

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 *

柴田 彬** 藤井浩光** 山下 淳*** 浅間 一***

Scale-Reconstructable Structure from Motion Using a Refractive Plate and a Single Camera

Akira SHIBATA, Hiromitsu FUJII, Atsushi YAMASHITA and Hajime ASAMA

Structure from Motion is a popular 3D measurement method. This technique uses images captured by a single camera with motion. Structure from Motion can calculate the 3D position of objects and the camera motion simultaneously. Because of its simplicity, Structure from Motion has been implemented in various ways. However, there is an essential problem that the scale of the objects cannot be calculated by Structure from Motion. In this paper, we propose a method which solves this problem using refraction. Refraction induced by introducing a different medium results in a change in the path of a light ray. This method is implemented using only a refractive plate and a single camera. The refractive plate is placed in front of the camera. We can obtain the refractive images using this system. The results of simulations show the effectiveness of the proposed method. It is also shown that the precision of reconstruction in the proposed method is improved when the thicker refractive plate is used.

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

1. 序 論

本論文は Structure from Motion においてスケール情報も含めて 3 次元復元をする新手法を提案する。

3 次元計測技術の 1 つである Structure from Motion は移動しながらカメラを用いて取得した複数の計測対象の画像から、計測対象の 3 次元位置情報を算出する手法である¹⁾。この手法はカメラ 1 台のみで実現可能であるという簡便性を有している。したがって有用性も高く、活発に研究されている技術である²⁾³⁾。

Structure from Motion は計測対象の 3 次元座標の算出と同時にカメラの移動情報も算出可能な手法である。しかし、カメラの移動量の大きさを算出することができず、その結果、計測対象の大きさを求めることができないという問題がある。すなわち、従来の Structure from Motion では計測対象の相対的な位置関係しか算出できない¹⁾。計測対象のスケールを含めた 3 次元復元するためにはカメラの位置関係についての制約条件、またはカメラ移動における幾何学的な情報が事前に必要となる⁴⁾。この問題に対し、著者らはこれまでに、屈折を利用することでスケール復元が可能となる Structure from Motion 手法を提案してきた^{5)~7)}。屈折は光線が異なる媒体を通過する際に発生する現象であり、スネルの法則に従って境界面において光線の方向が変化することが知られている。屈折現象に関する研究はコンピュータビジョンの分野でも、多く行われている。特に水中計測では活発であり、計測を行った際に屈折によって発生する画像の歪みを算出する方法や屈折を考慮した上での計算方法がまとめられている^{8)~10)}。水中環境などにおいて屈折を考慮した Structure from Motion を扱う研究も行われている^{11)~13)}。しかしこれらの研究では水中環境下において発生する屈折の効果を歪みとして除去することを目的としている。

一方、屈折を積極的に利用して 3 次元計測を行う研究も多く行われている。透明平板をカメラと計測対象の間に置いた状態で撮影した画像と除いた状態で撮影した画像から生じる視差を利用して計測対象のデプスマップの作成に成功している¹⁴⁾。また、カメラと計測対象の間に置いた透明平板をカメラの光軸に沿って回転させながら画像を取得し、そこから 3 次元計測をする研究もある¹⁵⁾。一方、屈折物体の形状を工夫することで、1 枚の画像内で視差を発生させ、3 次元計測を実現する手法もある¹⁶⁾¹⁷⁾。これらの研究は屈折の効果を積極的に取り入れている。しかし、これらの研究では計測範囲が狭いという問題がある。また、Structure from Motion におけるスケール復元性の問題に対して、屈折の効果に注目した研究はない。

本論文では、従来の手法では不可能であったスケール復元が可能な Structure from Motion 手法を提案する。具体的には、カメラの前に透明な平板を置くことで屈折を生じさせ、屈折による歪みが生じた画像を取得する。この屈折による画像の変化を利用してスケール復元を行う。提案手法では、計測対象の幾何学的情報やカメラ移動の事前情報などがなくても、透明平板を置くのみでスケール復元が可能である。

2. 屈折を用いた Structure from Motion

2.1 アプローチ

Structure from Motion は、カメラで撮影した計測対象の画像情報のみから、計測対象の 3 次元情報を算出する手法である。その際、カメラの姿勢と位置も同時に算出可能である。しかし、Structure from Motion には計測対象のスケールを算出することができないという問題がある。これは以下のように説明できる。図 1 では、カメラ位置 A とカメラ位置 B の移動距離（青い矢印）の比と計測対象 A と B のスケールの比が等しくなっている。このとき、カメラ位置 A で計測対象 A を撮影した画像とカメラ位置 B で計測対象 B を撮影した画像は等しくなる。Structure from Motion では 2 視点のカメラから取得した画像のみを入力

* 原稿受付 平成 28 年 1 月 21 日

掲載決定 平成 28 年 9 月 6 日

** 東京大学大学院（東京都文京区本郷 7-3-1）

*** 正 会 員 東京大学大学院

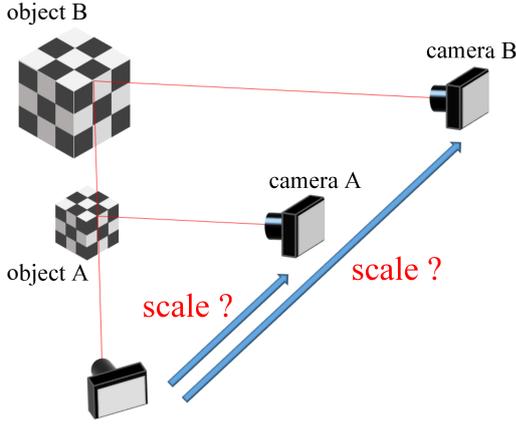


Fig. 1 The images captured by camera A and camera B will be equal. Therefore we cannot which camera position is correct from those images

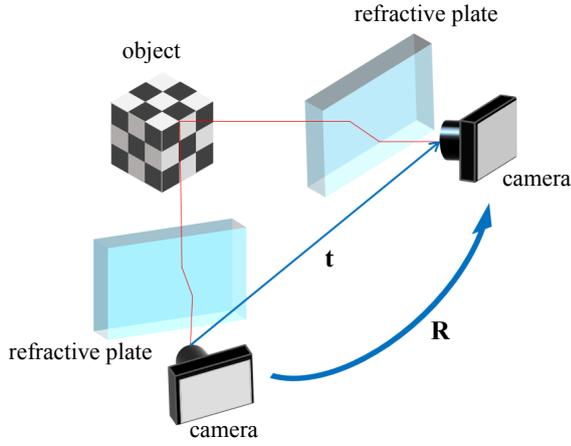


Fig. 2 Our approach to calculate the scale of the object in Structure from Motion is using a refraction. A refractive plate is placed in front of a camera

