

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月22日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560270

研究課題名（和文） 四足歩行ロボットの最速歩行制御

研究課題名（英文） Fastest Walk Control for Quadruped Robots

研究代表者

大隅 久 (OSUMI HISASHI)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：00203779

研究成果の概要（和文）：四足歩行ロボットのトロット歩容を対象とし、歩行中の胴体姿勢、及び高さを一定とした直線軌跡に対し、DC モータで駆動される各関節の出力限界、及び支持脚接地点での摩擦条件を考慮した最速歩行軌道を、直線軌跡における時間軌道として導出した。更に、静止から最速、最速から静止までの状態遷移における最短時間軌道を導出し、静止するロボットを任意の距離だけ歩かせて再び静止させるための、最速歩行軌道の設計法を確立した。

研究成果の概要（英文）： The fastest trot walk for quadruped robots controlled by DC servo motors is derived as a time trajectory of the gravity center of the body assuming that the desired path is a horizontal line and the orientation of the body is constant during the walk. In addition, a way of deriving time optimal trajectories between two different velocities is proposed. By using the above results, the fastest walk between two resting states is obtained.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械システム

キーワード：ロボティクス，四脚歩行ロボット

1. 研究開始当初の背景

歩行型の移動ロボットは不整地や段差の多い環境下において車輪移動ロボットよりも適性が高いことにより、次世代のホームロボットや未舗装フィールドでの利用等が期待されている。しかし、実用化された移動ロボットは車輪やクローラタイプのものが大多数で、歩行ロボットの実用化は進んでいない。この理由の一つとして、脚歩行ロボットの移動速度が車輪やクローラと比較して極

端に遅いという点が挙げられる。しかし歩行研究の多くは歩行の安定性や環境への適応性を追及したものが多く、高速な歩行を目指した研究は少ない。

2. 研究の目的

本研究課題は、四脚歩行ロボットの最も基本的な動歩行であるトロット歩容に対し、理論的な最速歩行動作を求め、それを実現することを目的とする。具体的には下記項

目を実施する。

(1) 歩行実現に必要な支持脚先端での摩擦に関する拘束条件と共に、脚関節駆動用アクチュエータのトルク・速度限界を考慮した、最速歩行のための脚運動の目標軌道を導出する。

(2) 初期位置・姿勢で静止するロボットに任意の目標位置・姿勢が与えられた時の、最短移動経路の設計法を確立する。

(3) 最適解の妥当性を実験により検証する。

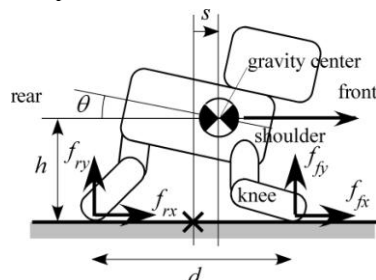
3. 研究の方法

(1) 四足歩行ロボットのモデル化

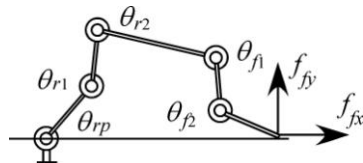
四足歩行ロボットは一般に各脚が3自由度を持っており、胴体部の質量に比べ、各脚の質量は小さいという特徴を持つ。

本研究で想定するロボットの運動モデルを図1に示す。ここでは2次元モデルを使用する。歩容は Trot である。図1では、支持脚のみが示されており、遊脚は省略されている。図1(a)に示す歩行中の胴体部の高さ h 、姿勢 θ 、及び接地脚先間距離 d は常に一定とする。

これより、支持脚の全ての関節角度は図2(a)で表されるように、重心の進行方向距離のパラメータ ' s ' で表せる。遊脚の目標軌道は、支持脚が地面を離れる瞬間を初期状態、次に接地した点を終端状態と考え、単に脚先を直線的に終端状態に戻すものとする。実際には、この軌道にごくわずかに上方変位を与えて脚先と地面との接触を回避する。これにより、後脚の関節角軌道は、図2(b)のように、胴体部移動距離 s と胴体に対する脚先端移動距離 s_s で表せる。移動距離 s と s_s は同じ歩幅 S_T からなる。

