

# 指先の皮膚感覚による凹凸知覚特性の研究

神明前 方嗣<sup>\*1</sup> 仲谷 正史<sup>\*1</sup> 川上 直樹<sup>\*1</sup> 館 暲<sup>\*1</sup>

## Convex-Concave Perception in fingertip

Masatsugu Shimmeimae<sup>\*1</sup>, Masashi Nakatani<sup>\*1</sup>, Naoki Kawakami<sup>\*1</sup> and Susumu Tachi<sup>\*1</sup>

**Abstract** – Human can readily identify convex and concave geometry with his/her fingertip. Human characteristics of geometric perception have been studied in the field of Braille to optimize its readability. However, how accurate human can identify convex and concave geometry has not been studied very well. If such study would be performed, the result would give some insights on how the design parameters of a tactile display or sensor should be determined. Our experimental results revealed that signal detection performance and shape identification performance was almost the same for convex and concave geometry when the height (or depth) of the raised (or indented) area is over 0.2 mm. This method we used in the experiment can be applied in evaluating the performance of a developed robotic finger comparing with human shape identification performance in fingertip.

**Keywords** : tactile sensation, geometric perception, convex-concave perception

### 1 触覚における凹凸知覚の意義

指先の皮膚感覚による凹凸知覚は、形状知覚の基礎的な知見として広く研究が行われてきている。Johnsonらは、心理物理学的手法を用いて凹凸形状が含まれる格子形状を利用した指先の空間解像度の感度や、アルファベット文字認識精度について調べた [1]。また、Phillipsらは神経生理学の側面から凹凸形状の押し込みに対して遅順応型 (SA I) 神経のインパルス発射頻度が再現性よく形状情報をエンコードしていることを示した [2]。しかし、人間の主観的知覚が凹凸形状に対して物理的な形状と一致して凹凸が正しく同定されているかに関する検討は十分とはいえない。実際、主観的な凹凸同定の結果が物理形状とは一致しない錯触覚現象も報告されている [3]。ゆえに人間の凹凸知覚特性について詳しく調べることは、皮膚感覚における凹凸知覚のメカニズムを解明する基礎知見となると考えられる。加えて VR 技術の観点から考えると、凹凸知覚の知見は、正しく凹凸情報を提示もしくは計測可能な触覚ディスプレイ・センサの設計パラメータを決める際に重要である。本稿は上述の視座に立った上で、人間の指先皮膚感覚における凹凸知覚特性を報告する。

### 2 実験：指先の皮膚感覚による凹凸の同定

本実験では2つの実験を通して人間の指先における凹凸検出感度を測定する。実験1では人間の指腹部に

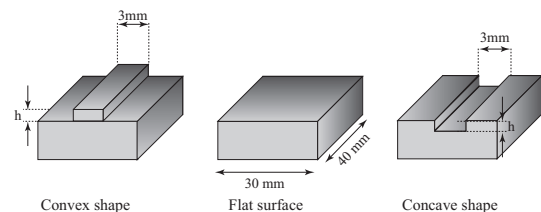


図1 実験に使用した触覚刺激形状。  
Fig.1 The experimental surface used in the experiment 1 and 2.

における凸形状・凹形状に対する検出感度を調べた。実験2では、何らかの凹凸情報が検出されたときに、それらを凸・凹形状と正しく同定されるかを調べた。

#### 2.1 実験装置

触覚刺激として、図1のような30 mm×40 mm、厚さ5 mmの6枚のアルミ板を用意した。3Dプロッタ (Roland社製 Modela MDX-20)により、中央部には幅3 mmで、高さ差  $h$  がそれぞれ0.1 mm~0.3 mmの凹、凸形状を製作した (信号+ノイズ刺激)。加えて、3Dプロッタによって表面を平らにした凹凸のないアルミ板片を用意した (ノイズ刺激)。3次元プリンタ (Dimension社製 BST 768) で作成した治具によって固定した。治具の下には3軸力センサ (ニッタ株式会社製 PD3-32) を取り付け、被験者がアルミ板片に触れているときの力を計測した。

<sup>\*1</sup>東京大学大学院 情報理工学系研究科

<sup>\*1</sup>Graduate School of Information Physics and Computing, The University of Tokyo

