空気圧駆動型腕相撲ロボットシステムの開発*

山田 貴志^{*1}, 渡辺 富夫^{*2}Development of a Pneumatic Cylinders-Driven
Arm Wrestling Robot SystemTakashi YAMADA^{*3} and Tomio WATANABE^{*3} Faculty of Education, Kagawa University,
1-1 Saiwai-cho, Takamatsu-shi, Kagawa, 760-8522 Japan

In this study, we develop a pneumatic cylinders-driven arm wrestling robot system known as ForceRobot, which comprises a 5-DOF force display system with 4 pneumatic cylinders and a force sensor and a human-like head robot with stereo visual servo mechanism. The head robot can display facial expressions by using its eyes, eyelids, lips, and by changing its facial color. We use the system to analyze the movements of the arm during arm wrestling in which a human pushes against a quantitative load. On the basis of the measurement results, a force display response model that is based on the impact absorption features of the human hand is proposed. We introduce this model into our system and verify the effectiveness of the force display by means of behavioral analysis and sensory evaluation. The effectiveness of our system is evaluated from the viewpoints of enjoyment and user-friendliness by children.

Key Words: Human Interface, Interaction Robot, Arm Wrestling, Force Display, Pneumatic Cylinder

1. はじめに

腕相撲は手腕から対戦相手の筋力特性を把握し、身体全体の相互作用で行われている。また、ふれあいを重視した腕相撲では、表情・顔色・視線などの反応を見ながら、円滑なコミュニケーションが図られている。そこで著者らは、バーチャルヒューマンや腕相撲ロボットの開発を通して、表情・顔色による情感表示や力み動作を合成的に解析し、力覚を介しての人間と機械との円滑な身体的コミュニケーションや協調作業の支援システムを検討している⁽¹⁾。

一方、腕相撲ロボットに関する研究は精力的に行われている。そこでは、力覚提示を駆動するためのアクチュエータの選定に伴う機構設計や力の駆け引きを人間らしく振舞わせるための機械側からの力覚表現が重要になる。腕相撲ロボットを用いたシステムとして、竹田らは肩・肘の3自由度を有する空気圧ゴム人工筋を用いた上肢装着型の力覚提示システムを開発し、仮想人物との腕相撲対戦システムを構築している⁽²⁾。北山らは肘・手首の3自由度を有するDCモータと力覚センサを用いた2台の腕相撲ロボットを開発し、遠隔腕相撲システムを構築している⁽³⁾。橋本らは肩・肘・手

首の7自由度を有するDCモータとハーモニックドライブを用いた腕相撲ロボットを開発している⁽⁴⁾。しかしながら、従来より空気圧シリンダの圧縮性による柔らかさに着目し、力制御のための空気圧サーボシステムの構築やその制御性能の改善に関する方法は提案されているが⁽⁵⁾⁽⁶⁾、空気圧シリンダを組み込んだ腕相撲ロボットの機構設計や表情を有する視覚・力覚系の協調制御が可能な腕相撲システムの研究開発は少ない。

著者らはこれまでに、空気圧シリンダで駆動する力覚提示システムの動きに重畳合成したバーチャルヒューマンを投影させることで、対戦相手の存在感を与えるバーチャル腕相撲システムを開発した。本システムを用いて、定量的な力覚提示の下で強制的に循環動態を変動させたときの腕相撲対戦中の人間のノンバーバル情報や生体情報を解析・モデル化し、バーチャルヒューマンや力覚提示システムを用いた力覚コミュニケーション特性を合成的に解析するためのバーチャル腕相撲システムのコンセプトを提案して、生体情報計測評価から解析システムとしての有効性を示した⁽⁷⁾。また、本システムを用いた静的な負荷に伴う顔面皮膚温と顔色の動的変化の分析評価に基づいて、平均顔色画像を平行投射してテクスチャマッピングした3次元顔形状モデルに、色彩強調された動的顔色と表情の合成的解析を行い、顔色の効果を示した⁽⁸⁾。しかしながら、これまでに力覚提示システムにおける力の駆け引きを目的とした腕相撲対戦アルゴリズムに関する検討は行われていない。そのため、力の駆け引

