

多様な路面に適応可能な
2足歩行ロボットの足部機構と
制御に関する研究

Study on Biped Foot Systems and
Controls Adaptable to Various Terrains

2009年 2月

早稲田大学大学院 理工学研究科
生命理工学専攻 バイオ・ロボティクス研究

橋本 健二

Kenji Hashimoto

摘 要

近年，移動ロボットに関する研究が行われているが，その移動様式に注目すると，車輪式やクローラ式，節体幹式，脚式あるいはそれらを組み合わせたものなど，様々な移動様式が見受けられる．移動ロボットを開発する際には，ある固有な移動環境に合わせた形態や駆動機構が導入されることが多く，想定していない環境では移動できない場合が多い．そのような中でも脚式移動ロボットは，移動面との接触状態が離散的な環境においても移動でき，1つの移動様式でより多くの環境に適応することができる．脚の数が多い4足以上のものは，路面との接地面積を広く確保することができ安定性に優れるが，ある程度の大きさのシステムとして考えた場合には占有面積が大きくなり，狭い人間の住環境への適応は困難である．その中で特に2足歩行は，その自由度の数に対して占有面積が小さく，狭い場所での小回りが可能であるということから，不整地移動において最も移動能力が高い移動様式になり得る可能性がある．

そのような点から2足歩行ロボットの研究が盛んに行われており，凹凸路面での歩行安定化に関しても研究されているが，ロボットの足部に注目すると剛体平板を用いているものが大半である．しかし，これでは足底の中心付近で突起物を踏んだ場合，支持多角形が大きく確保できず，凹凸路面で継続して安定歩行を実現することは極めて困難であるといえる．また，2足歩行という移動様式は，平坦路面での移動速度において車輪式に劣るといいう短所がある．

そこで本研究では，2足歩行ロボットの實用化につながる基礎研究として，多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し，実際に製作した足部機構を用いて評価実験を行い，その有効性を実証することを目的とした．具体的には，実環境に存在する様々な不整路面に適応可能な足部機構や，平坦路面での移動速度向上を図った車輪式足部機構を開発し，2足歩行ロボットに装着して行った実験により評価した．

本論文は，以下に示す8章から構成されている．各章の要約を示す．

第1章では，序論として本研究の研究背景と目的，その意義と関連研究の動向について述べた．

第2章では，足部機構単体で凹凸路面での接地面積を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R (Waseda Shoes - No.1 Refined) の開発について，その動作原理とロック機構，評価実験と考察を述べた．WS-1Rは足底4隅に直動するシリンダがあり，各支持点が高さ方向に関して受動的に凹凸路面にならうというものであ

る。各シリンダは路面との接地が検出可能なセンサを備えており、4点全ての接地を検出したら各支持点をロックし、大きな支持多角形を確保する。ロック機構には「くさびの原理」を応用したカム式ロック機構を採用した。開発した WS-1R を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RII (Waseda Leg - No.16 Refined II) に装着して実験により評価したところ、剛体平板の足底では大きな支持多角形が確保できないような、厚さ 20 mm までのアクリル板を用いた擬似的な不整地での歩行に成功した。また、開発した足部機構の汎用性を評価するために、2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R (Waseda Bipedal Humanoid - No.2 Refined) にも装着して実験したところ、厚さ 20 mm のアクリル板を用いて作製した擬似的な不整地での歩行に成功し、WS-1R の汎用性についても確認した。一方で、この足部機構単体では、傾斜路面に適応できないため、そのような路面での歩行実現には、不整路面適応制御の開発が必要であった。

第 3 章では、未知の凹凸路面に適応可能な着地軌道修正制御法の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。本制御法は、足部に非線形コンプライアンス制御を適用し、歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と足部 6 軸力覚センサのデータから算出される実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより路面形状を検知するものである。そして、この路面情報を元に遊脚の荷重が増大してくる以前に歩行パターンにおける着地軌道を変更し路面にならわせることで、未知の凹凸路面や傾斜路面における歩行を可能とするものである。また、ジャイロを含め特別なセンサや機構を必要とせず、ZMP (Zero Moment Point) 計測用の力センサのみを用いて実装が可能である。この制御法を、人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RII を用いた実験により評価したところ、歩行周期 2.0 s/step において 20 mm の凹凸のある未知の不整路面での歩行に成功した。しかし、本制御法は機械剛性やモータの応答偏差などにより腰部と路面との平行が確保されない場合、足部が路面に対して水平に着地することができず、姿勢角の誤差が累積されるという欠点があった。特に、1.0 s/step などの歩行周期が短い場合に、足部の着地衝撃が原因で姿勢の倒れこみが顕著になるため、高速な歩行を実現するためには、姿勢補償制御法の開発が必要であった。

第 4 章では、第 3 章において述べた着地軌道修正制御法の欠点を補う推定姿勢補償制御法の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。姿勢角を補償する際には、姿勢角センサから得られるデータを用いることが一般的であるが、それでは着地軌道修正制御法の ZMP 計測用の力センサのみで実装可能という長所が薄れる。そこで、力センサから得られるデータのみで姿勢角を推定し補償する制御法を考案した。本制御法は、力センサから計測される ZMP 偏差に応じて姿勢角を補償するものである。着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RIII (Waseda Leg - No.16 Refined III) に実装し評価したところ、歩行周期 1.0 s/step での凹

凸路面の歩行や、傾斜約 10 deg での適応歩行に成功した。また、第 2 章で述べたセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合することにより、段差 20 mm の凹凸と傾斜約 10 deg の混在する路面においての安定歩行に成功し、開発した手法の有効性を確認した。

第 5 章では、2 足歩行という移動様式の離散的な環境に適応しやすいという長所を生かし、平坦路面での移動速度が遅いという短所を補うことができる能動車輪式足部機構 WS-2 (Waseda Shoes - No.2) の開発について、その機械ハードウェアと移動経路設定法、評価実験、考察を述べた。WS-2 の構成としては、4 点の接地点のうち内側 2 点が通常の摩擦接地、外側前方が DC モータ駆動の能動車輪、そして外側後方は平面内で拘束を持たない 3 自由度の球状キャストになっている。足部外辺を中心軸に各足を外側に傾け、車輪とキャストのみが接地する状態にすることで 2 足歩行と車輪走行の切り換えが可能である。この足部機構を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R (Waseda Leg - No.16 Refined) に装着して行った実験の結果、平面内における安定かつ高速な並進・旋回運動および 2 足歩行との滑らかな切り換えを実現した。また、2 足歩行の場合と比べエネルギー消費量の低減も確認でき、開発した足部機構や移動経路設定法の有効性を確認した。

第 6 章では、受動車輪を一行に配置したインラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 (Waseda Shoes - No.3) を製作し、滑らかな滑走移動を実現するために必要な制御法の開発とその評価実験、考察を述べた。第 5 章で述べた能動車輪式足部機構 WS-2 は車輪を駆動するアクチュエータのために足部重量の増加を招いているが、一般に脚式移動ロボットは脚の慣性モーメントの影響を小さくするために、可動部である脚部の重量増加は避けるべきである。WS-3 は市販のインラインスケートをロボットに装着できるようにしたものであり、スウィズル動作というスケートを周期的に運動させる動作により車輪の摩擦力を推力として取り出して滑走移動することができる。考案したスウィズル動作による滑走移動法は、脚に通常的位置制御を適用すると摩擦力により拘束された足部を無理に動かすことになり過大な内力が生じるため、この状態を回避するために、力に応じて位置指令値を変化させるというものである。この足部機構を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R に装着して行った実験の結果、円滑なスウィズル動作の生成に成功し、考案した手法の有効性を確認した。

第 7 章では、ローラースケート型受動車輪式足部機構 WS-4 (Waseda Shoes - No.4) を製作し、滑らかな蹴り出し動作を実現するために必要なパターン生成法の開発とその評価実験、考察を述べた。受動車輪を用いた滑走移動については第 6 章で述べたスウィズル動作によるものと、蹴り出し動作によるものの大きく 2 つに分けられる。スケート側の足に ZMP を置いたままで蹴り出し動作を行うと蹴り出し時の衝撃により

不安定になり、また十分な推力が得られない。そこで、蹴り足から軸足へスムーズに ZMP を移動させながら足を蹴り出すことにより推力を得て滑走移動するスケーティングパターン生成法を考案した。この足部機構を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R に装着して行った実験の結果、蹴り出し動作による滑走移動に成功し、考案した手法の有効性を確認した。

以上のように、第 2 章、第 3 章、第 4 章で述べたセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と不整路面適応制御を実装することにより、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。また、第 5 章では能動車輪式足部機構 WS-2 を、第 6 章、第 7 章では受動車輪式足部機構 WS-3, WS-4 を用いることにより、2 足歩行ロボットの平坦路面での移動効率の向上が図れることを示した。結果として、多様な路面に適応可能な 2 足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し、本研究の目的を達成した。

最後に、第 8 章では結論として以上の研究成果を総括した。また今後の展望として、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と車輪式足部機構 WS-2, WS-3, WS-4 の統合の可能性について示し、2 足歩行ロボットのさらなる不整地適応能力向上の可能性について言及した。

以上、本論文では、2 足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面に適応可能な 2 足歩行ロボットの足部機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に製作した足部機構を 2 足歩行ロボットに装着して実験を行い評価することにより、その有効性を実証することを研究の目的とした。その成果として、凹凸路面で接地面積を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を開発し不整地適応能力向上が図れることを示し、車輪式足部機構 WS-2~WS-4 を開発することによって平坦路面における移動速度や移動効率を向上させることが可能であることを実証した。本論文において述べたような手法により、2 足歩行ロボットの足部機構を交換することで、2 足歩行ロボットに様々な能力を付加することが可能であることを主として報告した。

本研究の成果は、2 足歩行を移動様式に用いたロボットの実用化に向けた基盤技術になるものである。この技術により、屋内のみならず屋外においても人間と一緒に移動ができる真の意味での人間共存型ロボットを提供することができる。また、人間共存型ロボットだけでなく、高い運動能力を持つ 2 足歩行型の車いすの実用化にもつながるものであり、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大するものと期待できる。よって、ロボット工学、機械工学のみならず福祉工学、リハビリテーション工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであると考える。

目 次

記号の説明

第 1 章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 本研究の背景	1
1.3 本研究の目的と意義	16
1.4 関連する研究事例	19
1.5 本論文の構成	41
第 2 章 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の開発	45
2.1 はじめに	45
2.2 基本設計	47
2.3 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の設計	48
2.4 実験方法	56
2.5 評価実験と考察	57
2.6 まとめ	71
第 3 章 着地軌道修正制御法の開発	73
3.1 はじめに	73
3.2 着地軌道修正制御法	74
3.3 実験方法	84
3.4 評価実験と考察	85
3.5 まとめ	107
第 4 章 推定姿勢補償制御法の開発	109
4.1 はじめに	109
4.2 推定姿勢補償制御法	110
4.3 実験方法	113
4.4 評価実験と考察	114

4.5	まとめ	123
第5章	能動車輪式足部機構 WS-2 の開発	127
5.1	はじめに	127
5.2	能動車輪式足部機構 WS-2	128
5.3	移動経路設定法	129
5.4	実験方法	143
5.5	評価実験と考察	144
5.6	まとめ	152
第6章	インラインスケート型足部機構 WS-3 の開発	155
6.1	はじめに	155
6.2	スイズル動作の原理	156
6.3	スイズル動作による滑走移動法	159
6.4	実験方法	167
6.5	評価実験と考察	168
6.6	まとめ	171
第7章	ローラスケート型足部機構 WS-4 の開発	173
7.1	はじめに	173
7.2	スケーティングパターン生成法	173
7.3	実験方法	185
7.4	評価実験と考察	186
7.5	まとめ	189
第8章	結論	191
8.1	総合的な考察	191
8.2	結論	195
8.3	今後の展望	199
付録 A	不整路面適応制御法の追加評価実験	205

A.1	ロボット開発実証・実験特区について	205
A.2	屋外不整地歩行の評価実験	207
A.3	人間搭乗不整地歩行の評価実験	221
付録 B	外乱補償制御法の開発	239
B.1	搭乗型 2 足歩行ロボットにおける外乱の分類	239
B.2	搭乗者が発生する外乱に対する補償制御法	240
B.3	外部環境から加わる外乱に対する補償制御法	316
付録 C	展示会でのロボット搭乗体験会	331
C.1	機械産業記念館（TEPIA）でのロボット搭乗体験会	331
C.2	Wired NextFest でのロボット搭乗体験会	331
参考文献		353
謝辞		369
研究業績		

記号の説明

第3章

Δl :

着地路面検知用移動許容量

$\mathbf{F} = [F_x, F_y, F_z]^T$:

足座標原点にかかる力・モーメント

$\Delta \mathbf{x}_f$:

足座標原点の歩行パターンからの位置偏差

$\Delta \dot{\mathbf{x}}_f$:

足座標原点の歩行パターンからの速度偏差

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & & & & & 0 \\ & K_y & & & & \\ & & K_z & & & \\ & & & K_{mx} & & \\ & & & & K_{my} & \\ 0 & & & & & K_{mz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想ばね係数行列

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & & & & & 0 \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{mx} & & \\ & & & & C_{my} & \\ 0 & & & & & C_{mz} \end{bmatrix} :$$

6次元仮想粘性係数行列

Δt :

制御周期

$\Delta \mathbf{x}_f(t)$:

現在の足座標原点の歩行パターンからの偏差

$\Delta \mathbf{x}_f(t - \Delta t)$:

1制御周期前の足座標原点の歩行パターンからの偏差

$\Delta z_{ac}(t)$:

現在の足座標原点のZ軸方向の実測コンプライアンス中心移動量

$\Delta z_{ac}(t - \Delta t)$:

1制御周期前の足座標原点のZ軸方向の実測コンプライアンス中心移動量

K_{z1}, C_{z1} :

着地路面検知用コンプライアンス係数

K_{z2}, C_{z2} :

振動抑制用コンプライアンス係数

$\Delta\theta_x(t), \Delta\theta_y(t):$	現在の足座標原点の Roll 軸, Pitch 軸方向のコンプライアンス中心移動量
$F_{\theta_x}, F_{\theta_y}:$	Roll 軸, Pitch 軸方向の床反力
$K_{\theta_x}, C_{\theta_x}, K_{\theta_y}, C_{\theta_y}:$	Roll 軸, Pitch 軸方向の着地路面検知用コンプライアンス係数
$\Delta z_{th}(t):$	現在の足座標原点の Z 軸方向の理論コンプライアンス中心移動量
$\bar{z}_{pat}(t):$	基準歩行パターンにおける足先位置高さ
$z_{waist}(t):$	腰座標原点の歩行面から高さ
$e(t):$	着地路面高さ誤差
$H(t):$	現在の Z 軸方向の着地軌道修正量
$H(t - \Delta t):$	1 制御周期前の Z 軸方向の着地軌道修正量
$k_e:$	ゲイン
$\bar{z}_{final}(t):$	軌道修正後の Z 軸方向の足先位置高さ
$\theta_{xfinal}(t), \theta_{yfinal}(t):$	軌道修正後の Roll 軸, Pitch 軸方向の足部姿勢角
$\theta_{xpat}(t), \theta_{ypat}(t):$	基準歩行パターンの Roll 軸, Pitch 軸方向の足部姿勢角

第 4 章

$\Delta\theta = [\Delta\theta_{roll}, \Delta\theta_{pitch}]^T:$	姿勢角の操作量
$\Delta\bar{x}_{zmp} = [\Delta\bar{x}_{zmp}, \Delta\bar{y}_{zmp}]^T:$	設定 ZMP と実測 ZMP の差である ZMP 偏差
$\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}:$	姿勢角推定のためのゲイン行列
$\Delta\theta' = [\Delta\theta'_{roll}, \Delta\theta'_{pitch}]^T:$	時刻 t における姿勢角の修正量
$T_{modif}:$	姿勢角の修正期間

第 5 章

$x_p:$	ロボットの基準点 P の x 座標位置
$y_p:$	ロボットの基準点 P の y 座標位置
$\theta_p:$	ロボットの方向

θ_R :	右側車輪の回転角度
θ_L :	左側車輪の回転角度
r :	車輪の半径 (左右同じとする)
l :	車輪間距離
n :	Bezier 曲線の次数
s :	パラメータ ($0 \leq s \leq 1$)
\mathbf{P}_i :	制御点 (2次元ベクトル)
$B_i(s) \equiv {}_n C_i \times s^i \times (1-s)^{n-i}$:	Bernstein 関数
T_n :	n 番目の通過点から $n+1$ 番目の通過点までの移動に要する時間
a_{nm} :	n 番目の関数の m 次の項の係数
s_n :	n 番目の通過点に対応する媒介変数
$\mathbf{P}_R(t) = [x_R, y_R]^T$:	右車輪の接地点の位置
$\mathbf{P}_L(t) = [x_L, y_L]^T$:	左車輪の接地点の位置
$L_R(t)$:	車輪の移動距離
$\sigma_R(t)$:	車輪の回転方向を示す関数
θ_{ilt} :	足の傾き角度
x_{RF}, y_{RF} :	右足の絶対座標における位置
x_{LF}, y_{LF} :	左足の絶対座標における位置

第6章

$O-xy$:	x 軸および y 軸を含む平面が路面に一致し、原点が路面に固定されている直交座標系 (絶対座標系)
$P-x'y'$:	原点が左右の足の中点に固定されている直交座標系 (運動座標系)
x'_W, y'_W :	運動座標系 $P-x'y'$ から見た受動車輪の位置
a_W :	受動車輪と足部中心間の距離
θ_W :	受動車輪の転がり方向と x' 軸のなす角
θ_P :	x 軸と x' 軸のなす角

F_t :	受動車輪の転がり方向に加わる力
F_n :	受動車輪の垂直方向に加わる力
v_t :	受動車輪の転がり方向の速度
v_n :	受動車輪の垂直方向の速度
μ_t :	受動車輪の転がり方向の摩擦係数
μ_n :	受動車輪の垂直方向の摩擦係数
N_W :	路面から受動車輪に加わる垂直抗力
T :	基本パターン関数の周期
F_{min} :	足部に作用する内力の最小値
F_{max} :	足部に作用する内力の最大値
Δ :	ゲイン関数の補間マージン
L :	位置指令値の振幅
L_0 :	位置指令値の初期値
Θ :	角度指令値の振幅
ϕ :	位置と角度の位相ずれ

第7章

$O-xyz$:	x 軸および y 軸を含む平面が路面に一致し、路面に垂直な軸を z 軸とし、原点が路面に固定されている（右手）直交座標系（絶対座標系）
$P-\overline{xyz}$:	原点がスケート側の足に固定されている（右手）直交座標系（運動座標系）
T :	各パターンの時間
$v_S(t)$:	スケート足の x 方向速度
$x_S(t)$:	スケート足の x 方向絶対位置
$\bar{v}_K(t)$:	蹴り足の相対的な x 方向速度
$\bar{x}_K(t)$:	蹴り足の相対的な x 方向位置
$\bar{z}_K(t)$:	蹴り足の相対的な高さ
v_{S0} :	スケート足の初期速度
v_{St} :	スケート足の最終速度
y_{S0} :	スケート側の足の y 方向初期位置

\bar{y}_{K0} : 蹴り足の y 方向初期位置 (相対座標)

本論文中における記号表記に関する注意事項

1. 記号上部の線 (例: $\bar{\mathbf{r}}_i$) は運動座標系 $\bar{\mathbf{O}}-\bar{\mathbf{XYZ}}$ もしくは腰座標系におけるベクトル表現であることを示す.
2. 記号上部の1つの点 (例: $\dot{\mathbf{r}}_i$) は時間に関する1回微分であることを示す.
3. 記号上部の2つの点 (例: $\ddot{\mathbf{r}}_i$) は時間に関する2回微分であることを示す.

第1章 序論

- 1.1 はじめに
- 1.2 本研究の背景
- 1.3 本研究の目的と意義
- 1.4 関連する研究事例
- 1.5 本論文の構成

1.1 はじめに

本論文では、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットのための足部機構と制御の開発について論ずる。

脚式移動機構は、車輪式に比べ平坦路面での移動速度や移動効率は劣るが、障害物の乗り越えや溝のまたぎ超えといった不整路面での移動に優れている。特に2足歩行という移動様式は、その自由度の数に対して占有面積が小さく、狭い場所での小回りが可能であり人間の住環境に適応しやすいという特長がある。本論文は、ヒューマノイド・ロボットなどの2足歩行ロボットの実用化を目指すべく、その足部機構に着目し、実環境に存在する様々な不整路面に対して歩行能力を向上させることが可能な足部機構や、平坦路面における移動速度や移動効率を向上させることが可能な車輪式足部機構を提供するものである。

1.2 本研究の背景

近年、移動ロボットに関する研究が盛んに行われているが[1, 2]、その移動様式に注目すると、車輪式やクローラ式、脚式あるいはそれらを組み合わせたものなど、様々な移動様式が見受けられる[3]。移動ロボットを設計する際には、ある固有な移動環境に合わせた形態や駆動機構が導入されることが多く、想定していない環境では移動できない場合が多い。そのような中でも2足歩行という移動様式は、車輪やクローラ、3つ以上の脚を用いたものに比べ、離散的な環境に適応しやすく、1つの移動様式でより多くの環境に適応できると考えられる。

本節では、まず屋内外に存在する移動環境を分類し、様々な移動様式で適応可能な移動環境について述べる。

1.2.1 移動環境の分類

移動ロボットを設計する際には、移動すべき環境を明確化しなければならない。平坦な移動環境に対比し、一般の移動環境は「不整地」である。不整地の定義および表現方法は多種多様であり、かつ想定するロボットの種類によっても状況が異なるが、ここでは接地状態の予測や事前の運動計画が難しい路面とする。なお、液体中や気体中などの浮遊環境は、路面との接触が生じない移動を必要とするので、本論分では対象としない。移動ロボットが路面と接触して移動する場合、移動環境は重力に逆らう方向の環境（鉛直型移動環境）と重力に逆らわない方向の環境（水平型移動環境）の大きく2つに分けられる。

(a) 水平型移動環境

重力に逆らわない水平面上の移動環境。路面の状態に注目すると、水平型移動環境はさらに以下の2つに分けられる：

- **凹凸型不整地** アスファルト路面、横断歩道、石畳、工事現場などの脚接地面に変形を伴わない凹凸のある環境。屋外に存在する路面の多くはこれに分類される。
- **脆弱型不整地** 砂地、砂漠、沼地、泥道、絨毯、マットレス、布団の上などの脚接地面に変形を伴う環境。

(b) 鉛直型移動環境

重力に逆らう鉛直方向の移動を伴う移動環境。坂道や階段、山道、壁面、梯子などの環境がこれに該当する。

これら以外にも瓦礫内や岩場の隙間などの細くて狭い環境として狭隘型不整地[4, 5]なども考えられるが、このような不整地は、ロボットの大きさや構成が重要になり、それに特化した移動様式を開発することが望ましいと考えられる。汎用性の高い移動様式を考える場合には、上記に分類したように移動ロボットと環境の接地状況に特に注目すべきである。実環境に存在する水平型移動環境と鉛直型移動環境の具体例を図1.1にまとめる。

また移動ロボットと移動面の接触状態に着目すると、移動環境はさらに3つに分類

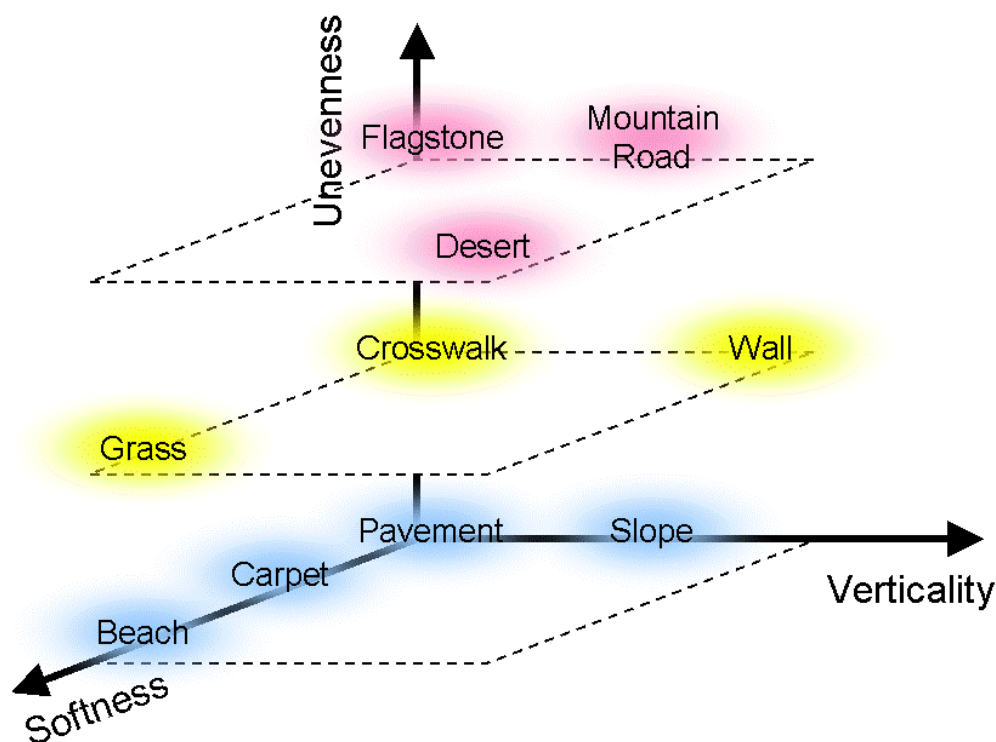


Figure 1.1 Moving environment.

することができる。まずは、車輪やクローラのように移動機構と地面が常に接触するような環境である。このような環境では、移動した後のトレースが、連続した線となるため、「連続接地移動環境」と呼ぶことにする。車輪やクローラで移動できなくなる環境としては、段差等の障害物の存在が考えられ、そのときの移動トレースは分断された線分となる。このような環境を「不連続接地移動環境」と呼ぶ。この環境での障害物を乗り越えて移動するための機構としては、形状の変化するクローラや、アクティブサスペンション機能を持った車輪などが提案されてきている。これらの機構では、何らかの手段によって、移動機構と地面との接点を切り替えることによって移動を継続することが可能となる。さらに厳しい条件の移動環境としては、「離散接地移動環境」が考えられる。この移動環境は、もはや移動機構と地面との連続的な接触が許されず、離散的な点で本体を支持しつつ推進を行わなければならない。移動機構としては、人間や動物のような脚が必要となり、その移動トレースは離散的な点列となる。

図 1.1 に示す不整地が踏破でき、離散接地移動環境に適応可能な移動様式を持つロボットが実現されれば、人間の生活環境に存在するほとんどの環境を移動することができると考えられる。

1.2.2 移動様式の種類

次に、上述の様々な環境を移動するロボットの移動様式について分類する。

(a) 無限回転式移動機構

これは車輪やクローラなどの無限回転機構により推進する移動機構である。特に、車輪式移動機構は動物の形態としては実現されていない機構であるが、人間の作り出した平面環境では移動速度、移動効率の面で最強の移動機構である。また、機械的に単純で制御性も良いという特徴がある。しかし、車輪の欠点は凹凸面、階段などの不整地走行機能が低いことである。

それに対してクローラは悪路走破性に優れており、一部階段の昇降が可能なものも見られる。しかし、着地可能な領域が限定されている離散接地移動環境や螺旋階段などに適応することは難しく、また大型のものは家庭内での運用は困難である。さらに、クローラは接地面圧を低減化する特性は大きいですが、その場旋回などを行うと大きな滑りが生じるため、エネルギー消費が大きくなるという欠点がある。

また、1967年のアメリカ軍の調査[6]によれば、地球上の地表面の半分は車輪やクローラでは到達不可能とされている。

(b) 脚式移動機構

車輪やクローラが移動面と連続的に接触するのに対して、脚は離散的な移動点を持つため、階段の昇降や地上の障害物の非接触なまたぎ越えなどの移動運動を容易に実現できる。また、凹凸の大きい不整地でも脚支持点を適当に選択することで滑らかに移動できる。

また脚式移動機構は、足裏の接地面積を必要によっては大きくすることができ、足首の能動あるいは受動自由度によって足裏を地表形状に従って支持できる。このことから足裏の接地面圧は低減化でき、脆弱な地表面でも歩行機械の運動性能は低下し難いといえる[7]。なお、沼地などの脆弱な地表面での移動に歩行が適することは、エネルギー効率の側面からも推測される。車輪は脆弱地表面では連続的な轍を残し土砂の変形のために大きなエネルギーを消費してしまう。それに対し、歩行機械は離散的に支持点を構成できることから土砂の変形を低く抑えることができ、移動時のエネルギー損失を低減化できるからである[8, 9]。さらに、歩行機械は足裏面積が広くても、足裏と地表面で滑りを生じることなく方向転換をすることができる。移動という点に注目すると、平地だけでなく壁や木の幹などの立体型不整地にも対応可能ということは特筆すべきであり[10, 11]、脚式移動機構の移動能力は非常に高いといえる。

さらに、確実に能動的な足場を構成する機能も脚式移動機構の利点である。クレーン車や高所作業車などの車輪移動機構の場合、静止作業時にクレーンやアームを伸ばす前に、アウトリガーを延ばして足場を構成しなければならない。しかし、脚式移動機構の場合は、静止時にその脚をロックすれば、地形に従った確実な足場を構成でき、作業を行う足場となる機能を兼ね備えている。

しかしながら、無限回転式移動機構に比べ、移動速度が遅く、制御も複雑になるという欠点がある。

(c) 節体幹式移動機構

これは複数の節からなり、それらが複数個の能動自由度で直列に連結されたことを特徴とする移動機構である[12]。例えば、蛇のように細長い体をくねらせたり、ミミズのように体節を伸縮して推進力を得て前進するものである[13-21]。この機構の特徴は、細長く能動的かつ柔軟な屈曲運動可能な体幹形状を活かすことにより、すべての単位節が先頭節の通過したところを移動可能なので、狭隘で曲がりくねった通路の移動に適している。また、単位節同士の運動により、谷渡りや障害物乗り越えなどの不整地を移動できる。さらに、体幹全体に自重を分散できるため、砂地のような脆弱なところの移動に適しているが、離散接地移動環境を踏破することは困難であると考えられる。

(d) ハイブリッド式移動機構

ハイブリッド式移動機構は、上述した各移動機構を組み合わせ、脚や節体幹の不整地移動能力の高さを活かしつつ、車輪やクローラでその移動速度の遅さを改善した機構である。図 1.2 に、こうした移動機構のハイブリッド化の概略図を示す。この中でも特に、特徴の大きく異なる脚と無限回転の組み合わせや節体幹と無限回転の組み合わせはメリットが大きく、多くの先行研究がある[22-26]。

脚と無限回転の組み合わせとしては、1) 無限回転式移動機構に脚を追加する方式[27-29]、2) 脚式移動機構の足先に車輪を追加する方式[30-41]、3) 歩行機械の胴体部に車輪を追加する方式[42]などがある。

節体幹と無限回転の組み合わせとしては、体幹を構成する節に車輪を配置して体をくねらせ、車輪を回転駆動せずに、車輪が持つ、円板の接線方向には回転ができ、それとは垂直方向には運動が拘束される特性を利用して、体幹の長手方向に合成される力を推進力として移動するものが最も有名である[43]。また、車輪式駆動機構をモジュール化してそれを複数個直列に結合したもの[44]や、独立駆動型の2車輪からなるモジュールを複数個、リンクで結合したもの[45]なども研究されてきている。

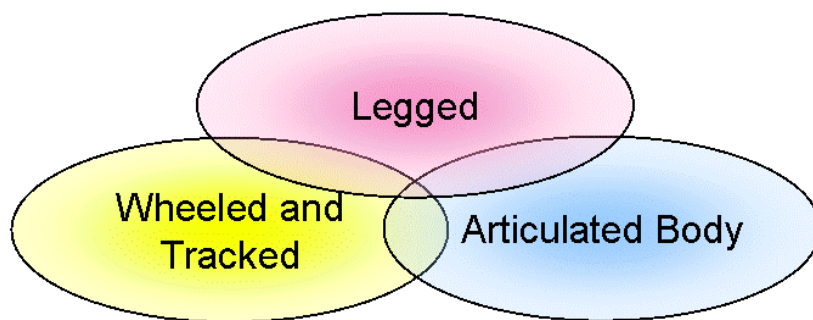


Figure 1.2 Mixed and hybrid locomotion.

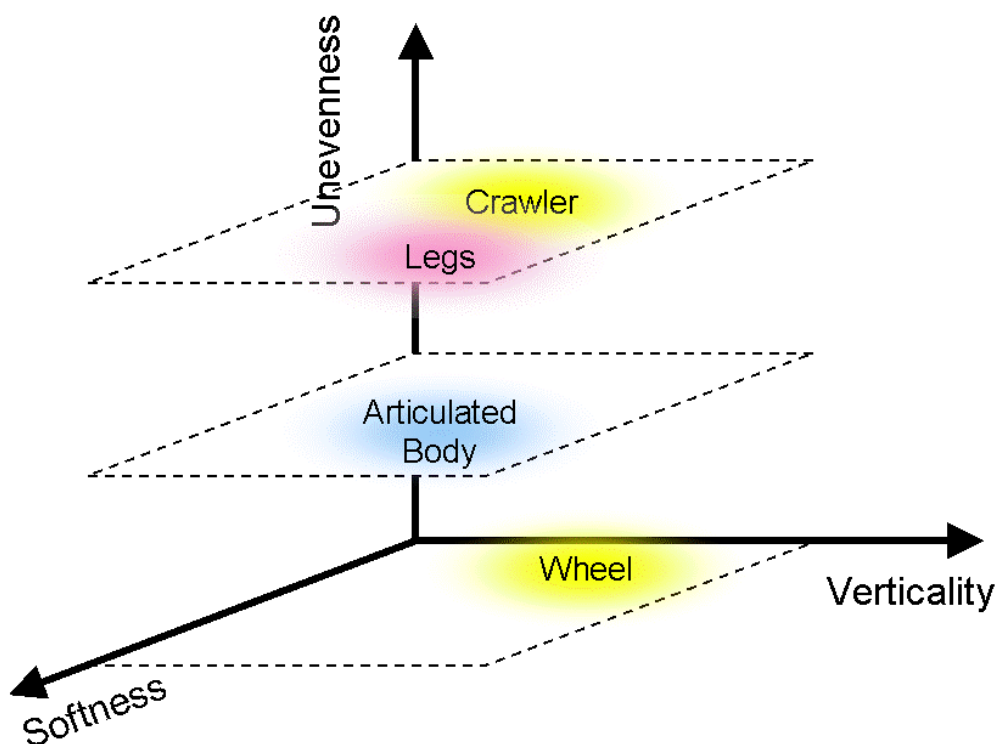


Figure 1.3 Characteristics of locomotion configurations.

以上述べたように、各移動様式には得意・不得意な移動環境があるが、狹隘型不整地については人間の生活環境にはあまり存在せず、その移動環境に合わせて移動様式を設計することが多い。人間の生活環境を見ると、その多くは水平型移動環境と鉛直型移動環境の組み合わせからなっており（図 1.1）、汎用性の高い移動様式を提供するためにはこの不整路面を安定かつ高速に移動することが求められる。

そこで、各移動様式について水平型移動環境（凹凸型不整地、脆弱型不整地）と鉛直型移動環境への適応能力についてまとめると図 1.3 のようになる。ただし、ハイブリッド式移動機構に関しては、それぞれの移動様式の長所を組み合わせたものになる

ため、ここでは図示しない。図 1.3 に示すように、離散接地移動環境に適応できるということで、脚式移動機構が最も凹凸型不整地や脆弱型不整地への適応度が高いと考えられる。しかし、これまでに開発されてきている脚式ロボットは、そのような不整地に適応可能なものは非常に少ないが、人間や動物が図 1.1 に示す環境を移動できていることを考えると、脚式移動機構は不整地に適応する潜在能力は高いといえる。一方、車輪式移動機構は凹凸型不整地への適応度は高くないが、凹凸が小さければ傾斜などの鉛直型移動環境を効率的に移動することができる。

1.2.3 2足歩行という移動様式の長所・短所

人間の生活環境に存在する不整地の多くは凹凸型不整地と脆弱型不整地であり、これらの路面に適応させることを考えると、移動面と離散的に接触することができる脚式移動機構が最も汎用性の高い移動様式であると筆者は考える。脚の数が多い4足以上のものは、路面との接地面積を広く確保することができ、安定性に優れるが、ある程度の大きさのシステムとして考えた場合には占有面積が大きくなり、狭い人間の住環境への適応は困難である。その中で特に2足歩行は、その自由度の数に対して占有面積が小さく、狭い場所での小回りが可能であるということから、不整地移動において最も優れた移動様式になり得る可能性がある。

このような理由から、近年2足歩行ロボットが様々な企業や研究機関から相次いで発表されてきている[46-56]。しかし、2足歩行という移動様式が本質的に不安定であるため、いかにして平坦路面を安定に歩行させるかに焦点が当てられており、歩行パターン生成法[57-65]や歩行安定化制御[66-75]などの研究が中心に行われてきている。それらを用いて不整路面での歩行に関する試みもなされているが、屋外に存在する不整地での歩行実現例はあまり多くない。その理由としては、2足歩行ロボットの足部形状に原因があるのではないかと考える。

2足歩行ロボットと路面との接触は足底で発生するにもかかわらず、平たい板にゴムを張った程度のものを使用しているものが多く、その足部形状というものはあまり注目されてきていない。剛体平板を足底に使用した場合、不整路面との接触状況は図 1.4 に示すように大きく4つに分けられる[76, 77]。1つ目は足底の面全体で凸部や凹部を踏んだ場合であり、このような場合は脚の着地位置を高さ方向に修正することで対応できる。2つ目は傾斜路面のように足部のある一辺で凸部や凹部を踏んだ場合であり、これは足部の姿勢を Roll 方向や Pitch 方向に修正することで対応可能である。3つ目は対角線上の頂点で凸部や凹部を踏んだ場合であり、このとき大きな支持多角形は形成されず、歩行安定化制御のみだけでは適応することが難しい。4つ目は足底の

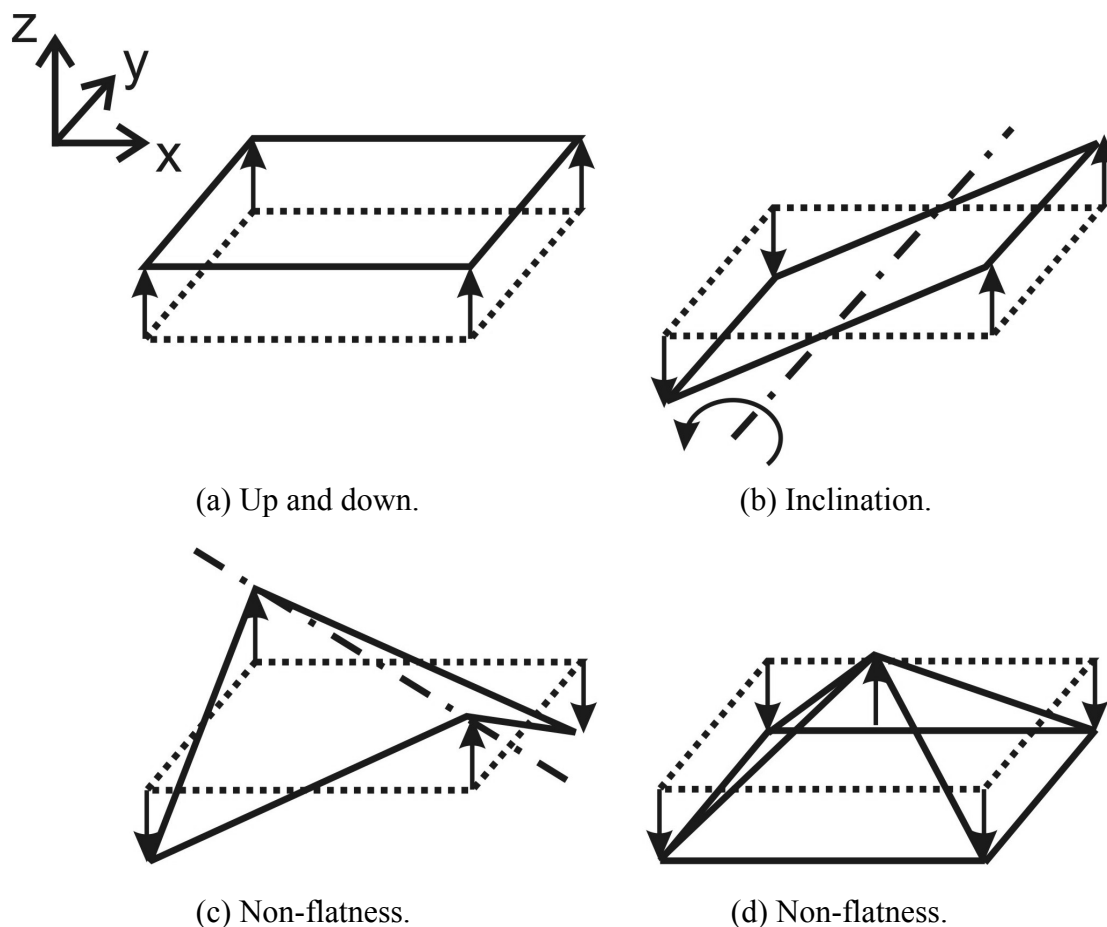


Figure 1.4 Condition of contact between a foot and uneven surface.

中心付近で凸部を踏んだ場合であり、3つ目の場合と比較しても支持多角形が小さくなるため、制御のみでは歩行の安定化は非常に難しく、支持多角形を大きく確保可能な足部機構が必要であると考えられる。特に屋外の路面には、小さな凹凸が多く存在し、図 1.4 (d)に示す接地状態になることが発生すると予想される。そこで、不整路面においても足部機構単体で大きな支持多角形が確保可能なものを提供することができれば、2足歩行ロボットの不整地適応能力を格段に向上させることができると筆者は考える。

一方で、不整路面ではなく平坦路面を考えた場合、脚式移動機構は移動速度や移動効率の点で無限回転式移動機構に劣る。不整地適応能力が高い2足歩行ロボットの平坦路面での移動効率向上を目指すには、脚機構と車輪機構を統合することが良いと思われる。この点に注目し、これまでに多数のハイブリッド式移動機構が開発されており、その関連研究を表 1.1 にまとめる。表中「?」の文字は詳細が不明であることを示す。この表から分かるように、車輪やクローラなどの無限回転機構をベースに脚

Table 1.1 Relevant studies to hybrid locomotion.

Developer	Endo and Hirose	EPFL	LABORIUS	RIKEN & SAITAMA Univ.	IHI	Matsumoto
Name	Roller-Walker [30]	Octopus [37]	AZIMUT [29]	Omni-Directional Mobile Robot [36]	IMR-Type I [34]	Self-contained Biped Leg-wheeled System [33]
Figure						
Year	2000	2002	2003	2003	2004	2004
Adaptable Area	Even terrain	○	○	○	○	○
	Uneven terrain	○	○	○	○	○
	Soft terrain	×	?	?	×	×
	Stairs	○	○	○	○	○
Discrete footholds	×	×	×	×	○	○
	○	×	×	×	×	×
Omnidirectional motion	×	×	×	×	×	×

の要素を取り入れているものは、離散接地移動環境に適応できない。一方で、脚式移動機構をベースに車輪の特徴を取り入れたもの[32-34]も開発されてきているが、それらは足先が車輪になっているものが多く、歩行の際は倒立振子を利用しており、安定性の面から離散接地移動環境に適応することが難しいと考えられる。また、どれも非ホロミックな系であり、全方向へ移動することができない。そこで、ハイブリッド式移動機構の中でも2足歩行をベースにし車輪走行が可能な機能を付加することができれば、不整地への適応能力が高く、平坦路面での移動効率も高い移動様式を提供することができる。その際、足部を交換することで2足歩行と車輪走行が切り換え可能になる車輪式足部機構を開発することができれば、2足歩行ロボットの普及の一助となるであろう。

1.2.4 ヒト足部の特徴

ここで、様々な環境を2足歩行で移動できているヒトの足部に注目してみる。動物の足部は、生活する地面や環境に適応し分化している。走行のためには狭く頑丈な足底、樹上生活のためには把持するための長い趾、起立のためには広い足底が必要である。それに対してヒトの足部には、起立、歩行、走行など様々な機能が要求されているのである (図 1.5)。

類人猿の足とヒトの足を比べてみると、チンパンジーや類人猿はどちらも物を把持するようにできているが、ヒトの足は、足長に比べて足趾長が極端に短く、足根部が

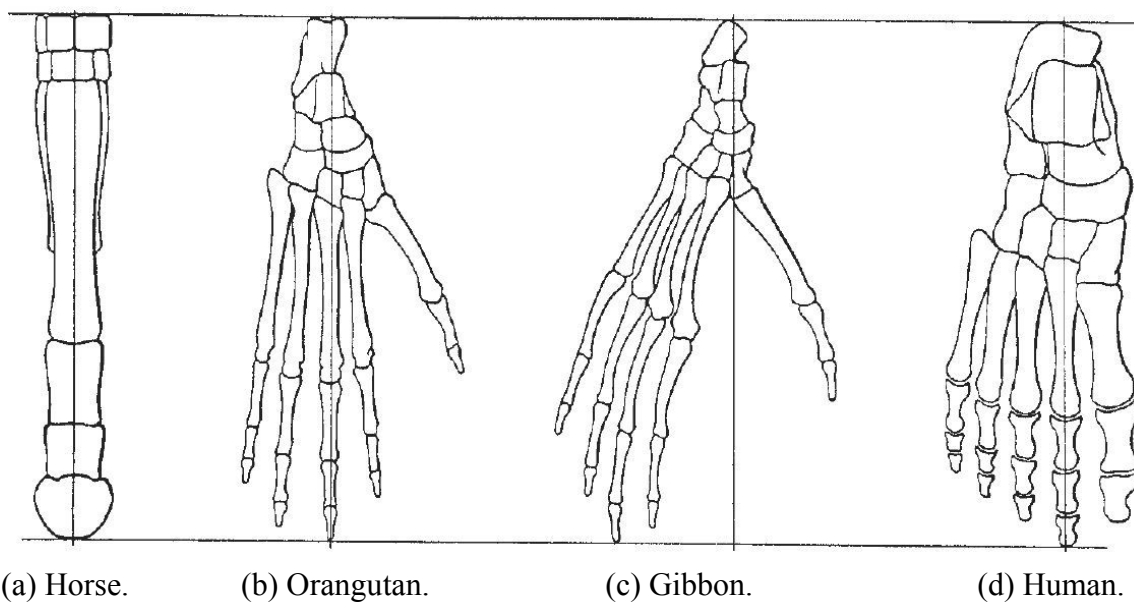


Figure 1.5 The skeletal structure of the human and animal foot [78].

大きくなっており、把持するのに適していないように見える (図 1.6)。もう1つ大きな特長として、第1中足骨が中心により、第2中足骨以下と並行する形となっており、横に開くことが困難な点である。類人猿では、第1中足骨が手と同じく対向して把握が可能であり、木の枝を握って登り、握って止まることができる。

人間学者の Weidenreich[80]は、類人猿からヒトへの足の移り変わりの特徴として、3つの特質を挙げている。①細長、②強固、③アーチ構造である。足の細長化は、その走力のしるしである。そして、ヒトの歩行を特徴付けているものにこのアーチ構造がある。足アーチを支える構造は骨、関節包・靭帯による保守的な支持と筋による自主的な支持がある[81]。その中で内側縦アーチは比較的伸縮性に富む組織であり、歩行に際し十分体を支えるとともに荷重による衝撃を吸収することで凹凸の地面にも良く適合することから臨床上的重要な意義をもつとされている[82]。例えば、アーチの存在理由としては様々な議論があり、足底接地時の不整路面对応や衝撃緩衝、あるいは踏み切り時のスプリング効果といった説である[83]。そんな中、高嶋[84]はアーチ部の粘弾性特性に着目した解析を行い、足底接地時における衝撃緩衝効果を検証した。また、アーチのスプリング効果や立脚相後半における関節機構によるアーチの硬化を定量的に評価している。しかしながら、依然としてアーチの存在については明確な理由が解明されておらず、アーチ構造が2足歩行の安定化に寄与しているかどうかは推定の域を出ていない。

ヒト以外の動物で足部にアーチを有する動物はほとんど存在しない[85]。動物たちはそれぞれに環境と生活形態に適応した足部と体形を有し、これもヒトと同じく淘汰

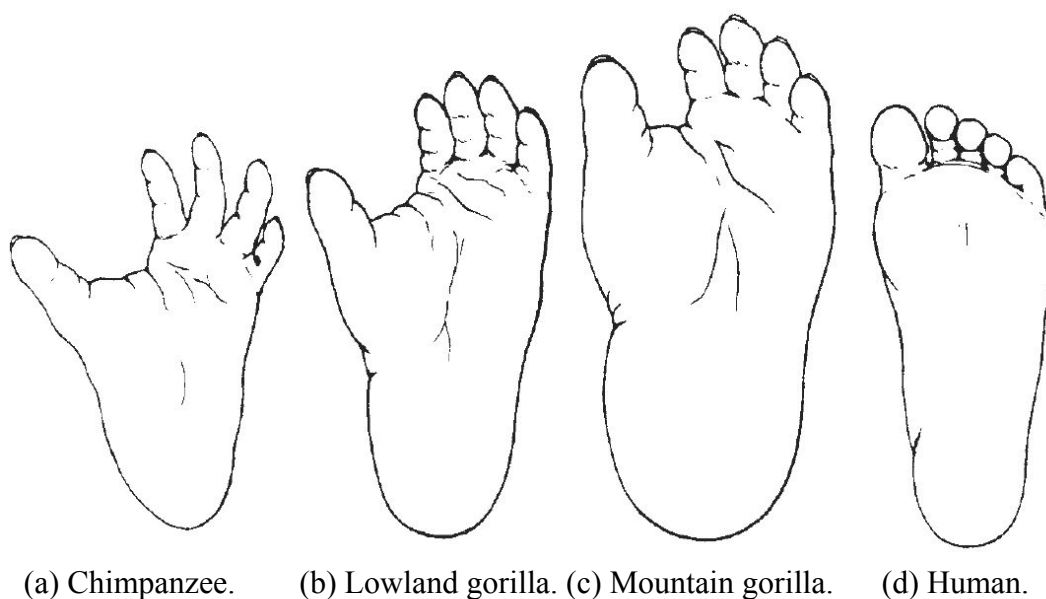


Figure 1.6 Comparison of the anthropoid's foot with human's foot [79].

と突然変異を繰り返した結果であろう。むしろその種が何らかの原因で途絶えない限りは進化の過程の一時期を形成した結果に過ぎず、ヒトも含めて数万年の未来、どのような体形と足部をもって生活しているのかという点では現在は推論の域を出ない。アーチ構造を模擬した足部機構を製作し、ロボットに装着した実験を通してヒト足部のアーチ構造の存在意義を調べることは非常に興味深いですが、2足歩行ロボットの不整路面での歩行安定性向上を目指す場合、ヒト足部の構造を模擬すればいいというわけではないと筆者は考える。

また、ヒト足部は3つのアーチ構造で支えられており、これらのアーチの支持点は、第1中足骨頭、第5中足骨頭、踵骨隆起の内側および外側突起である[86]。このことから、ヒト足部は3点支持構造であると考えることができる。3点が定まれば面は1つに決まるため、3点支持であれば図 1.4 に示すような支持多角形が一意に決まらないという問題は起こらない。そこで、庄司[87]らは2足歩行ロボットの佇立能力向上のために、距腿関節と距骨下関節の構造を模擬した3点支持の足部機構を開発している。しかし、路面と足部との接地点数を考えた場合、4点接地は3点接地と比較して、接地点を1つ増やすだけで2倍の大きさの支持多角形を確保することができる。現状では2足歩行ロボットの不整地適応能力は高くないため、歩行安定性を考えると支持多角形はできる限り大きいほうが良い。そこで本研究では、接地点の数と路面に形成される支持多角形の面積の大きさの関係から、接地点数は4点が望ましいと筆者は考えた。

1.2.5 2足歩行ロボットに望まれる不整地適応能力

ここで、2足歩行ロボットが備えるべき未知の不整地適応能力について考える。2足歩行ロボットが不整路面を歩行する際、足を置く場所を視覚から観察することができれば、その観測されたデータに基づき足先高さや角度を変更することで足部を路面の凹凸にならわすことができる。そこで、カメラを用いた画像処理で三次元計測を行う手法[88, 89]があるが、計測対象の模様や照明条件などに影響されやすいことや距離情報の精度が低いという問題点がある。また、レーザレンジファインダや赤外線センサを用いて障害物の検出や路面形状の計測を試みる研究[90, 91]もあるが、現状で開発されている視覚センサの計測精度は測定距離の1%程度であり、1000~2000 mm先の路面の状況を観察する場合、10~20 mm程度の誤差が生じる。

そのため、視覚センサを持っている2足歩行ロボットにおいても20 mm程度の未知の凹凸に適応できる能力が必要である。傾斜に関しては、大抵の2足歩行ロボットは人間の大きさを真似て作られており、足の大きさについても250 mm前後のものが

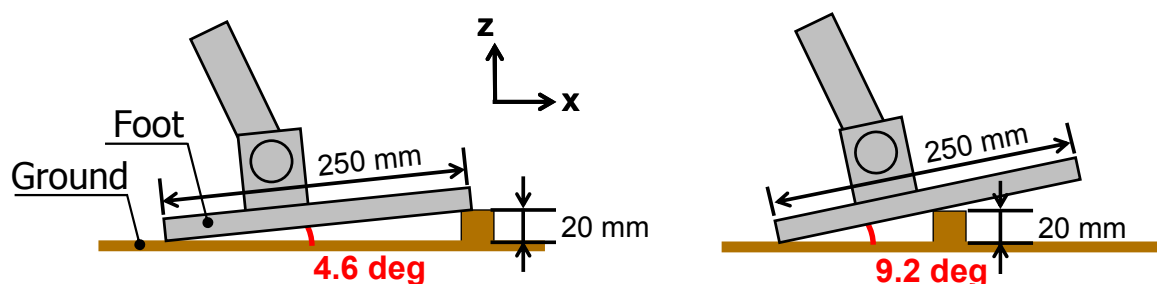


Figure 1.7 Inclination angle of a target surface.

多く、その足底で 20 mm の凸を踏んだ際、最大で約 9.2 deg のならい動作が必要となるため (図 1.7), 10 deg の未知の傾斜を目標傾斜角とした。

以上まとめると、本研究で目標とする段差や勾配を以下のように設定する：

- 段差：20 mm 以下
- 勾配：10 deg (18%) 以下

この値は、平成 18 年 12 月 20 日に施工された「高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律」(通称：バリアフリー新法) [92]からも十分であることが分かる。これは、高齢者や障害者などの移動上及び施設の利用上の利便性及び安全性の向上の促進を図り、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする法律であり、歩道に関する勾配や段差について次のように規定されている：

- 歩道等の縦断勾配は、5 パーセント以下とするものとする。ただし、地形の状況その他の特別の理由によりやむを得ない場合においては、8 パーセント以下とすることができる。(第 6 条)
- 横断歩道に接続する歩道等の部分の縁端は、車道等の部分より高くするものとし、その段差は 2 センチメートルを基準とするものとする。(第 9 条)

この法律からも 2 足歩行ロボットが適応できなければならない不整路面として段差 20 mm, 傾斜 10 deg を目標路面とすることは妥当であると言える。

早稲田大学高西研究室では、本研究以前にも不整地歩行に関する研究が菅原らによって行われている。人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16 (Waseda Leg - No.16) に仮想コンプライアンス制御[93]を実装し、厚さ 2 mm のアクリル板を並べた擬似的な不整地において前進歩行に成功している。また、姿勢補償制御[94]を開発し、3 deg の未知の傾斜路面においても安定歩行を実現している。本田技研工業株式会社の ASIMO[48]は、路面の凹凸が 40 mm 以内であれば、路面形状が未知であっても転倒せずに移動できる能力を持つという。傾斜路面については、既知であれば勾配 10 %程度までは移動可能とあるが、未知の傾斜に関する記述はない。また、独立行政法人産

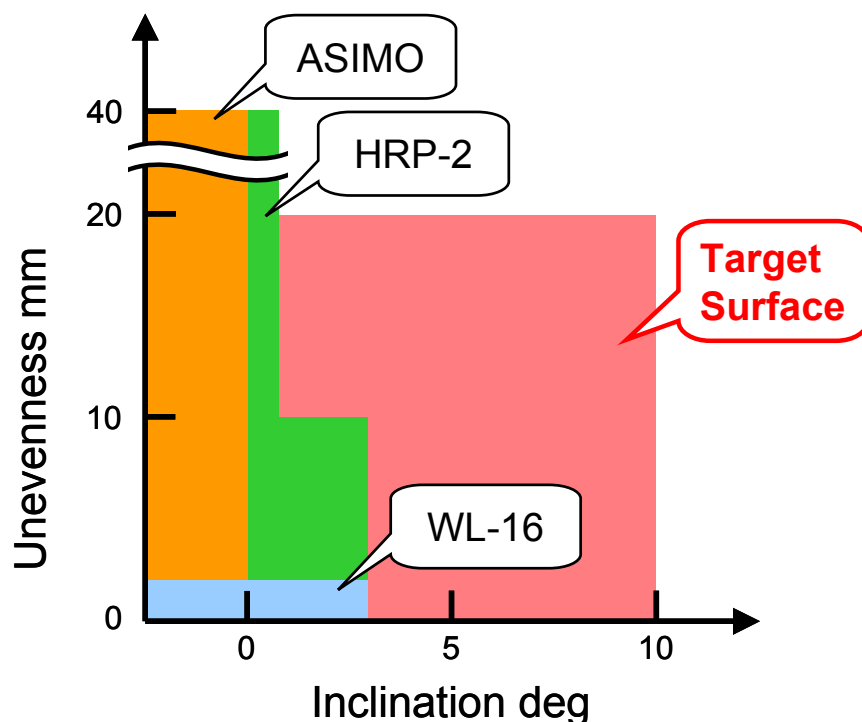


Figure 1.8 Required walking ability on unknown uneven terrain for biped walking robots.

業技術総合研究所・川田工業株式会社で開発された HRP-2[52, 95]は高低差 40 mm の不整地，着地面の傾き 5 % (= 2.9 deg) の不整地をそれぞれ歩行することができると報告されているが，図 1.7 の左図のように足先で 40 mm の凸を踏んだ場合，10 deg 程の量が必要になるため，2.9 deg までの傾斜にしかならえないということは，図 1.4 (b)のように足部のある一辺で 40 mm の凸部や凹部を踏むことができないと推測される．高低差 40 mm の不整地に適応可能であるということであるが，図 1.4 (a)のように高さ方向に修正することしか想定されておらず，実環境に存在するような傾斜と凹凸が混在している路面への適応性については言及されていない．HRP-2 の足部は剛体平板の足底であるため，凹凸と傾斜の混在する路面において安定して歩行することは難しいと予想される．また，[95]中でも述べられているように，高低差 40 mm の不整地の歩行安定性は十分でないとされている．

以上述べたような先行研究の成果だけでは，本研究で対象とする段差 20 mm と傾斜 10 deg の混在した路面での歩行実現は難しく，現状では 2 足歩行ロボットの歩行能力は十分とはいえない (図 1.8)．

1.2.6 早稲田大学における2足歩行ロボット研究

ここで、早稲田大学における2足歩行ロボットの研究について触れておく。

早稲田大学は、1967年より人間の脚と2足歩行ロボットに関する研究を継続しており、世界でもっとも長い2足歩行ロボット研究の歴史を持つ研究機関である[96]。

最初に実際の機械を用いて2足歩行ロボットの研究を始めたのは加藤らであり、静歩行を提案し、ゴム人工筋を用いた2足歩行ロボット WAP-3 (Waseda Anthropomorphic Pedipulator - No. 3) により、1972年に2足歩行を自動的に行うことに初めて成功した[97]。また1973年には油圧により駆動される2足歩行ロボット WL-5 (Waseda Leg - No. 5) を用いての静歩行にも成功した[98]。

1980年には、高西・加藤らは、単脚支持相においては静歩行と同様に床面上の重心位置が立脚の足底による安定領域から外れないよう制御し、立脚切替相においては動歩行と同様に重心を動的に切り替える準動歩行方式を提案し[99]、1982年には10自由度の2足歩行ロボット WL-9DR を用いて平均台型の準動歩行を実現した[100]。

また1985年には、高西・加藤らは単脚支持相において設定歩行パターンを用いたプログラム制御を行い、立脚切替相においては切替状況に応じて足首部のトルクと機械的インピーダンスを可変とするシーケンス制御を行うことで、12自由度の2足歩行ロボット WL-10RD を用いて動完全歩行を実現した[101]。

1987年から1990年にかけては、高西・加藤らは上体補償型2足歩行制御方式を提案し[102]、上体を有する2足歩行ロボット WL-12, WL-12R, WL-12RII, WL-12RIII を用いて、既知あるいは未知の外力下での動歩行[103, 104]、また階段や斜面などの不整地上での動歩行を実現した[105]。

また1991年から1993年にかけて山口・高西・加藤らは、3軸モーメントを補償し、着地する路面の形状を検知しそれに基づく軌道修正を行う不整地歩行制御を提案し、未知の不整路面における歩行に成功した[106-108]。その際、形状に偏差のある路面に対して実時間で対応するために、着地衝撃緩和機構や着地路面検知機構を備えた足部機構 WAF-3 (Waseda Anthropomorphic Foot - No. 3) を搭載していた[107-113]。

その後、これらの研究成果を背景に1996年に視聴覚情報取得機構を有する頭部、胴部および腕部を持つ2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN (WAseda BIpedal humANoid) を設計・製作し、1.3 s/step, 100 mm/step の動歩行、手先一定条件下で双腕による動的荷物運搬作業、また人間が振る指揮棒のリズムに合わせての可変速ダンスなどを実現した[114, 115]。

小椋・高西らは、2002年より人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイド・ロボットという主題により、人間に近い自由度を持つ脚と骨盤を持つ2足ヒューマノ

イド・ロボット WABIAN-2 を開発しており、これまでに膝関節を伸ばした歩行に成功、またこのときの床反力や関節モーメントを測定し考察することによる人間の歩行運動の工学的見地からの研究を行っている[116-118]。また、定常歩行時の人の足部軌道を測定し、その軌道を満たす爪先に1自由度を持つヒューマノイド・ロボット用足部機構を作製しており、これを用いて1.0 s/step, 500 mm/stepでの踵接地・爪先離地を伴う歩行を実現した[119-121]。

菅原・高西らは、2002年より人間を搭乗させて歩行可能な2足歩行ロボットについて、その機構と制御方式を提案し、脚機構に平行・メカニズムを用いた人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16 を開発している。そして、人間を搭乗させての2足歩行が可能であることを世界で初めて実証した[122-125]。

以上見てきたように、早稲田大学における2足歩行ロボット研究の目的は、人間の歩行の工学的見地からの解明と、人間と同等の運動能力を持つヒューマノイド・ロボットの開発にある。その目的はもちろんどちらもいまだ達成されたとはいえないが、2足歩行ロボットに関する基礎的な技術の完成度は高まってきているといえる。

すなわち、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットのための足部機構の開発に際し、歩行制御技術の基礎はすでに開発されたものをベースとして利用できると考えられる。また複数の2足歩行ロボットがあるため、開発した足部機構の汎用性についても、実際に装着して実験を行うことにより検証することができる。

1.2.7 2足歩行ロボットの足部機構への着目

そこで本研究では、ヒューマノイド・ロボットなどの2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し評価することを着想した。

本研究の研究目的はあらためて次節にて詳説する。また、本節における論理の流れを図1.9に示す。

1.3 本研究の目的と意義

1.3.1 本研究の目的

本研究では、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に製作した足部機構を2足歩行ロボットに装着して実験を行

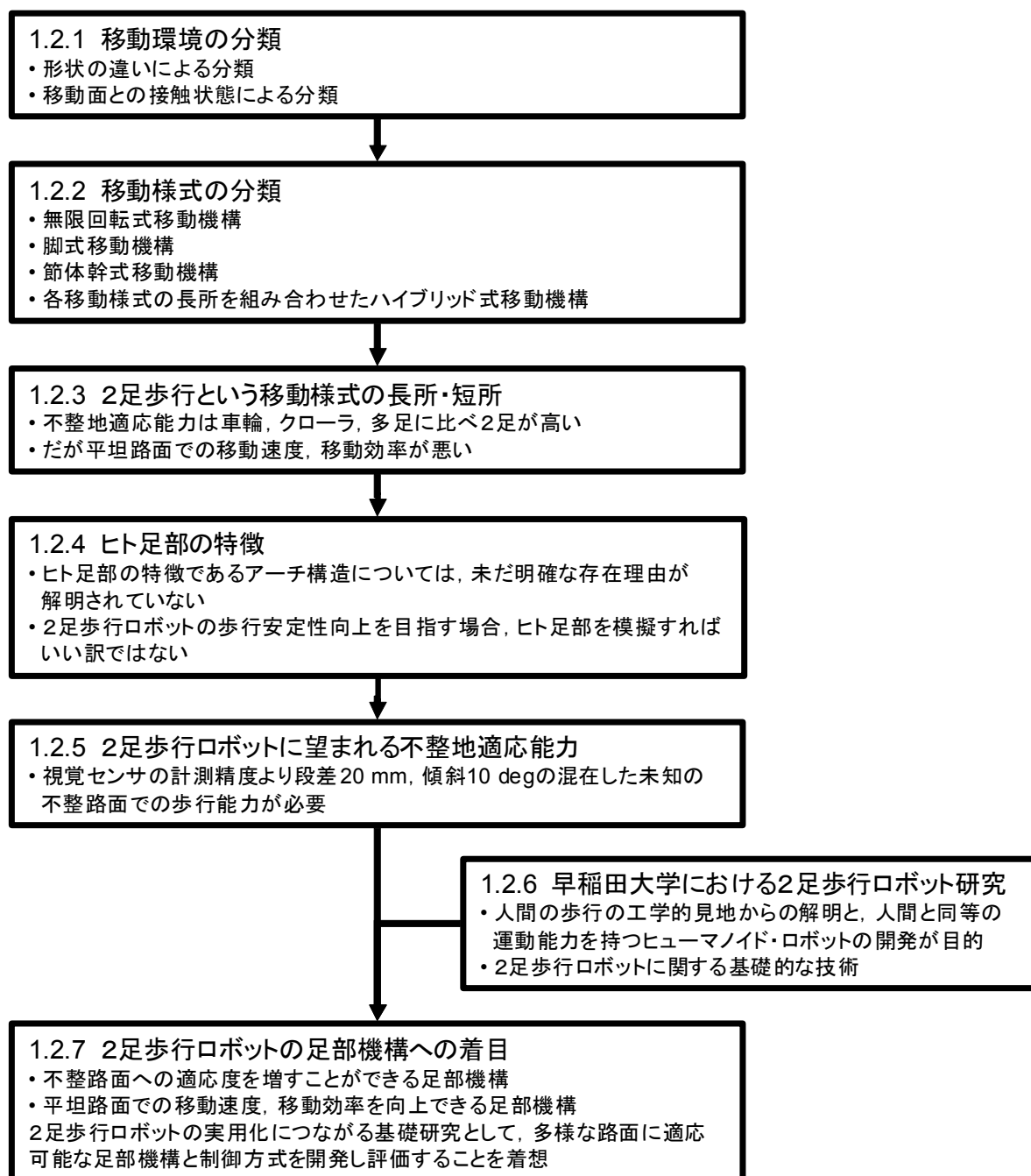


Figure 1.9 Flow of logic of research background.

い評価することにより, その有効性を実証することを目的とする。

具体的には, 実環境に存在する様々な不整路面に対して歩行能力を向上させることが可能な足部機構や, 平坦路面における移動速度や移動効率を向上させることが可能な車輪式足部機構を開発し, 評価を行う。

1.3.2 本研究の意義

本研究によって提案する足部機構や制御方式は、ヒューマノイド・ロボットなどの2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として開発するものである。

したがって、本研究によりその基礎的な技術が構築できれば、人間の住環境などの屋内だけでなく、山野などの屋外も含めた環境をその対象とした2足歩行ロボットを提供することが可能になると考える。

本研究では大きく分けて2種類の足部機構を開発することを目的としており、1つは不整路面においても大きな支持多角形を確保できる足部機構であり、もう1つは平坦路面における移動効率を向上させることが可能な足部機構である。どちらも装着部のみ変更すれば、あらゆる2足歩行ロボットに適用できるものである。

あらためて本研究の意義を述べると、大きく分けて以下の2点が挙げられる：

(a) 2足歩行を移動様式に用いたロボットの実用化に向けた基礎技術の構築

これまでに人間共存型ロボット、ヒューマノイド・ロボットが開発され、実際にレンタルなどされ人間の住環境に進出しつつあるように思われる。しかし、その移動様式に注目すると、車輪やクローラを用いているものが圧倒的多数を占めている。バリアフリー化されつつある屋内では十分な場合もあるが、屋外などの本当の意味での人間共存型ロボットを目指すには、その移動様式は2足歩行が最も優れていると筆者は考える。

そこで本研究により、実環境における不整地歩行技術を提供することができれば、屋内のみならず屋外においても人間と一緒に移動できる人間共存型ロボットを提供することの一助になるため意義がある。

(b) 2足歩行ロボットの靴としての足部機構の提案

本研究で開発する足部機構は装着部のみ変更すれば、あらゆる2足歩行ロボットに装着することが可能であるため、大きな機械ハードウェアの変更をすることなく導入することができる。特に2足歩行ロボットの不整地歩行技術については、ハードウェアの変更に比べ歩行安定化制御に関する研究が多い。しかし、それぞれのロボットにおいて使用しているセンサやハードウェアの違いから、その制御方式がそのまま他のロボットに移行できない場合がある。しかし、そのような場合においても、足部機構のみで不整地に適応することができれば、大きな制御方式の変更をすることなく、そのロボットの不整地歩行能力向上を期待することができる。また、車輪走行と2足歩行が切り換え可能な足部機構を提供することができれば、2足歩行ロボットの平地で

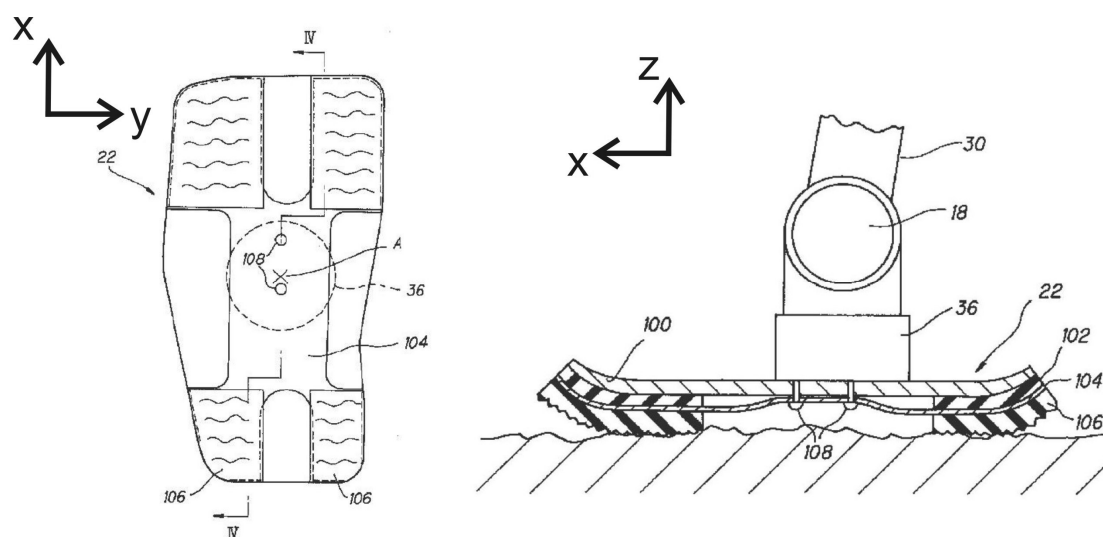
の移動速度や移動効率の向上が図れる。

この2足歩行ロボットの靴としての足部機構の提案は、今後2足歩行ロボットを開発する上で非常に重要になる可能性があると考ええる。

1.4 関連する研究事例

脚式移動ロボットにおいて移動面と接して力を伝達する足部の構造は、脚式作業時の安定性と制御性に大きな影響を与えるため非常に重要である。近年多くの研究機関で2足歩行ロボットが開発されてきているが、安定した歩行を実現している2足歩行ロボットの多くが企業で開発されているため、その足部構造については学会での報告は非常に少なく、特許出願されている場合が多い。そこでまず、各企業で開発されている2足歩行ロボットの足部構造の現状についてまとめる。

ASIMO[48, 49]を開発している本田技研工業株式会社は、着地時の衝撃を緩和するための足部機構を多数提案している。日本国特許庁公開特許公報特開平 5-293776[126]では、硬度 40 程度の比較的柔らかいゴム材 (102) と硬度 70~90 程度の比較的硬いゴム材 (106) を使用し、2つの弾性体の間に板ばね (104) を介挿した足部機構 (図 1.10) が提案されている。柔らかいゴムは着地時の衝撃を可能な限り吸収し、硬いゴムは路面との摩擦力を大きくする役割がある。二種類のゴム材だけでは、鉛直方向軸 (Z 軸) 周りのスピニング力が作用して着地時に柔らかいゴム材 (102) が路面に平行な X



(a) Bottom view.

(b) Cross-section view of (a) along the line IV-IV.

Figure 1.10 Landing-impact force reduction mechanism [126].

軸，Y 軸方向に変形して姿勢を不安定にする恐れがあるため，その変形を防止するために板ばね (104) を介挿している。

日本国特許庁公開特許公報特開平 5-305578[127]では，踵接地時に発生する大きな反力を吸収，緩和することができる機構 (図 1.11) が提案されている．シリンダ (402) 内には油などの作動流体が充填されており，この流体抵抗とスプリング力によって着地衝撃を緩和することができる。

日本国特許庁公開特許公報特開 2001-129774[128] においても同様に，踵接地時の着地衝撃緩和を目的とした足部機構 (図 1.12) が示されている．2足歩行ロボットの足部は，一方では着地時の衝撃を吸収して緩和できるように適宜な弾性を備えると共に，他方では着地後の姿勢を安定に保持できるように適宜な剛性を備えることが望ましい．しかしながら，この相反する要求を同時に満足させることは困難であり，その点で従来技術は未だ改良すべき余地を残していた．そこで，足部の踵を硬質部材と軟質部材から構成すると共に，硬質部材は重力軸方向から作用する力に対する剛性に比してそれ以外の方向から作用する力に対する剛性が低いように構成し，2足歩行ロボットにおいて着地時の衝撃の吸収・緩和と着地後の姿勢安定化を最適にバランスさせることができるようになっている．しかしながら，かかる踵構造によると，脚部の着地時における衝撃吸収・緩和についてはそれなりの効果を得られることが期待できるものの，足底全体として見た場合に足底形状が常に固定であることから，凹凸路面において十分な接地圧や支持モーメントを得難く，不整地に対する適応性が未だ不十分な問題がある。

日本国特許庁特許公報特許第 2826858 号[129]においても，同様の目的の足部機構

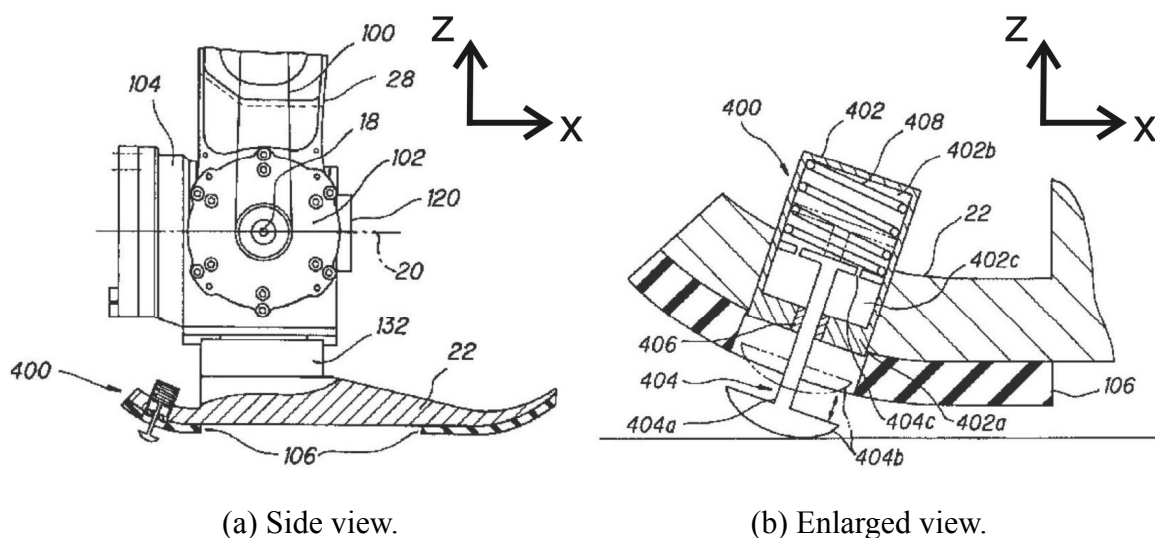
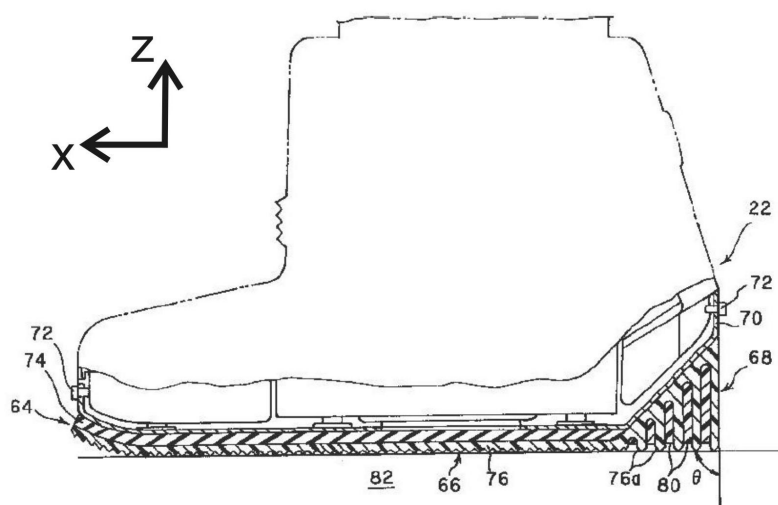
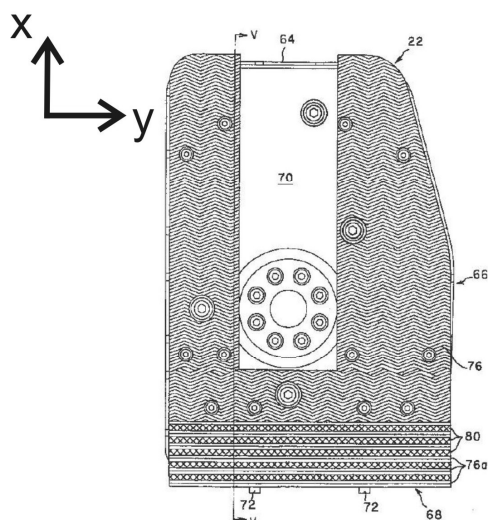


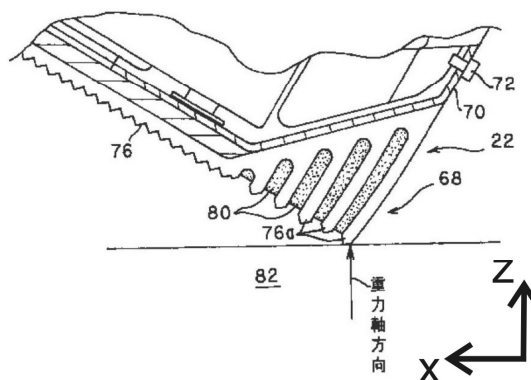
Figure 1.11 Landing-impact force reduction mechanism [127].



(a) Cross-section view of (b) along the line V-V.



(b) Bottom view.



(c) Enlarged view of heel.

Figure 1.12 Landing-impact force reduction mechanism [128].

(図 1.13) が提案されている．これは，踵部に概ね小さな変形を示す柔らかいゴム (114) と，その後の大きな力が加わってもそれほど変形が増加しない硬いゴム (106) からなっており，着地時の衝撃を効果的に緩衝させることができる．また，踵部 (60) は軸方向に連続する全体として丸みを帯びた凸面状に形成され，踵部 (60) がどの部位から着地しても足関節において前記した円弧が得られる様に形成し，接地面に良く馴染むことが可能になっている．

日本国特許庁公開特許公報特開 2006-62057[130]では，簡素な構造でありながら，着地時の衝撃を吸収でき，軽量化された足部機構 (図 1.14) が提案されている．脚式歩

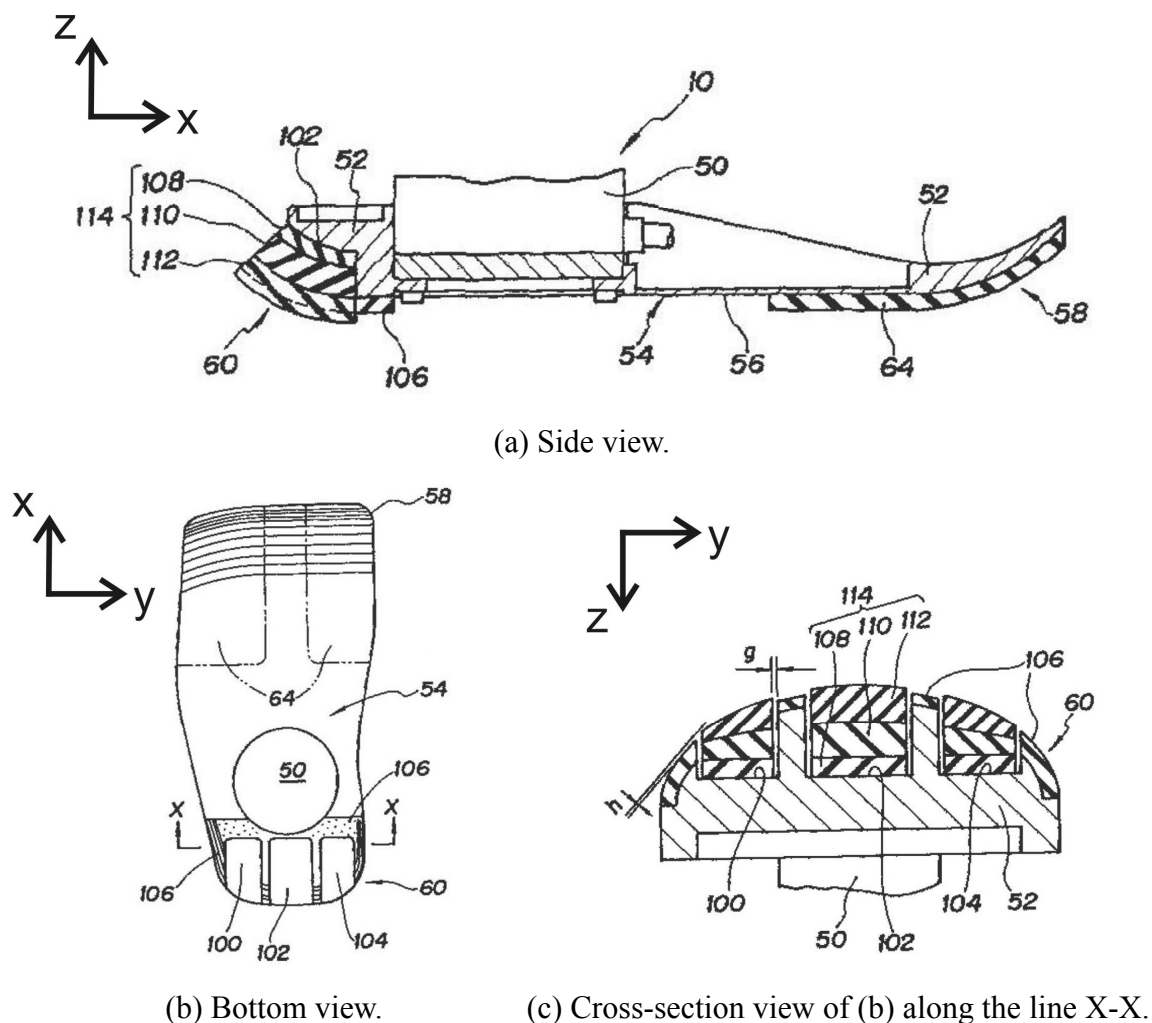
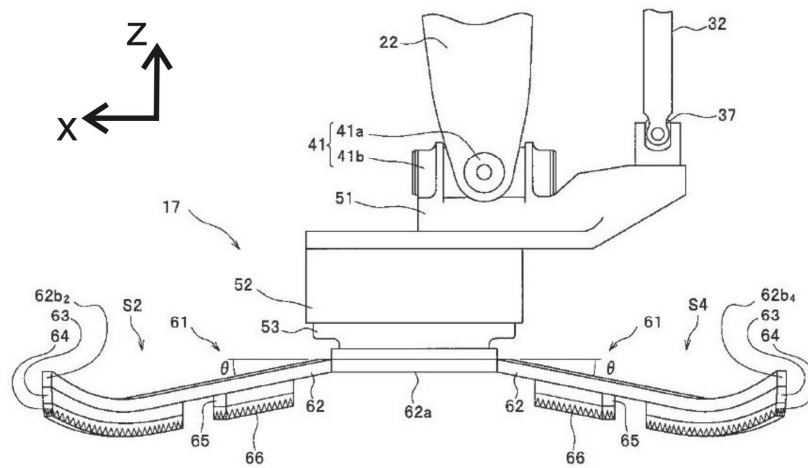


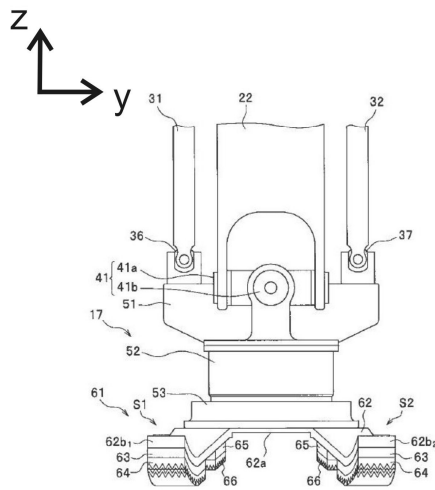
Figure 1.13 Landing-impact force reduction mechanism [129].

行ロボットにおいては、走行など移動スピードを高めることが望まれているが、高速で移動する場合には、脚部に大きな慣性力が生じる。かかる慣性力を小さくするために、脚部の末端側、すなわち足部の軽量化が必要である。また、高速で移動する場合には、接地時に足部に加わる床反力による衝撃力も大きくなることから、足部はかかる衝撃力に耐えうる構造でなければならない。そこで本発明の足部は、床面に接地する接地領域を下端部に有する足底部を備え、接地時にたわみつつ自重を支持する板ばね部を備えていることを特徴とする。歩行または走行時には、一以上の板ばね部が弾性変形し、一以上の板ばね部の弾性力によってロボットの自重を支持しながら、着地時の衝撃も吸収することができる。

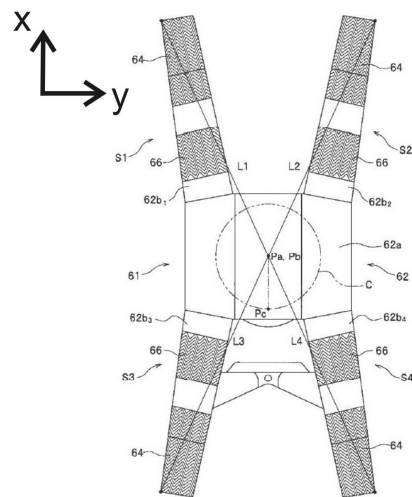
また、ロボットの移動時にその足部が障害物に当たった際に、障害物が破損したり、足部から脚部に衝撃が伝わって脚部が損傷を受けたりする事態を防止することができる足部機構（図 1.15）が日本国特許庁公開特許公報特開平 11-33941[131]で公開され



(a) Side view.

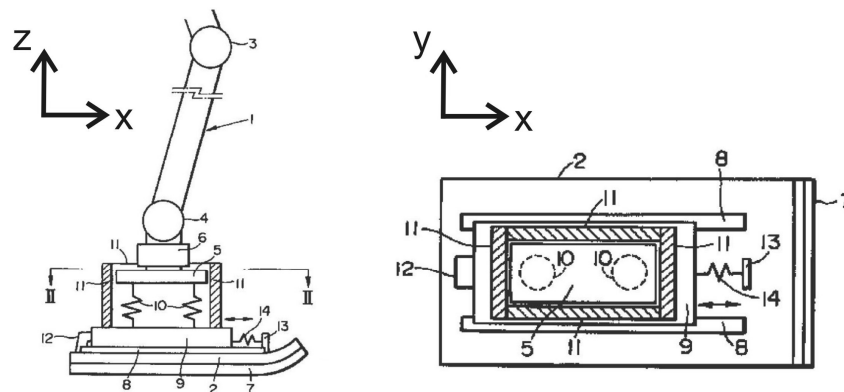


(b) Front view.



(c) Bottom view.

Figure 1.14 Landing-impact force reduction mechanism using leaf spring [130].



(a) Side view.

(b) Top view.

Figure 1.15 Shock-absorbing foot mechanism [131].

ている。2足歩行型ロボットなどの脚式移動ロボットは、その移動時に、離床させた脚部の足部を進行方向前方に振り出して着床させるが、このとき、ロボットの進行方向への足部の振り出しの最大速度は、ロボット全体の移動速度よりも速いものとなる。このため、ロボットを比較的高速で移動させようとした場合、振り出した足部が予期せぬ障害物に衝突すると、足部から脚部に大きな衝撃が加わって、脚部の関節機構が破損したり、障害物を破損したりする恐れがあった。そのため、本発明は進行方向に対して脚部と足部をばねでつなぎ、衝撃を吸収しようというものである。

それ以外に日本国特許庁公開特許公報特開平 5-318335[132]では、平坦な歩行面や階段昇降時に有効接地面積を可変することにより歩行安定性を増すことができる足部機構（図 1.16）が提案されている。歩行面が平坦な面であっても一般には微小な凹凸が存在することが多く、たとえ凹凸が微小であってもロボットの歩行時に足部の接地面の一部が局部的に凸部に乗ってしまえば足部の接地面が歩行面に対して傾いてしまつて歩行面に均一に接触せず、歩行が不安定となる。一方、ロボットの歩行時においてロボットが転倒しないように歩行面に対して支点として機能するのは、可動脚部の足首関節中心から最も離れた外縁部分であり、それよりも内側の部分は支点として機能しない。そこで一般には、足部の全体に接地面を形成せず、4隅部分にのみ緩衝材としてゴムなどからなる弾性材を貼着しておいて、これらの4隅部分を歩行面に対する有効接地面となる接地部としておくのが通常である。しかしながら、このように足部の4隅部分にのみ接地部を形成した場合、歩行面に対する有効接地面積が少ないため、歩行の状況によっては逆に不安定となることがある。例えば階段の上昇時や下降時においては、階段の各段面に足部の全体が乗るとは限らず、上昇時に足部の後端部分が段面から外れたり、下降時に足部の先端部分が段面から外れたりすることが多

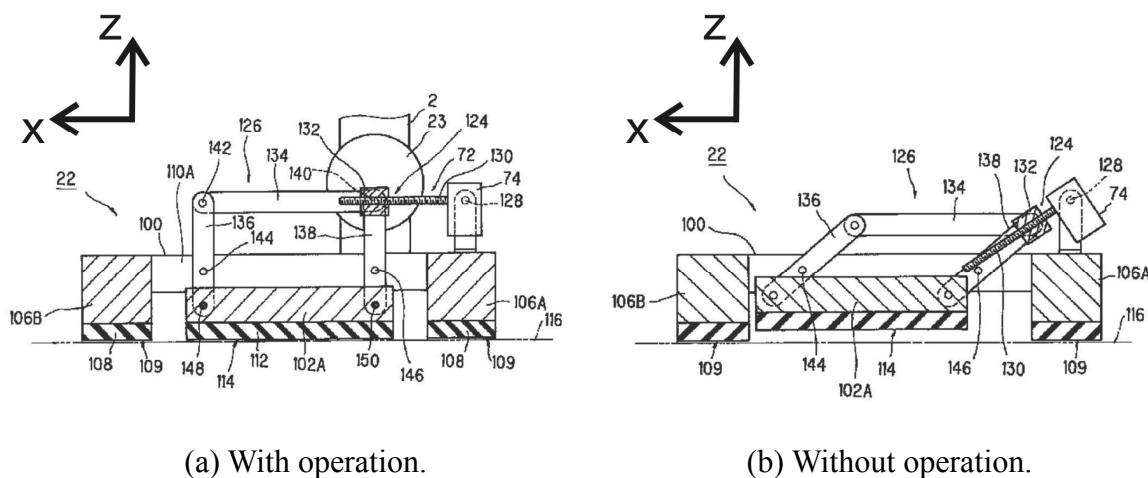
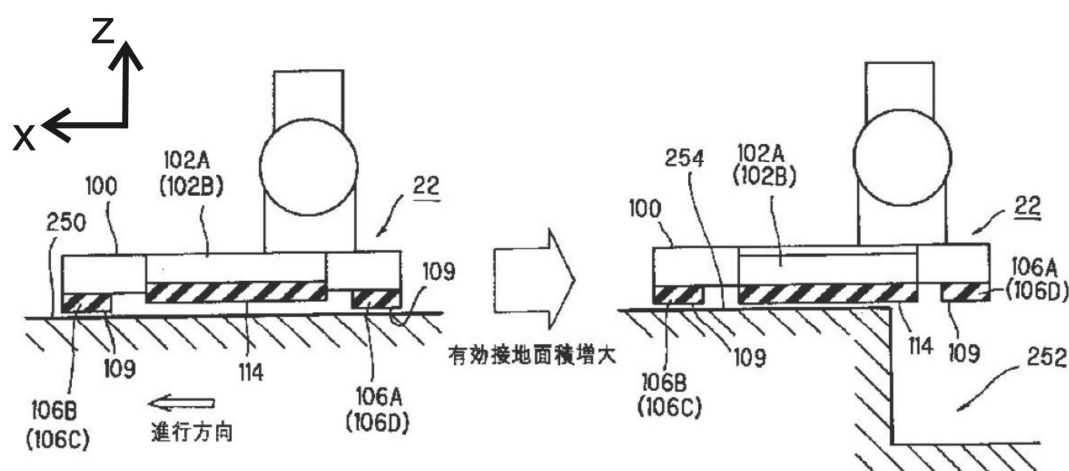


Figure 1.16 Foot mechanism to expand the ground contact area [132].

い. このような場合, 足部の4隅にのみ接地部を形成すると, 足部の前端側もしくは後端側の接地部が段面から外れ, そのため接地部でない部分が段面のエッジ部分に接して足部が衝撃を受け, また足部が段面に対して傾き, その結果ロボットが不安定となり転倒する恐れがある. そのような場合に本提案機構を用いて有効接地面積を可変することができる (図 1.17).

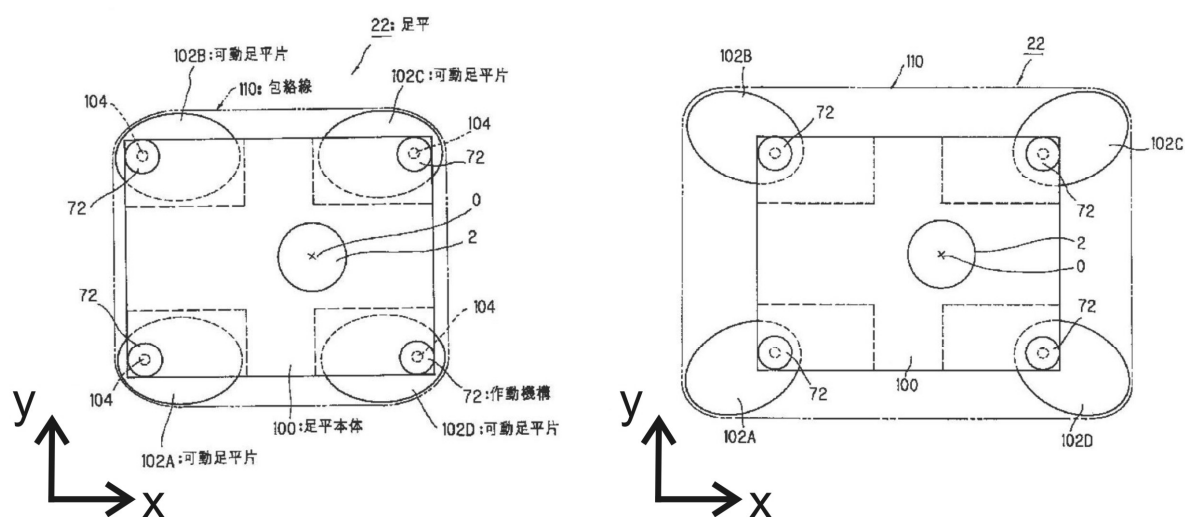
日本国特許庁公開特許公報特開平 5-318336[133]では, 状況に応じて安定領域の大きさを変えられる足部機構 (図 1.18) が提案されている. 2足歩行ロボットの歩行時の安定性を増すための一つの方策としては, 歩行面に対する接地面積が大きくなるように足部を設計することが考えられる. しかしながら単純に足部を大きくしただけでは,



(a) Without operation.

(b) With operation when going up a stair.

Figure 1.17 Foot mechanism to expand the ground contact area [132].



(a) Without operation.

(b) With operation.

Figure 1.18 Foot mechanism to expand the support polygon [133].

歩行の状況によっては逆に安定性を損なうことがある。例えば歩行面が階段である場合、階段には各段の段差部分に廂状の突出部分が存在することが多く、このような場合足部が大きければ、階段上昇時にその廂状の部分に足部のつま先側の部分が干渉し転倒する可能性が高い。また歩行面に存在する突起などの障害物を跨ぐような場合、足部が大きければ足部の先端もしくは後端が障害物に干渉して転倒する可能性がある。この発明の足部機構においては、作動機構により可動足部片を作動させることにより、歩行面に対する有効接地面の外縁を結ぶ包絡線によって取り囲まれる領域を拡大、縮小させることができる。

ソニー株式会社についても、すでにエンターテインメントロボット事業からの撤退を発表しているが、小型2足歩行エンターテインメントロボット QRIO[51]などの足部機構について多数の特許が公開されている。

日本国特許庁公開特許公報特開平 11-320461[134]では、滑りやすい路面であっても、滑ることなく、安定した歩行を得ることができ、また、義足として、あるいは歩行ロボットの足部として寿命の長く、さらに路面に与える損傷も少ない人工足部(図 1.19)を提案している。滑りやすい路面に対応する方法としては、あらかじめ足部の底面にスパイクを設けることも考えられるが、滑りやすい路面でない場合にもスパイクが路面に接地して歩行することになり、スパイクの寿命が短くなってしまうこと、路面をスパイクで常に削ってしまうこと、さらにスパイクが引っ掛かって歩行の妨げになることなどの理由により好ましくない。そこで本発明では、路面の状態を判断した後、滑りやすい路面の時にスパイクを突出させることができ、微細な動きができない義足、または歩行ロボットの足部であっても、滑りやすい路面で転倒することなく歩行することができ、しかも、滑りやすい路面でない場合には、スパイクを引っ込めることにより、スパイクを路面に接触させることはなく、したがって、スパイクを削ることも

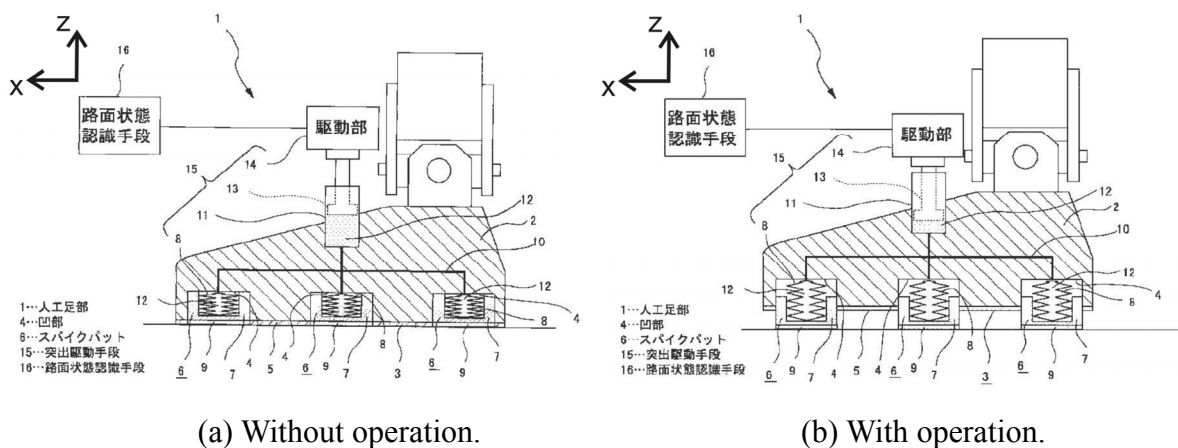


Figure 1.19 Foot mechanism to increase friction force between feet and a ground [134].

路面を痛めることもなく、安定した歩行動作を行うことができる。

日本国特許庁公開特許公報特開平 11-320463[135]では、歩行ロボットあるいは義足を装着した人体において、立位状態にあるときに、上半身が大きく動いても接地面積を大きく確保し、転倒を回避する足部機構（図 1.20）が提案されている。歩行ロボット、または義足を装着した人体において、立位状態で上半身を屈めて、左右又は前後に大きく傾けたとき、左右方向への上半身の移動においては、両足部を左右に開くことにより、比較的立位状態を安定に維持することができるが、特に、前後方向に上半身が移動したときは、転倒するしかなかった。ちなみに、健常な人間の場合は、上半身が前後に移動したときは、足部のつま先側または踵側に力を入れたり、腰の位置を前後に移動させたりすることによりバランスをとって、転倒を防止するようにしているが、歩行ロボットの足部、または義足にあっては、その足部を微細に動かすことができないため、転倒してしまうことが多かった。本発明の人工足部にあっては、人体が立位状態において、上半身を屈めて重心が移動させても、転倒防止部材が側方に突出して、足部の接地面積が広がるため、転倒しにくく、立位状態を維持することができる。

日本国特許庁公開特許公報特開 2001-277159[136]では、足部と路面との接地状態を確認するための路面接地センサの他に、路面と接地脚との間の相対移動（滑り）を測定するための相対移動測定センサを配設した足部機構（図 1.21）が提案されている。図中（1504）が相対移動測定センサであり、（1505）～（1508）は路面接地検出センサである。2足歩行ロボットにおいては、立脚中の足部が路面に対して滑りなどの相対移動を起こすことがしばしばある。ロボット上に標準的に搭載されている加速度センサやカメラによる視覚認識などの検出システムを用いて、路面に対する相対移動を

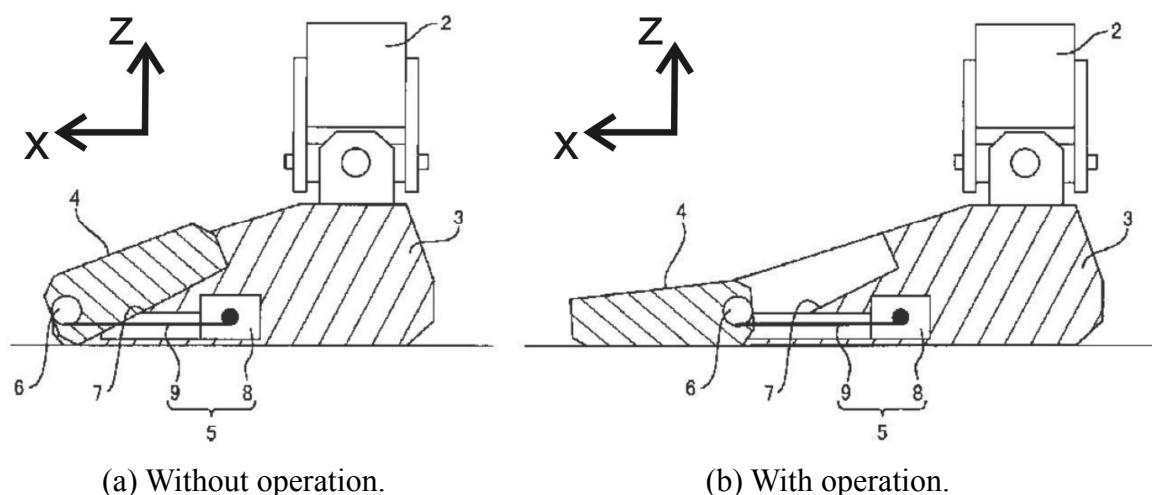


Figure 1.20 Foot mechanism to expand the support polygon [135].

正確な量まで測定することは、非常に困難である。従来の2足歩行ロボットの足部に設けられていたセンサは、一般に、路面からの反力や、路面までの距離測定を行うものがほとんどであった。言い換えれば、路面に平行な面方向の移動、あるいは、路面の法線まわりの移動など、路面に対する足部の相対移動（滑り）に相当する物理量を測定または認識する測定機器は、ロボットに適用されていなかった。いわゆる足裏感覚を2足歩行ロボット上で実現するためには、路面に対する足部の相対移動を検知し定量化することが重要であると考えられる。このため、提案されている足部機構を使うことにより、計画された軌道と実際の軌道との間にずれが発生した場合であっても、適応的に動作制御を行うことができる。

また、日本国特許庁公開特許公報特開 2001-353686[137]では、路面との距離を離散的に測定可能な足部機構（図 1.22）が提案されている。2足歩行ロボットの実用化を目前としている昨今、実験室外での作業場、すなわち、未知の路面、凹凸、傾斜などのある路面への対応がロボットにとって不可欠なものとなってくる。これに対する方策として、1つは視覚センサ入力に基づいた処理の更なる開発が考えられる。しかし、人間と同程度の視覚認識をロボット上で実現するためには、まだまだ前途は長いと言わざるを得ない。そこで、ポテンショメータを用いて路面との距離を検出する方法が考えられるが、移動ロッド・ストロークの2倍以上の長さが必要となるので、小型ロボットに対して搭載することは設計上無理がある。また、特に小型ロボットの場合、路面と足部の距離を厳密に測定することが必ずしも必要ではないこともある。すなわ

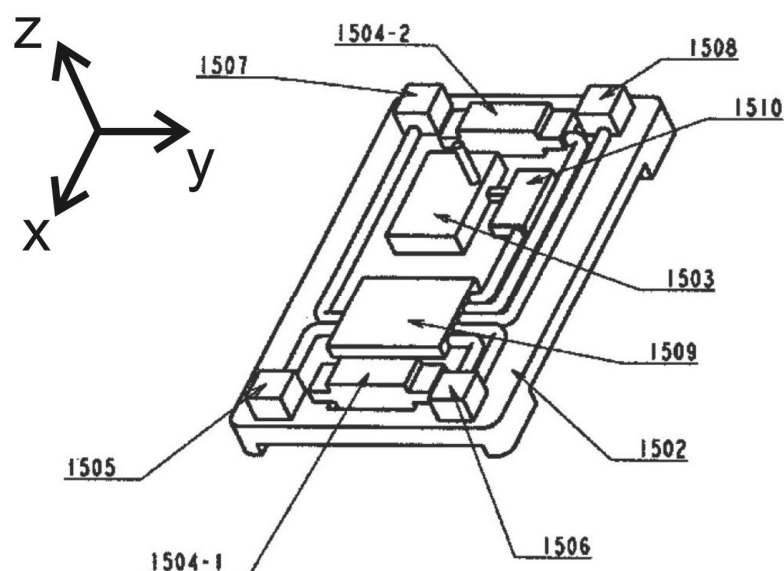
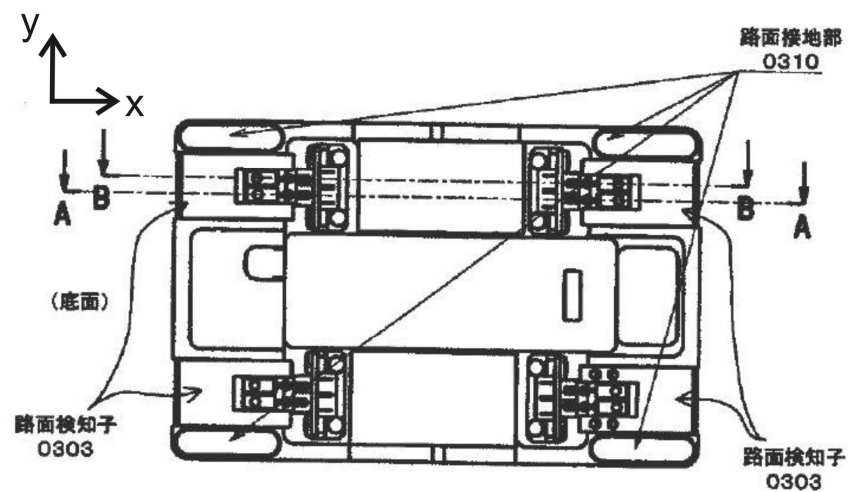
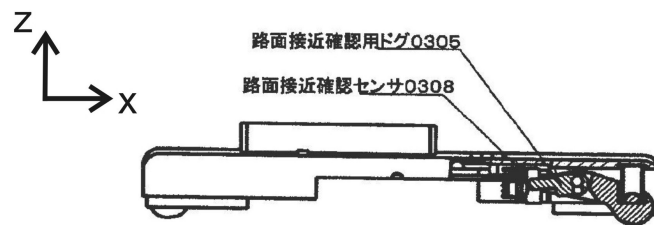


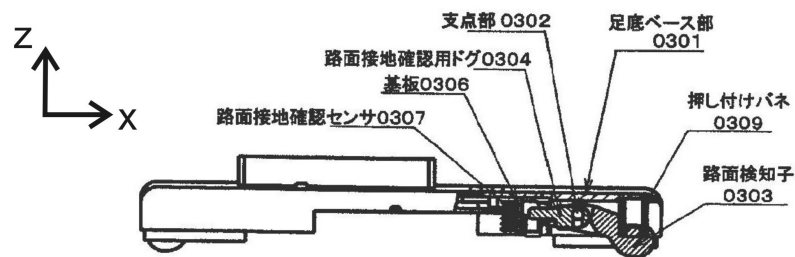
Figure 1.21 Foot mechanism to detect the ground height and the slip between feet and a ground [136].



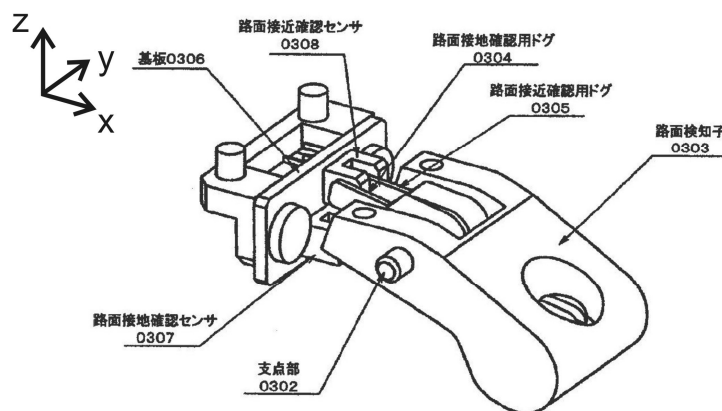
(a) Top view.



(b) Cross-section view of (a) along the line A-A.



(c) Cross-section view of (a) along the line B-B.



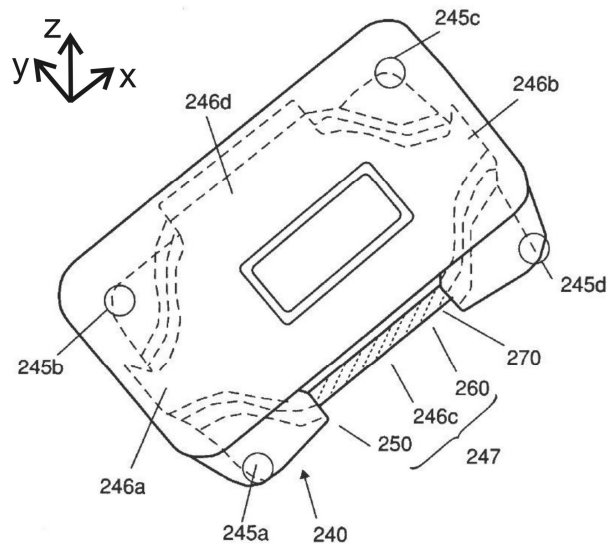
(d) Detail view of sensors.

Figure 1.22 Foot mechanism to detect the ground height [137].

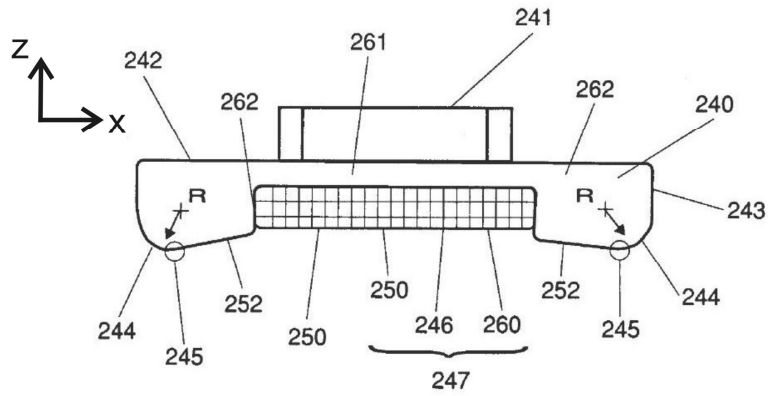
ち、路面と足部の距離関係を2~4段階程度の離散的な値で測定すれば十分であることもある。そこで本発明の足部機構の路面検知部は、足部ベース体(0301)に対して出沒自在で、かつ路面方向に付勢されて取り付けられた路面検知子(0303)と、路面検知子が第1の出沒位置にいるか否かを検出する第1の検出部(0308)と、路面検知子が第2の出沒位置にいるか否かを検出する第2の検出部(0307)とで構成されている。こうすることで、第1および第2の検出部からの各出力に基づいて、足部と路面との距離関係を段階的に検地することができる。

日本国特許庁再公表特許国際公報番号 WO2003/068455[138]では、抗力発生実効面の変化を抑制することで、うねりのある路面、芝上、絨毯、砂利道、段差などの様々な移動面に受動的に適応して脚式移動ロボットの姿勢の安定性を十分に確保することを目的とした足部に関する技術が公開されている。また、これについては山口によって学会誌[139]においても報告されている。図 1.23 に本技術の具体例の一つである足部を示す。本足部は、外周部にある曲面部(244)によって、躓きおよびスティックスリップを抑制し、外側縁部分(243)は、足裏面に含む面に投影したときの形状が直線もしくは内側に湾曲する曲線になるように設計されている。これは、転倒時のYaw軸周りの回転運動発生を抑制するためである。足裏面の第1の凹部面(252)は、荷重によって変形したり、柔軟路面に接地しても抗力発生実効面の変化を抑制するために設けられている。図 1.24 に変形する様子を示す。この図を見ると分かるように、このような形状により、荷重が増加しても接地部(245)が中心方向に移動しづらくなり、抗力発生実効面の減少を抑制できることが分かる。足裏面の第2の凹部面(260)は、内部が柔軟部材により被覆され、段差などの凸部を柔軟部材が包み込むことで凸部の影響を抑制する機能がある。図 1.25 にその様子を示す。大きくて包み込むことができないものに対しても、柔軟部材が凸部を包み込むことで抵抗を回転方向に対しても発生させることができ、抗力発生実効面が急速に減少してしまっても、機体の姿勢変化を緩やかにすることができる。また、同凹部側面は、絨毯などに対して毛足を誘導して集めるとともに毛足が引っかかることで抵抗となり、滑りやすい絨毯路面や軟弱路面での摩擦力の低下を補う機能がある。ヒト足部とは形状の類似性は低い、その機能の多くは、形を変えて引き継がれていると言えるであろう。

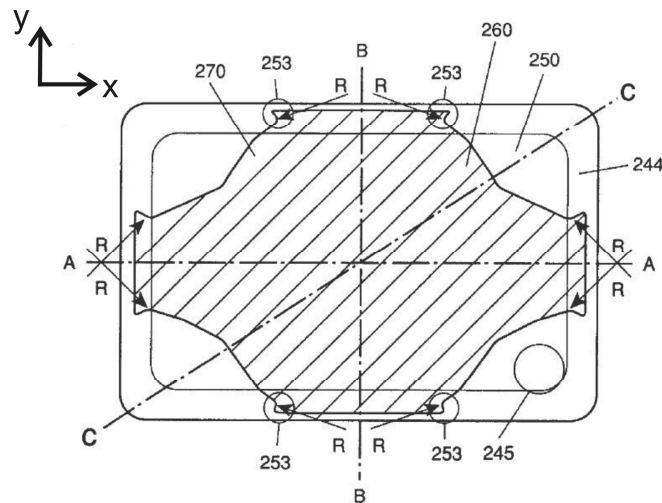
日本国特許庁公開特許公報特開 2005-177960[140]では、機械的な弾性要素を利用してさまざまな移動面に適応させて姿勢の安定性を確保する足部機構が公開されている。従来、環境との接触部である足裏に弾性素材を装備する方法や、コンプライアンス制御を用いることで接地時の衝撃を制御的に緩和する方法などが採用されている。前者の方法の場合、環境にならって変形するように、ゴムなどの柔らかい素材が足裏に用いられることが多い。しかしながら、ゴムなどの素材の経年劣化による耐久性の



(a) Perspective view.



(b) Side view.



(c) Bottom view.

Figure 1.23 Foot mechanism to control the pressure distribution between feet and a ground [138].

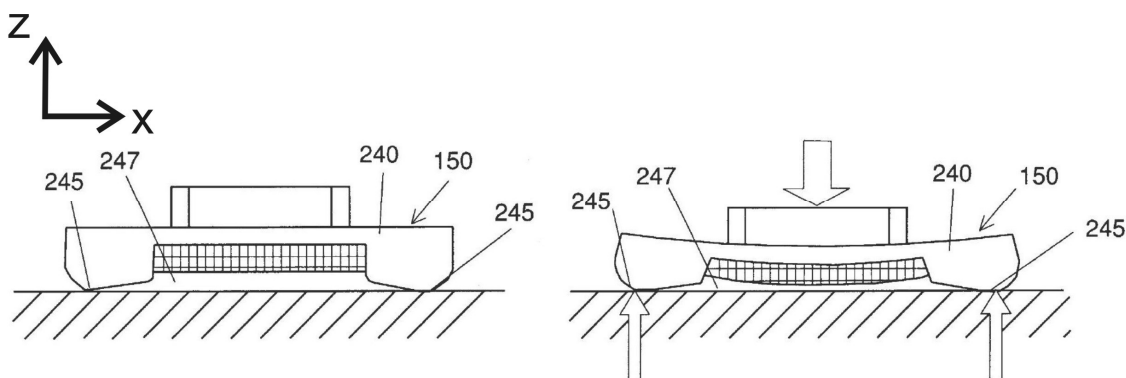


Figure 1.24 Deformation of the example foot shown in Figure 1.23 [138].

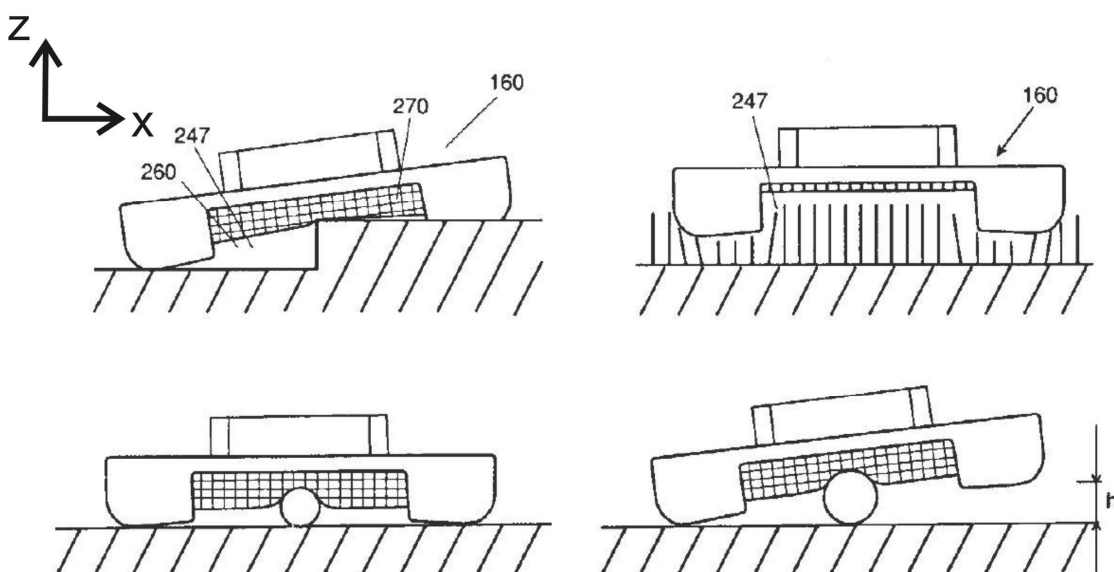


Figure 1.25 Adaptation to uneven surface by using soft material [138].

問題がある．また，後者のコンプライアンス制御による方法では，アクチュエータの応答性に限界があるため，飛躍した後の着地や衝突といったような高い周波数成分を十分に吸収することができない．現在，2足歩行ロボットの制御方式の主流である目標 ZMP 追従制御では，足裏を剛体と仮定し，足底接地点と路面の形成する支持多角形の内側に ZMP があれば転倒モーメントを支えられるものと考えている．したがって，足裏はなるべく剛体に近いものが求められる．これは，前述の衝撃吸収とは相反する立場である，過去の成功事例の多くは，機械的な変形要素と，制御的な手法を組み合わせることで2足歩行を実現している．例えば，衝撃吸収時は柔らかく，自重を支えるときは硬くなるような非線形のばね機構を足部に適用する．本発明は，粉体封入ブロックからなる底部柔軟部を供えた足部に関するものである．柔軟部は片足支持

期での足裏圧力に対する耐圧性と、低密度、微細な粒子径を備えた粉体により構成されている。例えば、 $10\ \mu\text{m}\sim 6\ \text{mm}$ の粒子径を持つ無数のガラス中空球からなる粉体を変形可能に封入したものが良いと記されている。微細なガラス中空球などの粉体を封入して構成される柔軟部は、負荷時と除荷時とで変形特性又は摩擦係数にヒステリシス特性を持つことができる。すなわち、負荷時にはほぼ線形的な変形特性を表す一方、除荷時には変形状態を保ち、徐々に復元していく。また、このような変形特性とも相まって、除荷時には負荷時よりも高い摩擦係数を示すことができる。図 1.26 は本発明の実施例の 1 つの足部機構の断面を示している。図示のように、底部芯部 (2103) の形状を変化させ、接地圧分布の効果を底部柔軟部 (2104) に与え、部分的に接地圧を調整している。このような構造によれば、足底の接地部は足機構の外周部に近いほど支持モーメントを高く保つことができ、かつ大きな衝撃にも耐えることができることから、位相発生に基づく姿勢安定制御と ZMP 安定度判別規範に基づく姿勢安定制御との整合性を満足することができる。また、図 1.27 に示すように足底部材の底面側

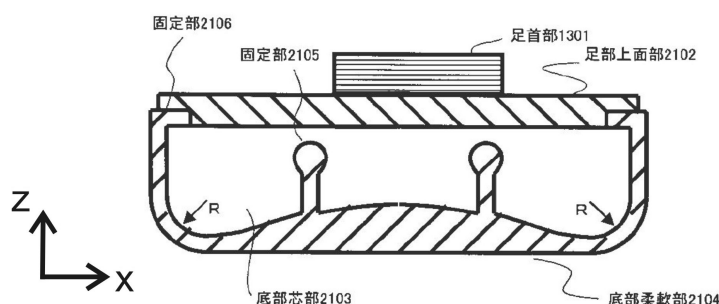


Figure 1.26 Foot mechanism having mechanical elastic element [140].

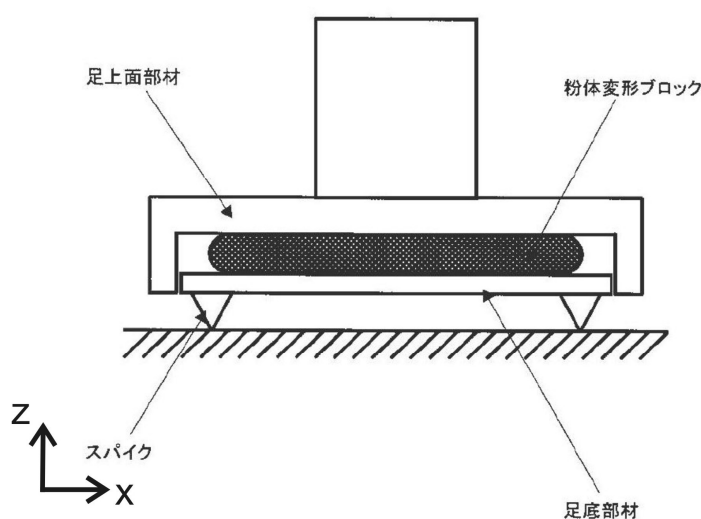


Figure 1.27 Foot mechanism having mechanical elastic element and spike [140].

に突起物によるスパイクを形設することにより、泥濘地や氷上などに着床したときに環境に適応することができる。この場合の粉体封入ブロックの体積変化方向は上下方向に拘束されており、粉体変形ブロックが足底部材に押しつぶされ、流動的な変形を起こすことにより衝撃吸収の効果を得ることができる。

トヨタ自動車株式会社もトヨタ・パートナーロボット[50]として人間形2足歩行ロボットを開発しており、近年その特許が公開され始めている。

まず、着地衝撃緩和を目的としたものとしては日本国特許庁公開特許公報特開2008-87142[141]がある。図1.28に示す足部機構は、歩行する床面に接触する接触部を底面に有する踵部材(261)と、前端が自由端であり、後端が踵部材の接触部よりも前方において、踵部材に対して相対的に姿勢変更が可能に接続されたつま先部材(262)と、つま先部分の前端を、鉛直下方成分を含む方向に姿勢変更するように付勢力を与える付勢手段(261c)とを備えている。そして、脚式移動型ロボットの歩行動作時において、踵部材の接触部(261b)が接触した後に、つま先部材の前端(262a)が床面に接触し、つま先部材が付勢手段に与えられる付勢力に反するように、踵部材に対して相対的に姿勢変更することを特徴とする。このような足部構造によると、支持脚となる側の脚部において、踵部材の接触部が床面に接触した後に、足裏全体を床面に対して面的に接触させるまで、付勢手段により与えられる付勢力によりつま先部材の姿勢変更する動きが弱まる。したがって、歩行動作中に足裏を床面に対して接触させる際に受ける衝撃が、つま先部材の姿勢変更する動きによって緩衝され、脚式移動型ロボットが床面から受ける衝撃を低減することができる。

日本国特許庁公開特許公報特開2008-126332[142]においても、着地衝撃緩和を目的とした足部構造が提案されている。2足歩行ロボットは、歩行時や走行時において、踵着地時に生じる衝撃に加え、足底が一気に着地面に衝突するために発生する衝撃も不安定要因となる。足底が一気に着地面に衝突すると、ZMPを滑らかに移動することができず、ZMP制御に悪影響を及ぼすためである。図1.29に示す本発明の足部構造は、つま先部(1)と踵部(2)を有するものであって、つま先部と踵部の間にある

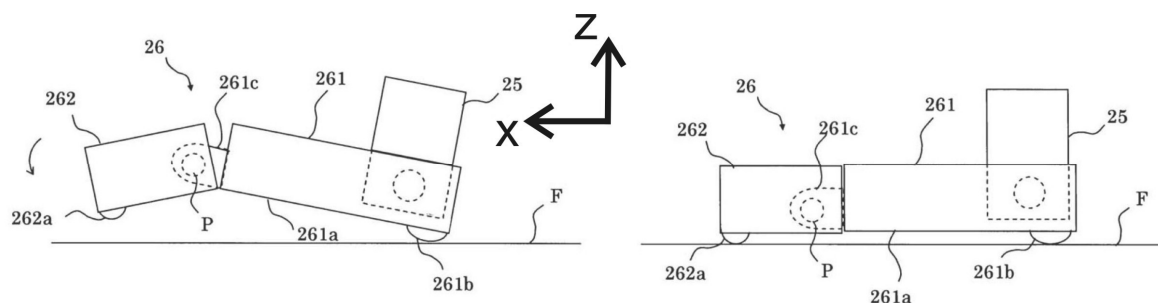


Figure 1.28 Landing-impact force reduction mechanism using toe [141].

中間部は、踵部からつま先部に向かう方向について連続的に接地面積が大きくなるように幅広に構成されている。このような構成により、踵部の着地時に、実 ZMP の収束性に優れ、着地動作が進むにつれて滑らかに実 ZMP を前方に移動させることができる。また、踵部の接地領域は、中間部における左右方向の幅の平均値よりも狭い幅を有することを特徴としてもよい。このような構成により、踵部の着地時に、実 ZMP を所望の位置に確実に位置させることができる。

また、路面高さ検出に関する特許についても複数公開されている。日本国特許庁公開特許公報特開 2008-49458[143]では、その基本的な原理が示されている。従来の多くの技術は、脚部の足部が着床したときの床反力を計測し、足部が着床してから歩容データを補正している。そのため、現実の歩行面の状態が仮想的な歩行面と異なる場合には、足部は歩容データ上での着床のタイミングとは異なるタイミングで着床することになる。早く着床した場合には歩行面から大きな外乱力を受け、遅く着床した場合

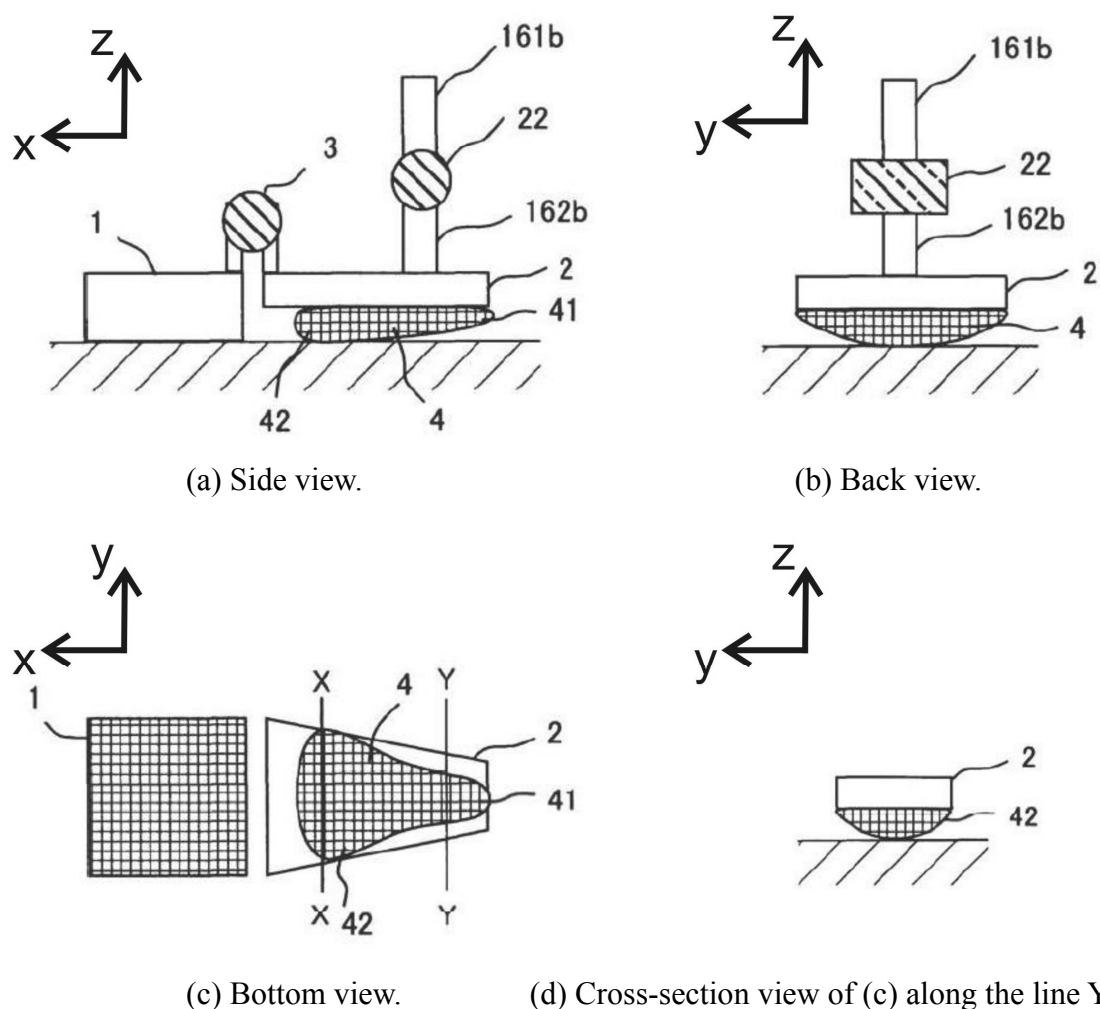


Figure 1.29 Foot mechanism to move measured ZMP smoothly forward [142].

には脚部を空振りさせることとなり、いずれの場合も脚式ロボットが転倒する原因となりやすい。スムーズな歩行を実現するには、足部が歩行面に着床する前に、実際の歩行面の段差や凹凸などの状態に応じて歩容データ内の足部の目標位置姿勢角をリアルタイムに補正できる方がよい。

そこで本発明では、図 1.30 に示すような足部を提案している。足部が着床位置に近づくと、足底部が先に歩行面と接する。足底部は足部の下面に弾性支持されているので、足部の姿勢角にかかわらずに歩行面の凹凸に適合した位置と姿勢角で静止する。したがって足底部の姿勢角が、足部を安定して着床させることのできる姿勢角となる。補正量は、足部と足底部の間の距離偏差を小さくするように設定されるため、そのような補正量を加えた目標位置姿勢角は、足底部の位置姿勢角となる。したがって、補正量の加算された目標位置姿勢角に足部が追従するように脚部の関節を駆動することによって、足部を安定して着床させることができる。足底部距離センサは少なくとも 3 点の距離を計測できればよいので、格子状に配置した距離センサや画像処理を利用する距離センサよりも低コストで製造できる。足部が歩行面に着床する前に、歩行面の凹凸などの状態に応じて歩容データをリアルタイムに補正してスムーズに歩行する脚式ロボットを低コストで実現することができる。

具体的な距離検出の方法として、日本国特許庁公開特許公報特開 2007-290058[144]ではコイルのインダクタンス変化を利用したものが公開されている。図 1.31 に示すように、足部本体と可動部の一方には、コイルが配置されており、足部本体と可動部の他方には、導電性を有する導電部材が接続されている。そして、導電部材は足部本体に対して可動部が進退したときに、コイルに対して進退する。このような構造にする

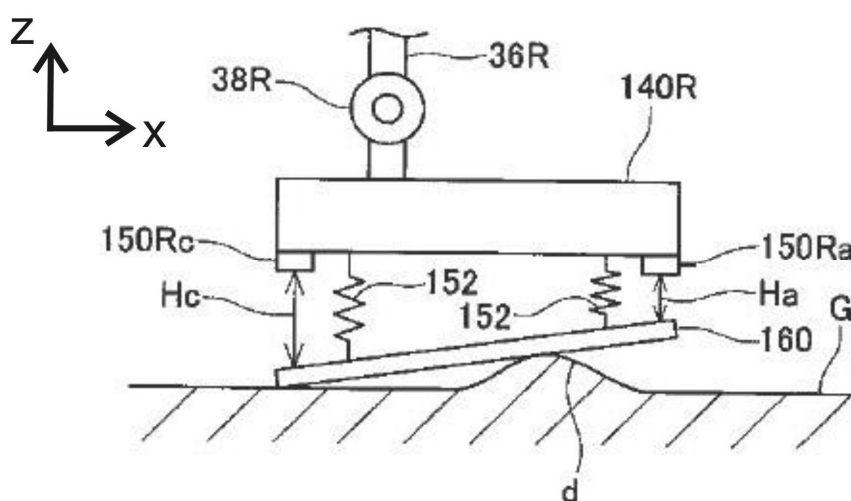


Figure 1.30 Foot mechanism to detect the ground height [143].

