



# 実物の立体像に対する視触覚重畳

村田華蓮<sup>1)</sup>, 大石恵利佳<sup>1)</sup>, 中村拓人<sup>1)2)</sup>, 梶本裕之<sup>1)</sup>, 佐野貴洋<sup>3)</sup>, 納谷昌之<sup>3)</sup>

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

2) 日本学術振興会特別研究員

3) 富士フイルム株式会社 (〒258-8577 神奈川県足柄上郡開成町牛島 577, {takahiro.a.sano, masayuki.naya}@fujifilm.com)

**概要:** これまでに平面映像に視覚的な影や変形の重畳, 触覚的な刺激の付与を行う手法は数多く提案されてきた. しかし, 視覚映像としてより納得感の高い実物の立体像への視触覚重畳提示を実現した例は稀である. そこで本研究ではハーフミラーによる実物の立体像に, 視覚ディスプレイを用いた視覚的な影や変形の提示とモータを用いたフィルム巻取りによる触覚提示を付与したマルチモーダルなシステムを提案する.

**キーワード:** マルチモーダル, 立体像, 視触覚重畳, ハーフミラー

## 1. はじめに

拡張現実感技術は近年著しい注目を集めている. そのなかでも平面映像の視覚的な影や変形の重畳[1]や触覚付与の研究は盛んにおこなわれてきた. また, 2次元平面だけではなく, バーチャル空間に表示された3次元映像への触覚付与についても数多く研究されている. 一方, 実空間における実物の立体像への触覚を実現した例は比較的稀であり, かつ比較的大掛かりなセットアップを必要としていた[2][3].

本研究では, 実物の立体像に対して視覚的エフェクトと触覚付与を同時に行うマルチモーダルシステムを実現することを目的とする. 実物の立体像の提示方法には, HMDや立体映画のように両眼用に2枚の視差付き映像を生成する手法, 光線群を再構成する手法, AIPやハーフミラーと実物体により実物体の像を空中に生成する方法などがあげられる. 今回提案するシステムでは, 現時点で3次元の実物の立体像として最も解像度の高い, ハーフミラーによる空中立体像を提示方法として用いる. この立体像に対し, 視覚ディスプレイを用いて影や変形などの視覚エフェクトの付与を行うと共に, DCモータによる透明フィルム巻取りによる指への水平奥行き方向の力覚提示を行う.

## 2. 関連研究

視覚重畳に関する研究は数多く, Amano[4]の映像の色や明るさ強度の修正や Raskarら[5]のプロジェクションマッピングを用いた物体テクスチャ変化や影の修正による手法があげられる. これらは主に物体表面の性状や周囲環境を変化させるものであるが, 運動や物体の変形を表現するものとしては Kawabeら[1]の光投影技術「変幻灯」があげられる. この研究では, 明るさと影の動き情報を投影することにより, まるで平面映像が動いているかのような錯覚的な印象を与えることを可能とした.

実物の立体像に対する触覚提示の試みとしては, 空中超音波触覚ディスプレイ[6]を用いた HaptoMime[2]や HaptoClone[3]があげられる. ただし提示される触覚は比較的短時間の接触に伴う皮膚感覚に限られていた.

以上の研究を背景として, 我々は実物の立体像に対して視覚と触覚両方の重畳を実現することを目的とし, 高解像度な実物の立体像へ, 視覚エフェクト提示と触力覚提示を同時に行うシステムを提案する. 触力覚提示方法には様々な研究があげられるが, 本システムでは特に今回の視覚システムに簡易に内蔵できる手法として中村ら[7]のフィルム巻取り機構を用いて, 物体に触れた際の反力の力覚提示を行う. また本システムでは, ハーフミラーを用いることで高解像度な実物の立体像提示を可能とする. さらに, 立体像へ, ディスプレイを用いた視覚エフェクトを提示することによって, 指が物体に触れた際の物体の動きを視覚的に重畳させる.

