

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*

奥村有加里** 藤井浩光*** 山下 淳† 浅間 一†

Robust Scale-Reconstructible Structure from Motion Using Refraction against Measurement Error

Yukari OKUMURA, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

This paper proposes a novel method to improve the robustness for scale-reconstructible structure from motion (SfM) using refraction. SfM is a three-dimensional (3D) measurement method using a single moving camera. The conventional SfM can simultaneously estimate the 3D positions of objects and camera poses. However, the real-world scales of objects cannot be determined. To solve this problem, a SfM using refraction was proposed. In the SfM using refraction, it was verified that the object shapes could be reconstructed with their real-world scales using just two images captured through a refractive plate. However, the SfM using refraction is greatly influenced by measurement errors, leading to reconstruction failure. The purpose of this paper is to improve the robustness for scale-reconstructible SfM using refraction. To that end, bundle adjustment considering the influence of refraction is proposed. We propose approaches to selection of initial values for bundle adjustment and evaluation function of the optimization. In simulations, it was verified that the 3D reconstruction was successful by applying the proposed method even if the measurement errors were large. The reconstruction was also successful in reconstructing the scale of the object in the real experiment.

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

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⁾。1 台のカメラのみを用いて 3 次元形状が計測できるという利点があるため、近年では UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いて取得した空中写真と SfM を組み合わせて 3 次元環境モデルの生成に用いるなど、関心が高まっている技術である²⁾³⁾。

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、カメラの移動情報である回転量と並進の方向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ができず、計測対象の大きさ (スケール) を推定できないという問題点がある。この問題を解決するために、カメラの移動に制限を加える、または大きさが既知の物体を写して画像を取得するなどして、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⁾⁴⁾。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。

カメラ 1 台のみを用いた 3 次元計測手法の中に、光の屈折現象を利用した手法がある⁵⁾⁶⁾。これらの手法では、カメラと計測対象の間に設置した透明平板を動かし、屈折を生じるとともに光路を変化させることで、スケールを含めた 3 次元計測を実現している。具体的には、GaO⁵⁾らは透明平板をカメラの光軸周りに回転させることで生じる光線の経路の変化を⁵⁾、Chen⁶⁾らは透明平板を設置した場合と取り除いた場合での視差をそれぞれ利用している⁶⁾。しかしこれらの手法は、カメラや透明平板の位

置姿勢を変化させるための装置が必要である。

一方で柴田らは、カメラに対して透明平板を固定し、そこで生じる屈折を利用することで、スケールを含めた 3 次元復元が可能な SfM を提案した^{7)~9)}。これらの研究では、屈折により生じる光線の経路の変化を考慮することでスケールまで含めた 3 次元復元を行う基礎的な理論を構築している。しかし、これらの手法は計測時に生じる誤差の影響を大きく受けるため、誤差が大きい場合に復元に失敗してしまうという問題点がある。例えば、画像間での対応点の検出精度がピクセル精度程度の場合には、ほとんどの場合で復元することができない。

SfM において精度良く計測するための手法として、バンドル調整による最適化が広く用いられている¹⁰⁾。バンドル調整は、複数視点から取得した画像を用いた計測結果全体の整合性を考慮して最適化を行う手法であり、SfM を用いた多くの研究で利用されている^{11)~14)}。これらの研究では、バンドル調整を用いることで計測の精度を向上させることに成功している。屈折を用いた SfM においてもバンドル調整は有効であり、計測誤差の影響を低減させることができると考えられる。実際に著者らは、屈折を用いた SfM に適したバンドル調整に関する研究を行ってきた¹⁵⁾。

本論文では、屈折を用いた SfM の頑健性の向上を目的とする。ここでの頑健性とは、計測誤差が大きい場合に誤差に影響されことなく精度の良い復元が可能であることを指す。本論文では計測誤差として、画像間での対応点を検出する際に生じる誤差を考える。屈折を用いた SfM の頑健性を向上させるために、屈折の影響を考慮したバンドル調整手法を提案する。

2. 透明平板を用いた計測システム

本論文が基礎とする屈折を用いた SfM の計測手法^{7)~9)}について述べる。透明平板による屈折を利用した SfM の概念図を

* 原稿受付 平成 29 年 5 月 11 日

掲載決定 平成 29 年 7 月 31 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

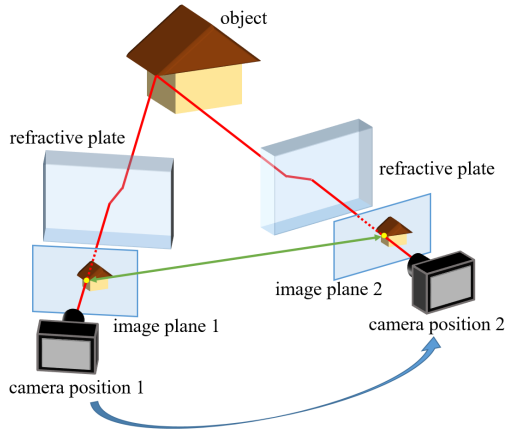


Fig. 1 System of structure from motion using refraction

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．屈折を用いた SfM ではスケールまで含めて並進ベクトルを算出することができるが，従来の SfM では並進ベクトルは方向のみしか算出することができない．これは，透明平板を利用しない場合には異なる場所で異なる大きさの計測対象の画像を取得した際に，対象物からの距離と対象物の大きさによっては同じ画像が得られるという相似関係が成立する場合があるためである．

屈折を用いた SfM では，屈折による光路の変化によりこの相似関係が成り立たなくなる．ここで，カメラと透明平板の関係を図 2 に示す．図 2 に示されている赤い実線は，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}_{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}_{out} である．図 2 から，内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} と外側光線ベクトル \mathbf{r}_{out} は同じであるが，同一直線上になくずれが生じることがわかる．このずれを透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} の方向へのずれと定義し，変化量ベクトル \mathbf{d} とする．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，

$$d = w \left(1 - \frac{\mathbf{r}_{in} \cdot \mathbf{n}}{\sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \|\mathbf{r}_{in} \times \mathbf{n}\|^2}} \right), \quad (1)$$

