

拮抗型空気圧二足歩行における床面の動特性の影響

細田 耕^{1,2}, 田熊隆史¹

1 大阪大学 大学院工学研究科 知能・機能創成工学専攻

2 阪大FRC

hosoda@ams.eng.osaka-u.ac.jp, takuma@er.ams.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract: Walking is a complex behavior that emerges from interaction between the agent body and the terrain. To realize adaptive dynamic walking by an artificial agent, therefore, not only its body and control dynamics but also the dynamics of the terrain should be taken into account. In this paper, we introduce design and control of a biped robot with pneumatic actuators whose dynamic characteristics are completely non-linear. Since the robot body is well-designed, the controller that makes it walk can be simple. By several walking trials, the robot can observe the interaction with the terrain, and can utilize it to stabilize the walking.

Keywords: biped walking, pneumatic Actuators, antagonistic drive, passive dynamic walk

1. はじめに

これまで数々の二足歩行ロボットが設計、実現されてきたが、そのほとんどは駆動源として DC サーボモータを採用している^{1, 2, 3, 4, 5}。現状の技術ではサーボモータの生み出すトルクは、二足歩行を実現するためには一般的に不足しており、高減速比の減速器を利用せざるを得ないケースがほとんどである。このような場合、ロボットは床面の幾何学的情報を既知として幾何学的な干渉のみを仮定し、その情報から各関節の軌道を計画、これを準静的に実現することによって歩行するという手順をとる。設計者はロボットの特性を地面のそれとを切り離して考えられるので、制御側の構成が容易になる。一方で、ロボットの幾何学的・静力学的特性のみを考慮するので、床面の幾何学的情報にモデル化誤差があったり、ロボットと地面との衝突が準静的な範囲を超える場合にはロボットの安定性に深刻な影響を及ぼす。こういった点が既存の二足歩行がわずかな外乱にも脆弱である原因の一つであると考えられる。

一方で歩行ロボットの幾何学的特性だけでなく、動特性を巧みに設計することにより、実現される歩行をより優れたものにしようとする試みがなされている。軽い傾斜を一切の制御なしに下る受動歩行⁶を実現できる設計は、下り坂のみでなく平面などに対しても妥当であるという考えの下に、このような動特性を利用した制御系の設計が提案されている^{7, 8, 9, 10, 11}。

空気圧駆動アクチュエータは、大きな出力を出すアクチュエータを軽く、コンパクトに実現でき、また、アクチュエータ自身が生み出す弾性が、地面との衝突に際してエネルギーを保存・再解放することによって走行に有利であることが示されている¹²。しかしながらその特性は非線形性を含む複雑なものとなり、目標軌道追従には必ずしも向いていない。ロボットが受動歩行を実現できるような特性を持つ場合には、複雑なフィードバックを用いることなくフィードフォワードのみで駆動することにより、空気圧駆動の歩行ロボットを実現できることが示されている¹⁰。

