



運動する柔軟球による硬平板の表現 (第 3 報)

運動速度比と知覚曲率に関する検討

Presentation of hard surface with moving soft ball (III)

Consideration of curvature perception

竹内将大¹⁾, 金子征太郎¹⁾²⁾, 梶本裕之¹⁾

Masahiro TAKEUCHI, Seitaro KANEKO, Hiroyuki KAJIMOTO

1) 電気通信大学 (〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, {takeuchi, kaneko, kajimoto}@kaji-lab.jp)

2) 日本学術振興会特別研究員

概要: 2本の指が同じ速度で向かい合って接触するとき2つの全く同じ曲率, 弾性の物体が同じ速さで接触するとするならば, 境界面ではどちらも同じ皮膚変形が起こり, 平らな動かない境界面となり, 硬い表面と同じような力覚を感じると考えられる. この考察から, 我々は指と同程度の曲率と硬度を持つ柔軟球を等速で対向させることで硬平板と同等の触覚を表現可能と考えた. 前報で得られた速度比と知覚された硬度の関係をもとに, 本稿では指と柔軟球の速度比によって知覚される曲率を様々な曲率サンプルとの比較によって検証する実験を行った.

キーワード: 触覚, 硬軟感, 曲率, 皮膚変形

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. このため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でき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(図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と予想される. 硬さはこれらの感覚が統合されて知覚される[2]と考えられているので, 上で述べた錯覚が生じると考えられる.

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」の皮膚変形と力覚を生起させることで, より硬く平らに知覚される現象を確認することを目的とする. 前報までに我々は指と半球状の人肌ゲルを様々な速度比の対向運動によって接触させたときに知覚される硬軟感の主観量測定を行った

[3][4]. 実験の結果, 指と弾性半球の速度比が等速に近づくほど人肌ゲルが硬く知覚されることが示された.

一方で前述の考察より指と柔軟球の対向は, より「平らに」も知覚されるはずであるが, この曲率知覚の変化については検証をしていなかった. よって本稿では前報と同様に様々な速度比で接触した際に主観的な曲率が変化し, より平面と知覚しうるか「平面感」が変化するかを様々な曲率のサンプルと比較することで確認する実験を行う.

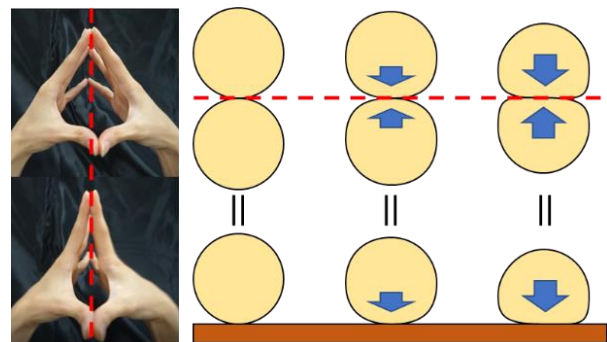


図 1: 指が硬平板に接触した際(右)と指同士が等速で互いに接触した際(左)で境界面は同じ平面になる

2. 実験

本実験は, 指と同じ弾性と曲率を持つ物体が対向して様々な速度比で接触する際に, 等速に近づくほど曲率が小さく, すなわち平面に近く知覚されることの確認を目的とする. 今回は半球状の人肌ゲルと被験者の指を対向させ,

曲率を変えたサンプルを試料として用いて実験を行った。評価は主観的等価点を PEST 法[5]による二重階段法で測定することで実施した。

2.1 実験条件

実験の比較刺激として 3D プリントした試料を使用した。作成した試料の曲率は曲率知覚の Weber 比[6]や丁度可知差異 (JND) [7]をもとに以下の表 1 のように設定した。またそれぞれの試料は中心が 15mm となるように高さを統制した (図 2)

表 1: 試料の曲率, 青枠は実験に使用した半球状人肌ゲルのサイズと同一

曲率半径 (mm)	曲率 (/m)	曲率半径	曲率	曲率半径	曲率	曲率半径	曲率
平面	0.00	385.8	2.59	84.0	11.91	18.3	54.73
1611.5	0.62	350.7	2.85	76.3	13.10	16.6	60.20
1465.0	0.68	318.8	3.14	69.4	14.41	15.1	66.23
1331.8	0.75	289.8	3.45	63.1	15.85	13.7	72.85
1210.7	0.83	263.5	3.80	57.3	17.44	12.5	80.13
1100.6	0.91	239.5	4.17	52.1	19.18	11.3	88.15
1000.6	1.00	217.8	4.59	47.4	21.10	10.3	96.96
909.6	1.10	198.0	5.05	43.1	23.21	9.4	106.66
826.9	1.21	180.0	5.56	39.2	25.53	8.5	117.32
751.8	1.33	163.6	6.11	35.6	28.09	7.7	129.05
683.4	1.46	148.7	6.72	32.4	30.89	7.0	141.96
621.3	1.61	135.2	7.40	29.4	33.98	6.4	156.16
564.8	1.77	122.9	8.14	26.8	37.38	5.8	171.77
513.5	1.95	111.7	8.95	24.3	41.12	5.3	188.95
466.8	2.14	101.6	9.84	22.1	45.23	4.8	207.84
424.3	2.36	92.4	10.83	20.1	49.76	4.4	228.63