## 2.2 実験1：指先の皮膚感覚による凹凸形状検出実験

### 2.2.1 実験手順

実験1では、指先の皮膚感覚において、接触表面に凸形状、もしくは凹形状が存在しているか否かを実験参加者に答えさせた。凸形状条件では、実験者は平らな板と0.1 mm～0.3 mmの凸を持つ板の計4種類を被験者に対してランダムに提示した。被験者は提示されたアルミ板片を目視することなく利き腕の人差し指で触れた。被験者はなぞり動作をせずに、刺激片に対して鉛直方向にのみ力をかけるように指示された。印加している力は液晶モニタ上に常時表示され、被験者自らが印加する力を1 Nとなるように調節した。被験者は接触表面に凸があるか否かを強制2択で回答した。熱の移動が凹凸知覚の手がかりにならないよう、各実験試行の前にアルミ板片を恒温プレート(日伸理化製NHP-45N)上で32℃に保温した。試行は各アルミ板片を10回ずつ、計40回提示した。同様の手順を凹形状に対しても行った(凹形状条件と呼ぶ)。

被験者は20代の男性6名であった。

### 2.2.2 実験結果

実験の結果を、信号検出理論により解析した[4]。実験データの解析結果を表1に示す。 $d'$ は信号検出の容易さを表す指標である。また、 $\Delta m$ はS+N分布の平均値からN分布の平均値を引いた値であり、S+N分布とN分布の分散が異なる場合に使われる指標である。いずれも、数値が大きいほど信号が検出しやすと考えられる。解析結果から、0.2 mm、0.3 mmでは凹凸ともに誤答がなかったため、 $\Delta m$ は0.9以上であった。一方、凸と凹の0.1 mmでの $\Delta m$ を比べたところ、凸では0.57、凹では0.62であった。以上の結果から、平らな面と凸、平らな面と凹の検出しやすさはほぼ同程度であった。

## 2.3 実験2：指先の皮膚感覚による凹凸形状同定実験

### 2.3.1 実験手順

実験1より、凹凸の高さ差が0.2 mm以上である場合、凹凸形状それぞれの信号検出感度に大きな違いは見られなかった。実験2では、凹凸のあるアルミ板片をランダムに提示し、どの程度正しく形状を同定できるかを調べた。触覚刺激としてのアルミ板片は実験1と同じ凸・凹形状それぞれ3種類と平面形状1種類、の計7種類を使用した。実験者はアルミ板片をランダムに提示し、知覚された形状を凸、凹、平らの強制3択で答えさせた。各アルミ板片を各10回ずつ、計70回提示した。被験者は20代の男性6名であった。

表1 実験1：人間の凸・凹形状信号検出感度実験(N=6)

Table 1 The result of experiment 1. The detection threshold  $d'$  and  $\Delta m$  for raised and indented surface is shown (N=6).

凸	Average	Variance	Standard Deviation	$d'$	$\Delta m$
N	0.10	0.06	0.25	—	—
SN(0.1)	0.63	0.23	0.48	2.3	0.57
SN(0.2)	1.0	0.0	0.0	3.0	0.94
SN(0.3)	1.0	0.0	0.0	3.0	0.94
凹	Average	Variance	Standard Deviation	$d'$	$\Delta m$
N	0.10	0.09	0.3	—	—
SN(0.1)	0.72	0.20	0.45	2.1	0.62
SN(0.2)	1.0	0.0	0.0	3.0	0.90
SN(0.3)	1.0	0.0	0.0	3.0	0.90

### 2.3.2 実験結果

実験結果を図2に示す。凸・凹形状に関わりなく、高さ差が0.2 mm、0.3 mmの場合に実験参加者はほぼ正しく形状を同定した。一方、高さ差が0.1 mmの場合には正答率が下がり、凸形状では43%、凹形状では67%であった。なお凸形状の高さ0.1 mmでの誤答の内訳は凹凸無し47%、凹53%、凹形状の深さ0.1 mmでの誤答の内訳は、凹凸無し40%、凸60%であった。

### 2.4 実験結果の考察

実験1と実験2の結果より、人間は幅3mm、高さ0.2 mm以上の凹凸をほぼ正確に同定できることが示唆された。また、高さ差が0.1 mmでの正答率が凸よりも凹の方が若干高いことがわかった。以上の結果より、人間の凹凸検出感度は同程度であるが、同定となると凸よりも凹の方が物理形状と一致した回答を行う傾向がわかった。

## 3 まとめと展望

人間の指先における凹凸の検出感度は、凹凸の高さ差が0.2 mm以上であれば同程度であることが分かった。ゆえに、触覚ディスプレイ等を設計する際には凸と凹のどちらを信号として利用しても高さ差が0.2 mm以上であれば同程度に検出されることがわかった。また、凹凸刺激の同定にも高さ差が0.2 mm以上であれば分かった。ゆえに触覚ディスプレイでは0.2 mm以上の凹凸を提示すればよいことが分かった。一方、今回の実験パラダイムはロボットフィンガの性能評価にも利用可能である。もし人間と同程度の凹凸検出ができるロボットフィンガを作成したと主張したいのであれば、ロボットフィンガが達成できる信号検出性能 $d'$ (もしくは $\Delta m$ )を求めることによって、評価すればよいと考えられる。また、人間の同程度の凹凸

