

HaptoMapping : 映像への不可視な情報埋め込みによる 視触覚重畳提示

宮武 大和¹ 平木 剛史¹ 前田 智祐² 岩井 大輔^{1,3} 佐藤 宏介¹

概要: 本研究では、映像に対する触覚提示の位置ずれ・時間遅れを知覚不可能なレベルに低減する視触覚重畳システムを開発し、視覚情報に対応した触覚刺激の提示を再現する手法を提案する。本手法では、空間分割型可視光通信を用いて映像に不可視の触覚刺激情報を埋め込み、この情報を用いて触覚提示デバイスを制御することで、位置ずれと時間遅れの低減、視覚情報に対応した触覚刺激の提示を実現する。この手法を用いて、振動子の異なる2種類の触覚提示デバイスと、このデバイスを用いた視触覚重畳システムを開発した。そしてデバイスの映像に対する触覚刺激提示の遅延時間を測定し、実装した視触覚重畳システムを用いて人間の視覚と触覚の遅延知覚に関する主観評価実験を行った。その結果、開発したデバイスは遅延時間を人間には知覚不可能なレベルまで低減できており、本システムにおける人間の遅延知覚の刺激閾は約 100 ms であることを明らかにした。

1. はじめに

近年、拡張現実 (Augmented Reality: AR) がエンターテインメントをはじめ、教育、医療などさまざまな分野で活用され始めている。中でも映像表示にプロジェクタを用いる投影型 AR は、身体や環境の拡張 [1], [2], 投影対象の見目の編集 [3] などを行う技術として知られている。投影型 AR はヘッドマウントディスプレイに代表される没入型の AR システムと異なり、複数のユーザが同時に環境を観測できるという利点がある。一方、投影型 AR でユーザと投影対象のインタラクションが発生するとき、多くの場合はユーザは投影対象に触れる必要があるが、ユーザが投影対象に触れたときに得られる触感と投影された映像から想起する触感が異なるために、投影対象のリアリティを低減してしまうという欠点がある。

この欠点を解決するため、視覚情報とそれに対応する触覚情報を同時に提示することにより投影対象のリアリティを向上させる、視触覚重畳という研究が注目されている。しかし、従来の視触覚重畳提示システムでは、ユーザの動きを赤外線カメラや深度カメラにより追跡していたため、映像に対する触覚刺激の位置ずれが発生していた。また位置合わせ処理のためにモーションキャプチャシステムなどを用いる方法があるが、これらを用いた触覚提示システムは計算や通信に時間がかかるため、ユーザが知覚で

きるレベルの時間遅延が発生していた [4]。さらに、これらのシステムは一般に煩雑なキャリブレーションを必要とする。この手間と、キャリブレーション後に装置を移動させることができないことが装置の設置自由度を低減させている [5]。この位置ずれ・時間遅延の問題を小型で単純なシステムにより解決することができれば、視触覚重畳提示システムの実用性と応用可能性の大幅な向上が見込める。

本研究では、空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) [6] を用いて映像に情報を埋め込み、この情報を用いて触覚提示デバイスを制御することで、人間が位置ずれ・時間遅延を知覚できない視触覚重畳提示システムを実現する。PVLC を用いると、映像と埋め込まれた触覚情報が画素単位で一致するため、位置合わせのための外部装置が不要な、小型で可搬性の高いデバイスの設計が期待できる。また情報通信の遅延時間がデバイスの数に依存しないため、デバイスを装着した複数人に対して同時に触覚を提示できる。このデバイスを用いてテキストの振動刺激を提示することにより、視覚情報に対応した触覚刺激を提示できる視触覚重畳システムを実現することができる。

本研究では、振動子の異なる2種類の指先装着型触覚提示デバイス及び、プロジェクタ、スクリーンを含む視触覚重畳システムを開発した。さらに2種類の触覚提示デバイスの、映像に対する触覚刺激提示の遅延時間を測定し、開発した視触覚重畳環境を用いて人間の視覚と触覚情報の遅延知覚に対する主観評価実験を行った。結果として、本研

