

解 説

触の技と数理

Skill and Mathematical Principle of Haptics

佐野 明人* 菊 植 亮* 望 山 洋* 武 居 直 行* 藤 本 英 雄*

*名古屋工業大学

Akihito Sano*, Ryo Kikuuwe*, Hiromi Mochiyama*, Naoyuki Takesue* and Hideo Fujimoto*

*Nagoya Institute of Technology

1. は じ め に

自動車業界に代表されるものづくりの現場は、IT化・自動化が進む中、今なお人の触覚に基づく技（面品質検査など）と感性が重要な役割を担っている。特に、グローバルな大競争に打ち勝つために、最高の商品性と卓越した製造品質を確保した車両品質の強化が叫ばれている [1]。

中村は、調査の結果から、1~2割はIT化できない部分が残る、この人を必要とする部分こそが他社との差別化につながっていると指摘している [2]。また、熟練技能は要求に応じて動的に変化するものであり、蓄積される技術が増大しても、最適・最善の作り方や品質の追究、機械では不可能な高精度・高品質の実現など、人が最先端の技術を引っ張っていく構図は変わらないのではと考えられる。

触覚の本質は能動触 [3] である。皮膚や機械受容器の構造には、巧妙な触覚情報処理機構が仕込まれており、その特徴は力学で議論することができる。本稿では、「触の技と数理」と題し「技能の起源と再現」に迫る。

2. 触 の 技

2.1 面検技能

視覚で検出することが困難あるいは不可能な、物体の微小な凹凸を検出する技術は、様々な分野で必要とされている。しかし、画像処理を用いた検査方法では、物体の表面の光沢や汚れにより検査自体困難な場合がある。例えば、自動車などの生産ラインにおいて行われている鋼板の面歪の検査（面品質検査）では、技能者が鋼板の表面をなぞることにより、数十 [μm] レベルの凹凸の検出が行われている。しかし、熟練度によってその能力に差があるため、凹凸の検査結果に差が生じるという問題がある。また、人が微小凹凸を検出する技能を習得するには、長い年月を要する。

ここで、作業安全性の観点からも必ず軍手をはめる。このとき、誰も軍手をはめることで感覚が鈍り、視覚で捕

えられない凹凸など見つけられないと考えるのが普通である。しかし、実際は素手でなぞっては分からない微妙なうねりがよく分かり、感覚的には大きく感じられる。また、必ずしも軍手をはめての作業に慣れている必要はない。筆者らもこれを体験し驚いた。

2.2 触覚の増強と軍手

触覚情報が重要な役割を担っていることは確かである。名工のレベルでは、微小な凹凸を「水溜りができるほど」、「突き指をするほど」などと、あたかも増幅され知覚されているかのごとく表現される。それでは、自らの触覚を増強する方法はないのか。すぐに考えられるのは、拡張現実感と呼ばれる技術分野である。触覚センサで検出した信号を増幅し、触覚ディスプレイで拡大提示する。しかし、現在の触覚センサ・ディスプレイが、その性能やロバスト性で、泥臭いものづくりの現場での使用に耐え得るレベルにないことを十分認識すべきである。そこで、原点に立ち返り考え直す。すなわち、手掌で表面をなぞる際に生じている力学的作用を簡単な物理現象を利用して増幅させるといった問題設定ができる。そのヒントになるのが軍手である。

まず、過去の文献を調べてみると、介在物により触知覚が改善されることが報告されている。1975年に、GordonとCooper [4] は、薄い紙を介して対象面をなぞることによって、表面の湾曲を検出する能力が向上することを簡単な心理物理実験により示している。その後、10年近く経て、1987年には、2枚の薄いシートの間に少量の潤滑油を封入した Touch Enhancing Pad と呼ばれるものが米国で特許成立している [5]。このパッドを介在させると、一方のシートは対象物の表面で接触したまま静止し、他方のシートは指先と共に動かされる。このとき、潤滑油の働きにより、対象物と指先との間での摩擦の影響がなくなり、物体の凹凸を明瞭に検知できる。

軍手をはめることでスムーズに表面をなぞることができるが、どの手袋でもよく分かるわけではなかった。このことから、軍手特有の何かが触覚を増強しているのではないかということが予想される。触知覚では、力学的な相互作用によるものであることから、軍手の構造、すなわち編み方に原因があるのではないかと気づく。軍手は、メリヤス

