

高速 RGB-D センサを用いた三次元地図生成

3D mapping using high-speed RGB-D sensor

精密工学専攻 15号 内田 裕己
Yuki Uchida

1. 序論

近年の距離計測センサの性能向上により、三次元計測が手軽に行えるようになってきたため、三次元に関する研究が増えてきている。三次元計測を利用した研究としては、ロボットの物体認識、モデリング、人流計測などがある。本稿では三次元地図生成に焦点を当てる。従来、三次元地図を生成する手法として主に色の特徴が必要なもの⁽¹⁾と三次元的な特徴を必要とするもの⁽²⁾があった。これらはその適用条件を満たさない場合には当然ながら地図を生成できず汎用的ではなかった。

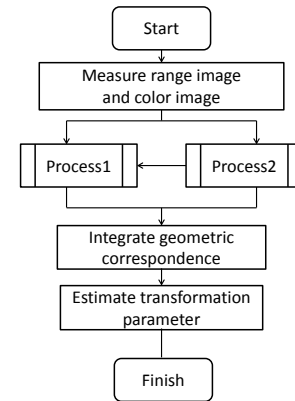
そこで本研究では色と三次元の両特徴を考慮することで汎用的な地図生成を行う。色の特徴を使った手法は KLT によるトラッキングを利用して対応点を決定している⁽³⁾。三次元の特徴を使った手法は ICP (Iterative Closest Point) アルゴリズムを発展させたものを使用しているが通常の ICP アルゴリズムは処理時間がかかるため北明らが提案している階層的探索⁽⁴⁾を取り入れることにより処理の高速化を図る。ただし、北明らの研究は、各階層での探索において限定した選択範囲を与えることで高速化を図っているが、選択範囲内に対応点が含まれていない場合は逆に処理時間が長くなってしまいう問題点がある。この問題に対しては選択範囲を慎重に選ばなければならないとしており具体的な対策はなされていない。本研究ではカラー画像のトラッキング結果を利用することでこの曖昧性を解消する。

2. 三次元地図生成の概要

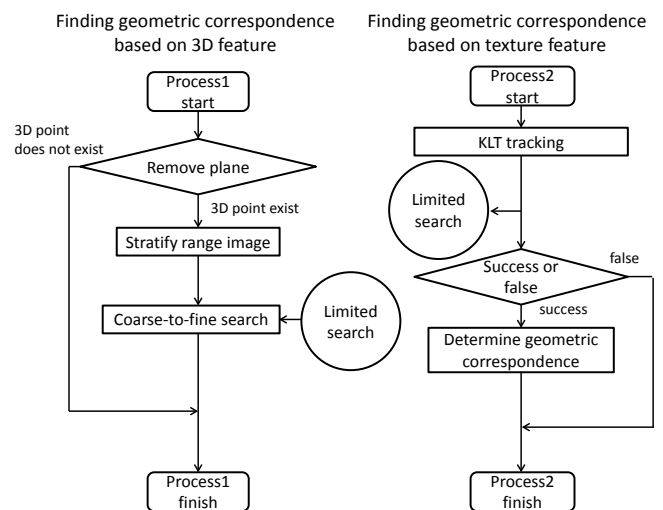
Fig.1 に提案手法のフローチャートを示す。距離画像とカラー画像に基づいて別々に三次元の対応点を求める。距離画像を用いた対応点決定では距離画像を平均化し階層構造を作り階層的探索を行う。さらにカラー画像を用いた対応点決定における時系列のトラッキング結果から階層的探索の最初の階層における探索範囲を限定する。Fig.1 (a) の処理 2 から処理 1 への矢印がこの範囲限定を示している。トラッキングが失敗する場合は全探索となる。

3. RGB-D カメラ

提案手法で使用する RGB-D カメラについて説明する。Fig.2 (a) に本センサの仕組みを示し、Fig.2 (b) に構築したセンサを示す。本センサは同軸系でカラー画像と距離画像を取得可能なものである⁽⁵⁾。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。距離画像の計測範囲は 900mm~2000mm でありこの範囲の精度は Fig.3 に示すように距離の二乗に比例し、距離 2000mm で標



