

錯触覚を用いた把持動作による硬軟感知覚時における視覚刺激の影響

○岸野 博明, 木村 亮, 野嶋 琢也 (電気通信大学大学院)

Influence of Visual Stimulation for Pseudo-haptic Feedback on Stiffness induced by Grasping Motion

○Hiroaki Kishino, Takashi Kimura, and Takuya Nojima (IS, UEC)

Abstract: The majority of research on pseudo-haptic softness/hardness feedback has the user's hands separated from the visual display for inducing altered touch perception. However, we proposed that the user can perceive changes in stiffness by using a visual image in the user's hand while he or she squeezes a hard object. In this paper, we focus on visual stimulation induced by grasping motion. We compose new visual stimulus and investigate the influence of them.

1. はじめに

触覚研究の一つとして視覚誘導性錯触覚(以下, 錯触覚)を利用した研究が行われている。錯触覚とは触覚と同時に適切な視覚的フィードバックを提示することで、触覚に変化が生じたとき錯覚させる現象である。これまでに錯触覚を利用することで、ユーザに重量感や硬軟感、物体形状などを提示する手法が提案されてきた。それらの多くはユーザをディスプレイ上の映像変化に注目させ、自身の手の動作から注意をそらす、または手を遮蔽するという形で提示するものであった[1]。これは、一般的なデスクトップ環境で容易に実現可能であるということの意味する。しかし、スマートフォンまで含めたモバイル環境を考えた場合、ディスプレイと手を空間的に離すことは困難であり、錯触覚を発生させるには不利な条件となっていた。これに対して我々は、スマートフォンを握った状態で発生する錯触覚について提案している[2]。これは従来の研究のように、手とディスプレイを分離することなく錯触覚を提示できるという特徴を有している。

本研究で対象としている錯触覚は、硬さが不変な物体を握った際に、握力に応じて変化するCGを手中に収めたディスプレイで提示することで、物体の硬さが変化したとき錯覚させるものである。把持動作は物体の硬さを認識するための手段の一つであり、その動作から得られる情報は触覚だけでなく、物体の変形などの視覚情報も受け取っている。そのため、硬さが不変な物体であっても、把持動作に合わせて適切な視覚刺激を提示することで、硬さが変化したとき錯覚させることが可能となっている。我々はこれまで、プロトタイプデバイスを用いて錯触覚による硬軟感提示が行えること、デバイスの素材によって感じる硬さに変化があることを報告した[3]。しかしながら、従来の視覚刺激には錯触覚を提示する上でいくつかの問題点が考えられる。本論文では、それらの問題点について検討を行い、新たな視覚刺激を考案した。また、考案した視覚刺激に

よる硬さ知覚への影響について実験を行ったため報告する。

2. 関連研究

Lecuyerらは錯触覚による硬軟感の提示についての研究を行なっている[4]。この研究では、ボール状の入力デバイスに接続されたピストンを用いており、CGで作成されたボールを視覚刺激としてディスプレイに表示することでユーザに錯触覚を提示している。これは、ピストンの押し込み変位量を計測し、その値に応じてCGのボールを任意に変形させることで、ユーザは硬い(あるいは軟らかい)ボールを押しているように錯覚するというものである。しかしながら、この手法は本研究とは異なり、操作している手を視界から遮蔽した状態で錯触覚を提示している。

また、kokubunらはモバイル環境において我々とは異なるアプローチによる硬軟感提示を提案している[5]。これはスマートフォンの背面に圧力センサを設置し、押下力に応じてディスプレイ上のCGを歪ませることで、硬軟感を提示するという手法である。この研究は、モバイル環境において錯触覚を提示できるという点で本研究と類似しているが、Lecuyerらと同様、手を視界から遮蔽した状態でなければならない。

hiranoらはMR技術を用いた硬軟感の錯触覚提示を試みている[6]。これは、物体を指で押し込む際にできる影をCGで作成し、HMDを用いてユーザの指の周辺に重畳することで、視覚刺激に誘導された硬軟感の認識をさせるものである。実験では複数の硬さのウレタンフォームを用いており、例えば硬いウレタンを押し込む際に凹みの大きい影のCGを提示することで軟らかく感じるといった、MR技術を用いた硬さの錯触覚提示が可能であることを示している。この研究は、錯触覚を提示する際にユーザの手と視覚刺激がユーザの視界内に存在するという点においては本研究と類似している。しかしhiranoらはMR環境下における錯触覚提示を主として取り扱っており、モバイル環境への適用

