

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 17 日現在

機関番号：23902

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23652040

研究課題名(和文) 幼児・児童のピアノ打鍵技能の発達過程の解明

研究課題名(英文) Clarification for children to develop the process of keystroke skill for piano

研究代表者

石垣 享 (Ishigaki, Tohru)

愛知県立芸術大学・美術学部・准教授

研究者番号：60347391

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、児童がピアノの音量を調節する際の上肢動作を、3次元動作解析を用いて明らかにすることであった。このために用いた課題は、ドミソの和音をピアノシモからフォルティシモまで8段階に増加させることであった。その結果、手掌部の前後動作が音量の段階的コントロールに強く影響を与えることが示された。利き腕である右手の打鍵技能は、加齢の影響を受けるが、左手のそれは訓練の影響を受けることが判明した。

研究成果の概要(英文)：This study was intended to clarify the upper-limbs operation by three-dimensional motion analysis for controlling sound dynamics on piano. The experimental tasks were playing a C major chord eight times in a row to change dynamics gradually from pianissimo to fortissimo. The results were clearly indicated that back and forth operation of a hand affects strongly the gradual control of sound volume. It was found that the keystroke skill of right hand, dominant hand, is subject to aging and that of left hand is affected by training.

研究分野：人文学

科研費の分科・細目：芸術学・芸術学・芸術史・芸術一般・音楽学

キーワード：感覚と運動発達学 生体情報解析 ピアノ 3次元動作解析 筋電図 バイオフィードバックレッスン

1. 研究開始当初の背景

(1) 芸術教育で実施されている師弟間における口頭伝承は、過去には競技スポーツ分野でも中心的に行われていたが、現在では指導法の効果を科学的な視点から検証し、このエビデンスを蓄積することでレベル評価が行いやすいトレーニング環境が構築され、競技力の底上げとトップアスリートの競技レベルが向上した。本試みは、このようなスポーツ科学の視点を、初めて芸術の世界に持ち込む事である。これまでのピアノ教育では、「腕の力を抜く」という指導上の表現が多く認められるが、果たして腕のどの筋を？どの時点で？どのように弛緩させているのかは不明であった。

(2) ヒトの感覚および随意的な筋活動に関連する神経系の発達、有名なスキヤモンの発育発達曲線によると生後間もない頃から幼児の期間に著しく、児童のレベルになると急速に低下する。いわゆる、幼時の時期は、感覚の認識および骨格筋の使い方が急速に高まる時期である。

(3) 幼少期の楽器演奏技法の発達に科学的なアプローチを加えることは、技能発達を効果的に支援し、また技能の発達過程の科学的エビデンスを獲得できるのではないかと考えられた。

2. 研究の目的

本研究は、ピアノを学習している幼児・児童を対象に、ピアノでの音量調節における上腕部の打鍵様式を、3次元動作解析および筋電図によって数値化して評価をする。この手法によって、これまで未知であった児童の打鍵技能の発達過程を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 実験条件

実験参加者は、4~13歳までの児童および生徒、ピアノ専攻の大学院生であった。全ての測定は、グランドピアノを用いて行った。実験参加者は、ピアノに対して各自の体格に適した高さに調整された椅子に腰掛け、足の届かない児童には踏み台を利用した。実験参加者は指慣らしを行った後に、ドミソの和音（左手ハホト音、右手2点ハ2点ホ2点ト音）でピアノシモからフォルティシモまでを8段階、約20~30回/分の間隔で弾く課題を両手同時、右手、左手の順に各回3~5回行った。

(2) 3次元動作解析

ピアノ打鍵時の上肢は3~5台の高速度カメラ(GV200)を用いて撮影した。撮影条件は、撮影スピード毎秒150コマ、露光時間1/500秒とした。カメラ間の同期は、接続されているパソコンの動作解析ソフトウェア

(Carrot)で行った。マーカーポイントは、第7頸椎横突起(首)、以下両側の肩峰突起部(肩)、上腕骨遠位端外顆(肘)、尺骨茎状突起(手首)、第3指中手骨頭(手)の9点であった。動作解析ソフトウェア(Carrot)を用いてDLT法により、各部位の3次元座標値を算出した。なお、キャリブレーションは、縦30cmおよび横40cmの矩形物を実験に先立ち撮影した。

