

非線形時系列解析の応用：綱渡り競技 “スラックライン”における両手の協調性

児玉 謙太郎・山際 英男

Application of a nonlinear time series analysis : bimanual coordination in a balance sport *slackline*

Kentaro Kodama・Hideo Yamagiwa

Kanagawa University・Tokyo Metropolitan Tobu Medical Center

【要約】 本稿では、筆者が2016年6月に参加した米国心理学会の Advanced Training Institutes の Nonlinear Methods for Psychological Science というデータ解析に関する研修の報告と、そこで得られた知識、技術を筆者自身の研究に応用した事例について報告する。具体的には、非線形時系列解析手法のうち、本稿では、システムのダイナミクスにみられる“再帰性”のパターンに基づく分析（再帰定量化分析）を取り上げ、スラックラインという綱渡り競技をしている際の両手の協調性の定量化に応用した事例を紹介する。その結果、本手法を応用することで、スラックラインの身体技能のレベルを定量的に評価できる可能性が示唆された。本研究の知見は、スラックラインの身体技能、コツの解明につながるため、スラックラインの指導や実践の現場へのフィードバックが可能であり、より安全で効果的な訓練方法の提案につながると考えられる。また、本手法は、経済学・社会科学分野のデータにも応用されており、今後、様々なデータへの応用が期待される。

【キーワード】 システム論 非線形手法 再帰定量化分析 スラックライン 両手協調

目 次

第1章 アメリカでの非線形手法の研修

第2章 綱渡りデータへの非線形手法の応用

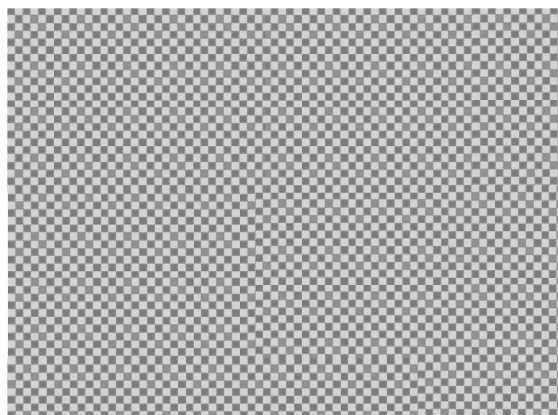
第1章 アメリカでの非線形手法の研修

第1節 アメリカ心理学会と Advanced Training Institute

アメリカ心理学会（American Psychological Association：以下、APA）とは、アメリカ合衆国の心理学分野の代表的な学会のひとつである。1892年に設立され、会員数15万人を超える、アメリカで最古かつ最大の心理学者の団体である。そのAPAが主催する Advanced Training Institutes（以下、

* 本研究は2016年度の神奈川大学経済貿易研究所による「研究支援」助成を受けて実施した。

図1 Cincinnati 大学内の会場（左）、Center of Cognition, Action and Perception の実験室（右）



ATI) では、様々な研究領域（統計、計算技術を含む）における研修、実践経験の機会を提供している。例えば、Structural Equation Modeling in Longitudinal Research、Big Data : Exploratory Data Mining in Behavioral Research などの研修がATIとして行われている。そして、今回、筆者が参加したATIがNonlinear Methods for Psychological Scienceである。

第2節 Nonlinear Methods for Psychological Science と Cincinnati 大学

Nonlinear Methods for Psychological Science（以下、NMPS）は、2006年より、毎年6月下旬の5日間、アメリカ合衆国オハイオ州にある Cincinnati 大学で開催されている（図1）。NMPSの企画・運営は、Cincinnati 大学の Center of Cognition, Action, and Perception（以下、CAP）の Michael Riley 教授、Tony Chemero 教授、Michael Richardson 准教授、Kevin Shockley 教授を中心としたメンバーによって行われている。CAPには、最先端の実験装置やエンジニアが集まり、新しいアイデアに基づく様々な研究が行われている（図1）。今回のNMPSは、Cincinnati 大学の Michael Richardson 准教授によってディレクションされ、Californian 大学（Merced 校）の Rick Dale 教授、Alex Paxton 博士、Northeastern 大学の Nikita Kuznetsov 博士、Cincinnati 大学の Michael Riley 教授、Kevin Shockley 教授と Tony Chemero 教授とのコラボレーションによって開催された。

