

令和 6 年 5 月 27 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2022～2023

課題番号：22K19794

研究課題名（和文）ノイズ付与部の感度低下効果を用いた高感度な指先触感覚の獲得

研究課題名（英文）Enhancing fingertip haptic sensitivity by cooling skin temperature effect and using stochastic resonance

研究代表者

遠藤 孝浩（Endo, Takahiro）

京都大学・工学研究科・准教授

研究者番号：70432185

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：ノイズを与えることで触感覚を向上させる、既存の確率共鳴を用いた指先触感覚向上法には、その向上に限界があった。十分大きなノイズを付与すれば感度は良くなるが、ノイズ付与部で知覚できる程大きなノイズを与えると、人の注意が付与部に向くため、指先触感覚は逆に低下する。本申請では、ノイズ付与部である手首の感度を低下させ、人の注意を引かずに大きなノイズを付与することで、指先触覚を高感度化させる手法を提案し、実験によりその有効性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、触覚の感度低下特性を用い、確率共鳴現象の強化を図る新たな試みであった。また温度依存という感度低下効果と、確率共鳴という感度向上効果の組合せによる知覚現象の解明は、世界初の知見を得ることであり、これらが研究成果の学術的意義である。さらに本研究の成果は、ノイズ付与だけでは迫れなかった、熟練手技を持つ技能者と同程度の知覚能力の獲得など、幅広い応用への展開が期待でき、大きな社会的意義を生む研究であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The current approach to improving fingertip haptic sensation using stochastic resonance, which enhances haptic sensation by applying mechanical noise, has limitations in its improvement. While the haptic sensitivity would improve when sufficiently large noise is applied, fingertip haptic sensitivity decreases when a large noise that humans can perceive is applied to the wrist. Thus, we proposed a novel method to improve the fingertip haptic sensitivity by applying vibrotactile noise to a cooled wrist. Specifically, we confirmed that cooling the wrist skin reduces its sensitivity to vibrotactile stimuli. Thus, using this effect, we could apply a large but imperceptible noise to the wrist. This allowed us to propagate a large noise to the fingertip, improving the tactile sensation of the fingertip via the stochastic resonance effect. Through several experiments, we verified the efficacy of our proposed method.

研究分野：ハプティクス

キーワード：触覚 確率共鳴 指先触感覚の高感度化 ノイズ 触診

1. 研究開始当初の背景

ヒトの指先での触感覚（物体に触れた感覚）が向上すれば、医療分野における触診手技など、手指を用いた作業の効果を飛躍的に向上できる可能性がある。そこで本申請では、指先触感覚を格段に高感度化する手法を探求する。

特に、申請者はこれまでに、手首に微小なガウスノイズを与えることで、指先の触感覚を向上させる確率共鳴現象を研究してきた。すなわち、手首に与えた微小な機械ノイズが指先に伝搬し、指先での力刺激に重畳する。これにより、力刺激が指先の知覚閾値を超えやすくなり、触感覚が増強される現象である。手首にノイズを与える理由は、指先での作業を阻害しないためである。十分大きなノイズを指先に伝搬できれば、指先での触感覚は大きく増強される。しかし、ノイズを与える手首部に、知覚できる程大きなノイズを与えると、指先での触感覚は逆に低下する。これはヒトの注意が手首に向くためと考えられる。このため、ヒトの手首での知覚感度を低下させ、かつ知覚されない十分大きなノイズを与えることができれば、ヒトの指先での触感覚を大いに高める可能性がある。そこで、ノイズ付与部の知覚感度を低下させ、ヒトが知覚しない大きなノイズを手首に与えることで、高感度な指先触感覚を獲得する手法を提案するに至った。

2. 研究の目的

ヒトに機械的ノイズを与えることで指先触知覚を向上させる確率共鳴において、ノイズ付与部の触覚受容器の特性を用いることで、指先触知覚を格段に高感度化させる手法を構築することを目的とする。特に、ヒトの指における、機械振動に対する振動知覚は、指を冷やすことで感度が低下する温度依存特性をもつことが知られている。そこで本研究では、この温度依存特性が手首部の知覚感度を低下できるという仮説を設け、それを検証する。そしてその特性を用いて、ノイズ付与部である手首の感度低下を誘発し、手首に知覚しない大きなノイズを付与できることで、指先触感覚を格段に高感度化させる手法(図1)を構築する。これが研究目的である。

