

路面環境地図に基づき校正を行う移動ロボットのオドメトリシステム - タイルカーペットにより生じるオドメトリの誤差と路面環境地図作成方法 -

A Odometry Error Proofing System with Road Surface Environment Map for Mobile Robot - Measurement Method of Odometry Error and Road Surface Environment Map Building on Tile-Carpet -

山田 大地 (筑波大) 正 大矢 晃久 (筑波大)

Taichi YAMADA, Univ. of Tsukuba, tyamada@roboken.esys.tsukuba.ac.jp
Akihisa OHYA, Univ. of Tsukuba

This paper describes a odometry error proofing system with road surface environment map. In many cases, localization, an essential technique for mobile robot is based on dead-reckoning using odometry. However, odometry error increase by asperity and steep of road surface, because odometry is a model of running on flat floor. Therefore, this system build the error map by road surface with sensor data in advance. When robot autonomously run, this system proof the odometry error with reference of the road surface error map. In this paper, we describes the building method of road surface map and map building experiment.

Keywords: Mobile Robot, Localization, Odometry

1. はじめに

近年、ロボットには人が生活する空間での活躍が期待されている。ロボットが人と同じ空間で活動するためには、自律的に目的の位置まで安全かつ確実に移動できることが重要であり、その要素技術として自己位置推定がある。

ロボットの自己位置推定方法としてオドメトリなどのデッドレコニングが用いられている。オドメトリはロボットのタイヤの回転量からロボットの軌跡を推定するデッドレコニングの手法であり、単純で手軽に用いることができ、計算負荷が小さく実時間で自己位置を推定可能な方法であることから広く用いられている。

しかし、オドメトリは誤差が制限無く累積されることが問題となる。オドメトリがタイヤの回転量から推定される移動量をもとに事前の自己位置に対する現在の自己位置を相対的に求めるため、誤差が累積する。この誤差の原因の1つとして、路面環境の影響がある。オドメトリは一般的に滑らかな平面上を走行を仮定して軌跡を求めるため、実環境では路面の凹凸や傾きなどから自己位置の推定に誤差が生じる。

この問題に対して、地図上の絶対位置の推定が用いられる。絶対位置の推定はICP スキャンマッチング [1] などの方法があり、様々なセンサを用いた手法が盛んに研究されている。しかし、実環境においては人の活動などによる周囲の環境の動的な変化やセンサの観測から位置推定可能な特徴が十分得られないため、絶対位置の推定が困難な環境が多くある。また、多くの絶対位置の推定手法はオドメトリの結果を初期位置として局所的に自己位置を探索するため、オドメトリによる自己位置の精度がよいと絶対位置の推定は容易になる。このため、オドメトリによる自己位置推定精度の向上は大きな効果が期待できる。

オドメトリの誤差の原因の1つとして路面環境がある。また、オドメトリの誤差は系統的な誤差と突発的な誤差に分けられ、突発的な誤差は予測、検出が困難であるが、系統的な誤差は実際に走行した際のデータを用いることで経験的に予測することができる。そこで、路面環境により生じる系統的な誤差を校正するオド

メトリシステムを研究している。本システムは事前に走行予定の経路上をロボットに走行させ、ロボットに搭載した外界センサによりオドメトリの誤差を計測する。この計測結果をもとに路面によるオドメトリへの影響を記した路面環境地図を作成する。自律走行時にはこの地図を参照することでオドメトリの誤差を校正する。本稿では、路面環境地図の作成方法について述べる。また、この手法の評価としてカーペット (特に、オフィス環境によく見られるタイルカーペット) 上の走行を対象とした実験とその結果について述べる。

2. オドメトリの誤差

オドメトリの誤差について系統的な誤差と突発的な誤差の2つに分けられる。突発的な誤差の原因としては小石などの予期しない物体に乗り上げやスリップなどがあげられる。系統的なオドメトリの誤差の主な原因として、車輪径等のパラメータの誤差、路面上の規則的な凹凸や傾きの2つがあげられる。車輪径等のパラメータの誤差に対して、キャリブレーションの方法として Johannらはロボットに正方形の軌跡を走行させた結果からパラメータの誤差を求め、キャリブレーションを行う手法 [2], [3] を提案している。

