

空気圧二足歩行ロボットの動的安定性

Controlling Ballistic Biped Walking with Pneumatic Actuators

細田 耕^{†‡}, 田熊隆史[†]

Koh Hosoda and Takashi Takuma

[†] 大阪大学大学院工学研究科知能・機能創成工学専攻

[‡] 阪大 FRC

Dept. of Adaptive Machine Systems, Osaka University

Handai FRC

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.

1 はじめに

これまでの二足歩行ロボットは、主に幾何学的・静力学的解析に基づいてハードウェアが設計されてきた。設計対象となるパラメータは、リンク長や関節の可動範囲、ロボットが静止できるように必要な停動トルクなど、ロボットの幾何学的・静力学的拘束条件を満たすためのものが重要な役割を果たしている。したがって、制御法もこのような側面に重点が置かれており、床面の幾何学的情報を既知として脚先軌道を計画し、それを実現するための位置制御を適用するという手法が代表的である。設計者はロボットの特性を地面と切り離して考えられるので、制御則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段差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 [1] 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 [2, 3, 4, 5]。

ロボットが与えられた幾何学的な軌道に追従しなければならない場合には、例えば比較的高い減速比を持つ電気モーター

を使用しなければならないなど、アクチュエータに対する制限が生まれる。これまでに作られた多くの二足歩行ロボットのアクチュエータに高減速比で減速された電気モーターが用いられているのには、現存するアクチュエータの出力が小さいというだけでなく、このように幾何学的拘束を実現しやすいということも理由の一つであると考えられる。

一方で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 [6]。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 [5]。

受動歩行の安定余裕の範囲で脚口ロボットが不整地を歩行する場合には、このようなフィードフォワードのみの制御で十分であるが、それ以上の外乱がもたらされる場合には、何らかの形でフィードバックを適用し安定化を図らなければならない。しかし、フィードバック系を設計するためには、ロボットの特性をモデル化する必要が生じる。受動歩行の場合、ロボットは地面の特性の影響を受けやすく、また空気圧駆動のアクチュエータの特性も複雑であるので、それぞれの特性を陽な形でモデル化することは非常に困難である。したがって、空気圧駆動の特性と受動歩行の特性両方を有効に利用するモデル化と制御の枠組みが必要となる。

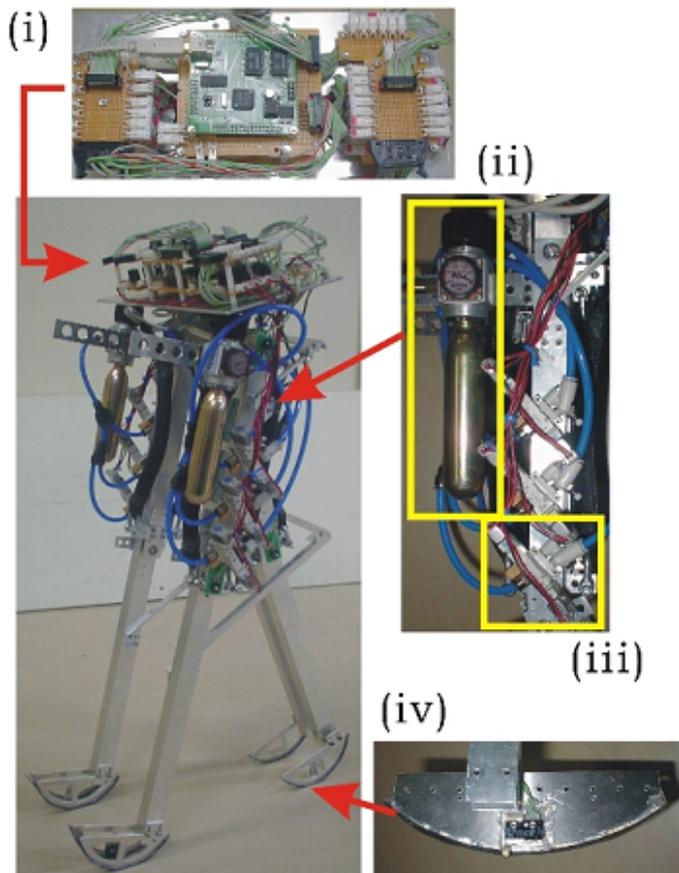


図 1: 空気圧駆動型二足歩行ロボットの概観

本報告では、受動歩行に基づく空気圧駆動二脚ロボットの安定化を図るために、受動歩行ロボットの特性を利用するための弾道学的な制御と、制御を安定化するためのロボットと床面の特性両方を含む入出力モデルの獲得およびそれを用いた安定化フィードバックについて述べる。

2 空気圧駆動型二足歩行ロボット

図 1 に作成した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）はロボットの上に取り付けられており（図中 i）、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 ii）と電磁弁（図中 iii）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 iv）。

