近畿大学工学部研究報告　No.43, 2009年, pp.91-96
Research Reports of the Faculty of Engineering,
Kinki University No.43 2009, pp.91-96

モーションキャプチャーを用いた人間上肢リーチング運動の計測

黄　　健

Measurement of the Reaching Movement of the Human Upper Limb Using a Motion Capture System

Jian HUANG*

Abstract

This paper presents a method for measuring the spatial cognitive ability of the moving distance of the human hand by using motion capture (MoCap). To improve the measurement accuracy of MoCap, a method involving the use of an upper limb model is proposed in this paper. The proposed method has many advantages such as the use of a small number of markers, and better alternatives for marker sticking positions that can reduce inaccuracies due to small muscular deformation. To investigate the cognitive ability of the moving distance of a human hand, both horizontal and vertical hand movements are measured using the proposed protocol for six subjects. The results demonstrate that the average moving distances obtained in both directions become closer to the standard length compared with the results obtained in the previous study. The experimental results also demonstrate a strong relationship between error of the hand moving distance and manipulability of the upper limb. Moreover, the maximum velocity observed during horizontal and vertical movements are compared; and the result implies that the gravitational force exerted on the arm evidently affects the hand movement in the blindfolded state during vertical movement.

keywords: Biomechanics, Motion Capture, Motion, Reaching Movement

1．はじめに

近年，ヒューマノイドロボットの研究が盛んに行われており，さまざまの場面で人間のようにロボットが自然かつ滑らかな動きが要求される．これを実現するため，ヒューマノイドロボットの上肢部が多数の関節を有しており，構造的には高度な冗長性をもつ．これまでに冗長自由度を利用してロボットの運動生成に関連する研究が多く報告されたが [1)-10)]，冗長ロボットを人間のように効率的に動かすアルゴリズムが確立されていない．一方，人間の身体は精密に作られており，細かい関節を使い分けることで滑らかな動きを表現することができる．人間の動きには柔軟な構造のゆえに複雑である．しかし，その柔軟な構造のためシ

*近畿大学工学部知能機械工学科
Department of Intelligent Mechanical Engineering,
Faculty of Engineering, Kinki University

アルゴリズムが確立されていない．一方，人間の身体は精密に作られており，細かい関節を使い分けることで滑らかな動きを表現することができる．人間の動きには柔軟な構造のゆえに複雑である．しかし，その柔軟な構造のためシステムが複雑で，どのような原理や法則に基づいているのかがほとんど解明されていない[11),12)]．

そこで本研究では，人間の上肢運動メカニズム解明の一端として，モーションキャプチャーシステムを用いて上肢機構モデルと併用することによって関節角度を算出する手法を提案する．次いで，異なる空間での指先の直線運動を測定し，運動しやすさを表す可操作度と運動誤差について調べる．さらに，可操作度の観点から測定結果を解析し，上肢の運動しやすさと運動感覚の関連を考察する．

2．測定方法

本論文で用いたモーションキャプチャーシステムの構成を図 1 に示す．画像測定には，3 次元リアルタイムトラッカーシステム(PRO-TrackerII，ディテクト(株))を用いる．撮影範囲周辺に取り付けられた 6 台の CCD カメラ(XC-HR57，SONY(株))によってマーカーの 3 次元座標を検出する．

2・1 反射マーカーの取り付け

モーションキャプチャーを使って上肢運動を測定する際は，上肢に決められたラベリング位置が必要となる．ラベリング位置を決定する際には筋肉や皮膚の動き，回旋の影響などを考慮する必要がある．

マーカーの 3 次元位置をモーションキャプチャーシステムで取得することによって上肢運動を解析するが，マーカーの取り付け位置は以下の点を考慮しなくてはならない．

① 皮膚・筋肉の動きによりラベリング部の位置が変化し，誤差が生じてしまう．

② 上肢の表面部にラベリングするため，リンク(骨)の動きを直接取得できるわけではない．

これらの問題点を機構学的な見地だけでなく，解剖学的・生理学的見地からも考える必要がある．そこで本研究では，ラベリング位置を図 2 の M1～M6 のように決定した．