(3) 表面筋電図(EMG)

表面筋電図(EMG)は、多用途生体計測器およびアクティブ電極を用いて測定した。被験筋は、両側の僧帽筋肩部、三角筋中部、上腕二頭筋、上腕三頭筋、長橈側手根伸筋、橈側手根屈筋とした。測定条件は、感度が10uV/mmで5~500Hzのバンドパスフィルターで、1kHzでサンプリングをした。EMG波形は、RMS処理により整流化し、各打鍵時のピーク音から200ms以前の区間の各部位の積分筋電図(IEMG)をデータとして用いた。

(4) 音圧測定(SPL)

音圧測定(SPL)は、ピアノの天板下に計測用マイクロホンを設置し、マイクロホン、アンプおよびサンプリングボードを経由して解析ソフトによってパソコンに取り込んだ。音圧のサンプリングレートは50kHzとし、音圧5dBの立ち上がりトリガーにて測定開始とした。SPLは、A特性フィルターで処理した後に、RMS処理により整流化したものをデータとして採用した。

(5) データ処理

全てのデータは、各項目の8段階中の最大値を100%として標準化した。

身体各部位の最大変位、最高速度、IEMGおよびSPLの8段階の調節は、身体の段階的調節能力と考えられ、これはSpearmanの順位相関分析(以降、Sr)により検討した。

発揮されたSPLとその他のパラメータとの関係は、発揮音圧に関わった動作部位と考えられ、Pearsonの積率相関分析(以降、Pr)を行った。

大学院生の結果を基にして、音量調節における打鍵動作の標準化を行い、各児童・生徒のデータを判断する基準とした。

4. 研究成果

(1) 標準打鍵動作の作成

研究当初は、子ども達の打鍵動作の測定に主眼を置いていたが、その結果に統一性は無く、何処に基準を置いて評価すればよいのかが不明であった。この分野の専攻研究では、初心者と比較して熟練ピアニストは音量を獲得するのに肩関節の回転に急激なブレーキをかけ、肘及び手首に生じる運動依存性トルクを獲得していた(Furuya, S., Kinoshita, H. (2008). Exp Brain Res, 185, 581-593.)。また、この動作を言い換えると、指先を中心

とした腕全体の回転運動であることが示されていた。そこで研究の再現性のために、急遽、ピアノ専攻大学院生 10 名に対して、子ども達と同じ課題を行わせた際の動作を解析し、これを基に標準打鍵動作を作成した。大学院生における SPL の調節能は、 $Sr=0.922 \pm 0.051$ とほぼ直線的に音量を調節していることが判明した。

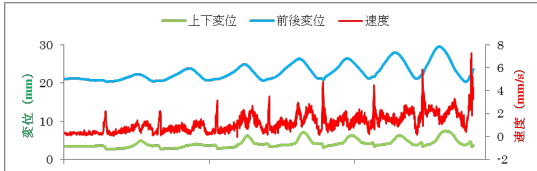


図 1. 大学院生の打鍵動作における手掌部の速度と上下および前後変位の変化

解析された動作のフェーズ分け
解析された動作のフェーズ分けは、鍵盤に最も近い手掌部の動作を基にして分類した(図 2)。

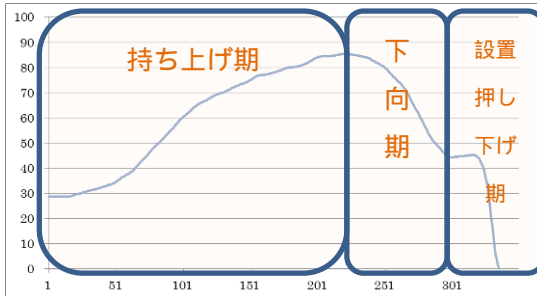


図 2. 大学院生の手掌部の打鍵動作のフェーズ分類

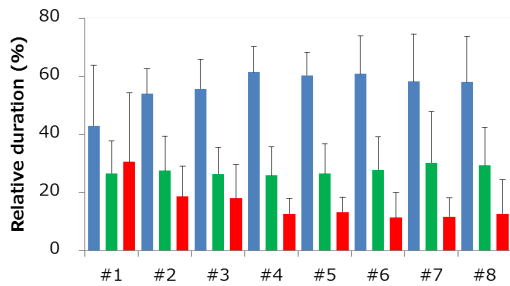


図 3. 各フェーズ時間の相対割合(青が持ち上げ期、緑が下向期、赤が設置押し下げ期)

