

夜間環境における複数台のサーモグラフィカメラを利用した 自己位置推定

千野 雅紀^{*1*3}, 小松 廉^{*1}, 浅間 一^{*1}, 山下 淳^{*2}

Localization Using Multiple Thermography Cameras in Low-light Environment

Masaki Chino ^{*1*3}, Ren Komatsu ^{*1}, Hajime Asama ^{*1} and Atsushi Yamashita ^{*2}

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

^{*2} Department of Human and Engineered Environmental Studies, The University of Tokyo
5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8563, Japan

^{*3} Advanced Technology Development Department, HAZAMA ANDO CORPORATION
1-9-1 Higashi-Shimbashi, Minato-ku, Tokyo 105-7360, Japan

In construction site, the location of construction machines is needed for driving automatically. Visual odometry using thermography camera is an effective method in GNSS denied environment and in the nighttime when it is difficult to calculate the location information from RGB image. In this work, we propose a method of combining multi-thermography cameras to enable self-localization. This is a method of integrating the accurate results of other cameras based on the position information calculated by the main camera. We test the effectiveness of the proposed method by acquiring thermography in outdoor environment at night. The result shows that the accuracy was slightly improved compared with the method using a thermography camera alone.

Key Words : Visual odometry, Thermography camera, Multi-camera, Low-light environment

1. 序 論

建設業の就労者数は1997年の685万人をピークとして減少が続いており、2020年にはピーク時の約70%の492万人となっている。また、就労者の高齢化も進んでおり、2020年の55歳以上の割合は36.0%であり、全産業よりも5%高くなっている^①。そのため、施工の生産性の向上が求められている。生産性を向上させる方法のひとつとして、油圧ショベルやダンプトラック、振動ローラなどの建設機械による施工の自動化があり、自動運転機能を備えた建設機械の技術開発が建機メーカーやゼネコンで行われている。施工が自動化されると、無人で昼夜を問わずに作業を行うことができるため、省人化および生産性の向上に寄与することが期待されている。建設機械の自動運転においては、計画された所定の位置に対して移動および作業を行うことから、建設機械の位置情報がリアルタイムに必要となる。建設機械の位置情報の取得方法には、人工衛星から

得られる情報を用いた Global Navigation Satellites System (GNSS) が広く用いられてきた。しかし、GNSS は人工衛星の信号を利用することから、マルチパスが発生する山間部や、信号を受信することができないトンネルや地下空間では利用することができない。

GNSS に代わる方法として、画像を利用した Visual odometry があり、Visual odometry によって得られた位置情報を建設機械の自動運転の制御に利用する取り組みがなされている^②。Visual odometry では光学カメラを利用することから、安定して位置情報を得るためには一定の照度の下で撮影を行う必要がある。しかし、自動運転は夜間に作業を行うことが期待されており、光学カメラの利用に十分な照度を得ることができない。そのため、自動運転に利用する位置情報を取得することは困難である。

夜間に画像を取得する方法としては、サーモグラフィカメラを利用する方法が考えられる。サーモグラフィカメラは物体から放射される赤外線強度を温度に変換して画像として表示するセンサである。熱を持つ物体であれば、夜間であっても画像を取得することが可能である。Jung ら^③は、単眼サーモグラフィカメラ

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) chino@robot.t.u-tokyo.ac.jp

^{*2} 東京大学大学院新領域創成科学研究科人間環境学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5)

^{*3} 株式会社安藤・間建設本部先端技術開発部 (〒105-7360 東京都港区東新橋 1-9-1)

を用いて自己運動推定を行うためのアルゴリズムを提案した. 特徴点マッチングに利用される Focus of Expansion (FOE) を用いてカメラの姿勢の推定を行ったが, 自己位置推定は行われなかった. サーマグラフィカメラで取得した画像を用いて Visual odometry を行った研究として, Vidas ら⁽⁴⁾ は単眼サーモグラフィカメラで特徴量ベースの手法でリアルタイムに自己位置推定を行うシステムの構築を行った. しかし, サーマグラフィのコントラストの低さが精度に大きく影響を与え, 精度が低いという問題があった. また, Borges ら⁽⁵⁾ は, 単眼での Visual odometry の問題の一つであるスケール不定性に対して, 地面の形状を推定することでスケールを求める研究を行った. しかし, カメラの高さとピッチが既知である必要があり, 精度も日中の単眼での Visual odometry には達しなかった.

