

# モーションキャプチャを用いた人間の上肢運動感覚の測定と解析

## Measurement and Analysis of Motion Cognition of Human Upper Limb by using Motion Capture

○学 小坂 翔 (横浜国大)      今村 雄樹 (横浜国大)  
正 黄 健 (横浜国大)      正 藪田 哲郎 (横浜国大)

Sho KOSAKA, (Yokohama National University)  
Yuuki IMAMURA, (Yokohama National University)  
Jian HUANG, (Yokohama National University)  
Tetsuro YABUTA, (Yokohama National University)

It is generally thought that human beings have high-performance system in body movement. However, mechanisms of the body movement have not been clarified. In this paper, a kinematical model of a human upper limb is proposed to simulate of human upper limb, and a new technique of measurement is developed. Moreover, a motion capture system with this new technique of measurement is utilized in order to measure and analyze the motion cognition of human upper limb in velocity and manipulability. Finally, discussions of mechanisms between human motion and the human cognition are made.

**Key Words:** Motion Capture, Motion Cognition

### 1. 緒言

人が巧みな動作を行えるのは、人体がとても精密に作られており、高性能なシステムを有しているためであると考えられる。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<sup>[1][2]</sup>。

人間の動きの解析にあたって、モーションキャプチャシステムを用いた測定法が存在している。身体に取り付けたマーカを元に、動きのデータを取得する方法である。しかし、従来用いられていた方法は、筋肉の動きや皮膚から骨までの距離から生じる誤差がつきものであった。

そこで本研究では、それらの誤差を出来る限り少なくする、モーションキャプチャシステムを用いた新しい上肢運動計測の方法を提案する。また、人間の運動メカニズム解明の一端として、本手法を用いて人間の上肢の運動を測定し、速度・可操作度等の観点から解析を行い、人間の動きと感覚の関係の解明を目指している。

### 2. 測定システム

本論文で用いたモーションキャプチャ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-Tracker II, ディテクト(株))を用いる。撮影範囲周

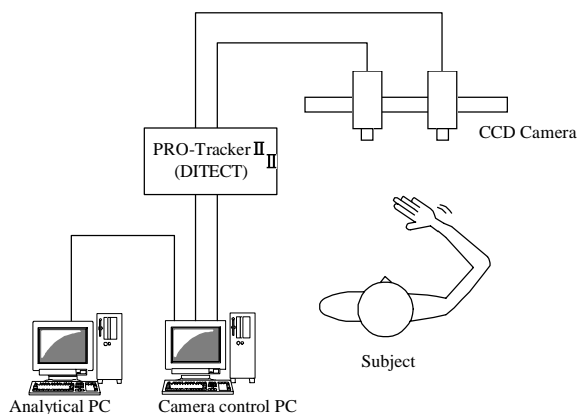


Fig.1 Motion capture system

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-の3次元位置座標を検出する。

### 3. モデリングと理論計算

**3.1 上肢の運動モデル** 一般的な、上肢のモデリングを図2に示す。人間上肢を、肩に3自由度、肘に2自由度、手首に2自由度を持つ7自由度マニピュレータとみなしている。本論文では、マーカ-の位置情報をモーションキャプチャ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-の取り付け位置は以下の点を考慮しなくてはならない。

- A) 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。
- B) 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なくてはならない。そこで、ラベリング位置を図3の $1 \sim 8$ に決定した。実際に角度の算出に利用するのは $1 \sim 6$ であり、本研究で提案する手法では、身に付けるマーカ-数を出来るだけ少なくすることによってAの問題点による誤差を少なくし、また、上腕の各部位の長さや太さを計測し、角度計算に取り入れることによってBの問題点を克服している。

