

[研究助成 (A)]

過剰訓練に伴う運動障害の機能正常化トレーニングシステムの創出

Development of Diagnostic and Training Methods for Movement Disorders Associated with Overtraining

2231008



研究代表者 芝浦工業大学 デザイン工学部 助教 奥 貴 紀

[研究の目的]

高度な外科医や職人・音楽家など、熟練者による巧緻な道具操作は、人間社会の医療・産業・文化を支える基盤である。しかし、高難度な技能を習得するために巧緻動作を長期間に渡り反復して行うトレーニングは、難治性の脳神経疾患であるタスク特異的局所性ジストニア (Task Specific Focal Dystonia: TSFD) の発症の引き金となり得る。TSFD を発症すると、熟練者が普段反復して行っている巧緻動作の精密な運動制御が損なわれるため、TSFD は時に職業生命を絶つ深刻な疾患であり、早期発見法や治療法の確立が渴望されている。しかし、TSFD の診断には病態についての知識に加え、対象となるタスクの身体動作についての知識が必要とされるため、非専門家の医師にとって、診断は非常に困難である。TSFD の治療法として、ボトックス注射や投薬、感覚運動機能のリトレーニング (再訓練) などさまざまな手法が提案されているが、決定的な治療法は確立されていない。

本研究ではピアニストの音楽家のジストニア (Musician's Dystonia: MD) を対象として、非専門家でも比較的使用が容易なビデオベースでの診断補助法、リハビリテーション法について検討する。MD は TSFD の一形態であるが、他の TSFD の形態と比べてきわめて発症率が高く、書癱の発症率が 0.08% なのに対して、プ

ロの演奏家における発症率は 1~2% であるといわれており、早期発見法・治療法の開発の意義は大きい。

[研究の内容, 成果]

本研究では、音楽演奏の非専門家の医師による局所性ジストニアの診断補助を目的とした、1. 異常検知アルゴリズムを用いた局所性ジストニアの診断補助システムの開発、及び、2. 手指関節キネマティクスのシナジーの、健側手と患側手の差異に着目した、神経リハビリテーション手法についての検討に取り組んだ。

手 法

初めに、両研究に用いられた、ピアノ演奏の計測システム、ビデオベースのモーションキャプチャを用いた手指キネマティクスの計測手法について説明する。

ピアノ演奏時の手指キネマティクス計測システム

TSFD の特徴として、症状の現れる部位に軽く触られる、薄い手袋を装着するなど、感覚入力を変化させることで、TSFD の症状が軽減される感覚トリック (Sensory Trick) と呼ばれる現象が知られている。そのため本研究では、ピアノ演奏時の自然な感覚入力に影響を与えないように、打鍵の検出に非接触の移動量計測センサを用い、手指のキネマティクスの計測に、一般的な光学マーカを用いたモーション