## 3. 提案システム

### 3.1 システム全体の構成

本システムは, 視覚提示デバイスと触覚提示デバイスによって構成される. 実際に作成したシステムの構成図を図1に, 全体の様子を図2に示す. 本システムの大きさは, W600×D500×H640mmであり, 視覚系は暗幕, 実物の鏡像を生成するハーフミラー, 鏡像に変形などのエフェクトを加え, 指位置も計測するタブレット型ディスプレイ (ASUS, Transbook T303U, W210×H300mm), 実物を照らすビデオライト LED (UTEBIT, PT204S\_BL) から構成される. また触覚系は, マイクロコントローラ (NXP Semiconductors, mbed NXP LPC1768), ロータリエンコーダ搭載の DCモータ (maxon, 10W), モータドライバ (ROHM, BD6222HFP), アクリル製ケース, 透明フィルム (東レ, ルミラー-S10, 膜厚 50um), アルミパイプ, 樹

脂製シャフト、ベアリングから構成される。

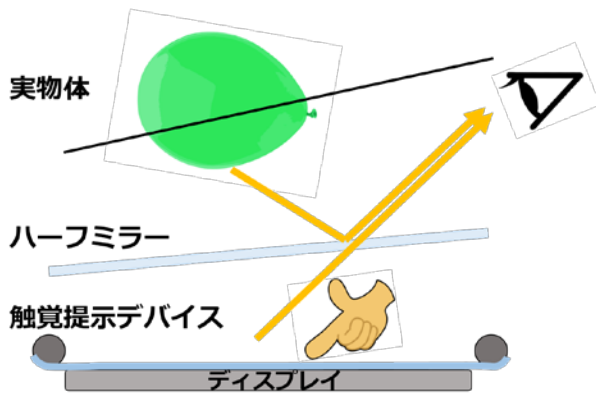


図 1：システム構成図



図 2：全体の様子

### 3.2 視覚提示デバイス

#### 3.2.1 立体像提示

本システムでは、ハーフミラーによる立体像提示方法を採用した。ハーフミラーによって実物体の虚像を、タブレット型ディスプレイに近い位置に生成させる。この立体像提示法を用いたことで、視点移動に問題のない、解像度の高い立体像の提示が可能となる。

#### 3.2.2 視覚エフェクト

指が実物体に触れる際、物体に触れている指の周りには半月状の影ができる。本システムでは、この影を視覚エフェクトとして提示する。指が触覚提示デバイスのフィルムを通してディスプレイに触れたとき、図 3 の右側の影のような映像を表示する。またディスプレイに触れたまま指を動かすと、その移動変位量に比例して視覚エフェクトの大きさが変化するようにした。これによってまるで指が触れたことによって対象が変形したかのような視覚効果を与えることができる。ただし、今回は後述する触覚ディスプレイの制約から、水平奥行き方向の 1 自由度のみの変位に対応するものとした。

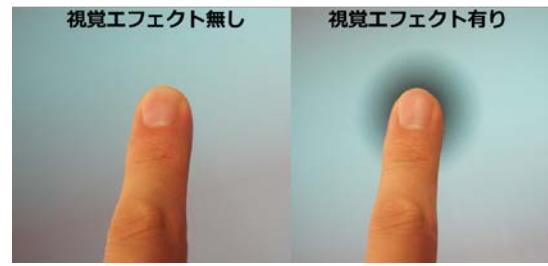


図 3：視覚エフェクト

### 3.3 触覚提示デバイス

指で実物体に触った際、指の進行方向とは逆向きに力が働く。本システムでは、物体の変位によって変化する反力を提示する。

ディスプレイ上にフィルムが張られており、このディスプレイ上で指を動かした際に、ディスプレイの前後に設置した DC モーターでフィルム巻取りを行うことで、指の進行方向とは逆向きに力を提示する。モーターは PWM 方式で駆動されている。指の力によって移動したディスプレイ上のフィルム変位  $x$  をモーター付属のエンコーダで読みとる。さらにこの変位  $x$  を一定時間  $t$  で割ることで速度  $v$  を計算する。変位  $x$  にはバネ定数  $k$  を、速度にはダンパ定数  $c$  を下記の(1)に代入し、反力  $F$  を求めて、PD 制御を行う。これにより、水平奥行き方向の 1 自由度の力覚提示を行うことが可能である。

$$F = -kx - cv \quad (1)$$

## 4. 実験：視触覚重畳効果の評価

### 4.1 実験概要

提案したシステムを用いて、実物の立体像への視触覚重畳の効果を評価する実験を行った。実物の風船に触る体験と、提案システムを用いて実物の風船の立体像に触る体験を比較させることで主観的な評価を行った。今回は視触覚重畳の対象物に実物の風船の立体像を用いた。

