

身体部位間の運動タイミング差を調整するための 部分的フォーム解析

吉川 健彦^{*1}, 松浦 健二^{*1}, カルンガル ステファン^{*1}, 後藤田 中^{*2}

^{*1} 徳島大学大学院, ^{*2} 香川大学

A Form Analysis for Harmonizing Timing Among Movements of Body Portions

Takehiko Yoshikawa^{*1}, Kenji Matsuura^{*1}, Stephen Karungaru^{*1}, Naka Gotoda^{*2}

^{*1} Tokushima University, ^{*2} Kagawa University

In integrative motor actions in which a human being cooperatively controls multiple primitive motions that are out of phase, it is necessary to coordinate gaps between each timing of primitive motion for embodying stabilized movement. This study focuses on rope-skipping skill in repetitive and integrative motor actions. For supporting to harmonize timing among movements of body portions, we analyze a form of rotating wrists that are major primitive motions on rope-skipping. In addition, we propose a wearable system for monitoring movement and design a support method for improving skill of coordinating timing difference between primitive motions.

キーワード: 前二重跳び, タイミング, フォーム, 学習支援, 装着型システム

1. はじめに

本研究では、運動スキル⁽¹⁾を、身体動作を必要とする課題を遂行するために学習によって得られた能力と捉え、その学習支援に焦点を当てる。特に、縄跳びやフラフープのような単位動作を繰り返し行うように見える反復運動に着目する⁽²⁾。その中でも、本研究では、前二重跳びを例に取り上げる。反復運動である前二重跳びは、体幹の運動波形で定義可能な単位運動である一跳躍二回旋を繰り返す。加えて、複数の身体部位運動が協調するため、統合運動と捉える。このような統合運動の協調動作はリズムをつくる⁽³⁾。本研究では、一跳躍二回旋という運動パターンを前二重跳びのリズムと捉え、特にリズムを構成する要素の一つとして、タイミングに注目する。

跳躍と手の回旋には、それぞれ固有のタイミングがある。そのため、それらの運動開始時については発動タイミングの時間差が生じる。この時間差が各単位運動間で安定している場合、リズムカルな運動であると

いえる。つまり、学習者がリズムカルな前二重跳びを行うための目標は、単位運動ごとの身体部位間の運動タイミング差におけるばらつきの低減と捉えると、その結果として運動が安定する。しかし、このタイミング差を安定するためには、一方のタイミングを基点に他方のタイミングを調整する必要がある。そのため、このような協調動作を獲得するための学習支援を設計・提案を行う。また、リズムは点ではなく連続した現象として捉えることが重要である⁽³⁾。したがって、本稿ではタイミングに影響を与えるフォームに注目し、運動の安定化にむけた支援に関する考察を行う。

2. 前二重跳びスキル

2.1 運動の特徴

前二重跳びは、縄跳びの技の中で最も基本的な前二重跳びの発展技として位置する⁽²⁾。また、他の一跳躍中に二回旋する技の基礎に位置づけられる。

この運動は、反復・統合運動である特徴の他に、バ

リスティック運動の側面が強く、一跳躍二回旋の運動を反復的に繰り返すとともに、運動の速さが要求される。そのため、単位運動毎にあらかじめ予測し設定された動作を体現することになる。また、操作対象を有する運動である前二重跳びは、オープンスキルが必要であり、操作対象を有しない運動に比べて、この予測は複雑である。

2.2 前二重跳びにおけるタイミング

本研究では、タイミングを、リズムを構成する重要な要素の一つと捉えている。そして、前二重跳びは、バリストック運動のため、単位運動が運動中に予測される動作の一単位となる。

前二重跳びの運動パターンを構成する各身体部位運動のタイミングを図1のように定義する。本研究では、手の振り下ろし運動を一時的にかつ一気に強化する瞬間を手の回旋タイミングと定義する。一跳躍における一回目の手の回旋タイミング後の手の回旋動作は、予測によってあらかじめ設定された動作に従い、体現される。跳躍タイミングは、着地し次の跳躍を開始した瞬間と定義する。これらのタイミングには、発動の瞬間がある程度の範囲で常にずれが生じ、これら身体部位運動の周期には、位相差が存在する。



