

路面環境地図に基づき系統誤差を校正するオドメトリ

山田大地 (筑波大学) 大矢晃久 (筑波大学)

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にはオドメトリなどのデッドレコニングをベースとして用いることが多い。オドメトリはロボットのタイヤ回転量からロボットの軌跡を推定する手法であり、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、オドメトリはタイヤ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、制限無く誤差が累積する。

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。絶対位置の推定はレーザスキャナの計測データに ICP スキャンマッチング [1] を適応する方法などがあり、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区間が多くある。このような区間ではオドメトリ等のデッドレコニングに頼った走行をせざるを得ない。また、多くの絶対位置の推定手法はオドメトリによる推定位置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の精度向上は信頼性の高い自律走行を実現に重要な要素である。

オドメトリの誤差は系統誤差と偶然誤差に分けらる。偶然誤差は予測、検出が困難であるが、系統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推定することができる。そこで、路面環境により生じるオドメトリの系統誤差を校正する手法を研究している。事前に走行予定の経路上をロボットを操作して走行させ、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り生じるオドメトリの誤差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推定し、これを校正する。

2. オドメトリの誤差

オドメトリの誤差は系統誤差と偶然誤差の2つに分けられる。偶然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り、不規則に発生するため対応が困難である。

一方で、系統誤差として同じ経路を走行する際に、同様の傾向でオドメトリの誤差が生じる。図.1 は実際にロボットが屋外を走行した際のオドメトリの軌跡、図.2

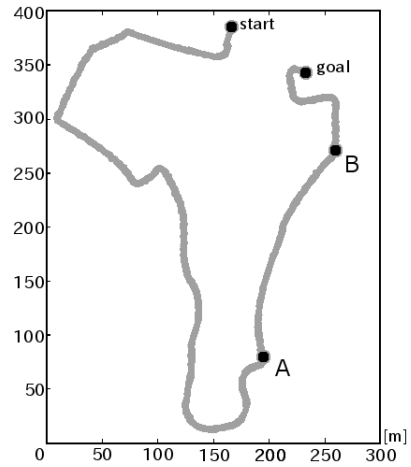


図 1 屋外走行時のオドメトリによる軌跡

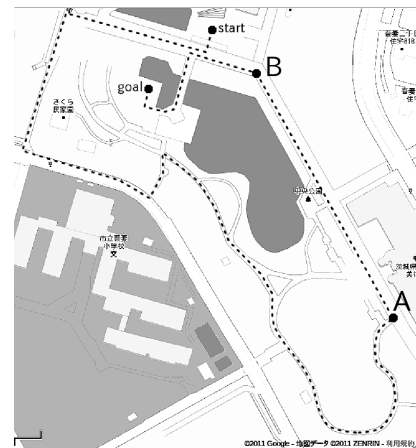


図 2 屋外走行コース

はそのコースであり、ロボットは図中 start から goal まで走行した。全体として、走行に伴って徐々に右に曲がっているが、図.1 の A-B の区間は図.2 に示す様に、実際には真っ直ぐな経路であるが、オドメトリの軌跡は他の区間比べて大きく右へそれている。このようにオドメトリの誤差は路面に応じて系統的に生じるものが存在する。

このようなオドメトリに系統誤差が生じるような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。

このような系統誤差は事前に予定した経路上を走行し、この時に生じた誤差を記録しておくことで、実走行時に推定することが可能であると考えられる。そこで、事前に走行した際に生じたオドメトリの誤差を測定し、これを記した路面環境地図を作成する。自律走

