

距離画像とカラー画像を用いた微小運動の直接推定による 三次元地図生成

野崎慎太^{*1}, 増山 岳人^{*2}, 梅田 和昇^{*2}

Three-dimensional mapping by direct estimation of small motion using range and color images

Shinta NOZAKI^{*1}, Gakuto MASUYAMA^{*2} and Kazunori UMEDA^{*2}

^{*1} Graduate School of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

^{*2} Faculty of Science and Engineering, Chuo University
1-13-27 Kasuga, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8551, Japan

In this paper, we propose a high-speed three dimensional map generation method using direct estimation of the motion parameters of a sensor. This method aligns range images between frames after estimating the motion parameters of the sensor using two kinds of information. One is the relationship of range images and the motion parameters of small motion. The other is intensity gradient information of color images. This method can create three dimensional maps quickly because the method does not need to obtain the correspondences of features. We verify both the processing time required for the motion parameter estimation and the accuracy of the map by experiments.

Key Words : Self localization, three dimensional mapping, motion estimation, range image, color image

1. 緒 言

自律移動ロボットが実世界において効率的に活動を行う上で三次元地図は重要である。三次元地図を活用することによってロボット自身が活動する環境における相対位置が分かる。

三次元地図の多くは複数の距離画像中の特徴量間を対応付ける位置合わせにより生成される。位置合わせ手法としては、KLT (Kanade-Lucas-Tomasi) による特徴点追跡を用いた手法⁽¹⁾や画像上のエッジ点追跡を用いた手法⁽²⁾等、数多くの手法が提案されている。移動ロボットによる3次元地図生成には、距離画像、もしくは距離画像とカラー画像を同時に取得するセンサを用いることが多い。これらのセンサの計測速度は一般に30~60fps程度である。距離画像の位置合わせはフレーム間の変化が大きいほど困難となるため、センサの計測速度が低い場合、センサの移動速度を制限しなければならない。

我々は200fpsでの計測が可能な高速RGB-Dセンサを構築⁽³⁾し、このセンサを用いた三次元地図生成手法⁽⁴⁾を提案している。この地図生成手法では、RGB-Dセ

ンサにより距離画像とカラー画像を高速に取得し、色と三次元の両特徴を同時に用いて時系列データの対応付けを行い、位置合わせを行っている。これにより、センサの移動速度の制限を緩和しつつ、様々な環境の三次元地図生成を可能とした。しかし、対応点探索にかかる計算負荷が大きく、オンラインで適用可能な位置合わせ速度を実現することは現実的には困難という問題があった。そこで、我々は直接法と呼ばれる、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を算出する手法⁽⁵⁾⁽⁶⁾を用いることで、対応点を探索することなく距離画像の位置合わせを行う手法を新たに提案している⁽⁷⁾。この手法により、1フレームの位置合わせにかかる処理時間を5ms以内に短縮しオンラインでの計測を可能としている。しかし、運動パラメータの推定に法線方向の異なる複数の平面を必要としたため、使用環境が制限されていた。そこで、本研究では、距離画像と同時に二次元画像の輝度勾配情報を用いてセンサの運動パラメータを直接推定することにより、処理時間の増加を最小限にしつつ、手法の使用環境の制限を緩和する。

以降、2節で本手法の概要を示し、3節で本センサに関して、4節で直接推定法を用いた運動パラメータの推定に関して詳しい説明を行う。また、5節では本

^{*1} 中央大学大学院理工学研究科精密工学専攻 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) nozaki@sensor.mech.chuo-u.ac.jp

^{*2} 中央大学理工学部精密機械工学科 (〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27) masuyama, umeda@mech.chuo-u.ac.jp

