

# 屋内外に渡って人間を誘導するキャンパスガイドロボットの開発 – レーザレンジセンサを用いた自己位置推定と自律走行 –

石岡 淳之(筑波大) 大矢 晃久(筑波大) 油田 信一(筑波大)

## Development of Campus Guide Robot in Indoor and Outdoor Environments – Self-Localization and Autonomous Navigation using a Laser Range Finder –

Atsushi ISHIOKA, Akihisa OHYA, Shin'ichi YUTA  
(University of Tsukuba)

**Abstract**—The purpose of this study is to establish a navigation methodology of a mobile robot in indoor and outdoor environment. As a concrete task, we are trying to develop a robot which can guide guests in the university campus. The robot has to navigate autonomously from a bus stop (outdoor) to the laboratory (indoor) in order to guide people. In this paper, a method for self-localization and autonomous navigation are described. The self-localization is done based on the scan-matching of the data obtained by a laser range finder and odometry information. The autonomous navigation is realized using the teaching and playback strategy. Some experimental results are also shown.

**Key Words:** Campus Guide Robot, Mobile Robot Localization, Indoor / Outdoor Navigation

### 1. はじめに

#### 1.1 研究の背景

近年、移動ロボットは工場や危険な環境から人間の生活環境へと、その活動場所を移している。そのようなロボットの例として、ビル内の警備ロボット<sup>1)</sup>や部屋の掃除ロボット<sup>2)</sup>などがある。しかし、これらの移動ロボットの多くは活動場所を屋内としている。

一方、人間は屋内だけでなく屋外においても多様な活動を行っている。しかし、屋外で活動する移動ロボットは屋内で活動する移動ロボットに比べてまだまだ少ない<sup>3)</sup>。これは、屋内に比べて屋外の環境は複雑で整っておらず、また行動すべき範囲が非常に広がるため、現在の移動ロボットの技術での実現が難しいことが原因と考えられる。

さらに、屋内外を連続的に移動して作業を行うロボットの実現例となるとあまりない。筆者が所属する研究室では過去に屋内外を移動する研究が行われた<sup>4)</sup>。これは、屋内の走行には人手によって計測した地図情報をロボットに与え、その地図を元に走行した。また、屋外では路面に敷き詰められたタイルブロックのパターンをカメラを用いて検出して走行に役立てていた。この方法では、ロボットに与える地図を人手により計測しなければならず、環境が広大になると非常に大変な作業になる。また、タイルブロックが敷き詰められている環境という制限がある。そこで、本研究では人手により環境を計測することが困難な広い範囲の屋内環境と、より一般的な屋外環境を選び、移動ロボットに作業を行わせることを考え、その総合的な具体タスクとしてキャンパスガイドロボットの開発を行うこととした。

#### 1.2 研究の目的と方針

本研究の目的は、キャンパスガイドロボットを開発することにより、ロボットが屋内外に渡って移動し、作業を行う技術を開発することである。キャンパスガイドロボットの開発にあたり、必要な技術課題はタスクの設定の方法により異なってくる。ここで、必要とな

る技術課題を明確にするためにタスクの設定を行う。

まず、研究室に来訪者があるとする。このとき、ロボットは筆者の研究室がある筑波大学第三学群L棟三階3L302室前の廊下から第三学群前バス停まで来訪者を迎えに行く。経路の途中にはエレベータがあり、研究室側は屋内環境であり、バス停側は屋外環境である。ロボットはバス停に到着すると来訪者が到着するまで待機する。ロボットは来訪者が到着したことを検知したら来訪者を研究室まで案内する。研究室まで来訪者を案内することでタスク終了とする。これがキャンパスガイドロボットが行うタスクである。

Fig.1は、本研究で走行する環境の略図と走行する経路を示している。また、Fig.2は走行する環境の写真である。走行する経路はエレベータを挟んで屋内環境と屋外環境に別れている。エレベータの乗降に関しては、ロボットに搭載されたマニピュレータでボタン操作を行う方法やロボットがエレベータと直接通信することで操作を行う方法が考えられるが、本稿ではエレベータの乗降は取り扱わないことにする。

### 2. システムのハードウェア構成

Fig.3は本研究で使用するロボットとシステムのハードウェア構成を示す。本システムは、移動ロボット本体(筐体、車輪、モータなど)、外界センサとしてレーザーレンジファインダ(以下LRFと呼ぶ)、それらを総括制御するノートPCからなる。