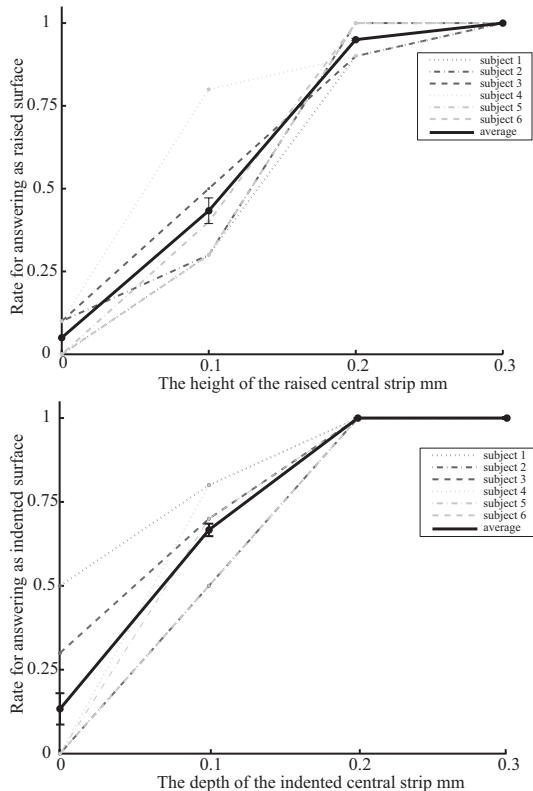


図2 実験2 上：凸形状提示時の回答率。下：凹形状提示時の回答率 (N=6)。エラーバーは標準偏差を表す。

Fig. 2 The result of Experiment 2 (N=6). Top: The rate for answering as raised surface for flat and raised surfaces. Bottom: The rate for answering as indented surface for flat and indented surfaces. Error bar indicates standard deviation.

同定ができると主張したいのであれば、同定性能を人間の性能と比較すればよい。今後は過去に我々が作ったロボットフィンガ等の評価を、今回の実験系で評価する手法についても報告してゆく。

### 謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学 工学部の畑中哲生さんのご協力を得ました。

### 参考文献

- [1] K. O. Johnson, J. R. Phillips: Tactile Spatial Resolution. I. Two-point Discrimination, Gap Detection, Grating Resolution, and Letter Recognition, *Journal of Neurophysiology* Vol. 46. No. 6, pp.1177-1191, 1981.
- [2] J. R. Phillips, K. O. Johnson: Tactile Spatial Resolution. II. Neural Representation of Bars, Edges, and Gratings in Monkey Primary Afferents, *Journal of Neurophysiology* Vol. 46. No. 6, pp.1192-1203, 1981.
- [3] M. Nakatani, R. D. Howe, S. Tachi: The Fishbone Tactile Illusion, in *Proc. of EuroHaptics*, pp. 69-

73, 2006.

- [4] A. H. Gescheider(著), 宮岡徹, 金子利佳, 倉片憲治, 芝崎 朱美 (翻訳): *心理物理学-方法・理論・応用*, 北大路書房, 2002.

(2007年10月24日受付)

### 〔著者紹介〕

神明前 方嗣 (学生会員)



2005 東大工学部・計数工学科・システム情報工学コース修了。同年より同大学院修士課程に在籍。オーグメンティドリアリティ, 触知覚の研究に従事。

仲谷 正史 (学生会員)



2005 年東大大学院・情報理工学・修士課程修了。同年より同大学院博士課程に在籍。日本学術振興会特別研究員 (DC1)。触知覚メカニズム・触覚ディスプレイの研究に従事。

川上直樹 (正会員)



1996 年東工大・理工・電気電子修士課程修了。1999 年東大・工・先端学際工博士課程修了。工学博士。同年大学院・工・計数工助手, 2002 年東大院・情報理工・システム情報学専攻講師。バーチャルリアリティの研究に従事。

館 暲 (正会員)



昭 43 東大・工・計数卒。昭 48 同大大学院博士課程修了。工学博士。同年同大助手。昭 50 通産省工技院機械技研研究員, マサチューセッツ工科大学客員研究員を経て, 平 1 東大先端科学技術センター助教授, 平 4 同センター教授, 平 6 同大・工・計数工教授, 平 13 同大大学院・情報理工・システム情報学専攻教授。トレイグジスタンス, 人工現実感の研究に従事。IEEE/EMBS 学会賞, 通産大臣表彰, 国際計測連合 (IMEKO) 特別功労賞, IEEE-VR Career Award など受賞。IMEKO ロボティクス会議議長, 計測自動制御学会会長, 日本バーチャルリアリティ学会初代会長。