ことで、足部本体が路面に接地するのに先立って可動部が路面に接地し、足部本体と路面との距離に応じて、可動部が足部本体に対して進退する。足部本体に対して可動部が進退すると、導電部材がコイルに対して進退することから、測定されるコイルのインダクタンスが変化する。測定したコイルのインダクタンスに基づいて、足部と路面との距離を把握することができる。この導電部材は、導電性を有するワイヤであることが好ましく、可撓性を有するワイヤを利用することによって、導電部材やコイルの配置位置に自由度が増し、足部の構造が無用に限定されない。

日本国特許庁公開特許公報特開 2008-272846[145]では、渦電流式変位センサを用いた路面検出方法が提案されている（図 1.32）。これは、足部本体に対して摺動可能に

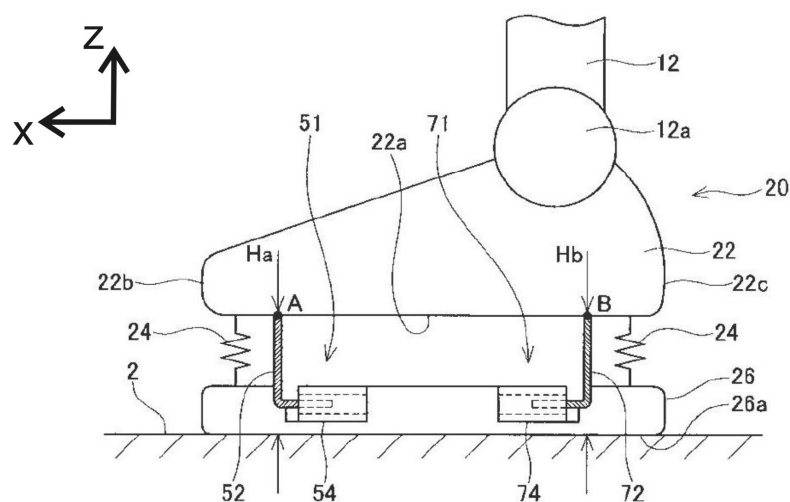


Figure 1.31 Foot mechanism to detect the ground height by using the change in inductance [144].

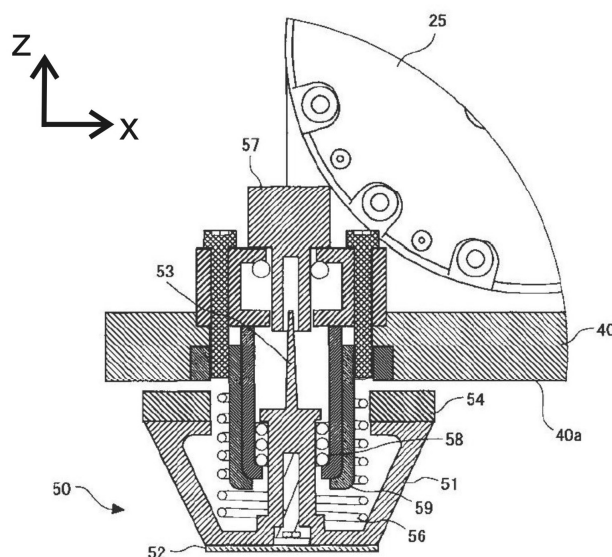


Figure 1.32 Foot mechanism to detect the ground height by using an eddy current displacement sensor [145].

取り付けられ、足部本体の底面よりも床面側に突出する可動部 (51) と、この可動部の摺動位置を検出するセンサ部 (57) と、可動部が足部本体の足裏面に近づく方向の摺動端において、可動部の下端が足部本体よりも床面側に突出するよう、可動部の摺動範囲を規制するストッパを備えるものである。これにより、床面に凹凸がある場合でも、床面までの距離を正確に測定することができる。また、可動部 (51) の突出量が 20 mm となっているが、この突出量は、レーザセンサなどの視覚センサで検出可能な最小凹凸高さに応じて規定すればよい。突出量以上の段差がある場合、レーザセンサなどを用いて段差を認識して、突出量以上の段差を踏まないようにロボットの移動経路を計画すればよい。

他の特許で見られない特徴的なものとしては、日本国特許庁公開特許公報特開 2006-218550[146]の内側に倒れさせるような足部構造がある。2足歩行ロボットの場合、足接地時に体・足が外側へ倒れると、歩行安定性を維持するのが困難になる。一方、体・足が内側へ倒れる場合は、その内側に倒れる足とは反対側の足を協調させるなどにより、比較的容易に安定性を維持できる。したがって、外側へ倒れることはできるだけ避けなければならない。従来技術においては、足裏部に着目すると、足裏内外側についてはそれらの全面に同様の弾性体が貼り付けられており、足裏が内外側ほぼ均等にたわむように形成され、足裏接地時の左右各足における内外側への倒れやすさは内外どちら側にも等しくなるという構造であった。そのため、外乱が作用する方向が内外各側について等しくなるので倒れる方向が足裏の内外各側で等しくなり、歩行が不安定になる確率が高くなるという問題点があった。そこで、この問題を解決するために、本発明の足部構造は、接地時に、足裏内外側の内側部分よりも外側部分からの反力が大きくなる材質 (図 1.33) および形状 (図 1.34) で形成された足裏部を備えることを特徴とするものである。

独立行政法人産業技術総合研究所・川田工業株式会社で開発された HRP-2[95]は、歩行時の着地衝撃などにより脚部リンク機構や足部に内蔵されたセンサの破損を防ぐために、低剛性のゴムブッシュを用いた衝撃吸収機構を可動脚の先端足部に備えており (図 1.35)、日本国特許庁公開特許公報特開 2004-106077[147]で特許公開されている。

セイコーエプソン株式会社からは、接地面の摩擦係数を変化させることが可能な足部機構が発明されており、日本国特許庁公開特許公報特開 2003-236779[148]で公開されている。脚式移動ロボットにおいては、片脚支持期や離床脚の着床時に姿勢が不安定になりやすく、特に、片脚支持期において支持脚の接地面がスリップすると、転倒の恐れがあるため、足部の接地面を高摩擦係数部材で形成し、スリップを防止することがこれまで提案されていた。しかしながら、接地面の摩擦係数を常に高くすると、

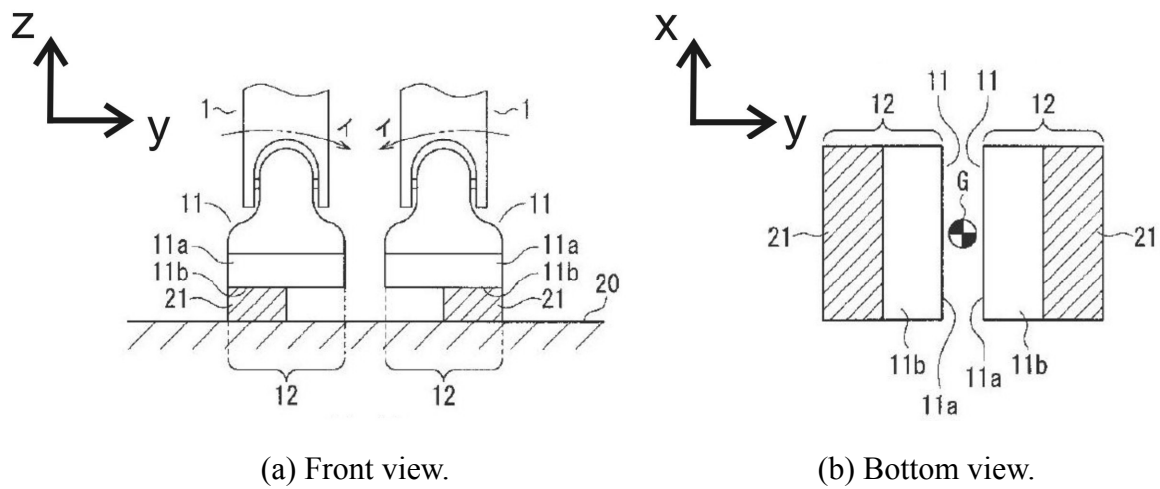


Figure 1.33 Foot mechanism that makes a robot fall down easily inside [146].

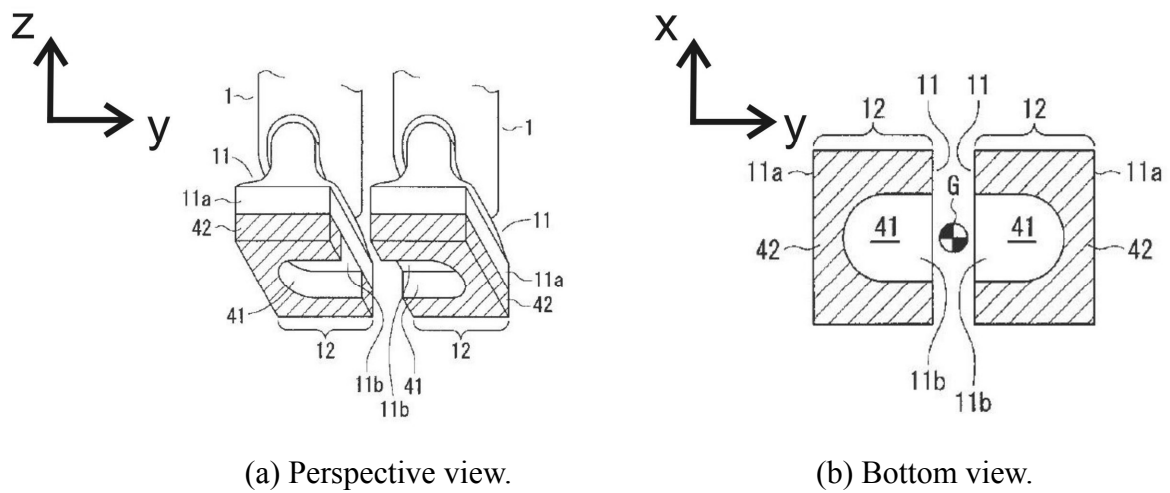


Figure 1.34 Foot mechanism that makes a robot fall down easily inside [146].

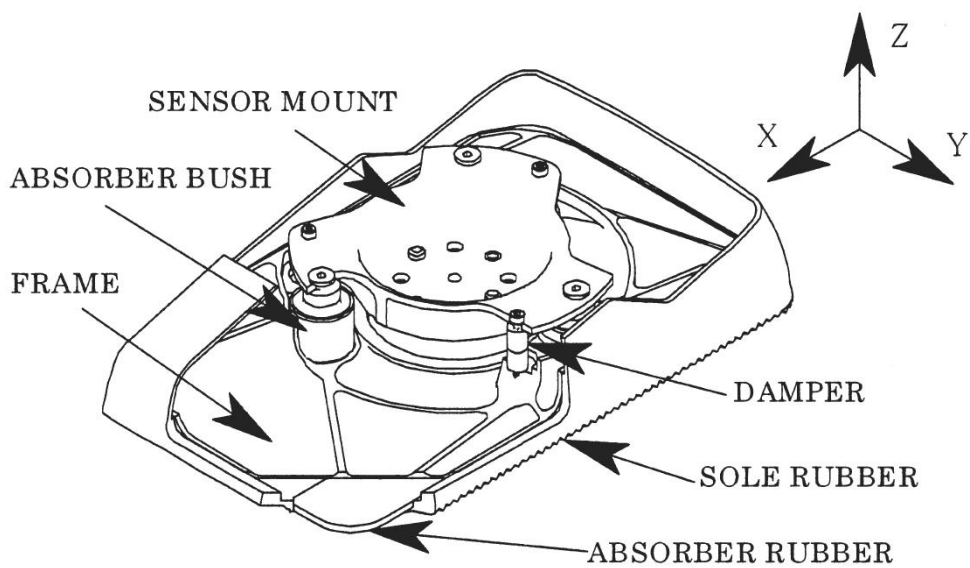


Figure 1.35 Landing-impact force reduction mechanism of HRP-2 [95, 147].

振り出し動作脚が床面に接触したときや、離床脚が着床したときに、接地面に大きな摩擦抵抗が作用するため、円滑な歩行動作がかえって阻害される恐れがあるばかりでなく、ロボット重心が急激に移動し、ロボットが転倒する可能性がある。そこで本発明の目的は、接地面の摩擦係数を適宜変化させることによって、支持脚の接地面がスリップしたり、振り出し動作脚の接地面に大きな摩擦抵抗が作用したりするなどの不都合を回避し、その結果、円滑で安定した歩行動作を行うことができる脚式移動ロボットを提供することにある。具体的には図 1.36 に示すように、接地部材出没機構 (42) が、足部フレーム (26) の下面と足裏部材 (37) の上面との間に上下動自在に介装されるゴム板支持部材と、このゴム板支持部材を強制的に上下動させる出没動作用モータ (41) とを備えて構成される。さらに、足平フレーム (26) の下部には、床面に対する足平部 (18) の滑りを検出する滑り検出センサ (48) が設けられる。以上のように本発明によれば、接地面の摩擦係数を適宜変化させることによって、支持脚の接地面がスリップし、振り出し動作脚の接地面に大きな摩擦抵抗が作用するなどの不都合を回避し、その結果、円滑で安定した歩行動作を行うことができる。

関西ティール・エル・オー株式会社からは、足部に永久磁石や電磁石を用い、歩行時に左右両足部の裏を着地面に吸着させる足部機構が特許出願されている。日本国特許庁公開特許公報特開 2002-166062[149]と公開特許公報特開 2003-260274[150]である。しかし、この足部機構を用いる場合は、路面は鉄などの磁石に吸着する性質を有する材料でなければならない。

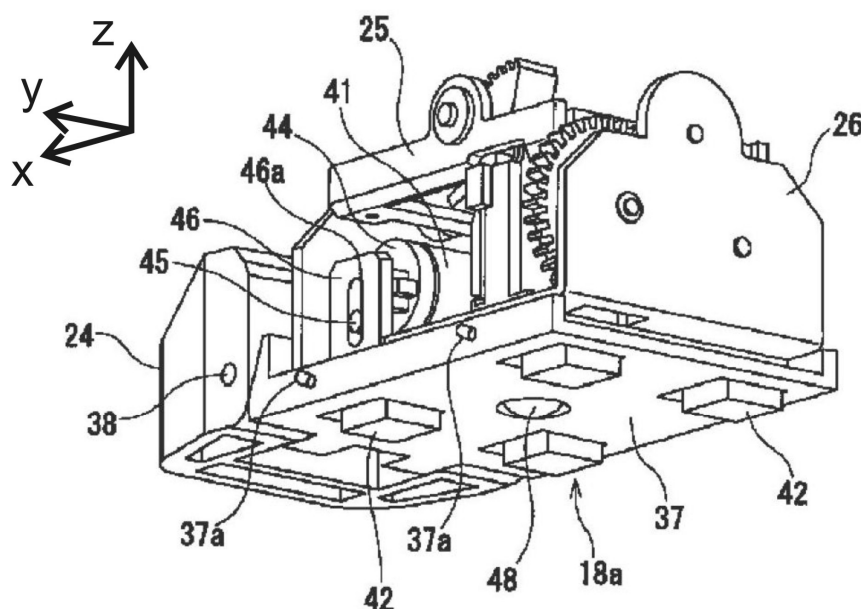


Figure 1.36 Foot mechanism to increase friction force between feet and a ground [148].

以上まとめると、現状では2足歩行ロボットの足部機構は以下の点について注目し、開発されてきている。

- 着地衝撃緩和
- 路面状況の検出（凹凸度合い、滑りなど）
- 抗力発生実効面の変化抑制
- 安定領域の大きさ可変

一般的に2足歩行ロボットの不整路面での歩行安定化に関する研究は、制御面からのアプローチが多く、ハードウェアの視点からの取り組みは少ない。ハードウェアからの取り組みとしては、足部機構に路面検出センサを搭載し、制御により凹凸路面にならうという程度である。しかしながら、それらの足底部に注目すると剛体平板を用いているといっても過言ではなく、それでは足底の4点すべてで路面に着地することは困難である。そこで、2足歩行ロボットの更なる歩行安定化を目指すには、その足部機構に注目することが重要であると筆者は考える。

1.5 本論文の構成

前述したように、本研究では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を提案し、これに基づき開発した足部機構を2足歩行ロボットに装着して評価実験を行うことによって、その有効性を実証することを目的とした。

本論文は全8章で構成されており、その構造は図1.37のようになっている。まず第1章（本章）では、序論として本研究の研究背景と目的、その学問的意義や関連する研究事例、論文構成について述べた。第2章では、足部機構単体で不整路面においても接地面積を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の開発と評価実験、考察について述べる。第3章では、未知の凹凸路面に適応可能な着地軌道修正制御の開発、およびこの評価実験と考察について述べる。第4章では、着地軌道修正制御の欠点を補う推定姿勢補償制御の開発、およびこの評価実験と考察について報告する。第5章では、2足歩行という移動様式の離散的な環境に適応しやすいという長所を生かし、平坦路面での移動速度が遅いという短所を補うことができる能動車輪式足部機構 WS-2 の開発について、その移動経路設定法と評価実験、考察について述べる。第6章では、受動車輪を一行に配置したインラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 を製作し、滑らかな滑走移動を実現するために必要な制御法の開発とその評価実験、考察について述べる。第7章では、ローラスケート型受動車輪式足部

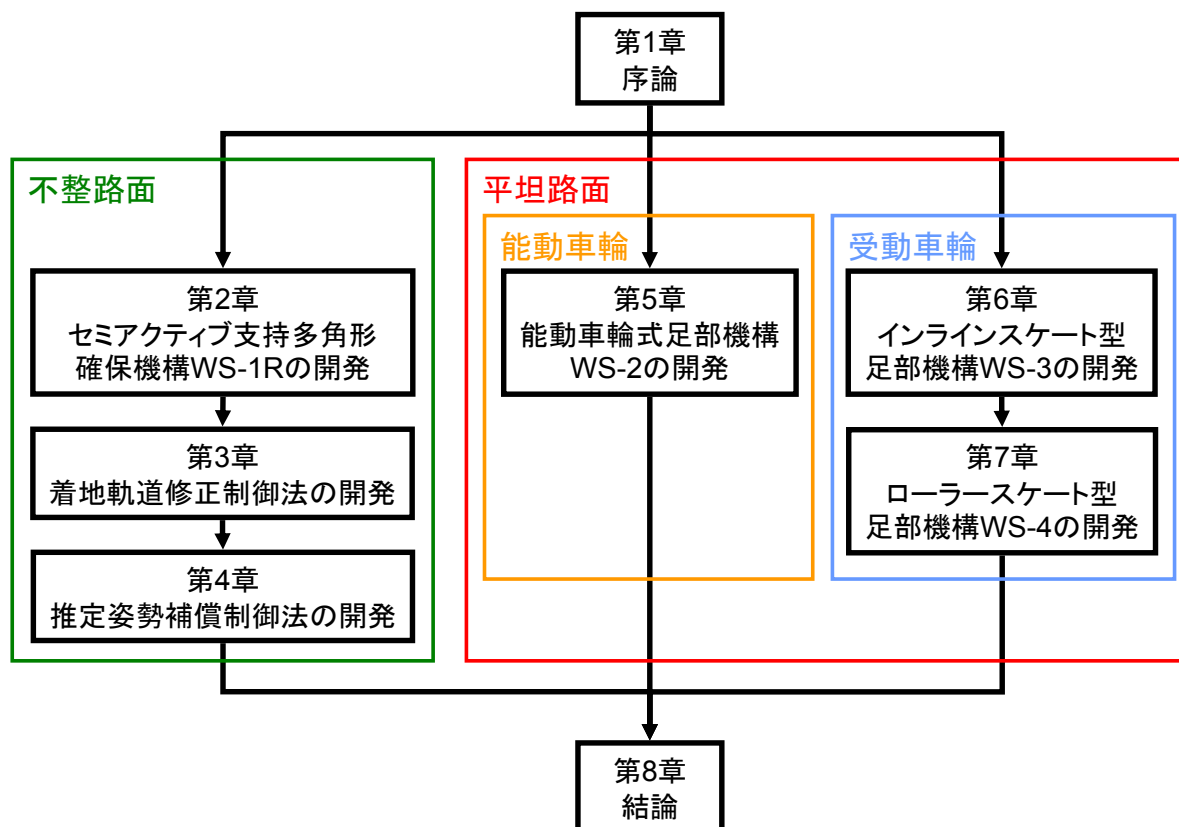


Figure 1.37 Configuration of this thesis.

機構 WS-4 を製作し，滑らかな蹴り出し動作を実現するために必要なパターン生成法の開発とその評価実験，考察について述べる．最後に第 8 章においてこれらの研究成果を統括し，本研究によって得られた知見をまとめ，また本研究の将来性について議論する．

図 1.38 に本研究で開発した足部機構をまとめる．また，表 1.2 は各足部機構の略称をまとめて示したものである．WS-1R は不整地適応能力を向上可能な足部機構である．WS-2～WS-4 については車輪式足部機構であり，平地での移動効率向上を図った足部機構となっている．

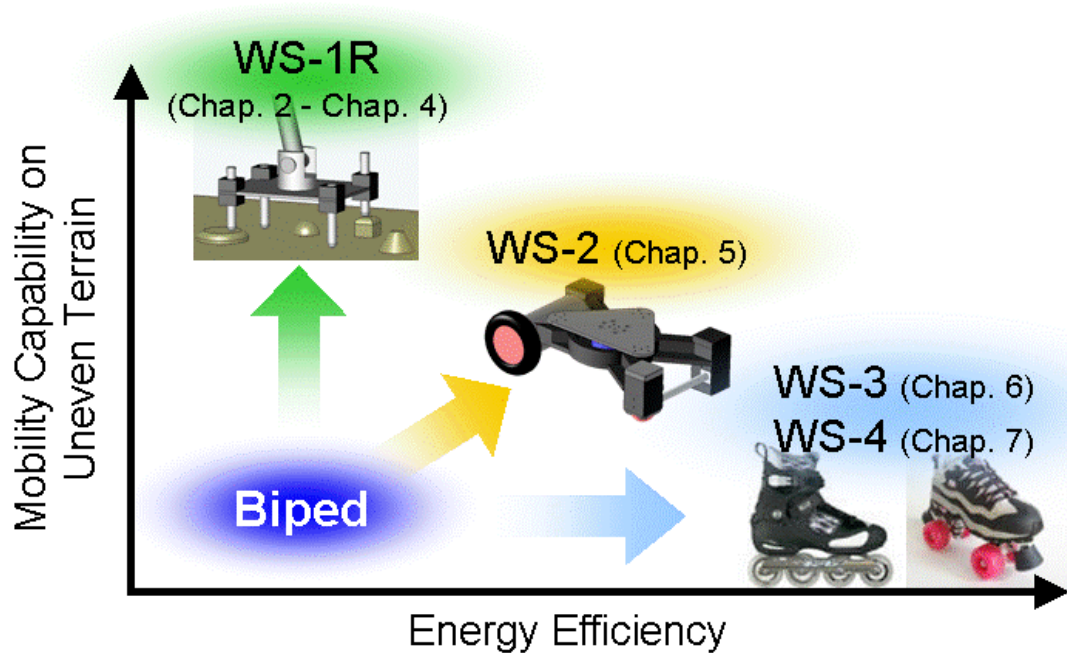


Figure 1.38 List of the developed foot systems.

Table 1.2 Abbreviation of the developed foot systems.

Name	Characteristics
WS-1R (Waseda Shoes - No.1 Refined)	Foot System Adaptable to Uneven Terrain
WS-2 (Waseda Shoes - No.2)	Active Wheel Driven Foot System
WS-3 (Waseda Shoes - No.3)	Inline Skate Foot System
WS-4 (Waseda Shoes - No.4)	Roller Skate Foot System

第2章 セミアクティブ支持多角形確保機構

WS-1R の開発

- 2.1 はじめに
- 2.2 基本設計
- 2.3 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の設計
- 2.4 実験方法
- 2.5 評価実験と考察
- 2.6 まとめ

2.1 はじめに

前述したように本研究の目的は、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発することである。本章では特に、不整路面に対する歩行能力向上に焦点を当てる。路面の凹凸を足部機構のみで吸収できれば、その足部機構を装着することによって、あらゆる2足歩行ロボットの不整路面への適応性を上げることができる可能性がある。

近年2足歩行ロボットについて多くの研究がなされてきており、安定した歩行を実現させるために様々なパターン生成法や実時間での歩行安定化制御が数多く提案されてきている[57-75, 151-155]。しかし、これらのリアルタイム歩行安定化制御の大半は単脚支持期に足底において支持多角形が確保できることを前提条件としており、路面において足底と同じ大きさの領域に凹凸が複数ある場合には、剛体平板の足底では足底と同じ大きさの支持多角形を構成できず、ZMP 安定判別規範による安定化が困難となる(図2.1)。このような問題を解決するためには、制御面だけではなくハード面で対応する必要もあると筆者は考える。

多脚型ロボットの不整路面への適応を目指した足部機構としては、尾形・広瀬の対地適応型足首機構 [156-158]がある。歩行時に3本以上の足が必ず接地する多脚型ロボットにおいてはこの足部機構は有効であるが、現状ではゴム製適応足裏機構の形状固定機能が実現されていないため、2足歩行ロボットのように1本の足で支持多角形を形成しなくてはならない場合、この足部機構を適用させることは困難である。また、

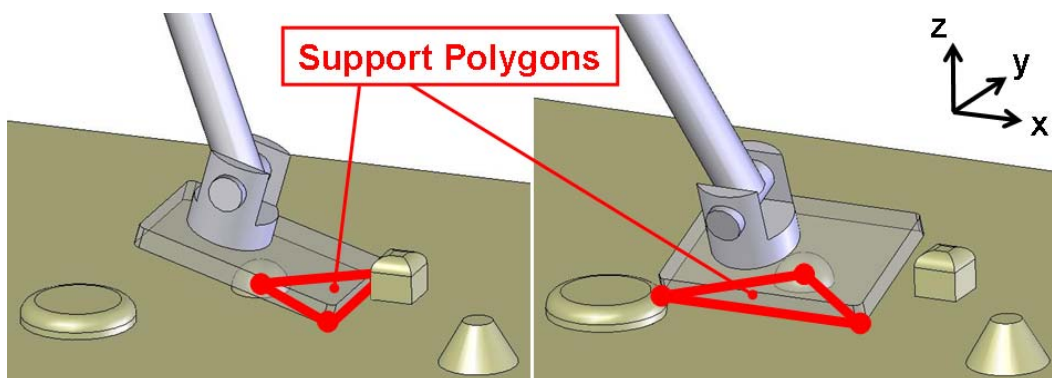


Figure 2.1 Rigid and flat sole.

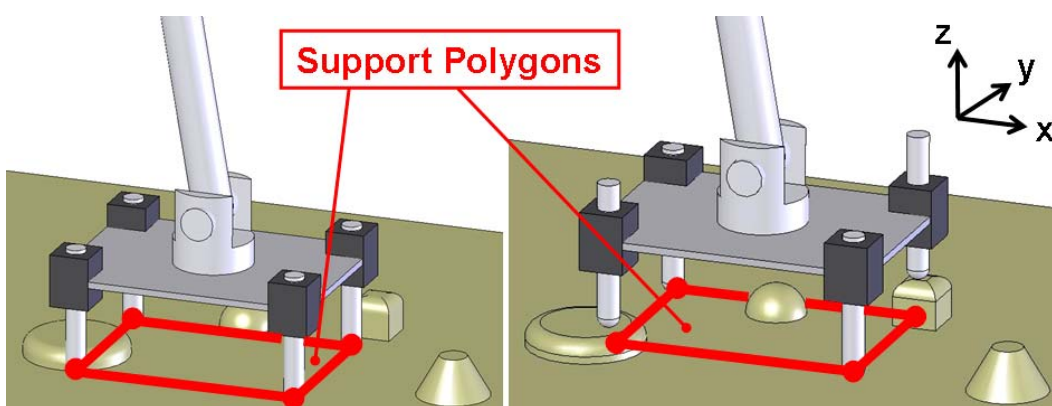


Figure 2.2 Proposed foot system adaptable to uneven terrain.

大塚・尾形・広瀬の対地適応受動型足先機構[159]については、足先が任意の位置では固定されず、ロックされる箇所が離散的に決まるため、数 mm の凹凸でも転倒してしまう 2 足歩行ロボットに適用することは難しいと考えられる。前章 1.4 節で述べたように、これまでに研究されてきている 2 足歩行ロボットの足部機構は、着地衝撃緩和のために軟素材を有していたり、凹凸度合いや滑りなどの路面状況の検出のためのセンサを有している程度であり、足部機構単体で不整路面にならうという例は少なく、その足部機構というものはあまり研究されてきていない。

そこで、以下の 2 点を開発要件として、不整路面適応型足部機構を開発することを考えた：

- 足部機構単体で路面の凹凸が吸収でき、足底と同じ大きさの大きな支持多角形が確保できること（図 2.2）。
- 装着部分のみ変更すればあらゆる 2 足歩行ロボットに適用可能な汎用性を有すること。

本章ではこの「不整路面適応型足部機構」について、基本原理、構造と動作原理およびこれを用いて行った評価実験と考察を述べる。

2.2 基本設計

2.2.1 目標段差高さ

1.2.5 節で述べたように、本研究では段差 20 mm と傾斜 10 deg が混在した不整路面での歩行実現を目標としている。この凹凸と傾斜が混在した路面を踏破するアプローチとしては、凹凸については足部機構というハードウェアの面から、傾斜については路面適応制御というソフトウェアの面から取り組むこととした。凹凸路面については足部機構単体で踏破することが可能だが、傾斜路面を上り・下り続ける場合は路面に対して腰部の相対的な高さを変更しなければならず、2足歩行ロボットの脚長の変更を必要とするからである。

そこで、本章で開発する足部機構については段差 20 mm の凹凸路面のみ対象とし、傾斜路面については対象としない。

2.2.2 動作原理

開発する不整路面に適応可能な足部機構は、足底と同じ大きさの領域に凹凸が複数ある路面に接地する場合においても、足部単体で大きな支持多角形を構成し、安定した歩行を実現することが目的である。この目的を実現するための足部機構として、図 2.3 に示すような動作原理の足部機構を考案した。

これは足底の4隅に受動的に直動するシリンダがあり、各支持点が高さ方向に関し

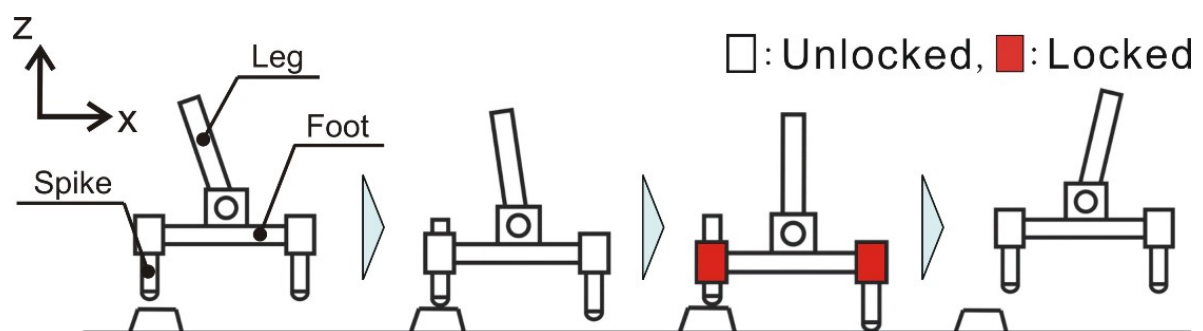


Figure 2.3 Operating principle of a new biped foot system.

て凹凸路面にならうというものである．たとえ4点の支持点のうち1点，2点，3点が接地してもシリンダはロックせず，4点すべてが路面に接地したら各支持点をロックし支持多角形を確保するというものである．

2.3 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の設計

2.3.1 ロック機構

この足部機構で最も重要なものが各支持点を固定するロック機構である．歩行中，着地時に衝撃を受けても確実にロックをかけることができる機構が求められる．また，ロック機構が複雑であると可動部である足部の重量増加を招くので，シンプルな機構が要求される．

現在市販されているもので，ロック機構にそのまま応用可能なものとしては電磁ブレーキやエアシリンダなどがある．しかし，これらは基本的に定格トルクやシリンダ力が小さく，実際に使用するととなるとロック機構の複雑化や，足部の重量増加を招く恐れがある．定格トルクが大きいものとしてはメカニカルクラッチがあるが，ロックがかかるまでにタイムラグを生じるという構造上の欠点がある．

そこで，任意の位置でロックができるロック機構を新たに考案した．

(a) 圧縮づめを用いたロック機構

機械的に確実にロックがかかる機構としては，圧縮づめを用いたロック機構がある

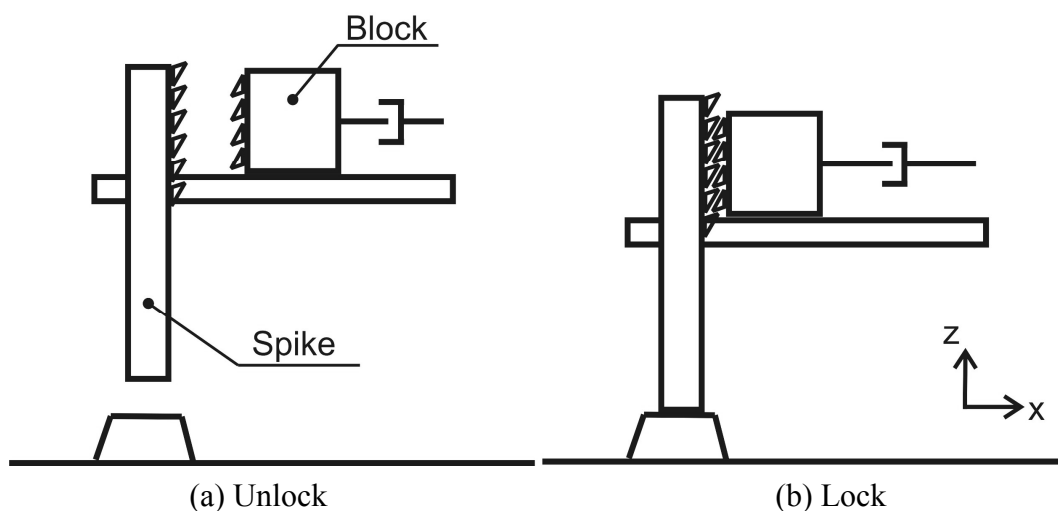


Figure 2.4 Locking with compression pawl.

(図 2.4). この場合は圧縮づめの歯の強度に注意し設計すればよいが、大きな欠点としてロックのかかる位置が離散的になることが挙げられる. リアルタイム歩行安定化制御を用いていない場合, 2足歩行ロボットは数 mm でも段差があると安定して歩行を継続することが困難であるので, このようにロックが離散的にかかることはロボットの歩行を不安定にする要因の1つになりうる. 歯の歯幅を 0.1 mm くらいに小さくできればこのような問題は生じないであろうが, 歯幅を小さくすると歯の強度が弱くなるため, このロック機構を用いた足部機構は非現実的である.

(b) スライド式ロック機構

そこで任意の位置でロックがかけられる機構として摩擦を利用したスライド式ロック機構を考案した. これは図 2.5 のようにスパイク部にテーパ部分が設けられており, ロック時にはブロックを押し当て, スパイクをロックするというものである.

これに関しては, 実際に任意の位置でスパイクを固定できるか確認するため, 簡単なモックアップを製作し, その有効性を検証した. 実際にモックアップで検証したところ, 理論上はロックするのに必要な摩擦力が得られているにもかかわらず, 非常に強い力をシリンダに加えるとシリンダに多少の滑りが観測された. 原因としては, 摩擦力についてはある程度定量的に計算できるのだが, 面の接触状態によっては理論通りに摩擦力が得られていないということが考えられる.

ブロックの角度を浅くすればより小さな力でロックをかけることができるのだが, そうするとシリンダで 20 mm のストロークを確保することが難しいため, この機構の採用を断念した.

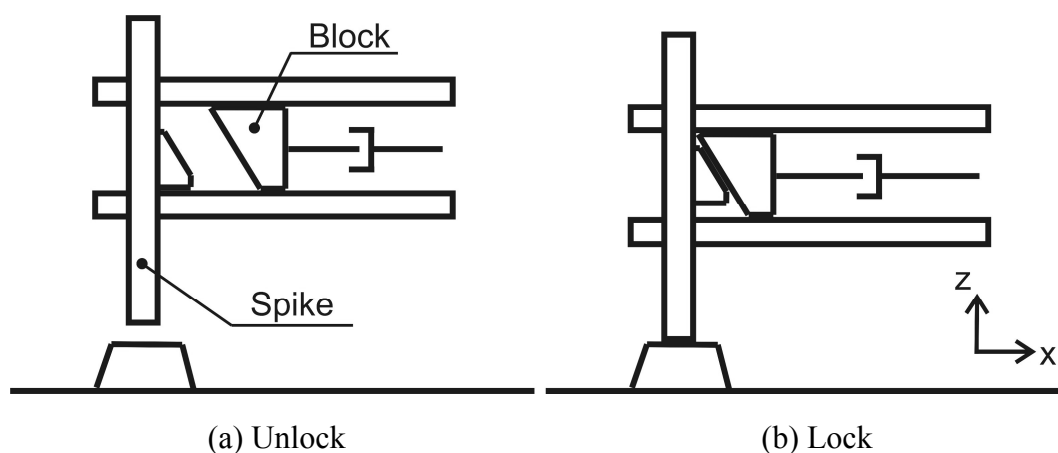


Figure 2.5 Slide locking.

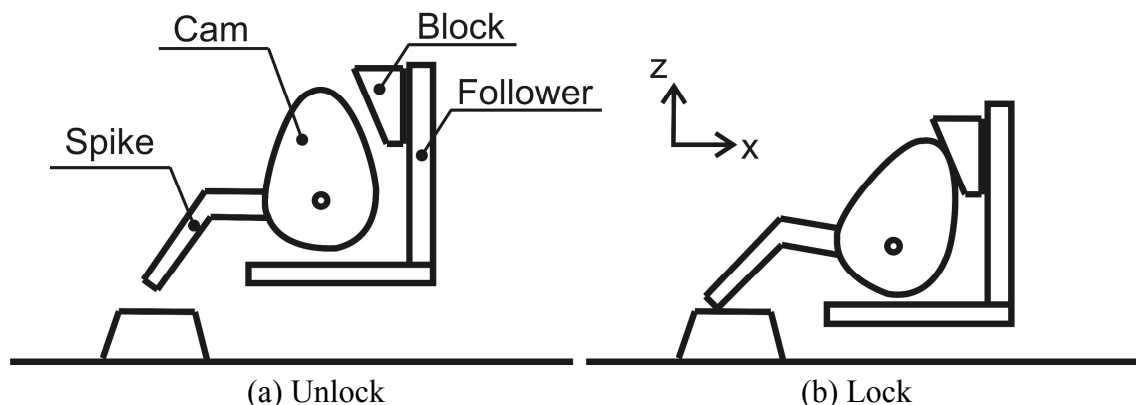


Figure 2.6 Cam locking.

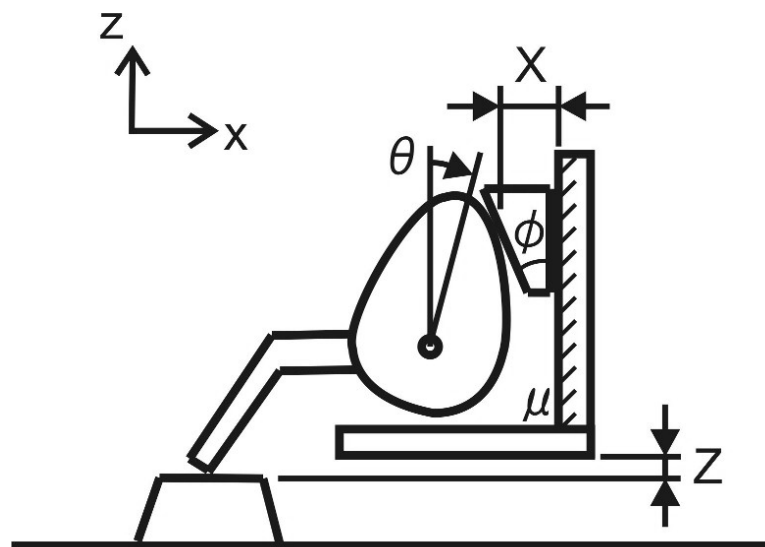
(c) カム式ロック機構

そこで次にカム式ロック機構というものを考案した (図 2.6). これは, 足先の動きに合わせてカムが回転し, 幅が狭まっていく部分に物を挟みロックをかける「くさびの原理」を応用したロック機構である. この機構に関しても簡単なモックアップを製作したところ, スライド式ロック機構よりも確実にロックがかかることが確認できた. そこで, 最終的にこのカム式ロック機構を不整路面適応型足部機構のロック機構に採用することとした. カム部の設計などの詳細については次節以降に述べる.

2.3.2 カム式ロック機構の詳細設計

ロックをかけるためのブロック部の出し入れのためのアクチュエータには, モータに比べ制御が簡単であり, 応答速度が速いという理由からソレノイドを使用した. 通常のソレノイドはプッシュ, プルのどちらか片方にしか力を出せないのだが, 今回はコイルに通電する極性を変えることによって往復動作が可能な双安定自己保持ソレノイドを採用した. これは永久磁石を内蔵することにより可動範囲両端での無電力保持を1つのソレノイドで実現しており, 吸引力が強いにもかかわらず比較的ストロークが長く取れるという特徴がある. カムやブロック部の形状はソレノイドのストロークを考慮に入れ, Z 軸方向の並進方向の可動範囲が 20 mm になるよう設計した.

カムがロックするかどうかは, ブロック部の角度 ϕ とブロック部とベース部の摩擦係数 μ より決定される (図 2.7). ブロック部とベース部の摩擦は大きいほうが確実にロックできるため, ベース側には摩擦材として, 耐摩耗性に優れ摩擦特性も良いクロップレンゴム (シヨア A65, $t=0.5$) を使用することとした. 測定実験から, アルミ



- X: Distance between the follower and the contact point of cam and block
- Z: Movable range
- θ : Cam rotation angle
- ϕ : Angle of the block
- μ : Coefficient of friction between block and follower

Figure 2.7 Parameter definition of the cam locking.

ニウム合金のブロック部と摩擦材を貼付したベース部の静止摩擦係数は約 0.7 であったため、クーロン摩擦を仮定すると、ブロック部の角度 ϕ は 35 deg 以下であれば、スパイクをロックすることが可能である。そこで余裕をみて、ブロック部角度 ϕ は 20 deg とすることとした。

理想的にはカムとブロックの接点からベースまでの距離 X が、カムの回転角度 θ に対して一定の間隔で狭まることが望ましい。今回はカムの形状を楕円にし、回転中心を楕円の長軸方向へずらすことにより、この要求を満たすことができた。カムの回転角度 θ と距離 X の関係を図 2.8 に、カムの回転角度 θ とシリンダの Z 軸方向移動距離 Z の関係を図 2.9 に示す。

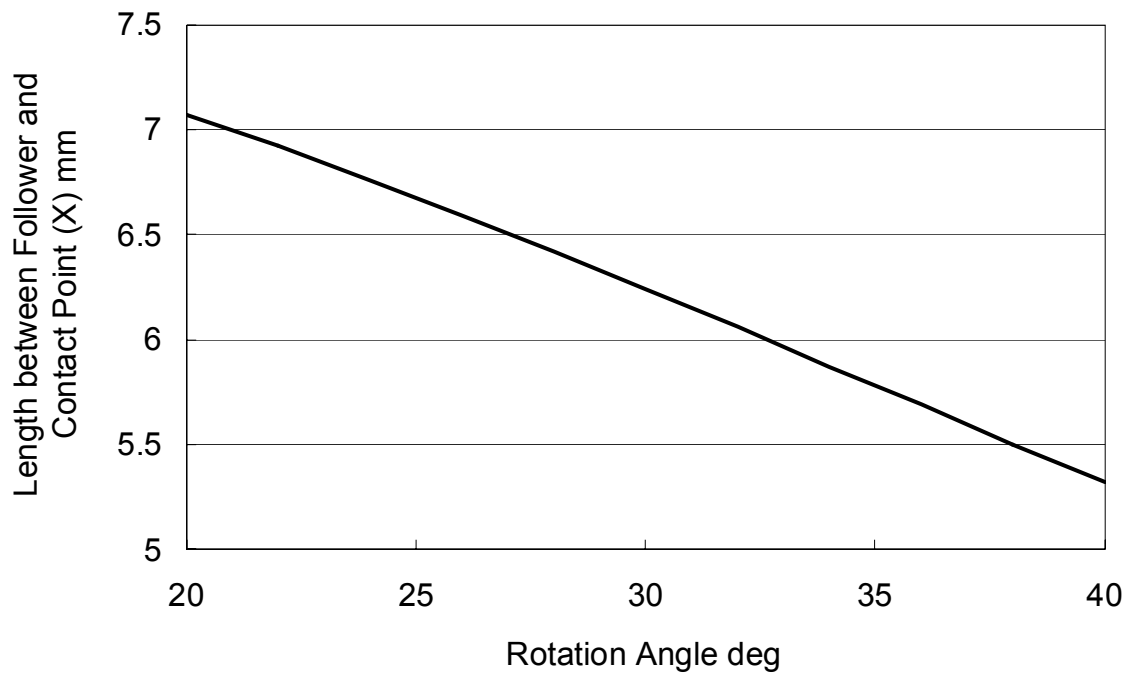


Figure 2.8 Rotation angle θ versus length X .

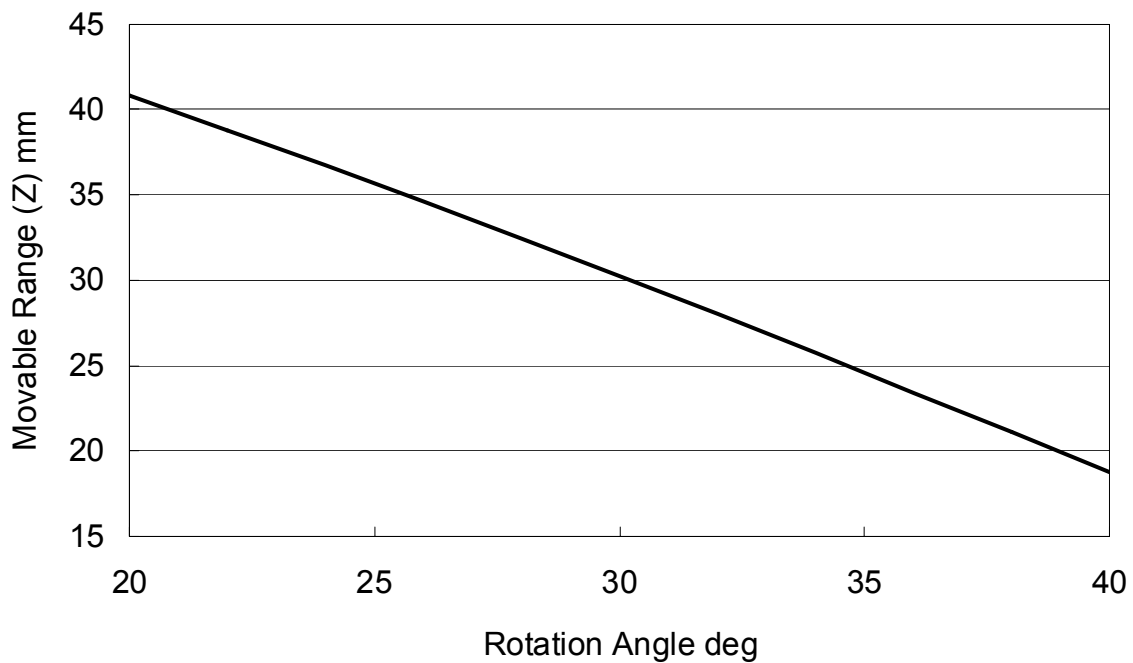


Figure 2.9 Rotation angle θ versus movable range Z .

2.3.3 接地検出センサ部の配置方法

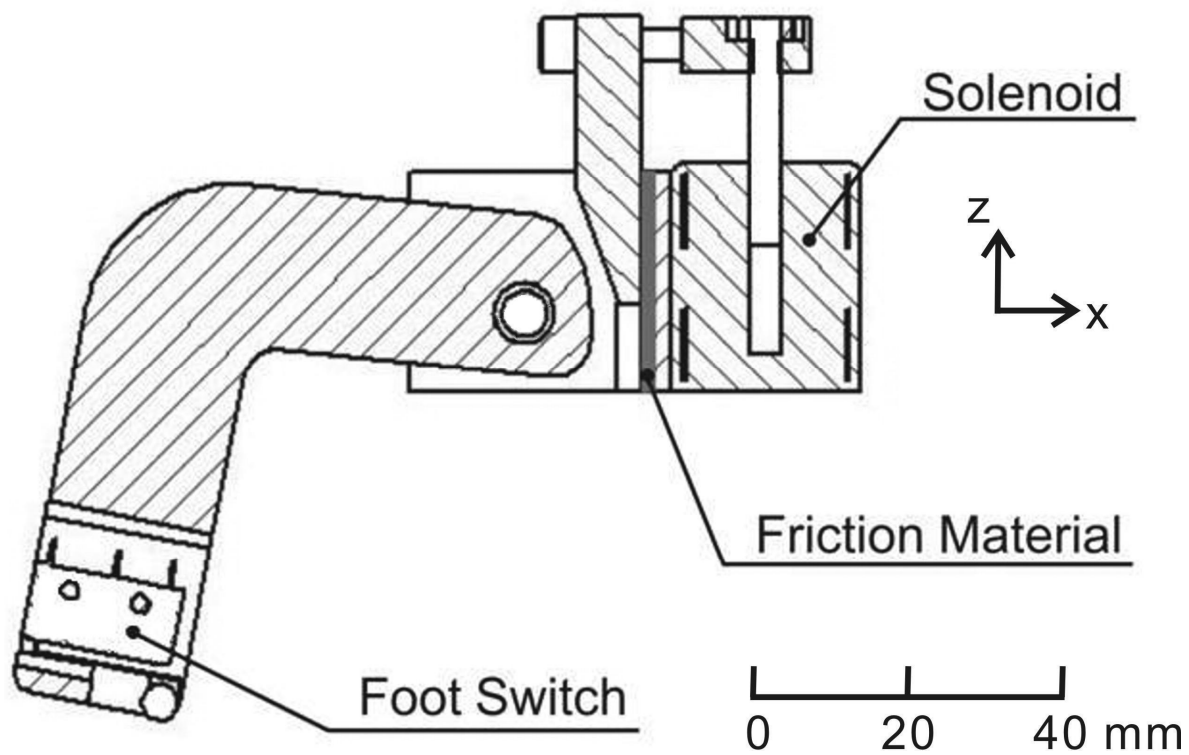
接地を検出するセンサについては、当初はマイクロスイッチをスパイクの先端に配置していた。そして、図 2.10(a)のようなロック機構部を足底の4隅に配置し、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1 (Waseda Shoes - No.1) を開発したのだが、マイクロスイッチのレバー部先端で路面と接触できなければセンサが反応しないという問題点があった。センサ位置を変更しない解決方法としては、カムのスパイク部分全体を覆う摺動可能なカバーを取り付けるなどの方法が考えられたが、それでは部品点数が増えメンテナンス性が悪くなり、重量も増加する。そこで、図 2.10(b)のようにセンサ配置を変更することとした。このようにすることで、センサは路面形状の影響を受けずに接地検出が可能になる。最終的には、このロック機構部を足底の4隅に配置し、WS-1 の改良機であるセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R (Waseda Shoes - No.1 Refind) を開発した。

2.3.4 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の仕様

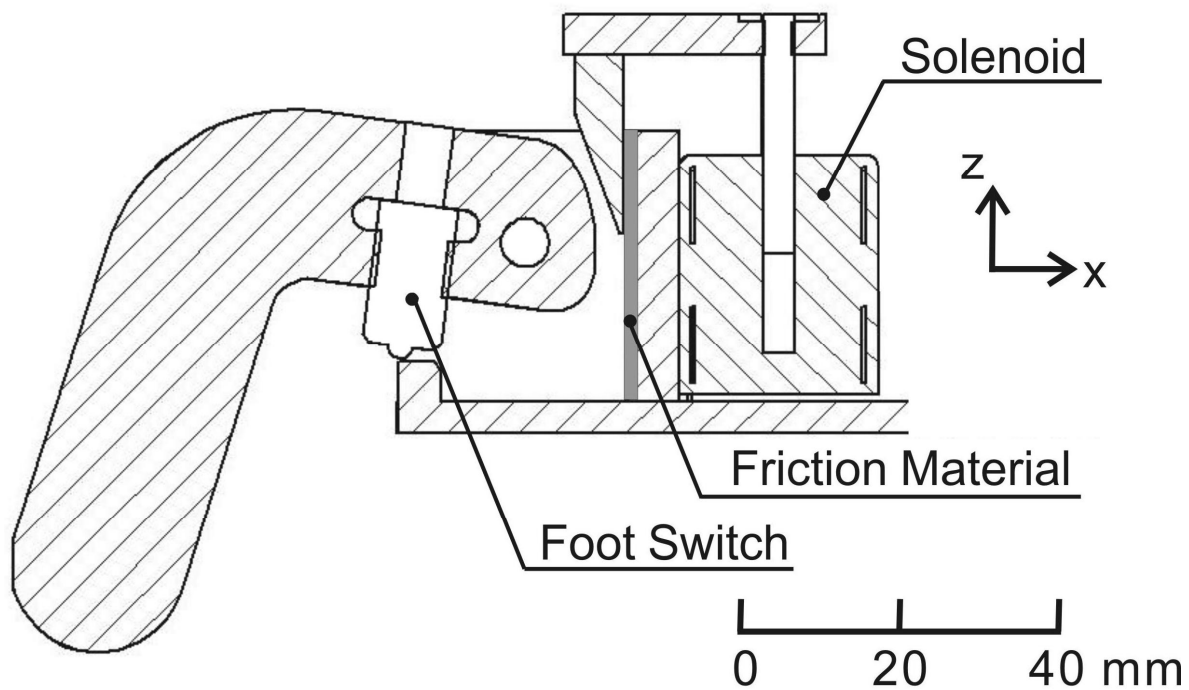
開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の外形寸法図を図 2.11 に、外形写真を図 2.12 に、仕様を表 2.1 に示す。カム式ロック機構を足底の4隅に配置している。支持多角形の大きさは、この足部機構の検証にメインで用いる人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16II (Waseda Leg - No.16 Refined II) [124]の剛体平板の足底と同じ大きさである 200×294 mm に設定した。重量についてはロック機構にアクチュエータを使用しているため 1850 g と剛体平板の足底よりも 800 g 程重くなってしまったが、高い剛性を保ちつつも軽量になるよう設計をした。

また予備実験の結果から、歩行周期が短くなると着地時の衝撃によって足底がバウンドしてしまい、ロックをかけているブレーキ部分がずれるという現象が見られたため、図 2.13 のように引張りばねを配置し、ロックをかけるまでの反応速度を上げると同時に、ロックがかかる方向に常に力がかかるようにし、保持機構の強化を図っている。ばねの張力については、ロック解除時にソレノイドを伸ばし、ソレノイドに内蔵されている永久磁石により無電力保持するが、その磁石による保持力よりも小さいものを選定した。

ソレノイドの制御に関しては、接地検出センサの出力を読み取り、4点すべてが接地したらソレノイドに通電しロックをかけ、4点すべてが離れたことをセンサの出力から検出すると、先程とは逆向きに通電しロックを解除するというものである。



(a) Detailed locking of WS-1.



(b) Detailed locking of WS-1R.

Figure 2.10 Effect on different position of foot switches on the function of Waseda Shoes.

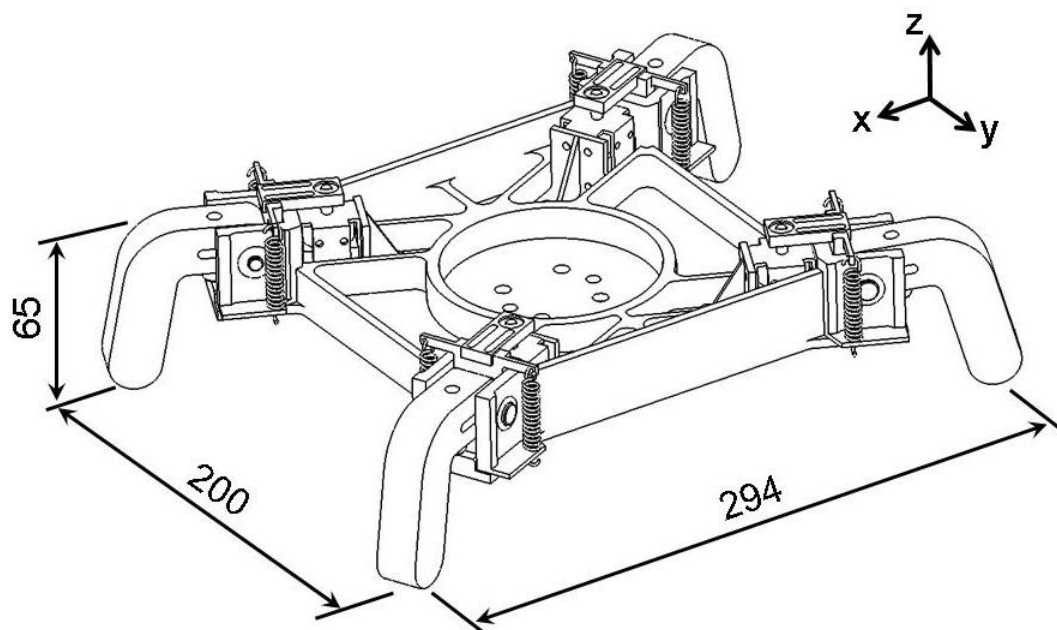


Figure 2.11 Assembly drawing of WS-1R.

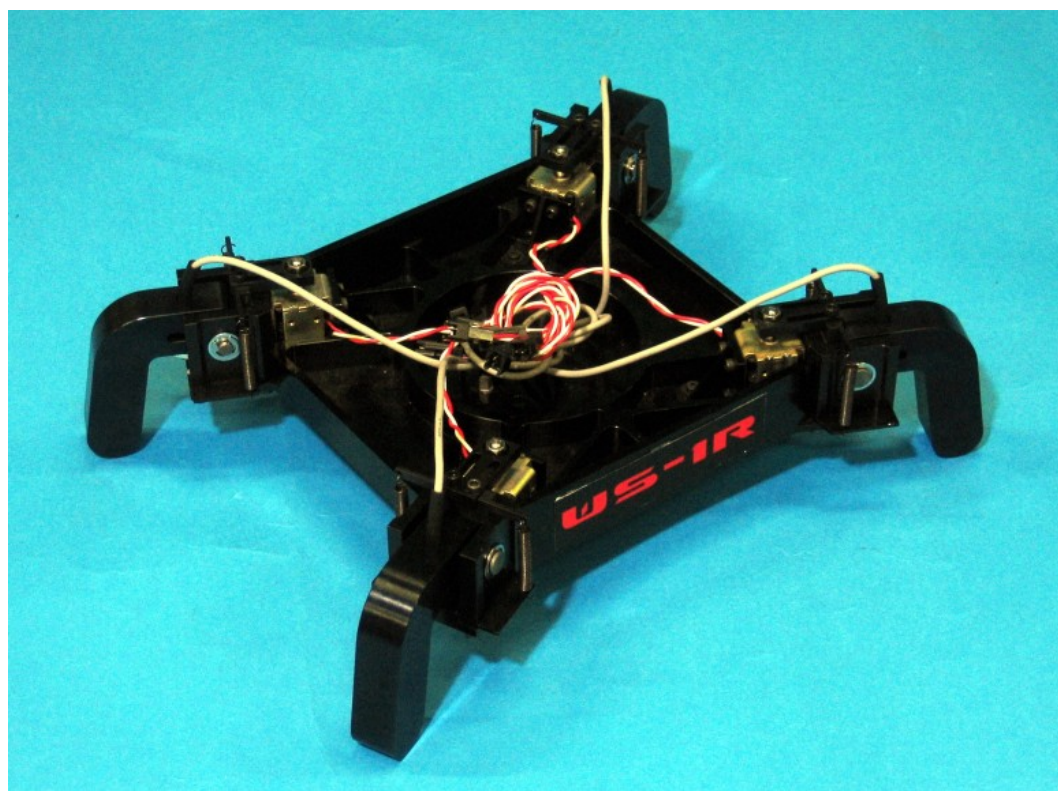


Figure 2.12 Photograph of WS-1R.

Table 2.1 Specifications of WS-1R.

Size	200×294×65 mm
Weight	1850 g
Movable range along the z axis	20 mm
Actuator drive	4 push-pull solenoids

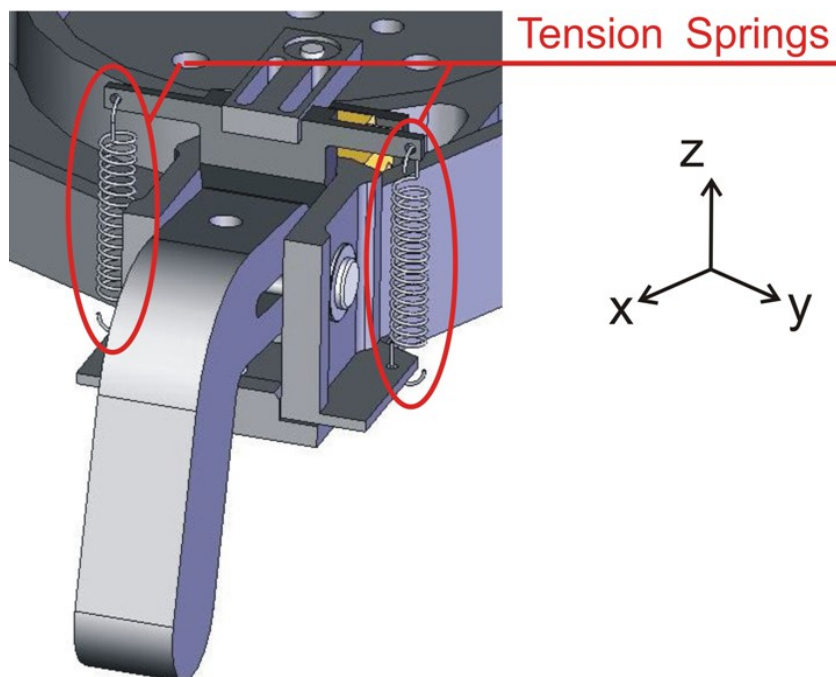


Figure 2.13 Arrangement of tension springs.

2.4 実験方法

セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R は以下のことを実現することを目標に開発された。

- (i) 20 mm までの段差に適応可能
- (ii) 剛体平板の足底では支持多角形が大きく確保できないような不整路面においても、大きな支持多角形が確保可能
- (iii) 細かい凹凸が多数存在する屋外路面においても、大きな支持多角形が確保可能
- (iv) 装着部分のみ変更すればあらゆる2足歩行ロボットに適用可能な汎用性

これらの目標値を満たしているか確認するために、それぞれ下記の通り評価実験を行う。

- (i) 目標段差高さである板厚 20 mm のアクリル板を 1 枚敷き作製した擬似的な不整路面での歩行の評価
- (ii) 剛体平板の足底では大きな支持多角形が確保できない路面を再現するために、平坦な床面上に板厚 3~20 mm のアクリル板をランダムに並べ作製した擬似的な不整路面での歩行能力の評価
- (iii) 細かい凹凸が多数存在する屋外路面での歩行能力の評価
- (iv) 複数の 2 足歩行ロボットに装着し、実験室内に作製した擬似的な不整路面で歩行実験を行い、足部機構の汎用性の評価

2.5 評価実験と考察

開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を用いて、前節で述べた評価実験を行った。これらについて以下に述べる。

2.5.1 段差 20 mm の凸路面での歩行実験

開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R は装着部のみ変更すればあらゆる 2 足歩行ロボットに適用可能な汎用的なものであるが、その機構の評価のために、人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RII[124]に WS-1R を装着し、歩行実験を行った。WS-1R を WL-16RII に装着した様子を図 2.14 に示す。

まずは WS-1R の設計仕様である板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き擬似的な不整地を作製し、歩幅 200 mm/step, 歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。その際、4 点のスパイクのうち 1 点だけが凸部に乗るようにアクリル板の位置を決定した。

歩行実験の様子を図 2.15 に示す。図中黄色い板が厚さ 20 mm のアクリル板であり、各写真の左下には足部の拡大写真を載せている。また、左上は WS-1R のロック機構を動作させず、常にロックをかけた場合の歩行実験の様子である。この結果、ロック機構を動作させない場合は転倒してしましたが、ロック機構を動作させることで、歩行を継続することができた。それぞれの場合の X 軸方向と Y 軸方向の ZMP 軌道を図 2.16, 図 2.17 に示す。また、姿勢角の推移を図 2.18 に示す。各図中の×印は、その時

間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す。これらの実験データからも、ロック機構を動作させない場合はスパイクが凸部に乗り上げ、そこで ZMP 偏差や姿勢角の倒れこみが大きくなり転倒してしまったのに対し、ロック機構を動作させた場合は、スパイクが路面の凸部を吸収し、実測 ZMP が設定 ZMP によく追従していることが確認できた。

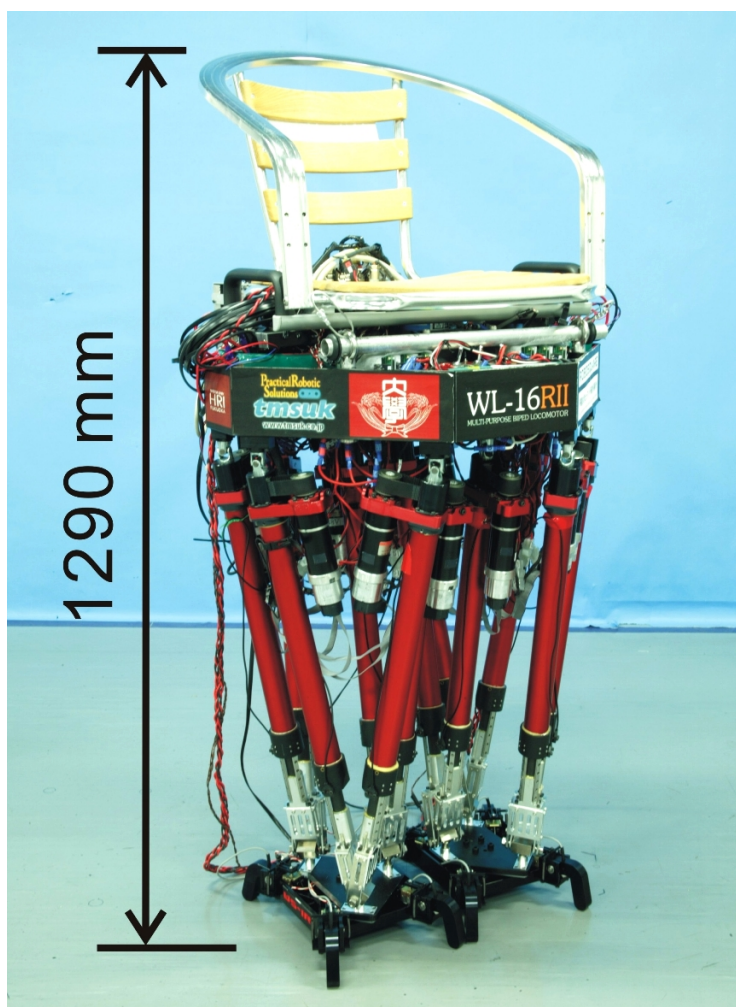


Figure 2.14 WL-16R II mounted on WS-1R.



Figure 2.15 Walking experiment on 20 mm board when WS-1R was operated.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

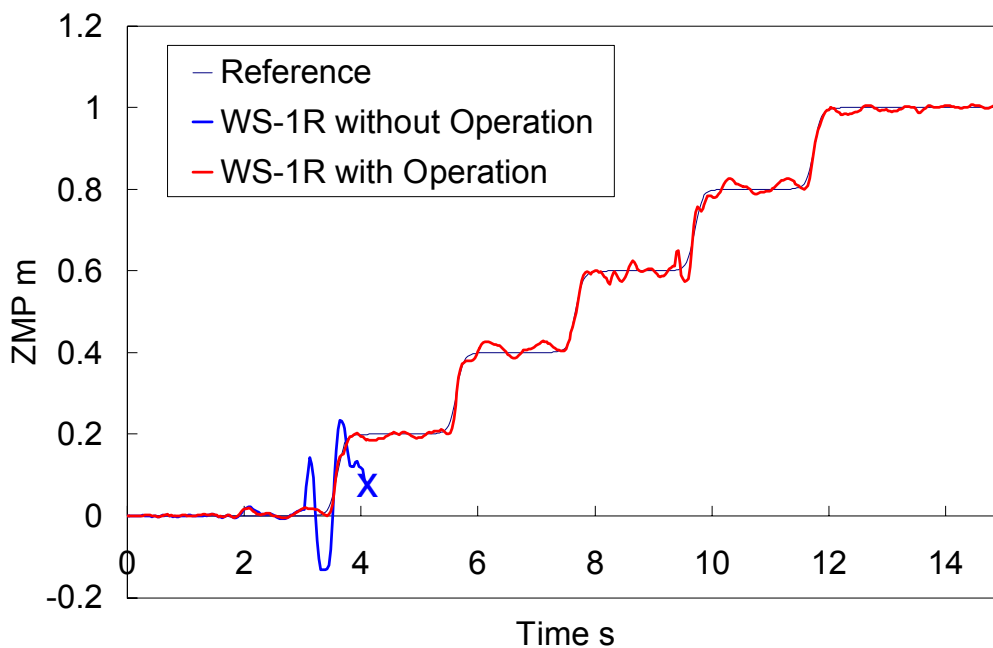


Figure 2.16 ZMP trajectories along the x axis on 20 mm board. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

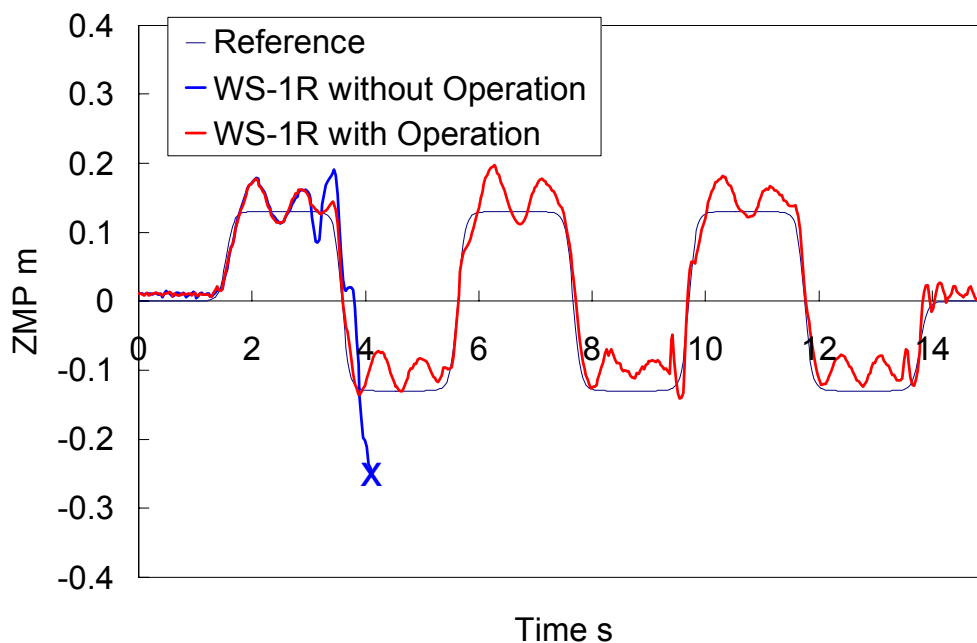


Figure 2.17 ZMP trajectories along the y axis on 20 mm board. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

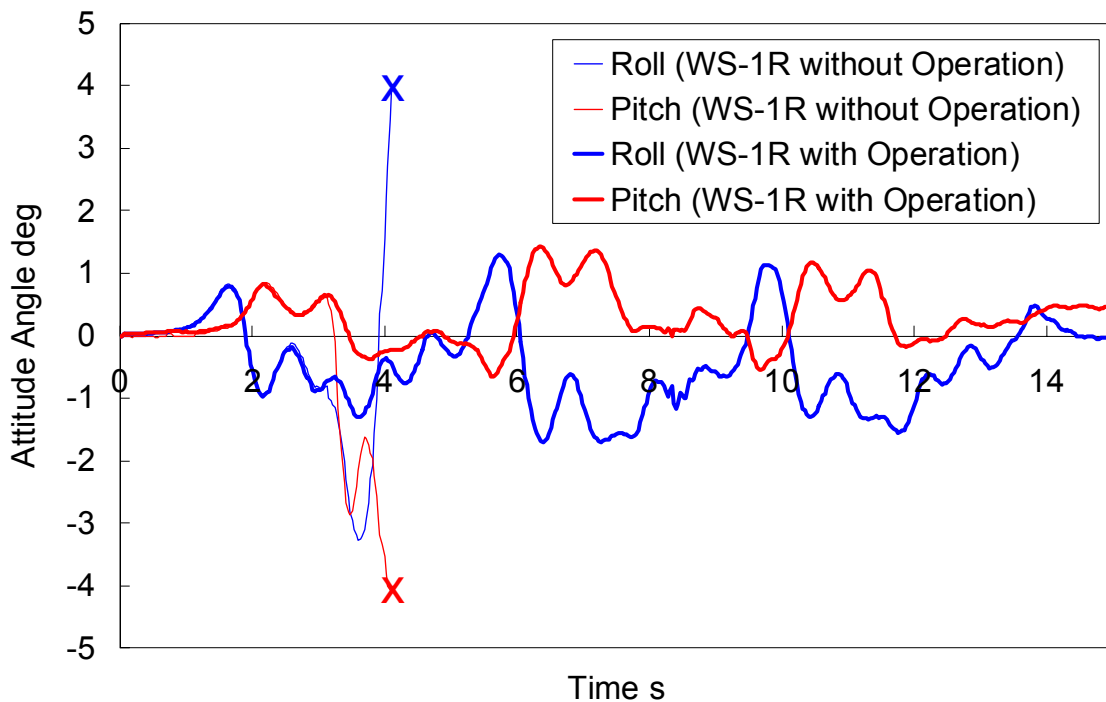


Figure 2.18 Attitude angle on 20 mm board. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

2.5.2 足底と同じ大きさの領域に凸部が複数ある不整路面での歩行実験

先ほどと同様な水平・平坦かつ十分な剛性を持つ床面の上に厚さ 3~20 mm のアクリル板と 10 deg の傾きを持った板をランダムにならべ、剛体平板の足底では大きな支持多角形が確保できないような擬似的な不整地を作製し、歩幅 200 mm/step, 歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図 2.19 に示す。図中赤色, 黄色, 橙色などの板が厚さ 3~20 mm のアクリル板である。傾斜 10 deg の板については, WS-1R のスパイクのならい量が 20 mm 以内に収まるように床面に配置した。また ZMP 軌道を図 2.20 に, 姿勢角推移を図 2.21 に示す。

図 2.20 より, ZMP 偏差はある程度生じているものの, それが時間と共に発散して

いく傾向はなく，継続して歩行できていることが分かる．また，この実験結果から，傾斜路面においても，スパイクのならい量が 20 mm 以内に収まる路面であれば，傾斜路面にもならうことができることが確認できた．

2.5.3 屋外に存在する不整路面での歩行実験

次に，福岡ロボット開発・実証実験特区において歩行実験を行った．屋外には実験室内に再現することが難しいような細かい凹凸が多数存在するので，実際に屋外で実験を行うことは大変意義があると考えた．実験としては，高さ 5 mm の点字ブロックを横に通り抜けるように実験を行った．その際の歩幅は 200 mm/step，歩行周期は 2.0 s/step である．開発した足部機構の有効性を確認するために，同じ場所で剛体平板の足底を用いて実験を行い，その有効性を評価した．

歩行実験の様子を図 2.22，図 2.23 に示す．図 2.22 は WS-1R のロック機構を動作させた場合，図 2.23 は剛体平板の足底を用いた場合の連続写真である．この結果，剛体平板の足底の場合は転倒してしましたが，WS-1R のロック機構を動作させることで，歩行を継続することができた．それぞれの場合の X 軸方向と Y 軸方向の ZMP 軌道を図 2.24，図 2.25 に示す．また，姿勢角の推移を図 2.26 に示す．各図中の×印は，その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す．どちらの場合も，点字ブロックに進入する前の ZMP 軌道に大きな違いはないものの，2～3 歩目で点字ブロックを踏んだ際に，剛体平板の場合は大きな ZMP 偏差が生じ転倒していることが確認できた．

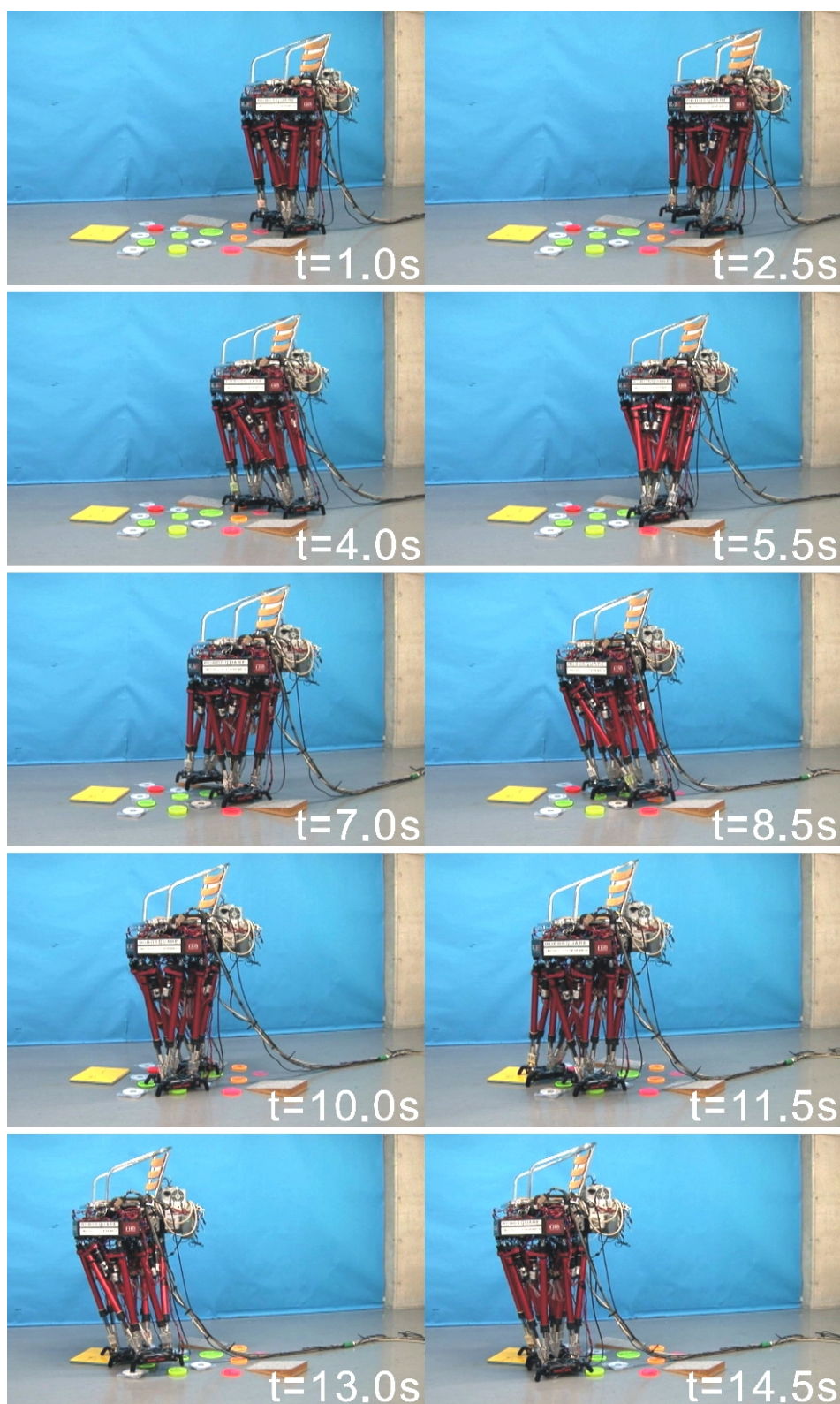


Figure 2.19 Walking experiment on uneven terrain.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 3 - 20 mm)

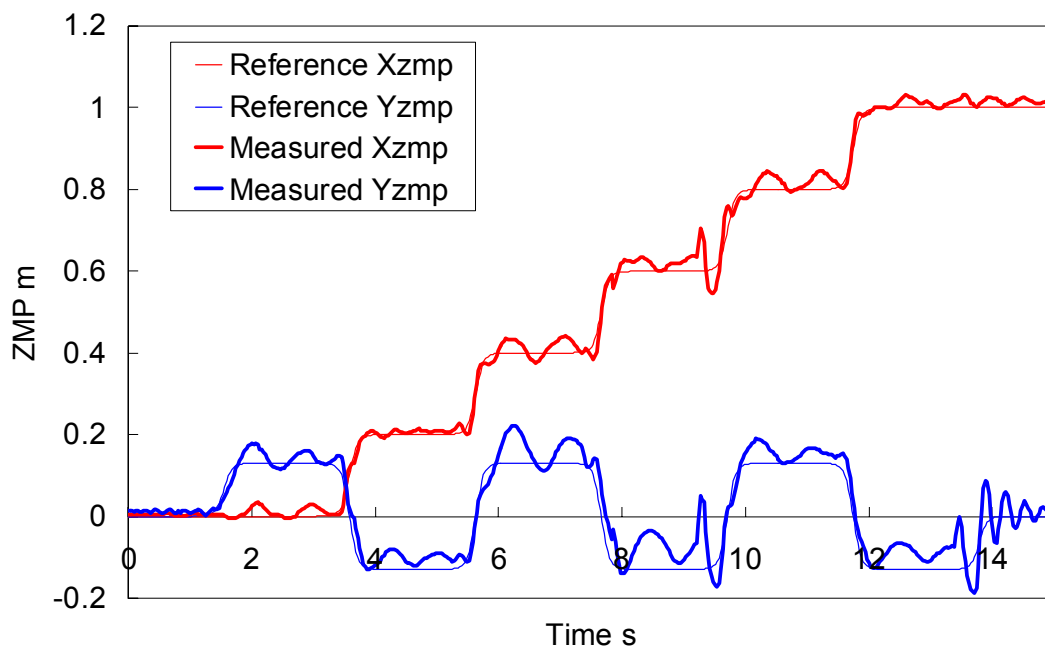


Figure 2.20 ZMP trajectories on uneven terrain.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 3 - 20 mm)

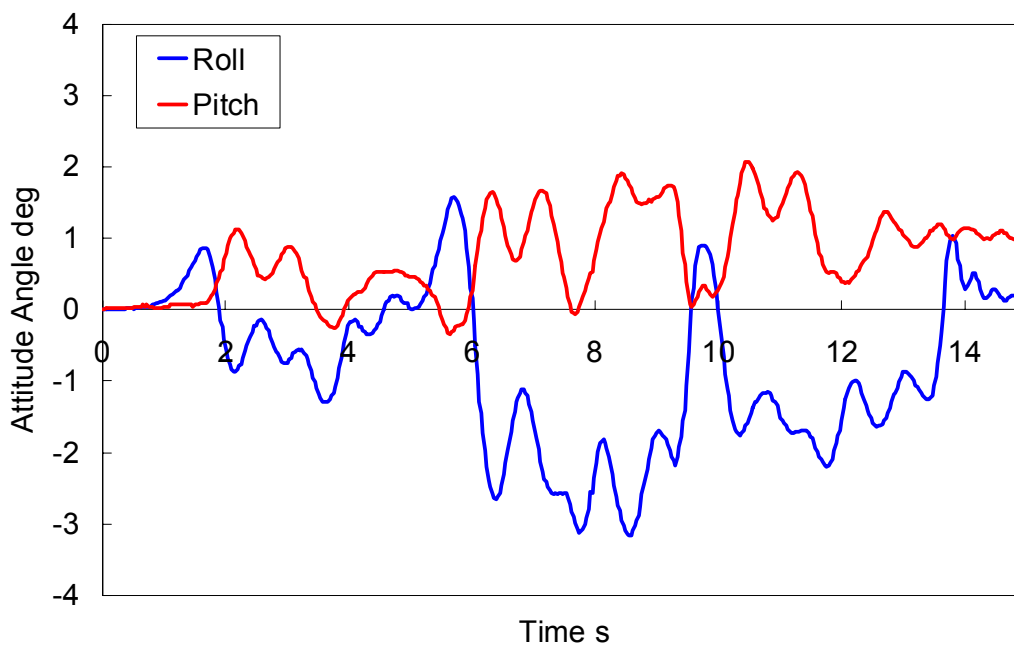


Figure 2.21 Attitude angle on uneven terrain.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 3- 20 mm)

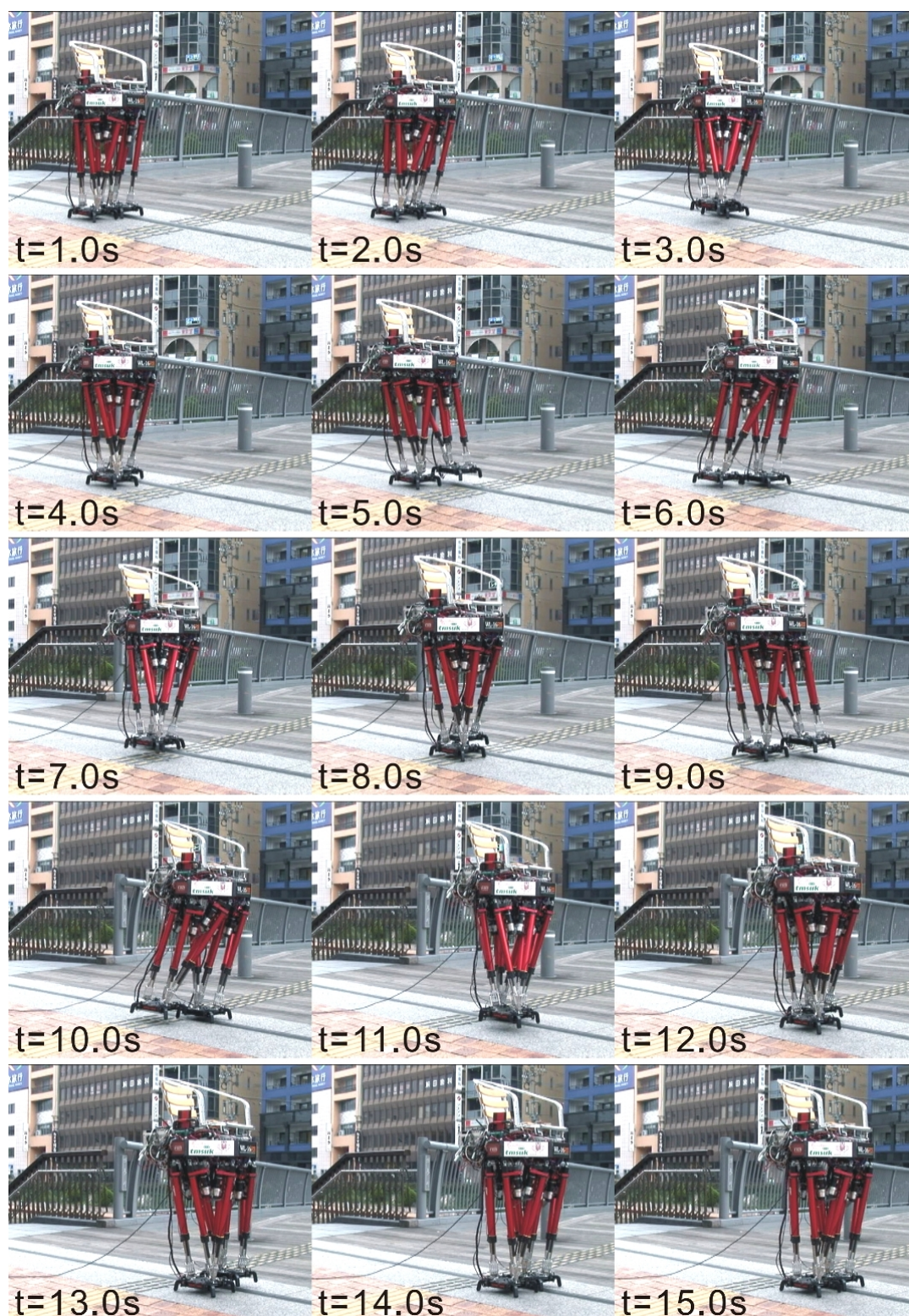


Figure 2.22 Walking experiment on public road in the Fukuoka Special Zones for Robot Development and Test when WS-1R was operated.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step)

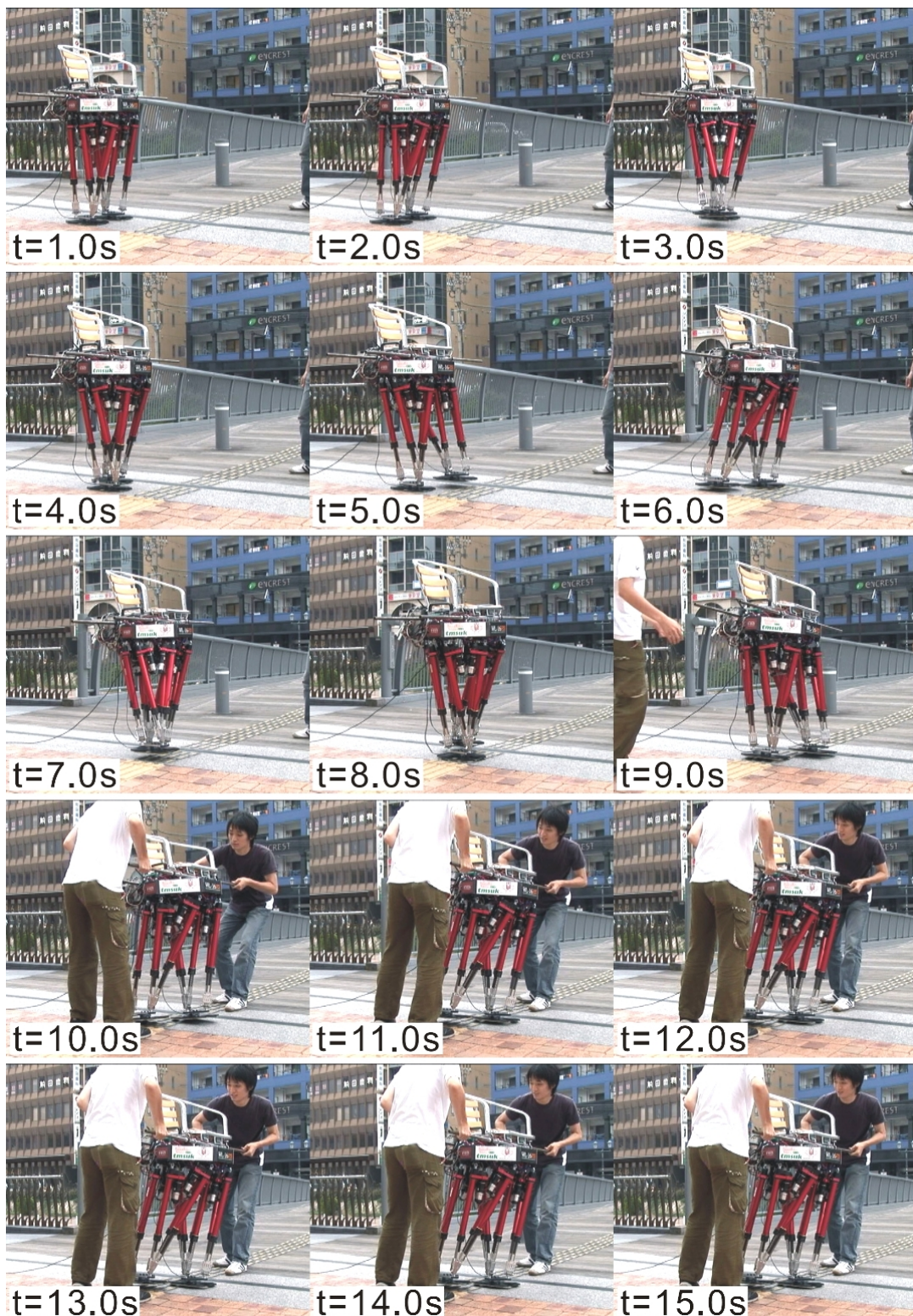


Figure 2.23 Walking experiment on public road in the Fukuoka Special Zones for Robot Development and Test when the feet was rigid and flat soles.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step)

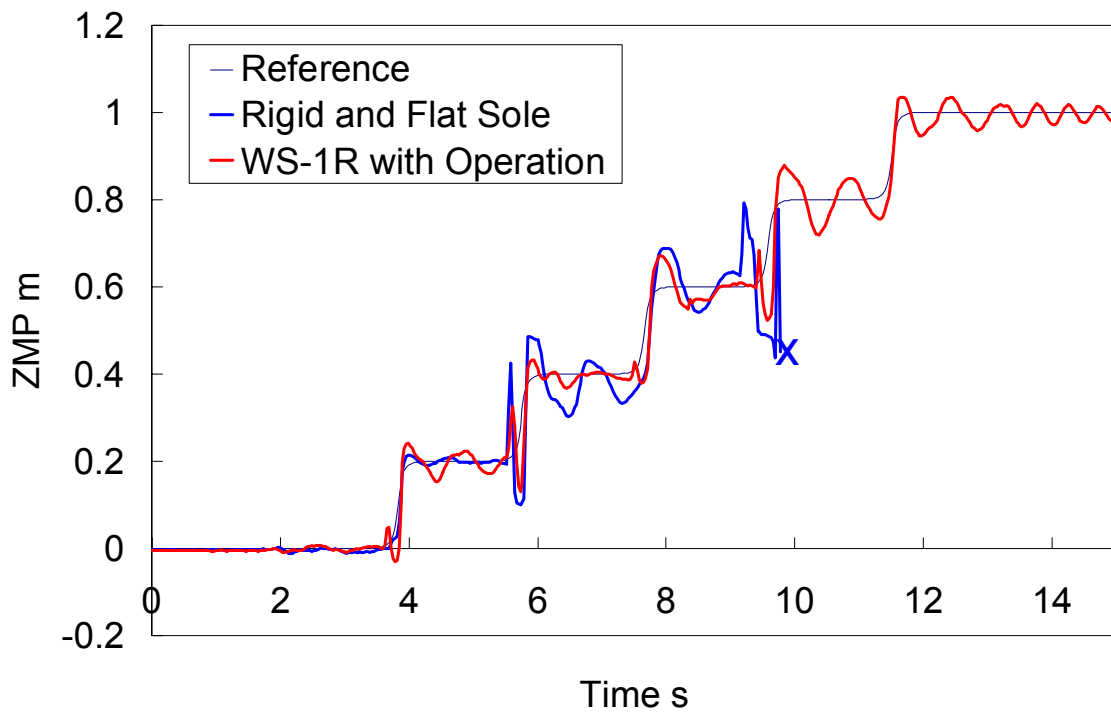


Figure 2.24 ZMP trajectories along the x axis on public road. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step)

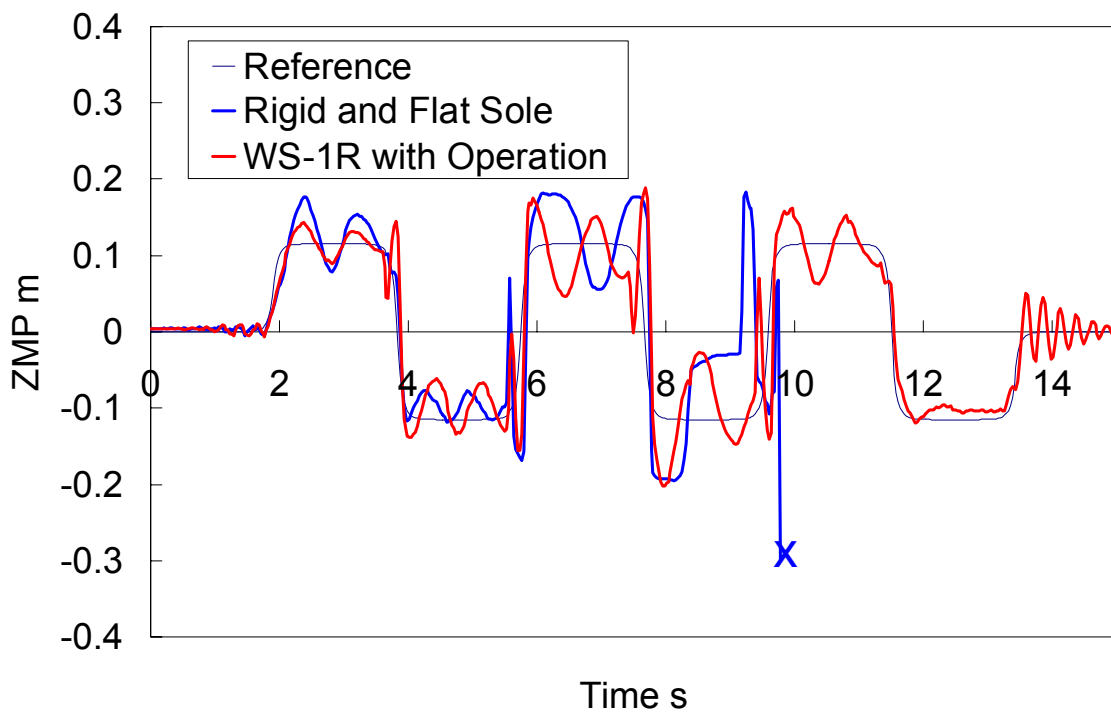


Figure 2.25 ZMP trajectories along the y axis on public road. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step)

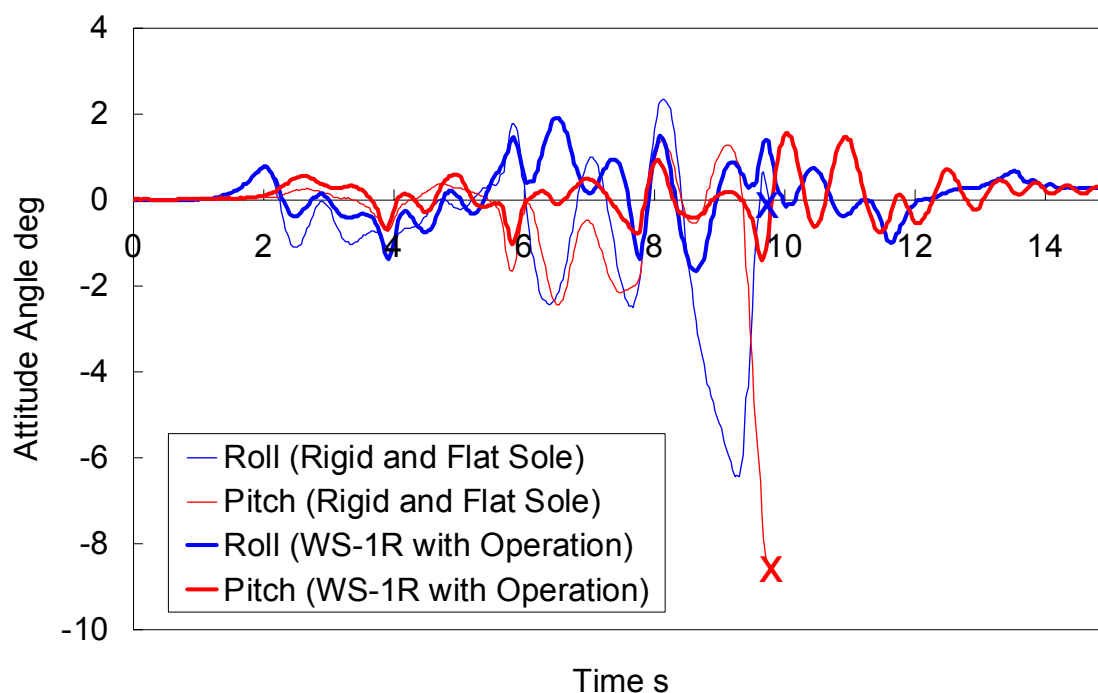


Figure 2.26 Attitude angle on public road. The robot fell at X.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step)

2.5.4 セミアクティブ支持多角形確保足部機構の汎用性を評価するための評価実験

以上までの実験では、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RII に装着し、動作原理やロック機構などの基本的な性能評価を行ったが、あらゆる 2 足歩行ロボットにも適用可能という足部機構の汎用性については確認できていない。そこで WS-1R の汎用性を確認するために、2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R[119-121] に装着し、評価実験を行う。平坦な床面の上に、厚さ 20 mm のアクリル板を敷き擬似的な不整地を作製し、歩幅 200 mm/step, 歩行周期 1.0 s/step での前進歩行をさせるが、その際 4 点のスパイクのうち 1 点だけが凸部に乗るようにアクリル板を配置した。WABIAN-2R の脚部はシリアルリンク機構で構成されているため WL-16RII の脚部に比べ剛性が低く、仮想コンプライアンス制御などの歩行安定化制御を入れなければ安定して歩行することができない。そこで、WS-1R を装着して歩行させる場合も、仮想コンプライアンス制御[160]を併用することとした。しかし、これだけでは 2 mm 程度の凹凸にしか対応できず、本章で目標としている 20

mm の凹凸に適応することはできない。

そこで、開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を WABIAN-2R に装着し、20 mm の段差のある不整路面において安定した歩行ができるようになるか確認するための評価実験を行った。WS-1R を WABIAN-2R にそのまま装着しようとする、足関節を駆動するモータと WS-1R のベース部分が干渉し取り付けられないため、干渉を防ぐための上げ底部材を用意し取り付けられるようにしている。

歩行実験の様子を図 2.27 に示す。図 2.28 の ZMP 軌道からも、開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R により路面の凸が吸収され、大きな ZMP 偏差を生じることなく安定して歩行できていることが確認できた。

この実験結果から、WS-1R を装着することができれば、あらゆる 2 足歩行ロボットの不整地での歩行能力向上が期待できることが確認できた。

2.5.5 考察

以上の実験結果より、開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R が目標高さとして設定した 20 mm までの段差に適応可能であることが確認できた。また、足底と同じ領域に凸が複数あり、剛体平板の足底では支持多角形を大きく確保することが困難な路面においても安定した歩行に成功した。さらに、細かい凹凸が多く存在する屋外の不整路面においても安定して歩行できることが確認できた。これは提案したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R が未知の不整路面において有効であることを示している。また、評価実験を通して確認したように、装着部分のみ変更すればあらゆる 2 足歩行ロボットに適用可能な汎用性を有しているため、ヒューマノイド・ロボットなどの 2 足歩行ロボットの実用化の一助になると考えられる。

しかしながら、この足部機構単体では凹路面に適応することができない。これについては、足底 4 隅のスパイクのストロークが 20 mm であるが、その中心の 10 mm 縮んだところを初期位置にすれば、凹路面にも適応できると考えられる。また、この足部機構の動作原理から、4 点全てが凸部に乗るような路面にも対応できない。これについてはロック機構部に搭載した接地検出センサの出力に応じて各シリンダをロックするのではなく、ロボットが遊脚から立脚に移る際にロックすればそのような路面にも適応できる。しかし、そうすると足部機構単体でロック機構を動作させることができなくなる。WS-1R を装着した 2 足歩行ロボットから、遊脚から立脚に移った際に信号を受け取らなければならず、足部機構の汎用性が薄れてしまう。この足部機構を装着する 2 足歩行ロボットに、ソフトウェア的に改良をせずとも不整地適応能力を向



Figure 2.27 Walking experiment using WABIAN-2R mounted on WS-1R.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

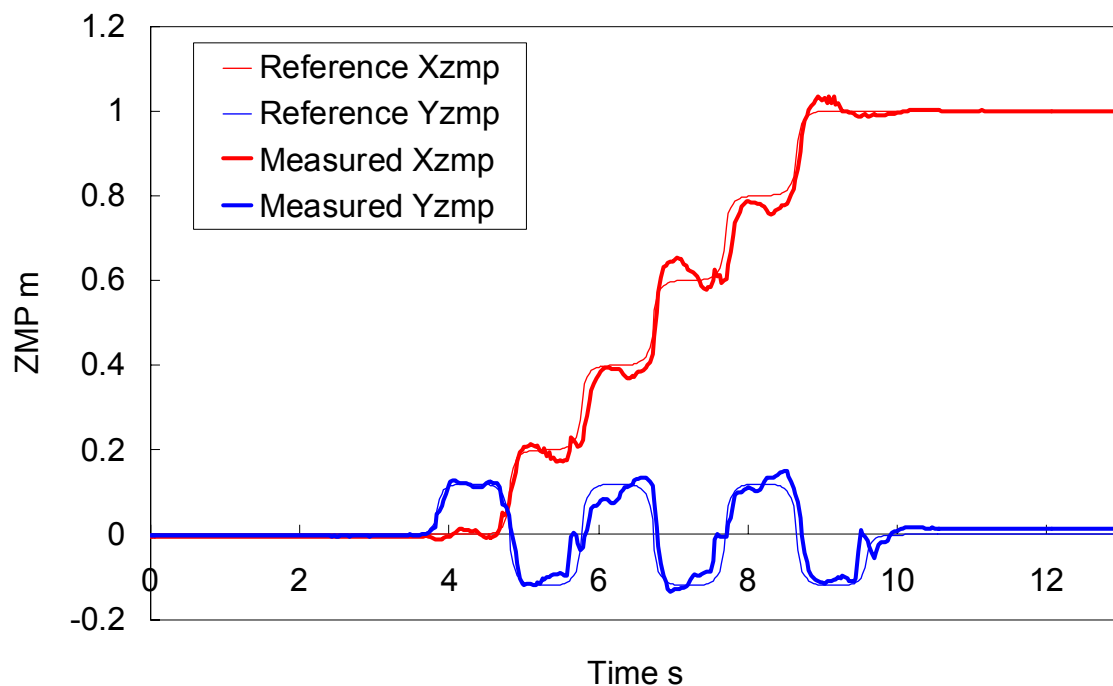


Figure 2.28 ZMP trajectories on 20 mm board.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

上させるためには、足部機構に搭載したセンサのデータのみを用いて、それに応じてロック機構を動作させることが好ましいと考える。

また、上り・下り続ける傾斜路面については、路面に対して腰部の相対的な高さを変更しなければならず、2足歩行ロボットの脚長を変更しなければならないため、この足部機構単体で適応することはできない。そのような路面に適応するためには、足先のZ軸方向の高さの修正を必要とするため、歩行安定化制御との統合が必要であると考えられる。

2.6 まとめ

本章では、足底と同じ領域に凸が複数あるような路面において支持多角形を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の開発、およびこの評価実験と考察について述べた。

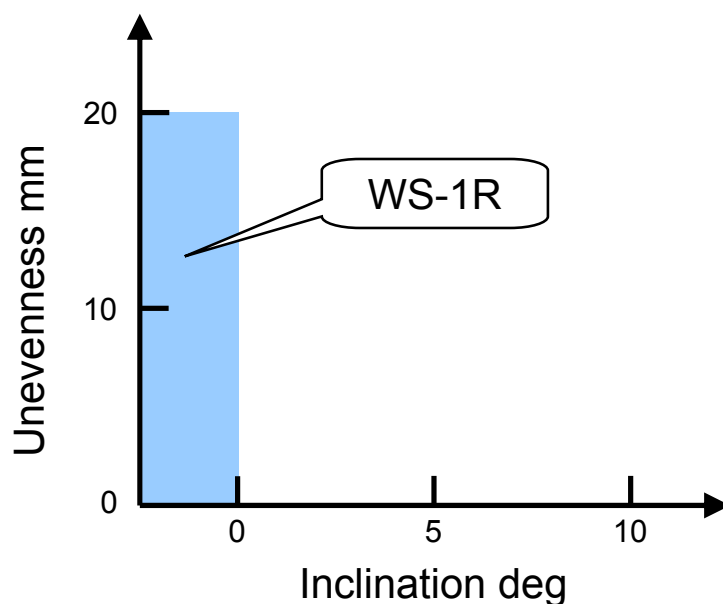


Figure 2.29 Performance of WS-1R.

WS-1R は足底 4 隅にカム式ロック機構を備えており、路面の凹凸を吸収することができる。また、各シリンダは路面との接地検出が可能なセンサを備えており、そのセンサによって 4 点全てが路面に接地したことを確認したら、各支持点をロックし支持多角形を確保するというものである。

WS-1R を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RII に装着して行った評価実験を通して、厚さ 20 mm までのアクリル板を用いた擬似的な不整地や、点字ブロックが敷設された屋外環境で歩行可能であることが確認できた。また、その足部機構の汎用性を評価するために、2 足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R にも装着して実験したところ、厚さ 20 mm のアクリル板を用いて作製した擬似的な不整地での歩行が実現され、WS-1R の汎用性についても確認した。

図 2.29 に WS-1R を装着した際の不整地適応能力を図示した。図中水色の範囲が WS-1R を装着することにより実現できた領域であり、傾斜路面には適応できないが、高さ 20 mm までの凸部のある路面には適応可能である。

一方で、この WS-1R 単体では、凹路面や傾斜路面に適応できないため、不整路面適応制御との統合が必要であるが、この問題点に関する改善策の提案と評価については、次章以降に報告する。

第3章 着地軌道修正制御法の開発

- 3.1 はじめに
- 3.2 着地軌道修正制御法
- 3.3 実験方法
- 3.4 評価実験と考察
- 3.5 まとめ

3.1 はじめに

第2章では、足底と同じ領域に凸が複数あるような路面において支持多角形を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を開発したことで、これを用いて行った評価実験と考察を述べた。これにより、剛体平板では大きな支持多角形を確保できないような 20 mm の凸部のある不整地における歩行に成功したが、WS-1R 単体では、凹路面や傾斜路面に適応できない。2足歩行を移動様式に用いたロボットの実用化に向けた基礎技術の構築を考えると、第2章の結果だけでは十分でなく、凹路面や傾斜路面にも適応できなければならない。

不整路面における安定化を含む実時間歩行安定化に関する研究は多くの先行研究がある[66-75, 152-155, 161-162]。これらの多くはその観測量に ZMP や体幹姿勢、上体加速度などを用いており、路面の凹凸をロボットが踏むことにより ZMP や体幹姿勢、加速度などの偏差の急激な変化をセンシングし、ロボットの力学モデルに基づく高精度な加速度制御を行うものである。これらはロボット自体のモデルが比較的正確に取得できる場合に非常に有効であるが、人間を乗せて歩行する場合のように正確なモデル化が困難なロボットでは適用が難しい。これに対し梶田ら[69]や山口ら[107-113]の手法はロボットの運動が路面形状の影響を受ける以前に路面に対する適応動作を開始するものであるが、いずれも路面を検知するセンサや機構の搭載が必要であり、重量増加が懸念される。

そこで、以下の2点を本章の研究目的とした。

- 開発する不整路面適応制御法は ZMP 計測用の力センサのみで実装可能であること。
- 20 mm の凹凸のある不整路面において安定に歩行できること。

これらについてその制御法と評価実験，考察について述べる．

3.2 着地軌道修正制御法

筆者らの歩行制御方式の基本部分は，高西研究室において 1996 年より研究・開発を行っている 2 足ヒューマノイド・ロボットの動歩行制御方式を一部変更したものである[163]．この手法においては，ロボットは水平平坦路を歩行するものとして歩行パターンを生成するため，このパターンのみでは不整路面での歩行は不可能である．

本制御方式のフローチャートを図 3.1 に示す．まず着地路面を検出するために，脚を Δl だけ伸ばしておく．そして，脚が Δl だけ縮む間に，歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより着地路面高さ誤差を検出し，その値に応じて高さ方向の着地軌道を修正する．その際，脚部コンプライアンスが小さいと大きな着地衝撃を生じ，ロボットが転倒する恐れがある．そこで，脚が Δl 短くなるまでは大きな着地衝撃を生じないように脚部コンプライアンスを大きくし，できる限り柔らかくしておく．足裏に軟素材を貼るなどハードウェア的にコンプライアンスを持たせなければ着地衝撃を小さくすることは困難であるが，脚部コンプライアンスを大きくすることで，着地時の衝撃を多少抑制することができる．この軌道修正は遊脚期の後半に行い，両立脚期はその修正量を保持する．そして，立脚期の前半には基準歩行パターンに復帰する．このようにして，大きな着地衝撃が生じる以前に路面の形状を検知し，この路面情報を元に遊脚の荷重が増大してくる以前に歩行パターンにおける着地軌道を変更し路面にならわせることで，未知の凸路面，凹路面や傾斜路面における歩行を可能とするものである．

本手法は以下の 4 つのポイントからなる：

- 非線形コンプライアンス制御
 - コンプライアンス中心移動量の理論値と実測値の比較による着地路面高さ誤差の検出
 - 着地路面高さ誤差に応じた着地軌道の修正
 - 1 歩ごとの基準歩行パターンへの復帰動作
- 以下にこれらについて述べる．

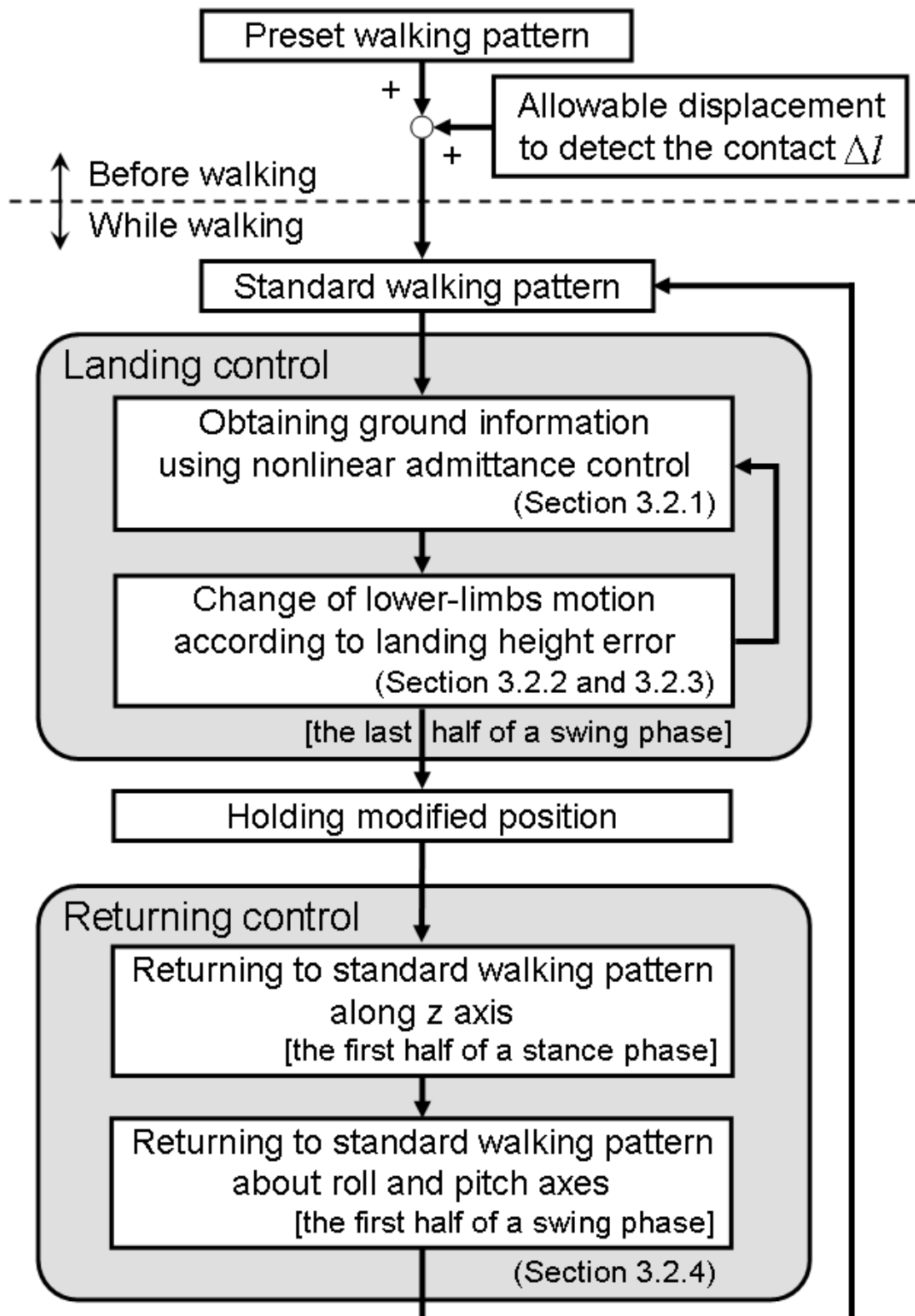


Figure 3.1 Outline of the landing pattern modification method.

3.2.1 非線形コンプライアンス制御

仮想的なコンプライアンスを実現する脚の運動は以下の式で記述される。

$$\mathbf{F} = \mathbf{K}\Delta\mathbf{x}_f + \mathbf{C}\Delta\dot{\mathbf{x}}_f \quad (3.1)$$

また、 $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ と $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ は以下のような仮想ばね係数，仮想粘性係数であり，次のような対角行列である：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_x & & & & & 0 \\ & K_y & & & & \\ & & K_z & & & \\ & & & K_{mx} & & \\ & & & & K_{my} & \\ 0 & & & & & K_{mz} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} C_x & & & & & 0 \\ & C_y & & & & \\ & & C_z & & & \\ & & & C_{mx} & & \\ & & & & C_{my} & \\ 0 & & & & & C_{mz} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ここで，制御周期を Δt とすれば，足部の速度は以下の式で与えられる。

$$\dot{\mathbf{x}}_f(t) = \frac{\Delta\mathbf{x}_f(t) - \Delta\mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (3.4)$$

これを用いて式(3.1)を離散化すると，足部のコンプライアンス移動量は以下のよう
に求められる。

$$\Delta\mathbf{x}_f(t) = \left[\mathbf{K} + \frac{\mathbf{C}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ \mathbf{F} + \mathbf{C} \frac{\Delta\mathbf{x}_f(t - \Delta t)}{\Delta t} \right\} \quad (3.5)$$

非線形コンプライアンス制御は Z 軸方向に適用し，大きな床反力を発生することなく足部が路面形状に十分にならうよう，コンプライアンス中心移動量が着地路面検知

用移動許容量 Δl 以下の場合はコンプライアンス係数を非常に小さくしておく.そして,脚が着地路面検知用移動許容量 Δl 以上短くなったら,コンプライアンス係数を大きくする. Z軸方向の本制御方式のイメージ図を図3.2, 図3.3に示す.

以下右脚の場合のみ示すが,左脚も同様である.

非線形コンプライアンス制御によるコンプライアンス移動量 (Z軸方向) は以下のように算出する.

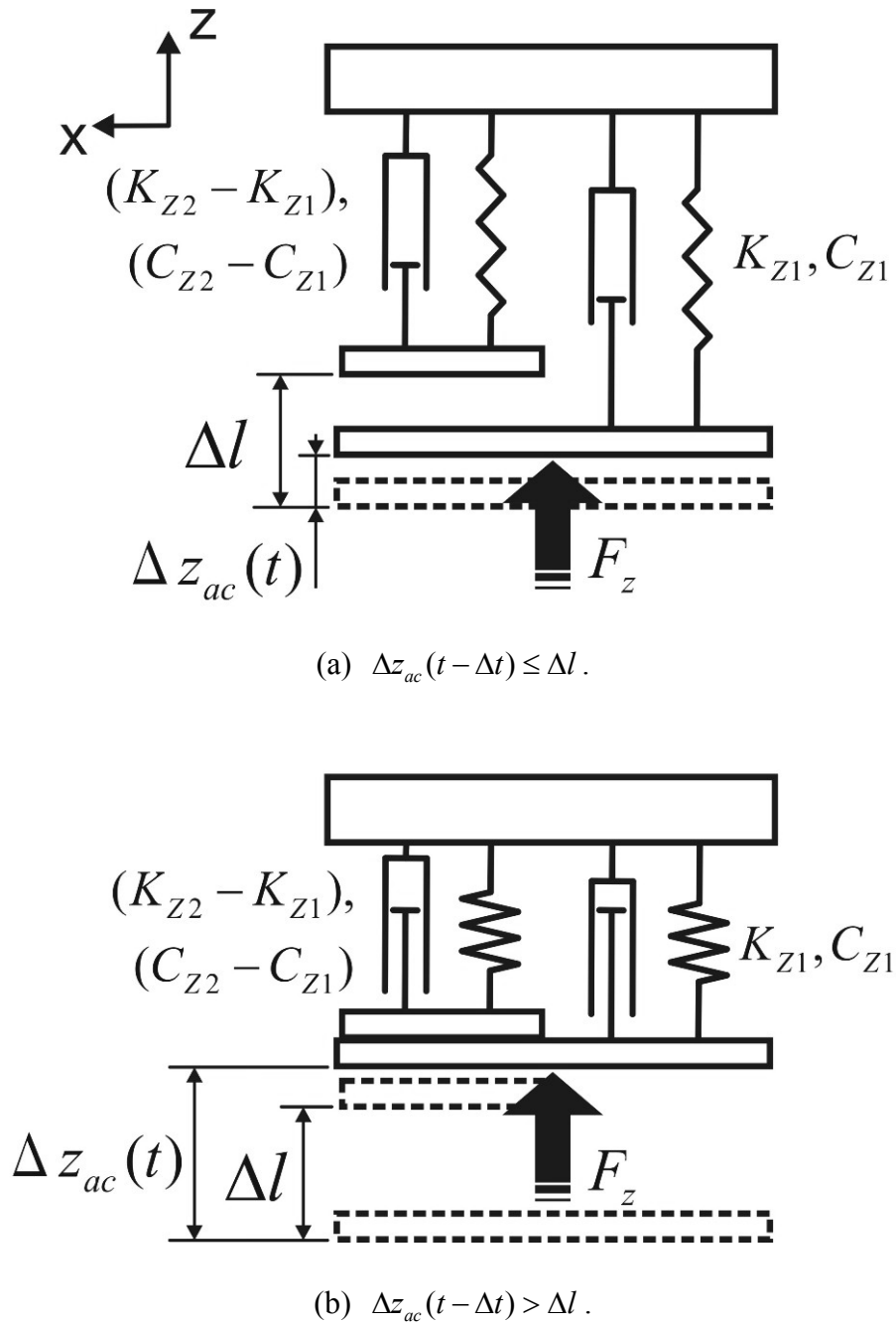


Figure 3.2 Nonlinear compliance control.

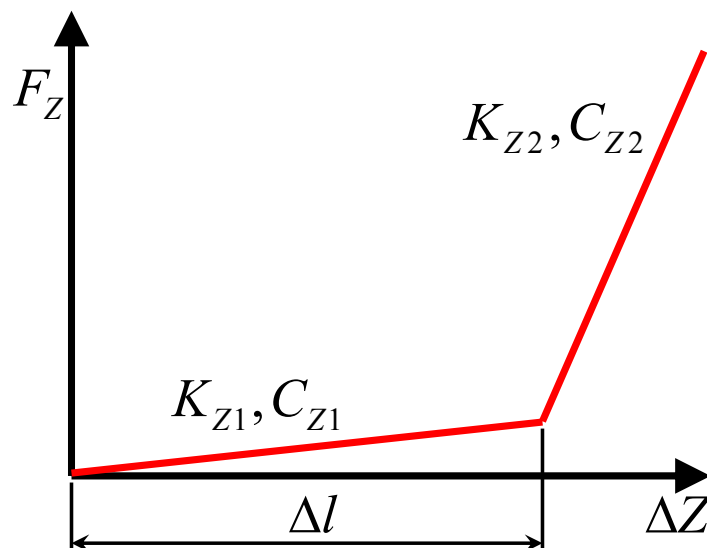


Figure 3.3 Change of stiffness coefficient.

(i) $\Delta z_{ac}(t - \Delta t) \leq \Delta l$ のとき

$$\Delta z_{ac}(t) = \left[K_{z1} + \frac{C_{z1}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_z + C_{z1} \frac{\Delta z_{ac}(t - \Delta t)}{\Delta t} \right\} \quad (3.6)$$

(ii) $\Delta z_{ac}(t - \Delta t) > \Delta l$ のとき

$$\Delta z_{ac}(t) = \left[K_{z2} + \frac{C_{z2}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_z + C_{z2} \frac{\Delta z_{ac}(t - \Delta t)}{\Delta t} + (K_{z2} - K_{z1}) \Delta l \right\} \quad (3.7)$$

一方, Roll 軸, Pitch 軸に関しては通常のコンプライアンス制御を行う. ただし路面の凹凸に接触しても大きな床反力を生じないように, 定数 K , C を発振しないレベルでなるべく小さい値を実験により決める.

$$\begin{aligned} \Delta \theta_x(t) &= \left[K_{\theta_x} + \frac{C_{\theta_x}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_{\theta_x} + C_{\theta_x} \frac{\Delta \theta_x(t - \Delta t)}{\Delta t} \right\} \\ \Delta \theta_y(t) &= \left[K_{\theta_y} + \frac{C_{\theta_y}}{\Delta t} \right]^{-1} \cdot \left\{ F_{\theta_y} + C_{\theta_y} \frac{\Delta \theta_y(t - \Delta t)}{\Delta t} \right\} \end{aligned} \quad (3.8)$$

以上の制御法の足部モデルと Roll 軸, Pitch 軸周りのならい動作の模式図を図 3.4, 図 3.5 に示す.

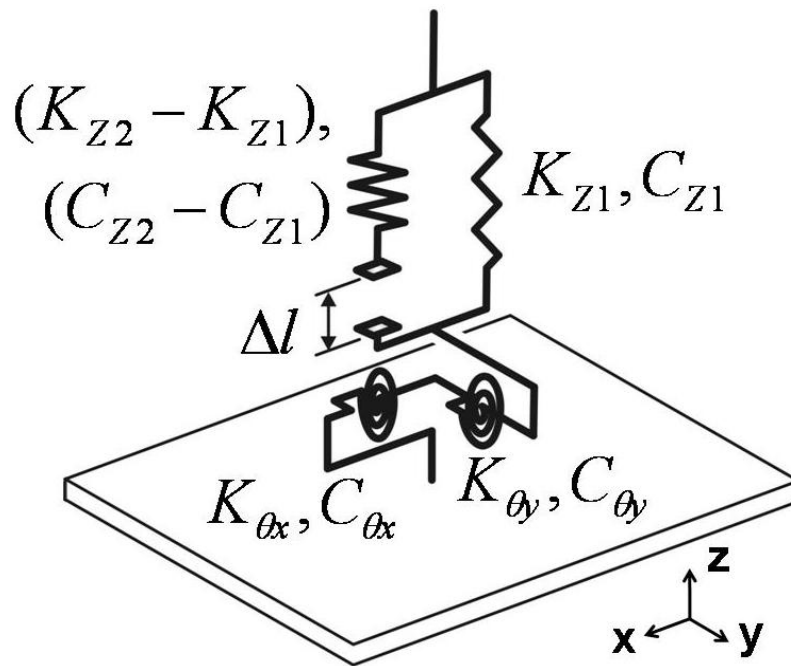


Figure 3.4 Foot model.

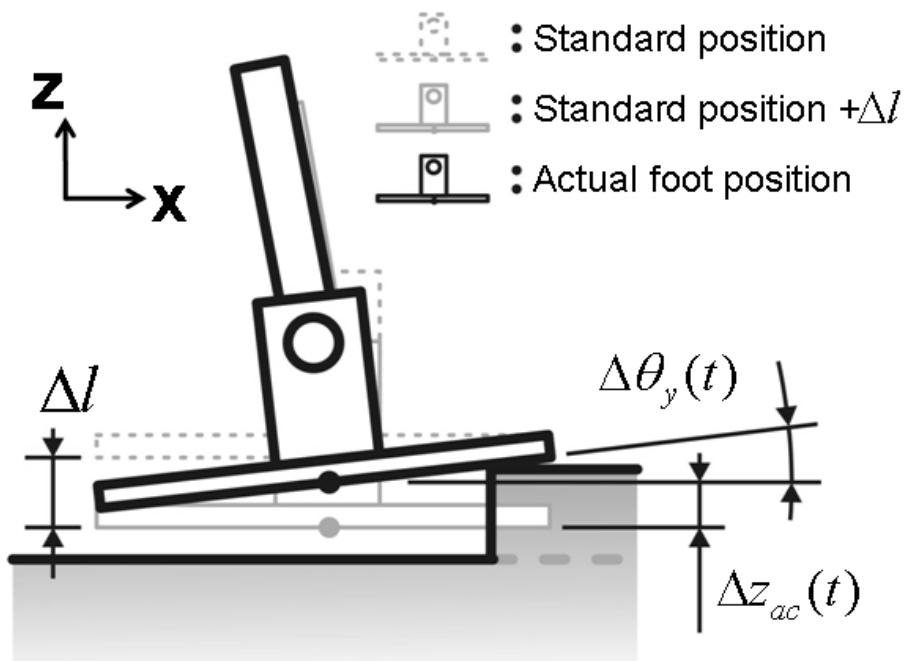


Figure 3.5 Landing motion.

3.2.2 着地路面高さ誤差の検出

非線形コンプライアンス制御を用いて水平平坦路を歩行した場合の Z 軸方向コンプライアンス移動量の理論値 $\Delta z_{th}(t)$ は容易に導出できる (図 3.6).

(i) $\Delta l - \bar{z}_{pat}(t) < z_{waist}(t)$ のとき

$$\Delta z_{th}(t) = 0 \quad (3.9)$$

(ii) $\Delta l - \bar{z}_{pat}(t) \geq z_{waist}(t)$ のとき

$$\Delta z_{th}(t) = \Delta l - z_{waist}(t) - \bar{z}_{pat}(t) \quad (3.10)$$

この理論値と実測値を比較することにより, 制御周期ごとの着地路面高さ誤差 $e(t)$ を算出する.

$$e(t) = \Delta z_{th}(t) - \Delta z_{ac}(t) \quad (3.11)$$

凸路面に着地した場合は, 平坦路ならコンプライアンス移動量が発生しない時刻に $\Delta z_{ac}(t)$ が値を持つことにより $e(t)$ は負の値をとり, 反対に凹路面に着地した場合はコンプライアンス移動量が発生するべき時刻になっても $\Delta z_{ac}(t)$ が値を持たないために $e(t)$ は正の値をとる.

一方, Roll 軸, Pitch 軸に関しては, 水平平坦路面歩行ではコンプライアンス移動量は理想的には生じないため, 実測値をそのまま誤差として扱う.

3.2.3 着地路面高さ誤差に応じた着地軌道修正

着地路面高さ誤差 $e(t)$ を制御周期ごとにフィードバックし, これに応じて基準歩行パターンにおける足部の Z 軸方向の軌道を修正することにより, 路面へののらひ動作を行う.

Z 軸方向の着地軌道修正量 $H(t)$ は以下の式により算出する.

$$\begin{aligned} H(t) &= H(t - \Delta t) - k_e \cdot e(t - \Delta t) \\ &= -\frac{k_e}{\Delta t} \int_t e(t) dt \end{aligned} \quad (3.12)$$

この修正量を基準歩行パターンにおける足先位置高さ $\bar{z}_{pat}(t)$ に加えることにより,

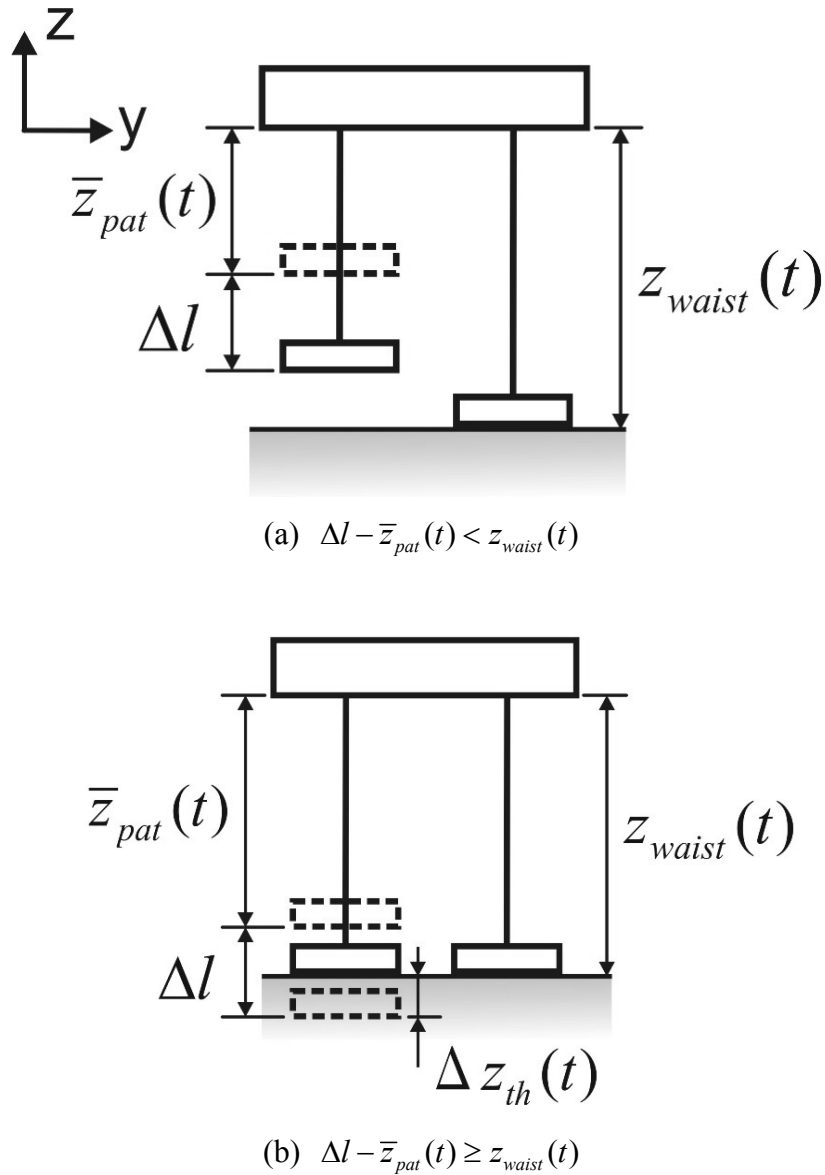


Figure 3.6 Theoretical compliance displacement in walking on even terrain.