**3.2 マーカ-3個による座標系の算出** 各関節角度を算出するために、3点マーカ-により作られる座標系を利用する。ここでいう3点マーカ-とは、マーカ- $1, 2, 3$ とマーカ- $4, 5, 6$ を指す。

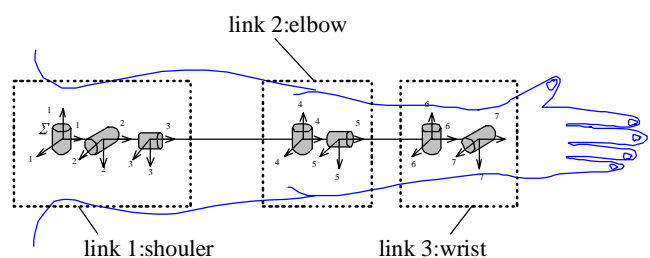


Fig.2 Model of the human upper limb

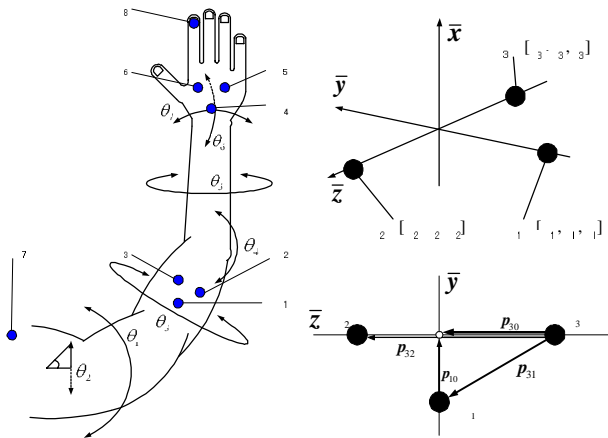


Fig.3 The position of markers Fig.4 coordinate system of 3 points markers

⇒ 3点マーカーから座標系を作成する(図4).

$\bar{z}$  は  $p_{20}$  と  $p_{30}$  より,

$$\bar{z} = \begin{bmatrix} \frac{p_{30} - p_{20}}{32} \\ \frac{p_{31} - p_{20}}{32} \\ \frac{p_{32} - p_{20}}{32} \end{bmatrix}$$

ただし,

$$32 = \sqrt{(p_{30} - p_{20})^2 + (p_{31} - p_{20})^2 + (p_{32} - p_{20})^2}$$

である.

$\bar{y}$  は座標系原点を O とすると図4より,

$$\bar{y} = \frac{p_{10} - p_{30}}{10} = \frac{p_{30} - p_{31}}{10}$$

ただし,

$$10 = \sqrt{(p_{10} - p_{30})^2 + (p_{10} - p_{31})^2 + (p_{10} - p_{32})^2}$$

である.

$\bar{x}$  は  $\bar{y}$  と  $\bar{z}$  の外積から求める.

$$\bar{x} = \bar{y} \times \bar{z} \quad (3)$$

### 3.3 各関節角度の算出法

上記で求めた座標系と上腕のリンクとの位置関係を図5の示した. その際, 運動モデルに則した各関節の座標系を  $\Sigma_1 \sim \Sigma_7$ , マーカー  $1, 2, 3$  による座標系を  $\Sigma_{3^*}$ , マーカー  $4, 5, 6$  による座標系を  $\Sigma_{7^*}$  としている. また, 上腕長を  $l_1$ , 前腕長を  $l_2$ , 手長を  $l_3$  としている. 関節点並びに運動回転中心は JIS Z 8500 を参考にした. マーカーの位置情報により得られる座標系は, 図5のように皮膚の表面に作られることになる. しかし, リンクと皮膚との距離による誤差を無くすためには, 各関節角度の算出にリンク上に配置された  $\Sigma_{3^*}, \Sigma_{7^*}$  を使用するのが望ましい. そこで上腕の太さ  $d$ , 手甲の厚さ  $t$  を計測しておき, 角度計算に利用する.

#### ① 肩部関節角度 $\theta_1 \sim \theta_3$ の算出

図5を参考にして  $\Sigma_b \sim \Sigma_{3^*}$  までの同時変換行列  $T_1, T_2, T_3$ ,  ${}^3T_{3^*}$  を求め,  $T_3 = T_1 \cdot T_2 \cdot T_3 \cdot T_3$  を計算すると,

$$\begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix} = T_3 = \begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix} \quad (4)$$

が得られる. ここで,  $c_i$  は  $\sin(\theta_i)$ ,  $s_i$  は  $\cos(\theta_i)$  を表している. (4)式の右半分はマーカーの位置座標計測により求められる値である.

⇒ マーカー位置より  $T_3$  を求める.

