

バーチャル腕相撲システムのための 力覚の動的分析ツールの開発

松 本 慎 平*・山 田 貴 志**

Development of Dynamic Analysis Tool of Force Display for Virtual Arm Wrestling System

Shinpei Matsumoto* and Takashi Yamada**

Abstract

We have developed an arm wrestling system with virtual human for the affect display of facial color and expression, and for the application to training and rehabilitation support. In this paper, for the battle algorithm of virtual arm wrestling, we develop a dynamic analysis tool of force display of human arm wrestling. By using the tool, we examine the transition of human movement and force display of human arm wrestling.

Keywords : Virtual arm wrestling, Force display, Analysis, Human movement

1. はじめに

著者らはこれまでに、仮想世界とヒトの力覚のやりとりに対し、単純かつ顕著な例として、顔表情と顔色変動を伴うバーチャルヒューマンとの腕相撲システムのプロトタイプを開発している^{[1]-[3]}。これは、単調な動作が繰り返され、持続的な訓練に苦痛を伴うトレーニングやリハビリテーションに訓練意欲を刺激するようなシステムである。しかしながら、現段階において、本システムはバーチャルヒューマンとの腕相撲の対戦アルゴリズムが実装されておらず、実際にヒトと腕相撲を行っているような微妙な力の駆け引きや拮抗状態が得られていない。一方、先行研究において、コンピュータ上で戦略を学習しながらバーチャルヒューマンと腕相撲を行う対戦アルゴリズムの検討がなされている^{[4]-[5]}。

そこで本論文では、バーチャル腕相撲システムに対して、あたかも実際のヒトと腕相撲を行っているような対戦アルゴリズムの実装を目指して、腕相撲対戦中の実際のヒトの関節の動きや力覚提示を動的に分析するためのツールを開発している。本ツールは、被験者の肩・肘・手首に取り付けた磁気センサの位置情報と手のひらに挟まれたロードセルの力覚情報を逐次計算機内に取り込み、OpenGLを用いた仮想環境下において、腕相撲対戦中のヒトの動作がリアルタイムに再現できる^{[7]-[10]}。また、本ツールを用いることによって、ヒトの関節の動きや力覚

提示の時系列変化を分析評価できる。

2. バーチャル腕相撲システム

2.1 研究のコンセプト

本研究は、バーチャル腕相撲システムに対して、ただ勝負に勝つことを目的とするだけではなく、“ヒトらしさ”をバーチャルヒューマンに与え、微妙な力の駆け引きや拮抗状態を行わせるための対戦アルゴリズムの開発を目的としている。図1に示すように、被験者から腕相撲対戦中、被験者の生理・生体情報（皮膚温・顔色・呼吸・心拍・血圧・発汗など）が逐次コンピュータに入力

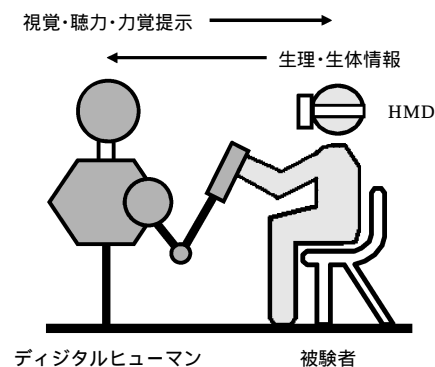


図1 本研究のコンセプト
Fig. 1 Concept of this research.

される。この入力情報から、コンピュータは被験者の興奮、疲労、達成度を推定する。以上によって、コンピュータからの出力として被験者の筋力特性に見合ったトルクが発生し、ヒトの力覚提示が再現される。

2.2 システム構成

本システムは、力覚ディスプレイの各関節と連動した動作が可能なバーチャルヒューマンを仮想環境下において表示して、力覚提示に伴う興奮や疲労といった顔色による情動提示が可能なものである。仮想環境下では、視覚、聴覚、力覚の提示が行われる。具体的には、視覚系では、CGを制御するPC、HMD(i-visior, Personal Display System)、空間位置センサ(FASTRAK, POLHEMUS)からなる。仮想世界を構築するためのソフトウェアとして、Omega Space(ソリッドレイ研究所)を用いている。HMDには左右2つのCCDカメラが取り付けられ、実写画像の立体視が可能で、実写画像とCGがクロマキー処理により合成された映像が映し出されている。また、HMDには空間位置センサが取り付けられており、



図2 バーチャル腕相撲システムの外観
Fig. 2 Overview of virtual arm wrestling system.



