

## 圧力同時計測型手指用モーションキャプチャ 装置の開発と手指巧緻動作の計測

水戸部一孝<sup>†</sup>, 二階堂 勲<sup>†</sup>, 鈴木雅史<sup>†</sup>, 吉村 昇<sup>†</sup>

磁気式三次元デジタイザに圧力センサを組み合わせた圧力同時計測型手指用モーションキャプチャ装置を構築した。これを用いて、同形状で弾性の異なる二種類の容器を移動させるときの手指動作を計測し、解析した。その結果、容器の形状変化を無意識下にPIP関節で調整している様子、さらに戦略の違いによる保持方法の共通点と個人差を確認した。

### Development of pressure measurable hand-MoCap system and analysis of finger dextrous manipulation.

Kazutaka Mitobe<sup>†</sup>, Tsutomu Nikaido<sup>†</sup>, Masafumi Suzuki<sup>†</sup>  
and Noboru Yoshimura<sup>†</sup>

In this paper, we have developed the pressure measurable hand motion capture system by combined with pressure sensors and three-dimensional magnetic digitizer. We analyzed the dextrous finger movement through the task of moving a cup of water. As a result, we made clear the difference of the strategy using adaptive control based on the quantitative data of human dextrous finger manipulation.

### 1. はじめに

ヒトの手は27本の骨と19個の関節で構成されており、その制御は脳の運動野が担っている。手の制御に関与する運動野の領域は、手を除く全身のそれとほぼ等しい面積を占める[1,2]。この生理学上の事実は、ヒトにとって手の制御は大きな負担であるが、その機能に大きく依存して進化してきたことを示している。しかしながら、実際の作業環境で手の動きを正確に計測する技術は発展途上であり、過去の研究ではX-ray CTおよびテレビカメラ等を用いた限定された動作範囲における計測にとどまっていた。また、身体の動きを3次元的な位置情報の経時変化として記録するモーションキャプチャ (Motion Capture: 以下 MoCap と略す) 技術でも、既存の技術で手指の動きを精度良く測定することは困難だった。そのため、日常生活における手指動作の理解は不十分であり、繊細な指使いを計測・解析することは困難であった。

現在、全身の動きをデジタイズする MoCap には、光学式[3,4]、光ファイバー式、ジャイロセンサ式、機械式等、様々な手法が提案され、商品化されている。一方、手指用の MoCap としては、グローブに埋め込まれた光ファイバーが曲がるときに光伝送率が減衰することを機序として手指の動きを測定する製品が主流である。しかし、キャリブレーションデータを用いた計算により補正しないとつまむ動作をしても指先が一致しない、手の大きさに合わせて買い揃えなければならないなど、精度と汎用性の点で問題が残っていた。一般に、マニピュレータやロボットの関節は1軸の回転中心が存在するが、ヒトの関節では骨同士がズレながら屈曲・伸展するため回転中心は存在しない。そのため、関節の角度情報から正確な手指の動作を再現することは原理的に不可能であり、厳密に手指の動きを再現するためには各指骨の位置情報 (x, y, z) に加え姿勢情報 (Azimuth, Elevation, Rotation) が必要となる。

複数台の赤外線カメラで身体に装着した反射マーカの位置座標を算出する光学式の MoCap 装置は全身の三次元位置計測技術として最も普及しているが、晴天の屋外での使用には不向きであり、原理上、カメラから見て物体の背後にあるマーカは計測できない。また、複数台のカメラを用いても、マーカの姿勢を直接計測することはできない。そのため、通常は複数個のマーカの相対的な位置関係から計算により姿勢を推定せざるを得ず、小指の末節骨等の小さな部位の姿勢計測は困難であった。カメラの空間分解能の向上により直径 1mm の小型マーカを利用した手指の計測も試みられているが、カメラの死角に入らない様な動作に限定されるため、手を重ねたり、道具を使ったりする動作の計測は容易ではない。

