

環境認識機能を有する人間共存型脚式ロボットの開発

鎌野琢也*, 安野 卓*, 西尾芳文*

Development of Human Beings Coexistence Type Quadruped Robot
with Environment Recognition Functions

by

Takuya KAMANO*, Takashi YASUNO* and Yoshifumi NISHIO*

This paper describes a human beings coexistence type quadruped robot with environment recognition functions. To develop the excellent quadruped robot, the adaptive gait patterns on the level and unlevel walking environments are required. In this research, CPGs (Central Pattern Generators) are introduced to generate the gait pattern on level walking environment. The CPGs are mutually connected each other, and the sets of the coupling parameters are adjusted by genetic algorithm so that the quadruped robot can realize stable and adequate gait patterns. As a result of generation, the suitable CPG networks for a walking straight, a right and a left rotation gait patterns is obtained on the level walking environment. On the other hand, the geometric calculations method is introduced to keep the quadruped robot stable on unlevel walking environment. Experimental results demonstrate that effectiveness of the proposed schemes on both environments.

Keywords : Quadruped robot, Central Pattern Generator (CPG), Unlevel walking environment

1. はじめに

従来、「ロボット」といえば「産業用ロボット」のことを指し、生産現場での省力化・生産効率の向上を主な目的として導入され成果を挙げてきた。これらの産業用ロボットは、整備された作業環境下において、予め記述されたプログラムにより繰り返し動作を行うことで目的タスクを実現している。一方、近年、掃除ロボットなどの家事支援ロボットや警備ロボットなどが開発され、ロボットの活躍の場が一般家庭や職場などへ広がりつつある。これらのロボットには、不特定多数の人間が存在し、また、整地のみならず段差などが存在する不整備な環境下での作業が要求される。このような人間との共存環境で使用されるロボットを構築するためには、外部環境認識機能による障害物回避行動を実現することに加え、ロボット自体の内部状態を考慮し、不整地においても転倒することなく移動可能であることが不可欠となる⁽¹⁾⁽²⁾。

移動ロボットは、その移動機構により車輪式、クローラー式、脚式に大別される。そのなかで脚式は、車輪式やクローラー式に比べて移動におけるエネルギー効率に劣り、しかも、着地時には地面との間に衝突と拘束を生じるため制御が困難である。その反面、地面との絶対的な固定点を持たないため、より優れた環境適応能力を有し、不整地環境や人間との共存環境下で用いられるロボットの移動機構として魅力的な方法の一つと期待されている。

本研究では、人間共存型脚式ロボットの開発のための基礎研究として、異なるタイプの4脚ロボットを2台試作している。

まず、整地における効率的歩行パターンを生成するために、生体の筋骨格系と神経系を工学的にモデリングし、それらの内部パラメータを遺伝的アルゴリズム(GA)により調整する方法について検討している。ここでは、歩行パターンとして直進および右左折パターンを生成し、CCDカメラによる外部環境認識データをもとに、歩行パターンを切り替えることにより目標追跡や障害物回避を行なっている。また、ロボット自体の内部状態を考慮した安定な整地歩行パターンの生成についても検討している。

* 徳島大学工学部電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering

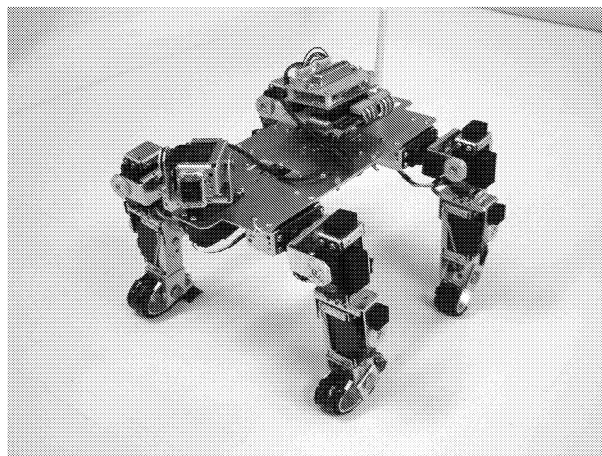
次に、不整地における安定静歩行パターンを生成する方法について検討している。ここでは、基本歩行パターンを間欠クロール歩容とした上で、段差などの不整地におけるロボット自体の内部状態から各脚の接地位置を修正する方法を用いている。これにより、ロボットの重心位置を常に接地脚の描く接地多角形内に留めることが可能となり、安定な静歩行が実現できる。

