

半透明物体の光弾性と吸収の画像計測

梶山 颯真 岡部 孝弘
九州工業大学 情報工学部

1 はじめに

ガラスやプラスチックは内部応力により破損・変形してしまうため、内部応力の検査は重要である。光弾性とは、弾性体に応力が働いた際に偏光方向により異なる2つの屈折率を持つ性質であり、光弾性を利用して応力を解析する方法を光弾性法 [1] という。

光弾性法では、光弾性体に偏光を透過させて、その透過光を解析することにより応力の大きさと方向を求める。光弾性体に偏光を入射させると、光弾性により透過光に位相差が生じる。その結果、各波長の透過光強度が変化して透明物体に色が生じるため、観測される色に基づいて応力の大きさと方向を得ることができる。

しかし、半透明物体は透明物体とは異なり、入射光の一部が吸収されるために透過光に色が生じる。そのため、観測される色が光弾性に起因する色か物体の吸収に起因する色か区別することは容易ではない。

そこで、本研究では、カラー偏光カメラを用いて撮影することにより観測される色を光弾性による色と吸収による色に分離する。さらに、分離した色から光弾性パラメータと吸収のパラメータを推定する手法を提案する。

2 提案手法

2.1 光弾性

物体が垂直な2方向に異なる屈折率を持つ現象を複屈折と呼び、2つの異なる屈折率のうち、屈折率が小さい方の軸を進相軸と呼ぶ。また、弾性体に応力が働いた際に、複屈折が起きる性質のことを光弾性と呼ぶ。進相軸は主応力のうち、大きい応力の方向と同じ方向であり、発生する屈折率の差は応力の大きさに比例する。

光弾性体を透過した光は複屈折により位相差が発生し、位相差が発生した透過光が直線偏光板を透過することにより、位相がずれた2つの波の偏光方向が揃うため、干渉が起きる。干渉の程度は発生した位相差に依存し、干渉でできた波の振幅は進相軸の方向に依存するため、透過光強度は位相差 δ_c ($c = R, G, B$)、進相軸の方向 ϕ に依存する [2]。

2.2 吸収

物体による色の吸収は Lambert-Beer の法則に従うと仮定する。このとき、透過光強度は光路長 d と吸収

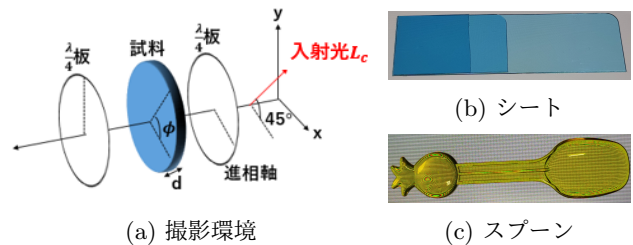


図 1: 撮影環境と被写体

係数 α_c に比例して指数関数的に減少する [3]。すなわち、透過光強度は厚さ d と吸収係数 α_c に依存し、吸収係数は各波長で異なるので、カメラのバンド毎にも異なる。

2.3 光弾性による色と吸収による色の分離

従来の光弾性法では、直線偏光を入射する場合と円偏光を入射する場合がある。本研究では、図 1(a) に示す円偏光を入射する場合を考える。具体的には、偏光方向が x 軸から 45° だけ傾いた偏光を $\frac{\lambda}{4}$ 板に入射させて円偏光にする。そして、それを被写体に入射させ、その透過光を再び $\frac{\lambda}{4}$ 板に入射させて、その透過光を偏光カメラで撮影することを考える。

図 1(a) の環境で平面状の物体に偏光を透過させ、カラー偏光カメラで撮影する。ジョーンズ計算法により偏光の伝播を求めると、透過光強度 I_c は各偏光角で

$$I_c(0^\circ) = \frac{1}{2} L_c e^{-\alpha_c d} (1 + \sin \delta_c \sin 2\phi) \quad (1)$$

$$I_c(45^\circ) = L_c e^{-\alpha_c d} \cos^2 \frac{\delta_c}{2} \quad (2)$$

$$I_c(90^\circ) = \frac{1}{2} L_c e^{-\alpha_c d} (1 - \sin \delta_c \sin 2\phi) \quad (3)$$

$$I_c(135^\circ) = L_c e^{-\alpha_c d} \sin^2 \frac{\delta_c}{2} \quad (4)$$

となる。ただし、 L_c は入射光強度、 δ_c は位相差の大きさ、 ϕ は x 軸と進相軸がなす角度、 α_c は吸収係数、 d は厚さ、 c はカメラの R,G,B バンドである。

式 (1) から式 (4) までを足し合わせると、

$$\frac{I_c(0^\circ) + I_c(45^\circ) + I_c(90^\circ) + I_c(135^\circ)}{2} = L_c e^{-\alpha_c d} \quad (5)$$

となり、式 (5) を式 (1) から式 (4) に代入すると、従来の光弾性法に帰着するため、 δ_c, ϕ を求めることができる。

式 (5) を変形し、両辺の自然対数を取ると、

$$\alpha_c d = -\log \frac{I_c(0^\circ) + I_c(45^\circ) + I_c(90^\circ) + I_c(135^\circ)}{2L_c} \quad (6)$$

