

確率共鳴現象を応用した 体性感覚情報付加による把持調整機能の促進

名古屋工業大学 和坂俊昭

Improvement of Gripping Control Function by Transcutaneous Electrical Stimulation

by

Toshiaki Wasaka
*Nagoya Institute of Technology,
Department of Engineering*

ABSTRACT

Developing a new training method that improves the ability of motor control is useful for rehabilitation for patients and elderly people and children for motor skill training. In order to clarify whether the stochastic resonance leads to improvement of human motor function, this study examined the effect of the subthreshold electrical stimulation on the adjustment ability of gripping force. Using the device that quantitatively evaluates the ability of adjustment of gripping (iWakka), the subjects performed a motor task to accurately match the hand grip force to the target value presented on the monitor. After performing the practice, the trial of presenting electrical stimulation under sensory threshold (0.9 times of the sensory threshold) to the median nerve (ON condition) and the trial without electrical stimulation (OFF condition) are randomly performed. The difference between the exerting gripping force and the target value was compared between both conditions. In the ON condition, the absolute error of the target value and the gripping force in the isometric and concentric contraction was significantly lower than that in the OFF condition. It is considered that the subthreshold electric stimulation activated the central nervous system and this phenomenon improved the

ability controlling the finger movement. It is useful to apply the stochastic resonance for facilitation of human sensorimotor function.

要 旨

手指の把持運動を適切に調整する能力（把持力調整能力）は、箸の取り扱いやコップの把持などの日常生活のあらゆる場面において用いられる。そのため、把持力調整能力を向上させる新たなトレーニング法を開発することは、リハビリテーションや高齢者、小児に対する運動制御能力の向上に対して役立つものである。本研究では、確率共鳴が筋収縮の制御能力の向上に結びつくのかを明らかにするため、感覚閾値以下の電気刺激のノイズ付加によって、把持機能が向上するのかを検討した。把持力調整能力を定量的に評価するデバイス（iWakka）を用いて、モニタ上に提示される目標値に対して右手の把持力を正確に合わせる運動課題を行った。練習試行を行った後、感覚閾値以下（感覚閾値の0.9倍）の電気刺激のノイズを正中神経に提示する試行（ON試行）と電気刺激がない試行（OFF試行）間で把持力と目標値との力の誤差を比較した。ON試行ではOFF試行と比較して、短縮性収縮と等尺性収縮時には目標値と把持力の絶対誤差が有意に低い値を示した。ON試行時に提示された感覚閾値以下の電気刺激は、脊髄や大脳感覚運動領域を活性化させ、その影響が把持の制御能力を向上させたと考えられる。以上のことから確率共鳴を感覚運動能力の向上に対して適用できることが明らかとなった。

緒 言

手指は物体を握ったり、掴んで持ち上げたり、箸や鉛筆などの物体を操作する時に用いられるため、日常生活動作を遂行する上で重要な役割を担っている。普段、我々は手指を用いた日常生活

動作を何気なく遂行することが出来るが、その背景には物体の重さや表面の材質などの特性に応じて、手指の筋収縮を適切にコントロールして把持力を調整する能力が働いている。合目的かつ効率的に把持動作を行うために、最大筋力下で把持力を調節する能力を把持力調整能力という¹⁾。把持力調整能力は、手指の筋を状況に応じて素早く、あるいはゆっくりと収縮させる能力、目的とする方向に正確に筋を収縮させる能力、適度な強さで筋を収縮させる能力が複合的に作用して形成されると考えられる。これまで健常人に対して手指の運動機能を評価する際には、体力測定における把持の最大筋力を測定する握力検査が行われてきた。しかし、日常生活では、最大の握力を発揮する場面は少なく、最大下で把持力を調節することが重要である場合が多くみられるため、手指の運動機能を評価するためには把持力調整能力を評価することは非常に重要であると考えられる。

