

特集 「構成的発達科学を目指して」

身体的共創知能

—柔軟な身体構造と環境との相互作用から生み出される適応性—

Physio-Synergistic Intelligence

—Adaptability Emerging from Interaction between
Compliant Body Structure and Environment—

細田 耕
Koh Hosoda

JST ERATO 浅田共創知能プロジェクト, 大阪大学大学院情報科学研究科
JST ERATO Asada Synergistic Intelligence Project. / Graduate School of Information Science and Technology, Osaka
University.
koh.hosoda@ist.osaka-u.ac.jp, <http://www-hi.ist.osaka-u.ac.jp>

Keywords: physio-synergistic intelligence, adaptability, muscular-skeleton structure, compliance.

1. はじめに

人間の知能的な行動を司る重要な部分が脳にあることは誰もが認めるところであるが, 脳のみが「知能の座」ではないことは, 近年の研究によって明らかになっている [Pfeifer 01, Pfeifer 10]. 人間の知能的な行動, 特に環境に対する適応性は, 脳内の活動だけを調べることで理解できず, その身体性を正しく捉えることによって初めて明らかになる。

著者らは, ERATO 浅田共創知能プロジェクトに身体的共創知能グループを構成し, このような身体性が環境適応にどのように働いているか, 特に柔軟性が適応的な行動を生み出すためにどのような役割を果たしているかを調べるために, 生物に類する筋骨格構造をもつロボットを試作し, その構造と振舞いの関係を調べてきた。我々が開発してきた筋骨格構造をもつ一連のロボットは, もちろん生物の完全なコピーではなく, その構造の一部分を再現したにすぎない。しかし, その構造がある特定の振舞いにどのように関与するかを詳細に調べることによって, 生物知能の原理の一端を明らかにすることができると考えている [Hosoda 10a]。また, このような方策に基づいて設計されたロボットは, 我々の環境により適している可能性が高く, これまでなかったようなパフォーマンスを発揮することが期待される。本稿では, まず, 人間の下肢の矢状面内の筋骨格構造を模したロボットによる跳躍運動 [Hosoda 10b] について, 次に, 人間の上半肢に類する筋骨格構造をもつロボットアームによる身体の柔軟構造を利用したドア操作 [Hosoda 11], そして最後に, 人間型上肢ロボットによる柔軟な身体を利用したダイナミックタッチによる物体認識 [Hosoda 11] について紹介する。これらの例を通して, 人間に類する筋骨格構造が, 振舞いや認識にどのような影響を与えるかにつ

いて述べる。

2. 下肢ロボットによる安定な跳躍

2.1 人間の安定な跳躍

人間の跳躍の場合, 三半規管や触覚, 視覚などの外界センサを用いたフィードバックが重要な要素を占めていることは明らかであるが, 地面との衝突は極めて高速であり, 反応時間のかかるフィードバックだけでは安定性が確保できない。生物は, その身体に存在する柔軟性によって, 外界との衝突に対して応答しており [Full 00], これが歩行の安定性につながっていることが知られている。人間の場合も, 筋骨格系がもつ構造的な弾性が, 跳躍の安定性に大きく寄与していると考えられる。また筋骨格系がもつ弾性によって, 衝突エネルギーは筋の弾性エネルギーへと変換され, 回生されることによってエネルギー効率の良い跳躍ができる。これらのことから, 人間の安定な跳躍を考えるうえで, 人間の筋骨格系の構造がどのような役割を果たしているかを調べるのが重要である。ここでは, 人間の下肢の矢状面内の主要な筋肉構造を模したロボット「空脚 K」を紹介し, このロボットを用いた跳躍実験について述べる [Hosoda 10b]。