このような空気圧拮抗駆動によって歩行を実現すると、関節に柔軟性が存在するために、地面の変化がロボットの行動の変化として観測される。つまり、ロボットの行

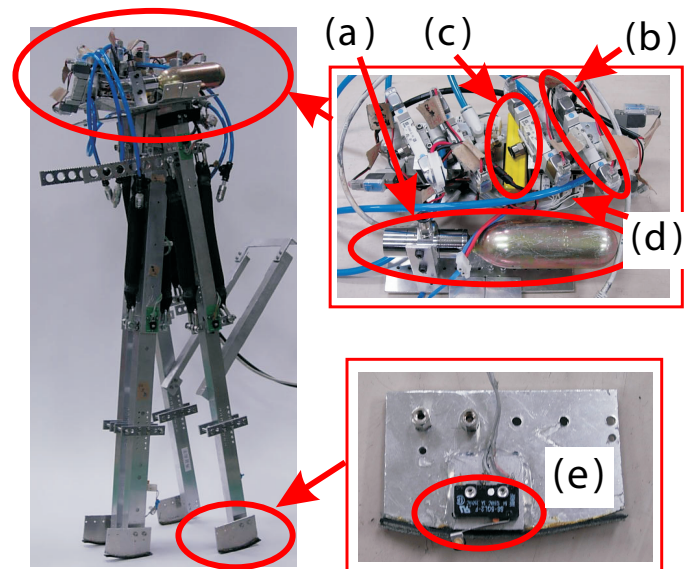


Figure 1: 空気圧駆動型二足歩行ロボットの概観：(a) 二酸化炭素ボトル、(b) ON/OFF 電磁弁、(c) コンピュータと電磁弁の駆動用電池、(d) 制御用コンピュータ H8、(e) 足先に取り付けられたタッチセンサ

動はロボット自身の動特性と、環境の持つ動特性との相互作用によって発現する。本報告では、地面の特性が変化したときに、空気圧駆動二脚ロボットの行動がどのように変化するかを調べ、地面の特性に適応的に歩行周期を変化させることのできる制御系について議論する。

2. 空気圧駆動型二足歩行ロボット

図1に対象となる空気圧駆動型二足歩行ロボットを示す。ロボットは平面内歩行をするように二本ずつ連結された四本の脚で構成されており、各脚はひざ関節を持つ。腿リンクおよび脛リンクの長さはそれぞれ 0.3[m] および 0.35[m]、重量が 2.1[kg]、0.5[kg] である。全ての関節は拮抗型に配置された空気圧アクチュエータ ((株) 日立メ

ディコ製)によって駆動されている。ロボットを制御するコンピュータ(H8)はロボットの上部に取り付けられており(図中(d)),また駆動源を全て搭載した自己充足型とするために、空気圧人工筋を駆動するための二酸化炭素ボトル(図中(a))と電磁弁(図中(b))が備えられている。各脚先には地面との接触を検出するためのタッチセンサが装備されている(図中(e))。

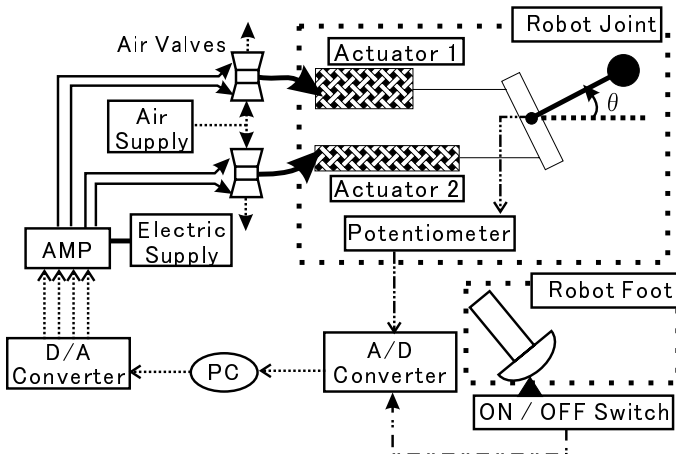


Figure 2: 各関節の駆動のためのシステム

図2に各関節の制御システム全体を示す。各アクチュエータには内圧を測る圧力センサが、また各関節には関節角を計測するポテンショメータが装備されており、それらの信号はA/Dを通してホストコンピュータで観測可能であるが、これらの信号はあとで述べられる制御則では使われていない。コンピュータからの制御信号により、各アクチュエータの吸気・排気弁を開閉し、拮抗した二つの空気圧アクチュエータを伸縮することによって関節を駆動する。本実験では供給圧側を0.4[MPa]、排気圧は大気圧とした。

3. 空気圧駆動型二足歩行ロボットの弾道学的歩行制御

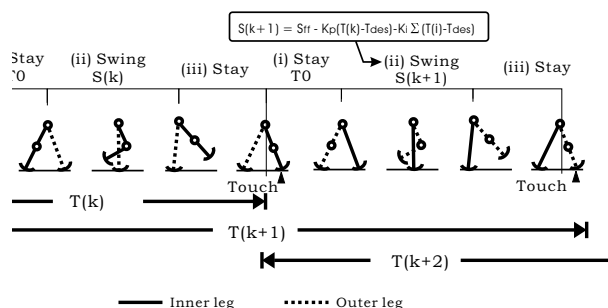


Figure 3: 弾道学的制御の枠組み

本ロボットは受動歩行を実現するのに適した構造を有している。その特性を利用すると、非常に単純な制御則を用いることで平面を歩行できる。本稿では、歩行周期の一部でロボットを駆動し、残りの時間は慣性力による