### 4.2 実験条件

本実験では、視覚エフェクトの有無と、触覚提示の有無を組み合わせた 4 条件を提示した。観察位置からハーフミラーを介して見た際のディスプレイの輝度は約  $8\text{cd/m}^2$  で、影として描画した最も暗い部分の輝度は約  $0.6\text{cd/m}^2$  であった。また左右からの照明光に照らされた風船の鏡像は  $7.5\sim 27\text{cd/m}^2$  であり、像の中心が暗く端になるにつれて明るかった。提示した反力は、実験者が事前に調整し、最も風船の感触に近いと感じた値に設定した。

### 4.3 実験手順

実験の様子を図 4 に示す。被験者には提案したシステムの前に座ってもらい実験を行った。まずハーフミラーによる立体像を見ることができ、かつディスプレイ上で自由に指を動かすことができるように椅子の高さを調整してもらった。次にノイズキャンセリングヘッドホン (BOSE, QuietComfort 15) を着用してもらい、外部環境音を遮断す

るためにヘッドホンからはホワイトノイズを提示した。次に、被験者には実物の風船に触れてもらい、その感触を覚えてもらった。その後、4条件のうちランダムに1条件を提示し、提案したシステムを用いて先ほど触れた風船の立体像へ触れてもらった。この際、指は水平奥行き方向にあらかじめ定めておいた変位量(約2.5cm)だけ動かすよう指示した。各試行の後、被験者は5つの質問に回答した。実物の風船に触れた際の感触を4としたときに、提案したシステムを用いて風船の実物の立体像に触れた際の感触が何点に相当するか、7段階リッカートスケールで回答してもらった。5つの質問とそれぞれの評価は、触覚のかたさ、やわらかさ(1: かたい, 7: やわらかい)、視覚の自然さ(1: 不自然, 7: 自然) 触覚の自然さ(1: 不自然, 7: 自然)、体験全体の心地よさ(1: 心地よくない, 7: 心地よい)、体験全体の違和感(1: 違和感あり, 7: 違和感なし)とした。試行は4条件を各5回ずつランダムに提示し、合計で20試行を行った。被験者は本実験に関してはナイーブな研究室の6名(男性3名、女性3名、21-25歳)であった。

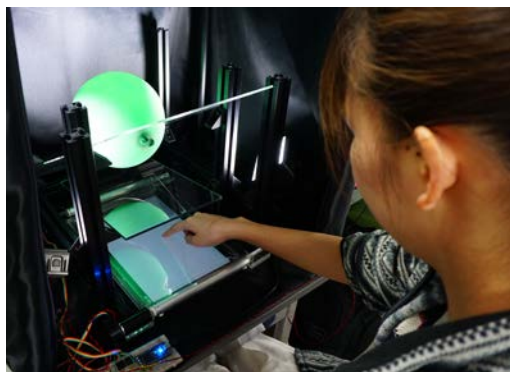


図 4: 実験の様子

#### 4.4 実験結果・考察

結果のグラフを質問1から5の順に図5から図9に箱ひげ図として示した。縦軸は7段階リッカートスケールの点数、横軸は4条件、エラーバーは最小値から最大値の間隔、オレンジ色の線は中央値を表す。Friedman検定を用いて分析した。各質問項目において、4条件の間に主効果で有意差が見られた。さらに多重比較では、視覚の自然さ以外の項目において、有意差のあるものが複数存在した。

触覚のかたさ、やわらかさは、図5で示した通り触覚提示の有無に違いのあるすべての4条件間において、有意差が見られた。触覚提示がある場合は、実際の風船よりもわずかにかたい触覚に感じた回答が多かった。反対に触覚提示のない場合は、風船よりも柔らかく感じた回答が多かった。また、視覚エフェクトの有無による結果の差はあまりみられなかった。このことから触覚提示デバイスによる反力がある場合は、硬い触覚となり、より実際の触覚に似たように感じ、触覚提示デバイスによる反力がない場合は、柔らかい触覚となり、実際の触覚には近づかないことが分

