屈折を利用したスケール復元が可能な Structure from Motion による屈折量が小さい状況下における スケール復元の頑健性の向上

○後田 啓太朗[†], 樋口 寛[‡], 山下 淳[‡], 淺間 一[‡]
†: 東京大学 工学部 精密工学科
‡: 東京大学大学院 工学系研究科 精密工学専攻
ushiroda@robot.t.u-tokyo.ac.jp

概要： 本研究では屈折を利用したスケール復元が可能な Structure from Motion (SfM) における，屈折が小さい状況での復元の頑健性を向上させる手法を提案する．SfM とは 1 台のカメラを移動させながら取得した画像のみを用いて 3 次元計測を行う手法であり，透明平板を計測対象とカメラの間に設置して屈折を生じさせることにより，計測対象のスケールまで含めた 3 次元計測が可能となる．従来研究では厚い平板を用いているが，実利用化には透明平板の薄型化が必要である．そこで本研究では屈折の大きさに応じた重みを設計しパラメータ推定に用いることで，平板が薄くなった場合でも頑健な 3 次元計測を図る．シミュレーション実験によって従来研究に比べて提案手法の有効性が示された．
＜キーワード＞ Computer vision, 3D measurement, Structure from Motion, Refraction

1. 序論

Structure from Motion（SfM）は，1 台のカメラを移動させながら取得した画像のみを用いて 3 次元計測を行う手法である[1]. SfM では，画像情報のみを用いて計測対象の形状を推定すると同時に，外部パラメータと呼ばれるカメラの位置姿勢を算出することができる．しかし，カメラの並進移動の大きさを求めることはできず，計測対象の大きさ（スケール）を推定できない問題点がある．この問題を解決するために従来研究では，水中環境での SfM で，空気とカメラの保護ケースと水という 3 種類の異なる媒体間で生じる屈折を利用することでスケール復元を可能にした[2]. しかし，この手法は特殊な環境に限定されており，一般的な利用は困難である．そこで柴田らはカメラに対して透明平板を固定し，平板での屈折を SfM に利用することで，地上でのスケールを含めた 3 次元復元が可能な SfM を提案している[3,4]. さらに奥村らは量子化誤差や誤対応点などの計測時に生じる誤差に頑健な，スケールまで含めた 3 次元復元の理論を構築している[5,6].

精度の良いスケール復元には十分な屈折量を確保するために厚い透明平板が必要であるが，移動を伴う SfM において，重厚な透明平板は実用的ではない．そこで従来研究では，透明平板の薄型化のために，平板の厚さに依らない一般的な精度向上の手法を導入して薄型化に対応している[7]. しかし，薄型化の失敗の原因である屈折の大きさ自体の考慮はしていない．

そこで本論文では，透明平板での屈折によって発生する光線の変化量と誤差の関係に着目する．変化量が大きいほどスケール復元を含めた SfM の計算に有効であると考え，カメラの位置姿勢の算出と 2 視点のバンドル調整による最適化の際に，変化量に応じて重みを考慮する．これによって，透明平板が薄いために光線の変化量が小さくなる厳しい環境下においても，SfM 手法による 2 視点での，スケールまでを含めた復元を頑健に行うことが可能となる．

2. スケール復元可能な SfM の計測システム

2.1. 屈折を用いた SfM の原理

本論文が基礎とする，屈折を用いた 2 視点での SfM の計測手法について述べる[3,4]. 透明平板による屈折を利用した 2 視点での SfM の概念図を図 1 に示す．この手法では，カメラと計測対象の間に透明平板を設置し，透明平板を通して画像を取得する．カメラと透明平板は，任意の位置関係で固定して移動させる．このようにして取得した画像を入力として用いることで，出力として計測対象の 3 次元点群位置とカメラの回転行列と並進ベクトルを得ることができる．