* 原稿受付 2007 年 12 月 25 日。

^{*1} 正員、香川大学教育学部 (〒760-8522 高松市幸町 1-1)。^{*2} 正員、フェロー、岡山県立大学情報工学部 (〒719-1197 総社市窪木 111)。

科学技術振興機構戦略的創造研究推進事業。

E-mail: tyama@ed.kagawa-u.ac.jp

きによる力覚コミュニケーション特性を把握するための人間からの力に応じて反応できる力覚提示反応モデルをシステムに導入する必要がある。

本論文では、空気圧駆動型腕相撲ロボットシステムのプロトタイプを開発している。次に、本システムを用いた定量的な力覚提示の下での人間が力を押し返す腕相撲動作を分析評価し、機械側が不利な状況から有利な状況に人間の力を押し返す力覚提示駆動モデルとして、手腕の衝撃吸収に基づく力覚提示反応モデルを提案している。また、本モデルを腕相撲ロボットシステムに導入し、行動解析と官能検査に基づいて力覚提示駆動の有効性を示している。さらに、腕相撲ロボットシステムを公開展示して、児童を対象としたデモンストレーションを行い、官能検査に基づいて安全面を配慮した操作性と腕相撲の楽しさの観点から本システムの有効性を示している。

2. 腕相撲ロボット ForceRobot の開発

腕相撲ロボット (ForceRobot: フォースロボットと命名する) の機構を図1に、外観を図2に示す。ForceRobotは、大別して上肢部である力覚提示システムと、眼球部、頸部、表情表出部による情感表示を行う頭部の機構からなる。以下、各部について述べる。

Fig.2 External view of the ForceRobot.

2.1 上肢部 著者らはこれまでに、人間の肩・肘の5自由度を有する力覚提示システムを開発した。本研究では、ForceRobotの上肢部に力覚提示システムを用いる。力覚提示システムの各関節の可動範囲と最大トルク(エアコンプレッサからの最大供給圧力値: 6.5Kg/cm^2)の仕様を表1に示す。力覚提示システムは女子学生より比較的大きな駆動力と人間の肩・肘関節の動きに近い可動範囲を持っていることから、指でグリップを握りしめて、人間同士で腕相撲を行っているような状態で操作することができる。力覚提示システムの関

Fig.1 Outline of the ForceRobot.

Table 1 Maximum torque and movable range of each joint of force display system.

Joint	Range of movement	Maximum torque
JSH	Internal rotation	80°
	External rotation	20°
JSS	Flexion	90°
	Extension	45°
JSD	Abduction	90°
JE	Flexion	120°
	Extension	0°
JF	Pronation	0°
	Supination	90°

節が制御できる駆動源には、4本の空気圧シリンダを用い、1自由度の回転駆動を得るために圧力比例弁を2つ使用している。各関節にはロータリエンコーダが取り付けられており、関節角度の位置を制御している。また、手首を捻りながら人間が勝ちやすくするために、前腕の回外方向(JF軸)を回転機構にして、回転させるとバネの力で元の位置に戻るようになっている。力覚提示システムのグリップには、力覚提示の大きさや柔らかさを分析するための6軸力覚センサが取り付けられており、力覚を制御している。

2.2 眼球部 眼球部の機構を図3に示す。ForceRobotの眼球として、2台の1394CCDカメラ(DFW-VL500, SONY)が取り付けられている。眼球(CCDカメラ)の可動範囲を表2に示す。人間の眼球運動は水平運動(ヨー軸)、上下運動(ピッチ軸)、回旋運動(ロール軸)の3自由度を有する。ForceRobotは回旋運動を除いた2自由度を実現している。眼球の上下運動は減速機を含むDCサーボモータで牽引して、ベルト駆動方式で実現している。水平運動はRCサーボモータで直接駆動方式としている。また、1自由度の瞬きの開閉の動きを減速機を含むDCサーボモータで牽引して、ベルト駆動方式で実現している。

Fig.3 CCD camera control mechanism.

