

リアルハプティクス技術を利用した左官作業の遠隔操作に関する研究

上田 尚輝 江沢 迪和

中島 康弘

(東日本ロボティクスセンター)

Study on Remote Control Systems for Construction Works using Real Haptics Technology

Hisateru Ueda Michika Kozawa

Yasuhiro Nakashima

Abstract

Real haptics technology has been studied to apply robotization at construction sites. This technology reproduces tactile information by bidirectionally transmitting contact information between an operator and a machinery. It can transfer the tactile information of the machinery to the operator at a distant location. Therefore, the application of this technology improves safety and productivity in dangerous environments. Obayashi used it in plastering work to test its effectiveness. First, the remote operation of the manufactured robots was checked at one site. Subsequently, a remote experiment was conducted between Tokyo and Osaka using modified robots to solve the identified problems. Based on the knowledge gained from this experiment, robotization of a wide range of manual work is promoted by applying it to other types of work.

概要

大林組ではリアルハプティクス技術を用いて、建設現場におけるロボット化の研究に取り組んできた。本技術は「操作器と作業装置からなる機械の制御において現実の物体や周辺環境との接触情報を双方向で伝送し、力触覚を再現する力触覚伝送技術」である。本技術の活用により、遠方地のロボットが直接触れている触覚を作業員に伝送できる。そのため、作業員が行けない危険な場所での作業に適用することで安全性と生産性の向上が期待される。本技術を活用する建設技能作業として「左官作業」を選択した。まず、専用左官ロボットの設計、製作を行い、同一敷地内での遠隔左官作業を実施した。その後、同一敷地内での実験で抽出された課題を解決するためのロボットの改良を行い、東京と大阪間での遠隔左官実験を実施し、良好な結果を得た。本実験で得た知見を基に、今後は他の職種にも本技術を活用し、幅広く人手による作業のロボット化を進めていく。

1. はじめに

近年、建設現場において、各種建設機械を用いた作業は積極的に自動化が進められ、生産効率は年々上がっている¹⁾。しかし、人手による作業が中心の建築の内装工事などの機械化は、数十年に渡り、様々な取り組みが行われてきたが、具体的な開発事例はほとんどない。

人手による作業の機械化が進まなかった原因の一つとして、手（力触覚）に代わる技術開発の進展がなかったことが考えられる。建設作業で使う機械はいわゆる「硬い制御」によるもので、技能労働に必要な触覚を活用することができなかった。

この課題の解決策の一つとして、「リアルハプティクス技術」の導入を計画した。リアルハプティクス技術とは、「操作器（以下：マスター）と作業装置（以下：スレーブ）からなる機械の制御において、現実の物体や周辺環境との接触情報を双方向で伝送し、力触覚を再現する力触覚伝送技術²⁾」である。本技術を遠隔操作に適用することで、直接触れている触覚を伝送することができ、高度な操作が可能となる。そのため、作業員が行けない

ような危険な場所や放射線に汚染された場所に適用することで、安全性、生産性の向上を図ることが期待できる。また、力触覚を用いた技能をデータ化、再現することができれば、建設技能作業の自動化、生産性向上、及び技能訓練の促進を図れる。

本研究では、リアルハプティクス技術を活用する建設技能作業として、特に力触覚を必要とし、視覚情報をあまり必要としないと考えられた「左官作業」を選定した。

本研究の目的は、遠隔での左官作業が、通常の左官作業と比較し、どの程度の品質確保と作業効率性を実現できたかを評価すること、及び建設技能作業にリアルハプティクス技術を活用するノウハウを取得し、他の建設技能作業に応用可能かを検討することである。

2. リアルハプティクス技術

先述のように、リアルハプティクス技術とはマスターとスレーブからなる機械の制御において、接触情報を双方向で伝送し、力触覚を再現する力触覚伝送技術である。このうち力触覚には、対象の硬さや軟らかさ、弾力性、

動きなどの人間の感覚が含まれる。

さらにリアルハプティクス技術を用いることで、人間の触覚を伝送・再現するだけでなく、それを拡張、縮小および保存することもできる。

力触覚伝送の概念図をFig. 1に示す。リアルハプティクス技術では、「硬い制御」と「軟らかい制御」の二つの制御を合成することにより得られる力触覚を一对のマスター、スレーブ間で双方向に伝送する。ここで言う「硬い制御」は、障害物をはね退けても定めた位置まで動かそうとする制御である。一方、「軟らかい制御」は、物体に接触した際の反作用力が、設定値に達した時点で静止させる制御を言う。従来、機械が軟らかい運動を持たず、硬い運動のみであったのと対照的である³⁾。

