

# 装着型センサによる2リンクアームの3次元動作推定

## 3D trajectory estimation of 2 link arm using body mounted sensors

○小田英晴\*, 佐川貢一\*

○Hideharu Koda\*, Koichi Sagawa\*

\*弘前大学

\*Hirosaki University

キーワード： 装着型センサ (Body-mounted-sensor), 3次元 (Three-dimension), 推定 (Estimation), 加速度 (Acceleration), 角速度 (Angular velocity), 積分 (Integration)

連絡先： 〒036-8561 青森県弘前市文京町3番地弘前大学大学院 理工学研究科 知能機械システム工学専攻  
小田 英晴, Tel.: (0172)39-3691, Fax.: (0172)39-3691, E-mail: h08gs512@stu.hirosaki-u.ac.jp

### 1. 緒言

現在, スポーツ時の身体動作を計測する場合には, 市販のビデオカメラでは計測が困難な高速動作が対象となるために, ハイスピードカメラやモーションキャプチャシステムを使う方法などが一般的である. これらの装置は, 身体の高速度動作を高精度で計測することが可能であるが, 高額であること, 計測範囲が限定されることなどの問題がある. また, カメラによる画像解析法の他にも, ジャイロを使用して身体運動を計測する方法が研究されている. この方法では, 腕や足の角度変化を計測することが可能であるが<sup>1)</sup>, 並進運動の計測は困難である. 一方, 加速度センサを併用した装着型センサを用いることで, 身体の回転, 並進運動を含んだ高速動作を計測する方法が提案されている<sup>2)</sup>. しかし, センサの取り付け方向を指定するなどの実験条件があり, 簡便な計測の妨げとなっている. そこで本報告では, 加速度センサとジャ

イロで構成される装着型センサを, 任意の方向で取り付けても, 腕の動作推定が可能な3次元位置計測方法を提案する. 特にここでは, 腕を模擬した2リンクアームの前腕と上腕それぞれにセンサを装着し, 投球を模擬した動作を行ったときの, 腕の3次元位置と肘の角度を計測する. 推定した腕の姿勢は, 光学式モーションキャプチャシステムによって得られた姿勢と比較し, 提案した方法の有効性を確認する.

### 2. 原理

#### 2.1 腕の3次元位置と方向の推定

本報告では, 上腕と前腕に装着型センサ(以下3Dセンサ, Fig.1)を取り付け, 腕動作時の加速度および角速度を計測し, 加速度の2階積分により並進運動を, 角速度の積分により回転運動を推定する. このとき, センサ座標系 $\Sigma'$ 上で計測された加速度 $a'$ および角速度 $\omega'$ は, 以下の式で固定座標系 $\Sigma$ 上

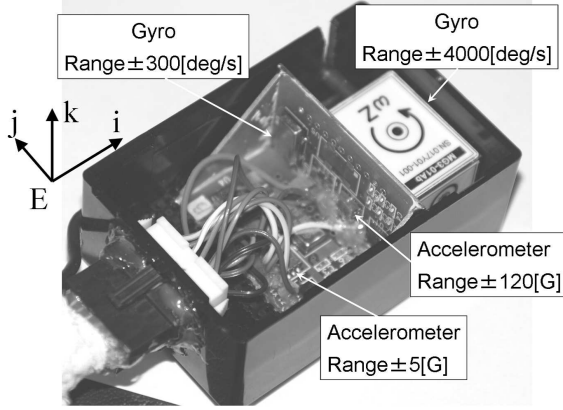


Fig. 1 Body mounted sensor

の加速度 $a$ および角速度 $\omega$ へと変換される。

$$a = Ea' \quad (1)$$

$$\omega = E\omega' \quad (2)$$

$$E = \begin{bmatrix} i & j & k \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで $E$ はセンサの姿勢を表すフレームマトリクス(以下FM)であり,  $i, j, k$ は $\Sigma'$ 座標系の基準単位ベクトルである.  $E$ は $\omega$ を1サンプルごとに積分することによって更新する. 次に腕の初期姿勢の推定方法について述べる. 3Dセンサの初期姿勢 $E$ は動作前に数秒間静止し, 計測された重力加速度を利用して推定する<sup>3)</sup>. しかし, 重力加速度のみでは $E$ を決定することはできない. そこで $E$ の $i$ 軸が固定座標系の $x$ 軸方向を向いていると仮定して,  $E$ を決定する. また, 上腕に取り付けた3Dセンサの姿勢 $E_1$ と, 前腕に取り付けた3Dセンサの姿勢 $E_2$ との位置関係は未知である. 腕全体の正しい初期姿勢を求めるためには,  $E_1$ と $E_2$ の関係, すなわち,  $E_1, E_2$ それぞれからみた肘関節伸展軸の方向, さらに $E_1, E_2$ と腕の方向の関係を知る必要がある. そこで次の3つの動きを計測することでこれらの関係を推定する.

