

Mechanisms of Audio-Motor Integration during Keyboard Instrument Playing

Momoka NISHIMURA*, Ayuna TAMURA**, Shota MURAI*, Kohta I KOBAYASI*

(Received April 10, 2020)

We conducted an experiment using a MIDI keyboard instrument. The purpose of this study was to reveal what kind of auditory feedback is helpful for controlling finger force. Participants were asked to control the force of fingertips depending on auditory feedback, and the brain activities related to the force control were measured with functional magnetic resonance imaging (fMRI). As a result, it was shown that “Normal condition,” in which the intensity of feedback sound increased as the finger force was strengthened, is more effective in controlling the fingertip force than “Reverse condition.” Furthermore, we found brain activity associated with adjustment of force control in the left angular gyrus and right superior parietal lobule. In addition, we observed activation patterns specific to feedback sound in the left dorsal premotor cortex and bilateral primary auditory cortex. This study will give an insight into adaptive mechanisms of auditory-motor integration.

Key words : MIDI keyboard, fMRI, left angular gyrus, right superior parietal lobule

キーワード : キーボード楽器, fMRI, 左角回, 右上頭頂小葉

キーボード楽器演奏時の聴覚－運動統合メカニズム

西村 杏香, 田村 明由奈, 村井 翔太, 小林 耕太

1. はじめに

日常で繊細な物を扱う時、指先の力を制御する能力は重要であり、その際は様々な知覚のフィードバックを頼りにする。例えば、私たちは視覚フィードバックを頼りに正確な運動をする¹⁾。また、運動障害のある患者に対しては視覚フィードバックを用いたりハビリテーションが重要視されている²⁾。一方、ピアノを弾く時は聴覚フィードバックが重要な役割を果たすことが実証されている³⁻⁶⁾。先行研究では指の力によってピッチの調整を行う実験を通して、聴覚と

運動の統合における神経メカニズムを検討した⁷⁾。この研究は音声や弦楽器など音の持つ性質を連続的に変えることができる場合の運動に着目している。しかし、連続的に音の性質を変えることのできない鍵盤楽器を用いた際の指の力と聴覚フィードバックとの関連について、神経メカニズムはまだ明らかにされていない。このような聴覚と運動の統合メカニズムを検討することは、力の制御のための適切な聴覚フィードバックの理解に繋がることが期待される。そこで本研究では、MIDI キーボードと機能的磁

*Graduate school of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto
Telephone/Fax: +81-774-65-6499, E-mail: momopon024@gmail.com, kkobayas@mail.doshisha.ac.jp
**Faculty of Life and Medical Sciences, Doshisha University, Kyoto

気共鳴画像法 (fMRI) を用い、指先の力(キーを押す速さ, velocity)を調整するときの脳活動を検討した。被験者は指先の力を調整して指定された音圧の音を出すことが求められる。指先の力と返ってくる音圧が実験ブロックごとに変化する条件下で、力の調整過程やフィードバック音の影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 被験者

右利きの男性 12 名, 女性 12 名 (21 歳~28 歳) を被験者とした。

2.2 実験環境

実験は MRI (ECHELON Vega, 1.5T, 日立メディコ製) 内で行い, 被験者には耳栓の上からヘッドフォン (Kiyohara optics) を装着した状態で仰向けに寝てもらった。MRI 実験キーボード用特殊架台 (105A, バイオメディカ) に MIDI キーボード (nanoKEY2, KORG) を設置し, 被験者が肘を身体につけた状態でキーボードが押せるよう, 特殊架台を被験者の腰付近に固定した。視覚刺激の呈示には Presentation (Neurobehavioral Systems) を使用した。

2.3 実験手順

被験者は利き手の示指で指先の力をコントロールしながら MIDI のキーボードを押すタスクを行った。target 音が呈示された後, 被験者が MIDI キーボードのキーを押すと, その力に応じた音量が呈示された。これを 1 trial とし, 被験者はその音量を target 音と同じ音量になるよう毎 trial ごとに調整するよう指示された。target 音は 2 秒間隔で呈示された。ここで target 音と同じ音量が呈示される時の強さを target velocity と定義した。10 trial 行くと合図の tone burst 音が呈示され, target velocity が疑似ランダムに変化した。この 10 trial が 12 回繰り返されて 1 session とした。

