

指動作計測システムを用いた関節に関する幾何学的情報の推定

Estimation of Geometrical Information of Joint by Finger Motion Measurement System.

○ 北野敬祐（同志社大院） 伊藤彰人（同志社大） 辻内伸好（同志社大） 和木田茂（テック技販）

Keisuke KITANO, Doshisha University
Akihito ITO, Doshisha University
Nobutaka TSUJIUCHI, Doshisha University
Shigeru WAKIDA, Tecgihan Co., Ltd.

Abstract: A wearable finger motion measurement system using inertial and geomagnetic sensors was developed. Using this system, motion and posture of the hands and fingers can be measured. However, the joint center and segment axis cannot be accurately measured in a previous study using the sensors. Therefore, a method of estimating the joint center was proposed. This method utilizes the fact that the formula of the rotational acceleration in the sensor’s coordinate system is the vector product. However, because this formula is irreversible, the rotation center was calculated using a position vector placed on an intersection line of two planes. As a result of the verification, error was small. In addition, finger motion was measured using posture measurement and rotation center estimation. Motion measured and joint angle estimated by developed system were compared with a motion capture. As a result, estimation of PIP and DIP joint center had some errors.

Key Words: Joint center, Finger motion, Inertial sensor, Measurement

1. 緒言

人の身体の動作計測および解析は人間工学，リハビリテーションなどの分野において重要である．特に，日常生活の動作解析では，手指の動作が重要な役割を持っている．日本での高齢者数は人口の 26.0%⁽¹⁾に至っており，そのため，誰にでも使用しやすい製品や空間の設計が広まっている．その手段として，3次元動作解析による身体負荷評価がある⁽²⁾．これには一般的に光学式のモーションキャプチャによる動作計測が用いられるが，死角や高コストといった問題がある．そこで，MEMS 慣性センサを使用した計測手法も提案されている^{(3),(4)}．本研究では，日常生活の解析に向け，慣性センサと地磁気センサによりウェアラブルな手指の運動計測システムを開発した．また，慣性センサの問題であるセンサと取り付け位置の相対関係を推定することにより，関節の幾何学的情報を得ることを目的とする．

2. 指動作計測

2.1 指動作計測システム

3軸加速度センサ，3軸ジャイロセンサ，3軸地磁気センサが1体に集積された9軸センサ(BMX055, Bosch Sensortec製)を17個使用し，ウェアラブルな指動作計測システム(図1)を開発した．本システムを手指に取り付けることにより，手指動作の計測が可能となる．また，各センサ間およびCPUを取り付けた基盤間をフレキシブルプリント基板により接続することで，手指動作への阻害を軽減させている．

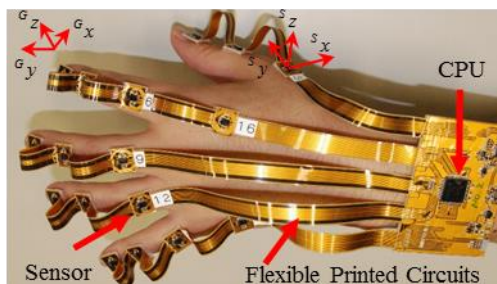


Fig. 1 Wearable finger motion measurement system.

2.2 センサの姿勢

センサによる動作計測では，グローバル座標系との関係が重要となる．まず，加速度出力による重力加速度，地磁気出力の方位からグローバル座標とセンサ座標系の初期姿勢を関連付け，このときのセンサ座標系からグローバル座標系への座標変換に関する角度を姿勢角と呼ぶ．このとき，センサ出力値 $\begin{bmatrix} {}^S X & {}^S Y & {}^S Z \end{bmatrix}$ とグローバル座標値 $\begin{bmatrix} {}^G X & {}^G Y & {}^G Z \end{bmatrix}$ との関係は以下で表される⁽⁵⁾．

$$\begin{bmatrix} {}^G X & {}^G Y & {}^G Z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} {}^S X & {}^S Y & {}^S Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ここで， \mathbf{R} は $x-y-z$ 系のオイラー角による回転行列である．また，動作中の姿勢としては，ジャイロセンサの角速度を利用して，回転行列を更新し，逐次姿勢を得ることが可能である．