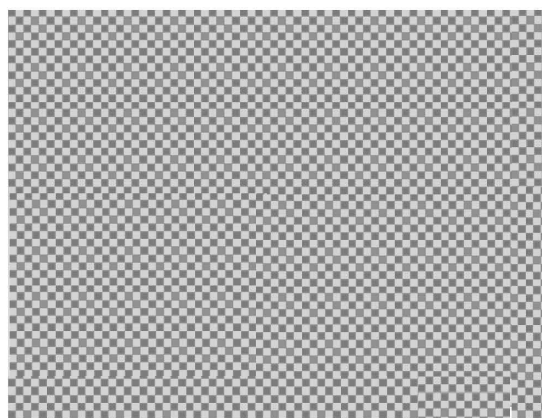
研修の対象者は、主に心理学を専攻する研究者や大学院生で、事前にCVを提出し、審査をパスした者（上限25名）が参加できる。2016年の参加者は、言語学、認知科学、計算機科学、リハビリテーション工学、臨床心理学など幅広い分野の研究者が世界各地から集った（図2）。NMPSは、非線形力学、複雑系科学の理論に関する講義と、それら理論に基づくデータ解析手法の演習からなる。講義は、講師陣らによって編纂されたテキスト（“Tutorials in Contemporary Nonlinear Methods for the Behavioral Sciences Web Book”、“Fractal Analysis : Statistical and Methodological Innovations and Best Practice”）や、最新の論文の知見も取り入れた内容となっている。コンピュータを使った演習は、講師陣が事前に用意した解析用プログラムが配布され、参加者が持参したデータ、あるいは、その場で作成したデータセットを用いて行われる。2016年の5日間の研修の内容は表1の通りである。

また、NMPSの期間中、参加者のうち希望する者は、自身の研究に関するポスターの設置が許可され、講師や参加者同士での自由なディスカッションの場が設けられていた（図3）。筆者も、自身のデータに対してどのような非線形解析が可能かを議論するため、ポスター2件を準備した（図3

図2 2016年の Nonlinear Methods for Psychological Science 講師陣と参加者



図3 会場に設けられたポスター発表スペース（左）、筆者らのポスター（右）



右)。そして、期間中、講師陣とのディスカッションを通し、様々なアドバイス、分析のヒントを得ることができた。そればかりか、その場で提案された解析アイデアを実装したプログラムが最終日に追加で配布されるなど、極めて親身かつ実践的なアドバイスとサポートを受けることができた。

以上、筆者が参加した研修の概要について報告した。以下では、そこで学んだデータ解析手法を実際のデータに応用した事例について報告する。具体的には、“スラックライン”という綱渡りを競技にしたバランス・スポーツを行っている際の両手の位置変化データに対して再帰定量化分析を応用した例である。本研究はスラックラインをバランス・トレーニングとしてリハビリテーションに取り入れている作業療法士との共同研究として実施された。また、本研究の成果の一部は、平成28年度神奈川大学経済貿易研究所科学研究事業申請奨励費の助成を受けて行われた。