本研究では, 夜間環境において, 複数台のサーモグラフィカメラを利用して自己位置推定を行うことを目的とする. 複数台のカメラの位置を平均化することで位置推定精度を向上させ, 1 台のカメラがロストした場合でも位置推定を行える手法を提案する.

2. 提案手法

2.1 提案手法概要

本論文で提案するシステムのアルゴリズムを図 1 に示す. カメラ間の位置関係を固定した複数台のカメラで取得した温度情報から画像を生成し, 自己位置推定を行う. その後, メインカメラとの位置の差が小さいサブカメラの位置情報をメインカメラの位置情報と統合して, システムの位置座標として出力する.

2.2 温度データの画像化

サーモグラフィカメラでは, 各画素の温度情報を 8 bit の輝度値に対応させることで画像化する. 図 2 に示すように, サーマグラフィカメラで取得される温度情報には, 街路灯や人, 金属柱, 空のように局所的に温度差が大きくなる箇所がある. 画像の輝度値は温度の最大値と最小値の間で振り分けるため, 全体として画像の輝度差は小さくなる. そこで, 出現頻度の低い温度情報を使用しないことで, 出現頻度の高い温度範囲に絞って画像化を行う. 具体的には, 撮影した全フレームの温度の出現頻度のうち, 上位と下位の 0.5% ずつを除いた中間の 99% の範囲を利用して温度情報から画像を生成する.

2.3 複数カメラの連携

自己位置推定には直接法のひとつである Direct Sparse Odometry (DSO) を利用する⁽⁶⁾. DSO は画像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手法であり, テクスチャに乏しい環境でも頑強であるという特徴を持