リハビリテーションの現場においては、手指の運動機能の評価としてペダボードの移動課題などが用いられており、作業後の達成度から上肢の運動機能の評価を行っている。しかしこれらの課題では、作業中の手指の把持力調整能力を直接計測するものではないため、その能力を定量的に評価することができなかった。そこで名古屋工業大学の森田らは、あらかじめ設定した目標値に対して、把持力を調整させながら追従する視覚追従課題を用いて、把持力と目標値の誤差を算出し、把持力調整能力を定量化できる機器を開発した^{1,2)}。

脳血管障害によって手指の運動機能に障害が残った場合や加齢などの要因によって、把持力調整能力が低下した場合には、日常生活動作が困難になる。そのため、手指の働きが低下した場合に

は、生活の質を保つために、その働きを高める必要がある。低下した運動機能を高めるためには練習を反復して行うことが一般的な対処法である。その他の方法として医療分野や神経科学分野では、頭皮上から微弱な電流で脳を刺激する経頭蓋直流電流刺激や磁気刺激を反復的に提示することで脳機能を高める方法が用いられている^{3,4)}。近年では、新たな手法として、感覚情報のノイズを生体に提示する方法が注目されている。触覚を用いた識別課題時に感覚閾値以下の機械的刺激のノイズを提示すると、識別能力が向上することが報告されており⁵⁻⁷⁾、この現象の背景には確率共鳴が関与していると考えられる。確率共鳴は、氷河期の周期変動のメカニズムや非線形のレーザーシステムなどの自然界や人工物などのあらゆる事象について観察されるものである⁸⁾。生体に確率共鳴を適用した場合には、閾値未満で反応しない生体系のシステムに対して不規則なノイズを印加すると、ノイズの入力によって生体系の活動が強まり、閾値を越える確率が向上して生体反応が起こり、感覚運動機能が向上すると考えられている。

確率共鳴を用いた運動能力への影響に関するこれまでの研究においては、前庭系に対して感覚閾値以下の電気刺激を付加すると姿勢動揺が減少することや⁹⁾、機械的刺激の提示によって手指の巧緻性を高めることが報告されており^{10,11)}、感覚情報の提示が運動の調節能力を高める可能性を示唆している。しかし、確率共鳴による運動系に関する報告は、多関節が関与する複雑な運動に対するものがほとんどである。運動はさまざまな筋収縮様式によって成り立っているため、感覚情報を提示して運動系に作用する確率共鳴が、運動の調節能力に対してどのように作用するのかを詳細に解明するためには、様々なタイプの筋収縮様式に関する検討が必要である。そこで本研究では、電気刺激のノイズにより把持力調整能力が向上するのかを明らかにすることを目的としており、

iWakkaを用いた視覚追従課題を用いて、確率共鳴が様々な筋収縮様式時の把持力調整能力に対してどのように作用するのかを検討するものである。

1. 方法

被験者は健常な右利き大学生14名であり(平均年齢22.6±6.0歳)、その内訳は男性9名、女性5名であった。被験者には事前に研究の趣旨と内容について説明を行い、参加の同意を得た上で実施した。本研究は名古屋工業大学倫理審査委員会の承認を得て実施した(承認番号2019-003)。

1. 1 把持力調整能力の定量的評価システム(iWakka)の概要

iWakkaは把持力調整能力をトレーニングし、同時に評価できる機器である。計測時には開閉の可動性を持つC字状のパイプを把持し、被験者にはモニタ内に表示されている目標値に対して把持力を出来るだけ正確に調整するように指示する。iWakkaを手指で把握して力を加えると、板バネが変形してiWakkaの幅が変化する。この変化を板バネに取り付けた歪センサーで計測して増幅し、パソコンに取り込んでリアルタイムで提示して把持力の変化を可視化している(図1)。

iWakkaを用いた把持力調整能力の評価課題は視覚追従課題であり、最小値(150g重)から最大値(400g重)の間で山型に設定された目標値に対して出来るだけ正確に把持力を一致させる課題である。評価課題の目標値は最初の150g重から4秒かけて62.5g重を漸増的に増大した後、4秒間はその値を保持し、再び4秒かけて62.5g重増大させることを4回繰り返して最大値に達する。その後、4秒かけて62.5g重を減少させた後、4秒間はその値を保持することを4回繰り返す。この視覚追従課題は筋収縮様式の違いにより、iWakkaを閉じる方向に手指を動かしながら

