

四脚ロボットを用いた実世界における複数台移動ロボットの 分散協調システムの研究

研究代表者 研究員 大隅 久 (中央大学理工学部精密機械工学科)
共同研究者 研究員 梅田 和昇 (中央大学理工学部精密機械工学科)
共同研究者 客員研究員 新井 民夫 (東京大学大学院工学系研究科)
共同研究者 準研究員 神谷 昌吾 (中央大学理工学研究科精密工学専攻)
共同研究者 準研究員 菊地 敏文 (中央大学理工学研究科精密工学専攻)

1 はじめに

複数のロボットを協調させ、所期の目的を達成することを目指した分散協調システムの研究が、移動ロボットの分野において盛んに研究されている。中でも西暦 2050 年に人間とサッカーを行うことを目標として創設されたロボットサッカーの世界大会、ロボカップ (RoboCup) は、分散協調システムを扱う研究の標準問題と位置付けられ、世界中の研究者の集う一大イベントとなっている。研究申請者らも、2003 年度より東京大学と合同で、本大会のリーグの一つ、4 足ロボットリーグに参加している (Fig.1)。2003 年度は、ロボカップジャパンオープンにおいて競技部門の 1 つ、ロボカップチャレンジで優勝を、またロボカップ世界大会でも同競技部門で 3 位を獲得している。

本研究グループでは、この活動を通じながら、実ロボットを用いた分散協調システムに関する多くの研究課題のうち、特にセンシング、協調の戦略、マンマシンインタフェース及び歩行の最適アルゴリズムの研究を行っている。これらはいずれも、将来ロボットを人間の身の回りで利用するための大変重要な課題と位置づけられる。

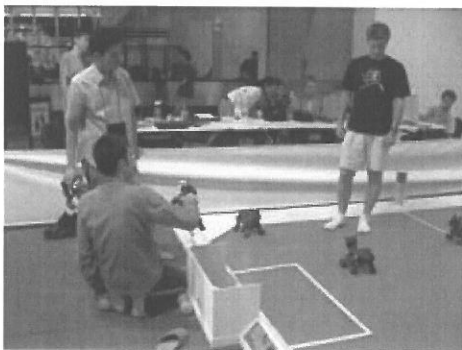


Fig.1 ロボット調整の様子 (パドバ)

2 研究プロジェクトの概要

研究プロジェクトの全体像を Fig.2 に示す。まずセンシングの研究として、ロボットが色情報からフィールドでの

自己位置を計測する方法、ボールの認識方法を開発した。ロボットに搭載された CCD カメラで見るフィールドの色 (緑) やボールの色 (オレンジ) は照明条件の違いによって大きく変わってしまうため、正しい色認識が研究の基本となる。このための色テーブル作成、及び補正のためのシステムを構築することで、試合会場における作業を大幅に短縮することができた。

自己位置同定、環境認識には、フィールド 4 隅にある色の塗り分けられたランドマークを利用する。これらを見ながら絶えず自己位置推定を行い、誤差を補正する。これにはパーティクルフィルタ、カルマンフィルタが利用される場合が多い。しかし、ゲームでは反則を犯したロボットが 30 秒間場外に出されるというルールがあり、フィールドに戻ったロボットは反則した地点とは全く違う場所に立たされる。すると、これまでロボットが記憶していた場所とは整合性の取れないセンサ信号が入ってくるため、推定ができなくなってしまう。これはキッドナプトロボットプロブレムと呼ばれ、自律移動ロボットを身の回りで利用するには避けて通れない重要な課題となる。この問題に対し、これまで膨張リセット戦略を提案している。

協調の戦略として、フィールド上のある場所にいるロボットに対して、相手ゴール、ボール、味方のロボットの相対位置に応じて最適な動作を行うためのテーブルを作成することを試みている。ロボットがどの位置でどの方向を向いていても、それに応じて最適な動作を求めていこうとすると、その場合の数は劇的に増加する。このため、ロボットの持つ状態変数を圧縮する技術を開発している。

