

非限定環境に適応する二足歩行ロボット

細 田 耕***

*大阪大学大学院工学研究科，吹田市山田丘 2-1

**阪大 FRC

*Osaka University, Yamadaoka 2-1, Suita, Osaka 565-0871, Japan

**Handai Frontier Research Center

*E-mail: hosoda@ams.eng.osaka-u.ac.jp

キーワード：移動知 (mobiligence)，受動歩行 (passive dynamic walk)，
空気圧アクチュエータ (pneumatic actuator)，拮抗駆動 (antagonistic
drive)，二足歩行 (bipedal walking)，地形適応 (terrain adaptation)
JL ???/??/???-??? ©2005 SICE

1. はじめに

二足歩行ロボットに関する論文を読むと，ロボットが二足歩行という移動形態を持つ必要性について，ヒトと同じ移動形態を持つことによって同じ環境を共有しやすいという説明をする研究者が多い．しかしながら安定性を確保しやすいという意味では，実装しやすく制御しやすい四足あるいはそれ以上の脚を持つ場合の方が，二足よりも有利であり¹⁾，環境共有だけでは二足歩行ロボット研究を行う理由としては若干弱い．実際には環境共有のためだけでなく，ヒトとわずかな種のみが持ちえた二足歩行という能力がどのような原理で実装あるいは獲得されるかについて知りたいという知的好奇心で研究を進めている場合がほとんどではないだろうか．

四足以上の多足歩行が実装しやすい主な理由は，足が多数あるため静的に安定な状況が作りやすいので，例えば生物を規範に制御則を構成する場合にも，その幾何学的な構造のみを模写し，それを準静的に実現することによって歩行させることができる点にある．一方で二足歩行の場合には，支持多角形が小さいために準静的な歩行を実現することが四足歩行に比べて困難である．逆に動的な歩行や走行を実現する場合には，地面との干渉が多足の場合に比べて単純になる．言葉を換えるとすると，二足歩行は，地面との干渉が幾何学的なモデルで記述されるような静的な歩行ではなく，むしろ干渉が複雑な動的歩行や走行にその特徴を活かせると考えられる．

しかしこれまで発表されてきた二足歩行ロボットのほとんどは，地面との幾何学的な干渉のみを仮定し，その情報からロボットの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している．つまり，四足以上の歩行ロボットの有利な設定で歩いているのである．このような方策が用いられているのは，地面に関する動特性とロボット自身に関するそれを分離して考えることができるため，制御方策が単純になるというだけが適用されている唯一の理由ではない．これまで作られてきた二足歩行ロボットに用いられている電気モータは供給できるトルクに制限があり，一般に高い減速比を持つ減速器が使用される．その場合摩擦による損失が大きくなり，指令値としてトルクが与えられる場合にこれを実現しにくいいため，現実的に関節に

与える指令値は準静的な目標軌道で十分となるからである．

地面によって歩行にもたらされる拘束が単に幾何学的な拘束だけであれば，実際に地面上を歩行することなく，カメラなど非接触の観測によって必要な情報が得られるはずである．しかし，歩行は地面と物理的な接触を通した相互作用をするので，もたらされる拘束は必ずしも幾何学的とみなされるものばかりではない．例えば，歩行速度が増したり地面の剛性がロボット自体に対して十分に硬いという仮定が崩れる場合には，地面はロボット身体と動的な干渉を生む．二足歩行ロボットは動作することによって移動するため，この干渉は接触位置，状態の変化に伴って時々刻々変化する．したがって，二足歩行ロボットがさまざまな(限定されない)環境で安定に歩行するためには，このような動的干渉を観測，これらに適応的に対処する必要がある．つまり離れてみているだけでなく，実際に歩行することによって観測し，その観測結果からさらに頑健な歩行を実現するというサイクルを実現しなければならない．アクティブに移動することにより情報を収集し，得られた情報をさらにロボストに移動するために利用するという**移動知**を，ロボットが持つ必要がある．

本解説では，移動することによる観測と，観測に基づいた制御をもとに，より適応的な二足歩行を実現するための枠組みについて考える．そのために，まずこれまで発表されてきた二足歩行の問題点を考察し，その限界と，どのようにすればこれを越えることができるかについて述べる．そして，受動歩行を規範としたロボットを設計することにより，適応的な歩行を志向するアプローチについて紹介する．

