

超音波振動による鏡面反射光の残像効果を利用した粘弾性の推定

青砥 隆仁^{2,a)} 向川 康博^{2,b)}

1. はじめに

物体に外力を与えると変形や流動が生じる。この時、物体の変形のしやすさと物体の流れやすさを併せ持つ性質を粘弾性と呼び、この性質を調べることでより構造・物性の評価や材料設計の効率化、触感の客観的評価による官能評価の補完が可能となることが知られている。特に非接触・非破壊による推定方法は、貴重な試料や繊細な試料を繰り返し使用可能となるため、応用が期待されている。

従来、コンピュータビジョンの分野においても様々な材質を推定する研究が活発に行われてきた。対象物体の光学的特性に基づく手法として、色やテクスチャなどの物体の見えに基づく手法や [6], [7], BRDF やスペクトルなどの物体の反射特性に基づく手法 [3], [5], [9]、時間的インパルス応答の違いにより様々な周波数間で ToF カメラの計測が変化することを利用した手法 [8] がある。しかし、粘弾性の推定には対象物体に応力を加え、その変化を調べる必要があるため、撮影画像のみからの推定は困難である。そのため、非接触・非破壊で対象物体の粘弾性を推定するためには、非接触で対象物体に力学的な応力を与える必要がある。

そこで本研究では、コンピュータ制御可能な超音波振動を用いて粘弾性を推定する手法を提案する。図 1 に提案手法の概念図を示す。超音波アレイから出た音波が対象物体を加振し、対象物体上の形状を微小変化させる。これにより、物体の法線方向が変化するため、入射する光が時間方向に異なる方向に鏡面反射される。そのため、拡散反射板上で観測される陰影は、残像効果により広がりを持って観測される。本手法では、残像効果による陰影情報の変化を利用し、対象物体の粘弾性を推定する。近年、Davis ら [1] は音波により対象物体を加振し、その際起きる物体表面のテクスチャの変化を利用し対象物体の弾性を推定する方法を提案している。また、空気ジェットを用いて対象物体を加振する方法や [4]、レーザードップラー振動計を用いて計

