



# レーザー光照射による熱弾性効果を用いた 空中触覚提示の性能評価

江口満国<sup>1)</sup>, 松下幸太郎<sup>1)</sup>, 平木剛史<sup>2,3)</sup>

Michikuni EGUCHI, Koutaro MATSUSHITA, and Takefumi HIRAKI

1) 筑波大学 大学院人間総合科学研究院 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2,  
{eguchi, matsushita}@pml.slis.tsukuba.ac.jp)

2) クラスター メタバース研究所 (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 8-9-5, t.hiraki@cluster.mu)

3) 筑波大学 図書館情報メディア系 (〒 305-8550 茨城県つくば市春日 1-2)

**概要:** 空中触覚提示はデバイスから触覚刺激の基となるエネルギーを空气中に放出し、それをユーザまで届けることによって非接触で触覚刺激を伝えることができる。しかし、放出したエネルギーは空气中で拡散していくことから高空間解像度をもちつつ様々な強度、周波数の触覚刺激を提示することが難しい。そこで本研究ではエネルギーの拡散が小さい特性を持つレーザー光を光吸収性の弾性媒体に照射することによって生じる熱弾性効果の振動を触覚刺激として利用する。本稿ではレーザー光のエネルギー量やパルスレートを変えた時の弾性媒体の振動の強度や周波数の測定を行った。結果として、本手法が様々な強度・周波数の振動触覚刺激を提示できることを確認した。

**キーワード:** 空中触覚提示、熱弾性効果、短パルスレーザー

## 1. はじめに

空中触覚提示はデバイスから触覚刺激の基となるエネルギーを空气中に放出し、それをユーザまで届けることによって非接触で触覚刺激を伝えることができる。そのためユーザに触覚提示デバイスを装着・接触させる必要が無く、人間の動作に制約を与えないという点からジェスチャーに対する触覚フィードバック [1] や空中触覚ディスプレイ [2] に利用されている。しかし、放出したエネルギーは空气中で拡散していくことから、遠方のユーザに対し高空間解像度の触覚刺激を提示することが難しい。

これに対し、高空間解像度な空中触覚提示の実現のために、さまざまな研究が行われている [3, 4]。これらの研究では既存の手法にエネルギーの拡散を防ぐような改良を加えることで高空間解像度の触覚刺激の提示が実現できている。一方、その改良により提示する触覚刺激の時間周波数に制限が生じるという課題がある。例えば、星らの超音波を用いた手法 [3] では超音波の周波数を高く (40 kHz) することで音波の指向性が増し、触覚刺激の空間解像度の低下が防がれることが報告されている。しかし、低周波数領域では触覚刺激の空間解像度が低下してしまうため、解像度を保ったまま触覚刺激を提示するにはその時間周波数に制限が生じる。また、Sodhi らの圧縮空気を用いた手法 [4] では空気の形状を渦輪とすることで空気の拡散を抑えられ、刺激の空間解像度の低下が防がれることが報告されている。しかし、渦輪を生成するまでに時間がかかるため、低い時間周波数の触覚刺激 (最大で 16 Hz) しか提示できないという問題

がある。この課題に対し、Chung ら [5, 6] は空气中でのエネルギーの拡散が小さい特性を持つレーザー光を用いることで解決を図っている。この手法では短パルスレーザー光を光吸収性の弾性媒体に照射することによって発生する熱弾性効果による振動を触覚刺激として利用する。レーザー光は空气中でのエネルギーの拡散量が少ないことから高空間解像度の触覚刺激の提示ができる。またレーザー光はその各種パラメータを変化させてもエネルギーの拡散特性に大きな変化は生じないため、触覚刺激の空間解像度を維持しつつ、強度や時間周波数を容易に制御できることが見込まれる。しかし、実際にレーザー光の各種パラメータを変えた時の弾性媒体の振動の変化について検証はなされていないため、どの程度の強度や時間周波数の触覚刺激を提示できるかは明らかになっていない。

そこで本稿では、レーザー光照射による熱弾性効果によって様々な強度・時間周波数の振動触覚刺激が提示可能であるか確認することでその空中触覚提示における性能を評価する。具体的には、レーザーのエネルギーやパルスレートを変えた時に弾性媒体の振動がどのように変化するかを検証する。