以上のように求まった戦略が、相手のいる実際の環境で果たして有効に作用するかどうかを検証するため、マンマシンインタフェースとして、シミュレータの開発を行っている。シミュレータでは、フィールド上の 4 台のロボットのそれぞれに搭載された CCD カメラから取得される画像を、レンズ系の持つゆがみまで含めてシミュレーションすることができる。更に、シミュレータ上で 2 つのチームを

対戦させることも可能で、それぞれに設計されたゲーム戦略アルゴリズムを与えておくことで、より強い戦略アルゴリズムを作っていくことが可能である。この戦略の構築と共に、シミュレータ上でのロボット、ボールの動的挙動の実現が課題となっている。

歩行に関しては、最適制御理論を応用し、歩行の高速化を目指した研究を行っている。どんなに優れた戦略を作ることができても、相手ロボットよりも足が遅いと、試合では決して勝利を収めることができない。脚型ロボットの歩行の高速化に関する研究はあまり行われておらず、高速な歩行制御方法の確立は、ロボット工学的な立場から見ても大変に意義のあることである。ボールのハンドリングについては、モデル、動作に不確定な要素が多く、どのチームもかなり原始的なレベルに留まっている。

以下では、制御の観点から4脚ロボットの最速歩行についての概略を示す。

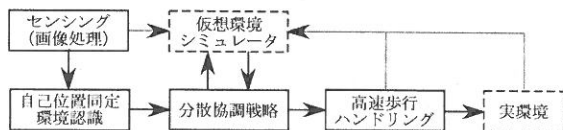


Fig.2 ロボカップにおける研究課題

3 四足ロボットの最短時間制御

3.1 歩行ロボット研究の動向

脚ロボットの高速移動の実現は、作業効率・危険回避能力の向上などのため非常に重要な要求の一つである。そのため、様々な動歩行の研究が行われてきている。4脚歩行ロボットでは、ZMPを滑らかに支持脚対角線上に移動し、少ないエネルギー消費で安定な動歩行を実現する3D揺動歩容 [1]、多様な不整地を自律適応的に高速移動することが可能なCPG規範型歩行 [2]、倒立振子モデルで高速歩行を議論した [3] などがある。また、高速歩行時の姿勢安定化の研究には、[4] ~ [6] などがある。しかしこれらは、4脚歩行ロボットの動特性・アクチュエータ限界・摩擦限界を全て考慮した高速歩行を実現するものではない。本研究ではこれらを考慮し、摩擦係数が一定の平面での高速歩行を実現することを目的とする。本稿では、カメラなどの環境認識用センサが歩行ロボットの胴体部に取り付けられることを想定し、歩行中、胴体部の高さ、姿勢が一定で揺動がない歩行を前提とする。

アクチュエータ限界を考慮した軌道拘束下でのシミュレータの最短時間制御の代表的な手法に追従限界曲線を用いて最短時間軌道を得るBobrowらの研究 [7] がある。本

研究では、それを歩行ロボットに拡張することにより高速歩行を実現する。ただし、歩行ロボットに適用するには、歩行の条件であるZMP軌道の設計、脚先での加重の変化など、新たに考慮しなくてはならない条件が多い。

アクチュエータ限界を考慮し、歩容はトロットを選択する。デューティ比を0.5とし、前進歩行を対象とする。今回はモデルを簡略化し、平面内の運動のみを考える。

制御対象となる4脚歩行ロボットにはSony ERS-210 (Fig.3) を用いることにし、機構・力学モデルを作成する。そして本研究で提案する手法を用い、胴体部の加速度軌道を得る。[7]では、アクチュエータ限界をトルクで表現していたが、実際は入力電圧が制限を受けるので、本研究では電圧を入力とした運動方程式を扱う。最後にシミュレーションで得られた電圧軌道を用いて歩行実験を行った結果を示す。

