

# 四脚歩行ロボットの高速曲線歩行のための動作設計

## Motion design of a Quadruped Robots for high speed curve walking

精密工学専攻 10号 五十嵐陽介  
Yosuke Igarashi

### 1. 序論

一般的な移動ロボットには車輪型移動機構が用いられており、水平面での移動には適しているが、不整地や段差のある環境下では移動が困難となる。これに対し、脚移動型ロボットは障害物の乗り越えや接地不可能な部位の回避、姿勢の変更などが可能であるため需要を高めている。そのため脚移動型ロボットは様々な研究が行われてきている。BostonDynamics社製のBigDog<sup>(1)</sup>は油圧アクチュエータを採用しており、高重量の荷物も積載可能であり、雪や砂の上においても歩行が可能である。広瀬らによって開発されたTITAN-XIII<sup>(2)</sup>はワイヤ駆動機構を用いており、軽量な脚機構を構成している。また、段差の乗り越えにも成功している。東芝社製4足歩行ロボット<sup>(3)</sup>のように危険なため作業員が立ち入れない原発内の調査において実用化された例もあり、用途によって多くの製品が存在する。また、動歩行時の安定性向上のためにZMP制御<sup>(3)(4)</sup>を用いた研究が行われている。上記のように脚移動型ロボットには様々な利用法が期待されているが、多くの課題も存在する。なかでも脚移動型ロボットは移動型ロボットに比べると移動速度が遅く、歩行時の速度制御が難しいという課題を抱えている。ロボットのバッテリーの燃費や作業の効率化の観点から歩行速度が実用化に向けてこの問題解決重要である。

我々の研究室ではこれまでにアクチュエータの改良などは行わずに、4脚歩行ロボットの速度向上を目指してきた。支持脚に対しては、歩行中の前後脚の推進力の最適化<sup>(5)</sup>を応用し、遊脚に対しては、Bobrow<sup>(6)(7)</sup>らにより提案された最短時間制御により最高速度の向上を図った。しかし、先行研究では直線歩行のみにしか対応していないという問題点が挙げられ、現実的にはカーブや旋回など様々な歩行パターンが求められる。そこで本研究では四脚歩行ロボットでの高速曲線歩行の動作設計手法の確立を目的とする。また、本研究と先行研究での直線歩行を組み合わせることで任意の点から目標点への最速歩行パターンを生成することが可能となる。

### 2. 四脚歩行ロボットの動力学モデル

#### 2.1 運動学モデル

本研究では実験機としてAIBO“ERS-7”を使用する。AIBOは各脚部には、付け根の関節に自由度2、膝の関節に自由度1を与える3個のモータを備え、合計12個の関節角を制御して四脚歩行を行う。各モータはPID制御によるサーボ機構を有している。またロボットの胴体の質量に比べ各脚の質量は小さいので、遊脚による慣性力の影響は無視するものとする。ロボットのモデルはFig. 1(a)で示す回転中心方向から見た後

脚接地点をベース、前脚接地点を手先とした5リンクシリアルマニピュレータ、Fig. 1(b)で示す進行方向から見た後脚接地点をベース、前脚接地点を手先とした3リンクシリアルマニピュレータとして2次元近似モデル化ができる。Fig.1では支持脚のみが示されている。 $\theta_1$ から $\theta_{13}$ は直前のリンクから見た各関節の関節角で、 $x$ 軸の向きを $0^\circ$ とし反時計回りを正とする。

歩容には左右の対角の脚を交互に出すトロット歩容を用い、歩行条件として胴体部の高さ $h$ 、姿勢 $\theta_0$ 、前後支持脚間距離 $l_0$ 、および左右支持脚間距離 $l_{z0}$ を一定に保つものとする。これらの条件によって支持脚間の midpoint を原点とした重心の進行方向距離を $s$ とすると支持脚の全ての関節角度は $s$ の関数となる。