#### 2.1 移動ロボット

本研究では、筆者らが所属する研究室で開発された自律型移動ロボットを使用した。ロボットのサイズは幅、奥行き共に約50cm、高さ約45cmであり、走行部は独立二輪操舵のノンホロミックな車両である。

ロボットのコントローラは機能分散アーキテクチャで構成されており、必要なモジュールを組み合わせで使用。本研究では、走行制御モジュール<sup>5)</sup>を用いる。PCからこのモジュールにコマンドを送ることによりロボットを走行させたり、オドメトリによる自己位置の取得を行うことができる。オドメトリとは、車輪

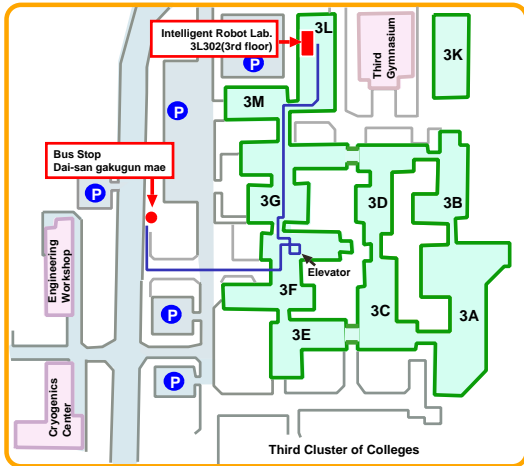


Fig.1 Rough sketch of environment and navigation route

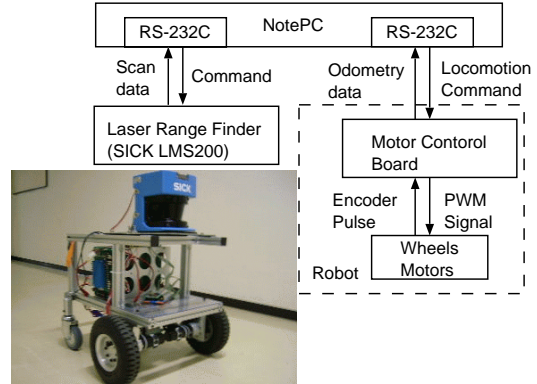


Fig.3 Hardware system

### 3.1 目的地まで走行するための基本戦略

ロボットが自律的に移動して目的地に到達するには、ロボットに何らかの地図を与えて、その地図上で現在位置を把握する必要がある。本研究では、ロボットは屋内外に渡って走行することから取り扱う環境が広大となる。したがって、環境を手により計測して地図を作成することは非常に困難となる。そこで、できるだけ簡単に地図作成を行うことを考え、“オドメトリとスキャンマッチングによる自己位置推定とマップ構築法”<sup>7)8)</sup>を用いることにした。これは、オドメトリデータとLRFデータのスキャンマッチングを確率的に融合することでロボットの自己位置推定を行い、推定した自己位置に基づいて地図作成も行うものである。あらかじめ計測したデータをコンピュータにより自動的に地図作成させるため、人間の労力を減らすことができる。また、比較的簡単に行えることから、環境の変化にも対応させやすいという利点がある。さらに、スキャンマッチングを行うことにより得られたLRFデータの重複を間引くことができるので、全体的にデータ量を削減することもできる。

自律走行には作成した地図と地図作成時に得られるロボットの軌跡を与え、その軌跡を追従するようにした。すなわち、地図作成時に教示、自律走行時にそれを再生するという教示再生方式による走行<sup>9)10)</sup>を行うことにした。教示再生方式による走行では、新たに経路を生成しなおす必要がないという利点がある。

また、再生走行中にロボットは与えられた地図上で自己位置を把握する必要があるが、これは与えられた地図上においてオドメトリとスキャンマッチングの自己位置推定法を用いることで対処する。

### 3.2 教示走行

教示走行では、ロボットの走行軌跡のデータ列と外界センサの計測データ列を記録しておく。

本研究では、ロボットにあらかじめ走行させたい経路をリモコンにて走行させておきオドメトリデータとスキャンデータを記録しておく。次に、記録したデータを用いて地図作成を行う。このときに得られるロボットの位置を走行軌跡として記録しておく。Fig.4は実際に作成した地図の一部であり、LRFによって計測された廊下の壁や障害物などのスキャンデータと自己位置推定によって得られたロボットの走行軌跡を表している。ロボットは30cm/secでリモコンにより操作され、オドメトリデータとLRFのスキャンデータを取得している。

