



光学・音響 ToF を用いた箸の持ち方計測に向けた基礎検討

A Preliminary Study on Optical and Acoustic Time-of-Flight Sensing for Chopstick Grip Measurement

廣川 七海¹⁾, 丁子 雄希²⁾, 北野 和哉¹⁾, 藤村 友貴¹⁾, 舩富 卓哉³⁾, 向川 康博¹⁾

Nanami HIROKAWA, Yuki CHOJI, Kazuya KITANO,

Yuki FUJIMURA, Takuya FUNATOMI, and Yasuhiro MUKAIGAWA

1) 奈良先端科学技術大学院大学 先端科学技術研究科 (〒 630-0192 奈良県生駒市高山町 8916-5, hirokawa.nanami.hu7@naist.ac.jp, kitano.kazuya@is.naist.jp, fujimura.yuki@is.naist.jp, mukaigawa@is.naist.jp)

2) 新潟リハビリテーション大学 医療学部リハビリテーション学科 (〒 958-0053 新潟県村上市上の山 2-16, tyouji@nur.ac.jp)

3) 京都大学 学術情報メディアセンター (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町, funatomi.takuya.2c@kyoto-u.ac.jp)

概要: 本研究では, 将来的な道具操作理解に向けた基礎検討として, 光学 ToF (Time-of-Flight) センシングおよび音響 ToF センシングを用いた箸の持ち方計測を行った. 複数の箸の持ち方および開閉状態を対象として, 各センシング手法による応答を取得し, その観測特性を調査した. その結果, 両手法ともに箸の持ち方や開閉状態に応じた反射応答の変化が確認された. 特に, 光学 ToF では空間分布の変化が, 音響 ToF では動作に伴う応答の時間的変化が顕著に観測された. これにより, 箸操作に対する光学 ToF および音響 ToF の応答の特徴を明らかにした.

キーワード: ToF センシング, 近赤外線, 音響, 道具操作

1. はじめに

道具操作の理解は, ヒューマンコンピュータインタラクションや技能学習支援における重要な課題である. 特に箸操作は, 日本の食文化を支える代表的な道具操作技能である. 和食はユネスコ無形文化遺産に登録されており [1], 農林水産省の第 4 次食育推進基本計画では, 地域や家庭で受け継がれてきた料理や味に加え, 「箸使い等の食べ方・作法」を次世代へ伝承することの重要性が示されている [2]. そのため, 箸の持ち方や操作状態を客観的に計測・分析することは, 食文化の継承や技能評価の観点から重要である.

箸操作は, 複数の指を協調的に用いて 2 本の箸を操作する複雑な技能であり, 持ち方や操作方法は多様である. また, 箸の持ち方によって指の配置や箸との位置関係が変化する. よって, 箸操作において形成される空間構造を直接観測することは容易ではない. 指間や箸周辺には複雑な遮蔽や重なりが存在し, 従来の画像ベースの計測 [3] では撮影方向の影響を受けやすい. そのため, 画像ベースの計測とは異なる原理に基づくセンシング手法を用いて箸操作を観測することは有用である.

本研究では, 道具操作理解に向けた基礎検討として, 近赤外線を用いた光学 ToF (Time-of-Flight) センシングと音響 ToF センシングを用いて異なる箸の持ち方を計測する. 特に, 箸の持ち方の違いが各センシング手法にどのように現れるかを比較し, それぞれの観測特性を分析する. これにより, 道具操作理解および技能評価に向けた知見を得ることを目的とする.

2. 関連研究

手指姿勢推定技術は大きく発展しており, MediaPipe Hands[4] などの姿勢推定手法が広く利用されている. さらに, 手と物体の相互作用を対象とした認識技術 [5] も提案されており, 道具操作の理解や解析への応用が進められている.

近年では, 光および音を利用したセンシングを用いて手指や周辺環境を計測する研究も行われている. 光学分野では, SPAD アレイを用いた近赤外線 ToF センサのモバイル機器やウェアラブル機器への応用 [6] が進められている. 音響分野では, スマートウォッチに搭載されたスピーカーおよびマイクを利用して手指姿勢を推定する研究 [7] も報告されている.