と求めることができる．ここで， w は透明平板の厚さ， n_1 は空気中の屈折率， n_2 は透明平板の屈折率である．内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} は，対応点の画像座標から算出可能である．ただし，内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} と法線ベクトル \mathbf{n} の方向が平行になる場合，すなわち計測点からの光が透明平板に垂直に入射する場合には，内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} と外側光線ベクトル \mathbf{r}_{out} にずれが生じないため，変化量ベクトル \mathbf{d} の算出が不可能である⁹⁾．本手法では，このような点を計測対象から除外するために， \mathbf{r}_{in} が透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} と平行になる計測点を計測対象として用いない．以上のように算出できる変化量ベクトル \mathbf{d} を考慮することで，屈折を用いた SfM では従来の SfM で生じ得る相似関係が成り立たなくなる．したがって，並進ベクトルを大きさを含め

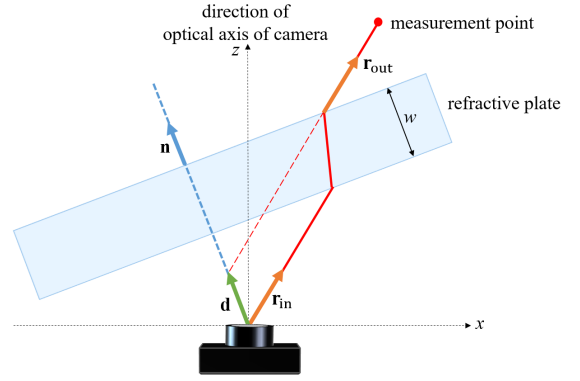


Fig. 2 Relationship between position of camera and refractive plate

て算出することができるようになるため，屈折を利用することで計測対象のスケールまで含めた 3 次元形状復元が可能となる．

3. 提案手法

3.1 屈折の影響を考慮したアプローチ

本論文では，屈折を用いた SfM の頑健性を向上させるために，屈折の影響を考慮したバンドル調整手法を提案する．バンドル調整では一般に，推定した 3 次元点群を画像上に再投影し，画像上での再投影点と元の点との距離（再投影誤差）を評価関数として，この評価関数の値が最小となるようにパラメータを調整することで，未知パラメータを推定する．ここで，バンドル調整に用いられる未知パラメータは，計測点群の 3 次元座標とカメラの移動情報である回転行列と並進ベクトルである．バンドル調整では調整すべきパラメータが多く，また，評価関数が一般に非線形であることから，最適化の初期値が最適解への到達に大きく影響を与えることが指摘されている¹⁶⁾．評価関数には，一般的には再投影誤差が用いられているが，問題設定や計測システムに応じて様々な関数が提案されている．このように，バンドル調整を行う上で，最適化の初期値の設定と評価関数の設計は重要な課題である．

本論文では，この 2 つの重要な課題に対してそれぞれ提案を行う．具体的には，バンドル調整の初期値に関しては最適化に用いる画像の取捨選択法，評価関数に関しては屈折の影響を考慮した評価関数をそれぞれ提案する．提案手法の流れを以下に示す．まず，複数視点から取得した 2 枚の画像を用いて画像対を作り，それぞれに関して 2 視点の屈折を用いた SfM を実行する．続いて，計測系で考慮すべき幾何的な整合性を制約条件として画像対を評価する．その評価結果に基づいて，計測精度を低下させる原因となり得る計測結果を除外するために，3 次元復元に用いる画像を取捨選択する．そして，選択した画像のみから得られる情報を用いてバンドル調整の初期値を算出する．このように算出された初期値を用いて，提案する評価関数を導入したバンドル調整を選択された画像のみを使用して実行することで，スケールまで含めた 3 次元復元を行う．以上の流れで復元を実施することで，屈折を用いた SfM における頑健性の向上が可能となる．以下では，提案手法である画像の取捨選択法と屈折の影響を考慮した評価関数について詳細を述べる．

3.2 バンドル調整に用いる画像の取捨選択

バンドル調整で利用する画像を取捨選択する条件について述べる．画像の取捨選択では，2 視点の屈折を用いた SfM での推定結果のうち，点群の 3 次元座標について評価を行う．屈折を用いた SfM の際には，計測誤差の影響で幾何的に整合性のない

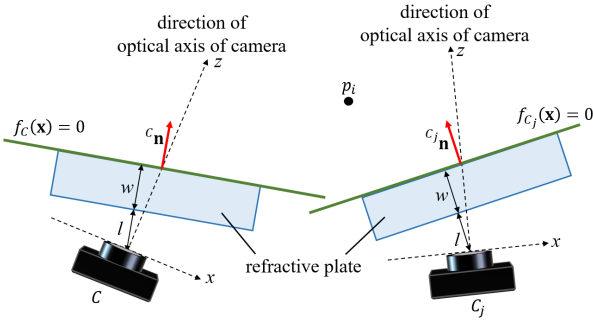


Fig. 3 Conditions for measurement point

点群が結果として得られる場合がある。ここで考慮する整合性とは、本計測システムでは復元結果の点群が透明平板に対してカメラと反対側にあることは明らかであり、計測対象の推定位置が平板の中やカメラと同じ側にあるべきではないことを意味する。本手法では、点群位置が平板に対して平板内を含むカメラ側に復元される結果となる画像対は不適切であると見なし、バンドル調整から除外する。

以下、画像の取捨選択について詳細に説明する。 n 枚の画像を使用した場合、 n 枚のうちの 1 枚を撮影したカメラ視点を基準視点とする。基準視点から撮影した画像とそれ以外の画像で画像対を作り、2 視点の屈折を用いた SfM を実行し、それぞれの結果に対してバンドル調整に使用するか否かの判定を実施する。具体的には、以下のように画像の取捨選択を行う。2 視点の屈折を用いた SfM において、2 つのカメラ座標系を考える (図 3)。基準とするカメラ座標系を C とし、カメラ座標系 C から見た i 番目の計測点を ${}^c\mathbf{p}_i = ({}^c x_i, {}^c y_i, {}^c z_i)$ とする。もう一方のカメラ座標系 C_j についても同様に ${}^{c_j}\mathbf{p}_i = ({}^{c_j} x_i, {}^{c_j} y_i, {}^{c_j} z_i)$ をカメラ座標系 C_j から見た i 番目の計測点とする。また、 l はカメラ中心と透明平板のカメラ側の面との距離とする。カメラ中心から透明平板の計測対象側の面までの距離を $l+w$ とし、画像の取捨選択の条件を以下の条件式で表す。

$$f_C({}^c\mathbf{p}_i) = {}^c n_x {}^c x_i + {}^c n_y {}^c y_i + {}^c n_z {}^c z_i - (l+w) > 0, \quad (2)$$

$$f_{C_j}({}^{c_j}\mathbf{p}_i) = {}^{c_j} n_x {}^{c_j} x_i + {}^{c_j} n_y {}^{c_j} y_i + {}^{c_j} n_z {}^{c_j} z_i - (l+w) > 0. \quad (3)$$

