



手指の位置予測を用いた空中触覚提示遅延の解消

Reduction of delay in midair haptic interaction
by hand position prediction

竹井達哉¹⁾, 鈴木颯¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾²⁾, 篠田裕之¹⁾

Tatsuya TAKEI, Shun SUZUKI, Masahiro FUJIWARA,
Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

- 1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, takei@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)
2) JST さきがけ (〒102-0076 東京都千代田区五番町 7, presto@jst.go.jp)

概要：本研究では超音波を利用した空中触覚提示処理を行う際に生じる遅延を動作予測によって補償するシステムを提案する。空中触覚提示技術を用いたインタラクションシステムを構築するためには手指の位置を取得する必要がある。しかし、手指の位置の測定と触覚の提示までには遅延が存在する。そこで、まずモーションキャプチャで手指を認識してから超音波が照射されるまでの遅延時間を測定する。そして、測定された遅延時間を基に手指の位置予測アルゴリズムを組み込むことで、遅延を解消するシステムを構築する。また、音圧評価と被験者実験を行い、本システムの有効性を確認する。

キーワード：空中触覚提示, 遅延補償, 位置予測

1. はじめに

ユーザビリティの高い VR 環境を構築する上で、ユーザーの動きに対して遅延のない触覚提示システムの実現は重要なテーマの一つである。VR 環境で触覚提示を行うには、対象の位置を光学系センサなどで測定する必要がある。この際、センサでの計測から触感提示までの間に遅延があると、手指の動作に依存して、測定された対象の位置と実際に触覚が提示される位置との間に差が生じる。この誤差は触覚のリアリティを損なうなどの問題を引き起こす。本研究ではこの問題に対し、対象の位置予測を行うことで遅延を補償し、適切な位置に触覚を提示するシステムを提案する。

先行研究において、触覚提示を行うデバイスは多く提案されてきた。その中でも、本研究では触覚提示デバイスとして超音波の音響放射圧を利用した空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile Display: AUTD, 図 1) [1] を用いる。AUTD では振動子の位相を制御することにより焦点を生成し、その音響放射圧により触覚を提示する。AUTD を含めた空中触覚技術を用いると、ユーザーはデバイスを装着する必要がない。特に、AUTD は高い空間解像度と時間応答性を持つため、触覚提示を行う有効な選

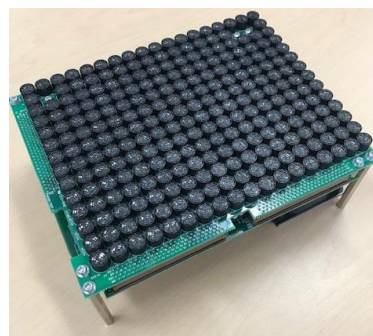


図 1：空中超音波触覚ディスプレイ

択肢となる。実際に AUTD を用いた空中映像とのインタラクションシステムなどでその有効性が確かめられている [2]。

AUTD を用いた触覚提示でも、音場の計算処理やデバイス間の通信などによって生じる遅延は避けられない。この遅延は触覚の提示座標の誤差を引き起こす一つの要因となる。本研究では空中超音波触覚提示システムに手指の位置予測アルゴリズムを組み込むことでリアルタイムな手指への触覚提示を実現する。予測アルゴリズムを組み込む

ことで遅延を補償する手法はタッチディスプレイにも用いられている [3].

2. 遅延時間の測定実験

まず、指に対して触覚フィードバックを与える過程で生じる遅延時間を測定した。ここで遅延時間とは、ある地点に指が来てから、そこに超音波の焦点が生成されるまでの時間とする。

2.1 実験手順

図 2 のように、AUTD, Leap Motion (Leap Motion 社), フォトリフレクタ (RPR-220, ローム社) を用いた近接センサ, 超音波センサ (T4010A1, 日本セラミック社) を配置した。Leap Motion は指の関節座標を取得することのできるモーションキャプチャである。AUTD と Leap Motion は PC で制御される。また、近接センサと超音波センサの出力は Arduino MEGA 2560 で測定する。Leap Motion により指の位置を計測し、近接センサの前に指が来たことをトリガに AUTD で収束超音波を超音波センサに向かって照射する。近接センサと超音波センサは隣接して置かれているため、これらのセンサの出力を比較することで、指が近接センサの前を通過してから、そこに超音波の焦点が生成されるまで遅延時間を測定することができる (図 3)。

実験の手順を図 4, 5 に示す。まず近接センサの位置を測定するため、近接センサの前に右手人差し指を置き、その指の座標を Leap Motion で計測した (図 4)。次に図 5 ①, ②の矢印方向に、人差し指が近接センサの前を通過するように右手を動かす試行を 50 回繰り返した。この時の手指の位置を Leap Motion で測定し、人差し指が近接センサの前を通過するのを確認したら (図 5 ①), 焦点を超音波センサの位置に生成するようにした (図 5 ②)。