音の返ってくる feedback 条件について, 音圧と力が正に相関する Normal 条件と負に相関する Reverse 条件の 2 パターンを用意した。1 人の被験者につき各条件 3 session ずつ計 6 session 行った。

また, 被験者 24 人のうち半分の 12 人には, 6-9

trial のうちのいずれか 1 trial に被験者が押した強さに関係なく target 音の音量と違う音量の feedback が呈示された。これを Manipulated Feedback (MFB) と定義した。MFB では 69, 71, 73, 77, 79, 81 dB SPL の 6 種類の音圧が疑似ランダムに呈示された。

2.4 音刺激

target 音及び被験者が押したときに呈示される音は 10 ms の立ち上がり・立ち下がりをつけた長さ 100 ms の white noise を使用した。white noise には 400-1600 Hz 帯域の Band Pass Filter をかけ, 65-85 dB SPL 間で 2 dB SPL ずつ変化させた。target 音は 75 dB SPL に統一した。

2.5 解析方法

MRI 計測データの画像処理および解析は, Statistical parametric mapping (SPM12) ソフトウェア (<http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>) を用いた。解析の前に画像処理として Realign, Coregister, Normalize および Smooth を行った。その後, fixed effect model に基づき個人解析を行い, random effect model を用いて集団解析を行った。また, 運動と聴覚の統合処理に関連する脳部位において, 関心領域 (region of interest, ROI) 分析を行った。その際の領域は, 半径 8mm の球体のボクセルによって定義された。脳領域は Automated Anatomical Labelling (AAL) に基づいて表記した。24 人の被験者のうち, 1 人は間違ったタスクをしてしまったため, 1st session (Reverse condition) を除き, もう 1 人はプログラムの誤作動により 3rd session (Normal condition) を除いて解析をした。

3. 実験結果

3.1 行動結果

被験者が押した強さが target velocity に収まっている場合を正解として trial ごとの正答率を算出した (Fig. 1a)。正答率は Normal 条件 Reverse 条件ともに上昇傾向が見られた。さらに, Reverse 条件と比較して Normal 条件の方が 10 trial かけて正答率の上昇が見られた。

さらに, target velocity の中央値を 0 として, 被験者が押した velocity がどれほど離れているのかを

絶対値 (delta) で算出した (Fig. 1b). 6.5 以内に入っていれば, target velocity である. delta も正答率同様 Normal 条件 Reverse 条件ともに target velocity に近づく傾向が見られた. さらに, Reverse 条件と比較して Normal 条件で 10 trial かけてより target velocity に近づいていることが分かった.

3.2 fMRI 結果

3.2.1 delta との相関

delta が大きくなるにつれて活動した部位を Fig. 2a 及び Table. 1a に示した. 右縁上回, 左中心前回, 右下頭頂小葉での活動が見られた. 一方, delta が小さくなるにつれて活動した部位を Fig. 2b 及び Table. 1b に示した. 左角回, 左島皮質での活動が見られた.

3.2.2 trial との相関

trial 数が大きくなるにつれて活動する部位を Fig. 3a 及び Table 2a に示した. 左島皮質, 左中後頭葉での活動が見られた. 一方, trial 数が小さくなるにつれて活動が見られた部位を Fig. 3b 及び Table 2b に示した. 両側の中心前回, 両側の中心後回の活動が見られた.

3.2.3 ROI 解析

Tachibana らによると, 指先の力を制御して連続的に pitch を target に近づけるタスクをする際に左 M1, 左背側前運動皮質, 両側の A1, 前補足運動野で活動が見られた. そこで, 左背側前運動皮質での本実験での Normal 条件, Reverse 条件における活動量を Fig. 4a に示した. どちらの条件においても有意な活動が見られた (Normal 条件, $t = 3.15$, $p < 0.05$; Reverse 条件, $t = 2.28$, $p < 0.05$). さらに, その部位を trial ごとに調べた (Fig. 4b).