路面の形状にならないながらの着地動作を実現する．軌道修正後の足部 Z 軸方向軌道 $\bar{z}_{final}(t)$ は以下の式で求める．

$$\bar{z}_{final}(t) = \bar{z}_{pat}(t) - \frac{k_e}{\Delta t} \int_t e(t) dt + \Delta z_{ac}(t) - \Delta l \quad (3.13)$$

ここで、基準歩行パターンにおける足先位置高さより Δl 分だけ足を伸ばしているのは、理想的歩行の場合も必ず Δl 分だけコンプライアンス移動量が発生するためである．

Roll 軸、Pitch 軸に関しては能動的な軌道修正は行わず、コンプライアンス制御のみを行う．

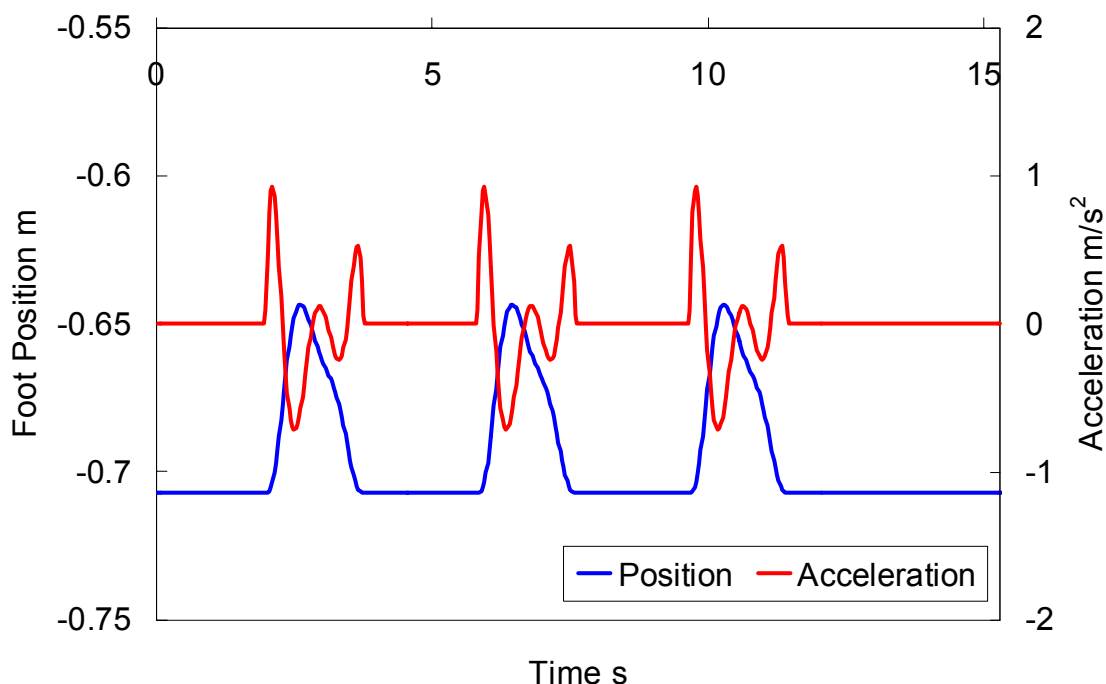


Figure 3.7 Right foot position along the z axis and its acceleration. The swing leg acceleration is less than 1.0 m/s^2 .

$$\begin{aligned}\theta_{x\text{final}}(t) &= \theta_{x\text{pat}}(t) + \Delta\theta_x(t) \\ \theta_{y\text{final}}(t) &= \theta_{y\text{pat}}(t) + \Delta\theta_y(t)\end{aligned}\tag{3.14}$$

式(3.13), (3.14)から得られる値から逆運動学計算により各リンク長さの目標値が求められ, 各アクチュエータ制御部へ出力される。

以上の着地路面高さ誤差の検出と軌道修正は遊脚期の後半に行う。コンプライアンス移動量が Δl 以上の大きさになるまで大きな床反力が発生しないことに注意されたい。

理論上は軌道修正後の足部 Z 軸方向軌道 $\bar{z}_{\text{final}}(t)$ は床反力 F_z だけでなく, 足部そのものの慣性力の影響も受ける。しかし, 足部重量が 1.0 kg 以下で, 図 3.7 に示すように遊脚期の足部の加速度が 1.0 m/s^2 以下であるため, 足部重量による完成力は 1.0 N 以下である。そこで, 足部 6 軸力センサから得られるデータに $\pm 1.0 \text{ N}$ の不感帯を設け, 足部の慣性力の影響を受けないようにした。

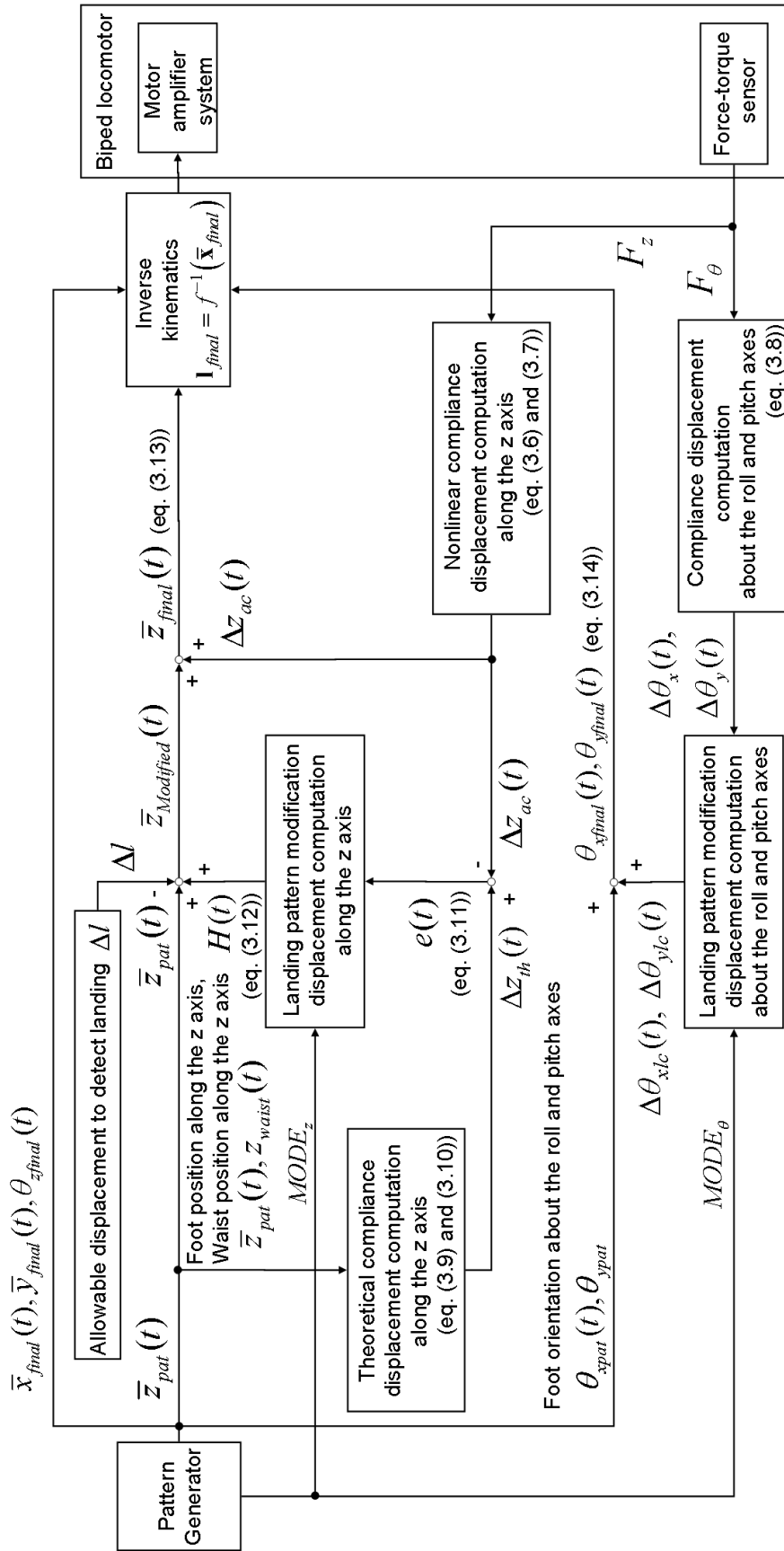


Figure 3.8 Block diagram of the landing pattern modification method with nonlinear compliance control.

Table 3.1 Timing chart of the landing pattern modification method.

Axis	Swing Phase		Double Support Phase	Stance Phase		Double Support Phase
	First Half	Last Half		First Half	Last Half	
Z	Preset Pattern	Landing Control	Holding Modified Position	Returning Motion	Preset Pattern	Preset Pattern
Roll, Pitch	Returning Motion	Landing Control	Holding Modified Position	Holding Modified Position	Holding Modified Position	Holding Modified Position

3.2.4 1歩ごとの基準歩行パターンへの復帰動作

以上述べた着地軌道修正は遊脚期の後半に行い、Z軸方向に関しては、両脚支持期は遊脚期最後の軌道修正量を保持し単脚支持期前半に基準歩行パターンに復帰する。Roll軸、Pitch軸に関しては立脚期を通じて遊脚期最後のコンプライアンス移動量を保持し、次の遊脚期前半に基準歩行パターンに復帰する。

復帰軌道の生成には5次関数を用いた。図3.8に本歩行制御系のシステム構成図を、表3.1に本手法のタイムチャートを示す。

3.3 実験方法

開発した不整路面適応制御法の評価のために、人間搭乗型2足歩行ロボットWL-16RII[124]に着地軌道修正制御法を実装した。制御単体での有効性の評価をするため、通常の剛体平板の足底をWL-16RIIに装着し、歩行実験を行う。剛体平板の足底では、足底の中心付近で凹凸を踏んだ場合、支持多角形が確保されず安定した歩行が難しいため、本節では剛体平板においても大きな支持多角形が確保できる不整路面を対象とする。

目標とする路面は以下の通りである。

- (i) Z軸方向に足部軌道の修正が必要な凹凸路面
- (ii) Pitch軸周りに足部軌道の修正が必要な凹凸路面
- (iii) Roll軸周りに足部軌道の修正が必要な凹凸路面
- (iv) Z軸方向、Pitch軸周り、Roll軸周りに足部軌道の修正が必要な凹凸路面
- (v) けあげ高さに偏差のある階段
- (vi) 屋外に存在する不整路面

これらの不整路面に適応可能かどうか確認するために、それぞれ下記の通り評価実

験を行う。

- (i) 目標段差高さである板厚 20 mm のアクリル板を足底全体で踏み, Z 軸方向のみにならい動作が生じるようにアクリル板を敷き作製した擬似的な不整路面での歩行能力の評価
- (ii) Pitch 軸周りのみにならい動作が生じるように板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き作製した擬似的な不整路面での歩行能力の評価
- (iii) Roll 軸周りのみにならい動作が生じるように板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き作製した擬似的な不整路面での歩行能力の評価
- (iv) (i)~(iii)の実験は各単軸方向のならい動作を評価する実験であるが, ロボットが前進歩行中にすべての軸方向にならい動作をしなければならないように, 板厚 5~20 mm のアクリル板と傾斜板を敷き作製した擬似的な不整路面での歩行能力の評価
- (v) あらかじめ作成した歩行パターンよりもけあげ高さが低いまたは高い階段を昇降させた際の歩行能力の評価
- (vi) 実際の屋外路面での歩行能力の評価

ただし, 最初にも述べたように, これらの実験は剛体平板の足底を用いて実験するため, 大きな支持多角形が確保できるように擬似的な不整路面を作製する。また, 屋外路面についても, 剛体平板の足底で接地面積が大きく確保できる場所にて実験を行う。

3.4 評価実験と考察

開発した着地軌道修正制御法を用いて, 前節で述べた評価実験を行った。これらについて以下に述べる。

3.4.1 Z 軸方向のならい動作に関する歩行実験

まず板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き擬似的な不整地を作製し, 歩幅 200 mm/step, 歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。その際, 足底全体でアクリル板を踏み, Z 軸方向のみにならい動作が生じるようにアクリル板の位置を決定した。

歩行実験の様子を図 3.9 に示す。図中黄色い板が厚さ 20 mm のアクリル板であり, 各写真の左端の図は着地軌道修正制御を用いない場合の連続写真である。

この結果、着地軌道修正制御を用いない場合は転倒してしまったが、着地軌道修正制御を用いることで転倒せずに歩行を続けることができた。着地軌道修正制御を用いた場合のZ軸方向軌道修正量を図3.10に示す。アクリル板の厚さが20 mmであるため、理論的な軌道修正量が20 mmであるのに対し、実際の修正量も最大で約20 mm発生していることが分かる。凸部を踏んだ後は、立脚前期に基準歩行パターンに復帰するため、次の1歩は凹路面になるが、図3.10より約15 mm軌道を修正していることが分かる。理論的には20 mmの修正量が発生すべきであるが、機体の倒れ込みなどにより予定していたよりも早く着地したものと考えられる。また姿勢角の推移を図3.11に示すが、着地軌道修正制御を用いない場合は、板を踏むと同時に姿勢が急激に倒れていることが分かる。同図中の×印は、その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す。

3.4.2 Pitch 軸周りのならい動作に関する歩行実験

次にPitch軸周りのならい動作を検証するために、ロボットの前進歩行中にPitch軸方向のみにならい動作が生じるように板厚20 mmのアクリル板を平坦な床面上に敷き、擬似的な不整地を作製した。そして、歩幅200 mm/step、歩行周期2.0 s/stepでの前進歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図3.12に示す。各写真の左端の図は着地軌道修正制御を用いない場合の連続写真と足部の拡大写真である。

Pitch軸周りのコンプライアンス移動量を図3.13に示す。ロボットの足底が前後方向に300 mmの長さがあることを考慮すると、つま先や踵で板厚20 mmのアクリル板を踏むと、Pitch軸周りに4.5 deg程の軌道修正が発生するはずである。図3.13を見ると、左脚は最大5.0 deg程の受動的軌道修正をしていることが確認できる。また、Pitch軸周りにならうだけでなく、Z軸方向にも足部の軌道修正をしなければ、完全に路面にならうことができない。図3.14にZ軸方向軌道修正量を示すが、約10 mm修正していることが分かる。



Figure 3.9 Walking experiment, stepping on 20 mm board along the z axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

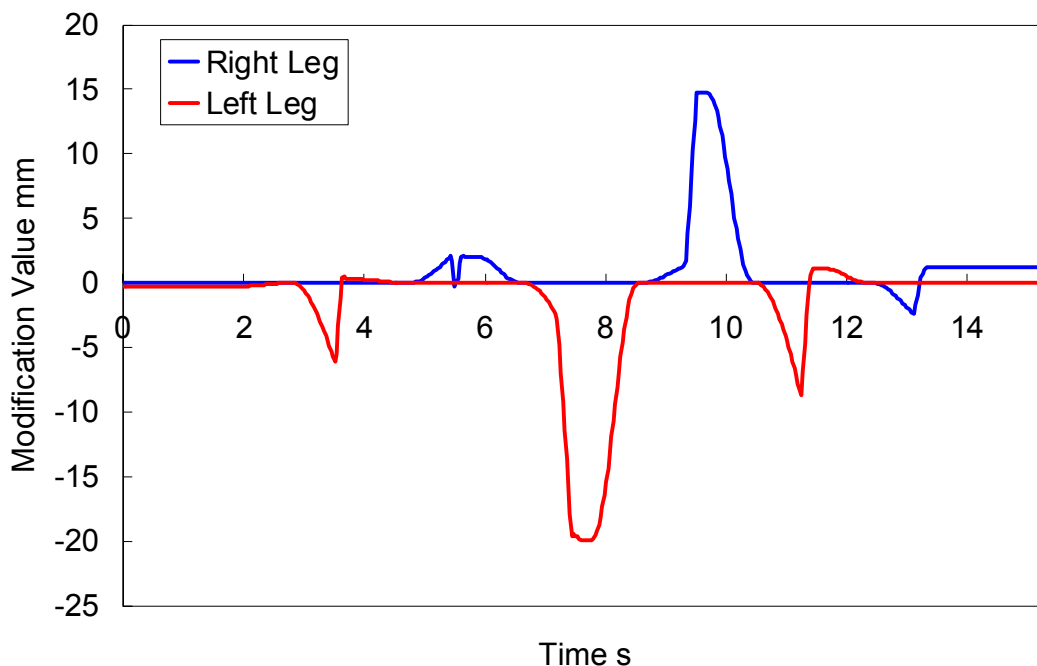


Figure 3.10 Modification value of the z axis, stepping on 20 mm board along the z axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

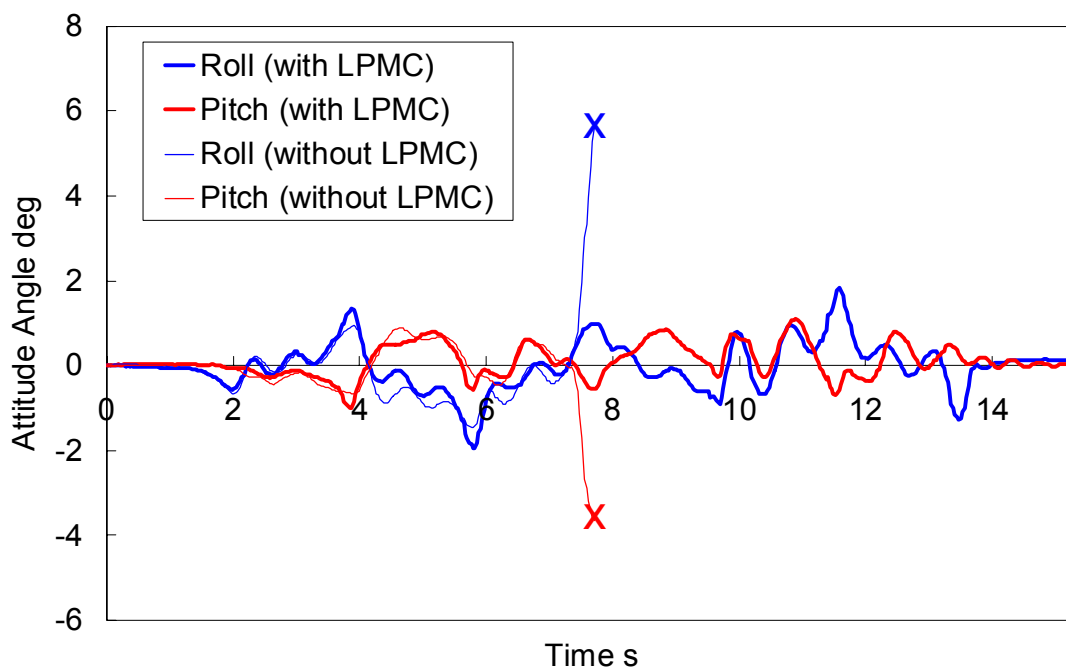


Figure 3.11 Attitude angle, stepping on 20 mm board along the z axis
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)



Figure 3.12 Walking experiment, stepping on 20 mm board about the pitch axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

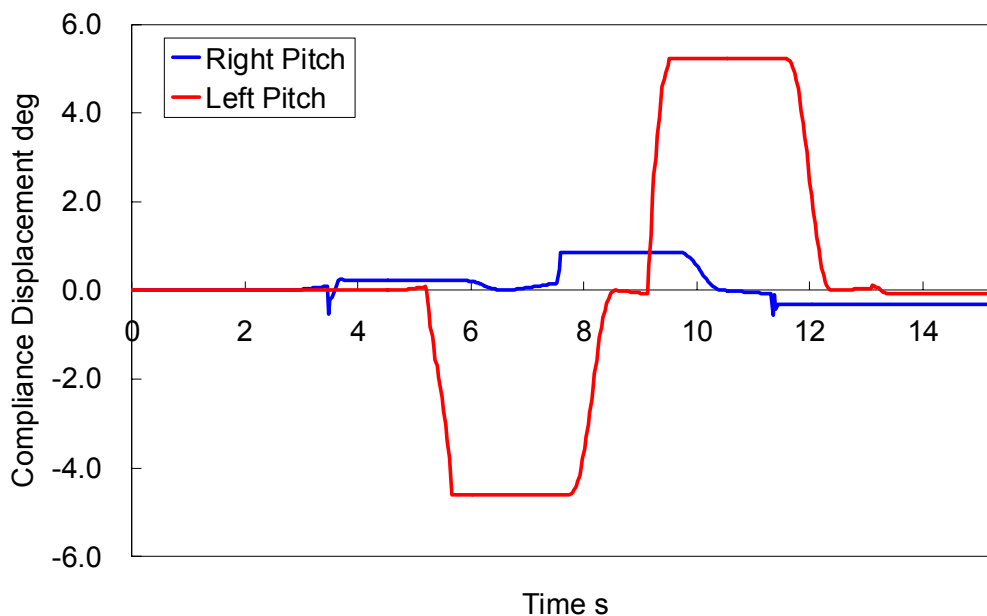


Figure 3.13 Pitch compliance displacement, stepping on 20 mm board about the pitch axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

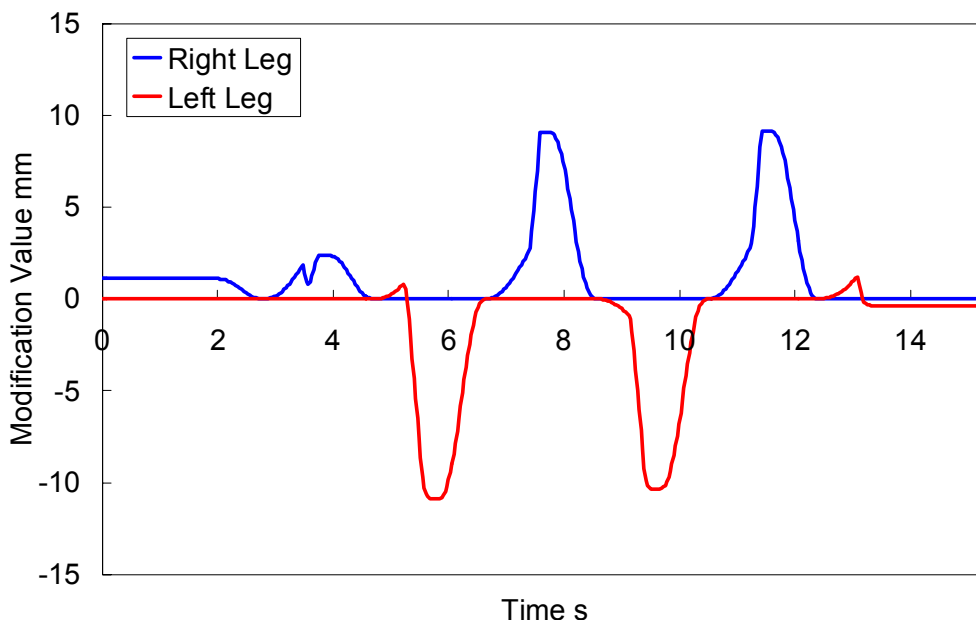


Figure 3.14 Modification value of the z axis, stepping on 20 mm board about the pitch axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

3.4.3 Roll 軸周りのならい動作に関する歩行実験

Roll 軸周りのならい動作を検証するために、ロボットの前進歩行中に Roll 軸方向のみにならい動作が生じるように板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き、擬似的な不整地を作製した。そして、歩幅 200 mm/step, 歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。

歩行実験の様子を図 3.15 に示す。各写真の左端の図は着地軌道修正制御を用いない場合の連続写真と足部の拡大写真である。

Roll 軸周りのコンプライアンス移動量を図 3.16 に示す。ロボットの足底が横方向に 200 mm の長さがあることを考慮すると、足の左端や右端で板厚 20 mm のアクリル板を踏んだ場合、Roll 軸周りに理論上は 5.5 deg 程の軌道修正が発生するはずである。図 3.16 を見ると、左脚は最大 5.5 deg 程の受動的軌道修正をしていることが確認できる。また、Roll 軸周りにならうだけでなく、Z 軸方向にも足部の軌道修正をしなければ、完全に路面にならうことができないが、図 3.17 に示すように Z 軸方向に 12 mm 程軌道修正をしていることが分かる。平坦路に着地する場合にも多少の軌道修正量が確認できるが、これは構造のたわみやモータの応答偏差などによるものと考えられる。

3.4.4 凹凸路面歩行実験

Z 軸方向、Pitch 軸周り、Roll 軸周り単体でのならい動作が確認できたので、前進歩行中にすべての軸方向にならい動作をしなければならぬように、板厚 5~20 mm のアクリル板と傾斜板を平坦な床面上に敷き擬似的な不整地を作製した。この際、ロボットの足は剛体平板であるので、足底中心付近で突起物を踏むと、大きな支持多角形が形成されず、転倒する可能性が大きいため、足底の端の一辺で突起物を踏むようにアクリル板や傾斜板の位置を決定した。そして、歩幅 200 mm/step, 歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。足底中心付近で突起物を踏むような不整路面については、前章のセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を装着すれば踏破できると考えられる。

歩行実験の様子を図 3.18 に示す。各写真の左端の図は正面と側面から見た足部の拡大写真である。

図 3.19 の ZMP 軌道からは、振動は決して少なくないものの、発散は見られず、安定して歩行を継続できているといえる。しかし、図 3.20 の姿勢角のデータを見ると、歩行開始前後で Pitch 方向に約 3 deg の偏差が生じていることが分かる。着地軌道修正



Figure 3.15 Walking experiment, stepping on 20 mm board about the roll axis.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

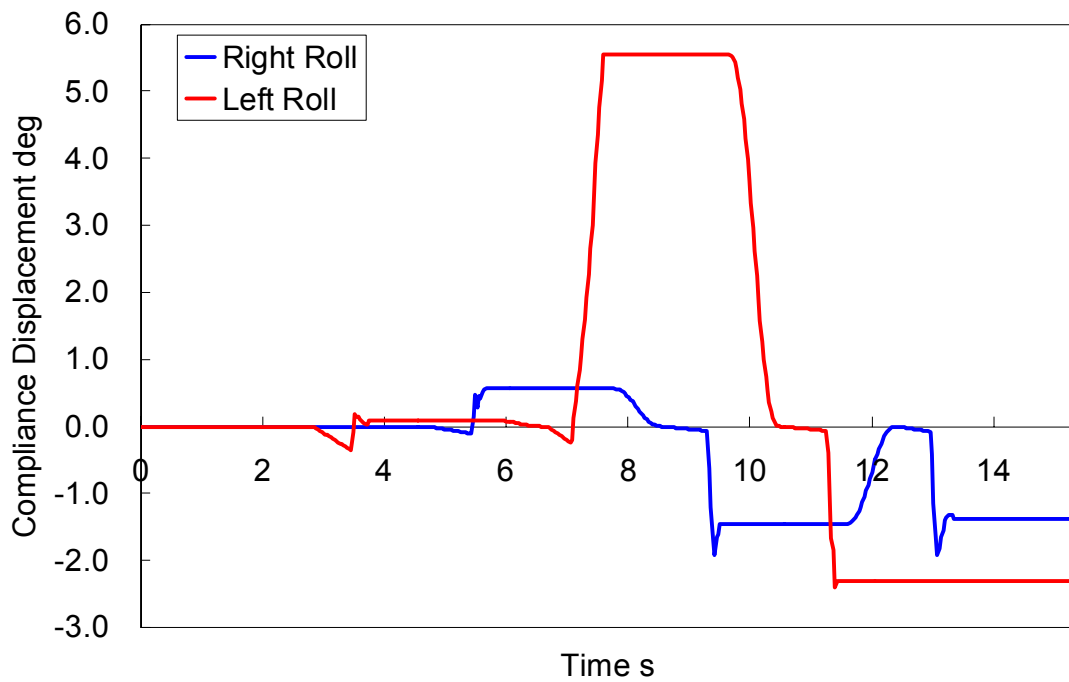


Figure 3.16 Roll compliance displacement, stepping on 20 mm board about the roll axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)

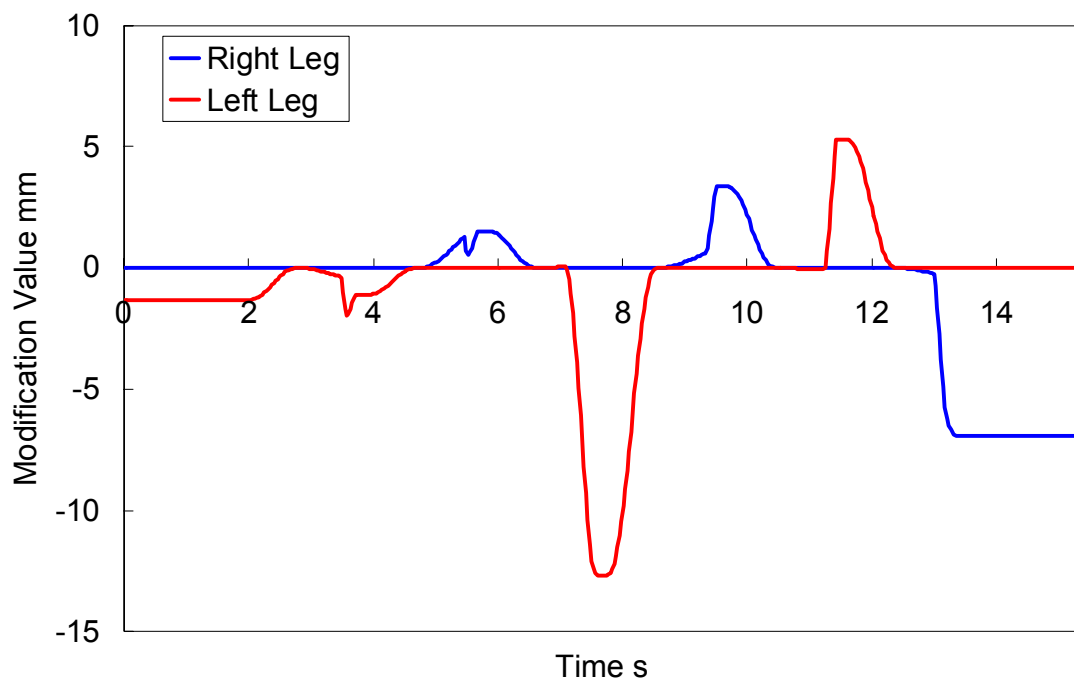


Figure 3.17 Modification value of the z axis, stepping on 20 mm board about the roll axis.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm)



Figure 3.18 Walking experiment on uneven surface.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm)

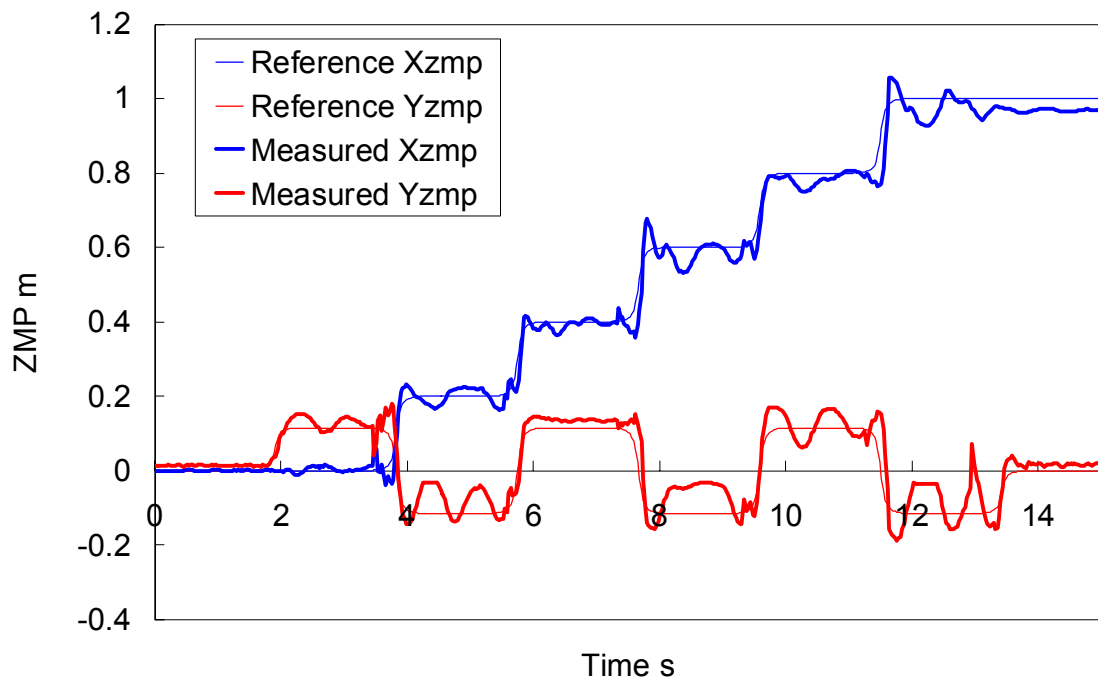


Figure 3.19 ZMP trajectories on uneven surface.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm)

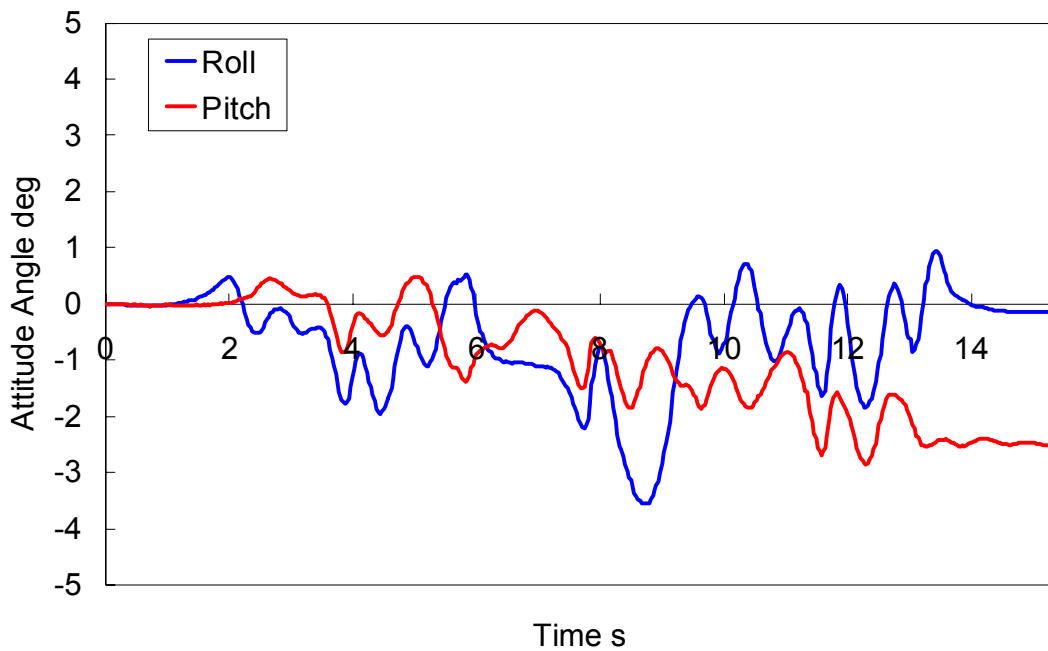


Figure 3.20 Attitude angle on uneven surface.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm)

制御単体では、一度姿勢が倒れると復帰できないため、長時間の歩行をする際には、姿勢角の補償が必要であることがこのことから分かる。

3.4.5 けあげ高さに偏差のある階段昇降実験

開発した着地軌道修正制御は、通常の歩行時のみならず、階段昇降時の階段のけあげ高さの偏差に関しても吸収することが可能である。そこで、階段のけあげ高さが 150 mm であるとして作成した歩行パターンを用いて、それよりも実際の階段の高さが低い場合、または高い場合においてもロボットが階段昇降できるかどうかの評価実験を行った。

まずは、水平平坦路面上にけあげ高さ 130 mm の水平平坦な階段を設置し、作成した歩行パターンの 150 mm よりも低い場合で実験を行った。

歩行実験の様子を図 3.21 に示す。各写真の左端の図は着地軌道修正制御を用いない場合の連続写真である。この結果、着地軌道修正制御を用いない場合は転倒してしまったが、着地軌道修正制御を用いることで転倒せずに段差を上ることが確認できた。図 3.22 に Z 軸方向軌道修正量を示すが、階段のけあげ高さの偏差が 20 mm であるため、理論的な軌道修正量が 20 mm であるのに対し、実際の修正量も最大で約 20 mm の発生していることが確認できる。図 3.23 は姿勢角の推移のグラフであるが、着地軌道修正制御を用いない場合は実際の路面に足部が到達しないため、その足部が立脚になったときに急激な姿勢の倒れこみが見て取れる。同図中の×印は、その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す。

次に、水平平坦路面上にけあげ高さ 170 mm の水平平坦な階段を設置し、作成した歩行パターンの 150 mm よりもけあげ高さが高い場合で実験を行った。

歩行実験の様子を図 3.24 に、Z 軸方向軌道修正量を図 3.25 に示す。階段のけあげ高さの偏差が 20 mm であるため、理論的な軌道修正量が 20 mm であるのに対し、実際の修正量も最大で約 20 mm の発生していることが確認できる。また、図 3.26 に示す姿勢角のデータからも、着地軌道修正制御を用いない場合は、ロボットが想定している段差よりも高いため、足部が路面を蹴ってしまい、姿勢が倒れていることが分かる。一方で、着地軌道修正制御を用いた場合は、姿勢が倒れこむことなく安定して段差を昇っていることが確認できる。

以上の実験結果より、本制御法が階段昇降時のけあげ高さの偏差に対しても適応可能であることが確認できた。



Figure 3.21 Walking experiment in ascending a stair. The preset stair height in the reference walking pattern is 150 mm, while the measured stair height is 130 mm. The walking cycle is 5.8 s/step.

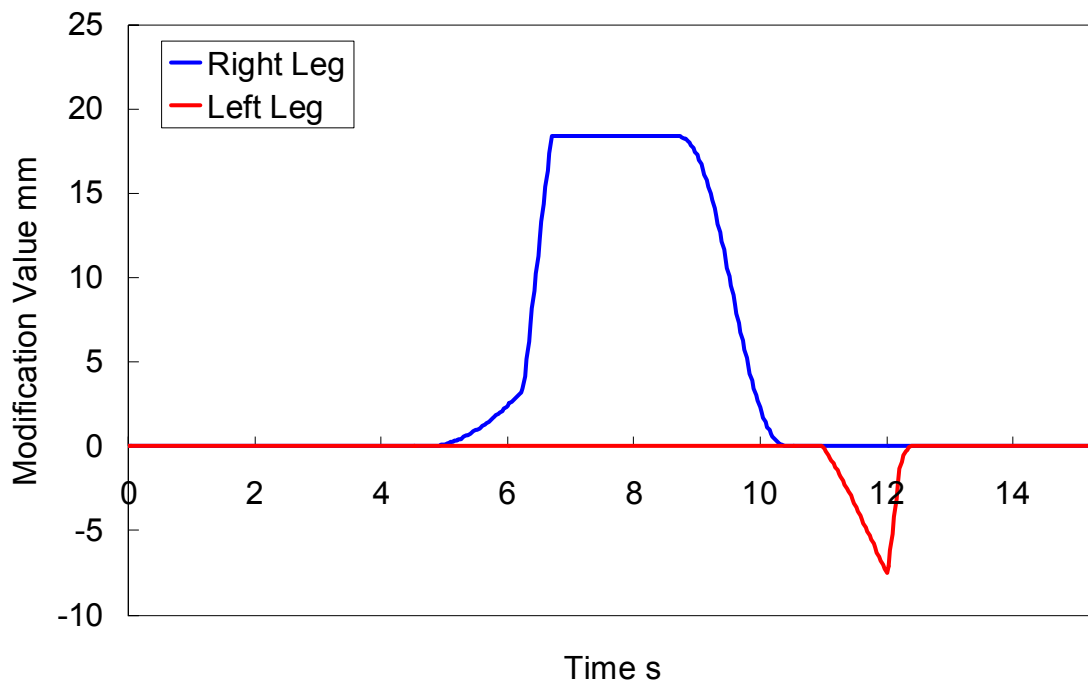


Figure 3.22 Modification value of the z axis in ascending a stair with a rise of 130 mm.

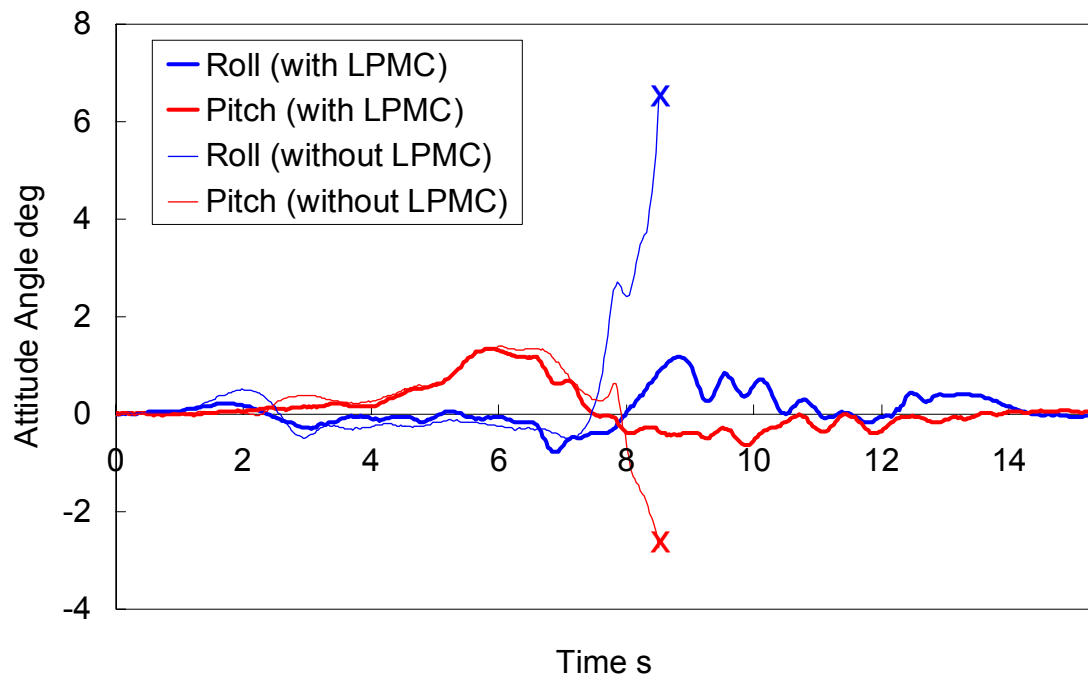


Figure 3.23 Attitude angle in ascending a stair with a rise of 130 mm.



Figure 3.24 Walking experiment in ascending a stair. The preset stair height in the reference walking pattern is 150 mm, while the measured stair height is 170 mm. The walking cycle is 5.8 s/step.

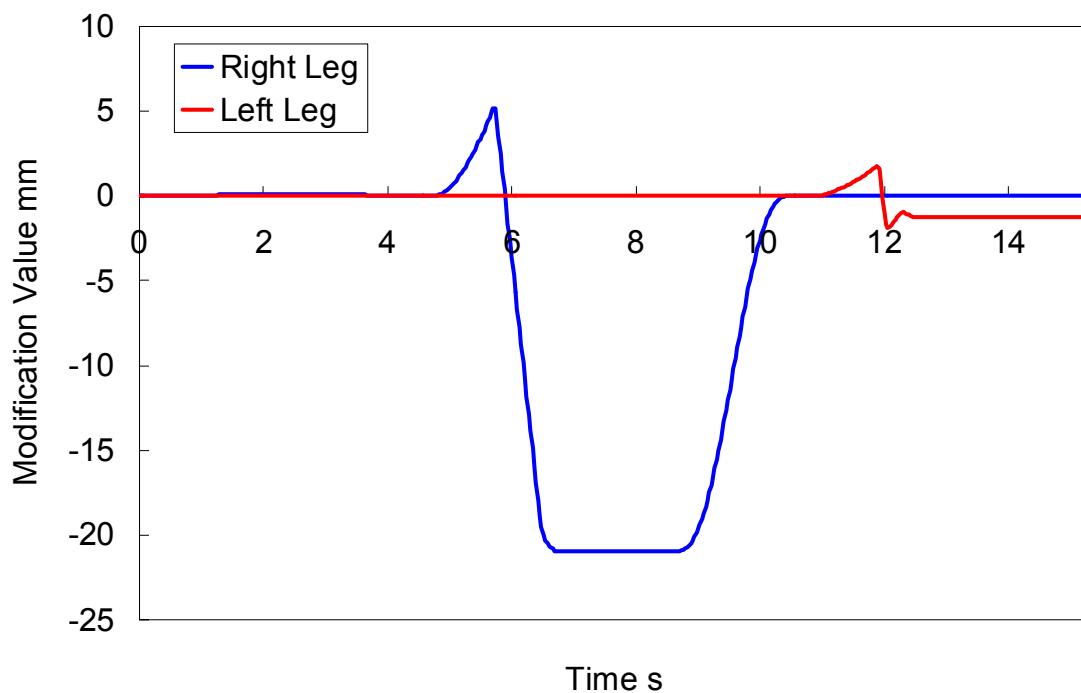


Figure 3.25 Modification value of the z axis in ascending a stair with a rise of 170 mm.

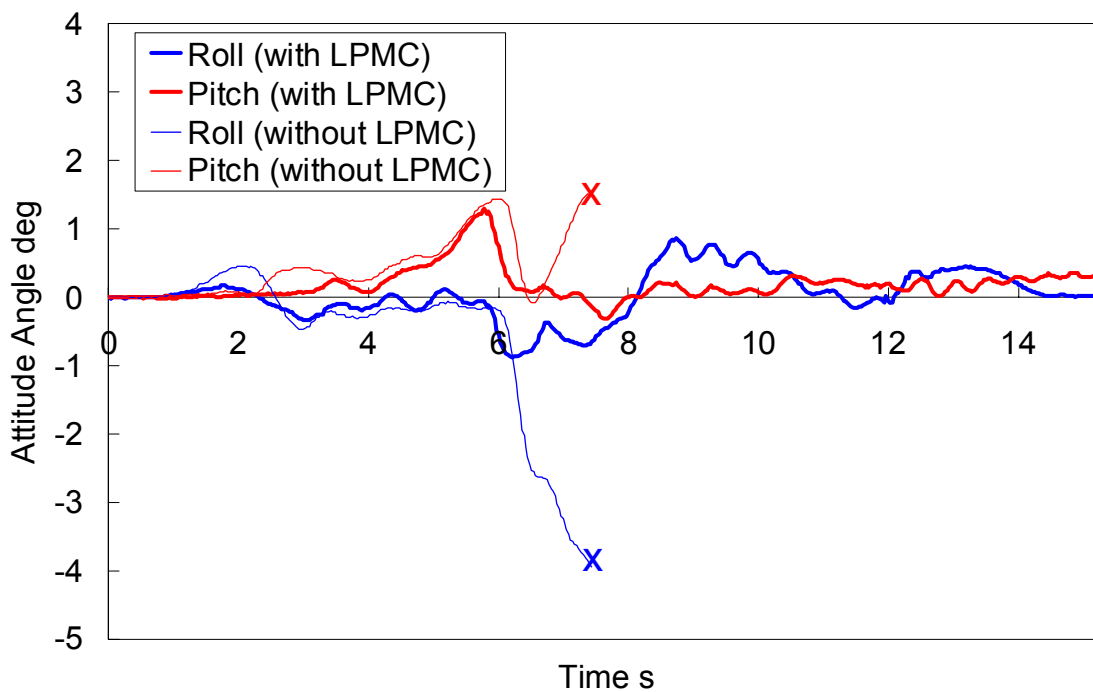


Figure 3.26 Attitude angle in ascending a stair with a rise of 170 mm.

3.4.6 屋外に存在する凹凸路面歩行実験

屋内に擬似的に作製した不整地で着地軌道修正制御の基本的な有効性が確認できたので、福岡ロボット開発・実証実験特区の屋外環境において、歩行実験を行った。実験としては、約 3 deg の傾斜路面を下り、高さ 5 mm の点字ブロックを乗り越えるように実験を行った。本評価実験では、足底に剛体平板を用いているため、剛体平板の足底においても支持多角形が大きく確保できる場所を選び実験を行った。歩幅は 200 mm/step、歩行周期は 2.0 s/step である。

歩行実験の様子を図 3.27 に示す。各写真の右端の図は着地軌道修正制御を用いない場合の連続写真である。路面に敷設されているレンガの凹凸を剛体平板の足底中心付近で踏むような場所では、支持多角形が大きく確保されず安定した歩行が実現されなかったが、剛体平板の足底においても大きな支持多角形が確保されるような場所においては、着地軌道修正制御のみを用いることによって安定した歩行が実現された。

このときの ZMP 軌道と姿勢角の推移のグラフを図 3.28、図 3.29 に示す。ZMP 軌道からは実測 ZMP が目標 ZMP に追従していることが見て取れるが、姿勢角のデータを見ると歩行開始時と終了時で約 1 deg の偏差が生じていることが分かる。着地軌道修正制御だけでは姿勢角偏差を修正することができないため、より長時間歩行させた場合、この姿勢角偏差が大きくなり、最終的には転倒することが予想される。

次に、歩行周期を短くし、歩幅 200 mm/step、歩行周期 1.0 s/step で同様の場所で歩行実験を行った。しかし、歩行の途中で姿勢角の偏差が大きくなり、転倒してしまった。この歩行実験の様子を図 3.30 に示す。

この原因として考えられるのが、歩行周期が短くなると路面に対して足部を振り下ろす速度も早くなり、コンプライアンス制御で大きなコンプライアンスを実現していても、着地衝撃が大きくなり、そのため姿勢の倒れも顕著になったと考えられる。歩行周期 1.0 s/step と歩行周期 2.0 s/step での着地衝撃のデータを図 3.31、図 3.32 にそれぞれ示す。これより、歩行周期 1.0 s/step の場合は、ロボットの自重を超える着地衝撃が発生していることが確認できる。また、その際の姿勢角のデータを図 3.33 に示す。図中の×印は、その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す。

より短い歩行周期での歩行を実現するためには、何らかの方法で着地衝撃自体を抑制するか、着地衝撃による姿勢角の偏差を抑える必要がある。



Figure 3.27 Walking experiment on public road in the Fukuoka Special Zones for Robot Development and Test.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

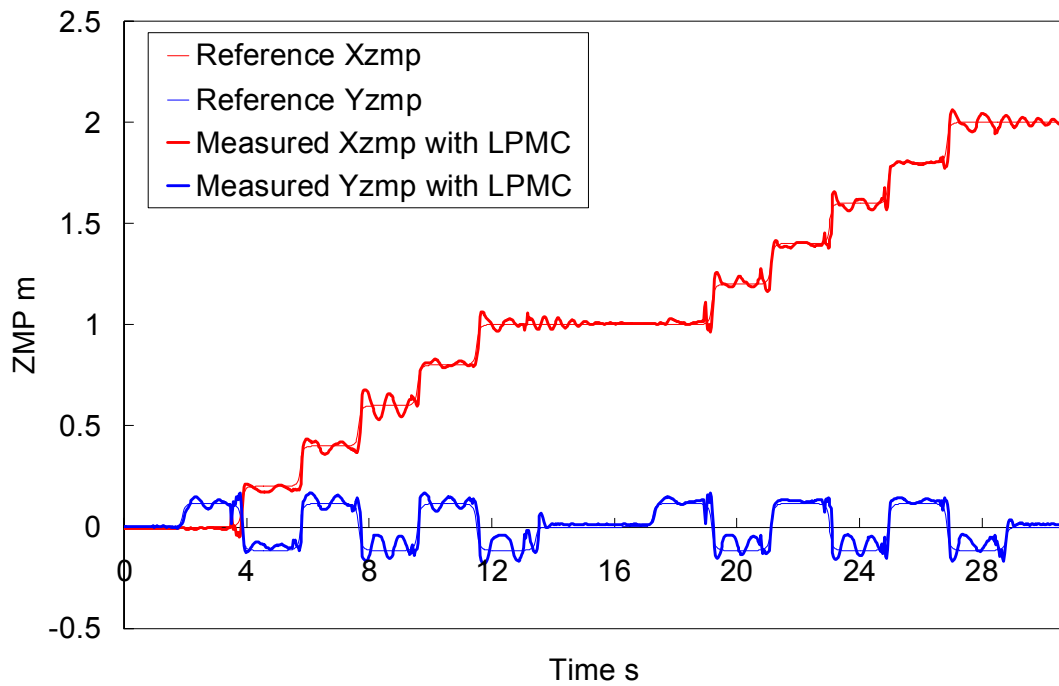


Figure 3.28 ZMP trajectories in walking on public road.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

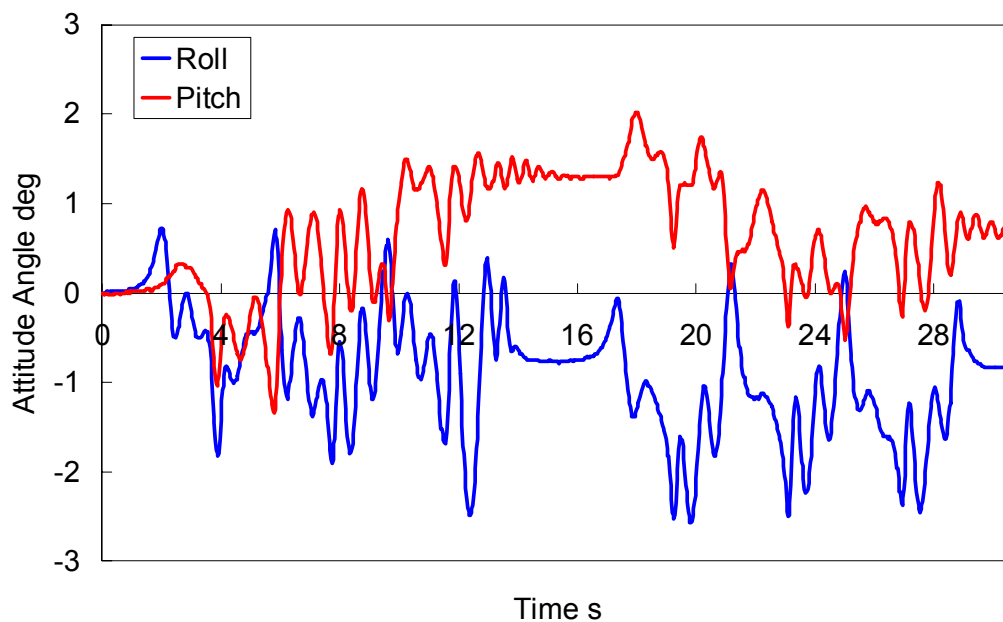


Figure 3.29 Attitude angle in walking on public road.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)



Figure 3.30 Walking experiment on public road in the Fukuoka Special Zones for Robot Development and Test.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

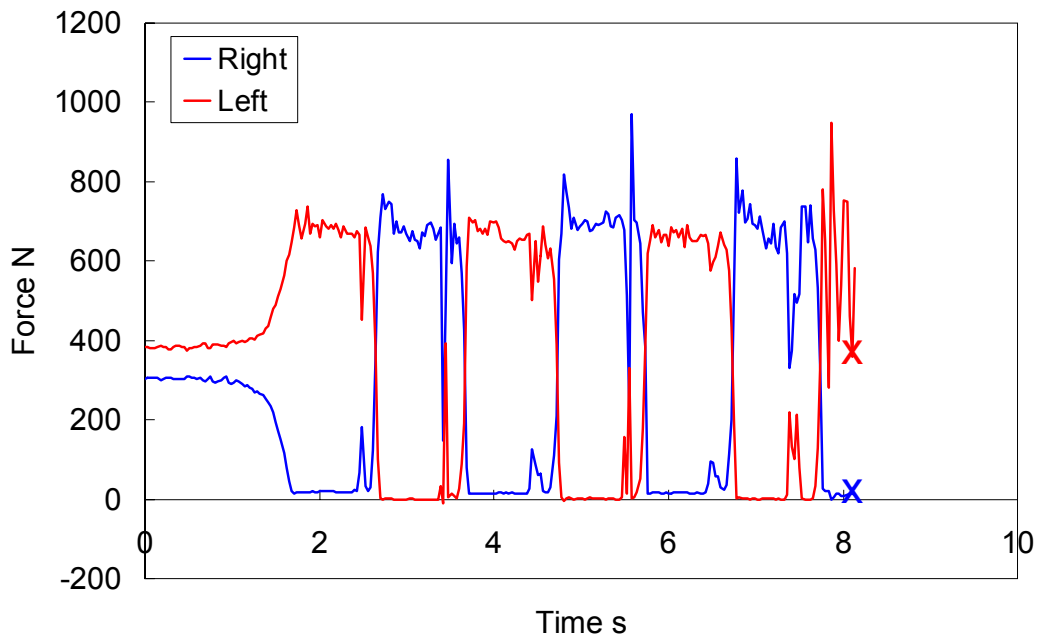


Figure 3.31 Foot-landing impact force with shorter walking cycle.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

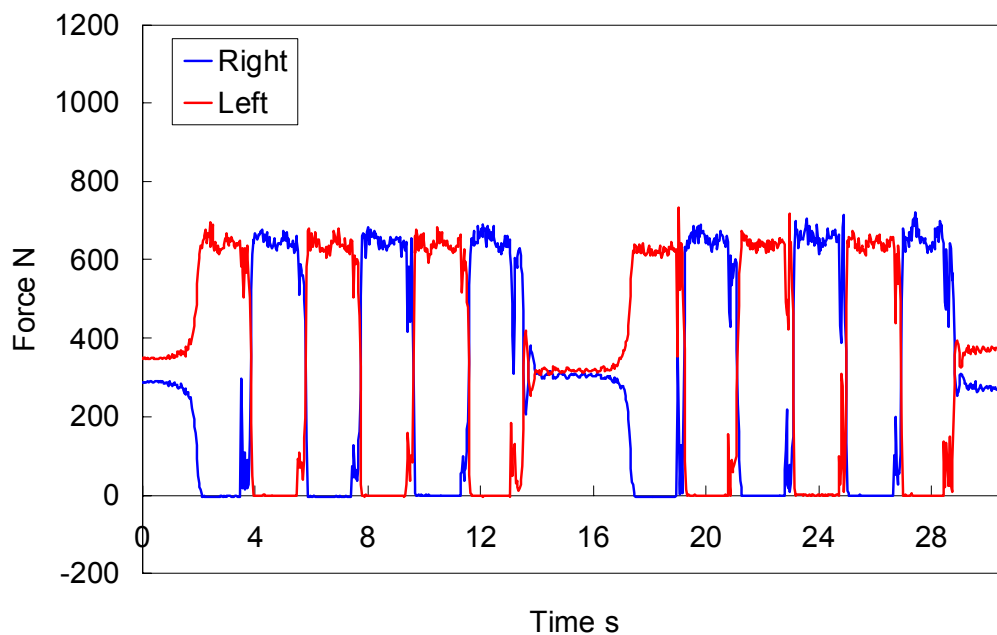


Figure 3.32 Foot-landing impact force with longer walking cycle.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

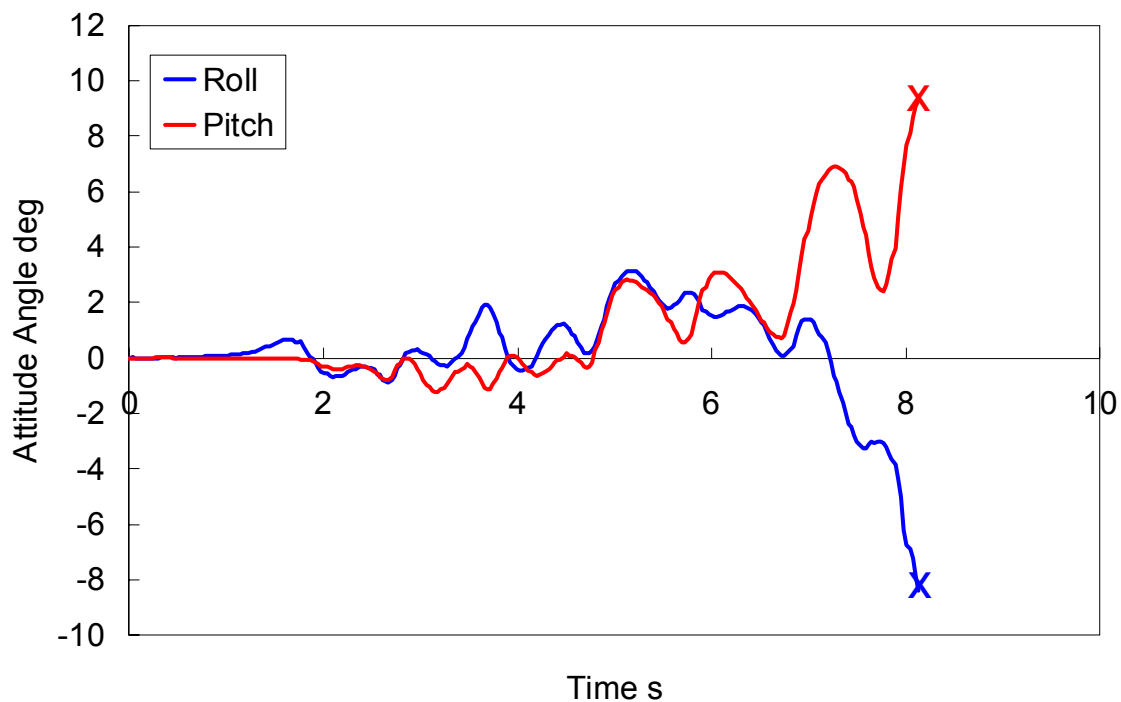


Figure 3.33 Attitude angle in walking on public road. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

3.4.7 考察

以上の実験結果より、開発した着地軌道修正制御により、Z 軸方向、Pitch 軸周り、Roll 軸周りに足部軌道の修正が必要な未知の不整路面での歩行に成功した。また、けあげ高さに偏差のある階段を昇降する際にも、本提案手法が有効であることが確認できた。本評価実験では、剛体平板の足底を用いていたため、支持多角形が大きく確保できない路面では安定した歩行を継続することができないが、大きな支持多角形が確保されれば、屋外に存在する不整路面においても歩行することに成功した。

しかしながら、本制御方式は遊脚後期に非線形コンプライアンス制御を導入し、路面形状検出時に着地衝撃緩和を抑えようとしているものの、歩行周期が短くなるにつれ、路面に対する足先の相対的な速度が上がるため、着地衝撃が大きくなる。着地軌道修正制御では、Roll 軸、Pitch 軸に関しては立脚期を通じて遊脚期最後のコンプライアンス移動量を保持し、次の遊脚期前半に基準歩行パターンに復帰するよう制御し

ているが、基準歩行パターンは腰部と足部が常に平行であるように設定されているため、着地衝撃により機械剛性不足によるたわみやモータの応答偏差などが大きくなると腰部と路面との平行が確保されなくなり、足部が路面に水平に着地することができず、姿勢角の誤差が累積されてしまう。

この問題を解決するためには、ロボット腰部にある姿勢角センサのデータをフィードバックする方法が容易に考えられるが、それでは着地軌道修正制御の力センサのみで実装可能という長所が薄れてしまうため、力センサから得られる情報のみで姿勢角を補償すべきである。

3.5 まとめ

本章では、未知の凹凸路面に適応可能な着地軌道修正制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。

本制御法は、足部に非線形コンプライアンス制御を適用し、歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより、大きな着地衝撃が生じる以前に路面の形状を検知し、この路面情報を元に遊脚の荷重が増大してくる以前に歩行パターンにおける着地軌道を変更し路面にならわせることで、未知の凸路面、凹路面や傾斜路面における歩行を可能とするものである。また、ジャイロを含め特別なセンサや機構を必要とせず、ZMP計測用の力センサのみを用いて実装が可能である。

この制御法を、人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RII を用いた実験により評価したところ、20 mm の凹凸のある未知の不整路面での歩行に成功した。さらに、階段のけあげ高さの偏差に対しても適応可能であることが確認できた。

図 3.34 に着地軌道修正制御を用いた場合の不整地適応能力を図示した。図中緑色の範囲が着地軌道修正制御を実装することにより実現できた領域であり、路面との接地面積が大きく確保されれば、高さ 20 mm までの凹凸や、約 3 deg の傾斜路面に適応可能である。

しかし、本制御法は機械剛性不足によるたわみやモータの応答偏差などにより腰部と路面との平行が確保されない場合、足部が路面に水平に着地することができず、姿勢角の誤差が累積されるという欠点がある。この問題点に関する改善策の提案と評価については、次章以降に報告する。

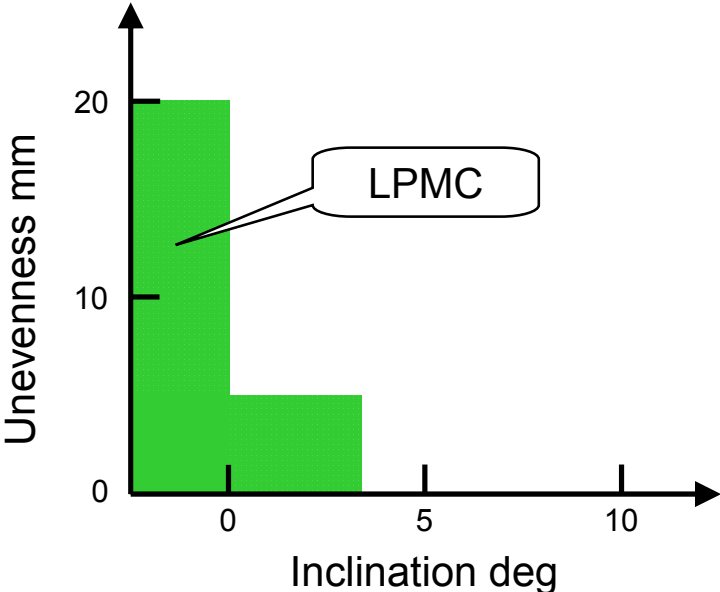


Figure 3.34 Performance of landing pattern modification control (LPMC).

第4章 推定姿勢補償制御法の開発

- 4.1 はじめに
- 4.2 推定姿勢補償制御法
- 4.3 実験方法
- 4.4 評価実験と考察
- 4.5 まとめ

4.1 はじめに

第3章では、未知の凹凸路面に適応可能な着地軌道修正制御法の開発と、その評価実験と考察について述べた。

着地軌道修正制御法では、Roll 軸、Pitch 軸に関しては立脚期を通じて遊脚期最後のコンプライアンス移動量を保持し、次の遊脚期前半に基準歩行パターンに復帰するよう制御している。しかし、基準歩行パターンは腰部と足部が常に平行であるように設定されているため、機械的なたわみやモータの応答偏差などにより腰部と路面との平行が確保されない場合、足部が路面に水平に着地することができず、姿勢角の誤差が累積されるという問題点がある（図 4.1）。

この問題を解決するためには、ロボット腰部にある姿勢角センサのデータをフィードバックする方法が容易に考えられるが、それでは着地軌道修正制御の力センサのみで実装可能という長所が薄れてしまうため、力センサから得られる情報のみで姿勢角を推定し補償するべきである。

そこで、以下の4点を本章の研究目的とした。

- 姿勢補償制御は ZMP 計測用の力センサのみで実装可能であること。
- 短い歩行周期（1.0 s/step）で屋外不整地での歩行を実現すること。
- 10 deg（18 %）の勾配のある傾斜路面において安定した歩行を実現すること。
- セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合し、20 mm の凹凸と 10 deg（18 %）の勾配が混在した路面において安定した歩行を実現すること。

これらについてその制御法と評価実験、考察について述べる。

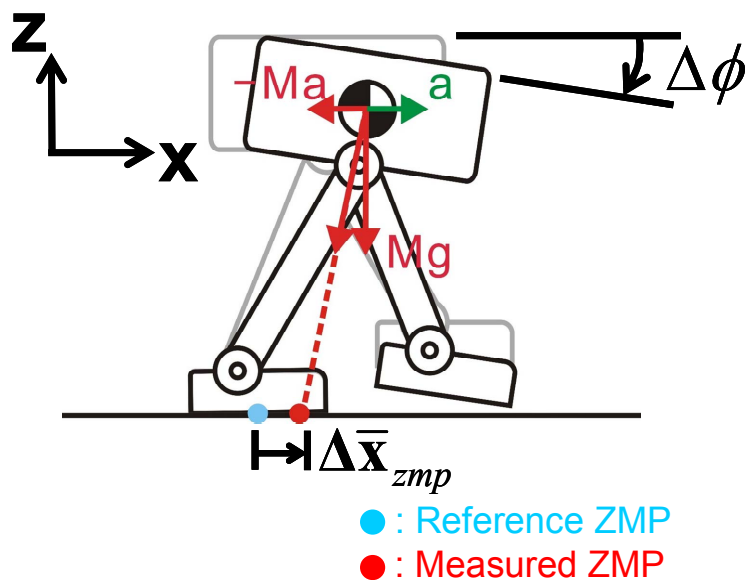


Figure 4.1 Error of waist orientation is accumulated by employing only the landing pattern modification method.

4.2 推定姿勢補償制御法

図 4.2 に着地軌道修正制御のみを用いて平坦路面を前進歩行 (歩行周期: 2.0 s/step, 歩幅: 100 mm/step) したときの姿勢角と ZMP 偏差を示す. この図より, 姿勢角と ZMP 偏差の間には相関関係があることがわかり, ZMP 偏差を 0 に近づけると姿勢角の偏差もある程度抑えられると考えられる. しかし, ZMP 偏差を即時に 0 にすると不安定になるため, ZMP 偏差の高周波成分を取り除くために, ZMP 偏差をある設定した期間積分し, その値に応じて姿勢角を修正することとした (図 4.3). 姿勢角は次式を用いて推定される.

$$\Delta\theta = K \cdot \int \Delta\bar{x}_{zmp} dt \quad (4.1)$$

推定姿勢補償制御のタイムチャートを図 4.4 に示す. 一定時間毎に姿勢角を式(4.1)により推定し, その値を目標値として次式の 5 次関数を用いて姿勢角の変更量を算出する.

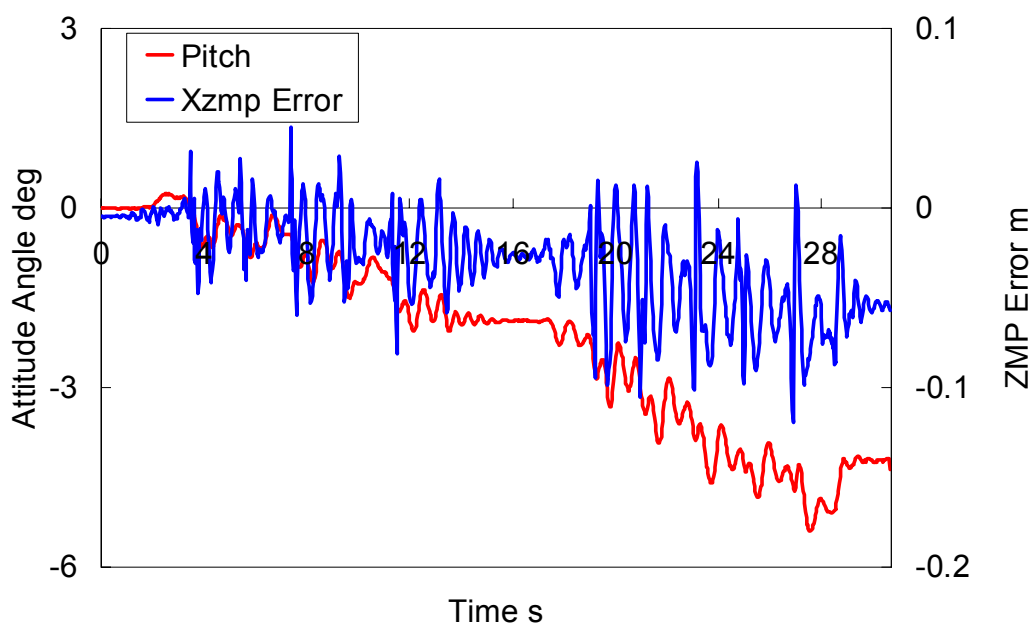


Figure 4.2 Relationship between ZMP error and attitude angle by employing only the landing pattern modification method.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 100 mm/step)

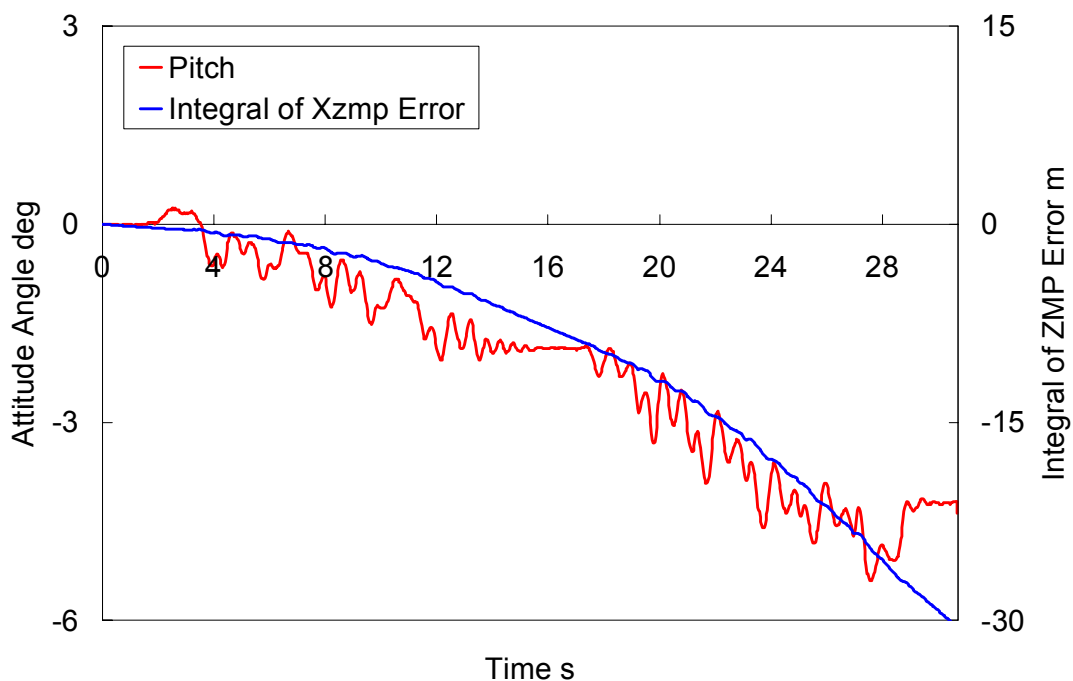


Figure 4.3 Relationship between integral of ZMP error and attitude angle.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 100 mm/step)

$$\Delta\theta' = \Delta\theta \left(\frac{6t^5 - 15T_{\text{modif}}t^4 + 10T_{\text{modif}}^2t^3}{T_{\text{modif}}^5} \right) \quad (4.2)$$

姿勢角の修正期間中も ZMP 偏差を積分し続けるが、長時間積分すると姿勢角の実測値と推定値の積分誤差が大きくなるため、ZMP 偏差をある規定時間 (Holding Period) 積分したら積分値をリセット ($\Delta\theta = 0$) する。

着地軌道修正制御は姿勢角の誤差が累積されるという欠点があるが、急激な姿勢角の変化は起こらない。そのため、ZMP 偏差から姿勢角を推定する際に、着地衝撃などによる ZMP 偏差の高周波成分を除去するという意味では、積分時間を長く取ることが好ましい。しかし、人間搭乗時などの重量物積載時は構造部材のたわみが大きくなり、それに伴い姿勢角の変化も大きくなるため、約 200 msec 毎に ZMP 偏差の積分値に応じて姿勢角を修正し、1 歩毎に積分値をリセットしている。姿勢角の修正期間 T_{modif} についても、約 200 msec に設定している。また、ゲイン \mathbf{K} に関しては、始めは小さい値に設定し、歩行実験を通して大きな値に変えていき、姿勢角の修正によって姿勢角が発散しない程度の値に設定している。

単脚支持期は立脚側の足部の姿勢のみを修正し、両脚支持期は両足部の姿勢を修正する。その際の回転中心は腰座標原点の路面上への投影点である。最終的に足先位置・姿勢の目標値 $\bar{\mathbf{x}}_f$ が求められ、この値から逆運動学計算により各リンク長さの目標値 $\mathbf{l}_{\text{final}}$ を算出し、各アクチュエータ制御部に出力している。推定姿勢補償制御のシステム構成図を図 4.5 に、姿勢角を修正する際のイメージ図を図 4.6 にそれぞれ示す。

考案した推定姿勢補償制御は ZMP 偏差を積分しているため、急激な姿勢角の変化には対応できない。しかし、着地軌道修正制御は遊脚が大きな着地衝撃を受けることなく路面にならうことができるため、他の歩行安定化制御と比べると急激な姿勢角の変化は生じない。そのため、2 つの制御法を統合することによりお互いの欠点を打ち消すことができる。

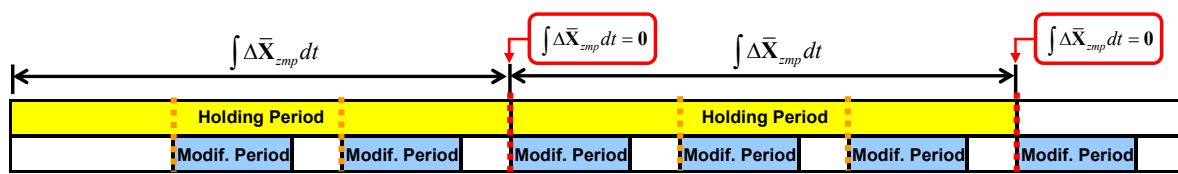


Figure 4.4 Timing chart of predictive attitude compensation control.

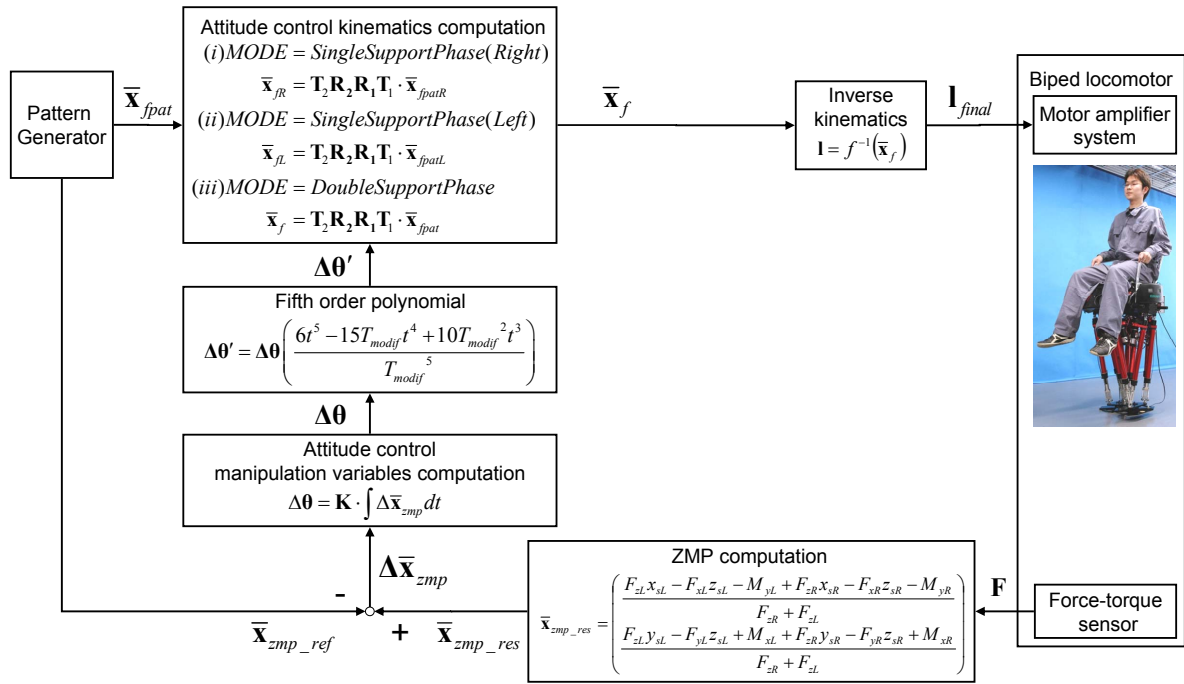


Figure 4.5 Block diagram of predictive attitude compensation control.

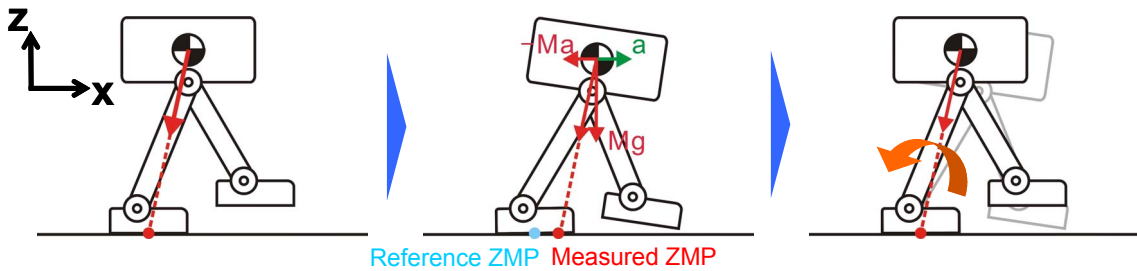


Figure 4.6 Outline of predictive attitude compensation control.

4.3 実験方法

開発した制御則の評価のために、人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIII (Waseda Leg - No.16 Refined III) [125]に着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法を実装した。まずは制御単体での有効性を評価するため、通常の剛体平板の足底を WL-16RIII に装着し、歩行実験を行う。しかし、それでは傾斜と凹凸の混在したような路面では大きな支持多角形が確保されず歩行が困難になると考えられるので、足部をセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R に付け替えた場合においても実験を行う。

安定した歩行の実現を目標とする路面は以下の通りである。

- (i) 屋外に存在する不整路面
- (ii) 傾斜 10 deg の不整路面
- (iii) 20 mm の凹凸と傾斜 10 deg の混在する不整路面

これらの不整路面に適応可能かどうか確認するために、それぞれ下記の通り評価実験を行う。

- (i) 着地軌道修正制御のみでは姿勢角の倒れが顕著になり、屋外の不整地において短い歩行周期（1.0 s/step）での歩行が実現できなかったため、開発した推定姿勢補償制御と統合することによる屋外不整地での歩行能力の評価
- (ii) 着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を統合し、屋外の傾斜約 10 deg の路面での歩行能力の評価
- (iii) 着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を統合し、さらにセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R をロボットの足部に装着し、屋外の 20 mm の凹凸と傾斜 10 deg の混在する路面での歩行能力の評価

4.4 評価実験と考察

開発した推定姿勢補償制御法と前章までに開発した着地軌道修正制御法とセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を用いて、前節で述べた評価実験を行った。これらについて以下に述べる。

4.4.1 屋外に存在する凹凸路面歩行実験

まず、3.4.6 節の着地軌道修正制御のみのときと同様、約 3 deg の傾斜路面を下り、高さ 5 mm の点字ブロックを乗り越えるように実験を行った。着地軌道修正制御のみでは着地衝撃による姿勢角の偏差が原因で短い歩行周期での歩行に成功しなかったが、推定姿勢補償制御と併用することにより、歩行周期 1.0 s/step、歩幅 200 mm/step での前進歩行に成功した（図 4.7）。

図 4.8 に姿勢角の推移を示すが、着地軌道修正制御のみの場合は姿勢角の偏差が累積し転倒してしまっていたが、推定姿勢補償制御を併用することにより、ある程度の姿勢の倒れが抑えられていることが分かる。また、図 4.9 に Pitch 軸周りのコンプライアンス移動量を示すが、これより路面の傾斜と同じく、約 3.5 deg のコンプライアンス移動量が生じていることが分かる。

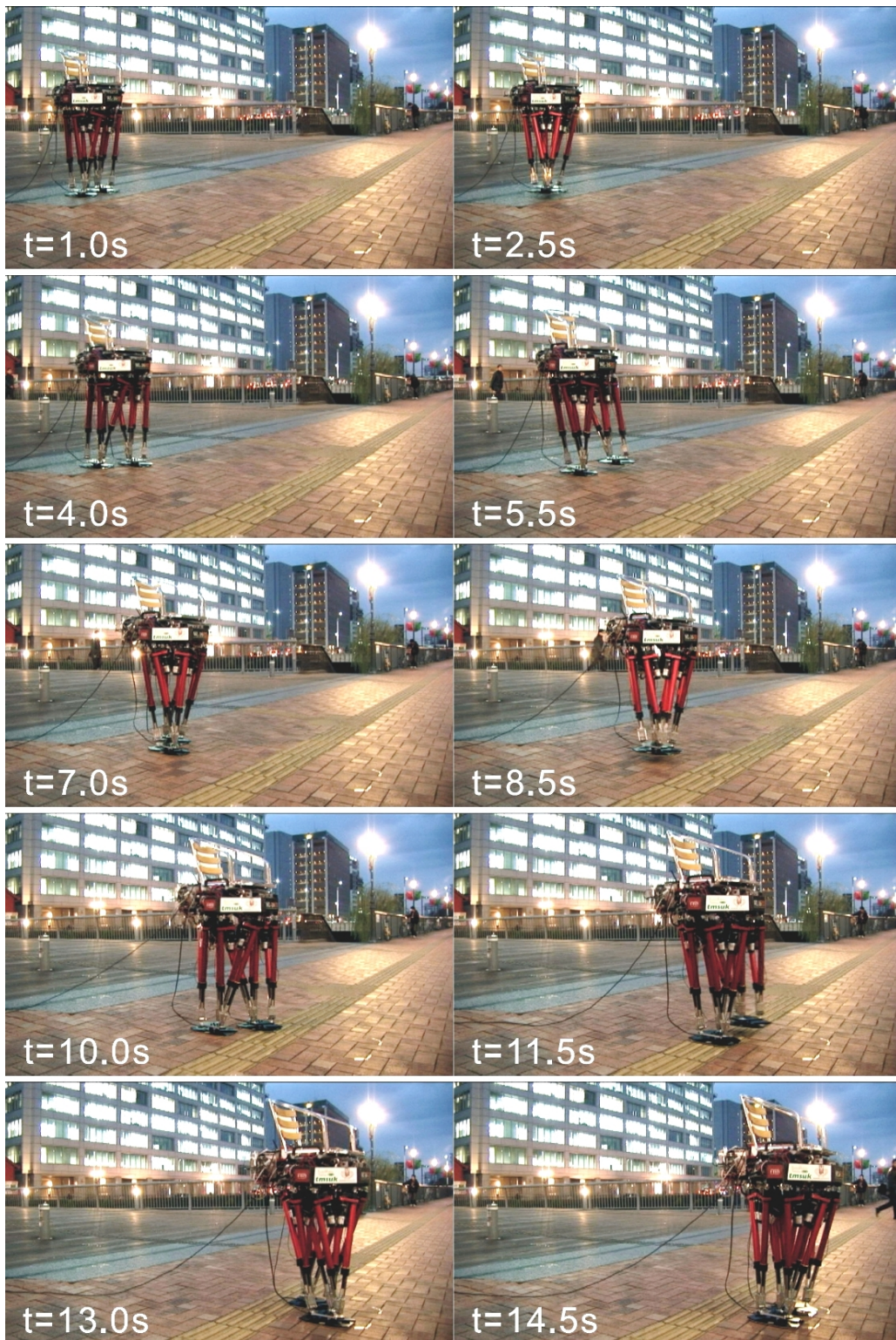


Figure 4.7 Walking experiment on the public road in the Fukuoka Special Zones for Robot Development and Test.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

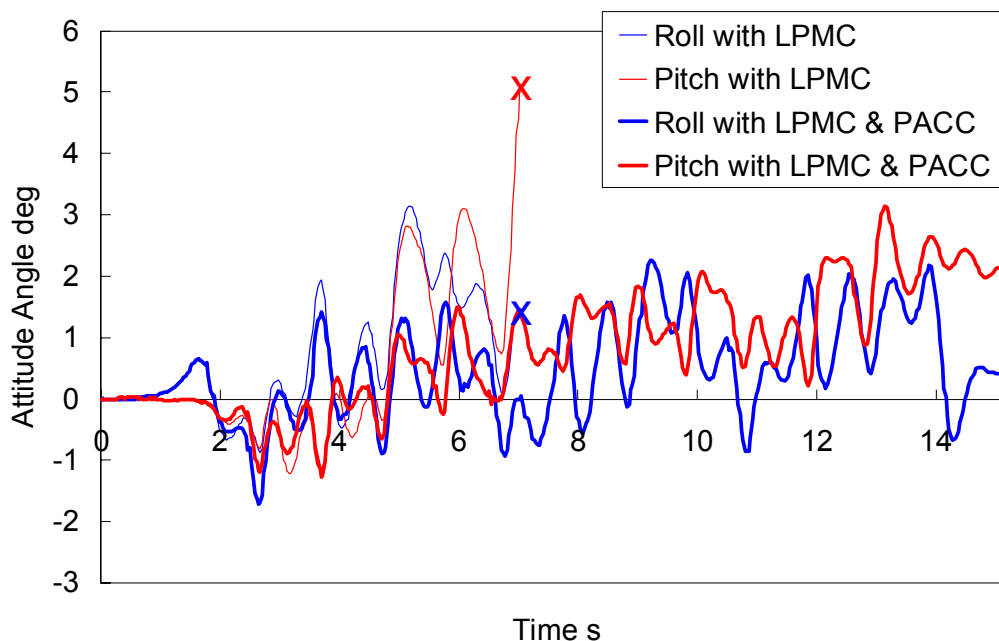


Figure 4.8 Attitude angle in walking on the public road. The robot fell at X.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

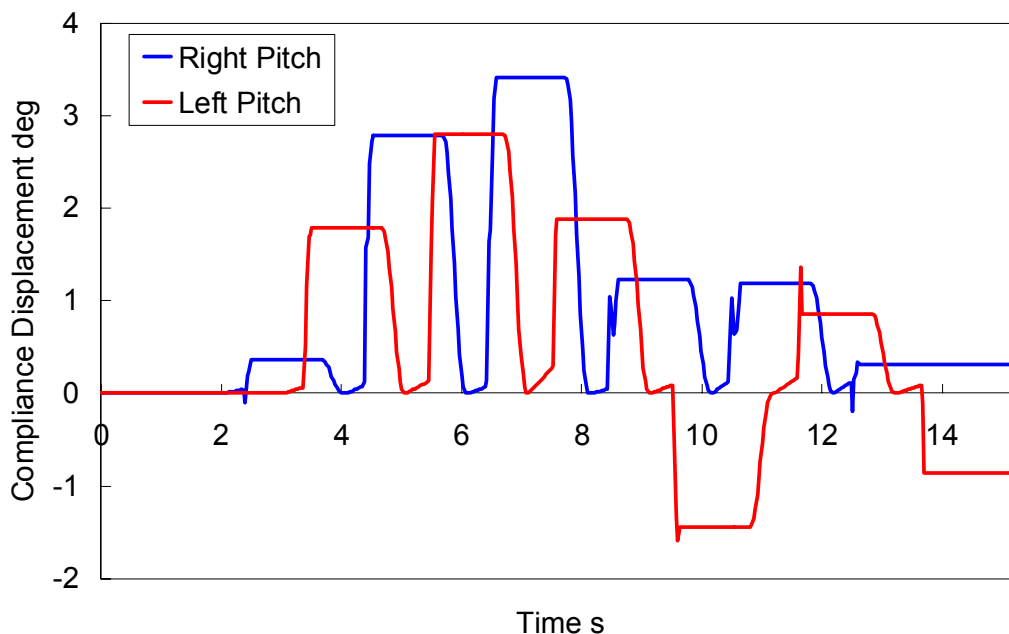


Figure 4.9 Pitch compliance displacement in walking on the public road.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm, inclination: 3 deg)

4.4.2 傾斜路面歩行実験

傾斜路面への適応度を評価するために傾斜約 10 deg の坂道での歩行実験も行った。このとき歩行周期 1.0 s/step では、あらかじめ作成している歩行パターンの遊脚後期の時間が短く、10 deg の傾斜に足部がならい切れないため、歩行周期 2.0 s/step で実験を行った。また、歩行実験を行った場所は比較的凹凸が小さく、剛体平板の足底でも大きな支持多角形が確保できたため、足部には通常の剛体平板のものを使用した。

歩行実験の様子を図 4.10 に示す。また、姿勢角推移と Pitch 軸周りのコンプライアンス移動量のグラフを図 4.11, 図 4.12 に示す。図 4.11 から姿勢角の倒れがある程度抑えられていることが分かり、図 4.12 から Pitch 軸周りの修正量が最大で 10 deg ほど発生していることが分かる。

4.4.3 凹凸と傾斜の混在する路面での歩行実験

最後に 20 mm の凹凸かつ傾斜 10 deg の混在する屋外の路面において、歩行実験を行った。路面の凹凸が大きくなると、剛体平板の足底では大きな支持多角形を確保することが難しい。そのため、ロボットの足部を剛体平板とセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の 2 通りに付け替えて歩行実験を行った。この際、どちらの場合も着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を用い、そのパラメータも同じ値である。

足部が剛体平板での歩行実験の様子を図 4.13 に、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を装着した際の歩行実験の様子を図 4.14 に示す。ZMP 軌道、姿勢角のデータを図 4.15, 図 4.16 に示すが、剛体平板の場合は、支持多角形が大きく確保されず、3 歩目で転倒してしまった。しかし、WS-1R を装着することにより、安定した歩行が実現された。このことより、足部機構で路面の細かい凹凸を吸収し、傾斜に関しては路面適応制御で適応できていることが分かる。

以上の実験結果より、着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を統合した実環境不整地歩行技術の有効性が確認された。

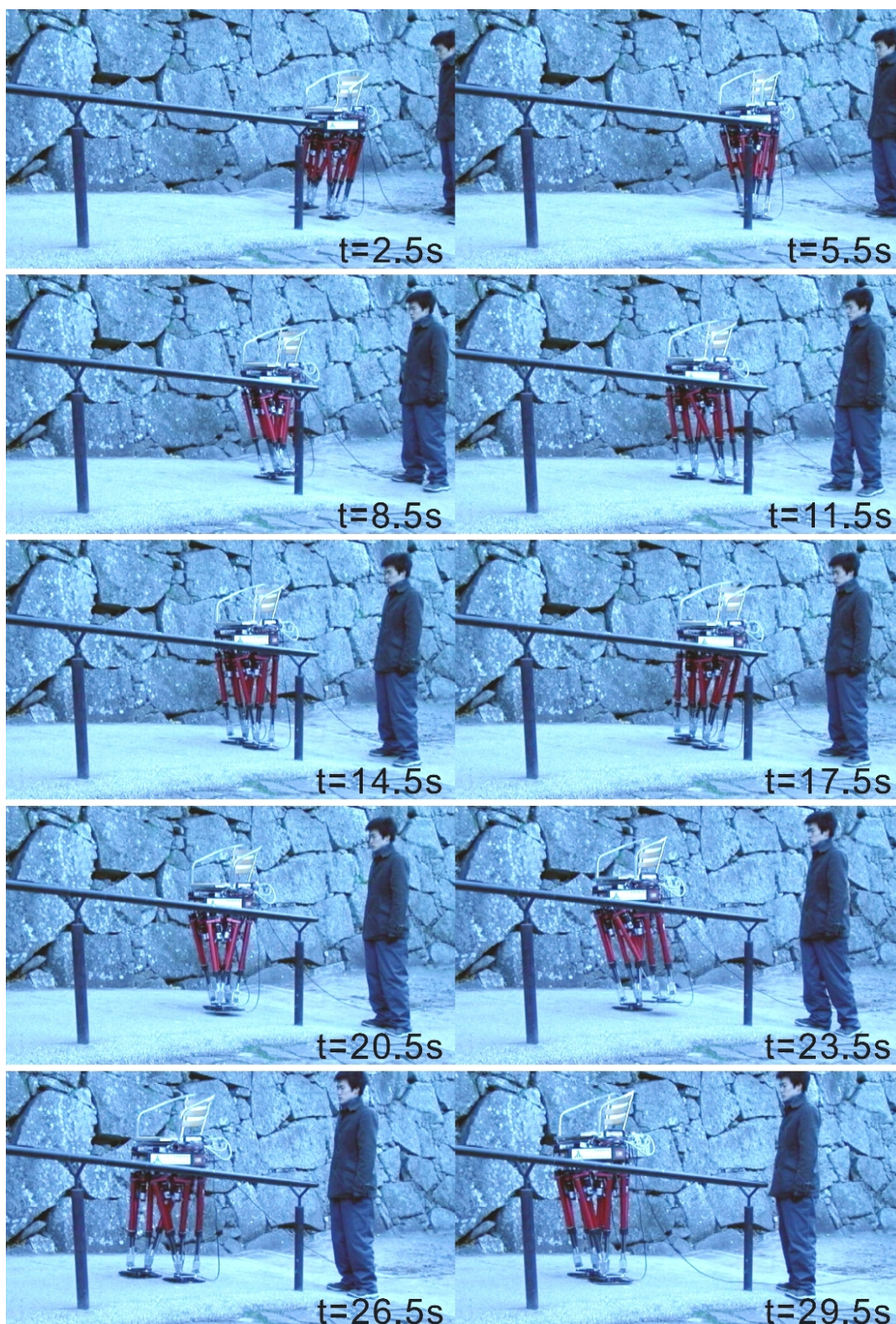


Figure 4.10 Walking experiment on 10 deg inclined plane.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 10 deg)

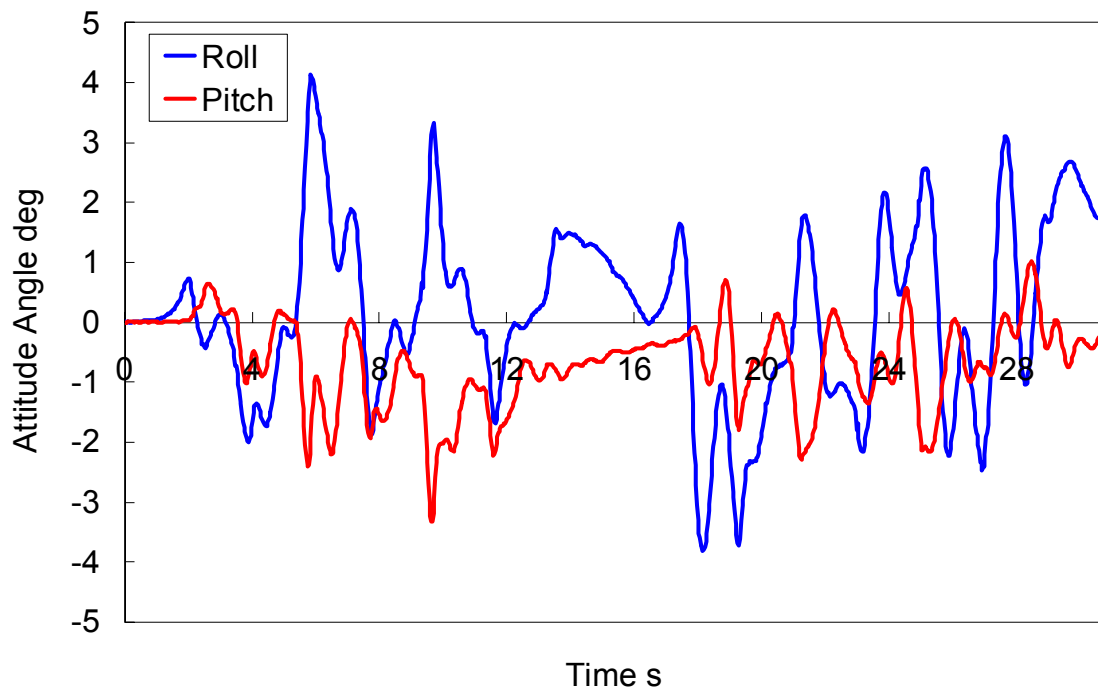


Figure 4.11 Attitude angle in walking on 10 deg inclined plane.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 10 deg)

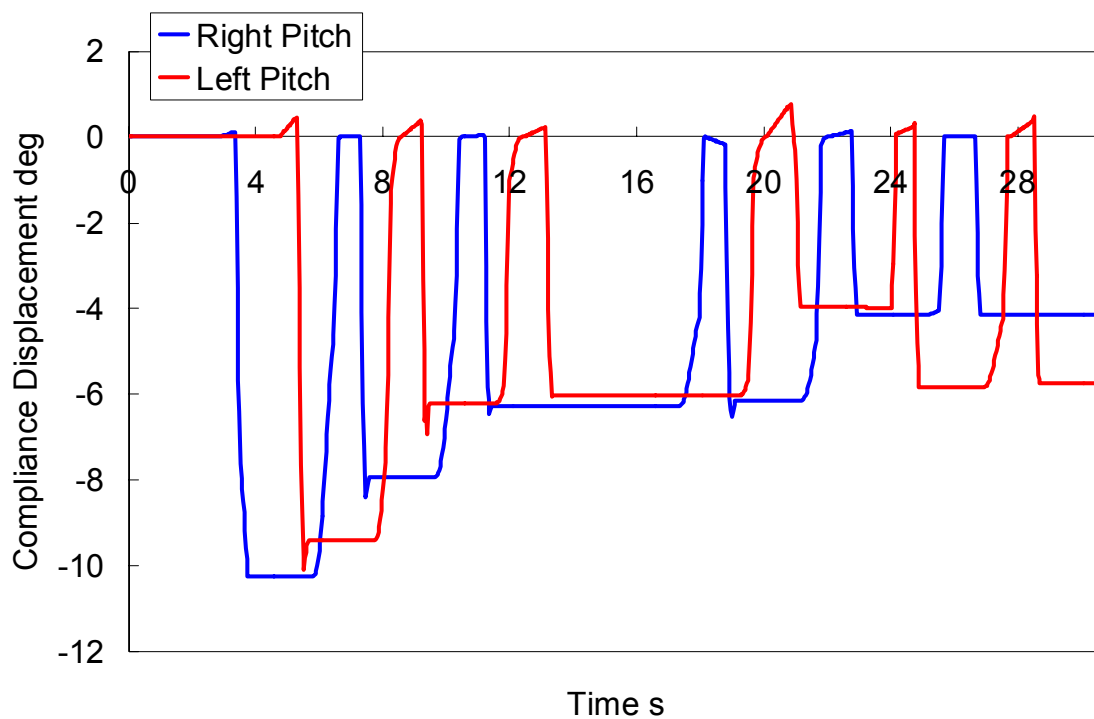


Figure 4.12 Pitch compliance displacement in walking on 10 deg inclined plane.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 10 deg)



Figure 4.13 Walking experiment on uneven terrain with 20 mm height and 10 deg inclination. The robot's feet are rigid, flat soles.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 10 deg)



Figure 4.14 Walking experiment on uneven terrain with 20 mm height and 10 deg inclination. The robot's feet are WS-1R adaptable to uneven terrain.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 10 deg)

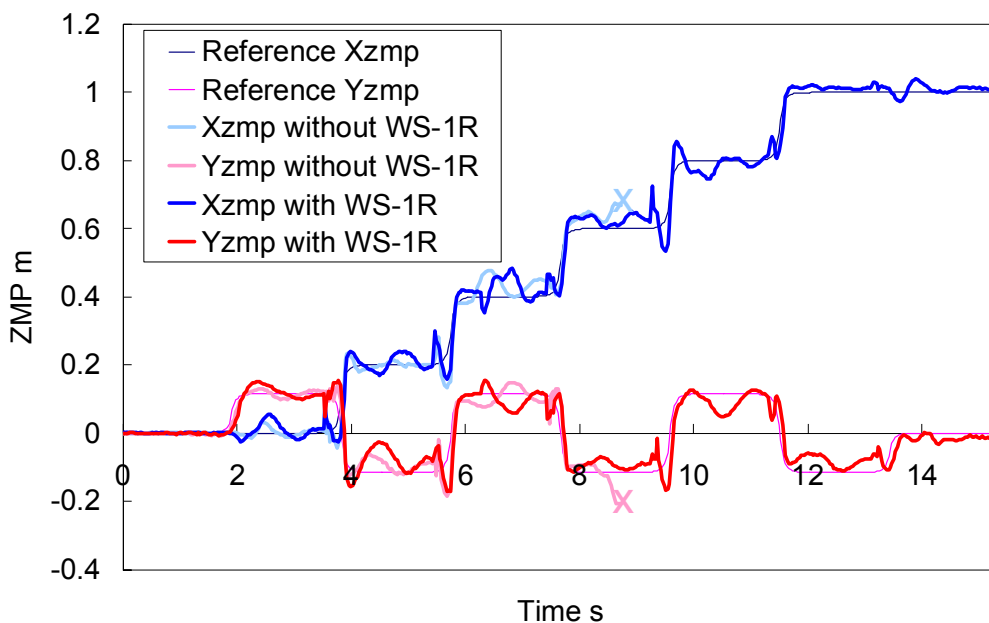


Figure 4.15 ZMP trajectories in walking on uneven terrain with 20 mm height and 10 deg inclination..
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 10 deg)

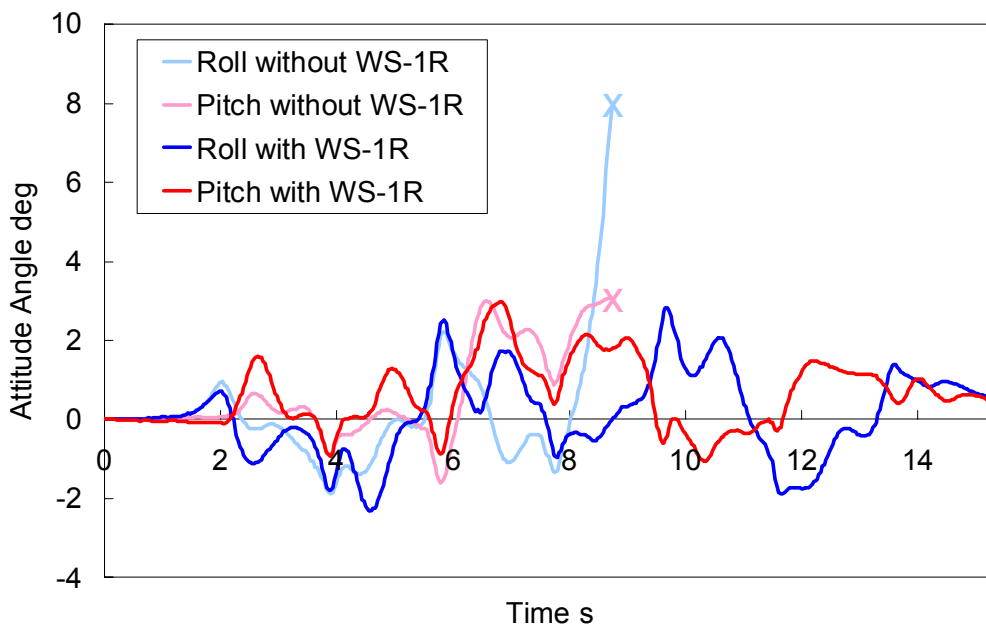


Figure 4.16 Attitude angle in walking on uneven terrain with 20 mm height and 10 deg inclination..
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 10 deg)

4.4.4 考察

以上の実験結果より、開発した着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御により、屋外に存在する不整路面において 1.0 s/step という短い歩行周期での歩行に成功した。また、傾斜約 10 deg の坂道での歩行にも成功した。さらに、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合することにより、剛体平板の足底では大きな支持多角形が確保できないような段差 20 mm と傾斜 10 deg の混在する路面においても安定した歩行に成功した。これは提案した手法が、実環境の不整地に有効であることを示すものと考えられる。

しかしながら、傾斜や凹凸が大きくなると、あらかじめ作成した歩行パターンの遊脚後期の時間内で足部が路面にならいきることができず、歩行周期を短くできないという問題がある。

そこで、視覚センサなどの非接触のセンサを搭載し、足部が路面に到達する前にある程度路面形状を把握し、ならいの予備動作をすることで、短い歩行周期の場合にも大きな傾斜や凹凸に適応できるようになると考えられる。 20 mm 程の凹凸であれば開発した実環境不整地歩行技術で吸収することが可能であるので、視覚センサと統合することにより、 20 mm 以上の凹凸がある路面についても歩行が可能になるであろう。

また、開発した足部機構や路面適応制御法は、脚接地面に変形を伴うような路面に対しては適応することができないので、このような路面での適応歩行を目指すには、他の解決策を考える必要がある。

4.5 まとめ

本章では、第3章において述べた着地軌道修正制御の欠点を補う推定姿勢補償制御の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。

着地軌道修正制御は ZMP 計測用の力センサのみで実装可能という長所があるため、通常は姿勢角センサの値をもとにロボットの姿勢を補償するが、本研究では力センサから得られるデータのみで姿勢角を推定し補償する方法を考案した。

着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIII に実装し歩行実験により評価したところ、傾斜約 10 deg での適応歩行が確認できた。また、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合することにより、段差 20 mm の凹凸と約 10 deg の傾斜の混在する路面においての安定歩行に成功し、開発した手法の有効性を確認した。本節で説明した実験以外にも多くの評価実験をしており、その

実験結果は付録 A を参照されたい。

図 4.17 に着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を用いた場合の不整地適応能力を図示した。図中緑色の範囲が両制御を実装することにより実現できた領域であり、路

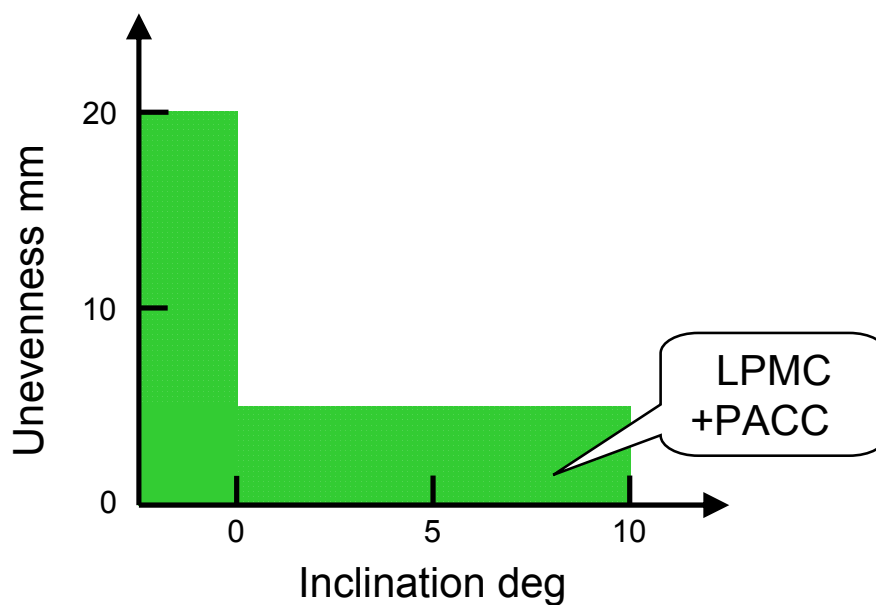


Figure 4.17 Performance of landing pattern modification control (LPMC) and predictive attitude compensation control (PACC).

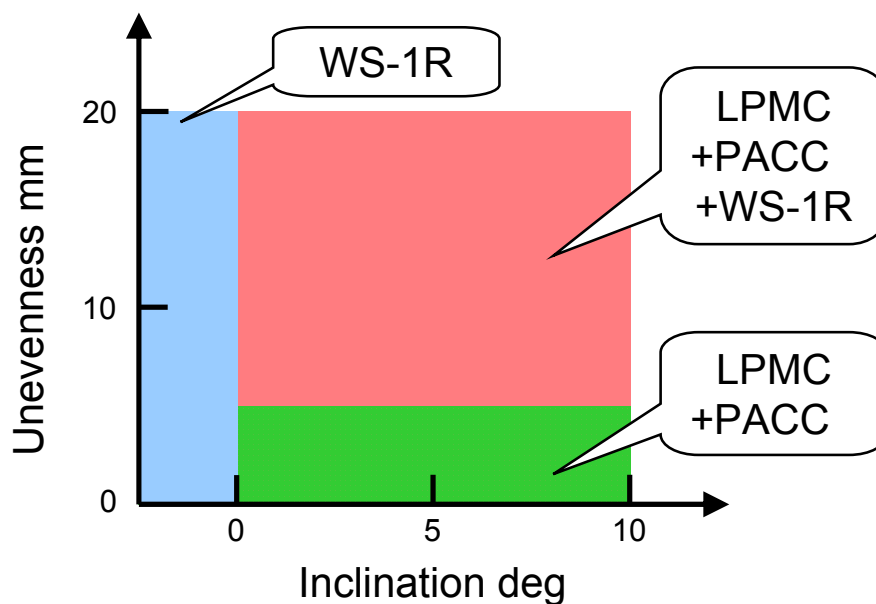


Figure 4.18 Performance of landing pattern modification control (LPMC), predictive attitude compensation control (PACC) and a new biped foot system adaptable to uneven terrain, WS-1R.

面との接地面積が大きく確保されれば、高さ 20 mm までの凹凸路面や、傾斜 10 deg までの傾斜路面をそれぞれ歩行することができる。また、図 4.18 には着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御、さらにセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を統合した際の不整地適応能力を図示した。これらすべてを統合することにより、20 mm までの凹凸と 10 deg までの傾斜の混在する路面にも適応可能になる。

第5章 能動車輪式足部機構 WS-2 の開発

- 5.1 はじめに
- 5.2 能動車輪式足部機構 WS-2
- 5.3 移動経路設定法
- 5.4 実験方法
- 5.5 評価実験と考察
- 5.6 まとめ

5.1 はじめに

第2章から第4章までは2足歩行という移動様式の不整路面における歩行能力向上に焦点を当ててきた。しかし、平坦路面においては無限回転式移動機構でも十分に移動することができ、2足歩行などの脚式移動機構に比べ高速に移動することができる。

そこで、脚式移動機構の不整路面適応能力と、無限回転式移動機構の平地での高速移動能力の長所を備えたハイブリッド式移動機構のロボットがこれまでに開発されてきている[27-42, 164-167]。それらの多くは無限回転式移動機構をベースにし、その上で階段や障害物をどのように乗り越えるかといった解決法を提案しているが、段差などを乗り越える場合でも常時安定状態を保つために機構の自由度が増え、機構が複雑になり、結果として高速な階段昇降が困難になっている。また、無限回転式移動機構をベースにした場合、移動面と離散的に接触することができない。

そこで脚式移動機構をベースにして、足先に車輪を追加するなどし、無限回転式移動機構の平坦路面での移動速度・移動効率の良さを取り入れたロボットも研究されてきている[30, 32-34, 164-167]。この中で2足での階段昇降が可能なものとしては、松本らの自立型脚車輪2足システム[32, 33, 166, 167]がある。しかし、これは脚先が車輪になっており、階段昇降時には倒立振り子と同じ状態になるため、外乱力が加わった場合、車輪が段差から滑落しやすいと考えられる。また、単脚支持期に路面との接触が線接地になるため、車輪モードでは走行できないような凹凸の大きい路面では安定した歩行が困難であると考えられる。

不整路面への適応を考えた場合、2足歩行という移動様式が最も優れているという考えのもと、2足歩行をベースにし、車輪走行の長所を付加できないかと考えた。

そこで本章では、以下の3点を研究目的とした。

- 2足歩行と車輪走行の切り換えが可能な車輪式足部機構を開発すること。
- 車輪走行時の移動経路設定法を開発すること。
- 路面の状況に応じて2足歩行と車輪走行の切り換えが可能であること。
- 2足歩行に比べエネルギー消費量の低減を図ること。

これらについてその制御法と評価実験、考察について述べる。

5.2 能動車輪式足部機構 WS-2

WS-2 (Waseda Shoes - No.2) は2足歩行と車輪走行とが切り換え可能な足部機構である。構成としては4点の接地点のうち、内側2点が通常の摩擦接地、外側前方がDCモータ駆動の能動車輪、そして外側後方は平面内で拘束を持たない3自由度の球状キャストになっている。足部外辺を中心軸に各足を外側に傾け、車輪とキャストのみが接地する状態にすることで2足歩行モードから車輪走行モードへの切り換えが可能である。

フレーム部分は汎用有限要素法解析システム COSMOS Works を利用し、高い剛性を保ちながらも軽量となるよう設計した。最終的に設計・製作した WS-2 の全体写真と組み立て図を図 5.1, 図 5.2 にそれぞれ示す。片足の重量は DC モータの重量 700 g を含み約 2500 g である。WS-2 の仕様を表 5.1 にまとめる。

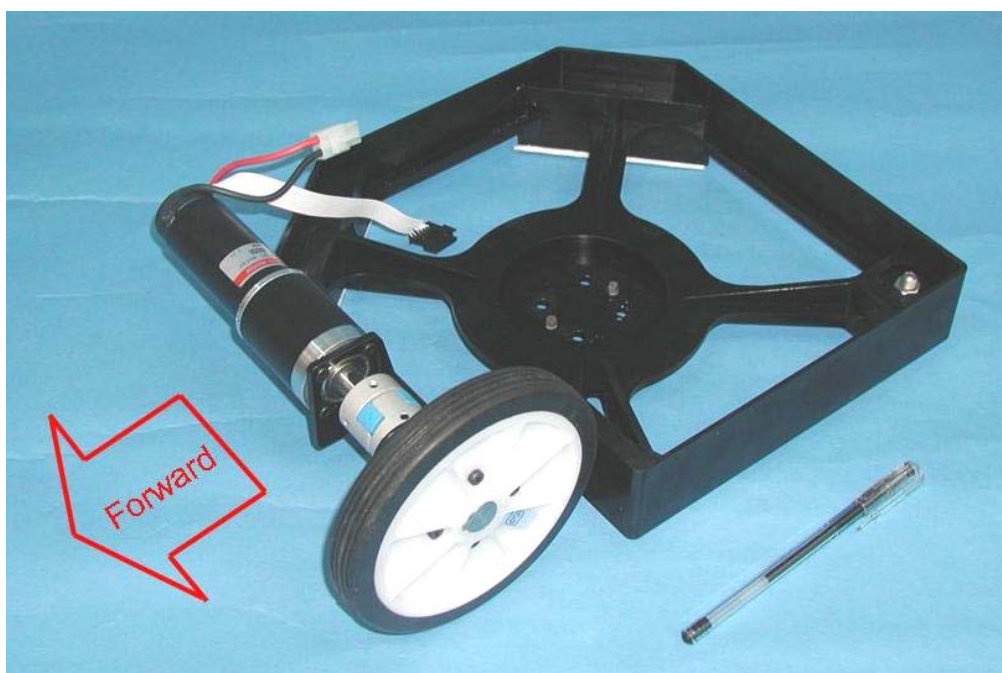


Figure 5.1 Photograph of WS-2.

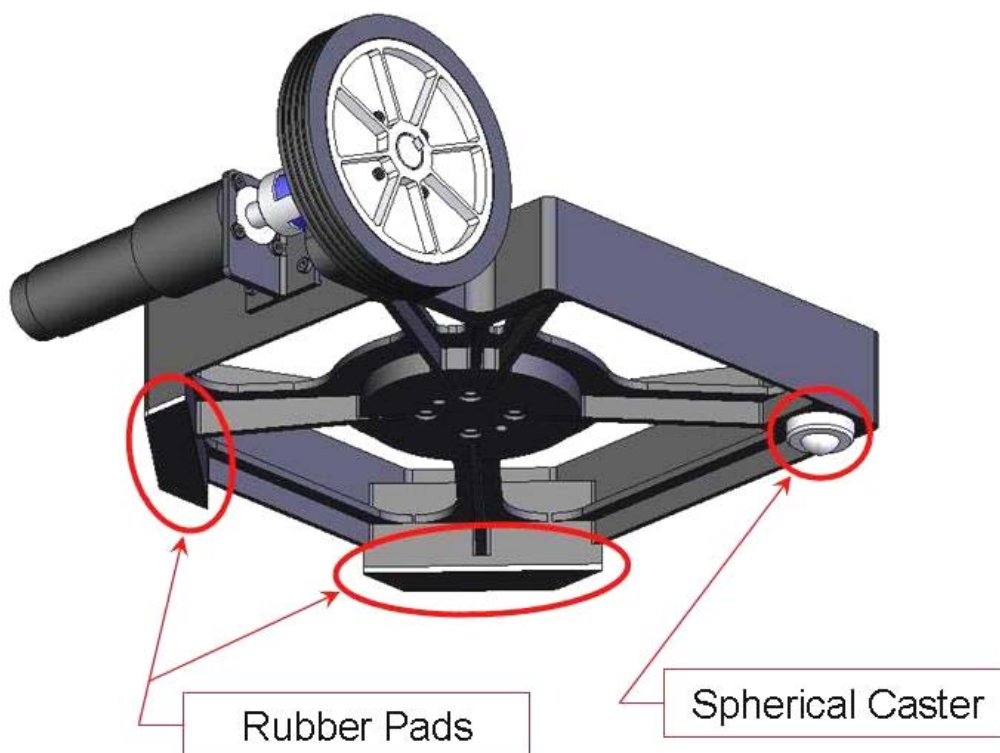


Figure 5.2 Assembly drawing of WS-2.

Table 5.1 Specifications of WS-2.

Size	260×350×60 mm
Weight	2500 g
Wheel Diameter	130 mm
DC Motor	90 W (Nominal Voltage 42 V)
Gear Reduction Ratio	26 : 1
Maximum Velocity	6.0 km/h

5.3 移動経路設定法

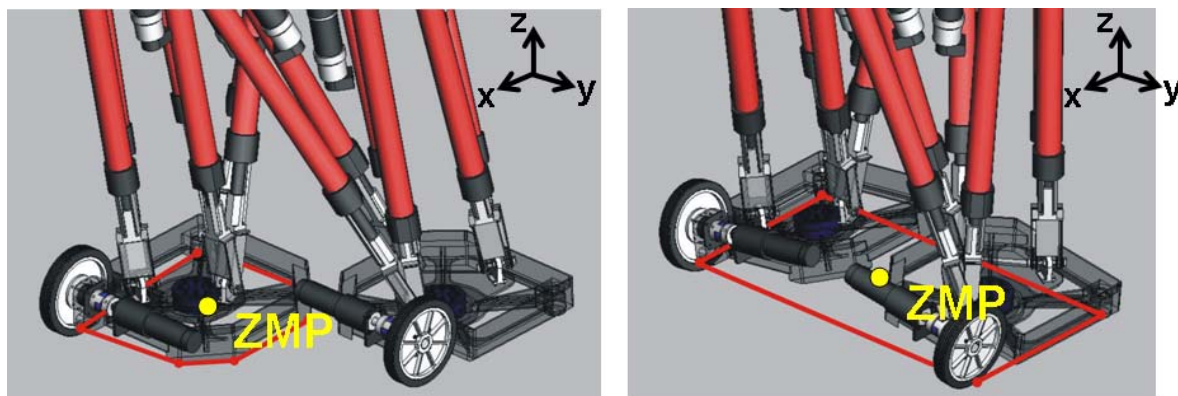
WS-2 を用いることの有利な点として、筆者の属する研究グループがこれまで研究してきた、2足ヒューマノイド・ロボットの ZMP 安定判別規範に基づく腰・体幹協調型 2 足歩行制御法[58, 106, 114]が車輪走行時においても適用できるという点が挙げられる。

WS-2 を 2 足歩行ロボットに装着した場合の歩行も、これまでに研究されてきた 2 足歩行の場合と同様に、足底の 4 つの接地点によって形成される支持多角形内の中心

付近に目標 ZMP が収まるように目標 ZMP 軌道を設定し、これより腰軌道を算出することで歩行が可能である。

車輪走行時においても、車輪とキャスタによって安定領域を確保しながら移動するので、これまでに蓄積されてきた2足歩行に関する技術（モーメント補償軌道算出法 [163]）を応用することで安定した車輪走行が可能になる（図 5.3）。

そこで新たに付け加えるべきものは移動経路設定法だけである。移動経路を決定し、



(a) Biped walking in single support phase.

(b) Wheeled locomotion.

Figure 5.3 Moment compensatory method.

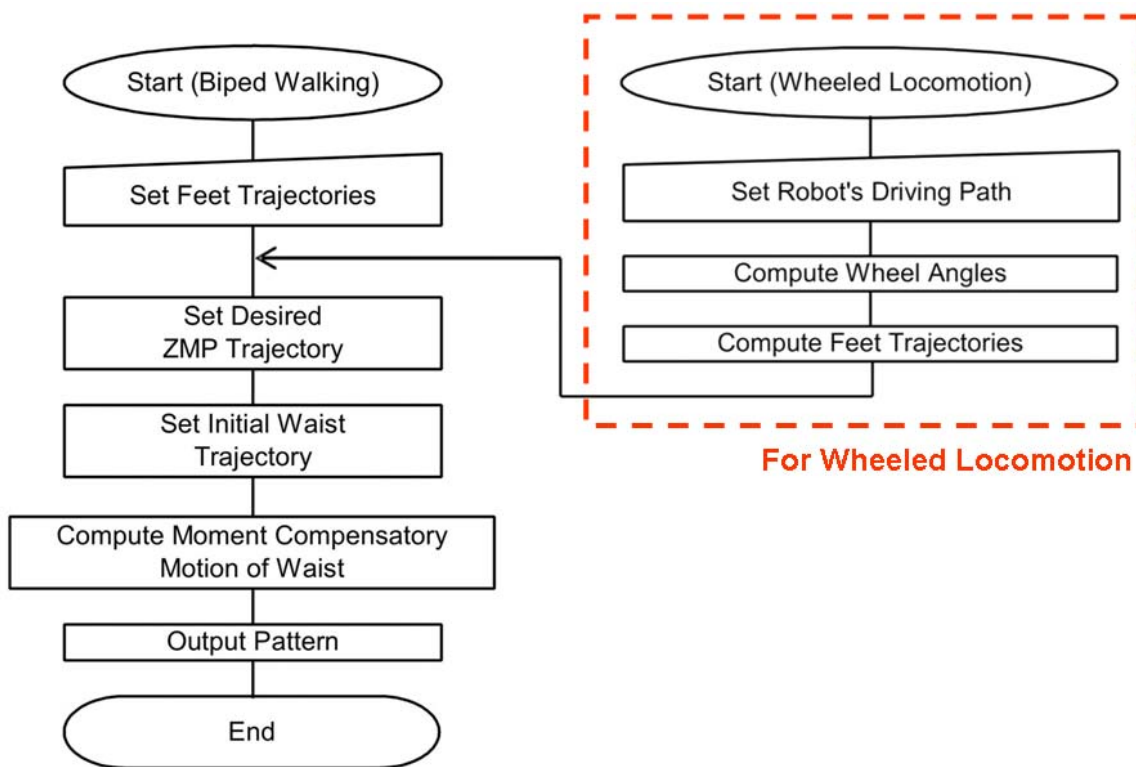


Figure 5.4 Pattern generation for wheeled locomotion.

ロボットの位置と方向が指定されれば ZMP が常に支持多角形内の中心付近に収まるような目標 ZMP 軌道を設定することができる。それと同時に両足のたどるべき軌道が決定されるので、これに基づいて腰の初期軌道も適当に決める。

そして、得られた目標 ZMP 軌道を満たすべく、筆者の属する研究グループがこれまで研究してきた「腰・体幹協調型モーメント補償軌道算出アルゴリズム」[163]を適用すればロボットが転倒することなく安定して移動できるような腰軌道が算出される (図 5.4)。

このようにして生成されたパターンは、歩行や車輪移動の種類を問わず、1 つ目のパターンの最後と 2 つ目のパターンの最初の足先と腰の相対的な位置関係が一致すれば連続して出力することができる。

以下、移動経路設定法の詳細について述べる。

5.3.1 拘束条件

能動車輪式足部機構 WS-2 を用いた車輪走行時においては、4 つの接地点のうち 2 点をモータによって駆動された能動車輪とし、残り 2 点を平面内において拘束の無い 3 自由度キャストとしている。このような構成の利点は、ロボットの 2 次元平面内における位置と方向が 2 つの車輪の回転のみによって定まるため、車輪の横滑り等の複雑な条件を考慮する必要がなくなるということである。実際には大きな加速度が生じる場合に車輪と路面との間ですべりが生じるが、本研究では車輪が滑らない範囲のみを考え、このような場合に適用可能なパターン生成法を提案する。

図 5.5 において、車輪の回転とロボットの速度・方向の関係を記述すると式は次のようになる。

$$\begin{aligned} \dot{x}_p &= \frac{1}{2} r (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \cos \theta_p \\ \dot{y}_p &= \frac{1}{2} r (\dot{\theta}_R + \dot{\theta}_L) \sin \theta_p \\ \dot{\theta}_p &= \frac{1}{2} \frac{r (\dot{\theta}_R - \dot{\theta}_L)}{l} \end{aligned} \quad (5.1)$$

このように座標と時間のみで表現できない (特にこの場合、速度を含む) 拘束条件を非ホロノミックな拘束条件といい x_p , y_p , θ_p の 3 つの自由度に対して操作可能な量が θ_R , θ_L の 2 つしかないため、平面内で任意の経路を移動させることは不可能で

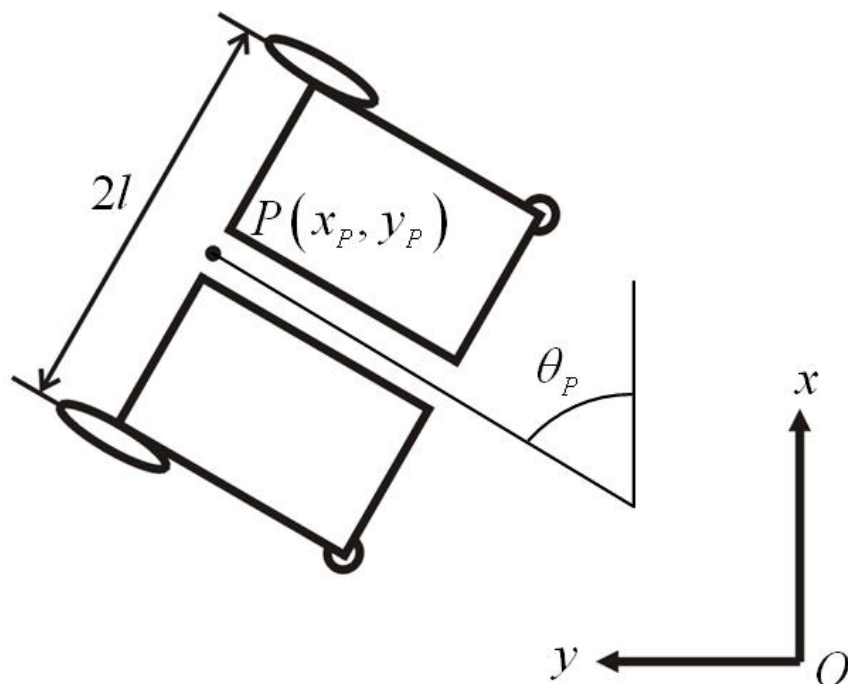


Figure 5.5 World coordinate frame.

あることが知られている.

式(5.1)から $\dot{\theta}_R$, $\dot{\theta}_L$ を消去すると次式を得る.

$$\frac{dy_P}{dx_P} = \tan \theta_P \quad (5.2)$$

これより, 非ホロノミックな拘束条件を満足するためには, ロボットは常に経路の接線方向を向いていなければならないということがわかる.

5.3.2 Bezier 曲線

本方法では経路を設定するに当たり, 5 次の Bezier 曲線を採用した. Bezier 曲線は, 制御点と呼ばれる複数の点に基づいて定義される多項式曲線であり, 車輪移動型ロボットの経路設定において様々な利点を持っている.

Bezier 曲線は次式で定義される.

$$\mathbf{P}(s) = \sum_{i=0}^n \mathbf{P}_i B_i(s) \quad (5.3)$$

したがって、5 次の Bezier 曲線は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}(s) &= \sum_{i=0}^5 \mathbf{P}_i B_i(s) \\
 B_0(s) &= (1-s)^5 \\
 B_1(s) &= 5s(1-s)^4 \\
 B_2(s) &= 10s^2(1-s)^3 \\
 B_3(s) &= 10s^3(1-s)^2 \\
 B_4(s) &= 5s^4(1-s) \\
 B_5(s) &= s^5
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Bezier 曲線の両端における位置は、

$$\mathbf{P}(0) = \mathbf{P}_0, \quad \mathbf{P}(1) = \mathbf{P}_5 \tag{5.5}$$

となり、それぞれの最初と最後の制御点に一致する。また、曲線の両端における傾きは、次のようになる。

$$\frac{d\mathbf{P}}{ds}(0) = 5(\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0), \quad \frac{d\mathbf{P}}{ds}(1) = 5(\mathbf{P}_5 - \mathbf{P}_4) \tag{5.6}$$

それぞれ2番目と5番目の制御点で指定できることが分かる。また、Bezier 曲線同士を接続する際に傾きの変化率（つまり、ロボットの向きの変化率）まで連続になるようにするため曲線の両端においてこれを0に指定すると、

$$\begin{aligned}
 \frac{d^2\mathbf{P}}{ds^2}(0) &= 0, \quad \frac{d^2\mathbf{P}}{ds^2}(1) = 0 \\
 \Rightarrow \mathbf{P}_2 &= 2\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0, \quad \mathbf{P}_3 = 2\mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_5
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

となり、残りの2点も自動的に決定される。

以上をまとめると、Bezier 曲線を用いることにより曲線の両端における位置と傾き、すなわちロボットの位置と方向を指定できる。また複数の Bezier 曲線はなめらかに接続することが可能である。

上述のように1つの Bezier 曲線を定義する際必要になる制御点は4つであるが、ここでは便宜上、表 5.2 のようにパラメータを定義した。このように定義することによ

り、曲線の最初と最後におけるロボットの位置と傾きを直感的に指定することができる。定数 c_0 , c_T は経路のカーブのふくらみを表すものと考えれば分かりやすい。

以上に定義したパラメータを用いて経路の開始点、終了点及び通過点（いくつでも可）を指定し、それぞれの点の間を 5 次の Bezier 曲線で補間することにより、多様な移動経路を容易に設定することができる。この方法を用いて作成した曲線の例を図 5.6 に示す。

Table 5.2 Definition of parameters.

	Forward Driving Path		Backward Driving Path	
	$s = 0$	$s = 1$	$s = 0$	$s = 1$
Position	$(x_0, y_0) \equiv \mathbf{P}_0$	$(x_T, y_T) \equiv \mathbf{P}_5$	$(x_0, y_0) \equiv \mathbf{P}_0$	$(x_T, y_T) \equiv \mathbf{P}_5$
Direction	$\theta_0 \equiv \angle(\mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0)$	$\theta_T \equiv \angle(\mathbf{P}_5 - \mathbf{P}_4)$	$\theta_0 \equiv \angle(\mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1)$	$\theta_T \equiv \angle(\mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_5)$
Constant	$c_0 \equiv \mathbf{P}_1 - \mathbf{P}_0 $	$c_T \equiv \mathbf{P}_5 - \mathbf{P}_4 $	$c_0 \equiv \mathbf{P}_0 - \mathbf{P}_1 $	$c_T \equiv \mathbf{P}_4 - \mathbf{P}_5 $

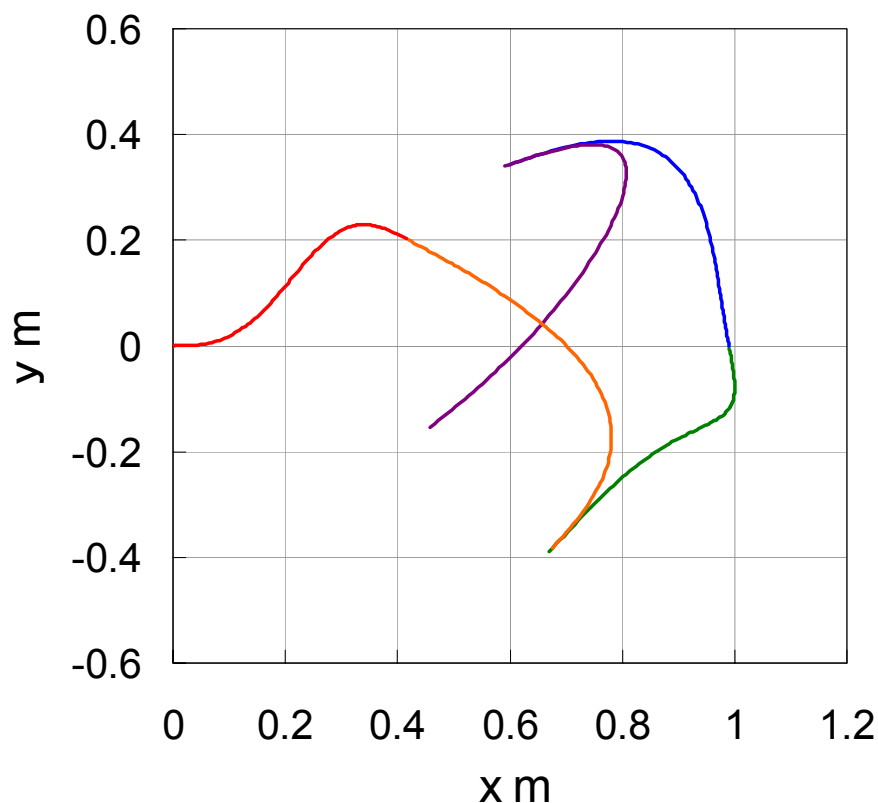


Figure 5.6 Robot's path generated by five Bezier curves.

5.3.3 曲線の時間への写像

m 個の Bezier 曲線を接続して得られた曲線は単なる媒介変数 $s = 0 \sim m$ に対応した 2 次元曲線なので、ロボットがこの曲線のどの位置をどれくらいの速度でいつ通過するかという情報を与える必要がある。そこで、媒介変数 s を時間 t に写像する。

$$\begin{aligned} (x_p(s), y_p(s)) &= \mathbf{P}(s) \\ \theta_p(s) &= \angle \dot{\mathbf{P}}(s) \\ s &= f(t) \end{aligned} \tag{5.8}$$

写像関数 $f(t)$ としては、時間 t の 5 次多項式を接続したものを使用する。この手段を用いると、任意の数の通過点において速度・加速度を指定することができる。ただし加速度を直感的に理解して指定することは困難なので、接続点における加速度は 0 になるように限定し、各通過点における速度のみを指定するものとする。

$$\begin{aligned} f(t) &= f_n \left(t - \sum_{i=0}^{n-1} T_i \right) + \sum_{i=0}^{n-1} f_i(T_i) \\ f_n(r) &= \sum_{j=0}^5 a_{nj} r^j \\ &\left(\sum_{i=0}^{n-1} T_i \leq t < \sum_{i=0}^n T_i \right) \end{aligned} \tag{5.9}$$

多項式の各係数は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} a_{n0} &= s_n \\ a_{n1} &= \dot{s}_n \\ a_{n2} &= 0 \\ a_{n3} &= \frac{2}{T_n^3} \{ 5(s_{n+1} - s_n) - T_n(2\dot{s}_{n+1} + 3\dot{s}_n) \} \\ a_{n4} &= \frac{1}{T_n^4} \{ -15(s_{n+1} - s_n) + T_n(7\dot{s}_{n+1} + 8\dot{s}_n) \} \\ a_{n5} &= \frac{3}{T_n} \{ 2(s_{n+1} - s_n) - T_n(\dot{s}_{n+1} + \dot{s}_n) \} \end{aligned} \tag{5.10}$$

ここで注意すべきは、ロボットの前進・後退が切り換わるような経路を設定する際

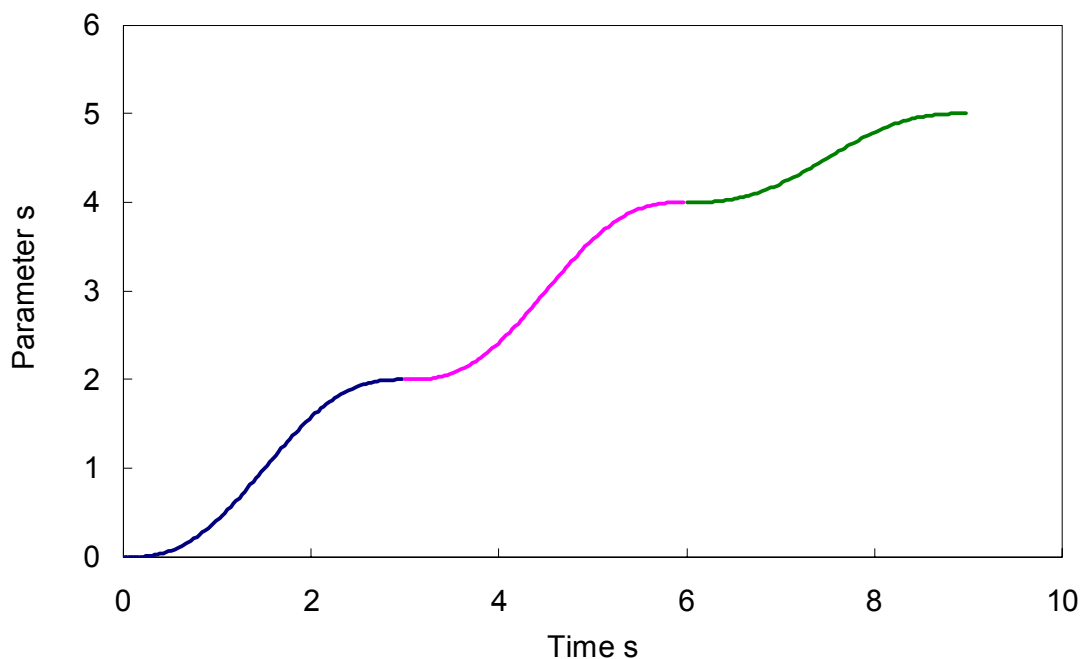


Figure 5.7 Mapping function using a fifth order polynomial.