(a) The flow of the 3D mapping

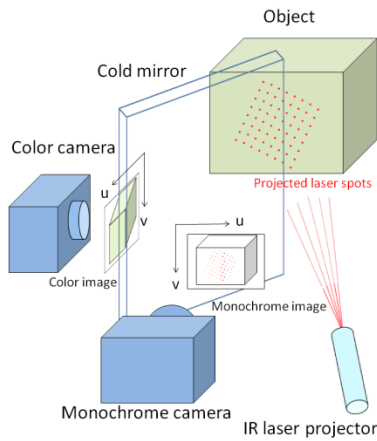


(b) Process1

(c) Process2

Fig.1 3D mapping method

準偏差 6mm 以下である。屋外計測も可能である。このセンサは 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 CCD モノクロカメラにより距離画像を取得し、CCD カラーカメラによりカラー画像を取得する。距離画像とカラー画像を同軸で取得するためにコールドミラーを利用している。コールドミラーは赤外光を透過し、可視光を反射する特性がある。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 光はミラーを透過しモノクロカメラで観測され、可視光はミラーに反射しカラーカメラで観測されるので 2 つのカメラは同じシーンを観測することができる。このセンサで取得できるデータの計測例を Fig.4 に示す。



(a) The structure of the coaxial sensor

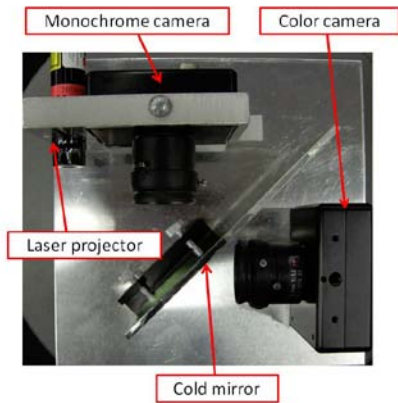


Fig.2 (b) The coaxial RGB-D sensor

4. 色の特徴に基づく対応点決定

色の特徴に基づく対応点決定は石山らの手法を応用している⁽⁶⁾。カラー画像に対して KLT を用いた時系列のコーナ点トラッキングを行い二次元の対応点を求める。次にこの二次元の対応点から三次元の対応点を求める。この際、得られているカラー画像と距離画像の対応関係はすでに求められており、カラー画像の画像座標を指定するとその座標の三次元座標も求められる。このようにして得られた三次元座標をカラー画像を用いた三次元の対応点とする。ただし距離画像の解像度はカラー画像よりも低い。このため解像度の差を埋めるために線形の補間処理を行う。

5. 三次元の特徴に基づく対応点決定

5.1 距離画像の階層化

階層的探索は画像処理でよく用いられる高速化手法である⁽⁷⁾。元データから 1/2, 1/4, 1/8 にダウンサンプリングしたデータを作成し階層構造を作る。次に最も解像度の低い階層のデータから探索を開始し、その結果を元にして解像度の高い階層での範囲を決定し探索を行う。ダウンサンプリングする手法としては単純に平均化を用いている。

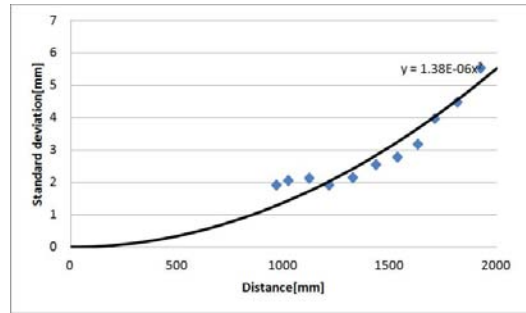
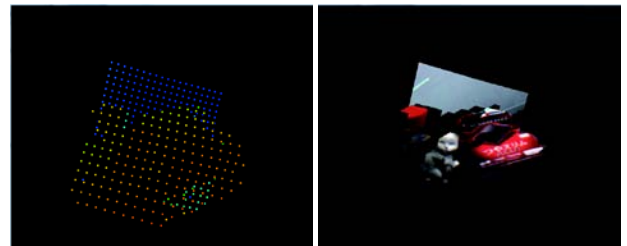


