屈折の大きさを考慮したスケール復元が可能な Structure from Motion*

後田啓太朗 ** 樋口 寛 *** 山下 淳 † 淺間 一 †

Scale-Reconstructible Structure from Motion Considering Amount of Refraction

Keitaro USHIRODA, Hiroshi HIGUCHI, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

In this paper, a method for scale-reconstructible Structure from Motion to improve the robustness of three-dimensional (3D) reconstruction with a thin plate is proposed. Scale-reconstructible Structure from Motion is a 3D measurement method with an absolute scale using a single camera and a refractive plate. However, previous studies need a large thick refractive plate to achieve scale-reconstructible Structure from Motion. To solve this problem, a weighting factor according to the amount of refraction for optimization of 3D reconstruction was designed. It was confirmed that optimization using the weighting factor is effective for the robust 3D reconstruction method by simulation experiment.

Key words: computer vision, 3D measurement, structure from motion, refraction

1. 序 論

3 次元計測技術は，計測可能な対象が半導体集積回路という微小なものから地形といった巨大なものまで幅広い．さらに，応用分野は製造分野，測量分野，社会インフラ分野など多岐にわたる [1]．

3 次元計測技術のうち，計測対象に接触することなく計測をする非接触手法がある．これは，対象に電磁波を照射してその反射を計測することで距離を計測する能動的手法と，2 次元平面に投影された通常の画像から計測対象の 3 次元情報を得る受動的手法とから構成されている．能動的手法は計測環境によらず適用できるが，計測装置が複雑という欠点がある．一方受動的手法は計測環境は制限されるが，計測装置が簡便であるため，汎用性が高い [2]．

受動的手法の 1 つに，Structure from Motion（SfM）と呼ばれる手法がある．SfM は，1 台の単眼カメラのみを用いて，カメラを移動させながら複数の異なる視点から計測対象の 2 次元画像を撮影し，取得した画像を基に三角測量の原理から計測対象の 3 次元形状を計測する手法である [3]．カメラ 1 台と計算機があれば 3 次元計測が可能であるため，その簡便さから SfM は盛んに利用されてきた．SfM の応用例としては，例えば小型無人航空機から撮影した写真を用いた地形の 3 次元計測が報告されている [4]．また，移動ロボットに搭載された単眼カメラを用いた SfM による自己位置推定手法も提案されている [5]．

SfM では，取得した 2 次元画像から，カメラ間の位置姿勢情報を推定する．そして，移動距離に応じて計測対象のスケールを決定する．しかし，画像情報だけでは，カメラ間の移動スケールは推定することができず，計測対象の実際のスケールは不定である．この問題を解決するために従来研究では，大きさが既知の物体を画像に映り込むように撮影し，相対的に計測対象のスケールを求める研究がなされている [6]．しかし，この研究は大きさが既知の物体を用意する必要がある．例えば人が立ち入ることのできない環境であれば物体を設置することが難しく，適用環境が制限されるという問題がある．そこで，光の屈折や反射といった光学現象を利用することで計測対象のスケールを求める研究がなされている．Sedlazeck らは，カメラを保護ケースの中に入れて行う水中での SfM において，空気と保護ケース，そして水という 3 種類の異なる媒体間で生じる屈折を考慮することで，計測対象のスケール復元を可能にした [7]．

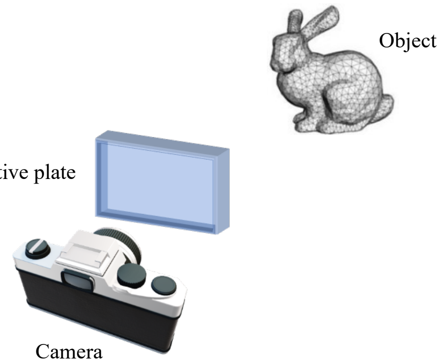


Fig. 1 Measurement Environment of Scale Reconstructible Structure from Motion

さらに柴田らは，透明平板を用いて，**図 1** のような計測環境で地上での計測対象のスケール復元が可能な SfM の理論を確立した [8]．しかし実際には，計測時の誤差によってスケール復元に失敗する場合が多いという課題がある．この課題に対して，奥村らは量子化誤差や誤対応点などの計測時の誤差に対応するために，屈折を利用しない通常の SfM で用いられている手法を導入することで，計測時に生じる誤差に頑健な手法を提案した [9]．