## 2. 熱弾性効果の原理と触覚提示機器構成

### 2.1 短パルスレーザー光照射による熱弾性効果

レーザー光を振動触覚刺激として活用する時、レーザー光が持つ光エネルギーが振動の力学的なエネルギーへと変換される必要がある。本研究の熱弾性効果を用いた手法で

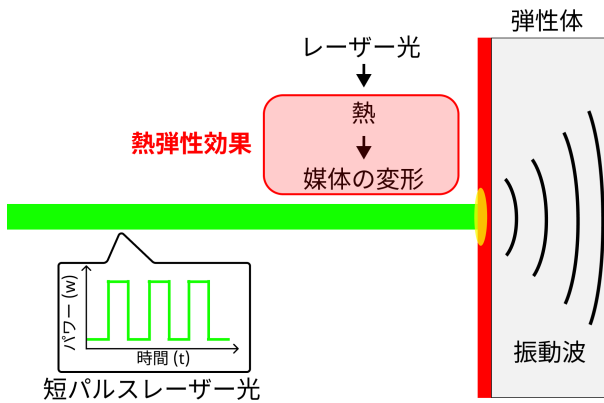


図 1: レーザー光照射による熱弾性効果の模式図

はエネルギー変換の流れの順序が光、熱、力となっており、この熱から力のエネルギーの変換に熱弾性効果が用いられる (図 1)。

まず光吸収性の媒体にレーザー光を照射した際、レーザー光はその媒体に瞬時かつ局所的に吸収される。その吸収の過程でレーザー光の光エネルギーは熱エネルギーに変換され、媒体を加熱する。次に弾性媒体内でレーザー光が照射された位置とその周りで温度分布が発生し、結果として熱応力が発生する。媒体の柔軟性が高い、つまり弾性媒体の場合には媒体内に熱応力に応じた変形が生まれる。この熱から媒体の変形につながる一連の現象が熱弾性効果と呼ばれる。

また、十分に短いパルス長でレーザー光を照射した場合、媒体にはレーザー光のパルスに合わせてインパルス状の変形が生じる。本研究では Chung ら [6] の機器構成を参考にナノ秒オーダーのレーザー発振器を用いることでレーザー光のパルスレートに応じた周波数の振動を媒体に発生させた。

## 2.2 レーザー光のエネルギー量と弾性媒体の振動強度の関係

レーザー光のエネルギー量に対する弾性媒体の振動強度の関係を明らかにするために以下のように立式を行う。まずレーザー光照射によって弾性媒体内に生じる熱量  $Q$  に対する弾性媒体の温度変化量  $\Delta T$  は熱量の公式から式 (1) のように表される。ここでの  $m$ 、 $c$  はそれぞれ弾性媒体の質量、比熱容量を表す。

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} \quad (1)$$

次に媒体の温度変化に対する媒体に生じる応力の変化量  $\Delta\sigma$  は式 (2) のように表されることが知られている。また応力から外力への変換はレーザー光の照射面積  $A$  から式 (3) のように表すことができる。ここでの  $k$  は熱弾性係数、 $T$  は絶対温度を表す。

$$\Delta\sigma = -\frac{\Delta T}{kT} \quad (2)$$

$$\Delta F = \Delta\sigma A \quad (3)$$

弾性媒体をバネ・マス・ダンパ系と仮定した時、媒体に外力  $\Delta F$  がかった時の振動の最大振幅  $x_{max}$  は式 (4) のよ

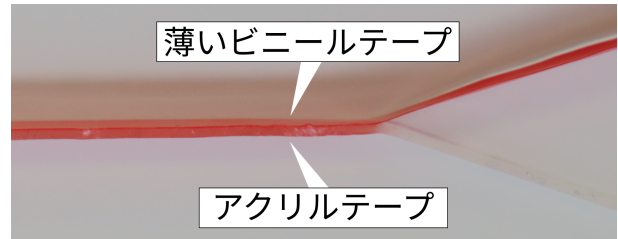


図 2: 弾性媒体の様子

うに表すことができる。ここでの  $\omega$  は角振動数、 $\omega_0$  は共振角振動数、 $\gamma$  は減衰定数を表す。

$$x_{max} = \left| \frac{\Delta F}{m\sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + 4\gamma^2\omega^2}} \right| \quad (4)$$

