

超音波振動による物体表面の法線方向の変化を利用した粘弾性の推定

青砥 隆仁^{1,a)} 向川 康博¹

概要：物体の変形のしやすさや流動性などの性質を表す粘弾性の推定は、物体の材質推定や状態推定が可能となるため重要な課題である。本研究では、非接触で物体の粘弾性を計測する方法として、超音波振動により物体表面の法線方向の変化させ、その際に生じる対象物体表面上で観測される陰影情報の変化に基づく粘弾性推定方法を提案する。従来の粘弾性を推定する手法は、物体表面で起きる変位と与えた外力の関係に対応付けることで粘弾性の推定を行ってきた。そのため、対象物体表面で起きる変位が小さくなればなるほど粘弾性の計測が困難であるといった問題が存在する。本研究では、物体表面で法線方向の変化に伴う陰影情報の変化を用いることで、この問題を解決する。提案手法は、(1) 対象物体表面の振動の振幅が小さい場合において粘弾性を推定可能であるため非破壊・低侵襲での計測が可能、(2) 超音波アレイカメラシステムを用いた計測であるため、非接触計測が可能、といった特長を持つ。実験では、実環境において、粘弾性が既知の物体を対象として粘弾性推定実験を行いその精度を評価する。

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有効に繰り返し利用可能となるため、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。しかし、粘弾性の推定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。

一方、触覚デバイスの分野では、近年、超音波を用いコンピュータで制御した触覚フィードバックを与える研究が行われている [3]。この研究は超音波を集音させることで音の力で非接触で対象物体に力学的な応力を与えることが可能となっている。そこで本研究では、コンピュータにより制御可能な超音波による応力を与えるデバイスを撮像系に取り込むことで、対象物体の粘弾性を推定可能なコンピュータショナルフォトグラフィ技術を確立する。

図1に提案手法の概念図を示す。超音波から出た音波が対象物体を加振し、対象物体上の形状が変化し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ている。そのため、残像効果によってカメラ上で広がりを持って観測される。そこで本研究では、対象物体を加振する際、法線方向の変化により観測輝度の変化すること、法線方向の変化は形状のスケール変化に依存しないことに着目し、対象物体の粘弾性を推定する。対象物体の粘弾性を非破壊で計測するためには、対象物体に与える応力が小さければ小さいほど破壊する可能性が低い。そこで、対象物体に与える応力が小さく、それによる変位が従来のコンピュータビジョンで用いられてきた変位計測技術（例えば、ステレオ法や構造化光投影法、Time-of-Flight法など）で直接計測できない場合においても対象物体の粘弾性を推定可能な方法を開発する。

本研究の寄与は大きく以下の3つである。(1) 物体の変位を非接触で計測することが困難な散乱物体の粘弾性を計測可能、(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. 関連研究