かった。

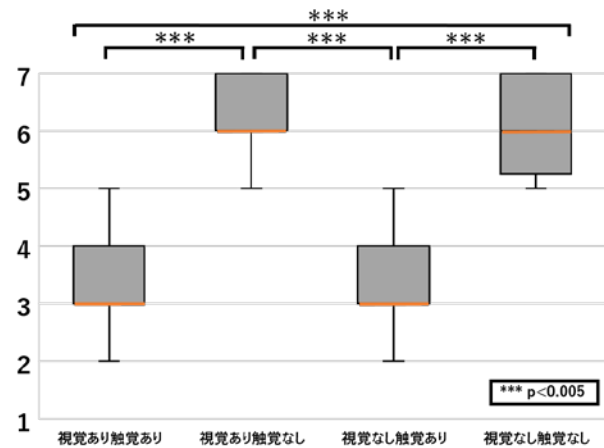


図 5: 触覚のかたさ, やわらかさの実験結果

視覚の自然さは、図6に示すように各条件間において有意差は見られなかった。触覚提示条件が同条件であり視覚エフェクトの有無に違いのある2条件間を比較すると、視覚エフェクトのある場合の方が実際の視覚に似ている、という回答に近づく傾向がありそうだが有意差は確認されなかった。また視覚提示条件が同条件で触覚提示の有無に違いのある2条件間を比較すると、触覚提示のあるほうが視覚の自然さが向上する傾向がありそうだが、有意差は確認されなかった。

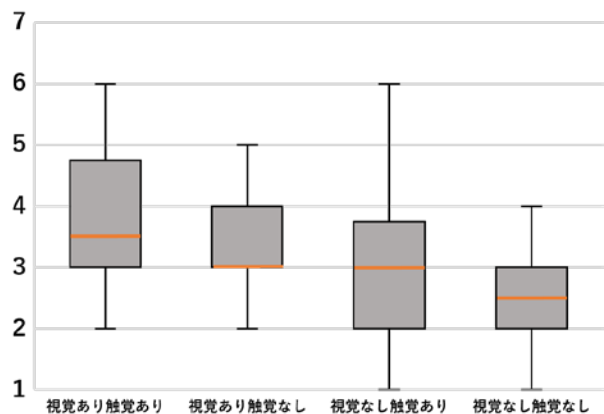


図 6: 視覚の自然さの実験結果

触覚の自然さは、図7からわかるように触覚のかたさ、やわらかさと同様、触覚提示の有無に違いのあるすべての4条件間において有意差が見られた。このことから、触覚提示デバイスによる反力の提示は、触覚の自然さを再現するうえで重要な要素であることが分かった。触覚提示も視覚提示もどちらもある際には、実際の風船よりも自然と答えている人が多かった。これは柔らかいものを触った時の体験の予想が、実際の風船よりも本システムでの提示と一致したという事だろうと推測される。

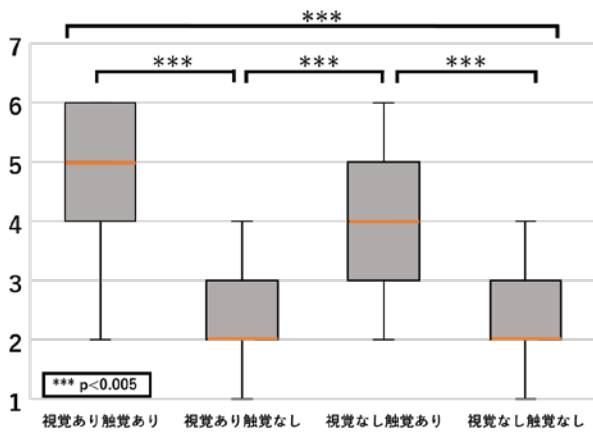


図 7：触覚の自然さの実験結果

体験全体の心地よさは、図 8 の通り 3 条件間において有意差がみられた。この結果から、今回のセットアップでは心地よさに触覚提示が必須であることがわかった。また触覚提示も視覚提示もどちらもある際には、実際の風船に触れるときよりも心地よいと答えている人が多くなっていった。このことから、体験向上のためには、視覚エフェクトの提示も必要となることが推測される。