2.2 一本足跳躍ロボット「空脚 K」

図 1 に人間の下肢の筋骨格構造を模した跳躍ロボット「空脚 K」を示す。このロボットは, 人間の矢状面内の代表的な筋肉に相当する空気圧人工筋を備えている。各関節には, それを拮抗に駆動する単関節筋 (#1, #2, #3, #4, #7, #8) があり, それに加えて腰とひざの関節にまたがっている #5 (大腿直筋に相当する) と, #6 (外側広筋に相当する), そして膝と足首の関節にまたがっている #9 (腓腹筋に相当する) をもつ。二つの関節にまたがるこれら 3 本の筋肉は 2 関節筋と呼ばれ, 生

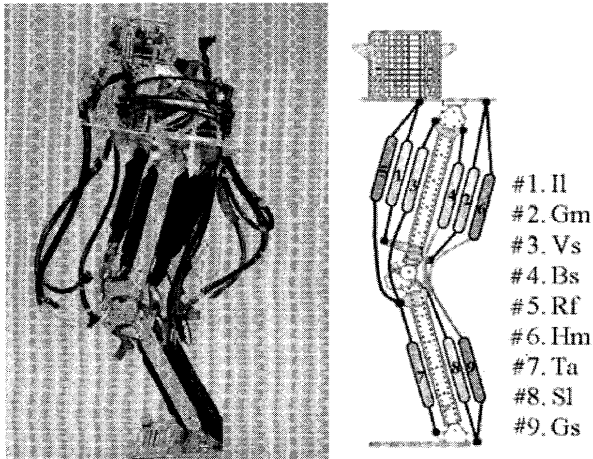


図1 人間の下肢の筋骨格構造を模した跳躍ロボット「空脚 K」

物の場合、関節間の連動や力の伝達に貢献していると考えられている [Doorenbosch 96]。このロボットで用いられている人工筋は、マッキベン型空気圧人工筋 [van der Linde 99] であり、ゴムからなる構造と、圧縮性のある空気によって駆動されるため、人工筋自体に固有の柔らかさがある。張力・ひずみ関係は、筋が自然長より短いときは人間の筋肉のもつそれにある程度類似しているが、粘性特性は異なることが知られている。ここではその弾性のみに着目し、骨格の構造と併せて、人間の筋骨格系の構造的弾性のある程度再現できていると考えている。

2.3 2 関節筋による連動

ここで、2 関節筋によって「空脚 K」にもたらされる関節間の連動について述べる (図 2)。例えば、抗重力筋の一つである膝の伸展筋 #3 に給気することを考える。#3 が収縮すると、2 関節筋である #6 によって腰が進展し、#9 によって足首も進展する。その結果体全体がまっすぐになり、直上に跳躍するための連動が生じるのがわかる。同様の連動は、腰を #2 によって伸展させたときに膝と足首にも生じるということがわかっており、2 関節筋の構造によって、真上に飛びやすい性質をつくりだしているといえる。実験によって、この性質を確認したものが、図 3 である。ここでは 2 関節筋のうち、腓腹筋 #9 の強度を強くすることによって、跳躍方向が直上