図1 身体部位運動のタイミング

タイミング差の調整にあたり、どちらかのタイミングを基準にし、相対的なタイミングとして捉えることは身体部位運動の協調には必要である。前二重跳びでは、跳躍を基準にし、手の回旋を調整することが望ましい。これは、跳躍が全身運動であり、各単位運動間のばらつきが比較的少ないと考えられ、手の回旋は跳躍に影響して行われるからである。

3. 支援要件

本研究では、学習者の体現と同期的に支援を行う。それには、学習者が運動しながらシステムが同期して

行う方法と運動開始の前後に運動とは独立して行うといった非同期的に行う方法がある。前二重跳びは、バリストック運動の側面が強く、オープンスキルの一種である。また、単位運動ごとのタイミング差にゆらぎがあるため、学習者の体現における誤りの修正内容は単位運動ごとに変化する。このような変化に対して調整を行うためには、同期的な支援の方が望ましい。

同期的な支援を実現するための手段として、本研究では、ウェアラブルセンサによって学習者の体現を観測する。具体的には、手の回旋は筋電センサを主として、加速度センサの補助を組み合わせることで観測を行う。これは、手の回旋が筋収縮の結果から生まれるためである。筋電センサによる筋電位の計測が内部状態の同定に直接的である。また、内部の変容に対して表層的な軌跡を捉えるために、加速度センサを併用する。一方、跳躍は、基準点としての運動結果を捉える必要があり、現象を加速度センサで観測する。

上記センサによる観測結果より、学習者に対し、支援を行う。学習者が自ら身体運動を含む環境を同定するためには、主に視覚、聴覚、触覚に対する刺激を用いる。簡単にこれらの感覚に働きかけられるフィードバックを、学習者は運動しながらでも受けられる教示方法が望ましい。人間は、視覚や触覚に比べ、聴覚は外部からの刺激に対する認識時間が短い⁴⁾。また、体現は視覚からの情報に多く依存する。そのため、視覚への刺激は認知的に過負荷になる可能性がある。以上より、同期的な支援のために、聴覚的教示を行う。

なお、運動をウェアラブルセンサで観測した場合、連続的に一定量のデータを逐次蓄積する必要がある。そのため、データ処理のために接続される汎用コンピュータの利用を考える。この間に有線通信を行う場合、ケーブルによる運動への制約が大きく、学習者への負担が懸念される。そのため、無線通信でこれらの制約は極力排除すべきである。また、運動時に装着するセンサ類は、軽量であることも必要である。そのため、本研究では、上記の要件を満たすデバイスを採用して、支援を実現する。

4. システム設計

4.1 概要

前章の要件を満たすように、本システムを設計・構築する。本システムは、汎用コンピュータと二つのデバイスからなる。図2にデバイスを装着した際の様子を示す。本研究では、手の回旋の観察のための計測に *Myo* (<https://www.myo.com/>) を採用している。*Myo* は、9軸のIMUセンサと8チャンネルの筋電位センサを有し、それぞれ50Hz、200Hzで計測されたデータを提供する。前腕に装着される *Myo* は、この二つのセンサから得られるデータを、Bluetoothによって汎用コンピュータに送信する。これら機能に加え、フィードバックのためのバイブレータも有するため、音の支援を補助する形で、*Myo* は触覚へのフィードバックも可能である。一方、跳躍の観察のために独自のデバイスを開発した。このデバイスは、100Hzで計測可能であり、腰部に装着して用いる。装着のため、ベルトによって腰部に固定し、加速度センサ、センサなどの制御のためのマイコン、汎用コンピュータとのデータ送受信のための無線モジュール、フィードバックを行うための小型スピーカからなる。これらは、本提案の要件を満たすデバイスである。

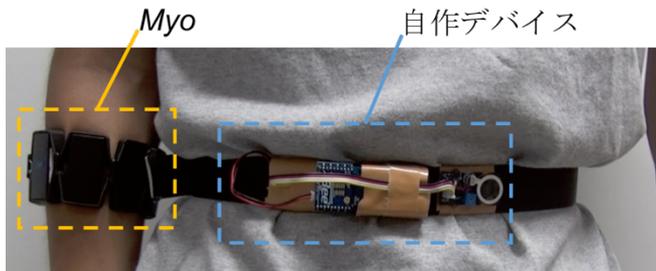


図2 計測デバイス

4.2 支援のためのタイミング予測

前二重跳びは、オープンスキルを必要とする側面が強く、縄の動き、もしくは跳躍に合わせて、手の回旋を調整する必要がある。それ故に、同期的な支援を行うが、その実現のために、システムは次のタイミングの予測を行う。具体的には、基準である跳躍の次タイミングの予測である。