また, 左右の A1 での Normal 条件, Reverse 条件における活動量を Fig. 4c, d に示した. 左右両側の A1 では Normal 条件でのみ有意な活動が見られた (右側, $t = 2.55$, $p < 0.05$; 左側, $t = 2.10$, $p < 0.05$).

3.2.4 聴覚フィードバックに関連した脳活動

MFB のうち, 69 dB SPL と 81 dB SPL が返ってきた時を large MFB, 73 dB SPL と 77 dB SPL が返ってきた時を small MFB として, 間違った大きさの feedback 音による脳活動の違いを比較した. さらに, それを 3.2.1 の delta の大きさに相関する脳活

動と比較して共通する部位を調べた. delta が大きくなるにつれて活動が増加する部位と large MFB の時に活動する部位の中で, 共通して右上頭頂小葉が活動していた (Fig. 5a). 一方, delta が小さくなるに

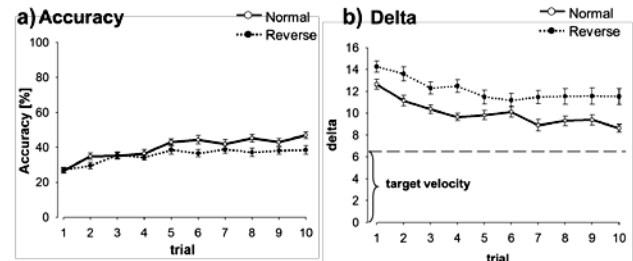


Fig. 1. Comparison of Normal condition and Reverse condition. a) The change of average accuracy from 1st to 10th trial. b) The change of average delta from 1st to 10th trial. Delta is the distance between target velocity and subjects' velocity. Error bar is standard error.

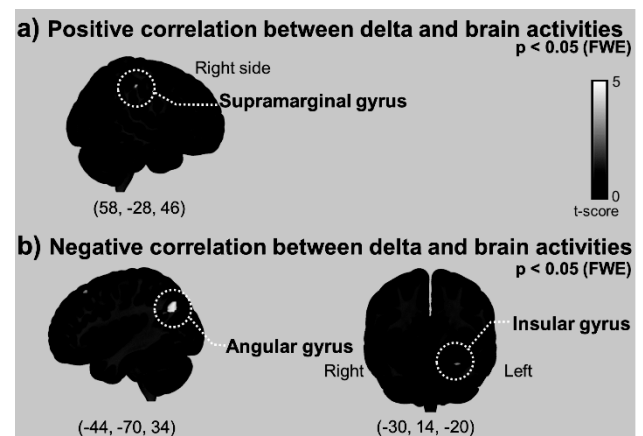


Fig. 2. Correlation between brain activities and delta. a) Positive correlation between activity and delta value. The statistical threshold was set at FWE-corrected $p < 0.05$. b) Negative correlation between activity and delta value. The statistical threshold was set at FWE-corrected $p < 0.05$.

Table 1. Correlation between brain activities and delta.

Brain Region	L/R	x	y	z	Z	k
a) Positive correlation with delta ($p < 0.05$, FWE)						
Supramarginal gyrus	R	58	-28	46	4.99	6
Precentral gyrus	L	-48	2	18	4.88	1
Inferior parietal gyrus	R	42	-38	46	4.87	1
b) Negative correlation with delta ($p < 0.05$, FWE)						
Angular	L	-44	-70	34	5.71	113
Superior temporal pole	L	-28	4	-22	5.62	9
Middle occipital gyrus	R	40	-82	20	5.36	14
Middle frontal gyrus	L	-26	28	52	5.22	12
Postcentral gyrus	R	36	-30	70	5.06	3
Amygdala	L	-20	2	-20	5.01	6
Precuneus	L	-6	-54	18	4.99	10
Insular gyrus	L	-30	14	-20	4.99	3
Superior occipital gyrus	R	26	-86	30	4.90	5
Lingual gyrus	R	12	-52	4	4.87	2
Fusiform gyrus	L	-32	-38	-14	4.84	1
Superior occipital gyrus	R	24	-72	30	4.84	1

つれて活動が増加する部位と small MFB の時に活動する部位の中で、共通して左角回が活動していた (Fig. 5b).