とするため、この画像のみからはカメラ位置 A と B のどちらから撮影したものであるかを判断することができない。このため、計測対象の大きさも算出することができない。そこで、本研究では屈折現象を用いるというアプローチでこの問題を解決する手法を提案する。屈折は光線が異なる媒体を通過する際、その媒体の境界面で曲がる現象である。本研究ではカメラに入射する光線に屈折が発生するように、カメラの前に透明平板を配置するシステムを用いる（図 2）。屈折の度合いは、カメラの位置と計測対象の位置に応じて変化するため、カメラの移動距離と計測対象のスケールが同じ比率で変化する場合でも異なる画像を得ることができる。この変化を利用することでスケール復元が可能となる。

2.2 透明平板を用いたシステム

本論文で提案するシステムの概観を図 3 に示す。一般的なカメラを用い、その光軸と垂直になるように、透明平板をカメラと観測点の間に配置する。カメラは十分にキャリブレーションされており、透明平板の厚さは既知とする。本研究では気中環境における計測を想定しているため、カメラと平板の間、および透明平板から観測物体までは空気となる。空気と透明平板の屈折率は既知とする。

2.3 光線追跡

屈折が発生したことにより、カメラに入射する光線は変化する（図 3）。その結果、透明平板の内側と外側では光線経路がずれる。そこで、透明平板の外側の光線ベクトルとカメラ光軸の

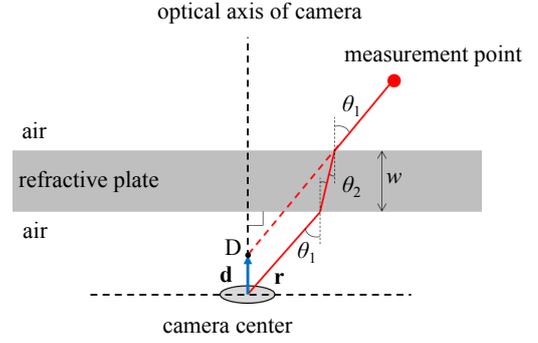


Fig. 3 The light ray path between the camera and measurement points is refracted twice in this system

交点を点 D とし、その位置ベクトルを光線の変化ベクトル \mathbf{d} とすると、

$$\mathbf{d} = (0, 0, d), \quad (1)$$

と表せる。 d は屈折による光線の変化の大きさを表すパラメータである。一般的に屈折現象はスネルの法則によって記述することができ、入射角と屈折角の関係は、

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (2)$$

と表せる。ここで、 n_1 と n_2 はそれぞれ、空気と透明平板の屈折率であり既知の値である。 θ_1 と θ_2 はそれぞれ、カメラ中心から透明平板への入射角と屈折角、および透明平板から計測対象への屈折角と入射角を表している。

カメラと透明平板の間の光線ベクトルを \mathbf{r} 、透明平板の法線ベクトルを \mathbf{n} とし、それぞれ単位ベクトルとする。光線ベクトル \mathbf{r} は写像面における画像座標を (u, v) 、焦点距離を f としたとき、 (u, v, f) を正規化することで求められる（図 3）。 \mathbf{r} と \mathbf{n} の外積のノルムから、

$$\sin \theta_1 = \|\mathbf{r} \times \mathbf{n}\|, \quad (3)$$

が成立する。式 (2) より

$$\sin \theta_2 = \frac{n_1}{n_2} \sin \theta_1, \quad (4)$$

$$= \frac{n_1}{n_2} \|\mathbf{r} \times \mathbf{n}\|, \quad (5)$$

が求められる。したがって、角度 θ_1 と θ_2 はそれぞれ、

$$\theta_1 = \arcsin(\|\mathbf{r} \times \mathbf{n}\|), \quad (6)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{n_1}{n_2} \|\mathbf{r} \times \mathbf{n}\|\right), \quad (7)$$

と求めることができる。透明平板はカメラの光軸に対して垂直に配置しているため、透明平板の法線ベクトル \mathbf{n} は常に $\mathbf{n} = (0, 0, 1)$ となる。したがって、画像の座標情報から角度 θ_1 と θ_2 が算出可能である。

屈折は同一平面上で生じるため、 d は幾何学的に求めることができ、

$$d = w \left(1 - \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}\right), \quad (8)$$

と表せる。 w は透明平板の厚さであり、既知とする。式 (8) より屈折の大きさを表すパラメータ d は透明平板の厚さのみに依存し、カメラと平板の距離には依存しないことが確認できる。すなわち、提案手法における計測系では、透明平板はカメラの光軸に垂直であれば、任意の位置に置くことが可能である。

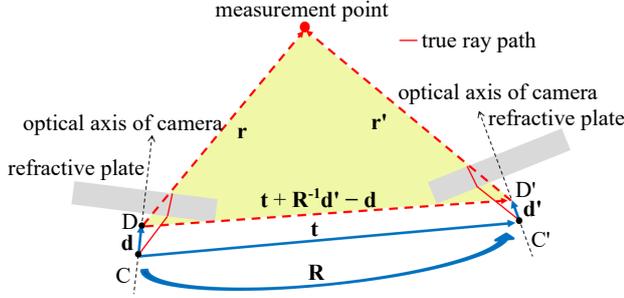


Fig. 4 The geometrical relation is that the outer vectors of two camera positions and the vector between D point and D' point are on the same plane

2.4 幾何学的条件の適用

Structure from Motion では 3 次元空間上の点を 2 つのカメラ視点から観測する。計測点と 2 つのカメラ視点の幾何学的関係を図 4 に示す。今、2 つのカメラ座標系を C , C' とする。それぞれのカメラ座標系の z 軸はカメラの光軸に一致し、座標系の原点とカメラ中心も一致するものとする。世界座標系はカメラ座標系 C と一致させる。このとき、3 行 3 列の回転行列 \mathbf{R} を座標系 C で表した座標を座標系 C' での表現に変換する行列とし、並進ベクトル \mathbf{t} を座標系 C で表した座標系 C' の原点の位置ベクトルと定義する。ここで、取得した画像から平板の内側の光線ベクトル \mathbf{r} を求めることができ、空中であるため平板の外側の光線ベクトルも \mathbf{r} と同じとなる。 C , C' における平板の外側の光線ベクトルと光線の変化ベクトルをそれぞれ

$$\mathbf{r} = (x, y, z)^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{d} = (0, 0, d)^T, \quad (10)$$

$$\mathbf{r}' = (x', y', z')^T, \quad (11)$$

$$\mathbf{d}' = (0, 0, d')^T, \quad (12)$$

とおく。今、屈折を考慮した幾何学的関係から、2 つのカメラの外側光線ベクトルと、点 D と点 D' を結んだベクトルは同一平面上に存在することが分かる。この関係を式で表すと、

$$\{(\mathbf{t} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}' - \mathbf{d}) \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'\}^T \mathbf{r} = 0, \quad (13)$$