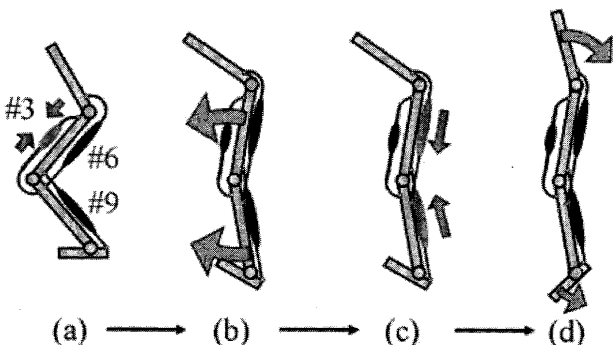


図2 2 関節筋 #6, #9 が #3 の膝伸展を腰関節と足首関節に伝達する仕組み

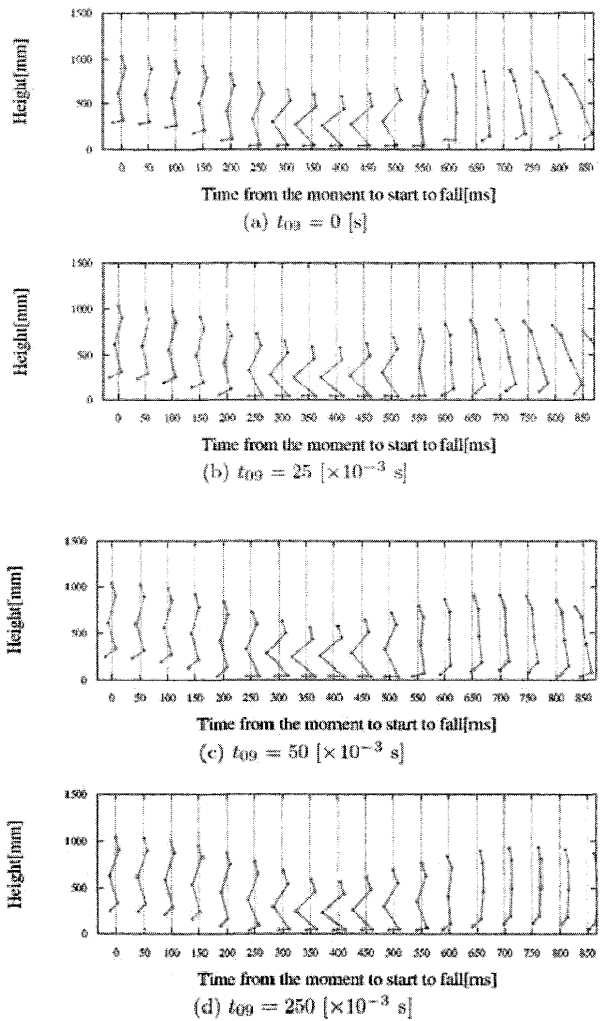


図3 2 関節筋 #9 への給気量 (時間) を変化させたときの身体全体の跳躍方向の変化

に寄っていく傾向が見て取れる。この実験を通して、人間の下肢の筋骨格構造がどのように安定な跳躍に寄与しているかの一端が示されたのではないかと考えられる。

3. 柔軟構造を利用したドア操作

3.1 身体的な制約の活用

人間の筋骨格は、進化によって獲得された構造 (筋骨格構造, 神経構造) によって、ある方向には動きやすいが、ある方向には動きにくい、あるいは、ある方向には力を出しやすいなど、動作方向に関する制約をもつ。このような制約を無視して設計された道具は、人間にとっては非常に使いにくい [Norman 02]。逆にいえば、我々にとって操作しやすい環境は、このような拘束をもつ身体に対して適するように設計されているといえる。もし、この仮説が正しければ、人間と同等の構造をもつロボットは、我々の環境で動作するために都合の良い構造をしているはずで、その結果、適応的な振舞いを生み出すために必要な計算量やエネルギーが減り、また学習が必要な場合でもその探索空間の削減や学習時間の短縮に貢献

することが期待される。この意味で、筋骨格構造をもつロボットは、我々人間と環境を共有するのに有利な構造をもっていると考えられる。ここでは、人間の上半身を模した筋骨格構造をもつロボットを紹介し、このロボットによる筋骨格構造を利用したドア開け操作について触れる [Hosoda 11].

3.2 筋骨格上腕ロボット

図4に、この実験で使用した筋骨格上腕ロボットを示す。この上腕ロボットは、人間の上半身の主要な構造をできるだけ模倣してつくられている(図5)。特に前腕は、橈骨と尺骨からなる平行リンク構造となっており、人間と類似の運動をすることができる。また、手首関節は楕円球を採用しており、これも実際の人間の手首の機構を参考に設計されている。このような手首構造を用いることにより、手の内旋・外旋運動を手首の関節ではなく、前腕部で実現することになる。

