



ビジョントラッキングを用いた 指先のレーザドップラ振動計測

Laser Doppler Vibrometry of Fingertips using Vision-based Tracking

立岩悠翔¹⁾, 岩井大輔¹⁾

Yuto TATEIWA, and Daisuke IWAI

1) 大阪大学 大学院基礎工学系研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3)

概要: 本研究では、指先と対象物体との接触時の振動を無拘束で計測することを目的とする。提案手法では、指先が物体と接触することで指先の微小振動が変化することに着目し、トラッキング用カメラをレーザドップラ振動計のレーザ参照光と同軸に配置し、二軸ミラーによって指先に追従させ微小振動を計測する。プロトタイプを実装し、異なる形状を持つ表面に対して接触時の指先振動を計測した。

キーワード: レーザドップラ振動計, 二軸ミラー, ビジョントラッキング

1. はじめに

指先の振動計測では、人が物体に触れている際の触覚に関する情報や触れている物体の材質や物体に対する触り方などがわかる可能性がある。そのため、手指先の振動を計測することは、リアルな触覚提示のための手指先と物体の接触時の振動取得、指の振動データから人の触覚原理の解明等への活用が期待でき、研究がなされている [1][2]。物体や人体にセンサを配置することなく手指先のセンシングを可能にする方法として、移動する表面から散乱された光の周波数シフトを検出することで物体の速度を計測するレーザドップラ振動計がある [3][4]。

Manfredi ら [5] は固定した手指先に対して、様々な表面形状を持つ物体を押し当てながらスライドさせ、その際の指先振動をレーザドップラ振動計によって計測した。レーザドップラ振動計による非接触な振動計測システムが提案される一方で、実際に人が物体に接触する状況では指先は拘束されず自由に動かすことが可能であることが自然である。宮下ら [6] はレーザドップラ振動計をミラーに反射させ、ミラーを偏向することでレーザ光の照射方向を制御し、動的物体の振動計測を行った。この手法を用いることで、指先の位置姿勢に合わせてレーザ光の照射方向を制御し、指先振動を動的に取得することが可能となる。

そこで本研究では、動的に手指先の振動を非接触、無拘束で取得する方法として、二軸偏向ミラーにレーザドップラ振動計のレーザ光を反射させ、移動する手指先を追従しながら振動を計測する。

2. 追従型振動計測システム

2.1 システム概要

本システムでは、手指先位置の追従を実現するため、カメラとレーザ光をビームスプリッタを用いて同軸に設置す

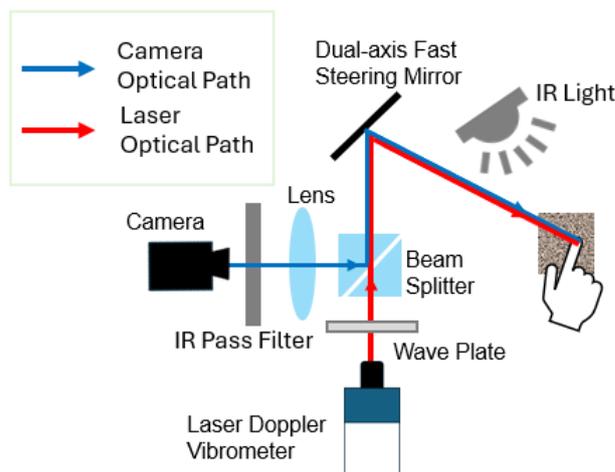


図 1: システムの構成

る。これにより、カメラで取得した画像中心に常にレーザ光が照射される。カメラで取得した画像内での追従対象の手指先座標を検出し、手指先をカメラの中心に捉え続けるようにミラーを制御することでレーザ光の指先追従を可能にする。本システムの構成を図 1 に示す。

