

「『ダイナミクスを規範とした歩行と制御』特集号」

解説

動特性を利用した空気圧拮抗駆動二足歩行

細田 耕^{*†}

1. はじめに

一切の駆動力無しに緩やかな坂を下ることのできる受動歩行は、1990年にMcGeer[1]によって定式化されて以来、その歩行の自然さゆえ多くの研究者の注目を集め、安定性などについて多くの研究がなされてきた。特に、受動歩行ロボットの持つ特性をうまく利用し、これにわずかな駆動力を加えることによって実現される歩行は、従来提案されているZMPの軌道設計に基づいた二足歩行に比較してエネルギー効率がよく自然であることが示されており、近年非常に注目を集めている[2]。本稿では、このように受動歩行に駆動力を加え、ロボットの持つダイナミクスを活かしてロバストで自然な歩行を実現するための研究について概説し、その中でも空気圧によって駆動される二足歩行ロボットに注目して、その利点とこれまで得られている結果について述べる。

2. 受動歩行ロボットを駆動する

2.1 理想的なシミュレーション

受動歩行ロボットは、その動特性にしたがい重力のみによって歩行するため、床面の傾きや初期値に強い依存性を持っている。したがって受動歩行の特性を利用しつつ、実際にさまざまな環境を移動する歩行ロボットを構成するためには、何らかの形でエネルギーを供給し、ロバストで自然な歩行を実現しなければならない。受動歩行ロボットに駆動力を加えるというアイデアはMcGeerの最初の論文に既に記載されており[1]、支持脚に撃力を発生することによって歩行を安定化させるという枠組みもまたMcGeerによって提案され、シミュレーションによって効果を確認されている[3]。それ以降、受動歩行にさまざまな形で駆動力を加え、歩行を安定化させようという試みがシミュレーション上で数多くなされてきている[4-7]。

シミュレーションの場合には、床面は完全に平らで勾配のばらつきもない理想的な環境内での実験が可能であり、床面のダイナミクスも例えばバネ・ダンパモ

デルや非弾性衝突としてモデル化され、床面全体にわたってそのパラメータは一樣であると仮定される。しかも歩行の初期条件となるロボットの姿勢や速度なども誤差なく一定にすることができる。しかし、実際のロボットではこのような再現性は保証されず、ロボットは移動するので床面のダイナミクスも時々刻々変化し、また外乱は予測が難しい。シミュレーションによって得られた知見は、環境に関するこのような形式的な記述に負うところが大きく、そのまま実ロボットに適用できるとは限らない。変化に富んだ実環境内で受動歩行の特性を活かした歩行制御を実現するためには、シミュレーションで得られた知見はそのまま使えないのが現状ではないだろうか。

ロボットの動特性を活かした歩行を実ロボットで実現しようとする、シミュレーションでは簡単に与えることができた理想的な駆動力を、実際のアクチュエータでどのように与えるかということが問題になる。技術的にもっとも容易なのが、一般にロボットに用いられている電動モータを使用する方法であろう。

2.2 電動モータを用いた駆動

第1表 電動モータを用いた受動型二足歩行

駆動関節	膝なし	膝あり
股	Sugimoto[8]	Ono[9,10]
股+足首	Asano[11], Morita[12]	
足首	Tedrake[13]	Collins[14]

電動モータを用いた場合について、表1に駆動のバリエーションをまとめてみた。Sugimoto and Osuka[8]は、ひざのない受動歩行をする四脚ロボットQuartet IIIを開発しその股関節をDDモータによって駆動することにより、駆動されている状態から受動歩行状態へと遷移させるような制御則の検証実験を行っている。Ono et al.[9,10]が扱っているロボットも平面内歩行するように四脚で構成されている。膝関節はソレノイドによって戻りを防止する機構が装備されているが、基本的に駆動されない状態であり、その変位に比例する入力トルクをACモータによって股関節に与え、平面上の歩行を実現している。用いられているアクチュエータの減速比は1/10[9]あるいは1/5[10]であり、一般に

* 大阪大学大学院工学研究科

† 阪大FRC

Key Words: biped walking, passive dynamic walk, pneumatic actuators

使われているものに比べると低い。これらのロボットに見られるように、ロボットの受動性を最大限に利用するためには、ロボットが弾道学的な運動をしている際にはそれを妨げないような駆動方法を用いる必要があり、一般にロボットに用いられているような減速比の大きい減速器は、摩擦によって生じる損失のため受動歩行を基本としたロボットの駆動には不適當であると考えられる。

