

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

柴田 彬^{*1}, 藤井 浩光^{*1}, 山下 淳^{*1}, 浅間 一^{*1}

Three-Dimensional Reconstruction with Absolute Scale in Single Camera Structure from Motion Using Refraction

Akira Shibata^{*1}, Hiromitsu Fujii^{*1},
Atsushi Yamashita^{*1} and Hajime Asama^{*1}

^{*1} Department of Precision Engineering, School of Engineering, The University of Tokyo
7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

Three-dimensional (3D) measurement is an important means for robots to acquire information about their environment. Structure from Motion is one of these 3D measurement methods. The 3D reconstruction of objects in the environment can be obtained from pictures captured with single camera in Structure from Motion. Furthermore, the camera motion can be obtained simultaneously. Because of its simplicity, Structure from Motion has been implemented in various ways. However there is an essential problem in that the scale of the measured objects cannot be computed by Structure from Motion. In order to compute the absolute scale, other information is required. However this is difficult for robots in an unknown situation. In this paper, we propose a method that can reconstruct the absolute scale of objects using refraction. Refraction changes the light ray path between the objects and the camera. This method is implemented using only a refractive plate and single camera. The results of simulations show the effectiveness of the proposed method in air environment.

Key Words : Computer Vision, 3D Measurement, Structure from Motion, Refraction

1. 序 論

近年ロボットの用途は多岐に渡り、様々なシチュエーションでの活動が期待される。その中でロボットを遠隔で操作することが多く行われており、特にロボットの周囲の環境を把握するための手法が数多く研究されている。その中で Structure from motion は、カメラ1台で3次元計測が可能であるため、機器を搭載するスペースに乏しい小型ロボットにも適している。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は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、または他の幾何学的な情報が事前に必要となる^{(1)~(4)}。しかし、このような制約条件はロボットの移動に対して

も制約を与えることになるため、遠隔操作ロボットには適していない。著者らはこれまでに、水中環境下において、スケール復元が可能な Structure from Motion 手法を提案してきた⁽⁵⁾⁽⁶⁾。これらは、水中において発生する屈折現象の効果を利用した手法であった。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。コンピュータビジョンの分野でも、水中計測を含め多くの研究が行われている^{(7)~(15)}。しかしこれらの研究では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。本研究ではカメラと計測対象の間に透明平板を配置することで、積極的に屈折を利用し、水中に限らず気中においても有効なスケール復元が可能な Structure from Motion 手法を確立する。

2. 屈折を利用した手法の原理

2.1 透明平板を用いたシステム 本研究で提案するシステムの概観を図1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

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒 113-8654 東京都文京区本郷 7-3-1) {shibata,fujii,yamashita,asama}@robot.t.u-tokyo.ac.jp

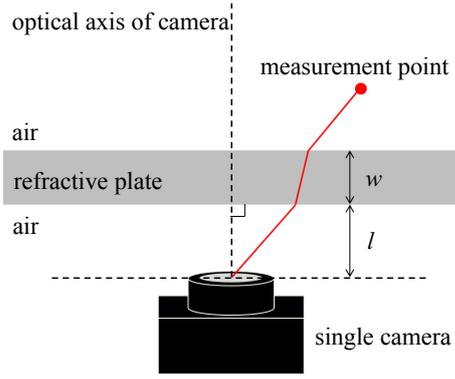


Fig. 1 The system of proposed method

レーションされており、また、カメラから平板までの距離と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、ならびに透明平板から観測物体までは空気となる。空気と平板の屈折率は既知とする。

2.2 光線追跡 ここでは透明平板を用いたシステムにおいて取得した画像の対応点座標から、屈折を考慮した上で、対応点まで光線追跡をする手順を述べる (図2)。本システムにおいては2回屈折が生じるため、3種類の光線ベクトルが存在する。まず最もカメラに近い内側光線ベクトル $\mathbf{r}_{in} = (\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)^T$ 、次に透明平板の中を通る $\mathbf{r}_{mid} = (\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)^T$ 、そして平板から計測対象までを通る外側光線ベクトル $\mathbf{r}_{out} = (\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ である。これらは同一の平面上に存在する。今、2回の屈折はどちらも空気と透明平板の境界面で生じるため、その関係はスネルの法則により、

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2, \quad (1)$$

と表現できる。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、 θ_1 と θ_2 はカメラ中心から透明平板への入射角と屈折角、ならびに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。この関係を利用して、3つの光線ベクトルを求める。 \mathbf{r}_{in} 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)。屈折は光線ベクトルと屈折面の法線ベクトル $\mathbf{n} = (0, 0, 1)^T$ がなす平面上で発生するため、

$$\mathbf{r}_{mid} = \begin{pmatrix} \alpha_2 \\ \beta_2 \\ \gamma_2 \end{pmatrix} = p_1 \begin{pmatrix} \alpha_1 \\ \beta_1 \\ \gamma_1 \end{pmatrix} + q_1 \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

