

座標系を用いない人工ランドマークを用いた 移動ロボットのナビゲーション

Navigation for Mobile Robot using Artificial Landmark without using Coordinate System

○及川一美*, 高氏秀則**, 江丸貴紀***, 土谷武士†, 大久保重範*

○Kazumi Oikawa*, Hidenori Takauji**, Takanori Emaru***,
Takeshi Tsuchiya†, Shigenori Okubo*

*山形大学工学部, **北海道大学大学院工学研究科,
**電気通信大学, †北海道工業大学

*Faculty of Engineering, Yamagata University,
**Graduate School of Engineering, Hokkaido University
***The University of Electro-Communications
†Hokkaido Institute of Technology

キーワード：人工ランドマーク(Artificial landmark), 自律移動ロボット (Autonomous mobile robot),
行動決定手法 (Decision making), 行動規範型ロボット (Behavior-based Robotics),
サブサンクション・アーキテクチャ (Subsumption Architecture)

連絡先：〒992-8510 米沢市城南四丁目三番地十六号 山形大学 工学部 機械システム工学科
及川一美, Tel.: (0238)26-3246, Fax.: (0238)26-3246, E-mail: okazu@yz.yamagata-u.ac.jp

1. はじめに

今回は我々が提案している座標系を用いないナビゲーション手法における問題点の解決として、ランドマークの改良及び、トポロジカルマップを与えることにより、プランニング及びエラーリカバリ能力を付加することについて述べる。本手法はロボットが家庭や福祉施設へ普及されるために、ロボット専門家ではない一般の方々でも容易にシステムを構築できるようなロボットシステムを目指して研究を行ってきた。従来のロボットシステムを考えると、作業環境を絶対座標で表現したり、ランドマークやロボットの初期位置を正確に配置し

なければならないなど、システム構築コスト(セットアップコスト)が多大にかかるという短所を有していた¹⁾。これまでシステム構築コストの低減を図るために、絶対座標を用いないナビゲーション手法を提案してきた。本手法では行動規範型手法に倣って地図を一切与えておらず、利用者はロボットに目的地までのランドマーク列及びランドマークにおける行動列を指示する必要があったが、絶対座標表現の地図に変わるトポロジカルマップを与えることで、目的地までの経路計画をロボットに行わせることを行った。これにより、ロボットに計画能力を与えることで更なるセットアップコ

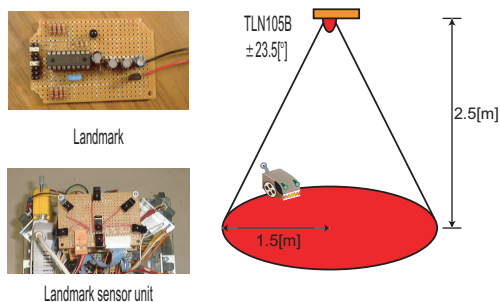


Fig. 1 Old IR Module Landmark and landmark sensors

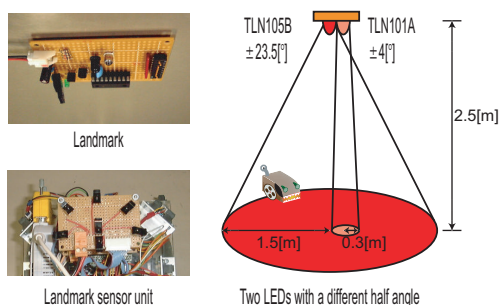


Fig. 2 New IR Module Landmark and landmark sensors

ストの低減が図れることになる。

2. 人工ランドマークの改良

本研究では認識が容易な人工のランドマークを利用している。本研究におけるランドマークの役割は次の2つを持たせてある、

- 1) 利用者に直感的な目的地の指示方法を提供する。
- 2) ロボットに分岐点を認識させる。

その役割を果たすために **Fig. 1** に示すような赤外線送信の人工ランドマークを使用していた。このランドマークは8bitのID番号を持たせてあり、38kHz変調でID番号を送出している。このランドマークは天井に下向きに設置され、2.5m位の高さの天井に配置した場合、床で真上に向けたセンサを用いると半径約1.5mの範囲でIDを認識することができる。しかし、範囲が広すぎるためランドマークの真下を検出するのが困難であるという問