しかし, 既存研究の多くは手や物体の位置・姿勢推定を目的としており, 箸の持ち方の違いが, 光学 ToF および音響 ToF にどのように現れるかについては十分に検討されていない. そこで本研究では, それぞれの計測手法で箸の持ち方を観測し, 各センシング手法で得られる応答の特徴を調査する.

3. 実験方法

3.1 計測原理

光学 ToF では, ams OSRAM 社製 TMF8828[8] を用いた光学 ToF センシングを行った. TMF8828 は SPAD を用いた近赤外線 ToF センサであり, 近赤外光を照射して対象物からの反射光を計測することで, 反射応答を取得した.

音響 ToF では, Google Pixel Watch 3 の内蔵スピーカー

Way of holding	Four Finger		Three Finger				Palm		
Upper Chopsticks	I, II, III		I, II, III	I, II			I, III, IV	I, II, III, IV	I, II, III, IV, V
Bottom Chopsticks	I, IV		I	I, III			I		
Close									
Open Finger Extension									
Open Finger Flexion									

図 1: 箸の持ち方分類 (出典: [9] Fig. 6)

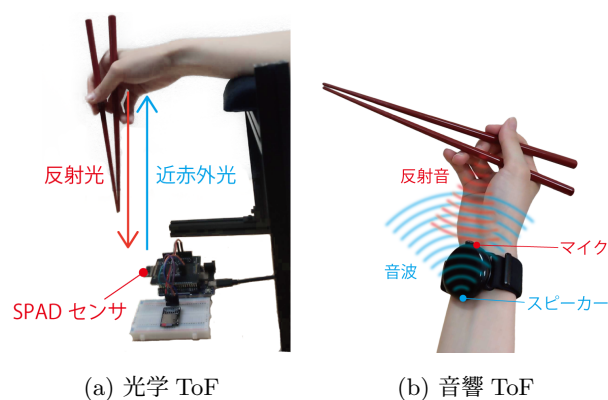


図 2: 光学 ToF および音響 ToF の計測環境

および内蔵マイクを用いた音響センシングを行った。内蔵スピーカーから 18~21kHz の線形チャープ信号を送信し、対象物からの反射音を内蔵マイクで受信し、反射応答を取得した。

3.2 実験セッティング

図 2 に光学 ToF および音響 ToF の計測環境を示す。

光学 ToF では、TMF8828 は手のひら正面に配置し、手のひら中心がセンサ視野の中央となるよう位置合わせを行った。センサ面から手首位置までの垂直距離は 25cm とした。計測設定はフレーム周期 132ms、積算回数 25 万回とした。

音響 ToF では、Pixel Watch 3 は右手首の手のひら側に装着した。チャープ長は 600 サンプル (12.5ms) とし、音響信号は 48kHz でサンプリングした。

3.3 計測対象

箸の持ち方は、Yokubo ら [9] により提案された分類表 (図 1) に基づき、指の配置や箸との位置関係が異なる Four Finger, Three Finger, Palm の 3 種類を対象とした。被験者は筆者本人 (右利き) とし、箸は一般的な朱色の塗り箸を使用した。

Four Finger, Three Finger, Palm の各持ち方について計測を行った。箸操作は手指と箸の運動を伴う動的な動作であるため、本研究では動作時の応答を解析対象とした。閉

状態から開状態へ移行する条件 (opening), および開状態から閉状態へ移行する条件 (closing) を設定した。各試行では、対応する開閉動作を 1 回含む 5 秒間の動作を計測し、各条件について 30 試行ずつ計測した。

4. 解析方法

4.1 光学 ToF

TMF8828 から取得したヒストグラムデータ (raw histogram) を解析対象とした。TMF8828 は 8×8 画素の ToF センサであり、SPAD アレイを複数の TDC (Time-to-Digital Converter) チャンネルへ割り当て、各チャンネルについて光子到達時間のヒストグラムを生成する。ヒストグラムデータは、TDC チャンネルと距離ビンから構成される。TMF8828 では、4 回の時分割計測によってゾーンを取得する。一方、ヒストグラムデータには 4 フレーム周期に加え、8 フレーム周期の変動も観測されたため、各試行を 8 つの位相に分割して解析を行った。試行間の姿勢や環境のばらつきの影響を低減し、試行内の変化を評価するため、各試行について、計測開始直後 1 秒間および計測終了直前 1 秒間の平均ヒストグラムを算出し、その差を光子数変化量 (Photon Count Change) と定義した。各位相、各 TDC チャンネルについて、光子数変化量を距離ビン方向に積算し、特徴量を算出した。