Table 2 Movable range of CCD camera.

Axis	Range of movement	
	Right	Left
JE1	Upper pitch	10°
	Lower pitch	30°
JE2	Right yaw	30°
	Left yaw	10°

2.3 頸部 頸部の可動範囲を表3に示す。頸部の動きは人間と同様の3自由度を有する。右旋・左旋は減速機を含むDCサーボモータで牽引したベルト駆動方式で実現している。屈曲・伸展と右屈・左屈は減速機を含むDCサーボモータで直接駆動方式としている。

Table 3 Movable range of cervical.

Axis	Range of movement
JC1	Flexion
	Extension
JC2	Left lateral bending
	Right lateral bending
JC3	Left rotation
	Right rotation

2.4 表情表出部 ForceRobotは、視線、瞬き、口の開閉、顔色による情感表示が可能となっている。口の開閉は、RCサーボモータを用いて、1自由度の直接駆動方式で実現している。また、2つの表示灯(IB-3105N, 東芝ライテック)を取り付け、赤みを帯びる顔色の表出が可能である。ForceRobotの視線、瞬き、口の開閉、顔色、首の動きによる表情表出を図4に示す。

Fig.4 Facial expressions of the ForceRobot.

2.5 システムの概略 腕相模ロボットシステムの構成を図5に示す。本システムは、イーサネットで接続された2台のパーソナルコンピュータ(以下、PC)で構成され、CCDカメラで取得された画像を処理する視覚系と力覚提示、表情表出、視線を駆動する機械制御系

Fig.5 System configuration.

の処理システムからなる。視覚系では、2台の CCD カメラ、動画キャプチャ機能を有する画像処理装置からなる。2台の CCD カメラでキャプチャされた 640×480 の動画像を2画面表示させ、30fpsの動作を確認している。機械制御系では、力覚提示を駆動するための空気圧シリンダ、圧力比例弁、ロータリエンコーダ、力覚センサと眼球、頸、表情表出を駆動するための DC サーボモータ、RC サーボモータ、電球からなる。空気圧シリンダは、PC からの I/O 信号が DA 変換器により DC 電圧に変換され、その電圧値で圧力比例弁を調整することで、空気圧を制御している。圧力比例弁の空気圧は AD 変換器を介して PC に入力され確認できる。眼球、瞬きによる表情表出や頸の位置を制御する DC サーボモータは、PC からのシリアル通信で接続された PIC マイコンに角度指令が送られ、モータドライバを介して PD 制御をしている。DC サーボモータのエンコーダ信号は PIC マイコンを介して PC に入力され確認できる。RC サーボモータも同様に、PIC マイコンに角度指令が送られ、PIC マイコンからのパルス周期に対応した眼球や口の開閉の位置の制御が行われる。顔色を表出させる表示灯の内部には、5W の電球が内蔵されており、PC からの I/O 信号が DA 変換器の DC 電圧に変換され、その電圧値で明るさを調節している。本研究では、眼球部、頸部、表情表出部を手動制御し、2台の CCD カメラでキャプチャされた動画像に基づいて、操作者の顔情報や腕相撲動作を PC のモニタ上で目視し、頭部動作を確認している。ForceRobot を実際に操作している様子を図 6 に示す。

3. 力覚提示把持動作の分析

3.1 実験方法 本研究では、人間からの力に応じて

Fig.6 Arm wrestling by using the ForceRobot.