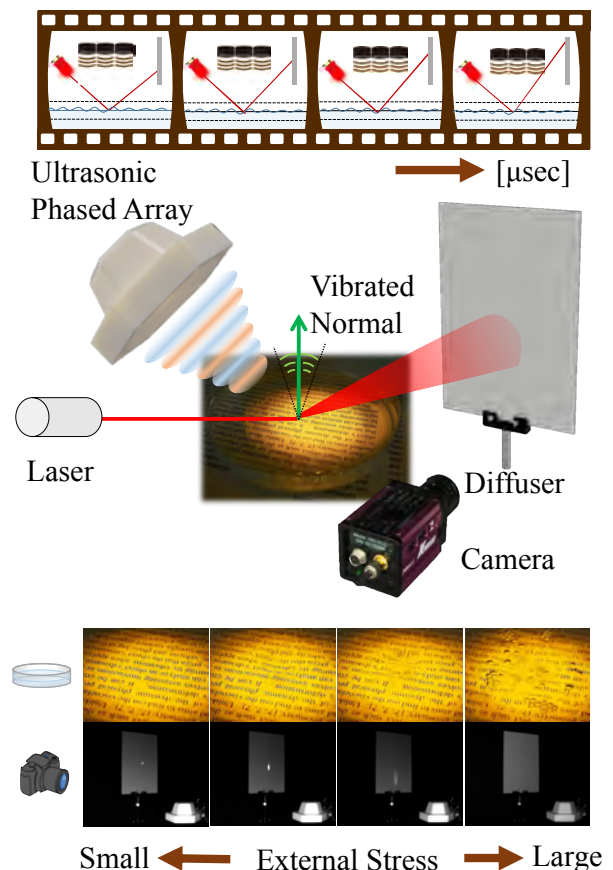


図 1 観測される輝度情報からの動的粘弾性の推定。超音波アレイから放射された疎密波は対象物体（水）を加振する。上段に示すように微小時間で観察した場合、時間によって対象物体の表面形状が異なるため、光源であるレーザーから照射された光は鏡面反射方向が異なるため拡散反射板上の異なる位置で観測される。また下段に示すように、超音波の出力を変更し、対象物体に加える応力を変化させた場合、出力が小さい場合においては対象物体上で変位はあまり観測されず拡散反射板上で観測される範囲も小さい。しかし、応力が増えるにつれ対象物体上の変位が視認できるようになり、拡散反射板上の陰影も広範囲に観測される。さらに変位を強くすると対象物体上に気泡が発生し、鏡面反射光が拡散反射板上で観測できなくなる。

測する手法が存在する [2]。これらの手法は対象物体の変位が計測可能なほど大きい必要があるため、物体を共振させたり強く加振する必要がある。これに対し、提案手法は

¹ 国立情報学研究所, 東京都千代田区一ツ橋 2-1-2
² 奈良先端科学技術大学院大学, 奈良県生駒市高山町 8916-5
^{a)} aoto@nii.ac.jp
^{b)} mukaigawa@is.naist.jp

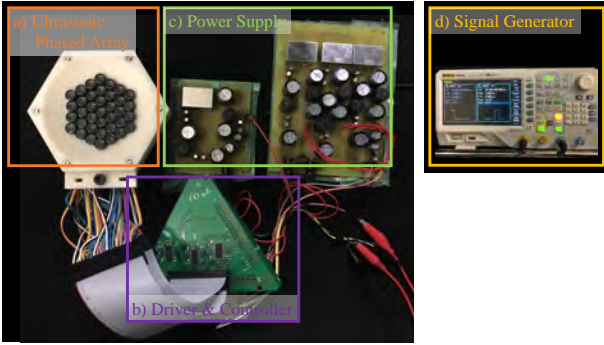


図 2 本実験に用いた超音波アレイ．(a) 超音波出力部，(b) ドライバ，(c) パイタイプフィルタを用いた電源，(d) 信号発生機．

対象物体の変位が小さい場合においても対象物体の粘弾性を推定可能であり，非破壊・非侵襲に対象物体の粘弾性を計測可能である．

本研究の寄与は大きく以下の 3 つである．(1) 超音波振動を用いるため非接触で粘弾性を計測可能，(2) 物体を共振させる必要がないため，固有振動数の探索が不要となり計測時間が短い，(3) 共振による塑性変形の危険が少ない．

2. 超音波アレイと対象物体上における振動

超音波は空気疎密波であるため十分にその力が強い場合，物体に対し非接触で力学的な働きをすることが可能である．そこで本研究では，超音波振動を用いて対象物体を加振し，その際観測される陰影情報の変化から対象物体の粘弾性を推定する．

図 2 に示すように，実験に用いた超音波アレイは超音波モジュールが密に並べられた構成となっている．各超音波モジュールから放射された超音波は，空間上で干渉し，強め合うことで，空間中の任意の点において力学的な力を発生させることが可能である．超音波による力学的な力は，スピーカーと同様，音量を調整することにより，0.1g から 0.5g まで細かく調整可能である．各超音波モジュールからは周期的な疎密波が出力されており，対象物体を加振する力 $\Gamma(t)$ は以下のように表現できる．

$$\Gamma(t) = \gamma \cos(2\pi f_M t), \quad (1)$$

ここで， γ [Pa·s] は対象物体を加圧する最大の力を表し， f_M は対象物体を加振する周波数を表す．また， t は時間を表す．超音波モジュールから出力される周波数は超音波モジュール固有のものではあるが，超音波から出力される信号を変調することで任意の周波数の力で対象物体を加振することが可能である．