透明平板によって光線は屈折するが，**図 2** のように屈折により生じるベクトル $\mathbf{d}$ を変化量ベクトルと定義する．そして変化量ベクトルのノルムを変化量と定義する．以降は透明平板で起こる屈折を変化量ベクトルを用いて表す．ただしカメラ座標系の光軸上に存在しかつ透明平板に対して垂直に入射する計測点については，透明平板で屈折しないためその変化量ベクトルは

* 原稿受付 令和 2 年 5 月 22 日
掲載決定 令和 2 年 11 月 16 日
** 学生会員 東京大学大学院（東京都文京区本郷 7-3-1）
*** 東京大学大学院
† 正 会 員 東京大学大学院

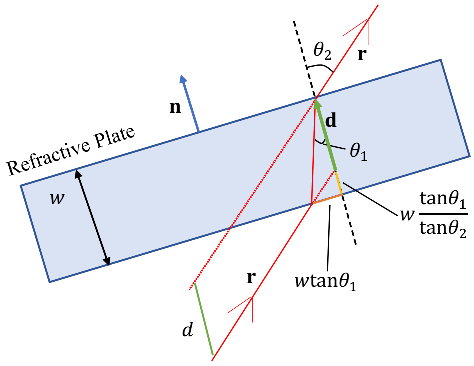


Fig. 2 Definition of Variation Vector **d**

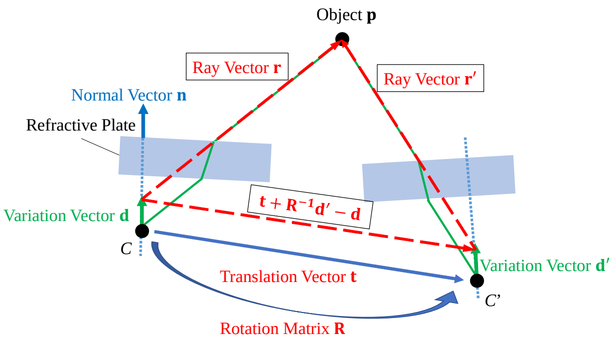


Fig. 3 Geometric Relationship of Scale Reconstructible Structure from Motion

定義できないが，変化量は 0 とする．さて，頑健なスケール復元を行うためには，十分な変化量を確保する必要があり，厚い透明平板が必要である．しかし，計測のためにカメラとそれに固定された透明平板を一緒に移動させる必要があるが，透明平板が厚い場合は取り扱いが困難である．奥村らは，柴田らの手法に比べて薄い透明平板であってもスケール復元の頑健性の向上を報告している [10] が，屈折現象に固有の誤差に対する頑健性に関しては考慮しきれていない．本研究では，屈折を用いた SfM において，変化量自体に注目することが有効であると考える．実際に著者らは変化量に注目した研究を行ってきた [11]．

本論文では，変化量に注目した 3 次元復元手法を提案する．提案手法を用いることで，透明平板が薄型化した場合であっても頑健なスケール復元ができることを目的とする．

2. 屈折を用いた Structure from Motion の原理

屈折を用いた 2 視点の SfM の原理について述べる．2 視点での屈折を用いた SfM の幾何学的関係を図 **3**に示す．3 次元空間において，1 視点目のカメラ座標系 C と 2 視点目の C' から計測点との間に透明平板を挟んで計測点 $\mathbf{p}$ の画像を取得する．透明平板はカメラに対して位置と姿勢を任意に固定する．カメラの移動として，並進ベクトル $\mathbf{t}$ と回転行列 $\mathbf{R}$ を定義する．これらはカメラの外部パラメータと呼ばれる．また，カメラ原点から計測点の画像上の投影点までのベクトルをそれぞれ光線ベクトル $\mathbf{r}$，$\mathbf{r}'$ とする．透明平板で光線が屈折することで生じる変化量ベクトルをそれぞれ $\mathbf{d}, \mathbf{d}'$ とおく．図 3 の赤色の 3 本のベクトルはすべて同一平面にあるという条件から，同一平面条件式 (1) が立式できる．

$$\{(\mathbf{t}+\mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}'-\mathbf{d})\times\mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'\}^{\mathrm{T}}\mathbf{r}=0. \tag{1}$$

