

姿勢事例の獲得とその補完による手の計測形状の姿勢操作

大内田裕胤[†] 藪内 智浩[†] 船富 卓哉^{††} 飯山 将晃^{†††} 椋木 雅之^{††}
美濃 導彦^{††}

E-mail: †{ouchida,yabuuchi}@mm.media.kyoto-u.ac.jp,
††{funatomi,mukunoki,minoh}@media.kyoto-u.ac.jp, †††iiyama@econ.kyoto-u.ac.jp

あらまし 姿勢操作可能な三次元手モデルを三次元計測によって獲得する手法が提案されている。このモデルは体節を表現する複数の剛体から構成されており、各体節を適切な位置・向きに配置すれば任意姿勢での形状を表現することができる。本研究では手の姿勢を計測できるデータグローブを用いてこのモデルの姿勢を操作することを目的とし、データグローブの伸びデータに応じて三次元手モデルの各体節の適切な配置を求める手法を提案する。データグローブから計測されうる任意の伸びデータに対する書く体節の適切は配置を得るために、まず、ある姿勢における伸びデータと三次元手モデルの各体節の配置を対応付けた「姿勢事例」を複数獲得する。次に、獲得した姿勢事例を伸びデータについて補完し、姿勢事例にない伸びデータに対する三次元手モデルの各体節の配置を求める。伸びデータに対する体節の配置の推定値と実測値とを比較し、提案手法の有効性を確認した。

キーワード 手, 計測形状, 三次元モデル, 姿勢操作, データグローブ

Completion of the Posture Examples for Manipulating 3D Hand Model

Hirothane OOUCHIDA[†], Tomohiro YABUUCHI[†], Takuya FUNATOMI^{††}, Masaaki IIYAMA^{†††},
Masayuki MUKUNOKI^{††}, and Michihiko MINOH^{††}

E-mail: †{ouchida,yabuuchi}@mm.media.kyoto-u.ac.jp,
††{funatomi,mukunoki,minoh}@media.kyoto-u.ac.jp, †††iiyama@econ.kyoto-u.ac.jp

Abstract In this paper, we aim to manipulate a personalized 3D hand model. We can acquire the 3D hand model consisted of 18 segments by the 3D measurement of his/her hand and markers on it. In order to manipulate the 3D hand model with a data glove, we need the appropriate position and rotation of segments for the sensor data of the data glove. However, it is not easy to acquire appropriate position and rotation of the segments since the 3D hand model does not have joints and segments are not linked. In this paper, we collect *the posture examples* as the pairs of the sensor data of the data glove and the position and rotation of segments. We complete the position and rotation of segments for all the sensor data to determine the posture of the 3D hand model. We verified the effectiveness of our method by comparing the calculated position and rotation of segments and the measured ones in the same sensor data.

Key words hand, measured shape, 3DCG model, posture manipulation, data glove

1. はじめに

TV 番組や教育用コンテンツなどで、出演する演者を撮影した映像に CG で作成した仮想背景や仮想物体を重畳した合成映像が多く利用されている。このような合成映像を作成する手法に、バーチャルスタジオ (VS: Virtual Studio) と呼ばれるシステムを用いる手法がある [1]。単に演者と仮想物体とを重畳するだけでなく、演者が仮想物体と直接インタラクションする映像を作成することができれば、そのような映像は視聴者にとってより直観的になると考えられる。直接的なインタラクションの 1 つ

として、演者が自身の手を用いて仮想物体操作を行う場合、現実世界の演者の手の位置・姿勢を仮想空間に座標変換することで仮想物体と手との干渉判定を行うが、演者の手と仮想物体の間にはレジストレーション誤差が発生する [2]。これに起因する位置ずれが合成映像中に現れると、視聴者にとっては違和感のある映像となってしまう。

これに対して尾原らは、演者の手と仮想物体との間に位置ずれが存在する場合、演者の手首から先を CG で作成した「仮想手」に置き換えることにより、視聴者に違和感を感じさせない合成映像を作成する手法を提案し



図 1 楕円体集合の三次元手モデル

た [3] . この手法において, 仮想手は人間の手の掌や指の体節を剛体体節と見立てた体節モデルの集合として表現され, データグローブで測定した伸びデータに合わせて姿勢操作することができるようになっている. 通常, 仮想手はデータグローブで計測された演者の手の姿勢と同じ姿勢を取っており, その形状が演者の手首から先に表示される. 演者が仮想物体を操作するとき, 演者の手と仮想物体との間に生じる位置ずれを解消するため, 仮想物体と仮想手をずれなく繋ぐように仮想手の姿勢を修正する.

しかしこの手法で用いる仮想手は各体節を楕円体で表現したモデルであり, 演者の手を写実的に表現できるものではなく, 仮想手モデルの形状そのものに違和感があるという問題があった (図 1) . この手法を実用化するためには, 演者の手に重畳する仮想手モデルが, 演者の個人特徴を反映していることが求められる.

本研究では, 演者の手を三次元計測することで, 演者の個人特徴を反映した写実性の高いモデルの獲得を目指す. 実際に手を三次元計測し, さまざまな姿勢における手の三次元形状を表現可能なモデルを獲得する手法が提案されている [4] . 合成映像に用いる「仮想手」として, 予め演者の手を計測して獲得した三次元手モデルを用いれば, 尾原らの手法 [3] の問題点を解決できると考えられる. [4] の手法で獲得される三次元手モデルは, 手の体節を表現する 18 の体節モデルから構成されている. これらの体節モデルを適切な位置・向きになるように配置すれば, さまざまな姿勢における手形状を表現することができる. しかし, 不適切に配置してしまうと, 各体節がばらばらとなり人間の手形状としてみなすことができない形状にもなりうる. そのため, この三次元手モデルが常に人間の手らしい姿勢を表現するためには, 体節モデルの配置に対して制約が必要となる. 特に, 演者が装着したデータグローブによってこの三次元手モデルの姿勢操作を実現しようとする, データグローブで測定した伸びデータに対応した各体節モデルの配置を獲得することが必要となる. そこで, 本研究ではデータグローブにより得られる伸びデータに応じて各体節モデルの位置・向きを適切に設定する手法を提案する.