2.3 手指の姿勢とリンクモデル

姿勢角による回転行列を用いることにより，各手指の部位ごとのベクトルを以下のように算出することができる．

$${}^G \mathbf{V}_{Seg} = \mathbf{R} (L_{Seg} {}^S \mathbf{V}_Y) \quad (2)$$

ここで， ${}^G \mathbf{V}_{Seg}$ は部位の大きさや姿勢を表すベクトルであり， L_{Seg} は部位の長さ（関節間距離）， ${}^S \mathbf{V}_Y$ はセンサ座標系における単位ベクトル（ y 軸）である．このベクトルを関連付ける事によって，手指のリンクモデルを作成することができる．しかし，この時次のような点が問題となる．1つ目として，各部位の長さ測定において，スケールなどの測定器を用いた場合，関節中心位置が曖昧となり，測定者ごとにばらつきが生じるなど正確さに問題がある．2つ目として，手指の各部の姿勢方向を表すベクトルはセンサの座標軸 ${}^S \mathbf{V}_Y$ を用いるが，この場合センサの取り付けの精度やセンサと部位との軸ずれが問題となる．このような問題を含んだ状態においても，動作計測として，図2のように計測およびリンクモデルによる表示が可能である．しかし，これらは，生体力学解析における逆動力学計算に影響を及ぼす問題である．そこで，慣性センサ出力のみを用いて，センサと関節中心などの幾何学的情報を推定する方法を提案する．

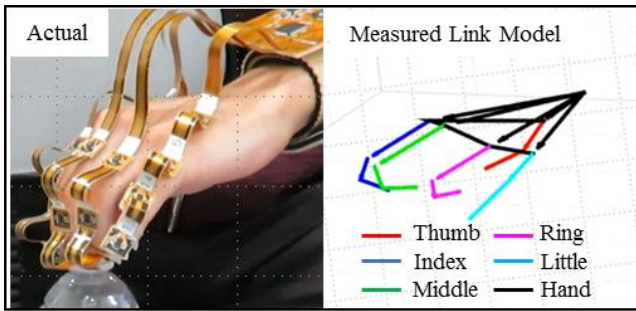


Fig. 2 Finger motion.

3. 理論

3.1 回転中心推定

回転加速度ベクトル a_R は以下の関係式にて表される。

$$a_R = \dot{\omega} \times x + \omega \times \dot{x} + (\ddot{r}/r)x - (\dot{r}^2/r)x + (\dot{r}/r)\dot{x}, (r = |x|) \quad (3)$$

ここで、 ω は角速度ベクトル、 x は回転中心からの位置ベクトルであり、 r はその大きさである。センサから回転中心位置を特定するためには、 x を算出する必要がある。まず、センサを取り付ける部位の回転中心が回転時に変動しないと仮定した場合、センサと回転中心の関係は一定 ($\dot{x} = 0, \ddot{r} = \dot{r} = 0$) であるので、式(3)は第一項のみとなる。したがって、回転加速度は角加速度ベクトルと位置ベクトルの外積である。しかし、外積は不可逆的な演算であるので、加速度センサからの回転加速度とジャイロセンサからの角速度の微分値である角加速度から位置ベクトルを直接求めることができない。そこで、図3に示したように回転中心における異なる2軸の回転による回転加速度ベクトルを法線とした2つの平面の交線として位置ベクトルを推定する。2つの異なる平面 A, B は以下のように表すことができる。

$$\begin{aligned} A: a_{R1X}x + a_{R1Y}y + a_{R1Z}z &= 0 \\ B: a_{R2X}x + a_{R2Y}y + a_{R2Z}z &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 $a_{R1} = [a_{R1X}, a_{R1Y}, a_{R1Z}]^T$, $a_{R2} = [a_{R2X}, a_{R2Y}, a_{R2Z}]^T$ はそれぞれの平面の法線ベクトルとなっている回転加速度であり、センサ座標系の値である。したがって、平面 A, B の交線ベクトル v は次のようになる。

$$v = \begin{bmatrix} a_{R1Z}a_{R2Y} - a_{R1Y}a_{R2Z} \\ a_{R1X}a_{R2Z} - a_{R1Z}a_{R2X} \\ a_{R1Y}a_{R2X} - a_{R1X}a_{R2Y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(5)の交線ベクトルと位置ベクトルの方向成分は等しいため、 v の単位ベクトルとして、方向成分 u を定義する。

$$u = \frac{v}{|v|} \quad (6)$$

次に、回転中心からの位置ベクトルの大きさ $|x|$ を算出する。位置ベクトルの大きさは式の外積の大きさの関係式を利用し特定する。

$$|\dot{\omega}_j \times x| = |\dot{\omega}_j| |x| \sin \beta_j \quad (7)$$

ここで、 j は平面 A ($j=1$) あるいは平面 B ($j=2$) を作成する回転を表す添え字である。また、この時、角加速度ベクトルと位置ベクトルのなす角は位置ベクトルの方向成分と角加速度ベクトルの内積を利用し算出を行う。

