

偏光情報を用いた 三次元形状復元に関する研究

ロボット・制御科 副主任研究員 近野裕太

質問はメールにて事務局までお気軽にお問い合わせください。
問い合わせ先：福島県ハイテクプラザ 企画連携部産学連携科
e-mail : hightech-renkei@pref.fukushima.lg.jp

目次

1. 背景・目的
2. 偏光について
3. SfP及びNI
4. SfM-MVS
5. 三次元形状復元実験
6. まとめ・今後の予定

1. 背景・目的

- 非接触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できるメリットがあるが、対象が低コントラストや弱テクスチャなものについては、特徴点を抽出できないため、原理的に復元することが難しい。



SfM-MVSによる欠損の例 [1]

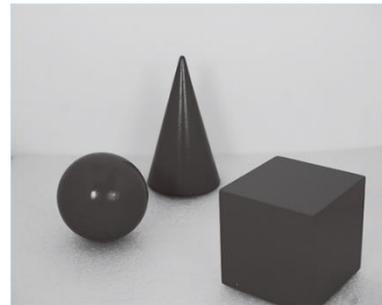
[1] 阿久津啓, et al. "画像のコントラスト強調と対象形状仮説に基づく深度の適応的選択による低テクスチャ表面の SfM-MVS 再構成モデル品質の向上." 精密工学会学術講演会講演論文集 2020 年度精密工学会春季大会. 公益社団法人 精密工学会, 2020.

1. 背景・目的

- 近年様々な製品が販売されている偏光カメラ等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。
- 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。



偏光カメラの例 [2]



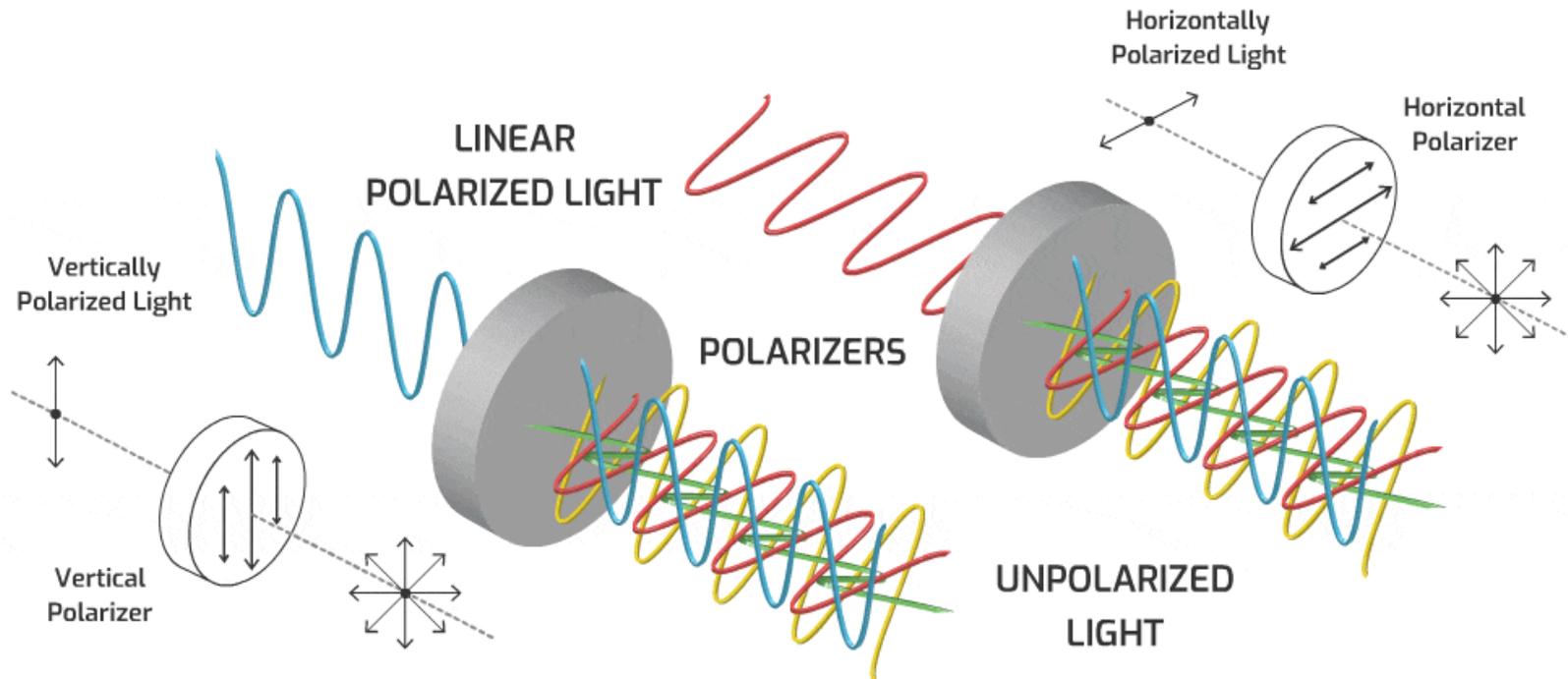
偏光情報の例(直線偏光角度 θ のHSV色空間による表現) [3]

