

建設機械のためのサーモグラフィカメラを用いた Visual SLAM

○千野雅紀（東京大学） 小松廉（東京大学） 浅間一（東京大学） 山下淳（東京大

1. 序論

建設業では就業者数の減少ならびに高齢化が進んでおり、2020年は492万人の就業者数に対して55歳以上の就業者数が36.0%となっている。一方で、建設業の労働生産性は他産業に比べて大きく下回っており、製造業と比べて49.6%である [1]。このことから建設業では生産性の向上が求められており、その方法の一つとして、建設機械の自動運転による施工がある。無人で昼夜を問わずに施工を行うことができることから、生産性の向上への寄与が期待されている。

建設機械の自動運転を行うには、計画した位置への移動と施工を行うために建設機械の位置情報を取得する必要がある。

位置情報を取得する方法として、これまでは人工衛星の信号情報を利用するGNSS (Global Navigation Satellites System) が一般的に用いられてきた。しかし、山間部やトンネルなど人工衛星の信号が受信できない場所での工事も多く、こうした場所ではGNSSが利用できない。

また、建設機械にセンサを搭載して周囲の環境地図の作成と自己位置推定を同時に行うSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を用いた方法もある。SLAMのうち、カメラで取得した画像を利用するVisual SLAMを建設機械の自動運転に適用する取り組みが行われている [2]。しかし、光学画像を利用することから、建設機械の自動運転に期待される夜間の施工においては、照度不足のために利用することができない。

夜間での自己位置推定を行うために、サーモグラフィカメラをVisual SLAMに利用する研究が行われている。サーモグラフィカメラは物体から放射される赤外線を画像として撮像するセンサであり、暗闇においても物体を写すことが可能である。

Vidasら [3]は熱画像を用いて特徴量ベースにリアルタイムで単眼Visual SLAMを実行するシステムを構築した。しかし、熱画像のコントラストの影響が大きく、精度が低いという問題がある。Delauneら [4]はサーモグラフィカメラをUAVに搭載し、熱画像とIMUの慣性データとを組み合わせた手法で位置計測を行っている。しかし、建設機械は不整地を走行することが多く、特に振動ローラは能動的に振動させながら走行することから、IMUにノイズが乗るため建設現場での利用には適していない。

本研究では、夜間施工における建設機械の自動運転における位置情報の取得を目的とし、サーモグラフィカメラで取得した熱画像を利用してVisual SALMを行う。

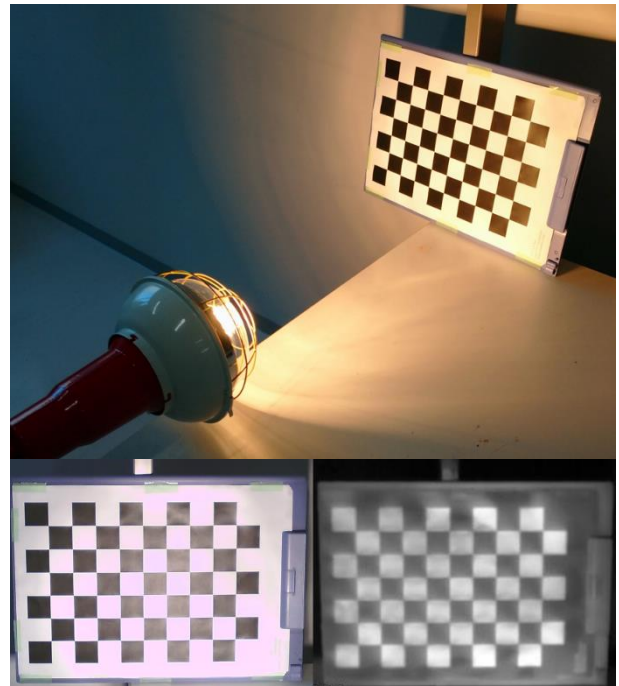


図1 投光器を用いたキャリブレーション
(左：光学画像、右：熱画像)