跳躍は、腰部の運動に注目すると、手の回旋に比べて、単純な垂直方向の動きである。また、特に反復運動の特徴を有する。この特徴に鑑みた予測の実装とし

て、回帰分析がある。比較的単純なモデルとして、単回帰があるが、正確性によっては、説明変数を増やす等、このモデルを発展させたものを適用し、予測に利用する。

このモデルは、学習者の体現の計測によって、データが蓄積されるごとに更新される。結果、より正確な予測が可能なモデルへと書き換えられる。この更新は、学習者の体現が終了し、正しくデータが蓄積されたタイミングで行われる。

4.3 タイミング差に対する支援

4.3.1 音による支援

音での支援方法として、吉川ら⁶⁾は前二重跳び運動における動作タイミングの安定化に向けて、跳躍中の一回旋目の手の回旋動作に対して合図音を提示している。学習者は、提示される音を目標として、そのタイミングに自身の動作タイミングを近づけることで運動の熟達を図る。本稿のプロトタイプ⁶⁾では、このシステムを拡張する形で、一跳躍二回旋の運動パターンに沿った支援が設計された。手の回旋タイミングの調整のために、タイミング差を認識させる目的で、跳躍タイミングに対しても合図音に支援を行う。これにより、音と音の時間差をタイミング差と認識させている。また、学習効果を高めるために、合図音による KP (Knowledge of Performance) の他に、バイブレータによる振動で、合図音に体現が添えたかどうかの KR (Knowledge of Result) を提示している¹⁾。

一方、Sigrist ら⁷⁾は音を使用した三つのフィードバック方法について検討している。一つ目は、学習者の体現にしきいを設け、取りうる計測データの範囲を設定し、その範囲を計測値が逸脱した際にアラートによって知らせる方法である。二つ目は、運動に応じて調整された音を提示する方法である。そして三つ目は、運動のずれに関する調整音を提示する方法である。

リズムカルな運動は、タイミングの点だけではなく、そこに至るまでの動作の軌跡や流れを捉えることが必要である⁸⁾。しかし、合図音による支援では、その支援間の体現に対して、寄与できない。また、体現の誤りを知らせる単一の音での支援の場合、学習者に対し、誤った結果の KR だけを提示し、修正に対する KP の教示ができない。そのため、本研究では、運動によっ

て音量や周波数が変化する音での支援を提案している。ただし、運動パターンの全てに対してフィードバックを与える場合、学習者の支援への依存が考えられるため、フィードバックの頻度などは考慮する必要がある。

また、フィードバックを即時的に提示せず、そのタイミングをずらすことで、リズムの変化をもたらす⁽⁸⁾。これにより、リズムの時間的要素である動作タイミングとともに、そのタイミング間の動作にも作用できる。例えば、遅延フィードバックは、動作における空間的な広がりが増加させるか、動作の速度を遅くさせる効果が期待される。ただし、フィードバックを与えた際に、学習者が認識するまでには時間が必要である⁽⁴⁾。そのため、反応時間分早めにフィードバックを発動させる補正は、学習者がシステムに慣れることで、音に対する見越し運動が行われる。これは、本来期待しているフィードバックとは異なってしまいう可能性があり、これらを考慮し、設計する必要がある。

4.3.2 振動による支援強化の検討

運動によって音量や周波数が変化する音での支援は、跳躍タイミングから手の回旋タイミングまでの時間差が考慮されているが、学習者には跳躍タイミングは直感的に提示されておらず、身体部位間の運動タイミング差の認識ができない可能性がある。そのため、別途合図音もしくは *Myo* の有するバイブレータの振動で提示する必要がある。しかし、前者の場合、手の回旋に対する支援と音が混同するという問題がある。そのため、本研究では後者を採用し、聴覚と触覚に対するマルチモーダルな支援を検討する。

