

四脚ロボットにおける曲線歩行の高速化

Design of Fast Walk Trajectory along Curved Paths for Quadruped Robots

精密工学専攻 41号 藤岡 徹

Toru Fujioka

1. 序論

脚移動型ロボットは車輪型ロボットに比べ不整地や段差などでの適性が高く、搬送や調査等の利用が期待されている。東芝の四足歩行ロボットは原発内の調査、Boston Dynamics社のLS3は米海兵隊の荷物搬送など徐々にではあるが実用例も見られている。そのため、様々な側面から脚移動型ロボットの開発や制御性の向上を目指した研究が行われている。

一例として動歩行時の安定性向上のための制御手法としてZMP制御⁽¹⁾⁽²⁾を用いた研究が行われている。また、近年は様々な環境への適応についても研究されている。BigDog⁽³⁾は整地だけでなく雪面や濡れた地面においても歩行を実現し、TITAN-IX⁽⁴⁾は地雷撤去用ロボットとして開発されている。一方、脚移動型ロボットは車輪型やクローラ型に比べ移動速度が遅いという問題もある。歩行速度の向上は作業の効率化につながるため、実用化に向けても重要な課題である。バウンス歩容を用いた高速な四脚ロボットの開発⁽⁵⁾⁽⁶⁾などの研究も行われているが、様々な機械的コンプライアンスが必要となるなど問題点も存在する。

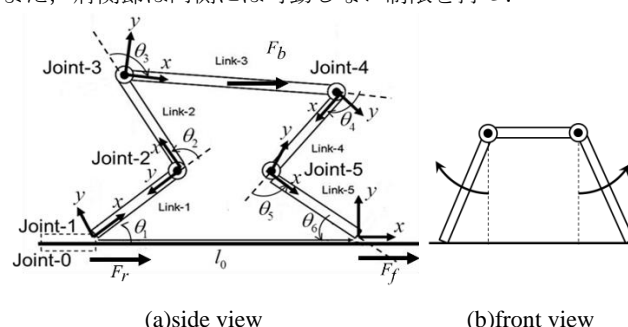
我々の研究室では上記のようにアクチュエータなどの改良は行わずに、安定かつ高速な歩行であるトロット歩容を用いて四脚ロボットの理論的な最速動作を求めることでこの課題の解決を目指してきた。遊脚相に対しBobrowらの提案した最短時間制御⁽⁷⁾⁽⁸⁾を応用し、支持脚相では歩行中の姿勢を一定に保ったまま、前後脚で発生させる推進力の比率を歩行中に変えることで、速度の向上を図った⁽⁹⁾。

しかし、先行研究の問題点として直線での歩行のみにしか適用できないということが挙げられた。実空間での作業を想定した場合、カーブや旋回など様々な歩行のバリエーションが求められる。そこで本研究では曲線歩行での高速化を目的とする。四脚ロボットの曲線歩行を取り扱った研究としては辻田ら⁽¹⁰⁾による研究があるが、ロボットの開発及び制御システムに焦点が当てられているためあくまで歩行パターンの一例であり、力学的・理論的な歩行の解析は行われていなかった。また、自由度が多いロボットを使用しているため本研究で制御対象としているAIBO "ERS-7"(SONY)には適用できなかった。本研究は必要最低限の自由度を有したロボットのモデルを対象とし、高速な曲線歩行動作を求めることで幅広い四脚ロボットへの適用が可能となる。また、本研究と先行研究によって、直線歩行と曲線歩行を組み合わせた任意の初期位置から目標位置への最速歩行パターンの生成を行うことができるため、障害物などを想定した実空間への適用に意義を持つ。