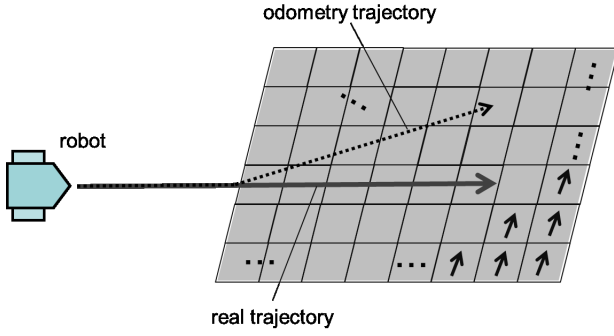


図3 オドメトリの誤差とその地図

行時にはこの路面環境地図に基づきオドメトリの系統誤差を考慮しつつ、自己位置を推定することで路面環境にロバストなオドメトリが実現できる。

3. 提案するオドメトリ校正手法

提案する手法では事前に路面により生じる誤差を記した路面環境地図を用意する。図.3 に示すように路面環境地図にはロボットが走行すると系統誤差が生じる路面に対してどのように誤差が生じるかを記録する。図.3 では色のついている区間をロボットが走行する際にオドメトリに誤差が生じるとする。そこで、路面環境地図として図の格子内に表記された矢印の様にどの区間を走行する際にどのような誤差が生じたかを記録する。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、事前に人が操作してロボットを目標経路上を走行させて外界センサを用いてこの時のオドメトリの誤差を推定する。

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路面環境地図を作成する。ロボットの自己位置は位置、姿勢 (x, y, θ) の3次元とする。路面環境地図は自己位置の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 $de = (d\bar{x}, d\bar{y}, d\bar{\theta})$ を保持する。

自律走行時、エンコーダのカウント値をもとにロボットの走行距離 r を求める。また、ロボットは自己位置の推定結果 \hat{P} より地図を参照し、走行距離に対するオドメトリの誤差 e を以下により求める。

$$e = r \times de \quad (1)$$

この誤差の推定結果によりオドメトリを校正した自己位置 \hat{P}_c を求める。

$$\hat{P}_c = \hat{P} - e \quad (2)$$

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より求めた単位

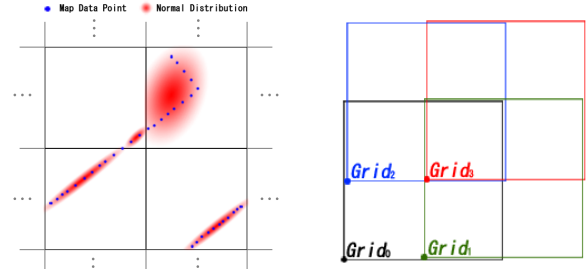


図4 NDT とその格子の重複

距離走行する毎に生じるオドメトリの誤差の平均値を記録する。

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。スキャンマッチングの参照には少し前の時点のスキャンを用いる。オドメトリによる推定位置とスキャンマッチングにより修正された位置の差を誤差とした。具体的には以下のステップを 0.025[sec] 毎に繰り返した。

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. オドメトリによる自己位置の推定とスキャンマッチングによる自己位置の推定結果の差を求め、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

スキャンマッチングの手法には NDT[4] を適応した。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。(図.4-左) スキャン点を位置を要素とするベクトル $(x, y)^T$ 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 $\Sigma_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{q}_k)^T (\mathbf{x}_{ki} - \mathbf{q}_k)$

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

$$s(\mathbf{v}) = \exp\left(-\frac{(\mathbf{v} - \mathbf{q}_k)^T \Sigma_k^{-1} (\mathbf{v} - \mathbf{q}_k)}{2}\right) \quad (3)$$

$$S(\mathbf{V}) = \sum_{i=1}^N s(\mathbf{v}_i) \quad (4)$$



図5 ロボットの外観

表1 ロボットの仕様

レーザスキャナ	UTM-30LX
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]

格子状に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図.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。

$S(X)$ 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用し、 $S(X)$ が最大となる自己位置を探索する。最適化アルゴリズムにはモンテカルロ法 [5] を用いた。

5. 実験

提案した校正手法が路面に対してロバストなオドメトリを実現できるか評価するために、ロボットをオドメトリにより自己位置推定して自律走行した時の軌跡と提案手法により誤差を校正しながら自律走行した時の軌跡を比較した。ロボットの走行軌跡の測定には自動追尾トータルステーション GPT-9000A を用いた。自動追尾トータルステーションによりロボットに搭載したプリズムを追尾、測定し、これをロボットの走行軌跡として表示している。