2. 試作 4 脚ロボット

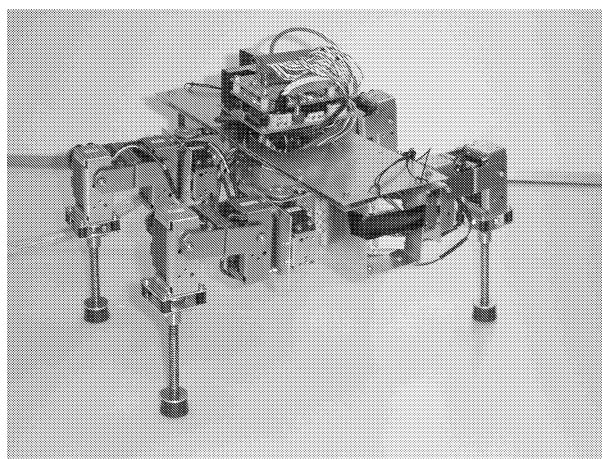
本研究では 2 つの研究目的それぞれに対して機構の異なる 2 台の 4 脚ロボットを試作した。

Fig.1(a) に示す 4 脚ロボット (Type-A) (全長 25cm, 全幅 25cm, 全高 24cm, 全重量 1.7kg) は、主として効率的歩行パターンの生成を目的として試作したものである。4 脚ロボットの各脚は、小型 DC サーボモジュールで駆動される能動関節 3 関節と、バネを組み込んだ足首受動関節 1 関節の合計 4 自由度を有している。いま、ロボットの進行方向を x 軸、横方向を y 軸、鉛直方向を z 軸と定め、 x 軸を回転軸とする股関節を第 1 関節、また、 y 軸まわりを回転する腰関節および膝関節を第 2 関節、第 3 関節とする。第 1 関節は旋回歩行動作を行う際に主として用いられ、第 2 関節と第 3 関節は脚を前後に振ることで前進歩行動作を実現する。関節角度は、小型 DC サーボモジュールに内蔵されたポテンシオメータにより検出し、脚の接地状態は足裏に設けたタッチセンサにより検出する。また、ロボットの頭部に小型カラー CCD カメラを取り付け、頭部を上下左右に制御することで外部環境を認識できるようにしている。認識した視覚情報は、上位中枢からの指令としてロボットの行動を制御するために用いる。試作ロボットは、胴体部に設置した H8 マイコンとニッケル水素バッテリー (9.6V) により自立歩行も可能であるが、本研究ではケーブルを介してロボットを外部電源とホストコンピュータに接続して実験を行っている。

Fig.1(b) に示す 4 脚ロボット (Type-B) (全長 30cm, 全高 24cm, 全幅 32cm, 重量 2.25kg) は、主として不整地における安定静歩行を検討するために試作したロボットである。各脚の第 1 関節は z 軸回りに回転し、第 2、第 3 関節は x 軸回りに回転する。すなわち第 1 関節で前進動作を実現し、第 2、第 3 関節は脚先を持ち上げる動作を実現する。各関節のアクチュエータには、前述のロボットと同様の小型 DC サーボモジュールを用い、ポテンシオメータにより関節角度を検出する。また、ロボットの内部状態を判断するために各脚先にタッチセンサと、ロボット胴体中央部に傾斜センサを 2 個設け、脚の接地状態および胴体のピッチ角とロール角を検出する。以上のセンサ情報は、16 ビット A/D 変換器を介して 0.04sec ごとにコンピュータにフィードバックされ、順次関節角度指令が計算される。



(a) Type-A.



(b) Type-B.

Fig. 1 Our developed quadruped robot.