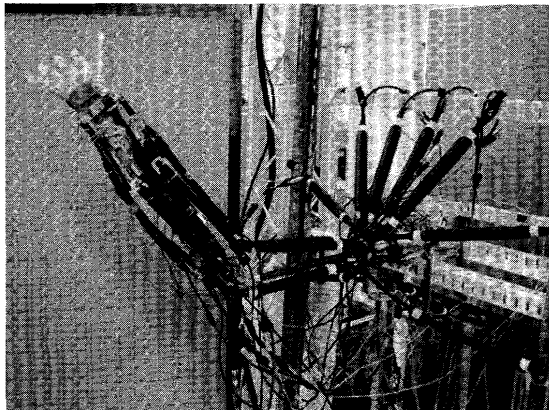


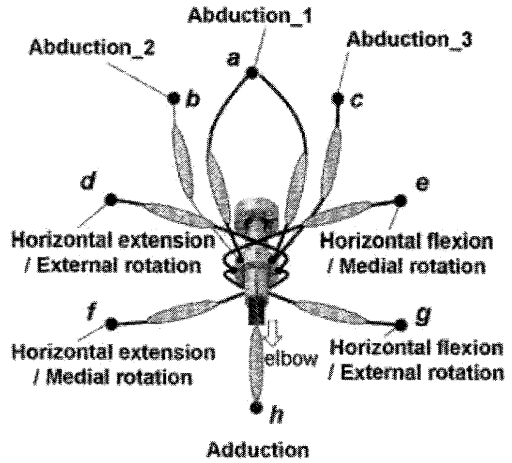
図4 人間の上半身を模した筋骨格構造をもつロボット

3.3 ドア開け操作

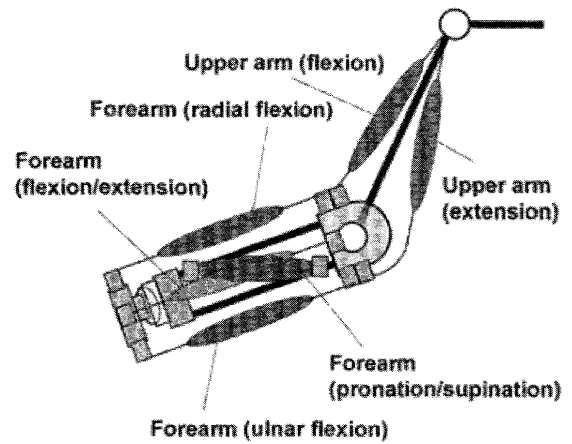
ドアノブは、人間が操作しやすいように設計されている。したがって、同じような筋骨格構造をもつロボットにとって、ドア開けの操作は、計算量的にも負荷の大きい仕事ではないと考えられる。ここでは、我々が実際にドアノブを握ってからどのようにドアを開けるかを自省し、その手続きをそのままロボットにプログラミングすることにする(図6)。

- (1) ドアノブにリーチングする,
- (2) ドアノブを握る,
- (3) 前腕の回外を利用してドアノブを回す,
- (4) 肘と肩を進展させ、ドアを押し開ける。

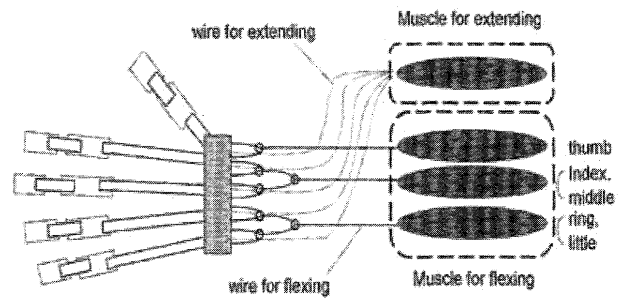
これら一連の行動によるロボット動きを図7に示す。ここで興味深いのは、上肢ロボットの筋骨格系が柔らかさをもつので、アームがドアノブとドアの動きに適應することである。通常のモータ駆動のロボットアームの場合、ドアノブをグリップしたときのハンドの姿勢を考慮して、ドアが開くときのドアノブの描く軌跡に応じたロボットアームの動きを詳細につくり込んでやる必要がある。その結果、



