

偏光情報を用いた三次元形状復元に関する研究

Study of Surface Reconstruction from Polarization information

電子・機械技術部 ロボット・制御科 近野裕太

非接触の三次元形状復元手法として、SfM (Structure from Motion) や SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) がある。カメラ単体で実施可能なため低コストで導入可能だが、低コントラストや弱テクスチャな対象については、各画像間の対応付けを行うための特徴点を抽出することができず原理的に復元することができない。本研究では、近年様々な製品が販売されている偏光カメラにより取得可能な偏光度、偏光角度等の偏光情報を用いた非接触三次元形状復元の SfM や SfM-MVS に比べた有効性について、実験により検証を行った。

Key words: 三次元形状復元、偏光カメラ、直線偏光度、直線偏光角度、法線マップ

1. 緒言

非接触の三次元形状復元手法として、SfM (Structure from Motion) や SfM-MVS (Structure from Motion-Multi View Stereo) がある。これらの手法は橋梁の点検やその他インフラメンテナンス等の建築・土木分野、及びドローン等のロボットビジョンの分野で主に用いられているものであり、三浦ら¹⁾はドローンに搭載した単眼カメラを用いて建造物等の三次元形状復元を行う用途に使用した。この手法はステレオカメラによる深度推定を拡張したものであり、単眼カメラを用いて測定対象物を多数の角度から撮影した画像から抽出した特徴点を用いてカメラを位置 w お推定し、推定したカメラ位置情報を用いたステレオカメラの原理による深度推定及び三次元形状復元を行う。撮影画像から複数の画像間で一致する特徴点を抽出する必要があるため、例えば単色の壁などの低コントラストや弱テクスチャな対象については、原理上三次元形状復元を行うことができない。そのような対象に対し、阿久津ら²⁾は Textureless-Aware PAtchMatch (TAPA)-MVS とコントラスト強調及び適応的の深度選択等を統合した手法を提案し、その有効性を示している。

近年、撮像素子上に4方向の直線偏光フィルタをグリッド状に配置した偏光カメラが多数販売されている。一度に 0°]、 45°]、 90°]、 135°] 方向の偏光画像を撮影し、撮影対象の表面からの反射光の直線偏光度 (Degree of Linear Polarization: DoLP)、直線偏光角度 (Angle of Linear Polarization: AoLP) 等の情報を取得することができ、通常の単眼カメラより多くの撮影対象表面の情報を得ることが可能である。偏光カメラを用いた三次元形状復元手法として SfP (Shape from Polarization)、またそれに伴う Normal Integration という分野がある。例えば透明測定物を対象とした三次元形状復元³⁾等の研究が行われている。

本研究では、SfM や SfM-MVS と比べた、偏光カメラ等により得られる偏光情報を用いた三次元形状復元の

有効性について検証した。

2. 実験

2. 1. 偏光情報

偏光カメラ等により得られる 0°]、 45°]、 90°]、 135°] 方向に直線偏光フィルタの角度を設定して撮影した画像から、直線偏光度 ρ 、直線偏光角度 θ 、及び非偏光画像 I_{un} 等の偏光情報を取得することができる。直線偏光度は撮影対象物からの反射光がどれだけ偏光しているかを表す値であり、0 から 1 の値を取る。完全に偏光している光は1、非偏光な光は0で表される。直線偏光度はその反射光の偏光の位相角を表す値であり、0 から π の値を取る。図1にカメラキャップを撮影した例を示す。通常の画像では黒色であるためエッジ等の判別が難しいが、直線偏光度及び直線偏光角度の画像では判別しやすくなっていることが確認できる。なお、直線偏光角度 θ は HSV 色空間により表示している。



非偏光画像 I_{un} 直線偏光度 ρ 直線偏光角度 θ

図1 カメラキャップを撮影した際の偏光情報の例

2. 2. SfP (Shape from Polarization)

SfP の研究の多くは、照明条件や測定対象にパターンを投影するなどの制限をかけた上での手法であるが、本研究では生産現場等での使用を想定し、通常の室内や屋外等の状況で撮影した偏光画像にも広く適用可能である、機械学習と組み合わせた LEI ら⁴⁾の手法を検証した。LEI らが提供している学習済みモデルに対し直線偏光度等の偏光情報を入力し、測定対象表面の密な法線マップを出力した。

2. 3. Normal Integration

三次元形状復元するため、前項で取得した法線マップを高さマップに変換する必要がある。本研究では、高さの不連続性を保持した最適化ベースの表面再構成手法について提案している CAO ら⁵⁾ の手法により、前項で取得した法線マップから高さマップの推定を行い、手法の有効性を検証した。

2. 4. 実験システム及び三次元形状復元実験

偏光画像取得のため、一眼レフカメラと直線偏光フィルタ及び直線偏光フィルタを任意の角度に回転させるステッピングモータを組み合わせた図2に示す実験システムを構築した。

本システムを用いて取得した偏光画像から三次元形状復元の実験を行うとともに、比較のため、SfM-MVS による三次元形状復元の実験を行った。SfM-MVS による復元には COLMAP⁶⁾ を使い、偏光画像を取得した位置に近い範囲において偏光フィルタを使用せずに撮影した 21 枚の画像を入力とした。