[2] <https://www.sony.co.jp/Products/ISP/products/model/pc/XCG-CP510.html>

[3] https://www.sony.co.jp/Products/ISP/download/pdf/catalog/03_Polarization_camera_Lineup_J_001_02.pdf

2. 偏光について

- 一般的な光は、様々な偏光角度の光の集合。
- 直線偏光フィルタを用いることで、任意の位相角の光のみを抽出可能。



偏光・偏光フィルタのイメージ [4]

[4] <https://thinklucid.com/ja/polarization-explained-sony-polarized-sensor-2/>

2. 偏光について

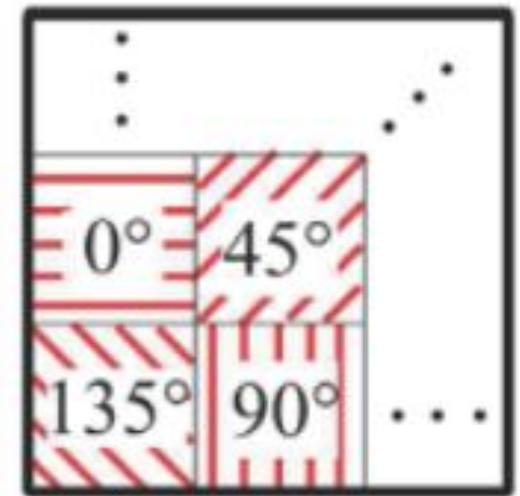
- 偏光カメラ等により得られる $\theta = 0[^\circ]$ 、 $45[^\circ]$ 、 $90[^\circ]$ 、 $135[^\circ]$ 方向に直線偏光フィルタの角度を設定して撮影した画像から、

- 直線偏光度 ρ → どれだけ偏光しているかを表す値 (0~1)

- 直線偏光角度 ϕ → 偏光の位相角を表す値 (0~ π)

- 非偏光画像 I_{un} → 偏光成分が除かれた画像

等の偏光情報を取得することが可能。



偏光カメラのグリッドイメージ [5]

[5] <https://thinklucid.com/ja/polarization-explained-sony-polarized-sensor-2/>

2. 偏光について

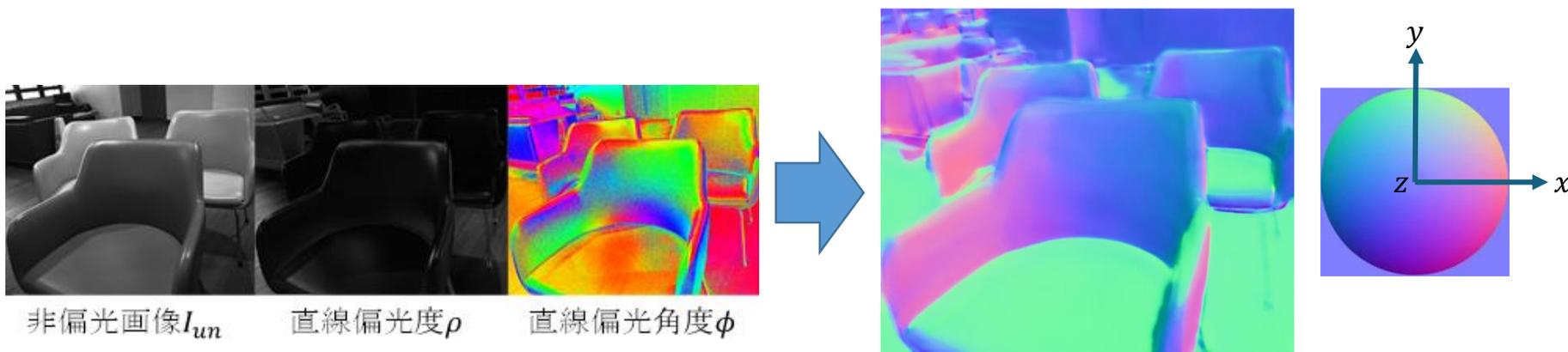
- 一般に、入射光の偏光状態はストークス・パラメータとして定量化可能。
- 偏光状態は、直線偏光、円偏光および楕円偏光等がある。本研究では直線偏光のみ取り扱う。
- それぞれの方向に設置した直線偏光フィルタで得られた画像の輝度値を I_0 、 I_{45} 、 I_{90} 、 I_{135} とすると、ストークスパラメータ及び直線偏光度 ρ 、直線偏光角度 ϕ 、非偏光画像 I_{un} の算出方法は以下のとおり。

