

屋内環境 SLAM のための点群グループ化による ICP 性能向上

○郭 承澈 (東京大学), 池 勇勳 (東京大学), 山下 淳 (東京大学), 浅間 一 (東京大学)

Performance Improvement of ICP by Grouping Point Cloud for Indoor SLAM

○Seungchul KWAK (The University of Tokyo), Yonghoon JI (The University of Tokyo),
Atsushi YAMASHITA (The University of Tokyo), Hajime ASAMA (The University of Tokyo)

Abstract: In this paper we propose a novel iterative closest point (ICP) method through grouping line features for simultaneous localization and mapping (SLAM) in indoor environments. The use of grouped line features improves the performance of ICP, especially in indoor environments. To accomplish this, we propose three techniques: 1) extraction of line features with RGB image, 2) a scheme on grouping line features with respect to its gradient, 3) matching each group by using point cloud. In this way, we acquired outstanding results in improving ICP accuracy and execution time.

1. 序論

Iterative closest point (ICP) は3次元形状モデルの間の位置合わせのような幾何学的アライメントなどによく使われる技術である。ICPは自律走行ロボットの自己位置推定及びsimultaneous localization and mapping (SLAM) などの分野においても多く利用されており, その精度の向上及び実行時間の短縮は非常に重要な意味を持つ[1]。ICPの性能の改善のために, 重要性の低い点の情報を除去し, 使用する点群を選別することやマッチングの性能を高めることなど, 様々なアルゴリズムが提案されている[2]。Chetverikovらが提案したTrICPでは, least trimmed squares (LTS) と呼ばれる手法を用い, マッチングに使用する点の数を減らすことで実行時間を短縮した[3]。しかし, この手法では精度が保たれない問題点がある。また, ZinberらはPicky ICP と呼ばれる手法を提案し, ICPの精度は向上したが, 実行時間の短縮には問題点が残っている[4]。

そこで, 本研究ではICPの精度を保ったまま, 実行時間を短縮する手法を提案する。ICPの精度の向上と実行時間の短縮を両立させるにあたって, RGB-Dセンサから得られた画像より直線を抽出し, それを構成している点群をグループ化する方法をとる。RGB-DセンサからはFig. 1(a)とFig. 1(b)に示すように, 環境に対するRGB画像及び距離画像が得られ, これら进行处理することでFig. 1(c)に示すような3次元点群データの取得が可能である。

人工物の構造は直線で構成されていることが多いため, 屋内環境においてSLAMを行う場合, 本研究の提案手法は非常に役に立つと考えられる。したがって, 提案したICPアルゴリズムを屋内環境におけるSLAMに適用することが可能である。

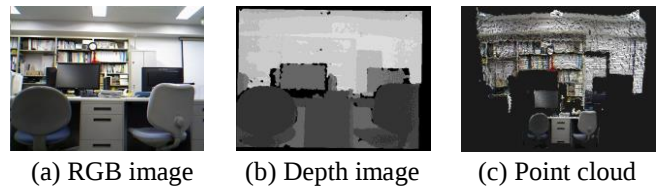


Fig. 1 Data from RGB-D sensor.

本論文の構成は, 以下の通りである。まず, 第2章で点群をグループ化する手法について述べる。第3章では本研究で提案するICPの性能を評価するための実験結果について考察を行い, その優位性について議論を行う。そして, 第4章では結論及び今後の展望について述べる。

2. 点群のグループ化による ICP

本研究では, 以下のステップにより点群のグループ化を行い, ICP に使用する点の数を減らすと共に精度を向上する手法を提案する。まず, 原画像より直線情報を抽出し, 抽出した直線情報に基づいて点群データをグループ化する。次に, グループ化によって対応付けられた点群同士でマッチングを行う。

2.1 画像より直線抽出

この節では, RGB-D センサから得られた RGB 画像より直線を抽出するプロセスについて述べる。

直線を抽出する方法としては, 多く利用されている Canny エッジ抽出法及び Hough 変換法を使用する[5][6]。まず, RGB 画像に Canny エッジ抽出法を適用して Fig. 2(a)に示すような 2 値画像を得る。そして, 得られた 2 値画像に Hough 変換法を適用して Fig. 2(b)に示す

ように直線を抽出する。

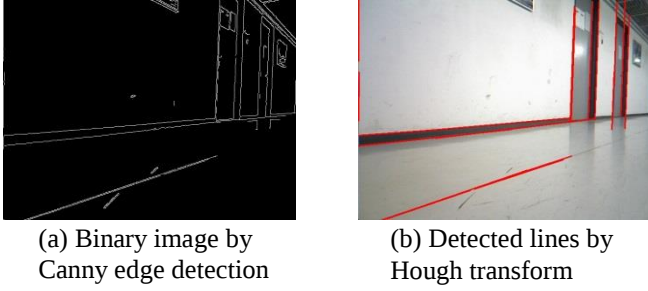


Fig. 2 Extraction of lines for proposed ICP.

