

# センサ位置の限定されたデータグローブにおける データ補正法の検討

A Study of Data Adjustment Method of Data-glove  
that Sensor Positions are Limited

森裕太郎<sup>1)</sup>, 舟橋健司<sup>2)</sup>

1) 名古屋工業大学 情報工学専攻 ( 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, moriyu@center.nitech.ac.jp )

2) 名古屋工業大学 情報工学専攻 ( 〒 466-8555 名古屋市昭和区御器所町, kenji@nitech.ac.jp )

概要: 安価なデータグローブはセンサ数が少なく, 全ての指関節角度を直接取得できない. 当研究室ではこれまでに各指のセンサが第 2 と第 3 関節にまたがるデータグローブに対して, まず手動作のパターンを推定した上で各指関節角度を推定する手法を提案している. 本研究では, 各指の第 2 関節のみにセンサがあるグローブにおいて, 手動作が推定できたと仮定した上で, 5 つのセンサ値から全ての指関節角度を推定する手法について検討する.

キーワード: データグローブ, センサ位置, 関節角度推定

## 1. はじめに

データグローブはバーチャルリアリティ ( VR ) 分野において広く用いられているインタフェースであり, データグローブに関する多数の研究が行われている [1][2]. データグローブは指関節部に備えたセンサによって各指関節の屈曲を測定するものであり, 屈曲度合を正確に測定するためには, センサを多数備えていることが望ましい. しかしそのようなグローブは高価になりがちであり, 一般家庭を対象とした VR システムを考える場合には価格が問題である. 一方, センサ数を抑えた低価格のグローブも存在するが, そのようなグローブを用いた場合には全ての指関節角度を直接的には取得できないという問題がある. そこで当研究室では, センサ数が少ないデータグローブから全ての指関節角度を得るためのデータ補正法を提案している [3][4]. この手法では, まずユーザが行う手動作を把持動作と仮定し, 人が行う把持動作の中からいくつかの代表的な把持動作を選んでおく. その上で, ユーザが行う把持動作はそれぞれの代表把持動作の合成動作として表現可能であると仮定する. それぞれの代表把持動作は, 事前にセンサ値と各指関節角度の対応関係を調べておくことで, 全ての指関節角度を推定することが可能である. 代表把持動作を行っているとき想定した時の指関節角度を, 合成動作を構成する代表把持動作の比率に基づいて各角度の加重平均を算出することでユーザの指関節角度を決定している.

ところで, これまで当研究室で提案してきたデータ補正法は, 5DT Data Glove 5 Ultra のような, 各指につき 1 本, 第 2 関節と第 3 関節にまたがるようにセンサが備え付けら



図 1: 5DT Data Glove 5 Ultra



図 2: DG5 VHand

れたグローブ ( 図 1 ) を想定していた. しかしグローブの中には, DG5 VHand ( 図 2 ) のような, 第 2 関節部のみにしかセンサが存在しないものも存在する. そのようなグローブを利用する場合, 第 3 関節の運動は直接的にはセンサ値を変化させない. そのため, 第 3 関節角度の推定に従来のデータ補正法を適用することは難しい. なお第 1 関節角度は, 第 2 関節角度との比例関係から算出できる [5]. そこで本研究では, 第 2 関節部にのみセンサが存在するグローブ