4. 考察

4.1 行動実験

trial が進むにつれ、どちらの条件でも正答率の増加と δ の減少傾向が見られた。そのため、本実験のタスクにおいて、指先の力の制御がうまくなっていることが分かった。つまり、Normal 条件、Reverse 条件ともに聴覚フィードバックがキーボードのフィードフォワード制御に有効であることが示された。さらに、Normal 条件の方が Reverse 条件よりも指先の力の制御がうまくなる傾向が見られた。被験者の音楽経験の有無は混在していたが、実験後のアンケートでは約 79% の被験者 (24 人中 19 人) が主観的に Normal 条件よりも Reverse 条件の方が難しかったと回答していた。このことから、キーボード楽器に慣れていてもそうでなくても Normal 条件の方が指先の力の制御に効果がある可能性が示唆された。

4.2 fMRI 結果

4.2.1 δ との相関

δ が大きくなるにつれて右縁上回や右下頭頂小葉で活動の増加が見られた。右下頭頂小葉は右縁上回の近くに位置している。右縁上回は言葉を発声している時に活動すると報告されており、音と運動の統合処理に関連していると考えられている⁸⁾。また左中心後回は指を動かすタスクの時に活動すると報告されている⁹⁾。さらに、この領域は自分が弾いたキーボードの鍵盤に対して違う周波数の feedback 音が返ってきた際にも活動すると報告されている¹⁰⁾。このことから、これらの活動は音圧を聞いて指の力を調整するタスクや、正解の音圧と自身が鳴らした音圧が一致していないことに関連した活動であると考えられる。

一方、 δ が小さくなるにつれて活動の増加が見られた左角回は聴覚への注意に関する活動が報告されている¹¹⁾。このことから、音への注意に関連する活動が見られた可能性がある。さらに、プロのウッド

演奏家は非音楽家と比べて左角回が大きいという報告もある¹²⁾。そのため、楽器を演奏する訓練において左角回は重要な役割を果たしている可能性が考えられる。また、島皮質はドラムのリズムに合わせて歌う時に活動するという先行研究があり、聴覚と運動の統合処理に関わると報告されている¹³⁾。そのため、これらの部位での活動は、鳴らしたい音圧を鳴らすことができるように上達していることや、音圧を聞いて指の力を調整するタスクに関連した活動であると考えられる。

以上のことから、タスクがうまくいっている時とうまくいっていない時で脳活動の違いが見られた。

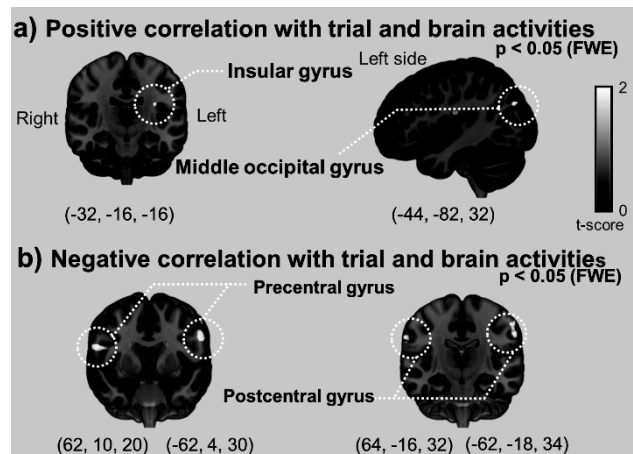


Fig. 3. Correlation between brain activities and trial. a) Positive correlation between activity and trial value. The statistical threshold was set at FWE-corrected $p < 0.05$. b) Negative correlation between activity and trial value. The statistical threshold was set at FWE-corrected $p < 0.05$.

