



[原著]

視覚ノイズが触 2 点閾に及ぼす効果についての報告

杉本 恵理

大阪府柔道整復師会専門学校

要旨

特定レベルの弱いノイズを付加する事により、閾下の信号が検出可能となる現象は確率共鳴と呼ばれている。本研究では、触 2 点閾が 5 つの異なる強度のランダムドットを用いた視覚ノイズを提示することによって改善されるかどうかを調べた。健康な 3 名の成人被験者において、非利き手の第 2 指第 3 指腹部での触 2 点閾を測定したところ検出閾値近辺の強度のノイズはノイズ非提示のコントロールに比べ 2 点閾を有意に改善させた。一方、より強い、またはより弱いノイズ強度では触 2 点閾の改善効果は認められず、2 点閾は視覚ノイズ強度に対し U-字曲線を描いた。以上の結果は 3 名の平均値でも、個別データでも同様に認められた。また、少数例にもかかわらず、平均値には検出閾値近辺の強度のノイズ条件とコントロール条件間に統計的有意差が認められた。これらの結果から、クロスモーダルな確率共鳴によって視覚ノイズは触 2 点閾の改善を引き起こすことが示唆された。

キーワード：視触覚の干渉、クロスモーダル、触知覚、触覚感受性、閾下刺激

序論

一般にノイズは信号検出にとって障害となるが、非線形システムにおいては閾値近辺の特定のレベルのノイズを付加する事により、閾下の信号が検出可能となる現象が知られており、確率共鳴と呼ばれている (1)。確率共鳴のメカニズムとしては、閾下の信号と、同時に提示された弱い強度の不規則なノイズが加算された結果、信号の振幅がある確率で閾上にまで増大することで、単独では検出不可能である閾下信号の検出が可能になるものと考えられている (2、3)。ヒトの体性感覚系においては、ノイズの付加により触覚閾値の改善が引き起こされることが知られ

ており、足底部に与えた閾下の触覚刺激にノイズとしての機械的振動刺激を同時提示すると、特定のノイズ強度の場合に閾下刺激の検出が可能になる (4、5)。また、Kurita et al. (6) は手指の先にノイズとして最適強度の振動刺激を提示すると、ノイズ提示の近傍部の 2 点閾が低下し、触覚機能の改善が引き起こされることを観察している。前回の自身の研究においては、健常成人の手背部にノイズとして振動刺激を提示し、比較的距離の離れた手掌部での 2 点閾の変化を測定したところ、閾値付近の弱い強度のノイズに対してのみ、2 点閾の改善が得られた (7)。一方、このようなノイズ提示部とは

連絡先: 杉本 恵理

〒550-0004 大阪府西区靱本町 3-10-3 大阪柔整
会館 3 F 公益社団法人 大阪府柔道整復師会
大阪府柔道整復師会専門学校
E-mail: sugimoto@osaka-jyusei.ac.jp

2020 年 1 月 18 日受付
2020 年 3 月 18 日受理

離れた部位で生じる信号検出閾値の改善は、異なる感覚様相のノイズと信号の組み合わせにおいても見出されており、特定レベルの聴覚ノイズがクロスモーダルに手の触覚閾値を低下させることが報告されている(8)。そこで本研究では、クロスモーダルな確率共鳴により視覚ノイズが触2点閾の改善を引き起こすかどうかについて調べることを目的とした。

方法

本実験の被験者は、専門学校に通う視力(または矯正視力)が正常で健康な右利き男子3名(平均年齢±標準偏差、18.7 ± 0.47歳)で、大阪府柔道整復師会学術専門委員会における倫理委員会での承認を得て行った(承認番号第20150704号)。全対象者にはヘルシンキ宣言に則り実験目的を除いて予め、実験内容に関する説明を行った上、同意を得た。触2点閾測定にはデジタルノギス(フリーダム, cw-80216m)の先端に鍼灸鍼の柄(セイリンディスプレイ鍼LタイプNO.4、コイル状の鍼柄直径約1mm)を取り付けたものを用いた。測定部位は非利き手でおこなったが、もし確率共鳴が生ずれば2点閾の低下が期待で