3. 整地における効率的歩行パターンの生成

〈3・1〉 CPG モデル 生理学的知見から、神経振動子モデルは Fig.2 のように興奮性ニューロン (Excitatory neuron) と抑制性ニューロン (Inhibitory neuron) を相互結合したものと表現され、筋骨格系の指令となる周期的動作パターンを生成していることが知られている⁽³⁾⁽⁴⁾。この神経振動子モデルを工学的に模擬し、脚式ロボットの歩行パターンの生成に用いた例が多く報告されている^{(5)~(14)}。そのほとんどは、CPG モデルで筋骨格系の規範パターンを生成し、それを実現するように各関節アクチュエータを制御するものである。この場合、CPG モデルは規範生成器として機能するため、関節アクチュエータに過負荷となる指示を与えたり、それを防ぐために多くの関節状態量の

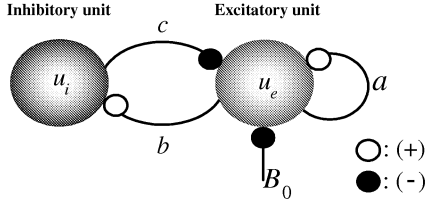


Fig. 2 CPG model

フィードバック情報が必要となる。

そこで本研究では、Type-A の4脚ロボットを用いて、限られたセンサ情報と少ない計算負荷で環境の変化にもある程度適応可能な歩行パターンを自律的に生成するために、CPG モデル内の抑制性ニューロンの機能を関節アクチュエータ (DC モータ) の位置サーボシステムで代替した新しい CPG モデルを提案する⁽¹⁵⁾。

Fig.3 に提案する CPG モデルのブロック図を示す。図中、 u_e : 興奮性ユニットの内部状態、 u_i : 抑制性ユニットの内部状態 (= 関節角)、 a : 自己興奮性結合係数、 b : 抑制性結合係数、 c : 興奮性結合係数、 K_m : DC モータのゲイン定数、 τ_m : DC モータの時定数、 K_g : ギア比、 K_a : DC アンプのゲイン、 ω : 回転角速度、 d : 外乱、 B_0 : 外部入力、 D : 微分演算子である。この図から明らかなように、本 CPG モデルにおける DC モータは、CPG からの指令に基づいて動作するアクチュエータとしてではなく、CPG の構成要素として発振に寄与するものである。それゆえ、DC モータの動特性に応じた発振パターンが得られることになる。

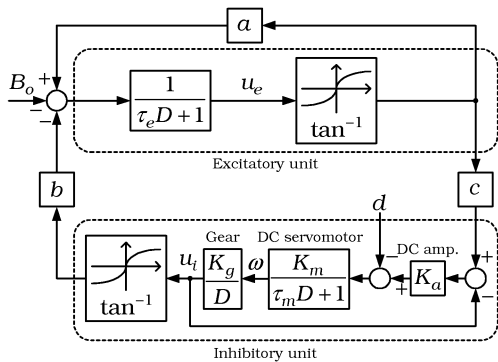


Fig. 3 Proposed CPG model.

Fig.3 に示した CPG モデルの状態方程式は次式で与えられる。

$$\tau_e \frac{du_e}{dt} = -u_e + a \tan^{-1} u_e - b \tan^{-1} u_i - B_0 \quad (1)$$

$$\tau_m \frac{d^2 u_i}{dt^2} = -\frac{du_i}{dt} - K_a K_g K_m u_i + c K_a K_g K_m \tan^{-1} u_e - K_g K_m d \dots \quad (2)$$

結合係数 a , b , c および外部入力 B_0 をそれぞれ変化させることにより、ニューロンの内部状態 u_e , u_i の発振波形の振幅と周波数を変化させることが可能である。

(3-2) CPG ネットワーク Fig.1(a) の供試 4 脚ロボットを歩行させるためには、各脚の第 2 関節および第 3 関節の協調動作により、その脚先を接地して後ろに蹴り出した後、浮遊して前に引き戻す動作を繰り返す必要がある。また、各脚間は各脚の周期運動に適切な位相差を設けることによって歩容動作を実現しなければならない。さらに、旋回動作では、各脚先の動作に応じて第 1 関節を動作させなければならない。そのため、提案する CPG を各脚の各関節に設け、それらを Fig.4 に示すように相互結合する。ここで、様々な動作を実現するためには、Fig.4 に示す CPG ネットワークの結合係数 k_{ij} (i, j : 関節番号 0~11) を適切に設定する必要がある。

