

卒業論文要旨

慣性センサと床反力計を用いた複雑なバランス動作に対する質量中心

Estimation of the center of gravity for complex motion during standing by using inertial sensors and a force plate

システム工学群

動的デザイン研究室 1210109 常田 仁

1. 緒言

人のバランス能力を評価するためには、重心軌跡による評価が望ましい。質量中心の推定では主に3次元解析システム（モーションキャプチャ）が使われるが、計測の手間や場所の制限といった問題がある。簡易的な方法として、慣性センサによる方法と床反力計による方法⁽¹⁾が考えられる。しかし、慣性センサでは上半身の推定精度の問題、床反力計では、複雑な動きに対応できない問題がある。

別の課題として、健常者の安静立位では質量中心変位が小さく、健常者間の運動能力の差が不明瞭になる、このため、トレーニング効果などの評価に使うには難しい。健常者間の運動能力を評価するためには、質量中心の動きが大きい複雑な動作にも対応できる簡易的な質量中心推定法が必要である。

本研究の目的は慣性センサと床反力計を用いた複雑な動作に対する質量中心推定法の提案である。慣性センサから下腿部質量中心と大腿部質量中心の推定を行い、床反力計の計測値から上半身の傾きを推定することで身体の質量中心の推定を行う。対象とする動作はスクワット動作とし、本研究の妥当性はモーションキャプチャ計測との比較によって検証した。

2. 慣性センサによる推定法

2.1 慣性センサの配置と座標

本研究では、図1のように慣性センサを両下腿部、両大腿部の計4個を身体に配置する。センサ座標系はx軸を前方、y軸を左方向、z軸を上方とし、絶対座標系は両足首の中央を原点として、前方方向をx軸、左方向をy軸、鉛直上向き方向をz軸とする。z軸まわりの身体の回転は考慮せずに、解析は矢状面のみとする。

慣性センサの姿勢は3-2-1オイラー角で表現する。x軸ま

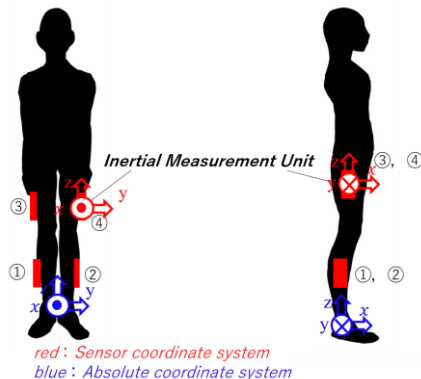


Fig. 1 Attachment position of inertial sensors.

わりのロール角 ϕ_{si} 、y軸まわりのピッチ角 θ_{si} で慣性センサの姿勢を表現する。 i はセンサ番号を示す($i=1, \dots, 4$)。慣性センサの姿勢角は、拡張カルマンフィルタより推定する⁽²⁾。

2.2 3リンクモデルからの下半身の質量中心推定

スクワット動作を剛体3リンクモデルで示したものを図2(a)に示す。人の身体を足部、下腿部、大腿部、上半身の4セグメントに分割した。 l_1 は足首から下腿部の質量中心までの長さ、 L_1 は下腿部の長さ、 l_2 は膝関節から大腿部の質量中心までの長さ、 L_2 は大腿部の長さを表す。これらは、各部位の身長比から表1のように求められる⁽³⁾。

下腿部質量中心、大腿部質量中心、膝関節、股関節の位置を $\mathbf{r}_1 = (x_1, z_1), \mathbf{r}_2 = (x_2, z_2), \mathbf{r}_k = (x_k, z_k), \mathbf{r}_{hp} = (x_{hp}, z_{hp})$ とすると、質量中心位置と関節位置は、次のように表される。

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1 &= l_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2)\mathbf{U} / 2 \\ \mathbf{r}_k &= L_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2)\mathbf{U} / 2 \\ \mathbf{r}_2 &= L_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2)\mathbf{U} / 2 + l_2(\mathbf{R}_3 + \mathbf{R}_4)\mathbf{U} / 2 \\ \mathbf{r}_{hp} &= L_1(\mathbf{R}_1 + \mathbf{R}_2)\mathbf{U} / 2 + L_2(\mathbf{R}_3 + \mathbf{R}_4)\mathbf{U} / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

