

令和 5 年 6 月 28 日現在

機関番号：92677

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04093

研究課題名(和文) アクティブタッチのトレーニングに伴う運動の遂行・学習・回復の促進と脳神経機序解明

研究課題名(英文) Enhancement of motor execution, learning, and recovery through active touch training

研究代表者

平野 雅人(Hirano, Masato)

株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所(Research Lab.)・Research Lab.・研究員

研究者番号：40852223

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はピアノ鍵盤の打鍵に伴う体性感覚知覚をアクティブタッチのモデルとし、当該知覚能力が洗練される機序および局所性ジストニア患者のアクティブタッチを評価することを目的とした。結果、被験者はトレーニング中に自発的に打鍵運動を最適化すること、運動指令から予測した感覚情報と実際に感覚器から入力された感覚情報の統合処理が変化することが明らかとなった。また、アクティブタッチのトレーニングに伴い、フィードバック制御が主となる運動のパフォーマンスが向上することが明らかとなった。一方、局所性ジストニア患者のアクティブタッチは概ね正常であり、今回の研究では疾患との関連は見出されなかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筋力や持久力などを鍛える身体トレーニングと同様に、運動に伴い生じる感覚の知覚能力を鍛える感覚トレーニングも運動のパフォーマンスを向上させる。本研究で得られた知見は感覚トレーニングを最適化する上で重要であり、今後パフォーマンスアートやスポーツ、リハビリテーションで感覚トレーニングを応用する上で有効な情報を提供すると言える。また、アクティブタッチは運動を介する分、受動的な感覚知覚より複雑な知覚形態と言える。その機序を解明する本研究は学術的な意義も大きい。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study was to investigate the somatosensory perception associated with piano keystrokes as a model of active touch and evaluate the active touch ability in patients with focal hand dystonia. The results revealed that participants actively optimized their keystroke movements during active touch training and demonstrated changes in the predictive integration process that integrates predicted sensory information from motor commands and actual sensory input. Additionally, it was found that feedback control of movements predominantly improved with active touch training. On the other hand, active touch in patients with focal hand dystonia appeared generally normal, and no significant association with the disorder was identified in this study.

研究分野：身体教育

キーワード：アクティブタッチ 知覚学習 エキスパート ジストニア

## 1. 研究開始当初の背景

運動課題を素早く正確に遂行することは、スポーツや音楽、手術や工具の使用、日常生活に求められるため、競技力の向上や医療・産業の発展、QOL 向上に不可欠である。このような運動技能の多くは、長期間の練習によって習得されるが、その中でも筋力や呼吸循環能力といった運動機能の増強は、運動パフォーマンス向上の土台となる。一方、「研ぎ澄まされた感覚」「指先まで神経の行き届いた演技」と形容されるように、感覚機能も高度な運動の遂行に重要であることは、疑いの余地がない。特に運動は体性感覚を基に適時修正され、理想の運動と体性感覚から知覚された運動の誤差に基づいて運動学習が進む。そのため、体性感覚機能の増強は運動のパフォーマンスを促進し得ると考えられる。にもかかわらず、そのような学術的な知見は極めて乏しく、身体教育の現場でも体性感覚のトレーニングは筋力やビジョンに比べると無いに等しい。

感覚知覚は、受動的な知覚(パッシブ知覚)と能動的な知覚(アクティブ知覚)に大別される。前者は運動を伴わない安静時の知覚であり、後者は自己の運動によって生じる感覚情報の知覚である。先行研究では、音楽家の指先の受動的な重量知覚閾値は非音楽家と差が無い一方、指先の能動的な重量知覚閾値は優れていることが報告されている(1)。この知見は、運動のパフォーマンスを促進するには、受動的ではなくアクティブ知覚を増強することが必要であることを示唆する。パッシブ知覚に関しては、訓練によって知覚能力が向上すること(知覚学習)、その背景に神経系の機能的・構造的な再組織化が関与していることが示されている(2-5)。しかし、アクティブ知覚の知覚学習のメカニズムはいまだ解明されていない。アクティブ知覚は運動を介するため、パッシブ知覚とは以下の2点が大きく異なる。一つは運動の能動的探索である。同じ物体を触っても運動が違くと感触も変わる。そのためアクティブ知覚を最大化する最適な運動が存在すると考えられ、アクティブ知覚の知覚学習に最適な運動を探索し獲得することが関与すると考えられる(運動の能動的探索)。もう一つは予測統合である。アクティブ知覚では、運動によって返ってくるであろう感覚情報を先んじて予測できる。この予測情報と実際に感覚器から入力された感覚情報が統合され、知覚が形成される。したがって、アクティブ知覚の知覚学習に伴い、予測統合が変化することが考えられる。

