

測域センサの反射強度情報を含む環境マップの構築

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)

Map Building for Mobile Robots using SOKUIKI Sensor - Usage of Laser Reflection Intensity -

*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 map building using a new scan matching method, Intensity-ICP. The method uses Laser Reflection Intensity of SOKUIKI Sensor. So compared with conventional scan matching methods which are effective in only geometric featured environments, the Intensity-ICP is effective in both geometric methods and featureless environments. And we propose two methods to remove outliers in scan matching. Laser Reflection Intensity and geometric constraint are used in this method. As the result of using Intensity-ICP scan matching and outlier removing methods, an accurate map can be built. In addition, the map has abundant informations; not only geometric data but also Laser Reflection Intensity, and it is useful for robust localization.

Key Words: SOKUIKI Sensor, Scan Matching, Map Building

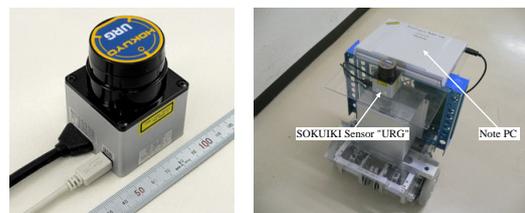
1. はじめに

自律型移動ロボットにおいて、自動的なマップ構築の技術は非常に有用である。人の作業によらないロボットによる自動的なマップ構築においては、ロボットが正確な自己位置を知ることが不可欠である。車輪型移動ロボットの場合、オドメトリによる自己位置推定がよく用いられるが、オドメトリには累積誤差が大きという問題がある。そこで測域センサ [1] を用いた自己位置推定手法が、近年盛んに研究されている。測域センサの測距データは高精度であり、かつ外乱光などに対してロバストなため、測域センサを用いた自己位置推定は信頼性が高い。

測域センサを用いた自己位置推定においては、スキャンマッチングと呼ばれる手法がよく用いられる。スキャンマッチングとは、マップとなるスキャンデータと現在位置で取得したスキャンデータをマッチングすることで自己位置推定を行う手法である。しかし既存のスキャンマッチング手法の多くは、形状情報を特徴量としてマッチングを行っているため、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。そこで筆者らは、測域センサから得られる反射強度情報を用いることで幾何特徴のない環境においても位置合わせ可能なスキャンマッチング手法、Intensity-ICP を開発した [2]。

本稿では、Intensity-ICP スキャンマッチングを用いた反射強度情報を含む環境マップの構築について述べる。特に、マップ構築をする際に有用となる、反射強度情報を用いて歪んだスキャンデータを除去する手法、スキャンマッチングの際に誤対応を除去する手法について述べる。

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マップ構築を扱う。



(a) URG-04LX[3]

(b) Mobile Robot

Fig.1 SOKUIKI Sensor and Mobile Robot

Table 1 Specifications of URG-04LX(intensity data ver.)

測定距離	0.02 ~ 5.5 m
距離分解能	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 0.70 deg
走査時間	100 ms/scan

2. Intensity-ICP アルゴリズム

Intensity-ICP アルゴリズムについて概説する [2]。Intensity-ICP では、測域センサから得られるスキャンデータの座標値と反射強度 (Laser Reflection Intensity) の値を特徴量として用いる。

本研究においては、図 1(a) に示す北陽電機 (株) 社製の測域センサ URG-04LX (以降、URG と呼ぶ) から反射強度情報を得る。また図 1(b) に示すように、URG を移動ロボット上に搭載した。なお、反射強度を取得するために URG のファームウェアを改造している。この URG の主な仕様を表 1 に示す。角度分解能は通常は約 0.36 deg であるが、反射強度を取得するために半分になっている。

Intensity-ICP アルゴリズムは、ICP アルゴリズム [4] を拡張することで設計した。Intensity-ICP アルゴリズム

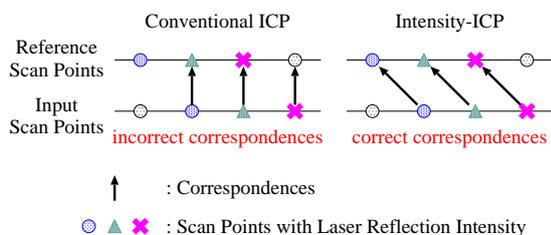


Fig.2 Intensity-ICP algorithm

ムの動作イメージを図2に示す。図中の、 \bullet 、 \triangle 、 \times の各点が、反射強度付きのスカ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カンデータにおいては、同じ反射強度のスカ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 \bullet に、 \triangle は \triangle に、 \times 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に間違えた対応が付いてしまう。しかしIntensity-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イメージである。