表1 2016年 Nonlinear Methods for Psychological Science のスケジュール

1日目：6月20日	
9：00—9：30	Welcome, Orientation, and Introductions
9：30—11：00	Introduction to Nonlinear Methods & Self-Organization
11：15—12：30	Time Series & Nonlinear Methods：Fundamental Concepts
13：30—15：00	Introduction to Recurrence Quantification Analysis (RQA)
15：15—17：00	RQA Using Categorical Data：Examples & Exercises
2日目：6月21日	
9：00—10：30	Phase Space Reconstruction
10：45—12：00	RQA Using Continuous Data
13：00—14：00	Continuous RQA：Examples & Exercises
14：00—15：15	Cross-RQA for Categorical Data
15：30—17：00	Cross-RQA for Categorical Data：Examples & Exercises
3日目：6月22日	
9：00—10：00	Cross-RQA Using Continuous Data
10：00—10：45	RQA Using Categorical Data：Examples & Exercises
11：00—12：00	Cross-RQA Examples & Exercises
13：00—14：30	Sample Entropy & Exercises
14：45—16：45	Categorical & Continuous RQA Q&A Discussion and Student-Instructor Data Consultations
4日目：6月23日	
9：00—10：00	Introduction to Fractals：Fundamental Concepts
10：00—10：45	Fractal Time Series：Fractional Gaussian Noise (fGn)/Fractional Brownian Motion (fBm) Framework
11：00—12：00	Standardized Dispersion Analysis
13：00—14：00	Autocorrelation Function/Introduction to Detrended Fluctuation Analysis
14：00—15：00	Detrended Fluctuation Analysis
15：15—16：45	Spectral Analysis
5日目：6月24日	
9：00—10：30	Introduction to Multifractals and Multifractal Detrended Fluctuation Analysis
10：45—11：45	Nonlinear Methods in Context
11：45—12：30	Closing Presentation
13：30—15：30	Student-Instructor Data Consultations

第2章 綱渡りデータへの非線形手法の応用

第1節 背景と目的

スラックラインとは

スラックラインとは、ベルト状の綱（ライン）の上で、全身を協調させてバランスをとるスポーツである（図4）。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。競技としてのスラックラインでは、ラインの上で立ったり、歩いたりするだけでなく、ジャンプや宙返りといったアクロバティックな技を競うこともある。また、近年では、バランス・トレーニングとしても着目され、アスリートの体幹・バランス能力のトレーニングや、高齢者や運動障害者を対象としたリハビリテーションとしても導入されている（Donath, Roth, Zahner, & Faude, 2016）。

目的

本研究では、スラックラインの基本的な身体技能を明らかにすることを目的とする。これまで、スラックラインのバランス・トレーニングとしての効果研究は行われてきたが、身体技能に関する先行研究は少ない。関連研究としては、ラインへ外乱を与えた後のバランスの持ち直しを検討した事例研究がある（Huber & Kleindl, 2010）。しかし、この研究が対象としたのは、外乱後のバランスの回復という限定的な状況である。スラックラインの身体技能の基礎にある基本的な技能に関しては、筆者らが調べた限り、筆者らの予備的研究の他には見当たらない（Kodama, Kikuchi, & Yamagiwa, 2015, 2016）。

意義

本研究により、スラックラインの基本技能とその獲得のコツが明らかになれば、より効果的で安全な指導方法の提案にもつながるため、スラックラインの実践に対する意義がある。また、スラックラ

図4 スラックラインの実施風景



出所：Granacher et al. (2010)。

図5 本研究の仮説（左右方向での両手の協調）



インというバランス・スポーツは、楽しみながら実践できる“バランス・トレーニング”としても着目され、バランス能力や運動協調性の向上への効果が期待され、リハビリテーションや身体教育の実践にも応用され始めている。そのため、その基本技能やコツが明らかになれば、より多くの人にとって実践しやすいバランス・トレーニング、健康増進方法としても普及しうるため、社会的にも意義がある。

仮説

スラックラインの指導現場では、片脚立ちを続けるためのコツとして、両手を挙げ、左右に並行に動かすよう指導される。この経験的な知見を、運動学的に解釈すると、水平方向に両手を協調させて動かすことで、質量中心の位置を調整していると考えられる。本研究では、「一定の技能レベルに達すれば、片脚立ちの際、両手を結合させ協調的に動かす行動が観察される」と仮説を立てた（図5）。そして、以下に示す方法で、技能レベルの異なる実験参加者に片脚立ち課題を行ってもらい、両手の協調性を非線形時系列解析により定量評価し、仮説を検証した。

