

距離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

High-speed three-dimensional mapping by direct estimation of a small motion using range images

精密工学専攻 33号 野崎慎太
Shinta Nozaki

1. 序論

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三次元地図生成には、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の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であった。そこで、本研究では、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⁽⁵⁾⁽⁶⁾及び、カラー画像の輝度勾配とセンサの微小運動による輝度変化の関係を用いて、センサの運動パラメータを直接推定することにより、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高速三次元地図生成システムを構築することを目的とする。

2. 三次元地図生成の概要

Fig.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。

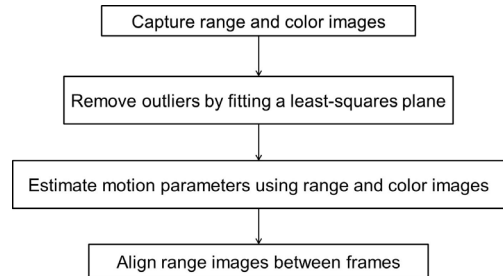


Fig.1 3D mapping method

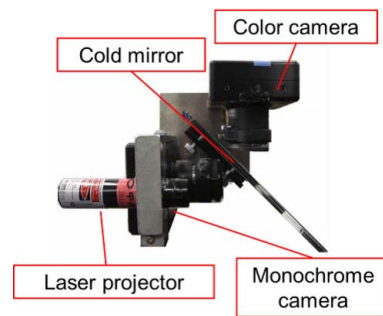


Fig.2 RGB-D sensor

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Fig.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。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278mm×278mm、距離2500mmで約772mm×772mm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)

Fig.3 に示すように、距離画像上のある計測方向を 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 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 v_0 、センサ座標系を原点とした回転速度ベクトルを ω 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。

$$n^T v_0 + r(t \times n)^T \omega = \dot{r}(n^T t) \quad (1)$$

式 (1) は並進速度ベクトル $v_0 = (v_{0x}, v_{0y}, v_{0z})$ 、回転速度ベクトル $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ 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 $V = (V_x, V_y, V_z)$ 、前フレームの距離画像上の三次元点 $P_1(X, Y, Z)$ を二次元画像上に投影した点を $p_1(u_1, v_1)$ とする。現フレームにおける三次元点 P_1 の座標 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 P_2 を二次元画像上に投影した点を $p_2(u_2, v_2)$ 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出来る (7)。

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

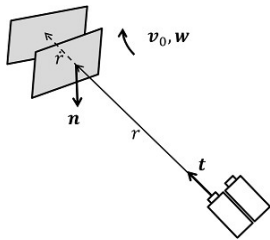


Fig.3 Parameters of the range-motion equation

$$V = v_0 + \omega \times (rt) \quad (5)$$

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。

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

$$a = \alpha_u I_u Z$$

$$b = \alpha_v I_v Z$$

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

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

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

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

式 (6) は式 (1) と同様に、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出来る。

4.3 最小二乗平面当てはめによる外れ値除去

距離画像及び二次元画像に基づく運動パラメータの拘束式を立てる際の仮定を以下にまとめる。

- 距離画像

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

- 二次元画像

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

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、フレーム間の微小運動及び計測方向に関する条件はすでに満たしている。しかし、距離画像における条件 3 や二次元画像における条件 2 は全ての計測点や画素で成り立つことはない。本研究では、こうした条件を満たさない点や画素の除去に最小二乗平面当てはめを用いる。距離画像においては、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。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。二次元画像においても距離画像と同様の手法により外れ値を除去する。最小二乗平面作成には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る。三次元点は画素の座標値及び輝度値の 3 つの値で表す。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

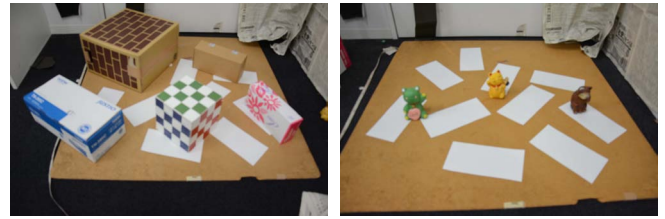
5.1.1 実験環境

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、地図生成はオフラインで行った。本実験では 3. 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している。平均化フィルタを使用することにより、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 Fig.4(a) に示す滑らかな面を十分に含むシーン、及び Fig.4(b) に示す滑らかな面が少ないシーンとした。本実験に使用する板にはテクスチャ特徴が乏しいため、それぞれのシーンにはエッジ情報となりえる白紙を配置している。計測枚数は Fig.4(a) のシーンが 315 枚、Fig.4(b) のシーンが 275 枚である。