2.2 画像取得

本システムにおいて、カメラとレーザドップラ振動計を同軸設置するためのビームスプリッタと、レーザ光とカメラの偏向をするためのミラーの設置が必要となる。しかし、ビームスプリッタやミラーの大きさはカメラの画角に対して十分な大きさではなく、追従対象の手指先領域が画像内にごく小さな領域しか写らないという問題が生じる。この問題を解決するため、複数のレンズを設置しカメラの入射瞳をミラー付近に転送することで、カメラに入射する光線

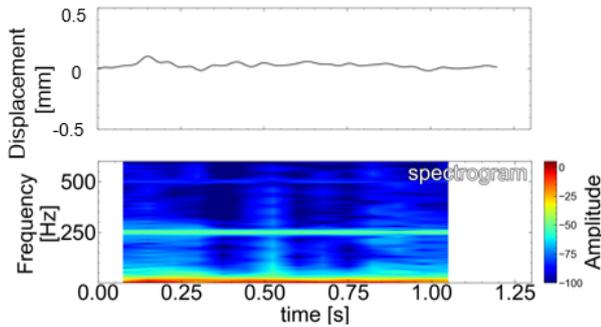


図 2: 250 Hz の純音計測での振動データ

のほとんどがミラーから反射された光線となるようにした。これにより、小さいミラーでも追従領域を十分な大きさに撮影することが可能となった。

2.3 振動取得

ビームスプリッタによってレーザドップラ振動計のレーザ参照光は透過光と反射光に分割される。振動計測に利用するのは透過光のみであるため、分割される反射光の割合を低減する必要がある。そのため、ビームスプリッタには偏光ビームスプリッタを利用し、さらに波長板を用いることでレーザ光の偏光状態を調整することで、ビームスプリッタで分割されるレーザ光の透過光の割合を増大させた。偏光ビームスプリッタ、波長板を通してのレーザドップラ振動計測が可能かを検証した。ミラーには電源を入れない状態で、250 Hz の純音を鳴らしている物体に対して、波長板、ビームスプリッタを透過しミラーに反射されたレーザ光で振動計測を行った結果を図 2 に示す。図 2 から分かる通り、低周波にノイズが見られるが高周波においては正しく 250 Hz が計測できていることが確認できた。

2.4 指先追従

撮影した画像では、レーザ輝点が検出対象の手指先に重なり、検出が困難となる。これに対処するため、可視光カットフィルタをカメラの前に設置し、レーザ輝点が画像に写らないようにした。一方で、可視光をカットすることで撮影した画像全体の輝度が低下するため、手指先に向けて近赤外ライトを照射することで輝度を補った。手指先の検出には、円をテンプレートとしたテンプレートマッチングを利用した。あらかじめ取得しておいたレーザ輝点の画像内の座標と、各フレームで取得した画像に対してマッチングしたテンプレート画像の中心座標との差がゼロとなるようにミラーに P 制御でフィードバックすることで、手指先追従を実現した。指先追従の様子を図 3 に示す。

