

全身協調バランス・スポーツ“スラックライン”における片脚立ちの熟達：初級者と上級者の比較

Fundamental skills in slacklining: A comparison of novice and expert

児玉 謙太郎[†], 山際 英男[‡], 安田 和弘^{*}

Kentaro Kodama, Hideo Yamagiwa, Kazuhiro Yasuda

[†]東京都立大学, [‡]東京都立東部療育センター, ^{*}早稲田大学

Tokyo Metropolitan University, Tokyo Metropolitan Tobu Medical Center, Waseda University

kodama_k@tmu.ac.jp

概要

本研究はスラックラインの基本技能について、初級者と上級者を比較し明らかにすることを目的とする。スラックラインとは、ベルト状の綱の上で全身を協調させてバランスをとるスポーツであり、近年、バランス・トレーニングとしても注目されている。本発表では、その基本技能である片脚立ちのコツとして、両手の協調性に着目した。両群を比較した結果、上級者の方が片脚立ちをしている最中の両手が協調していることが示唆された。今後、熟達のコツや知覚・認知との関係を定量的に調べることで、リハビリテーションなどへの応用に繋げたい。

キーワード: スラックライン, 身体性認知, 動的安定性, 両手協調, 全身運動

1. はじめに

近年、スポーツやリハビリテーションなどの分野で全身を協調させ動的にバランスをとるスラックラインが注目されている。スラックラインとは、ベルト状の綱(ライン)の上で、バランスをとるスポーツの1種で、ラインの上に乗るとラインがたわみ、上下・左右方向の揺れや回転が生じるため支持面は極めて不安定となる[1]。この不安定なラインの上でバランスをとるには、手足を含む全身の協調が必要となる。スラックラインは2007年ごろスポーツとして確立され、以降その身体技能を競う世界大会も開かれている[1]。

スラックラインの身体技能やパフォーマンスの先行研究として、例えば、Mildrenらはスラックライン経験のない初級者が1週間のトレーニングでパフォーマンスがどのように変化するかを調べている[2]。その結果、とくに上体の協調的な運動(両手の肘関節の協調など)によりスラックライン上での片脚立ちが熟達することを示している[2]。また、Steinらは、初級者と上級者のパフォーマンスを比較し、上級者の特徴として、全身の重心(Center of Mass)と角運動量を正確に制御していることを挙げている[3]。そして、これらを支える要素として両手の協調関係を視覚的に表し、初級者と比較し考察している[3]。

著者らの事例研究でも、スラックラインの基本技能として片脚立ちに着目し、初級者と経験者の比較[4],[5]や初級者の熟達過程[6]において、両手の協調性が熟達の鍵となる可能性が示唆されている。本研究では、これらの先行研究の知見を踏まえ、初級者と上級者(インストラクターや日本女子チャンピオンを含む)のパフォーマンスを比較した。とくに両手の協調性に着目して、その協調パターンを視覚化、定量化できる非線形解析を適用し、スラックラインの熟達のコツを検討した。

2. 方法

実験参加者

本実験にはスラックラインの経験がない初級者5名(うち女性3名, 平均±SD 22.6±3.4歳)と、スラックラインのインストラクター、日本女子チャンピオンを含む上級者5名(うち女性3名, 平均±SD 28.4±11.1歳)が参加した。実験手続きは、神奈川大学における人を対象とする研究に関する倫理審査委員会で承認され、参加者には同意のもと実験に参加してもらった。

実験装置

実験では屋内用器具(SLACKRACK300, GIBBON, 長さ3m, 高さ30cm)が用いられた。身体運動は光学式モーションキャプチャーシステム OptiTrack Flex 13(カメラ計12台, Natural Point)でサンプリング周波数100Hzで計測され、分析にはMATLAB(R2014a, MathWorks), R(3.1.2)が使用された。

実験課題

本研究では、スラックラインの基本技能と考えられている片脚立ち課題[4],[5]を採用し、その最中の全身の動きをモーションキャプチャーで計測した。本発表では、とくに先行研究で片脚立ちのコツで、熟達の指標と示唆されている「両手の協調性」に着目して以下に示す時系列解析を行った。