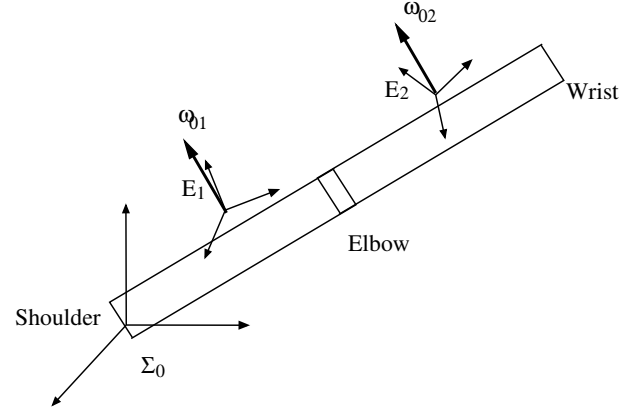


Fig. 2 Derivation of sensors relation

## 2.2 上腕側3Dセンサと前腕側3Dセンサの関係

ここでは, Fig.2のように座標系を定義する.  $\Sigma_0$ は固定座標系,  $E_1, E_2$ はそれぞれ上腕側3Dセンサ, 前腕側3DセンサのFMである.  $\Sigma_0$ 上で計測された角速度を,  $\omega_{01}, \omega_{02}$ , センサ座標系で計測された角速度を $\omega_1, \omega_2$ とすると,

$$\omega_{01} = E_1\omega_1 \quad (4)$$

$$\omega_{02} = E_2\omega_2 \quad (5)$$

と表される. いま, 肘関節を固定し, 肩関節中心の回転運動を行うと,

$$\omega_{01} = \omega_{02} \quad (6)$$

$$= E_1\omega_1 \quad (7)$$

$$= E_2\omega_2 \quad (8)$$

となる. ここで $E_1$ からみた $E_2$ の姿勢を $E_{12}$ とすると,

$$\omega_1 = E_{12}\omega_2 \quad (9)$$

となる. 以上より $E_{12}$ は次式のように推定される.

$$E_{12} = \omega_1\omega_2^T(\omega_2\omega_2^T)^{-1} \quad (10)$$

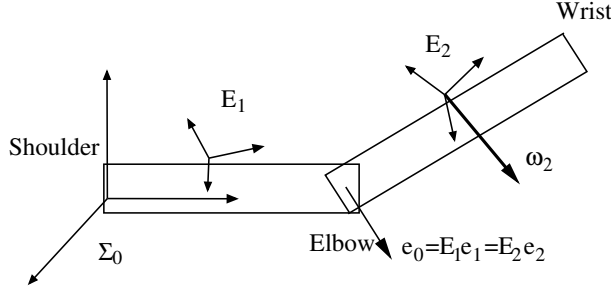


Fig. 3 Derivation of rotate axis of elbow

### 2.3 肘関節伸展軸の推定

前腕のみ伸展，屈曲させた時の座標系をFig.3のように定義する． $e_0$ は固定座標系の肘関節伸展軸であり， $e_1$ ， $e_2$ はそれぞれ $E_1$ ， $E_2$ からみた肘関節伸展軸である．いま，肩と肘の位置を固定し，肘の伸展，屈曲運動をしたとき， $e_2$ は，

$$e_2 = \frac{\omega_2}{\|\omega_2\|} \quad (11)$$

と表され，(10)式を利用すると $e_1$ は，

$$e_1 = E_{12}e_2 \quad (12)$$

と導出される．腕全体の姿勢を決定するためには， $e_1$ と $e_2$ が重なるようにすればよい．

### 2.4 腕の初期姿勢導出

動作開始前の腕の初期姿勢を決定するため，動作前の重力加速度を利用して，上腕に取り付けた3Dセンサの姿勢 $E_1$ と，前腕に取り付けた3Dセンサの姿勢 $E_{tmp2}$ を求める．このとき，どちらのFMの $i$ 軸も固定座標系の $x$ 軸上にあるとして算出する(Fig.4)．次に $E_1$ からみた肘関節伸展軸 $e_1$ と， $E_2$ からみた肘関節伸展軸 $e_2$ の方向が一致するように垂直軸まわりに $E_{tmp2}$ 回転させる．具体的には，Fig.5に示すように， $e_1$ ， $e_2$ を $xy$ 平面に投影して，ベクトルの方向が一致するように $e_2$ を $z$ 軸周りに $\theta$ だけ