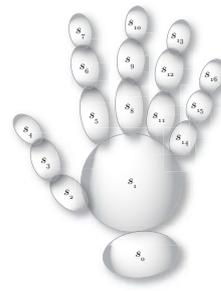


図 2 三次元手モデルを構成する各体節の一例

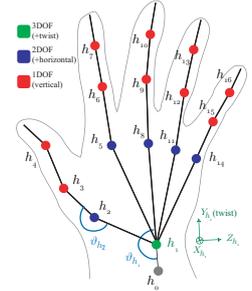


図 3 各体節モデルの親子関係の一例

本手法では事例ベースアプローチにより伸びデータに対応した各体節モデルの配置を獲得する. まず, ある姿勢においてデータグローブから得られる伸びデータと, それと同じ姿勢における各体節モデルの配置の対応を「姿勢事例」として複数獲得する. データグローブによる伸びデータの計測と, 各体節モデルの配置の計測を行う際に同一の姿勢を取れるようにするため, 「基準物体」を導入し, その把持の仕方を教示することとした. この基準物体を, データグローブを装着した状態で把持させることで伸びデータを計測し, また演者の手の三次元形状計測を行う際にも同様に基準物体を把持させることで, 同一の姿勢における各体節モデルの配置を獲得する. 同一の物体を同様にして把持すれば, そのときの手の姿勢が同一となるという仮定をおくことで, 伸びデータと体節モデルの配置の対応付けを「姿勢事例」として獲得することができるようになる. こうして得られた複数の姿勢事例を伸びデータについて補完することによって, 任意の伸びデータに対する各体節モデルの配置を獲得する.

2. 三次元手モデルの獲得と姿勢操作

2.1 計測に基づいた三次元手モデルの獲得手法

三次元手モデルは一般的に掌, 指などの体節を表現する複数の体節モデルから構成され (図 2) , 各体節モデルは図 3 のように, 手首を「根」, 指先を「葉」とした木構造のような親子関係を持つ. 各体節モデルを適切な位置・向きに配置することで, さまざまな姿勢における手形状を表現することが可能となる.

実際の人の手を計測したデータを基にこのような三次元手モデルを構築することで, 写実性の高いモデルを獲得する手法がいくつか提案されている.

Yasumuro らは, ある姿勢において手の三次元形状を計測し, 手の姿勢を表現可能なスケルトンを導入してこの計測された手形状と対応付けることで, 姿勢操作が可能な三次元手モデルを構築している [5] . この手法ではまず, 手を開いた姿勢で石膏型を取り, レーザレンジファインダを用いてその三次元形状を計測することで, 手の三次元形状計測を行う. 次に, 手の骨格構造を近似して, 姿勢表現可能なスケルトンを導入している. このスケル

トンは一定の長さを持った体節が関節に相当する部分で接続されており、各関節部分は1次元もしくは2次元の回転自由度を持っている。このスケルトンを、先ほど計測を行った手と同じ姿勢に変形し、獲得した三次元形状モデルに手動で位置合わせする。これを基に、形状モデルを構成する各頂点とスケルトンとの対応付けを自動的に構築することで、スケルトンを用いて形状モデルを変形操作することができるモデルを構築している。この三次元手モデルは、実際の手を三次元計測しているため、写実性の高い形状モデルを獲得することができている。しかし、型を取ったとき以外の姿勢における手の形状は、手動で配置されたスケルトンを基に生成されており、形状が正しく再現されているとは限らない。

また、栗原らはX線CT画像を用いて姿勢操作可能な三次元手モデルを獲得する手法を提案している[6]。この手法では3つの姿勢において手のX線CT画像を獲得し、その姿勢における表皮と骨格の形状を獲得している。ある1つの姿勢を基準として、その姿勢における各骨の形状を他の2姿勢における各骨の形状に対して剛体変換を用いて位置合わせする。位置合わせに用いた剛体変換から、各骨を接続する関節の位置・回転軸を推定している。こうして獲得した関節位置・軸を用いると、任意の角度で関節軸周りで骨形状を回転させることで、他の姿勢における骨形状を表現することができる。こうして得られる骨形状に対する表皮形状を、計測を行った3つの姿勢で獲得した表皮の形状から補間することで生成し、その姿勢における表皮形状を表現できるモデルを獲得している。しかし、この手法では少ないサンプルで補間結果を示されているのみであり、任意の関節角度に対応する手形状の生成は実現されていない。また補間手法の特性から、任意の角度に対応する手形状を得るためには大量のサンプルが必要になると予想され、X線CTのような特殊な装置で大量のサンプルを獲得することは現実的でない。

一方、船富らはレーザーレンジファインダを用いて多くの姿勢における三次元計測を行い、さまざまな姿勢での手形状を表現可能なモデルを獲得する手法を提案している[4]。この手法では、手を掌・指など18の剛体体節からなる体節集合として定義し、その体節形状を組み合わせることで、手全体の形状を表現している。さまざまな種類の姿勢において計測された手形状を統合することで各体節の形状を獲得しているため、さまざまな姿勢における適切な手形状を表現可能な三次元モデルを獲得することができる(図4)。本研究では、さまざまな姿勢において写実性の高い形状を表現可能な手モデルを獲得するため、この手法を用いることを考える。