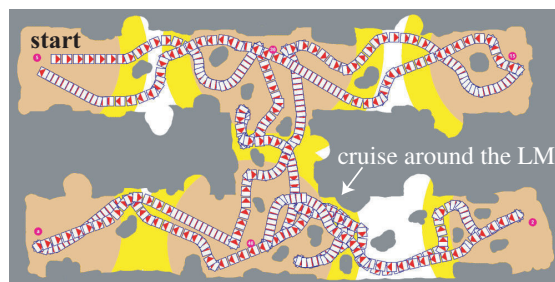


Fig. 3 Problem of cruising around a landmark

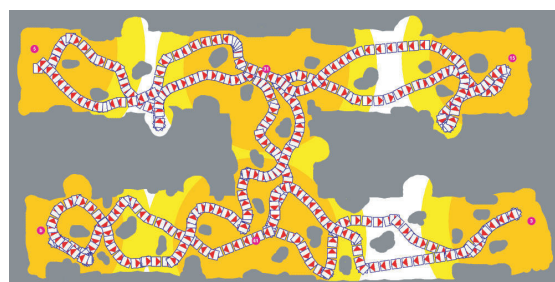


Fig. 4 Result using new landmark sensor

題があった。そこで、**Fig. 2** に示すような半値角の狭いLEDを追加し、真下の検出が容易に行えるようにした。

その変更に合わせてランドマークセンサの改良を行った。従来のセンサは中央の受信モジュールのみIDが識別可能であり、その他周囲のモジュールはIDに関係なく信号を受信のみを判断していた。この方式では、シミュレーション上ではあるが **Fig. 3** で示されるような、ランドマーク付近で巡回が起こるといった問題があった。これは、ランドマーク認識範囲を越える付近に障害物が存在する場合、一度範囲から出たロボットが障害物回避により範囲内に戻されると、再びそのランドマークのIDを識別しようと接近を試みるからであり、そのため、出入りを繰り返すからであった。そこで、今回の改良では全てのモジュールでIDを識別できるようにした。この改良により、どの方向にどのIDのランドマークがあるのか識別できるようになったため、**Fig. 4** に示したように障害物が増えても上記のような無駄な出入りはなくなった。

3. トポロジカルマップ

経路計画やエラーリカバリには地図が必要となる。ここでは絶対座標表現の地図の代わりに、ランドマークをノード、通路をアークとするグラフ表現の地図を与える。今回は簡単のために各ノードの最大次数を4として、リンクの接続方向を便宜上、東、西、南、北とする。これは概念上の方向であり、実環境における方向と等しくなる必要はない。したがって、初期状態においてロボットが向いている方向が、どのランドマークからどのランドマークへリンクしている通路の方向なのか教える必要がある。

3.1 経路計画

本手法における経路とは目的地までのランドマーク列である。タスクの与え方としては次の3通りの与え方を対象にする。

- 1) 目的地までの連続した全てのランドマーク列を与える。
- 2) 必ず通らなければならないサブゴールのランドマーク列を与える。
- 3) スタートとゴールのランドマークのみを与える。

1つ目の与え方は利用者が全経路計画を行う方法で、利用者は自由に細かく経路を指定できる。2つ目の与え方は必要とする部分を概略的に指示する方法で、辿るランドマークの順番が重要である場合の与え方である。離散的にランドマークがサブゴールとして指示されているので、サブゴール間の計画はロボットが行わなければならない。3つ目はロボットにスタートとゴールの最短距離（最小ノード数）を計画させる方法である。プランニングにはグラフ探索手法を用いる。エラーリカバリとプランニングは誤った地点から計画するのか、

正しい地点から計画するのかの違いであるから、必要なときにプランニングを行うようにすれば、これら二つの処理を一つの処理にまとめることができる。つまり、現在到達したランドマークと次に向かうべきサブゴールが地図上で隣接しておらず、且つその間のサブプランが立てられていない場合にプランニングを行い、そのサブプランを実行すればよい。

3.2 計画実行

従来手法における計画実行は経路の線に追従することであるのに対して、本手法においてはランドマークにおける行動を決定することである。つまり、次のランドマークに向かうための方向を決定することである。

