2対の全天球カメラとクロスラインレーザによる相対姿勢推定に基づく 光切断法を用いた3次元計測

Cross Line Structured via Mutual Pose Estimation of Two Sets of Spherical Camera and Cross Line Laser

東京大学 〇朝倉 友和,伊賀上 卓也,安 琪,山下 淳

1. 序論

3次元計測は、農業[1]や自動運転 [2]など様々な分野で利用され、 建設現場 [3]やインフラ点検の現場でも取り入れられている. 高度 経済成長期に整備された社会インフラは老朽化が進行し、維持管理 を行うためには定期的な点検が必要である.全国の橋梁の老朽化も 深刻であり、次回点検までに措置が必要と判断された橋梁は約7万 橋存在する [4].国土交通省では3Dモデルの作成により施工・維持 管理プロセスの効率化・高度化を図る取り組みである、Construction Information Modeling (CIM)を推進している.加えて、今後の人口 減少による労働力の低下を鑑みると、省人化された3次元計測法の 確立が急務である.

橋梁計測の省人化のためにロボットの活用が期待されており、中 でも Unmanned Aerial Vehicle (UAV)を橋梁の3次元計測へ活用 する研究が行われている.渡辺らは LiDAR-SLAM 機構を搭載した ドローンを用いて橋梁の3次元計測を行った [5].LiDAR-SLAM に よる計測は、得られる点群間隔が狭いため高密度なデータが取得で き、周囲の明るさに影響されず夜間でも行うことができる利点があ る.しかし LiDAR 機構は高重量であるため、運用にはペイロード の大きい大型の UAV が必要となり、落下時の危険性が高まり橋梁 下部の狭い空間を通ることが難しくなる.3次元モデルを生成する 他の技術として、Structure from Motion (SfM)があり、測定に小型 カメラを用いるため運用上利便性が高く、小型の UAV を利用でき る [6].しかし SfM は画像内の特徴点を基準として撮影した位置・ 姿勢を求め3次元モデルを復元するため、コンクリート平面で構成 される特徴点の少ない橋梁には不向きである.

特徴点の少ない環境での3次元計測手法として光切断法がある. Igaue et al. は、2台のカメラを用いたレーザ光の2D-3Dマッチング によりトンネルの3次元計測とカメラの位置姿勢推定を行った[7]. 3次元計測を行う断面計測装置のレーザを固定したカメラにより観 測することで2次元点群を取得し、2次元点群と3次元点群マッチ ングを行うことで断面計測装置の位置姿勢を推定した.

RGB カメラとレーザのみを用いるこの手法はUAV への高い可搬 性があり、また計測にテクスチャを用いないため特徴点の少ない対 象でも3次元計測が可能である.しかしリングレーザの形状をカメ ラで観測し位置姿勢推定に用いることからトンネルのような断面 が閉じた長尺物以外の対象の計測は検討されておらず、計測方向が 1方向に制限される.橋梁等平面で構成される対象を計測するには、 断面形状の特徴に依存しない位置姿勢推定法が必要である.

2. 提案手法

2.1 要求されるカメラとレーザの特性

平面で構成される対象の計測には、断面形状の特徴によらない位置姿勢推定法が求められる.計測装置の位置姿勢推定は3次元計測において計測点を統合する際に重要である.先行研究[7]ではトン

ネル断面にリングレーザを照射することで得られたレーザ形状の 特徴を用い、固定点から観測したレーザ画像とのマッチングを行い 計測装置の位置姿勢を推定した.平面計測の際は、レーザのマッチ ングによって得られる位置姿勢の不定性を減らすことが必要であ り、位置姿勢パラメータを更新する情報がより多いことが望ましい. 2 台の断面計測装置を用意しそれぞれに観測機能と3次元計測機能 を持たせ、マッチングする点群の組数を増やすことができれば、パ ラメータの更新情報をより多く得られる.1台のカメラが両方の役 割を担うには、別地点にある2点のレーザを捉える広い視野角が必 要である.

また,平面にリングレーザを照射する際はトンネル等の長尺物を 計測する場合と異なり,特徴的なレーザ形状を得ることが出来ず照 射面は1本の直線となる.直線情報だけでは位置姿勢推定時に並進 方向と回転方向の不定性が生じるため,これを解消する形状のレー ザを使用する必要がある.クロスラインレーザは十字型の形状を持 っため,レーザを照射する断面計測装置の位置姿勢6自由度の内, 適切な初期値を与えることにより並進1自由度以外を定めることが できる.



2.2 提案手法の概要

図1 提案手法の概略

本手法では、2台の全天球カメラとクロスラインレーザを用いた 点群マッチングによる位置推定を提案する.図1に示すように3次 元計測を行う全天球カメラとクロスラインレーザを組み合わせた 計測装置を2台用意し、光切断法による3次元計測ともう一方の装 置のレーザ観測を同時に行い、点群のマッチングから計測装置の位 置姿勢を推定する.

2.3 点群マッチング手法及び位置姿勢推定法の詳細

先行研究[7] は点群のマッチングを行うため、剛体変換において 回転と並進を推定する Rigit Coherent Point Drift を拡張し、射影変換 における回転行列と並進ベクトルの推定をおこなった.本研究では この手法を 2 つの全天球カメラを用いるシステムにさらに拡張す る.