2. 四脚ロボットの動力学モデル

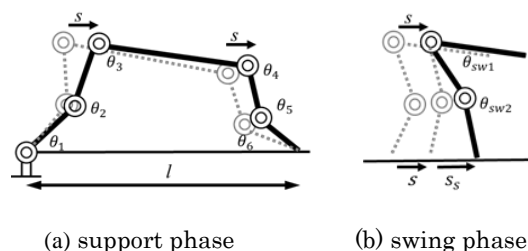
2.1 運動学モデル

制御対象AIBO "ERS-7"は各脚に前後方向2自由度、左右方向外側に1自由度の計3自由度を持つ。胴体の質量に比べ各脚の質量は小さいため、遊脚による慣性力の影響は無視することができる。ロボットの2次元モデルは図1のように5リンクのシリアルマニピュレータと近似することができる。また、肩関節は内側には可動しない制限を持つ。



(a)side view (b)front view
Fig.1 Model of quadruped robot

本研究では制御の簡略化のため歩行条件として胴体部の高さ h 、傾き θ_0 、支持脚間距離 l_0 を一定としている。また、トロット歩容という対角の脚を交互に出す歩行を用いる。これらの条件によって、重心の進行方向距離のパラメータ s を用いて図2のように支持脚・遊脚の運動を表すことができる。



(a) support phase (b) swing phase
Fig.2 Relationship between body movement and joint angles

2.2 動力学方程式

図1のモデルより動力学方程式は式(1)のように表せる。

$$\begin{aligned} \tau_{sp} &= \mathbf{H}_{sp}(\theta_{sp})\ddot{\theta}_{sp} + \mathbf{h}_{sp}(\theta_{sp}, \dot{\theta}_{sp}) + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_f \\ \theta_{sp} &= [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5 \ \theta_6]^T \\ \mathbf{F}_f &= [f_{fx} \ f_{rx}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

ただし、 \mathbf{H}_{sp} は5リンクマニピュレータの慣性行列、 \mathbf{h}_{sp} は非線形項、 \mathbf{F}_f は前脚での発生力、 \mathbf{J}^T はヤコビ行列である。

2.3 アクチュエータによる拘束条件

アクチュエータにはDCサーボモータが使われている。入

力電圧 V_{sp} と出力トルク τ_{sp} には式(2)のような関係を示す.

$$V_{sp} = K_E \dot{\theta}_{sp} + R_a K_r^{-1} \tau_{sp} \quad (2)$$

ここで、 R_a はモータの電気抵抗、 K_E は誘起電圧定数行列、 K_r はトルク定数行列である. モータの駆動電源電圧が決定されると、その時のモータ回転速度に合わせて発生可能トルクの限界も決定される.

3. 高速化手法

本研究では先行研究によって提案された二つの高速化手法を曲線歩行においても適用する. 以下に示す手法により歩幅を広げ、歩行の周期を早くすることができる.

3.1 支持脚相における推進力比の最適化

ロボットの歩行のための推進力は図1のように前後支持脚が地面を蹴ることによって発生する力 F_f と F_r の和となる. 一方でトロット歩容の場合、歩行中の胴体部加速度は力学的な拘束から一意に定まってしまうため、胴体の歩行に必要な推進力 $F_b (=F_f + F_r)$ を変化させることができない. ただし、前後支持脚への推進力比を変化させることにより、脚関節にかかる負担を変化させることができるため、これを利用することで、歩幅を広げながら平均速度を向上させることができる. 推進力比を α とすると F_f と F_r は式(3)のようになる.

$$F_f = (1-\alpha)F_b, \quad F_r = \alpha F_b \quad (3)$$

推進力比 α の決定法は先行研究⁽⁹⁾を参照のこと.

3.2 遊脚相における最短時間制御

最短時間制御とは初期状態から終端状態まで最大加速・最大減速の切替えのみを行う制御手法である. 図3のように遊脚の変位を s 、速度を \dot{s} として示す. 遊脚の初期終端状態は支持脚により拘束されるため点A、Bは歩幅によって決定される. また、破線部はアクチュエータにより制限された最大速度の曲線である. 遊脚は初期状態Aより最大加速で加速し、速度制限を超えないよう点Cで最大減速に切り替える. 同時に終端状態Bより時間を遡るように最大減速を行い、同様に速度制限を超えないよう点Eで最大加速に切り替える. 最後にこの2曲線が交わった時遊脚軌道が完成される.