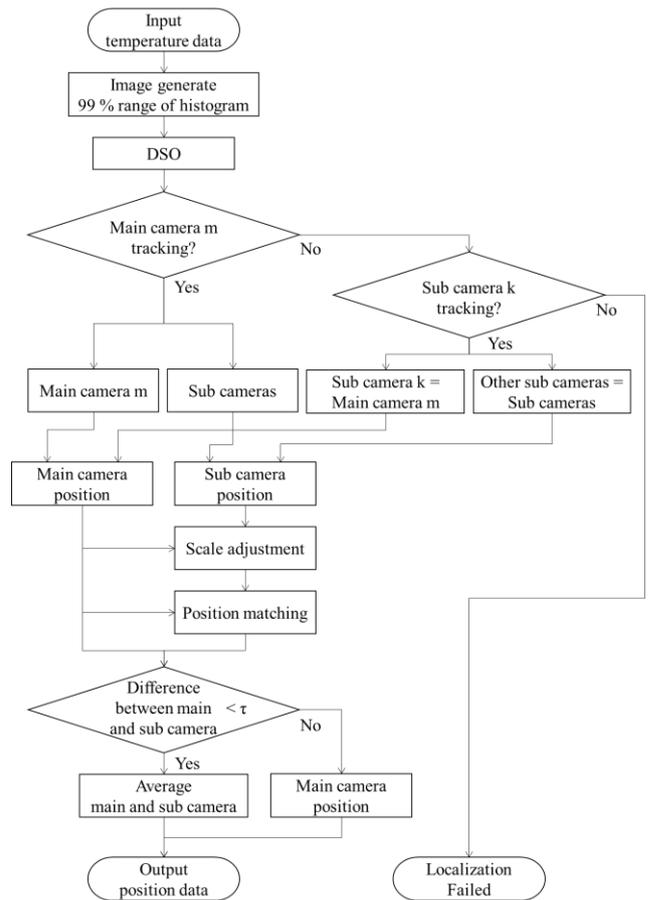


Fig. 1 Overview of the proposed method

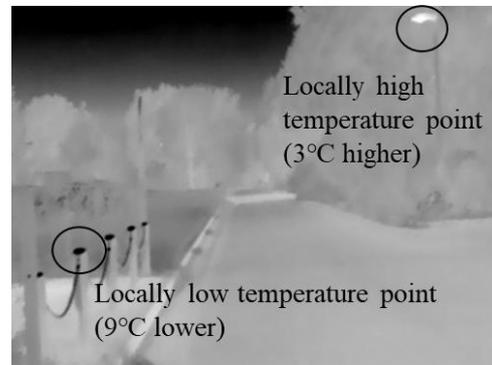


Fig. 2 Locally temperature difference

つ. 各サーモグラフィカメラで取得した画像から DSO を用いて位置情報を取得する. 連続して位置推定が行える 1 台をメインカメラとし, その他のカメラをサブカメラとする. 単眼カメラによる Visual odometry では, 各々のカメラで出力される位置情報は縮尺が合っていない. メインとサブのカメラの移動量は同じであることから, メインカメラを基準にして, 他のサブカメラのスケール調整と位置合わせを行う.

スケール調整の手法について図 3 に示す. p_{Mi} はメインカメラの i フレーム目の位置, $p_{S(k)i}$ は k 番目のサブカメラの i フレーム目の位置, $p'_{S(k)i}$ はスケール調整後の

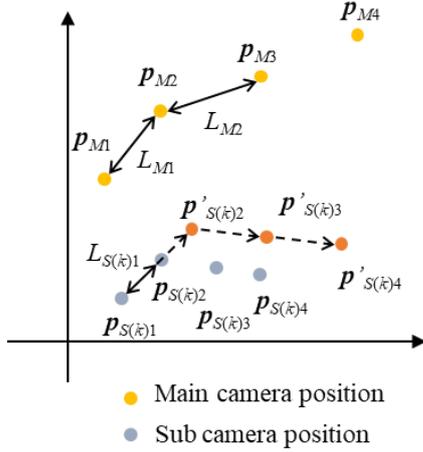


Fig. 3 Method of scale adjustment

k 番目のサブカメラの i フレーム目の位置である. 例えば $\mathbf{p}_{S(k)1}$ から $\mathbf{p}'_{S(k)2}$ を算出する際には, 縮尺の違いをメインカメラの移動量 L_{M1} とサブカメラの移動量 L_{S1} の比から求める. $\mathbf{p}_{S(k)1}$ と $\mathbf{p}_{S(k)2}$ のベクトル方向に移動量の比をサブカメラの移動量に乗じることで $\mathbf{p}'_{S(k)2}$ を得る. $\mathbf{p}'_{S(k)i}$ を求める計算を式(1)に示す.

$$\mathbf{p}'_{S(k)i} = \mathbf{p}'_{S(k)i-1} + \frac{L_{Mi-1}}{L_{S(k)i-1}} (\mathbf{p}_{S(k)i} - \mathbf{p}_{S(k)i-1}). \quad (1)$$

上述の通りにスケールを合わせた後, 点群同士の位置の誤差を最小化できるよう繰り返し計算を行う Iterative Closest Points (ICP) を利用してメインカメラとサブカメラの位置合わせを行う⁽⁷⁾.

その後, メインカメラの位置とサブカメラの位置の差が閾値 τ より小さいときには, メインカメラとサブカメラの位置を平均して, それをシステムの位置情報 \mathbf{p}_{Oi} として扱う. 複数のカメラの位置情報を平均化することで, 赤外線吸収時に生じる温度誤差に起因する位置の誤差を低減できると考えた. 今回は, 閾値 τ は 0.5 として, 1 秒ごとのデータを利用して上述の処理を行い, 位置情報を算出する. 利用するカメラの数を n としたとき, 提案手法の位置情報 \mathbf{p}_{Oi} は式(2)で表される.

$$\mathbf{p}_{Oi} = \begin{cases} \frac{1}{n} \left(\sum_k^{n-1} \mathbf{p}'_{S(k)i} + \mathbf{p}_{Mi} \right) & \text{if } \|\mathbf{p}_{Mi} - \mathbf{p}'_{S(k)i}\| < \tau \\ \mathbf{p}_{Mi} & \text{else} \end{cases}. \quad (2)$$

メインカメラの位置推定が途中で失敗した場合, メインカメラとの位置の差が小さいサブカメラをメインに切り替える. メインであったカメラはサブカメラの

1 台へと役割を変更する. これにより, システムが停止することなく位置推定を継続することが可能である.

