

修士学位論文要約（令和4年3月）

## 下腿部慣性センサによる異常歩行の評価指標推定に関する基礎研究

赤塚 勝多

指導教員：渡邊 高志

A Basic Study on Estimation of Evaluation Index for Abnormal Gait  
Using Lower Leg Inertial Sensor

Kanta AKATSUKA

Supervisor: Takashi WATANABE

This study focused on using the inertial sensor attached on the shank in order to estimate stride length and walking speed by applying the inverted pendulum model. A secondary objective of this study was to compare the estimation accuracy of the inertial sensors depending on their mounting position. Therefore, the shank and foot sensors were used to estimate the stride length in normal walking and walking simulating hemiplegia. Although the method using the shank sensor detects vertical events of the shank from the maximum value of the angular velocity, the angular velocity in the simulated hemiplegic gait is sometimes oscillatory, which may lead to false detection of vertical events. In this study, the interval of the foot flat was estimated from the angular velocity and acceleration, and the time within that interval when the angular velocity is closest to zero of the angular velocity was detected within the interval to improve the accuracy of vertical event detection. As a result, the accuracy of stride length and walking speed estimated by the shank sensor was better than that of the foot sensor in many walking conditions, and the estimation error of the walking speed did not exceed the Minimal Clinical Important Difference (MCID) in simulated walking. This showed the usefulness of using the inertial sensor of the shank and the inverted pendulum model in estimation of the stride length and walking speed for normal and simulated walking. In the future, it is necessary to examine the usefulness of the method for paralyzed patients.

## 1. はじめに

本研究では、下腿部に装着した慣性センサを使用し、倒立振り子モデルを適用して、ストライド長および歩行速度を推定する方法について、健常者歩行と異常歩行を対象として検討した。また、本研究の副次的な目的には、慣性センサの装着位置の違いによる推定精度の比較も含まれる。したがって下腿および足部センサを用いて通常歩行、片麻痺模擬歩行での計測を行った。下腿センサを用いた方法では、下腿が重力ベクトルと平行になる時刻（以下、垂直イベント）を角速度極大値から検出するが、片麻痺模擬歩行における角速度は振動的であり、垂直イベント誤検出の可能性が考えられた。そこで本研究では、角速度と加速度から大まかな足底接地区間を推定し、区間内の角速度が最も0に近い時刻を検出することで垂直イベント検出精度の向上およびストライド長、歩行速度推定精度への影響を調査した。

## 2. 原理

## 2-1 ストライド長算出法の概要

ストライド長は、連続する運動である歩行を垂直イベントによって各ストライドに分割し、その間の運動加速度の2重積分から算出する。また、積分の際に生じる累積誤差を補正するため、垂直イベントにおける運動速度を角速度から算出し、その値を

用いて補正を行う。運動加速度は、センサで計測した加速度 $\mathbf{a}$ を回転行列を用いて基準座標系における加速度に変換し、重力加速度 $\mathbf{g}$ を減算することで算出した(式(1))。ここで回転行列 $\mathbf{R}$ は加速度と角速度を用いて算出したクォータニオンから求めた。

$$\mathbf{a}_m(t) = \mathbf{R}(t)\mathbf{a}(t) - \mathbf{g} \quad (1)$$

## 2-2 垂直イベント検出法

先行研究<sup>1)</sup>では、垂直イベントは立脚期中の矢状面角速度極大値によって検出されていたが、ここでは片麻痺模擬歩行において垂直イベント誤検出の可能性があった。そこで本研究では、角速度由来の加速度と運動加速度の偏差から、大まかな足底接地区間を探索し、その間の角速度が最も0に近い時刻を垂直イベントとした。角速度由来の運動速度 $\mathbf{v}_{ms}$ は、歩行のロッカー機能のアンクルロッカーが機能している際にセンサが外果を中心に円運動をすると考えられるため、式(2)のように算出される。ここで $\boldsymbol{\omega}$ は角速度、 $l_n$ は外果-センサ間ベクトルを示す。

$$\mathbf{v}_{ms}(t) = \boldsymbol{\omega}(t) \times l_n \quad (2)$$

式(2)で求めた値を微分することで角速度由来の運動加速度が算出され、この値はアンクルロッカー

が機能している区間のみ正しく算出されるため、運動加速度との偏差が0かつ一定区間が大きな足底接地区間として検出される。

### 3. スライド長算出法の検討

実験は健康者6名を対象に行った。被験者は慣性センサを下腿の外果付近(下腿下部)、下腿の膝関節付近(下腿上部)、足背部に取り付けて16mの歩行路を通常歩行、ぶん回し模擬歩行、鶏歩模擬歩行で歩いた。歩行路の中心に圧力分布計測装置を配置し、計測されたスライド長を参照値として推定精度を比較した。足部センサを用いたスライド長の算出には、野崎らの提案法<sup>2)</sup>を用いた。

