

## 関節角度の位相差を用いた競歩の運動パターン抽出

平川武仁<sup>1)</sup> 吉田 茂<sup>2)</sup>

1) 筑波大学体育センター 2) 筑波大学体育科学系

### Extraction of Movement Patterns during Race Walking using Phase Differences of Joint Angles

Takehito Hirakawa<sup>1)</sup> Shigeru Yoshida<sup>2)</sup>

1) Sport and Physical Education Center, University of Tsukuba

2) Institute of Health and Sport Sciences, University of Tsukuba

#### Abstract

Movement patterns during race walking were extracted and the phase relations of joint angles and body segments were analyzed. Four skilled and four semi-skilled male subjects walked on a treadmill at their best speed for 10000 m W. Their motions were videotaped from the right side of the body and each 10 second segment was digitized. Principal component analysis (PCA) with oblique rotation was applied for six angles of the right side joints and segments (upper arm, elbow, upper body, thigh, knee, and ankle). Results indicated the following.

- (1) Cumulative contribution of factors was more than 80%.
- (2) All subjects had a similar movement pattern.
- (3) The movement patterns could be classified into two groups: "upper arm, upper body, thigh, and ankle" and "elbow and knee".
- (4) The phase differences of the upper arm, the upper body, and the thigh were small, and that of the ankle showed a little phase lag as compared with other parts of the body.
- (5) The phase difference of the elbow and the knee was small. Movement patterns extracted by PCA with phase relations are important for novices in understanding, and in training to perform basic race walking.

#### I. 緒言

陸上競技の種目の中でも競歩競技（以下、競歩）は、「歩」という意味で歩行に分類されると考えられるが、膝伸展着地という競技規定を遵守するために、自然歩行とは大きく異なった動作となっている。これに加えて、伸展させて着地した膝への衝撃を緩和するために、腰の捻転動作が必要（楠本ほか、1983）となっているため、陸上競技の他の種目に比べて、非日常的で複雑な動作となる。

陸上競技に限らず、各種スポーツにおける複雑な運動は、各身体関節の角変位の位相が同じ（in-phase: 同位相）、反対（anti-phase: 逆位相）、ずれ

ている（phase difference: 位相差）という3要素によって構成されている。この3要素の組合せがあるからこそ、非常に多様な動作が可能となっている。競歩の位相に関しては、平川・吉田（2006）が前額面における肩と腰の協応パターン（coordination pattern）について検討している。その結果、熟練者の動作には、腰に対して肩の位相が遅延していること、すなわち位相差があることを指摘した。この流れで体幹動作の解析をさらに発展させ、指導現場に生かす知見を得るには、計測する身体関節・部位を増やすことが必要である。

複数の関節における角変位の位相解析には、多変量の交差相関係数を用いて、動作パターンを定量化

することが有効である (Mah et al., 1994). これは、同位相になれば相関係数が高く (1.0 に近い)、逆位相であれば低い (-1.0 に近い) ことを利用する。複数の関節の位相が類似しているならば、これらの関節は主成分分析によって同パターンとして抽出される。反対に、類似していないならば、異パターンとして抽出される。この分析方法によって得られた結果は、初心者が新たに習得しなければならない動作パターンを抽出したものであるため、習得の目標パターンとして有効利用できる。

本研究では、競歩動作における複数関節の角変位に主成分分析を適用し、これらの位相関係をモデル化することによって、競歩の動作パターンを数量的に抽出する。そして、初心者が理解し練習への方向づけに役立つ提案をすることを目的とした。

## II. 方法

### 1. 被験者

競歩競技を専門とする男子選手 8 名であった (10000m 競歩の自己記録の平均と標準偏差は、上位群 4 名:  $40' 26'' 3 \pm 49'' 5$ , 下位群 4 名:  $47' 01'' 3 \pm 1' 50'' 6$ ). 上位群には、陸上競技世界選手権大会 20km 競歩 (2003 年) に出場した 2 名とアテネ五輪 20km 競歩 (2004 年) に出場した 1 名が含まれていた。結果と考察では、自己最高記録 (自己記録) の良い順に A から H までのアルファベットで表記した。実験では、測定手順、身体負荷などの実験内容について十分な説明を行い、参加の同意を得た。

