

慣性センサを用いた歩行時足部の動作推定

An estimation of foot motion at walk using inertial sensors

○ 成松賢司（高知工大院） 井上喜雄（高知工大） 芝田京子（高知工大）

園部元康（高知工大） 橋口秋彦（高知工大院）

Kenji NARIMATSU, Kochi Univ. of Tech
Yoshio INOUE, Kochi Univ. of Tech
Kyoko SHIBATA, Kochi Univ. of Tech
Motomichi SONOBE, Kochi Univ. of Tech
Akihiko HASHIGUCHI, Kochi Univ. of Tech

Abstract: This paper presents a method for an estimation of foot motion at walk as the one of simple gait analysis using two inertial sensors. The accelerations of walking and vertical directions are integrated twice and to suppress the integration error, the velocity is modified to satisfy that velocity of the foot is zero at the stance phase of every walking cycle. Walking experiments are carried out. As results, it can be seen the proposed method using two inertial sensors is enough to estimate foot motion.

Key Words: Estimation, Gait analysis, Inertial sensor

1. 緒言

歩行解析の手段として複数のカメラを用いる三次元動作解析装置が挙げられるが、非常に高価で、なおかつ設置式のため計測範囲が限られている。本研究グループでは、つま先に慣性センサを取り付け、歩行中の進行方向と鉛直方向の位置を推定する手軽で歩行範囲の指定などをすることなく歩行状態を知る方法を提案してきた⁽¹⁾。歩行中の足部の挙動は、MTP 関節での回転を含む2リンクとして動作していると考えられるため、本報では既報⁽¹⁾の方法を進展させ、つま先と足の甲にそれぞれ慣性センサを取り付けることで、足部の2リンクとしての動作を推定することを考える。それぞれのセンサ取り付け位置の進行方向と鉛直方向の位置を推定するとともに、推定した進行方向位置と鉛直方向位置をもとにMTP 関節での回転が可能な2リンク系で足部をモデル化し、足部の動的挙動を推定することを目的とする。

2. 提案する推定方法

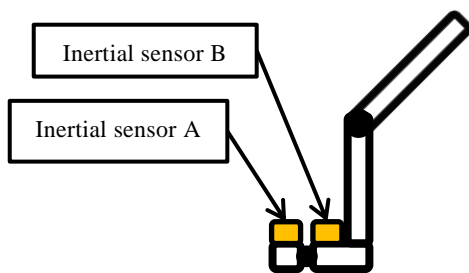


Fig.1 Sensors attached to foot

2.1. 座標変換

本研究では、図1に示したようにつま先と足の甲に慣性センサを1つずつ取り付ける。慣性センサから出力される加速度は慣性センサ固有の座標系での加速度になっているため、この座標系をグローバル直交静止座標系に変換する必要がある。

X 軸変換

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (1)$$

Y 軸変換

$$Y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

Z 軸変換

$$Z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここで、 α 、 β 、 γ はそれぞれロール角、ピッチ角、ヨー角の角度とする。

これらを式(4)で示す順に計測した3軸加速度 (x, y, z) に掛け合わせ、グローバル座標系での加速度 (x', y', z') を算出する。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = ZYX \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (4)$$

2.2. 提案する補正法

座標変換後の加速度に対して、理論的には数値積分を2回行うことで歩行距離が求まるが、積分誤差等により単純に積分を2回行うだけでは正しく距離を推定できない。そのため、歩行運動の特徴を考え、加速度を1階積分して得られた速度 $V(t)$ に対して補正を行い、補正速度 $V'(t)$ を求める。

まず、進行方向位置の推定について述べる。図2は、右足部に慣性センサを取り付け、左足から4歩の歩行を行った際の進行方向速度を示している。歩行前後に約2秒間の停止区間を設けた。

赤の実線が、座標変換後の進行方向加速度を単に1階積分した場合の速度を表す。今回センサは足部に取り付けており、人間の歩行時の足部の動きは、立脚期では接地しているため停止しており、1歩ごとに停止区間が存在する。そのため、図2において歩行前後の停止区間と5~5.5秒の立脚期では速度が0となるはずである。しかしながら、補