¹ 大阪大学

² 株式会社 豊田中央研究所

³ 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ

究で開発したシステムは遅延時間を人間が知覚不可能なレベルまで低減しており、遅延知覚の刺激閾は約 100 ms であることを明らかにした。

2. 関連研究

2.1 投影光を用いた触覚提示デバイスの制御

本項では、カメラなどの外部観測装置を用いず、投影光のみを用いて触覚提示デバイスを制御した研究を述べる。

SenseableRays [7] は、投影される構造化光を用いてピエゾ素子の振動を制御する触覚提示デバイスである。この研究では、センサで受光した信号をピエゾ素子を用いて直接振動に変換することで、振動触覚を提示していた。ここでは、光を用いてデバイスを制御することで外部の観測装置が必要なシステムを実現し、触覚提示デバイスの小型化と触覚提示までの遅延時間の低減を実現している。しかしここでは、光は情報送信のみに使用されるため、視触覚重畳提示のためには別途映像表示のための装置が必要であった。

HALUX [8] は全身に身につけた直動振動子を投影光で制御する触覚提示デバイスである。プロジェクタから明度差の大きい映像を投影し、デバイスが受光した画素の明るさで振動子の ON/OFF を制御する。これにより単一のプロジェクタで映像表示とデバイスの制御を両立できる。しかし、映像の輝度値を用いて振動子を制御するため、投影できる映像コンテンツが制限されるため、布や木目のようなテクスチャ画像は投影できなかった。

一方、SensibleShadow [9] は本研究と同様に PVLC を用いた触覚提示デバイスの制御を実現している。SensibleShadow では、指先につけた触覚提示デバイスの影が特定の投影像に重なるとデバイスが振動し、指先に触覚を提示する。この研究では、PVLC を用いて映像自体に振動子の制御信号を埋め込むことにより、一台のプロジェクタを用いた視触覚重畳提示を可能にした。さらに画素ごとに埋め込まれた情報を光信号として受信し、これをマイコンでデコードして振動を提示することができるため、事前のキャリブレーションを必要としない。しかしこの研究では、影が投影像に重なったタイミングで振動子が一定の周波数で振動することで触覚を提示するため、視触覚重畳提示は実現されておらず、また単純な振動覚しか提示することができなかった。

2.2 空間分割型可視光通信

2.2.1 概要

PVLC では、DLP プロジェクタを用いて画素単位で明滅時間を制御することにより、人間が知覚できる映像とデバイスのみが受光できる不可視の情報を同一の光源環境から提示することが可能である。また、PVLC では映像の画素単位で情報を埋め込むため、原理的に位置ずれが発生せず、位置合わせのためのキャリブレーションの必要もない。

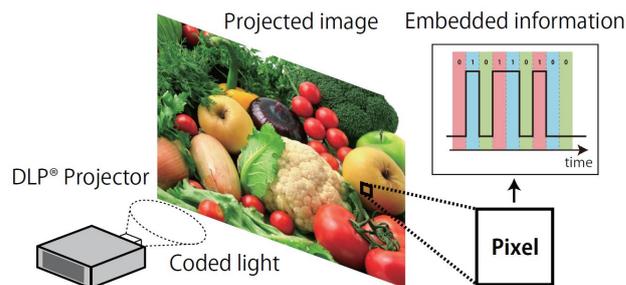


図 1 空間分割型可視光通信 (PVLC) の概念図

PVLC の概念図を図 1 に示す。

2.2.2 原理

PVLC では、DLP プロジェクタを用いることにより、不可視の情報を映像内に埋め込む。DLP プロジェクタとは、DMD (Digital Micromirror Device) と呼ばれる格子状に配列した極小のミラーの一つ一つの傾きを操作することで、映像を投影する装置である。このとき、各ミラーには投影面に光を照射する ON 状態とそうでない OFF 状態がある。各ミラーは投影面の各画素に対応するため、DLP プロジェクタはミラーの ON/OFF を制御することにより、二値画像を投影できる。