<sup>†</sup> 秋田大学工学資源学部電気電子工学科  
Department of EEE, Faculty of Engineering and Resource Science, Akita UNIVERSITY

高周波磁場を発生させるトランスミッタとその磁場を受けるレシーバとを組み合わせ、トランスミッタに対するレシーバの相対的な位置および姿勢を計測する手法が磁気式の MoCap 装置である。過去の磁気式の MoCap 装置は、レシーバが大きい、サンプリングレートが低い、金属周辺では精度が低下する等の問題があり、近年では利用される機会が限られている。しかしながら、磁場は生体を透過するためカメラの死角の問題は無く、1 個のレシーバで「位置と姿勢」(6 自由度)を同時に計測することができるため、基本的な電磁気学の知識があれば高い精度で計測でき、光学式 MoCap と比べて安価にシステムを構築できるとのメリットもある。近年、磁気式デジタル技術の進歩によりトランスミッタおよびレシーバの小型・軽量化が進み、サンプリングレートも十分に実用な速度に向上したことを受け、我々は磁気式の高精度な手指用 MoCap の開発に取り組んできた[5-7]。

本論文では、過去に構築した磁気式の手指用 MoCap に圧力センサを組み合わせることで、手指の位置姿勢と指先が加える圧力を同時計測可能な圧力同時計測型手指用 MoCap 装置を構成し、本装置により水の入ったカップを移動させる際の手指巧緻動作を計測したので報告する。

## 2. 計測システムの構成

### 2.1 手指用磁気式 MoCap

図 1 に手指用 MoCap システムの構成を示す。3 次元デジタルライザ(Liberty™ 16 System, Polhemus)は、1 個のトランスミッタと 16 個のレシーバで構成されており、トランスミッタ(23×28×16mm)に対するレシーバ(9.6×9.6×9.6mm)の相対的な位置(x,y,z)および姿勢(Az,El,Ro)を同時計測することができる。また、レシーバのケーブルは指の動作を妨げないように、細く柔軟なケーブルに細線化されている。表 1 に 3 次元デジタルライザの精度および分解能を示す。精度は 1mm, 1.5deg 程度であるが、空間分解能が 4μm, 1/500deg と極めて高いことが磁気式 MoCap の特徴であり、手指の巧緻動作を研究する上での大きなメリットとなる。図 2 に右手に装着したレシーバの配置図を示す。親指には、末節骨(Distal Phalanx), 基節骨(Proximal Phalanx), 中手骨(Metacarpal Bone)の中央部の手背側表皮にキネシオテープ(Kinesiotex)を用いてレシーバを配置した。親指を除く 4 本の指には、それぞれ末節骨, 中節骨(Middle Phalanx), 基節骨の中央部の手背側表皮にレシーバを配置した。さらに、手背側有頭骨付近にもレシーバを装着し、片手あたり 16 個のレシーバを装着した。各指骨の位置姿勢を計測できるため、理論上、各関節における屈曲, 伸展, 外転, 内転等, あらゆる手の動きを計測することができる。また、手の大きさに関わらず装着できるようにトランスミッタと手掌部のレシーバを固定するグローブは伸縮性に富むバンドを巻き付けて装着する構造とした。なお、指先には滑り止めの液状プラスチックを介して固定した。2 台の Liberty は USB 経由

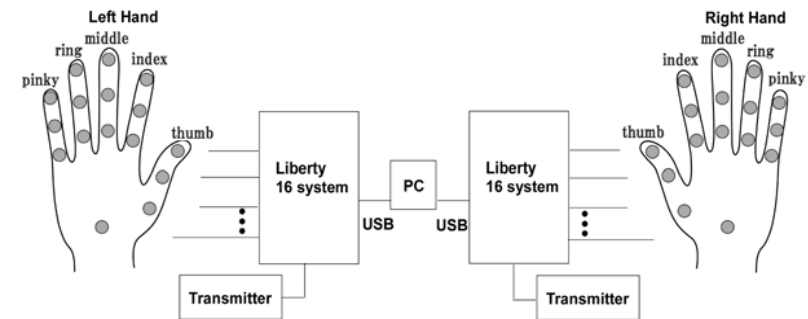


図 1 手指用磁気式 MoCap の構成  
 Figure 1 Hand MoCap system configuration.