2.2 複数の体節モデルによって表現された手モデルの姿勢操作

船富らの手法[4]によって獲得される三次元手モデル

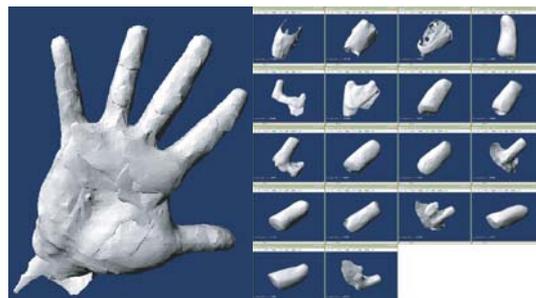


図4 体節集合で表現される三次元手モデルと計測形状

は、各体節モデルを適切な位置・向きに配置することで、さまざまな姿勢における手の形状を表現することができる。しかし、Yasumuroら[5]や栗原ら[6]が用いていたようなスケルトンや関節構造を持たず、体節同士が接続されていないため、各体節モデルの配置によっては、人間の手を取り得ることのない形状になってしまうこともある。

船富らの手法では、各体節の適切な配置を獲得するため、手の三次元形状を計測する際に各体節に3つ以上ずつのマーカを貼付し、その三次元位置を計測している。そのため、三次元手モデルの姿勢操作を行う際にも、演者の手の各体節にマーカを貼付し、その三次元位置を常に計測することができれば、それを基に各体節モデルを配置することで演者の手の姿勢に応じた形状を表現することができる。このような手法は大量のカメラで取り囲まれた三次元形状計測装置の内部であれば実現可能であったとしても、本研究が想定するようなバーチャルスタジオで大量のカメラを設置することはスタジオという性質上難しく、また演者自身の身体によるオクルージョンも避けられないことから、このようなアプローチは現実的でなく、データグローブのような演者の手の姿勢を計測するデバイスからのセンサデータを基に姿勢操作を実現することが望ましい。

2.2.1 点関節モデルに基づく姿勢操作

データグローブで上記のような三次元手モデルの姿勢操作を行うためには、各体節モデルの適切な配置を伸びデータから変換するためのスケルトンを導入しなければならない。このような体節モデルの配置に対する制約として、Yasumuroら[5]や栗原ら[6]が用いたような、関節周りの回転構造を表現する点関節モデルが一般的に用いられる。

Kirkらは、人体の体表に貼付したマーカの三次元位置をさまざまな姿勢において計測し、それを基に各関節の位置を推定することで点関節モデルを獲得する手法を提案している[7]。この手法では、関節を中心とした回転のみによって各体節の配置を表現することが可能であるという点関節を仮定しているが、実際の関節はより複雑な構造をしている。例えば、屈曲の際には関節のすべりが

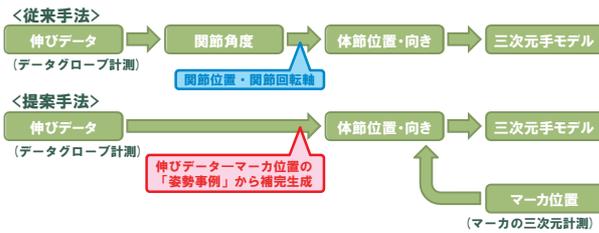


図5 点関節モデルを用いた従来手法と提案手法との比較

発生し、体節は関節を中心とした回転だけではなく、並進もさせなければ位置合わせを行うことができない。このような並進成分を関節中心周りの回転によって吸収しようとした場合、関節中心は体節から遠く離れた場所に設定されてしまう。このような事態を防ぐため、体節から関節中心までの距離もペナルティとして推定を行っているが、その結果として並進成分は誤差として扱われることになる。特に、手を構成する各体節の配置は、体節の親子関係を基に親（手首）から子（指先）へと逐次的に決定される。複数の関節を介して体節の位置・向きを定める指先の体節では、回転のみでは吸収できないこのような誤差が蓄積し、結果として生成される姿勢と実際の手の姿勢とのあいだには大きなずれが生じる。

2.2.2 事例に基づいたスケルトンに基づく姿勢操作

そこで本研究では、各体節モデルの配置に対する制約として点関節モデルを用いるのではなく、事前に複数の姿勢で伸びデータや各体節の位置・向きを事例として獲得し、これを補完したものをを用いる。これを基に任意の伸びデータに対する各体節の位置・向きを獲得する手法を提案する(図5)。

本手法ではまず、データグローブの伸びデータと各体節の配置を同一の姿勢において計測することで対応付け、複数の「姿勢事例」を獲得する。このとき、事例を獲得した手の姿勢が偏っていると補完がうまくいかず、未知の伸びデータに対する各体節の適切な配置を獲得できないと考えられる。そのため、伸びデータの値域を考慮して多様な姿勢における事例を獲得する。

各体節の配置は、手の形状を計測する際に各体節の表面に貼付したマーカの三次元位置をもとに獲得する。各体節は剛体であると仮定しているため、ある姿勢で獲得した各体節のマーカの三次元位置を基準として、体節ごとに個別の剛体変換を施すことで、任意の姿勢における各体節のマーカ位置に位置合わせできる。本研究では、手を広げた「パー」の姿勢を基準姿勢0とし、基準となる各体節のマーカの三次元位置を獲得する。また、他の姿勢sにおけるマーカ位置を獲得し、これに基準姿勢のマーカ位置を位置合わせするのに必要となる剛体変換を、姿勢sにおける各体節の配置として獲得する。本手法では、各体節の位置合わせに並進・回転を含んだ剛体変換を用いるため、点関節モデルが持つ回転だけでは吸収で

