

測域センサの反射強度データを用いたスキャンマッチング による移動ロボットの自己位置推定

Mobile Robot Localization by Scan Matching using Laser Reflectance Intensity of the SOKUIKI Sensor

原 祥堯 (筑波大) 川田 浩彦 (筑波大)
大矢 晃久 (筑波大) 油田 信一 (筑波大)

*HARA Yoshitaka, Univ. of Tsukuba KAWATA Hirohiko, Univ. of Tsukuba
OHYA Akihisa, Univ. of Tsukuba YUTA Shin'ichi, Univ. of Tsukuba

Abstract— This paper describes a new scan matching method for mobile robot localization. This method uses Laser Reflectance Intensity. We call this method the "Intensity-ICP". Compared with conventional scan matching method which is effective in only geometric featured environment, the Intensity-ICP is effective in both geometric featured and featureless environments.

Key Words: SOKUIKI Sensor, Scan Matching, Localization

1. はじめに

ロボットの自律移動においては、正確な自己位置を推定することが非常に重要となる。自己位置推定の手法には、内界センサを使用するものと、外界センサを使用するものが存在する。特に内界センサを使用した自己位置推定を、デッドレコニングと呼ぶ。デッドレコニングの代表例としては、車輪の回転数によるオドメトリが挙げられる。この他にも、ジャイロや加速度センサを用いた方法も存在する。一方、外界センサを使用するものとしては、超音波センサを用いたものやカメラを用いたもの、測域センサ [1] (光走査型距離センサ) を用いたものなどがある。

外界センサを使用する自己位置推定は、内界センサによる自己位置推定と比較して累積誤差が小さいという利点があるため、盛んに研究されている。超音波センサを用いた場合、センサから得られる情報量が少ないため高速な処理が可能だが、その反面、複雑な環境においては正確に自己位置を推定することが難しい。カメラを用いた手法では、センサから得られる情報量が多いものの、その分複雑な処理が必要となり、また受動型センサであるため、外乱光などの影響を大きく受ける。これらのセンサと比較して、測域センサを用いた場合、十分な情報量の環境幾何形状データが得られ、また能動型センサであるため、外乱光の影響が比較的少ない。幾何形状データが直接得られるため、それほど複雑な処理を必要としないという利点もある。そのため、外界センサを用いた自己位置推定において、測域センサが盛んに使用されている。

測域センサを用いた自己位置推定においては、マップデータと現在位置で取得したスキャンデータのマッチングを行うことで自己位置推定を行う、スキャンマッチングと呼ばれる手法がよく用いられる。既存のスキャンマッチング手法の多くは、形状情報を利用してマッチングを行っている。すなわち、うまく重なる形状の部分と比較することで、マッチングを行う。そのため、形状に変化の少ない環境、すなわち幾何特徴のない環境に弱いという問題があった。例えば、柱などの凹凸のない壁が続く廊下環境などにおいては、既存のスキャンマッチング手法では正確な自己位置推定ができない。

以上のような問題をふまえ、本研究では、環境中に存在



Fig.1 SOKUIKI Sensor "URG-X003S"[2]

する物体の表面の色や材質によって異なる反射強度の情報の特徴量として用いることで、幾何特徴のない環境においても正確な自己位置推定が可能なスキャンマッチング手法を提案する。本研究においては、反射強度の情報は、図 1 に示す測域センサ URG-X003S (北陽電機 (株) 社製) により得る。

なお、本稿においては、2次元空間のスキャンデータによるスキャンマッチングを扱うが、3次元空間のスキャンにも容易に拡張可能な手法である。

2. 関連研究

スキャンマッチングは、大きく分けて局所的マッチングと大域的マッチングの2つに分類できる。局所的マッチングは、初期値を必要とし、ある程度マッチングができているものを、より正確にマッチングする手法である。一方で、大域的マッチングは、初期値を必要とせずにマッチングする手法である。局所的マッチングの代表的なものとしては、ICP[3] や IDC[4] が、大域的マッチングとしては、不変特徴量を用いたもの (Signature-based Scan Matching[5]、CCF[6]、LineMatch[7]、APR[8]) が挙げられる。移動ロボットの自己位置推定では、多くの場合オドメトリなどによって初期値が得られることが期待できるため、局所的マッチングを使用することが多い。本研究で提案する手法も、局所的マッチングに分類される。