$f_C(\mathbf{x}) = 0$ と $f_{C_j}(\mathbf{x}) = 0$ は、それぞれカメラ座標系 C と C_j における、透明平板の計測対象側の面の方程式である。また、カメラ座標系 C と C_j における法線ベクトル ${}^c\mathbf{n}$ と ${}^{c_j}\mathbf{n}$ について、それぞれ ${}^c\mathbf{n} = ({}^c n_x, {}^c n_y, {}^c n_z)^T$ 、 ${}^{c_j}\mathbf{n} = ({}^{c_j} n_x, {}^{c_j} n_y, {}^{c_j} n_z)^T$ とした。2 視点の屈折を用いた SfM の点群の推定結果のすべてに対して式 (2) と式 (3) を満たす場合、カメラ座標系 C_j で取得した画像はバンドル調整に利用する。一方、点群の推定結果の中に上記の条件を満たさない点が 1 点でも存在した場合、カメラ座標系 C_j で取得した画像はバンドル調整から除外する。

3.3 バンドル調整の初期値の決定

バンドル調整の初期値は、画像の取捨選択において選択された画像から得られる情報をもとに算出する。バンドル調整では、最適化する未知パラメータである、点群の 3 次元位置座標、カメラの回転行列と並進ベクトルについて、それぞれ初期値を定める必要がある。

まず、カメラの回転行列と並進ベクトルは、選択された画像対を使用した屈折を用いた SfM により推定された値を用いる。一方、点群の 3 次元位置座標については、選択された画像対を使用した 2 視点の屈折を用いた SfM において推定された複数の

3 次元点群座標を、各対応点ごとに平均する。すなわち、 m 枚の画像が選択された場合 m 種類の点群が推定されるが、それらを用いて各対応点ごとに平均をとり、それら平均値からなる点群をバンドル調整の初期値として用いる。具体的には、まず選択された m 枚の画像を用いて求められる m 種類の点群について、基準座標系から見た座標を求める。 m 種類のうち k 種類目の点群の i 番目の計測点に関する基準座標系における位置座標を \mathbf{p}_{ik} とする。初期値として用いる点群の i 番目の計測点に関する基準座標系における位置座標 $\bar{\mathbf{p}}_i$ は、

$$\bar{\mathbf{p}}_i = \frac{\sum_k \mathbf{p}_{ik}}{m}, \quad (4)$$

と平均して求める。全ての点に関して位置座標 $\bar{\mathbf{p}}_i$ を算出し、この処理によりできる点群をバンドル調整の初期値として用いる。

3.4 バンドル調整の評価関数

ここまでは、バンドル調整の重要な課題の 1 つであるバンドル調整の初期値を獲得するための画像の取捨選択法を提案した。ここでは、バンドル調整のもう 1 つの重要な課題であるバンドル調整の評価関数について、屈折の影響を考慮した評価関数を提案する。提案する評価関数は、光線ベクトルの同一性を評価する誤差関数 e_1 と、最適化の過程における点群の位置の整合性を評価するペナルティ関数 e_2 、および計測環境の未知パラメータの推定に関する評価関数 e_3 の 3 つの項を持つ。これらを用いて、バンドル調整の評価関数を

$$E = e_1 + \alpha e_2 + \beta e_3, \quad (5)$$

と定義する。 α と β は各項の重みを調整する重み係数である。本手法では評価関数 E を用いて、点群の 3 次元座標とカメラの回転行列と並進ベクトル、および計測環境の未知パラメータを調整する。最適化手法としては Levenberg-Marquardt 法を用いる。以下では評価関数の 3 つの項について詳細に述べる。

3.4.1 光線ベクトルの同一性を評価する誤差関数

バンドル調整では、再投影誤差を評価関数として用いることが一般的である。しかし、屈折を用いた SfM において再投影誤差を評価関数として用いた場合、3.2 節で述べたような幾何的な不整合状態において正しく評価できない場合がある。そこで本手法では、内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} と外側光線ベクトル \mathbf{r}_{out} の同一性に注目し、この関係を定量化し評価関数として用いる。2 つの光線ベクトルの関係を図 4 に示す。内側光線ベクトル \mathbf{r}_{in} は、対応点の画像座標から求めることができるため、既知のベクトルである。一方、外側光線ベクトルは、推定した点群の 3 次元位置座標を利用して求めるため、推定点が正しい位置に推定さ

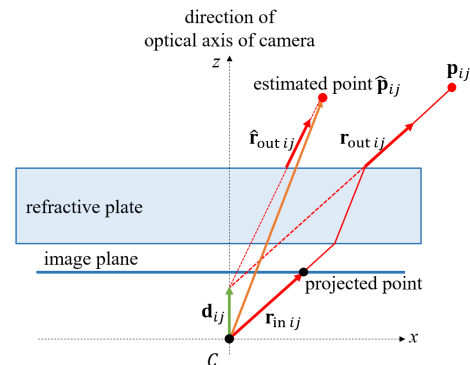


Fig. 4 Relationship of two ray vectors

れていない場合その方向にずれが生じる。したがって、外側光線ベクトルの方向が内側光線ベクトルの方向と等しくなるように評価関数を設計し、2つのベクトルが等しくなるように最適化を行う。j番目のカメラによる画像のi番目の計測点に関して、外側光線ベクトル $\mathbf{r}_{out\ ij}$ の推定値（推定外側光線ベクトル）を $\hat{\mathbf{r}}_{out\ ij}$ とする。2つの単位ベクトル、内側光線ベクトル $\mathbf{r}_{in\ ij}$ と推定外側光線ベクトル $\hat{\mathbf{r}}_{out\ ij}$ の方向を考えれば良く、光線ベクトルの同一性を評価する誤差関数 e_1 は、

$$e_1 = \sum_{i,j} \|\mathbf{r}_{in\ ij} - \hat{\mathbf{r}}_{out\ ij}\|^2, \quad (6)$$