一方、路面の規則的な凹凸や傾きによる誤差についてはあまり研究されていない。オドメトリは滑らかな平面で走行するモデルであるため、路面の凹凸や傾きにより誤差が生じる。例えば、ロボットが坂を走行する場合、現実にはロボットは平面ではなく高さを含めて立体的に移動するため、オドメトリによる位置の推定には誤差が生じる。

このようなオドメトリに誤差が生じる路面環境は屋内環境においてはタイル張りの床、カーペット、屋外環境においては水はけをよくするために設けられた緩やかな傾斜など多数存在する。このような路面による系統的な誤差の校正を目的としている。本稿ではタイルカーペットを対象としてオドメトリの誤差を調査した。

カーペットには目があり、この目の方向にオドメトリの誤差は

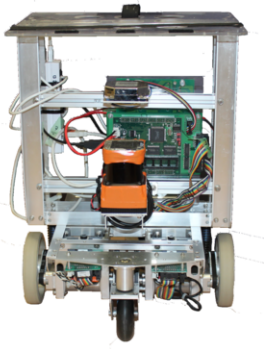


Fig. 1 Robot "M1"

Table 1 M1's specification

レーザスキャナ	UTM-30LX
ジャイロセンサ	CRS09-22
エンコーダ分解能	4000
ギア比	17.1428570
車輪径	58.17[mm]
車軸の長さ	294.37[mm]
重量	8.8[kg]

依存する．筆者らの研究室が所有する車輪型移動ロボット「M1」(外観を Fig.1, スペックを Table.1 に示す) がタイルカーペット上を走行した時の誤差について調査した．

本稿ではオドメトリの代わりにジャイロオドメトリ [4] を用いることとした．ジャイロオドメトリはエンコーダにより並進速度を，ジャイロセンサにより角速度の計測し，これにより位置を推定する．タイルカーペット上をロボットが走行する際，左右の車輪がそれぞれ目の向きが違うカーペット上を走行すると，左右の車輪がそれぞれ異なる影響を受けるためロボットの姿勢の推定に誤差が生じるためジャイロオドメトリを用いる．このような姿勢の誤差はロボットの走行する軌跡により大きく変化し，系統的な誤差として扱うことが難しい．路面による誤差の生じないジャイロセンサを用いてロボットの姿勢を推定し，カーペットの目による位置の推定誤差を測定した．

ロボットに 3[m] 直進を指示し，実際に走行させた際のジャイロオドメトリにより位置の推定する．次に走行開始位置のタイヤの位置と走行後のタイヤの位置より，ロボットの位置を人手により実測し，オドメトリによる位置の推定と比較して誤差を計測した．誤差を計測した路面の写真を Fig.2 に示す．Fig.3 に調査を行った目のパターンを示す．目の方向に対するジャイロオドメトリの誤差について調査するために，A～D は目の向きを単一方向に並べた．E, F では一般的なタイルカーペットの並べ方の(垂直な目の向きを市松模様に並べる)場合について調査した．それぞれ 5 回ジャイロオドメトリの誤差を計測した．

カーペット上に 5 回の計測による実測したロボットの位置に対するオドメトリの推定値の平均値を Table.2 に示す．A～D の結果より，いずれの目の向きでもカーペット上を走行した場合，実測結果に対してオドメトリの推定値は目の方向へ大きくずれる傾向があることがわかる．また，A と B はお互い、往路・復路の関

Table 2 Average of Odometry error (Estimation by Odometry for Measurement)

目の向き	x[m]	y[m]
A	0.156	0.019
B	-0.078	0.023
C	0.017	0.163
D	0.026	-0.145
E	0.121	0.091
F	-0.036	-0.081



Fig. 2 Experimental Environment

係であるが，A では B よりも大きく誤差が生じている．これらから，誤差の方向は目の向きにより決まるが，誤差の大きさはロボットの進行方向によって異なることがわかる．また，E と F の結果から，市松模様に並べられたタイルカーペット上では，それぞれの目の向きによる影響をあわせたような誤差が生じていると考えられる．

3. 提案するオドメトリ校正システム

ロボットの自己位置は位置，姿勢 (x, y, θ) の 3 次元とする．提案システムでは事前に路面により生じる誤差を記した地図を用意し，この地図を参照することでオドメトリの誤差を校正する．