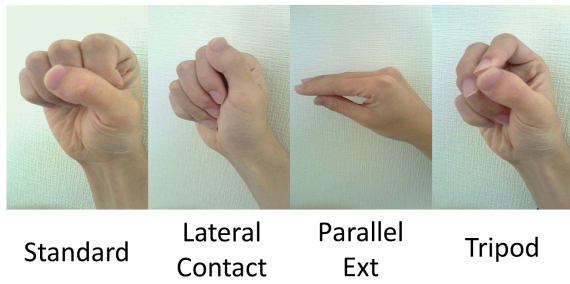


図 3: 代表把持動作

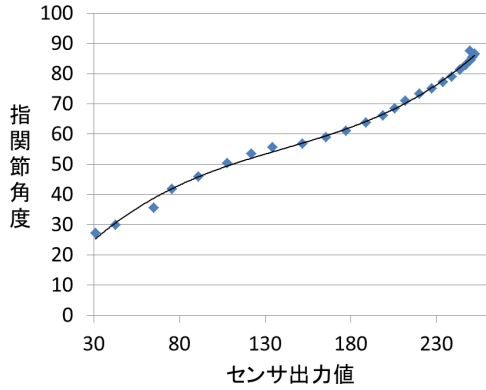


図 4: センサ値と関節角度真値の対応関係の例

から第 3 関節角度を推定する手法について検討する。

以下、2 章では当研究室でこれまで提案してきた指関節角度推定法について、3 章では第 3 関節角度を推定する手法について、4 章では実験結果と考察について述べる。

## 2. 指関節角度推定手法

データグローブのセンサが第 2 関節と第 3 関節にまたがる場合の関節角度推定法を述べる。

### 2.1 代表手動作

まず、人が行う把持動作の中から、4 つの代表把持動作を設定する(図 3, 手を開いた状態と図中それぞれの姿勢との間の動作)。具体的な決定方法については文献 [3] を参照されたい。また、これらの代表把持動作を行った際の、各時刻における少数センサデータグローブのセンサ出力値、および関節角度の真値を測定する。なお当研究室では関節角度の真値としてセンサを多数備えたデータグローブ(Immersion 社, CyberTouch)から得られた値を用いている。そして、センサ値と真値の同時刻における値を対応付けることで、図 4 のような対応関係を得る。この対応関係から、代表手動作  $p$  における指  $i$  の第  $j$  関節角度  $\theta_{pij}$  を求める 3 次多項式を

得る(式 1~3)。

$$\theta_{pi1} = \frac{2}{3}\theta_{pi2} \quad (1)$$

$$\theta_{pi2} = E_{pi2}S_i^3 + F_{pi2}S_i^2 + G_{pi2}S_i + H_{pi2} \quad (2)$$

$$\theta_{pi3} = E_{pi3}S_i^3 + F_{pi3}S_i^2 + G_{pi3}S_i + H_{pi3} \quad (3)$$

ここで、 $S_i$  は指  $i$  におけるセンサ出力値であり、 $E_{pij}$ ,  $F_{pij}$ ,  $G_{pij}$ ,  $H_{pij}$  は定数である。

### 2.2 手動作推定

ユーザが行っている手動作を代表手動作の合成動作として表現するために、ユーザの手動作が代表手動作のどの動作に近いかを推定する [6]。まず各指のセンサ値を特徴ベクトルとした 5 次元特徴空間における  $n$  点に対して、多変量正規分布の確率密度関数に基づく式 4 を考える。

$$L_{pn} = \exp\left\{-\frac{1}{2}(S - \mu_{pn})^T \Sigma_{pn}^{-1}(S - \mu_{pn})\right\} \quad (4)$$

ここで  $S$  はセンサ値ベクトル、 $\mu_{pn}$  および  $\Sigma_{pn}$  は手動作  $p$  における  $n$  点目のセンサ値平均ベクトル、分散共分散行列を表す。実際にデータグローブからセンサ値が得られた際、式 4 から得られる値の中で最大となるものを選択し、現在のセンサ出力値に対する代表手動作  $p$  における尤度を得る(式 5)。

$$L_p = \max_n \{L_{pn}(S : \mu_{pn}, \Sigma_{pn})\} \quad (5)$$

各代表手動作について  $L_p$  を求め、得られた  $L_p$  から比率  $r_p$  を求める(式 6)。

$$r_p = \frac{L_p}{\sum_{p=1}^P L_p} \quad (6)$$

なお、 $P$  は代表手動作の総数を表し、ここでは 4 である。最後に、この比率に基づいて各代表手動作の指関節角度の加重平均を求めることでユーザの指関節角度を決定する。