正前の赤実線では，3箇所の停止時すべてが0になっていない．そこで，誤差の要因は不明確であるが，短い距離であれば誤差は時間経過とともに累積していると考えられるとして，ずれた分だけ平均的に取り除く．したがって，運動開始の時間を s ，運動終了の時間を f とすると，速度補正の式は以下ようになる．

$$V'(t) = V(t) - V(s) - (t - s) \frac{V(f) - V(s)}{f - s} \quad (5)$$

運動開始と終了の時間 s, f は，各軸の加速度とジャイロから判別する．今回は鉛直方向の加速度と，ロール角方向のジャイロが大きく変化する時間を見て，手動で判別を行った．自動で運動開始と終了の時間を判別方法は今後の課題とする．補正後の速度を図2の青実線に示す．停止時の速度が0になっていることがわかる．このようにして，積分誤差の累積を防ぐ．

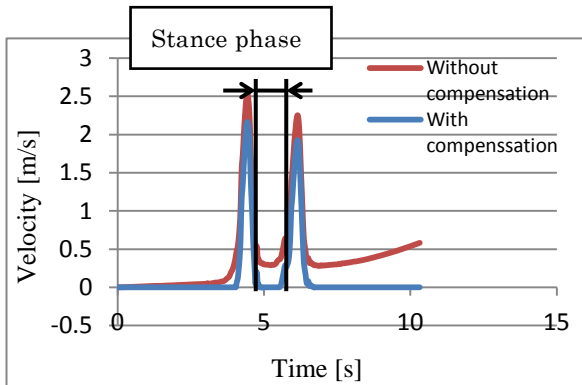


Fig.2 Velocity of instep in walking direction

センサは足部に取り付けているため，1歩ごとに立脚期での速度が必ず0になることを利用して，その度に式(5)の速度補正を行う．このようにして補正速度を導出した後，再び積分を行うことで歩行距離を推定する．

次に鉛直方向位置の推定について述べる．進行方向と同様，立脚期において速度は0になる．速度補正を用いて速度を推定し，一階積分することで距離を推定する．しかし，立脚期において鉛直方向位置は接地しているため0であるはずだが，補正速度を単に1階積分することで推定した鉛直方向位置は0にならない．そこで，立脚期の鉛直方向位置の値が0になるように，さらに位置補正を行う．補正前の距離と補正後の距離をそれぞれ $X(t), X'(t)$ とおくと，位置補正に用いる式は以下ようになる．

$$X'(t) = X(t) - X(s) - (t - s) \frac{X(f) - X(s)}{f - s} \quad (6)$$

つまり，進行方向は速度のみ補正を行い，鉛直方向は速度の補正に加えて位置も補正する．

3. 実験方法

右足に慣性センサを図3のようにつま先と足の甲にそれぞれ1つ取り付け，比較検証として慣性センサ付近に計測用マーカを貼り三次元動作解析装置を用いて計測しながら歩行実験を行う．実験では Xsens 社製の慣性センサ MTW2-3A7G6 を使用した．右足に慣性センサを固定し，片足2歩ずつで合計4歩の歩行実験を行い，左足から歩き始めた．また，停止時の情報を得るために計測開始から約2秒間停止した状態から運動を開始し，運動終了後に再び約2秒間停止してから計測を終了し，進行方向と鉛直方向の位置をそれぞれ推定した．今回正解値とする三次元動作解析装置の計測結果と比較を行う．実験は健康な20代男性1

