

# 路面環境地図に基づくオドメトリの系統誤差の校正

## - 多様な路面における有効性の検証 -

山田 大地 (筑波大学), 大矢 晃久 (筑波大学)

### Correction of Systematic Odometry Error with Road Surface Environment Map

Taichi YAMADA (Univ. of Tsukuba), and Akihisa OHYA (Univ. of Tsukuba)

**Abstract**— This paper presents a method for correction of systematic odometry error. It use a road surface environment map that describes odometry error on a route. In autonomous running, robot estimate odometry error with this map and correct position estimation. In this paper, we present the experiment to verify robustness of the method on various road surface and this experimental result.

#### 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の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、筆者らは事前に走行した際のセンサデータを基にオドメトリの系統誤差を推定し、これを校正する方法を提案し、基礎実験により有効性を検証した [2]。

本稿ではこの校正手法が様々な路面に有効であることを検証するために行っ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への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。具体的な例として、タイルカーペットがある。ロボットがタイルカーペット上を走行すると、オドメトリによる自己位置推定結果はカーペットの目の向きに応じて位置に系統誤差が生じる [3]。

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カーペット、屋外環境においては舗装路面の横断勾配など広く存在する。

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外界センサのデータを基に測定し、これを記した路面環境地図を作成する。自律走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. オドメトリの校正手法

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。Fig.1 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。Fig.1 では赤い床の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。ここで、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、この時の外界センサの情報よりオドメトリの誤差を推定する。

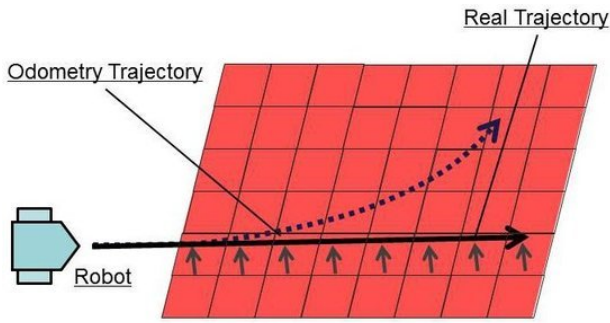


Fig. 1 Road surface environment map



Fig. 2 Robot "M1"

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  $(x, y, \theta)$  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  $de = (\overline{dx}, \overline{dy}, \overline{d\theta})$  を保持する。

自律走行時、エンコーダのカウンタ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。

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

以上の方法による校正をオドメトリによる自己位置の更新のたびに繰り返す。

Table 1 Specification of "M1"

laser scanner	UTM-30LX
gyro sensor	CRS09-22
encoder resolution	4000
gear ratio	17.1428570
wheel diameter	115.00[mm]
tread	294.37[mm]

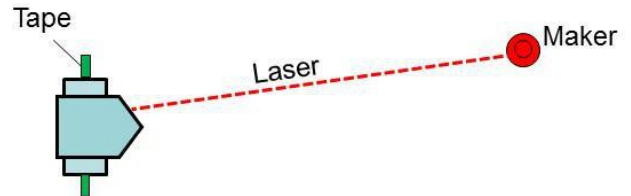


Fig. 3 Initial position determination

#### 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こととした。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ロボットが0.1m走行するたびに得られたスキャンを重ね合わせたデータを用いた。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0.025sec毎のレーザスキャナのセンサデータとオドメトリに対して繰り返した。また、スキャンマッチングの手法にはNDT[4]を適用した。

- 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

#### 5. 実験

提案した校正手法により多様な路面に対してロバストなおドメトリを実現できるか評価するために実験を行った。実験ではいくつかの路面上で、ロボットをオドメトリによる自己

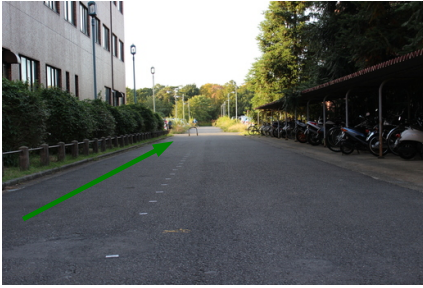


Fig. 4 Experiment environment (a,b)



