

触覚研究における細胞工学からのアプローチ

Research of Tactile from A Cell Engineering Approach

佐野 明人 (名工大) 星 貴之 田中 由浩

Akihito SANO (Nagoya Inst. Tech.), Takayuki HOSHI and Yoshihiro TANAKA

The sheet metal inspectors in automobile industries know that the knitted work gloves help the perception of surface undulation. We have found three mechanisms of touch enhancing on work gloves. The first one is a lever mechanism of knitted glove. The second one is a buckling phenomenon of glove which generates the tactile stimulus to the articular joint. The third one is the noise-mediated improvements, namely a stochastic resonance, which is enhancing the detectability of a weak stimulus.

Key Words : Tactile Perception, Surface Undulation, Touch-Enhancing, Tactile Lens, Cell Engineering

1. はじめに

現在、触覚認識メカニズムとその応用技術が注目されている⁽¹⁾。ヒトの五感の中でも、触覚は機械受容器と呼ばれるように、対象と皮膚との力学的相互作用に基づき、神経発火が行われる。また、触覚にも錯覚が存在し、脳神経系の作用によるところも大きい。したがって、心理物理実験に加え、fMRI などを使った脳機能解析が活発化している。

近年、ヒトの触覚現象の発生メカニズムに基づいた革新的な触覚デバイスも開発されつつあり、企業も感性品質を高めるために非常に注目している。また現在、iPS細胞の研究が非常に注目されているが、皮膚内に機械受容器細胞そのものを作りだし、その発生過程や再生した触覚でその本質を探求すべきと考えている。

2. 工学領域での触覚増強

軍手は、図1(a)に示すようなメリヤス編(裏面)と呼ばれる最も基本的な編み方で作られている。表裏があり、かつ方向性がある。通常、手を長手方向(図1(a)の上下方向)に動かして凹凸を知覚する。この方向においては、表面から裏面に向かってループが形成されており、裏面は表面に比べて高い伸縮性を持つ。さて、凹凸の知覚に関係の深い機械受容器はマイスナー小体であり、その適刺激は剪断方向の歪の時間変化であると言われている。軍手を鋼板の表面の凹凸に沿わせて動かすと、裏面に表出したループ先端(円弧部)が「てこ」の原理でなぞり方

向に大きく変位する。裏面は皮膚に離散的に接触しているが、皮膚との間のずれは小さい。したがって、結果的に凹凸に起因する増幅された触刺激が皮膚に加わる。

図1(b)に、メリヤス編の「てこ」の作用を応用した触覚コンタクトレンズを示す。これを使うと、たとえば、5[mm]厚のゴムシートの下にある直径6[mm]で数十~百数十マイクロン厚のペーパーディスクがはっきりと分かる(ブツと呼ばれる微小凹凸)。ちょうど、蚊に刺された後のようにプクッと盛り上がりを感じる。触覚コンタクトレンズは、自らの触動作で知覚の最適化が図れる。すなわち、触覚コンタクトレンズで対象をなぞりながら、より良く分かるようになぞり速度や押付け力をその場で簡単に調整することができる(双方向性)。したがって、体験したほぼすべての人が触覚の増強を実感できる。

50年前、Cauna⁽²⁾が、皮膚の「Intermediate Ridge」(指紋直下にあり、表皮から真皮に突き出た突起)を模して実際に製作した「てこ」とほぼ同構造であることを知り、生体の素晴らしさを改めて認識した。

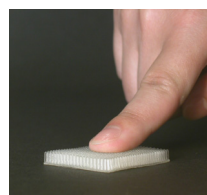
ヒトの皮膚特性は、指先での「知覚(触覚)」と「操作」のトレードオフを取っていると考えられる。ここで、触覚感度を上げるために皮膚特性を変えたとすると、重い物を持ち上げると皮膚がすぐに傷ついたり、上手く操作できないかもしれない。操作特性を犠牲にしても触覚感度を上げられる皮膚ができれば、それを移植するということも夢ではないかもしれない。触覚コンタクトレンズは、皮膚の上に一種の皮膚を重ねることで触覚感度を上げていると捉えることもできるが、工学の領域を越えてはいない。

3. 確率共鳴の心理物理実験

素手よりも軍手で鋼板をなぞる方が、ザーザーと言った音は小さくなっているが、滑らかなアクリルをなぞると音が聞えないのに対して、わずかに音が発生している。これは、軍手綿糸と鋼板の粗い肌理の擦れによる振動であり、面歪知覚においては単なるノイズにしか過ぎない。



