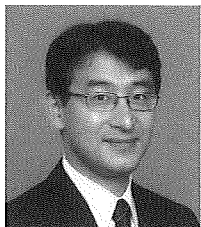


自由運動を利用した歩行ロボットの制御理論と実験

Control Theory and Experiment of a Walking Robot Utilizing Free Motion

1051005



研究代表者

大阪大学大学院 基礎工学研究科 教授

大塚 敏之

[研究の目的]

近年、2足歩行ロボットがいくつも開発されているが、それらは常に曲げた膝で体重を支えつづけるため消費エネルギーが大きくなってしまふ。人間と共に活動する歩行ロボットの実現には、消費エネルギーを抑え長時間の作動を可能とする歩行原理の開発が必要である。

そこで、本研究は、何ら力を加えない自由運動を積極的に利用した機構と制御によって、できるだけ消費エネルギーの少ない歩行ロボットを開発することを目的とする。歩行運動に潜む対称性などの力学的原理を利用して、運動の途中でほとんど力のいらない制御手法を確立し、簡便な機構の実機を開発する。主目的は歩行ロボットの効率的な運動制御を確立することであるので、人間を模擬することには拘らずに力学的な特徴を捉えたロボットを設計する。

[研究の内容、成果]

1. 自由運動を利用した制御理論

1.1 歩行制御の基本的考え方

歩行運動の力学的特徴を捉えるモデルとして、本研究では図1のようなコンパス型歩行モデルを用いた。このモデルの自由運動は、脚の角度を表す θ_1 - θ_2 平面において原点对称な軌道を持つことが示せる。したがって、図2のように、前方に振った脚が地面と衝突するときのみ適

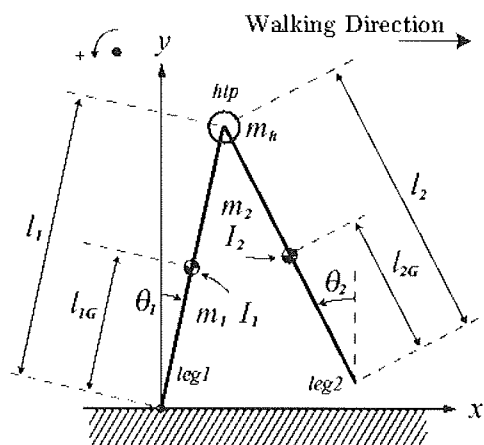


図1 コンパス型歩行モデル

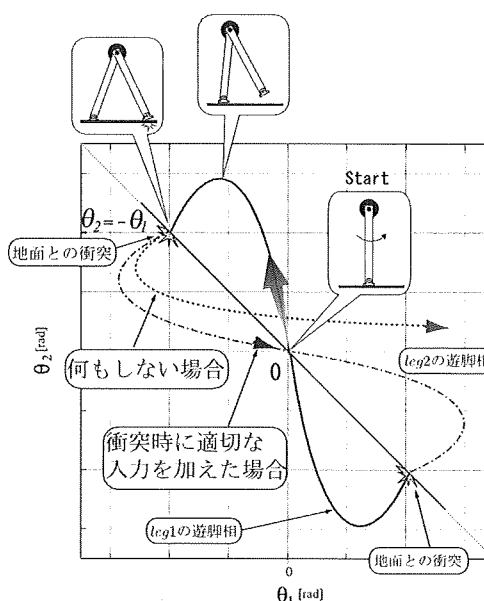


図2 歩行運動の例

切な入力を加えれば周期軌道を実現できる。これが自由運動を利用した歩行制御の基本的な考え方である。衝突の瞬間に加える入力は蹴り動作に相当する。ただし、力積（撃力）であるため正確に実現することが難しい。また、脚を前方に振っている間に腰関節で小さいトルク入力を加えることも考えられる。