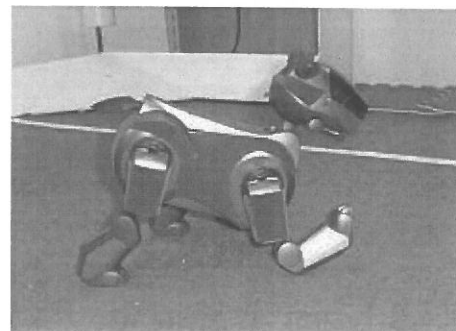


Fig.3 ERS-210

3.2 ロボットの2次元平面内モデル

Fig.4が制御対象を2次元で表現したリンクモデルである。駆動関節は、Joint-f2, Joint-f3およびJoint-r2, Joint-r3の4つである。ERS-210は脚部が胴体部に比べ非常に軽いため、遊脚の慣性力は無視する。支持脚の脚先は地面と点接地するものとする。

胴体が一定の高さと姿勢で移動するという条件を設定したので、ロボットの運動方程式の状態変数、角度・角速度・角加速度は全て、支持脚相における胴体部の目標軌道の線

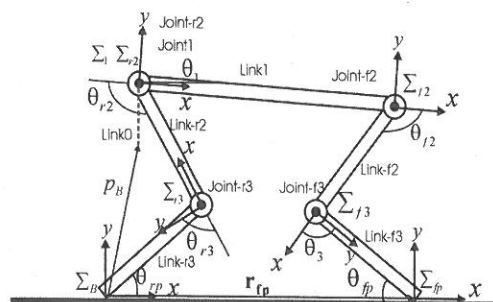


Fig.4 ロボットの2次元平面内モデル

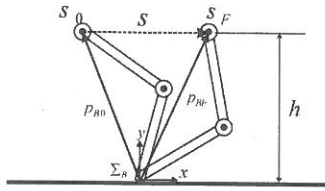


Fig.5 線長 s による表現

長パラメータ s で表現する (Fig.5)。

3.3 脚先発生力と加速度との関係

ロボット全体の力とモーメントのつりあい式を、(1)～(3)に示す。

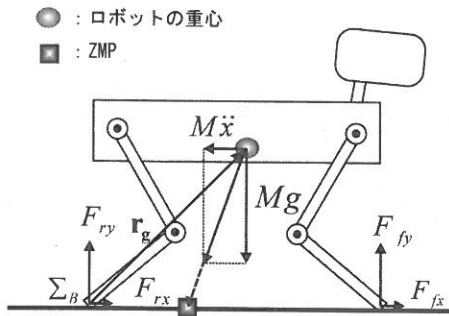


Fig.6 力のつりあいと重心位置

$$F_{fy} + F_{ry} = Mg \quad (1)$$

$$F_{fx} + F_{rx} = M\ddot{x} \quad (2)$$

$$F_{ry} \cdot r_{gx} = M\ddot{x} \cdot r_{gy} + F_{fy} \cdot (r_{fx} - r_{gy}) \quad (3)$$

M はロボット全体の質量、 \ddot{x} は胴体部の進行方向加速度、 g は重力加速度である。 F_{fx} と F_{rx} の間に冗長性が存在するが、前脚の発生力 $F_{fx} = 0$ と設定したため、 F_{rx} 、 F_{fy} 、 F_{ry} は一意に決定することができる。また、脚先のすべりを防止するために $|F_{rx}| \leq \mu|F_{ry}|$ を満たさなければならない。 μ は静止摩擦係数である。

重心に働く外力の合力の作用線と地面との交点を ZMP (ゼロ・モーメント・ポイント) と呼ぶ。重心を水平方向に制御する際、常に ZMP が 2 つの支持脚接地点の midpoint となっているように、重心の時間軌道を設計しなくてはならない。

