

# 3次元インタフェース構築に向けた手先動作の重回帰モデル

## — 3次元動作への拡張 —

県立長崎シーボルト大学 情報メディア学科 野田大作

### 1. まえがき

我々の研究室では、2指（親指と人差し指）の指先の座標と傾きより2指の各関節の座標を推定するモデルを構築してきた<sup>1)</sup>。しかしながら、従来提案してきたモデルは同一平面上で行う2指の動作のみ対応しており、3次元空間内での自由な動作には対応していなかった。

そこで、本論文では2指の3次元空間内での全ての動作に対応したモデルの提案を行う。モデルは、指手先の座標と角度を入力とし、関節座標を出力する線形モデルである。入力に掛かる係数は重回帰分析法を用いて決定した。ここで提案したモデルの検証を行った結果、手先動作を再現する用途において極めて有効であることがわかった。

### 2. 実験方法

本研究では、マーカー追跡手法を用いて2指の動作計測を行った。動作の計測にあたって、2指（親指と人差し指）の指先、DIP関節、PIP関節、IP関節、MP関節、CM関節、手首関節の9つの特徴点に直径5mmの球形反射マーカーを装着した。各特徴点の位置を図1に示す。実験にあたって、6台のカメラを三脚に固定し、手の動作の撮影を行った。また、マーカーを反射させるために、6台のスポットライトをカメラ付近に設置した。

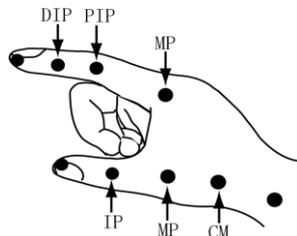
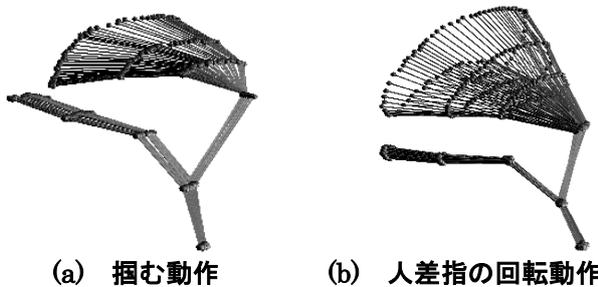


図1 特徴点の位置

### 3. 実験結果

実験結果の一例を3次元表示したものを図2に示す。同図は、指の形状を斜め上方からの視点で表現したものであり、(a)は掴む動作、(b)は人差し指の回転動作を表している。



(a) 掴む動作 (b) 人差し指の回転動作

図2 実際の動作例

### 4. 重回帰モデル

2指の各特徴点を図3のように定義する。同図において、 $J_1$ は人差し指の、 $J_9$ は親指の指先を示しており、 $J_2$ は人差し指DIP関節、 $J_3$ は人差し指PIP関節、 $J_4$ は人差し指MP関節、 $J_5$ は親指CM関節、 $J_6$ は手首関節、 $J_7$ は親指MP関節、 $J_8$ は親指IP関節を示している。

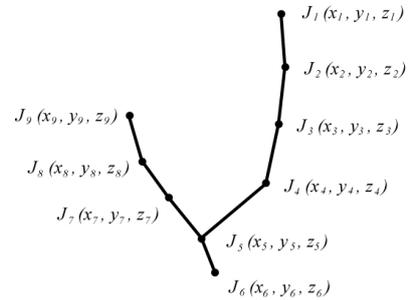


図3 特徴点の定義

本研究で用いた座標系において、横方向をX軸、縦方向をY軸、奥行き方向をZ軸と定義した。

指先角度の定義を図4に示す。図4において、(a)はXY平面における指先角度、(b)はXZ平面における指先角度、(c)はYZ平面における指先角度を示している。また、 $J_1 - J_2 - J_3 - J_4$ の連節は人差し指、 $J_9 - J_8 - J_7 - J_5$ の連節は親指、 $J_6$ は手首関節を示している。