## 3. 第 3 関節角度推定手法の検討

第 2 関節部だけにセンサが装着されているグローブを対象とする関節角度推定法について述べる。本稿では 2.1 節に相当する、手動作が明らかな場合の関節角度推定手法について検討し、2.2 節に相当する手動作推定は今後の課題とする。

### 3.1 代表手動作の削減

これまで当研究室で提案してきたデータ補正法では、図 3 に示すように 4 種類の手動作を代表把持動作として設定していたが、このうち Parallel Ext は第 3 関節の運動が主である。DG5 VHand を装着して Parallel Ext を行った際のセンサ値の変化を、図 5 に示す。この図からも確認できるように、第 2 関節部にのみセンサが存在するグローブを装着して Parallel Ext を行ってもセンサ値はほとんど変化せず、代表手動作として設定する意義が失われてしまう。そこでこの Parallel Ext は代表手動作から除外し、本稿では以後、Standard, Lateral Contact, Tripod の 3 種類の手動作を代表把持動作として扱う。

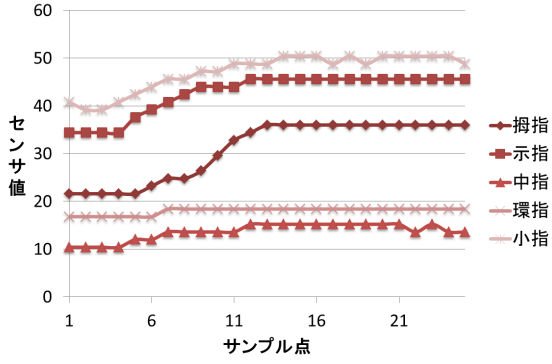


図 5: センサ値の変化

### 3.2 重回帰分析による関節角度推定

各代表把持動作を行う際、試行毎に指関節の屈曲の仕方が大きく異なるようなことはないと考えられる。そこで、代表把持動作毎に、各指同士の間には何らかの相関関係が存在すると仮定し、ある指の第 3 関節角度を推定するために複数の指のセンサ値を利用することを試みる。本研究では、関節角度を推定するために重回帰分析によるモデルを考え、回帰式を導出するための手法として重回帰分析を採用する。説明変数を指のセンサ値、目的変数を指の第 3 関節角度とし、代表手動作  $p$  におけるある指  $i$  の第 3 関節角度を式 7 より求める。

$$\theta_{pi3} = \sum_{f=1}^5 C_{pif3} S_f + I_{pi3} \quad (7)$$

ここで、 $\theta_{pi3}$  は代表手動作  $p$  における指  $i$  の第 3 関節角度を表し、 $S_f$  は指  $f$  のセンサ値である。また、 $C_{pif3}$ 、 $I_{pi3}$  は定数である。

実際に各代表手動作を行い、時刻  $time$  における各指のセンサ値  $S_f(time)$  および第 3 関節角度の真値  $\theta_{pi3}(time)$  を取得する。この時に得られる値を実測値とし、式 8 によって導出される残差の平方和  $Q$  が最小となるような係数  $C_{pif3}$  および定数項  $I_{pi3}$  を求める。

$$Q = \sum_{time} \{ \theta_{pi3}(time) - (\sum_{f=1}^5 C_{pif3} S_f(time) + I_{pi3}) \}^2 \quad (8)$$