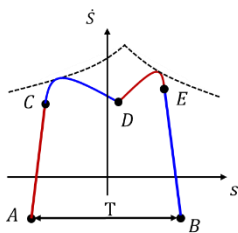


Fig.3 Time optimal trajectory for swinging legs

4. 曲線歩行理論の構築

制御対象において曲線歩行を実現するために考慮すべき点が二つある. 一つ目は遠心力の影響である. これにより制御が複雑になってしまうという問題がある. 二つ目は脚の可動域の制限である. 図1に示した通り肩関節は内側には可動しないために脚の出す位置を適切に考慮しなければ転倒やつまずきの恐れがある. そこで本研究ではロボット胴体部の

運動と歩幅に着目し、問題の解決を目指した. 遠心力の作用しない胴体部軌道を提案し、その胴体部軌道と脚の接地可能範囲から逆算的に歩幅の探索を行う.

4.1 曲線歩行理論-胴体部-

4.1.1 ロボット胴体部の運動

ロボット胴体部の目標軌道を曲率半径 R の円弧とする. また、トロット歩容の半周期ごとに中心 O から回転角 θ での移動を行う. 目標とする円弧に沿ったロボット胴体部の軌道を考える場合外向きに遠心力の影響を受ける. そのため、図3のような長さが短い直線軌道の連続と考えることで遠心力が作用せず、並進運動と回転運動の組み合わせとして運動を表す. このときZMP(Zero Moment Point)から重心真下までの距離を S (以下線長)、重力加速度を g 、胴体部高さを h とすると、胴体部の並進運動は式(3)、慣性モーメントを I 、脚に発生する力を N とすると、回転運動は式(4)のように表せる.

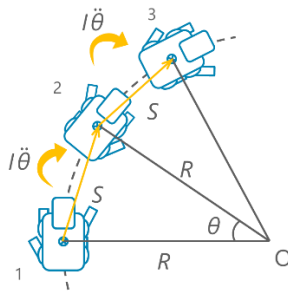


Fig.4 Curved path stroke of robot body

$$\ddot{S} = \frac{g}{h} S \quad (4) \quad I \ddot{\theta} = N \quad (5)$$

4.1.2 ZMP 制御とロボット胴体部の速度

ZMP が支持脚対角線上にあるときにトロット歩容では安定した歩行ができる. そこで、支持脚対角線上にZMPを制御し、 $S=0$ とする. 式(3)の微分方程式を解き、速度について整理すると、

$$\dot{S} = \sqrt{\dot{S}_0^2 + \frac{g}{h} S^2} \quad (6)$$

となる. 式(5)を用いて胴体部速度と線長の関係を図5のようにグラフに示す. 二次曲線の横幅 T 、 T' は歩幅を表す. 脚の可動域の制限があるために、トロット歩容の脚パターンによって図のように二種類の速度波形が得られる. また、グラフよりトルク限界・加速度限界を考慮したうえで歩幅を広げ、最低速度 \dot{S}_0 を上げることが高速化につながる事が分かる.

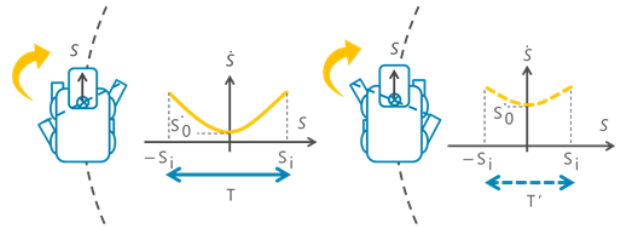


Fig. 5 Velocity of robot body by each leg pattern

4.1.3 曲線歩行におけるロボット胴体部の速度パターン

4.1.2 項より曲線歩行ではトロット歩容の2つの脚パターンにおいて速度と歩幅が異なるため、連続的な曲線歩行においては図6のような周期的な速度波形の繰り返しとなる。また、グラフよりトロット歩容の脚の切り替え点では速度が一致しなければならない。そこで、本研究ではより速度が出る遊脚パターンを先に設計することで全体の歩行速度の向上を図った。