機械側から力押し返すタイミングを検討するために、ForceRobot の肩の回旋 (JSH 軸) の動きを利用して、定量的な運動負荷の提示下での人間が有利な状況に力を押し返す場合の力覚提示の時系列変化を計測する。ForceRobot を用いた計測装置の概略を図 7 に示す。実際の腕相撲では、手首の強さが腕相撲の強さに大きな影響を及ぼすことが考えられる。本研究では、プロトタイプシステムの機構を考慮し、人間の肩の回旋の運動により機械側で吸収される特性を調べるために、被験者の右手首をボーリングで使用する皮製のプロテクトで固定した。力覚提示駆動は、肩の回旋を対象とし、他軸の制御に関しては、中立させるために適切な圧力を予備実験で得て、関節の動きを静止位置で維持させた。実験手順として、被験者の筋力特性に合った運動負荷を調節するために、被験者と ForceRobot が腕相撲をしているような状態で、手動制御で空気圧を徐々に上昇させ、あらかじめ被験者の肩の内旋 (JSH 軸) の筋力と拮抗できるまでの負荷量を実験を開始する前に計測した。この拮抗状態を被験者の最大許容負荷量とした。次に、ForceRobot の関節位置の自動制御によりグ

Fig.7 Setup of the measurement.

リップを把持させた後に、被験者に最大許容負荷量70%の運動負荷を加えた。被験者の上肢は、肘関節を直角に保持し、静止させた。この運動負荷の下でForceRobotのグリップを把持している状態を肩の内旋(JSH軸)の初期位置0度とした。そして、被験者への実験開始の合図として、コンピュータのピープ音を鳴らし、力を押し返す腕相撲動作を行わせた。本実験では、-10度以下の微小変位とそれ以上押し返す動作を意識的に行わせた。また、実験を行う前に10回以上の練習を実施させた。被験者は女子学生5名(21~23歳)である。

3.2 実験結果 被験者に最大許容負荷量70%を提示し、ForceRobotが押し返された肩の回旋(JSH軸)、角速度、角加速度、力覚提示の時系列変化の一例を図8に示す。肩の回旋の時系列変化の数値微分により、角速度、角加速度の時系列変化を求めている。ForceRobotの肩の回旋が負の方向に変位し、不利な状況が示されている。また、角速度の変化から肩の内旋・外旋の動く方向と、角加速度の変化からどちらの方向にどれくらいの勢いで動いているかがわかる。被験者に最大許容負荷量70%を提示して、ForceRobotが押し返された場合の角速度の変化は、顕著に現れる1箇所の極大値を持ち、負の速度ピーク地点を頂点とした急斜面の三角形の波形が示されている。10度以上の変位で押し返された場合は、角速度が減少するまでに時間が長くなっている。角加速度の変化は、顕著に現れる極大値と極小値が見られる。力覚提示の変化は、人間からの力による衝撃力のピーク値を持つ手腕の衝撃吸収の波形が示されている⁹⁾。これにより、ForceRobotの手腕に生じる衝撃力を数値的に把握できる。他の被験者4名においても、同様の傾向が見られた。

3.3 力覚提示反応モデル 本研究では、図8(d)で示された意識的な人間からの力に応じたForceRobot側の肩の回旋による衝撃吸収特性の時間波形を予測して、機械側から力覚提示駆動を行うために、負の角速度における力覚センサのデータ $d(n)$ の積分から力積 $S(n)$ を求めて、ある一定の閾値を超えたら、人間の力を押し

(a) Rotation of the ForceRobot movement.

(b) Velocity of the ForceRobot movement.

(c) Acceleration of the ForceRobot movement.

(d) Force display of the ForceRobot movement.

Fig.8 Transition of human movement and force display under 70% of maximum load.

