

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25390089

研究課題名(和文) 傾斜エリプソメトリーによるその場精密3次元形状計測法の開発

研究課題名(英文) Development of in-situ three-dimensional shape measurement method by tilt-ellipsometry

研究代表者

津留 俊英 (Tsuru, Toshihide)

山形大学・教育文化学部・准教授

研究者番号：30306526

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：円偏光照明による2次元偏光解析で試料の3次元形状を精密計測できる傾斜エリプソメトリーの高精度化と高速化を目指して、LEDを光源とした円偏光度97%以上の疑似ドーム型照明装置を作製した。また、高速4検出器型ポラリメーターを開発して液晶可変リターダーの較正法を考案した。作製した円偏光照明装置を用いて、2つの波長で計測した異なる偏光画像から同一傾斜角及び傾斜方位角が得られ、傾斜エリプソメトリーの高感度特性が実証できた。

研究成果の概要(英文)：For fast and precise three-dimensional shape measurement by tilt-ellipsometry, pseudo-dome type illumination using LEDs of more than 97% of degree of circular polarization was developed. We proposed calibration method by using fast four detectors polarimeter for adjustment of azimuthal angle of the liquid crystal variable retarder. Using circularly polarized light illumination, the same slope and azimuthal angles of the facet is obtained from the different polarization images measured at two wavelengths. High-sensitivity characteristic to the slope and azimuth of the tilt-ellipsometry could be successfully demonstrated.

研究分野：応用光学

キーワード：偏光 エリプソメトリー 形状計測

1. 研究開始当初の背景

エリプソメトリーは、規定した偏光を水平または垂直に配置した平面試料に斜めに入射して、反射光の偏光状態を精密計測し、薄膜の屈折率と厚さを決定する方法として知られ、広く様々な分野で利用されている。平面試料を立体に拡張し滑らかな表面の反射を考えると、物体表面または界面で反射の法則を満たす方向に必ず光が反射される。照明光として、物体の反射面の傾斜方位角に依存しない円偏光を用いると、

- ・ 楕円の短軸と長軸の長さの比で定義される楕円率角は入射角に対して(図1)、
- ・ 反射楕円偏光の傾きは入射面に対してそれぞれ単調に変化する。我々は、この光学的な基本的な特性を利用し、エリプソメトリーによって傾斜情報が直読できる3次元形状計測法を独自に考案し、これを傾斜エリプソメトリーと名付けた。反射特性が既知の物体に対して、反射楕円偏光の精密計測によって反射点の法線ベクトルが決定できるので、積分操作で3次元形状が再構築できる。精密に調整したエリプソメーターの偏光解析パラメーターの計測精度は 0.001° にも達する。これを物体傾斜角に換算すると 0.001° の感度に相当する。

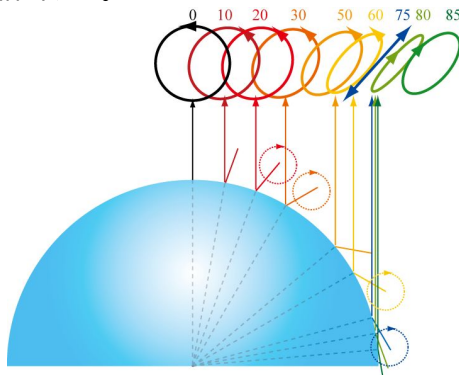


図1. 金属半球による右回り円偏光の反射楕円変化。

偏光を利用した3次元形状計測法はロボティクス分野で1970年代から研究が行われている。円偏光照明による傾斜計測法が越川らによって提案され、その後、非偏光照明下の3次元形状計測法に研究は移行した。計測の原理は偏光度のポラリメトリーによる計測で、直線偏光度の傾斜角依存性を利用した形状認識に成功している。計測の原理が偏光度の計測であるために、測定対象は透明物質に限定される。偏光度の計測に対して本手法はエリプソメーターの計測精度と同等の精度を実現し得る。従来の3次元形状計測法に対し、本手法は

- ・ 偏光のリモートセンシング特性を利用した試料の2次元偏光画像から傾斜情報を直読する手法
- ・ 光が正反射する程度に滑らかであれば、試料の材質を限定することなく計測が可能
- ・ 計測環境に制限がないために、水面、界面、