マーカーの位置情報をもとにカメラ座標系  $\Sigma_c$  における  $\Sigma_{3^*}$  の同時変換行列  ${}^3T_{3^*}$  を算出できる. よって,  $T_3$  は

$T_3 = T \cdot T_3 \cdot {}^3T_{3^*} \Rightarrow T_3 = T^{-1} \cdot T_3 \cdot {}^3T_{3^*}^{-1}$  (5) によって得られる. 図3の位置にマーカーを取り付ける, つまり図5の位置に  $\Sigma_{3^*}$  がある場合,  ${}^3T_{3^*}$  は腕の太さを考慮して,

$${}^3T_{3^*} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & - \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

で表され, 乗数行列である. ただし, マーカーの取り付け位置によって  ${}^3T_{3^*}$  は変わる.

$T$  はカメラ座標系  $\Sigma_c$  から見た肩のベース座標系  $\Sigma_b$  の同時変換行列である. 理想的には, 上肢運動中に肩が動かないため,  $T$  は乗数行列である. したがって, 運動する前に標準姿勢 ( $\theta = 0, 1, 2, \dots, 7$ ) を一度撮影すれば, 乗数  $T$  を

$$T = T(\odot) = T_3(0) \cdot {}^3T_{3^*}^{-1} \cdot T_3(0)^{-1} = T_3(\odot) \cdot {}^3T_{3^*}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix}^{-1} \quad (7)$$

によって求めることができる.

よって式(4)より,

$${}^3T_{3^*} = \begin{bmatrix} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{bmatrix} \Rightarrow \theta_2 = \arcsin\left(\frac{-}{-}\right) \quad (8)$$

$$\begin{cases} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1 = \frac{-}{-} \\ 2 = \frac{-}{-} \\ 3 = \frac{-}{-} \end{cases} \Rightarrow \theta_1 = \tan^{-1} 2\left(\frac{-}{-}, \frac{-}{-}\right) \quad (9)$$

$$\begin{cases} - & - & - \\ - & - & - \\ - & - & - \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 3 = \frac{-}{-} \\ 2 = \frac{-}{-} \\ 1 = \frac{-}{-} \end{cases} \Rightarrow \theta_3 = \tan^{-1} 2\left(\frac{-}{-}, \frac{-}{-}\right) \quad (10)$$

の式が導かれ,  $\theta_1 \sim \theta_3$  を算出することが出来る.

#### ② 前腕部関節角度 $\theta_4 \sim \theta_7$ の算出

$\theta_1 \sim \theta_3$  までの時と同様に,  $\Sigma_{3^*} \sim \Sigma_{7^*}$  までの同時変換行列  ${}^3T_4, {}^4T_5, {}^5T_6, {}^6T_7, {}^7T_7$  を求め,  ${}^3T_{7^*} = {}^3T_4 \cdot {}^4T_5 \cdot {}^5T_6 \cdot {}^6T_7 \cdot {}^7T_7$  を計算し, マーカーの位置情報より得られた  ${}^3T_{7^*}$  と比較することによって各関節角度を求めることが出来る.

⇒ マーカー位置より  ${}^3T_{7^*}$  を求める.

$T_3$  をマーカー位置から求めたのと同様に, 運動モデルの位置関係から,

$$T_{7^*} = T \cdot T_3 \cdot {}^3T_{7^*} \cdot {}^7T_{7^*} \quad (11)$$

が得られる. 図3の位置にマーカーを取り付ける, つまり図5の位置に  $\Sigma_{7^*}$  がある場合,  ${}^7T_{7^*}$  は手甲の厚さを考慮して,

$${}^7T_{7^*} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

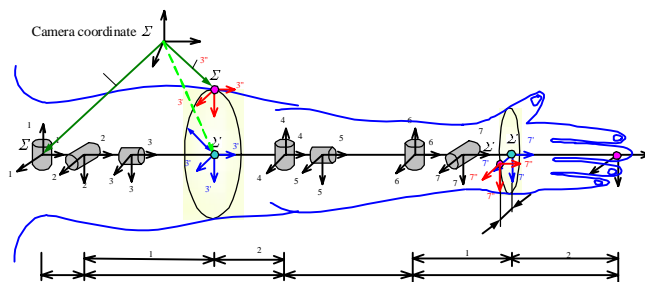


Fig.5 Relationship between position of markers and upper limb

で表され、乗数行列である。ただし、マーカーの取り付け位置によって ${}^7T_7$ は変わる。

また、式(5)、式(7)より同時変換行列  $T$ 、 $T_3$  を算出できるため、 $\theta_4 \sim \theta_7$  の計算に必要とされる同時変換行列 ${}^3T_7$ を