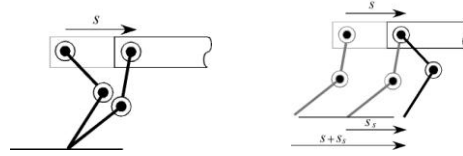


(a) ロボットの胴体パラメータ



(b) リンクモデル

図1 四足歩行ロボットのモデル



(a) 支持脚 (b) 遊脚
図2 ' s ', ' s_s ' と関節角度の関係

図1の機構の動力学方程式は式(1)と表せる。

$$\begin{aligned} \tau_{sp} &= \mathbf{H}_s(\boldsymbol{\theta}_{sp}) \ddot{\boldsymbol{\theta}}_{sp} + \mathbf{h}_s(\boldsymbol{\theta}_{sp}, \dot{\boldsymbol{\theta}}_{sp}) + \mathbf{J}^T \mathbf{F}_f \\ \boldsymbol{\theta}_{sp} &= [\theta_{rp} \quad \theta_{r1} \quad \theta_{r2} \quad \theta_{f1} \quad \theta_{f2}]^T \quad (1) \\ \boldsymbol{\tau}_{sp} &= [0 \quad \tau_{r1} \quad \tau_{r2} \quad \tau_{f1} \quad \tau_{f2}]^T \end{aligned}$$

ただし、 \mathbf{H}_s は図1(b)の5リンクマニピュレータの慣性行列、 \mathbf{h}_s は非線形項、 \mathbf{F}_f は前脚接地点で地面から受ける力ベクトルである。また、 θ_{rp} は受動関節とみなせるため、トルクは0である。

(2) 歩行のための拘束条件

① 脚先の摩擦による拘束

ロボットの前後脚先で発生することのできる水平方向の推進力は、最大静止摩擦以下以下の値しかとることができない。 F_{fr} 後脚接地点で地面から受ける力ベクトルを F_{fr} とし、 F_{fr} 、 F_{fr} それぞれの進行方向成分を F_{fx} 、 F_{rx} 、地面からの垂直抗力を F_{fy} 、 F_{ry} とする。この時、水平方向の合力

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{fx} + \mathbf{F}_{rx} \quad (2)$$

がロボットを駆動するための推進力となる。

この前脚と後脚の推進力 F_{fx} 、 F_{rx} が 1:1 以外の値を取ると、胴体の鉛直軸回りにモーメントが発生する一方、これを打ち消すための摩擦力が脚先に発生する。この成分を F_{fz} 、 F_{rz} とすると、脚先が滑らないための摩擦による拘束条件は式(3)となる。

$$-\mu F_{jy} \leq \sqrt{(F_{jx}^2 + F_{jz}^2)} \leq \mu F_{jy} \quad (3)$$

ここで $j=f, r$ 、 μ は脚先と地面の間の静止摩擦係数である。

また、式(2)より、胴体に目標加速度を発生するための前後脚による推進力には冗長性が存在する。よって、それぞれの脚先で発生する力の配分率を、パラメータ α を用いて式(4)のように表すこととする。

$$\begin{aligned} F_{fx} &= (1-\alpha)M\ddot{s} \\ F_{rx} &= \alpha M\ddot{s} \end{aligned} \quad (4)$$

この α を動的に変化させることで、拘束条件を緩和しながら拘束歩行を実現していく。

②目標加速度に対する拘束

歩行中、ロボットのZMPは支持脚の接触点を作る多角形の中になければならない。四脚ロボットの Trot 歩容では、この支持脚多角形は前後支持脚を結んだ線分となる。一方、ロボットの重心は進行方向に直線運動を行うので、ZMPは図3に示すように歩行中絶えず前後支持脚の中心となっている必要がある。これより、軌道上の加速度 \ddot{s} は式(5)を満たす必要がある。

