

# 卒業論文要旨

## 慣性センサ計測に基づく脚部関節トルク推定

### Leg joint torque estimation using inertial sensor

システム工学群

動的デザイン研究室 1200044 鍵山 裕輝

#### 1. 緒言

現在、変形性膝関節症（膝 OA）の患者が全国に一千万人存在しており、症状の発生および進行の抑制が課題となっている。膝 OA の要因として着地時の膝関節にかかるトルクの影響が考えられる。立ち上がり動作や歩行等の日常動作において膝関節への負担を減らすような指導が求められるが、計測が難しいため、適切な指導が難しい課題がある。

計測の課題を解決する手段として、慣性センサを用いた測定が挙げられる。慣性センサによる計測は手間が少なく、人体への装着の負荷も小さい。本研究では、下肢と体幹に複数の慣性センサを取り付けて重心位置だけではなく、足関節と膝関節のモーメントを推定することを目的とする。

一般的に、関節モーメントはモデルの端点に作用する力と複数のセグメントの重心位置や加速度から推定できる。頭部から順に推定した場合は端点の力の情報が不要となり重心情報のみで推定できるが、質量比の大きく背骨による変形がある上半身を介して下肢の関節トルクを推定することにより精度の低下が生じる。一方、下肢側から関節トルクを推定するためにはフォースプレートによる足裏に作用する力の計測が必要になる。そこで、本研究では、慣性モーメントから簡易的に足裏の圧力中心とせん断力を推定し、その結果から膝関節モーメントを推定することを目指す。

#### 2. 慣性センサによる質量中心の推定

##### 2.1 センサの配置と加速度の推定

本研究では、図 1 のように慣性センサ 7 個を両下腿、両大腿、第 5 腰椎付近（下胴）、第 1 胸椎付近（上胴）、頭部に付ける。座標系は両足首の中央を原点とする絶対座標系とし、前方を  $x$  軸、鉛直上向きを  $z$  軸とする右手系とする。動作は立位、立ち上がり、屈伸などを想定しており、 $z$  軸回りの身体のねじれは考慮しない。従って、解析は矢状面内とする。

慣性センサの姿勢は、3-2-1 オイラー角で表現する。 $x$  軸

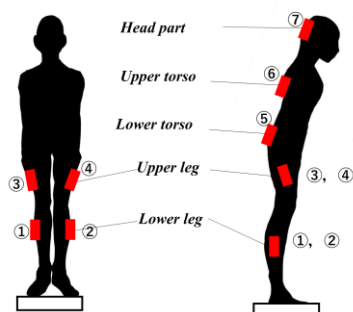


Fig. 1 Distribution of Inertial sensors for estimating COP and moments of joints of legs.

まわりのロール角  $\varphi$  と  $y$  軸まわりのピッチ角  $\theta$  でセンサの姿勢を表現する。センサの姿勢は文献<sup>(1)</sup>に従って、拡張カルマンフィルタによって推定する。

慣性センサによる計測した加速度は、次式によってセンサ座標系から絶対座標系への変換する。

$$\mathbf{a}_i = \mathbf{R}_{si} \mathbf{a}_{si} \quad (i=1, \dots, 7) \quad (1)$$

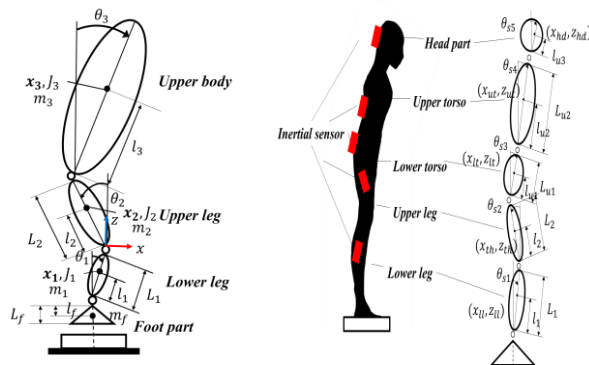
ここに、 $i$  はセンサ番号、 $\tilde{\mathbf{a}}_{si}$  は計測されたセンサ座標系の 3 軸加速度ベクトル、 $\mathbf{a}_i$  は絶対座標系の加速度であり、回転変換行列は次のようになる。

$$\mathbf{R}_{si} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{si} & \sin \varphi_{si} \sin \theta_{si} & \cos \varphi_{si} \sin \theta_{si} \\ 0 & \cos \varphi_{si} & -\sin \varphi_{si} \\ -\sin \theta_{si} & \sin \varphi_{si} \cos \theta_{si} & \cos \varphi_{si} \cos \theta_{si} \end{bmatrix} \quad (2)$$