ここで，カメラと透明平板の関係を図 2 に示す．

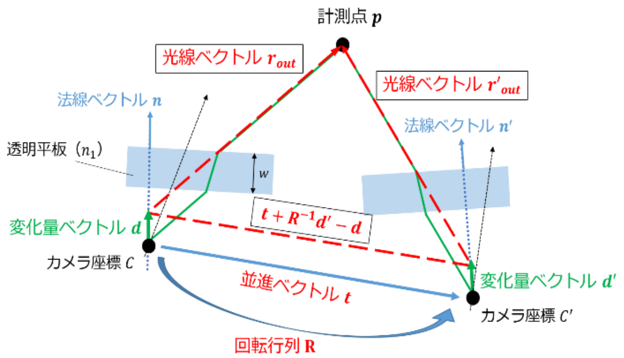


図 1　2 視点間での幾何学的関係

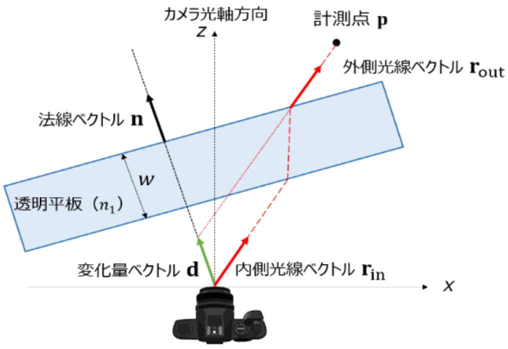


図 2 カメラと透明平板の位置関係と光線ベクトル

図 2 に示されている赤い破線は，カメラに入射する光線の経路を表している．光線に関して，屈折の前後で 2 つの単位ベクトルを定義する．2 つのベクトルとは，カメラから透明平板への光線の方向を示す内側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$と，透明平板から計測対象点への光線の方向を示す外側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{out}}$である．図 2 から，内側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$と，外側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{out}}$の方向は同じであるが，同一直線状になく，ずれが生じることがわかる．このずれの透明平板の法線ベクトル$\mathbf{n}$の方向への正射影を変化量ベクトル$\mathbf{d}$と定義する．変化量ベクトル$\mathbf{d}$はその大きさをdとすると，$\mathbf{d} = d\mathbf{n}$となる．また，変化量ベクトル$\mathbf{d}$の大きさdは，

$$d = w\left(1 - \frac{\mathbf{r}_{\mathrm{in}} \cdot \mathbf{n}}{\sqrt{n_1^2 - \left\|\mathbf{r}_{\mathrm{in}} \times \mathbf{n}\right\|^2}}\right), \qquad (1)$$

と求めることができる．ここでwは透明平板の厚さ，n_1は透明平板の屈折率である．空気中の屈折率は 1 としている．内側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{in}}$は，対応点の画像座標から算出可能である．

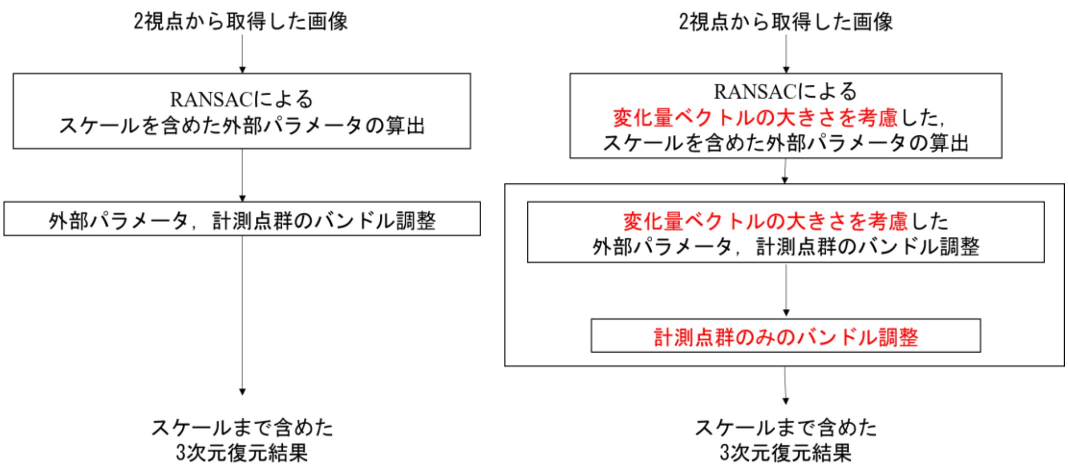
図 1 の幾何学的関係で，カメラの移動ベクトルと光線ベクトルはすべて同一平面上にあることを利用して，

$$\{(\mathbf{t} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}' - \mathbf{d}) \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'_{\mathrm{out}}\}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}_{\mathrm{out}} = 0, \qquad (2)$$