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

支持脚間の中心を $s=0$ とし、式(5)の微分方程式を解くと、式(6)が得られる。

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

式(6)の軌道は図4のように、 $s-\dot{s}$ の位相平面において左右対称になる。つまり、重心の加速度軌道の関数形は歩行の場合には予め決まっている。つまり、最速歩行とは、半周期中の平均速度が最も大きくなるよう、重心が $s=0$ を通過する時の速度 \dot{s}_0 と歩幅 S_T を求める問題となる。

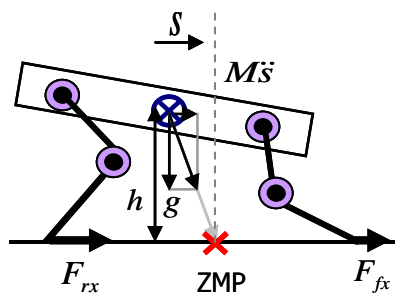


図3 ZMPに対する拘束

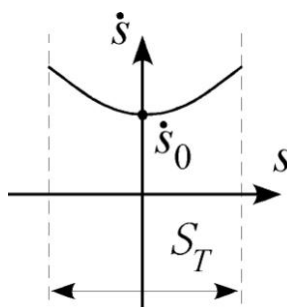


図4 位相平面における歩行軌道

③アクチュエータの最大出力による拘束

アクチュエータには DC サーボモータを使用する。入力電圧と出力トルクには式(7)のような関係がある。

$$\mathbf{V}_{sp} = \mathbf{K}_E \dot{\boldsymbol{\theta}} + \mathbf{R}_a \mathbf{K}_T^{-1} \boldsymbol{\tau}_{sp} \quad (7)$$

ここで、 \mathbf{R}_a はモータの電気抵抗行列、 \mathbf{K}_E は逆起電圧定数行列、 \mathbf{K}_T はトルク定数行列である。モータ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あわせて、発生可能トルクの最大値が決定される。

(3) 最速歩行軌道の設計

以上より、まず適当な \dot{s}_0 を定めた上で s の値を左右に十分広くとり、それぞれの s について、全ての関節における発生トルクの値が、関節のトルク限界から最も速くなる α を決定することで、支持脚に対する拘束を考慮した最大歩幅を求めることができる。この歩幅と最適な α の値は \dot{s}_0 を変えると変化するので、 \dot{s}_0 を様々に変えながら平均速度が最大となるように歩幅と α を決定する。ただしその結果、歩幅が小さくなりすぎると、遊脚の動作が間に合わなくなる。このため、遊脚の動作が間に合わない場合には \dot{s}_0 を小さくし、遊脚動作の実現が可能な歩幅を決定することとなる。

遊脚は ZMP や摩擦の制約を受けないので、最適時間制御を得る手順は Bobrow の方法と同じである。遊脚の初期条件 s_i, \dot{s}_i は支持脚の設計で得られる値とする。図5にその方法を示す。

初めに初期位置から、最大電圧命令を出す。軌道が境界線に達する直前に切替点 A で電圧を最小電圧に切り替える。この時に軌道が境界と接するように切り替え点 A の時刻を決定する。また、終端位置位からは最小電圧を与えた場合の軌道を時間を遡って描く。そして、次に境界とぶつかった点 C に最大電圧で到達する軌跡を、同じく時間を遡って描く。この軌跡と、スタートから1回の切り替えで得られた軌跡の交点を B とする。すると、A, B, C でそれぞれ最大から最小、最小から最大、最大から最小と、3回の切り替えで遊脚の最短時間軌道を得ることができる。