Fig. 5 Experiment environment (c)



Fig. 6 Experiment environment (d)

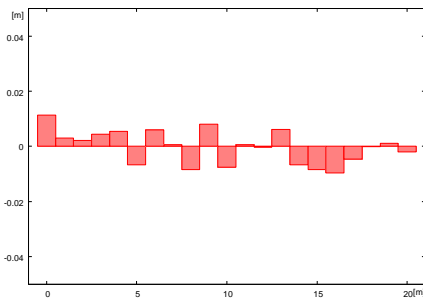


Fig. 7 Odometry error on x component in (a)

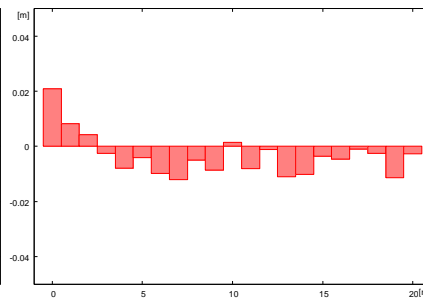


Fig. 8 Odometry error on y component in (a)

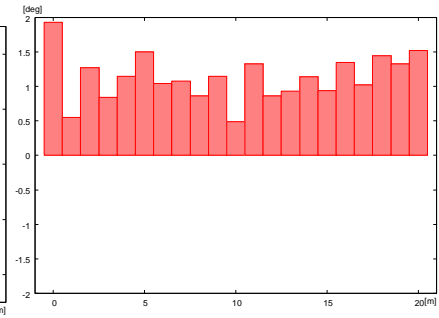


Fig. 9 Odometry error on orientation component in (a)

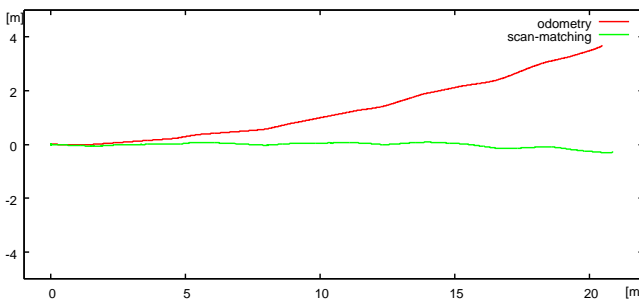


Fig. 10 Position estimation on control running in (a). Red line describes Odometry Estimation. Green line describes Scan-matching Estimation.

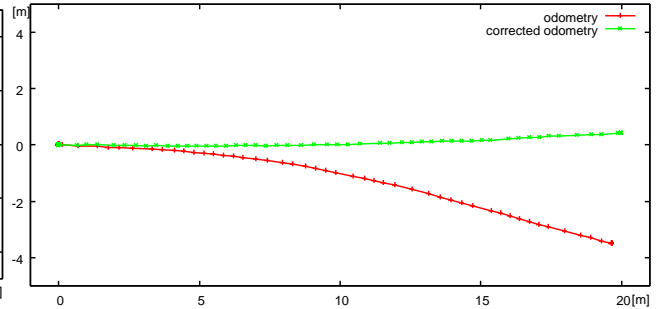


Fig. 11 Autonomous running robot trajectory in (a). Red line describes the trajectory with odometry. Green line describes the trajectory with corrected odometry.