2.2 結果

近接センサと超音波センサの出力の一例を図 6 に示す。電源ノイズの影響で周期的な変動が見られるが、ここでは近接センサの出力が最大になる時刻を指が近接センサの前に来た時刻とし、超音波センサの出力が立ち上がりの時刻を焦点が生成された時刻とした。すなわち、図 5 の矢印を遅延時間とした。50 回の試行と解析の結果、遅延時間の平均は 33.27 ms となり、標準偏差は 17.80 ms であった。

例えば、指先の速度を 40 cm/s と仮定した場合、この遅延により、触覚提示対象である指先の位置に約 1.3 cm の誤差が生じると計算される。これは 40 kHz の超音波を用いた場合の焦点径 (0.85 cm) より大きい。そのため、指先に適切に触覚が提示されない可能性がある。また、40 cm/s の動きは一般的な人間の動きにおいて特に無理のない速度であると考えられる。実際に 4 章の実験ではこの速さで手を動かす。

3. 位置予測

本章では位置予測アルゴリズムを説明する。指の動きは局所的に等加速度運動をすると仮定する、すなわち、位置

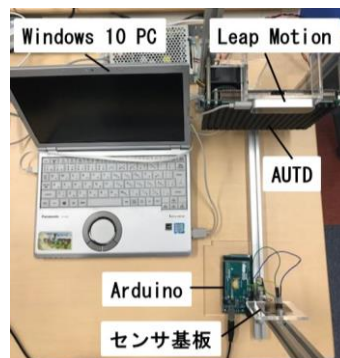


図 2: 遅延測定実験の配置

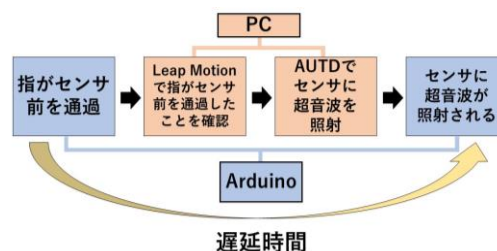


図 3: 測定する遅延時間

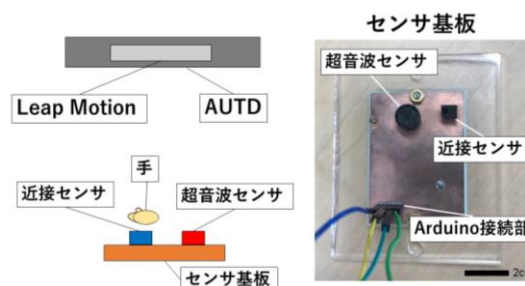


図 4: 近接センサの座標計測とセンサ基板

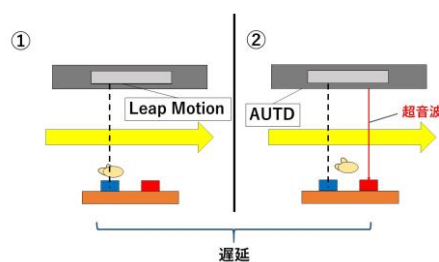


図 5: 遅延測定実験の流れ

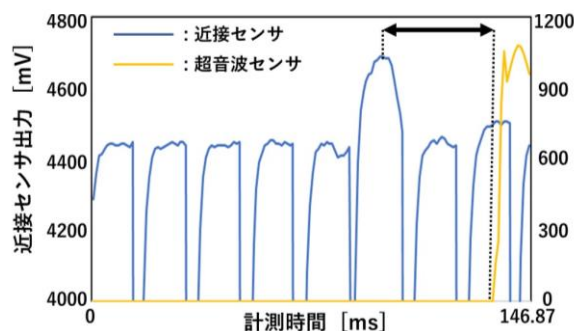


図 6: センサの出力値

予測アルゴリズムは次の式 (1) に基づく、

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v}_i t + \frac{1}{2} \mathbf{a}_i t^2, \quad (1)$$

ここで、下付きの i は Leap Motion で取得したフレーム番号を表す。

予測アルゴリズムではあるフレームの座標ベクトル \mathbf{x}_i その 1 フレーム前の座標ベクトル \mathbf{x}_{i-1} から速度ベクトル \mathbf{v}_i を計算し、 \mathbf{v}_i と \mathbf{v}_{i-1} から加速度ベクトル \mathbf{a}_i を計算する。そして式 (1) の t に、2 章で測定した遅延時間 (= 33.27 ms) を代入することで、遅延時間後の指の位置予測し、遅延を補償する。

4. 精度評価

本章では、従来の空中触覚システムに 3 章で説明した位置予測を組み込むことによって、実際に触覚提示座標の精度が向上されるかどうかを評価する。精度の評価実験として、マイクデバイスを用いて超音波の音圧を測定する実験を行った。また、被験者実験による主観評価も行った。

4.1. 音圧評価

4.1.1. 実験手順

エレクトレットコンデンサマイク (KWCG2738PBJ-A, Kingstate Electronics Corp) を右手人差し指の指先に装着し、その出力を解析することで超音波の焦点が適切に生成されているかを確認する。本実験では表 1 に示す 5 通りの場合で出力を記録した。以下、各条件を説明する。1) は超音波を出力しない場合、2) はある場所に固定した超音波の焦点にマイクデバイスを当てて維持した場合、3) は