2. 二足歩行ロボットの設計

2.1 幾何学的設計と高減速モータによる二足歩行

これまでにたくさんの二足歩行ロボットが提案，製作されてきた．あまりに多数で枚挙にいとまがないが，あえて完成度の高いものをあげるとすれば，例えば早稲田大学のヒューマノイド^{2),3)}，ホンダのヒューマノイド⁴⁾，ソニーのヒューマノイド⁵⁾，富士通 HOAP シリーズ⁶⁾，川田工業のヒューマノイド⁷⁾ などである．これらのロボットは人間の持つ幾何学的関節構造をまねて機械的な構造が決定され，身体を準静的に支えることのできる電気モータが選定，搭載されている．一般に電気モータの出力トルクはロボットの

身体を支えるには小さいので、高い減速比の減速を介する。例えばソニーのヒューマノイド⁵⁾に代表されるように、ロボットの自重に対するモータと減速器の性能の向上によって二足歩行が容易に実現されるようになったと考えてもよい。この場合、ロボットの動特性は設計されるというよりは、関節構造と選定されたモータの種類によって結果的に得られることになる。

これらのロボットによる歩行は、地面とロボットの幾何学的情報とロボットの静的、動的バランスを基に関節の軌道を計画し、これに準静的に追従する制御則を適用することによって実現されている。そもそも、ヒトの持つ二足歩行の特性のうち幾何学的な構造のみを模して作られているので、幾何学情報をベースに軌道を設計し、これに追従する制御則を適用することは妥当である。しかも高減速比のギアによって駆動されているため出力としてのトルクを制御することは難しく、ダイナミックに軌道を修正する場合にも目標となる軌道を修正するにとどまる。また幾何学的にヒトの構造を模しただけなので、結果的に得られるロボット全体の動特性は、計算された目標値を実現するためにキャンセルされなければならない、その結果さらに高出力のアクチュエータを必要とするというサイクルに捕らわれることになる。

2.2 二足歩行ロボットの動特性設計

では、二足歩行ロボットの動特性を設計することは可能なのだろうか。ヒトの動特性が二足歩行に関してどのくらい効率的であるかは工学的にはまだよく知られていない。そこで注目されるのは受動歩行である。下りの斜面をアクチュエータ無しで歩くことのできる受動歩行ロボットは、McGeer⁸⁾によって最初に定式化されて以来、実現される歩行の自然さなどで注目を集めている。ヒトがこのような受動歩行を用いているかどうかには議論が残るが⁹⁾、自分自身の動特性を利用して弾道学的な歩行を実現しているのではないかと考えられている^{10), 11)}。

二足歩行ロボットの設計に際して、これまで受動歩行の実現に関してわかっている工学的・経験的事実を参考にできれば、歩行に有利な動特性を実現でき、しかもその結果、制御器の設計が単純になることが期待される。もともとロボット自体が受動歩行できる能力を持つなら、条件があう床面の場合には駆動力はなくなるはずであるし、そうでない場合にも省エネルギーになることが期待されるからである¹²⁾。

また、動特性自体に歩きやすい特性が考慮されているということは、制御則設計のために非常に重要なキーになる。幾何学的に設計され、結果的に得られた動特性の場合、これをキャンセルした上で望みの動特性を実現するのがこれまでのヒューマノイドであったが、もともと動特性が歩行に向いているものであれば、これを制御によってキャンセルする必要はなく、制御則自体も簡素にできるからである。



図1 McKibben 型空気圧アクチュエータの外観 ((株) 日立メディコ製)

2.3 アクチュエータの選定

従来二足歩行ロボットによく用いられている高いギア比の減速器は、受動歩行を規範として弾道学的な歩行を実現するのに向いていない。このような減速器にはバックドライバビリティがなく、関節をフリーにして慣性によって足を振り出すという動きが実現できないからである。減速器を介さないで十分なトルクを得ながら、バックドライバビリティを確保するためにDD モータを使用することも考えられるが¹³⁾、ロボット全体の重量や慣性が大きくなる傾向を避けることはできない。