が成立する。ここで、 p_1 と q_1 は定数とする。今、 \mathbf{r}_{in} と \mathbf{n} の内積から、

$$\mathbf{r}_{in} \cdot \mathbf{n} = |\mathbf{r}_{in}| |\mathbf{n}| \cos \theta_1, \quad (3)$$

$$\therefore \cos \theta_1 = \gamma_1, \quad (4)$$

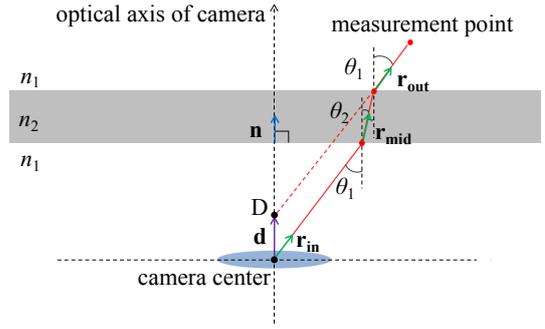


Fig. 2 Light ray through the refractive plate

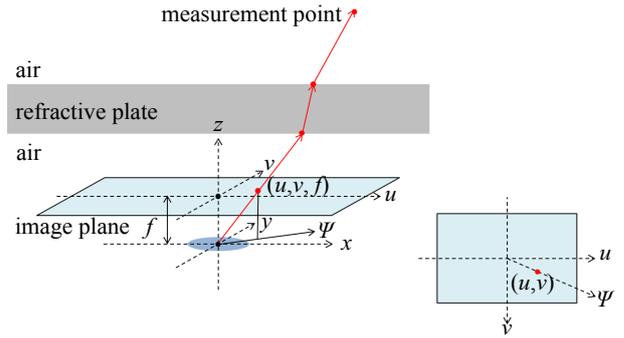


Fig. 3 Camera coordinate and image plane

また、 \mathbf{r}_{in} と \mathbf{n} の外積のノルムから、

$$|\mathbf{r}_{in} \times \mathbf{n}| = |\mathbf{r}_{in}| |\mathbf{n}| \sin \theta_1, \quad (5)$$

$$\therefore \sin \theta_1 = \sqrt{(\alpha_1)^2 + (\beta_1)^2}, \quad (6)$$

が成立する。同様に、 \mathbf{r}_{mid} と \mathbf{n} の内積から

$$\mathbf{r}_{mid} \cdot \mathbf{n} = |\mathbf{r}_{mid}| |\mathbf{n}| \cos \theta_2, \quad (7)$$

$$\therefore \cos \theta_2 = \gamma_2 = p_1 \gamma_1 + q_1, \quad (8)$$

が成立し、 \mathbf{r}_{mid} と \mathbf{n} の外積のノルムから、

$$|\mathbf{r}_{mid} \times \mathbf{n}| = |\mathbf{r}_{mid}| |\mathbf{n}| \sin \theta_2, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \therefore \sin \theta_2 &= \sqrt{(\alpha_2)^2 + (\beta_2)^2} \\ &= \sqrt{(p_1 \alpha_1)^2 + (p_1 \beta_1)^2}, \end{aligned} \quad (10)$$

となる。したがって、式 (1), (6), (10) より

$$p_1 = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{n_1}{n_2}, \quad (11)$$

と表せる。一方、式 (4), (8), (11) より

$$\cos \theta_2 = p_1 \gamma_1 + q_1 = \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 + q_1, \quad (12)$$

となり、また、三角関数の関係から、

$$\cos \theta_2 = \sqrt{1 - \sin^2 \theta_2} = \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}, \quad (13)$$

と表せ、式(12), (13)から q_1 は

$$q_1 = -\frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 + \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1}, \quad (14)$$

となる。したがって、式(2), (11), (14)から

$$\mathbf{r}_{\text{mid}} = \frac{n_1}{n_2} \mathbf{r}_{\text{in}} - \left\{ \frac{n_1}{n_2} \cos \theta_1 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2 \sin^2 \theta_1} \right\} \mathbf{n}, \quad (15)$$

と求まる。同様の手順により、 \mathbf{r}_{out} を求めると、

$$\mathbf{r}_{\text{out}} = \frac{n_2}{n_1} \mathbf{r}_{\text{mid}} - \left\{ \frac{n_2}{n_1} \cos \theta_2 - \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \sin^2 \theta_2} \right\} \mathbf{n}, \quad (16)$$