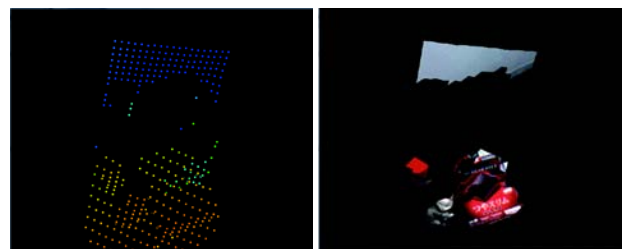
Fig.3 The accuracy of the sensor



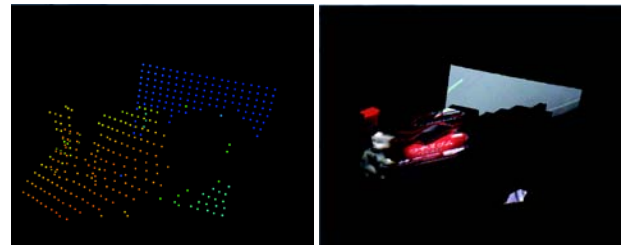
(a) The measurement scene



(b) At front



(c) At bird's - eye view



(d) At side

Fig.4 Measurement example

(left: Range image, Right:Textured range image)

5.2 探索範囲選択

カラー画像のトラッキング結果から推定したフレーム間の移動量により階層的探索において最初の探索での範囲を動的に変化させることで無駄な処理を省く。移動量が大きいほど全探索に近づき、微小であるほど1点に近づく。この指定範囲探索によって従来の全探索に比べて大幅に高速化を行うことができる。また次章で説明する Point to Plane を用いた処理の際も階層的探索により得られた対応点情報を用いて探索範囲の限定を行っている。

6. 複数距離画像の位置合わせ

カラー画像と距離画像から得られた対応点を合わせたものを最終的な対応点とし全対応点間の距離の誤差が最小となるように変換パラメータを決定する。

変換パラメータは Horn らの固有ベクトルを用いた手法を使って求める⁽⁸⁾。この手法では四元数によって回転成分の解が得られる回転行列に変換する。並進成分は得られた回転行列から求められる。

誤対応の対策として色の特徴に基づく対応点の決定ではトラッキングの精度が低いものは除外する。また、三次元の特徴に基づく対応点の決定でも局所曲率を用いて平面に近いものは除外する。このようにして二つの対応点決定において特徴の少ないほうが重みが自動的に小さくなる。得られたパラメータを用いて位置合わせを行った後にさらに Point to Plane を用いてより細かな位置合わせを行う。この処理により位置合わせ精度がさらに向上する。

7. 実験

提案手法を用いて3種類のシーンにおいて三次元地図生成を行った。計測速度は200Hzとし人間がセンサを持って移動させながら計測を行い、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 Fig.5 に示すように色と三次元の特徴があるシーン、色の特徴だけがあるシーン、三次元の特徴だけがあるシーンとした。処理に用いた CPU は Core2Extreme3.00[GHz]、メモリは 4[GB]である。プログラムは C++ で記述している。また Fig.1 (a) の処理 1 と処理 2 の段階の記述は並列処理化していないためこの実験では処理 2 の後に処理 1 を行う仕様となっている。実験結果を Fig.6 に示す。8 つの図のうち上 6 つは地図が成長する過程を示しており、残り 2 つは 6 つ目の結果を側面の視点から見たものである。

両特徴ありの地図は 189 枚のデータを使用し構築した。その際の処理時間は 1 フレーム 200~500[ms]であった。また位置合わせ誤差は最大約 7[cm]であった。色の特徴のみの地図は 207 枚のデータを使用し、処理時間は 100~300[ms]、位置合わせ誤差は最大約 6[cm]であった。三次元特徴のみの地図は 114 個のデータを使用し処理時間は 400~800[ms]、位置合わせ誤差は最大約 4[cm]であった。

結果からテクスチャか三次元の特徴のみのシーンであっても地図生成が行われていることがわかる。また 3 種類の実

験で処理時間の最大値が大きく異なっている。この理由としては平面除去を行った後に距離点が残っていないこととカラー画像のトラッキングの失敗が挙げられる。色の特徴のみのシーンでは平面除去を行うとほとんどの点が消滅し Fig.1 (b) に示すように以降の処理が行われないので処理時間が結果的に短くなる。三次元的な特徴のみのシーンはカラー画像のトラッキングが失敗し Fig.1 (b) における探索範囲選択が利用できない。階層的探索で全探索を行うので処理時間が大きくなったと考えられる。