3. 実験

3.1 実験方法 提案した手法を用いることによる位置推定精度を検証する実験を行った. サーモグラフィカメラは FLIR E54 を用いた. 計測温度範囲は $-20 \sim 120^\circ\text{C}$, 視野角は $24 \times 18^\circ$, 解像度は 320×240 pixel, サンプルングレートは 30Hz である.

サーモグラフィカメラを 3 台用いて, 左側, 右側, 正面にカメラを向けて固定した. 計測は夜間に行い, 撮影時の周囲の光源は街路灯および建物の光であった. 実験における移動経路を図 4 に示す. 3 方向に向けたカメラで映像を撮影しながら, 直進で約 110 m 移動し, 交差点の角を曲がり約 10 m 移動した. カメラの位置の正解値として GNSS を用いて移動中の位置計測を行い, 提案手法で得られた位置情報と GNSS の位置情報とを比較することで評価を行った.

3.2 実験結果 実験中のそれぞれのカメラで取得した画像を図 5 に示す. 左側に向けたカメラ 1 では, 建物と地面の間には輝度差がはっきりと表れていることが分かる. 右側に向けたカメラ 2 では, 近い距離に木々が写っており, 木の中での輝度差は小さくなっていった. 正面に向けたカメラ 3 では, アスファルトと地面と木が写っており, それぞれの物体で分布する温度が異なることが輝度差としてはっきりと表れている.

各カメラのサーモグラフィを用いて DSO を利用した結果, カメラ 3 では対応点をロストすることなく連続して位置推定を行うことができた. また, カメラ 1 は対応点のロストは 1 回のみであった. 一方, カメラ 2 では 5 回トラッキングに失敗した. これは, 右側に向けたカメラ 2 は木々が多く写ることで画像上に輝度値の差が生じにくかったことに加えて, 物体までの距離が近くフレーム間で対応する点の移動量が大きくなったことが原因と考えられる.

今回の実験においては, 正面に向けたカメラ 3 をメインカメラとしてシステムの位置推定を行った. カメラ 3 は最後まで位置推定を継続できたため, 提案手法におけるメインとサブの役割の切り替えは起こらなかった. 提案手法と GNSS との誤差の推移を図 6 に表す.

先述の通り, カメラを左右に向けた際には位置推定の精度が低く, メインカメラとの差も大きかったため, ほとんどがメインカメラの位置情報をそのまま利用することになり, 左右のカメラの位置情報を統合することは少なかった. GNSS の結果と比較すると, 誤差の平均は, メインカメラのみでは 2.793 m, 提案手法では