となる。2つの光線ベクトルの誤差を小さくするには、この関数を最小化すればよい。

ここで、推定外側光線ベクトル $\hat{\mathbf{r}}_{out\ ij}$ は、図4より、

$$\hat{\mathbf{r}}_{out\ ij} = \hat{\mathbf{p}}_{ij} - \mathbf{d}_{ij}, \quad (7)$$

と算出できる。 $\hat{\mathbf{p}}_{ij}$ と \mathbf{d}_{ij} は、それぞれj番目のカメラによる画像のi番目の計測点に関する推定点と変化量ベクトルである。また、推定点 $\hat{\mathbf{p}}_{ij}$ は、基準座標系における推定点 $\hat{\mathbf{p}}_i$ と、j番目のカメラの移動を表す回転行列と並進ベクトルの推定値 $\hat{\mathbf{R}}_j$ と $\hat{\mathbf{t}}_j$ を用いて、

$$\hat{\mathbf{p}}_{ij} = \hat{\mathbf{R}}_j \hat{\mathbf{p}}_i - \hat{\mathbf{t}}_j, \quad (8)$$

となる。式(7)と式(8)を用いて式(6)の誤差関数 e_1 を算出することで、点群の3次元位置座標、カメラの回転行列と並進ベクトルが推定可能となる。

3.4.2 点群の位置の整合性を評価するペナルティ関数

3.4.1項において、2つの光線ベクトルの同一性の評価を導入したが、この評価のみでは、バンドル調整の途中で生じ得る3.2節で述べた幾何的な不整合状態を十分に考慮することができない。そのため、式(2)と式(3)の条件を満たす方向に最適化が進行するように、幾何的に整合性のない位置に推定された点にはペナルティを与える。具体的には、j番目のカメラによる画像のi番目の計測点に関する推定点 $\hat{\mathbf{p}}_{ij}$ に対し、以下の外点ペナルティ関数を導入する。

$$e_2 = \sum_{ij} \{\max(0, -f_{c_j}(\hat{\mathbf{p}}_{ij}))\}^2. \quad (9)$$

この関数により、透明平板に対してカメラ側や透明平板内に推定された点に対して、その距離に応じてペナルティが与えられ、最適化中に幾何的な整合性が保たれる。

3.4.3 計測環境の未知パラメータの推定に関する評価関数

本計測システムに特有の透明平板に関するパラメータをバンドル調整において未知パラメータとして推定することを考える。本手法における透明平板に関するパラメータには、透明平板の厚さ w と法線ベクトル \mathbf{n} と透明平板の屈折率 n_2 がある。

まず、透明平板の厚さ w は精度良く計測できるため、実測値を用いることが可能である。なお、式(1)に着目すると、変化量ベクトルの大きさ d が透明平板の厚さ w に比例して変化することがわかる。これにより、透明平板の厚さを未知パラメータ化すると、カメラの移動情報である並進ベクトルの大きさが一意に定まらなくなり、対象物のスケールまで含めた復元が不可能となる。したがって、透明平板の厚さ w はバンドル調整の未知パラメータとして扱うことはできない。

これに対し、透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} と屈折率 n_2 は式(1)において非線形に作用し、バンドル調整の未知パラメータとして扱った場合にも並進ベクトルの大きさは一意に定めることが

可能である。そのため、未知パラメータとして推定することが可能である。

以下、透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} の未知パラメータ化について述べる。法線ベクトルは、正確な値を求めるためには精度の良い事前の計測が必要となる。そのため、未知パラメータとして扱い、バンドル調整により推定できることは有効である。法線ベクトルの方向は、カメラに対する平板の傾きからおおよその方向を実際に計測することが可能であるため、あらかじめ計測した値を初期値として用いる。

法線ベクトルを未知パラメータ化した場合、最適化の過程で評価関数の繰り返し計算を行うたびに変化量ベクトル \mathbf{d} の値が変化する。式(7)における計算に変化量ベクトル \mathbf{d} が含まれているため、法線ベクトル \mathbf{n} の値を更新する場合には、繰り返し計算を行うたびに式(1)と $\mathbf{d} = d\mathbf{n}$ を用いて変化量ベクトル \mathbf{d} も再計算する。また、透明平板はカメラと計測対象の間に設置されていることから、カメラの光軸方向を z 軸方向とすると、透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} の z 成分が負になることはない。したがって、法線ベクトル \mathbf{n} を未知パラメータ化するときには、法線ベクトル \mathbf{n} の z 成分が負になることを防ぐために、未知パラメータに関する評価関数 e_3 として以下の項を定義する。

$$e_3 = \{\max(0, -n_z)\}^2. \quad (10)$$

以上の方法で、法線ベクトルをバンドル調整の未知パラメータとして扱うことが可能となる。なお、法線ベクトルを未知パラメータとして扱った場合において、ペナルティ関数の計算式に含まれるカメラ中心から透明平板の計測対象側の面までの距離 $l+w$ は一定であるとする。

また、屈折率 n_2 を未知パラメータとして扱うためには、法線ベクトルを未知パラメータ化する場合と同様に、屈折率 n_2 の値を更新するために変化量ベクトル \mathbf{d} の再計算を行えばよい。

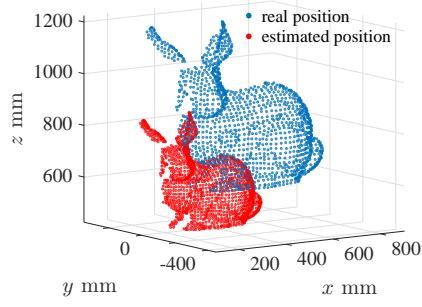
4. シミュレーション実験

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。提案手法により屈折を用いた SfM の頑健性が向上していることを示すために、計測誤差として画像間での対応点を検出する際に生じる誤差（対応点検出誤差）を考える。対応点検出誤差には、そもそも画像間での対応が間違っていることで生じる誤差と、対応関係は正しいが画像上での位置がずれていることによる誤差がある。ここでは画像間での対応関係は全て正しく与え、前者による誤差はないものとし、後者による誤差のみを考える。以下の実験においては、対応点検出精度が n ピクセル精度であるとは、対応点の画像上での位置に $\pm n/2$ ピクセルまでの対応点検出誤差が生じ得ることを意味するものとする。

