

透明平板による屈折を利用した単眼カメラでの スケール復元が可能な Structure from Motion

Single Camera Structure from Motion with Absolute Scale Using Refractive Plate

○学 柴田 彬 (東京大学) 藤井 浩光 (東京大学)
正 山下 淳 (東京大学) 正 浅間 一 (東京大学)

Akira SHIBATA, The University of Tokyo, shibata@robot.t.u-tokyo.ac.jp
Hiromitsu FUJII, The University of Tokyo
Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo
Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Structure from Motion is one of the 3D measurement methods. This technique requires only a single camera, and reconstructs the objects from pictures obtained by the camera with moving. However there is an essential problem that the scale of the objects cannot be computed by Structure from Motion. In order to solve this problem, we have proposed scale-reconstructable Structure from Motion using refraction. The refractive plate is placed in front of a camera to generate the refraction. The normal of the refractive plate is required to be the same direction of the camera axis in the previous study. This is a limitation when the camera and the refractive plate are set. In this paper, we propose the method that the plate is not required to be placed orthogonal to the optical axis of camera. Therefore the setting of a camera and a refractive plate is more flexible than previous method.

Key Words: Computer Vision, 3D reconstruction, Refraction

1 緒言

近年ロボット技術は多くの場面で実用化されている。特に災害現場などの危険な場所においては、人間に代わって作業をすることができる遠隔操作ロボットが導入されている。遠隔操作ロボットを用いて正確に作業を行うために周囲情報の3次元計測が必要である。3次元計測の手法の1つに Structure from Motion がある。これはカメラで移動しながら取得した画像のみから3次元の情報を取得することができ、カメラ1台のみで実現できるためセンサの搭載可能数に制限がある遠隔操作ロボットにも適した手法である。しかし、Structure from Motion には計測対象のスケールが復元できないという問題点がある [1]。著者らはこれまでに、屈折現象を利用することで、スケール復元が可能な Structure from Motion 手法を提案してきた [2][3]。これらはカメラに入射する光線がカメラの前に配置した透明平板にて屈折によって変化することを利用している。しかし、これらの研究では透明平板の法線方向がカメラの光軸と一致している必要があるという制約があった。そこで本研究では、カメラの前に配置する透明平板を任意の位置、姿勢とした場合でもスケール復元が可能な Structure from Motion 手法を提案する。

2 カメラと平板の配置が任意な手法

2.1 カメラと透明平板の位置関係

本手法でのカメラと透明平板の位置関係を図1に示す。ここでは、気中においてカメラの前に透明平板を配置する。透明平板を通過する際、屈折により光線に変化が生じる。そこでこの屈折による変化量を $\mathbf{d}$ とおき、カメラ座標系における透明平板の法線方向にとる。すなわち、

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

である。法線ベクトル $\mathbf{n}$ は既知とする。 $\mathbf{d}$ の大きさ d は幾何学的に算出することができ、屈折現象におけるスネルの法則を利用

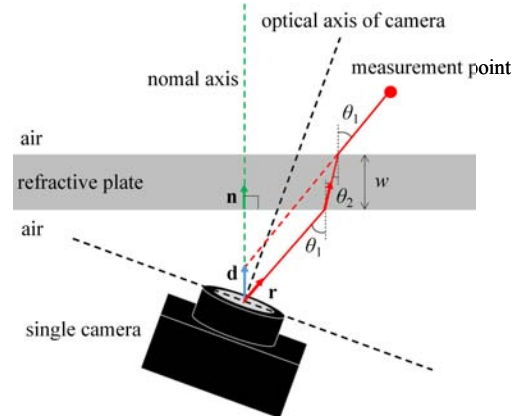


Fig.1 System of proposed method

すると、

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

と気中を通る光線ベクトル $\mathbf{r}$ と透明平板の法線ベクトル $\mathbf{n}$ のみで表現できる。光線ベクトル $\mathbf{r}$ はカメラで取得した画像座標から算出可能である。また、 w は透明平板の厚さ、 n_1 、 n_2 はそれぞれ空気と透明平板の屈折率であり、既知とする。

2.2 幾何学的条件の適用

計測対象の画像を2視点から取得すると、それぞれのカメラ位置での光線ベクトルと屈折により変化した位置 $\mathbf{d}$ を結んだベクトルが同一平面上に存在するという幾何学的な関係が成り立つ (図2)。したがって、

$$\{(\mathbf{t} + \mathbf{R}^{-1}\mathbf{d}' - \mathbf{d}) \times \mathbf{R}^{-1}\mathbf{r}'\}^T \mathbf{r} = 0, \quad (3)$$

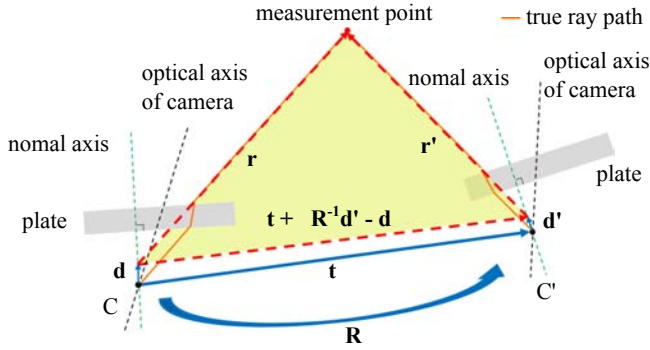


Fig.2 Geometrical relation of two cameras

が成立する．ここで， $\mathbf{R}$ はカメラの姿勢変化を表す回転行列， $\mathbf{t}$ はカメラ中心の移動ベクトルである．簡単のため，2 視点 C と C' における光線ベクトル $\mathbf{r}$ と $\mathbf{d}$ をそれぞれ $\mathbf{r} = (x, y, z)^T$ ， $\mathbf{d} = (d_1, d_2, d_3)^T$ ， $\mathbf{r}' = (x', y', z')^T$ ， $\mathbf{d}' = (d'_1, d'_2, d'_3)^T$ とおき，式 (3) を既知数の成分からなるベクトルと未知数からなるベクトルの内積の形に整理すると，