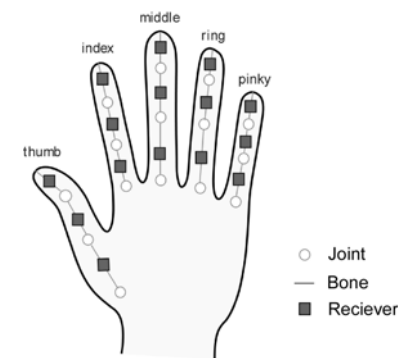


図 2 レシーバの装着位置  
 Figure 2 Layout of receivers.

表 1 精度と分解能  
 Table 1 Accuracy and resolution.

	Potion[mm]	Angle[deg]
Accuracy	0.76	0.15
Resolution	0.0038	0.0012

でコンピュータ(ThinkPad, IBM)と接続し, 32 個のレーザーの位置および姿勢をサンプリングレート 240Hz で計測した。

身体の動作計測に広く用いられている光学式 MoCap の場合には, 手指の関節部位の表皮にマーカを貼り付ける場合が多いため, 指の屈曲・伸展に伴う皮膚のズレやたわみに伴うマーカのズレが計測誤差を生む要因となっている。一方, 本手法では 1 個のレーザーで位置と姿勢(6 自由度)を計測できるため各指骨の中央部にレーザーを装着でき, 関節部に比べ指の屈曲・伸展時の皮膚のズレは相対的に小さく, 光学式の手指動作計測技術と比べて計測誤差を低く抑えることができている。

手指にレーザーを装着する段階でレーザーの姿勢を指骨のそれに 1/500deg の精度で一致させることは非常に困難であり, 通常, 指骨に対して一定角度でレーザーが傾いた状態で装着される。そのため, レーザーデータから指骨の姿勢を計算するために, 指骨に対するレーザーの相対的な姿勢, つまり補正用データ  $H$  を計測する必要がある。以下に指骨の姿勢を表す回転行列  $R_b(i)$  の算出方法を示す。

$$R_b(i) = R_r(i) \times H^{-1} \quad (1)$$

レーザーと指骨の姿勢のズレを補正するための回転行列を  $H$ , 第  $i$  フレームにおけるレーザーの姿勢データの回転行列を  $R_r(i)$  とする。回転行列  $H$  の逆行列と第  $i$  フレームにおけるレーザーの姿勢データ  $R_r(i)$  の行列の積を算出することで指骨とレーザーの姿勢のズレを補正することができる。一方, 位置ズレ(レーザーと指骨中心部とのズレ)は, レーザーの位置データを指骨の Z 軸正方向に沿って, レーザーの厚さと指の厚さを合計した値の半値分平行移動させることで補正した。以後, 位置は各指骨の中心位置, 姿勢は指骨の姿勢を示す。

## 2.2 圧力センサ

本論文では薄型(1mm 厚)の感圧導電性エラストマーセンサ(SF-5, 5mm×5mm, イナバゴム製)を手指用 MoCap に組み込んだ。本センサは無負荷時には抵抗値が  $10^7 \Omega$  以上であるが, 加圧すると抵抗値が下がり, その抵抗値から加えた圧力を算出できる。また, 減圧して無負荷状態に戻るとポリマーの弾性による復元力により導電性粒子は再び非接触状態に戻る。本論文で使用したセンサで検出可能な圧力の最小値は約 70gf であった。圧力センサの抵抗値は PC に USB 経由で接続された計測用回路(イナバゴム製)で電圧値として計測され, 図 3 に示す圧力センサの特性を近似式で数式化し, 電圧値から加えた力を算出した。なお, 圧力センサごとに特性が異なるため, 圧力センサごとに近似式を導出した。