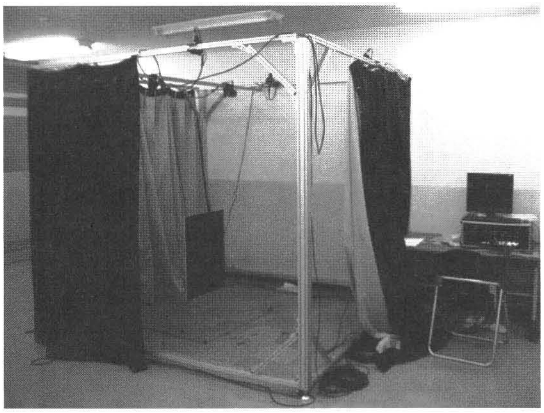


図 1　本研究で用いた測定システム

本手法では，体に付けるマーカー数を大幅に減らすことができ，これによって測定誤差を軽減する．

2・2 上肢モデル同次変換行列による関節角度の算出

一般に，人間上肢機構を考えるとき，肩に 3 自由度，肘に 2 自由度，手首に 2 自由度の計 7 自由度を有するマニピュレータと見なすことができる[13)]．多くの場合図 3 に示すリンクモデルをよく用いる．

ここで，肩部の座標系をベース座標系 Σ_b とし，図 3 に示すように，マーカーの座標中心を通す上腕断面図とリンク中心軸の交点を原点とする座標系を $\Sigma_{3'}$ とする．ベース座標系 Σ_b から見た $\Sigma_{3'}$ の同次変換行列 ${}^b\boldsymbol{T}_{3'}$ が

$$
{}^b\boldsymbol{T}_{3'} = \begin{bmatrix} t_{11}^3 & t_{12}^3 & t_{13}^3 & t_{14}^3 \\ t_{21}^3 & t_{22}^3 & t_{23}^3 & t_{24}^3 \\ t_{31}^3 & t_{32}^3 & t_{33}^3 & t_{34}^3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{1}
$$

測定されたマーカーの 3 次元位置から得られるとすれば，関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ を式

$$\theta_1 = \arctan 2(-t_{13}^3 / c_2, t_{23}^3 / c_2)\ , \tag{2}$$

$$\theta_2 = \arcsin(t_{33}^3)\ , \tag{3}$$

$$\theta_3 = \arctan 2(-t_{31}^3 / c_2, -t_{33}^3 / c_2)\ , \tag{4}$$

より算出できる．

また，手甲の皮膚上のマーカー座標系を $\Sigma_{7''}$，手部断面図と軸の交点での座標系を $\Sigma_{7'}$ とする．同様に測定したマーカーの 3 次元位置から同次変換行列 ${}^b\boldsymbol{T}_{7'}$ が

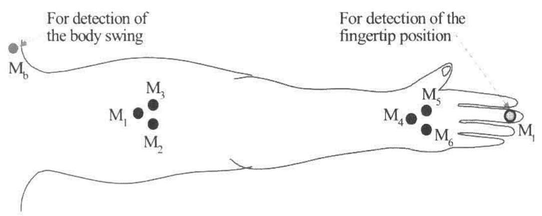


図 2 マーカーの取り付け

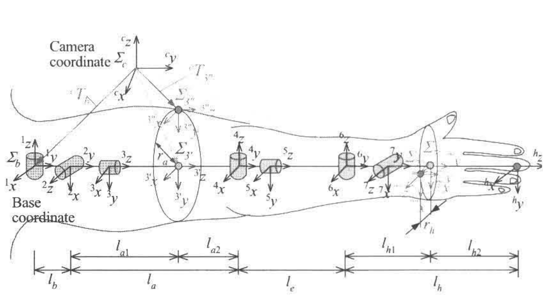


図 3　7 関節上肢モデル

$$
{}^{3'}\boldsymbol{T}_{7'} = \begin{bmatrix} t_{11}^{7} & t_{12}^{7} & t_{13}^{7} & t_{14}^{7} \\ t_{21}^{7} & t_{22}^{7} & t_{23}^{7} & t_{24}^{7} \\ t_{31}^{7} & t_{23}^{7} & t_{33}^{7} & t_{34}^{7} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{5}
$$