$$s = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (I_0 + I_{45} + I_{90} + I_{135}) \\ I_0 - I_{90} \\ I_{45} - I_{135} \end{bmatrix}$$

$$\rho = \frac{\sqrt{s_1^2 + s_2^2}}{s_0}, \quad \phi = \frac{1}{2} \tan^{-1} \frac{s_2}{s_1}, \quad I_{un} = \frac{s_0}{2}$$

3. SfP及びNI

- 取得した偏光情報から、画素毎の法線マップを取得するSfP(Shape from Polarization)が多数研究されている。
- 本研究では、機械学習と組み合わせたLEIら[6]の手法を使用。
- LEIらが提供している学習済みモデルを用いて、測定対象表面の法線マップを出力。

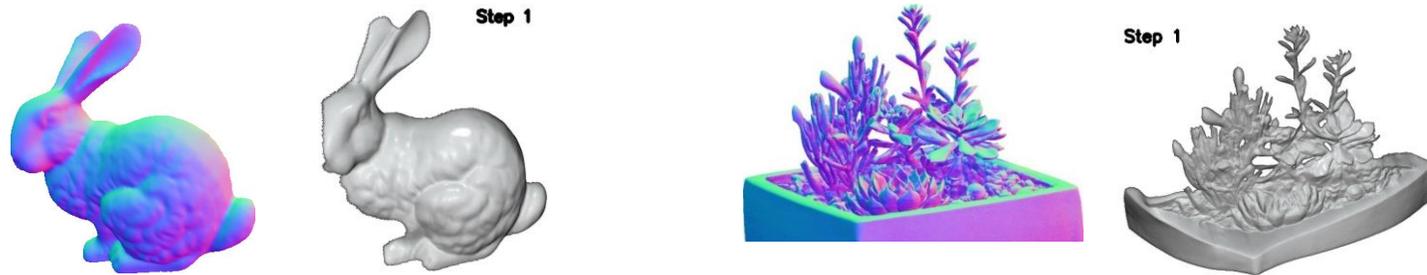


法線方向推定結果の例

[6] LEI, Chenyang, et al. "Shape from Polarization for Complex Scenes in the Wild". arXiv. <https://arxiv.org/abs/2112.11377>

3. SfP及びNI

- 推定した法線マップから、高さマップを推定することで三次元形状復元を行うNI(Normal Integration)の研究も数多く行われている。
- このタスクの難点は、高さ方向に不連続な部分を以下に綺麗に復元するか。
- 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[7]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（三次元形状復元）を実施。



高さ推定(三次元形状復元)結果の例[8]

[7] CAO, Xu, et al. "Bilateral Normal Integration". European Computer Vision Association. https://www.ecva.net/papers/eccv_2022/papers_ECCV/papers/136610545.pdf

[8] "bilateral_normal_integration". Github. https://github.com/xuca0-42/bilateral_normal_integration