運動を利用する弾道学的歩行を採用する。図3に、適用した弾道学的制御則を示す。

- (1) 脚先の接触センサが反応してから、 $T_0[s]$ 間は全ての弁を閉じる。したがって、この間ロボットは同じ姿勢をとり続ける。ロボットはそれまでの歩行で生じている慣性力によって弾道学的に運動する。
- (2) $T_0[s]$ 後に、股関節のアクチュエータに対し、 $S(k)[s]$ 間、吸気側は供給圧に、排気側は大気圧に対してそれぞれ開放する。遊脚のひざ関節は脚先が地面に衝突しないように、関係する弁を適当な時間、供給圧および大気圧に開放してひざを曲げ伸ばしする。
- (3) 脚先が地面に接触してから $T_0 + S(k)[s]$ 後、全ての弁が閉じられ、脚先接触センサの次の反応を待つ。この段階も慣性力による弾道学的な運動となる。脚先センサが反応をした時点で手続き(1)に戻る。

4. 床面特性の変化に伴うロボットの行動変化

前章で提案した制御則によって、ロボットがカーペット上を歩行したとき、リノリウム上を歩行したときについて、歩行周期 $T(k)$ の時間的変化を図4に示す。図からわかるように、床面の変化によって、ロボットの歩行周期が変化しているのがわかる。床面が変わらないときには歩行周期はほぼ一定になる。

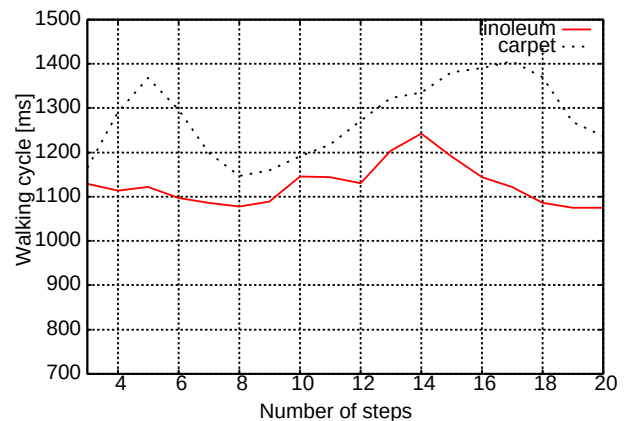


Figure 4: カーペット上/リノリウム床上を歩行した場合の歩行周期 $T(k)$ の時間変化

床面が一定の場合、空気の供給時間 $S(k)$ と歩行周期 $T(k)$ の間には、よい線形性があることが、以前の実験によって確かめられている¹³⁾。床面が異なる場合には、この関係にはどのような変化が起こるかを調べた。結果を図5に示す。このように、床面がカーペットである場合とリノリウムである場合について、空気の供給時間と歩行周期の間に存在する関係は、その床面の変化を反映して変化するということがわかった。