Photo 1にリアルハプティクス技術を用いた基礎実験の例を示す。左側のマスターの動きに右側のスレーブが追従し、スレーブがスポンジに接触するとマスターに接触情報が伝送される。弾力、粘性、ざらつきなどの触覚を伝送することができ、直接物体に触れているような感覚が得られる。

3. リアルハプティクス技術を用いた左官作業

3.1 左官作業ロボットの基本構造

左官作業ロボットの基本構造として、水平多関節ロボットであるSelective Compliance Assembly Robot Arm (SCARA)を採用した。本研究で採用したSCARAロボットは一般的な多関節ロボットと異なり、各部材の曲線的な動きは一部制限されている。一方、作業者が小さい力で安定した操作を行うことが可能で、双方向の力触覚の伝送に適している。これらから、左官作業への採用を決定した。本ロボットは以下の特徴を有する。

- ・ アームなど主要部材の自重は構造的に補償されている。(追加の機構でキャンセルする必要がない)
- ・ 主要部材を軽量化することで、操作時の慣性力を最小に抑えることが可能である。
- ・ 垂直方向の部材は、コンストンバネ（伸び、縮み量に関係なく一定の荷重を出力するバネ）による自重補償が可能である。

3.2 左官作業ロボットの概略構造

Fig. 2, 3にロボットの概念図を示す。水平方向に第1アームと第2アームが移動する構造となっている。肩関節は支持プレートに取り付けられており、背面に設置した架台に固定されている。上下方向には縦部材を直動機構で移動させるが、縦部材の先端にはジンバル構造のコテの姿勢を制御する装置が取り付けられている。この機構により、コテ中心のXYZ位置制御と、コテの姿勢（ピッチング、ヨーイング、ローリング）を制御できる。それぞれの関節部にサーボモーターが1台ずつ配置され、計6台のモーターが装備されている。

マスターとスレーブは基本的に同一構造となっている

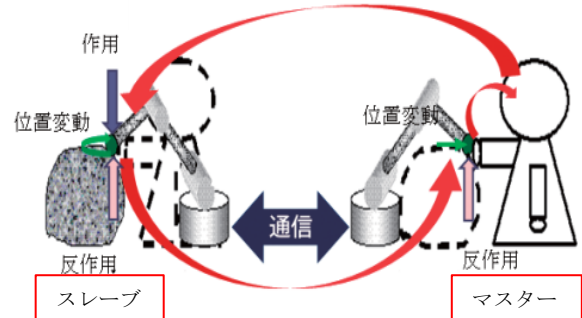


Fig. 1 力触覚伝送の概念図³⁾
Overview of Tactile Transmission

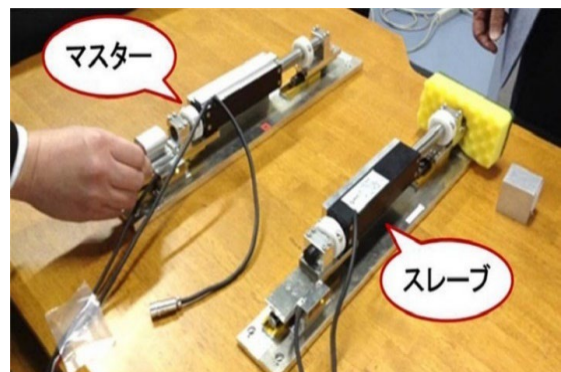


Photo 1 リアルハプティクス技術を用いた基礎実験
Basic Experiment using Real Haptics Technology

が、先端のコテの部分だけが異なっている。一般的な左官コテは、木製のハンドル部分と金属製のコテ部分で構成される。本研究では、マスターにはハンドル部分を取り付け、スレーブにはコテ部分を取り付けた。これによって、作業者はマスターのハンドルを操作して、スレーブのコテを遠隔で操作できる機構となっている。

3.3 全体システムの概要

Fig. 4, 5にシステムの概念図を示す。左官工が操作するマスターとその動きに追従して動作するスレーブは遠隔に設置されており、スレーブ側の作業状況をマスター側の左官工は直接視認できない。そこで、本研究ではスレーブ側に作業状況を撮影するカメラを3台設置し、その映像をマスター側のモニターに映すシステムとした。マスターとスレーブの動作を以下に示す。