また、本研究で提案する手法では、従来の多くのスキャンマッチング手法と同様、2つのスキャンデータのマッチングを行う。一方、3つ以上のスキャンデータを同時にマッチングする手法 [9] も存在する。3つ以上のスキャンデータを同時にマッチングする手法では、膨大な計算量が必要になるという問題点がある。

Table 1 URG-X003S(Intensity data Ver.) specifications

測定距離	0.02 ~ 5.5 m
測距分解能	1 mm
反射強度値域	0 ~ 40,000 程度
走査角度	240 deg
角度分解能	約 0.71 deg
走査時間	100 ms/scan
インタフェース	USB2.0 FS モード (12 Mbps) RS232C (最速 750 kbps)

スキャンマッチングにおいてよく用いられる ICP アルゴリズムでは、形状情報のみ、つまりスキャンデータ点の座標値のみを用いてマッチングを行う。しかし、誤対応によって誤った値に収束することを防ぐために、その他の特徴量も用いることで、通常の ICP よりもロバストにする手法がいくつか提案されている [10]。

Color ICP[11] は、カメラにより取得した物体表面のテクスチャや色を特徴量として用いた、ICP アルゴリズムの拡張である。同様の手法は文献 [12] においても用いられている。しかし、カメラから得られるテクスチャや色の情報は外乱光の影響を大きく受けるため、不変な特徴量とは言えない。そこで文献 [13] では、照明状態による色の变化を考慮した手法を提案している。これらの手法では、外界センサとして、測域センサ 1 個とカメラ 1 個の合計 2 個、もしくはカメラ 2 個が必要となる。しかし本研究で提案する手法においては、外界センサは測域センサ 1 個のみで良い。

2 次元-3 次元ロバスト位置姿勢推定法 [14] では、3 次元測域センサから反射強度の情報が付いた 3 次元距離画像データを取得し、それに対して 2 次元カメラ画像のマッチングを行っている。具体的には、3 次元距離画像データの反射強度エッジに対して、2 次元カメラ画像のエッジをマッチングしている。測域センサから得られる反射強度の情報をを用いている点は本研究と同様であるが、マッチングさせるデータが異なる。すなわち、この手法では、カメラ画像のマッチングを扱っているが、本研究で提案する手法では、測域センサのスキャンデータ同士のマッチングを扱う。

このように、本研究で提案する手法は、外界センサとして測域センサのみを用い、スキャンデータ点の座標値と反射強度の値を特徴量とした、新しいスキャンマッチング手法である。

3. 反射強度データを用いたスキャンマッチング

3.1 反射強度データの取得

前述の通り、本研究で提案する手法では、測域センサ URG-X003S (以降、URG と呼ぶ) から得られるスキャンデータの座標値と反射強度 (Laser Reflectance Intensity) の値を特徴量として用いる。反射強度の情報が付いたスキャンデータを、反射強度データと呼ぶ。なお、反射強度データを取得するために、URG のファームウェアを特別に改造している。URG の主な仕様を表 1 に示す。

3.2 反射強度の性質

URG から得られる反射強度は、不変な特徴量ではない。反射強度は、スキャン対象物の表面の色や材質によって一意に決まる訳ではなく、同じ対象物をスキャンしたとしても、対象物までの距離と角度に応じて、得られる反射強度は多少異なってくる。すなわち、反射強度は、スキャンをする位置に依存する。

そこで本稿では、スキャンマッチングを行う 2 つのスキャン間において、スキャン位置の変化は反射強度に影響を与えない程度に小さい場合のみを扱う。これにより、反射強度を不変特徴量とみなす。それ以外の場合への対処は、今後の課題として後述する。

3.3 ICP アルゴリズム

反射強度データを用いたスキャンマッチングのアルゴリズムは、ICP アルゴリズムを拡張することで実現している。そのため、最初に通常の ICP アルゴリズムについて述べる。