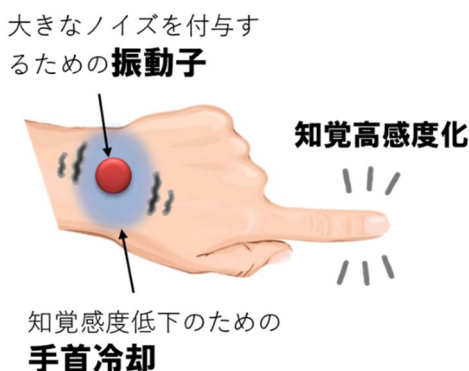


図1 指先触感覚の高感度化手法。ノイズ付与部の感度を低下させ、大きなノイズを手首に与える。この大ノイズが指先に十分伝搬し、触感覚を高感度化させる。

3. 研究の方法

本研究では、目的達成のために以下の2項目について研究を行う。

(1) 手首部の知覚感度低下特性の解明

申請者はこれまで、手首に微小なガウスノイズを与えることで、指先の触感覚を向上させる確率共鳴現象を研究してきた。本研究においても、ノイズ付与部として、手首部を用いる。そして保冷剤や冷水等で手首部を冷やし、冷却時における手首の機械振動刺激に対する閾値を計測する。特に、様々な温度および様々な周波数の振動に対する知覚実験を通し、手首における温度依存特性をはじめとした手首部感度低下特性を解明する。

(2) 指先触感覚の高感度化手法の実現

上記(1)の手首部感度低下特性を利用し、指先触感覚を高感度化させるシステムを構築する。手首部冷却に加え、これまで申請者が研究開発してきた、機械的ノイズを手首部に付与することで指先触知覚を向上させる方法と統合し、手首部知覚感度低下を用いた指先触感覚を高感度化するシステムを開発する。特に様々な被験者実験を通し、多方面から、提案する触感覚高度化手法の有効性を検討する。

4. 研究成果

(1) 手首部の知覚感度低下特性の解明

ノイズ付与部である手首部を、保冷剤または冷水等で冷却し、手首部における機械ノイズ(確率共鳴で用いる白色ガウスノイズ)に対する閾値を計測した。特に、様々な手首温度に対する知覚実験を通し、手首における温度依存特性をはじめとした手首部感度低下特性を検討した。

結果の一例を図2に示す。本実験における被験者は、10名である。図において、横軸は手首

の皮膚温度を示し、縦軸は手首の機械ノイズに対する感覚閾値（全被験者の平均値）を示している。誤差バーは標準誤差であり、各被験者の値を丸で表示している。なお、閾値が高いほど、ノイズの知覚は低くなる。

結果として、手首を冷却すると、手首における機械ノイズに対する感度が低下することが示された。このため、冷却することで、人の注意を引かずにノイズ提示部である手首部に大きなノイズを付与できることが明らかになった。またこの時、指先における変位を計測することで、指先に大きなノイズを伝播できることも明らかになった。なお被験者のアンケート調査より、手首を冷却すれば、冷却部である手首での感度は低下するが、冷やしすぎると被験者への負担になることが分かり、実験実施時において、この点について注意が必要である。

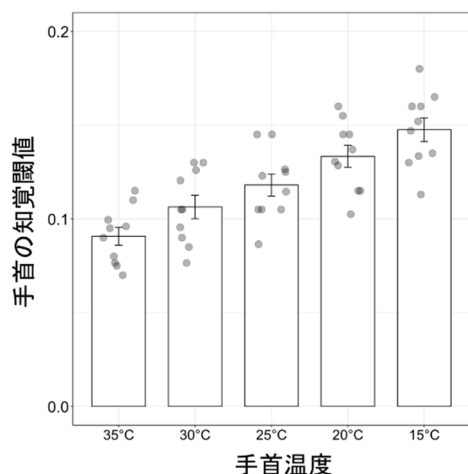


図2 機械ノイズに対する手首の知覚閾値。様々な手首温度時における、手首の知覚閾値を計測した。

(2) 指先触感覚の高感度化手法の実現

上記(1)で検討した手首部冷却を、これまで申請者が研究開発してきた、機械的ノイズを手首部に付与することで指先触知覚を向上させる方法と統合した。これにより、手首部知覚感度低下を用いた指先触感覚を高感度化する手法(図1)を提案した。そして、人の注意を引かずに大きな機械ノイズを付与することで、確率共鳴現象が強化されることを検討した。