については考慮されていない。

3. 現行デバイスとその問題点

3.1 プロトタイプシステムの概略

まず、錯触覚による硬軟感提示を行うために作成したプロトタイプデバイスについて説明する。デバイスは Fig. 1 に示すように、スマートフォン (Samsung Nexus S) とその両側面に設置した圧力センサ (Interlink Electronics Inc. FSR-400) によって構成されている。圧力センサはスマートフォンの両側面中央部に 2 枚ずつ、計 4 枚設置されており、測定された値はマイコン (Arduino RT-ADK) によって CG を生成するために用いられる。

CG は Fig. 2 に示すように、青色で塗りつぶされた長方形を用いており、スマートフォンのディスプレイ上に表示される (ディスプレイ解像度は 800×480 [pixels])。提示する CG はバネの変形法則に従って変形する。デバイスに力を加えていない状態での CG の幅を w_i 、デバイスに力 F を加えた時の幅を w_a とすると、 w_a はフックの法則を用いて以下のように記述できる。

$$F = k \cdot (w_i - w_a) \tag{1}$$

$$\frac{F}{k} = w_i - w_a \tag{2}$$

$$w_a = w_i - \frac{F}{k} \tag{3}$$

ただし、式中の k はばね定数である。プロトタイプデバイスでは $w_i = 1000$ としており、ばね定数 k によって CG の変形を制御することが出来る。

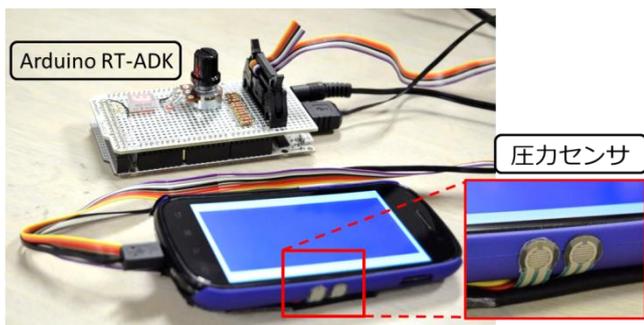


Fig. 1 プロトタイプデバイス

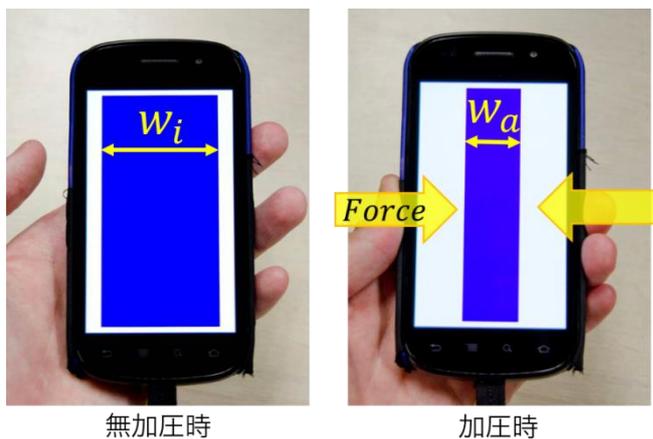


Fig. 2 把持動作時の画像の変形

3.2 視覚刺激による硬軟感知覚への影響

本節では従来の視覚刺激の問題点および今回提案する視覚刺激について説明する。これまで用いてきた視覚刺激は単純でありながら硬軟感を提示することが可能であったが、二つの問題点が考えられる。一つは、複数の試行を通して視覚刺激の差分を順位付けできてしまうことである。これはつまり映像を観察するだけで、「同じ力を加えた時に変位量が大きいほうが柔らかいということなのだろう」という、知識に基づく推測が可能であるという問題を意味する (Fig. 3)。この場合、触覚への影響は関係ないということとなり、錯触覚による硬軟感提示が実際には実現できていないということになり得る。