超音波アレイを用い，十分に長い時間同じ周波数の超音波で対象物体を加振した場合，対象物体上の変位 $x(t)$ は以下のように表現できる．

$$x(t) = |C| \cos(2\pi f_M t + \delta), \quad (2)$$

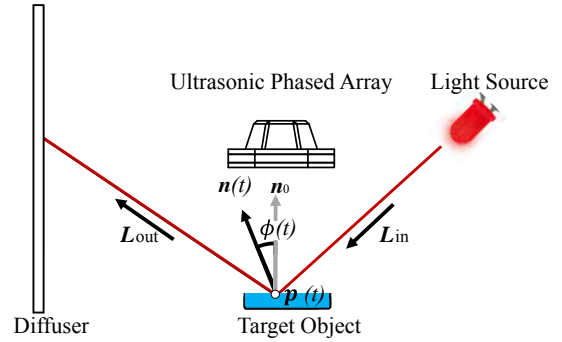


図 3 提案手法で用いる光学系の概念図．光源と対象物体上の計測点および拡散反射板上の入射点を通過する平面の断面図となっている．

ここで C は対象物体上の最大変位を表し， δ は弾性と粘性の割合によって決定される振動の位相遅れを表す．よって超音波による最大応力 γ と最大変位 C の関係は以下のように表現できる．

$$C = \gamma G, \quad (3)$$

ここで， G は粘弾性を表す．本研究では，観測される陰影情報から最大変位 C を推定し，応力との関係から対象物体の粘弾性 G を推定する．

3. 動的粘弾性-光変換

本研究では動的粘弾性 G を推定するために，超音波によって対象物体を微小変位させ，それにより対象物体上の法線方向が変化することを利用する．図 3 に提案手法で用いる光学系の概念図を示す．光源から放射された光は対象物体上で反射し拡散反射板上に入射する．この際，拡散反射板上に入射する点は対象物体上の反射位置と法線方向によって決定される．対象物体が超音波によって加振されており，加振する力が十分に弱い場合，対象物体上で起こる変位は無視できるほど小さくなる．しかし，対象物体上で起こる法線方向の変化によって拡散反射板上に光が入射する位置は大きく異なる．振動の周期に比べ対象の観測時間が十分に長い場合，拡散反射板上の反射光は，残像効果により広がりを持って観測される．カメラ・対象物体上の加振位置・拡散反射板の位置が既知の場合，拡散反射板上で観測される明るさと広がり幾何学的に決定できる．

具体的には，拡散反射板上の局所領域で観測される陰影情報 $I_{(x,y)}$ は局所領域に入射する光の強度と入射時間に比例する．そのため，陰影情報 $I_{(x,y)}$ を推定するためには，各局所領域に光が入射する時間を推定すれば良い．

対象物体表面が静的な場合，法線方向は常に n_0 となる．そのため，鏡面反射方向は変化せず，対象物体上で反射された鏡面反射光は拡散反射板上の一点にのみ入射する．このような場合，観測される陰影情報は最大値 I_{MAX} となり，以下のように表すことができる．

$$I_{MAX} = \alpha \int E\delta(\phi)d\phi, (-\pi \leq \phi < \pi) \quad (4)$$

$$= \gamma E, \quad (5)$$

ここで、 α は放射輝度 E を観測される陰影情報に変換する比例定数である．また ϕ は静的な状態の法線方向 n_0 との角度の差分を表し、 $\delta(\cdot)$ はディラックのデルタ関数を表す．対象物体表面が静的な場合、 ϕ が常に 0 となるため、一方向のみ反射光が観測されるため、反射光分布は空間的にインパルス応答として表現される．

に対象物体表面が微小振動しており、その変位が無視可能なほど小さい場合、鏡面反射方向は法線方向にのみ依存し決定される．ここで、対象物体上の位置 $p(t)$ の傾きは以下のように表現できる．

$$\frac{d}{dt}y = -\omega|C| \sin(\omega t + \delta), \quad (6)$$

式 (6) より、傾き方向 $a(t)$ は以下のように計算できる．

$$a(t) = \left(\begin{array}{c} 1 \\ \sqrt{1 + \omega^2|C|^2 \sin^2(\omega t + \delta)} \\ \frac{\omega|C| \sin(\omega t + \delta)}{\sqrt{1 + \omega^2|C|^2 \sin^2(\omega t + \delta)}} \end{array} \right) \quad (7)$$