には必ずその切り換わる点における速度を 0 に指定しなければならないことである。進む方向を逆にすることは、速度の符号を逆にすることに他ならない。

写像関数のグラフの例を図 5.7 に示す。このグラフは図 5.6 の曲線に対応している。

5.3.4 車輪回転角度の算出

以上の手続きにより、ロボットの移動経路が定まった。しかし、実際にロボットをこの経路に沿って移動させるためには、入力である左右の車輪回転角度を求めなければならない。ロボットの基準となる点 P (図 5.5) と左右の車輪の接地点の相対的な位置関係を固定するものとすれば、ロボットの位置と方向を決めれば、同時に車輪の接地点の位置も定まる。

$$\begin{aligned}
 \mathbf{P}_R(t) &= \mathbf{P}(t) + \mathbf{R}_z(\theta_p) \begin{bmatrix} 0 \\ -l \end{bmatrix} \\
 \mathbf{P}_L(t) &= \mathbf{P}(t) + \mathbf{R}_z(\theta_p) \begin{bmatrix} 0 \\ l \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_z(\theta) &\equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{5.11}$$

例として、両車輪の軌跡のグラフを図 5.8 に示す。このグラフは図 5.6 の Bezier 曲線に対応している。小回り旋回時の右側車輪の軌道が一見不連続のように見えるが、 x 、 y の各座標の時系列データで見ると連続かつなめらかである。

式(5.11)で得られた車輪の接地点の軌道の接線はロボットの移動経路の接線に並行であり、また、ロボットは常に経路の接線方向を向いている。従って、車輪の向きもつねに接地点軌道の接線方向を向いていることになる。車輪が滑らないと仮定すれば、車輪の移動距離を車輪半径で割ると回転角度が得られることになる。

車輪の移動距離を得るためには、車輪の接地点軌道に沿って長さを積分すればよい。

$$\begin{aligned}
 L_R(t) &= \int \sigma_R(t) dL_R \\
 &= \int \sigma_R(t) \sqrt{dx_R^2 + dy_R^2} \\
 &= \int \sigma_R(t) \sqrt{\left(\frac{dx_R}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy_R}{dt}\right)^2} dt \\
 &= \int_0^t \sigma_R(t) |\dot{P}_R(t)| dt
 \end{aligned} \tag{5.12}$$

ただし、 $\sigma_R(t)$ は車輪の回転方向を示す関数である。

式(5.12)は、ただ曲線の長さを積分しているだけではないことに留意されたい。同じ移動距離でも回転方向によって車輪の回転角度は異なるため、その点も考慮しなければならない。車輪の回転方向を示すものは車輪の回転速度の符号であるから、 $\dot{P}_R(t)$ の接線方向成分を調べればよい。 $\dot{P}_R(t)$ はつねに接地点軌道の接線方向を向いており、垂直方向成分は必ず 0 になるため、 $\sigma_R(t)$ は次のようになる。

$$\begin{aligned}
 \sigma_R(t) &\equiv \text{sign}(\dot{P}_R(t)) \\
 &= \text{sign}(\dot{x}_R \cos \theta_P + \dot{y}_R \sin \theta_P) \\
 \text{sign}(x) &= \begin{cases} -1 & (x < 0) \\ 0 & (x = 0) \\ 1 & (x > 0) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

以上と全く同様の方法で、左車輪の回転角度も求めることができる。例として図 5.8 の経路に沿って移動させる場合の左右の車輪角度を図 5.9 に示す。

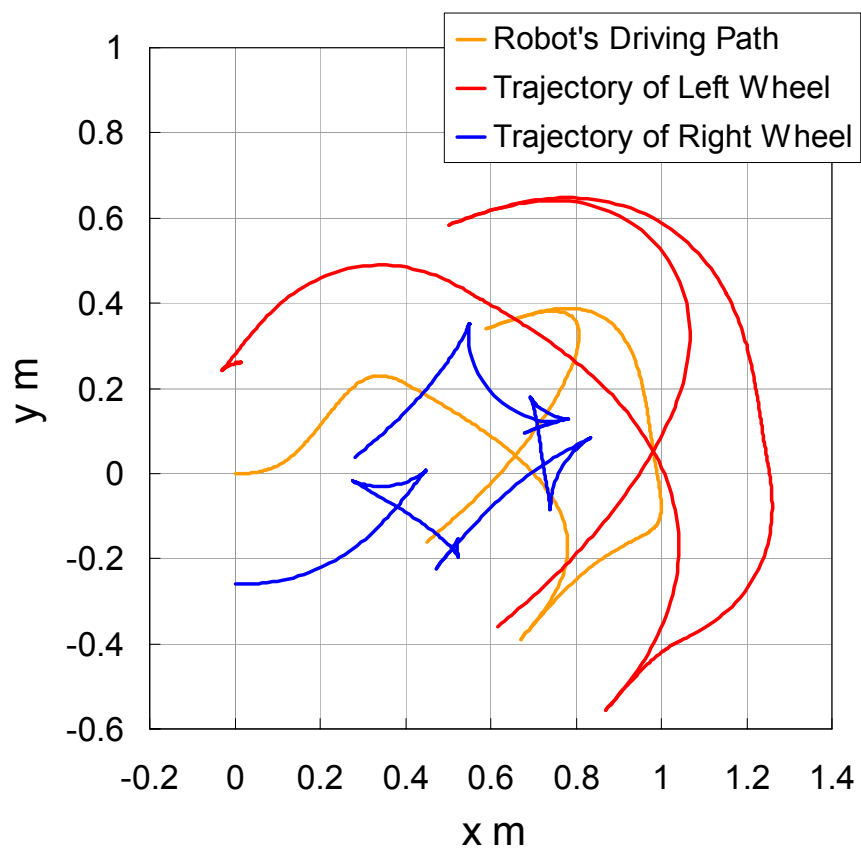


Figure 5.8 A robot's path generated by five Bezier curves and wheel trajectories.

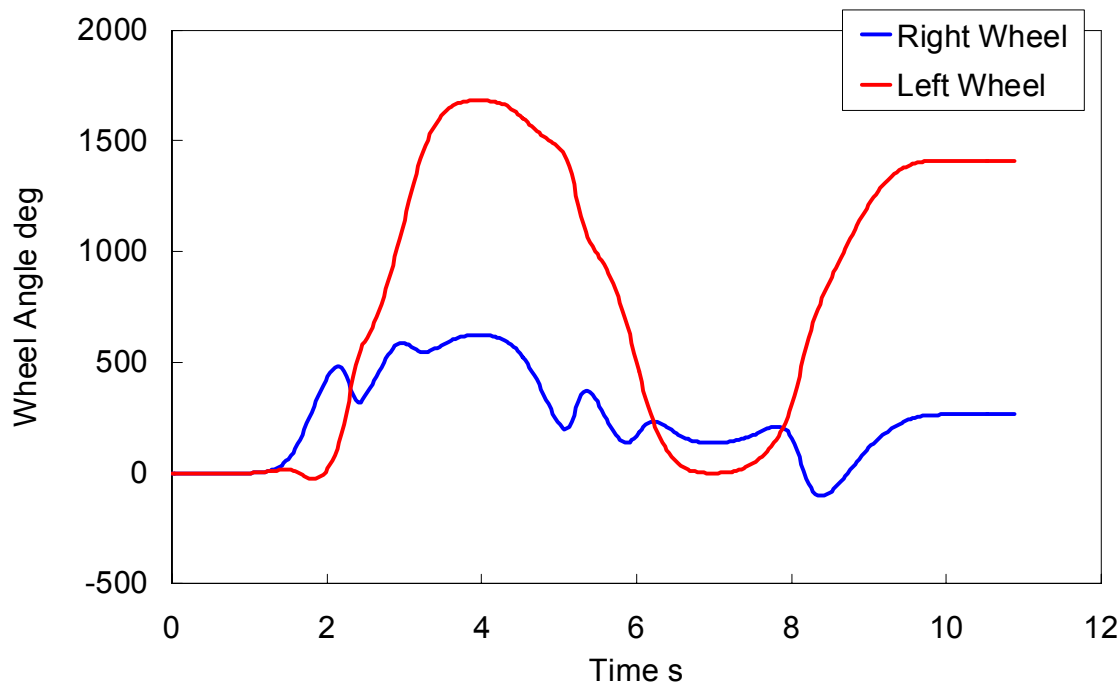


Figure 5.9 Wheel angles.

5.3.5 2足歩行と車輪走行の切り換え方法

足先軌道の設定について説明する前に、どのようにして2足歩行と車輪走行を切り換えるかについて説明せねばならない。なぜなら車輪走行時の足先は水平になっておらず、単純な計算では足先軌道は得られないためである。

すでに述べたとおり、この度開発した能動車輪式足部機構 WS-2 は左右各足の外側前方に DC モータ駆動の能動車輪、外側後方に平面内で拘束のない球状のキャストを備えており、残り2点の接地点は通常の摩擦接地点になっている。車輪移動モード時には、両足を外側に傾けることにより能動車輪とキャストのみが接地し、平坦路面を2輪駆動で移動することができる (図 5.10)。

足を傾げるには車輪の接地点とキャストの接地点を結んだ直線 (以下エッジと呼ぶ) の周りに回転させればよいが、これには並進と回転を伴う複雑な座標変換が必要である。そこで、本研究ではフレーム (座標系) 間の写像およびフレームの位置・姿勢を定めるものとして同次変換行列を採用した。同次変換行列を用いることにより多数の中間フレームを有する複雑な座標変換の問題でも単なる行列の操作として扱うことができる。

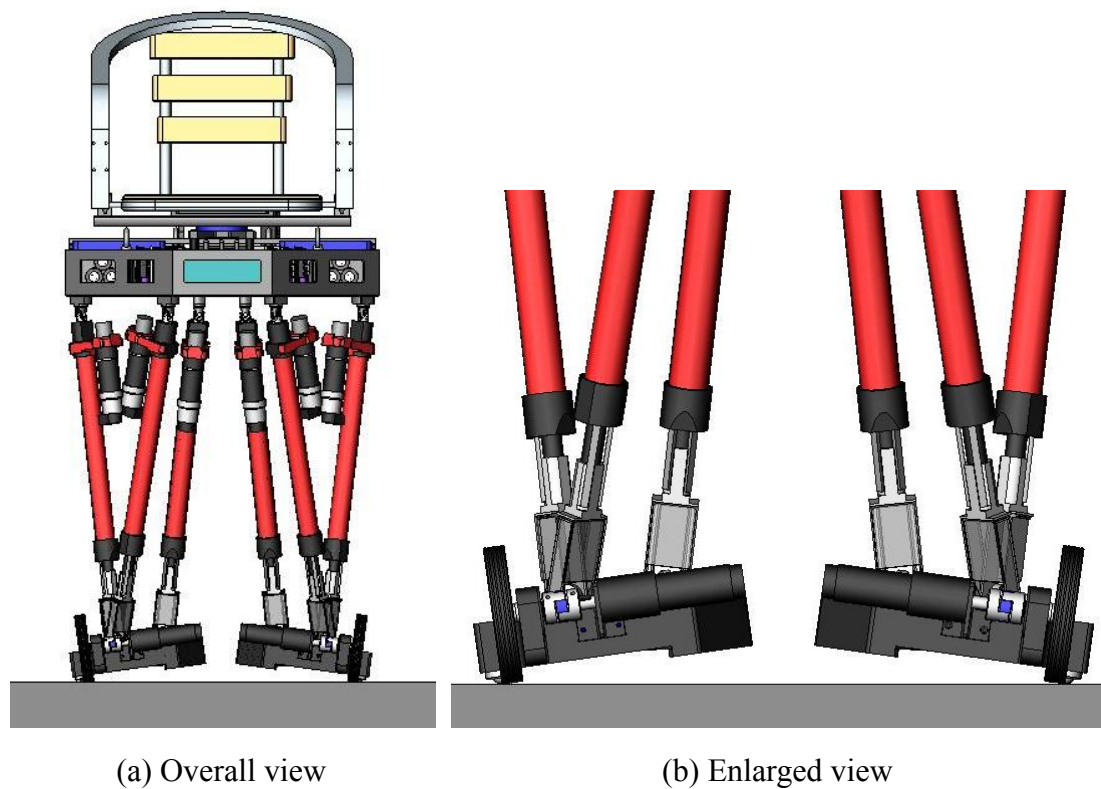


Figure 5.10 Basic position in wheel driving mode.

右足を例にとって考える. まずは足の4点がすべて接地している状態であるとする. 車輪の接地点に原点を有し, X軸がエッジに沿って前方に, Z座標が路面に対して垂直上方に向いているフレームを $\{A\}$ (図 5.11) と定義する. ロボットの位置・姿勢を表すフレームを $\{P\}$ とすると, フレーム $\{P\}$ に基づくフレーム $\{A\}$ の記述は次のようになる.

$${}^P_A\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -l \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

次に, フレーム $\{A\}$ をエッジ周りに回転したフレーム $\{B\}$ を定義する (図 5.12).

$${}^A_B\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{\text{tilt}} & -\sin\theta_{\text{tilt}} & 0 \\ 0 & \sin\theta_{\text{tilt}} & \cos\theta_{\text{tilt}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

最後に, 足の位置・姿勢を表すフレームを $\{C\}$ とし, これをフレーム $\{A\}$ に基づいて記述すると次のようになる (図 5.11). 特に本研究の場合, フレーム $\{C\}$ の原点は6軸力覚センサの力・モーメントの座標系の原点を足底部の4つの接地点で構成される多角形に投影した点としている.

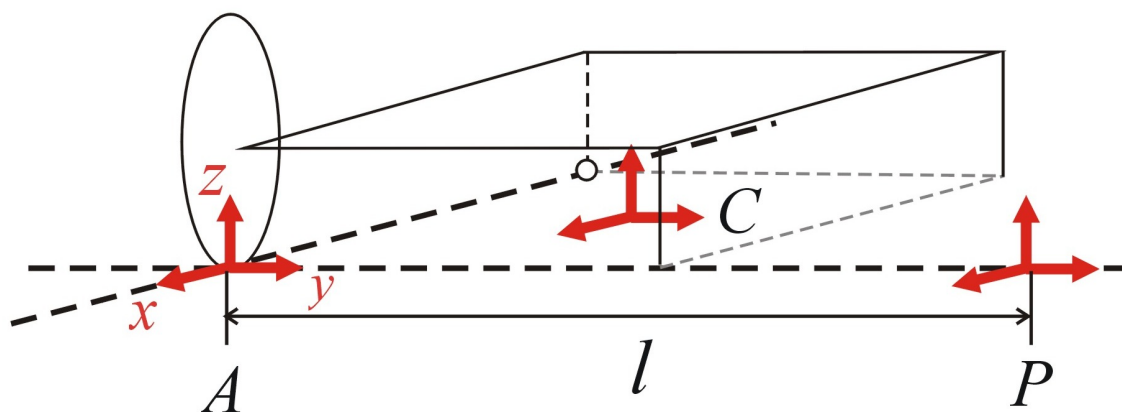


Figure 5.11 Frame $\{A\}$, $\{C\}$ and $\{P\}$.

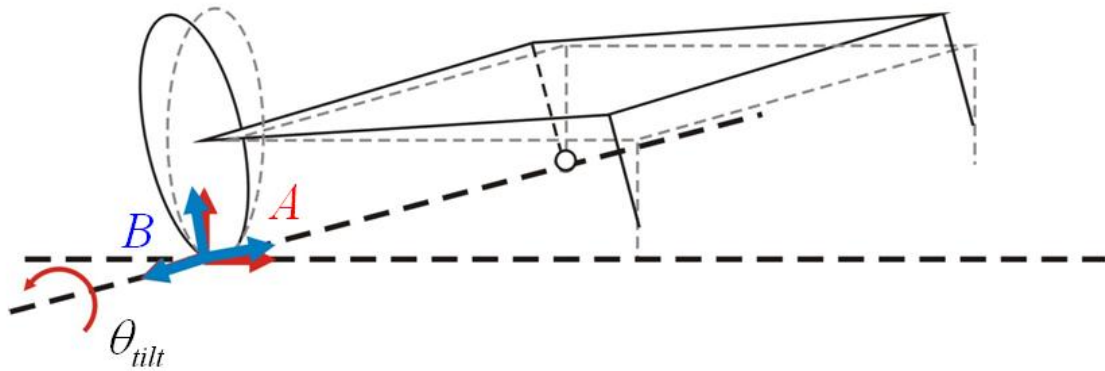


Figure 5.12 Frame $\{B\}$.

$${}^A_C\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \\ 0 & 1 & 0 & {}^A\mathbf{P}_{CORG} \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

ただし, ${}^A\mathbf{P}_{CORG}$ はフレーム $\{A\}$ から見たフレーム $\{C\}$ の原点の位置である.

足を傾ける前と後で車輪と足の相対的な位置関係は変化しない. 従って最終的に求めたい足を傾けた後の位置・姿勢を示すフレームを $\{D\}$ とすると,

$${}^B_D\mathbf{T} = {}^A_C\mathbf{T} \quad (5.17)$$

以上の中間フレームの積をとることにより, 傾けたあとの足の位置・姿勢を得ることができる.

$${}^P_D\mathbf{T} = {}^P_A\mathbf{T} {}^A_B\mathbf{T} {}^B_D\mathbf{T} = {}^P_A\mathbf{T} {}^A_B\mathbf{T} {}^A_C\mathbf{T} \quad (5.18)$$

5.3.6 足先軌道の設定

足先軌道は, 5.3.4 節で得られたロボットの基準位置を用いて 5.3.5 節で得られた足先の相対位置を絶対位置に変換することによって得られる.

路面上に $x-y$ 平面が路面に一致するフレーム (絶対座標系) $\{O\}$ を定めると, ロボットの位置・姿勢を表すフレーム $\{P\}$ は次のようになる.

$$\begin{aligned}
{}^o_P\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} {}^o_P\mathbf{R} & {}^o\mathbf{P}_{PORG} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^o_P\mathbf{R} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_p & -\sin\theta_p & 0 \\ \sin\theta_p & \cos\theta_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^o\mathbf{P}_{PORG} &= \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ 0 \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.19}$$

したがって、足先軌道は次式で与えられる。

$${}^o_D\mathbf{T} = {}^o_P\mathbf{T} {}^P_D\mathbf{T} \tag{5.20}$$

5.3.7 初期腰軌道の設定

腰軌道は最終的にはモーメント補償軌道算出アルゴリズムによって目標 ZMP 軌道を満たすように決定されるが、初期値はあらかじめ用意してやる必要がある。初期腰位置は両足の間中間点に設定すると計算の収束性が良いことが経験的に分かっている。また、本研究では Yaw 軸周りのモーメントについて補償を行っていないので、腰の向きについては初期軌道の値がそのまま結果として出力される。

腰高さを $h_w = \text{const.}$ とし、腰の向きはロボットの向きと一致するように設定すると、初期腰起動は次式で表される。

$$\begin{aligned}
{}^o_w\mathbf{T} &= \begin{bmatrix} \cos\theta_p & -\sin\theta_p & 0 & \\ \sin\theta_p & \cos\theta_p & 0 & {}^o\mathbf{P}_{WORG} \\ 0 & 0 & 1 & \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
{}^o\mathbf{P}_{WORG} &= {}^T \left[\frac{(x_{RF} + x_{LF})}{2} \quad \frac{(y_{RF} + y_{LF})}{2} \quad h_w \right]
\end{aligned} \tag{5.21}$$

以上の手続きで、モーメント補償軌道算出アルゴリズムに必要な軌道のすべてが得られたことになる。図 5.13 にロボットの移動経路設定法をフローチャートで示す。

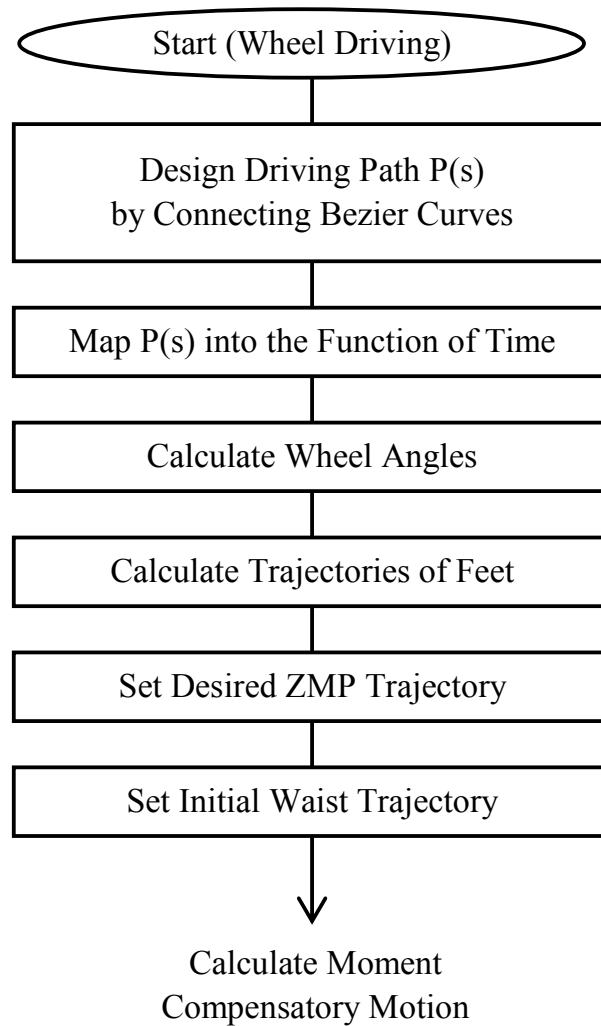


Figure 5.13 Flowchart of wheel driving path generation.

5.4 実験方法

開発した能動車輪式足部機構 WS-2 は一般的な2足歩行ロボットすべてに適用される汎用的なものであるが、今回は機構評価のプラットフォームとして人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R (Waseda Leg - No.16 Refined) [94]を用いて評価実験を行う。能動車輪式足部機構 WS-2 とその移動経路設定法は、以下のことを実現することを目標に開発された。

- (i) 平坦路面で車輪走行が可能な足部機構の開発
- (ii) 任意の移動経路に沿って車輪走行が可能

- (iii) 路面の状況に応じて2足歩行と車輪走行の切り換えが可能
- (iv) 2足歩行に比べ平坦路面移動時のエネルギー消費量の低減

これらの目標を実現することが可能か確認するために、それぞれ下記の通り評価実験を行う。

- (i) 平坦路面で最高加速度での直進走行実験を行い、開発したハードウェアの評価
- (ii) 8の字の移動経路を設定し、その軌道に対するロボットの追従性の評価
- (iii) 実験室内に擬似的な段差を作製し、2足歩行と車輪走行の切り換えの評価
- (iv) 2足歩行と車輪走行で同じ距離を同じ時間で移動させ、それぞれの場合のエネルギー消費量の評価

5.5 評価実験と考察

開発した能動車輪式足部機構 WS-2 とその移動経路設定法の評価のために、WS-2 を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R に装着し (図 5.14), 前節で述べた評価実験を行った。これらについて以下に述べる。

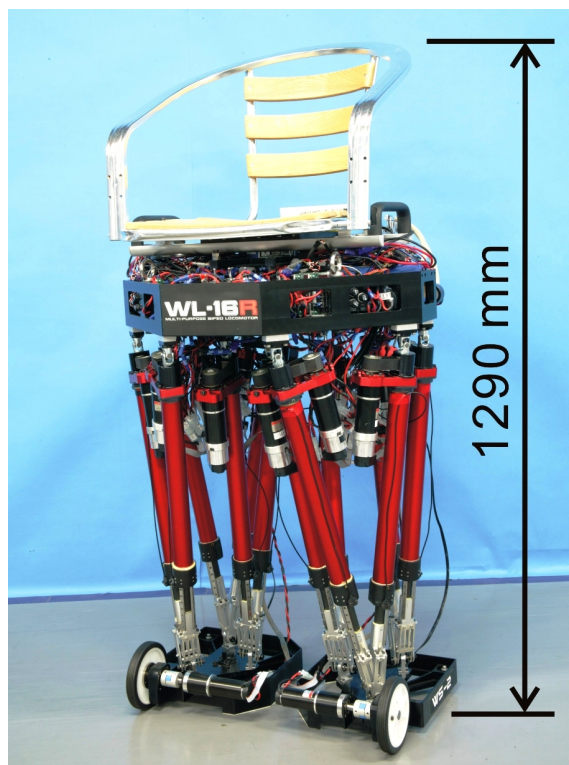


Figure 5.14 WL-16R mounted on WS-2.

5.5.1 能動車輪式足部機構 WS-2 の評価実験

開発したハードウェア WS-2 の性能を評価するため、最高加速度での直進走行実験を行った。この際、最高加速度は「車輪が滑らない範囲で出しうる最大の加速度」と定義した。

実験方法としては、静止状態から最終位置に移動して再び静止するまでの時間を変化させ、車輪の滑らない範囲で最短の時間を測定した。この際、直進移動距離は1 mで固定とし、車輪の滑りの有無は目印として路面に貼り付けたテープの地点で静止したか否かをその判断基準とした。

実験の結果、静止状態から1 mの距離を1.2 sで進み、静止することに成功した。この際の最大速度は約0.61 m/s（時速に換算すると2.2 m/h）、最大加速度は約1.7 m/s²である（図 5.15）。

走行中の支持多角形内のZMPの実測データを図 5.16 に示す。機械的なたわみ等によるモーメント誤差のため、加減速時にZMPが前後に大きく動いてしまっていることが確認できる。指示多角形が前後に±150 mm程の余裕を持っていることを考えるとそれほど大きな値ではないが、実際にはこれ以上の加速度を出そうとすると車輪に十分な押し付け力が得られず車輪が滑り始めてしまうという結果が出ている。

5.5.2 移動経路設定法評価実験

考案した移動経路設定法の有効性を検証するため、設定した軌道にロボットが追従しているか否かを確認するための実験を行った。

実験方法としては、8の字型の移動経路を設定し、これに沿ってロボットが移動しているか否かを検証した。しかし、ロボットの絶対座標系における位置を取得する計測システムを有していないため、確認は腰部姿勢角センサを用いた方位角の計測に止まっている。

設定した経路におけるロボットの腰部の方位角と、実際に姿勢角センサで取得した方位角のデータをグラフにしたものを図 5.17 に示す。結果を見るとロボットはほぼ設定した経路通りに動いているが、最大約30 degの角度のずれ生じていることがわかる。この実験の様子を図 5.18 に示す。

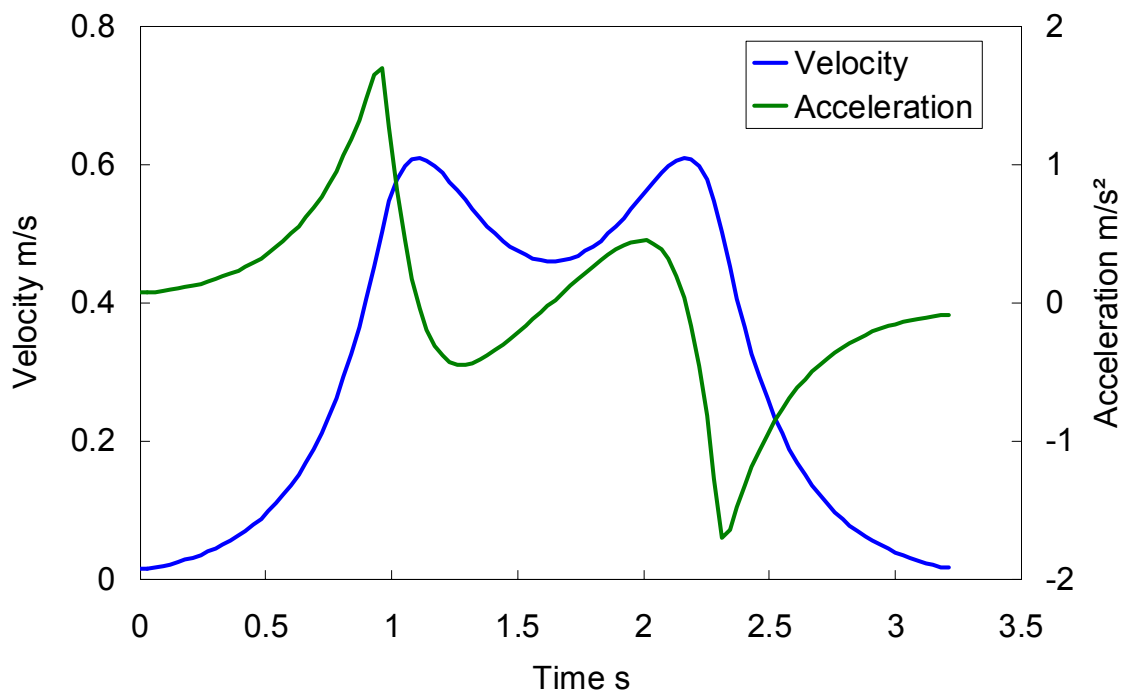


Figure 5.15 Velocity and acceleration when the robot moves 1 m forward in wheeled locomotion.

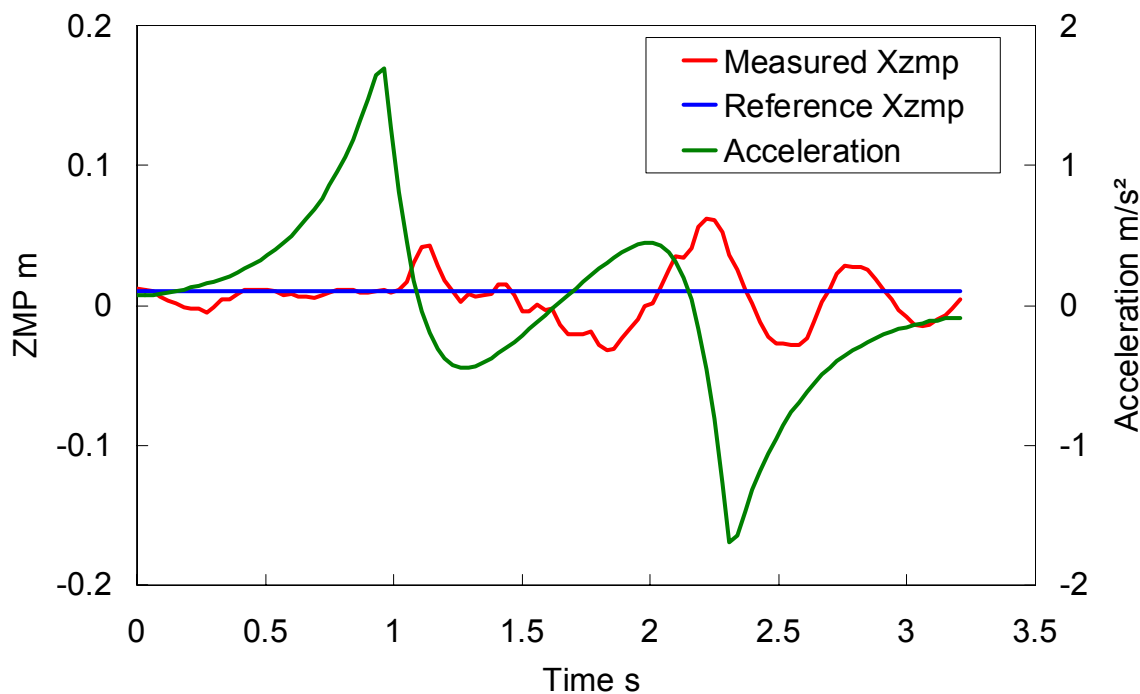


Figure 5.16 ZMP trajectories when the robot moves 1 m forward in wheeled locomotion.

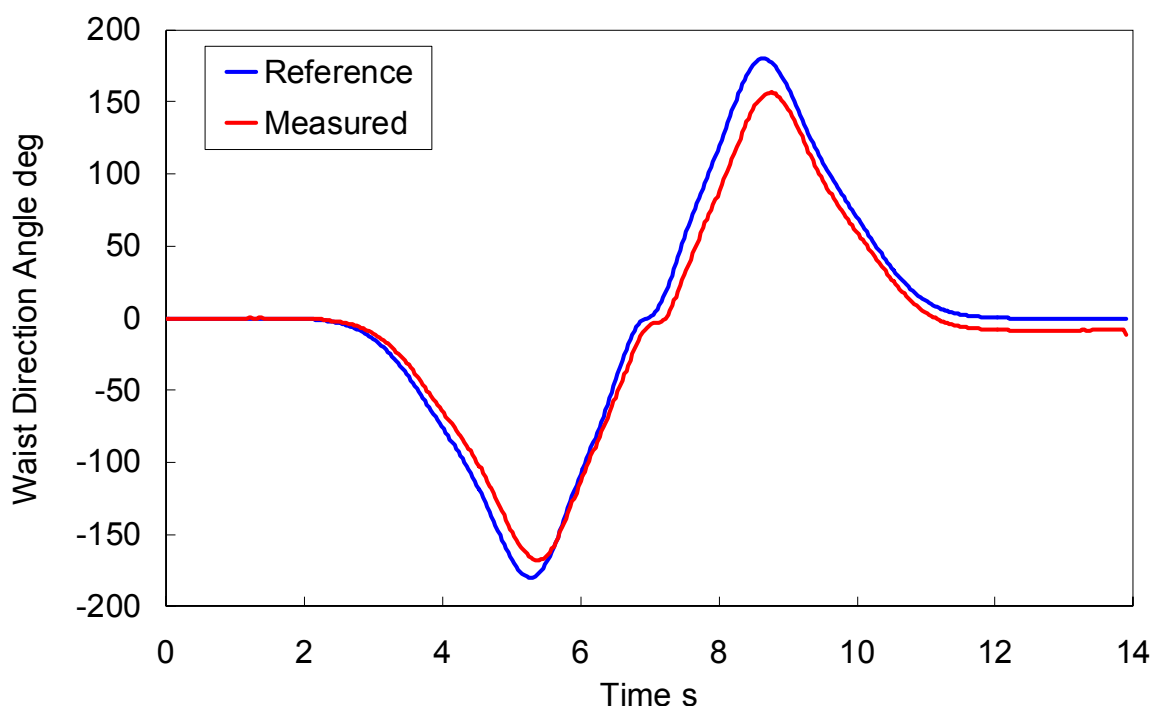


Figure 5.17 Waist direction angle of an 8-type driving path.

5.5.3 2足歩行と車輪走行の切り換え実験

能動車輪式足部機構 WS-2 は2足歩行と車輪走行との容易な切り換えを念頭において設計されている。2足歩行が最も必要とされるのは段差乗り越え時であると考え、平坦路面では車輪で移動し段差乗り越え時には2足歩行に切り換えるという実験を行った。

実験方法としては、高さ 75 mm、長さ 600 mm の木製の台を平坦な路面に設置し、以下のようなパターンで実験を行った。

- ① 台の直前まで車輪で移動
- ② 歩幅 400 mm/step の歩行で台に上る
- ③ 台の縁まで車輪で移動
- ④ 歩幅 350 mm/step の歩行で台を下りる
- ⑤ 車輪走行で旋回しつつ台を離れる

実験の結果、このパターンでの2足歩行と車輪走行の切り換え移動に成功し、機構の有効性を確認した。実験の様子を図 5.19 に示す。

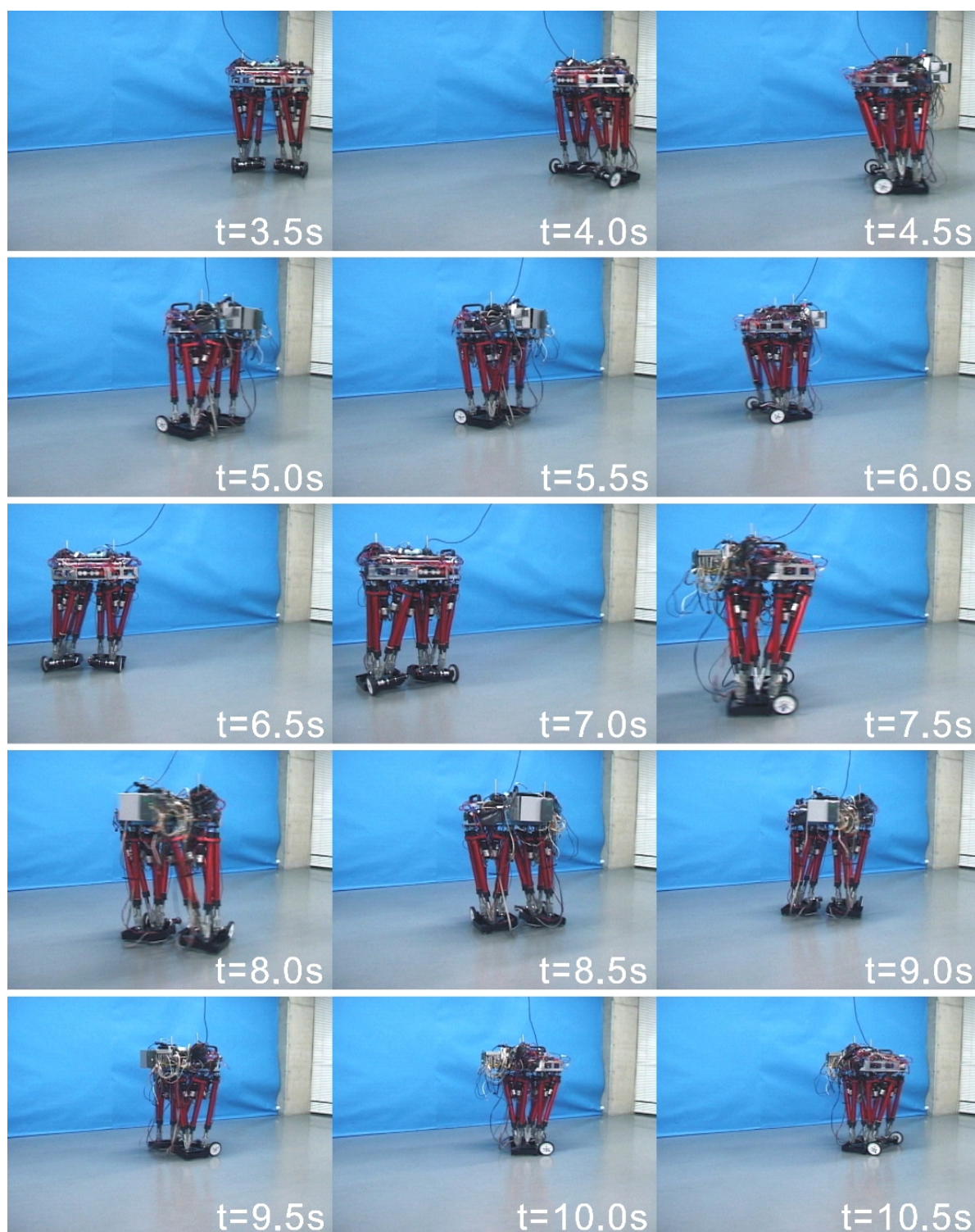


Figure 5.18 Driving experiment of an 8-type driving path.

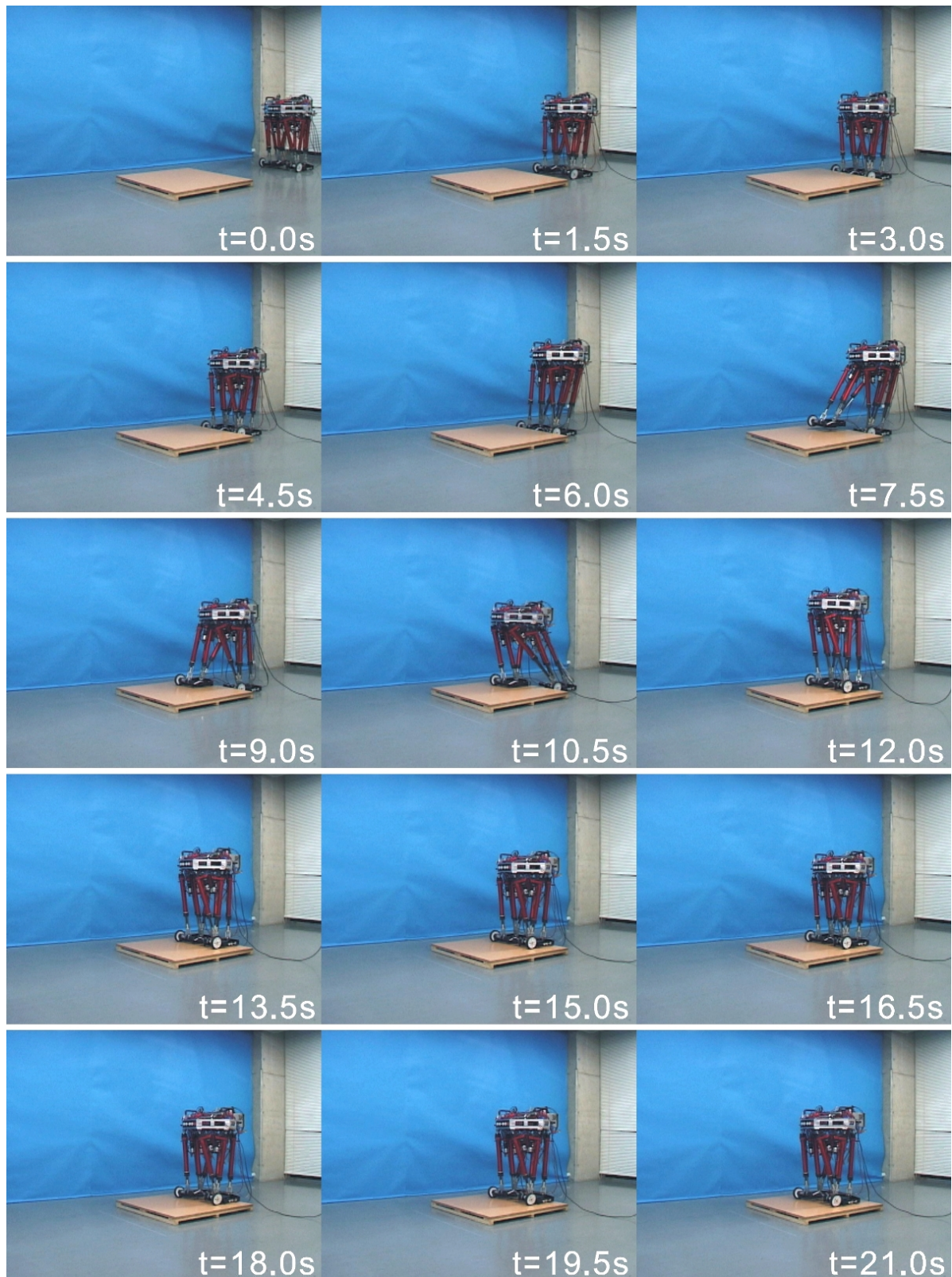


Figure 5.19 Switching between biped walking and wheeled locomotion (1/2).



Figure 5.19 Switching between biped walking and wheeled locomotion (2/2).

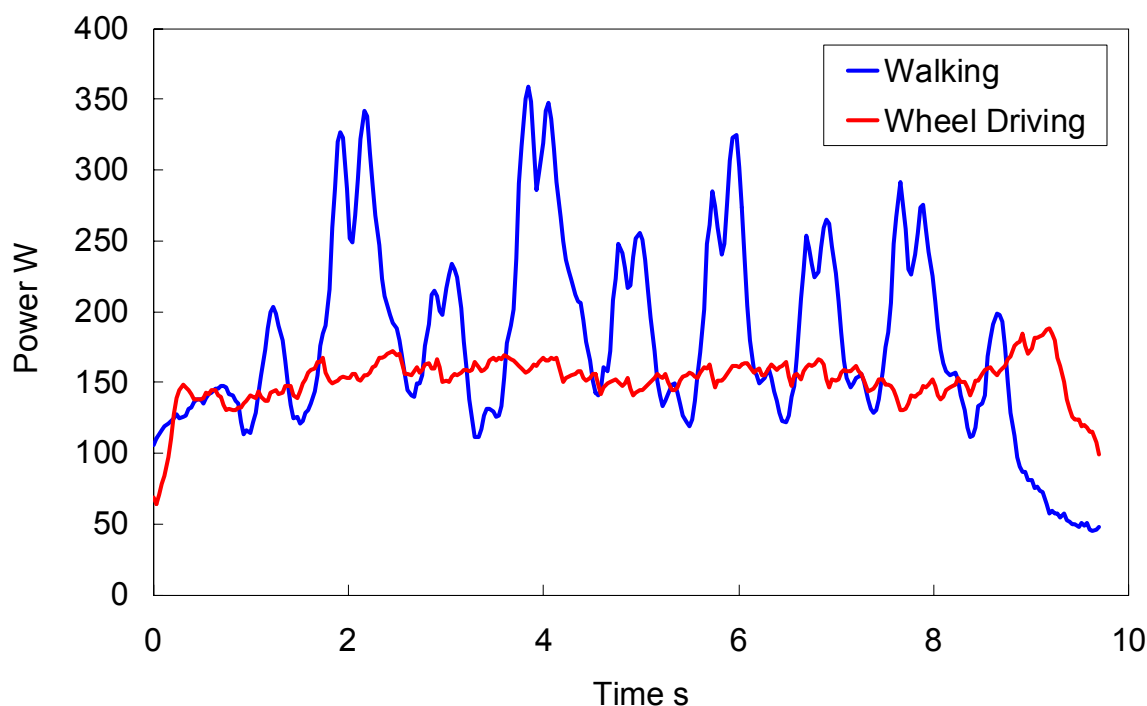


Figure 5.20 Comparison of energy consumption between biped walking and wheeled locomotion.

5.5.4 エネルギー消費量の検証

次に、2足歩行と車輪移動のエネルギー効率を比較するために、歩幅 100 mm/step、歩行周期 1.0 s/step の歩行（8 歩）と、それと同じ時間、同じ距離（700 mm, 7.7 sec）を車輪でも走行させ、それぞれの場合においてモータ電流を測定した。エネルギー消費量としては、2足歩行の場合が 1740 J、車輪走行が 1470 J となり、約 15% エネルギー消費量の低減を確認した（図 5.20）。

5.5.5 考察

移動経路設定法の評価実験結果より、ロボットはほぼ設定した経路通りに動いているが、最大約 30 deg の角度のずれ生じていることが分かった。この原因としては以下の 2 つが考えられる。

- (1) 車輪間隔の理論値とのずれ
- (2) 車輪の滑り

(1)については実際に 30 mm のずれが確認されており、これは調整によって改善可能である。しかしこのずれは安定した歩行時のための微調整の結果であり、変更することは好ましくない。(2)の車輪の滑りというのが最も考えられる原因であり、車輪の摩擦特性の改善および目標 ZMP 軌道の設定方法に何らかの工夫が必要であると考えられる。

以上をまとめれば、経路に対するずれは十分に改善可能であるが、改善したために生じるマイナス面を十分に考慮する必要がある。この場合のようにロボットが自分の位置を把握できないようなケースでは、ロボットが設定通りの経路を小さい誤差で移動することはあまり期待されないことが多く、より上位の制御（例えば画像処理などによる経路設定）などを考えるほうが現実的である。

また、2足歩行と車輪走行の切り換え評価実験からは、能動車輪式足部機構 WS-2 は通常の足部と比較して段差を昇降するのに適していないという欠点が判明した。歩行時の WS-2 は片足 4 点で接地するため段差昇降時にはこれら 4 点が段差上にある必要がある。また、外側前方に取り付けられた車輪のために、WS-2 通常の足部と比較して前方に長くなっている。以上のことから、通常の剛体平板の足部の場合よりも大きな歩幅が要求され、ロボットの可動範囲の制約から上下方向の足部の動きが制限されてしまう。これらは WS-2 の機構の本質的な問題であり、抜本的な機構の見直しによってのみ改善されるものであると考えられる。

エネルギー消費量の検証実験結果からは、約 15%エネルギー消費量を低減することに成功したが、それほど大幅には低減されなかった。この実験では車輪走行時においても脚部モータのトルクによって胴体を支持していたため、そのことによるエネルギー損失が車輪走行時のエネルギー損失の中で最も大きいと考えられる。しかし、WL-16R の脚のモータには負動作ブレーキが組み込まれていることを考えると、定常走行などの急激な ZMP の位置の変化がない場合は、負動作ブレーキを動作させれば、更なるエネルギー消費量の低減が見込まれる。

5.6 まとめ

2足歩行という移動方式の長所を生かし短所を補うような、歩行と車輪型移動機構が併用できる足部機構の設計・製作を行った。この足部機構を実際にロボットに装着して行った実験の結果、平面内における安定かつ高速な並進・旋回運動および歩行と

の滑らかな切り換えを実現した。また，2 足歩行の場合と比べエネルギー消費量の低減も確認できた。以上により，本研究で開発した足部モジュールの有効性が確認された。

第6章 インラインスケート型足部機構

WS-3 の開発

- 6.1 はじめに
- 6.2 スウィズル動作の原理
- 6.3 スウィズル動作による滑走移動法
- 6.4 実験方法
- 6.5 評価実験と考察
- 6.6 まとめ

6.1 はじめに

第5章では、2足歩行ロボットの平地での移動速度、移動効率が悪いという欠点を補うことのできる能動車輪式足部機構 WS-2 を開発したことで、これを用いて行った評価実験と考察について述べた。

これにより、2足歩行と車輪走行の切り換えを実現したが、その車輪の駆動にはアクチュエータを用いており、足部重量の増加を招いていた。一般に脚式移動ロボットは脚の慣性モーメントの影響を小さくするために、可動部である脚部の重量増加は避けるべきである。

この点に注目し、簡素な機構で重量増加も少ない受動車輪を用いた脚車輪ハイブリッド型の移動体に関する研究も行われている。遠藤らのローラーウォーカー[30]は4足歩行と受動車輪による滑走移動の切り換えを実現しているが、基本的に4足歩行ロボットを前提としており、提案されている手法を2足歩行ロボットに適用することはできない。2足歩行ロボットに関しても、受動車輪での滑走移動を目標としている研究例があり、これらは大きく分けて次の2つに分類される。

- スウィズル動作と呼ばれるスケートを周期的に運動させることにより車輪の摩擦力を推力として取り出し、滑走移動を実現しているもの[168-171]
- 蹴り出し動作によって滑走移動を実現しているもの[172, 173]

本章では、前者のスウィズル動作による滑走移動に焦点を当てる。スウィズル動作によって滑走移動を実現している研究例の中でも、熊谷ら[168]や遠藤[169]、内海ら

[170]はロール角度を傾けることにより旋回曲率を変化させることが可能な特別な自由度を有するローラースケートシューズを用いている。そのため、車輪を駆動するためのアクチュエータを備えていなくても、足部重量の増加を招く傾向がある。一方、日向野らの BSR-1[171]は受動車輪を一行に配置したインラインスケートを用いているが、この手法はスケートを周期的に動かす際に単なる位置制御を用いており、スウィズル動作中に過大な内力が生じ、ロボットが予測不能な挙動を示す恐れがある。車輪に作用する力のうち推進力として作用しない方の成分は、左右の足で相殺する方向に働き内力となる。単なる位置制御ではどんなに大きな内力が生じても足部を目標位置に追従させようとするため、過大な内力が生じる可能性がある。もしロボットが無制限の剛性を持ち、どんなに大きな力でも発揮できるとすれば従来の位置制御でスウィズル動作を実現することも可能であるが、これは現実とは掛け離れている。

そこで具体的な目標としては、特別な工夫のない受動車輪式足部機構を用い、スウィズル動作により滑らかに滑走移動できることと定めた。

本章では、滑らかな滑走移動を実現するために必要な制御法の開発とその評価実験、考察について述べる。

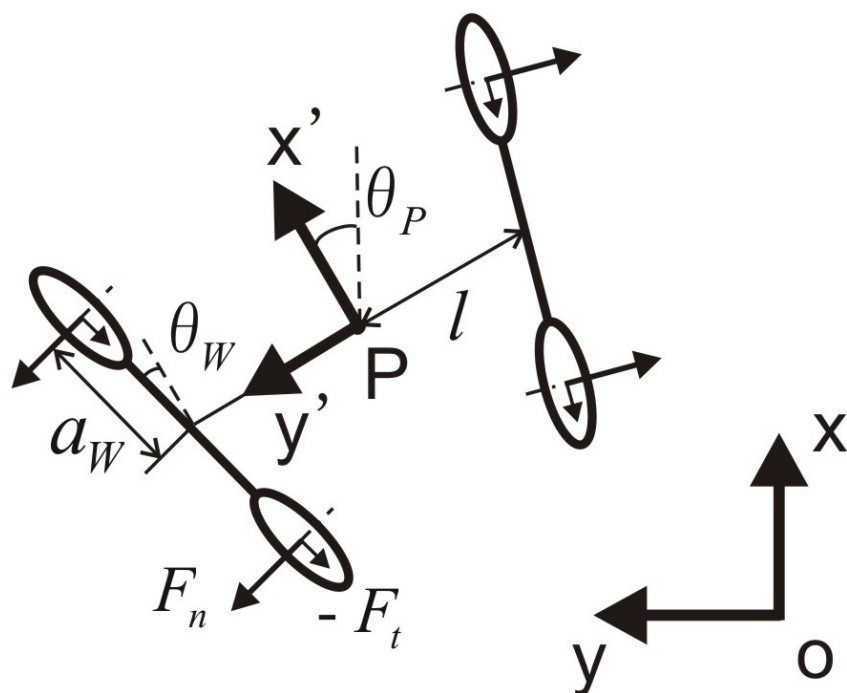
6.2 スウィズル動作の原理

スウィズル動作は車輪の転がり方向は摩擦係数が小さく軸方向は摩擦が大きいという抗力の異方性を利用することにより推進力を得ている。制御入力としては左右の足の距離 l と各足が x' 軸となす角を考える (図 6.1)。

まず1つの車輪に作用する力を考える。ロボットに相対座標系 $P-x'y'$ を固定し、車輪の位置と向き (向きは車輪の転がり方向 x' 軸となす角) をそれぞれ x'_w , y'_w , θ_w とする。

$$\begin{aligned} x'_w &= a_w \cos \theta_w \\ y'_w &= l + a_w \sin \theta_w \end{aligned} \quad (6.1)$$

車輪の絶対座標系における位置は次のように同次変換行列をかけることによって計算できる。



- Σ_O : Fixed coordinate system
- Σ_P : Moving coordinate system
- a_W : Length between the wheel and the center of the foot
- θ_W : Angle between x' axis and each foot
- θ_P : Angle between x and x' axis
- l : Length between P and the center of the foot
- F_t : Sagittal force acting on wheel
- F_n : Lateral force acting on wheel

Figure 6.1 Position and direction of wheels.

$$\begin{aligned}
 {}^O\mathbf{P}_P &\equiv \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ 1 \end{bmatrix} = {}^O_P\mathbf{T}^P \mathbf{P}_W \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_P & -\sin \theta_P & x_P \\ \sin \theta_P & \cos \theta_P & y_P \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x'_W \\ y'_W \\ 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} a_W \cos(\theta_P + \theta_W) + x_P - l \sin \theta_P \\ a_W \sin(\theta_P + \theta_W) + y_P + l \cos \theta_P \\ 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.2}$$

これを微分することにより x , y 方向の車輪の速度 v_x , v_y を得る.

$$\begin{aligned}
 v_x &\equiv \dot{x}_W \\
 &= -a_W (\dot{\theta}_P + \dot{\theta}_W) \sin(\theta_P + \theta_W) - \dot{l} \sin \theta_P - l \dot{\theta}_P \cos \theta_P + \dot{x}_P \\
 v_y &\equiv \dot{y}_W \\
 &= a_W (\dot{\theta}_P + \dot{\theta}_W) \cos(\theta_P + \theta_W) + \dot{l} \cos \theta_P - l \dot{\theta}_P \sin \theta_P + \dot{y}_P
 \end{aligned} \tag{6.3}$$

得られた速度に回転行列をかけて、車輪の転がり方向の速度 v_t と垂直方向の速度 v_n を得る.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} v_t \\ v_n \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_Z(-\theta_P - \theta_W) \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} \\
 \mathbf{R}_Z(\theta) &\equiv \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.4}$$

以上で求めた車輪の速度より、動摩擦の状態に限り車輪に加わる力は次式で表される. ただし、ここでは車輪の粘性摩擦は十分に小さいものとして無視している.

$$\begin{aligned}
 F_t &= -\mu_t N_W \text{sign } v_t \\
 F_n &= -\mu_n N_W \text{sign } v_n
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

実際に推進力になるのは上述の力の x' 成分であるから、回転行列をかけてこれを計算する. 簡単のため転がり方向の摩擦係数 μ_t が十分に小さいとしてこれを無視している.

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} F_{x'} \\ F_{y'} \end{bmatrix} &= \mathbf{R}_Z(-\theta_W) \begin{bmatrix} F_t \\ F_n \end{bmatrix} \\
 &= -\mu_n N_W \text{sign } v_n \begin{bmatrix} \sin \theta_W \\ \cos \theta_W \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{6.6}$$

本研究では移動を前後方向に限定し、各足が x' 軸に対して対称に運動するものとする. また実際とは異なるが簡単のために各車輪に路面から加わる垂直抗力は均一なものであると仮定すると、 y' 方向の力は相殺して内力となり $F_{x'}$ の合力だけを推進力として取り出せる.

6.3 スウィズル動作による滑走移動法

本研究で制御対象となるのは足の位置であり、それに作用する力である。しかし力の制御はあくまで補助的なものであって、本質的に重要なのはロボットの支持状態を決定する足部の位置である。すなわち、実際の足部軌道は十分な推進力を得るために、あらかじめ設定した軌道に追従すべきであり、その足部参照軌道から外れるべきではない。

このような理由から、位置と力が対等なものとして扱われるハイブリッド制御[174]は本研究の目的を達成するのに適していない。また、過大な内力を防ぐだけであれば、仮想コンプライアンス制御[175]や仮想内部モデル[176]を利用することができるが、それら従来手法は力に応じて参照する位置指令値を変更している。そのため、足先軌道の変更量が大きくなると十分な推進力が得られない可能性がある。

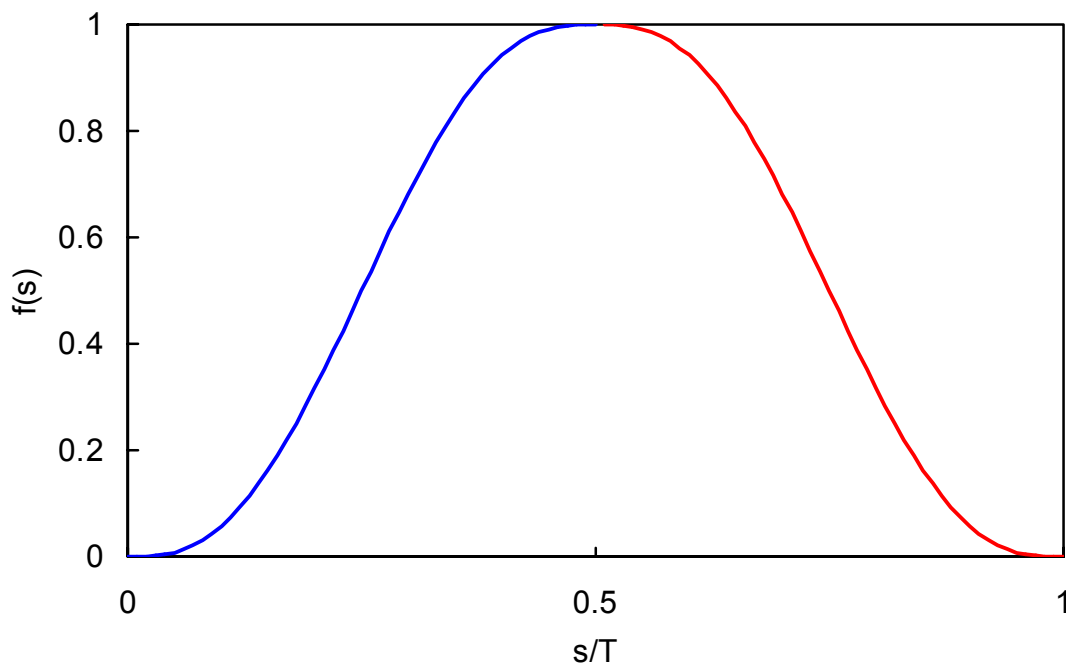
本研究の場合、制御の目的は力を指令値に追従させることではなく、ある値に制限することである。また、位置制御のみでは静止摩擦から動摩擦へ切り換わる際にはステップ状の力が計測され、その際に大きな制御入力が入り、ロボットが予測できない挙動を示す恐れがある。

そこで、力に応じて位置指令値を変化させる制御法を考案した。本制御方法の目的は第一に内力を一定範囲内に制限すること、第二に力のレスポンスがどのようなものであっても大きな位置指令値が入らないようにすることである。これを達成するために新たに考案した制御方法の骨子は次の2点からなる。まず、位置指令値は基本パターン関数を時間領域で変形させたものに限定する。このことにより、足先位置はある定められた軌道に拘束される。次に、位置指令値の変化率は計測した内力を元にしてゲイン関数によって決定する。これはつまり、内力が過大にならないように自動的に位置指令値が変更されることを意味する。

上述の各ポイントについて以下に詳述する。

6.3.1 基本パターン関数

基本パターン関数 $f(s)$ は、5次関数を2つ接続したものの繰り返しとする(図6.2)。

Figure 6.2 Basic pattern function $f(s)$.

$$f(s) \equiv \begin{cases} f_{OPEN}(s) & \left(0 \leq s \leq \frac{T}{2}\right) \\ f_{CLOSE}(s) & \left(\frac{T}{2} < s \leq T\right) \end{cases} \quad (6.7)$$

$$f_{OPEN,CLOSE}(s) = as^5 + bs^4 + cs^3 + ds^2 + es + f$$

正弦波等の周期関数でも代用は可能だが、開始時の速度がゼロに指定できる点が有利であるため5次関数を採用した．式(6.7)の係数を求めるための境界条件は以下の通りである．

(i) $0 \leq s \leq \frac{T}{2}$ のとき

$$\begin{aligned} f(0) &= 0, \quad f'(0) = 0, \quad f''(0) = 0, \\ f\left(\frac{T}{2}\right) &= 1, \quad f'\left(\frac{T}{2}\right) = 0, \quad f''\left(\frac{T}{2}\right) = 0 \end{aligned} \quad (6.8)$$

(ii) $\frac{T}{2} < s \leq T$ のとき

$$\begin{aligned} f\left(\frac{T}{2}\right) &= 1, f'\left(\frac{T}{2}\right) = 0, f''\left(\frac{T}{2}\right) = 0, \\ f(T) &= 0, f'(T) = 0, f''(T) = 0 \end{aligned} \quad (6.9)$$

上記の計算から5次関数の係数が得られる。そして、周期 T の基本パターン関数の一周分は次式で表される。

$$\begin{aligned} f_{OPEN}(s) &= 192\left(\frac{s}{T}\right)^5 - 240\left(\frac{s}{T}\right)^4 + 80\left(\frac{s}{T}\right)^3 \\ f_{CLOSE}(s) &= -192\left(\frac{s}{T}\right)^5 + 720\left(\frac{s}{T}\right)^4 - 1040\left(\frac{s}{T}\right)^3 + 720\left(\frac{s}{T}\right)^2 - 240\frac{s}{T} + 32 \end{aligned} \quad (6.10)$$

この関数を全周期に適用できるように拡張し、位置基本パターン関数 $l_B(s)$ として定義する。

$$\begin{aligned} f_B(s) &\equiv f\left(s - T \operatorname{int}\left(\frac{s}{T}\right)\right) \\ l_B(s) &\equiv L f_B(s) + L_0 \end{aligned} \quad (6.11)$$

ただし、式中の $\operatorname{int}(x)$ は整数部分を返す関数である。

6.3.2 ゲイン関数

本制御アルゴリズムでは内力に応じて位置指令値を変化させるため、力と位置変化量の関係を決める関数をどのように定めるかが重要になる。

スウィズル動作においては摩擦力を利用して進むため、ある程度より小さい内力に関してはこれを制限すべきでない。内力が小さい場合はゲイン関数 $g(F)=1$ とし、足先位置はあらかじめ設定された基本パターン関数に応じて変更する。しかし足部の位置制御に影響が出るような大きな内力が生じた場合にはこれを制限すべきであるため、ゲイン関数 $g(F)=0$ とし、内力が小さくなるまで足先位置を変更しないものとする。ゲイン関数の値を0から1まで変更する際には、2つの状態を滑らかに接続するために5次関数を使用する。そこで、次のような関数をゲイン関数 $g(F)$ として定義

した.

$$\mathbf{g}(F) \equiv \begin{cases} 0 & (F < F_{\min}) \\ \mathbf{g}_L(F) & (F_{\min} \leq F \leq F_{\min} + \Delta) \\ 1 & (F_{\min} + \Delta < F < F_{\max} - \Delta) \\ \mathbf{g}_H(F) & (F_{\max} - \Delta \leq F \leq F_{\max}) \\ 0 & (F > F_{\max}) \end{cases} \quad (6.12)$$

$$\mathbf{g}_{L,H}(F) = as^5 + bs^4 + cs^3 + ds^2 + es + f$$

5次関数の係数を求めるための境界条件は以下の通りである.

(i) $F_{\min} \leq F \leq F_{\min} + \Delta$ のとき

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_L(F_{\min}) &= 0, \quad \mathbf{g}'_L(F_{\min}) = 0, \quad \mathbf{g}''_L(F_{\min}) = 0, \\ \mathbf{g}_L(F_{\min} + \Delta) &= 1, \quad \mathbf{g}'_L(F_{\min} + \Delta) = 0, \quad \mathbf{g}''_L(F_{\min} + \Delta) = 0 \end{aligned} \quad (6.13)$$

(ii) $F_{\max} - \Delta \leq F \leq F_{\max}$ のとき

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_H(F_{\max} - \Delta) &= 1, \quad \mathbf{g}'_H(F_{\max} - \Delta) = 0, \quad \mathbf{g}''_H(F_{\max} - \Delta) = 0, \\ \mathbf{g}_H(F_{\max}) &= 0, \quad \mathbf{g}'_H(F_{\max}) = 0, \quad \mathbf{g}''_H(F_{\max}) = 0 \end{aligned} \quad (6.14)$$

上記の計算から5次関数の係数が得られ、ゲイン関数 $\mathbf{g}_L(F)$ 、 $\mathbf{g}_H(F)$ は次のように表すことができる.

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_L(F) &\equiv \frac{1}{\Delta^5} \sum_{n=0}^5 G_{Ln} F^{5-n} \\ G_{L0} &\equiv 6 \\ G_{L1} &\equiv -15(2F_{\min} + \Delta) \\ G_{L2} &\equiv 10(6F_{\min}^2 + 6F_{\min}\Delta + \Delta^2) \\ G_{L3} &\equiv -30F_{\min}(2F_{\min}^2 + 3F_{\min}\Delta + \Delta^2) \\ G_{L4} &\equiv 30F_{\min}^2(F_{\min}^2 + 2F_{\min}\Delta + \Delta^2) \\ G_{L5} &\equiv -F_{\min}^3(6F_{\min}^2 + 15F_{\min}\Delta + 10\Delta^2) \end{aligned} \quad (6.15)$$

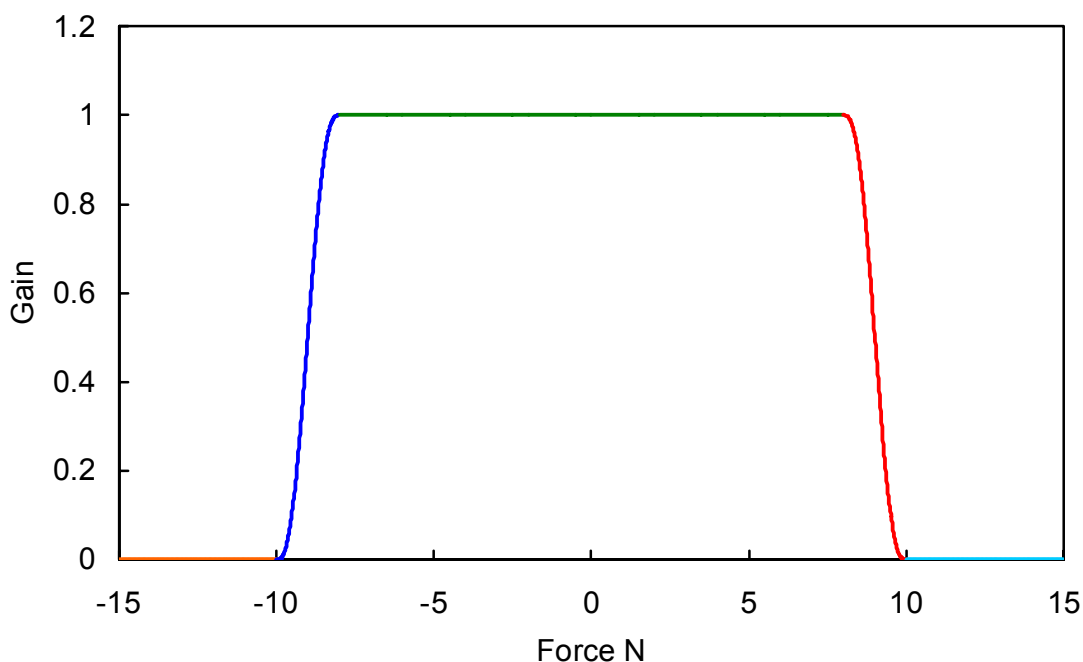


Figure 6.3 Gain function $g(F)$.

$$\begin{aligned}
 g_H(F) &\equiv \frac{1}{\Delta^5} \sum_{n=0}^5 G_{Hn} F^{5-n} \\
 G_{H0} &\equiv -6 \\
 G_{H1} &\equiv 15(2F_{\max} - \Delta) \\
 G_{H2} &\equiv -10(6F_{\max}^2 - 6F_{\min}\Delta + \Delta^2) \\
 G_{H3} &\equiv 30F_{\max}(2F_{\max}^2 - 3F_{\max}\Delta + \Delta^2) \\
 G_{H4} &\equiv -30F_{\max}^2(F_{\max}^2 - 2F_{\max}\Delta + \Delta^2) \\
 G_{H5} &\equiv F_{\max}^3(6F_{\max}^2 - 15F_{\max}\Delta + 10\Delta^2)
 \end{aligned} \tag{6.16}$$

例として $F_{\min} = -10 \text{ N}$, $F_{\max} = 10 \text{ N}$, $\Delta = 2 \text{ N}$ とした場合のゲイン関数のグラフを図 6.3 に示す.

6.3.3 位置指令値の決定

足先の位置の軌跡は基本パターン関数に拘束されるものとし、時間的な変化量をゲイン関数により決定する.

まず, 現在の位置指令値に対応するパラメータ s を位置基本パターン関数 $l_B(s)$ の逆関数により求める.

$$s_i = l_B^{-1}(l_i) \quad (6.17)$$

位置基本パターン関数は周期関数であり, また部分的に見ても 5 次関数であるから, 逆関数を解析的に求めることは不可能である. したがって足部の開閉方向の動きで場合分けし, Newton-Raphson 法で数値的に解を求める.

現在の位置指令値に対応するパラメータ s が求まったら, 次はそこからの変化量 Δl を求める. これは基本パターン関数の微分値にゲイン $g(F)$ をかけて算出する. ゲインの値は 0 から 1 の範囲しかとらないので, どのような力が入力されても位置指令値は基本パターン関数の最大値より大きくなることはない.

$$\Delta l(F, l_i) = g(F) \frac{dl}{dt}(s_i) \quad (6.18)$$

以上より, 現在の位置指令値 と力のレスポンスから次に出力する位置指令値 l_{i+1} が計算できる.

$$l_{i+1} = \Delta l(F, l_i) + l_i \quad (6.19)$$

6.3.4 角度指令値の決定

左右の足先の角度は位置指令値を基にして, あらかじめ決められた分だけ位相をずらすことにより決定する. 後述するようにスイズル動作においては位置と角度の位相差が重要であり, それぞれを独立に決定したのでは位相がずれてしまうという問題点がある. この位相ずれにより, ロボットの移動方向 (前進, 後退) が決まる.

$$\begin{aligned} s_{i+1} &= l_B^{-1}(l_{i+1}) \\ \theta_{Li+1} &= \Theta f_B(s_{i+1} - \phi) - \frac{\Theta}{2} \\ \theta_{Ri+1} &= -\theta_{Li+1} \end{aligned} \quad (6.20)$$

6.3.5 パラメータの決定

この制御方法においては、決定すべきパラメータが8つ($T, F_{\min}, F_{\max}, \Delta, L, L_0, \Theta, \phi$)存在する。

まず、 $F_{\min}, F_{\max}, \Delta$ に関しては脚のサーボ剛性の測定結果をもとに決定した。本提案手法を評価するためのプラットフォームとしては人間搭乗型2足歩行ロボットWL-16Rを用いるので、WL-16Rの脚のサーボ剛性を測定した結果を図6.4に示す。実験結果、サーボ剛性は約9400 N/mであった。つまり、追従誤差は約0.1 mm/Nである。またグラフを見ると約70 Nまでの内力ならば指令値によく追従するということが分かる。この結果をもとに、ゲイン関数に關係するパラメータ $F_{\min}, F_{\max}, \Delta$ を以下のように定めた。ただし、補間マージン Δ に関しては経験的に決定した。

$$\begin{aligned} F_{\min} &= -70 \text{ N} \\ F_{\max} &= 70 \text{ N} \\ \Delta &= \frac{F_{\max}}{2} \text{ N} \end{aligned} \quad (6.21)$$

また、基本パターン関数に關連するパラメータを決定するために、人間のスウィズル動作に注目した。実験方法としては、自分の足にインラインスケートを装着し、位置・角度の基準点となるマーカを付けてスウィズル動作を行った。そして滑りながら自分の足をデジタルビデオカメラで真上から撮影し、映像をフレームごとのスチル写真に分解して各足の角度および左右の足の間隔を測定し、グラフにプロットした。結果のグラフを図6.5に示す。

興味深い点は、距離と角度の位相ずれが約45 degであることである。理論的には足が最も開いた状態、閉じた状態で角度が0 degになるようにすれば常に推進方向に力を得られるため有利であるが、実際には位相ずれを0 degにすると左右の足が平行になった状態で停滞してしまう。これは、指令値の速度・角速度が同じ瞬間にゼロになってしまうからである。そこで、推進力を多少犠牲にしても位置と角度のタイミングをずらすことによって停滞状態を回避していると思われる。

以上のことを踏まえて、各パラメータを式(6.22)のように定めた。ただし、位置の振幅および初期値に関してはロボットのハードウェアの都合上、通常の歩行で用いる範囲内に収まるように決定した。また、基本パターン関数の周期と実際に出力される位置指令値の周期は異なるので、これに関しては小さめの値を採用した。

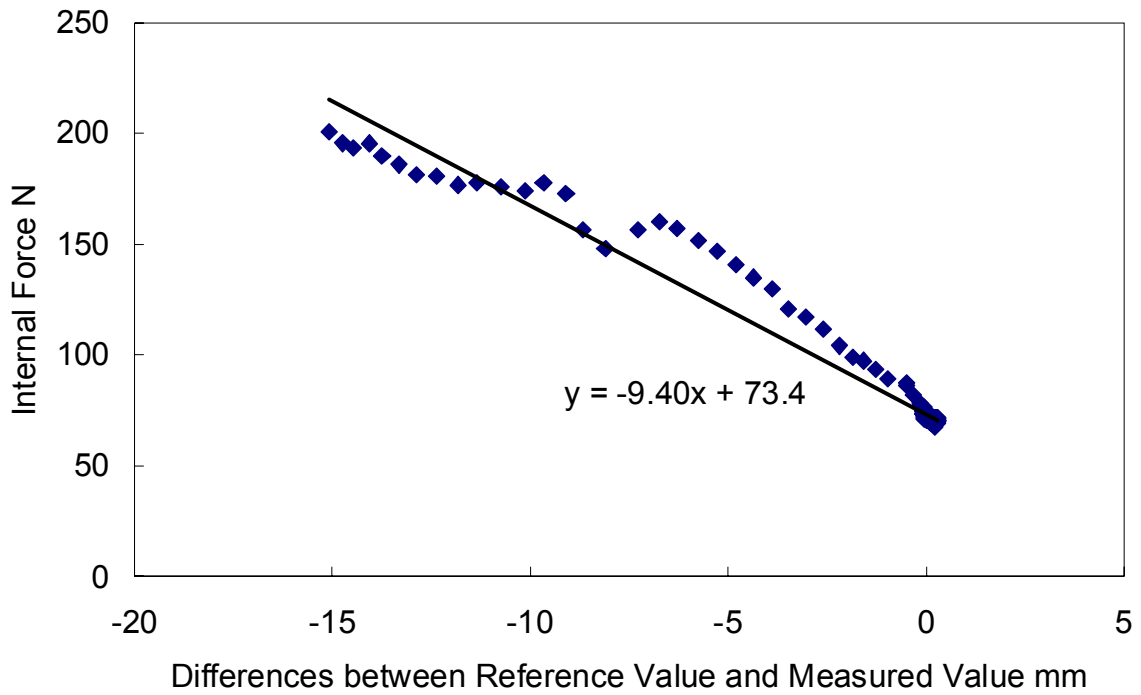


Figure 6.4 Servo stiffness of WL-16R's leg.

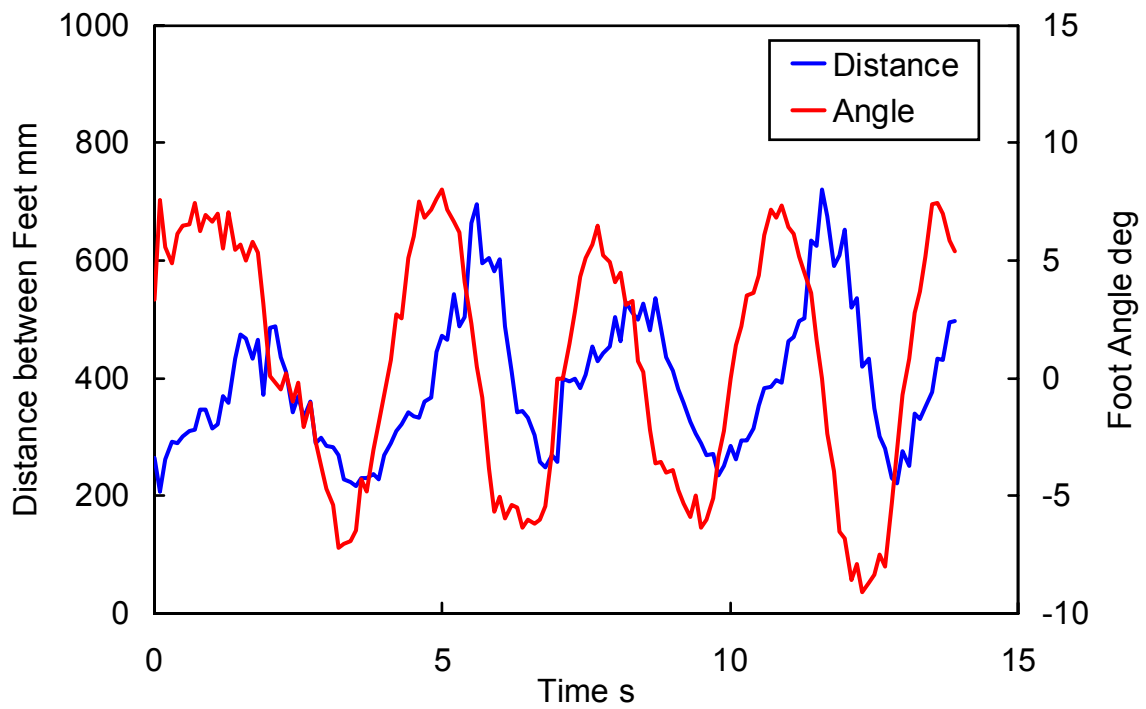


Figure 6.5 Swizzle motion of a human.

$$\begin{aligned}
 T &= 1.5 \text{ s} \\
 L &= 100 \text{ mm} \\
 L_0 &= 115 \text{ mm} \\
 \Theta &= 10 \text{ deg} \\
 \phi &= 45 \text{ deg}
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

6.4 実験方法

考案したスイズル動作による滑走移動法を評価するためのプラットフォームには, 人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R (Waseda Leg - No.16 Refined) [94]を用いる. また, その評価のための足部機構として, インラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 (Waseda Shoes - No.3) を製作した (図 6.6). これは市販品のインラインスケートを人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R に取り付けるためのアタッチメントを装着したものであり, 4つの受動車輪はベアリングを備えているため転がり特性が良く, また転がり方向に垂直な方向に対しては良好な摩擦特性を有している.

本章の目標は, 以下のように定めている.

- 特別の工夫のない受動車輪式足部機構を用い, スウィズル動作というスケートを周期的に運動させることにより車輪の摩擦力を推力として取り出し, 滑らかな滑走移動を実現すること

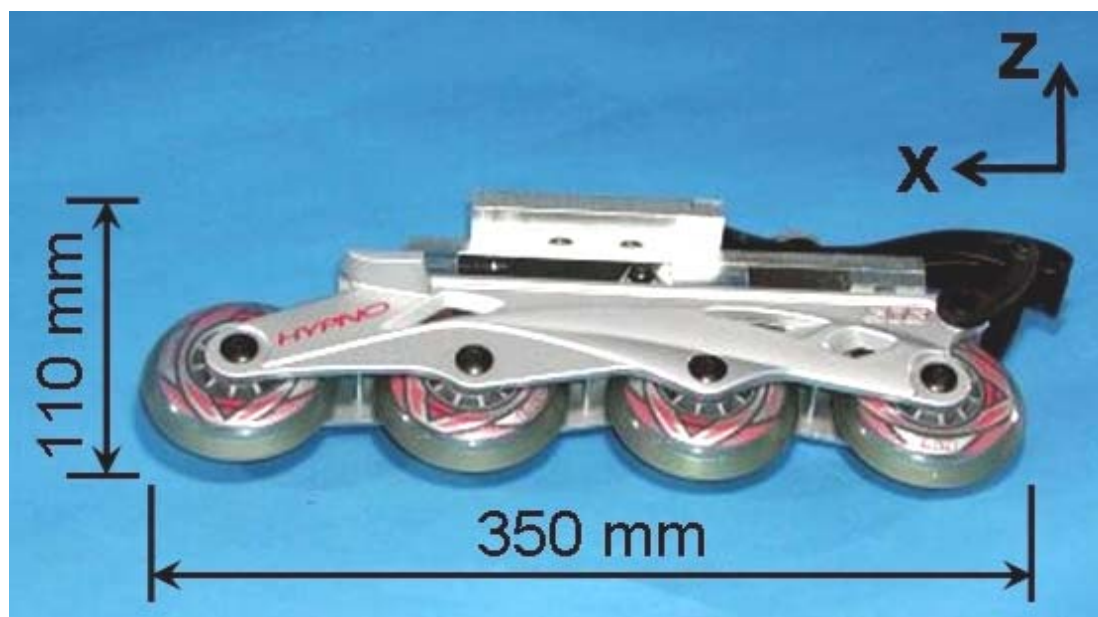


Figure 6.6 Inline skate system for biped robots, WS-3.

この目標に対して、開発した制御アルゴリズムの有効性を確認するために、下記の通り評価実験を行う。

- 平坦路面においてロボットを滑走移動させ、足先部の位置および内力を計測し、過大な内力が生じずに円滑なスウィズル動作が可能か評価

6.5 評価実験と考察

インラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R に装着し、前節で述べた評価実験を行った。

評価実験としては、スウィズル動作のための制御アルゴリズムを評価するため、足先部の位置および内力を計測して検証した。その際、ロボットは絶対座標系から足先の位置・角度を測定するための機器を備えていないため、モータのエンコーダ値から順運動学を解き、足先の位置・角度を算出した。内力に関しては、ロボットの足部にある 6 軸力覚センサを使い測定した。

実験の結果、スウィズル動作により円滑な滑走移動することに成功し、WL-16R は 10 秒間で約 4 m 進んだ。実験の様子を図 6.7 に示す。滑走距離については、筆者が実験後にもものさしで測ったものである。

その際の Y 軸方向の力の応答を図 6.8 に示す。本実験では力のリミット値を 70 N に制限しているが、内力が設定値通りに一定値に制限されていることがわかる。本提案手法を用いない位置制御のみの場合は、スウィズル動作中に内力が大きくなり、ロボットが不安定になり、滑走移動することができなかった。

図 6.9 に実際に出力された左足の位置・角度指令値を示す。基本パターン関数は 5 次関数を接続したものであるが、内力に応じて位置指令値を変化させていることが確認できる。また、距離と角度の位相をずらすことにより、停滞することなくスムーズに移動していることが分かる。

また、左足の足先の位置・角度指令値の偏差を図 6.10 に示す。これより、サーボ追従誤差も非常に小さくなっていることが確認できる。

本研究の最終目標としては、滑走移動だけでなく 2 足歩行との切り換えが重要になるが、これについては能動車輪式足部機構 WS-2 と同様に、足部に受動車輪だけでなく通常の摩擦接地部を設け、各足を足部内辺や外辺を中心軸に内側や外側に傾けることによって実現可能と考えられる。また、本研究では前進のみの滑走移動しか実現されていないので、今後は停止動作や旋回動作の生成が必要であると考えられる。



Figure 6.7 Skating experiments using inline skate system, WS-3.

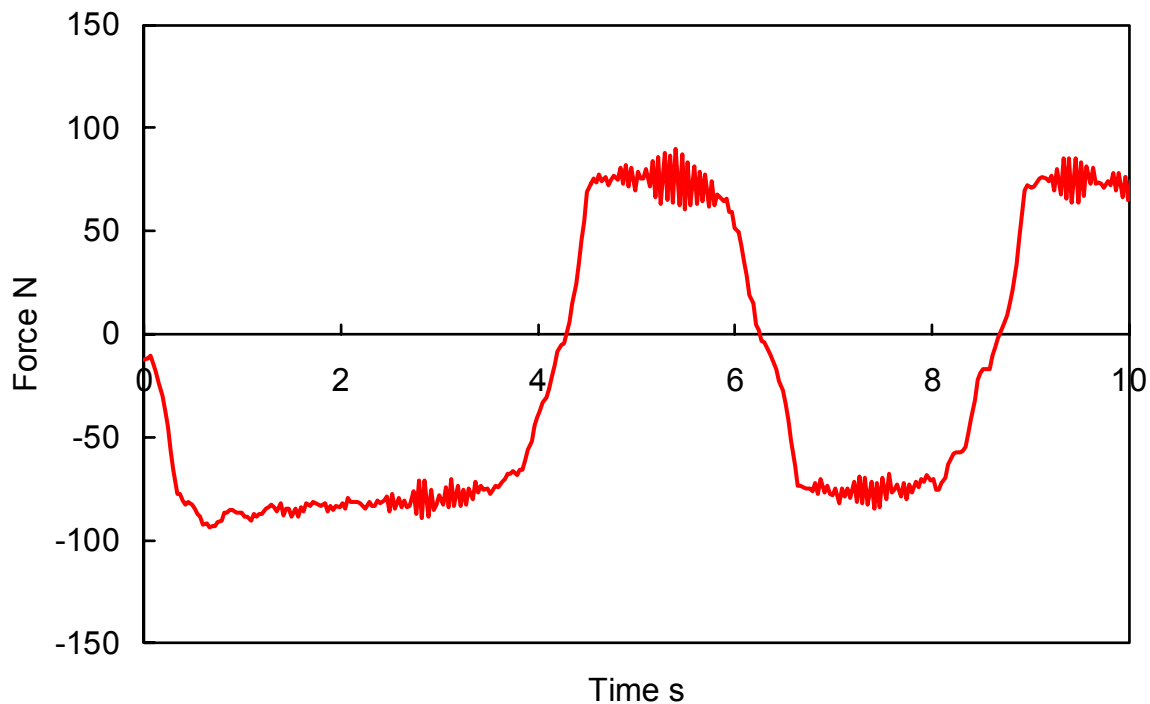


Figure 6.8 Left foot reaction force along the y axis.

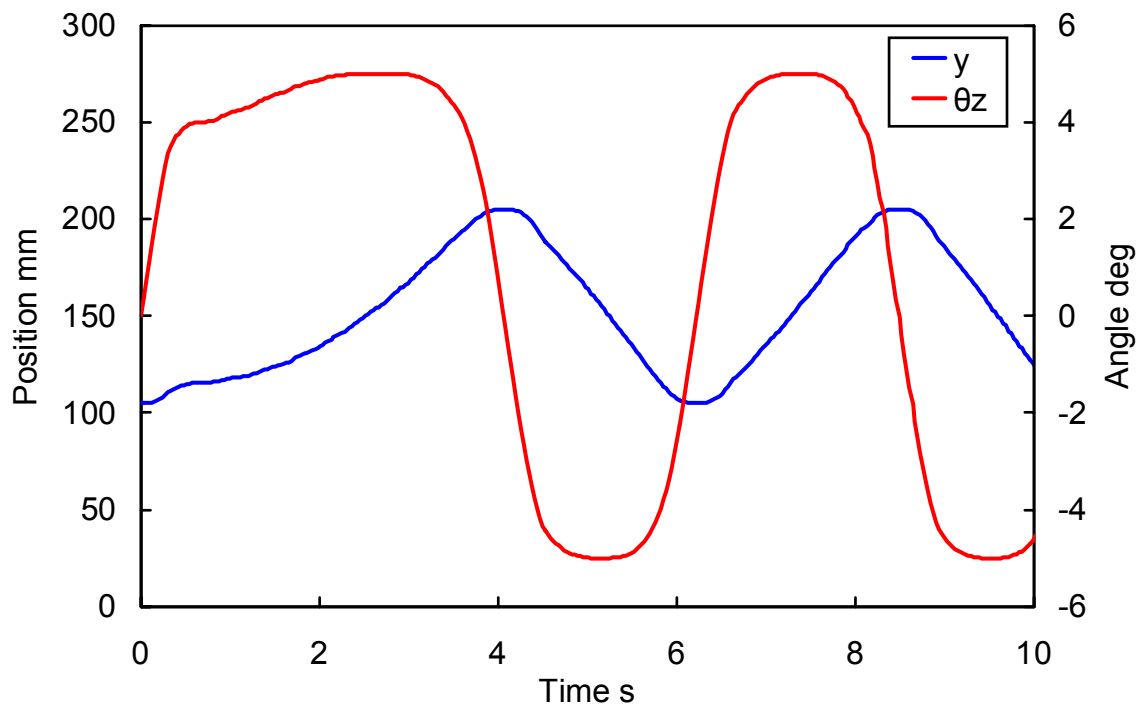


Figure 6.9 Left foot response position and angle.

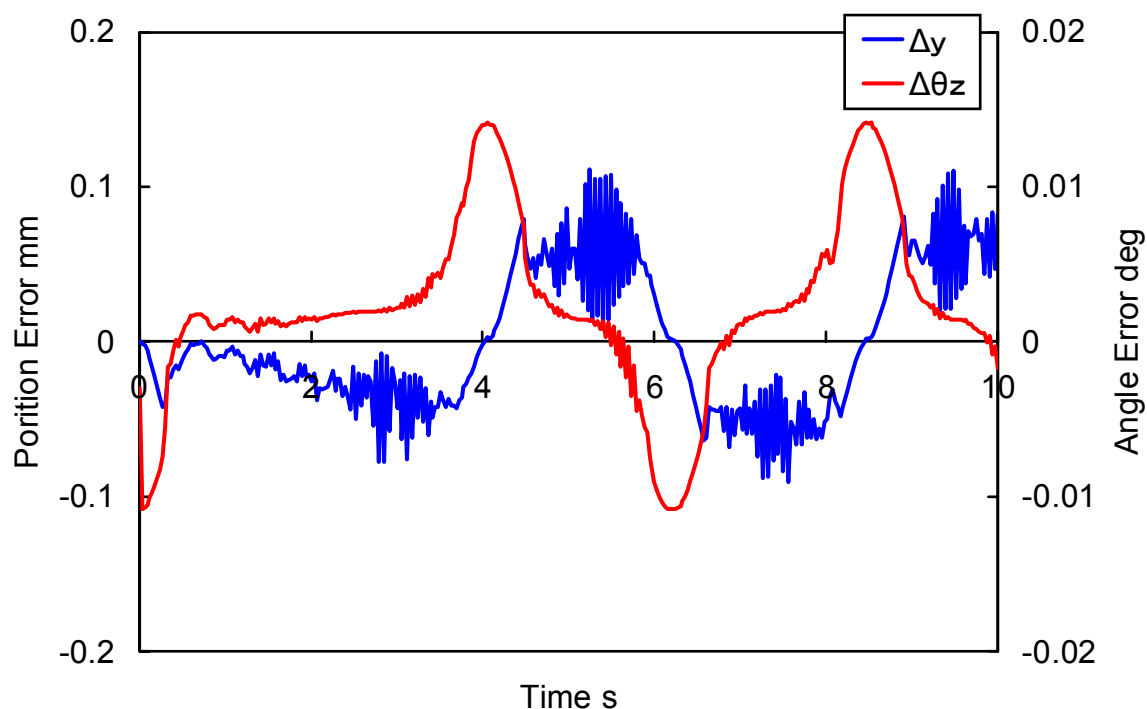


Figure 6.10 Deflection of left foot position and angle.

6.6 まとめ

2足歩行ロボットのためのインラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 を製作し、スウィズル動作というスケートを周期的に運動させることにより車輪の摩擦力を推力として取り出す滑走移動のための制御法を考案した。これは脚に通常的位置制御を適用すると摩擦力により拘束された足部を無理に動かすことになり過大な内力が生じるため、この状態を回避するために、力に応じて位置指令値を変化させるというものである。実験の結果、円滑なスウィズル動作の生成に成功し、考案した手法の有効性を確認した。

第7章 ローラースケート型足部機構 WS-4 の開発

- 7.1 はじめに
- 7.2 スケーティングパターン生成法
- 7.3 実験方法
- 7.4 評価実験と考察
- 7.5 まとめ

7.1 はじめに

第6章では、インラインスケート型足部機構 WS-3 を開発し、スウィズル動作により滑らかに滑走移動するための滑走移動法を導入し、これを用いて行った評価実験と考察について述べた。WS-3 は受動車輪式足部機構であるため、アクチュエータを持つ能動車輪式足部機構 WS-2 に比べ軽量に構成できる利点がある。

2足歩行ロボットにおいて、受動車輪を使って滑走移動を実現する方法は、第6章でも述べたようにスウィズル動作によるものと、蹴り出し動作によるものの大きく2つに分けられる。本章では後者の蹴り出し動作による滑走移動に焦点を当てる。蹴り出し動作による滑走移動を試みる先行研究はいくつかある。大塚ら[172]はシミュレーション上で試行錯誤的に滑走パターンを求めており、また前田ら[173]は滑走動作生成時にロボットの重心位置のみしか考慮しておらず、滑走移動の際に生じる慣性力の影響を考慮していない。

そこで本研究ではローラースケート型の受動車輪式足部機構を用い、蹴り出し動作によって推力を得て滑走移動を実現することを目標とする。これは片足を受動車輪のみで構成し他方を通常の板状の足とすることにより、キックスケートのように漕ぎ進むという移動方法である。本章では、滑らかな蹴り出し動作を実現するために必要なパターン生成法の開発とその評価実験、考察について述べる。

7.2 スケーティングパターン生成法

路面を蹴って進むという方法は一見簡単な様に思われるが、実際には路面との摩擦

や着地時の衝撃など複雑な問題を含んでいる．これらの問題はシミュレーションでは対応困難であるため，まず一般的なキャストでスケート側の足を構成して予備実験を行った．

実験用のパターンとしては通常の歩行と同じようにして設定したパターンを用いた．これは立脚側（スケートを装着した方の足部）に ZMP が来るように設定し，蹴り足を浮かせた状態から，路面を蹴ってまた浮かせるというものである（図 7.1）．

実験の結果，上述のパターンでは全く目的が達成されないことが分かった．その原因としては次のようなものが挙げられる．

- 機械的なたわみにより蹴り足が路面を蹴ってしまった場合，衝撃によりロボットが不安定になる．衝撃が少なくなるように蹴り足の高さを調節したパターンでは逆に足が路面に全く接触しない場合がある．
- ZMP が車輪側の足にあるため蹴り足側に体重が乗らず，十分な摩擦力が得られない．

そこで新たに考案した蹴り出し動作は，ZMP を立脚側に移しながら蹴るところに特徴がある（図 7.2）．十分な摩擦力を得られるだけの蹴り足側の床反力を確保し，かつ蹴り出し時の衝撃を緩和するのが狙いである．この蹴り出し動作は次の 3 つのパターンを接続したものとして考えられる．

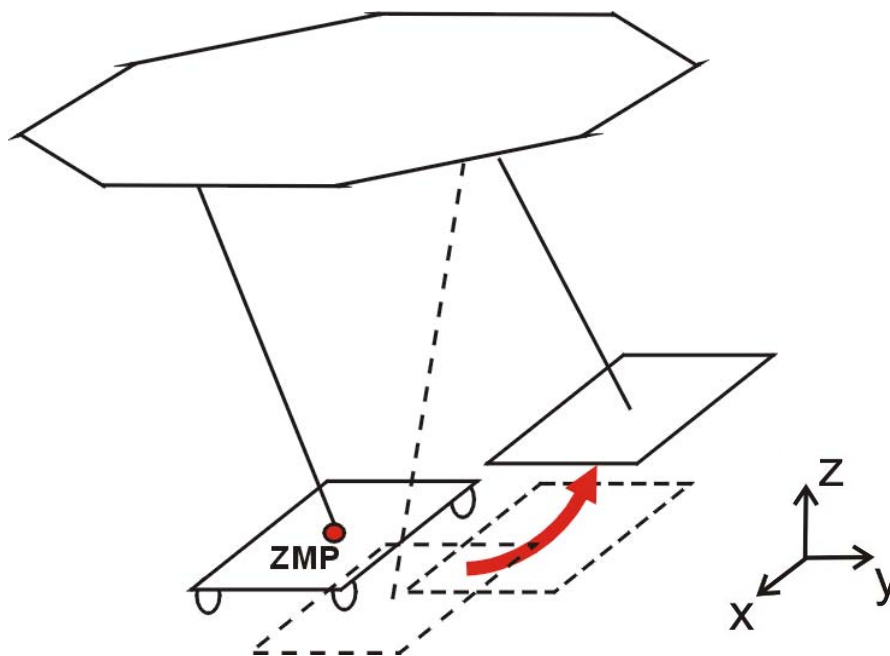


Figure 7.1 Skating motion of preliminary experiment. A robot's weight is on the standing foot during kicking motion.

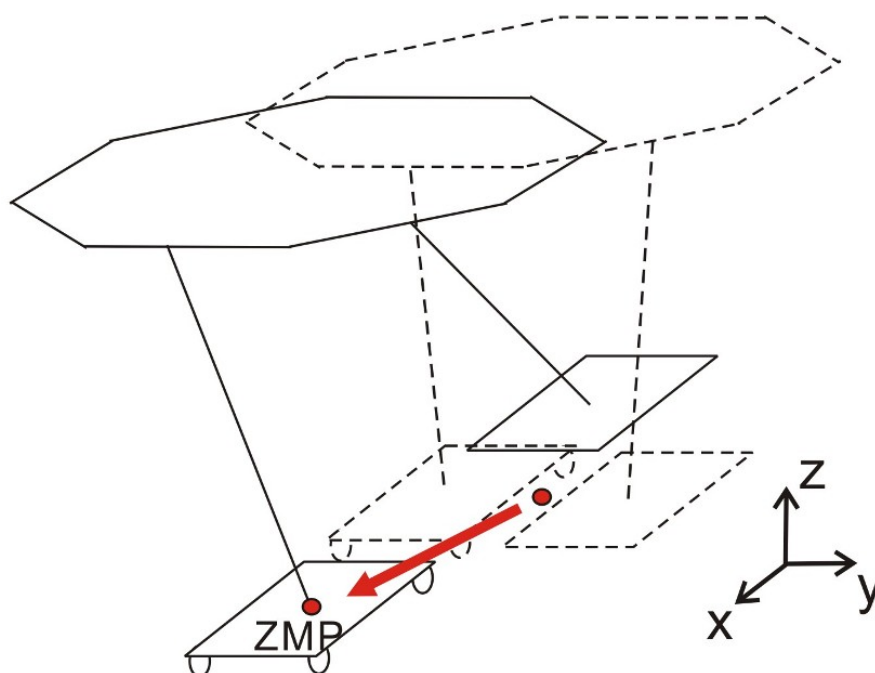


Figure 7.2 Skating motion shifting ZMP from the kicking foot to the standing foot.

- 蹴り出しパターン
- 滑走パターン
- 両立脚パターン

各パターンは、それぞれにパラメータの指定の仕方や ZMP の位置が異なっており、互いをいかにして滑らかに接続するかが重要になる。

新しく考案した蹴り出し動作のパターン生成法について、以下に詳述する。

7.2.1 座標系の定義

重要な点として運動座標系の定義の問題がある。滑走動作時は歩行の場合と異なり、両方の足が路面に対して相対的に運動する。特に滑走中には蹴り足がスケート側の足に対して相対的に運動する。したがって運動座標系をスケート側の足に固定し、蹴り足側の運動をこの座標系で指定すると直感的に分かりやすい (図 7.3)。

上述のように座標系を定義すると、各パターンで決定すべきパラメータは次のようになる (一部従属的なものも含まれる)。

T : 各パターンの時間

v_s : スケート足の x 方向速度

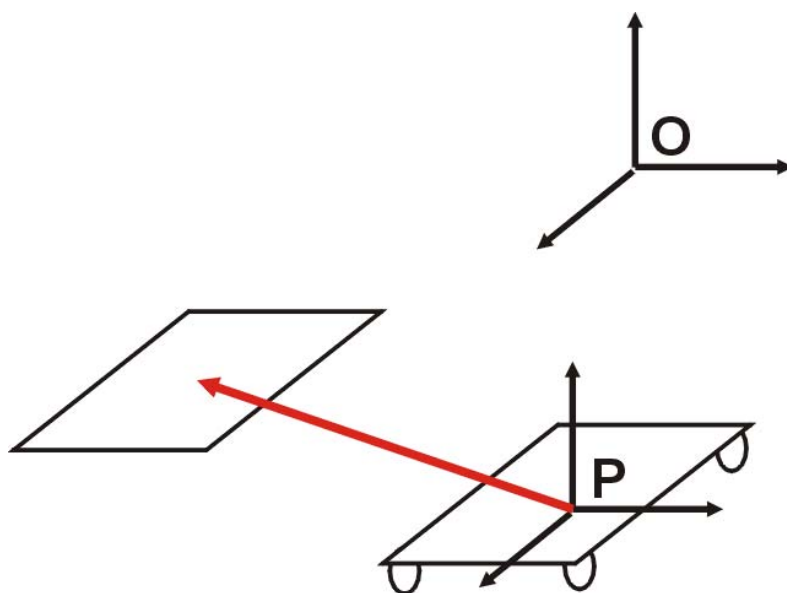


Figure 7.3 Definition of coordinate systems.

x_S : スケート足の x 方向絶対位置

\bar{v}_K : 蹴り足の相対的な x 方向速度

\bar{x}_K : 蹴り足の相対的な x 方向位置

\bar{z}_K : 蹴り足の相対的な高さ

パラメータは各パターンの終了時の値を指定し、途中の値は直前のパターンの最終値を考慮して補間することにより計算する。

7.2.2 補間関数

各パラメータを補間する際には以下のような関数を使用する。これは、5 次関数およびそれを微積分したものであり s_0 , s_t はそれぞれ初期値と最終値である。

$$f_1(s_0, s_t, t) \equiv 6 \frac{s_t - s_0}{T^5} t^5 - 15 \frac{s_t - s_0}{T^4} t^4 + 10 \frac{s_t - s_0}{T^3} t^3 + s_0 \quad (7.1)$$

$$\begin{aligned} h_1(s_0, s_t, c, t) &\equiv \int_0^t f_1(s_0, s_t, t) dt \\ &= \frac{s_t - s_0}{T^5} t^6 - 3 \frac{s_t - s_0}{T^4} t^5 + \frac{5}{2} \frac{(s_t - s_0)}{T^3} t^4 + s_0 t + c \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$\begin{aligned}
 f_2(s_0, \dot{s}_0, s_t, t) &\equiv \frac{3}{T^5}(2s_t - \dot{s}_0 T - 2s_0)t^5 + \frac{1}{T^4}(-15s_t + 8\dot{s}_0 T + 15s_0)t^4 \\
 &+ \frac{2}{T^3}(5s_t - 3\dot{s}_0 T - 5s_0)t^3 + \dot{s}_0 t + s_0
 \end{aligned}
 \tag{7.3}$$

$$\begin{aligned}
 g_2(s_0, \dot{s}_0, s_t, t) &\equiv \frac{d}{dt} f_2(s_0, \dot{s}_0, s_t, t) \\
 &= \frac{15}{T^5}(2s_t - \dot{s}_0 T - 2s_0)t^4 + \frac{4}{T^4}(-15s_t + 8\dot{s}_0 T + 15s_0)t^3 \\
 &+ \frac{6}{T^3}(5s_t - 3\dot{s}_0 T - 5s_0)t^2 + \dot{s}_0
 \end{aligned}
 \tag{7.4}$$

7.2.3 蹴り出しパターン

蹴り足が離地する際のスケート側の足の x 方向の速度がスケーティング動作の移動速度を決定する。蹴り足は路面に接地しておりその位置は固定であるから、スケート足の絶対速度のみを指定すればよく、その他のパラメータはこれに応じて自動的に決定する。

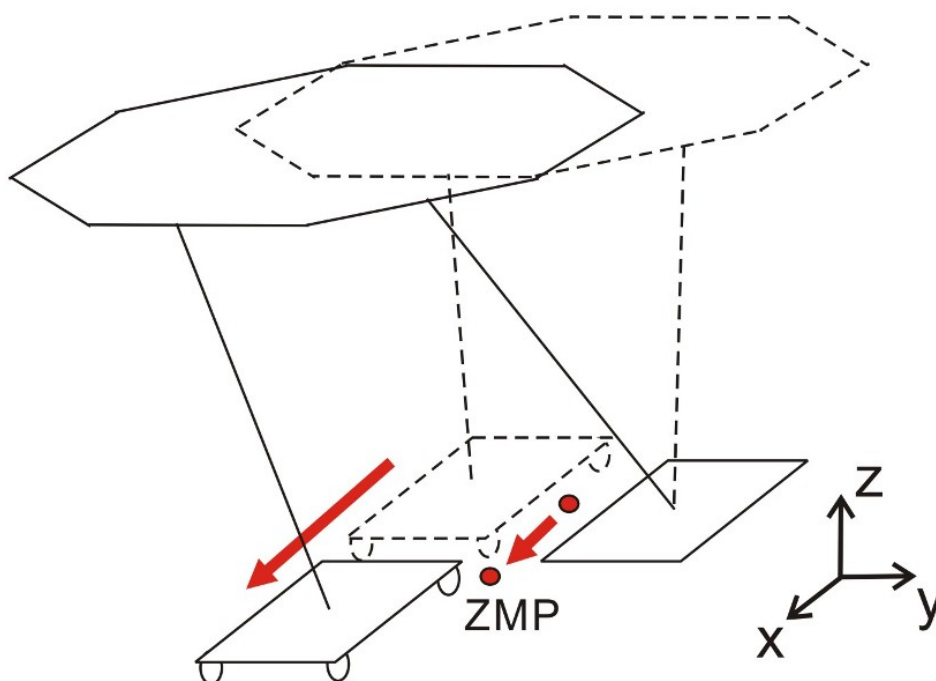


Figure 7.4 Kicking motion.

$$\begin{aligned}
 v_S(t) &= f_1(v_{S0}, v_{St}, t) \\
 x_S(t) &= h_1(v_{S0}, v_{St}, x_{S0}, t) \\
 \bar{v}_K(t) &= f_1(-\bar{v}_{S0}, -\bar{v}_{St}, t) \\
 \bar{x}_K(t) &= h_1(-\bar{v}_{S0}, -\bar{v}_{St}, \bar{x}_{K0}, t) \\
 \bar{z}_K(t) &= 0
 \end{aligned}
 \tag{7.5}$$

また、このときの ZMP は、つねに両足を結んだ線の中点にできるように設定する。こうすることにより、後述するフィルタによって ZMP はスケート側の足にスムーズに移動する。蹴り出しパターンのイメージ図を図 7.4, またこのときの各パラメータのグラフの例を図 7.5 に示す。

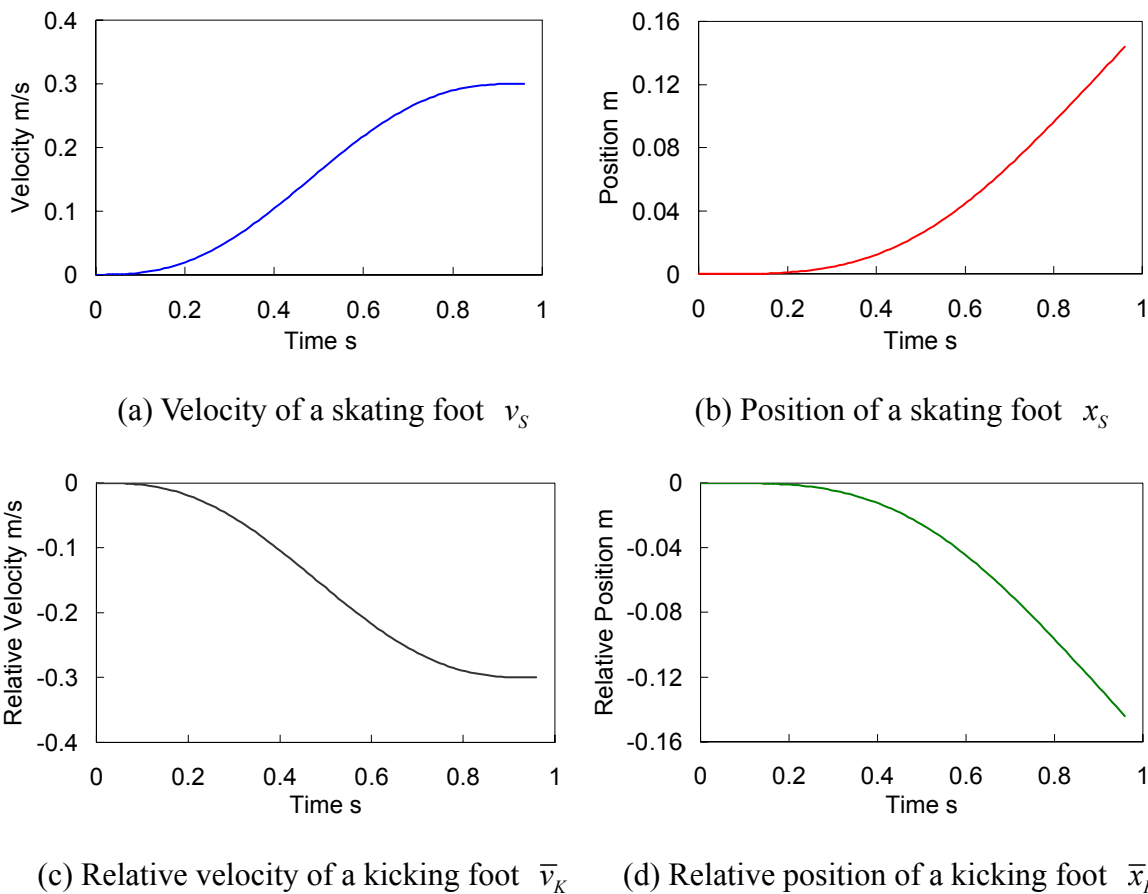


Figure 7.5 Example of kicking pattern.

7.2.4 滑走パターン

滑走パターンとは、蹴り出しの力によって惰性で滑る期間のパターンを指す。滑走パターンのパラメータ設定に際して最も注意しなければならないのは、スケート側の足の速度をどのようにして指定するかということである。

実際にはロボットは車輪の転がり抵抗によって減速するが、これは荷重の偏り具合や車輪の接地状態などにより毎回異なるため数式として実装することはほとんど無意味である。そこで、減速時の加速度は非常に小さいと考え、モーメント補償計算でこれを無視できると仮定すれば速度はある程度自由に決めることができる。ただし、誤って滑走中に足を下ろす様なパターンを作ってしまうと転倒に繋がるので、あらかじめ実験を行って推進距離に見当をつけておくことが必要である。

また、滑走中の蹴り足は自由に動かすことが可能なので、これについてもパターン設定時に決める必要がある。ZMP に関してはスケート側の支持多角形の範囲内に設定する。

以上よりスケート側の足は速度を、遊脚側は位置を基準に設定すればよいから、滑走パターンの各パラメータは次のようになる。

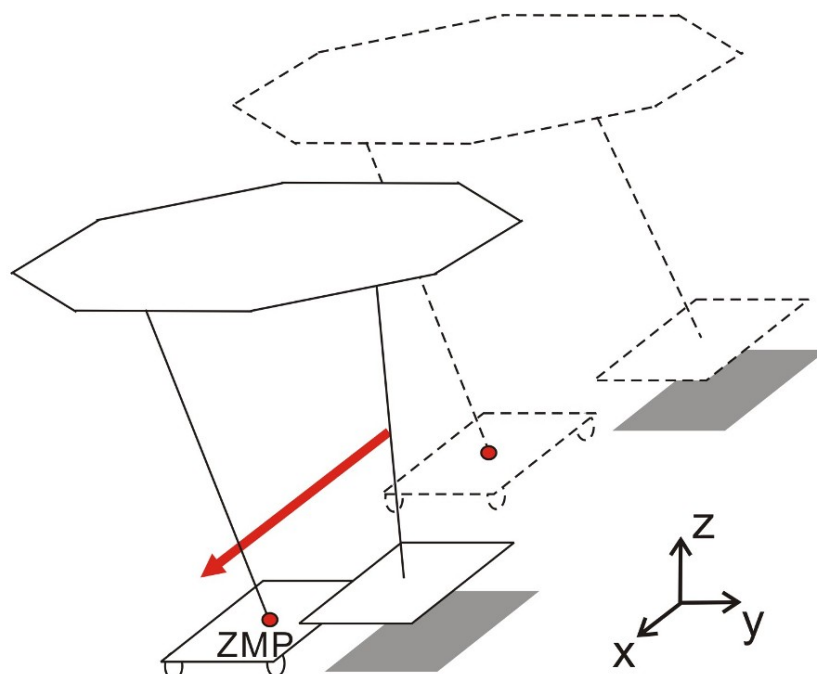
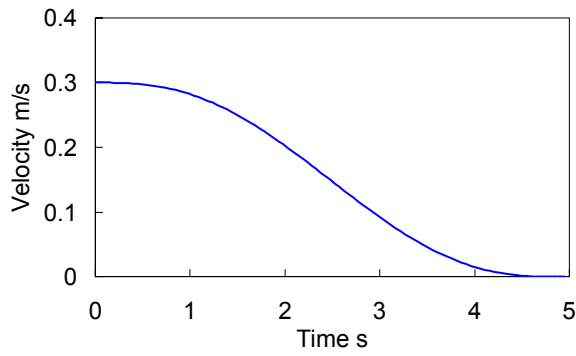
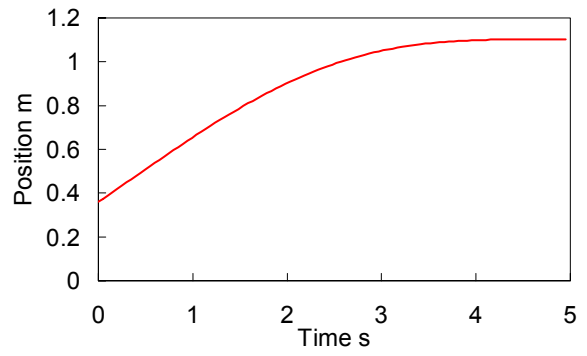


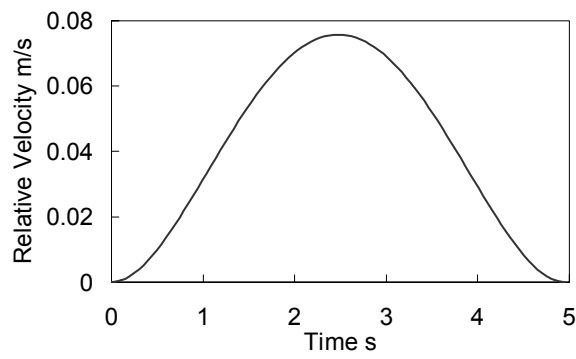
Figure 7.6 Sliding motion.



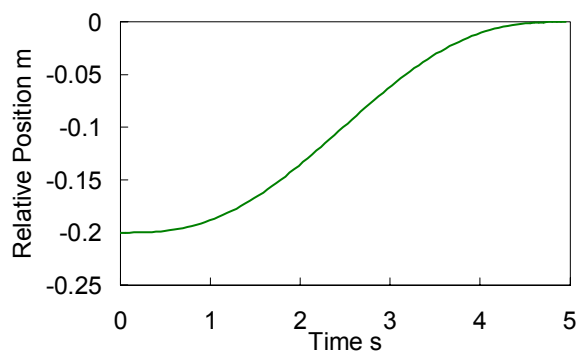
(a) Velocity of a skating foot v_s



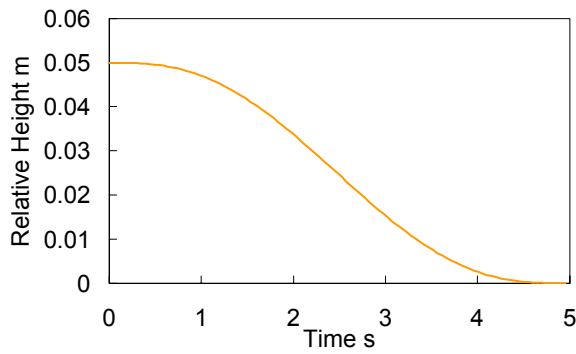
(b) Position of a skating foot x_s



(c) Relative velocity of a kicking foot \bar{v}_k



(d) Relative position of a kicking foot \bar{x}_k



(d) Relative height of a kicking foot \bar{z}_k

Figure 7.7 Example of sliding pattern.

$$\begin{aligned}
v_S(t) &= f_1(v_{S0}, v_{St}, t) \\
x_S(t) &= h_1(v_{S0}, v_{St}, x_{S0}, t) \\
\bar{v}_K(t) &= g_2(\bar{x}_{K0}, \dot{\bar{x}}_{K0}, \bar{x}_{Kt}, t) \\
\bar{x}_K(t) &= f_2(\bar{x}_{K0}, \dot{\bar{x}}_{K0}, \bar{x}_{Kt}, t) \\
\bar{z}_K(t) &= f_1(\bar{z}_{K0}, \bar{z}_{Kt}, t)
\end{aligned} \tag{7.6}$$

滑走パターンのイメージ図を図 7.6 に、またこのときの各パラメータのグラフの例を図 7.7 示す。

7.2.5 両立脚パターン

両立脚時はロボットが完全に静止している状態であるから、特に設定すべきパラメータはない。またこのときの ZMP は両足の間差点に設定する。

$$\begin{aligned}
v_S(t) &= 0 \\
x_S(t) &= x_{S0} \\
\bar{v}_K(t) &= 0 \\
\bar{x}_K(t) &= \bar{x}_{K0} \\
\bar{z}_K(t) &= 0
\end{aligned} \tag{7.7}$$

両立脚パターンのイメージ図を図 7.8 に示す。

7.2.6 パターンの接続

以上で説明した 3 つのパターンを接続することにより、スケーティングパターンを設定することができる。各パターンは位置または速度の次元の 5 次関数として定義されているため、少なくとも加速度までは連続である。したがって、それぞれのパターンは滑らかに接続することができる。表 7.1 のようなパターン構成で作成した前進スケーティングパターンのグラフを図 7.9 に示す。ただし、初期値はすべてゼロである。最初の黒線は表 7.1 の No.1 の両立脚パターンを、次の青線は No.2 の蹴り出しパターンを、赤線と緑線は No.3, No.4 の滑走パターンを示している。

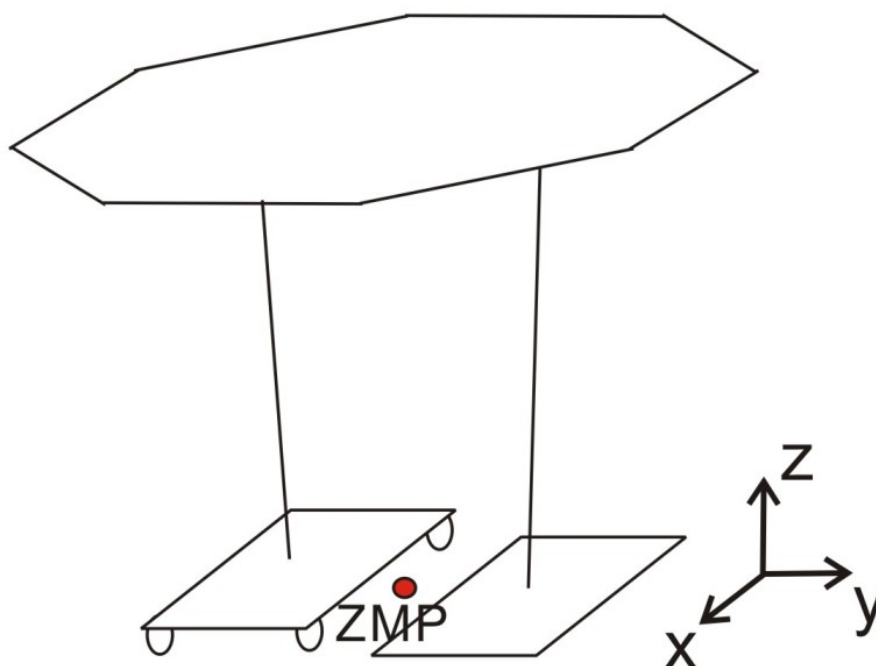
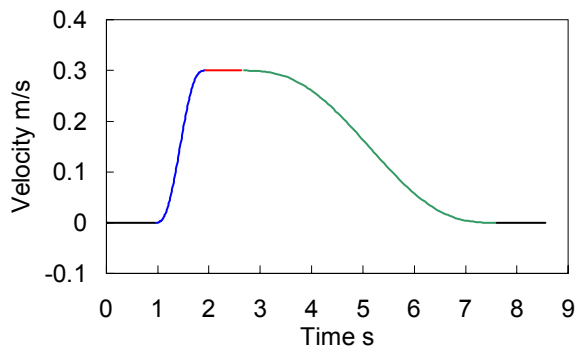


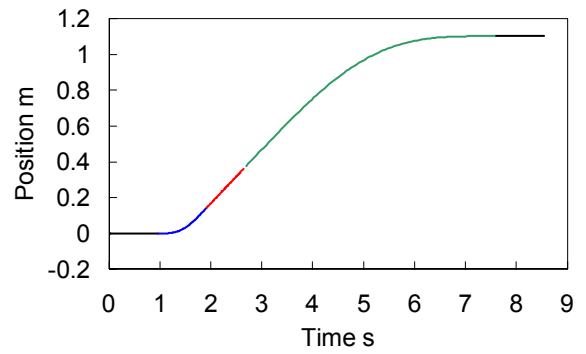
Figure 7.8 Double support phase.

Table 7.1 Setup of forward skating motion.

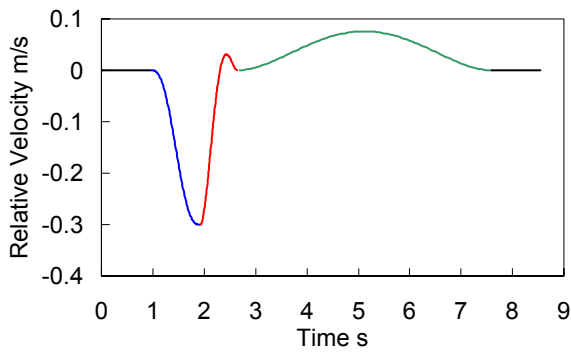
No.	Type of Motion	Parameter
1	Double support phase	$T = 0.96$ sec
2	Kicking	$T = 0.96$ sec $v_{St} = 0.3$ m/s
3	Sliding motion	$T = 0.72$ sec $v_{St} = 0.3$ m/s $\bar{x}_{Kt} = -0.2$ m $\bar{z}_{Kt} = 0.05$ m
4	Sliding motion	$T = 4.95$ sec $v_{St} = 0$ m/s $\bar{x}_{Kt} = 0$ m $\bar{z}_{Kt} = 0$ m
5	Double support phase	$T = 0.96$ sec



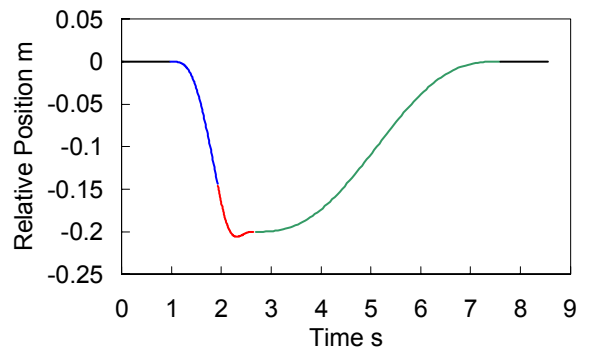
(a) Velocity of a skating foot v_s



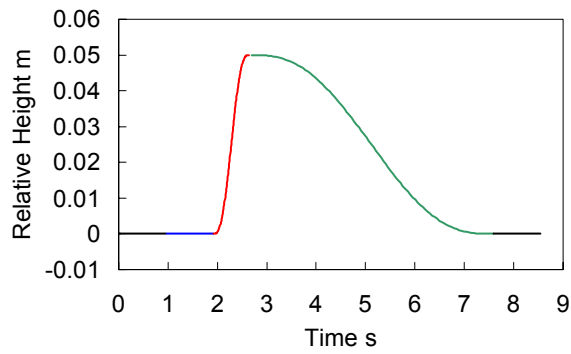
(b) Position of a skating foot x_s



(c) Relative velocity of a kicking foot \bar{v}_k



(d) Relative position of a kicking foot \bar{x}_k



(d) Relative height of a kicking foot \bar{z}_k

Figure 7.9 Example of forward skating motion.

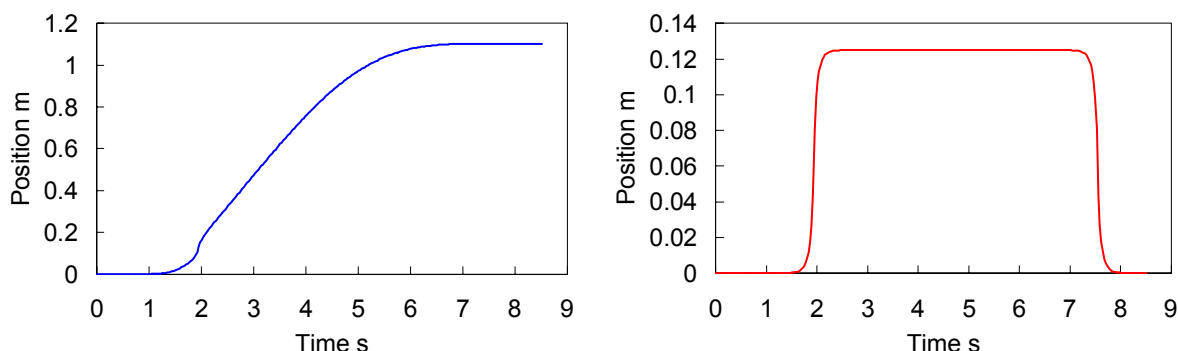
7.2.7 モーメント補償軌道の算出

第5章でも述べたが、モーメント補償軌道計算を適用するために必要なものは左右の足先軌道、目標 ZMP 軌道および腰の初期軌道である。腰の初期軌道については、第5章と全く同様に左右の足の間接点の真上に設定すればよいのでここでは説明しない。

これまでに、スケート側の足については X 方向の位置が、そして蹴り足についてはスケート側の足に対する X, Z 方向の相対位置が求まっている。スケーティング動作においては前後方向の移動しか考えないので、各足の Y 方向の位置は初期値そのままであると考えてよい。したがって、スケート側・蹴り足側の足先の位置・姿勢をそれぞれフレームで表現すると次のようになる。

$$\begin{aligned}
 {}^o_s\mathbf{T}(t) &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x_s(t) \\ 0 & 1 & 0 & y_{s0} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^s_k\mathbf{T}(t) &\equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \bar{x}_k(t) \\ 0 & 1 & 0 & \bar{y}_{k0} \\ 0 & 0 & 1 & \bar{z}_k(t) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^o_k\mathbf{T}(t) &\equiv {}^o_s\mathbf{T}(t) {}^s_k\mathbf{T}(t)
 \end{aligned} \tag{7.8}$$

目標 ZMP は、接続前の個別のパターンにおいてそれぞれに都合のよい位置に設定されており、接続したパターン全体で見るときには連続でない。したがって、歩行の



(a) ZMP trajectory along the x axis

(b) ZMP trajectory along the y axis

Figure 7.10 Reference ZMP trajectories.

場合と同じように Butterworth フィルタをかけることにより滑らかにする。これまで述べてきた方法で作成したパターンの ZMP 軌道にフィルタをかけたものを図 7.10 に示す。

7.3 実験方法

考案したスケーティングパターン生成法を評価するためのプラットフォームには、人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R (Waseda Leg - No.16 Refined) [94]を用いる。また、その評価のための足部機構として、ローラースケート型受動車輪式足部機構 WS-4 (Waseda Shoes - No.4) を製作した (図 7.11)。これは市販品のインラインスケートを 2 つ結合し、人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R に装着可能にしたものである。8 つの受動車輪を有しており、優れた直進性と転がり特性を有している。

本章の目標は、以下のように定めている。

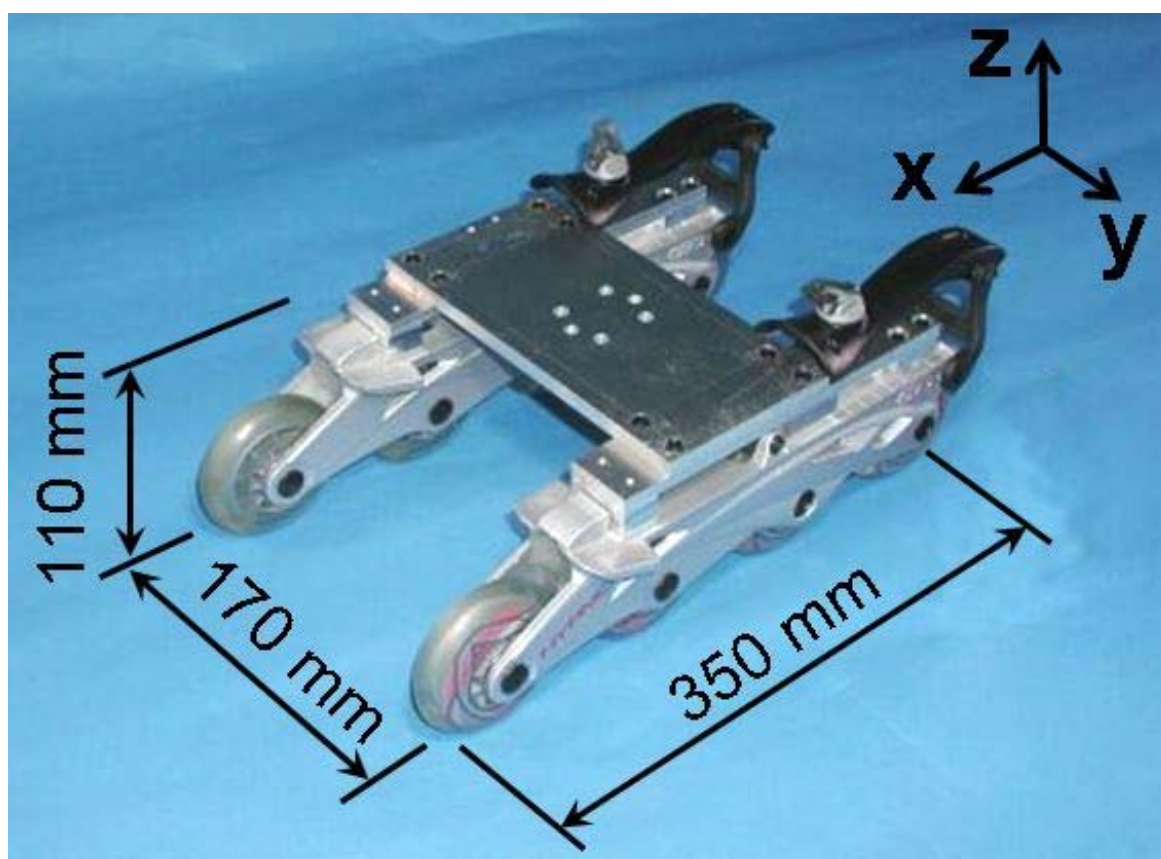


Figure 7.11 Roller skate system for biped robots, WS-4.

- ローラースケート型の受動車輪式足部機構を用い、蹴り出し動作によって推力を得て滑走移動を実現すること

この目標に対して、開発したスケーティングパターン生成法の有効性を確認するために、下記の通り評価実験を行う。

- 平坦路面において滑走移動をさせ、円滑な蹴り出し動作が可能か評価

7.4 評価実験と考察

ローラースケート型受動車輪式足部機構 WS-4 を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16R に装着し、前節で述べた評価実験を行った。

考案したスケーティング動作のための蹴り出し動作を評価するため、生成したスケーティングパターンを出力して動作を観察した。この際、蹴り出し速度を 0.3 m/s に設定して前後へのスケート動作パターンをロボットに出力し、蹴り脚の反力を計測した。

実験の結果、円滑な前進・後退動作の生成に成功した。実験の様子を図 7.12 に示す。また、その際に足部 6 軸力覚センサで計測した蹴り脚の反力のグラフを図 7.13 に示す。蹴り出し時に十分な摩擦力得るための Z 方向の力はほぼ一定に保たれており、また推進力になる X 方向の力も十分に得られていることが確認できる。さらに、着地衝撃による影響も少なくなっており、考案したパターン生成法は有効であると考えられる。また、図 7.14 と図 7.15 に示すように、ZMP 軌道からも安定した滑走動作を実現できていることが分かる。

本研究の最終目標としては、滑走移動だけでなく 2 足歩行との切り換えが重要になるが、これについては能動車輪式足部機構 WS-2 と同様に、足部に受動車輪だけでなく通常の摩擦接地部を設け、各足を足部内辺や外辺を中心軸に内側や外側に傾けることによって実現可能と考えられる。また、重量は増加してしまうが、各受動車輪の回転を固定するロック機構を導入することも 1 つの解決策である。

また、本研究では前進のみの滑走移動しか実現されていないので、停止動作や旋回動作の生成が必要であると考えられる。



Figure 7.12 Skating experiments using roller skate system, WS-4.

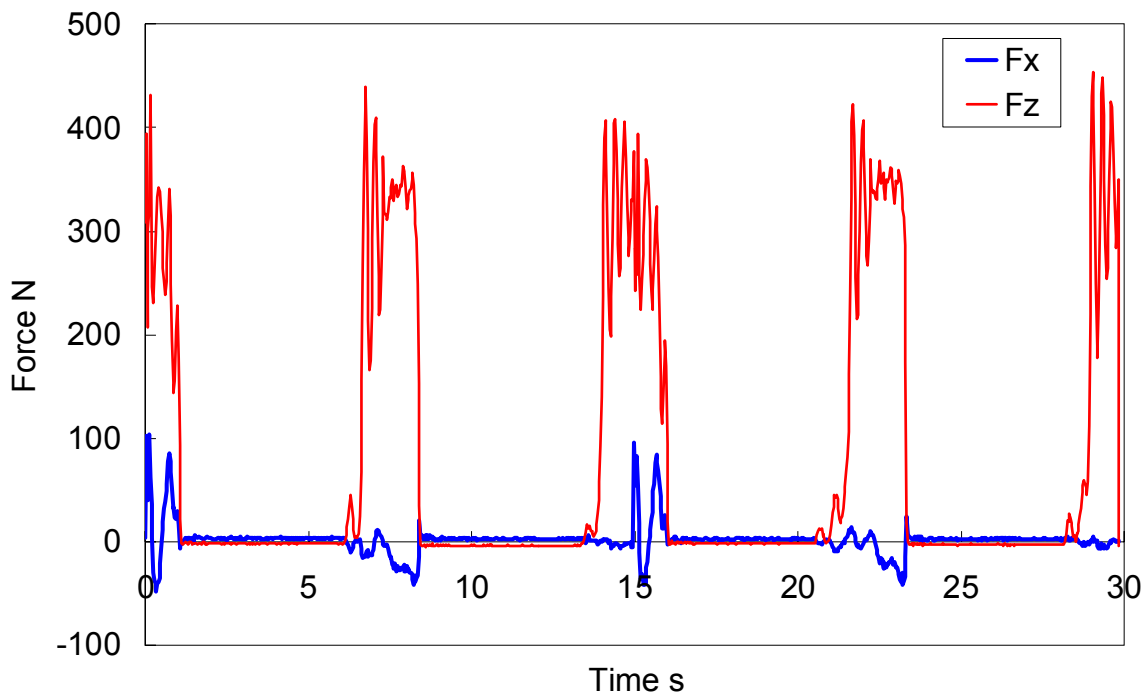


Figure 7.13 Force applied on the kicking foot.