得られるとすれば．${}^{b}\boldsymbol{T}_{7'}$から関節角度$\theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$を式

$$
\theta_4 = \arctan 2\left(\frac{\left(t_{12}^{7} l_{h1} - t_{14}^{7}\right)}{l_e}, \frac{\left(t_{32}^{7} l_{h1} - t_{34}^{7} + l_{a2}\right)}{l_e}\right) \tag{6}
$$

$$
\theta_6 = \arcsin(c_4 t_{33}^{7} - s_4 t_{13}^{7}) \tag{7}
$$

$$
\theta_7 = \arctan 2\left(\frac{c_4 t_{31}^{7} - s_4 t_{11}^{7}}{s_6}, \frac{c_4 t_{32}^{7} - s_4 t_{12}^{7}}{c_6}\right) \tag{8}
$$

$$
\theta_5 = \arctan 2\left(\frac{s_7 t_{21}^{7} + c_7 t_{22}^{7}}{s_6}, (c_7 t_{21}^{7} - s_7 t_{22}^{7})\right) \tag{9}
$$

によって算出できる．

2・3 関節角度の補正

上述したように，7 個の関節角度が同次変換行列 ${}^{b}\boldsymbol{T}_{3'}$, ${}^{3'}\boldsymbol{T}_{7'}$から算出できることが分かった．しかしながら，マーカーが皮膚の表面に貼り付けており，マーカーの3次元位置情報から${}^{b}\boldsymbol{T}_{3'}$, ${}^{3'}\boldsymbol{T}_{7'}$を求める方法を示す必要がある．

上腕皮膚上のマーカー座標系を$\Sigma_{3''}$とし，手部皮膚上のマーカー座標系を$\Sigma_{7''}$とすれば，変換行列${}^{3'}\boldsymbol{T}_{3''}$が

$$
{}^{3'}\boldsymbol{T}_{3''} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -r_a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}
$$

で表れる．ただし，r_aは腕の半径である．したがって，同次変換行列${}^{b}\boldsymbol{T}_{3'}$が

$$
{}^{b}\boldsymbol{T}_{3'} = {}^{c}\boldsymbol{T}_{b}^{-1} \cdot {}^{c}\boldsymbol{T}_{3''} \cdot {}^{3'}\boldsymbol{T}_{3''}^{-1} \tag{11}
$$

から求められる．同様に，同次変換行列${}^{3'}\boldsymbol{T}_{7'}$が

$$
{}^{3'}\boldsymbol{T}_{7'} = ({}^{c}\boldsymbol{T}_{b} \cdot {}^{b}\boldsymbol{T}_{3'})^{-1} \cdot {}^{c}\boldsymbol{T}_{7''} \cdot {}^{7'}\boldsymbol{T}_{7''}^{-1} \tag{12}
$$

ただし，変換行列${}^{7'}\boldsymbol{T}_{7''}$が

$$
{}^{7'}\boldsymbol{T}_{7''} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_h \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{13}
$$

で表れ，r_hが手甲の厚みである．

2・4 可操作度

可操作度（manipulability）は，ロボット工学に多く用いられている運動しやすさの評価関数である[14]．ロボットは，特異点から離れれば離れるほど，すべての方向に対して動きが均等になり，均等に力を加えることができるようになる．この効果を定量的に表すための指標のひとつが可操作度である．可操作度Wは

$$
W = \sqrt{\det(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}) \cdot \boldsymbol{J}^{T}(\boldsymbol{\theta}))} \tag{13}
$$

で表される．ただし，行列$\boldsymbol{J}$は図3に示すリンク機構のヤコビ行列である．また，上肢リンクすべての関節角度が0°のときに，上肢が伸ばした状態であり，このときの可操作度Wが0である．

3．実験結果

3・1 有効性検証実験

今回の実験において関節角度をどれほど正確に測定できるかを検証するため，図2に示す本研究での提案手法と従来の方法との比較実験を行った．

従来の実験に肘関節の回転角度を測るため，図4に示すように被験者の肘側面に上部，中部，下部にマーカーを取り付ける．実験では，被験者の肘関節が90°に屈曲にさせた状態から腕を伸ばすまでの様子を撮影し，得られた関節角度を図5に示す．

