

# ランドマークとGPSによる移動ロボットのナビゲーション

奥山 公浩\* モハマド アナスリ\*\* スマランダチェ フロレンティン\*\*\*  
クルモフ バレリー\*\*

\* 岡山理科大学大学院工学研究科電子工学専攻

\*\* 岡山理科大学工学部電気電子システム学科

\*\*\* ニューメキシコ大学、アメリカ合衆国

## Mobile Robot Navigation Using Artificial Landmarks and GPS

Kimihiko OKUYAMA\*, Mohd ANASRI\*\*, Florentin SAMARANDACHE\*\*\*

Valeri KROUMOV\*\*

\*Okayama University of Science, Graduate School, Okayama, Japan

\*\*Okayama Univ. of Science, Dept. of Electrical & Electronic Engineering,

\*\*\*University of New Mexico, Arts & Science Division, NM, U. S. A.

### 1 はじめに

移動ロボットのナビゲーションを行うにはロボットが十分に現在位置と周囲の環境を認識する必要がある。そのために、ロボットにレーザーレンジスキャナや超音波センサ、カメラ、オドメトリ、GPS (Global Positioning System) 等のセンサを搭載することで、ロボットは現在位置・姿勢、周囲の様子、移動距離、周囲の物との距離等を知ることができるようになる。しかし、センサからの情報には誤差が含まれており、移動している環境や搭載しているセンサにより生じる誤差が累積されることで、現在の位置がわからなくなり、走行経路から外れて、目的地へたどりつけなくなることがある。正しい位置を認識するには、定期的に誤差を解消し、位置の校正を行う必要がある。位置校正を向上させるために、ロボットにSLAM (Simultaneous Localization and Mapping)[1] アルゴリズムや Kalman Filter[2] などの制御技術が導入される。

SLAM とは、自己位置認識と自己位置の校正方法の一つであり、物体と移動ロボットとの相対距離を距離測定センサによって計測しながら、得られたデータをもとにし、環境地図を作成する。また、同時にオドメトリ (Dead reckoning) 法によって移動距離を計算し、自己位置の認識を行う。

移動ロボットが屋内環境でナビゲーションする場合、建造物の構造によって行動範囲が限定され、ロボットに与えられている経路情報や障害物などの環境情報量が少なく済む。その反面、走行経路の特徴が単調な場合が多く、現在位置を認識するのが難しくなる可能性がある。さらに、床がタイルなどであれば、タイヤがスリップを起こし、オドメトリセンサに誤差が累積されるため、より位置を認識するのが難しくなる。これらの問題に対する解決策として、床や壁に描かれて

いる模様や天井の蛍光灯、通路上の仕切りなどから現在位置を推定する手法、画像やタグなどの人工のランドマークを設置し、これをもとに位置推定を行う手法などが提案されている [3][4]。

一方、屋外環境をナビゲーションする場合、行動範囲が非常に広く、走行経路が複雑になる。特に、屋内とは違い、走行環境は起伏が多く、障害となるものが多い。そのため、ロボットに与える環境情報量が多くなる。屋外での位置推定には、GPS や V-SLAM (Vision-based SLAM) を使った手法などがある [5]。

本研究の目標は、移動ロボットの屋外走行を行うことである。移動ロボットを屋外走行させている他の研究では [6][7]、ロボットに事前に走行環境を学習させており、高性能なセンサを搭載している。しかし、屋外の環境が変わるつどに、事前準備としての再学習が必要になり、手間がかかる。また、高性能なセンサを使用すると、ロボットシステムが高価になってしまう欠点がある。そこで、本研究では、移動ロボットに事前に学習をさせない、あるいは、少ない学習量で、屋外走行を行うことを目指す。

本稿の構成は次のようになっている。校正用ランドマークと V-SLAM を使用して、移動ロボットを屋内環境で走行させていた研究 [8][9] では、自己位置認識が困難な環境でもランドマークを設置することで、自己位置の認識ができ、環境内を正確に走行することができた。この手法を屋外走行に用いるので、移動ロボットの自己位置認識の向上を行う。そのため、2 節では、校正用ランドマークと V-SLAM を使用した移動ロボットのナビゲーションについて簡単に説明する。