一方で、そもそも二足歩行がヒトの歩行を規範にしているということを考えると、ヒトが筋肉によって関節を拮抗駆動している構造を模写することにより得られる知見は少なくないはずである。特に二足歩行の動特性を考慮しようとする、各関節のインピーダンスを自在に変更可能な拮抗駆動は有望な駆動方法の一つである。拮抗駆動するためのアクチュエータも種々想定されるが、例えば図1に示すような McKibben 型空気圧アクチュエータが候補となる。

2.4 受動歩行を規範とした空気圧駆動二足歩行ロボット

このように受動歩行を規範とし、空気圧アクチュエータによって駆動される二足歩行ロボットはデルフト工科大学、van der Linde¹⁴⁾によって提案されており、さらに同じ研究グループの Wisse らによって、実ロボット Mike, Max, Denise が作製されている^{15), 16)}。このうちロボット Mike は平面内に運動を拘束された脚だけの二足歩行ロボットで、傾斜面上で受動歩行できる身体を持ち、それに空気圧によって小さな駆動力を加えることによって平らな床面上をロボストに歩行できる。もともと受動歩行できるように身体が設計されているので、足裏に装備された接触センサの信号から一定時間後に脚の振り出しをするための空気圧弁を ON にする、というきわめて単純な制御則によってロボストに歩くことが可能である。ただし、一方が空気圧によって引張られるのに対し、他方はばねによって関節の駆動を拮抗

型としているので、関節のインピーダンスを変えることにより地面の変化に対応するという事は志向されていない。むしろ、身体が受動歩行する特性を利用して、省エネルギー歩行を実現できる点に重点がおかれている¹²⁾。

3. 適応的な空気圧駆動二足歩行ロボット

3.1 二足歩行ロボットの設計と製作

Wisse らによって、受動歩行を規範にして二足歩行ロボットの動特性を設計することにより、単純かつ安価な制御則である程度ロバストな歩行を実現できることが示された。こうして実際に歩くことによって得られたデータより環境の状態を推定し、さらに地面に関する適応性の向上を図ることができる。先にも述べたように、地面のダイナミクスは実際にロボットが動的に歩行し、干渉の中から推定するほかはなく、その意味でロボットは「移動知」を備える必要がある。従来のヒューマノイドで用いられているような目標値に対する準静的制御を適用すると、このような干渉はフィードバックに吸収され、ロボットに感知されにくい。受動歩行を規範とした弾道学的制御を用いることにより、地面の変化に対してロボット全体の運動に変化がしやすいので、この観測を利用することによりロボットをよりロバストに歩行させることが可能である。

このような考えに従い、著者らは図2に示すような空気圧駆動型二足歩行ロボットを設計、製作した¹⁷⁾。各関節は拮抗に配置された McKibben 型アクチュエータによって駆動され、完全にフリーな状態から緊張した状態まで、さまざまな関節の柔らかさを実現できる。図3にこのロボットの関節配置と駆動の様子を示す。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, (株) ルネサステクノロジ) はロボットの上部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)。

身体の動力学パラメータの設計に際しては、例えば重心をできるだけ上方にする、脚先の曲率は足の長さのほぼ 1/3 にするなど、受動歩行しやすいロボットに関して得られている知見を基にしている¹⁵⁾。その結果、歩行制御のための制御コストはきわめて低く、ロボットの状態を検出するセンサとしては脚先センサのみ、空気圧を供給する弁も精密な制御が可能な電磁比例弁と圧力センサという組み合わせではなく、センサを装備しない ON/OFF 弁のみで歩行が可能となっている。さらにエネルギー効率もよいため、供