返すことを試みる。ここでは、式(1)に示す手腕の衝撃吸収の波形に基づく力覚提示反応モデルを提案し、ForceRobotに導入する。

$$S(n)=d(n)-d(n-20) \quad (1)$$

力覚提示反応モデルは、負の角速度の変化に基づいて、ForceRobot側の肩の回旋が外旋方向にあると認識させた瞬間から力覚センサのデータの変化量を求める。そして、その変化量がある閾値に達した時点で、機械側から力覚提示を駆動するものである。本研究においては、ForceRobot側の肩の回旋の角速度が正になり、肩の回旋が内旋方向にあると認識させた時点で、初期状態の負荷量に戻した。力積に基づく力覚提示反応の開始から終了までをON、それ以外をOFFとする力覚提示のON-OFF駆動を行っている。ただし、力覚提示が駆動されている時間の力積は零とし、閾値の選定と最大許容負荷量は実験により決定している。

4. 力覚提示反応モデルの評価実験

4.1 実験方法 本実験では、力覚提示反応モデルをForceRobotに導入し、官能検査による力覚提示反応モデルの評価を行った。その実験方法として、力覚提示が駆動される閾値のタイミングを変えたモデルⅠとモデルⅡの2つの力覚提示反応モデルをForceRobotに導入し、モデルⅠを基準にして、モデルⅡのアンケートによる5段階の官能検査を行った。ここでは、モデルⅠの力覚提示駆動の閾値を基準とし、モデルⅡはモデルⅠの2倍の力積データによる加算の閾値で、力覚提示駆動が行われる。力覚提示の強さは、閾値に達した時点で最大許容負荷量70%(ON状態)とし、初期状態を最大許容負荷量40%(OFF状態)とした。サンプリング周波数は40Hzである。被験者は女子学生10名(19~25歳)である。

4.2 実験結果 最大許容負荷量70%で力覚提示反応モデルをON-OFF駆動させたときのForceRobotの肩の回旋(JSH軸)、角速度、力覚提示、力覚提示反応モデルのON-OFF駆動の状況の時系列変化の一例を図9に示す。実験開始直後から2秒後にかけて、人間からの力に応じてForceRobotの肩の回旋が負の方向に変位し、機械側は不利な状況下にある。このとき、負の角速度の変化における力覚センサのデータの変化量が閾値に達し、0.36秒後から力覚提示反応モデルがONされている。そして、1.6秒後にForceRobotの肩の回旋が正の方向に変位し、機械側の有利な状況に押し返され、力覚提示反応モデルがOFFされていることがわかる。力覚提示反応モデルは、人間からの力の増加に応じて力覚提示を駆動させ、押し返される力覚提示の継続時

Fig.9 Transition of the ForceRobot movement by using the force display response model.

間を意識的に調節することが可能である。なお、被験者全員の操作力から人間からの力の増加に応じて的確に押し返す反応行動である力覚提示反応モデルのON-OFF駆動を確認した。力覚提示反応モデルの閾値の選定に伴う力感覚の官能検査の結果を図10に示す。モデルⅡはモデルⅠと比較して、10名中7名が「とてもやわらかい」、3名が「やわらかい」と回答し、被験者全員が肯定的に評価した。本システムを用いて、力覚提示反応モデルの閾値のパラメータを制御し、空気圧シリンダの圧縮空気を利用した力感覚の知覚実験に有効であることがわかる。力のやりとりによる人間と機械が相互に協調し、誰にとっても扱いやすい親和性の高いシステムには、安全性と柔軟性が重要になる。これにより、本システムは操作者の筋力に合わせた機械の柔軟性を調節することも可能である。

Fig.10 Sensory evaluation of force sense.

5. システムの評価実験

5.1 実験方法 2006年10月に香川大学教育学部主催「未来からの留学生」において、香川県内の児童を対象

にForceRobotのデモンストレーションを行い、官能検査によるシステムの評価実験を行った。本実験では、ForceRobotの可動範囲と必要以上の無理な力覚提示や恐怖感を児童に与えないように、力覚提示反応モデルを導入したForceRobotの操作性に関するシステムの評価を目的とした。被験者は小学1年生から6年生までの57名である。官能検査の協力を求めた児童の学年の内訳を図11に示す。

Fig.11 Distribution of subjects.