式 (1) の未知数はカメラの外部パラメータである．透明平板のカメラ光軸に対する傾き，厚さ w は事前に固定してあるため既知であり，カメラキャリブレーションができているとすると，式 (1) は，次の式 (2) へと整理することができる．

$$\mathbf{u}^{\mathrm{T}}\mathbf{g}=0, \tag{2}$$

ただし，$\mathbf{u}$ は，既知数から構成されており，

$$\mathbf{r}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}, \tag{3}$$

$$\mathbf{r}'=(x',y',z')^{\mathrm{T}}, \tag{4}$$

$$\mathbf{d}=(d_1,d_2,d_3)^{\mathrm{T}}, \tag{5}$$

$$\mathbf{d}'=(d_1',d_2',d_3')^{\mathrm{T}}, \tag{6}$$

とすると，

$$\mathbf{u}=\begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ d_3yx'-d_2zx'+d_3'xy'-d_2'xz' \\ d_1zx'-d_3xx'+d_3'yy'-d_2'yz' \\ d_2xx'-d_1yx'+d_3'zy'-d_2'zz' \\ d_3yy'-d_2zy'+d_1'xz'-d_3'xx' \\ d_1zy'-d_3xy'+d_1'yz'-d_3'yx' \\ d_2xy'-d_1yy'+d_1'zz'-d_3'zx' \\ d_3yz'-d_2zz'+d_2'xx'-d_1'xy' \\ d_1zz'-d_3xz'+d_2'yx'-d_1'yy' \\ d_2xz'-d_1yz'+d_2'zx'-d_1'zy' \end{pmatrix}, \tag{7}$$

と表される．

また，$\mathbf{g}$ は未知数である外部パラメータから構成されており，

$$\mathbf{R}=\begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix}, \tag{8}$$

$$\mathbf{t}=(t_1,t_2,t_3)^{\mathrm{T}}, \tag{9}$$

とすると，

$$\mathbf{g}=\begin{pmatrix} r_{12}t_3-r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1-r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2-r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3-r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1-r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2-r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3-r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1-r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2-r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}, \tag{10}$$

と表される．

式 (2) の未知数は未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を構成する 18 個の項である．しかし，これは 1 次の斉次方程式であるので，17 式を連立すれば式 (2) は解くことができる．取得した 2 次元画像の対応点 1 つにつき，1 つの方程式が立式できるので，17 ペアの対応点があればこの方程式を解くことができる．しかし，このままでは得られる解は 1 自由度足りない．そこで同時に回転行列の正規直行性を制約条件として考慮すると，すべての未知数を求めることができる．

最後に，解として求めた外部パラメータを用いて，三角測量の原理から計測対象の 3 次元位置を求めることができる．

3. 透明平板の厚さのスケール復元への影響

透明平板の厚さがスケール復元に与える影響に関して述べる．

透明平板で光線が屈折することで生じる変化量ベクトル $\mathbf{d}$ を図 3 で定義しているが，$\mathbf{d}$ のノルム d を求める．透明平板での光線の屈折を表した図を図 2 に示す．光線の透明平板での屈折の幾何学的な条件と，スネルの法則を考慮すると，以下の式 (11) を立式することができる．

$$\begin{aligned} d &= w\left(1 - \frac{\tan\theta_1}{\tan\theta_2}\right) \\ &= w\left(1 - \frac{\mathbf{r}^{\mathrm{T}}\mathbf{n}}{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \|\mathbf{r}\times\mathbf{n}\|^2}}\right), \end{aligned} \tag{11}$$

ただし，透明平板の厚さを w，空気の屈折率を n_1，透明平板の屈折率を n_2 とする．本手法は陸上かつ空気中で使用されるために $n_1 < n_2$ である．透明平板での光線が屈折する面に対する法線ベクトルを $\mathbf{n}$ とする．ただし $\mathbf{n}$ は単位ベクトルである．光線ベクトル $\mathbf{r}$ はカメラ座標から画像面上での投影点までのベクトルとして定義され，事前に求めることができるので，式 (11) の右辺は全て既知である．また，変化量ベクトルは，透明平板の法線ベクトルを用いて，

$$\mathbf{d} = d\mathbf{n}, \tag{12}$$

と定義される．

式 (11) から，変化量ベクトルのノルム d が小さくなる要因は 2 つ挙げられる．第 1 の要因は，透明平板の厚さ w である．透明平板が薄くなると比例して d も小さくなる．第 2 の要因は，計測点と透明平板の位置関係である．計測点が画像の中心部分に投影されるような位置関係の場合は，計測点からカメラ座標への光線は透明平板においてほとんど屈折しない．したがって d は小さくなる．