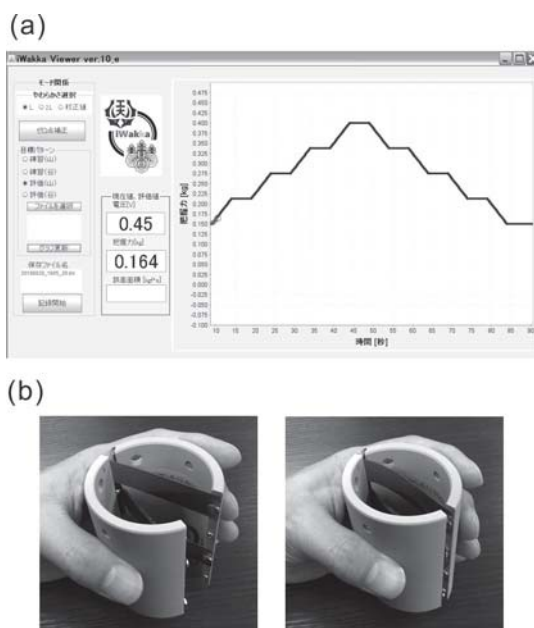


図1 把持力調整能力の評価に用いた装置
 (a) 視覚追従課題の測定画面 (b) 把持力測定デバイス (iWakka) の無収縮時 (左図) と張力発揮時 (右図)

筋力を発揮する短縮性収縮区間 (Concentric 区間: Con 区間), iWakka が開く方向に手指を動かしながら筋力を発揮する伸張性収縮区間 (Eccentric 区間: Ecc 区間), 筋の長さを変化させないで筋力を発揮する等尺性収縮区間 (Isometric 区間:

Iso 区間) から構成されている (図2).

被験者は目標値 (灰色) に対してできるだけ正確に把持力を合わせようとするが, 誤差が生じる. 目標値と発揮力の間の誤差の絶対値を計算して, 各区間における平均値を算出した.

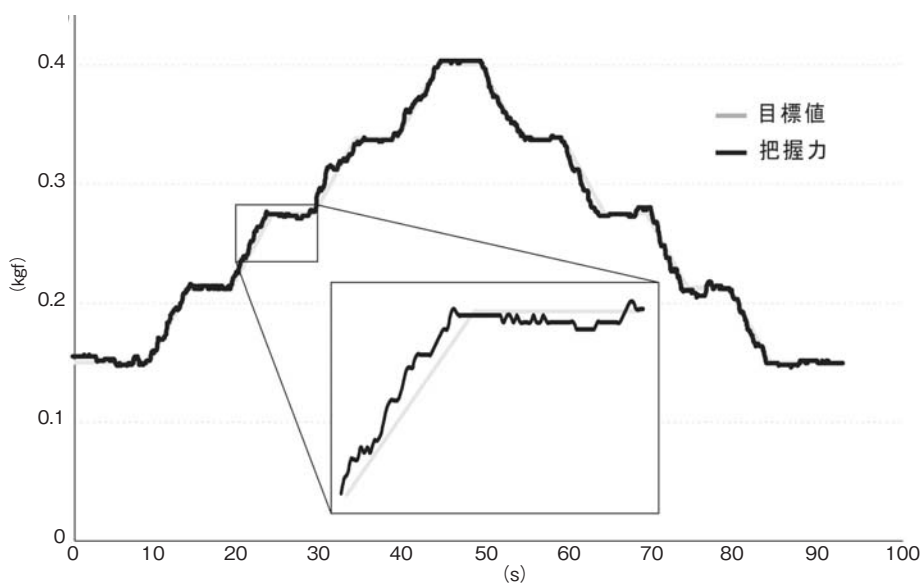


図2 一試行における測定結果

1. 2 実験設定

被験者には測定中は椅子に深く腰掛け、背筋を伸ばした姿勢で腰が背もたれにからうじて当たる程度の位置に座るように指示した。両脚は肩幅程度に開き、膝関節は90度程度曲げた状態で、両足は地面に接地した状態で測定を行った。右肘は椅子の肘かけに乗せて上肢の重さを感じない状態を保ち、5本すべての指を用いて iWakka を把持させた。視覚追従課題中は、把持運動の關係しない上腕の筋の関与を除外するために、iWakka を持ち上げて操作しないようにさせた。被験者は視覚追従課題の内容を理解して慣れるために、測定課題と同じ課題を用いた練習を3回行わせた。