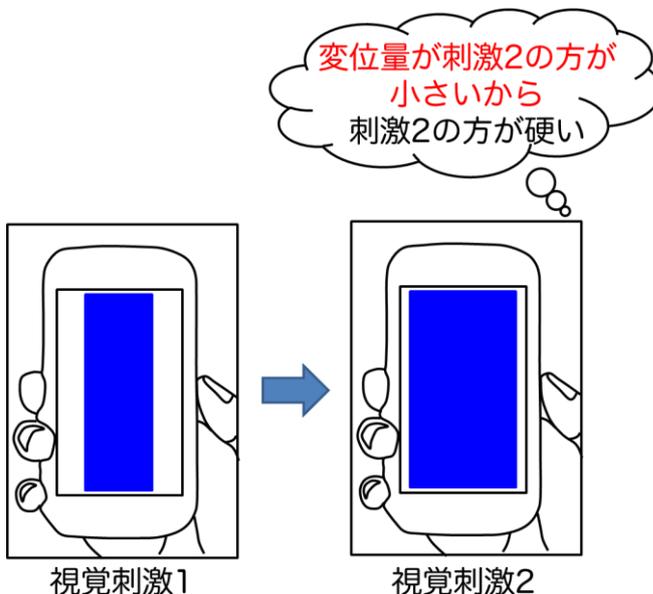


Fig. 3 知識による硬さの推測

もう一つは、変形する物体に対して力を加えているものが視覚的に確認できないことである。現実の世界において物体を変形させる時、指など、その物体に直

接力を及ぼしているものが見えるはずである。しかし本装置の構成では、変形する長方形に対して、直接力を加えているように見える映像は表示されていない。すなわち、映像だけ見れば四角い物体が勝手に変形するように見える状態となってしまう。この現実世界との間の不整合が、ユーザへの違和感となり、錯触覚の効果に影響を及ぼしている可能性が考えられる。

これらの問題について検証するため、われわれはまず、四角形の変位量に制限を設けることとした。変位量に制限を課すことによって、ばね定数によらず最終的な変位量を同一にし、知識による推測を難しくする効果を狙っている。次に、四角い物体に対して力を及ぼすものの表示を試みた。つまり指先に相当する映像を付与することによって、現実世界との差分を解消し、錯触覚への悪影響を回避する狙いがある。次章では各々の条件での実験の詳細について述べる。

4. 変位制限を設けた視覚刺激による比較実験

従来刺激では各ばね定数間で変位量が明らかに異なっていたため、知識による推測が可能であったと考えられる。そこで我々は、従来と同様の弾性変形をするが、変位量の最大値に制限を設けた視覚刺激を作成した。制限を設けることで、ばね定数が異なる視覚刺激同士を比べた際に、変位量が明らかに異なるという状態を解消できる。これにより、変位量のみから提示された視覚刺激の硬さの推測を行いにくくなるのではないかと期待される。以下実験の詳細について説明する。

4.1 実験準備：比較対象となる実物体の選定

今回使用する実物体は計4つであり、Fig. 4に示すように、中心にバネが通されており、一軸方向に移動するものとなっている。実物体の大きさはバネが自然長のときにプロトタイプデバイスと同等の大きさになるように作成し、中心に装着するバネのバネ定数を変化させることで様々な硬さの実物体を実現が可能となっている。



Fig. 4 バネ付き実物体

以前の実験において、比較対象となる実物体それぞれの硬さがわかりにくいというコメントを得ていたため、本実験で使用したバネはウェーバーフェヒナーの法則に基づき、軟らかい方から 0.647, 1.01, 2.785, 4.737[N/mm]とした(Fig. 5)。予備実験として、3人の被験者に目隠しをした状態でこれらの実物体をランダムに握らせ、軟らかい順番に並べ替える実験を行ったところ、すべての被験者が正しく並べ替えることができた。従って、実物体の硬さがわかりにくいという可能性は低いと考えられる。