##### 2.2 基本モデルの定義と重心の推定

本研究では、基本モデルとして図 2(a) に示す 3 リンクモデルを用いる。このモデルでは、下腿部、大腿部、上半身の 3 つの剛体リンクと支持面に固定した足部で構成される。関節トルクの推定では、基本モデルを用いる。

提案手法では、慣性センサの計測から足部を除く部位（身体部）の質量中心位置を推定する。しかし、基本モデルの 3 リンクから質量中心位置を求めた場合、上半身の質量中心の導出が難しく、推定誤差が生じる。そこで、質量中心の推定用に図 2(b) に示す上半身をさらに下胴、上胴、頭部の 3 セグメントに分割したモデルを用い、これを質量中心推定モデルと呼ぶ。基本モデルおよび質量中心推定モデルにおける各剛体リンクの質量、慣性モーメント、リンク長、重心位置は、文献<sup>(2),(3)</sup>に基づいて表 1 に示す身長体重比で計算する。ただし、 $H$  は身長、 $M$  は体重を表している。



(a) Basic model (b) COM estimation model

Fig. 2 Analytical model for COM estimation

7 個の慣性センサは各リンクに対し、 $z$  軸が平行になるように取り付けたと仮定する。このとき図 2(b)の各リンクの重心位置は次式で得られる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_{ll} &= l_1(\mathbf{R}_{s1} + \mathbf{R}_{s2})\mathbf{U} / 2 \\ \mathbf{x}_{th} &= L_1(\mathbf{R}_{s1} + \mathbf{R}_{s2})\mathbf{U} / 2 + l_2(\mathbf{R}_{s3} + \mathbf{R}_{s4})\mathbf{U} / 2 \\ \mathbf{x}_{lr} &= L_1(\mathbf{R}_{s1} + \mathbf{R}_{s2})\mathbf{U} / 2 + L_2(\mathbf{R}_{s3} + \mathbf{R}_{s4})\mathbf{U} / 2 + l_{u1}\mathbf{R}_{s5} \\ \mathbf{x}_{ur} &= L_1(\mathbf{R}_{s1} + \mathbf{R}_{s2})\mathbf{U} / 2 + L_2(\mathbf{R}_{s3} + \mathbf{R}_{s4})\mathbf{U} / 2 \\ &\quad + L_{u1}\mathbf{R}_{s5} + l_{u2}\mathbf{R}_{s6} \\ \mathbf{x}_{hd} &= L_1(\mathbf{R}_{s1} + \mathbf{R}_{s2})\mathbf{U} / 2 + L_2(\mathbf{R}_{s3} + \mathbf{R}_{s4})\mathbf{U} / 2 \\ &\quad + L_{u1}\mathbf{R}_{s5} + L_{u2}\mathbf{R}_{s6} + l_{u3}\mathbf{R}_{s7} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)から図 2(a)の質量中心位置は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= \mathbf{x}_{ll} \\ \mathbf{x}_2 &= \mathbf{x}_{th} \\ \mathbf{x}_3 &= (m_l\mathbf{x}_{lr} + m_u\mathbf{x}_{ur} + m_{hd}\mathbf{x}_{hd}) / m_b \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

このとき、身体部質量中心変位は次式で得られる。

$$\mathbf{x}_b = (m_l\mathbf{x}_1 + m_2\mathbf{x}_2 + m_3\mathbf{x}_3) / m_b \quad (5)$$

また、質量中心加速度は次式で得られる。

$$\ddot{\mathbf{x}}_b = \{m_l(\mathbf{R}_{s1}\mathbf{a}_{s1} + \mathbf{R}_{s2}\mathbf{a}_{s2}) / 2 + m_{th}(\mathbf{R}_{s3}\mathbf{a}_{s3} + \mathbf{R}_{s4}\mathbf{a}_{s4}) / 2 + m_{lr}\mathbf{R}_{s5}\mathbf{a}_{s5} + m_{ur}\mathbf{R}_{s6}\mathbf{a}_{s6} + m_{hd}\mathbf{R}_{s7}\mathbf{a}_{s7}\} / m_b \quad (6)$$

質量中心の角度と角速度は次式で得られる。

$$\theta_b = \tan^{-1}(\ddot{x}_b / \ddot{z}_b) \quad (7)$$

$$\dot{\theta}_b = (-\ddot{x}_b \cos \theta_b + \ddot{z}_b \sin \theta_b) / l_b \quad (8)$$