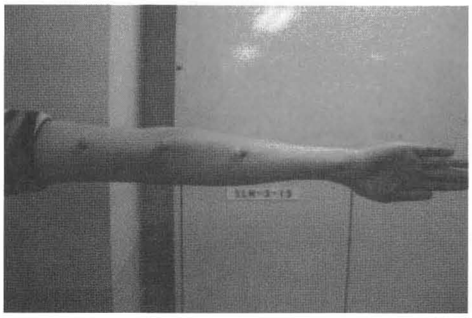


図4 肘部3つのマーカーの取り付け

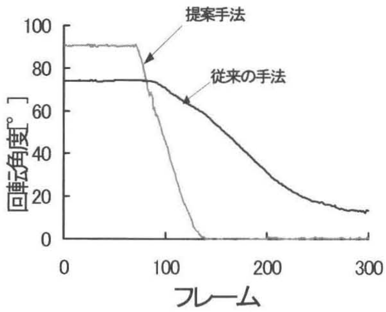


図5　7関節上肢モデルによる回転角の測定結果

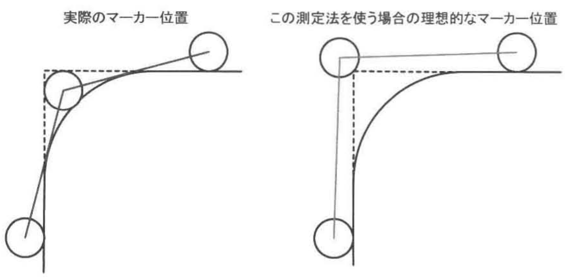


図6　従来手法での肘回転角度

図 5 に示すように，提案手法での関節角度の測定値は 90° に近づいていることに対し，従来の方法では 10° 以上の誤差が出たことが分かった．

また，図 6 左図に示すように従来の方法では，身体の構造上肘関節は丸みをおびているため，皮膚の伸縮による変化が出てしまう．回転軸付近のマーカーは肘関節を 0° から 90° に屈曲する間に移動しているのでこのことも誤差が大きくなった原因のひとつと考えられる．本研究で提案したマーカーの取り付け手法では，筋肉や皮膚の伸縮の影響が少ない場所にマーカーを配置しているため，より正確な数値を測定できたと考えられる．

3・2 指先の直線軌道のなぞる運動

次に人間の上肢の運動感覚を測定する実験を行った．この実験では，図 7 に示すように被験者の前方空間を 9 つの領域に分け，それぞれの領域において目隠し状態で水平，垂直方向に指先を動かすという実験である．また，指先の移動中にモーションキャプチャーシステムを用いて上肢運動の測定を行う．

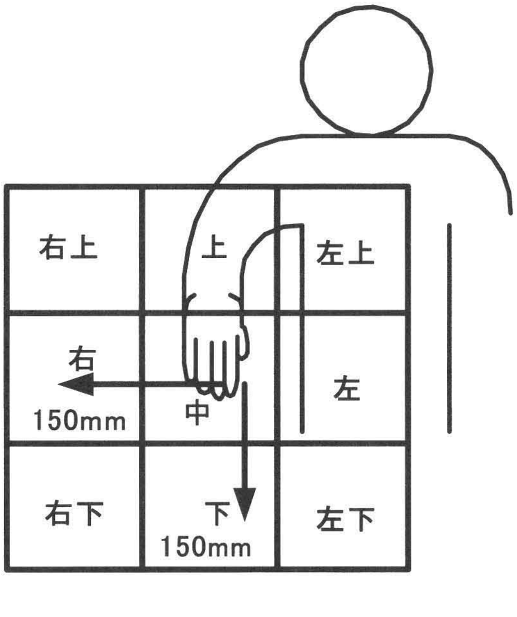


図 7 指先の直線運動

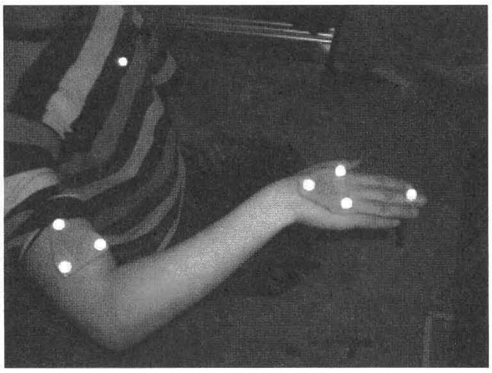


図 8　マーカーの取り付け

3・2・1 実験プロフィール

被験者が床に座り背筋を伸ばした状態で右腕を前に出す．腕の出し方は図 8 に示すように肩を 45°，肘を 90°，手首を 45° に曲げた状態にする．領域までの距離は 40cm と固定した．