となる。式 (13) を各成分について計算し、既知数と未知数の積の形で表す。回転行列の正規直交性を利用して、

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ dyx' + d'xy' \\ -dxx' + d'yy' \\ d'zy' \\ dyy' - d'xx' \\ -dxy' - d'yx' \\ -d'zx' \\ dyz' \\ -dxz' \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \end{pmatrix} = 0, \quad (14)$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{u}^T \mathbf{g} = 0, \quad (15)$$

とまとめることができる。 \mathbf{u} は既知数からなる 17 次元のベクトルであり、既知数ベクトルと呼ぶ。一方、 \mathbf{g} は未知数からなる 17 次元のベクトルであり、未知数ベクトルと呼ぶ。また、 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。式 (15) は各対応点について成り立つので、 n 個の対応点に対し、 k 番目の対応点に対する既知数ベクトル \mathbf{u}_k を用いて、

$$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_k, \dots, \mathbf{u}_n)^T, \quad (16)$$

とおくと、

$$\mathbf{U}\mathbf{g} = \mathbf{0}, \quad (17)$$

を満たす。したがって、 \mathbf{g} を最小二乗法を用いて求めればよい。 \mathbf{g} の成分は 17 個であるが、式 (17) は同次式であるため、これを解くために必要な最小対応点数は 16 個となる。 \mathbf{g} の i 番目の成分を g_i と置くと $g_{10} \sim g_{12}$ は \mathbf{R} の 1 行目の成分に、 $g_{13} \sim g_{15}$ は \mathbf{R} の 2 行目の成分にそれぞれ等しいため、回転行列の正規性より、

$$g_{10}^2 + g_{11}^2 + g_{12}^2 = 1, \quad (18)$$

$$g_{13}^2 + g_{14}^2 + g_{15}^2 = 1, \quad (19)$$

が成り立つ。式 (18), (19) を利用することで制約条件を得ることができ、この制約により \mathbf{g} のノルムは一意に決まり、スケール復元が可能となる。また、回転行列の直交性より、

$$g_{10}g_{13} + g_{11}g_{14} + g_{12}g_{15} = 0, \quad (20)$$

$$g_{11}g_{15} - g_{12}g_{14} = g_{16}, \quad (21)$$

$$g_{12}g_{13} - g_{10}g_{15} = g_{17}, \quad (22)$$

が成り立つ。

これらの制約条件 (式 (18)~ 式 (22)) はラグランジュの未定乗数法を用いて式 (17) の最小二乗法の計算に適用する。

2.5 回転行列と並進ベクトルの算出

上記で求めた未知数ベクトル \mathbf{g} の成分から回転行列 \mathbf{R} と並進ベクトル \mathbf{t} を算出する。 \mathbf{R} の 1, 2 行目の成分は $g_{10} \sim g_{15}$ から直接求めることができ、3 行目の成分である r_{31}, r_{32}, r_{33} は正規直交性から

$$\begin{pmatrix} g_{10} \\ g_{11} \\ g_{12} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} g_{13} \\ g_{14} \\ g_{15} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix}, \quad (23)$$

より求めることができる。一方、並進ベクトルの算出では、 $g_1 \sim g_9$ を成分とする行列 \mathbf{E} が回転行列 \mathbf{R} と歪対称行列 \mathbf{T} の積であることを利用すると、

$$\mathbf{E} = \begin{pmatrix} g_1 & g_2 & g_3 \\ g_4 & g_5 & g_6 \\ g_7 & g_8 & g_9 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 & r_{13}t_1 - r_{11}t_3 & r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 & r_{23}t_1 - r_{21}t_3 & r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 & r_{33}t_1 - r_{31}t_3 & r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \end{pmatrix} = \mathbf{R}\mathbf{T}, \quad (24)$$

Table 1 Simulation conditions

n_1	1.00 (air)
n_2	1.49 (acryl)
w	50 mm
\mathbf{R}	$(0.15\pi, 0.10\pi, 0.10\pi)$ rad (Euler angles)
\mathbf{t}	$(-600, 300, -100)$ mm

となるため、

$$\mathbf{T} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{E}, \quad (25)$$

が得られる。ここで、

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (26)$$

であり、並進ベクトルは \mathbf{T} の成分から求めることができる。カメラの位置姿勢が求まると、三角測量の方法を用いて計測対象物の3次元座標を算出することができる。

しかし、式 (17) において、 \mathbf{g} の正負が逆の場合も解として成立する。つまり、並進ベクトルは正しいが、回転行列の正負が逆となる場合も解として求まる可能性がある。そこで \mathbf{g} の正負の判定をする必要がある。今、計測対象の点群はカメラによって計測されるため、カメラの前に位置している。したがって、それぞれのカメラ座標系において点群の z 座標は正の値となる。そこで、カメラの位置姿勢が求まった後、三角測量により3次元座標を求め、移動後のカメラ座標系において計測点の z 座標が負となる場合、求まった \mathbf{g} の正負が逆になっていると判断でき、その場合は \mathbf{g} の正負を逆転させることで正しい解を得ることができる。

3. 検証実験

提案手法の有効性を検証し、その性質を明らかにするため、シミュレーション実験を行った。3.1 節では提案手法の有効性を検証する。3.2 節では計測で画像に生じる誤差の影響を調べるために、カメラで取得した画像上で発生する量子化誤差、および画像ノイズの影響について述べる。一方、本手法では実験装置のパラメータにより屈折による影響の程度を変えることができる。3.3 節では、透明平板の屈折率、厚み、およびカメラの解像度が計測精度に与える影響について述べる。

3.1 シミュレーション実験

第2章で述べた提案手法の有効性を検証するためにシミュレーション実験を行った。シミュレーションの条件を表1に示す。透明平板の屈折率についてはアクリルを想定して1.49と設定した。観測点は3次元空間上のカメラの観測可能な範囲内にランダムに100個配置した(図5)。本実験での観測点は一般的な計測の一例として600 mm程度の大きさの物体を約1 mの距離から計測した状態を想定し、範囲として $-300 \text{ mm} < x < 300 \text{ mm}$, $-300 \text{ mm} < y < 300 \text{ mm}$, $800 \text{ mm} < z < 1400 \text{ mm}$ に配置した。観測点がそれぞれのカメラで結像する画像座標をシミュレートし、取得画像とした。この画像座標に対し、提案手法を適用して3次元復元を行い、真値との誤差を算出した。シミュレーションの結果を図6に示す。結果から図5に示した真値の点群位置と同じ位置に点群が復元されており、このことからスケールの情報も含めて算出されていることが確認できる。各点における真値と復元値のユークリッド距離を誤差とすると、その平均は

