

# ラダー運動の関節間協調に関する研究

## Study on inter-joint coordination in ladder movements

武藤航<sup>1)</sup>, 大小島結<sup>1)</sup>

指導教員 齊藤亜由子<sup>1)</sup>, 研究協力者 木澤悟<sup>2)</sup>

1) 工学院大学 先進工学部 機械理工学科

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、発達性協調運動障を客観的に評価する手法の確立を目指した。ラダー運動中の関節運動を特異値分解することで、協調パターンを定量的に抽出した。その結果、股関節と膝関節の協調を明確に要求する運動が、評価課題として優れている可能性を示した。

キーワード：DCD，筋シナジー，関節間シナジー，ラダー運動，SVD

### 1. 緒言

人の身体運動は複数の筋肉や関節が協調して動くことによって成り立っている。この協調パターンを「筋シナジー」や「関節間シナジー」と呼び、効率的な動作の鍵となる。しかしながら、発達性協調運動症（DCD）のような協調運動に困難を抱える人々は、この協調パターンがうまく形成されない。現在の DCD の評価方法は、医師の主観的な観察や、被験者の努力に左右されることが多く、正確性や信頼性に課題が残る。このため、客観的で定量的な評価指標が求められる。本研究では、DCD の特徴が現れやすいラダー運動に注目する。ラダー運動は、はしご状の器具を地面に置き、そのマス目の中で素早いステップやジャンプを組み合わせて様々な動きを行う運動である。身体の協応性が求められる運動であり、本研究における評価方法として採用した。ラダー運動中の身体協調の特徴を客観的に示すことで、「正常な協調」と「異常の可能性のある協調」を識別することが可能になると考えられる。

本研究の目的は、ラダー運動中の関節間協調パターンを定量的に分析し、光学式モーションキャプチャから得られた関節角度データに特異値分解を適用することで主要な協調パターンを抽出する。本実験においては DCD の被験者を対象にした実施が困難であるため、健常成人のラダー運動の特徴を明らかにする。

### 2. 実験

本実験の被験者は成人健常女性 1 名である。実験は工学院大学ヒトを対象とする研究倫理審査委員会 の了承を得た後、事前に被験者に対し実験内容と目的について十分な説明を行い、同意を得た。ラダー

運動中の全身運動データを取得するため、光学式モーションキャプチャシステムを用いた。データはサンプリング周波数 60Hz で記録した。全身の主要な関節および部位 29 点に反射マーカを貼付し、ラダー運動中の反射マーカの座標データを記録した。本実験では、マス目の一辺が 40cm、総マス数が 7 マスのラダーを使用した。運動パターンとして 2 種類のラダー運動パターンを選定した。それぞれの運動パターンの詳細な動きの設定は図 1 および図 2 に示す。計測実験では被験者に対し、可能な限り一定の歩幅でメトロノーム 140bpm に合わせて一歩ずつ自然

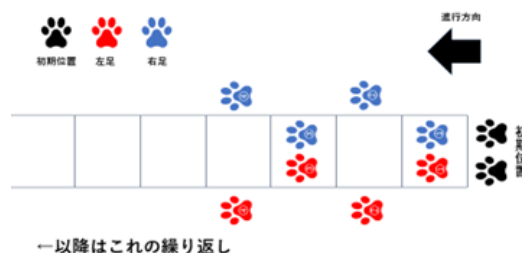


Fig.1 パターン 1 の動き方

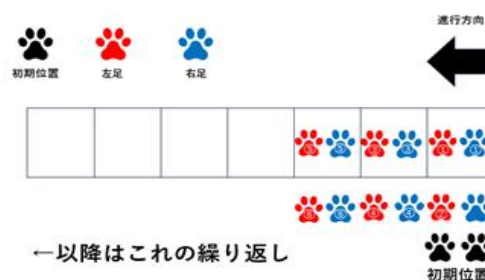


Fig.2 パターン 2 の動き方

に進むよう指示した。不慣れさによる影響を排除し、被験者本来の協調性を示すデータを取得するため、計測前に各運動パターンにつき 1~2 回程度の練習を行った。動作が安定した状態で選定した 2 種類のラダー運動パターンに対しそれぞれ 5 回の計測を実施した。その後、実験により得られたモーションキャプチャデータから各関節の角度変化を算出した。

### 3. 協調運動の評価

算出された関節角度データに対し、特異値分解 (SVD) を適用することで各運動パターンにおける関節間の協調パターン (関節間シナジー) を定量的に抽出、分析する。この分析を通じて、運動中の協調パターンの定量評価を行う。

