



# 手首装着型レーザスペckル振動計測を活用した 触覚拡張による遠方物体の不可視情報識別

Invisible Information Discrimination of Distant Objects by Haptic Augmentation  
based on Wrist Mounted Laser Speckle Vibration Measurement

花井俊, 岡本祥宏, 佐藤優志, 岩井大輔, 佐藤宏介

Shun HANAI, Yoshihiro OKAMOTO, Yushi SATO, Daisuke IWAI, and Kosuke SATO

大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3, shun.hanai@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp)

**概要:** 本研究は, 遠方物体の微細な振動情報および内部充填率をユーザに伝達するための手首装着型レーザスペckル振動計測システムを提案する. イベントカメラとレーザモジュールを組み合わせ, 取得した振動データをユーザの指先に設置した振動アクチュエータを通じてフィードバックすることで, 視覚に依存せず不可視情報を知覚できるシステムを構築した. 内部充填率の識別実験では, 0%, 50%, 100%の充填率を持つ PLA 製立方体に対して異なる周波数のプローブ振動を適用し, 得られたデータを SVM で解析することで, 高精度な識別が可能であることを確認した.

**キーワード:** ウェアラブル, 身体拡張, レーザスペckル

## 1. はじめに

近年, 人工知能やロボット工学, バイオテクノロジーなどの技術革新により, 人間の身体的・認知的能力を超えた「人間拡張」が活発に研究されている. その中でも特に, 人間の五感を超えた情報を取得し, 新たな知覚チャンネルを創出する研究が注目を集めており, その一つに, 遠くの物体の材質や形状, 内部情報等をユーザに知覚させる研究がある.

Tanabe らは専用の触覚提示装置を用いて CG 手腕像が触れている遠くの物体の形状をユーザに知覚させる fARFEEL を提案した [1]. また Sato らは, CG 手腕像の触れている物体の材質に応じて, 手腕像の手指を揺らす等の視覚効果を付与することで, 疑似触覚によりその物体材質を知覚させる手法を提案した [2]. 岡本らは, 遠方の物体の微細な振動から生じるレーザスペckル変動を高速イベントカメラにより計測し, それをユーザが知覚可能な振動刺激に変換して, ユーザの示指に触覚提示する触覚拡張システムを実現した. そして, 物体の違いによって生じるレーザスペckル変動の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, ユーザが遠方の物体の振動や内部構造の違いを触覚で知覚することを可能にした [3]. しかし, これらの研究はいずれも据え置き型のシステムを使用しており, 観測系を環境に固定する必要があるため, ユビキタスな利用に乏しいという制約を抱えている.

そのため本稿では, 物体の振動情報や内部充填率など, 見た目では分からない物体の不可視な内部情報をユーザに知覚させる装着型インターフェースの構築を目指す. 図 1 に本稿で提案する触覚拡張の概要図を示す. 装着型にすることでシステムの可搬性や振動知覚の直観性の向上が狙える

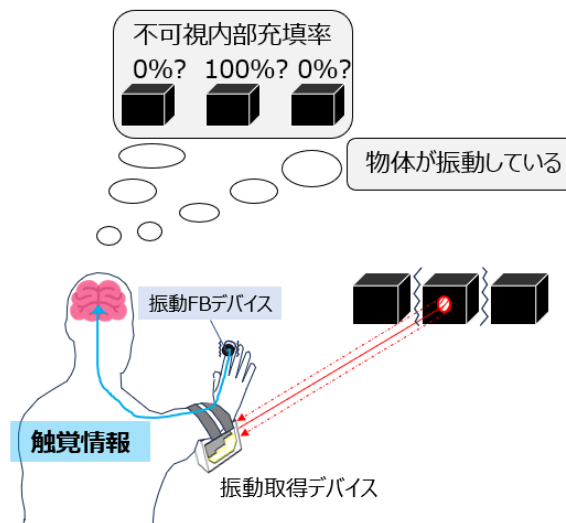


図 1: 指先を伸長する触覚拡張の概要

一方, 体動ノイズによる影響を振動計測の際に考慮する必要がある. 以前の研究によって, 手首装着型システムにおいては, 低周波数帯の雑音が顕著に結果に現れることや, 全体的に低強度の雑音が見ることが確認できた. しかし, 手首装着時にも固定条件と同様の周波数信号を観測できるため, 閾値処理によって十分遠方物体の振動を観測可能であることが明らかになった [4]. 本稿では, まず初めに手首装着型システムのハウジング, 体動ノイズが振動計測に与える影響を加味した振動計測手法について述べる. その後, 本来不可知の内部情報として物体の内部充填率に焦点を当て, 本システムにおける内部充填率の識別手法について述べる.