体性感覚情報のノイズとして用いた電気刺激は、刺激間隔 20ms, 40ms, 60ms, 80ms, 100ms の間でランダムに提示した。刺激部位は手指の筋を支配する正中神経であり、電気刺激の強度は感覚閾値の0.9倍に設定した (ON 条件)。また、コントロール条件として、電気刺激がない条件 (OFF 条件) の測定も行った。視覚追従課題は ON 条件を2回、OFF 条件を2回行い、試行間には3分程度の休憩を設けた。ON 条件と OFF 条件の試行順はランダムに設定し、被験者にはどの条件を行っているのかの告知は行わなかった。また、ON 条件で用いた刺激強度は感覚閾値以下であったため、被験者はどちらの条件が行われているかを課題遂行中に察知することは出来なかった。

1. 3 データ解析と統計処理

把持力調整能力の評価としては、被験者が発揮した把持力の実測値と目標値の間の誤差の絶対値を0.1秒毎に算出し、各区間において平均値を求めた。ON 条件と OFF 条件における測定値は2試行の平均値とした。最初に、ノイズの提示が把持力調整能力に対して影響を与えるのかを明らかにするために区間全体における ON 条件と OFF

条件における絶対誤差を比較した。その後、短縮性収縮、伸張性収縮、等尺性収縮における ON 条件と OFF 条件の比較を行った。統計分析では対応のある t 検定を用い、統計的有意水準は5%未満とした。

2. 結果

視覚追従課題の区間全体における目標値と測定値の間の絶対誤差は、ON 条件では $3.46 \pm 0.39\text{g}$ 重、OFF 条件では $3.58 \pm 0.52\text{g}$ 重であり、ON 条件の方が低い値を示したが、統計的有意差は得られなかった ($p=0.07$) (図3)。本研究で用いた視覚追従課題は、筋収縮様式に注目すると短縮性収縮、伸張性収縮、等尺性収縮の三種類に分類することが出来るため、それぞれの筋収縮様式において電気刺激の有無における把持力調整能力への影響を比較した。

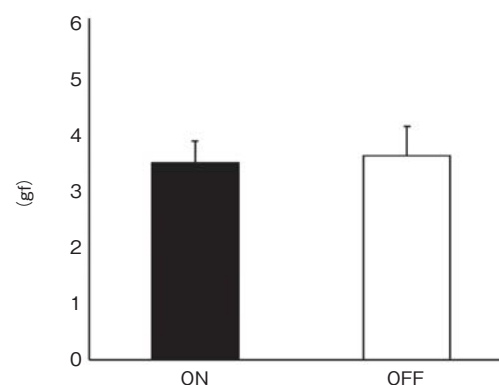


図3 区間全体における ON 条件と OFF 条件の絶対誤差

ON 条件における Con 区間, Ecc 区間, Iso 区間の目標値と測定値との間の絶対誤差は、 $3.78 \pm 0.57\text{g}$ 重、 $4.05 \pm 0.79\text{g}$ 重、 $2.48 \pm 0.37\text{g}$ 重であった。OFF 条件における Con 区間, Ecc 区間, Iso 区間の目標値と測定値との間の絶対誤差は、 $4.15 \pm 0.77\text{g}$ 重、 $4.48 \pm 0.87\text{g}$ 重、 $2.72 \pm 0.52\text{g}$ 重であった (図4)。各区間について ON 条件と OFF 条件を比較すると、Con 区間 ($p<0.05$) と Iso 区間 ($p<0.05$) とともに ON 条件で OFF 条件よりも絶対