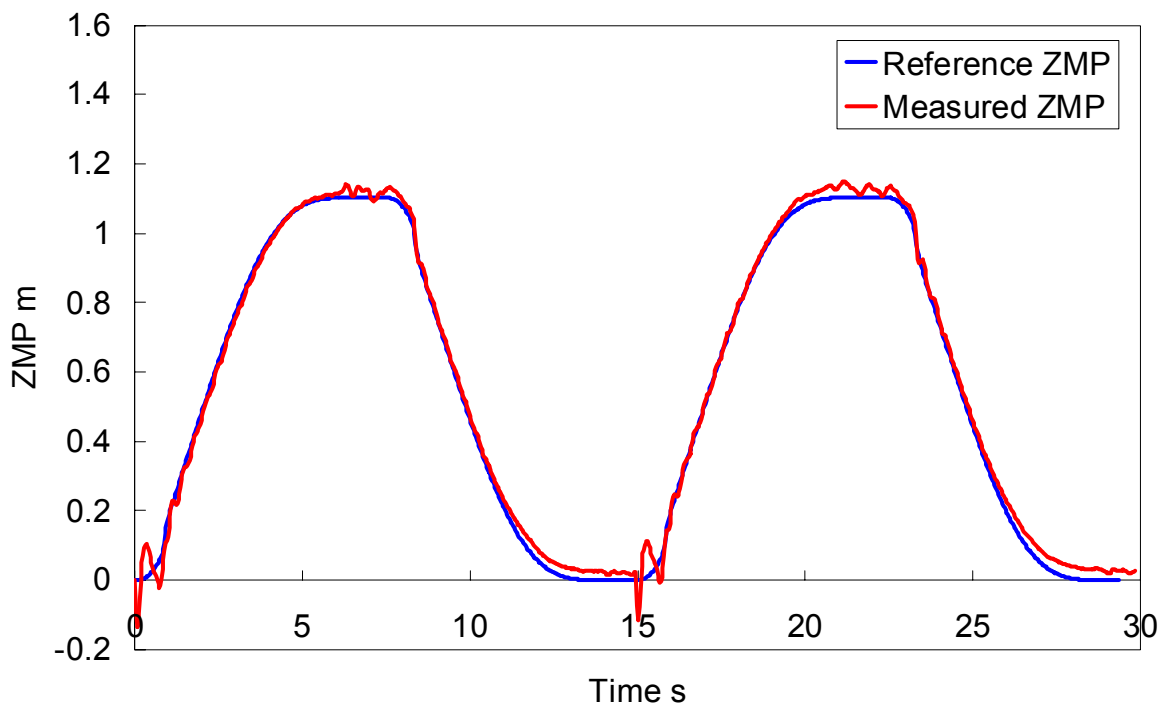


Figure 7.14 ZMP trajectories along the x axis.

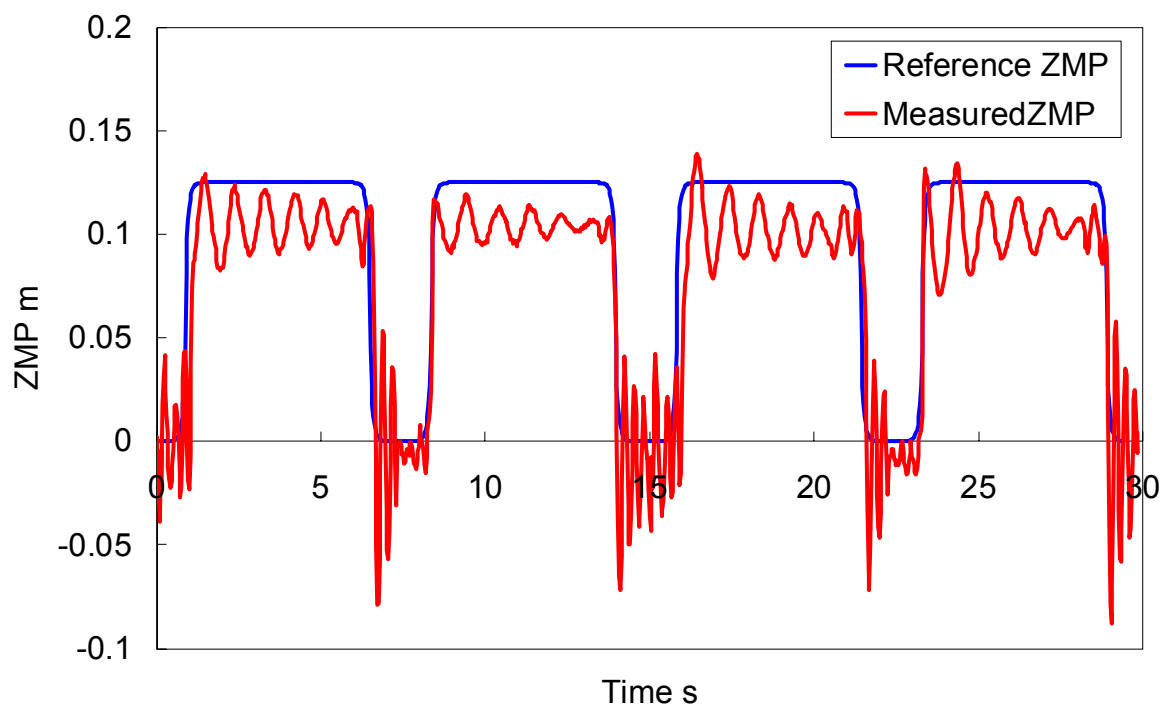


Figure 7.15 ZMP trajectories along the y axis.

7.5 まとめ

2足歩行ロボットのためのローラースケート型受動車輪式足部機構 WS-4 を製作し、足を蹴り出すことにより推力を得て滑走移動するスケーティングパターン生成法を考案した。スケート側の足に ZMP を置いたままで蹴り出し動作を行うと蹴り出し時の衝撃により不安定になり、また十分な推力が得られないため、蹴り足から軸足へスムーズに ZMP を移動させながら蹴り出す動作を生成するというものである。実験の結果、蹴り出し動作による滑走移動に成功し、考案した手法の有効性を確認した。

第8章 結論

- 8.1 総合的な考察
- 8.2 結論
- 8.3 今後の展望

8.1 総合的な考察

本論文では、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御の開発について述べた。特に、不整路面に適応可能な足部機構や、平坦路面での移動効率向上が可能な足部機構など4つの足部機構の開発について論じた。しかし、現時点では1つの足部機構で適応できる路面は1つだけであり、路面に応じて足部機構を交換しなければならない。各章末ではそれぞれの足部機構単体に関する考察をしたが、本論文を通じた総合的な考察ができていないため、本章ではまず、開発した4つの足部機構について総合的な考察を行う。

8.1.1 開発した足部機構の統合

本研究では4つの足部機構を開発した。第2章では実環境に存在する様々な不整路面に適応可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を開発し、第3章と第4章で述べた着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法を統合することにより、段差 20 mm と傾斜 10 deg の混在する路面での歩行に成功した。また第5章では、平坦路面における移動効率向上を目指し、能動車輪式足部機構 WS-2 を開発し、平地での高速移動や2足歩行と車輪走行の切り換えなどを実現した。しかし、WS-2 は車輪を駆動するためのアクチュエータを備えているため、足部の重量増加は免れない。そこで第6章と第7章では、車輪の回転にアクチュエータを用いない、受動車輪式足部機構を開発した。インラインスケート型足部機構 WS-3 では、スウィズル動作と呼ばれるスケートを周期的に運動させることにより車輪の摩擦力を推力として取り出す滑走移動を実現した。また、ローラスケート型足部機構 WS-4 では、蹴り出し動作によって推力を取り出す滑走移動を実現した。受動車輪に関しては、下り坂などの傾斜路面では推力を生み出す動作をしなくとも移動することができるため、大きな移動効率向上

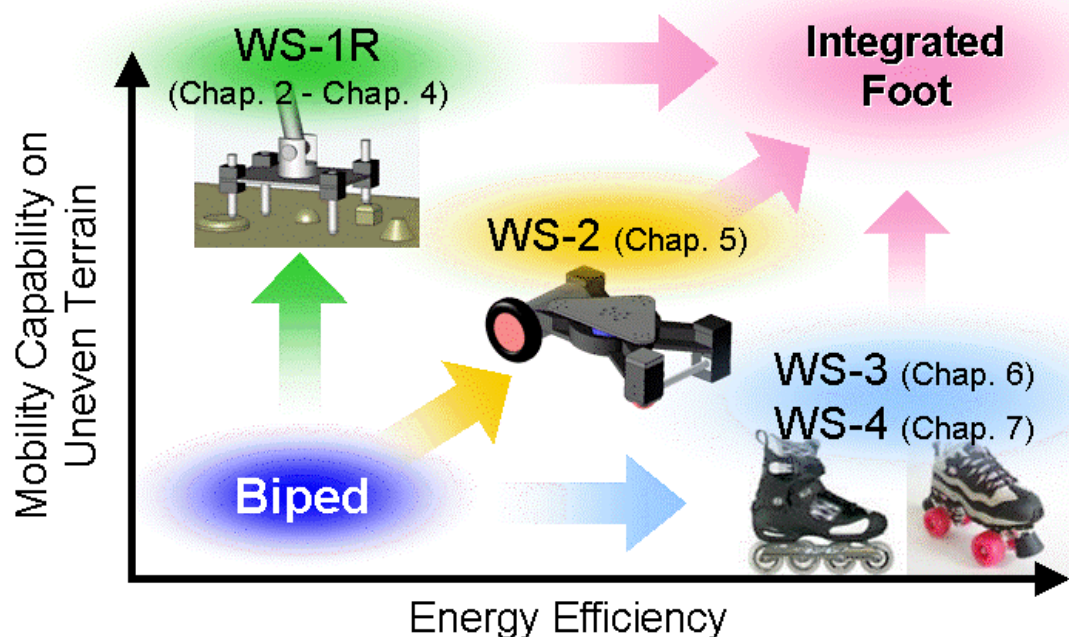


Figure 8.1 Prospect for integrating the developed foot systems.

が期待される。しかし、現段階ではブレーキ動作の生成が実現できていないため、その効果が確認できていない。

本研究では、不整地や平地などの路面の状況に応じて足部機構を交換するという発想のもと研究を行ったが、将来的には1つの足部機構で不整地や平地などの多様な路面に適応できることが望ましい。図8.1にそれぞれの足部機構の不整路面適応能力と平坦路面での移動効率の概略を示すが、これらの長所を組み合わせることにより、高効率に平地を移動でき、なおかつ不整地も歩行できるような2足歩行ロボットが提供できるのではないかと考える。

しかし、単純に統合しただけでは重量増加が免れないため、できる限り可動部は少ないほうがよく、アクチュエータの数は減らされるべきである。足部重量の点から考えると、能動車輪は使わずに、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と受動車輪式足部機構 WS-3, WS-4 を統合することが現実的ではないかと考える。またその際、セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R のロック機構と受動車輪式足部機構 WS-3, WS-4 の受動車輪のロック機構を共通なものにするなどの工夫が必要になるであろう。

8.1.2 セミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の可動爪の数の検討

本論文で開発したセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R は、足部機構単体で路面の凹凸を吸収し、足底と同じ大きさの大きな支持多角形を確保することを目的に開発した。しかし、不整路面適応制御法と統合することを考えると、路面と接地する4点すべてが可動する必要はない。不整路面適応制御法を有効に機能させるためには、路面からの反力を検出しなければならないため、むしろシリンダは固定されているべきである。固定爪の数を増やすことができれば、可動爪のロック機構が不要になるため、その分の軽量化が期待できる。4点すべてが可動、または固定という場合を除くと、可動爪と固定爪の組み合わせは図 8.2 のように4通り考えられる。それぞれの場合において、第3章で述べた着地軌道修正制御と統合する際の、各足部機構の特徴を以下にまとめる。

(a) 1点可動爪, 3点固定爪の組み合わせ

着地軌道修正制御で足部が Roll, Pitch 方向にならえるとしても、対角線上の固定爪が凸部を踏む場合、大きな四角形の支持多角形が確保できない場合がある。

(b) 2点可動爪, 2点固定爪（縦方向に配置）の組み合わせ

凸路面にはある程度ならうことができるが、固定爪が凹路面を踏む場合に支持多角形が確保できないなど、凹路面への適応性が悪い。

(c) 2点可動爪, 2点固定爪（対角線上に配置）の組み合わせ

凸部だけの不整路面については高い適応性を持つ。凹部だけの不整路面についてもある程度ならうことができるが、凸部と凹部の両方がある不整路面では、対角線上の固定爪で凸部を踏んだ場合、大きな四角形の支持多角形が確保できない場合がある。

(d) 3点可動爪, 1点固定爪の組み合わせ

凸部と凹部が混在した不整路面において、高い適応性を持つ。

本研究で開発した着地軌道修正制御を用いる場合は、“3点可動爪, 1点固定爪”を持つ足部機構と併用した場合が最も不整地適応能力が高く、4点可動爪の場合と同等の大きな四角形の支持多角形を確保できると考えられる。しかし、“2点可動爪, 2点固定爪（対角線上に配置）”の場合においても、エンコーダなどで可動爪の移動量を検出できるようにし、その値を制御にフィードバックすれば、対角線上の固定爪で凸

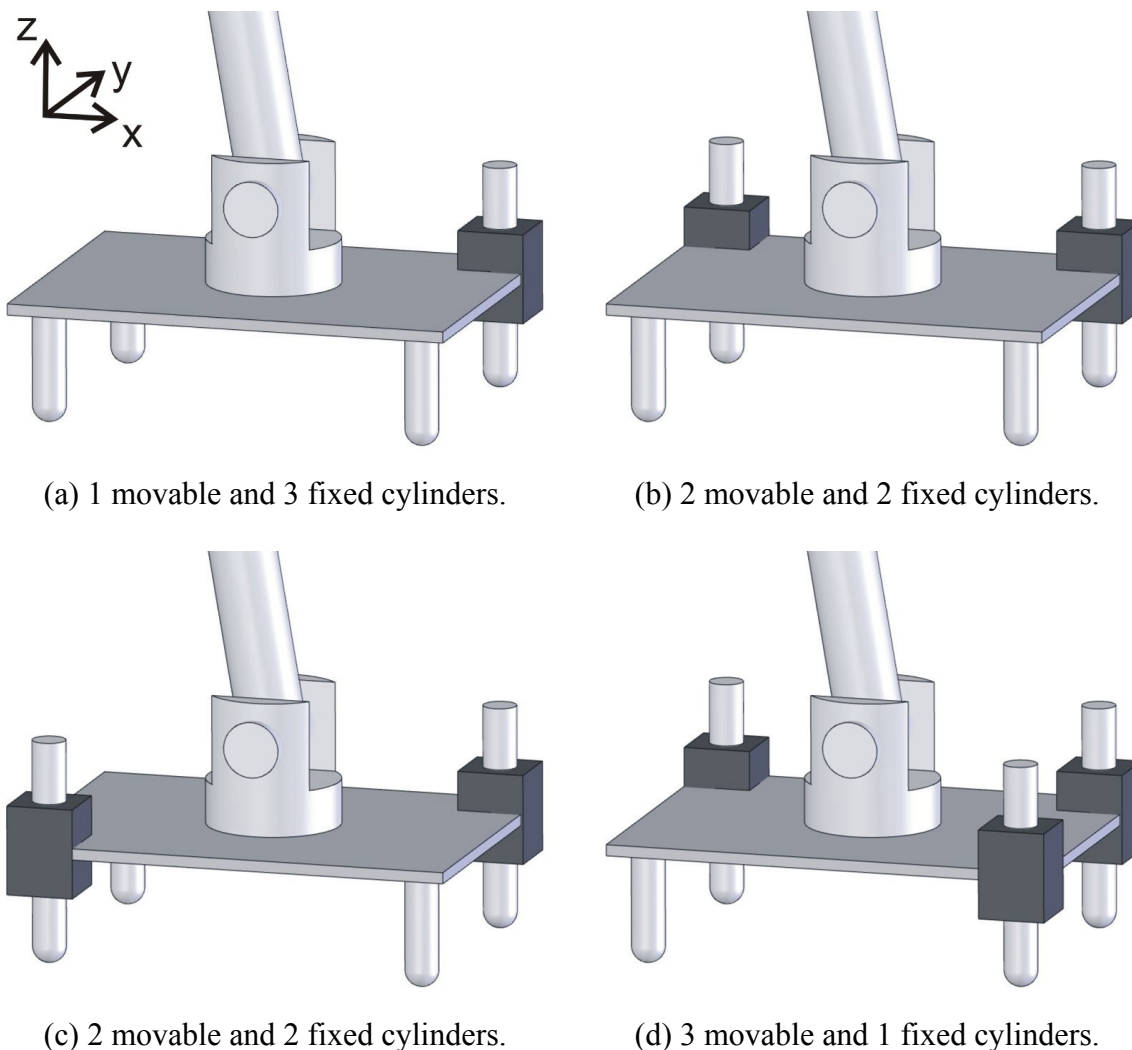


Figure 8.2 Combination of movable cylinder and fixed cylinder.

部を踏むような路面においても適応できるようになる可能性がある。可動爪の移動量を検出できるようにすると、センサを搭載する分重量増加が見込まれるが、可動爪の個数を減らせる可能性があるため、検討の余地は十分にあると考える。

ただし、上記で述べたことは路面との接地点が4点で、四角形の大きな支持多角形が確保できることが前提条件になっている。本研究では、支持多角形の面積と接地点数の関係から4点接地を選択したが、ZMP フィードバックなどの歩行安定化制御の改良がなされ、歩行安定性の向上が実現されれば3点接地でも問題はない。路面との接地点が3点の場合は、不整路面適応制御でロボットの足首がRoll軸とPitch軸周りに修正することができれば、3点とも固定爪で不整路面にならうことができ、足部は軽量になることが期待される。将来的に2足歩行ロボットの歩行安定性が向上されれば、3点接地の足部機構の開発についても考慮されるべきである。

8.2 結論

本研究では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し、実際に製作した足部機構を用いて評価実験を行い、その有効性を実証することを目的とした。具体的には、実環境に存在する様々な不整路面に適応可能な足部機構や、平坦路面での移動速度向上を図った車輪式足部機構を開発し、2足歩行ロボットに装着して行った実験により評価した。

本論文は、以下に示す8章から構成されている。

第1章では、序論として本研究の研究背景と目的、その意義と関連研究の動向について述べた。

第2章では、足部機構単体で凹凸路面での接地面積を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R (Waseda Shoes - No.1 Refined) の開発について、その動作原理とロック機構、評価実験と考察を述べた。WS-1Rは足底4隅に直動するシリンダがあり、各支持点が高さ方向に関して受動的に凹凸路面にならうというものである(図2.2)。各シリンダは路面との接地が検出可能なセンサを備えており、4点すべての接地を検出したら各支持点をロックし、大きな支持多角形を確保する。ロック機構には「くさびの原理」を応用したカム式ロック機構を採用した。開発した WS-1R を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R (Waseda Leg - No.16 Refined) に装着して実験により評価したところ、厚さ20mmまでのアクリル板を用いた擬似的な不整地(図2.19)や、点字ブロックが敷設された屋外環境(図2.22)での歩行に成功した。また、開発した足部機構の汎用性を評価するために、2足ヒューマノイド・ロボット WABIAN-2R (WAseda BIpedal humANoid - No.2 Refined) にも装着して実験したところ、厚さ20mmのアクリル板を用いて作製した擬似的な不整地での歩行に成功し、WS-1Rの汎用性についても確認した(図2.27)。一方で、この足部機構単体では、凹路面や傾斜路面に適応できないため、そのような路面での歩行実現には、不整路面適応制御の開発も必要であった。

第3章では、未知の凹凸路面に適応可能な着地軌道修正制御法の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。本制御法は、足部に非線形コンプライアンス制御を適用し、歩行パターンから得られる理論コンプライアンス中心移動量と足部6軸力覚センサのデータから算出される実測コンプライアンス中心移動量を比較することにより路面形状を検知するものである(図3.1)。そして、この路面情報を元に遊脚の荷重が増大してくる以前に歩行パターンにおける着地軌道を変更し路面にならわせることで、未知の凹凸路面や傾斜路面における歩行を可能とするものである。また、ジャイロを含

め特別なセンサや機構を必要とせず、ZMP (Zero Moment Point) 計測用の力センサのみを用いて実装が可能である。この制御法を、人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RII を用いた実験により評価したところ、歩行周期 2.0 s/step において 20 mm の凹凸のある未知の不整路面での歩行に成功した (図 3.18)。しかし、本制御法は機械剛性やモータの応答偏差などにより腰部と路面との平行が確保されない場合、足部が路面に水平に着地することができず、姿勢角の誤差が累積されるという欠点があった。特に、1.0 s/step などの歩行周期が短い場合に、足部の着地衝撃が原因で姿勢の倒れこみが顕著になるため、高速な歩行を実現するためには、姿勢補償制御の開発が必要であった。

第4章では、第3章において述べた着地軌道修正制御の欠点を補う推定姿勢補償制御法の開発、およびこの評価実験と考察を述べた。姿勢角を補償する際には、姿勢角センサから得られるデータを用いることが一般的であるが、それでは着地軌道修正制御の ZMP 計測用の力センサのみで実装可能という長所が薄れる。そこで、力センサから得られるデータのみで姿勢角を推定し補償する制御法を考案した。本制御法は、力センサから計測される ZMP 偏差に応じて姿勢角を補償するものである。着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIII に実装し評価したところ、歩行周期 1.0 s/step での凹凸路面の歩行 (図 4.7) や、傾斜約 10 deg での適応歩行 (図 4.10) に成功した。また、第2章で述べたセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合することにより、段差 20 mm の凹凸と傾斜約 10 deg の混在する路面においての安定歩行に成功し、開発した手法の有効性を確認した (図 4.14)。

第5章では、2足歩行という移動様式の離散的な環境に適応しやすいという長所を生かし、平坦路面での移動速度が遅いという短所を補うことができる能動車輪式足部機構 WS-2 (Waseda Shoes - No.2) の開発について、その移動経路設定法と評価実験、考察を述べた。WS-2 の構成としては、4 点の接地点のうち内側 2 点が通常の摩擦接地、外側前方が DC モータ駆動の能動車輪、そして外側後方は平面内で拘束を持たない 3 自由度の球状キャストになっている (図 5.2)。足部外辺を中心軸に各足を外側に傾け、車輪とキャストのみが接地する状態にすることで2足歩行と車輪走行の切り換えが可能である (図 5.10)。この足部機構を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R に装着して行った実験の結果、平面内における安定かつ高速な並進・旋回運動および2足歩行との滑らかな切り換えを実現した (図 5.19)。また、2足歩行の場合と比べエネルギー消費量の低減も確認でき (図 5.20)、開発した足部機構や移動経路設定法の有効性を確認した。

第6章では、受動車輪を一行に配置したインラインスケート型受動車輪式足部機構 WS-3 (Waseda Shoes - No.3) を製作し (図 6.6)、滑らかな滑走移動を実現するために必要な制御法の開発とその評価実験、考察を述べた。第5章で述べた能動車輪式足部

機構 WS-2 は車輪を駆動するアクチュエータのために足部重量の増加を招いているが、一般に脚式移動ロボットは脚の慣性モーメントの影響を小さくするために、可動部である脚部の重量増加は避けるべきである。WS-3 は市販のインラインスケートをロボットに装着できるようにしたものであり、スウィズル動作というスケートを周期的に運動させる動作により車輪の摩擦力を推力として取り出して滑走移動することができる。考案したスウィズル動作による滑走移動法は、脚に通常的位置制御を適用すると摩擦力により拘束された足部を無理に動かすことになり過大な内力が生じるため、この状態を回避するために、力に応じて位置指令値を変化させるというものである。この足部機構を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R に装着して行った実験の結果、円滑なスウィズル動作の生成に成功し、考案した手法の有効性を確認した (図 6.7)。

第7章では、ローラースケート型受動車輪式足部機構 WS-4 (Waseda Shoes - No.4) を製作し (図 7.11)、滑らかな蹴り出し動作を実現するために必要なパターン生成法の開発とその評価実験、考察を述べた。受動車輪を用いた滑走移動については第6章で述べたスウィズル動作によるものと、蹴り出し動作によるものの大きく2つに分けられる。スケート側の足に ZMP を置いたままで蹴り出し動作を行うと蹴り出し時の衝撃により不安定になり、また十分な推力が得られない。そこで、蹴り足から軸足へスムーズに ZMP を移動させながら足を蹴り出すことにより推力を得て滑走移動するスケーティングパターン生成法を考案した。この足部機構を人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16R に装着して行った実験の結果、蹴り出し動作による滑走移動に成功し、考案した手法の有効性を確認した (図 7.12)。

以上のように、第2章、第3章、第4章で述べたセミアクティブ支持多角形確保機構と不整路面適応制御を実装することにより、屋外に存在する凹凸路面で歩行できることを実証した。また、第5章では能動車輪式足部機構を、第6章、第7章では受動車輪式足部機構を用いることにより、2足歩行ロボットの平坦路面での移動効率の向上が図れることを示した。結果として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を開発し、本研究の目的を達成した。

最後に、第8章 (本章) にて、本研究の結論と今後の展望について報告する。

以上、本論文の成果をまとめると、次のようになる。

- 装着するのみで2足歩行ロボットの移動能力を向上させることが可能な足部機構の提案 (第1章, 図 1.38)
- 足底と同じ大きさの領域に凹凸が複数ある路面においても、足部機構のみで大きな支持多角形が確保可能なゼミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R の開発 (第2章, 図 2.12)

- 段差 20 mm の凸路面での歩行実験を通して、WS-1R の有効性を確認 (第 2 章, 図 2.15)
- 剛体平板の足底では支持多角形が大きく確保できないような不整路面での歩行実験を通して、WS-1R の有効性を確認 (第 2 章, 図 2.19)
- 複数の 2 足歩行ロボットで実験を行い、WS-1R の汎用性を確認 (第 2 章, 図 2.27)
- 未知の凹凸路面や傾斜路面に適応可能な着地軌道修正制御法を開発 (第 3 章)
- 段差 20 mm の凹凸路面における安定歩行を実現 (第 3 章, 図 3.18)
- 蹴上げ高さに偏差のある階段昇降を実現 (第 3 章, 図 3.21, 図 3.24)
- 推定姿勢補償制御法を開発 (第 4 章)
- 着地軌道修正制御法と統合することにより、傾斜 3 deg と高さ 5 mm の点字ブロックのある屋外路面での歩行を実現 (第 4 章, 図 4.7)
- 着地軌道修正制御法と統合することにより、傾斜 10 deg の傾斜路面での歩行を実現 (第 4 章, 図 4.10)
- 着地軌道修正制御法とセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R と統合することにより、傾斜 10 deg, 段差 20 mm の混在する路面での歩行を実現 (第 4 章, 図 4.14)
- 2 足歩行と車輪走行の切り換えが可能な車輪式足部機構 WS-2 を開発 (第 5 章, 図 5.1)
- 車輪走行時の移動経路設定法を開発 (第 5 章)
- 2 足歩行と車輪走行の切り換えを実現 (第 5 章, 図 5.19)
- 平坦路面を 2 足歩行と車輪走行で移動させた際に、車輪走行時のエネルギー消費量の低減を確認 (第 5 章, 図 5.20)
- 受動車輪を一行に配置したインラインスケート型足部機構 WS-3 を開発 (第 6 章, 図 6.6)
- スウィズル動作と呼ばれるスケートを周期的に運動させることにより車輪の摩擦力を推力として取り出す滑走移動のための制御法の開発 (第 6 章)
- 脚部に過大な内力が生じることなく、円滑なスウィズル動作を実現 (第 6 章, 図 6.7)
- 単脚支持期に支持多角形が確保できるローラースケート型足部機構 WS-4 の開発 (第 7 章, 図 7.11)
- 蹴り出し動作によって推力を取り出す滑走移動のためのスケーティングパターン生成法を開発 (第 7 章)
- 蹴り出し動作による滑走移動の実現 (第 7 章, 図 7.12)

以上要するに、本論文では、2足歩行ロボットの実用化につながる基礎研究として、多様な路面に適応可能な2足歩行ロボットの足部機構と制御方式を提案し、これに基づき実際に製作した足部機構を2足歩行ロボットに装着して実験を行い評価することにより、その有効性を実証することを研究の目的とした。その成果として、凹凸路面で接地面積を大きく確保可能なセミアクティブ支持多角形確保機構 WS-1R を開発し不整地適応能力向上が図れることを示し、能動車輪式足部機構 WS-2 や受動車輪式足部機構 WS-3, WS-4 を開発することにより平坦路面における移動速度や移動効率を向上させることが可能であることを実証した。本論文において述べたような手法により、2足歩行ロボットの足部機構を交換することで、2足歩行ロボットに様々な能力を付加することが可能であることを主として報告した。

本研究の成果は、2足歩行を移動様式に用いたロボットの実用化に向けた基盤技術になるものである。この技術により、屋内のみならず屋外においても人間と一緒に生活空間を共にすることができる真の意味での人間共存型ロボットを提供することができる。また、人間共存型ロボットだけでなく、高い運動能力を持つ2足歩行型の車いすの実用化にもつながるものであり、歩行障害者や高齢者の行動範囲を飛躍的に拡大するものと期待できる。よって、ロボット工学、機械工学のみならず福祉工学、リハビリテーション工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであると考える。

8.3 今後の展望

8.3.1 脆弱型不整地歩行技術の構築

本研究では人間の生活環境を水平型移動環境と鉛直型移動環境に分け、さらに路面の状態に注目し、凹凸型不整地と脆弱型不整地の2つに分けた。本研究で開発した足部機構や不整路面適応制御では凹凸型不整地にしか対応できず、砂利道や砂地のような脚接地面に変形を伴う脆弱型不整地には対応することができない。脆弱型不整地に関しては、先行研究例[177-179]も少なく、2足歩行ロボットの研究領域で未開拓といっても過言ではないだろう。

脆弱型不整地では、視覚センサなどの外界センサを用いても、路面との滑りや路面の柔らかさを事前に予測することは難しく、物理的な接触をすることによってはじめて路面の特性が分かる。そのため、足底と路面が接触し路面の変形を検出した後に、補償動作を生成する必要があるだろう。しかし、そのような路面においても、足部機

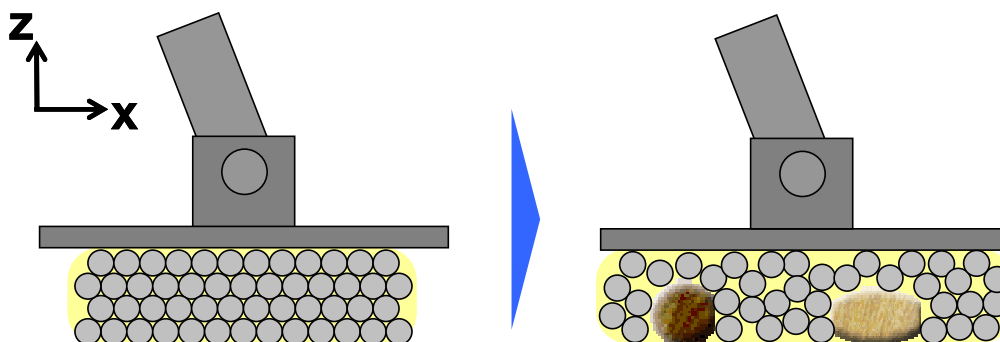


Figure 8.3 Foot system adaptable to soft terrain.

構に注目することは非常に重要で、接地面積が大きく確保でき、局所荷重が加わらないような足部機構が必要になるのではないかと考える。例えば、図 8.3 に示すように、スチールボールと永久磁石を組み合わせる方法がある。スチールボールが移動することで路面の凹凸にならば、磁石で磁界を印加することで路面形状にならわせ、路面との接地圧低減を図るものである。しかし、足部機構を工夫するだけでは足部と路面との間で生じる滑りを低減することはできても完全になくすことは難しいため、滑り動作に対応可能な制御アルゴリズムの構築も同時に必要になる。また、路面によっては逆に接地圧を上げ、脆弱な路面にスパイクなどを突き刺しながら歩行したほうがより安定した歩行が実現できる場合もある。

脆弱型不整地に関しても、単に 1 つの大きな枠組みでとらえるのではなく、脆弱性などで細分化し、取り組んでいく必要があると考える。

8.3.2 不整地の定量化

これまで 2 足歩行ロボットの運動性能を表す場合、「 \sim mm の凹凸まで対応可能」という表現が用いられてきた。しかし、これではロボットの歩きにくさを定量的に表しているとはいえない。なぜなら、同じ高さの突起物を踏んだ場合でも、図 2.1 のように足部と路面との接地状況によっては接地面積が大きく確保できず、その接地状況が歩行の安定性に大きく影響を与えるからである。2 足歩行ロボットの“歩きにくさ”を考える場合、足底面内の凹凸に注目することが重要であると考えられる。これまでに歩行ロボットの静的安定性や動的安定性の評価手法[180, 181]は提案されてきているが、それらは各足部で大きな支持多角形が確保されていることが前提となっており、足部の中心付近で凸部を踏んだ場合などに適用することは難しい。

そこで、あらゆる歩行ロボット、特に2足歩行ロボットが歩行する路面に対して“歩きにくさ”を定量的に表すことのできる指標の必要性を強く認識するに至った。

歩行安定化制御アルゴリズムや接地面積を大きく確保できる足部機構などの歩行安定化技術を定量的に評価するための指標としては次のようなものが考えられる。

- 足底基準面の基準点の相対高さ $\Delta h/H$ (図 8.4)
- 足底基準面の絶対傾斜 $\Delta\theta$ (図 8.5)
- 支持多角形の面積 S'/S (図 8.6)
- 足底面内の凹凸度合い

ここで、 Δh は足底基準面の基準点の相対高さ、 H は歩行開始時のロボットの脚長、 S' は不整路面歩行時の支持多角形の面積、 S は平坦路面歩行時の支持多角形の面積である。

またこれ以外にも、路面の柔らかさや滑りやすさなどの粘弾性係数や、摩擦係数も考慮すべきである。この指標を選出する際は、小型の2足歩行ロボットや、多脚型の歩行ロボットにも適応できる汎用性の高いものが望まれるため、可能な限り無次元量である必要がある。

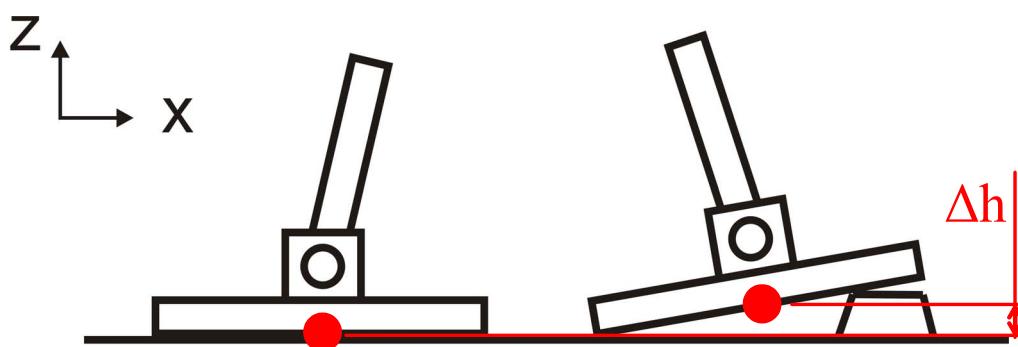


Figure 8.4 Relative height of the foot reference point: $\Delta h/H$.

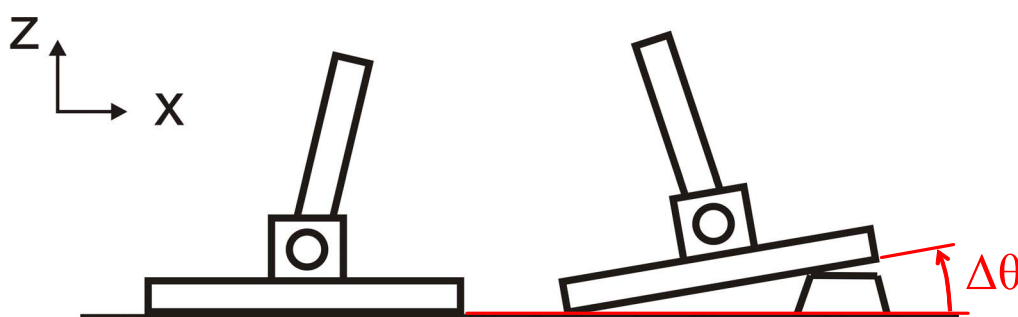
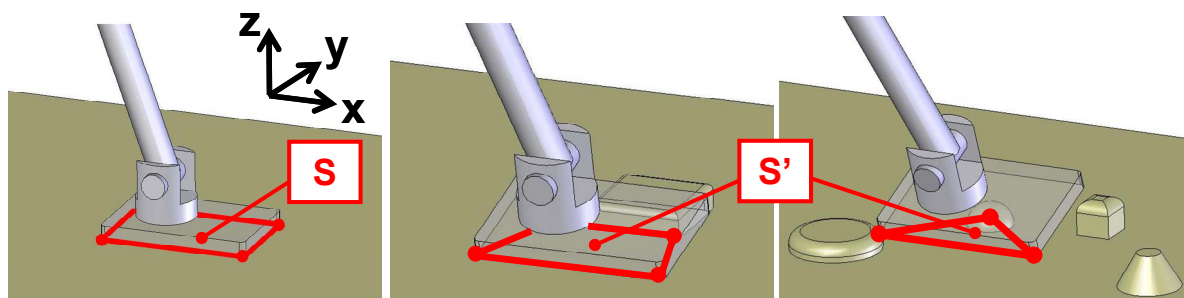


Figure 8.5 Absolute angle of the foot reference point: $\Delta\theta$.

Figure 8.6 Area of the support polygon on uneven terrain: S'/S .

8.3.3 2足歩行ロボットの転倒回避・安全技術の構築

2足歩行という移動様式は、歩行中に大きな重心の加減速運動を生じ、その重心位置が高いにも関わらず支持多角形が小さいため、本質的に不安定な系である。運動中に緊急停止を求められても、停止動作により発生する慣性力で転倒は避けられない。2足歩行ロボットの実用化のためには、転倒回避やロボット周辺に対する安全確保の技術開発は必要不可欠である。

転倒時の衝撃を和らげる技術に関しては、藤原らによっていくつかその手法が提案されてきている[182, 183]。これは後方へ転倒する際にはしゃがみ動作により着地衝撃を抑制し、前方へ転倒する際には膝着地衝撃を抑制するというものである。

一方、転倒そのものを回避する技術に関しては、森澤らや金子らによって緊急停止動作アルゴリズム[184]や動作一時停止システム[185]が考案されてきている。これらは何らかの緊急停止指令を検出した場合、実時間に停止動作を生成するというものであり、制御装置の信頼性が高ければ有効である。しかし、制御装置に何らかの問題が生じた場合、このような方法では対処できない。2足歩行ロボットに関しては、ロボット周辺に対する安全を十分に確保するために、制御装置に何らかの問題が発生した際にも転倒を回避し、安全に緊急停止する技術が必要であると考えられる。

そこで、筆者らはすでに、機械ハードウェアのみで実装可能な2足歩行ロボットのための転倒防止機構の提案と試作を開始している(図8.7)。これは、足部機構のみで実装が可能であり、緊急時に支持多角形を拡大して転倒を回避するというものである。今後も引き続き、転倒回避やロボット周辺に対する安全確保に関する技術開発は行われるべきである。

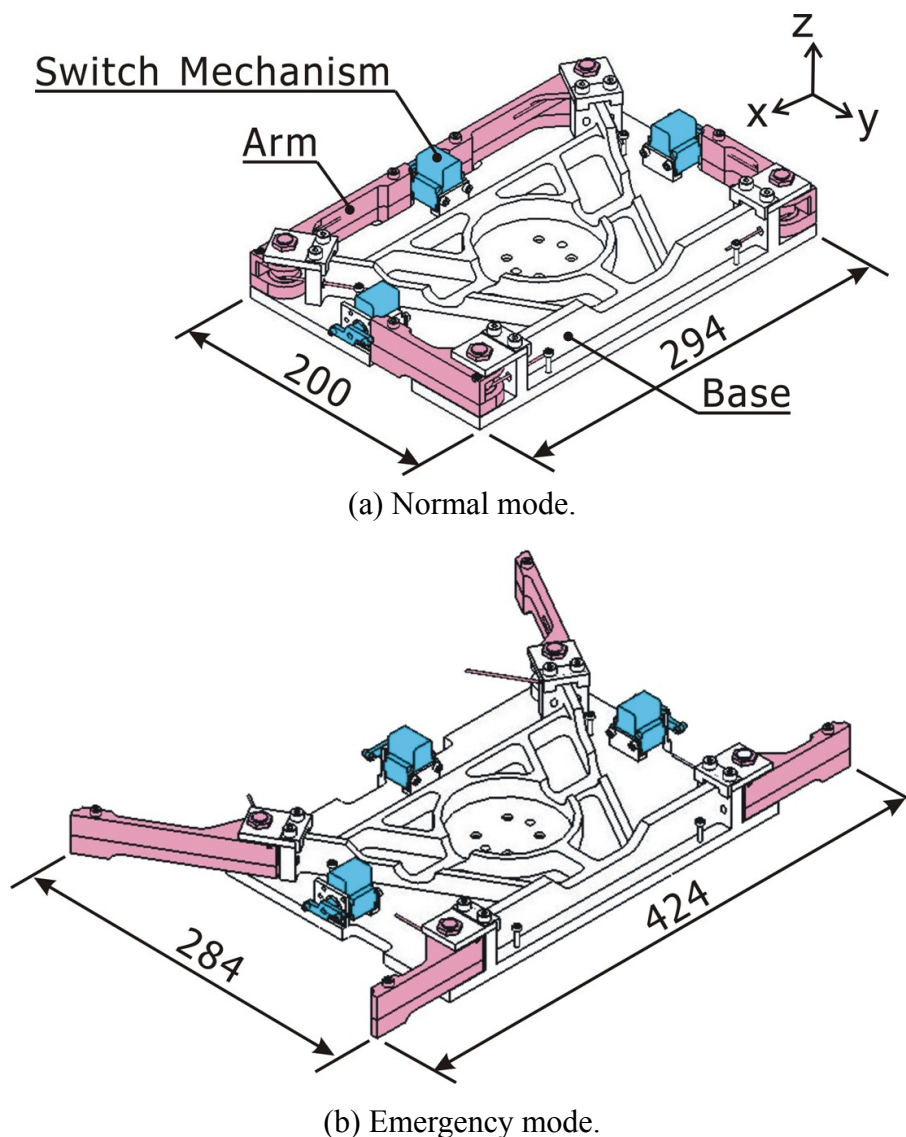


Figure 8.7 Support polygon expansion foot mechanism.

8.3.4 ヒト足部の機能に関する研究

本研究で2足歩行ロボットの足部機構を開発したが、ヒトは屋外の凹凸路面や脆弱な路面においても2足歩行できていることを考えると、ヒト足部の構造に注目することは重要である。しかしながら、ヒト足部の特徴であるアーチ構造（図 8.8）を取っても、依然としてその存在については明確な理由が解明されておらず、アーチ構造が2足歩行の安定化に寄与しているかどうかは推定の域を出ていないのが現状である。そのため、本研究ではヒト足部の構造を模擬することはせずに不整路面に適応可能な足部機構を開発した。しかし、逆にヒト足部の特徴を持った足部機構を開発し、それ

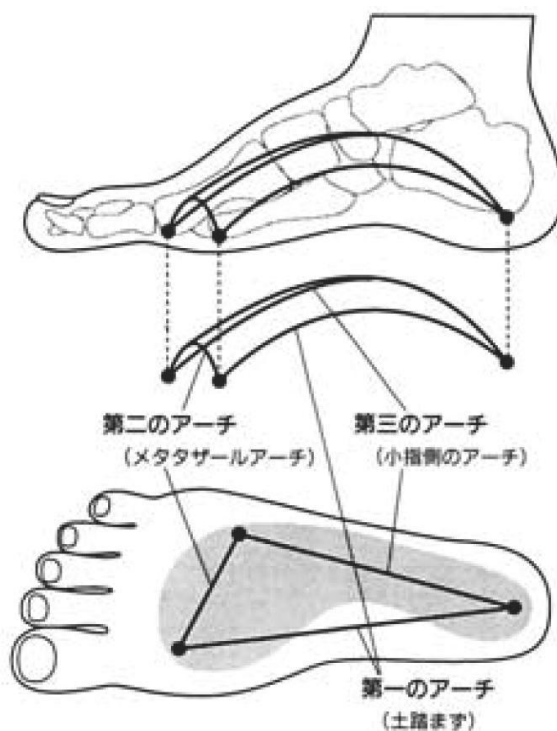


Figure 8.8 Human's foot-arch structure [186].

をロボットに装着した実験を通してヒト足部のアーチ構造の存在意義を調べることは、人間工学の視点から非常に重要であると考えられる。しかし、そのような足部を開発したからといって2足歩行ロボットの歩行能力が向上するわけではなく、ロボット全体のシステムとしてその制御系についてもヒトに近づける努力を続けなければならない。

8.3.5 まとめ

以上、本研究において発掘した問題領域に関する今後の展望について述べた。こうしてみると2足歩行ロボットの実用化に向けて解決すべき課題は多く、これらを解決するのは容易ではない。しかしながら、2足歩行という移動様式の実用化がなれば、人間共存型ロボットの行動範囲は格段に広がり、高い運動能力を持つ2足歩行型の車いすの実用化にもつながるものであり、ロボット工学、機械工学のみならず福祉工学、リハビリテーション工学など幅広い工学分野の発展に大きく貢献するものであると考える。

付録 A 不整路面適応制御法の追加評価実験

- A.1 ロボット開発実証・実験特区について
- A.2 屋外不整地歩行の評価実験
- A.3 人間搭乗不整地歩行の評価実験

A.1 ロボット開発実証・実験特区について

A.1.1 ロボット特区とは

人間の日常生活に関わるロボットの実用化を図る上で、人間の住環境内においてロボットの実験を行うことは極めて重要な事である。特に、実験室内のようなロボットにとって恵まれた環境ではなく、気温、湿度、路面状況等が大きく異なる屋外での実験によって得られるデータは、2足歩行ロボットの実用化に向けた問題点を浮き彫りにし、今後のロボット開発に大きな影響を与えるものであると考えられる。

しかし、一般に公道でロボットを用いた実験を行おうとした場合、法律制定時には想定されていなかった事例であるために、道路の使用許可を得ることがほぼ不可能であった。そのため、公道においてロボットを用いた実験を行うことは非常に困難であった。

一方、構造改革特区の一環として設定されたロボット開発実証・実験特区（以下、ロボット特区と呼ぶ）内においては、特区内の公道においてのロボットの実証実験が道路使用許可の対象となることが明確化されたため、円滑にロボットを用いた実験を行うことができる。

ロボット特区は、次のような目標の実現を目的としている。

- (i) ロボット産業創出に向けた研究開発拠点の形成
- (ii) ロボット開発に向けた実証実験の推進
- (iii) ロボット関連研究者の集積促進
- (iv) 青少年のロボット科学教育の振興

(i)に関連して、福岡市ロボット特区内に「早稲田大学ヒューマノイド研究所福岡分室」が設置され、福岡分室を拠点としてロボット特区内での実証実験を行うことが可能となり、2004年～2005年の2年間に合計でおよそ4ヶ月にわたりロボット特区内

で実験を行った。第3章と第4章で開発した着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法の評価実験については、このロボット特区内で多数の実験を行っており、本文中に載せきれなかった評価実験について本付録に記載する。

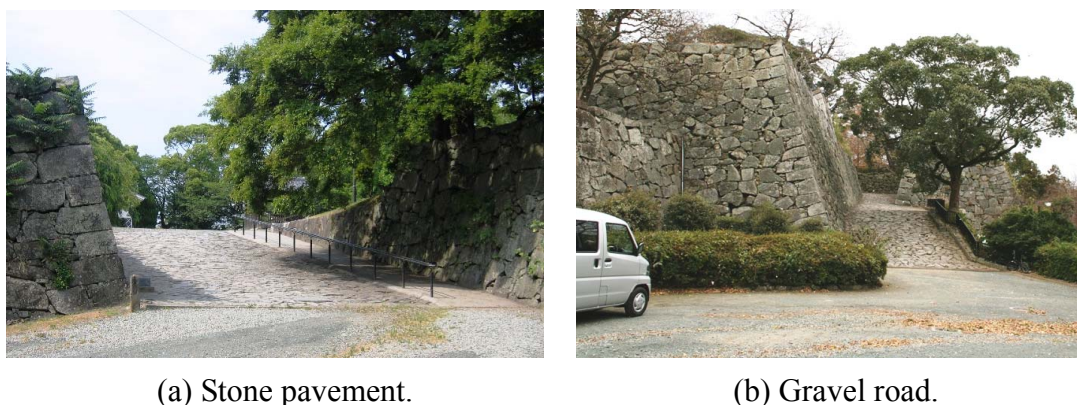
A.1.2 ロボット特区内の実験場所について

ロボット特区内の実験場所は、以下の3箇所である。各実験場所の位置関係、及び写真を図A.1、図A.2に示す。

- (i) 博多ことぶき橋渡口
- (ii) 川端中央商店街入口横断歩道
- (iii) 福岡城跡（舞鶴公園）



Figure A.1 Experiment area (Hakata-ku, Fukuoka City, Fukuoka) [187].



(a) Stone pavement. (b) Gravel road.
Figure A.2 Experiment area in the site of Fukuoka-jyo castle.

(i)の博多ことぶき橋渡口の路面は、平坦路面と約 3 deg の傾斜路面が混在しており、点字ブロックも敷設されている。また、路面にはレンガが埋め込まれており、細かい凹凸も見受けられる。

(ii)の商店街入口横断歩道は非常に通行量の多い場所であるため、横断歩道全体ではなく、一部だけを使用して実験を行った。横断歩道の白線部は数 mm の凸となっており、道路の水はけを良くするために道路中央が盛り上がったような傾斜を持っている。また、歩道に上がる部分については 20 mm 程の段差もある。

(iii)の福岡城跡には実験室内のような平坦路面はほとんど存在せず、砂利道や約 10 deg の傾斜路面、凹凸と傾斜の混在した石畳の路面などがある。実験室内に作製した擬似不整地と比較すると、安定した歩行を実現するには過酷な実験場所である。

A.2 屋外不整地歩行の評価実験

本実験目的は第 4 章の評価実験と同じく、着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法の評価をすることにある。両制御を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RIII[125] に実装し、屋外の不整地環境で歩行させ評価実験を行う。その際の足底は剛体平板とし、剛体平板においても大きな支持多角形が確保できる不整路面を対象とする。第 3 章と第 4 章において、Z 軸方向や Pitch 軸周り、Roll 軸周りのならい動作の基本的な有効性は確認できているため、本付録での評価実験は、開発した制御法のロバスト性を評価するものである。

A.2.1 点字ブロックでの歩行実験

まず、博多ことぶき橋渡口の点字ブロック敷設部分を横断するように実験を行った(図 A.3)。このとき歩幅 200 mm/step で、歩行周期 1.0 s/step である。その際の ZMP 軌道と姿勢角推移を図 A.4、図 A.5 に、Z 軸方向軌道修正量を図 A.6 に、Pitch 軸周りのコンプライアンス移動量を図 A.7 に示す。

4 歩目で左足が高さ 5 mm の点字ブロックに乗ったため、それに適応するために Z 軸方向に約 6 mm 足部軌道を修正していることが図 A.6 から分かる。また、3 歩目、5 歩目で右足が足部の端で点字ブロックを踏み、Pitch 軸周りに足部を修正しなければならないが、最大 2.5 deg の受動的軌道修正していることが図 A.7 から確認できる。

A.2.2 博多ことぶき橋渡口での歩行実験

次に博多ことぶき橋渡口において、高さ 5 mm の点字ブックを乗り越え、約 3 deg の傾斜を上るように実験を行った (図 A.8). なお、本評価実験では、足底に剛体平板を用いているため、剛体平板の足底においても支持多角形が大きく確保できる場所を選び実験を行った. このときの ZMP 軌道と姿勢角推移を図 A.9, 図 A.10 に示す.

着地軌道修正制御のみの場合は着地衝撃による姿勢角の偏差が原因で短い歩行周期での歩行に成功しなかったが、推定姿勢補償制御と併用することにより、歩行周期 1.0 s/step, 歩幅 200 mm/step での前進歩行に成功した. 図 A.10 に示すように、着地軌道修正制御のみの場合は姿勢角の偏差が累積し転倒してしまっていたが、推定姿勢補償制御を併用することにより、ある程度の姿勢の倒れが抑えられていることが分かる. 図中の×印は、その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す.

A.2.3 横断歩道での歩行実験

川端中央商店街の入り口にある横断歩道においても実験を行った (図 A.11). このとき歩幅 200 mm/step で、歩行周期 1.0 s/step である. バリアフリー新法[92]で定められているように、横断歩道に接続する歩道等の部分の縁端段差は 20 mm を基準とされており、歩行中に支持多角形が大きく確保されれば、開発した着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法を併用することにより、歩行が可能であるはずである.

また、ZMP 軌道と姿勢角推移を図 A.12, 図 A.13 に示す. 実験の結果、縁端を乗り越える際に姿勢角が約 5 deg 倒れているが、推定姿勢補償制御により、その倒れこみが抑制されていることが確認できる.

A.2.4 砂利道での歩行実験

さらに傾斜約 3 deg の砂利道でも歩幅 200 mm/step, 歩行周期 1.0 s/step で歩行実験を行った. なお、この路面は力を加えても路面形状が変化するような路面ではない.

歩行実験の様子を図 A.14 に示す. また、ZMP 軌道と姿勢角推移を図 A.15, 図 A.16 に示す. ZMP 偏差もそれほど小さくなく、姿勢角の倒れこみも押さえられていることが確認できる.

A.2.5 落ち葉の積もった路面での歩行実験

また、図 A.17 に示すような落ち葉の積もった路面での歩行実験も行った。このとき歩幅 200 mm/step で、歩行周期 1.0 s/step である。

落ち葉の層が厚ければ、砂地や雪道と同様に脆弱度合いが大きい路面となり、歩行中に立脚側の足の姿勢を一定に保つことが難しい。しかし、実験場所は落ち葉の層が薄く、その下の路面は硬い路面で大きな凹凸もなく水平な路面であったため、ロボットの自重によって落ち葉は変形し、実際は硬い水平面上を歩いているのと大きな差異はなく、安定した歩行が実現された。

ただし、図 A.18, 図 A.19 に ZMP 軌道と姿勢角推移のグラフを示すが、姿勢角の揺れが最大で 3 deg 程あり、硬い路面を歩行しているときよりも姿勢角の揺れが大きい。その原因としては、落ち葉の層が薄いといっても、路面が多少の柔らかさをもっており、立脚側の足部が落ち葉の柔らかさの影響を受け、倒れそうになっていることが予想される。この結果より、砂地や雪道などの力を加えたときの変形量が大きい脆弱路面では、より応答性の速い姿勢補償制御法が必要になると考えられる。

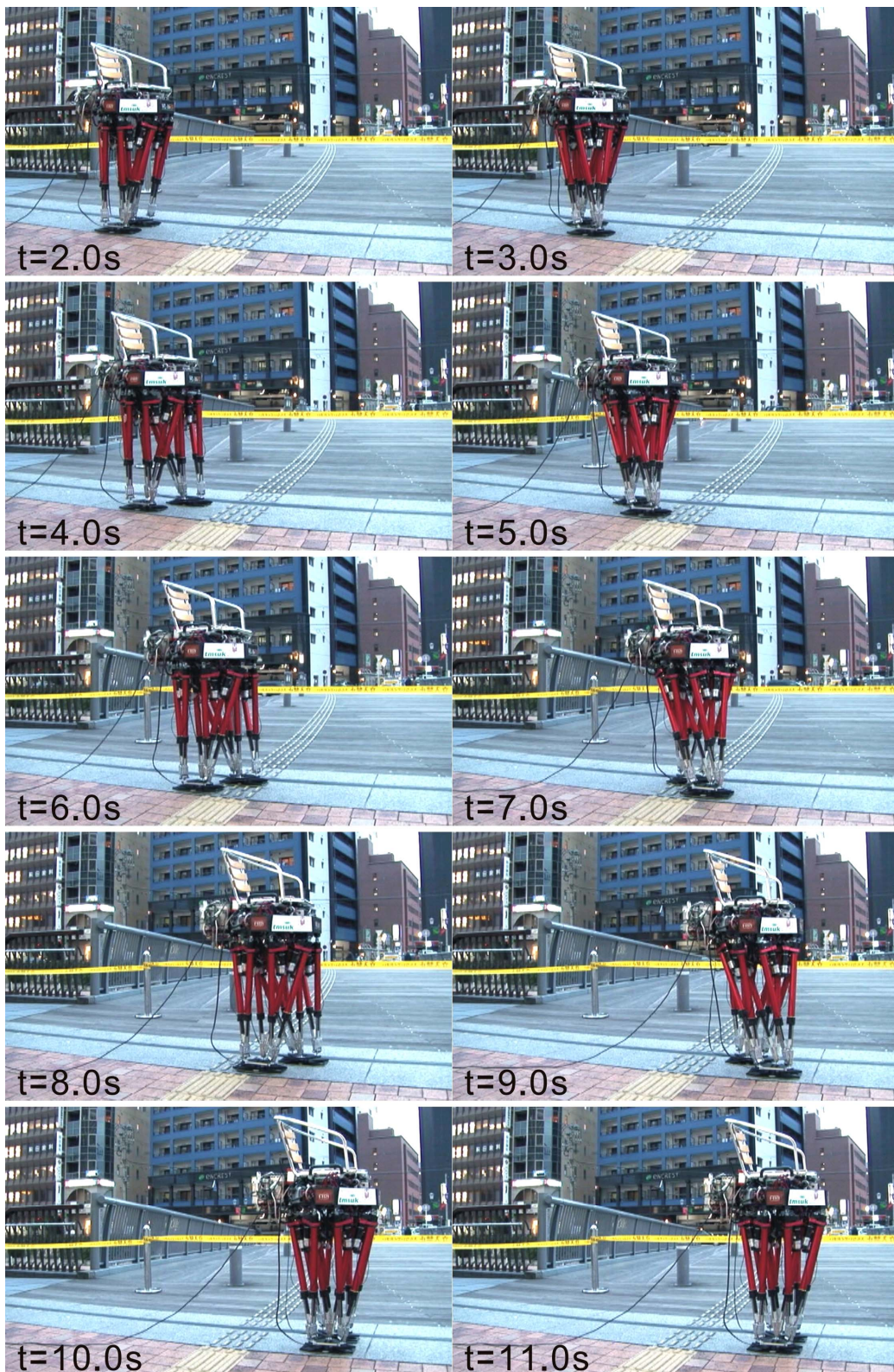


Figure A.3 Walking experiment on textured paving blocks.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

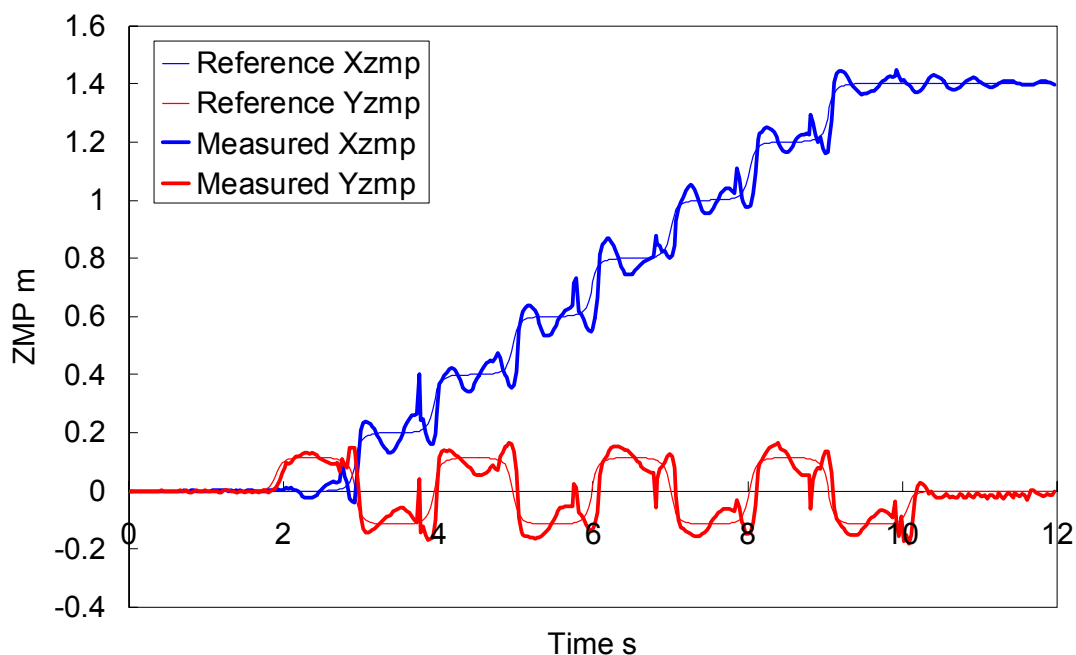


Figure A.4 ZMP trajectories in walking on textured paving blocks.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

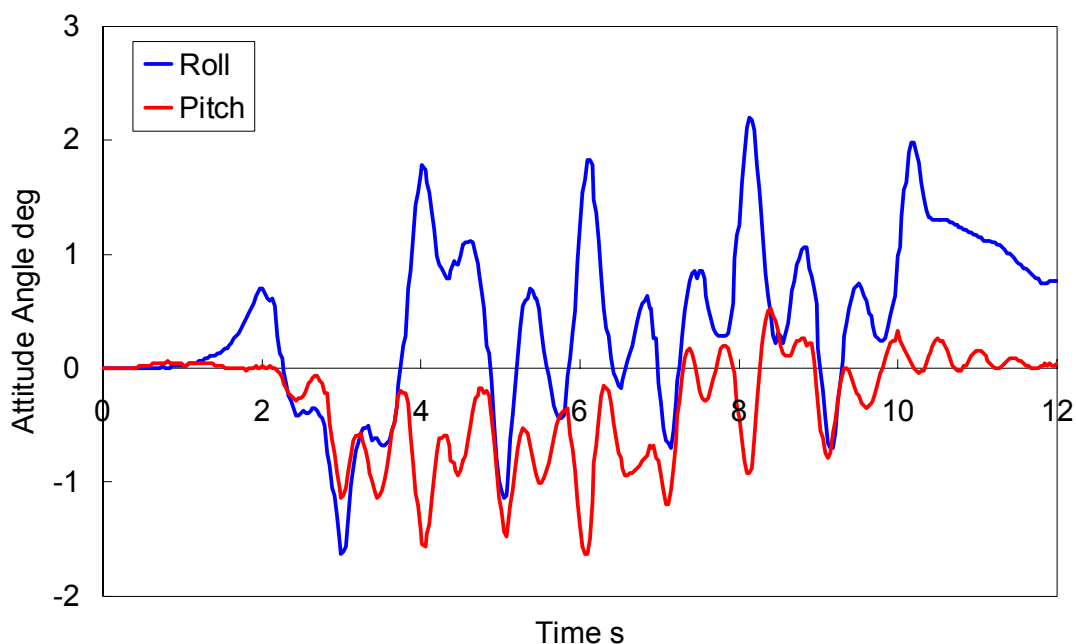


Figure A.5 Attitude angle in walking on textured paving blocks.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

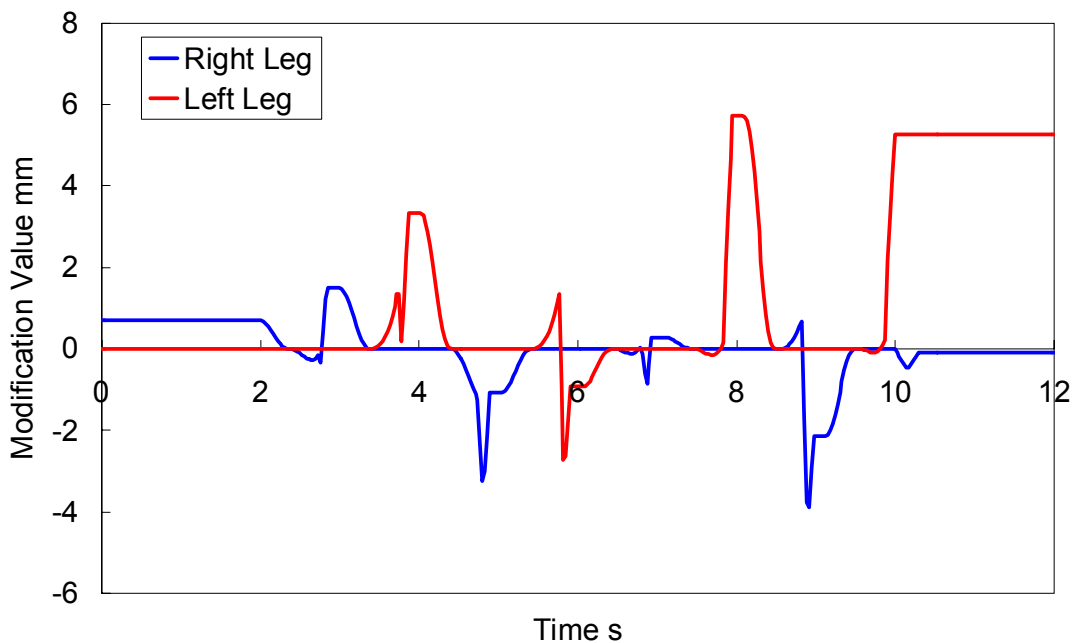


Figure A.6 Modification value of the z axis in walking on textured paving blocks. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

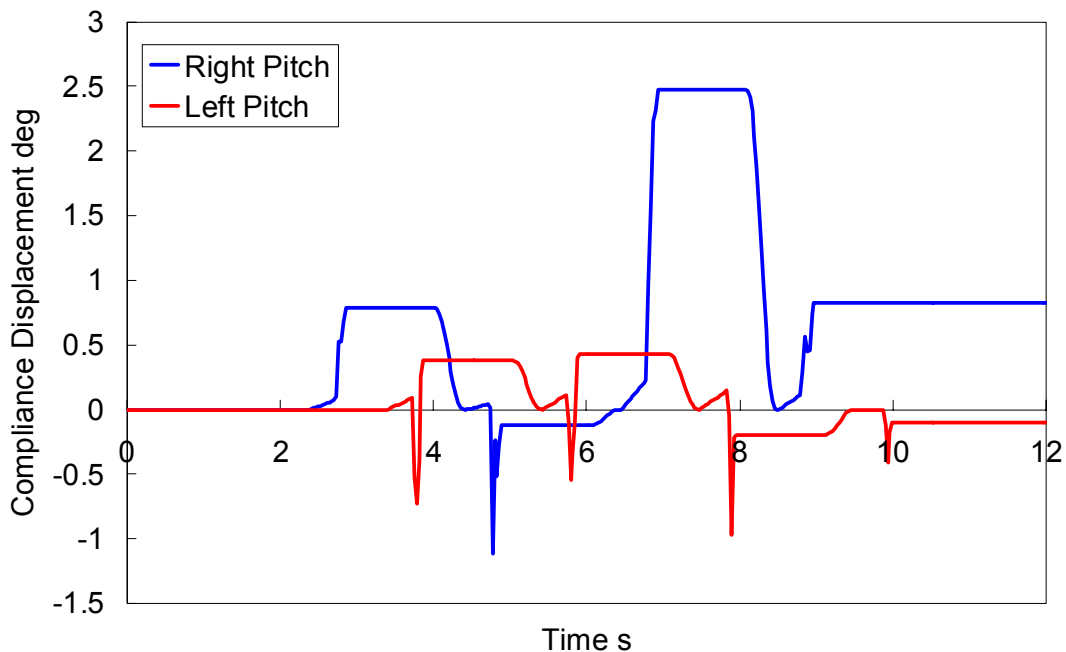


Figure A.7 Pitch compliance displacement in walking on textured paving blocks. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

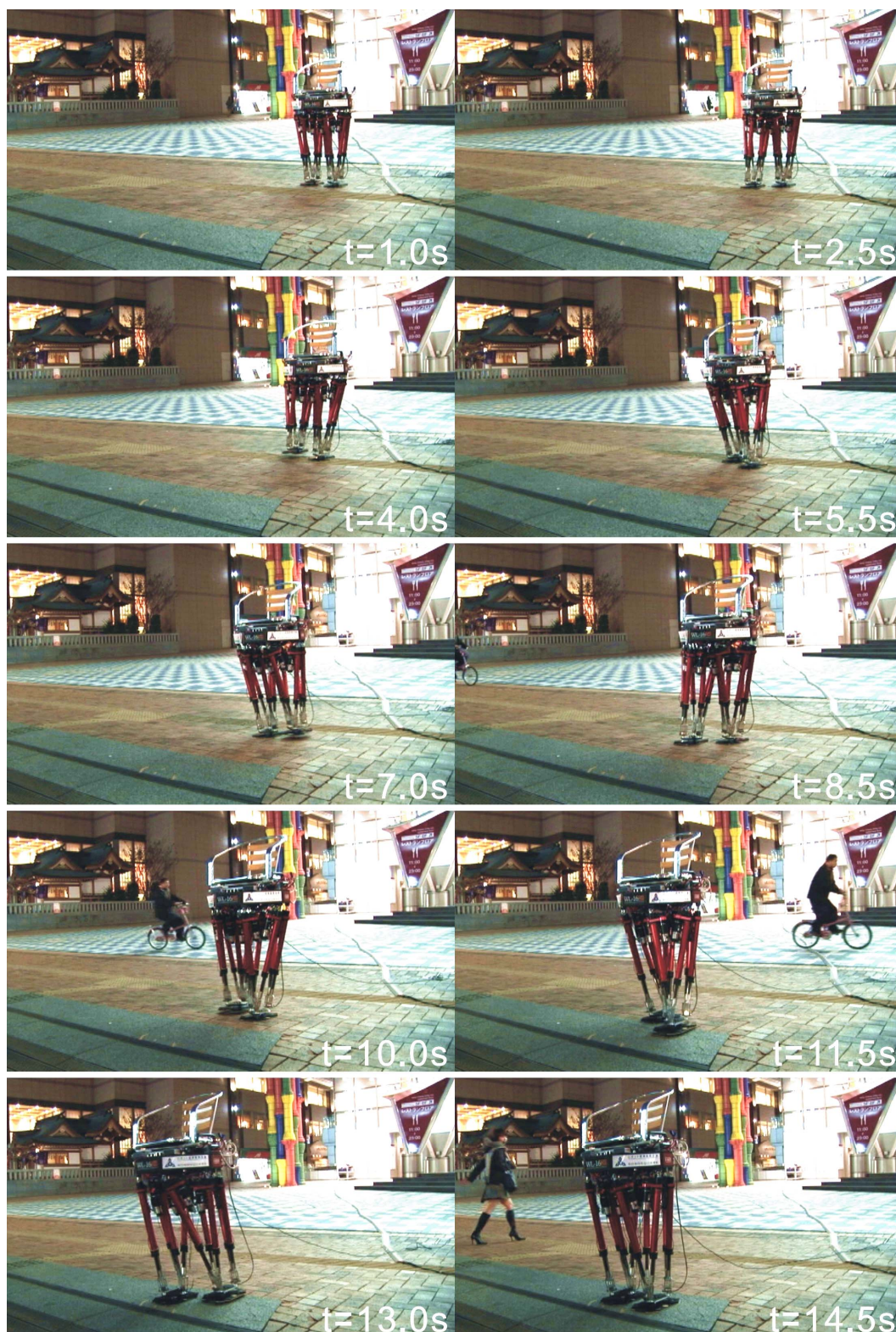


Figure A.8 Walking experiment on textured paving blocks and inclined plane.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5mm, inclination: 3 deg)

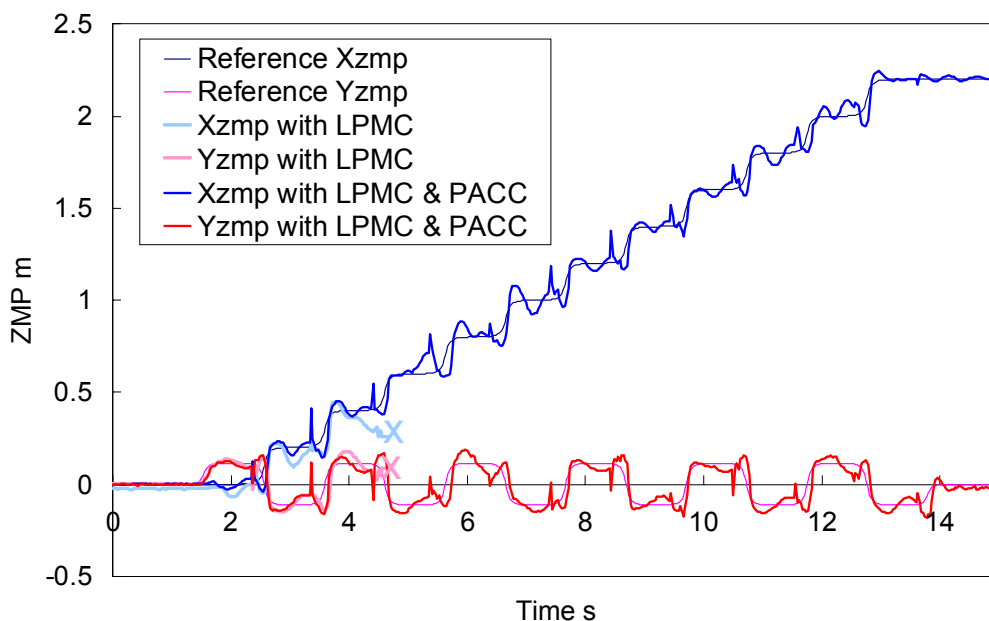


Figure A.9 ZMP trajectories in walking on textured paving blocks and inclined plane. The robot fell at X.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5mm, inclination: 3 deg)

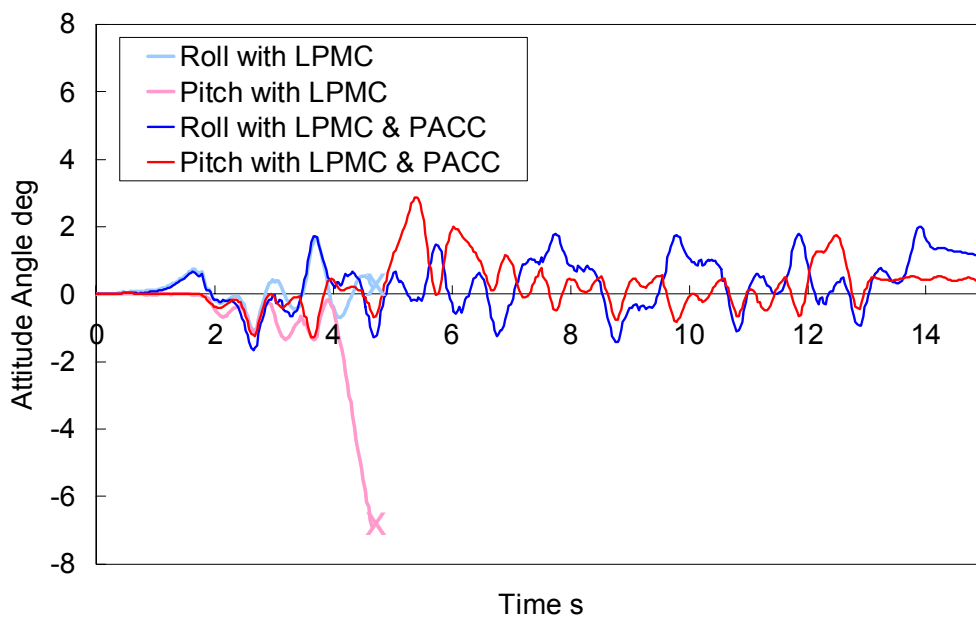


Figure A.10 Attitude angle in walking on textured paving blocks and inclined plane. The robot fell at X

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5mm, inclination: 3 deg)



Figure A.11 Walking experiment on crosswalk.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 3 deg)

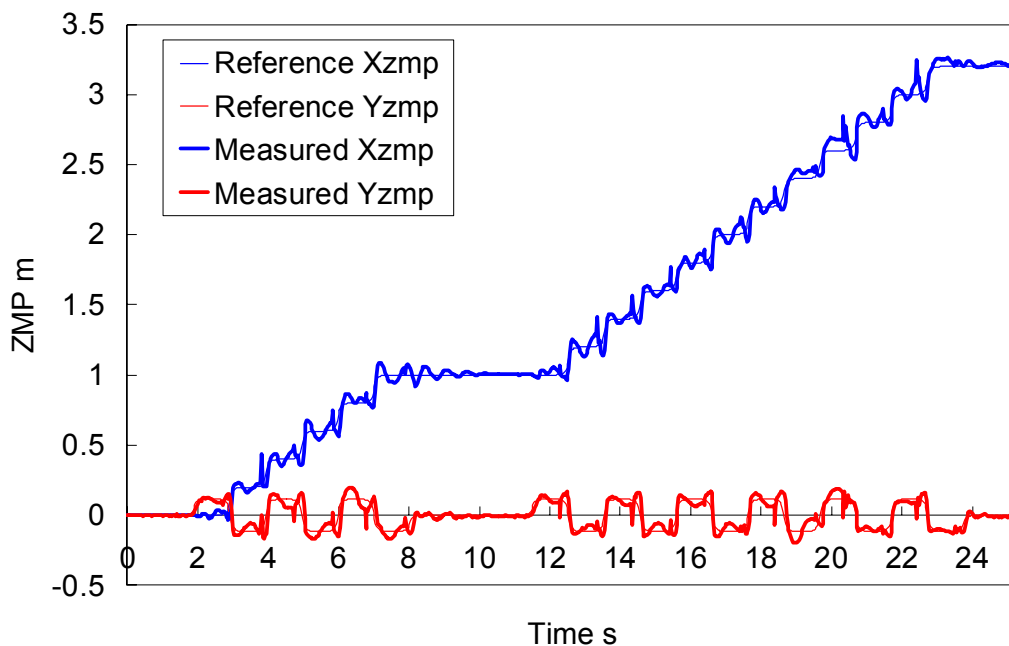


Figure A.12 ZMP trajectories in walking on crosswalk.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 3 deg)

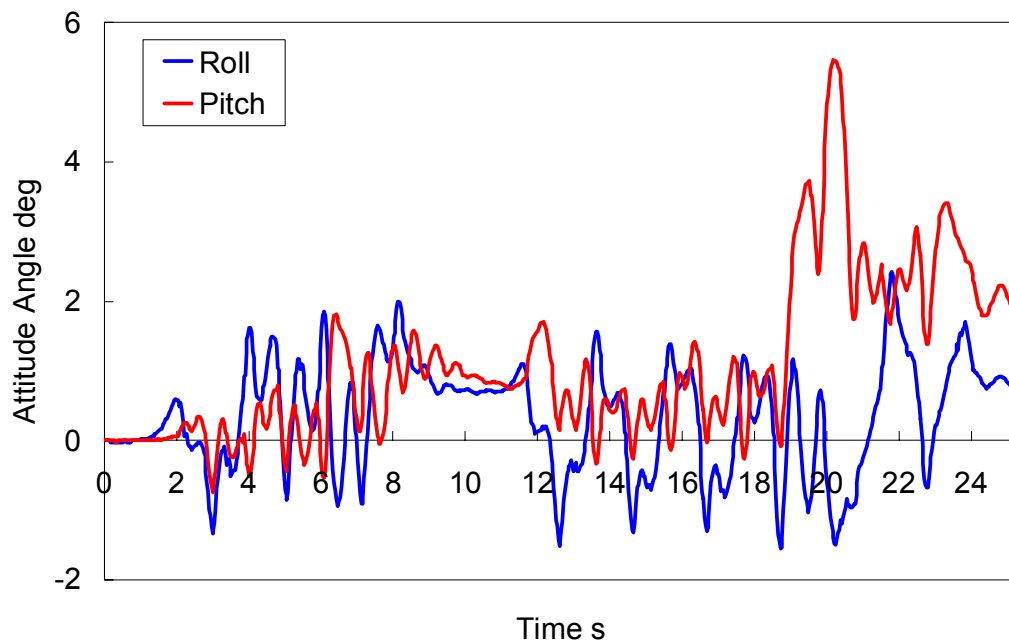


Figure A.13 Attitude angle in walking on crosswalk.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, inclination: 3 deg)



Figure A.14 Walking experiment on gravel road in Fukuoka-kyo castle.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 3 deg)

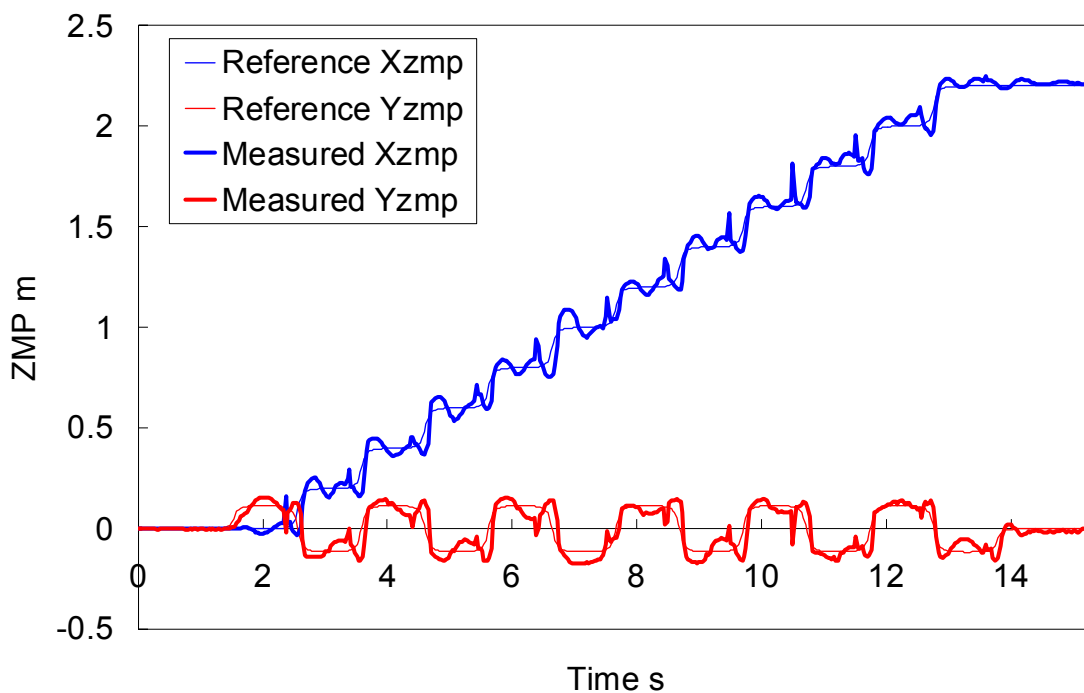


Figure A.15 ZMP trajectories in walking on gravel road in Fukuoka-jyo castle. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 3 deg)

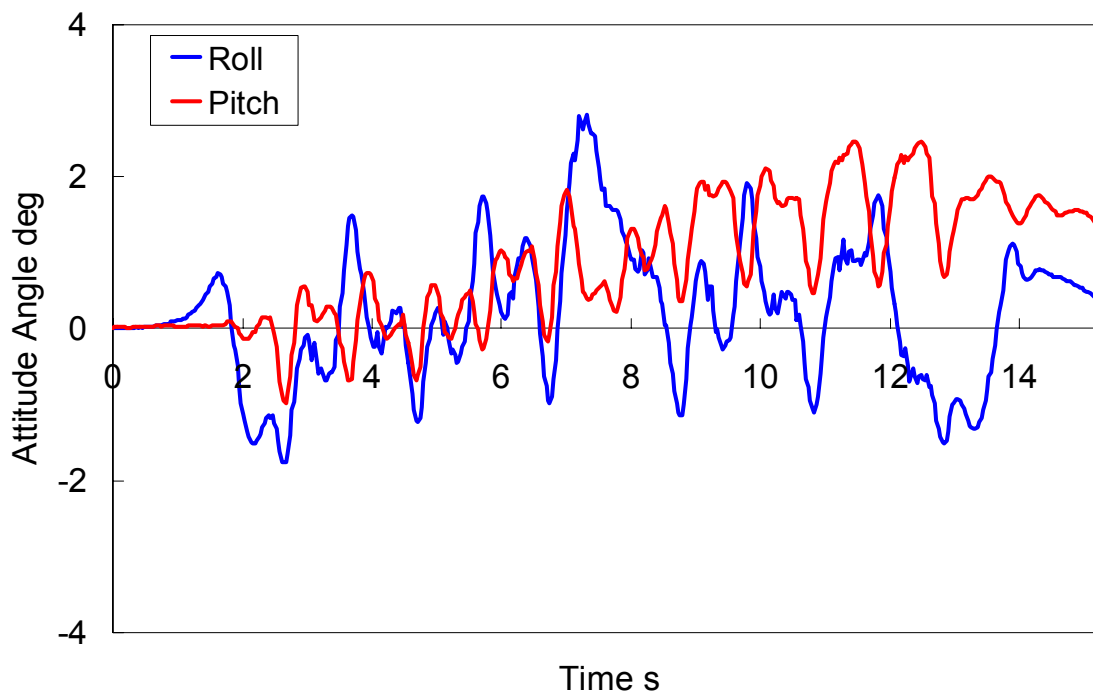


Figure A.16 Attitude angle in walking on gravel road in Fukuoka-jyo castle. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 3 deg)

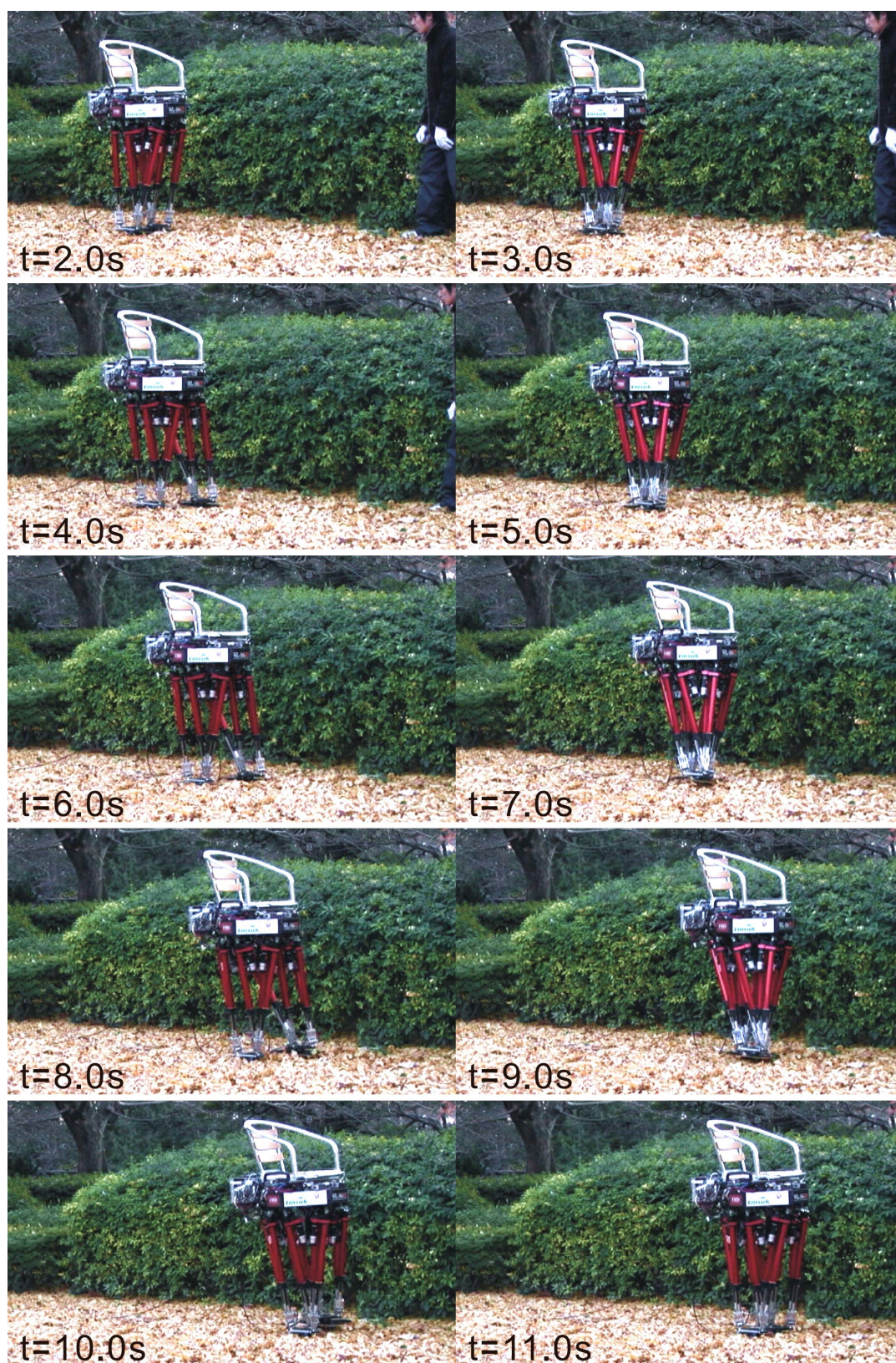


Figure A.17 Walking experiment on fallen leaves in Fukuoka-kyo castle.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step)

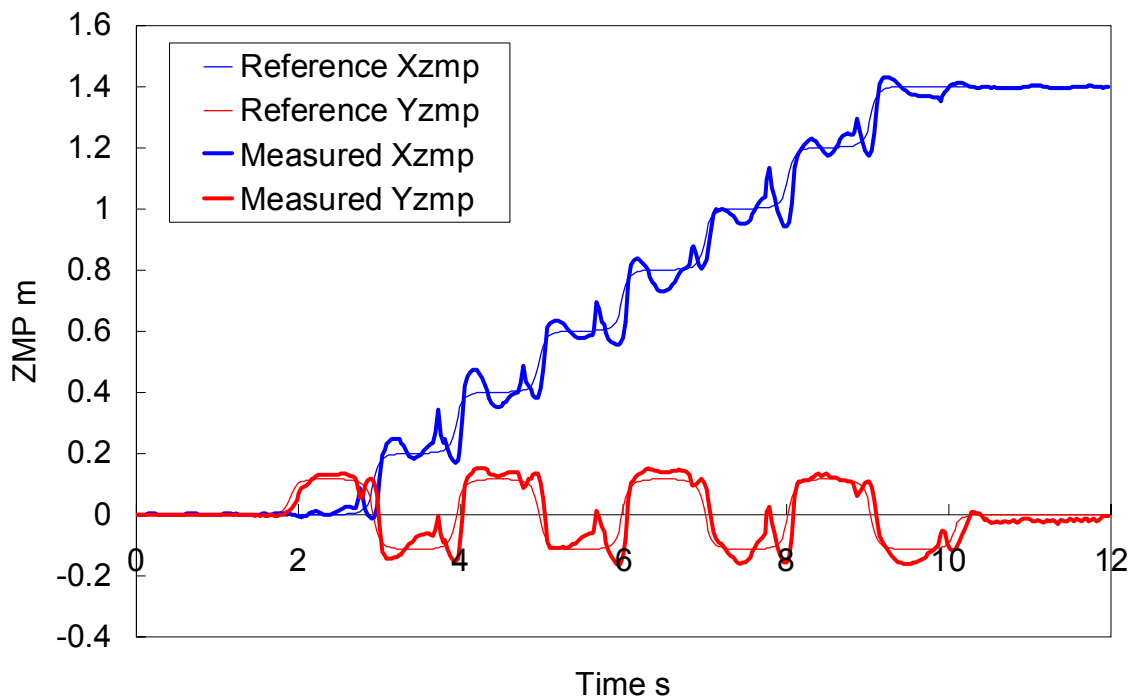


Figure A.18 ZMP trajectories in walking on fallen leaves in Fukuoka-jyo castle.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step)

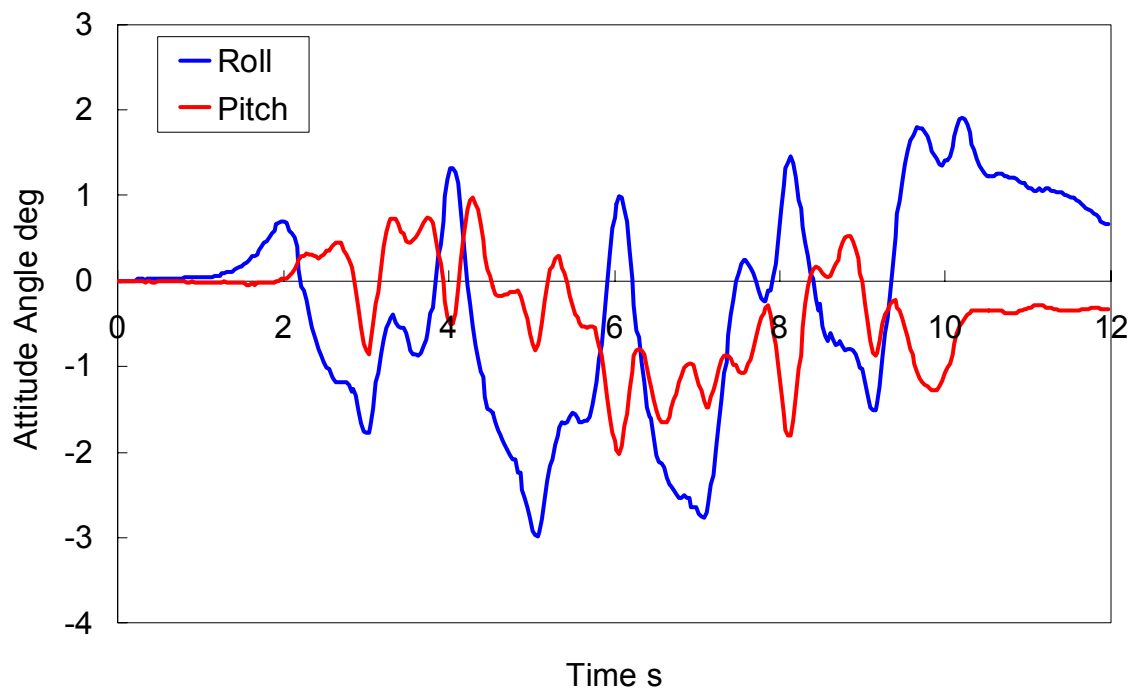


Figure A.19 Attitude angle in walking on fallen leaves in Fukuoka-jyo castle.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step)

A.3 人間搭乗不整地歩行の評価実験

不整路面における歩行安定化に関する研究は多くの先行研究がある[66-75]。しかし、これらの多くはロボットの力学モデルに基づく高精度な加速度制御を行うものであり、人間を乗せて歩行する場合のように正確なモデル化が困難なロボットには適用が難しい。本論分で開発した着地軌道修正制御は、そのような正確なモデル化が困難なロボットにも適応可能な不整路面適応制御である。本評価実験は、人間を搭乗しての不整地歩行実験を通して、その有効性を評価するものである。

A.3.1 50 kg の重りを積載しての Z 軸方向のならい動作に関する歩行実験

まず、50 kg の重りを乗せた状態で着地軌道修正制御を用いた場合と、さらに推定姿勢補償制御を用いた場合の 2 通りで歩行実験を行った (図 A.20)。この際、実験室内の平坦な床面上に厚さ 15 mm のアクリル板を敷いて擬似的な不整地を作り、Z 軸方向のみにならいが生じるようにアクリル板の位置を決定した。

着地軌道修正制御のみを用いた場合、重りを載せることにより構造部材のたわみが顕著になり姿勢角の倒れが大きくなるため、アクリル板を踏む前の 2~3 歩目で転倒した。しかし、推定姿勢補償制御と組み合わせることにより、姿勢角の偏差がある程度抑えられ、安定した歩行に成功した。ZMP 軌道と姿勢角の推移のグラフを図 A.21、図 A.22 に示す。図中の×印は、その時間にロボットが転倒を始めてしまい介助者がロボットを支えたため計測を打ち切ったことを示す。

また、Z 軸方向の足部軌道修正量を図 A.23 に示すが、実際のアクリル板の厚さが 15 mm であるのに対して、Z 軸方向の修正量が 20 mm 発生していることが分かる。この原因は、機械的なたわみにより予定していた時刻よりも早く足部が路面に着地し、5 mm ほど修正量を多く生じているためと考えられる。

A.3.2 人間を搭乗しての Z 軸方向のならい動作に関する歩行実験

次に目標段差高さである板厚 20 mm のアクリル板を平坦な床面上に敷き擬似的な不整地を作製し、歩幅 200 mm/step、歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。重りを積載した状態での着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法の有効性が確認できているので、実際に 55 kg の成人男性がロボットに搭乗して歩行実験を行った (図 A.24)。この際も、足底全体でアクリル板を踏み、Z 軸方向のみにならい動作が生じるようにアクリル板の位置を決定した。ZMP 軌道と姿勢角の推移のグラフを図 A.25、

図 A.26 に示す。

Z 軸方向の足部軌道修正量を図 A.27 に示すが、50 kg の重りを積載したときと同様に、20 mm の板を踏んでいるのにも関わらず、Z 軸方向の修正量がそれよりも大きく約 25 mm 生じていることが分かる。これも機械的なたわみが原因であると考えられる。

また、このときの歩行周期は 2.0 s/step であるが、これ以上歩行周期を短くすると着地時の衝撃が大きくなり、足部の 6 軸力覚の許容荷重を超えてしまうことがあったため、凹凸度合いの大きい路面においては、これ以上歩行速度を速くすることは困難であった。

A.3.3 人間を搭乗しての凹凸路面歩行実験

Z 軸方向単体でのならい動作が確認できたので、前進歩行中に Pitch 軸周り、Roll 軸周りなどすべての軸方向にならい動作をしなければならないように、板厚 5~20 mm のアクリル板と傾斜板を平坦な床面上に敷き、擬似的な不整地を作製した。この際、ロボットの足は剛体平板であるので、足底中心付近で突起物を踏むと、大きな支持多角形が形成されず、転倒する可能性が大きいので、足底の端で突起物を踏むようにアクリル板や傾斜板の位置を決定した。そして、歩幅 200 mm/step、歩行周期 2.0 s/step での前進歩行実験を行った。歩行実験の様子を図 A.28 に示す。また、このときの ZMP 軌道と姿勢角の推移のグラフを図 A.29、図 A.30 に示す。ZMP 軌道から、実測 ZMP が設定 ZMP によく追従し、安定して歩行できていることが見て取れる。

A.3.4 人間を搭乗しての屋外アスファルト路面歩行実験

屋内の擬似的な不整地での着地軌道修正制御法と推定姿勢補償制御法の基本的な有効性が確認できたので、実際の屋外環境において歩行実験を行った。まずはアスファルト路面などの比較的凹凸の小さい路面で実験した。このような路面では足部の位置・姿勢の修正量が小さくて良いため、歩行周期が 1.0 s/step と短い場合においても、大きな着地衝撃を発生することなく歩行することができる。そのときの歩行実験の様子、ZMP 軌道、姿勢角の推移のグラフを図 A.31、図 A.32、図 A.33 に示す。

また、長距離歩行させた場合に姿勢角の累積誤差が大きくなるかどうかを確認するために、アスファルト路面を約 4 m 歩行させたときの様子を図 A.34、図 A.35 に示す。ZMP 軌道と姿勢角の推移のグラフを図 A.36、図 A.37 に示す。どちらの場合も安定した歩行を実現した。

A.3.5 人間を搭乗しての屋外不整地歩行実験

最後に実際の屋外環境に存在する段差 20 mm のある路面においても歩行実験を行った。その際の歩幅は 200mm/step で、歩行周期は 2.0 s/step である。歩行の様子を図 A.38 に示す。図 A.39 の ZMP 軌道のデータから、実測 ZMP が設定 ZMP によく追従していることが分かり、図 A.40 の姿勢角の推移のデータからも、姿勢の倒れがある一定角度内に収まっていることが分かる。



Figure A.20 Walking experiment on 15 mm board, carrying 50 kg load.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 15 mm, load: 50 kg)

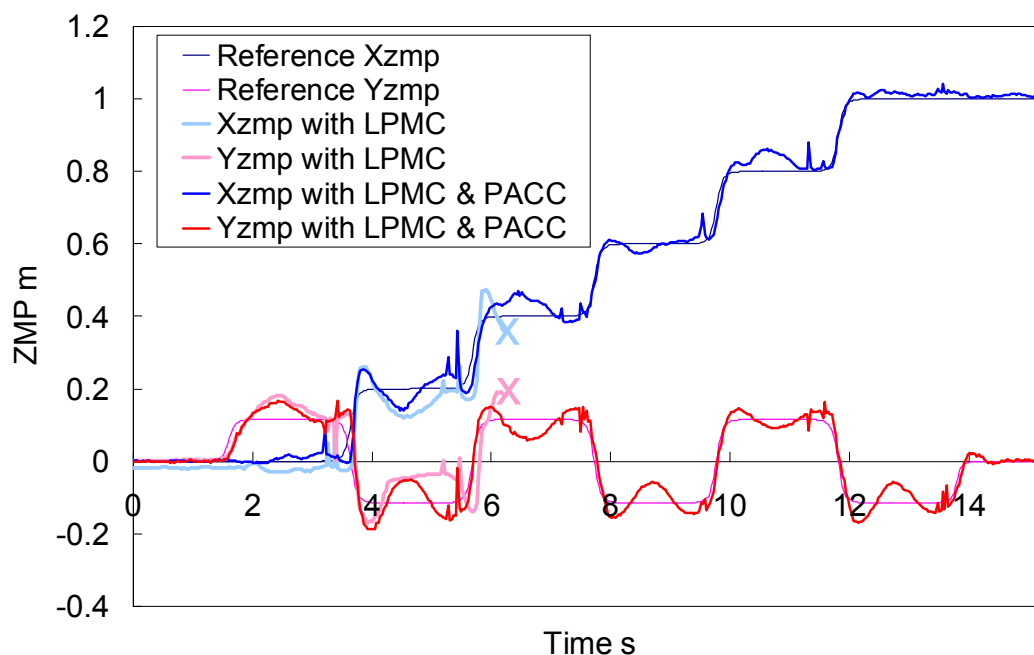


Figure A.21 ZMP trajectories in stepping on 15 mm board, carrying 50 kg load. (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 15 mm, load: 50 kg)

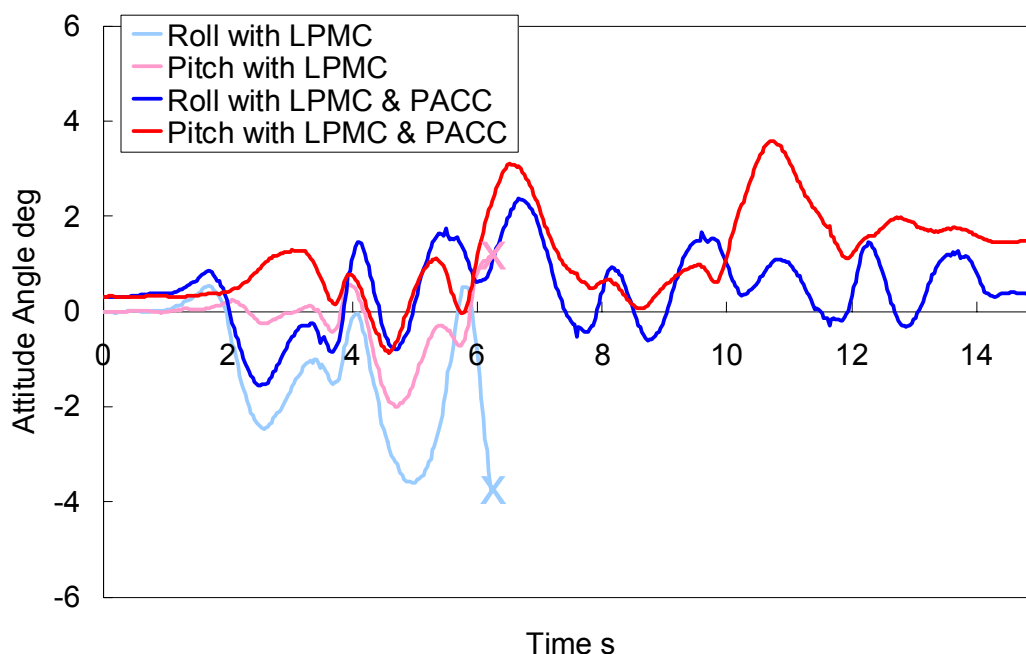


Figure A.22 Attitude angle in stepping on 15 mm board, carrying 50 kg load. (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 15 mm, load: 50 kg)

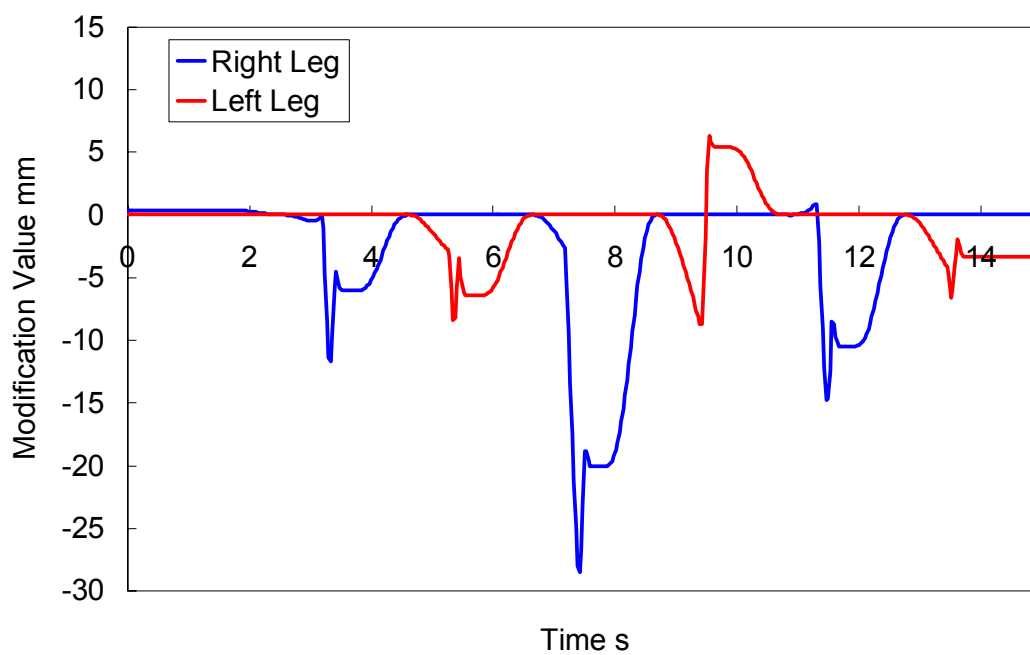


Figure A.23 Modification value of the z axis in stepping on 15 mm board, carrying 50 kg load.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 15 mm, load: 50 kg)



Figure A.24 Walking experiment on 20 mm board, carrying a human.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, load: a 55 kg human)

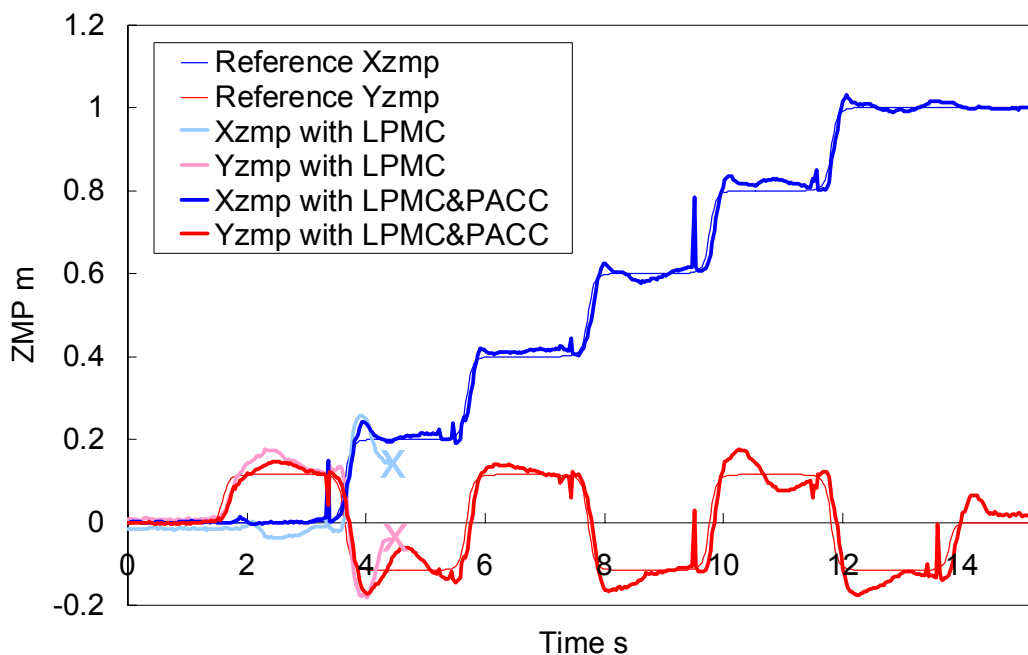


Figure A.25 ZMP trajectories in stepping on 20 mm board, carrying a human. (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, load: a 55 kg human)

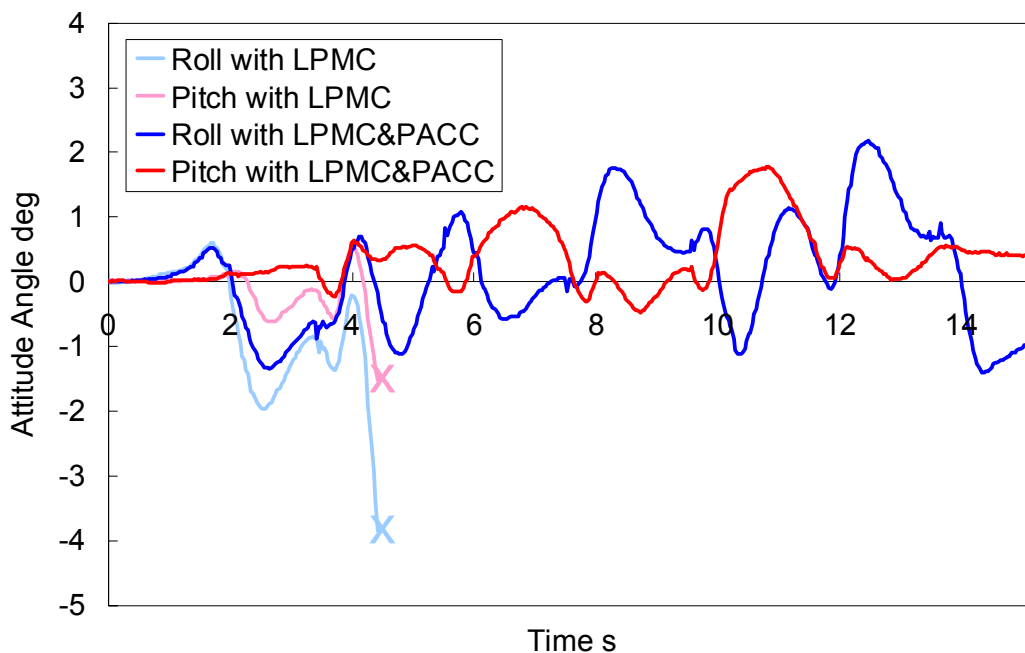


Figure A.26 Attitude angle in stepping on 20 mm board, carrying a human. (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, load: a 55 kg human)

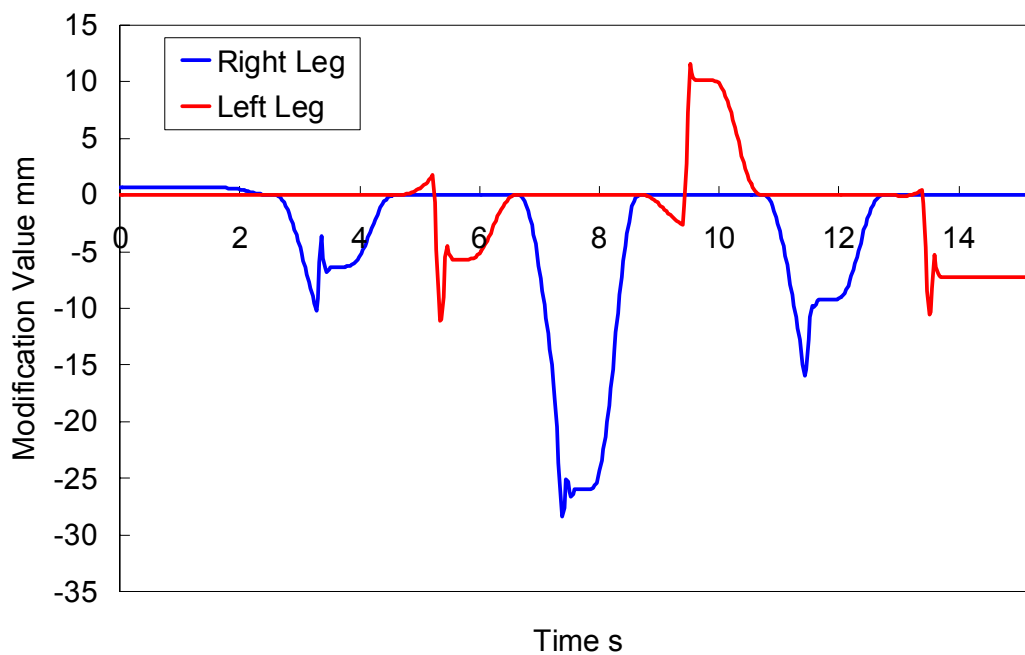


Figure A.27 Modification value of the z axis in stepping on 20 mm board, carrying a human.

(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 20 mm, load: a 55 kg human)



Figure A.28 Walking experiment on uneven surface, carrying a human.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm, load: a 55 kg human)

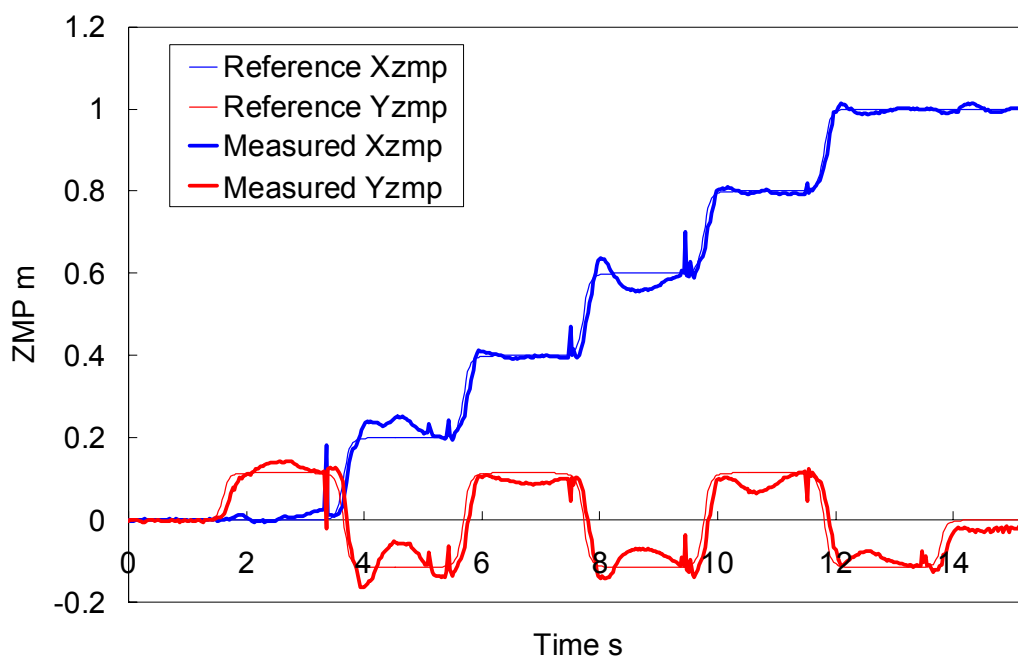


Figure A.29 ZMP trajectories in walking on uneven surface, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm, load: a 55 kg human)

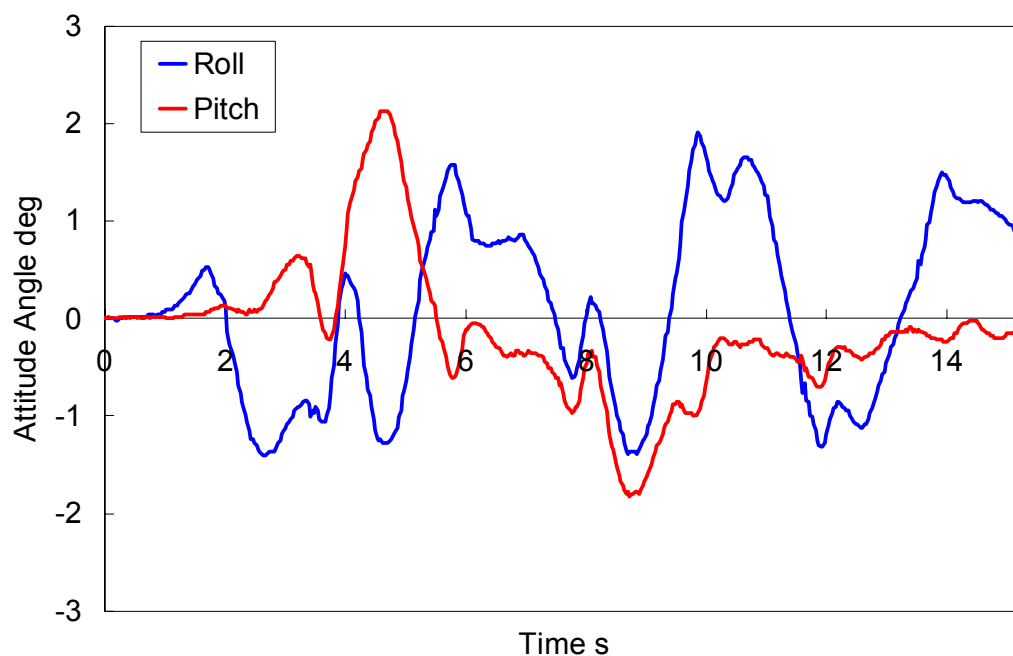


Figure A.30 Attitude angle in walking on uneven terrain, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, height of unevenness: 5-20 mm, load: a 55 kg human)

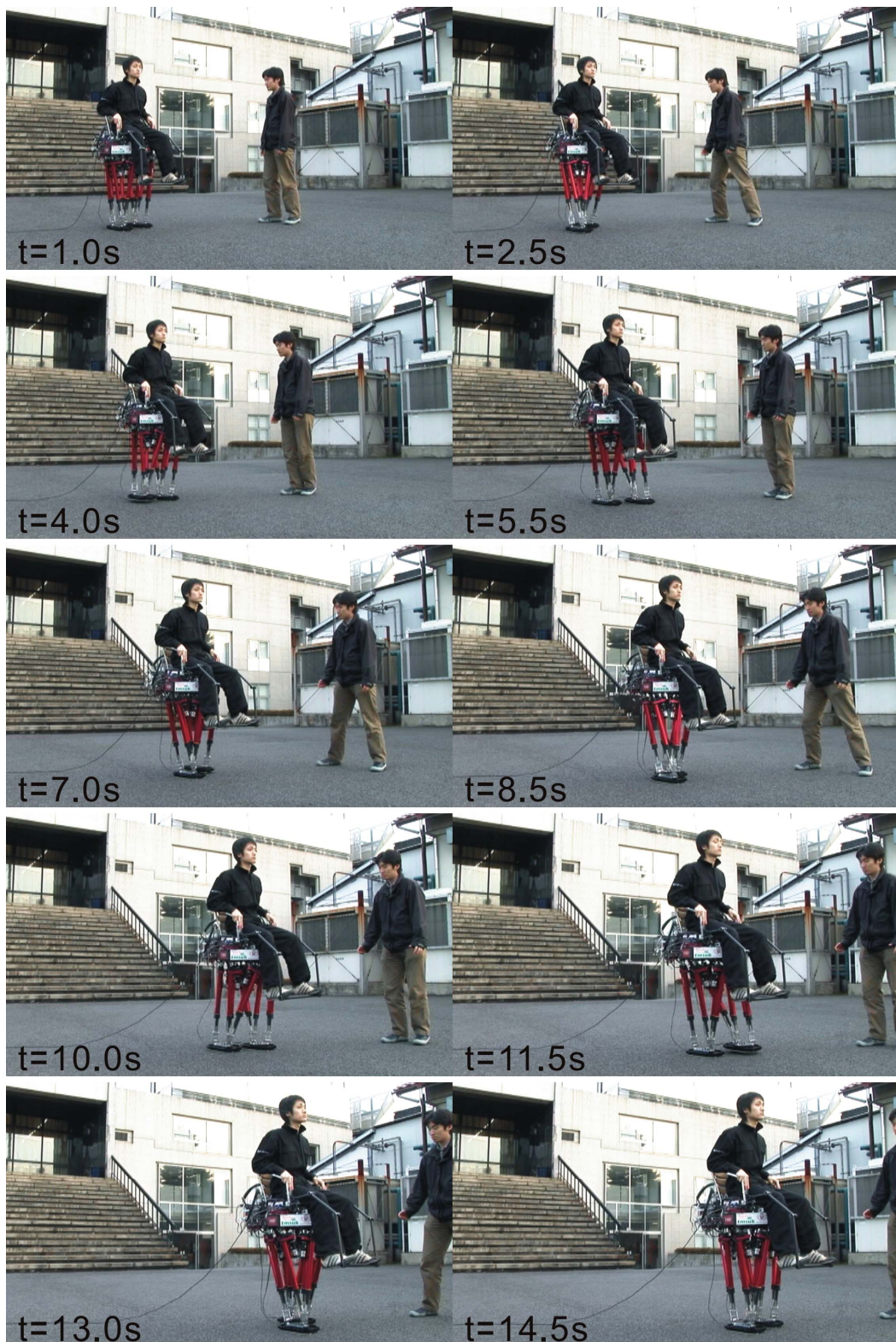


Figure A.31 Walking experiment on the blacktop road, carrying a human.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, load: a 55 kg human)

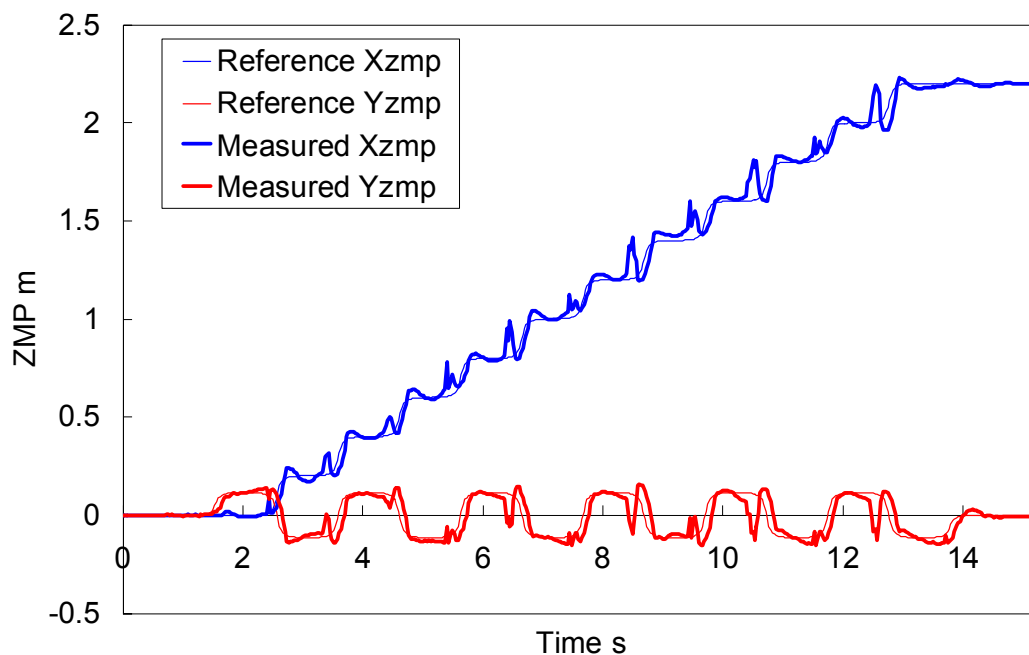


Figure A.32 ZMP trajectories in walking on the blacktop road, carrying a human.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, load: a 55 kg human)

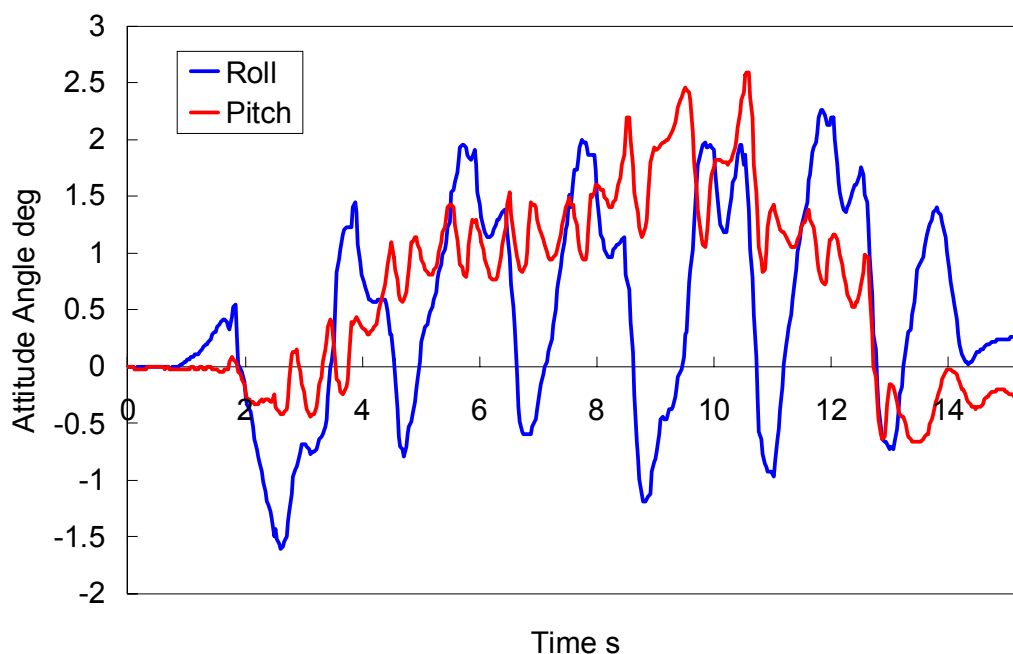


Figure A.33 Attitude angle in walking on the blacktop road, carrying a human.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, load: a 55 kg human)

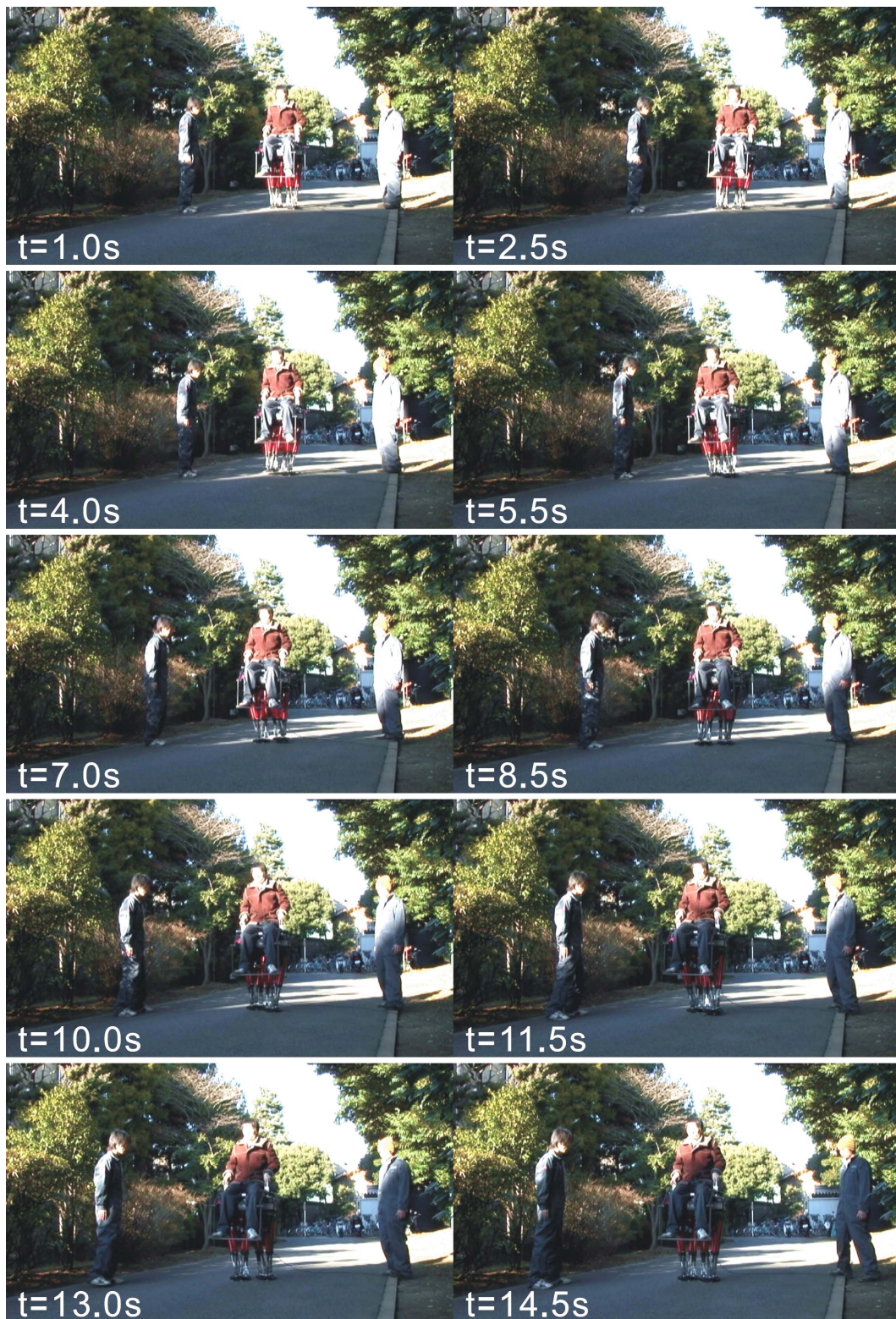


Figure A.34 Walking experiment on the blacktop road, carrying a human (1/2).
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 1-2 deg,
load: a 55 kg human)



Figure A.35 Walking experiment on the blacktop road, carrying a human (2/2).
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 1-2 deg,
load: a 55 kg human)

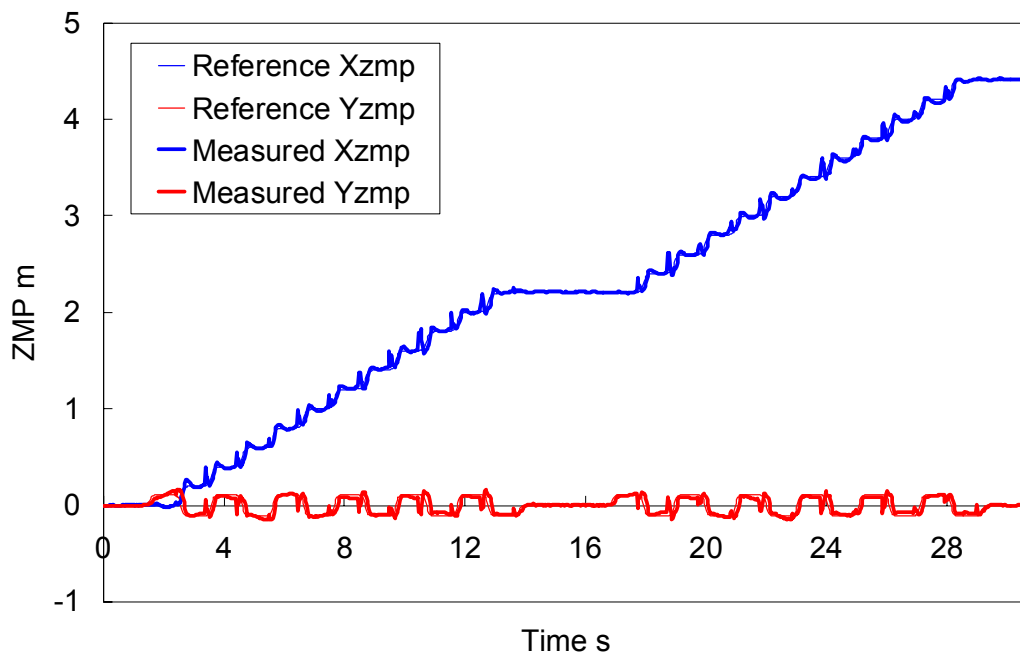


Figure A.36 ZMP trajectories in walking on the blacktop road, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 1-2 deg,
 load: a 55 kg human)

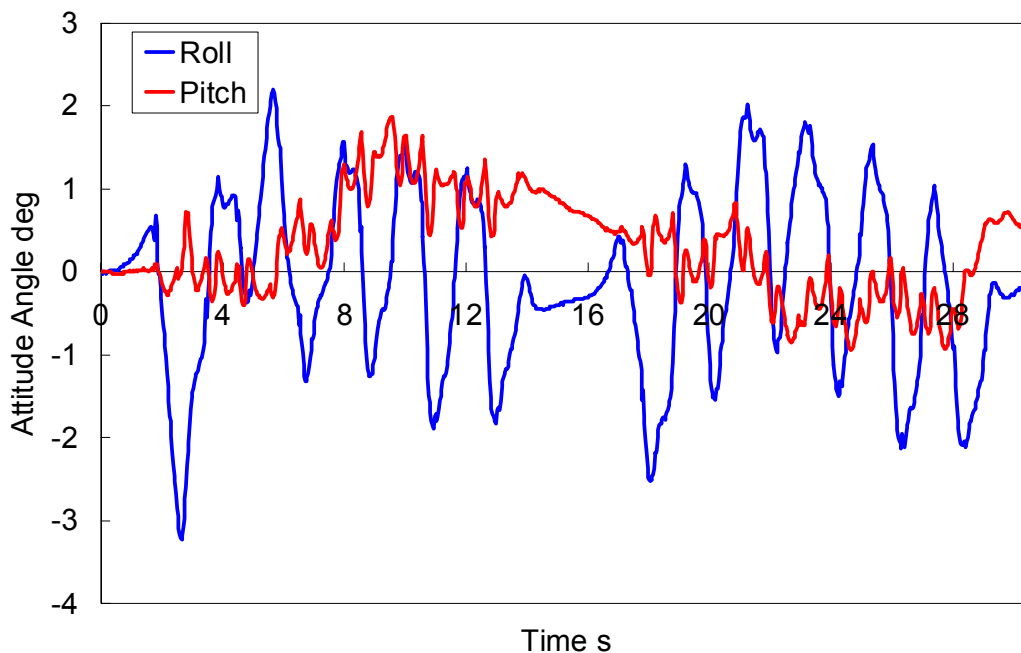


Figure A.37 Attitude angle in walking on the blacktop road, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 200 mm/step, inclination: 1-2 deg,
 load: a 55 kg human)

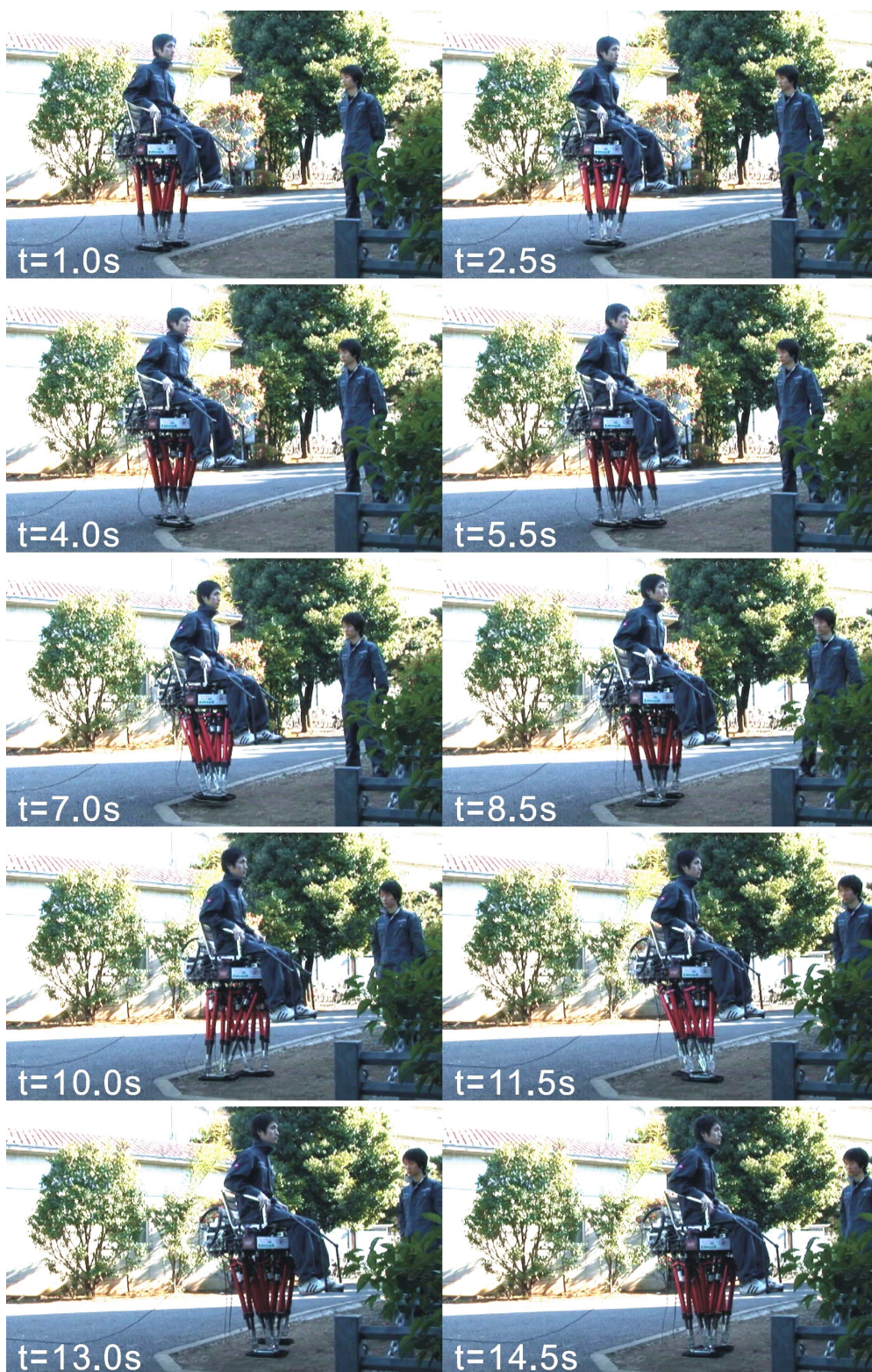


Figure A.38 Walking experiment on uneven terrain in real environment.
(Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, unevenness: 20 mm,
load: a 55 kg human)

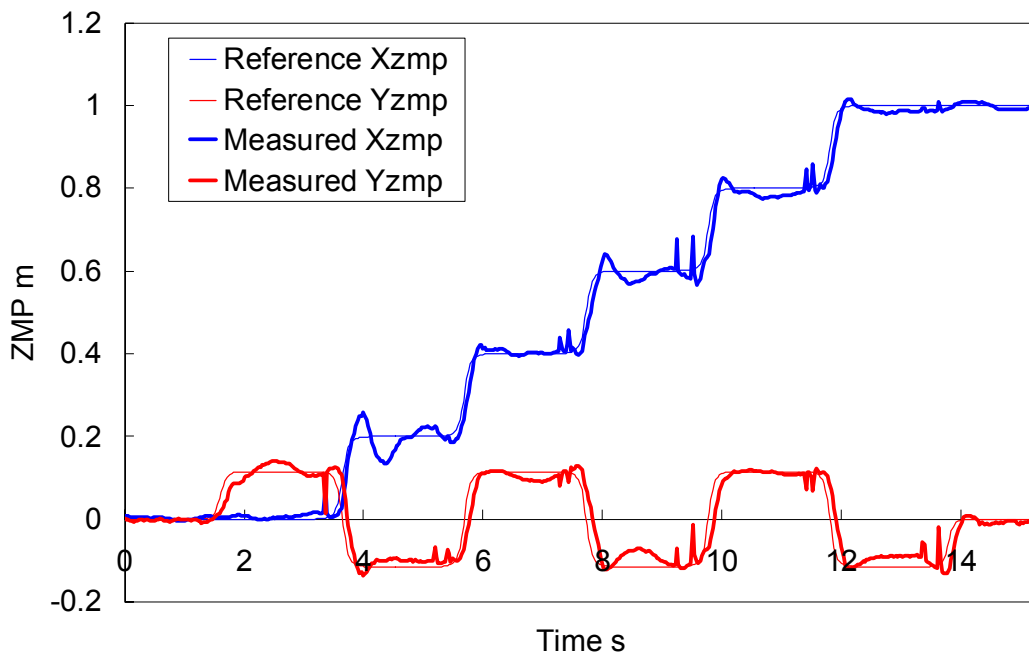


Figure A.39 ZMP trajectories in walking on uneven terrain in real environment.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, unevenness: 20 mm,
 load: a 55 kg human)

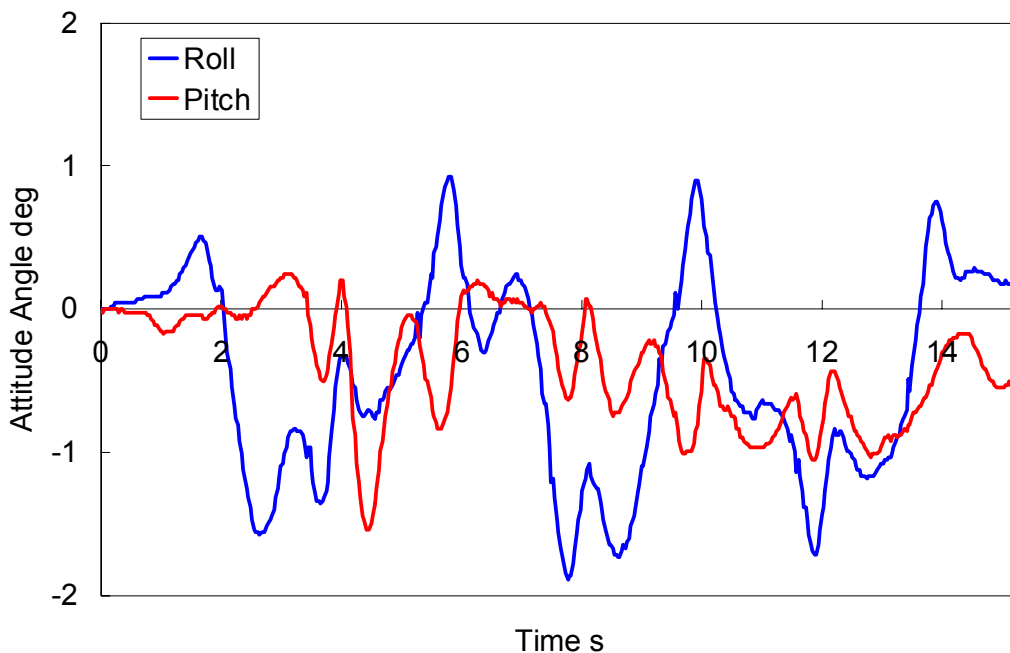


Figure A.40 Attitude angle in walking on uneven terrain in real environment.
 (Walking forward, walking cycle: 2.0 s/step, step length: 200 mm/step, unevenness: 20 mm,
 load: a 55 kg human)

付録 B 外乱補償制御法の開発

- B.1 搭乗型 2 足歩行ロボットにおける外乱の分類
- B.2 搭乗者が発生する外乱に対する補償制御法
- B.3 外部環境から加わる外乱に対する補償制御法

B.1 搭乗型 2 足歩行ロボットにおける外乱の分類

外乱とは予期せぬ環境の変化のことであり，路面の凹凸によるものと，外から加えられる力によるものの大きく 2 つに分けられる．路面の凹凸に対しては本論分の第 2 章～第 4 章で開発した路面適応制御系により適応することができる．本付録では外から加えられる力によって発生する外乱に対する補償動作生成法について述べる．本付録中で外乱という用語を使う場合は，外から加えられる力のことを指すこととする．

搭乗型 2 足歩行ロボットにおいては，外乱は大きく 2 つに分けられる（図 B.1）．搭乗者が発生する外乱とロボットの外部環境から加わる外乱である．搭乗者が発生する外乱に関してはさらに 2 つに分けることができる．1 つは搭乗者の急激な動きによって生じる動的な外乱，もう 1 つは搭乗者の座る位置のずれなどによる静的な外乱である．これら搭乗者が発生する外乱に対しては，できる限りロボットの進行方向から逸脱することがないように補償動作を生成することが好ましい．なぜなら，搭乗者の着座位置のずれなどの静的な外乱を補償する場合，補償の仕方によっては，搭乗者が意図

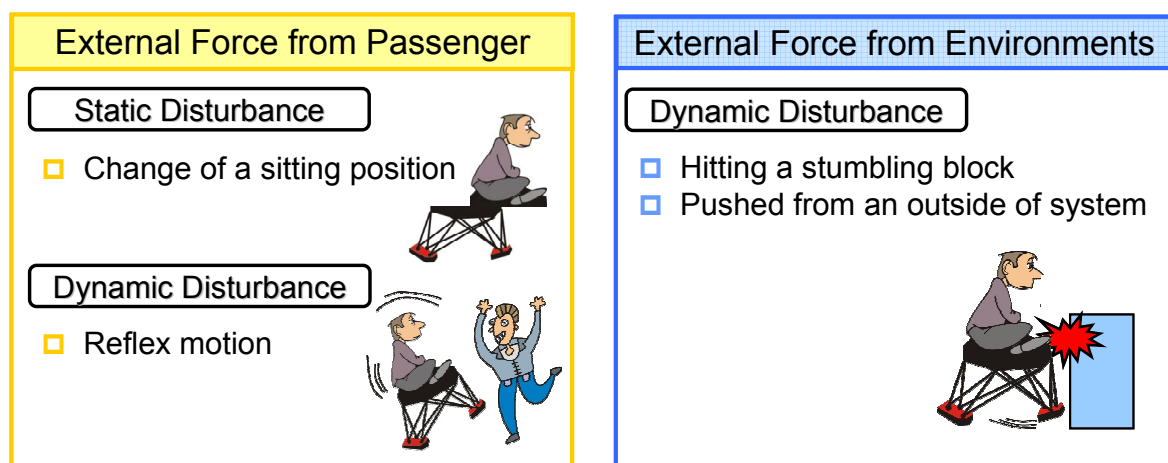


Figure B.1 Category of disturbances.