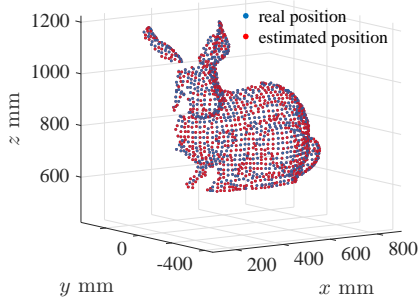
なお、評価関数の重み α と β について、 α は幾何的な不整合状態を防ぐため、 β は法線ベクトルの z 座標が負になることを防ぐために導入している。本研究ではこれらの値の違いが推定結果に与える影響は小さいことを確認した上で、すべての実験を通して α と β は試行錯誤的に決定した。

4.1 3次元形状モデルの復元実験

3次元形状モデルを用いたシミュレーション実験について述べる。3次元形状モデルとしては、Stanford Bunny の点群形状モデルを用いた。点群の数は1,428点で、異なる10視点から取得した10枚の画像を用いて復元を行った。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



(a) Conventional method



(b) Proposed method

Fig. 5 Reconstruction results of the Stanford Bunny

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 n_1 と n_2 をそれぞれ 1.00 と 1.49 とし、透明平板の厚さ w を 200 mm、カメラから平板までの距離 l を 50 mm、評価関数の重み係数 α を 1 とした。また、この実験では法線ベクトルを既知として扱い、重み係数 β は 0 とした。

復元した結果を図 5 に示す。比較のため、屈折を用いた Structure from Motion に対して一般的なバンドル調整¹⁰⁾を適用した従来手法での結果を図 5 (a) に、提案手法を導入したバンドル調整を適用した提案手法での結果を図 5 (b) に示す。ここでの一般的なバンドル調整とは、画像の取舍選択を適用せず、再投影誤差を評価関数として用いた手法を示す。提案手法によりスケールまで含めた 3 次元復元が実現できていることがわかる。また、それぞれの場合についての誤差平均は、(a) 279 mm, (b) 0.0433 mm であった。ここで、誤差平均とは、3 次元空間内において各点ごとに真値と推定値の距離を計算し、その平均を求めた値である。誤差平均の値からも、提案手法によりスケールまで含めた精度の良い復元ができていることが確認できる。

4.2 透明平板の傾きの影響

透明平板の傾きを変えて行った実験について述べる。透明平板の傾きは、カメラの光軸と透明平板が垂直である状態を基準として、透明平板の中心を通りカメラの上向きにとった軸回りに 0 deg, 10 deg, 20 deg, 30 deg 傾けた 4 通りの傾きの条件で入力画像を生成して実験を行った。パラメータの条件は 4.1 節で用いた値と同様とし、法線ベクトルは既知であるとした。また、評価関数の重み係数は α を 1, β を 0 とし、対応点検出精度は 1 ピクセル精度であるとした。計測対象は 200 点のランダム点群とし、異なる 20 視点から取得した画像を用いた。視点の組み合わせは 30 種類とし、4 種類の透明平板の傾きのそれぞれに関して実験を行った。誤差平均が 1 mm 以下と 2 mm 以下を成功とした場合について、それぞれの傾きに関して 30 回の試行

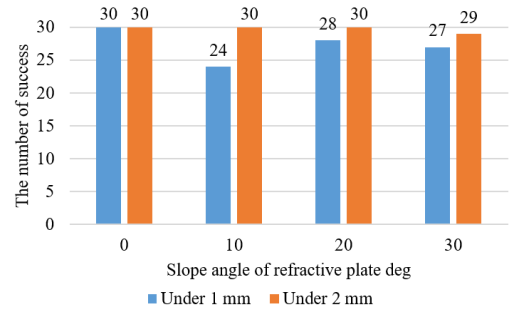


Fig. 6 Effect of slope angle of refractive plate

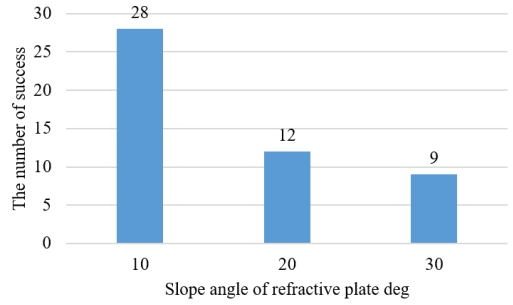


Fig. 7 Result of handling normal vector as unknown parameter

Table 1 Averages of differences between true and estimated normal vectors

	10 deg	20 deg	30 deg
difference deg	9.1×10^{-3}	1.4×10^{-2}	4.7×10^{-2}

中の成功回数を比較した。

結果を図 6 に示す。誤差平均が 2 mm 以下の場合を見るときは、どの傾きについてもほぼすべての場合で復元に成功した。以上のように、透明平板の傾きを大きくした場合に 30 deg まではスケールまで含めた形状復元が可能であることを確認した。

4.3 透明平板の法線ベクトルの推定

3.4.3 項で述べたバンドル調整における計測環境の未知パラメータ化について、透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} を未知パラメータとして扱った場合のシミュレーションについて述べる。したがって、ここでのシミュレーションでは、計測点の 3 次元座標、カメラの回転行列と並進ベクトル、透明平板の法線ベクトルがバンドル調整で推定する未知パラメータとなる。

法線ベクトルを未知パラメータ化した場合の評価をするために、透明平板の傾きを変えて生成した画像を入力としてバンドル調整を行った。この実験では、入力画像生成時の法線ベクトルが推定可能であること、また、計測対象のスケールまで含めた 3 次元復元が可能であることを検証した。