非破壊かつ非接触による物体の材質推定は、古くからコンピュータビジョン分野で活発に取り組みられてきており、いまだなお、挑戦的に取り組まれているテーマである。こ

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} takahito-a@is.naist.jp

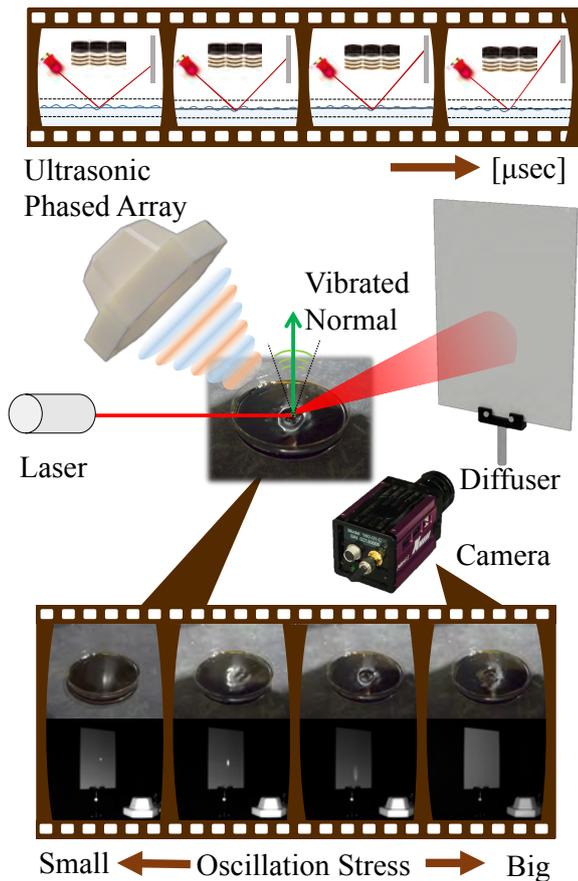


図1 観測される輝度情報からの動的粘弾性の推定．超音波アレイから放射された疎密波は対象物体（水）を加振する．上段に示すように微小時間で観察した場合，時間によって対象物体の表面形状が異なるため，光源であるレーザーから照射された光は鏡面反射方向が異なるため拡散反射板上の異なる位置で観測される．また下段に示すように，超音波の出力を変更し，対象物体に加える応力を変化させた場合，出力が小さい場合においては対象物体上で変位はあまり観測されず拡散反射板上で観測される範囲も小さい．しかし，応力が増えるにつれ対象物体上の変位が視認できるようになり，拡散反射板上の陰影も広範囲に観測される．さらに変位を強くすると対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

れまで取り組まれてきた手法は，推定された物質の物性情報に基づき大別すると，対象物体の光学的特性に基づく手法と熱的特性に基づく手法，力学的特性に基づく手法に大別できる．

光学的特性に基づく手法は，色やテクスチャなどの物体をマクロに捉えた物体の見えに基づく手法 [1], [4], [9], [10], [12], BRDF やスペクトルなどの物体の反射特性に基づく手法 [5], [6], [8], [13]，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 [11] などがある．

熱的特性に基づく手法として Saponaro らは [7] 水の浸透具合と加熱・冷却過程をサーモカメラで撮影することで材質推定を行っている．



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．

力学的特性に基づく手法として，Davis ら [2] 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？，レーザードップラー振動計を用いて計測する手法が存在する？．これらの手法は対象物体の変位が計測可能なほど多き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．

3. 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．本研究ではこれらの性質を利用し，超音波アレイを用いて対象物体を加振し，その際観測される輝度の変化から対象物体の粘弾性を推定する．本節では提案手法に用いる超音波アレイと超音波アレイを用いて対象物体を加振した場合における振動のモデルについて説明する．

3.1 超音波アレイ

図2に示すように，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する．このことを利用し，空間中の任意の点を通ずるすべての超音波が強め合うよう各超音波モジュールから放射された超音波の位相を制御することで，超音波による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，スピーカーと同様に，音量を調整することにより細かく調整可能である．

図2に示した超音波アレイは村田製作所製の超音波モジュール MA40S4S を 37 個密に設置したものとなっている．それぞれの超音波モジュールは 3D プリントによって印刷された形状固定されており，各超音波モジュールの中心から 10cm 先で超音波が強め合うよう形状により位相が調整されている．本超音波アレイモジュールの出力は

PWM 制御されており、デューティ比を 10% から 50% まで変更することにより対象物体を $0.1g$ から $0.5g$ までの任意の強さで対象物体を加振することが可能である。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。なお実験の章では使用した超音波モジュールの固有の周波数 40kHz で対象物体を加振している。