地図生成のために路面により生じるオドメトリの誤差を推定する必要がある．そこで，提案システムでは事前に人が操作してロボットを目標経路付近で走行させ，レーザスキャナを用いてこの時のオドメトリの誤差を推定することとした．ロボットに搭載したレーザスキャナを用いて現在のスキャンに対して，少し前の時点のスキャンを参照とした照合を行うことで自己位置を推定する．このレーザスキャナによる自己位置の推定結果とオドメトリによる推定結果を比較することで誤差を推定する．提案システムは地図上の絶対位置の推定が困難な環境として，位置推定可能な特徴が十分観測できない環境での利用も想定しているため，レーザスキャナを用いた自己位置推定が困難である場合もある．そのような時は，地図作成のために路面により生じるオドメトリの誤差を推定する際には，環境中に位置推定の特徴となるような物を人が設置することとした．

誤差の推定結果より，路面により生じるオドメトリの誤差を記した地図を作成する．地図は自己位置の 3 次元空間を等間隔の格子状に区切る．各ボクセルにはロボットの自己位置がそのボクセルの範囲内であるとき，単位距離走行する毎に生じるオドメトリの誤差の平均値を保持する．地図を姿勢を含む 3 次元としたのは，ロボットの進行方向によっても誤差の傾向が異なる場合があ

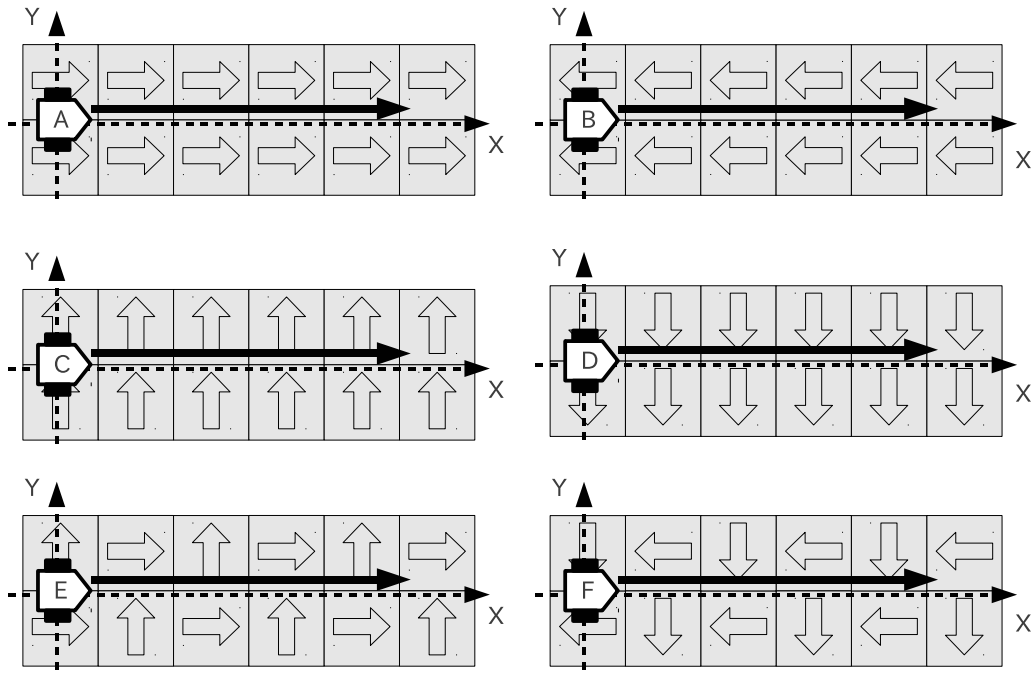


Fig. 3 Tile carpet pattern

るためである。

自律走行時、ロボットは地図よりその自己位置で生じるオドメトリの誤差を参照し、オドメトリによる自己位置の推定を校正する。

本稿では提案システムのオドメトリの誤差の計測について4.章にて地図の生成方法, 5.章にて評価のための実験とその結果について述べ, 6.章でまとめる。

4. 路面環境地図の作成

路面環境地図の各ボクセルにオドメトリが示す走行距離の総和とオドメトリの誤差の総和を記録し, これをもとに単位距離走行する毎に生じるオドメトリの誤差の平均値を求める。

オドメトリの誤差の計測はレーザスキャナによるスキャンマッチングを用いる。実際にロボットに路面上を走行させ, この時のジャイロオドメトリによる自己位置の推定結果をスキャンマッチングにより修正する。このスキャンマッチングにより修正された位置に対するジャイロオドメトリによる推定位置を誤差とした。具体的には以下のステップを繰り返す。

