

大学構内歩道における移動ロボットの
長距離自律ナビゲーションに関する研究

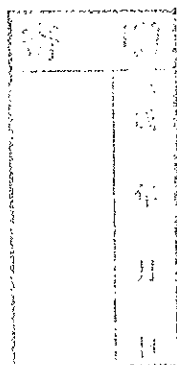
1998年7月

前 山 祥 一

大学構内歩道における移動ロボットの
長距離自律ナビゲーションに関する研究

1998 年 7 月

前 山 祥 一



99012423

論文概要

本研究は、自律移動ロボットの長距離屋外ナビゲーションに関する研究である。ここでいう「ナビゲーション」とは、与えられた経路情報に従ってスタート地点からゴール地点まで到達することを言う。ナビゲーションを実現するには、経路および経路に沿った環境情報の獲得と記憶、現在位置の推定、経路への誘導制御などの様々な要素技術がうまく統合されなければならない。本論文は、これら要素技術についての研究報告、および、要素技術を統合したロボットによる屋外ナビゲーションの実験結果についての報告である。

タスクの設定

実環境において、長距離のナビゲーションを 100 % 確実に行えるロボットを実現するのは非常に難しい。そこで、より重要な技術から開発し、徐々に確実性を増すアプローチをとる。しかしながら、何が重要で何が些細なことかは、走行したい環境や行わせたい仕事(目標タスク)によって大きく異なる。そこで、本研究では、まず、環境を含む具体的な目標タスクを以下のように設定した。

目標タスク

実現目標とするタスクは、移動ロボットの長距離自律ナビゲーションに決めた。

対象とする環境

対象とする走行環境は、筑波大学構内の歩道に決めた。走行経路は、筆者の所属する筑波大学知能ロボット研究室がある校舎前から 1.2km の道程を隔てた学生宿舎前までに設定した。

対象とするロボット

対象とするロボットは、移動に必要なすべての機能をロボット本体に搭載した自立・自律型の移動ロボットで、独立二動輪操舵型の移動ロボットとする。また、人間と共存できる、つまり、万が一人間に衝突しても怪我を負わせることがない大きさ、重さ、走行速度のロボットとする。

目標タスク実現のための基本戦略

設定した目標タスクを解析した結果、対象とする環境は、路面は舗装されており、歩道に沿って街路樹や生け垣などが存在する環境であることがわかった。従来の移動ロボットのナビゲーションに関する研究を概観すると、屋外歩道のような環境では、視覚センサで取り込んだ画像を処理して歩道の境界線を検出し、それに沿って走行する方法がとられている。屋内ナビゲーションでは、デッドレコニングとランドマーク認識のセンサ融合により現在位置を推定することで長距離のナビゲーションを実現しているが、屋外では、ほとんどこの方法は用いられていない。しかし、本研究で対象とする環境は、街路樹や生け垣を始め、ランドマークとして利用できそうな環境構成物が適度に存在する。そこで、本研究では、目標タスクを実現するための基本戦略として、これまで主として屋内ナビゲーションで用いられてきた「推定位置に基づくナビゲーション」を用いることに決めた。

この戦略に沿って、目標タスクを実現するには、解決すべき課題がいくつかある。まず、路面は屋内に比べて凹凸や小さな障害物があるので、それらに頑強なデッドレコニングを開発しなければならない。また、ランドマークとなり得る環境構成物が存在すると述べたが、屋内のように壁で構成された直角並行の世界ではないので、ランドマークの検出にはより処理時間を要することが容易に予想できる。しかし、デッドレコニングとランドマーク認識のセンサ融合による現在位置推定では、通常、ランドマーク認識に要する処理時間を考慮に入れていないので、そこが問題となる。さらに、推定位置に基づくナビゲーションを行うには、予め、経路・ランドマーク情報をロボットに記憶させる必要があるが、1.2kmにもおよぶ長距離の走行が目

標タスクなので、この作業も大変である。したがって、ロボットが、効率良く経路・ランドマークを獲得し記憶できる方法についても考えなければならない。また、環境を大学構内歩道に限定したとは言え、1.2kmにおよぶ実環境を対象にしているので、全経路におよぶ確実なナビゲーションを実現するのは、かなり困難である。この基本戦略の場合、いろいろな環境に対応するというのは、すなわち、いろいろな環境構成物がランドマークとして利用可能になることであるが、様々なランドマークを認識できるロボット・システムは、簡単には実現できない。そこで、漸進的に、様々なランドマークを認識できるような枠組を予め準備する必要がある。

上記の課題を解決する技術を順に開発していき、また、漸進的にランドマークを追加していけば、この基本戦略に沿って、大学構内歩道における長距離のナビゲーションが実現できると考えられる。そこで、これらの課題を解決するための技術開発を行った。

路面の凹凸に頑強なデッドレコニング

デッドレコニングとは、初期位置からのロボットの移動量を積算することでロボットの現在位置を推定する方法である。デッドレコニングを行うには、速度、加速度、角速度などのロボットの動きを測定し積算すれば良い。もっとも簡単なデッドレコニングの方法はオドメトリである。オドメトリは、車輪の回転量を積算することにより現在位置を推定するものであり、路面の凹凸や路上の小石などに車輪が乗り上げたり、空転したりする状況に弱いという欠点がある。ジャイロは、一方、車輪の空転などとは無関係に角速度を測定できるが、時間がたつにつれて出力のバイアス・レベルがドリフトして精度がだんだん悪くなる性質がある。そのため、安価で入手できる振動ジャイロなどでは、単体でロボットの方位を推定するのは不可能である。そこで、オドメトリとジャイロの融合により互いの弱点を補完しあうことで、路面の凹凸に頑強なデッドレコニング・システムを開発した。開発したシステムの基本的なアルゴリズムは、ジャイロによる角速度測定値をオドメトリから計算される角速度と比較することで車輪の空転等を検知し、それによる悪影響を軽減させようというものである。通常の走行時は、オドメトリから計算される角速度を使ってジャ

イロのバイアスドリフトを推定し、ジャイロとオドメトリから得られる角速度が同じになるような状態を作っておく。この状態を作っておくと、二つの角速度測定値が大きく異なったら通常の走行状態ではないことが検知できる。多くの場合これは、車輪の空転などによって起こる。そこでこのような場合はジャイロの角速度のみを信用する。なお、開発したデッドレコニング・システムでは、現在位置の推定だけでなくその不確実性（誤差分散）も同時に推定している。

このデッドレコニングのシステムにより、大学構内の歩道においても、屋内の廊下での使用に近い信頼性をもったデッドレコニングが確保された。

ランドマークを用いた遡及的現在位置推定

上記の開発したデッドレコニングは、路面の凹凸に対して頑強になるように工夫したものであるが、積算で位置を計算することには変わらないので、走行距離に比例して誤差が累積する欠点は相変わらず存在する。そのため、デッドレコニングだけでは長距離のナビゲーションを行うことはできない。そこで、現在位置とその誤差分散を、環境に存在するランドマークとロボットとの相対位置情報を用いて、時折、修正しなければならない。ランドマークは、超音波距離センサや視覚センサなどの外界センサを利用して検出される。本研究では、ランドマークによる位置修正には、最尤推定法を用いた。この種の手法による位置修正は、屋内環境のナビゲーションにおいては報告例があるが、屋外環境については、あまり例が見当たらない。本研究では、内外界センサの不確実性が屋内と比較してかなり大きな屋外環境においてもこの手法が良い性能を発揮することを確認した。さらに、この手法を、外界センサ情報の取得時間の位置情報とその後の増分を保持することによって、外界センサ情報の処理に時間を要する場合についても適用可能となるよう拡張した。この拡張された位置推定法を遡及的現在位置推定法と呼ぶ。本研究では、推定位置に基づくナビゲーションの中核となる要素技術である現在位置の推定は、この遡及的現在位置推定法で実現した。

遡及的現在位置推定法に基づいた現在位置推定システムが実現できたことにより、認識処理に時間を要するランドマークを利用しても、その処理時間をあまり気にせ

ず通常走行速度を保ったまま走行することができるようになった。

経路・ランドマーク情報の獲得と記憶

経路・ランドマーク情報をロボットに記憶させる作業の軽減方法として、経路教示に基づいて、ロボットが自動的に経路・ランドマーク情報を獲得する方法を考案した。具体的には、ロボットを走行経路に沿って、一度、目的地まで連れていき、その間に、ロボットが自律的に周囲の環境からランドマークとなり得るものを獲得し記憶する方法である。自律ナビゲーションは、獲得したランドマークを利用して位置を修正しながら教示時に記憶した経路を再生することで実現する。この方法で、頑強なナビゲーションを実現するには、教示時に様々なランドマークをなるべく多く獲得する必要がある。しかし、ロボットには、いつどんなランドマークが現れるかがわからないので、同時に複数のランドマークを観測できるシステムが必要となる。そこで、この教示・再生によるナビゲーションを、パス・エージェント、ランドマーク・エージェント、および、センシング・エージェントからなる複数エージェントの並行実行により実現した。パス・エージェントとは、経路の記憶と再生を行う実行単位である。ランドマーク・エージェントとは、特定のランドマークを探索するランドマーク獲得のための実行単位であり、各ランドマーク・エージェントは、各々がもつランドマークのモデルに基づいて、ランドマークの候補を見つけ、それを追跡し獲得する。センシング・エージェントは、複数のランドマーク・エージェントが一つのセンサ資源を共有するような場合に、そのセンサ資源を有効に利用するために働く。複数のランドマーク・エージェントを並行実行させることにより、全体として複数のランドマークが同時観測できるランドマーク獲得システムが実現される。また、1.2kmにおよぶ長距離のナビゲーションを実現するには、様々な環境に対応する必要があるが、実現したランドマーク・エージェントの並行実行によるランドマーク獲得システムの設計は、漸進的に新しいランドマーク・エージェントを追加していくことにより、様々なランドマークに漸進的に対応していくことができる。その結果、この設計方針により、漸進的に長距離におよぶ全経路のナビゲーションを実現していく上で有効な枠組が実現できた。

実験システムの実装

筆者が所属する研究グループでは、「山彦」というファミリー・ネームをもつロボットを実験用移動ロボットのプラットフォームとして開発している。「山彦」は、小型の自立・自律型車輪移動ロボットである。本研究では、その一つである「山彦ナビ」に、上に述べてきた全システムを搭載した。本研究のために新たに実装されたものは、複数エージェントによる教示・再生ナビゲーションのプログラムと街路樹や生け垣をランドマークとして検出するための超音波距離センサとビジョン・センサの融合によるランドマーク検出センサ SONAVIS、および、振動ジャイロと遡及的現在位置推定のアルゴリズムを搭載した位置推定システム POEM3G の 3 つの機能である。ランドマーク獲得システムとしては、街路樹ランドマーク・エージェント、生け垣ランドマーク・エージェント、壁ランドマーク・エージェントの 3 種類のランドマーク・エージェントを実装した。

また、屋外での走行実験をより快適に行うために、デバッグ・ツールとしての内部状態監視システムとロボット運搬用の台車も製作した。プログラムや回路に誤りがあると多くの場合、ロボットはおかしな振舞いをおこすが、その振舞いだけで、その原因を発見するのは、非常に困難である。そこで、グラフィクス表示、画像表示、そして、音声の三種類の媒体を用いたロボットの内部状態監視システムを開発した。このシステムは可搬でき、屋外での効率の良いデバッグが実現できた。

長距離屋外ナビゲーションの実験と結果

上に述べた、街路樹、生け垣、壁の三種類のランドマークが利用可能なロボット「山彦ナビ」を用いて、設定した大学構内歩道で長距離ナビゲーションの実験を行った。そして、経路教示により、全経路の経路・ランドマーク情報の獲得を実現した。教示に要した時間は、1.2km におよぶ長距離で約 1 時間 20 分であり、劇的に経路・ランドマーク情報の作成作業の軽減が実現された。教示により生成された経路・ランドマーク情報の再生によるナビゲーションについては、全経路のうちの 50 %が、街路樹、生け垣、壁の 3 種類のランドマークによってナビゲーションができる見通

しが立った。残り 50 % の区間については、この 3 種類のランドマークだけでは、ナビゲーションが困難であることがわかった。この区間でのナビゲーションを実現するには、路肩の境界線や横断歩道の位置をランドマークとして獲得できるランドマーク・エージェントを新たに追加しなければならないことがわかった。

まとめ

本研究では、大学構内歩道における長距離の自律ナビゲーションを目標タスクに、このタスクが実現可能なロボット・システムの構築を進めてきた。実験結果からわかるとおり、目標タスクの実現という観点からみると、本研究はいまだ研究途上である。しかしながら、経路・ランドマーク情報をロボットに記憶させる作業の大幅な軽減に成功した。また、街路樹、生け垣、壁の 3 種類のランドマークだけでも 50 % の区間においては、ナビゲーションができることがわかった。残りの 50 % の区間においても、路肩の境界線や横断歩道の位置をランドマークとして利用できるようになれば、街路樹や生け垣の場合と同様に位置を推定することで、本基本戦略に沿って自律ナビゲーションが実現できる。

さらに、目標タスクから離れて一般的な移動ロボットのナビゲーション技術という観点からみても、路面の凹凸に頑強なデッドレコニング、遡及的現在位置推定、教示・再生方式による屋外ナビゲーション、そして、ロボットの内部状態監視システムの実現など、移動ロボットのナビゲーション技術への大きな貢献があった。

もくじ

論文概要	i
目次	xiii
図目次	xvi
1 序論	1
1.1 本研究の背景	1
1.2 本研究の目的	2
1.3 本研究の経過と内容	3
1.4 論文の構成	4
2 タスクの設定	6
2.1 本章の概要	6
2.2 目標とするタスク	6
2.3 対象とする環境	7
2.4 対象とするロボット	9
2.5 本章のまとめ	9
3 移動ロボットのナビゲーションに関する従来の研究	10
3.1 本章の概要	10
3.2 屋内ナビゲーションに関する研究	10
3.2.1 推定位置に基づくナビゲーション	10
3.2.2 視覚情報に基づくナビゲーション	13

3.3	屋外ナビゲーションに関する従来の研究	13
3.3.1	屋外の歩道におけるナビゲーションに関する従来の研究	13
3.3.2	高速道路におけるナビゲーションに関する従来の研究	14
3.3.3	起伏のある路面を移動するロボットに関する従来の研究	14
3.3.4	屋外作業ロボットに関する従来の研究	14
3.4	障害物回避に関する研究	14
3.5	従来の研究に対する評価と本研究の位置付け	15
4	基本戦略と解決すべき課題	16
4.1	本章の概要	16
4.2	目標タスクに対する基本戦略	17
4.2.1	推定位置と経路・ランドマーク情報に基づくナビゲーション	17
4.2.2	位置推定法	17
4.2.3	経路とランドマーク情報の記憶	19
4.2.4	障害物に対する行動	20
4.3	解決すべき課題	20
4.3.1	路面の凹凸に対して頑強なデッドレコニング	20
4.3.2	ランドマークの認識処理時間を考慮した位置の推定	21
4.3.3	経路・ランドマーク情報作成のための作業量の軽減	21
4.3.4	利用可能なランドマークの種類を漸進的に増やす枠組み	22
4.4	本章のまとめ	22
5	路面の凹凸に頑強なデッドレコニング	23
5.1	本章の概要	23
5.2	従来の研究と開発したシステムの基本的な考え方	23
5.3	デッドレコニングによる位置推定	26
5.4	オドメトリによる並進速度と角速度の測定	28
5.4.1	オドメトリのモデル化	28
5.4.2	オドメトリの性質	30
5.5	振動ジャイロによる角速度測定	32
5.6	オドメトリとジャイロによる角速度測定の比較	32

5.7	オドメトリとジャイロを用いた頑強なデッドレコニング	34
5.7.1	オドメトリとジャイロの融合による角速度の測定	35
5.7.2	内界センサ系の異常の検出	36
5.8	デッドレコニング・システムの実装	37
5.9	基礎実験	37
5.9.1	ジャイロのバイアス・ドリフトの推定実験	37
5.9.2	車輪の空転等の検出に基づく測定モードの切替え	40
5.9.3	障害物乗り越え時の推定位置精度	40
5.9.4	屋外における位置推定精度	42
5.10	本章のまとめ	44
6	ランドマークを用いた遡及的現在位置推定	45
6.1	本章の概要	45
6.2	遡及的現在位置推定とは	45
6.3	ランドマークの認識処理時間を考慮した位置推定	48
6.3.1	ランドマーク認識処理中のデッドレコニングによる位置情報の増分	48
6.3.2	ランドマークの認識処理の開始時刻における位置情報の修正	49
6.3.3	現在位置情報の再計算	51
6.4	遡及的現在位置推定法の公式	52
6.5	複数のランドマークの並列認識が可能な場合への拡張	53
6.6	位置推定サブシステムの設計	55
6.7	基礎実験	56
6.8	本章のまとめ	59
7	経路・ランドマーク情報の獲得と記憶	60
7.1	本章の概要	60
7.2	教示・再生による長距離ナビゲーションの考案	60
7.3	経路の教示と記憶	64
7.4	ロボット知覚によるランドマーク情報の獲得	65
7.4.1	ランドマーク・エージェント (LmA)	65
7.4.2	ランドマーク・エージェントの基本動作	66

7.4.3	センシング・エージェント	67
7.5	ランドマーク・エージェントの実装	67
7.5.1	街路樹検出ランドマーク・エージェント (Tree LmA)	67
7.5.2	生け垣検出ランドマーク・エージェント (Hedge LmA)	69
7.5.3	壁検出ランドマーク・エージェント (Wall LmA)	69
7.6	経路・ランドマーク情報の再生によるナビゲーション	69
7.6.1	経路情報の再生	70
7.6.2	ランドマーク情報の再生による推定位置の修正	71
7.6.3	障害物への対処	72
7.7	教示・再生によるナビゲーションの基礎実験	72
7.8	本章のまとめ	72
8	屋外実験用ロボット「山彦ナビ」の試作	75
8.1	本章の概要	75
8.2	自立・自律型移動ロボット「山彦」について	75
8.3	「山彦ナビ」のシステム構成	76
8.3.1	ロボット・システム全体の構成	77
8.3.2	複数エージェントによる教示・再生ナビゲーションのプログラム	78
8.3.3	屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS	81
8.3.4	位置推定モジュール POEM3G	83
8.4	本章のまとめ	85
9	屋外実験のためのロボット内部状態監視システムの開発	86
9.1	本章の概要	86
9.2	屋外走行実験用システム台車	86
9.3	ロボットの内部状態監視システム	87
9.3.1	グラフィクス表示によるモニタ TPDS	88
9.3.2	音声によるモニタ VOICEモジュール	88
9.3.3	画像モニタ	90
9.4	本章のまとめ	91

10 長距離屋外ナビゲーションの実験と結果	92
10.1 本章の概要	92
10.2 筑波大学構内の歩道における長距離ナビゲーションの実験	92
10.2.1 経路・ランドマーク情報の作成	92
10.2.2 長距離自律ナビゲーション	97
10.3 実験結果の考察	100
10.3.1 教示システムにおける問題	100
10.3.2 ランドマーク認識における問題	100
10.3.3 再生による自律ナビゲーションにおける問題	101
10.3.4 部分経路に分割したことで生じた問題	102
10.3.5 車輪機構等に関する問題	102
10.4 本章のまとめ	103
11 本研究で得られた成果	104
11.1 本章の概要	104
11.2 設定したタスクの実現について	104
11.2.1 経路・ランドマーク情報の獲得	104
11.2.2 自律ナビゲーション	105
11.3 移動ロボットのナビゲーション技術への貢献	105
11.3.1 ロボットの現在位置推定に関する研究	106
11.3.2 教示・再生方式によるナビゲーション	108
11.3.3 ロボットの内部状態の監視法	108
11.4 本章のまとめ	108
12 結論	109
謝辞	111
参考文献	113
付録	121

図一覧

2.1	筑波大学構内の歩道の模式図と設定した走行経路	7
2.2	設定した走行環境の写真	8
4.1	推定位置に基づくナビゲーションの概念図	18
5.1	開発したデッドレコニング・システムの構成図	25
5.2	車輪型移動ロボットのモデル	29
5.3	オドメトリによる位置とその誤差分散の推定のシミュレーション結果の例	31
5.4	静止状態における振動ジャイロ ENC-05 で測定された角速度の積分による角度	32
5.5	ロボットが左車輪で直径 6mm の棒を踏んだ場合のオドメトリとジャイロの比較	33
5.6	ロボットが走行中におけるバイアス・ドリフトの推定	38
5.7	ルールに基づくオドメトリとジャイロのセンサ融合の結果	39
5.8	ロボットが小障害物 (直径 6mm の棒) を乗り越えた際の位置推定に関する実験環境と実験方法	41
5.9	図 5.8 で示した実験におけるゴール位置での精度の比較	41
5.10	屋外歩道におけるオドメトリのみの場合と開発した方法の場合の位置推定精度の比較	43
6.1	時間軸でみた遡及的現在位置推定法	47

6.2	移動平面でみた遡及的現在位置推定の概念図	48
6.3	二つのランドマーク認識処理が時間軸上で重なった場合	54
6.4	遡及的現在位置推定法を利用した位置推定サブシステム	55
6.5	街路樹と生け垣を利用した移動ロボットのノン・ストップ・ナビゲーションの実験環境	57
6.6	街路樹と生け垣を利用した移動ロボットのノン・ストップ・ナビゲーション実験時の移動ロボットの移動軌跡	57
6.7	街路樹と生け垣を利用した遡及的現在位置推定のシミュレーション結果	58
7.1	経路の教示に基づくランドマーク情報の自律的な獲得と経路・ランドマーク情報の再生による自律ナビゲーション	62
7.2	ロボット知覚を用いた複数エージェントの並行実行による経路・ランドマーク情報の自動生成	63
7.3	経路の獲得と記憶	64
7.4	教示時のランドマーク・エージェントの基本動作	66
7.5	街路樹検出ランドマーク・エージェントによって街路樹がランドマークとして獲得される様子	68
7.6	パス・エージェントによる経路再生の方法	70
7.7	再生時のランドマーク・エージェントの動作	71
7.8	教示・再生によるナビゲーションの基礎実験の結果	73
8.1	屋外実験用 自立・自律型移動ロボット「山彦ナビ」	77
8.2	「山彦ナビ」のシステム構成	79
8.3	屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS の超音波センサと TV カメラ部分	82
8.4	位置推定モジュール POEM3G	84
9.1	屋外走行実験用システム台車	87
9.2	教示時のグラフィクス表示画面	89

9.3 自律ナビゲーション時のグラフィクス表示画面	89
9.4 音声によるモニタ VOICE モジュール	90
10.1 経路指示に基づいて作成された長距離におよぶ経路・ランドマーク 情報	93
10.2 地点 A から地点 C までの経路・ランドマーク情報	95
10.3 地点 C から地点 E までの経路・ランドマーク情報	95
10.4 地点 E から地点 G までの経路・ランドマーク情報	96
10.5 地点 G から地点 I までの経路・ランドマーク情報	96
10.6 地点 B から地点 C への自律ナビゲーション時の位置修正の例	98

第 1 章

序論

1.1 本研究の背景

近年、移動ロボットの自律的なナビゲーションの技術が蓄積され洗練された結果、ビル内での長距離のナビゲーションがある程度可能になってきた。屋内ナビゲーションでは、建物特有の構造をランドマークに利用して現在位置を推定することで長距離ナビゲーションが実現されている。本研究を始めた動機は、屋内ナビゲーションの研究で培われた技術を屋外の歩道で適用した場合、どの程度有効に働くかということに技術的興味を沸いたからである。歩道は建物内ほど構造化されてはいないが、人が歩くことを想定しているため、ある程度の整備がなされている。そこで、屋内ナビゲーションで用いられてきた推定位置に基づくナビゲーションを拡張することで、歩道でのナビゲーションが実現できるのではないかと考えた。

現在、移動ロボットは、工場の生産ラインやビル内の警備 [1]、病院内でのカルテや食事の搬送 [2] など主として屋内で活躍している。また、屋外環境では、建設機械や農作業の自動化 [3]、露天掘鉱山の採掘現場における無人ダンプトラック [4] などの応用例がみられる。これらの例は、予め自動化に必要な設備を環境側に用意することが許される状況下における屋外環境への移動ロボットの応用例である。しかしながら、歩道などの人間の生活の場になっている屋外環境では、そのように環境への設備を用意するのは困難であるため、移動ロボットの応用は、未だあまり進

んでいない。それは、現在の移動ロボットの技術では、あるがままの屋外環境で遠くの目的地に到達すること自体が難しいからである。しかしながら、屋外の歩道において、移動ロボットが屋内の廊下と同等な信頼性で目的地まで到達できる技術が確立されれば、ビル間の書類の配達や買い物、盲人の歩行の補助 [5] など、格段に移動ロボットの応用範囲が広がると期待される。

なお、カーナビゲーション・システム (カーナビ) などのように現在位置を提示し次の道を指示するものについても「ナビゲーション」という言葉が一般に使用されるが、この論文では、「ナビゲーション」という言葉は、「与えられた経路および環境の情報に従ってスタート地点からゴール地点までロボット自身を誘導すること」という意味で使用する。言い替えると、この論文における「ナビゲーション」という言葉は、「カーナビと運転手の両方の役割を統合したもの」を意味する。

1.2 本研究の目的

本研究では、上に述べた将来的な発展に対する期待を背景に、まず、身近な屋外環境である大学構内歩道において、遠くの目的地まで到達するために必要なナビゲーションの技術について研究を行った。

ナビゲーションに必要な要素技術は、ロボットを走行させる環境とロボットに行わせるタスクに大きく依存する。建物内、高速道路、砂漠、月、歩道では、各々の環境で適切なナビゲーション方法が全く異なる。また、目標タスクが、遠くの目的地までの移動か、障害物回避か、物資の運搬等の作業かによっても大きく異なる。したがって、まず、具体的な目標タスクと対象とする走行環境を決めなければならない。本研究では、まず、対象とする走行環境を筑波大学構内の歩道に設定し、目標タスクを、1.2km 離れた目的地までのナビゲーションに設定した。走行環境は、普段、人間が利用する状態とする。つまり、ロボットにとって都合のよい人工的なランドマークは存在しない、あるがままの環境を対象とする。

本研究の具体的な目的は、この設定した「筑波大学構内の歩道」という環境で、設定したタスクである「長距離自律ナビゲーション」を実現することである。その

ために必要な要素技術を研究・開発し、そして、その要素技術を統合した移動ロボットを試作し、走行実験を行いその結果を検討して、目標タスクである「長距離ナビゲーション」の実現方法を明らかにする。さらに、タスクを実現する目的で開発した要素技術について、設定したタスクから離れた観点でみた場合、つまり、一般的な移動ロボットのナビゲーションの要素技術として捉えた場合、どのような意義があるかについても考察する。

1.3 本研究の経過と内容

目標タスクである「長距離屋外ナビゲーション」を実現するために、屋外ナビゲーションが、屋内ナビゲーションと比較してなぜ困難かを解析した。まず、路面が屋内の床面と比較すると凹凸であることが挙げられる。また、屋内は、多くの場合、四方が壁で覆われた直角並行な構造であるのでこの構造が良いランドマークとして利用できる。しかし、屋外は、このような構造をしていないため、これとは異なる屋外特有のランドマークが利用できなければならないことも難点として挙げられる。そこで、多少の凹凸がある路面でも頑強に現在位置が推定でき、かつ、屋外に存在するランドマークを認識することができるロボットの開発を進めた。