8. 結論と今後の展望

距離画像とカラー画像を用いた実環境の三次元地図生成手法を示した。この手法は従来の三次元と色どちらかの特徴に着目した手法に比べて汎用性が高い。

今後は処理時間の短縮、ロバスト性の向上などを行っていく予定である。時間短縮に関しては処理のマルチスレッド化、GPU 処理の導入などが挙げられる。ロバスト性の向上に関してはカラー画像の特徴点追跡と距離画像のダウンサンプリング処理に改善の余地がある。本手法では特徴点追跡に KLT を用いているが照明環境が激しく変化する屋外やセンサの計測スピードが遅くフレーム間の移動量が多い場合は SIFT 特徴や SURF を用いるほうが精度が向上する。ただし SIFT は計算コストが大きいためなんらかの高速化を行う必要がある。また KLT や SIFT のようなコーナー点を用いる手法ではなくエッジ点を用いることでロバスト性が向上する可能性がある。また本手法ではダウンサンプリングのために単純な平均化を用いているが別の手法に変更する必要がある。これは特徴的な三次元的エッジ部分を有効に活用できていないためである。そのまま平均化してしまうと特徴を弱めてしまう。北明らは単純な平均化ではなくウェーブレット変換を用いることで特徴を弱めることなくダウンサンプリングを行えるとしている⁽⁴⁾。平均化手法の見直しが必要である。