- 1) オドメトリにより, 前の時点から現在までのロボットの移動量を推定
- 2) オドメトリによる移動量の推定結果と前の時点の自己位置から, ロボットの自己位置を推定
- 3) オドメトリより推定したロボットの自己位置をオドメトリの推定値は初期位置としてスキャンマッチングにより自己位置を推定する。
- 4) スキャンマッチングによる自己位置の推定に対するオドメトリによる自己位置の推定結果を比較し, これを路面により生じたオドメトリの誤差とする
- 5) スキャンマッチングにより推定した自己位置を現在の自己位置とする

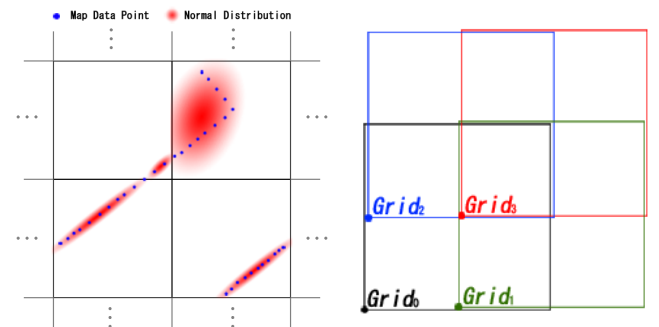


Fig. 4 NDT and overlapping cell

置とする

NDT では空間を等間隔な格子状に分割し, 各格子に含まれる参照となるスキャン (以下, 参照スキャン) を正規分布に変換する。(Fig.4-左) スキャン点を位置を要素とするベクトル $\mathbf{x} = (x, y)^T$ とする。参照スキャンが得られたとき, NDT では格子区切った各セルに対して, 以下を求める

- 1) セル k に含まれる参照スキャンを集計 $(\mathbf{x}_{k1}, \dots, \mathbf{x}_{kN_k})$
- 2) セル k に含まれる参照スキャンの位置の平均値 $\mathbf{q}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} \mathbf{x}_{ki}$
- 3) セル k に含まれる参照スキャンの位置の共分散 $\Sigma_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{q})^T (\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{q})$

あるセル k 内でスキャン点が位置 \mathbf{x} で観測されたとき, このスキャン点の評価値 $s(\mathbf{x})$ として, 入力スキャン $\mathbf{X} = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$ の評価値をその総和 $S(\mathbf{X})$ とする。

$$s(\mathbf{x}) \sim \exp \left(-\frac{(\mathbf{x}_i - \mathbf{q}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\mathbf{x}_i - \mathbf{q}_k)}{2} \right) \quad (1)$$

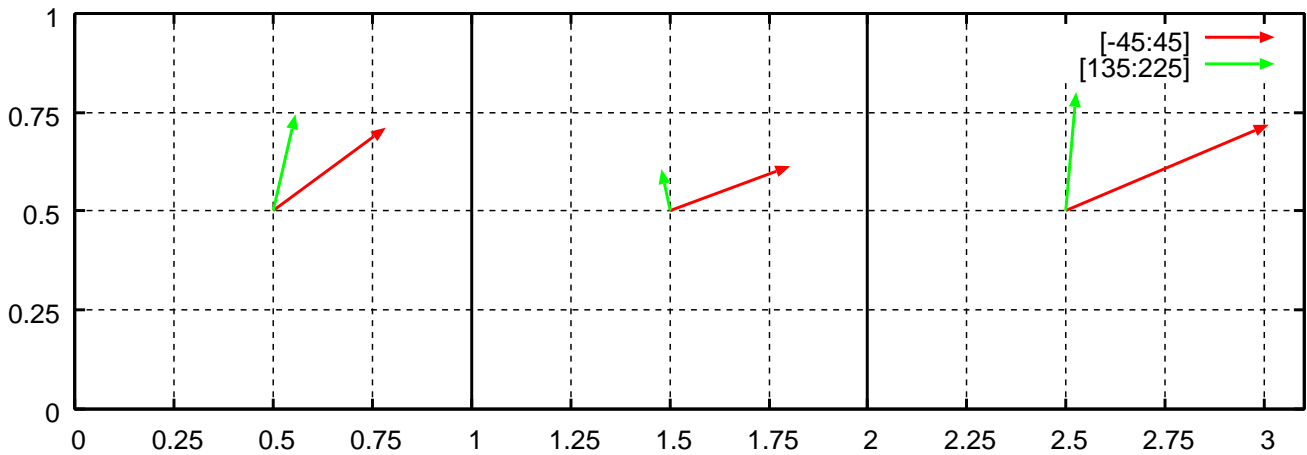


Fig. 5 Road surface environment map

$$S(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^N s(\mathbf{x}_i) \quad (2)$$