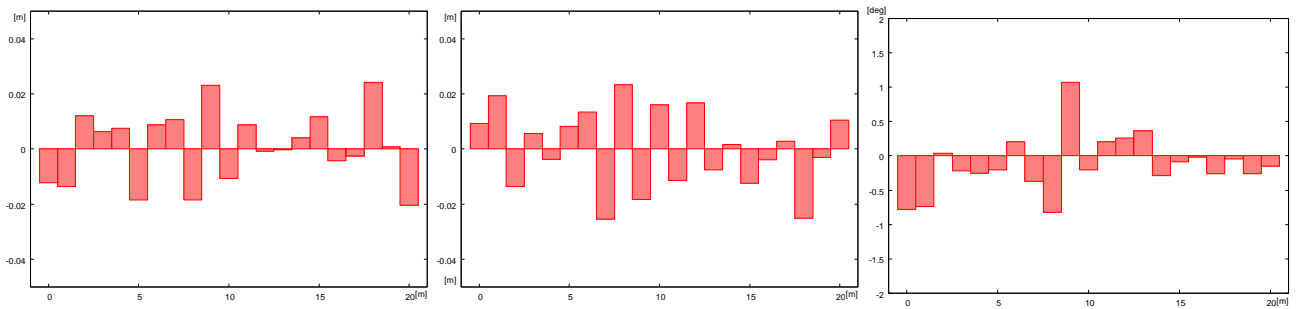
位置推定により自律走行した時の軌跡と、提案手法によりオドメトリを校正しながら自律走行した時の軌跡を比較した。ロボットの走行軌跡の測定には自動追尾トータルステーション GPT-9000A を用いた。自動追尾トータルステーションによりロボットに搭載したプリズムを追尾、測定し、これをロボットの走行軌跡として表示している。

まず、ロボットを操作してコース上を任意の距離直進させ、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。次に、同じコースをオドメトリによる自己位置推定をもとに任意の距離自律走行により直進した後、静止させる。さらに、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。ロボットには任意の距離直進を指示しているので、走行軌跡が真っ直ぐであり、指示した距離で静止

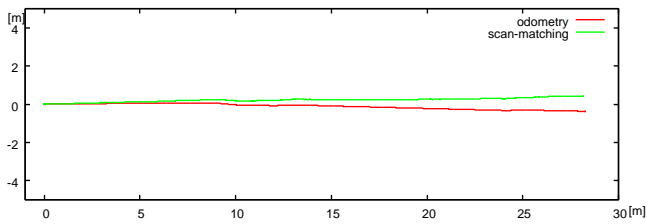
していれば、自己位置推定の誤差が小さいといえる。ここで、本実験では同じ経路を 3 回走行させるため、各走行の初期位置が一致する必要がある。そこで、Fig.3 に示すように、初期位置におけるロボットの車輪の位置にテープで印をつけ、ロボットに搭載したレーザポインタが指す位置を一致させることで、各走行の初期位置を合わせた。

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 Fig.2, 仕様を Table.1 に示す)を用いた。

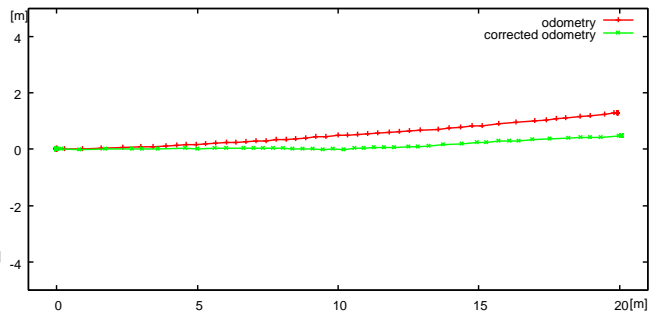
多様な路面に対して有効であることを検証するために、(a)~(d)の4つの環境において実験を行った。Fig.4~6にそれぞれの実験環境を示す。(a),(b)は舗装路面の横断勾配2度の傾斜がある経路を対象として、(a)は写真の矢印が示す経路であり、(b)はその復路である。(c)はタイルカーペット上を



**Fig. 12** Odometry error on x component in (b) **Fig. 13** Odometry error on y component in (b) **Fig. 14** Odometry error on  $\theta$  component in (b)



**Fig. 15** Position estimation on control running in (b). Red line describes Odometry Estimation. Green line describes Scan-matching Estimation.



**Fig. 16** Autonomous running robot trajectory in (b). Red line describes the trajectory with odometry. Green line describes the trajectory with corrected odometry.