図 4 に圧力センサの装着位置を示す。圧力センサは各指先の指腹部にキネシオテープを用いて装着した。

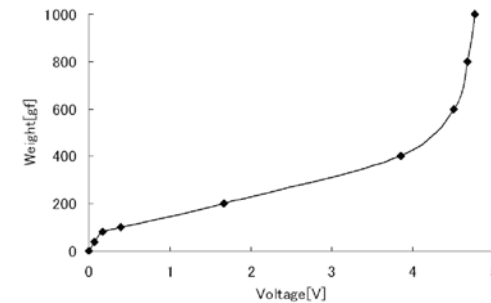


図3 圧力センサの特性

Figure 3 Characteristic of pressure sensor.

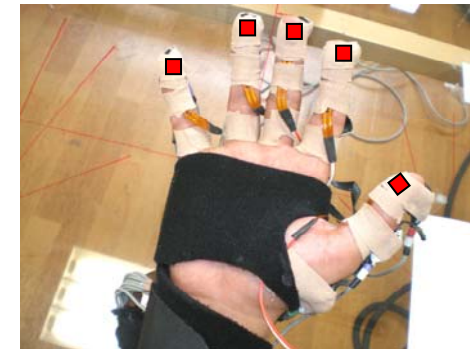


図4 圧力センサの配置

Figure 4 Location of pressure sensors.

## 3. 手指動作の計測手順

### 3.1 タスクの設定

本論文では日常的な手指動作に着目し, 水の入ったカップを右手で掴んで移動させるという単純なタスクを設定し, 新たに開発した圧力同時計測型手指用 MoCap を用いて指先が加える圧力と動作を計測した。ここでは, 薄いプラスチックの容器の内面を白色の塗料で塗装した柔らかい容器と同容器の内面を白色の樹脂でモールドした堅い容器を作製し, 見た目は同じでも弾性が異なる 2 種類の容器で実験した。容器の外形は, 高さ 12cm, 上面の直径 8.32cm, 下面の直径 5.52cm である。なお, 注水してそれ

それぞれの容器の総重量を 200g に調整した。図 5 に本実験で設定した座標系とカップ等の配置図を示す。計測では、人差し指とトランスミッタの X 軸を平行に置いた状態を初期状態として、はじめに容器をつかみ、持ち上げ、移動し、目標位置に容器を置いた後、計測開始時と同様の状態に手指を戻すように教示した。さらに、計測開始時および終了時には、クリックするように人差し指で机を叩く様に教示した。人差し指で机をクリックすることで人差し指に装着したレシーバの Z 軸成分が変化し、さらに人差し指に装着した圧力センサが机に衝突することで抵抗値が変化する。この値を手がかりに MoCap データと圧力センサデータの時間軸を調整し、同期をとった。計測には若年者(21~22 歳)の 8 名を対象とした。

### 3.2 評価用パラメータ

本論文では指の関節角に着目してデータを評価した。関節角の算出には、近位の指骨と遠位の指骨における姿勢データを用いた。図 6 に指骨およびレシーバの配置図を示す。ここで、近位の指骨を  $R_{upper}(i)$  と遠位の指骨を  $R_{lower}(i)$  と定義し、近位の指骨を原点とした遠位の指骨の姿勢  $R_j(i)$  を以下の式により算出した。

$$R_j(i) = R_{lower}(i) \times R_{upper}(i)^{-1} \quad (2)$$

(2)式において算出された回転行列  $R_j(i)$  を ZYX 型オイラー角へと変換する。ここでは、DIP および PIP 関節を 1 軸性と近似して、変換後の ZYX 型オイラー角における Elevation の値は近位の指骨と遠位の指骨の屈曲を表す。以後、この値を関節角と定義する。