#### 3.1 特異値分解による評価

計測実験により得られた 11 個の関節角度データから運動の全体的な安定性に関与する Trunk (体幹) のデータを除外し、四肢の協調運動に焦点を当てた 10 個の関節角度データを解析対象とした。標準化した関節角度データにより構成される観測行列を式 (1) に示す。

$$R(J, t) = \begin{pmatrix} J_{R.hip}(t_1) & J_{L.hip}(t_1) & J_{R.knee}(t_1) & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & & \\ J_{R.hip}(t_m) & J_{L.hip}(t_m) & J_{R.knee}(t_m) & & & \\ & J_{L.knee}(t_1) & J_{R.ankle}(t_1) & J_{L.ankle}(t_1) & J_{R.shoulder}(t_1) & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \\ & J_{L.knee}(t_m) & J_{R.ankle}(t_m) & J_{L.ankle}(t_m) & J_{R.shoulder}(t_m) & \\ & J_{L.shoulder}(t_1) & J_{R.elbow}(t_1) & J_{L.elbow}(t_1) & & \\ & \vdots & \vdots & \vdots & & \\ & J_{L.shoulder}(t_m) & J_{R.elbow}(t_m) & J_{L.elbow}(t_m) & & \end{pmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $J_{R.hip}(t)$ ,  $J_{L.hip}(t)$ ,  $J_{R.knee}(t)$ ,  $J_{L.knee}(t)$ ,  $J_{R.ankle}(t)$ ,  $J_{L.ankle}(t)$ ,  $J_{R.shoulder}(t)$ ,  $J_{L.shoulder}(t)$ ,  $J_{R.elbow}(t)$ ,  $J_{L.elbow}(t)$  はそれぞれ、右股関節、左股関節、右膝、左膝、右足首、左足首、右肩、左肩、右肘、左肘を標準化した値である。

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

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

ここで、 $\lambda_j$  は各正規直交基底ベクトルの寄与率であり、値の大きい順に第 1 モード、第 2 モードとした運動モードを表す。

#### 3.2 主成分分解による評価

特異値分解による評価で定義した手法に基づき、2 つの運動パターンの核となる協調を特定した。明確な協調がみられ、かつ第 1 モードの寄与率が最も高

くなる関節角度の組み合わせで特異値分解を行った結果、第 1 モードの寄与率はパターン 1 で 49.3%、パターン 2 で 36.3% となった。この時特異値分解に使用した関節角度の組み合わせは左右股関節 (hip)、膝 (knee)、肩 (shoulder) の 6 関節モデルである。

図 3, 4 はそれぞれパターン 1, 2 の空間基底であり、図 5 は両パターンの時間基底である。パターン 1 の主要な関節間協調のパターンを見ると、股関節と膝関節が強く連携しており、肩の関与が少ないことが示された。本結果より、パターン 1 は股関節と膝関節を強く協調させる、歩行や走行の基本となる運動であることを示している。一方パターン 2 では膝の関与が小さく、本結果は運動中に膝を軽く曲げたままの状態を維持していたことが原因であると考えられる。股関節と肩関節の協調を使って、ステップを行う動きであり、股関節と膝関節の協調が失われた動き方と言える。本結果より、協調運動障害の発見には、股関節と膝関節の協調を明確に要求するパターン 1 のほうが、肩関節による代償的な協調を許容するパターン 2 よりも評価テストとして適していることが考えられる。

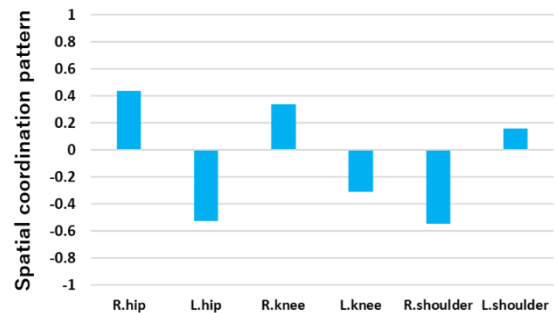


Fig.3 パターン 1 の空間基底

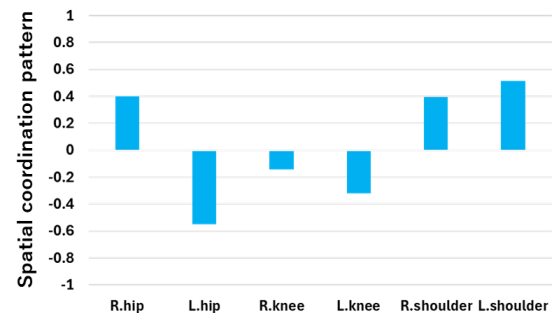


Fig.4 パターン 2 の空間基底

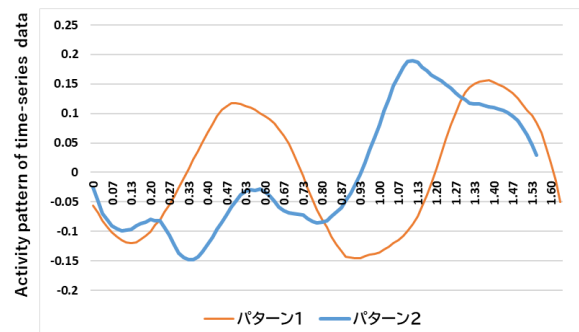


Fig.5 パターン 1 と 2 の時間基底