図3 バーチャルヒューマン
Fig. 3 Virtual human.

被験者の頭(視点)の位置・姿勢を計測している。聴覚系では、MIDI インタフェース、サンブラ、3次元立体音場を生成するためのRSS-10、スピーカから効果音が再生される。力覚系では、力覚ディスプレイの各関節を制御する駆動源として、4本のエアシリンダ(SMC)を用い、人の肩・肘関節の動きの4自由度を有した力覚ディスプレイから構成されている、1自由度の回転駆動を得るために圧力比例弁(ITV3051-312BL, SMC)を2つ使用し、各関節にはロータリエンコーダが取り付けられており、関節角度の位置の制御も可能である。システムを実際に使用している様子を図2に示す。HMDに映し出されるバーチャルヒューマンの様子を図3に示す。

3. ヒトの腕相撲対戦中の力覚の分析

3.1 計測方法

腕相撲対戦中の実際のヒトの関節の動きを計測するために、被験者の肩・肘・手首の関節に磁気センサ(FASTRAK, POLHEMUS)を取り付け、ヒト対ヒトによる対戦を繰り返し行い位置情報を計測した。同時に、手のひらの間にロードセル(LM-20KA, 共和電業)をはさんで、力覚提示の時系列変化を計測している。被験者は力が拮抗している男子学生10名(18~20歳)で、サンプリング周波数20[Hz]である。

被験者の肩・肘・手首の関節に取り付けた磁気センサの位置と関節角の関係を図4に示す。ここでは特に、腕相撲対戦中の関節の動きが顕著に現れる肘の屈曲・伸展($\theta_e(t)$)と肩の内旋・外旋($\theta_s(t)$)に注目し計測を行った。

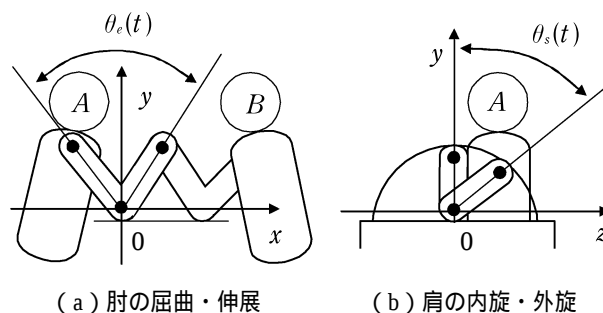


図4 磁気センサの位置と関節角の関係

Fig. 4 Relation between spatial position of magnetic sensor and joint angle.

3.2 計測情報の変換手順

磁気センサの絶対座標から分析対象の角度情報への変換手順を以下に示す。絶対座標は図5に示すように与えられる。サンプリング間隔毎に、腕相撲の状況を磁気センサより取り込む。時間 t における肩 $\alpha(t)$ 、肘 $\beta(t)$ 、手首 $\gamma(t)$ の座標を $(\alpha_x(t), \alpha_y(t), \alpha_z(t))$, $(\beta_x(t), \beta_y(t), \beta_z(t))$, $(\gamma_x(t), \gamma_y(t), \gamma_z(t))$ とする。ここで t は離散的に発展するパラメータである。また肩・肘($p(t)$)、肘・手首

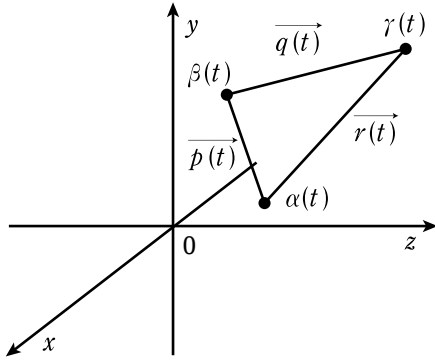


図5 絶対座標による磁気センサの値

Fig. 5 Value of magnetic sensor by absolute coordinate.