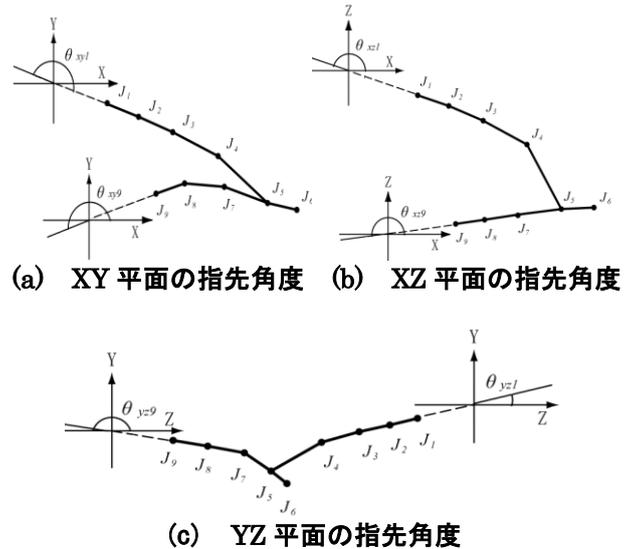


図4 角度定義

本論文で提案するモデルは、指先の座標と角度を入力とし、関節座標を出力する構成とした。指先動作を表現する重回帰式を、式(1)～式(3)で定義する。また、重回帰分析により求めた偏重回帰係数を表1に示す。

$$\hat{x}_i = a_{1i}x_1 + a_{2i}y_1 + a_{3i}z_1 + a_{4i}\theta_{xy1} + a_{5i}\theta_{xz1} + a_{6i}\theta_{yz1} + a_{7i}x_9 + a_{8i}y_9 + a_{9i}z_9 + a_{10i}\theta_{xy9} + a_{11i}\theta_{xz9} + a_{12i}\theta_{yz9} + a_{13i} \quad (1)$$

$$\hat{y}_i = b_{1i}x_1 + b_{2i}y_1 + b_{3i}z_1 + b_{4i}\theta_{xy1} + b_{5i}\theta_{xz1} + b_{6i}\theta_{yz1} + b_{7i}x_9 + b_{8i}y_9 + b_{9i}z_9 + b_{10i}\theta_{xy9} + b_{11i}\theta_{xz9} + b_{12i}\theta_{yz9} + b_{13i} \quad (2)$$

$$\hat{z}_i = c_{1i}x_1 + c_{2i}y_1 + c_{3i}z_1 + c_{4i}\theta_{xy1} + c_{5i}\theta_{xz1} + c_{6i}\theta_{yz1} + c_{7i}x_9 + c_{8i}y_9 + c_{9i}z_9 + c_{10i}\theta_{xy9} + c_{11i}\theta_{xz9} + c_{12i}\theta_{yz9} + c_{13i} \quad (3)$$

( $i = 2, \dots, 5, 7, 8$ )

表1 偏回帰係数

(a) x座標

	$a_{11}$	$a_{21}$	$a_{31}$	$a_{41}$	$a_{51}$	$a_{61}$	$a_{71}$	$a_{81}$	$a_{91}$	$a_{101}$	$a_{111}$	$a_{121}$	$a_{131}$
$i=2$	0.63	-0.07	0.27	-0.16	0.16	0	-0.05	0.05	0.04	0.01	-0.20	-0.01	-8.24
$i=3$	0.39	-0.12	0.38	-0.22	0.30	0	-0.09	0.09	0.07	0.02	-0.29	-0.01	-22.34
$i=4$	0.11	-0.06	0.06	-0.07	0.07	0.01	-0.07	0.17	0.09	0.03	-0.27	0	31.28
$i=5$	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0	0.11	0.15	0.08	0.04	0.04	0	-17.39
$i=7$	0.01	0	-0.03	0	-0.02	0	0.33	0.33	0.12	0.08	0.03	0	-26.03
$i=8$	0.01	0	-0.02	0.01	-0.01	0	0.77	0.08	0.13	0.02	0.16	0	-27.20