まず、ロボットを操作してコースを走行させ、この時のセンサデータをもとに路面環境地図を作成する。また、この時のロボットの走行軌跡を測定する。自律走行時の軌跡がこの軌跡に近ければ、自己位置推定の誤差が小さいといえる。次に、同じコースをオドメトリにより自己位置推定して自律走行させる。さらに、提案手法によりオドメトリの誤差を校正しながら自律走行させ、それらの走行軌跡を測定する。



図6 実験環境

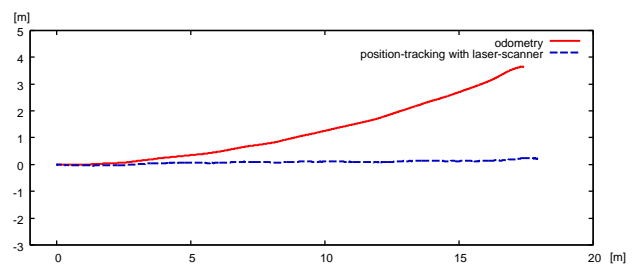


図7 オドメトリの軌跡

実験には筆者らの研究室が所有する車輪型移動ロボット「M1」(外観を図.5, 仕様を表.1 に示す) を用いた。実験は舗装路面の横断勾配による誤差を対象とした。図.5. に実験環境を示す。図中の矢印で示す箇所をおよそ 18m 直進し、静止した。

図.7 に路面環境地図の作成のためにロボットを操作して走行した際のオドメトリと、それをスキャンマッチングにより修正した結果を示す。オドメトリを実線、スキャンマッチングにより修正した結果を破線で示す。ロボットは直進しており、スキャンマッチングの結果も直進したことを示している。一方、オドメトリの結果は進行方向に対して左に大きく歪み、姿勢の推定に正方向の誤差が生じたことを示している。この結果をもとに地図を生成した。地図の格子は $1[m] \times 1[m] \times 90[deg]$ とした。図.8 に x 軸成分の誤差, 図.9 に y 軸成分の誤差, 図.10 に θ 軸成分の誤差に示す。提案手法では地図を位置, 姿勢 (x, y, θ) の3次元の格子状に区切るが、本実験ではロボットを x 軸方向に直進させたため、図.8,9,10 は横軸にロボットの自己位置の x 軸成分, 縦軸に地図の各格子に登録された各成分の 1m 走行あたりの誤差を棒グラフで示す。図.10 より、実験環境全体においてオドメトリには姿勢に正方向の誤差が生じることが地図に登録されていることが確認できる。

図.11 にロボットの走行軌跡を測定した時の軌跡を示す。実線は操作した結果, 破線はオドメトリをもとに自律走行, 一点鎖線は提案手法によりオドメトリを校

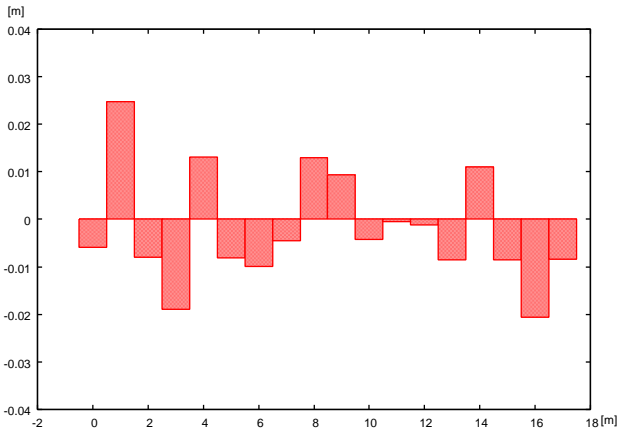


図 8 路面環境地図に記録された誤差 (x 軸)