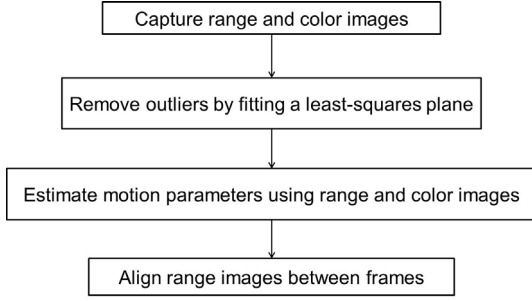


Fig. 1 3D mapping method

手法の有用性を検証するための実験について述べる。6節では本論文での結論を述べる。

2. 三次元地図生成の概要

図1に提案手法のフローチャートを示す。本手法では、我々が構築した高速RGB-Dセンサを用いて距離画像及びカラー画像を取得する。その後、最小二乗平面当てはめによる外れ値の除去を行い、得られた距離画像上の局所的平面の傾き及び二次元画像上の輝度勾配情報を基にセンサの運動パラメータに対する拘束式を立て、センサの運動パラメータを推定する。得られたセンサの運動パラメータを用いることで2フレーム間の距離画像の位置合わせを行い、三次元地図を生成する。最小二乗平面当てはめによる外れ値除去及び運動パラメータの拘束式の説明は4節にて詳しく行う。

3. RGB-D センサ

本節ではRGB-Dセンサについて説明する。センサの外観を図2に示す。本センサは計測点数361点の距離画像とVGAサイズのカラー画像を最大200Hzで同時に取得することができる。距離計測手法にはアクティブステレオ法を用いている。361点のマルチスポットIR光を投影するレーザプロジェクタとモノクロCCDカメラにより距離画像を取得し、カラーCCDカメラによりカラー画像を取得する。コールドミラーを用いることで距離画像とカラー画像を同軸で取得する。コールドミラーはIR光を透過し、可視光を反射する特性をもつ。この特性から2つのカメラをミラーに対して鏡像関係になるように配置することで、IR光はミラーを通過しモノクロカメラで観測され、可視光はミラーで反射しカラーカメラで観測されるため、2つのカメラは同じシーンを観測することが出来る。距離画像の計測可能な距離は900mm~2500mm、計測可能な範囲は距離900mmで約278×278mm²、距離2500mmで約772×772mm²である。屋外計測も可能である。なお、本センサの距離計測の標準偏差は1000mmにて約

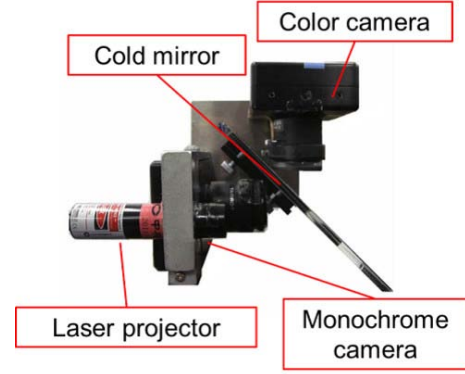


Fig. 2 RGB-D sensor

2mm, 2000mmにて約6mmとなっている。

4. センサの運動パラメータ推定

本節では、距離画像及び二次元画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式と最小二乗平面当てはめによる外れ値の除去方法について説明する。

4.1 距離画像を用いた運動パラメータ推定⁽⁵⁾ 図3に示すように、距離画像上のある計測方向を \mathbf{t} 、その計測距離を r とする。このとき、計測方向は既知であり、変化しないものと仮定する。また、計測点の単位法線ベクトルを \mathbf{n} 、距離の変化率を \dot{r} とする。このとき、フレーム間の計測点の並進速度ベクトルを \mathbf{v}_0 、センサ座標系を原点とした回転速度ベクトルを $\boldsymbol{\omega}$ とし、センサの運動は微小であると仮定すると、以下の式が成り立つ。

$$\mathbf{n}^T \mathbf{v}_0 + r(\mathbf{t} \times \mathbf{n})^T \boldsymbol{\omega} = \dot{r}(\mathbf{n}^T \mathbf{t}) \quad (1)$$

式(1)は並進速度ベクトル $\mathbf{v}_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ 、回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega} = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ の6成分を未知数とする式であり、運動・距離式は後述の仮定を満たす各計測点ごとに得られる。これらの式からなる連立方程式を解くことによりセンサの運動パラメータを推定することが出来る。

