

様式 C - 19

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2010～2011

課題番号：22656043

研究課題名（和文）

触覚の確率共鳴現象のモデル化に関する研究

研究課題名（英文）

Mathematical Modeling of Tactile Stochastic Resonance

研究代表者

大岡 昌博 (Masahiro OHKA)

名古屋大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50233044

研究成果の概要（和文）：

確率共鳴(stochastic resonance; SR)とは適切なノイズの下で検出限界以下の小さな刺激が感じ取れるようになる現象である。本研究では、SRの原理をロボットに組み入れノイズの混入が避けられない触覚センシングの能力を高めることを目的としている。Parameter Estimation by Sequential Testing (PEST)による一連の心理物理実験の結果、弁別閾とノイズ強度の関係において弁別閾が極小値を採る現象を発見した。このことは丁度可知差異(just noticeable difference ; JND)が適切なノイズにより減少することを意味している。JNDは心のなかの物差しであり、適切なノイズによりその物差しの目が小さくなる、すなわち精度が向上することを意味している。この結果に基づいて、双安定な特性をもつ非線形なニューロンのから構成される新しい神経回路モデルを定式化した。本神経回路を用いると、従来表面の判定できなかった表面の微細テクスチャの凹凸形状を抽出できることを実験に示した。

研究成果の概要（英文）：

Human tactile stochastic resonance (SR) capable of enhancing sensitivity by superimposing proper noise upon undetectable weak signals is utilized to enhance the tactile processing method for robotics. Psychophysical experiments are conducted based on the Parameter Estimation by Sequential Testing (PEST) method. The experimental result shows that variation in the difference threshold (Difference Limen; DL) has a local minimum point in the relationship between DL and noise. Therefore, the tactile sensation's just noticeable difference (JND) is decreased by appropriate external noise. Since JND denotes the scale divisions of sensation in the human mind, the present result shows that precise tactile sensations are enhanced by the appropriate external noise. Based on the abovementioned results, we introduce a neural network model composed of nonlinear neurons with the bi-stable equilibrium condition to explain this result. Although original sensor data do not represent the morphology of the fine texture, the neural network model extracts the morphology and distinguishes the wave amplitude of the fine texture.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,500,000	0	1,500,000
2011年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,000,000	450,000	3,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械機能要素

キーワード：複雑系科学，触覚，確率共鳴，心理物理学，ソフトコンピューティング

1. 研究開始当初の背景

確率共鳴とは、通常では閾下の微弱な信号に対して適度なノイズを印加するとシステムの多安定・非線形特性とノイズが共鳴することにより検出が可能となる現象である。図1に示すように適切なノイズを加えた方がむしろ S/N 比（ノイズに対する有効な信号の比）が向上する確率共鳴現象がいくつも報告されている⁽¹⁾。

一方、ヒトの触覚センシングでは、指と対象物との間の相対運動により対象を認識しているためにノイズの混入が避けられないにもかかわらず、数 μm の凹凸まで検出することができている⁽²⁾。研究代表者は、これには確率共鳴現象が関与していると考え、圧力センサ、自動ステージ、閾値処理回路、ノイズジェネレータを用いて触覚の確率共鳴現象の人工生成に成功している⁽³⁾。

2. 研究の目的

触覚では他の感覚と異なり、センサ自体を動かして対象との干渉によりはじめてセンシングできるものである。とくにセンサ自身に機械的な外力が作用し、変形が生じることが不可避である。したがって、神経の作用により生じる神経的確率共鳴現象だけでなく、物理的な外力により生じた変形が関与して生じる力学的確率共鳴現象がある。皮膚は、コラーゲン繊維を含む層や流体とポーラス体の混合構造の層など、相互の材質・物性値が大きく異なる三層構造で構成されているため、構造的にも材料的にも非線形である。以上を勘案して次の三点について研究を進める：

(1) 系統的な心理物理実験によりヒトの触覚における神経的確率共鳴現象について調査する。

(2) 皮膚の非線形な力学構造が関与する力学的確率共鳴現象について調査する。

(3) 以上の検討により得られた知見に基づいて、ヒトの触覚の確率共鳴現象の数理モデルを定式化するとともに、触覚センサと触覚ディスプレイへの応用の目処をつける。

3. 研究の方法

本研究では、新しい神経回路網を提案するだけでなく、確率共鳴現象は、神経回路網と生体の構造の両者のバランスにより実現されていることを示す点が他の研究に先駆けて新しい点である。この考え方は、確率共鳴現象を研究する他の研究グループにも参考

