

マルチスリットレーザプロジェクタを利用した距離画像センサを用いた 微小運動の直接推定による三次元地図生成

Three-dimensional mapping by direct estimation of a small motion using range image sensor
with multi-slit laser projector

木村優志 (中央大) 増山岳人 (中央大)
正 〇梅田和昇 (中央大)

Masashi KIMURA, Chuo University, kimura@sensor.mech.chuo-u.ac.jp
Gakuto MASUYAMA, Chuo University
Kazunori UMEDA, Chuo University

In this paper, a three-dimensional (3D) mapping method is proposed using a range image sensor with a multi-slit laser projector. Motion parameters of measurement points are directly estimated using range images and optical flow of color images. A 3D map is constructed by registration of range images between frames using the relationship of the range images and estimated motion parameters. In experiments, a 3D map is generated by the constructed sensor using the proposed method. The computational time of estimating the motion parameters and the accuracy of the map are verified.

Key Words: 3D mapping, range image sensor, direct estimation

1 緒言

近年、介護や災害現場における救護活動、人の滞在できない環境での調査などでの自律移動ロボットの導入が期待されている。自律移動ロボットが複雑な環境において効率的に活動するためには、自身の周囲の環境、位置、姿勢の把握が必要になる。周囲の環境を把握する手段の一つに三次元地図生成がある。三次元地図を生成することにより、ロボットと周囲の環境の相対位置がわかるため、複雑な環境においても効率的に活動することが可能となる。

三次元地図は、フレーム間の距離画像を位置合わせすることで生成される。位置合わせ手法は、三次元特徴を用いる手法とテクスチャ特徴を用いる手法に大別される。三次元特徴を用いる手法としては、ICP アルゴリズム [1] がよく用いられる。テクスチャ特徴を用いる手法として、コーナー点を追跡する手法 [2] やエッジ点を追跡する手法 [3] が提案されている。これらの手法は、処理時間が長く、処理速度が 30-60fps の一般的なセンサでは、フレーム間の変化が大きくオンラインでの三次元地図生成が困難である。

この問題に対し、Nozaki らは、センサの微小運動に関する運動パラメータと距離画像の関係式を用いて運動パラメータを直接推定し距離画像の位置合わせを行う手法 [4] を提案した。一フレームの距離画像の位置合わせを 5ms 以内に行い、オンラインでの計測を可能にしている。しかし、運動パラメータ推定するためには、計測環境に法線方向の異なる複数の平面を必要とするため、使用可能な環境が制限される欠点があった。これに対し、我々は、距離画像と同時にカラー画像のオプティカルフローを用いてセンサの運動パラメータを直接推定する手法を提案し、マルチスポット光を用いた RGB-D センサを用いて使用環境の形状に依存しない三次元地図生成を実現した [5]。本研究では、マルチスリット光を用いた RGB-D センサを構築し、このセンサを用いて三次元地図生成を行うことで、距離画像とカラー画像のオプティカルフローを用いてセンサの運動パラメータを直接推定する手法の汎用性を検証する。

2 マルチスリット光を用いた RGB-D センサ

構築した RGB-D センサの外観を図 1 に示す。

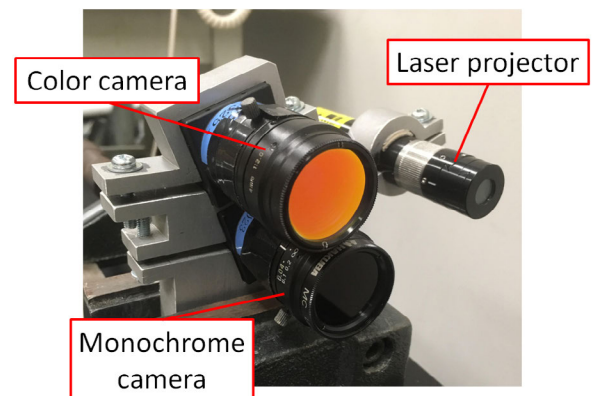


Fig.1 RGB-D sensor with multi-slit laser projector

本センサは 15 本のスリットの距離画像と 1280×960 の解像度のカラー画像を同時に取得することができる。レーザプロジェクタから照射される波長 690nm の 15 本のマルチスリット光とモノクロ CCD カメラによりアクティブステレオ法によって距離画像を取得し、カラー CCD カメラによりカラー画像を取得する。モノクロカメラのレンズ前面に、640nm 以下の波長の光を取り除くハイパスフィルタを取り付けることにより、外乱光を遮断している。また、カラーカメラのレンズ前面に 600nm 以上の波長の光を取り除くショートパスフィルタを取り付けることにより、カラー画像にレーザプロジェクタから照射されるマルチスリット光が写らないようにしている。