Intensity-ICPでは反射強度を用いる分、スカンデータの次元は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。

Intensity-ICPにおける評価値は、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。

反射強度を考慮した評価値の定義を式(1)に、同次変換の式を式(2)に表す。

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

e : 距離の二乗和 + 反射強度の差分の二乗和 (評価値)

p : 参照スカンデータ点

q : 入力スカンデータ点

(m) : 繰り返し計算の試行回数

N : スカンデータ点数

k_i : 入力スカンデータ中の i 番目の点に対応する参照スカンデータ点

x, y : 各スカンデータ点の座標値

l : 各スカンデータ点の反射強度 (Laser Reflection Intensity)

w : 反射強度の重み係数

$$q_i^{(m+1)} = T^{(m)} + \{R^{(m)}(q_i^{(m)} - c^{(m)}) + c^{(m)}\} \quad (2)$$

T : 同次変換行列の並進成分ベクトル

R : 同次変換行列の回転成分行列

c : 測域センサ搭載位置、 R 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、 $c^{(1)} = 0$ である。

x, y の単位はmmである。また、 w の値は経験的に求めた。表1に示す通り、URGの反射強度の値域は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 $w = 0.0002$ とした。ただし、スカンデータにより最適な値は多少異なってくる。

Intensity-ICPアルゴリズムの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つのスカン間の相対位置から同次変換行列を求め、入力スカ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カンデータから参照スカ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カンデータ点、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。

同次変換行列が求めたら最初のステップに戻り、入力スカ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。

この結果、ある同次変換行列に収束する。ここで、同次変換行列を求めることが、スカンを行った自己位置を推定することに等しい。

3. マップ構築における問題点と対策

3.1 スカンデータの歪み

測域センサはレーザー光を用いて測距するセンサである。そのため、測域センサの測距データが高精度であるとはいえ、スカン対象物の光反射特性によっては、得られるスカンデータが歪んでしまう。スカンデータが歪んでしまうようなスカン対象物としては、金属などの反射率が高すぎる物や、半透明のプラスチックなどが挙げられる。歪んでいるスカンデータは、スカンマッチングの際に外れ値となり、マッチング精度を下げてしまう。

これはどのような測定原理を用いている測域センサにおいても発生する問題であり、測域センサが光を用いている以上、避けられない問題である。少なくとも、URGおよびSICK社製のLMS200においてはこの問題が起こることを確認している。

反射率が高すぎる物をスカンした際にスカンデータが歪んでしまう現象は、URGにおいては位相差法を用いて測距していることに起因している。URGはAGC (Auto Gain Control)を用いて受光素子であるAPD (Avalanche Photodiode)の電圧を調整している[1]。スカンデータが歪んでしまう現象は、AGCによる制御の限界を超えてしまい、正確な反射光の波形、つまり位相が得られないことによって起こる。逆に言えば、AGCによる制御の限界を超えているスカン点を除去することで、歪んでいるスカンデータを除去することができる。

URGから得られる反射強度の値はAPDの電圧に相当する。しかし、単に反射強度の値が高いというだけでAGCによる制御の限界を超えていると判断するこ

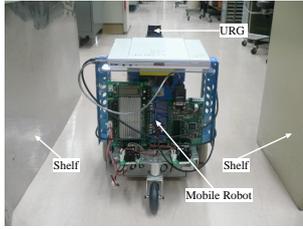


Fig.3 Experimental environment of outlier removing

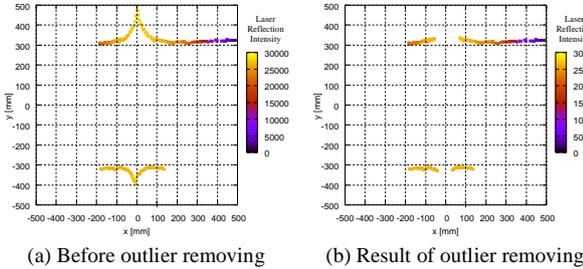


Fig.4 Experimental result

とはできない。これは、得られる反射強度の値は AGC によって制御された後の値であるため、反射強度の値が高かったとしても、それが AGC による制御の限界を超えているかどうかは分からないためである。すなわち、反射強度の値が高いということは、AGC による制御の限界を超えていることの必要条件ではあるが十分条件ではない。

そこで複数回の実験を行った結果、URG からの距離が近く、かつ反射強度の値が高いスキャン点は、AGC による制御の限界を超えている可能性が高いという知見が得られた。よって、URG からの距離が近く、かつ反射強度の値が高いスキャン点を除去することで、歪んでいるスキャンデータを除去することができる。