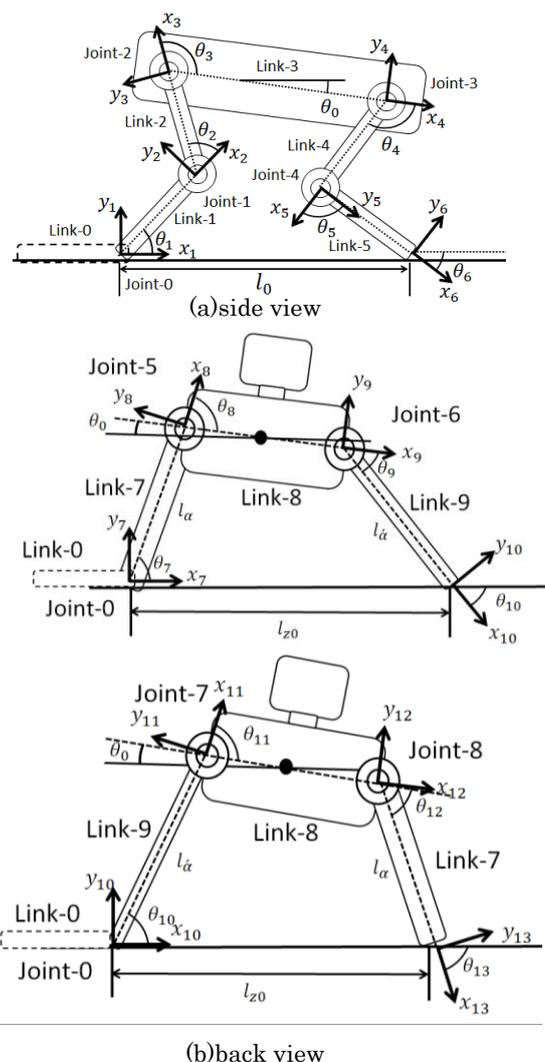


Fig. 1 The link model of control object

## 2.2 動力学方程式

Fig.1 のモデルの動力学方程式は式(1), (2), (3)と表すことができる。

$$\tau_{sp1} = H_{sp1}(\theta_{sp1})\ddot{\theta}_{sp1} + h_{sp1}(\theta_{sp1}, \dot{\theta}_{sp1}) + J_{sp1}^T F_f + g_{sp1}(\theta_{sp1}) \quad (1)$$

$$\theta_{sp1} = [\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3 \ \theta_4 \ \theta_5]^T$$

$$\tau_{sp1} = [0 \ \tau_2 \ \tau_3 \ \tau_4 \ \tau_5]^T$$

$$F_f = [F_{fx} \ F_{fy}]^T$$

$$\tau_{sp2} = H_{sp2}(\theta_{sp2})\ddot{\theta}_{sp2} + h_{sp2}(\theta_{sp2}, \dot{\theta}_{sp2}) + J_{sp2}^T F_{z1} + g_{sp2}(\theta_{sp2}) \quad (2)$$

$$\theta_{sp2} = [\theta_7 \ \theta_8 \ \theta_9]^T$$

$$\tau_{sp2} = [0 \ \tau_7 \ \tau_8]^T$$

$$F_{z1} = [F_{zx1} \ F_{zy1}]^T$$

$$\tau_{sp3} = H_{sp3}(\theta_{sp3})\ddot{\theta}_{sp3} + h_{sp3}(\theta_{sp3}, \dot{\theta}_{sp3}) + J_{sp3}^T F_{z2} + g_{sp3}(\theta_{sp3}) \quad (3)$$