3 三次元地図生成手法

2 節で述べた RGB-D センサを用いて距離画像およびカラー画像を取得する。連続する 2 枚のカラー画像からオプティカルフローを抽出する。その後、カラー画像のオプティカルフローと距離画像に基に計測点の運動パラメータに対する拘束式を立て、運

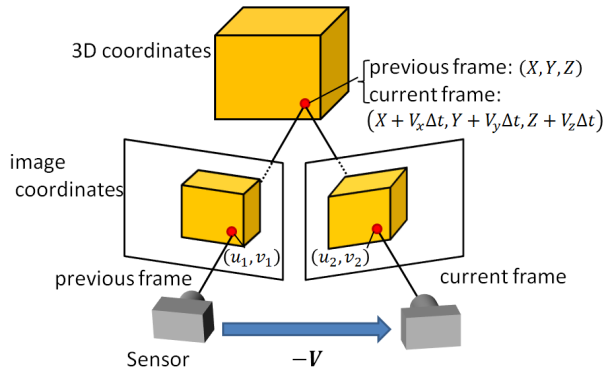


Fig.2 Relation of 3D and 2D coordinates

動パラメータを推定する。得られた運動パラメータを用いて、フレーム間の距離画像の位置合わせを行い、三次元地図生成を行う。

3.1 オプティカルフロー推定

カラー画像のオプティカルフローは、連続に取得した二枚のカラー画像に対して、KLTトラッカー [6] を適用し、検出された対応点のフレーム間の移動量を用いる。KLTトラッカーは、画像の局所的にオプティカルフローを求めるため高速なトラッキングが可能である。一方で、特徴点の変化が小さいことを仮定しているため大きな変化をする特徴点に対してはしばしば追跡を失敗してしまうという欠点がある。

3.2 運動パラメータ推定

距離計測方向が既知で変化せず、かつセンサの運動が微小であると仮定する場合、計測点 $\mathbf{X} = (X, Y, Z)^T$ のフレーム間の速度ベクトル $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)^T$ は、計測点 $\mathbf{X}$ の並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})^T$ 、センサ座標系を原点とした回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)^T$ を用いて以下のように表すことができる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{X} \quad (1)$$

また、計測点 $\mathbf{X}$ をカラー画像上に投影した点 $(u, v)^T$ は、カメラの内部パラメータである、 x, y 軸方向の画素間隔 δ_x, δ_y 、焦点距離 f 、画像中心 c_u, c_v を用いて以下のように表すことができる。

$$u = \frac{X}{Z} \alpha_u + c_u \quad (2)$$

$$v = \frac{Y}{Z} \alpha_v + c_v \quad (3)$$

$$\alpha_u = \frac{f}{\delta_u} \quad \alpha_v = \frac{f}{\delta_v}$$

拘束式で使用するオプティカルフローは、KLTトラッカーより検出された対応点のフレーム間の移動量を用いている。図2に示すように前フレームにおけるカラー画像のある特徴点の画像座標と三次元座標をそれぞれ $(u_1, v_1)^T, (X, Y, Z)^T$ とする。また、現フレームにおけるカラー画像のある特徴点の画像座標と三次元座標をそれぞれ $(u_2, v_2)^T, (X + V_x \Delta t, Y + V_y \Delta t, Z + V_z \Delta t)^T$ とする。このとき、フレーム間のオプティカルフロー $(\Delta u, \Delta v)^T$ は、式 (2)(3) より以下のように表すことができる。

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \frac{X + V_x \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_u - \frac{X}{Z} \alpha_u \quad (4)$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = \frac{Y + V_y \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_v - \frac{Y}{Z} \alpha_v \quad (5)$$

式 (1) を式 (4)、式 (5) にそれぞれ代入し、 $\Delta t = 1$ すると、以

下の二つの式が成り立つ。

$$Z v_{0x} - (X + Z \Delta u') v_{0z} - (X + Z \Delta u') Y \omega_x + (X^2 + Z^2 + X Z \Delta u') \omega_y - Y Z \omega_z = Z^2 \Delta u' \quad (6)$$

$$Z v_{0y} - (Y + Z \Delta v') v_{0z} - (Y^2 + Z^2 + Y Z \Delta v') \omega_x + (Y + Z \Delta v') X \omega_y + X Z \omega_z = Z^2 \Delta v' \quad (7)$$

$$\Delta u' = \frac{\Delta u}{\alpha_u} \quad \Delta v' = \frac{\Delta v}{\alpha_v}$$

式 (6), (7) は並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0$ 、回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を未知数とする線形の式であり、フレーム間で検出される各オプティカルフローごとに得られる。オプティカルフローを三つ以上用い、六つ以上の拘束式からなる連立方程式を解くことにより、運動パラメータを推定することができる。