5.1.2 実験結果

Fig.4(a) を計測した結果の内、距離画像のみの結果を Fig.5 に、距離画像・二次元画像併用の結果を Fig.6 に示す。このうち、Fig.5(a) 及び Fig.6(a) は完成した地図を、Fig.5(b) 及び Fig.6(b) はテクスチャマッピングを施した結果を表している。運動パラメータ推定の処理時間は、距離画像のみで 0.55ms、距離画像・二次元画像併用で 3.76ms であった。なお、チェッカーパターンを持つ箱の頂点のずれを計測した結果、距離画像のみでは約 12mm、距離画像・二次元画像併用では約 49mm であった。同様に、Fig.4(b) を計測した結果の内、距離画像のみの結果を Fig.7 に、距離画像・二次元画像併用の結果を Fig.8 に示す。このうち、Fig.7(a) 及び Fig.8(a) は完成した地図を、Fig.7(b) 及び Fig.8(b) はテクスチャマッピングを施した結果を表している。運動パラメータ推定の処理時間は、距離画像のみで 0.64ms、距離画像・二次元画像併用で 4.20ms であった。なお、中央の置物のずれを計測した結果、距離画像のみでは約 132mm、距離画像・二次元画像併用では約 15mm であった。

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、Fig.4(b) の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。小さ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、Fig.6(b) に注目すると、距離画像のみの Fig.5(b) と比較して位置合わせ精度が低下している。二次元画像の輝度値は、分解能が低い。また、本センサの露光時間は 5ms と短く、画像の明るさを保つためにゲインを上



(a) Enough smooth surfaces

(b) Few smooth surfaces

Fig.4 The measurement scene

げており、強くノイズが発生している。これらの要因が二次元画像を用いた際の地図生成精度低下の原因と考えられる。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。

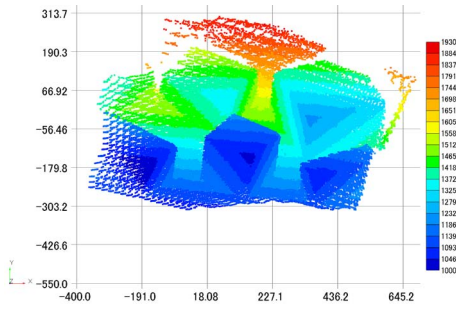
6. 結論

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、二次元画像の使用により地図生成が可能となることを示した。

今後は、RANSAC 等のロバスト推定手法を用いることによる外れ値の除去により地図生成精度の向上を目指す。また、直接推定法による大まかな位置合わせを利用し、後処理による高精度な地図生成手法を試みる予定である。

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 (2008) pp.310-313.
- (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 (2009) pp.759-767.
- (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 (2012) I3-3.
- (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 (2013) pp.315-318.
- (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 (1993) pp.2165-2173.
- (6) 山本正信ほか: “距離動画像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 (1991) pp.1129-1141.
- (7) 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-I I, no.8 (2005) pp.1469-1479.

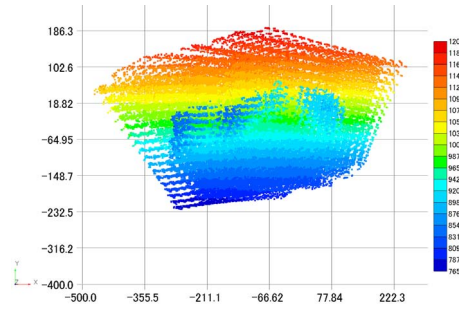


(a) Constructed 3D map : 200th frame



(b) Constructed 3D map with texture mapping

Fig.5 Experimental results to construct 3D map for Fig.4(a) : range image only

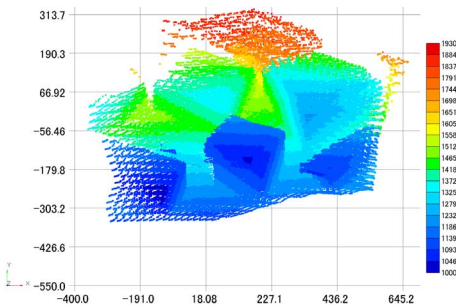


(a) Constructed 3D map : 120th frame

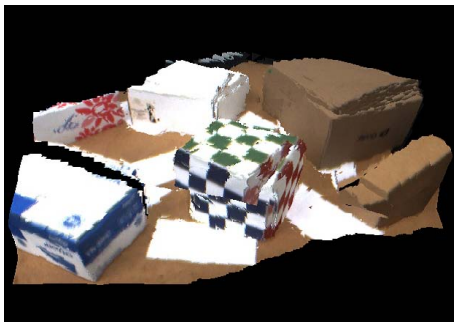


(b) Constructed 3D map with texture mapping

Fig.7 Experimental result to construct 3D map for Fig.4(b) : range image only

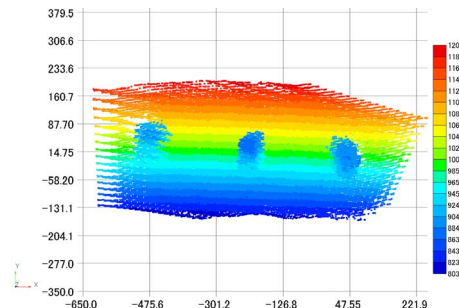


(a) Constructed 3D map : 200th frame



(b) Constructed 3D map with texture mapping

Fig.6 Experimental result to construct 3D map for Fig.4(a) : range and color images



(a) Constructed 3D map : 120th frame



(b) Constructed 3D map with texture mapping

Fig.8 Experimental result to construct 3D map for Fig.4(b) : range and color images