DLP プロジェクタでは、画像の輝度を時分割して高速に点滅させることにより、投影された映像の輝度を表現する。これは、高速明滅する光の輝度を時間平均して知覚するという人間の特性を利用している。また輝度が時間平均されたものであるため、人間が知覚する輝度は二値画像の点滅の順序によらない。

PVLC では、人間が知覚する輝度が二値画像の点滅の順序によらないことを利用して可視光通信を行うことにより、人間には映像を提示しつつ、デバイスには受光位置ごとに異なる情報の伝送を行っている。具体的には、各画素に埋め込むバイナリデータを時分割して投影し、それにより乱れた輝度を補正する画像を投影する。これらの点滅は高速であるため、人間には点滅を知覚できず、輝度を時間平均した映像が見える。一方フォトダイオードなどの素子は時間分解能が高いため、映像の中に埋め込まれたデータを取得することができる。これにより、PVLC では映像の投影と情報の送信を両立することができる。

2.3 本研究の位置づけ

光を用いた触覚提示デバイスを制御する方法は、通信と複雑な計算を要する外部観測装置を用いないため、触覚提示の時間遅れを低減している。中でも、PVLC を用いた触覚提示は、映像投影と情報送信の両立、受光位置に応じたデバイスの制御、位置合わせ無しで制御が可能である。そのため、PVLC を用いることで、位置ずれ・時間遅延を知

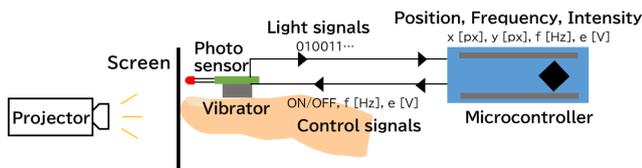


図 2 視触覚重畳システムの概要

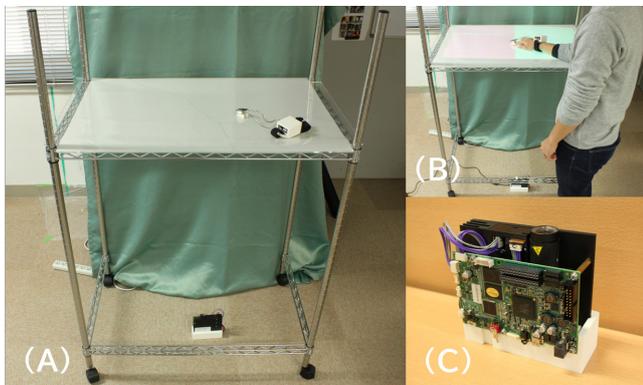


図 3 (A) 視触覚重畳システム全体の外観 (B) ユーザが使用している様子 (C) プロジェクタの拡大図 (LightCrafter 4500, Texas Instruments)

覚不可能なレベルに低減した可搬性の高い触覚提示デバイスの設計が可能である。しかしこれまでの PVLC を用いた触覚提示の研究では、一定の周波数での振動でしか触覚を提示しておらず、投影された映像に対応する触覚の提示は未だ行われていなかった。そこで本研究では、PVLC を用いて、投影するテクスチャの振動刺激の周波数・強度情報を埋め込み、広い周波数帯域で振動子を制御することで、映像から想起する触覚と提示する触覚が一致する視触覚重畳提示を目指す。

3. 提案手法

本研究では、輝度変調により映像に情報を埋め込む技術である PVLC を用いて、直動振動子の強度、周波数を制御できる指先装着型触覚提示デバイスを開発し、投影された映像に対応した触覚提示を再現する手法を提案する。

3.1 システム概要

本研究で開発した視触覚重畳システムの概要を図 2 に示す。また、視触覚重畳システム全体の外観を図 3、触覚提示デバイスの外観を図 4 に示す。ユーザは指先に触覚提示デバイスを装着し、スクリーン面に触れることで、触れた位置に投影された映像に対応した振動刺激を得る。ここで触覚提示デバイスは、投影画像中に埋め込まれた光信号を受信することで、映像に対応した振動刺激を提示できる。以下では、システムの詳細を述べる。