3.4 歩行ロボットの追従限界曲線の導出

最短時間制御の評価関数は、

$$J = t_f = \int_{t_0}^{t_f} dt = \int_{s_0}^{s_f} (ds)/\dot{s} \rightarrow \min \quad (4)$$

で表される (t_f は終端時間)。この評価関数の最適解においては、どの関節への制御指令も常に最大、あるいは最小値となることが最大原理により知られている。

さて、それぞれのモータへの入力電圧と線長パラメータ s との関係は、ロボットの脚の動力学方程式を基に、式 (5) と表すことができる。

$$V_i = c_{1i}(s)\dot{s} + c_{2i}(s, \dot{s}) \quad (5)$$

ただし、添え字 i は脚の i 番目の関節を表す。また、右辺第 1 項は慣性力による項、第 2 項はコリオリ、遠心力、重力、モータの逆起電圧の影響を合わせた項に対応する。

一方、ロボットには各関節に最大入力電圧と最大角速度の制限がある。制御入力の不等式拘束条件、状態変数の不等式拘束条件はそれぞれ

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (6)$$

$$\dot{\theta}_{i \min} \leq \dot{\theta}_i \leq \dot{\theta}_{i \max} \quad (7)$$

である。また、脚先の摩擦限界より

$$-\mu F_{ry} \leq M\ddot{s} \leq \mu F_{ry} \quad (8)$$

が存在する。ただし F_{ry} には \dot{s} の項が含まれている。

胴体部の高さや姿勢が一定で、デューティ比 0.5 のトロット歩容であることを考慮すると、胴体部の初期条件・終端条件は式 (9)、(10) のように設定される。添字 0 は歩行 1 周期における初期、F は終端を表す。

$$[p_{B0} \quad \dot{p}_{B0}]^T = [x_{B0} \quad h \quad \dot{x}_{B0} \quad 0]^T \quad (9)$$

$$[p_{BF} \quad \dot{p}_{BF}]^T = [x_{BF} \quad h \quad \dot{x}_{B0} \quad 0]^T \quad (10)$$

つまり、初期と終端の進行方向速度は等しくなければならない。また目標軌道は X 座標と平行なため $\dot{x} = \dot{s}$ 、 $\ddot{x} = \ddot{s}$ が成立する。

式 (5)、(6) 式より式 (11) が得られる。

$$f_i(s, \dot{s}) \leq \dot{s} \leq g_i(s, \dot{s}) \quad (11)$$

ただし

$$f_i(s, \dot{s}) = \begin{cases} (V_{i \min} - c_{2i}(s, \dot{s}))/c_{1i} & c_{1i} > 0 \\ (V_{i \max} - c_{2i}(s, \dot{s}))/c_{1i} & c_{1i} < 0 \end{cases}$$

$$g_i(s, \dot{s}) = \begin{cases} (V_{i \max} - c_{2i}(s, \dot{s}))/c_{1i} & c_{1i} > 0 \\ (V_{i \min} - c_{2i}(s, \dot{s}))/c_{1i} & c_{1i} < 0 \end{cases}$$

である。縦軸に \dot{s} 、横軸 s をとり、(11) の領域を第 1 象限で表したのが Fig.7 の太線で、これを追従限界曲線と呼ぶ。この曲線の下側が実際にモータによる加速が可能な領域となる。つまりこの曲線は式 (11) の範囲が存在するかしないかの境界を表しており

$$f_{\max}(s, \dot{s}) = g_{\min}(s, \dot{s}) \quad (12)$$

から求めることができる。 f_{max} , g_{min} はそれぞれ、全てのモータの中で最も大きな f_i , 小さな g_i を表す。

歩行ロボットではこの他に、マニピュレータの場合とは異なり、脚先に発生可能な摩擦力の限界があるため、式(11)だけでは十分でなく、Bobrow らの手法をそのまま適用することできない。その摩擦力限界による拘束条件は、

