

大腿部・下腿部・足部の加速度協調を用いた歩行における協調運動の解析

Analysis of Coordinated Movement in Walking Using Acceleration Coordination of the Thigh, Lower Leg, and Foot

佐藤悠樹¹⁾, 横川智映¹⁾, 渡辺洋士¹⁾

指導教員 齊藤亜由子¹⁾, 研究協力者 木澤悟²⁾

1) 工学院大学 先進工学部 機械理工学科 システム設計研究室

2) 秋田工業高等専門学校 創造システム工学科 機械系

本研究は、歩行における協調運動の解析を行った。被験者の左右大腿部・下腿部・足部に9軸モーションセンサを取り付け歩行計測し、重力加速度を含む加速度と含まない加速度を算出し、各条件における協調パターンを抽出した。その結果、重力加速度の有無によって協調関係はほぼ変化しないことが分かった。

加速度, 関節間協調, 協調運動, 特異値分解, 標準化

1. 緒言

筋活動の協調パターンを筋シナジー、関節間の協調活動を関節間協調と呼ばれている。ヒトの運動では冗長性による筋骨格系の複雑化を緩和するため中枢神経系は、複数の筋や関節をひとまとまりに群として扱い、それらに対して統合的な制御指令を出していると考えられている。これは歩行に関しても該当しており歩容における関節間協調のパターンを解明することができれば歩行評価に有用であると考えられる。これまでの筋シナジーや関節間協調の解析では動作中の関節角度、床反力の計測データを利用して解析されてきた。しかし身体部位の動きが筋活動による関節の動きの結果として生じることから身体部位の加速度を用いて関節間協調の解析が可能であると考えられる。慣性センサは可搬性に優れ従来の計測装置に比べて安価でありユーザビリティに優れる。そこで本研究では、加速度センサを大腿部、下腿部、足部に貼付し、歩行計測により得られた下肢6部位の加速度協調から歩行における協調運動の解析をすることを目的とする。

2. 歩行計測

被験者は健常成人男性2名である。歩行計測においては3軸加速度センサ、3軸ジャイロセンサ、

Table1 センサ貼付位置

センサ	貼付位置	センサ	貼付位置
1	右大腿部	4	左下腿部
2	左大腿部	5	右足部
3	右下腿部	6	左足部

3軸地磁気センサを搭載した9軸モーションセンサを被験者の大腿部、下腿部、足部の前面に貼付し(表1)、90bpmの速さで3回ずつ計測した。貼付した9軸モーションセンサの絶対座標系はX軸正方向を身体左側方、Z軸を鉛直下向きとした右手座標系で定義している。9軸モーションセンサのサンプリング周波数は100Hzである。

3. 解析方法

本研究では運動によって生じる加速度のみ、または重力加速度を含む加速度のどちらで協調評価をすることが有用であるか検討する。重力加速度を含む加速度は、加速度センサの出力に座標変換のみを施し、絶対座標系で表現した。一方、重力加速度を除いた加速度は、ジャイロ・加速度・地磁気を用いたセンサフュージョンによりセンサ姿勢を推定し、推定姿勢から各軸の重力成分を算出して当該成分を加速度出力から除去したのち、同様に絶対座標系へ変換した。歩行中の一歩行周期を片

脚の踵が接地してから次に接地するまでの区間と定義し右脚，左脚の連続した一歩行周期を含む区間を解析対象とした．被験者 2 名それぞれについて 3 回ずつ測定を行い，合計 6 区間分のデータを特異値分解することで下肢の各部位における加速度協調を確認する．下肢の各部位における加速度を標準化して構成される観測行列を式(1)に示す．

$$R(A, t) = \begin{pmatrix} A_{1y}(t_1) & A_{2y}(t_1) & A_{3y}(t_1) & A_{4y}(t_1) & A_{5y}(t_1) & A_{6y}(t_1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ A_{1y}(t_m) & A_{2y}(t_m) & A_{3y}(t_m) & A_{4y}(t_m) & A_{5y}(t_m) & A_{6y}(t_m) \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで A_{1y} から A_{6y} はセンサ 1 から 6 の Y 軸加速度を標準化したものであり， t は時刻である．