きるため、2点閾の小さな指先ではなく、第2指第3指腹部中央部とした(7)。視覚ノイズはPC(HyperCard, Apple)で制御した視覚刺激発生装置(VSG Three, Cambridge Research Systems)を用いて作成したランダムドットを被験者の眼前約114cmに置いたディスプレイ(Multi-scan GD420, SONY)の中央部の100mm × 100mm(視角で5度×5度)の範囲に提示し、各ドットは速度45度/秒で右から左へ常に移動させた(9)。ドットの集合の平均輝度は常にディスプレイの背景輝度と同じ70 cd/m²とし、ドットの集合の輝度分布範囲の上限値と下限値を変化させることによりノイズの強度を変化させた(±5、±10、±15、±20 cd/m²; N1、N2、N3、N4)。加えて、ノイズ非提示条件をコントロール(±0 cd/m²; N0)とし、計5段階のノイズ強度を作成した。恒常法を用いて測定したノイズ検出閾値は、3名ともにN2とN3との間に存在した。

被験者は明視野条件下の実験室内で椅子に座り、頭部は顎のせ台を用いて弱く固定した。被験者は左手の手掌を上にして机の上に置いた。被験者に2点閾の測定部位

が見えないようにするため被験者の左手は実験者からのみアクセス可能な箱の中に入れた。2点閾は、触覚計の2本の先端の間隔を0.5mmのステップで変化させた極限法を用いて測定した。1回の触刺激提示時間は約2秒とし試行間隔は3~5秒とした。1セッションは10ブロックからなり、5段階のノイズ強度のそれぞれで、5回の上昇および5回の下降系列によって計10回の2点閾の測定を実施した。合計で5セッションを実施し、計50回の2点閾の測定を行った(図1A)。ノイズ強度はブロック間では疑似

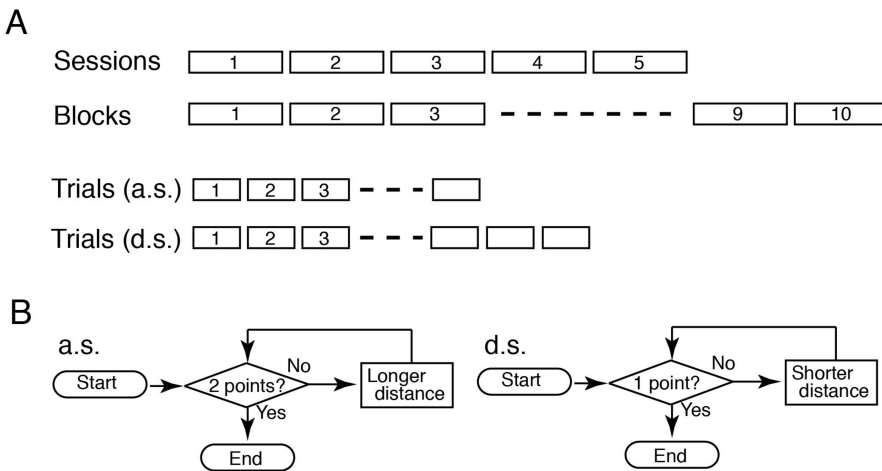


図1 実験手続き

A: セッション(Sessions)、ブロック(Blocks)、試行(Trials)の関係。合計で5セッションを実施した。1セッションは10ブロックから成り半数の5ブロックは上昇系列、残り半数は下降系列で2点閾の測定をおこなった。B: 上昇系列(ascending sequence; a.s.)と下降系列(descending sequence; d.s.)のフローチャート。両系列とも2点間距離のそれぞれの初期値からスタートし、上昇系列では「2点」、下降系列では「1点」の反応が得られるまで0.5mmステップで2点間距離を変化させた。

ランダムな順序で変化させ、ブロック内では同一強度に維持し、ブロック中はノイズを常時提示した。

下降系列の場合は1点、上昇系列では2点の判断が報告された時点で系列を打ち切った(図1 B)。上昇または下降系列ともに、系列を打ち切る判断が生じたときの2点間距離とその直前に実施した試行の2点間距離との中間の値を各系列での2点閾とした。5段階のノイズ強度ごとに、上昇及び下降系列での測定値の平均値を求め、各セッションにおける2点閾とした。