- ① 左官工はマスターのコテのハンドル部分を握って空中で操作する。
- ② スレーブのコテ部分はマスターの動作に同期して動く。
- ③ スレーブのコテ部分が接触した触覚をリアルタイムに左官工は感じる。

リアルハプティクス技術の制御では、マスターとスレーブがロボットの位置情報及び現実の物体や周辺環境との接触情報を双方向で伝送し、力触覚を再現する技術が必要であり、「AbcCore」⁴⁾と呼ばれるICチップで本制御を具現化している。本システムでは双方向で位置、力

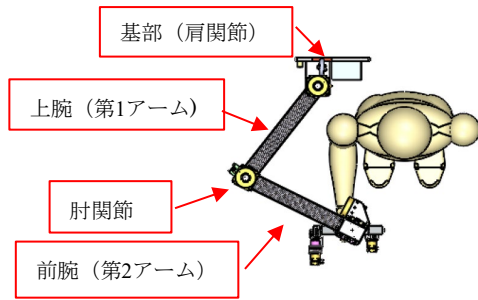


Fig. 2 ロボット概念図
Robot Overview (Ground Plan)

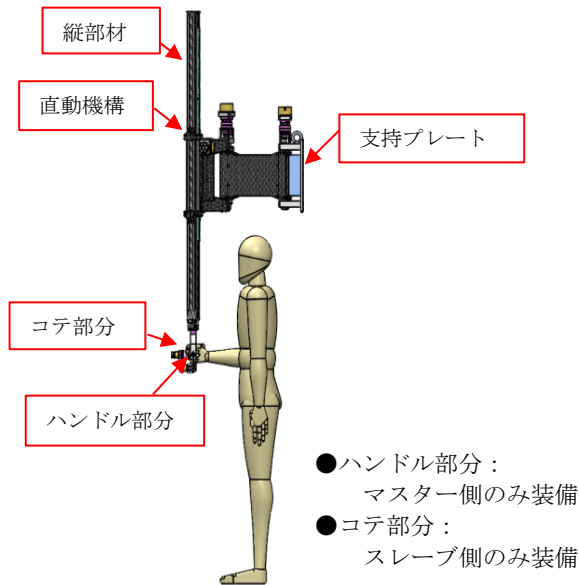


Fig. 3 ロボット概念図
Robot Overview (Side View)

触覚を伝送しているため、スレーブのコテ部分が壁に当たるなど拘束されると、同時にマスターのハンドル部分が、同じ位置・力で制御される。以上によって、あたかも直接コテを操作して左官作業を行っているのと同じ力触覚を再現できる。

4. 遠隔操作実証実験 (Part 1: 同一敷地内)

4.1 実証実験の進め方

実証実験は、2段階で行った。Part 1では、同一敷地内で実施して性能を確認した。この実験について、4章で詳述する。Part 2では、同一敷地内の実験で抽出された課題を解決するための改善を行い、東京・大阪間で遠隔操作を実施し、その性能を総合的に評価した。この実験は5章で詳述する。

4.2 実験結果

スレーブの前方に1m四方の塗り壁を設置し、左官工が遠隔で左官作業を行う実証実験を実施した。視覚については、3D映像や2D映像などを切り替えて複数回の実験を



Fig. 4 マスターのシステム概念図
System Overview of Master



Fig. 5 スレーブのシステム概念図
System Overview of Slave

行い、細かい表面の仕上がり状況など左官工が必要とする情報の視認性についても検証した。

実験の結果、被験者の左官工は、ハンドル部分から力触覚を感じられることにより、通常の作業と近い感覚で作業を行うことができると評価した。

最終仕上げでは左官工の技能により、表面を平滑化する必要があるが、このような微細な調整も可能で、通常の左官作業と同様の良好な仕上げ品質が得られた。作業効率については、最終的に通常作業の3割増程度の時間で作業が完了した。作業効率が低下した主な要因は、当初想定していたよりも視覚情報が重要であり、遠近感に関する視覚情報の不足により安全を確認しながらの作業となったこと、コテの微妙な接触情報の伝送が十分でなかったことが考えられた。

5. 遠隔操作実証実験 (Part 2: 東京・大阪間)