誤差が有意に小さかった。Ecc 区間については、ON 条件の方が OFF 条件よりも絶対誤差が小さい傾向であったが、統計的有意差は得られなかった ($p=0.07$)。

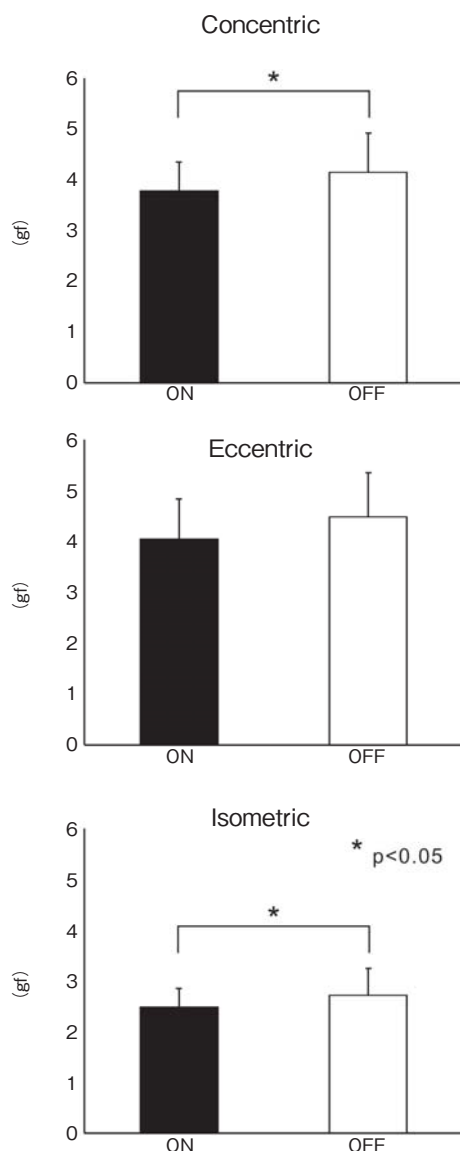


図4 各収縮区間 (Con 区間:Concentric 区間, Ecc 区間: Eccentric 区間, Iso 区間: Isometric 区間) における ON 条件と OFF 条件の絶対誤差

3. 考察

本研究では、把持動作を用いた視覚追従課題時に電気刺激を用いて体性感覚情報のノイズを与

えると (ON 条件), 電気刺激がない OFF 条件より Iso 区間と Con 区間において, 目標値と発揮力との絶対誤差が有意に減少するが, Ecc 区間ではノイズの有無に関わらず絶対誤差には有意差がみられなかった。これらの結果は, 感覚閾値以下の強度の電気刺激によって把持力調整能力が向上するが, その影響はすべての筋収縮様式に対して同様の結果をもたらすわけではないことを示している。下腿筋の等尺性収縮時に脛骨神経に対して電気刺激を提示すると, 目標値との絶対誤差が減少する結果は報告されており¹²⁾, 本研究の結果と一致している。これまでの研究においては確率共鳴が等尺性収縮以外の収縮様式において作用するのは調べられておらず, 短縮性収縮時において確率共鳴によって把持力調整能力が向上することが明らかになった結果は, 本研究における新たな知見である。

本研究では手首へ電気刺激を提示しているため, 電気刺激に対する注意の影響が, 手指の把持力調整能力を向上させることが想定される。しかしながら, 本研究で用いた電気刺激の強度は感覚閾値の 0.9 倍であったため, 被験者は課題遂行中には電気刺激が提示されているのかを判断することができなかった。さらに, ON 条件と OFF 条件はランダムに試行したため, 被験者はどの条件が行われているのかも判断できなかった。そのため, 電気刺激に対する注意の影響や心理的なバイアス以外の要因, つまり感覚閾値以下の電気刺激が生体の感覚運動系に作用して確率共鳴を引き起こしたことによって, 把持力調整能力が向上したと考えられる。

体性感覚情報は筋の収縮状態をモニタするためのフィードバック情報であり, 一部の情報は脊髄の運動ニューロンに直接入力して反射的に運動を調節している。残りの体性感覚情報は, 視床を経由して一次体性感覚野へ投射し, 筋の収縮状態をモニタするとともに運動のプログラムの形成に用