3.1.1 触覚提示デバイス

本研究では、振動子の異なる 2 種類の触覚提示デバイスを開発した。これらは大きく分けて受光部と信号処理部、

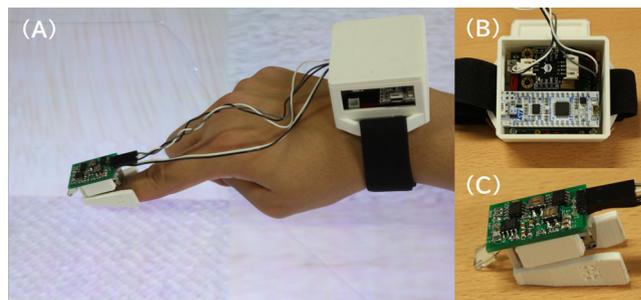


図 4 (A) 開発した触覚提示デバイスの外観 (B) 触覚提示デバイス (手首) の拡大図 (C) 触覚提示デバイス (指先) の拡大図

振動部からなり、振動部のみ構成が異なる。

提案する触覚提示デバイスは、どちらも小型でユーザの指先に装着しても動きを制限しない。またプロジェクタ以外の外部装置がなく、外部装置の取得画像と投影画像の位置合わせを行うためのキャリブレーションを必要としないため、装置の設置が容易である。以下では各部の詳細を述べる。

3.1.1.1 受光部

受光素子にはフォトダイオード (浜松ホトニクス, S5971) を用いた。フォトダイオードで受信した信号は、オペアンプによるハイパスフィルタと増幅回路、コンパレータを経てマイクロコントローラに送信される。

3.1.1.2 信号処理部

受信した信号の処理には、マイクロコントローラ (STMicroelectronics, Nucleo STM32F303K8) を利用した。マイクロコントローラでは、受信したデジタル信号をデコードすることによって位置情報と触覚情報を取得する。これらの情報に基づいて、振動子の制御信号を振動部に送信する。

3.1.1.3 振動部

本研究では、直動振動子に LD14-002 (日本電産コパル) とハプティックリアクタ (アルプスアルパイン) を使用した。LD14-002 は小型かつ薄型であるが、単一の共振周波数しかもたない。LD14-002 を用いた触覚提示デバイス (デバイス A) の振動部は振動子のみで構成される。一方、ハプティックリアクタは LD14-002 と比較すると大型でありアンプを必要とするが、広い周波数帯域で触覚を提示することができる。ハプティックリアクタは、マイクロコントローラで周波数・強度が制御された振動を提示することで、ユーザが触れている映像に対応した触感を提示できる。ハプティックリアクタを用いた触覚提示デバイス (デバイス B) の振動部は音声再生モジュール (DFR0534, DFRobot)、アンプ、直動振動子により構成される。予め音声再生モジュールに音声ファイルとして振動情報を保存しておき、マイクロコントローラから再生する音声ファイルを指定することで提示する振動を操作する。

3.1.2 映像投影

本研究では、PVLC のための高速 DLP プロジェクタと

して、DLP LightCrafter 4500 (Texas Instruments) を使用した。LightCrafter 4500 の二値画像一枚当たりの最小投影時間は 235 μs である。

PVLC において、投影される画像は、同期フレーム、データフレーム、輝度調節フレームによって構成される。また各フレームはそれぞれ複数枚の二値画像で構成される。プロジェクタは同期、データ、輝度調節の順でフレーム内の二値画像を投影する。

同期フレームでは、デバイスにデータの開始を知らせるための同期信号を送信する。また、データフレームでは、画素ごとに値の異なる触覚情報などのデータを送信する。同期信号及びデータはバイナリデータで表される。このとき、フレーム内の一枚の二値画像はバイナリデータの各ビットに対応し、二値画像の輝度値はバイナリデータの各ビット値に対応する。輝度調節フレームでは、RGB ごとの輝度調整用画像を各色一定時間投影する。これにより、データの送信により乱れた輝度を投影したい映像の輝度に近づくように調整することができる。

