

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

○野崎慎太(中央大) 増山岳人(中央大) 梅田和昇(中央大)

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通常用いる。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センサの構築 [3] 及び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。そこで本研究では、直接法と呼ばれる、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、対応点を探ることなく距離画像の位置合わせを行い、大幅に処理時間を短縮する。

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節で直接法に関しての詳しい説明を行う。また、5節では本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と今後の展望を述べる。

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、得られた三次元情報を基に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立て、センサの運動パラメータを推定する。この式を今後、参考文献 [5] に従って、運動・距離式と呼ぶ。

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、三次元地図を生成していく。最小二乗平面当てはめによる外れ

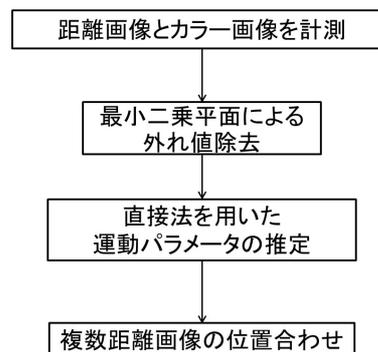


図1 三次元地図生成手法

値除去及び運動・距離式の説明は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。距離画像の計測範囲は900mm~2500mmである。屋外計測も可能である。

4. センサの運動パラメータ推定

本節では、本手法で距離画像の位置合わせに用いている運動・距離式とその適用条件及び最小二乗平面当てはめによる適用条件を満たさない外れ値の除去方法について説明する。

4.1 運動・距離式 [5]

図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

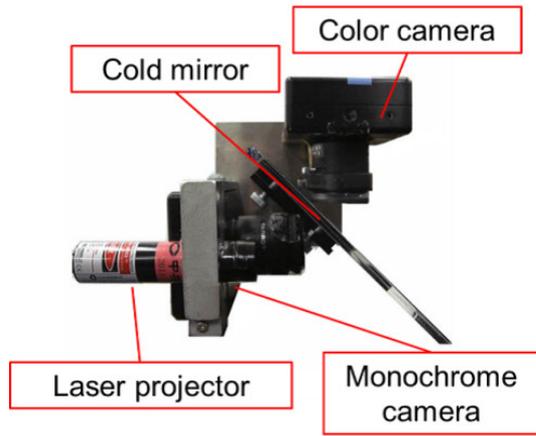


図 2 RGB-D センサ

成り立つ。

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

式(1)は並進速度ベクトル \mathbf{v}_0 、回転速度ベクトル $\boldsymbol{\omega}$ を未知数とする式であり、この式を運動・距離式と呼ぶ。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。これらの式より以下のような連立方程式が成り立つ。

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{\mathbf{n}_1^T}{\mathbf{n}_1^T \cdot \mathbf{t}_1} & \frac{r_1 \cdot (\mathbf{t}_1 \times \mathbf{n}_1)^T}{\mathbf{n}_1^T \cdot \mathbf{t}_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\mathbf{n}_m^T}{\mathbf{n}_m^T \cdot \mathbf{t}_m} & \frac{r_m \cdot (\mathbf{t}_m \times \mathbf{n}_m)^T}{\mathbf{n}_m^T \cdot \mathbf{t}_m} \end{bmatrix} \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} \dot{r}_1 \\ \vdots \\ \dot{r}_m \end{bmatrix} \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_0^T \\ \boldsymbol{\omega}^T \end{bmatrix}$$

擬似逆行列を用いることで運動パラメータの最尤推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ を以下のように求めることができる。

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{y} \quad (3)$$

式(3)により求められた運動パラメータを用いて、フレーム間の距離画像同士の位置合わせを行う。

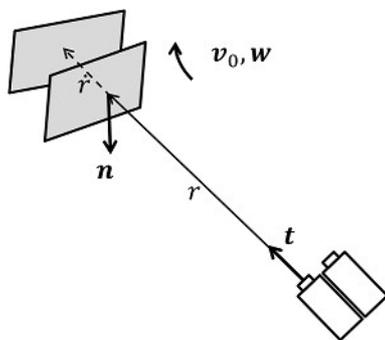


図 3 運動・距離式のパラメータ

4.2 最小二乗平面当てはめによる外れ値除去

直接法ではいくつかの条件を仮定することで4.1節のようにセンサの運動パラメータを算出している。これらの仮定を以下にまとめる。

- ・フレーム間の運動が微小である
- ・計測方向が既知であり、変化がない
- ・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

本研究にて用いるセンサは 200fps での高速度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 のように計測点とその周囲の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 5 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。

5. 実験

5.1 精度検証

5.1.1 実験環境

提案手法を用いて三次元地図の精度検証を行った。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。計測対象は各辺の長さが既知である立方体の箱(図 6)とした。図 7 に示す立方体の 2 辺 L1, L2 に対応する三次元地図上の辺の長さを測定し、実物体の辺の長さと比較することにより三次元地図生成の精度を検証する。計測枚数は 230 枚である。