いられている。本研究では、感覚閾値の0.9倍の刺激強度を用いて電気刺激を行ったが、感覚閾値以下の強度で電気刺激を行った場合においても、感覚神経が全く興奮していないわけではなく、体性感覚情報は脊髄や大脳皮質に伝わっている。脳磁図を用いた研究では、安静時に感覚閾値付近の強度で電気刺激を単独で提示して大脳皮質の誘発反応を記録した際には、一次体性感覚野における初期応答はみられない¹³⁾。しかし、感覚閾値以下の体性感覚情報のノイズを提示しながら体性感覚誘発電位を記録すると、ノイズのない条件よりも体性感覚誘発電位の振幅が増大する¹⁴⁾。このことより、体性感覚の経路あるいは大脳皮質の体性感覚領域において、ノイズによって体性感覚情報処理を促進させる神経機構が存在することが考えられる。把持運動中には、運動によって筋肉や皮膚からの体性感覚情報のフィードバックが存在するため、電気刺激による体性感覚情報の入力が増加したとしても、一次体性感覚領域が活性化し、運動系に作用するためには十分な情報となることが考えられる。

脳卒中で上肢の運動機能障害を有する患者に対して、手首へ感覚閾値以下の体性感覚情報を提示すると、ペグや正方形のボックスを移動する能力や精密把持力の最大値が改善することが報告されている¹⁰⁾。これらの結果は、体性感覚情報のノイズによって確率共鳴が起こり、手指の巧緻的動作や最大筋力を向上させることを示している。本研究においては、拇指や示指を支配する正中神経に対して感覚閾値以下の電気刺激を提示すると、把持力調整能力が向上した。しかし、すべての筋収縮様式において把持力調整能力が向上したわけではなく、Con区間とIso区間においてのみ把持力調整能力の向上が認められ、Ecc区間では把持力調整能力に変化はみられなかった。核磁気共鳴画像を用いて把持動作時の短縮性収縮と伸張性収縮時の脳活動を計測すると、短縮性収縮は伸張性

収縮と比較して、一次運動野や大脳基底核の尾状核の活動が高まっている¹⁵⁾。また、握力把持を用いた視覚追従課題時における一次体性感覚領域の活動については、伸張性収縮時よりも短縮性収縮時において有意な活動の減少がみられる¹⁶⁾。これらのことから、手指の把持という動作が同じであっても、筋収縮様式によって脳の感覚運動領域の活動が異なることが分かる。本研究では、視覚追従課題時に提示した電気刺激の強度は一定であったが、筋収縮様式によって運動系の活動が異なるため、体性感覚情報の処理に対する運動領域からの影響が異なり、電気刺激のノイズによる確率共鳴が伸張性収縮と他の筋収縮様式で異なる結果になったと考えられる。

本研究では把持を行う筋を支配する正中神経に対して電気刺激を提示したため、主働筋における体性感覚系と運動系間の感覚運動連関に影響を与えていることが想定される。しかし、指先を用いた触覚の識別課題時に、感覚閾値以下のノイズを指先に提示すると識別能力が向上するが、識別に関連しない手背部や拇指にノイズを提示しても識別能力が向上する⁶⁾。ノイズによる感覚運動機能の促進については、中枢神経のどの領域でどのように作用しているのかについては明らかにされていない。さらに、今回の報告では、感覚閾値以下(感覚閾値の0.9倍)の強度の電気刺激によって把持調整能力が向上したが、本研究で用いた刺激強度が確率共鳴を引き起こすための最適の刺激強度であるのかは明らかにされておらず、今後の検討が必要である。

4. 結 論

本研究より、把持運動遂行中に感覚閾値以下の電気刺激を提示することで、把持力調整能力が向上することが明らかとなった。確率共鳴の応用は運動能力を向上させる新たな手法となる可能性がある。

謝 辞

本研究に対して研究助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に心よりお礼申し上げます。また実験のためにiWakkaを貸与下さりました名古屋工業大学の森田良文教授に深く感謝申し上げます。