第2節 方法

実験参加者

スラックラインの基本的な身体技能を明らかにするため、片脚立ち課題を実験課題とし、技能レベルの異なる実験参加者に実験に参加してもらった。経験者として3年以上のスラックライン経験と指導者としての経験も有する男性1名（40歳、身長175cm）、初心者としてスラックラインを始めたばかりの男性1名（30歳、身長174.5cm）の計2名が実験に参加した。

実験装置

スラックライン専用の装置 SLACKRACK300（GIBBON SLACKLINES、長さ 3 m、高さ 30 cm、ラインの幅 5 cm）を使用して実験を行った。身体動作の計測には、光学式 3 次元モーションキャプチャーシステム（OptiTrack V120 : Trio, NaturalPoint, Inc.）を使用し、両手の人差し指の先と質量中心（Center of Mass, COM）付近に反射マーカールが取り付けられ、サンプリング周波数 120 Hz で計測された。

実験手続き

実験参加者には、できるだけ長く片脚立ちを続けるよう求めた。疲労によるパフォーマンスの低下や転倒を抑えるため 1 セッションは 3 分程度とし、適宜、休憩を挟みながら、合計時間が 20 分以内となるようにした。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にて承認されており、実験参加者には、同意のもと実験に参加してもらった。

分析

本稿では、今回得られたデータの一部に対し、非線形時系列解析手法のひとつである相互再帰定量化分析（Cross Recurrence Quantification Analysis, CRQA : Zbilut, Giuliani, & Webber, 1998）を応用した。

再帰定量化分析（Recurrence Quantification Analysis : RQA）は力学系の再帰特性や再帰パターンを定量化する非線形時系列解析手法であり、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 を実行するものである（Zbilut et al., 1998）。RQA は、時系列データ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系のダイナミクスの特性を定量化する手法であり（Shockley, 2005 ; Webber & Zbilut, 2005）、データのサイズや分布に限定されず様々なデータに対して実行できるという特徴をもつ（Zbilut & Webber, 1992）。

CRQA では、元の 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て、高次元位相空間にアトラクターを再構成し（Takens, 1981）、2 つの軌道の間の再帰構造を分析する（Zbilut et al., 1998）。RQA における“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とみなす。また、このように再帰を定義し、時系列の再帰状態を 2 次元平面図として視覚的に表現したものが Recurrence Plot (RP ; Eckmann, Kamphorst, & Ruelle, 1987) であり、縦軸、横軸ともに時系列の経過時間を示す。また、両軸それぞれを 2 つの時系列間でプロットしたものが Cross Recurrence Plot (CRP) である。

RP、RQA は、生理学・心理学・認知科学分野では心拍変動、重心動揺、個人間の身体協調など様々な種類のデータに应用されている（Webber & Marwan, 2014）。その他、経済学、社会科学分野でも应用されている（Marwan, 2008）。その傾向は、RP、RQA をプログラミング言語 Matlab で実行できるプログラムを提供している CRP Toolbox のダウンロード状況から窺える。2003 年 5 月～2005 年 10 月の 2 年半で経済学領域での利用目的でのダウンロード数は 41 件（Finance and markets で 35 件、Economics で 6 件）であったのに対し、2005 年 11 月～2008 年 5 月の 2 年半では経済学領域のダウンロード数は 55 件（Finance and markets で 41 件、Economics で 14 件）と増加傾向にある（Marwan, 2008）。RP や RQA を経済データに应用した論文としては、DAX や NASDAQ の終値データに RP と RQA を应用してバブル崩壊前の臨界点を検出しようとする研究（Fabretti & Ausloos, 2005）や、株式市場のデータに RP を应用して金融バブル、財政危機の検出を試みた研究（Addo, Billio,

& Guégan, 2013) などがある。

本研究で CRQA を応用する両手の協調など、身体運動研究分野における体肢間協調の分析では、運動の安定性、協調性についての有力な指標として再帰率 (%Recurrence) と最大線長 (Maxline) が用いられている (Pellecchia, Shockley, & Turvey, 2005)。再帰率は、位相空間における可能な再帰点に対する実際の再帰点の割合として求められ、0～100%の範囲の値をとる。再帰率はシステムにおける確率的ノイズの程度を表す指標であり、再帰率が高いほどシステムにおける確率的ノイズは小さいとみなされる。最大線長は、位相空間において最も長く再帰が続いた軌跡の長さであり、RP における対角方向の線の最大値である。最大線長はシステムの安定性、とくに体肢間協調においては外乱に対するアトラクターの強度 (結合強度) を表す指標であり、最大線長が長いほど協調における結合が強いとみなされる。