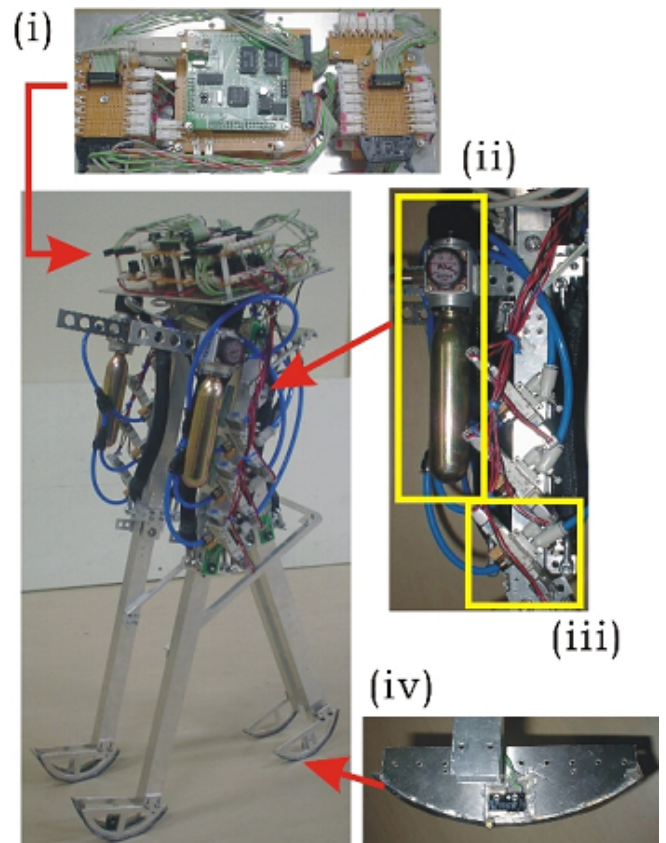


図2 自己充足型の空気圧駆動型二足歩行ロボット。自立歩行のために (i) 制御コンピュータ H8, (ii) 駆動力を供給する2本のCO₂ ボトル, (iii) on/off 弁, (iv) 脚先の接触状態を検出する接触センサを装備している。

給源として2本のCO₂ ボトルで約5分間の歩行が可能である。

3.2 弾道学的制御の枠組み

設計された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ので、その特性を利用し、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4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

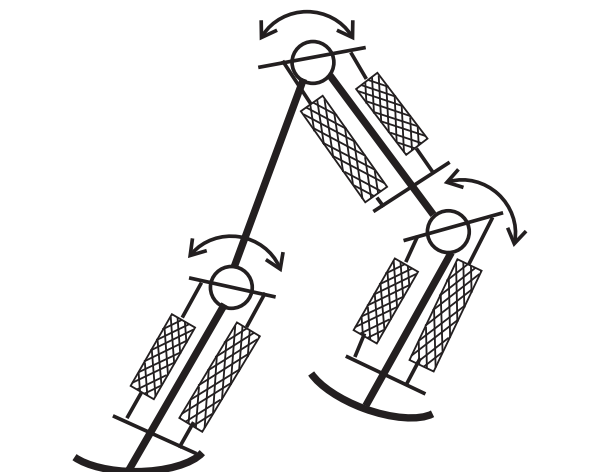


図3 開発された空気圧駆動型二足歩行ロボットの駆動の様子。三つの関節がそれぞれ拮抗する二本のアクチュエータの組によって駆動される。

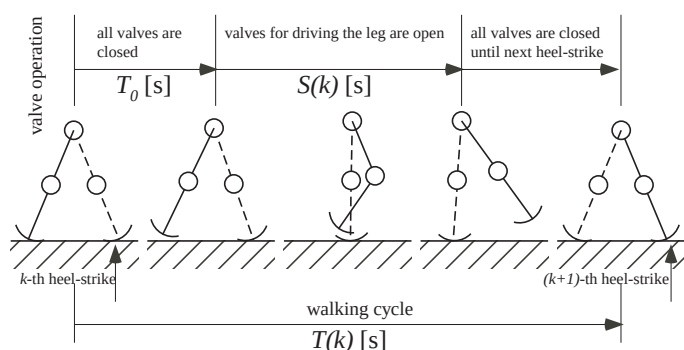


図4 弾道学的制御の枠組み

サが反応をした時点で手続き (1) に戻る。

3.3 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ボストに歩行することができるので、歩行の際に得られる地面に関する情報を利用し、制御にフィードバックすることによって更なる安定化を目指すことが考えられる。