一方、体性感覚機能は局所性ジストニア患者において低下していることが報告されている(6)。しかしアクティブ知覚も同様に機能が低下しているかどうかは未解明であり、アクティブ知覚の増強が当該疾患患者の症状へ及ぼす影響も未解明である。

申請者は近年、ピアノ打鍵中における指先のアクティブ知覚(アクティブタッチ)を増強する感覚トレーニングを開発した。そこで本研究は当該感覚トレーニングをモデルとし、アクティブタッチが向上する機序の解明と局所性ジストニア患者におけるアクティブタッチの変容を明らかにすることを目的とする。

## 2. 研究の目的

本研究はトレーニングに伴うアクティブタッチ向上の機序は何か、局所性ジストニア患者においてアクティブタッチに異常が見られるか、もしそうならアクティブタッチのトレーニングが症状に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

## 3. 研究の方法

### アクティブタッチの評価とトレーニング

アクティブタッチの課題として、ピアノ鍵盤の重量弁別課題を用いた。被験者はピアノ鍵盤を右手示指で2回打鍵するよう指示された。いずれかの打鍵時に鍵盤に取り付けられた力触覚提示デバイスが鍵盤を引張ることで鍵盤重量を増大させた。被験者は鍵盤が重いのはどちらの打鍵だったかを回答した。適応的階段法を用いて鍵盤重量の弁別閾値を評価した。またトレーニングでは、トレーニング前に測定した弁別閾値で当該課題を実施させ、毎試行回答後に正否のフィードバックを与えた。

### (1)アクティブタッチのトレーニングにおける運動の能動的探索の関与

被験者はアクティブタッチのトレーニングを実施し、その前後でアクティブタッチの評価を行った。その際、右手示指の運動に関連する6つの筋肉から筋活動を計測した。トレーニングに伴い、打鍵時の筋活動が変化するかどうかを評価した。

### (2)アクティブタッチのトレーニングに伴う予測統合の変化

被験者はアクティブタッチのトレーニングを実施し、その前後で力一致課題を実施した。力一致課題は予測統合を間接的に評価できる課題である。当該課題では、まず力触覚提示デバイスが右手示指を動かし、鍵盤を受動的に打鍵させる。その後、被験者は力触覚提示デバイスによる打鍵を再現するよう指示された。再現した打鍵と受動的な打鍵の鍵盤下降速度を比較した。予測統合において、予測情報の重みが大さいと再現した打鍵の鍵盤下降速度は受動的打鍵よりも大きくなり、逆に予測情報の重みが小さいと再現した打鍵の鍵盤下降速度は受動的打鍵と同程度になる(7)。

### (3) アクティブタッチのトレーニングに伴う受動的知覚の変化

被験者はアクティブタッチのトレーニングを実施し、その前後で受動打鍵の力弁別課題を実施した。当該課題では、力触覚提示デバイスが右手示指を動かし鍵盤を2回異なる強さで打鍵させる。被験者はどちらが強い力の打鍵だったかを弁別するよう指示された。適応的階段法を用いて弁別閾値を評価した。

### (4) アクティブタッチのトレーニングに伴う運動のパフォーマンス向上

被験者はアクティブタッチのトレーニングを実施し、その前後で運動課題を実施した。運動課題では、被験者はピアノ鍵盤を右手示指で20回、ターゲットとなる鍵盤下降速度を狙って打鍵するよう指示された。打鍵は0.25, 0.5, 1, 2, 3Hzのテンポでそれぞれ実施した。打鍵力の均一性のパフォーマンス指標として、20回の打鍵における鍵盤下降速度のばらつきを算出した。

### (5) 局所性ジストニア患者のアクティブタッチの評価

音楽家の局所性ジストニアを罹患した患者を対象に、アクティブタッチの評価を実施した。

## 4. 研究成果

(1) トレーニング前の評価時に計測した筋活動に対し、非負値行列因子分解(NMF)を用いて筋活動パターンを抽出した。そのパターンを基に、最小二乗法でトレーニング中およびトレーニング後の筋活動を再構成した。トレーニングによっての筋活動パターンが変化したなら、再構成の質は低下し、変化していないなら再構成の質は高くなる。結果、アクティブタッチのトレーニングによって筋活動の再構成の質は低下した。これは、トレーニング中に打鍵時の筋活動、すなわち運動そのものを変化させていることを意味し、アクティブタッチを洗練する最適な運動を探求していることを示唆する。