する進行方向から逸脱する方向に移動し続けるということが起こる可能性があるからである。ロボットの外部環境から加わる外乱に対しては，進行方向からの逸脱を許し，外乱の発生源から離れることにより，外力の低減が図れるものと思われる。

以下にそれぞれの外乱に対する補償制御法の詳細について述べる。

B.2 搭乗者が発生する外乱に対する補償制御法

2足歩行ロボットの外力下での歩行安定化に関する研究は以前から多く行われているが[103, 104, 188, 189], 人間搭乗型のように積載物の運動に関する安定化の研究例は少ない。原田ら[190]は質量の不明な重量物を持ち上げる動作についてこれを安定に行う制御系を提案しているが，重量物が運動することは対象としていない。

本節ではまず，搭乗者や積載物が発生する外乱をリアルタイムで補償する外乱補償制御アルゴリズムについて述べる。搭乗者が発生する外乱と外部環境から加わる外乱を区別するため，搭乗者外乱は人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIV (Waseda Leg - No.16 Refined IV) の搭乗席下部に搭載された6軸力覚センサを用いて検出する(図B.2)。そのため，本節の外乱補償制御法だけではロボット腰部より下の脚などに加わった外乱は補償できないことに注意されたい。

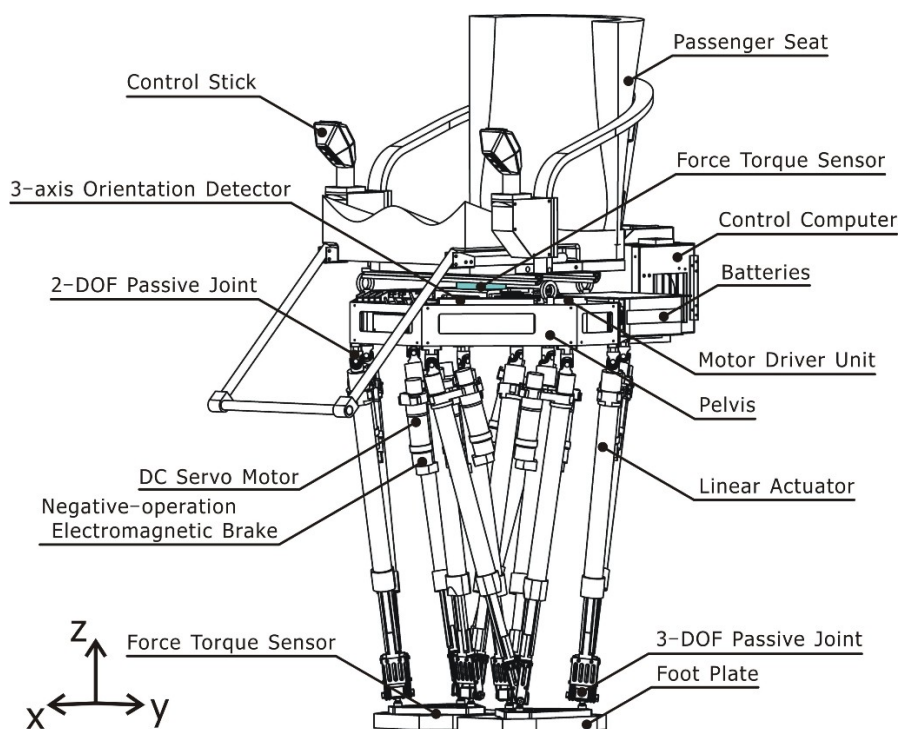


Figure B.2 WL-16RIV (Waseda Leg - No.16 Refined IV).

以下，本制御アルゴリズムの詳細を順に説明する．

B.2.1 動的な外乱補償制御法

これは，搭乗者や積載物の動きによって発生する動的な外乱を補償するものである．実際には外乱は連続的にロボットに加わるため，絶えず設定 ZMP にあわせるように補償軌道を算出すると軌道が発散してしまう．この問題を解決するために補償軌道の収束性を考慮しながら設定 ZMP を足底の ZMP 安定領域内で操作する手法をとった．本手法は以下の 5 つのポイントからなる：

- 外乱成分の抽出
- 腰部補償軌道の算出
- 設定 ZMP 軌道の変更
- 着地位置の変更
- 足部軌道の生成

動的な外乱補償制御法の流れの概略図を図 B.3 に示す．以下にこれらについて述べる．

(a) 動的な外乱補償制御法の詳細

外乱成分の抽出

ロボットの歩行パターンは，搭乗者や積載物は運動しないものとして，それが発生するモーメントを考慮して事前に生成される．しかし歩行時には，腰部力センサは重量物が発生する慣性力を検出してしまふ．そのため，それを外力として見なさないように，重量物が腰部に固定された剛体であると考えた場合に発生する慣性力やそれによって発生するモーメントをあらかじめ計算し，力センサの測定データか

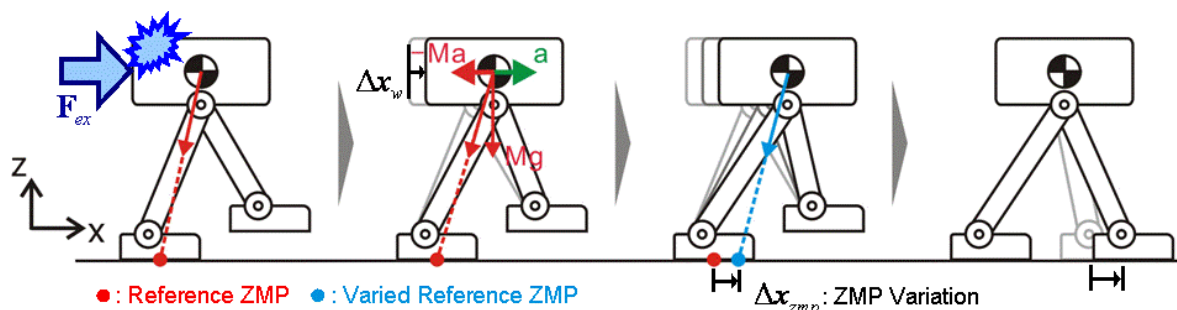


Figure B.3 Outline of the dynamic disturbance compensation control under unknown external force which acts on the robot's waist.

ら差し引くことで外乱成分を抽出する.

腰部補償軌道の算出

歩行中にロボットに外乱が加わった際、ロボットの転倒を防ぐため、実測 ZMP を後に修正される設定 ZMP に一致させるように腰部を加速させる. その軌道計算には搭乗者も含めた腰部質点が、腰部重心 1 質点に集中する 3 質点近似モデルを用いる (図 B.4). このモデルの ZMP 周りのモーメントのつりあい式は次式のようになる. なお搭乗者が発生する外乱検知は、搭乗席下部の 6 軸力覚センサを用いて行うので、外乱入力点もこの場合、腰部 6 軸力覚センサ配置点のみとなる.

$$\sum_i^{All\ Particles} m_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_{vzmp}) \times (\ddot{\mathbf{x}}_i + \mathbf{G}) - \{ (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_{vzmp}) \times \mathbf{F}_{ex} + \mathbf{M}_{ex} \} + \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \quad (B.1)$$

ただし、 m_i は i 番目の質点の質量、 $\mathbf{x}_i = [x_i, y_i, z_i]^T$ は i 番目の質点の位置ベクトル、 $\mathbf{x}_{vzmp} = [x_{vzmp}, y_{vzmp}, z_{vzmp}]^T$ は設定 ZMP の位置ベクトル、 $\mathbf{G} = [0, 0, g_z]^T$ は重力加速度ベクトル、 $\mathbf{x}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ は 6 軸力覚センサの位置、 $\mathbf{F}_{ex} = [F_x, F_y, F_z]^T$ は搭乗者が発生

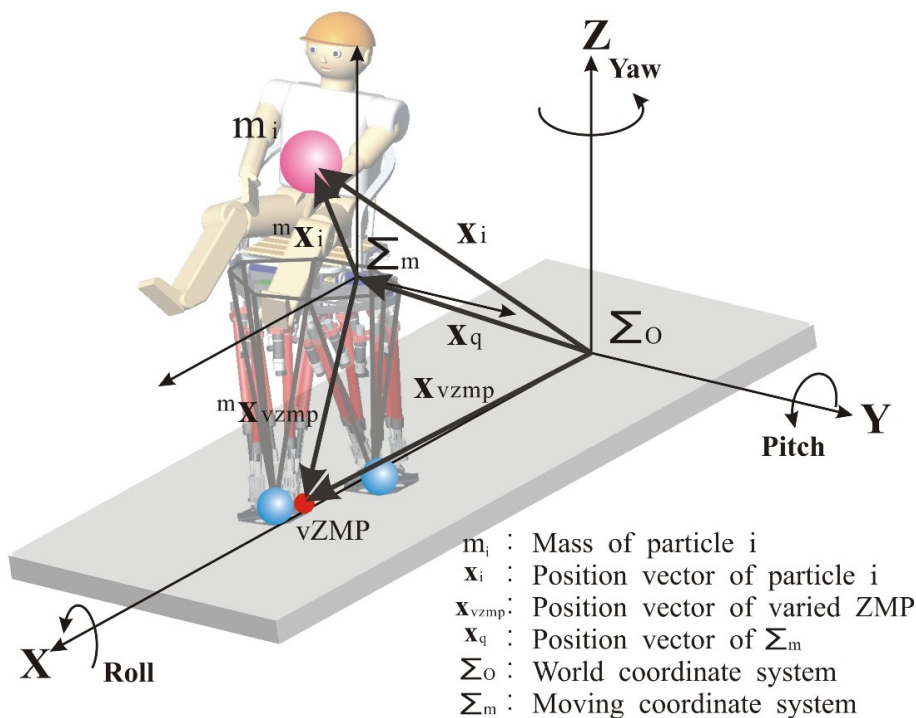


Figure B.4 Definition of coordinate systems and vectors.

する外力, $\mathbf{M}_{ex} = [M_x, M_y, M_z]^T$ は搭乗者が発生する外力モーメント, $\mathbf{T}_0 = [0, 0, T_z]^T$ は変更後の設定 ZMP における路面からロボットに作用する床反力モーメントベクトル.

各部の相対運動を考えるために, 図 B.4 に示す 2 足歩行ロボットの腰部付近を運動する運動座標系 Σ_m ($\mathbf{x}_i = {}^m \mathbf{x}_i + \mathbf{x}_q$) を設定する. この座標系を用いて ZMP 方程式を表すと次式を得る.

$$\begin{aligned} & \sum_i^{All\ Particles} m_i \left({}^m \mathbf{x}_i - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times \left({}^m \ddot{\mathbf{x}}_i + \ddot{\mathbf{x}}_q + {}^m \mathbf{G} \right) \\ & - \left\{ \left({}^m \mathbf{x}_s - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times {}^m \mathbf{F}_{ex} + {}^m \mathbf{M}_{ex} \right\} + {}^m \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (\text{B.2})$$

ただし, 運動座標系の回転は考慮しないものとした.

ここで, 式(B.2)の第一項を腰と下肢に分解すると次式のようになる.

$$\begin{aligned} m_w \left({}^m \mathbf{x}_w - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times \left({}^m \ddot{\mathbf{x}}_w + \ddot{\mathbf{x}}_q + {}^m \mathbf{G} \right) + \sum_i^{All\ Foot} m_i \left({}^m \mathbf{x}_i - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times \left({}^m \ddot{\mathbf{x}}_i + \ddot{\mathbf{x}}_q + {}^m \mathbf{G} \right) \\ - \left\{ \left({}^m \mathbf{x}_s - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times {}^m \mathbf{F}_{ex} + {}^m \mathbf{M}_{ex} \right\} + {}^m \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \end{aligned} \quad (\text{B.3})$$

式(B.3)の腰, 下肢, 外乱の項について, それぞれ各成分について計算する.

(i) 腰の項について

$$\begin{aligned} & m_w \left({}^m \mathbf{x}_w - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times \left({}^m \ddot{\mathbf{x}}_w + \ddot{\mathbf{x}}_q + {}^m \mathbf{G} \right) \\ & = m_w \begin{bmatrix} {}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \\ {}^m y_w - {}^m y_{vzmp} \\ {}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^m \ddot{x}_w + \ddot{x}_q \\ {}^m \ddot{y}_w + \ddot{y}_q \\ {}^m \ddot{z}_w + \ddot{z}_q + {}^m g_z \end{bmatrix} \\ & = m_w \begin{bmatrix} \left({}^m y_w - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m g_z - \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{y}_w + \ddot{y}_q \right) \\ \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_w + \ddot{x}_q \right) - \left({}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m g_z \\ \left({}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{y}_w + \ddot{y}_q \right) - \left({}^m y_w - {}^m y_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_w + \ddot{x}_q \right) \end{bmatrix} \\ & \equiv \Phi_w \end{aligned} \quad (\text{B.4})$$

(ii) 下肢の項について

$$\begin{aligned}
& \sum_i^{AllFoot} m_i \left({}^m \mathbf{x}_i - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times \left({}^m \ddot{\mathbf{x}}_i + \ddot{\mathbf{x}}_q + {}^m \mathbf{G} \right) \\
&= \sum_i^{AllFoot} m_i \begin{bmatrix} {}^m x_i - {}^m x_{vzmp} \\ {}^m y_i - {}^m y_{vzmp} \\ {}^m z_i - {}^m z_{vzmp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^m \ddot{x}_i + \ddot{x}_q \\ {}^m \ddot{y}_i + \ddot{y}_q \\ {}^m \ddot{z}_i + \ddot{z}_q + {}^m g_z \end{bmatrix} \\
&= \sum_i^{AllFoot} m_i \begin{bmatrix} \left({}^m y_i - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m g_z - \left({}^m z_i - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{y}_i + \ddot{y}_q \right) \\ \left({}^m z_i - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_i + \ddot{x}_q \right) - \left({}^m x_i - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m g_z \\ \left({}^m x_i - {}^m x_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{y}_i + \ddot{y}_q \right) - \left({}^m y_i - {}^m y_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_i + \ddot{x}_q \right) \end{bmatrix} \\
&\equiv \Phi_{foot}
\end{aligned} \tag{B.5}$$

(iii) 外乱の項について

$$\begin{aligned}
& \left({}^m \mathbf{x}_s - {}^m \mathbf{x}_{vzmp} \right) \times {}^m \mathbf{F}_{ex} + {}^m \mathbf{M}_{ex} \\
&= \begin{bmatrix} {}^m x_s - {}^m x_{vzmp} \\ {}^m y_s - {}^m y_{vzmp} \\ {}^m z_s - {}^m z_{vzmp} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} {}^m F_x \\ {}^m F_y \\ {}^m F_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} {}^m M_x \\ {}^m M_y \\ {}^m M_z \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \left({}^m y_s - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m F_z - \left({}^m z_s - {}^m z_{vzmp} \right) {}^m F_y + {}^m M_x \\ \left({}^m z_s - {}^m z_{vzmp} \right) {}^m F_x - \left({}^m x_s - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m F_z + {}^m M_y \\ \left({}^m x_s - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m F_y - \left({}^m y_s - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m F_x + {}^m M_z \end{bmatrix} \\
&\equiv \Phi_{ex}
\end{aligned} \tag{B.6}$$

式(B.4)～式(B.6)を式(B.3)に代入し，X軸とY軸方向のみに注目すると，

$$m_w \begin{bmatrix} \left({}^m y_w - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m g_z - \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{y}_w + \ddot{y}_q \right) \\ \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_w + \ddot{x}_q \right) - \left({}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m g_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{foot_x} - \Phi_{ex_x} \\ \Phi_{foot_y} - \Phi_{ex_y} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{B.7}$$

$$m_w \begin{bmatrix} -\left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \ddot{y}_q - \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) {}^m \ddot{y}_w + \left({}^m y_w - {}^m y_{vzmp} \right) {}^m g_z \\ \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \ddot{x}_q + \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) {}^m \ddot{x}_w - \left({}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m g_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_{foot_x} - \Phi_{ex_x} \\ \Phi_{foot_y} - \Phi_{ex_y} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \tag{B.8}$$

式(B.8)において一行目，二行目に注目すると，それぞれY軸方向，X軸方向の腰

部補償軌道が算出できることが分かる．以下，簡単のために X 軸方向の運動のみに
ついて考える．

式(B.8)の二行目に注目し，腰部の加速度項を左辺に，それ以外を右辺にまとめると，式(B.9)となる．式中の Φ_{foot_y} は下肢質点が設定 ZMP 周りに発生するモーメント， Φ_{ex_y} は外乱が設定 ZMP 周りに発生するモーメントを表す．

$$\begin{aligned}
 {}^m\ddot{x}_w &= -\ddot{x}_q + \frac{m_w({}^m x_w - {}^m x_{vzmp})}{m_w({}^m z_w - {}^m z_{vzmp})} {}^m g_z + \frac{-\Phi_{foot_y} + \Phi_{ex_y}}{m_w({}^m z_w - {}^m z_{vzmp})} \\
 &= -\ddot{x}_q + \frac{1}{B} \left\{ m_w({}^m x_w - {}^m x_{vzmp}) {}^m g_z - \Phi_{foot_y} + \Phi_{ex_y} \right\} \\
 B &= m_w({}^m z_w - {}^m z_{vzmp}) \tag{B.9} \\
 \Phi_{foot_y} &= \sum_i^{AllFoot} m_i \left\{ ({}^m z_i - {}^m z_{vzmp}) ({}^m \ddot{x}_i + \ddot{x}_q) - ({}^m x_i - {}^m x_{vzmp}) {}^m g_z \right\} \\
 \Phi_{ex_y} &= ({}^m z_s - {}^m z_{vzmp}) {}^m F_x - ({}^m x_s - {}^m x_{vzmp}) {}^m F_z + {}^m M_y
 \end{aligned}$$

さらに歩行安定性を向上させるために，実測 ZMP のフィードバックを腰部補償軌道算出の式に追加することとした．実際には式(B.10)のように修正し，実測 ZMP (${}^m x_{azmp}$) と変更された設定 ZMP (${}^m x_{vzmp}$) の偏差にゲイン K_{zmp} をかけたものを式(B.9)の右辺に追加する．

$${}^m\ddot{x}_w = -\ddot{x}_q + \frac{1}{B} \left\{ m_w({}^m x_w - {}^m x_{vzmp}) {}^m g_z - \Phi_{foot_y} + \Phi_{ex_y} \right\} + K_{zmp} ({}^m x_{azmp} - {}^m x_{vzmp}) \tag{B.10}$$

この式を 4 次のルンゲクッタ法を用いて解き，次制御周期における腰部補償軌道を算出する．ただし，ここで求まる解は初期値問題の解となるので，必ず発散解となる．そこで，式(B.10)内の設定 ZMP 軌道を支持多角形内で変更し，着地位置を変更することにより発散の抑制を行う必要がある．

設定 ZMP 軌道の算出

ロボットに加わった外力に対して補償軌道を生成するとき，オフラインで計算された設定 ZMP 軌道に沿って腰部軌道の変更を行うと，補償動作が大きくなり収束性が悪くなり外力補償範囲の低減につながる．そこで，オフラインで運動パターンを生成する際は設定 ZMP 軌道 (${}^m x_{pzmp}$) を足底の真ん中に設定していたが，外乱

の影響により実測 ZMP が ZMP 安定領域外に出てしまうような時は設定 ZMP を安定領域の端近くに変更する。これによって、補償動作を行う腰軌道の収束性が改善できる。

外乱の影響が ZMP 安定領域内のときは、式(B.11)によって算出された ZMP 操作量だけ変更する。そのとき、変更後の設定 ZMP が安定領域を出てしまうときは、設定 ZMP を安定領域の端近くに変更する。本研究では、安定性の点から x 方向に 40 mm, y 方向に 30 mm と ZMP の変更量に制限を設けた。この値は WL-16RIV の腰部を引っ張った際に、足部が路面から浮き上がる際の ZMP の移動量を基礎実験から測定し、決定したものである。以上の操作を行うことによって急激な補償運動の変更がなくなり、腰軌道偏差を減らすことが可能となる。そして、歩幅変更量の減少にもつながる。式(B.11)で求めた ZMP 操作量を式(B.12)のように設定 ZMP にプラスする。

$${}^m \Delta x_{zmp} = K_p {}^m \Delta x_w + K_v {}^m \Delta \dot{x}_w \quad (\text{B.11})$$

$${}^m x_{vzmp} = {}^m x_{pzmp} + {}^m \Delta x_{zmp} \left(\left| {}^m \Delta x_{zmp} \right| \leq \text{Limit} \right) \quad (\text{B.12})$$

この操作に加えて、歩幅変更（着地位置変更）することによって補償軌道の位置偏差，速度偏差が減少し ZMP 操作量もゼロに近づく。ここで用いている位置ゲイン K_p ，速度ゲイン K_v の値は外乱補償運動をシミュレーションする中で補償軌道の収束性を考慮して決定した。

着地位置の変更

設定 ZMP 軌道の変更をもって腰部軌道が収束しない場合，足部の着地位置を変更することで，設定 ZMP を変更できる範囲を発散していく方向に広げることができるため，腰部軌道の発散を防ぐことができる。着地位置変更量の算出には，図 B.5 の単質点近似モデルを用いる。このモデルにおける設定 ZMP 周りのモーメントのつりあい式は式(B.13)となる。

$$m_w \left({}^m z_w - {}^m z_{vzmp} \right) \left({}^m \ddot{x}_w + \ddot{x}_q \right) - m_w \left({}^m x_w - {}^m x_{vzmp} \right) {}^m g_z = 0 \quad (\text{B.13})$$

また補償軌道の生成により，時刻 T_0 に設定パターンからの腰部偏差が ${}^m \Delta x_w$ ，ZMP

$$X = ae^{At} + be^{-At}$$

$$\text{ただし, } A = \sqrt{\frac{{}^m g_z}{{}^m z_w - {}^m z_{zmp}}} \quad (\text{B.17})$$

$t=0$ のとき, $X_0 = {}^m \Delta x_w|_{t=t_0}$, $\dot{X}_0 = {}^m \Delta \dot{x}_w|_{t=t_0}$, $R_{p0} = {}^m \Delta x_{zmp}|_{t=t_0}$ とすると, 式(B.17) の a , b は次のように求まる.

$$\begin{cases} a+b = X_0 - R_{p0} \\ aA - bA = \dot{X}_0 \end{cases}$$

$$\therefore \begin{cases} a = \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2A} \\ b = \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2A} \end{cases} \quad (\text{B.18})$$

よって, 式(B.15)の微分方程式の解は, 式(B.19)のようになる.

$${}^m \Delta x_w = \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2A} e^{At} + \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2A} e^{-At} + R_{p0}$$

$${}^m \Delta \dot{x}_w = \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2} e^{At} - \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2} e^{-At} \quad (\text{B.19})$$

ここで式(B.19)はある時刻の腰部の偏差(X_0 , \dot{X}_0)が与えられた場合の, t 秒後の腰部偏差を表している. 以上の式から 3 歩目の着地で腰部偏差 (位置・速度) が 0 になるように境界値問題を解き, 次の 1 歩の着地位置変更量を求める. いま, 時刻 $t = t_0$ のときに, 腰部偏差がそれぞれ X_0 , \dot{X}_0 で与えられた場合, 1 歩目, 2 歩目, 3 歩目の腰部偏差 X_1 , X_2 , X_3 は次のようになる.

$$X_1 = \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2A} e^{A(t_1-t_0)} + \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2A} e^{-A(t_1-t_0)} + R_{p0}$$

$$\dot{X}_1 = \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2} e^{A(t_1-t_0)} - \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2} e^{-A(t_1-t_0)} \quad (\text{B.20})$$

$$\begin{aligned}
X_2 &= \frac{A(X_1 - R_{p1}) + \dot{X}_1}{2A} e^{A(t2-t1)} + \frac{A(X_1 - R_{p1}) - \dot{X}_1}{2A} e^{-A(t2-t1)} + R_{p1} \\
\dot{X}_2 &= \frac{A(X_1 - R_{p1}) + \dot{X}_1}{2} e^{A(t2-t1)} - \frac{A(X_1 - R_{p1}) - \dot{X}_1}{2} e^{-A(t2-t1)}
\end{aligned} \tag{B.21}$$

$$\begin{aligned}
X_3 &= \frac{A(X_2 - R_{p2}) + \dot{X}_2}{2A} e^{A(t3-t2)} + \frac{A(X_2 - R_{p2}) - \dot{X}_2}{2A} e^{-A(t3-t2)} + R_{p2} \\
\dot{X}_3 &= \frac{A(X_2 - R_{p2}) + \dot{X}_2}{2} e^{A(t3-t2)} - \frac{A(X_2 - R_{p2}) - \dot{X}_2}{2} e^{-A(t3-t2)}
\end{aligned} \tag{B.22}$$

ただし, $t1, t2, t3$ は 1 歩目, 2 歩目, 3 歩目の着地時刻である. また, 1 歩目までの ZMP 変更量 R_{p0} は遊脚が着地する前であるので, $R_{p0} = 0$ である.

式(B.22)の 3 歩目の腰部偏差 (X_3, \dot{X}_3) が 0 になるように R_{p1}, R_{p2} を求めることで, 1, 2 歩目の ZMP 変更量が決まる. 以下に R_{p1}, R_{p2} の計算の流れを示す.

式(B.20)は, 次のように書きなおせる.

$$\begin{aligned}
X_1 &= \frac{1}{2} [e^{A(t1-t0)} + e^{-A(t1-t0)}] X_0 + \frac{1}{2A} [e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}] \dot{X}_0 + \frac{1}{2} [2 - e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}] R_{p0} \\
\dot{X}_1 &= \frac{A}{2} [e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}] X_0 + \frac{1}{2} [e^{A(t1-t0)} + e^{-A(t1-t0)}] \dot{X}_0 - \frac{A}{2} [e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}] R_{p0}
\end{aligned} \tag{B.23}$$

ここで, 以下のようにおくと, 式(B.24)を得る.

$$P_t = \frac{1}{2} [e^{A(t1-t0)} + e^{-A(t1-t0)}], \quad Q_t = \frac{1}{2A} [e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}], \quad J_t = \frac{1}{2} [2 - e^{A(t1-t0)} - e^{-A(t1-t0)}]$$

$$\begin{cases} X_1 = P_t X_0 + Q_t \dot{X}_0 + J_t R_{p0} \\ \dot{X}_1 = A^2 Q_t X_0 + P_t \dot{X}_0 - A^2 Q_t R_{p0} \end{cases} \tag{B.24}$$

同様に, 式(B.21), 式(B.22)についても変形する.

$$\begin{aligned}
X_2 &= \frac{1}{2} [e^{A(t2-t1)} + e^{-A(t2-t1)}] X_1 + \frac{1}{2A} [e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)}] \dot{X}_1 + \frac{1}{2} [2 - e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)}] R_{p1} \\
\dot{X}_2 &= \frac{A}{2} [e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)}] X_1 + \frac{1}{2} [e^{A(t2-t1)} + e^{-A(t2-t1)}] \dot{X}_1 - \frac{A}{2} [e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)}] R_{p1}
\end{aligned} \tag{B.25}$$

$$P_{2t} = \frac{1}{2} \left[e^{A(t2-t1)} + e^{-A(t2-t1)} \right], \quad Q_{2t} = \frac{1}{2A} \left[e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)} \right], \quad J_{2t} = \frac{1}{2} \left[2 - e^{A(t2-t1)} - e^{-A(t2-t1)} \right]$$

$$\begin{cases} X_2 = P_{2t} X_1 + Q_{2t} \dot{X}_1 + J_{2t} R_{p1} \\ \dot{X}_2 = A^2 Q_{2t} X_1 + P_{2t} \dot{X}_1 - A^2 Q_{2t} R_{p1} \end{cases} \quad (\text{B.26})$$

$$X_3 = \frac{1}{2} \left[e^{A(t3-t2)} + e^{-A(t3-t2)} \right] X_2 + \frac{1}{2A} \left[e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right] \dot{X}_2 + \frac{1}{2} \left[2 - e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right] R_{p2}$$

$$\dot{X}_3 = \frac{A}{2} \left[e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right] X_2 + \frac{1}{2} \left[e^{A(t3-t2)} + e^{-A(t3-t2)} \right] \dot{X}_2 - \frac{A}{2} \left[e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right] R_{p2}$$

(B.27)

$$P_{3t} = \frac{1}{2} \left[e^{A(t3-t2)} + e^{-A(t3-t2)} \right], \quad Q_{3t} = \frac{1}{2A} \left[e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right], \quad J_{3t} = \frac{1}{2} \left[2 - e^{A(t3-t2)} - e^{-A(t3-t2)} \right]$$

$$\begin{cases} X_3 = P_{3t} X_2 + Q_{3t} \dot{X}_2 + J_{3t} R_{p2} \\ \dot{X}_3 = A^2 Q_{3t} X_2 + P_{3t} \dot{X}_2 - A^2 Q_{3t} R_{p2} \end{cases} \quad (\text{B.28})$$

式(B.28)の中で $X_3 = 0$, $\dot{X}_3 = 0$ の境界条件で R_{p1} , R_{p2} の算出を行う。以下、計算の概略だけを示す。式(B.24), 式(B.26), 式(B.28)から以下の関係式を導く。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X_3 \\ \dot{X}_3 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} a1 & a2 \\ b1 & b2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{p1} \\ R_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a3 \\ b3 \end{bmatrix} \\ &= C \begin{bmatrix} R_{p1} \\ R_{p2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a3 \\ b3 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (\text{B.29})$$

ここで境界条件を式(B.29)に代入すると,

$$\begin{bmatrix} R_{p1} \\ R_{p2} \end{bmatrix} = -C^{-1} \begin{bmatrix} a3 \\ b3 \end{bmatrix} \quad (\text{B.30})$$

よって, 1 歩目, 2 歩目の歩幅変更量は以下のようなになる。

$${}^m \Delta x_{vzmp(1)} = R_{p1}$$

$${}^m \Delta x_{vzmp(2)} = R_{p2}$$

ただし,

$$\begin{aligned} a1 &= J_{2t} P_{3t} - A^2 Q_{2t} Q_{3t} \\ a2 &= J_{3t} \\ a3 &= P_t P_{2t} P_{3t} X_0 + A^2 P_{3t} Q_t Q_{2t} X_0 + A^2 P_t Q_{2t} Q_{3t} X_0 + A^2 P_{2t} Q_t Q_{3t} X_0 \\ &\quad + P_{2t} P_{3t} Q_t \dot{X}_0 + P_t P_{3t} Q_{2t} \dot{X}_0 + A^2 Q_t Q_{2t} Q_{3t} \dot{X}_0 + P_t P_{2t} Q_{3t} \dot{X}_0 \end{aligned} \quad (B.31)$$

$$b1 = A^2 J_{2t} Q_{3t} - A^2 P_{3t} Q_{2t}$$

$$b2 = -A^2 Q_{3t}$$

$$\begin{aligned} b3 &= A^2 P_t P_{2t} Q_{3t} X_0 + A^4 Q_t Q_{2t} Q_{3t} X_0 + A^2 P_t P_{3t} Q_{2t} X_0 + A^2 P_{2t} P_{3t} Q_t X_0 \\ &\quad + A^2 P_{2t} Q_t Q_{3t} \dot{X}_0 + A^2 P_t Q_{2t} Q_{3t} \dot{X}_0 + A^2 P_{3t} Q_t Q_{2t} \dot{X}_0 + P_t P_{2t} P_{3t} \dot{X}_0 \end{aligned}$$

足部軌道の生成

着地位置変更量の算出を受けて最後に足部軌道の生成をおこなう。本制御では、Z 軸の軌道は設定パターンを用いており、X 軸、Y 軸に関してのみ、毎制御周期に 5 次関数補間することで足部軌道を算出し、ロボットに出力している。

図 B.6 に動的な外乱補償制御法のシステム構成図を示す。

(b) 外乱補償シミュレーション

以上述べた動的な外乱補償制御法では、モーメント補償軌道算出アルゴリズムや ZMP 変更量導出アルゴリズムにおいて ZMP 方程式を線形化して算出していたが、実際の 2 足歩行ロボットは非線形モデルである。そこで、本アルゴリズムを用いたシミュレーションプログラムを開発し、シミュレーションを行い、本提案手法が有効であるかどうか検討を行う。可変できるパラメータは、外乱の大きさ、外乱の時間幅、ロボットの歩行周期、ロボットの腰部重量などである。

本シミュレーションを通して、ロボットが補償可能な外乱の大きさや時間幅の限界を調査する。また、本シミュレーションでは、外乱は方形波状のものを入力し、ロボットがその場足踏み中に前方向に作用させるものとする。

図 B.7 はロボットの歩行周期を一定 (0.78 s/step) とし、外乱の大きさと時間幅を変更した際の補償可能範囲を示している。縦軸は外乱の大きさをロボット腰部重量で割

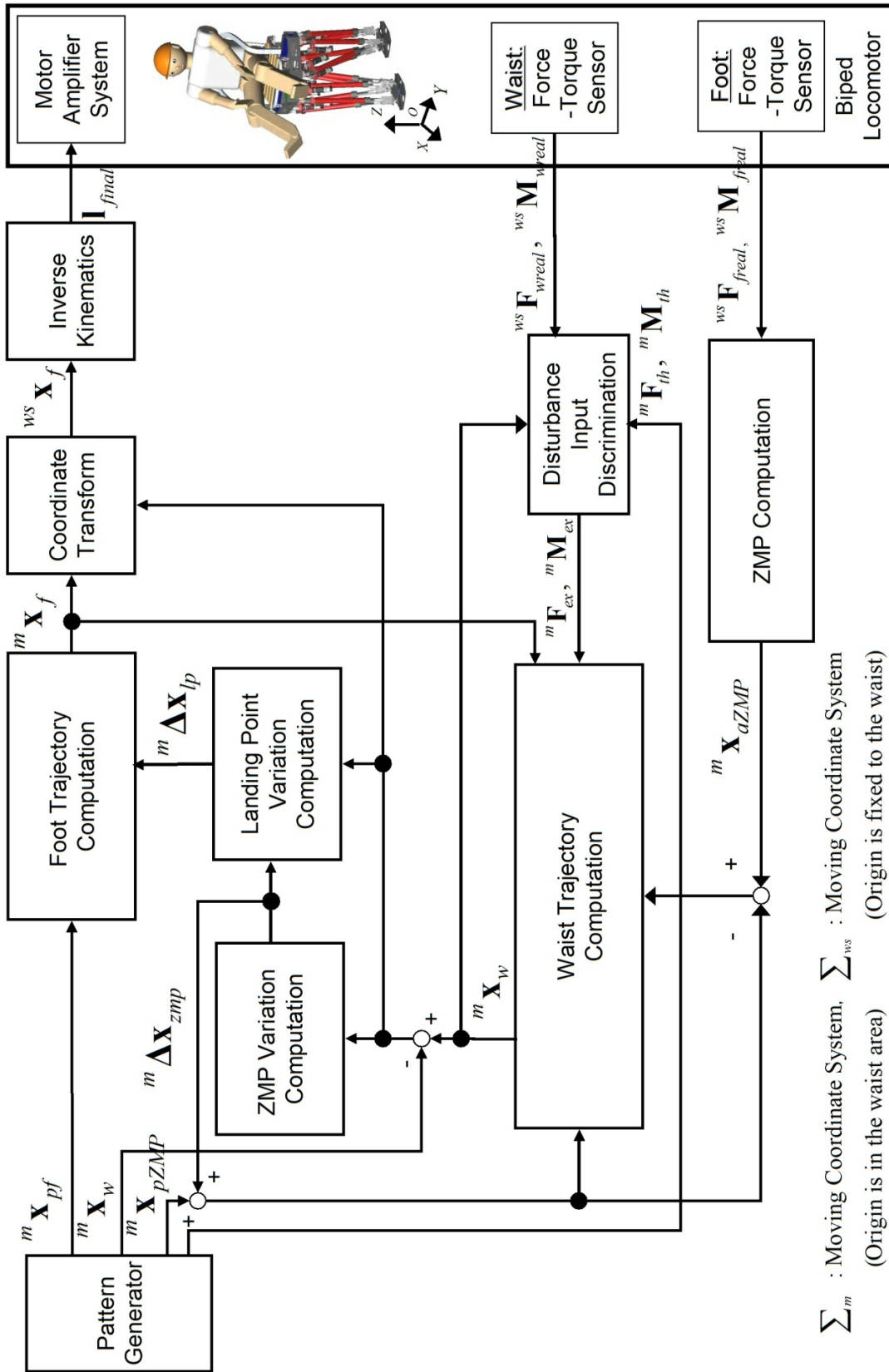


Figure B.6 Block diagram of the dynamic disturbance compensation control.

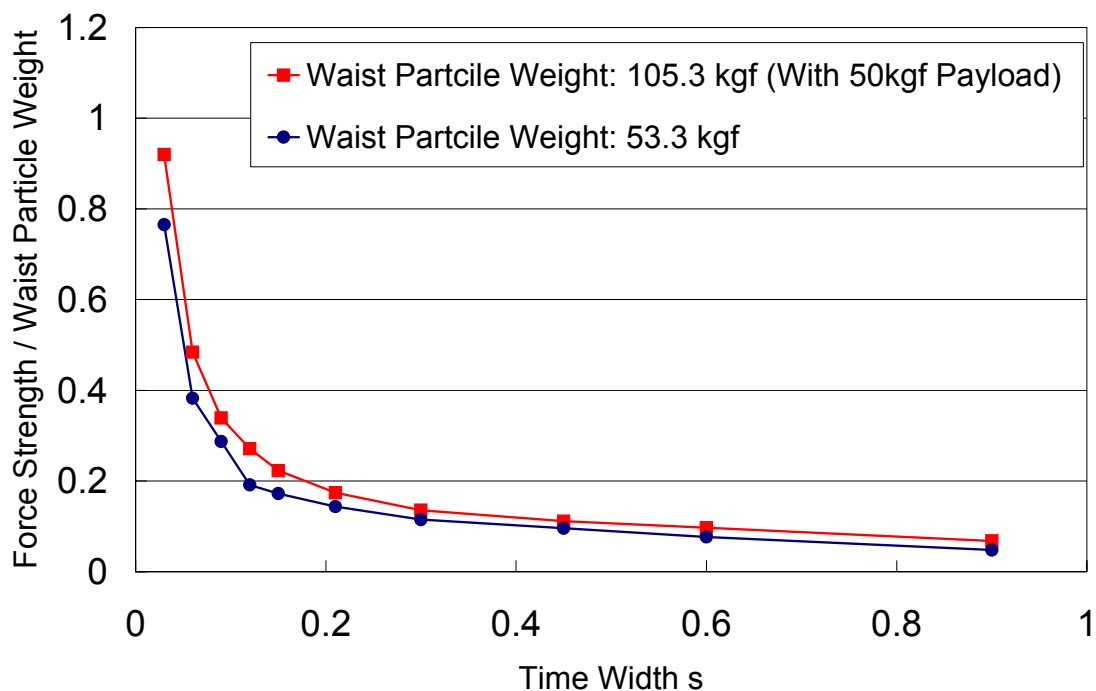


Figure B.7 Recoverable region when changing the force strength and the acting time width, while the walking cycle is constant, 0.78 s/step.

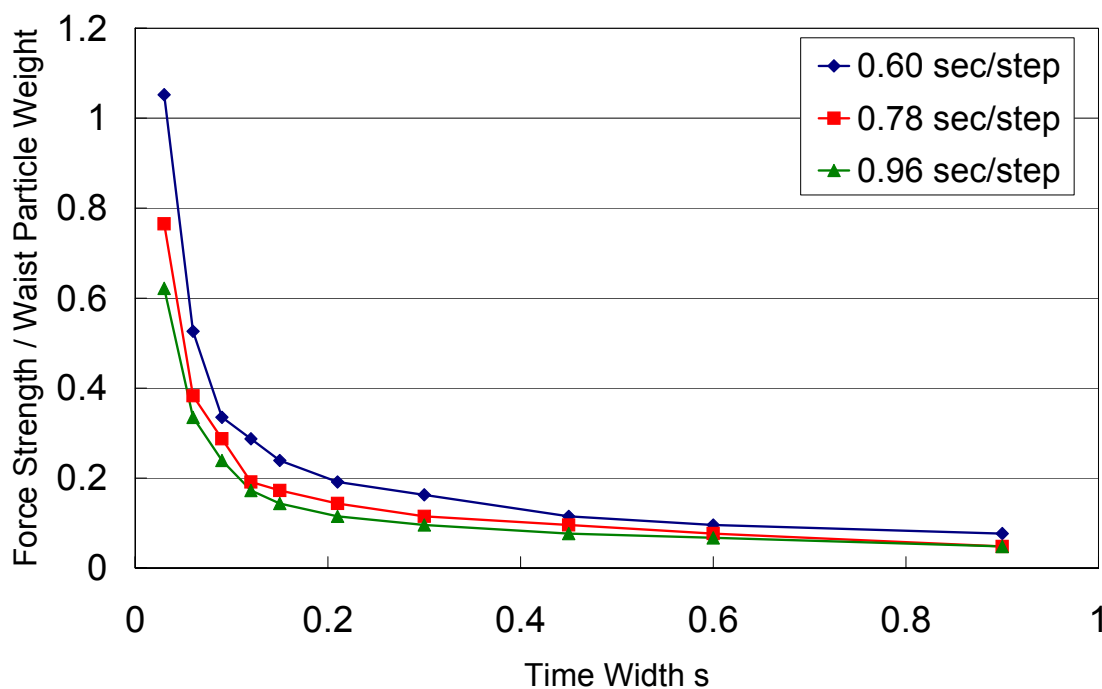


Figure B.8 Recoverable region when changing a walking cycle, while the waist particle weight is constant, 53.3 kgf.

った無次元量であり、横軸は外乱が加わる時間幅を示している。図 B.7 から分かるように、外乱が小さければ小さいほど、より長い時間幅の外乱に耐えることができ、ロボット腰部重量が重ければ重いほど、より大きな外乱に耐えられることが分かる。さらに、補償可能な外乱の大きさと時間幅の間には、反比例の関係があることが分かる。

図 B.8 はロボット腰部重量を一定とし、歩行周期を変えたときの補償可能範囲を示したものである。これより、歩行周期が短ければ短いほど、より大きな外乱を補償可能ということが分かる。

以上のシミュレーション結果から、動的な外乱補償制御法の特性が確認できた。

(c) 実験方法

開発した動的な外乱補償制御法の評価のために、本制御法を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RIV に実装した。まずは搭乗者が外乱を発生したときを想定し、以下の 3 条件でロボットの腰部上部をワイヤで引っ張り、評価実験を行う。

- (i) 積載物なし
- (ii) ペイロード 50 kg 積載時
- (iii) 人間搭乗時

それぞれの場合において、ロボットがその場足踏みや前進歩行をしている途中で、3 歩目に前方向や横方向にワイヤを引っ張り、外力を加える。シミュレーション結果から、歩行周期が短いほうが対応範囲が広いため、できる限り短い歩行周期で実験を行う。歩行周期の上限は、WL-16RIV のシリンダに使用しているボールねじの危険速度で決まっており、その場足踏み歩行の際は 0.8 s/step とする。また、前進歩行中は脚を前後に伸縮させなければならぬため 1.0 s/step とする。また、構造部材のたわみやモデル誤差などにより着地衝撃が発生する可能性があるため、それを抑えるために仮想コンプライアンス制御[93]を併用することとする。

また、本研究で開発した不整路面適応制御と動的な外乱補償制御を統合し、不整地を歩行中に外乱が加わった際にも安定歩行が実現されるかの確認も行う。

- (iv) 不整路面適応制御と動的な外乱補償制御の統合評価実験

それぞれの実験において、外力の入力タイミングや大きさを目視できるように、LED で構成された外力レベルメータをロボット腰部に取り付けており、一列当たり 10 N の大きさを示す。

(d) 評価実験

- (i) 積載物なし

歩行周期 0.8 s/step でその場足踏みをさせた際に、前方向に外力を付加した際の歩

行実験の様子を図 B.9 に示す。連続写真白枠内は、足元の拡大映像である。このときの外力の大きさを図 B.10，腰部軌道の変更量を図 B.11 に，着地位置変更量を図 B.12 に，X 軸方向の ZMP 軌道を図 B.13 にそれぞれ示す。同様に，その場足踏み歩行時に横方向に外力を付加した実験結果を図 B.14～図 B.18 に，歩幅 100 mm/step，歩行周期 1.0 s/step での前進歩行中に横方向に外力を付加した実験結果を図 B.19～図 B.23 に示す。

(ii) ペイロード 50 kg 積載時

次にペイロード 50 kg を積載して評価実験を行った。まずは，歩行周期 0.8 s/step でその場足踏みをさせた際に，前方向と横方向に外力を付加した際の実験結果を図 B.24～図 B.28 と図 B.29～図 B.33 に示す。また，歩幅 100 mm/step，歩行周期 1.0 s/step での前進歩行中に前方向に外力を付加した実験結果を図 B.34～図 B.38 に示す。

(iii) 人間搭乗時

体重 50 kg 程の成人男性を乗せての評価実験を行った。歩行周期 0.8 s/step でその場足踏みをさせた際に，前方向と横方向に外力を付加した際の実験結果を図 B.39～図 B.43 と図 B.44～図 B.48 に示す。また，歩幅 100 mm/step，歩行周期 1.0 s/step での前進歩行中に前方向と横方向に外力を付加した実験結果を図 B.49～図 B.53 と図 B.54～図 B.58 に示す。

(iv) 不整路面適応制御と動的な外乱補償制御の統合評価実験

最後に，本研究で開発した不整路面適応制御と動的な外乱補償制御を統合し，評価実験を行った。この際，ロボットの左足を厚さ 5mm のアクリル板に乗せた状態で歩行を開始し，段差を下りるように実験を行った。歩幅 100 mm/step，歩行周期 1.0 s/step である。その間，3 歩目に前方向にワイヤを引っ張り，外力を加えた。積載物なしの場合の実験結果を図 B.59～図 B.63 に示す。実際に人間が搭乗したときの実験結果を図 B.64～図 B.68 に示す。

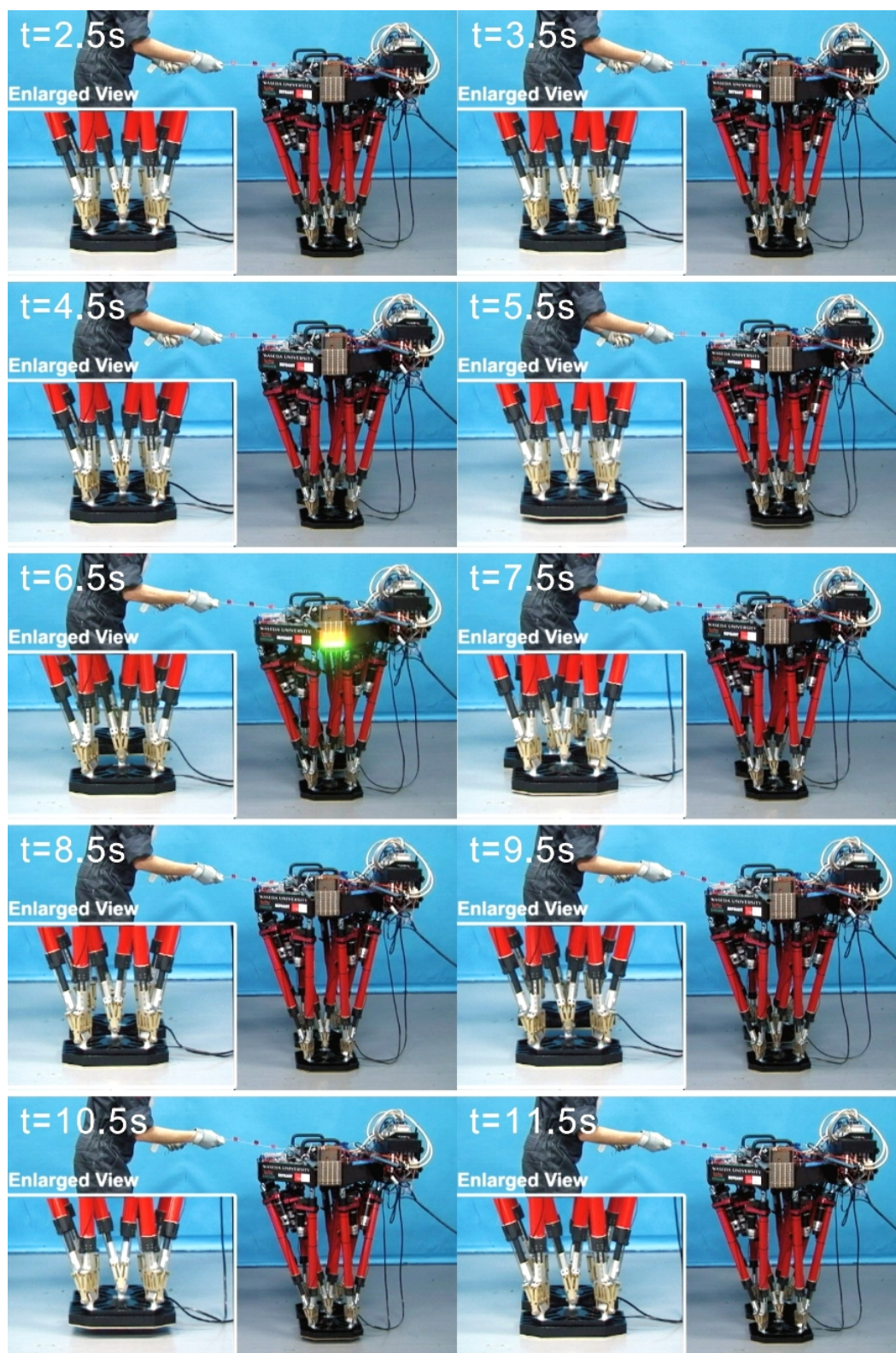


Figure B.9 Walking experiment, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

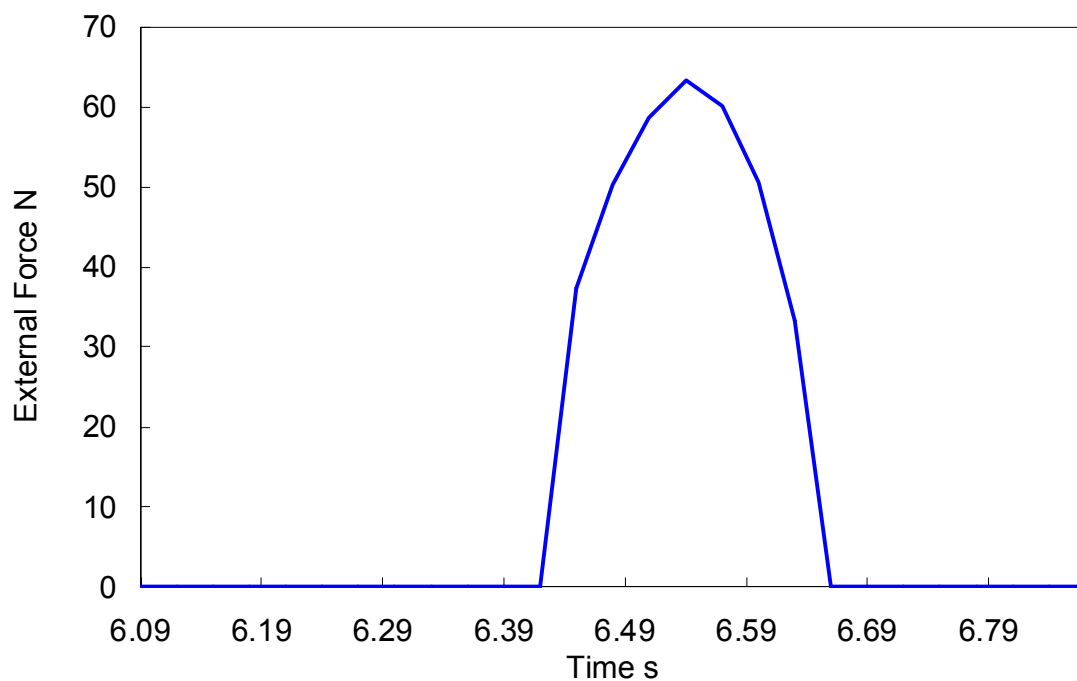


Figure B.10 Force strength of the external force, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

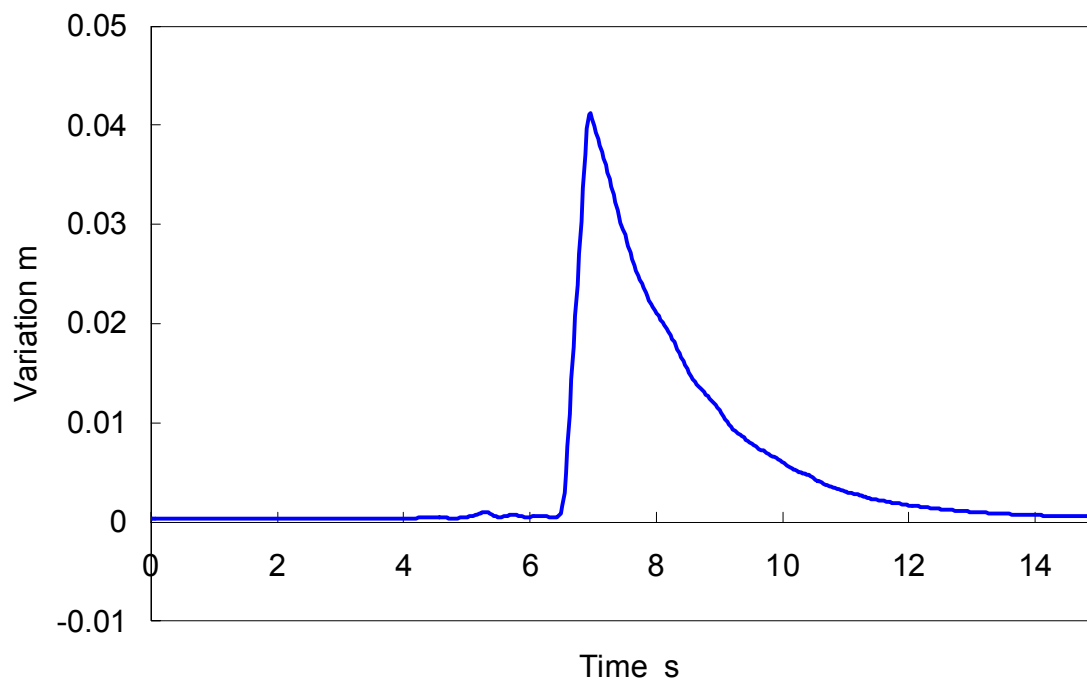


Figure B.11 Waist trajectory variation, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

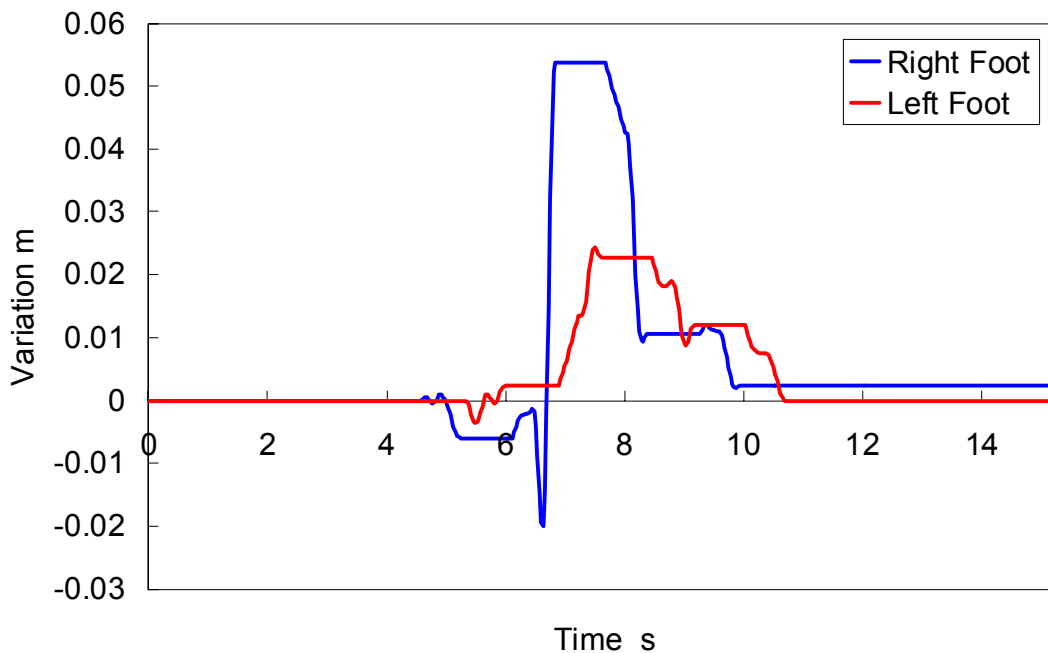


Figure B.12 Foot trajectories variation, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

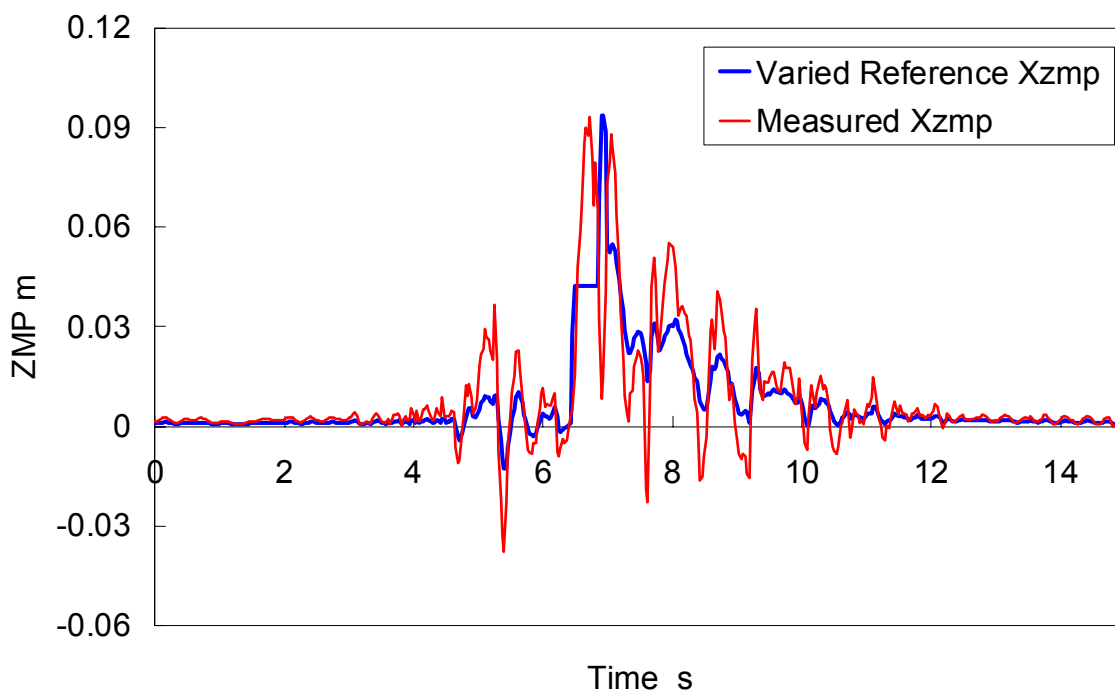


Figure B.13 ZMP trajectories, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)



Figure B.14 Walking experiment, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

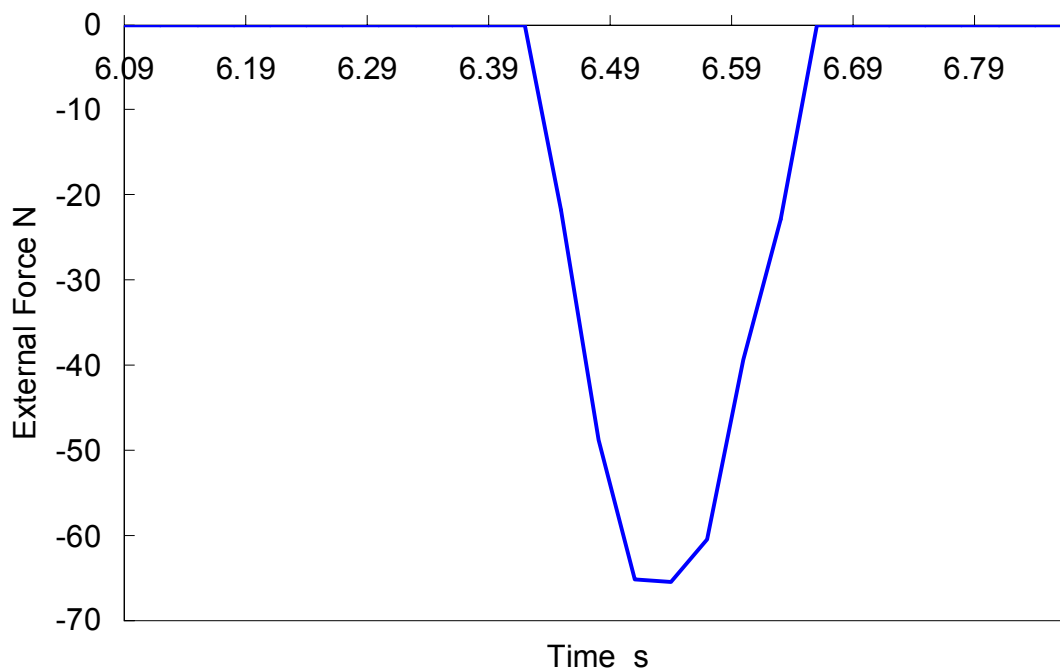


Figure B.15 Force strength of the external force, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

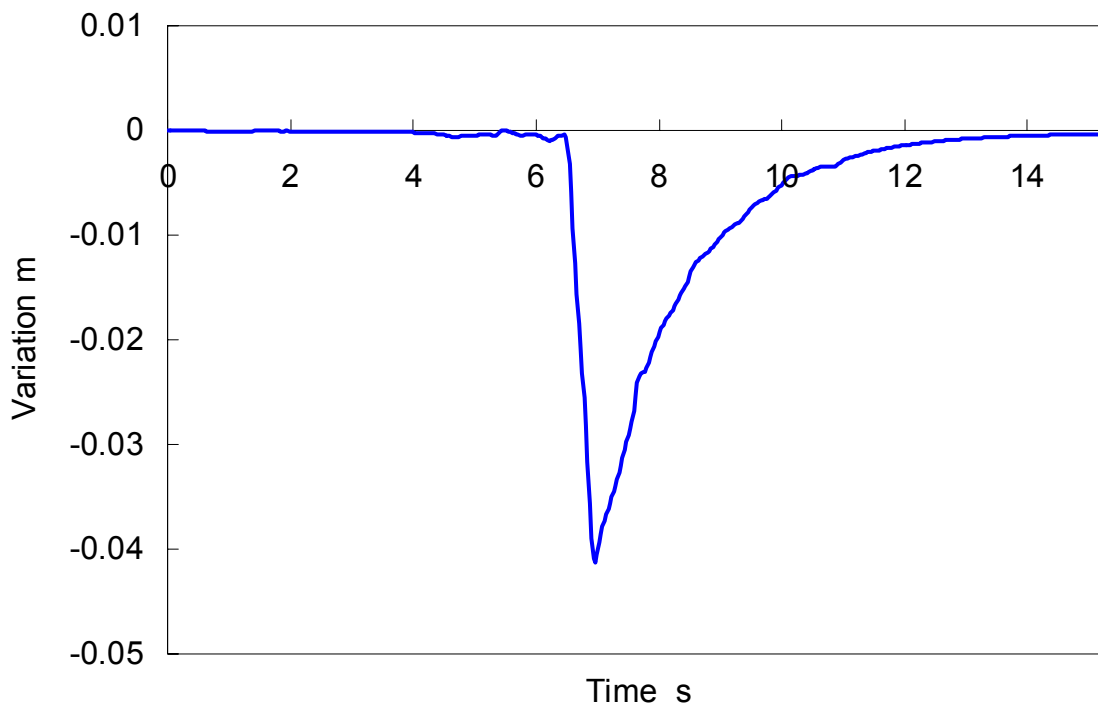


Figure B.16 Waist trajectory variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

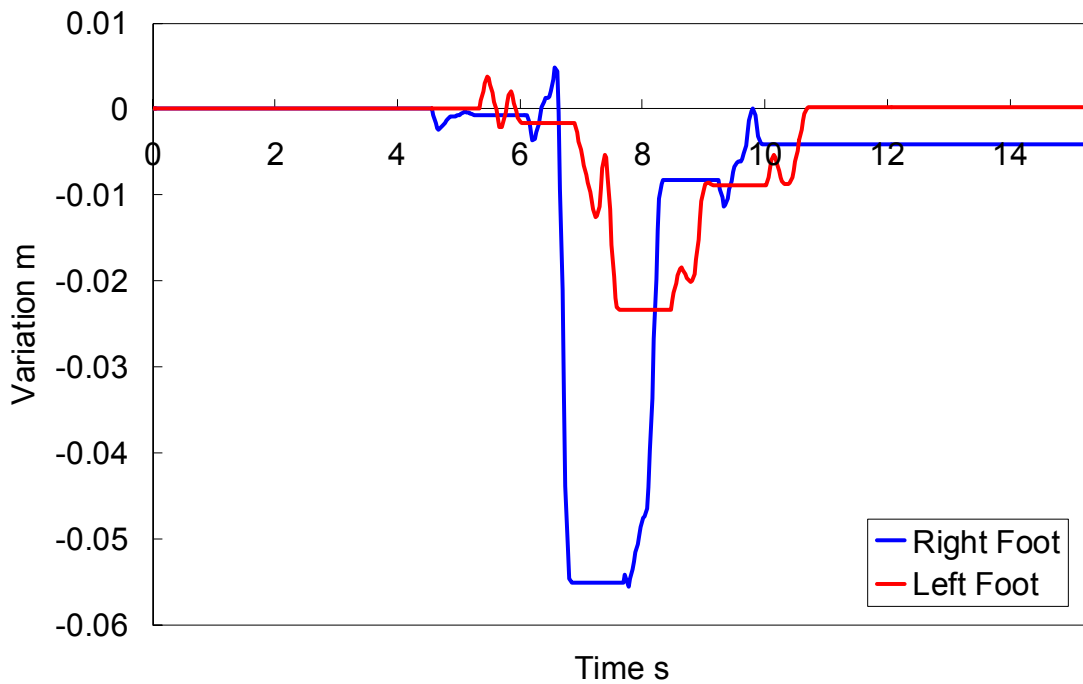


Figure B.17 Foot trajectories variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)

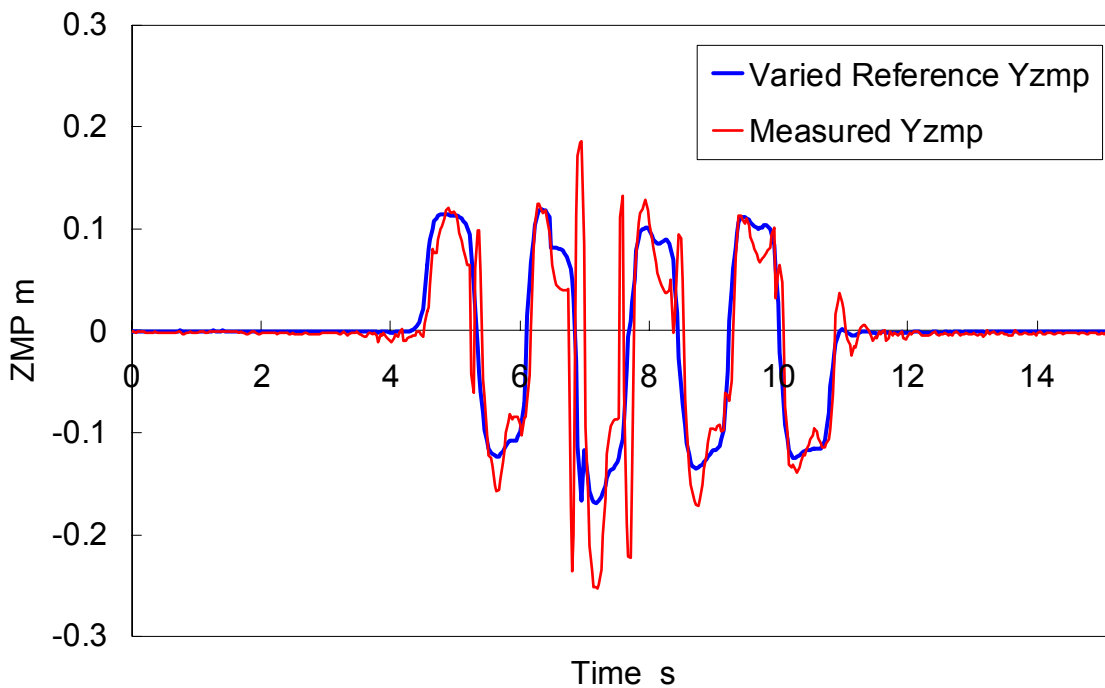


Figure B.18 ZMP trajectories, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step)



Figure B.19 Walking experiment, pulling the robot rightward at the third step.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step)

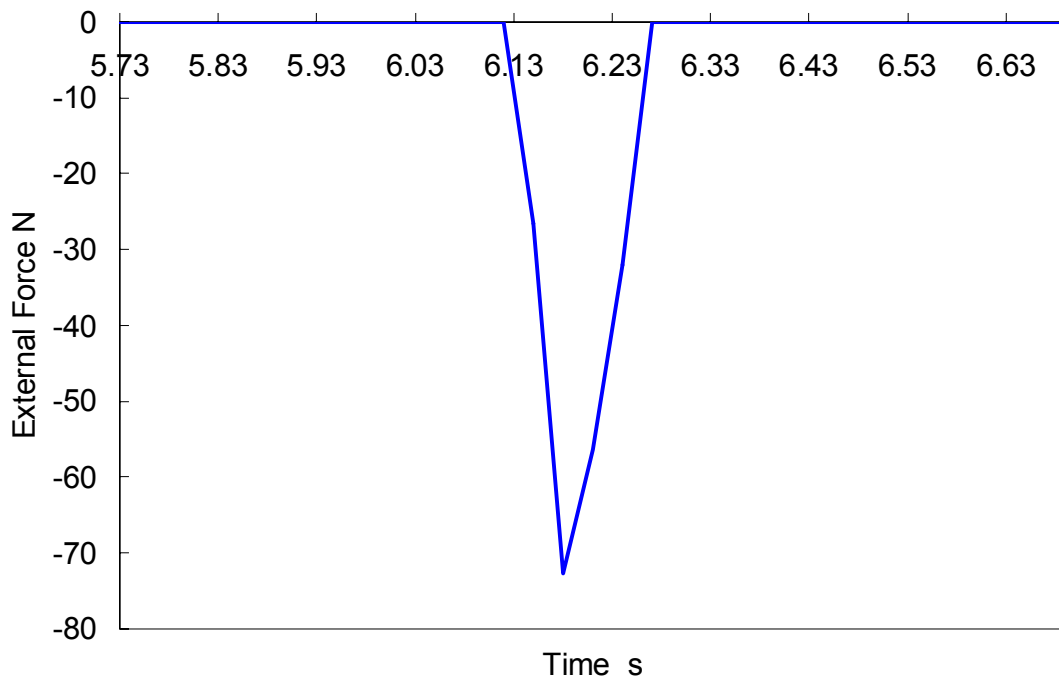


Figure B.20 Force strength of the external force, pulling the robot rightward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step)

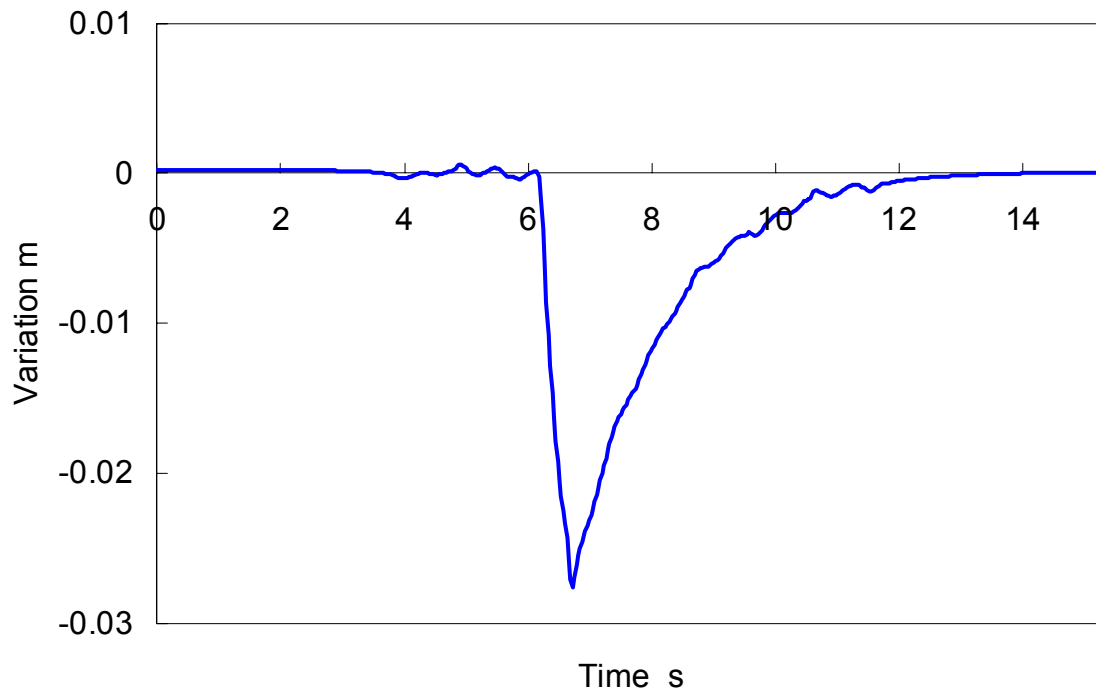


Figure B.21 Waist trajectory variation, pulling the robot rightward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step)

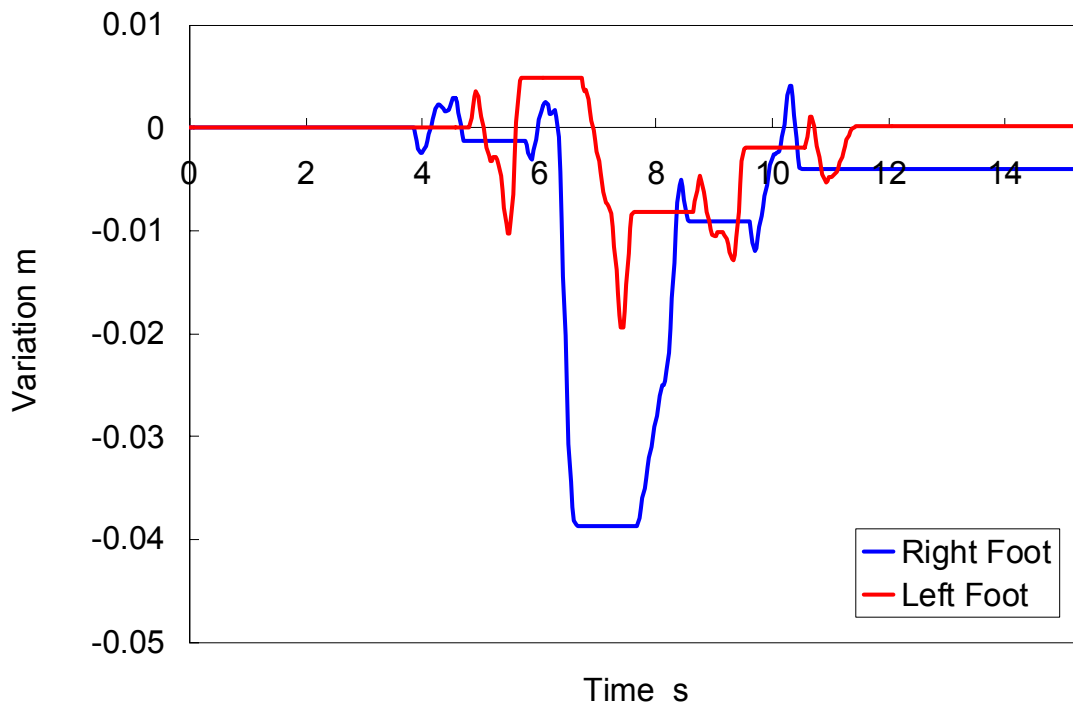


Figure B.22 Foot trajectories variation, pulling the robot rightward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step)

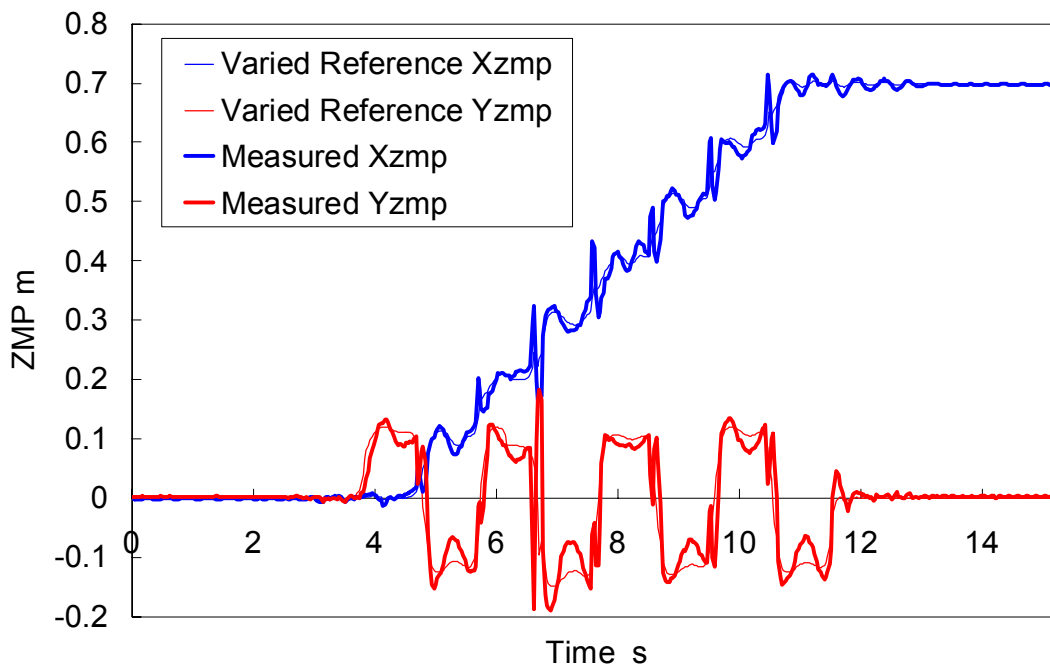


Figure B.23 ZMP trajectories, pulling the robot rightward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step)

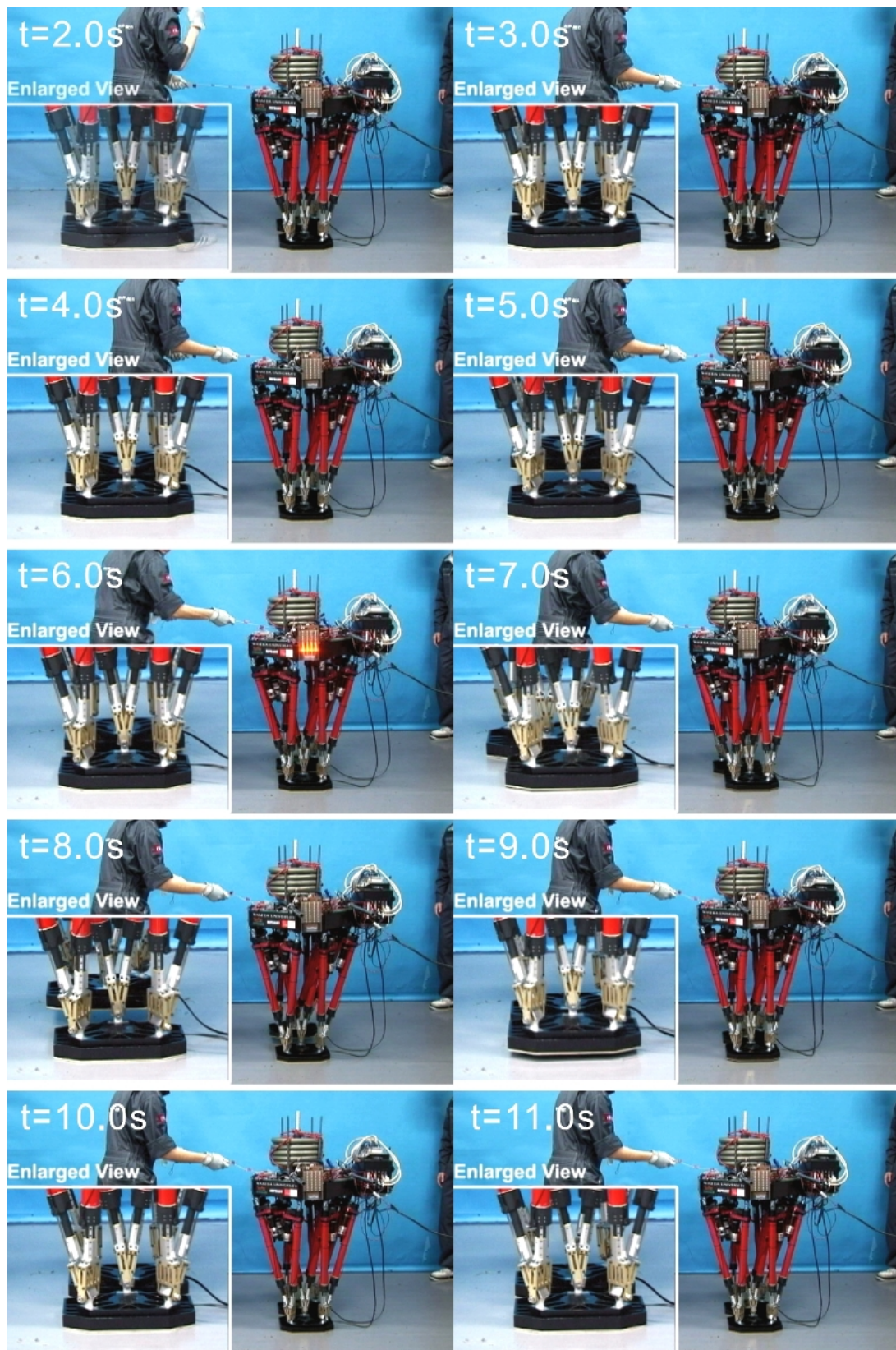


Figure B.24 Walking experiment, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

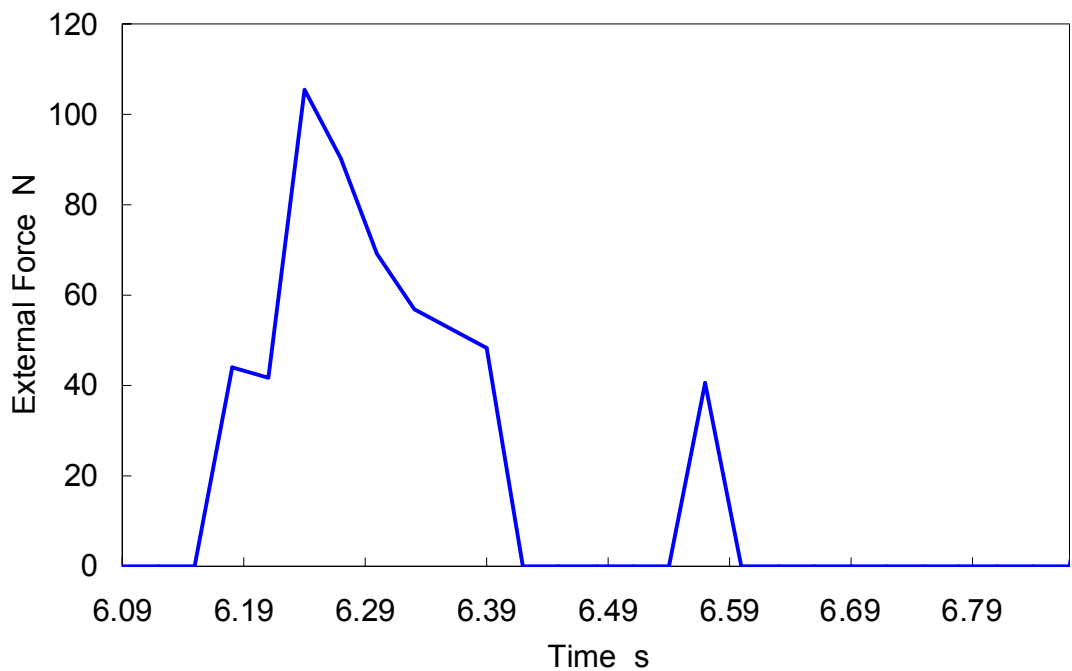


Figure B.25 Force strength of the external force, pulling the robot forward at the third step.

(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

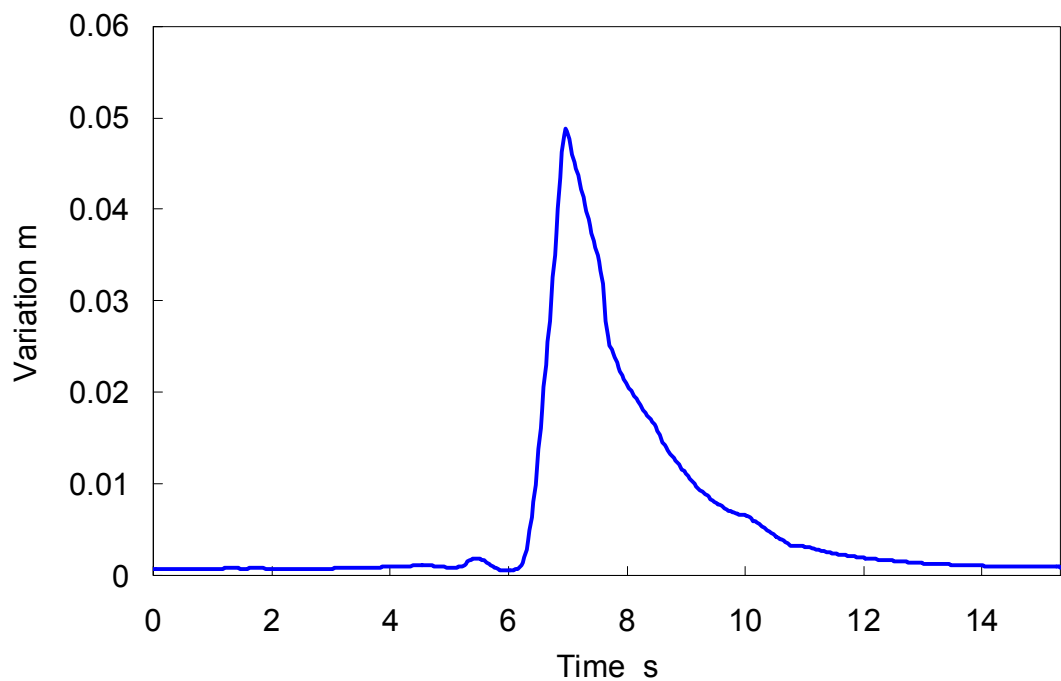


Figure B.26 Waist trajectory variation, pulling the robot forward at the third step.

(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

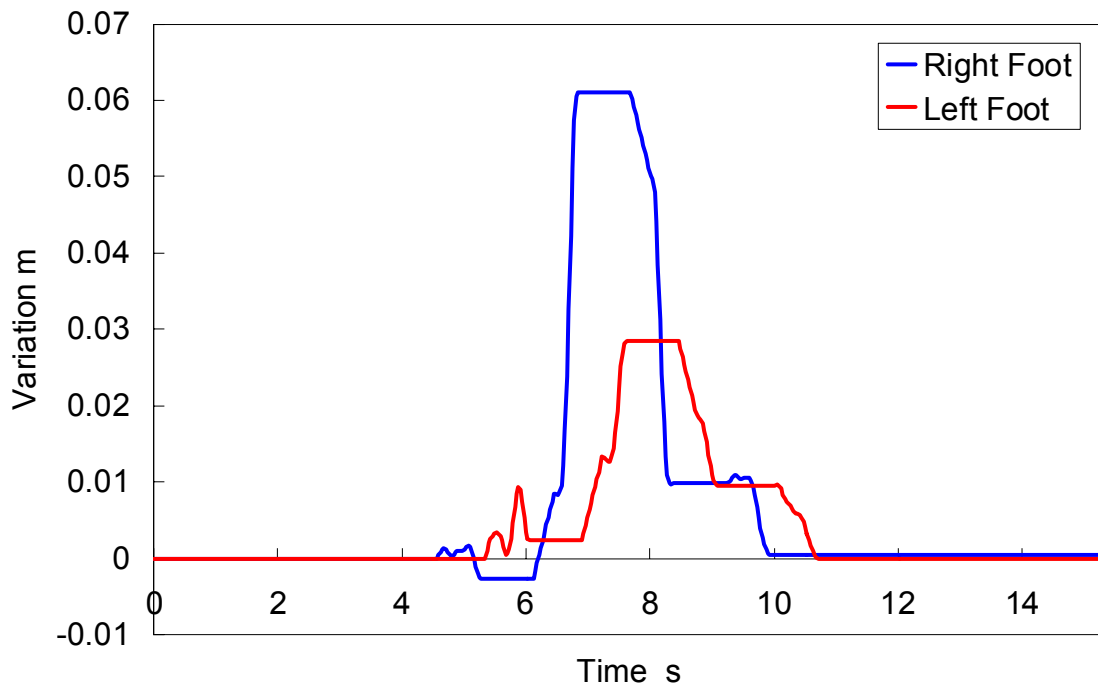


Figure B.27 Foot trajectories variation, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

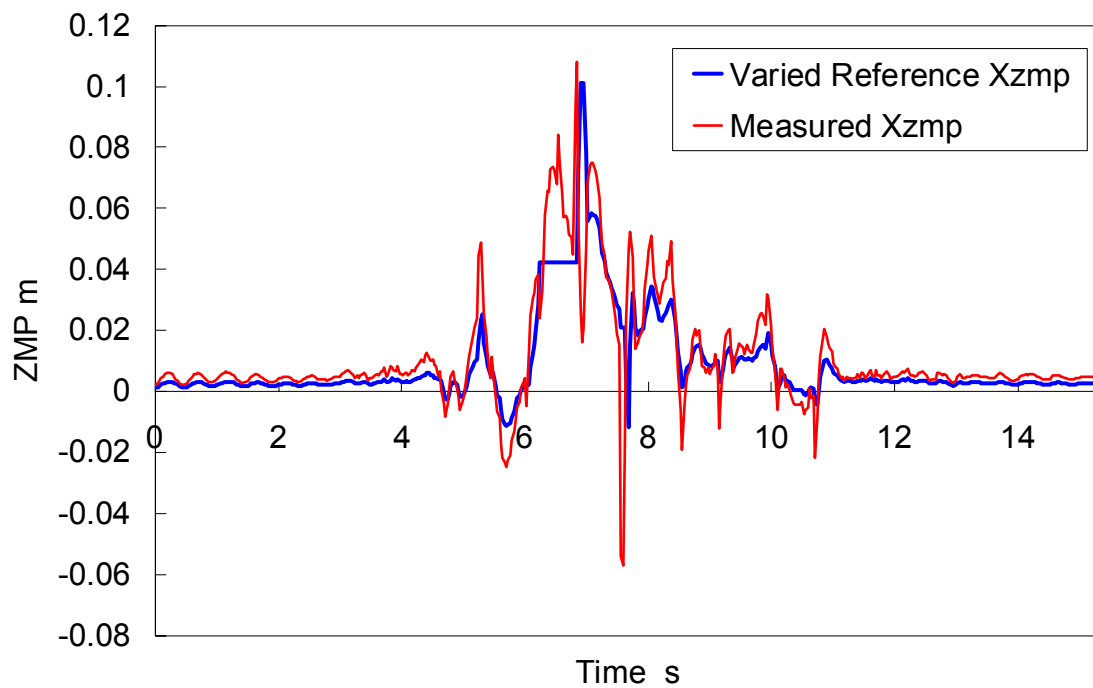


Figure B.28 ZMP trajectories, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

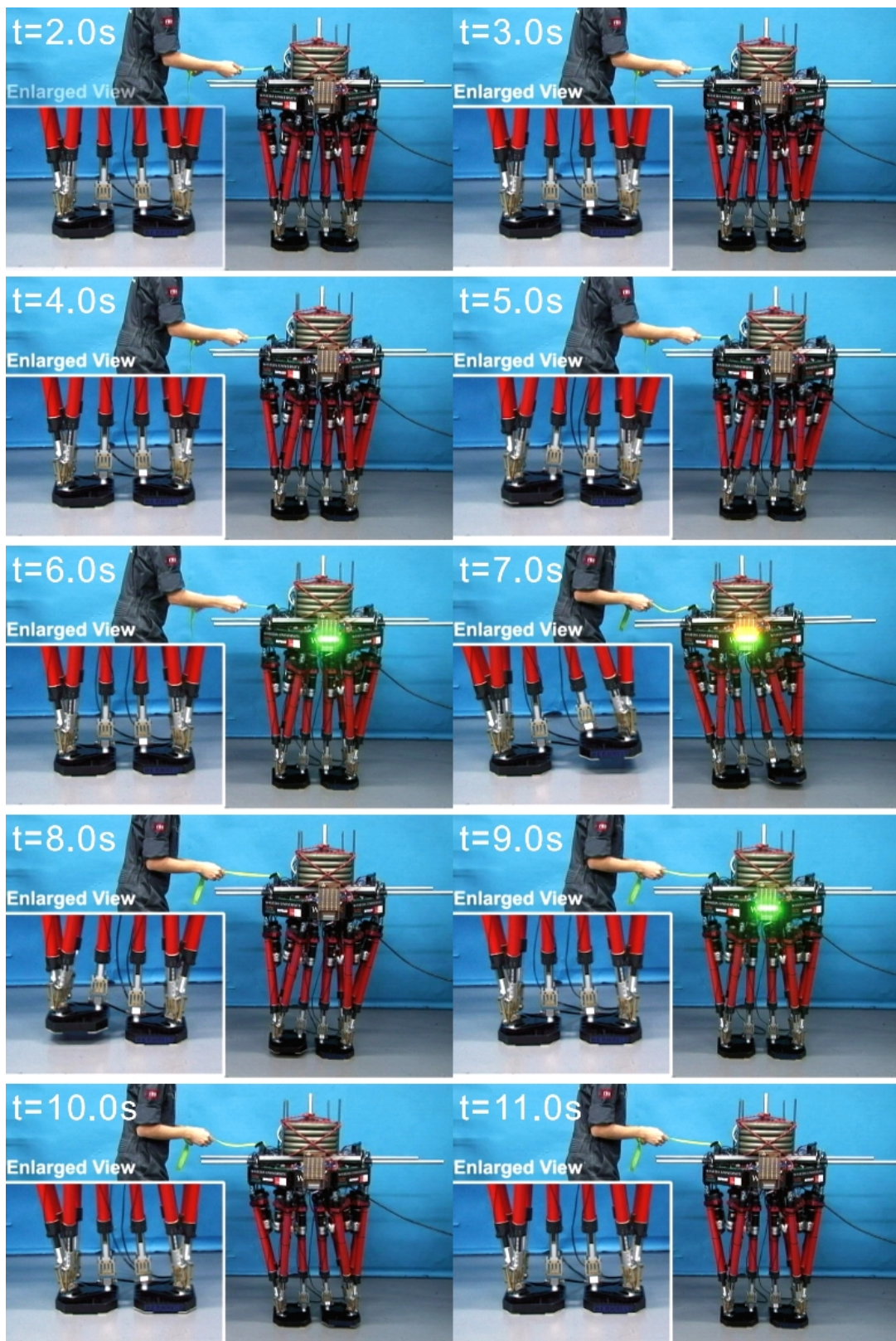


Figure B.29 Walking experiment, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

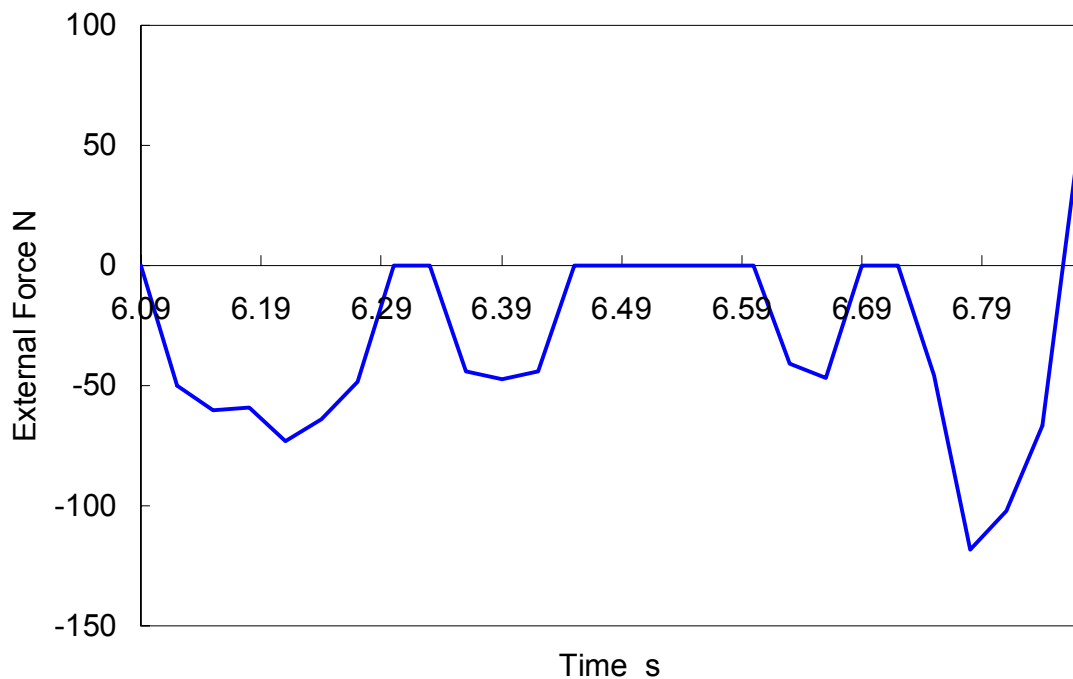


Figure B.30 Force strength of the external force, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

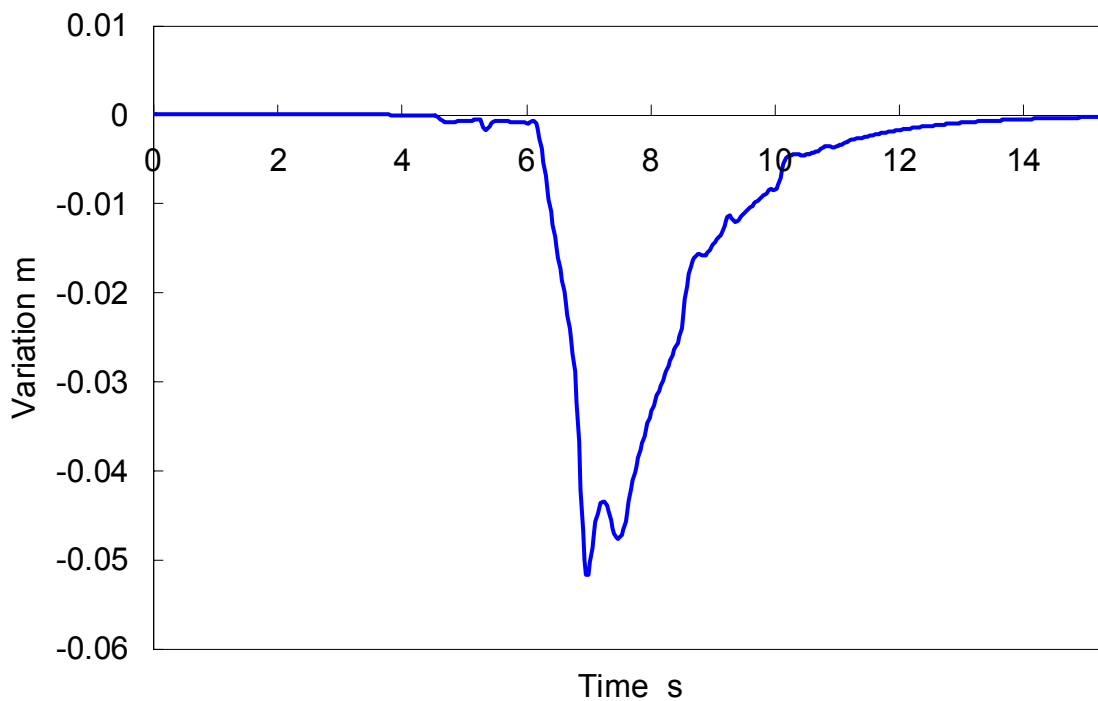


Figure B.31 Waist trajectory variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

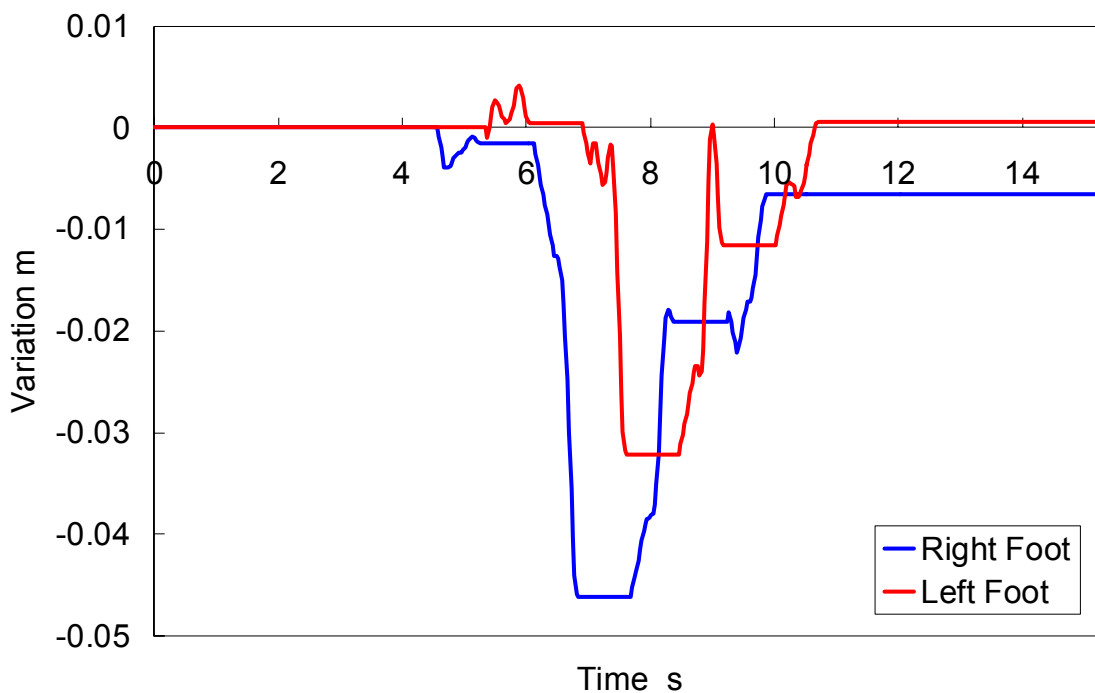


Figure B.32 Foot trajectories variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)

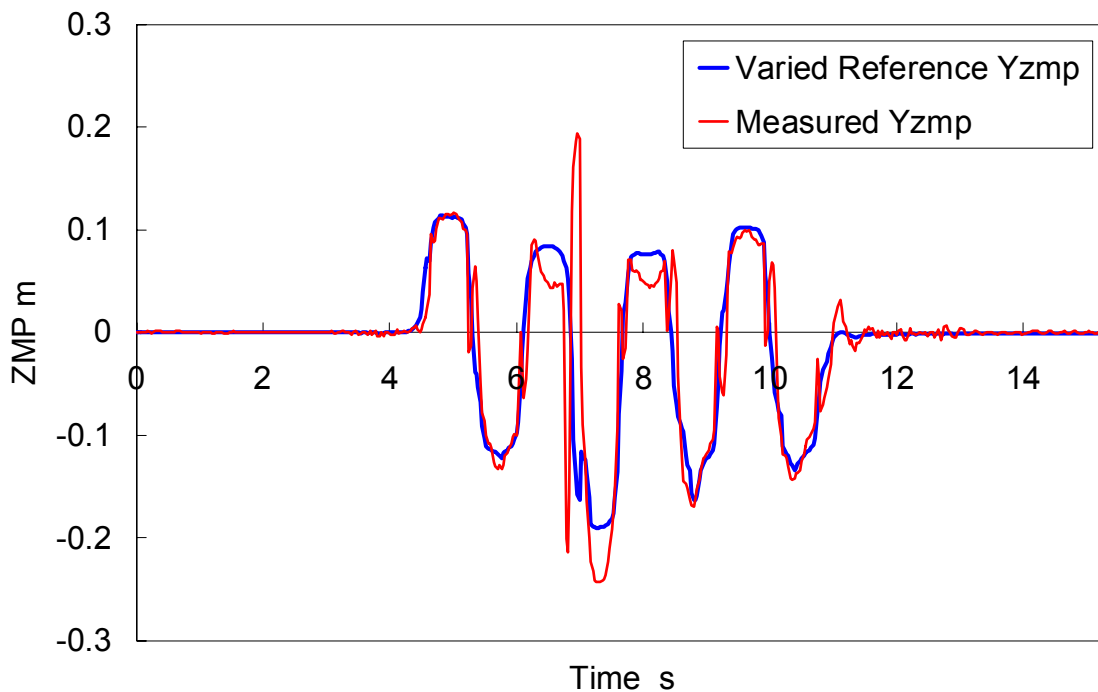


Figure B.33 ZMP trajectories, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: 50 kg)



Figure B.34 Walking experiment, pulling the robot forward at the third step.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

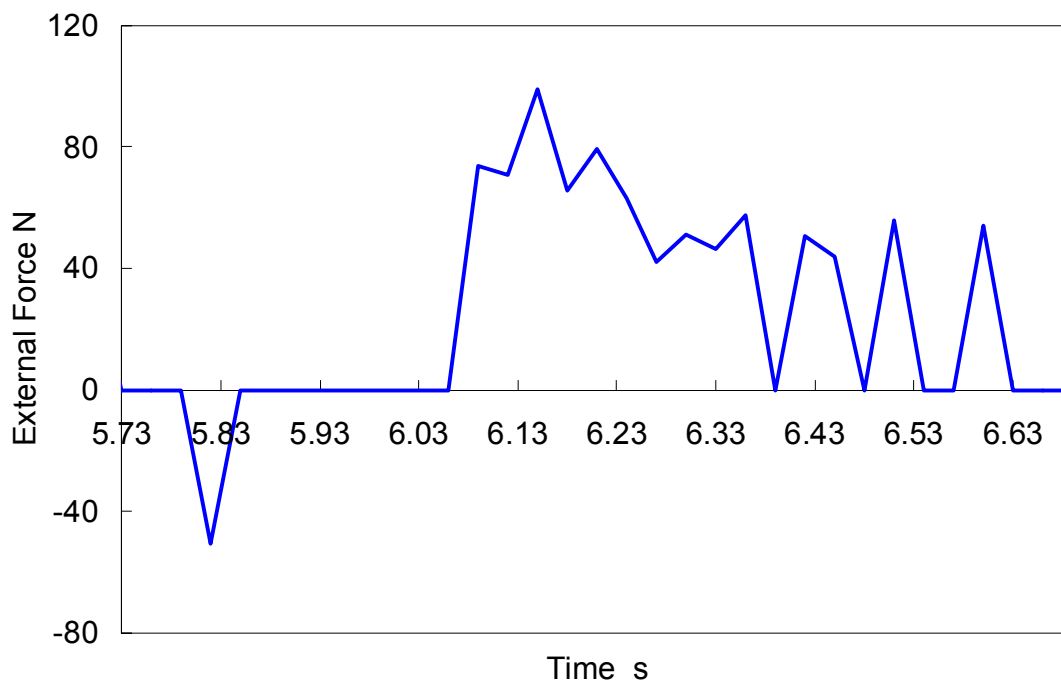


Figure B.35 Force strength of the external force, pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

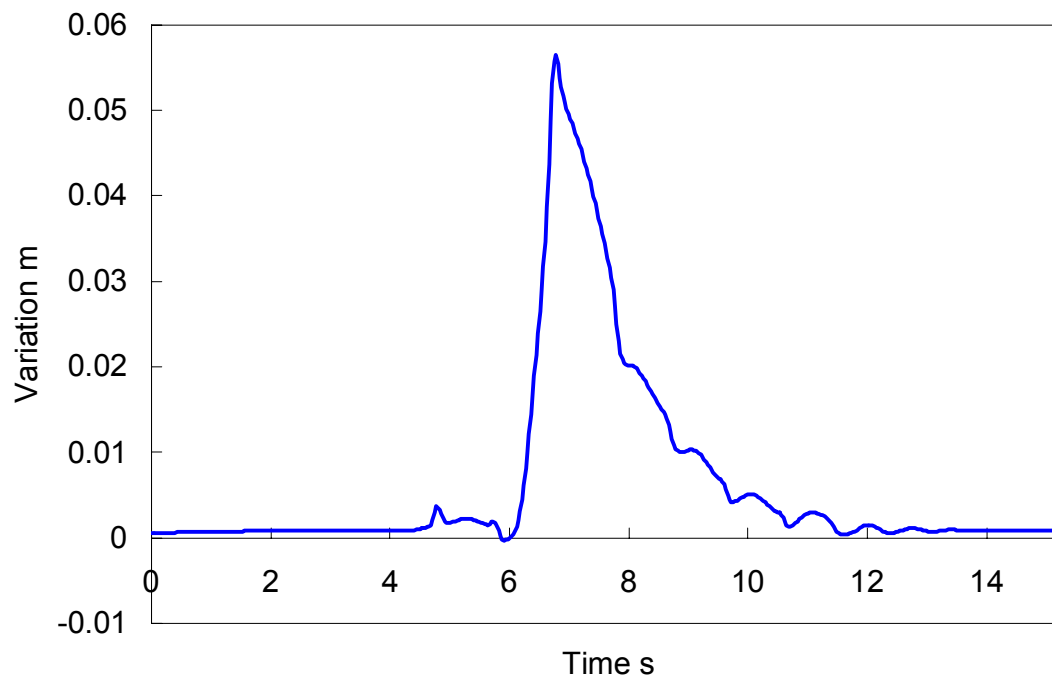


Figure B.36 Waist trajectory variation, pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

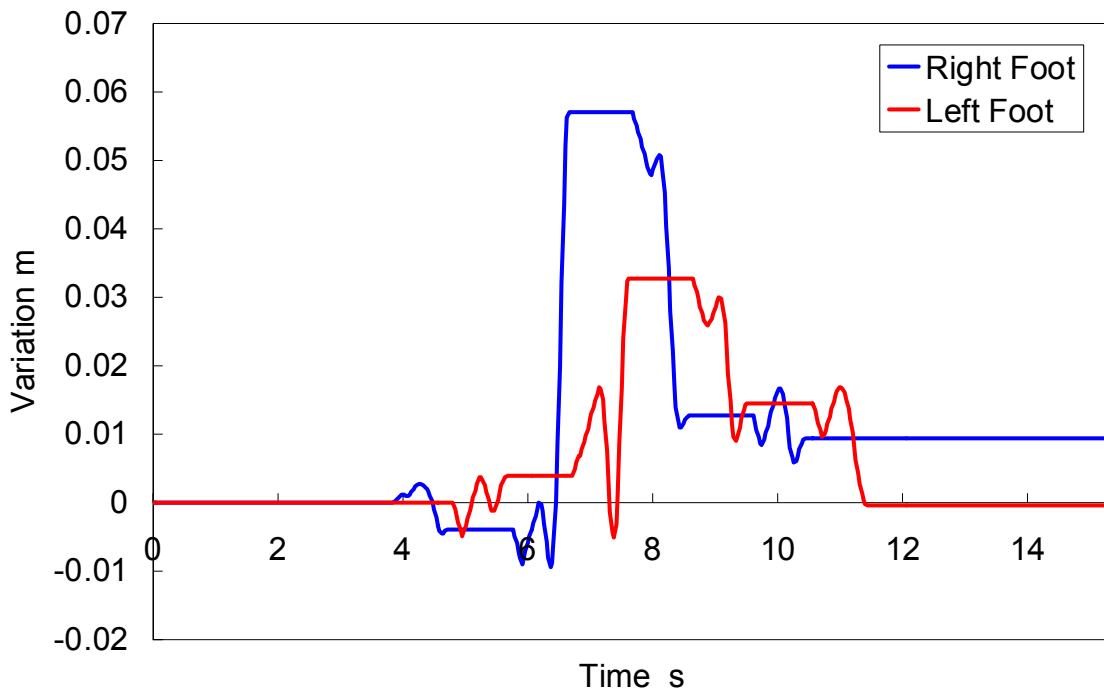


Figure B.37 Foot trajectories variation, pulling the robot forward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)

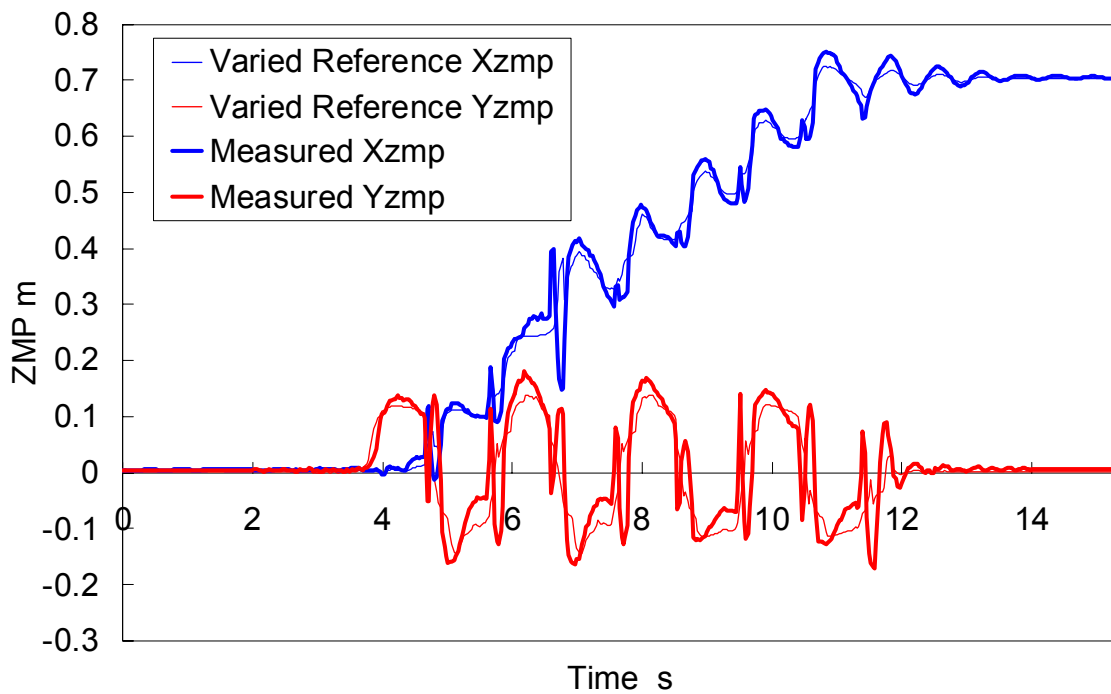


Figure B.38 ZMP trajectories, pulling the robot forward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: 50 kg)



Figure B.39 Walking experiment, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

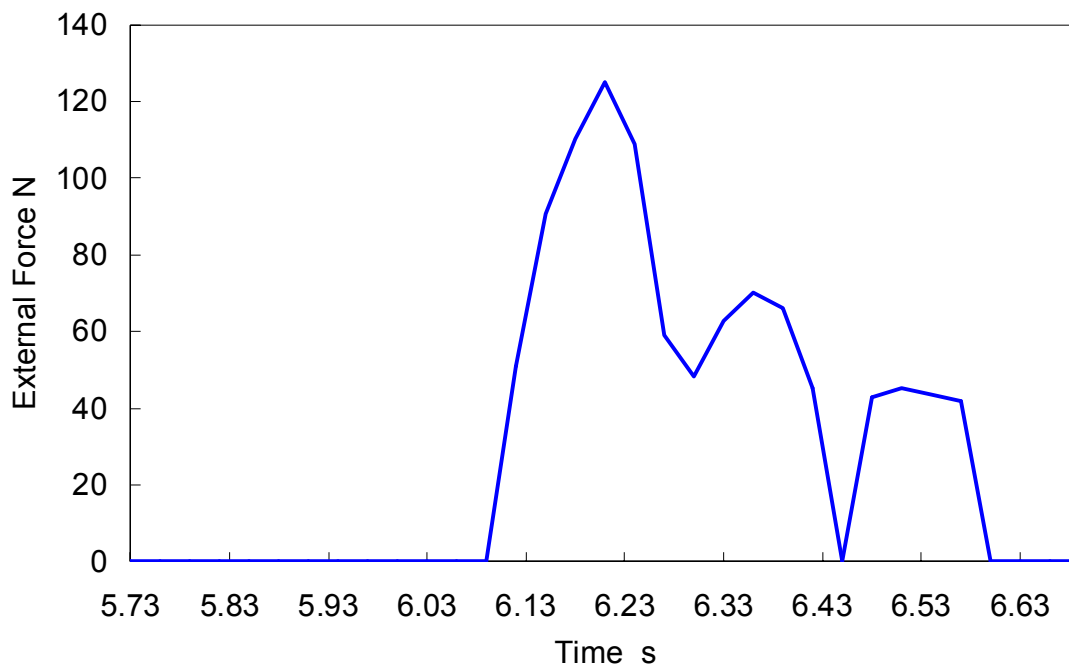


Figure B.40 Force strength of the external force, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

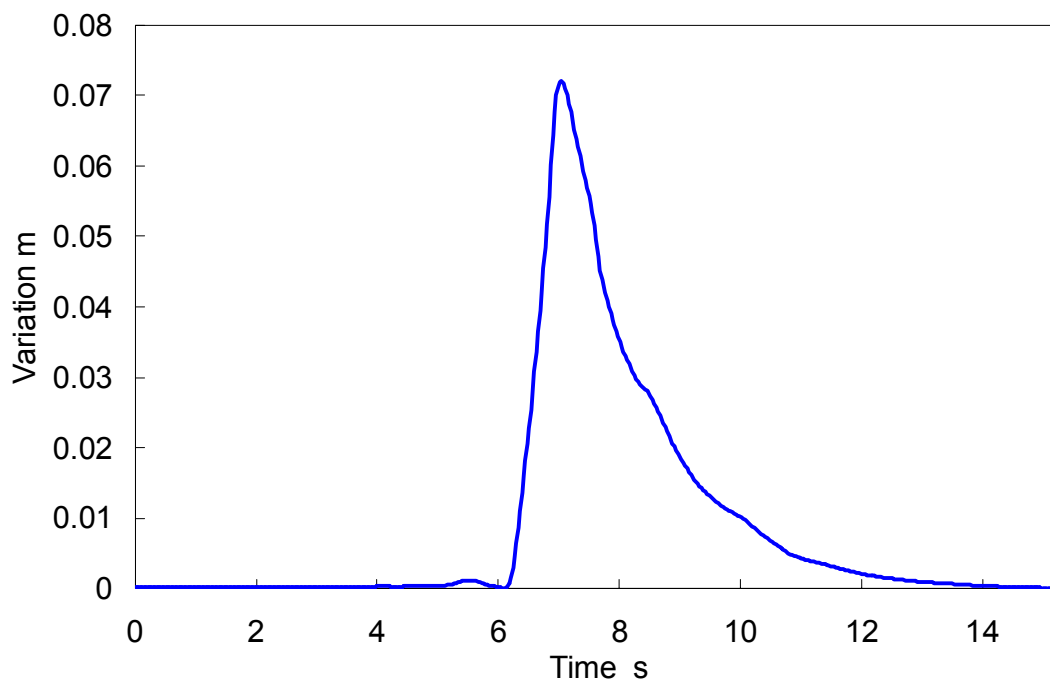


Figure B.41 Waist trajectory variation, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

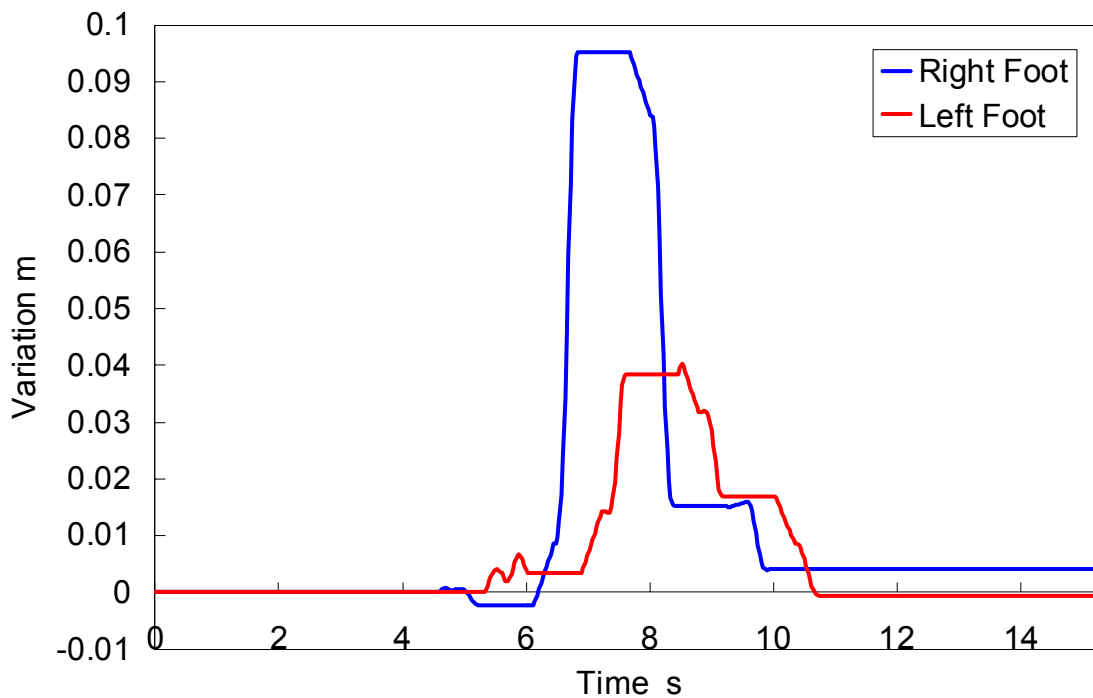


Figure B.42 Foot trajectories variation, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

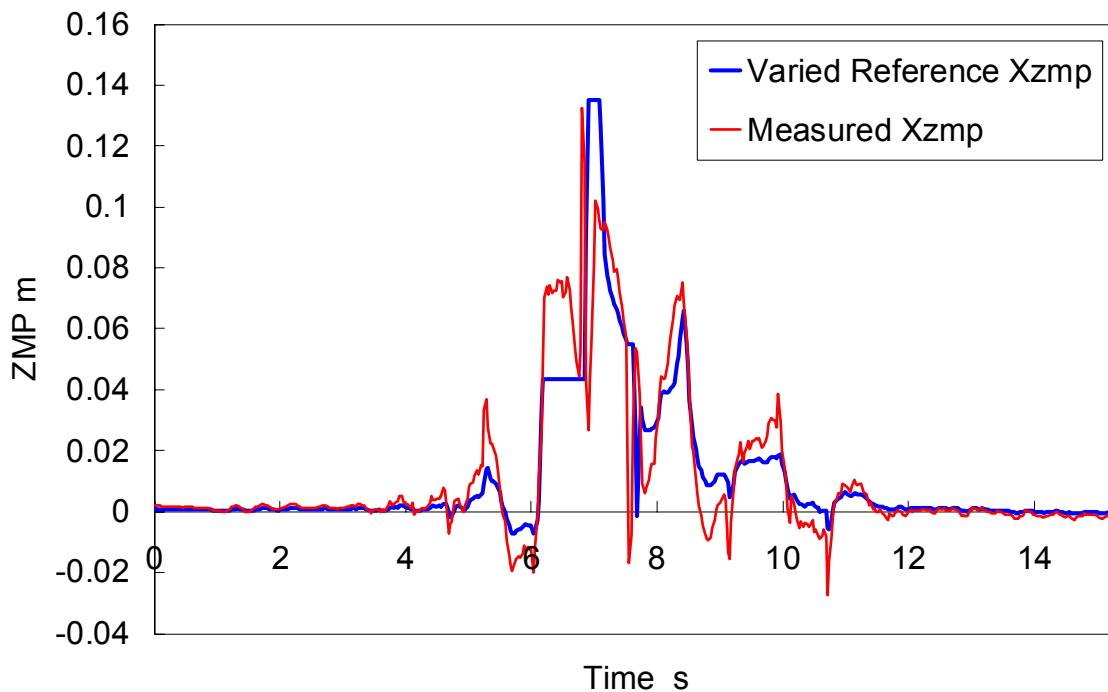


Figure B.43 ZMP trajectories, pulling the robot forward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)



Figure B.44 Walking experiment, pulling the robot rightward at the third step.
 (Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

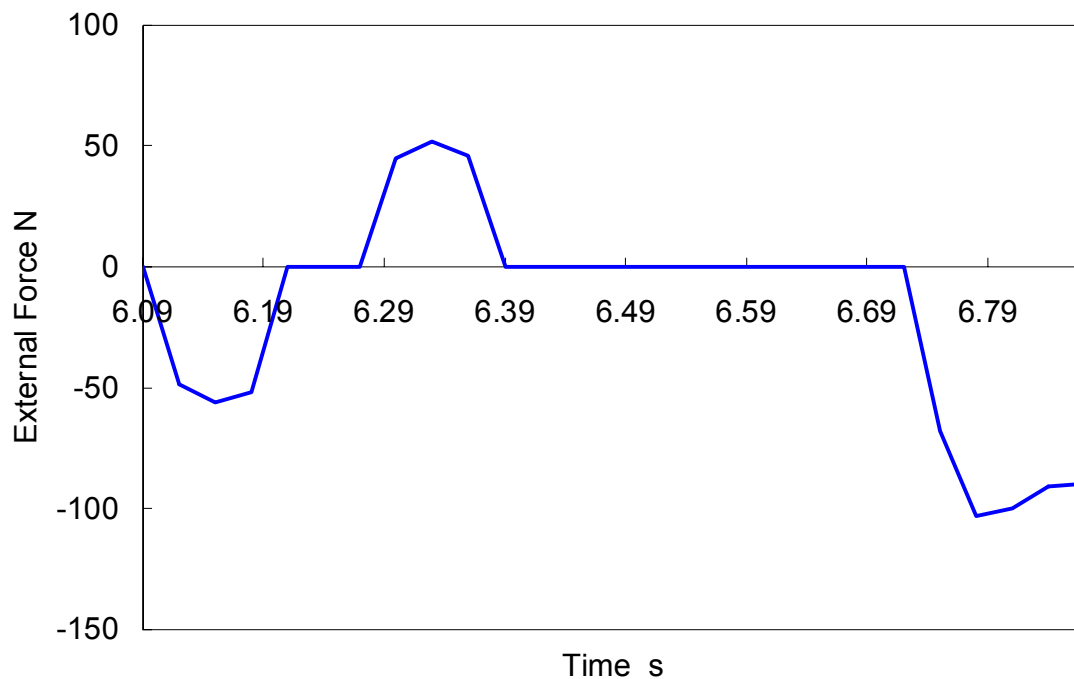


Figure B.45 Force strength of the external force, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