液中観測にも適用できる

という従来にない独創性と新規性を持つ。反射の偏光変化は、本質的に振動面分割のコモンパス干渉で発生し、媒質伝播中の偏光変化は無視できるため従来計測が困難な特殊な環境下でも計測できる。

2. 研究の目的

本研究は、一般に平面試料に用いられるエリプソメトリーを立体試料に拡張し物体表面の法線ベクトルを直読する「傾斜エリプソメトリー技術を用いた3次元形状計測法の確立と、これを用いた実時間精密3次元形状計測装置を開発することを目的」とする。

エリプソメトリーでは、光の入射角と入射面方位角は既知の変数とし、計測時は固定される。しかし、平面を立体の一部に拡張すると観察方向から見える物体表面の任意の反射点で反射の法則を満たす明るい正反射光が存在し、その反射楕円の形状から反射点の傾斜角と傾斜方位角、すなわち法線ベクトルが決定できる。傾斜エリプソメトリーの原理検証実験で得られた実用化要件から高速化と高精度化した3次元形状計測法の確立を目指す。

3. 研究の方法

傾斜エリプソメトリーによるその場精密3次元形状計測法を確立し、実用的な計測装置を実現するために以下の研究テーマを遂行する。実用的な装置を目指すため、計測時間1/30秒以下、傾斜角及び傾斜方位角の計測精度 0.1° を目標値とする。

(1) 液晶位相変調方式による高速イメージングエリプソメーターの開発

高速駆動できる大面積液晶セルを用いた位相変調型イメージングエリプソメーターを開発し、計測速度1/30秒以下で反射楕円の楕円率角と楕円方位角を全画面で決定する。

(2) 円偏光度97%以上の多分割照明装置の開発

傾斜エリプソメトリーでは計測精度がそのまま傾斜角及び傾斜方位角精度に対応する。本手法は反射楕円形状と照明円偏光の差を計測する。円偏光度97%の照明光を用いれば計測精度 0.1° を実現できることから、円偏光板への入射角と入射波長を考慮した多分割照明装置を開発する。

(3) 非金属物質への展開、特に人体の形状計測

これまでの研究から、非偏光成分が多く偏光画像が得られないと考えていた人体も偏光画像が得られたことから、本手法を人体へ適用し立体イメージングする。医療応用などの可能性を検討する。

4. 研究成果

(1) 高速イメージングエリプソメーターの開発

計測時間 1/30 秒以下で 2 次元偏光解析を行うために、大口径ネマティック液晶を使用した液晶変調型のイメージングエリプソメーターの高精度化に取り組んだ。ネマティック液晶による液晶可変リターダーは、機械的な駆動部が無く、液晶への印加電圧のみで偏光を制御できる。ただし、印加電圧による偏光の位相変化は線形ではないことから較正が不可欠である。

液晶変調型エリプソメーターの高精度化には、

液晶素子への印加電圧と位相変化量の再現性の向上

液晶素子方位角の高精度アライメントなどの課題を克服する必要がある。については、液晶素子を温度調整セル内に設置することで高い再現性が得られた。については、規定した偏光を入射したときの、液晶素子からの出射偏光を計測すれば良い。そこで、本研究では、独自に開発した 4 検出器型ポラリメーター(Transmission-type Four Detector Polarimeter: T-FDP)を用いて、射出偏光をその場計測した。入射光を方位角 0° の直線偏光とし、液晶素子ホルダーに予め設けられた取り付けネジを利用して進相軸に対して 45° で光を入射し、その射出光の偏光状態を T-FDP で計測した。ポアンカレ球上の偏光変化の軌跡を図 2 に赤線として示す。 S_1 - S_3 軸が作る平面上を変化して、円を描く変化が理想的であるが、計測の結果から液晶の設置基準角度から 4° 回転された状態で液晶が保持されていることが明らかとなった。

そこで、液晶素子を回転調整できる光学ホルダー上に配置し、調整後の出射偏光を再度 T-FDP でその場計測した(図 2 の青線)。調整後の偏光変化の軌跡は、位相変調素子として理想的な S_1 - S_3 平面上の変化として観察された。また、位相変化量も 360° 以上で、位相変調型イメージングエリプソメーターに実装できる数値であった。