格子状には区切る際に離散化による影響があり、これに対応するために Fig.4 右に示すように 4 つの格子が重複する格子の間隔の半分ずつずらして配置し、スキャン点がいずれかの格子の中央付近になるようにする。

$S(\mathbf{X})$ を評価関数としてロボットの自己位置に対して最適化アルゴリズムを適応し、自己位置を推定する。最適化アルゴリズムにはモンテカルロ法 [6] を用いた。

参照スキャンには、誤差の計測開始位置でしばらく静止して得られた 40 スキャンを常に用いる。常に同じデータを参照することで自己位置の推定に誤差の累積を防ぎ、複数のスキャンを参照することでレーザスキャナの計測誤差を平滑化するためである。

5. 実験

上述 (2. 節) のタイルカーペットによるオドメトリの誤差を調査を行った環境において路面環境地図を作成した。一般的なオフィス環境にあるように市松模様 (Fig.3-E) の目のパターンを対象とした。路面環境地図は x, y 平面 (位置) を 1[m], θ (姿勢) を 90[deg] 毎の 3 次元格子とした。オドメトリの誤差の調査した時と同様にオドメトリの代わりにジャイロオドメトリを用い、ロボットをリモコンで操作して 3[m] の区間を 3 往復して、収集したデータから地図を作成した。Fig.5 に作成した路面環境地図を示す。実線で区切られた範囲が x, y 平面の格子であり、それぞれの進行方向に 10[m] 走行する毎のオドメトリの誤差をベクトルで示す。ここで、 θ を 90[deg] 毎に区切ったが、ロボットを x 軸に平行に往復させた際のデータを用いたため、進行方向が -45 ~ 45, 135 ~ 225[deg] の場合のみ、誤差が地図に登録されている。

作成した地図は -45 ~ 45, 135 ~ 225[deg] いずれの進行方向においても、オドメトリによる位置の推定値はカーペットの目の方向へずれることを示している。また、赤 (-45 ~ 45[deg])、緑 (135 ~ 225[deg]) が異なる方向、大きさを示すことから、オドメトリの誤差がロボットの進行方向にも依存していることを示す。これらのことから作成した地図は実測した結果と傾向が一致している

ことが確認できる。

6. まとめ

路面環境地図に基づき校正を行う移動ロボットのオドメトリシステムを提案した。提案のシステムは事前に人がロボットを操作して走行予定の経路付近を走行させ、この時生じたオドメトリの誤差を推定する。この誤差の計測結果をもとに路面環境地図を作成し、自律走行時、路面環境地図を参照することでオドメトリの誤差を校正する。本稿では、路面環境地図の生成方法とその地図の生成実験について述べた。路面環境地図の生成は NDT を用いたスキャンマッチングにオドメトリの誤差を推定する。この推定結果から、地図の各ボクセルに単位距離走行毎のオドメトリの誤差を登録する。実験ではこの手法により生成した地図が示すオドメトリの誤差が、実測した結果と傾向が同じであることを確認した。

今後は、生成した地図を用いて路面により生じる系統的な誤差を示した地図を生成し、提案オドメトリシステムの構築、評価する予定である。

参考文献

- [1] P.Besl and N.Mckay. A method for registration of 3-d shapes. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 14:239-256, 1992
- [2] J. Borenstein and L. Feng. UMBmark: A Benchmark Test for Measuring Odometry Errors in Mobile Robots. Conference on Mobile Robots, October 22-26, 1995
- [3] J. Borenstein and L. Feng. Measurement and correction of systematic odometry errors in mobile robots. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1996.
- [4] 吉田 智章, 入江 清, 小柳 英次, 友納 正裕: ジャイロオドメトリを利用した 3D スキャンングプラットフォーム. 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2010 講演予稿集, 2010
- [5] Peter Biber and Wolfgang StraBer: "The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching", Proc. of IROS2003, pp. 2743-2748, 2003.
- [6] S.Thrun, W.Burgard and D.Fox, 上田隆一 訳: 確率ロボティクス. 毎日コミュニケーションズ, pp.225, 2007