と立式されるため，平板を使用しない SfM では不可能であったカメラの並進ベクトルの大きさも算出可能になる．つまり，屈折によって計測対象のスケールまで含めた 3 次元形状の復元が可能になる．

2.2.　計測時の誤差への頑健性の向上

屈折を用いた SfM において，誤対応点や量子化誤差に対して頑健な計測を行う必要がある．誤対応点の影響を取り除くために，RANSAC（RANdom SAmple Consensus）を利用する[6,8]．さらにより正確な結果を得るために RANSAC の結果を初期値として 2 視点でのバンドル調整を導入する[7]．



(a) 従来手法　　(b) 提案手法

図 3　従来手法と提案手法の比較

3. 提案手法

3.1. 提案手法の概要

本論文では，透明平板による屈折から生じる変化量ベクトルの大きさが小さい条件下でも，屈折を用いた SfM のスケール復元の精度を向上させるために，図 3(b)の一連の提案手法を導入する．

図3(a)の従来手法では，画像上の点すべてをSfMに用いる[7]が，提案手法は，変化量ベクトルの大きさが大きなものほどスケール復元への信頼度が高いと考え，変化量ベクトルの大きさに応じた重みを導入する．この重みを考慮してカメラの位置姿勢である外部パラメータの算出や 2 視点でのバンドル調整をすることにより，変化量ベクトルが小さい条件下でも頑健なスケールを含めた SfM が可能になる．

3.2. 重みの設計

変化量ベクトルの大きさに応じた重みは，図 4 のように，$d_{\mathrm{threshold}}$を閾値とし，[0,1]の範囲で設計する．画像上の点の変化量ベクトルの大きさは，式(1)により計算可能であり，d_{min}とd_{max}は変化量ベクトルの大きさの最大値と最小値に対応している．$d_{\mathrm{threshold}}$は，画像上の点のすべての変化量ベクトルの大きさの平均値とする．

3.3. 重みを考慮した外部パラメータの算出

従来手法による外部パラメータを算出する方法を説明する．各ベクトルの成分を$\mathbf{r}_{\mathrm{out}} = (x, y, z)^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{d}_{\mathrm{out}} = (d_1, d_2, d_3)^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{r}'_{\mathrm{out}} = (x', y', z')^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{d}' = (d'_1, d'_2, d'_3)^{\mathrm{T}}$とし，式(2)を既知数と未知数の積の形となるように整理すると，

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ d_3yx' - d_2zx' + d'_3xy' - d'_2xz' \\ d_1zx' - d_3xx' + d'_3yy' - d'_2yz' \\ d_2xx' - d_1yx' + d'_3zy' - d'_2zz' \\ d_3yy' - d_2zy' + d'_1xz' - d'_2xx' \\ d_1zy' - d_3xy' + d'_1yz' - d'_3yx' \\ d_2xy' - d_1yy' + d'_1zz' - d'_3zx' \\ d_3yz' - d_2zz' + d'_2xx' - d'_1xy' \\ d_1zz' - d_3xz' + d'_2yx' - d'_1yy' \\ d_2xz' - d_1yz' + d'_2zx' - d'_1zy' \end{pmatrix}, \quad (3)$$

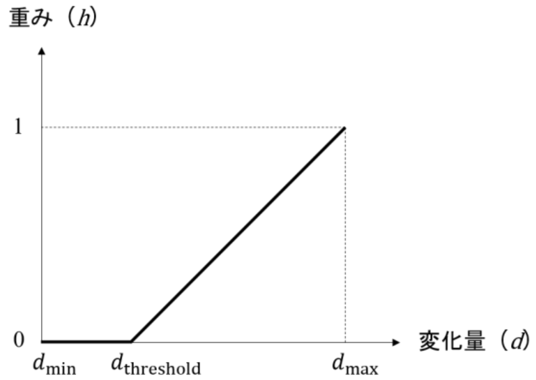


図 4 重みhの設計

$$\mathbf{g} = \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

を用いて，

$$\mathbf{u}^{\mathrm{T}}\mathbf{g} = 0, \quad (5)$$

と表される．ここで，r_{ij}は回転行列$\mathbf{R}$のi行j列の成分の値であり，t_iは並進ベクトル$\mathbf{t}$のi番目の成分の値である．また，回転行列$\mathbf{R}$の正規性と直行性を制約条件として，未知数を推定することにより外部パラメータを算出する[7]．制約条件は，式(6)のように表せる．ただし，δ_{ij}はクロネッカーのデルタである．

$$a_{ij} \coloneqq [r_{i1}\ \ r_{i2}\ \ r_{i3}][r_{j1}\ \ r_{j2}\ \ r_{j3}]^{\mathrm{T}} - \delta_{ij} = 0. \quad (6)$$
$$(1 \le i \le j \le 3)$$