2.2 抽出した直線による点群のグループ化

この節では、画像中で得られた直線を3次元空間中の点群に変換する際のプロセスについて説明する。

抽出した直線を構成している各画素に対して、その直線の傾きの情報を点に追加する。Fig. 3(a)に示すように、抽出した直線は画像中においてある角度で傾いている。抽出した直線が、画像中の水平軸を基準として傾いている角度をそれぞれの直線に対して算出する。算出にあたっては、直線の両端点の座標情報を用いる。直線を構成している各画素に対して、それらを点群に変換するとき、上記の傾き角度を追加する。すなわち、角度の情報を追加することによって、画像中において (u, v) 情報を持つ各画素は、 (x, y, z, θ) 情報を持つ点となる。ここで、 u, v は画像中における水平軸座標、垂直軸座標であり、 x, y, z は3次元空間中における座標である。また、 θ は抽出した直線が画像中の水平軸を基準として傾いている角度である。

直線の傾き情報が追加された点群をグループ化することに関しては、Fig. 3(b)に示すように同じ直線上に存在する点群を1つのグループとする。したがって、抽出された直線の数だけのグループが生成され、各グループ内の点は同じ直線を構成する。

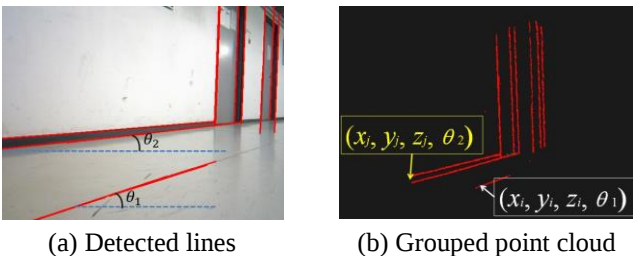


Fig. 3 Grouping of point cloud from detected lines.

2.3 対応するグループ同士での点群マッチング

この節では、生成された3次元空間中の点群グループを用いてマッチングするプロセスについて述べる。

ICPを行う際には、点群のグループ化の結果に基づく。1つ目のフレームに対して、抽出された直線の数だけのグループが生成される。2つ目のフレームに対しても同様であり、それぞれのフレームにおいてお互いに対応するグループが存在する。例えば、壁と床の接するところにより抽出された直線は両方のフレームに存在しており、このように同じ実物から生成されたグループを対応するグループと定義する。ICPを行う際には、対応するグループ同士でマッチングを行う。すなわち、1つ目のフレームにおいて傾き情報 θ_a を持つ点のグループ $\mathbf{x} = [x_i, y_i, z_i, \theta_a]^T$ ($i = 1, 2, \dots, N$) と2つ目のフレームにおいて傾き情報 θ_b' を持つ点のグループ $\mathbf{x}' = [x'_j, y'_j, z'_j, \theta_b']^T$ ($j = 1, 2, \dots, M$) に対して、点の間の対応関係を探索する際、次の式(1)と式(2)の条件を満たすと対応が行われる。ここで、 N は点のグループ $\mathbf{x}$ を構成する点の数であり、 M は点のグループ $\mathbf{x}'$ を構成する点の数である。

$$|\theta_a - \theta_b'| < \tau \quad (1)$$

$$\sqrt{(x_i - x'_j)^2 + (y_i - y'_j)^2 + (z_i - z'_j)^2} < \rho \quad (2)$$

ここで、 τ は2つのフレームにおいてそれぞれの点群が持っている傾きの角度の差を意味する閾値であり、本研究では 0.2 deg と設定した。また、 ρ は2つのフレームにおける点群の間の距離を意味する閾値であり、本研究では 20 と設定した。その結果、余計なマッチングが避けられ、ICPの実行時間が短縮できる。

3. 実験

3.1 実験内容

少し姿勢を変えたRGB-Dセンサから取得した2つのフレームを用い、本研究で提案したICPを行う。また、本研究で提案したICPの性能を評価するために、すべての点群データよりICPを行った結果及び、グループ化せずに直線上の点群を用いた場合のICP結果を述べ、比較を行う。本研究で使用するRGB-D画像の画素数は $307,200$ (640×480) 個である。

3.2 実験の結果と考察

上述の実験に対する結果及び評価をTable 1に示す。ここで点群の数は、2つのフレームにおける点群の総数とする。また、マッチングエラーの測定に root-mean-square error (RMSE) を採用する。実行時間は1回のマッチングに要した時間の平均値とする。すなわち、ICP終了までの時間をマッチング回数で割ったものである。