3.2 加振した場合における振動モデル

超音波を用いて対象物体に照射した場合、対象物体は超音波によって振動させられる。一般的に物体表面における応力と変形の関係は複雑で非線形であることが知られている。しかし、レオロジーの分野では、対象物体の変形が微小かつ周期的な応力が加えられている場合、弾性 k と粘性 m をバネとダッシュポットを用いたマックスウェルモデルを用いて表現される。マックスウェルモデルは線形モデルであり、超音波による応力を $\gamma(t)$ とすると、対象物体上の変形は以下のように表現できることが知られている。

$$\gamma(t) = kx(t) + f\dot{x}(t) + m\ddot{x}(t), \quad (2)$$

ここで $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $\ddot{x}(t)$ はそれぞれ対象物体上の点の変位、速度、加速度を表す。また f は摩擦係数を表す。十分に長い時間同じ周波数の超音波で加振された場合、対象物体上の変位 $x(t)$ は以下のように表現できる。

$$x(t) = |C| \cos(2\pi f_M t + \delta), \quad (3)$$

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。

$$C = \gamma G, \quad (4)$$

ここで、 G は粘弾性を表す。なお、本研究ではこの粘弾性 G を推定対象とし、弾性と粘性の割合を決定する δ は推定対象ではない。観測される輝度から最大変位 C を推定し、事前に応力が既知であるため、対象物体の粘弾性 G を推定することができる。

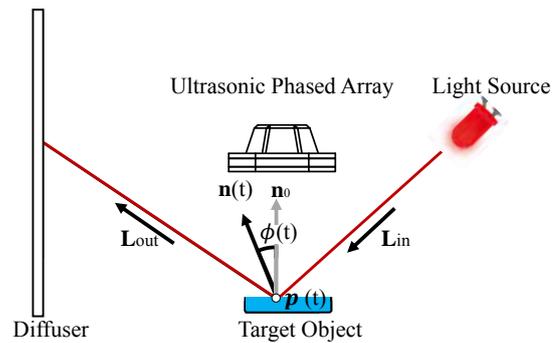


図3 提案手法で用いる光学系の概念図。光源と対象物体上の計測点および拡散反射板上の入射点を通る平面の断面図となっている。

4. 動的粘弾性-光変換

本研究の目的は非接触かつ非破壊・非侵襲に観測輝度から動的粘弾性 G を推定することがである。粘弾性を推定するには対象物体に加圧・加振など力学的な力を与える必要がある。その際、非破壊・非侵襲に粘弾性を推定するためには、極力対象物体表面で起こる変位 C が小さいことが望ましい。しかしながら、対象物体上の変位 C が小さい場合、コンピュータビジョンの分野で用いられるステレオ法や干渉法、Time-of-Flight などの方法を用いて特長のない微小変位を動的に計測することは困難である。そこで、本研究ではこの問題を解決するため、超音波によって対象物体が微小変位し、そにより対象物体上の法線方向が変化することを利用した粘弾性の推定を行う。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是对象物体上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板は、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は幾何学的に決定できる。以下では、法線方向の分布と観測輝度の関係を導出し、観測輝度から粘弾性を推定する方法について述べる。なお、対象物体を加振する強さ γ と超音波による加振の周波数 f_M は事前に既知であるものとする。また対象物体上の変位は無視できるほど小さいと仮定する。

