

イベントカメラを用いたレーザスペckル振動計測による遠隔触覚拡張

岡本 祥宏^{1,a)} 佐藤 優志¹ 岩井 大輔¹ 佐藤 宏介¹

概要: 人間の能力を拡張させる研究の一つに触覚能力の拡張を目指したものがある。ただ、これまで遠隔物体の微細な触覚情報を非接触に得て、それをユーザに知覚させる手法は検討されていない。本研究では、遠隔物体の微小な振動情報をレーザ計測しフィードバックすることで触覚拡張を目指す。そこで、画素変動に反応するイベントカメラからレーザスペckルの高速変動に追従して指先にフィードバックする触覚拡張システムを提案する。物体の違いによって生じる周波数応答特性の違いを基にした振動刺激をフィードバックすることで、遠隔の物体の素材や表面属性を触覚で知覚することを可能とする。

1. はじめに

人間の身体・認知・知覚能力の拡張を目指した研究がある。これらの研究では、身体の到達範囲外の物体に対するインタラクション手法 [1] や人間が持ちえない感覚の獲得手法 [2] について検討されている。そのため、人間生来の特性や時間・空間の制約から解放された新たな生活様式を提供することが期待できる。

知覚能力の拡張の一つに触覚能力の拡張を目指す研究がある。Tanabe らは CG 手腕を介してインタラクションした遠隔物体の凹凸をユーザにフィードバックするシステムである fARFEEL を提案した [3]。これにより、ユーザは遠隔物体まで移動することなく物体の触覚情報を知覚することができる。また、Maeda らは、ユーザが物体をなぞった際に生じる振動を増幅してユーザの手首にフィードバックすることでユーザは物体形状を容易に知覚することができる HapticAid と呼ばれるウェアラブルデバイスを提案した [4]。しかしこれらの研究では、遠隔物体の微細な触覚情報を非接触で得て、それをユーザに提示することは想定されていない。

本研究では、遠隔物体の素材や表面属性に基づいた触覚情報を計測し、ユーザが知覚可能な刺激として提示することで触覚能力の拡張を目指す。そこで、遠隔物体のレーザスペckル変動をイベントカメラにより計測して振動刺激に変換し、ユーザの指先にフィードバックする触覚拡張システムを提案する (図 1)。輝度変動に高速に反応するイベントカメラを用いて、振動に応じて変動するレーザスペckル

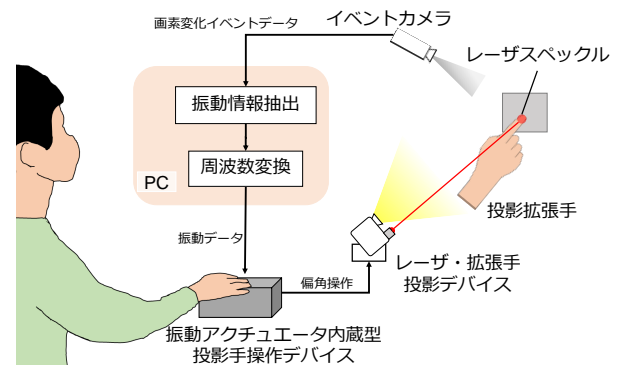


図 1 提案システムの概要図

ckルの微小変動を取得する。そして、物体の違いによって生じる周波数応答特性の違いを基にした振動刺激をフィードバックすることで、ユーザが遠隔物体の素材や表面属性を触覚で知覚することを可能とする。このとき、遠隔物体にレーザと同時に CG 手腕 (以下、投影拡張手) を投影することでユーザが直観的に振動刺激と現実空間とを対応付けられるようにする。

2. 提案システム

2.1 システム概要

投影拡張手の人差し指の指先とレーザの振動計測点が一致するように投影拡張手を投影する。このとき、ユーザは投影拡張手操作デバイスを用いて、拡張手を操作することができる。そして、レーザスペckルの変動をイベントカメラで計測し、得られた結果に基づいて拡張手操作デバイスを振動させることでユーザに遠隔物体の触覚情報をフィードバックする。ここで、人が知覚できる振動の周波

¹ 大阪大学 大学院基礎工学研究科

^{a)} okamoto@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp

数帯は計測可能な周波数帯よりも狭いため、得られた計測結果に対して周波数変換を行うことで調整する。

2.2 レーザスペckル振動計測

レーザは周波数と位相が整ったコヒーレント光であり、物体表面の微細な凹凸によってレーザスペckルと呼ばれる干渉縞が生じる。この干渉縞は一般的に物体の僅かな変動に対しても模様が大きく変動する。しかし、非合焦のレンズを物体との間に設置して観察した場合には、干渉縞の模様が一定に保たれ、物体の振動に応じて平行移動量のみが変動することが知られている [5]。そこで本システムでは、イベントカメラのレンズを非合焦させた時のレーザスペckルの変動を計測することで、遠隔物体の振動情報を取得する。