Table 1 より、直線情報に基づく点群の選択によって ICP に使用される点群の数が大幅に減ることが分かる。したがって、すべての点群を用いた場合に対して実行時間も大きく減少した傾向がみられる。Fig. 4 に示すように、本研究で提案した ICP は、点群をグループ化せずに直線上の点群を用いた場合に比べてマッチングエラーが低いことが確認できる。これは、点群をグループ化したことによって、マッチングの失敗する可能性が抑えられたからだと考えられる。

また、真値に対する並進移動量及び回転移動量の誤差に対する結果を Table 2 に示す。

Table 1 Results of the experiment

ICP evaluation	All of the points	Points on the detected lines	Grouped points
the number of points	614,400	6,159	6,159
execution time [ms]	1,334,334 (≈ 22 [min])	136	1,268
alignment error (RMSE)	0.1822	0.0213	0.0182

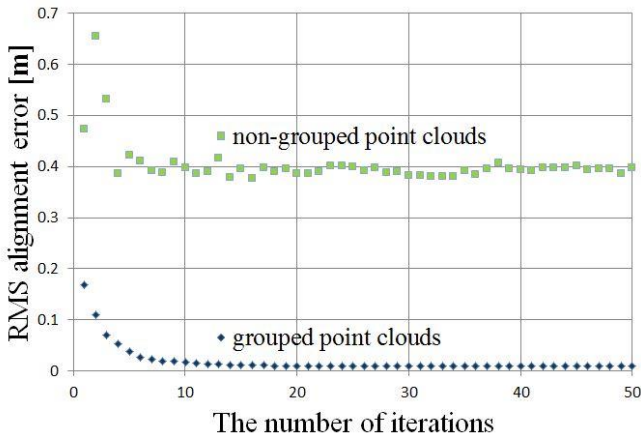


Fig. 4 Comparison of matching error for grouped point clouds and non-grouped point clouds.

Table 2 に示した実験の結果を Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す。緑の点群は 1 つ目のフレームにおける点群であり、赤の点群は 2 つ目のフレームにおける点群を表している。また、各図の(a)と(b)は ICP を行う前における点群の正面図、上面図を、(c)と(d)は ICP を行った後における点群の正面図、上面図を表している。

Fig. 5 は抽出した直線の点群をグループ化したとき

の ICP 結果を示している。また、Fig. 6 はすべての点群を用いた場合における ICP 結果を、Fig. 7 は抽出した直線上に存在する点群を利用した場合における ICP 結果を表している。

Table 2 Comparison of the each error

ICP evaluation	All of the points	Points on the detected lines
translation (x, y, z) [m]	(-0.010, 0.019, -0.006)	(-0.074, -0.051, 0.017)
rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) [deg]	(-1.807, -1.231, -0.270)	(-0.537, 0.155, 5.015)
translation error [m]	0.096	0.123
ground-truth ($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)	(-0.030, -0.165, 0.000, 0.000, 0.000, 6.000)	
ICP evaluation	Grouped points	
translation (x, y, z) [m]	(-0.067, -0.087, -0.021)	
rotation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) [deg]	(0.608, -0.695, 5.689)	
translation error [m]	0.089	
ground-truth ($x, y, z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$)	(-0.030, -0.165, 0.000, 0.000, 0.000, 6.000)	

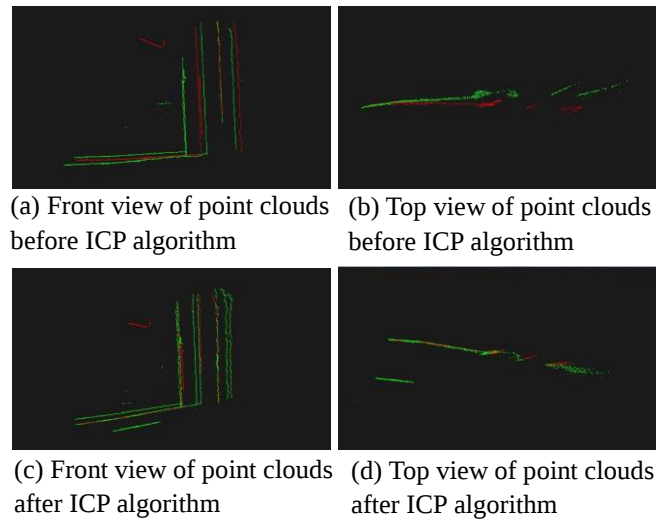


Fig. 5 ICP results when using grouped point clouds.