$$f_i(s, \dot{s}) \leq -F_{rx \max}/M \quad (13)$$

$$g_i(s, \dot{s}) \geq -F_{rx \max}/M \quad (14)$$

と表現される。 $F_{rx \max}$ は最大静止摩擦力である。これは Fig.7 の細線で表される。歩行ロボットにおいては式(12)~(14) および関節角速度限界を表す式(7)より追従限界曲線が得られる。ただし、これだけでは外乱の存在する実際の制御への利用には十分ではない。誤差のフィードバックを行うには常に加速・減速の両方が可能、すなわち \ddot{s} が正負両方の値を取ることが必要である。この範囲は式(11)より

$$f_i(s, \dot{s}) \leq 0 \quad (15)$$

$$0 \leq g_i(s, \dot{s}) \quad (16)$$

で表される。式(15)が減速可能範囲、式(16)が加速可能範囲である。等式が成り立つときの曲線をそれぞれ減速限界曲線、加速限界曲線と呼ぶこととする。速度が正の領域に加速限界曲線、負の領域に減速限界曲線が現れる。

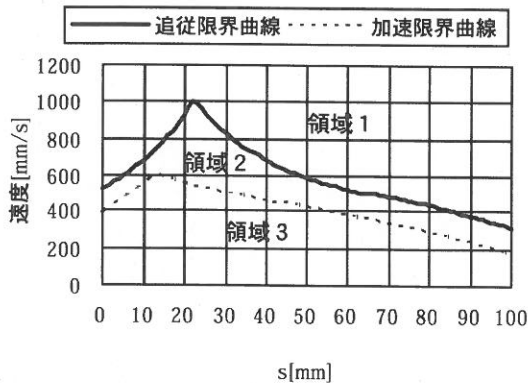


Fig.7 限界曲線

ERS-210 の各リンクの質量と長さを Table 1 に示す。胴体部が地面と平行な状態で、初期座標 $\mathbf{p}_{B0}(\theta) = [-50 \ 110]^T$ (mm) から終端座標 $\mathbf{p}_{BF}(\theta) = [50 \ 110]^T$ までの追従限界曲線・加速限界曲線を、横軸を線長パラメータ s , 縦軸を線長の速度パラメータ \dot{s} として描いたのが Fig.7 である。 $s_0 = 0$ [mm], $s_F = 100$ [mm] となる。領域は 3 つに分けられる。それぞれの領域で可能な運動は以下の通りである。

<領域 1: 追従限界曲線以上>

式(13)を満たす \ddot{s} が存在せず、式(7),(13),(14)も成り立たない領域である。初期速度・終端速度にこの領域の速度を設定することはできない。関節角が目標値に追従できないか、スリップにより目標加速度が発生できない。

<領域 2: 追従限界曲線以下・加速限界曲線以上>

式(7),(13),(14)を満たすが、式(16)が成り立たない減速のみ可能な領域である。この領域では、大きな外乱が生じ目標軌道から大きく外れて加速が必要になった場合、目標軌道に追従できない。

<領域 3: 加速限界曲線以下>

全ての条件を満たす、加速・減速ともに可能な領域である。この領域内ならば外乱に強く、様々な状況に柔軟に対応できる歩行が可能である。

Table 1 ERS-210 の各リンク質量・長さ

	質量 [kg]	リンク長 [mm]
Link1	1.36	119
Link-f2	0.06	65.3
Link-f3	0.06	69.6
Link-r2	0.06	65.3
Link-r3	0.06	77.0

3.5 加速度軌道 \ddot{s} の設計

今回のモデルの動特性は、制御対象モデルを 2 次元平面内に近似し、また支持脚交換時の撃力は考慮していないので実機とは完全に一致しない(特に撃力により脚先負荷の変動が大きい)。しかし、これらの外乱により誤差が生じても補正を行う余裕をもたせ、なんらかのサーボ系を構築することにより追従が可能である。その余裕を保てる領域が加速限界曲線以下(領域 3)である。