データ分析

両手の協調性は、左右の手首に装着したマーカーの水平方向の時系列に対し、相互再帰定量化分析 (*Cross Recurrence Quantification Analysis: CRQA*) を行い定量的に評価した。再帰定量化分析 (RQA) は、力学系の再帰パターンを定量化する手法であり、時系列を高次元の位相空間に再構成し、その軌道の再帰状態を調べることでシステムのダイナミクスを定量評価する[7]。CRQA は同時に生起し相互作用する2つの時系列データ間でRQAを実行し、2つの時系列データを一定時間ずつ遅延させた時系列を用い、高次元位相空間にアトラクターを再構成し、2つの軌道間の再帰構造を分析する[8]。「再帰」の定義は、位相空間内において、入力変数(閾値)として設定した半径内に一定時間後に軌道が再び訪れた場合を軌道が再帰したと定義する。CRQA では、2つの時系列がこの半径内に収まる場合を再帰(協調)とみなす[9]。

本研究では、運動の協調性をCRQAで算出される再帰率(%*Recurrence*)と最大線長(*MaxLine*)という指標で評価する。再帰率は、位相空間内全体の潜在的な再帰点(再帰しうる点の数)に対する実際の再帰点の割合で、確率的ノイズと反比例する指標であり、協調の安定性と解釈される[10]。最大線長は、位相空間(または後述するリカレンスプロット上)で連続して再帰した際に生じる線状の再帰点の最大値であり、再帰状態の持続性を意味し、協調の結合の強さと解釈される[10]。

また、RQAとCRQAでは、再帰パターンを視覚化できるリカレンスプロット(RP)という2次元平面図を用いることができる[11]。RPとは、時間軸からなる2次元平面に時系列データの再帰状態をプロットし、パターンを視覚的に表現したものである[11]。本研究では、参加者の左右の手の水平方向の位置データに基づくクロスリカレンスプロット(CRP)[12]を作成する。すなわち、位相空間内で2つの時系列が再帰した場合、平面上にプロットを打つ。CRPの対角線上のプロットは、位相空間で2つの時系列が同時刻に再帰したことを意味する。

CRQAの実行、CRPの作成には*Cross Recurrence Plot Toolbox for MATLAB*®[13]、R'*crqa*'package[14]を用いた。CRQAの計算に必要な変数は、標準的な最適化手法[7],[15],[16]を用いて遅延時間40、埋込次元3、半径50であった(各時系列をZスコアで標準化、平均値により距離行列をリスケール)。

3. 結果・考察

図1は、片脚立ちをしている最中(15秒間)の両手のCRPを初級者と上級者それぞれのサンプルデータで作成したものである。縦軸が左手、横軸が右手を示し、対角線と平行な線状のプロットは持続して左右の手が協調していたことを表し、とくに同期していた場合は、図の中央の赤線上に黒い点がプロットされる。

両者のCRPを比較すると、上級者の方(下)が対角線と平行な線、とくに中央の赤線上に多くのプロットが観察される。これは左右の手が同期して水平方向に動いていたことを意味する。この結果は、先行研究の知見とも一致し、全身のバランスを維持するために重心の水平方向の位置[5]や加速度[3]の調整に両手が寄与している可能性を示唆する。これらの点を踏まえ、次にCRPを定量的に数値化したCRQAの結果をみってみる。

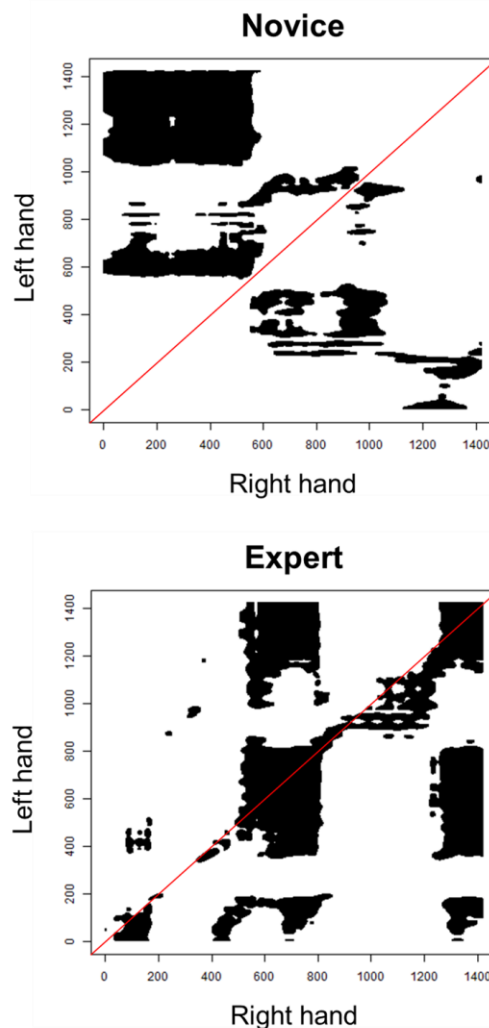


図1 初級者と上級者のサンプルデータの両手のクロスリカレンスプロット(上:初級者,下:上級者)