名に対して4回行った．被験者の体重は64.9kg，身長178.5cm，BMIが20.3であり，同意を得ている．

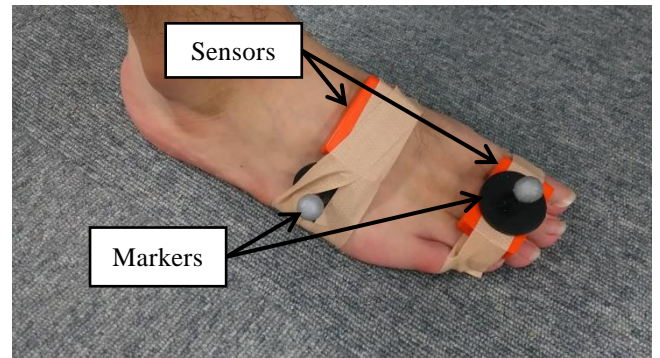


Fig.3 Sensors and markers attached to foot

4. 実験結果

4試行のうちの1回につき，つま先部分の進行方向位置の推定結果と三次元動作解析装置での計測結果を図4と表1に示す．

赤実線の速度補正前の速度を積分した推定結果は，緑破線の三次元動作解析装置の計測結果と比べて大きく異なる値となったが，青実線で示しているように速度補正後の速度を用いた推定では，三次元動作解析装置での計測結果との誤差が非常に小さく，提案法によって進行方向距離を高い精度で推定できることが確認できた．

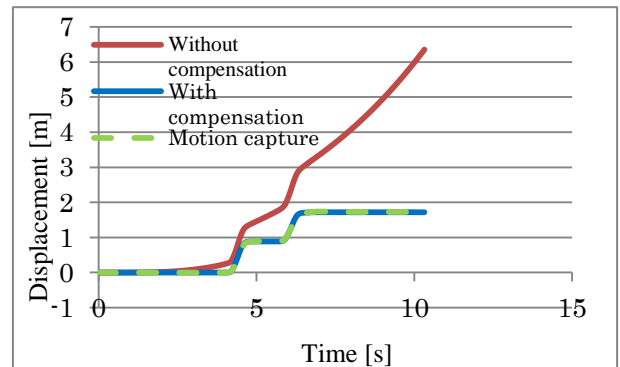


Fig.4 Displacement of toe in walking direction

Table1 Displacement of toe in walking direction

The step of number	2	4
Without compensation[m]	1.75	6.35
With compensation[m]	0.887	1.72
Motion capture[m]	0.894	1.73
Error[%]	0.782	0.578

足の甲部分の進行方向位置の推定結果と三次元動作解析装置での計測結果を図5，表2に示す．つま先部分の推定結果同様，速度補正前の速度を用いて推定した赤実線と比べて，青実線で示す速度補正後の速度から推定した結果の方が精度が高いが，1歩目では約15cm，2歩目では約20cmの誤差があった．このことから，つま先部分での進行方向距離の推定よりも精度が低いことがわかった．ただし，進行方向の変位に関しては，2つのセンサ取り付け位置での差がないので，つま先部の結果で代替することは可能である．

鉛直方向の位置推定では前述の通り，算出後の距離に対しても補正を行う．図6につま先部分の鉛直方向の推定距

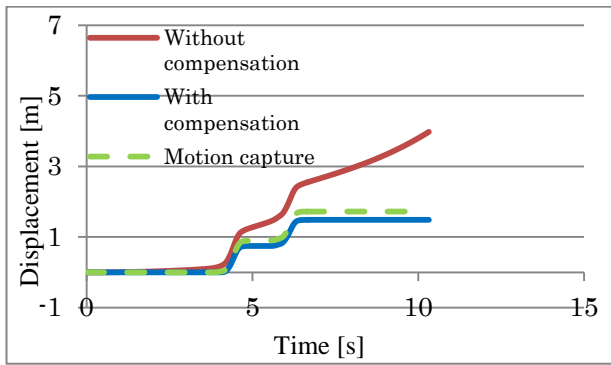


Fig.5 Displacement of instep in walking direction

Table2 Displacement of instep in walking direction

The step of number	2	4
Displacement[m]	1.44	3.98
Without compensation[m]	0.747	1.49
Motion capture[m]	0.891	1.72
Error[%]	16.1	13.4

離と三次元動作解析装置での計測結果を示す。ピーク値において誤差があるものの、二峰性があることや、1つ目の山の方が2つ目の山よりも小さいことなど、特徴が一致している。このことから、提案法を用いることで鉛直方向の位置推定も可能であることが示された。

足の甲部分の鉛直方向の推定距離と三次元動作解析装置での計測結果を図7に示す。つま先部分での推定結果と同様、ピーク値での誤差はあるが、二峰性があり、1つめの山の方が大きいことが一致しており、足の甲部分での鉛直方向位置においても提案法によって推定可能であることが示された。