4.2 音響 ToF

反射音から算出したエコープロファイルを解析対象とした。エコープロファイルは、反射音の強度を時間遅延 (距離) 方向に表したプロファイルである。フレーム間差分の二乗平均平方根を Motion Magnitude として算出した。各試行について、試行内の反射応答の変化を評価するため、計測開始直後 1 秒間および計測終了直前 1 秒間の平均エコープロファイルを算出し、終了時と開始時の差分の総和を Signed Motion Contrast とした。

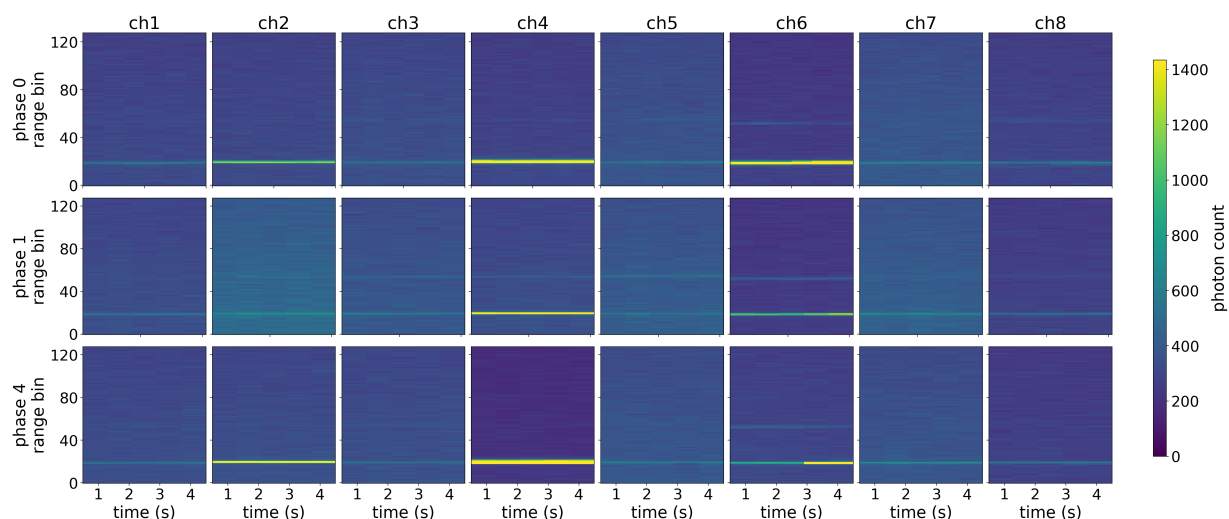


図 3: Four Finger の opening 条件における応答例

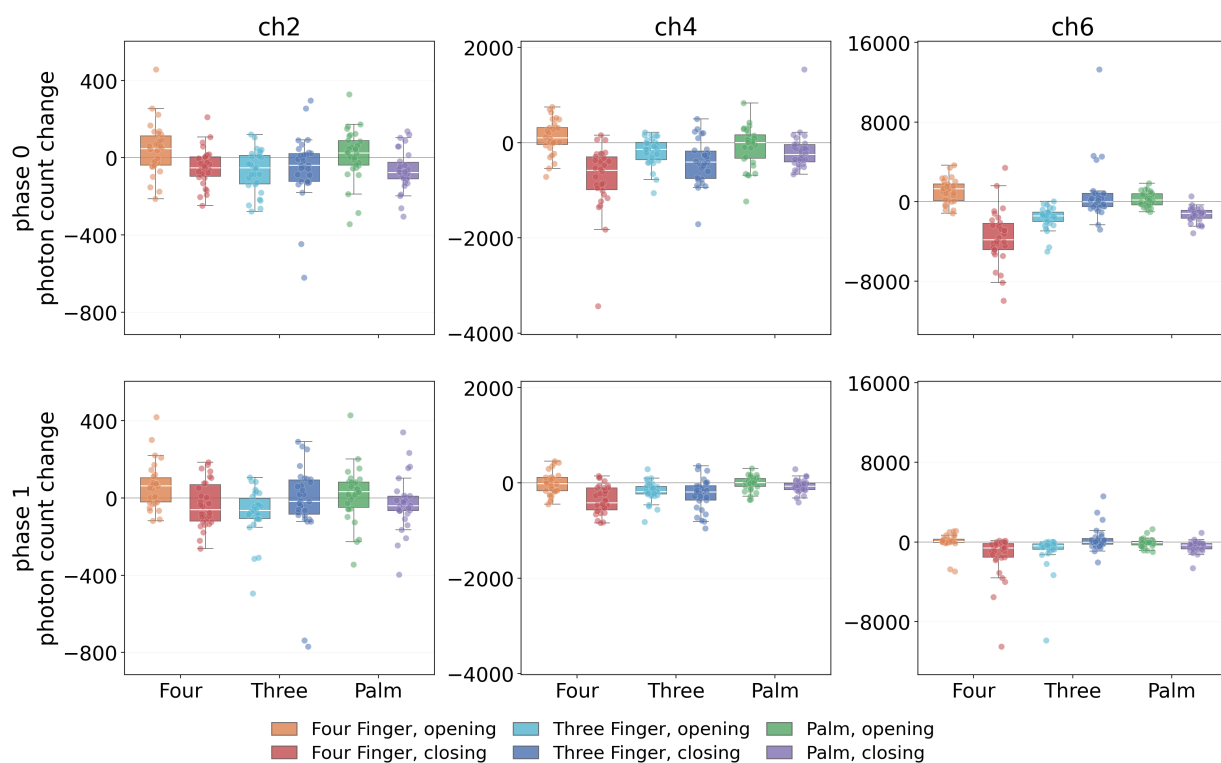


図 4: 各持ち方における動作特徴量の分布

5. 結果

5.1 光学 ToF

図 3 に、Four Finger の opening 条件における phase0, phase1 および phase4 のヒストグラムデータを示す。各 TDC チャンネルについて、横軸を時間、縦軸を距離ビンとした。時間方向に並べた各列は 1 フレーム分のヒストグラムに対応し、色の強度は各距離ビンにおける光子数を表す。

図 4 に、phase0 および phase1 におけるチャンネル (ch2, ch4, ch6) の特徴量分布を示す。応答変化が大きく観測された距離ビン 14-24 を関心領域 (ROI) として用いた。光子数変化量の分布は、チャンネルおよび位相によって異なる傾

向を示した。Four Finger では opening と closing の応答差が顕著であり、Three Finger ではチャンネルによって応答方向が異なった。また、Palm では opening と closing の応答差は比較的小さかった。これらの結果から、複数チャンネルの反射応答を比較することで、持ち方に応じた応答パターンの違いを捉えられることが確認された。

5.2 音響 ToF

図 5(a) に、Four Finger の opening 条件における代表的なエコープロファイルを示す。横軸を時間、縦軸を距離ビンとしたプロファイルであり、300bin 付近に強い応答が確認された。