その結果、1 回目(ピアノシモ)とそれ以降の打鍵(2~8 回)では、各フェーズ時間の相対割合が異なることが判明したことより(図 3) 1 回目とそれ以外の平均フェーズ時間割合に対する動作の標準化を行った。

手掌部の上下(図 4)および前後(図 5)の標準化動作は、ピーク部の高さは、きちんと 8 段階の順に並んでいた。この結果により、ピアノの音量を徐々に増加させる際の手掌部の動作は、上下および前後に対して、徐々に変位を増大させることで行われているこ

とが判明した。

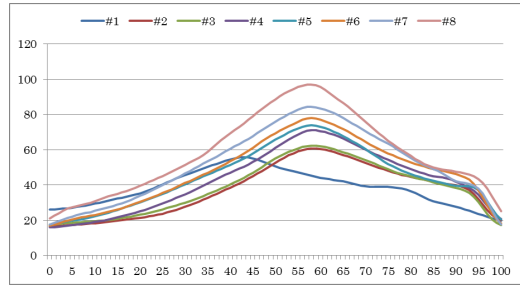


図 4. 手掌部の標準的上下動作

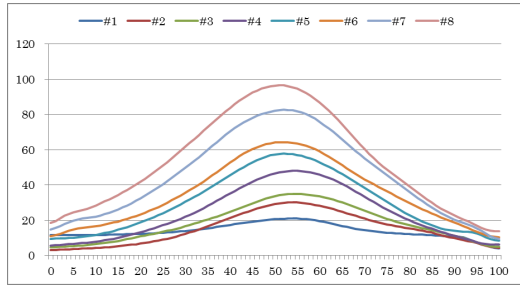


図 5. 手掌部の標準的前後動作

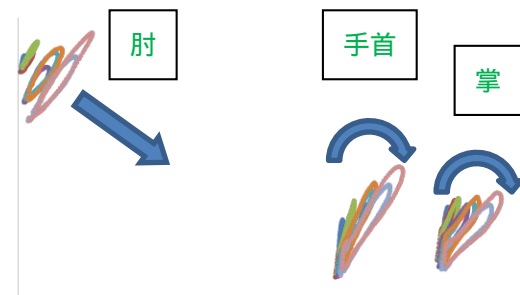


図 6. 肘、手首および手掌部の標準矢状面軌跡

肘、手首および手掌部の標準矢状面軌跡から、大学院生は、音量を増大させるために肘は直線的に、手首および掌は最下点を中心とした円形で前方にシフトすることが判明した(図 6)。

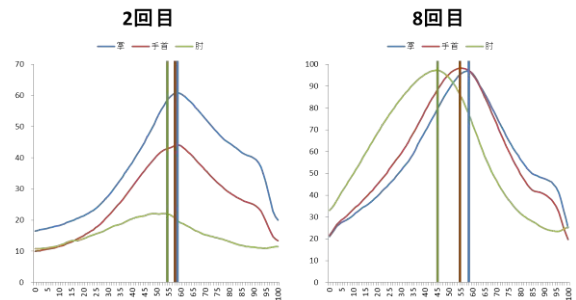


図 7. 肘、手首および手掌部の標準上下動作のピーク位相差

肘、手首および手掌部の標準上下動作のピーク位相差の結果から、音量を増大させるために肘から抹消に向けて順に持ち上げていく位相差が大きくなる事が判明した(図 7)。これは言い換えると、むちがしなるような動作が大きくなるといえる。

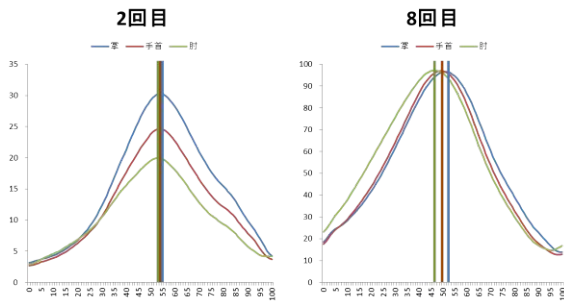


図 8. 肘、手首および手掌部の標準前後動作のピーク位相差

肘、手首および手掌部の標準前後動作のピーク位相差の結果から、前後動作は椅子と鍵盤のクローズドキネティックでの動作となるので、大きな位相差は認められない事が判明した(図 8)。