原稿受付 2005年8月10日

キーワード: Skill, Haptics, Sensation Enhancement, Model and Principle, Theory

*〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町

*Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi

編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。裏面は表面に比べて高い伸縮性を持つ（中立面が表面側に位置する）。手首と指先とを結ぶ方向に軍手を鋼板の表面の凹凸に沿わせて動かすと、皮膚に離散的に接触している裏面の凸部が、なぞり方向に大きく伸縮する。なお、現場でもこの方向に手を動かしている。

2.3 触覚コンタクトレンズ

筆者らは、手掌で表面をなぞる際に生じている力学的作用を、レバーメカニズムによる簡単な物理現象を利用して増幅させる第3の触覚デバイスを実現した[6]。図1に示す触覚コンタクトレンズは、厚さ0.3[mm]のシート状の台座の上に、直径1[mm]、高さ4.2[mm]の突起を、1.5[mm]のピッチで配置したものである。光硬化樹脂を用いて、光造形装置により一体成形した。なお、台座下面には摩擦低減のためにテフロンテープを貼っている。

使用時には、台座の下面を対象面に、突起側の面を手掌に当て、触覚コンタクトレンズ越しに手掌で対象面を押え付けながら表面をなぞる。このとき、対象面の曲率に応じて突起側の面に伸縮が生じる。しかも、中立面が薄い台座内に位置するために、可撓性を損なうことなく、物体の凹凸の情報が的確に増幅し呈示される。

増幅効果を上げるためには、台座部分の曲げ剛性は十分に小さく、なぞり時の通常の押し付け力で表面の凹凸に沿って曲がる必要がある。また、厚さ方向に伸縮しないほうがよい。一方、突起は撓むことなく垂直を保つだけの剛性が要求される。

触覚コンタクトレンズは、事前準備・調整が一切不要で、物体の微小な凹凸を鋭敏に、しかも素早く検出できる。なお、突起の高さを調整することで、容易に感度を調整することができる。また、携帯性に優れ、頑健で故障や破損が生じ難い。もちろん、大量生産も可能で低コストである[7]。

素人でも感動的な感覚を体験することができるが、熟練技能者からも次のようなコメントを得ており、鋼板の面歪検査において高い評価を得ている。

- ・感覚的には、3～5倍に感じる。



図1 触覚コンタクトレンズ (TouchLens)

- ・指先で感じて驚いている。感触が全然違う。
 - ・少ないなぞり動作でピリッと鮮明に感じられる。すぐに「ここ」と分かる。
 - ・従来見落としていた小さい面歪も検出できる。
- また、技能伝承の道具としても、次の使い方が可能である。
- ・触覚コンタクトレンズにより、増幅された大きさや形状のイメージを獲得し、そのイメージを頼りに訓練する。
 - ・生徒に触らせて、正解を示すときに触覚コンタクトを使う。

3. 触 の 数 理

3.1 力学と触

触覚は皮膚と物体の接触によって生み出される感覚である。物体との接触によって、皮膚表面には変位と表面力の時空間分布が生じ、皮膚の内部には歪と応力の時空間分布が生じる。皮膚の内部には主に4種類の機械受容器が存在する。機械受容器は、歪・応力、あるいはそれらの時間変化に反応して神経パルスを発射する。その神経パルス列は脳に伝わり、人は様々な触感を感じることができる。神経パルス列がどのように脳で処理されているかという問題は、脳科学・神経科学の領域であろう。一方で、少なくとも、皮膚表面から機械受容器への物理刺激の伝達は、古典力学に従う現象としてとらえることができる。

皮膚表面の変位や表面力は、巧妙な装置を用いて観測や制御が可能である。また、機械受容器から発生する神経パルスは、マイクロニューログラムなどの方法によって観測できる。しかし、機械受容器に生じる歪や応力を観測することは非常に困難である。皮膚表面の機械刺激と神経パルスとの相関により、機械刺激がどのように符号化されているのかをある程度知ることができる[8]～[11]。しかし、触覚のメカニズムを工学的に応用するためには、皮膚と機械受容器の力学的な特性と働きを理解する必要がある。

筆者らは既報[12]において、触覚コンタクトレンズ効果の原因を説明するために、弾性力学に基づいた解析を試みた。本章では、この解析から得られた知見をもとにして、触覚の力学的な側面、特に皮膚の表面と内部における力学的な相互作用について解説する。まず、指の皮膚構造の大域的な力学的性質について概観する。次に、皮膚を十分な深さを持つ均一な弾性体とみなした場合の、弾性力学に基づいた定式化を示す。そして、弾性力学から導かれる皮膚の二つの性質について解説する。