### 2. 実験設定

電動トレッドミル (以下、トレッドミル) 上で 100m/min から開始し、10000m 競歩の自己記録の平均速度まで 30s ごとに 10m/min で増速する漸増負荷条件であった。それゆえ、終了時の速度は被験者によって異なっていた。

撮影にはビデオカメラ (SONY 社製 DCR-TRV17, 30fps, 露出時間 1/250-1/4000s) を用いた。被写体の奥行き誤差、ビデオカメラの鉛直垂直誤差を減少させるため、遠方から撮影することが望ましいが、実験室の広さに制限があったため、被験者の右側方から約 4m 離れた位置から撮影することとした。ただし、トレッドミル上を歩行する被験者に対して真横から撮影できるように、まずビデオカメラを上下に振ることで鉛直方向の軸を決定し、次にビデオカメラに設置した水準器に基づいてビデオカメラの水平方向の軸を決定した。本研究の統計解析では、角

変位が最大・最小になる時間が重要であるため、今回の撮影条件で十分であると判断した。

また被験者がトレッドミル歩行に慣れるために、まず漸増速度条件で自然歩行をし、次に、競歩の歩型での歩行を納得するまで行わせた。そこでは、希望する準備運動に基づいて、被験者は通常練習の歩行速度で数分、あるいは高速度で 10s から 20s を数回繰り返した。

### 3. データ処理

自己記録の平均速度における 30s 間の中間 10s の映像を  $720 \times 480$  dots でパーソナルコンピュータに取り込み、デジタイズした (片足で十数歩)。分析