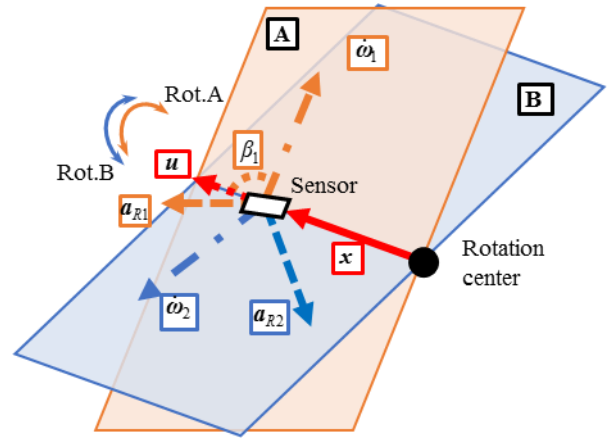


Fig. 3 Position vector on intersection line of two planes.

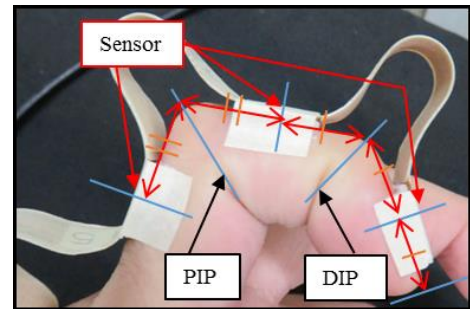


Fig. 4 Constraint of sensor position on finger.

$$|\dot{\omega}_j \cdot u| = |\dot{\omega}_j| |u| \cos \beta_j \quad (8)$$

式(7), (8)より位置ベクトルの大きさが算出可能となるので、位置ベクトルの方向成分 u と大きさ $|x|$ より回転中心位置はセンサ座標原点から考えると、次のようになる。

$$c = -x = -|x|u \quad (9)$$

したがって、センサを手指の関節を含む剛体部位に取り付け、2軸の回転を行うことにより、関節中心を推定することが可能となる。

3.2 中心間距離

センサから推定した回転中心との関係を利用することにより、取り付けた部位内に存在する回転中心間距離を推定する。推定した2箇所の回転中心位置 c_1, c_2 から次のように、その回転中心位置を結ぶベクトル ${}^S V_{Seg}$ が得られ、その大きさが中心間距離となる。

$${}^S V_{Seg} = c_1 - c_2 \quad (10)$$

したがって、センサを手指に取り付けた場合、部位内に存在する関節中心間（手指の各部位の軸）のベクトルや長さを推定することが可能となり、センサと手指の骨、関節などとの相対的な幾何学的情報を得ることができる。

式(10)を式(2)の $L_{seg} {}^S V_Y$ の替わりに使用すれば、各部位の長さを計測する必要がなく、またセンサの取り付けにおけるセンサ軸と部位軸のずれを考慮する必要がなくなる。

3.3 1自由度回転中心の推定

手指などにおいては、回転自由度が1自由度の関節も存在している。例えば、指の遠位指節間 (DIP), 近位指節間 (PIP) 関節では回転自由度が1軸であるため、3.1節の回転中心推定により、直接推定することができない。そこで、末節骨と中節骨を基節骨と平行 (PIP, DIP 関節角度を0度) とした状態に固定し、2軸回転が可能な中手指節 (MP) 関

