

修士学位論文要約（令和4年3月）

# 慣性センサを用いた体重心位置推定の精度向上に関する研究

中西 慶樹

指導教員：渡邊 高志

## Basic Study on Improvement of Accuracy of Body Center of Mass Position Estimation Using Inertial Sensors

Keiju NAKANISHI

Supervisor : Takashi WATANABE

Early rehabilitation of patients suffering from sequelae such as hemiplegia after cerebrovascular disease is considered important. So far, the calculation of evaluation index of movement using inertial sensors has been carried out for rehabilitation applications. In particular, the center of mass (COM) trajectory has the potential to provide new insights into the evaluation of exercise in clinical practice. This study aimed to improve the accuracy of COM trajectory estimation using inertial sensors. Specifically, this study quantified the relationship between the error of the direction of the foot position trajectory and the sensor azimuth angle at the initial time of the measurement (initial azimuth angle), which had been suggested as an error factor in previous study, and showed that there was a strong positive correlation between the initial azimuth angle and the error of the direction of the foot position trajectory. Next, the error in the foot position trajectory direction was used to improve the accuracy of COM trajectory estimation. The result showed that the error of the COM trajectory direction decreased in most of measurements, and differences in shape of COM trajectory on the horizontal plane reduced in some measurement trials. It was suggested that a method of correcting foot position trajectory and segment vectors using angle rotation error would be useful in the COM trajectory estimation.

### 1. 序論

脳血管疾患によって片麻痺などの後遺症を患った患者は、早期からの適切なリハビリテーションが必要となる。これまでに、臨床応用に向けて慣性センサを用いた運動指標の算出が行われてきたが、特に体重心位置軌跡は、運動の非対称性[1]や歩行中の安定性[2]などを定量評価することができ、従来の臨床における運動評価に新たな知見を提供する可能性がある。我々の研究グループでは、慣性センサを用いた運動計測法を応用して体重心位置軌跡を推定する方法を構築してきたが[3]、推定精度に課題が残った。そこで本研究では、慣性センサによる体重心位置軌跡の推定精度の向上を目的とした。

### 2. 慣性センサを用いた体重心位置推定法

先行研究で構築された体重心位置推定法の概略を図1に示す。初めに、両足部、両下腿部、両大腿部、体幹部の7か所に装着した慣性センサの信号から、各部位の姿勢を表す姿勢ベクトルを算出する。次に、足部センサの信号から足部位置軌跡を算出し、その位置を起点として姿勢ベクトルを組み上げ、各部位の重心位置を合成することで、体重心位置を算出する。

### 3. 足部位置軌跡の誤差要因および推定精度向上の検討

先行研究において、体重心位置軌跡の誤差要因として足部位置軌跡の誤差が示唆された。また、足部位置軌跡の誤差要因として、足部センサの初期時刻における方位角（初期方位角）が示唆された。そこで、直方体の剛体に8つの慣性センサを装着し、直線模擬歩行運動を行った。このとき、4種類の初期方位角（0deg, 30deg, 60deg, 90deg）を設定し、各初期方位角にセンサを2個ずつ割り当てた。各センサの位置軌跡が、進行方向から回転した方向になったことから、式(1)により回転誤差を定義した。

$$\theta = \tan^{-1} \left[ \frac{\text{試行終了時刻の足部位置軌跡の X 変位}}{\text{試行終了時刻の足部位置軌跡の Y 変位}} \right] \quad (1)$$

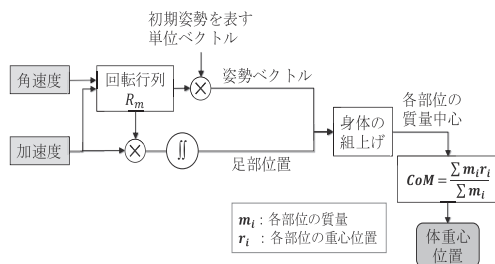


図1 体重心位置推定の概略

実験結果から、初期方位角と回転誤差の間には、相関係数 0.97、傾き 1.00 の関係が確認され、回転誤差と初期方位角はおおむね同じ値であることを確認した。このことを踏まえ、初期方位角を用いてセンサデータを補正することで、センサ位置軌跡の進行方向からの回転誤差の低減を検討した。その結果、どの初期方位角に対応するセンサにおいても、回転誤差がおおむね 0 deg に収束した。また、身体に装着した場合を想定して、センサに装着傾斜を与えた場合にも同様に、初期方位角を用いてセンサ位置軌跡を補正することができることを確認した。