4. SfM-MVS

- 本研究では、比較を行う際のSfM-MVSはCOLMAP[9]を用いて実施。

①画像の特徴検出及び抽出



②特徴マッチング



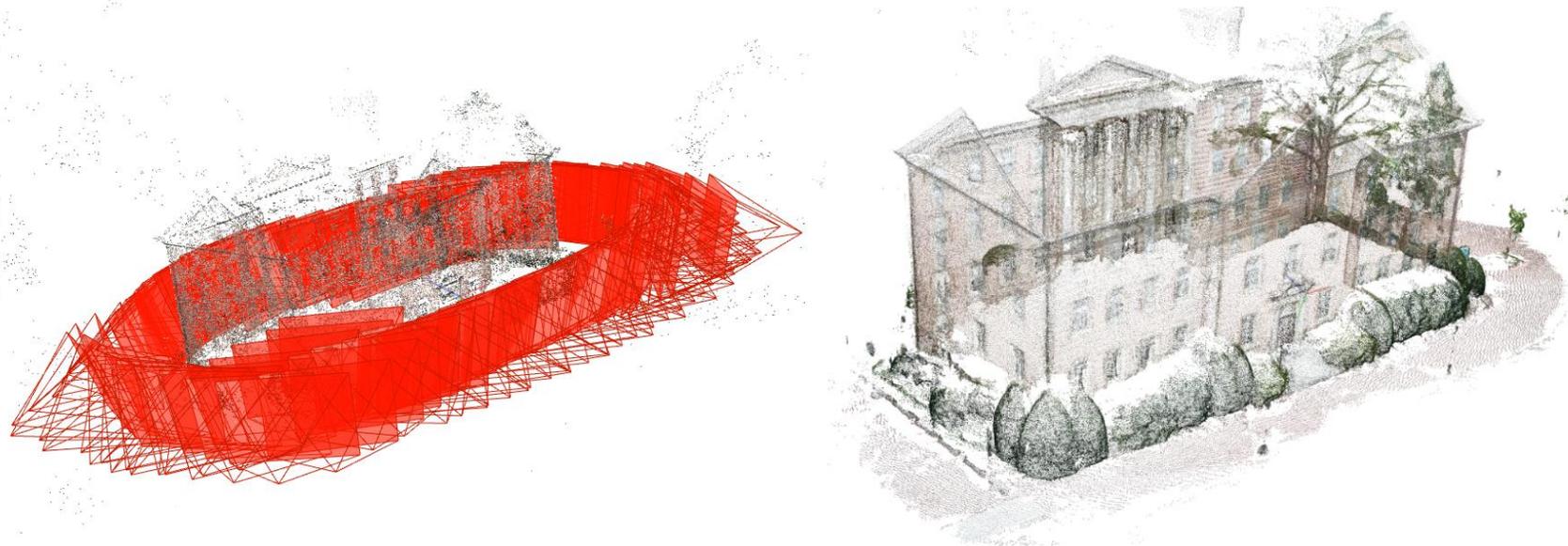
③バンドル調整



④MVS



⑤メッシュ化



COLMAPを用いた三次元復元の例

SfM-MVSの処理フローの概要

[9] "colmap". Github. <https://github.com/colmap/colmap>

5. 三次元形状復元実験

- 実験システムの構成
 - 一眼レフカメラ
(Canon EOS R100)
 - 直線偏光フィルタ
 - フィルタ回転用治具
- 無回転時のフィルタ角度を 0° とした場合
 - ① 0° 、② 45° 、③ 90° 、④ 135°にフィルタを回転させた際の画像を自動で撮影。

直線偏光フィルタ



ステッピングモータ

実験装置

5. 三次元形状復元実験 結果(SfP-NI)



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°]