実験手順として、まず児童が実験を開始する前に、空気圧を与えていない状態でForceRobotを操作させ、可動範囲の説明と確認を行った。低学年の児童に関しては、保護者に寄り添わせ、保護者と一緒に目視による安全面を再確認した。次に、児童の最大許容負荷量を考慮して、閾値と力覚提示の強さを試行錯誤的に設定した力覚提示反応モデルをあらかじめForceRobotに導入し、3種類の力覚提示の強さが違うモデルを提示した。本実験では、ForceRobotの動作をスタートさせる大学生が児童の筋力特性を目視で判断し、力覚提示が弱いモデルから1回ずつ順番に計3回のForceRobotを操作させた。各モデルの力覚提示の強さと閾値は一定である。頭部の動きは、上肢の動きに関係付けて、試行錯誤的に自動制御した。さらに、操作終了後、アンケートによる5段階の官能検査を行った。官能検査による設問は、ForceRobotとの腕相撲対戦について、「操作はやさしい-難しい」、「腕相撲は楽しい-楽しくない」の2項目と自由記述で評価させた。

5.2 実験結果 システムの評価に関する官能検査の結果を図12に示す。操作性に関する項目では、57名中40名が「やさしい」と回答した。児童への力覚提示は比較的弱いもので、あっさり勝負がついて腕相撲が終了する場面も見られたが、機械側からの力覚提示駆動を体感しようと児童が意識的に操作力を調節している様子が観察された。また、「むずかしい」と回答した残りの17名中12名は、小学3年生以下で、身長の高さや筋力による影響が考えられる。低学年の児童においては、疲労に伴い両手でForceRobotのグリップを操作したり、児童の前にある机の脚に自分の足をかけて踏ん

(a) Easy - Difficult

(b) Pleasant - Not pleasant

Fig.12 Sensory evaluation of the system.

張る様子も見られた。児童の行動から、腕相撲における力み動作は上肢だけでなく、足腰を利用して巧みに行われていることがわかる。腕相撲ロボットを操作し、怪我をする原因の一つとして、人間が力みを緩めたときに無理な力が関節に提示されることが考えられる。本システムでは、空気圧シリンダの圧縮空気を利用して、ForceRobotの関節に柔軟性を持たせる工夫を施している。また、力覚提示反応モデルを導入し、児童の意識的な力に応じて機械側からの力覚提示が行われるので、安全面に配慮している。腕相撲の楽しさに関する項目では、57名中51名が「楽しい」と回答し、児童に高く評価された。2項いずれも、「どちらでもない」という児童からの回答はなく、明確に意見が分かれた。自由記述欄からも、「ロボットに勝って、気持ちよかった」「ロボットが意外と強かった」「ロボットの力が変わるのが不思議」など、肯定的なコメントがあった。人間同士の競技としての腕相撲は力の駆け引きの戦略を持って行われている。一方、筋力が明らかに違う親子間の腕相撲では、子どもの力を保護者が受け止め押し返すことで、子どもは安心感を得ている。本研究では、空気圧シリンダを組み込んだ腕相撲ロボットの機構設計と的確に機械側から押し返す力覚提示反応モデルを用いて、比較的弱い筋力の児童に対し、恐怖心を抱かせない安全面を配慮した操作性と腕相撲の楽しさの観点からプロトタイプシステムの有効性を官能検査で示した。また、ForceRobotは、力のやりとりに応じて表情表出や頭部動作が可能なロボットシステムであることから、児童が気合を入れるための掛け声や