透明平板が薄く，変化量ベクトルも小さくなると，式(5)の解は量子化誤差の影響を大きく受け不安定になる．この問題を解決するために，提案手法では式(5)に変化量ベクトルの大きさによる信頼度を考慮した重みhをかけた条件式を作る．つまり，カメラの位置姿勢である外部パラメータを推定する際には，式(7)を最小二乗法により最適化する．最適化には Levenberg-Marquardt 法を用いる．

$$F = \sum_i h_i \left\| \mathbf{u}_i^T \mathbf{g} \right\|^2 + \sum_{i,j} a_{ij}^2. \qquad (7)$$

推定には誤対応点の影響を取り除くために RANSAC を利用する．サンプリングには式(5)を解くための必要最小点数の 17 点をランダムに選択して使用する．

3.4. 重みを考慮した 2 視点のバンドル調整

外部パラメータを算出したのち，より正確な結果を得るために 2 視点のバンドル調整を行う．従来手法では，バンドル調整の過程において，図 5 に示されるようにj視点目のi番目の推定外側光線ベクトル$\hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\ ij}$を用いて画像面上に再投影した点と，内側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{in}\ ij}$の画像面上の投影点の差を再投影誤差と定義し，この再投影誤差を最小化する最適化を行う．推定内側光線ベクトルと推定外側光線ベクトルの方向は同じであるため，内側光線ベクトル$\mathbf{r}_{\mathrm{in}\ ij}$と推定外側光線ベクトル$\hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\ ij}$の方向が近づくと，再投影誤差も小さくなる．その結果，計測点と推定点が近づき，正確性の高い 3 次元復元が可能となる．

提案手法でも変化量ベクトルの大きさが大きいほど信頼度が高いと考え，変化量ベクトルの大きさによる重みを考慮して 2 視点でのバンドル調整を行う．ただし，図 4 で定義される重みhを導入すると，hが小さい点は，十分なバンドル調整ができず正確性の低い復元になると考えられる．したがって，図 3 の提案手法のように，バンドル調整を 2 回実行する．

1 回目のバンドル調整では，RANSAC から得られる推定結果を初期値として採用し，外部パラメータと推定点の整合性を考慮する．したがって，式(8)のように，評価関数に重みhをかけあわせる．$\mathbf{x}_\mathrm{i}$を推定点の 3 次元座標とする．

$$e_1(\mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_m) = \sum_{i,j} h_{ij} \left\| \mathbf{r}_{\mathrm{in}\ ij} - \hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\ ij} \right\|. \quad (8)$$

2 回目のバンドル調整では，1 回目のバンドル調整から得られた結果のカメラの位置姿勢である外部パラメータを固定し，推定点の位置のみを変数とする．改めて再投影誤差を計算し最適化を行うことにより，推定点だけの整合性を考慮することができる．評価関数は式(9)を用いる．

$$e_2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = \sum_{i,j} \left\| \mathbf{r}_{\mathrm{in}\ ij} - \hat{\mathbf{r}}_{\mathrm{out}\ ij} \right\|. \qquad (9)$$

