

角速度を用いた下肢関節間協調の推定

Estimation of Lower Limb Joint Coordination Using Angular Velocity

横川智映¹⁾, 佐藤悠樹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

本研究では、角速度を用いた下肢関節間協調の推定をおこなった。最も支配的な運動モードは脚部を踏み出す際の左右大腿部における屈曲の協調であり、2 番目に支配的なモードではつま先離れにおける膝・足関節の伸展・背屈の協調であることが示された。

キーワード：関節間協調，歩行評価，角速度，9 軸モーションセンサ

1. 緒言

ヒトの筋骨格系は運動学的に冗長であることから、適応的な運動を行うことができる。一方で、冗長性による筋骨格系の制御の複雑化を軽減するため、中枢神経系が複数の筋・関節をモジュール化し、まとめて制御指令を与えていると考えられている。筋活動の協調パターンは筋シナジーと呼ばれ、関節間の協調パターンは関節間シナジーと呼ばれている。歩行における筋シナジーと関節間シナジーは一対一で対応していることが示唆されており、ヒトの歩行運動は関節間協調のパターンの組み合わせによって制御されていることも複数の研究において示されてきた。

これまで筋シナジーや関節間協調を解析する方法として、特異値分解や UCM 解析が用いられてきた。これらの方法においては動作における関節角度、床反力の計測データを解析対象としているため、モーションキャプチャを用いた計測に加えて、関節角度、筋張力の導出までの過程が必要である。しかし、筋活動によって関節が動き、関節の動きの結果として、身体各部位に角速度が生じることから、身体部位の角速度を用いることで関節間協調の解析が可能になることが考えられる。そこで本研究では、角速度を用いて関節間協調の推定可能性について検討する。

2. 実験

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、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に貼付した (表 1)。貼付した 9 軸モーションセンサのセンサ座標系は X 軸正方向を身体左側方、Z 軸を各身体部位の長さ方向とした右手座標系としており、90bpm、110bpm の二種類のテンポに合わせて足を一歩ずつ踏みこむ歩行を各テンポ 3 回ずつ計測した。サンプリング周波数は 100Hz である。90bpm における 2 名計 6 試行の矢状面角速度の結果を図 1~3 に示す。

Table1 センサ貼付位置

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

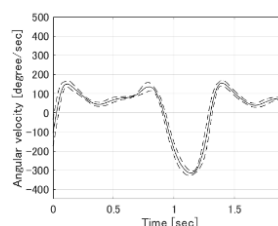


Fig.1 センサ 1

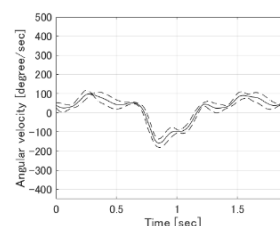


Fig.2 センサ 3

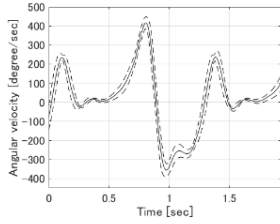


Fig.3 センサ 5

図 1~3 は矢状面における角速度であり，実線は平均値，破線は標準偏差を示している．縦軸に示す角速度の正方向はセンサ座標系における X 軸の反時計回りであり，右大腿部においては主に股関節の伸展，右下腿部においては主に膝関節の屈曲，右足部においては主に足関節の背屈に起因する角速度の変化を示す．横軸は右脚の踵接地から左右各一歩行周期を含む時間区間としている．図 1~3 より，各センサの大きな角速度の変化は，右足のつま先離れが生じている 0.8 秒時点で発生している．大腿部に貼付したセンサ 1 では，股関節の屈曲に伴う負の角速度，下腿部に貼付したセンサ 3 では，膝関節の伸展に伴う負の角速度，足部に貼付したセンサ 5 では，足関節の背屈に伴う負の角速度がそれぞれ生じている．

3. 解析方法

図 1~3 の横軸に示す右脚の踵接地から左右各一歩行周期を含む時間区間を解析対象とし，6 個のセンサから得られた角速度を特異値分解することで角速度協調を得る．標準化した角速度により構成される観測行列を式(1)に示す．

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

ここで， $G_{1x}(t_1), G_{2x}(t_1), G_{3x}(t_1), G_{4x}(t_1), G_{5x}(t_1), G_{6x}(t_1)$ はそれぞれ，センサ 1，センサ 2，センサ 3，センサ 4，センサ 5，センサ 6 を標準化した値である．

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

$$R(G, t) = \sum_j^n \lambda_j X_j(t) X_j^T(G) \quad (2)$$

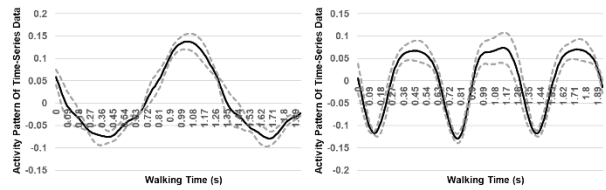
ここで， λ_i は各基底ベクトルの寄与度(特異値)， $v_i(t)$ は各基底ベクトルの活性パターン(時間基底)， $X_i^T(a)$ は各基底ベクトルにおける角速度の協調パターン(空間基底)である．時間基底 $v_i(t)$ は行列の各要素の時系列における特徴を示す．空間基底 $Z_i^T(a)$ は各時刻において角速度間にどのような相関があるか，すなわち同時に活動する角速度の協調パターンを示す．

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 x_i は式(3)で表すことができる．

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

4. 結果

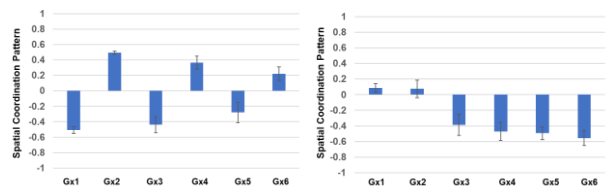
被験者 2 名の 90bpm，合計 6 試行における特異値分解の空間基底，時間基底について述べる．図 4~5 は矢状面における角速度の時間・空間基底を示している．図 4 の時間基底から歩行運動の基本リズムは緩やかであり急激な角速度の変化がなくテンポに沿った安定的な歩行ができていると考えられる．さらに図 5 の第 1 モードから大腿部，下腿部，足部の順に小さくなっており，最も支配的な協調は左右大腿部の屈曲伸展であることが示された．第 2 モードでは下腿部，足部の角速度が大きく出ており主につま先離れの足部と膝関節の動きが大きく生成されていることが示された．



(a) 第 1 モード

(b) 第 2 モード

Fig.4 矢状面における角速度の時間基底



(a) 第 1 モード

(b) 第 2 モード

Fig.5 矢状面における角速度の空間基底