次に d が小さくなった場合において式 (2) の未知数の各成分への影響について考察する．式 (7) の第 1~9 成分を $\mathbf{a}$，第 10~18 成分を $\mathbf{b}$ と表し，同様に $\mathbf{g}$ の第 1~9 成分を $\mathbf{g_1}$，第 10~18 成分を $\mathbf{g_2}$ とおくと，式 (2) は，

$$\mathbf{a}^{\mathrm{T}}\mathbf{g_1} + \mathbf{b}^{\mathrm{T}}\mathbf{g_2} = 0, \tag{13}$$

と表される．$\mathbf{b}$ に変化量ベクトル $\mathbf{d}$ の成分が表れているため，d が小さくなると，$\mathbf{b}$ のスケールも同様に小さくなる．式 (13) を解くためには，これに回転行列 $\mathbf{R}$ の制約条件を考慮して解く必要がある．しかし，$\mathbf{b}$ がほとんど $\mathbf{0}$ に近いような場合においては，$\mathbf{g_1}$ は誤った解になることが考えられる．回転行列 $\mathbf{R}$ は $\mathbf{g_2}$ から求めることができるが，並進ベクトル $\mathbf{t}$ は，$\mathbf{g_1}$ と $\mathbf{R}$ の値から求められるので，$\mathbf{g_1}$ が実際のスケールと異なる結果になると，スケール復元は失敗する．

4. 提　案　手　法

4.1 提案手法の概要

本論文では，薄い透明平板であっても頑健なスケール復元が可能な手法を提案する．第 3 章で述べた通り，精度よくスケールを求めるためには，変化量の大きい投影点を用いて式 (2) を解く必要がある．透明平板の厚さが薄くなりすぎると，画像面上のどの投影点を用いたとしてもスケール復元に失敗するが，透明平板が極端に薄すぎない場合においては，画面の端に投影されている変化量の大きな投影点を用いることで精度の良いスケール復元が可能になる．

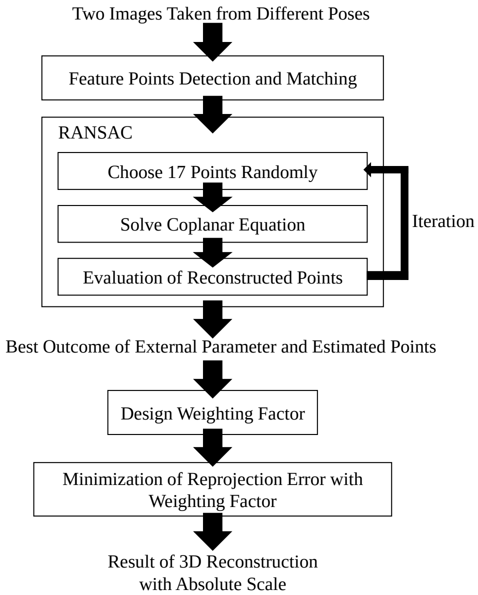


Fig. 4 Proposed Method

したがって，提案手法では，図 **4**の一連の手法を導入する．まず，RANSAC（Random Sample Consensus）[12] を行い，式 (2) を解く．RANSAC とは，ロバスト推定アルゴリズムの 1 つである．第 3 章で述べたように，透明平板が薄い状況で透明平板で十分に屈折しない点は正確な解の導出に寄与しないと考えられる．そこで RANSAC を用いることで，十分な回数の繰り返し処理によって解を推定することが可能である．

RANSAC によって得られた解である外部パラメータを用いて計測点の 3 次元座標が復元できるが，これだけでは画像の計測時に生じる標本化誤差及び対応付けの際の誤差のために，3 次元空間上での推定点は元の計測点と位置がずれる場合があり，その再投影点は元の投影点と数ピクセル程度の誤差が生じることがあるので，復元精度は悪いことが考えられる．そこで，得られた推定点の画像面上への再投影点と計測点の投影点とのユークリッド距離を最小化するための最適化を行う．ただし，この際に透明平板と計測点との位置関係によっては，変化量が小さい投影点は，画像面上の投影点と，3 次元推定点の画像面上への再投影点との距離で定義される再投影誤差がすでに小さく，再投影誤差の最小化には寄与しないと考えられる．一方変化量が大きい投影点は，再投影誤差も大きく，再投影誤差の最小化に大きく寄与すると考えられる．そこで，全ての計測点の変化量に応じて，重みを設計し，その重みを掛け合わせて最小化を行う．その結果，変化量が小さいものより変化量が大きい投影点の再投影誤差を優先的に最小化することができ，全体のスケール復元精度が向上する．