$$\begin{pmatrix} xx' \\ yy' \\ zz' \\ d_3yx' - d_2zx' + d'_3xy' - d'_2xz' \\ d_1zx' - d_3xx' + d'_3yy' - d'_2yz' \\ d_2xx' - d_1yx' + d'_3zy' - d'_2zz' \\ d_3yy' - d_2zy' + d'_1xz' - d'_3xx' \\ d_1zy' - d_3xy' + d'_1yz' - d'_3yx' \\ d_2xy' - d_1yy' + d'_1zz' - d'_3zx' \\ d_3yz' - d_2zz' + d'_2xx' - d'_1xy' \\ d_1zz' - d_3xz' + d'_2yx' - d'_1yy' \\ d_2xz' - d_1yz' + d'_2zx' - d'_1zy' \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} r_{12}t_3 - r_{13}t_2 \\ r_{13}t_1 - r_{11}t_3 \\ r_{11}t_2 - r_{12}t_1 \\ r_{22}t_3 - r_{23}t_2 \\ r_{23}t_1 - r_{21}t_3 \\ r_{21}t_2 - r_{22}t_1 \\ r_{32}t_3 - r_{33}t_2 \\ r_{33}t_1 - r_{31}t_3 \\ r_{31}t_2 - r_{32}t_1 \\ r_{11} \\ r_{12} \\ r_{13} \\ r_{21} \\ r_{22} \\ r_{23} \\ r_{31} \\ r_{32} \\ r_{33} \end{pmatrix} = 0, \quad (4)$$

となる．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 (4) は画像上の各対応点について成り立つため，連立方程式を立て，最小二乗法を用いることで未知数ベクトルを求めることができる．その際に，未知数ベクトルの 10~18 成分が回転行列の成分であるため，正規直交性から，

$$\sum_{j=1}^3 r_{ij}^2 = 1 \quad (i = 1, 2, 3), \quad (5)$$

を制約条件としてラグランジュ未定乗数法を用いて付加することで，未知数ベクトルのノルムが一意に決まり，スケール復元が可能となる．また，式 (4) は同次式であるため，必要な対応点の数は最小で 17 点となる．

式 (4) において， $\mathbf{d}$ の x, y 成分を 0 にした場合，先行研究 [3] の式に一致する．これは，先行研究 [3] は透明平板の法線とカメラ光軸が一致しているという限定された状況でのみ成り立つ手法であることによるが，その際式 (4) の既知数ベクトルの第 18 成分は 0 となるため，本手法のように式 (4) から直接 r_{33} を求めることはできなかった．本手法は先行研究 [3] に比べ，より一般的な位置・姿勢での計測に拡張した手法である．これは，先行研究 [3] では透明平板はカメラ光軸に対して垂直である必要があったのに対し，本手法では配置の条件がないことに対応している．

Table 1 Simulation conditions

n_1	1.0 (air)
n_2	1.49 (acryl)
w	50 mm
$\mathbf{R}$	$(-0.15\pi, -0.15\pi, 0.10\pi)$ rad (Euler angles)
$\mathbf{t}$	$(600, -300, 50)$ mm
$\mathbf{n}$	$(0.454, -0.275, 0.847)$

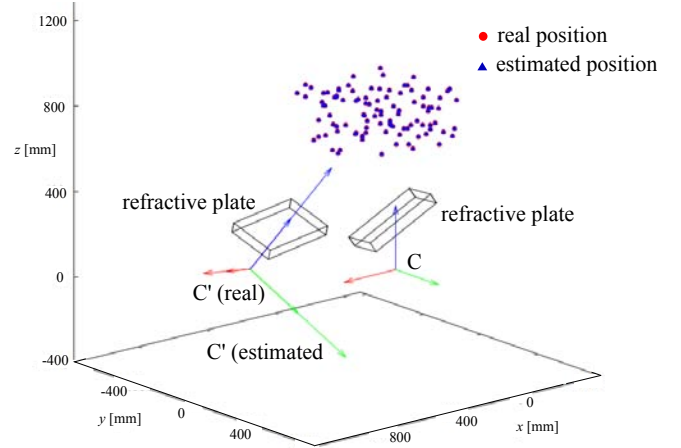


Fig.3 Result of the simulation

3 シミュレーション実験

本手法の有効性を確認するためにシミュレーション実験を行った．実験条件を表 1 に示す．3 次元空間上に点群を 100 点ランダムに配置し，指定した 2 つカメラ位置 C, C' から点群を撮影した際の取得画像を算出した．その画像座標に対し，本手法を適用し，点群の位置を復元できるかを検証した．結果を図 3 に示す．赤い丸が真値で青い三角が復元値である．カメラ座標系において青いベクトルが光軸を示し，黒い四角が透明平板の姿勢を表している．真値と復元値の誤差平均は 4.32×10^{-6} mm と極めて小さく，スケールを含め復元できることが確認できた．

4 結言

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 手法において，カメラと透明平板の位置関係が任意の場合でも復元可能な手法を提案し，シミュレーションによりその有効性を確認した．実測実験による実証が今後の課題である．また，透明平板の配置姿勢と復元精度との関係の解析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．

References

- [1] Richard Hartley and Andrew Zisserman: *Multiple View Geometry in Computer Vision*, Cambridge University Press, Second Edition, 2004.
- [2] 久米大將, 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.
- [3] Akira Shibata, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita, 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.