両方のバンドル調整で最適化には Levenberg-Marquardt 法を用いる．

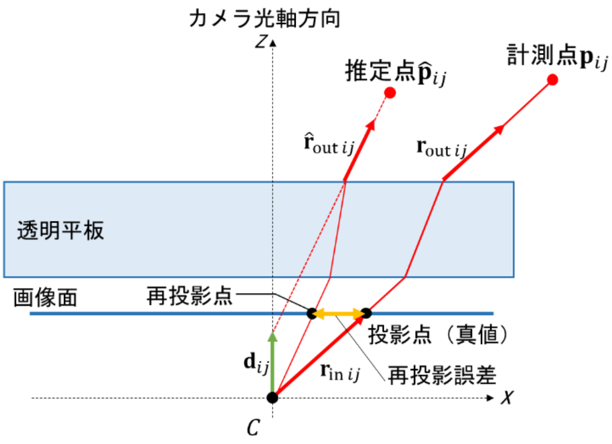


図 5 再投影誤差の定義

4. シミュレーション実験

4.1. シミュレーション実験の環境設定

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．従来手法は図 3(a)とし，提案手法は図 3(b)とする．計測対象は Stanford Bunny の点群形状モデルを用いる．使用した点群は 453 点で，異なる 2 視点から取得した 2 枚の画像を用いて復元を行った．従来研究では 30 mm や 50 mm の厚さの透明平板を用いていた[7]が，提案手法により，透明平板が薄く変化量ベクトルが小さい状況でも屈折を用いたスケール復元可能な SfM の頑健性が向上していることを示すために，本論文では 20 mm の厚さの透明平板を用いた．また，計測時の誤差として，整数精度の量子化誤差を考慮し，画像上での位置がずれていることに生じる点の誤対応を全体の 1%に付与した．

4.2. 従来手法と提案手法の復元結果の比較

ランダム選択や誤差による影響をなるべくなくすために，従来手法と提案手法による SfM をそれぞれ 30 回ずつ実施し,平均を比較する．

本論文では 2 種類の比較実験を行う．実験 1 では，重みを考慮した外部パラメータの有効性を検証する．比較には，図 3 の，RANSAC 後の結果である外部パラメータを従来手法・提案手法ともに用いる．これらと真値とを比較し提案手法の有効性を検証する．実験 2 では，重みを考慮したバンドル調整の有効性を検証する．図 3 の最終的な推定点を用いて，真値からの距離の差を誤差として平均を比較する．提案手法では，画像上の点の変化量ベクトルから算出した，図 4 の通りの [0,1] の範囲の重みをかけあわせている．$d_{\mathrm{threshold}}$は画像上の点のすべての変化量ベクトルの大きさの平均とした．

表 1　外部パラメータ（真値）

回転行列 R	並進ベクトル t [mm]
$\begin{pmatrix} 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.57 \\ 0 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 201 \\ 63.3 \end{pmatrix}$

表 2　RANSAC 後の外部パラメータ（従来手法）

回転行列 R	並進ベクトル t [mm]
$\begin{pmatrix} 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.57 \\ 0 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.03 \\ 50.0 \\ 15.8 \end{pmatrix}$

表 3　RANSAC 後の外部パラメータ（提案手法）

回転行列 R	並進ベクトル t [mm]
$\begin{pmatrix} 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.57 \\ 0 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0.05 \\ 69.5 \\ 21.9 \end{pmatrix}$

4.2.1.　重みを考慮した外部パラメータの有効性の検証

外部パラメータの真値を表 1 に示す．また，実験 1 を通して従来手法により得られた外部パラメータの平均値を表 2 に，提案手法により得られた外部パラメータの平均値を表 3 に示す．これらの値は，それぞれ 30 回の平均値を用いた．

回転行列に関しては，提案手法・従来手法ともに正確な値が算出されている．一方，並進ベクトルに関しては，従来手法に対して，提案手法が真値におよそ 10%近い値になっている．

4.2.2.　重みを考慮したバンドル調整の有効性の検証

実験 2 を通して，従来手法により得られた最終的な推定点と計測点の真値との距離の差の平均の分布と，提案手法により得られた最終的な推定点と計測点の真値との距離の差の平均の分布を図 6 に示す． 1 回の試行で得られた点群の推定値と真値のユークリッド距離の差のすべての平均を誤差とし，30 回の試行の平均を誤差平均と定義した．また，従来手法により得られた外部パラメータの平均値を表 4 に，提案手法により得られた外部パラメータの平均値を表 5 に示す．

まず従来手法について，図 6 より，46.7%の割合で誤差平均が 200 mm を上回る結果となったことがわかる．この内，誤差平均が 1000 mm を超えるものはおよそ 21%を占めていた．つまり，従来手法では透明平板が薄くなった場合に，スケールを含めた復元は高い確率で失敗した．また，表 4 では，回転行列は表 1 の真値の値と一致しているが，並進ベクトルは，真値から大変遠い値となった．表 2 の RANSAC 後の並進ベクトルの値と比較すると，バンドル調整が原因で並進ベクトルの推定がうまくいっていないといえる．