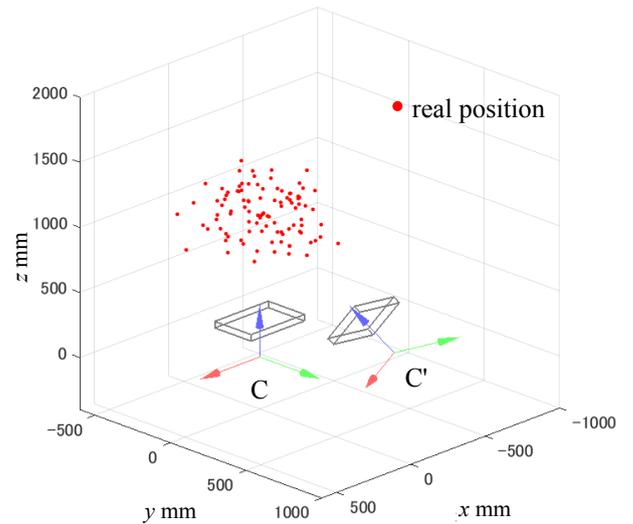


Fig. 5 The 100 points were placed randomly in simulation (red circle). Two camera positions were set as points can be taken by both cameras

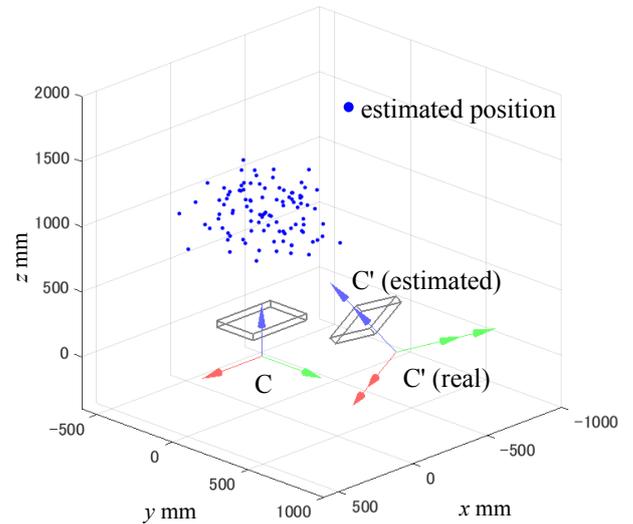


Fig. 6 The estimated positions using proposed method were shown (blue circle). The positions of points were calculated with absolute scale

$3.78 \times 10^{-6} \text{ mm}$ と非常に小さいことが確認された。この誤差は計算機の演算誤差であり、提案手法により Structure from Motion においてスケール復元が可能となったことが明らかとなった。以上より、提案手法の理論的な有効性が示された。

3.2 計測における誤差の影響

3.2.1 量子化誤差の影響

シミュレーション実験では、点群からカメラにおける画像座標を算出する際、誤差やノイズのない座標値を算出していた。しかし、実世界のカメラでは、画像座標はピクセル単位でしか取得できず量子化誤差が発生する。したがって、提案手法が量子化誤差にどの程度影響を受けるのかを検証することは、実際の計測に適用する際に要求される精度を明らかにするために必要である。ここでは、シミュレーションにおいて画像座標を取得する際、その座標値を整数、小数第1位、小数第2位、小数第3位のそれぞれの精度で表し、その座標値に対し提案手法を適用した際、復元結果がどのように変化するかを検証した。シミュレーション条件は表1と同じとした。なお、シミュレーションにおけるカメラの解像度は $2496 \times 1664 \text{ pixel}$ とした。結果を図

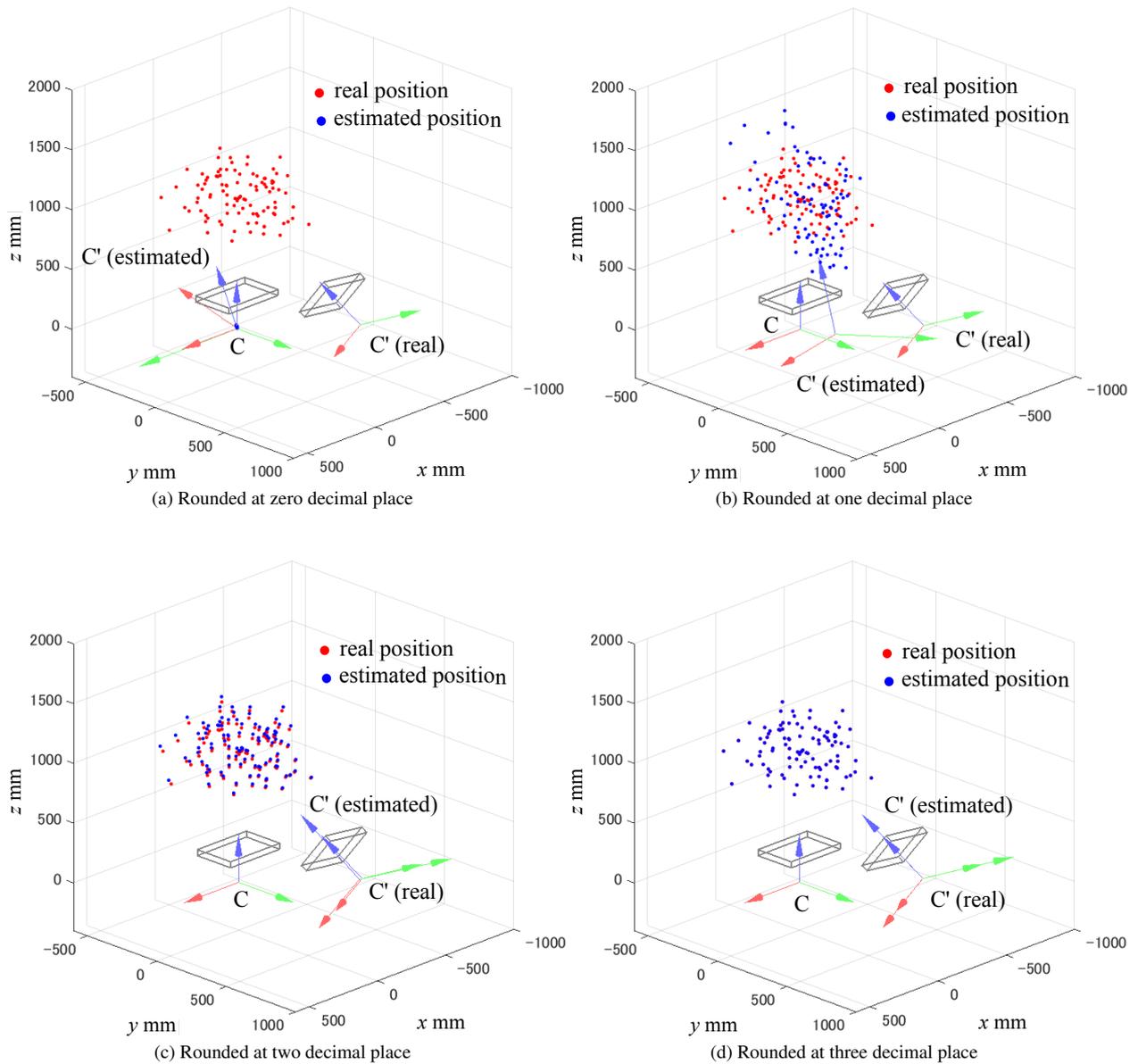


Fig. 7 The results of proposed method when quantization error exists on the simulation

