透明薄板による屈折を利用したスケール復元可能な Structure from Motion

東京大学　○奥村 有加里，　藤井 浩光，　山下 淳，　淺間 一

Scale Reconstructible Structure from Motion Using Refraction with Thin Refractive Plate

The University of Tokyo　Yukari OKUMURA, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Structure from Motion (SfM) is a three-dimensional reconstruction method which uses a moving camera. However, the real-world scales of objects cannot be estimated. To solve this problem, we proposed a SfM method using refraction with a refractive plate. In our previous method, the reconstruction fails with a thin refractive plate. In this paper, we propose a SfM method that can reconstruct with a thin refractive plate. To that end, we introduce an optimization technique into the reconstruction process. Our method can obtain translational movement with consistency during estimation, and can optimize the reconstruction result that minimizes reprojection errors. Effectiveness of the proposed method is confirmed by simulation experiments.

1.　序論

Structure from Motion（SfM）はカメラ 1 台のみを用いる 3 次元計測手法の 1 つである [1]．SfM はカメラの移動情報を推定すると同時に計測対象の形状を復元できる一方で，計測対象の大きさ（スケール）を復元できない問題がある．この問題を解決するためには，カメラの位置関係に関する定量的な値や幾何学的な情報を与える手法が提案されている [1)2)]．しかし，環境が完全に未知でスケールに関する情報が利用できない場合はこれらの手法は適用することができない．

SfM のスケール不定性を解決するために，我々は屈折を利用した 2 視点での SfM を提案した [3]．この研究では，計測対象とカメラの間に透明平板を設置することで生じる光学的な屈折現象を利用しており，計測対象のスケールを含めた 3 次元形状の復元を可能とする理論を構築した．また，この手法を多視点に拡張することで計測誤差に対する頑健性を向上させた [4]．一方でこれらの手法では，透明平板を薄くした際に屈折の影響が小さくなるため，スケールだけでなく形状を含めて復元ができなくなる課題がある．そのため，精度の良い復元には厚い透明平板が必要となるが，SfM における移動しながらの計測では計測装置が重厚化することは大きな問題となる．

本論文では，薄い透明平板を用いた際の屈折を用いた SfM の精度の向上を目的とする．そのために，カメラの並進ベクトルに関する制約条件と再投影誤差を最小化する最適化を導入する．

2.　屈折を用いた SfM の計測原理

屈折を用いた SfM の計測原理 [3] を図 **1** に示す．この図は，異なる 2 視点から透明平板を通じて計測点 P を観測した模式図を表している．なお，カメラと透明平板の相対位置は固定されているとする．2 つのカメラ座標系 C と C′ について，緑色の線が計測点からの光路を示している．各カメラ座標系について，カメラから透明平板までの光線を表すベクトルをそれぞれ内側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\rm in}$ と $\mathbf{r}'_{\rm in}$，透明平板から計測対象点への光線を表すベクトルをそれぞれ外側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\rm out}$ と $\mathbf{r}'_{\rm out}$ と表す．また，内側光線ベクトルと外側光線ベクトルの透明平板の法線方向へのずれ量を変化量ベクトル $\mathbf{d}$ と $\mathbf{d}'$ と定義し，原点を始点とした際の変化量ベクトルの終点をそれぞれ D と D′ する．

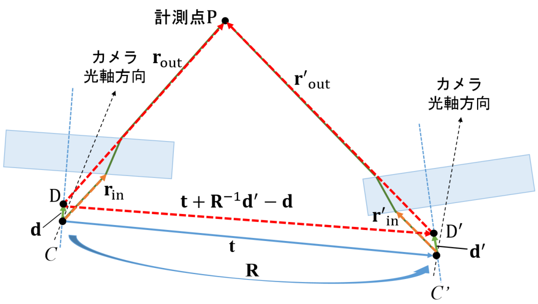

Fig. 1 2 視点の屈折を用いた SfM の幾何的関係

図 **1** において，D，D′，計測点 P の 3 点は同一平面上に存在する．したがって，以下の関係式が成り立つ．

$$\left\{(\mathbf{t}+\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}'-\mathbf{d})\times\mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'_{\rm out}\right\}^{\rm T}\mathbf{r}_{\rm out}=0, \tag{1}$$

ただし，カメラ座標系 C からカメラ座標系 C′ への移動を表す回転行列を $\mathbf{R}$，並進ベクトルを $\mathbf{t}$ とする．式 (1) の各要素について成分をそれぞれ，$\mathbf{r}_{\rm out}=(x,y,z)^{\rm T}$, $\mathbf{d}=(d_1,d_2,d_3)^{\rm T}$, $\mathbf{r}'_{\rm out}=(x',y',z')^{\rm T}$, $\mathbf{d}'=(d'_1,d'_2,d'_3)^{\rm T}$ とすると，式 (1) は，