KLTトラッカーで得られるオプティカルフローの中には誤検出されたオプティカルフローも含まれる。そのため、運動パラメータ推定時に RANSAC [7] を適用し、誤検出されたものを取り除く。

式 (6), (7) のカラー画像のオプティカルフローに基づく拘束式には特徴点の三次元座標が含まれている。距離画像とカラー画像の解像度が異なるため、特徴点の三次元座標の補間を行う必要がある。そのため、特徴点が2本のスリットの間に存在する場合、各スリットの最近傍の計測点を探索し、これらの点の平均を特徴点の三次元座標とする。特徴点が2本のスリットの間に存在していない場合、その特徴点は運動パラメータ推定に用いない。

4 三次元地図生成実験

本実験では、2節で述べた RGB-D センサを用いて、従来研究 [5] と異なるセンサで三次元地図生成を行い、提案手法の汎用性を検証する。

三次元地図生成実験を行った実験環境を図3に示す。三次元地図生成に使用した距離画像の枚数は、80枚である。人が RGB-D センサを手にとって図3に示す矢印の方向に移動させ、距離画像およびカラー画像を取得した。本実験では、生成された三次元地図の精度および運動パラメータ推定に要した処理時間の検証を行う。三次元地図の精度検証方法を以下に述べる。

三次元地図は複数の距離画像を重ね合わせることで生成される。距離画像が精度良く重ね合わせられた場合、統合された計測点はばらつきが少なく計測対象の形状通りに分布すると考えられる。このことから、三次元地図の平面箇所の計測点を抽出し、抽出した計測点を用いて最小二乗平面当てはめを行う。得られた最小二乗平面より平均誤差を求め、平均誤差の大きさを三次元地図の評価を行う。精度評価に使用する平面は、図3のチェック柄の立方体の上面を用いる。

図4に RGB-D センサより取得した1枚の距離画像、図5に図3の三次元地図生成結果を示す。図4、図5の計測点の数はそれぞれ、3536点、283536点である。最小二乗平面と計測点の平均誤差は10.07mm、標準偏差は10.06mmとなった。運動パラメータ推定に要した処理時間は133.00msとなった。

図5より、図3の形状通りに計測点が分布していることがわかる。しかし、最小二乗平面と計測点の誤差の平均が10mmを超えているため、正確な距離画像の位置合わせはできていないと考えられる。本研究で用いている RGB-D センサはレーザを用いているため、計測対象の色によってはレーザの反射は弱くなり、計測点を取得することができないことがある。図4より、取得できない計測点があることがわかる。取得できない計測点が存在すると、特徴点の三次元座標の補間のときに、正確な最近傍の計測点から三次元座標を補間することができない。これにより、正確な運動パラメータ推定ができず、三次元地図の精度が低下したと考えられる。また、処理時間は約133ms 要しているため、オンラインでの計測は困難である。従来研究 [5] では、提案手法の処理時間は約27ms で、1枚の距離画像の計測点の数は約360点である。本センサの1枚の距離画像の計測点の数は約3500点と従来研究と比べて多いため、密な三次元地図を生成できるが処理時間が大きくなってしまったと考えられる。また、提案手法は特徴点の三次元座標の補間を行うときに付近の計測点を利用する。最近傍の計測点を探索する処理時間は計測点の数が多いほど大きくなるため、処理時間が大きくなってしまったと考えられる。