Asano et al.[11] や Morita et al.[12] も、四脚にすることによって横方向への運動を拘束している点では同じである。これらのロボットは膝関節がなく、股と足首ともに駆動されている。Asano et al. のロボットは、股関節は DC モータ、足首関節はプーリを介した DC モータによって駆動されている。Morita et al. は股関節に DD モータを、足首関節には直動モータを使用している。これらの研究では、受動性を積極的に利用するという側面よりは、歩行をより安定化させるためにどのような入力を補うかについて焦点が当てられているため、全ての軸が駆動されていると考えられる。

股関節への駆動入力、完全な受動歩行の性質を変えてしまうと考えた Tedrake et al. や Collins and Ruina は、股関節にはモータを装備せず、足首を駆動することによって歩行を実現している。Tedrake et al.[13] は、足首のロール角とピッチ角を市販のサーボモジュールを用いて位置制御している。一方で Collins and Ruina[14] は、脚が地面を離れる前に蹴り動作によってエネルギーを供給するために、モータによってワイヤを巻き上げてバネにエネルギーをため、一気にトルクを出すためのメカニズムを開発し、受動歩行ロボットに装備している。ロボットの持っている受動性の支配的な部分は股関節がフリーになることによって実現されていると考えられるので、足首の駆動方法は必ずしも摩擦の小さいものになる必要はない。また注目すべきは、ここまで紹介してきたロボットが二足歩行と称しながら、これまでのロボットのほとんどが4足を持ち、運動を平面内に拘束していたのに対し、彼らのロボットいずれも足裏の構造を工夫することによって復元力を増し、運動を矢状平面内に限らず、3次元歩行が可能であるということである。

2.3 空気圧を用いた駆動

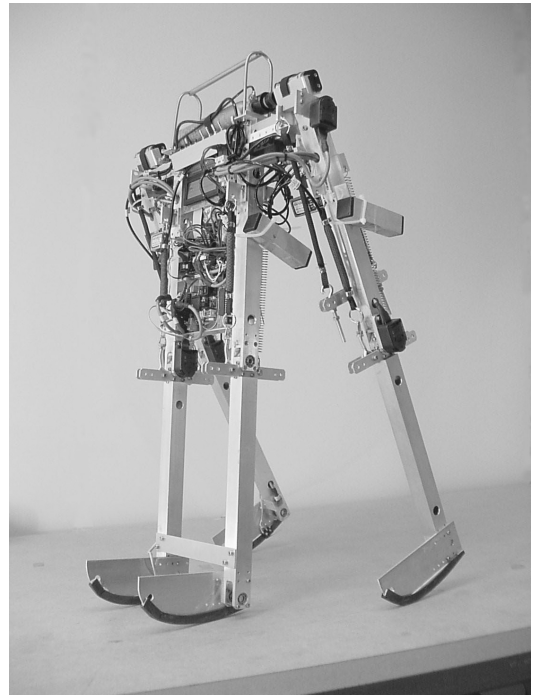
電動モータを用いる場合モータとリンク機構は直列に接続されるため、関節を駆動する一方で完全に関節を自由にする状態を作り出すためには、ここまで見てきたように、その減速方法やどの関節を駆動するかに細かい注意を払う必要がある。また、減速比が一般的に大きくできないためにロボットの質量が増加するという傾向も避けられない。

一方で、空気圧人工筋による拮抗駆動方式を採用すれば、このような問題を簡単に回避することができる。

また弁を閉じ、気体を供給しない状態でバネ要素を実現できることもエネルギー消費が少ないという意味で有望である。関節にバネ要素を実現することによって、歩行中にエネルギーを吸収し、それを開放することによる効率のよい移動も実現可能であると考えられる。以下では、このような空気圧人工筋を用いた拮抗駆動による歩行ロボットを取り上げる。

3. 空気圧駆動二足歩行ロボット

3.1 デルフト工科大学の二足歩行ロボット



第 1 図 デルフト工科大学で開発された二足歩行ロボット Mike(許可を受けて掲載)