4.1 法線方向の分布と観測輝度の関係

本節では、議論を簡単にするために、光源から放射された光は対象物体表面で鏡面反射のみ起こすものとする。拡

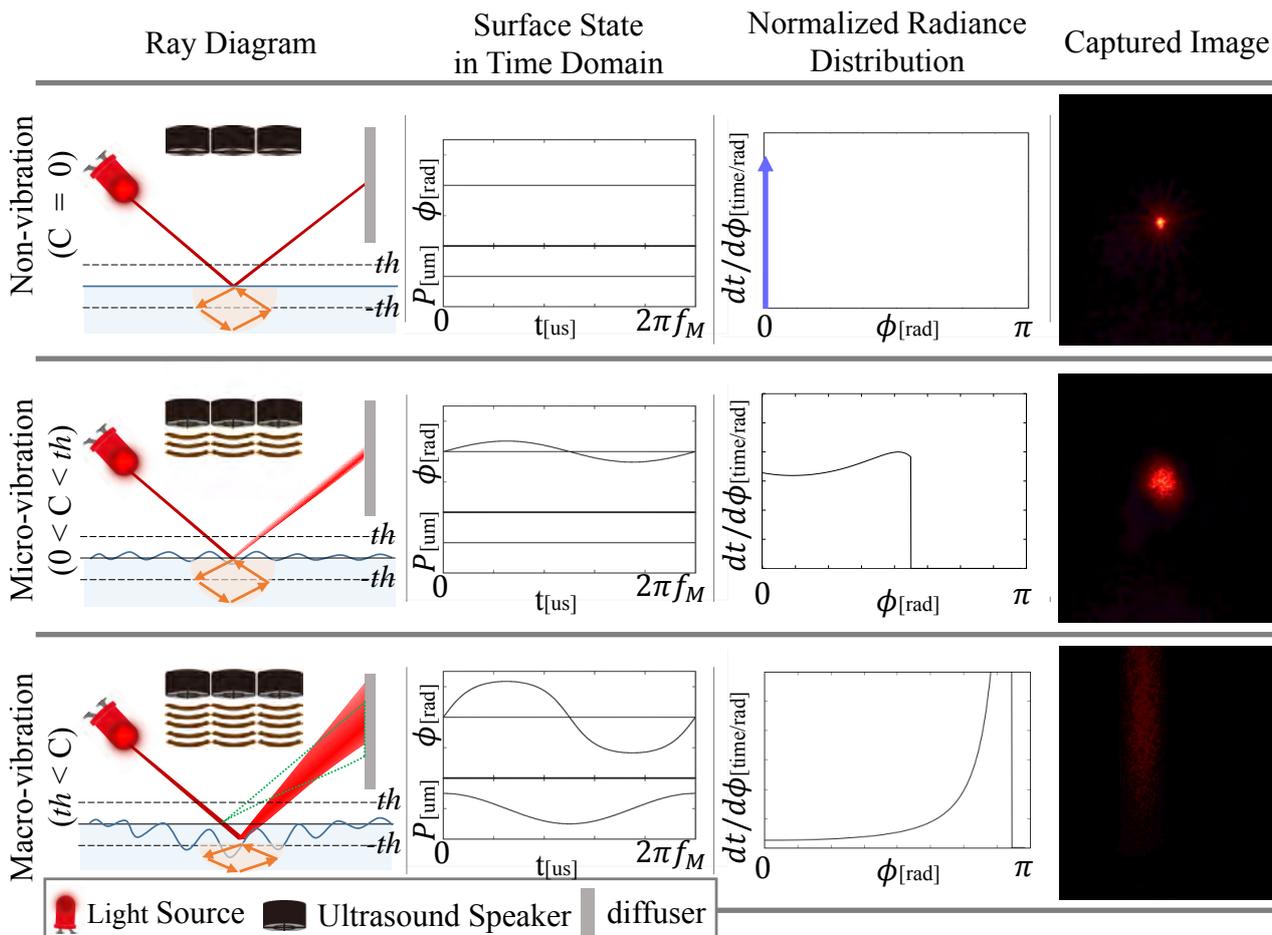


図4 対象物体上における振動の種類による分類．左：光源から放射された光線の光路．中左：時間領域における $\phi(t)$ と $p(t)$ の変化．中右： $p(t)$ における正規化された反射率分布．右：それぞれの場合において拡散反射板上で観測される画像のイメージ図．

散反射板上の局所領域で観測される輝度 I は局所領域に入射する光の強度と入射時間に比例する．局所領域に入射する鏡面反射光は光源、対象物体上反射位置、法線方向、拡散反射板位置によって幾何学的に容易に計算可能である．また、光源、対象物体上反射位置、拡散反射板位置が固定であるため、ここでは法線方向の変化と輝度情報の関係について述べる．