(b) y座標

	$b_{11}$	$b_{21}$	$b_{31}$	$b_{41}$	$b_{51}$	$b_{61}$	$b_{71}$	$b_{81}$	$b_{91}$	$b_{101}$	$b_{111}$	$b_{121}$	$b_{131}$
$i=2$	0.01	0.68	-0.04	-0.02	0.02	0	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	0	14.81
$i=3$	0.02	0.41	-0.07	0.01	0.01	0	-0.07	-0.02	-0.01	-0.02	-0.05	0	26.01
$i=4$	0.01	0.05	-0.03	0.01	-0.02	0	-0.05	0.05	-0.01	0.02	-0.05	0	22.78
$i=5$	-0.01	0.02	0	0.01	-0.01	0	0.04	0.09	-0.01	0.04	0.03	0	-2.76
$i=7$	-0.02	0.04	-0.01	0.03	-0.03	0	0.15	0.40	-0.06	0.14	0.07	0	-12.76
$i=8$	0	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0	-0.06	0.89	-0.08	0.15	-0.16	0	1.53

(c) z座標

	$c_{11}$	$c_{21}$	$c_{31}$	$c_{41}$	$c_{51}$	$c_{61}$	$c_{71}$	$c_{81}$	$c_{91}$	$c_{101}$	$c_{111}$	$c_{121}$	$c_{131}$
$i=2$	0.06	-0.12	0.86	-0.13	0.31	0	0	-0.01	0.01	-0.01	0	0	-10.19
$i=3$	0.08	-0.18	0.62	-0.10	0.36	0.01	0	-0.03	0.03	-0.02	0.02	0	-0.40
$i=4$	0.03	-0.16	0.19	-0.03	0.10	0	0.02	0.01	0.06	-0.01	0.02	0	53.64
$i=5$	0.01	-0.03	0.02	-0.02	0.02	0	0.01	-0.04	0.19	-0.03	0.04	0	9.79
$i=7$	0.02	-0.04	0.03	-0.02	0.03	0	0.23	-0.13	0.45	-0.04	0.25	0	-2.88
$i=8$	0	0	0.01	0	0.01	0	0.25	-0.12	0.75	-0.04	0.24	0	-7.76

5. 評価

モデルの検証を行うため、提案した重回帰モデルを用いてシミュレーションを行った結果を図5に、計測値と推定値の重相関係数ならびに決定係数を求めたものを表2に示す。図5は、モデルより算出した関節座標を用いて指の形状を再現し、3次元表示を行ったものであり、(a)は握む動作、(b)は人差指の回転動作を表している。図2に示した計測結果と目視で比較できるように視点位置が同じになるように表現してあるが、両者の違いがほとんど確認できない程、指形状を正確に再現できていることがわかる。また、表2において、重相関係数の値が人差指MP関節のy座標を除いて、いずれの座標でも0.9以上の高い値を示している。従って、今回提案したモデルをインタフェースに応用した場合、操作者に違和感を与えることなく、非常に自然な手先の表示を行うことが可能となる。

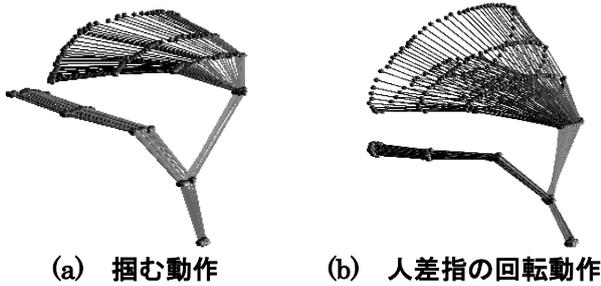


図5 シミュレーション

表2 重相関係数と決定係数

	人差指 DIP 関節			人差指 PIP 関節			人差指 MP 関節		
	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標
重相関係数	0.986	0.997	0.998	0.957	0.989	0.989	0.928	0.831	0.992
決定係数	0.973	0.994	0.996	0.916	0.977	0.979	0.861	0.691	0.984
	親指 CM 関節			親指 MP 関節			親指 IP 関節		
	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標	x座標	y座標	z座標
重相関係数	0.985	0.913	0.968	0.994	0.962	0.990	0.998	0.999	0.998
決定係数	0.969	0.834	0.937	0.988	0.926	0.980	0.996	0.998	0.997