$(\vec{q}(t))$, 手首 - 肩 $(\vec{r}(t))$ のベクトルを求め, 各成分を算出し, $(p_x(t), p_y(t), p_z(t))$, $(q_x(t), q_y(t), q_z(t))$, $(r_x(t), r_y(t), r_z(t))$ とする。

まず, 平行移動により肘 $\beta(t)$ を原点 $o(0, 0, 0)$ に置き換える。原点を中心にした各関節の座標を $\alpha(t)$, $\beta'(t)$, $\gamma'(t)$, ベクトルを $\vec{p}'(t)$, $\vec{q}'(t)$, $\vec{r}'(t)$ として変換する。変換は式 (1) に従う。

$$\begin{bmatrix} d'_x(t) \\ d'_y(t) \\ d'_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -\beta_x(t) \\ 0 & 1 & 0 & -\beta_y(t) \\ 0 & 0 & 1 & -\beta_z(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_x(t) \\ d_y(t) \\ d_z(t) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

また同時に被験者の腕に対応する $\vec{p}'(t)$, $\vec{q}'(t)$ を単位ベクトルとして大きさを一定にする。そのままの計測情報では時間毎に腕の長さに若干のズレが生じるので (磁気センサの取り付け位置によって生じる誤差である), 式 (1) の変換と同時に各ベクトルを単位ベクトルとして大きさを一定にする。これにより分析対象の情報の精度や描画に対しての整合性を高めることができる。変換は式 (2) に従う。変換後の座標は, $\alpha''(t)$, $\beta''(t)$, $\gamma''(t)$, ベクトルは $\vec{p}''(t)$, $\vec{q}''(t)$, $\vec{r}''(t)$ とする。変換後の各座標を図6に示す。

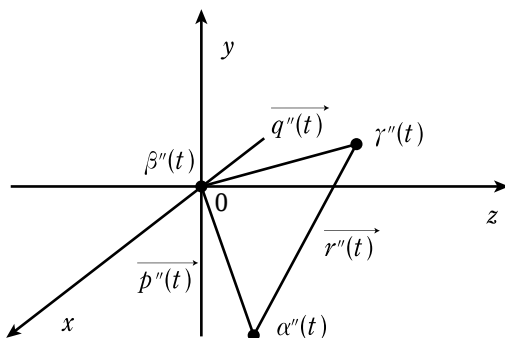


図6 変換後の座標

Fig. 6 Coordinates after the conversion.

$$\begin{bmatrix} d''_x(t) \\ d''_y(t) \\ d''_z(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/|\vec{d}'(t)| & 0 & 0 \\ 0 & 1/|\vec{d}'(t)| & 0 \\ 0 & 0 & 1/|\vec{d}'(t)| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d'_x(t) \\ d'_y(t) \\ d'_z(t) \end{bmatrix} \quad (2)$$

これより, 変換した座標に回転変換を加える。これは, 実験において機器の設定環境が異なった場合でも, 磁気センサより得た情報を一定の基準に従った値に変換する操作である。この操作によって, 肩の回旋における勝ち方向, 負け方向の判定をコンピュータ上で行うことができる。ここで, 通常腕相撲では, 肘は原則的に動かさないものと考えられるので, 本研究ではセンサより取得された被験者の肩・肘は動かないものと仮定し, もし計測の結果より動いたと判定された場合は, 実際に動いた分の誤差を手首の運動に付加するように回転変換を考慮する。

回転変換に対して, 我々は3つの条件を考慮した。

- (1) 初期状態において, 肩, 肘, 手首は xy 平面に位置する。
- (2) y 軸を仮想空間の高さに設定する。
- (3) 優勢, 劣勢は, z 軸の値で判定する。