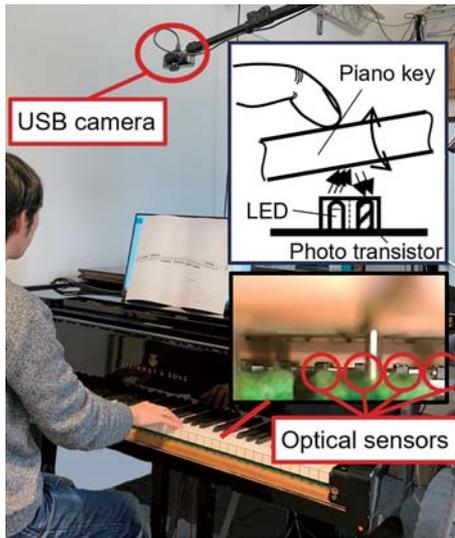


図1 ピアノ演奏の計測システム

キャプチャではなく、ビデオ映像から手指姿勢を推定するマーカレスモーションキャプチャを用いた（図1）。使用した鍵盤移動量計測センサは、我々の研究チームで開発されたものであり、1ミリ秒の時間分解能と0.01 mmの空間分解能で、88個のピアノ鍵盤すべての動きを記録する。演奏中の手指のビデオ映像は、ピアノの鍵盤直上に設置した市販のUSBカメラ（BRIO, Logicool社）により、解像度1920×1080、サンプリングレート60 Hzで記録した。記録された演奏中の手指ビデオ映像から、MediaPipe PythonライブラリのHand landmark detectionを使用して、手指のキネマティクスを推定した。MediaPipeは、映像や音声などの時系列データを処理するための機械学習パイプラインを構築するためのフレームワークである。MediaPipeを使用することで、各指の関節位置、指先と手首の位置を含む、手の21の解剖学的ランドマークの位置を、各ビデオフレーム上の3次元座標で検出できる。ピアノの鍵盤の動きと手指ビデオ映像は、計測システムの内部クロックによって同期して記録された。

計測対象者・計測タスク

健常なピアニスト20名（25.2±4.1歳、男性30%）と、MDを患うピアニスト16名（47.0±10.9歳、男性56.2%）が計測に参加した。被験

者は全員、音大でピアノ演奏の教育を受けている、もしくはピアノ演奏の修士号を持つプロのピアニストであった。罹患した手や指は患者ごとに異なる。

被験者はグランドピアノ上で11個のピアノ音列を演奏した。これらのピアノ音列には、音階、アルペジオ、トリルなどの単音のみで構成された音列と、3度の和音、5音和音、オクターブの和音連打など、和音で構成された音列の両方が含まれている（図2）。これらの音列は実際のピアノ演奏においても頻繁に使用されているものである。被験者は指定された運指で演奏するよう指示された。被験者は、各音列を2つの音量レベル（ppとff）と2つのテンポ（固定テンポと各参加者の可能な最速テンポ）で演奏した。各音列は、右手と左手で鏡合わせの指使いとなるように、それぞれ演奏された。

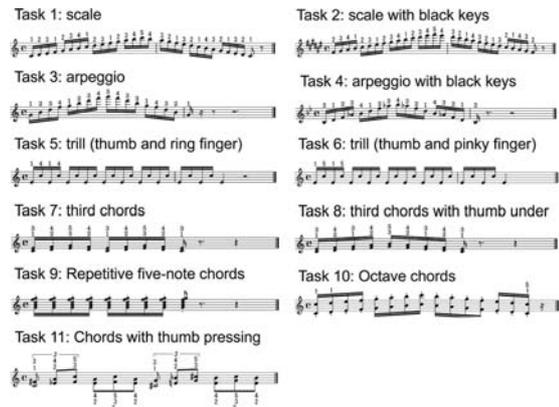


図2 演奏課題

機械学習を用いた異常検知アルゴリズム

ビデオベースの診断補助システムの開発のため、オートエンコーダを用いた異常検知システムを開発した。オートエンコーダとは、入力データと出力データが同一となるよう、入力データを再構成するように学習されたニューラルネットワークである。入力データの特徴量を抽出するため、中間層が入力・出力層よりも次元が少ない砂時計様の構造を持つ。入力データの特徴量を抽出するためのネットワーク構造は、入力層から中間層に向かって学習され（エ

ンコード), 特徴量から元のデータに展開するためのネットワーク構造は, 中間層から出力層に向かって学習される (デコーダ)。そのため, 学習済みのオートエンコーダは, 学習データセットとは異なる特徴を持つ見慣れないデータを再構成する際に, 学習データセットに含まれない特徴をうまく再構成できないため, 再構成精度が低下する。この特性により, オートエンコーダは異常検知によく用いられている。本研究では, 健康なピアニストの演奏時の手指キネマティクスを学習データとして用いてオートエンコーダの学習を行い, その再構成精度に基づいて MD 患者と健常ピアニストの演奏の識別を試みた。