6. 主観評価

本論文で提案した重回帰モデルでは実際の手の形状が再現できるかどうか重要である。手に見えるかどうかの評価を下すのは

人間であり、その評価は主観的である。そこで、男女大学生10名の被験者による主観評価実験を行った。主観評価実験は、被験者に手先の動きを表すアニメーションを提示した後、アンケートに回答してもらう方法で行った。その際にアニメーションは2種類用い、モーションキャプチャで計測した座標値より作成したものをアニメーション1、重回帰モデルにより計算した座標値を用いたものをアニメーション2とした。アンケート項目を表3に、評価基準を表4に示す。

表3 アンケート項目

項目番号	内容
A	アニメーション1は手に見えますか？
B	アニメーション1は手の形状を保っていますか？
C	アニメーション2は手に見えますか？
D	アニメーション2は手の形状を保っていますか？
E	アニメーション1と2を比較して、違和感がありますか？

表4 評価基準

評点	基準
1	悪い(手に見えない、形状を保てていない、非常に違和感がある)
2	あまり良くない(手に見えにくい、部分的に形状を保てていない、多少の違和感がある)
3	普通(手に見える、形状を保っている、特に違和感はない)
4	良い(はっきりと手に見える、綺麗な形状を保っている、ほとんど違和感はない)
5	非常に良い(完全な手に見える、完全に形状を保っている、全く違和感はない)

アンケート結果を図6に示す。重回帰モデルより算出したデータで作成したアニメーションと、モーションキャプチャより得られた計測値で作成したアニメーションとに大差がないという結論が得られた。従って、今回提案した重回帰モデルは、手先動作を再現する用途において、極めて有効であるということが出来る。

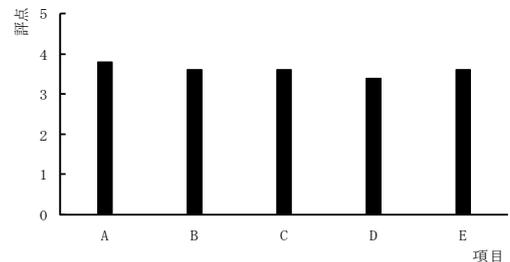


図6 アンケート結果

7. あとがき

本論文では、2指の3次元空間内での自由な動作を再現するモデルの構築方法について述べ、その評価を行った。本論文で提案したモデルより算出した関節座標値と実際に計測した関節座標値について、時間領域における評価を行った結果、両者間の重相関係数は、人差指MP関節のy座標を除いて、いずれの座標でも0.9以上の高い値が得られた。さらに、手先の形状が再現できているかどうかを検証するために、被験者10人による主観評価実験による検証を行った。その結果、重回帰モデルより算出したデータで作成したアニメーションと、計測値で作成したアニメーションが非常に類似しているとの結論が得られた。この結果より、今回提案した重回帰モデルは、手先動作を再現する用途においては、極めて有効であるということが出来る。本論文では、モデルの構築までしか行うことができなかったため、このモデルを用いて手先の動作を入力とするインタフェースを構築することを今後の課題としたい。

参考文献

[1]李亜兵, 辺見一男, 亀井且右, 井上和夫: “自然な手先動作を入力とする3次元インタフェース”, Human Interface, 9, (1994).

# 付録

表 1 偏回帰係数

(a) x 座標

	$a_{1i}$	$a_{2i}$	$a_{3i}$	$a_{4i}$	$a_{5i}$	$a_{6i}$	$a_{7i}$	$a_{8i}$	$a_{9i}$	$a_{10i}$	$a_{11i}$	$a_{12i}$	$a_{13i}$
$i = 2$	0.63	-0.07	0.27	-0.16	0.16	0	-0.05	0.05	0.04	0.01	-0.20	-0.01	-8.24
$i = 3$	0.39	-0.12	0.38	-0.22	0.30	0	-0.09	0.09	0.07	0.02	-0.29	-0.01	-22.34
$i = 4$	0.11	-0.06	0.06	-0.07	0.07	0.01	-0.07	0.17	0.09	0.03	-0.27	0	31.28
$i = 5$	-0.01	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0	0.11	0.15	0.08	0.04	0.04	0	-17.39
$i = 7$	0.01	0	-0.03	0	-0.02	0	0.33	0.33	0.12	0.08	0.03	0	-26.03
$i = 8$	0.01	0	-0.02	0.01	-0.01	0	0.77	0.08	0.13	0.02	0.16	0	-27.20