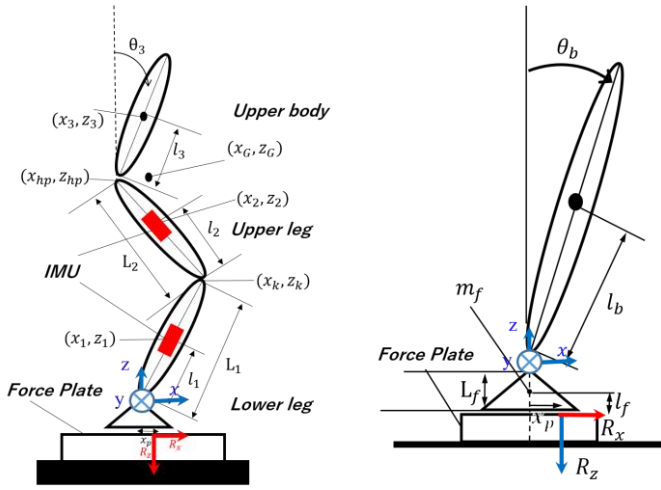
ここに、 $\mathbf{U} = [0 \ 0 \ 1]^T$ である。 $\mathbf{R}_i (i=1, \dots, 4)$ は、以下の回転変換行列である。

$$\mathbf{R}_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_{si} & \sin \phi_{si} \sin \theta_{si} & \cos \phi_{si} \sin \theta_{si} \\ -\sin \theta_{si} & \sin \phi_{si} \cos \theta_{si} & \cos \phi_{si} \cos \theta_{si} \end{bmatrix} \quad (2)$$

上記の方法により、慣性センサの姿勢角 ϕ_{si}, θ_{si} から下腿部と大腿部の質量中心と膝関節と股関節の位置が推定できる。

Table 1 Physical parameters of the single and three-link model. (M :mass[kg], H :height[m])

Symbol	Value	Symbol	Value
m_b [kg]	$0.978 M$	l_1 [m]	$0.144 H$
m_1 [kg]	$0.102 M$	l_2 [m]	$0.129 H$
m_2 [kg]	$0.220 M$	l_3 [m]	$0.157 H$
m_3 [kg]	$0.656 M$	L_1 [m]	$0.242 H$
m_f [kg]	$0.022 M$	L_2 [m]	$0.245 H$
J_1 [kgm ²]	$2.24 \times 10^{-4} MH^2$	L_f [m]	$0.043 H$
J_2 [kgm ²]	$5.10 \times 10^{-4} MH^2$		
J_3 [kgm ²]	$1.09 \times 10^{-2} MH^2$		



(a) Triple-link model (b) single-link model
Fig. 2 Rigid body models for estimation of the center of gravity.

3. 質量中心の推定

3.1 スクワット動作の質量中心推定

図 2(a)より, 上半身の質量中心が推定できれば身体の質量中心推定ができる. しかし, 3リンクモデルでは, 上半身質量中心と床反力計との関係が遠いために, 式が複雑になる. そこで, スクワット動作を図 2(b)のように, 一本の伸び縮みする剛体リンクモデルで近似することで, 身体部と足部の簡単な関係式を得る. この式から床反力計の計測値に基づいて, 身体の質量中心を推定する.

前提条件として, 下腿部と大腿部の質量中心位置 r_1, r_2 と股関節位置 r_{fp} は, 慣性センサの姿勢角から式(1)によって推定できると仮定する. このとき, 上半身の鉛直角 θ_3 が定まれば, 上半身の質量中心 r_3 と身体の質量中心 r_b は以下のように求められる.

$$r_3(\theta_3) = r_h + l_3 \begin{bmatrix} \sin \theta_3 \\ \cos \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$r_b(\theta_3) = \frac{m_1}{m_b} r_1 + \frac{m_2}{m_b} r_2 + \frac{m_3}{m_b} r_3(\theta_3) \quad (4)$$

図 2(b)より, 剛体 1 リンクモデルは伸び縮みするため, 身体部慣性モーメント J_b と身体部質量中心高さ l_b は時間変化する. これらを θ_3 の関数として次のように表す.

