

ユビキタス社会に向けた Sensory-Motor Coordination

平井 慎一
立命館大学 ロボティクス学科

1. はじめに

立命館大学では、COEプログラム「マイクロ・ナノサイエンス・集積化システム」を進めている。このプログラムでは、電子、機械、光、化学、バイオ等、多岐に渡り複合領域に関わるエネルギー・情報を、微小空間内で組織的にプロセッシングできる新しい集積化システムを創造することを目的としている。近年、ウェアラブルシステムやバイオメトリクス、生体内システムなど、従来型のメカトロニクスでは対応できない領域が急速に増大している。これらの領域においては、センサやアクチュエータを含むメカニズムと、知能・情報処理を司るエレクトロニクスの双方をマイクロ化、集積化し、コンパクトなシステムチップを創製する必要がある。そのために、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) とシステム LSI(System LSI) の融合を実現し、実世界で動作するコンパクトな知能情報システムを実現したい。

人間の知能は、視覚や触覚などのセンシングと、手指や足、舌などの多自由度運動を、協調的に動作させることから生まれると考えられる。たとえば、Fig. 1に示すように、水道において湯の温度を一定に保つためには、指先で温度を感じるとともに、手で蛇口を動かす。このようなインテリジェンスの源を、sensory-motor coordination とよぶ。本プログラムで新しい集積化システムを創造することにより、sensory-motor coordination を基礎とした新しい知能情報システムが構築できると確信している。ユビキタス社会においては、マイクロ化されたセンサチップや通信チップ、さらにはアクションを司るチップが、環境や物体に数多く埋め込まれ、それらの協調が新しい機能を生むと期待される。Sensory-motor coordination の考えは、そのための基礎と位置づけられる。そこで本講演では、sensory-motor coordination に関する研究開発を紹介し、今後のユビキタ

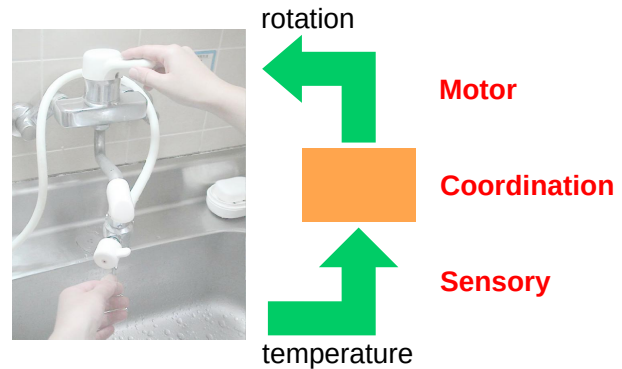


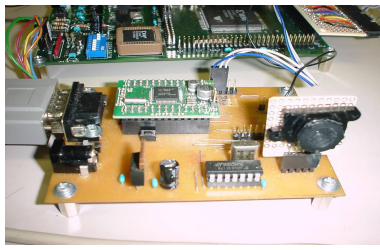
Fig.1: Sensory-motor coordination

ス社会との接点を展望する。

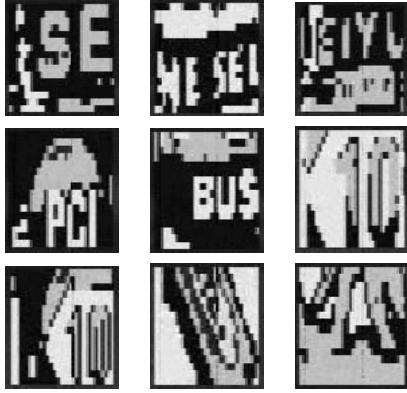
2. センシングと認識

コンパクトな知能情報システムを実現するためには、外界の情報を獲得するセンサと、獲得した情報をプロセッシングし外界を認識する信号情報処理が必要である。センシングと認識に関する研究として、プログラムでは、視覚、触覚、嗅覚のセンサと信号情報処理に関する研究を進めている。

視覚 視覚に関する研究の一つの方向は、高速キャプチャリングである。現在、CCDカメラで一般的に使用される NTSC 信号は、約 30fps である。一方、運動制御の観点からは、数百 fps ないしは 1000fps が望ましく、通常の CCD カメラを運動制御に用いることは難しい。そこで、原理的に高速キャプチャリングが可能な、CMOS イメージセンサにより、高速に画像を獲得する。野方らは、Fig. 2-(a) に示す、CMOS イメージセンシングユニットを試作している。試作ユニットは、250fps で 32×32 の画像をキャプチャすることが可能である。キャプチャした画像の例を、Fig. 2-(b) に示す。今後は、画素数とフレームレートを向上させるとともに、メカニカルシステムの制御、特に柔