本研究では、CRQA によって定められる再帰状態を2つの時系列が“協調”している状態とみなし、スラックライン (片脚立ち) を行っている最中の両手の協調におけるノイズの程度、結合強度をそれぞれ再帰率、最大線長で評価する。CRQA の実行にあたっては、MATLAB toolbox 'CRP TOOLBOX' (version 5.17) (Marwan, 2013)、R パッケージ 'crqa' (version 1.0.5) (Coco & Dale, 2014) を用いた。本研究の仮説に従えば、技能レベルの高い経験者のほうが、両手協調の安定性は高く、両手の結合強度は強くなると予測されるため、再帰率、最大線長ともに値が大きくなると予想される。

第3節 結果と考察

両手と質量中心の位置

図6は、経験者 (上) と初心者 (下) の両手と COM の水平方向での変化を20秒間サンプルの時系列として抽出したものである。黒の実線が左手、破線が右手、青い実線が COM の時間変化を表している。経験者では、左右の手が水平方向に同期して動いていること、常にリズムに動いていることが見てとれる。一方、初心者では、左右の手の連動は見受けられず別々に動いていること、前半部分は動きが小さいが途中で2度ほど大きな動きが見られ両手がクロスしていることが分かる (図6)。

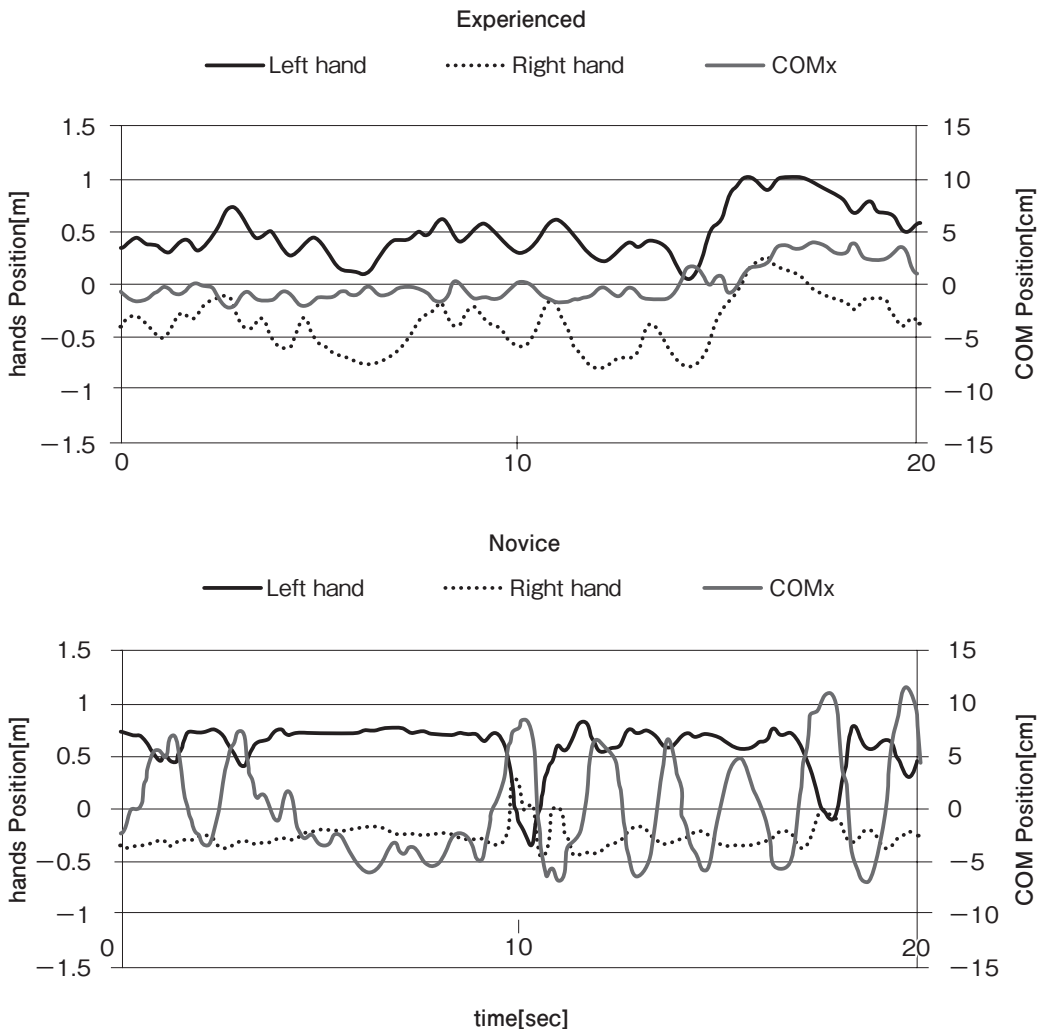
両手と COM の位置の変化を時系列で視認する限りでは、経験者では両手と COM の位置が反対方向 (逆位相関係) に動いているように見える (図6)。どちらが先行しているかは厳密には確認できないが、両手が左方向に動くときには COM は右方向へ動き、その逆も然り、両者はカウンターバランスをとるように動いているように見える。これに対して、初心者では両手と重心位置は別々に動いているように見える (図6)。