### 3. 圧力中心と関節モーメントの推定

#### 3.1 剛体 1 リンクモデルの導入とパラメータ

慣性センサから圧力中心を推定するために、本研究では身体部を図 3 のような剛体 1 リンクとみなし、そのシステムから圧力中心を求める。ただし、屈伸動作のような大きな運動を行った場合は、1 リンクの質量中心の高さや慣性モーメントが時々刻々と変化する。2 章の議論より、各セグメントの重心位置は推定できるため、その情報から重心高さや慣性モーメントを求めると次のようになる。

$$l_b(t) = \|\mathbf{x}_b\| \quad (9)$$

$$J_b(t) = J_1 + m_1 \|\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_b\|^2 + J_2 + m_2 \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_b\|^2 + J_3 + m_3 \|\mathbf{x}_3 - \mathbf{x}_b\|^2 \quad (10)$$

#### 3.2 圧力中心と関節トルク推定

図 3 の剛体 1 リンクモデルからフリーボディダイアグラムに基づいて圧力中心の式を整理すると、次のようになる。

$$\mathbf{x}_p = \frac{-J_b \ddot{\theta}_b + (l_b \cos \theta_b + L_f) m_b \ddot{x}_b + m_b l_b (\ddot{z}_b + g) \sin \theta_b}{m_b \ddot{z}_b + Mg} \quad (11)$$

式(11)を利用し、足関節トルク  $N_a$  は次のようになる。

$$N_a = -(m_b \ddot{z}_b + Mg) x_p + m_b L_f \ddot{x}_b \quad (12)$$

また、膝関節トルク  $N_k$  を求めると次のようになる。

$$\begin{aligned} N_k &= -J_1 \ddot{\theta}_1 - (m_1 \ddot{x}_1 - m_b \ddot{x}_b) L_1 \cos \theta_1 - m_1 \ddot{x}_1 l_1 \cos \theta_1 + \\ &\quad (m_1 \ddot{x}_1 + m_1 g) l_1 \sin \theta_1 - m_b \ddot{x}_b L_f - (m_f g + m_b g + m_b \ddot{z}_b) x_p \end{aligned} \quad (13)$$

### 4. 検証実験

慣性センサ計測に基づく関節トルク推定の精度の確認を行うため、比較用としてフォースプレートとモーションキャプチャの計測も同時並行で行う。屈伸は 3 回、立ち上がりは 1 回行った。また、被験者には FP からかかとが離れず腕を脇

Table 1 Physical parameters of the basic model and the COM estimation model

Parameter	Value	Parameter	Value
$m_b$	0.978M	$m_{u1}$	0.187M
$m_1$	0.102M	$m_{u2}$	0.302M
$m_2$	0.220M	$m_{u3}$	0.069M
$m_f$	0.022M	$h_{u1}$	0.051H
$J_b$	7.49e-2MH <sup>2</sup>	$h_{u2}$	0.096H
$J_1$	2.32e-4MH <sup>2</sup>	$h_{u3}$	0.129H
$J_2$	3.23e-4MH <sup>2</sup>	$L_{u1}$	0.130H
$J_3$	1.36e-2MH <sup>2</sup>	$L_{u2}$	0.208H
$h_b$	0.457H		
$h_1$	0.100H		
$h_2$	0.102H		
$h_3$	0.191H		
$L_1$	0.246H		
$L_2$	0.195H		
$L_f$	0.039H		

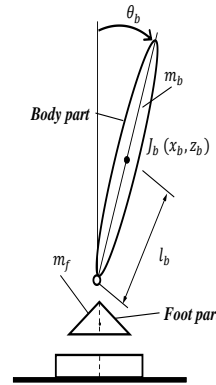


Fig. 3 Single-link model for COP estimation.

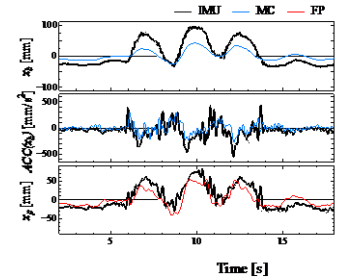


Fig. 4 Estimation result of COP and displacement and acceleration of COM

から離れないように動作させた。また、慣性センサは下腿部、大腿部、上半身の質量中心位置に左右に取り付けている。以上の条件で質量中心変位及び質量中心加速度、圧力中心の推定結果を図 4 に示す。

### 5. 結言

推定結果より、圧力中心位置は比較的精度良く推定できた。しかし、質量中心変位の推定精度があまりよくないため、これを合わせるものが課題となっている。

### 参考文献

- (1) 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”, 2013, pp.113
- (2) 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特性の推定”, バイオメカニズム, Vol.11(1992), pp.26.
- (3) Contini, R., Body segment parameters, Part II, Artificial limbs, Vol. 16, No. 1 (1972), pp.1-19.