3. 振動取得実験

実装したシステムを図 4 に示す。実装システムに用いた機器は以下の通りである。

- レーザドップラ振動計
Polytec, VibroGo-200

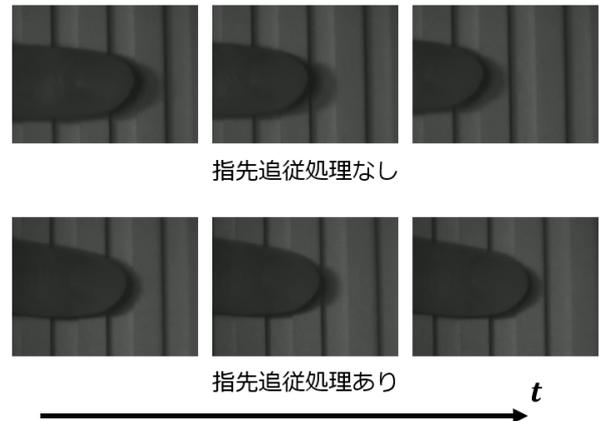


図 3: 指先追従の様子

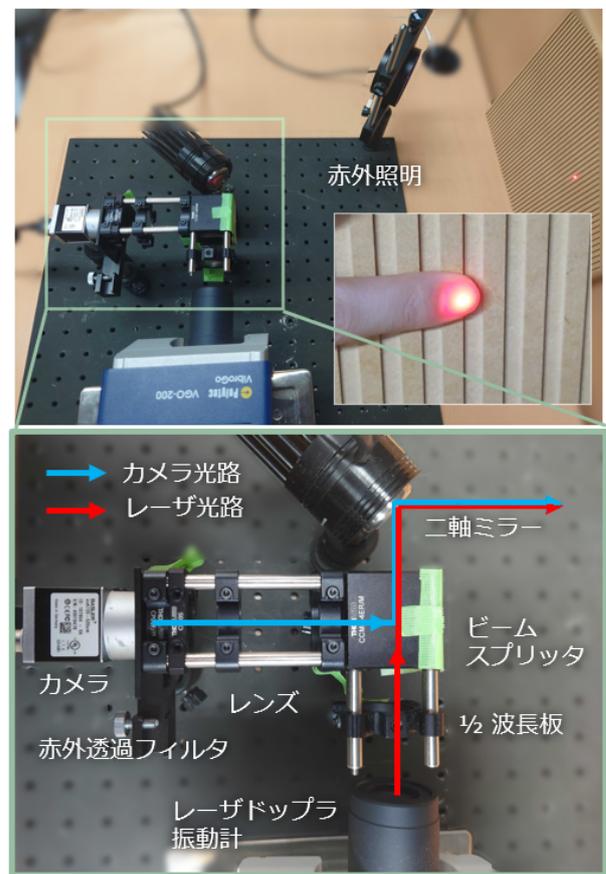


図 4: 実装システム

- 二軸ミラー
Optotune, MR-E-2
- カメラ
Basler, acA720-520um

実装システム用いて複数の異なる凹凸形状を持つ表面に対して指先追従しながら振動計測を行い、表面形状による指先振動の違いを本システムで計測可能か調査した。

3.1 実験条件

計測はサンプリング周波数 218,750 kHz, サンプリング点数 2^{18} で行った。追従性能はカメラのフレームレートに依存する。今回使用したカメラは最大 525 fps であったが、撮影した画像を都度画像処理し、ミラーにフィードバックを行うため、実際は 125 fps 程度であった。手指先を凹凸間隔の異なる木板上でスライドさせた際の振動計測を行った。凹凸の深さは 3 mm, 凹凸の間隔は 3 mm と 6 mm の木板を使用した。また、レーザドップラ振動計から得られるデータは速度であるため、台形近似によって変位へと変換し、変位の時間変化から短時間フーリエ変換を用いてスペクトログラムを作成した。短時間フーリエ変換は窓長 2^{15} , ハニング窓で行った。

3.2 結果

振動計測実験の結果を図 5, 図 6 に示す。変位のグラフから凹凸間隔の広い木板では指先が大きく振動していることが読み取れる。スペクトログラムでは、広間隔凹凸での振動の振幅は狭間隔凹凸での振動の振幅に比べて全体的に大きくなっており、加えて低周波付近での振幅が大きい周波数の範囲も大きくなっているが、高周波において特徴的な違いは見られなかった。

3.3 考察

スペクトログラムにおける振幅が広間隔凹凸において狭間隔凹凸より全体的に大きくなったのは、狭間隔凹凸では指が凹凸の上をなぞるように動いたのに対し、広間隔凹凸では指が凹凸の隙間に入り込み、より大きな摩擦力などが働いたことにより振動が強まったことが原因として考えられる。低周波での振幅が大きくなっているのは、材質との接触による指先振動よりも指の大域的な運動によるノイズの影響が大きい可能性が高い。また、高周波において特徴的な違いが見られなかったのは、接触対象の材質は同一であったため、材質によって発生する手指先の細かな振動に違いがなかったためであると考えられる。