走行する経路である．ここで、タイルカーペット上の走行では、ロボットの左右の車輪が異なる目のカーペット上を走行するとき、オドメトリによる姿勢の推定に系統的ではない誤差が生じるため、(c)では姿勢の推定にジャイロセンサを用いた．ジャイロセンサより得られた角速度よりロボットの姿勢を推定する．また自律走行時、地図による姿勢の校正は行わず、 $x, y$ 成分のみ校正した．(d)は誤差の少ない路面として屋内のリノリウムを対象とした．

Fig.10に(a)の路面上を操作して走行した際のオドメトリとスキャンマッチングの結果について示す．ここで、ロボットの初期位置は原点で $x$ 軸正方向を向いている．スキャンマッチングが示す走行軌跡に対してオドメトリは左に大きくそれており、姿勢に正方向の誤差が生じていることがわかる．ここで、本稿では姿勢は反時計回りを正方向としている．この結果より上述の方法により地図を作成する．地図に登録された $x, y, \theta$ の各成分の誤差をFig.7~9に示す．ここで提案手法では地図を位置、姿勢 $(x, y, \theta)$ 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、グラフの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．Fig.9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ということが地図に登録されていることが確認できる．Fig.11に自律走行の走行軌跡を示す．オドメトリによる自律走行時の軌跡を赤で、地図によりオドメトリを校正しながら走行した結果を緑で示す．この時、ロボット

には20mの直進を指示した．オドメトリによる自律走行の結果ロボットの走行軌跡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、わずかな誤差しか生じておらず、 $x = 19.98, y = 0.42$ の位置で静止した．

Fig.15に(b)のオドメトリとスキャンマッチングの結果について示す．スキャンマッチングが示す走行軌跡に対してオドメトリは(a)とは反対に右にそれている．Fig.12~14に地図に登録された誤差を示す．Fig.14より、経路の主な部分では姿勢に負方向に誤差が生じることが地図に登録されている．Fig.16に自律走行の走行軌跡を示す．この時ロボットには(a)と同様に20mの直進を指示した．提案手法によりオドメトリの誤差を校正した場合はオドメトリと比較して誤差が小さく、 $x = 20.07, y = 0.48$ の位置で静止した．

(c)の絨毯上の走行についてFig.19に操作時のオドメトリとスキャンマッチングの結果について示す．オドメトリとスキャンマッチングの結果を比較するとオドメトリは走行距離が短くなっている．具体的にはオドメトリの走行距離がおよそ7.65mであるのに対してスキャンマッチングの結果はおよそ7.76mであり、0.11m程度の差がある．Fig.17, 18に地図に登録された誤差を示す．Fig.17では地図には4m走行したあたりから $x$ 軸成分(進行方向)に対して1m毎に0.02m程度の誤差が生じることが記録されている．Fig.20に自律走行の走行軌跡を示す．この時ロボットには7mの直進を指示した．オドメトリによる自律走行の結果ロボットは7.08mの地点で静止しており、0.08mの誤差が生じている．一方、地図によ

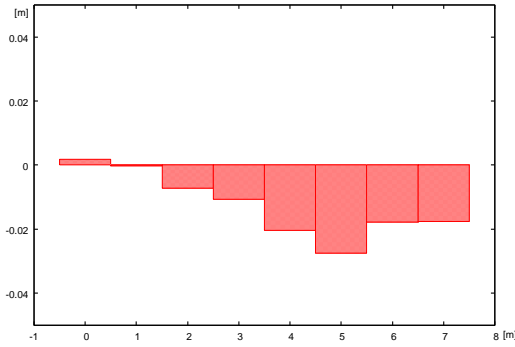


Fig. 17 Odometry error on x component in (c)

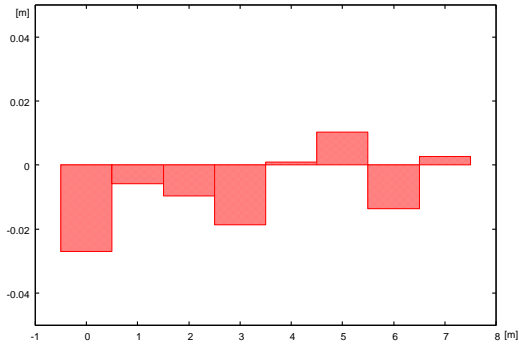


Fig. 18 Odometry error on y component in (c)