3.2 指と皮膚の大域的な構造

人間の皮膚は、外側から表皮、真皮、皮下組織という大きく分けて三つの層からなっている。表皮、真皮、皮下組織の中では、表皮が最も弾性率が高く、皮下組織が最も弾性率が低いという測定結果がある[13]。しかし、表皮は角質層と呼ばれる弾性率が高い層とそれ以外の柔らかい層（表

皮生細胞層)からなっており, 表皮生細胞層は真皮よりも若干柔らかいという報告もある [14]. いずれにしても, 無毛部の皮膚は有毛部と比較して厚い角質層を持つ [15] ので, 指の皮膚は, 外側が硬く内側が柔らかいと考えてよい.

この考え方を極限まで簡略化すると, 薄膜の袋の中に液体を満たしたモデルで指先をモデル化することができる. 「ウォーターベッドモデル」と呼ばれるこのモデルは, 指全体の変形を予測するのに有効であることが示されている [16]. この内部は液体であるので, 内部の応力 (圧力) 分布が均一になる. これは, 指先が環境との接触時に, 接触部の中心に圧力を集中させずに, 均一な接触圧を実現しているという予想 [17] と一致する. ただしこのモデルに基づくと, 指の中の応力が均一になり, 応力の空間的分布の情報が得られなくなる. したがって, 指の力学的性質は, 大域的にはウォーターベッドモデルに近く, 局所的には弾性体に近いと考えるのが妥当であろう. 指全体の変形を予測するためには, 少なくとも外側の硬い層と内側の柔らかい層の 2 層からなるモデルが必要であることが, 有限要素解析によって確かめられている [18].

なお, 真皮と表皮の境界面は入り組んだ構造になっている. この構造は, 機械受容器の位置に応力集中を起こして刺激の伝達効率を高める役割を持つという解釈が, 有限要素解析によって示されている [13]. ただし, 解剖学的な観察によると, 表皮と真皮の間は緩やかに接合されている部位と強固に結合している部位とが交互に配置されている [15]. そして, この構造が機械受容器位置で機械刺激を増幅する役割を持っているという予想も導かれている [15].

3.3 弾性力学に基づいた単純なモデル

前節の説明のように, 指の皮膚は, 複数の要素からなる巧妙な器官である. しかし, 微小で局所的な変形によって生じる感覚を論じるには, 皮膚を均一な弾性体とみなした単純なモデルが有効である.

弾性力学に基づいた解析的なアプローチを用いて皮膚の変形と機械刺激の伝達をモデル化するためには, 皮膚は等方性であり, 均一であり, 無限の厚さを持った半無限弾性体として取り扱うのが便利である [19]~[21]. このような単純なモデルでも, 様々な情報処理機能を持ちうることが示されている [22]. 二次元の半無限弾性体のモデルと, 骨に相当する剛体の基部がある弾性体のモデルとの比較によって, 半無限弾性体近似が妥当なものであるという結論が導かれている [20].

弾性体内部の力学現象を記述するために必要な物理量は, 歪と応力である. 一般的な弾性体中において歪と応力は線型的に関連しているため, 機械受容器は歪と応力のどちらに反応するのか, という問題は大きな意味を持たない. ただし, 非圧縮性の弾性体内では体積変形を伴う歪が許容されないため, 歪を伴わない応力が存在する. したがって上

記の問題は, 機械受容器は歪を生じない応力に反応するか否か, という問題に置き換わることになる. 弾性体内の空洞の変形から応力を推定する触覚センシング手法が提案されている [22], これは, 非圧縮性弾性体中に設けた圧縮性領域の変形を測定しているため, 応力を検出する手法であるといえる. しかし, 機械受容器は周囲の組織とほぼ同じく非圧縮性であると考えられる. そして機械受容器は, 変形して細胞膜が引き伸ばされることによって脱分極し [23], パルスを発生する. したがって, 生体の機械受容器は, 歪に反応する (すなわち, 歪を生じない応力には反応しにくい) 可能性が高いと考えられる. 有限要素法による解析結果とマイクロニューログラムの観測結果との比較により, 機械受容器の一種であるメルケル盤の応答は, 歪エネルギー密度と高い相関を持つことが示されている [24]. 歪エネルギー密度は歪の関数であるため, 機械受容器が歪に反応するという考え方が相反しない.