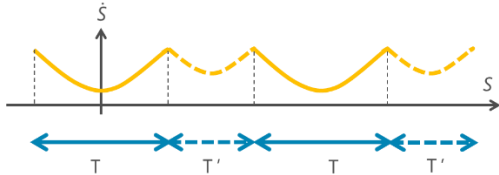


Fig. 6 Periodic pattern of velocity along curved path

4.2 曲線歩行理論-歩幅-

4.2.1 脚の接地位置の探索法

4.1 節で提案した胴体部の目標軌道を達成するためには適切な歩幅を求めなければならない。なぜならロボットの肩関節は内側に可動しないという制限があるため、転倒やつまずきの可能性がある。そこで、ERS-7のパラメータから脚の接地可能範囲を求め、胴体部の目標軌道と照らし合わせることで歩行が達成可能な脚の接地位置を探索する。

4.2.2 脚の接地可能範囲

進行方向前後、左右に対する脚の接地距離は脚のリンク長と胴体部高さを用いて表すことができる。図7のように前後脚のリンク長 l と胴体部高さ h をおくと、膝を曲げずに脚を伸ばした時に最大接地距離をとる。前脚、後脚の最大接地距離 l_{fmax} , l_{rmax} はERS-7のパラメータによって幾何的に一意に定まる。よって脚の接地可能範囲はロボットを上から見たとき、 l_{fmax} , l_{rmax} を半径とする半円の領域として図示できる。

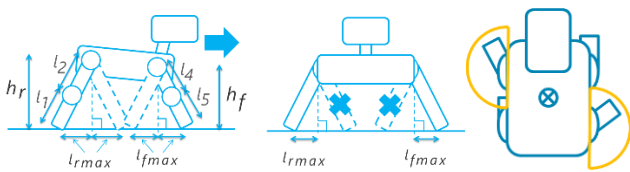


Fig.7 Reachable areas of legs

4.2.3 歩幅の決定法

4.2.2 項で求めた脚の接地可能範囲を用いて、歩行が達成可能な脚の接地位置を探索する。図8のようにトロット歩容における半周期後の胴体部位置を考えると、半円が重なっている領域に脚を接地すれば歩行が達成可能であることが分かる。また、トルク限界・遊脚達成時間を考慮した上で半円の重なる領域を調節し、歩幅を広げることで歩行の高速化が達成できる。

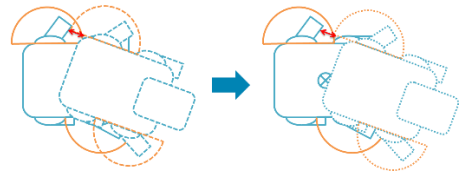


Fig.8 Determination method of stride

5. 曲線歩行シミュレーション

5.1 シミュレーション条件

これまで導出した理論式(1)~(6)を用いて曲線歩行シミュレーションを行う。表1~3がそれぞれ力学・機構・歩行パラメータである。

Table 1 Parameters of Robot links

| | Link-1 | Link-2 | Link-3 | Link-4 | Link-5 |
|------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| L_i [m] | 0.076 | 0.089 | 0.133 | 0.089 | 0.071 |
| M_i [kg] | 0.06 | 0.06 | 1.42 | 0.06 | 0.06 |