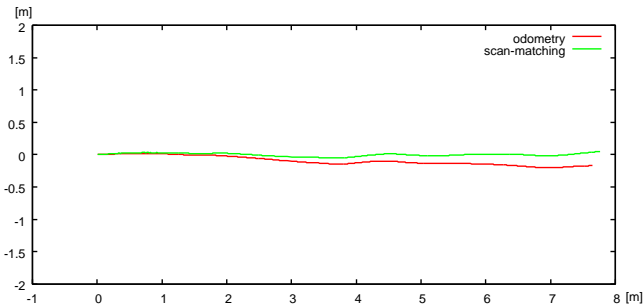


Fig. 19 Position estimation on control running in (c). Red line describes Odometry Estimation. Green line describes Scan-matching Estimation.

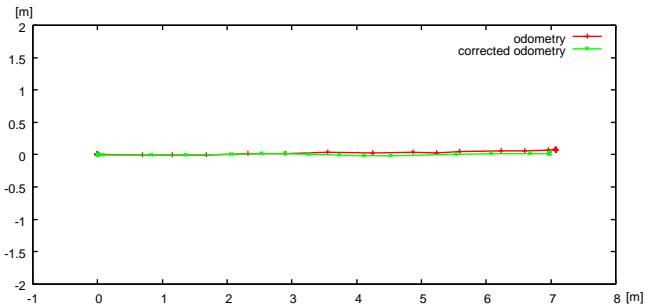


Fig. 20 Autonomous running robot trajectory in (c). Red line describes the trajectory with odometry. Green line describes the trajectory with corrected odometry.

り校正しながら走行した結果ロボットは 6.98m の地点で静止しており、0.02m と誤差が減少していることが確認できた。

Fig.24 に (d) の経路における操作時のオドメトリとスキャンマッチングの結果について示す。スキャンマッチングが示す走行軌跡に対してオドメトリは左にそれており、姿勢に正方向の誤差が生じていることがわかる。(d) は滑らかなリノリウム上の経路であり、路面による誤差は少ないので、これはキネマティクスパラメータの誤差が原因だと考えられる。Fig.21 ~ 22 に地図に登録された誤差を示す。Fig.23 によると、経路全体で姿勢にわずかに正方向に誤差が生じることが記録されている。Fig.25 に自律走行の走行軌跡を示す。この時ロボットには 20m の直進を指示した。また、オドメトリにより自律走行した際に、ロボットが壁に接触し、危険であるため、途中でロボットを停止した。一方、地図により校正しながら走行した結果ロボットはほぼ真っ直ぐ走行でき、 $x = 20.02, y = 0.16$  の位置で静止した。このことから、路面による誤差が小さな経路でも悪影響はなく、また、キネマティクスパラメータの誤差による系統誤差に対しても有効であることがわかる。

地図を用いてオドメトリを校正した結果、いずれの路面においても自己位置推定の精度の向上が確認できたことから、本手法は様々な系統誤差に対して有効であるといえる。

## 6. まとめ

路面環境地図をもとにオドメトリの系統誤差を校正する手法について多様な路面に対する有効性を検証した。本手法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校正手法の多様な路面に対する有効性を検証するための実験とその結果について述べた。