$$\theta_{sp3} = [\theta_{11} \ \theta_{12} \ \theta_{13}]^T$$

$$\tau_{sp3} = [0 \ \tau_{10} \ \tau_{11}]^T$$

$$F_{z3} = [F_{zx2} \ F_{zy2}]^T$$

ただし,  $H_{sp1}$ ,  $H_{sp2}$  はそれぞれ 5 リンクシリアルマニピュレータ, 3 リンクシリアルマニピュレータの慣性行列,  $h_{sp}$  は非線形項ベクトル,  $F_f$  は前脚での発生力ベクトル,  $F_z$  は横方向の前脚での発生力ベクトル,  $J_{sp}$  はこのマニピュレータのヤコビ行列,  $g_{sp}$  は重力項ベクトル,  $\tau_2$  から  $\tau_5$  は関節 1 から 4 の発生トルク,  $\tau_8$  と  $\tau_9 \cdot \tau_{10}$  と  $\tau_{11}$  は関節 5 と 6 の発生トルク,  $H_{sp}$ ,  $h_{sp}$ ,  $J_{sp}$  の各成分はマニピュレータの動力学方程式より導出されるが, 紙面の都合により省略する。

## 3. 歩行時の拘束条件

### 3.1 脚先接地点の拘束条件

前後脚接地点で発生させることのできる水平方向の推進力は静止摩擦力以下でなければならない。前脚接地点からの反力ベクトルを  $F_f$ , 後脚接地点からの反力ベクトルを  $F_r$  とし, それぞれの進行方向成分を  $F_{fx}$ ,  $F_{rx}$ , 地面からの垂直成分を  $F_{fy}$ ,  $F_{ry}$  とする。また同様に横方向への移動を考えた際の前脚接地点からの反力ベクトルを  $F_{zf}$ , 後足接地点からの反力ベクトルを  $F_{zr}$ , 地面からの垂直成分を  $F_{zfy}$ ,  $F_{zry}$  とする。この時, 式(2)に示す  $F_{fx}$  と  $F_{rx}$  の合力  $F_1$ , 式(3)に示す  $F_{zfx}$  と  $F_{zrx}$  の合力  $F_2$  のそれぞれが歩行ロボット全体を直線方向と横方向に駆動させるための推進力となる。

$$F_1 = F_{fx} + F_{rx} \quad (4)$$

$$F_2 = F_{zfx} + F_{zrx} \quad (5)$$

この前脚と後脚の推進力  $F_{fx}$  と  $F_{rx}$ ,  $F_{zfx}$  と  $F_{zrx}$  が 1:1 以外の値を取ると胴体のヨー方向にモーメントが発生するため, これを打ち消すための摩擦力  $F_{fz1}$ ,  $F_{rz1}$ ,  $F_{fz2}$ ,  $F_{rz2}$  が脚先に

発生する。したがって, 脚先が滑らないための摩擦による拘束条件は式(4)となる。

$$-\mu F_{jy} \leq \sqrt{F_{jx}^2 + F_{jz1}^2} + \sqrt{F_{jz1x}^2 + F_{jz2}^2} \leq \mu F_{jy} \quad (6)$$

ここで,  $j = f, r$  でそれぞれ前脚, 後脚を表す。  $\mu$  は脚先と地面の間の静止摩擦係数である。

### 3.3 アクチュエータトルクによる拘束条件

アクチュエータの DC サーボモータへの印加電圧ベクトルを  $V_{sp}$ , サーボモータの出力トルクベクトルを  $\tau_{sp}$  とすると, 式(5)の関係が成り立つ。

$$V_{sp} = K_E \dot{\theta} + R_a K_T^{-1} \tau_{sp} \quad (7)$$

ここで,  $R_a$  はそれぞれ各関節のサーボモータの電気抵抗,  $K_E$  は誘起電圧抵抗,  $K_T$  はトルク定数行列である。

## 4. 推進力の設計

本研究では先行研究によって提案された以下 2 つの高速化手法を曲線歩行においても適用する。

### 4.1 支持脚における推進力比の最適化

ロボットの ZMP は支持脚の接地点が作る多角形の中になければならない。トロット歩容では ZMP は歩行中常に支持脚の midpoint となっている必要がある。これより, 軌道上の水平方向加速度  $\dot{s}$  は式(8)を満たす必要がある。