透明平板の傾きは、4.2 節と同様に 10 deg, 20 deg, 30 deg 傾けた 3 通りの傾きの条件で入力画像を生成して実験を行った。パラメータの条件は 4.1 節で用いた値と同様とし、法線ベクトルの初期値はいずれの傾きにおいても、カメラの光軸方向を z 軸方向として $\mathbf{n} = (0, 0, 1)^T$ とした。評価関数の重み係数は α , β ともに 1 とし、対応点検出精度は 1 ピクセル精度であるとした。計測対象は 200 点からなるランダム点群とし、異なる 20 視点から取得した画像を用いて復元を行った。視点の組み合わせは 30 種類とし、3 種類の透明平板の傾きのそれぞれに関して実験を行った。誤差平均が 1 mm 以下を成功とし、それぞれの傾きについて 30 回中の成功回数を比較した。

結果を図 7 に示す。傾きが 10 deg の場合は 93 % 程度復元に

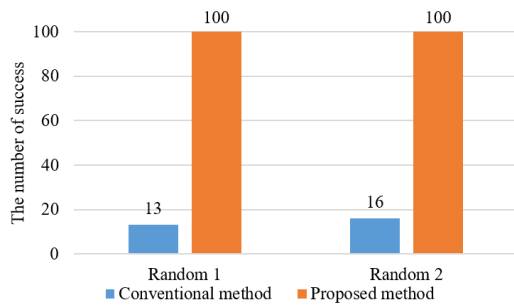


Fig. 8 Comparison with conventional method

成功した。また、傾きが 20 deg, 30 deg と大きくなるにつれて、成功回数が減少していることが確認できる。4.2 節において、透明平板の傾きが 30 deg の場合まで精度良く復元に成功していることから、初期値と真値のずれが大きくなったために成功回数が減少したと考えられる。このことから、法線ベクトルの初期値にはある程度の正確さが必要であると考えられる。復元に成功した場合について、推定された法線ベクトルと真値との角度差の平均値を表 1 に示す。復元に成功した場合は、法線ベクトルも非常に精度良く推定できていることが確認できる。以上から、法線ベクトルを未知パラメータとして扱った場合においても、精度良く 3 次元復元が可能であることが示された。

また、透明平板の屈折率を未知パラメータ化した場合について、真値をアクリルの屈折率 1.49 とし初期値を一般的なガラス（ソーダ石灰ガラス）の屈折率 1.52 と設定した場合と、真値をガラスの屈折率 1.52 と設定し初期値をアクリルの屈折率 1.49 と設定した場合の 2 通りについて同様の条件で実験を行った。前者の結果は 30 回すべての試行で誤差平均が 1 mm 以下、後者の結果は 30 回の試行中 27 回の試行で誤差平均が 1 mm 以下、かつ 29 回の試行で誤差平均が 2 mm 以下となり、屈折率を未知パラメータ化した場合にも精度良く復元できることが確認できた。

4.4 従来手法との比較

画像を取得する際のカメラの位置関係が変わった場合にも安定して精度良く計測が可能であることを検証するために、4.1 節で用いた従来手法と提案手法の比較を行った。

透明平板はカメラの光軸に垂直であるとし、対応点の検出精度は 1 ピクセル精度と設定した。計測対象は、200 点のランダム点群 2 種類とし、画像は異なる 20 視点から取得した画像を生成して使用した。カメラの動きの変化を想定し、100 種類の異なる組み合わせのカメラ視点を無作為に用意し、100 回中の復元成功回数を比較した。なお、成功の判定は誤差平均が 1 mm 以下の場合を成功とした。パラメータの条件は、4.1 節で用いた値と同様とした。ただし、法線ベクトルは既知として扱い、評価関数の重み係数 β は 0 であるとして、検証を行った。

結果を図 8 に示す。従来手法では、成功回数が 20 回未満であったことに対し、提案手法を用いた場合は、今回用いた 2 種類のランダム点群双方において 100 回すべてで誤差平均が 1 mm 以下となった。

提案手法では、様々な組み合わせの視点をを用いた場合に復元に成功していることから、画像を取得する際のカメラの位置関係が変わった場合にも頑健に 3 次元復元をすることができていることが確認できた。

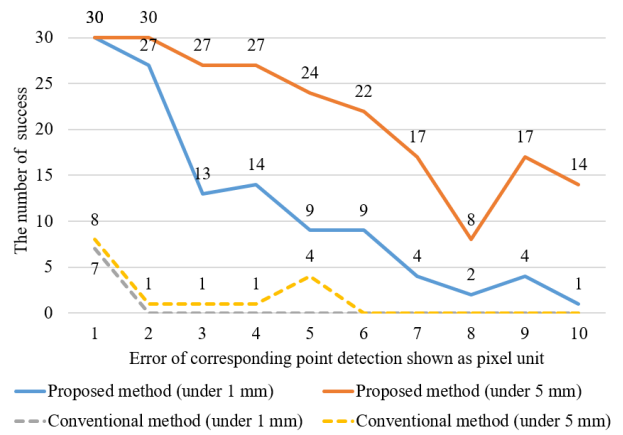


Fig. 9 Influence of corresponding point detection

4.5 対応点検出精度の影響

対応点検出精度を変化させて行ったシミュレーションの結果を示す。同一条件下で対応点の検出精度を低くした、すなわち対応点検出誤差を大きくした場合に提案手法による復元を行うことで、提案手法の対応点検出誤差に対する頑健性を検証した。透明平板はカメラの光軸に対して垂直に設置した。計測対象は 200 点のランダム点群 1 種類とし、画像は異なる 20 視点から取得した画像を使用した。視点の組み合わせは無作為に 30 種類用意し、30 回中の復元成功回数を比較した。成功の基準は、誤差平均が 1 mm 以下の場合と、誤差平均が 5 mm 以下の場合とした。対応点の検出精度は、1 ピクセル精度から 10 ピクセル精度まで変化させて検証を行った。また、比較のために従来手法を用いた場合についても同様の条件で検証を行った。

結果を図 9 に示す。横軸は対応点の検出精度の尺度である対応点検出誤差 (Error of corresponding point detection) をピクセル単位で示している。また、縦軸は 30 回の試行における成功回数であり、見やすさのために各点の上にもその値を示している。提案手法の結果を実線で示しており、青色の線が誤差平均 1 mm 以下を成功とした場合、赤色の線が誤差平均 5 mm 以下を成功とした場合の結果を示す。また、従来手法の結果を点線で示しており、灰色の線が誤差平均 1 mm 以下を成功とした場合、黄色の線が誤差平均 5 mm 以下を成功とした場合の結果を示す。