これらの一連の結果は、Furuya らの先行研究と一致していたことから、本研究のシステムにおいても、ピアノ打鍵技能の熟達度が測定できることが確立された。

(2) 児童および生徒の標準打鍵動作の達成度

解析の手続き

実験参加者は、4~13 歳までの児童および生徒 25 名であった。各打鍵時の最大変位は、8 回の打鍵中の最大値を 100%として標準化した。音量調節能力は、8 段階の 2 回目以降の各最大変位が前回よりも 10%以上低下している回を不可とし、それ以外を調整できている(達成)と判定した。調整能力の不可が全くない者を優れているとし、3 個以上出現する者を未達成とし、それぞれの割合の部位および左右差を、8 歳未満(14 名)と 9 歳以上(11 名)で比較した。

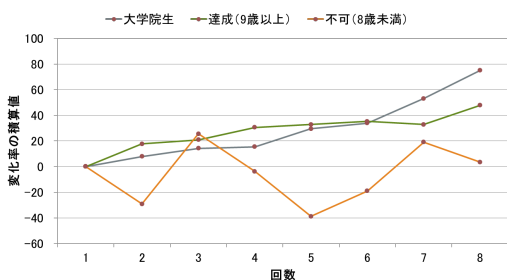


図 9. 調整能力の差違例

大学院生も含めた達成者では、ほぼ直線的に調整できているが、未達成者ではばらばらであることが理解できる(図 9)。

解析の結果

大学院生の結果から、音量調節の動作は、上下よりも前後動作に依存することが再確認された(図 10 および図 11)。右上肢の上下および前後動作調整能力が優れている者の出現率は、いずれの部位でも 9 歳以上が 8 歳未

満より多かったが、左上肢での上下動作ではこの関係が逆転する場合も認められた。したがって、各部位の上下動作における課題達成率は、音量調節能力の指標としては不向きであることが示された(図 10 および図 11)。児童および生徒の両群とも掌から肘に向かい達成者の出現割合が低下する傾向であった。特に、利き腕の調節能力は、年齢の影響が認められた。熟達した動作獲得には、反利き腕であり鍵盤が重い左手および腕全体の前後動作の調節能力を獲得する必要が明らかとなった。

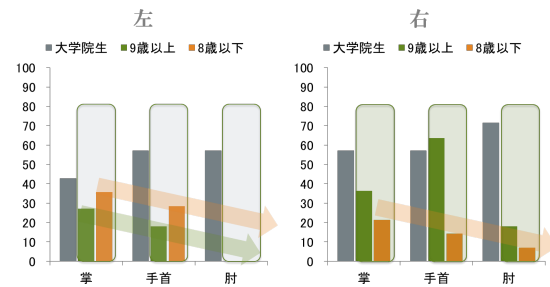


図 10. 完全達成者の出現割合(上下)

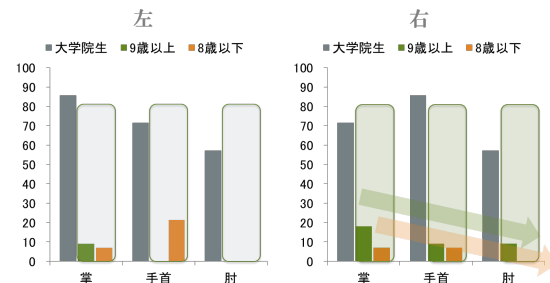


図 11. 完全達成者の出現割合(前後)

(3) 筋電図解析

積分筋電図解析による上肢筋群の音量調節への貢献度(大学院生)

各筋の IEMG と最大音圧間との関係は、右側では長橈側手根伸筋および浅指伸筋が $r=0.924$ と最も高く、上腕三頭筋、橈側手根屈筋、上腕二頭筋、浅指屈筋、三角筋中部、僧帽筋肩部の順であった。同様に左側では、上腕三頭筋が $r=0.937$ と最も高く、浅指屈筋、橈側手根屈筋、浅指伸筋、長橈側手根伸筋および上腕二頭筋、三角筋中部、僧帽筋肩部の順であった。本研究で認められた上肢の左右差は、利き腕のみならず鍵盤の重さの違いも大きく関与するものの体幹に近づくにつれ、音量調節への貢献度は低くなった(図 12)。