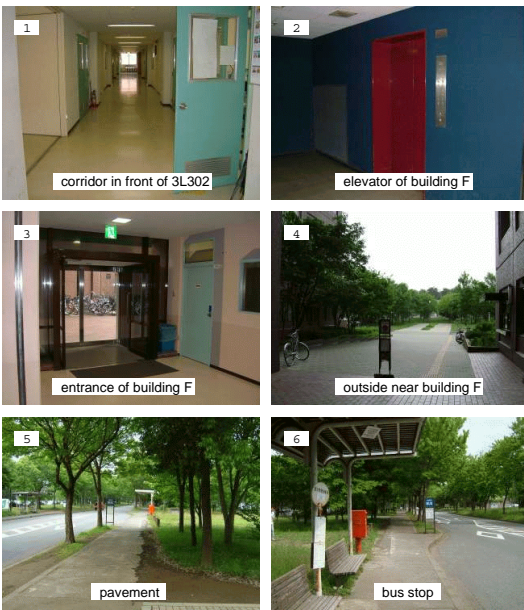


Fig.2 Pictures of environment

につけられたエンコーダから出力されるパルスを積算することにより、ロボットの位置 $(x,y,\theta)$ (本稿では特に断らない限り姿勢も含む)を推定する方法である。本システムにおけるオドメトリデータは、車輪からのエンコーダパルスより、ロボットが起動した点を原点とした座標系(グローバル座標系と呼ぶ)での位置を計算したものである。

### 2.2 LRF

LRFは、SICK社製のLMS200<sup>6)</sup>を使用する。これは周囲を二次元的にスキャンする非接触レーザ測定システムであり、レーザを照射し、その反射光を受け取るまでの時間によりセンサから物体までの距離を求める。本研究では、角度分解能を0.5度、測定距離を32m、測定視野角を180度に設定して用いている。

## 3. 自律走行機能の実現

本稿ではキャンパスガイドロボットの機能として最も重要である目的地までの走行について述べる。

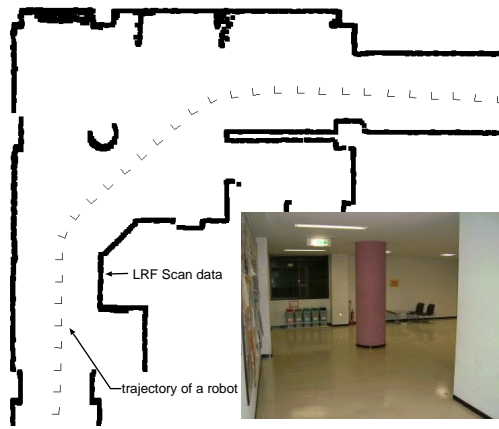


Fig.4 A map used for navigation

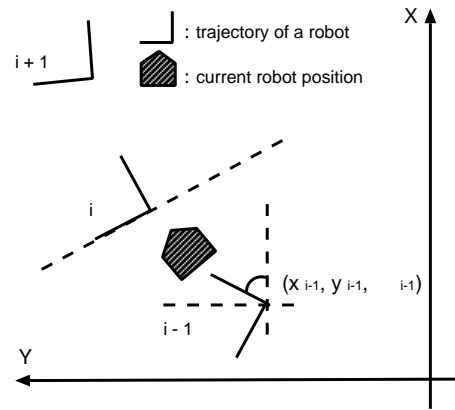


Fig.5 Relation between tracks and current robot position

### 3.3 再生走行

再生走行では、教示走行時に得られた走行軌跡のデータ列に基づいて走行する。

再生走行を行うためには、Fig.4のような地図を与え、その地図上で自己位置を把握し、与えられた走行軌跡に追従するように走行制御を行う必要がある。

ここで走行制御について説明する。例えば、走行軌跡が  $(0, \dots, i-1, i, i+1, \dots, n)$  と与えられており、Fig.5のようにロボットは軌跡  $i-1$  と軌跡  $i$  の間を走行しているとする。この時、ロボットは軌跡  $i$  を次の目的地として、座標  $(x_i, y_i)$  を通り、傾き  $\theta_i$  の直線を追従する走行コマンドを発行する。ロボットの自己位置が軌跡  $i$  の座標  $(x_i, y_i)$  を通り、傾き  $\theta_i$  の直線に垂直な直線 (Fig.5の軌跡  $i$  上の点線) を超えたら、ロボットの目的地を軌跡  $i+1$  にする。これを  $n$  まで繰り返すことにより、最終目的地に達する。