(a) 肩部の構造。人間の肩部は肩甲骨などからなる複雑な構造であるため、ここでは3自由度をもつ球面関節で機能を実現している



(b) 前腕部の構造。橈骨と尺骨からなる構造で、回内、回外を実現する



(c) 手部の構造。ワイヤによる劣駆動システムをもち、全体を進展させる筋が1、親指、人差し指+中指、薬指+小指それぞれの屈曲のための筋が装備されている

図5 人間の上半身を模した筋骨格構造をもつロボットの筋骨格構造の詳細

ロボットアームがどのようにドアノブを握ったかによって、ドア開けの作業の成否に大きな影響を及ぼす。したがってロボットは、ドア(ノブ)に対して正確な位置を知る必要があるし、リーチングの際に精度良くハンドを動かし、正確に決まった姿勢でドアノブをつかむ必要がある。一方筋骨格上肢ロボットの場合、いったんドアノブを握ってしまえば、ドアとアームから構成される柔らかい「チェーン」を利用して、おおよそのアームの動きだけでスムーズにド

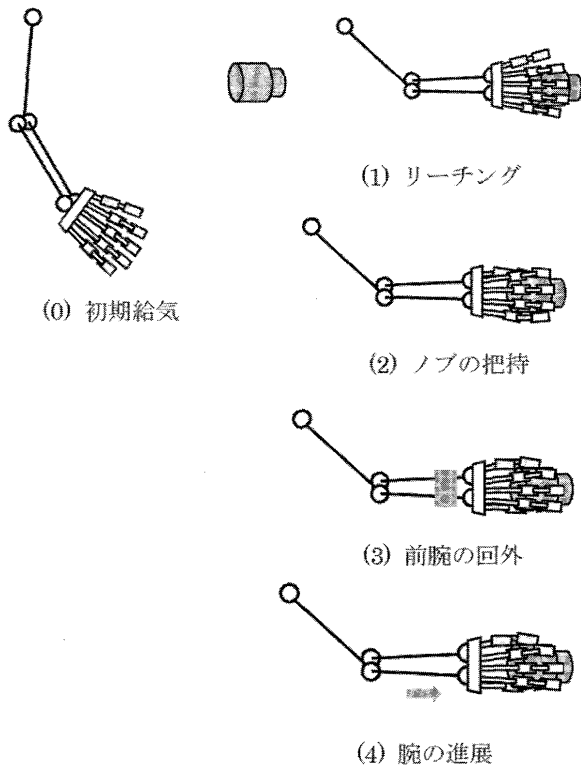


図6 人間の行動をもとにした、ドアを開けるための一連の動作。ロボットが人間に類似した筋骨格系をもつため、直感的な動作教示ができる

アを開けることができる。

ERATO 浅田共創知能プロジェクトの一つの重要なターゲットは認知発達である [Asada 10]。乾らはリーチングや物体操作が、特に自己受容感覚との関係においてどのように発達するかについて考察しており [乾 10]、またリーチングの脳内モデルについても言及している [Inui 09]。ここで述べているような筋骨格をもつ身体の場合には、その自己受容の表現は非常に複雑になる可能性があり、これらのモデルと突き合わせた検証が必要であると考えられる。

4. ダイナミックタッチによる認識

4.1 ダイナミックタッチ

本章では、筋骨格系をもつロボットアームによるダイナミックタッチを利用した対象物のカテゴリー化能力を示し、筋骨格系のもつ柔軟性がどのように認識に寄与するかを示す。ダイナミックタッチとは、対象物を触ったり、振ったり、たたいたりするなど、動的に関わることによって得られる触覚や自己受容感覚のことである [Truvey 96]。対象物に動的に働きかけることにより、人間は対象に関するより詳細な特性を得ることができる。従来のロボットのように、関節の剛性が大きい場合には、対象の変化は関節の運動に大きな影響を及ぼさない。したがって、対象に関する情報を得るためには、力覚や触覚、聴覚など、いわゆる外界センサを利用する必要がある。