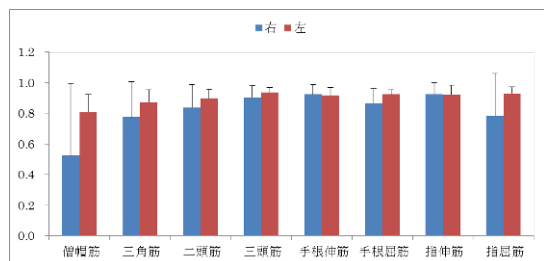


図 12. 上肢筋群の IEMG と最大音圧との平均

積率相関係数

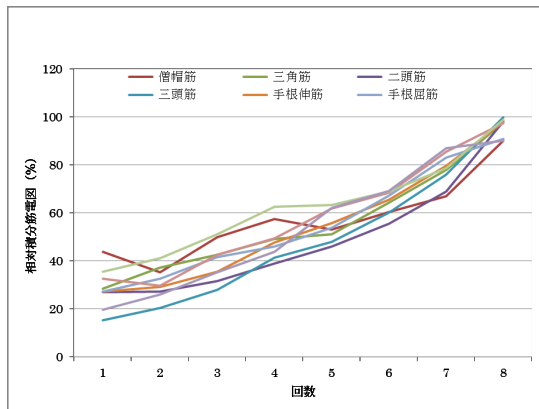


図 13. 上肢筋群の相対 IEMG の変化 (m 意義)

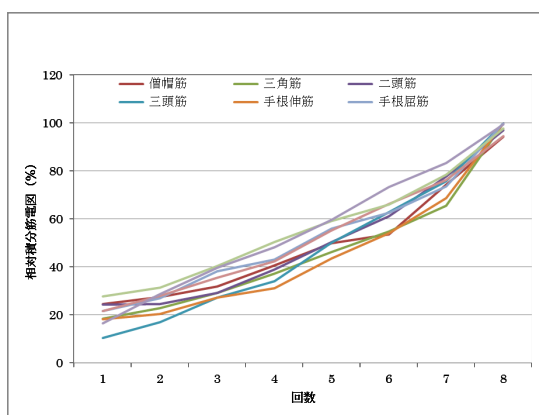


図 14. 上肢筋群の相対 IEMG の変化 (左)

しかしながら、上肢筋群の相対 IEMG の変化は、両側ともほぼ直線的であり、上肢全体の筋群を利用して音量調節をしていることが推測された。

リアルタイム筋電図を利用したバイオフィードバックレッスンの可能性について

これまでピアノ打鍵における課題とされる脱力に注目して、打鍵前後における無駄な筋活動を、非侵襲的にリアルタイムに筋活動（モーターユニットの発火）を可視化できる表面筋電波形をバイオフィードバックすることで改善できるのかについて、検討を行った。

ピアノは、打楽器と同じように発音する前までは楽器に働きかけるが、発音後はいかに鍵盤に物理的な作用をしても、音量に関しては全く無意味な行為である。そこで、運動選手に認められるような効率の良い運動を打鍵技能に見出すなら、発音後の筋活動を瞬時に 0 レベルまで下げることになると考え、このような筋活動が可能であるのかを大学院生を対象として検討した。

図 15 は、大学院生の一例であるが、各打鍵の前後に僅かに筋活動が窺えるだけで、打鍵後速やかに打鍵前レベルまで筋活動が低下するのが認められる。ヘアライン状の波形は、

打鍵時の伸張反射の波形と考えられ、いずれの部位でも音量の増加に連れて増大している。

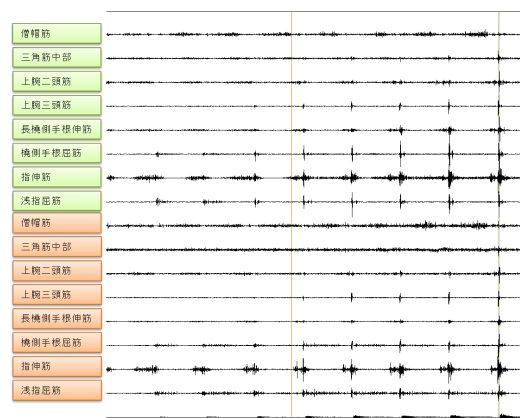


図 15. 8 段階の音量調節における上肢筋群の EMG 生波形の変化 (最下段は音圧)