実験Ⅰは，まず被験者に床に座ってもらい初期姿勢，上肢運動時の姿勢でマーカーがきれいに映る領域を探す．場所が決まれば，長さ 150mm の定規を見せて覚えてもらう．被験者の肩から 40cm の位置に板を固定する．その板に中指が触れるように移動させ，撮影を開始する．開始後 60 フレーム経ったところで被験者に合図を出し指先を右に 150mm と思われるところまで水平に動かしてもらう．これを 300 フレームまで撮影する．この動作を図 7 に示す 9 ヶ所の領域で行う．実験Ⅱは，実験Ⅰと同じ条件で指先が垂直に移動する．3 人の被験者に対して上記の実験を行った．

3・2・2 指先の移動距離

3 名の被験者の水平，垂直方向におけるそれぞれの指先の移動距離を表 1 と表 2 にまとめた．

表 1　水平指先移動距離（mm）

	A	B	C	平均	標準偏差
左上	153	114	158	142	24
左	161	141	163	155	12
左下	186	105	143	144	40
上	198	134	197	176	37
中	188	109	195	164	48
下	220	122	220	188	56
右上	201	129	174	168	36
右	196	128	157	160	34
右下	216	132	215	187	48

表 2　垂直指先移動距離（mm）

	A	B	C	平均	標準偏差
左上	147	161	164	157	9
左	134	121	120	125	8
左下	152	118	83	118	35
上	147	113	148	136	20
中	162	123	114	133	25
下	138	109	127	125	14
右上	124	177	119	140	32
右	162	118	141	140	22
右下	148	136	101	128	24

また，水平，垂直方向の指先の移動距離を図 9 に示す．水平方向の平均移動距離は垂直方向に比べ大きくなる傾向がある．平均移動距離は 3 人とも垂直の移動の方が 15cm に近かった．今回の測定では水平方向の運動より，垂直方向の運動の方が感覚は正確だった．

最初に指先移動距離の水平と垂直のときでの違いだが，水平は 150mm の基準距離よりも大きく動く傾向があり，垂直では 150mm より小さくなるという結果が出た．これは，被験者の体内感覚が 150mm よりも大きい人が多かったのではないかと考えられる．垂直ではこれとは逆に，基準距離よりも移動距離が小さくなっていた．こうなった原因として重力が考えられる．上肢を運動させるときに縦の移動では重力に引っ張られて上に抵抗しようとする．このために体内感覚にずれが生じたのではないだろうか．

水平方向の運動を見ると，左側で相対移動距離にばらつきがある．垂直では領域の 4 隅でのばらつきが大きい．これは左側で体勢が不自然になることや領域が遠いことによって上肢を動かしにくかったのではないかと思う．

3・2・3 可操作度の結果

図 3 のリンクモデルによって関節角度 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6, \theta_7$ を算出したのち，式(13)によって可操作度 W を求める．得られた異なる空間での可操作度結果の 1 例を図 10 に示す．可操作度のグラフに興味深い傾向があった．

図 10 に示す可操作度のグラフを見ると，指先が右に移動するに従って可操作度が増加していることが分かる．左列の可操作度は上肢を右に移動させると大きくなる．中列ではあまり変化が無く，右列になると左列ほどではないが可操作度は変化して大きくなる．可操作度は関節角度の変化に影響されるのでこれらの結果から，左列と右列でグラフが変化しているのは上肢の関節角度に変化があったものだと考えられる．中列では上肢の正面に領域があり，移動距離が 150mm と小さいことから各関節をあまり曲げる必要が無かったので変化が小さかったのではないかと思う．

4．考察

人間の上肢運動の生成に関しては，躍度モデルや最小とる理論による提案が報告された [15),16)]．また，人間上肢のインピーダンス特性が体の中心に近づいていくほどインピーダンス楕円体が丸形状になることに対し，体の中心から離れるほどインピーダンス楕円体の形状が細長くなることが分かった [17)-20)]．これらの研究に対して本研究では，｢動きやすい場所で上肢の運動精度は高い｣という仮説を考えて測定を行った．

