

# 四脚ロボットにおける高速曲線歩行の設計

## Design of high-speed gait on curved trajectories for quadruped robots

精密工学専攻 17号 賀陽裕亮

Yusuke Kayo

### 1. 序論

現在、脚移動型ロボットの実用化に向けた取り組みの機運が高まってきており、Boston Dynamics の BigDog<sup>(1)</sup>を代表に様々な脚移動型ロボットが開発されている。四脚ロボットの制御方法に関する研究も様々行われており、当研究室においてもトロット歩容を用いて歩行の高速化を目指してきた。先行研究ではまず、脚相に対し Bobrow らの提案した最短時間制御<sup>(2)(3)</sup>を適用し、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比を歩行中に変化させることによって、与えられたハードウェアに対する理論的な最速歩行を実現している。ただし、曲線や旋回等の歩行に関しては、まだ制御方法が確立したとは言えない。四脚歩行ロボットの曲線歩行の研究には辻田ら<sup>(4)</sup>による研究がある。ただしこれは、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、理論的な最速歩行パターンは求められておらず、力学的・理論的な歩行の解析は行われていない。また、自由度が多いロボットを使用しており、脚毎に3関節を有する通常の四脚ロボットには適用できない。これに対して当研究室では、ソニー製の四脚ロボット ERS-7<sup>®</sup>“AIBO”を用いて、歩行する曲線を線分に分割することで遠心力の発生を抑え、それぞれの線分毎に、ロボット胴体部の軌道と脚の可動域の制限を考慮した歩幅の探索法を提案してきた<sup>(4)</sup>。ただし、線分への分割手法が最速の条件を満たしておらず、これを考慮した新たな設計法が必要である。そこで本研究では、線分分割の見直しを行い最速軌道設計を行うと共に、直線と曲線の組み合わせられた軌道に適用する際に必要となる考慮点を明らかにする。本手法が確立すれば、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可能となり、障害物<sup>(5)</sup>などを想定した実空間への適用にも有用である。

### 2. 四脚ロボットの動力学モデル

#### 2.1 運動学モデル

今回用いる制御対象の ERS-7<sup>®</sup>“AIBO”は、肩と膝に各関節を持ち、直進方向に2自由度、横方向に内側外側に1自由度の計3自由度を各脚に持つ。先行研究では肩関節は内側には可動しないと定義していたが、実際は約 15° 可動できるので、今回は精度を高めるために内側の可動も考慮する。また、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次元モデルを図1のように5リンクシリアルマニピュレータで示す。

本研究では、制御の簡略化のために歩行条件として胴体部重心角度 $\theta_0$ 、胴体部重心高さ  $h$ 、支持脚間距離 $l_0$ を常に一定

とする。また、四脚ロボットのオーソドックスな歩行方法であるトロット歩容という、対角線の脚を対にして交互出す歩行方法を用いる。また、前後支持脚の床からの垂直反力を $F_{fy}$ 、 $F_{ry}$ とし、ロボットが床を蹴った時の床からの反力を $F_{fx}$ 、 $F_{rx}$ とする。この $F_{fx}$ 、 $F_{rx}$ の合力がロボット胴体部を進行方向に歩行させる推進力となる。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。

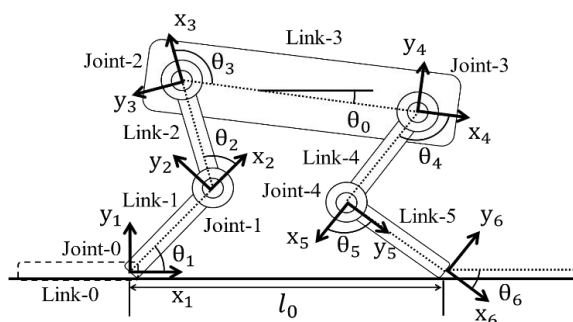


Fig.1 Model of quadruped robot

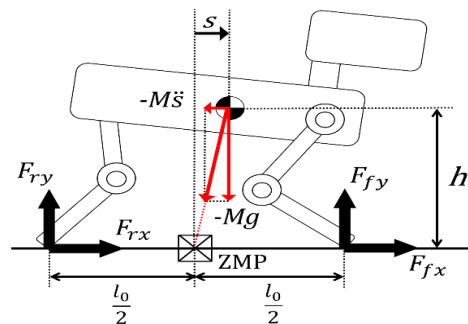


Fig.2 Forces generated in the robot

#### 2.2 動力学方程式

図1, 図2のモデルより動力学方程式は式(1)~(3)で表せる。

$$\tau_{sp} = H_{sp}(\theta_{sp})\ddot{\theta}_{sp} + h_{sp}(\theta_{sp}, \dot{\theta}_{sp}) + J^T \quad (1)$$