元ができていることが確認できた。

また SfM-MVS に入力した画像の例及び三次元形状復元結果を図 1 1、1 2 に示す。床や青色の扉などの特徴がない平面部分の形状が復元できていないことが確認できた。



図2 実験システム

3. 結果

3. 1. SfP の実験結果

図3に入力した偏光情報、図4に出力結果の法線マップを示す。入力した偏光情報は、LEI らが作成したデータセット中のものを使用した。法線マップの座標系は図4中に示す通りであり、通常の下条件下で得られた偏光情報からも良好に法線推定ができていることが確認された。



図3 入力した偏光情報

3. 2. Normal Integration の実験結果

CAO らの手法を用いて、図4の推定法線マップから高さの推定及び三次元形状復元を行った結果を図5、6に示す。図5は図4の全ての法線情報を入力した場合、図6は図4の内前方にある椅子の一部分の法線情報のみを使用した場合の高さの推定結果である。図5では本来の高さとは乖離した結果となっており、CAO らの手法は不連続性を保持した最適化ベースの表面再構成手法ではあるが、例えば椅子の前後等、高さ方向の距離が離れているような場合は推定高さ等の誤差が大きくなってしまふ可能性がある。図6では良好に高さを推定できていることが確認できる。

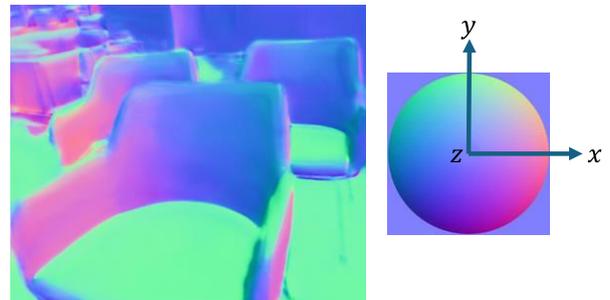


図4 推定した法線マップ

3. 3. 実験システムを用いた結果

図2の実験システムにより取得した図7に示す偏光画像から得た直線偏光度等の偏光情報を図8に、偏光情報をもとに取得した推定法線マップ、推定高さマップを図9、10にそれぞれ示す。図9、10ともに一部正しく推定できていない箇所が存在するが、床や青色の扉などの平面部分については良好に三次元形状復

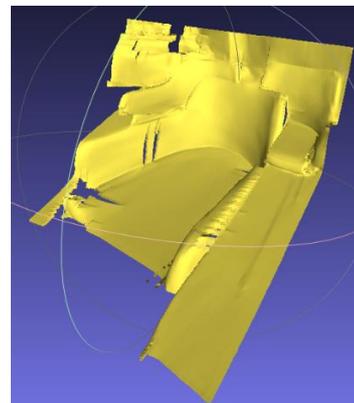


図5 全ての推定法線を使用した場合の出力

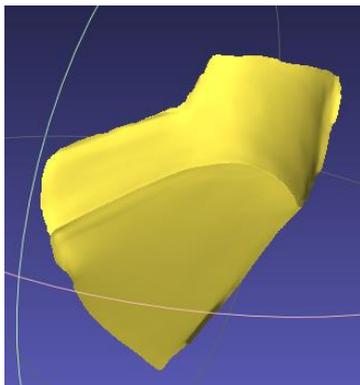


図6 一部の推定法線を使用した場合の出力

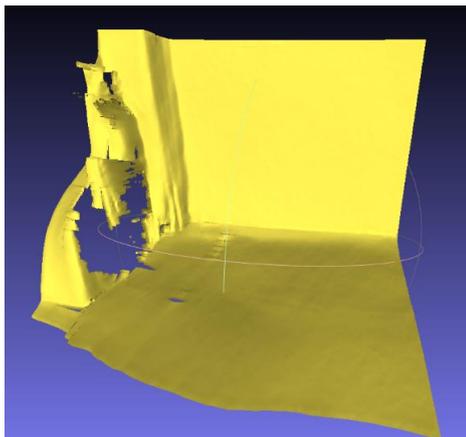


図10 三次元形状復元結果



直線偏光画像 [0°]

直線偏光画像 [45°]



直線偏光画像 [90°]

直線偏光画像 [135°]

図7 実験システムにより取得した直線偏光画像



図11 COLMAP への入力画像の例



非偏光画像 I_{un}

直線偏光度 ρ

直線偏光度 ϕ

図8 入力した偏光情報

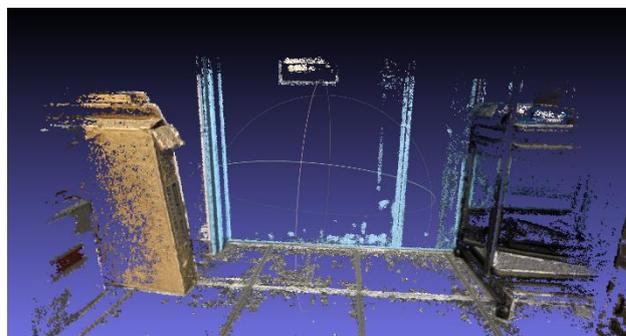


図12 COLMAP での三次元形状復元結果



図9 法線マップ推定結果

4. 考察

4. 1. SfP 及び Normal Integration の有効性

SfM や SfM-MVS では、三次元形状復元を行うために複数の視点から撮影した多数の画像が必要となるが、SfP 及び Normal Integration による三次元形状復元においては、0[°]、45[°]、90[°]、135[°]方向に直線偏光フィルタの角度を設定して撮影した一組の画像により、1 視点からの画像であっても、SfM や SfM-MVS より密な点群を取得することが可能である。また図 10、12 を比較すると、SfM や SfM-MVS では原理的に