5.1.2 実験結果

図 6 の対象を計測した結果を図 8 に示す。三次元地図上の立方体と実物体の各辺の長さを表 1 に示す。

実験結果から、作成された三次元地図上の立方体の辺 L1, L2 の誤差は 6mm 以内に抑えられており、位置合わせ誤差は低く抑えられていることが分かる。このことから、滑らかな面を十分に含む環境では、本手法により正確な三次元地図を作成することが出来ると考えられる。

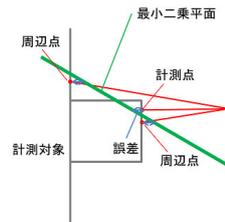


図 4 最小二乗平面 (外れ値)

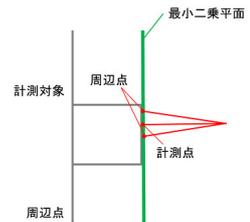


図 5 最小二乗平面



図 6 計測対象

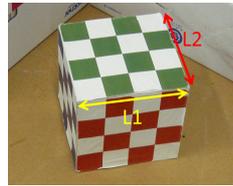


図 7 長さ測定箇所

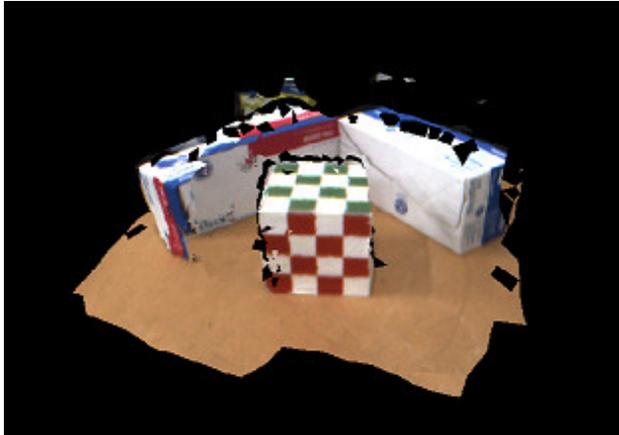


図 8 実験結果

表 1 長さ比較

	L1 [mm]	L2 [mm]
実物体	161	161
三次元地図	155	157

5.2 三次元地図生成

5.2.1 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。計測対象は図 9 に示す滑らかな平面を含むシーン、及び図 10 に示す小さな物体を含むシーンとした。小さな物体は幅が 50~60mm の物を使用した。これは小型物体を計測した際の距離における計測点間隔の約 3 倍程度である。計測枚数は図 9 のシーンが 340 枚、図 10 のシーンが 170 枚である。

5.2.2 実験結果

図 9 の対象を計測した結果を図 11~14 に示す。このうち、図 11, 12 は地図の生成過程を、図 13 は完成した地図を、図 14 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。図 10 の対象を計測した結果を図 15~18 に示す。このうち、図 15, 16 は地図の生成過程を、図 17 は完成した地図を、図 18 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。また、運動パラメータの推定を行う際の平均処理時間を表 2 に示す。

実験結果から、滑らかな平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えることが分かる。しかし、図 10 のような小さな物体のみのシーンでは、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。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、小型な対象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。また、表 2 より、運動パラメータ推定にかかる処理時間は 0.8ms 以内であることが分かる。この処理時間は本センサの計測間隔 5ms と比較し十分に短く、オンラインでの地図生成も可能であると考えられる。

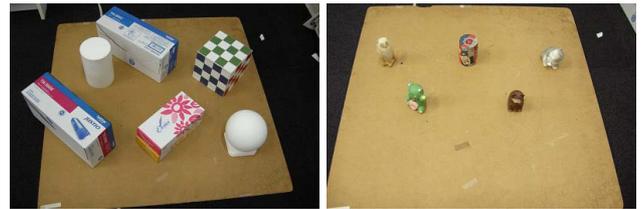


図 9 計測対象 (滑らかな面) 図 10 計測対象 (小さな物体)

表 2 運動パラメータ推定時間

	計測対象 (図 9)	計測対象 (図 10)
平均処理時間 [ms]	0.55	0.76

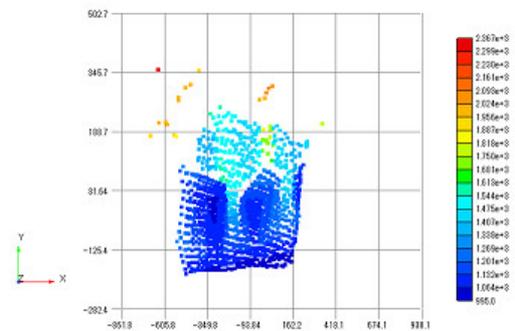


図 11 地図生成過程 (統合枚数: 120 枚)