Table 2. Correlation between brain activities and trial.

Brain Region	L/R	x	y	z	Z	k
a) Positive correlation with trial ($p < 0.05$, FWE)						
Insular gyrus	L	-32	-16	22	5.87	10
Middle occipital gyrus	L	-44	-82	32	5.26	13
Middle occipital gyrus	L	-48	-78	40	5.10	1
Superior frontal gyrus medial part	L	-4	68	20	4.95	1
b) Negative correlation with trial ($p < 0.05$, FWE)						
Precentral gyrus	L	-62	4	30	6.43	82
Precentral gyrus	R	62	10	20	5.94	128
Postcentral gyrus	L	-62	-18	34	5.72	67
Postcentral gyrus	R	64	-16	32	5.52	32
Postcentral gyrus	R	60	-18	44	5.22	5
Postcentral gyrus	L	-36	-22	54	5.06	18
Precentral gyrus	R	60	10	44	5.03	2
Precentral gyrus	L	-40	-20	60	5.01	2
Inferior frontal gyrus opercular part	L	-54	6	10	4.99	4
Inferior parietal gyrus	L	-42	-40	40	4.95	1

4.2.2 trial との相関

trial 数が大きくなるにつれて活動した左島皮質は、4.2.1 で述べた通り、聴覚と運動の統合処理に関連すると報告されている。左中後頭葉は角回の近くに位置している。左角回も 4.2.1 で述べた通り、音への注意や楽器の訓練に関連して活動が見られたと報告されている。このことから、trial 数が大きくなるにつれて活動する部位は、鳴らしたい音圧を鳴らすことができるように上達していることや、音圧を聞いて指の力を調整するタスクに関連した活動であると考えられる。

一方、trial 数が小さくなるにつれて活動が見られた中心前回や中心後回は 4.2.1 で述べた通り、指の力や動きを制御する時に活動する報告があるため、指の力を調整するタスクに関連した活動であると考えられる。

以上より、trial が進むにつれて脳活動も変化していくことが考えられた。

4.2.3 ROI 解析

Tachibana らの実験は圧力センサーを用いて連続的に音のピッチを変えるタスクであった。一方、連続的に音の性質を変えることのできないキーボード楽器を用いた本実験においても Tachibana らの結果と同様に左背側前運動皮質でタスク中に有意な活動が見られた。さらに、trial ごとに着目すると、trial が進むにつれて左背側前運動皮質の活動量が減少していくことが分かった。3.1 で示した結果より、trial が進むにつれて正答率が上昇していた。そのため、タスクがうまくいくにつれて左背側前運動皮質の活動が減少していたと考えられる。そのため、この部位は音の特徴を連続的に制御可能かどうかに関わらず、聴覚情報にもとづく運動の制御に広く関与する可能性が示された。

また、両側の A1 では Normal 条件でのみ有意な活動が見られた。このことと 3.1 の結果から、Normal 条件と Reverse 条件では聴覚の入力段階において運動と聴覚の統合処理が異なる可能性が示唆された。

以上より、左背側前運動皮質、両側の A1 は聴覚 feedback をもとに運動を制御する時に重要な役割を

果たすことが示唆された。

4.2.4 聴覚フィードバックに関連した脳活動

delta が大きくなるにつれて活動が増加する部位と large MFB の時に活動する部位の中で、右上頭頂小葉が共通して活動していた。これは、タスクがうまくいかなかった時に返ってきた feedback 音に対して特異的に活動していた部位であると考えられる。この部位は音に対して注意をむけた時に活動すると報告されている¹¹⁾。また、空間上での物体保持課題や指示運動課題、サッケード課題、視覚注意課題などの視覚空間に対しての課題においても活動すると報告されており、特に物体保持課題や指示運動課題で活動することが報告されている¹⁴⁾。このことから、