以下, 皮膚の表面から内部への情報伝達についての考察を行うために, 弾性力学に基づいた定式化を行う. 皮膚の表面に原点を持つ座標系を考える. 皮膚表面の接線方向に互いに直交する x 軸および y 軸をとり, 法線方向に z 軸をとる. 皮膚の内部に向かう方向を z 軸の正の向きとする. 皮膚の表面上の位置 $(x, y, 0)$ における単位面積当たり表面力ベクトルと表面変位ベクトルをそれぞれ $\mathbf{f}_o(x, y)$ および $\mathbf{u}_o(x, y) (\in \mathcal{R}^3)$ とする. また, 皮膚内部の位置 (x, y, Z) における歪を $\boldsymbol{\varepsilon}_o(x, y) \triangleq [\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{zx}, \varepsilon_{xy}]^T (\in \mathcal{R}^6)$ とする (以後, Z は定数として扱う). ここで, 例えば ε_{xx} は x 方向の圧縮歪を表し, ε_{xy} は xy 平面内での剪断歪を表す.

等方性の弾性を持つ三次元半無限体において, 境界面に加えられた集中荷重とその内部の歪と変位の関係は, Boussinesq の解および Cerruti の解 [25] と呼ばれている. 皮膚がほぼ非圧縮性であることを考慮して, これらの解にポアソン比 $= 1/2$ を代入すると, 下記のような表現が得られる.

$$\mathbf{u}_o(x, y) = \mathbf{K}_{uf}(x, y) \otimes_{xy} \mathbf{f}_o(x, y) \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_o(x, y) = \mathbf{K}_{\varepsilon f}(x, y) \otimes_{xy} \mathbf{f}_o(x, y) \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{uf}(x, y) \triangleq \frac{3}{4\pi E(x^2 + y^2)^{3/2}} \times \begin{bmatrix} 2x^2 + y^2 & xy & 0 \\ xy & x^2 + 2y^2 & 0 \\ 0 & 0 & x^2 + y^2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{K}_{\varepsilon f}(x, y) \triangleq \frac{3}{4\pi E(x^2 + y^2 + Z^2)^{5/2}} \times \begin{bmatrix} -2x^2 + y^2 + Z^2 \\ x^2 - 2y^2 + Z^2 \\ x^2 + y^2 - 2Z^2 \\ -6Zy \\ -6Zx \\ -6xy \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ Z \end{bmatrix}^T$$

ここで, $\otimes_{xy}$ は畳み込み積分, E はヤング率である.

式 (1) および式 (2) をフーリエ変換すると, 畳み込み積分は乗算に変換され, 以下の形の式が得られる.

$$\tilde{\mathbf{u}}_o(\xi, \eta) = \tilde{\mathbf{K}}_{uf}(\xi, \eta) \tilde{\mathbf{f}}_o(\xi, \eta) \quad (3)$$

$$\tilde{\mathbf{e}}_o(\xi, \eta) = \tilde{\mathbf{K}}_{ef}(\xi, \eta) \tilde{\mathbf{f}}_o(\xi, \eta) \quad (4)$$

ここでチルダ ($\sim$) は対応する関数のフーリエ変換を表し, ξ および η はそれぞれ x 方向および y 方向の空間周波数を表す. さらにこれらを用いると, 下式が導かれる.

$$\tilde{\mathbf{e}}_o(\xi, \eta) = \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) \tilde{\mathbf{u}}_o(\xi, \eta) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) &\triangleq \tilde{\mathbf{K}}_{ef}(\xi, \eta) \tilde{\mathbf{K}}_{uf}(\xi, \eta)^{-1} \\ &= \frac{e^{-Z\rho}}{\rho} \begin{bmatrix} -j\xi(Z\xi^2 - \rho) & -jZ\xi^2\eta & Z\rho\xi^2 \\ -jZ\xi\eta^2 & -j\eta(Z\eta^2 - \rho) & Z\rho\eta^2 \\ -j\rho\xi(1 - Z\rho) & -j\rho\eta(1 - Z\rho) & -Z\rho^3 \\ -\xi\eta(1 - 2Z\rho) & -\xi^2 - 2\eta^2(1 - Z\rho) & 2jZ\rho^2\eta \\ -\eta^2 - 2\xi^2(1 - Z\rho) & -\xi\eta(1 - 2Z\rho) & 2jZ\rho^2\xi \\ -j\eta(2Z\xi^2 - \rho) & -j\xi(2Z\eta^2 - \rho) & 2Z\rho\xi\eta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

ただしここで, $\rho = \sqrt{\xi^2 + \eta^2}$ である.

