

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：15301

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K18855

研究課題名（和文）ミクロンの表面凹凸の違いを指先で感じ取る「匠の技」の脳科学的解明

研究課題名（英文）Integrative study on neural mechanisms of the haptic fine surface texture perception

研究代表者

楊 家家（Yang, Jiajia）

岡山大学・大学院ヘルスシステム統合科学研究科・助教

研究者番号：30601588

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）：本研究の主な成果として、1）指紋微小振動の直接観察システムの開発の成功、2）凹凸刺激に対する指紋微小振動と表面手触り感の相互関係の評価、3）ヒトの第一体性感覚野における触覚振動検出の神経基盤の検討の3項目があげられ、概ね計画当初の目標を達成している。また、本研究の実施により、従来が困難と言われた指紋微小振動の精密な動的特性の観察・計測が実現できたと同時に、指紋微小振動・触感の心理的評価・触感の脳内処理ネットワークの関係解析への発展も期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本の工学分野において、「匠の技」と言われる伝統的な技や職人の感は無形な財産であり、それを受け継ぐ若い世代が減りつつあるのが現状である。本研究の実施により、「触覚の物理的特性」、「接触皮膚の動的特性」、「心理的評価特性」及び「脳ネットワーク特性」の関係解析を可能にし、従来までは困難と考えられていた扉を開いて、新しい研究視点を切り拓くことが期待されている。さらに、「匠の技」の科学的理解が進み、情報処理メカニズムが解明できれば、その機能を工学的装置に置き換えることができると考えられ、新たな「匠の技」を保持する概念は意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：One of the major unresolved questions in human haptic fine surface texture perception is how the human detect the micro surface changes using their fingertip. During the current research project, we addressed this question by developing a new device to observe the real-time fingerprint vibration when one touches the micro surface. We further investigated the relationship between the fingerprint vibration pattern and surface perception. Finally, for the first time, we investigated the columnar organization in the human primary somatosensory cortex (SI) by using advanced high-resolution (0.7mm) fMRI at 7T. We find that human SI is columnar organized with alternating SA and RA columnar preferences. We regard these observations as an essential step towards the understanding of the human haptic micro surface perception.

研究分野：人間工学

キーワード：指紋微小振動 触覚認知機能 体性感覚野 脳機能 匠の技

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

ヒトは、わずか数ミクロンの凹凸でも指先で触れるだけで判断ができる能力を備えている。多くの自動車メーカーの工場では、熟練の技術者が経験で磨いた「匠の技」を利用して、車体表面を撫でることで数ミクロンの突起を検出し、品質検査を行っている。しかし、このような熟練の技術者は、「どのようにしてミクロンオーダーの凹凸を指先で検知しているのか?」、「どのような情報を指先で取り込んでいるのか?」、「脳内でどのような情報処理して接触面の違いを判断できるのか?」は未だ明らかにされていないため、「匠の技」を工学的技術に置き換えることができない主要因である。本研究は、上記の疑問に対する解答を得て、「匠の技」を工学的技術に置き換える方策を提案することを目指している。

2. 研究の目的

視覚や聴覚とは異なり、手触り感は、必ず指先の皮膚と対象を接触して得る感覚である。ミクロンの表面凹凸感は、皮膚の変形を引き起こすエネルギーがないため、撫でる動作によって生じる振動（以降、指紋微小振動と呼ぶ）が主要因と考えられるが、撫でる際の摩擦や力加減により得られる感覚も異なり、単なる機械受容器の振動特性だけでは説明できない。この謎を解明する鍵は、指が対象面を撫でる際に指紋微小振動の直接観察にあるが、その技術がないのが現状である。そこで、本研究では、指が対象面を撫でる際の指紋微小振動の直接観察システムの開発が第一の目標である。次に、つるつる感・粗さ感と指紋微小振動の関係を実験的に解析し、指紋微小振動と表面手触り感の相互関係を明らかにする。さらに、磁気的共鳴画像法（fMRI）を用いて、凹凸刺激に対するミクロンの表面凹凸の違いを指先で感じ取る「匠の技」の脳機能を検討することを目指している。