Fig.7 の結果を基に、Fig.8 に領域 3 の範囲で、摩擦力を考慮した最大加速・最大減速による \ddot{s} 軌道を描いた。 $s_0 = 20$ [mm] から $s_F = 80$ [mm] を軌道に設定した。X 座標では $x_{B0} = -30$ [mm] から $x_{BF} = 30$ [mm] に対応、また歩幅 60 [mm] である。最大加速・最大減速のスイッチングポイントは 1 つであった。

本来高速歩行を行うには、加速限界の高い範囲を採用すべきである。しかし実際には、同側の前脚との機構的な衝突や、ZMP が支持脚前脚と後脚の間に存在しなければならない条件などにより、設定できる範囲が限定されてしまう。よって今回は上記の範囲を選択した。

3.6 歩行実験結果

目標軌道の平均速度は326[mm/s]で、実験で得られた速度は平均341[mm/s]である。理論値に近い値が得られた。我々はRoboCup SoccerのSony 4-Legged Robot Leagueに参加しており、同機体を用いて歩行を行っている。今までは経験的に歩行を作っており、その最大速度は今回と同様に転倒を抑制しても、平均295[mm/s]であった(本リーグではトップクラスの速さである)。本手法の適用により、10%以上の速度向上が達成できた。

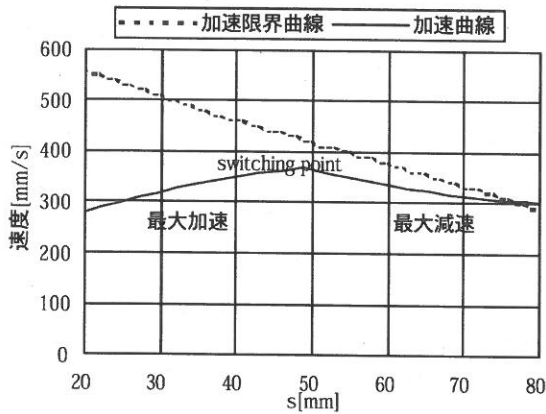


Fig.8 設計された軌道

4 おわりに

Bobrowらの手法におけるマニピュレータの追従限界曲線を、脚先摩擦限界を拘束条件として考慮することにより歩行ロボットに拡張した。また歩行ロボットは外乱の多い環境で仕事をしなければならないので、それらを補正できる力を発生できる領域を加速・減速限界曲線として設定し、その領域内で歩行実験を行い補正が可能であることを示した。

参考文献

- [1] 倉爪, 米田, 広瀬: “4足動歩行機械の拡張左右揺動歩容”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'00講演会論文集, 2P2-84-121, 2000.
- [2] 福岡, 木村: “四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, pp510-517, 2001.
- [3] 木村, 下山, 三浦: “四足動歩行ロボットの力学的解析”, 日本ロボット学会誌, vol.6, no.5, pp367-378, 1988.
- [4] 吉野: “歩行パターン・レギュレータによる拘束歩行ロボットの安定化制御”, 日本ロボット学会誌, vol.18,

- no.8, pp1122-1132, 2000.
- [5] 倉爪, 葉石, 米田, 広瀬: “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, pp380-386, 2001.
- [6] 米田, 飯山, 広瀬: “4足歩行機械のスカイフックサスペンション制御”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.7, pp1066-1071, 1994.
- [7] J.E. Bobrow, S. Dubowsky, J.S. Gibson: “Time-Optimal Control of Robotic Manipulators Along Specified Paths,” The International Journal of Robotics Research, vol.4, no.3, Fall 1985
- [8] 藤本, 河村: “床との衝突および摩擦を考慮した2足歩行ロボットの三次元運動シミュレーション”, 日本ロボット学会誌, vol.15, no.6, pp857-863, 1997.