撮影した偏光画像



非偏光画像 I_{un}

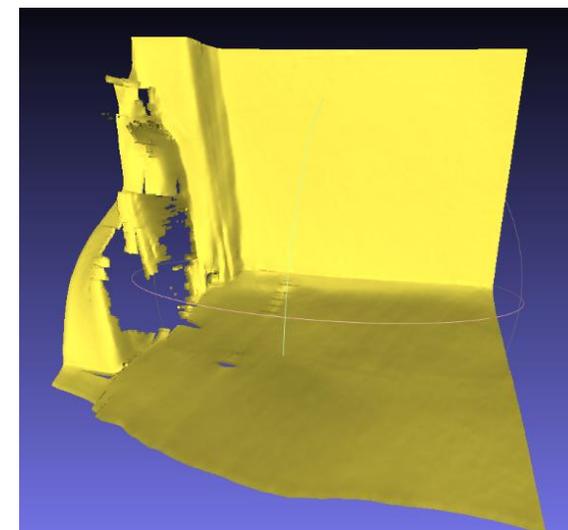
直線偏光度 ρ

直線偏光角度 ϕ

偏光情報



推定法線マップ

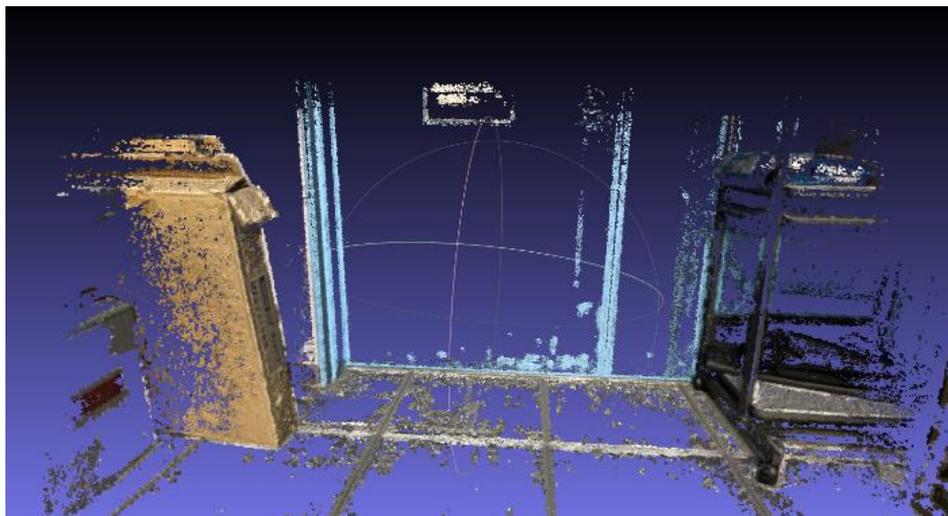


三次元形状復元結果
(SfP+NI)

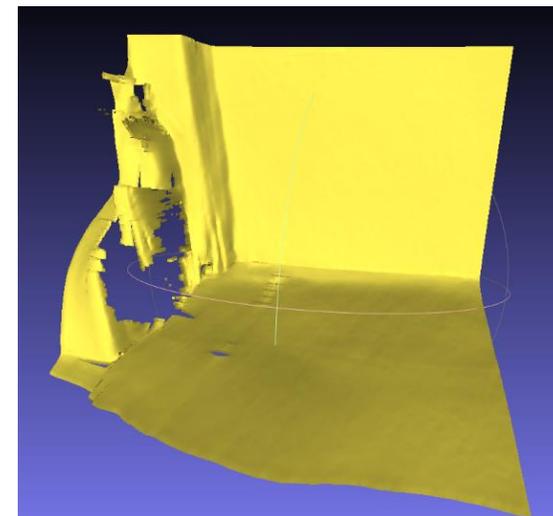
5. 三次元形状復元実験 結果(SfM-MVSとの比較)



SfM-MVSで使った画像の例
(他20枚使用)



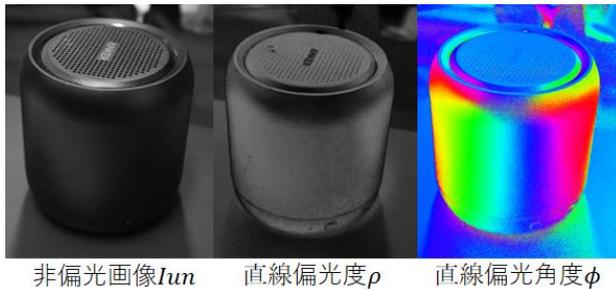
三次元形状復元結
(SfM+MVS)



三次元形状復元結果
(SfP+NI)