各演奏の最初の打鍵から最後の離鍵までに対応するビデオフレームを抽出し, 各フレームに MediaPipe の Hand landmark detection を適用することで, 手指の 21 点のランドマークの 3 次元位置の時系列データを得た。各演奏データに, スプライン補間によりデータ点数を 128 点にリサンプリングする時間正規化を行うことで, 各演奏の運動データを $21 \times 3 \times 128$ のテンソルに整形し, オートエンコーダへの入力データとした。オートエンコーダは 7 層の畳み込みエンコーダと 128 次元の中間層, 7 層の畳み込みデコーダで構成された。異なるカメラ設置条件に対してロバストな推定結果を得るために, 起こりうるカメラの取り付けのずれをシミュレートする, MediaPipe によって抽出された座標の回転, 垂直方向と水平方向のスケーリング, およびそれらの組み合わせによるデータ拡張を行った。健常ピアニストの計測データをランダムに訓練用データ 80%, 検証用データ 20% に分割し, 検証データの平均再構成誤差 $+2$ 標準偏差を閾値とし, 再構成誤差が閾値を超えたものを異常データとして判別した (図 3)。

健側手・患側手の手指患側キネマティクスシナジールの算出アルゴリズム

ヒトの中樞神経系は, 身体の個々の筋や関節を直接個別に制御するのではなく, シナジーと

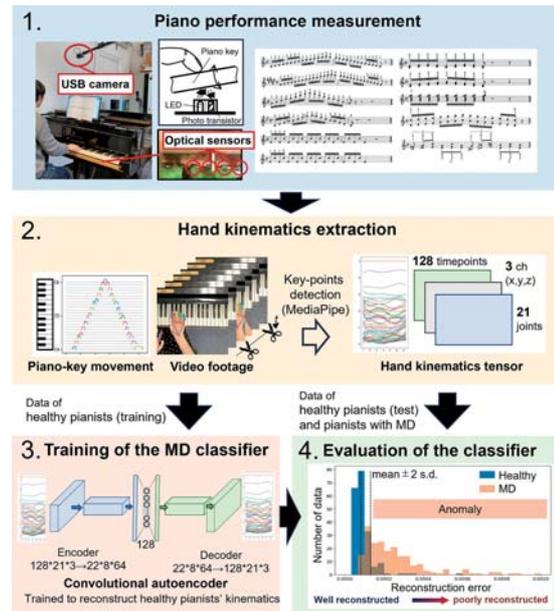


図 3 異常検知アルゴリズム概要

呼ばれる少数の関節・筋などの協調パターンを制御し, 巧緻な身体運動を実現していることが示唆されている。近年, 脳神経疾患に伴う運動障害とシナジールの異常変容との関連が注目されており, 脳卒中やパーキンソン病などの脳神経疾患に伴うシナジール異常が数多く報告されている。同様に, TSFD においても筋レベル・キネマティクスのレベルでシナジールが変容することが我々の研究で明らかになっていることから, 本研究では, このシナジールの観点からの, TSFD 患者の健側手・罹患手の非対称性を評価した。

手指キネマティクスシナジールの抽出のため, 健常ピアニスト, MD 患者それぞれの各演奏動画のビデオフレームに MediaPipe の Hand landmark detection を適用することで, 手指の 21 点のランドマークの 3 次元位置の時系列データを得た。抽出されたランドマークの時系列データに主成分分析 (Principal Component Analysis: PCA) を適用することで, 関節のキネマティクスの協調パターン (主成分ベクトル) と, その協調パターンの活動量 (主成分得点) に分解した。この際の主成分の数は, キネマティクスデータの分散に関する第 1 主成分が

らの累積寄与率が 90% を超える個数とした。この協調パターンと活動量を、それぞれシナジーベクトル、シナジースコアと定義する。各ピアニストの左右両方の手の演奏動画から抽出された各シナジーベクトルどうしの内積を取り、内積の値が最も大きくなったものを、左右の手の対応するキネマティクスシナジーとした。対応する手指キネマティクスシナジーベクトルどうしの内積をシナジーの類似度とし、健常ピアニストと MD 患者の比較により、MD による手指キネマティクスシナジーの非対称性を評価した。