5. ケーススタディ

5.1 計測データにおけるタイミング

実際に計測した個人データの例を、図3に示す。本システムは腰部の加速度 (Acceleration) を計測し、着地時の加速度の極大を跳躍タイミングとする。ただし、図3の右部のように、着地時の衝撃などでセンサが揺れ、ノイズが混入した場合、二次関数で近似することで、その区間を補間したデータを使用する。そして、加速度の極大から次の極大までを前二重跳びの一周期と捉える。一方、筋電位は、前腕における手首の背屈に関係する部位を計測しているチャンネルを選択し、

動作タイミング同定のための処理を行った波形を利用する。計測した表面筋電位に対して、安静時の電位を0として全波整流化する。その後、時定数 0.03s を用いて、全波整流化波形を平滑化する。この際、平滑化による遅れが発生するため、信号の時間反転を行い、再度同じ平滑化を施し、全波整流平滑化波形 (ARV) とすることで、位相ずれを打ち消している。ARV は、筋活動の活発さを表しており、円で囲んだ部分を本研究における手の回旋タイミングとして定義する。前二重跳びは、一跳躍二回旋の運動パターンであるため、一周期中に手の回旋タイミングは、二度現れる。跳躍タイミングに対する、これら手の回旋タイミングの相対的なタイミングの差を、本研究における身体部位間の運動タイミング差とし、このタイミング差の安定化を目指す。特に一回旋目に焦点を当てて、支援内容の設定を行う。

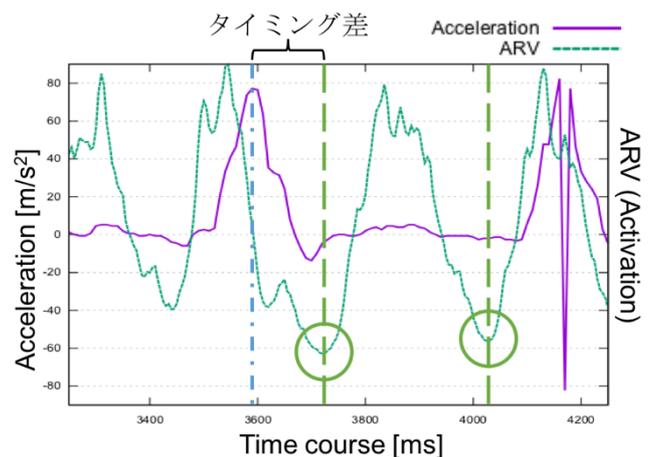


図3 計測データ例

5.2 手の回旋のフォームに対する考察

Myo は、IMU センサの値を基に、絶対座標系に対する各軸の傾き (Roll 角, Pitch 角, Yaw 角) を提供している。図4は、学習者の右腕へ *Myo* を装着した際の、跳躍における一周期間の傾き (Pitch 角, Yaw 角) と ARV のデータ例である。

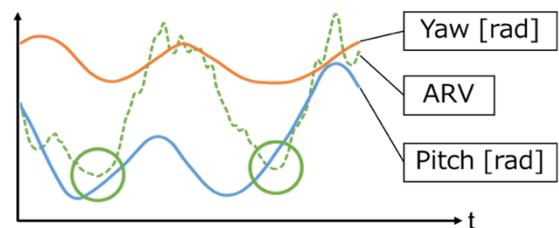


図4 ARV と傾き (Pitch 角, Yaw 角) との関係

筋活動は、自身では正確に認識しづらい。加えて、筋活動は単独の筋肉が収縮して行われるのではなく、周囲の複数の筋肉が協力して運動を引き起こすため、特定の筋肉の発動タイミングは、そのタイミングを提示したとしても、認識と体現の差を埋めることができない可能性がある⁽⁶⁾。また、手の回旋の動作における波形のピークをタイミングと捉えている場合、それらの間にも時間的なずれが存在する。そのため、タイミングに対する支援において、動作の軌跡を考慮する。

本研究では、Pitch 角と Yaw 角の回転角度を平面上に描画し、これを手の回旋のフォームと捉える。図 5 は、前二重跳びの中級者 A (a1, a2) と上級者 B (b) の手の回旋の軌跡である。なお、抽出範囲は、跳躍タイミングから次の跳躍タイミングまでの一周期とし、各ラベルの横には、これら手の回旋の軌跡を抽出した一周期の時間を示した。(b)は、図 4 と同じデータである。また、表 1 には、一周期を抽出した試行の跳躍に関する回数、周期の平均、*S.D.*を示す。