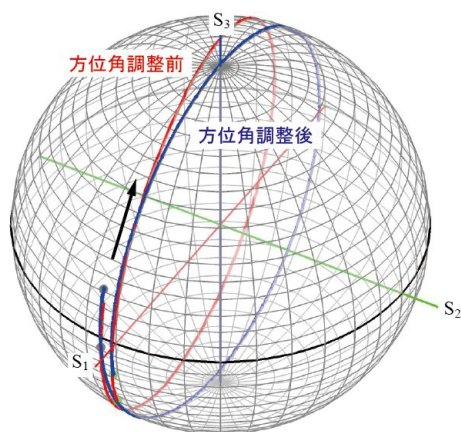


図 2. 4 検出器型ポラリメーターによる液晶素子からの出射偏光変化の軌跡。液晶方位角調整前(赤)と調整後(青)。なお、 S_3 軸正方向を左回り楕円とした。

また、2 つの直線偏光子をクロスニコル配置にして偏光子間に液晶を配置し、液晶への印加電圧を変えたときの光応答速度を光強度変化としてオシロスコープで実測した。光強度の立ち上がり(位相量が 360° から 180°) 応答時間と立ち下がり(位相量が 180° から 0°) 応答時間はそれぞれ、95 ミリ秒と 5 ミリ秒で、当初目標として設定した 1/30 秒での偏光イメージングは困難であるが、より高速な駆動が可能な液晶素子と本研究で用いた液晶の方位角調整法を用いれば、十分実現できる値と考えられる。

(2) 円偏光照明装置の開発

偏光イメージングによって、傾斜角の計測精度 0.1° を達成するためには、円偏光度 97% 以上の完全円偏光に近い円偏光を照明しなければならない。円偏光を生成するには、直線偏光子と $1/4$ 波長板を所定の角度でそれぞれ配置し、光を垂直入射すれば良い。しかし、3 次元形状の測定試料を全方位から円偏光照明するために、多くの精密光学素子やレーザーを用いるのは現実的ではない。そこで本研究では、市販の円偏光板の光学特性を計測し、適用波長と入射角を評価した。図 3 (a) に示すように、白色平行光を直線偏光として右回り円偏光子に入射し、出射偏光を分光エリプソメーターで計測した。図 3 (b) に円偏光子への入射角を変えた時の右円偏光度変化を示す。図 3 (c) に波長 532 nm と 540 nm で実測した偏光楕円の形状を示す。図 3 (b) より、緑色の波長を用いれば入射角 45° 付近までも右円偏光度 97% 以上が実現できることが分かった。

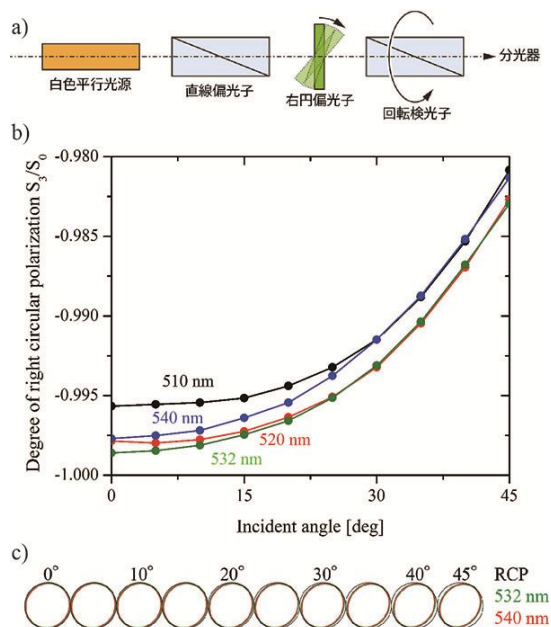


図 3. 右円偏光素子の分光入射角特性。(a) 測定配置、(b) 右円偏光度変化、(c) 出射楕円形状。

右円偏光板の分光入射角特性評価から、光源として緑色の高指向性 LED を用い、LED 前面に右円偏光子を貼り付けて光源ユニットを作製する。緯度及び経度方向にそれぞれ 10° 毎に光源ユニットを配置して、試料の全方位から円偏光照明できる装置を構成した。なお、偏光イメージングに用いる 2 次元検出器の前面に干渉フィルターを挿入し、LED の発光波長の範囲で波長選択できるようにした。作製した円偏光照明装置を図 4 に示す。