これまで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、またロボット自身が持つダイナミクスとのスケールングにより、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。特に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ので、動特性を有する地面との干渉を分離して表現することは効率も悪い。したがってここでは、床面とロボットのダイナミクスを陽に分離して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間の関係を同定し、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閉時間 $S(k)$ を 200[ms] から 450[ms] に変化させたときの歩行周期 $T(k)$ を図 5 に示す。脚先が

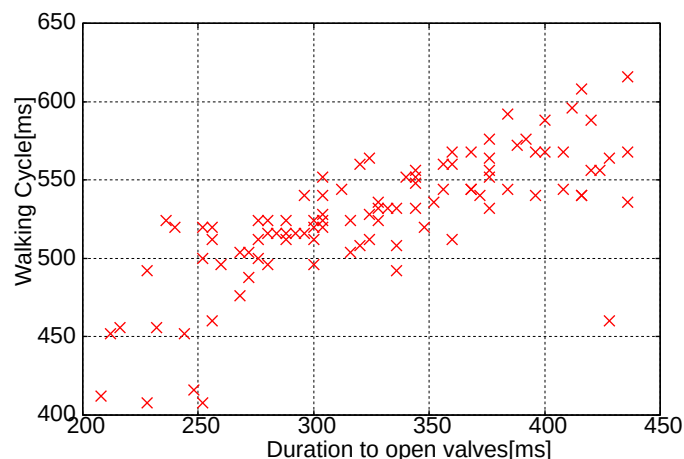


図5 床面とロボット自身のモデル化: 歩行中にバルブの開閉時間 $S(k)$ を 200[ms] から 450[ms] に変化させたときの歩行周期 $T(k)$ の変化

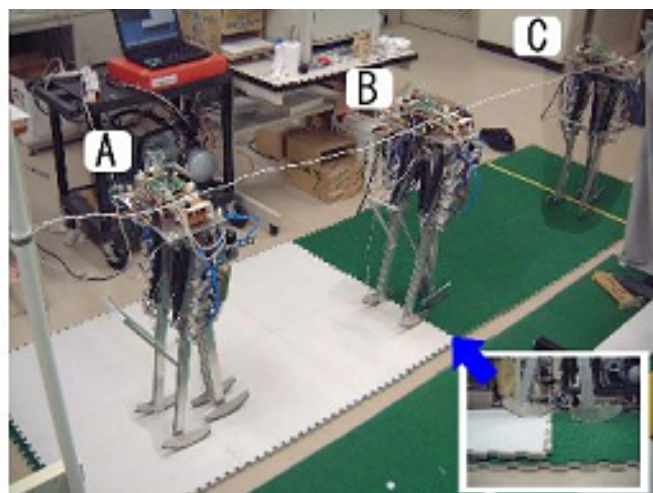


図6 ウレタングムの床面の 9[mm] の段差を下る実験風景: A からスタートし、段差 B を下って C に至る。

地面と衝突する時点でのロボットの状態の揺らぎや、床面の特性が足場によって異な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 (この結果を見ても、床面との衝突を決定的論的にモデル化しにくいことがわかる)。この正の相関を利用すると、一歩ごとの単純なフィードバックを適用することができる。

3.4 周期に関するフィードバック制御

得られた正の相関を利用して、バルブの開閉時間 $S(k)$ を一歩行周期ごとに变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 5 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 $K = 0.3$ とした。

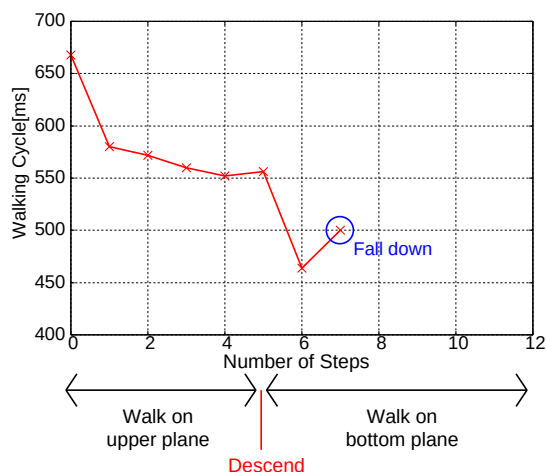


図7 提案制御法を適用しない場合:段差のために5歩目に周期が大きく減少し、7歩目に転倒する。

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6に示す。床面の材質はウレタンゴムで段差は9[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かを提案手法を適用しない場合(図7)と適用した場合(図8)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。段差が2度にわたってある場合に、この制御則を適用されたロボットが動く様子を図9に示す。