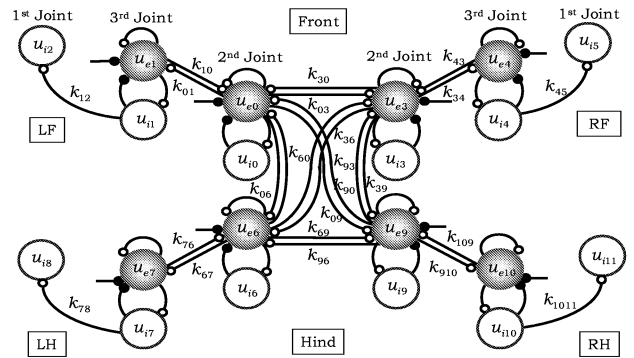


Fig. 4 CPG network

(3-3) GA による CPG ネットワークのパラメータ調整 CPG ネットワークを用いて 4 脚ロボットを歩行させるためには、CPG の内部パラメータおよび CPG ネットワークの結合係数をロボットの身体性に応じて決定する必要がある。しかしながら、これらのパラメータの組み合わせには多様性があり、また、試作した 4 脚ロボットおよび歩行環境の正確なモデルを導出することは困難であることから、ここでは組み合わせ最適化手法の一つである GA を用いる。そして、試作した 4 脚ロボットを実際に動作させることによって個体を評価し、歩行運動を実現するためのパラメータを探索する。

(3-3-1) コーディング 各個体は左右の脚の対称性を考慮し、CPG の内部パラメータ (a , b , c) と CPG ネットワークの結合係数 ($k_{10} \sim k_{96}$) を実数値遺伝子の配列としてコーディングする。ただし、探索範囲は供試 DC モー

タの公称値を用いたシミュレーションにより事前を得ることができるため、ここでは学習を効率良く行うために予め探索範囲を設定する。

〈3・3・2〉 個体の評価 上述のようにコーディングされた初期個体をランダムに7個体用意する。そして、各個体が表現するパラメータや結合係数を順次試作した4脚ロボットに適用し、次式に基づいて評価する。

評価1 前進動作においては横方向のずれはペナルティとし、評価時間内にロボットがx軸方向へできる限り直進できる個体を優良個体として評価する。そのとき個体は次式で評価される。

$$f_1 = \{x(T) - x(0)\} - g_1 \{y(T) - y(0)\} \cdots \quad (3)$$

ここで、 T :各個体の評価時間、 $x(T)$:評価時間終了後のx方向移動距離、 $y(T)$:横方向のずれ、 $(x(0), y(0))$:初期位置座標、 g_1 :ペナルティゲインである。同様に、旋回動作においてはその場での旋回を目的としているので、評価時間 T 後の旋回角 $\theta(T)$ をもとに、重心位置のずれをペナルティとして評価する。すなわち、次式で評価する。

$$f_1 = \{\theta(T) - \theta(0)\} - g_2 \sqrt{\{x(T) - x(0)\}^2 + \{y(T) - y(0)\}^2} \quad (4)$$

ここで、 $\theta(0)$:初期角、 g_2 :重心位置ずれに対するペナルティゲインである。以上の評価は、Type-Aの試作ロボットに適用して実測される。

評価2 直進移動距離に加え、ロボット自体の傾斜角を設定範囲内にできる限り保持できる個体を優良個体として評価する。これは、安定歩行を実現する一つの評価となり、次式により評価する。

$$f_2 = \alpha L - \beta \sum_{t=0}^{T/T_s} (|Q_p(t)| + |Q_r(t)|) \cdots \quad (5)$$

ここで、 α と β :ゲイン、 L :試行時間 T での歩行距離、 T_s :サンプリングタイム、 Q_p と Q_r :サンプリングタイムごとのロボット胴体のピッチ角とロール角である。この評価は、Type-Bの供試4脚ロボットに適用して実測される。

〈3・3・3〉 遺伝子操作 前述の個体評価に基づいて一世代すべての個体の適応度が決定された後、Fig.5に示すエリート保存戦略、ランク戦略、多点交叉、突然変異等の遺伝子操作を行う。これらの操作を設定世代数繰り返すことで、最適なパラメータを探索する。

