

# 運動する柔軟球による硬平板の表現（第2報）

○竹内 将大（電気通信大学），村田 華蓮（電気通信大学），梶本 裕之（電気通信大学）

## Presentation of hard surface with moving soft ball (II)

○Masahiro TAKEUCHI(UEC), Karan MURATA(UEC), Hiroyuki KAJIMOTO(UEC)

Abstract: When two fingers face and touch each other at the same speed, it is considered for both fingers to cause similar skin deformation in a boundary surface and user feel the same force sensation as a hard surface. In a previous paper, we suggested that the finger model might feel harder when facing each other at the same speed than when finger model does not move. In this paper, we did an additional experiment and a statistical analysis. As a result, we confirmed a significant difference.

### 1. はじめに

両手の指先を合わせた状態で指を押し付ける，力を弱めるといった動作を繰り返すと，指と指の間に非常に薄い硬平板があるように知覚される．これは一種の錯覚と考えられる．

球状の同一弾性体の接触は，対称な変形を生じその境界面は平面になるので，摩擦のない剛体平面との接触と同等に扱うことができる[1]．ここで指同士の接触において，接触部分は半球状であると仮定すると，高応力場による局所的な影響は遠方に及ばないというサンブナンの原理から，指同士の接触も同一弾性体の球の接触と捉えることが出来るのでその境界面は剛体平面との接触と同等になるはずである(Fig.1)．また，このとき両手が常に同じ速度で動いているならば皮膚変形により生じる平面の絶対的な位置は常に同一の場所にとどまっていると考えられる．よって，これらは固定された硬平板に指を押し付ける場合と同等の皮膚変形と力覚を生起させる．硬さ知覚にはばね定数，弾性係数[2]，粘性[3]など多くの物理量が影響していることが知られているがそれらは皮膚変形と深部感覚によって統合されていると考えられている[4]ので，上で述べた錯覚が生じると考えられる．

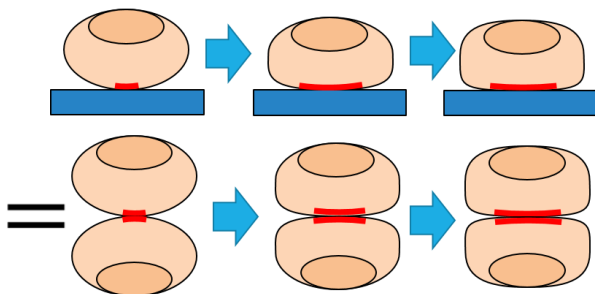


Fig.1 The boundary surface is the same when a finger touches a hard surface (top) and fingers touch each other at the same speed (bottom)

以上の考察により，本研究では指と柔軟球の接触において，柔軟球を指の動きに対向させて「硬い平面」の皮膚変形を起こすことで，より硬く知覚される現象を確認することを目的とする．前報で我々は指を模した人肌ゲルを等速で対向運動させた場合（条件 A）と静止させた場合（条件 B）で，指が接触した際の硬軟感の主観量測定を心理物理的手法によって行った．実験の結果，硬平板と同様の皮膚変形と力覚が生じるであろう条件 A の方が，条件 B より硬く知覚される可能性が示唆されたが，すべての被験者に対し条件 A から実験を行ったため順序効果が残っている可能性があった．また，被験者数の少なから統計検定は行わなかった．

そこで本稿では追加実験として条件 B から硬軟感の主観量測定を行い，前報の結果と合わせて t 検定による統計検定を行う．

### 2. 実験

本実験は，指と同形状かつ同弾性の人工指が対向して等速で接触する際に，静止している状態の人工指に接触する場合と比べてより硬く知覚されることの確認を目的とする．実験では指を模した人肌ゲルと被験者の指を対向させ，硬度を変えた人肌ゲルを試料とした．評価は主観的等価点を二重階段法で測定することで行われた．

#### 2.1 実験条件

実験に用いる人肌ゲルには株式会社エクシールの「人肌®のゲル原液 乳白」を使用した．硬化剤の種類や混合比率を変えて 8 種類の硬度の試料を作成し，厚さが約 3cm になるように質量を統制した (Fig.2)．硬度はタイプ E2 のアスカー硬度計を用いて測定したところ，柔らかいものから順に，3.0, 11.2, 19.2, 29.5, 38.9, 45.8, 54.0, 62.2 であった． (Fig.3)