7に示す。赤い点は点群の真値を表し、青い点は提案手法による推定位置を示している。図7(a)は整数精度での結果であるが、復元したカメラ位置(C'(estimated))はカメラCの位置に近くなり、結果的に復元点群の位置はカメラ座標系Cの原点付近となった。図7(a)においても点群復元位置を示す青点はカメラCの原点近くに密集する結果となった。小数第1位(図7(b))、小数第2位(図7(c))と対応点の画像座標の精度を上げるにしたがって、点群の復元位置は真値に近くなった。小数第3位(図7(d))の精度では真値と復元値の位置はほぼ重なっており、精度良く復元できていることが分かる。復元誤差を算出したところ、小数第2位では27.3 mm、小数第3位では1.79 mmとなった。以上の結果から、提案手法では、小数第2位より小さなサブピクセル精度での対応点検出により、精度の高い復元が可能となることが明らかとなった。しかし、実際の画像から小数第2位より小さなサブピクセル精度での対応点検出は、一般的には困難である。そこで、バイキュービック補間などサブピクセルの対応点検出手法を用いつつ、その他のアプローチにより本

手法の復元精度の向上を図る必要がある。具体的には、3.3.2項において透明平板を厚くするアプローチについて述べ、3.3.3項においてカメラの解像度を高くするアプローチについて述べる。

3.2.2 画像ノイズに対する耐性

本項では、提案手法の画像ノイズへの耐性を調査するために、シミュレーションにおいて取得する画像に対し画素単位でガウシアンノイズを付加し、画像ノイズのみを発生させた状態での復元精度の変化を評価した。 σ を 1.0×10^{-5} から1.0まで変化させたガウシアンノイズを付加した画像を用いて提案手法を適用し、復元後の点群の位置と真値とのユークリッド距離の平均を誤差として評価した。ノイズは投影された点群の座標値に対して付加した。なお、画素単位でノイズを発生させているため、 σ の単位はpixelである。表1と同じ条件で実験を行い、特に平板の厚みは50 mmとした。また、点群についてもこれまでのシミュレーションと同様の位置とした。

結果を図8に示す。横軸は発生させた画像ノイズの標準偏差

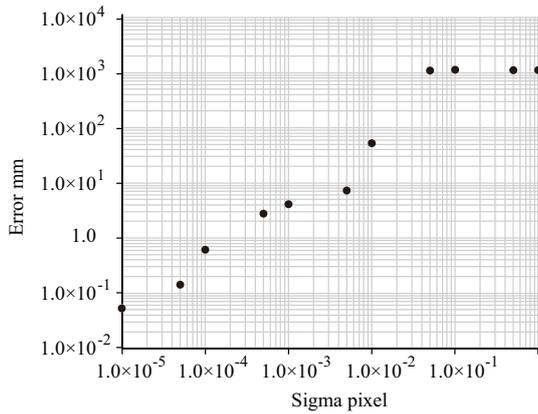


Fig. 8 The result of reconstruction with Gaussian noise. Sigma was changed from 1.0×10^{-5} to 1.0, and Error was the average of Euclidean distance between true positions and estimated positions

σ であり、縦軸は復元した際の点群の誤差である。特に復元可能な境となる $\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$ と $\sigma = 1.0 \times 10^{-2}$ の復元結果を図9、図10に示す。 $\sigma = 1.0 \times 10^{-2}$ では誤差はあるものの、点群およびカメラ位置は真値に近い値を算出できているが(図10)、それ以上の大きさのノイズがある場合、点群は復元できていない(図9)。この結果から、画像ノイズが大きいほど復元誤差が大きくなり、 σ が 1.0×10^{-2} より大きいと復元が難しいことが明らかになった。すなわち、本手法は画像ノイズに敏感であり、本実験条件下においては、 1.0×10^{-2} pixel 程度のずれも復元には大きく影響する。

3.3 計測装置のパラメータによる影響

提案手法では、透明平板によって生じる屈折現象を利用してスケール復元を実現しており、屈折の大小が復元精度に影響を与えると考えられる。式(8)から確認できるように屈折の程度を表す d は、透明平板の屈折率 n_2 で決まる屈折角(式(2))と、透明平板の厚み w に依存している。これら屈折率 n_2 と平板厚み w 、およびカメラの画素数による解像度が提案手法の実験装置で設定可能なパラメータである。ここでは、まず透明平板の屈折率、および平板厚みと解像度の組合せが計測精度に与える影響について調べ考察する。

3.3.1 屈折率の影響

屈折率が計測精度に与える影響を調べるために、3.2.2項の図9の結果に対して透明平板の屈折率を変化させ、屈折率が計測精度に与える影響を調べた。平板の屈折率以外の条件は表1と同様にした。カメラの画素数は 2496×1664 pixel とし、点群についてもこれまでのシミュレーションと同様の位置とした。各屈折率に対して50回の計測を行い、画像に生じる誤差として計測の度にガウシアンノイズ ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$) を発生させ、画像に付加した。結果を図11に示す。図11の横軸は屈折率であり、縦軸は復元誤差である。各屈折率についての計測における復元誤差の平均値を太実線で示し、標準偏差の大きさを誤差棒で示した。

屈折率を上げるほど、式(2)のスネルの法則、および式(8)から確認できる屈折の影響による光線のずれ量が大きくなる。その結果、屈折率を上げることで復元精度が向上することが確認できる。しかし、屈折率2.5程度から復元精度はほぼ変化しなくなり、屈折率5.5においても 1.084×10^3 mm と復元誤差が非常に大きいという結果が得られた。さらに、図11中に青い網