3. 研究の方法

1) 指紋微小振動の直接観察システムの開発

図1は、観察システムのプロットに示す。本システムは、主に独自加工した触覚試験片と高解像度カメラの二つで構成されている。触覚試験片は、アクリル樹脂の土台の上にレーザ加工により、100ミクロンから800ミクロンまで間に数種類のパラメータを決めてミクロンオーダーの凹凸表面（つるつるやざらざら感を再現）を作成する。さらに、試験片を透過して、指紋を撮影するため、幅0.5mmの計測窓を加工する。最後に、試験片を定速で移動する際の指紋微小振動をリアルタイムで計測して、その様態を明らかにする。

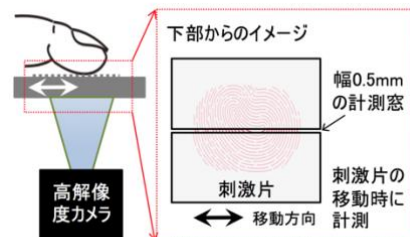


図1 観察システムのプロット

2) 指紋微小振動と表面手触り感の相互関係の解明

前述のように、表面のミクロンの空間構成情報は撫でる動作によって時間的変化が現れて検知するが、この確たる証拠を示すには、指紋微小振動を観察するだけでなく、その心理的評価との関係を明らかにする必要がある。そのため、本研究では、指が対象表面を撫でる時のつるつる感・粗さ感と指紋微小振動の関係を実験的に解析する。

3) ミクロンの表面凹凸の違いを指先で感じ取る脳機能の解明

ものに触れたときに得られる触覚情報は、脊椎や視床を經由して大脳皮質の第一体性感覚野に到達し、前頭・側頭葉を含む高次の脳領域に伝わり、各領域間の相互作用により対象の状態を判断している。本研究は、超高磁場7テスラfMRIを用いて、第一体性感覚野におけるミクロンオーダーの表面粗さを評価する際の脳活動を検討する。

4. 研究成果

代表者らは、該当研究期間において、1) 指紋微小振動の直接観察システムの開発に成功し、2) 凹凸刺激に対する指紋微小振動と表面手触り感の相互関係を明らかにし、3) ヒトの第一体性感覚野における振動検出の神経基盤を検討したなどの成果が得られ、概ね計画当初の目標を達成している。

1) 指紋微小振動の直接観察システムの開発に成功

図2に示すように、本システムは、観察装置本体、コントローラと制御用PCの三つの部分で

構成されている。観察装置本体の上部に独自加工した触覚格子刺激を設置し、電動スライダにより格子刺激の移動方向と速度を制御することができる。また、六軸力覚センサーを設置することにより、移動中に指先にかかる力の同時計測も実現した。次に、観察装置本体の下部に高解像度カメラを設置することにより、指紋振動の画像データを記録できる。さらに、専用のプログラムを作成し、図2の例に示すように、リアルタイムで指紋の振動プロファイルを出力できる。