以上から得られた結果が，提案手法の出力となる．

4.2 RANSAC によるスケールを含めた外部パラメータの算出

提案手法の 1 段階目である，RANSAC によるスケールを含めた外部パラメータの算出方法について述べる．同一平面条件式 (2) を解くとは，未知数であるカメラの外部パラメータを推定することである．式 (2) は斉次であるが，カメラの回転行列の正規直行性を同時に考慮することで全ての未知数をそのスケールも正しく求めることができる．式 (2) を解くためには，最低でも 17 ペアの対応点が必要である．したがって，全てのペアの点のうち，ランダムに 17 ペアを選択してできる連立方程式 (14)

を解く．

$$\begin{pmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_{17} \end{pmatrix} \mathbf{g} = 0. \tag{14}$$

さらに，回転行列の制約条件はクロネッガーのデルタを用いて，

$$a_{ij} := [r_{i1}\ r_{i2}\ r_{i3}][r_{j1}\ r_{j2}\ r_{j3}]^{\mathrm{T}} - \delta_{ij} = 0 \quad (1 \le i \le j \le 3), \tag{15}$$

と表されるので，最終的には，以下の評価関数 F が最小となるように未知数ベクトル $\mathbf{g}$ を最適化する．

$$F = \sum_i \|\mathbf{u}_i^{\mathrm{T}} \mathbf{g}\|^2 + \sum_{i,j} a_{ij}^2 . \tag{16}$$

第 3 章では，透明平板が薄い状況下では，計測点と透明平板の位置関係によって一部の点は同一平面条件式を解く際に悪影響を及ぼす可能性について言及した．したがって，全ての対応点を用いて解くのではなく，ランダムに一部の点だけを選択し，その点を用いて 3 次元復元を行い，判定も行う．この一連の流れを繰り返すことで，復元に適した点の組み合わせとその組み合わせで導出した外部パラメータを求めることが可能となる．評価方法に関しては，奥村らの手法 [9)10)] を採用する．具体的には，2 段階の評価を行う．まず，復元点はカメラと透明平板との位置関係を考慮したときに，カメラから見て透明平板の奥に位置しているかを評価する．そして，復元点を画像面上に再投影し，その再投影点と投影点の距離を求め，これが閾値より小さいかどうかを評価する．以上の 2 段階の判定条件を満たす復元点をインライアとして数え，インライアの数が最も多い場合の結果を RANSAC の最終結果として採用する．

4.3 変化量に応じた重みの設計

投影点の変化量に応じた重みの設計について述べる．変化量が小さい投影点は再投影誤差の最小化の際に悪影響を及ぼすと考えて，そのような点の影響力を弱めるために重みを設計する．

ある投影点の変化量ベクトルのノルムを d_i とすると，その重み h_i は，以下の式 (17) で求められる．

$$h_i = \frac{d_i - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}}, \tag{17}$$

ただし，$d_{\min}$ と $d_{\max}$ はそれぞれ画像中の全ての投影点の変化量ベクトルの最小値と最大値である．重みは [0,1] の範囲で d が大きいほど重みの値も 1 に近くなるように線形に設計する．

4.4 重みを考慮した再投影誤差の最小化

RANSAC で得られた結果と重みを用いて行う再投影誤差を最小化する最適化について説明する．

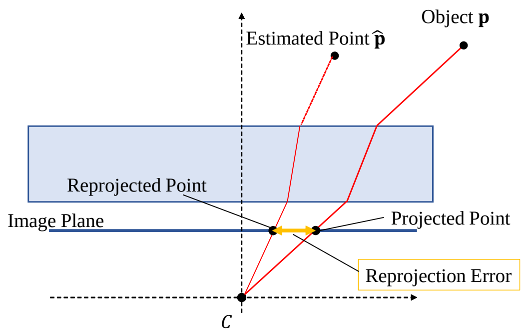


Fig. 5 Definiton of Reprojection Error

再投影誤差とは，図 **5** のような 3 次元の推定点を画像面上に再投影したときの再投影点と元の投影点のユークリッド距離である．再投影誤差はカメラ座標から計測点までの光線ベクトルの差 D で表すことができる D を式 (18) に示す．