結果

図2A-Cに3名の被験者での視覚ノイズ強度による2点閾の変化を示す。ノイズ非提示のコントロール条件(N0)における第2指第3指腹部中央部での2点閾は 3.1 ± 0.33 mm (平均値 \pm 標準偏差)であった。2点閾に及ぼすノイズの効果は3名の被験者ともほぼ同様の傾向を示し、弱い強度のノイズの提示(N1)では2点閾に大きな変化は認められず、コントロールに比べて減少率は94.0%~104.0%であった。しかし、N2へとノイズ強度を増大させると2点閾はコントロールの57.0%~71.9%に減少した。N3では若干回復して65.2%~82.6%となり、さらにノイズ強度を上げると(N4)逆に2点閾は上昇

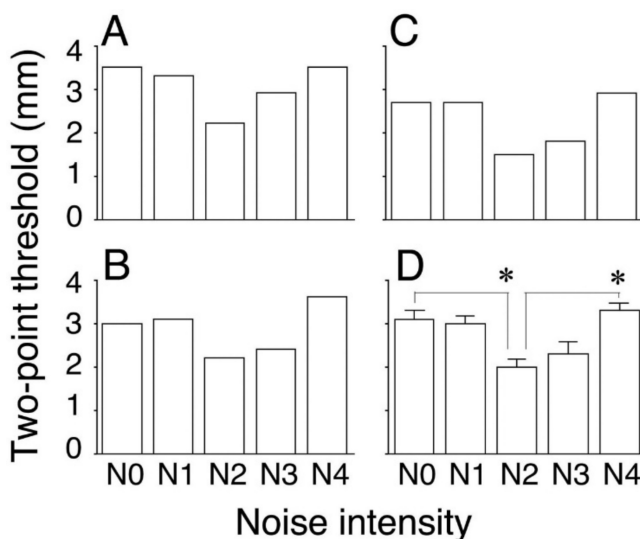


図2 視覚ノイズ強度による2点閾の変化。
A-C: 個別データ、D: 平均値 \pm 標準誤差、* $p < 0.05$

傾向を示した(99.7%~118.2%)。図2Dには、これら3名のデータの平均値(\pm 標準誤差)を示した。2点閾は個別データ同様、ノイズ強度に対しU-字曲線を示し、比較的弱い強度のノイズ(N2)の付加によって最も減少した。

一般にサンプル数が少ない場合には母集団のデータが正規分布するのかどうかを決めることが困難である。そこで、本実験では母集団の正規性の仮定を前提としないノンパラメトリックの検定法を用いて統計的解析をおこなった。フリードマン検定の結果、ノイズ強度の効果は有意であったため($df=4$, $\chi^2=10.467$, $p < 0.05$)、下位検定としてTukey-Kramer法によって多重比較をおこなった結果、N0とN2間($p < 0.05$)、およびN2とN4間($p < 0.05$)に有意差が認められた。

考察

本研究では、特定レベルの視覚ノイズの付加により、感覚様相の異なる触覚閾値の改善が生じるかを被験者内実験デザインを用い、3名の被験者で検討した。2点閾は触覚の感受性を計測するために広く用いられてきた。本実験では頭打ち効果を避けるため、あえて第1指腹部(指先)ではなく、より2点閾の値が大きい第3指腹部を測定部位とした。コントロール条件における第2指第3指腹部中央部での2点閾は 3.1 ± 0.33 mmであった。この値は先行研究の結果とほぼ一致しており(7, 10)、本実験結果の再現性および本実験における2点閾測定方法の妥当性を示唆している。

視覚ノイズの強度を変化させて測定した2点閾はU-字曲線を描き、ノイズの検出閾値近辺の弱い強度のノイズを与えた条件で2点閾は最も改善された。この結果は信号とノイズとの閾下での加算の結果生じた確率共鳴によるものと考えられる(2, 11)。非線形システムにおける閾下での加算による信号検出閾値の低下は工学、生物学、医学等の広い分野において報告されており(12, 13, 14, 5)、生物が外乱の多い環境に適応して進化してき

