# 屈折を用いたスケール復元可能な Structure from Motion の誤対応点への頑健化

Robustification against Incorrespondence Points for Scale Reconstructible SfM Using Refraction

○　奥村　有加里 (東京大学)　　正　藤井　浩光（千葉工業大学／東京大学）
正　山下　淳（東京大学）　　正　淺間　一（東京大学）

Yukari OKUMURA, The Univ. of Tokyo, okumura@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hiromitsu FUJII, Chiba I.T./The Univ. of Tokyo, fujii@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Atsushi YAMASHITA, The Univ. of Tokyo, yamashita@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hajime ASAMA, The Univ. of Tokyo, asama@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Structure from Motion (SfM) is a three-dimensional reconstruction method which uses a moving camera. However, it cannot estimate the real-world scales of objects. To solve this problem, in our previous studies, a scale reconstructible SfM method using refraction was proposed. However, our previous method is not robust against measurement errors. In particular, a few inaccurate correspondence points cause reconstruction failure. In this paper, we improved the robustness against large measurement errors by introducing 17 points RANSAC.

***Key Words***: Computer vision, 3D measurement, Structure from Motion, Refraction, Refractive plate

## 1　序論

Structure from Motion（SfM）は 1 台のカメラのみを用いる 3 次元計測手法の 1 つである．SfM はカメラの移動情報と計測対象の形状を同時に復元することが可能であるが，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付与する手法が提案されているが [1][2]，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消するために，我々は屈折を利用した多視点での SfM を提案した [3]．屈折を用いた SfM 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，計測対象のスケールまで含めた復元を行う．屈折における光線の入射角は計測点ごとの 3 次元位置とカメラの位置関係によって定まるため，対応点ごとに屈折の影響による画像上でのずれ量は異なる．画像上でのずれ量が小さい場合には撮像の際の丸め誤差などの計測誤差の影響が大きくなるため，カメラの位置によっては正確な 3 次元復元が困難になることが課題であった．我々の従来手法では，3 次元復元された計測点とカメラ位置の幾何的な整合性を元にした評価により 2 視点の組み合わせを取捨選択する．選択された視点の組み合わせから得られた計測点を初期値として複数の視点を用いたバンドル調整による最適化を行うことで，計測誤差の影響に頑健な計測を実現した．

しかし，従来手法においては全ての計測点の対応関係が正しいという前提があるため，計測点の対応付けの誤りなど，大きな計測誤差を持つ点が存在する場合に大きな課題がある．例えば，対応関係に誤りがある計測点が存在する場合は，カメラの移動推定や 3 次元復元の精度が大きく低下する．さらにそのような視点の組み合わせは計測に用いられないため，3 次元復元のためには多くの視点が必要となる．

本論文では，屈折を用いた SfM における計測点の対応付けの誤りを考慮した計測誤差に対する頑健性を向上させることを目的とする．復元した計測点の画像上での再投影誤差と 3 次元位置の評価により大きな計測誤差を持つ計測点を除外することで，屈折を用いた SfM 手法による 2 視点でのスケールまでを含めた復元を行う．

## 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 を観測した模式図であり，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．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．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 $\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$ と $\mathbf{r}'_{\mathrm{in}}$，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 $\mathbf{r}_{\mathrm{out}}$ と $\mathbf{r}'_{\mathrm{out}}$ 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，各カメラ座標系の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．

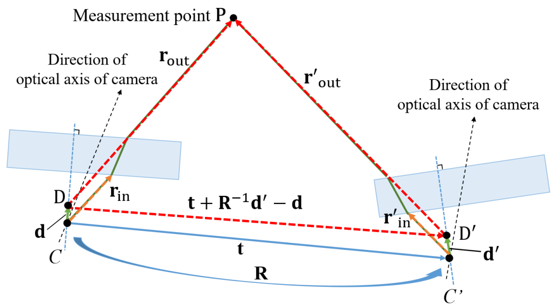


**Fig.1** The geometry of 2view SfM using refraction

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．

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

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，$\mathbf{r}_{\mathrm{out}}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{d}=(d_1,d_2,d_3)^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{r}'_{\mathrm{out}}=(x',y',z')^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{d}'=(d'_1,d'_2,d'_3)^{\mathrm{T}}$ とすると，式 (1) は，

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

と整理でき，さらに $\mathbf{u}^{\mathrm{T}}\mathbf{g} = 0$ 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 (2) は各対応点について成り立つので，$i$ 番目の対応点に対する既知数ベクトル $\mathbf{u}_i$ を用いて，$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \cdots, \mathbf{u}_i, \cdots, \mathbf{u}_n)$ とおくと，

$$\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{g} = 0, \tag{3}$$

となる．未知数ベクトル $\mathbf{g}$ が 18 成分であり，式 (3) が同次式であることから，未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の算出には 17 点以上の対応点が必要となる．算出した未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の成分から回転行列と並進ベクトルを求め，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ことで計測対象のスケールまで含めた形状を復元することができる．

## 3　提案手法

従来の SfM においては，計測誤差に対して頑健にカメラの運動を推定をするために，従来の SfM の解法である 5 点法や 8 点法と RANSAC を組み合わせる手法が広く用いられている [1]．この手法では，全ての計測点からランダムに選択した 5 点もしくは 8 点の計測点をもとにカメラの移動情報を推定し，その結果の評価を行う．この過程を繰り返し，最も良い結果を推定結果として採用する．結果として計測誤差の影響の少ない点のみを用いた推定結果が採用されるため，計測誤差に頑健な推定が可能となる．同様のアプローチは計測誤差の影響を大きく受ける屈折を用いた SfM においても，計測誤差に対する頑健性の向上のために有効であると考えられる．