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

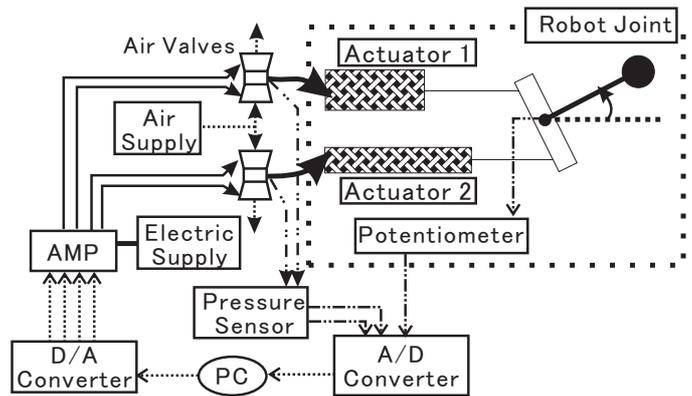


図 2: 各関節の駆動のためのシステム

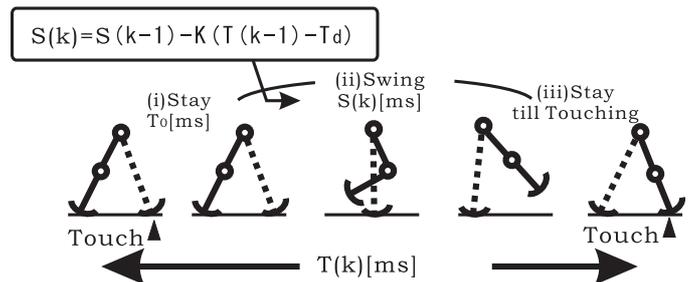


図 3: 弾道学的制御の枠組み

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 5[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

3.1 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．

3.2 入出力関係の同定

前節で述べた制御則で、空気圧歩行ロボットは平面上をある程度ロバストに歩行することができる．しかし、このままでは外乱やモデル化誤差に弱く、例えば床面の変化に対応するためには、何らかの形でフィードバックを加えることが必要である．しかし、空気圧駆動の二足歩行の場合、アクチュエータの特性が非常に複雑な上、床面のダイナミクスをモデル化することは困難である．

従来の研究では、床面のモデルとしてはばね・ダンパなどで近似する方法が一般的であった．しかし、実際の床面はより複雑なダイナミクスを持っており、しかも歩行の場合、一步一步の足場が常に変化する．またロボット自身が持つダイナミクスとのスケールリングにより、異なる性質を表出するので、床のモデルをロボット自身のダイナミクスと分離して考えることは難しい．したがって本報告では、床面やロボットのダイナミクスを陽にモデル化するのではなく、数回の試行から歩行パラメータと歩行の関係性を同定し、これを利用してロボットの制御則を実現することを考える．

歩行中にバルブの開時間 $S(k)$ を 200[ms] から 450[ms] に変化させたときの歩行周期 $T(k)$ を図 4 に示す．脚先が地面と衝突する時点でのロボットの状態に揺らぎがあるため分布には広がりがあるが、全体的には正の相関があることがわかる．この正の相関を利用すると、一步一步の単純なフィードバックを適用することができる．

3.3 周期に関するフィードバック制御

前節で示された結果を基に、バルブの開閉時間 $S(k)$ を一歩行周期ごとに変化させることにより、歩行周期を望みの値 T_d に収束させるフィードバック則

$$S(k) = S(k-1) + K(T(k-1) - T_d) \quad (1)$$

を適用する．本実験では、図 4 の結果を参考に、 $T_d = 560$ [ms] とし、またフィードバックゲインは経験的に $K = 0.3$ と

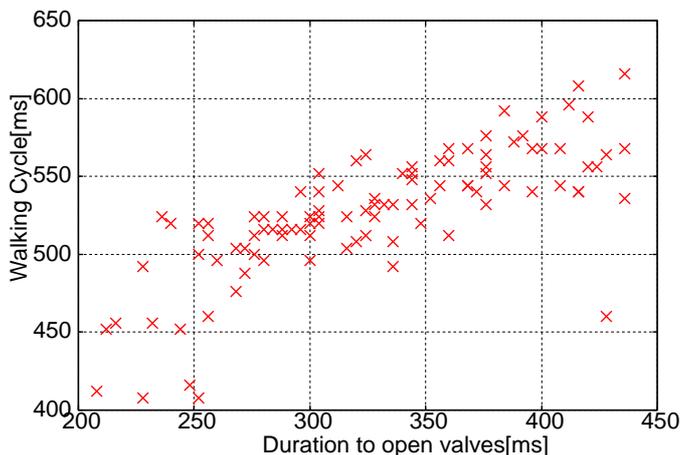


図 4: 床面とロボット自身のモデル化: 歩行中にバルブの開時間 $S(k)$ を 200[ms] から 450[ms] に変化させたときの歩行周期 $T(k)$ の変化