抽出した直線上に存在する点群をグループ化した後の結果を Fig. 5 に示す。ICP を行うことによって、(a)

と(b)に示す2つのフレームから生成された点群が、(c)と(d)に示すように位置合わせができたことが確認できる。

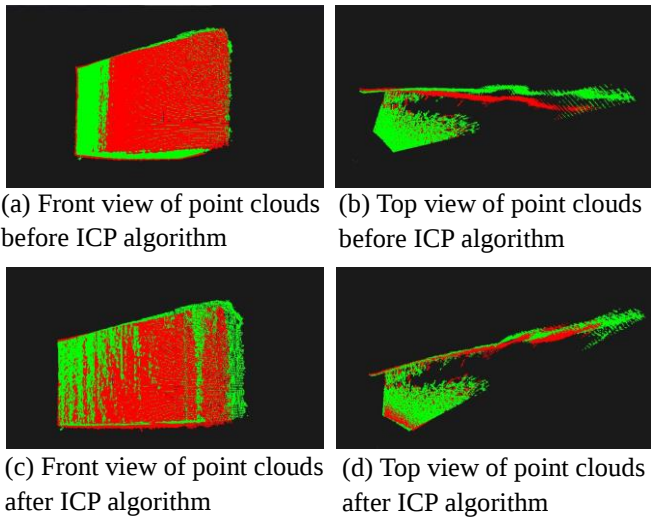


Fig. 6 ICP results when using all of the point clouds.

上記の Fig. 6 は、すべての点群を用いた場合における ICP 結果である。すべての点群を使用するため、Fig. 6(d) に表すように ICP の精度は向上するが、その一方、実行時間は遅くなってしまいう短所が挙げられる。

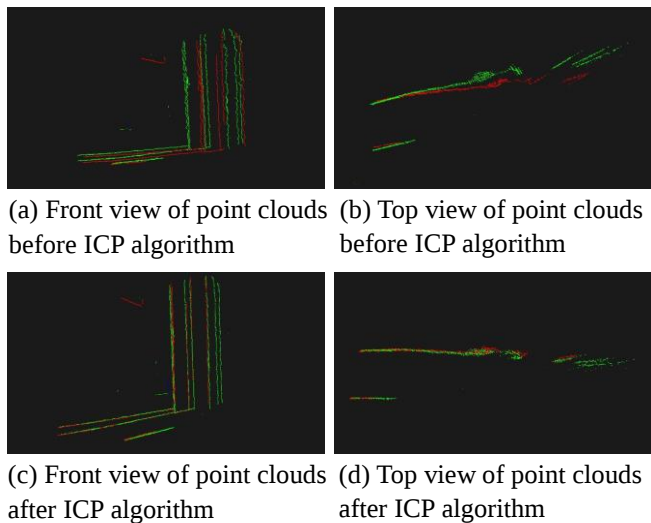


Fig. 7 ICP results when using point clouds on the detected lines.

抽出した直線の点群を用いた場合の結果を Fig. 7 に表している。Fig. 6 に示す結果に比べ、使用する点群の数が大幅に減ったため、実行時間は短縮できる。

Table 2 と Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 から、グループ化した後の点群を利用した場合、並進誤差が減少したことが分かる。また、回転移動量に関しても、グループ化した点群を用いた方が真値と近い値が得られることがみ

られる。

以上より、本研究で提案した点群のグループ化によって ICP の精度は向上したと考えられる。また、実行時間に関しては、すべての点群を用いた場合に比べて大幅に減ることが確認できた。点群をグループ化したことによって ICP の精度を保ちながら実行時間が短縮され、本研究で提案した ICP を屋内環境における SLAM に応用できると考えられる。

4. 結論

本研究では、屋内環境における SLAM のために点群のグループ化を用いた ICP を提案し、その性能を評価した。点群をグループ化することによって、ICP の精度向上と実行時間の短縮を両立させることが確認できた。点群のグループ化により、対応するグループに限って ICP が行われ、余計なマッチングが避けられたからである。

今後の展望として、本研究で得られた結果を屋内環境における SLAM に応用し、ロボットの運用における実現性を検討する。

参考文献

- [1] A. Nuchter, H. Surmann, K. Lingemann, J. Hertzberg and S. Thrun: "6D SLAM with an Application in Autonomous Mine Mapping," *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1998-2003, 2004.
- [2] S. Rusinkiewicz and M. Levoy: "Efficient Variants of the ICP Algorithm," *Proceedings of the 3rd International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling*, pp.145-152, 2001.
- [3] D. Chetverikov, D. Svirkov, D. Stepanov and P. Krsek: "The Trimmed Iterative Closest Point Algorithm," *Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition*, pp.545-548, 2002.
- [4] T. Zinber, J. Schmidt and H. Niemann: "A Refined ICP Algorithm for Robust 3-D Correspondence Estimation," *Proceedings of the 2003 International Conference on Image Processing*, pp.695-698, 2003.
- [5] J. Canny: "A Computational Approach to Edge Detection," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, pp. 679-698, 1986.
- [6] P. Hough: "Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures," *Proceedings of the International Conference on High Energy Accelerators Instrumentation*, pp.554-556, 1959.