ForceRobot に話しかける場面も見られ、情感表示の有効性が示唆された。

6. おわりに

本論文では、空気圧駆動型腕相撲ロボットシステムのプロトタイプを開発した。次に、本システムを用いて、力覚提示把持動作を分析評価し、手腕の衝撃吸収に基づく力覚提示反応モデルを提案した。また、本モデルを腕相撲ロボットシステムに導入し、行動解析と官能検査に基づいて人間からの力に応じて押し返す反応行動の有効性を示した。さらに、腕相撲ロボットシステムを公開展示し、児童を対象としたデモンストレーションを行い、官能検査に基づいて安全面を配慮した操作性と腕相撲の楽しさの観点から本システムの有効性を示した。空気圧駆動型腕相撲ロボットシステムは、表情を有する視覚・力覚系の協調制御が可能な腕相撲システムである。本研究では、力覚提示反応モデルの閾値のパラメータで押し返すタイミングを制御し、リンク機構を利用した角度情報と力覚情報から操作者の反応行動を分析評価できるシステムとして有効であることを示した。

今後の課題として、腕相撲の動きを表現する場合の力の駆け引きの戦略や腕相撲らしさを与える要素の評価を行うために、本システムを用いて人間の心理的・生理的な反応から分析評価する。また、ForceRobot の遠隔操作により人間同士があたかも腕相撲をしているような状況を作り出すマスタースレーブ型遠隔腕相撲インタラクションロボットシステムを開発し⁽¹⁰⁾、空気圧シリンダで駆動する関節の位置および力制御モデルの構築や⁽¹¹⁾、腕相撲における視線や各関節の動きの協調作業を合成的に解析する予定である。

なお、本研究は、科学技術振興機構(JST)の戦略的創造研究推進事業(CREST)研究領域「デジタルメディア作品の制作を支援する基盤技術」における「人を引き込む身体性メディア場の生成・制御技術」プロジェクトによるものである。

文 献

- (1) Yamada, T. and Watanabe, T. : Dynamic Analysis of Facial Color by Using the Force Feedback System for Virtual Arm Wrestling, *Proc. of IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.765-770 (2003).
- (2) Takeda, T. and Kamohara, S. : Construction of VR System to the Arm Wrestling with Virtual Person, *Transactions of the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers.A*, Vol.J79-A, No.2, pp.489-497 (1996).
- (3) Kitami, S., Yamamoto, N., Kano, K. and Tsutsumi, K. : Design and Prototype of a Remote Arm-Wrestling System, *Proc. of JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, pp.22 (2002).
- (4) Hashimoto, M., Hattori, T., Horiuchi, M. and Kamata, T. : Development of a Torque Sensing Robot Arm for Interactive Communication, *Proc. of the 11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, pp.344-349 (2002).
- (5) Yamafuji, K., Kobayashi, Y. : Position and Force Control of a Pneumatic Cylinder for Z Axis Actuator of a Robot for Assembly, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.53, No.11, pp.1740-1745 (1987).
- (6) Noritsugu, T., Wada, T., and Yanosaka, M. : Adaptive Control of a Pneumatic Servo System, *Transactions of the Society of Instrumental Control Engineering*, Vol.24, No.11, pp.1187-1194 (1988).
- (7) Yamada, T. and Watanabe, T. : Development of a Virtual Arm Wrestling System for Force Display Communication Analysis, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers.C*, Vol.72, No.721, pp.2972-2989 (2006).
- (8) Yamada, T. and Watanabe, T. : Analysis and Synthesis of Facial Color for Facial Image Synthesis in a Virtual Arm Wrestling System, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers.C*, Vol.70, No.635, pp.139-146 (2004).
- (9) Ikeura, R., Fujii, Y. and Inooka, H. : Impact Absorption Characteristics of Human Arm, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers.C*, Vol.60, No.580, pp.4123-4129 (1994).
- (10) Yamada, T. and Watanabe, T. : Development of a Remote Arm Wrestling Interaction Robot System, *Proc. of JSME Annual Meeting*, Vol.4, pp.353-354 (2005).
- (11) Noritsugu, T., Wada, T. and Asanoma, T. : Impedance Control of a Pneumatic Servo System with Adaptive Control Method, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol.26, No.12, pp.1414-1420 (1990).