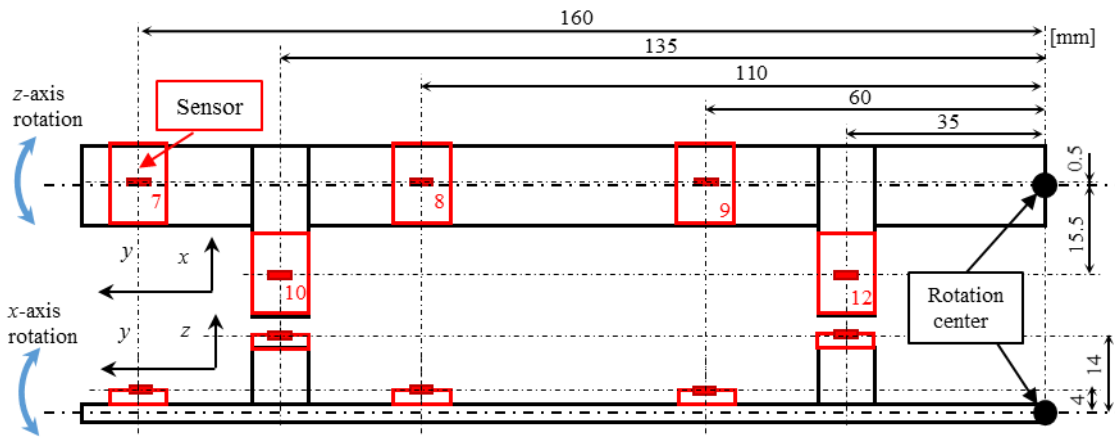


Fig. 5 Verification apparatus and position of sensors.

Table 1 Estimated rotation center and error.

[mm]	Estimated value(Mean±S.D.)			Error(Mean - true)		
	x	y	z	x	y	z
Sensor						
No.7	1.5±1.4	162±1.6	2.0±1.7	+1.0	+2.1	-2.1
No.8	-1.9±0.8	110±1.3	2.9±0.3	-2.4	±0.0	-1.1
No.9	-1.0±0.6	59.2±0.9	2.3±0.3	-1.5	-0.8	-1.7
No.10	-17.1±1.9	136±1.9	16.8±0.6	-1.6	+1.1	+2.8
No.12	-17.5±0.8	34.7±0.6	12.2±1.5	-2.0	+0.3	-1.8

節を回転させ、MP 関節中心位置をそれぞれ推定する。このとき、末節骨、中節骨、基節骨のそれぞれにセンサを取り付けており、その取り付け位置に関しては図4のような制約を加える。この制約条件と各MP 関節中心位置推定により各関節中心および指先位置、指の各部のベクトル、長さが推定可能となる。

4. 実験および結果

4.1 中心位置推定法の検証実験

4.1.1 検証方法

3.1 節で述べた回転中心位置推定法の検証を行う。検証としては、同一回転中心において2軸回転が可能な図5の器具を作成し、既知位置と推定位置を比較する。使用するセンサは図1に示した計測システムの番号7-10, 12のセンサ計5個であり、それぞれ回転中心から図5記載の距離に取り付けた。2軸の回転としては、z軸周り、およびx軸周りの回転とし、計測は回転幅が10度、20度、30度をそれぞれ2回ずつの2軸分行った。この時、センサ出力の回転加速度のみを考慮するために、z, x軸回転それぞれにおいて、センサのz, x軸方向に重力加速度が入力されるように調整し、推定計算時はその入力を除外した。

4.1.2 検証結果

回転幅における差は見られなかったため、表1に6回ずつの計測から推定した回転中心位置の平均とその誤差を示した。表より、誤差は最大2.8[mm]であり、ばらつきを考慮した3次元での誤差は5[mm]程度であり、誤差は小さい。

4.2 指動作計測における比較実験

4.2.1 光学式モーションキャプチャとの比較

次に動作計測に際して、一般的に用いられる光学式モーションキャプチャとセンサによる人差し指の動作計測を行い、両者の比較を行う。比較対象としては、人差し指の動作姿勢、関節角度、各部位の長さ（関節間距離）とする。

本比較実験は同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査にて承認され、被験者には同意書へのサインにて同意を取った。本実験は20代男性1人に対して行った。

4.2.2 実験装置および取り付け位置

光学式側の計測装置は、3次元リアルタイムモーション計測システムVENUS3D（ノビテック製）および、動作を追跡するための反射マーカである。マーカは直径4[mm]を計16個使用し、被験者の左手人差し指の指先から順に末節骨、中節骨、基節骨および手の甲の4箇所それぞれ4個1組として取り付けた。同時に、センサ側は図1のシステムを用い、マーカ位置に対応する4箇所計4個（13-15, 17番）のセンサを取り付けた。ただし、手の甲以外の3箇所の取り付けには3.3節の制約通りとした。