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ d_3yx'-d_2zx'+d'_3xy'-d'_2xz' \\ d_1zx'-d_3xx'+d'_3yy'-d'_2yz' \\ d_2xx'-d_1yx'+d'_3zy'-d'_2zz' \\ d_3yy'-d_2zy'+d'_1xz'-d'_3xx' \\ d_1zy'-d_3xy'+d'_1yz'-d'_3yx' \\ d_2xy'-d_1yy'+d'_1zz'-d'_3zx' \\ d_3yz'-d_2zz'+d'_2xx'-d'_1xy' \\ d_1zz'-d_3xz'+d'_2yx'-d'_1yy' \\ d_2xz'-d_1yz'+d'_2zx'-d'_1zy' \end{pmatrix}^{\rm T} \begin{pmatrix} r_{12}t_3-r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1-r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2-r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3-r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1-r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2-r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3-r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1-r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2-r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}=0, \tag{2}$$

と整理でき，さらに

$$\mathbf{u}^{\rm T}\mathbf{g}\ =\ 0, \tag{3}$$

とベクトルの内積で表すことができる．ここで，$\mathbf{u}$ は既知数からなる既知数ベクトル，$\mathbf{g}$ は未知数からなる未知数ベクトルである．式 (3) の連立方程式に最小二乗法を適用することで未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を推定し，未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の成分から回転行列と並進ベクトルを算出する．さらに，これらの移動情報から計

測点の 3 次元位置を推定する．

3. 提案手法

3.1 並進ベクトルに関する制約条件

未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を推定する際，復元に用いる透明平板を薄くすると式 (2) の幾何学的な整合性を満たす解を得ることが困難になる．これは，透明平板を薄くすると屈折の効果により生じる変化量ベクトル $\mathbf{d}$ の大きさが小さくなるためである．整合性を満たす解を得るために，従来手法[3]では回転行列 $\mathbf{R}$ の正規直交性を保証する制約条件を最小二乗解を算出する際に付与した．これらの条件により回転行列 $\mathbf{R}$ の正規直交性は保証されるが，一方で透明平板を薄くすると並進ベクトル $\mathbf{t}$ に関して成分同士で成立すべき関係における整合性が満たされなくなり，精度良く復元することが困難となる．

本研究では，並進ベクトル $\mathbf{t}$ の整合性を満たす解を得るために並進ベクトル $\mathbf{t}$ に関する制約条件を追加する．ここで，$\mathbf{T}$ を並進ベクトル $\mathbf{t}$ の歪対称行列，すなわち，

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

とすると，回転行列 $\mathbf{R}$ と並進ベクトル $\mathbf{t}$ と未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の第 1 成分 g_1 から第 9 成分 g_9 までについて，以下の関係がある．

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_4 & g_5 & g_6 \\ g_7 & g_8 & g_9 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 & r_{13}t_1 - r_{11}t_3 & r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 & r_{23}t_1 - r_{21}t_3 & r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 & r_{33}t_1 - r_{31}t_3 & r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \end{pmatrix} \\ &= \mathbf{R}\mathbf{T}, \end{aligned} \tag{5}$$

ただし，行列 $\mathbf{E}$ は未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の第 1 成分 g_1 から第 9 成分 g_9 までを成分に持つ行列とする．式 (5) より，歪対称行列 $\mathbf{T}$ は，$\mathbf{T} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{E}$ と計算することにより，未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の成分で表すことができる．ここで歪対称行列 $\mathbf{T}$ は式 (4) であることから，対角成分が 0 になり，かつ対応する成分の和が 0 になる必要がある．したがって，未知数ベクトル $\mathbf{g}$ について，以下の 6 つの制約条件が付与される．

$$g_1g_{10} + g_4g_{13} + g_7g_{16} = 0, \tag{6}$$
$$g_2g_{11} + g_5g_{14} + g_8g_{17} = 0, \tag{7}$$
$$g_3g_{12} + g_6g_{15} + g_9g_{18} = 0, \tag{8}$$
$$g_3g_{11} + g_6g_{14} + g_9g_{17} + g_2g_{12} + g_5g_{15} + g_8g_{18} = 0, \tag{9}$$
$$g_3g_{10} + g_6g_{13} + g_9g_{16} + g_1g_{12} + g_4g_{15} + g_7g_{18} = 0, \tag{10}$$
$$g_2g_{10} + g_5g_{13} + g_8g_{16} + g_1g_{11} + g_4g_{14} + g_7g_{17} = 0. \tag{11}$$