4. おわりに

二足歩行ロボットが一定のテンポで颯爽と歩くためには、接触を含む地面との動的干渉を無視できない。多足歩行ロボットと最も異なるのはこの点であると考えられ、その意味で二足歩行ロボットのニッチとして、動的干渉を無視することはできない。しかし一方で、地形の変化に適応できるロボットを作るためには、ロボットに何らかの形でやわらかさを実装する必要があるが、実装されたやわらかさが地面のそれと同程度になると、地面の動特性は相対的に制御性能全体に影響を及ぼす結果となる。これまでの二足歩行ロボットは、地面の動特性が陽に制御性能に影響することを嫌い、準静的な目標値に追従するフィードバック制御を適用することによって仮想的に地面の動特性を無視して

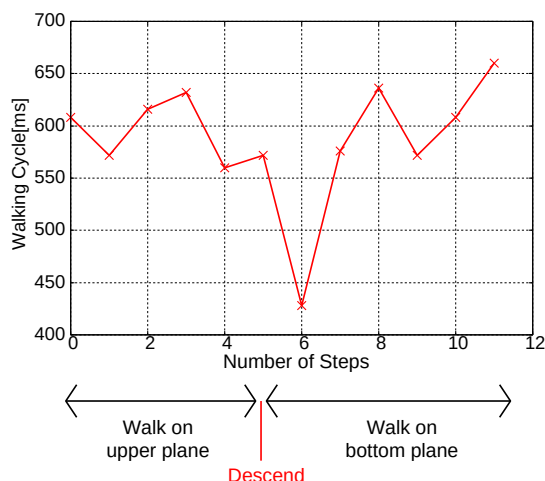


図8 提案制御法を適用した場合:同様に段差のために6歩目に周期が減少しているが、その後周期は回復する。

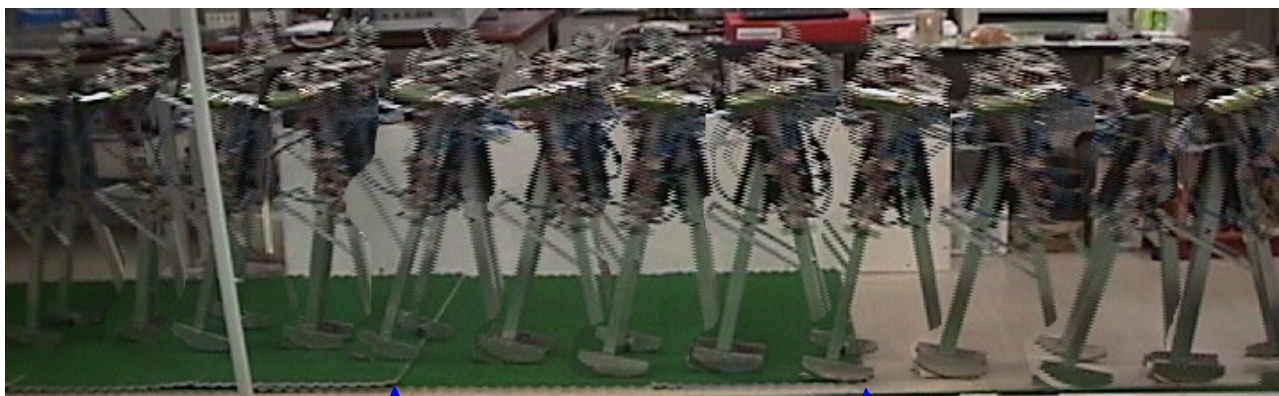
きたといえる。その結果、ロボットの内界センサから見た安定性は確保されても、結果的にさまざま地形に対する適応性は下がっているというのが、現存の二足歩行ロボットの安定性に関する問題ではないだろうか。