手指動作の評価パラメータとして、本論文では各指骨の移動量の相互相関係数に着目した[8]。トランスミッタを原点とする外部座標で計測された移動量では、手の移動距離に比べ指先がコップに作用する動作は小さく、コップの硬さの違いによる指先動作の違いを評価することはできなかった。そこで、手背側で頭骨付近に装着したレシーバを原点とした手の甲のローカル座標系における各指骨の移動量を算出し、この相互相関係数を評価対象とした。

## 4. 計測結果

各被験者の手指動作を評価する上で、個人の癖や戦略の違いによる個人差が問題となった。例えば、計測された指骨の関節角は、手の大きさやコップを握るときの姿勢により全く異なっていた。そこで、全被験者に共通するタスクによる差を顕在化するために、容器を把持した瞬間における関節角を基準値として、コップを操作するときの関節角の相対値を算出した。以後、この関節角を「相対的な関節角」と呼ぶ。

図 7 に、容器を把持してから移動させるまでの人差し指遠位指節間関節(DIP 関節)および近位指節間関節(PIP 関節)における全被験者の「相対的な関節角」の平均値およ

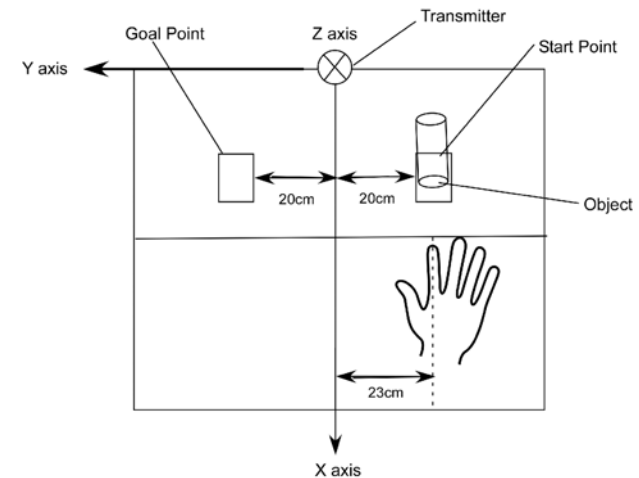


図5 トランスミッタのグローバル座標系と配置図

Figure 5 Experimental setup.

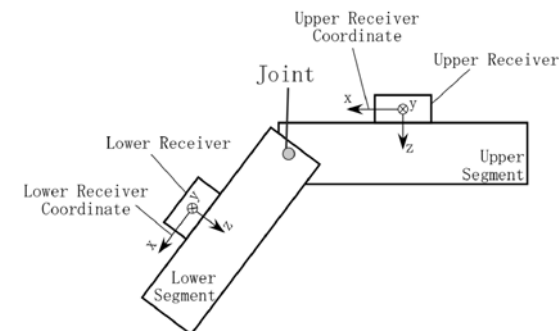


図6 レシーバのローカル座標系と指骨の位置関係

Figure 6 Relationship between bones and receivers.

び標準偏差を示す。なお、縦軸は「相対的な関節角」、横軸は容器の硬さを示しており、凡例は黒色が DIP 関節、灰色が PIP 関節の「相対的な関節角」を示している。図 7 より、硬い容器および軟らかい容器を移動させた場合における DIP 関節の相対的な関節角の値はそれぞれ 3.85deg, 3.88deg で有意差はない。一方、硬い容器に比べ軟らかい容器を移動させる場合にはそれぞれ 4.57deg, 7.02deg となり、two sample t-test の結果、危険率  $P < 0.05$  で有意に PIP 関節の「相対的な関節角」が大きく屈曲していることを確

認した。この結果より、コップを握るという比較的粗大な手指動作では、容器の変形分を PIP 関節の屈曲により補っていると考えられる。一方、DIP 関節はこのような制御には関与していないといえる。