$$D = \|\mathbf{r}_{ij} - \hat{\mathbf{r}}_{ij}\|. \tag{18}$$

透明平板が薄くなると，変化量も小さくなる．以降では透明平板の法線とカメラ光軸が一致する場合について論じるが，一般性は失われない．このとき変化量が小さい点が集まる画像の中心部分より，変化量が相対的に大きい画像の端の方が再投影誤差は大きくなると考えられるので，これらの点を優先的に最小化することでスケール復元の精度は向上する．したがって，変化量から設計した重みを考慮して再投影誤差を最小化する最適化を行う．最適化の変数は，外部パラメータの $\mathbf{R}, \mathbf{t}$，そして全ての推定点の 3 次元座標 $\mathbf{x_1}, \mathbf{x_2}, \ldots, \mathbf{x_n}$ である．評価関数は，以下の式 (19) である．

$$e(\mathbf{R}, \mathbf{t}, \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \ldots, \mathbf{x}_n) = \sum_{i,j} h_{ij} \|\mathbf{r}_{ij} - \hat{\mathbf{r}}_{ij}\|^2. \tag{19}$$

以上から最適化を行い最終的に得られた推定点が提案手法の出力となる．

5. 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，シミュレーション環境において行った実験について述べる．

5.1 実験環境

実験のために構築したシミュレーション環境に関して述べる．実験環境の構築には MATLAB2019a を用いた．計測対象には Stanford Bunny の 453 点からなる 3 次元点群モデルを用いる．Stanford Bunny の点群モデルの大きさは，約 180×180×280 mm である．また，空気の屈折率を 1，透明平板の屈折率をアクリルの屈折率に合わせて 1.49 と設定した．また，カメラパラメータの値を表 **1** に示す．

本実験の一連の流れについて述べる．まず，異なる 2 視点からカメラとの間に透明平板を挟んで Stanford Bunny の画像を取得した．カメラキャリブレーションは事前に十分にできているため歪みは補正されているとし，カメラと透明平板の距離を 100 mm に固定し，透明平板の法線をカメラ光軸に一致させた．

次に 2 視点で取得したそれぞれの画像に対して，計測時の誤差として，2 種類の誤差を画像に付与した．1 つ目は画像上の全ての投影点の量子化の際に生じる誤差である．量子化誤差の精度は整数精度とし，投影点の画像座標を整数に丸めることで実現した．2 つ目は，画像間の対応点を検出する際の誤差（誤対応点）である．誤対応点は全計測点の 1%とし，片方の画像面上の無作為に選ばれた点に対して互いの座標を交換することで誤対応を与えた．それ以外の点に関しては正しく対応関係が取れているとする．

誤差が付与された画像を用いて，RANSAC を行う．繰り返し

Table 1 Camera Parameters

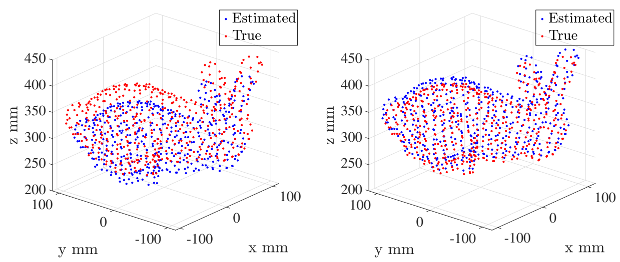
Focal Length of x-Axis pixel	5792
Focal Length of y-Axis pixel	5792
Pixel Size of Horizontal Direction mm/pixel	0.004144
Pixel Size of Vertical Direction mm/pixel	0.004144

Table 2 Result of External Parameter

	Rotation Matrix	Translation Vector mm
Truth	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.82 & 0.57 \\ 0.00 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} 0 \\ 201 \\ 63.3 \end{pmatrix}$
10 mm	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.82 & 0.57 \\ 0.00 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.02 \\ 184.02 \\ 58.05 \end{pmatrix}$
20 mm	$\begin{pmatrix} 1.00 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 0.82 & 0.57 \\ 0.00 & -0.57 & 0.82 \end{pmatrix}$	$\begin{pmatrix} -0.01 \\ 206.83 \\ 65.18 \end{pmatrix}$

Table 3 Scale and Direction Information of Translation Vector

	Scale mm	Direction Vector
Truth	210.73	$\begin{pmatrix} 0.00 \\ 0.95 \\ 0.30 \end{pmatrix}$
10 mm	192.96	$\begin{pmatrix} 0.00 \\ 0.95 \\ 0.30 \end{pmatrix}$
20 mm	216.86	$\begin{pmatrix} 0.00 \\ 0.95 \\ 0.30 \end{pmatrix}$