もしこの仮定が正しいとすると、二足歩行ロボットの適応性をさらに高めるためには、視覚センサなどによって離れたところから得られる幾何学的情報だけではなく、地面の動特性についてどう情報を収集するかが問題となる。動特性についての情報は、ロボットの持つ動特性とのスケラビリティに依存するので、実際に床面を歩行することによってのみ収集が可能である。つまり、歩行できないと情報は得られないし、情報が得られないと歩行が安定化できないという「鶏と卵」のような関係にある。この問題を打破する一つの方法が、本解説で示されたようにハードウェアを巧妙に設計することにより、最低限の歩行を実現し、その歩行中に得られたデータを安定化にフィードバックすることであると著者は考えている。

謝辞

本稿で紹介した大阪大学大学院で行われている研究結果は、共同研究者である田熊隆史氏の協力なくしては得られなかった。この場を借りて感謝の意を表す。また日頃より研究に関するディスカッションを通し、さまざまな協力をいただいている大阪大学大学院工学研究科浅田稔教授、並びに荻野正樹氏に感謝の意を表す。またこの研究の萌芽段階は、科学研究費萌芽研究 16650037 によってその一部を援助されている。ここに感謝の意を表す。

(2005年4月28日受付)



First Difference

Second Difference

図9 ロボットが2段の段差をロバストに歩行する様子。

参 考 文 献

- 1) 広瀬茂男, 米田完, “実用的4足歩行機械の開発に向けて,” 日本ロボット学会誌, 11巻, 3号, pp.360–365, 1993.
- 2) H. Lim, Y. Yamamoto, and A. Takanishi, “Stabilization control for biped follow walking,” *Advanced Robotics*, Vol.16, No.4, pp.361–380, 2002.
- 3) Y. Ogura, et al., “Evaluation of Various Walking Patterns of Biped Humanoid Robot,” *Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.605–610, 2005.
- 4) K. Hirai, M. Hirose, Y. Haikawa, and T. Takenaka, “The Development of Honda Humanoid Robot,” *Proc. of the 1998 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp.1321–1326, 1998.
- 5) 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, 1C-17, 2002.
- 6) 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, 22巻, 1号, pp.10–12, 2004.
- 7) 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, 22巻, 1号, pp.15–17, 2004.
- 8) T. McGeer, “Passive Dynamic Walking,” *The International Journal of Robotics Research*, Vol.9, No.2, pp.62–68, 1990.
- 9) ロルフ・ファイファー, クリスチャン・シャイアー, “知の創成,” 共立出版, 2001.
- 10) S. Mochon and T. A. McMahon, “Ballistic walking,” *J. Biomech.*, 13, pp.49–57, 1980.
- 11) T. A. McMahon, “Muscles, Reflexes, and Locomotion,” Princeton University Press, 1984.
- 12) S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse, “Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers,” *SCIENCE*, Vol.307, pp.1082–1085, 2005.
- 13) Y. Sugimoto, K. Osuka, “Walking Control of Quasi-Passive-Dynamic-Walking Robot “Quartet III” based on Delayed Feedback Control,” *5th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots*, pp.123–130, 2002.
- 14) R. Q. van der Linde, “Design, Analysis, and Control of a Low Power Joint for Walking Robots, by Phasic Activation of McKibben Muscles,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.15, No.4, pp.599–604, 1999.
- 15) M. Wisse and J. van Frankenhuyzen, “Design and Construction of MIKE; a 2D autonomous biped based on passive dynamics walking,” *Proc. of the 2nd International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines*, 2003.
- 16) M. Wisse, “Three additions to passive dynamic walking: actuation, an upper body, and 3D stability,” *IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2004)*, 2004.
- 17) T. Takuma, K. Hosoda, M. Ogino, and M. Asada, “Stabilization of Quasi-Passive Pneumatic Muscle Walker,” *IEEE-RAS/RSJ International Conference on Humanoid Robots (Humanoids 2004)*, 2004.

[著 者 紹 介]

細田 耕



1965年11月9日生。1993年京都大学大学院工学研究科機械工学専攻博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手。1997年同大学大学院工学研究科助教授となり現在に至る。この間1998年に1年間スイスチューリヒ大学客員教授。知能開発のためのロボットの設計と制御の研究に従事。博士（工学）。IEEE、日本ロボット学会、日本機械学会の会員。