表面変位から内部歪への変換は, 長さの次元の物理量のみを含んだ幾何学的な問題である. したがって, 関数 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ は力の次元を含んだヤング率 E などには依存しない.

3.4 接線変位知覚と法線変位知覚

周波数応答関数 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ が持つ重要な性質の一つは, 表面変位から内部歪への変換の特異性である. 式 (6) より, 行列 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ は下式を満たす.

$$\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) [j\xi, j\eta, 1/Z - \rho]^T = \mathbf{o}_6 \quad (7)$$

ここで $\mathbf{o}_6$ は六次元零ベクトルである. 式 (7) は, 行列 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ が零空間を持つことを意味する. これは, 非圧縮性弾性体中では体積変形を伴う歪が許容されないことに起因する. 式 (7) の物理的意味は, 下式のように変形すると理解しやすくなる.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) [-j\xi, -j\eta, 0]^T \tilde{\mathbf{u}}(\xi, \eta) \\ = \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) [0, 0, 1/Z - \rho]^T \tilde{\mathbf{u}}(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで, $\tilde{\mathbf{u}}(\xi, \eta)$ は任意のスカラー関数である. 空間周波数領域で $j\xi$ ($j\eta$) をかけることは, 空間領域で x (y) について微分することと等価であるので, 式 (8) は下式のように書き直すことができる.

$$\boldsymbol{\varepsilon}_T(\xi, \eta) = (1/Z - \rho) \boldsymbol{\varepsilon}_N(\xi, \eta) \quad (9)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_T(\xi, \eta) = \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) \mathcal{F}_{xy} \left(\begin{bmatrix} -\partial u(x, y)/\partial x \\ -\partial u(x, y)/\partial y \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}_N(\xi, \eta) = \tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta) \mathcal{F}_{xy} \left(\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ u(x, y) \end{bmatrix} \right)$$

ここで, $u(x, y)$ は $\tilde{u}(\xi, \eta)$ の逆フーリエ変換であり, $\mathcal{F}_{xy}$ はフーリエ変換を表す. 式 (9) より, ある関数 $u(x, y)$ を法線変位として与えて得られる歪テンソル ($\boldsymbol{\varepsilon}_N(\xi, \eta)$) は, その関数の勾配 (gradient) を接線変位として与えて得られる歪テンソル ($\boldsymbol{\varepsilon}_T(\xi, \eta)$) を, スカラ倍したものに等しいということが分かる.

式 (9) の関係は, ある内部歪の空間分布が, 表面の接線変位で生じたものなのか表面の法線変位で生じたものなのか, 区別できないということを意味している. なお, 周波数応答関数 $\tilde{\mathbf{K}}_{ef}(\xi, \eta)$ についても式 (9) と同様の式が成り立つので, 接線力と法線力についても同様のことがいえる. 物体の凹凸を知覚する際には, 紙片などを介して滑りを良くしたほうが分かりやすいということはよく知られている [4]. この現象の一つの説明として, 通常外乱として働く接線力が介在物によって小さくなったことが挙げられている [26]. これは, 人間が接線力と法線力の区別ができないということを意味するので, $\tilde{\mathbf{K}}_{ef}(\xi, \eta)$ および $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ の性質に由来する可能性もある.

式 (9) の示唆は, 触覚提示の分野でも重要である. 現在開発されている触覚ディスプレイは, 皮膚表面に法線方向の力と変位を加えるタイプが多い [27] [28]. これに対して, 接線方向の力と変位を与えるタイプの触覚ディスプレイも, 近年いくつか考案されている [29]~[31]. 式 (9) の関係は, 接線方向タイプの触覚ディスプレイでも, 法線方向タイプの触覚ディスプレイと同等の触覚感覚を生成する能力があることを示唆している. また, 触覚コンタクトレンズの突起は対象表面の傾斜に応じて皮膚表面に接線変位を発生させると考えられるが, 式 (9) の効果により, 接線変位が法線変位の感覚を増幅した感覚を生んでいると考えられる.

3.5 空間周波数フィルタ効果とエイリアシング効果

周波数応答関数 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ の空間周波数フィルタ特性から, 興味深い洞察が得られる. 生体の皮膚や触覚センサの弾性カバーが空間ローパスフィルタとして働くことは, 古くから指摘されている. 皮膚表面の一点に加えられた機械刺激は, 皮膚の内部に分散して伝達されるので, この働きは直感的にも理解しやすい. 圧力を検出するセンサ素子を弾性体でカバーした場合は, その弾性体のローパスフィルタ効果によって, 分解能が低下する原因にもなる [20] [32]. 皮膚のローパスフィルタ特性を利用した触覚ディスプレイも考案されている [33].