相互再帰定量化分析

図7は、経験者 (左) と初心者 (右) の CRP (図6と同じ20秒の区間) を表す。CRP では、平面の左下から右上にかけて延びる対角線は、2つの時系列が同期していることを示す。経験者では左右の手が同期しているのに対し、初心者では対角線上のプロットはあまり観察されず、左右の手が別々に動いている様子が見てとれる (図7)。また、CRP の対角線を境とする上下の対称性から両手の相互作用関係を評価できる。経験者では、対角線を挟んだ上下の三角形が左右対称となっており、とくに前半部分については両手が相互に作用し合っていると様子が観察される。一方、初心者では明確な対称性は観察されない (図7)。

図8は、図6と同じ20秒の区間に対し、CRQA を実行し、再帰率と最大線長を求めた結果である。図8左は、両手協調の安定性を指標する再帰率を実験参加者ごとに示している。経験者は3.65%、初

図6 両手と質量中心の位置変化（上：経験者、下：初心者）



心者は0.65%と経験者のほうが再帰率は高かった。この結果より、片脚立ち課題において経験者のほうが両手の協調が安定していることが示唆された。図8右は、両手の結合強度を指標する最大線長を実験参加者ごとに示している。経験者は97、初心者は67と経験者のほうが最大線長は長かった。この結果より、片脚立ち課題において経験者のほうが両手の協調の結合が強いことが示唆された。これらの結果は、事例的データの分析結果ではあるものの、本研究の仮説を支持すると解釈される。

今後の展望

以上の事例的データの分析結果から、スラックラインの片脚立ちにおける技能レベルの指標として、両手の協調性が有効であり、それは相互再帰定量化分析という非線形時系列解析によって定量的に評価できる可能性が示唆された。今後、この可能性を量的に検証するためには、本実験を実施し、サンプル数を増やす必要がある。