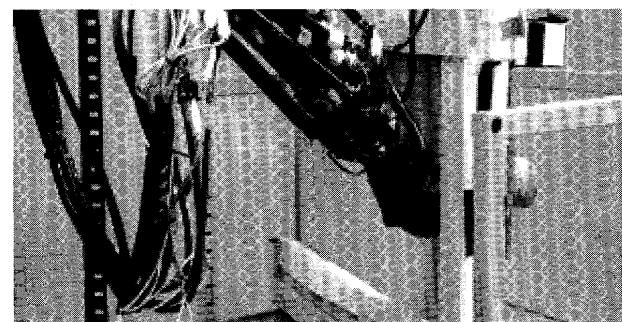
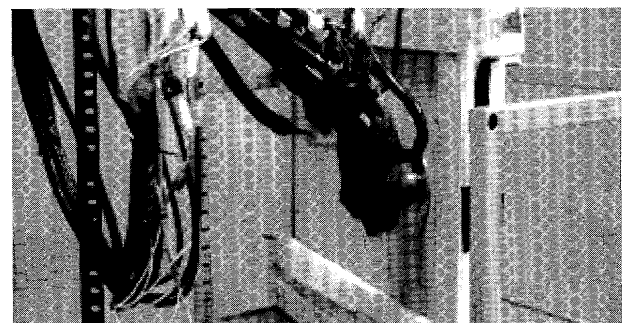
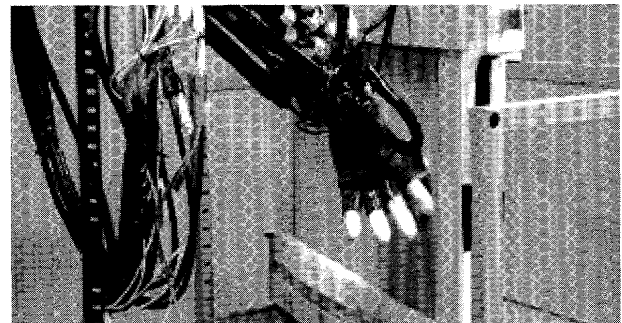
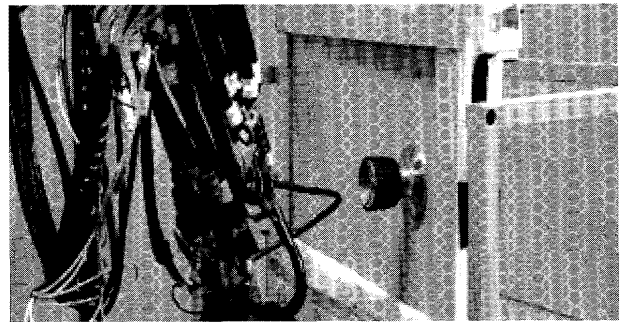


図7 実験時のロボットの動作

る。関節が柔軟である場合には、対象の変化は関節の運動に影響を及ぼす。したがって、自己受容器である関節角度センサを用いることによって、物体に関する情報を獲得することができる [Hosoda 11]。

4.2 物体識別実験

実験では、手のひらに存在する触覚に相当するひずみゲージと、筋肉の自己受容器に相当する圧力センサとひずみゲージの出力を用いる (図8)。対象物は数種類の材料が入ったペットボトルで、これを上腕ロボットによって振り、内容物とその重さを推定する。いくつかのあら

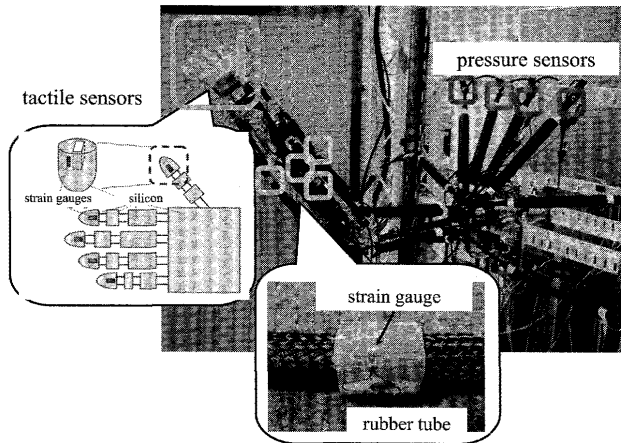


図8 人間の四肢を模した筋骨格構造をもつロボットのセンサシステム、触覚センサとしてのひずみゲージと、自己受容感覚（筋感覚）センサとしてのひずみゲージ、圧力センサが装備されている