次に、3 節において、移動ロボットの屋外ナビゲーション方法を提案する。提案するナビゲーション法では、ロボットにあらかじめ移動経路を渡すが、V-SLAM、



図 1: 校正用ランドマーク

ランドマークと GPS からの情報を用いて、自己位置認識及び位置の校正を行う。本手法では、GPS 信号の受信が不可能となった場合、V-SLAM とランドマークによって位置・姿勢を推定する。また、ランドマーク認識に失敗した場合、GPS と V-SLAM を使用して、高信頼性なナビゲーションを目指す。4 節に、使用するロボットの構成を説明して、行ったナビゲーション実験とその結果を示し、最後に、本研究のまとめと今後解決すべき課題について述べる。

## 2 位置校正用ランドマークと V-SLAM

本研究では、移動ロボットが屋内環境でナビゲーションする際に、校正用ランドマークと V-SLAM を用いて、ロボットの自己位置認識と位置の校正を行う手法を提案した [8][9]。これにより、移動ロボットは経路を正確に走行することができた。

本手法は、ロボットが経路を走行中に校正用ランドマークを認識するとその場で位置の校正を行う。ランドマークは、基準となる校正位置を示しており、ロボットがこの位置とオドメトリによって推定した現在位置との誤差をなくすことで位置の校正を行う。

### 校正用ランドマーク

校正用ランドマークを図 1 に示す。QR コードには位置情報が書き込まれており、ロボットは、この情報をもとに位置の校正を行う。左右に配置されている三角形は、ロボットがランドマークを認識しやすくなるためのものである。

### 校正手順

初めに、校正用ランドマークをロボットのカメラで撮影する。このときにランドマークまでの正確な距離や角度、特徴点の数などをモデル情報として、ロボット

のモデル用データベースに記憶させる。ロボットは、V-SLAM アルゴリズム下で、撮影した画像をもとにして、走行中に校正用ランドマークを認識すれば、ランドマークまでの距離と角度を算出して、位置を推定する。算出結果からの位置とランドマークが示している位置との誤差をなくすことによって位置の校正が行われる。

ランドマークの導入をしたことにより、特徴の数が少ない環境でも正確な屋内走行の実現ができた。そのこのとを複数の実験で検証した。

## 3 屋外でのナビゲーション

本研究の主な目的は移動ロボットを屋外走行させることである。移動ロボットの屋外ナビゲーションを行うために GPS を使用する。そこで、使用する GPS 受信機を 3 つ用意し、それぞれの性能を評価する。

次に、評価し終えた GPS 受信機を移動ロボットに搭載して、屋外走行を行う。また、2 節で述べたように校正用ランドマークと V-SLAM を使用した手法と併せてナビゲーション精度の向上を目指す。

行う屋外ナビゲーションは次のステップからなる。

1. 初期化：移動ロボットに移動経路、ランドマークモデルを転送する。
2. GPS 信号受信による走行
3. 校正用ランドマーク認識
4. ロボット・ランドマークの相対位置算出
5. 2次元コード (QR コード) の内容により自己位置校正
6. GOTO ステップ 2

なお、走行時に常に V-SLAM アルゴリズムを用いて、環境地図生成を行う。そこで、GPS 信号受信状況が悪化した場合、V-SLAM と校正用ランドマークにより、走行を続行する。また、ランドマーク認識ができないときに、GPS と V-SLAM によりナビゲーションを行うこととする。このナビゲーション方法のより信頼性が向上し、移動ロボットはキドナッピング状態を起こすことが避けられる。

### GPS について

ここで、まず、GPS について説明する。GPS には大きく分けて次の 2 種類の測位方法がある。1 つ目は、単独で測位する方法で、もう 1 つは相対測位である。前者は、1 個の GPS 受信機が 4 つ以上の GPS 衛星を捉える