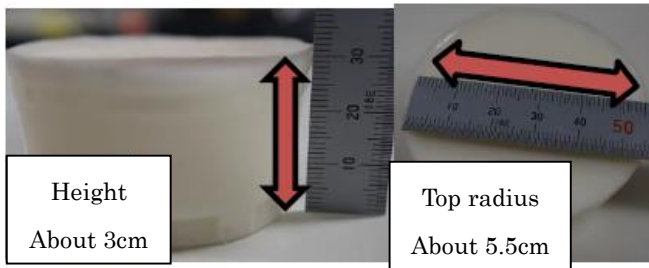


Fig.2 Size of experiment sample



Fig.3 Samples used for the experiment

実験で指と衝突させる指モデルには、試料の中央に近い4番目の硬度にあたる29.5の人肌ゲルを使用した。一般的な日本人成人の指サイズ[5]に近いマネキンの指で型取りを行い、実際の指に近づけるために、指の骨と爪をそれぞれ割り箸とプラスチック板によって再現した。(Fig.4)

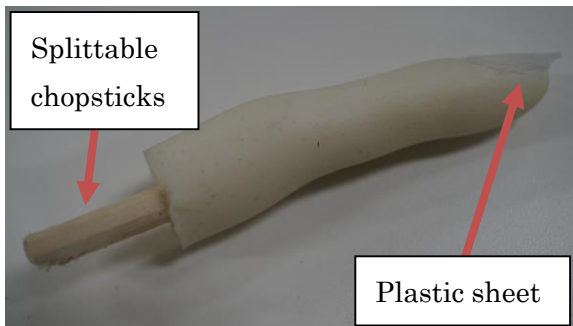


Fig.4 Finger model used for the experiment

## 2.2 実験手順

実験の様子を Fig.5 に示す。Fig.6 のような、モータを回転させるとプーリーが糸を巻き取り 2 つの指置きが等速で対向する実験装置を作成し、利用した。マイクロコントローラ (ESP32 DevkitC) を用いた PD 制御によって位置制御を行った。実験中はモータの駆動音等の外部環境音や、視覚的情報を排除するため、ヘッドホンからホワイトノイズを提示し、閉眼するよう指示した。被

験者には実験装置によって指と指モデルを 3 回接触させた後、提示された試料に触らせ、指モデルより「硬い」または「柔らかい」ということを強制二択で回答させた。試料は二重階段法によってランダムに選択された。上昇系列、下降系列ともに 3 回連続で回答が反転するまで行うというセットを、指モデルを装置に固定して指と等速逆方向の運動をさせた場合 (条件 A) と、装置から外し外部に固定した場合 (条件 B) の 2 条件で行った。前報では全員条件 A から実験を行っていたので、本稿では順序効果をなくすために、全員条件 B から実験を行った。

実験は前報と合わせて 21~42 歳 (平均年齢 24.2 歳) のナイーブな被験者 16 名 (男性 12 名, 女性 4 名) で行われた。利き手は右利き 15 名, 左利き 1 名であった。



Fig.5 Condition of the experiment

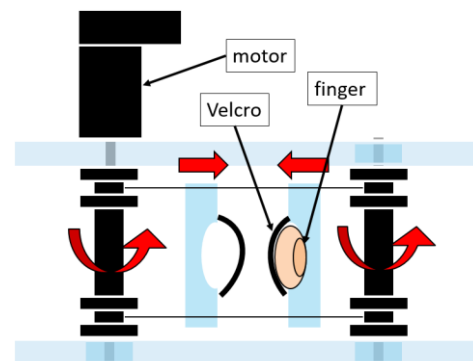


Fig.6 Overview of the device

## 3. 結果

Fig.7 はそれぞれ、被験者ごとに上昇系列と下降系列の終点を平均した結果を、指モデルを実験装置に固定した場合(条件 A)と装置から外して固定した場合(条件 B)で比較した箱ひげ図である。