4.2 二次元画像を用いた運動パラメータ推定 センサと計測物体との相対的な運動速度ベクトルを $\mathbf{V} = (V_x, V_y, V_z)$ 、前フレームの距離画像上の三次元点 $\mathbf{P}_1(X, Y, Z)$ を二次元画像上に投影した点を $\mathbf{p}_1(u_1, v_1)$ とする。現フレームにおける三次元点 \mathbf{P}_1 の座標 \mathbf{P}_2 は $(X + V_x \Delta t, Y + V_y \Delta t, Z + V_z \Delta t)$ と表すことができる。現フレームにおける三次元点 \mathbf{P}_2 を二次元画像上に投影した点を $\mathbf{p}_2(u_2, v_2)$ とすると投影点のフレーム間のオプティカルフローは以下のように表すことが出来る。

$$\dot{u} = u_2 - u_1 = \frac{X + V_x \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_u - \frac{X}{Z} \alpha_u \quad (2)$$

$$\dot{v} = v_2 - v_1 = \frac{Y + V_y \Delta t}{Z + V_z \Delta t} \alpha_v - \frac{Y}{Z} \alpha_v \quad (3)$$

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

f : 焦点距離 δ_u, δ_v : x,y 軸方向の画素間隔

また、センサの運動が微小かつ画像上の輝度の変化が滑らかであると仮定すると、ある画素における輝度の時間的変化 I_t は x,y 軸方向の輝度勾配 I_u, I_v より以下のように表すことができる⁽⁸⁾。

$$I_u \dot{u} + I_v \dot{v} = -I_t \quad (4)$$

なお、センサと計測物体との相対的な運動速度ベクトル \mathbf{V} は以下のように表すことができる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{v}_0 + \boldsymbol{\omega} \times (r\mathbf{t}) \quad (5)$$

式 (2), (3), (5) を式 (4) へ代入し整理すると以下の式が成り立つ。

$$av_{0x} + bv_{0y} + cv_{0z} + d\omega_x + e\omega_y + g\omega_z = -I_t Z^2 \quad (6)$$

$$a = \alpha_u I_u Z$$

$$b = \alpha_v I_v Z$$

$$c = -\alpha_u I_u X - \alpha_v I_v Y + I_t Z$$

$$d = -\alpha_u I_u XY - \alpha_v I_v Z^2 - \alpha_v I_v Y^2 + I_t YZ$$

$$e = \alpha_u I_u Z^2 + \alpha_u I_u X^2 + \alpha_v I_v XY - I_t XZ$$

$$g = -\alpha_u I_u YZ + \alpha_v I_v XZ$$

式 (6) は式 (1) と同様に並進速度ベクトル \mathbf{v}_0 、回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を未知数とする式であり、仮定を満たす各計測点ごとに得られる。これらの連立方程式を解くことによりセンサの運動パラメータを求めることができる。

4.3 最小二乗平面当てはめによる外れ値除去

4.3.1 距離画像 4.1 節にて述べた通り、距離画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式を立てる際にいくつかの仮定を立てている。これらの仮定を以下にまとめる。

1. フレーム間の運動が微小である
2. 計測方向が既知であり、変化がない

3. ある計測方向での移動前・移動後の計測点は同一の滑らかな面上に存在する

本研究で用いるセンサは 200fps での高速な計測を可能としており、かつ距離計測にアクティブステレオ法を採用しているため、条件 1 及び 2 はすでに満たしている。しかし、条件 3 は全ての計測点で成り立つことはない。そのため、計測された点が局所的に滑らかな面上に存在するかを判定し、異なる点を外れ値として除去する必要がある。本手法では、図 4(a) のように計測点とその周囲の計測点の計 9 点を用いて最小二乗平面を作成し、平面と各点との誤差の平均値が閾値を超えた場合、その計測点を外れ値として除去する。図 4(b) のように計測点とその周囲の点が滑らかな同一の面上に存在し、最小二乗平面との誤差の平均値が閾値を下回る場合のみ、運動パラメータ推定に使用する。なお、運動パラメータ推定に用いる法線ベクトルはここで求められた最小二乗平面の法線ベクトルを用いる。