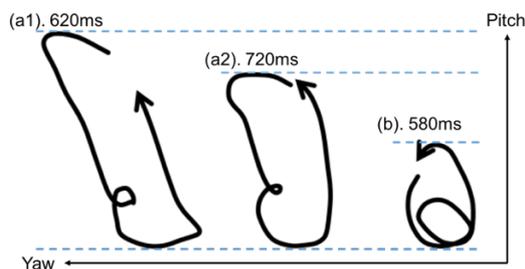


図 5 手の回旋の軌跡

表 1 各試行の跳躍に関する諸情報

	(a1)	(a2)	(b)
跳躍回数[回]	20	9	20
周期平均[ms]	648	710	581
周期 <i>S.D.</i> [ms]	20.4	44.0	12.9

まず、(a1)と(a2)とを比較すると、周期の差は 100ms と小さいとは言えないが、似たような軌跡を描いている。ただし、*S.D.*が示すように、(a1)の試行の方がより安定して運動を行っている。しかし、(a1)の方が Pitch 角の方向で大きく手を回旋している。前二重跳びは、跳躍を高く行うことで、手の回旋の体現に対して余裕を持たせることが可能である。そのため、跳躍周期が(a2)より少ない(a1)では、より大きく手を回旋する必要があったと考えられる。一方、(a1)と(b)とを比較すると、形に大きな違いが現れている。(a1)の形

は四角形に近いのに対し、(b)は比較的綺麗な円を描いている。また、(b)の軌跡は Pitch 角、Yaw 角の双方に動きが少なく、より小さいエネルギーで体現ができていたことがわかる。具体的には、一跳躍中の二回旋目の振り上げ動作において、中級者 A は大きく膨らんでいるのに対し、上級者 B は一回旋目とほぼ同じ軌跡で動作している。また、これは一回旋目の振り下ろし動作にも同じことがいえ、手の回旋動作は、前二重跳びが上達すればするほど、軌跡の膨らみは抑制され、綺麗な円を描くことが想定される。ただし、これら軌跡の大きさは、学習者の身長や跳躍周期に影響されることが考えられる。そのため、正確な比較のためには、先に挙げた値で正規化したデータを使用する必要がある。

次に、(a2)の試行において、失敗した際の手の回旋の軌跡の一部を図 6 に示す。ここで、この学習者は、一回旋目の縄を足の下に通す動作の際に、足に縄が引っかかって失敗している。成功した手の回旋の軌跡である(a2)と比較すると、(a2)'は網掛けされた部分で、軌跡が停滞している。これは、跳躍に対して、手の回旋動作を調整した結果であるが、スムーズに動作できていないことがわかる。そのため、例えば、(a2)'の点線のような軌跡が望まれる。跳躍周期はほぼ変わらない場合、(a2)における跳躍と(a2)'における跳躍は、鉛直方向の運動としては同じとみなせる。点線は(a2)を重ねたもので、(a2)'の際に点線のような軌跡だった場合、成功していたと考えられる。しかし、運動予測時点において、跳躍の想定か、もしくは手の回旋のためのパラメタの設定に誤りが発生し、網掛け部分における停滞の影響が、時間的・空間的な現象として現れている。

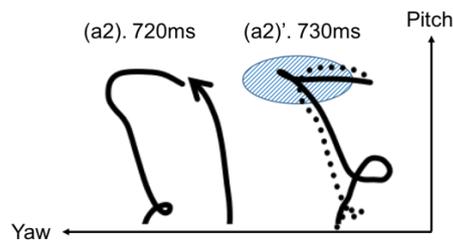


図 6 失敗した際の軌跡の上部

前二重跳びの訓練は、連続して跳躍するため、このような失敗は、運動の熟達を妨げる。前二重跳びの安定化は、学習者の手の回旋の軌跡を図 5 の(b)のような軌跡に近づけることでなされるが、まず、