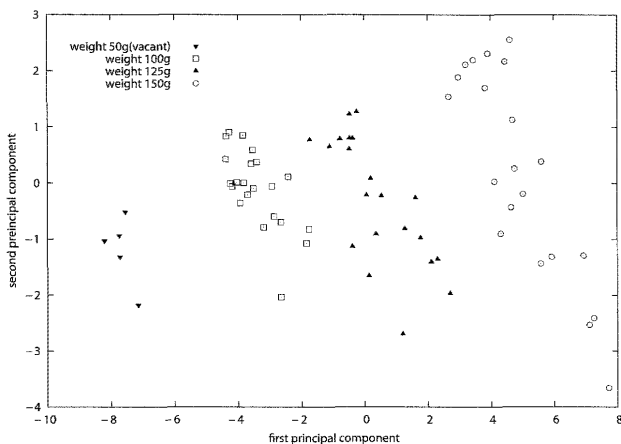


図9 物体識別の実験結果の一例。1Hzで対象を鉛直方向に振ったときのFFT出力の共振成分の主成分分析の結果。対象物の重さの違いによって、分布が異なることがわかる

はじめ決められた筋肉の行動パターンで対象物を振っている間に得られる信号をFFTおよび主成分解析によって処理する。図9にその結果の一例を示す。対象物の重量を変化させたときに、これを垂直（重力）方向に1Hzの周期で振ったときに、各センサから得られる信号からFFTを用いて、それぞれ二つの共振振動数を取り出し、主成分分析をした第2成分までをプロットしたものである。この実験結果を見ると、この振り方によって、内容物の質量をセンサ信号から識別することができるがわかる。振り方を変化させることによって、対象物の内容物を推定できるような実験結果も得られている。

このダイナミックタッチによる物体識別実験において、筋骨格系の柔軟性が果たしている役割は主に二つであると考えられる。まず一つ目は、筋骨格による身体の変柔軟性によって、対象物との結合系の動特性を変化させることができるため、対象に関する情報を柔軟性を変化させることにより変調できることである。例えば対象物の質量に関してより詳しく知りたい場合には、弾性

を低くして、結合系の固有振動数を小さくすることが、より精度の良い観測につながる。

二つ目は、筋骨格構造がもたらす柔軟性によって、視覚や聴覚などの外界センサからだけではなく、自己受容センサで対象物に関する情報が収集できることである。対象物を身体と切り離して考えるのではなく、双方の相互作用の結果、本来は身体自身を観測するセンサによって対象物の特性が推定できることは、身体イメージ [Iriki 01] など適応的な身体表象とも関連が深く、知能研究としては極めて興味深い。

5. 身体的共創知能

ここまで、人間の下肢の矢状面内の筋骨格構造を模したロボットによる跳躍運動、人間の四肢に類する筋骨格構造をもつロボットアームによる身体の柔軟構造を利用したドア操作、そして人間型上肢ロボットによる柔軟な身体を利用したダイナミックタッチによる物体認識を紹介した。第一、第二の例では、筋骨格構造が運動方向の安定なアトラクタを生み出す様相を、それぞれ下肢と上肢で示したことになる。また第三の例では、筋骨格がもたらす柔軟な構造が、対象の性質を推定するのに有用であることが示されているといえる。これらの例で重要なことは、筋骨格系のもつ柔軟性によって、身体と環境の相互作用を「形づくり」、それによって適応的な運動を生み出したり、環境に関する柔軟な観測を可能にしたりしていることである。これらの例を通して、筋骨格系の構造とそれからもたらされる柔軟性は、さまざまな知能的な運動、認識に関与していると考えられる。生物は、筋骨格系からもたらされる柔軟性だけではなく、皮膚もまた柔軟であり、この柔軟性もまた、知的な行動を生み出すために非常に重要な要素である。進化によって得られた、このような身体の柔軟性と知能的な行動の間には、どのような普遍的な原理が存在するのであろうか。このような身体がもたらす、知能的な行動へのカギを、身体と環境の相互作用から理解しようとする分野が「身体的共創知能」である。そこに統一的な原理が存在するのか、それとも単に進化という比較的ランダムなプロセスが生み出した、状況対処の集合体のようなものかはいまだにわからないが、知能的な振舞いを生み出すためには、身体についても十分な考察が必要であることを我々に教えてくれるのではないだろうか。