マップ上では隣接するノードの方向が分かるので、次のランドマークに向かうために、右に90°曲がればいいのか、左に90°曲がればいいのか、直進すればいいのかの行動を計算することができる。一方、ロボットは通路に沿うための方向を保持しているので、計算で得られた行動から次の方向を計算することができる。これを各サブゴールで順に行うことによりゴールに到達することができる。

4. イベント駆動型階層構造切替手法

本手法は座標を用いないため行動決定には行動規範型手法を用いる。我々が提案しているイベント駆動型階層構造切替手法は、SA²⁾を基本としているが、我々が「非干渉型SA」と呼んでいる手法³⁾の問題点の解決を図った手法である。非干渉型SAは層間に通信路を持たないために、層の追加、変更、削除、交換が容易であり、通信路を持っている干渉型SAに比べてデバッグまで含めた開発が容易である。しかし、非干渉型SAの場合は、固定階層

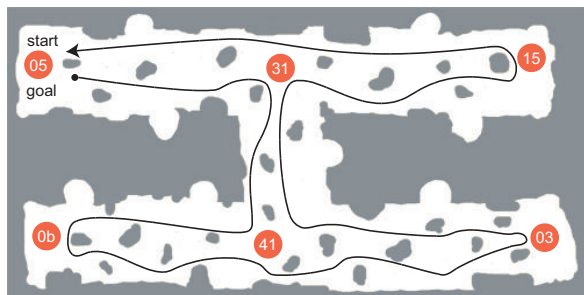


Fig. 5 Corridor environment used in the simulation

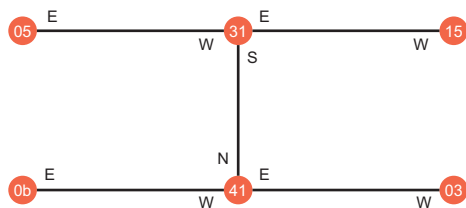


Fig. 6 Topological map

問題があるためタスクによっては設計が困難となる場合がある。その問題を状態遷移手法を用いて解決を図った手法である⁴⁾。

5. シミュレーション

ここでは実験で使用する実機を想定してシミュレーションを行った。ロボットは独立駆動車輪型移動ロボットで、測距センサを8個、電子コンパスを1個、そしてランドマーク検出センサを1個搭載している。測距センサは最大で0.8[m]まで計測可能で約 ± 0.1 [m]の範囲の誤差があるものとした。電子コンパスは8方位検出できるものとした。ロボットはデッドレコニングは用いず正確な自己位置はわからないものとする。

作業環境はFig. 5にあるような通路状環境に複数のランドマークを配置し指示通りに辿らせることを考える。環境内のランドマークは天井に配置されるものとして、障害物によるオクルージョンは起きないものとする。トポロジカルマップとしてFig. 6を与えた。

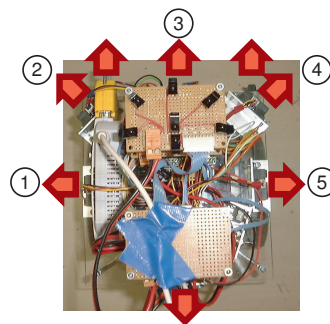


Fig. 7 Arrangement of PSD

5.1 モジュール

以下、今回のタスクで設計した各モジュールについて述べる

Ring Modle 障害物回避を行うモジュールである。障害物検知を行うための8個の測距センサをFig. 7のように配置してある。

Compass Modle 通路に沿って移動するためのモジュールである。電子コンパスを用いて目標の方向に沿って移動するための行動を出力する。障害物回避などで逆走することが起きるため、逆走を知らせる「REVERSE」イベントを発行する。

MapNavi Module トポロジカルマップを利用してナビゲーションを行うためのモジュールである。このモジュールのタスクは、与えられたランドマーク列を辿ることである。発見したランドマークの真下に接近する行動と、ランドマークにおいて計画を実行する二つの行動を出力する。このモジュールは4種類のイベントを発行する。「FOUND」イベントはランドマークを発見したとき、「ARRIVED」イベントはランドマークを認識したとき、「NEXT」イベントは次の方向を決定したとき、「LOST」イベントはランドマークを見失ったときに発行される。