ここで、PVLC の同期信号とデータの送信にかかる時間を $T_{sync,data}$ とすると、これは次式で表される。

$$T_{sync,data} = (N_{sync} + N_{data}) \times T_{psd} \quad (1)$$

N_{sync} は同期信号のビット数、 N_{data} はデータのビット数を表し、 T_{psd} は同期信号及びデータの 1 ビットあたりの投影時間を表す。本研究では、 $N_{sync} = 10$ [bit]、 $N_{data} = 32$ [bit]、 $T_{psd} = 0.235$ [ms] とした。従って、 $T_{sync,data} \approx 9.9$ ms と計算できる。

また、PVLC の 1 周期にかかる時間 (T_{pvlc}) は次式で表される。

$$T_{pvlc} = T_{sync,data} + T_{pl} \times 3 \quad (2)$$

ここで T_{pl} は輝度調節フレームにおける RGB1 色あたりの投影時間である。本研究では、 $T_{pl} = 3.5$ [ms] として可視映像の投影を行った。従って $T_{pvlc} = 20.4$ ms と計算できる。よって、人間が見る映像のリフレッシュレートは 49 Hz となる。

投影する画像は、触覚情報のデータベースである LMT Haptic Texture Database [10] から選出した。このデータベースでは、108 種類のテクスチャの画像ファイルと、その振動情報の音声ファイルが提供されている。振動情報には高周波の信号も含まれていたが、人間の触覚は主に低周波数領域 (< 400 Hz) の振動について反応する [11]。そのため、振動情報に遮断周波数を 400 Hz としたローパスフィルタをかけ、低周波数領域の信号を取り出した。使用する振動情報は前述した音声再生モジュールに保存しておき、投影画像の各画素には、PVLC により対応する振動情報のファイル番号を画素ごとに異なる情報として埋め込んだ。

4. 実験 1：遅延時間の測定

本実験では、開発した 2 つの触覚提示デバイスの遅延時間を測定した。本実験における遅延時間 (T_{late}) とは、ユーザの指先に取り付けられた触覚提示デバイスが触覚制御情報が埋め込まれた映像領域に侵入してから、実際に触覚刺激が提示される (振動子が振動する) までの時間と定義する。PVLC を用いて制御する触覚提示デバイスの T_{late} は、次式で表すことができる [9]。

$$T_{late} = T_{recv} + T_{wait} + T_{vib} \quad (3)$$

ここで、 T_{wait} はデバイスの同期開始までにかかる時間、 T_{recv} はデバイスの同期開始からデータの受信完了までにかかる時間、 T_{vib} は、振動子に制御信号を送ってから実際に振動子が振動するまでの時間である。

T_{wait} 及び T_{recv} は、PVLC における二値画像一枚あたりの投影時間と投影枚数から計算により求めることができる。 T_{vib} は、デバイス A とデバイス B のそれぞれに対して、制御信号送信後から振動までの時間をマイクロコントローラのタイマーで測定した。

4.1 T_{wait} , T_{recv}

T_{wait} は、デバイスの同期開始までにかかる時間であり、この時間は指先に取り付けられたセンサが制御情報が埋め込まれた映像の画素に侵入したタイミングに依存して決まる。そのため T_{wait} は、同期信号の投影開始の直前に当該画素に侵入した場合に最短となり、同期信号の投影と同時に侵入した場合に最長となる。 T_{wait} が最短の場合、同期開始までの待ち時間はほぼ 0 秒である。最長の場合、待ち時間は PVLC での一周期にかかる時間 (T_{pvlc}) に相当する。そのため、 T_{wait} は式 4 の範囲にあり、その平均は式 5 で表される。

$$0 \leq T_{wait} \leq 20.4 \quad (4)$$

$$E [T_{wait}] = \frac{20.4}{2} = 10.2 \quad (5)$$

T_{recv} は、デバイスの同期開始からデータの受信完了までにかかる時間であるから、同期信号の投影開始からデータの投影終了までの時間である。これは、3.1.2 で示した $T_{sync,data}$ に相当するため、9.9 ms となる。