最後に式 (4) に式 (1) - (3) を代入することでレーザー光によって生じた弾性媒体内の熱量に対して生じる媒体の最大振幅は式 (5) のように表すことができる。ここで熱量がレーザのエネルギー量に対し線形に変化すると仮定すると、この関係式から弾性媒体の振動強度はレーザー光のエネルギー量に 1 次で比例すると分かる。

$$x_{max} = |CQ| \quad (5)$$

$$C = \frac{-A}{m^2ckT\sqrt{(\omega_0 - \omega)^2 + 4\gamma^2\omega^2}}$$

## 2.3 レーザー発振器

本研究では弾性媒体に様々な強度・周波数の振動を発生させるためにレーザー光のパルスエネルギー量、パルスレートをそれぞれ独立に制御することができるレーザー発振器 (Centurion+, LUMIBIRD) を用いた。このレーザー発振器から波長 532 nm、パルス幅 11.5 ns のパルスレーザーが出力される。またレーザー発振器の制御パラメータとして Q スイッチディレイ ( $\mu s$ ) とパルスレート (Hz) があり、それぞれの値を変化させることによりレーザー光のパルスエネルギーを 0~25.5 mJ、パルスレートを 1~100 Hz の間で制御することができる。

## 2.4 弾性媒体

レーザー光による熱弾性効果を効果的に発生させるために図 2 に示すような 2 層構造で厚み 1 mm のテープ (TAP3J10M-10mm, ORIGINCOM) を弾性媒体として採用した。まずこの媒体のレーザー光にさらされる面の方は薄いビニールテープで覆われており、この色をレーザー光の色の補色とすることでエネルギーの吸収率を高めることができる。本研究ではレーザー発振器が出力するレーザー光が緑色 (波長 532 nm) であることから、その補色である赤色とした。弾性媒体の背面は柔らかいアクリルテープとなっておりビニールテープの熱を応力へと変化させる。

## 3. 実験

### 3.1 実験環境

短パルスレーザー光を用いた熱弾性効果による弾性媒体の振動を測定するために図 3 に示すような実験環境を構築した。レーザー発振器は 2.3 節に示すような仕様となって



図 3: 実験装置の構成

おり、実験の際はレーザーエネルギーセンサ (EO12-3S-H2, Edmund Optics) を用いてパルスエネルギーを目標の値に調節したレーザー光を出力した。出力されたレーザー光はガルバノスキャナ (GVS-312M, Thorlabs) によってその照射位置を制御され、スタンド上の弾性媒体に照射される。レーザー発振器とガルバノスキャナはそれぞれ制御用 PC (Dell G15 5511, Dell) からシリアルコマンドを介して制御される。スタンドは 3D プリンタによって造形されており、レーザー光の透過を防ぐためにその背面をアルミ箔テープ (No.AL-50BT, 3M) で覆われている。

振動の測定にはレーザーヘッド (LC-2440, キーエンス) を接続したレーザー変位計 (LC-2400, キーエンス) を用いた。レーザー変位計の出力はオシロスコープ (MSO5074, RIGOL) で観測した。またスタンドとレーザーヘッドはノイズの影響を減らすために除振台 (VPG2836, ナベヤ) の上に設置されている。

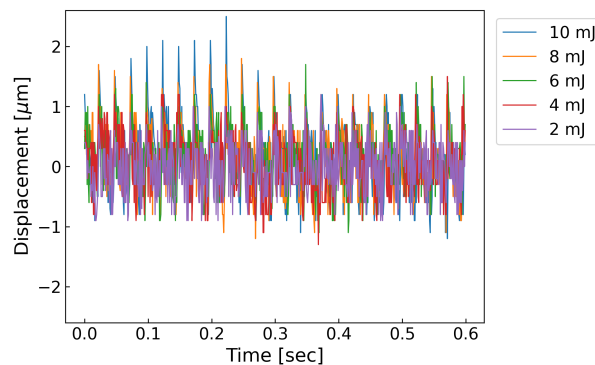
### 3.2 測定条件

本実験ではレーザー光のパルスエネルギー及びパルスレートをそれぞれ独立に変化させて照射した時の弾性媒体の振動の測定を行った。パルスエネルギーは弾性媒体の発火を防ぐために最大で 10 mJ まで、またパルスレートはレーザー発振器が出力できる 1~100 Hz の範囲で測定を行った。