さらに，基底ベクトル $R(A, t)R(A, t)^T$ ， $R(A, t)^T R(A, t)$ の固有ベクトルをそれぞれ $V_j(t)$ ， $Z_j(A)$ ，特異値を λ_j とすると， $R(A, t)$ は式(2)で表すことができる．

$$R(A, t) = \sum_j^n \lambda_j V_j(t) Z_j^T(A) \quad (2)$$

ここで， λ_i は各基底ベクトルの寄与度(特異値)， $v_i(t)$ は各基底ベクトルの活性パターン(時間基底)， $Z_i^T(a)$ は各基底ベクトルにおける加速度の協調パターン(空間基底)である．時間基底 $v_i(t)$ は行列の各要素の時系列における特徴を示す．空間基底 $Z_i^T(a)$ は各時刻において加速度間にどのような相関があるか，すなわち同時に活動する加速度の協調パターンを示す．

得られた特異ベクトルを特異値 λ_i の大きい順に第 1 モード，第 2 モード…としたときにそれらの寄与度 γ_i は式(3)で表すことができる．

$$\gamma_i = \frac{\lambda_i^2}{\sum_{i=1}^6 \lambda_i^2} \quad (3)$$

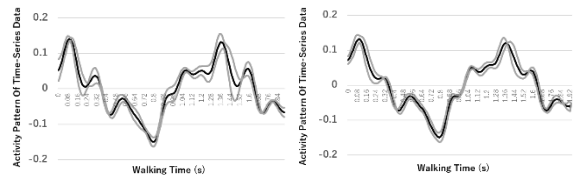
以上は各センサの Y 軸出力について記述したが同様に，Z 軸出力も同じ手順で行う．

4. 結果

ここでは被験者 1 名の結果について述べる．図 1 に Y 軸加速度の空間基底，図 2 に Y 軸加速度の時

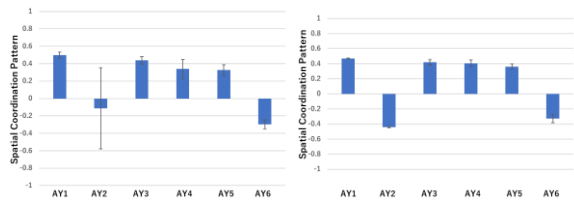
間基底，図 3 に Z 軸加速度の空間基底，図 4 に Z 軸加速度の時間基底を示す．

本研究では絶対座標系を使用しており，鉛直方向軸のみに重力加速度が含まれるため，重力加速度の有無による違いが表れなかったと考える．特異値分解による加速度協調の評価に関しては，最も支配的な第一モードの空間基底においてすべての加速度が同程度に生成されており，特徴的な結果を得ることができなかった．そのため，加速度協調にはセンサ座標系による評価が必要であると考ええる．



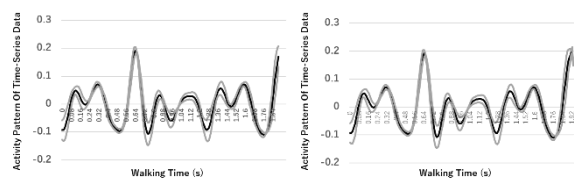
(a) 重力加速度を含む (b) 重力加速度を含まない

Fig. 1 Y 軸加速度の空間基底



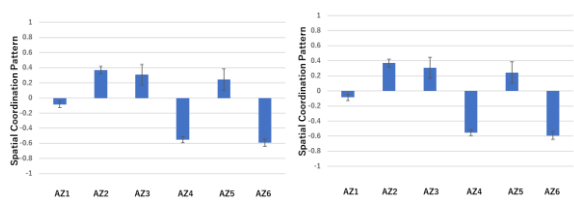
(a) 重力加速度を含む (b) 重力加速度を含まない

Fig. 2 Y 軸加速度の時間基底



(a) 重力加速度を含む (b) 重力加速度を含まない

Fig. 3 Z 軸加速度の空間基底



(a) 重力加速度を含む (b) 重力加速度を含まない

Fig. 4 Z 軸加速度の時間基底