Table 2 Parameters of servo motors

| | Joint-2 | Joint-3 | Joint-4 | Joint-5 |
|---------------|---------|---------|---------|---------|
| V_{max} [V] | 7.4 | 7.4 | 7.4 | 7.4 |
| K_e | 1.39 | 1.28 | 1.29 | 1.28 |
| K_τ | 1.15 | 1.12 | 1.15 | 1.12 |
| R_a [Ω] | 8 | 8 | 8 | 8 |

Table 3 Parameters of robot locomotion

| R[m] | h[m] | θ_0 [deg] | l_0 [m] |
|------|-------|------------------|-----------|
| 3.00 | 0.143 | -7 | 0.100 |

5.2 曲線歩行シミュレーション

曲線歩行シミュレーションの結果を表4及び図9に示す。4.1 節で示した通り、トロット歩容の二つの脚パターンにおいて速度と歩幅の違いを確認することができた。歩行速度に関しては直線歩行の最速である464[mm/s]に比べると遅いものの、胴体部の向きを変えるために脚の力を使うため妥当な結果であると考えられる。

Table 4 Simulation result

| T[mm] | T'[mm] | θ [deg] | θ' [deg] | \bar{v} [mm/s] | \bar{v}' [mm/s] |
|-------|--------|----------------|-----------------|------------------|-------------------|
| 55.4 | 44.9 | 0.0152 | 0.0145 | 385.1 | 397.7 |

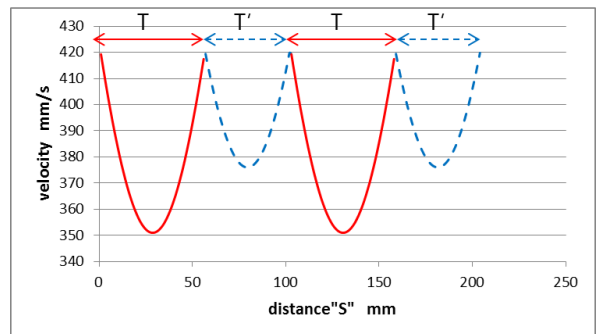


Fig. 9 Velocity along curved path in simulation

6. 三次元物理演算シミュレータを用いた挙動解析

衝突判定や重力・摩擦の影響を考慮し、実空間に近い環境でシミュレーションを行うことができる三次元物理演算シミュレータを用いて挙動解析を行う。5章の歩行シミュレーションでは2章の図1にも示す通り、ロボットを平面で考えた二次元近似モデルを用いているため三次元の実験機との違いが存在する。そこでODE(Open Dynamics Engine)をベースとする”Go Simulation”というソフトを用いて3次元歩行シミュレーションを行った。シミュレーション条件としては5章のパラメータとそのシミュレーションによって得られた角度データを用いて実際に曲線歩行が可能か検証した。図10に各軸における時間ごとの重心の変位のグラフを示す。

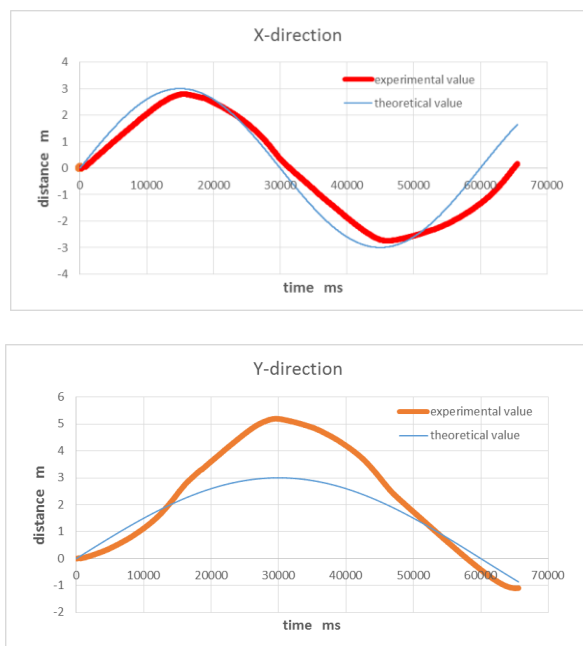
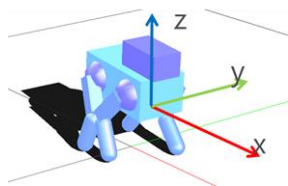