4. おわりに

本研究では、非接触で無拘束に手指先を追従し、振動を計測するシステムを提案し、ビジョントラッキングを用いて指先を検出しながらカメラと同軸に設置したレーザドップラ振動計で手指先の振動計測を行うシステムを実装した。異なる間隔の凹凸を持つ木板と指の接触時の振動を計測した結果、凹凸間隔が広く指が凹凸の隙間に入る場合、振動が全体的に強まることが示唆された。また、凹凸の形状に沿った指の動きが大きくなることでスペクトログラムの低周波での振幅が大きくなることが示唆された。

今後は、材質の異なる物体との接触時の振動を計測し、材質による振動の高周波成分の違い等に焦点を当てた分析に取り組む。また、追従性能向上のため、カメラの最大フレームレートを活用できるよう改良を行う。

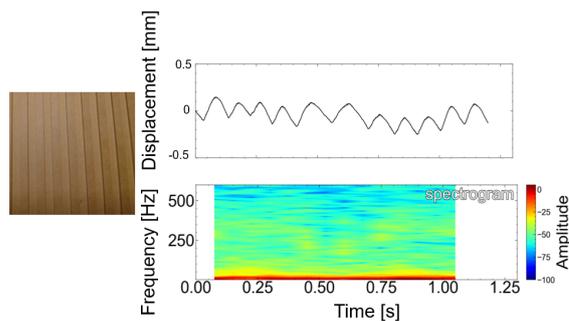


図 5: 広間隔凹凸での振動データ

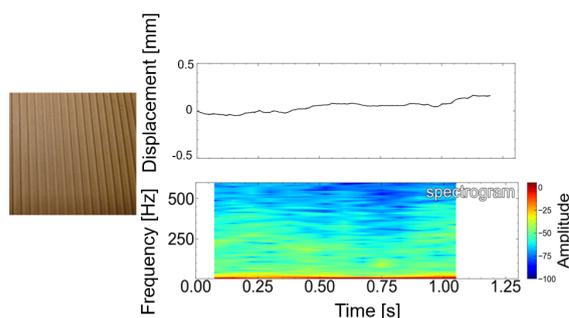


図 6: 狭間隔凹凸での振動データ

参考文献

- [1] 昆陽雅司, 岡本正吾. 振動刺激を用いた疑似力覚提示. 日本ロボット学会誌, Vol. 30, No. 5, pp. 475–477, 2012.
- [2] 小瀬村悠美, 渡邊順平, 石川寛明, 三木則尚. 20pm3-pm013 触覚センサとの連携による疑似触覚の提示と評価. マイクロ・ナノ工学シンポジウム 2014.6, pp. 20pm3-PM0. 一般社団法人 日本機械学会, 2014.
- [3] S Jj Rothberg, MS Allen, Paolo Castellini, Dario Di Maio, JJJ Dirckx, DJ Ewins, Ben J Halkon, P Muysshondt, Nicola Paone, T Ryan, et al. An international review of laser doppler vibrometry: Making light work of vibration measurement. *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 99, pp. 11–22, 2017.
- [4] Paolo Castellini, Milena Martarelli, and Enrico Primo Tomasini. Laser doppler vibrometry: Development of advanced solutions answering to technology's needs. *Mechanical systems and signal processing*, Vol. 20, No. 6, pp. 1265–1285, 2006.
- [5] Louise R Manfredi, Hannes P Saal, Kyler J Brown, Mark C Zielinski, John F Dammann III, Vicky S Polashock, and Sliman J Bensmaia. Natural scenes in tactile texture. *Journal of neurophysiology*, Vol. 111, No. 9, pp. 1792–1802, 2014.
- [6] 宮下令央, 藏悠子, 奥村光平, 奥寛雅, 石川正俊. 高速光軸制御を用いた動的物体の非接触振動計測システム (<特集> 複合現実感 6). 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp. 99–104, 2014.