提案手法と従来手法を比較すると、提案手法の方が成功回数が多いことが確認できる。例えば従来手法では、誤差平均 1 mm 以下を成功の基準とすると、対応点検出精度が 2 ピクセル精度以上の場合では 1 度も成功しなかった。また、誤差平均 5 mm 以下を成功の基準とした場合は、対応点検出精度が 6 ピクセル精度以上では 1 度も成功しなかった。一方、提案手法について、誤差平均 1 mm 以下を成功とした場合の結果を見ると、対応点検出精度が 2 ピクセル精度であっても 9 割以上の割合で成功した。また、誤差平均 5 mm 以下を成功とした場合の結果を見ると、対応点検出精度が 4 ピクセル精度であっても 9 割以上の割合で復元に成功した。

以上により、提案手法を用いることで対応点検出精度が低い場合、すなわち対応点検出誤差が大きい場合にも精度の良い 3 次元形状復元が可能であることが示された。

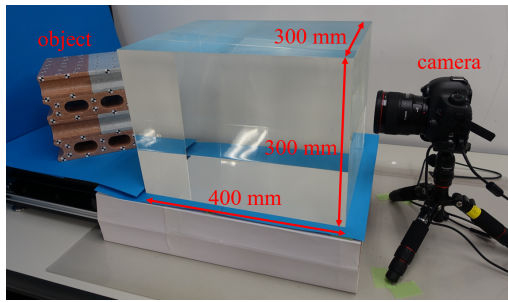


Fig. 10 Real experimental setup

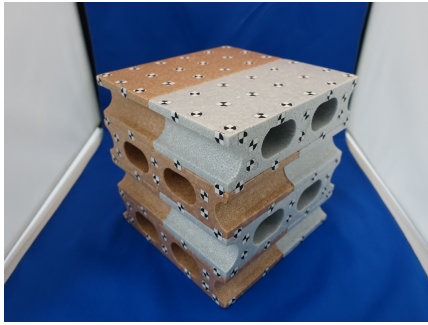


Fig. 11 Measurement object: the model of concrete blocks

5. 実環境における実験

5.1 実験条件

提案手法の有効性を示すために行った実環境における実験について述べる。実験環境を図 10 に示す。実測実験では、カメラと透明平板の位置関係を保つために、計測対象を移動させることで画像を取得した。これは、カメラを動かして対象物の画像を異なる角度から取得することと本質的には同じである。本実験では、カメラの光軸と透明平板はおおよそ垂直になるように設置する。しかし、透明平板の傾きを事前に正確に計測することは困難であるため、本実験では透明平板の法線ベクトルをバンドル調整の未知パラメータとして扱った。

透明平板としては大きさが幅 300 mm、高さ 300 mm、奥行き 400 mm の直方体のアクリルキューブを用いた。また、カメラは Canon 製のデジタル一眼レフカメラ EOS 5Ds R (ローパスフィルタレスモデル) を用いた。計測対象物には、コンクリートブロックの模型を用いた(図 11)。模型は 1 辺がおおよそ 200 mm の立方体である。また、対応点検出を精度良く行うために、計測対象の 100 カ所にマーカを貼り付けた。このマーカを目印に、手動で対応点検出を行った。対応点検出精度は 1 ピクセル精度である。

空気と透明平板(アクリル材質)の屈折率 n_1 と n_2 はそれぞれ 1.00 と 1.49 とした。また、評価関数の重み係数 α と β はともに 1 とした。バンドル調整の未知パラメータとして扱う透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} は、透明平板をカメラの光軸に垂直になるように設置していることから、法線ベクトルの初期値はカメラの光軸方向を z 軸方向として $\mathbf{n} = (0, 0, 1)$ とした。

ここで、提案手法における画像の取捨選択による初期値の推定について、2 枚の画像による屈折を用いた SfM⁹⁾ がノイズの影響を受けやすいことを考慮して、バンドル調整から除外するための条件を緩めて画像の取捨選択を行った。具体的には、計測点はカメラの裏側には推定されるべきではないことを条件とし、式 (2) と式 (3) において $l+w=0$ とした式を画像の取捨選択の条件式として用いる。

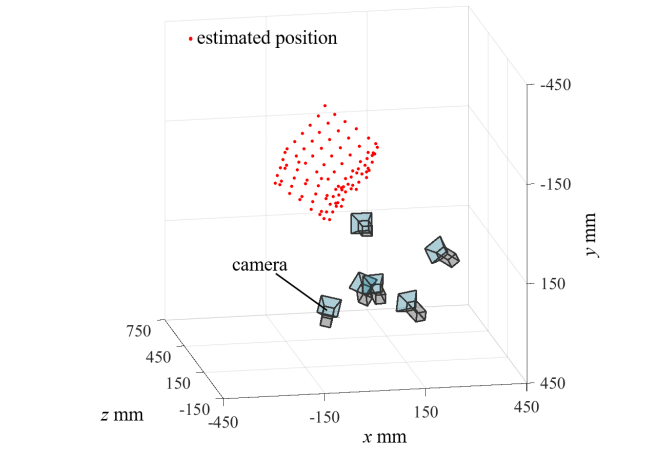
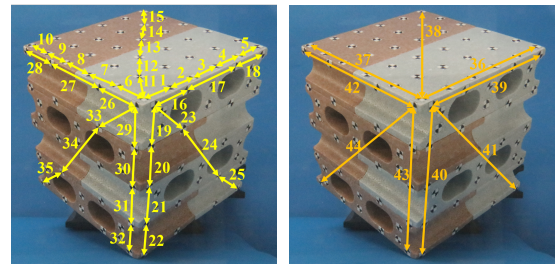


Fig. 12 Result of real experiment



(a) Short distances

(b) Long distances

Fig. 13 Distances between two points for evaluation

以上の条件の下で復元実験を行った。本実験では、異なる視点から撮影した 7 枚の画像を用いた。

5.2 実験結果

実環境で行った実験の結果について述べる。実験に用いた画像のうち画像の取捨選択により 1 枚が除外された。残りの 6 枚の画像を用いて、提案した評価関数を導入したバンドル調整を実行した。