図2は、初級者と上級者それぞれのCRQAの結果であり、上が再帰率、下が最大線長を示している。再帰率は、初級者群で平均10.50(SD=0.82)%, 上級者群で平均13.02(SD=2.84)%であった。最大線長は、初級者群で平均99.50(SD=4.90)%, 上級者群で平均149.63(SD=49.21)%であった。

CRQAの指標の平均値を比較すると、両手の協調の安定性を示す再帰率も、両手の結合の強度を示す最大線長も初級者群より上級者群の方が高く、両手が協調していたことが示された。このことは、本研究の仮説と一致するが、本データは参加者5名ずつのため統計的な検定は行っていない。そのため、今後この傾向を統計的に示すために、より多くのデータを集めて検証する必要がある。

また、CRQAの指標の標準偏差(SD)を比較したところ、再帰率、最大線長いずれにおいても初級者群より上級者群の方が大きかった。これについては、上級者は常に両手の結合を強くし、協調させているのではなく、全身のバランスを動的に安定化させながら要所所で、すなわち、バランスが崩れそうになったら両手や他の身体部位の結合を弱め、柔軟に全身を協調させている可能性がある。そのため、CRQAの指標も一定の値をとるといよりも、ダイナミックに変化していたためばらつきも大きくなったのではないかと考えられる。

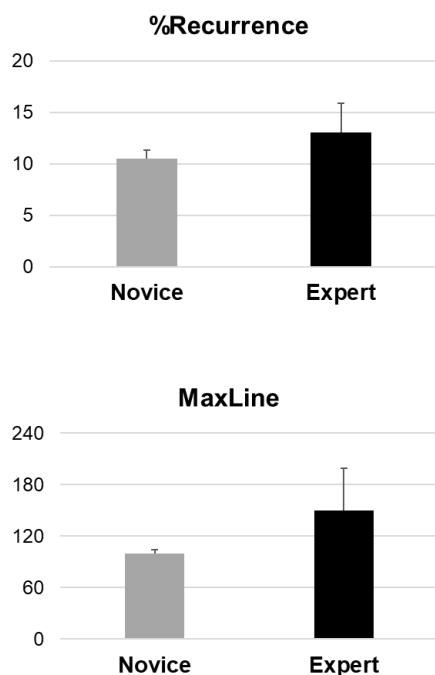


図2 初級者と上級者の両手の協調性
(上：再帰率，下：最大線長)

4. 今後の展望

本研究では、全身協調バランス・スポーツ“スラックライン”の基本技能である片脚立ち課題において、両手の協調性という観点から、初級者と上級者のパフォーマンスを比較した。その結果、上級者の方が初級者より両手の協調性が高い傾向が示唆された。しかし、今回の実験参加者は両群5名ずつであったため、統計検定は行っていない。今後、データ数を増やし、本研究の仮説を検証する必要がある。

また、本研究のデータや先行研究で示唆されているように、上級者も常に両手を協調させているとは限らない[4], [17]。よって、こういった場面で両手の協調性が増加、あるいは低下するのかを調べ、全身のバランス調整と両手や各部位の関係性を明らかにしていきたい。

近年、スラックラインは、バランス・トレーニングとしても注目されている[18]。スラックラインは、感覚運動能力のトレーニングとして期待され[19]、脳卒中患者のバランスや筋力のトレーニング[20]、パーキンソン病患者の歩行改善のためのトレーニング[21]などへ応用されている。今後、身体運動科学・認知科学の立場からスラックラインの基本技能にアプローチすることで、安全で効果的な練習方法や熟達のコツを解明し、リハビリテーションなどへ応用していきたい。さらに、不安定な環境に適応するための全身による動的な安定化の原理を解明できれば、身体性認知の理解[22]を深めることにも繋がると期待される。

謝辞

本研究の一部はJSPS 科研費17K18191の助成を受け実施された。尚、スラックラインの上級者の実験参加にあたり、一般社団法人日本スラックライン連盟、及び、ギボンスラックラインに協力をしていただきました。ここに感謝の意を表します。