〈3・4〉 歩行特性

〈3・4・1〉 評価1に対する歩行特性 まず、評価1(前進動作評価)を適用した場合の歩行特性を示す。Fig.6は設定世代数を75、1個体の評価時間を5sとしたときの前進動作に対する各世代ごとの最大適応度(=最大移動距離)の推移を示している。初期世代では約4cm/sの移動速度であったが、世代の進行とともに移動速度は徐々に大きくな

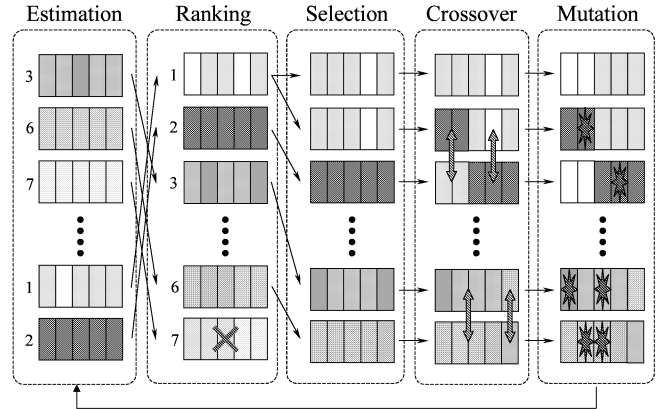


Fig. 5 Genetic operations.

り、75世代目では約9cm/sの速度で安定して歩行できるようになっている。Table1は、75世代目の最優良個体が表すCPGの内部パラメータとCPGネットワークの結合係数を示している。

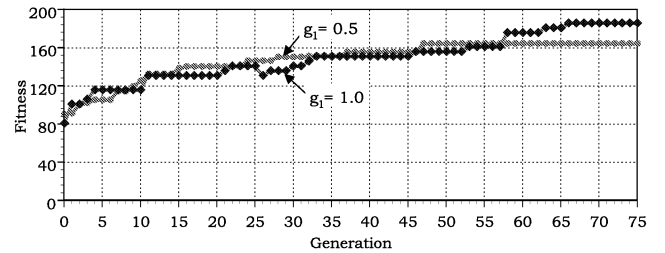


Fig. 6 Maximum value of fitness Eq.(3).

Table 1 Estimated CPG parameters and coupling parameters.

a	6.79	b	15.53	c	0.14	τ_e	0.08
k_{10}	-3.94	k_{01}	3.09	k_{43}	-3.94	k_{34}	3.09
k_{76}	-3.94	k_{67}	3.09	k_{109}	-3.94	k_{910}	3.09
k_{30}	-2.38	k_{60}	2.73	k_{03}	-2.38	k_{06}	-2.93
k_{90}	-3.20	k_{63}	-3.20	k_{09}	3.34	k_{36}	3.34
k_{93}	1.95	k_{96}	-2.38	k_{39}	-2.93	k_{69}	-2.38

Fig.7は75世代目の最優良個体を用いて前進歩行動作を行った場合の各脚第2、第3関節の応答を示している。各脚は適切な位相差を生じることによりWalk歩容を実現している。同様に、左右旋回についても実測しているが、紙面の都合によりここでは割愛する。

次に、ロボットの頭部に搭載したCCDカメラにより目標物体を検出し、GAで生成した前進動作、右旋回動作、左旋回動作の3つの基本歩行パターンを用いて追跡動作を行っている。追跡動作のアルゴリズムは以下の通りである。

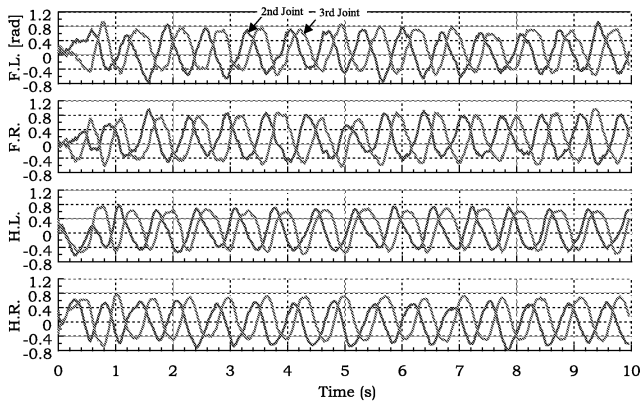


Fig. 7 Responses of the second and third joint angle of each leg for forward walking motion.