5.1 通信システムの検討

東京・大阪の実験予定拠点間にVPN回線を敷設して、データ伝送の状況を調査した。調査内容と調査結果を、

以下に示す。

- ① 専用のプログラムで拠点間のデータ往復時間、データの欠損状況を調査した。
- ② データの伝送遅延は10(ms)以内であり、また、ばらつきも少ないため各種の制御パラメータの調整で対応可能と考えられた。
- ③ 予測されるデータ伝送の遅延を模擬的に発生させて、システムの動作状況を確認した。

以上から、想定されるデータ遅延、欠損等に対して制御プログラムを通信システムに実装することで安全に対応できると判断した。

5.2 映像システムの検討

同一敷地内での実験結果を考慮して、2Dの高解像度のカメラで3方向から作業状況を撮影するシステムとした。映像データの容量は制御系データに比べて大きいため、カメラ側でエンコードして送信し、受信側でデコードして受信した。事前に使用予定の映像システムで送受信を行い、遅延時間を計測した。視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚は100(ms)未満となり、人間が認識できる遅延時間より短く許容範囲内であることが確認された。⁵⁾

5.3 制御のアルゴリズムの検討

ロボット全体の姿勢を検出、分析して、各瞬間のロボット全体の慣性モーメントをリアルタイムで補償した。これにより、左官工はロボットの慣性をほぼ感じずに作業を行うことができた。また、マスターのハンドル部分、スレーブのコテ部分に力センサーを追加で装備して、より高精度に力触覚を伝送する機構とした。これらの制御の変更により、ロボットの操作がよりスムーズになるとともに、微小な接触情報を伝送しやすくなった。

5.4 実験結果

マスターは東京の拠点に、スレーブは大阪の拠点に設置した。実験Part 1と同様にスレーブの前方に1m四方の塗り壁を設置し、東京の拠点より左官工が遠隔で作業を行う実証実験を実施した、実験の様子をPhoto 2, 3に示す。

実験の結果、同一敷地内実験で実施した場合より、さらにコテの微小な接触情報を再現することができた。また、より小さい操作力でスムーズに操作することが可能となった。これはロボット本体のハードの改造、新規の制御アルゴリズムの開発、データ遅延・欠損に対するアルゴリズムの適用などによると考える。スレーブ側の最終仕上げの品質は、左官工の目視による評価から実用レベルの平滑度が実現されていることを確認した。

5.5 実験データ1(性能評価)

システムの性能を評価するために、コテを前後方向(X方向、模擬壁と手前方向)に移動させ、①壁に接触していない自由動作、②壁に触れている接触動作、③撃力が発生するインパクト動作の動作試験を実施した。自由動



Photo 2 実験風景(東京)
Experimental View(Tokyo)



Photo 3 実験風景(大阪)
Experimental View(Osaka)

作時のX方向の位置応答をFig. 6、力応答をFig. 7、に示す。また、接触動作時のX方向の位置応答をFig. 8、力応答をFig. 9に示す。さらに、インパクト動作時のX方向の位置応答をFig. 10、力応答をFig. 11に示す。それぞれのグラフにおいて、赤線はマスター、青線はスレーブを表している。

いずれも高精度な位置追従と力伝送が達成されており、良好な力触覚伝送が実現されていることが確認できる。ただし、Fig. 7に示したように、自由動作時において、マスター側に力が発生している。これはロボットの慣性モーメントに起因する操作力であると考えられる。最大値は2.5N程度であり、Fig. 9に示す接触動作時の最大の力応答値の1/10程度であることから、作業上支障はないものと判断した。また、Fig. 11に示すインパクト動作時において、スレーブ側のスパイク状の力がマスター側に伝送されていない。これは力触覚伝送の制限帯域が限られているために生じたものと思われる。実際の左官作業において、このようなスパイク状の力が発生する可能性は低いですが、これを改善するためには、装置の軽量化やフィードバックゲインの向上が効果的であると考えられる。

5.6 実験データ2(左官作業)

左官材料が乾燥して、ある程度硬化した状態で、左官作業を実施した。位置応答のグラフをFig. 12, 13, 14に示す。事前の性能評価と同様に一連の作業において、マスター、スレーブ間のずれがほとんど発生しておらず、壁面に沿った動作が双方向で遅延なく高精度に制御されていることが確認できる。