また、今回は線形手法（相互相関など）との直接的な比較は行っていないが、今後、どのような

図7 クロスリカレンスプロット（左：経験者、右：初心者）

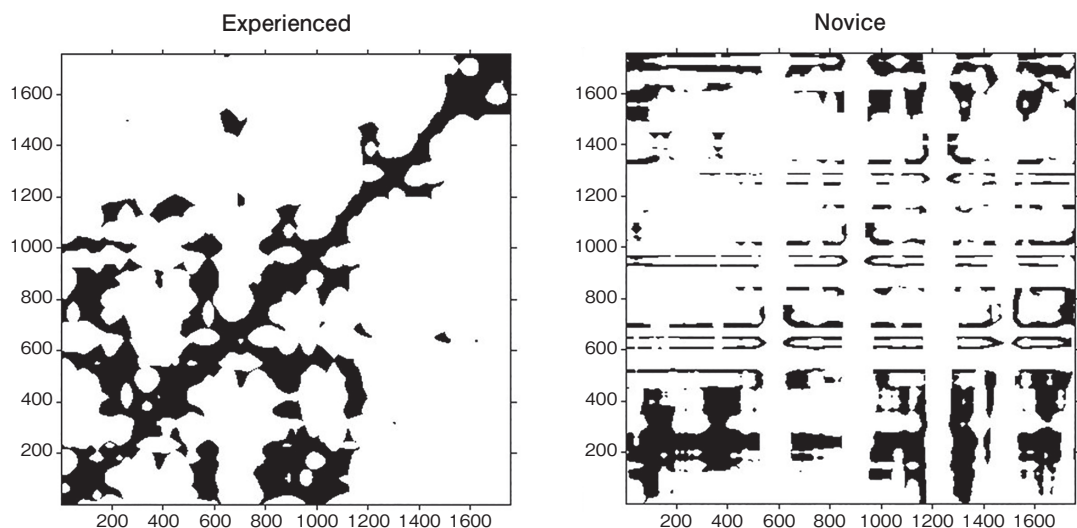
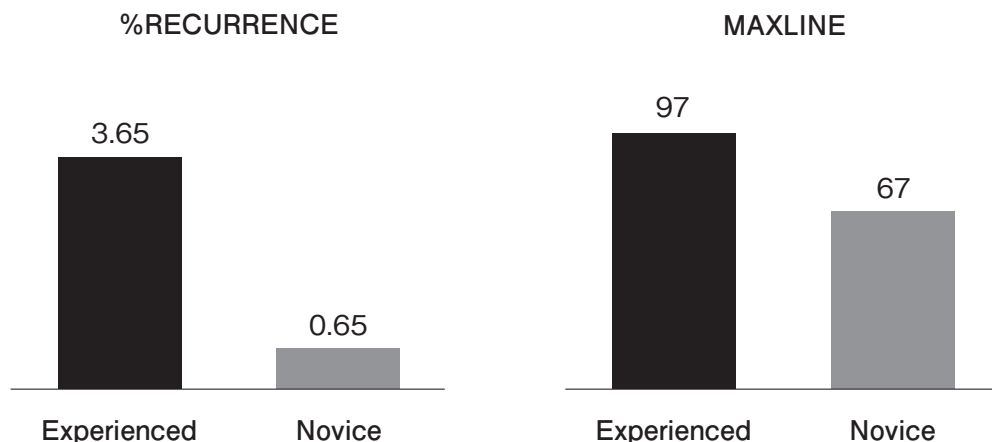


図8 CRQA によって算出された指標（左：再帰率 %RECURRENCE、右：最大線長 MAXLINE）



データに対して線形／非線形手法が有効なのか、非線形手法のメリット、デメリットを見定めながら、様々なデータに応用していくことが期待される。先述の通り、同手法は、心理学・認知科学分野のみならず、経済学・社会科学分野でも応用されている（Guhathakurta, Marwan, Bhattacharya, & Chowdhury, 2014；Marwan, 2008）。また、本稿では、相互再帰定量化分析という手法の概要と、一部その事例的な報告を行ったが、今後、同手法の詳細や、アメリカで研修を受けた他の非線形時系列解析手法（フラクタル解析など）についてもサマリーして報告できる機会があれば幸いである。

[謝辞]

本稿で報告したアメリカでの研修は、アメリカ心理学会 Advanced Training Institutes からの経済

支援、及び、神奈川大学経済学部学会等出張旅費（国外）を受け、参加することができた。また、本研究の一部は、平成28年度神奈川大学経済貿易研究所科学研究事業申請奨励費の助成によって行われた。ここに感謝の意を表す。