となる。式(15), (16)から、

$$\mathbf{r}_{\text{in}} = \mathbf{r}_{\text{out}}, \quad (17)$$

が導ける。

ここで、 \mathbf{r}_{out} のカメラ光軸上の始点を点 D とすると、その位置ベクトルは

$$\mathbf{d} = (0, 0, d), \quad (18)$$

と表せる。これは、屈折によって生じた光線ベクトルの変化を表している。屈折の程度を表すパラメータ d は幾何学的に求めることができ、図2より、

$$d = w \left(1 - \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1} \right), \quad (19)$$

となる。

d は、カメラから透明平板までの距離 l に依存しないが、これは、式(17)から分かるように、 \mathbf{r}_{in} と \mathbf{r}_{out} が平行であるため、カメラと透明平板の距離にかかわらず、2つの光線の距離が一定となるためであると考えられる。

2.3 幾何学的条件の適用 Structure from Motion
では2つのカメラ視点から3次元空間上の点を観測する。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、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、光線追跡により算出した C , C' における外側

光線ベクトルとその始点の位置ベクトルをそれぞれ

$$\mathbf{r}_{\text{out}} = (x, y, z)^T, \quad (20)$$

$$\mathbf{d} = (0, 0, d)^T, \quad (21)$$

$$\mathbf{r}'_{\text{out}} = (x', y', z')^T, \quad (22)$$

$$\mathbf{d}' = (0, 0, d')^T, \quad (23)$$

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、それぞれの始点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、

$$\{(\mathbf{t} + \mathbf{R}^{-1} \mathbf{d}' - \mathbf{d}) \times \mathbf{R}^{-1} \mathbf{r}'_{\text{out}}\}^T \mathbf{r}_{\text{out}} = 0, \quad (24)$$

となる。この関係が成立する平面を図4に赤破線で示す。式(24)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、

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yx' \\ zx' \\ xy' \\ yy' \\ zy' \\ xz' \\ yz' \\ zz' \\ dyx' + d'xy' \\ -dxx' + d'yy' \\ d'zy' \\ dyy' - d'xx' \\ -dxy' - d'yx' \\ -d'zx' \\ dyz' \\ -dxz' \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \end{pmatrix} = 0, \quad (25)$$

$$\iff \mathbf{u}^T \mathbf{g} = 0, \quad (26)$$

とまとめることができる。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。式(26)は各対応点について成り立つので、 n 個の対応点に対し、

$$\mathbf{U} = (\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2, \mathbf{u}_3, \dots, \mathbf{u}_n)^T, \quad (27)$$

とおくと、

$$\mathbf{U} \mathbf{g} = \mathbf{0}, \quad (28)$$

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(26)は同次式であるため、対応点は16個以上あれば式(26)を解くこ

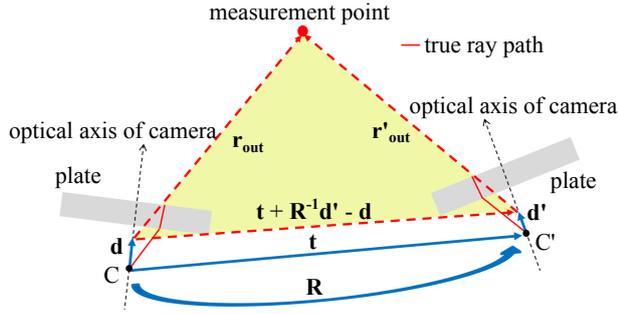


Fig. 4 Modified geometrical relation

とができる． \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，

$$g_{10}^2 + g_{11}^2 + g_{12}^2 = 1, \quad (29)$$

$$g_{13}^2 + g_{14}^2 + g_{15}^2 = 1, \quad (30)$$

が成り立ち，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．制約条件はラグランジュの未定乗数法を用いて適用する．

2.4 回転行列と並進ベクトルの算出 上記で求めた未知数行列 \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 行目の成分は正規直交性から

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

より求める．一方並進ベクトルの算出では， $g_1 \sim g_9$ ができる行列 \mathbf{E} が回転列 \mathbf{R} と歪対称行列 \mathbf{T} に分解できることを利用すると，

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

$$\therefore \mathbf{T} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{E}, \quad (33)$$

Table 1 Simulation conditions

Situation	Air
n_1	1.0 (air)
n_2	1.49 (acryl)
l	200 [mm]
w	50 [mm]
\mathbf{R}	$(0.15\pi, 0.10\pi, 0.10\pi)$ [rad] (Euler angles)
\mathbf{t}	$(-600, 300, -100)$ [mm]