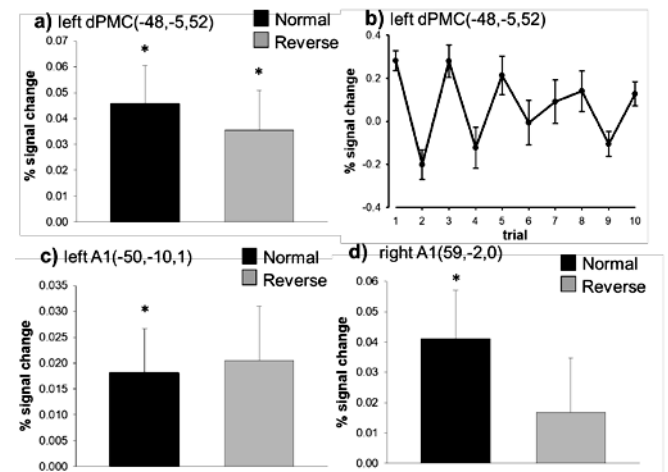


Fig. 4. Brain activity in areas related to audio-motor integration process during Normal and Reverse conditions. a) The ROI analysis data of left dorsal premotor cortex (dPMC). b) Activities in dPMC during each trial. Error bar is standard error. c) The ROI analysis data of left primary auditory cortex (A1). d) The ROI analysis data of right primary auditory cortex (A1). * $p < 0.05$, without correction for multiple comparisons.

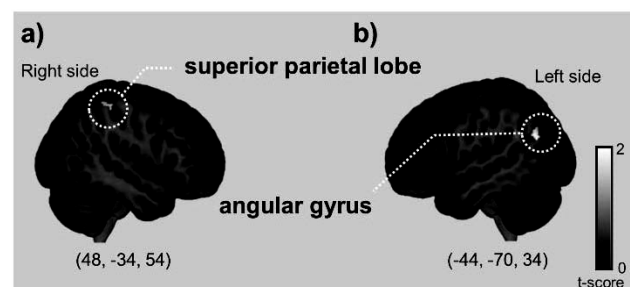


Fig. 5. Brain area related to auditory feedback. a) An area activated both in large feedback error and large MFB. b) An area activated both in small feedback error and small MFB. The statistical threshold was set at FWE-corrected $p < 0.05$.

指の力と音圧との関係を把握する際の活動である可能性が示唆された。

一方, Δ が小さくなるにつれて活動が増加する部位と small MFB の時に活動する部位の中で, 左角回が共通して活動していた。これは, タスクがうまくいった時に返ってきた feedback 音に対して特異的に活動していた部位であると考えられる。この部位は 4.2.1 や 4.2.2 で述べた通り, 音への注意や楽器の訓練に関連して活動が見られたという報告より, 本タスクでは鳴らしたい音圧を鳴らすことができていたことと関連した活動である可能性が示唆された。

以上より, 力を大きく制御しなければいけない feedback が返ってきた時には右上頭頂小葉が活動し, 力を細かく制御しなければいけない feedback が返ってきた時には左角回が活動することが分かった。これらの部位が指先の力を制御するタスクに対する聴覚フィードバック音の処理に関連する可能性が示された。

5. まとめ

本実験では, 指の力のコントロールにおける聴覚フィードバックの効果と, その時の脳活動について調べた。実験の結果, 音の性質をフィードフォワード制御するキーボードタスクにおいて, 指先の力を制御する際に音圧と力に対応する聴覚フィードバック (Normal 条件) が対応していない場合 (Reverse 条件) より有効であることが示された。さらに, 両側の A1 では Normal 条件が Reverse 条件よりも活動が見られたため, 音圧と力の関係によって聴覚野の活動に違いが生じる可能性が示唆された。

また, 力の制御がうまくいく時やエラー量の少ない聴覚フィードバックが返ってきた時には左角回や左島皮質での活動が見られ, 力の制御がうまくいかない時やエラー量の多い聴覚フィードバックが返ってきた時には両側の中央前回や中央後回, 左縁上回, 右上頭頂小葉, 左背側前運動皮質での活動が見られた。以上より, 指先の力によるキーボードの音圧調整には, 聴覚系や運動系, 左右の頭頂葉といった皮質領域の機能的関与が示唆された。