$$J_b(\theta_3) = J_1 + m_1 \|r_1 - r_b(\theta_3)\|^2 + J_2 + m_2 \|r_2 - r_b(\theta_3)\|^2 + J_3 + \frac{1}{m_3} \|(m_1 + m_2)r_b(\theta_3) - m_1 r_1 - m_2 r_2\|^2 \quad (5)$$

$$l_b(\theta_3) = \|r_b(\theta_3)\| \quad (6)$$

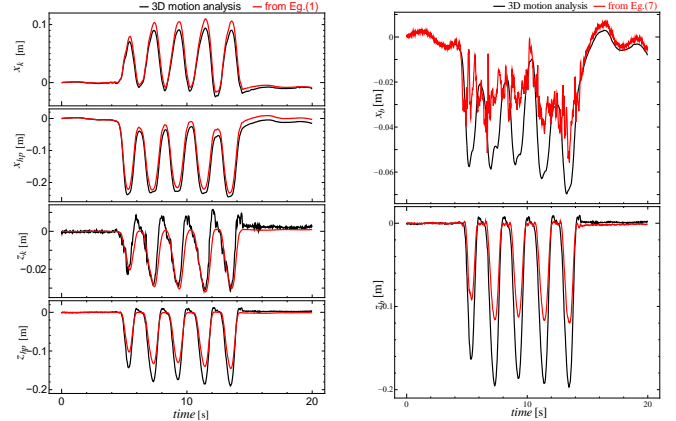
図 2(b)の剛体 1 リンクモデルの鉛直角 θ_b を微小として, 身体部と足部の運動方程式を整理すると, 次式が得られる.

$$\frac{\dot{J}_b(\theta_3)}{l_b(\theta_3)} \dot{x}_b + \frac{J_b(\theta_3) + m_b l_b^2(\theta_3)}{m_b l_b(\theta_3)} R_x + (R_z - m_f g)x_b + (-x_b R_z - L_f R_x) = 0 \quad (7)$$

ここに, R_x, R_z は床反力計で計測されるせん断力と鉛直力である.

以上の, 式(3),(4),(5),(6),(7)を, θ_3 についてニュートン法で解くことにより, 上半身角度 θ_3 を求め, 式(4)より身体の質量中心を推定する. 式(7)の \dot{J}_b と \dot{x}_b は, 次の後退差分公式で求めた.

$$\dot{J}_b = \frac{J_b(t) - J_b(t - \Delta t)}{\Delta t}, \quad \dot{x}_b = \frac{x_b(t) - x_b(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad (8)$$



(a) Kneejoint and Hipjoint (b) Center of mass
Fig. 3 Joint position obtained from inertial sensors.

4. 検証実験

4.1 実験の概要

慣性センサ(TSND151,ATR-promotins)と床反力計(TF3040, テック技販)による質量中心推定の結果を比較するためにモーションキャプチャ(MAC3Dsystem,MotionAnalysis)を用いて検証実験を行った. 被験者の両下腿部, 両大腿部に慣性センサを装着し, 床反力計の上で, 左右の腕をぶら下げた状態でスクワット動作を 5 回行ってもらい, 計 3 回計測した.

また, モーションキャプチャの解析では筋骨格解析ソフト(KinTools)を使用して関節位置と質量中心位置を求めた. サンプル時間は慣性センサを 500Hz, モーションキャプチャと床反力計を 100Hz とした.

4.2 実験結果

慣性センサで計測した膝関節位置と股関節位置の推定結果を図 3(a)に示す. 黒線が KinTools の結果で赤線が慣性センサからの推定結果である. 比較のために, 初期位置をゼロとした. この結果より慣性センサから膝関節位置と股関節位置の推定が行えていることがわかる.

この結果を用いて式(7)より推定した身体の質量中心を図 3(b)に示す. x 方向変位はかなりノイズの乗った結果となっている. これは式第一項の微分項によるものである. この結果から, 微分項の改善, または, フィルタをかけるといった事で身体の質量中心が推定できる見通しが得られた.

5. 結言

今回の結果より, 慣性センサから身体の質量中心推定に必要な股関節位置推定が行えることがわかった. 目的の, 身体の質量中心推定では微分項の改善や, フィルタ処理によって推定ができる見通しが得られたため, 今後検討していきたいと考える.

参考文献

- (1) 園部元康, 井上喜雄, フォースプレート計測に基づく立位時の矢状面質量中心推定 (推定誤差の発生メカニズムと推定精度の評価), 日本機械学会論文集, 85 巻, 877 号(2019)
- (2) 近藤 亜希子, 土岐 仁, 廣瀬 圭, 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, 79 巻, 803 号(2013)
- (3) 阿江 通良, 湯 海鵬, 横井 孝志, 日本人アスリートの身体部分慣性の特性の推定, バイオメカニズム, vol.11(1992), pp. 23-33