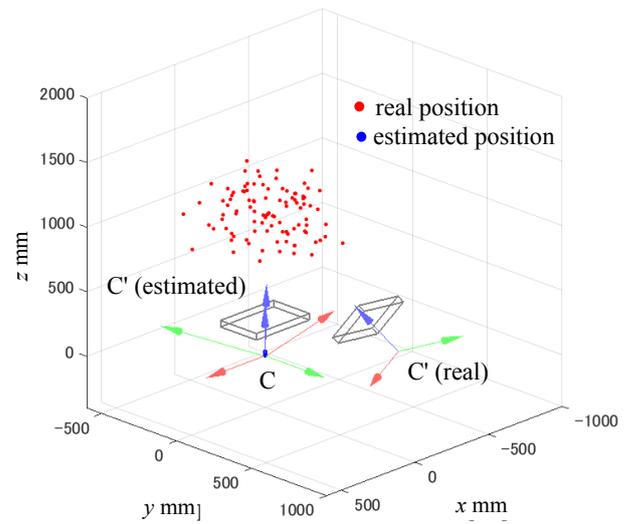


Fig. 9 The results of reconstruction of $\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$

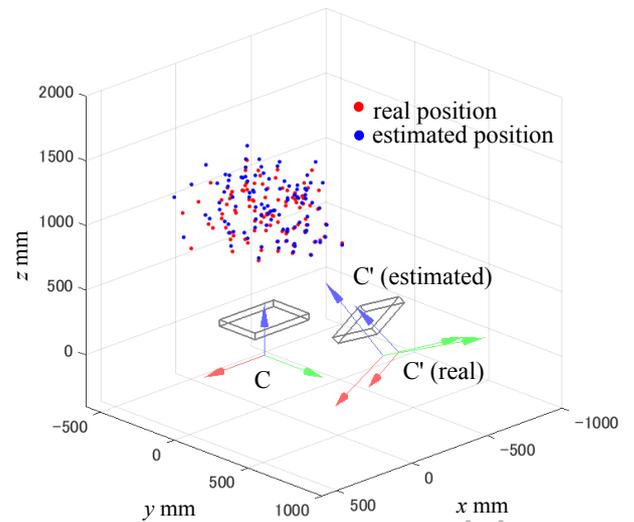


Fig. 10 The results of reconstruction of $\sigma = 1.0 \times 10^{-2}$

掛けで示した部分が、実際に利用可能と考えられる透明物質の屈折率の範囲であり、例えば極めて高い屈折率で知られるダイヤモンドの屈折率は2.42である。以上より、屈折率の変化が復元精度に与える影響は小さいと考えられ、本論文では広く用いられているアクリル材質の屈折率1.49を用いることとする。

3.3.2 透明平板の厚みの影響

提案手法では、透明平板を利用して屈折を生じさせることでスケール復元を実現しており、その際の屈折の大小が復元の精度に影響を与えると考えられる。ここで、式(8)より、屈折の程度を表す d は透明平板の厚み w に依存しているため、ここでは透明平板の厚みを変化させた際の復元精度の変化を検証する。表1と同じ条件で実験を行い、点群についてもこれまでのシミュレーションと同様の位置とした。画像にガウシアンノイズ ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$) を付加した状態で、透明平板の厚み w を 100 mm, 300 mm, 500 mm と変化させた場合の復元結果を比較した。結果を図12、図13、図14に示す。3.2.2項の結果(図9)において $\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$ では復元誤差が大きいことが確認されたが、本項の実験により透明平板を厚くすることで画像ノイズへの耐性が向上し、復元精度が改善することが明らかになった。本シミュレーション結果から、1000 mm 程度の距離にある対象を

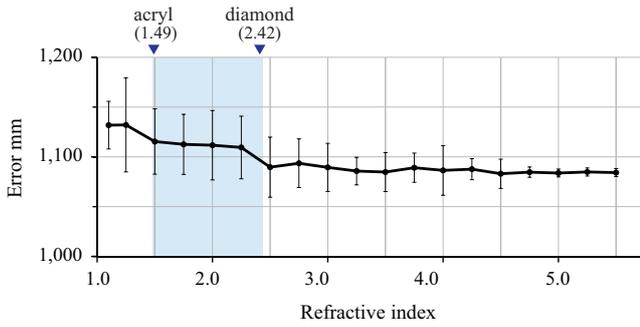


Fig. 11 The result of relation between refractive index and the reconstruction error ($w = 50$ mm)

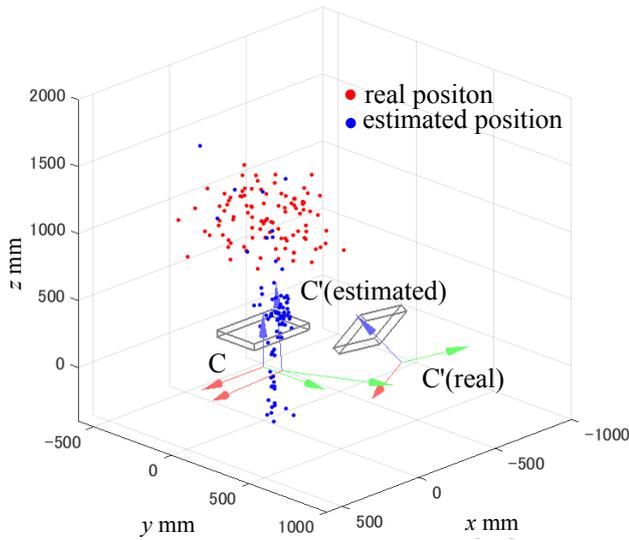


Fig. 12 The results of reconstruction of $w=100$ mm ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$)

計測する際、500 mm の透明平板を用いることで、誤差 20 mm 程度の精度で計測可能であることが明らかとなった。

3.3.3 カメラの高解像度化による平板厚みの考察

提案手法では屈折によって変化した光線がカメラ画像として写像されるため、屈折が大きくなるほど得られる画像の解像度は低くなる。したがって、カメラ自体の解像度を高くすることで、本手法の復元精度が向上すると考えられる。そこで、本項では使用するカメラの解像度を变化させた際の復元精度の変化を検証する。この際、透明平板の厚みも同時に变化させることで、計測の要求精度に応じた平板厚みとカメラ解像度の組合せを検証した。

平板厚み以外の実験条件は表 1 と同様とし、点群についてもこれまでのシミュレーションと同様の位置とした。実験では、画素数が 2496 × 1664 pixel, 6000 × 4000 pixel, 9000 × 6000 pixel, 12000 × 8000 pixel, 18000 × 12000 pixel の 5 種類の解像度に対して、平板厚み $w=50$ mm, 100 mm, 200 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm の 6 種類の平板を用いた計測実験を行った。ここまでの実験と同様、ガウシアンノイズ ($\sigma=1.0 \times 10^{-1}$) を画像に付加し、カメラ解像度と平板厚みの組合せについてそれぞれ 50 回の計測を行った。結果を図 15 に示す。横軸には平板厚みを示し、縦軸には復元誤差の値を示す。グラフの各値は 50 回の計測の平均値である。前項で確認したように、いずれの解像度の場合にも平板厚みを大きくするほど計測精度が向上することが確認