図2のように 断面計測装置で得られた3次元点群を回転行列 R, 並進ベクトル t を用いて観測カメラの座標系に座標変換し、ノル ムを1とすることで点群を観測カメラの球面上に投影する.この点 群と断面計測装置のレーザを観測することで得られた点群を,球面 座標系で EM アルゴリズムに基づいた最尤推定によりマッチング し, R 及び t を最適化する.1 つ目の断面計測装置のカメラを S_1 , 得られた3次元点群を $Y_{S_1} = \{y_{S_1,m_1} \in \mathbb{R}^{3\times 1}, m_1 = 1, 2, \cdots, M_1\},$ 他方の計測装置のレーザを観測した点群を $X_{S_1} = \{x_{S_1,n_1} \in \mathbb{R}^{3\times 1}, n_1 = 1, 2, \cdots, N_1\}$ とする. S_1 球面に投影された3次元座標 $y_{2,m_2} \epsilon \mu_{S_1,m_2}$ と表すとき,球面座標系への変換は以下のように表さ れる.

$$\boldsymbol{\mu}_{S_1,m_2} = \frac{{}^{1}\mathbf{R}_2 \ \mathbf{y}_{S_2,m_2} + {}^{1}\mathbf{t}_2}{\left|{}^{1}\mathbf{R}_2 \ \mathbf{y}_{S_2,m_2} + {}^{1}\mathbf{t}_2\right|} \qquad (1)$$
$$\boldsymbol{\mu}_{S_2,m_1} = \frac{{}^{2}\mathbf{R}_1 \ \mathbf{y}_{S_1,m_1} + {}^{2}\mathbf{t}_1}{\left|{}^{2}\mathbf{R}_1 \ \mathbf{y}_{S_1,m_1} + {}^{2}\mathbf{t}_1\right|} \qquad (2)$$

座標変換の際, ${}^{1}\mathbf{R}_{2}$, ${}^{2}\mathbf{R}_{1}$, ${}^{1}\mathbf{t}_{2}$, ${}^{2}\mathbf{t}_{1}$ の関係は ${}^{2}\mathbf{R}_{1} = {}^{1}\mathbf{R}_{2}^{-1}$, ${}^{2}\mathbf{t}_{1} = -{}^{1}\mathbf{R}_{2}^{-1}{}^{1}\mathbf{t}_{2}$ と表わせる.

最小化する負の対数尤度 $E(\mathbf{p}, \sigma^2)$ は以下である.

 $\arg_{\mathbf{p}} \min \{ -E_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) - E_2(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \} \quad (3)$

点群のマッチングからは位置姿勢パラメータの更新ベクトルを 算出する. M ステップでは2次微分により高速な最適化が可能であ るニュートン法により計測装置の位置姿勢パラメータ p を更新す る.

2.4 マッチングによる3次元点群の座標系統合

R, t が推定されたことで2 つの断面計測装置で得られた3 次元 点群が1つの全天球カメラの座標系に統合できる. 統合する座標系 をもつ全天球カメラの計測装置の位置を固定し,他方の計測装置を 移動させることで,計測対象平面の全体計測が可能である.

3. 実験

屋内実験の様子を図3に示す.全天球カメラのTHETAX(RICOH) とクロスラインレーザをアルミフレームに固定した装置を2組配置 した.レーザを照射したときと照射していないときの差分画像を取 得し,画像からレーザを抽出した. 屋外実験の様子を図4に示す. 模擬トンネルの断面にクロスライ ンレーザを照射し,全天球カメラで撮影し,3次元計測を行う実験 を行った.



図3 レーザ光による屋内壁面の3次元座標の計測



図4 レーザ光によるトンネル壁面の3次元座標の計測

4. 結論

本論文では、2組の全天球カメラとクロスラインレーザを用いた 相互位置推定に基づく光切断法の計測断面統合による3次元計測手 法を提案した.

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 22K18826 の助成を受けたものである.

参考文献

- Lin, G., Tang, Y., Zou, X. & Wang, C. (2021) Three-dimensional reconstruction of guava fruits and branches using instance segmentation and geometry analysis. Computers and Electronics in Agriculture, 184, 106–107.
- [2] Arnold, E., Al-Jarrah, O.Y., Dianati, M., Fallah, S., Oxtoby, D. & Mouzakitis, A. (2019) A survey on 3D object detection methods for autonomous driving applications. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 20(10), 3782–3795.
- [3] Chen, M., Tang, Y., Zou, X., Huang, K., Li, L. & He, Y. (2019) Highaccuracy multi-camera reconstruction enhanced by adaptive point cloud correction algorithm. Optics and Lasers in Engineering, 122, 170–183.
- [4] 国土交通省 (2023): "令和五年度国土交通省白書", 223-224.
- [5] 渡辺豊(2020): "橋梁におけるドローンと 3D データ活用の 最前線", 土木学会 第 23 回 橋に関するシンポジウム論文報 告集,42-48.
- [6] 小花和宏之,早川祐,ゴメス クリストファー. (2014): "UAV 空撮と SfM を用いたアクセス困難地の 3D モデリング",国 立情報学研究所, 35(3), 283–294.
- [7] Takuya, I., Toko, H., Hiroshi, H., Miro, I., Kenichi, Y., Satoshi, Y., Takashi, Y., Hajime, A., & Atsushi, Y. (2023) Cooperative 3D tunnel measurement based on 2D–3D registration of omnidirectional laser light, Journal of Field Robotics, 40(8), 2042–2056.