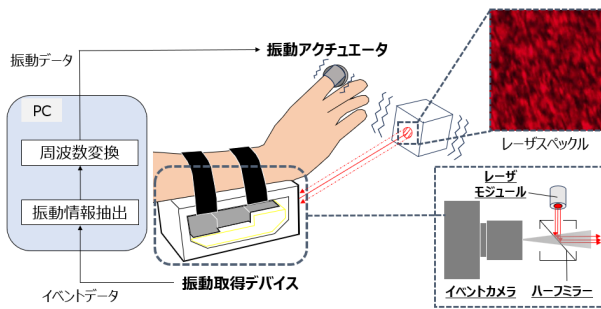


図 2: 提案するシステム構成

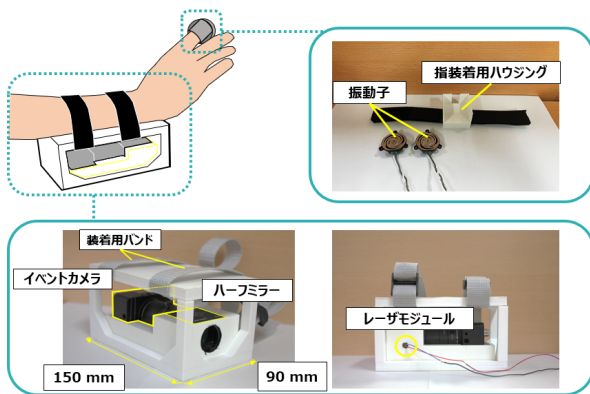


図 3: 実装システム

## 2. 提案手法

本章では、まず本稿で提案するシステムの概要を述べる。その後、岡本らの研究を参考にした観測手法と実装システム、体動ノイズを加味した計測手法について述べる。

### 2.1 提案するシステム構成

本稿で提案するシステムの詳細を図 2 に示す。イベントカメラ、レーザモジュール、ハーフミラーを統合したデバイスを腕に固定し、振動フィードバック用のアクチュエータを指先に装着する。これにより、レーザスペckルを観測し、ユーザに振動刺激として観測データをフィードバックさせる手首装着型デバイスを実現する。イベントカメラにて、遠方物体の微小な変動から生じるレーザスペckルの輝度変化を観測し、光量変化データをユーザが知覚できる振動データに変換することで、ユーザが直観的に遠方物体の変化を知覚できることが期待される。

### 2.2 実装システム

実装システムを図 2 に示す。本システムは主に振動提示部(図 3 上部)と振動計測部(図 3 下部)に分かれる。振動提示部は振動アクチュエータ(BitTradeOne 社製, ADTEDS)と、3D プリンタとバンドを用いて作成した指装着用ハウジングで構成される。振動計測部は赤色レーザモジュール、イベントカメラ(iniVation 社製, DVXplorer), ハーフミラー(THORLABS 社製, CCM1-BS013/M)で構成される。3D プリンタでレーザ・カメラ固定台を作成することで、レーザ光とイベントカメラをハーフミラーを用いて同軸系にしている。これにより、レーザ光とイベントカメラの位

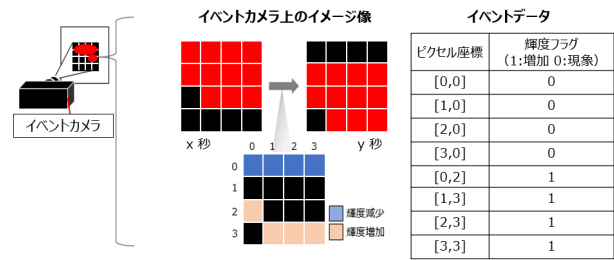


図 4: イベントカメラによる計測システムフロー

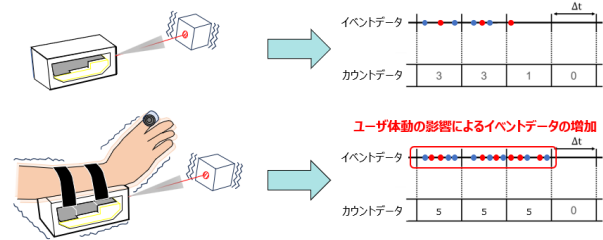


図 5: 手首装着時のイベントデータへの影響

置関係を対象との距離に依存しないように固定した。また、計測デバイスを 3D プリンタのハウジングで囲み、手首装着用のバンドを取り付けることで装着型の振動計測部を設計、実装した。