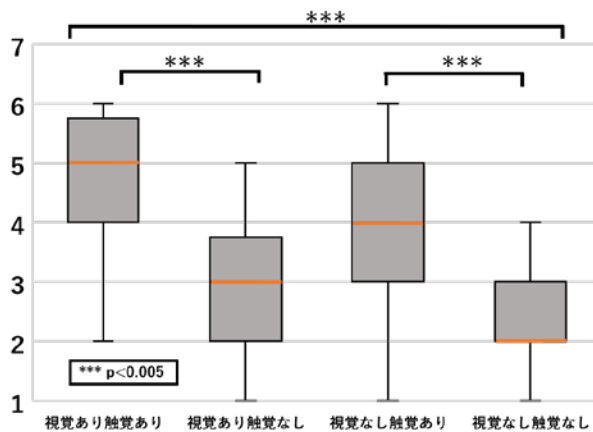


図 8：体験全体の心地よさの実験結果

体験全体の違和感（図 9）の有意差のある条件間を見ると、触覚提示も視覚提示も体験全体の違和感をなくす上で重要な要素であることがわかった。触覚提示も視覚提示もある際には、実際よりも違和感がない、に偏っており、触覚の自然さ、心地よさと似た結果となった。図 7、図 8、図 9 は、類似した結果となっていることから、特に触覚提示は体験の再現において必須である。

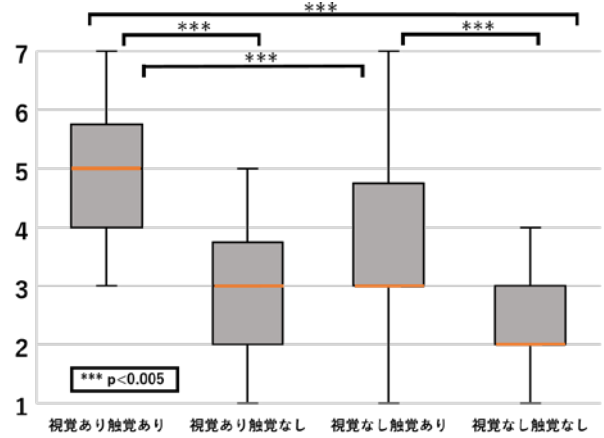


図 9：体験全体の違和感の実験結果

## 5. おわりに

本稿では、実物の立体像に触覚付与が可能となるマルチモーダルシステムを提案し、このシステムを用いて実物の立体像への視触覚重畳の実現を試みた。作成したシステムによる効果を評価するため、実物体に触る体験と、実物の立体像に触る体験を比較する実験を行った。実験の結果、物体への反力の力覚提示は、体験の再現に必要な重畳要素であることが示唆された。また、視覚エフェクトも体験を向上させる要素であると推測されたが、現時点では視覚エフェクトのクオリティの問題もあり明瞭な効果は見られなかった。

今後は、視覚エフェクトのクオリティをあげていくことで、インタラクティブ性の向上を目指す。

## 参考文献

- [1] Kawabe, T., Sawayama, M., & Nishida, S. : Deformation lamps: a projection technique to make a static picture dynamic, SIGGRAPH 2015 Emerging Technologies Article No. 8, 2015.
- [2] Monnai, Y., Hasegawa, K., Fujiwara, M., Inoue, S., & Shinoda, H. : HaptoMime: Mid-Air Haptic Interactions with a Floating Virtual Screen, UIST 2014 Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.663-667, 2014.
- [3] Makino, Y., Furuyama, Y., Inoue, S., & Shinoda, H., : HaptoClone (Haptic-Optical Clone) for Mutual Tele-Environment by Real-time 3D Image Transfer with Midair Force Feedback, CHI Conference 2016 Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, pp.1980-1990, 2016.
- [4] Amano, T. : Projection based real-time material appearance manipulation, CVPRW 2013 Proceedings of the 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, pp.918-923, 2013.
- [5] Raskar, R., Welch, G., & Low, K.-L. : Shader lamps: Animating real objects with image-based illumination, 12th Eurographics Workshop on Rendering Techniques, pp.89-102, 2002.
- [6] Iwamoto, T., Tatzono, M., & Shinoda H. : Non-contact Method for Producing Tactile Sensation Using Airborne Ultrasound, EuroHaptics 2008 Proceedings of the 6th international conference on Haptics: Perception, Devices and Scenarios . pp.504-513. 2008.
- [7] 中村 拓人, Yem Vibol, 梶本 裕之 : モバイルデバイスのためのベルト巻取り機構を用いた省エネルギーでの振動提示. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017, 2017.