(a) Thickness: 10 mm　(b) Thickness: 20 mm

Fig. 6 Reconstruction of Stanford Bunny with Proposed Method

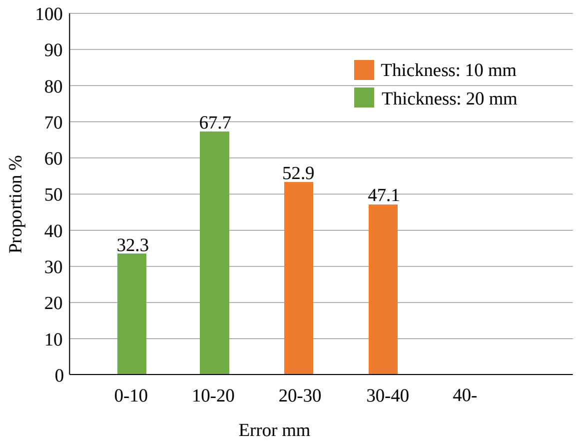


Fig. 7 Error Distribution

回数は 2000 回とした．RANSAC の各繰り返しでの評価に関して，再投影誤差の閾値は 100 pixel とする．次に，投影点の変化量から重み関数を設計した．最後に RANSAC から得られた解である外部パラメータを用いて，再投影誤差を小さくするようなパラメータの探索を行った．なお，今回の最適化ではすべて Levenberg-Marquardt 法を用いた．

本実験では，従来の研究より薄い透明平板において復元精度が向上していることを確認する．従来研究 [10] ではシミュレーション実験において 30 mm での有効性を示した．したがって本実験では，透明平板の厚さを 20 mm，10 mm の 2 種類の場合で提案手法を用いて復元を行う．

5.2　実験結果

シミュレーション実験の結果に関して述べる．透明平板が 10 mm の厚さの場合の復元結果を図 **6**(a) に，20 mm の場合の復元結果を図 6(b) に示す．これらの例では Stanford Bunny の形状とスケール復元が確認できた．

次に，誤差の分布を，図 **7** に示す．ただし，誤差とは，対応する推定点と真値の間のユークリッド距離と定義した．推定点と真値の点を構成する座標系の座標軸と原点を一致させているため，対応する推定点と真値との間のユークリッド距離を誤差として評価に用いる．透明平板の厚さが 20 mm のときは，すべての点のうち 32.3%は誤差が 10 mm 以下となり，残りの 67.7%は誤差が 10~20 mm となった．一方，透明平板の厚さが 10 mm になると，誤差が 20 mm 以下の点はなく，誤差が 20~30 mm 以下のものが 52.9%，残りの 47.1%が誤差が 30~40 mm となった．

また，外部パラメータの真値と推定結果を表 **2** に示す．透明平板の厚さによらず，回転行列は真値と一致しており精度良く推定することができた．

5.3　考　　察

シミュレーション実験の結果に関する考察を述べる．実験結果をもとに，透明平板の厚さとスケール復元の精度に関して考察する．

図 7 より透明平板が薄くなると誤差も大きくなることがわかったが，これは，式 (11) から，透明平板が薄くなると変化量ベクトルのノルム d も同様に小さくなるために，その結果，変化量が相対的に大きい点を用いたとしても，同一平面条件式である式 (13) を精度良く解くことができず，結果として並進ベクトルのスケールが十分な精度で求められないからであると考えられる．

並進ベクトルを，単位方向ベクトルとスケール成分に分離して求めた結果を表 **3** に示す．透明平板の厚さによらず，並進ベクトルの方向性分は真値と一致した．しかし，スケール成分に関しては，透明平板の厚さが 10 mm の場合は真値からおよそ 8.4%ずれており，20 mm の場合は，真値からおよそ 2.9%ずれている．つまり，透明平板が薄くなったとしても，並進ベクトルの単位方向ベクトル成分は精度よく求まることがわかり，今回の実験ではスケール，形状復元は破綻することなく確認することができた．

さらに，重みづけを行う提案手法が，重みづけを行わない場合に対して復元精度が向上することを確認するために透明平板の厚さを 10 mm に固定して，両手法を用いて追加実験を行った．重みづけを行わない手法での実験結果を図 **8**(a) に，重みづけを行う提案手法の結果を図 8(b) に示す．また，両手法の誤差の分布を図 **9** に示す．以上から，重みづけをする提案手法を用

いることで誤差の小さい復元ができることを確認できた．つまり，透明平板が 10mm の場合において重みづけを行う提案手法の有効性を確認した．ただし，図 6(a) と図 8(b) のシミュレーション実験では同じ 10 mm の透明平板を使用しているが，入力画像に与える誤対応点の組が異なっているため復元結果も異なっている．