ナビゲーションは、いくつかのロボット技術の集積の結果達成されるものであり、実際には、各々の重要度に基づいて順番に開発していく他はない。しかしながら、どの要素技術がより重要かは、環境を含めた目標タスクによって大きく異なり、一般論では解析できないことが問題となる。そこで、まず、環境を含めた目標タスクを明確に定め、その目標タスクを実現するという観点から何がより重要かを決定し、その重要度にしたがって順番に研究・開発を進めるアプローチが必要となる。このような研究の進め方は、タスクオリエンテッドアプローチと呼ばれており、実験ロボット工学の分野では、よく用いられる [6]。本研究においても、屋内ナビゲーション技術の屋外への拡張を行う際にやるべきことを明確にするため、タスクオリエンテッドアプローチに基づいて、目標タスクを実現する環境を大学構内歩道に定め研究を行った。

1.4 論文の構成

この論文は、これまでに発表した屋内ナビゲーション技術の屋外環境への拡張と適用に関する研究をタスクオリエンテッドアプローチに基づく実験ロボット工学の観点・立場から整理したものである。

まず、次の章で、ロボットに行わせる具体的な目標タスクである「筑波大学構内の歩道における長距離ナビゲーション」について述べる。そして、対象とする環境について詳細に解説し、最後に、対象とするロボットについても述べる。3章では、本研究に関連する従来の研究について概観する。そして、従来の研究に対する本研究の位置付けを明らかにする。4章では、目標タスクを実現するための基本戦略を定め、その戦略にそって目標タスクを実現する上で解くべき問題点を列挙し、新たにどのような研究が必要かを検討する。

5章から7章では、4章で挙げた解くべき問題点を解決するための具体的な要素技術についての研究報告を順に述べる。5章では、オドメトリとジャイロのセンサ融合による、路面の凹凸に頑強なデッドレコニングについて報告する。6章では、ランドマークの観測情報を適応的に利用できるロボットの現在位置推定法について報告する。7章では、長距離におよぶ経路・ランドマーク情報の作成作業の軽減策として、教示・再生方式のナビゲーションを考案し、その実現方法について述べる。

8章では、5章から7章で述べた要素技術を統合したロボットの試作例について報告する。9章では、屋外での走行実験を行うためのデバッグ・ツールとしてのロボットの内部状態監視システムについて検討する。そして、開発したグラフィックス表示、画像、音声による内部状態監視モニタについて報告する。10章では、8章で述べたロボット、および、9章で述べたモニタを用いて行った屋外走行実験の結果について述べ、その結果を考察する。

11章では、本研究の研究成果について述べる。まず、設定したタスクの達成度について検討する。次に、タスクから離れて、一般的なロボット技術としてみた場合に、本研究を通して開発された要素技術がどのような意味を持つかについて述べる。

12 章では、結論と残された課題を述べ、本論文を総括する。

第 2 章

タスクの設定

2.1 本章の概要

前章でナビゲーションの研究は、設定した環境と設定したタスクによって解くべき問題が大きく異なることについて述べた。本章では、本研究で目標とするタスク、対象とする走行環境、そして、対象とするロボットについて順に述べ、本研究で取り扱うタスクを具体的に設定する。

2.2 目標とするタスク

前章で述べたように、実環境でのナビゲーションの研究は、環境を含む目標タスクを設定することで始めて問題が具体的に解析でき、研究としてやるべき課題が明確になる。そこで、本研究では、まず、具体的な目標タスクを「筑波大学構内の屋外歩道における長距離自律ナビゲーション」に設定した。自律ナビゲーションとは、「ロボットが自分の内部に記憶した知識とセンサで獲得した周囲の環境情報を駆使して、予定した経路を通して目的地まで到達すること」を意味する。長距離とは、「ナビゲーションの頑強さを実証するという観点からみて道程に十分に様々な環境が存在し、かつ、ロボットに経路や環境情報を持たせる作業の手間が軽視できないくらい膨大になる」距離を意味する。そこで、本研究では、これらの条件を満たす大学構内 1.2km の道程を走行環境に設定した。

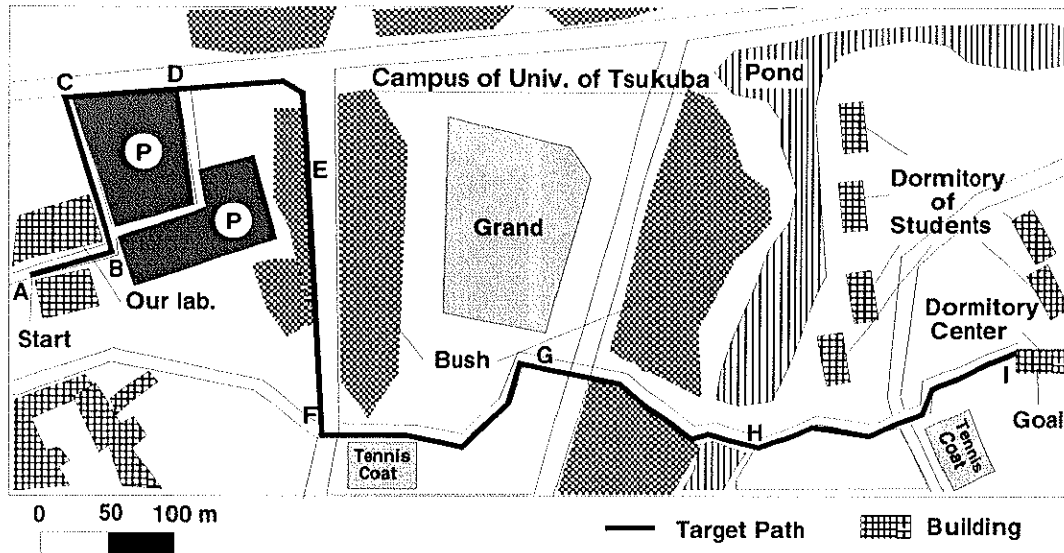


図 2.1: 筑波大学構内の歩道の模式図と設定した走行経路

なお、一般論として、未知環境の探索、予想外のことが生じたときの対処、および、障害物回避がナビゲーションの課題とされているが、本研究では、予め環境を定め、その環境内で起こり得ることのみを考える。

2.3 対象とする環境

ナビゲーションに必要な技術は、走行する環境の道路やその周囲を構成するものに大きく依存するため、対象とする環境を明確にすることが重要である。本研究では、「筑波大学構内の歩道」を走行環境に設定した。走行経路は、研究室がある校舎前の道路から学生宿舎までに設定した。図 2.1は、設定した環境と走行経路を模式的に表したものである。地点 A から地点 I は通過点を表しており、図 2.2 の各写真の下の説明の A から I と対応している。地点 A から地点 B は、校舎を左手にみながら車道の左端を走行する。地点 B から地点 C は、引続き車道の端を走行するが、途中から校舎がなくなり両側が駐車場になる。地点 C から地点 F は、車道の

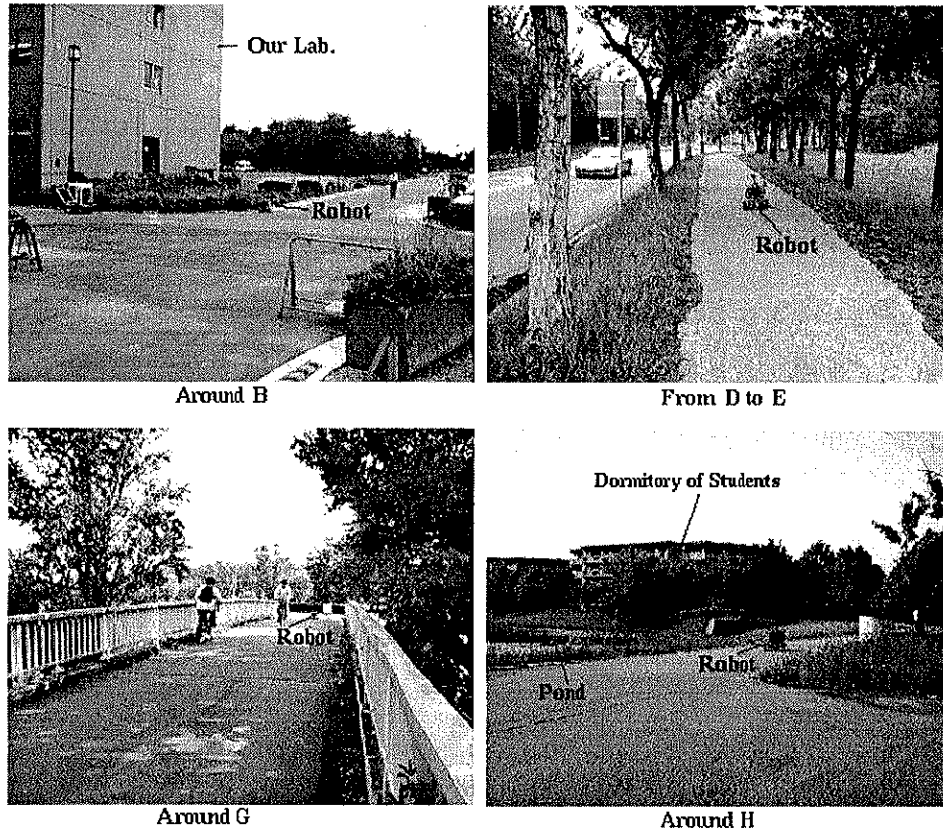


図 2.2: 設定した走行環境の写真

脇に設けられた歩道の上を走行する。途中、地点 D の直後に車道を横切るが、それ以外は歩道である。この歩道には、車道側に沿っておよそ 7m 間隔で街路樹が植樹されている。地点 F から地点 G は登り坂になっている。地点 F の直後に車道を横切って渡ったあとしばらくすると左側に手入れの行き届いた生け垣が続いている。地点 G の直後から陸橋になっていて車道の上を通る。その後、藪に挟まれた歩道を池の前にある地点 H に向かって下っていく。最後に藪に挟まれた歩道を抜けて学生宿舎の共用施設の前の I 地点に到達する。ここが目的地である。

路面は、基本的に舗装されており、近似的に二次元とみなせる。しかし、歩道と

車道の境目に段差があったり、路面にも小石などの小さな障害物が時折存在しているため、路面の条件は、屋内よりはるかに悪い。また、部分的に舗装状態が良くない路面があり、日当たりが悪く一度雨が降ると数日乾かない路面もある。

なお、天候は、晴れまたは曇の場合のみを対象とし、雨天時は対象としない。

2.4 対象とするロボット

本研究では、上に述べたように、人間の生活の場である歩道を走行環境とする。したがって、対象とするロボットは、まず、人間と共存できる、つまり、万が一人間に衝突しても怪我を負わせないサイズ・移動速度のロボットを対象とする。かつ、移動に必要なエネルギー源やコントローラ等の装置をロボット本体に搭載し(自立型)、走行制御や環境認識など必要な計算を自分で行う(自律型)の移動ロボットを対象とする。移動機構としては、車輪型の移動機構を有するロボットを対象とする。この種のロボットが与えられた環境で定めたタスクを実現するための方式を検討し、開発し、その方式を実際にハードウェア・ソフトウェア的に実現して実環境内でその有効性を示すことが、本研究の課題である。

2.5 本章のまとめ

本章では、タスクオリエンテッドアプローチに従い、目標とするタスク、対象とする走行環境、対象とするロボットについて順に設定した。

目標タスクは、筑波大学構内の歩道を長距離自律ナビゲーションできる自立・自律型移動ロボットを実現することである。また、そのために、目標タスクの実現に必要な要素技術を重要な順番に開発し、その成果を統合したロボットでナビゲーションの実験を行い、その結果を検証することである。

第 3 章

移動ロボットのナビゲーションに関する従来の研究

3.1 本章の概要

前章で、本研究で取り扱う研究課題において対象とする環境と目標タスクを設定した。従来の屋外ナビゲーションの研究においても、対象とする環境とタスクを設定し、その環境とタスクに特有の性質を解析するというアプローチが多くみられる。本章では、移動ロボットのナビゲーションに関する従来の研究を、1. 屋内ナビゲーション、2. 屋外ナビゲーション、3. 障害物回避の 3 つに大別して概観する。

3.2 屋内ナビゲーションに関する研究

屋内ナビゲーションに関する研究は、大別すると、推定位置に基づくナビゲーションと視覚に基づくナビゲーションの二種類に分類できる。

3.2.1 推定位置に基づくナビゲーション

屋内のナビゲーションでは、現在位置を推定し、その推定位置に基づいてナビゲーションする手法が多く用いられている。筑波大学知能ロボット研究室でも、推定位

置に基づく屋内ナビゲーションの研究を長年行ってきた [7][8][9][10][11][12][13][14][15]。推定位置に基づくナビゲーションは、位置推定法によって下記三つに分類される。

3.2.1.1 デッドレコニングによる位置推定

デッドレコニングとは、車軸エンコーダ、ジャイロ、速度センサ、角速度センサなどロボット本体の動きを測定する内界センサからの測定値を積算することで現在位置を推定する方法である。初期位置が分かっているときには、有力な位置推定法である。しかしながら、測定値の積算により現在位置を推定するので測定系の僅かな誤差が積算して走行距離とともに精度が悪くなる欠点がある [7][16]。そのため、デッドレコニングだけでは、長距離のナビゲーションはできない。最も良く利用されるデッドレコニングは、オドメトリである。オドメトリは、左右の車輪に取り付けられたエンコーダで測定した回転量から本体の並進速度と角速度を計算し位置を求める方法である。DC モータで駆動輪を制御している場合は、モータの回転数制御のため予めエンコーダが取り付けられていることが多く、新たにセンサを取り付ける必要がないのでシステムが非常に簡単になる。しかし、オドメトリは、路面との接触状態に左右されやすい欠点もある。これまでに、車輪の空転を軽減するために駆動輪ではなく補助輪にエンコーダを取り付けるなどの工夫がなされてきた [17]。オドメトリは、左右の車輪の回転量の差で方位を求めるため方位の精度が一般に良くない。そこで、オドメトリに高精度の光ファイバジャイロを併用することで方位精度を向上させ、推定位置の誤差のバラツキを抑える研究もなされている [18]。また、加速度計、傾斜計、ジャイロなど路面との非接触な内界センサの融合によるデッドレコニングの研究もなされている [19]。

3.2.1.2 ランドマーク認識に基づく位置推定

ランドマークとは、位置が既存の環境構成物である。ランドマークによる位置推定は、ランドマークとの相対位置を測定することでロボットの位置を推定する方法である。長所は、推定位置の誤差が、ランドマークの測定誤差のみによって決まるため誤差が累積しないことである。しかしながら、一つのランドマークとの相対位

置だけでは、ロボット位置が一意に決まらない場合が多いことやランドマークが観測できない場所では位置が得られないという欠点がある。

ランドマークは、人工ランドマークと自然のランドマークとに大きく分類できる。人工ランドマークを利用する場合は、ランドマークの最適な配置やランドマークの形状など、ロボットの位置が高い精度・信頼性で推定し易いランドマークの設計が研究の焦点となる [20][21]。また、GPS のように直接位置に関する情報を提供するようなシステムも人工ランドマークの一つである [22]。自然のランドマークとは、ロボットのために置かれたものではなく、元々その環境を構成している物の中で、ロボットが位置を知るために有効に利用できる対象物である。認識すべきランドマークは、走行環境によって大きく異なる。二次元平面を移動するロボットの場合、ランドマークは、線分か点かのいずれかでランドマークの位置を表現できる場合が多い [23]。

3.2.1.3 内外界センサ融合による位置推定

デッドレコニングは、誤差が少しずつ溜まっていくが連続的に位置が推定でき、ランドマークは、離散的にしか位置が推定できないが誤差の累積がない位置推定ができる。つまり、互いに相補的な性質を持っていると言える。そこで、デッドレコニングとランドマーク認識のセンサ融合によって位置を推定すると良い性能が得られ、これを内外界センサ融合による位置推定と呼ぶ。このデッドレコニングとランドマーク認識の融合による位置推定の研究は、屋内環境での長距離ナビゲーションの実現において中心的な研究課題となっている [9][24][25]。

多種センサのセンサ融合では、各センサ間の誤差の大きさ・性質の違いをどう取り扱うかが問題となる。移動ロボットの推定位置の誤差については、最尤推定法を用いることで、デッドレコニングによる推定位置の誤差とランドマークの測定誤差を考慮して位置を推定する方法が知られている [9][12][26]。このデッドレコニングとランドマークを最尤推定法に基づいてセンサ融合する方法は、デッドレコニングをシステム・モデルとして捉え、ランドマーク認識を観測モデルとして捉えると拡張カルマン・フィルタの枠組みで表現できる [23][19][27][12][25]。この方法では、

常に推定位置だけでなくその誤差の大きさも推定される。この誤差の大きさの推定値は、その時のロボットの推定位置がどれくらい信頼できるかを表しており、この情報はいろいろな目的で有効に利用できる。そのため、近年、多くの研究者が、この方法で位置を推定し移動ロボットのナビゲーションを実現させている。

3.2.2 視覚情報に基づくナビゲーション

ロボットに取り付けた TV カメラの視覚情報(画像)を直接利用して、ロボットをナビゲーションする方法も提案されている。例えば、教示走行時に時系列画像を記憶しておき、再生走行時には、現在獲得した画像と記憶しておいた画像が同じになるようにナビゲーションする方法が提案され実現されている [28]。一般に時系列画像の記憶によるナビゲーションでは、記憶すべき画像データ量が膨大になるが、ビデオテープにデータを記憶する方法 [29] や画像中の縦線の位置のみを記憶させる方法なども提案されている [30]。また、複数のカメラを用いて、環境を直線経路による骨組みモデルで表現し、画像上の特徴間をナビゲーションする研究も行われている [31]。

3.3 屋外ナビゲーションに関する従来の研究

3.3.1 屋外の歩道におけるナビゲーションに関する従来の研究

屋外歩道におけるナビゲーションは、主として、画像処理により道路領域や道路端を抽出して道路に沿って走行する手法が取られている。山梨大学の森研究室では、盲導犬の替わりになるロボットの実現を目指して、画像処理により道路端を検出し、それに沿って道路を走行する研究が行われている [32][33]。また、ロボットが視覚情報により道路端に沿って走行できることを前提に簡潔な経路情報によるナビゲーションも提案されている [34]。また、明治大学では、ゴルフカートを改良した AGV を用いて、ステレオ・ビジョンによる道路領域と障害物検出に関する研究が行われている [35]。また、米国のカーネギーメロン大学では、カラーカメラを用いて道路と交差点を追跡することで歩道等での走行を実現している [36][37][38]。

3.3.2 高速道路におけるナビゲーションに関する従来の研究

高速道路の自動走行の研究も、日本、アメリカ、ドイツなどで盛んに行われている [39][40][41]。高速道路の走行では、白線に沿って走るアプローチが多くみられる。米国のカーネギーメロン大学では、ALVINN というニューラルネットワークによる画像処理でステアリング制御の自動化を実現した [42]。これら高速道路では、走行路に沿うようにステアリングを制御することで高速な走行を実現している。

3.3.3 起伏のある路面を移動するロボットに関する従来の研究

惑星探査などの目的で利用することを意識したロボットの研究も行われている。大きな起伏のある路面の上に岩が点在するような環境での移動を目的としている。そのため、脚や特殊な車輪などの移動機構に関する研究や三次元的な環境認識に基づく走行可能領域の検出などに興味を中心に置かれている [43][44][45]。

3.3.4 屋外作業ロボットに関する従来の研究

農作業の自動化を目的としてトラクタなどの農業機械の自動運転の研究が行われている [46]。また、露天掘鉱山の採掘現場における無人ダンプトラックの自動運転 [4] やホイールローダによる鉱石の拾い上げ作業の自動化の研究も進められている [47]。作業を行うことを目的とする場合、移動する道程は比較的短く、同じ経路を繰り返し走行する場合が多い。

3.4 障害物回避に関する研究

ナビゲーションの研究は、ゴールまでの到達と作業の実行など予定した目的行動を実現するための研究と予定外のことが起こったらどうするかという研究の大きく二つの研究に分類できる。目的行動をゴールまでの到達に設定した場合、予定外のできごととは、予定経路の走行を妨害する障害物の出現である。

障害物の検出には、リアルタイムの検出が必要であるため、超音波やレーザ光を照射するなど環境にアクティブに働きかけをし、障害物があるときとないときとの

物理現象の相違を捉える手法がよくとられる [48][38][35]。また、環境モデルも併用した、単眼カメラと超音波距離センサによる障害物回避の実現例もある [49]。

さらに、移動障害物についても衝突回避の計画に関する研究が行われている [50]。

3.5 従来の研究に対する評価と本研究の位置付け

本章では、移動ロボットのナビゲーションに関する従来の研究を概観した。屋内ナビゲーションの研究は、推定位置に基づくナビゲーションの技術が習熟し、信頼性、完成度、使い易さなどより洗練されたシステムへの発展が図られる段階である。また、屋外ナビゲーションの研究は、環境やタスク毎に異なるアプローチで様々な研究が進められている。障害物回避の研究については、障害物の回避行動を障害物を回避して予定経路上に戻ってくるまでの行動と位置付けて、予定経路への追従と問題を分けて考える場合が多い。本研究における目標タスクに最も近い研究は、上記分類では屋外の歩道におけるナビゲーションである。従来屋外の歩道におけるナビゲーションの研究では、主としてビジョンで歩道の境界線を検出し、それに沿って走行する方法が用いられていることが多い。本研究では、屋内ナビゲーションで用いられてきた推定位置に基づくナビゲーションを大学構内歩道に適用するが、このようなアプローチは、従来研究では、ほとんど試みられていない。大学構内歩道は、屋外の歩道の中でも、街路樹、生け垣、建物の外壁などのランドマークとなり得る構造物が比較的多く存在する環境である。したがって、屋内ナビゲーションの技術として習熟してきたデッドレコニングとランドマーク認識のセンサ融合による現在位置推定に基づくナビゲーションを大学構内歩道での適用を試みることは大変意義があると思われる。

第 4 章

基本戦略と解決すべき課題

4.1 本章の概要

本章では、目標タスク実現のための基本戦略について述べる。

本研究の目標タスクは、実世界での長距離ナビゲーションの実現であり、100 % の実現を期待するのは非常に困難である。そこで、目標タスクの実現の上で重要なところから順番に研究を行い、実現可能性と確実性を少しずつあげていくアプローチをとる。また、ナビゲーションというと、予期せぬ障害物の回避が重要であると一般に考えられているが、対象とする環境は、大学構内歩道であり、障害物となり得るのは、歩行者や自転車のような自分から避けてくれるものである。したがって、障害物を検知した場合は止まればよい。設定した環境では、障害物回避よりも長距離におよぶグローバルな環境の中での目的への到達を実現することの方が重要である。そこで、本研究では、遠くの目的地への到達に焦点を当てる。

以下に、長距離自律ナビゲーションの基本戦略、および、その実現のために解決すべき問題点を述べる。

4.2 目標タスクに対する基本戦略

4.2.1 推定位置と経路・ランドマーク情報に基づくナビゲーション

本研究では、長距離屋外ナビゲーションの基本戦略として「推定位置と経路・ランドマーク情報に基づくナビゲーション」を用いる。この方法では、まず、目的地までの経路やその経路に沿ったランドマークに関する情報を何らかの形式でロボットに事前に与える。この場合、原理的には、ロボットが現在位置を正しく推定できれば、それをフィードバックして与えられた経路に沿うように制御することで、目的地まで到達することができる。経路を走行可能な路面の上に予め設定すれば、道路領域を認識できなくても、現在位置さえ正しく認識できれば、道路から外れることなく目的地まで到達できる(図4.1)。これが、「推定位置と経路・ランドマーク情報に基づくナビゲーション」である。

以下に、現在位置の推定方法と経路・ランドマーク情報の記憶方法についての基本戦略を述べる。

4.2.2 位置推定法

現在位置推定は、上述の基本戦略を実現するために、最も重要な技術である。現在位置の推定には、内外界センサ融合による位置推定法を用いる。これは、前章に述べたように、デッドレコニングを基本として用い、ランドマークが観測されたらその情報を用いて推定位置を修正する方法である。

内界センサとして最も簡単なものは、ロータリー・エンコーダであり、左右の車輪の回転軸にロータリー・エンコーダを取り付けることで、左右車輪の回転量からロボットの本体の並進速度と角速度が測定できる。DC モータ等で車輪を回転させている場合、モータの回転数の制御のために予めエンコーダが付いている場合もある。このような場合は特に、新たにセンサを取り付ける必要がないので、非常にシステムが簡単になる。そこで、デッドレコニングは、オドメトリを基本にしてシステムを構築する。

大学構内の歩道では、街路樹や電柱、街灯が点で表される自然のランドマークで

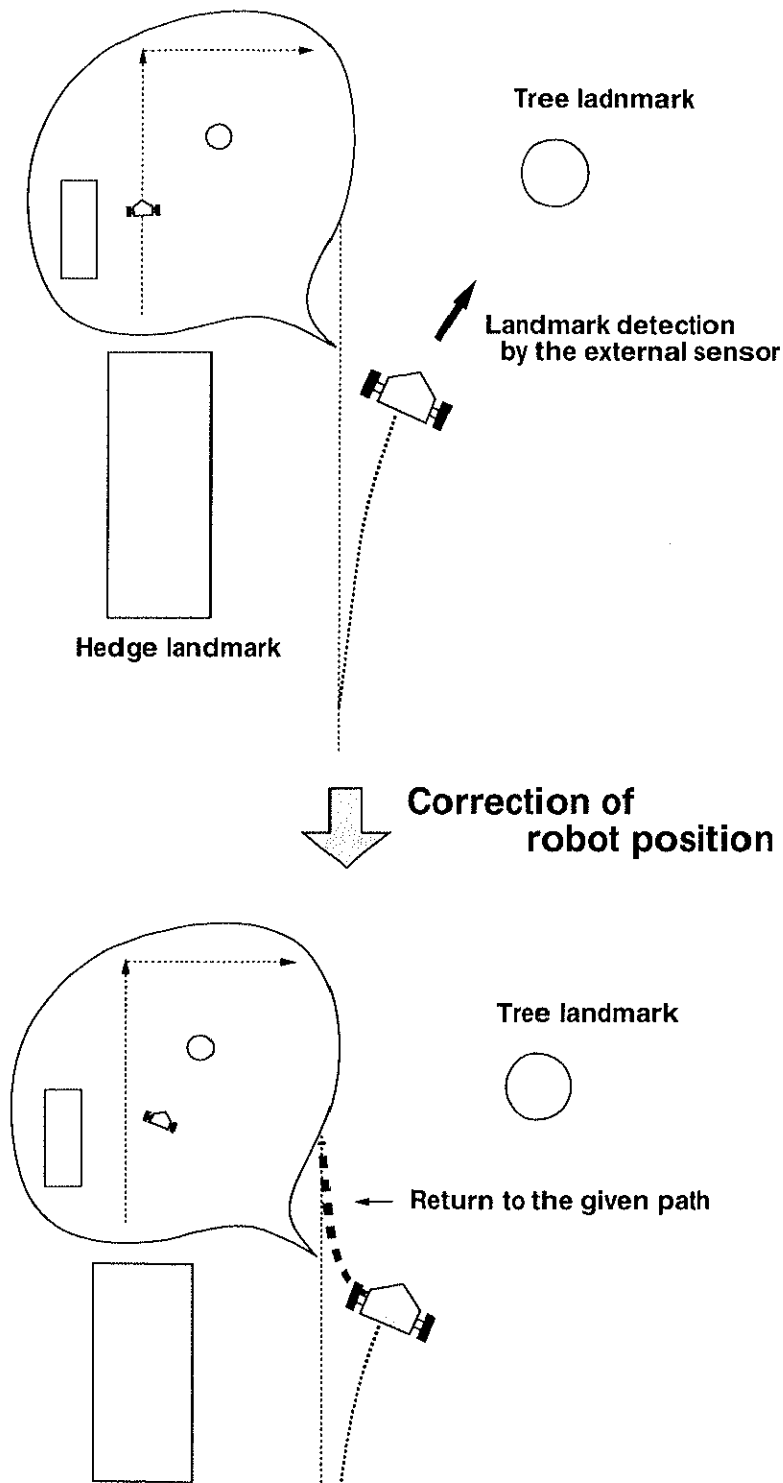


図 4.1: 推定位置に基づくナビゲーションの概念図

ある。また、壁や生け垣、橋の欄干、路肩の境界線、横断歩道が線分で表される自然のランドマークである。

長距離におよぶ設定した全経路のナビゲーションを実現するには、これらのランドマークが利用可能でなければならない。しかし、最初から様々なランドマークが利用可能なシステムが実現できるわけではない。そこで、漸進的に、利用可能なランドマークの種類を増やす枠組みを予め用意し、重要な順に実装するアプローチをとる。設定した走行経路の半分近くは、街路樹に沿った歩道である。そこで、本研究では、まず、街路樹をランドマークに利用できるようにし、次に、生け垣の順でランドマークの実装を試みる。そして、漸進的に全経路のナビゲーションを実現していく。