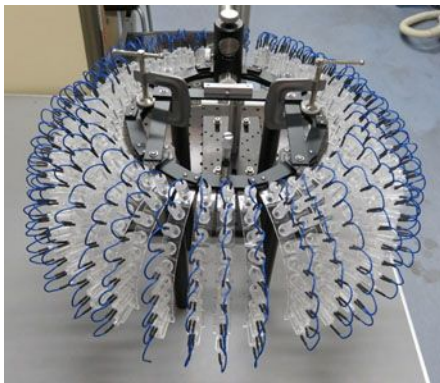


図 4. 作製した円偏光照明装置。

作製した円偏光照明装置を用いて金を十分厚く成膜した多角形を試料として、偏光画像を計測した。波長 532 nm 及び 540 nm の楕円率角分布と主軸方位角分布を図 5 に示す。画像右側(楕円率角分布で濃い青色)は、LED 光をそのまま照明した領域に相当する。右円偏光板を貼り付けていないため、非偏光照明となることを想定した。しかし、主軸方位角分布を見ると、同一面内で不均一な分布が見られることから、LED からの光は不均一な偏光状態であることが分かる。一方、右円偏光照明した領域では、楕円率角分布と主軸方位角分布は予測通りの分布が得られた。

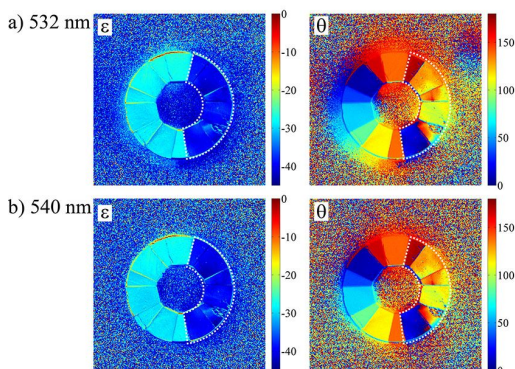


図 5. 金多角形試料の偏光画像。(a) 波長 532 nm の楕円率角(ϵ)分布と主軸方位角(θ)分布。(b) 波長 540 nm の楕円率角(ϵ)分布と主軸方位角(θ)分布。

分光エリプソメトリーで決定した金厚膜の複素屈折率 ($n_{532\text{nm}}=0.595-2.36i$ 、 $n_{540\text{nm}}=0.536-2.457i$) を用いて計算した入射角と楕円率角の関係を図 6 に示す。また、図

7 には、偏光画像から算出した同一傾斜面内の楕円率角分布をヒストグラム表示した。図 7 から、波長 532 nm と 540 nm の中心値はそれぞれ約 -29.5° と約 -30° であり、図 6 から共に入射角が 45° であることが示された。入射波長の差は僅かであるが、楕円率角に明確な差として反映されたことから、本手法の高い計測感度を実証された。