1.2 歩行軌道の最適化

まず、蹴り動作と腰関節トルクの役割について、消費エネルギーの観点から検討した。与えられた平均速度を達成するという拘束条件の下で歩行運動の消費エネルギーを最小化する最適化問題を定式化し、数値解法によって最適解の性質を調べた。数値的に得られた最適解は、大部分のエネルギーを蹴り動作で与えており、腰関節トルクの寄与はわずかであった。腰関節トルクも含めた最適制御問題をオンラインで解くのは困難なので、蹴り動作のみでの歩行は、低消費エネルギーとアクチュエーションの簡便さとを兼ね備えていることになる。

つぎに、より実機に即した問題設定として、瞬間ではなく有限な時間区間にわたる有限な大きさの力ないしトルクのみを入力とする最適化問題も考えた。具体的には、地面から浮いた片方の脚を振っている間（遊脚相）にのみ、脚を伸縮させる力と腰関節トルクとを与えることとした。その結果、振った脚が地面に衝突し両脚で接地する直前と直後に入力が大きくなる傾向が見られ、両脚接地時に瞬間的な力積を加える蹴り動作との類似が見られた。その一方で、遊脚相における入力として、脚の伸縮よりも腰関節トルクを主に使った方が歩行の実現する条件は広いことが分かった。前述の結果と併せて考えると、蹴り動作が重要であるものの、安定した歩行のためには腰関節トルクを積極的に活用する駆動方法が望ましいことになる。

1.3 フィードバック制御

歩行軌道最適化の結果を踏まえて、腰関節トルクを制御入力とし、さらには各時刻におけるシステムの実状の状態をフィードバックする制

御手法を検討した。歩行ロボットは非線形システムである上に脚と地面との衝突現象を含むが、遊脚相中の腰関節トルクによって非線形性をキャンセルする入出力線形化手法を導入した。これにより、十分短い時間内で所望の歩幅まで脚が開くように応答を指定可能なフィードバック制御則が設計できた。ただし、完全に指定通りの応答は過大な制御入力を要する場合があるので、制御入力大きさを制限する方法も検討し、小さい入力でも図3のように継続的な歩行軌道が得られることを確認した。したがって、腰関節トルクを利用するものの、あくまでも自由運動に対して補助的に入力を加える制御手法となっている。さらに、歩行運動の安定性を向上させる手段として、歩幅を拘束する機構を想定し、シミュレーションによって大きな効果が確認できた。

これらの結果を組み合わせ、さらに腰関節トルクを低減させる制御方法も検討した。その結果、歩幅を拘束する機構を想定し、単に脚を前に振り出す一定トルクを与える制御手法によって、継続的な歩行が実現できることが分