●引用文献

- Addo, P. M., Billio, M., & Guégan, D. (2013). Nonlinear dynamics and recurrence plots for detecting financial crisis. *The North American Journal of Economics and Finance*, 26, 416–435.
- Coco, M. I., & Dale, R. (2014). Cross-recurrence quantification analysis of categorical and continuous time series: an R package. *Frontiers in Psychology*, 5, 510.
- Donath, L., Roth, R., Zahner, L., & Faude, O. (2016). Slackline Training (Balancing Over Narrow Nylon Ribbons) and Balance Performance: A Meta-Analytical Review. *Sports Medicine*, 1–12.
- Eckmann, J.-P., Kamphorst, S. O., & Ruelle, D. (1987). Recurrence Plots of Dynamical Systems. *Europhysics Letters*, 4 (9), 973–977.
- Fabretti, A., & Ausloos, M. (2005). Recurrence plot and recurrence quantification analysis techniques for detecting a critical regime. *International Journal of Modern Physics C*, 16 (5), 671–706.
- Granacher, U., Iten, N., Roth, R., & Gollhofer, A. (2010). Slackline training for balance and strength promotion. *International Journal of Sports Medicine*, 31(10), 717–723.
- Guhathakurta, K., Marwan, N., Bhattacharya, B., & Chowdhury, A. R. (2014). Understanding the Interrelationship Between Commodity and Stock Indices Daily Movement Using ACE and Recurrence Analysis. In *Translational Recurrences: From Mathematical Theory to Real-World Applications* (pp. 211–230). Springer International Publishing.
- Holden, J. G., Riley, M. A., Gao, J., & Torre, K. (Eds.). (2013). *Fractal Analyses: Statistical and Methodological Innovations and Best Practices*. Frontiers E-books.
- Huber, P., & Kleindl, R. (2010). A case study on balance recovery in slacklining. *ISBS-Conference Proceedings Archive*, (1990), 1–4. Retrieved from
- Kodama, K., Kikuchi, Y., & Yamagiwa, H. (2015). Whole-body coordination skill for dynamic balancing on a slackline. In *Post-proceedings of Second International Workshop on Skill Science*, New Frontiers in Artificial Intelligence. Springer.
- Kodama, K., Kikuchi, Y., & Yamagiwa, H. (2016). Relation between bimanual coordination and whole-body balancing on a slackline. In *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 794–799).
- Marwan, N. (2008). A historical review of recurrence plots. *The European Physical Journal Special Topics*, 164 (1), 3–12.
- Marwan, N. (2013). Cross Recurrence Plot Tool box. Available online at: <http://tocsy.pik-potsdam.de/CRPtoolbox>
- Pellicchia, G. L., Shockley, K. D., & Turvey, M. T. (2005). Concurrent cognitive task modulates coordination dynamics. *Cognitive Science*, 29 (4), 531–57.
- M. Riley & G. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences*. National Science Foundation.
- Shockley, K. D. (2005). Cross recurrence quantification of interpersonal postural activity. In M. Riley & G. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 142–177).
- Takens, F. (1981). Detecting strange attractors in turbulence. In *Lecture Notes in Mathematics* (Vol. 898, pp. 366–381). Springer Berlin Heidelberg.
- Webber, Jr., C. L., & Marwan, N. (Eds.). (2014). *Recurrence Quantification Analysis: Theory and Best Practices*. Springer. Retrieved from
- Webber, C. L., & Zbilut, J. P. (2005). Recurrence quantification analysis of nonlinear dynamical systems. In M. Riley & G. Van Orden (Eds.), *Tutorials in contemporary nonlinear methods for the behavioral sciences* (pp. 26–94). Retrieved from
- Zbilut, J. P., Giuliani, A., & Webber, C. L. (1998). Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environ-

ments using cross-recurrence quantification. *Physics Letters A*, 246(1–2), 122–128.

Zbilut, J. P., & Webber, C. L. (1992). Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. *Physics Letters A*, 171(3–4), 199–203.