傾き方向と法線方向は直交しているため、傾き方向 $a(t)$ と法線方向 $n(t)$ の関係は回転行列 R を用いて以下のように表現できる．

$$n(t) = R(\pi/2)a(t). \quad (8)$$

ここで、回転行列の要素は二つのベクトルが直交しているという条件から一意に決定可能である．図 3 に示すように、 n_0 と $n(t)$ の成す余弦 $\cos \phi(t)$ は以下のように表現できる．

$$\cos \phi(t) = n_0 \cdot n(t), \quad (9)$$

そのため、 $\phi(t)$ は以下のように求まる．

$$\phi(t) = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2|C|^2 \sin^2(\omega t + \delta)}} \quad (10)$$

$$= \arctan(\omega|C| \sin(\omega t + \delta)). \quad (11)$$

法線が振動することによっておこる反射分布は、角速度の逆数として表される．そのため $\frac{dt}{d\phi}$ は式 (11) より以下のように算出される．

$$\frac{dt}{d\phi} = \frac{1 + \omega^2|C|^2 \sin^2(\omega t + \delta)}{\omega^2|C| \cos^2(\omega t + \delta)}. \quad (12)$$

$\frac{dt}{d\phi}$ より $p(t)$ における反射率分布が計算可能となる．なお、 I_{MAX} と $\frac{dt}{d\phi}$ の関係は以下のように表現できる．

$$I_{MAX} = \int \frac{dt}{d\phi} dt. \quad (13)$$

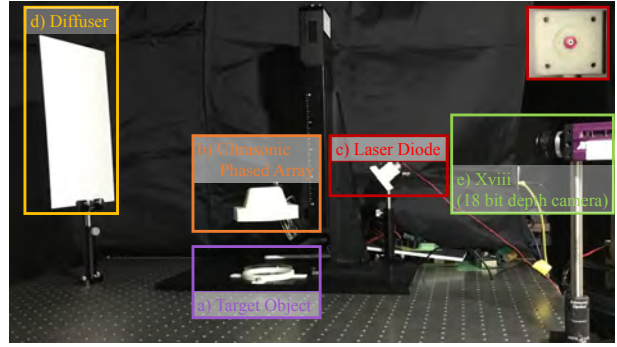


図 4 実験環境概観

対象物体表面が静的な場合の観測される陰影情報と対象物体表面が微小振動している場合の陰影情報の比をとることによって、1 周期の内に観測された位置に光が入射する時間が計算できるため、対象物体表面が静的な場合と微小振動している場合の二種類の陰影情報と式 (12) より粘弾性が推定可能となる．

4. 実験

提案手法の有効性を示すために、粘弾性が既知の物体について粘弾性の計測を行い、真値との比較を行うことで粘弾性の推定精度を検証した．また、様々な実物体の粘弾性を推定し、実際に材質ごとに粘弾性が異なることを確認した．図 4 に実験環境を示す．粘弾性を計測する対象の真上に図 2 に示した超音波アレモジュールを設置し、対象物体を 0.3g の力で加振した光源としてレーザダイオード (VHK LD module 635NM X 4.9MW) を使い、超音波の集音位置に光が入射するよう設置した．集音位置にレーザが入射するよう設置し、鏡面反射方向に拡散反射板としてポリ塩化ビニルを設置した．このような環境において、拡散板上で反射された光を 18 ビットカメラ (ViewPLUS Xviii) を用いて観測した．なお、本実験を通し、実験環境の温度は空調を用いて 20 度となるようコントロールし、対象物体の温度も実験環境と同じ温度になるように計測前に十分な時間をとった．また、シャーレを用いる際はシャーレの底で起きる鏡面反射の影響を防ぐため、光吸収シートをシャーレの底に設置した．