4.2 T_{vib} (振動子に依存して発生する遅延)

4.2.1 実験環境

T_{vib} の測定のため、振動情報を送信してから実際に振動子が振動を開始するまでの時間をマイクロコントローラ上で測定する実験を行った。振動開始のタイミングは、デバイスの側面に加速度センサ (KXR94-2050, Kionix) を取り付け、値をマイクロコントローラで測定することにより検知した。

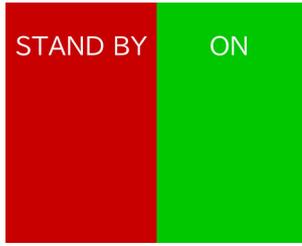


図 5 T_{vib} の測定時に使用した投影用画像

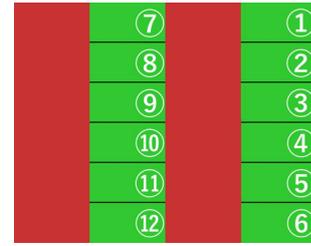


図 6 主観評価実験で使用した投影用画像

表 1 各デバイスにおける映像に対する触覚刺激提示の遅延時間 (ms)

	T_{wait}	T_{recv}	T_{vib}	T_{late}
デバイス A	10.2	9.9	15.9	36.0
デバイス B	10.2	9.9	66.5	86.6

測定に使用した投影用画像を図 5 に示す。図 5 の赤の領域には振動をオフ、緑の領域には振動をオンとする制御信号を埋め込んだ。デバイスを指先に装着し、赤から緑へ指を移動し、振動までの時間を記録する動作を繰り返し行った。

4.2.2 結果

各デバイスに対し、制御信号送信直後から加速度センサで振動を検知するまでの時間をマイクロコントローラ上で 100 回測定した。各デバイスの遅延の平均値を T_{vib} とし、 T_{wait} 、 T_{recv} 及びその和である T_{late} を表 1 に示す。 T_{vib} は、デバイス A では 15.9 ms であり、デバイス B では 66.5 ms であった。ここでデバイス B の T_{vib} は、音声再生モジュールが指定された音源を再生するまでの時間とハプティックリアクタが実際に振動するまでの時間の和であった。そのため音声再生モジュールのみでの遅延を測定したところ、平均 48.8 ms であった。従って、ハプティックリアクタの駆動に関する遅延は 17.7 ms 程度であると推測できる。

5. 実験 2 : 視覚と触覚の遅延知覚に関する主観評価

4.2.2 より、本研究で開発した 2 種類の触覚提示デバイスの遅延時間が明らかになった。そこで本節ではこの遅延時間を用いて開発したデバイスの遅延に関する評価を行う。

これまでの視覚と触覚の遅延知覚に閾値に関する調査によると、刺激閾は約 100 ms であると報告されている [12], [13]。しかしこれらの研究で用いられた視覚情報は液晶ディスプレイを用いて表示される遠隔の情報であったため、これらの研究で得られた刺激閾を視触覚重畳システムでの遅延時間の評価にそのまま適用することはできない。そこで、開発した視触覚重畳システムを用いて視覚と触覚の遅延知覚に関する被験者実験を実施した。そして被験者実験の結果から得られ刺激閾を用いて、開発した触覚提示デバイスの評価を行った。

5.1 実験環境

本実験で使用した投影用画像を図 6 に示す。図 6 の番号で区切られた緑の各領域に、PVLC により振動をオンにする制御信号と遅延時間の情報を埋め込んだ。触覚提示デバイスにはデバイス A を使用した。デバイス A は 4.2.2 より、最短で 36 ms の遅延時間で振動を提示することができる。そこでプログラムで振動子への制御信号の送信に待ち時間を設けることで、指定された遅延時間 (≥ 36 ms) でデバイスから触覚刺激を提示することができる。