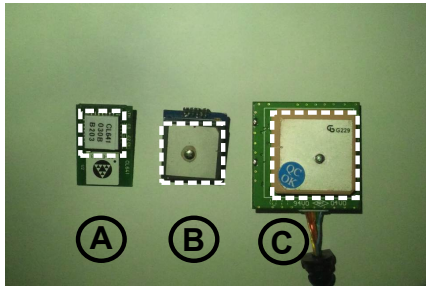


図 2: 使用する GPS

ことで位置を検出する測位方法である。相対測位は、さらに、DGPS (Differential GPS) と RTK-GPS (Real Time Kinematic-GPS) に分かれる。DGPS は相対測位のことであり、複数の受信機で 4 つ以上の GPS 衛星を観測して、受信機間の相対的な位置関係を計測する方法である。RTK-GPS とは、干渉測位のことであり、2 つの受信機から、ある衛星までの距離の差を搬送波の位相を使って求め、基線ベクトルを決定する計測方法である。単独測位は、測位精度が低く、相対測位は、精度が高い。特に、RTK-GPS は高い精度で測定を行うことができるが、測定に時間がかかるという欠点がある。

GPS のデータにはさまざまな要因により誤差が生じる。例えば、衛星から受信機までのあいだにある大気の影響、遮蔽物による影響、建物などによるマルチパス、また、受信データ自体にも人工的なノイズが含まれている。

GPS が出力するデータの通信規格は NMEA と呼ばれるものであり、音波探査機、ソナー、風速計 (風向風速計)、ジャイロコンパス、自動操舵装置 (オートパイロット)、GPS 受信機、その他数々の海上電子装置における通信規格のことである。NMEA 規格は、米国に本拠を置く米国海洋電子機器協会により規定されている。本研究で使用する GPS の通信規格は NMEA0183 となっている。今回は、受信データに含まれている緯度経度の情報を使用する。なお、GPS が出力する緯度経度の単位が世界測地系の度分秒 (60 進数) で表示されており、地図上で表示する場合は、度 (10 進数) に変換する必要がある。

図 2 は、本研究で使用する 3 種類の GPS 受信機 (以下、GPS) である。GPS の測位方式は単独測位するタイプで、測位精度は 3m となっている。点線で囲まれている部分は GPS のアンテナである。

## 4 実験結果

ここで、提案したナビゲーション法を検証するために行った実験について説明する。まず、使用する車輪型移動ロボットの仕様を次節で示す。次に、屋内ナビ

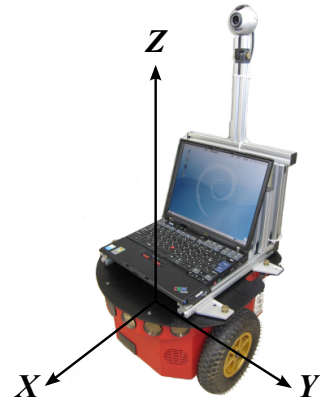


図 3: 移動ロボットの外観と座標系

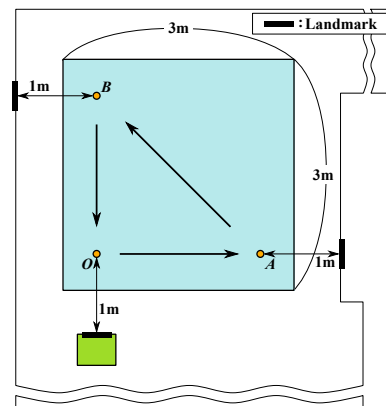


図 4: 走行環境

ゲーション実験、行った GPS レシーバの評価と屋外走行実験の内容について述べる。

### 4.1 移動ロボットの構成

移動ロボットにはカメラ、オドメトリ、超音波センサ、GPS センサを搭載し、これらのセンサを使用して、移動ロボットのナビゲーション実験を行う。屋外環境での正確な位置推定には、GPS の精度により左右されるため、初めに複数 GPS の精度の評価を行う。次に、選定した GPS を移動ロボットに搭載して、屋外走行を行う。また、校正用ランドマークと V-SLAM を使用して、移動ロボットを屋内環境で走行させていた研究 [8][9] では、自己位置認識が難しい環境でもランドマークを設置することによって、自己位置の認識ができ、環境内を正確に走行することができた。この手法を屋外走行に用いることで移動ロボットの自己位置認識の向上を図る。

本研究では、MobileRobots 社製の P3-DX 移動ロボットを用いる [10]。移動ロボットの外観と座標系を図 3 に示す。搭載されているセンサ類は、500ppr の分解能を持つロータリエンコーダ、障害物回避のための超音

表 1: Calibration results

Method	Location error [mm]	Orientation error [deg]
Odometry	307.4	52.9
V-SLAM	342.2	51.3
Proposed	69.2	10.2