図4に示すように、対象物体上の状態は3つの状態に大別することができる．以下ではそれぞれの場合について法線方向の変化について考える．図4上段に示すように、対象物体表面が静的な場合 ($C = 0$)、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のみ入射する．このような場合、観測輝度は最大値 I_{MAX} となり、以下のように表すことができる．

$$I_{MAX} = \gamma \int E \delta(\phi) d\phi, (0 \leq \phi < 2\pi) \quad (5)$$

$$= \gamma E, \quad (6)$$

ここで、 γ は放射輝度 E を観測輝度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、反射光分布は図4上段左三番目に示すように空間的にインパルス応答として表現される．

図4中段に示すよう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 ($0 < C < th$)、鏡面反射方向は法線方向のみに依存し決定される．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．

$$\frac{d}{dt}y = -\omega|C| \sin(\omega t + \delta), \quad (7)$$

式(7)より、傾き方向 $a(t)$ は以下のように計算できる．

$$a(t) = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \omega|C| \sin^2(\omega t + \delta)}}, \frac{\omega|C| \sin(\omega t + \delta)}{\sqrt{1 + \omega|C| \sin^2(\omega t + \delta)}} \right) \quad (8)$$

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．

$$\mathbf{n}(t) = \mathbf{R}(\pi/2)\mathbf{a}(t). \quad (9)$$

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、 \mathbf{n}_0 と $\mathbf{n}(t)$ の成す余弦 $\cos \phi(t)$ は以下のように表現できる．

$$\cos \phi(t) = \mathbf{n}_0 \cdot \mathbf{n}(t), \quad (10)$$

そのため、 $\phi(t)$ は以下のように求まる．

$$\phi(t) = \arccos \frac{1}{\sqrt{1 + \omega|C| \sin^2(\omega t + \delta)}} \quad (11)$$

$$= \arctan(\omega|C| \sin(\omega t + \delta)). \quad (12)$$

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 (12) より以下のように算出される．

$$\frac{dt}{d\phi} = \frac{1 + \omega|C| \sin^2(\omega t + \delta)}{\omega^2|C| \sin^2(\omega t + \delta)}. \quad (13)$$

光量の総量は変化しないため、図 4 の左から三番目に示すグラフの面積は一定である． $\frac{dt}{d\phi}$ 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．

$$I_{MAX} = \int \frac{dt}{d\phi} dt. \quad (14)$$

対象物体表面が静的な場合の観測輝度と対象物体表面が微小振動している場合の観測輝度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、二種類の観測輝度と式 (13) より粘弾性が推定可能となる．

図 4 下段に示すように、対象物体表面が強く加振されている場合 ($th < C$)、対象物体上の位置 $p(t)$ における $p(t)$ の変位が無視できない．このような場合においては、対象物体上の変位は無視できるくらい小さいと仮定している提案手法とのモデルと合わず粘弾性を精度良く推定することができない．

4.2 鏡面反射成分の分離

前節では議論の簡単化のために対象物体上で鏡面反射のみ起こると仮定した．しかし、一般的に対象物体上の点 $p(t)$ に入射した光は鏡面反射成分 S だけでなく拡散反射や散乱などの光学現象を起こし放射される大域成分 E が存在する．本研究では、観測輝度から鏡面反射成分 S のみを分離することで粘弾性をより高精度に推定する．具体的には、対象物体が静的な場合に観測される輝度値を I_n とし、同一観測点において対象物体が微小振動されている場合の輝度値を I_v とすると、鏡面反射成分 S と大域成分 E の関係は以下のように表される．