時間 t において, 回転角を導くために $\alpha''(t)$, $\beta''(t)$, $\gamma''(1)$ を用いる。

$$\begin{bmatrix} d''_x(t') \\ d''_y(t') \\ d''_z(t') \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} d''_x(t) \\ d''_y(t) \\ d''_z(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで, R はアフィン変換による回転演算子である。 R は

$$R = R_{z2} \cdot R_x \cdot R_{z1} \cdot R_y \quad (4)$$

$$R_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_x(t) & -\sin \theta_x(t) \\ 0 & \sin \theta_x(t) & \cos \theta_x(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$R_y = \begin{bmatrix} \cos \theta_y(t) & 0 & \sin \theta_y(t) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_y(t) & 0 & \cos \theta_y(t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$R_{zi} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{zi}(t) & -\sin \theta_{zi}(t) & 0 \\ \sin \theta_{zi}(t) & \cos \theta_{zi}(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

x , y , z 軸を中心とした回転により構成される。

まず, $\alpha''_z(t) = \gamma''_z(1)$ とする回転角 $\theta_y(t)$ を算出する。図7(a)視点から見た回転の様子を図8(a)に示す。この回転角 $\theta_y(t)$ は, $\theta_x(t)$ の回転を行った後に, 初期状態の肩・肘・手首を x 軸上に配置するためのものである。

次に, $\alpha''_y(t) = \gamma''_y(1) > 0$ とする $\theta_{z1}(t)$ を決定する。この回転角は, $\theta_x(t)$ の回転後, $\vec{r}''(t)$ と x 軸とを平行にす

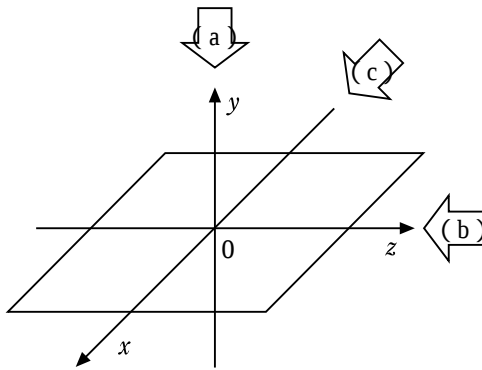


図7 仮想空間
Fig. 7 Virtual space .

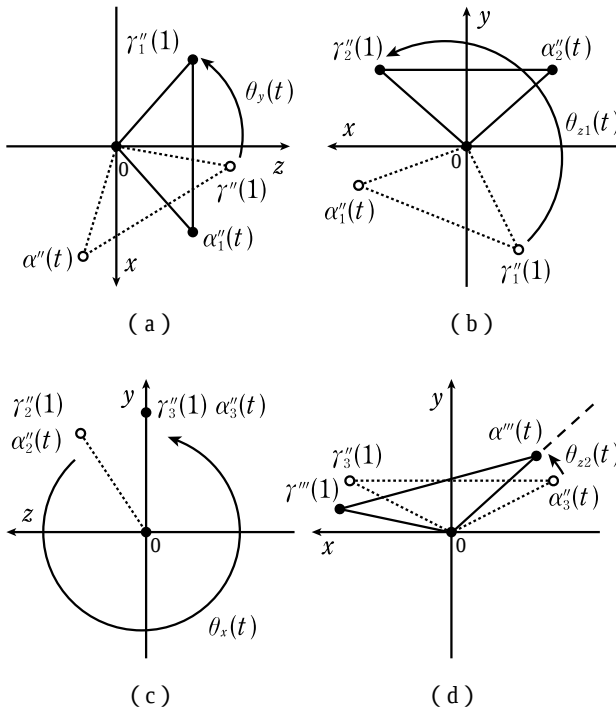


図8 座標の回転変換
Fig. 8 Rotation conversion of coordinates.

るためのものである。図7 (b) 視点から見た回転の様子を図8 (b) に示す。

同様に、 $\alpha_z''(t) = \gamma_z''(1) = 0$ とする回転角 $\theta_z(t)$ を決定する。この回転角は、実際の腕相撲と同様に、手首を初期位置において高さに対して垂直にすることによって、肩の回旋の優劣を判定するための変換である。図7 (c) 視点から見た回転の様子を図8 (c) に示す。

最後に、 $\gamma'''(1) = (\sqrt{2}/2, \sqrt{2}/2, 0)$ とする回転 $\theta_{z2}(t)$ を施す。この回転により、仮想空間の肩の位置は固定される。図7 (b) 視点から見た回転の様子を図8 (d) に示す。