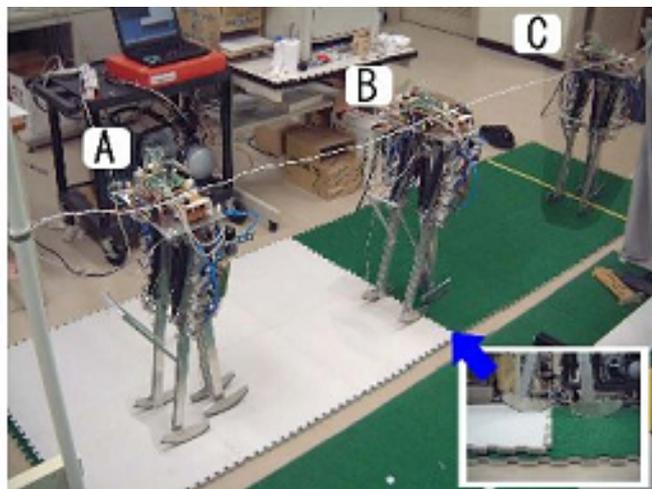


図 5: ウレタンゴムの床面の 4[mm] の段差を下る実験風景: A からスタートし、段差 B を下って C に至る．

した．

提案する制御法の有効性を検証するために、段差のある床を下る実験を行った．実験の様子を図 5 に示す．床面の材質はウレタンゴムで段差は 4[mm] の下りである．床面の特性は均一でないのと、各試行毎にロボットの初期値にばらつきがあるので、歩行軌道の厳密な再現性はない．そこで、統計的な評価をするために、提案手法を適用した場合とそうでない場合について、それぞれ 100 回ずつの試行を行った．その結果、提案手法を用いない場合には 10/100 回歩き続けることができたのに対し、提案手法を用いると 82/100 回は段差を乗り越えて歩行を続けることができた．この結果から提案手法が、段差を乗り越えることによって生じる外乱を収束させる能力があるということがわかった．具体的にある試行について、歩行周期がどのように変化する

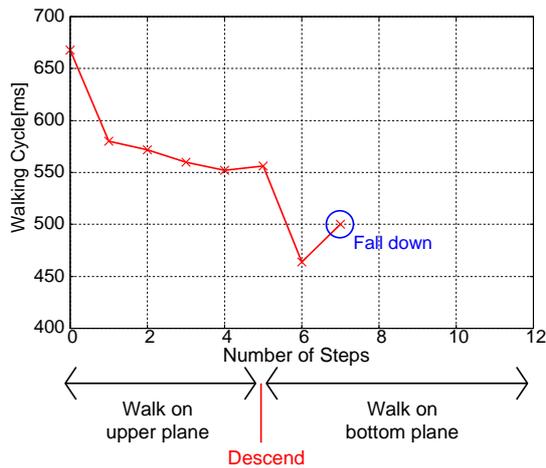


図 6: 提案制御法を適用しない場合:段差のために 5 歩目に周期が大きく減少し, 7 歩目に転倒する .

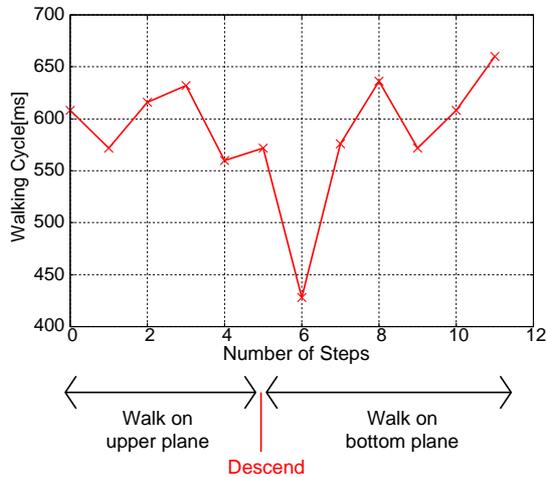


図 7: 提案制御法を適用した場合:同様に段差のために 6 歩目に周期が減少しているが, その後周期は回復する .

るかを提案手法を適用しない場合 (図 6) と適用した場合 (図 7) について調べた . 段差の部分で歩行周期は大きく減少する . この周期の減少を提案手法によって回復できることがわかる .

4 おわりに

床面の動的な特性を, ばね・ダンパとしてモデル化することは, これまでもコンピュータシミュレーションなどで行われてきた . しかし, 歩行の場合, ロボットは一步一步進んでいくので床面の特性はそのときの足場によって時々刻々変化する . このようなゆらぎを含めた形で床面の特性を考慮し, 歩行を実現した研究はこれまでにない . ゆらぎを含めたモデルの表現が難しいのと, それを獲得する方

法が確立されていなかったためではないかと考えられる .

モデルの表現が難しい原因の一つは, 地面のモデル化をロボットの身体と切り離して考えていたからではないかと考えられる . ここで, 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 .

参考文献

- [1] Tad McGeer. Passive dynamic walking. *The International Journal of Robotics Research*, 9(2):62–82, 1990.
- [2] 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.
- [3] 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*, pages 1149–1154, 2000.
- [4] 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)*, pages 123–130, 2002.
- [5] 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.
- [6] Marc H. Raibert. *Legged Robots That Balance*. The MIT Press, 1986.