GoForward Module 常に前進信号を出力するモジュールである。

Idle Module 常に停止信号を出力するモジュールである。

5.2 階層構造遷移

これらのモジュールを提案手法で構成した例を **Fig. 8** に示す。遷移を表す矢印の根元にイベントを発行するモジュールの名前とイベント名を記した。各階層構造について簡単に説明をする。

Arrived ランドマークに到達した後、次のランドマークの方向に向く、もしくはナビゲーションが完了後停止するための階層構造である。

NextLM 次のランドマークが検出されるまで通路に沿って移動するための階層構造である。この状態に遷移した直後、Compassモジュールを初期化し現在ロボットが向いている方向に向かうようにする。

Corridor NextLMと動作は変わらないが、Compassモジュールの初期化は行わない。

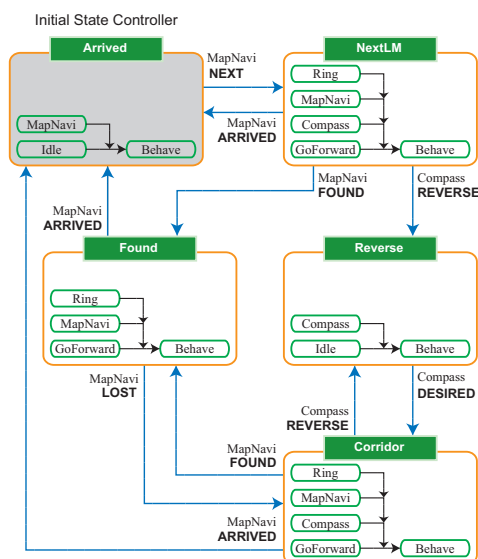


Fig. 8 State transition diagram of Event Driven Layered Control Changing System

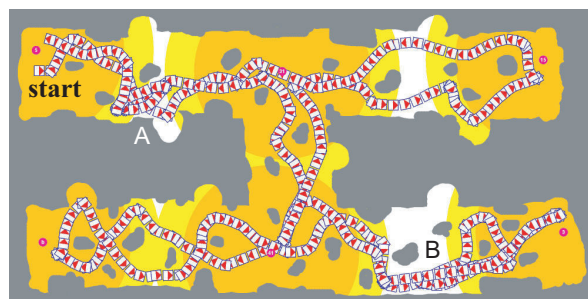


Fig. 9 Simulation result of first task

Found ランドマークが検出可能範囲での階層構造である。

Reverse ロボットが望ましい方向に対して逆走することがあり、正しい方向に追従するためにこの階層構造を追加した。Ringモジュールは優先順位が最高であるので、障害物が周囲に多数存在しそれらを回避するのに忙殺されると、compassモジュールが出力した行動が採用され難くなり、ロボットは望ましい方向に向かなくなる。そして、時には反対方向に移動することがある。これは層間に通信路がないためであり、独立に層を設計するSAの問題であった。状態遷移手法を用いる目的はこの問題の解決にある。

5.3 シミュレーション結果

最初のタスクとしてランドマークID列を次のように与えた。

順番	1	2	3	4	5	6
ID列	05	31	41	03	41	0b
順番	7	8	9	10	11	
ID列	41	31	15	31	05	

シミュレーション結果を **Fig. 9** に示す。この結果はサンプリングタイムを10[msec]として、200[msec]毎の位置と向きを示している。目的地まで7015ステップで到達した。このステップの意味はサンプリングの回数を意味している。結果から、それぞれのランドマークで適切に計画が実行されていることが分かる。