(2) トレーニング前において、力一致課題時の再現打鍵は受動打鍵よりも鍵盤下降速度が大きく、強い打鍵をしていることが分かった。一方、トレーニング後は、再現打鍵と受動打鍵で鍵盤下降速度の差は小さくなった。この結果は、トレーニング前は予測情報を使って知覚が形成されていたのに対し、トレーニング後は予測情報を使わなくなった、もしくは感覚器から入力される間買う情報の重みが増したことを示唆する。

(3) アクティブタッチのトレーニングに伴い、受動打鍵の力弁別閾値は変化しなかった。この結果は、受動的知覚に関与する機能(すなわち知覚全体に関与する機能)ではなく、アクティブタッチに特異的な機能がアクティブタッチの向上に関与していることを示唆する。

(4) アクティブタッチのトレーニングに伴い、遅いテンポで実施した打鍵力の均一性パフォーマンスが向上した一方、速いテンポで実施したパフォーマンスは向上しなかった。テンポが速い運動は、打鍵間の時間間隔が短いため、前の打鍵から得られた感覚情報を次の感覚情報へ統合する時間的余裕がない。そのため、速い運動は主にフィードフォワード制御であると考えられる。逆に、遅いテンポは前の打鍵から得られた感覚情報を次の感覚情報へ統合する時間的余裕が十分にあるため、フィードバック制御の貢献度が大きくなる。したがって、アクティブタッチのトレーニングは、フィードバック制御が主体の運動に般化することが示唆される。

(5) 局所性ジストニアに罹患したピアニスト数名を対象に、アクティブタッチを評価した。これまでの実験で得られた健康ピアニストのアクティブタッチと比較して、大きな差はみられなかった。したがって、今回の課題で測定したアクティブタッチに関しては、ジストニア患者は正常であることが示唆される。アクティブタッチが正常であったため、ジストニア患者にアクティブタッチのトレーニングは実施させなかった。

### <引用文献>

1. M. Hosoda and S. Furuya. Shared somatosensory and motor functions in musicians. *Scientific Reports*. 6 (2016).
2. M. Hirano, Y. Kimoto, S. Furuya, Specialized Somatosensory-Motor Integration Functions in Musicians. *Cerebral Cortex*. 30, 1148-1158 (2020).
3. D. J. Ostry, M. Darainy, A. A. G. Mattar, J. Wong, P. L. Gribble, Somatosensory plasticity and motor learning. *J Neurosci*. 30, 5384-93 (2010).
4. B. Godde, B. Stauffenberg, F. Spengler, H. R. Dinse, Tactile coactivation-induced changes in spatial discrimination performance. *J Neurosci*. 20, 1597-604 (2000).
5. S. Vahdat, M. Darainy, D. J. Ostry, Structure of Plasticity in Human Sensory and Motor Networks Due to Perceptual Learning. *Journal of Neuroscience*. 34, 2451-2463 (2014).
6. W. Bara-Jimenez, M. J. Catalan, M. Hallett, C. Gerloff. Abnormal somatosensory homunculus in dystonia of the hand. *Ann Neurol*. 44(5):828-31 (1998).
7. P. M. Bays, D. M. Wolpert, E. P. Haggard, Y. Rosetti, M. Kawato, "Predictive attenuation in the perception of touch Attention & Performance XXII, Sensorimotor Foundations of Higher Cognition" (2007).

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hirano M., Sakurada M., Furuya S.	4. 巻 6
2. 論文標題 Overcoming the ceiling effects of experts' motor expertise through active haptic training	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 2558:1-11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abd2558	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Shinichi FURUYA, Takanori OKU, Yudai KIMOTO, Hayato NISHIOKA, Masato HIRANO	4. 巻 26
2. 論文標題 Skillful and Pathological Movement Coordination in Musical Performance	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in exercise and sports physiology	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hirano Masato, Furuya Shinichi	4. 巻 -
2. 論文標題 Active perceptual learning involves motor exploration and adaptation of predictive sensory integration	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 bioRxiv	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1101/2022.02.17.480969	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Masato Hirano
2. 発表標題 Surmounting limits of musician's expertise through a novel somatosensory training
3. 学会等名 Neuroscience and Music VII（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Hirano
2. 発表標題 Active haptic training overcomes the ceiling effects of experts' fine motor control
3. 学会等名 The 44th Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masato Hirano
2. 発表標題 Robust but specific enhancement of somatosensory-motor skills through an active haptic training in expert pianists
3. 学会等名 Neural Control of Movement 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関