### 2.3 イベントカメラを活用した遠方物体振動知覚システム

本節では、岡本らの先行研究を参考にし、遠方物体に対するイベントカメラを活用したレーザスペckル振動計測について述べる。レーザは周波数と位相が整ったコヒーレント光であり、物体表面の微細な凸凹によってレーザスペckルと呼ばれる干渉縞が生じる。この干渉縞を非焦点のカメラで観察すると、干渉縞のパターンが物体の振動に応じて平行移動する [5]。この現象を利用し、レーザスペckル像の画像変位を計測することで、遠方の振動物体の振動情報を取得する。

レーザスペckル像の平行移動によって生じる各画素の輝度変動を迅速に取得するために、数十  $\mu\text{s}$  の時間解像度で動作するイベントカメラを用いる。イベントカメラは画素ごとに独立しており、一定輝度の変動があった場合のみデジタルデータ(以下、イベントデータ)を出力する。この特性により、一般的に通常のカメラよりも高いフレームレートでの計測が可能であり、発生時刻、位置、増加/減少方向などのイベントデータを迅速に取得できる(図 4)。こちらのイベントカメラを活用し、 $\Delta t$ 秒ごとに発生するイベントデータの数をカウントする。そして、カウントしたデータに対して高速フーリエ変換(FFT)を施すことで、遠方物体の振動周波数を取得する。これにより、物体に直接触れることなく、レーザスペckルの変化から振動情報を取得することが可能となる [3]。

### 2.4 手首装着時におけるノイズ除去

先ほどレーザスペckルを活用した振動計測に関して述べたが、デバイスの手首装着時には、観測できるイベントデータにユーザ体動由来の振動に基づく信号がノイズとし

て混入することが考えられる(図5)。しかし、先行研究により、手首装着時に体動ノイズが計測結果に及ぼす影響として、低周波数帯における高強度の雑音ノイズと、全周波数帯における低強度ノイズが発生することが示された[5]。そのため、本稿では計測時に閾値処理に基づくノイズ除去を行うことで、体動に基づくノイズの影響を抑える手法を提案手法に組み込むことを考える。これにより、遠方物体の振動計測時における、ユーザ体動に対する頑健性の向上が期待される。

### 3. 遠方物体の不可視内部充填率識別調査

遠方物体の不可視な内部充填率をユーザが識別する際の手がかりを明らかにするために調査を行った。本稿では、計測物体として、外観が同じであるが内部充填率が異なる3種類のPLA製立方体を用意した。それぞれの大きさは一辺40 mmの立方体であり、内部充填率は0%(空洞)、50%、100%である。内部充填率が異なる物体間において、10から1000 Hzのsin波から成るチャープ信号を用いたプローブ振動による事前調査を行った。その結果、計測物体に入力するプローブ振動の周波数によって、計測結果の波形特徴に違いが発生することが分かっている。この事前調査を受け、本稿では200,400,800 Hzの正弦波から成るプローブ振動を計測物体に入力し、それぞれの計測結果から、SVM(Support Vector Machine)を用いて実際に分類ができるか調査した。これにより、充填率分類のための手がかりになる要因についての見解について報告する。

#### 3.1 実験

実験の様子を図6に示す。計測物体は一辺40 mmのPLA製立方体であり、表面にはレーザスペックルが観測しやすいよう、再帰性反射シートを張り付けてある。こちらの計測物体を計測物体後方に設置してある振動子により振動させ、内部充填率が異なる計測物体それぞれに対して0.5 m離れた地点からの計測を行った。なお、振動子を駆動するプローブ信号として、200 Hz、400 Hz、800 Hzの正弦波信号をそれぞれ150 sずつ入力した。カウントデータ作成時のイベントカメラのサンプリング周波数を4000 Hzとし、0.1 s計測したデータを1サンプルとして1500サンプルのデータを記録した。