$$\dot{s} = \frac{g}{h} s \quad (8)$$

ただし,  $g$  は重力加速度。ロボットの推進力は支持脚が地面を蹴ることによって発生する力  $F_f$  と  $F_r$  の和になる。ただし, 支持脚への推進力比を変化させることにより, 各関節にかかるトルクによる負荷も変化させることができる。これを利用し, 平均速度の向上をはかる。この時の推進力比を  $\alpha$  とすると式は(9)のようになる。

$$F_f = (1 - \alpha) F_a, \quad F_r = \alpha F_b \quad (9)$$

### 4.2 遊脚の最短時間制御

Fig. 2 に遊脚の変位を  $s$ , 速度を  $\dot{s}$  として示す。遊脚の初期条件 A と終端条件 B は支持脚の歩幅によって決定される。また, 破線部はモータの制限による最大速度曲線である。A より最大加速を行い, 速度曲線を越えないように C で最大減速に切り替える, また, B より最大減速を行い, E で最大曲線を越えないように最大加速に切り替える。交わった時が遊脚の軌道となる。また, 遊脚 1 軌道に要する時間を  $t_{sw}$ , 支持脚移動に要する時間  $t_{sp}$  とすると, 歩行達成条件は式(10)を満たす必要である。

$$t_{sw} \leq t_{sp} \quad (10)$$

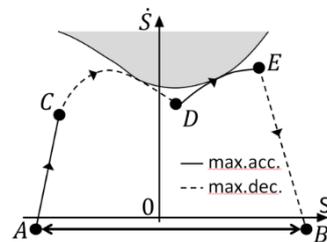


Fig. 2 Time optimal trajectory for swinging legs

## 5. 高速曲線歩行理論

### 5.1 高速曲線歩行における問題点

高速曲線歩行を実現するために考慮すべき点が2つある。1つ目は胴体重心が円軌道を描くことにより発生してしまう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点がある。そこで Fig. 3 のように円を多角形近似しロボットを並進させ、遠心力を回避する。

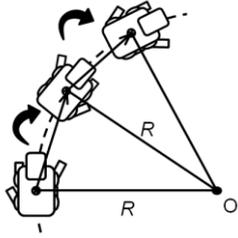


Fig. 3 Target trajectory

### 5.2 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時のロボット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、重心の真上にあるときを  $S = 0$  とする。式(8)を解くと速度式は(11)となる。

$$\dot{s} = \sqrt{\dot{s}_{min}^2 + \frac{g}{h} s^2} \quad (11)$$

式(11)を用いて胴体部速度と線長の関係を Fig. 4 に示す。2次曲線の横幅は歩幅を示す。脚の可動域の制限により、左右対称であるトロット歩容の脚パターンでは Fig. 4 のように2種類の速度波形が得られる。また、摩擦限界やトルク限界を考慮しつつ最低速度を上げていき、平均速度を上昇させることにより高速化を図る。

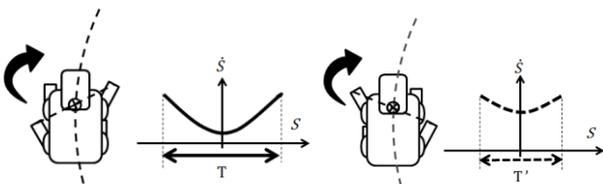


Fig. 4 Velocity of robot body by each leg pattern

### 5.3 曲線歩行におけるロボット胴体部の速度パターン

曲線歩行ではトロット歩容の2のパターンにおいて描く曲線の方向での支持脚・遊脚共に速度と歩幅が異なるため、Fig. 5 のように周期的な速度波形の繰り返しとなる。そのためトロット歩容の脚の切り替え点においては速度が一致していなければならない。本研究では平均速度が遅い支持脚のパターンから速度パターンを決定し、そのパターンに間に合うようにもう一方の支持脚のパターンと遊脚のパターンを生成する。