(a) Knitted glove



(b) TouchLens

Fig. 1 Knitted glove and TouchLens

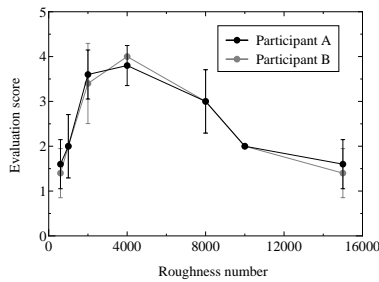


Fig. 2 Stochastic resonance

面歪（凸）の精密アルミプレートにノイズ源としてのラッピングフィルム（# 600（粗）から# 15000（滑）までの7種類）を貼り付け、なぞり知覚実験を行った。図2に実験結果を示す。横軸に表面粗さ（フィルム番号）、縦軸に評価値を示す。図からわかるように、# 4000の場合が最も明瞭に知覚されている¹。これよりも表面粗さが増加しても減少しても面歪を感じ辛く、確率共鳴（Stochastic resonance）の存在を示唆する釣鐘型の曲線となっている。したがって、軍手・鋼板間の適切な振動ノイズによる確率共鳴が、触覚増強メカニズムになっていると考えられる。

以上のように、心理物理実験により、確率共鳴の存在を示唆したが、やはりもう一步踏み込み、細胞工学からのアプローチにより、確率共鳴の特性を明らかにしたい。アクチュエータの研究では、「光刺激」と「遺伝子工学技術」を導入することで、細胞へのダメージが少なく、かつ任意のタイミングで特定部位の駆動制御を可能とする筋細胞アクチュエータの構築がすでに試み始められている⁽³⁾。

4. 細胞工学からのアプローチ

4.1 触角転じて足となる

iPS細胞の研究のきっかけの一つが「触角転じて足となる」のようである。これは、ショウジョウバエの触角のところに一つの遺伝子²を働かせると、本来触角が生えるはずの部分に足が発生したというものである⁽⁴⁾。

神経細胞の研究は脳神経など中枢に向い、抹消である機械受容器の研究は比較的少なく、その実態についてもまだ不明なことが多いと考えられる。

4.2 皮膚内の制約から離れる

名大のチームが、生物が光合成をする際の力ギになるたんぱく質をガラスのビーズの小さな穴の中で働かせることに成功したとの新聞報道がなされた。そこに「生物体内の制約から離れることで、光合成たんぱく質の能力

が効率よく引き出せる可能性がある。複雑な反応を組み合わせることもできる」とのコメントが掲載されている。

触覚研究でも、「生体皮膚内の制約から離れる」ことができれば、研究が飛躍する可能性がある。皮膚内の制約から離れることで、触覚受容器の能力が効率よく引き出せる可能性がある。四つの機械受容器を組み合わせることもできる。たとえば、生体マイスナーよりも、より精密でかつ均一な構造に「型成形」できれば、高性能な「人工マイスナー小体」ができるかもしれない。

4.3 大きいものだけを通す孔

マイスナー小体は、その適刺激が剪断方向の歪の時間変化であると言われている。そこには、イオンチャンネルが深く関わる。

カリウムチャンネルは選択性フィルタにより、カリウムイオンをナトリウムイオンの1000倍通し易くなっている。では、大きいカリウムイオンを通し、小さいナトリウムイオンは通さない孔は、次のようなメカニズムになっている。カリウムチャンネルがもつ孔の一番狭い部分は、酸素原子を含む「カルボニル基」があり、このカルボニル基が水の代わりにカリウムイオンを包み込むことで、イオンが水を脱ぎ捨てて通過できるようになっている。一方、ナトリウムイオンはこれができず通ることができない⁽⁵⁾。

5. まとめ

機械受容器細胞は、螺旋構造や層構造を成しており、さらに皮膚表面に剥き出しになっているのではなく、真皮乳頭を含む3層構造の皮膚内の絶妙な位置に配置されている。これらの発生過程を再現することは、触覚の本質に迫る上で非常に重要である^{(6),(7)}。また、再生した触覚は、まさに「Live Sensor」であり、基礎的な研究が可能となる。

文 献

- (1) 下条誠, 前野隆司, 篠田裕之, 佐野明人編: “触覚認識メカニズムと応用技術 - 触覚センサ・触覚ディスプレイ -”, サイエンス&テクノロジー, (2010)
- (2) N. Cauna: “Nature and Functions of the Papillary Ridges of the Digital Skin,” *Anatomical Record*, **119**, 449/468 (1954)
- (3) 八幡慎太郎ほか: “光入力駆動が可能な筋細胞アクチュエータの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'11講演論文集, 1A2-E01 (2011)
- (4) http://www.cira.kyoto-u.ac.jp/j/faq/session_2009.html
- (5) <http://d.hatena.ne.jp/popeetheclown/20110515/1305397047>
- (6) D.H. Sanes, T.A. Reh, and W.A. Harris: “Development of The Nervous System,” Elsevier, (2006)
- (7) 岡野栄之, 植村慶一監訳: “オックスフォード・生理学”, 丸善出版(2009)

¹ # 4000 と鋼板を軍手でなぞると、250[Hz] 以上で同様な振動ノイズが含まれる。

² アンテナペディア遺伝子。アンテナは触角、ペディアは足という意味。