- ステップ 1 目標物が画面中央に位置するように首の振れ角を制御する。
- ステップ 2 首の振れ角から目標物とロボット胴体の角度 α を検出する。
- ステップ 3 $\alpha = 0$ となるように左右旋回動作を行う。
- ステップ 4 $\alpha = 0$ となった段階で歩行動作を旋回動作から前進動作に切り替える。前進動作への切り替えは、GA で生成したパラメータの組を切り替えることで実現する。
- ステップ 5 前進動作中に画面が目標物を捉えることができなくなれば一端前進動作を中止し、ステップ 1 に戻る。
- ステップ 6 ロボットが目標物に到達すると追跡動作を終了する。

Fig.8(a)~(d) は、4脚ロボットが円形目標物を追跡している様子を示している。頭部のスイングにより円形の目標物を認識し、 $t=4.0s$ の時 (Fig.8(b)) にその場で左旋回動作を行って目標物方向を向いた後、前進歩行により目標物への追跡歩行に成功している。

また、目標物を障害物に置き換え、それを迂回するように同アルゴリズムを変更すれば、容易に障害物回避動作を実現できることも確かめている。

〈3・4・2〉 評価 2 に対する歩行特性 評価 2 (本体傾斜角を考慮した評価) を用いて GA により相互結合係数を実験的に探索した結果を Fig.9 に示す。ここでは、比較のために移動速度のみを考慮した適応度による学習結果も示している。速い移動速度を得るためには、適度に胴体を揺らせながら脚の振れを大きく取る必要がある。それゆえ、胴体の揺れと移動速度の間にはトレードオフがある。しかし、GA により進化の過程で適当な妥協点を見出し、それにより比較的高速で安定した歩行パターンが得られている。

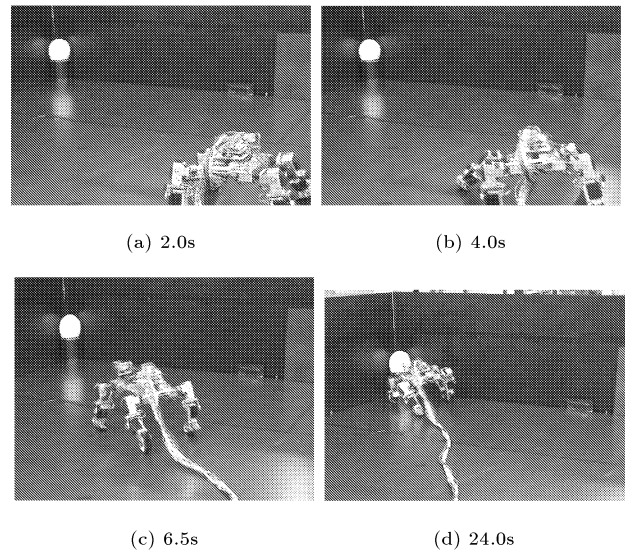


Fig. 8 Example of target tracking performance.

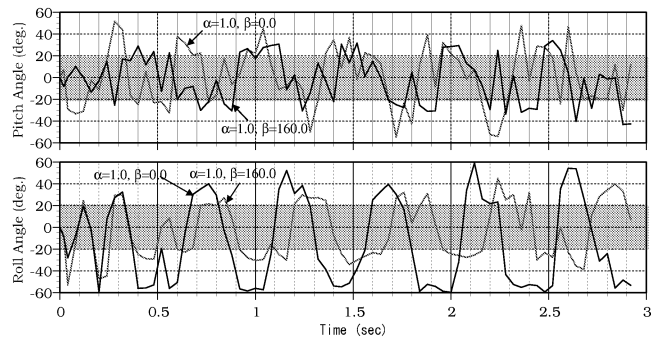


Fig. 9 Rolling and pitching angles of the robot's body on the level floor.