文 献

- 1) 森田良文, 中嶋伸吾, 佐藤徳孝, 矢崎潔, 把持力調整能力の定量的評価システム, 日本福祉工学会誌, **18**(2): 5-10(2016)
- 2) 金野達也, 佐藤彰紘, 矢崎潔, 森田良文, 柴垣浩明, 秋月千典, 把持力調整能力評価法の測定誤差の検討, 理学療法学, **32**(1): 117-121(2017)
- 3) Tanaka S., Hanakawa T., Honda M., Watanabe K., Enhancement of pinch force in the lower leg by anodal transcranial direct current stimulation, *Exp. Brain Res.*, **196**(3): 459-465 (2009)
- 4) Kang S.K., Wasaka T., Shamin E.A., Auh S., Ueki Y., Lopez G.J., Kida T., Jin S.H., Dang N., Hallett M., Characteristics of the sequence effect in Parkinson's disease, *Mov. Disord.*, **25**(13): 2148-2155 (2010)
- 5) Collins J.J., Imhoff T.T., Grigg P., Noise-mediated enhancement and decrement in human tactile sensation, *Phys. Rev. E.*, **56**: 923 (1997)
- 6) Lakshminarayanan K., Lauer A.W., Ramakrishnan V., Webster J.G., Seo N.J., Application of vibration to wrist and hand skin affects fingertip tactile sensation, *Physiol. Rep.*, **3**(7): e12465 (2015)
- 7) Wells C., Ward L.M., Chua W.R., Inglis J.T., Touch Nose Increases Vibrotactile Sensitivity in Old and Young, *Psychol. Sci.*, **16**(4): 313-320 (2005)
- 8) Benzi R., Sutera A., Vulpiani A., The mechanism of stochastic resonance, *J. Phys. A: Math. Gen.*, **14**: L453-L457 (1981)
- 9) Fujimoto C., Yamamoto Y., Kamogashira T., Kinoshita M., Egami N., Uemura Y., Toga F., Yamasoba T., Iwasaki S., Noisy galvanic vestibular stimulation induces a sustained improvement in body balance in elderly adults, *Sci. Rep.*, **6**: 37575 (2016)
- 10) Seo N.J., Kosmopoulos M.L., Enders L.R., Hur P., Effect of remote sensory noise on hand function post stroke, *Front. Hum. Neurosci.*, **8**: 934 (2014)
- 11) Nobusako S., Osumi M., Matsuo A., Furukawa E., Maeda T., Shimada S., Nakai A., Morioka S., Subthreshold Vibrotactile Noise Stimulation Immediately Improves Manual Dexterity in a Child With Developmental Coordination Disorder: A Single-Case Study, *Front. Neurol.*, **10**: 717 (2019)
- 12) Kouzaki M., Kimura T., Yoshitake Y., Hayashi Y., Moritani T., Subthreshold electrical stimulation reduces motor unit discharge variability and decreases the force fluctuations of plantar flexion, *Neurosci. Lett.*, **513**: 146-150 (2012)
- 13) Lin Y.Y., Shih Y.H., Chen J.T., Hsieh J.C., Yeh T.C., Liao K.K., Kao C.D., Lin K.P., Wu Z.A., Ho L.T., Differential effects of stimulus intensity on peripheral and neuromagnetic cortical responses to median nerve stimulation, *NeuroImage*, **20**: 909-917 (2003)
- 14) Seo N.J., Lakshminarayanan K., Boniha L., Lauer A.W., Smit B.D., Effect of imperceptible vibratory noise applied to wrist skin on fingertip touch evoked potentials – an EEG study, *Physiol. Rep.*, **3**(11): e12624 (2015)
- 15) Spraker M.B., Corcos D.M., Vaillancourt D.E., Cortical and Subcortical Mechanisms for Precisely Controlled Force Generation and Force Relaxation, *Cerebral Cortex*, **19**: 2640-2650 (2009)
- 16) Wasaka T., Kida T., Kakigi R., Modulation of somatosensory evoked potentials during force generation and relaxation, *Exp. Brain Res.*, **219**: 227-233 (2012)