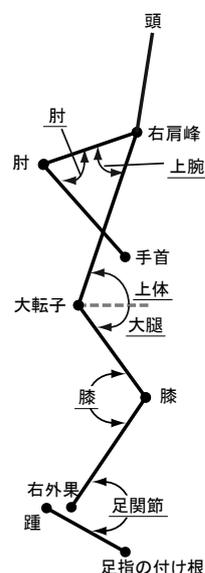


図 1 分析点と身体関節の角度定義。

図中の分析角度には下線を引いている。上体と大腿の分析角度のみ、画像上の水平面を基準に分離した。

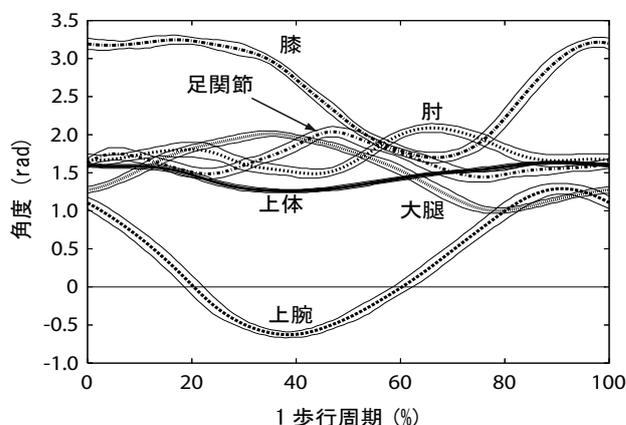


図 2 各身体関節の角変位の例。

実験参加者 A の 16 周期分の平均の角変位とその標準偏差。各時系列データの上下にある細線が標準偏差を示す。

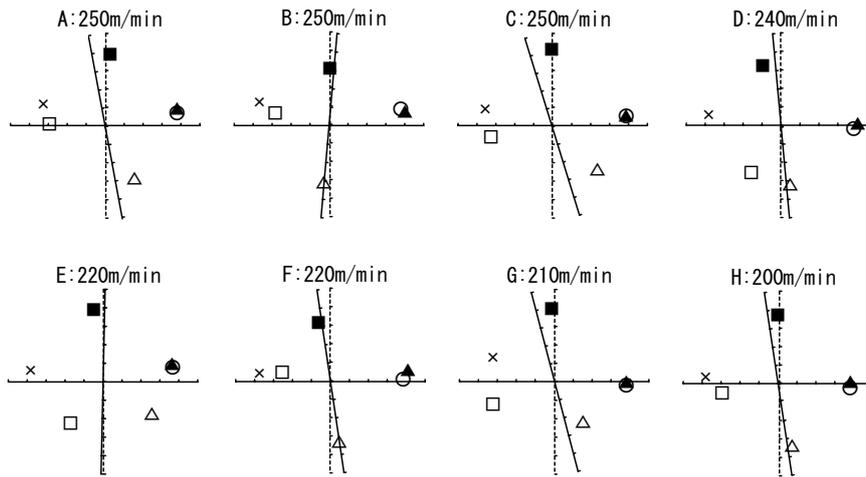


図3 斜交回転後の主成分負荷量.

10,000m 競歩における自己記録の良い実験参加者から順にAからHとした. アルファベットの右の表記は歩行速度を示す. 横軸に第1主成分, 縦軸に第2主成分を配置した. 両軸とも -1.2 から 1.2 の範囲である. 図中の記号は, ○上体, ▲上腕, △肘, ×大腿, ■膝, □足首を示す.

点は右肩峰, 肘, 手首, 大転子, 膝, 右外果, 踵, 足指の付け根の計8箇所であり, これらの分析点をもとに上体, 上腕, 肘, 大腿, 膝, 足関節の角度(図1)の時系列データを作成した(1周期分のデータ例を図2に示す). 実長換算と平滑化はしなかった.

#### 4. 統計処理

上体, 上腕, 肘, 大腿, 膝, 足関節の角度の時系列データを用いて, 被験者ごとに主成分分析を適用し, 次元の単純構造化のために斜交回転を施した. 斜交回転には, 予備回転として算出したバリマックス回転を強調して作成した仮説行列との差異を最小化するプロマックス回転を施し, 単純構造を推定した(柳井, 1994, pp. 132-134; 柳井・高根, 1985, pp. 128-137). 仮説行列作成のための累乗指数は4乗とした(中村, 2002, pp. 136-143; 柳井・高根, 1985, pp. 128-137). 次にサー斯顿の回帰式によって主成分得点を推定した. 主成分数の採択においては, 固有値1.0以上, スクリー基準, 累積寄与率をもとにして最適解を求めた(古谷野, 1988, pp. 126-147; 村上, 1985, pp. 166-167). 各主成分

を構成する変数の分類では, 主成分負荷量の基準値を絶対値0.40とした. 統計的な有意水準は $p=.05$ とした.

今回, 利用する主成分分析は, 複数関節の角変移データが屈曲から伸展, あるいは伸展から屈曲というように, 角変位の方向が切り替わるタイミングをデータの類似度として利用する. そのため, 複数関節の動作のタイミングを1つの主成分として抽出する有効な手法である.

### III. 結果

#### 1. 主成分の抽出

被験者全員の固有値の平均と標準偏差は, 第1主成分が $3.26 \pm 0.15$ , 第2主成分が $1.58 \pm 0.11$ であった. これらは全分散の説明率の平均が80.52%であった. この結果から, 主成分数の決定においては, 固有値の基準と累積寄与率の基準を満たしているため, 第1・第2主成分に主成分数を固定し, 再分析し解析を進めた.

図3に被験者全員の第1主成分と第2主成分の負

表1 斜交回転後の主成分負荷量の平均と標準偏差

(a)上位群		主成分		共通性
身体関節	第1	第2		
上腕	.98 ± .01	.12 ± .06	.96 ± .02	
上体	.96 ± .02	.10 ± .08	.93 ± .02	
大腿	-.90 ± .05	.23 ± .06	.91 ± .04	
足関節	-.66 ± .16	-.15 ± .33	.59 ± .13	
膝	.17 ± .19	.90 ± .11	.78 ± .17	
肘	.06 ± .23	-.77 ± .04	.68 ± .16	
寄与率	54.20 ± 3.48	26.81 ± 2.39	81.01 ± 4.47	
固有値	3.25 ± .21	1.61 ± .14		
主成分間	第1 1.00	-.07 ± .17		
相関係数	第2 -.07 ± .17	1.00		