図 6 の(a2)'のような軌跡にならないように、フィードバックを与える必要がある。

5.3 跳躍タイミングの予測に向けて

本節では、同期的支援のための、システムによる運動の予測に必須な、跳躍運動について述べる。跳躍タイミング予測の実現として、重回帰分析があることを節 4.2 で述べた。ここで、中級者 A と上級者 B を含む、一試行に最長 20 回以上の前二重跳びが可能な 4 人分のデータに対し、 n 回目の周期を目的変数、 $(n-1)$ 回目から $(n-5)$ 回目の周期を説明変数として、重回帰分析を行った。その結果を図 7 に示す。ただし、一試行 20 回を上限とした、三試行分のデータであり、各人のデータにおける平均 (S.D.) は、A は 681(50.8)ms, B は 580(12.5)ms, C は 558(12.0)ms, D は 559(15.7)ms であった。また、跳躍回数は、A は 40 回, B は 57 回, C と D は 60 回であった。結果として、 $(n-1)$ 回目から $(n-5)$ 回目の周期は、 n 回目の周期に対して、影響を与えているとはいえない(例えば A では $R^2=0.395$)。B, C, D は、跳躍周期におけるばらつき小さく、目的変数に与える定数項の影響が大きい。また、A の結果より、跳躍の調整が周期毎に行えない可能性が考えられる。その場合、フィードバックの頻度を一様に実装すると、学習者にはフィードバックが外乱になる可能性があるため、注意する必要がある。

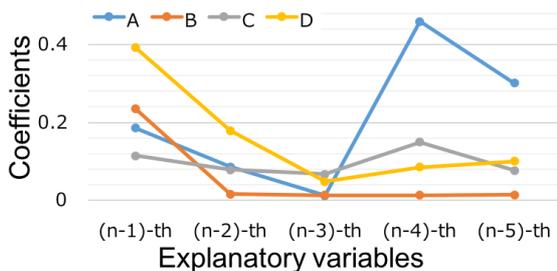


図 7 跳躍における 1-5 周期前との重回帰分析

6. まとめ

本研究では、反復運動の中でも、複数の身体部位運動を有する運動として、前二重跳びを例に取り上げ、身体部位間の運動タイミング差を調整し、安定化する支援システムを考察し、設計した。

本システムは、装着型デバイスを用い、学習者の体現と同期的に、音による支援を行う。その際に、タイミングを対象にした教示を行うが、タイミングはその

運動のフォームに影響されるため、デバイスによって計測されたデータを一周期ごとに分割し、例を挙げて、部分的なフォームについて考察を行った。

今後の課題として、前二重跳びにおける中級者と上級者の境界の定義が曖昧であり、それを決定づける指数の設定の必要がある。そのため、さらなるデータの計測を行うとともに、手の回旋のフォームにおける軌跡の特徴解析を行っていく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP15K01072, JP18H03344 の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) リチャード・A・シュミット著, 調枝孝治訳: “運動学習とパフォーマンス-理論から実践へ”, 大修館出版, 日本 (1994)
- (2) 後藤田中, 松浦健二, 鍋島豊晶, 金西計英, 矢野米雄: “SNS 上でのナワトビスキルの学習者を対象とする個別記事閲覧とその全体像俯瞰の支援”, 日本教育工学会論文誌, Vol. 34, No. 3, pp.269-277 (2010)
- (3) 藤波努: “リズムで越える時間の壁: 身体知へのアプローチ”, 映像情報メディア学会技術報告, Vol. 30, No. 68, pp.71-76 (2006)
- (4) 調枝孝治: “タイミングの心理”, 不昧堂出版, 東京 (1972)
- (5) 吉川健彦, 松浦健二, 菅原宏太, カルンガル ステファーン, 後藤田中: “二重跳びにおける身体部位間の運動タイミング差の安定化支援”, 日本教育工学会論文誌, Vol. 41, No. Suppl., pp.229-232 (2017)
- (6) Yoshikawa, T., Sugawara, K., Matsuura, K. et al.: “Observing the Degree of Distortion in Coordinated Motor Actions”, Proceedings of 25th ICCE, pp.415-420 (2017)
- (7) Sigrist, R., Rauter, G., Riener, R. et al.: “Augmented visual, auditory, haptic, and multimodal feedback in motor learning: a review”, Psychonomic bulletin & review, Vol. 20, Issue 1, pp.21-53 (2013)
- (8) Pfordresher, P. Q., Dalla Bella, S.: “Delayed auditory feedback and movement”, Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, Vol. 37, No. 2, pp.566-579 (2011)