#### 4. 初期方位角推定法と体重心位置推定への適用の検討

4 種類の足部初期条件を設定し、5 名の被験者 (22~24 歳) で各足部初期条件に対して 10 試行ずつ合計 40 試行の約 3.0m 直線歩行を行い、慣性センサと 3 次元動作解析装置の同時計測を行った。初期方位角の推定法として、使用している慣性センサ (Xsens システム) から推定されるオイラー角の初期 Yaw 角を用いる方法、前述の回転誤差を用いる方法の各々について、体重心を算出し、3 次元動作解析装置の計測値から算出した体重心位置 (リファレンス) との比較を行った。

初期 Yaw 角を用いる方法では、先行研究法と比較して推定した体重心の誤差が増加する結果となった。初期 Yaw 角の試行毎の変化を確認すると、地磁気の変化に起因すると考えられる初期 Yaw 角の誤差の増加を確認した。臨床現場でも、地磁気の変化が生じる可能性は否定できず、地磁気の変化によって体重心位置推定の精度が悪化する可能性があることから、Xsens システムから算出される初期 Yaw 角を初期方位角として用いる方法は、現時点では適切でないと考えられた。

回転誤差を用いる方法では、回転誤差を用いて足部位置軌跡を補正する方法 (方法 1)、回転誤差を用いて足部位置軌跡および姿勢ベクトルの補正を行う方法 (方法 2) の検討を行った。方法

1 では、回転誤差を用いて足部センサデータの補正を行った。方法 2 では、回転誤差を用いて足部センサデータの補正および重みづけした回転誤差を用いて各姿勢ベクトルの補正を行った。方法 1、方法 2 で算出した水平面体重心位置軌跡を図示した例を図 2 に示した。図 2 は、右足部初期方位角 30 deg (外旋)、左足部初期方位角 0 deg の時の結果である。リファレンスと比較すると、先行研究法は、水平面の体重心位置軌跡が進行方向 (Y 軸) に対して回転していたが、方法 1 および方法 2 では回転誤差が低減されていた。また、方法 1 では軌跡の左右方向 (X 軸) の変動の増加や変動周期の減少、位相のずれがみられたが、方法 2 では、それらが低減されていることを一部の試行で確認し、方法 2 の有効性を示唆する結果を得た。

#### 5. まとめ

本研究では、先行研究で構築された体重心位置推定法の推定精度向上を目的とした。まず、剛体を用いてセンサ位置軌跡の進行方向と初期方位角の関係を定量化し、初期方位角と回転誤差の間に強い相関があることを確認した。また、初期方位角を用いてセンサデータを補正することでセンサ位置軌跡の進行方向の回転誤差を低減できることを確認した。次に、初期方位角の推定法として、初期 Yaw 角を用いる方法と回転誤差を用いる方法の検討を行った。回転誤差を用いて足部位置軌跡と姿勢ベクトルの補正を行う方法について、重心位置軌跡の推定精度の向上における有効性が示唆された。

#### 文献

- 1) Chitralakshmi K. Balasubramanian, Richard R. Neptune, and Steven A. Kautz, "Foot placement in a body reference frame during walking and its relationship to hemiparetic walking performance," *Clinical Biomechanics*, vol.25, no.5, pp.483-490, 2010.
- 2) Fokke B.van Meulen, Dirk Weenk, Edwin H.F.van Asseldonk, H.Martin Schepers, Peter H.Veltink and Jaap H.Buurke, "Analysis of Balance during Functional Walking in Stroke Survivors," *PLOS ONE*, vol.11, no.11, 2016.
- 3) 武田優帆, "慣性センサによる重心位置推定とその運動評価への応用に関する研究," 東北大学大学院医工学研究科修士学位論文, 2018.

— リファレンス — 先行研究法 — 方法1 — 方法2

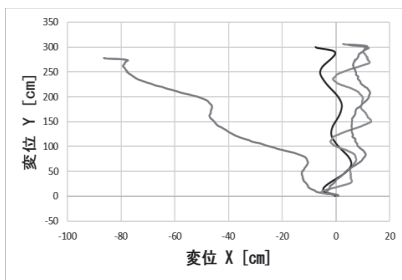


図 2 水平面体重心位置軌跡の比較の例