4.2.3 経路とランドマーク情報の記憶

ナビゲーションを行うためには、ロボットは、経路と環境に関する情報を持つていなければならない。経路や環境の表現方法としては、人間用の地図のようにある範囲の道路や建物などの配置が詳細に記述されたものやバスの路線図のようにバス停の連結で表現されたようなものなどが考えられる。経路やランドマークの情報を、どういう形式で表すかは、ロボットが持つ能力やナビゲーションの方法と密接に関わっている。人間用の地図をロボットにそのまま利用するのは、人間とロボットの環境認識能力の大きな相違のため現実的ではない。推定位置に基づくナビゲーションでは、走行すべき経路が直線や円弧など数値的な軌跡データとして与えられていれば良い。また、ランドマーク認識に基づく位置推定を行うには、その経路から観測できるランドマークの情報が与えられていればよい。経路とランドマークの情報の二種類の情報が、推定位置に基づくナビゲーションのために必要な最小限のデータである。ナビゲーションのためのデータは、走行距離が長くなるにつれてデータ量も増える。そこで、本研究では、経路とランドマーク情報のみを、経路と環境に関する情報としてロボットに与えることにした。

4.2.4 障害物に対する行動

最後に、障害物に対するロボットの行動についての基本戦略を述べる。障害物に対する基本戦略は、障害物を検知したら立ち止まり、万が一衝突したらそれを検知して急停止することに決めた。その理由は、大学構内歩道の場合、障害物は人間か自転車でありロボットよりも衝突回避能力が高いため、ロボットの方は立ち止まるのが一番安全だからである。また、歩道上に動かない障害物が置かれるのは、その先が通行止めの場合だけであり、それ以外で道路を塞ぐように障害物が放置されることはほとんどない。もちろん、研究という観点からは、障害物の回避も興味深いテーマではあるが、障害物を避けてから本来の経路上に復帰するまでを障害物回避と定義すると、ナビゲーションとは、問題を分離して考えることが可能である。よって、本研究では障害物の回避については取り扱わない。

4.3 解決すべき課題

上に述べた基本戦略に基づいて、目標タスクである「大学構内歩道の長距離屋外ナビゲーション」を実現するためには、以下の問題を解決しなければならない。

4.3.1 路面の凹凸に対して頑強なデッドレコニング

前節で、オドメトリを基本にデッドレコニングのシステムを構成することを決めた。オドメトリは、システムが簡単である反面、車輪の回転を測定しているので、車輪が路面に対して空転したり、障害物を乗り越えたりすると地面に対するロボットの移動量が正しく測定できないという欠点がある。大学構内の歩道の路面は、基本的に舗装されているので、通常走行時は、車輪の大きな空転はほとんど起こらないと考えてよい。しかしながら、車輪が段差や小さな障害物を越えることも瞬間的には発生し、それが大きな位置の誤差、特に進行方位の誤差を招くこともある。そこで、屋外の歩道では、このような状況にも頑強なデッドレコニングが望まれる。また、大学構内の歩道は、屋内の廊下などに比べてランドマークの間隔が離れている。ランドマーク間は、デッドレコニングのみで走ることになるので、歩道では、

廊下よりもデッドレコニングに頼った走行をする距離が長くなる傾向にある。したがって、デッドレコニングの信頼性をいかにあげるかが、この基本戦略で目標タスクを実現する上での一つの重要なかぎとなる。

本論文では、第5章でこの課題の解決方法を提案する。

4.3.2 ランドマークの認識処理時間を考慮した位置の推定

デッドレコニングとランドマーク認識のセンサ融合を行う際に注意すべき点は、誤差の大きさと時間の同期である。大学構内歩道では、屋内に比べてランドマークの認識処理に時間を要するが多い。しかしながら、従来の最尤推定法によるセンサ融合では、ランドマークの認識処理に時間を要することが考慮されていなかった。そのため、従来の方法では、認識処理に要する時間が無視できないランドマークを利用する場合、ロボットはランドマークの観測の度に一時停止する必要があった。これは、ゴール地点への到着が遅れるだけでなく、停止発進を繰り返すことによるエネルギーの無駄も引き起こす。これは、長距離のナビゲーションにおいては、無視できない問題である。そこで、このような場合にもロボットが一時停止せずに通常速度で走行できるようにするには、ランドマークの認識処理に要する時間を考慮した位置推定が必要となる。

本論文では、この課題の解決法を、第6章で詳細に述べる。

4.3.3 経路・ランドマーク情報作成のための作業量の軽減

推定位置に基づくナビゲーションを行うには、ロボットに、目的地までの経路や経路に沿ったランドマークに関する情報を予め記憶させなければならない。人手で経路やランドマーク情報を作成しロボットに与えることも可能であるが、走行距離が長くなると作業量が膨大になる。逆に、ロボットが走行環境を徘徊して目的地までの経路等を自動的に獲得させる方法も考えられるが、それはあまりにも非効率である。本研究の主体は、あくまでナビゲーションである。そこで、人手でも手間にならない部分は人間が行い、ロボットでも可能な事やロボットの方がむしろ得意である部分はロボットに作らせるという方法が妥当であると考えられる。作業量の軽

減と作成される経路・ランドマーク情報の信頼性の確保という二つの観点に注意して、ロボットと人間の協調による経路・ランドマーク情報の作成手法を開発する必要がある。

本論文では、この課題に対して開発された経路指示に基づく経路・ランドマーク情報の自動獲得方法を、第7章で詳細に述べる。

4.3.4 利用可能なランドマークの種類を漸進的に増やす枠組み

長距離におよぶ走行環境には、それだけ様々な環境が存在し、全経路にわたるナビゲーションを実現するには、様々なランドマークが利用できなければならない。しかしながら、最初から様々なランドマークが利用可能なシステムが実現できるわけではないので、利用頻度の高いランドマークから順に実現していくしかない。そこで、漸進的に、利用可能なランドマークの種類を増やす枠組みを予め用意する必要がある。

本論文では、このために開発したランドマーク・エージェントの漸進的追加によるランドマーク獲得システムについて、第7章4節で詳細に述べる。

4.4 本章のまとめ

本章では、本研究の基本戦略を示しその戦略で設定したタスクを実現する上で、解決すべき問題について述べた。基本戦略として、「推定位置に基づくナビゲーション」を用いることに決め、この戦略で、大学構内歩道を長距離ナビゲーションするには、路面の凹凸に頑強なデッドレコニング、ランドマークの認識処理時間を考慮した位置推定、経路とランドマーク情報の作成作業の軽減、そして、ランドマークの漸進的追加の枠組などの課題を解決する必要があることを示した。

第 5 章

路面の凹凸に頑強なデッドレコニング

5.1 本章の概要

本章では、路面の凹凸に頑強なデッドレコニングを実現する目的で開発したオドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニング・システムについて述べる。開発したシステムは、オドメトリに加えてジャイロも用いることで、間欠的に生じる車輪の空転等によるデッドレコニングの精度の低下をできる限り防いで、精度よく位置を推定するシステムである。次の節で関連する従来の研究と開発したシステムの基本的な考え方を述べた後、オドメトリとジャイロのそれぞれの誤差の性質の解析結果、その解析結果に基づいてオドメトリとジャイロの融合方法の考案とシステムの開発、基礎実験の結果の順に述べる。

5.2 従来の研究と開発したシステムの基本的な考え方

設定した大学構内の歩道は舗装されており、走行中のほとんどの時間については、オドメトリでもある程度良い精度で位置推定が可能である。オドメトリによるデッドレコニングの精度がひどく劣化するののは、路面の小さな石や段差の上を車輪が乗り越える瞬間などに、車輪が地面に対して大きく空転するときである。デッドレコニングで特に問題となるのは、ロボット方位の推定誤差であるが、その値は、オドメトリのみによってデッドレコニングを行う場合、左右の車輪の回転数の差から推

定され、車輪のスリップなどの影響を非常に受けやすい。一方、ジャイロセンサは、路面の状況と無関係にロボット本体の回転を測定できるので、車輪のスリップ等とは無関係に方位が測定できるので有効である。目標タスクを実現するには、上に述べた間欠的に生じるスリップ等によるデッドレコニングの精度の低下をできる限り防いで、精度よく位置を推定する方式が必要である。

Borenstein らは、移動ロボットのためのデッドレコニングによる位置推定について詳しく研究を行っている。彼らは、オドメトリによる角速度測定値とジャイロによる角速度測定値はほとんどの時間においてほぼ同じ値を示し、小さな障害物や段差を乗り越えた時だけ大きく異なる値を示すことに着目し、*Gyrodometry* という新しいデッドレコニングのアルゴリズムを提案した [51]。しかし、そこではジャイロのバイアス・ドリフトは無視しているため、ジャイロの測定値から角度を計算している時間においては角度の精度が良くなかった。また、推定位置の誤差の大きさについては推定していない。一方、Barshan らは、ジャイロのバイアス・ドリフトに関して、その特性を解析し、モデルを提案した [19]。Komoriya らは、Barshan らのモデルに基づいてカルマン・フィルタを構成し、オドメトリとジャイロの情報をセンサ融合することでジャイロのバイアス・ドリフトとロボットの位置を推定する方法を提案した [18]。彼らは、精度の良い光ファイバジャイロをオドメトリに併用することで、推定位置の誤差のバラツキを抑える実験結果を示した。しかし、カルマン・フィルタで推定位置の誤差の共分散を用いてはいるものの、これを内界センサ系の異常の検出等に積極的に利用することは行っていない。また、屋外の路面のように凹凸やスリップが発生する状況は全く想定されていない。筑波大学知能ロボット研究室でも、これまでに、オドメトリによるデッドレコニングとランドマーク観測の融合による移動ロボットの位置推定システムを開発し、これを POEM と名付けて実験用移動ロボット「山彦」上に実装し、屋内のナビゲーションに利用してきた [14]。しかし、このシステムは基本的に屋内環境で働く移動ロボットのために開発されたものであり、大学構内歩道環境で発生する車輪のスリップ等への対処は十分でなかった。

そこで、本研究では、従来の位置推定システムにおいて問題となっていた路面の

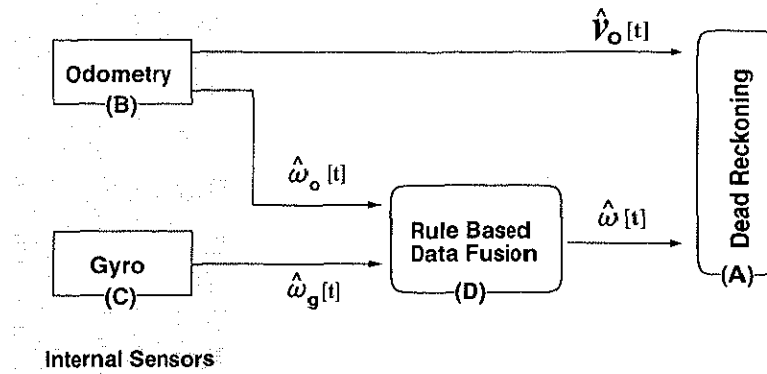


図 5.1: 開発したデッドレコニング・システムの構成図

($\hat{v}_o[t]$ は、オドメトリによるロボット本体の並進速度、 $\hat{\omega}_o[t]$ は、オドメトリによるロボット本体の角速度、 $\hat{\omega}_g[t]$ は、ジャイロで測定したロボット本体の角速度、 $\hat{\omega}[t]$ は、オドメトリとジャイロのセンサ融合後のロボット本体の角速度。)

凹凸や小さな障害物による車輪の空転などの悪影響を軽減するため、従来のシステムのオドメトリによるデッドレコニング部分に、ジャイロセンサを加えた新しいデッドレコニング・システムを開発した。その新しいデッドレコニング・システムでは、図 5.1 に示すように、オドメトリによる並進速度 $\hat{v}_o[t]$ と図 5.1(D) に示すルールベースのセンサデータ融合で推定された角速度 $\hat{\omega}[t]$ からデッドレコニングによる位置情報が計算される。図 5.1(D) の部分は、以下の 2 つ基本的な考え方に基づいて設計されている。(1) ロボットが通常走行している時は、ジャイロとオドメトリは同じ物理量を測定していると考えられるので、それらのデータを融合して角速度を推定し、同時にジャイロのバイアス・ドリフトも推定する。(2) 路面上の石を踏んだりスリップが生じたりしたと判断された場合、オドメトリとジャイロによる測定値が大きく異なることを利用し、より正しいと考えられるジャイロセンサの値のみを用いる。このような設計により、路面の凹凸や車輪のスリップに強く、かつ、ジャイロのバイアス・ドリフトも推定できるデッドレコニング・システムが実現できる。また、(2) の状態が長時間持続するのは、内界センサ系が正しく機能していない状態であると推定でき、(2) の状態の頻度を監視することにより内界センサ系の故障

に対する警告も可能となる。

以下、デッドレコニングによる位置推定(図 5.1の (A))を 5.3 節で、オドメトリによる並進速度・角速度の測定(図 5.1の (B))を 5.4 節で、ジャイロによる角速度の測定(図 5.1の (C))を 5.5 節で述べる。そして、5.7 節で、ルールベースのセンサ融合(図 5.1の (D))により角速度を推定することでロバストなデッドレコニング・システムを構成する方法を述べる。

5.3 デッドレコニングによる位置推定

ロボットの 2 次元平面上の位置 $(x[t], y[t])$ とロボットの方位 $\theta[t]$ (以後これらを合わせて“位置”と呼ぶ)をベクトルにより、

$$\mathbf{P}[t] = \begin{bmatrix} x[t] & y[t] & \theta[t] \end{bmatrix}^T \quad (5.1)$$

で表す¹。ここで、 T は転置を表す。

サンプリング時間 τ 秒後の位置は、ロボットの並進速度 $v[t]$ とロボット本体の角速度 $\omega[t]$ から、

$$\mathbf{P}[t + \tau] = \mathbf{P}[t] + \tau \begin{pmatrix} v[t] \cos(\theta[t]) \\ v[t] \sin(\theta[t]) \\ \omega[t] \end{pmatrix} + \tau \mathbf{n}[t] \quad (5.2)$$

で計算される。ここで、 $\mathbf{n}[t]$ は、量子化や計算によって生じる誤差である。 $v[t]$ と $\omega[t]$ をまとめて、ベクトル $\mathbf{V}[t]$ で表す。今、 $\hat{\mathbf{P}}[t]$ を位置推定システムによる $\mathbf{P}[t]$ の推定値、 $\Delta \mathbf{P}[t]$ をその誤差、 $\hat{\mathbf{V}}[t]$ を $\mathbf{V}[t]$ の測定値、 $\Delta \mathbf{V}[t]$ をその誤差とおき、

$$f(\mathbf{P}[t], \mathbf{V}[t]) = \mathbf{P}[t] + \tau \begin{pmatrix} v[t] \cos(\theta[t]) \\ v[t] \sin(\theta[t]) \\ \omega[t] \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

¹ここで、ロボットの位置等は、 $t = n\tau (n = 0, 1, 2, \dots)$ で表されるサンプリング間隔毎の離散的な時間に対してのみ考えている。 t が離散的な値をとることを示すため、本稿で時刻 t の関数 $\mathbf{P}(t)$ を $\mathbf{P}[t]$ で表記している。

としたとき、 $\Delta \mathbf{P}[t], \Delta \mathbf{V}[t]$ と $\mathbf{n}[t]$ の期待値が 0 とみなせるならば、時刻 $t + \tau$ における位置の推定値は、

$$\hat{\mathbf{P}}[t + \tau] = f(\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]) \quad (5.4)$$

で与えられる。このとき、 $\Delta \mathbf{P}[t], \Delta \mathbf{V}[t]$ と $\mathbf{n}[t]$ が小さいとみなせると、

$$\begin{aligned} \mathbf{P}[t + \tau] &= f(\mathbf{P}[t], \mathbf{V}[t]) + \tau \mathbf{n}[t] \\ &= f(\hat{\mathbf{P}}[t] + \Delta \mathbf{P}[t], \hat{\mathbf{V}}[t] + \Delta \mathbf{V}[t]) + \tau \mathbf{n}[t] \\ &\simeq f(\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]) + \mathbf{j}[t] \Delta \mathbf{P}[t] + \mathbf{k}[t] \Delta \mathbf{V}[t] + \tau \mathbf{n}[t] \\ &= \hat{\mathbf{P}}[t + \tau] + \Delta \mathbf{P}[t + \tau] \end{aligned} \quad (5.5)$$

と表される。ここで、

$$\mathbf{j}[t] = \left. \frac{\partial f(\mathbf{P}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{P}} \right|_{\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]} \quad (5.6)$$

$$\mathbf{k}[t] = \left. \frac{\partial f(\mathbf{P}, \mathbf{V})}{\partial \mathbf{V}} \right|_{\hat{\mathbf{P}}[t], \hat{\mathbf{V}}[t]} \quad (5.7)$$

である。したがって、推定位置 $\hat{\mathbf{P}}[t]$ の誤差は、サンプリング時間間隔 τ 秒毎に

$$\Delta \mathbf{P}[t + \tau] = \mathbf{j}[t] \Delta \mathbf{P}[t] + \mathbf{k}[t] \Delta \mathbf{V}[t] + \tau \mathbf{n}[t] \quad (5.8)$$

と変化する。また、 $\Delta \mathbf{P}[t]$ の共分散行列は、

$$\begin{aligned} \Sigma_P[t] &= E(\Delta \mathbf{P}[t] \Delta \mathbf{P}[t]^T) \\ &= \begin{bmatrix} \sigma_x[t]^2 & \sigma_{xy}[t] & \sigma_{x\theta}[t] \\ \sigma_{xy}[t] & \sigma_y[t]^2 & \sigma_{y\theta}[t] \\ \sigma_{x\theta}[t] & \sigma_{y\theta}[t] & \sigma_\theta[t]^2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5.9)$$

で与えられる。この値は、誤差 $\Delta \mathbf{P}[t]$ の大きさの指標である。共分散行列 $\Sigma_P[t]$ は、 $\Delta \mathbf{P}[t]$ と $\Delta \mathbf{V}[t]$ と $\mathbf{n}[t]$ が、互いに無相関であるとみなせるならば、式 (5.8) より、サンプリング時間間隔 τ 秒毎に

$$\Sigma_P[t + \tau] = \mathbf{j} \Sigma_P[t] \mathbf{j}^T + \mathbf{k} \Sigma_V[t] \mathbf{k}^T + \tau^2 \Sigma_N[t] \quad (5.10)$$

で更新される。ここで、

$$\Sigma_V[t] = E(\Delta \mathbf{V}[t] \Delta \mathbf{V}[t]^T) \quad (5.11)$$

$$\Sigma_N[t] = E(\mathbf{n}[t] \mathbf{n}[t]^T) \quad (5.12)$$

である。

5.4 オドメトリによる並進速度と角速度の測定

5.4.1 オドメトリのモデル化

図 5.2 に示す二輪を有する移動ロボットを考える。いま、二輪の中点をロボットの代表点と仮定する。車輪がスリップ等をする事なく路面上を回転しているとす。このとき、オドメトリによるロボットの並進速度 $v_o[t]$ と方位角速度 $\omega_o[t]$ は、左右の車軸に取り付けられたエンコーダで測定される車輪の回転速度 $\hat{u}_l[t], \hat{u}_r[t]$ と計算のために与えられた左右の車輪径 \hat{R}_l, \hat{R}_r 、トレッド \hat{T} より、各々、

$$\hat{v}_o[t] = \frac{\hat{R}_r \hat{u}_r[t] + \hat{R}_l \hat{u}_l[t]}{2} \quad (5.13)$$

$$\hat{\omega}_o[t] = \frac{\hat{R}_r \hat{u}_r[t] - \hat{R}_l \hat{u}_l[t]}{\hat{T}} \quad (5.14)$$

によって計算される。ここで、添字 r は右車輪を、添字 l は左車輪を意味する。いま、 $\hat{u}_l[t], \hat{u}_r[t], \hat{R}_l, \hat{R}_r, \hat{T}$ をまとめて、ベクトル $\hat{\mathbf{m}}[t]$ で表し、その誤差を $\Delta \mathbf{m}[t]$ で表す。そのとき、オドメトリによる並進速度と方位角速度の誤差の共分散行列 $\Sigma_V[t]$ は、

$$\begin{aligned} \Sigma_V[t] &= \begin{bmatrix} \sigma_{v_o}[t]^2 & \sigma_{v_o \omega_o}[t] \\ \sigma_{v_o \omega_o}[t] & \sigma_{\omega_o}[t]^2 \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{L}[t] \Sigma_m[t] \mathbf{L}[t]^T \end{aligned} \quad (5.15)$$

で計算される。ここで、

$$\Sigma_m[t] = E(\Delta \mathbf{m}[t] \Delta \mathbf{m}[t]^T) \quad (5.16)$$

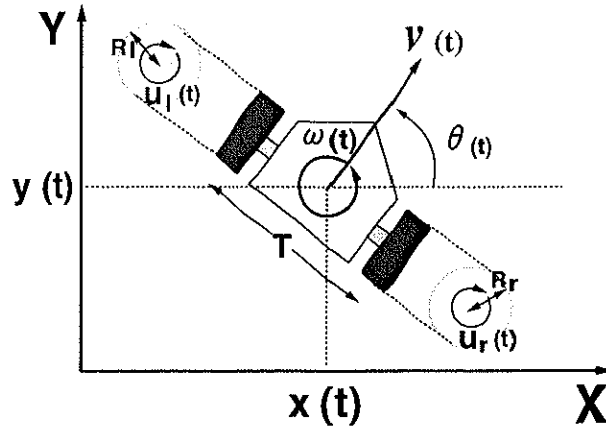


図 5.2: 車輪型移動ロボットのモデル

($v(t)$ は、ロボット本体の並進速度、 $\omega(t)$ は、ロボット本体の角速度、 R_r : 右車輪径、 R_l : 左車輪径、 T : トレッド (車輪間隔)、 u_r : 右車輪の回転角速度、 u_l : 左車輪の回転角速度。)

は、車輪の回転量の測定誤差、および、ロボットのキネマティクス・パラメータの計算に用いた値の誤差の共分散行列である。一般に、これらの確率変数は、無相関と考えられるので、

$$\Sigma_m[t] = \begin{bmatrix} \sigma_{u_l}[t]^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{u_r}[t]^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{R_l}[t]^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{R_r}[t]^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sigma_T[t]^2 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

と考えて良い。また、

$$\mathbf{L}[t] = \left. \frac{\partial V[\mathbf{m}]}{\partial \mathbf{m}} \right|_{\hat{\mathbf{m}}[t]} \quad (5.18)$$

である。

5.4.2 オドメトリの性質

ロボットが長い距離走行するにつれて、推定位置の誤差は次第に増加していく。図 5.3 に、左右の車輪径 \hat{R}_l, \hat{R}_r 、角速度 $\hat{\omega}_l, \hat{\omega}_r$ 、トレッド \hat{T} の誤差によって引き起こされる推定位置の誤差の数値シミュレーションの結果を示す。位置の誤差の共分散の推定値は、マハラノビス距離 1 の誤差楕円を用いて表示されている。ここに示された誤差楕円は 3 次元の共分散行列 Σ_P から求められた誤差楕円体を xy 平面に投影したものである。このシミュレーションでは、初期位置・方位の誤差はゼロとしたが、良くキャリブレーションされたオドメトリでも、初期方位の誤差が推定位置の誤差の大きな要因となることに注意する必要がある。オドメトリによる位置推定においては、位置のパラメータ x, y, θ の誤差が互いに強い相関関係をもつ性質がある。この相関関係は、例えば、 x 軸方向の位置が外界センサで測定されると、最尤推定により、 x だけでなく y, θ の値も自動的に修正する際に利用され、非常に重要である [14]。

なお、実際には、ロボットの位置推定誤差を知るために正確な確率モデルを作ることには難しい。また、実際のオドメトリの各誤差要因について、その期待値は完全にゼロではなく、必ずしもガウス性白色雑音ではない。しかし、厳密にモデルに従わなくても、 Σ_v, Σ_n として適切な値を設定すれば、(5.10) 式を適用することによって、推定位置の誤差の計算が可能である。具体的には、数十回の実機走行実験による位置のバラツキと (5.10) 式で計算される分散の範囲内に収まるように Σ_v, Σ_n の値を決定する。

実験によると、キャリブレーションを十分に行えば、ほぼ平らな路面であれば屋外環境であっても 10m の走行距離に対して数 10cm 程度の位置の誤差でオドメトリによる位置推定が可能であった。したがって、ロボットが石や段差を乗り越えたり大きな空転をしたりしない限り、間欠的なランドマーク認識との組合せによりナビゲーションに必要な精度で位置とその不確実性が推定できる [52][53]。