6. 結　　論

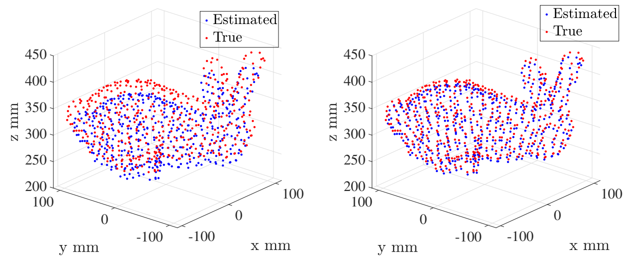
本論文では，屈折を用いたスケール復元が可能な Structure from Motion の薄い透明平板での復元の精度を向上させるために，屈折の影響を考慮した重みを設計し，再投影誤差の最小化に組み込む手法を提案した．全ての投影点の屈折の大きさは変化量ベクトルのノルムとして計算できることを利用して，重みを変化量ベクトルの大きさに対して線形に [0,1] の範囲で設計した．変化量の大きな点ほど再投影誤差の最小化の場合において有効であると考えて再投影誤差の最小化において重みを導入した．

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では，透明平板の厚さを変化させて実験を行うことで，従来の研究で有効性が確認されていた厚さより薄い透明平板を用いて復元を行うことができた．

屈折を用いたスケール復元可能な Structure from Motion の重みを用いた提案手法の理論的な解析及び多視点化が今後の課題である．また，薄い透明平板であるが，透明平板の形状を例えば曲面に変更することで変化量を大きくさせることができる．つまり透明平板の形状の考察も今後の課題である．

謝　　辞

本研究の一部は，科研費基盤研究 (B)18H03309 の援助を受けた．



(a) Without Weighting Factor　(b) With Weighting Factor

Fig. 8 Reconstruction of Stanford Bunny with and without Weighting Factor

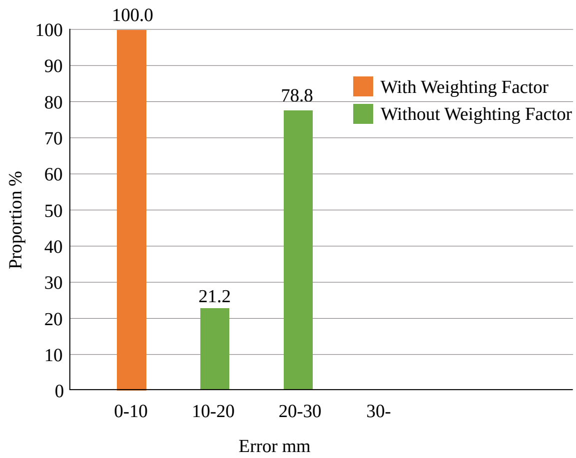


Fig. 9 Error Distribution

参 考 文 献

1) 特許庁: 平成 30 年度特許出願技術動向調査—三次元計測—, 特許庁, (2019).
2) 佐藤 宏介, 横矢 直和: 測定手法の種類と基本原理—能動的手法を中心として—, 計測と制御, **34**, 6, (1995), 435.
3) Rechard Hartley and Andrew Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Second Edition, (2004).
4) 早川 裕弌, 小花和 宏之: 小型無人航空機を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による地形情報の空中計測, 物理探査, **69**, 4, (2016), 297.
5) Masahiro Tomono: 3-D Localization and Mapping Using a Single Camera Based on Structure-from-Motion with Automatic Baseline Selection, Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, (2005), 3342.
6) Andreas Kaiser, Fabian Neugirg, Gilles Rock, Christoph Müller, Florian Haas, Johannes Ries and Jürgen Schmidt: Small-Scale Surface Reconstruction and Volume Calculation of Soil Erosion in Complex Moroccan Gully Morphology Using Structure from Motiony, Remote Sensing, **6**, 8, (2014), 7050.
7) Anne Jordt-Sedlazeck and Reinhard Koch: Refractive Structure-from-Motion on Underwater Images, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision, (2013), 57.
8) 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, (2015), 5239.
9) 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, **83**, 12, (2017), 1201.
10) 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, (2018), 269.
11) 後田 啓太朗, 樋口 寛, 山下 淳, 淺間 一: 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精度向上, ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, OS4-H1, (2019), 1.
12) Martin A. Fischler and Robert Coy Bolles: Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography, Commnications of the ACM, **24**, 6, (1981), 381.