となると思われる。

まず、本研究で新しく提案する神経回路網について述べる。確率共鳴現象は非線形・多安定によって引き起こされるために、ヤリイカの巨大軸索の電気的作用を模擬した Hodgkin-Huxley 模型をベースとしてニューロンの模型を新しく定式化する。同模型は、4 元連立微分方程式で表されるために、規模の大きなネットワーク構造をシミュレーションするには簡略化が求められる。例えば、2 元連立微分方程式に縮約した模型を定式化する予定である。このニューロンを多数用いて人工ニューラルネットワークを構成して、数値実験により確率共鳴現象が発生・伝搬・消失する過程を観察して、確率共鳴現象が生じる条件を明らかにする。

また、非線形構造体が引き起こす確率共鳴現象を明らかにするために、皮膚に皺が寄って生じる飛び移り座屈現象に関する数値実験も併せ行う。van der Pol 形の自励振動と飛び移り座屈の履歴現象が類似であるために、飛び移り座屈も確率共鳴現象と関連があると考えられる。指の皮膚モデルを作成して粘弾性、超弾性、構造非線形性をすべて考慮した有限変形解析を有限要素法により実施する。

さらに、人工ニューラルネットワークと指の構造モデルを合体させて、実際のヒトで生じている確率共鳴現象に近い状態のシミュレーションを実施して、システム全体で確率共鳴現象が発生・伝搬・消失する過程を観察して、確率共鳴現象の機構の本質について明らかにする。

4. 研究成果

4.1 はじめに

本研究では、触覚センシングにおける SR のメカニズムを明らかにすることを目的に、弁別閾(Difference Limen; DL)が外部ノイズの下でどのような影響を受けるか調査する。これは DL(物理事象)と JND(心的事象)の関係の中で SR がどのようにかかわっているか調べるためである。このため、垂直方向とせん断方向の振動刺激を生成する装置を開発し、Parameter Estimation by Sequential Testing (PEST)による心理物理実験を実行するためのプログラム開発も併せ行う。実験では、被験者が実験中変化しない標準刺激の振幅と一致するように比較刺激の振幅を調整する。調整後最終的に得られた標準刺激と比

較刺激の振幅の差が弁別閾となる。種々のレベルの振動ノイズを加えた状態で弁別閾がどのように変化するか調査する。触覚受容器の種類によって刺激の面積変化により感度が増加するものとし、しないものに分類されるために刺激の接触子の直径として 2.5 mm と 8 mm の二種類について検討を行う。また、振動方向が SR に及ぼす影響を調査するために、指に対して垂直振動とせん断振動の二種類について調査する。

以上の実験結果に基づいて新しい数理モデルの定式化を行う。既に、これまでの研究により単一の神経細胞により SR が生じることが明らかにされている。この研究の中で、神経細胞の挙動を忠実に再現できるとされている Hodgkin-Huxley (HH) モデルの SR 特性は非対称なシュミットトリガー回路で代用できることも示された。本研究では、新しく神経細胞のネットワーク構造を定式化するために、個々の神経細胞をシュミットトリガー回路で近似して単純化された非線形神経細胞モデルのネットワークを定式化してそれを用いて実験的に求めた SR 現象をシミュレーションできるか検討する。

4.2 確率共鳴の原理

4.2.1 確率共鳴の一般論

これまでの研究によれば、SR 現象は多安定な非線形力学システムで生じることが明らかにされている。非線形多安定システムの代表として Langevin 方程式⁽⁶⁾に外乱ノイズを加える解析では、SN 比 (SNR) は次の式によりノイズの強さと関連付けられることが数理的に証明されている。

$$\text{SNR} = \frac{A}{\sigma^2} e^{-\frac{B}{\sigma}} \quad (1)$$

ここで A と B はシステムに依存する係数である。また、 σ は入力ノイズの偏差値を示している。式 (1) には極大値があるために適切な値の σ の下で SN 比が極大値をとることがわかる。

4.2.2 研究代表者らは、生物の神経細胞の電気化学的変化を忠実にシミュレーションできる HH モデルにより触覚の SR がどの程度シミュレーションできるか検討している。以下でこれまでの成果を簡単に要約する。

HH モデルを用いたシミュレーションの結果、適切なノイズの下で SN 比が式 (1) と類似な変化をすることを確認できたが、ノイズの強さの変化に対する SN 比の変化の仕方が激しく振動するために、ノイズの強さの調整が最適値から少しでもずれると SN 比が大きく変わってしまう問題も同時に認められた。このように HH では SR が生じることが証明できたが、ノイズの強さの変化に対して SN 比が安定して得られないことから、ロボット用触