4.1 粘弾性が既知の物体を用いた定量評価

ここでは、提案手法の有効性を示すために粘弾性が既知の物体として図 5 上段に示す ISO 粘度グレードが既知のオイルを用いた．これらの潤滑油などの液体は弾性成分が無視できるほど小さいことが知られている．そこで、本実験でも推定された結果はすべて粘性成分によるものであるとみなした．図 5 中段に観測される陰影情報と下段に推定結果を示す．実験結果から算出された粘弾性が比例の関係となり、推定値も概ね正しいことを確認した．

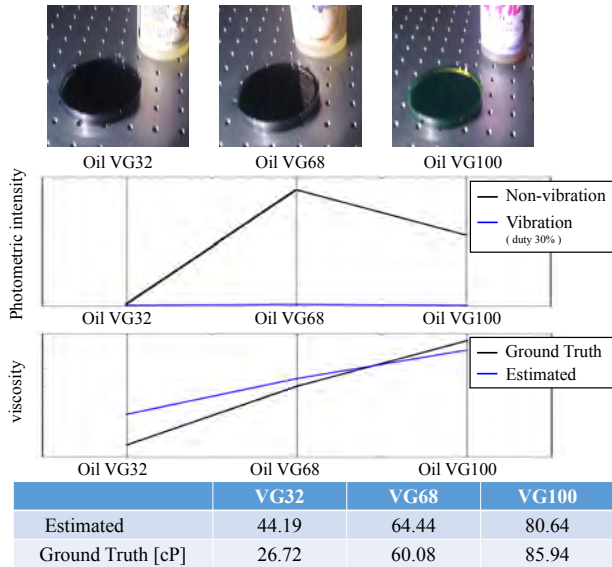


図 5 オイルの粘性推定実験．上段：対象物体．中上段：観測される陰影情報．中下段：粘性推定結果．下段：粘性推定結果の表．

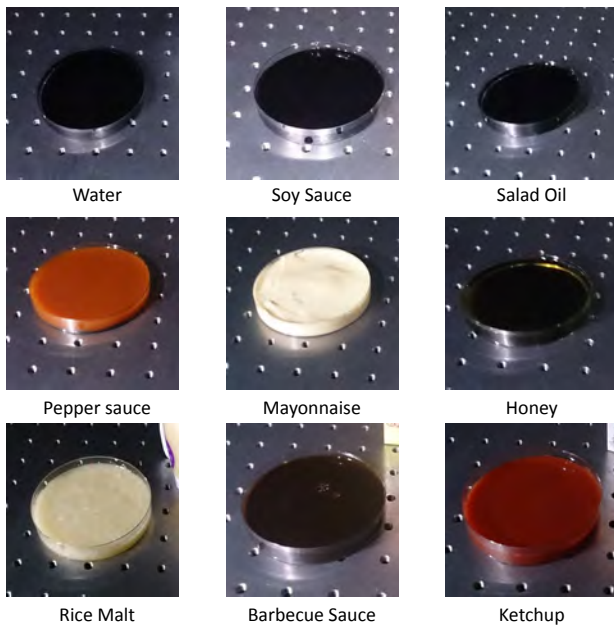


図 6 身の回りに存在する計測対象物体．対象物体として見た目の色や鏡面反射の程度が異なる 9 つの物体を用いた．

4.2 その他の物体の粘弾性の推定

図 6 に示すように，身の回りに存在する 9 つの物体の粘弾性を推定した．これらの物体はどれも手で触った感触が異なるため，粘弾性の推定結果にも違いがあると予想される．図 7 に実験結果を示す．実験結果に示すように，見た目の色や反射の程度に影響されず，おおむね正しく粘弾性が推定されていることが確認できる．