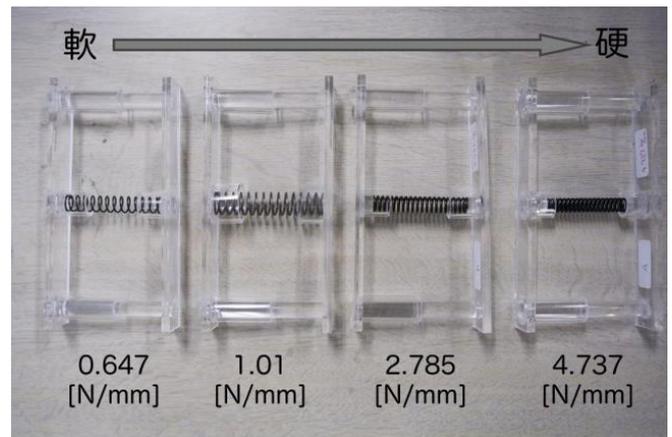


Fig. 5 本実験で使用した実物体

4.2 実験準備：変位制限を設けた視覚刺激の作成

本実験で被験者に見せる視覚刺激として変化を実物体合わせたものを4種類用意した。そしてそれぞれに対して、3種類の変位制限(制限なし, 変位制限 60%, 変位制限 30%)を与えた。60%及び30%の視覚刺激は、被験者に制限なしの視覚刺激を10回握らせた時の変位量の最大値を100%とし、それに対する60%及び30%を最大の変位量とした(Fig. 6)。それぞれの視覚刺激は、変位量が所定の制限値に到達すると、それ以降はどれだけ力を加えても変位が増加しないようになっている。

各実物体および視覚刺激はFig. 7のように、軟, 中軟, 中硬, 硬とラベル付けしている。

4.3 実験手順

本実験では、まず被験者に対して錯触覚の発生が期待される、合計12種類の視覚刺激を試してもらう。その後、視覚刺激と同じく軟, 中軟, 中硬, 硬と4種類用意された実物体を複数握ってもらい、もっとも感触が近いと感じられる構造物を選んでもらった。具体的な手順は以下の通りである。

1. 4パターンのCG(CG(軟), CG(中軟), CG(中硬), CG(硬))のうち、ランダムに選び出した1パターンを視覚刺激として用い、プロトタイプデバイ

ス握った時に感じた硬さを被験者に記憶してもらおう。

2. 被験者に目隠しをさせた状態で、4つの実物体をランダムな順番で握らせる。
3. プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さと最も感覚が似ている実物体を被験者に回答させる。

1~3の手順を計12回、各CGパターン(変位制限を含む全12種類)でそれぞれ1回の回答が得られるようにCGをランダムに変えて試行する。なお実験は20代前半の男性6名(右利き5名, 左利き1名)で行い、すべての手順終了後、簡単なアンケートを実施した。

