

柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報処理メカニズムの解明

Understanding The Sensory Information Processing Mechanism Yielded from Soft Deformable Feet

2011002



研究代表者

東北大学 電気通信研究所

助教

大 脇 大

[研究の目的]

本研究の目的は、柔軟な身体を有し、これまでのロボティクスで取り扱われていた（機構的、また感覚情動的な）自由度数を遙かに凌駕する超大自由度を、実時間で「手なづけ」ながら無限定環境に適応可能な知能機械システムを実現する「コンティニューム・ロボティクス」技術の創出である。具体的には、歩行運動を事例として、ヒトと同等程度の感覚機能を有する柔軟足「Bionic foot」の開発と感覚情報の統合処理アルゴリズムの構築を目指す。本研究では、柔軟な身体材料とそのレオロジー的性質から生み出される多様な時空間感覚情報を獲得し実時間で統合するメカニズムを構築することによって、適応的歩行生成の鍵となる身体特性（足裏の材料特性、センサの配置）およびそれらを活用した感覚情報統合メカニズムの解明を目指し研究を行った。

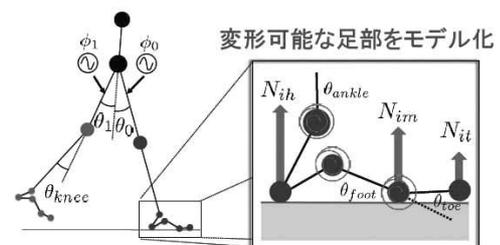
[研究の内容, 成果]

具体的に本研究では、(1) 柔軟な足裏の変形から生み出される感覚情報を活用する制御モデルの提案（シミュレーション）、(2) 提案する制御則を検証するための2足ロボット実機の開発、および(3) 2足ロボットに実装する柔軟な足部「Bionic foot」の開発と実機への実装、理論解析という手順で研究を行ってきた。

(1) シミュレーション

ヒトの筋骨格構造を参考に柔軟な変形を可能とする足部の骨格モデルを有する動力学シミュレータ（図1）を構築した。また、位相振動子をベースとし、足部からの感覚情報をフィードバックすることで、歩行のリズムを調整する歩行パターン生成器モデルを提案した（図1）。構築した制御則に基づき、定常歩行、移動速度変化に対する適応性、環境変化、外乱に対する頑健性の検証を行った。

シミュレーションの結果、安定かつ継続的な歩行、静止状態から歩行状態への遷移が確認された。さらに、平地から斜面上へと環境が変化した際の環境適応性、歩行中に外乱を印可した際の頑健性（図2）についても、提案する歩行制御モデルによってパフォーマンスが向上する結果が得られた。柔軟な足裏から生み出される感覚情報を制御系にフィードバックし、歩行リ



位相振動子で歩行パターン生成器をモデル化

$$\dot{\phi}_i = \omega + \epsilon \sin(\phi_j - \phi_i - \pi) + (aN_{ih} + bN_{irm} + cN_{it}) \cos \phi_i$$

脚間相互作用 足からのセンサフィードバック

図1 筋骨格モデルと制御モデル

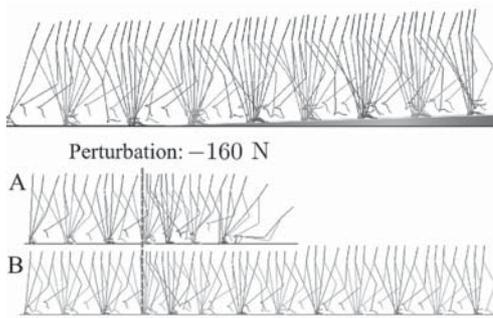


図2 シミュレーション結果

ズムを調整することで、優れた環境適応性や頑健性が発現する結果が得られた。

(2) 実機実験

提案する制御則の妥当性を実世界において検証するため、足裏にウレタン樹脂を実装し、センサを埋め込んだ足部を有する二脚ロボット(図3)を開発し、実機実験を行った。シミュレーションと同様に定常歩行、移動速度変化の実験を行った。

開発した2足ロボットは、脚長0.4[m]、上体長0.2[m]、幅0.2[m]、重量1.6[kg]となっている。腰関節、および各脚に股関節、膝関節を有する構造となっている。腰関節には弾性要素が実装されており、受動的に可動可能となっている。各脚の股関節にはサーボモータが実装されており、歩行パターン生成器からの指令に応じて脚を駆動する。膝関節は、受動的な関節となっており、足裏が接地している時のみ関節の剛性を高める反射機構を有している。腰部に実装したサーボモータによりワイヤを引っ