デルフト工科大学の研究グループによって、McKibben 型空気圧人工筋によって拮抗駆動される 3 体の二足歩行ロボット Mike, Max, Denise が開発されている [16](Wisse 氏の好意により, Mike を図 1 に示す)。Mike は上体のない股、膝計 3 自由度の二足歩行ロボットで、他の受動歩行ロボット同様 4 本の脚を持ち、運動を平面内に拘束している。股関節は空気圧人工筋により拮抗駆動されている。各膝にも人工筋は装備されているが、バネとの拮抗構造で基本的にはラッチと同じ機能を持つ。全重量はおよそ 7[kg] である。

ロボットの動特性が受動歩行しやすいように設計されているため、平面上を歩行するために必要なエネルギーは小さく、5.8[MPa] の二酸化炭素 38[g] を封入したボトルによって 3 分強歩行が可能である。また、ロボットの動特性が歩行に向いているということは、エネルギーを節約するだけでなく、その特性によってもたらされる歩行の状態がある程度決定されるために、状態を観測するためのセンサが少なく済むという利点もある。

る。例えば、Mikeの場合、足裏に接触センサを持つだけで、関節角を計測するポテンショや人工筋の圧力を測る圧力センサなどがなくても安定な歩行を実現できている。この接触センサの信号を得てから400[ms]後に股関節を駆動することによって歩行は実現されるが、その歩行は驚くほど安定である。

空気圧駆動二足歩行ロボットMax[16]は四脚の下半身の上部に上半身を持つロボットである。全重量が10[kg]、ギアとチェーンの組み合わせで、上半身が必ず二本の脚の真中に来るように機械的に拘束されている(reciprocating hip mechanism)。下半身の構造は基本的にMikeと同じだが、膝の伸展にアクチュエータを用いず、ラッチ機構のみが装備されている。Mikeより大型の450[g]の二酸化炭素ボトルを二本装備し、合計60分間の歩行が可能である。

Maxと同様の上半身を持ち、幅の広い足底を持たせて脚を二本としたのが、Deniseである[16,2]。全重量が約8[kg]、左右への運動を安定化するために、足首に取り付けられた回転軸が、自転車のハンドルのように前方へ傾いている。ロボットがある程度の速度で前進しているときに、この傾いた回転軸によって復元力が生じ、安定な歩行を可能とする。

3.2 空気圧駆動二足歩行ロボット「空脚」

図2に、著者の研究グループで開発した空気圧駆動ロボット「空脚」を示す。他の受動歩行を基礎としたロボットと同様に、このロボットも平面内歩行をするために4本の脚を持つ。股と膝に合計3つの関節を持ち、全てがMcKibben型空気圧人工筋を拮抗に配置することにより駆動されている。全重量は約5[kg]で、自立歩行するために制御用コンピュータ、On/Off空気弁、二酸化炭素ボトルなどを全て搭載している。Mikeと同様、脚先に備え付けられた接触センサによって床面を検知し、この接触センサの信号を得てから一定時間 $S[s]$ 後に股関節を駆動することによって歩行する。この時間 S は、床面の形状や材質によって変化するが、200[ms]から450[ms]まで変更可能であり、この時間に比例して歩行周期全体も変化するという実験結果が得られている[17]。周期に関する簡単なフィードバックを適用することにより、このロボットは9[mm]の段差を二段連続して降りることが可能である(図3)。

3.3 空気圧駆動3次元二足歩行ロボット「Pneu-Man」

さらに著者のグループでは、脚が2本で運動が平面内に拘束されない空気圧駆動3次元二足歩行ロボット「Pneu-Man」を開発した(図4)[18]。図5にその自由度構成と寸法を示す。高さが約0.8[m]、重量が約7.0[kg]である。「空脚」と同様に自立歩行を目指して制御用コンピュータ、電磁弁、および二酸化炭素ボトルを搭載している。三次元歩行を可能とするために幅の広い足



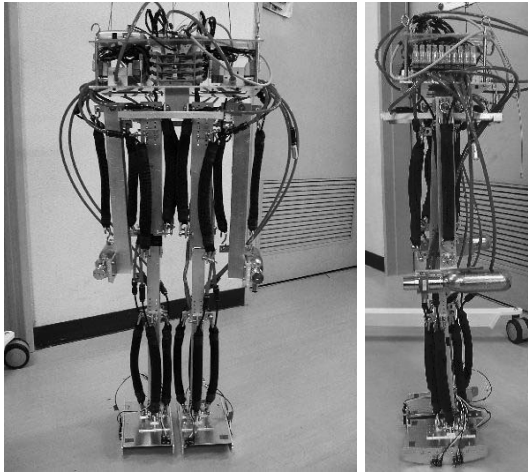
第2図 大阪大で開発された空気圧駆動二足歩行ロボット空脚(Que-Kaku)