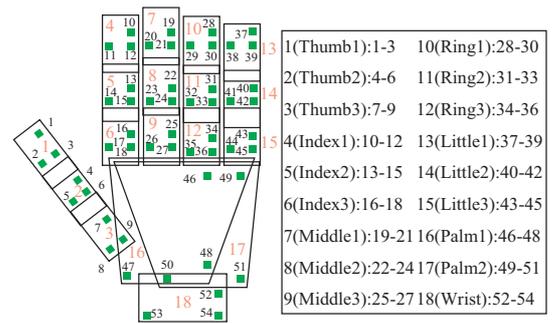


図6 各体節における体節番号とマーカ番号

きなかつた並進成分にも対応することが可能であり、指先の体節でも誤差が蓄積してしまわない。

次に、事例として獲得された伸びデータとそれに対応する各体節の剛体変換の集合を用いて補完処理を行うことで、事例にない伸びデータに対する各体節の剛体変換を獲得する。ひとつの体節の剛体変換に影響を及ぼすのはデータグローブに取り付けられたセンサ1つのみであると仮定し、その伸びデータを変数とする一価関数を用いることによって、姿勢事例から得られるその体節の剛体変換を表現する。この関数によって各体節の剛体変換の補完を実現し、任意の伸びデータに対する各体節の配置を獲得する。

以下では、それぞれの処理の詳細について述べる。

3. 基準物体を用いた姿勢事例の獲得

3.1 基準物体の導入

姿勢事例として、手にデータグローブを装着して計測される伸びデータと、体節モデルの配置として各体節の基準姿勢に対する剛体変換を同一の姿勢において獲得する。剛体変換は、各体節に貼付したマーカの三次元位置をカメラを用いて計測し、これらを位置合わせすることによって獲得する。データグローブを装着した状態ではマーカをカメラによって観測することができないため、同時に伸びデータと剛体変換の獲得を行うことができない。

そこで本研究では、データグローブによる姿勢計測とマーカ位置の三次元計測のそれぞれを別々に行うこととし、それぞれの計測で同一の姿勢を再現するために「基準物体」を把持させることとする。

基準物体が同一姿勢を再現するように、手の大部分が物体に接触して指のあそびが生じない形状の物体を基準物体として選定し、指の置く場所を指定して把持方法を一意に示す。また、物体を把持した手の姿勢がいずれも似通っていると、獲得した事例から伸びデータに対する適切な剛体変換が生成されることが期待できない。そこで大きさや把持方法が多様な基準物体を用意した。

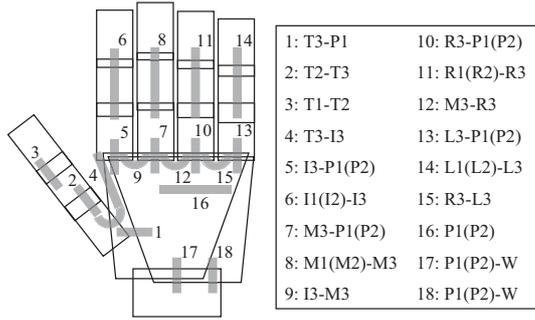


図7 データグローブの伸びセンサの配置と各体節との関係

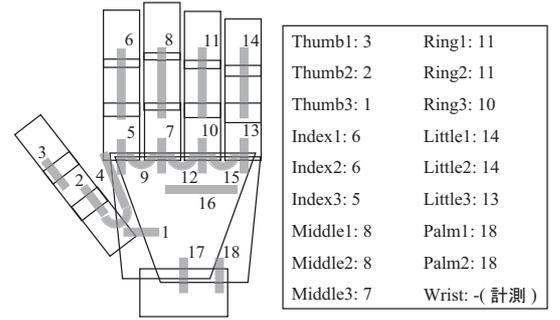


図9 剛体変換の生成に用いる伸びセンサと各体節の関係

3.2 基準物体を用いた姿勢事例の獲得

3.2.1 伸びデータと体節の剛体変換の表現

本研究で用いたデータグローブには18の伸びセンサ(抵抗素子)がついており、計測された伸びデータとして18次元ベクトル値 $\Phi = \{\phi_i | i = 1, 2, \dots, 18\}$ が出力される。基準姿勢0における伸びデータを Φ_0 、姿勢 s における伸びデータを Φ_s と表わす。

[4]の手法による三次元手モデルの獲得では、各体節に取り付けたマーカと各体節の形状を同時に計測できる。そのため、ある体節 n のマーカの三次元位置と体節モデルは同一の座標系で表現される。したがって、各体節モデルの配置は各体節のマーカ位置によって表現することができ、任意の姿勢における計測形状はその姿勢におけるマーカ位置から一意に定まる。

本研究で用いる三次元手モデルの体節配置の模式図を図6に、抵抗素子のデータグローブ上の配置と体節との関係を図7に示す。なお各体節に対して体節番号 $n = 1, 2, \dots, 18$ を付す。各体節が剛体であると仮定したとき、その位置・向きを一意に求めるためには1体節ごとに3つのマーカが必要である。そのため、体節 n に貼付するマーカを $\{p_{3n-2}, p_{3n-1}, p_{3n}\}$ とおき、図6のようにマーカを各体節に配置する。各マーカの三次元位置ベクトル p_j の集合を P と表現する。

本研究では、 K 個の基準物体を用いて K 種類の手の姿勢における伸びデータ、各体節の配置を獲得する。姿勢 k における伸びデータ Φ_k ($k = 1, 2, \dots, K$) は、各体節について、その親体節を基準とした曲がり具合を表わす値の集合である。そこで各体節 n の配置は、その親体節を基準とした、基準姿勢からの位置・向きの変化として表現する。剛体変換は回転と並進に分解して表現することとし、基準姿勢0から事例中の姿勢 k への剛体変換の回転行列を \mathbf{R}_{kn} 、並進行列を \mathbf{T}_{kn} として表わす。