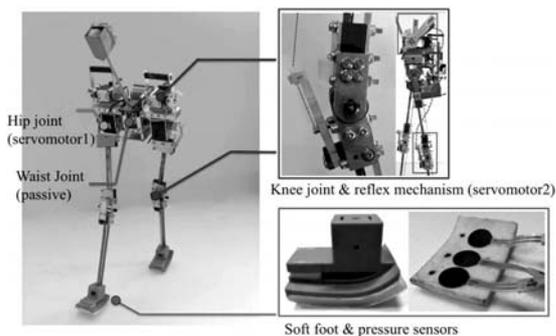


図3 実機プロトタイプ

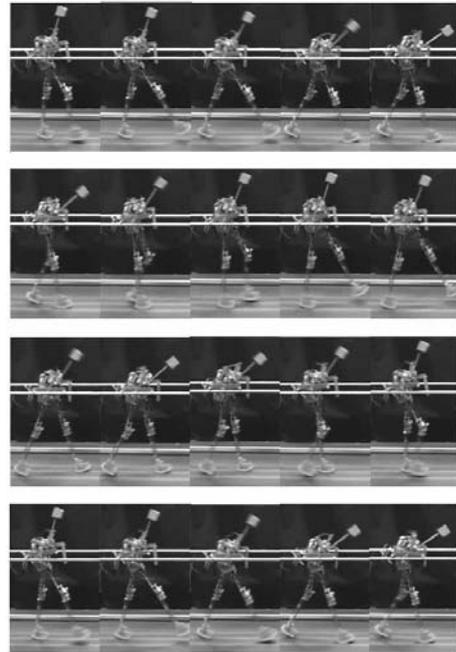


図4 定常歩行の様子

張ることで、足裏接地時に膝関節剛性を高める機構を実装した。本研究で着目する足裏には、シリコン材料である人肌ゲルを貼ることで柔軟性を実現した。足裏からの感覚情報取得のために圧力センサを用い、柔軟な人肌ゲルを介したセンサ情報を活用することで、多様な感覚情報の取得が可能となる機構を採用した。初動段階の検証のため、実験環境であるトレッドミル上において、ロボットは矢状面のみに運動を拘束されている。

図4は、開発した2足ロボットの定常歩行時のスナップショット(歩行1周期)を示す。提案する制御則を用いることによって、安定かつ継続的な歩行が実世界においても確認された。さまざまな初期条件に対して約70%の成功率で100歩以上の継続的な歩行が可能であった。

(3) ヒトを模擬した足部開発と理論解析

ヒトの足部を詳細に模擬した足部機構「Bionic foot」(図5)を開発し、足部の柔軟性から生み出される感覚情報が歩行の頑健性に与える影響を、2足ロボット(図6)を用いて検証した。さらに、得られた実験データから、安定な歩行

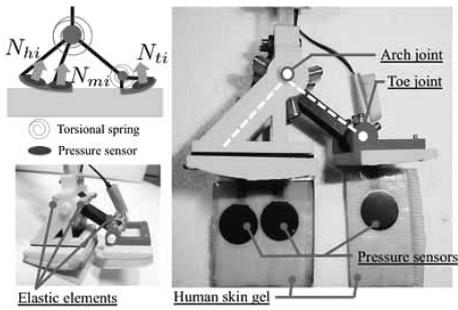


図5 柔軟な足部「Bionic foot」

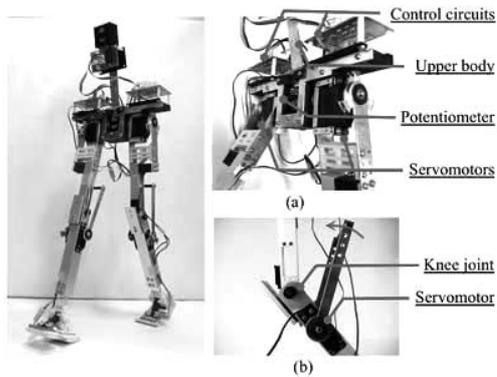


図6 柔軟な足部を有する2足ロボット

生成に内在する力学構造の理論解析を行った。

足部構造に2関節を有し、各関節に弾性要素を実装した足部を開発し、関節可動による柔軟性を新たに実現した。また、足裏には人肌ゲル（ウレタン樹脂）を実装することで、ヒトの皮膚構造を模擬した柔軟性を実現した。足裏に圧力センサを埋め込むことによって、足裏の皮膚変形から生み出される感覚情報を獲得する機構を開発した。