ロボットの自己位置は、オドメトリから取得することができる。しかし、オドメトリにはスリップなどにより誤差が累積するという問題がある。したがって、再生走行中にロボットの自己位置を修正する必要がある。ロボットの自己位置の修正にも地図作成時に使用したオドメトリとスキャンマッチングによる自己位置推定法を用いる。推定された位置をロボットに与えることで走行位置の修正が行われるようにした。

しかし、自己位置推定の処理には時間がかかるため、その間にロボットは走行しており、推定結果が得られた時にはロボットの位置姿勢はすでに変化している。したがって、推定処理中のロボットの姿勢変化を考慮する必要がある。そこで、Fig.6のように、自己位置推定開始前と推定終了時のオドメトリデータを取得しておき、その差分を推定処理中の姿勢変化として自己位置推定結果の位置に加えることで現在のロボットの位置とした。これをロボットに与えることで位置の修正を行う。

## 4. 実験

### 4.1 自己位置推定

まず、与えられた地図上でロボットが自己位置を推定できるかどうかを確認した。ロボットはあらかじめ作成しておいた地図を読み込み、その地図上で自己位置推定を行う。このとき、地図上でロボットの初期位置は与えておき、オドメトリとLRFのスキャンマッチングにより自己位置推定を行う。実験では、教示走

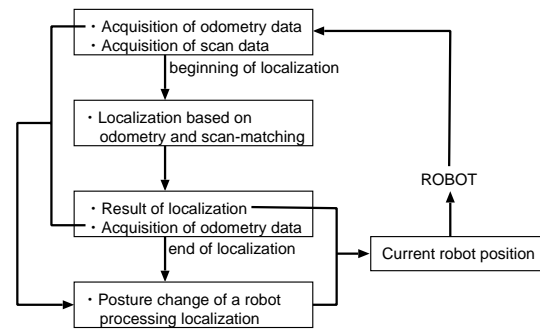


Fig.6 Algorithm for retroactive position correction

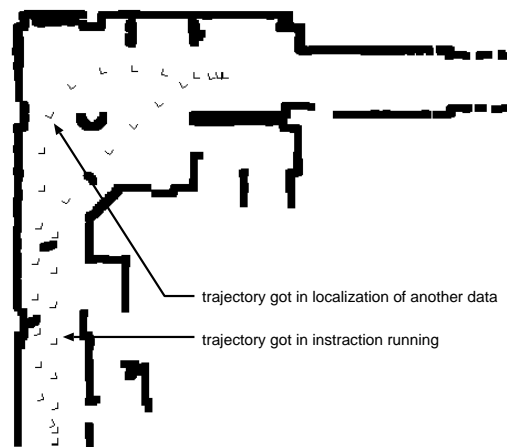


Fig.7 Localization in indoor environment

行とは異なる走行で得られたデータを取得しておき、作成した地図とそのデータによりオフラインで自己位置推定を行うこととした。Fig.7,8は、屋内と屋外の一部においてそれぞれ地図作成を行い、もう一度別の経路を走行させて得られたデータを用いて自己位置推定を行ったものである。走行経路そのものは異なるが、読み込んだ地図上でうまく自己位置推定が行われている。ここでは短一部分の結果を示したが、ほとんどのすべての走行経路で正しく自己位置推定が行われることを確認した。



Fig.8 Localization in outdoor environment

#### 4.2 自律走行

これまでに述べた自律走行機能をロボットに実装し、実際に走行する屋内環境と屋外環境にてそれぞれ自律走行実験を行った。ロボットの走行速度は 30cm/sec、自己位置の取得は 50msec 毎、自己位置の修正は 2000msec 毎に行った。

まず、位置修正を行わないでオドメトリだけに基づいて屋内環境を与えられた軌跡に従って走行させた。このとき、ロボットは徐々に右方向にずれていき、壁に衝突するという結果が得られた。約 20m の走行で実際の位置よりも右方向に約 1m、後方向に約 1m のずれが生じた。