事例中の姿勢 k における体節 n の剛体変換 $\mathbf{R}_{kn}, \mathbf{T}_{kn}$ は、以下の手順によって獲得する。まず、姿勢 k の親体節 n_p のマーカ位置を、基準姿勢0における親体節 n_p のマーカ位置に位置合わせする(図8(a))。位置合わせを行った体節 n のマーカ位置を $p'_{k,j}$ とおく。次に、これを基準姿勢0の体節 n のマーカ位置 $\tilde{p}_{0,j}$ に位置合わせする(図8(b))。位置合わせを姿勢 k から基準姿勢0へと行

うことを考えると、剛体変換と体節 n におけるマーカ位置と間には以下の関係式が成立する。

$$\tilde{p}_{0,j} = \mathbf{R}_{kn}^{-1} \mathbf{T}_{kn}^{-1} p'_{k,j} \quad (j = 3n - 2, 3n - 1, 3n) \quad (1)$$

本研究では、 $p'_{k,j}$ を $\tilde{p}_{0,j}$ に位置合わせする際、座標系の原点を着目している体節 n の親体節 n_p におけるマーカ位置 $p_{0,j'}$ ($j' = 3n_p - 2, 3n_p - 1, 3n_p$) の重心 O_n とする。

$$O_n = (p_{0,3n_p-2} + p_{0,3n_p-1} + p_{0,3n_p})/3 \quad (2)$$

各マーカ j について、そのマーカが属する親体節の重心 O_n を原点とした座標系への変換を $\tilde{\mathbf{T}}_n$ 、その座標系でのマーカ位置を $\tilde{p}_{0,j}$ とおく。親体節の重心を原点とした座標系を考えることは、親体節の内部付近に回転の中心を設定することに相当し、並進成分の存在する局所的な関節を表現することができる。

4. 姿勢事例の補完による剛体変換の生成

4.1 剛体変換によるマーカ位置変化の算出

各体節に貼付されたマーカの三次元位置と体節モデルは同一の座標系で表現されているため、マーカ位置変化から得られた剛体変換を加えることでその体節モデルの配置を獲得することができる。

ある姿勢 s における、体節 n のマーカ位置を $p_{s,j}$ とおく。姿勢0から姿勢 s に姿勢操作を行ったときの体節 n の位置・向きを表わす剛体変換の回転行列・並進行列をそれぞれ $\mathbf{R}_{sn}, \mathbf{T}_{sn}$ とおくと、式(1)より $p_{s,j}$ が以下のように表せる。

$$p_{s,j} = \tilde{\mathbf{T}}_n^{-1} \mathbf{T}_{sn} \mathbf{R}_{sn} \tilde{\mathbf{T}}_n p_{0,j} \quad (3)$$

提案手法では、 Φ_s における剛体変換 $\mathbf{R}_{sn}, \mathbf{T}_{sn}$ を、 Φ_s の各センサの中で体節 n の剛体変換と最も関連性のあるセンサの伸びデータ $\phi_{s,i}$ ($i = 1, 2, \dots, 18$) を変数とした、一変数関数により生成する。なお、体節ごとにどの伸びセンサを変数としたかを図9に示す。

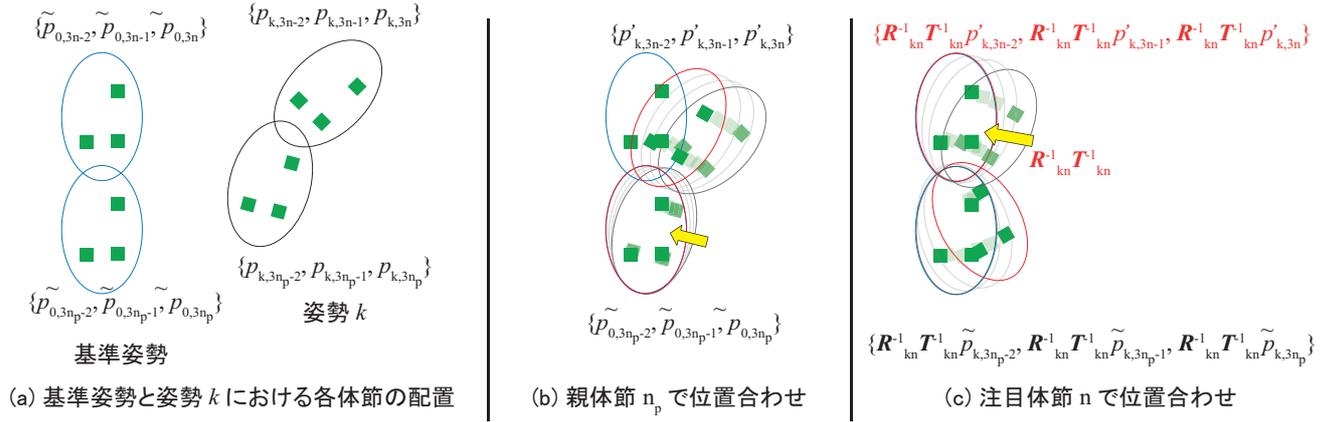


図 8 マーカ位置の位置合わせによる剛体変換の獲得

4.2 回転行列と並進行列の事例補完

2つの回転行列の補完には、四元数（クォータニオン）を用いた表現が有効であることが知られている。四元数 $\mathbf{Q} = (q_0; q_1, q_2, q_3)$ の各要素は回転行列 $\mathbf{R} = r_{ij}$ ($i, j \in \{1, 2, 3\}$) を用いて以下のように表され、姿勢 s における回転行列 \mathbf{R}_{sn} を四元数 \mathbf{Q}_{sn} に変換することができる。

$$\begin{aligned}
 q_0 &= \frac{1}{2} \sqrt{r_{11} + r_{22} + r_{33} + 1} \\
 q_1 &= \frac{r_{32} - r_{23}}{|r_{32} - r_{23}|} \sqrt{r_{11} - r_{22} - r_{33} + 1} \\
 q_2 &= \frac{r_{13} - r_{31}}{|r_{13} - r_{31}|} \sqrt{-r_{11} + r_{22} - r_{33} + 1} \\
 q_3 &= \frac{r_{21} - r_{12}}{|r_{21} - r_{12}|} \sqrt{-r_{11} - r_{22} + r_{33} + 1}
 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3) より、 K 個の姿勢事例について下式を満たす $\mathbf{R}_{kn}, \mathbf{T}_{kn}$ が存在する。

$$\mathbf{p}_{k,j} = \tilde{\mathbf{T}}_n^{-1} \mathbf{T}_{kn} \mathbf{R}_{kn} \tilde{\mathbf{T}}_n \mathbf{p}_{0,j} \quad (5)$$