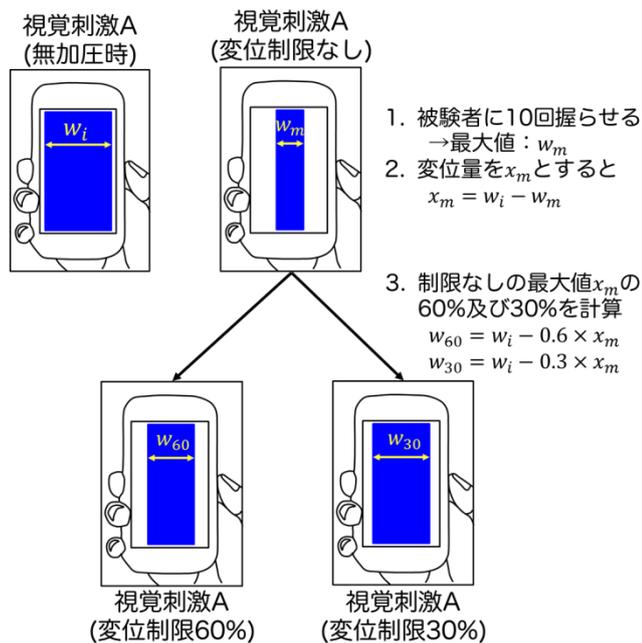


Fig. 6 変位制限を設けた視覚刺激

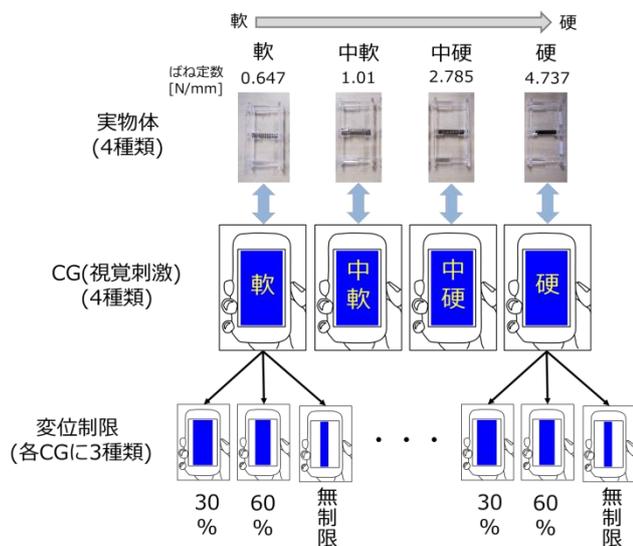


Fig. 7 使用する視覚刺激のパターン

4.4 実験結果と考察

まず始めに、本実験での理想とする結果を Fig. 8 に示す。本実験は視覚刺激の変位量の差分を知識として硬さの判別に利用しているかどうか検証するものである。知識を利用して硬さ判別を行っていないのであれば、変位制限を与えた視覚刺激を用いて正しい実物体を選択できるはずである。従って、正答数は変位制限の有無にかかわらず Fig. 8 のように同数になるのが理想である。

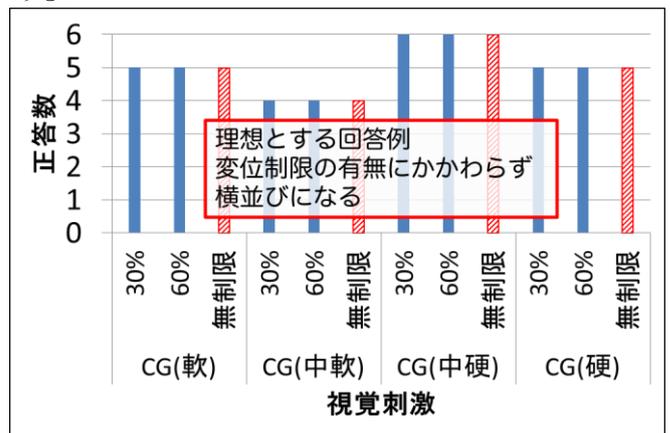


Fig. 8 理想とする実験結果

次に被験者による実験結果を Fig. 9 に示す。この結果から、CG(軟)およびCG(中硬)に関しては全ての変位制限においてほぼ同数の正答数であることがわかる。一方でCG(中軟)及びCG(硬)については、60%の変位制限を与えた視覚刺激の正答数が最も多く、変位制限によって正答数にばらつきが見られた。この結果から、60%の変位制限を与えたCGが、変位制限を設けていないCGよりも効果的に硬軟の知覚を与えられると考えられる。一方で、各変位制限で回答数にばらつきが見られることから、知識による推測から硬さを判別しているという考察も無視できない。しかし、被験者から視覚刺激体験後に実物体の違いがわかりにくくなったというコメントが得られている。例えば、被験者Dは実物体(軟)と実物体(中軟)について、視覚刺激体験前は正確に弁別できていたが、視覚刺激体験後は違いがわかりにくくなったとのことだった。同様に、被験者Cおよび被験者Eからは、視覚刺激体験後に実物体(中硬)と実物体(硬)の違いがわかりにくくなったというコメントも得られている。本実験の結果からは、変位量から把持している物体の硬さを、知識に基づいて判断しているという可能性を完全に否定することはできなかった。しかしながら実験の前後で、被験者の触覚による硬さ判別能力に変化が発生していると伺われることから、何らかの触覚的效果が発生している可能性があるものと判断される。