$$\theta_{sp} = [\theta_1 \theta_2 \theta_3 \theta_4 \theta_5 \theta_6]^T \quad (2)$$

$$F_f = [f_{fx} \ f_{fy}]^T \quad (3)$$

ただし、 $H_{sp}$ は5リンクマニピュレータの慣性行列、 $h_{sp}$ は非線形項、 $F_f$ は前脚での発生力、 $J^T$ 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 サーボモータが用いられている。入力電圧 $V_{sp}$ と出力トルク $\tau_{sp}$ には式(4)のような関係を示す。

$$V_{sp} = K_E \dot{\theta}_{sp} + R_a K_\tau^{-1} \tau_{sp} \quad (4)$$

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、 $K_\tau$

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. 高速歩行のための拘束条件と応用

#### 3.1 拘束条件

脚歩行型ロボットの歩行を考えるときは、ZMP(Zero Moment Point)を考慮する必要がある。歩行中、ロボットのZMPは支持脚の接地点を作る多角形の中になければならない。本研究のように左右対称なロボットによるトロット歩容では、ZMPは歩行中常に前後支持脚接地点の midpoint となっている必要がある。質量 $M$ 、重力加速度 $g$ は一定で、重心は胴体部重心高さ $h$ の水平線上を移動するので、重心の位置 $s$ を定めると、その位置で歩行に必要なとなる重心の水平方向加速度 $\dot{s}$ も式(5)のように一意に定まる。また、式(5)を解くことによって式(6)が求まる。

$$\ddot{s} = \frac{g}{h} s \quad (5)$$

$$\dot{s} = \sqrt{\dot{s}_{min}^2 + \frac{g}{h} s^2} \quad (6)$$

よって胴体部速度の式を導出した。

#### 3.2 新しい脚接地範囲

今回用いる実験機ERS-7”AIBO”は肩に2自由度、膝に1自由度の計3自由度を持つ。先行研究では、肩関節の横方向の可動域が外側のみで考慮してきていたが実際は内側にも可動域があるので、より精度を高めるために今回内側の可動域も考慮する。そしてソニー株式会社提供のAIBOの機種情報基に胴体部や各脚のパラメータと歩行条件である胴体部重心高さ $h$ 、胴体部重心角度 $\theta_0$ は常に一定により新しい脚接地範囲を導出し図3に示す。AIBOのパラメータは進行方向を $x$ 軸、横方向を $y$ 軸とすると肩と膝はそれぞれ $x$ 軸、 $y$ 軸まわりを関節角度、式(7)、(8)が可動域である。今回胴体部重心高さを128[mm]、胴体部角度を-4[deg]として計算する。

$$\text{肩} \quad -15^\circ \leq \theta_x \leq 93^\circ \quad -120^\circ \leq \theta_y \leq 135^\circ \quad (7)$$

$$\text{膝} \quad -30^\circ \leq \theta_y \leq 127^\circ \quad (8)$$

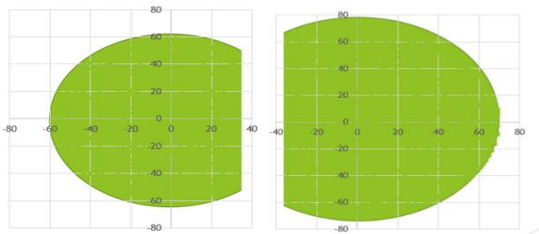


Fig.3 Leg grounding range of each leg

上記の図の見方として(0, 0)の点が肩の位置であり、この結果を近似することによって、各脚の最大歩幅を導出する。今回、横方向を $x$ 軸、縦方向を $y$ 軸とする近似結果を式(9)、(10)に示す。

$$x^2 + y^2 = 60^2 \quad (-60 \leq x \leq 33 \quad -60 \leq y \leq 60) \quad (9)$$

$$x^2 + y^2 = 69^2 \quad (-34 \leq x \leq 69 \quad -69 \leq y \leq 69) \quad (10)$$

### 3.3 最大歩幅の導出

3.2で導出した近似結果を用いて運動学的に各脚の最大歩幅を求める。例としてここでは右前脚の最大歩幅を求める。右肩の位置(0, 0)を基準として脚を出す方向である進行角度 $\theta$ を設定し、また右前脚の位置を(a, b)とすると右前脚の進行直線の式(11)が求まる。

$$\text{進行直線} \quad y = \frac{1}{\tan \theta} x + (-a + b \times \frac{1}{\tan \theta}) \times \frac{1}{\tan \theta} \quad (11)$$