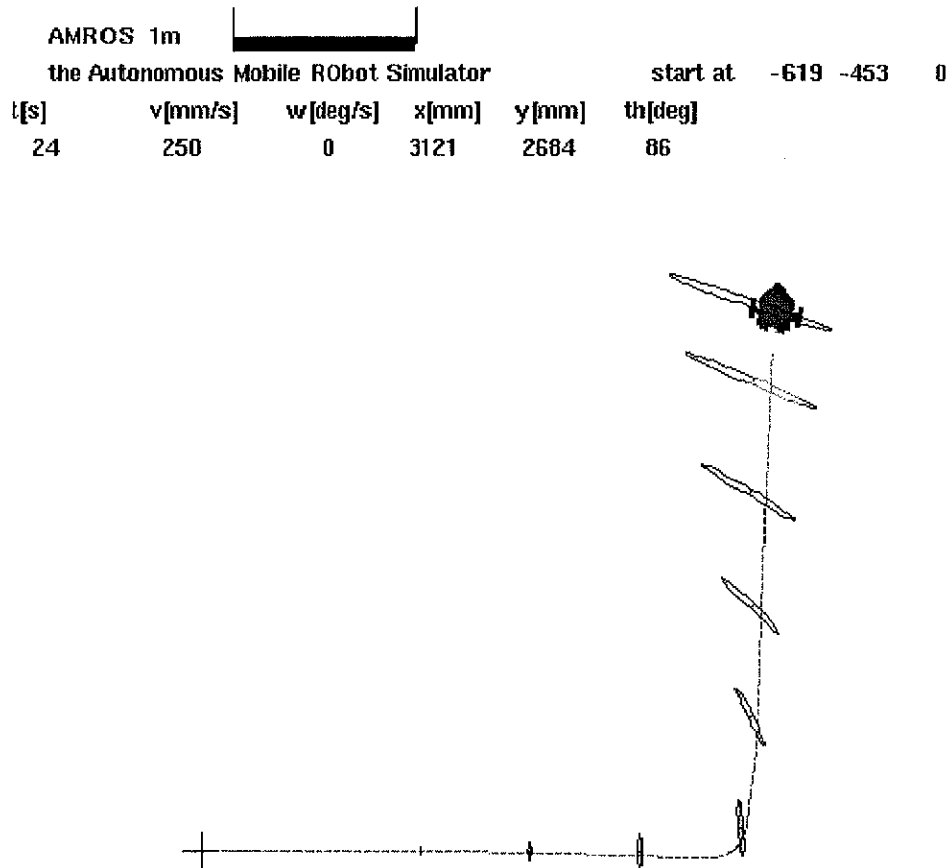


図 5.3: オドメトリによる位置とその誤差分散の推定のシミュレーション結果の例
(誤差分散の初期値は、 $\sigma_x = \sigma_y = 0mm, \sigma_\theta = 0^\circ, \sigma_{R_l} = \sigma_{R_r} = \sigma_T = 1mm, \sigma_{u_l} = \sigma_{u_r} = 1^\circ/s$ であり、各楕円は、マハラノビス距離 1 の誤差楕円である。)

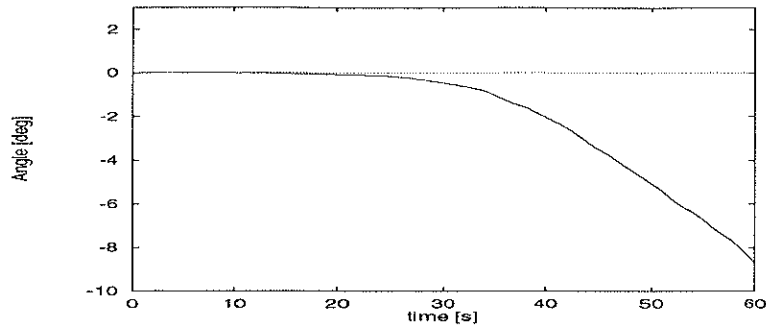


図 5.4: 静止状態における振動ジャイロ ENC-05 で測定された角速度の積分による角度

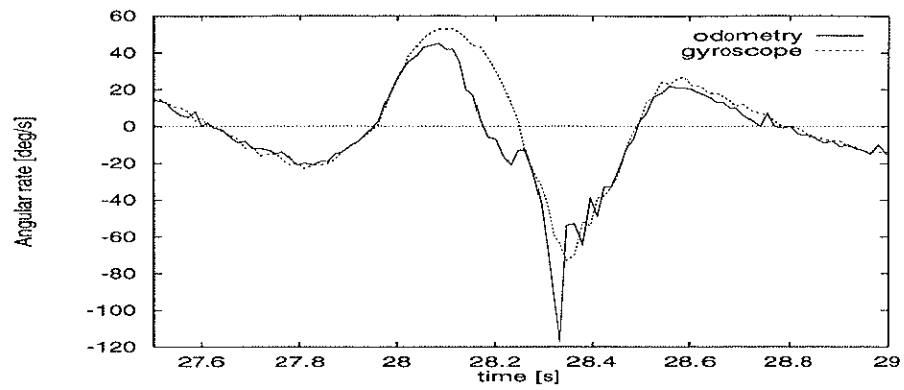
5.5 振動ジャイロによる角速度測定

ジャイロは、並進運動と独立に測定軸回りの角速度を測定するセンサである。とくに、振動ジャイロは、小型・軽量・低消費電力・安価で、小型の自律移動ロボットには非常に有用である。振動ジャイロを利用する際の問題点は、出力のバイアス・レベル (ジャイロが静止状態すなわち角速度 $0^\circ/\text{s}$ のときの出力) の時間変動である [19]。これは、バイアス・ドリフトと呼ばれる。振動ジャイロの測定値の積分によってロボットの方位角を知ろうとする場合、バイアス・ドリフトは、特に大きな悪影響を及ぼす。

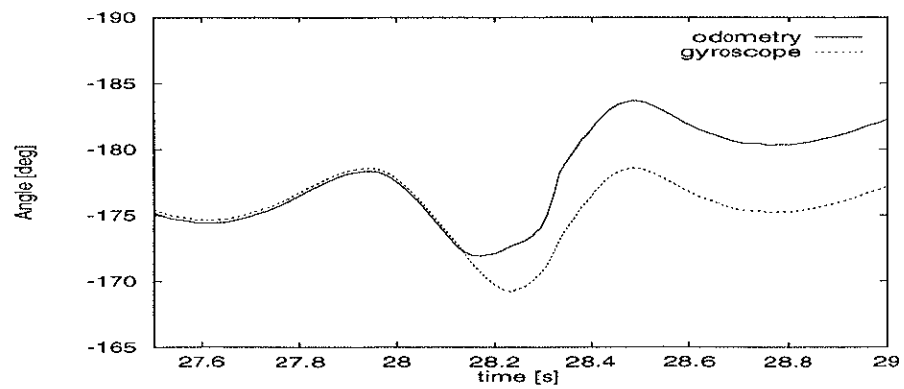
図 5.4 は、(株)村田製作所製の圧電振動ジャイロ ENC-05 [54] で測定された角速度を積分して得た方位角であり、1 分間で約 10 度の誤差が累積している。ジャイロが静止状態であっても、バイアス・ドリフトのため、方位の計算値は時間が経つにつれてかなり急激に誤差が累積することが確認できる。

5.6 オドメトリとジャイロによる角速度測定の比較

車輪型移動ロボットを走行させ、それが路面上の小さな障害物を乗り越えた際のオドメトリとジャイロによる角速度と方位の計測値を比較した。計測は実験用移



(a) オドメトリとジャイロによる角速度



(b) 上記測定結果から計算された角度

図 5.5: ロボットが左車輪で直径 6mm の棒を踏んだ場合のオドメトリとジャイロの比較

動ロボット「山彦ナビ」を用い、ロボットをほぼ直進させ、途中で、約直径15cmの左車輪に直径6mmの円柱を乗り越えさせた。この場合、円柱は車輪の下で転がるため車輪の回転による方位角速度の測定には大きな誤差を生じる。オドメトリとジャイロによってそれぞれ測定された角速度の一部を図5.5 (a)に示す。図5.5 (a)において、28.00秒から28.35秒までの間、オドメトリで測った角速度とジャイロで測った角速度が異なる区間が車輪が円柱を乗り越えている間である。オドメトリとジャイロによる角速度測定値をそれぞれ積分して求めた角度の違いは、およそ5度にもなる(図5.5 (b))。この結果により、通常走行時は2つの測定値には、それ程大きな差は見られないが、路面の影響で車輪が空転する瞬間にオドメトリによる測定に大きな誤差が発生することがわかる。

5.7 オドメトリとジャイロを用いた頑強なデッドレコニング

オドメトリは、ロボットが舗装された道を走行する限り、小石などを乗り越えて車輪が空転する場合などの間欠的な短い時間を除けば、かなり正しくロボットの動きを推定できる。しかし、車輪が空転した瞬間には、方位角速度の測定に誤差を生じこれが位置推定の大きな誤差要因となる。一方、ジャイロは、ロボット本体の角速度を直接測定するので上記の空転の影響は受けないが、一般にセンサの帯域と電氣的ノイズ等によりオドメトリと比較して十分な精度が得られないばかりでなく、前述したバイアス・ドリフトの問題がある。そこで、オドメトリとジャイロの情報に対して次節に示すルールベースのセンサデータ融合を行い、より正確な角速度を推定する。これとオドメトリによる並進速度を用いて、車輪が小石を踏んで間欠的に空転したりスリップを生じることがある屋外環境でも、ある程度の精度が確保されたデッドレコニング・システムを構成した。また、冗長センサ系であることを利用して、センサ系が正しく動作しているかどうかを検出する方法についても考案した。

5.7.1 オドメトリとジャイロの融合による角速度の測定

提案するデッドレコニング・システムでは、常時オドメトリとジャイロによる角速度を測定し、その差 $\Delta[t]$ をモニタする。 $\Delta[t]$ は、

$$\Delta[t] = \omega_g[t] - \hat{\omega}_o[t] = (\hat{\omega}_g[t] - \hat{\epsilon}[t]) - \hat{\omega}_o[t] \quad (5.19)$$

で与えられる。ここで、 $\hat{\omega}_g[t]$ は、バイアス・ドリフト $\hat{\epsilon}[t]$ をキャンセルしたジャイロの測定値を示す。

差の絶対値 $|\Delta[t]|$ が小さいときは、車輪の空転等はなく、オドメトリとジャイロは、いずれもロボットの方角角速度をほぼ正しく測定していると考えられる (Case 1)。逆に、 $|\Delta[t]|$ が大きいときは、車輪の空転等が生じていると考えられ、オドメトリによる測定値は信用できない (Case 2)。そこで、これら2つの場合に分けて、各サンプリング毎の角速度を決定する。

以下に各場合における、角速度およびその誤差の分散の推定方法を示す。

5.7.1.1 Case 1 : オドメトリとジャイロによる角速度測定値がほぼ等しい場合

この場合、双方の値が信用できるとして、これらの誤差分散の値 $\sigma_{\omega_g}^2$ 、 $\sigma_{\omega_o}^2$ を用いて最尤推定の公式

$$\hat{\omega}[t] = \frac{1}{\sigma_{\omega_g}^2 + \sigma_{\omega_o}^2} (\sigma_{\omega_o}^2 \hat{\omega}_g[t] + \sigma_{\omega_g}^2 \hat{\omega}_o[t]) \quad (5.20)$$

によってロボットの方角角速度を推定する。ここで、 $\sigma_{\omega_g}^2$ は、主にジャイロの値の測定誤差によるため、

$$\sigma_{\omega_g}[t]^2 = \sigma_{w_{\omega_g}}[t]^2 + \sigma_{\epsilon}[t]^2 \approx \sigma_{w_{\omega_g}}[t]^2 \quad (5.21)$$

で表され、 $\sigma_{\omega_o}[t]^2$ は、式 (5.16) で与えられる。ここで、 $\sigma_{w_{\omega_g}}[t]^2$ は、ジャイロによる角速度測定の測定誤差の分散、 $\sigma_{\epsilon}[t]^2$ は、ジャイロのバイアス・ドリフトの誤差の分散である。また、最尤推定後の角速度推定値の分散 $\sigma_{\omega}[t]^2$ は、

$$1/\sigma_{\omega}^2[t] = 1/\sigma_{\omega_g}[t]^2 + 1/\sigma_{\omega_o}[t]^2 \quad (5.22)$$

で与えられる。このとき、ジャイロのバイアス・ドリフトも同時に推定する (付録参照)。

5.7.1.2 Case 2 : オドメトリとジャイロによる角速度測定値が大きく異なる場合

この場合、「オドメトリによる角速度の測定値は信用できない」と判断する。したがって、ロボットの方角角速度はジャイロの値だけを用いて

$$\hat{\omega}[t] = \hat{\omega}_g[t] \quad (5.23)$$

とする。この時、石を踏んだり、段差を通過したり、あるいは、ロボット本体が持ち上げられた、などの状況が想像される。このような場合、ロボット本体にもかなりの揺れが生じるので、ジャイロの測定値にも安定走行時以上の誤差が発生している可能性がある。そこで、安全のため、角速度の測定誤差の分散は、安定走行時のジャイロの誤差分散 $\sigma_{\omega_g}^2$ よりも大きな値を設定する。

5.7.2 内界センサ系の異常の検出

オドメトリとジャイロによる角速度の測定値が大きく異なる時 (Case 2) は、車輪が進行方向のみでなく横方向へもすべっている可能性、あるいは、ロボット自身が持ち上げられている可能性もあるため、角速度だけでなく並進速度についても誤差が大きいと考えられる。そこで、この場合はデッドレコニングによる推定位置の誤差の共分散行列を、安全のために大きめの値にするため、車輪のスリップ等がないとして求めた並進速度の分散から計算した共分散行列 $\Sigma_P[t]^-$ に対して、

$$\Sigma_W = \begin{bmatrix} \sigma_{W_x}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{W_y}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (5.24)$$

を加え、

$$\Sigma_P[t] = \Sigma_P[t]^- + \Sigma_W \quad (5.25)$$

をもって、 $\Sigma_P[t]$ の更新値とすることにした。この行列 $\Sigma_P[t]$ は、もはや数学的に厳密な共分散行列ではないが、推定誤差の大きさを安全サイドに評価するパラメータとしては利用できる。このようにして定めた $\Sigma_P[t]$ の大きさは、オドメトリとジャイロの測定値の差が大きい状態が続くと急速に大きくなる。したがって、例えば、 $\Sigma_P[t]$ のトレースを監視することでデッドレコニング用のセンサ系の故障やロボットが持ち上げられた状況などの異常事態を検出するために有用な情報を提供できる。

5.8 デッドレコニング・システムの実装

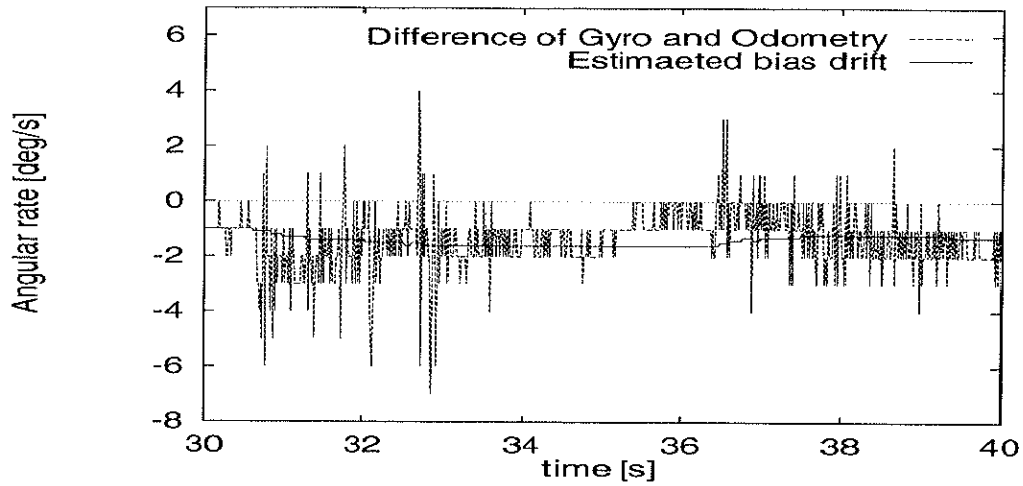
ジャイロセンサ ENC-05 を用い、5ms 毎に提案したデッドレコニングのアルゴリズムに従って推定位置と共分散を計算するシステムを開発した。但し、ここでは、オドメトリとジャイロセンサの測定値の差 $|\Delta|$ による場合わけは、 $|\Delta| \leq 5^\circ /s$ のとき Case 1、 $|\Delta| \geq 20^\circ /s$ のとき Case 2 とした。また、実験システムにおいては、ジャイロ出力に時折発生する間欠的なある大きさの誤差を避けることができなかった²、 $5^\circ /s < |\Delta| < 20^\circ /s$ のときは、オドメトリの値のみを用いることとした。各パラメータの値は、それぞれ $\sigma_{\omega_g} = 31.25^\circ /s$ 、 $\sigma_{\omega_o} = 0.025|u_r| + 0.025|u_l| + 0.001^\circ /s$ 、 $\sigma_\epsilon[0] = 0.002^\circ /s$ に設定した。また、 $\sigma_\epsilon[0]$ は、システムの起動後の 30 秒間、バイアス・レベルの初期化を行う際に測定される $\hat{\epsilon}$ の分散値を初期値とした。

5.9 基礎実験

5.9.1 ジャイロのバイアス・ドリフトの推定実験

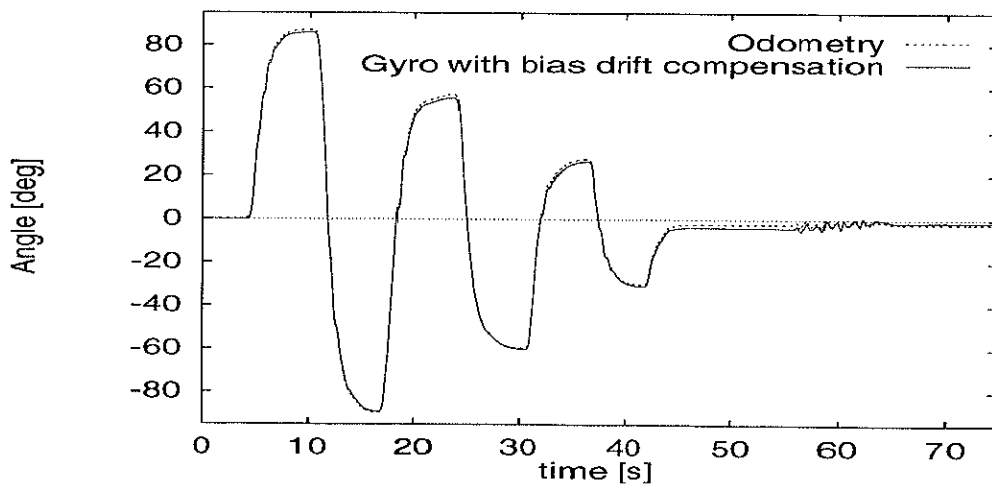
ジャイロのバイアス・ドリフトが走行状態においても求まっていることを確認するため、バイアス・ドリフトの推定値を記録した。図 5.6 (a) は、ロボットが走行中の、ジャイロとオドメトリの角速度測定値の差とバイアス・ドリフト推定の結果

²この誤差は、角速度がゆるやかに変化する時にのみ、時折、ジャイロ出力に現れる誤差で、筆者らが用いたジャイロに固有な非線形誤差と考えられている。



(a) 走行中におけるバイアス・ドリフトの推定

(Case 1では、オドメトリとジャイロによる角速度測定値の差がバイアス・ドリフトと考え得る。)



(b) バイアス・ドリフトの補正を行った場合のジャイロによる角度

(ロボットは、 90° 、 -90° 、 60° 、 -60° 、 30° 、 -30° 、 0° の順にその場回転をし、その後、2m 直進した。)

図 5.6: ロボットが走行中におけるバイアス・ドリフトの推定

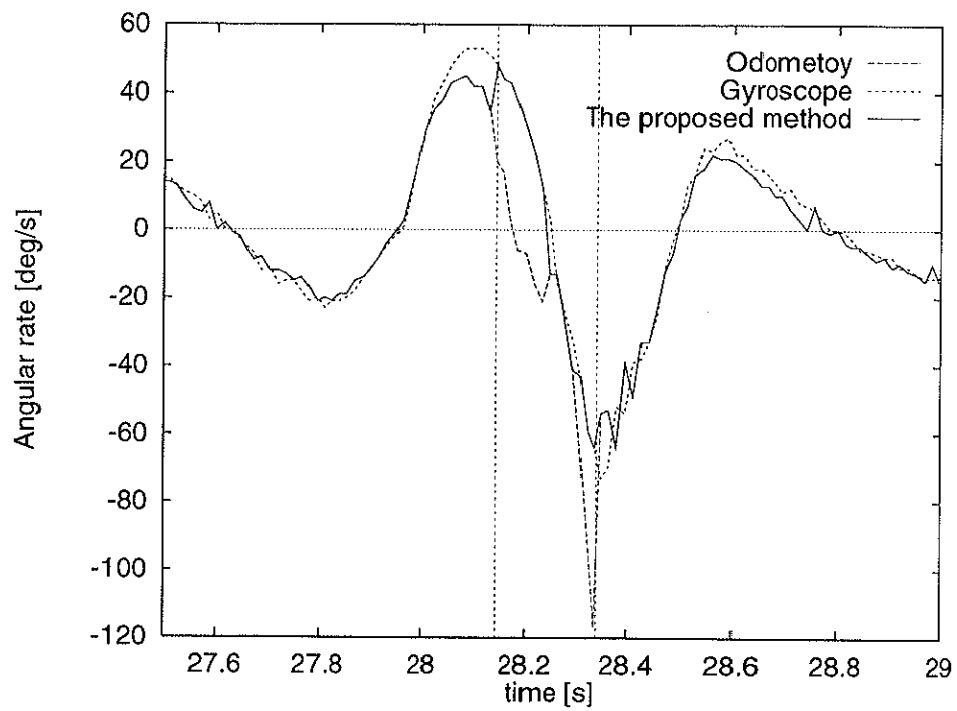


図 5.7: ルールに基づくオドメトリとジャイロのセンサ融合の結果
(28.14 秒から 28.34 秒までの間、測定モードは、Case 2 に切替えられた。)

を示している。結果として、ジャイロとオドメトリの測定値の差がスムージングされ、バイアス・ドリフトとして推定されている。図 5.6 (b) は、ロボットに、 90° 、 -90° 、 60° 、 -60° 、 30° 、 -30° 、 0° その場回転したあと 2m 直進するという動作をさせ、オドメトリで測定した角度とバイアス・ドリフトの補償をした ENC-05 での角速度の測定値を積分した角度を比較したものである。その結果、オドメトリで測定した角度とジャイロによる角度がほぼ同じ値を示しており、ロボットが動いていても、ジャイロのバイアス・ドリフトが十分な精度で補償されていることが分かった。なお、これらの実験では、平らな路面を走行させており、常に Case 1 が適用された。

5.9.2 車輪の空転等の検出に基づく測定モードの切替え

図 5.7 に、ロボットの左車輪に直径 6mm の円柱を乗り越えさせた場合のデータについて、提案した方式で融合した結果を示す。ここでは、28.14s から 28.34s の間、空転等が検出され、測定モードが Case 2 に切替えられていることが分かる。この間、ロボットの方位角は、ジャイロの情報だけから計算されている。なお、仮に、バイアス・ドリフトが推定されていないとすると、その値が $2^\circ/\text{s}$ としても 0.4° の誤差を生じることとなる。

5.9.3 障害物乗り越え時の推定位置精度

小さな障害物を乗り越えた際の、デッドレコニング・システムの位置の推定精度を確認するための実験を行った。図 5.8 に実験環境と方法を示す。ロボットに、デッドレコニングによって、スタート後、2m 直進して、 -180° 回って初期位置に戻る動作を行わせた。その際、帰り道の $(180\text{cm}, 0)$ の点で、ロボットの左車輪に直径 6mm の円柱を乗り越えさせた。ここで、走行制御は、推定位置のフィードバックで制御されるので、ロボットが推定しているゴール位置は、 $(0, 0)$ である。また、ロボットの移動速度は、 300 mm/s である。

実験は、円柱のない状況でオドメトリだけで走行した場合、円柱が置かれた状況でオドメトリだけで走行した場合、円柱が置かれた状況で開発した方法で走行した

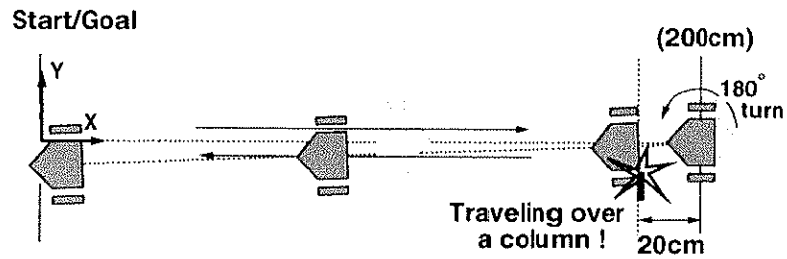


図 5.8: ロボットが小障害物 (直径 6mm の棒) を乗り越えた際の位置推定に関する実験環境と実験方法

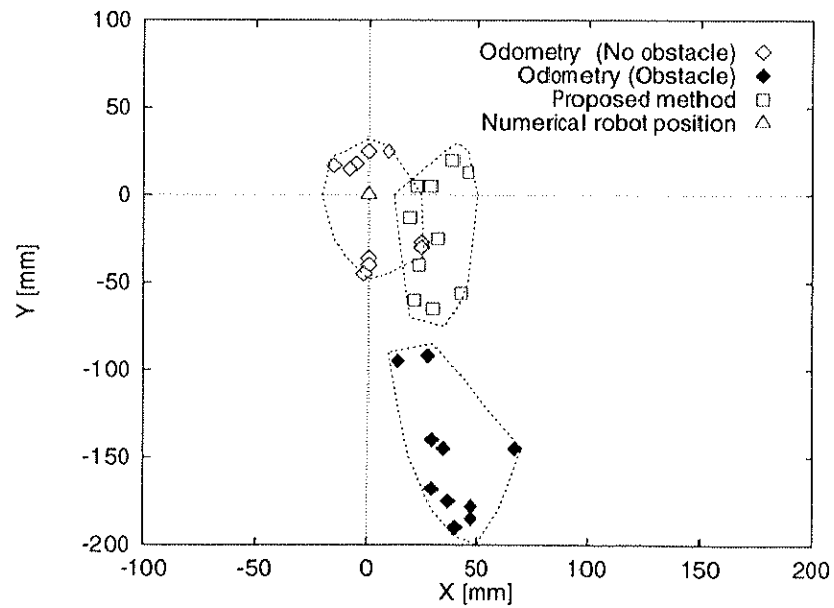


図 5.9: 図 5.8 で示した実験におけるゴール位置での精度の比較
(障害物なしでオドメトリのみの場合、障害物ありでオドメトリのみの場合、そして、開発した方法の場合)

場合の3つの条件で行った。その実験結果を図5.9に示す。図5.9から、ロボットが円柱を踏んだ場合に、開発したデッドレコニングがオドメトリだけの場合に比べて方位角の精度が良くなったことが確認できる。この結果は、障害物を踏まなかった場合のオドメトリによる位置測定値とほぼ等しい。したがって、開発した方法により、障害物を踏んでも障害物がない場合とほぼ同様の精度が確保されることがわかる。

なお、円柱を乗り越えたことによって、前後方向にも誤差が生じているが、これに関する情報は得られないのでこの成分については精度は改善されていない。しかし、通常よりも共分散値は大きく計算され、ロボットの存在領域の推定という観点からは推定値が改善された。