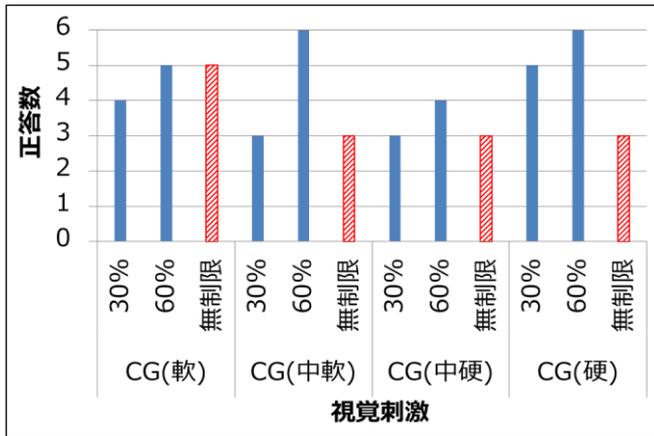


Fig. 9 被験者による実験結果

5. 指マーカを追加した視覚刺激による比較実験

本実験では、指マーカを加えた視覚刺激によって硬軟感知覚に影響が生じるか検証する。検証は実物体との比較によって行い、実験に使用する実物体は前章と同様のものを使用した。視覚刺激については、前章の結果から最も硬軟を提示できる変位制限 60%を設けたCGを作成した。

5.1 指マーカを追加した視覚刺激

従来刺激における違和感を解消するため、把持動作時の指の動きに相当するマーカ（以下、指マーカとする）を追加した。これは Fig. 10 に示すように、把持することで画面内に表示され、力を加える事で長方形の変形に追従するものである。これにより、物体を変形させているものが視覚的に確認できるため、ユーザの違和感を軽減できるのではないかと考えられる。

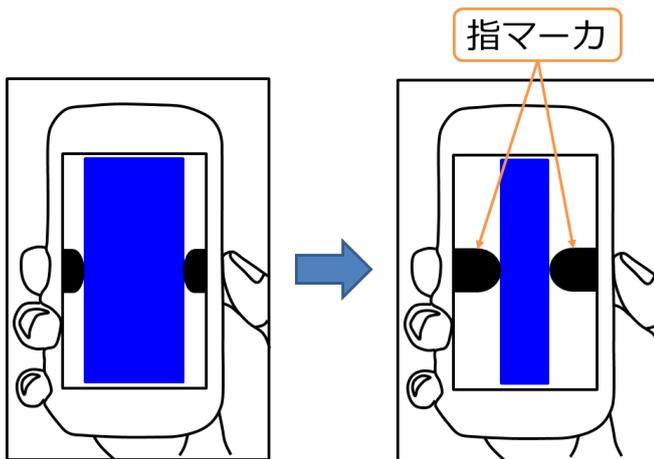


Fig. 10 指マーカを追加した視覚刺激

5.2 実験手順

実験は以下の手順で行った。

1. 4 パターンの CG(CG(軟), CG(中軟), CG(中硬),

CG(硬))のうち、ランダムに選び出した 1 パターンを視覚刺激として用い、プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さを被験者に記憶してもらう。なお、指マーカの有無については被験者ごとに設定した。

2. 被験者に目隠しをさせた状態で、4 つの実物体をランダムな順番で握らせる。
3. プロトタイプデバイスを握った時に感じた硬さと最も感覚が似ている実物体を被験者に回答させる。
4. 1~3 の手順を計 16 回、各 CG でそれぞれ 4 回の回答が得られるように CG をランダムに変えて試行する。
5. 実験日の翌日、指マーカの有無を変更して 1~4 の手順を行う。翌日に行うのは、記憶による推測をなるべく避けるためである。

実験は 20 代の男性 5 名(右利き 4 名, 左利き 1 名)で行った。また、実験終了後、各被験者に簡単なアンケートを実施した。

5.3 実験結果と考察

Fig. 11 に指マーカの有無による正答数を示す。指マーカを追加することで、5 名中 2 名は正答数が向上し、3 名は正答数が変化しなかった。このことから、指マーカの付加は各人の錯触覚の発生に多少の影響があり得るものの、現状ではその効果は決して大きくはないと言える。