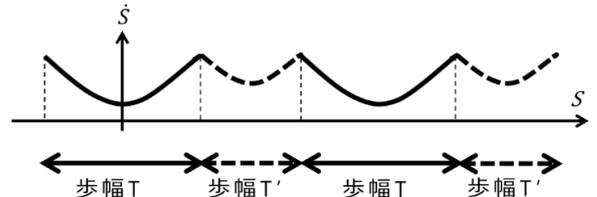


Fig. 5 Periodic pattern of velocity along curved path

### 5.4 脚の接地位置の探索法

ロボットの拘束条件を加味しつつ、提案された目標軌道を決めるために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は可動しないために、転倒やつまぎの可能性がある。Fig. 6 のように進行方向前後、左右に対する脚の接地距離はリンク長  $l$  と胴体部高さ  $h$  を用いて表すことができる。関節を曲げずに脚を伸ばしているとき最大接地距離となる。前脚、後脚の最大接地距離  $l_{fmax}$ ,  $l_{rmax}$  は実験機のパラメータによって幾何的に定まる。よって脚の設置可能範囲は Fig. 6 のように  $l_{fmax}$ ,  $l_{rmax}$  を半径とする半円内である。

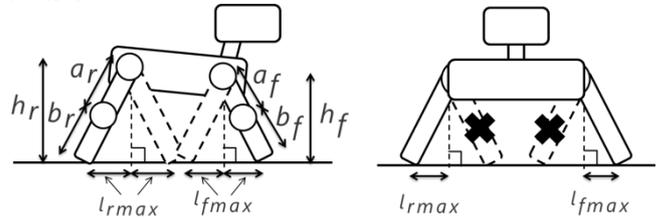


Fig. 6 Reachable areas of legs

### 5.5 歩幅の設計方法

5.4 項で提案された接地可能範囲より、歩行が達成可能な脚の接地位置を探索する。Fig. 6 より直線歩行での歩幅が求まれば、曲線歩行の半径  $R$  を設定すると必要な横方向への歩幅  $T_z$ 、胴体部の角度  $\varphi$  も求まる。Fig. 7 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慮すると、半円が重なる領域に脚を接地すれば歩行は達成可能である。摩擦限界、トルク限界、遊脚達成時間を加味した上で半円が重なる領域を調節する。

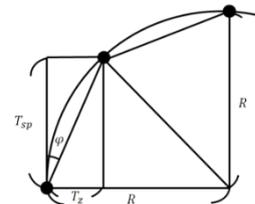


Fig. 7 Determination method of center of gravity

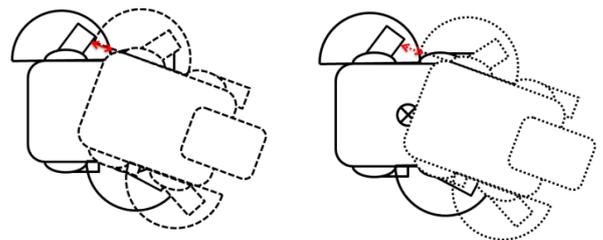


Fig. 8 Determination method of stride

## 6. 3次元物理演算シミュレータを用いた挙動解析

### 6.1 実験機のパラメータ

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。ロボットの各部位のパラメータを表1、各関節のサーボの特性を表2、姿勢パラメータを表3に示す。

Table 1 Parameters of robot legs

	Link-1	Link-2	Link-3	Link-4
Length[m]	0.0794	0.0695	0.0695	0.0767
Mass[kg]	0.06	0.06	0.06	0.06

Table 2 Parameters of joint actuators

	Joint-1	Joint-2	Joint-3	Joint-4	Joint-5	Joint-6
$V_{max}$ [V]	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4	7.4
$K_e$ [Nm·s/rad]	1.28	1.39	1.39	1.28	1.39	1.39
$K_t$ [Nm/A]	1.28	1.39	1.39	1.28	1.39	1.39
$R_a$ [ $\Omega$ ]	8	8	8	8	8	8

