

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82626

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14686

研究課題名（和文）テーラーメイド型運動スキル獲得システムの開発

研究課題名（英文）Development of a tailor-made motor skill acquisition system

研究代表者

鷲野 壮平（Washino, Sohei）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：30850937

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究に取り組むことで得られた成果は次の通りである。1) 現在の運動から目標となる運動に任意の段階で変容させたランニング運動を生成する技術を開発した、2) 目標とする運動に対する学習状況をリアルタイムに確認できる運動計測、解析、介入基盤を構築した、3) 体幹のマーカー数点から水泳運動中の身体重心高の軌跡を低コスト化で推定するモデルを構築した、4) データの個人差を考慮した統計処理を活用し、水泳運動中の速度を身体重心高の関係をモデル化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果を活用することで、運動学習者は現在の運動と目標となる運動との差異が大きくても、少し変容させれば到達できる段階的なゴールを設定でき、かつインタラクティブに運動学習を行える。これにより、運動学習者はモチベーションを保ちながら、運動スキル獲得に向けて着実に運動学習を進められることが期待できる。身体重心位置は、スポーツ指導現場で頻りに体重移動という言葉で馴染みのある指標であり、その評価が簡便に行えるようになることで、効果的なコーチングの実現に貢献する。ヒトを対象とした実験で得られるデータには、個人差が含まれるが、線形混合モデルを用いることで、適切にデータの処理および解釈ができるようになる。

研究成果の概要（英文）：The main findings of this project are as follows: 1) A technique was developed to generate a running motion that can be seamlessly transformed from the current motion to the target motion in arbitrary steps; 2) A comprehensive platform for motion measurement, analysis, and intervention was established, enabling real-time monitoring of learning progress toward the target motion; 3) A subset model was proposed to estimate the trajectory of the vertical center of mass position for the whole body during swimming, using a few markers on the trunk segment; 4) By employing statistical analysis that accounts for individual differences in data, the relationship between swimming speed and the vertical center of mass position during swimming was established.

研究分野：バイオメカニクス、トレーニング科学

キーワード：運動解析 ランニング 運動学習 運動フィードバック 身体重心位置 線形混合モデル

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ランニングのような持久的運動パフォーマンスは、「体力×運動スキル」で決定されるが、競技レベルが高くなるほど体力要素の向上は見込めず、やがて選手間の体力レベルの差は消失する (Lucia et al. 2008)。そのため、運動スキルの要素が、高い競技レベルにおける持久的運動パフォーマンスの向上に寄与する。長距離ランニングの運動スキルは、「高い速度を同じエネルギー消費量で走る」または「同じ速度を低いエネルギー消費量で走る」といったエネルギー消費効率で評価され、それに関与するバイオメカニクスの影響因子は解明されてきた。しかし、いずれも単相関分析が用いられており (Moore 2016)、その背後に存在する全身運動情報は考慮されていない。このような影響因子の解明は学術的に重要である一方、持久的運動パフォーマンスを向上させる上で核心的となるエネルギー消費効率を改善させる効果的な運動スキルトレーニング法の確立は未だなされていない。

運動スキルは、得られたフィードバックをもとに、認識された目的の動きと現在の動きとの差異を埋めるようにトライ&エラーを繰り返しながら獲得される。しかし、トップ選手が有する運動スキル (= 高いエネルギー消費効率) を伴う動きは、それに関与するバイオメカニクスの影響因子がわかっていたとしても、「身体的特徴の個人差」と「現状の運動と目的の運動との大きな乖離」があり習得困難である。以上より、学術的「問い」として、「持久種目の運動スキルである高いエネルギー消費効率を伴う運動を複数のバイオメカニクスデータと身体的特徴から表現できるか、身体的特徴が異なる場合、どのようにしたら運動スキルをトランスファーできるか、目的とする運動スキルと現在の運動スキルとの差が大きい場合、どのようにしたら効率的に獲得できるかが挙げられる。

2. 研究の目的

当初、本研究は、エネルギー消費効率の高い運動スキルを誰もが獲得できるテーラーメイド型運動学習システムの開発をゴールとし、以下3点の達成を目的としていた。

- ・「運動個別化技術」の開発：ある運動スキルの運動を個人の運動特徴に合わせて表現する技術
- ・「ステップフィードバック技術」の開発：現在の運動から目標となる運動に向けて段階的に変容させた運動を生成する技術

- ・個別化した運動を特定個人の運動レベルに合わせて効率的に学習法させるシステムの確立

しかし、研究実施期間を通じて、新型コロナウイルスの影響を大きく受け、本研究で運動スキルの対象としたエネルギー消費効率を評価するために行う呼吸ガス計測は非常に困難であり、研究の進行が大きく遅れた。そのため、途中から新たな指標として身体重心位置の変動に着目した。しかし、身体重心位置を精度高く算出するには、対象者の身体各部に多くのマーカーを貼付する必要があるため、評価コストが高く現場での応用には不向きであるという問題に直面した。また、本研究のキーワードである「個人差」について調査する上で、データの個人差を適切に取り扱える統計処理手法である線形混合効果モデルを偶然知ることができた。以上の背景より、本研究は以下の4点について取り組んだ。