5.9.4 屋外における位置推定精度

屋外の舗装された歩道におけるデッドレコニング・システムの位置推定精度を検証する実験を行った。路面は、スタート地点からx軸方向9mまではタイル張りであり、その後は、アスファルトである。人間によるマニュアル操縦で、ロボットに、x軸方向に10m、左に90°曲がって、y軸方向に10m進ませた。実験は、意図的な障害物を置かない場合、円柱状の障害物(直径6mm)をスタート地点から1.5mから4mの範囲で2回踏ませた場合、そして、高さ5mm程度の小石を1.5mから4mの範囲に適当にばらまいた場合について行った。Fig.5.10に、各々の場合における、オドメトリのみによる位置推定と開発したデッドレコニング・システムによる位置推定の結果の一例を示す。オドメトリのみの場合、円柱を踏んだり、小石を踏んだりした場合、極端に精度が悪くなっている事が分かる(同図(A),(B))。開発したデッドレコニング・システムでは、いずれの場合も、安定しておおよそ正しい位置が推定できている事がわかる。2m付近で本来のコースから一度外れているのは、乗り越えられない大きさの小石を乗り越えようとして軌道が一旦ずれたからである。

結論として、開発したデッドレコニング・システムにより、屋外の歩道でも15mくらいは、デッドレコニングのみで誤差が約20cm以下の精度で位置を推定できる事がわかった。

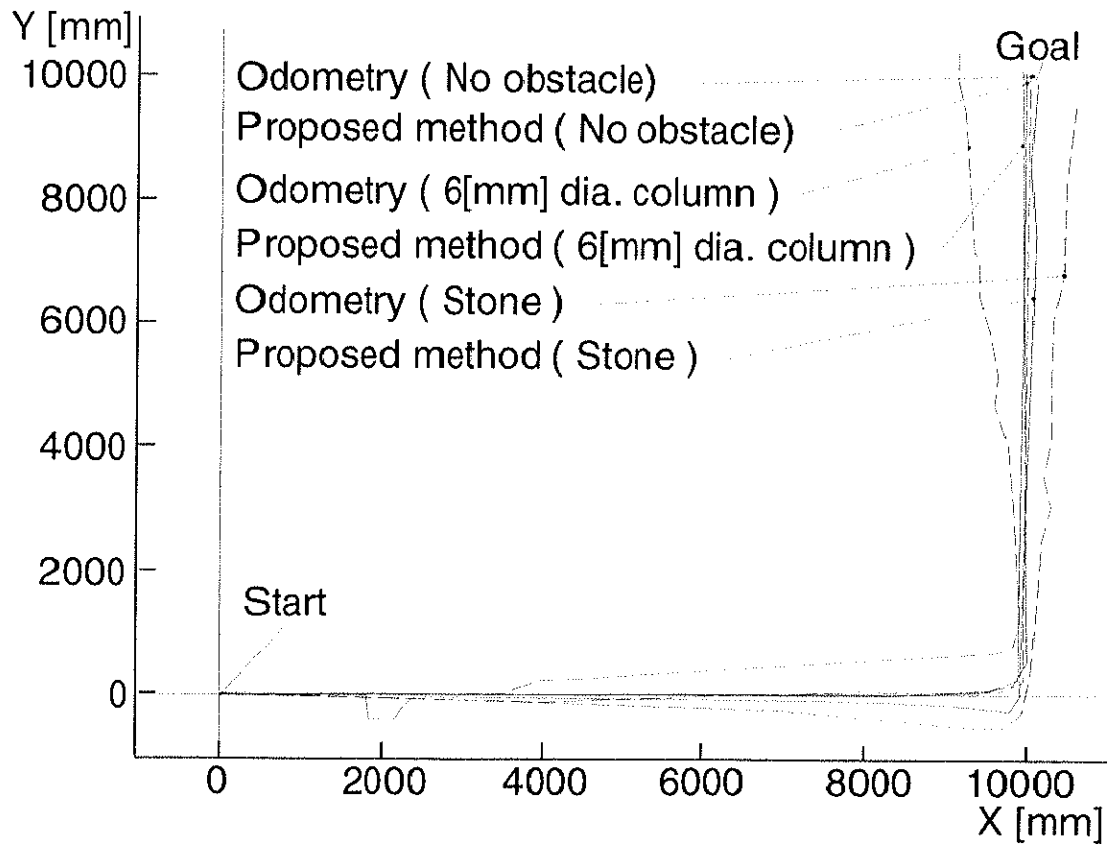


図 5.10: 屋外歩道におけるオドメトリのみの場合と開発した方法の場合の位置推定精度の比較

(障害物がない場合、棒状の障害物がある場合、小石がある場合。ロボットは、マニュアル操作で 10m 直進後左に 90 度曲がってさらに 10m 直進した。)

5.10 本章のまとめ

本章では、オドメトリとジャイロによる角速度の測定値の相違に基づいたセンサ融合による路面の凹凸に頑強なデッドレコニングのシステムについて述べた。開発したシステムの目的は、オドメトリに加えてジャイロを併用することで、屋外の歩道でも、石を踏むことなどによる悪影響を軽減し、屋内と同等に信頼できるデッドレコニングの性能を発揮することである。開発したシステムのアルゴリズムは、以下の2つの測定モードの切替えによって成り立っている。(1) オドメトリとジャイロによる角速度測定値の違いが小さい場合、平らな路面を走行していると判断し、ジャイロのバイアス・ドリフトを推定し、かつ、デッドレコニングの計算のための角速度には、オドメトリとジャイロの測定値の最尤推定値を用いる。(2) オドメトリとジャイロによる角速度測定値の違いが大きい場合、デッドレコニングの計算のための角速度には、ジャイロの方の測定値だけを用い、かつ、推定位置の誤差分散の値を適当に増大させる。

このアルゴリズムに基づくデッドレコニング・システムをロボット上に実装して評価実験を行った。本システムは、(1) 路面の凹凸の悪影響を軽減して方位角の測定精度を改善できる、(2) 走行しながらジャイロのバイアス・ドリフトの推定を行える、(3) 内界センサ系の異常に対して警告を出すことができる、という特徴を有する。これらの機能は、大学構内歩道が屋内廊下に比べて位置推定が困難な理由の一つである路面の整備状態の悪さを克服するために有効であり、目標タスクの実現に大きく寄与する。

勿論、デッドレコニングだけでは、長距離の走行は不可能であるが、開発したデッドレコニング・システムは、ランドマーク間の走行、および、ランドマークの認識時にセンサ融合によって位置を推定するために必要な位置の不確実性に関する十分な情報を提供することが明らかとなった。

第 6 章

ランドマークを用いた遡及的現在位置推定

6.1 本章の概要

大学構内の歩道に存在するランドマークの認識には、屋内に比べて処理に時間を要するケースが多いが、従来のデッドレコニングとランドマーク認識の融合による位置推定では、ランドマーク認識に要する時間が考慮されていなかった。そのため、ランドマークの認識処理に要する時間が無視できないときは、ロボットがゆっくり走行したり停止したりするケースが多かった。本章では、ランドマークの認識処理に要する時間が無視できない場合にも、ロボットが通常速度を保ったまま現在位置の推定が行えるようにランドマーク認識に要する時間を考慮した位置推定法である遡及的現在位置推定法について述べる。

6.2 遡及的現在位置推定とは

大学構内歩道においては、屋内の壁に比べて街路樹など比較的認識処理に時間を要するランドマークが多い。しかし、デッドレコニングとランドマーク観測のセンサ融合による位置推定では、ランドマークの認識処理に時間を要すると、その処理結果から得られるロボットの位置は、既に過去の位置の情報になっているという問題が起こる。何故なら、ランドマークの認識処理中に、デッドレコニングにより現在位置が更新されてしまうからである。ロボットがゆっくり走行したり、停止した

りする場合を除き、ランドマークの認識処理に要する時間が無視できないときに通常の走行速度を維持するには、ランドマークの認識に要する時間を考慮した現在位置の推定が必要である。障害物の検出を行う場合、センサの処理はリアルタイムでなければならない。しかし、位置の推定を行う場合には、センサの処理は必ずしもリアルタイムである必要はない。推定位置の誤差が回復不可能くらい大きく累積する前に、その誤差をキャンセルできれば良い。現在位置の推定のためのランドマーク認識においては、誤認識を防ぐことが何よりも重要であり、そのために処理に時間を要するのはやむを得ない。このような場合にもロボットが通常速度を保ったまま現在位置の推定が行えるようにするには、過去のロボットの位置の推定結果をうまく現在位置の推定に利用できる方法があればよい。通常速度を保持したまま走行できることは、目的地までの到着を短縮し、エネルギーを省力化できるので、目標タスクである長距離のナビゲーションを達成する上で非常に重要である。

本節では、まず、本章で取り扱う問題の前提条件を整理し、開発した手法の基本的な考え方を述べる。ロボットは、ロボット本体の並進速度・角速度を測定する内界センサを持ち、サンプリング時間間隔 τ 毎に、それらの測定値を用いたデッドレコニングによる位置推定を行えるものとする。ここでは、 τ 毎に行われる1回のデッドレコニングのための計算を1ステップの計算と呼ぶことにする。また、ランドマークの観測などにより間欠的にロボットの位置に関する外界センサデータが得られ、そのデータを使ってデッドレコニングによる位置が修正できるものとする。以上の枠組の中で、ランドマークの認識処理に要する時間が無視できない場合にも、ロボットを通常走行速度に保ったまま走行させる方法を開発した。

ランドマークの認識処理に n ステップ要する場合、つまり、処理時間が $n\tau$ である場合の基本的な処理の流れは、図 6.1と図 6.2に示すように、

1. 時刻 t_0 にランドマークを観測し、認識処理を開始 (図 6.1と図 6.2の (A))
2. $n\tau$ 間、動きながらランドマークの認識処理 (図 6.1と図 6.2の (B))
3. 時刻 $t_0+n\tau$ のとき、認識処理が終了、現在の位置情報を再考 (図 6.1と図 6.2の (C))

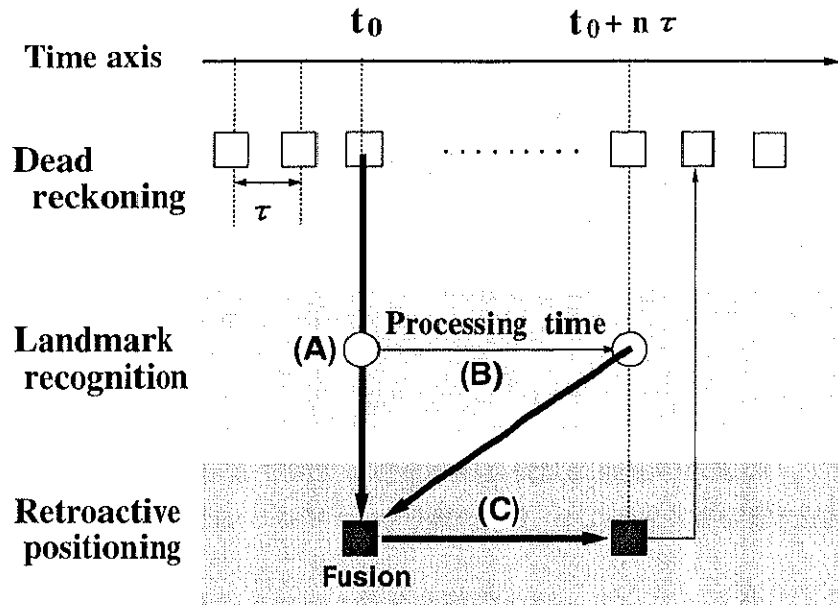


図 6.1: 時間軸でみた遡及的現在位置推定法

((A) ランドマーク観測、(B) ランドマーク情報の処理、(C) 現在位置情報の再計算)

という手順になる。但し、移動ロボットは、二次元平面とみなせる路面を移動するものとする。また、“位置”とは、二次元平面上の位置だけでなくロボットの進行方位も含み、“位置情報”とは、推定位置だけでなく、誤差の共分散行列により表される不確実性の推定量も含むものとする。図6.2中の楕円は、位置の誤差の共分散行列から計算される誤差楕円 [9][24] であり、ロボットの存在確率が等しい位置を結んだものである。

ここで、時刻 t_0 における位置情報と時刻 t_0 から時刻 $t_0 + n\tau$ までの位置情報の増分を全て保持しておき、まずランドマークの認識結果から得られる位置情報を用いて時刻 t_0 における位置情報を修正した後、時刻 t_0 から時刻 $t_0 + n\tau$ までの位置計算をもう一度行えば原理的には遡及的に現在位置情報が修正できる。しかし、この計算を何ら工夫をせず行くと、 n ステップ分の計算時間と記憶容量が必要となり現実的でなくなってしまう。

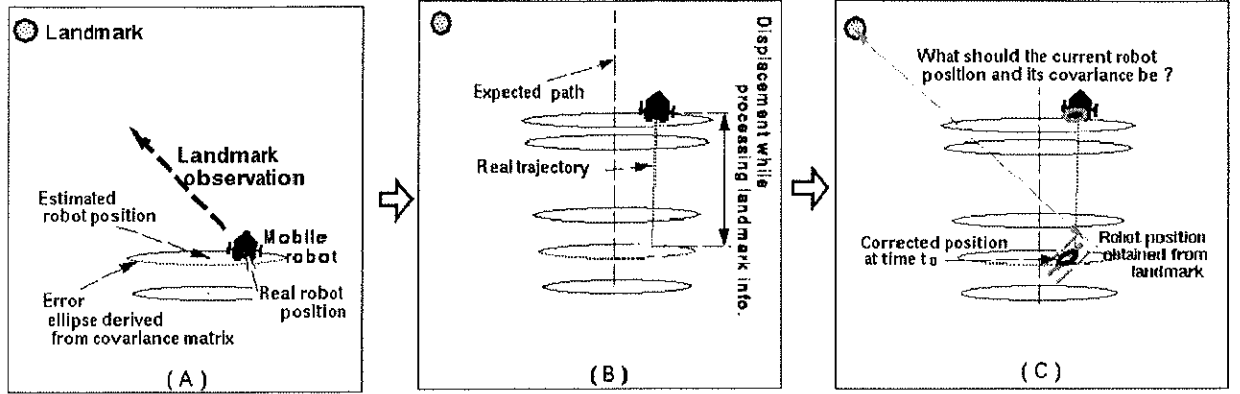


図 6.2: 移動平面でみた遡及的現在位置推定の概念図

((A) ランドマーク観測、(B) ランドマーク情報の処理、(C) 現在位置情報の再計算)

以降、6.3 節では、ランドマーク認識処理中のデッドレコニングによる位置情報の増分について解析し、ランドマークの認識結果が得られた時に現在位置を再考するために必要なデータについて検討する。6.4 節では、6.3 節の解析結果に基づいて、遡及的位置推定法の公式を導く。

6.3 ランドマークの認識処理時間を考慮した位置推定

6.3.1 ランドマーク認識処理中のデッドレコニングによる位置情報の増分

時刻 t_0 の位置情報と時刻 $t_0 + n\tau$ の位置情報の二つの位置情報の関係、すなわち、 n ステップ間のデッドレコニングによる位置情報の増分を求める。

まず、時刻 t_0 において、ロボットの並進速度 $v[t_0]$ 、ロボット本体の角速度 $\omega[t_0]$ が得られた場合における、デッドレコニングによる位置とその誤差の不確実性の推定値は、前章の式 (5.2) ～式 (5.4) と式 (5.10) より以下の式で更新される。

$$\mathbf{P}[t_0 + \tau] = \mathbf{P}[t_0] + \tau \begin{pmatrix} v[t_0] \cos(\theta[t_0]) \\ v[t_0] \sin(\theta[t_0]) \\ \omega[t_0] \end{pmatrix} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned}\Sigma_P[t_0 + \tau] &= \mathbf{j}[t_0]\Sigma_P[t_0]\mathbf{j}[t_0]^T + \mathbf{k}[t_0]\Sigma_V[t_0]\mathbf{k}[t_0]^T \\ &\quad + \tau^2 \Sigma_N[t_0]\end{aligned}\tag{6.2}$$

次に、式 (6.1) と式 (6.2) の漸化式を $t_0 + n\tau$ と $t_0 + (n-1)\tau$ の関係式から順々に t_0 まで時間を遡っていき、 n サンプルング離れた推定位置とその誤差の共分散行列の関係を求めると、推定位置は、

$$\hat{\mathbf{P}}[t_0 + n\tau] = \hat{\mathbf{P}}[t_0] + \hat{\mathbf{P}}_n\tag{6.3}$$

となる。ここで、

$$\hat{\mathbf{P}}_n = \sum_{i=0}^{n-1} \tau \begin{pmatrix} v[t_0 + i\tau] \cos(\theta[t_0 + i\tau]) \\ v[t_0 + i\tau] \sin(\theta[t_0 + i\tau]) \\ \omega[t_0 + i\tau] \end{pmatrix}\tag{6.4}$$

である。そして、その誤差の共分散行列は、

$$\Sigma_P[t_0 + n\tau] = \mathbf{J}_n \Sigma_P[t_0] \mathbf{J}_n^T + \mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n\tag{6.5}$$

となる。ここで、

$$\mathbf{J}_n = \prod_{i=n-1}^0 \mathbf{j}_i = \mathbf{j}_{n-1} \mathbf{j}_{n-2} \cdots \mathbf{j}_1 \mathbf{j}_0\tag{6.6}$$

$$\mathbf{K}_n = \sum_{l=0}^{n-1} \left\{ \prod_{i=n}^{l+1} \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{k}_l \Sigma_V \left(\prod_{i=n}^{l+1} \mathbf{j}_i \cdot \mathbf{k}_l \right)^T \right\}\tag{6.7}$$

$$\mathbf{N}_n = \sum_{l=0}^{n-1} \left\{ \prod_{i=n}^{l+1} \mathbf{j}_i \tau^2 \Sigma_N \left(\prod_{i=n}^{l+1} \mathbf{j}_i \right)^T \right\}\tag{6.8}$$

であり、 \mathbf{j}_i は、 $\mathbf{j}[t_0 + i\tau]$ を意味し、 \mathbf{k}_i は、 $\mathbf{k}[t_0 + i\tau]$ を意味する。但し、 $i = n$ のときの \mathbf{j}_i 、つまり \mathbf{j}_n は単位行列とする。

6.3.2 ランドマークの認識処理の開始時刻における位置情報の修正

ここでは、時刻 $t_0 + n\tau$ においてランドマークの認識処理が終ったときの、ランドマークの認識結果に基づいた時刻 t_0 の位置情報の修正方法について述べる。

ランドマークの認識結果から得られる情報をベクトルを用いて

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} s_1 & s_2 & \dots & s_n \end{bmatrix}^T \quad (6.9)$$

で表し、その誤差の共分散行列を Σ_s で表す。また、ランドマークの認識結果から得られるロボットの位置の拘束関係を、

$$\mathbf{g}[\mathbf{P}[t_0], \mathbf{s}] = \mathbf{0}_{m \times 1} \quad (6.10)$$

で表す。式 (6.10) は、 $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ の推定位置に含まれる誤差が小さいとみなせる場合、 $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ まわりで線形化でき、

$$\mathbf{g}[\hat{\mathbf{P}}[t_0], \hat{\mathbf{s}}] + \mathbf{j}_p(\mathbf{P}[t_0] - \hat{\mathbf{P}}[t_0]) + \mathbf{j}_s \Delta \mathbf{s} = \mathbf{0}_{m \times 1} \quad (6.11)$$

と表せる。ここで、 s の測定値を \hat{s} 、その誤差を Δs とすると、 \mathbf{j}_p と \mathbf{j}_s は、

$$\mathbf{j}_p = \left. \frac{\partial \mathbf{g}[\mathbf{P}(t_0), \mathbf{s}]}{\partial \mathbf{P}(t_0)} \right|_{\hat{\mathbf{P}}(t_0), \hat{\mathbf{s}}}, \quad \mathbf{j}_s = \left. \frac{\partial \mathbf{g}[\mathbf{P}(t_0), \mathbf{s}]}{\partial \mathbf{s}} \right|_{\hat{\mathbf{P}}(t_0), \hat{\mathbf{s}}} \quad (6.12)$$

で与えられる。

式 (6.11) の両辺を \mathbf{j}_p の各行ベクトルで正規化すると

$$\mathbf{J}_p(\mathbf{P}[t_0] - \hat{\mathbf{P}}[t_0]) = -\mathbf{G} - \mathbf{J}_s \Delta \mathbf{s} \quad (6.13)$$

となり、ランドマークの認識結果によって拘束される位置情報は、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_{su} &= \mathbf{J}_p(\hat{\mathbf{P}}_s - \hat{\mathbf{P}}[t_0]) \\ &= -\mathbf{G} \end{aligned} \quad (6.14)$$

$$\Sigma_{su} = \mathbf{J}_s \Sigma_s \mathbf{J}_s^T \quad (6.15)$$

で表せる。

次に、 $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ とランドマークの認識結果から得られたロボットの位置に関する情報とを融合するために、 \mathbf{J}_p を用いて $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ を $\hat{\mathbf{P}}_{su}$ と同じ座標系に変換する。

$$\hat{\mathbf{P}}_u[t_0] = \mathbf{0} \quad (6.16)$$

$$\Sigma_u[t_0] = \mathbf{J}_p \Sigma_p[t_0] \mathbf{J}_p^T \quad (6.17)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{P}}_u[t_0]$ は、座標変換後の $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ であり、 $\Sigma_u[t_0]$ は、その誤差の共分散行列である。

そのとき、その最尤推定量は、

$$\hat{\mathbf{P}}_{fu} = \Sigma_{fu} \Sigma_{su}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{su} \quad (6.18)$$

$$\Sigma_{fu} = (\Sigma_u[t_0]^{-1} + \Sigma_{su}^{-1})^{-1} \quad (6.19)$$

で表される。

最後に式 (6.18)(6.19) を元の $xy\theta$ の座標系に戻すと、

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{P}}_f[t_0] &= \hat{\mathbf{P}}[t_0] + \mathbf{J}_p^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{fu} \\ &= \hat{\mathbf{P}}[t_0] + \Sigma_f \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{su} \end{aligned} \quad (6.20)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_f[t_0] &= \mathbf{J}_p^{-1} \Sigma_{fu} (\mathbf{J}_p^T)^{-1} \\ &= \{\Sigma_p[t_0]^{-1} + \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \mathbf{J}_p\}^{-1} \end{aligned} \quad (6.21)$$

となる。したがって、センサデータの処理開始時のロボットの位置 $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ は、式 (6.20) より、 $\Sigma_f \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{su}$ だけ修正される。また、修正後の誤差の共分散行列は、式 (6.21) で与えられる。

6.3.3 現在位置情報の再計算

本節では、時刻 t_0 の位置情報が、前節の公式で修正されたときに、現在時刻 $t_0 + n\tau$ の位置を再計算する方法を導く。

ここで、単に式 (6.3) の $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ を式 (6.20) の $\hat{\mathbf{P}}_f[t_0]$ に、また、式 (6.5) の $\Sigma_p[t_0]$ を式 (6.21) の $\Sigma_f[t_0]$ に置き換えることを考えてみる。この置き換えたものを逆行列の補助定理 [55] を用いて式変形すると、ランドマークの認識処理の結果が得られた後の現在時刻 $t_0 + n\tau$ の位置情報は、

$$\hat{\mathbf{P}}_f[t_0 + n\tau] = \hat{\mathbf{P}}[t_0] + \hat{\mathbf{P}}_n + \Sigma_f \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \hat{\mathbf{P}}_{su} \quad (6.22)$$

$$\begin{aligned} \Sigma_f[t_0 + n\tau] &= \mathbf{J}_n \Sigma_f[t_0] \mathbf{J}_n^T + \mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n \\ &= \mathbf{J}_n \{\Sigma_p[t_0]^{-1} + \mathbf{J}_p^T \Sigma_{su}^{-1} \mathbf{J}_p\}^{-1} \mathbf{J}_n^T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& +\mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n \\
& = \mathbf{J}_n \Sigma_p[t_0] \mathbf{J}_n^T + \mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n - \mathbf{J}_n \Sigma_p[t_0] \mathbf{J}_p^T \\
& \quad (\mathbf{J}_p \Sigma_p[t_0] \mathbf{J}_p^T + \Sigma_{su})^{-1} \mathbf{J}_p \Sigma_p[t_0] \mathbf{J}_n^T
\end{aligned} \tag{6.23}$$

と書ける。式(6.22)の第1項と第2項の和は、まさしく、ランドマークの観測結果を利用する前の現在位置であり、式(6.23)の第1項から第3項までの和は、まさしくランドマークの観測結果を利用する前の現在位置の誤差の分散であり、一見、現在の位置情報とランドマークの認識結果による位置情報の修正分は、分離できるかにみえる。しかしながら、これらの式中の $\hat{\mathbf{P}}_n, \mathbf{J}_n, \mathbf{K}_n, \mathbf{N}_n$ の各項は、時刻 t_0 のロボットの方位 $\theta[t_0]$ に依存するため、 $\theta[t_0]$ が $\theta[t_0] + \alpha$ に修正された時、実際には、これらの項も修正されなければならない。

これらの項の修正は、回転行列

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \tag{6.24}$$

を使って以下のように計算できる。まず、 $\hat{\mathbf{P}}_n$ は、 $\hat{\mathbf{P}}'_n = \mathbf{R}(\alpha) \hat{\mathbf{P}}_n$ で修正される。次に、 \mathbf{J}_n の修正値 \mathbf{J}'_n は、 \mathbf{J}_n の3列目の列ベクトルを $\mathbf{R}(\alpha) \mathbf{J}_{n3}$ で置き換えることで得られる。また、 \mathbf{K}_n は、 $\mathbf{K}'_n = \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{K}_n \mathbf{R}(\alpha)^T$ で修正できる。なお、 \mathbf{N}_n は $\mathbf{R}(\alpha)$ を使っても修正できないが、 \mathbf{N}_n は小さい値なので、後の公式の導出の便宜上、 $\mathbf{N}'_n \simeq \mathbf{R}(\alpha) \mathbf{N}_n \mathbf{R}(\alpha)^T$ で置き換えておく。

6.4 遡及的現在位置推定法の公式

前節の解析結果から、ランドマークの認識処理の開始時点での位置情報である $\hat{\mathbf{P}}[t_0]$ が $\hat{\mathbf{P}}_f[t_0]$ に、 $\Sigma_p[t_0]$ が $\Sigma_f[t_0]$ に修正されたとき、処理の終了時点での位置情報である $\hat{\mathbf{P}}_f[t_0 + n\tau]$ $\Sigma_f[t_0 + n\tau]$ を得る遡及的現在位置推定法の公式は、

$$\hat{\mathbf{P}}_f[t_0 + n\tau] = \hat{\mathbf{P}}_f[t_0] + \hat{\mathbf{P}}'_n, \tag{6.25}$$

$$\begin{aligned}\Sigma_f[t_0 + n\tau] &= \mathbf{J}'_n \Sigma_f[t_0] \mathbf{J}'_n{}^T + \mathbf{K}'_n \\ &\quad + \mathbf{N}'_n.\end{aligned}\quad (6.26)$$

で与えられる。

ここで、 $\hat{\mathbf{P}}'_n$ は、 $\mathbf{R}(\alpha)\hat{\mathbf{P}}_n$ であり、 \mathbf{J}'_n は \mathbf{J}_n の 3 列目の列ベクトルを $\mathbf{R}(\alpha)\mathbf{J}_{n3}$ で置き換えたものであり、

$$\mathbf{K}'_n + \mathbf{N}'_n = \mathbf{R}(\alpha)\{\mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n\}\mathbf{R}(\alpha)^T \quad (6.27)$$

である。但し、 α はロボット方位 $\theta[t_0]$ の修正量であり、 $\mathbf{R}(\alpha)$ は式 (6.24) で与えられる回転行列である。また、 $\hat{\mathbf{P}}_n, \mathbf{J}_n, \mathbf{K}_n, \mathbf{N}_n$ は、ランドマークの認識処理中のデッドレコニングによる位置情報の増分で式 (6.4) と式 (6.6) ～式 (6.8) で与えられる。