覚センサの原理としては好ましくない。

そこで、SR 現象が生じるとして知られているシュミット・トリガー回路を用いて HH モデルの代わりに使用可能か確認した。シュミット・トリガー回路では通常対称のしき居値を設定するが、触覚に用いるため特に表面の凹凸形状に適合するように上閾と下閾を別々に設定して非対称なリミットサイクルもつようにした。これによって、もし下閾より小さい値の信号が入力されると下閾と同じ値の信号を出力されるようになり、上閾より大きい信号が入力されると上閾と同じ値の信号が出力されることになる。

評価実験では、5 から 30 μm の深さのストライプ状の凹部のあるステンレス試料を触覚センサで走査する実験を行った。得られた触覚センサが出力する電圧を製作した回路に入力する実験を行った。適切なノイズを電気信号として触覚センサの出力に重畳すると、微小段差の周期に等しい信号が本シュミット・トリガー回路から出力された。SN 比とノイズレベルの関係を調べると、式 (1) に類似な関係が得られた。これによって、本回路に SR の特性があることを確認したが畝が存在するか否かの on-off のレベルなので、前述の Collins らの触覚の SR と同じレベルと言える。後述するように、本研究ではこの原理をさらに発展させたモデルを提案する。

4.3 心理物理実験

4.3.1 実験装置

心理物理実験を実施するために、積層形 Piezo アクチュエータ (ASB680C801*P0, NEC/TOKIN) を用いて触覚刺激生成装置を開発した。指と直接接触させる振動部分の面積の大きさが変化すると、弁別閾が顕著に変化するタイプとあまり変化しないタイプの 2 種類の触覚受容器がある。この特性を利用すると、SR にどの触覚受容器が関係しているか調査できる。このため、直径 2.5 mm と 8 mm の接触部を用意した。

上述の装置は、指の表面に垂直方向の振動を伝えるものであった。皮膚の中に存在する 4 種類の触覚受容器のうちどれが SR に関係しているか考察するためには、接触部のサイズを変更することも必要であるが、振動刺激の方向も変更する必要がある。そこで、構成する部品のいくつかを変更することによりせん断方向の振動を生成するようにした。

本装置を駆動するためまず PEST 法のアルゴリズムに従って出力すべき標準刺激と比較刺激の波形の振幅を決定する。標準刺激については、一度設定したら 1 回の実験中に変更することはないが、比較刺激についてはその後の被験者の回答の履歴に従って適宜変更することになる。SR を調べるために標準刺激と比較刺激の波形にノイズを重畳させる。

以上を計算機の中で行い、計算の結果得られた波形をコンピュータに内蔵された D/A ボードを通じて出力して、それがピエゾドライバーに送られピエゾアクチュエータを駆動する。

4.3.2 実験手順

実験では、5 人の男性を被験者として選定した。左手で接触部を触り、1 試行につき 2 種類の振動を評価して大きい方の刺激を回答する。2 種類の刺激の内一方が標準刺激であり、他方が比較刺激である。標準刺激と比較刺激が呈示される順序はランダムである。回答はキーボードで行われ、特定のキーを押すことによって大きい方の刺激であると思われる順番を入力する。

ノイズレベルとして、 $\sigma = 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2 \mu\text{m}$ の 6 種類を選定し、必要に応じて $4 \mu\text{m}$ の条件でも実験を行った。