(b)下位群		主成分		共通性
身体関節	第1	第2		
上腕	.96 ± .03	.10 ± .10	.94 ± .02	
上体	.95 ± .01	.03 ± .11	.92 ± .02	
大腿	-.92 ± .06	.17 ± .10	.91 ± .01	
足関節	-.66 ± .17	-.23 ± .29	.64 ± .21	
膝	.24 ± .29	.92 ± .05	.74 ± .15	
肘	.04 ± .15	-.69 ± .20	.65 ± .11	
寄与率	54.32 ± .47	25.71 ± .61	80.03 ± .96	
固有値	3.26 ± .03	1.54 ± .04		
主成分間	第1 1.00	-.06 ± .15		
相関係数	第2 -.06 ± .15	1.00		

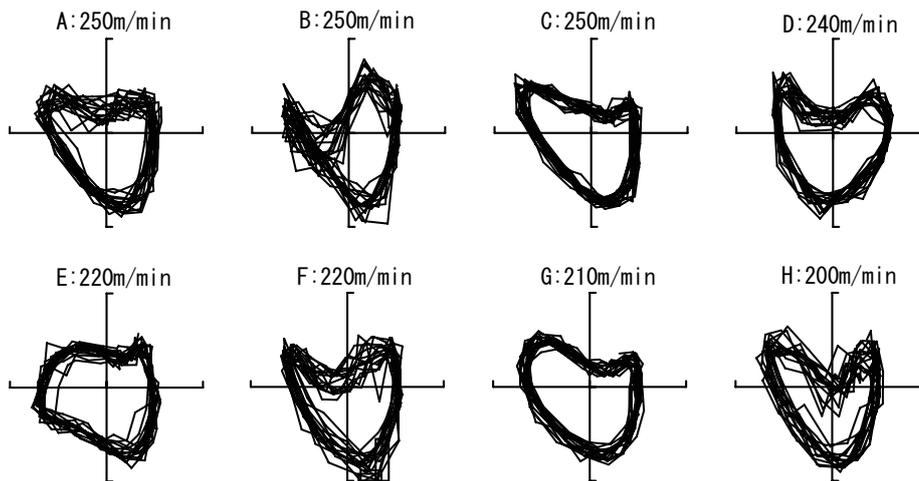


図4 斜交回転後の主成分得点。

10,000m 競歩における自己記録の良い実験参加者から順に A から H とした。アルファベットの右の表記は歩行速度を示す。横軸に第 1 主成分，縦軸に第 2 主成分を配置した。両軸とも  $-2.5$  から  $2.5$  の範囲である。

荷量の結果を示した。この図は、横軸に第 1 主成分負荷量，縦軸に第 2 主成分負荷量を配置したものである。表 1a に上位群，表 1b に下位群における斜交回転後の主成分負荷量の平均と標準偏差の結果を示した。

主成分負荷量の結果（値）から，第 1 主成分は上体，上腕，大腿，足，第 2 主成分は肘，膝で構成されていることが認められた。そこで，各群内での被験者の主成分負荷量の一致の程度を検討するため，第 1 主成分と第 2 主成分それぞれについて，各被験者の負荷量を用いて Kendall の一致係数 ( $\tau$ ) を算出した結果，高い相関関係（第 1：上位群 .97，下位群 .94；第 2：上位群 .97，下位群 .73）があった。これらの結果から，各群内で主成分負荷量の傾向が類似していることが認められた。

さらに，各被験者の第 1・第 2 主成分の負荷量を代表値として，身体関節ごとに順位和検定によって群間差を検定した結果，いずれの身体関節においても有意差はなかった（上体： $\chi^2(7)=1.79$ ,  $p=.18$ ；上腕： $\chi^2(7)=1.27$ ,  $p=.24$ ；肘： $\chi^2(7)=0.00$ ,  $p=1.00$ ；大腿： $\chi^2(7)=0.19$ ,  $p=.66$ ；膝： $\chi^2(7)=0.18$ ,  $p=.66$ ；足関節： $\chi^2(7)=0.00$ ,  $p=1.00$ )。この結果から，群間の主成分負荷量の傾向が類似していることが認められた。