これに対し, 周波数応答関数 $\tilde{\mathbf{G}}(\xi, \eta)$ は, ローパスフィルタではなくバンドパスフィルタとして働く. これは, 応力・圧力ではなく歪を出力としていることに起因する. 歪を

出力とした場合に、非圧縮性弾性体が空間バンドパスフィルタとして働くということは、過去の研究者によっても指摘されている [21] [27]. 空間的に低周波な (すなわち、ほぼ均一な) 分布の表面圧力や表面変位が加えられたとき、非圧縮性の物体は変形しにくいので歪も生じにくい. それに対して圧力分布が離散的であると、体積変化を生じない変形が可能となるので、内部に歪が生じやすくなる.

関数 $\tilde{G}(\xi, \eta)$ の空間バンドパスフィルタ特性によって、均一な分布の表面変位や表面力は、皮膚の内部へ伝達しにくくなる. ただし、人間の指には指紋が存在するので、接触は離散的になっている. すなわち、平らな面に接触した場合でも、高空間周波数成分がある程度は発生することになる. これは、一種のエイリアシング効果であるといえる. すなわち、表面変位の空間スペクトルが、空間バンドパスフィルタ $\tilde{G}(\xi, \eta)$ を通過しやすい高空間周波数領域にコピーされ、高ゲインで歪へ変換されることになる. 通常の場合、エイリアシング効果は情報を歪ませる欠点が強調される [27] [28]. しかし触覚の場合は、機械刺激の空間分布だけでなく、その時間分布にも大きい情報量が含まれるので、空間分布の情報を犠牲にしても、時間分布の情報の伝達効率を高めることは重要である. 特に物体表面を指でなぞる際には、物体の形状の空間的な情報が、指に加わる変位と力の時間変化の情報に変換されるので、時間分布の情報伝達は重要である. 指紋の凹凸がこのような役割を持っている可能性は、すでに指摘されている [21]. また、触覚コンタクトレンズは突起先端部で指先と離散接触するので、この場合もエイリアシング効果が発生すると考えられる [12], また、高密度ピンアレイを介して物体表面をなぞった際にも [34], 同様の効果が期待できる.

なお、周波数応答関数 $\tilde{G}(\xi, \eta)$ の各成分の絶対値は、 $Z\rho = 2$ となる周波数で極大値をとる. 人間の指紋の空間周期はおおよそ $0.2 \sim 0.5$ [mm] といわれている [13] [35] ので、その空間周波数は $\rho = 2\pi/0.5 \sim 2\pi/0.2 = 12 \sim 31$ [mm⁻¹] となる. 一方、高い時間分解能を持つ機械受容器 (マイスナー小体およびメルケル盤) の深さは $Z = 0.5 \sim 1.0$ [mm] という値がよく用いられている [13] [18] [24]. これらの値に基づく、 $Z\rho > 6$ となり、最適値である $Z\rho = 2$ よりもかなり大きくなる. すなわち、均一な半無限弾性体の理論に基づく、人間の指の構造は最適解ではなく、指紋のピッチが細かすぎるか、または機械受容器の位置が深すぎるということになる. 二次元の半無限体モデルに基づいた考察でも同様の指摘はすでになされている [21].

4. お わ り に

本稿では、だれも目を向けなかった軍手から、触覚コンタクトレンズが生み出されたことを紹介した. この第3の触覚デバイスは、その原理も機能も容易に理解できるやさ

しい道具であり、高度技能に接近できる.

さらに、指の皮膚を極端に単純化したモデルからも、様々な知見が得られた. 解説した力学的なメカニズムはすべて仮説の域を出ておらず、生体の皮膚の中で実際に機能しているかどうかは不明である. しかしこれらの知見は、新しいデバイスの開発につながることを期待できる. 工学的に応用可能な洞察を得るためには、問題のポイントをとらえた単純なモデルが有効であろう.

技能の起源に潜む触覚は、高付加価値を生む最大にして最後の感覚かもしれない. 本稿がこの分野の発展の一助になれば幸いである.