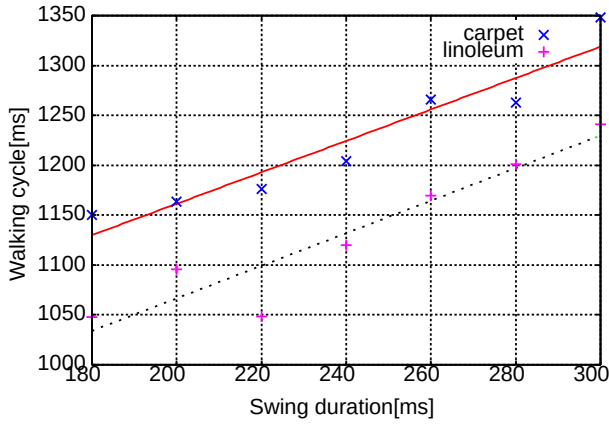


Figure 5: カーペット上/リノリウム床上を歩行した場合の空気の供給時間 $S(k)$ と歩行周期 $T(k)$ との関係

5. 歩行周期の制御

図5で得られた性質を利用すると、ロボットにある床面上を歩行させ、そのデータから地面の特性を推定し、さらにその特性に合わせて制御パラメータを変化させることによって歩行周期を望みのものに变化させることができる。この図で得られたような線形性を利用して歩行周期を制御する方策は

$$S(k) = S_{ff} - K_p(T(k) - T_{des}) - K_i \sum_i^k (T(i) - T_{des}) \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 S_{ff} はあらかじめ地面の特性がわかっているときに、それに基づいて与えられるフィードフォワード項、 T_{des} は、目標歩行周期、 K_p 、 K_i はそれぞれ比例ゲイン、積分ゲインである。

この制御則によって、歩行中に歩行周期を変化させた実験の結果を図6、7に示す。ここでは、比例ゲイン、積分ゲインを $K_p = 0.5$ 、 $K_i = 0.5$ としている。実験開始時にはロボットは床面がカーペットであると仮定し、図5の結果を利用して、目標歩行周期 1150[ms] の歩行を実現するために空気供給時間を約 190[ms] として歩行を始める。図7の最初の4歩のデータより、空気供給時間が固定されている様子を見てとれる。4歩の歩行後、歩行周期が約 1050[ms] であることがわかり、ロボットは床面がリノリウムであることを推定する。そして、図5のリノリウムに関する結果を利用し、さらに式1の制御則を用いることにより、歩行周期を目標の 1150[ms] に制御することができた。

6. おわりに

従来のように関節が硬いロボットを用いた場合、床面の動特性の変化は、ロボット全体の姿勢に大きく反映され、その結果床面の変化は転倒へと直接つながりやすい。そのため、床面からの力を過大に受けないように、これまでのロボットでは、足裏にゴムを取り付けるなどの工夫が必要であった。床面の変化は、それゆえ、ジャイロなどの姿勢センサで計測するしかなかった。一方で本報告で用いられているような空気圧拮抗駆動型のロボットの場

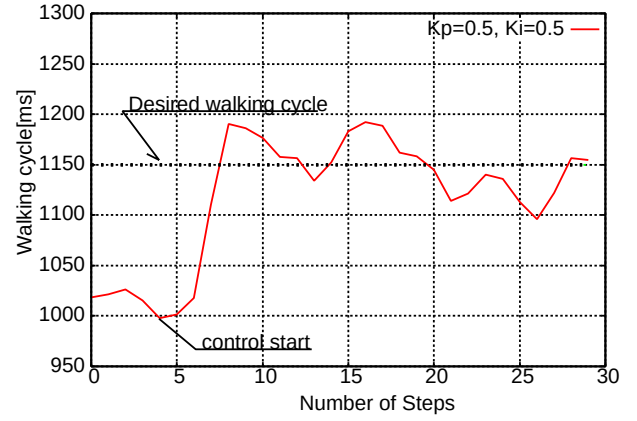


Figure 6: 地面の推定と歩行周期の制御：実験の初期にはほぼ 1050[ms] であった歩行周期が、制御適用後4歩目以降から、目標である 1150[ms] に収束している