(a) With both features

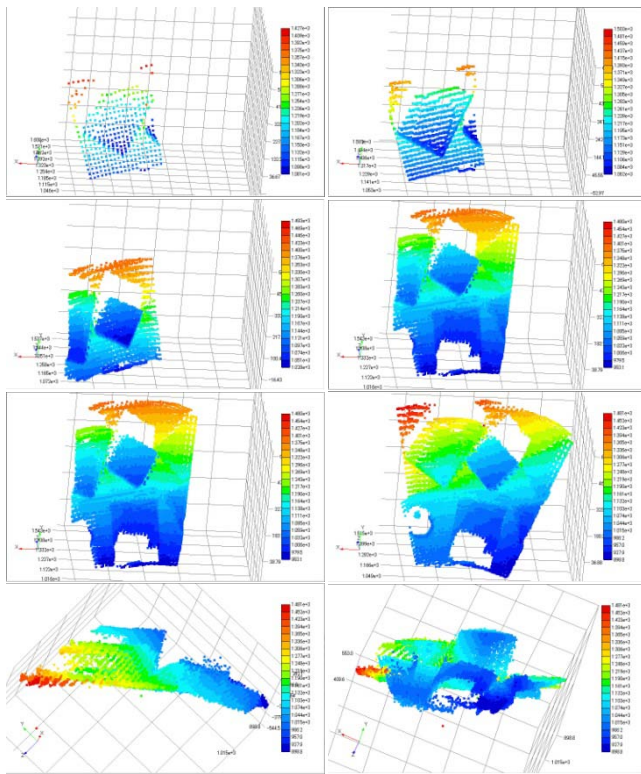


(b) With only a texture feature

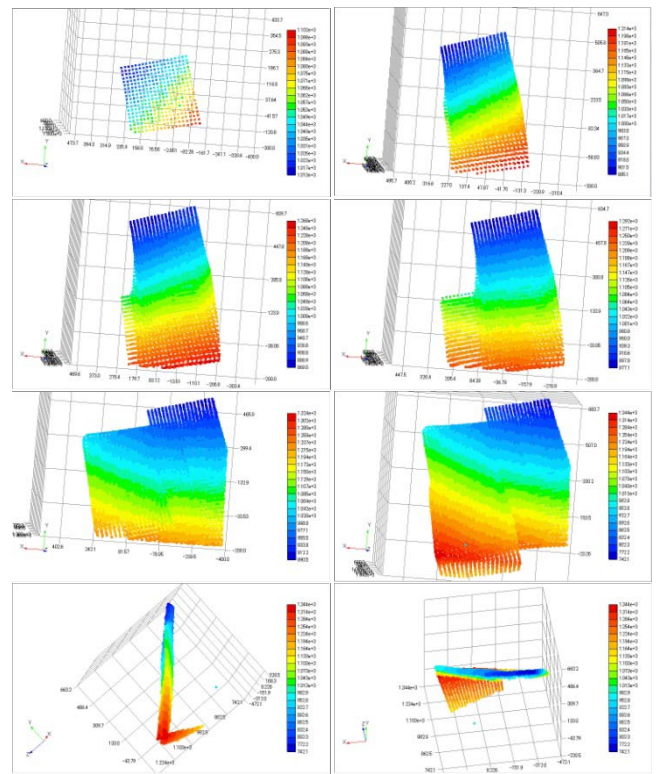


(c) With only a 3D feature

Fig.5 A measurement scene



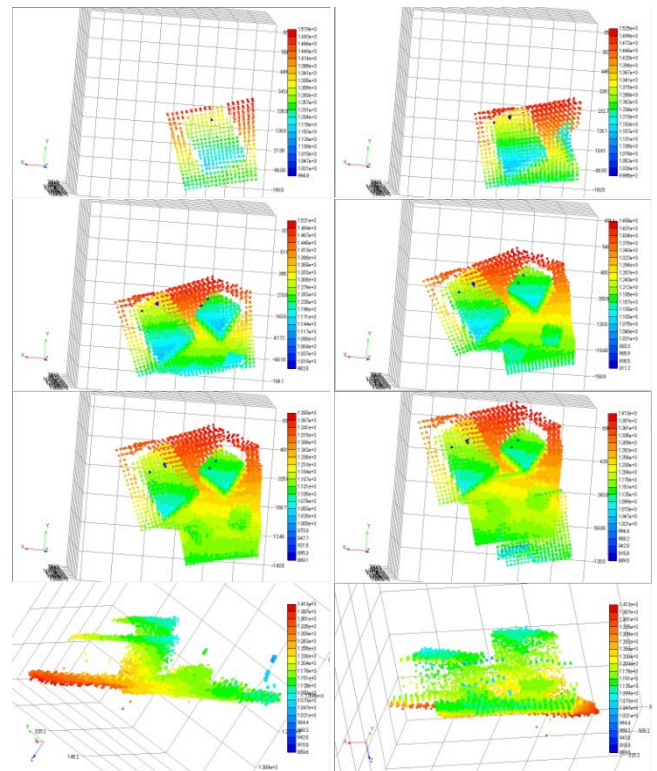
(a) The 3D map of the scene with both features



(b) The 3D map of the scene with only a texture feature

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”, ロボット学会誌, vol.26, no.4, pp.310-313, 2008.
- (2) P.J. Besl and N.D. McKay, “A method for registration of 3-d shapes,” *IEEE Trans. Patt. Anal. Machine Intell.*, 14(2):239–256, Feb 1992.
- (3) 内田裕己, 寺林賢司, 梅田和昇:“テクスチャ付距離画像計測システムを用いた実環境の 3D マッピングの高速化”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2011 講演論文集, 1P1-D07, 2011.5.
- (4) 北明靖雄, 金子俊一, 橋本学, 奥田晴久:“非重複 3 次元距離データのロバスト照合の高速・高精度化”, SSI2004, pp.29-34, 2004.
- (5) 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.
- (6) 石山英俊, 寺林賢司, 内田裕己, 梅田和昇:“100Hz テクスチャ付き距離画像計測システムの構築と三次元マッピングへの応用”, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.1, pp.62-71, 2012.1.
- (7) 奥富正敏:“デジタル画像処理”, CG-ARTS 協会, pp.206-207, 2007
- (8) B. Horn, “Closed-Form Solutions of Absolute Orientations Using Unit Quaternions,” *J. Opt. Soc. America, A* vol. 4, no. 4, pp.629-642, 1987.



(c) 3D map of the scene with only a 3D feature

Fig.6 The experimental result

(Upper six of eight figures show the process of the map growth and the other two shows the figure watched at side view)