Fig.10 Displacement of center of gravity

グラフの細線は目標軌道、太線がシミュレーション結果の軌道を示している。グラフからx軸に関してはある程度追従しているが、y軸に関しては差異が見られた。また、平均速度に関しては約320[mm/s]と5章の結果の82%を達成することができた。差異の原因としてはやはり二次元近似モデルと三次元モデルの違いが考えられる。特に大きな影響としては無視していた遊脚の慣性力による胴体部の揺動が挙げられる。また、脚の接地面の違いも大きいと考えている。実際の実験機では脚は点接触ではなく面接触するので左右に曲がる影響を受けやすいと予想する。解決策としてはより厳密なモデル化や拘束条件の緩和が考えられるが、制御の複雑へもつながるため検討が必要である。

7. 結言

本稿では四脚ロボットにおける高速な曲線歩行理論の構築及び検証を行った。カーブにおける遠心力の影響、制御対象モデルの可動域の制限を考慮した上でロボット胴体部の軌道と歩幅の決定法を提案することで簡易な制御により曲線歩行が可能な理論を構築した。また、歩行シミュレーションによりロボットの運動を求めることで理論の妥当性を確かめた。三次元の挙動解析では目標軌道との差異も見られたため、より厳密なモデル化や拘束条件の緩和も求められる。

今後は今回の結果をフィードバックし実験機への適用を行う必要がある。また、本研究と先行研究の直線歩行を組み合わせることで実空間を想定した目標への最速歩行パターンの生成が可能となる。

参考文献

- (1) R.Kurazume, K.Yoneda, and S.Hirose, Feedforward and feedback dynamic trot gait control for quadruped walking vehicle, *Autonomous Robots*, **12-2** (2002) pp.157-172.
- (2) 倉爪亮, 葉石敦生, 米田完, 広瀬茂男, 4足歩行機械の動歩行時の姿勢安定化制御, *日本ロボット学会誌*, **19-3** (2001) pp.380-386.
- (3) M.Raibert, K.Blankespoor, G.Nelson, R.Playter and the BigDog Team, BigDog, the Rough-Terrain Quadruped Robot, *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control* (2008) pp.10822-10825.
- (4) K.Kato and S.Hirose, Development of the quadruped walking robot, TITAN-IX –mechanical design concept and application for the humanitarian de-mining robot-, *Advanced Robotids*, **15-2** (2001) pp.191-204.
- (5) D.Papadopoulos and M.Buchler, Stable Running in a Quadruped Robot with Compliant Legs, *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (2000) pp.444-449.
- (6) J.Furusho, A.Sano, M.Sakaguchi and E.Koizumi, Realization of Bounce Gait in a Quadruped Robot with Articular-Joint-Type Legs, *Proc.IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation* (1995) pp.697-702.
- (7) J.E.Bobrow, S.Dubowsky and J.S.Gibson, Time-Optimal Control of Robotic Manipulators along Specified Paths, *Int. J. of Robotics Research*, **4-3** (1985) pp.3-17.
- (8) J.E.Bobrow, Optimal Robot Path Planning Using the Minimum-Time Criterion, *J.of Robotics and Automation*, **4-4** (1988) pp.443-450.
- (9) H.Osumi, K.Yokohama, K.Takeuchi and R.Nakamura, Time Optimal Control for Quadruped Robots by Using Torque Redundancy, *Proc. Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2012) pp.1853-1858.
- (10) K.Tsujita, H.Toui and K.Tsuchiya, Dynamic Turning Control of a Quadruped Locomotion Robot using Oscillators, *Journal of Advanced Robotics*, **15-10** (2005) pp.1115-1133.