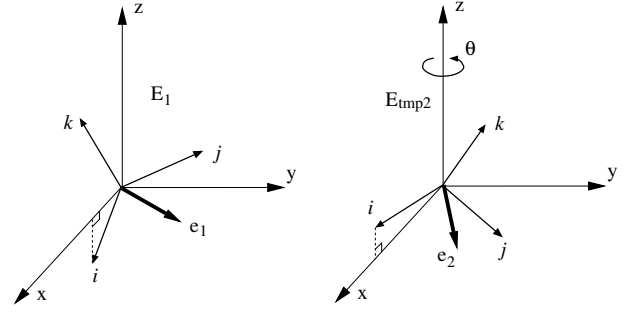


Fig. 4 Derivation of initial position

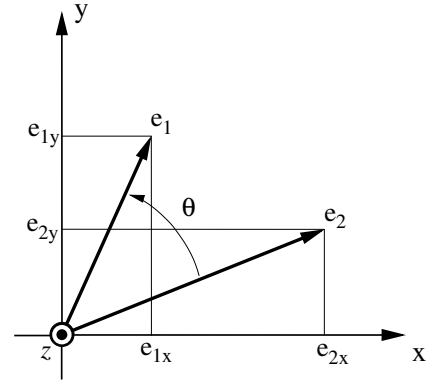


Fig. 5 Relation of rotate axis when view each FM

回転する．そのときの回転角 $\theta$ は，

$$e_1 = \begin{pmatrix} e_{1x} & e_{1y} & e_{1z} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} e_{2x} & e_{2y} & e_{2z} \end{pmatrix} \quad (14)$$

より，

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{e_{1x} \cdot e_{2y} - e_{1y} \cdot e_{2x}}{e_{1x} \cdot e_{2x} + e_{1y} \cdot e_{2y}} \right) \quad (15)$$

となる．これにより正しい前腕側センサの姿勢 $E_2$ は，

$$E_2 = E^{z\theta} E_{tmp2} \quad (16)$$

と求めることができる(Fig.4右)． $E^{z\theta}$ は， $z$ 軸周りに $\theta$ 回転させる回転マトリクスである．

### 2.5 FMと腕の関係

ここでは，それぞれのFMから見て腕がどちらの方向を向いているかを推定する．3Dセンサを取り付け方向を考慮せずに腕に装着した場合，FM

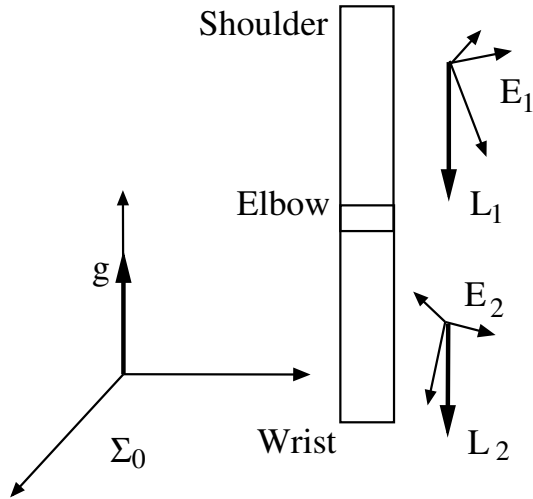


Fig. 6 Derivation of relation of FM and links

と腕の方向の関係が未知である。そこで、Fig.6のように腕を真下に向けて下ろして静止しているときの重力加速度から、FMと腕の方向の関係を求める。それぞれのFMで計測された重力加速度を $g_1$ ,  $g_2$ とすると、腕の方向を表す単位ベクトル $L_1$ ,  $L_2$ は、

$$L_1 = -\frac{g_1}{\|g_1\|} \quad (17)$$

$$L_2 = -\frac{g_2}{\|g_2\|} \quad (18)$$

さらに、上腕、前腕の長さをそれぞれ $l_1$ ,  $l_2$ とすると、腕を表すベクトルは、

$$L_{01} = E_1 L_1 l_1 \quad (19)$$

$$L_{02} = E_2 L_2 l_2 \quad (20)$$

と求めることができる。

### 3. 実験

#### 3.1 実験方法

今回、動作を計測するために上腕と前腕の動きを再現できる2リンクアームを製作した(Fig.7)。2リンクアームは、600[mm]の木材2本を連結させ、肘関節を模している。このアームを使うことによって、センサの取り付け位置や角度を明確にすることが