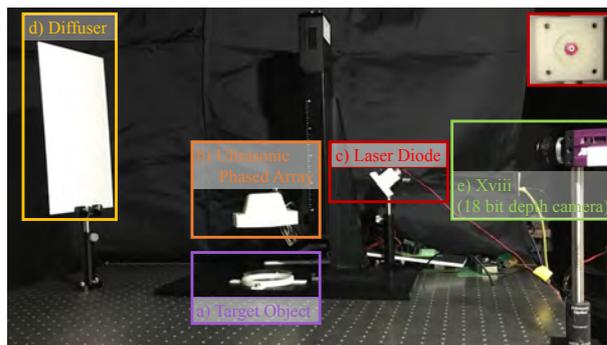


図 5 実験環境概観

$$I_n = S + E, \quad (15)$$

$$I_v = LS + E, \quad (16)$$

ここで、 L は振動により鏡面反射成分が低下する割合である．ここで、対象物体を加振する力を $|C|$ から $|C| + \Delta C$ に変化させた場合、対象位置において観測可能な時間は以下のように線形倍変化しているとみなすことができる．

$$\beta = \frac{|C|}{|C| + \Delta C} \quad (17)$$

その際、観測される輝度値は以下のように表現することができる．

$$I_{v2} = \beta LS + E, \quad (18)$$

よって式 (17) と式 (18) より以下のように L を算出できる．

$$L = \frac{1 - M}{1 - \beta M}, M = \frac{I_n - I_v}{I_n - I_{v2}}. \quad (19)$$

5. 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．その際、濃度の変化によっても粘弾性が変化することを推定結果から確認した．図 5 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イモジュールを設置し、超音波を集音することで対象物体を加振した．加振する強さはすべての実験においてデューティ比が 50 と 30 の二種類を用いた．光源としてレーザダイオード (VHK LD module 635NM X 4.9MW) を用い、超音波の集音位置に光が入射するように設置した．レーザは放射強度が強いため、対象物体表面で反射した光によってカメラの素子が焼けるのを防ぐため、拡散反射板としてポリ塩化ビニルをレーザの鏡面反射方向に設置し、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．ここでは、観測ノイズの影響を低減するため、観測輝度として 256 枚撮影された画像の平均値を観測輝度と

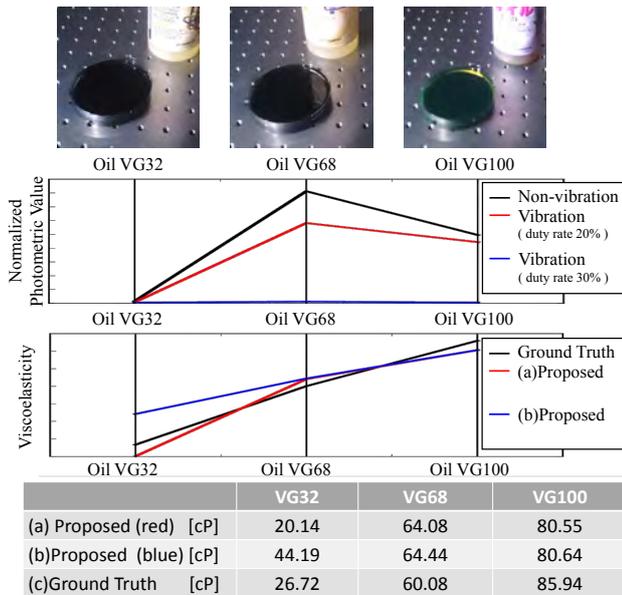


図6 オイルの粘性推定実験．上段：対象物体．中段：観測輝度．下段：粘性推定結果．提案手法 (a) は鏡面反射成分の分離を行った手法で提案手法 (b) は鏡面反射成分分離を行わなかった手法である．

した．この際、レーザーによるスペックルの影響を考慮するため、観測輝度に対し4画素のガウスブラーを掛けた後、観測画像のサイズを1/4にリサイズしたものを観測画像とした．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た．対象物体は十分な時間実験環境に置くことで実験環境と同じ温度になるように配慮した．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．

5.1 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6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6中段に観測輝度と下段に推定結果を示す．実験結果から鏡面反射成分を分離し、分離した結果を用いた方が分離しない方法よりもより高精度に粘弾性を推定可能であることが確認できる．この結果から観測輝度は鏡面反射光とそれ以外の光の成分（拡散反射や散乱光など）の和であり、それ以外の光の成分は超音波の出力の変化の影響をあまり受けないことがわかる．