(a) sensor unit



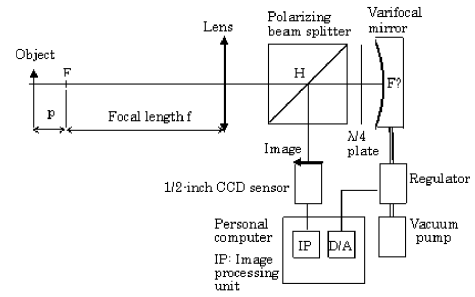
(b) captured images

Fig.2: Image capturing by CMOS sensor

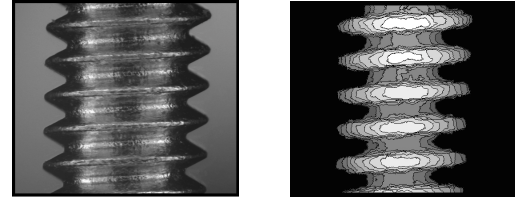
軟構造体の運動制御への適用を目指す。

別の方向として、三次元形状のセンシングがあげられる。特に、マイクロマニピュレーションを目的として、ミクロンオーダの三次元形状センシングに関する研究を、石井らが進めている [1]。Fig. 3-(a) に示すように、定倍率可変焦点ミラーを用いて三次元形状をセンシングする。 piezo素子により可変焦点ミラーを駆動し、複数の画像を取得する。焦点距離が異なる複数の画像を取得し、合焦点の評価を通して、全焦点画像と距離画像を求める。可変焦点ミラーにより三次元形状を取得した例を、Fig. 3-(b) に示す。焦点距離 $20\mu\text{m}$ ピッチで 50 枚の画像を取得し、合焦点を計算することにより、左に示す全焦点画像と右に示す等高線画像を得た。対象物であるねじのピッチが獲得できている。今後は、静電アクチュエータと一体化された可変焦点ミラーを構築し、高速な三次元形状のセンシングを目指す。

キャプチャリングの高速化と計算量の増大に対応するためには、画像処理をハードウェア的に実現する必要がある。物体操作や人間識別など多くのアプリケーションにおいて、オクルージョンや照明変動にロバストなアルゴリズムが必要であり、位相限定相関法やハフフーリエ変換法等、計算量の多いアルゴリズム