指先が容器に加える力を解析する際に、人差し指や小指を浮かせた状態で容器を掴むなど、持ち方に個人差が多く現れ、戦略の違いによる個人差が問題となった。そこで、本論文では、容器を把持してから離すまで圧力センサの閾値以上の力を維持した指のみを対象として指先が加える力の平均値を算出した。図8に指先が容器に加えた力の平均値を示す。縦軸は指が容器に加えた力、横軸は容器の種類を示す。図8より、硬い容器を移動させる場合には、柔らかい容器と比べ加える力が有意に増加することを確認できる ( $P<0.01$ )。また、硬い容器を移動させる条件では加える力のばらつきが大きいのに対し、柔らかい容器では標準偏差は小さく、ほぼ一定の力で支えていることを確認できる。

次に、コップを掴んでから置くまでの親指を除く各指の末節骨と中節骨の相互相関係数を算出した。表2に全被験者の相互相関係数の平均値を示す。表2より、容器の堅さの違いで相互相関係数を比較すると、硬い容器を移動させる条件では人差し指および中指の相互相関係数が大きく、柔らかい容器を移動させる条件では薬指および小指の相互相関係数が大きいことがわかる。相互相関係数の大きさは各指骨の移動量の違いを示しており、相関係数が高いということは末節骨と中節骨の移動量が等しいこと、つまり DIP 関節を固定していることを意味する。一方、相関係数が低い場合には DIP 関節が屈曲・伸展していたことを意味する。つまり、硬い容器を移動させる際には（容器の上部を支える）人差し指と中指の指が固定されていたのに対し、柔らかい容器を移動させる際には（容器の下部を支える）薬指と小指が固定された状態で容器を移動させていたと推測できる。つまり、容器の堅さに応じて無意識のうちに戦略を変え、容器を支える指を切り替えている様子を確認できる。この結果は、逆に、硬い容器を移動させる際には薬指と小指を屈曲・伸展させて容器のバランスを取り、柔らかい容器を移動させる際には中指で容器の傾きを調整しバランスを取っている様子を確認できる。本結果は、ヒトが無意識のうちに容器の硬さにより手指の把持方法を切り替えて状況に適応している様子を定量的に示している。

## 5. おわりに

本論文では、高い空間分解能を有する磁気式手指用 MoCap に圧力センサを組み合わせて手指の3次元的な動作と指先が加える圧力を同時に収録できる計測システムを構築した。そして、硬さが異なる2種類の容器を把持・移動する過程の手指巧緻動作および指先が加える圧力を計測・解析した。その結果、柔らかい容器等の変形に伴う変位量の調整は PIP 関節が担っていることがわかった。また、容器移動時の各指骨の移

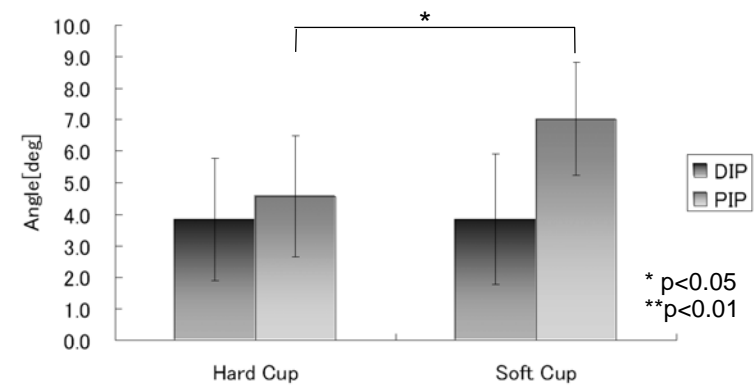


図7 人差し指の DIP 関節および PIP 関節の相対的な関節角  
Figure 7 Mean value of relative joint angle for grasping a cup.