本研究は科研費 (17H01769) の支援を受けた。ま

た, 実験に関してご教授いただいた飛龍志津子教授に感謝する。

参考文献

- 1) S. W. Keele, M. I. Posner, "Processing of Visual Feedback in Rapid Movements", *J. Exp. Psychol.*, **77** [1], 155-158 (1968).
- 2) S. M. P. Verschueren, S. P. Swinnen, R. Dom, W. D. Weerdt, "Interlimb Coordination in Patients with Parkinson's Disease: Motor Learning Deficits and the Importance of Augmented Information Feedback", *Exp. Brain Res.*, **113** [3], 497-508 (1997).
- 3) S. Furuya, J. F. Soechting, "Role of Auditory Feedback in the Control of Successive Keystrokes during Piano Playing", *Exp. Brain Res.*, **204** [2], 223-237 (2010).
- 4) K. Katahira, D. Abla, S. Masuda, K. Okanoya, "Feedback-Based Error Monitoring Processes During Musical Performance: an ERP Study", *Neurosci. Res.*, **61** [1], 120-128 (2008).
- 5) C. Maidhof, N. Vavatzanidis, W. Prinz, M. Rieger, S. Koelsch, "Processing Expectancy Violations during Music Performance and Perception: an ERP Study". *J. Cogn. Neurosci.*, **22** [10], 2401-2413 (2010).
- 6) P. Q. Pfordresher, "Coordination of Perception and Action in Music Performance", *Adv. Cogn. Psychol.*, **2** [2], 183-198 (2006).
- 7) R. O. Tachibana, M. Yanagida, H. Riquimaroux, "Novel Approach for Understanding the Neural Mechanisms of Auditory-Motor Control: Pitch Regulation by Finger Force", *Neurosci. Lett.*, **482** [3], 198-202 (2010).
- 8) F. H. Guenther, "Cortical Interactions Underlying the Production of Speech Sounds", *J. Commun. Disord.*, **39** [5], 350-365 (2006).
- 9) J. P. Kuhtz-Buschbeck, H. H. Ehrsson, H. Forssberg, "Human Brain Activity in the Control of Fine Static Precision Grip Forces: an fMRI Study", *Eur. J. Neurosci.*, **14** [2], 382-390 (2001).
- 10) P. Q. Pfordresher, J. T. Mantell, S. Brown, R. Zivadinov, J. L. Cox, "Brain Responses to Altered Auditory Feedback during Musical Keyboard Production: an fMRI Study". *Brain Res.*, **1556**, 28-37 (2014).
- 11) K. R. Pugh, B. A. Shaywitz, S. E. Shaywitz, R. K. Fullbright, D. Byrd, P. Skudlarski, D. P. Shankweiler, L. Katz, R. T. Constable, J. Fletcher, C. Lacadie, K. Marchione, J. C. Gore, "Auditory Selective Attention: an fMRI Investigation",

Neuroimage, **4**, 159-173 (1996).

- 12) N. Acer, S. Bastepe-Gray, A. Sagioglu, K. Z. Gumus, L. Degirmencioglu, G. Zararsiz, M. U. Ozic, “Diffusion Tensor and Volumetric Magnetic Resonance Imaging Findings in the Brains of Professional Musicians”, *J. Chem. Neuroanat.*, **88**, 33-40 (2018).
- 13) C. G. Tsai, L. Y. Fan, S. H. Lee, J. H. Chen, T. L. Chou, “Specialization of the Posterior Temporal Lobes for Audio-Motor Processing-evidence from a Functional Magnetic Resonance Imaging Study of Skilled Drummers”, *Eur. J. Neurosci.*, **35** [4], 634-643 (2012).
- 14) O. Simon, J. F. Mangin, L. Cohen, D. Le Bihan, S. Dehaene, “Topographical Layout of Hand, Eye, Calculation, and Language-related Areas in the Human Parietal Lobe”, *Neuron*, **33** [3], 475-487 (2002).