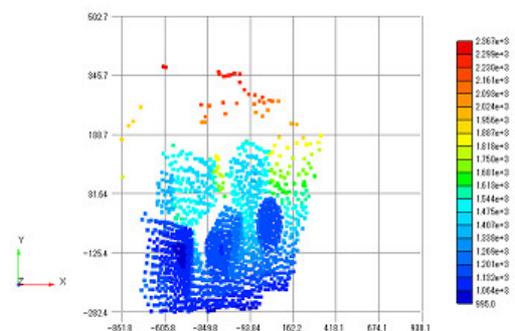


図 12 地図生成過程 (統合枚数: 220 枚)

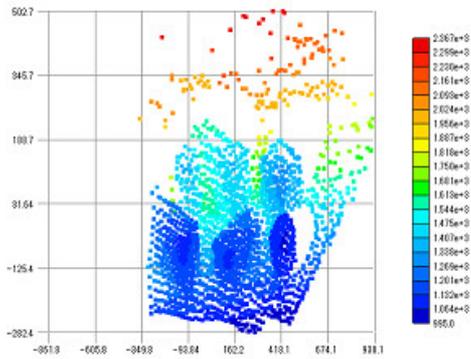


図 13 実験結果

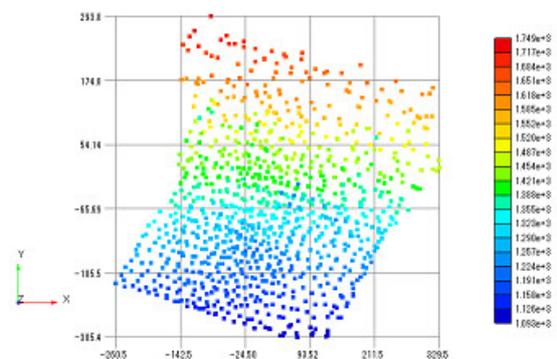


図 17 実験結果



図 14 実験結果 (テクスチャマッピング)

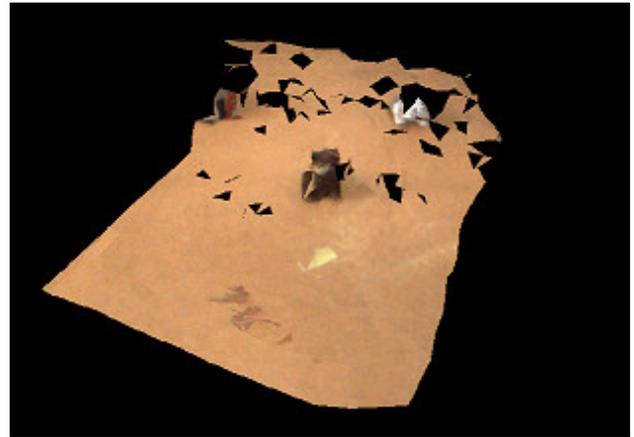


図 18 実験結果 (テクスチャマッピング)

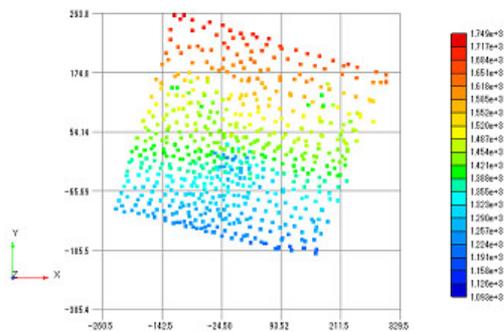


図 15 地図生成過程 (統合枚数: 60 枚)

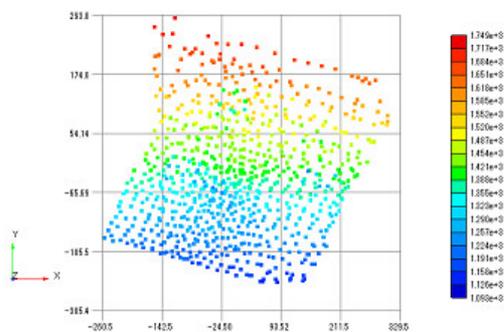


図 16 地図生成過程 (統合枚数: 120 枚)

6. 結論と今後の展望

直接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、複数の滑らかな平面が計測できる

という条件では、本手法により高速で地図生成を行えることを示した。

今後は、色情報も用いることで距離画像のみでは十分な拘束条件を得られない環境においても地図生成可能な手法を構築する予定である。

謝辞

本研究は科研費(26330205)の助成を受けたものである。

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, 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, pp.1129-1141, 1991.9.