以上の条件を回転行列 $\mathbf{R}$ の制約条件とともに最小二乗解の算出時の制約条件として扱うことで，整合性を満たした解の算出が可能となる．

3.2 再投影誤差最小化のための最適化

3.1 節で述べた推定のみでは十分な復元精度が得られない場合に，各点の画像上での再投影誤差が大きくなる．ここで再投影誤差とは，3 次元空間内に推定された点を画像上に再投影した点と，元の画像上の点との距離のことである．本研究では，3.1 節での推定結果に対し再投影誤差を最小にする最適化を行う．

具体的には，外側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\mathrm{out}}$ と内側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$ の方向に注目する．図 **1** において，正しい 3 次元位置に計測点が推定された場合，外側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\mathrm{out}}$ と内側光線ベクトル $\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$ の方向は一致する．したがって，i 番目の推定点を j 番目のカメラから見た際の外側推定光線ベクトルを $\hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\,ij}$，内側光線ベクトルを $\mathbf{r}_{\mathrm{in}\,ij}$ として，2 つのベクトルの方向が等しくなるように，以下のように評価関数を設定する．

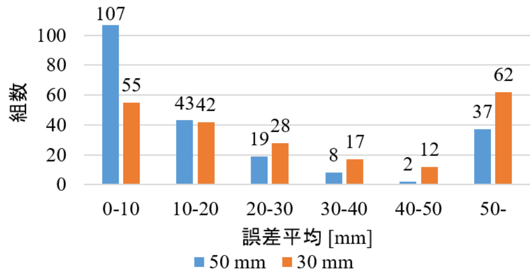

Fig. 2 透明平板の厚さと誤差平均の分布の関係についての実験結果

$$E = \sum_{i,j} \|\mathbf{r}_{\mathrm{in}\,ij} - \hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\,ij}\|^2. \tag{12}$$

本研究では，評価関数 E を Levenberg-Marquardt 法を用いて最小化することで解を求める．

4. シミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するために行ったシミュレーション実験について述べる．薄い透明平板で復元可能であることを検証するために，透明平板の厚さを変えて実験を行った．計測対象としては，453 点からなる全長約 250 mm の 3D モデルを使用した．透明平板はカメラの光軸に垂直になるように設置し，対応点の検出精度は 1 ピクセル精度とした．また，空気と透明平板（アクリル材質）の屈折率をそれぞれ 1.00 と 1.49 とし，各視点からの遮蔽と画角を考慮して実験を行った．透明平板の厚さは 50 mm，30 mm とした．216 組の画像組に対して，2 視点の SfM を実行した．

結果を図 **2** に示す．図 **2** は各厚さの透明平板を用いた場合について，216 組の画像組それぞれの復元結果の誤差平均の分布を示している．なお，従来手法[3]を用いた場合は，すべての場合において形状を含めて復元できていなかった．提案手法について図 **2** を見ると，誤差平均の値がいずれの厚さについても小さくなり精度が向上していることが確認できる．例えば透明平板の厚さが 50 mm の場合でも，半分程度の画像組で誤差平均が 10 mm 以下となった．以上から，提案手法を用いることで薄い透明平板を用いた場合の復元精度が向上することが確認できた．

5. 結論

本論文では，薄い透明平板を用いた際の屈折を用いた SfM の精度を向上させるために，並進ベクトルに関する制約条件と再投影誤差を最小化する最適化を導入した．実環境における提案手法の有効性の評価が今後の課題である．

謝辞

本研究の一部は，総合科学技術・イノベーション会議が主導する革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）の一環として実施したものである．

参 考 文 献

1) Rechard Hartley and Andrew Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Second Edition, 2004.
2) Davide Scaramuzza, Friedrich Fraundorfer, Marc Pollefeys and Roland Siegwart: “Absolute Scale in Structure from Motion from a Single Vehicle Mounted Camera by Exploiting Nonholonomic Constraints”, Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computer Vision, pp. 1413–1419, 2009.
3) 柴田 彬, 藤井 浩光, 山下 淳, 淺間 一: “単眼カメラと透明平板による屈折を利用したスケール復元が可能な Structure from Motion”, 精密工学会誌, Vol. 82, No. 12, pp. 1045–1053, 2016.
4) 奥村 有加里, 藤井 浩光, 山下 淳, 淺間 一: “屈折を利用したスケール復元が可能な計測誤差に頑健な Structure from Motion”, 精密工学会誌, Vol. 83, No. 12, pp. 1201–1208, 2017.