これと3.2で求めた右前脚接地範囲の近似の式を連立することで最大歩幅が求まる。プログラムによって進行角度を入力することによって最大歩幅を導出できるようにした。以下の表1表2に各脚の最大歩幅を示す。

Table 1 Result of the stride of the first step

( $\theta = 0.5[\text{deg}]$ )

右前脚步幅	左前脚步幅	右後脚步幅	左後脚步幅
59.9[mm]	59.9[mm]	69.0[mm]	69.0[mm]

Table2 Result of the stride of the first step

( $\theta = 45[\text{deg}]$ )

右前脚步幅	左前脚步幅	右後脚步幅	左後脚步幅
59.9[mm]	33.0[mm]	69.0[mm]	48.6[mm]

進行角度が小さいとパターン1とパターン2で違いは見られないが、進行角度が大きくなると左脚の歩幅が小さくなるのがわかった。

### 4. 曲線歩行の高速化と設計

曲線歩行するロボットを制御するにあたって考慮する点は、遠心力についてである。ここでは遠心力を無視できるような軌道を求め、3章で求めた歩幅と組み合わせて曲線歩行の高速化を目指す。

#### 4.1 ロボット胴体部の運動

今回曲線歩行するにあたってロボットの胴体部軌道は、短い直線の連続軌道だと考える。そして、曲率半径を $R$ の円弧として、トロット歩容の半周期ごとに中心から回転角 $\theta$ での曲線歩行を目指す。本来曲線歩行する場合遠心力を考慮しなければいけないが、図4のように短い直線の連続のため遠心力の影響を無視し、並進運動と考える。また、先行研究より曲線歩行をするにあたって支持脚、遊脚の切り替え時に撃力が発生するが、大きさは非常に小さく運動に対して支配的でないため本研究では無視している。並進運動の式は式(5)で示したとおりである。

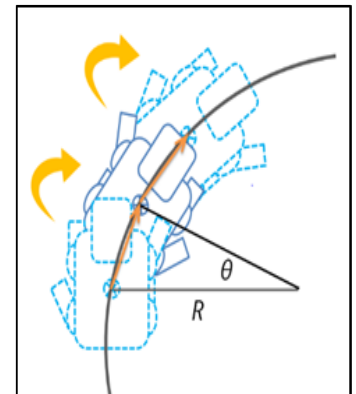


Fig.4 Curved path stroke of robot

#### 4.2 ロボット胴体部の速度

ロボットの胴体部の速度は、式(5)を解くことによって式(6)が求められることは2章で解説した。胴体部速度と線長  $s$  の関係を図5に示す。トロット歩容を用いているので、2種類の速度波形パターンが求められる。この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  $s_0$  を上げることが高速化につながる。

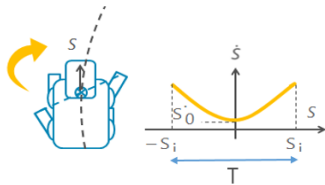


Fig.5 Velocity of robot body by each leg pattern

#### 4.3 速度パターンの組み合わせ

先行研究では2種類の速度波形パターンを組み合わせ、高速化を目指してきた。しかし、歩幅の異なる歩行パターンを組み合わせると最低速度が下がってしまい、結果的に平均速度が速度下がってしまうと考えた。そこで今回、図6のように同じ歩幅で平均速度上げる手法を提案する。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。

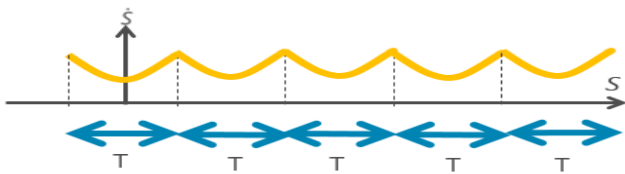


Fig.6 New Periodic pattern of velocity along curved path

#### 4.4 クロソイド曲線

本研究の目的は、直線と曲線の組み合わせられた軌道に本研究の曲線歩行を適用することにより最速歩行パターンの生成である。しかし、図8のように直線と曲線の切り替え時に胴体部に力が加わり目標軌道からズレが生じる。そこで今回クロソイド曲線を用いて直線と曲線の組み合わせの実現を目指す。クロソイド曲線は図7に示すように慣性航法の理想軌道上を走行する、消費エネルギーを最小にする経路のことである。またクロソイド曲線の基本式を式(12)で示す。 $R$ は曲率半径、 $L$ は曲線長、 $A$ はクロソイドパラメータでこの基本式を変形することによって各パラメータを導出できる。