5.2 二種類の液体の混合比率の変化による粘弾性の変化

水は様々な物体の溶液となることが可能な粘性の低い液体として知られている．そのため、液体を希釈する際など

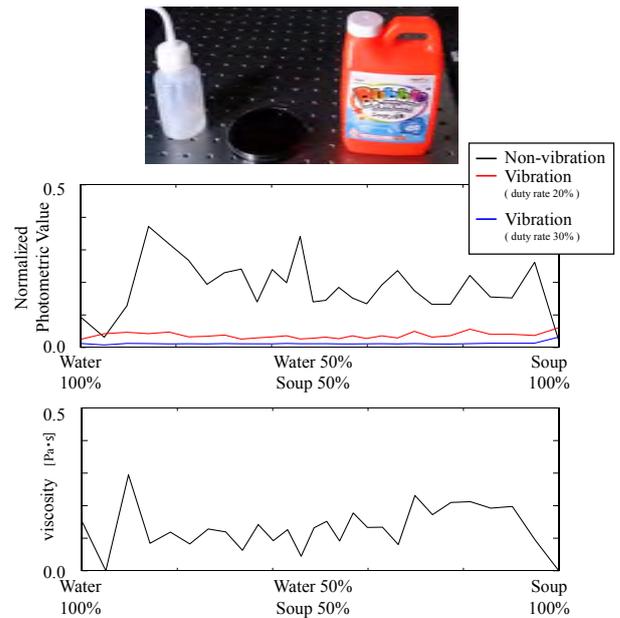


図7 増粘剤の濃度変化による粘弾性の変化．上段：水（左），増粘剤（右）．中段：各濃度における観測輝度．下段：各濃度における粘弾性推定結果．ここでの粘弾性の推定結果は鏡面反射成分を分離したものをを用いて粘弾性を推定した結果である．

にも用いられる．一方、シャボン玉などを作る際には水溶性の増粘剤が用いられている．そこで、本節では図7上段（右）に増粘剤を水（上段（左））で希釈し濃度を変化させた際の粘性の変化を確認する．図7中段、下段より、振動させていない際の輝度の変化に推定結果が引っ張られているものの、水の割合が減り増粘剤の濃度が上昇するに連れて推定結果が右肩上がりに増加していることが確認できる．また、増粘剤が濃度が上がり、増粘剤の原液付近において推定された粘度が低下している．これは、増粘剤を加えた際に気泡が発生し観測輝度の値を大きく変化させたことに起因する．

5.3 その他の物体の粘弾性の推定

図8に示すように、身の回りに存在する8つの物体の粘弾性を推定した．これらの物体はいず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9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粘弾性が推定されることが確認できる．