4.3.2 二次元画像 4.2 節にて、二次元画像に基づくセンサの運動パラメータの拘束式を立てる際に、いくつかの仮定を立てている。これらの仮定を以下にまとめる。

1. フレーム間の運動が微小である
2. 二次元画像上の輝度の変化が局所的に滑らか

4.3.1 節にて述べたように条件 1 はすでに満たしている。しかし、条件 2 は全ての画素で成り立つことはない。そのため、計測点を二次元画像上に投影した点とその周辺の画素の輝度が滑らかに変化しているかを判別する必要がある。そこで、計測点を二次元画像上に投影した点及びその周辺の画素を用いて最小二乗平面当てはめを行い、外れ値を除去する。二次元画像の画素に対して最小二乗平面当てはめを行う際には、画素の座標値及び輝度値の 3 つの値からなる 3 次元ベクトルを用いる。この 3 次元ベクトルを用いて、距離画像と同様に最小二乗平面に当てはめることにより、仮定に当てはまらない点を除去する。なお、本研究では、計測点の投影点とその周辺の画素は 11×11 の計 121 点を使用している。

5. 実験

5.1 三次元地図生成

5.1.1 実験環境 提案手法を用いて 2 種類のシーンにおいて三次元地図生成を行った。距離画像の取得は人間がセンサを持って移動させながら行い、得られた RGB-D 情報を用いてオフラインで地図生成を行った。本実験では 3 節にて述べたセンサを用いて計測を行う。また、二次元画像には 25×25 の平均化フィルタを使用することで画像の平滑化を行う。これによ

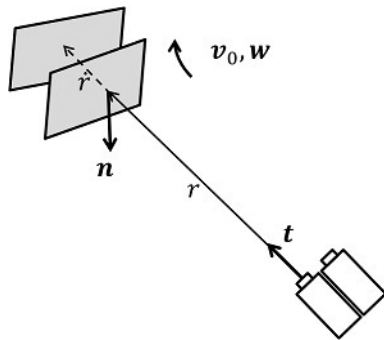


Fig. 3 Parameters of the range-motion equation

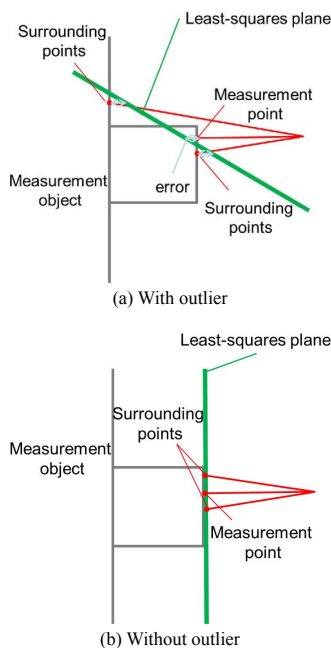


Fig. 4 Fitting a least-squares plane

り、エッジ部の輝度変化を滑らかに、かつノイズの影響を低減することが出来る。計測対象は図5に示す滑らかな面を十分に含むシーン、及び図6に示す滑らかな面が少ないシーンとした。計測枚数は図5のシーンが200枚、図6のシーンが120枚である。

5.1.2 実験結果 図5の対象を計測した結果の内、距離画像のみを使用した結果を図7に、距離画像・二次元画像共に使用した結果を図8に示す。このうち、図7(a)は地図の生成過程を、図7(c)及び図8(a)は完成した地図を、図7(d)及び図8(b)は完成した地図にテクスチャマッピングを施した結果を表している。同様に、図6の対象を計測した結果の内、距離画像のみを使用した結果を図9に、距離画像・二次元画像共に使用した結果を図10に示す。このうち、図9(a)及び図10(a)は完成した地図を、図9(b)及び図10(b)は完成した地図にテクスチャマッピングを施した結果を表している。