### 3.1　計測点のランダム選択による未知数ベクトルの算出

計測誤差の影響の小さい点のみを用いることで屈折を用いた SfM の計測誤差に対する頑健性を向上させる．具体的にはまず，屈折を用いた SfM での復元に必要な最低点数である 17 点を計測点の中からランダムに選択する．そして，その 17 点をもとに式 (3) を構成し，未知数ベクトル $\mathbf{g}$ の算出結果からカメラの回転行列と並進ベクトルを推定する．この際，式 (3) の解である未知数ベクトル $\mathbf{g}$ は $\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}$ の最小固有値に属する固有ベクトルとして算出することができる．しかし固有ベクトルをもとに未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を算出した場合，計測誤差の影響により回転行列と並進ベクトルが満たすべき条件を備えた解が得られることは極めて少ない．したがって，固有ベクトルを未知数ベクトル $\mathbf{g}$ として採用すると計測対象の形状を復元することが困難となる．

そこで本手法では，$\mathbf{U}^{\mathrm{T}}\mathbf{U}$ の最小固有値に属する固有ベクトルを初期値として最小二乗法により未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を算出する．最小二乗を行う際に回転行列と並進ベクトルに関する制約条件を付与することで，回転行列と並進ベクトルが満たすべき条件を備えた解を得ることができる．

### 3.2　3 次元復元結果の評価

3.1 節において算出した未知数ベクトル $\mathbf{g}$ をもとに，カメラの移動情報である回転行列と並進ベクトルを求める．これらの移動情報を用いて全ての計測点について 3 次元位置を推定し，復元結果を評価する．

復元結果の評価は 2 段階で行う．1 段階目では，推定点の 3 次元位置の整合性を評価する．ここでの整合性とは，文献 [3] での視点の取捨選択の基準として利用されている，復元結果は透明平板に対してカメラと反対側に位置するべきであるという条件である．本手法では整合性を満たしていない推定点をアウトライアとして扱う．一段階目で整合性を満たすと判定された推定点のみを用いることで，各復元における幾何的な整合性を確保する．

2 段階目では，各点の画像上での再投影誤差を用いて評価を行う．ここで再投影誤差とは，もとの画像上の点と 3 次元復元結果を画像上に再投影した点との距離である．正しく復元された場合，再投影誤差は小さくなるため，再投影誤差が閾値以下になる点をインライアとして採用する．以上の一連の評価を一定回数繰り返し，インライアとなった点数が最も多い推定値を復元結果として採用する．

### 3.3　再投影誤差最小化のための最適化

以上の処理で対応付けの誤りがある計測点を除いた推定が可能であるが，計測における撮像時の丸め誤差やその他の計測誤差の影響による計測結果の誤差が存在する．それらの誤差の影響に対して計測精度を向上させるため，ここまでの計測点の評価によりインライアとして採用された結果に対し再投影誤差を最小化する最適化を行う．再投影誤差を最小化した結果が，本研究における 3 次元復元結果となる．

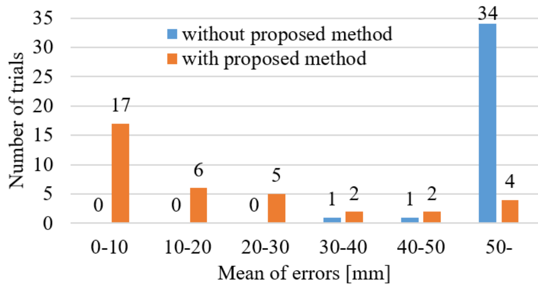


**Fig.2** The result of simulation experiments

## 4　シミュレーション実験

本手法の有効性を検証するために，シミュレーションによる実験を行った．計測対象は，453 点からなる全長約 230 mm の 3D モデルを用いた．計測誤差への頑健性を検証するために，計測点全体に対応点検出精度を 1 ピクセル精度として丸め誤差を与えた上で，全体の 1 %の計測点に対し画像上で 100 ピクセルから 200 ピクセルの大きなずれを無作為に付与した．3.1 節で述べたランダム選択は 500 回繰り返し，再投影誤差のインライアとしての評価基準は 10 ピクセルとした．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，各カメラ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 100 mm とした．2 視点の SfM を異なる 36 組の視点から実行し，提案手法を適用していない場合と適用した場合について比較を行った．

結果を図 2 に示す．図 2 は提案手法を適用していない場合と適用した場合について，36 組のそれぞれの復元結果の誤差平均の分布を示しており，横軸が誤差平均であり，縦軸が 2 視点の SfM の試行回数である．提案手法を適用していない場合，ほぼすべての結果で誤差平均が 50 mm 以上となった．多くの場合形状を復元できておらず，形状が復元できてもスケールが復元できないという結果となった．提案手法を適用した場合は復元精度が向上しており，全体の 6 割以上の結果について，誤差平均が 20 mm 以下となった．以上から，提案手法を用いることで 2 視点の屈折を用いた SfM の計測誤差に対する頑健性が向上していることが確認できた．

## 5　結論

本論文では，復元した計測点の画像上での再投影誤差と 3 次元位置の評価により大きな計測誤差を持つ計測点を除外することで，2 視点の屈折を用いた SfM の計測誤差に対する頑健性を向上させた．精度の向上および平板の薄型化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] 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.