5.2 実験方法及び被験者

設定する遅延時間は 50 ms から 160 ms までを 10 ms 刻みとした 12 点を用意した。被験者は利き手人差し指にデバイス A を装着後、赤の領域から緑の領域へ左から右に指をスライドして触り、指先が緑の領域に侵入したという視覚情報の認識に対し、触覚情報が遅延しているかどうかを 2 択で回答した。被験者は 1 系列につき 12 回の判定を行い、これを 10 系列繰り返すことで計 120 回の回答を行った。提示する触覚情報は被験者の予想の影響を防ぐため、各系列でランダムとし、また被験者間でもランダムにした。被験者は右利きの 20 代 10 名 (男性 7 名、女性 3 名) であり、実施時間は一人当たり約 20 分であった。

5.3 結果

被験者実験の結果を図 7 に示す。図上の各点は各被験者の遅延を知覚した割合を平均した値であり、エラーバーは標準誤差を示す。また、破線はデータをシグモイド関数にフィッティングした結果である。フィッティングに使用したシグモイド関数を次式に示す。

$$y = \frac{1}{1 + \exp(-k(x - x_0))} \times 100 \quad (6)$$

フィッティングの結果、 $k = 0.04$ 、 $x_0 = 103$ を得た。

次に、人間が触覚の遅延を知覚できる刺激閾 (T_{th}) を求めた。本実験では、遅延を知覚する割合が 50% となる遅延時間を T_{th} とし、フィッティングした関数から T_{th} を計算すると、 $T_{th} \approx 100$ ms であった。

T_{th} は先行研究 [12], [13] で報告されている刺激閾 (100 ms) と矛盾しておらず、本実験により視触覚重畳環境においても人間の遅延知覚の刺激閾は 100 ms であることが明らかになった。

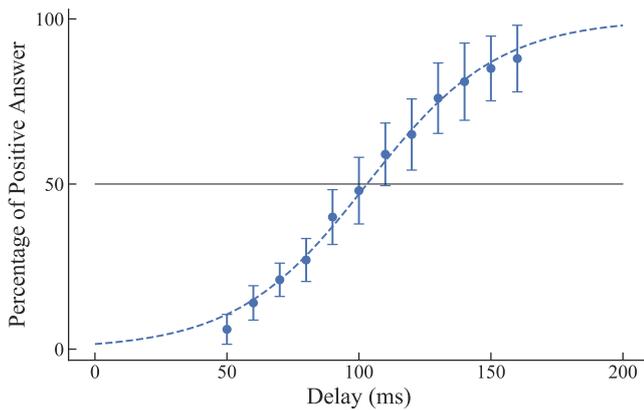


図7 視覚と触覚の遅延知覚に関する主観評価実験の結果

本研究で開発した触覚提示デバイスの遅延時間は、デバイスAで36.0 ms、デバイスBで約86.6 msであるので、どちらも刺激閾(100 ms)以下に収まっている。このことから、本研究で開発した触覚提示デバイスは人間が知覚できないレベルまで遅延時間を低減できているといえる。

6. おわりに

本研究では、空間分割型可視光通信を用いて位置ずれ・時間遅延を人間が知覚できない程度に低減し、かつ小型の触覚提示デバイスを構築し、視覚情報に対応した触覚刺激を提示できる視触覚重畳システムを提案した。

本研究では、開発した2種類のデバイスの評価として映像に対する触覚刺激提示の遅延時間を調査し、小型かつ薄型であるが単一の共振周波数しかもたない振動子を使用したデバイスAでは36.0 ms、大型でありアンプを必要とするが広い周波数帯域で触覚を提示することができる振動子を使用したデバイスBでは86.6 msの遅延時間があることが計測により明らかになった。さらに本システムにおける人間の視覚情報と触覚情報の遅延知覚に関する刺激閾を調査し、刺激閾はおよそ100 msであることが被験者実験により明らかになった。これは視触覚重畳システムの設計の重要な指標になると考えられる。またこの結果から、本研究で開発した2種類のデバイスはどちらも遅延時間を人間が知覚できないレベルまで低減できているといえる。