実験結果より、距離画像のみを使用した場合、滑らかな面を十分に含むシーンでは、大きな位置合わせ誤差もなく、地図生成が正確に行われているが、図6のような滑らかな面の少ないシーンでは、位置合わせが正しく行われず、地図生成に失敗していることが分かる。本手法で、運動パラメータの推定に用いる計測点は、計測点とその周囲の点が同一の滑らかな面に存在する必要があるが、小型な物体や形状が複雑な物体では計測点と周囲の点が同一の面に存在しない。そのため、運動パラメータの推定に有用な計測点が少なく、運動パラメータを推定するための拘束条件が十分に得られなかったことが、位置合わせが正しく行われなかった原因として挙げられる。一方、距離画像と二次元画像を共に使用した場合には、滑らかな面が少ないシーンにおいても大まかな位置合わせに成功している。しかし、図8(b)の円で囲まれた部分に注目すると、距離画像のみと比較して位置合わせ精度が低下していることが分かる。本センサの露光時間は5msと短く、画像に一定以上の明るさを持たせるにはゲインを上げる必要がある。そのため、大きなノイズが発生していることが、二次元画像を利用した際の地図生成精度の低下の原因として挙げられる。また、表1より、二次元画像を含めた場合、距離画像のみと比較して10倍近く処理時間が増加していることが分かる。これは、最小二乗平面作成にて参照する三次元座標が、距離画像では9点に対し、二次元画像では121点となるため計算負荷が高まるのが原因として考えられる。しかしながら、運動パラメータ推定にかかる処理時間は距離画像のみで1ms以内、二次元画像を含めた場合でも5ms以内と短く、十分にオンラインでの地図生成が可能であると考えられる。



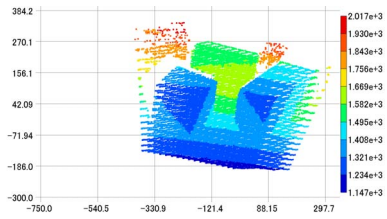
Fig. 5 The measurement scene containing enough smooth surface



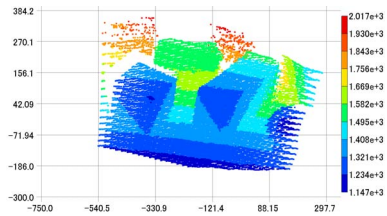
Fig. 6 The measurement scene containing few smooth surface

Table 1 Estimation time of the motion parameter (unit:ms)

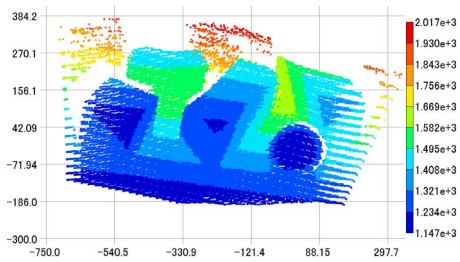
	Fig.5	Fig.6
Range image	0.56	0.62
Range and color image	4.66	5.00