文献

- [1] H. Ashburn, (2013) *How to Slackline!: A Comprehensive Guide to Rigging and Walking Techniques for Tricklines, Longlines, and Highlines*. Falcon Pr Pub Co.
- [2] R. L. Mildren, M. Zaback, A. L. Adkin, L. R. Bent, and J. S. Frank, (2018) “Learning to balance on a slackline: Development of coordinated multi-joint synergies,” *Scand. J. Med. Sci. Sports*.
- [3] K. Stein and K. Mombaur, (2019) “Performance indicators for stability of slackline balancing,” *IEEE-RAS 19th International*

- Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 469–476.
- [4] K. Kodama, Y. Kikuchi, and H. Yamagiwa, (2016) “Relation between bimanual coordination and whole-body balancing on a slackline,” *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society*, pp. 794–799.
- [5] K. Kodama, Y. Kikuchi, and H. Yamagiwa, (2017) “Whole-body coordination skill for dynamic balancing on a slackline,” *New Frontiers in Artificial Intelligence*, Springer, pp. 528–546.
- [6] 児玉謙太郎・山際英男, (2018) “スラックラインの熟達過程に関する事例研究,” *日本認知科学会第35回大会発表論文集*, pp. 628–631.
- [7] C. L. Webber and J. P. Zbilut, (2005) “Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems,” *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, M. Riley and G. Van Orden, Eds., pp. 26–94.
- [8] J. P. Zbilut, A. Giuliani, and C. L. Webber, (1998) “Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification,” *Phys. Lett. A*, vol. 246, no. 1–2, pp. 122–128.
- [9] K. D. Shockley, (2005) “Cross recurrence quantification of interpersonal postural activity,” *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*, M. Riley and G. Van Orden, Eds., pp. 142–177.
- [10] G. L. Pellicchia, K. D. Shockley, and M. T. Turvey, (2005) “Concurrent cognitive task modulates coordination dynamics,” *Cogn. Sci.*, vol. 29, no. 4, pp. 531–557.
- [11] J. P. Eckmann, O. Oliffson Kamphorst, and D. Ruelle, (1987) “Recurrence plots of dynamical systems,” *Epl*, vol. 4, no. 9, pp. 973–977.
- [12] N. Marwan, M. Carmen Romano, M. Thiel, and J. Kurths, (2007) “Recurrence plots for the analysis of complex systems,” *Phys. Rep.*, vol. 438, no. 5–6, pp. 237–329.
- [13] N. Marwan, (2017) “Cross Recurrence Plot Toolbox for MATLAB®.
- [14] M. I. Coco and R. Dale, (2014) “Cross-recurrence quantification analysis of categorical and continuous time series: an R package,” *Front. Psychol.*, vol. 5, p. 510.
- [15] A. M. Fraser and H. L. Swinney, (1986) “Independent coordinates for strange attractors from mutual information,” *Physical Review A*, vol. 33, no. 2, pp. 1134–1140.
- [16] M. B. Kennel, R. Brown, and H. D. I. Abarbanel, (1992) “Determining embedding dimension for phase-space reconstruction using a geometrical construction,” *Phys. Rev. A*, vol. 45, no. 6, pp. 3403–3411.
- [17] 児玉謙太郎・菊池雄介・山際英男, (2016) “全身協調バランス・スポーツ ‘スラックライン’ の身体技能,” *人工知能学会全国大会論文集 第30回全国大会*, p. 1M31.
- [18] L. Donath, R. Roth, L. Zahner, and O. Faude, (2016) “Slackline Training (Balancing Over Narrow Nylon Ribbons) and Balance Performance: A Meta-Analytical Review,” *Sport. Med.*, pp. 1–12.
- [19] S. Volery et al., (2017) “Traditional balance and slackline training are associated with task-specific adaptations as assessed with sensorimotor tests,” *Eur. J. Sport Sci.*, vol. 17, no. 7, pp. 838–846.
- [20] C. P. Gabel, J. Osborne, and B. Burkett, (2015) “The influence of ‘Slacklining’ on quadriceps rehabilitation, activation and intensity,” *J. Sci. Med. Sport*, vol. 18, no. 1, pp. 62–66.
- [21] D. G. Rutz and D. H. Benninger, (2020) “Physical Therapy for Freezing of Gait and Gait Impairments in Parkinson Disease: A Systematic Review,” *PM&R*, pp. 1–17.
- [22] L. Montull, P. Vázquez, L. Rocas, R. Hristovski, and N. Balagué, (2020) “Flow as an Embodied State. Informed Awareness of Slackline Walking,” *Front. Psychol.*, vol. 10, no. January, pp. 1–11.