具体的には、14名の被験者に対して、サンドペーパーを用いた粗さ知覚実験(あるサンドペーパーを指で触ってもらい、それを覚えてもらう。その後、複数のサンドペーパーを触ってもらい、その中から、先ほど覚えたサンドペーパーを回答してもらう。これを複数試行を行う。正答率が高いほど、指先知覚が高いことに対応する)を行った。一例を図3に示す。図において、横軸は、手首に与えた機械的ホワイトノイズの大きさ、縦軸は正答率を示す。また灰色の棒は、手首を20度冷却した場合の応答、白い棒は手首を冷却しなかった場合の応答である。本図においても図2と同様、誤差バーは標準誤差であり、各被験者の値を丸で表示している。

本結果より、手首を冷却した場合でもしない場合でも、手首部に与える機械ノイズ(白色ガウス雑音)の振幅は、0.6Tが最も感度が良くなることが分かる。ここで、Tは手首における知覚閾値の値であり、被験者ごとに異なる。0.6Tは各被験者の知覚閾値の60%の大きさのノイズを用いていることを表す。また、正答率は、手首を冷却した場合の方が高いことが分かる。実験結果より、提案手法により、より高感度に知覚実験を行えること、すなわち、指先触感覚の高感度化手法が実現できることを明らかにした。また外にも、様々な被験者実験を行い、本提案手法の有効性を示した。

なお上記の実験では、手首の冷却は保冷剤や冷水を用いて行っていた。この冷却を効果的に行えるよう、フィードバック制御機能をもたせた手首部冷却装置の開発も併せて行った。この装置を用い、手首部知覚感度低下を用いた指先触感覚を高感度化するシステムの開発を検討した。

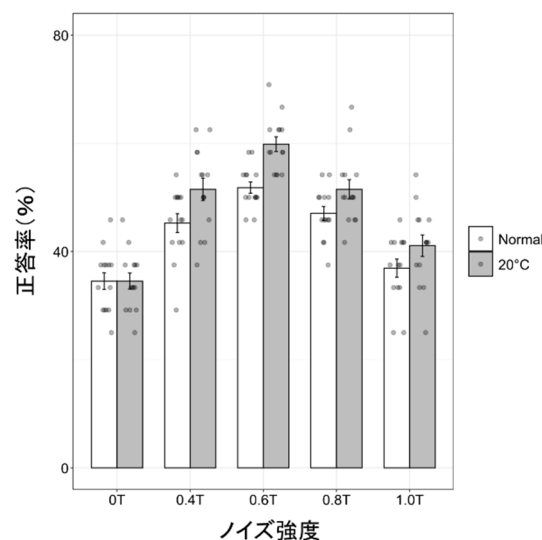


図3 サンドペーパーの識別実験結果。手首に与える機械ノイズの大きさ(ノイズ強度)を様々な変化させ、また手首の温度に関しては2種類(冷却時および非冷却時)とし、正答率を求めた。

ノイズを与えることで触感覚を向上させる、既存の確率共鳴を用いた指先触感覚向上法には、その向上に限界があった。十分大きなノイズを付与すれば感度は良くなるが、ノイズ付与部で知覚できるほど大きなノイズを与えると、人の注意が付与部に向くため、指先触感覚は逆に低下する。本研究では、ノイズ付与部である手首の感度を低下させ、人の注意を引かずに大きなノイズを付与することで、確率共鳴現象を強化する新規な試みを行い、その有効性を示すことができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Endo Takahiro, Kim Dong-Hwan, Chamnongthai Komi	4. 巻 16
2. 論文標題 Enhancing Fingertip Tactile Sensitivity by Vibrotactile Noise and Cooling Skin Temperature Effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 391 ~ 399
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2023.3299575	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 Chamnongthai Komi, Endo Takahiro, Matsuno Fumitoshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Two-finger Stiffness Discrimination with the Stochastic Resonance Effect	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ACM Transactions on Applied Perception	6. 最初と最後の頁 1 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3630254	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 Chamnongthai Komi, Li Zhu, Endo Takahiro	4. 巻 24
2. 論文標題 Band-Limited Vibrotactile Noise Enhances Fingertip Haptic Sensation	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Computing and Information Science in Engineering	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) 10.1115/1.4064651	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 Komi Chamnongthai, Takahiro Endo, Fumitoshi Matsuno	4. 巻 -
2. 論文標題 Two-finger stiffness discrimination of a virtual object with haptic sensation enhancement via the stochastic resonance effect	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Displays	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) 10.1016/j.displa.2023.102429	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 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takahiro Endo, Komi Chamnongthai
2. 発表標題 Enhancement of fingertip haptic sensation by band-limited vibrotactile noise
3. 学会等名 The 9th IEEJ international workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization (SAMCON2023) (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------