また、同様にピッチング、ローリング、ヨーイングの姿勢制御、および合計6軸の力制御においても、高精度な位置追従と力伝送が達成されており、VPN回線を使用した東京・大阪間の長距離遠隔操作においても良好な結果が得られた。

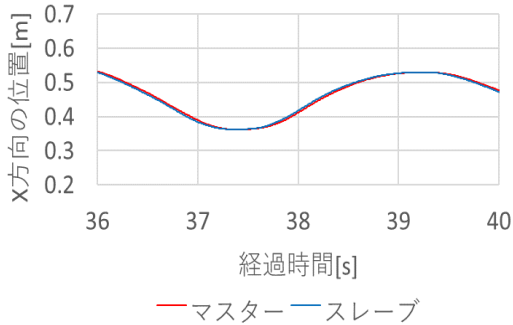


Fig. 6 X方向の位置応答 (自由動作)
Position Response in X Direction
(Free Motion)

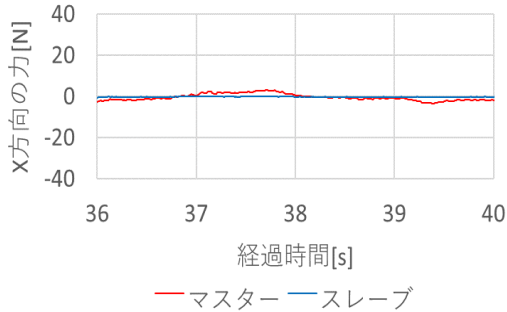


Fig. 7 X方向の力応答 (自由動作)
Force Response in X Direction
(Free Motion)

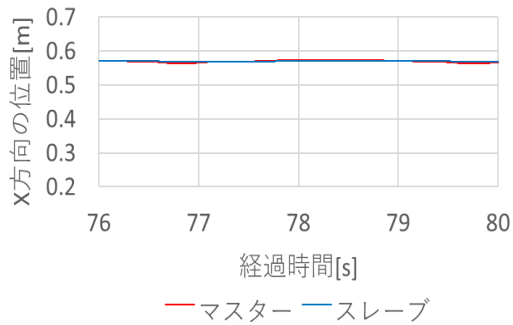


Fig. 8 X方向の位置応答 (接触動作)
Position Response in X Direction
(Contact Motion)

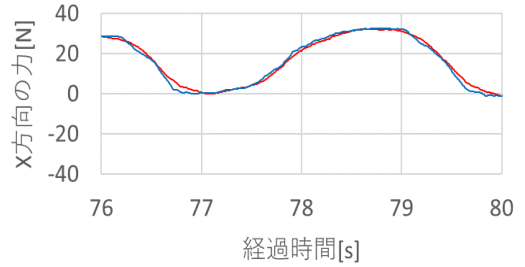


Fig. 9 X方向の力応答 (接触動作)
Force Response in X Direction
(Contact Motion)

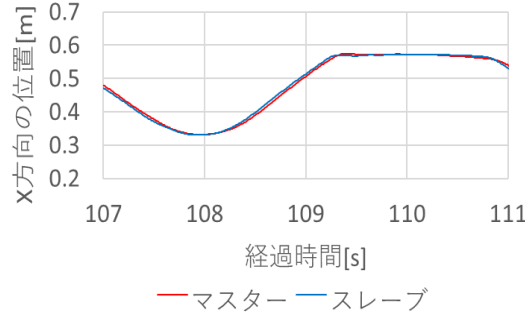


Fig. 10 X方向の位置応答 (インパクト動作)
Position Response in X Direction
(Impact Motion)

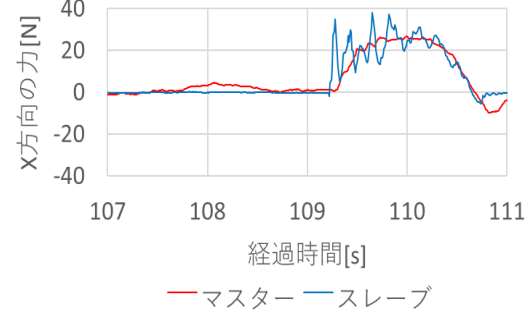


Fig. 11 X方向の力応答 (インパクト動作)
Force Response in X Direction
(Impact Motion)