まず、本研究で提案した垂直イベント検出法の効果を検証した。従来法では、垂直イベントが足底接地区間内に検出されない場合があり、スライド長推定の相対誤差が20%を超えるような試行があったが、提案した方法では、そのような誤検出が無くなり、スライド長の推定誤差が改善された。次に、ぶん回し歩行および鶏歩において、下腿下部、下腿上部、足部のセンサでスライド長を算出した際の相対誤差を図1に示す。まず、下腿の下部と上部の慣性センサより求めたスライド長の精度を比較すると、下腿下部の方が誤差のばらつきが小さく、RMSEも優れていた。また、下腿下部と足部のセンサでの結果を比較すると、ぶん回しの麻痺脚以外の条件ではおおむね同等の精度であったが、足部センサを用いた場合には誤差が非常に大きくなる試行がいくつか確認された。また、ぶん回しの麻痺脚のセンサでは、足部センサの場合に相対誤差のばらつきが非常に大きくなった。これは、足部センサで積分区間を正しく検出できない場合が発生したためと考えられる。

### 4. 歩行速度算出法の検討

3章の計測データを使用し、歩行速度算出法の検

討を行った。歩行速度の参照値は、歩行路の3mから13mまでの区間を定常歩行区間として、この区間の移動に要した時間をストップウォッチで測定することで求めた。また、慣性センサを用いた歩行速度の算出では、スライドの3歩目を定常歩行区間の開始地点として、そこから10m移動した後初めて着地したスライドを定常歩行区間の終了地点とした。この間のスライドの総移動距離を移動に要した時間で割ることで、歩行速度を算出した。片麻痺模擬歩行における歩行速度の推定精度を比較すると、全ての条件で下腿下部が最も優れており、ぶん回し模擬歩行時の健脚側で $0.9 \pm 3.9\%$  ( $0.01 \pm 0.03\text{m/s}$ )、麻痺側で $0.4 \pm 4.4\%$  ( $0.00 \pm 0.03\text{m/s}$ )、鶏歩模擬歩行時の健脚側で $1.9 \pm 2.9\%$  ( $0.02 \pm 0.03\text{m/s}$ )、麻痺側で $-1.0 \pm 2.7\%$  ( $-0.01 \pm 0.02\text{m/s}$ )であった。また、歩行速度の臨床的優位な最小変化量(MCID)は、片麻痺者において $0.16\text{m/s}$ であるという報告<sup>3)</sup>があり、下腿センサを用いた場合に、全ての条件でMCIDの判別が可能であることが確認でき、許容範囲内の誤差であると考えられる。

### 5. まとめ

下腿部慣性センサを用いたスライド長推定における垂直イベント検出法として、角速度由来の加速度から大まかな足底接地区間を検出し、その区間の角速度から垂直イベントを検出する方法を提案した。片麻痺模擬歩行において垂直イベント誤検出を改善し、スライド長推定精度を改善できることを確認した。また歩行速度の推定において、下腿部慣性センサを用いた場合に全ての条件で、MCIDの判別が可能であることが確認でき、平均歩行速度推定法の臨床における実用可能性が示唆された。

### 文献

- 1) Mao, Y., Ogata, T., Ora, H. et al., "Estimation of stride-by-stride spatial gait parameters using inertial measurement unit attached to the shank with inverted pendulum model," Sci. Rep. 11, 1391, 2021.
- 2) Y. Nozaki and T. Watanabe, "Development of Artificial Neural Network based Automatic Stride Length Estimation Method Using IMU: Validation Test with Healthy Subjects," IEICE Trans. Inf. & Syst., Vol.E103-D, No.9, pp.2027-2031, 2020.
- 3) J. K. Tilson, K. J. Sullivan, et al., "Meaningful Gait Speed Improvement During the First 60 Days Poststroke: Minimal Clinically Important Difference," Physical Therapy Vol.90 No.2, pp.196-208, 2010.

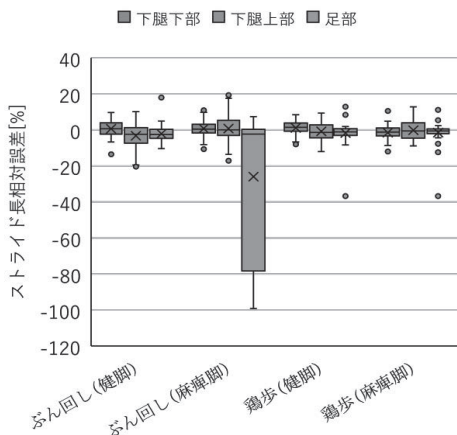


図1 スライド長の相対誤差