結果

ビデオベースでの MD 診断補助アルゴリズム

健常ピアニストの演奏中のキネマティクスデータを学習させたオートエンコーダを用いて、各ピアノ演奏課題ごとに、異常検知アルゴリズムの感度と特異度を評価した。演奏課題とした 11 のタスクのうち、音階、アルペジオ、3 度の和音打鍵を含む 4 つの演奏タスク (Task 1, 3, 4, 7) において、感度はチャンスレベルを上回った (50% 以上)。算出された感度と特異度は、それぞれ課題 1 (音階) で 66% と 79%、課題 3 (アルペジオ) で 82% と 78%、課題 4 (黒鍵を含むアルペジオ) で 91% と 95%、課題 7 (3 度の和音打鍵) で 91% と 88% であった。分類精度が最も高くなったタスクは、黒鍵と白鍵の両方の打鍵を要求される、精度の高い指先の動きの制御が要求され、かつ、親指が他の指の下を通過する、ピアノ特有の手指運動である「指くぐり」を含むものであった。残りの 7 つの課題では、オートエンコーダの感度はチャンスレベル (50% 未満) を下回っていた (図 4)。

手指キネマティクスシナジーの非対称性

手指ランドマークの時系列データに主成分分析を適用したところ、9 割を超える計測データにおいて、4 つの主成分での累積寄与率が 90% を超えたことから、主成分の個数を 4 個と定め、キネマティクスシナジーの抽出を行った。健常

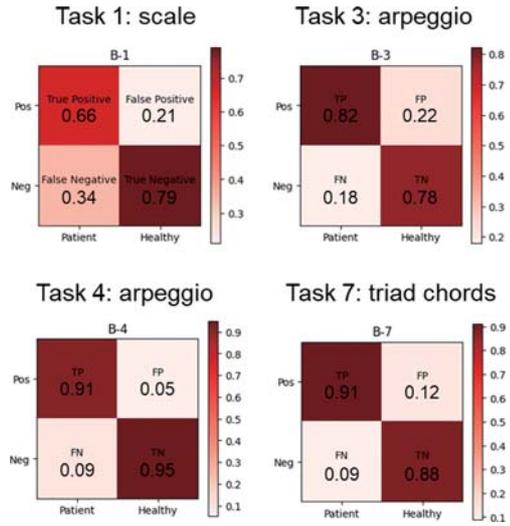


図 4 異常検知アルゴリズムの分類結果

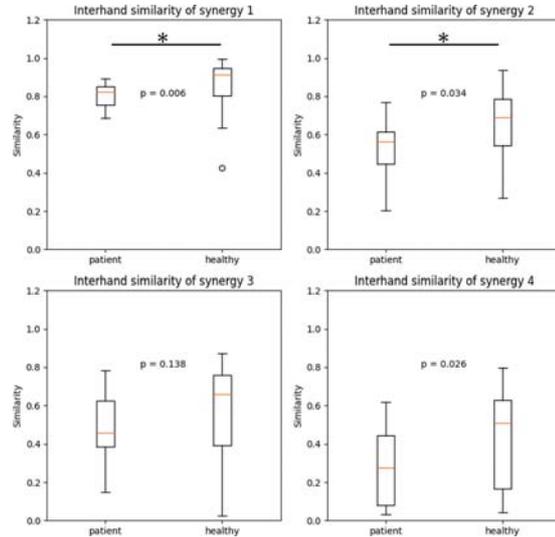


図 5 手指キネマティクスシナジーの非対称性

ピアニストと MD 患者の手指キネマティクスシナジーの非対称性を評価したところ、第 1、第 2、第 4 キネマティクスシナジーにおいて、MD 患者は健常ピアニストと比較して、有意に左右の手の間の非対称性が高くなった (図 5)。

まとめ

本研究では、市販のビデオカメラからピアノ演奏中の手指キネマティクスを計測出来るシステムを開発し、異常検出を用いて、ピアニストの MD を約 90% の精度で検出できる機械学習アルゴリズムを提案した。MD の診断は、症状