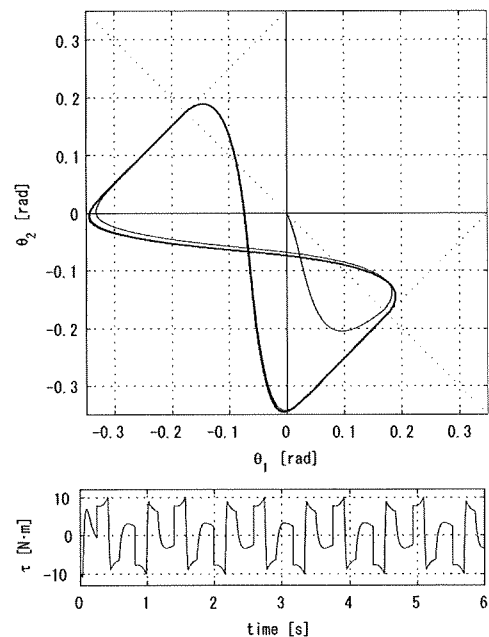


図3 腰関節トルクによるフィードバック制御の歩行軌道（入出力線形化）

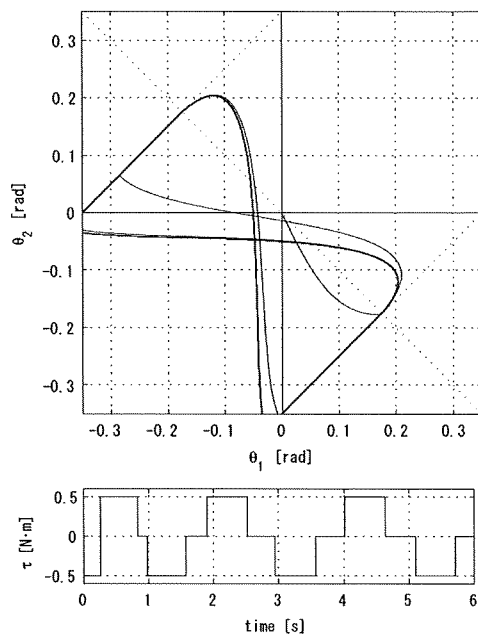


図4 腰関節トルクによるフィードバック制御の歩行軌道 (拘束機構付)

かった。さらに、その際のトルクは従来手法に比べて大幅に低減できた。図4にシミュレーション結果の一例を示す。図3と同様8の字型軌道を描いているが、腰関節トルクの絶対値は従来手法の1/20になっている。

2. 実機の開発

本研究の開始までに、外部から電源供給する1号機と完全自立型の2号機を設計・製作済みであった。1号機は4脚構造で計算機と電源を除いても約30 kgもの重量だったのに対し、2号機では自立型2脚構造で約12 kgを達成した。しかし、2号機では構造の微小なたわみやがたにより歩行中に横方向の揺れが生じ、それが長距離歩行の妨げとなった。

そこで、構造と機構を改良した3号機(図5)の開発を進めた。3号機では、構造の剛性を向上させると共に一層の軽量化を達成することを目標とした。具体的には、脚と地面との角度を計測するための可動部ががたの要因であったので、角度計測用可動部が荷重を持たないように、図6のように構造を工夫した脚先を開発した。他の改良点として、片脚で自重を支持する

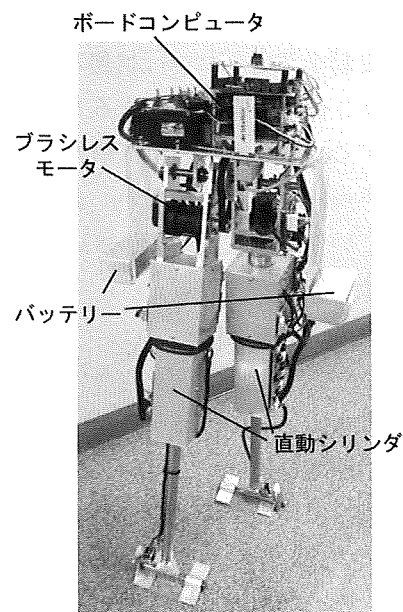


図5 3号機

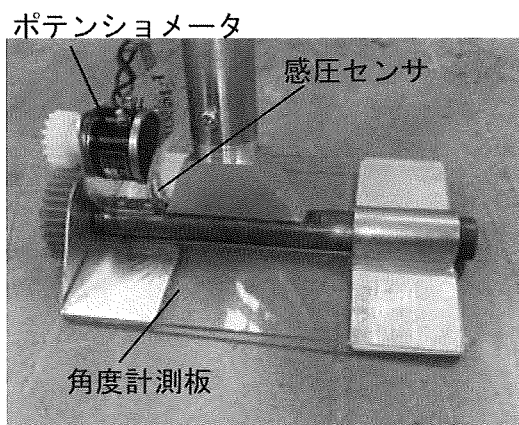


図6 3号機の脚先

際の消費エネルギーを低減するために超音波モータを用いた直動アクチュエータを自主開発した。さらに、方向制御用の機構においても超音波モータを採用し、一定角度を保持する際の消費エネルギーを低減した。3号機はほぼ完成し、センサー/アクチュエータ周辺の回路系やプログラムを開発・調整中である。

コンパス型の実機によって歩行が実現できることは、簡易型の制御則によって確認した。図7のように、遊脚が地面に衝突する直前にオンラインでシミュレーションを行い、適切な歩幅が達成されるように直動アクチュエータの駆動