この手順により、代表手動作  $p$  におけるある指  $i$  の第 3 関節角度を求めるための推定式が決定可能である。

### 3.3 説明変数の削減

前節で設定した推定式では、説明変数として 5 つの指全てのセンサ値を用いていた。しかし、説明変数の中には目的変数に与える影響が大きいものと小さいものが存在する。そこで、目的変数に与える影響が小さい説明変数を除外することで、冗長な計算を削減できる。目的変数に与える影響の大きさを判断するために、各推定式の説明変数に対して、式 9 より導出される  $t$  値を求める。

$$t = \frac{C_{pif3}}{S.E.} \quad (9)$$

表 1: 小指 (Standard) における  $t$  値

	拇指	示指	中指	環指	小指
$t$ 値	4.155	-1.036	1.959	-2.620	4.117

表 2: 推定モデル 1 における関節角度誤差 [度]

	拇指	示指	中指	環指	小指
Standard	8.8	5.3	10.9	16.4	10.0
Lateral Contact	8.0	8.5	13.4	11.8	8.6
Tripod	3.4	5.6	3.4	11.3	7.5
Ave.	6.7	6.5	9.2	13.1	8.7

ここで、 $S.E.$  は標準誤差を表す。一般的に、 $t$  値の絶対値が 2 より小さい場合に、統計的にはその説明変数は目的変数に影響を与えないものとされている。そこで、説明変数を取捨選択した推定式を考える (式 10)。

$$\theta_{pi3} = \sum_{f=1}^5 T_{pif} C_{pif3} S_f + I_{pi3} \quad (10)$$

$$T_{pif} = \begin{cases} 1 & (|t| \geq 2) \\ 0 & (|t| < 2) \end{cases} \quad (11)$$

例として表 1 に、把持動作 Standard の小指第 3 関節角度の回帰式における  $t$  値を示す。この例では  $t$  値の絶対値が 2 以上であるのは拇指、環指、小指であり、式 10 によって関節角度推定を行う際、示指および中指のセンサ値は除外される。さらに、比較のために説明変数の次数を 2 とした式 12 を求める。

$$\theta_{pi3} = \sum_{f=1}^5 T_{pif} (C_{pif3} S_f + D_{pif3} S_f^2) + I_{pi3} \quad (12)$$

ここで、 $D_{pif3}$  は定数であり、式 7、10、12 のいずれかにより、各指の第 3 関節角度を推定することを考える。

## 4. 実験と結果

本研究で提案する重回帰分析による推定モデルの有効性を確かめるために、実験を行った。

### 4.1 各推定モデルによる関節角度誤差

本実験では、次の 4 つの推定モデルを用いて関節角度推定を行った。

推定モデル 1 従来と同様に、注目している指のセンサ値の 3 次多項式によって関節角度を求める (式 3)。

推定モデル 2 5 つの指全てのセンサ値を用いて関節角度を求める (式 7)。

推定モデル 3 推定モデル 2 から、目的変数に与える影響度の小さい説明変数を除外する (式 10)。

推定モデル 4 推定モデル 3 で選ばれた説明変数の次数を 2 として推定式を設定する (式 12)。

表 2~5 に、各推定モデルにおける関節角度誤差を示す。

表 3: 推定モデル 2 における関節角度誤差 [度]

	拇指	示指	中指	環指	小指
Standard	4.6	5.1	2.5	5.8	3.3
Lateral Contact	7.8	7.6	9.8	8.7	8.1
Tripod	3.3	2.4	2.5	3.7	5.4
Ave.	5.3	5.0	4.9	6.0	5.6

表 4: 推定モデル 3 における関節角度誤差 [度]

	拇指	示指	中指	環指	小指
Standard	4.6	9.4	2.3	5.1	3.1
Lateral Contact	5.7	7.6	9.7	8.8	8.2
Tripod	2.7	2.3	2.0	4.4	5.1
Ave.	4.4	6.5	4.7	6.1	5.5