2. 手法

2.1 手法概要

本研究では、サーモグラフィカメラで取得した赤外線強度の数値情報それ自体は扱わず、赤外線強度の分布として表示された画像に対して処理を行う。そのために、カメラキャリブレーションを行い、その後自己位置推定の算出処理を行う。

2.2 キャリブレーション

カメラキャリブレーションでは焦点距離やレンズ歪みといった内部パラメータの推定を行う。一般的に用いられる紙やボードに印刷されたチェッカーボードでは、ボード表面の温度変化が乏しいため、サーモグラフィカメラで格子模様を明確に撮影することができない。黒色は白色よりも光を吸収しやすいという特性から、チェッカーボードを外部熱源を利用して暖めてから熱画像の撮影を行う [5]。

2.3 自己位置推定

カメラの自己位置推定にはDSO (Direct Sparse Odometry) を用いる [6]。DSOは、画像全体の画素の輝度値の誤差を最小化することでフレーム間のマッチングを行う直接法である。テクスチャに乏しい環境でも頑強であるという性能を持ち、平坦な空間が広範に及ぶ工事現場での自己位置推定に適していると考えた。

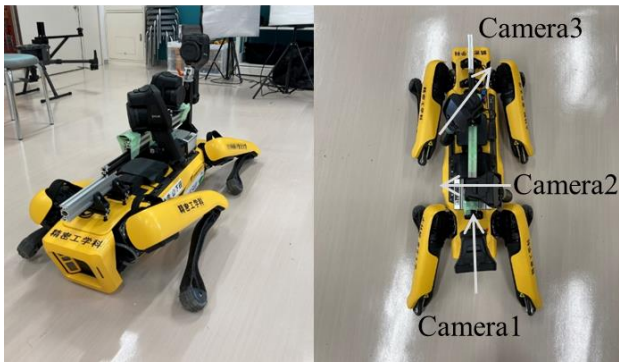


図2 サーモグラフィカメラ設置状況

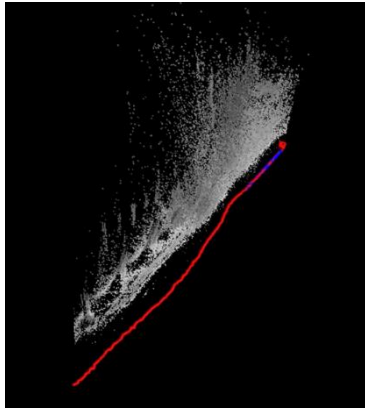


図3 DSOによる移動軌跡

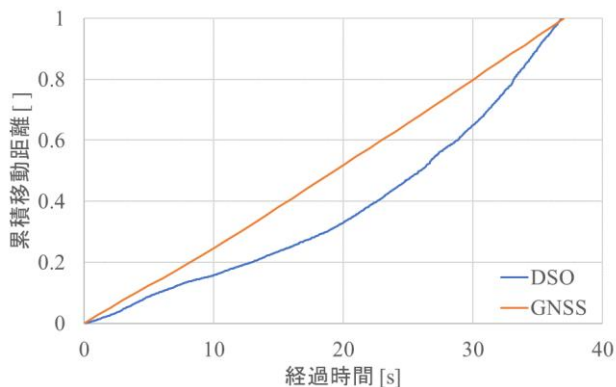


図4 累積移動距離



図5 撮影データ
(上段：良好な例，下段：不良な例)

3. 実験

3.1 実験方法

サーモグラフィカメラには FLIR E54 を用いた。測定温度範囲は $-20 \sim 120$ $^{\circ}\text{C}$ ，視野角は $24 \times 18^{\circ}$ ，熱画像の解像度は 320×240 pixel である。

チェッカーボードの加熱には 500 W 投光器を用いた。5 分程度チェッカーボードに光を当てた後にサーモグラフィカメラで撮影を行った。図1にキャリブレーションで使ったチェッカーボードを示す。格子模様の温度は最高で 66.1 $^{\circ}\text{C}$ ，最低で 31.8 $^{\circ}\text{C}$ となり， 30 $^{\circ}\text{C}$ 以上の温度差となった。