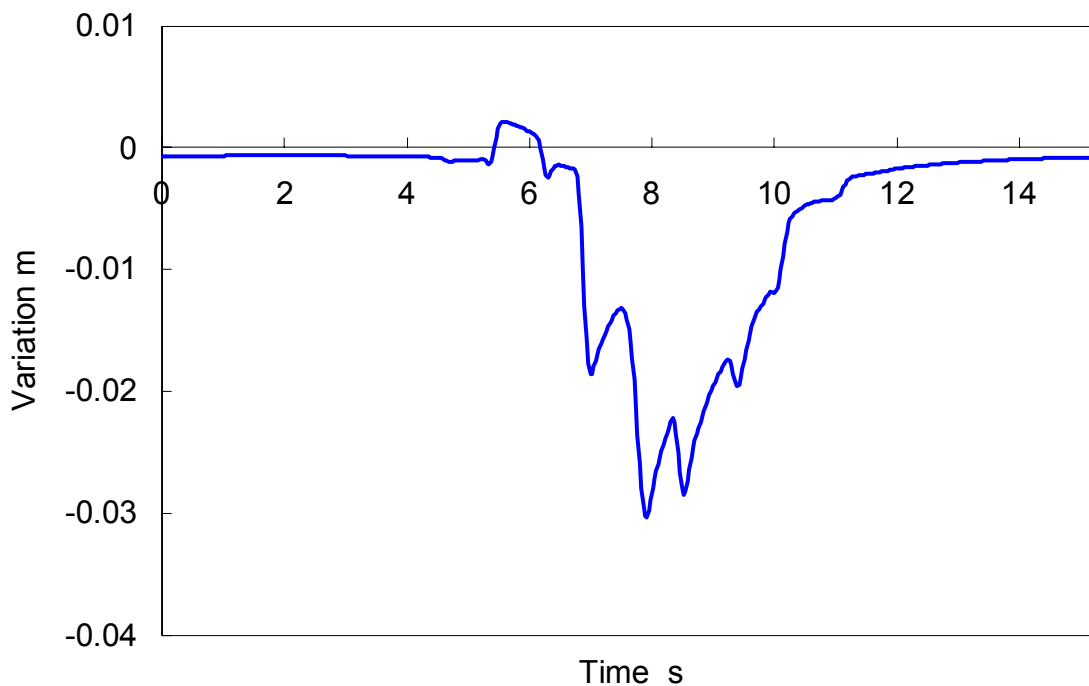


Figure B.46 Waist trajectory variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

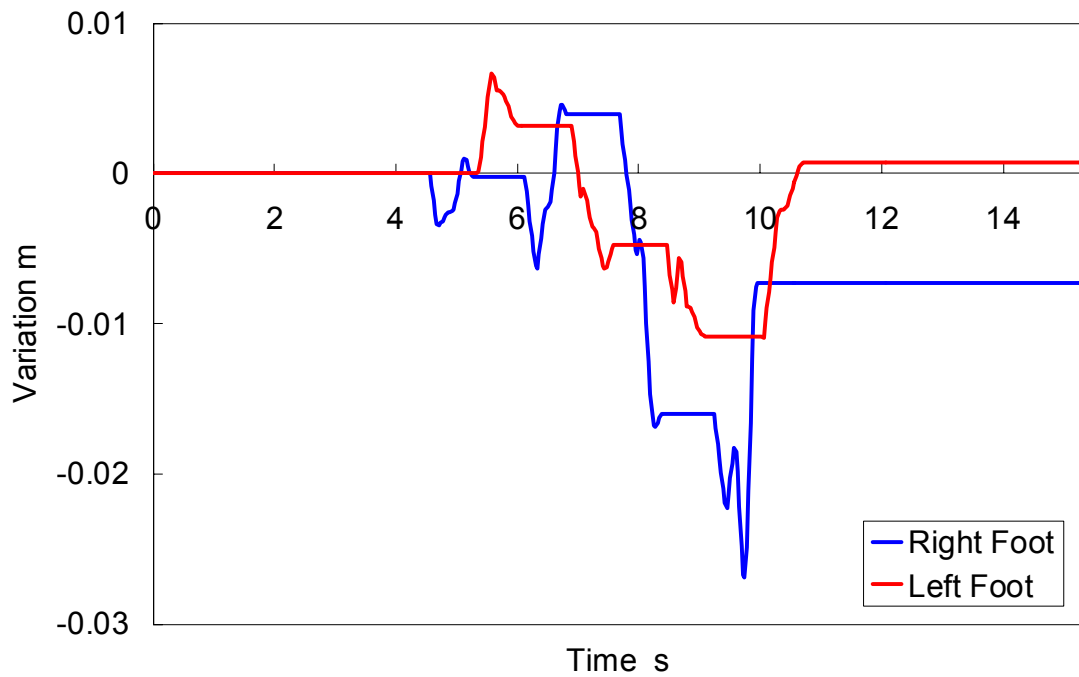


Figure B.47 Foot trajectories variation, pulling the robot rightward at the third step.
 (Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)

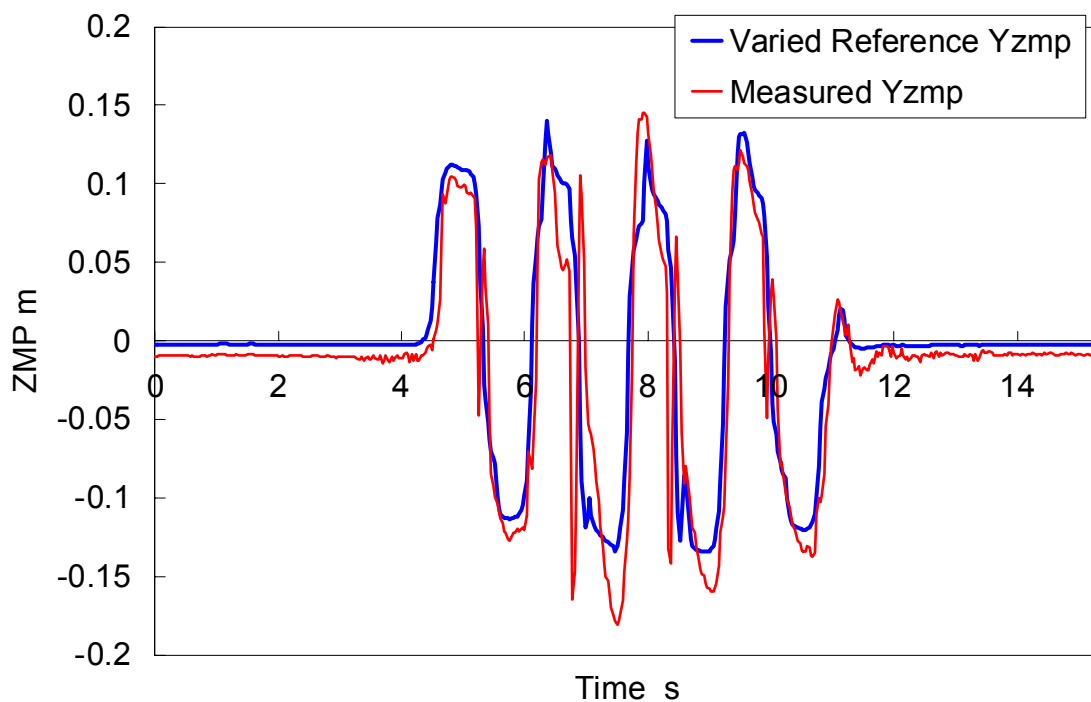


Figure B.48 ZMP trajectories, pulling the robot rightward at the third step.
 (Stamping, walking cycle: 0.8 s/step, load: a 50 kg human)



Figure B.49 Walking experiment, pulling the robot forward at the third step.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

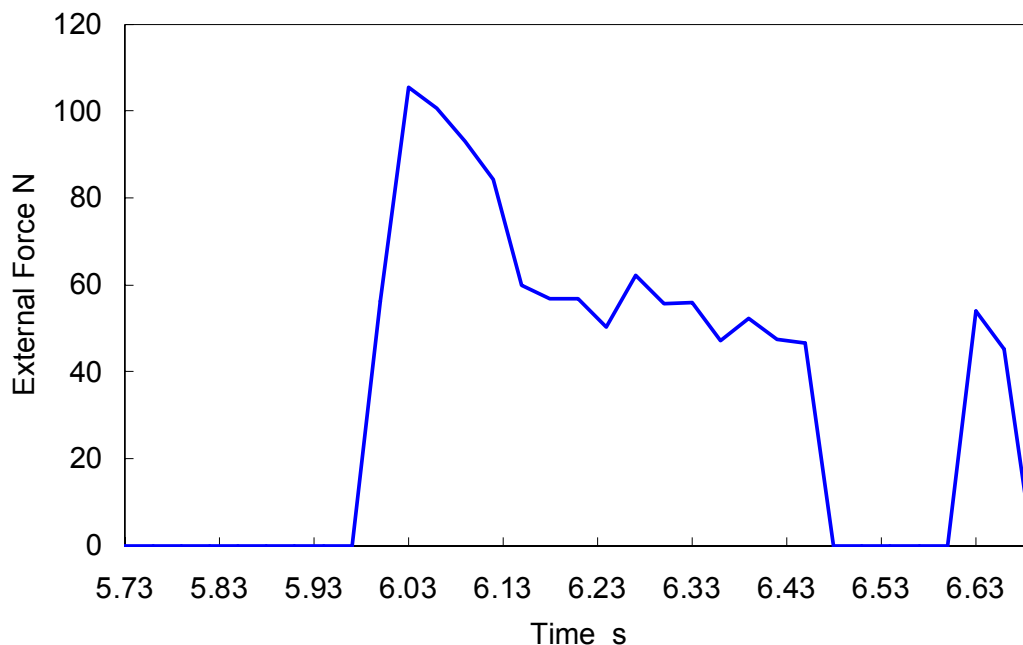


Figure B.50 Force strength of the external force, pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

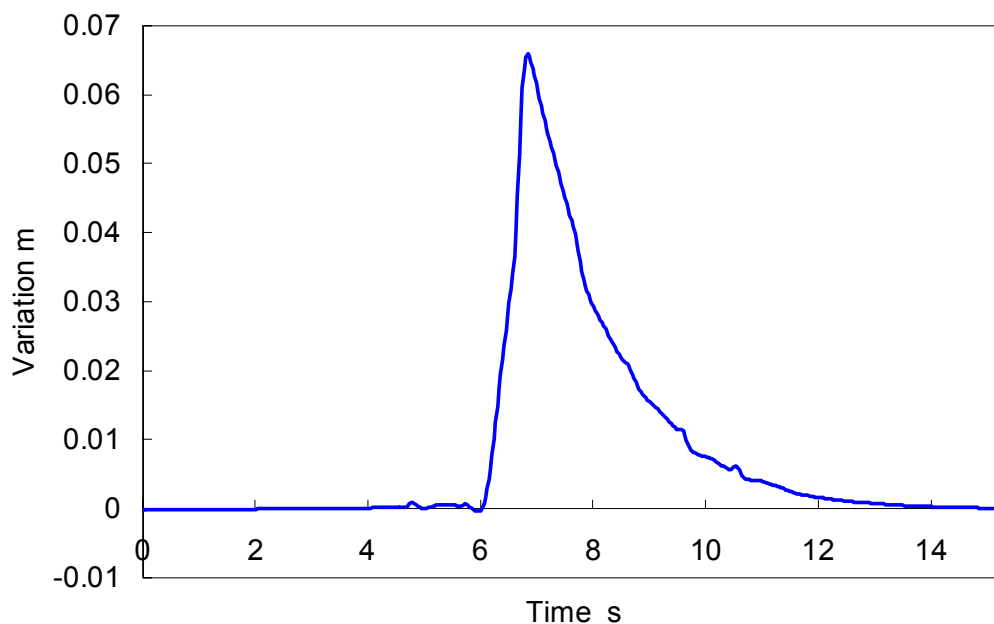


Figure B.51 Waist trajectory variation, pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

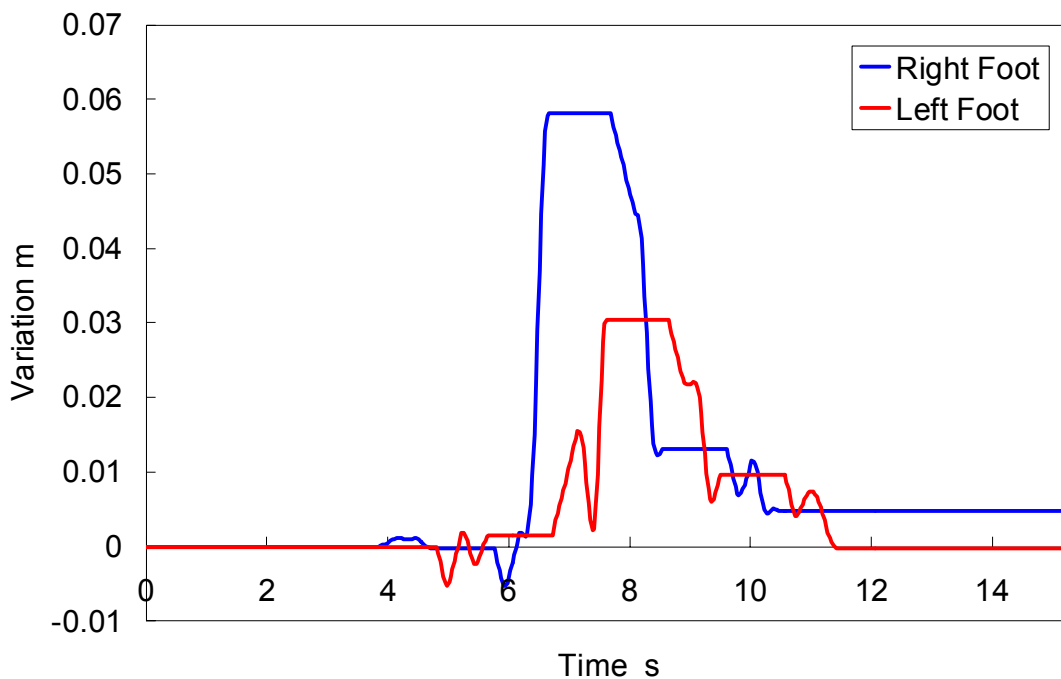


Figure B.52 Foot trajectories variation, pulling the robot forward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

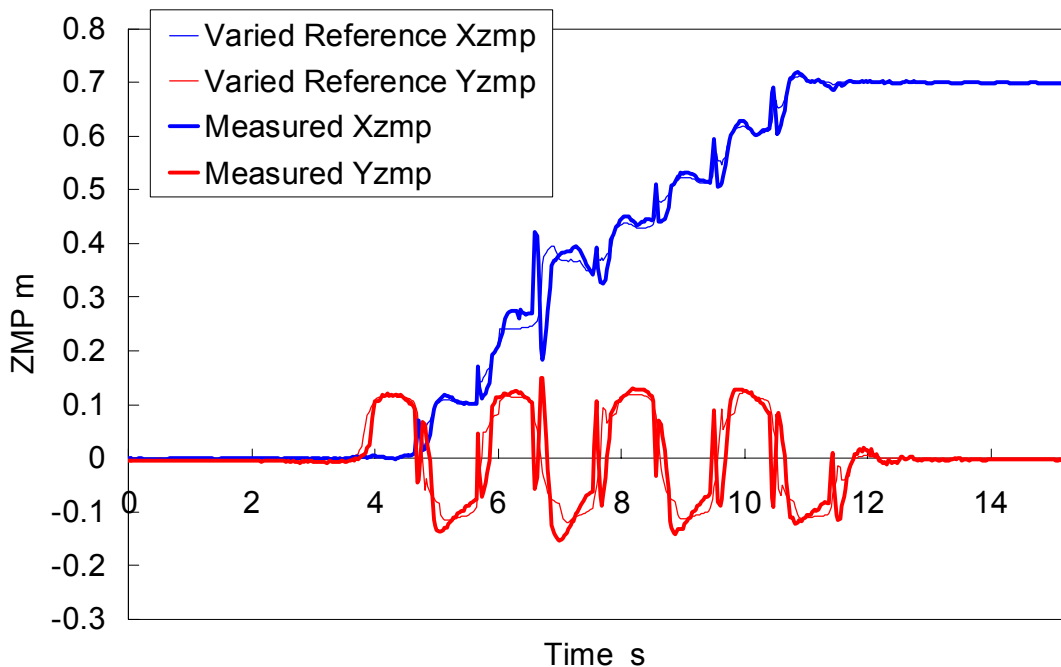


Figure B.53 ZMP trajectories, pulling the robot forward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)



Figure B.54 Walking experiment, pulling the robot rightward at the third step.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

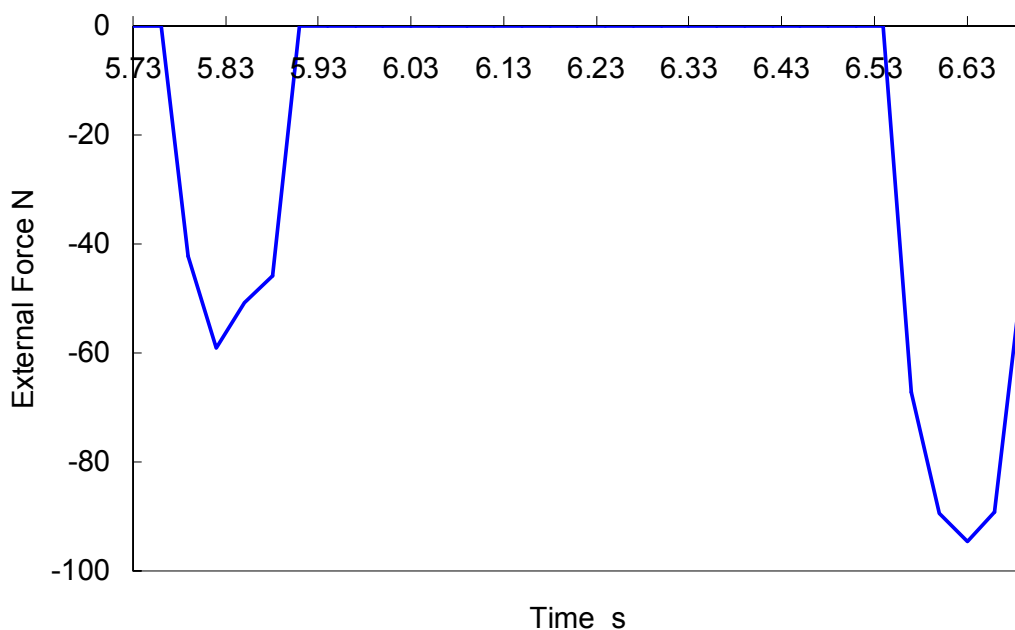


Figure B.55 Force strength of the external force, pulling the robot rightward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

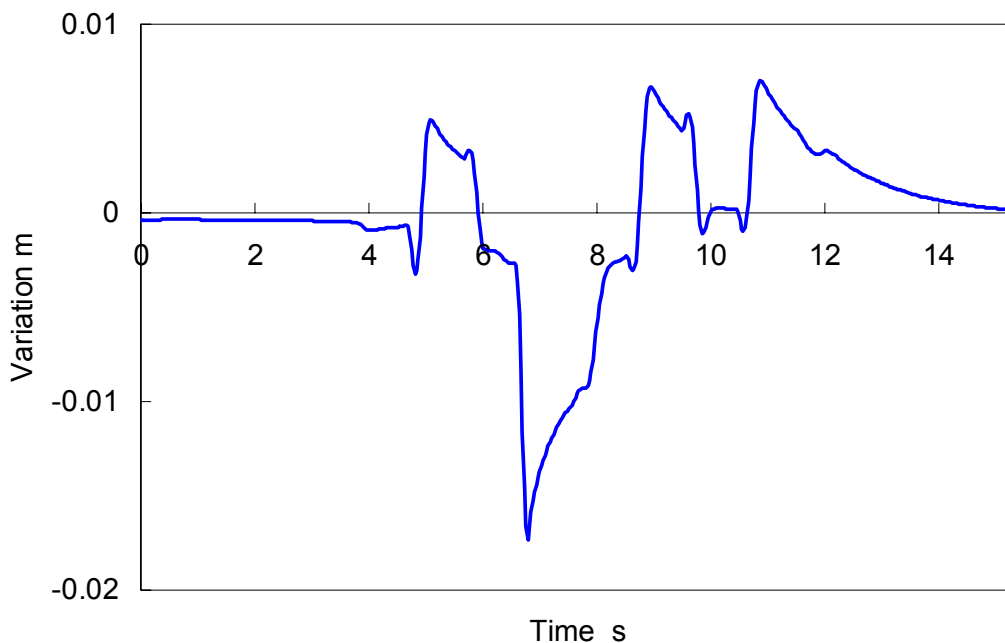


Figure B.56 Waist trajectory variation, pulling the robot rightward at the third step.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

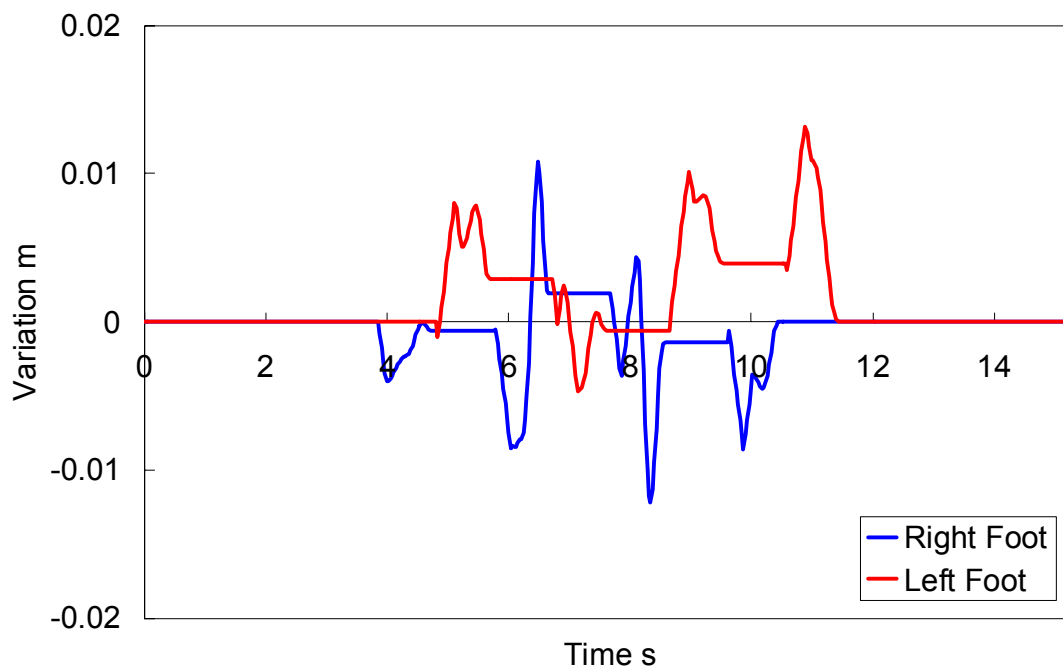


Figure B.57 Foot trajectories variation, pulling the robot rightward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

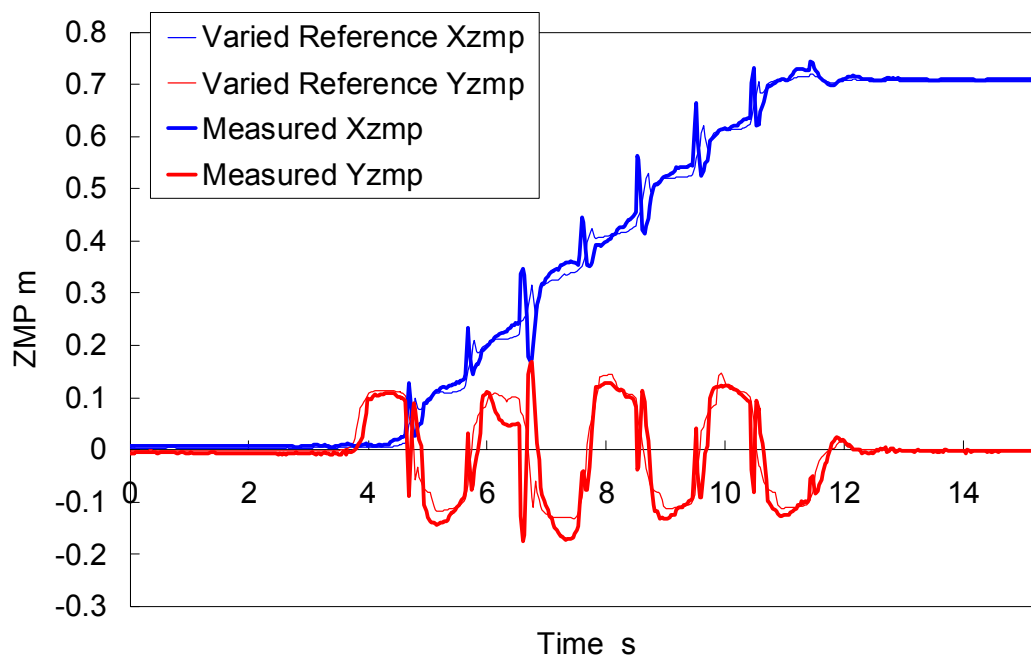


Figure B.58 ZMP trajectories, pulling the robot rightward at the third step. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 50 kg human)

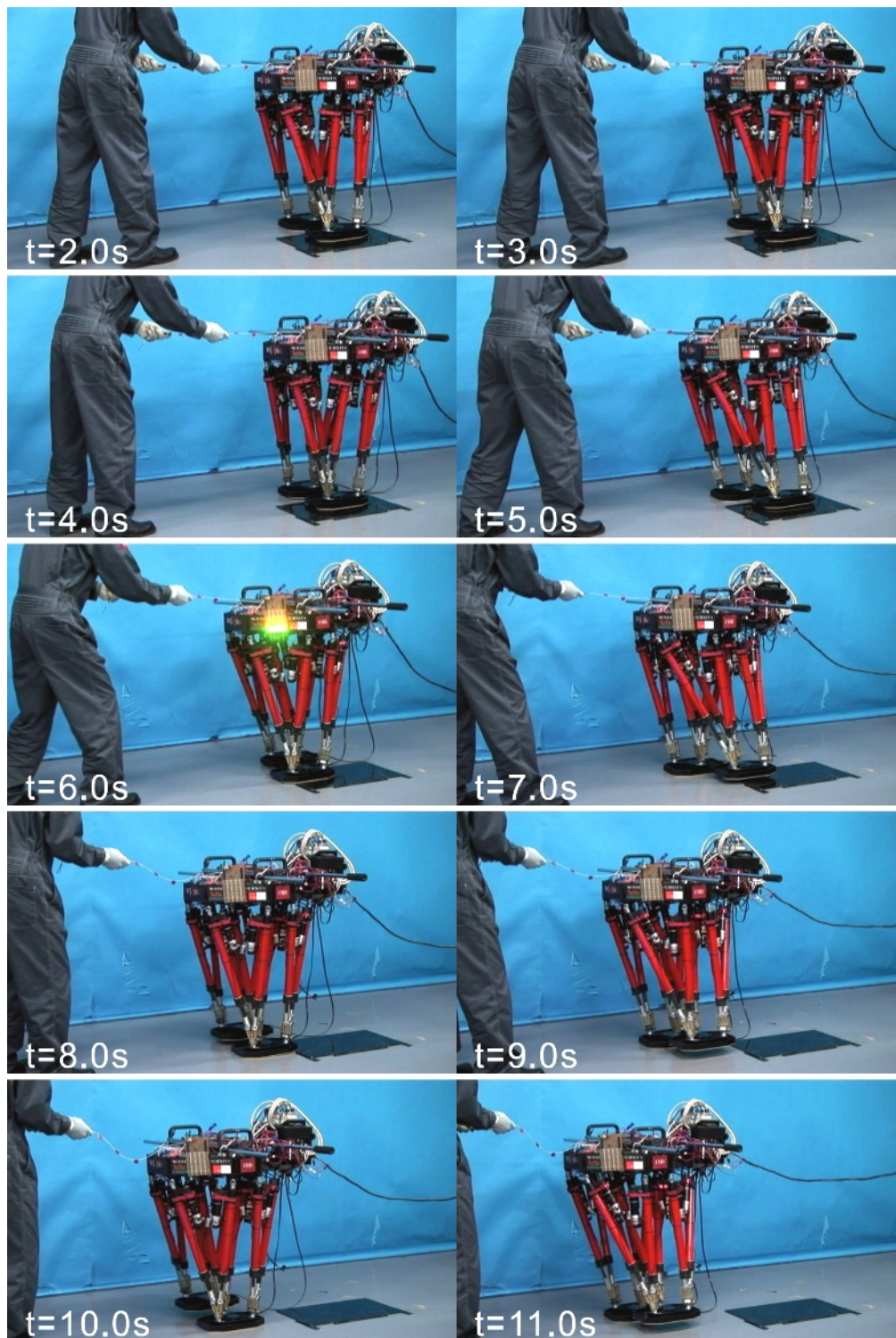


Figure B.59 Walking experiment, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

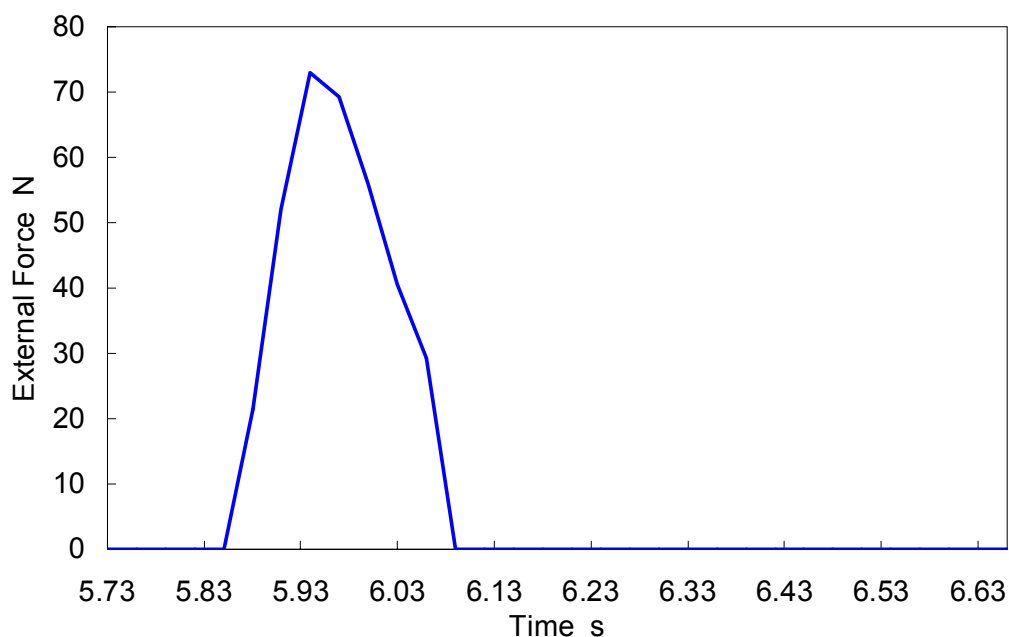


Figure B.60 Force strength of the external force, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

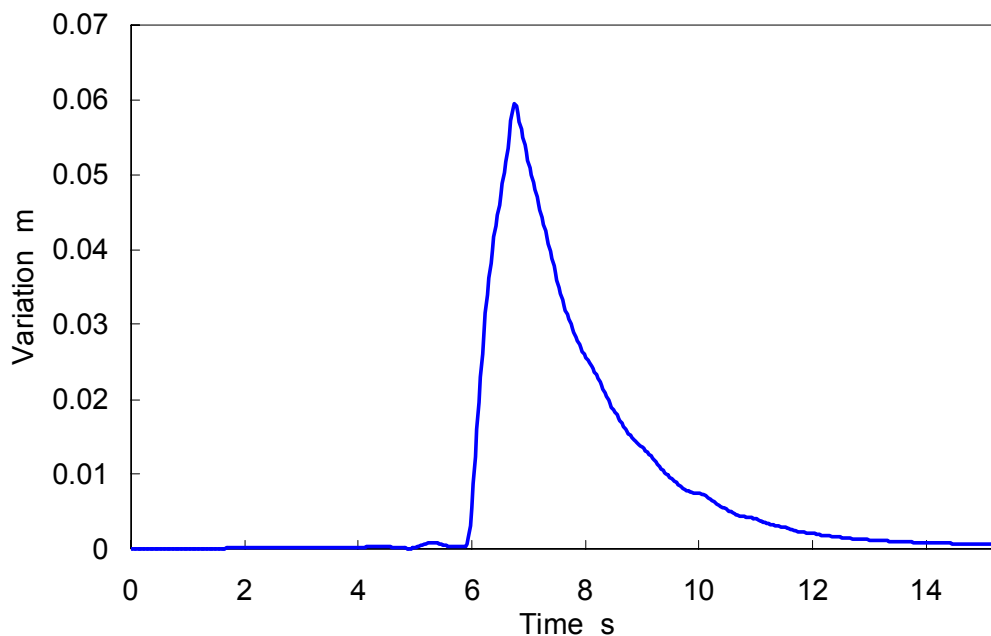


Figure B.61 Waist trajectory variation, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

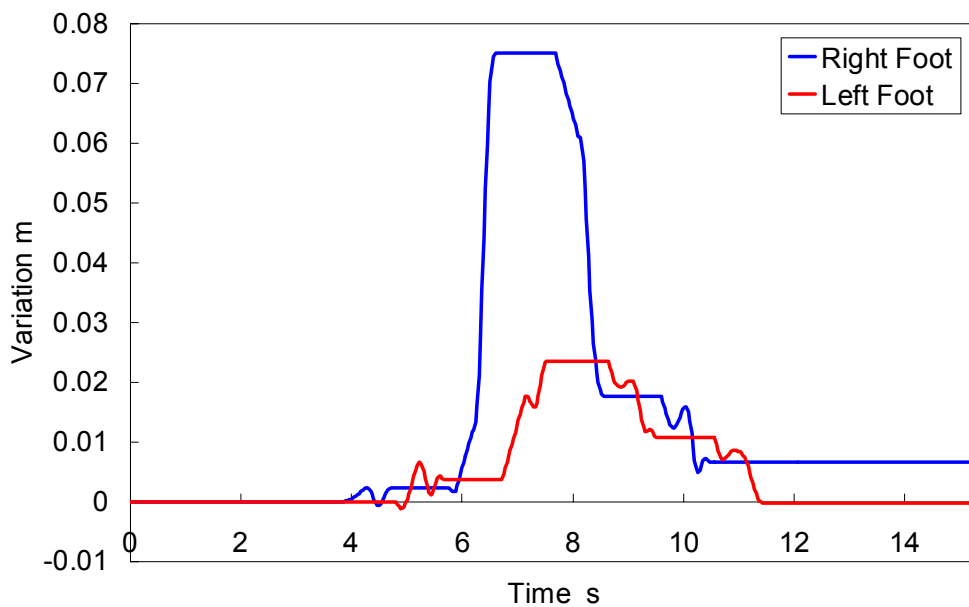


Figure B.62 Foot trajectories variation, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm)

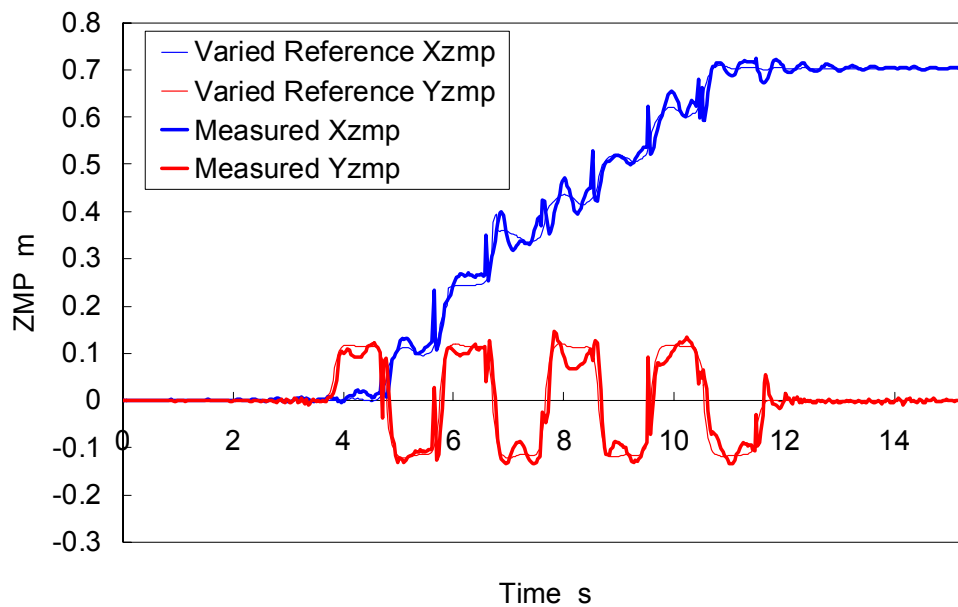


Figure B.63 ZMP trajectories, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm)



Figure B.64 Walking experiment, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm, load: a 50 kg human)

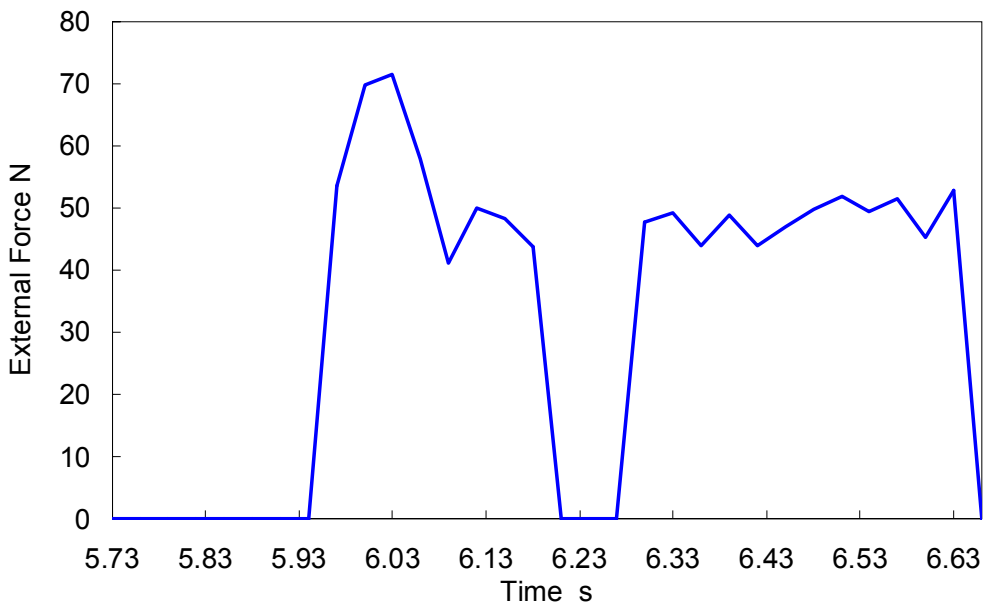


Figure B.65 Force strength of the external force, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm, load: a 50 kg human)

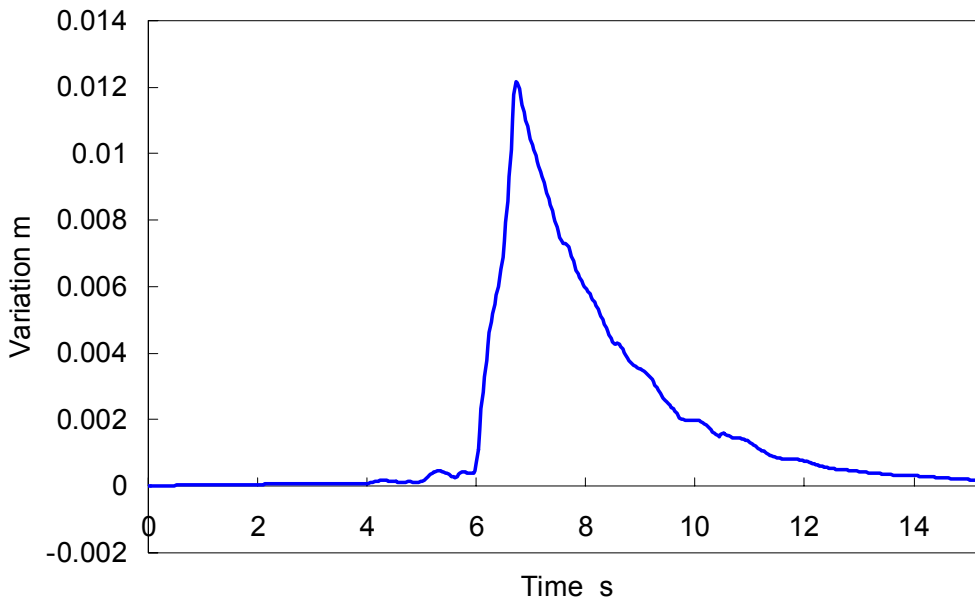


Figure B.66 Waist trajectory variation, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm, load: a 50 kg human)

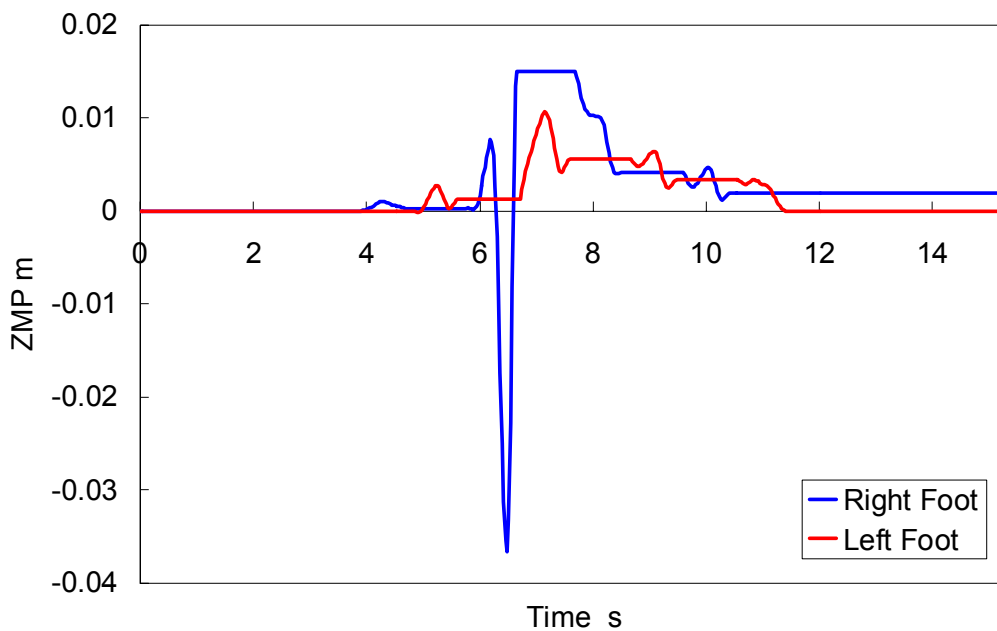


Figure B.67 Foot trajectories variation, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm, load: a 50 kg human)

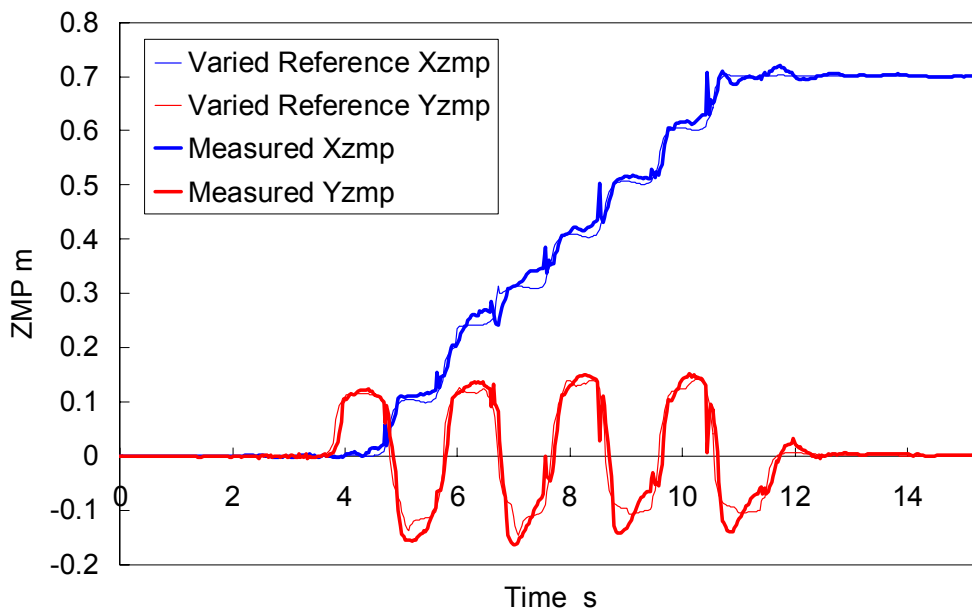


Figure B.68 ZMP trajectories, stepping down 5 mm board and pulling the robot forward at the third step.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, height of unevenness: 5 mm, load: a 50 kg human)

(e) 実験結果の考察

実験結果より、積載物の有無にかかわらず、外力の作用方向に対し腰部を加速し、その発散を抑制するために設定 ZMP 軌道および着地位置が変更されていることが確認できる。以上より、開発した動的な外乱補償制御法が正常に機能していることが確認できた。また ZMP 軌道のデータから、外力作用時以外にも設定 ZMP 軌道が歩行パターン生成時の設定 ZMP 軌道より変更されていることが確認できる。これは動的な外乱補償制御法による補償動作が歩行開始から終了まで行われているためであり、リアルタイムに腰部補償軌道を算出しており、設定パターンでの腰部軌道に対し偏差を生じているためである。

今回の実験で、ZMP フィードバックの比例ゲインを高めると、実測 ZMP 軌道の設定 ZMP 軌道への追従性は高まることは確認できたが、大きな着地衝撃を生じることがあった。実測 ZMP 軌道が一瞬大きく乱れると、それまで補償してしまうため、逆に歩行が不安定になることが確認できた。そこで着地衝撃が極力生じないように仮想コンプライアンス制御を併用し、フィードバックゲインを極力大きく設定できるように対処を行った。

また、不整路面適応制御法と動的な外乱補償制御法の統合実験においては、積載物の有無にかかわらず、不整地歩行中に外力を作用させても転倒することなく、安定した歩行を実現し、2つの制御が有効に機能していることが確認できた。人間搭乗歩行では、外力作用直後や、不整地から平坦路へ移行する瞬間などに、搭乗者が大きな外乱を生じていることが確認できたが、これに対しても補償動作を生成し、安定した歩行を実現した。また着地軌道修正制御法の使用時は、使用しない場合に比べ着地衝撃は大きくなるので、ZMP フィードバックのゲインを小さめに設定した。

(f) まとめ

人間搭乗型2足歩行ロボットのための、動的な外乱補償制御法を考案した。これは実測 ZMP を設定 ZMP に一致させるための腰部補償軌道の生成、その腰軌道の発散を防ぐための設定 ZMP 軌道の変更、着地位置の変更の3つを軸に構成されている。実際に約 50 kg の人間が搭乗し、外力入力実験を行ったところ、安定した歩行が継続され、本動的な外乱補償制御アルゴリズムの有効性を確認した。

B.2.2 静的外乱補償制御法

これは、搭乗者の座る位置のずれなどによって発生する静的な外乱を補償するものである。腰軌道を修正するだけでも、静的外乱は補償可能であるが、急にその外乱を取り除いた場合、腰部の修正量が大きいと歩行が不安定になるため、できるだけ腰部の修正量は小さいほうが良い。そのため、外乱が小さい場合は設定 ZMP を安定領域内で操作する手法をとった。

本手法は以下の 3 つのポイントからなる：

- 外乱成分の抽出
- 設定 ZMP 軌道の変更
- 腰部補償軌道の算出

以下にこれらについて述べる。

(a) 静的外乱補償制御法の詳細

外乱の目標値の算出

搭乗者や積載物によって加えられた外乱力や外乱モーメントの測定には、動的な外乱補償制御のときと同様に搭乗者席下部の力センサを用いる。図 B.69 はその力センサによって測定された搭乗者が発生する外乱力の一例であり、縦軸は外乱力をロボット腰部の重量で割った無次元量である。ちなみに、本データを測定するのに使用した人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RV (Waseda Leg - No.16 Refined V) の腰部質量は 61.6 kg である。図 B.69 に示すように、外乱力の測定値は振動的になっており、この値をそのまま用いるとロボットの修正量も振動的になり、歩行が不安定になることが予想される。そこで、次式のように N 制御周期毎に移動平均を取り、その値に応じて修正量を算出することにした。

$$F_{target} = \int_{t-N}^t F_t dt / N \quad (\text{B.32})$$

ここで、 F_{target} は外乱の目標値、 F_t は時刻 t での外乱の測定値である。 N については実験を通して 600 と決定し、制御周期は 1 msec である。

外乱に対する補償軌道については、この目標値に応じて算出する。外乱モーメントについても同様に移動平均を取っている。実際には、腰部に大きな加速度がかかると、慣性力の影響により歩行が不安定になるため、腰部の速度・加速度に制限を

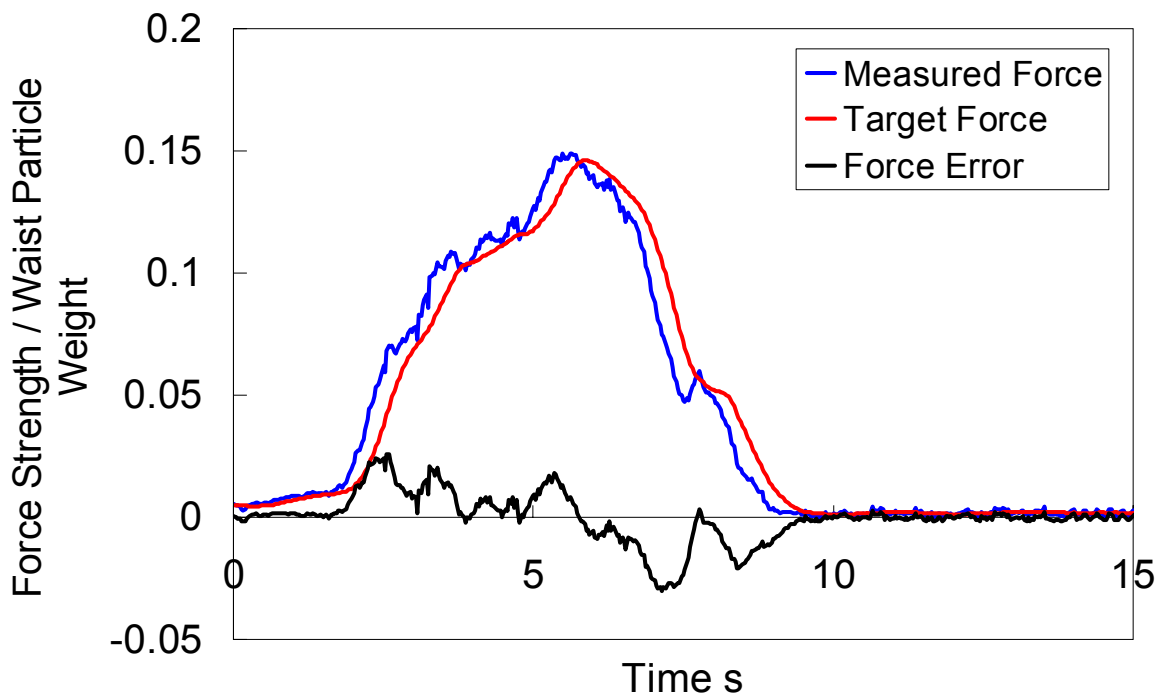


Figure B.69 One example of external forces measured by the force/torque sensor placed under the passenger's seat.

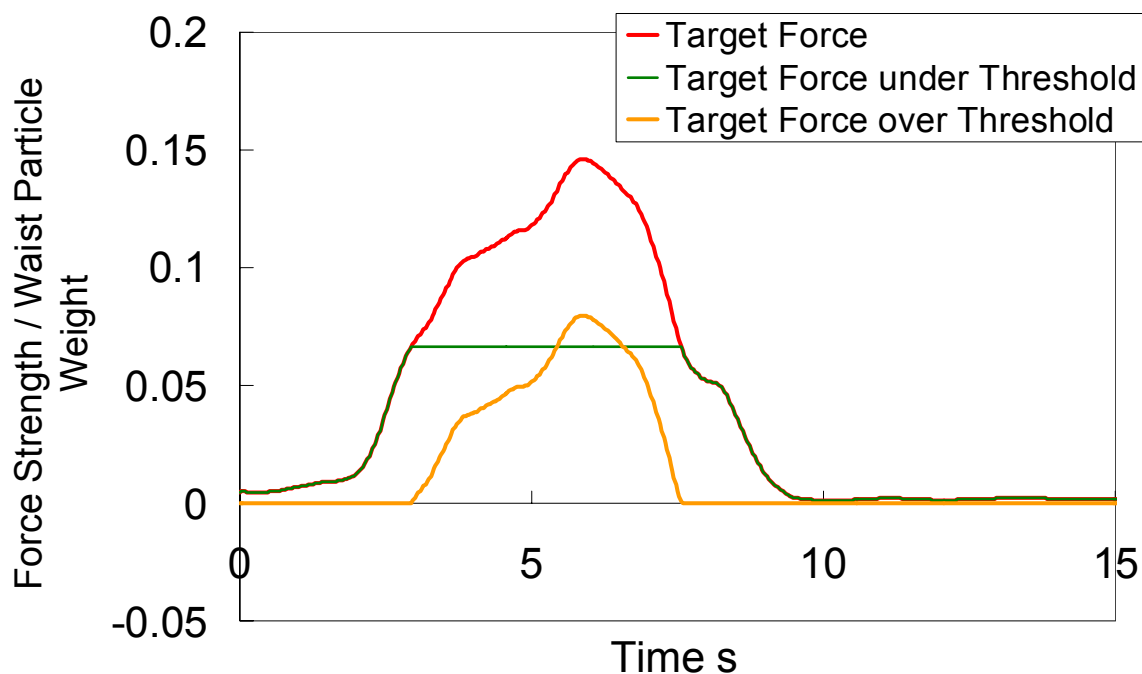


Figure B.70 Target force divided to two parts; external force under a predetermined threshold value (green line), and external force over the threshold value (orange line).

設けている。

設定 ZMP 軌道の変更

本制御は静的外乱補償制御であるため、急な外乱の変化には対応できない。もし、加わっていた外力が急になくなった場合、腰部位置を外力が加わらないところまで戻すまでの間に、逆に静的なつり合いが崩れ、外力が加わっていないにもかかわらず、歩行が不安定になる。そのため、静的外乱を補償する際は、できるだけ腰部修正量は少ないほうが外力の急激な変化に対応しやすいと考えられる。そこで、ある大きさまでの外力に対しては、腰の位置を変更せず、設定 ZMP の変更のみで対応することとした。

例えば、図 B.69 に示すような外力が加わった場合、閾値を設け、それより大きい小さいかで外力を 2 つに分ける (図 B.70)。そして、ある閾値までの外乱成分に関しては設定 ZMP 軌道を変更することで対応する。人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RV を立たせた状態で、70 N 以上の力で腰部を押すと、ZMP が足部の端まで移動しロボットの足部が浮き始めるため、本研究では、余裕をみて閾値を 40 N に設定した。

設定 ZMP の変更量を計算するために、図 B.5 に示す 1 質点モデルを用いる。このとき、両脚の質量は 0 と仮定する。ここで、設定 ZMP 周りのモーメントのつり合いの式は次のように表される。

$$m_w (\mathbf{x}_w - \mathbf{x}_{zmp}) \times (\ddot{\mathbf{x}}_w + \mathbf{G}) - \{ (\mathbf{x}_s - \mathbf{x}_{zmp}) \times \mathbf{F}_{ex} + \mathbf{M}_{ex} \} + \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \quad (\text{B.33})$$

ここで、 m_w はロボット腰部質点の質量、 $\mathbf{x}_w = [x_w, y_w, z_w]^T$ は腰部質点の位置ベクトル、 $\mathbf{x}_{zmp} = [x_{zmp}, y_{zmp}, z_{zmp}]^T$ は設定 ZMP の位置ベクトル、 $\mathbf{G} = [0, 0, g_z]^T$ は重力加速度ベクトル、 $\mathbf{x}_s = [x_s, y_s, z_s]^T$ は腰部 6 軸力覚センサの位置ベクトル、 $\mathbf{F}_{ex} = [F_x, F_y, F_z]^T$ は搭乗者が発生する外乱力、 $\mathbf{M}_{ex} = [M_x, M_y, M_z]^T$ は搭乗者が発生する外乱モーメント、 $\mathbf{T}_0 = [0, 0, T_z]^T$ は ZMP における路面からのロボットに作用する床反力モーメントベクトルである。特にロボットが静的につり合っている場合は、 $\ddot{\mathbf{x}}_w = \mathbf{0}$ と $\mathbf{F}_{ex} = [0, 0, F_z]^T$ が成り立つ。

そして、ロボットが静的につり合っているところに、 $\Delta \mathbf{F}_{ex} = [\Delta F_x, \Delta F_y, \Delta F_z]^T$ なる外乱力がロボット腰部に作用し、それを設定 ZMP 軌道の変更のみで対応すること

を考える。そのとき、変更後の設定 ZMP 周りのモーメントのつり合いの式は次のようになる。

$$m_w \left\{ \mathbf{x}_w - (\mathbf{x}_{zmp} + \Delta \mathbf{x}_{zmp}) \right\} \times (\ddot{\mathbf{x}}_w + \mathbf{G}) - \left[\left\{ \mathbf{x}_s - (\mathbf{x}_{zmp} + \Delta \mathbf{x}_{zmp}) \right\} \times (\mathbf{F}_{ex} + \Delta \mathbf{F}_{ex}) + (\mathbf{M}_{ex} + \Delta \mathbf{M}_{ex}) \right] + \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \quad (\text{B.34})$$

式(B.33), 式(B.34)より設定 ZMP の変更量 $\Delta \mathbf{x}_{zmp} = [\Delta x_{zmp}, \Delta y_{zmp}, \Delta z_{zmp}]^T$ は次のように算出される。

$$\Delta x_{zmp} = \frac{(z_s - z_{zmp}) \Delta F_x + \Delta M_y}{m_w g_z - F_z - \Delta F_z} \quad (\text{B.35})$$

$$\Delta y_{zmp} = \frac{(z_s - z_{zmp}) \Delta F_y - \Delta M_x}{m_w g_z - F_z - \Delta F_z}$$

なお、設定 ZMP の変更のみで対応できなかった外力成分に関しては、腰部軌道を修正しモーメント補償を行うものとする。

腰部修正量の算出

ロボット腰部に外乱力が発生した際、それを腰部を水平に移動させることによって補償すると、設定 ZMP 周りのモーメントのつり合いの式は次のように表すことができる。

$$m_w (\mathbf{x}_w + \Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_{zmp}) \times (\ddot{\mathbf{x}}_w + \mathbf{G}) - \left\{ (\mathbf{x}_s + \Delta \mathbf{x} - \mathbf{x}_{zmp}) \times (\mathbf{F}_{ex} + \Delta \mathbf{F}'_{ex}) + (\mathbf{M}_{ex} + \Delta \mathbf{M}'_{ex}) \right\} + \mathbf{T}_0 = \mathbf{0} \quad (\text{B.36})$$

ここで、 $\Delta \mathbf{x} = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]^T$ は腰軌道の修正量、 $\mathbf{F}'_{ex} = [F'_x, F'_y, F'_z]^T$ は閾値を超えて発生した外乱力、 $\mathbf{M}'_{ex} = [M'_x, M'_y, M'_z]^T$ は閾値を超えて発生した外乱モーメントである。本研究では、ロボット腰部は上下に移動しないことを仮定しているので、 $\Delta z = 0$ である。

式(B.33), 式(B.36)より、ロボットの腰部修正量は次のように算出される。

$$\begin{aligned}\Delta x &= \frac{(x_s - x_{zmp})\Delta F'_z - (z_s - z_{zmp})\Delta F'_x - \Delta M_y}{m_w g_z - F_z - \Delta F'_z} \\ \Delta y &= \frac{-(y_s - y_{zmp})\Delta F'_z + (z_s - z_{zmp})\Delta F'_y - \Delta M_x}{m_w g_z - F_z - \Delta F'_z}\end{aligned}\quad (\text{B.37})$$

式(B.35), 式(B.37)に基づいて設定 ZMP 軌道と腰軌道を修正することで, 未知の静的な外乱に対応することが可能となる。

(b) 実験方法

開発した静的な外乱補償制御の評価のために, 本制御法を人間搭乗型 2 足歩行ロボット WL-16RV に実装した。まず, 静的な外力が補償可能か評価するために, ロボット腰部上部をワイヤで引っ張り, 外力を加える。また同時に, 設定 ZMP 軌道を変更することの有効性を評価するために, 設定 ZMP を変更しない場合と変更する場合の 2 通り実験を行うこととした。その際, 外力の入力タイミングや大きさを目視で確認できるように, LED で構成された外力レベルメータを作製した。一列当たり 10 N の大きさを示す。また, 静的な外力モーメントの補償を確認するために, 重りをロボットの中心から横方向にずらした位置に載せ, 定常的に外力モーメントが発生するようにし, 実験を行う。以上まとめると, 静的な外乱補償制御の評価のために, 以下の 3 つの実験を行う。

- (i) 静的な外力入力 (設定 ZMP 変更なし)
- (ii) 静的な外力入力 (設定 ZMP 変更あり)
- (iii) 静的な外力モーメント入力 (設定 ZMP 変更なし)

(c) 評価実験

- (i) 静的な外力入力 (設定 ZMP 変更なし)

ロボットを歩行周期 1.0 s/step でその場足踏み歩行をさせ, ロボット腰部上部のワイヤをゆっくり引っ張り, 徐々に力を抜く実験を行った。このとき, 急激な力の変化を起こさないように注意した。図 B.71 に歩行実験時の連続写真を示す。図 B.72 に外力の入力および, 実際に修正した力を, また図 B.73 に制御で修正しきれなかった外力成分を示す。図 B.74 に本制御において実際に修正した腰部変更量を, 図 B.75 に実測 ZMP を示す。

(ii) 静的外力入力（設定 ZMP 変更あり）

先ほどと同様に、歩行周期 1.0 s/step で足踏み歩行中のロボット腰部をゆっくり引っ張り、外力を付加する実験を行った。ただし、今回は外力を補償する際に、腰部だけでなく設定 ZMP の変更も行うため、先ほどより腰部修正量が少なくなり、より安定した歩行が期待される。図 B.76 に歩行実験時の連続写真を示す。図 B.77 に外力の入力および実際に修正した力と、閾値で分けられた外力成分を、また図 B.78 に制御で修正しきれなかった外力成分を示す。図 B.79 に本制御において実際に修正した腰部変更量を、図 B.80 に実測 ZMP を示す。

(iii) 静的外力モーメント入力（設定 ZMP 変更なし）

最後に 30 kg の重りを中心から 100 mm 左にずらしてロボットに積載し、静的な外力モーメントが作用するようにし、歩行周期 1.0 s/step で足踏み運動をさせる歩行実験を行った。図 B.81 に歩行実験時の連続写真を示す。図 B.82 に外力モーメントの入力および、実際に修正したモーメントを示す。図 B.83 に本制御において実際に修正した腰部変更量を、図 B.84 に実測 ZMP を示す。

(d) 実験結果の考察

(i) 静的外力入力（設定 ZMP 変更なし）

最大 60 N の外力に対し、腰部を 180 mm 程度修正することで、安定した歩行を実現していることが確認できた。ただし、外力を徐々に弱めていく際に、急な力の変化が生じており、その誤差成分は静的外乱補償制御法だけでは修正し切れず、大きな ZMP 偏差が見られた。動的な外乱補償制御法と統合することで、この力成分の誤差に対応できるものと考えられる。

(ii) 静的外力入力（設定 ZMP 変更あり）

最大 100 N の外力に対し、設定 ZMP を前方へ 50 mm、腰部を 75 mm 程度修正することで、安定した歩行を実現していることが確認できた。なお、先ほどの設定 ZMP を変更しない場合と比べて、設定 ZMP の変更を行うことで、より小さな腰部変位量でより大きな力に対応できることが確認できた。

(iii) 静的外力モーメント入力（設定 ZMP 変更なし）

30 kg の重りを横方向に 100 mm ずらして載せたことで、腰部 6 軸力覚センサに Roll 方向に約 35 Nm のモーメントがかかっているのに対し、腰部を約 40 mm 修正することにより、安定して歩行できることが確認できた。

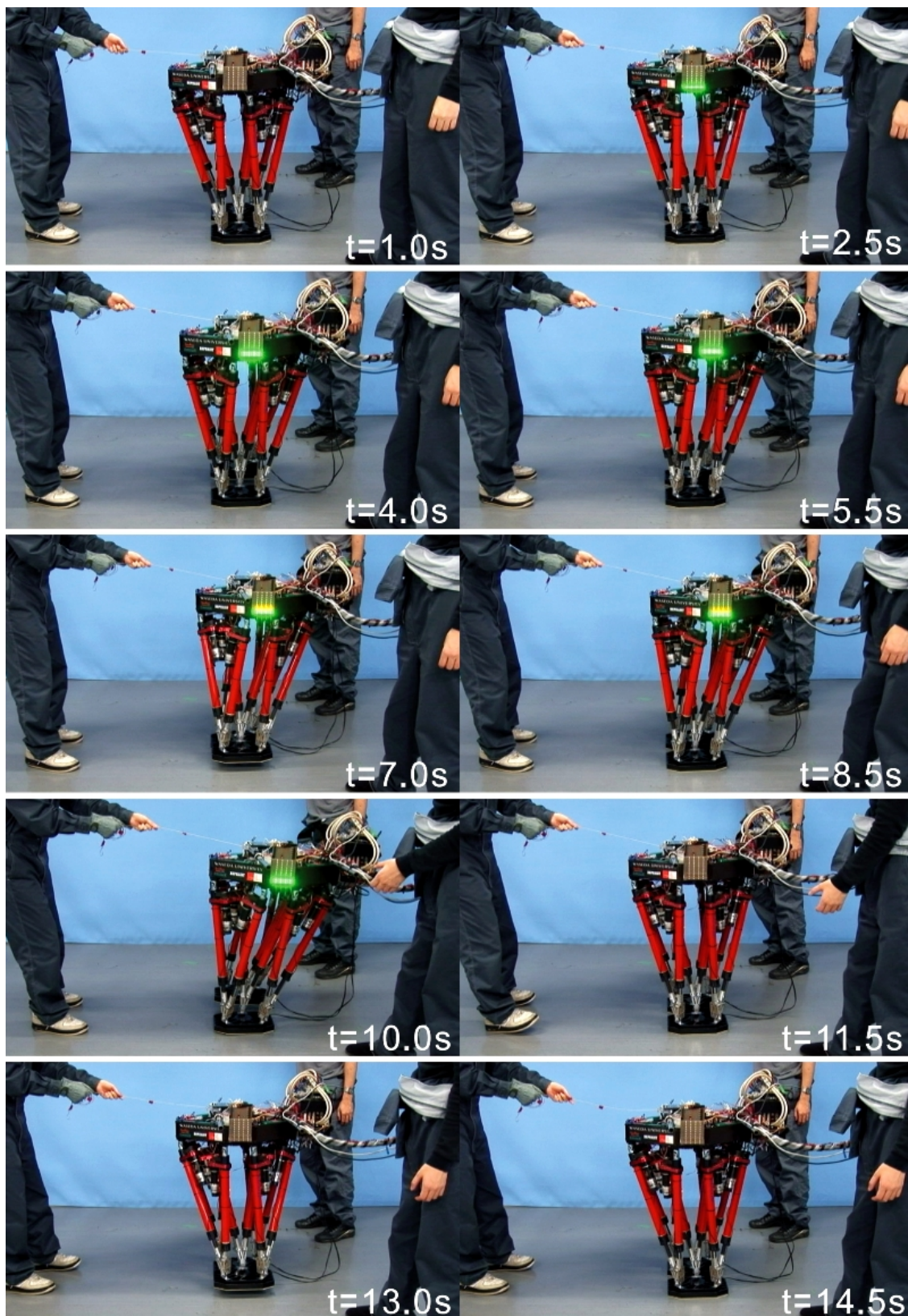


Figure B.71 Walking experiment, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

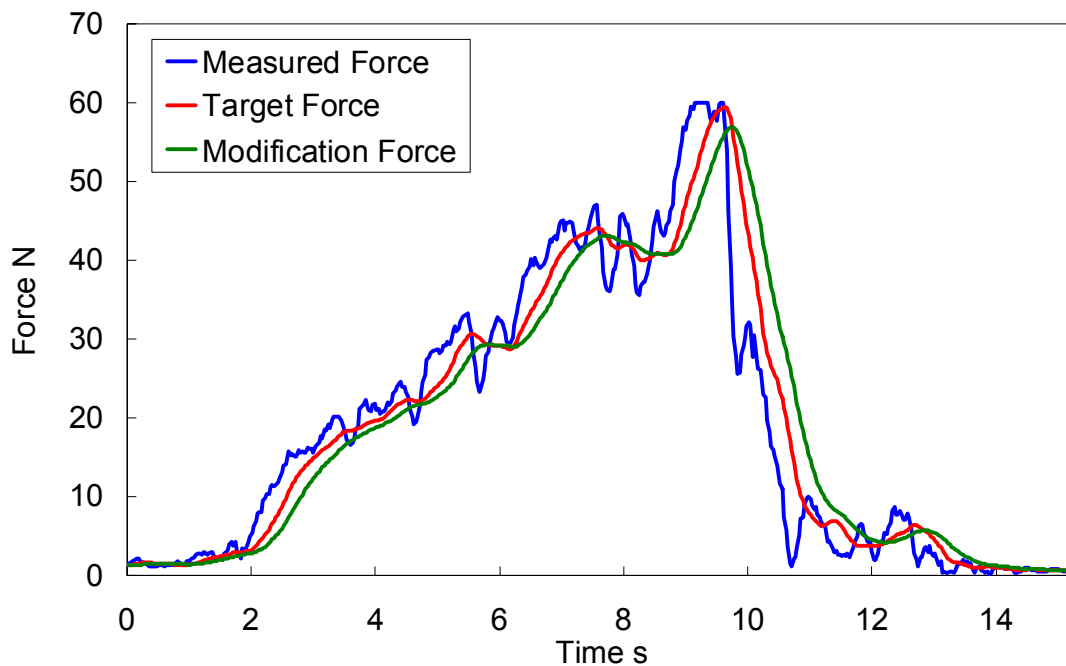


Figure B.72 Force strength of the external force, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

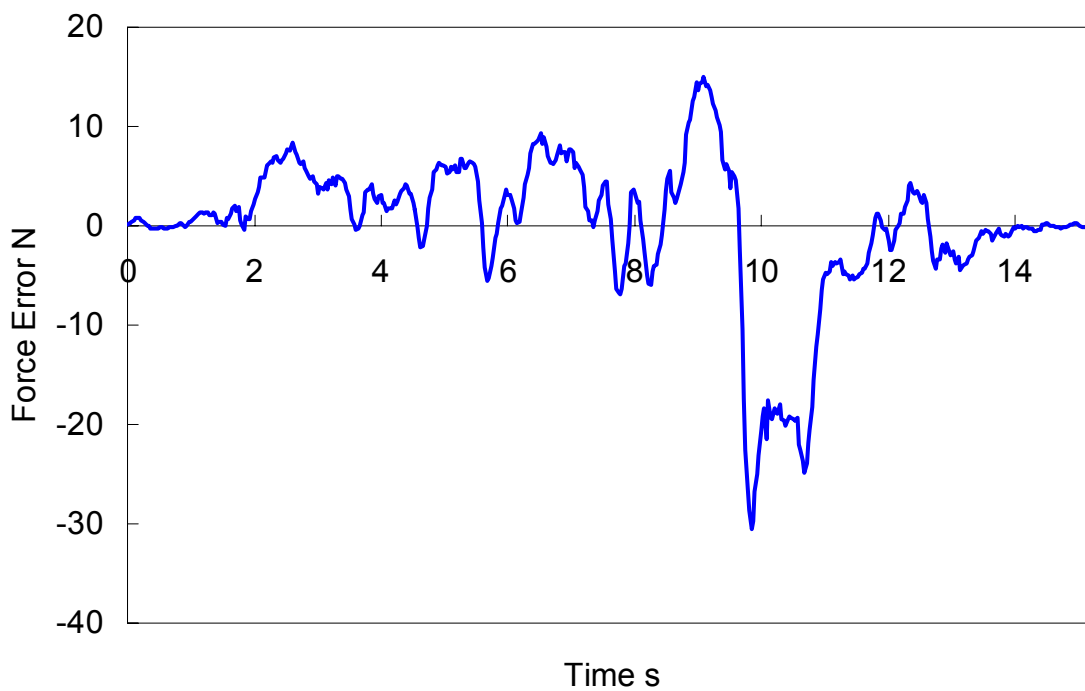


Figure B.73 Force error, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

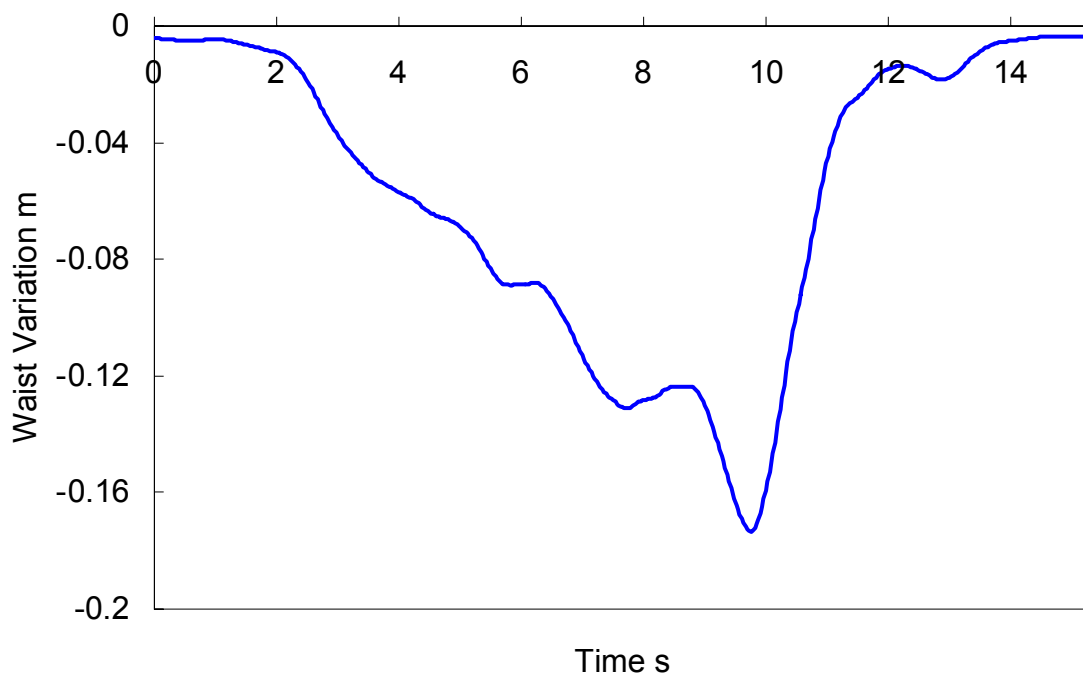


Figure B.74 Waist trajectory variation, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

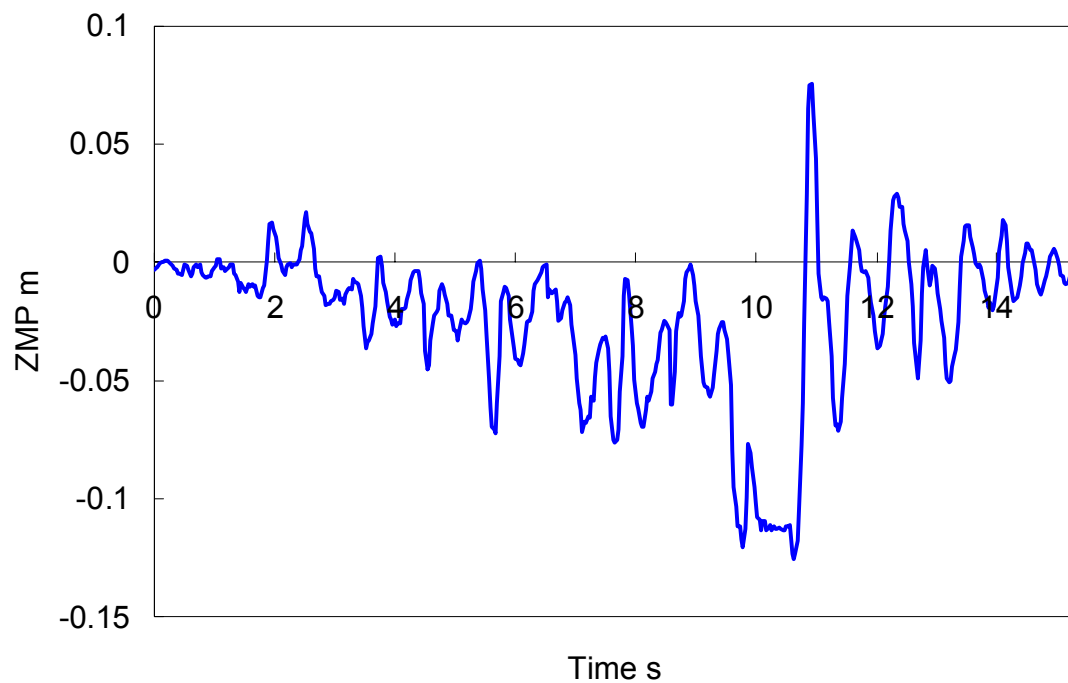


Figure B.75 ZMP trajectories, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

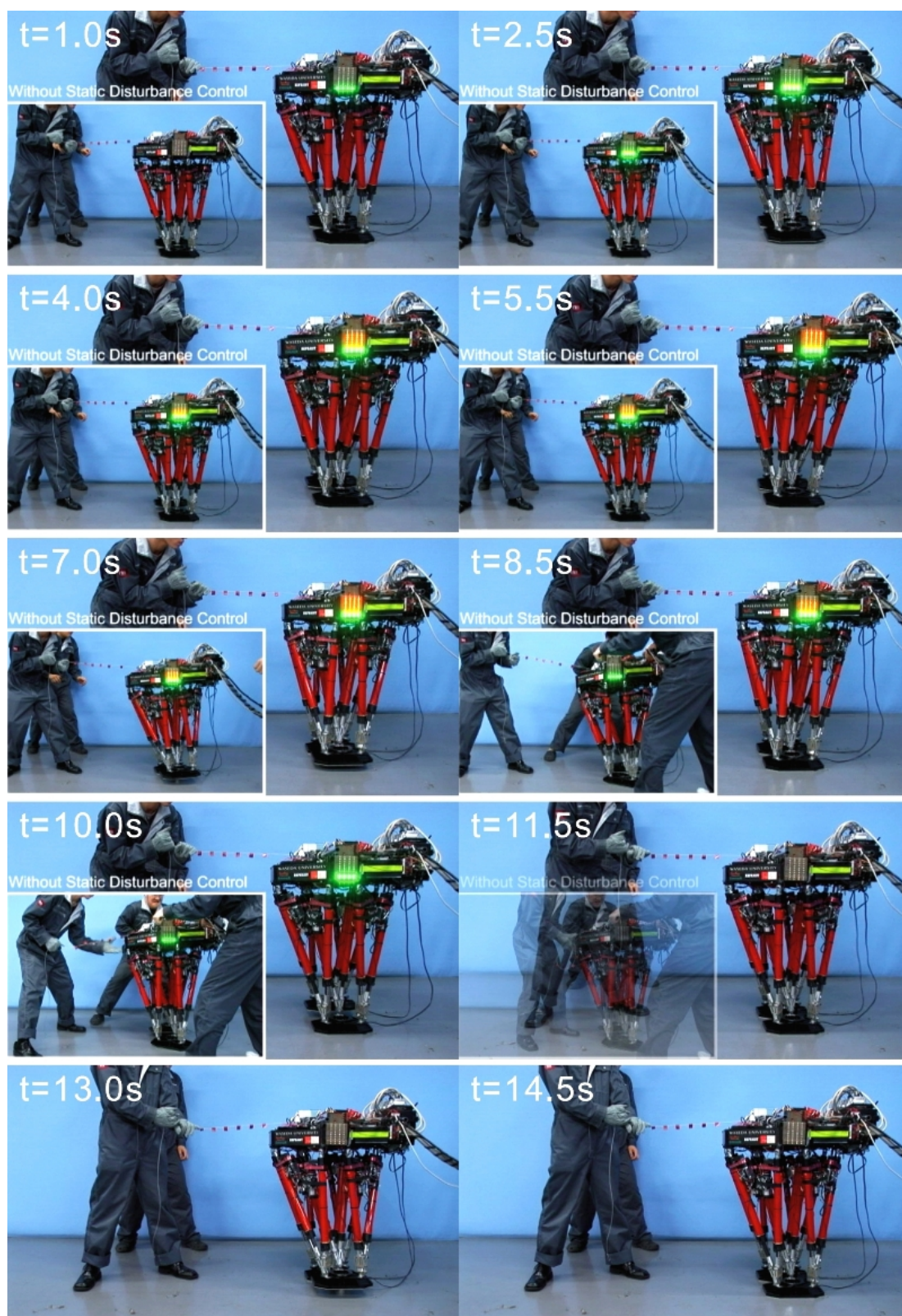


Figure B.76 Walking experiment, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

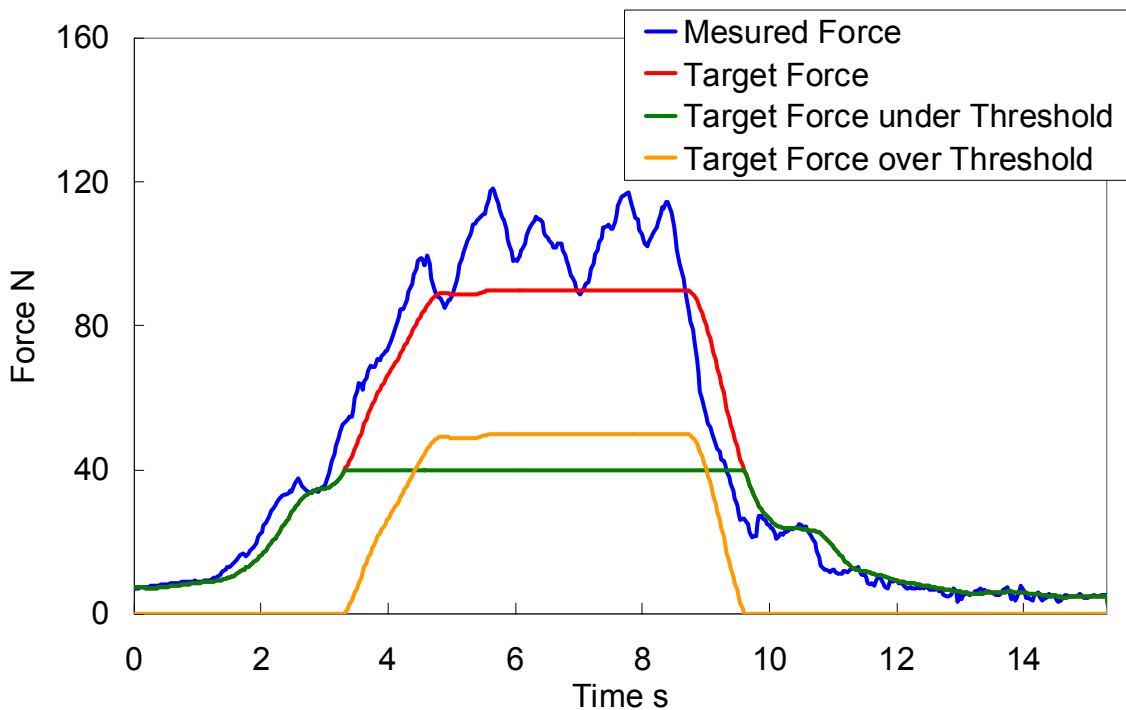


Figure B.77 Force strength of the external force, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

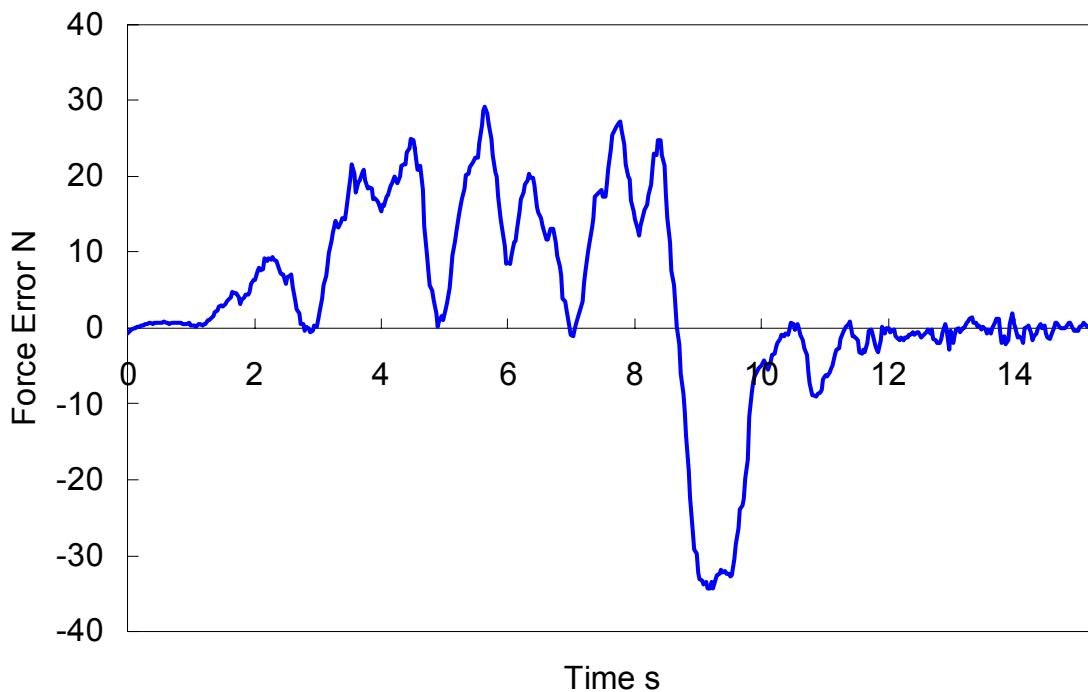


Figure B.78 Force error, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

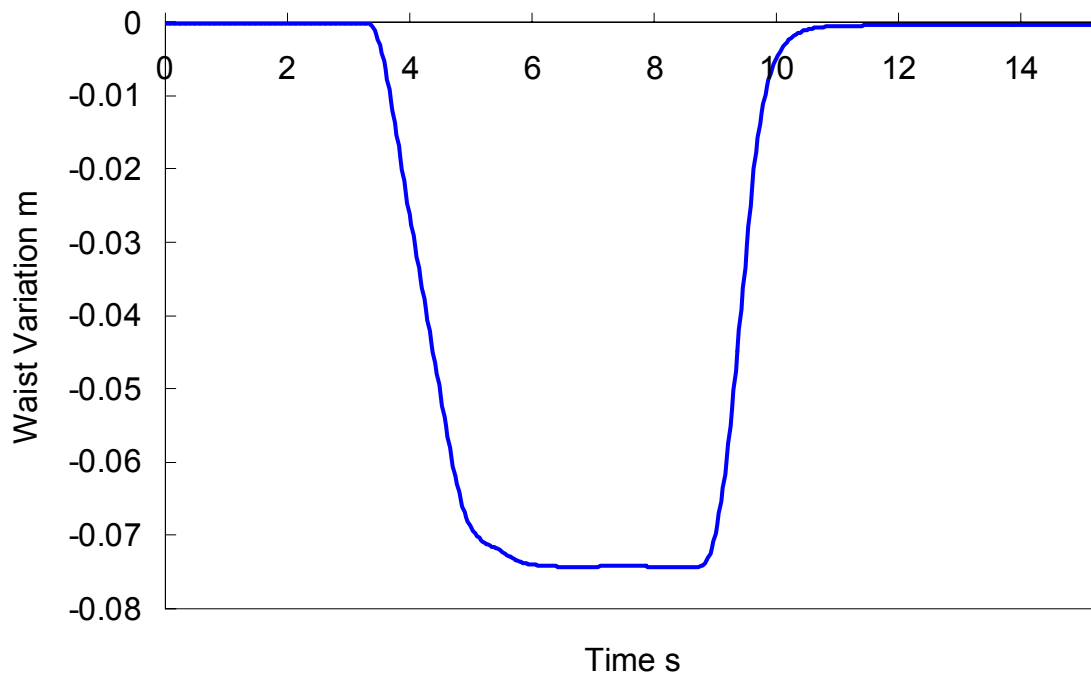


Figure B.79 Waist trajectory variation, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

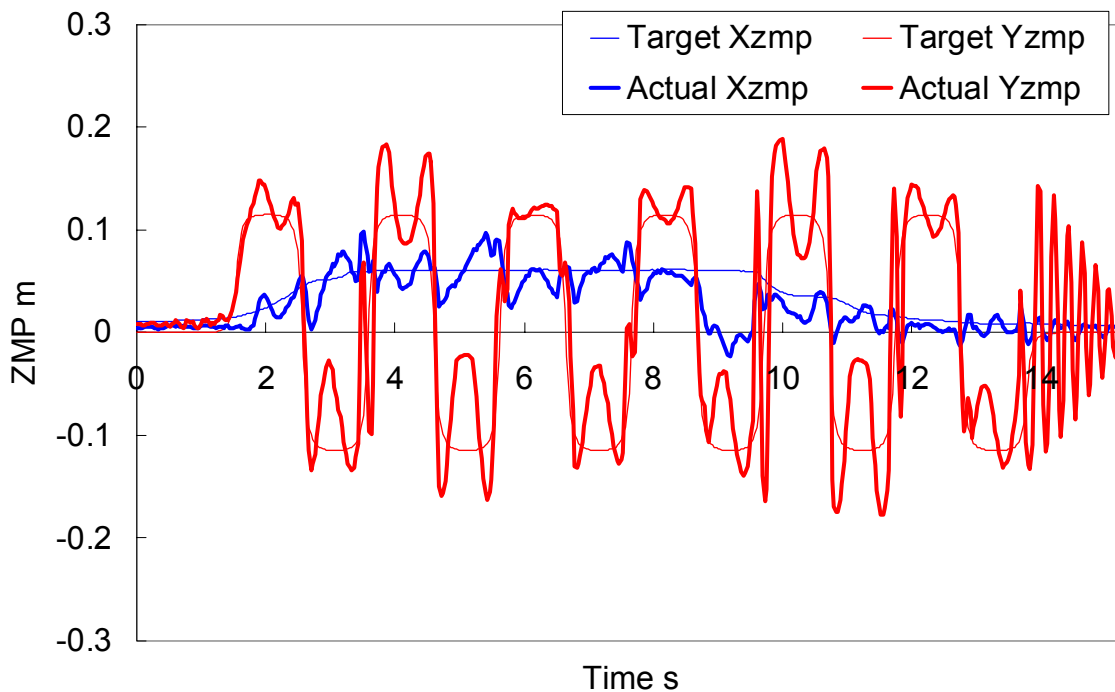


Figure B.80 ZMP trajectories, pulling the robot forward slowly.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

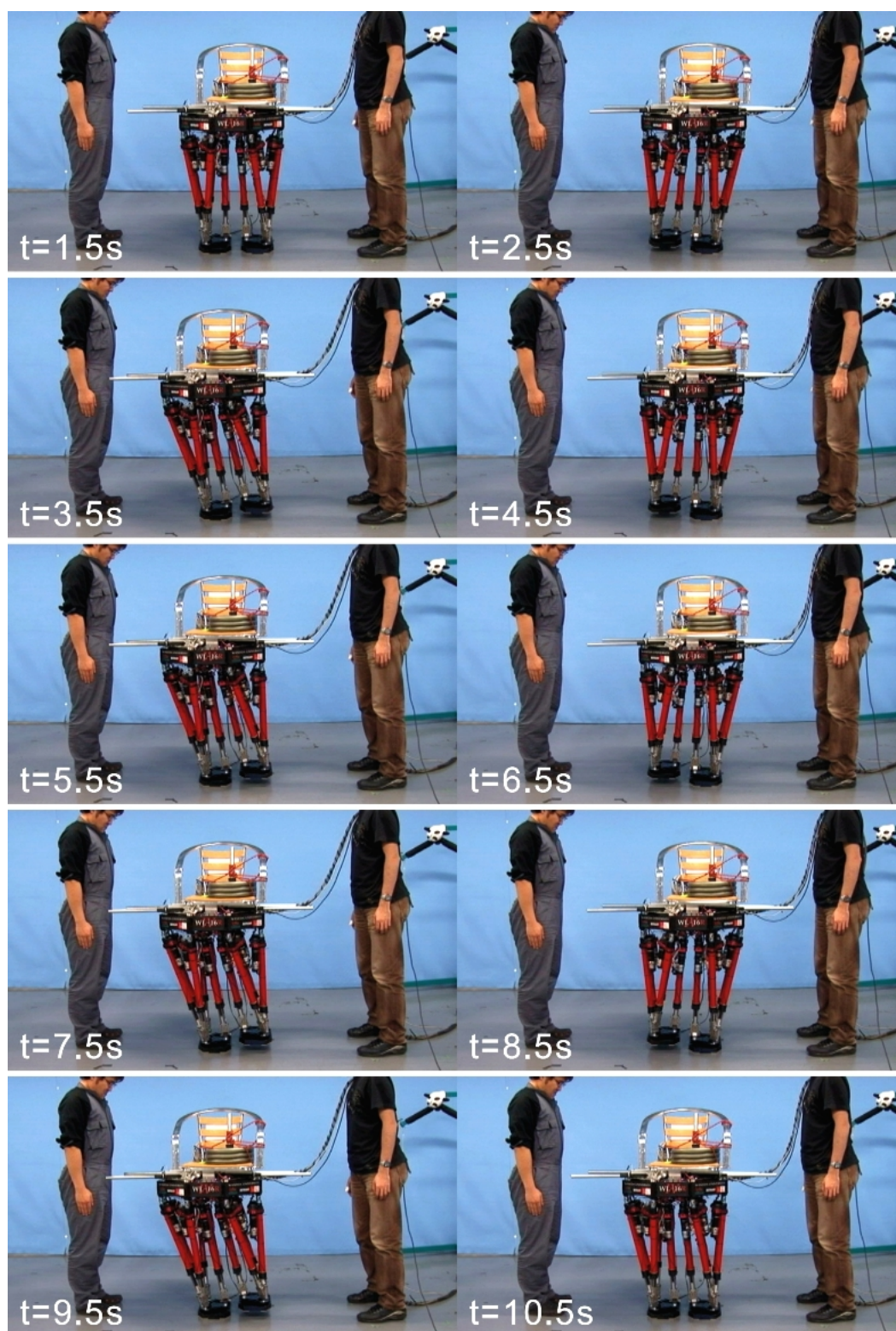


Figure B.81 Walking experiment, carrying a 30 kg load displaced leftward about 100 mm from the center of the waist.

(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

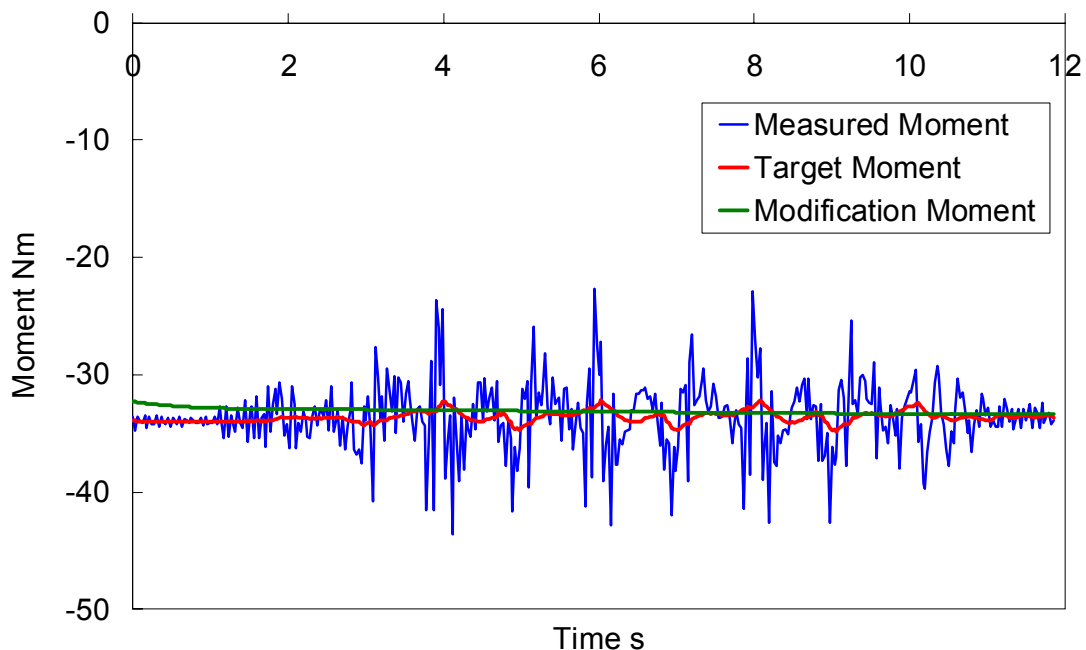


Figure B.82 External moment about the roll axis, carrying a 30 kg load displaced leftward about 100 mm from the center of the waist.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

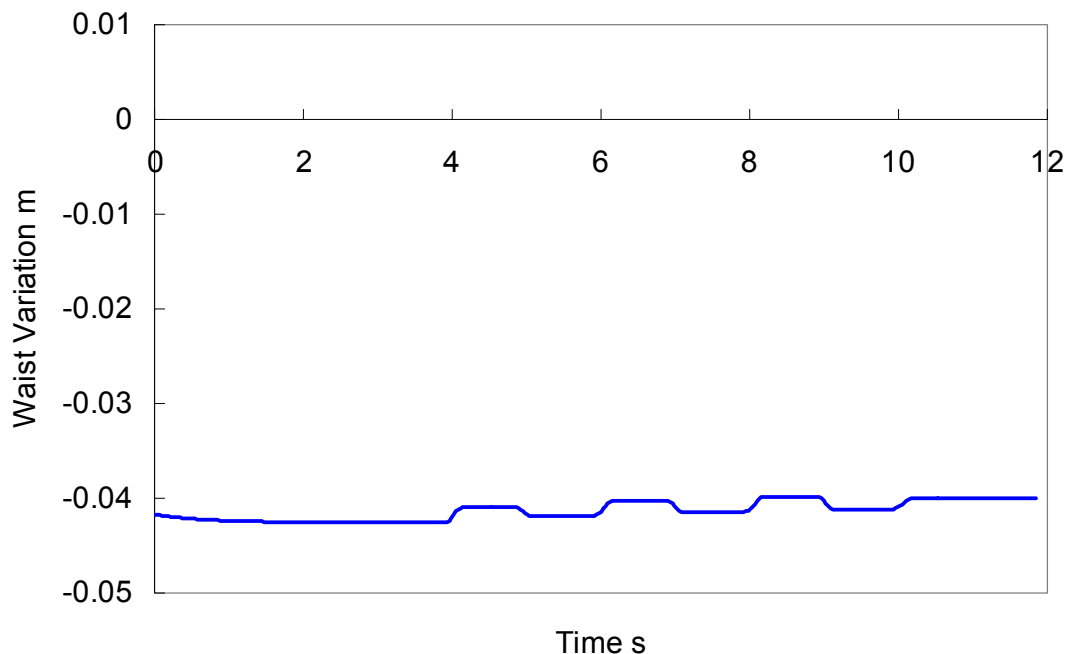


Figure B.83 Waist trajectory variation along the y axis, carrying a 30 kg load displaced leftward about 100 mm from the center of the waist.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

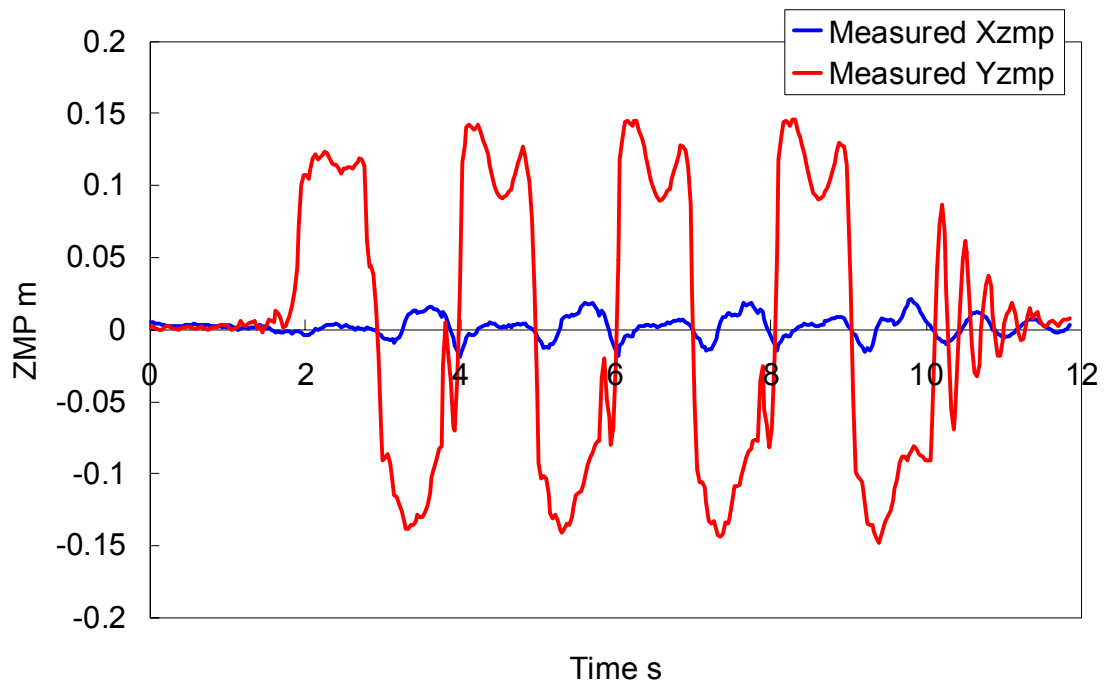


Figure B.84 ZMP trajectories, carrying a 30 kg load displaced leftward about 100 mm from the center of the waist.

(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

(e) まとめ

人間搭乗型2足歩行ロボットのための、静的外乱補償制御法を考案した。外乱の検出には、搭乗者シート下部の6軸力センサを使用するが、生データは振動的であるため移動平均を取り、その値に応じて補償軌道を生成することとした。外力が設定した閾値以下の場合は足底内で設定 ZMP を修正し、閾値以上になった場合に腰部を修正することとした。こうすることで、腰部修正量を小さくすることができ、動的な外乱に対応しやすくなる。結果的にロボットの歩行安定性を向上させることができた。

しかし、本静的外乱補償制御法だけでは、急激な外力の変化には対応できないため、動的な外乱補償制御法との統合が不可欠であった。

B.2.3 動的な外乱補償制御法と静的な外乱補償制御法の統合

前節までに詳述した動的な外乱補償制御法と静的な外乱補償制御法はそれぞれ動的、または静的な外乱にしか対応できないものである。静的な外乱補償制御法に注目すると、外乱の目標値を算出する際に、測定された外乱力の振動成分を抑えるために移動平均を取っていたが、急激に外力が変化する場合、外乱の目標値と実測値の差が大きくなってしまう (図 B.69)。

そこで、静的な外乱補償だけでは修正しきれなかった外力成分を、動的な外乱補償制御における入力値として扱うこととした。2つの制御を併用することにより、ステップ状の外乱に対しても対応できるようになるはずである。

(a) 実験方法

動的な外乱補償制御法と静的な外乱補償制御法を併用することにより、ステップ状の急激な外乱がロボットに作用しても継続して歩行が可能かどうか調べるために評価実験を行う。外乱発生装置がないため、本研究では人間がワイヤを引っ張り、外乱を加えなければならない。しかし、それではステップ状の外乱を入力することは非常に難しいため、はじめはゆっくりと外力を加えていき、途中で急にワイヤを離すことで、擬似的にステップ状の外乱を入力できるようにし、実験を行う。最終的には、実際に人間が搭乗し、急に姿勢を倒した場合にも継続して歩行が可能かどうか評価を行う。以上まとめると、2つの外乱補償制御を統合した際の評価実験として、以下の2つの実験を行う。

- (i) おもりなし、その場足踏み (設定 ZMP 変更あり)
- (ii) 人間搭乗歩行、前進歩行 (設定 ZMP 変更あり)

(b) 評価実験**(i) おもりなし，その場足踏み（設定 ZMP 変更あり）**

ロボットを歩行周期 1.0 s/step でその場足踏み歩行させ、前方向の外力を徐々に大きくしていき、9 歩目で急にワイヤを離し、外力をなくすようにして実験を行った。急にワイヤを離すことで、ステップ状の外力を与えている。

図 B.85 に歩行実験の連続写真を示す。図 B.86 に腰部 6 軸力覚センサに加えられた外力および、腰部軌道の修正によって補償した外力成分と設定 ZMP の変更によって対応した外力成分を示す。また、実測の外力と静的な外乱補償で補償した外力成分の誤差も同図に示す。図 B.87 に静的な外乱補償制御と動的な外乱補償制御で修正した腰部軌道変更量を示す。足先変更量を図 B.88 に、目標 ZMP と実測 ZMP を図 B.89 に示す。

(ii) 人間搭乗歩行，前進歩行（設定 ZMP 変更あり）

次に 60 kg の成人男性を乗せて、歩幅 100 mm/step、歩行周期 1.0 s/step で前進歩行中に外乱を与える歩行実験を行った。この際、搭乗者は 3 歩目に急に前傾姿勢をとり、そこから徐々に状態を元の位置に戻すことにより、Pitch 方向に動的および静的な外乱モーメントを加える。

図 B.90 に歩行実験の連続写真を示す。図 B.91 に腰部 6 軸力覚センサに加えられた外力モーメントを示す。図 B.92 に静的な外乱補償と動的な外乱補償制御で修正した腰部修正量を示す。足先変更量を図 B.93 に、目標 ZMP と実測 ZMP を図 B.94 に示す。

(c) 実験結果の考察**(i) おもりなし，その場足踏み（設定 ZMP 変更あり）**

約 80 N のステップ状の外力に対し、まず、静的な外乱補償にて補償し、補償しきれなかった外力成分をリアルタイム外乱補償制御によって補償することにより、安定して歩行できることが確認できた。また、静的な外乱補償における設定 ZMP の変更を導入することで、より大きな外乱に対応できることが確認できた。

(ii) 人間搭乗歩行，前進歩行（設定 ZMP 変更あり）

最大 80 Nm ほどの外力モーメントが加わっているのに対し、静的な外乱補償制御においては最大で 25 mm ほど腰部を移動させ、リアルタイム外乱補償制御では腰部を最大 40 mm ほど移動させ、また足先軌道を 40 mm ほど変更させることで搭乗者の動きによる外乱を補償し、安定した歩行を実現できることが確認できた。



Figure B.85 Walking experiment, pulling the robot forward and suddenly quitting hold of the wire.

(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

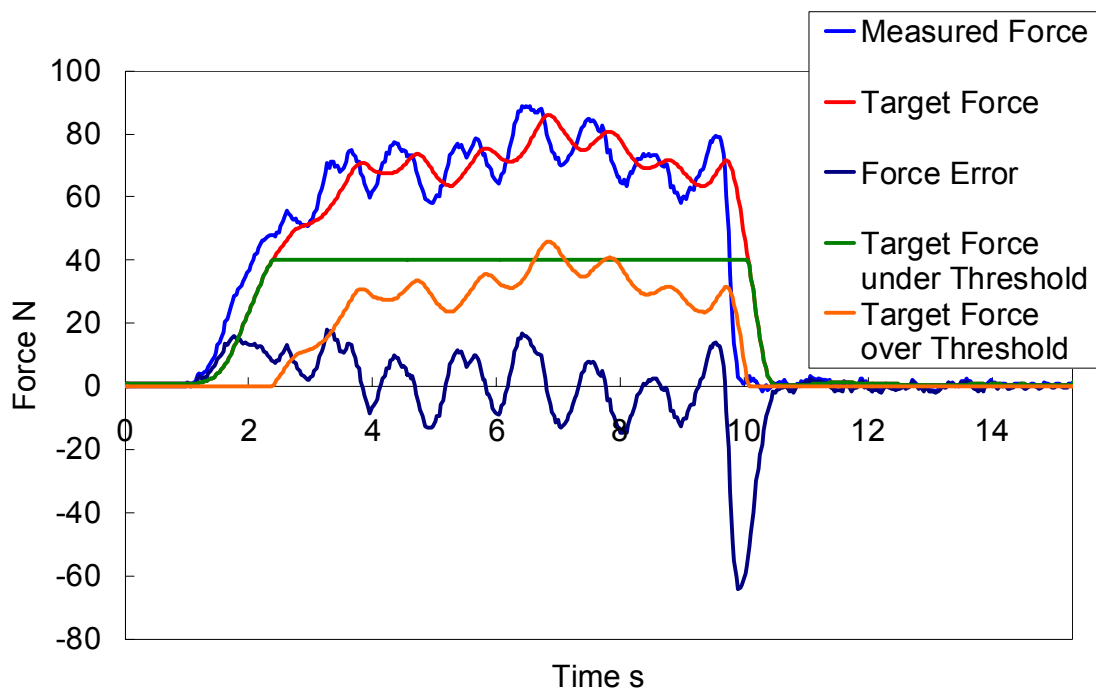


Figure B.86 Force strength of the external force and force error, pulling the robot forward and suddenly quitting hold of the wire.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

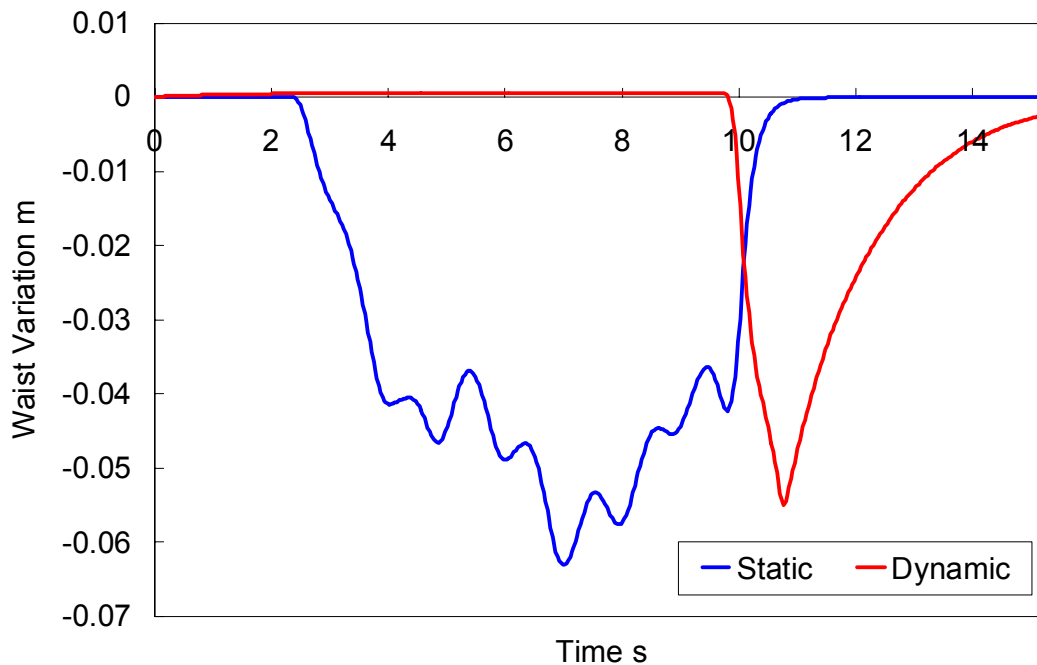


Figure B.87 Waist trajectory variation, pulling the robot forward and suddenly quitting hold of the wire.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

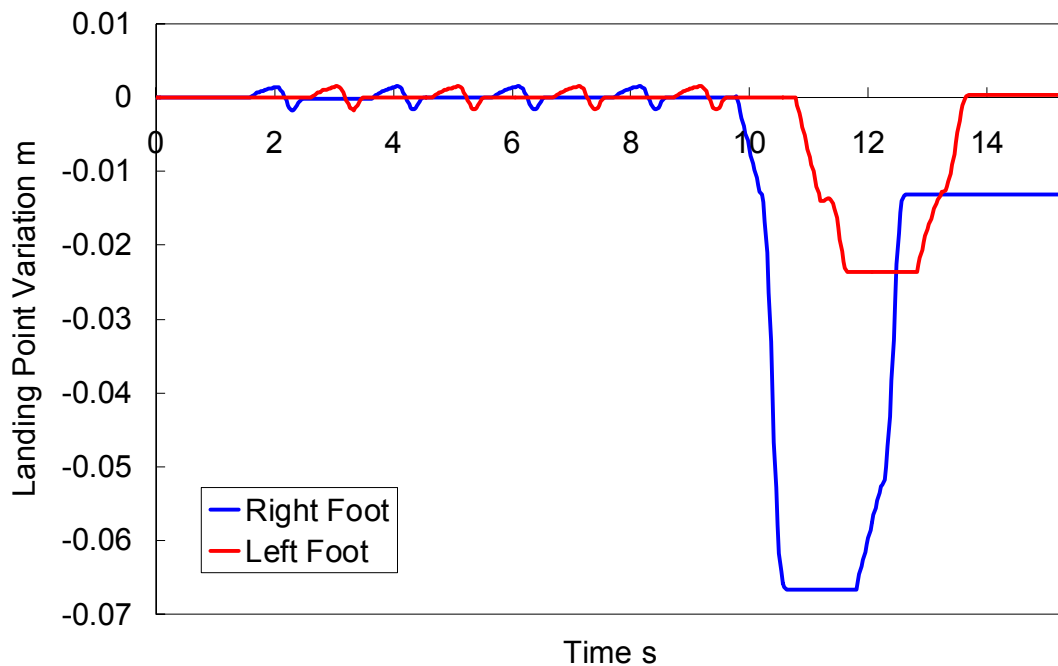


Figure B.88 Foot trajectory variation, pulling the robot forward and suddenly quitting hold of the wire.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

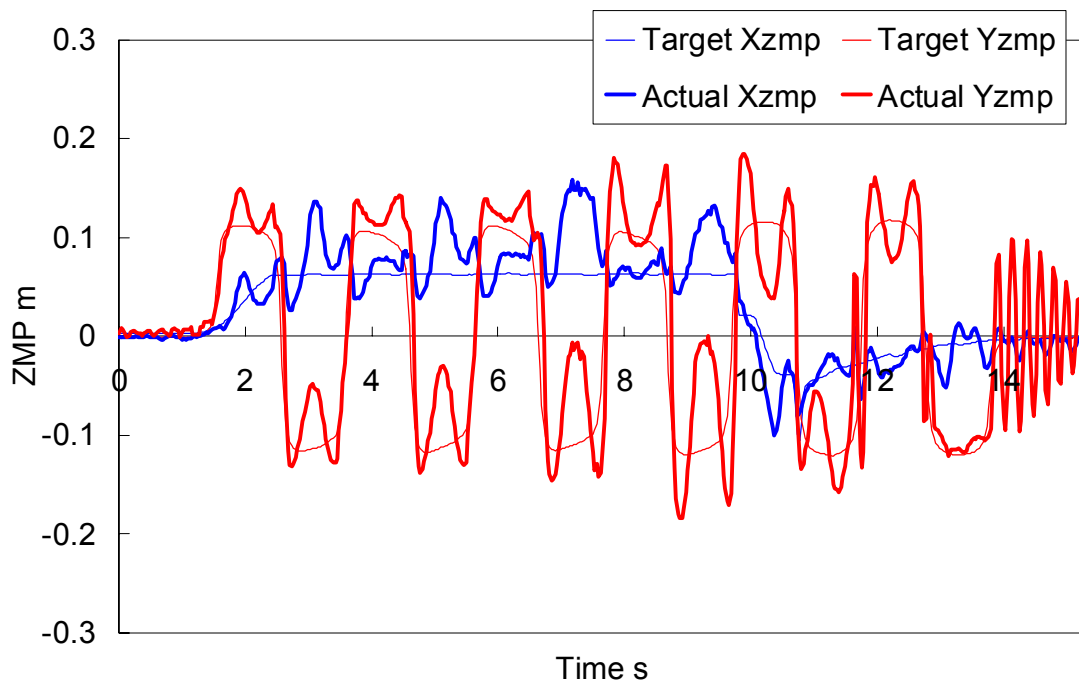


Figure B.89 ZMP trajectories, pulling the robot forward and suddenly quitting hold of the wire.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)



Figure B.90 Walking experiment, carrying a human. A human bent down suddenly during walking.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

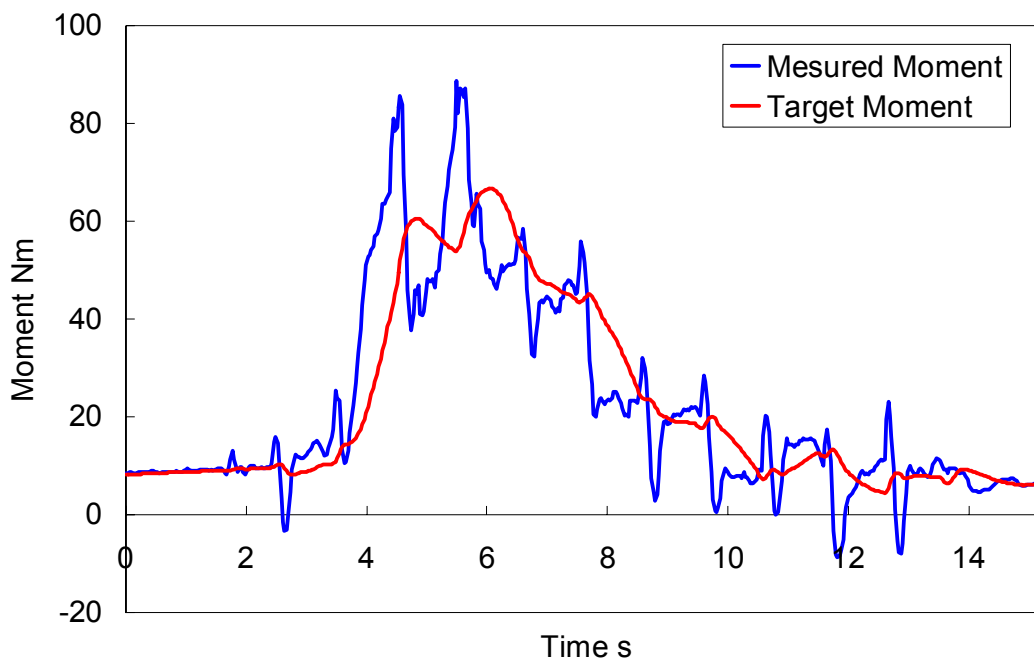


Figure B.91 Force strength of the external force and force error, carrying a human. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

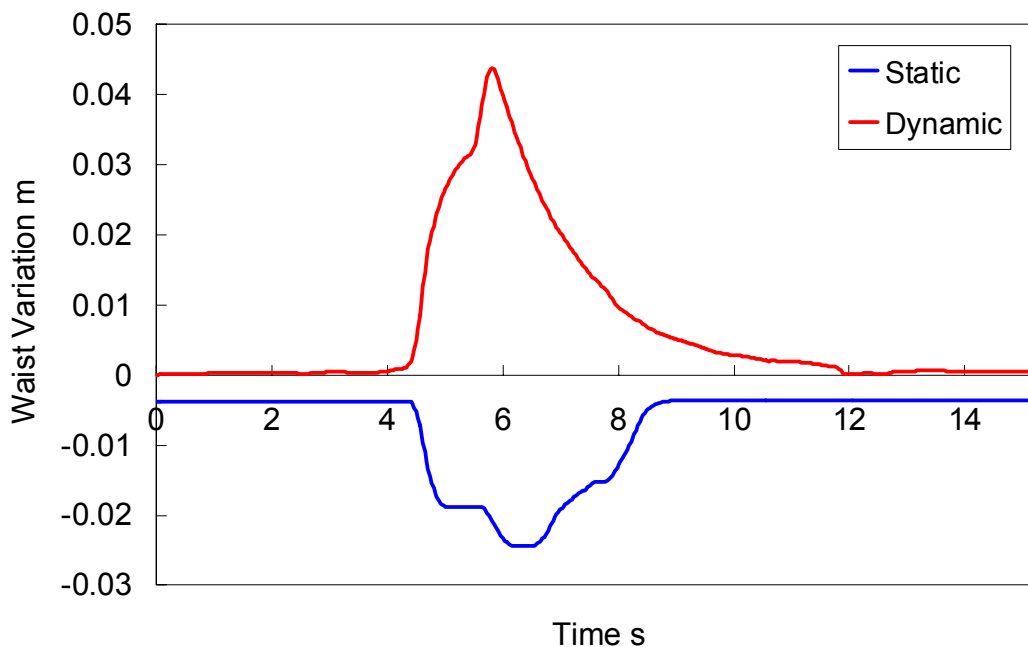


Figure B.92 Waist trajectory variation, carrying a human. (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

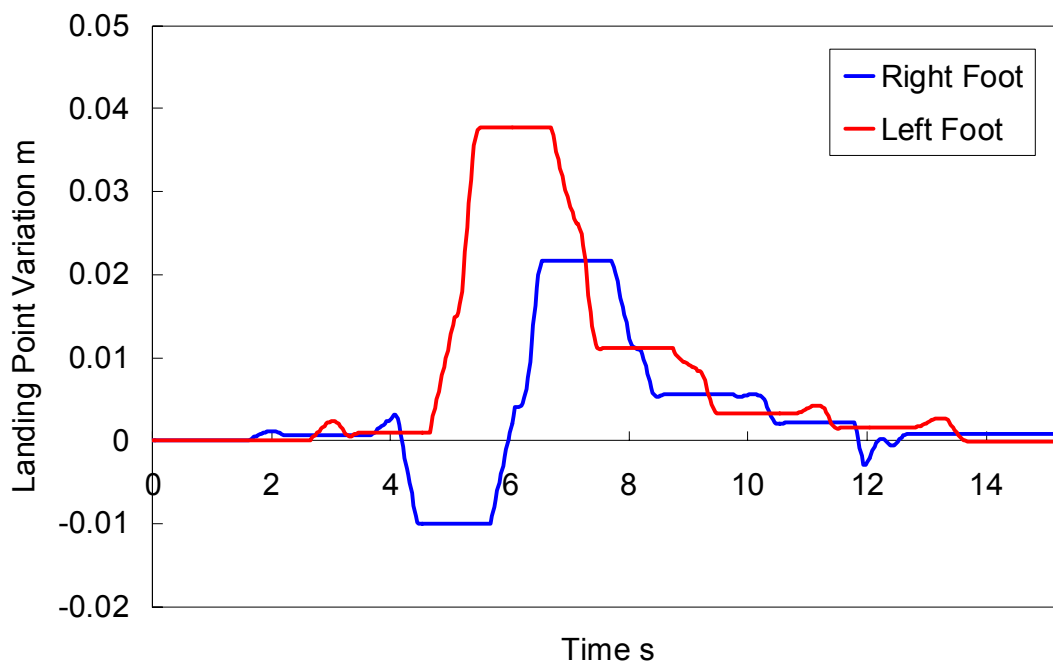


Figure B.93 Foot trajectory variation, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

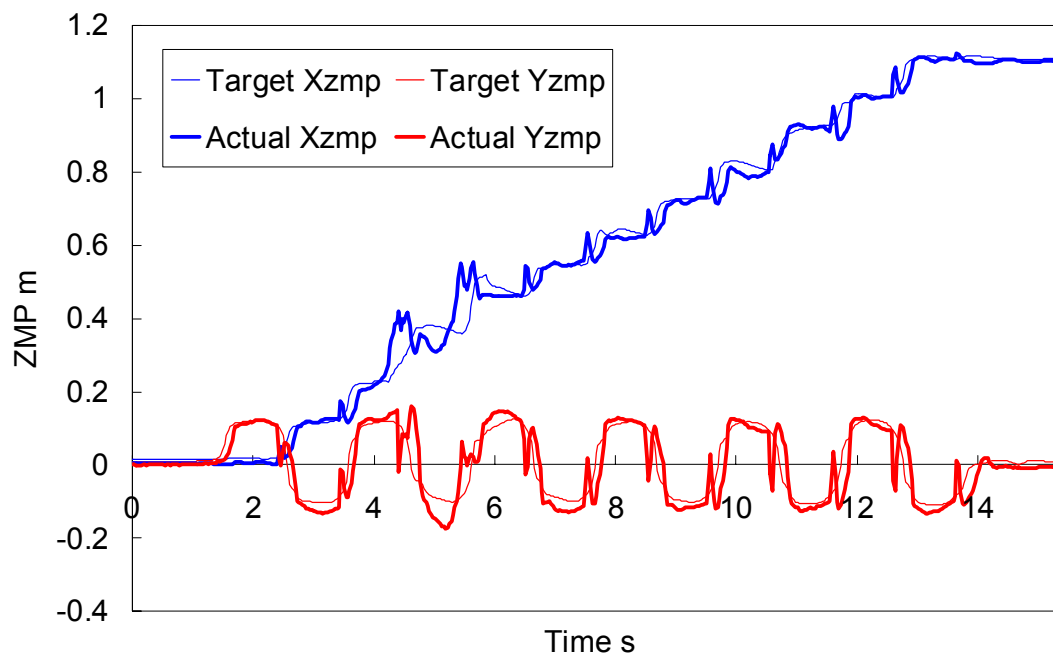


Figure B.94 ZMP trajectories, carrying a human.
 (Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

(d) まとめ

人間搭乗型 2 足歩行ロボットのための動的な外乱補償制御法と静的な外乱補償制御法を開発し、それら 2 つを統合して行った評価実験について述べた。搭乗者が発生する外乱を腰部軌道や着地位置を変更することで補償し、安定した歩行が実現できることを、実験を通して確認した。

しかし、これまでに述べてきた外乱補償制御法は、搭乗者が発生する外乱には対応できるが、脚部に加わる外乱などロボット外部の環境から加わる外乱には対応できない。そこで、外部環境から加わる外乱に対する補償制御法についても検討を行ったので、次節に詳述する。

B.3 外部環境から加わる外乱に対する補償制御法

本節では、ロボットの外部環境から加わる未知の外力に対する回避運動生成法について述べる。ロボット外部環境から加わる外乱としては、人や障害物との衝突や人に押されたりすることなどが挙げられる。例えば、障害物に衝突した場合は、その障害物から離れることによって外力をなくすことができる。人が押した場合も同じく、押された方向に逃げることで外力の低減が図れる。また、さらに離れることによって外力をなくすことができる。このように外部環境から加わる未知の外力に関しては、外力の発生源から逃げることによって低減が見込まれるため、回避運動をリアルタイムで生成することが必要になると考えられる。以下、外部環境からの外力に対する回避運動生成法について順に説明する。

B.3.1 ZMP 偏差に応じた回避運動生成法

搭乗者が発生する外乱については搭乗席下部に搭載された 6 軸力覚センサで検出をしていたが、ロボットの外部環境から加わる外乱の検出には、足部の 6 軸力覚センサを使用することとする。そして、その値に応じて着地位置を変更するものである。本手法は以下の 3 つのポイントからなる：

- 外乱の検知
- 着地位置の変更
- 設定 ZMP 軌道の変更

以下にこれらについて述べる。

(a) ZMP 偏差に応じた回避運動生成法の詳細

外乱の検知

ロボット外部環境からの外乱の検知には足部 6 軸力覚センサ (図 B.2) のデータから算出される実測 ZMP を用いることとした。

図 B.95 のような外力をロボット腰部に加えた場合、実測 ZMP と設定 ZMP の差の ZMP 偏差は図 B.96 のようになり、ある程度の相関性を持っていることがわかる。したがって、ZMP 偏差が常に生じていた場合、ロボットには ZMP 偏差が生じている方向に外力が加わっているものと判断できる。そこで、この ZMP 偏差の大きさに応じて、足先軌道を変更することで外部環境から加わる外力を低減することが可能になると考えた。

着地位置の変更

着地位置を変更するために足先軌道変更量を算出しなければならない。それには、現在の立脚期の一步前の単立脚期に生じた ZMP 偏差の平均値をとり、それに定数をかけたものに応じて足先軌道を変更するものとした (図 B.96)。

$$x_{ave_eZMP,k-1} = \frac{\sum x_{eZMP,k-1}}{n_{k-1}} \quad (B.38)$$

$$x_{modif,k} = Dx_{ave_eZMP,k-1} \quad (B.39)$$

ここで、 n は単立脚期の総数、 k は現在の歩数、 D は定数である。

なお、足先軌道の設定においては、通常のパターン生成と同様、遊脚のはじめと終わり、速度、加速度がゼロになるように、5 次関数補間を用いる。

設定 ZMP 軌道の変更

着地位置変更に伴い、設定 ZMP 軌道の変更も行わなければならない。単立脚期は変更を行わず、両立脚期に足先を変更した分だけ設定 ZMP を移動させる。なお、滑らかに軌道をつなげるために、5 次関数補間を用いた。

B.3.2 動的な外乱補償制御法を応用した回避運動生成法

B.3.1 節にて述べた回避運動生成法は、足部 6 軸力覚センサで外乱を検出し、外乱の発生源から離れることによって、外乱力がなくなるであろうという考えのもとに回避運動を生成しているだけであり、外乱力に対して補償運動を行っているわけではな

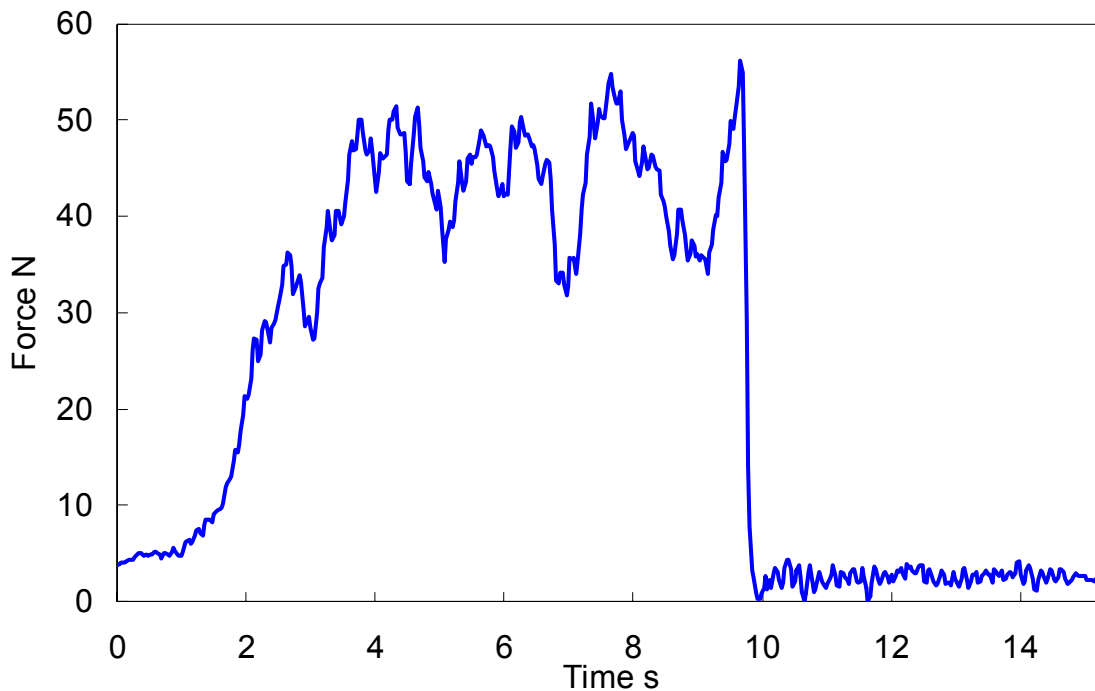


Figure B.95 External force measured by the force/torque sensor attached on the waist.

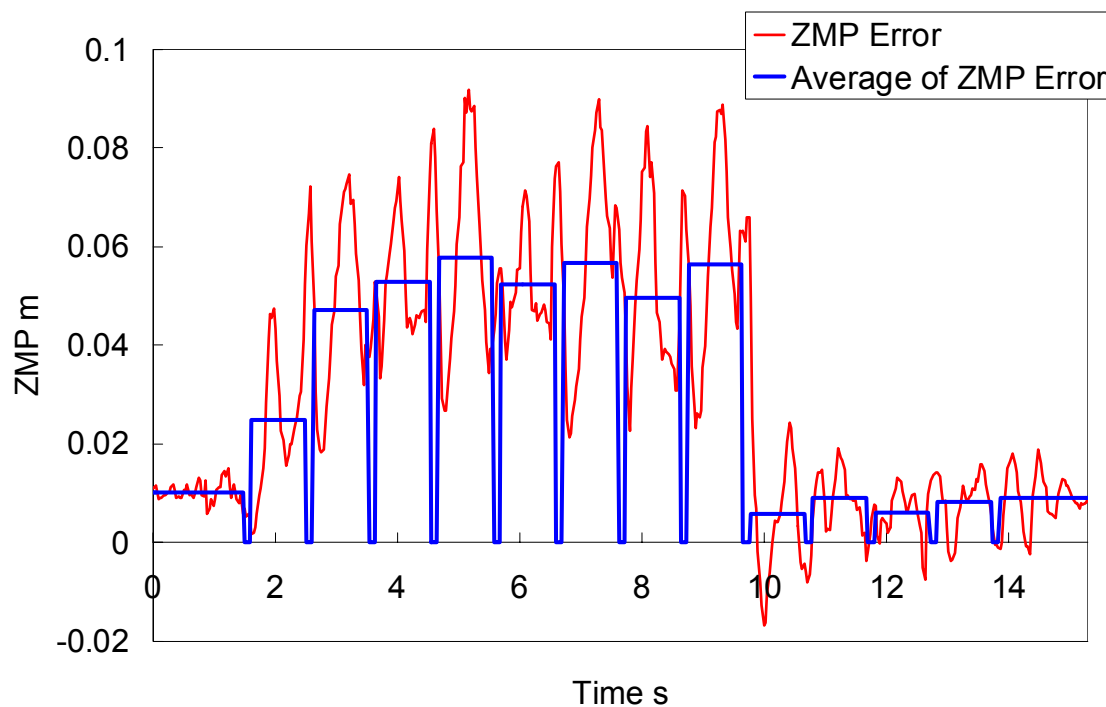


Figure B.96 ZMP error measured by the force/torque sensor attached on the feet.