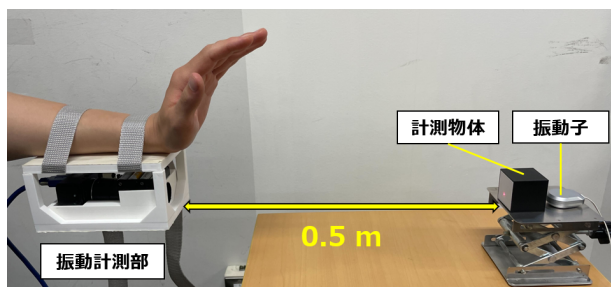


図6: 実験の様子

### 3.2 結果

#### 3.2.1 計測結果のカラーマップ表示

10 s分の計測結果を図7に示す。なお、2.4節の閾値除去処理を用いて、体動ノイズと思われる0から50 Hzの周波数帯の信号をあらかじめ除去している。また、サンプリング周波数の倍音ノイズと考えられる950から1050 Hz、1950から2000 Hzの周波数帯の信号も前処理として除去している。結果から、入力信号の倍音の周波数と考えられる信号がより顕著に波形の違いとして現れると考えられる。また、200 Hzの場合と400 Hzの場合には0%から100%まで充填率が増えていくにつれて、全体的に信号の強度が大きくなっていることが確認できる。

#### 3.2.2 SVMによる分類結果

3.2.1節の結果から特徴量を抽出し、SVMによる内部充填率分類を行う。本稿では全音特徴量と倍音特徴量の2種類の特徴量から成るデータセットをそれぞれ1000個用意した。前者は、30サンプル分の連続値データを矩形窓とし、窓を1サンプルずつずらしながら特徴量をベクトルとして取得した。なお、それぞれの特徴量は、0から2000 Hzの周波数範囲を200分割した200次元のベクトルである。後者は、入力信号の倍音信号のみに着目したものである。3.2.1節において、入力信号の倍音信号の出方に違いが見られた。そのため、200 Hz、400 Hz、600 Hz、800 Hz、1200 Hz、1400 Hz、1600 Hz、1800 Hzの前後10 Hzの信号を含めて各3次元を取り出した24次元のベクトルから特徴量を構成した。これにより、他の周波数帯に発生する体動由来の低強度ノイズの影響に対して頑健な分類ができることが期待される。なお、SVM分類にあたり、カーネルとしてRBFカーネル、Polyカーネルの2種類を用意した。分類精度の結果を表1に示す。RBFカーネルとPolyカーネルを用いた結果において、いずれも高い識別精度で内部充填率を分類できていると考えられる。また、倍音特徴量を用いた分類に着目すると、RBFカーネル400 Hz、Polyカーネル200 Hz、800 Hz、の場合において全音特徴量を用いた分類結果よりも識別精度が高いことが示された。

表1: 0%, 50%, 100%分類の分類精度

特徴量	RBF カーネル	Poly カーネル
200Hz 全音	1.0	0.933
200Hz 倍音	1.0	1.0
400Hz 全音	0.973	0.967
400Hz 倍音	0.983	0.967
800Hz 全音	0.933	0.958
800Hz 倍音	0.908	0.975