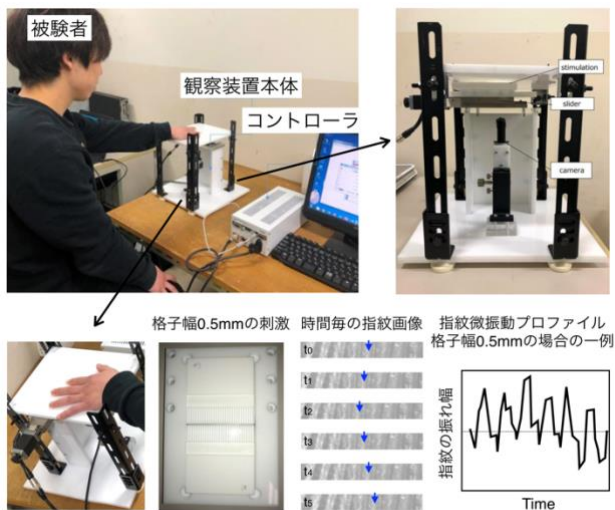


図2 開発した観察システムと実測データの一例

2) 凹凸刺激に対する指紋微小振動と表面手触り感の相互関係の解明

現在、7種類の凹凸刺激を用いて、指紋微小振動の特徴とヒトの表面手触り感の相互関係を調べる実験も終了しており、データまとめと解析を進めている途中である。

3) ヒトの第一体性感覚野における振動検出の神経基盤の検討

ものに触れたときに、接触による皮膚変形は皮膚内部にあるメルケル盤とルフィニ終末 (Slowly Adapting, SA) で検出され、撫でる動作によって生じる振動感覚はマイスナー小体とパチニ小体 (Rapidly Adapting, RA) で検出され、それらの情報は脳内で統合されて対象認識が達成されると考えられる。代表者らは、最新の超高磁場 7T-fMRI 技術の高空間分解能を生かして、図3に示すように、ヒトの第一体性感覚野の SA と RA のそれぞれの受容野における触覚振動に対する脳活動の観察に成功した。今後、さらなる研究を進めることにより、ミクロンの表面凹凸の違いを指先で感じ取る「匠の技」の脳機能の検討を進める予定である。