四元数は四次元ベクトルとして表現できる。また並進行列 \mathbf{T}_{sn} は三次元空間中の座標変化を表わす行列だが、三次元ベクトルとしても表現できる。そこで四元数 \mathbf{Q}_{sn} を四次元ベクトルで表したものを \mathbf{q}_{sn} と、並進行列を三次元ベクトルで表したものを \mathbf{t}_{sn} とおき、以下のように各要素ベクトルを定義する。

$$\mathbf{q}_{sn} = (q_{sn}^0, q_{sn}^1, q_{sn}^2, q_{sn}^3) \quad (6)$$

$$\mathbf{t}_{sn} = (t_{sn}^x, t_{sn}^y, t_{sn}^z) \quad (7)$$

$\mathbf{q}_{sn}, \mathbf{t}_{sn}$ における事例の補完手法を、以下の2手法についてそれぞれ検討する。以下では姿勢事例において、体節 n の剛体変換に関連付けられた伸びデータをそれぞれ ϕ_{k,i_n} ($k = 1, \dots, K$) とし、 ϕ_{k,i_n} に対応する四元数および並進ベクトルを $\mathbf{q}_{kn}, \mathbf{t}_{kn}$ ($k = 1, \dots, K$) とする。

4.2.1 加重平均による補完

任意の姿勢 s における、体節 n の剛体変換に関連付けられた伸びデータ ϕ_{s,i_n} に対して、 K 種類の事例におけ

る同じセンサの伸びデータ ϕ_{k,i_n} との差分に応じた重みを設定する。 ϕ_{k,i_n} に対応する $\mathbf{q}_{kn}, \mathbf{t}_{kn}$ の重み w_{kn}^s および ϕ_{s,i_n} に対応する $\mathbf{q}_{sn}, \mathbf{t}_{sn}$ は、 $|\mathbf{q}_{sn}| = 1$ が成立するように正規化すると下式のようなになる。

$$\begin{aligned}
 q_{sn}^l &= \sum_{k=1}^K w_{kn}^s \cdot q_{kn}^l \quad (l = 0, 1, 2, 3) \\
 q_{sn}^l &= \frac{q_{sn}^l}{|\mathbf{q}_{sn}|} \quad (l = 0, 1, 2, 3) \\
 t_{sn}^m &= \sum_{k=1}^K w_{kn}^s \cdot t_{kn}^m \quad (m = x, y, z)
 \end{aligned} \quad (8)$$

ここで ϕ_{s,i_n} と ϕ_{k,i_n} の差分を評価する距離関数を $d(s, k)$ とおくと、重み w_{kn}^s は以下のように表される。

$$w_{kn}^s = \frac{d(s, k)}{\sum_{k=1}^K d(s, k)} \quad (9)$$

なお本研究では、各伸びデータとの差分の絶対値による距離関数 $d(s, k) = \frac{1}{|\phi_{s,i_n} - \phi_{k,i_n}|}$ と、差分の二乗による距離関数 $d(s, k) = \frac{1}{(\phi_{s,i_n} - \phi_{k,i_n})^2}$ の2種類を用いて補完を行う。

4.2.2 回帰直線による補完

各ベクトルごとに ϕ_{s,i_n} を変数とした回帰直線を求める。 ϕ_{k,i_n} に対する q_{kn}^l ($l = 0, 1, 2, 3$), t_{kn}^m ($m = x, y, z$) の回帰直線の傾きを $a_{q_n}^l, a_{t_n}^m$, 切片を $b_{q_n}^l, b_{t_n}^m$ とおく。 ϕ_{s,i_n} に対応する $\mathbf{q}_{sn}, \mathbf{t}_{sn}$ を回帰直線上の点として求め、 $|\mathbf{q}_{sn}| = 1$ が成立するように正規化する。このとき、 ϕ_{s,i_n} に対応する $\mathbf{q}_{sn}, \mathbf{t}_{sn}$ は下式のようなになる。この手法は加重平均に対し、全ての事例を「等しく」利用した補完方法といえる。

$$\begin{aligned}
 q_{sn}^l &= a_{q_n}^l \cdot \phi_{s,i_n} + b_{q_n}^l \quad (l = 0, 1, 2, 3) \\
 q_{sn}^l &= \frac{q_{sn}^l}{|\mathbf{q}_{sn}|} \quad (l = 0, 1, 2, 3) \\
 t_{sn}^m &= a_{t_n}^m \cdot \phi_{s,i_n} + b_{t_n}^m \quad (m = x, y, z)
 \end{aligned} \quad (10)$$