波センサ、640×480の有効画素数を持つ130万画素のCCDカメラ(Logitech社製QuickCam Pro 4000)、自己位置認識のためのGPSである。

## 4.2 屋内環境での走行実験

ここで、校正用ランドマークとV-SLAMを用いた屋内走行実験について説明する[8][9]。図4に屋内走行の1つの環境を示す。校正用ランドマークの有効性を確認するため、オドメトリとV-SLAMには不利な環境で実験を行った。実験環境は周囲に目立った特長が少なく、床はタイヤがスリップを起こしやすいタイルになっている。ロボットは点O、点A、点Bの順に循環する。移動中にランドマークを認識すると位置の校正を行う。移動と校正を繰り返し、生じる誤差の平均値を表1に示す。

オドメトリよりV-SLAMの位置誤差が大きくなっているのが、走行環境内に目立った特徴が少ないからである。一般的に、環境の数多くの特徴点を持つ場合、V-SLAMの精度はおおよそ10cm以下である。今回の実験でこのことを確認した。

また、同表より、本手法は正しい自己位置に復帰していることが分かる。この結果から、V-SLAMにランドマークを適用することで、校正精度の向上を図れたことが明らかである。

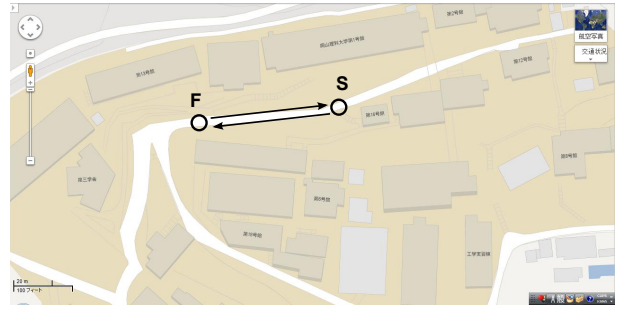


図 5: 測定環境の地図

## 4.3 GPS 測位性能の検証

### 測定方法

図5は測定環境である。道の幅が3~4mであり、移動距離が約60mの道である。測定は、図5のS点とF点の間の道のりを往復して行った。

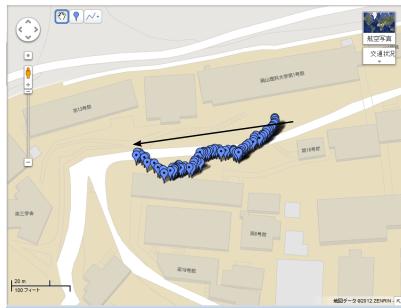
図6は、地点Sから移動しながら測定した結果である。AのGPSは蛇行して、道からそれている。BとCのGPSは道に沿うように寄ってきていることがわかる。特に、CのGPSが正確に道に沿っている。AとBのGPS受信機の精度がよくないのは、走行環境での受信状況が頻繁に変更するからである。両GPSのアンテナの寸法が小さいため、感度が減少する。

移動ロボットには、CのGPSを搭載して、屋外ナビゲーションを行う。

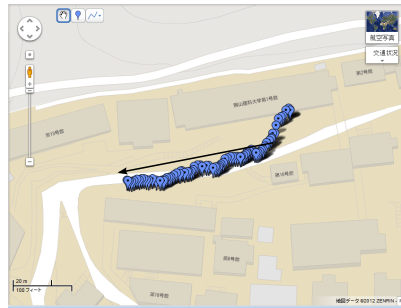
## 4.4 移動ロボットの屋外走行

図5に示した環境内に移動ロボットの屋外ナビゲーションを行う。ここで、校正用ランドマークとV-SLAMを併用した走行も行う。

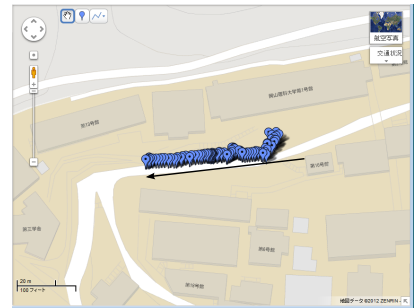
まず、GPSのみで以下のように屋外走行を行った。事前に移動ロボットには走行経路の情報を与えている。移動ロボットは開始地点から目的地までの経路を移動中に定期的に一時停止し、その場でGPSによる位置の