図 2: 実験に使用した試料

実験で指と衝突させ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。厚さ 3cm の柱体で硬度 29.5 (アスカタイプ E2) の混合比の物を用い、図 3 のような半径 15.1mm の半球を作成した。半球の半径は、人差し指の第一節表面を同一曲面とみなし、著者の一人の人差し指の先から第一関節までの表面距離を弧長、直線距離を弦長として計算によって求めた値とした。

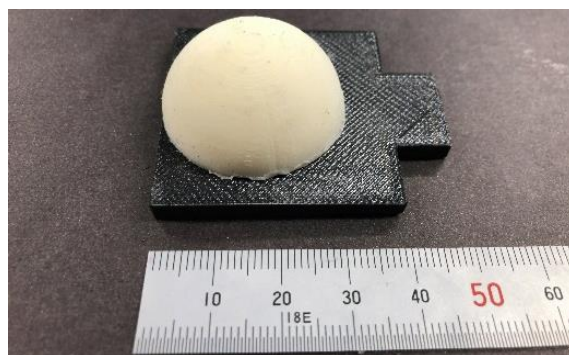


図 3: 実験に使用した半球状の人肌ゲル

2.2 実験手順

実験の様子を図 4 に示す。図 5 のような、左右に移動する自走可能なスライドボリューム (ALPS ALPINE CO., LTD., RSA0N11M9A0K) を 2 つ用いた実験装置を作成した。本スライドボリュームは DC モータを内蔵しており自走可能で、指および人工指を動かすために十分な力を出すことが出来る。マイクロコントローラ (Espressif Systems, ESP32 DevkitC) を用いた PD 制御によって指および人工指の位置制御を行った。実験中はモータの駆動音等の外部環境音を遮断するためヘッドホンからホワイトノイズを提示し、被験者には閉眼するよう指示した。また、実験中は人肌ゲルの形状を視認できないようにするために装置全体に暗幕がかけられた。被験者には実験装置によって指と半球を 3 回連続で接触させることを 3 往復分を行った後、比較対象の試料に触らせ、半球より「平らである」または「曲がっている」の強制二択で回答させた。比較対象の試料は上昇系列と下降系列がランダムに選択されたのち PEST 法によってステップ数が決定された。上昇系列、下降系列ともに初期ステップを 8 とし、ステップ数が 1 未満になるまで続けるというセットを、指と半球の速度比が 10:0, 7:3, 5:5, 3:7, 0:10 (それぞれ条件 a~e とする) の 5 条件で行った。10 の速度は約 30mm/s に相当する。実施する実験条件の順序は、順序効果をなくすようバランスされた。一人当たりの実験時間は約 60 分であった。

実験は 23~26 歳 (平均年齢 25 歳) のナイーブな被験者 3 名 (男性 3 名) で行われた。全員が右利きであった。

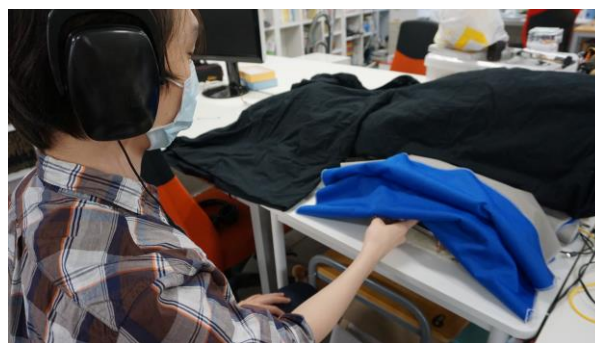


図 4: 実験の様子

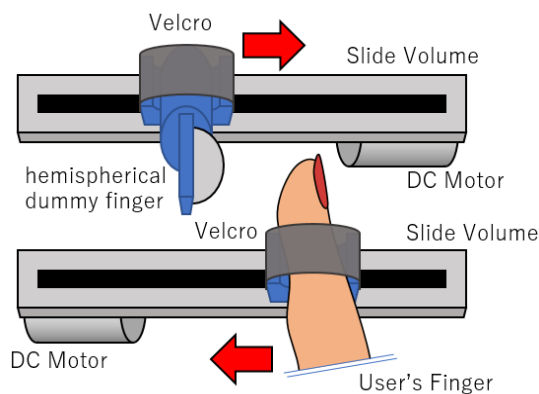
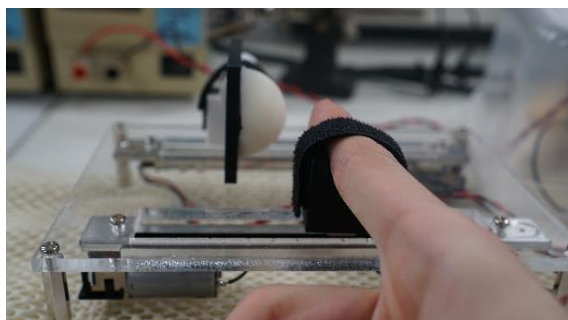