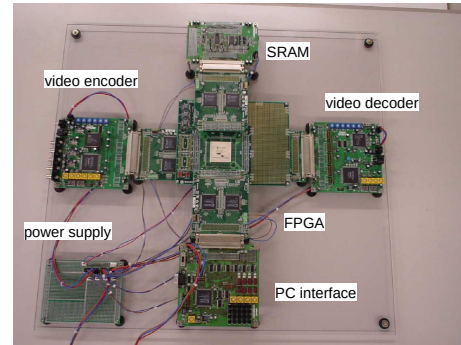


(a) system for 3-D imaging

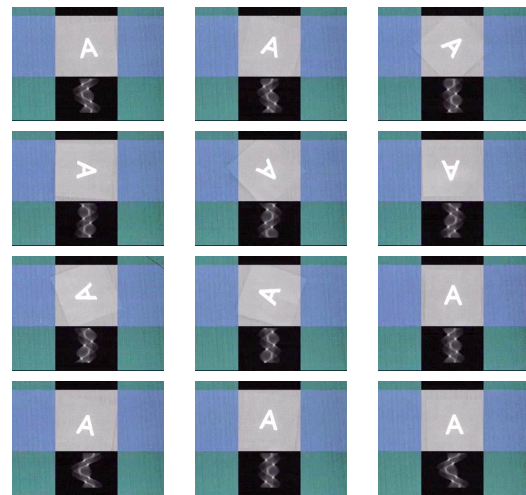


(b) entirely focused (c) contour map

Fig.3: 3-D imaging using varifocal mirror



(a) prototype of FPGA-based vision



(b) realtime Hough transform

Fig.4: FPGA-based realtime vision

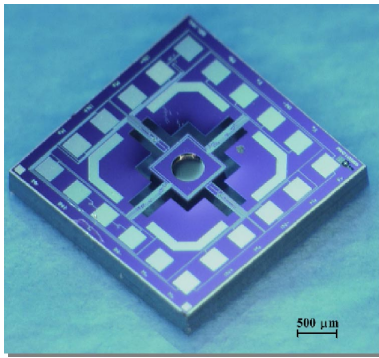


Fig.5: Micro 6-axis force/moment sensor



Fig.6: Soft-fingered Manipulation

ムが用いられる．これらのアルゴリズムは並列性が高いので，FPGA 上にアルゴリズムを実装し，リアルタイム性を達成する．平井らは，FPGA ベースビジョンシステムを開発している [2]．Fig. 4-(a) は，FPGA ビジョンシステムのプロトタイプである．Fig. 4-(b) に，リアルタイムでハフ変換を計算している様子を示す．ハフ変換は，画像処理における基本的な演算の一つであるが，計算量が多くリアルタイム計算は困難であった．FPGA ビジョン上に演算を実装することにより，リアルタイム計算が可能になった．今後は，CMOS イメージセンシングユニットと結合し，さらに高速のトラッキングを目指す．

触覚 触覚は，物体操作においてキーとなる感覚である．触覚センサを，柔らかい皮膚の中に埋め込むためには，皮膚の変形に対処するために，マイクロ化することが必須である．Dao らは，圧電抵抗を用いたマイクロ力/モーメントセンサを開発している [3]．Fig. 5 に，開発されたセンサを示す．センサの大きさは，3mm×3mm である．一方，井上らは，柔軟指による物体操作における触覚センシングに関する研究を進めている [4]．Fig. 6 に示すような，柔軟指による物体操作において，指と物体との接触力は，指先の柔軟材により分散され，結果として触覚センサに適した圧力分布

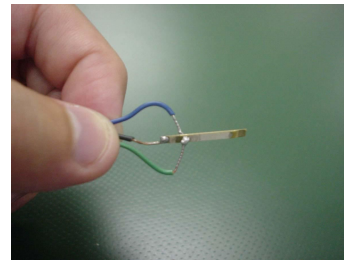


Fig.7: Micro odor sensor

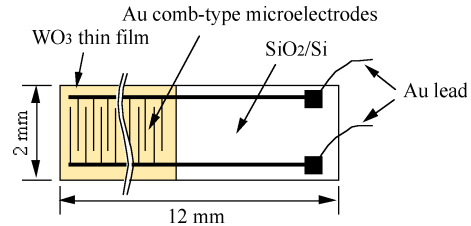


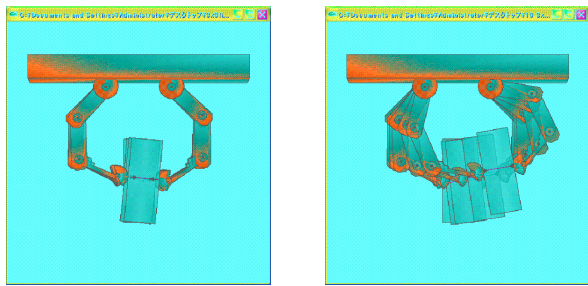
Fig.8: Micro NO₂ sensor

が得られる．すなわち，力学的な情報が力学的にプロセッシングされ，その後で触覚センサにより電子的な情報に変換される．このようなメカニズムは，近年急速に解明が進められており，柔軟指の力学モデルが確立されつつある．現在，柔軟指の特性に基づいた，触覚センシングに関する研究を進めている．

嗅覚 嗅覚センサは，化学的な反応を基にするという点で，新たな展開が期待できる．野方らは，マイクロ匂いセンサの研究を進めている．Fig. 7 に，その試作品を示す．センサは，マイクロビームと回路部から構成される．マイクロビームの先端には，匂い分子に選択的な化学物質が塗布されている．匂い分子が化学物質に付着すると，マイクロビームの固有振動数が変化するので，振動数の変化を回路部で検出することにより，匂いをセンシングすることができる．本センサは，匂い分子に対する選択性という化学的情報から固有振動数の変化という機械的情報への変換，さらには電気的な情報への変換を原理としている．玉置らは，NO₂ センサに関する研究を進めている．Au 電極上に WO₃ 薄膜を生成することにより，0.1ppm の NO₂ を検出することができる [5]．今後は，コンパクトなシステムチップとして実現することで，様々な匂いや気体を検出できる集積嗅覚チップを目指す．