この公式を適用するために保存しなければならないデッドレコニングによる位置情報は、

$$\hat{\mathbf{P}}[t_0], \Sigma_P[t_0], \hat{\mathbf{P}}_n, \mathbf{J}_n \quad (6.28)$$

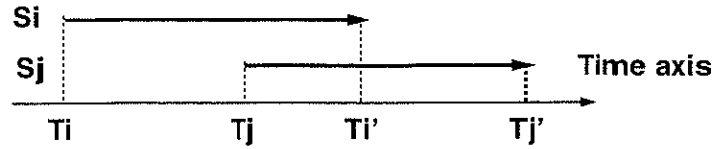
の 4 つとなる。ここで、 $\mathbf{K}_n + \mathbf{N}_n$ については、式 (6.5) を用いて、 $\Sigma_P[t_0], \Sigma_P[t_0 + n\tau], \mathbf{J}_n$ とから逆算できることを考慮した。

6.5 複数のランドマークの並列認識が可能な場合への拡張

ここでは、複数のランドマークの認識処理を並列に認識できる場合について述べる。

もし、複数のランドマークの認識処理が時間軸上で重なり合わなければ、前章で述べた計算方法は、そのまま用いることができる。しかし、もし複数のランドマークの認識処理が時間軸上で重なり合う場合、その複数のランドマークの認識結果を有効に使うって現在位置情報を計算するには、計算の順序を考慮しなければならない。例えば、2 つのランドマークの認識処理が時間軸上で重なりあった場合を考えると、図 6.3 に示すような 2 種類の場合が考えられる。ここで、 S_i は、時刻 T_i に処理を

[CASE 1]



[CASE 2]

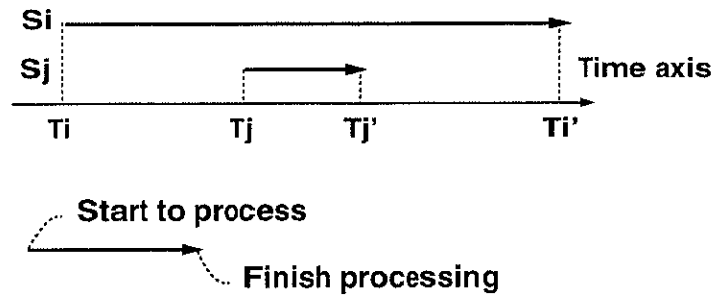


図 6.3: 二つのランドマーク認識処理が時間軸上で重なった場合
 (S_i, S_j : ランドマーク認識処理、 T_i, T_j : 処理の開始時刻、 T_i', T_j' : 処理の終了時刻。)

開始時刻 T_i' に処理を終了するランドマークの認識処理を表す。CASE 1 は、2 つのランドマークの認識処理が部分的に重なりあった場合である。CASE 2 は、2 つのランドマークの認識処理が完全に重なりあった場合である。いずれの場合も問題は、過去の位置情報を修正した後で通常どおりに直接現在位置情報を修正すると、その前に既に処理を終えていた方のランドマークによる修正の意味がなくなってしまうことである。

この問題を解決するために、過去のある時刻から現在時刻までの位置情報の増分を、ランドマークの認識処理の開始毎に分割して保持しておくことにする。そして、あるランドマークの認識処理が終了したら、そのランドマークを観測したときから現在までに保持された全ての位置情報を順々に修正しながら現在位置の修正を行うことにする。このようにすれば、現在の位置情報は、これまでに処理が終了したランドマークの情報を全て反映した上で推定されていることになる。

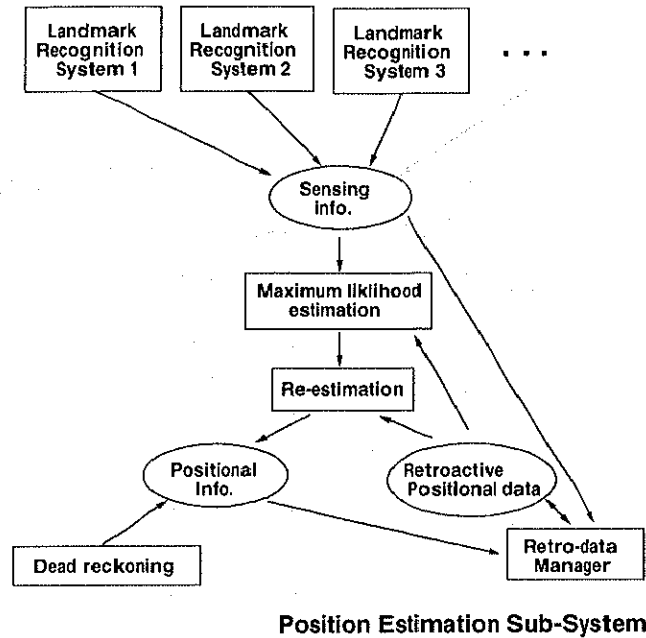


図 6.4: 遡及的現在位置推定法を利用した位置推定サブシステム

このアルゴリズムは、2つ以上のランドマークの認識処理が時間軸上で重なりあった場合においても同様である。

6.6 位置推定サブシステムの設計

6.4 節で得られた遡及的現在位置推定の公式と 6.5 節での複数のランドマークの並列認識についての検討結果に基づき、遡及的現在位置推定法を用いて位置を推定する、独立したサブシステムとしての位置推定システムを設計した。

図 6.4は、そのシステムの構成を示したものである。まず、内界センサで測定されたロボット本体の速度・角速度を常に測定しデッドレコニング法により位置情報を更新する機能を用意した。そして、ランドマーク認識システムから提供される位置情報を最尤推定法を用いてデッドレコニングと融合を行う機能を用意した。また、ランドマーク認識システムからの認識処理の開始・終了の指示に基づいて、遡及的

現在位置推定に必要なデータを管理する機能を用意した。このような機能を図 6.4 に示すように統合し、遡及的現在位置推定機能を有する位置推定サブシステムを実現した。

本位置推定システムは、ランドマーク認識システムからランドマーク認識の開始・終了、そして、その認識結果から得られる位置情報などをコマンドとして入力すれば、ブラックボックスとして利用できるようになっている。また、その出力である推定現在位置情報は、走行制御、動作計画、そして、ランドマークの探索範囲の制限など様々な目的で他のサブシステムから利用できる。

6.7 基礎実験

考案した遡及的位置推定法を検証するため、移動ロボット「山彦ナビ」に前述した位置推定サブシステムを実装し、図 6.5 に示す環境で通常速度 (25cm/s) を落さずに走行させる実験を行った。この環境では、木や生け垣がランドマークとして利用できる。生け垣は、超音波距離センサを用いて瞬時に検出できるが、木の認識は、画像処理と超音波距離センサの融合による街路樹検出センサ [52] を用いて検出するのに約 2 秒の処理時間を要する。また、これらのランドマークの認識処理は、独自の CPU を有する別々のモジュール上で並列に行われる。ロボットには、木や生け垣をランドマークに利用して位置を推定しながら 43m 直進し右に曲がって 30m 直進するという経路を走行させた。その結果の一例を図 6.6 に示す。図 6.6 の合成画像は、一定時間間隔のロボットの画像を同じ背景の上に重ねたものである。これにより、ロボットは、一定速度を保ちつつ走行していることが確認できた。

ロボットの内部で行われている計算の様子を示すために、木と生け垣をランドマークに利用したナビゲーションのシミュレーション結果の一例を図 6.7 に示す。図 6.7 の (A) は、木を観測した時点でのロボットの位置情報を示している。(C) は、木の認識処理中に生け垣による位置の修正を行っている様子を示しており、(B) は、木の認識処理が終ったときに、その処理結果を利用して木を観測した時点でのロボットの位置情報を修正した結果である。そして、(E) は、木の認識処理が終ったときに、

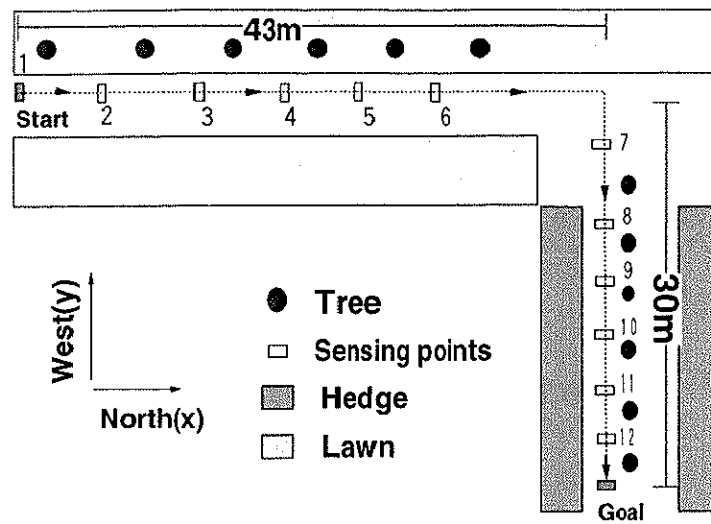


図 6.5: 街路樹と生け垣を利用した移動ロボットのノン・ストップ・ナビゲーションの実験環境

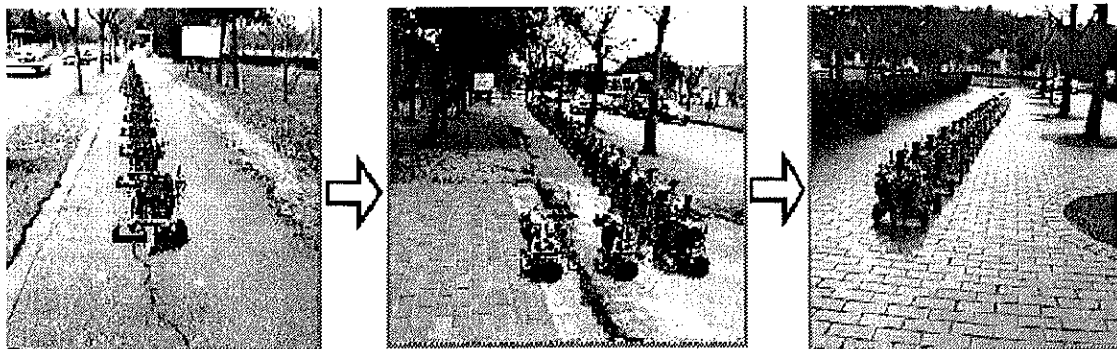


図 6.6: 街路樹と生け垣を利用した移動ロボットのノン・ストップ・ナビゲーション実験時の移動ロボットの移動軌跡

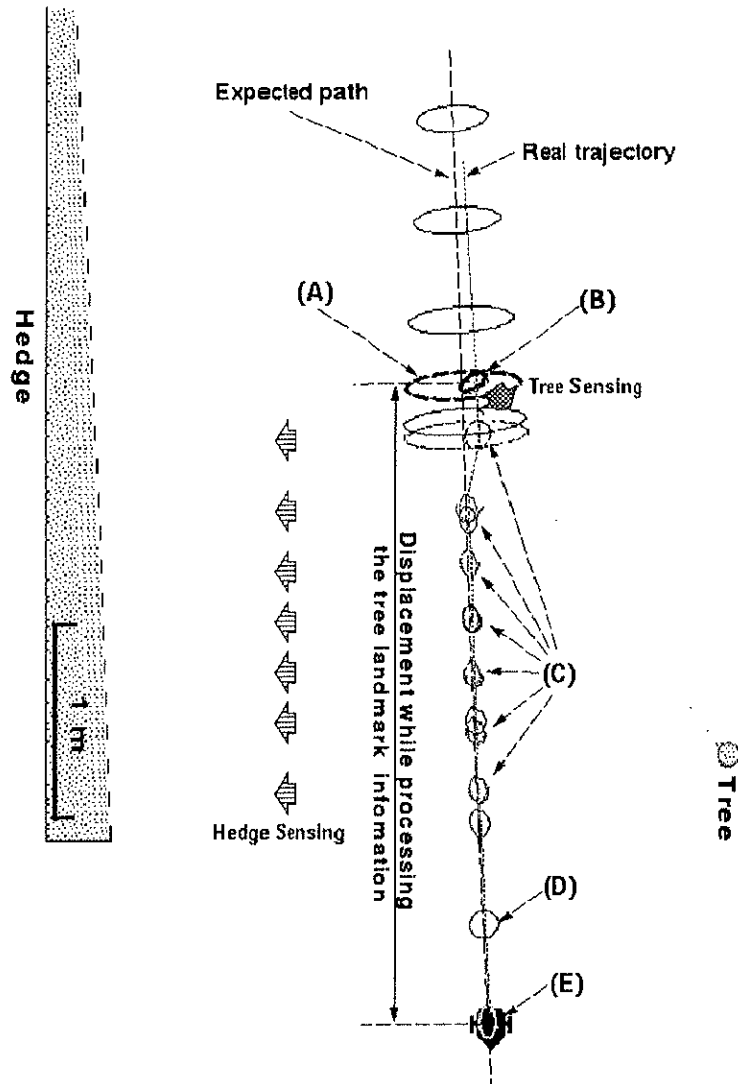


図 6.7: 街路樹と生け垣を利用した遡及的現在位置推定のシミュレーション結果 ((A) 街路樹観測時点での街路樹認識処理が終る前の推定位置の誤差楕円、(B) 街路樹観測時点での街路樹認識処理が終了後の推定位置の誤差楕円、(C) 生け垣による位置修正、(D) 街路樹の認識結果が融合される前の推定位置の誤差楕円 (E) 街路樹の認識結果が融合された後の推定位置の誤差楕円)

その処理結果と生け垣による修正結果も含めて現在位置情報を修正した結果である。但し、本シミュレーションでは、複数のランドマーク認識処理が時間軸上で重なりあった場合の計算例を示すため、木の認識処理に要する時間を 10s にしている。その点だけが実機実験と条件が異なる。(C) は、木の認識処理時間中に生け垣を使った修正が行われ、その結果ロボットの位置が修正され推定位置の精度が向上し、誤差楕円の大きさが縮小していることが分かる。その後生け垣が途切れてから、再び、(D) のように一旦誤差楕円が増大するが木の認識処理が終了したことによって、木の認識処理開始時の位置情報 (A) が (B) に修正され、現在位置が途中の生け垣による修正も考慮した上で (E) のように修正されている。誤差楕円 (E) がその一つ前の誤差楕円 (D) よりも小さいことは、生け垣だけによる位置推定よりも生け垣と木の両方を用いた位置推定の方がより精度が高いことを示している。

6.8 本章のまとめ

本章では、デッドレコニングとランドマーク認識の融合による位置推定における遡及的現在位置推定法を考案した。本法は、不確実性を考慮した複数センサ情報の融合において、各センサの処理に要する時間の相違を考慮してセンサ融合するための一手法である。本手法により、ランドマークの認識処理に時間を要する場合においても、ロボットは通常の走行速度を維持したまま走行できるようになった。本法は、ランドマークの観測時刻の位置情報とその後の位置情報の増分だけを保持しておく。そして、ランドマークの認識処理が終了した時点で、処理を開始した時点の位置情報を修正し、次いで、現在位置情報が修正できる。本法は、計算方法も比較的簡単であり、記憶すべき容量も少ない。さらに、本手法は、複数のランドマークが時間的に重なりあって処理される場合にも適用可能である。

これにより、目標タスクである大学構内歩道のナビゲーションにおいて、認識処理に時間を要するランドマークを利用しても、通常走行速度を落さずに走行できるようになった。

第7章

経路・ランドマーク情報の獲得と記憶

7.1 本章の概要

本章では、より長距離のナビゲーションを実現するために、ナビゲーションに先だってロボットが記憶しなければならない経路・ランドマーク情報の獲得方法について述べる。

7.2 教示・再生による長距離ナビゲーションの考案

推定位置に基づくナビゲーションを行うには、事前に、走行経路と経路に沿ったランドマーク情報を何らかの形式でロボットに記憶させなければならない。

前章で示した実験では、人間が手作業で経路・ランドマーク情報を作成したが、走行距離が数百メートルに及ぶとその作業は現実的な作業量を越える。したがって、本研究の目標タスクである1.2kmのナビゲーションを実現するためには、何からの方法で、その作業量を現実的な範囲に収めなければならない。山梨大学では、ロボットに与える経路を手作業で与えることが大変であることを考慮して、なるべく簡潔な経路情報でナビゲーションできるロボットの研究が行われている[34]。しかし、それでもまだ、大変な作業量である。

この問題を解決するために、本研究では、経路・ランドマーク情報の作成をロボット自身に行わせることで作業量の軽減を実現する方法を考案した。具体的には、ロ

ロボットを人間がマニュアル操作でスタート地点からゴール地点まで一度連れていき、その間にロボットが自分で自動的経路・ランドマーク情報を獲得するという方法である。本手法を図示したものが、図7.1である。作業の軽減を目的としているので、オペレータはロボットの能力を配慮して教示を行うものとする。例えば、ロボットの認識処理が間に合わない時は、ゆっくり走行させ、壁や生け垣など線分で表現できるランドマークが存在するような歩道では、それに沿って走行させる。

本手法の長所を挙げると以下ようになる。

1. 作成作業の劇的な軽減
2. ロボットの身体性が反映
3. 表現形式がロボット向き

これらの長所は、考案した教示・再生によるナビゲーションでは、自然と得られるものである。2.の「ロボットの身体性が反映」とは、各ロボットに固有のオフセット誤差などが、獲得した経路・ランドマーク情報の中に自然と内包されるという意味である。例えば、センサの取り付け位置である。移動平面を二次元で考えているが実際には、センサの取り付け位置の面で切った環境がそのセンサにとっての移動平面である。人手で地図を作成する場合、この「ロボットの目線」で環境をとらえなければならぬのでかなり煩わしかった。また、車輪径などのシステムのわずかな誤差も身体性の一つである。これは、一見短所のようにも思えるが、獲得した経路を再生してその通りにナビゲーションを行う場合、このような誤差は、再生の際も再現される。したがって、本手法では、絶対誤差の影響は少なくなり、繰り返し誤差のみがランドマークによる位置修正で補正できればナビゲーションができる。3.の「表現形式がロボット向き」とは、ロボットが経路・ランドマーク情報を自動生成する場合、作成処理には、人間が介在しないので人間に合わせたデータ表現にする必要がない。そのため、中間処理から最終的に生成される経路・ランドマーク情報に関するデータまで、全てロボットの処理しやすい形式で表現されていれば良い。本手法における技術的な一番の問題点は、「ランドマークとしてふさわしいかどうかの決断」をロボット自身が行わなければならないことである。人手で作成する場合、この点に関しては作成者の経験による判断で行われていたが、本手法では、こ

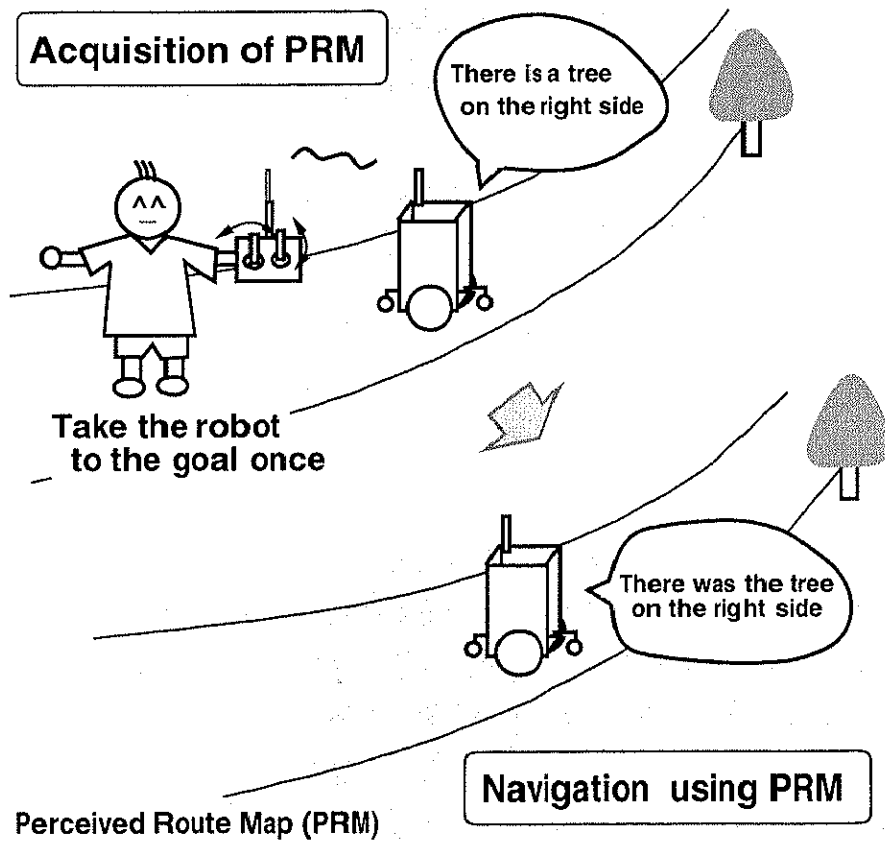


図 7.1: 経路の教示に基づくランドマーク情報の自律的な獲得と経路・ランドマーク情報の再生による自律ナビゲーション

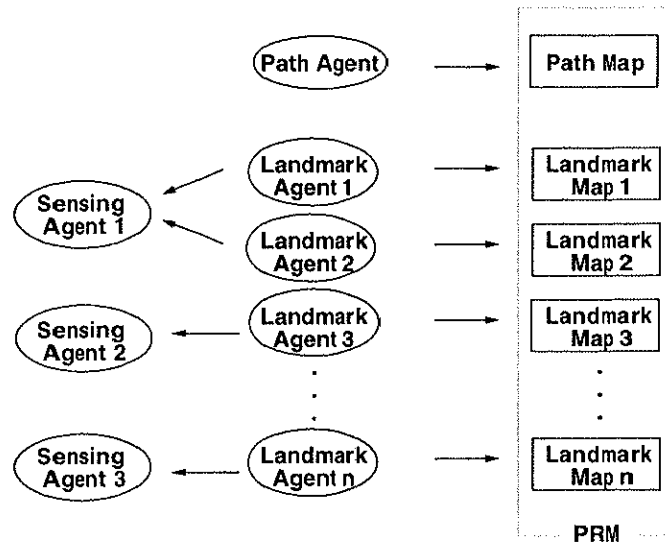


図 7.2: ロボット知覚を用いた複数エージェントの並行実行による経路・ランドマーク情報の自動生成

の判断のための処理をランドマーク獲得処理の中に組み込まなければならない。また、ロボットは、教示に従って、ある程度リアルタイムでランドマークの認識・獲得の処理を行って行かなければならない。さらに、どんなランドマークがいつ現れるかもわからないので、複数の種類のランドマークを獲得するためには、それだけ、並行して複数のランドマークを認識する必要がある。頑強なナビゲーションを実現するには、ある程度冗長な量のランドマークを教示時に獲得しておく必要がある。この複数ランドマークの並行観測ができるシステムは必須である。

そこで、教示・再生によるナビゲーションを実現する具体的な案として図 7.2 のような複数エージェントの並行実行による経路・ランドマーク獲得システムを開発した。これにより自動生成された経路・ランドマーク情報をロボット知覚によって自動生成された地図という意味で、Perceived Route Map (PRM) と呼ぶことにする。但し、対象とする環境でどのような種類の対象物がランドマークとして利用できそうか、また、位置修正のためにそのランドマークのどのようなパラメータを

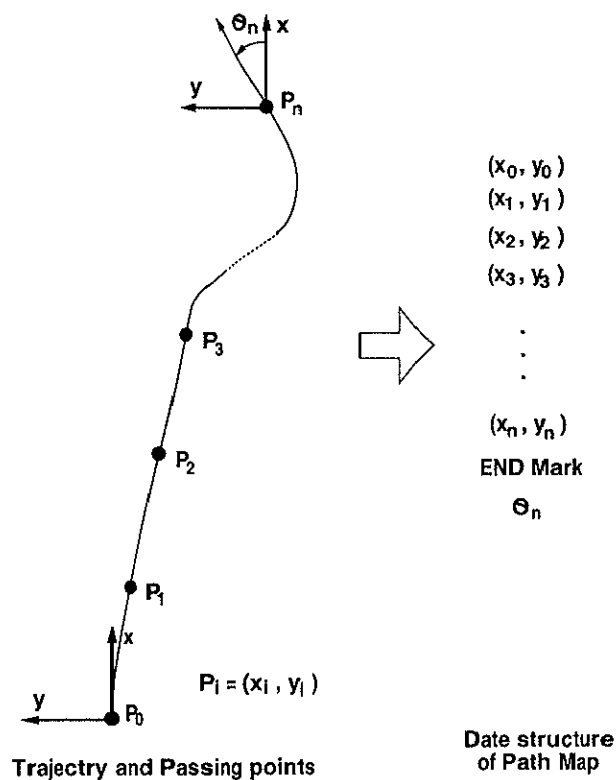


図 7.3: 経路の獲得と記憶

記憶しておくかについては、ロボットの開発者が予め決めてロボットに与える。ロボットは、周囲を探索することによってその与えられた種類のランドマークがどこにあるかを発見しその位置を記憶することを自動的に行う。

7.3 経路の教示と記憶

まず、経路の教示と記憶の方法について述べる。

ロボットは、ラジコンを用いてマニュアル操作で速度や進行方位を制御できるものとする。最初にロボットをスタート地点に置き、マニュアル操作でゴール地点に向けて走行させたい経路に沿って走らせる。図7.3に示すように、スタート地点からゴール地点までの間の移動軌跡を、一定時間間隔毎にデッドレコニングで測定し

記憶する。この通過点の時系列が経路情報である。ゴール地点のロボットの姿勢(方位角)については地図の連結に用いるために記憶する。

ここで、重要な点は、ロボット自身が車輪の回転を制御して走行することである。なぜなら、手で押すなどの受身の教示では、路面と車輪の摩擦が自分で車輪を回す場合と大きく異なるからである。そこで、ラジコンなどで速度や進行方位を指示する教示方法を開発した。そして、指示された速度や進行方位になるように車輪を回す制御はロボット自身が行う。

7.4 ロボット知覚によるランドマーク情報の獲得

自律ナビゲーションの際、教示時には存在したランドマークがなくなっていたり、何かに遮られて観測できなかったりする場合がある。したがって、教示時には、必要最低ランドマーク数よりも冗長な量のランドマークを獲得する必要がある。また、どのようなランドマークがいつ現れるかは事前には、わからないので、いろいろなランドマークを同時に観測する必要がある。さらに、ランドマーク観測システムの実装という点から考えると、いろいろな種類のランドマークを観測できるものが一度に完成するわけではない。したがって、漸進的に利用できるランドマークの種類を増やせる枠組が必要である。

そこで、複数のランドマークの並行観測によるランドマーク獲得システムを、特定のランドマークを専門に観測するランドマーク・エージェント (LmA:Landmark Agent) という単位で漸進的に実現する方法を開発した。

7.4.1 ランドマーク・エージェント (LmA)

ロボットが自分自身のセンサ(知覚)を用いて、ランドマーク情報を獲得する上で一番難しい問題は、どういう基準で、センサから測定された対象物がランドマークとしてふさわしいかどうかを判断するかである。一言でランドマークと言っても、その種類によって認識のためのアルゴリズムや必要なセンサが大きく異なる。そこで、特定のランドマークを専門に検出するエージェントをその固有のアルゴリズム