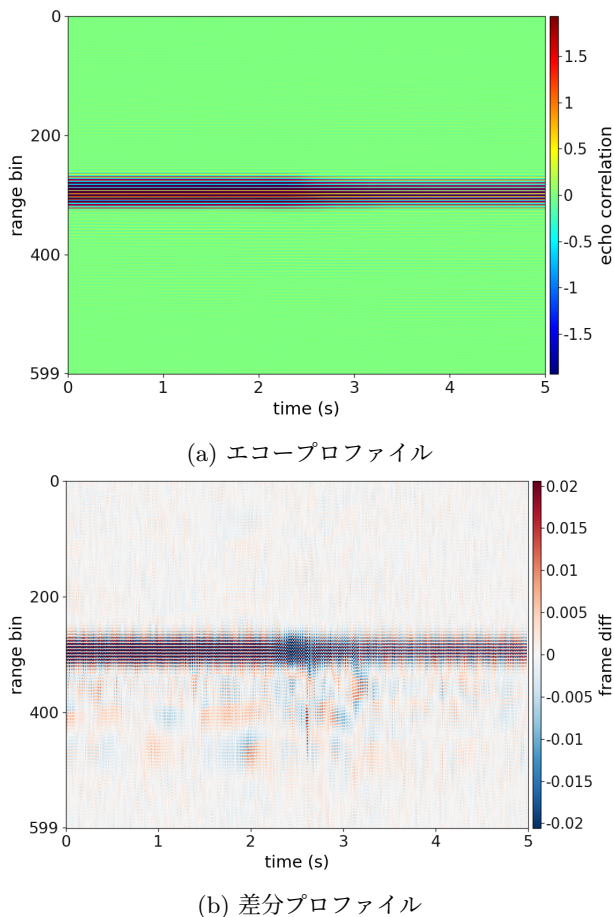


図 5: Four Finger の opening 条件における応答例

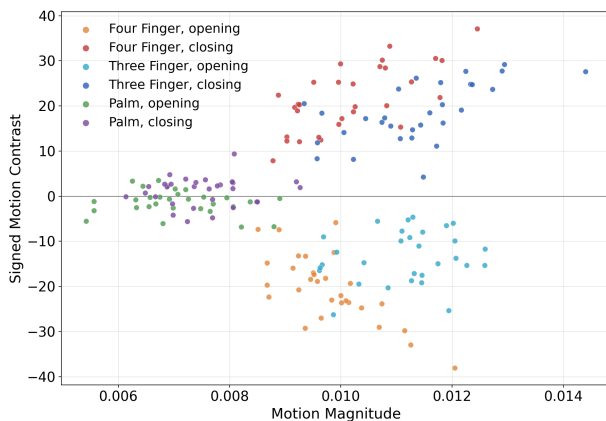


図 6: 各持ち方における動作特徴量の分布

図 5(b) に、同条件におけるフレーム間差分プロファイルを示す。開閉動作に伴う応答変化が主に距離ビン 260–340 に観測されたため、この範囲を特徴量算出の ROI として用いた。

図 6 に、各持ち方における特徴量分布を示す。Signed Motion Contrast により opening 条件と closing 条件が明確に分離し、closing 条件では正、opening 条件では負の値を示す傾向が確認された。また、Motion Magnitude は持ち方によって異なり、Four Finger および Three Finger では比

較的大きい値を示した一方、Palm では小さく、特徴量は原点付近に集中した。動作に伴う反射応答の時間変化が特徴量として現れ、開閉動作および持ち方の違いを反映していることが示唆された。

6. まとめと今後の課題

本研究では、光学 ToF センシングおよび音響 ToF センシングを用いて、箸操作時の応答特性を比較した。その結果、光学 ToF ではチャンネルごとの応答から空間的な反射分布を、音響 ToF では反射応答の時間変化をそれぞれ捉えられることを確認した。両センシング手法は異なる応答特性を有しており、組み合わせることでより多面的な箸操作の計測が期待される。

今後は、被験者数および対象とする持ち方を拡大するとともに、光学 ToF と音響 ToF で観測される反射位置と応答の対応関係を詳細に解析する。さらに、両センシング手法を組み合わせた箸操作認識および技能評価への応用を検討する。

謝辞 本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2140 の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] 文化庁, 和食;日本人の伝統的な食文化, https://online.bunka.go.jp/special_content/intangible/209802, (2025 年 6 月 7 日閲覧).
- [2] 農林水産省, 第 4 次食育推進基本計画, 2021.
- [3] 廣川七海ほか, 「箸と手指の姿勢推定モデルを用いた箸操作分析および箸の持ち方練習支援アプリの開発」, インタクション 2025 論文集, pp.1248–1253, 2025.
- [4] F. Zhang et al., “MediaPipe Hands: On-device Real-time Hand Tracking.” CVPR Workshops, 2020.
- [5] Chao, Yu-Wei et al., “DexYCB: A Benchmark for Capturing Hand Grasping of Objects.” CVPR, pp.9040–9049, 2021.
- [6] Sifferman, Carter et al., “Recovering Parametric Scenes from Very Few Time-of-Flight Pixels.” ICCV, 2025.
- [7] Jiwan Kim et al., “WatchHand: Enabling Continuous Hand Pose Tracking On Off-the-Shelf Smartwatches.” CHI, Article 740, pp.1–21, 2026.
- [8] ams OSRAM, “TMF8820/21/28 Multizone Time-of-Flight Sensor.” Version 8-00, Aug. 2023.
- [9] Yuko Kaneko Yokubo et al., “Relationship between chopstick manipulation and cross-sectional shape in the developmental stages from infancy to early school age.” Applied Ergonomics, vol.97, 103507, 2021.