以上の変換に従うことにより、肘の屈曲・伸展 ($\theta_e(t)$)、肩の内旋・外旋 ($\theta_s(t)$) の関節角が、次式により得られる。

$$\theta_e(t) = \cos^{-1} \left(\frac{|\vec{p}''(t)|^2 + |\vec{q}''(t)|^2 - |\vec{r}''(t)|^2}{2|\vec{p}''(t)||\vec{q}''(t)|} \right) \quad (8)$$

$$\theta_s(t) = \cos^{-1} \left(\frac{\gamma_y'''(1)\gamma_y'''(t) + \gamma_z'''(1)\gamma_z'''(t)}{\sqrt{\gamma_y'''(1)^2 + \gamma_z'''(1)^2} \sqrt{\gamma_y'''(t)^2 + \gamma_z'''(t)^2}} \right)$$

$$\theta_s(t) = \begin{cases} +\theta_s(t) & \text{if } \gamma_z'''(t) > 0 \\ 0 & \text{if } \gamma_z'''(t) = 0 \\ -\theta_s(t) & \text{if } \gamma_z'''(t) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

同時に、得られた $\theta_e(t)$ 、 $\theta_s(t)$ をサンプリング間隔で微分することによって、関節角の角速度、手の圧力の変化量を導き出す。

$$\begin{aligned} \Delta\theta_e(t) &= \theta_e(t) - \theta_e(t-1) \\ \Delta\theta_s(t) &= \theta_s(t) - \theta_s(t-1) \\ \Delta P(t) &= P(t) - P(t-1) \end{aligned} \quad (10)$$

さらに、角速度をさらに微分することにより、関節角の角加速度と、圧力の変化量の割合を求める。

$$\begin{aligned} \Delta^2\theta_e(t) &= \Delta\theta_e(t) - \Delta\theta_e(t-1) \\ \Delta^2\theta_s(t) &= \Delta\theta_s(t) - \Delta\theta_s(t-1) \\ \Delta^2P(t) &= \Delta P(t) - \Delta P(t-1) \end{aligned} \quad (11)$$

3.3 仮想空間

前節で述べた変換から、腕相撲対戦開始時の状態が仮想空間上に再現される。図9に、コンピュータ画面上に描画された腕相撲システムを示す。視点は、キーボードを用いることにより上下左右に移動可能である。また、マウスの左右クリックにより回転を行うことができる。対戦開始時の状態を図10 (a) に示す。時間の経過において、前節で導き出された各回転角で $\gamma'''(t)$ を変換することにより、ヒトの関節の動きが再現される。回転変換によって、もし $\alpha'''(t)$ が動いた場合でも $\alpha'''(t) = \alpha'''(1)$ となり、肩、肘の運動は手首 $\gamma'''(t)$ に付加されており、被

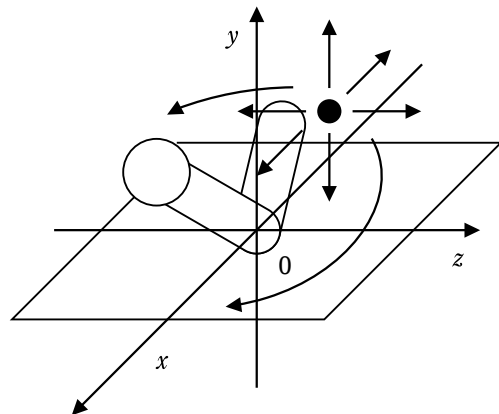
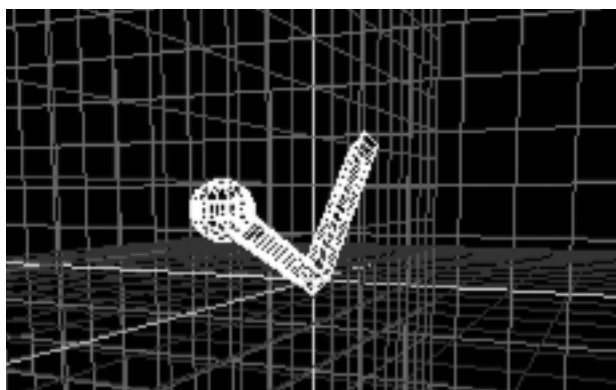
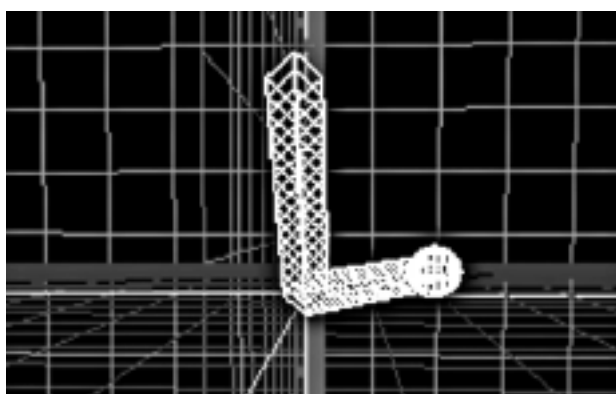