次に、自己位置の修正を行いながら屋内環境を走行させる実験を行った。結果として、3L302 室からエレベータ前まで自律走行することができた。Fig.9 は走行経路の一部であり、ロボットが与えられた軌跡に沿って走行している様子が見られる。しかし、実験において何度か失敗するケースが見られた。失敗の原因の一つには、オドメトリとスキャンマッチングによる自己位置推定を失敗することがあった。走行する環境は長い直線の廊下であり、自己位置推定時に廊下の長手方向に誤推定をする可能性が高かった。そのため、自己位置がわからなくなり、壁に衝突するなど自律走行不能になっていた。これに対処するためには、自己位置推定をよりロバストに行う必要がある。

一方、屋外環境においても走行実験をおこなった。結果は最終目的地であるバス停まで走行することができなかった。屋外環境では屋内環境よりも自己位置推定に失敗する頻度が高く、自律走行不能になりやすいためと考えられる。また、自動車などの障害物の影響も大きい。自己位置推定に失敗しないために移動障害物をスキャンデータから取り除く必要がある。

#### 5. まとめと今後の予定

本研究ではキャンパスガイドロボットの開発を行う。大学への来訪者をバス停まで迎えに行き、研究室まで案内することを目標としている。本稿ではロボットのナビゲーション方法について説明し、ロボットの自己位置推定と自律走行の実験について述べた。屋内環境における自律走行実験では自律走行させることに成功した。今後は屋外環境での自律走行の成功を目指し、設定した走行経路の全経路の走破を試みる。また、自己位置推定のロバスト性を向上させることで自律走行の信頼性を上げる。さらに、走行経路上にある障害物

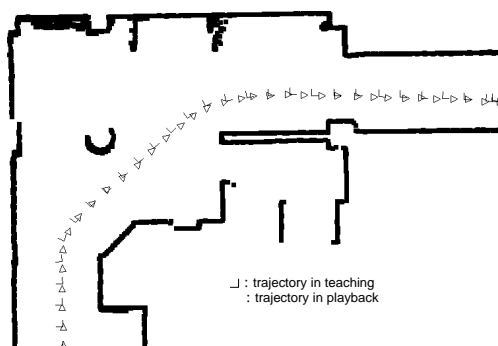


Fig.9 Trajectory in teaching and in playback

などの検出や回避を行い、より安全に目的地まで走行させる機能を実装することを考えたい。

#### 謝辞

本研究で使用しているスキャンマッチングは科学技術振興事業団さきがけ 21 研究員 友納正裕氏によって開発されたもので、そのプログラムを提供していただいた。ここに感謝いたします。

#### 参考文献

- 1) 総合警備保障株式会社 <http://www.alsok.co.jp/>
- 2) 松下電器産業株式会社 <http://panasonic.co.jp/>
- 3) 田中 豊, 永谷 圭司, 赤沢 鉄一:“自律走行車の屋外ナビゲーション ( LRF を用いたランドマークマップの逐次構築 )”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, 1A1-G05(2002)
- 4) 入江 清, 油田 信一:“移動ロボットの屋内外を通じた自律的ナビゲーション”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'03, 1P1-1F-D4 (2003)
- 5) S.Iida, S.Yuta : “Vehicle command system and trajectory control for autonomous mobile robots”, Proc. of IEEE/RSJ Intl. IROS'91, pp.212-217 (1991)
- 6) ジック株式会社 <http://www.sick.co.jp/>
- 7) 友納 正裕 : “移動ロボットの大域的自己位置推定のためのスキャンマッチング方式”, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2003), 2I1-4 (2003)
- 8) 石岡 淳之, 友納 正裕, 坪内 孝司, 油田 信一:“オドメトリと LRF のスキャンマッチングを用いた移動ロボットの確率的自己位置推定とマップ構築”, ロボティクス・メカトロニクス講演会'04, 1P1-L1-74 (2004)
- 9) 斎藤 雄一, 油田 信一:“移動ロボットにおけるティーチング 操縦による経路と環境データの教示とそれに基づく自律走行”, 第 9 回日本ロボット学会学術講演会, pp.255-258 (1991)
- 10) T.Ohno, A.Ohya and S.Yuta:“Autonomous Navigation for Mobile Robots Referring Pre-recorded Image Sequence”, Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and System, Osaka, Japan, pp.672-679 (1996)