$${}^3T_7 = (T \cdot T_3)^{-1} \cdot T_7 \cdot {}^7T_7^{-1} \quad (13)$$

によって求めることができる。

計算は煩雑になるので、計算結果のみを示す。

$$\theta_4 = \tan^{-1} 2 \left( \frac{12}{1-14}, \frac{32}{1-34+2} \right) \quad (14)$$

$$\theta_5 = \arcsin \left( \frac{7}{4 \cdot 33} - \frac{7}{4 \cdot 13} \right) \quad (15)$$

$$\theta_7 = \tan^{-1} 2 \left( \frac{4 \cdot 31 - 4 \cdot 11}{6}, \frac{4 \cdot 32 - 4 \cdot 12}{6} \right) \quad (16)$$

$$\theta_3 = \tan^{-1} 2 \left( \frac{7 \cdot 21 + 7 \cdot 22}{6}, \left( \frac{7}{7 \cdot 21} - \frac{7}{7 \cdot 22} \right) \right) \quad (17)$$

これらによって、前腕部の関節角度を求めることができる。

**3.4 体幹の揺れによる誤差の補正** 上腕の運動の際に影響を受けない位置にマーカーをひとつ取り付けた(図 3,  $M_7$ )。これを利用することで、体の揺れによる誤差の補正を行う。ここでは並進移動の揺れのみを考える。マーカーの位置情報によって揺れが検出された場合は、同時変換行列  $T$  が常数ではなくなる。時刻  $t$  にボディマーカーの 3 次元空間位置を  $p(t) = [x(t), y(t), z(t)]^T$  とすれば、同時変換行列  $T(t)$  は、

$$T(t) = T + \begin{bmatrix} \dots \\ \dots \\ \dots \end{bmatrix} \quad (18)$$

となる。

**3.5 可操作度** 可操作度は、ロボット工学で広く用いられている評価関数である<sup>[3][4]</sup>。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。図 2 のようにモデル化した人間の上肢の場合にも、動きやすさを表す指標として用いることができる。可操作度は、ヤコビ行列  $J(\theta)$  を用いて、
$$= \sqrt{\det(J(\theta)J^T(\theta))} \quad (19)$$
 と表される。通常、可操作度が大きいほど動きやすく、小さいほど動きにくい状態にあると考えられる。

## 4. 運動測定

**4.1 運動空間** 今回提案した手法を用いて、上肢運動を行う場所によって人間の指先の移動距離感覚に差がでるのかどうかという測定を行った。図 6 に示すように、実験を行う空間を 9 つに分割した。

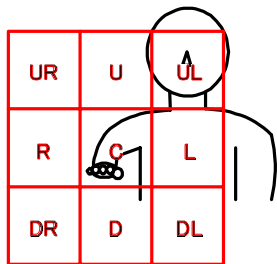


Fig.6 Divided measurement space from the view of subject

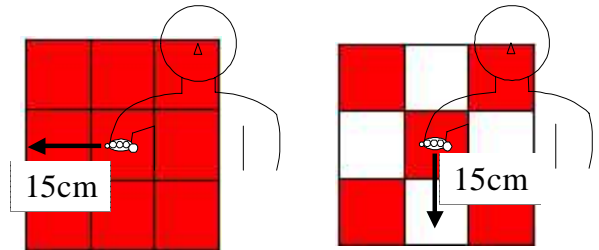


Fig.7 Schematic diagram of measurement

**4.2 測定手順** 図 3 に示したラベリング位置を基に、右上肢にマーカーを取り付ける。15cm の長さを覚えてもらう。前方に設置してあるアルミニウム板に指先を触れさせる。目を閉じ、板との接触状態を保ちつつ、感覚のみで指先を 15cm 移動させる。この動作を図 6 に示した分割領域で行ってもらう。