たことを反映していると考えられる (15)。

ヒトの感覚系における確率共鳴を示した多くの研究では、感覚様相が等しい信号とノイズを用いている (5、16) が、いくつかの研究では異なる様相の信号とノイズを用いても確率共鳴が生ずることを認めている (8、17)。しかし、本実験で示したように、視覚ノイズがクロスモーダルな確率共鳴によって触覚閾値の改善をもたらすという報告は、少なくとも私どもの知る限り初めての知見であるが、視覚刺激によって引き起こされたニューロン活動は視覚皮質を越えて体性感覚野にまで伝達され、体性感覚野のニューロン活動に影響を及ぼす可能性は、視覚と触覚間に様々な干渉がある(ラバーハンド錯視、ミラーセラピー等)ことから強く示唆される(8、18、19)。外界の変化をいち早く検出し、適切な適応反応を生じさせるためには、感覚系は独立に働くのではなく、種々の入力情報を統合する必要がある。体性感覚入力と視覚入力との干渉は外界をより詳細に捕らえるための生体のストラテジーの1つと考えられる。

触2点閾の改善は、高齢者や神経障害を有する患者のみならず、健常成人においてもバランス能力の向上あるいは手指の繊細な作業能力の向上をもたらす (16、20、21)。本実験では視覚ノイズの付加により2点閾の改善が得られた。この方法は従来の振動ノイズを与える方法と比較して、振動子の装着による生体への動きの制限がないため、より広い分野への応用が期待できる。

また、本実験での被験者数は3名と限られているにもかかわらず、統計的に有意な差を検出することができた。この理由としては、本実験で取り扱った現象は極めて再現性の高い現象であることがあげられる。実際、3名の被験者の個別データはバラツキが少なく、ほぼ同様の結果を示した。しかしながら、ここで得られた結果を一般化するためには、今後さらに被験者数を増やして更なる検証が必要である。

結語

視覚ノイズが確率共鳴によって触覚閾値の改善を引き起こすのかを確かめるため、健常成人3名を対象として5段階の強度の視覚ノイズが触2点閾に及ぼす効果を被験者内実験デザインで検討した。非利き手第2指第3指腹部中央部での2点閾は視覚ノイズ強度に対しU字曲線を描き、検出閾値近辺の弱い強度の視覚ノイズを提示した条件ではコントロール条件と比べ触2点閾は57.0%~71.9%減少し、有意な改善が認められた。一方、より強い、あるいはより弱い視覚ノイズの提示条件においては、触2点閾の改善は少ないかあるいは認められなかった。以上の結果は特定レベルのノイズを付加した条件下では視覚ノイズ間のクロスモーダルな確率共鳴が生じ、視覚ノイズが触覚閾値の改善を引き起こすことを示唆している。

2点閾の改善は触覚機能の向上に留まらず関連する運動機能の改善をも引き起こす可能性が示唆される。本実験で用いたノイズは従来の方法と異なり、手指の動作になんら制限を加えないため実用上の有効性も高いと考えられる。

引用文献

- (1) Benzi R, Sutera A, Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance. *J Phys A*. 1981, 14(11), p. 453-457.
- (2) Simonotto E, Riani M, Seife C, Roberts M, Twitty J, Moss F. Visual perception of stochastic resonance. *Phys Rev Lett*. 1997, 78(6), p. 1186-1189.
- (3) Zeng FG, Fu QJ, Morse R. Human hearing enhanced by noise. *Brain Res*. 2000, 869(1-2), p. 251-255.
- (4) Collins JJ, Imhoff TT, Grigg P. Noise-enhanced tactile sensation. *Nature*. 1996, 383, 770 p.
- (5) Collins JJ, Imhoff TT, Grigg P. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation. *Physical Rev E*. 1997, 56(1), p. 923-926.