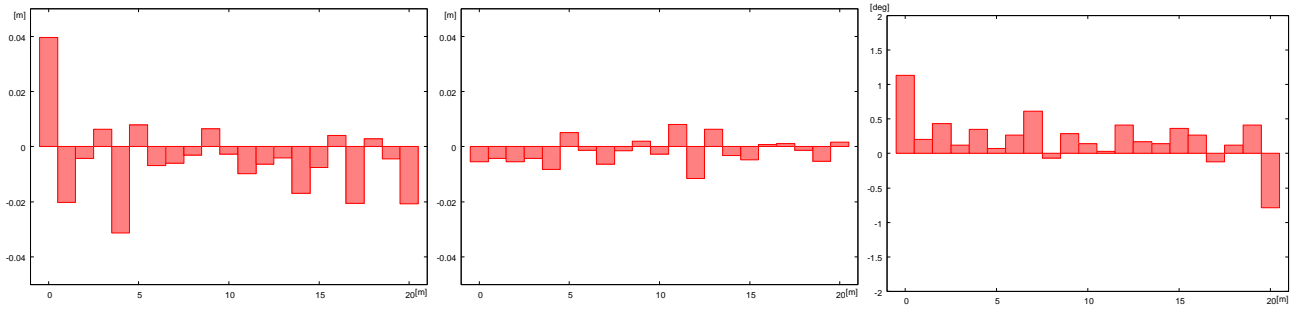
実験では舗装路面の横断勾配によりロボットの姿勢推定に誤差が生じる環境、タイルカーペット上でロボットの位置の推定に誤差が生じる環境、路面による誤差が少ないリノリウム上のいずれにおいても誤差が減少したことから、多様な路面の系統誤差に対して有効であることが確認できた。

今後の課題としては地図の格子の大きさの検討方法があげられる。本稿では格子の大きさは人が経験的に決めている。また、真っ直ぐな経路のみの実験であるため、格子の大きさの検討ができていない。

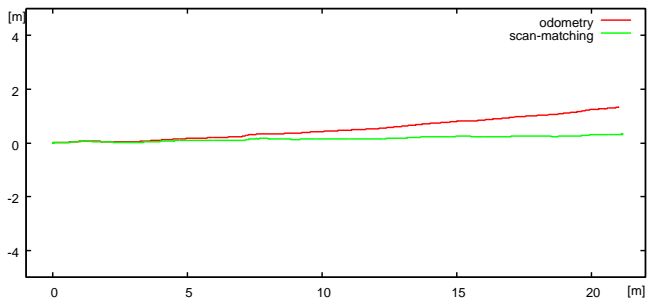
## 参考文献

- [1] P.Besl and N.Mckay. "A method for registration of 3-d shapes". IEEE Transactions on Pttren Analysis and Machine Intelligence,

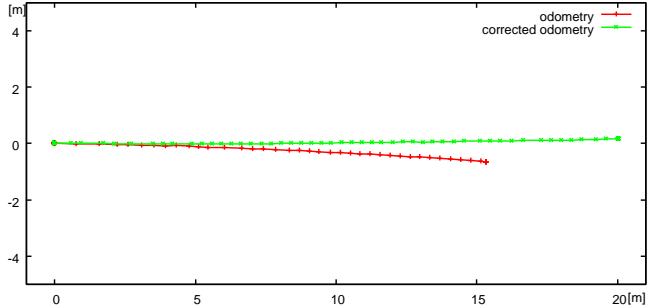




**Fig. 21** Odometry error on x component in (d) **Fig. 22** Odometry error on y component in (d) **Fig. 23** Odometry error on  $\theta$  component in (d)



**Fig. 24** Position estimation on control running in (d). Red line describes Odometry Estimation. Green line describes Scan-matching Estimation.



**Fig. 25** Autonomous running robot trajectory in (d). Red line describes the trajectory with odometry. Green line describes the trajectory with corrected odometry.

14:239-256, 1992

- [2] 山田 大地, 大矢 晃久. "路面環境地図に基づき系統誤差を校正するオドメトリ" 第30回日本ロボット学会講演会, Sep 16-20, 2012
- [3] T. Yamada and A. Ohya. "A Odometry Error Proofing System with Road Surface Environment Map for Mobile Robot" Conference on Robotics and Mechatronics, May 27-29, 2012
- [4] P. Biber and W. StraBer. "The Normal Distributions Transform: A New Approach to Laser Scan Matching", Proc. of IROS2003, pp. 2743-2748, 2003.