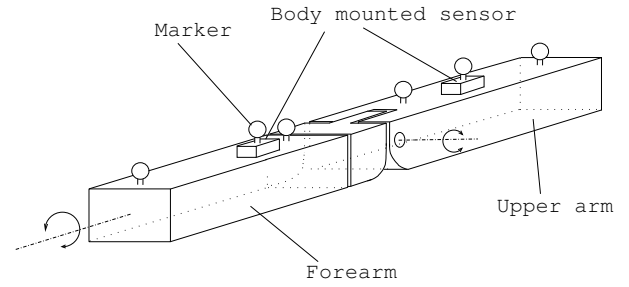


Fig. 7 Configuration of experimental setup

でき、アルゴリズム検証を容易にできる。3Dセンサ(Fig.1)は加速度センサ(Analog Devices, ADXL320, 193)およびジャイロ(Murata, ENC-03M:MicroStone, MG3-01Ab)で構成されている。ADXL320は検出範囲が $\pm 5[G]$ , ADXL193は $\pm 120[G]$ , ENC-03Mは $\pm 300[\text{deg/s}]$ , MG3-01Abは $\pm 4000[\text{deg}]$ である。検出範囲が広いセンサは、動きの小さい区間では出力電圧に対するノイズ成分の影響が大きくなってしまうため、2種類のセンサを併用することでこれを防いでいる。各センサから出力される電圧データは、ADコンバータカード( CONTEC, ADA16-32/2(CB)F )を使用して、ノート型PC( Panasonic, CF-03 Let's note )でサンプリング周波数1000[Hz]でサンプリングした。3DセンサはFig.8に示すように、腕に対して20[deg]回転させた姿勢で取り付ける。同時に、光学式モーションキャプチャシステム(Vicon460, Vicon Motion Systems)で動作を計測するために、前腕および上腕の姿勢、センサの位置を計測するための反射マーカ6個を2リンクアームに取り付ける。光学式モーションキャプチャシステムは、物体に取り付けられた反射マーカの位置を複数のカメラでとらえることで、精密な3次元位置情報を得ることができるシステムである。Viconのサンプリング周波数は最大120[Hz]であるので、計測後に1000[Hz]に再サンプリングして比較する。実験で行う動作は、今後の応用を考え、野球の投球動作を模擬したものとした。

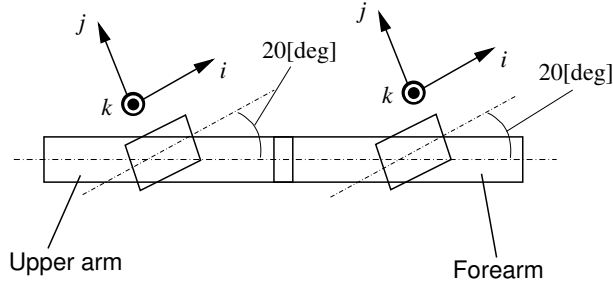


Fig. 8 Angle of sensors mounting

## 3.2 評価方法

### 3.2.1 並進運動

並進運動については上腕側のセンサに取り付けたマーカの3次元座標と、加速度の積分によって得た3Dセンサの3次元座標を比較する。3Dセンサとマーカの3次元軌道の $x$ 座標,  $y$ 座標,  $z$ 座標それぞれの時間変化について相関係数を算出し, 評価する。その際, 積分誤差を軽減するために, 初期位置と移動後の位置を測定し, センサから計算した3次元座標を測定した最終位置に修正する。

### 3.2.2 回転運動

回転運動は, 3DセンサとViconそれぞれから上腕, 前腕を表すベクトルを算出し, 上腕ベクトル同士がなす角, 前腕ベクトル同士がなす角を算出し, 評価する。さらにそれらのベクトルから肘関節角度を算出し, 3Dセンサ, Viconそれぞれの角度を比較する。