- (1) 「ステップフィードバック技術」の開発
- (2) テーラーメイド型運動学習システムの開発
- (3) 身体重心高の軌跡を低コスト化で算出するサブセットモデルの構築
- (4) 個人差を考慮したデータ処理の適応

3. 研究の方法

- (1) 「ステップフィードバック技術」の開発

トレッドミル上での1分間のランニング運動を対象に、2つの実験を実施した。実験1では成人男性ランナー7名を対象に12 km/hにて、実験2では成人男性ランナー1名を対象に8つの走速度(8 km/h~15 km/h)および12 km/hでの7つのピッチ(自然ピッチ±20%, 10%, 0%)にて行わせた。その際取得した光学式モーションキャプチャデータおよびデジタルヒューマンモデルより逆運動学計算を行うことで、モデルのルートリンクの位置・姿勢及び各関節角度の時系列データを算出した。各試技について、運動データを走行サイクルで切り出した後、時間正規化を行い、そのアンサンブル平均を代表運動とした。その後、各次元の各タイミングにて、個人間の運動に対しては線形補間を、個人内の異なる走速度及びピッチの運動に対してはスプライン補間を施した。

- (2) テーラーメイド型運動学習システムの開発

光学式モーションキャプチャシステムを用いて、トレッドミル上でのランニング運動を成人男性ランナー2名について計測した。その後、各被験者の解剖学的特徴点を基に個別化させたデジタルヒューマンモデルを作成し、逆運動学計算より、ランニングの運動解析を行った。解析した1名の運動をトレーニング前の運動(現在の運動)、もう1名の運動を変容させるゴールとなる運動(目標となる運動)と仮定し、(1)の実施内容を基に、現在の運動から目標となる運動に任意の段階で変容させたランニング運動を生成した。運動学習システムの構築には、光学式モーションキャプチャシステムによって計測されたランニング運動中のヒトの骨格情報をリアルタ

イムでUnity上にストリーミングする仕組みを利用した。

(3) 身体重心高の軌跡を低コスト化で算出するサブセットモデルの構築

水泳中の身体重心高は、肺内の空気量や泳速度によって影響を受ける。そのため、2つの課題を実施した。1つ目の課題は、肺内の空気量を随意的に調整した3つの条件(最大吸気、中間、最大呼気)にて同一速度で泳ぐ試技、2つ目の課題は、肺内の空気量を最大吸気に調整したまま異なる泳速度で泳ぐ試技を実施した。泳スタイルおよび泳距離はクロール泳で15mとし、泳動作中には呼吸動作は行わないようにして肺内の空気量を保持するように指示をした。光学式水中モーションキャプチャシステムを用いて、身体各部に貼付したマーカーの位置座標を取得した。2つの課題を通じて、対象者13名から計212ストロークサイクルのデータを取得した。各試技1ストロークサイクル区間の身体重心高、および体幹部に貼付したマーカーから4つの候補点として胸骨上縁、剣状突起、肋骨下端中点、大転子中点の鉛直位置座標を算出した。サブセットモデルの候補として、体幹部の4つの候補点の組み合わせで考えられた15パターンの線形回帰モデルを分析した。身体重心高と各サブセットモデルの垂直位置の間の二乗平均平方根誤差を最小化する最適化問題を解くことで、モデル式の重みパラメータを導出した。サブセットモデルのパフォーマンスは、5分割の交差検証(Five-fold Cross Validation)を用いて、正解データとした身体重心高と各サブセットモデルから再構築した値との絶対一致の級内相関係数(ICC)から評価した。

(4) 個人差を考慮したデータ処理の適応

個人ごとに複数のデータ点があり、独立変数と従属変数の関係を調べる場合、各個人について個別に線形回帰分析を行うと、観測値の独立性(ランダムサンプル)の仮定が崩れてしまう。このような場合に、観測データの個人差を考慮した統計処理が可能な線形混合モデル(Linear mixed-effects model)という手法を知ることができた。ここでは、クロール泳中の泳速度と身体重心高の関係および泳速度と体幹の迎え角の関係を明らかにするために、異なる泳速度で泳いだ際に取得したモーションキャプチャデータより身体重心高および体幹の迎え角を算出し、それらについて線形混合モデルを用いた処理を行った。個人差を考慮するために、ランダム効果として対象者を、固定効果として泳速度を扱った線形混合モデルを構築した。その際、線形の傾きを考慮するモデルと考慮しないモデルを構築し、モデルの適合度を赤池情報量基準(AIC)を基に比較し、データがよりフィットするモデルを選択した。その後、独立変数(泳速度)と従属変数(身体重心高または体幹の迎え角)との全体的な傾向(general trend)が得られるかを検証した。また、今回は統計処理手法で得られる傾向の違いを比較するために、泳速度と身体重心高および泳速度と体幹の迎え角との関係について、各個人ごとに線形回帰分析を行った。