ICP アルゴリズムによるスキャンマッチングは、オドメトリなどから得られる 2 つのスキャン間の相対位置を初期値とし、対応点間の評価値が最小となる相対位置を、繰り返し計算により求める手法である。評価値として距離の二乗和を、対応点として最近接点を用いる。マップデータなどのスキャンデータ (以降、参照スキャンデータと呼ぶ) に対して、現在位置でのスキャンデータ (以降、入力スキャンデータと呼ぶ) をマッチングしていく。

対応点間の評価値の定義を式 (1) に、同次変換の式を式 (2) に表す。

$$\begin{aligned}
 E^{(m)} &= \sum_{i=1}^N |p_{k_i}^{(m)} - q_i^{(m)}|^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \{x_{diff}^2 + y_{diff}^2\} \\
 &= \sum_{i=1}^N \{(x_{p_{k_i}^{(m)}} - x_{q_i^{(m)}})^2 + (y_{p_{k_i}^{(m)}} - y_{q_i^{(m)}})^2\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

E : 距離の二乗和 (評価値)

p : 参照スキャンデータ点

q : 入力スキャンデータ点

(m) : 繰り返し計算の試行回数

N : スキャンデータ点数

k_i : 入力スキャンデータ中の i 番目の点に対応する参照スキャンデータ点

x, y : 各スキャンデータ点の座標値

$diff$: 各パラメータの差分

$$q_i^{(m+1)} = Trans^{(m)} + \{Rot^{(m)}(q_i^{(m)} - C^{(m)}) + C^{(m)}\} \quad (2)$$

$Trans$: 同次変換行列の並進成分ベクトル

Rot : 同次変換行列の回転成分行列

C : 測域センサ搭載位置 (スキャン中心)、 Rot の回転中心
測域センサの搭載位置とロボット座標系の原点が一致している場合、 $C^{(1)} = 0$

繰り返し計算の手順は以下の通りである。

最初のステップにおいては、初期値としてオドメトリなどから得られる 2 つのスキャン間の相対位置から同次変換行列を求め、入力スキャンデータを同次変換する。

二番目のステップでは、同時変換後の入力スキャンデータから参照スキャンデータへの対応点探索を行う。この際、評価値が最も小さいスキャンデータ点、すなわち最近接点を対応点とする。

三番目のステップでは、対応点間の評価値、すなわち距離の二乗和が最小となるような同次変換行列を、非線形最小化法などにより求める。一般的には、最急降下法やニュートン法が用いられる。

同次変換行列が求まったら最初のステップに戻り、入力スキャンデータを、求めた同次変換行列により同次変換する。以降はこれらのステップの繰り返し計算である。

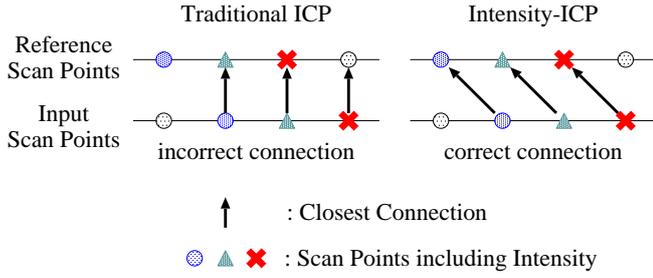


Fig.2 Intensity-ICP algorithm

ここで、同次変換行列を求めることが、スキャンを行った現在位置を推定することに等しい。

3.4 Intensity-ICP アルゴリズム

次に、ICP アルゴリズムを拡張することで、反射強度データを用いたスキャンマッチングのアルゴリズムを設計する。この手法を、本研究では Intensity-ICP と呼ぶ。

Intensity-ICP アルゴリズムの動作概念を図 2 に示す。図中の、 \bullet 、 \triangle 、 \times の各点が、反射強度付きのスキャンデータ点を示している。 \bullet 、 \triangle 、 \times の各点は、それぞれ、反射強度が高、中、低であることを表す。図 2 のような、幾何特徴のないスキャンデータにおいては、同じ反射強度のスキャンデータ点間に対応関係が付き、マッチングされることが正解である。すなわち、 \bullet は \triangle に、 \triangle は \times に対応関係が付いているのが正解となる。通常の ICP では、反射強度を考慮していないため、誤対応が付いてしまう。しかし、反射強度データを用いた ICP においては、反射強度を考慮しているため、正しい対応関係が付く。これが、Intensity-ICP アルゴリズムの動作概念である。

