

フアム クアン チュン

氏 名	PHAM QUANG TRUNG
学位の種類	博士（工学）
学位記番号	博第1117号
学位授与の日付	平成30年3月26日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	Study on Generation Process and Spatial Configuration of RA-I Mechanoreceptor (速順応 I 型機械受容器の発生過程と空間配置に関する研究)

論文審査委員	主 査	教授	佐野 明人
		教授	山田 学
		准教授	坂口 正道
		教授	宮田 卓樹
			(名古屋大学)

## 論文内容の要旨

RA-I receptor plays an important role in human haptic perception, detecting the stimuli that produce minute skin motion (fluttering, slipping, micro-geometric surface, low-frequency vibration). The high-level understanding of human tactile sensing is convinced to provide important hints for tactile sensor design by which raises the level of tactile sensitivity and acuity of robots to human range. This study was motivated by the idea to look for such hints through investigating the poorly known generation process and spatial configuration of RA-I tactile receptors. We expect to find the potential use of this knowledge in producing micro tactile sensors densely and designing high-sensitive sensor cover effectively. However, both topics are not well-investigated at the moment. In this study, we conducted a series of experiments to discover these missing pieces. Our approach includes both anatomical method for investigating the generation process of RA-I receptors and simulation method for investigating the effect of spatial configuration on them.

Firstly, we observed the development of RA-I receptor in-vivo by using conventional fluorescent observation on cross-sectioned samples. We confirmed the development process

of RA-I receptor in ICR mouse. Consider the limitations of conventional method, we develop a novel method involved with two-photon microscopy and DiO staining technique. The novel method allows us to repeatedly observe the development of RA-I on the same living mouse, which is not possible in traditional methods. Early result of the two-photon imaging of MC during development period leads us to an idea that the development of MC might be triggered globally by the dermal events (for instance, the growth of phalanx, extension of skin).

Secondly, we develop a finite-element model which mimic the three-dimensional configuration of dermal papillae (the location where the RA-I receptor distributed). The strain energy density tends to concentrate more at RA-I receptor, in comparison with a model with two-dimensional configuration of dermal papillae. In addition, this mechanical response at RA-I receptor also appears to help discerning the spatial configuration of similar indenters. In term of tactile sensor design, this finding could help improve the elastic cover which usually reduces the spatial resolution of the sensor.

Thirdly, we seek an interpretation of the neurophysiological phenomena where the RA-I afferent (innervated into RA-I receptor) fails to represents the stimulus with the width less than 3 mm. We extended the previously developed model of skin with a transduction layer and synthetic sub-model. The implementation of synthetic sub-model is based on the fact that a single RA-I afferent usually innervates a number of RA-I mechanoreceptors. The output of synthetic sub-model appears to be well-fitted to the neurophysiological data. Therefore, the model can be used for further investigating the mechanism underlying the population response of RA receptor to many types of stimulus such as depressed patterns, gratings, slipping. This finding also suggests the role of branching method in signal pre-processing process at the receptor level.

## 論文審査結果の要旨

速順応 I 型機械受容器 (RA-I) は人間の触覚において重要であり、微小な皮膚の動きを起こす刺激 (凸凹、滑り、低周波振動等) を検出している。人間の触覚を高いレベルで理解することは、触覚センサのデザインに重要なヒントを与える。そこで本研究は、RA-I の未解明な発生過程と空間配置を調べることを目的に行われた。具体的なアプローチとして、発生過程を解明するために解剖学的方法および空間配置の影響を検討するためにシミュレーション解析を用いた。なお、得られた知見は、微細な触覚センサを高密度に製作することや高感度なセンサカバーを効果的に設計すること等への応用が期待される。

まず、従来研究での手法を使って RA-I の発達を切片で蛍光観察した。マウスにおいて RA-I の発生過程を従来研究と同様な結果で確認できた。ここで、従来手法の制約を考慮し、二光子顕微鏡と DiO という蛍光色素を用いて新たな観察方法を開発した。この観察方法は、同一の生きたままのマウスにおいて継続観察を可能にした。従来手法では、このような観察が不可能であった。さらに、発生期間内の初期観察結果によって、RA-I の発生を引き起こすのは真皮内の外的要因 (たとえば、指骨の成長や皮膚の膨張など) である可能性が高いことが示唆された。

次に、RA-I が配置された真皮乳頭の三次元形状を模擬し、有限要素法で精密なモデルを作製した。二次元形状のモデルと比べて、本研究のモデルでは歪エネルギー密度が RA-I の位置で集中することを明らかにした。さらに、RA-I での力学的な応答は、対象物の形状認識を支援する可能性を示唆していた。この発見は、触覚センサのデザインにおいて弾性カバーを改善することに繋がる。従来の弾性カバーは、センサの空間分解能を低下させる傾向にあった。

最後に、RA-I の求心性神経が幅 3mm より小さい対象物のエッジを識別できないという神経物理現象の解釈を行った。上述のモデルに変換層 (transduction layer) と合流モデル (synthetic model) を加えた。なお、合流モデルの導入に関しては、一本の求心性神経は複数の受容器に枝分かれしているという事実に基づいている。結果として、合流モデルの出力が神経物理学のデータの形状に類似した。したがって、本モデルは、格子パターンや滑りなど様々な刺激に対して RA-I の集団応答を引き起こすメカニズムの研究で活用されることが期待される。さらに、本研究で見出した神経の配線方法は、受容器レベルでの信号の前処理に役立つと考えられる。

以上の博士論文の成果は、学術雑誌 (審査有) 論文 3 編に公表されており、これらの学術的価値から博士論文として十分な内容だと判断される。よって、博士 (工学) の学位論文として適格であると認める。