4. 研究成果

(1) 「ステップフィードバック技術」の開発

12 km/hにおける個人間の運動を任意の割合で変化させた運動(図1)ならびに個人内にて走速度及びピッチを任意の割合で変化させた運動間のランニング運動を連続的に再構築した。これにより、運動学習者の現在の運動と目標となる運動との差異が大きかったとしても、少し運動変容させれば到達できる段階的なゴールを設定することができ、運動学習者のモチベーションを維持しつつ、着実に運動学習が進むことが期待される。

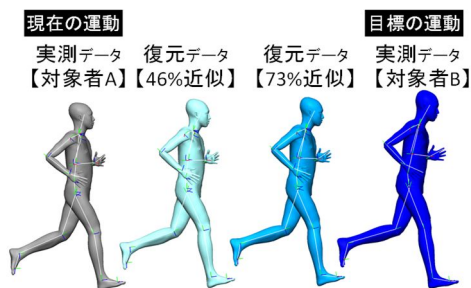


図1. 対象者間の運動の再構築した運動例

(2) テーラーメイド型運動学習システムの開発

モーションキャプチャソフトウェアで検出した骨格(スケルトン)データをリアルタイムにUnity上にストリーミングし、運動学習者が現在行っている運動と目的とした運動を行うアバターの表示できるようにした。さらに、ランニング1サイクルを都度抽出し、運動学習者の任意の関節角度をリアルタイムに、計測、解析、およびその結果をフィードバックすることを可能とした。フィードバックには、色彩を用いたビジュアルフィードバック、音階を用いたサウンドフィードバックを利用できるようにした。これらにより、運動学習者は、目的とする運動に対して現在の運動がどの程度異なるのかおよび現在の運動学習が改善の方向に進んでいるのかを定性的かつ定量的に確認でき、効果的なトライ&エラーを基づく運動学習の実現が期待される。

(3) 身体重心高の軌跡を低コスト化で算出するモデルの構築

体幹部に貼付した4つのマーカー(胸骨上縁、剣状突起、左右大転子)から構築したサブセットモデルが最も高かつ良好な信頼性を示した(ICC:0.776; good reliability, Koo & Li, 2016)。このことは、体幹部に貼付した数点のマーカーから高い精度でクロール泳中の身体重心高の軌跡を推定できることを意味する。全身の身体重心位置を算出するには、マーカーの貼付や計測したデータのラベリング処理に多くの時間を要するが、本アプローチにより体幹部に貼付したマーカー数点からクロール泳中の身体重心高の軌跡を精度高く評価できることで、現場への応用が

期待される。本アプローチは、ランニングや自転車などで取得した学習データに適用することで、様々な運動様式にも応用可能である。

(4) 個人差を考慮したデータ処理の適応

線形の傾きの個人差を考慮したモデルがより高い適合度を示した (AIC: -787.0 vs. -843.6)。このことは、個人ごとに、線形回帰モデルの傾きにバラつきがあることを意味する。線形混合モデルの分析により、泳速度と身体重心高の間には、正の general trend が認められた ($\beta = 0.037$, $p < 0.001$)。一方、泳速度と体幹の迎え角の間には、general trend は認められなかった ($p > 0.05$)。また、統計処理手法で得られる傾向の違いを比較するために行った個人ごとの線形回帰分析については、泳速度と身体重心高には、全対象者 (11 名) において有意な関係が認められた ($p < 0.05$) もの、泳速度と体幹の迎え角については、11 名中 2 名においてのみ有意な関係が認められた ($p < 0.05$)。個人ごとに線形回帰分析した場合は、泳速度と体幹の迎え角の結果のように全体的な傾向を結論として述べることは難しいが、線形混合モデルを用いることで、線形の傾きの個人差を考慮した上で、独立変数と従属変数の全体的な傾向を検証することができる。このように、線形混合モデルの優位性を確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Washino Sohei, Yoshitake Yasuhide, Mankyu Hirotooshi, Murai Akihiko	4. 巻 -
2. 論文標題 Vertical body position during front crawl increases linearly with swimming velocity and the rate of its increase depends on individual swimmers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sports Biomechanics	6. 最初と最後の頁 1~13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/14763141.2022.2071329	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Washino Sohei, Murai Akihiko, Mankyu Hirotooshi, Yoshitake Yasuhide	4. 巻 -
2. 論文標題 Determination of subset models for predicting vertical centre of mass position during front crawl in male swimmers	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Sports Sciences	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/02640414.2023.2214393	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 鷲野壮平、村井昭彦
2. 発表標題 運動補間技術の提案
3. 学会等名 第76回日本体力医学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鷲野壮平、村井昭彦、萬久博敏、吉武康栄
2. 発表標題 肺気量が水泳運動中の各セグメントの前方投影面積に及ぼす影響 ~ デジタルヒューマンモデルを活用して ~
3. 学会等名 第28回日本バイオメカニクス学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷺野壮平、吉武康栄、加地智哉、萬久博敏、村井昭彦
2. 発表標題 クロール泳中の前方投影面積の身体セグメント間比較
3. 学会等名 日本水泳水中運動学会2022年次大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------