皮膚中に存在する 4 種類の触覚受容器は、振動の刺激の周波数、刺激の接触部の面積、および振動方向に依存している。したがって、以下の実験を実施している：

実験 A：振動方向は指表面に対して垂直で、周期と接触部の直径をそれぞれ 150 ms と 2.5 mm とする。

実験 B：振動方向は指表面に対して垂直で、周期と接触部の大きさをそれぞれ 300 ms と 2.5 mm。

実験 C：振動方向は指表面に対して垂直で、周期と接触部の直径をそれぞれ 150 ms と 8 mm とする。

実験 D：振動方向は指表面に対して水平で、周期と接触部の直径をそれぞれ 150 ms と 2.5 mm とする。

実験 E：振動方向は指表面に対して水平で、周期と接触部の直径をそれぞれ 150 ms と 8 mm とする。

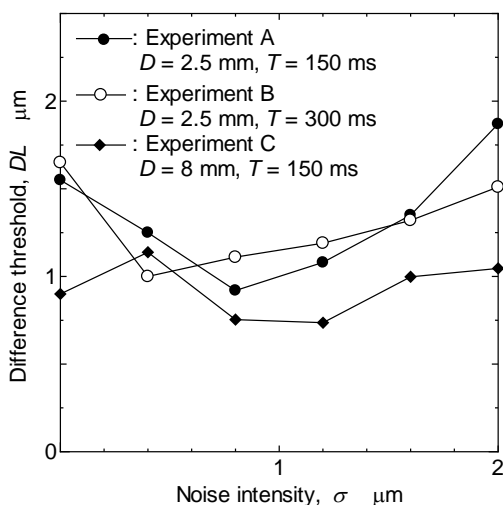


図1 実験 A~C の結果

4.3.3 心理物理実験の結果と考察

実験 A~C の結果を図 1 に示す。黒く塗りつぶした円は、実験 A の結果を示している。縦軸と実験結果が交わる点は、ノイズが 0 のときの弁別閾が $1.6 \mu\text{m}$ である弁別閾を表している。図からノイズが 0 のとき、弁別閾が約 $1.6 \mu\text{m}$ であることがわかる。この値は、標準刺激の $3 \mu\text{m}$ に対していくぶん大きいように思われるが、周期が 150ms (6Hz) のときの絶対閾は、他の研究者の実験によると $1.8 \mu\text{m}$ であることを考えると、妥当な値である。

図 1 から明らかなように、弁別閾の最小値は $0.8 \mu\text{m}$ のときの $0.93 \mu\text{m}$ である。この値は、ノイズ 0 の条件で得られた弁別閾の約 1/2 である。また、この弁別閾を標準刺激の $3 \mu\text{m}$ で割ると Weber 比 0.3 が得られる。多くの感覚は Weber 比 0.1 から 0.3 の間にあるために、適切なノイズの下では通常の精度で刺激を弁別できることがわかる。しかし、ノイズの強さを増大すると再び弁別閾は増大している。

一方、大きい接触部を用いた実験 C について調べてみると、ノイズが 0 の条件でも約 $1 \mu\text{m}$ という小さい弁別閾を示している。この値から Weber 比を計算すると 0.27 となる。大きい接触部を用いると、ノイズ 0 でも極めて小さい弁別閾を示すことから、ノイズを加えてもあまり弁別閾は小さくならず、また極小値でも $0.74 \mu\text{m}$ であり、この値から Weber 比を計算すると 0.25 である。ノイズ 0 で弁別閾が十分に小さい場合には顕著な SR は生じないようである。

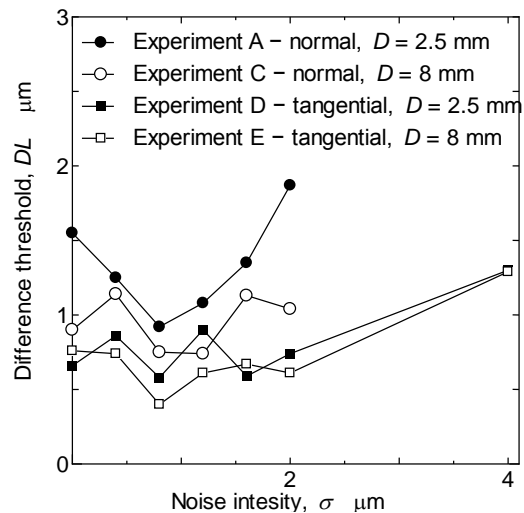


図2 垂直振動と水平振動の比較 (実験 A, C, D, E)

Collins らは、極小の触覚刺激が呈示されたか、あるいはされないかの on-off の評価に関して、適度なノイズを混入させると正答率 50% から 75% に向上することを示した⁽⁸⁾。すなわち、彼らは感度についての SR の効果を示したと言える。これに対して、本研究で

は刺激が変化する場合の鋭敏性について SR の効果があることを示している. すなわち, 触覚の精度についても SR の効果があることを示したことになる.

次に, せん断方向振動に対する結果を図 2 に示す. 図 2 には比較のために, 前述の垂直方向振動の実験である実験 A と C の結果も重ね合わせて示されている. 実験 D と E の間には接触部のサイズの違いがあるが, 両者の間に大きな差がない. 0, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2 および $4\mu\text{m}$ の各条件について両者の平均値の t 検定を行った結果, 5%の棄却水準で有意差は認められなかった. したがって, せん断方向振動を感知しているのは, 面積に対する依存性がない受容器であると推察される. 面積に対応して感度が変わる現象を空間加算といい, FA II (速順応機械受容単位 II 型) 空間加算の効果があることが知られている. 本研究で扱う数 Hz 程度の低周波数領域ではせん断方向振動については, FA II は関与していないと推察される.