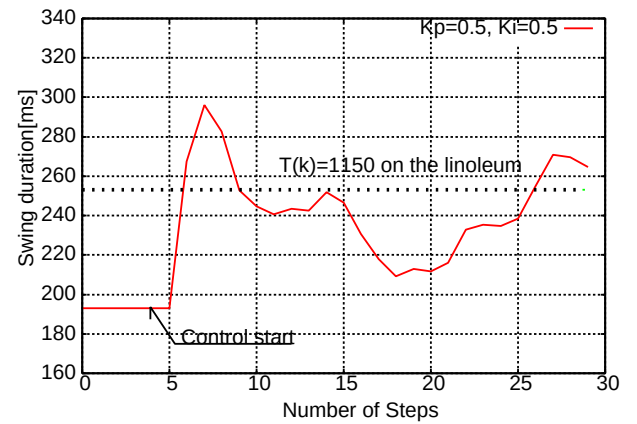


Figure 7: 地面の推定と歩行周期の制御：空気の供給時間 $S(k)$ の変化

合、床面の特性の変化はロボット全体ではなく、関節の柔らかさによって吸収される。柔らかい関節であるために、歩行全体に大きな不安定性をもたらすことなく、しかもロボットの動きの変化から床面の動特性を推定し、これに対処することができると考えられる。ただし現状では、設計者がロボットに床の分類を与えている。本来、床の分類はロボットの行動を通して定義されるべきものであり、ロボットの行動の変化しないような分類はロボットにとって意味のないものであるべきである。ロボットの行動を指標として、ロボットの自律的な床動特性の方策を考案する必要があると考えられる。

本報告で提案した床面の推定方法は、地面のモデル化をロボットの行動を元に行っているところに新規性がある。地面のモデルはロボットの歩行実現のためだけに用いられるので、ほかのコンテキストで再利用されることを考慮せず、そのロボットの身体を持つコンテキストのみで議論されればよいということに着目すべきである。本研究では、歩行ロボットの振る舞いは、身体・制御・環境のエコロジカルバランスの中から創発されるものであるという考え方にに基づき、ある設計の歩行ロボットのもとで環境である地面をどのように表現するか、それにした

がって、歩行安定化制御をどのように設計するかを議論した。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、有意義な議論を重ねていただいた浅田教授に感謝の意を表する。また本研究の一部は、文部科学省科学研究費萌芽研究 16650037「拮抗型空気圧人工筋による弾道学的な行動の模倣と習熟」、および文部科学省科学研究費特定研究(領域略称：移動知)17075009「適応的ロコモーション創発のための反射と志向性の相互作用設計」によって援助されている。ここに感謝の意を表する。

References

- [1] K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka. The development of honda humanoid robot. In *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1321–1326, 1998.
- [2] 黒木義博, 石田健蔵, 長阪憲一郎, 山口仁一. 高度統合運動制御機能を有する小型二足歩行エンターテインメントロボット SDR-4X. 日本ロボット学会第 20 回学術講演会予稿集, pp. "1C-17", 2002.
- [3] 木村公一, 村瀬有一. 「HOAP」シリーズの事業化. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 10–12, 2004.
- [4] 五十棲隆勝. ヒューマノイドロボットプラットフォーム HRP-2 の事業化. 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 1, pp. 15–17, 2004.
- [5] Y. Ogura, et al. Evaluation of various walking patterns of biped humanoid robot. In *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 605–610, 2005.
- [6] Tad McGeer. Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 9, No. 2, pp. 62–82, 1990.
- [7] K. Ono, R. Takahashi, T. Shimada, and A. Imadu. Self-excited walking of a biped mechanism. In *Proceedings of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 10 2000.
- [8] Fumihiko Asano, Masaki Yamakita, and Katsuhisa Furuta. Passive dynamic walking and energy-based control laws. In *Proc. of the RSJ/IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1149–1154, 2000.
- [9] Y. Sugimoto and K. Osuka. Walking control of quasi-passive-dynamics-walking robot “quartet iii” based on delayed feedback control. In *Proceedings of 5th International Conference on Climbing and Walking Robots (CLAWAR 2002)*, pp. 123–130, 2002.
- [10] M. Wisse and J. van Frankenhuyzen. Design and construction of mike: 2d autonomous biped based on passive dynamic walking. In *Proceedings of the International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 3 2003.
- [11] S. Collins and A. Ruina. A bipedal walking robot with efficient and human-like gait. In *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1995–2000, 2005.
- [12] Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.
- [13] T. Takuma, K. Hosoda, M. Ogino, and M. Asada. Stabilization of quasi-passive pneumatic muscle walker. In *IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2004)*, pp. CD-ROM, 2004.