図9 仮想空間における視点の設定
Fig. 9 Setting of aspect in virtual space.



(a) 対戦開始時



(b) 対戦終了時

図10 仮想空間上の上腕

Fig. 10 Upper arm in virtual space.

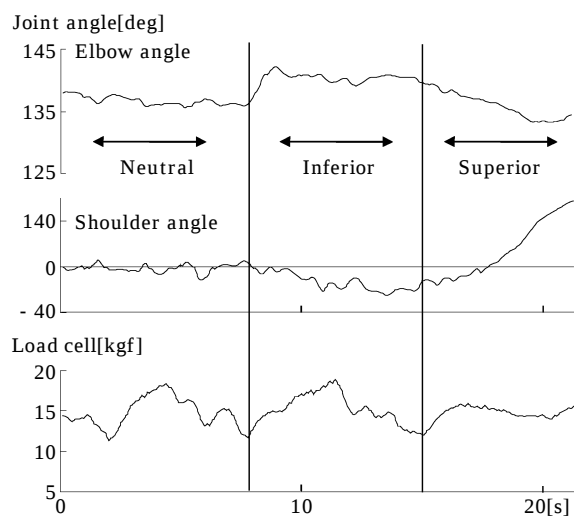
験者が優勢な状態であれば $\gamma_z'''(t) > 0$ ，逆に劣勢であれば $\gamma_z'''(t) < 0$ となる。図10(b)は、被験者が負けた状態である。

仮想空間への描画と同時に、前節により得た肘の屈曲・伸展，肩の内旋・外旋の時系列変化を別ウィンドウに表示し、逐次状態の確認が可能である。

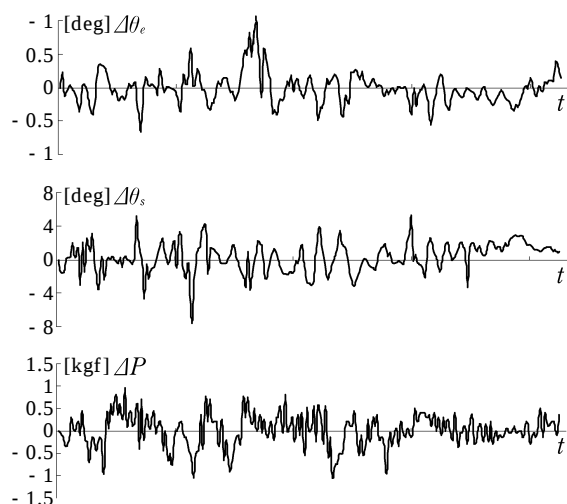
なお、腕相撲システムは可動範囲と測定の誤差を考慮する必要がある。対戦中、拮抗状態からの激しい運動によって肘の位置が変わったり、あるいは被験者の肩が手首の運動に引っ張られ、肩の位置が左右に変動することが頻繁に起こり得る。従って、本研究では内旋方向に70度以上傾いた場合は勝ち、外旋方向に-70度以上傾いた場合は負けと判定している。