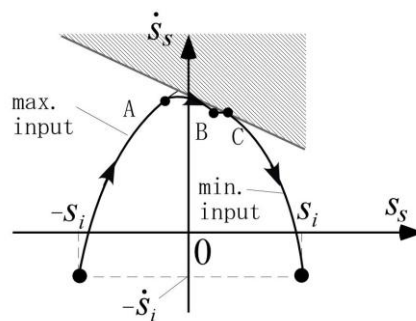


図5 遊脚最短時間軌道の求め方

以上の手順を纏めたものを以下に示す。

- 1) \dot{s}_0 を1つ定め、それぞれの s において運

動に必要な関節トルクをすべての関節について求める。

2) それぞれの s について、全ての関節トルクの中で発生可能トルクに対する余裕が最も小さな関節トルクを選び、その発生可能トルクに対する余裕が最大となるよう、 α を決定する。

3) 2) で決定された α とアクチュエータの発生可能トルクから、達成可能な最大歩幅を得る。

4) \dot{s}_0 を調整して1) から3) を繰り返し、平均速度が最大となる \dot{s}_0 と歩幅、および α を決定する。

5) 4) で得られた条件を初期状態とし、遊脚の最短時間軌道、およびその時の時間を求める。

6) もし5) の時間が支持脚の移動時間以下であれば、これが最速歩行となる。また、5) の時間が支持脚の移動時間よりも長ければ、 \dot{s}_0 の値を減らして歩幅を広げ、支持脚移動時間を長くして再度5) を計算する。

(4) 静止から最速、最速から静止への最短時間遷移軌道の設計手順

① 静止から最速、最速から静止への遷移軌道設計手順

最短時間加速歩行を実現するためには、図4における減速区間をなくし、図5に示すように常に1歩毎(1周期を2歩と数える)の軌道が加速のみを行うことが必要となる。その際、できるだけ歩幅を大きくとることで、最大の加速を得ることができる。なお、速度が0からのスタート時は式(6)の \dot{s}_0 が0となるので、グラフは直線となる。この時、目標速度を超えた速度に到達することのできる最小の歩数を n とすると、 $n-1$ 歩目まで最大加速をしてしまうと、最後の1歩のみでちょうど目標速度に到達できる保証はない。これは n 歩目にちょうど最大速度の歩行となった次の瞬間、遊脚が最速歩行の条件を満たすとは限らないからである。そこで、図6に示すように、2歩手前まで最大加速とした後に、最後の2歩でちょうど継続した最速歩行が可能となるための歩幅を、調整に要する時間が最短となるよう求めることとする。これにより最短時間で目標速度達成ができる。なお、目標速度は最速である必要はなく、この方法で最速歩行以下のような歩行への遷移も可能である。

任意速度の歩行から静止への遷移も同様の手順で行うことができる。図7のように、今度は加速区間がなくなるようできるだけ歩毎に大きな減速を繰り返す。速度が0を下回る速度に到達する最小の歩数を n とし、加速の時と同様、 $n-1$ 歩目から減速に補正を加え、 n 歩終了時点で静止するよう、探索を行う。これにより、最短時間で減速ができる。

② 目標静止位置が与えられた場合の軌道の生成法

まず、上記の最短時間での減速軌道に要する制動距離を予め求め、これを D_{min} とする。そして、図8に示すように、歩行中の現在の位置から目標静止位置までの距離が、現在の歩行速度での一步の幅 S_T との合計 $D_{min} + S_T$ 以下となった時点の歩行から、減速を開始する。その際、減速を開始するタイミングを少しずつずらしながら、上記の最短時間での減速を適用し、その際得られる制動距離を求める。これがちょうど目標静止位置までの距離と等しくなるタイミングが必ず存在するので、これを求めることで目標位置での静止が実現できる。その際の探索方法は上記の方法がそのまま利用できる。