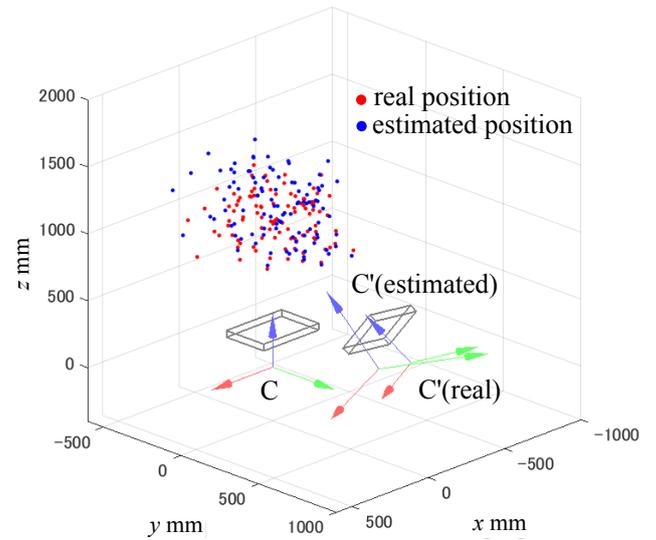


Fig. 13 The results of reconstruction of $w=300$ mm ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$)

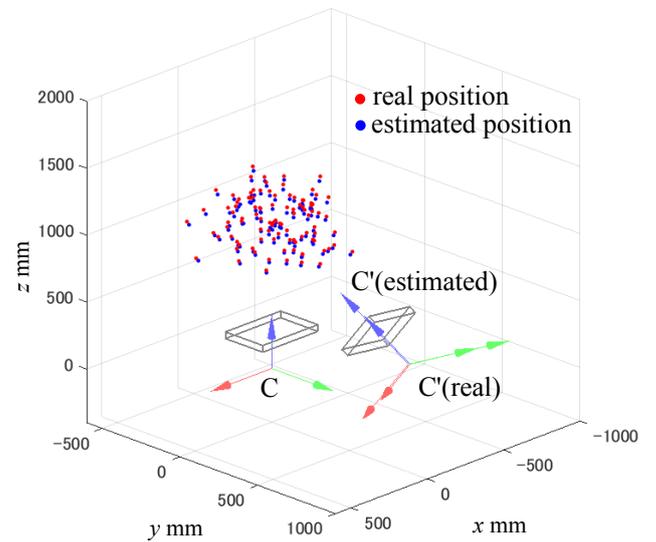


Fig. 14 The results of reconstruction of $w=500$ mm ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$)

できる。同時に、同じ平板厚みの場合には、カメラの解像度が高いほど計測精度が向上することも確認できる。

代表的な結果の例を図 16 に示す。図 16(a), 図 16(b) は画素数が 6000 × 4000 pixel の解像度のカメラを用いた場合に、それぞれ厚みが 50 mm, 100 mm の平板を用いて計測した結果であり、平板厚みを増すことで計測精度が向上した。また、図 16(c), 図 16(d) は、画素数が 9000 × 6000 pixel の解像度のカメラを用いた場合の同様の例であり、透明平板を厚くするとともにカメラの解像度を高くすることで復元精度がより向上することが確認できる。この時、図 12 に示した画素数が 2496 × 1664 pixel の解像度のカメラで厚みが 100 mm の透明平板を用いた例では、復元誤差が 1.0×10^3 mm 以上であったのに対して、図 16(d) に示した画素数が 9000 × 6000 pixel の解像度のカメラで厚みが 100 mm の透明平板を用いた例では、復元誤差は 60 mm 程度であった。

以上のように、本手法を適用する際の要求精度に対する、透明平板の厚みとカメラの解像度の組合せの関係が確認できた。例えば、200 mm の厚みの平板を用いた場合に、復元精度を平

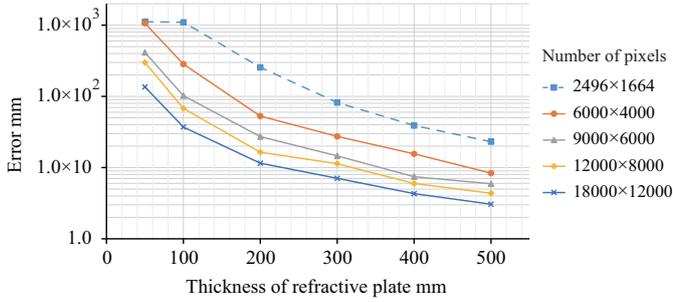


Fig. 15 The result of relation between thickness of refractive plate and the reconstruction error

均的に 10 mm 程度に抑えるためには、画素数が 18000 × 12000 pixel 程度の高い解像度のカメラを使用する必要がある。一方で、500 mm 程度の厚みの平板が利用可能な場合には、画素数が 6000 × 4000 pixel 程度の解像度のカメラを用いても、10 mm 以下の復元精度を実現することが可能である。

4. 結 論

本論文では屈折を利用することで、スケール復元が可能な Structure from Motion 手法を提案し、シミュレーションを用いてその有効性を確認した。提案手法はカメラの前に透明平板を配置することで屈折を発生させ、その効果による光線の変化を利用した手法である。3.2.1 項、3.2.2 項の結果から、提案手法では画像での高精度な対応点検出が必要であること、および画像ノイズの影響を大きく受けることが明らかとなった。また、3.3.1 項の結果からは実利用可能な範囲における屈折率の変化が、復元精度に与える影響は小さいことが確認できた。一方で、3.3.2 項において透明平板を厚くすることで復元精度が向上し、画像ノイズのある状態でも復元が可能であることを確認した。さらに、3.3.3 項では、透明平板を厚くするとともに、カメラの解像度を高くすることで復元精度がより向上することも明らかとなった。例えば、200 mm 以上の厚みの平板と画素数が 18000 × 12000 pixel 程度の解像度のカメラ、または 500 mm 程度以上の厚みの平板と画素数が 6000 × 4000 pixel 程度の解像度のカメラの組合