このアルゴリズムを実装し、有効性を評価する実験を行った。今回の実装では、URG からの距離が 1 m 以内であり、かつ反射強度の値が 27000 を超えているスキャン点を除去するようにした。実験環境を図 3 に示す。ロボットの左側には塗装されていないステンレス製の棚が、右側にはクリーム色に塗装された棚がある環境である。除去する前のスキャンデータを図 4(a) に、除去後のスキャンデータを図 4(b) に示す。なお、URG のスキャン中心が座標系の原点である。図 4(a) のスキャンデータを見ると、URG とスキャン対象物との角度が 90 deg 付近のスキャンデータが歪んでいるのが分かる。特にロボットの左側にある塗装されていないステンレス製の棚をスキャンしたデータは、最大で 100 mm 以上歪んでいる。一方で図 4(b) のスキャンデータを見ると、歪んでいる部分をうまく除去できているのが分かる。よって、本稿で提案する歪み除去アルゴリズムは有効だと言える。

3.2 対応する参照スキャン点のない入力スキャン点

スキャンマッチングによってマップ構築を行う場合、入力スキャン中の参照スキャンにない部分をマップに加えていくことで、マップ領域を拡大していく。そのため、入力スキャン中には含まれるが参照スキャン中にはないスキャン点が存在する。このことが非常に問題となる。すなわち、入力スキャン中には含まれるが

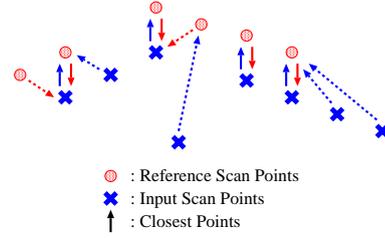


Fig.5 Bidirectional search for correspondences

参照スキャン中にはないスキャン点を除去してからマッチングを行わないと、これらの点に間違えた対応関係が付いてしまい正確な位置合わせができない [5]。

文献 [6] などにおいては ICP アルゴリズムに M 推定を導入し、誤対応の影響を小さくしている。しかし M 推定を用いても外れ値の影響を小さくできるだけであり、対応する参照スキャン点のない入力スキャン点を除去できるわけではない。よって M 推定を用いたとしても、参照スキャン点のない入力スキャン点における誤対応の影響が残り、正解への収束精度は落ちる。

また RANSAC などの、ランダムサンプリングによって評価値の良いスキャン点のみを用いる手法は、ICP アルゴリズムとうまく適合しない。ICP アルゴリズムは、繰り返し計算の初期のステップにおいては誤対応があったとしても、繰り返し計算を重ねることで誤対応を減らしていき正解へ収束させていくアルゴリズムだからである。そのためランダムサンプリングによって対応する参照スキャン点のない入力スキャン点を除去することはできず、偶然評価値の良い間違えた対応関係だけが残ってしまい、正解には収束しない。

文献 [7] では適応的に調整される閾値によって誤対応を除去している。文献 [8] では位置合わせ誤差が適度に小さい対応点だけを利用している。本研究ではこれらを参考にして、他と比較して評価値が大きく異なる対応関係を除去することで誤対応を除去する。

さらに、対応点の双方向探索による誤対応除去アルゴリズムを提案する。これは入力スキャンから参照スキャンへの対応点を探索するだけでなく、参照スキャンから入力スキャンへの対応点探索も行い、双方向の対応点の探索結果が一致した対応関係のみを使用するというものである。繰り返し計算の初期において双方向探索を行うと逆に正解への収束性が悪くなるが、ある程度収束した後双方向探索を行うと正解への収束精度が向上する。

なお、スキャン点の間隔が小さいと上記アルゴリズムがうまく動作しないため、スキャンデータは適当な間隔で間引く。これは計算量の削減にもなる。今回の実装では 50 mm の間隔で間引いた。

双方向探索による誤対応除去アルゴリズムの動作イメージを図 5 に示す。矢印が各点の最近接点を表しており、実線は双方向の探索結果が一致した対応関係を、破線は一致しなかった対応関係を意味する。双方向探索の結果が一致した対応関係のみを用いてマッチングを行うと、正しく位置合わせできることが分かる。