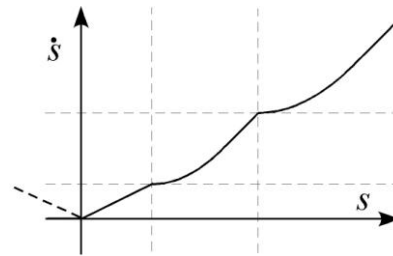


図5 最速加速パターン

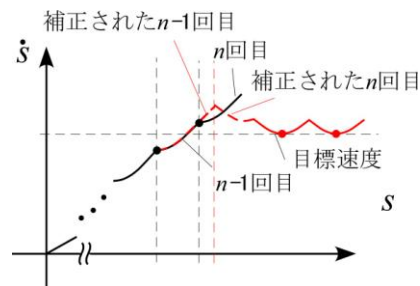


図6 加速時における歩幅調整

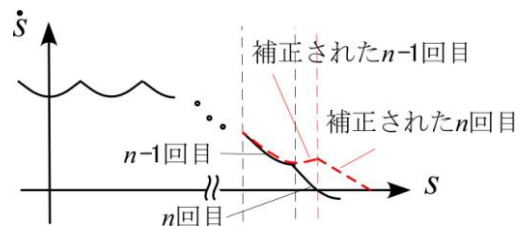


図7 減速時における歩幅調整

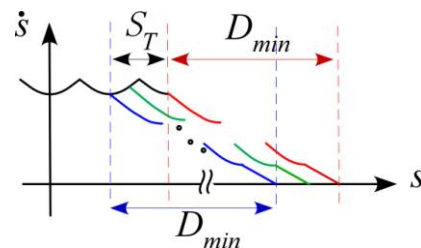


図8 目標地点での停止方法

4. 研究成果

(1) 最速歩行実験と成果

まず、SONY製の四足歩行ロボット Aibo ERS-7 を用いて、最速歩行実験を行った。運動・力学パラメータを表 1, 2 に示す。胴体重量は 1.4[kg]、各足は 0.12[kg]である。

表 1 歩行ロボットのパラメータ

	Joint-b	Joint-f1	Joint-f2	Joint-r1	Joint-r2
L_i [m]	0.130	0.0701	0.077	0.0701	0.077
M_i [kg]	1.42	0.06	0.06	0.06	0.06

Table 2 Parameters of DC servo motors

	Motor-f1	Motor-f2	Motor-r1	Motor-r2
τ_{max} [Nm]	1.06	1.04	1.06	1.04
V_{max} [V]	7.4	7.4	7.4	7.4
$\dot{\theta}$ [rpm]	51	55	51	55

h [mm], θ [°], l_0 [mm], \dot{s}_0 [mm/s], 推進力配分率 α を変えながら、前後支持脚の全ての関節トルクが歩幅と共にどのように変化するかを算出した。その結果、表 3 に示す条件のとき、平均理論速度が最大となり、歩幅 56[mm]で平均理論速度 467[mm/s]となった。また、その際の推進力配分率の変化を図 9 に示す。

表 3 胴体姿勢・脚幅の最適パラメータ

h [mm]	143
θ [°]	-6
l_0 [mm]	100

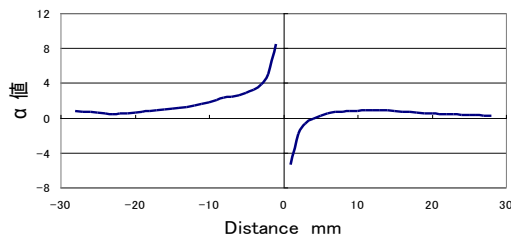


図 9 α の最適値

図 9 では、 α が原点近傍で無限大に発散している。原点においては胴体加速が 0 となるため、原点近傍でも配分の元となる推進力自体が非常に小さな値となる。これを関節トルクの改善に敢えて利用しようとするため、その係数が大きな値を取ってしまうことが原因である。ただし、その効果は非常に小さいので、原点近傍では例えば $\alpha=0.5$ と設定しておけば良い。

ただし実験では、目標通りの結果を得ること

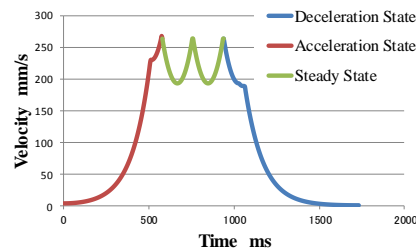
ができなかった。これは、後脚膝関節トルクが飽和したためで、この原因は、既製品を利用したためモータ特性の同定がうまくできていないためと推測される。