い。つまり、厳密に歩行安定を保障するものでなく、いわば足底の安定領域に頼っている制御といえるであろう。したがって、もし ZMP が安定領域から外れてしまうような大きな外力が加わった場合、上述の回避運動だけでは転倒してしまう。そこで、ZMP が安定領域から外れるような大きな力が加わったときのみ、モーメント補償運動をすることにより転倒を防ぐことを考えた。なお、基本的には、動的外乱補償制御法と同様のアルゴリズムを用いているが、外力の取得方法、着地位置の変更方法、設定 ZMP の変更方法に関して一部変更点がある。本手法は以下の 5 つのポイントからなる：

- 外乱力の推定
- 腰部補償軌道の算出
- 着地位置の変更
- 設定 ZMP 軌道の変更
- 足部軌道の生成

以下にこれらについて述べる。

(a) 動的外乱補償制御法を応用した回避運動生成法の詳細

外乱力の推定

本回避運動生成法においてもロボット外部環境から加わる外乱力を検出する際には、搭乗者が発生する外乱と区別をするために、足部 6 軸力覚センサから得られるデータを用いて外力を推定する。特に、ZMP 偏差からロボットに加わっている外力を推定することとした。

ZMP 偏差を x_{eZMP} とすると、以下の式を用いることで腰部 6 軸力覚センサの位置にどれだけの力に相当する力が加わっているかを算出することができる。ただし、ロボットのモデルは、単質点近似モデルとする (図 B.5)。

$$F_x = \frac{m_r g}{h_s} x_{eZMP} \quad (\text{B.40})$$

ただし、 m_r はロボットの質量 (単質点モデル)、 h_s は腰部 6 軸力覚センサの高さ、 g は重力加速度である。

腰部補償軌道の算出

上記のようにして推定した外力 F_x を動的外乱補償制御の式における外力として、

代入することで腰部補償軌道を算出することができる。

$$\begin{aligned}
{}^m\ddot{x}_w &= -\ddot{x}_q + \frac{1}{B} \left\{ m_w ({}^m x_w - {}^m x_{vzmp}) {}^m g_z - \Phi_{foot_y} + \Phi_{ex_y} \right\} \\
B &= m_w ({}^m z_w - {}^m z_{vzmp}) \\
\Phi_{foot_y} &= \sum_i^{AllFoot} m_i \left\{ ({}^m z_i - {}^m z_{vzmp}) ({}^m \ddot{x}_i + \ddot{x}_q) - ({}^m x_i - {}^m x_{vzmp}) {}^m g_z \right\} \\
\Phi_{ex_y} &= ({}^m z_s - {}^m z_{vzmp}) {}^m F_x - ({}^m x_s - {}^m x_{vzmp}) {}^m F_z + {}^m M_y
\end{aligned} \tag{B.41}$$

なお、動的外乱補償制御では、腰部修正量の計算式(B.41)に ZMP 偏差にゲインをかけたものを右辺に加えていたが、本制御においては、ZMP 偏差をロボット腰部に加わる外力に換算しているため、動的外乱補償制御で行っていたような実測 ZMP フィードバックの項は追加しないこととする。

着地位置の変更

動的外乱補償制御における、着地位置の変更方法は、単質点近似モデル (図 B.5) を用いて設定 ZMP 周りのモーメントのつり合い式を導出し、 t 秒後の時刻における腰部偏差の位置・速度偏差、および ZMP の変更量の関係を求め、3 歩目で腰部の位置・速度偏差が 0 となるように境界値問題を解き、次の 1 歩の着地位置変更量を次式より求めていた。

$$\begin{aligned}
{}^m \Delta x_w &= \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2A} e^{At} + \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2A} e^{-At} + R_{p0} \\
{}^m \Delta \dot{x}_w &= \frac{A(X_0 - R_{p0}) + \dot{X}_0}{2} e^{At} - \frac{A(X_0 - R_{p0}) - \dot{X}_0}{2} e^{-At}
\end{aligned} \tag{B.42}$$

この手法は、常に 3 歩目で元の軌道に戻ろうとするものであるため、外力の発生源から遠ざかることができない。

そこで、本回避運動生成法においては、2 歩目で腰部の速度の偏差が 0 になるという条件を与えることにし、こうすることで 2 歩目まで境界値問題を解くことができる。ここで求めた次の 1 歩の着地位置変更量を求めることによって、ある偏差をもったところで、外力が加わる前と同様の歩行を継続できるのではないかと考えた。

設定 ZMP 軌道の変更

動的な外乱補償制御のときと同様、腰部補償軌道の発散を遅延または収束させるため、設定 ZMP 軌道を変更する。設定 ZMP の変更量は、腰部軌道の設定パターンからの偏差に比例ゲイン K_p 、微分ゲイン K_v を乗じて求める。変更された設定 ZMP 周りに補償軌道を生成することで、腰部補償軌道の収束性が改善できる。しかし、設定 ZMP ${}^m x_{pzmp}$ は支持多角形の中心付近に設定されており、設定 ZMP 軌道を大きく変更すると歩行が不安定になる可能性がある。そこで、変更後の設定 ZMP が安定領域を出てしまうときは、設定 ZMP を安定領域の端近くに変更する。本研究では、安定性の点から x 方向に 40 mm、y 方向に 30 mm と ZMP の変更量に制限を設けた。

また、外乱に応じて回避運動を生成すると腰軌道の位置にオフセット量が発生するため、動的な外乱補償制御と同様の式を用いることはできない。したがって、本制御においては、式(B.43)のように腰部のオフセット量 ${}^m x_{offset}$ を考慮する。

$${}^m \Delta x_{ZMP} = K_p ({}^m \Delta x_w - {}^m x_{offset}) + K_v {}^m \Delta \dot{x}_w \quad (\text{B.43})$$

$${}^m x_{vZMP} = {}^m x_{pZMP} + {}^m \Delta x_{ZMP} \left(\left| {}^m \Delta x_{ZMP} \right| \leq Limit \right) \quad (\text{B.44})$$

なお、腰部のオフセット量 ${}^m x_{offset}$ は外力が加わらなくなった瞬間に式(B.42)を用いて境界値問題を解いたときの、2 歩目の腰の位置とする。

足部軌道の生成

着地位置変更量の算出を受けて最後に足部軌道の生成をおこなう。本制御では、Z 軸の軌道は設定パターンを用いており、X 軸、Y 軸に関してのみ、毎制御周期に 5 次関数補間することで足部軌道を算出し、ロボットに出力している。

(b) 実験方法

以上述べてきた外部環境から加わる外乱に対する回避運動生成法の有効性を確認するために、実際にロボットの外側から外力を与えた場合に、外力の発生源から離れ、かつ安定して歩行を継続できるかを確認する。まず、人間がロボットの骨盤部を押すことにより外力を与える。その際、はじめに大きなインパルス状の外力を与え、その

後力を加え続けることにより、ZMP が安定領域から外れそうな外力とそうでないものを加えることとした。次に、実際に人間が搭乗し、歩行実験を行った。以上まとめると、外乱回避運動生成法の評価のために、以下の2つの実験を行う。

- (i) おもりなし，その場足踏み
- (ii) 人間搭乗歩行，前進歩行

(c) 評価実験

- (i) おもりなし，その場足踏み

ZMP 偏差に応じた回避運動生成法と動的な外乱補償制御法を応用した回避運動生成法を実装し、歩行実験を行った。このとき、ロボットは歩行周期 1.0 s/step でその場足踏みをし、3 歩目にロボットを押すことにより瞬間的な外力を加え、その後定期的に力をかけ続けた。

図 B.97 に歩行実験の連続写真を示す。図 B.98 に ZMP 偏差を、図 B.99 に ZMP 偏差から求めた腰部 6 軸力覚センサに相当する外力を示す。回避運動によって変更した足先変更量を図 B.100 に示し、動的な外乱補償制御で変更した足先変更量を図 B.101 に示す。また、腰部軌道を図 B.102 に示し、目標 ZMP と実測 ZMP を図 B.103 に示す。

- (ii) 人間搭乗歩行，前進歩行

実際に人間がロボットに乗った状態で、ZMP 偏差に応じた回避運動生成法を用い歩行実験を行った。このとき、ロボットは歩幅 100 mm/step，歩行周期 1.0 s/step で前進歩行し、ロボットの前方にいる人がロボットの腰部を押すことにより、後ろ方向に外力を加える。

図 B.104 に歩行実験時の連続写真を示す。図 B.105 に ZMP 偏差を示す。回避運動によって変更した足先変更量を図 B.106 に示す。また、目標 ZMP と実測 ZMP を図 B.107 に示す。

(d) 実験結果の考察

- (i) おもりなし，その場足踏み

瞬間的な外力が加わったとき、ZMP 偏差より推定した外力は約 90 N であり、動的な外乱補償制御でこの成分を補償することにより転倒することなく歩行を継続することができた。また、長期的に加わる外力に対しても、1 歩あたり最大 105 mm，12 歩の足踏みの間に合計 130 mm ほど外力の発生源から遠ざかるような軌道を生成しつつ、安定した歩行の継続を行うことができた。

(ii) 人間搭乗歩行, 前進歩行

外部から加わる外力に対し, 足先を最大 170 mm ほど変更することにより, 外力の発生源にこれ以上近づかないようにし, 安定した歩行を実現することができた.

(e) まとめ

外部環境からの外乱に対応する方法として, ZMP 偏差に応じた回避運動生成法や動的な外乱補償制御法を応用した回避運動生成法を考案した. 実験を通して, これらの手法がロボットの外部環境から加わる外乱に対して, 有効に働くことが確認できた.



Figure B.97 Walking experiment under external force from environments.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

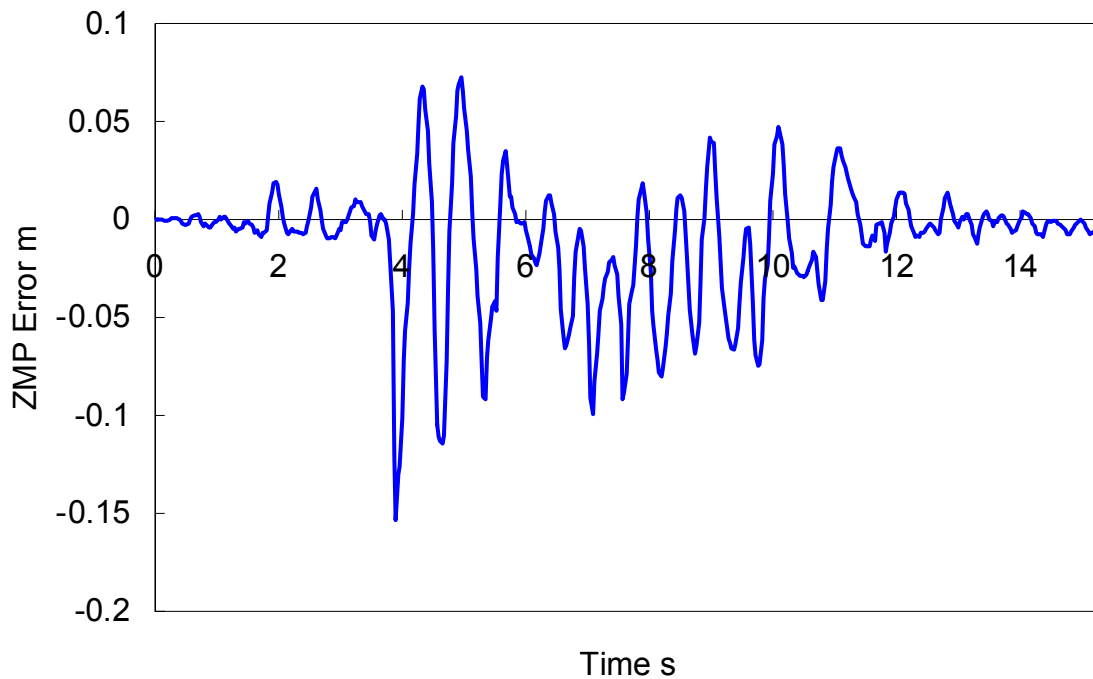


Figure B.98 ZMP error.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

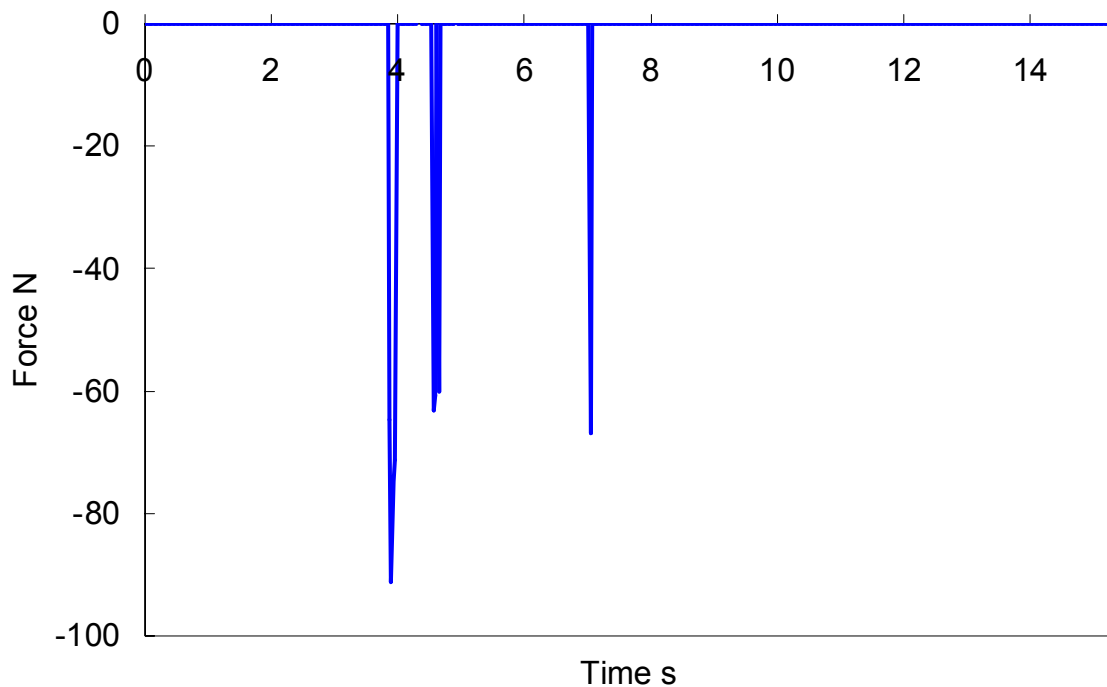


Figure B.99 External force calculated from ZMP error.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

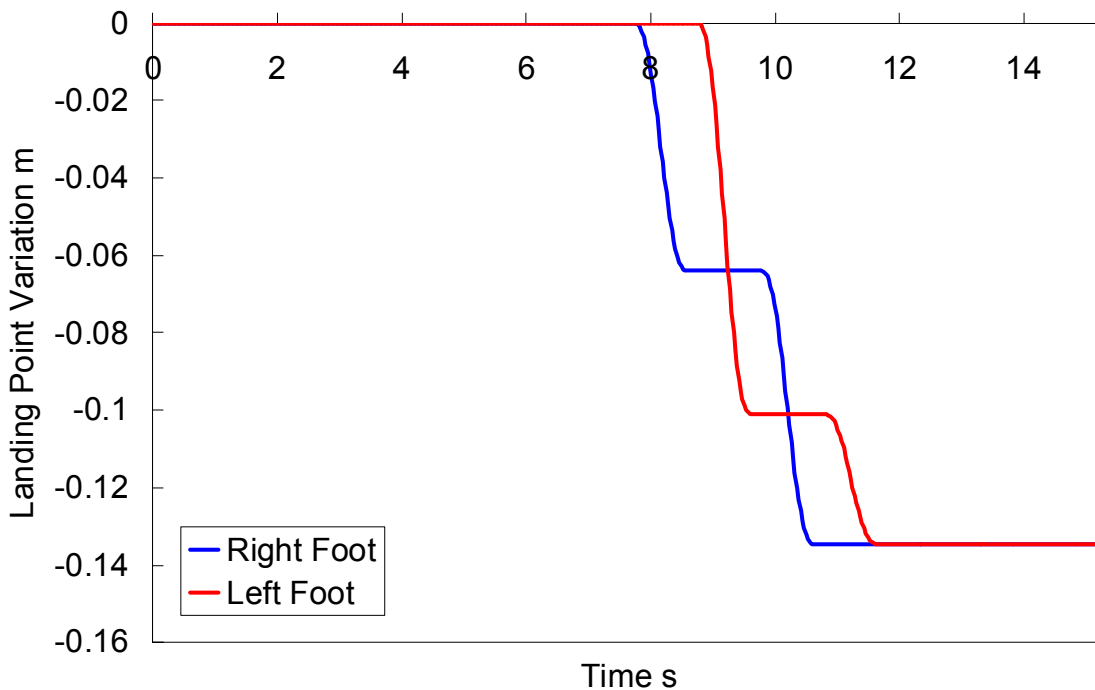


Figure B.100 Foot trajectory variation (avoidance action).
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

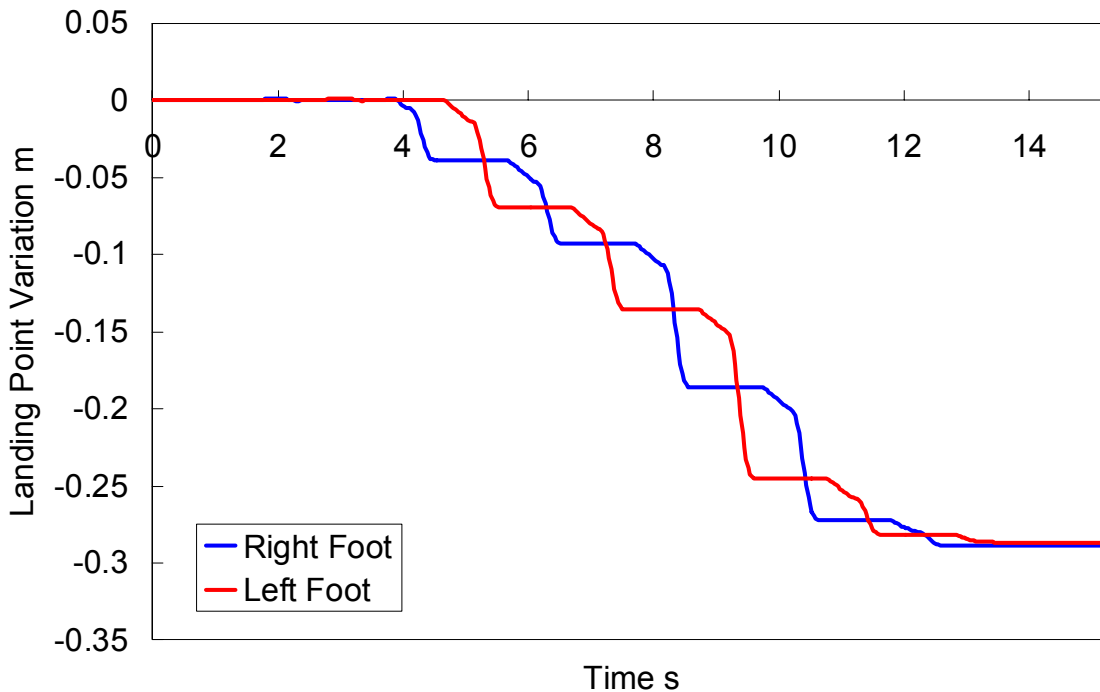


Figure B.101 Foot trajectory variation (dynamic disturbance compensation control).
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

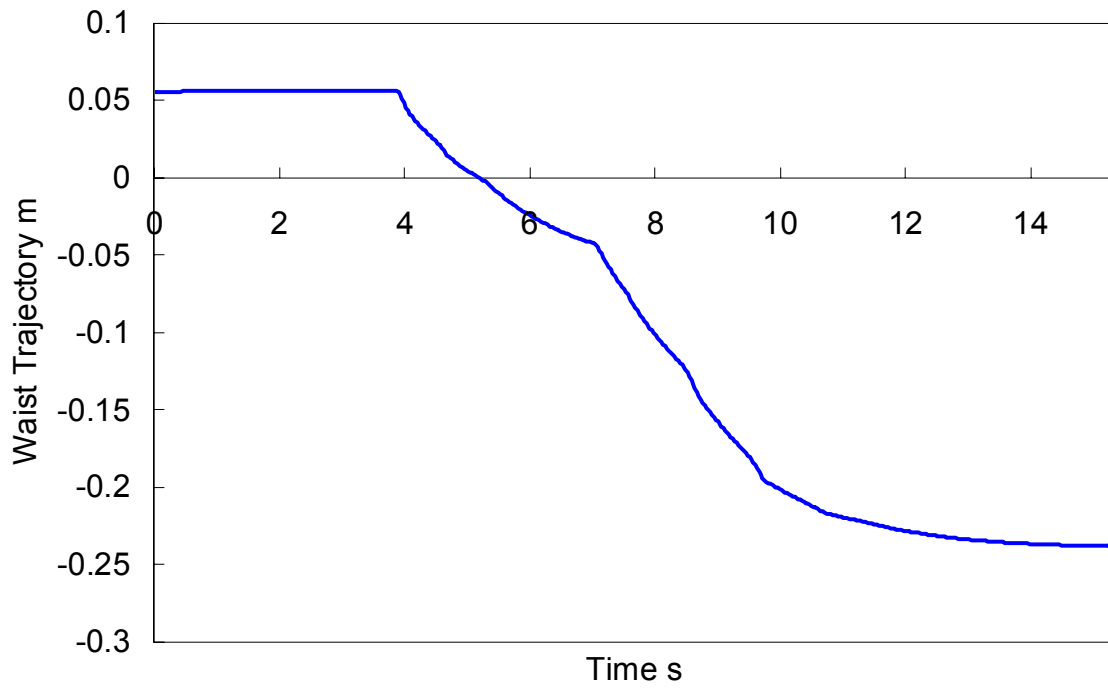


Figure B.102 Waist trajectory variation.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

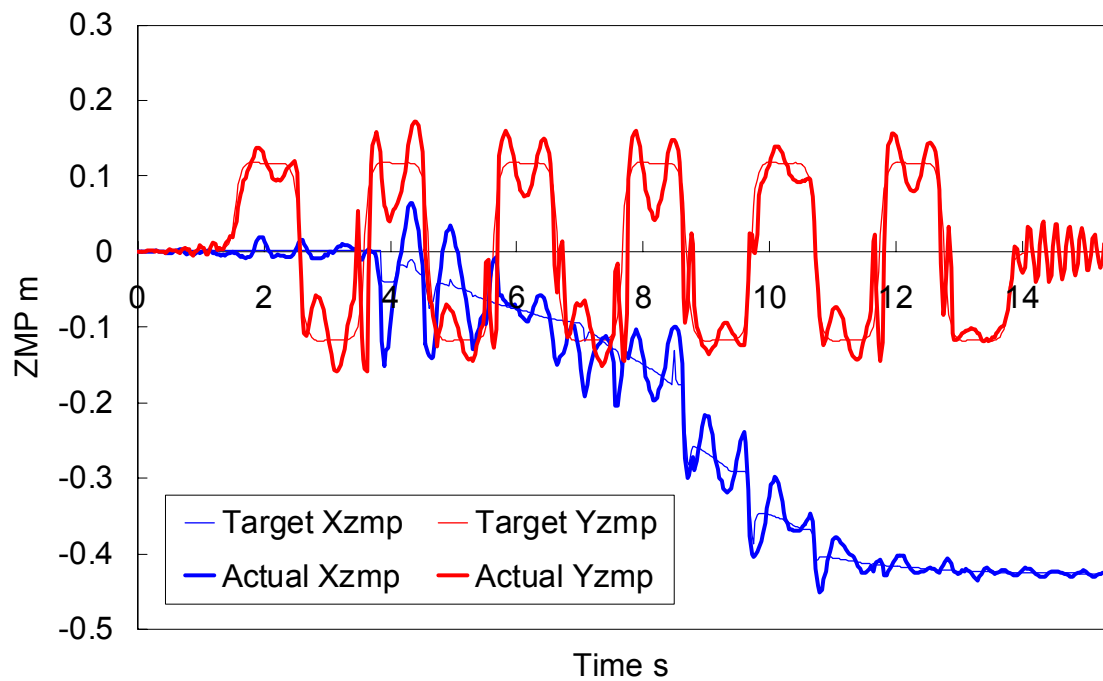


Figure B.103 ZMP trajectories.
(Stamping, walking cycle: 1.0 s/step)

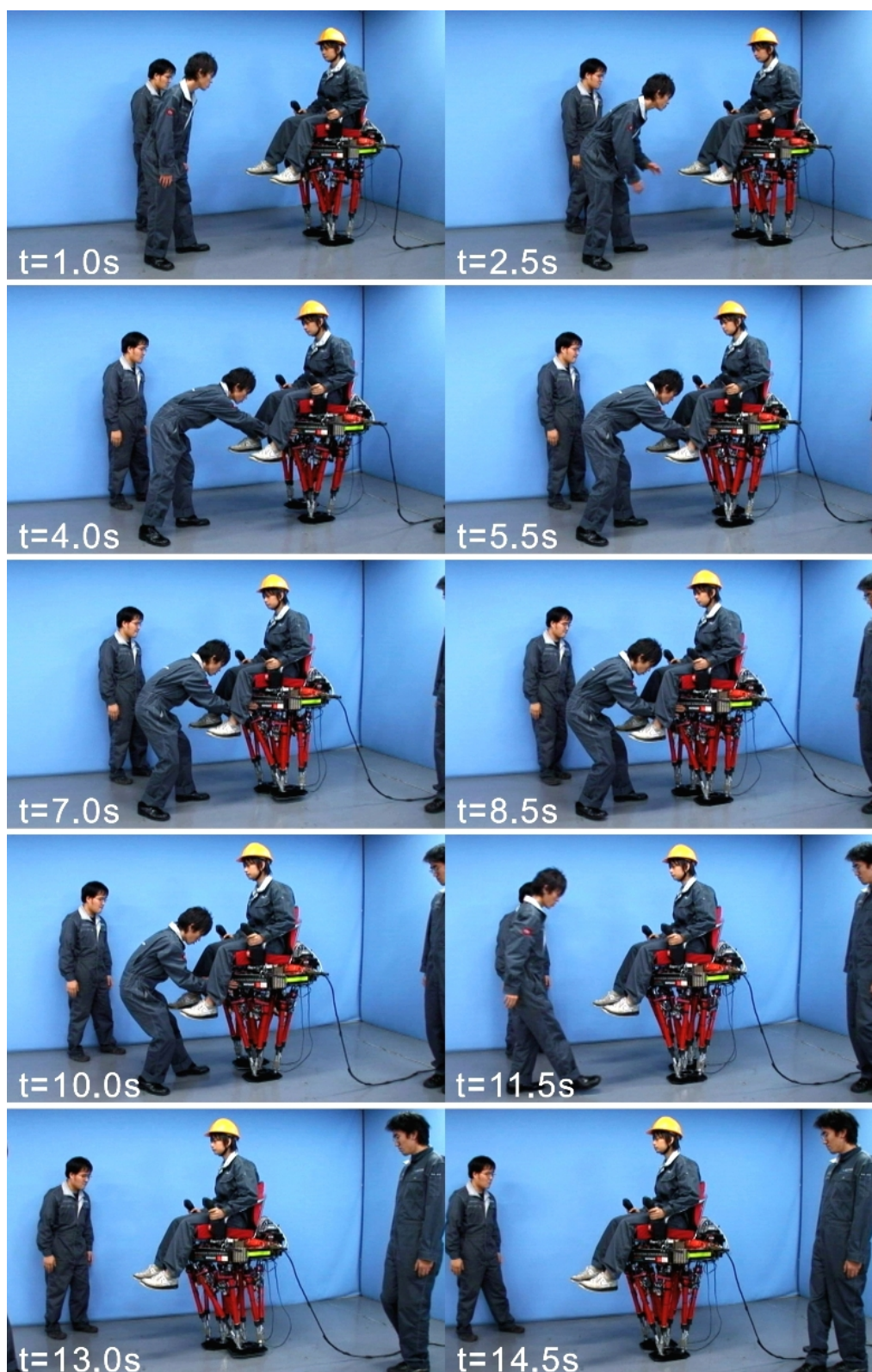


Figure B.104 Walking experiment under external force from environments.
(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

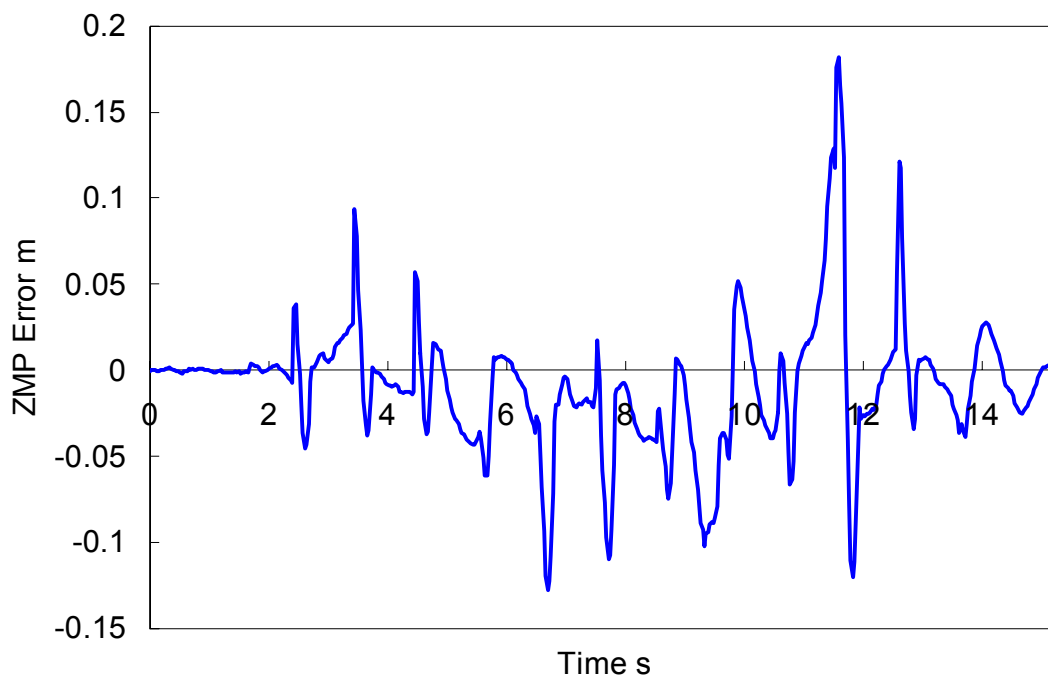


Figure B.105 ZMP error.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

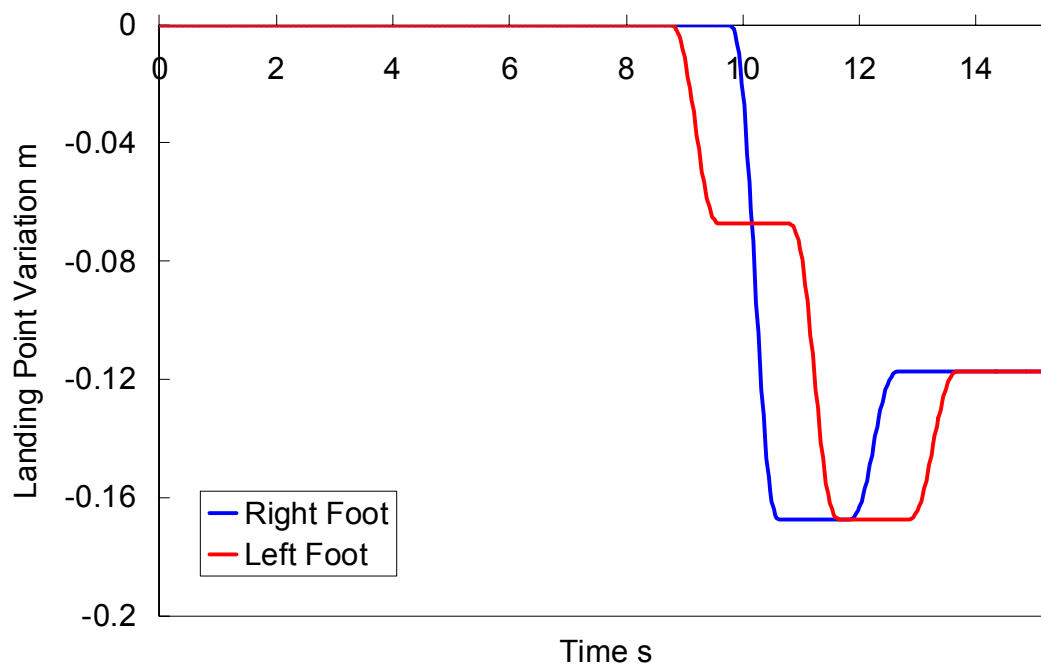


Figure B.106 Foot trajectory variation (dynamic disturbance compensation control).

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

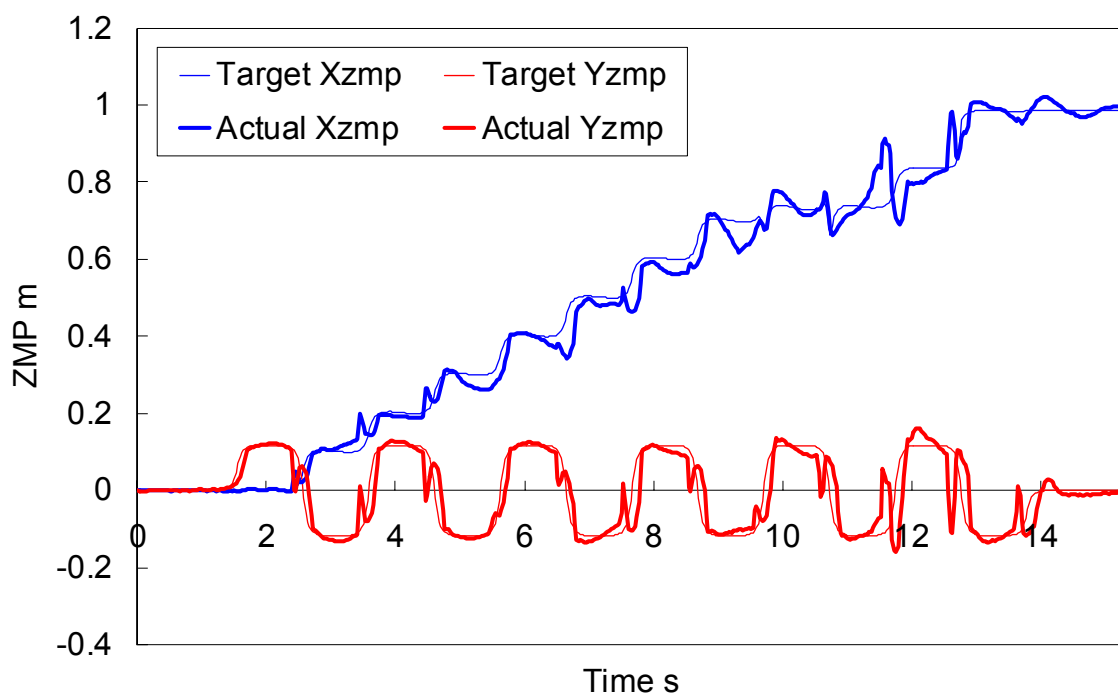


Figure B.107 ZMP trajectories.

(Walking forward, walking cycle: 1.0 s/step, step length: 100 mm/step, load: a 60 kg human)

付録 C 展示会でのロボット搭乗体験会

C.1 機械産業記念館 (TEPIA) でのロボット搭乗体験会

C.2 Wired NextFest でのロボット搭乗体験会

C.1 機械産業記念館 (TEPIA) でのロボット搭乗体験会

2007年3月3日に機械産業記念館 (TEPIA) において、「ロボット&サイエンス@TEPIA～遊んで、学んじゃおう！～」展が開かれた。これは「TEPIA 第19回展示 ちえものづくり展～社会を豊かにする最先端技術～」の併催イベントとして開催されたものである。そこに筆者らが開発している人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIV を展示し、計4回のデモンストレーションを行った。毎回のデモンストレーション後に、一般の方の搭乗体験会も実施し、計15名の方が試乗した (図 C.1, 図 C.2)。この際、安全のために搭乗者は体重の軽い子供だけに限定して行った。

C.2 Wired NextFest でのロボット搭乗体験会

米ロサンゼルス市で2007年9月13日～16日、ハイテク情報誌 WIRED の主催する技術見本市 “NextFest” が開催された。この行事は小中学校、高校の生徒や先生を中心とした一般人に世界各国で開発が進む先端技術を紹介するのが目的で、2007年は4回目の開催となる。こちらにも人間搭乗型2足歩行ロボット WL-16RIV を展示し、展示期間中に搭乗体験会を1日に5回実施し、4日間で計20回のデモンストレーションを行った。搭乗会に関しては総勢171名の方が試乗した (図 C.3～図 C.20)。本研究を通して開発した歩行安定化制御により、ロボットの歩行安定性が向上していたため、NextFest では搭乗者は子供だけに限定せず、大人の方にも試乗していただいた。92歳の方が最高齢で、図 C.21 に示すように搭乗者の体重は10 kg～80 kg の多岐にわたり、平均体重は41 kg であった。4日間の展示期間中、一度もロボットは転倒することなくデモンストレーションを実施することができ、本研究を通して開発した機械ハードウェアや制御法の信頼性を確認することができた。



Figure C.1 Test-riding event at the 19th TEPIA Exhibition held in TEPIA Plaza (1/2).



Figure C.2 Test-riding event at the 19th TEPIA Exhibition held in TEPIA Plaza (2/2).



Figure C.3 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (1/18).



Figure C.4 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (2/18).

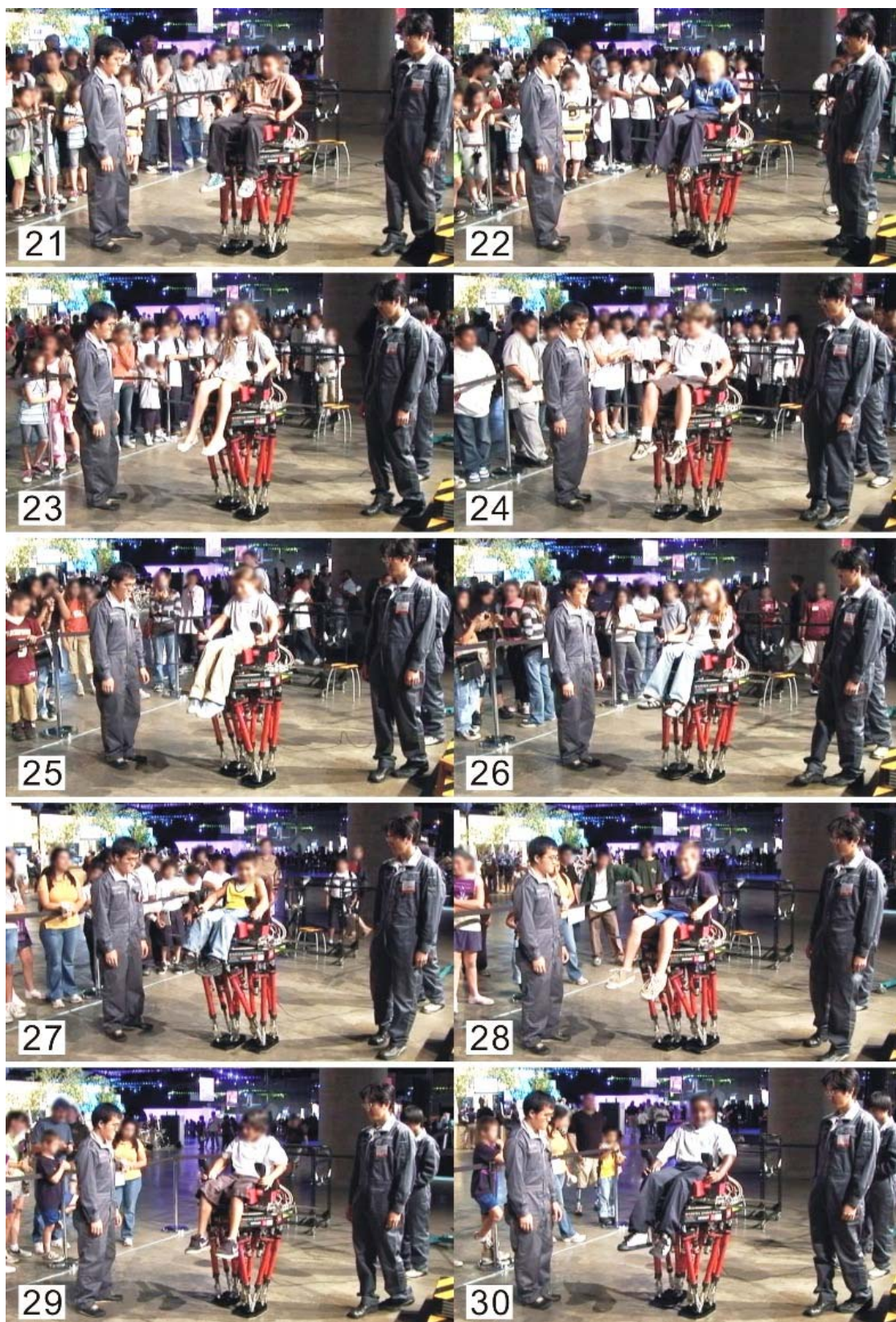


Figure C.5 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (3/18).

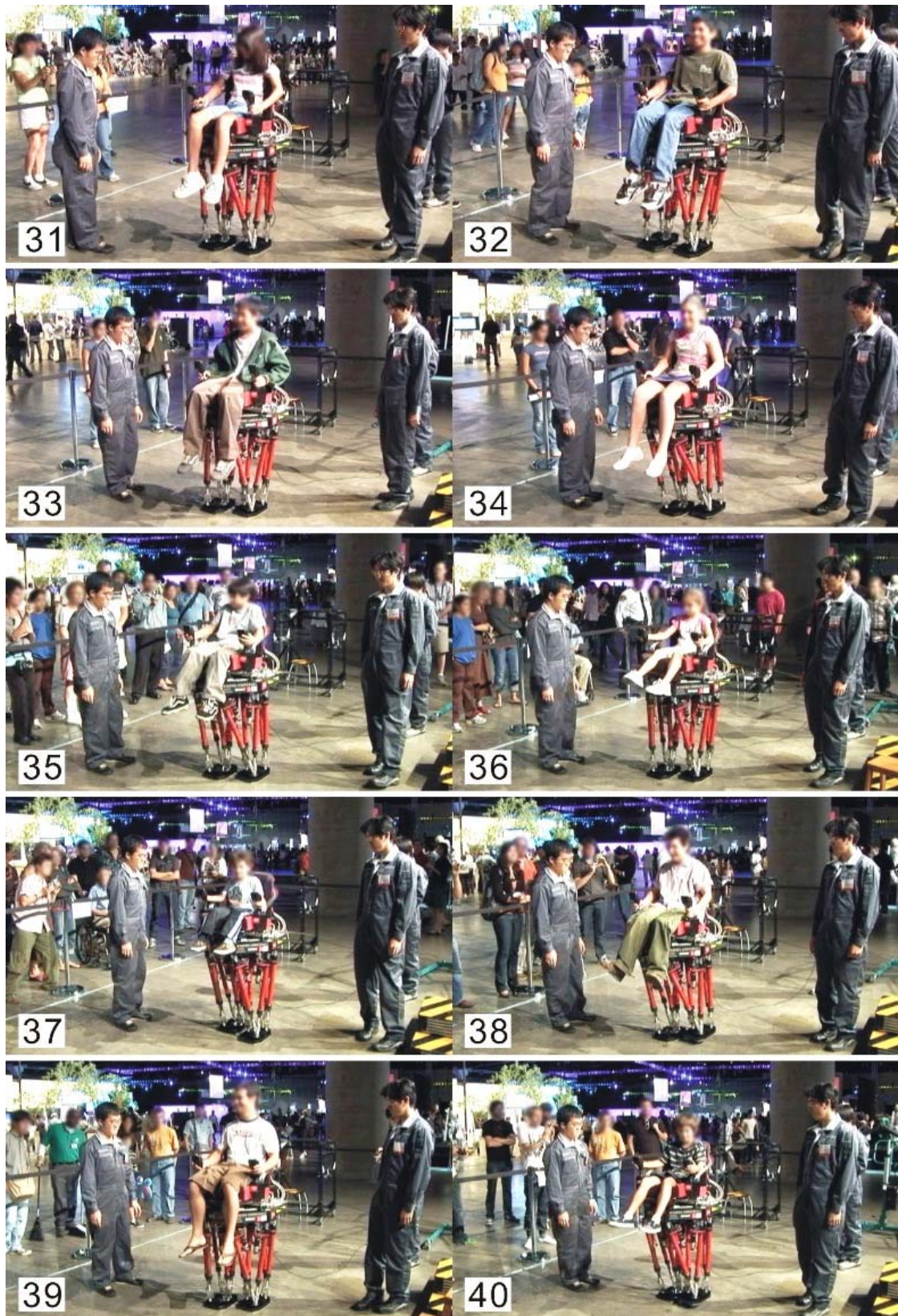


Figure C.6 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (4/18).

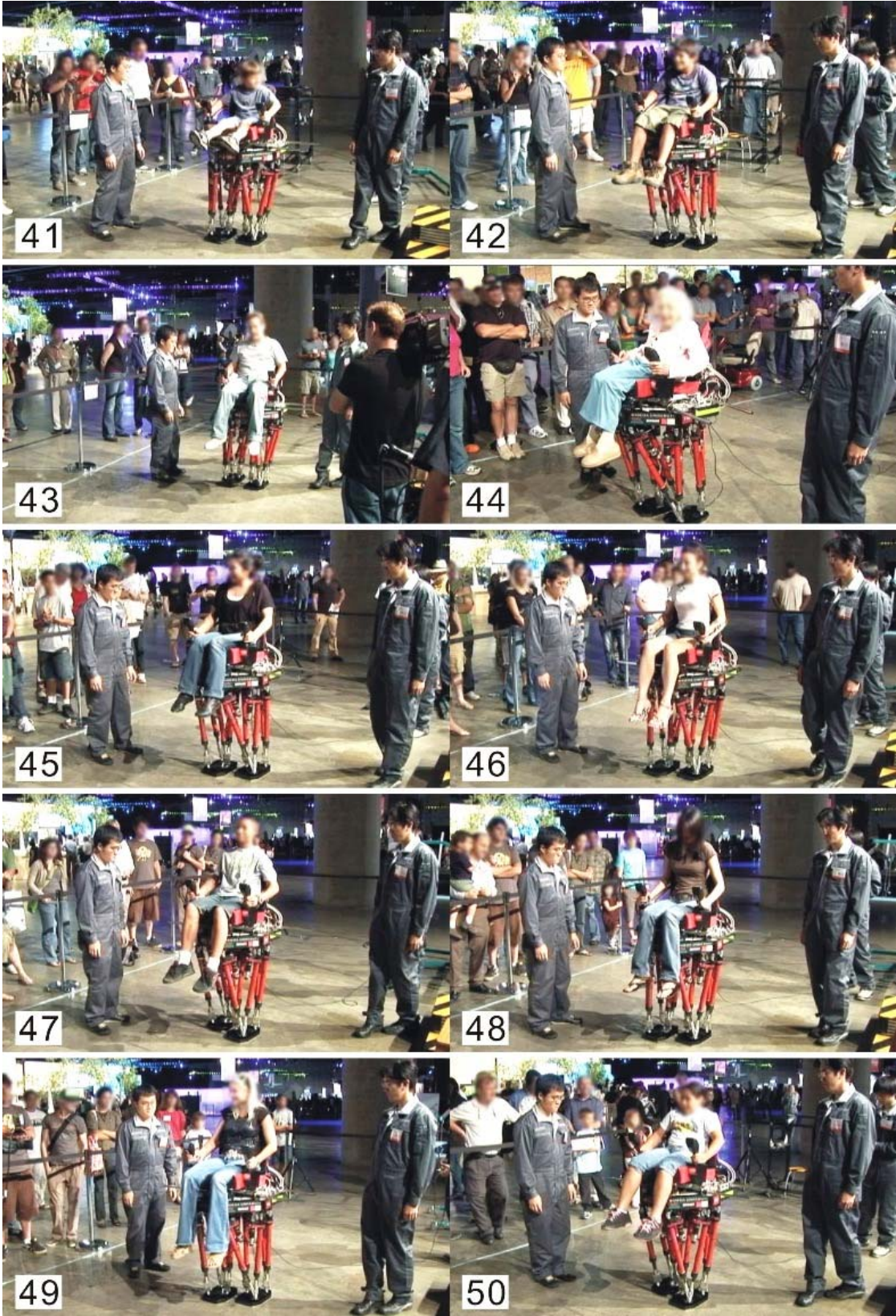


Figure C.7 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (5/18).

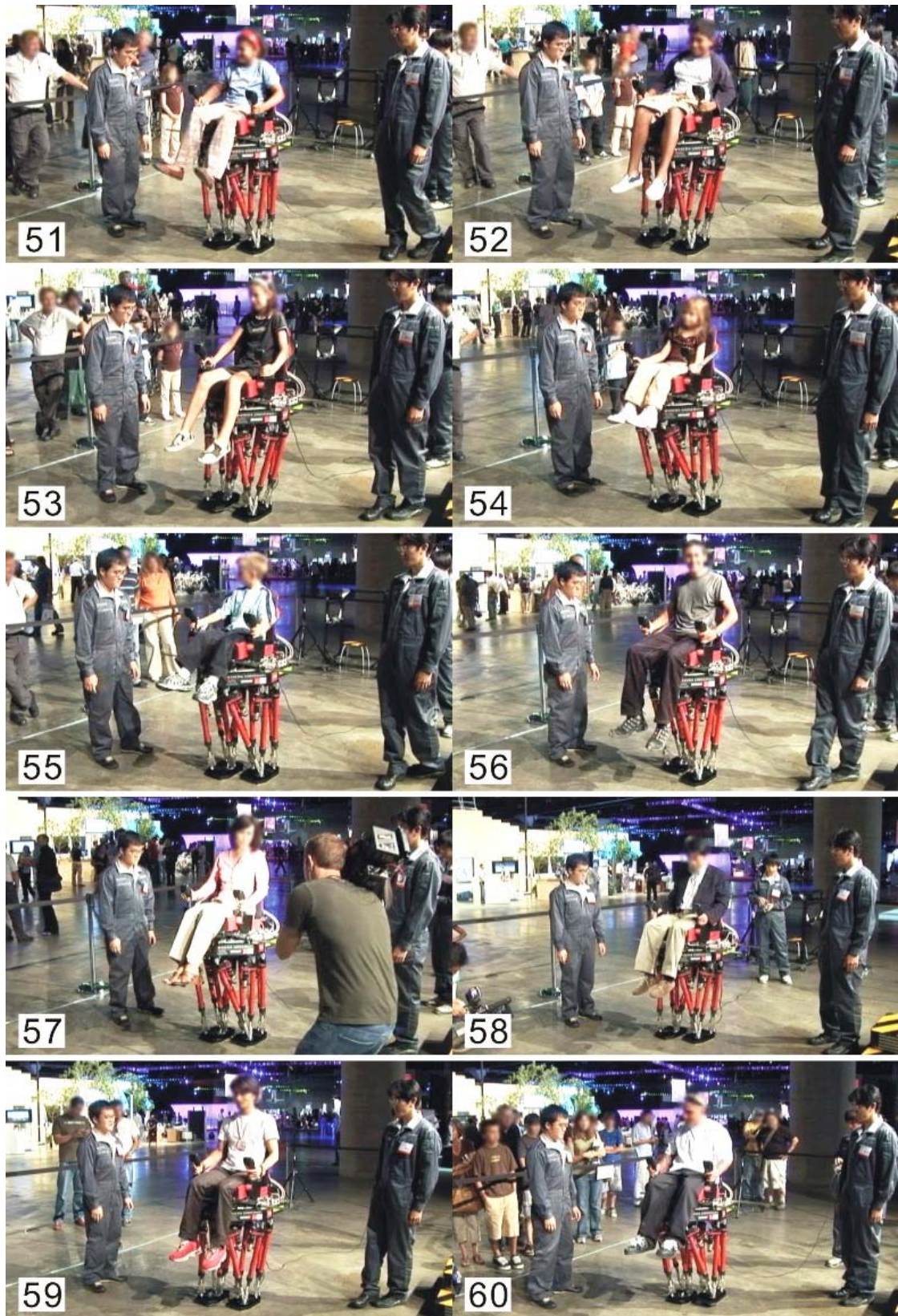


Figure C.8 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (6/18).

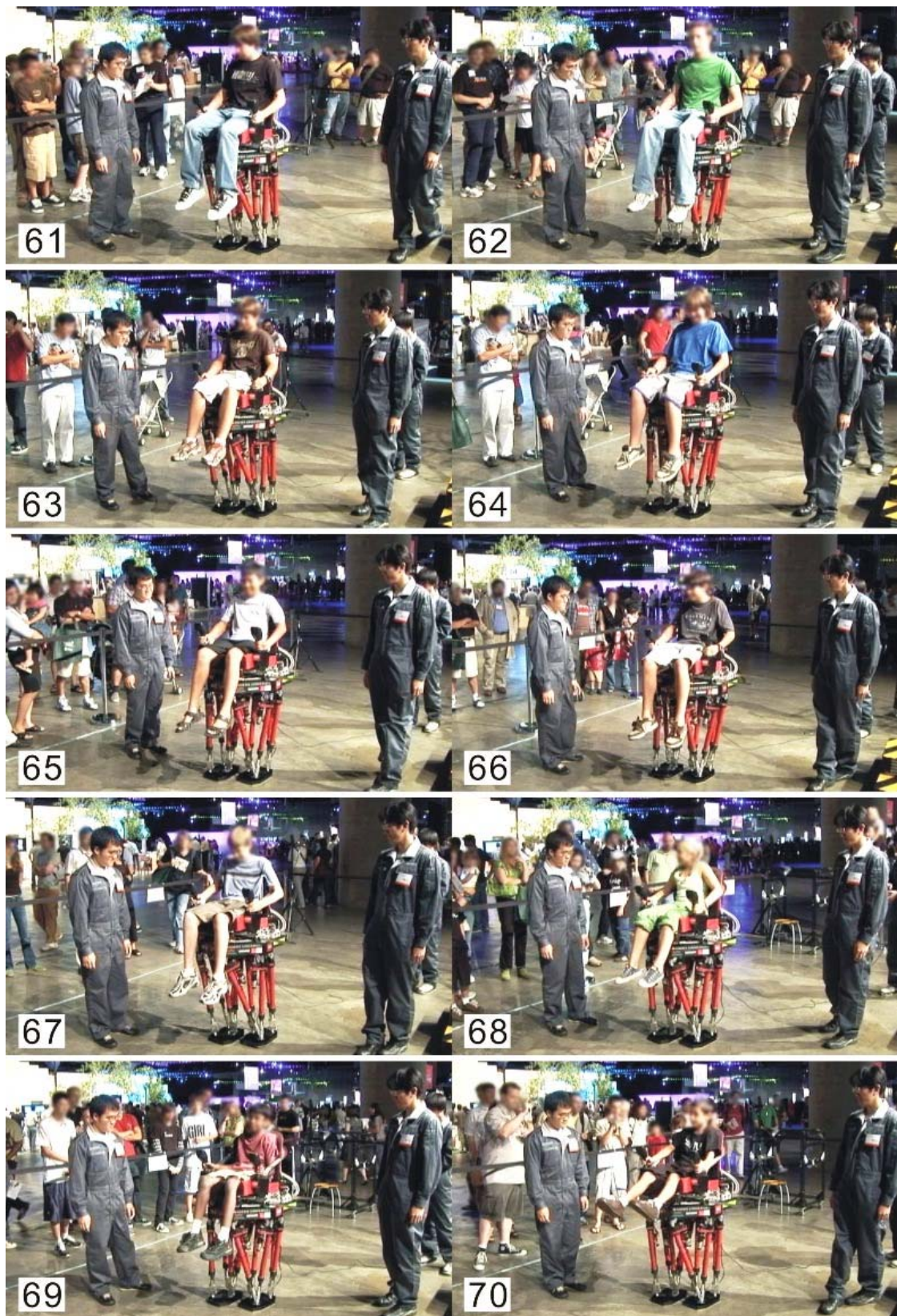


Figure C.9 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (7/18).

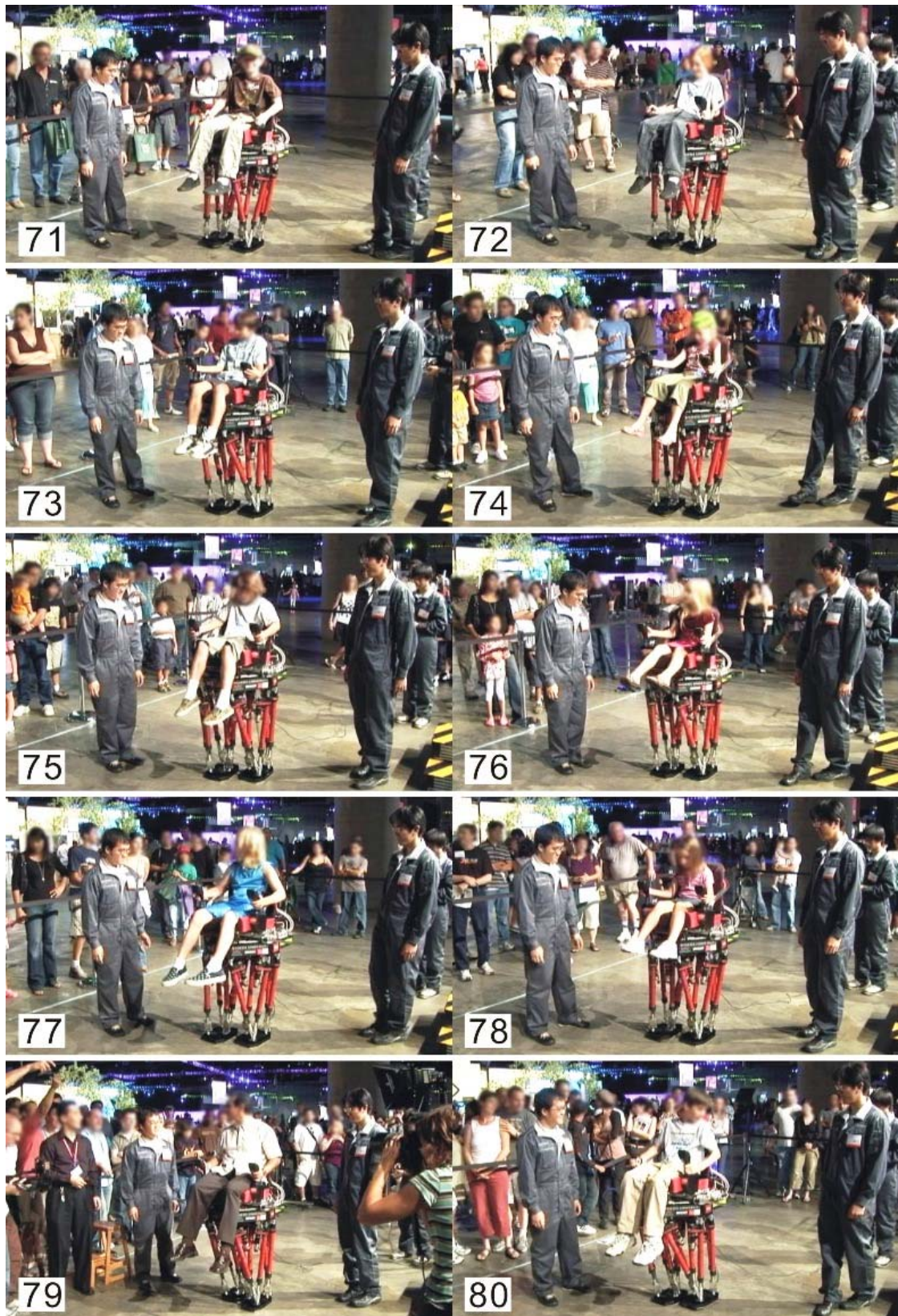


Figure C.10 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (8/18).

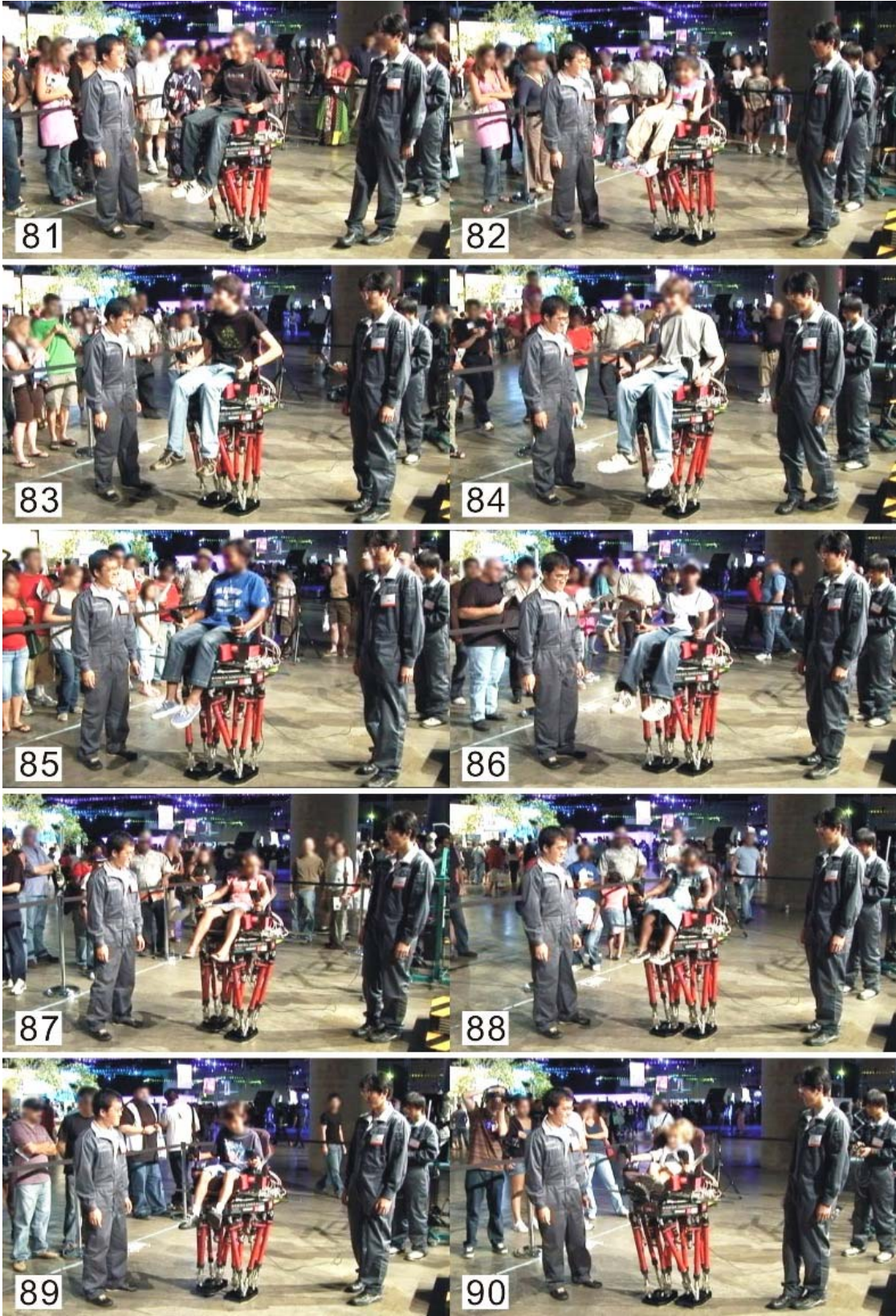


Figure C.11 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (9/18).

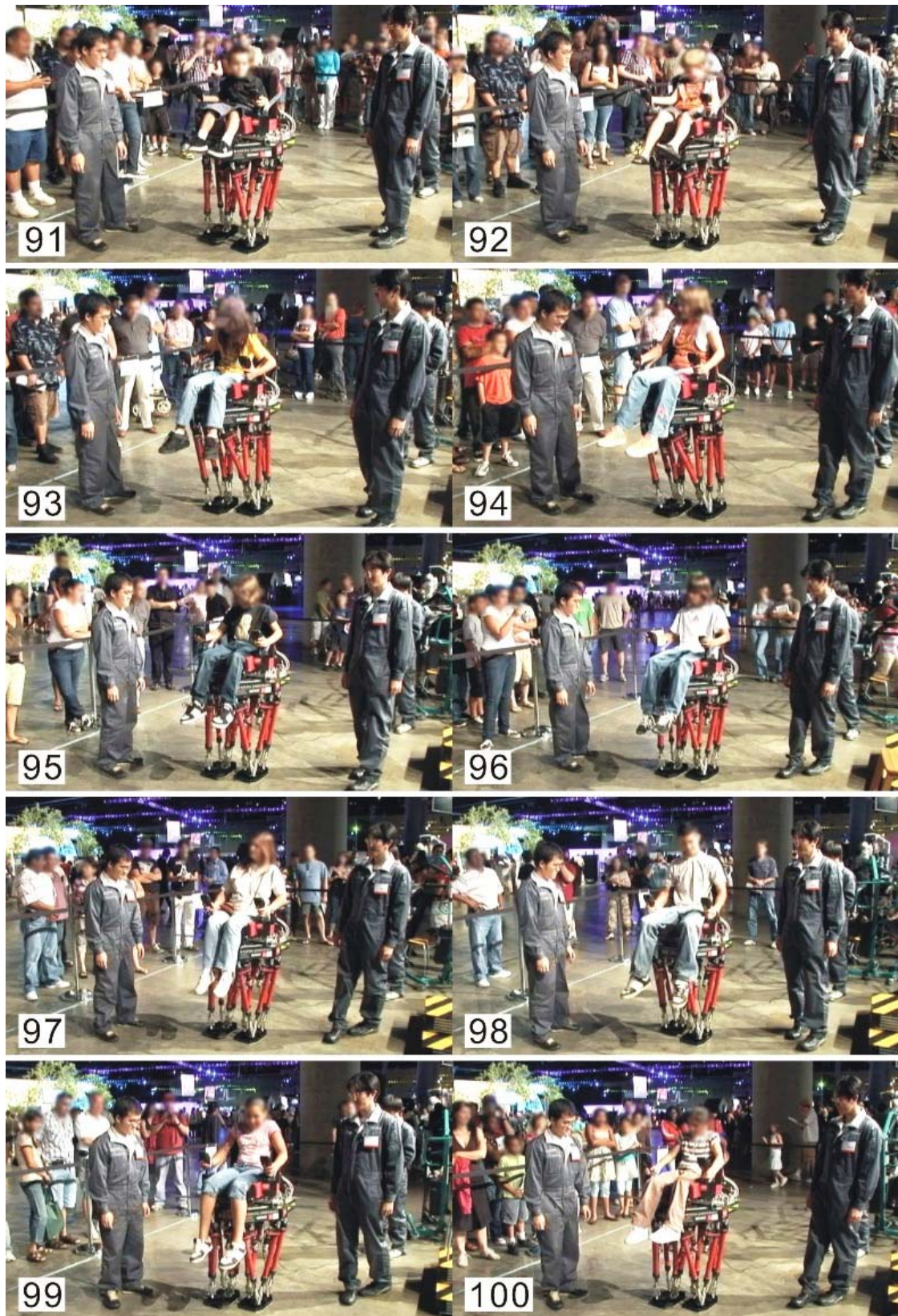


Figure C.12 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (10/18).



Figure C.13 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (11/18).

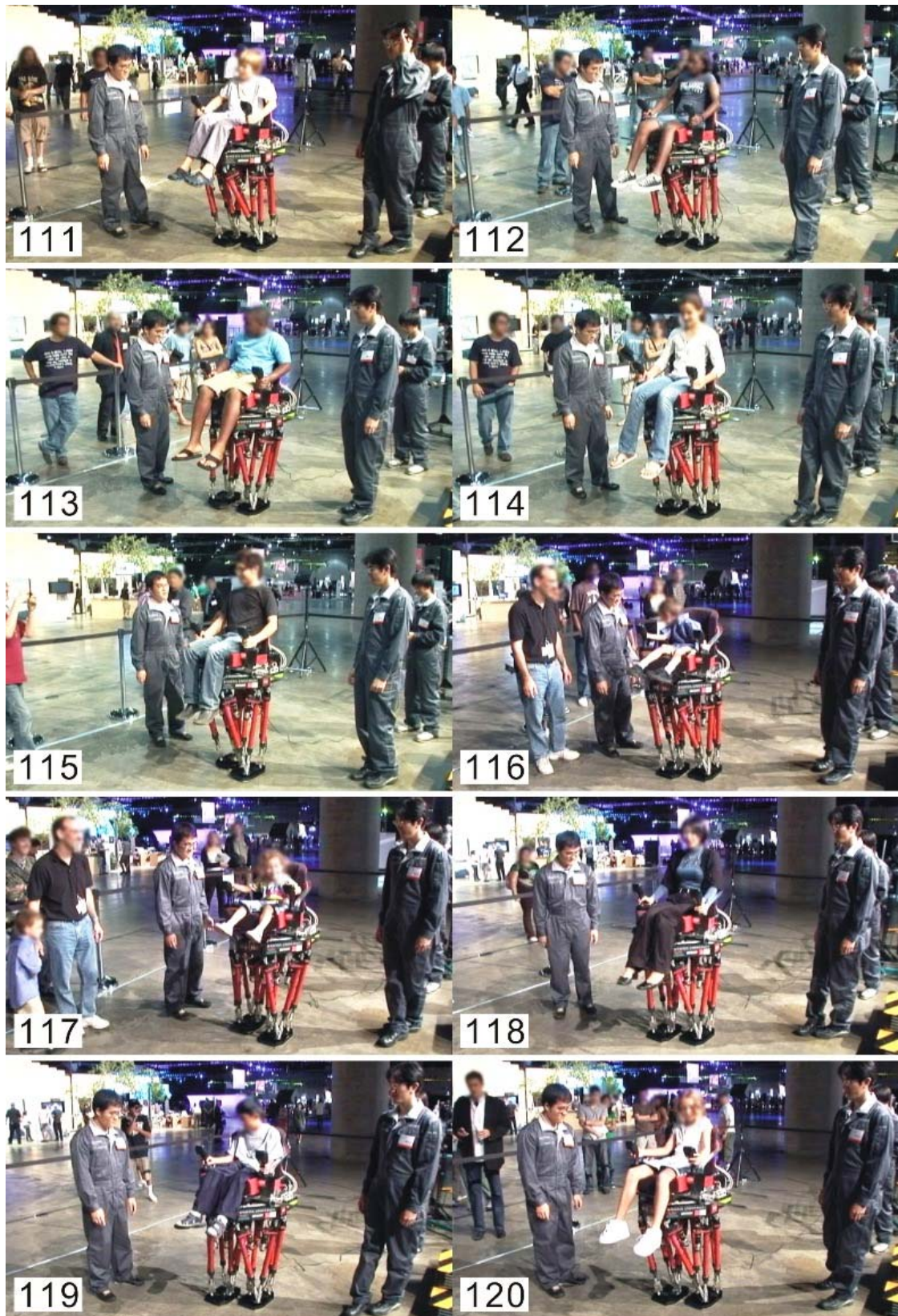


Figure C.14 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (12/18).



Figure C.15 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (13/18).

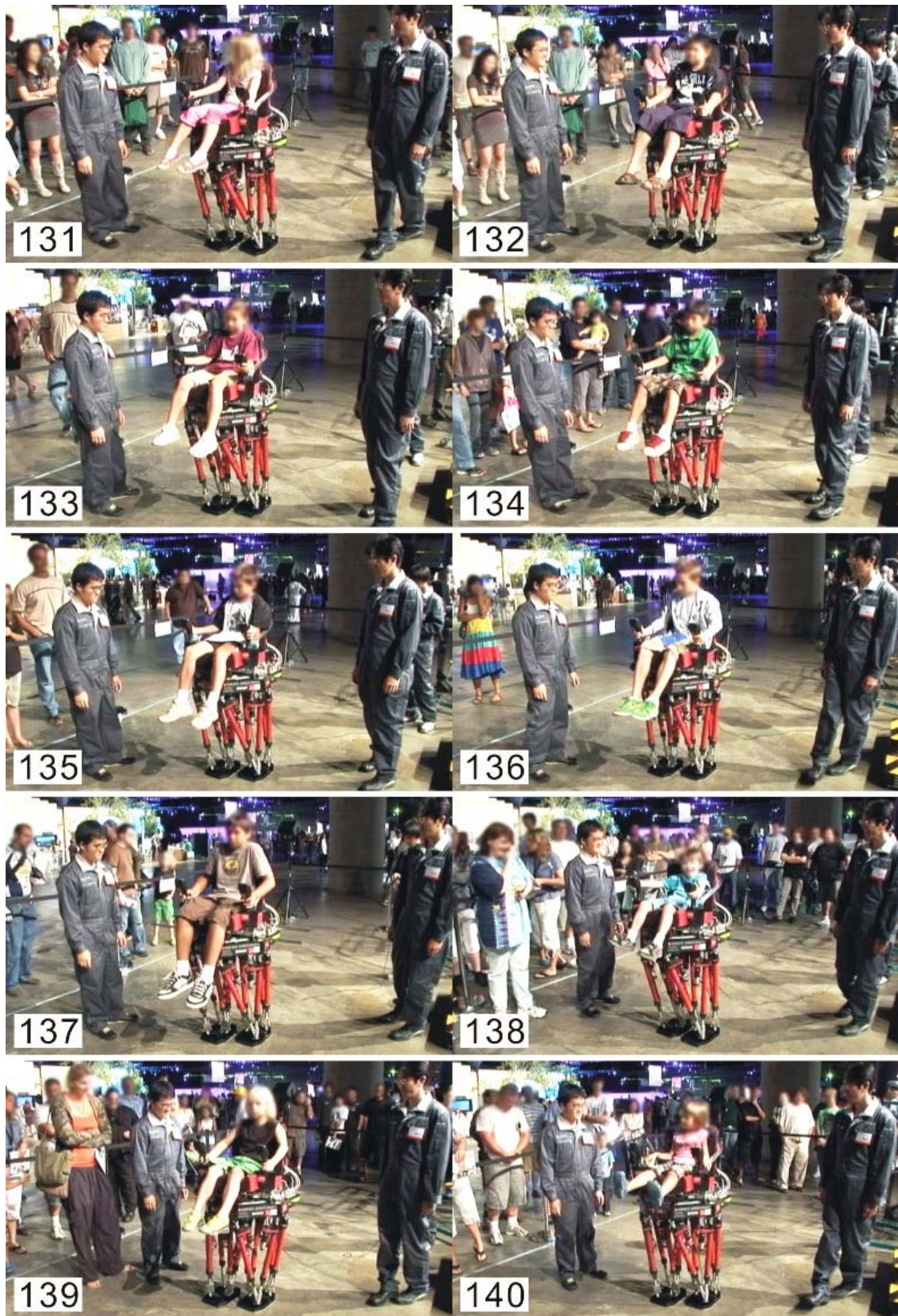


Figure C.16 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (14/18).



Figure C.17 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (15/18).

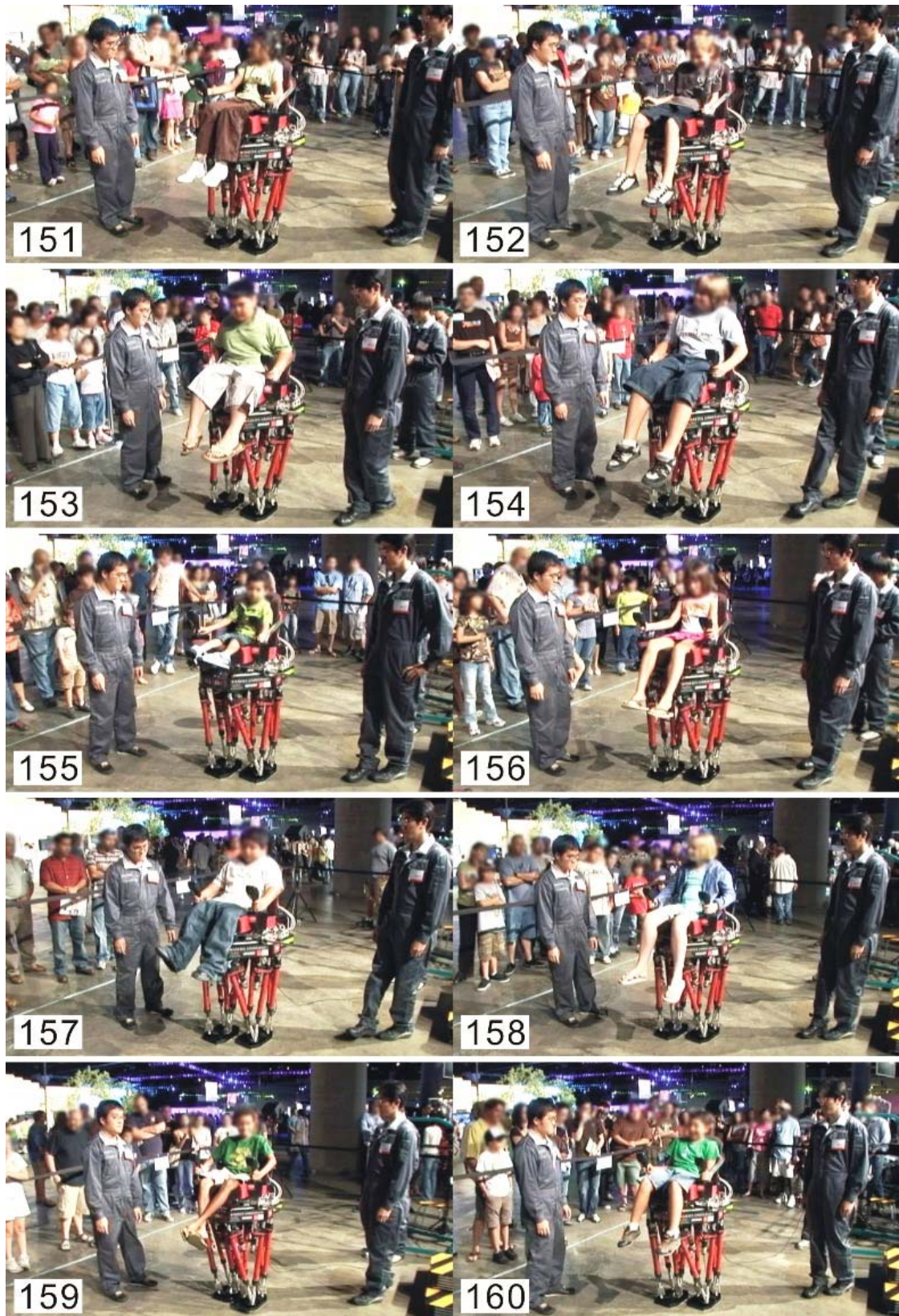


Figure C.18 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (16/18).

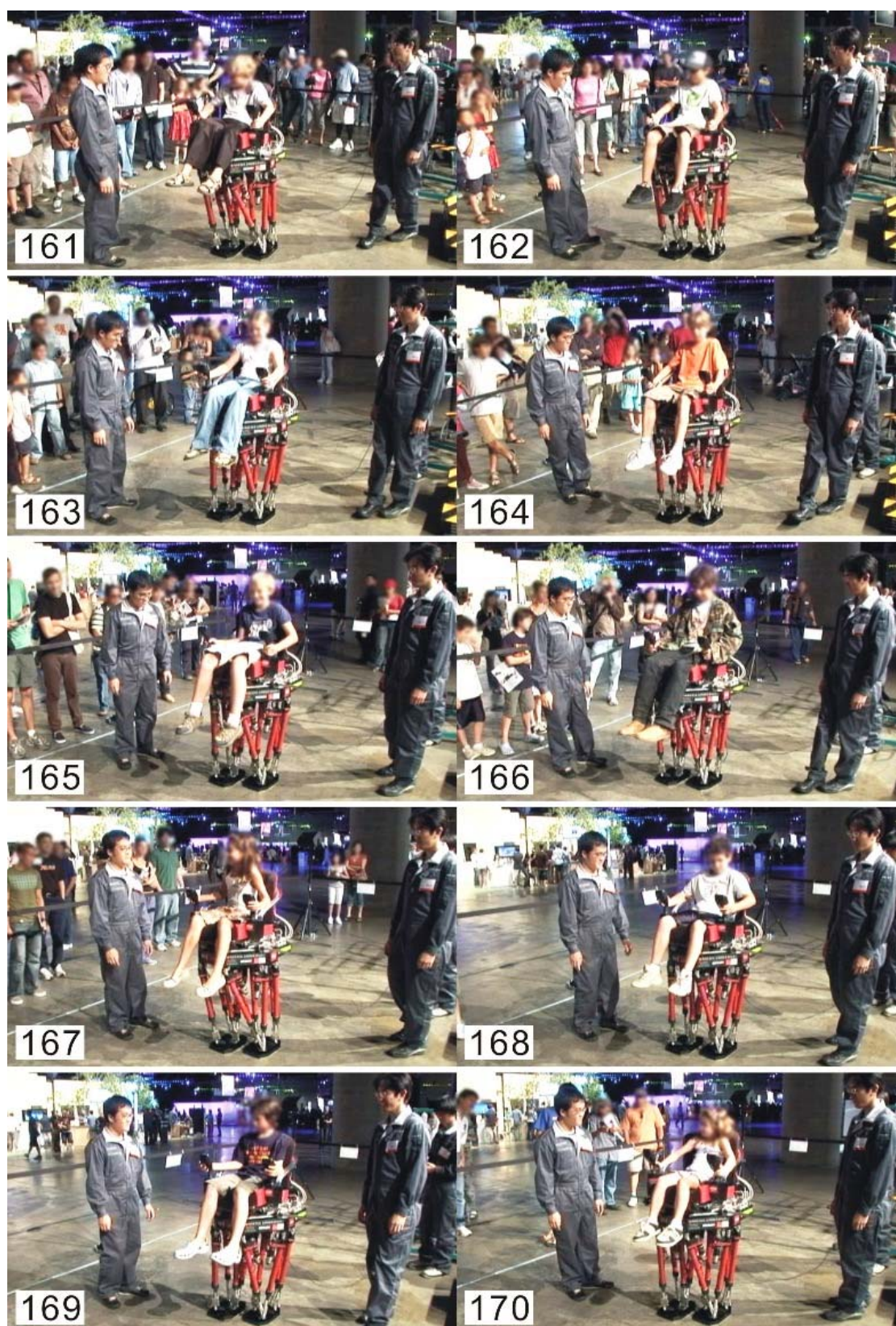


Figure C.19 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (17/18).



Figure C.20 Test-riding event at the Wired NextFest held in Los Angeles (18/18).

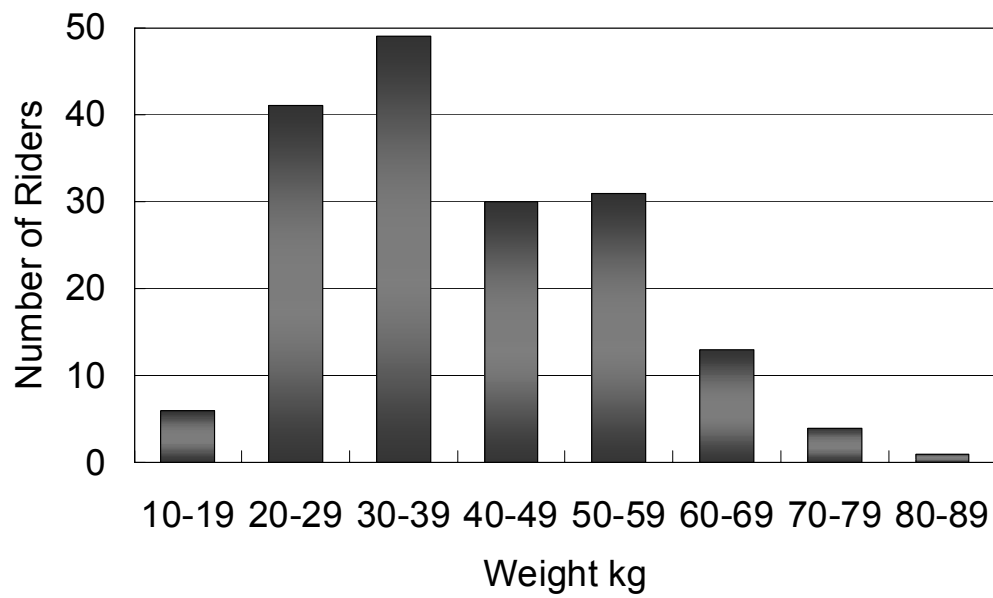


Figure C.21 Data of riders' weight. 171 people rode on the robot, and the average weight of them is 41 kg.

参 考 文 献

第 1 章

- [1] 米田完, “不整地移動の将来展望”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 265-266, 2002.
- [2] 大道武生, “ロコモーション開発 30 年から見た実用化への進化論—移動ロボットは社会に受け入れられるか?”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 255-260, 2002.
- [3] 山下淳, 浅間一, 新井民夫, 太田順, 金子透, “ロボットの移動機構に関する研究動向”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 3, pp. 282-292, 2003.
- [4] 広瀬茂男, “屋外で活躍する移動ロボットの機構設計”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 7, pp. 904-908, 2000.
- [5] 広瀬茂男, 福田靖, 菊地秀和, “4 足歩行機械の制御システム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 4, pp. 46-66, 1985.
- [6] Anonymous, “Logistical Vehicle Off-Road Mobility”, U.S. Army Transportation Combat Developments Agency, Project TCCO 62-5, 1967.
- [7] 広瀬茂男, 米田完, “実用的 4 足歩行機械の開発に向けて”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 3, pp. 360-365, 1993.
- [8] M. G. Bekker, “Off-The-Road Locomotion”, University of Michigan Press, 1960.
- [9] M. G. Bekker, “Introduction to Terrain Vehicle Systems”, University of Michigan Press, 1969.
- [10] M. Kaneko, A Mizuno and K. Harada, “Torque Distribution for Achieving a Hugging Walk”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2613-2618, 2002.
- [11] M. J. Spenko, G. C. Haynes, J. A. Sanders, M. R. Cutkosky, A. A. Rizzi, R. J. Full, and D. E. Koditschek, “Biologically Inspired Climbing with a Hexapedal Robot”, Journal of Field Robotics, Vo. 25, Issue 4-5, pp. 223-242, 2008.
- [12] 広瀬茂男, 森島昭男, 永井宏一, “節体幹形移動ロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol. 7, No. 1, pp. 56-61, 1989.
- [13] S. Hirose, “Biologically Inspired Robots - Snake-Like Locomotors and Manipulators”, Oxford University Press, 1993.
- [14] M. Nilsson, “Snake Robot Free Climbing”, Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3415-3420, 1997.

- [15] B. Klaassen and K. L. Paap, “GMD-SNAKE2: A snake-like robot driven by wheels and a method for motion control”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3014-3019, 1999.
- [16] K. J. Kyriakopoulos, G. Migadis and K. Sarrigeorgidis, “The NTUA Snake: design, planar kinematics and motion planning”, Journal of Robotics Systems, Vol. 16, No. 1, pp.37-72, 1999.
- [17] K. L. Paap, T. Christaller and F. Kirchner, “A Robot Snake to Inspect Broken Buildings”, Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2079-2082, 2000.
- [18] H. Streich and O. Adria, “Software Approach for the Autonomous Inspection Robot MAKRO”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3411-3416, 2004.
- [19] 山田浩也, 広瀬茂男, “へビ型ロボットの Sidewinding 運動の操舵制御の研究”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A2-01, 2008.
- [20] T. Nakamura, T. Kato, T. Iwanaga and Y. Muranaka, “Development of a Peristaltic Crawling Robot Based on Earthworm Locomotion”, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 18, No. 3, pp. 299-304, 2006.
- [21] G. Long, J. Anderson and J. Borenstein, “The Kinematic Design of the Omnipede: A new approach to obstacle traversal”, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 714-719, 2002.
- [22] 広瀬茂男, “「可変拘束機構」とその設計—特殊環境移動作業ロボットへの適用—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 5, pp. 615-619, 1999.
- [23] 黒田洋司, “不整地移動メカニズム”, 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 5, pp. 477-479, 2003.
- [24] 広瀬茂男, “ロコモーション研究の 20 年—私的回想と展望—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 20, No. 3, pp. 223-228, 2002.
- [25] 大道武生, 井辺智吉, “脚車輪型移動装置の開発 (その 1)”, 日本ロボット学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 68-75, 1984.
- [26] 高野政晴, “自律移動ロボットの機構と移動制御技術”, 日本ロボット学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 52-58, 1987.
- [27] 木村浩, 中野栄二, 野中洋一, “脚車輪型ロボットの開発および脚と車輪の協調動作”, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 520-525, 1992.
- [28] 中嶋秀朗, 中野栄二, 高橋隆行, “脚車輪分離型ロボットの未知不整地における基本移動制御手法”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 1082-1092,

- 2004.
- [29] F. Michaud, D. Létourneau, M. Arsenault, Y. Bergeron, R. Cadrin, F. Gagnon, M. A. Legault, M. Millette, J. F. Paré, M. C. Tremblay, P. Lepage, Y. Morin, J. Bisson and S. Caron, “AZIMUT, a Leg-Track-Wheel Robot”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2553-2558, 2003.
 - [30] G. Endo and S. Hirose, “Study on Roller-Walker (Multi-mode Steering Control and Self-contained Locomotion)”, Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2808-2814, 2000.
 - [31] 木邑信夫, “防災ロボット移動装置”, 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 5, pp. 669-672, 1991.
 - [32] 松本治, 梶田秀司, 西郷宗玄, 小森谷清, 谷和男, “自立型脚車輪2足システムの開発(第1報) —機構と移動形態—”, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 399-400, 2001.
 - [33] O. Matsumoto, S. Kajita and K. Komoriya, “Flexible Locomotion Control of a Self-contained Biped Leg-wheeled System”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2599-2604, 2002.
 - [34] 曾根原光治, 小林研吾, 田中宏一, 山本忠幸, 藤井正和, 村上弘記, “3脚車輪型ロボットの機構設計と実験システムの開発”, 第9回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 236-241, 2004.
 - [35] Y. Ota, K. Yoneda, T. Tamaki and S. Hirose, “A Walking and Wheeled Hybrid Locomotion with Twin-Frame Structure Robot”, Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2645-2651, 2002.
 - [36] S. Yokota, K. Kawabata, P. Blazevic, H. Kobayashi, H. Hashimoto and Y. Ohyama, “The development of crawler type robot that can move in all over the house”, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, pp. 4266-4269, 2006.
 - [37] M. Lauria, Y. Piguet and R. Siegwart, “Octopus: An Autonomous Wheeled Climbing Robot”, International Conference on Climbing and Walking Robots 2002 (CLAWAR 2002), pp. 315-322, 2002.
 - [38] A. Halme, I. Leppanen, M. Montonen and S. Ylonen, “Robot Motion by Simultaneously Wheel and Leg Propulsion”, International Conference on Climbing and Walking Robots 2001 (CLAWAR 2001), pp. 1013-1019, 2001.
 - [39] E. Rollins, J. Luntz, A. Foessel, B. Shamah, and W. Whittaker, “Nomad: a demonstration of the transforming chassis”, Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 611-617, 1998.

- [40] R. Volpe, “Rocky 7: A next generation mars rover prototype”, *Journal of Advanced Robotics*, vol. 11, no. 4, pp. 341-358, 1997.
- [41] C. Grand, F. BenAmar, F. Plumet and P. Bidaud, “Decoupled Control of Posture and Trajectory of the Hybrid Wheel-legged Robot Hylos”, *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 5111-5116, 2004.
- [42] H. Adachi, T. Arai, K. Homma, T. Nakamura and H. Yoshinada. “Study on Underground Space Excavation Machine”, *Proceedings of the 9th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, pp. 751-758, 1992.
- [43] M. Mori and S. Hirose, “Development of Active Cord Mechanism ACM-R3 with Agile 3D Mobility”, *Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1552-1557, 2001.
- [44] 広瀬茂男, 森島昭男, 塚越真一, 妻木俊道, 物部宏之, “節体幹型移動ロボット KRII の開発”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 5, pp. 551-559, 1991.
- [45] H. Kimura and S. Hirose, “Development of Genbu: Active Wheel Passive Joint Articulated Mobile Robot”, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 823-828, 2002.
- [46] 橋本周司, 成田誠之助, 小林哲則, 高西淳夫, “プラットフォームとしての2足歩行型ヒューマノイド: WABIAN”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 763-764, 1997.
- [47] K. Nishiwaki, T. Sugihara, S. Kagami, F. Kanehiro, M. Inaba and H. Inoue, “Design and Development of Research Platform for Perception-Action Integration in Humanoid Robot: H6”, *Proceedings of the 2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1559-1564, 2000.
- [48] 広瀬真人, 竹中透, 五味洋, 小澤信明, “人間型ロボット”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 15, No. 7, pp. 983-985, 1997.
- [49] Y. Sakagami, R. Watanabe, C. Aoyama, S. Matsunaga, N. Higaki and K. Fujimura, “The intelligent ASIMO: System overview and integration”, *Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 2478-2483, 2002.
- [50] 高木宗谷, “トヨタパートナーロボット”, *日本ロボット学会誌*, Vol. 24, No. 2, pp. 208-210, 2006.
- [51] 石田健蔵, 黒木義博, 山口仁一, “小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4XII に関する機構部の開発”, *日本ロボット学会第21回学術講演会*, 1E25, 2003

- [52] 五十棲隆勝, 赤地一彦, 太田成彦, 金広文男, 金子健二, 比留川博久, “ヒューマノイドロボット HRP-2”, 日本ロボット学会第 21 回学術講演会, 3A32, 2003
- [53] M. Gienger, K. Löffler and F. Pfeiffer, “Towards the Design of a Biped Jogging Robot”, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4140-4145, 2001.
- [54] K. Löffler, M. Gienger and F. Pfeiffer, “Sensor and Control Design of a Dynamically Stable Biped Robot”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 484-490, 2003.
- [55] S. Lohmeier, K. Löffler, M. Gienger, H. Ulbrich and F. Pfeiffer, “Computer System and Control of Biped “Johnnie”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4222-4227, 2004.
- [56] I. W. Park, J. Y. Kim, J. Lee and J. H. Oh, “Mechanical Design of Humanoid Robot Platform KHR-3 (KAIST Humanoid Robot - 3: HUBO)”, Proceedings of 2005 5th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, pp. 321-326, 2005.
- [57] J. Yamaguchi, S. Inoue, D. Nishino and A. Takanishi, “Development of a Bipedal Humanoid Robot Having Antagonistic Driven Joints and Three DOF Trunk”, Proceedings of the 1998 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 96-101, 1998.
- [58] J. Yamaguchi, E. Soga, S. Inoue and A. Takanishi, “Development of a Bipedal Humanoid Robot –Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking–”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 368-374, 1999.
- [59] S. Kajita and K. Tani, “Experimental Study of Biped Dynamic Walking in the Linear Inverted Pendulum Mode”, Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2885-2819, 1995
- [60] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Yokoi and H. Hirukawa, “A Realtime Pattern Generator for Biped Walking”, Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 31-37, 2002.
- [61] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Fujiwara, K. Harada, K. Yokoi and H. Hirukawa, “Biped Walking Pattern Generation by using Preview Control of Zero-Moment Point”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1620-1626, 2003.
- [62] 梶田秀司, 金広文男, 金子健二, 藤原清司, 原田研介, 横井一仁, 比留川博久, “分解運動量制御: 運動量と角運動量に基づくヒューマノイドロボットの全身

- 運動生成”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 6, pp. 772-779, 2004.
- [63] 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “最適勾配法を用いた人間型ロボットの動歩行パターン生成”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-78-110, 1999.
- [64] 西脇光一, 北川知伸, 杉原知道, 加賀美聡, 稲葉雅幸, 井上博允, “ZMP 導出の線形・非干渉化, 離散化によるヒューマノイドの動力学安定軌道の高速度生成—感覚行動統合全身型ヒューマノイド H6 での実現—”, 第 18 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 721-722, 2000.
- [65] S. Kagami, T. Kitagawa, K. Nishiwaki, T. Sugihara, M. Inaba and H. Inoue, “A Fast Dynamically Equilibrated Walking Trajectory Generation Method of Humanoid Robot”, *Autonomous Robots*, Vol. 12, No. 1, pp. 71-82, 2002.
- [66] T. Mita, T. Yamaguchi, T. Kashiwase and T. Kawase, “Realization of a High Speed Biped Using Modern Control Theory”, *The International Journal of Control*, Vol. 40, No. 1, pp. 107-119, 1984.
- [67] J. Furusho and M. Masubuchi, “Control of a Dynamical Biped Locomotion System for Steady Walking”, *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 108, No. 2, pp. 111-118, 1986.
- [68] J. K. Hodgins and M. H. Raibert, “Adjusting Step Length for Rough Terrain Locomotion”, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 7, No. 3, pp. 289-298, 1991.
- [69] 梶田秀司, 谷和男, “実時間路面形状計測に基づく動的 2 足歩行の制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 1062-1069, 1996.
- [70] Y. Fujimoto and A. Kawamura, “Simulation of an Autonomous Biped Walking Robot Including Environmental Force Interaction”, *IEEE Robotics and Automation Magazine*, Vol. 5, No. 2, pp. 33-41, 1998.
- [71] 長坂憲一郎, 稲葉雅幸, 井上博允, “体幹位置コンプライアンス制御を用いた人間型ロボットの歩行安定化”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3M13, 1999.
- [72] K. Inoue, H. Yoshida, T. Arai and Y. Mae, “Mobile Manipulation of Humanoids—Real-Time Control Based on Manipulability and Stability—”, *Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2217-2222, 2000.
- [73] Q. Huang, K. Kaneko, K. Yokoi, S. Kajita, T. Kotoku, N. Koyachi, H. Arai, N. Imamura, K. Komoriya and K. Tanie, “Balance Control of a Biped Robot Combining Off-line Pattern with Real-time Modification”, *Proceedings of the 2000 IEEE*

- International Conference on Robotics and Automation, pp. 3346-3352, 2000.
- [74] 吉野龍太郎, “歩行パターン・レギュレータによる高速歩行ロボットの安定化制御”, 日本ロボット学会誌, Vol. 18, No. 8, pp. 1122-1132, 2000.
- [75] S. Kagami, F. Kanehiro, Y. Tamiya, M. Inaba and H. Inoue, “AutoBalancer: An Online Dynamic Balance Compensation Scheme for Humanoid Robots”, Proceedings of the 4th International Workshop on Algorithmic Foundation on Robotics, pp. 329-340, 2000.
- [76] M. Morisawa and K. Ohnishi, “Interactive Control of Environmental Mode for Biped Walking”, Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 490-495, 2003.
- [77] M. Morisawa, T. Tsuji, Y. Nishioka, K. Akuzawa, H. Takahashi and K. Ohnishi, “Contact Motion in Unknown Environment”, Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, pp. 992-996, 2003.
- [78] Marquardt W (加倉井周一 訳), “靴型装具のすべて—理論と実際—”, パシフィックサプライ, 1983.
- [79] 加辺憲人, “足趾の機能”, 理学療法科学, Vol. 18, No. 1, pp. 41-48, 2003.
- [80] Weidenreich F, “Der Menschenfuss”, Z Morphol Anthropol, Vo. 22, p. 51, 1922.
- [81] 水野祥太郎, “ヒトの足 この謎にみちたもの”, 創元社, pp. 132-182, 1992.
- [82] 鈴木良平, “歩行と足”, 整形外科, Vol. 39, pp. 257-262, 1988.
- [83] Ker R.F., Bennett M.B., Bibby S.R., Kester R.C., Alexander R.M., “The spring in the arch of the human foot.”, Nature, Vol. 8, No. 14, pp. 147-149, 1987.
- [84] 高嶋孝倫, “歩行中のヒト足部に着目した力学モデル解析とその応用に関する研究”, 早稲田大学博士論文, 2003.
- [85] 木村忠直 (木村賛 編), “歩行の進化と老化 2.1 ヒトの歩行に関する骨格筋の加齢変化”, 人間科学全書研究報告シリーズ1, てらぺいあ, pp. 161-178, 2002.
- [86] I. A. Kapandji, “関節の生理学 II 下肢”, 医歯薬出版, pp. 220-221, 1988.
- [87] 庄司道彦, 王志東, 高橋隆行, 中野栄二, “二脚ロボットの佇立能力向上のための足構造”, バイオメカニズム学会誌, Vo. 25, No. 1, pp. 36-42, 2001.
- [88] 加賀美聡, 木田祐介, 溝口博, 岡田慧, 西脇光一, 井上博允, “ヒューマノイドの歩容計画のためのPSFの精度評価”, 第21回日本ロボット学会学術講演会, 1A18, 2003.
- [89] 金広文男, 吉見隆, 梶田秀司, 森澤光晴, 金子健二, 比留川博久, 富田文明, “3Dグリッドマップを用いたヒューマノイドの狭隘部移動”, 日本ロボット学

- 会誌, Vol. 25, No. 4, pp. 589-597, 2007.
- [90] 湯浅卓也, 怡土順一, 栗田雄一, 松本吉央, 小笠原司, “ヒューマノイドによるレーザレンジファインダを用いた三次元地図作成と障害物回避”, 第 8 回システムインテグレーション部門講演会 (SI2007), pp. 539-540, 2007.
- [91] 狩野累, 森澤光晴, 比留川博久, “実時間歩容生成と着地補正を用いたヒューマノイドの不整地歩行”, 第 26 回日本ロボット学会学術講演会, 201-07, 2008.
- [92] 国土交通省, “高齢者、障害者等の移動等の円滑化の促進に関する法律 (平成 18 年 6 月 21 日法律第 91 号)”, 2006.
- [93] Y. Sugahara, T. Hosobata, Y. Mikuriya, H.O. Lim and A. Takanishi, “Realization of Stable Dynamic Walking by a Parallel Bipedal Locomotor on Uneven Terrain Using a Virtual Compliance Control”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 595-600, 2003.
- [94] Y. Sugahara, Y. Mikuriya, K. Hashimoto, T. Hosobata, H. Sunazuka, M. Kawase, H. O. Lim and A. Takanishi, “Walking Control Method of Biped Locomotors on Inclined Plane,” Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1989-1994, 2005.
- [95] 五十棲隆勝, 赤地一彦, 平田勝, 金子健二. 梶田秀司, 比留川博久, “ヒューマノイドロボット HRP-2 の開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 8, pp. 1004-1012, 2004.
- [96] 加藤一郎, “二足歩行ロボット—その歴史と課題—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 164-166, 1983.
- [97] 加藤一郎, 石田豊彦, 森善朗, 山本敏博, “ゴム人工筋を用いた 2 足歩行機械”, バイオメカニズム, 東京大学出版会, pp. 267-274, 1972.
- [98] 加藤一郎, 角尾光信, 平林久明, 石原好実, 遠藤敏一, 小日向静夫, “2 足歩行ロボット (WABOT-1) の開発: 足 (人間型油圧歩行機械)”, バイオメカニズム 2, 東京大学出版会, pp. 173-184, 1973.
- [99] 雁瀬彰, 加藤高明, 加藤一郎, “油圧式 2 足歩行機械による準動歩行の研究”, バイオメカニズム 5, 東京大学出版会, pp. 269-280, 1980.
- [100] 高西淳夫, “2 足歩行ロボットによる準動歩行”, 日本ロボット学会誌, Vol. 1, No. 3, pp. 196-203, 1983.
- [101] 高西淳夫, 石田昌己, 山崎芳昭, 加藤一郎, “2 足歩行ロボット WL-10RD による動歩行の実現”, 日本ロボット学会誌, Vol. 3, No. 4, pp. 325-336, 1985.
- [102] A. Takanishi, Y. Egusa, M. Tochizawa, T. Takeya and I. Kato, “Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion”, RoManSy 7: Proceedings of the 7th

- CISM-IFTToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators, pp. 68-79, 1988.
- [103] A. Takanishi, M. Tochizawa, T. Takeya, H. Karaki and I. Kato, "Realization of dynamic biped walking stabilized with trunk motion under known external force", *Advanced Robotics: Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Robotics*, pp. 299-310, 1989.
- [104] A. Takanishi, T. Takeya, H. Karaki and I. Kato, "A control method for dynamic biped walking under unknown external force", *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 795-801, 1990.
- [105] A. Takanishi, H. O. Lim, M. Tsuda and I. Kato, "Realization of dynamic biped walking stabilized by trunk motion on a sagittally uneven surface", *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pp. 323-330, 1990.
- [106] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, "上体運動により 3 軸モーメントを補償する 2 足歩行ロボットの開発", *日本ロボット学会誌*, Vol. 11, No. 4, pp. 581-586, 1993
- [107] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, "路面形状に偏差のある環境における 2 足歩行制御—未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現—", *日本ロボット学会誌*, Vol. 13, No. 7, pp. 1030-1037, 1995.
- [108] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, "衝撃緩衝材料を用いた足底機構による 2 足歩行の安定化と路面位置情報の取得", *日本ロボット学会誌*, Vol. 14, No. 1, pp. 67-74, 1996.
- [109] 高西淳夫, 桑田真宏, 山口仁一, 松熊研司, 加藤一郎, "衝撃緩衝材料を用いた足底機構による 2 足歩行の安定化", 第 9 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 325-326, 1991.
- [110] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato, "Experimental Development of Foot Mechanism with Shock Absorbing Material for Acquisition of Landing Surface Position Information and Stabilization of Dynamic Biped Walking", *Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2892-2899, 1995.
- [111] 山口仁一, 高西淳夫, 加藤一郎, "環境適応能力を持つ 2 足歩行ロボットの開発～未知の凹凸路面に対する適応歩行の実現～", 第 11 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 233-236, 1993.
- [112] J. Yamaguchi, A. Takanishi and I. Kato, "Development of a Biped Walking Robot Adapting to a Horizontally Uneven Surface", *Proceedings of the 1994 IEEE/RSJ*

- International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1156-1163, 1994.
- [113] 山口仁一, 木下昇, 高西淳夫, 加藤一郎, “路面形状に偏差のある環境に対する適応能力を持つ2足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 546-559, 1996.
- [114] 山口仁一, 井上貞敏, 松尾茂樹, 高西淳夫, “2足歩行型ヒューマノイドにおける全身協調型2足動歩行制御”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 851-852, 1997.
- [115] 山口仁一, 井上貞敏, 西野大助, 玄相昊, 石井啓範, 松尾茂樹, 山本要介, 高西淳夫, “早稲田2足歩行型ヒューマノイド WABIAN の開発—全体システム的设计—”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 773-774, 1997.
- [116] 小椋優, 林憲玉, 高西淳夫, “2足ヒューマノイドロボットの膝関節伸展型歩行パターン生成アルゴリズム”, 日本機械学会論文集, C編, 第70巻, 700号, 2004.
- [117] Y. Ogura, H. Aikawa, H. O. Lim and A. Takanishi, “Development of a Human-like Walking Robot Having Two 7-DOF legs and a 2-DOF Waist”, Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 134-139, 2004.
- [118] Y. Ogura, T. Kataoka, H. Aikawa, K. Shimomura, H. O. Lim and A. Takanishi, “Evaluation of Various Walking Patterns of Biped Humanoid Robot”, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 605-610, 2005.
- [119] Y. Ogura, H. Aikawa, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, H. O. Lim and A. Takanishi, “Development of a Humanoid Robot WABIAN-2”, Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 76-81, 2006.
- [120] 桃木新平, 下村嘉士, 大久保達, 小椋優, 近藤秀樹, 森島彰俊, 林憲玉, 高西淳夫, “人間の歩行データを用いたヒューマノイド用足部機構の開発”, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H13, 2006.
- [121] 小椋優, 下村嘉士, 桃木新平, 大久保達, 林憲玉, 高西淳夫, “爪先受動関節を持つヒューマノイドロボットによる踵接地・爪先離地歩行”, 第24回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3H14, 2006.
- [122] 菅原雄介, 圓戸辰郎, 細畠拓也, 御厨裕, 林憲玉, 高西淳夫, “脚機構にパラレルメカニズムを用いた汎用2足ロコモータの開発 (第1報, 試作機 WL-15 の設計・開発)”, 日本機械学会論文集, 70-691, C編, pp. 790-797, 2004.
- [123] Y. Sugahara, T. Hosobata, Y. Mikuriya, H. Sunazuka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Realization of Dynamic Human-Carrying Walking by a Biped Locomotor”,

- Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3055-3060, 2004.
- [124] Y. Sugahara, A. Ohta, K. Hashimoto, H. Sunazuka, M. Kawase, C. Tanaka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism”, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3425-3430, 2005.
- [125] Y. Sugahara, K. Hashimoto, M. Kawase, T. Sawato, A. Hayashi, N. Endo, A. Ohta, C. Tanaka, H. O. Lim and A. Takanishi, “Walking Pattern Generation of a Biped Walking Vehicle Using a Dynamic Human Model”, Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2497-2502, 2006.
- [126] 広瀬真人, 五味洋, 高橋秀明, 竹中透, 西川正雄, 高橋忠伸, “脚式歩行ロボットの足部構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 5-293776, 1993.
- [127] 広瀬真人, 五味洋, 西川正雄, 高橋秀明, 高橋忠伸, “衝撃吸収機構を備えた脚式歩行ロボット (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 5-305578, 1993.
- [128] 五味洋, 浜谷一司, “脚式歩行ロボットの足部構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2001-129774, 2001.
- [129] 西川正雄, 広瀬真人, 熊谷智治, 阿部昇栄, 五味洋, 平川三昭, “脚式歩行ロボットの足部構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁特許公報, 特許第 2826858 号, 1998.
- [130] 竹中透, 松本敬三, 五味洋, 浜谷一司, “脚式移動ロボット (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2006-62057, 2006.
- [131] 竹中透, 河井孝之, 五味洋, “脚式歩行ロボットの脚構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 11-33941, 1999.
- [132] 五味洋, 西川正雄, 広瀬真人, 高橋秀明, 松本隆志, “脚式歩行ロボットの足平構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 5-318335, 1993.
- [133] 五味洋, 西川正雄, 広瀬真人, 高橋秀明, 松本隆志, 竹野晃, “脚式歩行ロボットの足平構造 (特許権者: 本田技研工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 5-318336, 1993.
- [134] 早川健, “人工足部 (特許権者: ソニー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開平 11-320461, 1999.
- [135] 早川健, “人工足部 (特許権者: ソニー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公

- 報, 特開平 11-320463, 1999.
- [136] 服部裕一, 山口仁一, “脚式移動ロボット及びその制御方法、並びに、脚式移動ロボット用相対移動測定センサ (特許権者: ソニー株式会社, 山口仁一)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2001-277159, 2001.
- [137] 服部裕一, “脚式移動ロボットのための足部構造、並びに路面検知装置 (特許権者: ソニー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2001-353686, 2001.
- [138] 加藤恵輔, 小池剛史, 登坂進, 森川浩昭, 山口仁一, 長阪憲一郎, 永野雅邦, “脚式移動ロボットの脚装置並びに脚式移動ロボットの制御方法 (特許権者: ソニー株式会社, 山口仁一)”, 日本国特許庁再公表特許, 国際公開番号 WO03/068455, 2003.
- [139] 山口仁一, “人間形ロボットの安定歩行実現技術ーソニー株式会社と山口仁一の運動制御特許技術を中心にー”, バイオメカニズム学会誌, Vol. 30, No. 3, pp. 123-127, 2006.
- [140] 遠藤玄, 加藤恵輔, “ロボット装置及びロボット装置のための足部装置 (特許権者: ソニー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2005-177960, 2005.
- [141] 本田大作, “脚式移動型ロボットの足平構造、脚式移動型ロボットおよび脚式移動型ロボットの歩行制御方法 (特許権者: トヨタ自動車株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2008-87142, 2008.
- [142] 本田大作, 寺川美咲, “脚式移動型ロボットの足構造 (特許権者: トヨタ自動車株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2008-126332, 2008.
- [143] 嶋田宏史, 菅敬介, 村山英之, 菊地貢, 津坂祐司, “脚式ロボット (特許権者: トヨタ自動車株式会社, 株式会社豊田中央研究所)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2008-49458, 2008.
- [144] マイケル・ウェイザート, 出尾隆志, 山田整, 新谷和宏, 落合一拓, “脚式ロボット (特許権者: トヨタ自動車株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2007-290058, 2007.
- [145] 嶋田宏史, 松本邦保, “脚式移動型ロボット (特許権者: トヨタ自動車株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2008-272846, 2008.
- [146] 海老原康弘, “二足歩行ロボットの足部構造 (特許権者: トヨタ自動車株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2006-218550, 2006.
- [147] 太田成彦, 川崎俊和, 五十棲隆勝, “歩行ロボットの衝撃吸収機構 (特許権者: 川田工業株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2004-106077, 2004.
- [148] 花岡幸弘, “脚式移動ロボットおよびその制御方法 (特許権者: セイコーエプソン株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2003-236779, 2003.

- [149] 高橋智隆, “二足歩行型ロボット (特許権者: 関西ティール・エル・オー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2002-166062, 2002.
- [150] 高橋智隆, 見城尚志, “二足歩行型ロボット (特許権者: 関西ティール・エル・オー株式会社)”, 日本国特許庁公開特許公報, 特開 2003-260274, 2003.

第 2 章

- [151] S. Kajita, F. Kanehiro, K. Kaneko, K. Yokoi and H. Hirukawa, “The 3D Linear Inverted Pendulum Mode: A simple modeling for a biped walking pattern generation”, Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 239-246, 2001.
- [152] K. Nishiwaki and S. Kagami, “Sensor Feedback Modification Methods that are Suitable for the Short Cycle Pattern Generation of Humanoid Walking”, Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 4214-4220, 2007.
- [153] 金子健二, 金広文男, 梶田秀司, 横井一仁, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久, “HRP-2 の歩行安定化制御”, 第 21 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3A34, 2003.
- [154] Y. Okumura, T. Tawara, K. Endo, T. Furuta and M. Shimizu, “Realtime ZMP Compensation for Biped Walking Robot using Adaptive Inertia Force Control”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 335-339, 2003.
- [155] 今田吉則, 田窪朋仁, 新井健生, 前泰志, “ZMP 修正指標マップを用いた不整地歩行”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-F12, 2008.
- [156] M. Ogata and S. Hirose, “Study on Ankle Mechanism for Walking Robots –Development of 2 D.O.F. Coupled Drive Ankle Mechanism with Wide Motion Range–”, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 3201-3206, 2004.
- [157] 尾形勝, 広瀬茂男, “歩行ロボットの足首機構の研究 –対地適応型受動式足首機構の開発–”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-L1-59, 2004.
- [158] 寺嶋延浩, 尾形勝, 広瀬茂男, “荒地歩行型 4 足歩行ロボットのための能動変形足先機構の研究”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-E09, 2008.
- [159] 大塚俊平, 尾形勝, 広瀬茂男, “4 足歩行ロボットの対地適応受動型足先機構

の開発”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，1A1-E06，2008.

- [160] 近藤秀樹，相川弘行，小椋優，森島彰俊，下村嘉士，林憲玉，高西淳夫，“人体運動シミュレータとしての2足ヒューマノイドロボットの開発（第2報：膝関節伸展型歩行における足部の倣い動作）”，第23回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1F32，2005.

第3章

- [161] J. H. Park and H. Chung, “Hybrid Control for Biped Robots Using Impedance Control and Computed-Torque Control”, Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1365-1370, 1999.
- [162] J. H. Park, “Impedance Control for Biped Robot Locomotion”, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 17, No. 6, pp. 870-882, 2001.
- [163] Y. Sugahara, T. Endo, H. O. Lim and A. Takanishi, “Control and Experiments of a Multi-purpose Bipedal Locomotor with Parallel Mechanism”, Proceedings of the 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4342-4347, 2003.

第5章

- [164] 曾根原光治，山本忠幸，田中宏一，小林研吾，村上弘記，“3脚車輪型ロボット試作機の開発”，石川島播磨技報，Vol. 44, No. 3, pp. 241-247, 2004.
- [165] 村上弘記，曾根原光治，生川俊則，坂野肇，立石淳，“脚車輪型移動ロボットのプロトタイプの開発”，石川島播磨技報，Vol. 46, No. 3, pp. 135-141, 2006.
- [166] 松本治，小森谷清，“自立型脚車輪2足システムの開発（第2報）－階段昇降手順と車輪持ち上げ基礎実験－”，第21回日本ロボット学会学術講演会予稿集，2G28，2003.
- [167] 松本治，小森谷清，矢ヶ崎幸治，町田智育，橋野賢，“自立型脚車輪2足システムの開発（第3報）－段差昇り実験－”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会，2P1-L1-70，2004.

第6章

- [168] 熊谷正朗，玉田薫，“傾きにより旋回曲率を操作する台車の提案と歩行ロボットへの応用”，計測自動制御学会東北支部第233回研究集会，資料番号233-1，2006.
- [169] 遠藤玄，“ロボット装置及びその制御方法（特許権者：ソニー株式会社）”，日本国特許庁特許公報，特開2006-68884，2006.

- [170] 内海弘宣, 池田宗央, 槐原満, 五百井清, “ヒューマノイドロボットの滑走移動の研究”, 日本ロボット学会第 24 回学術講演会予稿集, 2H25, 2006.
- [171] 日向野光康, 氏田祐, 田口幹, “スケーティングロボットの研究 (第二報: 試作機の滑走実験)”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 1A1-D32, 2006.
- [172] 大塚友哉, 高信英明, 鈴木健司, 三浦宏文, “ローラースケートを用いたロボットの滑走移動”, 日本ロボット学会第 23 回学術講演会予稿集, 3G22, 2005.
- [173] 前田和彦, 三輪昌史, “二足歩行ロボットのローラー移動”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2006, 2P1-B15, 2006.
- [174] T. Yoshikawa, “Dynamic Hybrid Position/Force Control of Robot Manipulators - Description of Hand Constraints and Calculation of Joint Driving Force”, IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-3, No. 5, pp. 386-392, 1987.
- [175] M. T. Mason, “Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators”, IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-11, No. 6, pp. 418-432, 1981.
- [176] K. Kosuge, K. Furuta and T. Yokoyama, “Virtual Internal Model Following Control of Robot Arms”, Proceedings of the 1987 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1549-1554, 1987.

第 8 章

- [177] 金子真, 谷江和雄, 堀内英一, “路面の変形を考慮した多足歩行機械の一制御法—交互 3 点支持歩行を中心に—”, 日本ロボット学会誌, Vol. 4, No. 3, pp. 231-240, 1986.
- [178] 西川昌宏, 島田茂伸, 江上正, “多足歩行ロボットのための接地面認識センサの開発”, 第 32 回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2000.
- [179] 西川昌宏, 福原裕明, 島田茂伸, 江上正, “多足歩行ロボットのための接地面認識センサ”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2P1-43-062, 2000.
- [180] 広瀬茂男, 塚越秀行, 米田完, “不整地における歩行機械の静的安定性評価基準”, 日本ロボット学会誌, Vol. 16, No. 8, pp. 1076-1082, 1998.
- [181] 米田完, 広瀬茂男, “歩行機械の転倒安定性”, 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 4, pp. 517-522, 1996.
- [182] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita, K. Yokoi, H. Saito, K. Harada, K. Kaneko and H. Hirukawa, “The First Human-Size Humanoid that can Fall Over Safely and Stand-up

- Again”, Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1920-1926, 2003.
- [183] K. Fujiwara, F. Kanehiro, S. Kajita and H. Hirukawa, “Safe Knee Landing of a Human-size Humanoid Robot while Falling Forward”, Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 503-508, 2004.
- [184] M. Morisawa, S. Kajita, K. Harada, K. Fujiwara, F. Kanehiro, K. Kaneko and H. Hirukawa, “Emergency Stop Algorithm for Walking Humanoid Robots”, Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 31-37, 2005.
- [185] 金子健二, 金広文男, 森澤光晴, 梶田秀司, 藤原清司, 原田研介, 比留川博久, “ヒューマノイドのための動作一時停止システム”, 第23回日本ロボット学会 学術講演会予稿集, 2F21, 2005.
- [186] 真喜屋光子, “靴で人生を変える. よい靴, よい足, ハンサムウォーク”, はまの出版, 1997.

付録 A

- [187] Yahoo! 地図, <http://map.yahoo.co.jp/>, 2008.

付録 B

- [188] S. Hyon and G. Cheng, “Disturbance Rejection for Biped Humanoids”, Proceedings of 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2668-2675, 2007.
- [189] S. Hyon, J. G. Hale and G. Cheng, “Full-Body Compliant Human-Humanoid Interaction: Balancing in the Presence of Unknown External Forces”, IEEE Transactions on Robotics, vol.23, No.5, pp.884-898, 2007.
- [190] K. Harada, S. Kajita, H. Saito, M. Morisawa, F. Kanehiro, K. Fujiwara, K. Kaneko and H. Hirukawa, “A Humanoid Robot Carrying a Heavy Object,” Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1712-1717, 2005.

謝 辞

本研究を進めるにあたり，多大なご指導とご教示を賜りました早稲田大学理工学術院 高西淳夫教授に，深く感謝し心より御礼申し上げます．学部 3 年から現在に至るまで 7 年間，研究活動だけでなくあらゆる面において，温かく熱心なご指導とご激励を賜りましたこと，重ねて御礼申し上げます．そして本論文をまとめるにあたり，貴重な御時間を割いていただいた上，適切なお指導ご意見を賜りました早稲田大学理工学術院 梅津光生教授，藤江正克教授，ならびに人間科学学術院 藤本浩志教授に，深く感謝いたします．

本論文は，筆者の修士課程および博士後期課程における研究成果をまとめたものであり，機械工学，ロボット工学，人間工学，福祉工学の各分野の先生方から数え切れないほどのご助言を頂きました．とりわけ，機械工学的観点から適切なお助言を頂きました機械工学科の諸先生方および生命理工学専攻の諸先生方，早稲田大学ヒューマノイド研究所の諸先生方，特に熱心なご指導を賜りました神奈川大学工学部林憲玉教授に深い感謝の意を表します．また，人間工学・福祉工学的観点から適切なお助言を頂きました国立障害者リハビリテーションセンターの高嶋孝倫先生に深い感謝の意を表します．

そして，本研究を共に遂行し寝食を共にした，高西淳夫研究室 2 足ロコモータ班の菅原雄介氏（2006 年博士後期課程卒，現東北大学助教），細島拓也氏（2004 年修士課程卒），御厨裕氏（2004 年修士課程卒），砂塚裕之氏（2005 年修士課程卒），川瀬正幹氏（2006 年修士課程卒），太田章博氏（2007 年修士課程卒），田中智明氏（2007 年修士課程卒），遠藤信綱氏（現早稲田大学博士後期課程 1 年），沢戸瑛昌氏（2008 年修士課程卒），林昭宏氏（2008 年修士課程卒），服部賢太郎氏（現早稲田大学修士課程 2 年），浅野哲平氏（2008 年学部卒），吉村勇希氏（現早稲田大学修士課程 1 年）に，心より感謝いたします．

また，本研究に際し多大なご協力を頂きました株式会社テムザックの皆様，福岡市役所の皆様，福岡県庁の皆様，財団法人福岡県産業・科学技術振興財団の皆様，ロボスクエアの皆様，ソリッドワークス・ジャパン株式会社様に深い感謝の意を表します．本研究に際しご協力いただきましたヒーハイス精工株式会社様，特殊電装株式会社様，ニッタ株式会社様，マイクロ・ビークル・ラボ株式会社様，有限会社エフテック様，お取引をさせていただきました株式会社アスク様，有明技研株式会社様，株式会社エムズコーポレーション様，新妻精機株式会社様，株式会社サンアル様，株式会社寺畑商会様，日本電計株式会社様，株式会社羽野製作所様，マクソンジャパン株式会

社様，ケーエスエス株式会社様に感謝いたします。

さらに，これまで7年間研究生生活を支えてくださいました高西研究室秘書の太田久子女史に厚く御礼申し上げます。そして，これまで楽しく研究室生活を共にした高西研究室の諸先輩方，同輩，後輩方に感謝いたします。また，共に学位取得に励んだ高西研究室の福井孝太郎氏と藤江研究室の川村和也氏に感謝いたします。

そして，学会等で御会いした折に議論に御付合いいただきご意見を頂きましたすべての研究者の皆様，関係者の皆様に感謝いたします。

最後に，筆者の研究活動を常に応援し，支えてくれた，両親と家族，すべての友人達に心より感謝いたします。

2009年2月
橋本 健二

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文	Static and Dynamic Disturbance Compensation Control for a Biped Walking Vehicle	2008年10月	Proceedings of the second IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp.457-462	橋本健二 沢戸瑛昌 林昭宏 吉村勇希 浅野哲平 服部賢太郎 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
○	Biped Landing Pattern Modification Method and Walking Experiments in Outdoor Environment	2008年10月	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20, No.5, pp.775-784	橋本健二 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
	Development of New Foot System Adaptable to Uneven Terrain for All Biped Robots	2008年7月	Proceedings of the 17th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY17), pp.391-398	橋本健二 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
○	Swizzle Movement for Biped Walking Robot Having Passive Wheels	2008年6月	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.20, No.3, pp.413-419	橋本健二 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
	Human-carrying Biped Walking Vehicle	2008年6月	Proceedings of the 6th International Conference of the International Society for Gerontechnology, 075	橋本健二 菅原雄介 砂塚裕之 川瀬正幹 服部賢太郎 林憲玉 高西淳夫
	Optimization Design of a Stewart Platform Type Leg Mechanism for Biped Walking Vehicle	2007年11月	Preprints of the 13th International Symposium of Robotics Research, pp.209-218	橋本健二 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Unknown Disturbance Compensation Control for a Biped Walking Vehicle	2007年10月	Proceedings of the 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2204-2209	橋本健二 菅原雄介 田中智明 太田章博 服部賢太郎 沢戸瑛昌 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
	○ 着地軌道修正制御と推定姿勢補償制御による人間搭乗型2足歩行ロボットの屋外歩行の実現	2007年9月	日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.851-859	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 林昭宏 田中智明 太田章博 沢戸瑛昌 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	New Foot System Adaptable to Convex and Concave Surface	2007年4月	Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1869-1874	橋本健二 菅原雄介 林昭宏 川瀬正幹 沢戸瑛昌 遠藤信綱 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	Landing Pattern Modification Method with Predictive Attitude and Compliance Control to Deal with Uneven Terrain	2006年10月	Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1755-1760	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 遠藤信綱 沢戸瑛昌 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き ○	New Biped Foot System Adaptable to Uneven Terrain	2006年6月	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.18, No.3, pp.271-277	橋本健二 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
	A Fall Avoidance Foot Mechanism for A Biped Locomotor	2006年5月	Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1219-1224	橋本健二 菅原雄介 田中智明 川瀬正幹 砂塚裕之 太田章博 林憲玉 高西淳夫
	Biped Landing Pattern Modification Method with Nonlinear Compliance Control	2006年5月	Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1213-1218	橋本健二 菅原雄介 砂塚裕之 田中智明 太田章博 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	Realization of Stable Biped Walking on Public Road with New Biped Foot System Adaptable to Uneven Terrain	2006年2月	Proceedings of the first IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp.226-231	橋本健二 菅原雄介 太田章博 砂塚裕之 田中智明 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	Development of Foot System of Biped Walking Robot Capable of Maintaining Four-point Contact	2005年8月	Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1464-1469	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Realization by Biped Leg-wheeled Robot of Biped Walking and Wheel-driven Locomotion	2005 年 4 月	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.2981-2986	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	搭乗者の受動的運動を考慮した人間搭乗型2足歩行ロボットの歩行パターン生成	2007 年 9 月	日本ロボット学会誌, Vol.25, No.6, pp.842-850	菅原雄介 橋本健二 川瀬正幹 沢戸瑛昌 太田章博 田中智明 林昭宏 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	Experimental Stiffness Measurement of WL-16RII Biped Walking Vehicle during Walking Operation	2007 年 6 月	Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.19, No.3, pp.272-280	菅原雄介 Giuseppe Carbone 橋本健二 Marco Ceccarelli 林憲玉 高西淳夫
	Development of a Biped Locomotor with the Double Stage Linear Actuator	2007 年 4 月	Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1850-1855	菅原雄介 橋本健二 遠藤信綱 沢戸瑛昌 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Walking Pattern Generation of a Biped Walking Vehicle Using a Dynamic Human Model	2006年10月	Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.2497-2502	菅原雄介 橋本健二 川瀬正幹 沢戸瑛昌 林昭宏 遠藤信綱 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	WL-16RII: Prototype of Biped Walking Wheelchair	2006年6月	Proceedings of the 16th CISM-IFTOMM Symposium on Robot Design, Dynamics and Control (ROMANSY16), pp.313-320	菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	Towards the Biped Walking Wheelchair	2006年2月	Proceedings of the first IEEE RAS/EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics, pp.781-786	菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	Walking Up and Down Stairs Carrying a Human by a Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2005年8月	Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3425-3430	菅原雄介 太田章博 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 田中智明 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
1. 論文 の続き	Walking Control Method of Biped Locomotors on Inclined Plane	2005年4月	Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1989-1994	菅原雄介 御厨裕 <u>橋本健二</u> 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	Support Torque Reduction Mechanism for Biped Locomotor with Parallel Mechanism	2004年10月	Proceedings of the 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.3213-3218	菅原雄介 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 <u>橋本健二</u> 林憲玉 高西淳夫
2. 講演	脚部に平行リンク機構を用いた2足ロコモータの開発 (第17報: 着地衝撃緩和を目標した不整路面適応制御)	2008年9月	日本ロボット学会第26回学術講演会予稿集, 101-02	<u>橋本健二</u> 林昭宏 沢戸瑛昌 吉村勇希 服部賢太郎 浅野哲平 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫
	脚部に平行リンク機構を用いた2足ロコモータの開発 (第16報: モータ冷却機構による稼働時間の飛躍的向上)	2008年9月	日本ロボット学会第26回学術講演会予稿集, 101-01	吉村勇希 <u>橋本健二</u> 沢戸瑛昌 林昭宏 服部賢太郎 浅野哲平 菅原雄介 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第15報：インパルス状外乱下における人間搭乗歩行の実現）	2007年12月	第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会予稿集, pp.813-814	橋本健二 菅原雄介 田中智明 太田章博 服部賢太郎 沢戸瑛昌 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発（第14報：脚機構の最適化設計）	2007年9月	日本ロボット学会第25回学術講演会予稿集, 1G22	橋本健二 菅原雄介 太田章博 服部賢太郎 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
	人間搭乗型2足歩行ロボットにおけるスチュワート・プラットフォーム型脚機構の最適化設計と評価	2007年7月	日本IFTtoMM会議シンポジウム前刷集（第13回）, pp.29-34	橋本健二 菅原雄介 服部賢太郎 太田章博 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 林憲玉 高西淳夫
	2足歩行ロボットの受動車輪機構を用いた滑走移動（第2報：ローラースケートによる蹴り出し動作の実現）	2007年5月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2007, 1A1-E12	橋本健二 菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	2足歩行ロボットの受 動車輪機構を用いた滑 走移動（第1報：インラ インスケートによるス ウィズル動作の実現）	2007年5月	日本機械学会ロボティ クス・メカトロニクス 講演会 2007, 1A1-E11	橋本健二 菅原雄介 細島拓也 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発（第13 報：推定姿勢補償制御と 着地軌道修正制御によ る人間搭乗屋外歩行の 実現）	2006年9月	日本ロボット学会第24 回学術講演会予稿集, 1F33	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 田中智明 太田章博 林昭宏 沢戸瑛昌 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発（第12 報：搭乗者の力学モデル を用いた歩行パターン 生成）	2006年9月	日本ロボット学会第24 回学術講演会予稿集, 1F32	橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 遠藤信綱 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発（第11 報：高可動範囲化を目的 とした2段直動アクチ ュエータの開発）	2006年9月	日本ロボット学会第24 回学術講演会予稿集, 1F31	橋本健二 菅原雄介 遠藤信綱 沢戸瑛昌 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林昭宏 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	2足歩行ロボットの不 整地適応能力向上を 図った足部機構の開 発(第3報:新保持機 構開発による不整 地歩行の実現)	2006年9月	日本ロボット学会第24 回学術講演会予稿集, 2F15	橋本健二 菅原雄介 林昭宏 川瀬正幹 太田章博 田中智明 遠藤信綱 沢戸瑛昌 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた汎用2足 ロコモータの開発(第1 0報:支持多角形拡大 による足部転倒防止 機構)	2006年5月	日本機械学会ロボティ クス・メカトロニクス 講演会2006, 2P1-B12	橋本健二 菅原雄介 田中智明 川瀬正幹 砂塚裕之 太田章博 林憲玉 高西淳夫
	人間搭乗型2足歩行ロ ボットWL-16RIIの歩 行中の剛性測定実験	2006年5月	日本機械学会ロボティ クス・メカトロニクス 講演会2006, 2P1-B11	菅原雄介 Giuseppe Carbone Marco Ceccarelli 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク 機構を用いた2足ロコ モータの開発(第9報: 非線形コンプライア ンス制御を用いた着 地軌道修正法と不整 地歩行の実現)	2005年9月	日本ロボット学会第23 回学術講演会予稿集, 1G26	橋本健二 菅原雄介 砂塚裕之 田中智明 太田章博 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第8報: スチュワートプラットフォーム型脚機構の1校正手法について)	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集, 1G25	橋本健二 田中智明 菅原雄介 砂塚裕之 太田章博 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第7報: 人間搭乗階段昇降の実現)	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集, 1G24	菅原雄介 太田章博 橋本健二 砂塚裕之 田中智明 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	2足歩行ロボットの不整地適応能力向上を図った足部機構の開発(第2報: 保持機構の強化による不整地歩行の実現)	2005年9月	日本ロボット学会第23回学術講演会予稿集, 1G23	橋本健二 菅原雄介 太田章博 砂塚裕之 川瀬正幹 田中智明 林憲玉 高西淳夫
	2足歩行ロボットの不整地適応能力向上を図った足部機構の開発	2005年6月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 1P1-S-041	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	福岡市ロボット開発・実証実験特区における2足歩行ロボットの公道歩行実験について	2005年6月	日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 1P1-S-040	菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 林憲玉 高西淳夫

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
2. 講演 の続き	2足歩行ロボットの移動効率向上を図った車輪式足部機構の開発	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 1K33	橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 砂塚裕之 川瀬正幹 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第6報: 姿勢補償制御を用いた傾斜路面歩行)	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 1K31	菅原雄介 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 川瀬正幹 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
	脚部にパラレルリンク機構を用いた2足ロコモータの開発(第5報: 自重支持トルク低減機構による可搬重量の増加と消費エネルギーの低減)	2004年9月	日本ロボット学会第22回学術講演会予稿集, 1K32	菅原雄介 川瀬正幹 御厨裕 細島拓也 砂塚裕之 橋本健二 林憲玉 高西淳夫
3. 特許	2足歩行ロボットの制御装置、及び2足歩行ロボットの制御方法	2008年9月	特願 2008-229532	高西淳夫 林昭宏 橋本健二 沢戸瑛昌 吉村勇希 浅野哲平 服部賢太郎
	制御装置、制御方法、及び2足歩行ロボット	2007年10月	特願 2007-278682	高西淳夫 田中智明 橋本健二 菅原雄介 太田章博 服部賢太郎 沢戸瑛昌 林昭宏

種類別	題 名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
3. 特許 の続き	多点接地型足部支持機構及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造	2007年9月	特願 2007-237309 特開 2008-93822	高西淳夫 林昭宏 <u>橋本健二</u> 菅原雄介 川瀬正幹 沢戸瑛昌 遠藤信綱 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	歩行パターン作成装置、2足歩行ロボット装置、歩行パターン作成方法、2足歩行ロボット装置の制御方法、プログラムおよび記録媒体	2006年9月	特願 2006-247375 特開 2008-68339	高西淳夫 川瀬正幹 <u>橋本健二</u> 菅原雄介 沢戸瑛昌 遠藤信綱 林昭宏 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	歩行パターン作成装置、2足歩行ロボット装置、歩行パターン作成方法、2足歩行ロボット装置の制御方法、プログラムおよび記録媒体	2006年4月	PCT/JP2006/308590 WO2007/032120	高西淳夫 <u>橋本健二</u> 菅原雄介 砂塚裕之 川瀬正幹 太田章博 田中智明 遠藤信綱 沢戸瑛昌 林昭宏 高本陽一 馬場勝之 井野重秋

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
3. 特許 の続き	歩行パターン作成装置、 2足歩行ロボット装置、 歩行パターン作成方法、 2足歩行ロボット装置 の制御方法、プログラム および記録媒体	2006年4月	PCT/JP2006/308609 WO2006/118095	高西淳夫 太田章博 砂塚裕之 菅原雄介 田中智明 橋本健二 川瀬正幹 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	直動リンク装置及びそれ を用いたロボット並び びに2足歩行ロボット	2006年4月	特願 2006-119934 特開 2007-290068	高西淳夫 遠藤信綱 橋本健二 菅原雄介 川瀬正幹 太田章博 田中智明 沢戸瑛昌 林昭宏 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	基準位置合わせ具及び それを用いた基準位置 合わせ方法	2005年9月	特願 2005-267697 特開 2007-75956	高西淳夫 菅原雄介 砂塚裕之 橋本健二 川瀬正幹 太田章博 田中智明 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	足部安全機構及びそれ を備えた2足歩行ロボ ット並びにその制御構 造	2005年9月	特願 2005-266064 特開 2007-75940	高西淳夫 田中智明 川瀬正幹 菅原雄介 橋本健二 砂塚裕之 太田章博 高本陽一 馬場勝之 井野重秋

種類別	題名	発表・発行年月	発表・発行掲載誌名	連名者
3. 特許 の続き	多点接地型足部支持機構及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造	2005年7月	PCT/JP2005/013882 WO2006/011577	高西淳夫 橋本健二 細島拓也 菅原雄介 御厨裕 川瀬正幹 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	歩行パターン作成装置、2足歩行ロボット装置、歩行パターン作成方法、2足歩行ロボット装置の制御方法、プログラムおよび記録媒体	2004年9月	特願 2004-267599 特開 2006-82155	高西淳夫 御厨裕 川瀬正幹 菅原雄介 細島拓也 橋本健二 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	自重支持装置及びそれを備えた2足歩行ロボット並びにその制御構造	2004年8月	特願 2004-242929 特開 2006-55973	高西淳夫 川瀬正幹 御厨裕 菅原雄介 細島拓也 橋本健二 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋
	足部走行機構及びそれを備えた2足歩行ロボット	2004年8月	特願 2004-242725 特開 2006-55972	高西淳夫 細島拓也 橋本健二 菅原雄介 御厨裕 川瀬正幹 砂塚裕之 高本陽一 馬場勝之 井野重秋