## 4. 結果・考察

### 4.1 初期姿勢推定用パラメータ

ここでは初期FM推定に必要な $E_{12}$ ,  $e_2$ ,  $L_1$ ,  $L_2$ の検証を行う。Fig.8のように取り付けた場合, 各

パラメータは,

$$E_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} 0.34 & 0.94 & 0 \end{pmatrix}$$

$$L_1 = L_2 = \begin{pmatrix} 0.94 & -0.34 & 0 \end{pmatrix}$$

となるはずである。これに対して推定結果は,

$$E_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0.05 & 0.03 \\ -0.05 & 1 & 0.01 \\ 0.03 & -0.01 & 1 \end{pmatrix}$$

$$e_2 = \begin{pmatrix} 0.42 & 0.90 & 0.07 \end{pmatrix}$$

$$L_1 = \begin{pmatrix} 0.92 & -0.39 & 0 \end{pmatrix}$$

$$L_2 = \begin{pmatrix} 0.92 & -0.39 & 0.05 \end{pmatrix}$$

であり, 推定結果から算出したセンサ取り付け角度は, 上腕側センサが23.1[deg], 前腕側センサが23.0[deg]であった。どちらのセンサも3[deg]ほどのずれと, 十分高い精度での推定ができたといえる。今回は, これらのパラメータの導出に必要な動作について詳細な検証は行っていないが, 腕の動かし方, 速度, 時間などを変化させることで精度が変わる可能性があるため, 精度向上のためにそれらについても検証したいと考える。

### 4.2 3次元動作推定

Fig.9に, 3Dセンサによる腕の推定軌道と, Viconによる実測軌道を示す。初期の姿勢から,  $-x$ 方向に腕を引いた後,  $+x$ 方向へ投球するような動作を推定できていることがわかる。この動作を, 並進運動と回転運動に分けて評価する。まず, 並進運動について比較する。Fig.10は, 加速度の2階積分による上腕側3Dセンサの軌道と, Viconによって計測されたマーカの軌道の一例である。Fig.10の各座標の軌道について, 時間変化を示したものがFig.11であり,  $R$ は相関係数である。各座標の $R$ をみると, すべての軸において0.98以上となっており, 非常に高い相関があることが示されている。ま

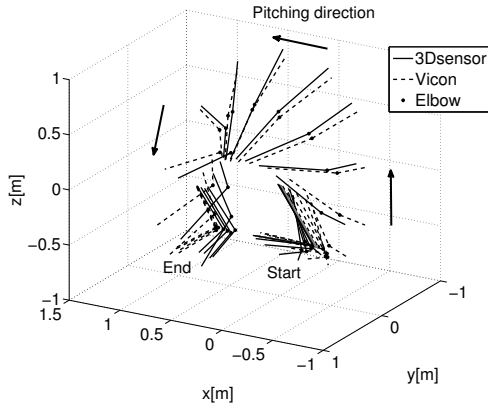


Fig. 9 Trajectory of upper arm and forearm measured 3D sensor and Vicon

Table 1 Correlation coefficient of coordinate between 3D sensor and Vicon

	x coordinate	y coordinate	z coordinate
1	0.99	0.98	1.00
2	0.99	0.96	1.00
3	0.97	0.99	0.98
Ave.	0.98	0.97	0.99

たTable 1に、同様の実験を3回行ったときの相関係数とその平均値を示す。表からも、軌道が高い相関関係にあることが示されており、高精度で推定ができていることがわかる。次に回転運動について比較する。Fig.12上は、3Dセンサ、Viconそれぞれから算出した上腕ベクトルがなす角と、前腕ベクトルがなす角を示したものであり、差がゼロであれば両者は一致していることを表す。Fig.12下は、肘角度の比較である。 $J$ は角度の差の2乗平均平方根、 $R$ は相関係数を表している。上腕、前腕ベクトルがなす角をみると、 $J$ が10[deg]以下という高い推定精度である。また、前腕の初期姿勢が6[deg]ほどずれている。このずれは、ほか数回の実験の結果にも見られたことから、上腕と前腕の関係やFMと回転軸の関係を導出の際の誤差が影響していると考えられる。また、肘関節角度につ