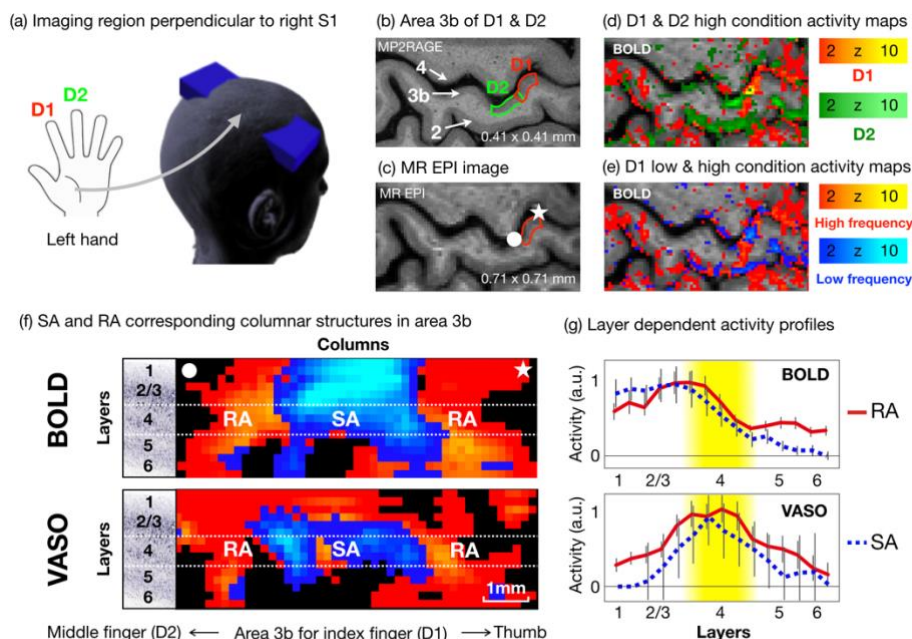


図3 異なる振動に対してヒトの第一体性感覚野のSAとRA受容野の活動

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yu Yinghua, Huber Laurentius, Yang Jiajia, Jangraw David C., Handwerker Daniel A., Molfese Peter J., Chen Gang, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong, Bandettini Peter A.	4. 巻 5
2. 論文標題 Layer-specific activation of sensory input and predictive feedback in the human primary somatosensory cortex	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 eaav9053
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.aav9053	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Wang Wu, Yang Jiajia, Yu Yinghua, Wu Qiong, Yu Jiabin, Takahashi Satoshi, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong	4. 巻 122
2. 論文標題 Tactile angle discriminability improvement: roles of training time intervals and different types of training tasks	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Neurophysiology	6. 最初と最後の頁 1918 ~ 1927
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） doi.org/10.1152/jn.00161.2019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 楊家家、于英花	4. 巻 45(7)
2. 論文標題 超高磁場・高精細レイヤーfMRI技術によるヒト大脳皮質の層別活動の可視化	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Medical Science Digest	6. 最初と最後の頁 418-421
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Yu Yinghua, Yang Jiajia, Ejima Yoshimichi, Fukuyama Hidenao, Wu Jinglong	4. 巻 11
2. 論文標題 Asymmetric Functional Connectivity of the Contra- and Ipsilateral Secondary Somatosensory Cortex during Tactile Object Recognition	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Frontiers in Human Neuroscience	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） https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00662	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Wu Zhiwei, Yu Yinghua, Yang Jiajia, Takahashi Satoshi, Ejima Yoshimichi, Wu Jinglong	4. 巻 5
2. 論文標題 The Effects of Aging on Haptic Working Memory During Length Discrimination	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Neuroscience and Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 74-80
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2174/2213385205666170117100827	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 Syafiq Mohd Usairy, Yang Jiajia, Yu Yinghua, Wu Jinglong	4. 巻 5
2. 論文標題 Bigger Influence by Smaller Particles in Tactile-Visual Cross-Modal Roughness Perception of Fine Surface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Neuroscience and Biomedical Engineering	6. 最初と最後の頁 134-141
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2174/2213385205666170801151630	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8件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yang J, Huber L, Yu Y, Chai Y, Khojandi A, Bandettini PA
2. 発表標題 High-resolution fMRI maps of columnar organization in human primary somatosensory cortex
3. 学会等名 In Proceedings of the 27th Annual Meeting of ISMRM, abstract 617 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu Y, Huber L, Chai Y, Jangraw DC, Khojandi A, Yang J, Bandettini PA
2. 発表標題 Increased activity in superficial and deep layers of human S1 for temporal prediction error
3. 学会等名 In Proceedings of the 27th Annual Meeting of ISMRM, abstract 613 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yang J
2. 発表標題 Challenges and opportunities for mapping layer/columnar organization in the human somatosensory system using ultra-high resolution fMRI
3. 学会等名 Functional MRI Core Facility, National Institute of Mental Health (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yu Y, Huber L, Jangraw DC, Molfese PJ, Hall A, Handwerker DA, Yang J, Bandettini PA
2. 発表標題 Depth-dependent functional mapping of mental prediction in human somatosensory cortex
3. 学会等名 26th Annual Meeting of ISMRM
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊家家, 于英花, Huber L, Bandettini PA
2. 発表標題 高空間分解能fMRIによるヒト第一次体性感覚野の皮質内回路機構の検討
3. 学会等名 第8回社会神経科学研究会『社会神経科学的アプローチによる精神疾患の社会性障害の理解』
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 楊家家
2. 発表標題 Neural correlates underlying tactile speed classification with periodic and non-periodic surfaces: an fMRI study
3. 学会等名 質感のつどい 第3回公開フォーラム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yang Liu
2. 発表標題 Tactile Sensory Memory for the vibration stimuli presented on the fingers: an ERP Study
3. 学会等名 International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Ting Guo
2. 発表標題 Cross-modal Transfer effect from tactile to visual working memory
3. 学会等名 International Conference on Complex Medical Engineering (CME 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017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
研究分担者	呉 景龍 (Wu Jinglong) (30294648)	岡山大学・大学院ヘルスシステム統合科学研究科・教授 (15301)	
研究分担者	山本 洋紀 (Yamamoto Hiroki) (10332727)	京都大学・人間・環境学研究科・助教 (14301)	
研究分担者	于 英花 (Yu Yinghua) (60812039)	岡山大学・大学院ヘルスシステム統合科学研究科・JSPS-RPD 研究員 (15301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	高橋 智 (Takahashi Satoshi) (20236277)	岡山大学・大学院ヘルスシステム統合科学研究科・准教授 (15301)	
研究分担者	呉 瓊 (Wu Qing) (40762935)	岡山大学・大学院ヘルスシステム統合科学研究科・特任助教 (15301)	