移動させる方向は、9 つの領域で水平右方向に、4 隅と中の計 5 つの領域で垂直下方向に動かしてもらった。実験の略図を図 7 に示す。

## 5. 測定結果と考察

**5.1 指先移動距離** 実験で得られた水平方向の指先移動距離を領域ごとにまとめたグラフを図 8 に示す。全体的な傾向として移動距離は、基準として記憶してもらった 15cm よりも小さくなっている。被験者 D 以外の 4 名は全員、平均移動距離が 15cm よりも小さかった。これは、指先とアルミニウム板の間に生じた摩擦の影響ではないかと考えられる。摩擦による抵抗のせいで、体内感覚で動かしたつもりより実際の指が動いた距離が短くなってしまったのではないかと。

次に個人的な傾向をみるために、各個人の「中」におけるデータを 100% とし、相対値を求めた。その結果、領域ごとに特定の傾向が現れたので、特徴がわかりやすいようにまとめたグラフを図 9 に示す。傾向として、上、中、下段のそれぞれにおいて、左右の列より中列の移動距離のほうが大きく、

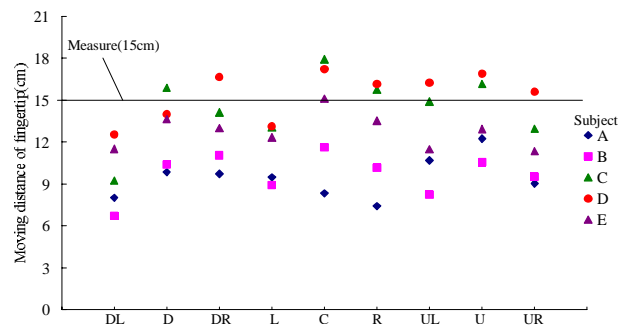


Fig.8 Absolute distance of movement

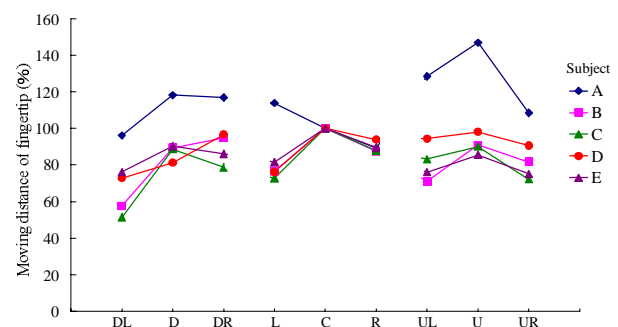


Fig.9 Relative distance of movement

山型の移動距離を示している。グラフには載せていないが、列ごとに分けた場合も、上下の段より中段の移動距離が大きくなる傾向が出ている。これは、運動を行う領域によって運動精度に差が出た結果ではないかと考えられる。つまり、4隅で行う運動よりも、中央部に近いほうが運動精度が良くなっていると考えられるのではないかと。

次に、方向による移動距離の差を調べるために、水平方向と垂直方向の移動距離平均を求めた。その結果を図10に示す。被験者のそれぞれの平均移動距離に差はあるものの、水平と垂直方向の平均移動距離の差はほとんどなかった。これは、体内の移動距離感覚には方向によらず一定であることを示していると考えられる。

**5.2 可操作度** 実験で測定した角度データから、式(19)の可操作度を算出した。代表として被験者 B の水平移動時の可操作度のグラフを図11に示す。傾向としては、運動領域が「右上」近くなるほど可操作度が高くなっているのがわかる。つまり、「右上」が一番動きやすかったということであるが、図8に示したグラフでは、「右上」の移動距離に特別な傾向が出ているわけではない。これは移動距離の精度の良し悪しを判断するには、可操作度だけでなく他の要因も考慮に入れて考えていかなければならないということであろう。「左下」のデータに乱れがあるのは、マーカーの撮影が一部うまくいってなかったためである。

**5.3 指先速度** 指先速度に関しては、特徴のあった水平方向移動時のグラフを図12に示す。図12は被験者 E の「下」における水平移動時の指先速度である。図13は被験者 E の「中」における垂直移動時の指先速度である。2点間を結ぶ運動であるために、単峰性のグラフになっている。また、加速区間と減速区間に注目すると、加速はゆるやかで、減速は急激になっている。これは水平移動時にのみ現れた傾向で、垂直移動時は加速と減速に差はなかった。これは、重力による影響を無