Table 3 Optimal parameters of robot pose

$\mu$	$h$ [mm]	$\theta_0$ [deg]	$l_0$ [mm]	$l_{z0}$ [mm]	$H$ [mm]
0.45	128	-4	140	137	15

### 6.3 シミュレーション結果

歩行シミュレーションでは2次元近似にてモデル化しているために、3次元の実験機との間に差異がある。そこで”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。章より得られた探索結果を用いて歩行が可能か証明した。Fig. 9に重心の軌跡を示す。

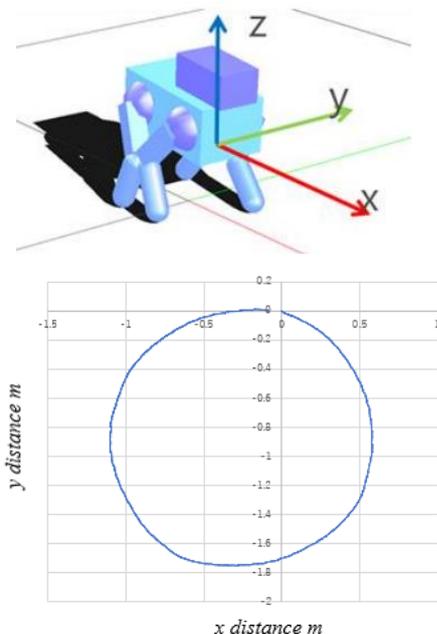


Fig. 9 Simulation results

グラフより目標半径1mに対して約0.8mと80%を達成した。また、平均速度は約354mm/sと理論速度448mm/sの78%を達成した。このような結果になった原因として、3次元モデルと2次元近似モデルとの差異が考えられる。直線歩行シミュレーションでは、胴体部高さは変化しないという前提であるが、横方向に脚を開く際に胴体部の高さが変化してしまうことから、上手くシミュレーション結果を達成できていないと考えられる。

## 7. 結果

本研究では、4脚歩行ロボットを2次元近似することで曲線歩行時の速度を向上させるために、遠心力の発生を回避する動作設計を行った。また、直線歩行の理論を応用し、ロボット軌道の探索を行い、3次元歩行シミュレーションソフトを用いた挙動の解析結果より、理論の妥当性を確認した。近似モデルとの差異も見られたため、より厳密なモデル化が求められる。先行研究では直線軌道のみに対応していなかったが、本研究との組み合わせによって任意の目標点への移動パターンの生成も可能である。

## 8. 参考文献

- (1) Raibert, M., Blankespoor, K., Nelson, G., Playter, R. 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
- (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, Vol.19, No.3 (2001), pp.380-386.
- (3) 菅沼直孝, 上原拓也, 中村紀仁, 原子炉建屋内の運搬作業を担う4足歩行ロボットの制御技術, 東芝レビュー, Vol.69, No.10(2014), pp.48-51.
- (4) 梶田秀司, ゼロモーメントポイント (ZMP) と歩行制御, 日本ロボット学会誌, Vol.20, No.3 (2002), pp.229-232.
- (5) 鈴木悠平, 大隅久, 岩田雅史, 脚関節トルクの冗長性を利用した四脚ロボットのトロット歩容における最速歩行制御, 日本機械学会論文集, Vol.82, No.842 (2016), DOI:10.1299/transjsme.16-00230
- (6) Bobrow, J.E., Dubowsky, S. and Gibson, J.S., Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths, The International Journal of Robotics Research, Vol.4, No.3 (1985), pp.3-17.
- (7) Bobrow, J.E., Optimal robot path planning using the minimum-time criterion, IEEE Journal of Robotics and Automation, Vol.4, No.4 (1988), pp.443-450.