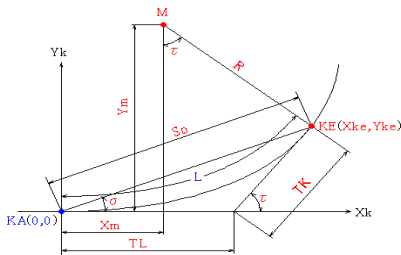


Fig.7 Draw clothoid curve

$$RL = A^2 \quad (12)$$

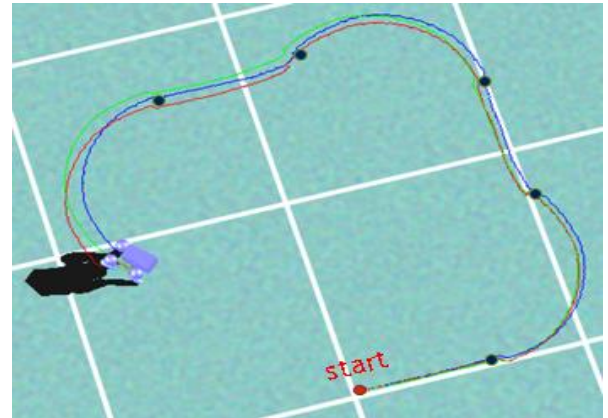


Fig.8 Switching between straight walking and curved walking

### 5. 曲線歩行シミュレーションによる解析

ここでは4章までに導出した高速化手法や歩幅から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による解析を行う。このシミュレーションでは5.1で得られる角度データを用いて先行検証との比較を行う。

#### 5.1 曲線歩行の設計

プログラムでサンプリングタイムごとの角度データを求めるにあたって、まず歩行条件である初期パラメータを定める。そして、3章で求めた最大歩幅を入力し、これを繰り返すことで平均速度が最大となる初期パラメータを定める。次に、支持脚の一軌道時間  $T_{sp}$  を定め、遊脚に最短時間制御を適用させ遊脚の一軌道時間  $T_{sw}$  を定める。 $T_{sp} < T_{sw}$  の場合遊脚が追い付けないため再度パラメータを設定する。 $T_{sp} \geq T_{sw}$  の時最適解なのでこの時の角度データを逆運動学計算によって導出する。先行研究での歩幅を変える歩行パターンでの理論平均速度は385[mm/s]なのでそれを超えることを目的とし、表2に歩行パラメータを示す。

Table 2 Parameters of robot locomotion

R[m]	h[mm]	$\theta_0$ [deg]	$l_0$ [mm]
0.5	128	-4	140

T[mm]	$\theta$ [deg]	$v_{min}$ [mm/s]	$v_{max}$ [mm/s]
43.6	6.65	370	410

#### 5.2 AIBOのモデル化

シミュレーションで解析を行うために、3章で解説したようにソニー株式会社が提供するAIBOの機種情報基に胴体部や各脚のパラメータから、簡易的なAIBOのモデルを図8のようにして作製した。

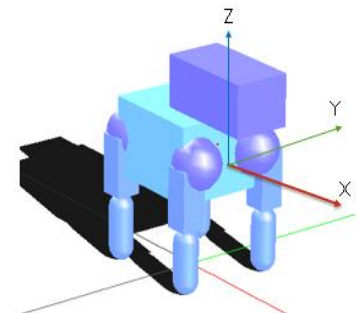


Fig.8 Modeling AIBO on 3Dsimulation



### 5.3 シミュレーション結果

#### 5.3.1 曲線歩行のシミュレーション結果

表2のパラメータから導出した角度データをシミュレーションに入力し歩行が可能かどうか調べた。図9にX方向、Y方向の重心のトレース結果を示す。グラフの青線は目標軌道、赤線がシミュレーション結果の軌道を示している。X軸Y軸どちらも追従することができており先行研究よりもズレを最小限に抑えられている。また速度についても理論値の平均速度は395[mm/s]であるが、シミュレーション結果の平均速度は約303[mm/s]と理論値の76.7%の歩行を実現させることができた。また、先行研究の異なった歩幅を組み合わせる歩行させるシミュレーション結果と比べると速く歩行させることができた。理論値より遅くなった原因として実験値から見てわかるように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。解決策としてシミュレーション上でのより精度の高いモデル化を行うか拘束条件を変えることが考えられる。