(a) A の GPS



(b) B の GPS



(c) C の GPS

図 6: S から F に移動しながら位置の測定をした結果

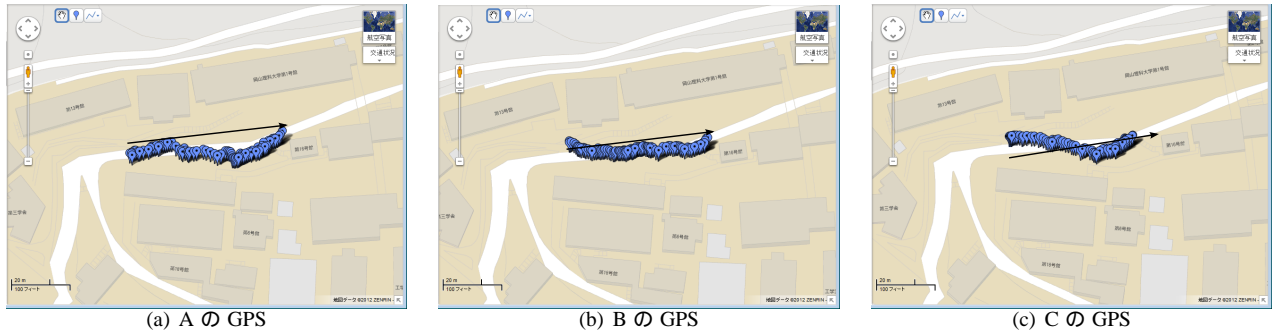


図 7: F から S に移動しながら位置の測定をした結果

測定を行う。オドメトリによって移動ロボットが認識している位置と GPS が示す位置との誤差をなくすことで、位置の校正を行う。なお、今回はソフトウェアの開発が途中であるため、GPS を使用するとき一時停止するが、今後は、リアルタイムで GPS を使用できるようにして、移動ロボットのナビゲーションを行う。

次に、校正用ランドマークと V-SLAM を GPS と共に用いる。事前にロボットに与える情報は、走行経路と校正用ランドマークのモデル情報である。校正用ランドマークは経路上に一定間隔で配置した。位置の校正をするときは、最初に校正用ランドマークと V-SLAM を使用する。校正手順は 3 節と同じである。ロボットが、ランドマークを認識すると、ロボットが持っているランドマークのモデル情報とカメラで読み取ったモデル情報を比較し、ランドマークとの距離や角度などの位置を算出する。算出された位置とランドマークが示している校正位置との誤差をなくすことで、位置の校正を行う。もし、カメラがランドマークを発見できなかった場合、代わりに GPS を用いて位置の校正を行う。

#### GPS のみで走行した場合

図 8 は走行経路と校正位置を表している。丸印が開始地点と目的地を表し、四角の印が校正位置である。三角の印は GPS が示した位置である。道の北側にコンクリートの壁があり、南側は斜面となっている。

start 地点の周囲には木や背の高いコンクリートの壁があるため、マルチパスが発生し、GPS は壁際や斜面に近い位置を示すことが多い。そこで、受信環境の良い所に移動して、再度、走行を行った。走行場所を図 9 に示す。そこで、GPS の精度が高くなり、移動ロボットの走行が期待通りにできた。

しかし、移動ロボットが安定した走行をするには、GPS の精度をさらに向上する必要がある。Kalman Filter 等を用いて GPS の精度を向上させた上で、再度、走行させることを試みる。

#### 校正用ランドマークと V-SLAM を併用した場合

次に、校正用ランドマークと V-SLAM を用いて屋外走行を行った。校正用ランドマークにより高精度な位置の校正はできるが、日差しの影響でランドマークの認識が困難である。これは、カメラに自動で明るさを調節する機能が付いていないために生じた問題である。ただし、良好な受信状況下で、2 節の方法を適用するとランドマークの認識が不可能であった場合でも GPS による高精度な走行を実現できた。