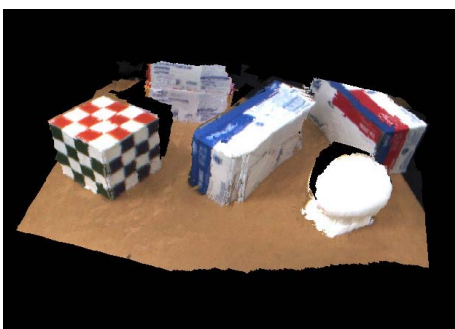
(a) 3D map : 100th frame



(b) 3D map : 150th frame

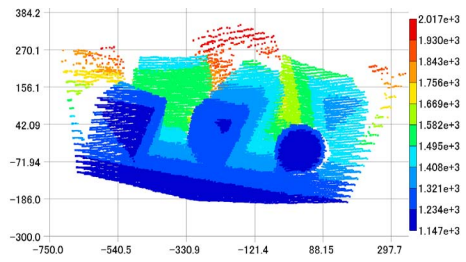


(c) 3D map : 200th frame

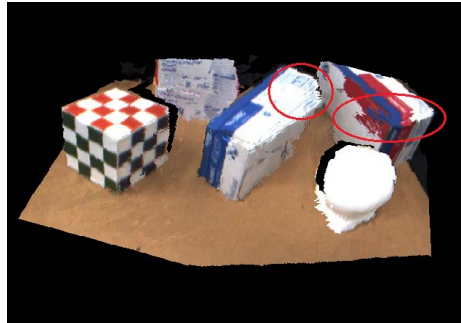


(d) 3D map with texture mapping

Fig. 7 Experimental results to construct 3D map for Fig.5 : range image only

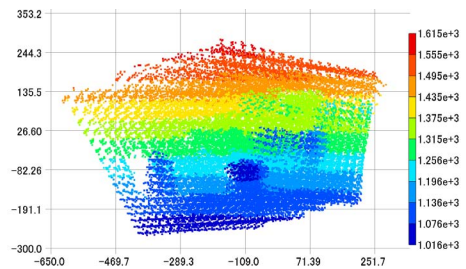


(a) 3D map : 200th frame



(b) 3D map with texture mapping

Fig. 8 Experimental result to construct 3D map for Fig.5 : range and color images



(a) 3D map : 120th frame

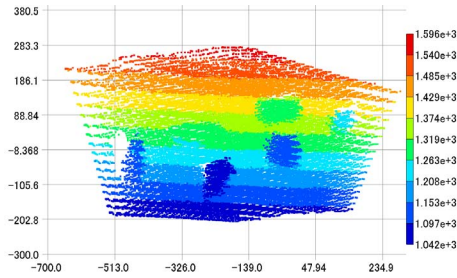


(b) 3D map with texture mapping

Fig. 9 Experimental result to construct 3D map for Fig.6 : range image only

参考文献

- (1) 加賀美聡: “ステレオカメラからのオンライン 3 次元 SLAM”, 日本ロボット学会誌, vol.26, no.4, pp.310-313, 2008.
- (2) 友納正裕: “エッジ点追跡に基づくステレオカメラを用いた三次元 SLAM”, 日本ロボット学会誌, vol.27, no.7, pp.759-767, 2009.
- (3) 内田裕己, 寺林賢司, 梅田和昇: “同軸系テクスチャ付距離画像センサの構築”, 第 30 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, I3-3, 2012.9.
- (4) 内田裕己, 寺林賢司, 梅田和昇: “RGB-D カメラを用いた三次元地図生成”, 動的画像処理実利用ワークショップ DIA2013 講演論文集, pp.315-318, 2013.3.
- (5) 梅田和昇, 新井民夫: “距離画像を用いた 3 次元運動の計測における運動計測性の評価”, 情報処理学会論文誌, vol.34, no.10, pp.2165-2173, 1993.10.
- (6) 山本正信ほか: “距離動画を用いた非剛体運動パラメータの直接的推定法”, 情報処理学会論文誌, vol.32, no.9, pp.1129-1141, 1991.9.
- (7) 野崎慎太, 増山岳人, 梅田和昇: “距離濃淡画像を用いた微小運動の直接推定による高速三次元地図生成”, 第 32 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1J2-03, 2014.9.
- (8) 梅田和昇, ギーゴダン, マークリュウ: “こう配拘束と距離濃淡画像を用いた距離画像とカラー画像のレジストレーション”, 電子情報通信学会論文誌 (D-II), vol.J88-D-II, no.8, pp.1469-1479, 2005.



(a) 3D map : 120th frame



(b) 3D map with texture mapping

Fig. 10 Experimental result to construct 3D map for Fig.6 : range and color images

6. 結論

距離画像と二次元画像に基づく直接推定法を用いた実環境の三次元地図生成手法を提案した。実験により、滑らかな面が複数存在する環境では正しくかつ高速に三次元地図生成が行えることを示した。また、滑らかな面が少ない環境においても、二次元画像を用いることにより地図生成が可能となることを示した。なお、本論文で行われた実験では 3 節で述べたセンサを用いて計測を行ったが、本手法は 4 節で述べた仮定を満たすセンサであれば地図生成可能である。

今後は、二次元画像を用いる際の誤差の原因を明らかにし、位置合わせの精度向上を目指す。また、3 節で述べたセンサとは異なるセンサを用いて地図生成を行い、使用するセンサの違いによる地図生成精度の変化を検証する予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 26330205 の助成を受けたものである。