3.4 時系列変化

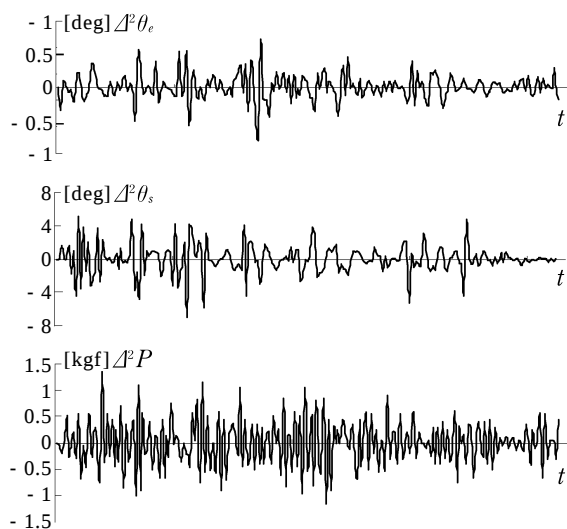
腕相撲対戦中の関節角と力覚提示の時系列変化の一例を図11に示す。図11(a)より、対戦中にお互いが拮抗している状態(0~8秒)、不利な状態(8~15秒)、有利な状態(15秒以降)が確認できる。拮抗状態に伴い、関節角の変化は微かな変動しか見られないが、力覚提示は10~20[kgf]の力の駆け引きが行われている。15秒以降は、不利な状態から有利な状態に変化しているが、肘の



(a) 関節角と力覚提示



(b) 関節角の角速度と力覚提示の変化量



(c) 関節角の角加速度と力覚提示の変化量の割合

図11 実験による計測結果の一例

Fig. 11 An example of measurement results by experiments

屈曲と肩の内旋の関節の動きの変化が顕著に現れている。またこの時系列から、肘と肩の関節角の動きに関連性が確認できる。

4. むすび

本論文では、バーチャル腕相撲システムの対戦アルゴリズムの開発を目指して、ヒトの動きや力覚提示を分析できるツールを開発した。今後は、腕相撲対戦中の実際のヒトの関節の動きや力覚提示の時系列変化の分析や評価を行う。また、計測結果をもとに、力覚ディスプレイへの合成的解析を行うことで、拮抗状態下での力覚提示を再現し、その有効性を主観評価実験によって確かめる予定である。

5. 参考文献

- [1] Yamada, T., Watanabe, T.: Dynamic Analysis of Facial Color by Using the Force Feedback System for Virtual Arm Wrestling, IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp. 765 - 770 , 2003 .
- [2] Yamada, T., Watanabe, T.: Analysis and Synthesis of Facial Color for Virtual Face Image in Force Display, The Twelfth International Conference on Artificial Reality and Tele-Existence, pp. 78 - 84 , 2002 .
- [3] 松本慎平, 山田貴志, 渡辺富夫, 田中稔次郎: バーチャル腕相撲システムにおける力覚提示の動的分析, FIT2003第2回情報科学技術フォーラム講演論文集第二分冊, pp. 283 - 284 , 2003 .
- [4] 竹田 仰, 蒲原新一: 仮想人物との腕相撲対戦システムの構築, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-A , No 2 , pp. 489 - 497 , 1996 .
- [5] Kamohara, S., Ichinose, Y., Takeda, T., Takagi, H.: Construction of Virtual Reality System for Arm Wrestling with Interactive Environment Computing, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 12 , No 1 , pp. 53 - 59 , 2000 .
- [6] Hashimoto, M., Hattori, T., Horiuchi, M., Kamata, T.: Development of a Torque Sensing Robot Arm for Interactive Communication, Proceedings of the 2002 IEEE Int. Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp. 344 - 349 , 2002 .
- [7] OpenGL ARB, OpenGL Programming Guide, Addison-Wesley, 1995 .
- [8] 相川恭寛, OpenGL プログラミング・ガイドブック, 技術評論社, 1995 .
- [9] Clayton Walnum, 3-D Graphics Programming with OpenGL, Prentice Hall Japan, 1996 .
- [10] Ron Fosner, OpenGL Programming for Windows 95 and Windows NT, Addison-Wesley Publishers Japan, 1997 .