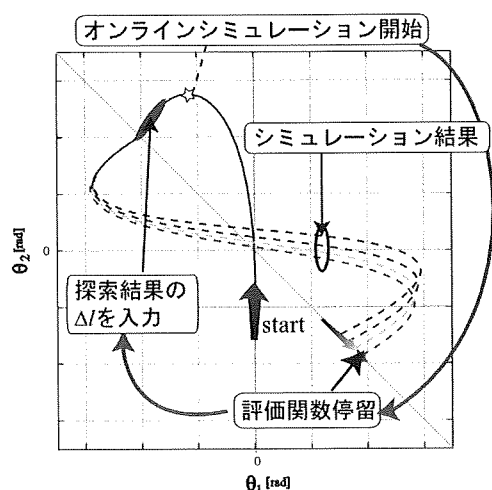


図7 歩行制御則

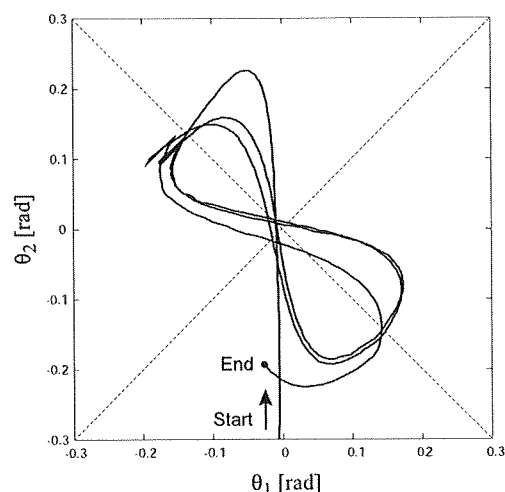


図8 歩行実験結果

量を探索する制御則を2号機に実装したところ、図8のような歩行運動が実現できた。

[今後の研究の方向, 課題]

簡便な機構を用いた歩行制御手法については、シミュレーションを通じて有効性が確認できた。また、低ギヤ比のモータや自由関節を用いた実機において、わずかな制御入力によって歩行が

実現できることも確認できた。ただし、新しい歩行制御手法を実機に実装するには至っていない。したがって、今後の課題は、歩行制御手法の解析と改良を進めつつ、実機への実装も行うことである。

[成果の発表, 論文等]

- 1) 大塚敏之: “力学原理に基づいた ‘自然な’ 運動生成”, 日本機械学会東北支部特別講演会, 仙台 (2005. 10)
- 2) 小曳孝志, 岡崎振一郎, 角口謙治, 大塚敏之: “コンパス型歩行機械のオンライン探索による制御実験”, 第48回自動制御連合講演会, 長野, pp. 389–392 (2005. 11)
- 3) 大塚敏之: “自由運動を活用した歩行機械の制御理論と実験”, 第6回計測自動制御学会システム・インテグレーション部門講演会論文集, 熊本, pp. 913–914 (2005. 12)
- 4) 森田晋, 大塚敏之: “Hamilton の原理に基づく自然な軌道の計画手法 — 力学変数の変数変換 —”, 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 1, pp. 1–10, Jan. 2006.
- 5) 藤井秀典, 大塚敏之: “コンパス型歩行モデルにおけるエネルギー最適軌道の探索”, 第6回計測自動制御学会制御部門大会資料, 名古屋, Vol. 1, pp. 169–172 (2006. 5)
- 6) 角口謙治, 岡崎振一郎, 大塚敏之: “自由運動を利用したコンパス型歩行機械 HW-III の開発”, 第7回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 札幌, pp. 15–16 (2006. 12)
- 7) 岡崎振一郎, 大塚敏之: “コンパス型歩行モデルにおける遊脚相中入力の最適化”, 第7回計測自動制御学会制御部門大会, 調布, No. 81–3–5 (2007. 3)
- 8) 寺山充実, 大塚敏之: “股関節角の拘束機構を用いたコンパス型歩行機械の制御”, 第52回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集, 京都, pp. 67–68 (2008. 5)
- 9) Hodaka Kato, and Toshiyuki Ohtsuka, “Walking Control of a Compass-like Biped Robot with a Constraint Mechanism”, *Proceedings of ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka, pp. 51–55, Aug. 18, 2009.