参 考 文 献

- [1] 白水: “自動車・輸送機器”, 日本機械学会誌, vol.107, no.1022, pp.32-36, 2004.
- [2] 中村: “製造現場の技能伝承”, 精密工学会誌, vol.68, no.10, pp.1273-1276, 2002.
- [3] 岩村: タッチ. 医学書院, 2001.
- [4] I.E. Gordon and C. Cooper: “Improving One’s Touch,” *Nature*, vol.256, pp.203-204, 1975.
- [5] D.A. Perry and H.E. Wright: Touch Enhancing Pad, US Patent, no.4,657,021, 1987.
- [6] 佐野, 望山, 武居, 菊植, 恒川, 藤本: “触覚コンタクトレンズ—基本コンセプト—”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会’04 講演論文集, 1A1-H-10, 2004.
- [7] A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue, R. Kikuuwe and H. Fujimoto: “TouchLens: Touch Enhancing Tool,” *Proc. of the 1st IEEE Technical Exhibition Based Conference on Robotics and Automation*, pp.71-72, 2004.
- [8] R.H. Lamotte and M.A. Srinivasan: “Tactile discrimination of shape: responses of slowly adapting mechanoreceptor afferents to a step stroked across the monkey fingerpad,” *Journal of Neuroscience*, vol.7, pp.1655-1671, 1987.
- [9] R.H. Lamotte and M.A. Srinivasan: “Tactile discrimination of shape: responses of rapidly adapting mechanoreceptive afferents to a step stroked across the monkey fingerpad,” *Journal of Neuroscience*, vol.7, pp.1672-1681, 1987.
- [10] M.A. Srinivasan and R.H. Lamotte: “Tactile discrimination of shape: Responses of slowly and rapidly adapting mechanoreceptive afferents to a step indented into the monkey fingerpad,” *Journal of Neuroscience*, vol.7, pp.1682-1697, 1987.
- [11] I. Birznieks, P. Jenmalm, A.W. Goodwin and R.S. Johansson: “Encoding of direction of fingertip forces by human tactile afferents,” *Journal of Neuroscience*, vol.21, no.20, pp.8222-8237, 2001.
- [12] R. Kikuuwe, A. Sano, H. Mochiyama, N. Takesue and H. Fujimoto: “Enhancing haptic detection of surface undulation,” *ACM Trans. on Applied Perception*, vol.2, no.1, pp.46-67, 2005.
- [13] 前野, 小林, 山崎: “ヒト指腹部構造と触覚受容器位置の力学的関係”, 日本機械学会論文集 (C 編), vol.63, no.607, pp.881-888, 1997.
- [14] 松村, 生田, 長山, 松本: “モルモットの角層・表皮・真皮の単軸引張特性”, 日本機械学会 2003 年度年次大会講演論文集, vol.5, pp.39-40, 2003.
- [15] N. Cauna: “Nature and functions of the papillary ridges of the digital skin,” *Anatomical Record*, vol.119, pp.449-468, 1954.
- [16] M.A. Srinivasan: “Surface deflection of primate fingertip under line load,” *Journal of Biomechanics*, vol.22, no.4, pp.343-349, 1989.
- [17] 篠田: “皮膚の力学的構造に隠れている知能”, システム制御情報学会誌, vol.46, no.1, pp.28-34, 2002.
- [18] K. Dandekar, B.I. Raju and M.A. Srinivasan: “3-d finite-