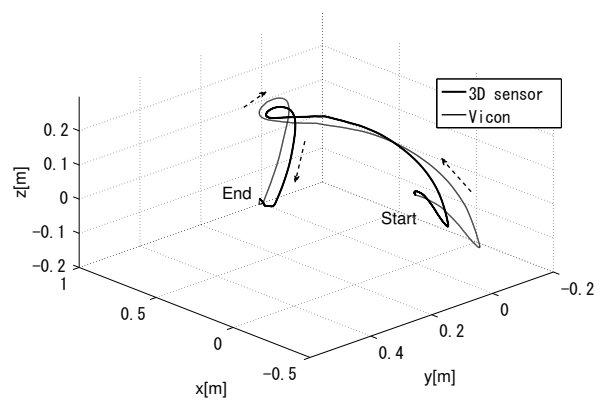


Fig. 10 Trajectory of upper arm mounted sensor measured 3D sensor and Vicon

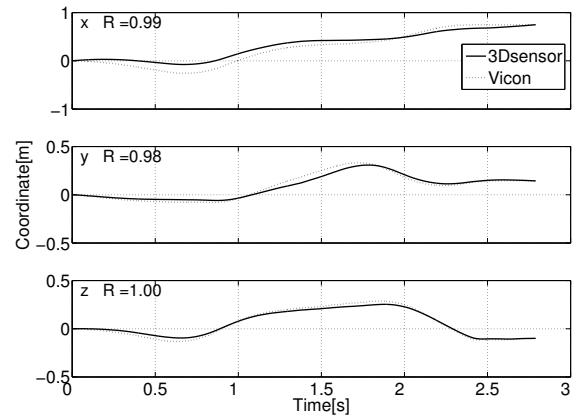


Fig. 11 Coordinate of upper arm mounted sensor of time variation( $R$ :correlation coefficient)

いてみると、相関係数が1.00と高いことや、初期角度、最終角度ともに小さい誤差で推定できていることから、動作中の姿勢更新が高精度でできているといえる。またTable 2に、実験3回分の角度の差の2乗平均平方根、相関係数とその平均値を示す。どの試行でもほぼ同様の結果が得られ、肘関節角度の推定精度が高いことが示された。このことから、さらなる精度向上を目指すためには、初期姿勢に関する検証が必要になると考えられる。

## 参考文献

- 1) 柘 幸伸, 加藤 宗規, 佐藤 仁, 丸山 仁司: 3軸角速度センサを用いた動作分析の試み, 理学療法科学, **20-2**, 93-98 (2005)
- 2) 塚本 利昭, 近藤 和泉, 及川 友和, 佐川 貢一: 装着型センサによる投球動作分析, 青森県スポーツ医学研究会誌, **14-5**, 13-16 (2005)
- 3) 佐川 貢一, 森山 靖子, 塚本 利昭, 近藤 和泉: 装着型センサによる投球動作計測-画像解析システムとの比較-, IIP情報・知能・精密機器部門講演会講演論文集, **2005-2504**, 337-340 (2005)

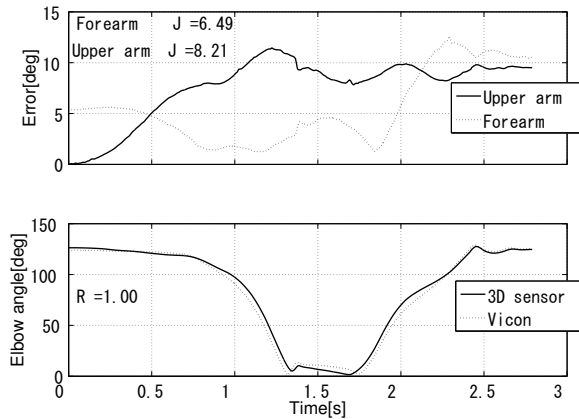


Fig. 12 Coordinate of Upper arm mounted sensor of time variation(J:root mean square, R:correlation coefficient)

Table 2 Error of arm position between 3D sensor and Vicon, and Correlation coefficient of elbow angle between 3D sensor and Vicon

	Forearm	Upper arm	Elbow angle
1	6.49	8.21	1.00
2	6.65	4.8	1.00
3	5.58	7.39	1.00
Ave.	6.24	6.8	1.00

## 5. 結言

本報告では3Dセンサを任意の姿勢に取り付けた場合の, 2リンクアームの3次元動作推定を実現するアルゴリズムの構築を試みた. 実験の結果, 並進運動, 肘関節角度の変化は非常に高い相関が見られ, 高精度で推定ができていた. 前腕, 上腕の姿勢は小さい誤差で推定ができていた. 初期姿勢の推定は可能だが, ある程度の誤差がみられた. これらの結果から, 装着型センサによって, 腕の動作推定が可能であることが確認された. 今後は推定精度を向上させ, 実際に投球動作を行ったときの, 腕の動作推定を行う予定である.