点群とカメラ位置の復元結果を図 12 に示す。赤い点が点群の復元結果を、四角い記号が復元したカメラ位置を示している。この結果から、ブロックの形状が復元できていることが確認できる。また、バンドル調整の未知パラメータとして扱った透明平板の法線ベクトルの推定結果は、 $\mathbf{n} = (-0.01260, 0.01474, 0.9998)$ とカメラの光軸に対する透明平板の向きはほぼ垂直となり、実測実験においても透明平板の法線ベクトルを未知パラメータとして扱い、推定できることが確認できた。

5.3 スケール復元の検証

5.2 節での結果における 3 次元形状の復元精度について評価を行った。計測対象物であるブロックに貼り付けたマーカ間の距離を実測し、その値を真値とした。評価のために計測した 2 点間の距離を図 13 に示す。図 13 (a) は近距離の 2 点間、図 13 (b) は遠距離の 2 点間を表している。2 つの図に示された計 44 個の距離について、復元結果の点群に関して各距離に該当するユークリッド距離を算出し、真値と比較した。

各距離における真値に対する誤差の割合は、近距離・遠距離の全ての場合において 4 % 未満であった。これらすべての結果は、真値より推定値の方が大きくなっていった。このことから、計測対象が全体的にわずかに拡大されて復元されたことがわかる。しかし、誤差の割合の平均は、近距離に関しては 2.7 %、遠距離に関しては 2.9 % となり、近距離・遠距離双方の場合につい

て精度良く復元できていることが確認できた。

以上の結果から、提案手法を適用することで実環境での実験においてもスケールまで含めた3次元復元が可能であることが示された。

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* の頑健性を向上させるために、屈折の影響を考慮したバンドル調整を提案した。その際に、バンドル調整の重要な課題である初期値の設定と評価関数の設計に関してそれぞれ提案を行った。まず、バンドル調整の初期値に関しては、計測システムの幾何的な整合性を考慮して、バンドル調整に用いる画像の取捨選択法を提案した。画像の取捨選択によって選択された画像のみから得られる情報を利用して、バンドル調整の初期値を算出した。続いて、バンドル調整の評価関数に関しては、屈折の影響を考慮し、2つの光線ベクトルの同一性を評価する誤差関数と点群の位置の整合性を評価するペナルティ関数を導入した。また、計測環境の未知パラメータ化に関する評価関数も導入した。

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、対応点検出誤差を大きくして実験を行うことで、提案手法により屈折を利用した *Structure from Motion* の頑健性が向上したことが示された。また、実環境における実験においては、提案手法を適用することで実際に撮影した画像を用いた場合にもスケールまで含めた3次元形状復元が可能であることが確認できた。

屈折を利用した *Structure from Motion* の実用性を高めることが今後の課題である。実測実験において対応点は手で検出したが、実用性を高めるためには自動で検出するシステムを考える必要がある。それに伴い、本論文では全て正しく与えていた画像間での対応に関して、対応に誤りがある場合に精度良く復元することも、解決すべき課題となる。また提案手法では、取得画像から得られる内側光線ベクトル \mathbf{r}_m と透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} の関係から、光線が平板に垂直に入射してくる計測点は理論的に扱うことができないため、特異点として計測対象から除外した。実測実験においてはノイズなどによる計測誤差が生じるため、これらの影響を考慮した特異点の評価法の構築も今後の課題である。

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。また、実験に用いた点群形状モデルの Stanford Bunny は、The Stanford 3D Scanning Repository より提供されたものである。

参 考 文 献

- 1) Recharad Hartley and Andrew Zisserman: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Second Edition (2004).
- 2) 内山庄一郎, 井上 公, 鈴木 比奈子: SfMを用いた三次元モデルの生成と災害調査への活用可能性に関する研究, 防災科学技術研究所研究報告, 81 (2014) 37.
- 3) 小花和 宏之, 早川 裕式, ゴメス クリストファー: UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング, 地形, 35, 3 (2014) 283.
- 4) 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 (2009)* 1413.
- 5) Chunyu Gao and Narendra Ahuja: A Refractive Camera for Acquiring Stereo and Super-resolution Images, *Proceedings of the 2006 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (2006)* 2316.
- 6) Zhihu Chen, Kwan-Yee K. Wong, Yasuyuki Matsushita, Xiaolong Zhu and Miaomiao Liu: Self-Calibrating Depth from Refraction, *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Computer Vision (2011)* 635.
- 7) 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.
- 8) 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 (2015)* 540.
- 9) 柴田 彬, 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 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る *Structure from Motion*, 精密工学会誌, 82, 12 (2016) 1045.
- 10) Bill Triggs, Philip F. McLauchlan, Richard I. Hartley and Andrew W. Fitzgibbon: Bundle Adjustment – A Modern Synthesis, *Vision Algorithms: Theory and Practice (2000)* 298.
- 11) Ji Zhang, Mireille Boutin and Daniel G. Aliaga: Robust Bundle Adjustment for Structure from Motion, *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Image Processing (2006)* 2185.
- 12) Sameer Agarwal, Noah Snavely, Ian Simon, Steven M. Seitz and Richard Szeliski: Building Rome in a Day, *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Computer Vision (2009)* 72.
- 13) Maxime Lhuillier: Incremental Fusion of Structure-from-Motion and GPS Using Constrained Bundle Adjustment, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 34, 12 (2012) 2489.
- 14) Soulaïman El Hazzat, Abderrahim Saaidi and Khalid Satori: Structure from Motion for 3D Object Reconstruction based on Local and Global Bundle Adjustment, *Proceedings of the 2015 Third World Conference on Complex Systems (2015)* 1.
- 15) Yukari Okumura, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita and Hajime Asama: Global Optimization with Viewpoint Selection for Scale-reconstructable Structure from Motion Using Refraction, *Proceedings of the International Workshop on Advanced Image Technology (2017)*.
- 16) 岡谷 貴之: バンドルアジャストメント, 情報処理学会研究報告 2009-CVIM-167 (37) (2009) 1.