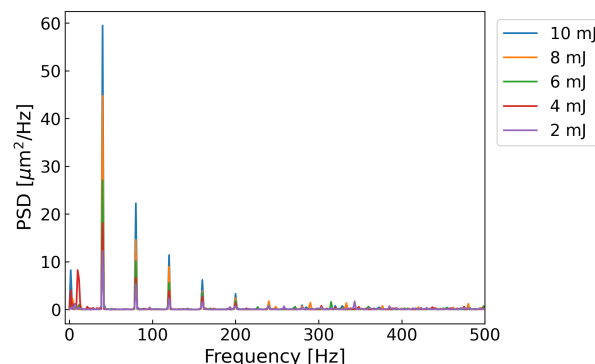
### 3.3 弾性媒体の振動計測

#### 3.3.1 レーザー光のパルスエネルギーを変化させた時

レーザー光のパルスレートを 40 Hz、パルスエネルギーをそれぞれ 2, 4, 6, 8, 10 mJ で照射した時の弾性媒体の振動の測定を行った。その時の弾性媒体の振動の波形とそのパワースペクトラム密度を図 4 に示す。それぞれの振動を並べた波形及び、パワースペクトラム密度から弾性媒体の振動の強度はパルスエネルギーが強くなるにつれ単調に大



(a) 振動波形



(b) パワースペクトル密度

図 4: 異なるパルスエネルギーを持つレーザー光を照射時の弾性媒体の振動の測定結果

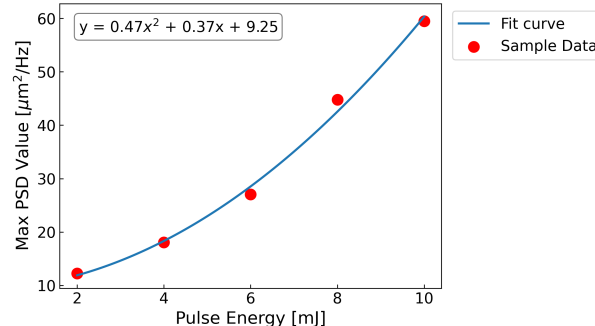


図 5: パルスエネルギー量それぞれの時の最大パワースペクトル密度と近似曲線

きくなることが確認できた。

次に、2.2 節で明らかにしたレーザー光のエネルギー量と振動強度の関係が実験で取得したデータに沿っているか確認を行った。ここでは振動強度の指標としてそれぞれのパルスエネルギーで照射時の振動の最大パワースペクトル密度の値を使用した。そしてパワースペクトル密度の単位は弾性媒体の変位量の 2 乗であることから、2.2 節で明らかにした関係の 2 乗の形である 2 次関数で近似した曲線を当てはめ、データがその通りの関係性になっているかを確認した。実験で取得した各パルスエネルギーに対する最大パワースペクトル密度とそれに近似曲線を当てはめたグラフを図 5 に示す。この図からパルスエネルギーと振動波形の最大パワースペクトル密度の関係は 2 次関数の関係になっている