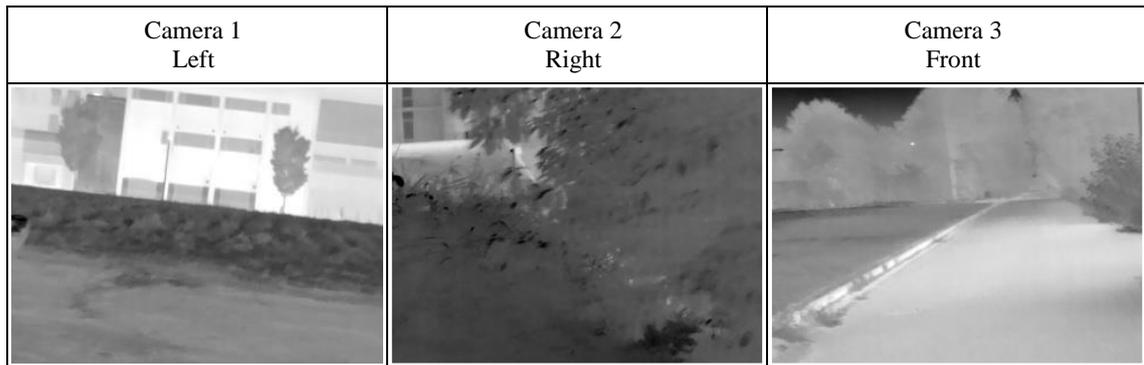


Fig. 5 Image generated from temperature information

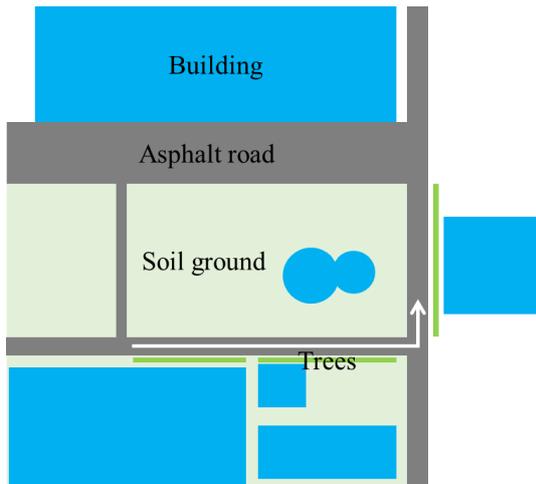


Fig. 4 Moving route for experiment

2.743 mであった。メインカメラのみを用いる場合に比べて、提案手法を用いることでGNSSとの誤差が減少している箇所もあれば増加している箇所もあったが、全体を平均すると誤差は減少した。一部の箇所で誤差が大きくなることについては、メインカメラとサブカメラの差が局所的に小さい箇所を統合したため、サブカメラにおいて位置推定精度自体は低かった箇所も利用することになったためと考えられる。

4. 結 論

複数台のサーモグラフィカメラの位置情報を統合することで、夜間環境における Visual odometry を行う手法を提案した。提案手法を用いて位置推定を行った結果、カメラ単体で位置推定を行う場合に比べて精度が向上することが確認できた。

今後はデータの連携方法について検討を行うことで、複数台のカメラを用いて安定的により精度よく位置推定を行う手法について検討を行う。

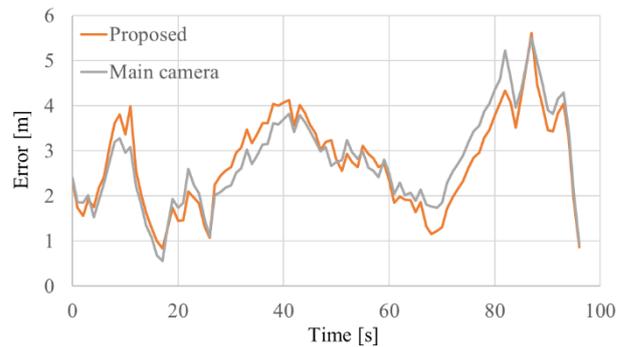


Fig. 6 Error from GNSS

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/handbook_2021.pdf，2022年11月2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) Sang-Hack Jung, Jayan Eledath, Stefan Johansson, Vincent Mathevon: “Egomotion Estimation in Monocular Infra-red Image Sequence for Night Vision Applications”, Proceedings of the 2007 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp. 1-6, 2007.
- (4) Stephen Vidas, Sridha Sridharan: “Hand-held Monocular SLAM in Thermal-infrared”, Proceedings of the 2012 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, pp. 859-864, 2012.
- (5) Paulo Vinicius Koerich Borges, Stephen Vidas: “Practical Infrared Visual Odometry”, IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol. 17, No. 8, pp. 2205-2213, 2016.
- (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.
- (7) Paul J. Besl, Neil D. McKay: “A Method for Registration of 3-D Shapes”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 14, No. 2, pp.239-256, 1992.