4.2.3 実験方法

まず、センサ側において、回転中心および各指の部位長さを推定する。手の甲のセンサに関して、手首およびMP関節を中心とした2軸の回転を計測をそれぞれ行い、手首およびMP関節中心を推定し、その関節間距離を算出する。次に人差し指に関してPIP, DIP関節角度を0度の状態にてMP関節での2軸回転を計測し、指の各関節および部位長さを推定する。

次に、光学式においても同様に各関節中心および関節間距離を推定する。まず、各関節を自由に動かし、その動作を計測する。その計測データより、手首およびMP関節中心を球体近似、PIPおよびDIP関節中心を円近似にて、各遠位（指先側）部分のマーカセット（4個1組）から推定する。推定した中心位置を各遠位側のマーカセットの動きから追従可能なようにするため、マーカセットから作成可能な単位直交3軸ベクトル V_{M1} , V_{M2} , V_{M3} の合成ベクトル V_{Joint} で表現できるように係数 a , b , c を決定する。

$$V_{Joint} = aV_{M1} + bV_{M2} + cV_{M3} \quad (11)$$

上記センサ側および光学式による関節中心推定を行った

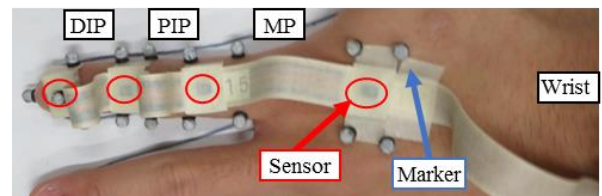


Fig. 6 Position of sensors and markers.

Table 2 Finger length.

[mm]	Hand (Index)	Proximal phalanx	Middle phalanx	Distal phalanx
Sensor	91.9	35.6	17.3	21.1
Motion capture	97.7	45.0	17.0	25.4
Reference		38.0	23.0	22.0

後，手首より近位側（身体側）を固定（前腕のひねり回転は可能）し，手の甲側を鉛直上向き，PIP，DIP 関節を 0 度とした状態から手首と MP，PIP，DIP 関節を任意に動かす動作を計測する．計測時間は，1 秒間静止，14 秒間動作の計 15 秒間とした．

4.2.4 実験結果

推定した各部位の長さ（関節間距離）を表 2 に示した．また，この表にはスケールにて直接計測した値も参考値として示した．計測結果として，図 7 にセンサおよび光学式における関節間ベクトルによる手指のリンクモデルを示した（z は鉛直上向き方向を正）．

関節角度に関しては両システムで定義を統一するために，グローバル座標において，次のように定義した．手首は手首と MP 関節の関節間ベクトルの x，y 成分を持ったベクトルを y 軸，グローバル座標 z 軸を z 軸とした座標系にて関節角度を定義した．手首以外の関節では，近位側の関節間ベクトルを y 軸の基準とした遠位側のベクトルの角度として，手首同様に関節角度を定義した．この時，MP 関節の z 軸はグローバル座標の z 軸を手首の y 軸関節角度分回転させた軸として算出した．各関節の x 軸は伸展/屈曲，y 軸は回内/回外，z 軸は橈屈/尺屈の軸 (+/-) とした．図 8，9 に差が生じた MP，PIP 関節の関節角度を示した．

5. 考察

得られたリンクモデルおよび関節角度，長さに基づいて比較する．まず，MP 関節の関節角度では初期に 7-8[deg]の差が見られ，センサ側の方がより中指側へ傾いていた．実際の手と指の配置関係と本実験での初期姿勢を考慮すると，センサ側の方が実際の指の形態を正確に表現しているのではないかと考えられた．原因として，手首中心を光学式で推定する球近似過程において，動作範囲が限定され，十分な近似が行われておらず，表 2 によれば手の甲部の長さが大きく推定されたのではないかと考えられる．次に，PIP 関節を見ると，初期に大きな差が生じている．これは図 7 の指リンクモデルの状態と表 2 のセンサ側関節骨長さが短く推定されていることを考慮すると，センサ側における関節中心推定で誤差が生じた可能性が高い．原因として，関節中心推定を行う動作中に PIP 関節での屈折が生じたためではないかと考えられる．