2.3 イベントカメラ

イベントカメラはイベントと呼ばれる輝度の変動を検出し、そのイベントの発生時間、発生位置、増加/減少方向を出力するカメラである。通常のカメラでは、指定されたレートでイメージセンサ全体のデータを出力する一方で、イベントカメラでは、イメージセンサの画素ごとに独立した非同期処理を行っており、一定輝度の変動が生じた画素のデータのみを出力する。そのため、一般的に通常のカメラよりも高フレームレートでの計測を行うことができ、高速変動する物体の計測などに利用されている [6]。本システムでは、レーザスペckルが平行移動した際に生じる模様の輝度変動を高速で取得するために、数 kHz の高フレームレートで輝度変動を取得することができるイベントカメラを用いる。

3. システム実装

本システムは、レーザを投影してイベントカメラでレーザスペckルの変動を計測する振動計測部と、投影拡張手の操作と振動フィードバックの提示が行われる振動フィードバック部で構成される。

3.1 振動計測部

振動計測部は赤色レーザ光源、イベントカメラ (iniVation 社製, DVXplorer)、ハーフミラー (THORLABS 社製, CCM1-BS013/M)、モータ (Keigan 社製, KM-1U)、プロジェクタ (Optoma 社製, ML1050ST+) で構成される (図 2)。レーザ光源とイベントカメラをハーフミラーを用いて同軸系とすることで、レーザとイベントカメラの位置関係を一定にしている (図 2(a))。本システムでは、振動計測部の下部にモータを取り付けることで複数箇所へのレーザ計測を可能にしている。また、プロジェクタをレーザ光源・イベントカメラと一体化させることにより、計測物体の位置によらず投影拡張手とレーザの関係を一常にす

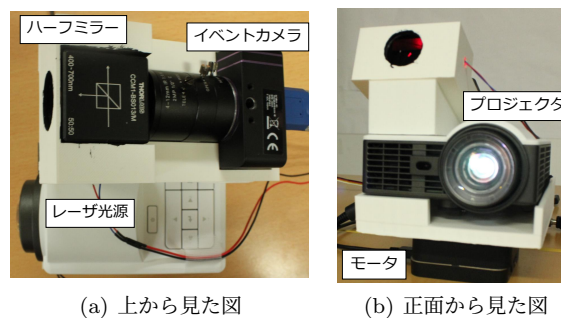


図 2 振動計測部

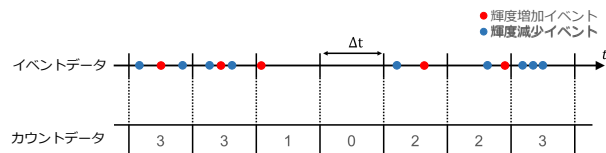


図 3 イベントカメラによる変動画素数の計測手法

ることができる。

イベントカメラは非同期かつ画素ごとに独立したイベントを取得する。そのため、周波数解析を行うためにはイベントのデータ列から一定サンプル時間の時系列データに変換する必要がある。本システムでは、ある時間 Δt (サンプリング周波数 $f_s = 1/\Delta t$) ごとに発生したイベント数をカウントしてカウントデータを作成する (図 3)。このとき、計測可能な最大周波数 f は $f = f_s/2$ となる。通常のカメラでは最大周波数が 60 Hz であるのに対して、本システムではイベントカメラの最大サンプリング周波数が 15 kHz であるため最大周波数は 7.5 kHz となる。

3.2 振動フィードバック部

振動フィードバック部は、ジョイスティック (M5Stack 社製, UNIT JOYSTICK) とボイスコイル型の振動アクチュエータ (BitTradeOne 社製, ADTEDS) で構成される (図 4)。ユーザはジョイスティックに人差し指を置いて左右に傾けることで振動計測部の下部に設置したモータを回転させ、投影拡張手を操作する。また、2 個の振動アクチュエータをジョイスティックの下部に設置しており、これらのアクチュエータで振動を発生させることでユーザに振動フィードバックを提示する。

3.3 周波数変換

振動計測部で得られた結果に対して周波数変換を行うことで、振動アクチュエータを振動させる振動データを作成する。人の振動知覚能力には制限があり、振動検出を行う受容器である SA II でも最大 1 kHz 程度の振動しか検知することができない [7]。そこで、提示する振動データに対して人が検知することができる範囲に周波数変換を行う。本システムでは、簡易化のために周波数を線形圧縮することで、振動データを作成している (図 5)。