## 2. 主成分間相関係数

第 1 主成分と第 2 主成分の間の相関関係について，群間の差異を検討するため，主成分間相関係数（上位群における主成分間相関係数の平均と標準偏差は  $-0.14 \pm 0.13$ ，下位群は  $-0.13 \pm 0.10$ ）を用いて，順位和検定をした。その結果，群間に有意な差はな

かった ( $\chi^2=0.06$ ,  $p=.81$ )。この結果から，主成分間の類似の程度に，群間の差異がないことが認められた。

## 3. 主成分得点

第 1 主成分を横軸に，第 2 主成分を縦軸に配置し，主成分間の関係を示したのが図 4 である。この結果から，被験者 E 以外のいずれの被験者もハート型の形状になっていることが認められ，競技水準による明確な差異はなかった。この結果から，各被験者の代表値として扱える主成分得点について，群間の差異がないことが認められた。

## IV. 考察

分析対象にした身体関節は，主成分数を決定する固有値および累積寄与率の結果から，第 2 主成分までが抽出された。これは，矢状面における競歩動作が大きく分けて 2 つの位相で構成されており，今回の解析によって動作パターンを 80% 以上説明していることを示している（表 1）。さらに，各主成分を構成する身体関節が両群で同一であり，主成分負荷量，主成分間相関係数，主成分得点において上位群と下位群に明確な差が認められなかったことは，本研究で抽出された動作パターンが，競技水準に影響を受けない頑健なモデルであることを示す。

第 1 主成分の下位項目である上腕と上体の主成分負荷量が同符号であったのは，上腕を後方にスウィングする動作と上体が後傾していく動作の角変位が同方向であったことを示し，主成分負荷量の高さ（上位群の上腕 .98，上体 .96；下位群の上腕 .96，

上体.95) が同位相であることを意味している (図 5a). ただし本研究では, 上体の角変位について, 身体前方への腰の移動と, 身体後方への肩の移動, の 2 つの割合を分離できないので, 支持足側の腰に対して遊脚側の腰の移動の程度を評価する方法や, 肩と腰の移動を別々に評価する方法などで詳細に検討していくことが必要である.

大腿と足の主成分負荷量が同符号であったのは, 後方に大腿を伸展させる動作と, 足が伸展 (底屈) する動作の角変位が同方向であったことを示している. 大腿の主成分負荷量の絶対値が高い (上位群 .90 ; 下位群 .92) ことは, 上腕と上体と同位相であること, また足関節の主成分負荷量の絶対値が中程度 (両群ともに .66) であったことは, 上腕, 上体, 大腿との位相差があったことを意味する. これは図 2 に示した熟練者 A の角変位から判定すると, 足関節の遅延が若干あったことを示す (図 5b). これは, 大腿が最大伸展した後に, 足関節が伸展 (底屈, あるいは身体後方にキック) している動作である.

第 2 主成分の下位項目である膝と肘の主成分負荷量が異なる符号であったのは, これら 2 つの角変位が反対方向であることを示している. これは, 後方へ腕をスウィングしながら肘角度を大きくしていく動作と, 後方から前方に脚をスウィングするときに膝を屈曲していく動作の位相が近いことを意味する (図 2 と図 5c).

以上のように, 主成分分析を用いることによって, 複数の身体関節の角変位の位相関係から動作パターンを抽出し, 動作の特徴を概ね捉えることができることがわかった. そして, 図 5 で示したように, 競歩における 3 つの動作パターンを習得できるように, 初心者を指導することが重要と考えられる.