復元ができない低コントラストや弱テクスチャな平面の部分についても三次元形状復元が可能なことが利点であると言える。

課題としては、Normal Integration を行う際に高さ方向が不連続な部分の高さ推定の精度が劣化する問題がある。一方、SfM や SfM-MVS においては高さ方向に不連続であっても画像間の特徴点を取得することができれば点群を取得することが可能である。そのため、SfM や SfM-MVS によりまず三次元形状復元を行い、取得した点群情報をもとに高さ方向に不連続な対象を分類、分類した対象毎に局所的に SFP 及び Normal Integration を行うようなシステムを構築することで、高精度に三次元形状復元を行うことができる可能性がある。

4. 2. 三次元形状復元の失敗例

図10に示す結果では概ね良好に三次元形状復元ができていたが、三次元形状復元ができない場合も確認された。図13、14、15に三次元形状復元に失敗した際の偏光情報、法線マップ推定結果、三次元形状復元結果の例を示す。LEI が学習時に使用した画像における対象物は図3に示すようにカメラから比較的遠方にあるのに対し、図13に示す偏光情報は対象を近傍から撮影した偏光画像から取得したものである。三次元形状復元に失敗した原因として、今回使用した LEI が提供している学習済みモデルでは近傍から撮影した対象物について学習できていないこと、また使用するカメラの画角の違いにより、学習済みモデルに入力できる画像の情報量が違うことなどが考えられる。

5. 結言

本研究では、SfM や SfM-MVS と比べた、偏光カメラ等からの偏光情報を用いた三次元形状復元の有効性について検証した。

今後、市販の偏光カメラを用いた実験や、対象物を接写した場合のデータ等も追加して学習したモデルを用いた実験、また SfM や SfM-MVS と組み合わせた SFP 及び Normal Integration による三次元形状復元に関する実験等を行っていきたい。

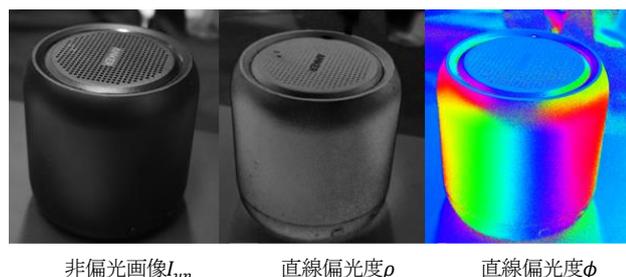


図13 失敗した際の偏光情報



図14 失敗した際の法線マップ推定結果

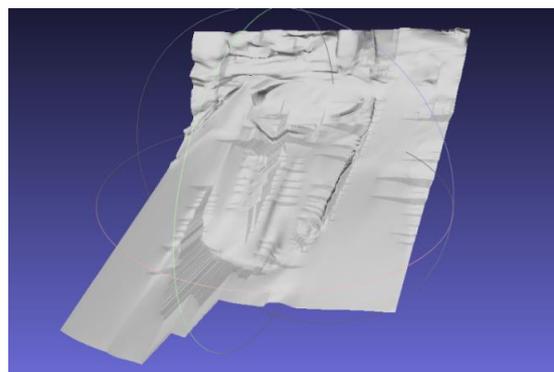


図15 失敗した際の三次元形状復元結果

参考文献

- 1) 三浦勝史, 塚本遊 他. ロボットビジョン技術を搭載したドローン実演機の試作と RTF でのフィールド実証 (第 2 報). 令和 4 年度福島県ハイテクプラザ試験研究報告, 2023
- 2) 阿久津啓, 金井理, 伊達宏昭 他. “画像のコントラスト強調と対象形状仮説に基づく深度の適応的選択による低テクスチャ表面の SfM-MVS 再構成モデル品質の向上”. 2020 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. 2020, p.230-231.
- 3) 宮崎大輔, 池内克史. “偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定手法”. 電子情報通信学会論文誌 D-II. 2005, 88(8), p.1432-1439.
- 4) LEI, Chenyang, et al. “Shape from Polarization for Complex Scenes in the Wild”. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2112.11377>, (参照 2024-2-26).
- 5) CAO, Xu, et al. “Bilateral Normal Integration”. European Computer Vision Association. https://www.ecva.net/papers/eccv_2022/papers_ECCV/papers/136610545.pdf, (参照 2024-2-26).
- 6) “colmap”. Github. <https://github.com/colmap/colmap>, (参照 2024-02-28)