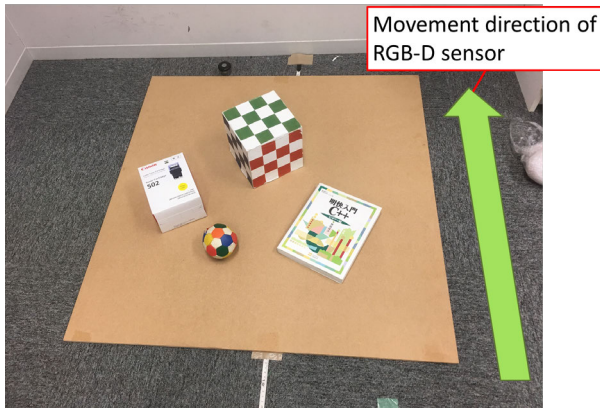


Fig.3 Measurement scene

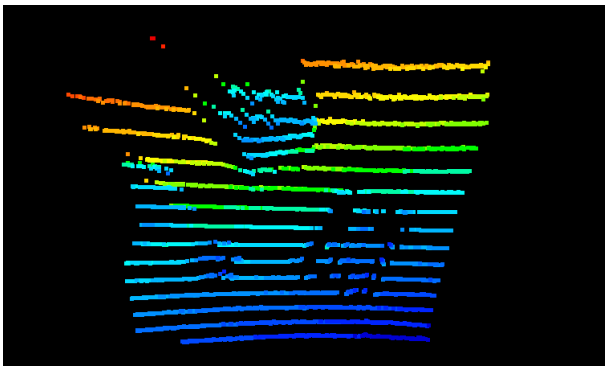


Fig.4 One-shot range image

5 結論

従来手法のセンサと異なるマルチスリット光を照射する RGB-D センサを用いて、提案手法による三次元地図生成を行った。三次元地図生成実験を行った結果、マルチスリット光を照射する RGB-D センサを用いた場合においても、大まかに三次元地図を生成することができたことから、提案手法の汎用性を示した。

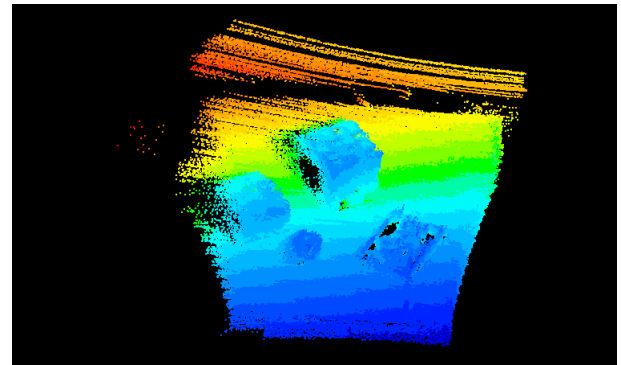
今後の課題として、距離画像の位置合わせの精度向上および運動パラメータ推定の処理の高速化を目指す。

謝辞

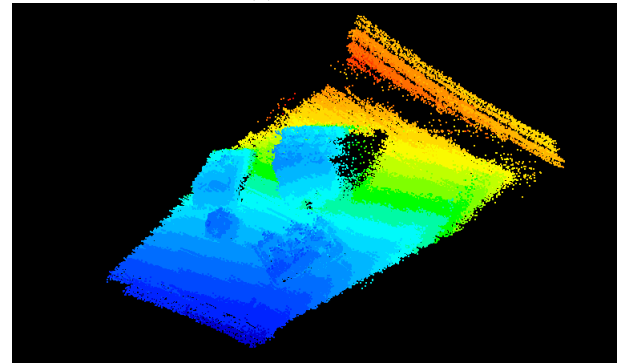
本研究は JSPS 科研費 26330205 の助成を受けたものである。

参考文献

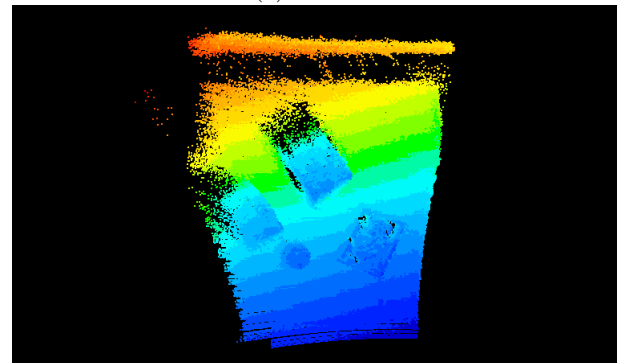
- [1] Besl, P. J. and McKay, N. D., "A method for registration of 3-d shapes," IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell, pp. 239-256, 1992.
- [2] Kagami, S., Takaoka, Y., Kida, Y., Nishiwaki, K., Kanade, T., "Online dense local 3D world reconstruction from stereo image sequences," Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 3858-3863, 2005.
- [3] Tomono, M., "Robust 3D SLAM with a Stereo Camera based on an Edge-Point ICP Algorithm," Proc. of 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4306-4311, 2009.
- [4] Nozaki, S., Kimura, M., Masuyama, M., Umeda, K., "High-speed Three-dimensional Mapping by Direct Estimation of a Small Motion Using Range Images," Proc. of 11th France-Japan congress on Mechatronics, pp. 68-73, 2016.
- [5] Kimura, M., Masuyama, M., Umeda, K., "Three-dimensional mapping by direct estimation of a small motion using range images and optical flow of color images," Proc. of the International Symposium on System Integration, pp. 756-761, 2016.
- [6] Tomasi, C., and Kanade, T., "Detection and tracking of point features," Proc. of Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132, 1991.
- [7] Fischler, A. M. and Bolles, C. R., "Random sample consensus a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography," Communications of the ACM, Vol. 24, No. 6, pp.381-395, 1981.



(a)Front view



(b)side view



(c)bird's eye view

Fig.5 Constructed 3D map