

報告番号	※甲	第	号
------	----	---	---

主論文の要旨

論文題目

An Investigation of Tactile Stochastic Resonance
Arising on the Human Fingertip

氏名

(心理物理実験による触覚確率共鳴の調査研究)
BECEREN Kadir

論文内容の要旨

先端ロボットには、触覚を利用して未知物体を探索・操作する能力が必要とされている。特に、近年では医療・介護においてロボットの活躍によせられる高い期待から、人間との接触状態を感じ取るためにも触覚を備えることが求められている。ヒトは優れた触覚を備えているため、ヒトを手本にしてロボットの触覚センサシステムの研究開発を行うことは有効である。

一方、今から二、三十年前から、信号処理の際に厄介者として扱われるノイズが逆に役に立つという確率共鳴 (stochastic resonance ; SR) が非線形科学の分野で話題となっている。生物系の情報処理では、SR によって検出できないくらいの感覚閾値以下の信号でも適切なノイズによって検出できるようになるとされている。特に本研究で着目する触覚では、物体表面に感覚器官をこすり付けてセンシングするために、ノイズの混入が不可避である。触覚センシングに SR の効果を取り入れることによって、センシング能力が飛躍的に向上することが期待される。

本論文では、これまで著者が行った 3 つの実験を通じてヒトの指先に生じる振動触覚の閾値に及ぼす SR の影響について調査する。これらの実験は、古典的心理物理学に基づき実施され、ここでは絶対閾 (absolute thresholds ; AT) と弁別閾 (difference thresholds ; DL) が調査された。ここで、AT と DL はそれぞれヒトが検出可能な振動刺激の最小振幅と二つの振幅の弁別可能限界値である。この古典的物理実験では、一連の刺激に対する被験者の回答を得る。このとき得られた被験者の回答に基づき、刺激に対する心的応答の関係を表す心理閾曲線を求める。ノイズによる心理閾曲線の変化を調査することにより、触覚センシングにおける SR の効果を評価して、その結果に基づいて触覚の SR をモデル化する。

本論文は、5 章から構成される。1 章では、前述の本研究の背景と目的を述べている。まず、本研究の主題となる SR についてこれまでの研究のあらましを述べるとともに、SR の効果をロボットの触覚センシングに組み入れることがロボットの発展にいかにか許与するのかを議論する。そのうえで、外乱ノイズが AT と DL に及ぼす影響を調査

することが本研究の目的であることを述べる。そのために、被験者に種々の振動の時間パターンを指に垂直とせん断方向に加えることができる装置の開発と SR 用の心理物理実験の手順を構築することも目的とする。さらに、得られた知見に基づいて触覚の SR をモデル化することも目的であることも述べる。

続く 2 章では、本研究に関係する知識の整理を行っている。まず、ヒトの触覚について生理学・心理物理学で得られた知見についてまとめる。ヒトの触覚の受容器（機械受容器とよぶ）には、4 つのタイプがあることを述べ、ヒトの手に分布している 4 種類の機械受容器の分布密度や反応特性などについてまとめる。また、本研究で用いる心理物理実験法についてもまとめる。さらに SR についてより詳細なサーベイと触覚と SR の関係についてもまとめられている。

3 章では、まず本研究で用いる装置とコンピュータ・プログラムについて述べている。本装置は積層型の piezoelectric actuator とそれを制御するためのコントローラで構成されている。ノイズを含む波形は C 言語によるソフトで生成している。また、刺激の面積が閾値に及ぼす影響をしらべるために接触子の直径を 2.5mm と 8mm の二種類に変更できるようにする。垂直振動とせん断振動など振動の方向によって DL が変化することが考えられるために、振動方向を変更できるようにする。この装置を用いて、振動子のサイズと振動方向を変更して実験を行う。その結果、垂直振動は振動子のサイズによって DL が変化することが確認されたが、せん断方向についてはほとんど振動方向による差異は認められないことを述べる。一方 DL とノイズの関係では、垂直振動とせん断振動の間で有意な差が認められる。

4 章では、AT の周波数依存性がノイズによってどのように変化するかを調査した結果について述べている。このため、3 種類の振動数 (32, 50, 75 Hz) において、振動触覚の SR の効果を調べた結果を述べている。この実験では、8mm のサイズの振動子が用いられ、信号の振動方向は垂直方向の連続振動（正弦波）のみである。振動波形にガウスノイズを混入させてノイズの rms 値を変化させて、AT を計測する。その結果、32~75Hz の信号について、適切なノイズを印加することにより、AT が顕著に低下する、すなわち適切なノイズにより感度が向上する現象が認められている。さらに、SR 効果が顕著になるノイズの条件で AT と周波数の両対数関係を調査すると傾きが -1 であるために、この周波数の範囲では速順応機械受容単位 I 型（fast adaptive type-I mechanoreceptive unit; FA-I）が SR 現象発生に寄与することがわかる。

5 章では、ガウスノイズによって丁度可差異 (just noticeable difference; JND) がどのように変化するか調査して、得られた結果と今までの結果を含めて触覚の SR をモデル化する。心理物理実験の結果、JND は適切なノイズによって低下することが示されている。これは、適切なノイズが触覚の感度だけでなく精度も向上することを示している。この結果に基づいて非線形な神経素子を並列に接続したモデルを定式化する。それぞれの神経素子は、上閾と下閾を有し、信号の振幅が増大するに従って発火する素子の数が増えるようにそれらの閾値が調整されている。過去に実施した触覚センサによる微小段差識別実験の結果をこのモデルに入力すると、適切なノイズによって微小段差の高さが増加すると発火する神経素子の数が大きくなることを示されている。

本研究で得られた成果を以下に要約する。

- ノイズ 0 と適切なノイズの条件化で垂直振動とせん断振動について触覚の SR の効果を調べた結果、垂直振動の方が顕著な SR が生じることがわかった。
- 32~75Hz の垂直方向振動に対する AT を調べた結果、適切なノイズ強度では AT が減少した。これは適切なノイズを与えると触覚の感度が向上することを示している。

- ・ 上述の関係を両対数グラフ上にプロットした結果、傾きが-1であった。このことは、刺激の一階微分に反応するFA-IにおいてSRが発生していることを示している。
- ・ 垂直振動とせん断振動についてノイズ強度と弁別閾の関係調べた結果、両者の特性が異なった。
- ・ 上記の事実は、SRは脳でなく機械受容単位で生じていることを示している。たとえば、せん断振動については遅順応機械受容単位(slowly adaptive mechanoreceptive unit; SA-II)がSRに関与している。
- ・ 触覚のJNDは適切なノイズによって減少した。すなわち、触覚は適切なノイズで精度が向上することを示している。
- ・ 以上の結果に基づいて、非線形な神経素子を並列に接続したモデルを定式化した。これを用いて、外乱ノイズを含む触覚センサのデータをこのモデルに入力した結果、段差の振幅の高さに比例した出力することがわかった。

本研究は、触覚のSRについて一部の機構の解明に貢献できた。さらにこの効果を取り入れることによって触覚センサの精度を向上できることを示した。今後は、ヒトの触覚のSRの機構解明をさらに進めるとともに、実際に触覚センサシステムの中にSRの機構をソフトウェアとして組み入れるなど応用研究に発展する予定である。