表 4　バンドル調整後の外部パラメータ（従来手法）

回転行列 R	並進ベクトル t [mm]
$\begin{pmatrix} 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.57 \\ 0 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -55 \\ 86312 \\ 27054 \end{pmatrix}$

表 5　バンドル調整後の外部パラメータ（提案手法）

回転行列 R	並進ベクトル t [mm]
$\begin{pmatrix} 1.00 & 0 & 0 \\ 0 & 0.82 & 0.57 \\ 0 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 169.9 \\ 53.6 \end{pmatrix}$

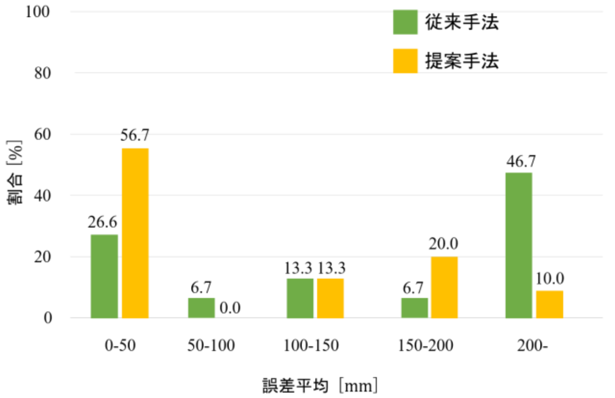


図 6　復元結果の誤差平均の分布

続いて提案手法の結果を検証する．図 6 より，50%以上の確率で誤差平均が 50 mm 以下であった．この内，誤差平均が 20 mm 以下のものはおよそ 17.6%を占めていた．また，表 5 では，回転行列の値は表 1 の真値と一致しており，並進ベクトルも重みを考慮したバンドル調整により，表 3 の重みを考慮した RANSAC の後よりも真値に近い値に調整された．

以上の実験結果から，提案手法を用いることで，屈折により生じる変化量ベクトルが小さい場合でも，屈折を用いた SfM のスケールを含めた復元の頑健性の向上に成功した．

5. 結論

本論文では，薄い透明平板を用いた際の，変化量ベクトルが小さい条件下でのスケールを含めた SfM の頑健性を向上させるために，変化量ベクトルの大きさに応じた重みを導入した．

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．

参考文献

[1] Rechard Hartley and Andrew Zisserman: “MultipleView Geometry in Computer Vision”, Cambridge UniversityPress, Second Edition, 2004.

[2] Anne Jordt-Sedlazeck, Reinhard Koch, “Refractive Structure-from-Motion on Underwater Images”, The IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2013), 2013, pp. 57-64.

[3] Akira Shibata, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Scale-Reconstructable Structure from Motion Using Refraction with a Single Camera”, Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA 2015), pp. 5239–5244, 2015.

[4] Akira Shibata, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: “Absolute Scale Structure from Motion Using a Refractive Plate”, Proceedings of the 2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII 2015), pp. 540–545, 2015.

[5] 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.

[6] 奥村有加里，藤井浩光，山下淳，淺間一: “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”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2018 講演論文集, 2A1-J13, pp. 1-2, 2018.

[7] 奥村 有加里, 藤井 浩光, 山下 淳, 淺間 一: “透明薄板による屈折を利用したスケール復元が可能な Structure from Motion”, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 269-270, 2018.

[8] Martin A. Fischler and Robert C. Bolles: “Random Sample Consensus: Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography”, Communications of the ACM, Vol 24, No. 6, pp. 381-395, 1981.

後田 啓太朗：東京大学工学部精密工学科所属．Structure from Motion に関する研究に従事.

樋口 寛：2016 年 3 月東京大学工学部精密工学科卒業. 2018 年 3 月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了．2018 年 4 月東京大学大学院工学系研究科博士課程入学．長尺構造物の 3 次元計測の研究に従事.

山下 淳：2001 年 3 月東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程修了，博士（工学）．静岡大学助手，助教，准教授を経て，2011 年 10 月東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻准教授，現在に至る．知能ロボット，コンピュータビジョン，画像処理の研究に従事.

淺間 一：1984 年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了．1986 年理化学研究所研究員補．同副主任研究員等を経て，2002 年東京大学人工物工学研究センター教授. 2009 年同大学院工学系研究科教授．IEEE フェロー．日本ロボット学会フェロー．日本機械学会フェロー.