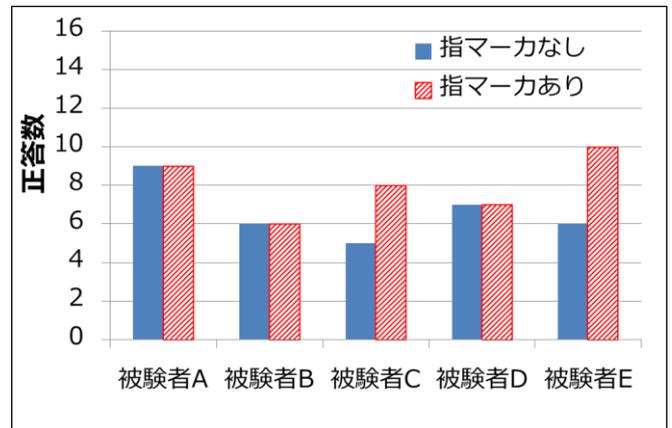


Fig. 11 指マーカの有無による実験結果

また、各視覚刺激における被験者の回答結果を Fig. 12 に示す。この結果から、指マーカ無しの刺激では CG(軟)および CG(中軟)の正答に難を要していたが、指マーカありの刺激ではどちらも正答しやすくなっていることが伺える。一方で、CG(硬)の正答数は下がっている。これらの結果から、指マーカを追加した CG を刺激として用いることで、指マーカ無しの CG を用いるよりも軟らかく知覚されているのではないかと考えられ

る。このことについては、被験者から長方形の変形前に指マーカが表示されることで、変形の瞬間がわかりやすくなったため軟らかく感じられたというコメントも得られた。

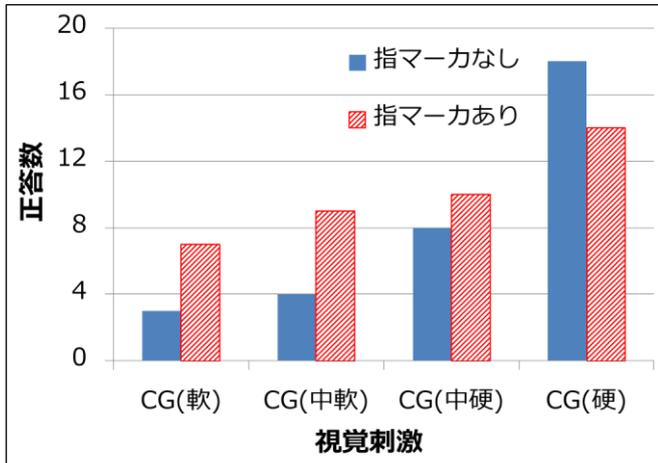


Fig. 12 各視覚刺激の回答結果

これらの結果をまとめると、現状では指マーカを提示することによって、硬軟感を知覚しやすくなるとは言いがたい。しかし、各視覚刺激の回答結果から、正答数の分布が変化していることがわかる。このことから指マーカを提示することで、指マーカなしに比べて軟らかく感じやすくなるのではないかと考えられる。すなわち、同様の変形を行う視覚刺激を用いても、指マーカの有無によって感じられる軟らかさが異なっている可能性がある。

6. 結論と今後の展望

本論文では錯触覚を用いた硬軟感提示手法について、2種類の視覚刺激を考案し、それぞれの影響について調査した。変形制限を設けた視覚刺激については、実験の結果から硬軟感の提示ができていたことが確認でき、触覚にも影響が生じていることが示唆された。また、指マーカを付与した視覚刺激については、指マーカ無しの場合と比べて、軟らかく感じられやすいという結果が得られた。今後は、視覚刺激が硬軟感知覚に与える影響についてより詳しい解析および評価を行っていく。

参考文献

[1] Anatole Lecuyer, Simulating Haptic Feedback Using Vision: A Survey of Research and Applications of Pseudo-Haptic Feedback, PRESENCE, Vol.18, No.1, pp.39-53, 2009.

[2] Takashi Kimura and Takuya NOJIMA, "Pseudo-haptic Feedback on Softness Induced by Grasping Motion",

proceedings of EuroHaptics, vol.2, pp.202-205,2012.

[3] 木村堯, 野嶋琢也, "錯触覚を用いた握り動作における硬軟感知覚", 第17回日本バーチャルリアリ学会大会論文集, pp.292-295, 2012.

[4] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P., and Coiffet, P., Pseudo-Haptic Feed-back: Can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?, proceedings of IEEE VR, pp.83-90, 2000.

[5] Arata Kokubun, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, Michitaka Hirose, "Visuo-haptic interaction with mobile rear touch interface", SIGGRAPH 2013 Posters, 38:1, 2013.

[6] Yuichi Hirano, Asako Kimura, Fumihisa Shibata, Hideyuki Tamura, Psychophysical influence of mixed-reality visual stimulation on sense of hardness, proceedings of IEEE VR, pp.51-54, 2011.