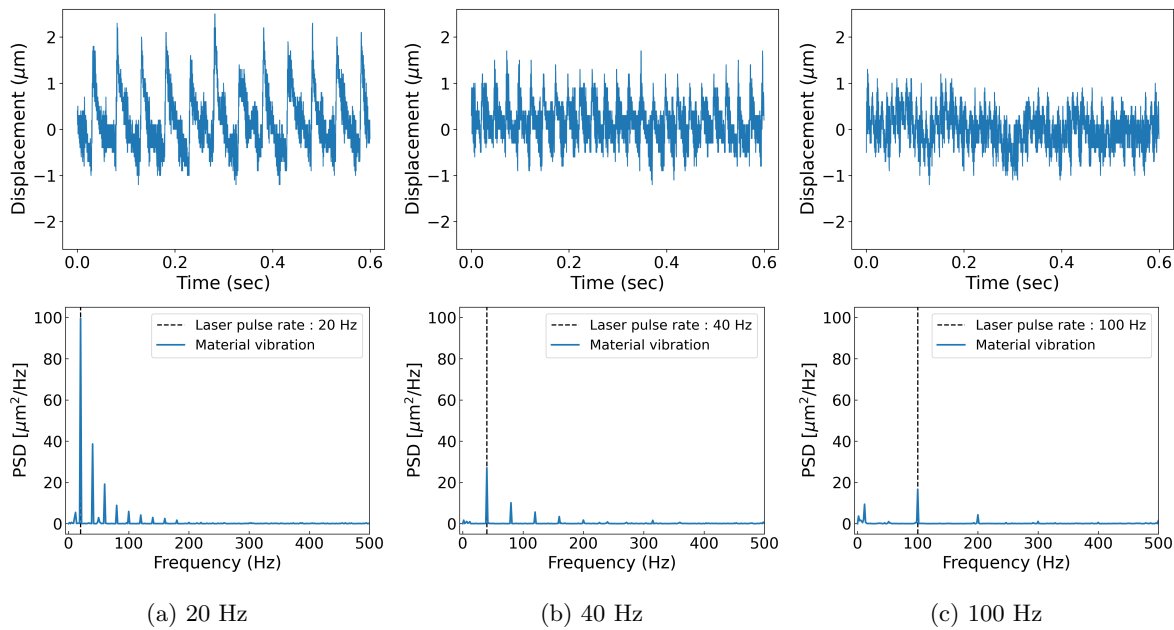


図 6: 異なるパルスレートのレーザー光を照射時の弾性媒体の振動の測定結果

ことが確認できた。ここから、実験で取得したパルスエネルギーと振動強度の関係は 2.2 節で立てた理論通りの関係であると考えられる。

### 3.3.2 レーザー光のパルスレートを変化させた時

レーザー光のパルスエネルギーを 6 mJ、パルスレートを 1~100 Hz で照射した時の弾性媒体の振動の測定を行った。ここではパルスレートが 20、40、100 Hz の時の弾性媒体の振動の波形とそのパワースペクトラム密度を図 6 に示す。図から分かるように測定した全ての弾性媒体の振動においてレーザー光のパルスレートと同じ周波数のスペクトルを主成分にもつ波形が観測された。よって、弾性媒体の振動の周波数は 1~100 Hz まで精度よく制御できると考えられる。

## 4. おわりに

本稿では、高空間解像度をもちつつ様々な周波数・強度の振動触覚刺激を空中で提示可能とするための手法としてレーザー光照射による熱弾性効果を用いた空中触覚提示手法を検討し、その性能評価を行った。レーザー光のエネルギー量やパルスレートといったパラメータを変えた時の弾性媒体の振動の測定を行った結果、制御入力に応じた強度・周波数の振動が生じることを確認した。今後の展望として、弾性媒体の材質・構造と振動の関係性の検証や、この空中触覚提示手法を用いたアプリケーションの開発に取り組んでいく。  
謝辞 本研究は、JSPS 科研費 JP20K19847, JP21H05798, JP23K16918 の助成を受けたものです。

## 参考文献

[1] Gözel Shakeri, John H Williamson, and Stephen Brewster. May the force be with you: Ultrasound haptic feedback for Mid-Air gesture interaction in cars. In *Proceedings of the 10th International Confer-*

*ence on Automotive User Interfaces and Interactive Vehicular Applications*, pp. 1–10, September 2018.

- [2] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. HaptoMime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 663–667, October 2014.
- [3] T Hoshi, M Takahashi, T Iwamoto, and H Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, February 2010.
- [4] Rajinder Sodhi, Ivan Poupyrev, Matthew Glisson, and Ali Israr. AIREAL: interactive tactile experiences in free air. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 32, No. 4, pp. 1–10, July 2013.
- [5] Jae-Hoon Jun, Jong-Rak Park, Sung-Phil Kim, Young Min Bae, Jang-Yeon Park, Hyung-Sik Kim, Seungmoon Choi, Sung Jun Jung, Seung Hwa Park, Dong-Il Yeom, Gu-In Jung, Ji-Sun Kim, and Soon-Cheol Chung. Laser-induced thermoelastic effects can evoke tactile sensations. *Scientific Reports*, Vol. 5, p. 11016, June 2015.
- [6] Hojin Lee, Ji-Sun Kim, Seungmoon Choi, Jae-Hoon Jun, Jong-Rak Park, A-Hee Kim, Han-Byeol Oh, Hyung-Sik Kim, and Soon-Cheol Chung. Mid-air tactile stimulation using laser-induced thermoelastic effects: The first study for indirect radiation. In *2015 IEEE World Haptics Conference*, pp. 374–380, June 2015.