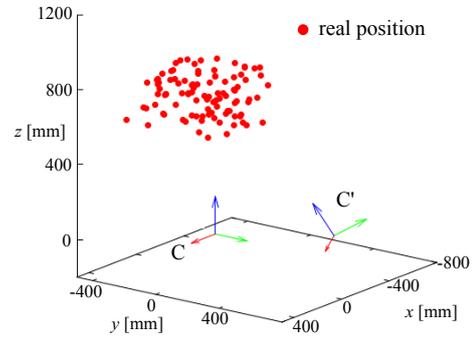


Fig. 5 Points and camera positions on the simulation

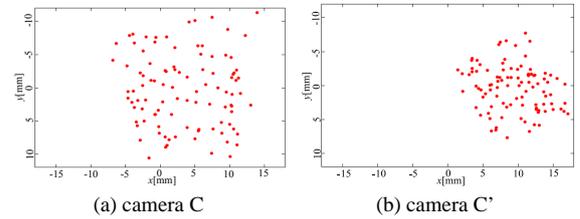


Fig. 6 Pictures captured by both cameras on the simulation.

となる．ここで，

$$\mathbf{T} = \begin{pmatrix} 0 & -t_3 & t_2 \\ t_3 & 0 & -t_1 \\ -t_2 & t_1 & 0 \end{pmatrix}, \quad (34)$$

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．

3. シミュレーション実験

3.1 気中実験 2章で述べた提案手法の有効性をシミュレーションにより検証した．計測環境は気中とした．シミュレーションの条件を表 1 に示す．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)．観測点がそれぞれのカ

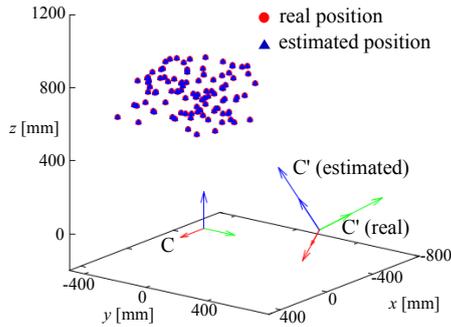


Fig. 7 Result of the proposed method on the simulation (in air)

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(図6)。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7に示す。点群が復元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誤差平均は 8.6×10^{-6} mmと非常に小さく、3元復元が実現できていることが分かる。以上より、提案手法によってスケール復元が可能な Structure from Motion が実現できることが明らかとなった。

3.2 透明平板の厚みの影響 提案手法では、透明平板によって発生する屈折現象を利用して、スケール復元を実現している。したがって、復元の精度は屈折の影響の大きさに依存すると考えられる。式(19)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。シミュレーション条件と点群の位置は気中実験と同じとし、透明平板の厚みを10mm~100mmの間で10mmずつ変化させ、復元値と真値の誤差平均を比較した。結果を図8に示す。結果から、透明平板が厚いほど精度が向上することが確認できる。したがって、厚い平板を用いることで屈折の効果が大きくなり、精度が向上することが明らかとなった。

3.3 量子化誤差の影響 提案手法は屈折による光線の変化を利用しているが、この効果は非常に小さいため、誤差の影響を受けやすい手法であると考えられる。シミュレーション実験では、点群からカメラでの画像座標を算出する際、高精度の座標値を算出している。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、実際の測定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

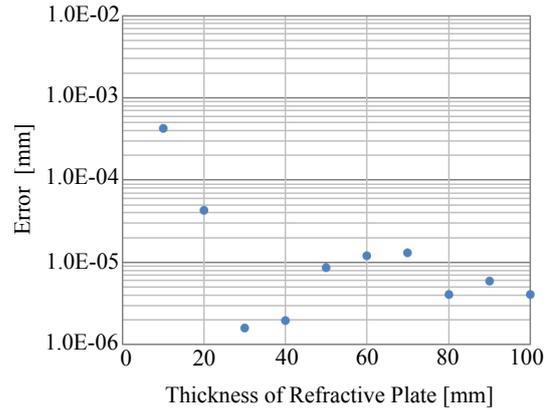


Fig. 8 Error for various thickness of refractive plate

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までの値とし、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検証した。シミュレーション条件は気中実験と同じとした。結果を図9に示す。結果から、整数、小数第1位の精度では不十分であり、復元には小数第2位の精度が必要であることが分かった。つまり、提案手法では、サブピクセル精度での対応点検出が必要であることが明らかとなった。

4. 結 論

本論文では屈折を利用することで、気中環境においてスケール復元が可能な単眼カメラによる 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だけのシンプルな構造で、屈折により発生する光線の変化を利用した手法であるため、陸上での計測だけでなく、上空からの計測にも応用できると考えられる。

実測実験による検証はまだなされていないので、今後の課題である。また屈折物体の形状を変化させることでより効果的な手法に改善されるかという点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」、および財団法人旭硝子財団の援助を受けた。

参 考 文 献

- (1) Recharad Hartley and Andrew Zisserman: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Second Edition, 2004.