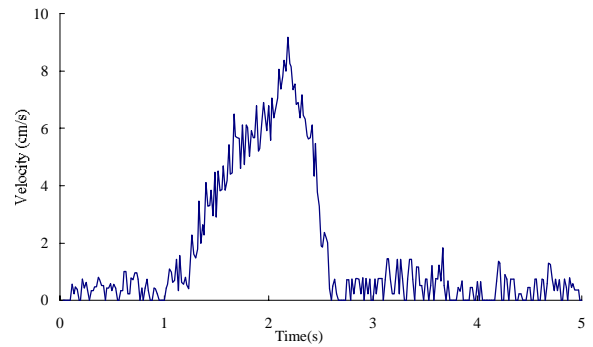


Fig.12 Horizontal fingertip velocity

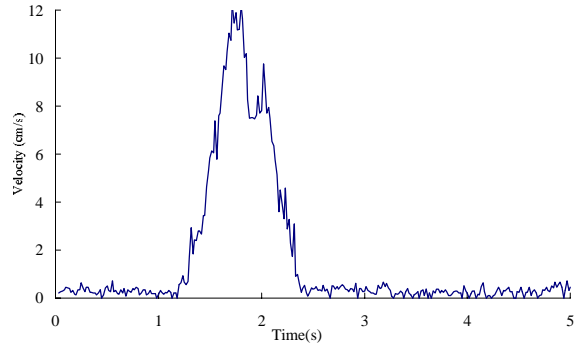


Fig.13 Vertical fingertip velocity

意識に補正した結果ではないかと考えられる。

## 6. まとめ

本論文では、モーションキャプチャシステムを用いた上肢運動計測における、新しい測定法の提案を行った。これにより、1)皮膚や筋肉の動きによる測定誤差、2)腕の太さや手甲の厚さによる測定誤差、を小さくすることに成功した。運動感覚測定においては、運動感覚は、運動領域の影響を受けるのではないかとという結果が得られた。また、運動感覚は、運動方向によらず一定であるという結果が得られた。指先速度において、水平・垂直方向でプロフィールに差が出たことから、人体は重力の補正を行っているのではないかとということがわかった。可操作度については、人間の感覚的には「右上」の位置での運動よりも「中」での運動のほうが動きやすい気がする。これは「右上」に近づくほど増加していた事実は意外な結果であった。運動感覚が何によって影響を受けているかを知るには、更なる追求が必要であろう。今後はエネルギーや力など、他の指標を使っての解析を進めていくことで、新たな事実の発見ができると考えている。

## 7. 謝辞

本研究の一部は、平成18年度日本学術振興会科学研究費補助金(B)(No.1830007300)の援助を受けて行われた。ここに感謝の意を表す。

## 文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 吉川恒夫, ロボット制御基礎理論, コロナ社, 2002.
- [4] John.J.Craig(著), 三浦宏文・下山勲(訳), ロボティクス, 共立出版, 2004.

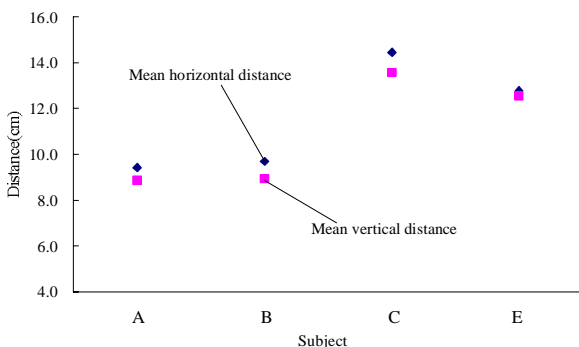


Fig.10 Mean movement distance

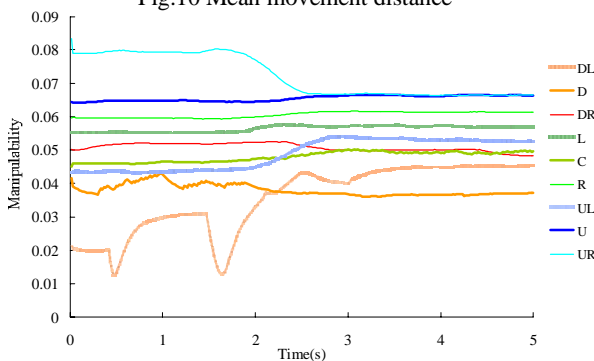


Fig.11 Result of manipulability of subject B