Intensity-ICP では、反射強度を用いる分、スキャンデータの次元は 3 次元に増える。すなわち、座標値 (x, y) の 2 次元と、反射強度の 1 次元の、合計 3 次元である。しかし、同次変換に関しては 2 次元空間で考えれば良いため、同次変換の式は通常の ICP の場合と同じ式 (2) である。

一方で、評価値は反射強度も含めた 3 次元で扱う。すなわち、対応点探索においては反射強度も考慮することで、距離が近く、かつ反射強度の値も近い 2 点間に対応関係を付ける。これにより、2 点間の距離が近くても反射強度が大きく異なる場合には対応点としない場合や、距離が多少遠くても反射強度が近い値であるときには対応点とする場合がある。これが、Intensity-ICP アルゴリズムにおいて、最も重要な部分である。

反射強度を考慮した評価値を、式 (1) を拡張することで、以下の式 (3) のように定式化した。

$$\begin{aligned}
 E^{(m)} &= \sum_{i=1}^N |p_{k_i^{(m)}} - q_i^{(m)}|^2 \\
 &= \sum_{i=1}^N \{x_{diff}^2 + y_{diff}^2 + K \times Intensity_{diff}^2\} \\
 &= \sum_{i=1}^N \{(x_{p_{k_i^{(m)}}} - x_{q_i^{(m)}})^2 + (y_{p_{k_i^{(m)}}} - y_{q_i^{(m)}})^2 \\
 &\quad + K(Intensity_{p_{k_i^{(m)}}} - Intensity_{q_i^{(m)}})^2\} \quad (3)
 \end{aligned}$$

E : 距離の二乗和 + 反射強度の差分の二乗和 (評価値)

p : 参照スキャンデータ点

q : 入力スキャンデータ点

(m) : 繰り返し計算の試行回数

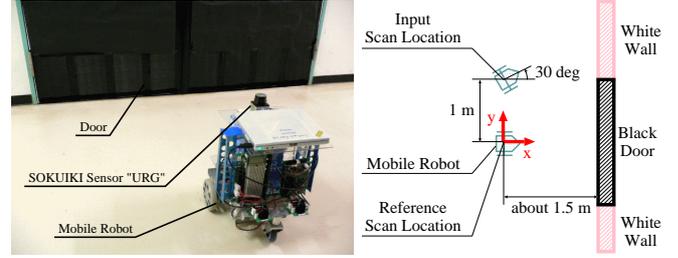


Fig.3 Experimental environment

N : スキャンデータ点数

k_i : 入力スキャンデータ中の i 番目の点に対応する参照スキャンデータ点

x, y : 各スキャンデータ点の座標値

$diff$: 各パラメータの差分

$Intensity$: 各スキャンデータ点の反射強度 (Laser Reflectance Intensity)

K : 反射強度の重み係数

K の値は経験的に求めた。前述の通り、URG の反射強度データの値域は 0 ~ 40,000 程度である。そのことを考慮し、また複数のパラメータを試した結果より、実装では $K = 0.0002$ とした。ただし、スキャンデータにより、最適な値は多少異なってくる。

評価値を式 (3) のように拡張したが、2 次元空間での同次変換を考えているため、非線形最小化の際には反射強度の項は影響しない。そのため、非線形最小化は通常の ICP と同様となる。

今回の実装では、非線形最小化法としてニュートン法を採用し、実装を行った。

4. 実験

以上のような Intensity-ICP スキャンマッチングを実装し、実験を行った。この実験では、幾何特徴のない環境において、通常の ICP スキャンマッチングによる自己位置推定と、Intensity-ICP スキャンマッチングによる自己位置推定の精度を比較した。