図 7: 精度評価実験の様子

表 1: 精度評価実験の条件

条件	予測アルゴリズム	手の動き	備考
①	-	-	超音波を出力しない
②	-	-	固定した超音波の焦点に対してマイクを当てる
③	×	×	-
④	×	○	-
⑤	○	○	-

Leap Motion で取得した指先の座標に超音波の焦点を生成するよう設定した上で、指を一点に静止させた場合、4) は 3) と同様の条件下で、指先を図 7 の矢印方向に AUTD の正面の約 20 cm を 1 秒程度で 1 往復させる動作を繰り返した場合、5) は 4) と同様の条件下で超音波照射プログラムに予測アルゴリズムを組み込んだ場合である。それぞれ 30 秒間データを記録した。

4.1.2. 結果

各条件におけるマイク出力の平均値を表 2 に示す。条件 4 と 5 の比較から、予測アルゴリズムを組み込んだ方が、マイク出力の平均値が高く、指先に対して正確に超音波の焦点を生成していることがわかる。

しかし、Leap Motion を使用しない条件 2 と比べ、Leap Motion で測定した指の位置に焦点を生成する条件 3~5 は出力平均値が著しく低い。この原因として、Leap Motion の精度 (A)、Leap Motion で測定される指の位置がマイクの位置と一致していない可能性 (B)、及び、Leap Motion と AUTD のキャリブレーション誤差 (C) の 3 つが考えられる。このうち、(B) については実際に、指に対して焦点が当たっているかどうかを確認することで、その可能性のある程度評価ができると考えられる。

表 2: 各条件下のマイク出力の平均値

条件	平均値 [mV]
①	56.438
②	236.570
③	88.070
④	59.607
⑤	76.683

4.2. 被験者実験

4.2.1. 実験手順

被験者に対し、予測アルゴリズムを組み込んだ場合と組み込まなかった場合の触覚提示を 1 回ずつ行い、どちらの提示が触覚を感じることが多かったかを質問する。被験者には事前に、4.1 節の条件 4、5 と同様に手指を AUTD の前で図 7 の矢印の方向に往復させるよう指示を行った。

今回は 7 名の被験者を対象に実験を行った。被験者の年齢は 23~27 歳 (平均 24.6 歳) で、男性が 6 名、女性が 1 名であった。

4.2.2. 結果

被験者全員が位置予測アルゴリズムを組み込んだ場合の方が触覚を感じることが多かったと答えた。よって予測アルゴリズムを組み込んだ触覚提示システムは、実際にユーザーに対してより精度の高い触覚提示に寄与したと考えられる。

また、Leap Motion で取得した指の位置に焦点を生成した場合でも、被験者は指先に触覚を感じていた。したがっ

て4.1節の条件2と3の違いの原因として、指先に焦点は生成されているものの Leap Motion の測定する指の位置とマイクデバイス（半径 0.3 cm）の位置が異なるため、マイクの出力に反映されなかったということが考えられる。

5. まとめ

本稿では空中触覚提示を行う過程で生じる遅延を補償するシステムを提案した。遅延時間をあらかじめ測定しておき、これを基にした位置予測アルゴリズムを空中触覚提示システムに組み込むことによって、実際に触覚の提示座標の精度が向上したことを確認した。

しかし、本研究で使用した簡易な物理モデルに基づいた予測では、より複雑な手の動きを対象とする場合や遅延時間の大きい場合はさらに精度が落ちると考えられる。そのため、今後はニューラルネットワークを用いた身体の運動予測 [4] を手指に応用するなど、様々な手の動きに対応した位置予測モデルを考案することや、他のデバイスや触覚提示方法も考慮に入れること、モーションキャプチャの精度を向上させることなど、より質の高い触覚提示を実現できる方法を追求していくことが必要である。

本研究の提案手法は超音波を用いた触覚提示以外の触覚提示方法にも応用が可能である。さらに、例えば、通信遅延の大きい離れた地点間の触覚インタラクションシステムのリアルタイム性を維持することなどにも応用でき

ると考えられる。

謝辞 本研究の一部は JST さきがけ 17939983 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] T. Hoshi, M. Takahashi, T. Iwamoto, and H. Shinoda, "Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound," *IEEE Trans. Haptics*, vol. 3, no. 3, pp. 155–165, 2010.
- [2] Y. Monnnai, K. Hasegawa, M. Fujiwara, K. Yoshino, S. Inoue, and H. Shinoda "HaptoMime: Mid-Air Haptic Interaction with a Floating Virtual Screen" *UIST'14, Augmented Reality II*, pp. 663-667, 2014.
- [3] E. Cattan, A. R. Capellan, P. Perrier, and F. Berard "Reducing Latency with a Continuous Prediction: Effects on Users' Performance in Direct-Touch Target Acquisitions" *ITS'15, Interactive Tabletops & Surfaces*, pp. 205-214, 2015.
- [4] Y. Horiuchi, Y. Makino, and H. Shinoda "Computational Foresight: Forecasting Human Body Motion in Real-time for Reducing Delays in interactive System" *ISS'17, Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 312-317, 2017.