- element models of human and monkey fingertips to investigate the mechanics of tactile sense," Trans. of ASME: Journal of Biomechanical Engineering, vol.118, pp.48-55, 2003.
- [19] J.R. Phillips and K.O. Johnson: "Tactile spatial resolution III. a continuum mechanics model of skin predicting mechanoreceptor responses to bars, edges, and gratings," Journal of Neurophysiology, vol.46, no.6, pp.1204-1225, 1981.
- [20] R.S. Fearing: "Tactile sensing mechanisms," International Journal of Robotics Research, vol.9, no.3, pp.3-23, 1990.
- [21] R.S. Fearing and J.M. Hollerbach: "Basic solid mechanics for tactile sensing," International Journal of Robotics Research, vol.4, no.3, pp.40-54, 1985.
- [22] H. Shinoda, K. Matsumoto and S. Ando: "Tactile sensing based on acoustic resonance tensor cell," In Proc. of the 9th Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators, pp.129-132, 1997.
- [23] E.R. Kandel, J.H. Schwartz and T.M. Jessell: Principles of Neural Science. McGraw-Hill Education, 2000.
- [24] M.A. Srinivasan and K. Dandekar: "An investigation of the mechanics of tactile sense using two dimensional models of the primate fingertip," Journal of Biomechanical Engineering, vol.118, pp.48-55, 1996.
- [25] A.E.H. Love: A Treatise on the Mathematical Theory of Elasticity. Dover, 4th edition, 1927.
- [26] S.J. Lederman: "Improving one's touch" ... and more," Perception and Psychophysics, vol.24, no.2, pp.154-160, 1978.
- [27] G. Moy, U. Singh, E. Tan and R.S. Fearing: "Human psychophysics for teletactile system design," Haptics-e, The Electronic Journal of Haptics Research, vol.1, no.3, 2000.
- [28] J.M. Lee, C.R. Wagner, S.J. Lederman and R.D. Howe: "Spatial low pass filter for pin actuated tactile displays," In Proc. of the 11th Symp. on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, pp.57-62, 2003.
- [29] M. Konyo, K. Akazawa, S. Tadokoro and T. Takamori: "Tactile feel display for virtual active touch," In Proc. of the 2003 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp.3744-3750, 2003.
- [30] K. Drewing, M. Fritsch, R. Zopf, M.O. Ernst and M. Buss: "First evaluation of a novel tactile display exerting shear force via lateral displacement," ACM Trans. on Applied Perception, vol.2, no.2, pp.118-131, 2005.
- [31] V. Lévesque, J. Pasquero, V. Hayward and M. Legault: "Display of virtual braille dots by lateral skin deformation: Feasibility study," ACM Trans. on Applied Perception, vol.2, no.2, pp.132-149, 2005.
- [32] 下条: "触覚センサにおける弾性体カバーの空間周波数フィルタリング効果", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.59, no.567, pp.3458-3463, 1993.
- [33] N. Asamura, N. Yokohama and H. Shinoda: "Selectively stimulating skin receptors for tactile display," IEEE Computer Graphics and Applications, vol.18, no.6, pp.32-37, 1998.
- [34] 仲谷, 梶本, 川上, 館: "高密度ビンアレイによる触覚呈示の可能性", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005 講演論文集, 1P1-N-103, 2005.
- [35] 前野, 山田, 佐藤: "ヒト指紋形状の力学的意味", 日本機械学会論文集 (C 編), vol.71, no.701, pp.245-250, 2005.



佐野明人 (Akihito Sano)

1987 年 3 月岐阜大学大学院工学研究科精密工学専攻修士課程修了。現在, 名古屋工業大学大学院工学研究科教授。触覚テクノロジー, 人間-機械系, 受動歩行の研究に従事。2004 年度日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門一般表彰 (ROBOMEC 表彰), Best

Technical Exhibition Award in 1st IEEE TExCRA2004 をおのおの受賞。2004・2005 年度本学会評議員。日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。博士 (工学)。

(日本ロボット学会正会員)



望山 洋 (Hiromi Mochiyama)

1998 年北陸先端科学技術大学院大学情報科学研究科情報システム学専攻博士後期課程修了。現在, 名古屋工業大学助教授。博士 (情報科学)。触覚情報処理メカニズムの研究に従事。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)



藤本英雄 (Hideo Fujimoto)

1970 年名古屋大学工学部機械学科卒業。現在, 名古屋工業大学教授, ものづくりテクノセンター長。医学工学や感性の工学, ロボティクスなどに興味を持つ。ASME 最優秀論文賞, 2004 年度グッドデザイン賞など多数受賞。スケジューリング学会会長, SICE 常務理事部門協議会議長, 文科省科学技術・学術審議会文化資源委員会委員など歴任。現在, 愛知県ものづくり人材育成協議会座長, 日本機械学会フェロー・評議員, SICE 中部支部支部長。工学博士。

(日本ロボット学会正会員)



菊植 亮 (Ryo Kikuuwe)

2003 年京都大学大学院工学研究科博士後期課程研究指導認定退学。同年名古屋工業大学助手, 現在に至る。触覚センシング, 作業支援ロボティクスなどの研究に従事。博士 (工学)。計測自動制御学会, 日本機械学会, IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)



武居直行 (Naoyuki Takesue)

2000 年大阪大学大学院工学研究科電子制御機械工学専攻博士後期課程修了。現在, 名古屋工業大学講師。博士 (工学)。ロボットの運動制御, 触覚テクノロジー, 人間・機械系などの研究に従事。日本機械学会, 計測自動制御学会, 電気学会, 精密工学会, IEEE の会員。

(日本ロボット学会正会員)