実験環境を図 3 に示す。左側が実験環境の写真、右側が実験環境の平面図である。柱などの凹凸のない白色の壁に、黒色のドアが存在する環境である。幾何特徴はなく、壁とドアで色が異なるという特徴があるのみである。なお、URG は移動ロボット上に搭載した。

この環境において、スキャン位置を変えて 2 回のスキャンを行った。まず、ドアの正面において、参照スキャンデータを取得した。このときのロボット座標系の原点を、世界座標系の原点とする。次に、人の手によりロボットを移動させた。移動後の位置は、世界座標系において、 $(x, y, \theta) = (0mm, 1000mm, 30deg)$ である。この位置において、入力スキャンデータを取得した。

入力スキャンデータを参照スキャンデータにマッチングさせることで、入力スキャンデータを取得した位置を推定する。すなわち、 $(x, y, \theta) = (0mm, 1000mm, 30deg)$ が正解である。

なお今回の実験においてはオドメトリデータは使用していない。2 つのスキャン間の相対位置の初期値として、 $(x, y, \theta) = (0mm, 0mm, 0deg)$ を代入している。

図 4 にマッチング前のスキャンデータをプロットしたものを示す。また、図 5 に ICP スキャンマッチングの結果、図 6 に Intensity-ICP スキャンマッチングの結果を示す。各図中において、左側の図の赤色の点列が参照スキャンデー

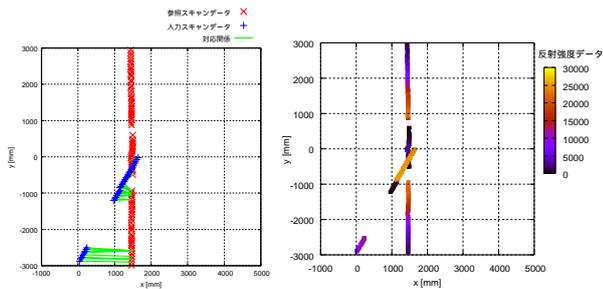


Fig.4 Before scan matching

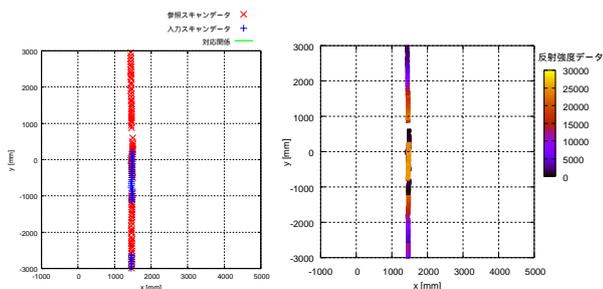


Fig.5 ICP scan matching result

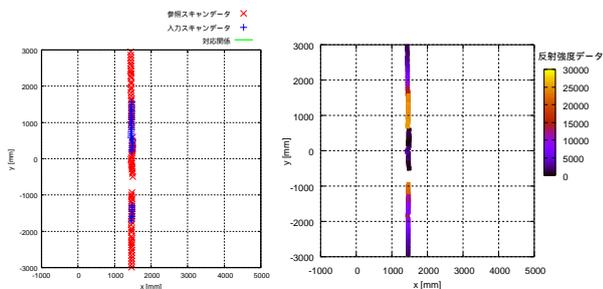


Fig.6 Intensity-ICP scan matching result

た、青色の点列が入力スキャンデータを表している。また、その間を結ぶ緑色の線分は、各点の対応関係を表している。右側の図は、各スキャンデータ点の反射強度を、色により表現している。

図 5,6 共に、うまくマッチングできているように見える。しかし、ICP スキャンマッチングによる自己位置推定結果は $(x, y, \theta) = (40\text{mm}, -567\text{mm}, 29\text{deg})$ であり、正解から約 1.5 m も離れた、間違った値に収束してしまっている。一方で、Intensity-ICP スキャンマッチングの自己位置推定結果は $(x, y, \theta) = (30\text{mm}, 972\text{mm}, 29\text{deg})$ であり、30 mm 程度の誤差はあるものの、ほぼ正確な値に収束している。

これより、Intensity-ICP スキャンマッチングでは、幾何特徴のない環境においても正確なマッチングが可能であり、正しい自己位置推定ができることを確認できる。