3. アクションと制御

機械，電磁気，光，化学など様々な領域におけるアクションを実現するためには，様々



(a) desired angle -5° (b) desired angle 10°

Fig.9: Dynamic control of object posture

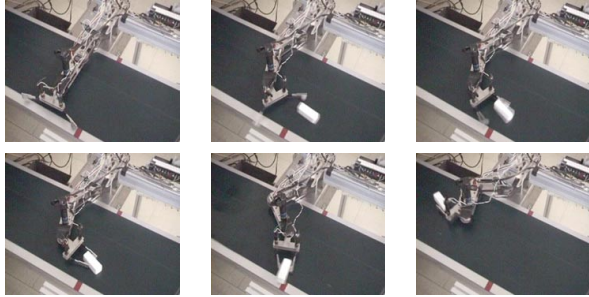


Fig.10: Dynamic grasping by soft fingers

な原理に基づくアクチュエータと、多変数のセンシングとアクションを結合する制御が必要である。アクションと制御に関する研究として、プログラムでは、センサフィードバックに基づく物体操作と分散マニピュレーションに関する研究を進めている。

センサフィードバックに基づく物体操作 人間の手による物体の把持と操作は、sensory-motor coordinationの典型的な例である。人間は、視覚と触覚によるセンシングと、手と指の運動制御を協調させて、物体を把持し操作する。有本らは、このような物体の把持と操作を、制御の観点から研究している。物体の姿勢センシングと受動性を用いた指制御により、対象物の形状や質量に関する事前情報を用いることなく、安定な把持と姿勢制御を実現することに成功している [6]。

Fig. 9に、把持力と姿勢の制御をシミュレーションした結果を示す。Fig. 10 に、把持力と姿勢を制御しながら、物体を操作する実験の結果を示す。物体の姿勢を制御できていることがわかる。現在は、レーザ距離計を用いて対象物の姿勢をセンシングしている。今後は、高速ビジョンと触覚センシングを導入し、視触覚サーボイングを実現する。Fig. 11に示すように、マイクロ化されたビジョンシステムと触覚センシングシステムを用いることによ

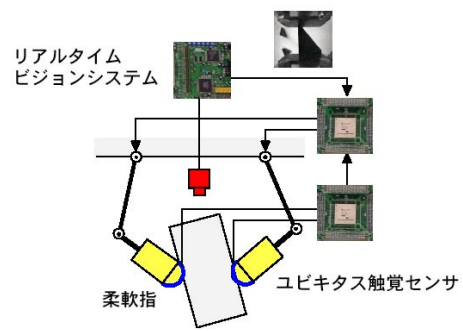
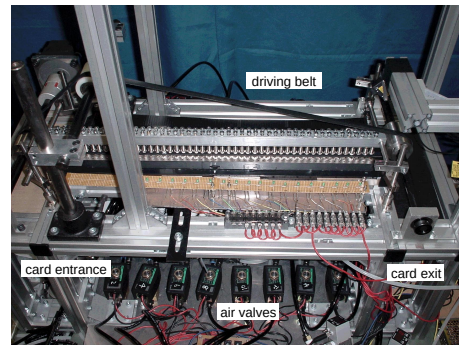
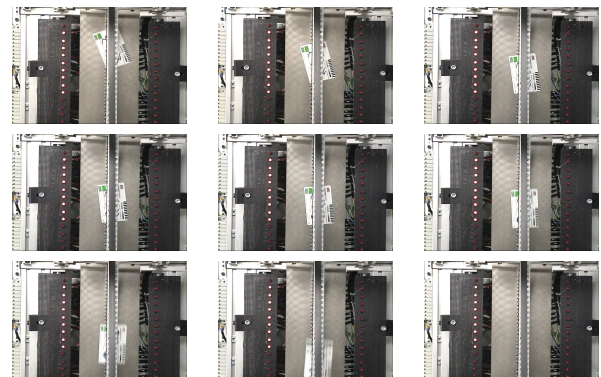