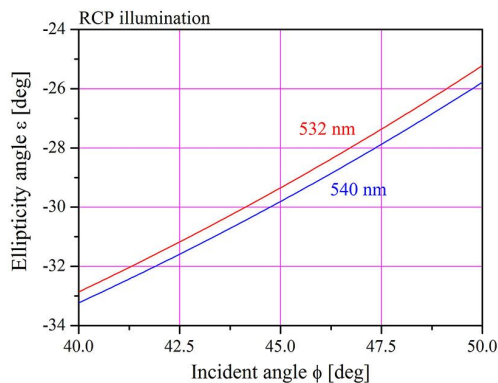


図 6. 波長 532 nm と 540 nm の入射光を用いたときの入射角に対する楕円率角変化。

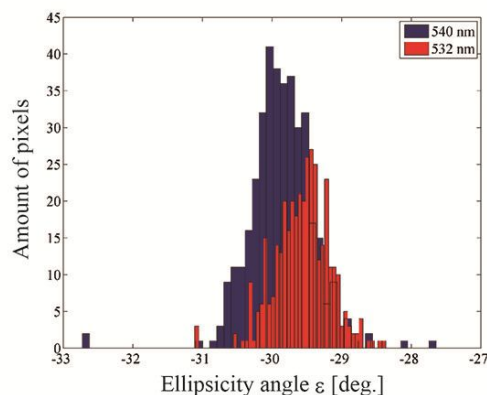


図 7. 波長 532 nm と 540 nm の楕円率角分布のヒストグラム。

(3) 人体の分光反射率計測

エリプソメトリーによる 3 次元形状計測の応用の可能性を評価するために、ハロゲン光源と Y 分岐バンドルファイバーを用いて、19 歳から 22 歳の男女 16 名の手首外側の分光反射率を計測した。なお、光源の分光スペクトル計測には Si ウエハーを用いた。

図 8 に示すように、可視光領域の肌の垂直入射の反射率は 1~3% 程度であった。人体の皮膚による光応答には正反射に加えて拡散反射や吸収があり、一般に報告されている分光反射率は拡散反射成分を含めた計測である。全被験者に共通して波長 610 nm 付近が最も反射率が高く、また、520~600 nm 付近に肌の透明感に起因すると考えられる僅かな凹みがあった。反射率は低いものの、十分偏光解析できる値であることから、エリプソメトリーによる 3 次元形状計測の人体応用の実現が期待できる。

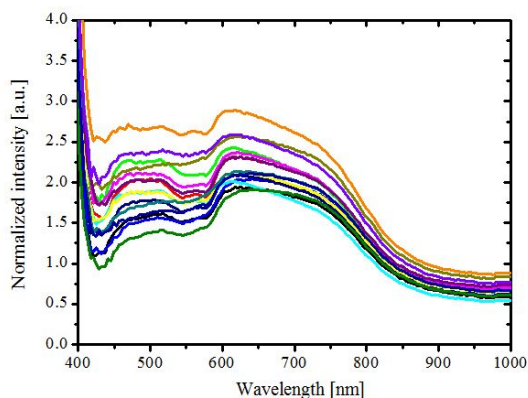


図8. 男女16名の手首外側の分光反射率。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計1件)

1. 津留俊英、山本治美、松川裕章、"2次元偏光解析による3次元形状計測"、表面科学 35 (2014) 300-305、査読有
DOI: 10.1380/jsssj.35.300

[学会発表](計9件)

1. 小川広暉、津留俊英、"エリプソメトリによる3次元形状計測のための偏光照明法"、第63回応用物理学会春季学術講演会、2016年3月21日、東工大学
2. 津留俊英、"EUV用偏光光学素子の開発と応用"、第11回偏光計測研究会、2015年12月4日、東京・(株)フォトロン
3. 石澤倫、津留俊英、"4検出器型偏光計の高精度化と高速化"、第76回応用物理学会秋季学術講演会、2015年9月15日、名古屋国際会議場
4. 津留俊英、"4検出器法による液晶可変リターダーの光学特性評価"、偏光計測・制御技術研究グループ偏光勉強会、2014年12月24日、東京都立産業技術研究センター
5. 大沼穂乃花、石澤美希、石澤倫、津留俊英、"液晶可変リターダーの光学特性評価"、第69回応用物理学会東北支部学術講演会、2014年12月4日、東北大学
6. 石澤倫、津留俊英、"4検出器法による高速偏光計測システムの開発"、第69回応用物理学会東北支部学術講演会、2014年12月4日、東北大学
7. 津留俊英、"光による三次元形状計測"、第64次山形地区教育研究合同集会、2014年10月11日、山形市立第四中学校
8. 石澤倫、津留俊英、"振幅分割型ポラリメーターによる液晶可変リターダーの評価"、第75回応用物理学会秋季学術講演会、2014年9月17日、北海道大学
9. Toshihide Tsuru, "Three-dimensional shape measurement of a glossy object

by imaging ellipsometry", The 6th International Conference on Spectroscopic Ellipsometry, 2013年5月28日、京都リサーチパーク

6. 研究組織

(1) 研究代表者

津留 俊英 (TSURU TOSHIHIDE)

山形大学・地域教育文化学部・准教授

研究者番号: 30306526