5. 今後の課題

前述の通り、本稿では反射強度を不変特徴量であると近似している。しかし実際には、反射強度は不変な特徴量ではない。そのため、反射強度から物体表面の濃淡値などの不変な特徴量を求め、その値を用いた方が良い。濃淡値を求めるためには、文献 [15] に示されるような距離補正を行う手法が有効である。文献 [15] では、実測値から、測定距離、反射強度、濃淡値の関係を表すテーブルを作製し、そのテーブルを用いることで反射強度から濃淡値を求めている。これは、URG 内部では AGC(Automatic Gain Control) が使用されているため、線形的な補正ができないためである。なお、文献 [15] においては距離補正しか行っていない

が、角度補正を行うことも非常に有用であると考えられる。

他にも、不変特徴量として、反射強度の微分値を用いる手法も有効と思われる [14]。

6. まとめ

本稿では、測域センサから得られる反射強度データを用いた、幾何特徴のない環境にも強い、新しいスキャンマッチング手法を提案した。また、幾何特徴のない環境での実験を行い、提案した手法の有効性を確認した。

参考文献

- [1] Hirohiko Kawata, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta, Wa-gle Santosh and Toshihiro Mori : "Development of ultra-small lightweight optical range sensor system", Proc. of IROS'05, pp.3277-3282, 2005.
- [2] Hokuyo Automatic Co., Ltd.
<http://www.hokuyo-aut.co.jp/>
- [3] Paul J. Besl, and Neil D. McKay : "A Method for Registration of 3-D Shapes", IEEE Trans. on PAMI, Vol.14 No.2 pp.239-256, 1992.
- [4] F. Lu, and E. Milios : "Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans", Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol.18, pp.249-275, 1997.
- [5] M. Tomono : "A Scan Matching Method using Euclidean Invariant Signature for Global Localization and Map Building", Proc. of ICRA'04, 2004.
- [6] G. Weiss, G. Wetzler, and E. V. Puttkamer : "Keeping Track of Position and Orientation of Moving Indoor Systems by Correlation of Range-Finder Scans", Proc. of IROS'94, pp.595-601, 1994.
- [7] J. S. Gutmann, T. Weigel, and B. Nebel : "Fast, Accurate, and Robust Self-Localization in Polygonal Environments", Proc. of IROS'99, 1999.
- [8] J. Weber, K. W. Jorg, and E. V. Puttkamer : "APR - Global Scan Matching Using Anchor Point Relationships", Proc. of IAS-6, 2000.
- [9] 大石 岳史, 佐川 立昌, 中澤 篤志, 倉爪 亮, 池内 克史 : "大規模距離画像の同時位置合わせ手法", 第 70 回 3 次元フォーラム, Vol.18, No.4, pp.2-5, 2004.
- [10] 増田 健, 岡谷 (清水) 郁子, 佐川 立昌 : "距離データ処理 - 複数距離画像からの形状モデル生成技術", 第 146 回 CVIM, pp.105-116, 2004.
- [11] Andrew Edie Johnson, and Sing Bing Kang : "Registration and Integration of Textured 3-D Data", Proc. of the International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling, 1997.
- [12] G. Godin, M. Rioux, R. Baribeau : "Three-dimensional registration using range and intensity information", Proc. SPIE Videometrics III, Vol.2350, pp.279-290, 1994.
- [13] Ikuko Shimizu Okatani, and A. Sugimoto : "Registration of range images that preserves local surface structures and color", Proc. of the 2nd International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission (3DPVT 2004), pp.789-796, 2004.
- [14] R. Kurazume, K. Nishino, Zhengyou Zhang, and Katsushi Ikeuchi : "Simultaneous 2d images and 3d geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute", Proc. of the 5th Asian Conference on Computer Vision, Vol.1, pp.99-106, 2002.
- [15] 橋本 浩一, 細田 強, 前山 祥一, 安 弘 : "測域センサを用いた夜間警備にも使える美術館遠隔鑑賞ロボットの開発", SI2005, pp.589-590, 2005.