本試みを検証するために、名古屋市を中心とした音楽指導者を対象に、「愛知県立芸術大学セミナー 児童のピアノ打鍵技能の発達過程の検証」と題してバイオフィードバックレッスンを公開し、専門家からの意見を求めた。

セミナーは、平成 25 年 7 月 7 日に愛知芸術文化センター内愛知県芸術劇場中リハーサル室で行った。内容は 3 部構成であり、第 1 部では 3 次元動作解析による打鍵動作の発達過程を報告し、第 2 部ではプロの演奏家による演奏中の筋活動を、筋電図を用いてリアルタイムで提示し、第 3 部では中学生および高校生それぞれ 1 名ずつに、バイオフィードバックレッスンを体験させ、専門家からの意見を交えてのディスカッションと有効性のアンケート調査を行った。参加者は音楽専科の高校教員を始めとしたピアノ指導者 22 名であった。アンケート結果から、ほぼ全参加者が初めて目にするピアノ演奏中の筋活動と、それを利用したレッスンの有効性を認めた。ただし 1 名から、この取り組みは一面的であるという貴重な意見を頂いた。やはり、筋活動がそのまま直接的に演奏技能または音色に繋がるのではないという本研究の限界を改めて知る良い機会であった。また、愛知県立芸術大学が発信する新たなピアノレッスンへの萌芽的な取り組みを、専門家に公表する事が可能であった。

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 13 件)

Ishigaki T, Takeya Y: Backward and forward hand movement of expert pianist in controlling sound dynamics,

The 19th Annual Congress of the European College of Sport Science in Amsterdam, 平成26年7月2日~5日, VU University in Amsterdam (オランダ)

石垣 享, 掛谷勇三: 児童の優れた上肢動作の調節能力における部位および左右差, 日本発育発達学会 第12回大会, 平成26年3月15日~16日, 大阪成蹊大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: ピアノ音量を調節する際の手掌部の標準動作, 日本体力医学会 第68回大会, 平成25年9月21日~23日, 日本教育会館
石垣 享: 児童のピアノ打鍵による音量調節の優劣は左手の打鍵速度に依存する, 日本体育学会 第64回大会, 平成25年8月27日~30日, 立命館大学

Ishigaki T: Backward and forward hand movement contributes to the control of piano sound dynamics, 第15回日・韓健康教育シンポジウム, 平成25年8月20日~21日, 国立済州大学校(韓国)

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: 児童の手掌部の打鍵速度調節の巧みさの特徴, 日本発育発達学会 第11回大会, 平成25年3月16日~17日, 静岡産業大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: ピアノ打鍵の言語的イメージと上肢筋活動および発揮音圧の差違, 日本生理人類学会 第67回大会, 平成24年11月17日~18日, 首都大学東京

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: 児童および生徒のピアノ音量調節に関する上肢筋活動の特徴, 日本体力医学会 第67回大会, 平成24年9月14日~16日, 長良川国際会議場

石垣 享: 児童のピアノ打鍵における音量獲得戦略, 日本体育学会 第63回大会, 平成24年8月22日~24日, 東海大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: 児童の打鍵動作の特徴, 日本発育発達学会 第10回大会, 平成24年3月17日~18日, 名古屋学院大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: 児童のピアノ音量調節における上肢動作の発達過程, 日本生理人類学会 第65回大会, 平成23年11月26日~27日, 関西大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: 上肢筋活動のフィードフォワードおよびフィードバック調節 - ピアノ打鍵動作と音量調節 -, 東海体育学会 第29回大会, 平成23年10月29日~30日, 静岡産業大学

石垣 享, 掛谷勇三, 中村ゆかり: ピアノ打鍵様式の言語的イメージと筋活動との関係, 日本体力医学会 第66回大会, 平成23年9月16日~18日, 東亜大

学

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕
出願状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計0件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石垣 享 (ISHIGAKI, Tohru)
愛知県立芸術大学・准教授
研究者番号: 60347391

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

掛谷勇三 (KAKEYA, Yuzo)
愛知県立芸術大学・准教授
研究者番号: 80381747