図 5: 実験に使用した装置 (上), システム概要図(下)

3. 結果

図 6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, 条件ごとに比較した箱ひげ図である。

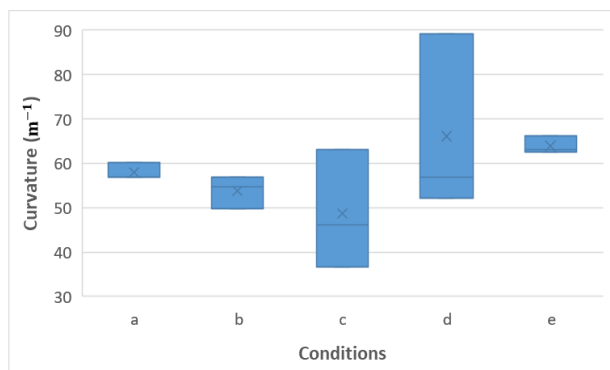


図 6: 各条件における実験結果

a-e 条件の平均値 (標準偏差) は順に, 57.95(1.59), 53.77(2.96), 48.64(10.91), 66.04(16.46), 63.93(1.64)であった。今回の実験では被験者数が3名と少なかったため, 統計検定は行わなかった。指と半球状の人肌ゲルとの接触において平均値を見ると, 人肌ゲルを指の動きに等速で対向させる場合最も曲率が小さく, つまり平らに知覚されることが分かった。また, 速度比が等速に近づくにつれて, 知覚される曲率が小さくなる傾向も観察された。

4. 考察

今回の実験結果より人差し指と半球状の人肌ゲルとの接触において, ゲルが指と等速で対向する場合に, より平

らに知覚される可能性が示唆された。先行研究から曲率知覚の Weber 比は 0.1 とされている[6]ため, これに基づく条件 c と条件 e で知覚された曲率の比率は Weber 比の 2.87 倍であるといえる。また, 標準偏差をみると速度比が等速に近づくにつれ増加する傾向がみられる。これは錯覚が起きやすい被験者とおきにくい被験者がおり, 錯覚が起きやすい被験者のみが知覚する曲率が小さくなったためであると考えられる。また, 柔らかい人肌ゲルと硬い試料との曲率比較が難しいと感じた被験者と比較的容易に感じた被験者がいたことも標準偏差の広がりの原因となっていると考えられる。

さらに実験後のコメントとして, 等速で対向する条件時に人肌ゲルの形状が半球ではなく縦と横で異なる曲率を持つような形状や, 接触面の中心部のみ平らで周縁部は球体のような形状に感じられた被験者がいた。これらは錯覚が部分的に生じた可能性を示唆している

5. おわりに

本稿では指と同等の曲率と弾性を持つ物体が等速で対向し接触した際により平らに知覚される現象を確認する実験を行った。実験の結果, ユーザ間のデータのばらつきは大きいものの, 等速で対向した場合に人肌ゲルが最も平らに知覚される傾向がみられた。また, 本現象が部分的に生じた場合に一部の曲率が変化して知覚される可能性も示唆された。

前報までの結果と合わせて速度比によって指と同等の曲率と弾性を持つ球体の曲率と硬さを変化させられることが示されたので, 今後はこの接触の鏡像性を応用して, 柔軟球をエンドエフェクタとして用いることで向きの制御が不要なため簡便な制御で安全な遭遇型触覚ディスプレイの開発を行う。

参考文献

- [1] L. Vu-Quoc, X. Zhang, and L. Laesburg, "A normal force-Displacement model for contacting spheres accounting for plastic deformation: Force-Driven formulation," *J. Appl. Mech. Trans. ASME*, vol. 67, no. 2, pp. 363–371, 2000, doi: 10.1115/1.1305334.
- [2] W. M. Bergmann Tiest and A. M. L. Kappers, "Kinaesthetic and cutaneous contributions to the perception of compressibility," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 5024 LNCS, pp. 255–264, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-69057-3_30.
- [3] 竹内将大, 村田華蓮, 梶本裕之, "運動する柔軟球による硬平板の表現," 第24回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.
- [4] 竹内将大, 村田華蓮, 梶本裕之, "運動する柔軟球による硬平板の表現 (第2報)," 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, SICE

SI2019論文集, 2020.

- [5] M. M. Taylor and C. D. Creelman, “PEST: Efficient Estimates on Probability Functions,” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 41, no. 4A, pp. 782–787, 1967, doi: 10.1121/1.1910407.
- [6] A. W. Goodwin, K. T. John, and A. H. Marceglia, “Tactile discrimination of curvature by humans using only cutaneous information from the fingerpads,” *Exp. Brain Res.*, vol. 86, no. 3, pp. 663–672, 1991, doi: 10.1007/BF00230540.
- [7] J. F. Norman *et al.*, “Aging and Curvature Discrimination from Static and Dynamic Touch,” *PLoS One*, vol. 8, no. 7, pp. 1–6, 2013, doi: 10.1371/journal.pone.0068577.