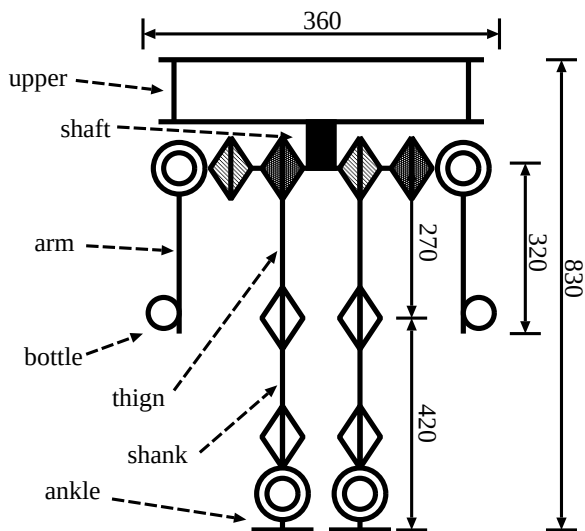
第3図 「空脚」が2段の段差を歩行する様子

裏を持ち、足首に2自由度、膝1自由度、股1自由度、肩1自由度と片半身5自由度、全身で10自由度の関節を持つ。これだけの自由度を持ちながら全重量を7[kg]と軽量化できているのは、McKibbenアクチュエータを採用したことによる。

他の空気圧駆動二足歩行ロボットと同様に、地面との接触を検知するための接触センサが足裏に装備されている。足首と肩を駆動するアクチュエータには一定の空気を注入してやわらかく固定し、接触センサの信号を基に股と膝関節に「空脚」と同じ制御を適用することによって、平面上を歩行することができる(図6)。以上、ここまで紹介してきた動特性を利用した空気圧二足歩行ロボットの特徴を表2にまとめる。



第 4 図 大阪大で開発された 3 次元空気圧駆動二足歩行ロボット Pneu-Man



第 5 図 3 次元空気圧駆動二足歩行ロボット Pneu-Man の関節構造と寸法

4. 動特性を利用した空気圧二足歩行ロボットの特徴

空気圧を用いた二足歩行ロボットの歴史は実は大変古く、早稲田大学の加藤らが最初に実現した二足歩行ロボットは空気圧駆動であった [19]。当時は電動モータの性能がよくなく、歩行ロボットを動かすには大きな出力を得られる空気圧が適当なアクチュエータと考えられていたと思われる。しかし空気圧アクチュエータは媒体として圧縮性を持つ気体を介するため、その動的特性は複雑になり、精密な制御が極めて困難である。したがって、加藤らの二足歩行ロボットにおいても、静歩行を実現するのが精一杯であった。その後、出力の大きさという点では魅力的でありながら、制御の困難さから空気圧アクチュエータは二足歩行ロボットに使われなくなった。

Wisse and van Frankenhuyzen の研究 [15] 以降、受



第 6 図 A motion sequence of walking of the 3D pneumatic driven walker

第 2 表 受動歩行の動特性を利用した空気圧駆動二足歩行ロボット

	上体なし	上体あり
4 脚 (平面内歩行)	Mike[15] 空脚 [17]	Max[16]
2 脚 (3 次元歩行)		Denise[2,16] Pneu-Man[18]

動歩行の性質を利用することにより、このような空気圧についての制御の困難さを避け、動的二足歩行を実現できる枠組みが確立した。その結果、さまざまなロボットが作成され、その有効性が検証されてきた。その理由を考察する。

4.1 ロボットの動特性とアクチュエータの制御特性

前述したとおり、空気圧アクチュエータは媒体となる気体に圧縮性があり、また McKibben 型人工筋肉の場合にはアクチュエータ自身に存在する非線形性やヒステリシスのため、その出力を精密に制御することが極めて難しい。そのため一般的に使われているように、幾何学的な情報と ZMP に関する情報から関節の目標軌道を生成し、これに精密に追従する制御を適用することにより歩行を実現する方法を用いることができない。したがって、任意に (特に静特性だけに注目されて) 設計された二足歩行ロボットを空気圧で駆動することは困難である。