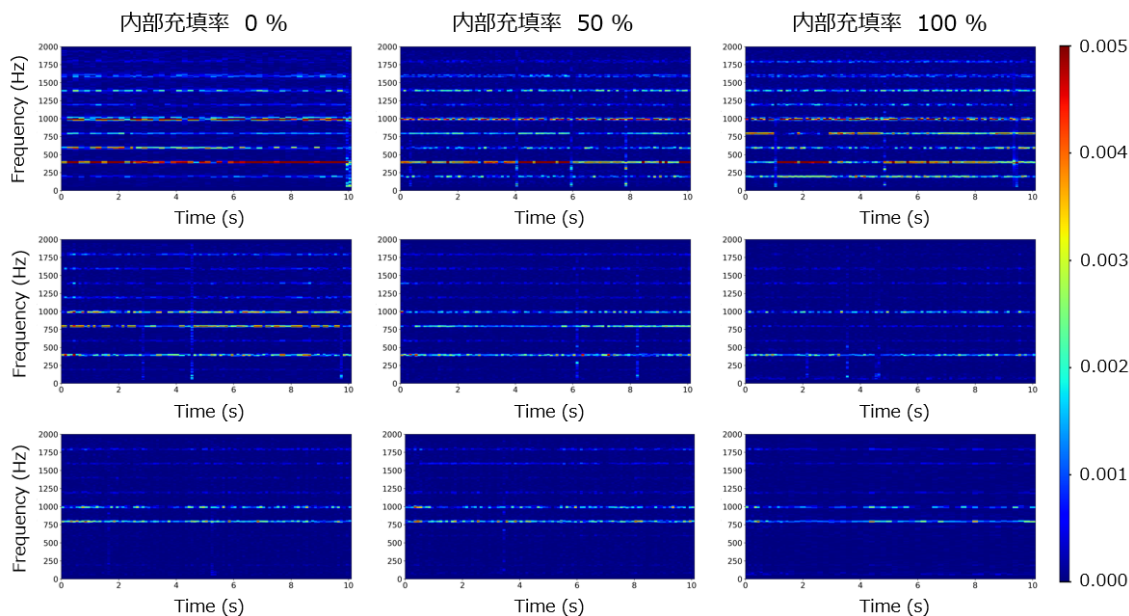


図 7: 計測結果のカラーマップ表示 (上段: 200 Hz, 中段: 400 Hz, 下段: 800 Hz)

### 3.3 考察

結果のカラーマップ表示および SVM 分類の結果から、手首装着型の本システムを用いて内部充填率を判別することが十分に可能であると考えられる。また、充填率判別の手がかりとして、入力信号の倍音成分の出現パターンが充填率ごとに異なることが有用であること示された。特に、倍音信号の強度に注目することで、より精度の高い判別が可能であることが明らかになった。

加えて、物体を加振するプローブ振動の周波数が低いほど分類精度が向上する傾向が見られた。これは、入力するプローブ振動の周波数の整数倍の倍音信号が高い強度で検出され、その情報が充填率判別に有効であるためと考えられる。倍音信号のみに着目する手法は、体動ノイズの影響を受ける低周波数帯のノイズや低強度のノイズに対しても頑健であり、分類精度向上につながる可能性があることも本実験結果から示された。

### 3.4 まとめ

本稿では、イベントカメラとレーザモジュールを組み合わせて、それを手首に装着し、取得した振動データを利用することで不可視内部充填率を識別できるウェアラブルシステムを構築した。内部充填率の識別実験では、0%、50%、100%の充填率を持つ PLA 製立方体に対して異なる周波数のプローブ振動を適用し、得られたデータを SVM で解析することで、高精度な識別が可能であることを確認した。また、内部充填率判別の手がかりとして、遠方物体を加振するための入力信号の倍音成分の出現パターンが充填率ごとに異なるため、それらの成分に着目することが有効であることが示された。今後はユーザへの適切な振動フィードバックシステムを組み合わせ、触覚情報からの内部充填率識別、振動情報識別のための被験者実験を行うことで、本システムの有用性について調査することを考えている。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 JP23K26073 の助成を受けたものです。

### 参考文献

- [1] Naruki Tanabe, Yushi Sato, Kohei Morita, Michiya Inagaki, Yuichi Fujino, Parinya Punpongsonon, Haruka Matsukura, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato: fARFEEL: Providing haptic sensation of touched objects using visuo-haptic feedback; IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 1355–1356 (2019)
- [2] Yushi Sato, Takefumi Hiraki, Naruki Tanabe, Haruka Matsukura, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato: Modifying texture perception with pseudohaptic feedback for a projected virtual hand interface; IEEE Access, 8, 120473–120488 (2020)
- [3] 岡本祥宏, 佐藤優志, 岩井大輔, 佐藤宏介. (2023). 投影拡張手指示指部にレーザスペckル振動計測機能を有する遠方触覚拡張. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 28(3), 165-174.
- [4] 花井俊, 岡本祥宏, 岩井大輔, 佐藤宏介, "手首装着型レーザスペckル振動計測による遠方触覚拡張", 第 68 回システム制御情報学会研究発表講演会講演論文集 (SCI'24), pp.973-976, 2024.
- [5] Zeev Zalevsky, Yevgeny Beiderman, Israel Margalit, Shimshon Gingold, Mina Teicher, Vicente Mico, and Javier Garcia: Simultaneous remote extraction of multiple speech sources and heart beats from secondary speckles pattern; Optics express, 17(24), 21566–21580 (2009)