が課題特異的に現れることや、音楽演奏における身体動作についての専門的な知識が必要なため、非専門家には診断が難しく誤診されやすいとされてきた。本研究で提案した方法は、演奏中のビデオ画像のみを用いたにもかかわらず、MDの有無によるピアニストの動作分類において高い精度を達成した。本手法のユニークな点は、MDの検出に教師なし学習に基づく異常検出法を用いた点にある。MDの有病率は1%程度と推定されているため、健康なピアニストから演奏データを収集することは、患者からデータを収集するよりもはるかに簡単である。教師あり学習の場合、正常と異常のラベルをアノテーションされた演奏データが必要となるが、ラベルの数が著しく不均衡な場合、少数ラベルの特徴が無視される傾向があり、学習データの数を増やしても精度を向上させることは困難である。これに対し、本研究では、教師なし学習を用いた異常検出手法により、健康ピアニストデータの特徴を学習することで、TSFDを罹患したピアニストの弁別を可能とした。そのため、健康ピアニストのデータセットを拡張することで、更なる精度が期待できる。

また、市販のビデオカメラ映像と多変量解析を用いて、MD患者の手指キネマティクスのシナジーの非対称性が健康ピアニストと比較して大きくなることを示した。MD患者の手指計測を行った従来研究では、主に曲げセンサを内蔵したデータグローブや、光学式の反射マークを手指に取り付けるマーク型のモーションキャプチャを用いて、手指運動の計測が行われているが、感覚入力を変化させることで、TSFDの症状が軽減される感覚トリックの現象が発生することから、その症状をそのまま捉えることが困難であった。そのため本研究において、市販ビデオカメラを用いた方法で、被験者の手に何も付与することなく、手指キネマティクスを計測し、シナジーの非対称性を示したことの意義は大きい。前半の異常検知アルゴリズムによる診断補助と組み合わせることで、更なる精度

の向上が図れるほか、シナジーの非対称性を正常化するようなバイオフィードバック訓練を用いた神経リハビリテーション手法として活用し得る。

今後の方針

本研究では、異常検知によりMDを罹患したピアニストを判別出来ることを示したが、ニューラルネットワークの特徴上、どのようなキネマティクスの特徴量を用いて弁別が行えたのかは明らかではない。Grad-CAMのような説明可能なAI(XAI)の開発で用いられている手法を用いて、ニューラルネットワークがどの部分をMDの弁別のための特徴量として用いたかを明らかにすることで、音楽の非専門家の医師がMDの診断を習得する手がかりとなる他、適切な治療法への示唆を与え得る。

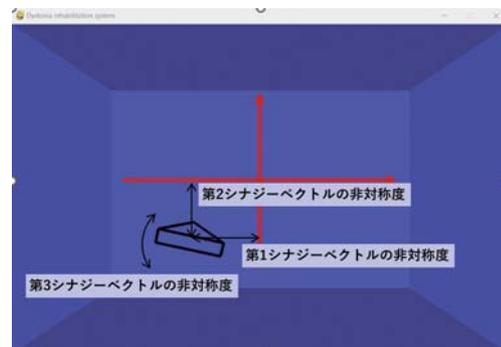


図6 手指シナジーフィードバックシステムのプロトタイプ

また、本研究で明らかにしたMDピアニストの手指キネマティクスシナジーの非対称性は、バイオフィードバックを用いた神経リハビリテーション手法として活用し得る。図6のような、健側と患側の非対称性をリアルタイムに可視化し、正常化を図るビデオゲーム様のバイオフィードバックシステムのプロトタイプを開発したが、開発が難航したこともあり、期間中に患者による効果検証までに至らなかった。今後はMD患者を対象として、開発したバイオフィードバックトレーニングの効果検証にも取り組む。

[成果の発表, 論文など]

- [1] T. Oku, S. Furuya, A. Lee, E. Altenmüller, Video-based diagnosis support system for pianists with Musician's dystonia, *Frontiers in Neurology* (under review)