(2) 状態遷移実験と成果

本実験とシミュレーションでは、hpi 社製の 4 足歩行ロボット G-Dog を用い、実験ではこれを改造し、外部のコンピュータからリアルタイムのフィードバック制御を行った。静止状態から最短時間で定常歩行状態まで加速、2 周期歩行した後に最短時間で停止するシミュレーションを行った。

シミュレーション結果を表 4 に示す。ただし T は加速や減速に要した時間、 D はそれに要した時間を表す。また、胴体部速度を示したものを図 8 に示す。

表 4 最短時間加速と距離



		加速	減速
T	ms	628	576
D	mm	36.5	37.4

図 8 最短時間状態遷移シミュレーション

表 4 より、加速時間と減速時間に若干の違いが見られる。また、図 8 より、加減速どちらも 2 歩で実現可能なことがわかる。表 5 は支持脚、遊脚どちらの脚が律速となっているかを示しており、2 歩目のみ、遊脚が歩幅を決定していることがわかる。加速は支持脚で実現されるため、加速の際にはできるだけ支持脚で長い時間加速をするのが有利である。2 歩目の律速のみ遊脚となっているのは、速度調整が最適に行われていることを表している。

上記の減速区間で、制動距離 D を 3 通りに設定して行った実験の結果を表 6 に示す。表中のシミュレーション及び実験結果は、図 8 で示した歩行全体での移動距離となっており、制動距離の 3 通りは、減速のタイミングをずらしてそれぞれ表に示した値となる軌道を求めたものである。この結果からは 50% 近い誤差が生じていることがわかる。これは、利用した G-Dog が理論では無視した遊脚の動的影響を大きく受けていること、関節のサー

ボが弱いことなどが原因で、最高速度が理論値の55%程度しか実現できていないことが考えられるが、詳細は今後の課題となっている。一方、最短加速時間は理論値の99%となり、停止も2歩で実現できた。

表5 支持脚・遊脚の最短時間

n	支持脚	遊脚
1	556	4
2	72	72
3	176	72
4	176	72
5	88	76
6	488	4

表6 実験結果

D	シミュレーション	実験	誤差%
37.4 mm	144.4 mm	78.0 mm	46.0
55.5 mm	162.5 mm	85.0 mm	47.6
72.6 mm	179.8 mm	92.0 mm	48.9

(3) 結論

本研究課題では、脚に比べて胴体質量が十分に大きい四足歩行ロボットに対して、歩行速度の最大化、及び静止を含めた達成可能な任意速度から任意速度までの遷移時における最短時間制御軌道の生成法を理論的に確立した。また、目標位置が与えられた際の最速での達成軌道の生成法を示した。このように歩行ロボットにおいて、目標位置が定められた最短時間での制御軌道生成法はこれまで提案されていない。

本課題期間で達成できなかった実機による検証、曲線を含めた軌道への展開が今後の課題である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

①大隅久, 中村亮介, 横濱和也, 竹内恭平
四足歩行ロボットの最短時間制御 - ODE
による3Dシミュレーション-, 日本機械学会
ロボティクス・メカトロニクス講演会,
2A2-B01, 2011年5月28日, 岡山.

②竹内恭平, 横濱和也, 大隅久
トルクの冗長性を利用した四足歩行ロボッ
トの最短時間制御, 日本機械学会ロボティク

ス・メカトロニクス講演会 2010 講演論文集,
1A2-A03, 2010年6月15日, 旭川.

③横濱和也, 大隅久, 竹内恭平, 石橋武則
トルクの冗長性を利用した四足歩行ロボッ
トの最短時間制御, 第15回ロボティクスシ
ンポジア予, 2010年3月16日, 吉野.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大隅 久 (OSUMI HISASHI)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号: 00203779