今後は、既存の振動情報をユーザーの動きに対してどのように提示するのが最適であるかを検討し、触覚提示システムのモデル化を進めていく予定である。加えて、LMT Haptic Texture Database [10]のような既存の触覚データセットやTactGAN [14]のような一枚のテクスチャの画像から、そのテクスチャに触れたときの触覚刺激を再現する手法から得られる触覚情報を利用することにより、視触覚情報を再生するメディアとしての活用が期待される。また、温度提示や圧覚提示などの装置を本手法を用いて制御することによって、マルチモーダルな感覚提示デバイスも実現できると考えられる。

謝辞 本研究は、JST ACT-X JPMJAX1900, JSPS 科研費 JP15H05925 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Tanabe, N., Sato, Y., Morita, K., Punpongsanon, P., Matsukura, H., Inagaki, M., Iwai, D., Fujino, Y. and Sato, K.: fARFEEL: Providing Haptic Sensation of Touched Objects Using Visuo-Haptic Feedback, *Proceedings of 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces*, pp. 1355–1356 (2019).
- [2] Tachi, S., Inami, M. and Uema, Y.: The transparent cockpit, *IEEE Spectrum*, Vol. 51, No. 11, pp. 52–56 (2014).
- [3] Miyashita, L., Ishihara, K., Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: ZoeMatrope: A system for physical material design, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, No. 4, p. 66 (2016).
- [4] Bau, O. and Poupyrev, I.: REVEL: tactile feedback technology for augmented reality, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 31, No. 4, p. 89 (2012).
- [5] Benko, H., Holz, C., Sinclair, M. and Ofek, E.: Normal-touch and texturetouch: High-fidelity 3d haptic shape rendering on handheld virtual reality controllers, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp. 717–728 (2016).
- [6] 北村匡彦, 苗村 健: DMDを用いた空間分割可視光通信: メタメディア情報を埋め込んだ映像投影, *日本バーチャリアリティ学会論文誌*, Vol. 12, No. 3, pp. 381–388 (2007).
- [7] Rekimoto, J.: SenseableRays: opto-haptic substitution for touch-enhanced interactive spaces, *CHI'09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, pp. 2519–2528 (2009).
- [8] Uematsu, H., Ogawa, D., Okazaki, R., Hachisu, T. and Kajimoto, H.: HALUX: projection-based interactive skin for digital sports, *ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies*, p. 10 (2016).
- [9] Hiraki, T., Fukushima, S. and Naemura, T.: Sensible shadow: tactile feedback from your own shadow, *Proceedings of the 7th Augmented Human International Conference*, pp. 23:1–23:4 (2016).
- [10] Stresse, M., Lee, J.-Y., Schuwerk, C., Han, Q., Kim, H.-G. and Steinbach, E.: A haptic texture database for tool-mediated texture recognition and classification, *Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games*, pp. 118–123 (2014).
- [11] Culbertson, H., Schorr, S. B. and Okamura, A. M.: Haptics: The present and future of artificial touch sensation, *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, Vol. 1, pp. 385–409 (2018).
- [12] Miyasato, T., Noma, H. and Kishino, F.: Subjective evaluation of perception of delay time between visual information and tactile information, *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences*, Vol. 79, No. 5, pp. 655–657 (1996).
- [13] Silva, J. M., Orozco, M., Cha, J., Saddik, A. E. and Petriu, E. M.: Human perception of haptic-to-video and haptic-to-audio skew in multimedia applications, *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications*, Vol. 9, No. 2, p. 9 (2013).
- [14] Ban, Y. and Ujitoko, Y.: TactGAN: Vibrotactile Designing Driven by GAN-based Automatic Generation, *ACM SIGGRAPH Asia 2018 Emerging Technologies*, pp. 13:1–13:2 (2018).