一方で、ロボットが受動歩行するような動特性を持っている場合には、歩行の安定性をもたらす領域がある程度存在するために、そこにわずかな駆動力を加えて実現される歩行も安定になりやすいと期待できる。本稿で紹介した空気圧駆動二足歩行ロボットはこのような「性質のよい」動特性を持つロボットを設計し、その特性を活かすことによって制御の困難な空気圧アクチュエータを有効に利用している。

4.2 エネルギー効率

ロボットはもともとエネルギーの供給を必要としない受動歩行を規範として設計されているので、平面上を歩行する場合にも、歩行を持続するために供給しなければならないエネルギーはきわめて小さいと考えられる。これに伴い、アクチュエータのサイズも小さくて済む。空気圧駆動ロボットの問題点の一つは、気体の供給方法であり、コンプレッサを用いる場合にはロボットは大型にならざるを得ない。アクチュエータが小さくなれば供給する気体の量は少なく済むので、小型の二酸化炭素ボトルでも十分な動作時間を得ることが可能となる。また空気圧アクチュエータは、その重量に対して非常に大きい力を発生できるので、同様のバックドライバビリティを持つ電動モータに比べてはるかに小さいアクチュエータでロボットを制御することが可能となる。その結果ロボットの重量が減少し、さらに必要なアクチュエータの出力が小さくなるという効果がある。

さらに、今後ロボットがジャンプ、走行することを想定すると、空気圧アクチュエータのメリットはよりはっきりとする。電動モータで二足歩行ロボットの走行を実現しようという研究も進んでいるが、磁界によって発生される表面力に頼ったアクチュエータであるため、爆発的な力を生じることが難しい。また、多くの場合大きな減速比の減速器を装備しているため、着地の衝撃により伝達機構を破壊してしまう可能性が高い。空気圧アクチュエータを拮抗に配している場合には、存在する弾性によって衝撃のエネルギーを吸収し、次のステップで開放することによってさらにエネルギー効率のよい歩行・走行が実現できる可能性がある(実際、二足ロボットの走行で著名な Reibert の研究 [20] は空気圧を使っている)。

4.3 省センサ

受動歩行を規範として歩行が設計されている場合、ロボットがとる状態のバリエーションが受動歩行の安定領域周りにある可能性が高い。したがって、センサが極めて部分的な情報しか観測できない場合にも、安定領域内のバリエーションによってもたらされるクラスにあると仮定でき、結果的に少ないセンサで制御則を構成できると考えられる。実際、現存する空気圧駆動二足歩行ロボットは、全て脚先に装備された接触センサの信号のみで歩行可能である。

観測にかかるコストが少なくて済むことは、制御のためのサンプリング時間を短くするだけでなく、制御に必要なコンピュータのコストを下げる。実際空脚や Pneu-Man には、20MHz あまりの RISC チップ H8((株) ルネサステクノロジ) が搭載されているのみであるが、制御には十分である。今後、人間型ロボットのアーキテクチャが複雑化していくことを想定する

と、運動制御系に関する観測のコストを下げることは、例えば視覚など他のコストがかかる観測系にさけるリソースを確保できることにつながり、利点は多い。

4.4 問題点と今後の展望

以上あげてきたように、動特性を利用した空気圧駆動二足歩行ロボットにはメリットも多いが、そのメリットによって生じる問題もある。まず、空気圧アクチュエータを含めた特性が複雑で、精密な制御を必要とするような作業には不向きである。単なる平面上の歩行の場合には、動特性を最大限に利用することによりこの問題は回避されているが、例えば階段の昇降など、脚先の位置を精密に制御したい状況が生じたときに、どのように問題を解決するかには工夫が必要である。

ロボットがさらに曲がったり、止まったりという行動を要求された場合に、このようなロボットでどうやってそれを実現するかも問題である。基本的に受動歩行ロボットは静止したり、任意の角度で曲がったりすることができないため、自由な歩行を実現するには問題が山積している。

5. おわりに

本解説では受動歩行をベースに、そこにわずかな駆動力を補うことによって自然な歩行を実現できるロボットを、空気圧駆動を中心に概観した。受動歩行ロボットの研究者たちは口をそろえて「従来の歩行よりも自然な歩行」が実現できることに問題の焦点を置くが、逆に従来のロボットで簡単に実現できる回転や停止の運動を実現することは難しい。実際に使用に耐える歩行ロボットをこのような枠組みで作り出すには、まだまだ研究の余地がある。