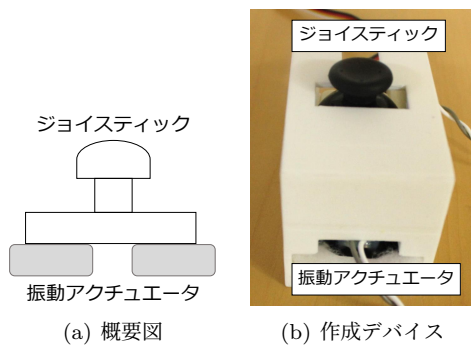


図 4 振動フィードバック部

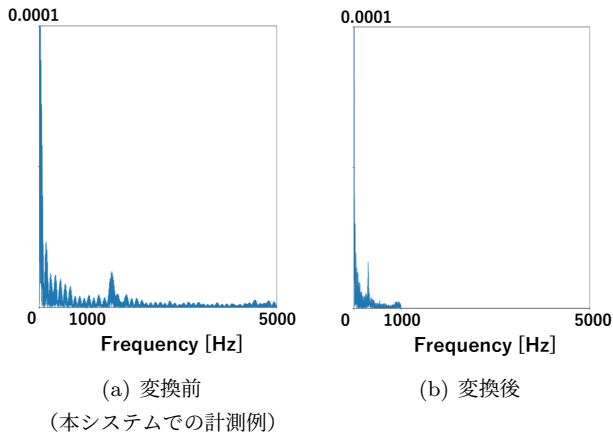


図 5 周波数変換

3.4 全体の様子

振動計測部と振動フィードバック部を統合したシステムを図 6 に示す。振動フィードバック部のジョイスティックによって振動計測部のモータを回転させることで投影拡張手を操作する。また、イベントカメラで振動計測を常に行い、振動フィードバックを提示している。これにより、遠隔の振動をユーザにフィードバックすることができる。

4. おわりに

本研究では、イベントカメラを用いてレーザスペckル振動計測を行い、その計測結果に応じた振動をユーザにフィードバックすることで遠隔物体の触覚情報を知覚させる触覚拡張システムを提案した。今後は、振動データの周波数変換を簡易的に線形変換するのではなく適応的に行うことで、触覚感度や分解能を向上させる等その他、遠隔地との共有コミュニケーションを行う複合現実空間における遠隔共有物体の内部構造などの不可視な情報の違いを直観的に提示する手法について調査していく。

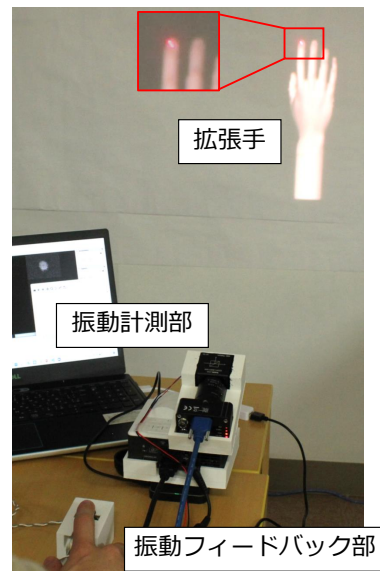


図 6 実装システムの全体図

参考文献

- [1] Ueda, Y., Asai, Y., Enomoto, K., Wang, K., Iwai, D., and Sato, K.: Body Cyberization by Spatial Augmented Reality for Reaching unreachable world, *Proceeding of Augmented Human International Conference*, pp. 1–9 (2017)
- [2] Novich, S. D., and Eagleman, D. M.: Using space and time to encode vibrotactile information: toward an estimate of the skin’s achievable throughput, *Experimental brain research*, Vol. 233, No. 10, pp. 2777–2788 (2015)
- [3] Tanabe, N., Sato, Y., Morita, K., Inagaki, M., Fujino, Y., Punpongsonon, P., Matsukura, H., Iwai, D., and Sato, K.: fARFEEL: Providing Haptic Sensation of Touched Objects using Visuo-Haptic Feedback, *Proceedings of IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, pp. 1355–1356 (2019).
- [4] Maeda, T., Tsuchiya, K., Peiris, R., Tanaka, Y., and Minamizawa, K.: HapticAid: Haptic Experiences System using Mobile Platform, *Proceedings of the Eleventh International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction*, pp. 397–402 (2017).
- [5] Zalevsky, Z., Beiderman, Y., Margalit, I., Gingold, S., Teicher, M., Mico, V., and Garcia, J.: Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern, *Optics express*, Vol. 17, No. 24, pp. 21566–21580 (2009).
- [6] Rebecq, H., Ranftl, R., Koltun, V., and Scaramuzza, D.: High Speed and High Dynamic Range Video with an Event Camera, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 43, No. 6, pp. 1964–1980 (2021).
- [7] Bolanowski Jr, S. J., Gescheider, G. A., Verrillo, R. T., and Checkosky, C. M.: Four channels mediate the mechanical aspects of touch, *The Journal of the Acoustical society of America*, Vol. 84, No. 5, pp.1680–1694 (1988).