5. まとめ

本研究では，超音波アレイによって物体表面を微小変動させた際に観測される輝度情報の変化をもとに対象物体の粘弾性を推定する方法を提案した．提案手法は，法線方向の変化により鏡面反射方向が変化することで単位時間あたりに拡散反射板上に入射する光が残像効果により陰影情報が変化することを利用している．実験では，粘弾性が既知

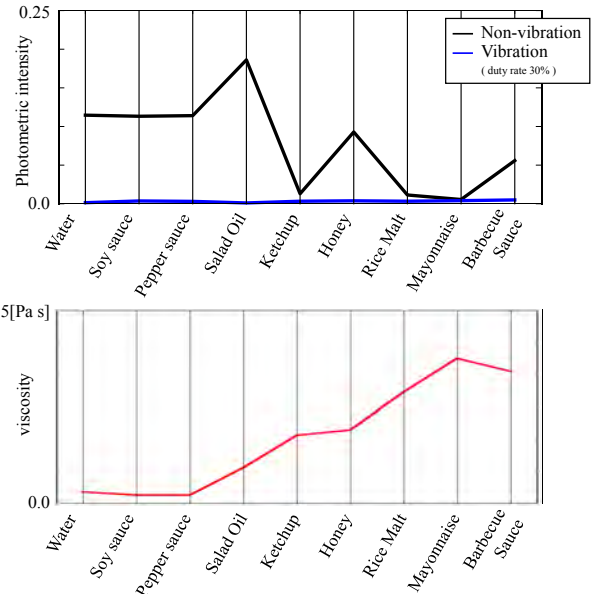


図 7 図 6 の観測される陰影情報 (上) と粘弾性推定結果 (下)

の物体を対象として提案手法の精度を評価した．また様々な物体の粘弾性を計測することで提案手法の有効性を示した．今後の課題として，より詳細な情報のとれる材質推定手法として粘性と弾性を区別して推定することがあげられる．また，現在は任意の一点の粘弾性計測となっているが，面での計測に拡張するといった方向も考えられる．

参考文献

- [1] Davis, A., Bouman, K. L., Chen, J. G., Rubinstein, M., Durand, F. and Freeman, W. T.: Visual Vibrometry: Estimating Material Properties from Small Motion in Video, *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp. 5335–5343 (2015).
- [2] Durst, F., Melling, A. and Whitelaw, J. H.: Principles and practice of laser-doppler anemometry, Vol. 76, No. 47019 (1976).
- [3] Liu, C. and Gu, J.: Discriminative Illumination: Per-Pixel Classification of Raw Materials Based on Optimal Projections of Spectral Brdf., *IEEE Trans. TPAMI*, Vol. 36, No. 1, pp. 86–98 (2014).
- [4] Petculescu, A. G. and Sabatier, J. M.: Air-coupled ultrasonic sensing of grass-covered vibrating surfaces; qualitative comparisons with laser Doppler vibrometry, Vol. 115, No. 4, pp. 1557–1564 (2004).
- [5] Sato, M., Yoshida, S., Olwal, A., Shi, B., Hiyama, A., Tanikawa, T., Hirose, M. and Raskar, R.: Spectrans: Versatile Material Classification for Interaction with Textureless, Specular and Transparent Surfaces, *Proc. ACM Conf. CHI*, ACM Press, pp. 2191–2200 (2015).
- [6] Schwartz, G. and Nishino, K.: Visual Material Traits: Recognizing Per-Pixel Material Context, *Proc. Color and Photometry in Computer Vision*, pp. 883–890 (2013).
- [7] Schwartz, G. and Nishino, K.: Automatically Discovering Local Visual Material Attributes, *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp. 3565–3573 (2015).
- [8] Su, S., Heide, F., Swanson, R., Klein, J., Callenberg, C., Hullin, M. and Heidrich, W.: Material Classification using Raw Time-of-Flight Measurements, *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp. 3503–3511 (2016).
- [9] Zhang, H., Dana, K. and Nishino, K.: Reflectance Hashing for Material Recognition, *Proc. IEEE Conf. CVPR*, pp. 3071–3080 (2015).