- (6) Kurita Y, Shinohara M, Ueda J. Wearable sensorimotor enhancer for fingertip based on stochastic resonance effect. *IEEE Trans Hum Mach Syst.* 2013, 43(3), p. 333-337.
- (7) 杉本恵理. 閾値付近の遠隔振動刺激がヒトの触 2 点閾に及ぼす効果. *日本運動生理学雑誌.* 2017, 24(2), p.31-40.
- (8) Lugo E, Doti R, Faubert J. Ubiquitous crossmodal stochastic resonance in humans: auditory noise facilitates tactile, visual and proprioceptive sensations. *PloS one.* 2008, 3(8), e2860.
- (9) Sasaki H, Saito H, Ishida, T. Beneficial effects of noise on visual acuity without consciousness. *International Journal of Medical and Biological Frontiers.* 2017, 23(2), p. 147-166.
- (10) Johansson RS, Vallbo ÅB. Tactile sensory coding in the glabrous skin of the human hand. *Trends in neurosciences.* 1983, 6, p. 27-32.
- (11) Hänggi P. Stochastic resonance in biology how noise can enhance detection of weak signals and help improve biological information processing. *ChemPhysChem.* 2002, 3(3), p. 285-290.
- (12) Melnikov VI: Schmitt trigger. A solvable model of stochastic resonance. *Phys Rev E.* 1993, 48(4), p. 2481-2489.
- (13) Douglass JK, Wilkens L, Pantazelou E, Moss F. Noise enhancement of information transfer in crayfish mechanoreceptors by stochastic resonance. *Nature.* 1993, 365(6444), p. 337-340.
- (14) 大岡昌博, 近藤慎吾. 確率共鳴を生じる電子回路による触覚センシング. *日本機械学会論文集 C 編.* 2007, 73(735), p.3003-3009.
- (15) Faisal AA, Selen LP, Wolpert DM. Noise in the nervous system. *Nature Rev Neurosci.* 2008, 9(4), p. 292-303.
- (16) Wells C, Ward LM, Chua R, Inglis JT. Touch noise increases vibrotactile sensitivity in old and young. *Psychol Sci.* 2005, 16(4), p. 313-320.
- (17) Manjarrez E, Mendez I, Martinez L, Flores, A, Mirasso CR. Effects of auditory noise on the psychophysical detection of visual signals: cross-modal stochastic resonance. *Neuroscience letters.* 2007, 415(3), p. 231-236.
- (18) Moseley, G. L., Gallace, A., & Spence, C. (2012). Bodily illusions in health and disease: physiological and clinical perspectives and the concept of a cortical ‘body matrix’ . *Neuroscience & Biobehavioral Reviews,* 36: 34-46.
- (19) Moseley, L. G., Gallace, A., & Spence, C. (2008). Is mirror therapy all it is cracked up to be? *Current evidence and future directions. Pain,* 138: 7-10.
- (20) Priplata A, Niemi J, Salen M, Harry J, Lipsitz LA, Collins JJ. Noise-enhanced human balance control. *Phys Rev Lett.* 2002, 89(23), p. 238101-1- 238101-4.
- (21) Kurita Y, Shinohara, M, Ueda J. Wearable sensorimotor enhancer for a fingertip based on stochastic resonance. In 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2011, p. 3790-3795.

Effects of visual noise on the tactile two-point threshold

Eri Sugimoto

Vocational College of Osaka Judo Therapist Association

Abstract

Stochastic resonance refers to the phenomenon in which a specific level of weak noise improves detection of sub-threshold signals. In this study we examined whether tactile two-point discrimination threshold is improved by addition of visual noise using random dots, with five different intensities. In 3 healthy adult participants, the two-point thresholds were measured at the 3rd pad of the index finger of the non-dominant hand. The two-point threshold was improved significantly by addition of weak noise near its detection threshold as compared to a control without noise. On the other hand, a more intense or a less intense noise had no such effect. Thus, the two-point threshold showed U-shaped curve against the noise intensity. Similar results were observed in both the mean and individual scores. Although the number of the samples was small, the observed differences were significant in all samples examined. These results suggest that the visual noise can improve the two-point threshold via the cross-modal stochastic resonance.

Keywords: visuotactile interaction, cross-modal, haptic perception, tactile sensitivity, subthreshold stimulus.