となる。ここで、試料を置かずに撮影することにより L_c を取得し、 $\alpha_R + \alpha_G + \alpha_B = 1$ と仮定すると、式 (6) から吸収係数 α_c の比と物体の厚さ d の相対的な値を求めることができる。

3 実験

図 1(b), (c) に示す半透明かつ単色のシート（下敷きを 3 枚重ねたもの）とプラスチックスプーンを用いて撮影を行い、光弾性パラメータと吸収パラメータを求めた結果を図 2(a) から (l) に示す。ただし、進相軸の方向は図 2(m) の色相環に基づいて可視化した結果であり、吸収係数は被写体で一定であると仮定し、被写体の吸収係数の平均を画素値として出力した結果である。

図 2(a), (b) より位相差の大きさと進相軸の方向はシートの枚数による差があり、シート毎に一樣であることが確認できる。これはシートが板状で内部応力が一樣に分布していると考えられるためである。また、図 2(c), (d), (e) の順に暗くなっているため、 α_R が最も大きく、 α_G , α_B の順に小さいことが確認できる。シートは水色であり、赤の波長を最も吸収し、次いで緑の波長を吸収していると考えられるため、定性的に良好な結果が得られていることがわかる。最後に、図 2(f) よりシートが 3 層あることが確認でき、それぞれの層の差が同程度であることが確認できる。よって、シートに関して定性的に良好な結果が得られていることがわかる。

スプーンはシートと比較すると形状が複雑であるため、様々な大きさ、方向の応力が働いていると考えられる。図 2(g) より位相差と進相軸の方向が連続的に変化していて、位相差には光弾性特有の縞が確認でき、スプーンの先は曲面であるため進相軸の方向の変化が比較的激しいことが確認できる。また、図 2(i), (j), (k) より α_R , α_G が小さく、 α_B が大きいことが確認できる。スプーンは黄色であり、青の波長を最も吸収して、赤と緑の波長は同程度吸収すると考えられることから、定性的に良好な結果が得られていることがわかる。最後に、図 2(l) において、背景の青色に対してスプーンの内側は緑色になっていることから、スプーンの薄い厚みを推定できていることが確認できる。よって、スプーンに関しても定性的に良好な結果が得られていることがわかる。なお、図 2(b), (h) において緑や青が確認できない。これは、進相軸 ϕ を推定する際に曖昧

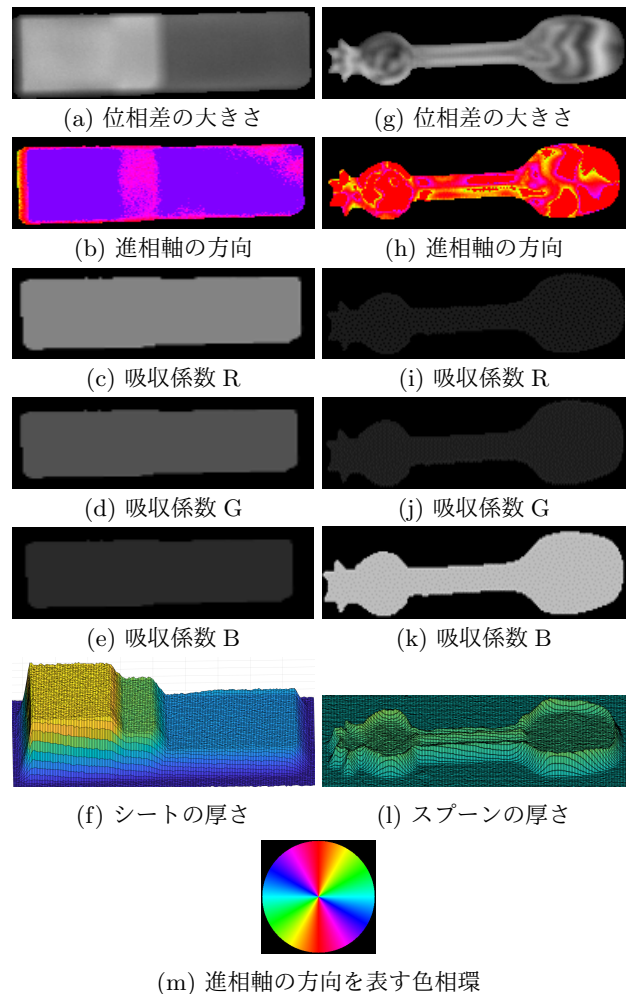


図 2: パラメータの推定結果

性が残っているためである。

4 むすび

本稿では、半透明物体の透過光に現れる色を光弾性による色と半透明物体の吸収による色に分離して、分離した色から光弾性パラメータと吸収のパラメータを推定する手法を提案した。また、実画像を用いた実験を行い、その有効性を示した。今後は、吸収係数と厚さの精度向上や光弾性パラメータの不定性を解決することが課題である。

謝辞 本研究の一部は、JSPS 科研費 JP17H01766 および JP20H00612 の助成を受けた。

参考文献

- [1] M. Frocht, "Photoelasticity", Wiley, New York, Vol. 1, pp.144-149, 1948.
- [2] K. Ramesh, "Digital Photoelasticity: Advanced Techniques and Applications", Springer Berlin Heidelberg, Vol.1, pp.1-pp.46, 2000.
- [3] D. Swinehart, "The Beer-Lambert Law", American Chemical Society, Vol. 39, No.7, pp.333-pp335, 1962.