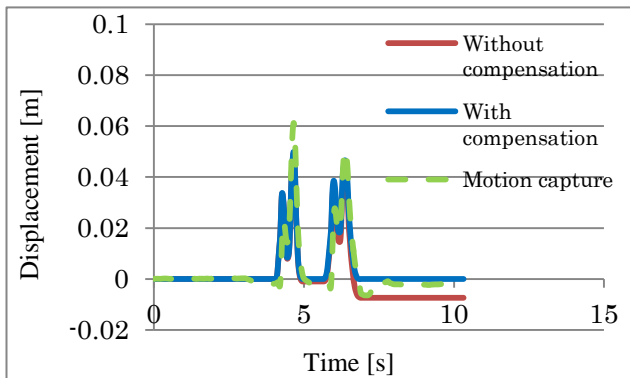


Fig.6 Displacement of toe in vertical direction

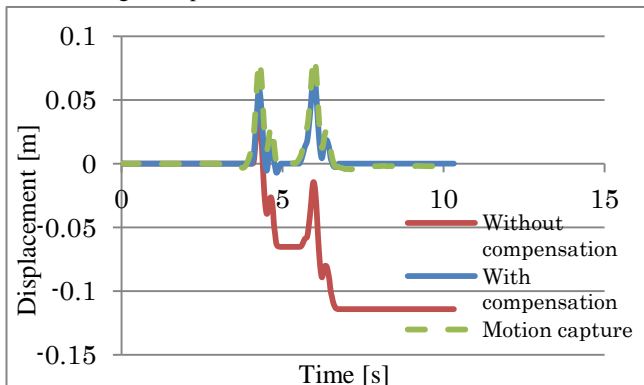


Fig.7 Displacement of instep in vertical direction

次に、進行方向と鉛直方向の推定結果と慣性センサから出力される角度情報を基に足部動作の軌跡を作成した。つ

ま先の進行方向位置と鉛直方向位置，つま先と足の甲それぞれの角度情報を基にすることで，MTP 関節を考慮した2リンクの足部モデルの挙動を表示した。

図8の青実線は，右足つま先の軌跡である。赤と緑の四角形はそれぞれつま先と足の甲部分のモデルである。この足部モデルを0.25秒ごとに軌跡上に表示した。これにより足部の状態を視覚的に捉えることができるようになった。

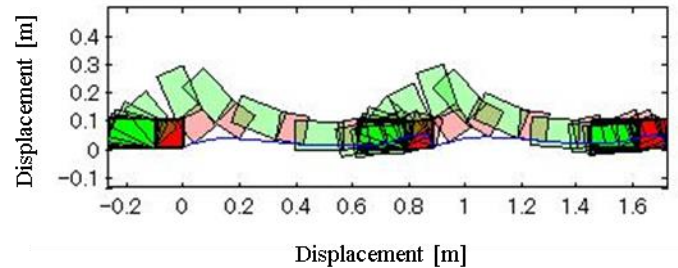


Fig.8 Tracks of foot while walking

5. 結言

手軽で計測範囲に制限を受けない歩行解析の1つとして、足部に取り付けた慣性センサを用いることで、歩行中の足部の状態を推定する方法を提案した。慣性センサから得られる角度を基に、加速度に対して行う座標変換と、座標変換後の加速度を数値積分して求めた速度に対して行う停止時の情報を利用した速度補正法及び位置補正法により、進行方向と鉛直方向の位置推定を行う方法を提案し、その妥当性を実験的に検討した結果、十分な精度での位置推定を行うことが確認できた。また、推定した位置と慣性センサの角度情報を基にMTP 関節を考慮した2リンクの足部モデルを作成し、足部の軌跡とともに表示することができた。これにより、歩行状態を視覚的に確認することができるため、病院内では手軽に診断につなげられ、ユーザにとっては、自身の歩行動作を知ることで日々歩行改善の意識を高めることが可能になると考えられる。

文献

- (1) 成松賢司, 井上喜雄, 芝田京子, 橋口秋彦, 慣性センサを用いた歩行時足部の位置推定, 日本機械学会中四国支部第46回学生員卒業研究発表講演会, 講演番号113, 2016.