上記の実験結果から分かるように，3 つ全ての縦列の上段で可操作度は最大となっている．可操作度が大きくなった原因としては，領域が肩より上にあったので上肢の関節が開いていたからではないかと思われる．自然な姿勢がとれる中央部では可操作度が大きくなることで，中央部での運動精度も良くなり，移動距離が 150mm に近くなる．逆に

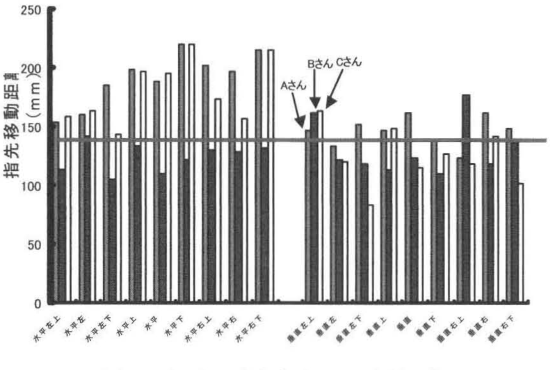
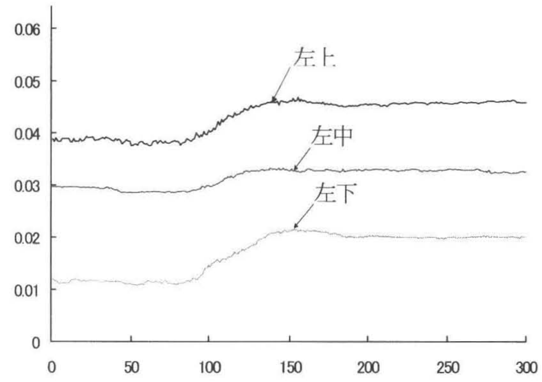
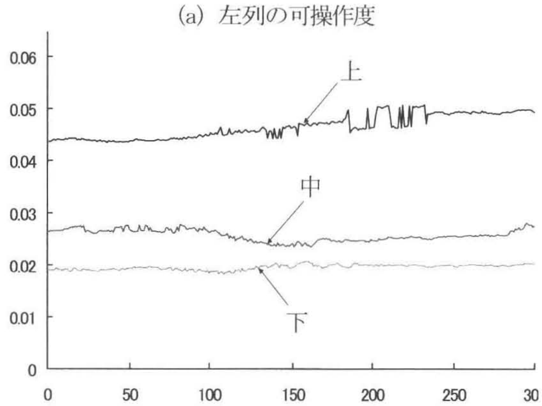


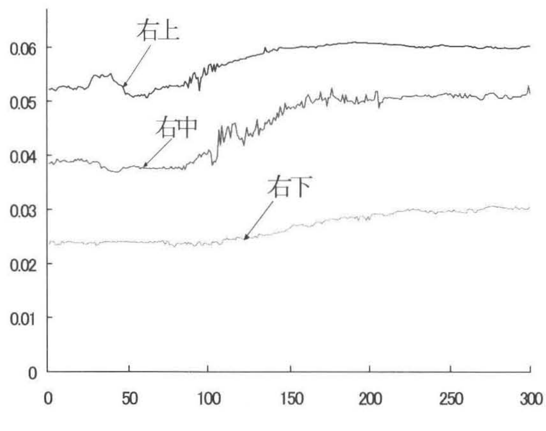
図 9　水平・垂直方向での移動距離



(a) 左列の可操作度



(b) 中間列の可操作度



(c) 右列の可操作度

図 10　可操作度の実験結果

4 隅の領域では不自然な体勢となり可操作度が小さくなることで，運動精度も悪くなり 150㎜ から離れた数値になる．したがって，測定結果が可操作度と運動精度の一定な関連が示された．

5．まとめ

本研究では，上肢運動を測定するためモーションキャプチャーを用いた測定システムを構築し，少数のマーカーと上肢リンク７自由度モデルを併用する手法を提案した．肘の 90° 回転運動によって提案手法の有効性を確かめた．また，異なる空間で指先の直線運動を測定した．測定結果から，水平方向の運動より，垂直方向の運動が正確であった．さらに，４隅の箇所に運動精度のばらつきが大きくことに対し，可操作度の高い中央部の場所において運動精度が比較的に高いことを確認できた．可操作度と運動精度の一定な関連性を確認できた．

参考文献

(1) Nakamura, Y. and Hanafusa, H., Inverse kinematics solutions with singularity robustness for robot manipulator control, Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Meas. & Control, Vol.108, No.4, pp.163-171.1986.