得られた結果を見ると、まず推定モデル 2, 3, 4 の全てで、従来のデータ補正法を用いるよりも誤差が小さくなる傾向にあることが確認できる。また、推定モデル 2 と 3 の誤差にはほとんど差が無く、変数を適切に選択すれば推定の精度に影響を与えずに説明変数の数を減らすことが可能であることがわかる。推定モデル 3 と 4 を比較すると推定モデル 3 の全ての指の平均関節角度誤差は 5.4 度であるのに対して、推定モデル 4 では 5.0 度となり、説明変数の次数を 2 としたほうが推定精度の向上が期待できるという結果となった。これらのことから、複数の指のセンサ値を用いて関節角度推定を行ったほうが、単一のセンサ値から推定を行うよりも推定精度が向上することが示された。

#### 4.2 重回帰式の妥当性

得られた重回帰式の妥当性は、決定係数によって判断することができる。決定係数が 1 に近いほど、重回帰式の精度は高いものとなる。本稿で述べた推定モデル 2, 3, 4 のいずれも高い決定係数を示したが、その例として表 6 に、推定モデル 4 における重回帰分析の決定係数  $R^2$  を示す。表を見ると、決定係数はほぼ 1 に近く、推定モデル 4 で導出した重回帰式は妥当なものであると結論付けることができる。

## 5. むすび

本研究では、第 2 関節部にのみセンサが存在するグローブに対して、第 3 関節角度が推定できるような指関節角度推定法について検討した。各指の第 3 関節角度は、重回帰分析を用いて回帰式を設定することで、複数の指のセンサ値から求めることとした。冗長な計算を削減するために、推定の上で影響の小さい指のセンサ値は、説明変数から除外した。各回帰式を用いて指関節角度を推定した際の関節角度誤差を比較したところ、従来のデータ補正法によって関節角度を推定するよりも推定の精度が向上することが確認された。今後は、第 2 関節部のみにセンサが存在するデー

表 5: 推定モデル 4 における関節角度誤差 [度]

	拇指	示指	中指	環指	小指
Standard	3.3	7.3	1.2	5.1	2.3
Lateral Contact	8.0	5.4	8.3	8.6	8.0
Tripod	2.6	2.6	2.0	5.6	5.3
Ave.	4.6	5.1	3.8	6.5	5.2

表 6: 推定モデル 4 における決定係数  $R^2$ 

	拇指	示指	中指	環指	小指
Standard	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99
Lateral Contact	0.98	0.99	0.99	0.99	0.99
Tripod	0.88	0.99	0.99	0.97	0.97

タグローブでの手動作推定を確かなものとし、その上で全ての関節角度を取得する一連のデータ補正法を実現したい。

謝辞 研究を進めるにあたり、有益な議論を頂いた本研究室諸氏に感謝する。

## 参考文献

- [1] 山根卓也, 船富卓哉, 飯山将晃, 美濃導彦: データグローブのセンサデータに基づく各指節の位置・向きの手動作推定の検討, 電子情報通信学会技術研究報告. PRMU, パターン認識・メディア理解 111 (353), pp. 77-82, 2011.
- [2] Francesco Camastra, Domenico De Felice: LVQ-based Hand Gesture Recognition using a Data Glove, Proceedings of Neural Nets and Surroundings Smart Innovation, Systems and Technologies, vol. 19, pp. 159-168, 2013.
- [3] Hiromasa Takahashi, Kenji Funahashi: A Data Adjustment Method of Low-priced Data-glove based on Representative Hand Motion Using Medical Knowledge, Proceedings of ICAT2013, 2013.
- [4] 森裕太郎, 舟橋健司: 各ユーザの手形状の相違に対応した少数センサデータグローブのデータ補正法, 日本バーチャルリアリティ学会第 19 回大会講演論文集, pp. 413-416, 2014.
- [5] ELKOURA G: Handrix: Animating the Human hand, Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, pp. 110-119, 2003.
- [6] 高橋寛昌, 舟橋健司: 医学的知見を利用した代表手動作に基づく少数センサデータグローブのデータ補正法, 日本バーチャルリアリティ学会第 18 回大会講演論文集, pp. 574-577, 2013.