サーモグラフィカメラは手持ち，手押し台車，四足歩行ロボットの Spot に設置してそれぞれ撮影を行った。図2にサーモグラフィカメラの設置状況を示す。カメラは正面，側面，斜め前に向けて設置を行い，一度の移動で 3 方向の映像データを取得した。移動経路は，長辺 110 m，短辺 65 m の矩形の経路を 1 周して，350 m の移動に対して撮影を行った。真値として，移動中の位置情報を GNSS により取得した。

3.2 実験結果

図1に示す通り，投光器でチェッカーボードを暖めたことにより，光学画像で黒色と白色の格子模様は熱画像においても明確に表れた。この画像を利用して内部パラメータの推定を行った結果，平均再投影誤差は 0.35 pixel であった。熱画像と同時に撮影した光学画像でキャリブレーションを行った結果，平均再投影誤差は 0.18 pixel であった。格子模様の境界が光学画像に比べて不鮮明であったことから，平均再投影誤差は熱画像の方が大きくなったが，キャリブレーションの結果としては良好であった。

撮影した映像データを使用して自己位置推定を行った結果，長期間での移動では途中でトラッキングが出来なくなるものの，短期間での位置推定は可能であった。図3に DSO による移動軌跡の結果を示す。位置推定が可能であったのは，台車にカメラを斜め前方向に設置して直進区間を移動した場合であり，アスファルトと縁石が継続して撮影されていた。図4に DSO と GNSS の累積移動距離の結果を示す。DSO は距離の尺度を持たないため正規化した後に比較を行った。一定速度で移動したために GNSS が線形に増加しているのに対して，DSO では指数的に増加している。これは，単眼 SLAM によるスケールドリフトの影響であると考えられる。移動速度のばらつきも大きく，標準偏差を平均値で除した変動係数は，GNSS が 0.07 に対して DSO では 0.79 となった。特に後半になるにつれてばらつきが顕著になった。図5に移動中の撮影データを示す。上段ではアスファルトと縁石，土の部分で温度差が表れている。一方，下段では温度が均一なものが画像を占める割合が高く温度変化が乏しい。また，移動時の振動により画像にモーションブラーが生じた。

4. 結論

サーモグラフィカメラを利用した Visual SLAM を実施するために、キャリブレーションおよび DSO による自己位置推定を行った。キャリブレーションではチェッカーボードを加熱する手法が有効であることが分かった。自己位置推定では短期的な自己位置推定を行うことはできたが、一連のデータを通して位置推定を行うことができなかった。今後は、良好なデータを取得するために振動対策を施した固定方法の検討、長期間の安定したトラッキングのための自己位置推定手法の検討を行い、建設現場で熱画像を利用した Visual SLAM の実現を目指す。

参 考 文 献

- [1] 一般社団法人日本建設業連合会：“建設業ハンドブック 2021”，
https://www.nikkenren.com/publication/pdf/hand-book_2021.pdf, 2022 年 7 月 5 日.
- [2] 千野 雅紀, 安保 篤康, 村石 辰徳, 包 潤秋, 小松 廉, Renato Miyagusuku, 山下 淳, 浅間 一：“Visual SLAM の自動運転振動ローラへの適用”, 土木学会令和 3 年度全国大会第 76 回年次学術講演会講演概要集, VI-687, 2021.
- [3] Stephen Vidas, Sridha Sridharan: “Hand-held Monocular SLAM in Thermal-infrared”, Proceedings of the 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, pp. 859-864, 2012.
- [4] Jeff Delaune, Robert Hewitt, Laura Lytle, Cristina Sorice, Rohan Thakker, Larry Matthies: “Thermal-Inertial Odometry for Autonomous Flight Throughout the Night”, Proceedings of the 2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 1122-1128, 2019.
- [5] Philip Saponaro, Scott Sorensen, Stephen Rhein, Chandra Kambhamettu: “Improving Calibration of Thermal Stereo Cameras Using Heated Calibration Board”, Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Image Processing, pp. 4718-4722, 2015.
- [6] Jakob Engel, Vladlen Koltun, Daniel Cremers: “Direct Sparse Odometry”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 40, No. 3, pp. 611-625, 2018.