◇ 参考文献 ◇

- [Asada 10] Asada, M., et al.: Cognitive developmental robotics: A survey, *IEEE Trans. on Autonomous Mental Development*, Vol. 1, No. 1, pp. 12-34 (2009)
- [Doorenbosch 96] Doorenbosch, C. A., Welter, T. G. and van Ingen Schenau, G. J.: Intermuscular co-ordination during fast contact control leg tasks in man, *Brain Research*, Vol. 751, pp.

- 239-246 (1996)
- [Full 00] Full, R. J.: Biological inspiration: Lessons from many-legged locomotors, J. M. Hollerbach and D. E. Koditschek, Eds., *Robotics Research*, Vol. 9, pp. 337-341, Springer London (2000)
- [Hosoda 10a] 細田 耕: 発見的バイオロボティクスアプローチと適応的2足歩行, 日本ロボット学会誌, Vol. 28, No. 4, pp. 526-531 (2010)
- [Hosoda 10b] Hosoda, K., et al.: Pneumatic-driven jumping robot with anthropomorphic muscular skeleton structure, *Autonomous Robots*, Vol. 28, Issue 3, pp. 307-316 (2010)
- [Hosoda 11] Hosoda, K., et al.: Anthropomorphic muscular-skeletal robotic upper limb for understanding embodied intelligence, *Advanced Robotics* (submitted)
- [Inui 09] Inui, T., Nagai, C., Ogawa, K., Takemura, N. and Tarasenko, S. S.: Synergistic intelligence mechanism: Modeling cognitive development, *Proc. 2009 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems* (2009)
- [乾 10] 乾 敏郎, 小川 健二: 認知発達の神経基盤: 生後8ヶ月まで, 心理学評論, Vol. 52, No. 4, pp. 576-608 (2010)
- [Iriki 01] Iriki, A., et al.: Self-images in the video minotor coded by monkey intraparietal neurons, *Neuroscience Research*, Vol. 40, pp. 163-173 (2001)
- [Pfeifer 01] Pfeifer, R. and Scheier, C. 著, 石黒章夫, 小林 宏, 細田 耕 訳: 知の創成, 共立出版 (2001)
- [Pfeifer 10] Pfeifer, R. and Bongard, J. 著, 細田 耕, 石黒章夫 訳: 知能の原理, 共立出版 (2010)
- [van der Linde 99] van der Linde, R. Q.: Design, analysis, and control of a low power joint for walking robots, by phasic activation of McKibben muscles, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol. 15, No. 4, pp. 599-604 (1999)
- [Norman] Norman, D.: *The Design of Everyday Things*, Basic Books (2002, reprint)
- [Turvey 96] Turvey, M. T.: Dynamic touch, *Am. Psychol.*, Vol. 51, pp. 1134-1152 (1996)

2011年11月25日 受理

— 著 者 紹 介 —



細田 耕

1993年京都大学大学院工学研究科博士後期課程修了, 博士(工学)。同年, 大阪大学工学部助手, 1997年大阪大学大学院工学研究科助教授, 1998~99年チューリッヒ大学計算科学科客員教授, 2005~11年JST ERATO 浅田共創知能プロジェクトグループリーダー兼任, 2010年大阪大学大学院情報科学研究科教授, 現在に至る。