人間や生物のメカニズムを説明するために、ロボットによってその行動を再現し、そこで観測される知見を用いる構成論的な手法が近年盛んにとられるようになってきている。しかし、電動モータによるリンクの直列的な駆動は、基本的に人間や生物とは違う駆動形式であり、軌道などの静力学的な知見についてはある程度の説明ができるであろうが、動的な特性についてはなかなか難しいのではないだろうか。空気圧によって拮抗に駆動されている歩行ロボットは、人間と同等の駆動構造を有しており、このようなロボットによって人間の持つ歩行の特性を調べることに貢献できないかと考えている。

謝辞

空気圧二足歩行ロボットについての先駆的研究者であるデルフト工科大学 Martijn Wisse 氏とは、ロボットに関する討論や意見交換を通し、また本解説を執筆するに当たって写真を提供していただくなど、多くの面で協力をいただいた。この紙面をお借りして感謝の意を表したい。また、著者の研究グループのメンバー

である大阪大学大学院工学研究科田熊隆史氏, 荻野正樹氏, 並びに浅田稔教授には, 実験, 討論などさまざまな面で多大な協力をいただいている。ここに感謝の意を表する。最後に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。

参考文献

- [1] T. McGeer, "Passive Dynamic Walking," The International Journal of Robotics Research, Vol.9, No.2, pp.62-68, 1990.
- [2] S. Collins, A. Ruina, R. Tedrake, and M. Wisse, "Efficient Bipedal Robots Based on Passive-Dynamic Walkers," SCIENCE, Vol.307, pp.1082-1085, 2005.
- [3] T. McGeer, "Dynamics and Control of Bipedal Locomotion", J. theor. Biol., Vol.163, pp.277-314, 1993.
- [4] A. D. Kuo, "Stabilization of Lateral Motion in Passive Dynamic Walking", The International Journal of Robotics Research, Vol.18, No.9, pp.917-930, 1999.
- [5] R. van der Linde, "Passive bipedal walking with phasic muscle contraction", Biological Cybernetics, 81, pp.227-237, 1999.
- [6] F. Asano and M. Yamakita, "Virtual Gravity and Coupling Control for Robotic Gait Synthesis", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Part A, Vol.31, No.6, pp.737-745, 2001.
- [7] M. W. Spong and G. Bhatia, "Further Results on Control of the Compass Gait Biped", Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.1933-1938, 2003.
- [8] 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.
- [9] K. Ono, R. Takahashi, and T. Shimada, "Self-Excited Walking of a Biped Mechanism", The International Journal of Robotics Research, Vol.20, No.12, pp.953-966, 2001.
- [10] K. Ono, T. Furuichi, and R. Takahashi, "Self-Excited Walking of a Biped Mechanism with Feet", The International Journal of Robotics Research, Vol.23, No.1, pp.55-68, 2004.
- [11] F. Asano, M. Yamakita, N. Kamamichi, and Z. Luo, "A Novel Gait Generation for Biped Walking Robots Based on Mechanical Energy Constraint", Proc. of the 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2637-2644, 2002.
- [12] S. Morita, H. Fujii, T. Kobiki, S. Minami, and T. Ohtsuka, "Gait Generation Method for a Compass Type Walking Machine Using Dynamical Symmetry", Proc. of 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.2825-2830, 2004.
- [13] R. Tedrake, T. Zhang, M. Fong, and H. Seung, "Actuating a Simple 3D Passive Dynamic Walker", Proc. of the 2004 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.4656-4661, 2004.
- [14] S. Collins and A. Ruina, "A Bipedal Walking Robot with Efficient and Human-Like Gait", Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1995-2000, 2005.
- [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.
- [18] K. Hosoda, T. Takuma, M. Ishikawa, "Design and Control of a 3D Biped Robot Actuated by Antagonistic Pairs of Pneumatic Muscles", 3rd International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, to appear, 2005.
- [19] 加藤, "二足歩行ロボット -その歴史と課題-", 二本ロボット学会誌, 1巻, 3号, pp.4-6, 1983.
- [20] M. Reibert, "Legged Robots That Balance", The MIT Press, 1986.

著者略歴

ほそ だ こう
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年間スウェーデンのストックホルム大学客員教授。知能創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。