Fig.11: Smart handling



(a) prototype overview



(b) Skew control of misaligned card

Fig.12: Card handling by vacuum hole array

り、人間のように巧みな物体操作を目指す。

分散メカニズム MEMSにおけるファブリケーションでは、単一の複雑なメカニズムより、単純なメカニズムが多数並んだシステムが望ましい。したがって、マイクロシステムで物体運動を制御するときには、単純な運動を生成するデバイスを多数並べ、それらの協調運動を通して運動を制御する、分散メカニズム (distributed mechanism) の考え方が有効である。分散メカニズムの例として、平井らは、吸圧アレイを用いたシートの分離と姿勢制御を研究している [7]。Fig. 12-(a)に示すプロトタイプでは、吸圧アレイと駆動ベルトにより、シ

ートの運動を制御する。Fig. 12-(b)に、シートの姿勢制御の例を示す。ビジョンシステムでシートの姿勢を検出し、吸圧アレイの吸圧パターンを制御することにより、シートの整列を実現している。マイクロ技術による吸圧ホールと圧力制御弁の小型化により、吸圧アレイの密度を増し、精密な運動制御を実現することが、次の課題である。

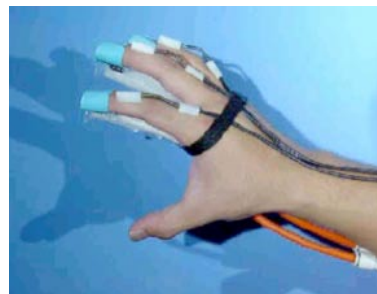
物体運動制御のみならず、MEMS技術により機械システムを実現するときには、分散メカニズムが有力な手法である。分散メカニズムが有効である一つの例が、触覚ディスプレイである。触覚ディスプレイにおいては、力や振動などの力学的刺激や温度刺激を、皮膚の表面に分布的に与える必要がある。田畑らは、SMAを用いて人の皮膚に分布的な力学的刺激を与えるデバイスを試作している。Fig. 13に示すように、力学的刺激、熱的刺激、電気的刺激を複合的に与え、様々な物理的な特性を提示することが、最終的な目標である。

柔らかいメカニズム 従来の硬い機械システムではなく、柔らかい機械システムを実現するためには、センサやアクチュエータを含むメカニズムと、知能・情報処理を司るエレクトロニクスの双方をマイクロ化し、柔らかいメカニズム内に分散させるアプローチが有望である。柔らかいメカニズム内に分散させることにより、メカニズムの変形に対応できる。川村らは、柔らかい機械システムの例として、ウェアラブルシステム (wearable systems) を開発している [8]。Fig. 14-(a)は、手に装着し、手に仮想的なインピーダンスを提示する、VRデバイスである。Fig. 14-(b)は、仮想的なスポーツを楽しむシステム、Fig. 14-(c)は、ジャンプ力を補助するデバイスである。

このようなシステムでは、人間の生理量をセンシングし、人間の状態を認識するとともに、力やインピーダンスを人間に作用させる。現在、Fig. 15に示す、可変インピーダンス要素の研究が進められている。Fig. 15-(a)に示すデバイスは一方向の曲げ剛性を、Fig. 15-(b)に示すデバイスは二方向の曲げ剛性を制御することができる。今後は、マイクロデバイスを導入することにより、高機能なウェアラブルシステムを構築する。

4. 知能情報システムの設計

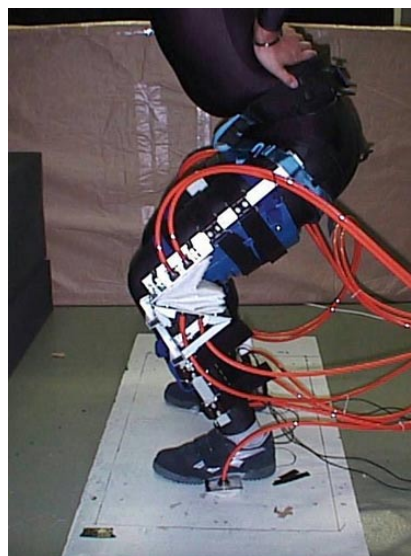
コンパクトな知能情報システムを実現するためには、システムとチップを設計する技術



(a) haptic display



(b) virtual boxing



(c) jump assist system

Fig.14: Wearable mechanical systems

が重要である。電子情報に加えて、機械、光、化学、バイオ等異なる領域の情報を扱う設計フローが必要である。さらに、異なる領域の研究者がシステムやチップのデザインに関わることを可能にすることが望まれる。