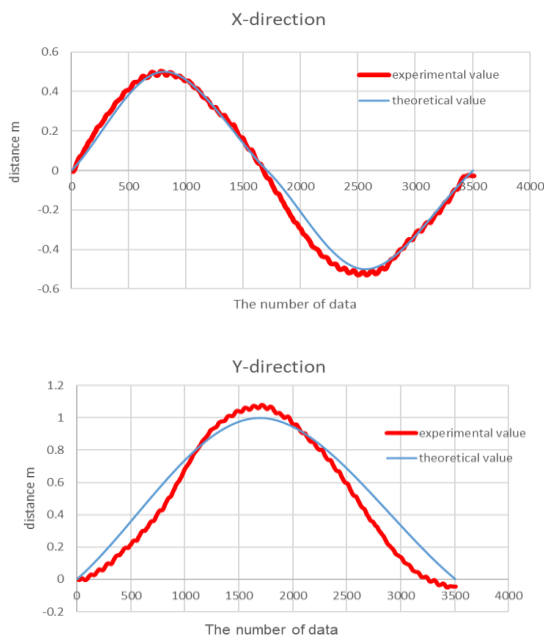


Fig.9 Displacement of center of gravity

#### 5.3.2 クロソイド曲線のシミュレーション結果

まず4.4章で解説したように図8の各パラメータを表3に示す。ドイツの経験法則によると基本型の場合、半径のR 1/3 ~ 1/1 に入るパラメータのクロソイドを使うことが望ましいとされている。また今回図10のようにクロソイド曲線の基本型である直進区間→クロソイド区間→円弧区間→クロソイド区間→直進区間の歩行パターンを目指す。結果は図10のように3回シミュレーションを行い直線と曲線の切り替えでもズレが生じずクロソイド曲線の有効性を検証できた。

Table 3 Each parameter of clothoid curve

R[m]	L[m]	A[m]	Xke	Yke	$\sigma$
0.5	0.4	0.45	0.39	0.05	7°

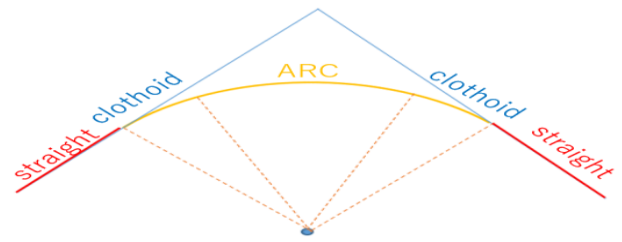


Fig.10 Basic type of clothoid

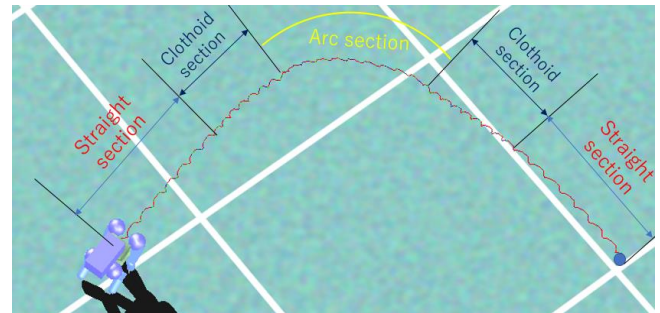


Fig.11 Simulation results using clothoid curve

### 6. 結言

本稿では、四脚ロボットにおける高速曲線歩行理論の構築及び検証を行った。まずより精度の高い脚接地範囲を作製し各脚の最大歩幅を求めた。そして先行研究の異なった歩幅の組み合わせの歩行パターンではなく新しい歩行パターンを提案した。本研究の妥当性を検証するために3Dシミュレーションを作製し先行研究との比較を行った。また、直線と曲線の切り替えにおいての問題点をクロソイド曲線を用いてシミュレーション上で解決をした。

今後の展望として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。

### 7. 参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) J. E. Bobrow, Optimal Robot Path Planning Using the Minimum-Time Criterion, J. of Robotics and Automation, 4-4 (1988) pp. 443-450.
- (4) 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.
- (5) 山口智浩, 渡辺桂吾, 泉清高, 木口量夫, ニューラルネットワークによる4脚歩行ロボットの障害物回避行動を伴う目的地経路の獲得, 日本機械学会論文集C編, Vol. 69, No. 687 (2003), pp. 2880-2887.