(2) Khatib, O., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, Int. J. of Robotics Research, Vol.5, No.1, pp.90-98, 1986.

(3) Maciejewski, A. A. and Klein, C. A., Obstacle avoidance for kinematically redundant manipulators in dynamically varying environments, Int. J. of Robotics Research, Vol.4, No.3, pp.109-117, 1985.

(4) Loeff, L. A. and Soni, A. H., An algorithm for computer guidance of a manipulator in between obstacles, Trans. ASME, J. of Eng. for Industry, Vol.97, No.3, pp.836-842, 1975.

(5) Khatib, O., Inertial Properties in Robotic Manipulation: An Object- Level Framework, Int. J. of Robotics Research, Vol.14, No.1, pp.19-36, 1995.

(6) Melchiorri, C. and Salisbury, J., Exploiting the Redundancy of a Handarm Robotic System, MIT A.I. Memo, No.1261, 1990.

(7) Quan, B.T., Huang, J., Harada, M. and Yabuta, T., Controlof a MacroMicro Robot System Using Manipulability of the Micro Robot, JSME International Journal (C), Vol.49 No.3, pp.897-904, 2006.

(8) クワン B.T.，原田実，黄健，藪田哲郎，可操作度を用いたロボットの協調制御による自然な運動機能の生成，日本機械学会論文集（C） Vol.73 No.733, pp.2551-2560, 2007.

(9) 黄 健，中村裕介，山田大輔，原正之，藪田哲郎，冗長ロボットの構造階層化を用いた運動制御，計測自動制御学会論文集（特集号），Vol.44 No.12, pp.1012-1014, 2008

(10) 山田大輔，中村裕介，原正之，黄 健，藪田哲郎，可操作度を考慮したフィンガ・アームロボットの協調的インピーダンス制御，日本機械学会論文集（C 編), Vol.74 No.748, pp.2994-3003, 2008.

(11) 有本卓，手の巧みさと解析力学：ベルンシュタイン問題（身体運動の謎）への挑戦，物性研究，No.7, pp625-655, 2004.

(12) ニコライ･A･ベルンシュタイン（著），工藤和俊･佐々木正人（訳)，デクステリティー:巧みさとその発達，金子書房, 2003.

(13) Huang, J., Kosaka, S., Imamura, Y. and Yabuta, T., Measurement of Distance Error in Reaching Movement ofthe Human Hand without Using Vision, Proc. of 29th Annual International Conference of the IEEE EMBS, pp.4866-4869, 2007.

(14) Yoshikawa, T., Manipulability of robotic mechanisms, Int. J. of Robotics Research, Vol.4, No.2, pp.3-9, 1985.

(15) Flash, T. and Hogan, N., The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model, The Journal of Neuroscience, Vol.5, No7, pp.1688-1703, 1985.

(16) Uno, Y., Kawato, M., and Suzuki, R., Formation and control of optimal trajectory in human multijoint arm movement - minimum torquechange model, Biological Cybernetics, Vol.61, pp.89-101, 1989.

(17) Hogan, N., Bizzi, E., Mussa-Ivaldi, F. A. and Flash, T., Controlling Multijoint Motor Behavior, Exerc. Sports Sci. Rev.15, pp.153-190, 1987.

(18) Mussa-Ivaldi, F. A., Hogan, N. and Bizzi, E., Neural and geometric factors subserving arm posture, J. Neuroscience, Vol.5, pp.2732-2734,1985.

(19) Tsuiji, T., Ito, K., Nagamachi, M. and Ikemoto, T. Impedance Regulation in muculo-motor control system and the manipulation ability of the end point, Trans. SICE, Vol.24, No.4, pp.385-392, 1988.

(20) Tsuiji, T., Goto, K., Ito, K. and Nagamachi, M., Estimation of human hand impedance during maintenance of posture, Trans. SICE, Vol.30, No.3, pp.319-328, 1994.