(b) y 座標

	$b_{1i}$	$b_{2i}$	$b_{3i}$	$b_{4i}$	$b_{5i}$	$b_{6i}$	$b_{7i}$	$b_{8i}$	$b_{9i}$	$b_{10i}$	$b_{11i}$	$b_{12i}$	$b_{13i}$
$i = 2$	0.01	0.68	-0.04	-0.02	0.02	0	-0.05	-0.01	-0.01	-0.01	-0.03	0	14.81
$i = 3$	0.02	0.41	-0.07	0.01	0.01	0	-0.07	-0.02	-0.01	-0.02	-0.05	0	26.01
$i = 4$	0.01	0.05	-0.03	0.01	-0.02	0	-0.05	0.05	-0.01	0.02	-0.05	0	22.78
$i = 5$	-0.01	0.02	0	0.01	-0.01	0	0.04	0.09	-0.01	0.04	0.03	0	-2.76
$i = 7$	-0.02	0.04	-0.01	0.03	-0.03	0	0.15	0.40	-0.06	0.14	0.07	0	-12.76
$i = 8$	0	0.01	-0.01	0.01	-0.01	0	-0.06	0.89	-0.08	0.15	-0.16	0	1.53

(c) z 座標

	$c_{1i}$	$c_{2i}$	$c_{3i}$	$c_{4i}$	$c_{5i}$	$c_{6i}$	$c_{7i}$	$c_{8i}$	$c_{9i}$	$c_{10i}$	$c_{11i}$	$c_{12i}$	$c_{13i}$
$i = 2$	0.06	-0.12	0.86	-0.13	0.31	0	0	-0.01	0.01	-0.01	0	0	-10.19
$i = 3$	0.08	-0.18	0.62	-0.10	0.36	0.01	0	-0.03	0.03	-0.02	0.02	0	-0.40
$i = 4$	0.03	-0.16	0.19	-0.03	0.10	0	0.02	0.01	0.06	-0.01	0.02	0	53.64
$i = 5$	0.01	-0.03	0.02	-0.02	0.02	0	0.01	-0.04	0.19	-0.03	0.04	0	9.79
$i = 7$	0.02	-0.04	0.03	-0.02	0.03	0	0.23	-0.13	0.45	-0.04	0.25	0	-2.88
$i = 8$	0	0	0.01	0	0.01	0	0.25	-0.12	0.75	-0.04	0.24	0	-7.76

表 2 重相関係数と決定係数

	DIP 関節			PIP 関節			人差指 MP 関節		
	x 座標	y 座標	z 座標	x 座標	y 座標	z 座標	x 座標	y 座標	z 座標
重相関係数	0.986	0.997	0.998	0.957	0.989	0.989	0.928	0.831	0.992
決定係数	0.973	0.994	0.996	0.916	0.977	0.979	0.861	0.691	0.984
	CM 関節			親指 MP 関節			IP 関節		
	x 座標	y 座標	z 座標	x 座標	y 座標	z 座標	x 座標	y 座標	z 座標
重相関係数	0.985	0.913	0.968	0.994	0.962	0.990	0.998	0.999	0.998
決定係数	0.969	0.834	0.937	0.988	0.926	0.980	0.996	0.998	0.997

---

評点	基準
1	悪い（手に見えない，形状を保てていない，非常に違和感がある）
2	あまり良くない（手に見えにくい，部分的に形状を保てていない，多少の違和感がある）
3	普通（手に見える，形状を保てている，特に違和感はない）
4	良い（はっきりと手に見える，綺麗に形状を保てている，ほとんど違和感がない）
5	非常に良い（完全な手に見える，完全な形状を保てている，全く違和感がない）

---