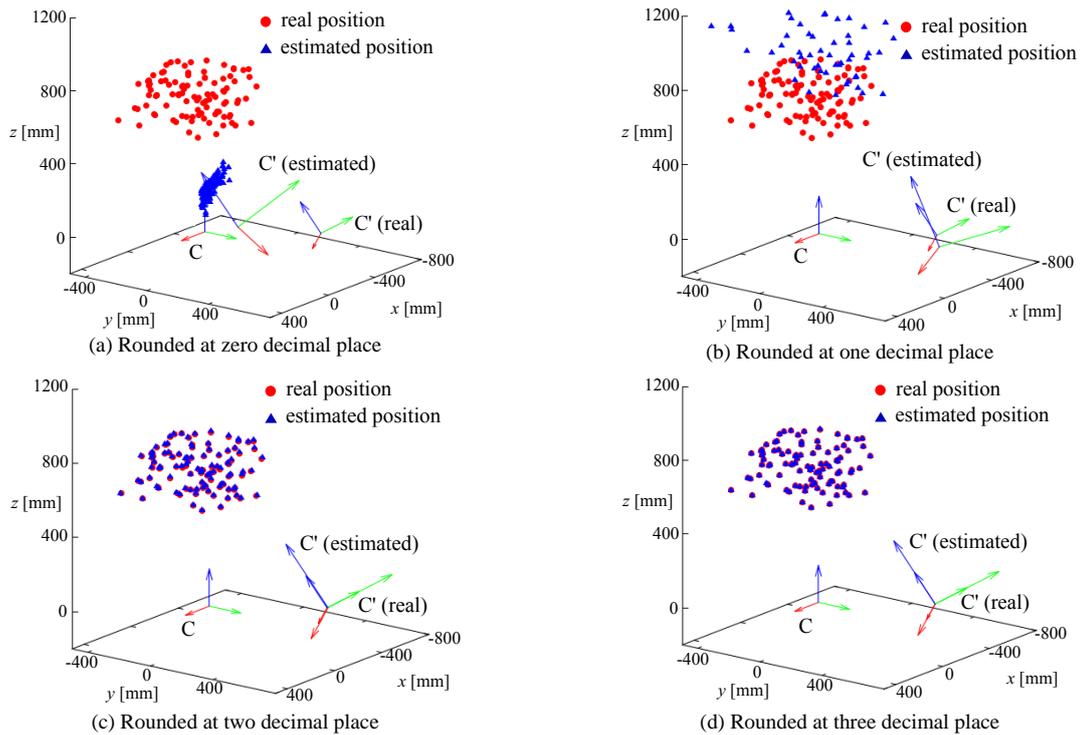


Fig. 9 The results of proposed method when quantization error exists on the simulation

- (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) Ashwin P. Dani, Nicholas R. Fischer, and Warren E. Dixon: “Single Camera Structure and Motion”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 57, No. 1, pp. 238–243, 2012.
- (4) Manolis Lourakis and Xenophon Zabulis: “Accurate Scale Factor Estimation in 3D Reconstruction”, *Proceedings of the International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns*, Vol. 1, pp. 498–506, 2013.
- (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, pp. 981–982, 2014.
- (6) 柴田彬, 藤井浩光, 山下淳, 浅間一: “単眼カメラと透明平板を用いたスケール復元が可能な水中 Structure from Motion”, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会講演予稿集, 1J3-02, 2014.
- (7) 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*, pp. 1–8, 2008.
- (8) Visesh Chari and Peter Sturm: “Multi-View Geometry of the Refractive Plane,” *Proceedings of British Machine Vision Conference 2009*, pp. 1–11, 2009.
- (9) 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 2011*, pp. 303–316, 2012.
- (10) Anne Jordt-Sedlazeck and Reinhard Koch: “Refractive Structure-from-Motion on Underwater Images”, *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Computer Vision*, pp. 57–64, 2013.
- (11) 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*, pp. 635–642, 2011.
- (12) 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*, pp. 2316–2323, 2006.
- (13) 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*, Vol. 1, pp. 82–87, 1999.
- (14) 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*, pp. 3652–3657, 2010.
- (15) 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 Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 351–358, 2011.