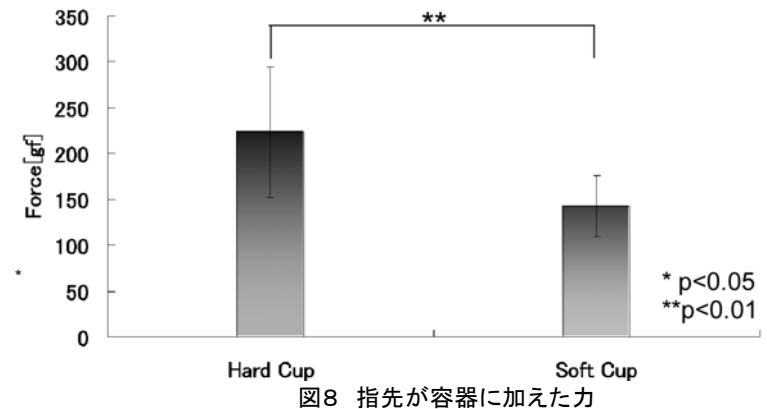


図8 指先が容器に加えた力  
Figure 8 Mean value of force for grasping a cup.

表2 末節骨と中節骨における相互相関係数

Table 2 Correlation coefficient of distal phalanx and middle phalanx

	Index	Middle	Ring	Little
Hard Cup	0.969	0.969	0.882	0.819
Soft Cup	0.946	0.885	0.929	0.911

動量の相互相関係数から、変形しない容器を移動させる際には人差し指と中指(容器上部)を固定し、薬指と小指でバランスを取っているのに対し、変形しやすい軟らかい容器を移動させる際には薬指と小指(容器下部)を固定し、中指でバランスをとっている様子を定量的に示すことができた。以上の知見は、ヒトが無意識に操作対象の状態に合わせて異なる戦略を選択していることを定量的に示している。

本論文では若年者のみを対象としてヒトの手指動作の解析を試みたが、今後、高齢者と若年者の手指動作を比較することにより臨床的に役立つ知見が得られるものと期待している。大脳皮質の積極的な制御が不可欠なヒトの手指動作を理解することは今後、医療における脳血管性障害の早期診断やヒトの手指機能を代行するロボットの実現に役立つと考えている。

### 参考文献

- 1) 酒田 英夫, 外山 敬介: 脳・神経の科学Ⅱ 脳の高次機能, 岩波書店, 東京都 pp111-130 (1999)
- 2) 鈴木 良次: 生物情報システム論, 朝倉書店, 東京都 pp213-223 (1991)
- 3) Natsuki MIYATA, Makiko KOUCHI, Tsuneya KURIHARA, and Masaaki MOCHIMARU: Modeling of Human Hand Link Structure from Optical Motion Capture Data, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp2129-2135 (2004)
- 4) Makiko Kouchi, Natsuki Miyata, Tsuneya, and Masaaki Mochimaru: An Analysis of Hand Measurements for Obtaining Reorientative Japanese Hand Models, SAE Tech Pap Ser, pp2734-2739 (2005)
- 5) 水戸部 一孝, 佐藤 潤, 吉村 昇: 手指用モーションキャプチャ装置の開発と応用事例, 日本バーチャルリアリティ学会第12回大会論文集, pp327-330 (2007)
- 6) 水戸部 一孝, 佐藤 潤, カビール ムハムドゥル, 鈴木 貴芳, 玉本 英夫, 吉村 昇: 磁気式3次元位置センサを用いた手指のモーションキャプチャシステムの開発, 平成18年電気学会全国大会講演論文集, Vol.3, pp134 (2006)
- 7) K.Mitobe, T.Kaiga, T.Yukawa, T.Miura, H.Tamamoto, A.Rodgers, and N.Yoshimura: Development of a Motion Capture System for a Hand Using a Magnetic Three Dimensional Position Sensor, ACM SIGGRAPH2006, No.102 (2006)
- 8) 市原 清志: バイオサイエンスの統計学, 南江堂, 東京都, pp224-232 (1994)