4. 不整地における安定静歩行パターンの生成

〈4・1〉 安定静歩行動作 前章では、整地での歩容パターンを効率的に生成する手法について検討した。これに対して不整地では、脚の接地状況やロボット自体の状態に基づいて安定性を最優先に考えなければならない。そこで、本研究ではより安定性の確保が容易な Type-B の 4 脚ロボットを用いて安定静歩行動作について検討する。ここで、基本歩行パターンとして Fig.10 に示す間欠クロール歩容を用いることとする。

〈4・2〉 歩行動作の安定化 斜面や段差などを含む不整地を転倒することなく安定して歩行するためには、常にロボット本体の重心位置が支持脚の描く多角形内に留まるように姿勢を制御する必要がある。しかし、斜面等を歩行する場合、整地での基本間欠クロール歩容を継続すれば、重

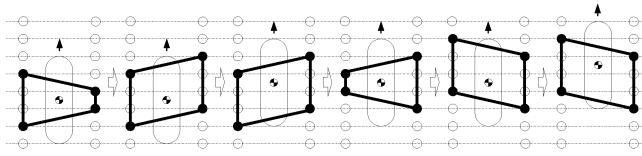


Fig. 10 Intermittent crawl gait.

力の影響でロボット本体の重心位置が支持脚の描く多角形外に移動することになり、転倒の危険性が大きくなる。そこで、Fig.11に示すように、斜面上に位置するロボットの水平面における重心投影点 G' を支持多角形内に保持するよう、前脚と後脚の着地点を $Q \rightarrow B$, $P \rightarrow A$ に変更し、 B 点および A 点を脚の旋回中心として脚の動作パターンを変更する。斜面の傾斜角はロボットに搭載した傾斜センサで測定し、脚の着地点は測定された各関節角から逆運動学モデルを用いて計算する。これより、不整地においても安定な歩行が実現できる。

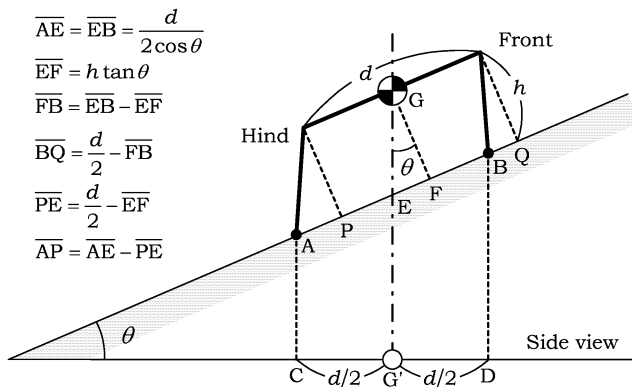


Fig. 11 The relationship between the posture and the position of stance legs on the slope.

〈4・3〉 不整地歩行特性 上述した安定化アルゴリズムを Type-B の試作 4 脚ロボットに適用し、5cm の段差乗り越え実験を行った。その結果を Fig.12 に示す。登段および降段時には、センサ情報に基づいて各脚の着地位置が修正されるため、それに伴って脚の振り幅が調整され、ロボット本体のピッチ角を $\pm 20\text{deg}$. 範囲に留めるような安定歩行が実現できている。また、段差乗り越え以外に、急な斜度 ($+30\text{deg}$. と -25deg .) の坂道における安定歩行も確認している。