文献 [9] においては、ある閾値以上の評価値を持つ対応関係を除外し、かつスキャン領域の端にあるスキャン点の対応関係を除外している。本稿で提案する手法

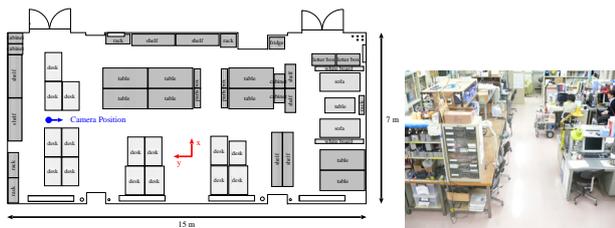


Fig.6 Experimental environment of mapping

は文献 [9] の手法とほぼ同じ挙動を示すが、この手法よりも有効性が高い。すなわち、スキャン領域の端以外のスキャンデータにも有効である。例えば本稿で提案する手法は、オクルージョンや前述の歪み除去によって対応する参照スキャン点のない入力スキャン点が生じた場合にも有効である。

4. マップ構築

以上の Intensity-ICP アルゴリズム、および歪み除去と誤対応除去のアルゴリズムを実装し、Intensity-ICP スキャンマッチングによるマップ構築実験を行った。

実験環境を図 6 に示す。この屋内環境を、人がロボットを操作することで走行させた。一定間隔ごとにスキャンデータを取得し、走行終了後にマップ構築を行った。

文献 [2] に示す通り、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が異なってくる。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が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。

よって、現時点までに構築したすべてのマップを参照スキャンとするのではなく、前回スキャンした位置でのスキャンのみを参照スキャンとし、現在位置で取得したスキャンを入力スキャンとする、逐次型のマッチングによりマップ構築を行った。

Intensity-ICP スキャンマッチングを用いて構築したマップを図 7 に示す。このように、反射強度情報を含む環境マップを構築することに成功した。

なお比較のために、オドメトリのみで構築したマップを図 8 に示す。オドメトリのみを用いて構築したマップは、累積誤差の影響でマップが歪んでしまっている。一方、Intensity-ICP スキャンマッチングを用いて構築したマップは、オドメトリのみにより構築したマップと比較して精度が良く、かつ反射強度情報も含んでいるために情報が多く、ロバストな自己位置推定に有用であると考えられる。

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反射特性などの不変な特徴量を求め、その値を用いた方

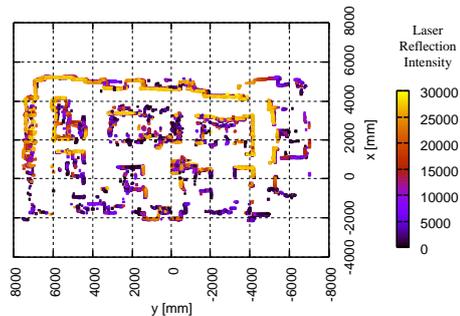


Fig.7 Map built by Intensity-ICP scan matching

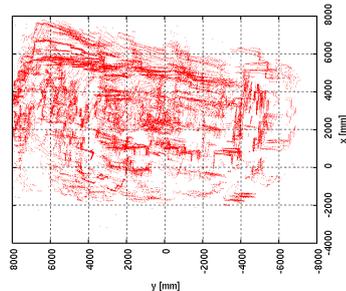


Fig.8 Map built by odometry

が良い。あるいは、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だと思われる。

6. まとめ

本稿では、Intensity-ICP スキャンマッチングを用いた反射強度情報を含む環境マップの構築について述べた。特に、マップ構築をする際に有用となる、反射強度情報を用いて歪んだスキャンデータを除去する手法、双方向探索などにより誤対応を除去する手法を提案した。

参考文献

- [1] Hirohiko Kawata, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta, Wagle Santosh, and Toshihiro Mori : "Development of ultra-small lightweight optical range sensor system", *Proc. of IROS'05*, pp.3277-3282, 2005.
- [2] 原 祥亮, 川田 浩彦, 大矢 晃久, 油田 信一 : "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", *Proc. of ROBOMECH'06*, 2006.
- [3] Hokuyo Automatic Co., Ltd.
<http://www.hokuyo-aut.co.jp/>
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 金子 俊一, 近藤 友紀, 宮本 敦, 五十嵐 悟 : "M 推定を導入したロバスト ICP 位置決め法", *精密工学会誌*, Vol.67 No.8 pp.1276-1280, 2001.
- [7] Z. Zhang : "Iterative point matching for registration of free-form curved surfaces", *International Journal of Computer Vision*, Vol.13, number 2, pages 119-152, 1994.
- [8] K. Pulli : "Multiview registration for large data sets", *Proc. of Second International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling*, pp.160-168, 1999.
- [9] Greg Turk, and Marc Levoy : "Zippered Polygon Meshes from Range Images", *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, (Proc. of SIGGRAPH'94)*, pp.311-318, 1994.