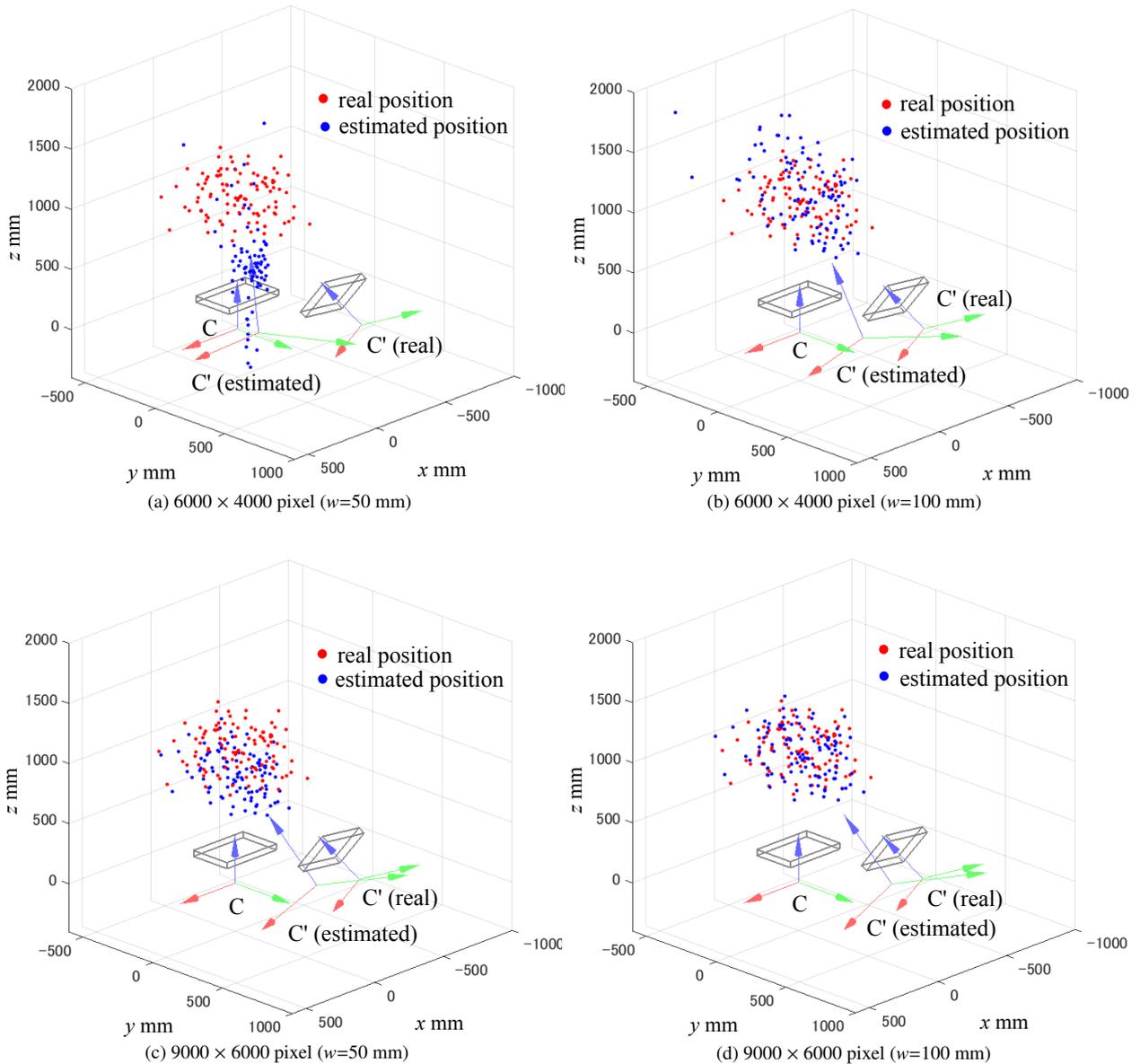


Fig. 16 The results of proposed method when the resolution of a camera is changed on the simulation ($\sigma = 1.0 \times 10^{-1}$)

せなどで、平均 10 mm 以下の復元精度を実現することが可能であることを確認した。

実測実験による検証は今後の課題である。特に実際の計測においては、計測システムの規模の観点から、提案手法で用いる透明平板の厚さはより薄くなることが求められると考えられる。提案手法において、複数視点から取得した画像の対応点座標と復元結果の再投影点の誤差を最小化する最適化手法などと組み合わせることは、薄い平板でも計測精度を向上させるためには有効であると考えられ、バンドル調整などを用いた高精度化が期待できる。

さらに実際の計測においては、レンズ中心や焦点距離などのカメラ内部パラメータの誤差が、計測精度に大きな影響を与えられ、シミュレーションを用いた本研究のアプローチは、これらのパラメータの影響の調査においても有効である。また、平板以外の形状で提案手法の復元精度を向上させる透明物体の設計も興味深い課題である。

謝 辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議により制度設計された革新的研究開発促進プログラム (ImPACT) 「タフ・ロボティクス・チャレンジ」、および JSPS 特別研究員奨励費 26-9039 の助成を受けた。

参 考 文 献

- 1) Richard Hartley and Andrew Zisserman: Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, Second Edition, (2004).
- 2) 川西亮輔, 山下淳, 金子透: 全方位画像の特徴点と直線エッジ分布に基づく基線長の最適化アルゴリズムを有する Structure from Motion による 3 次元環境計測, 第 16 回ロボティクスシンポジウム講演集, (2011), 449.
- 3) Changchang Wu: Towards Linear-time Incremental Structure from Motion, Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on 3D Vision, (2013), 127.
- 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 Vi-

sion, (2009), 1413.

- 5) 久米大将, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一: 全方位カメラを用いたスケール復元が可能な水中 Structure from Motion, 2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2014), 981.
- 6) 柴田彬, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一: 屈折を利用した単眼カメラによるスケール復元が可能な Structure from Motion, 第 20 回ロボティクスシンポジウム講演会講演集, (2015), 25.
- 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) Vishesh Chari and Peter Sturm: Multi-View Geometry of the Refractive Plane, Proceedings of British Machine Vision Conference, (2009), 1.
- 9) Tali Treibitz, Yoav Y. Schechner and Hanumant Singh: Flat Refractive Geometry, Proceedings of the 2008 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2008), 1.
- 10) Amit Agrawal, Srikumar Ramalingam, Yuichi Taguchi, and Vishesh Chari: A theory of multi-layer flat refractive geometry, Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2012), 3346.
- 11) Yao-Jen Chang and Tsuhan Chen: Multi-View 3D Reconstruction for Scenes under the Refractive Plane with Known Vertical Direction, Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (2011), 351.
- 12) 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.
- 13) Lai Kang, Lingda Wu, and Yee-Hong Yang: Two-View Underwater Structure and Motion for Cameras under Flat Refractive Interfaces, Proceedings of European Conference on Computer Vision, (2012), 303.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) Doo Hyun Lee, In So Kweon and Roberto Cipolla: A Biprism-Stereo Camera System, Proceedings of the 1999 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1, (1999), 82.
- 17) Atsushi Yamashita, Yudai Shirane and Toru Kaneko: Monocular Underwater Stereo – 3D Measurement Using Difference of Appearance Depending on Optical Paths –, Proceedings of the 2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2010), 3652.