次に, せん断方向振動についての SR を評価する. 4 本の曲線の内, 実験 A のみが顕著な SR を示しているが, そのほかは最小値と最大値の間の差が小さくあまり目立った SR を観測することはできない. 実験 C~E の結果は, いずれもノイズ 0 のときの弁別閾が小さいことが挙げられる. これらについては, ノイズ 0 の条件でも十分精度が高いために, ノイズを重畳させてもあまり目立った SR が生じなかったものと考えられる. しかし, 実験 D および E においても, わずかではあるが $\sigma = 0.8\mu\text{m}$ の条件で弁別閾が極小となっており SR が確認される.

5. 確率共鳴の模型化

5.1 SR の数理模型

前章では, 適度なノイズにより弁別閾が減少することを実験的に示した. 前述の 4.2.2 節で紹介したシュミット・トリガー回路は on-off の信号に対応するものなので, 弁別閾が減少する現象には対応できない. 本節では, 任意の凸部の高さに対応できるように改良する.

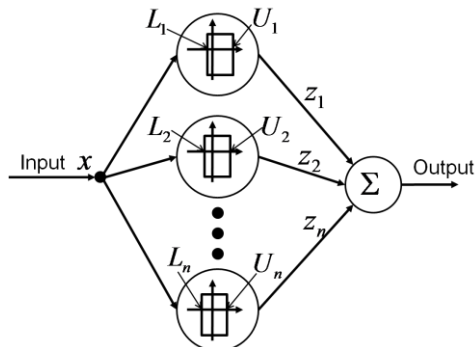


図 3 非線形ニューロンで構成されるネットワーク

そこで, 図 3 に示すように, シュミット・トリガー回路と同じ非線形な特性を有したニューロンによりネットワークを構成する. 各々のニューロンは HH モデルを近似的に表すモデルとして用いている.

一つのニューロンが JND 一単位分の上昇あるいは下降を表すので, ニューロンの集合体は様々な信号レベルの変化を模擬することができる. 図 3 では, 各ニューロンは, それぞれ異なるレベルの L_i と U_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$) を持っている. ここで, n はニューロンの個数を表す. 各々のニューロンは, 興奮すると出力 $1(z_i=1)$ を発し, そうでなければ $0(z_i=0)$ である. 式 (2) に従ってニューロンからの出力の総和が計算されて最終的な出力を得る. 入力振幅に比例して興奮するニューロンの数が増加するために, 入力振幅に比例した JND 値が出力される.

$$JND = \sum_{i=1}^n z_i \quad (2)$$

式 (2) で定義される JND は, 原子核物理を比喩として用いると理解されやすい. 原子に外部からエネルギーが注入されて注入されたエネルギーの総計があるレベルを超えると原子核の周りをまわっている電子が外側の軌道にジャンプする. 心理状態について上のメカニズムが成り立っていると考えると, 外的刺激の変化を変化として認識するには, JND 一単位分を超えるだけのエネルギーが必要となるという状況を表しているとしている.

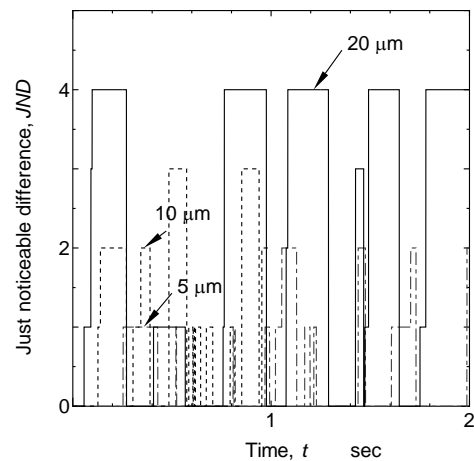


図 4 数値解析の結果

5.2 検証実験

本モデルを検証するために, ステンレス表面にエッチングで凹凸を付けた試験片を触覚センサで走査する実験を行った. 試験片表面には 1mm ピッチで $5\sim 20\mu\text{m}$ の段差が設けられている. 走査した生データには, 全体にノイズが混入しており, 波形から段差形状を抽出することは困難であった.