実機実験の結果、継続かつ定常的な歩行が実現できた（図7）。また、歩行速度の変化に対しても柔軟に歩行速度を適応可能であることを示した。さらに興味深いことに、柔軟な足部機構を有するロボットにおいて、歩行中の外乱に対する頑健性が大きく向上する結果が得られた。この結果は、柔軟な足部を用いることで、歩行運動中の地面との力学的相互作用を反映した感覚情報が獲得され、さらにその感覚情報を歩行リズム制御器へとフィードバックすることで、感覚運動協調を生起し、より安定な歩行を生成できたことを示唆する結果である。

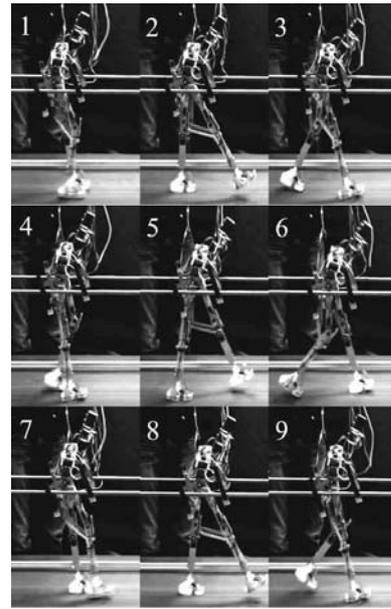


図7 柔軟な足部を活用した定常歩行

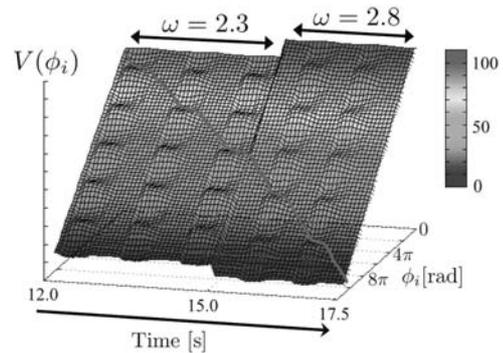


図8 柔軟な足部を用いた歩行の背後に潜む感覚情報処理の力学構造

さらに理論的な観点から考察を行った結果、適応的な歩行を実現する力学構造として、周期的な振動性と非周期的な興奮性の特性を、状況依存的に遷移する適応的構造が、柔軟な足部を用いた感覚情報処理メカニズムの背後に存在すること（図8）が明らかとなった。

[今後の研究の方向、課題]

これまでの研究成果から柔軟な足部から得られる感覚情報、具体的には足圧中心（CoP: Center of Pressure）が安定な歩行を生成するためには非常に重要な役割を果たすことが明らかとなった。歩行の状態をより反映した足圧情

報を獲得するため、さらに多数のセンサを埋め込んだ足部構造の開発が現状の課題であり、現在研究に取り組んでいる。また、これらの成果をもとに、東北大学医学部と議論を行い、歩行中の足圧情報を提示することによる新奇なリハビリシステムの構築を目指した共同研究に取り組んでいる。

[成果の発表, 論文等]

- [1] 受賞: IEEE/RSJ IROS JTCF Novel Technology Paper Award for Amusement Culture Finalist, 2012/10/11 (関連研究)
- [2] Dai Owaki and Akio Ishiguro, "Adaptive Walking Generated From Soft Deformable Feet", *Bioinspiration & Biomimetics*, (preparing for submission).
- [3] Hartmut Witte and Dai Owaki, Role of Passive

Properties in Producing Adaptive Motion in Robotic and Biological Systems, 6th International Symposium on Adaptive Motion on Animals and Machines (AMAMM2013), 2013 (Invited talk).

- [4] 大脇 大, 福田裕樹, 石黒章夫, 柔軟な足部から生み出される感覚情報を活用した適応的動歩行制御, 第33回バイオメカニズム学術講演会, pp.201-202.
- [5] Dai Owaki, Hiroki Fukuda, and Akio Ishiguro, Adaptive Bipedal Walking through Sensory-motor Coordination Yielded from Soft Deformable Feet, The 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2012), pp. 4257-4263.
- [6] 福田裕樹, 大脇 大, 石黒章夫, ミニマリストなCPGモデルから探る二脚ロコモーションに内在する脚間協調と脚内協調の発現機序, 第30回日本ロボット学会学術講演会.