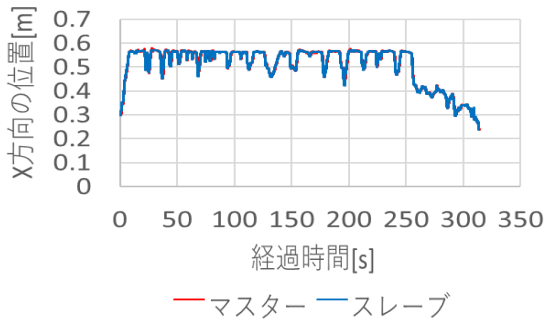


Fig. 12 X方向 (前後方向) の位置応答
Position Response in X Direction
(Front and Back Direction)

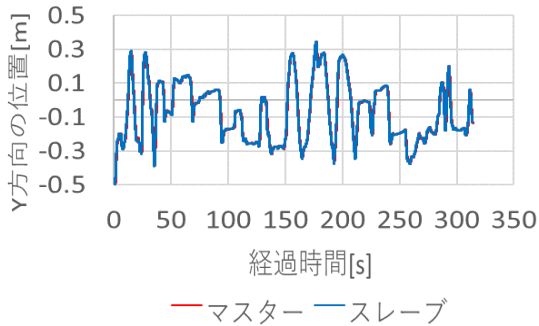


Fig. 13 Y方向（水平方向）の位置応答
Position Response in Y Direction
(Horizontal Direction)

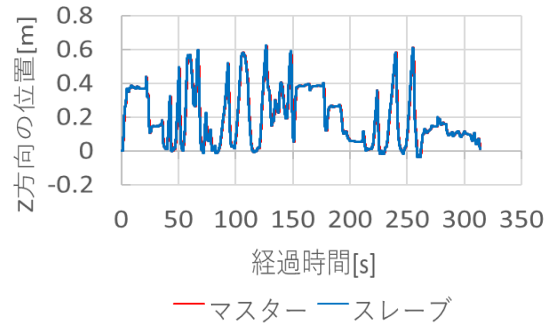


Fig. 14 Z方向（縦方向）の位置応答
Position Response in Z Direction
(Vertical Direction)

6. おわりに

本研究では、リアルハプティクス技術を建設技能作業である左官作業に適用し、遠隔操作実験を行った。その結果、明らかになったことを以下に示す。

- ・ リアルハプティクス技術を用いた遠隔操作を行う場合、視覚情報が重要である。
- ・ 円滑な操作のためには、ロボットの姿勢変化によって影響を受ける慣性を、リアルタイムに補償する必要がある。
- ・ より微小な接触情報を伝送するためには、マスターとスレーブに力センサーを取り付ける必要がある。
- ・ 東京・大阪間の長距離遠隔操作において、左官作業の仕上げ品質は実用レベルの平滑度が実現された。

以上から、左官作業に要求される繊細な力触覚を遠隔で再現できることを確認した。今後は、リアルハプティクス技術を他の職種にも適用することで、幅広く人手による作業のロボット化を進めることが可能になると考えられる。

さらに、作業の力触覚情報をデータとして蓄積し、AIに学習させることで、将来は熟練技能を再現するシステムやトレーニングシミュレーターなどにも適用可能だと考えており、幅広い分野への展開を目指していく。

謝辞

慶應義塾大学理工学部野崎貴裕准教授、およびハプティクス研究センターの皆様には、温かいご指導ご鞭撻を賜りました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 清水実, 松村学樹: 建設機械の稼働見える化による生産性向上, *Komatsu Technical Report(Web)*, Vol. 65, pp. 13-18, 2020
- 2) 田中一行, 関雅代, 黒田聡, 大西公平, 溝口貴弘: リアルハプティクス技術と複合現実技術を用いた袋状食品包装の空気漏れ検査システムの開発, *自動制御連合講演会講演論文集*, 第63回自動制御連合講演会セッションID: 113-5, 2020
- 3) 永島晃: リアルハプティクスが生み出す未来, *機関誌 Bulletin JASA*, Vol. 65, pp. 4-8, 2018. 4
- 4) 大西公平, 齊藤佑貴, 福嶋聡, 松永卓也, 野崎貴裕: リアルハプティクスの拓く未来社会, *日本AEM学会誌*, Vol. 25, No.1, pp. 9-16, 2017
- 5) 宮里勉, 岸野文郎: 視覚情報と触覚情報の間の遅延知覚に関する主観評価, *テレビジョン学会誌*, Vol. 49, No. 10, pp. 1353-1356, 1995