5.3 実験結果と検討

解析では、 $n=4$ とした。本神経回路モデルに4.5.2節で得た波形データを入力したところ、図4の結果が得られた。5 μm であっても二単位のJNDが出力されていたり、逆に10 μm であっても一単位のJNDしか出力されない場合もあるなど与えられた敵データを必ずしも正確に判別できているとは言えない箇所も散見されるが、生波計では判別できなかった5 μm と10 μm の差は明確になっている。図4にフーリエ変換を施して最大振幅の比を求めると5:10:20の入力に対して5.0:9.2:20.0となり、段差の大きさの変化を判別できているといえる。

6. まとめ

ノイズを受けやすい触覚センシングの精度向上を目指して、ヒトの触覚における確率共鳴現象を調査した。その結果、従来明らかにされてきた適切なノイズを与えると絶対閾が低下する現象に加えて、弁別閾も低下することを初めて明らかにした。垂直振動とせん断振動の2条件に対して弁別閾とノイズ強度の関係を調査して絶対閾が比較的大きい場合に上述の効果が明確になることも確認した。以上の実験事実を踏まえて、非線形ニューロンのネットワーク構造によりJNDを推定するモデルを考案した。数値実験の結果、適切なノイズの下で本モデルが5 μm 、10 μm および20 μm の敵高さを判別できることがわかった。

参考文献

- (1) Herrmann, G. and Melhuish, C., 2010. Towards Safety in Human Robot Interaction, *Int. J. Soc. Robot*, Vol. 2, pp. 217-219.
- (2) Tanaka, M. L ev eque, L., Tagami, H., Kikuchi, K., and Chonan, S., 2003. The "Haptic Finger" - a new device for monitoring skin condition, *Skin Research and Technology*, Vol. 9, pp. 131-136.
- (3) Hosoda, K., Tada, Y., and Asada, M., 2006. Anthropomorphic Robotic Soft Fingertip with Randomly Distributed Receptors, *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 54, pp. 104-109.
- (4) Shirado, H. and Maeno, T., 2005. Modeling of Human Texture Perception for Tactile Displays and Sensors, *The First Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interface for Virtual Environment and Teleoperator Systems*.
- (5) Moss, F. and Wiesenfeld, K., 1995. The Benefits of Background Noise, *Sci. Am.* 273(2), pp. 50-53.
- (6) Gammaitoni, L., H anggi, P., Jung, P. and Marchesoni, F., 1998. Stochastic

Resonance, *Reviews of Modern Physics*, Vol. 70, No. 1, pp. 223-287.

(7) Gluckman, B. J., Netoff, T. I., Neel, R. J., Ditto, W. L., Spano, M. L. and Schiff, S. J., 1996. Stochastic Resonance in a Neuronal Network from Mammalian Brain, *Physical Review Letters*, Vol. 77(19), pp. 4098-4101.

(8) Collins, J. J., Imhoff, T. T. and Grigg, P., 1997. Noise-mediated enhancements and decrements in human tactile sensation, *Physical Review E*, Vol. 56-1, pp. 923-926.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

(1) M. Ohka, K. Beceren, T. Jin, A. Chami, H. B. Yussuf and T. Miyaoka, Experiments on Stochastic Resonance Toward Human Mimetic Tactile Data Processing, *International Journal of Social Robotics*, 4(2012), 65-75. 査読有

〔学会発表〕(計3件)

(1) B. Kadir, 金 涛, 大岡 昌博, 宮岡 徹, 心理物理実験による触覚の確率共鳴に関する研究 (A model of tactile stochastic resonance), 日本機械学会 2011 年度年次大会. 2011. 9. 13. 東京

(2) K. Baceren, T. Jin, A. Chami, H. B. Yussuf, T. Miyaoka, M. Ohka, Psychophysical Experiment on Tactile Stochastic Resonance Toward Mathematical Model, 2010 International Annual Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science (MHS), 2010. 11. 9. 名古屋.

(3) M. Ohka, Y. Kawabe, T. Jin, A. Chami, R. Nader, B. Kadir and T. Miyaoka, Psychophysical Experiments for Tactile Sensors/Displays Promoted by Complex Systems Science, World Automation Congress, ISORA128, 2010. 9. 20. 神戸

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大岡 昌博 (OHKA MASAHIRO)

名古屋大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号: 50233044

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

宮岡 徹 (MIYAOKA TETSU)

静岡理工科大学・理工学部・教授
研究者番号: 00111815