ただし, 競技水準と複数の身体関節の位相差の関

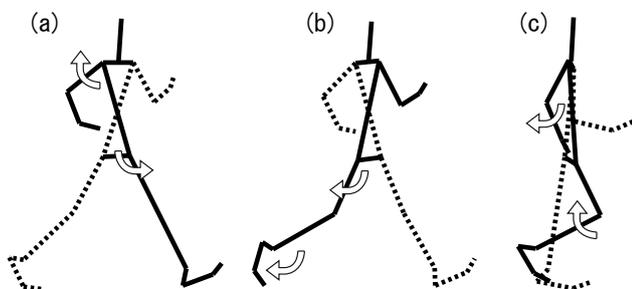


図 5 主成分分析によって抽出された動作パターン.

実線が身体の右側面であり, 破線は身体の左側面を示す. 矢印は, 主成分分析によって抽出された角変位の方向を示す.

係については, 主成分負荷量に群間の差異が認められなかったことからわかるように, 微細な解析は困難である. そのため, 主成分分析によって動作パターンを抽出することと, 2 変量の交差相関による時間差 (位相の尚早・遅延) の抽出を併用することが望ましい. さらに, 平川・吉田 (2005) が, 電動トレッドミル上での漸増歩速度条件で大腿と下肢の位相差パターンを検討した結果, 10,000mW の自己記録平均速度 (100%) と低速度 (60%, 80% 相対速度) において, 熟練者の動作パターンに変化は認められなかったが, 初級者の位相パターンは 100% 相対速度で遅延することを報告している. このように, 歩行速度の変化によって協応パターンが変化することもあるため, 個人内変動を踏まえて多次元的に検討していくことが, 今後必要であると考えられる.

## V. 要約

本研究では, 競歩における身体関節の位相関係から, 動作パターンを数量的に抽出し, 初心者が有効利用できる習得の目標パターンを提示することを目的としていた. 得られた結果は以下のように要約される.

1) 主成分分析によって抽出された矢状面の動作パターンは 80% 強の説明率である. また, 動作パターンは, 大きく 2 つの位相 (「上腕, 上体, 大腿, 足関節」と「肘, 膝」) に分類される.

2) 上腕, 上体, 大腿の角変位は同位相に近似しているが, 足関節の位相は若干遅れていることが中程度の主成分負荷量から認められた. これは, 上腕を身体後方へスウィングする動作と反時計回り方向に上体が傾斜していく動作が同位相であることを意味する. ただし, 身体後方への肩の移動と身体前方への腰の移動のいずれがこの角変位に大きく寄与しているかを判断することができない. そして, 足関節の遅延は, 大腿が最大伸展した後に, 足関節を伸展していることを意味している.

3) 後方へ腕をスウィングしながら肘角度が大きくなっていく動作と, 後方から前方に脚をスウィングしながら屈曲していく動作との位相が近似していることが認められた.

## 文献

平川武仁・吉田 茂 (2005) 競歩の漸増速度条件における腰膝位相パターンの遅延. 日本体育学会第 56 回大会予稿集, 203.

- 平川武仁・吉田 茂 (2006) 競歩選手における肩腰動作の位相遅延と円滑性. スポーツ心理学研究, 33 (1), 1-10.
- 古谷野 亘 (1988) 数学が苦手な人のための多変量解析ガイド, 川島書店, 東京.
- 楠本秀忠・後藤幸弘・辻野昭 (1983). 競歩の筋電図的研究. 体育学研究, 28 (1), 43-54.
- Mah C D, Hulliger M, Lee R G, and Callaghan I S (1994) Quantitative analysis of human movement synergies: constructive pattern analysis for gait. Journal of Motor Behavior, 26 (2), 83-102.
- 村上 隆 (1985) 変数間の関係の構造を探る. 海保博之 (編), 心理・教育データの解析法 10 講基礎編, 福村出版, 東京, pp. 150-172.
- 中村知靖 (2002) 構成概念を測定する. 渡部洋 (編), 心理統計の技法, 福村出版, 東京, pp. 128-150.
- 柳井晴夫 (1994) 多変量データ解析法—理論と応用—, 朝倉書店, 東京.
- 柳井晴夫・高根芳雄 (1985) 新版多変量解析法, 朝倉書店, 東京.