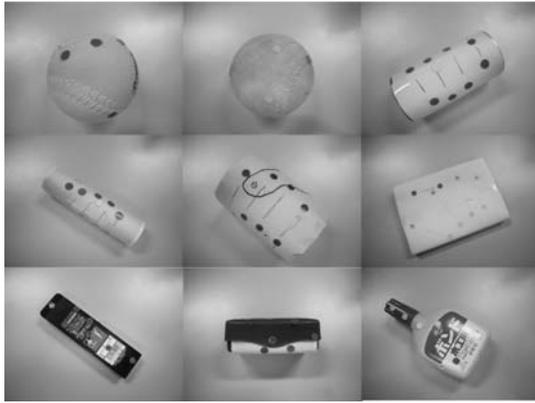
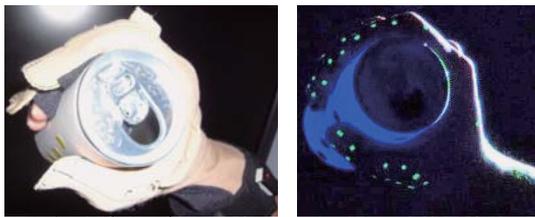


図 10 実験で用いた基準物体



(a) データグローブによる計測 (b) マーカ位置計測

図 11 姿勢事例の獲得

5. 実験と評価

5.1 実験環境

物体把持時の各指の根元，先端の位置を指定するシールを貼付した物体 9 個を用意し，そのうちの 8 個を事例獲得用の基準物体として，残り 1 個を精度評価用の基準物体として用いた．事例用物体に対しては互いに異なる 2 種類の把持方法を，評価用物体に対しては 1 種類の姿勢を教示し，9 つの物体 (図 10) で 17 姿勢を再現した．事例用物体および評価用物体を演者に把持させてデータグローブ計測を行い，17 姿勢の伸びデータを獲得した．三次元計測は，約 30cm 立方を観測空間として設定された空間において 30 台の CCD カメラを用いて行った．演者の手の各体節に 3 つのマーカを貼付し，事例用物体と評価用物体を把持させた状態でマーカ位置の三次元計測を行い，17 姿勢のマーカ位置を獲得した．同じ姿勢でデータグローブ計測，マーカ位置計測を行った様子例を図 11 に示す．

5.2 体節位置・向き生成値と実測値の誤差評価

提案手法により体節の配置が適切に生成されることを示すため，評価用の物体を把持した時に得られる伸びデータに対する剛体変換を事例を用いて補完することで生成したものの精度を評価した．8 つの事例用物体を用いて再現した 16 姿勢のうち，体節ごとに (a) ランダムに選んだ 8 姿勢を事例に用いた場合，(b) 不適切な事例 (負事例) を手動で除去した 8 姿勢を事例に用いた場合，(c) 16 姿勢全てを事例に用いた場合，の 3 通りの事例でそれぞれ比較を行った．

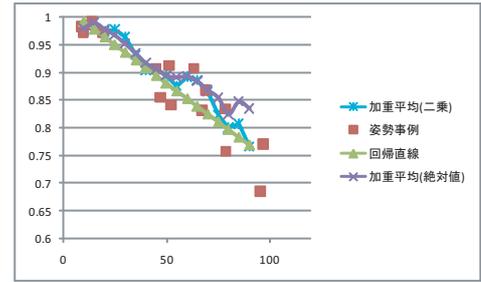


図 12 Middle2 における q_0 の生成関数と事例

4.2.1 節で述べた，近傍の事例を重み付けして q_{sn}, t_{sn} を加重平均で補完した手法を手法 1，4.2.2 節で述べた，全ての事例を均等に用いて q_{sn}, t_{sn} を回帰直線で補完した手法を手法 2 として生成値を獲得する．各手法を用いた補完によって生成された剛体変換がどの程度正しいのかを定量的に評価するため，評価用の物体を把持した時に得られるマーカの三次元位置を利用する．具体的には，各手法を用いた補完によって生成された剛体変換を利用して，姿勢 0 のマーカ位置を移動させることによって，評価用の物体を把持した時に得られるマーカの三次元位置を再現することができるが，これが実際に評価用の物体を把持した時に得られるマーカの三次元位置の実測値とどの程度ずれているかを計算することによって，補完によって生成された剛体変換がどの程度正しいかを評価する．剛体変換を利用して再現された三次元位置とマーカの三次元位置の実測値との誤差を全てのマーカに対して計算し，それを平均した結果を表 1 に示す．なお手法 1 のうち，重みを差分の絶対値で取ったものを手法 1a，差分の二乗で取ったものを手法 1b とする．横軸を伸びデータ，縦軸を四元数ベクトルの 1 要素 (q_0) とし，それぞれの事例補完手法ごとに求めた q_0 の生成関数と実際の事例における q_0 の値を表したグラフを図 12 に示す．

表 1 より，8 姿勢を事例として用いるときには，ランダムの場合よりも負事例を除去した場合の方が，マーカ位置の誤差が小さいという結果が得られた一方，依然として平均で 10mm 未満の誤差が生じた．これは，事例を獲得する際の計測誤差により不適切な事例が含まれたことで，外れ値を含みうる特定の事例に補完が影響を受けたことが原因と考えられる．従って，姿勢によっては基準物体を用いても同一姿勢を厳密には再現できなかったといえる．

ランダムに選んだ 8 事例を用いた場合と 16 事例全てを用いた場合を比較すると，手法 2 では誤差が減少したものの，手法 1 では a, b とともにあまり誤差の変化が見受けられなかった．これも先述と同様に，事例を増やした際にその中に負事例が含まれたことで，近傍事例に重みを付す手法 1 の補完が影響を受けたことが原因として考えられる．

表 1 マーカ位置の実測値と生成値の平均誤差

誤差 (mm)		手法 1a	手法 1b	手法 2
(a)8 事例 (ランダム)	平均値	8.87	7.71	18.2
	中央値	8.40	6.91	15.4
	最大値	28.3	21.8	38.9
(b)8 事例 (負事例除去)	平均値	8.88	7.15	6.69
	中央値	8.00	6.68	5.87
	最大値	22.2	15.1	15.1
(c)16 事例	平均値	8.88	7.90	7.03
	中央値	8.05	6.94	5.98
	最大値	30.0	20.2	18.1