## 5 まとめ

移動ロボットを屋外走行させるために、GPS と校正用ランドマークおよび V-SLAM を使用した。GPS を使用して移動ロボットの屋外ナビゲーションを行う前に、

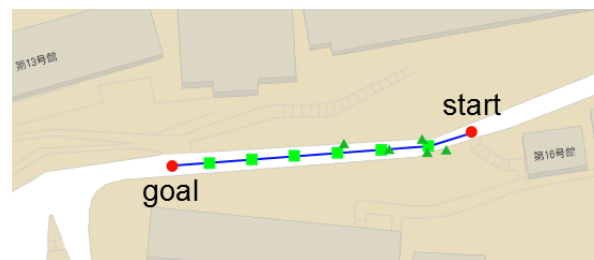


図 8: 走行経路と校正位置

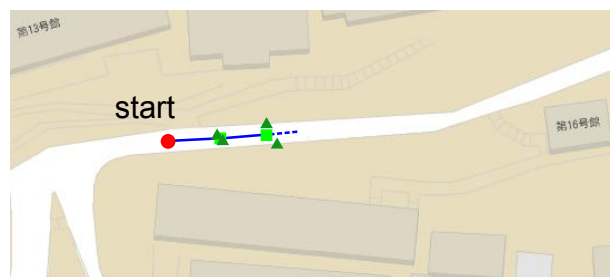


図 9: 受信状況の良い走行場所

GPS レシーバの測位精度を評価した。検証に使用した GPS は 3 種類で、いずれも単独測位するタイプである。GPS を利用したときにロボットが道に沿った高精度な走行が得られた。

しかし、安定した走行を実現するには、GPS の精度をさらに向上させる必要がある。Kalman Filter 等の制御技術を用いて、GPS の測位精度が向上し、安定した走行をできると考えている。

次に、校正用ランドマークと V-SLAM を使用して屋外ナビゲーションを行った。この手法は、高い精度の位置校正ができたため、今回の屋外走行にも用いた。その結果、十分な精度での走行はできたが、日差しの影響でランドマークも認識が困難になることがあった。自動で明るさを調節する機能を持ったカメラを使うことで、この問題は解決でき、長距離の走行が可能になると考えている。

今後、上記の問題を解決することで、GPS と校正用ランドマークと V-SLAM を併用した、移動ロボットの長距離屋外走行させることが可能になる。

## 参考文献

[1] Durrant-Whyte, H. and Bailey, T. “Simultaneous localization and mapping: part I”, Proc. Robotics & Automation Magazine, IEEE, 2006, Vol.13, pp. 99–110.

[2] Hargrave, P. J., “A tutorial introduction to Kalman filtering”, Proc. Kalman Filters: Introduction, Applications and Future Developments, IEE Colloquium on, 1989, pp. 1/1–1/6.

[3] 吉田 享平, 日比野 文則, 高橋 泰岳, 前田 陽一郎, “移動ロボットのための全天周視覚システムによる人間

指示認識システムの開発と評価”, 第 27 回ファジィシステムシンポジウム, 2011.

- [4] 落田 純, “車輪型移動ロボットの屋内長距離ナビゲーションに関する研究”, 筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文, 2003.
- [5] Karlsson, N., Di Bernardo, E., Ostrowski, J., Gonclaces, L., Pirjanian, P., and Munich, M. E., “The vSLAM Algorithm for Robust Localization and Mapping”, Proc. 2005 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, 2005, Barcelona, Spain, pp. 24–29.
- [6] 大野 和則, “GPS を利用した自立移動ロボットの屋外ナビゲーションのための測位手法に関する研究”, 筑波大学博士 (工学) 学位論文 (甲第 3545 号), 2004.
- [7] 酒井 大介, 水川 真, 安藤 吉伸, “GPS 搭載の屋外自律移動ロボットにおける移動経路指定に関する研究”, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2009, ”2A2-F11(1)”–”2A2-F11(2)”.
- [8] Kroumov, V. and Okuyama, K., “Localization and Position Correction for Mobile Robot Using Artificial Visual Landmarks”, Int. J. Advanced Mechatronic Systems, 2012, Vol. 1, Nos. 3/4, pp.197–212.
- [9] 川崎 徹, 奥山 公浩, クルモフ バレリー, “単眼カメラによる移動ロボットの自己位置校正”, 第 19 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, 2010, pp. 118–119.
- [10] MobileRobots, Inc., <http://www.mobilerobots.com/>, 2013.