5. まとめ

本研究では、人間共存型脚式ロボットに必要な不可欠な動作として、まず、整地における効率的な歩行パターンの生

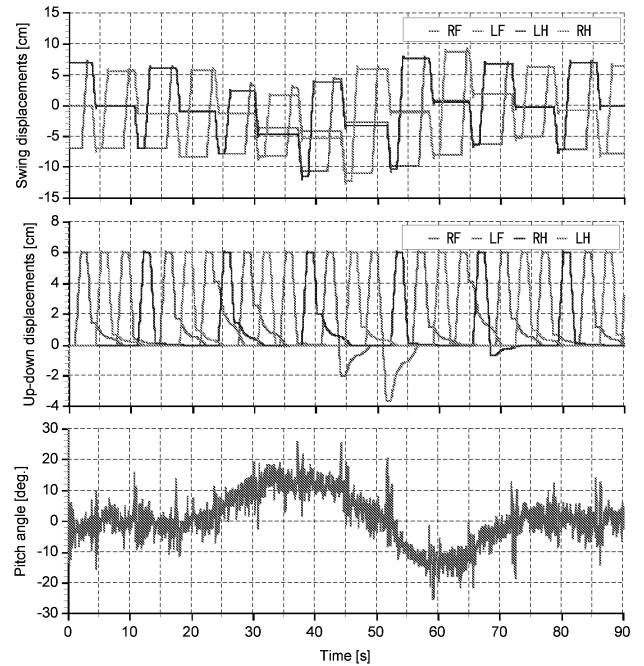


Fig. 12 Experimental results on the uneven terrain with the step.

成方法とそれらを用いた目標追跡特性について、次に、不整地における安定歩行の実現について実験的に検討した。その結果、整地における前進および右左折の歩行パターンを遺伝的アルゴリズムにより効率的に生成できることが確かめられた。また、それらの歩行パターンを外部環境の認識により切り替えることで、目標追跡や障害物の迂回避が可能であることも確認した。次に、斜面や段差などの不整地における安定化制御の結果、各脚の着地位置を適切に修正することで、転倒することなく安定な歩行を実現できることが確認できた。今後は、外界センサ情報と内界センサ情報の融合により、自律的環境認識とそれに基づく行動制御戦略について検討する予定である。

本研究は、平成 15 年度徳島大学工学部研究プロジェクトの補助を得て行った。記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 古荘純次:「歩行ロボットの研究展開」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.306-313 (1993)
- (2) 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)
- (3) Y. Nakamura and H.Kawakami: "Hard Oscillation and Its Synchronization of a Simple Neural Oscillator", Proceedings of International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Vol.1, No.2G-7, pp.351-354 (1995)
- (4) Y. Son, T. Kamano, T. Yasuno, T. Suzuki and H. Harada: "Target Tracking Control of Quadrupedal Robot using CPG Network Tuned by Genetic Algorithm", Proceedings of 2002

International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes, No.TA2D-4, pp.661-666 (2002)

- (5) 土屋和雄, 辻田勝吉: 「Central Pattern Generator モデルに基づく 4 脚歩行ロボットの歩行制御」, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3, pp.243-246 (2002)
- (6) J. Estremera and P.G. Santos: "Free Gaits for Quadruped Robots over Irregular Terrain", Int. J. of Robotics Research, Vol.21, No.2, pp.115-130 (2002)
- (7) 五十嵐洋, 柿倉正義: 「3 次元経路計画を想定した 4 脚ロボットの適応的歩容制御」, 電学論誌 C, Vol.123, No.10, pp.1813-1821 (2003)
- (8) 伊藤宏司: 「歩行運動とリズム生成」, 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.3, pp.320-325 (1993)
- (9) 木村浩: 「生物を規範とした脚式ロボットの不整地適応」, 計測と制御, Vol.42, No.9, pp.705-711 (2003)
- (10) G. Taga: "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion I. Emergence of basic gait", Biological Cybernetics, No.73, pp.97-111 (1995)
- (11) G. Taga: "A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion II. Real-time adaptability under various constraints", Biological Cybernetics, No.73, pp.113-121 (1995)
- (12) 木村浩: 「神経振動子を用いた四足ロボットの不整地動歩行と整地走行」, 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.8, pp.1138-1145 (1998)
- (13) 福岡泰宏, 木村浩: 「4 足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行 — 体性感覚・前庭感覚による調節 —」, 日本ロボット学会誌, Vol.19, No.4, pp.510-517 (2001)
- (14) 福岡泰宏, 木村浩: 「4 足ロボットの生物規範型不整地適応動歩行 — 神経—機械カップリング系構成法の提案とピッチ運動・CPG・ロール運動間相互引き込みの評価 —」, 日本ロボット学会誌, Vol.21, No.5, pp.569-580 (2003)
- (15) 孫悠洛, 鎌野琢也, 安野卓, 鈴木茂行, 原田寛信: 「モータ動特性を考慮した CPG ネットワークによる 4 脚ロボットの歩行動作の生成」, 電気学会論文誌 C, Vol.124, No.10, pp.2148-2154 (2004)