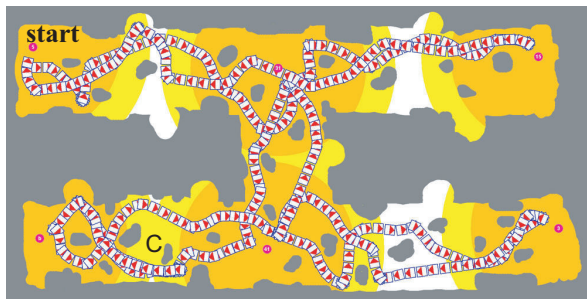


Fig. 10 Simulation result of second task

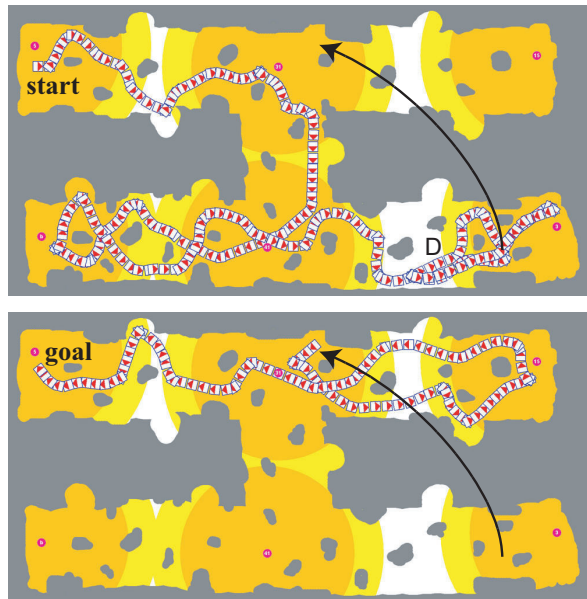


Fig. 11 Simulation result of second task with disturbance

二番目のタスクとして最初のタスクと同じ結果が得られる離散的な列を与えた。

	1	2	3	4	5
ID	05	0b	03	15	05

結果をFig. 10に示す。目的地まで7923ステップで到達した。適切にサブゴール間のサブプランを立てていることが分かる。

Fig. 11は二番目と同じシーケンスを与えた結果であるが、途中でロボットの位置を移動した結果である。この結果によって、このような外乱に対して本手法がロバストであることが示された。

以上の結果は座標系を用いないナビゲーションの可能性を示し、そして一方では行動規範型アプローチの非効率性を示している。結果のAからD地

点の各地点においてロボットは巡回しており、多くの無駄な軌跡が見られる。

6. 考察

シミュレーション結果と実験結果により、トポロジカルマップとランドマークを用いることで、確実なエラーリカバリを行うことで、座標系を用いないナビゲーションの可能性が示された。一方、本手法が抱えている最も深刻な問題である効率の悪さが目立つ。この問題は行動規範型アプローチの短所である。状態遷移を用いてこの問題の解決を図ったが、この問題の側面を解決したに過ぎず、本質的解決には至らなかった。層同士で通信をしない設計法はデバッグを含めたSAの構成を容易にしたが、効率の悪さももたらした。それぞれの層は相手の層の意図を知らないため、無駄な行動であってもより優先度の高い層が出力する行動が選択される。例えば、障害物回避層が他の層にとっての望みの方向とは反対の方向を選択する可能性がある。それぞれの層にとって最適な行動でも、システム全体にとって最適とはならないのが本手法の問題点である。行動規範型アプローチの効率の改善は解決されなければならない課題であり、今後も続けてこの問題の解決を図る。

7. おわりに

今回はトポロジカルマップを与えることで、座標系を用いないナビゲーション手法に、プランニングやエラーリカバリ能力を付加する手法について述べた。また、ランドマークを改良することで、ランドマークにより接近できるようにした。シミュレーションや実験結果より、解決しなければならない問題点を挙げた。今後はこの問題の解決法を探ると共に、ナビゲーションだけでなくより高度なタスクに適用し、本手法がどの程度高度なタス

クにまで適用可能か検討する。

参考文献

- 1) 太田順, 新井民生: “単機能モジュール群ロボットシステム”, 日本ロボット学会誌, vol. 21, no. 8, pp. 877-881, 2003.
- 2) Rodney A.Brooks: “A Robust Layered Control System For A Mobile Robot,” IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. RA-2, no. 1, pp. 14-23, 1986.
- 3) Joesph L.Jones and Anita M.Flynn: Mobile Robots: Inspiration to Implementation. A K Peters,Ltd, 1993.
- 4) 及川一美, 高氏秀則, 江丸貴紀, 土谷武士, 大久保重範: “赤外線モジュールランドマークによる自律移動ロボットのナビゲーション”, 第35回計測自動制御学会北海道支部学術講演会論文集, pp. 29-32, 2003.