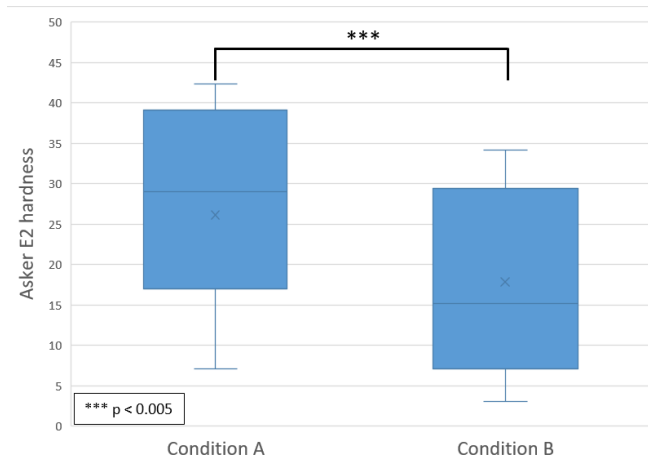


Fig.7 Result of each experiments

指モデルを装置に固定して指と等速逆向きの運動をさせた場合(条件 A)の平均値(標準偏差)は 26.09(12.58)であり、装置から外して固定した場合(条件 B)の平均値(標準偏差)は 17.87(10.96)であった。また、有意水準を.005 と定め t 検定を行ったところ、両条件の間に有意差が確認された( $p < .005$   $p = .001$ )。このことから、指と指モデルとの接触において指モデルを指の動きに対向させることによって、より硬く知覚させられることが分かった。

#### 4. 考察

今回の実験により人差し指とそれに似た指モデルとの接触において、指モデルが指と等速で対向する場合に指が静止している場合に比べてより硬く知覚されることが確認された。

また、条件 A から実験を始めたグループのみを扱った前報では条件 A で条件 B よりも硬く知覚された被験者と両条件においてほとんど回答の変わらない被験者に二分されたが、今回条件 B から始めたグループでは全員が条件 A の方が条件 B よりも硬く知覚しているという結果になった。被験者のコメントでも条件 A では指と指モデルの間に硬平板が存在したように感じた、という指摘が多数あった。これは、まず条件 B から実験を行ってから条件 A を実施したことである程度学習効果が見られたためではないかと考えられる。先に述べた指同士を押し付けあう錯覚においても、錯覚がすぐに生じない人も長時間押し付けを繰り返すことでより鮮明に硬平板の存在を知覚するケースがある。

#### 5. おわりに

本稿では前報に引き続き、同等の形と弾性を持つ物体が等速で対向し接触した際により硬く知覚される現象を確認する実験を行い、新たに統計検定を行った。その結果、等速で対向した場合の方が指モデルをより硬く知覚するという傾向が優位に見られた。また、学習効果によりこの傾向が増強される可能性も示唆された。

今後は、現行の装置を改良して振動などの要因をできるだけ排除した装置を作成し、速度や曲率の条件を変えることで本現象についてより詳細な検証を進める。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP15H05923 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] L. Vu-Quoc, X. Zhang, L. Lesburg, “A Normal Force-Displacement Model for Contacting Spheres Accounting for Plastic Deformation: Force-Driven Formulation”, ASME J. Appl. Mech., 67, pp. 363–371, (2000)
- [2] Wouter M. Bergmann Tiest and Astrid M.L. Kappers, “Cues for Haptic Perception of Compliance”, IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, Vol. 2, NO. 4, pp. 189–199, (2009)
- [3] Femke E. van Beek, Dennis J.F. Heck, Henk Nijmeijer, Wouter M. Bergmann Tiest, and Astrid M.L. Kappers “The Effect of Global and Local Damping on the Perception of Hardness”, IEEE TRANSACTIONS ON HAPTICS, Vol. 9, NO. 3, pp. 409–420, (2016)
- [4] Wouter M. Bergmann Tiest and Astrid M.L. Kappers, “Kinaesthetic and Cutaneous Contributions to the Perception of Compressibility”, EuroHaptics 2008: Haptics: Perception, Devices and Scenarios, Vol. 5024, pp 255-264(2008)