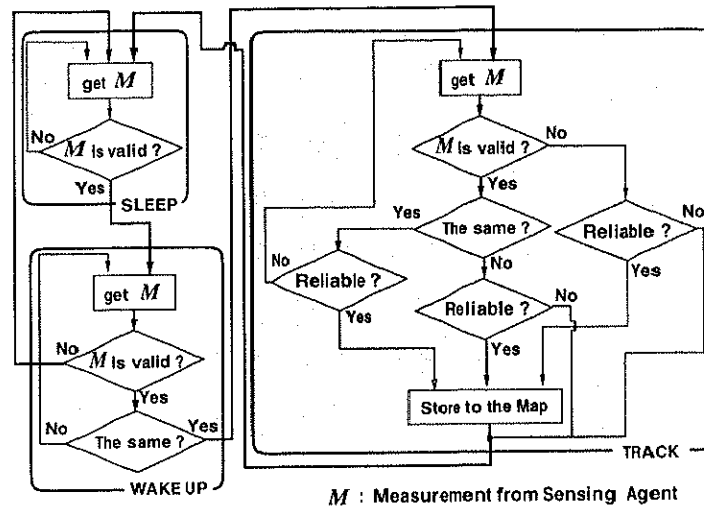


図 7.4: 教示時のランドマーク・エージェントの基本動作

に従って設計する方針をとることにした。つまり、各ランドマーク・エージェントは、各ランドマーク固有のモデルをもち、ランドマークとしてふさわしいかを自己判断し、ランドマークを獲得する。しかしながら、いろいろなランドマーク・エージェントが共存して働けるような枠組が必要であるし、また、ランドマークとしてふさわしいという判断のアルゴリズムの上で共通する部分もある。そこで、次に、その共通部分の動作について述べる。

7.4.2 ランドマーク・エージェントの基本動作

ランドマークとは、常に同じ場所に存在し、その相対的な位置関係を測定することで絶対位置に関する何らかの情報を与えるものである。但し、ここでいうランドマークは自然に存在するものを対象としており、ランドマークの方から積極的にロボット位置に関する情報が送られてくることはない。したがって、如何なるランドマークの獲得においても、ランドマーク候補の探索、候補の発見、候補の追跡確認のステップを踏み、ロボットが移動しても同じ位置に観測されなければならない。

逆に言えば、ロボットが移動しても同じ位置に何度も観測される対象物がランドマークとして適当であると考えられる。

そこで、SLEEP, WAKE UP, TRACK の三状態の状態遷移によってランドマーク・エージェントの基本動作を設計することにした。図 7.4 は、その基本動作のフローを表している。ランドマークとしての信頼性・頑強さの判定は、「ロボットがある程度の距離を移動しつつ、かつ、同じ位置に何度も観測される」ことを確認することで行なわれる。

最終的に、ランドマーク情報として記憶されるものは、大きくわけて、(1) 観測位置、(2) ランドマークの位置、(3) ランドマークの特徴量の三つである。

7.4.3 センシング・エージェント

ランドマーク・エージェントにセンサによって測定された値を提供する。複数のランドマーク・エージェントが共通のセンサ資源を利用する際、同時に使用すると混乱が生じるのでその調停の役割をするのがセンシングエージェントの主たる役割である。特に、センシング方位を制御できるセンサの場合、方位を変えるためにある程度時間を要するので、どう優先順位をつけて順番にセンシングに行くかを決定することは重要である。

7.5 ランドマーク・エージェントの実装

対象とする環境では、街路樹、電柱、街灯、壁、生け垣、橋の欄干、路肩の境界線、横断歩道が自然に存在するランドマークである。大学構内の歩道は、大部分が街路樹や生け垣に沿っているので、まず、上に挙げたランドマークの中で、街路樹と生け垣をランドマークとして獲得するランドマーク・エージェントを実現した。また、従来より壁をランドマークとして利用する方法は開発されていたので、壁をランドマークとして獲得するランドマーク・エージェントも実装した。

7.5.1 街路樹検出ランドマーク・エージェント (Tree LmA)

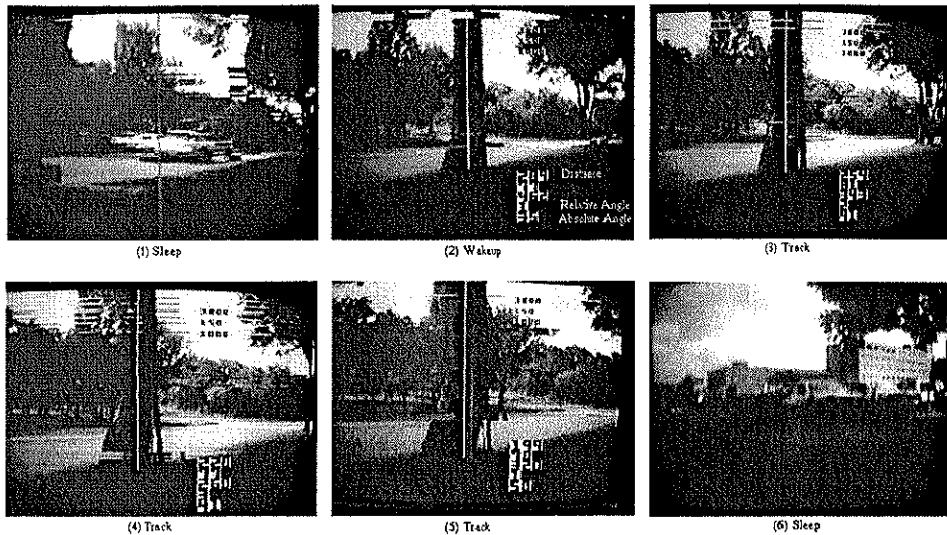


図 7.5: 街路樹検出ランドマーク・エージェントによって街路樹がランドマークとして獲得される様子

このランドマーク・エージェントは、センシング・エージェントから街路樹の候補の位置と幹の太さの測定値を受けとり、それがランドマークとして信頼できるかを評価する。

信頼性は、1. 同じ位置に2回以上観測されるか、2. 同じ幹の太さか、3. ロボットが移動しても同じ位置に観測されるかの3点で評価される。1. の同じ位置かどうかの判断は、今回測定された街路樹候補の位置と前回までに測定された街路樹候補の位置の平均位置の差が30cm以内に入っているという閾値を用いた。2. の同じ幹の太さかの判断は、今回測定された街路樹候補の幹の直径と前回までに測定された街路樹候補の幹の直径の平均位置の差が10cm以内という閾値を用いた。また、3. のロボット移動距離の閾値は、1回目の観測から最後の観測までが90cm以上であることとした。

図 7.5は、街路樹の候補を発見して獲得するまでの様子を画像処理結果とランドマーク・エージェントの状態の遷移で示したものである。

7.5.2 生け垣検出ランドマーク・エージェント (Hedge LmA)

このランドマーク・エージェントは、センシング・エージェントからロボットの左側または右側にある対象物までの距離値を受けとり、それが線分ランドマークとして利用可能かを評価する。ここで、ロボットは、人間の経路教示によって、ほぼ生け垣に沿って走行していると仮定されている。

信頼性は、1. 同じ距離に2回以上観測されるか、2. ロボットが移動しても同じ距離に観測されるかの2点で評価される。1. の同じ距離かどうかの判断は、今回測定された生け垣候補までの距離と前回までに測定された生け垣候補までの距離の平均値の差が10cm以内という閾値を用いた。また、2. のロボットの移動距離の閾値は、1回目の観測から最後の観測までが90cm以上であることとした。

7.5.3 壁検出ランドマーク・エージェント (Wall LmA)

このランドマーク・エージェントは、ロボットの左側または右側にある対象物までの距離値から、それが線分ランドマークとして利用可能かを評価する。前述の生け垣検出ランドマーク・エージェントとは、距離測定に用いられるセンサが異なる。このエージェントが使用するのは、本来屋内の壁までの距離を測定することを目的として開発されたセンサである[56]。ここで、ロボットは、人間の経路教示によって、ほぼ壁に沿って走行していると仮定されている。

信頼性は、1. 同じ距離に2回以上観測されるか、2. ロボットが移動しても同じ距離に観測されるかの2点で評価される。1. の同じ距離かどうかの判断は、今回測定された壁候補までの距離と前回までに測定された壁候補までの距離の平均値の差が5cm以内という閾値を用いた。また、2. のロボット移動距離の閾値は、1回目の観測から最後の観測までが30cm以上であることとした。

7.6 経路・ランドマーク情報の再生によるナビゲーション

自律ナビゲーションは、前章までに述べた推定位置に基づくナビゲーションで行う。経路情報は、パス・エージェントによって、ランドマーク情報は、各ランドマー

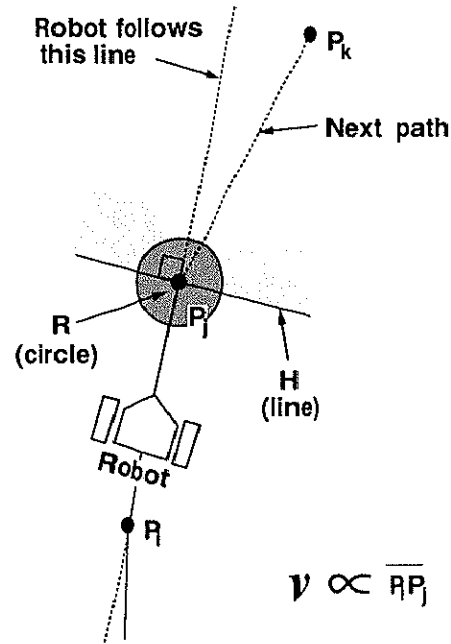


図 7.6: パス・エージェントによる経路再生の方法

ク・エージェントによって各々再生される。

7.6.1 経路情報の再生

図 7.6 は、経路を再生する方法を図示したものである。経路情報は、一定時間間隔毎の通過点であるので、ある通過点と次の通過点までの距離は速度を表している。最寄りの通過点と次の通過点を結ぶ線分をその線分に比例した速度で走行するように走行を制御する。経路は、線分の連結とみなし、その線分に沿うように努力する。そして、次の通過点の近傍に近付いたら、新たにその次の通過点と結ぶ線分を追従すべき線分に設定し直す。次の通過点に到達したという判定は、図 7.6 中の円 R の内側に入ったか、もしくは、直線 H を越えたかのどちらかが満たされたかどうかで判定する。円 R の径をある程度大きくとると通過点列からなる線分群を滑らかに沿うような走行が可能になる。このような方法で、折れ線近似で保持された経路

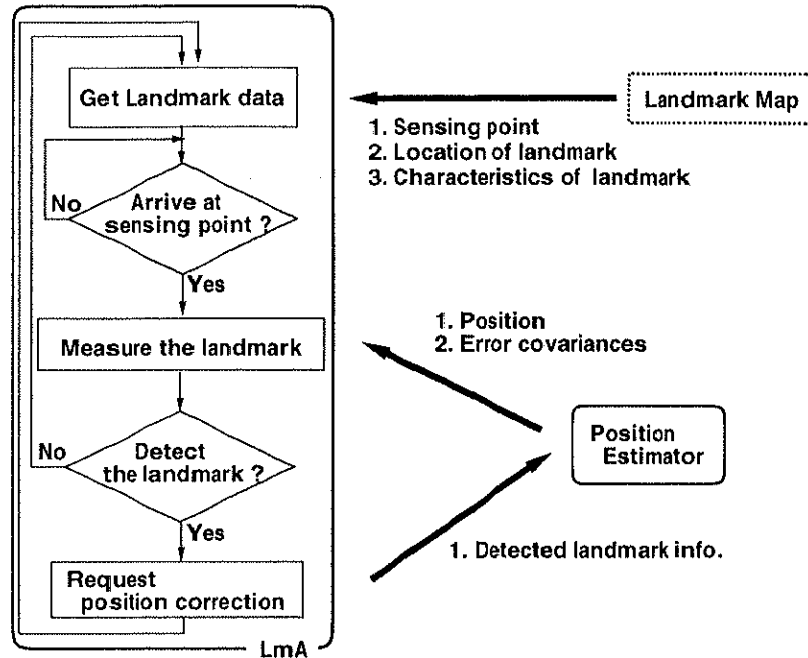


図 7.7: 再生時のランドマーク・エージェントの動作

をスムージングして走行する。

7.6.2 ランドマーク情報の再生による推定位置の修正

図 7.7は、ランドマークの再生時のランドマーク・エージェントの動作アルゴリズムを示したものである。前に述べたパス・エージェントの経路再生によって、ロボットは経路上をほぼ走行していると考えて良い。したがって、ロボットは、経路指示の際に通過したランドマークの観測地点の近傍を必ず通過すると考えて良い。そこで、ランドマーク・エージェントは、次のランドマークの観測点までロボットが到達したかどうかを常時監視し、ロボットが観測点まできたらランドマークを探しに行くようにした。もし、ランドマークが検出できたら、位置の修正を行う。ランドマークの検出に失敗した場合は、ランドマークが何かに遮られているか、もしくは、なくなったと判断し、このランドマークによる位置修正をあきらめる。誤認

識すると致命的な失敗になるので、ランドマークによる位置修正は、安全を重視したランドマークの探索方針をとる必要がある。そのため、期待した特徴量をもったランドマークが検出できない場合や検出されたランドマークの位置が期待される位置よりも大きく異なる場合は、そのランドマークを利用しない。

7.6.3 障害物への対処

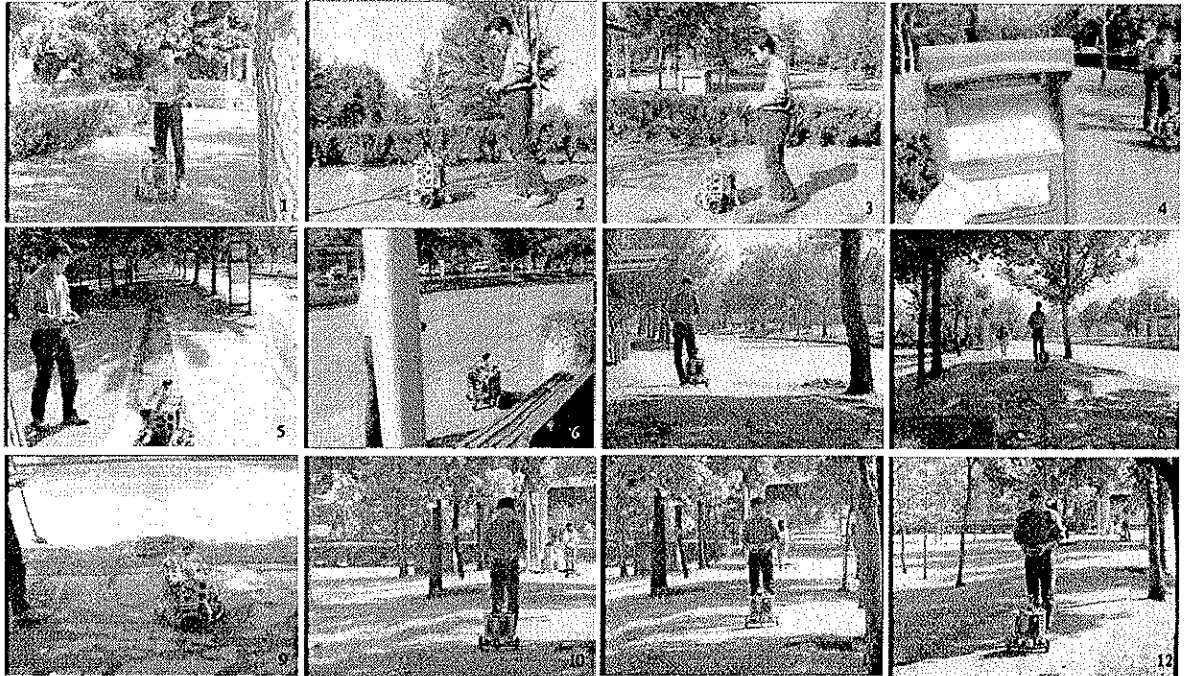
障害物の検知は、パス・エージェントで行う。ロボット前方を超音波距離センサで監視することで、予定された走行経路に障害物がないかどうかを確認する。障害物があった場合は、緊急停止しその障害物を取り除かれるまで待つ。また、万が一、ロボットが障害物に衝突した場合は、バンパーに取り付けられた接触センサで検知する。障害物に対する接触が確認された場合は、ナビゲーションをその場で中止する。

7.7 教示・再生によるナビゲーションの基礎実験

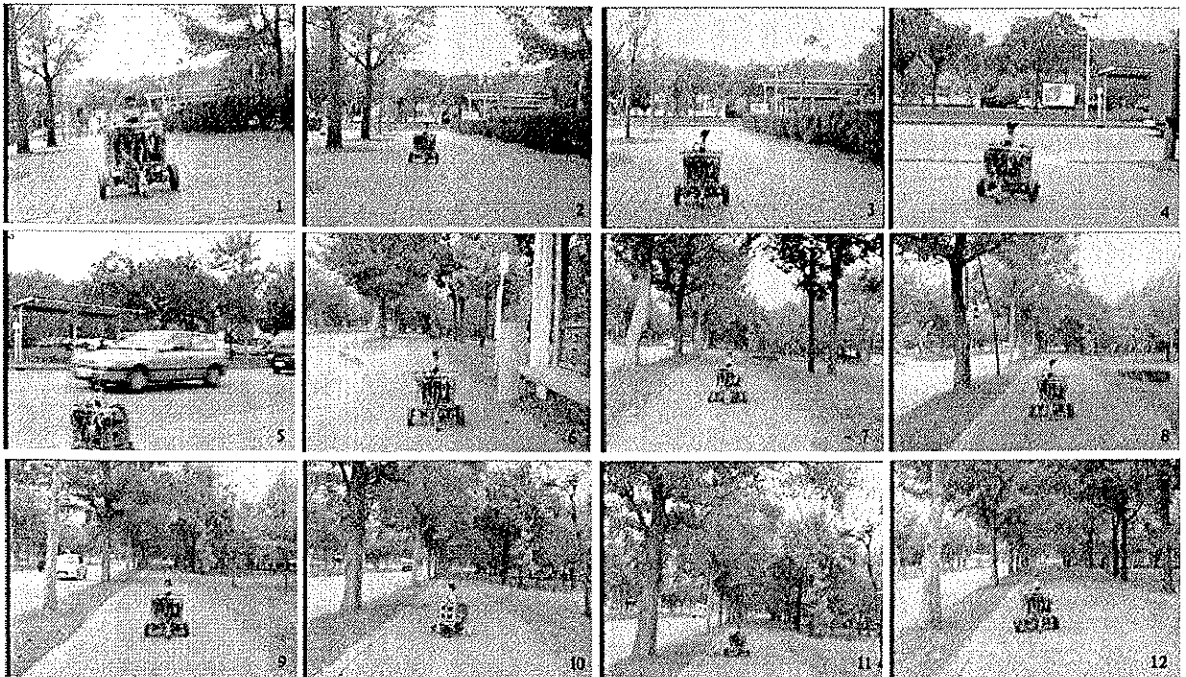
教示・再生によるナビゲーションを行った実験結果を図7.8に連続写真で示す。教示は、ラジコンのプロポから速度と進行方位を指示する方式を用いた。再生によるナビゲーションでは、まず、初期方位の誤差を最初の何回かのランドマークによる位置修正で補正し、その後は、教示時との地面との摩擦や接触状態の違いからくるランダムな誤差の移動に伴う累積誤差が修正された。人間が測量によって作成した経路・ランドマーク情報の場合、車輪径の誤差等の偏った誤差の関係で同じ側に修正される傾向がみられるが、教示・再生の場合、ランドマークによる位置修正は、実験を行うたびに異なっていた。

7.8 本章のまとめ

本章では、長距離におよぶ経路・ランドマーク情報をロボットに記憶させる方法として考案した経路教示に基づくランドマーク情報の獲得について述べた。そして、その実現のため、ランドマーク・エージェントという単位で漸進的にランドマーク



(a) 経路指示による経路・ランドマーク情報の自動生成の様子



(b) 生成された経路・ランドマーク情報の再生によるナビゲーションの様子

図 7.8: 指示・再生によるナビゲーションの基礎実験の結果

観測システムを実現する枠組を考案し、街路樹、生け垣、壁を検出するランドマーク・エージェントを実現した。さらに、獲得した経路・ランドマーク情報の再生による自律ナビゲーションについても実現した。

第 8 章

屋外実験用ロボット「山彦ナビ」の試作

8.1 本章の概要

5 章から 7 章にかけて、タスクの実現をする上での問題を解決する要素技術の研究について述べた。本章では、前章までに提案した要素技術の統合により試作した、屋外実験用ロボット・システム「山彦ナビ」について報告する。ランドマーク観測システムとしては、街路樹、生け垣、壁の三つの種類のランドマークを獲得する機能のみを搭載した。

8.2 自立・自律型移動ロボット「山彦」について

筆者の所属する研究グループ「山彦プロジェクト」では、自立・自律型移動ロボットについて長年にわたる基礎研究を積み重ねている。そして、「山彦」というファミリー・ネームをもつ実験用移動ロボットのプラットフォーム上に、確立した技術を標準機能として搭載していくことで洗練された移動ロボットを開発している。自立・自律型と呼ばれているのは、コントローラだけでなくバッテリーもロボット本体に搭載しており、エネルギー源も含めて移動に必要な全てのものをロボット本体に搭載しているからである。現在、標準的な装備として、統括行動制御、車輪による走行制御、超音波距離センサ、接触センサ付きバンパー [57] などが実装されている。

「山彦」のコントローラは、集中意思決定・機能分散型のアーキテクチャを有し、

意思決定レベルと機能レベルの 2 階層構造となっている [58][59]。意思決定レベルには、MASTER と呼ばれる一つのハードウェア・モジュールがあり、この MASTER モジュールによってロボットの行動が集中的に統括制御される。機能レベルには、走行制御、位置推定、超音波距離センサ、ビジョンセンサなど各機能を分担するハードウェア・モジュールがある。各ハードウェア・モジュールには、各々 CPU が搭載されており、独立して処理が実行される。MASTER から各機能モジュールへの通信はコマンドを与えることで実現される。各機能モジュールは、MASTER からのコマンドにしたがって、それを実現するための処理を実行する。各機能モジュールから MASTER への通信は状態表示板 (State Information Monitoring Panel : SIMP) と名付けられた一種のブラックボードに最新の実行状況やセンサ情報等を常時書き出すことにより実現される。MASTER と各機能モジュール間の通信をハードウェアとして実現するために、各機能モジュールの基板上に、YBUS II と呼ばれる専用のバスを介して MASTER からも読み書きできる双方向メモリ Dual Ported Memory(DPM) が実装されている。

移動ロボット「山彦」は、元来、屋内の廊下等での移動を想定して開発されてきたため、車輪の幅が数ミリの細い車輪を用いていた。木元氏によって初めて屋外での「山彦」の使用が試みられたが、この細い車輪では、小さな溝に車輪が引っかかる問題が多発した。そこで、一台だけ、車輪を幅の広い車輪に改造した [60]。

8.3 「山彦ナビ」のシステム構成

本研究のタスクを実現する上で、上に述べた自立・自律型移動ロボット「山彦」は、大きさ・重さ・走行速度の点で、持ち運びが楽で、かつ、万が一人間に衝突しても怪我を負わせないなど、実験を遂行する上での効率や安全性の点で優れている。そこで、車輪サイズを幅広にしたタイプの「山彦」ロボットをプラットフォームに、新たに追加機能を搭載し、屋外実験用移動ロボット「山彦ナビ」を試作した。図 8.1 に、「山彦ナビ」の概観を示す。

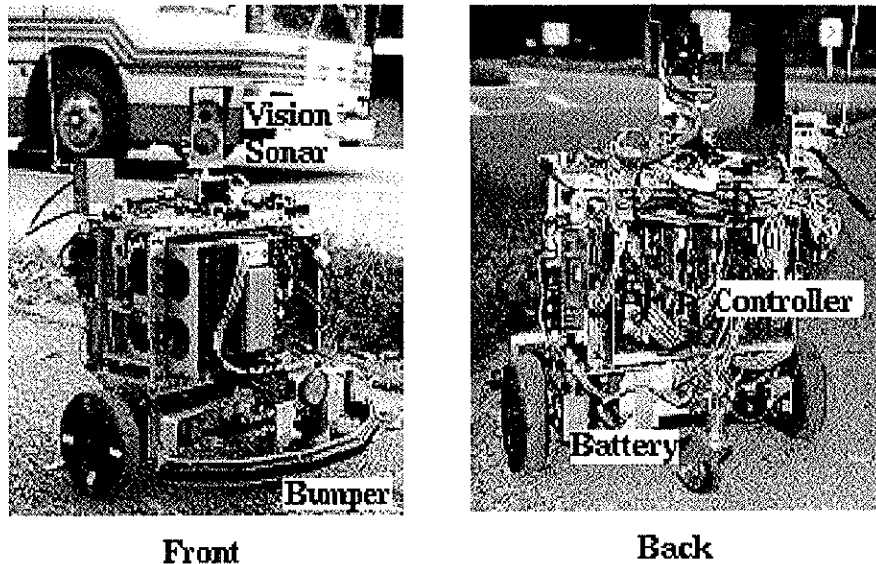


図 8.1: 屋外実験用 自立・自律型移動ロボット「山彦ナビ」

8.3.1 ロボット・システム全体の構成

図 8.2 に、「山彦ナビ」のシステムの全体構成を示す。図 8.2 の各四角枠は各々 CPU(68000 または T805) をもつハードウェア・モジュールを表している。コントローラは、上述の集中意思決定・機能分散アーキテクチャに基づいて実現されている。ハードウェア・モジュールとして、統括制御用モジュール MASTER、走行制御用モジュール SPUR[61]、位置推定モジュール POEM3G、画像処理用モジュール IS EYE、超音波測距モジュール SONIC EYE、音声モニタ用モジュール VOICE[62] を搭載した。センサとしては、振動ジャイロ、広い指向性の近距離用超音波距離センサ [56] と狭い指向性の遠距離用超音波距離センサの二種類の距離センサ、および、小型 CCD TV カメラを搭載した。アクチュエータとしては、走行制御用に DC モータを 2 個、センサの観測方位の制御用にステッピング・モータを 1 個搭載した。また、経路指示用にラジコンのプロポからの信号を受信するためのサーボとそのインターフェイス回路、ロボット内部状態監視モニタへ無線でデータを送受信するため

の無線モデム、および、画像処理の様子を表示するためのTVトランスミッタも搭載した。

新たに教示・再生による長距離屋外ナビゲーション用に追加した機能は、

1. 複数エージェントの並行実行による教示・再生ナビゲーションのプログラム
2. 屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS
3. 位置推定モジュール POEM3G