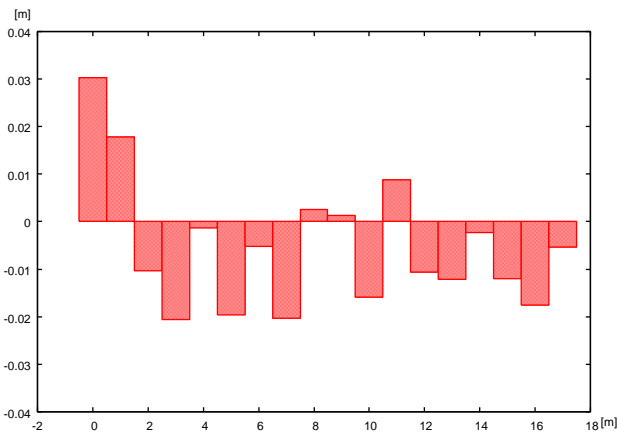


図 9 路面環境地図に記録された誤差 (y 軸)

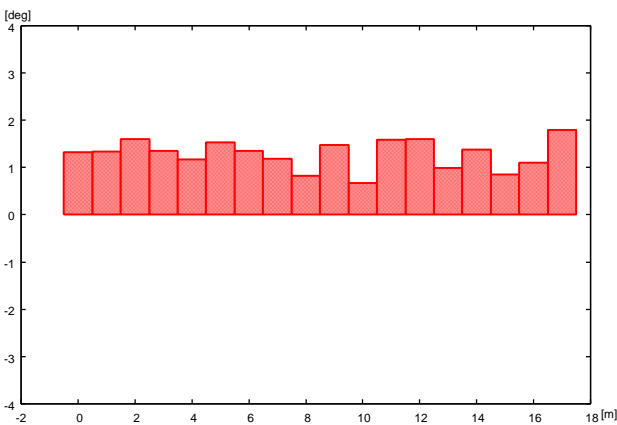


図 10 路面環境地図に記録された誤差 (姿勢)

正して自律走行した際の軌跡を示す．ここで，オドメトリには姿勢に正方向の誤差が生じるため，オドメトリをもとに自律走行させた場合，直進を指示したにもかかわらずロボットは徐々に右にそれている．一方，提案手法によりオドメトリの誤差を校正した場合は，操作した際と同様に直進することに成功し，わずかな誤差

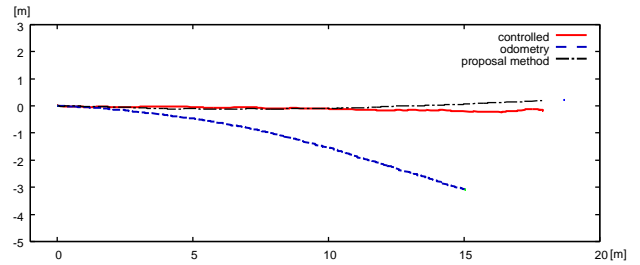


図 11 ロボットの走行軌跡

しか生じていない．このことから，提案手法により系統誤差の校正に成功していることが確認できる．また，わずかに生じた誤差は偶然誤差によると考えられる．

6. まとめ

路面環境により生じるオドメトリに系統誤差にロバストな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．この誤差の推定結果をもとに地図を作成し，自律走行時，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，地図生成方法と地図に基づきオドメトリの誤差の校正とその評価について述べた．

地図の生成においてはレーザスキャナの計測データに NDT を用いたスキャンマッチングを適応しオドメトリの誤差を推定する．自律走行時は生成された路面環境地図を参照し，オドメトリの誤差を推定し，これ校正する．評価としてオドメトリをもとに自律走行した時の走行軌跡とオドメトリを校正しながら自律走行した時の走行軌跡を比較した．結果，提案手法では系統誤差が校正でき，自己位置の推定精度が向上できることを確認した．

今後は提案手法が多様な路面に対しても有効であることを示すため，様々な路面において走行実験を行う予定である．

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] P. Biber and W. StraBer: "The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching", Proc. of IROS2003, pp. 2743-2748, 2003.
- [5] F. Dellaet, D. Fox, W. Burgard and S. Thrun: Monte Carlo Localization for Mobile Robots. Proc. of ICRA-99, pp. 1322 - 1328 vol2,