SfP+NIでは、弱テクスチャな床や扉の平面部分の三次元形状復元が可能

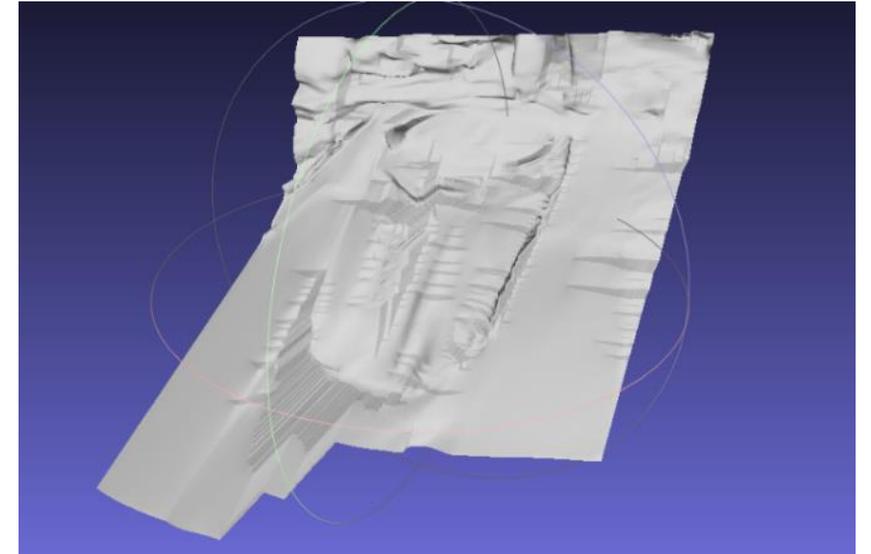
5. 三次元形状復元実験 失敗例



偏光情報



推定法線マップ



三次元形状復元結果

原因の考察

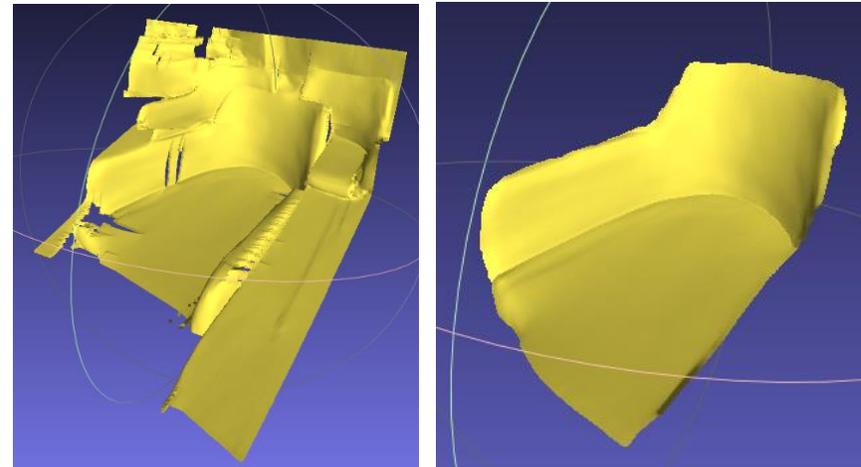
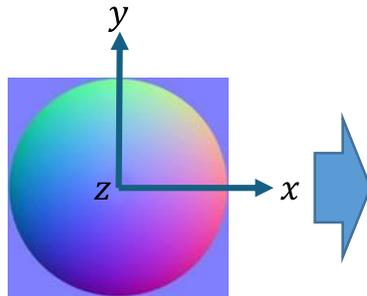
- ① LEIらが提供している学習済みモデルでは近傍から撮影した対象物について学習できていないこと。
- ② 使用するカメラの画角の違いにより、学習済みモデルに入力できる画像の情報量が違うこと。

5. その他の問題

- NIを行う際、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る。
- 前方にある椅子の一部の法線情報のみを使用した場合は、良好に高さを推定できていることが確認できる。



推定法線マップ



三次元形状復元結果の比較

6. まとめ・今後の予定

- SfP + NIによる三次元形状復元と、SfM+MVSによる三次元形状復元との比較を行い、SfP + NIによる三次元形状復元の有効性について検証した。
- SfM+MVSでは復元できない箇所の復元が可能であり、かつ1視野からの画像のみで密な三次元形状点群を取得可能である優位性がある。
- NIを行う際に高さ方向が不連続な部分があると、高さ推定の精度が劣化する問題等がある。
- 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ため、SfM-MVSとSfP及びNIを組み合わせたシステムを構築することで、高精度に、データの抜け無く、三次元形状復元を行うことができる可能性がある。
- 今後実装に向けて調査・研究を行っていききたい。