6. 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

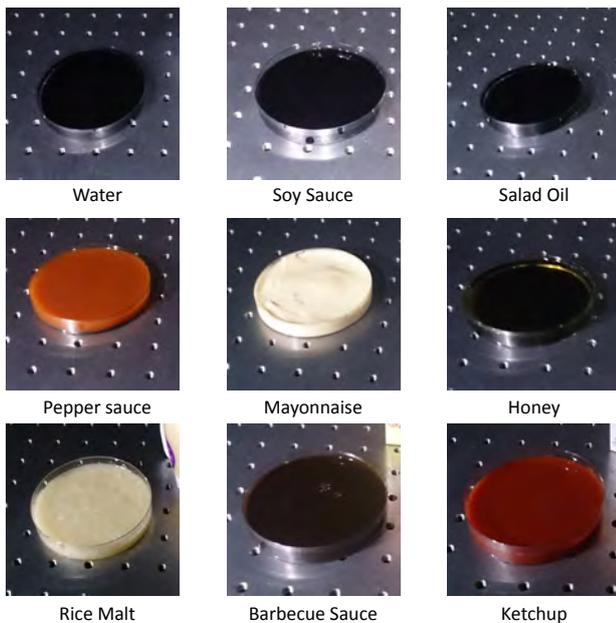


図 8 身の回りに存在する計測対象物体．対象物体として見た目の色や鏡面反射の程度が異なる 9 つの物体を用いた．

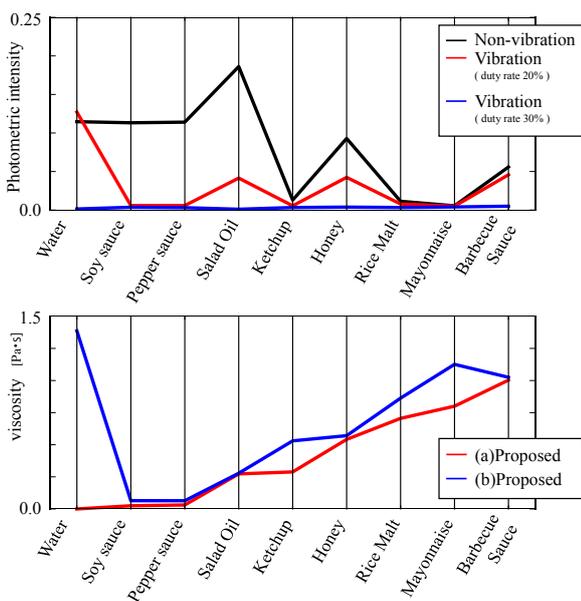


図 9 図 8 の観測輝度と粘弾性推定結果

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．

謝辞 本研究は，JSPS 科研費 16H06982（研究活動スタート支援）の助成を受けた．

参考文献

- [1] Caputo, B., Hayman, E. and Mallikarjuna, P.: Class-Specific Material Categorisation, *Proc. International Conference on Computer Vision (ICCV)*, IEEE, pp. 1597–1604 (2005).
- [2] 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 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 5335–5343 (2015).
- [3] Hoshi, T. and Shinoda, H.: Free-Form Tactile Sensor Using 3-Dimensional Shape Capture Sheet, *Proc. 2nd Joint Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (2007).
- [4] Liu, C., Sharan, L., Adelson, E. H. and Rosenholtz, R.: Exploring Features in a Bayesian Framework for Material Recognition, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, IEEE, pp. 239–246 (2010).
- [5] Liu, C. and Gu, J.: Discriminative Illumination: Per-Pixel Classification of Raw Materials Based on Optimal Projections of Spectral Brdf., *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 36, No. 1, pp. 86–98 (2014).
- [6] Mannan, M. A., Das, D., Kobayashi, Y. and Kuno, Y.: Object Material Classification by Surface Reflection Analysis with a Time-of-Flight Range Sensor, *Advances in Visual Computing*, Springer Berlin Heidelberg, pp. 439–448 (2010).
- [7] Saponaro, P., Sorensen, S., Kolagunda, A. and Kambhamettu, C.: Material Classification with Thermal Imagery, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 4649–4656 (2015).
- [8] 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 Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI)*, ACM Press, pp. 2191–2200 (2015).
- [9] Schwartz, G. and Nishino, K.: Visual Material Traits: Recognizing Per-Pixel Material Context, *Proceedings of Color and Photometry in Computer Vision (Workshop held in conjunction with ICCV)*, pp. 883–890 (2013).
- [10] Schwartz, G. and Nishino, K.: Automatically Discovering Local Visual Material Attributes, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3565–3573 (2015).
- [11] 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 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3503–3511 (2016).
- [12] Varma, M. and Zisserman, A.: A Statistical Approach to Material Classification using Image Patch Exemplars, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (TPAMI)*, Vol. 31, No. 11, pp. 2032–2047 (2009).
- [13] Zhang, H., Dana, K. and Nishino, K.: Reflectance Hashing for Material Recognition, *Proc. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, pp. 3071–3080 (2015).