また，手首および DIP 関節の関節角度において両者の差は見られなかった．動作中はジャイロセンサの角速度のみ

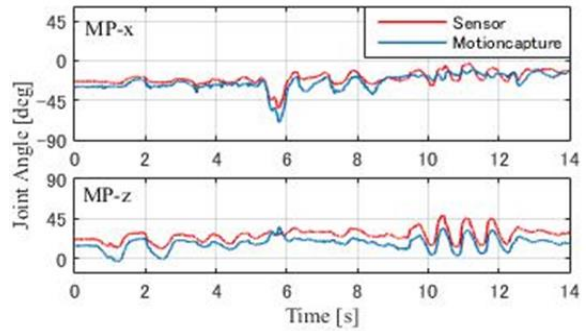


Fig. 8 Joint angle of MP joint (x, z)

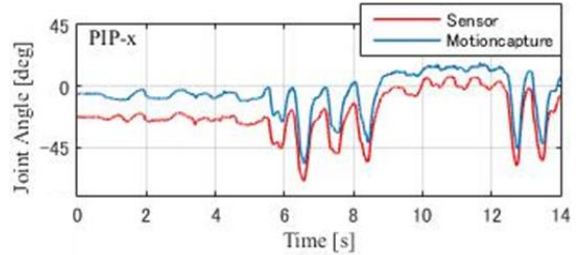


Fig. 9 Joint angle of PIP joint (x)

を利用したため，短時間計測では両者の違いは初期角度差以外見られなかった．よって，回転自由度が 1 軸しか持たない関節における中心推定には課題が見られるが，2 軸の関節中心推定と長さ推定は十分に有用であるといえた．

6. 結言

本研究では，開発した指運動計測システムを使用し，以下の結論を得た．

- (1) 関節中心推定手法を提案し，既知の位置において精度を検証した結果，誤差は小さかった．
- (2) 光学式との比較では，関節の幾何学的情報の推定と動作計測は，2 自由度回転を持つ関節の推定において有用であった．

謝辞

本研究は，日本学術振興会科学研究費補助金若手研究（B）（課題番号「15K18000」）の補助を受けた．記して謝意を示す．

参考文献

- (1) 内閣府，平成27年度版高齢白書，available from http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2015/zenbun/27_pdf_index.html，（参照日2015年7月28日）
- (2) P. V. Hareesh, T. Kimura, K. Sawada and D. Thalmann, Aging Algorithm for Applications, Proc. IMECS 2010, Vol. 3, 2010.
- (3) W. Adachi, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, K. Shiojima, Y. Tuchiya and Y. Inoue, Development of walking analysis system consisting of mobile force plate and motion sensor, Conf. Proc. IEEE Eng Med Biol Soc., pp. 4022-4025, 2011.
- (4) H. G. Kortier, V. I. Sluiter, D. Roetenberg and P. H. Veltink, Assessment of hand kinematics using inertial and magnetic sensors, Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation 2014 11:70, 2014.
- (5) 廣瀬圭，近藤亜希子，特集3:人間工学のための計測手法 第1部：動作計測(2)—慣性センサによる動作計測—，人間工学，Vol. 50, No. 4, 2014.

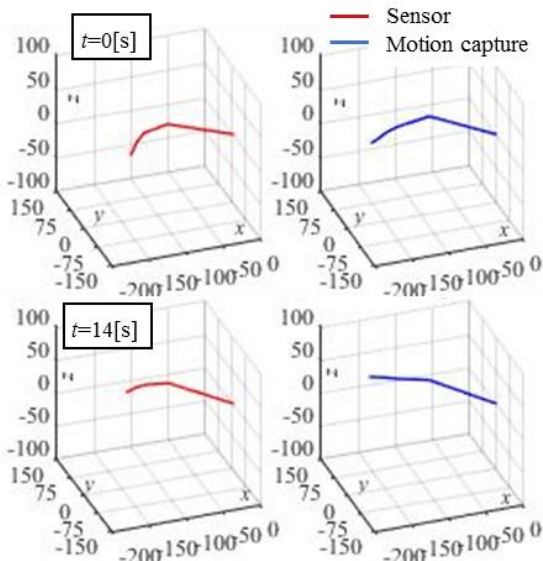


Fig. 7 Measurement result of index finger motion.