5.3 生成値における体節位置・向き of 視覚的評価

提案手法により体節の位置・向きが適切に生成されていることを視覚的に評価するため、グーからパーへの姿勢変化でデータグローブ計測を行い、提案手法を用いて各体節の位置・向きを求めた。ここでは、不適切な事例を手動で除去した 8 姿勢の事例に対し回帰直線によって補完を行った。図 13 の左側の列にデータグローブを装着した手でグーからパーへの姿勢変化をしている様子を、データグローブから計測された伸びデータを元に補完処理によって各体節の剛体変換を計算し、それを用いて姿勢 0 のマーカ位置を移動させた結果を図 13 の右側の列に示す。図 13 左側の列の画像から確認できる手の姿勢と、図 13 右側の列のマーカ位置から確認できる手の姿勢とが一致していれば、データグローブによる三次元手モデルの姿勢操作が正しくできていると見なすことができる。図 13 左側と右側を比較してみると、左側の画像で演者がとっている手の姿勢が、右側のマーカ位置の配置によってある程度は再現できているが、まだ不十分なところがある。提案手法による姿勢事例の補完を用いた三次元手モデルの姿勢操作が実現できているが、補完方法については更なる検討が必要であることが確認できた。

6. 結 論

本研究では、三次元計測により獲得した計測形状をデータグローブで姿勢操作するために、姿勢事例を補完することで伸びデータに対応する体節の位置・向きを生成する手法を提案した。まず、伸びデータとマーカの三次元計測により求まる体節位置・向きとを対応付けた姿勢事例を、「基準物体」を導入して複数獲得した。次に、姿勢事例にない伸びデータに対する剛体変換の回転成分・並進成分をそれぞれ事例の補完により生成した。剛体変換の実測値と生成値の比較、および生成値の視覚的評価により提案手法の有効性を示した。

今後の課題として、今回対応付けに失敗した負事例があったことを踏まえ、姿勢事例を獲得するために姿勢を再現する手法について、更なる検討が必要であると考えられる。また、事例を獲得する際に、最も基準物体の個数が少なく、かつ効率良く多様な姿勢の事例を獲得する

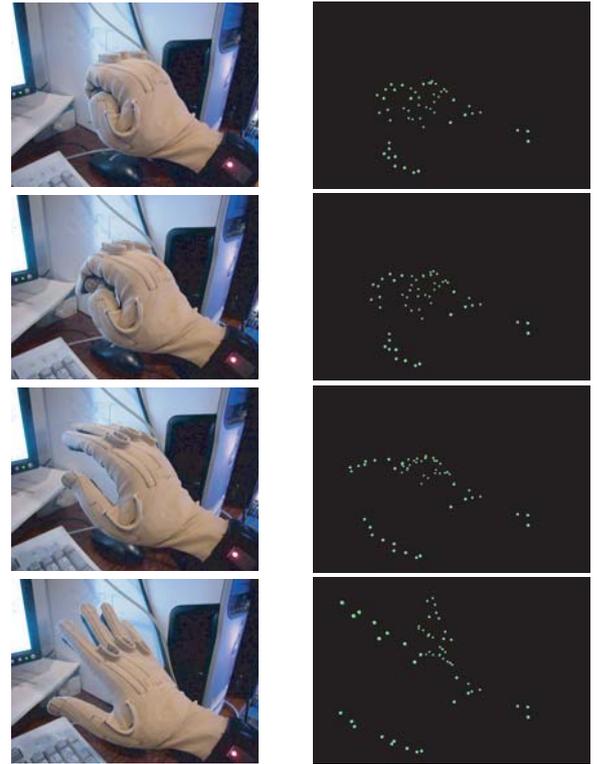


図 13 実際の手の姿勢と提案手法で生成したマーカ位置

ためにどのような形状の基準物体をいくつ用いるか、ということにも更なる検討が必要であると考えられる。さらに、体節との関係性に応じて複数のセンサの伸びデータを用いることで、より高精度な体節位置・向きの生成を実現することも課題として挙げられる。

文 献

- [1] S. Gibbs, C. Arapis, C. Breiteneder, V. Lalioti, S. Mostafawy, J. Speier, "Virtual studios: an overview", IEEE Multimedia, Vol.5, Issue 1, pp.18-35, 1998.
- [2] 角所考, 萩原 史郎, 美濃 導彦, "仮想現実感による仮想物体操作仮定を利用した適応的レジストレーション", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J85-D No.11 pp.1701-1713 2002.
- [3] 尾原 秀登, 角所考, 美濃 導彦, "バーチャルスタジオにおける演者の手を用いた仮想物体の直接操作の実現", 信学技法, MVE, vol.106, no.91, pp.103-109, MVE2006-21, 2006.
- [4] 船富 卓哉, 飯山 将晃, 角所考, 美濃 導彦, "光切断法による複数運動剛体の形状計測", 電子情報通信学会論文誌 Vol.J90-D No.8, pp.1858-67, 2007.
- [5] Yoshihiro Yasumuro, Qian Chen, Kunihiko Chihara, "Three-dimensional modeling of the human hand with motion constraints", Image and Vision Computing Vol.17, Issue 2, pp.149-156, February 1999.
- [6] 栗原 恒弥, 宮田 なつき, "医用画像を用いた変形可能な手の CG モデル", 画像電子学会論文誌 Vol.33 4-B, pp.539-546, 2004.
- [7] Adam G. Kirk, James F. O'Brien, David A. Forsyth, "Skeletal Parameter Estimation from Optical Motion Capture Data" IEEE CVPR, Vol.2, pp.782-788, 2005.