5. おわりに

本プログラムの課題の一つとして、電子、機械、光、化学、バイオなど異なる領域の情報を対象とする、コンパクトな知能情報システムに関する研究を進める。従来型のメカトロ

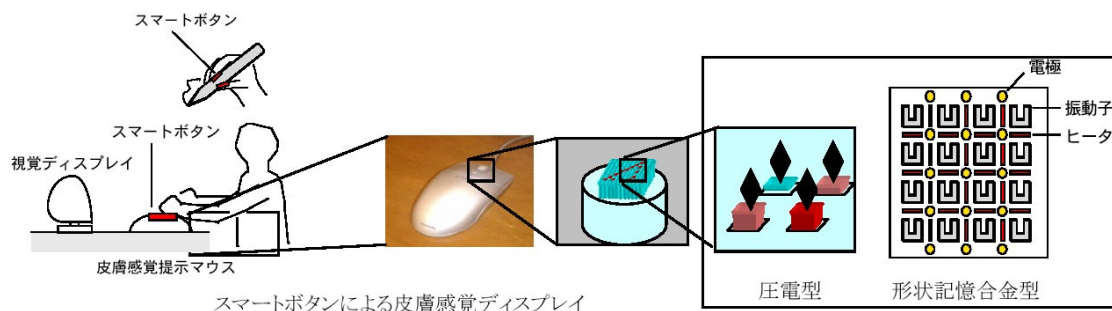


Fig.13: Smart haptic display

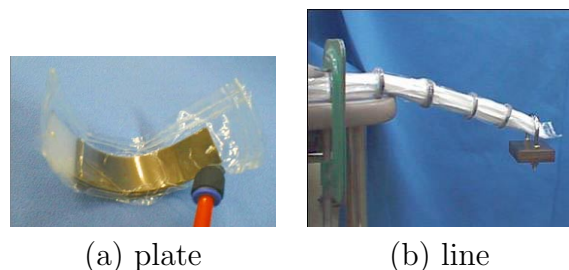


Fig.15: Variable impedance devices

ニクスでは対応できない，ウェアラブルシステムやバイオメトリクス，生体内システムなど，ユビキタス社会における新しい領域のメカトロニクスの創造に，本プログラムは貢献できると考えている。

【参考文献】

- 1) Ishii, A., Sugiyama, S., Sakai, J., Hirai, S., and Ochi, T., *Constant-magnification focusing using a varifocal mirror and its application to 3D imaging*, Optomechatronic Systems III, pp.238–245, Stuttgart, November, 2002.
- 2) Hirai, S., Zakouji, M., and Tsuboi, T., *Implementing Image Processing Algorithms on FPGA-based Realtime Vision System*, 11th Synthesis and System Integration of Mixed Information Technologies, SASIMI2003, pp.378–385, Hiroshima, April, 2003.
- 3) Dao, D. V, Toriyama, T, Wells, J., and Sugiyama, S., *Silicon Piezoresistive Six-Degree of Freedom Force-Moment Micro Sensor*, Sensors and Materials, MYU, Tokyo, Vol. 15, No. 3, pp.113–135, 2003.
- 4) Inoue, T. and Hirai, S., *Modeling of Soft Fingertip for Object Manipulation Using*
- Tactile Sensing*, IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, October, 2003.
- 5) Tamaki, J., Hayashi A., Yamamoto, Y., and Matsuoka, M., Proc. Euroensors XVI, pp.1107, 2002.
- 6) Arimoto, S., Tahara, K., Yamaguchi, M., Nguyen, P.T.A., and Han, H.-Y., *Principle of superposition for controlling pinch motions by means of robot fingers with soft tips*, Robotica, Vol. 19, pp.21-28, 2001.
- 7) Hirai, S., Ukai, M., Yamada, K., and Sugita, K., *Spreading and Isolating Multiple Stacked Cards Using Absorptive Hole Array*, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 2, pp.1445–1450, Washington D.C., May, 2002.
- 8) Kawamura, S., Yamamoto, T., Ishida, D., Ogata, T. Nakayama, Y., Tabata, Y., and Sugiyama, S., *Development of Passive Elements with Variable Mechanical Impedance for Wearable Robots*, Proc.of the IEEE Int. Conf on Robotics and Automation, 2002.