の三つの機能である。

以下に順に説明する。

8.3.2 複数エージェントによる教示・再生ナビゲーションのプログラム

第7章で考案した複数エージェントによる教示・再生ナビゲーションのプログラムを MASTER モジュール上に実装した。図 8.2に示されているように、パス・エージェント (Path)、壁検出エージェント (Wall-LmA)、生け垣検出エージェント (Hedge-LmA)、街路樹検出エージェント (Tree-LmA)、屋外ランドマーク検出用センシング・エージェント (Sonavis)、オペレータとの通信エージェント (Supervisor)、経路教示を行うためのラジコン・エージェント (Radio controller) の計7つのエージェントの並行実行により、ロボットの全体の行動が統括制御されている。全てのエージェントは、Supervisor から起動され、その際に教示のために働くのか、再生のために働くのか各エージェントに伝えられる。また、エージェント間の通信は、非同期メッセージ通信で行われる。各エージェントは、起動後は基本的に独立して与えられた仕事を行うが、CPU は一つであるため、実際には、ある時刻には一つの仕事しかできない。そこで、各エージェントが一回で行う仕事はなるべく短時間で終了するように設計し、ある程度処理時間が必要なまとまった仕事は、各機能モジュールの方で処理するように設計した。そして、各機能モジュールの方に仕事を依頼したら一旦休憩し、他のエージェントが仕事をするように設計した。

教示による経路・ランドマーク情報の作成時には、各エージェントは、以下のようなアルゴリズムで仕事を行う。

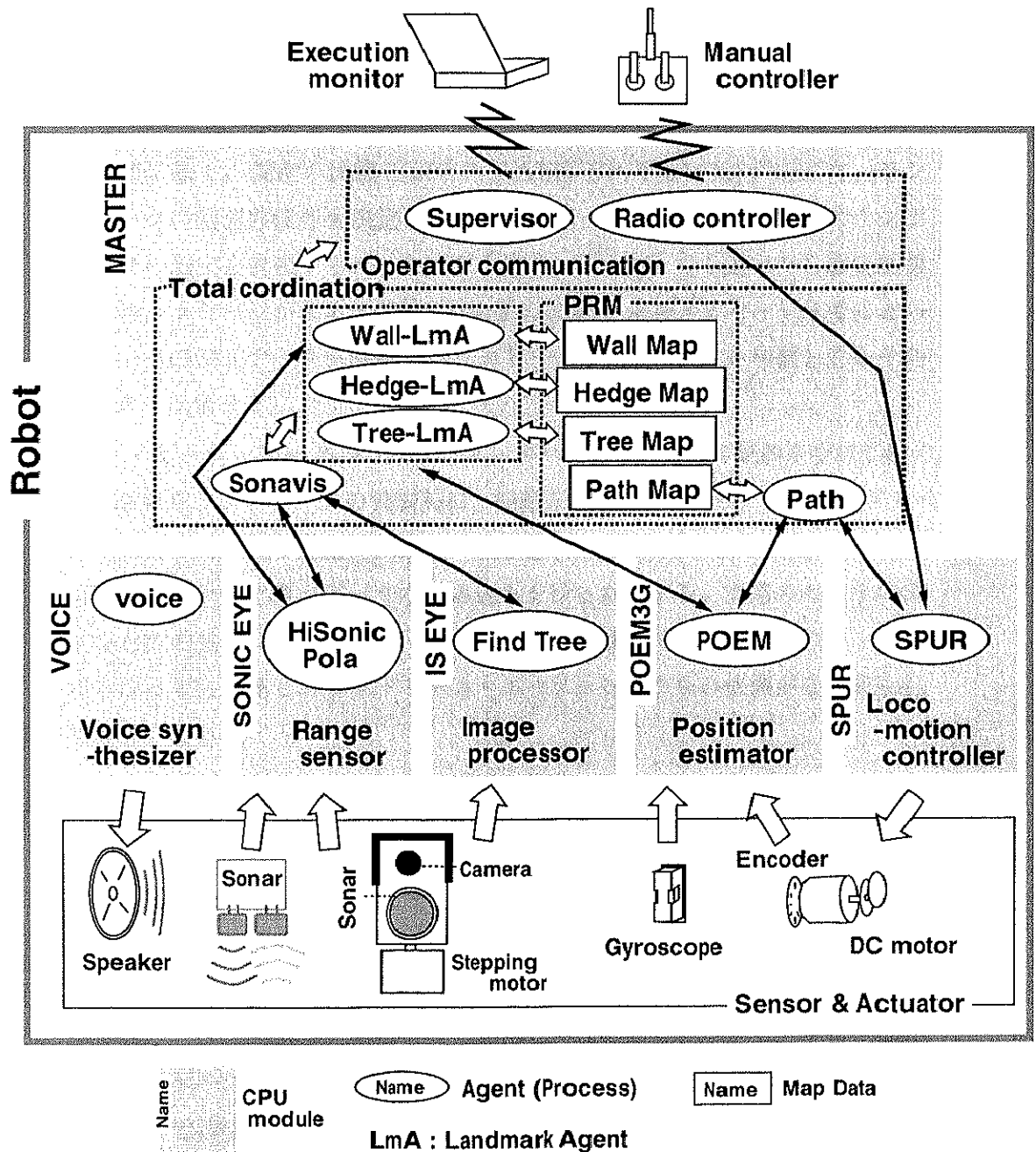


図 8.2: 「山彦ナビ」のシステム構成

ラジコン・エージェント 100ms 毎に起きてラジコンによる人間の経路指示を解釈し、走行制御モジュール SPUR へ速度・進行方位を指示するコマンドを送る。
パス・エージェント 1s 毎に起きて通過点を記録する。

各ランドマーク・エージェント ラジコン・エージェントとパス・エージェントの空き時間に働く。現在の状態 (SLEEP/WAKE UP/TRACK) に応じて、ランドマークの観測方位等を決定し、センシング・エージェントに特定のランドマークの測定を依頼するメッセージを送る。メッセージを送ったら測定結果の返答メッセージが来るまで待つ (休憩の状態)。返答メッセージを受けとったら、その測定データを解析し、ランドマークを認識したと判断したらそのデータを記憶する。

センシング・エージェント 各ランドマーク・エージェントからの依頼を受けて働く。依頼されたランドマークの種類毎に、観測方位を制御したり、そのランドマークの測定に対応する機能モジュールに測定を指示するコマンドを発行したり、SIMP に書かれた測定データの読み込みを行ったりする。実際のセンサの測定のための処理は機能モジュールで行われる。機能モジュールでのセンサ処理を待っている間と各ランドマーク・エージェントからの依頼がない間が休憩状態である。

再生による自律ナビゲーション時は、各エージェントは、以下のようなアルゴリズムで仕事を行う。

パス・エージェント 10ms 毎に起きて、次の通過点に到達したか、前方障害物はないか、バンパーへの接触はないかを監視する。通過点を中心に 20cm の円内に入った、または、現在の経路と通過点を通る法線を越えたのいずれかの条件を満たせば、通過点へ到達したと判定し、次の経路を設定し、走行制御モジュールへその指示を送る。ロボットの正面方向に取り付けられた超音波距離センサで測定した値が 60cm 以下の場合、前方に障害物があると判断し、それがなくなるまで停止する。また、バンパーへの接触が一箇所でもあった場合は、走行を完全にやめる。

各ランドマーク・エージェント 20ms 毎に起きて、ランドマークの観測点にロボットがきたかどうかを判定し、観測点に到達していたら、センシング・エージェントにランドマークの測定を指示するメッセージを送る。メッセージを送ったら測定結果の返答メッセージが来るまで待つ (休憩の状態)。観測点を中心に 30cm の円内にロボットが入っていたら、観測点に到達したと判定する。センシング・エージェント 教示時と同様である。

8.3.3 屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS

大学構内歩道に自然に存在するランドマークである街路樹と生け垣の検出に使用するためのセンサ SONAVIS を開発した。

8.3.3.1 ハードウェア

図 8.3に、屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS の超音波距離センサ、TV カメラ、そして、ステッピング・モータ部分の写真を示す。超音波距離センサとTV カメラは常に同じ方向を向くように一体化されており、それらは、ステッピング・モータにより制御される回転台の上に搭載されている。この回転台により、観測方位をロボットの正面を 0° に $\pm 90^{\circ}$ の範囲で動かせるようにした。この観測方位の制御は、MASTER モジュール上のセンシング・エージェント Sonavis で制御される。超音波センサによる距離測定は、SONIC EYE モジュール上で、また、画像処理による測定は、IS EYE モジュール上で処理される。

8.3.3.2 ソフトウェア

街路樹の検出は、まず、超音波距離センサで SONAVIS のセンシング方向に存在する対象物までの距離を測定する。そしてその方向に何か存在したら、次にTV カメラからの画像を取り込み、画像から街路樹の幹を探索する処理をする。その結果、画像上で街路樹の幹が検出されたら、画像上での横方向の位置から街路樹の方位を計算する。これらの処理から街路樹の距離と方位が測定され、街路樹の位置が求ま

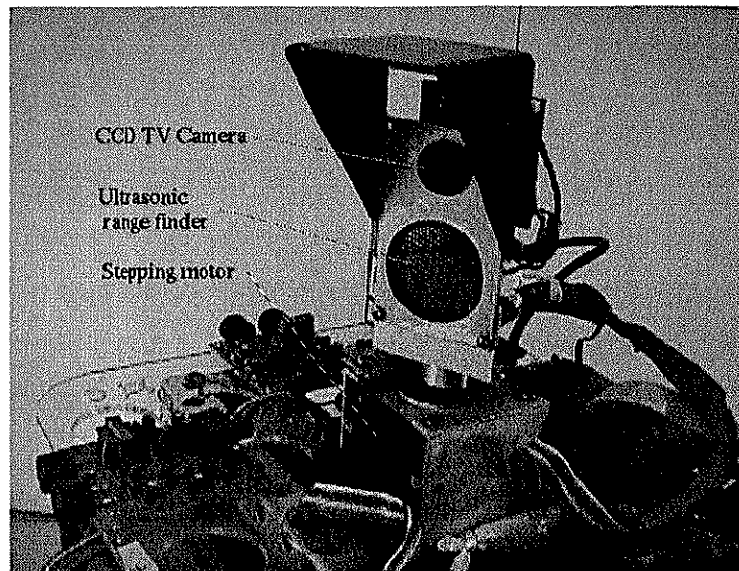


図 8.3: 屋外ランドマーク検出用センサ・システム SONAVIS の超音波センサと TV カメラ部分

る。超音波距離センサでは、最寄りの対象物までの距離が測定できるが、方位分解能は低い。逆にビジョンは、方位分解能は高いが単体で距離測定をするのは困難である。街路樹の検出のために、このように、超音波距離センサとビジョンが相補的にうまく利用されている [52][63]。

生け垣の検出には、超音波距離センサからの距離測定値のみを用いた。

街路樹を観測するか生け垣を観測するかにより観測方位を決定して、ステッピング・モータを制御しなければならないが、この選択は、センシング・エージェント Sonavisで行うようにした。このように物理的に限られたセンサ資源を有効に利用する働きをセンシング・エージェントは担っている。

8.3.4 位置推定モジュール POEM3G

8.3.4.1 ハードウェア

図 8.4は、位置推定モジュール POEM3G のコントローラの基板の写真である。右側の白い枠内が振動ジャイロとそのインターフェイス回路である。左側は、位置推定の計算等を行う CPU が搭載された部分である。左側の CPU 部が基板の 1 階で、右側のジャイロ部が基板の 2 階になっていて二階で一組のシステムである。新たなハードウェアとして作成したのは、2 階ボードに取り付けた振動ジャイロ ENC-05 とそのインターフェイス回路である。振動ジャイロには、村田製作所製の圧電振動ジャイロ ENC-05 を用いた。このジャイロは、本来、ビデオカメラの手振れ補正などに使われるもので小型安価であるが、精度は良くない。しかし、本研究のように、オドメトリとのセンサ融合で車輪の回転の異常検出をする目的には、十分有効であった。本研究の過程で、日本航空電子(株)製の光ファイバジャイロ JG-108FD でも同様の実験を行ったが、本目的においては大差はなかった [64]。それは、車輪が障害物に乗り上げると本体が少し傾くため、どちらのジャイロでも精度そのものはあまり良くなく、ジャイロの基本性能の差がでにくいためであると考えられる。圧電振動ジャイロ ENC-05 を採用することで、結果として、非常にコンパクトで安価なシステムとして実現できた。「山彦」シリーズのロボットへの実装は、この二階で一組のボードをロボットのラックに挿入するだけで行える。

8.3.4.2 ソフトウェア

ソフトウェアは、上田氏によって開発された POEM II[13][14] をベースに開発した。POEM II は、推定位置と共分散行列を管理する機能を有し、外界センサによってランドマークが観測された時に、コマンドによってデッドレコニングとランドマークによる情報を融合させ、推定位置とその誤差分散を修正する機能を持っていた。また、これらの値は、常に SIMP に書き出され、MASTER 上の統括制御プログラムによって利用できる機能があった。本研究では、それに新たに、以下のような機能を追加した。

1. 第 5 章で提案したオドメトリにジャイロを追加したデッドレコニング

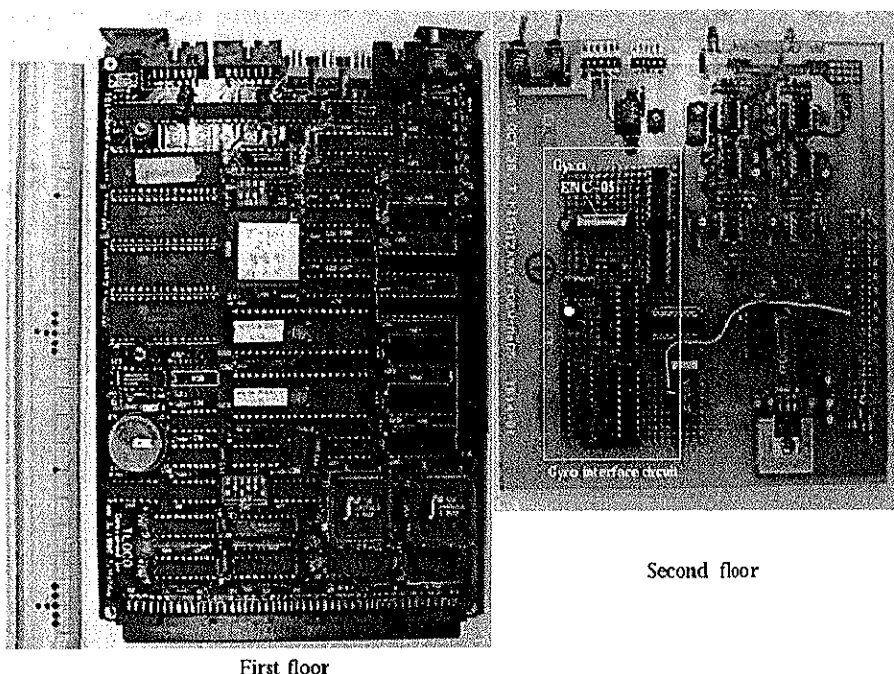


図 8.4: 位置推定モジュール POEM3G

2. 第 6 章で提案した遡及的現在位置推定

3. 点型ランドマークを利用した最尤推定による位置修正の計算 [52]

POEM3G では、デッドレコニングの計算のためのサンプリング時間間隔 τ は、5ms とした。この 5ms における計算の内訳は、内外界センサデータの融合と 6 章の公式を用いた遡及的再計算の 1 回分の計算時間が合わせて約 1ms、デッドレコニングの計算・コマンド入力の解析・出力情報の提示などの計算に要する時間が合わせて約 3.5ms であった。したがって、複数のランドマーク認識処理が時間軸上で多重に重なりあう場合を除き、1 ステップのデッドレコニングのサンプリング間隔の中で全ての計算が行えるシステムが実現できた。また、ランドマークの認識処理を開始したことを POEM3G に伝えるコマンドやランドマークの認識処理結果を用いた遡及的位置推定を要求するコマンドを新たに用意し、MASTER モジュールからブラックボックスとして利用できるようにした [63]。POEM3G のコマンドは、POEM II

の既存のコマンド体系に追加する形で実装されており、POEMIIに対してソース・レベルでのアップコンパチブルが保証されている。

8.4 本章のまとめ

本章では、試作した屋外実験用ロボット・システム「山彦ナビ」について説明した。特に、屋外での実験のために新たに開発した「複数エージェントによる教示・再生ナビゲーションのプログラム」と「屋外ランドマーク検出センサ SONAVIS」と「位置推定モジュール POEM3G」について詳細に述べた。

第 9 章

屋外実験のためのロボット内部状態監視システムの開発

9.1 本章の概要

本章では、屋外実験ために用いられる、可搬のプログラム開発・デバッグ環境について述べる。また、デバッグの強力なツールとしてのロボット内部状態監視システムについても述べる。

9.2 屋外走行実験用システム台車

屋外環境での実験は、プログラム開発、デバッグ環境という観点からみてかなり制約が厳しい。電源の問題、携帯可能なコンピュータの処理能力の問題、ディスプレイのサイズなどあらゆる意味で制約される。しかしながら、長距離ナビゲーションの研究を行う際、些細なデバッグの度に研究室まで帰るのは、効率の点から言って現実的ではない。そこで、制約はあるが、一つのまとまったプログラム開発・デバッグ環境を可搬な台車の上に構築した。図 9.1 は、開発した屋外走行実験用システム台車の写真である。台車の 1 階は、ロボットと工具セットおよび予備バッテリーの置き場、2 階が、ノート型ワークステーション (Sparcbook)、TV モニタ、無線データ通信モデムなどのプログラム開発・デバッグのための装置である。また、2

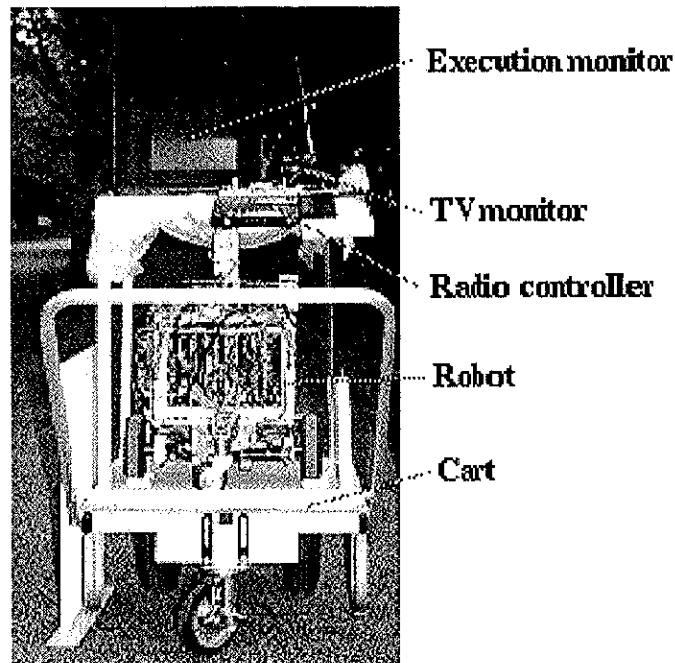


図 9.1: 屋外走行実験用システム台車

階には、経路教示の際に用いるラジコンのプロポの置き場も用意した。

なお、ロボットの後ろからこの台車とともについていくことで実験を行うわけだが、本台車は、あくまでプログラムを開発を行う人間のために準備されているものである。完成したロボットは、この台車がなくても独立して動作する。

9.3 ロボットの内部状態監視システム

移動ロボットのプログラムを開発する上で、ロボットが今何を考えて行動しているのかを人間がモニタできることは非常に重要である。なぜなら、ロボットがプログラムの期待と異なる行動を取った場合、その振舞いだけでは、その原因がわからない場合が多いからである。そこで、グラフィクス表示、音声、画像によるロボットの内部状態監視システムを開発した。

9.3.1 グラフィクス表示によるモニタ TPDS

前節で述べた台車上に搭載したワークステーションのディスプレイにロボットから送られてくる情報をグラフィクス表示するものを開発した。データは、無線モデムを用いてシリアル通信で送られる。

図9.2は、経路教示中にロボットから送られてくる情報は表示したものである。(1) ロボットの現在位置と(2) 検出されたランドマーク候補の位置が表示される。これにより、ランドマーク検出のためのセンサが正常に働いているかをリアルタイムで監視できる。

図9.3は、自律ナビゲーション時にロボットから送られてくる情報を表示したものである。右上のウィンドウは、教示の際に獲得した経路情報である。その経路上に描かれた四角形の領域を拡大したものが、左のメイン・ウィンドウに図示されている。(1) ロボットの現在位置と誤差分散から導出される誤差楕円、(2) 検出されたランドマークの位置が表示される。また、経路教示時に獲得した経路とランドマーク情報を重ねて表示することもできる。これにより、ロボットが期待した経路を走行しているつもりになっているかが確認でき、また、位置の修正が期待された通りに働いているかも監視できる。

9.3.2 音声によるモニタ VOICE モジュール

ロボットがしゃべることによって内部状態を伝える音声モニタを開発した[62]。グラフィクス表示と比較すると情報量は減るが、小型のロボットに搭載可能なサイズで実装できるのが特徴である。図9.4は、開発した音声によるモニタ Voice module の写真である。この Voice module は、回路設計からプログラム開発まで著者が設計・製作した。音声の発生は、マスタ・モジュールから音声発生関数を呼び出すことによって実行できるようになっている。例えば、sayd(num) という関数を実行すると num の値を10進数でしゃべってくれる。また、sayp(“音声データの名前”) を実行するとその名前で登録された音声データに記憶された言葉をしゃべらせることができる。このような関数をプログラムの随所に埋め込むことによって、

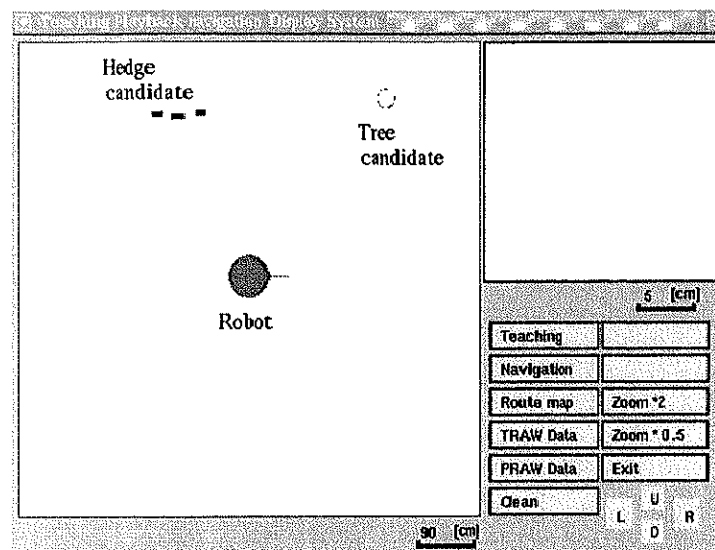


図 9.2: 教示時のグラフィクス表示画面

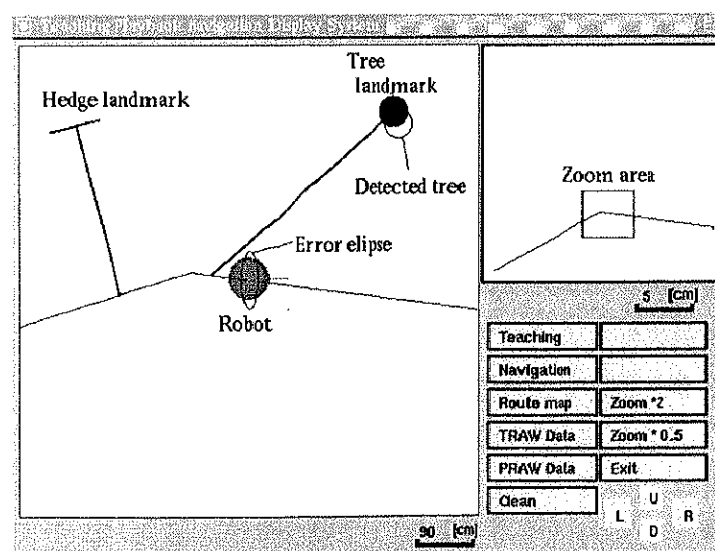


図 9.3: 自律ナビゲーション時のグラフィクス表示画面

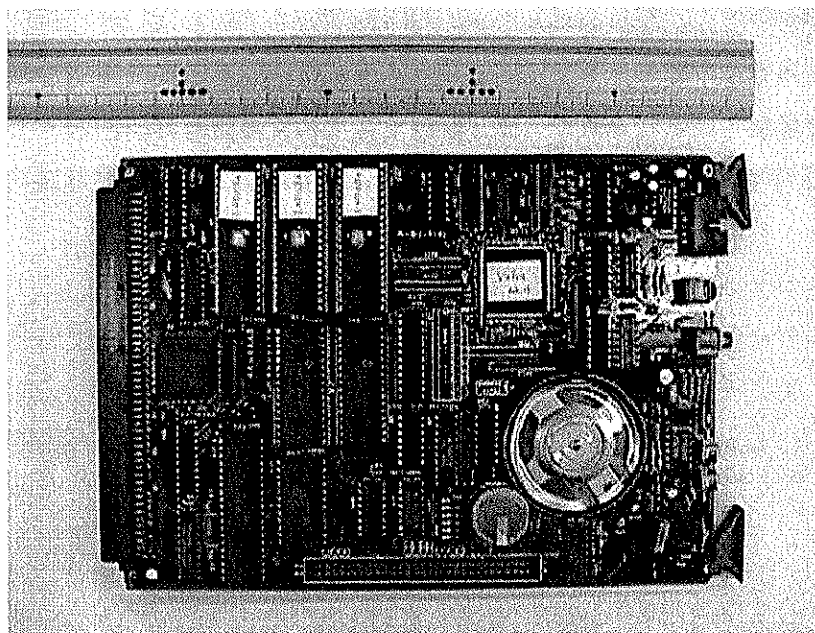


図 9.4: 音声によるモニタ VOICE モジュール

プログラムのどの部分が実行されているかを確認できる。単なるブザーとは異なり、メッセージを伝えることが可能であるので便利である。

9.3.3 画像モニタ

搭載された TV カメラでロボットが見ている画像を人間にも提示することができるように TV モニタを搭載した。画像は、TV トランスミッタを用いて無線で TV モニタに伝送できるようにした。単に見ている画像を送るだけでなく、画像に処理の経過や結果を提示することで、ロボットの内部状態が監視できる。

9.4 本章のまとめ

以上に示した屋外走行実験用システム台車とグラフィクス表示、音声、画像を用いたロボットの内部状態監視システムを開発した。これら三種類の情報を用いてロボットが内部状態を人間に提示することにより格段にデバッグ効率が向上した。

第 10 章

長距離屋外ナビゲーションの実験と結果

10.1 本章の概要

本章では、8,9 章で述べた実験システムを用いて行った長距離屋外ナビゲーションの実験結果について報告する。街路樹、生け垣、壁だけをランドマークとして用いて行った実験に対する結果である。

10.2 筑波大学構内の歩道における長距離ナビゲーションの実験

10.2.1 経路・ランドマーク情報の作成

まず、7 章で述べた経路教示による経路・ランドマーク情報の自動獲得方法を用いて、経路・ランドマーク情報の作成を行った。ここで、ランドマークとしては、街路樹、生け垣、壁の三種類のランドマークを獲得する。設定した走行経路は、1.2km であり、ロボットの標準走行速度で走行すると 1 時間 20 分も教示に要することになる。もちろん、人手で作成する場合と比較すると劇的に短時間ではある。しかし、環境は、こちらの意図とは無関係に歩道のメンテナンス等の事情で変化する。メンテナンスによって、歩道の周囲の環境構成物が変化した場合、その部分の教示をやり直す必要がある。したがって、教示に要する時間と環境の変化の両方を考慮すると、一度にすべての経路を教示するのはあまり良い方法とは言えない。そこで、部

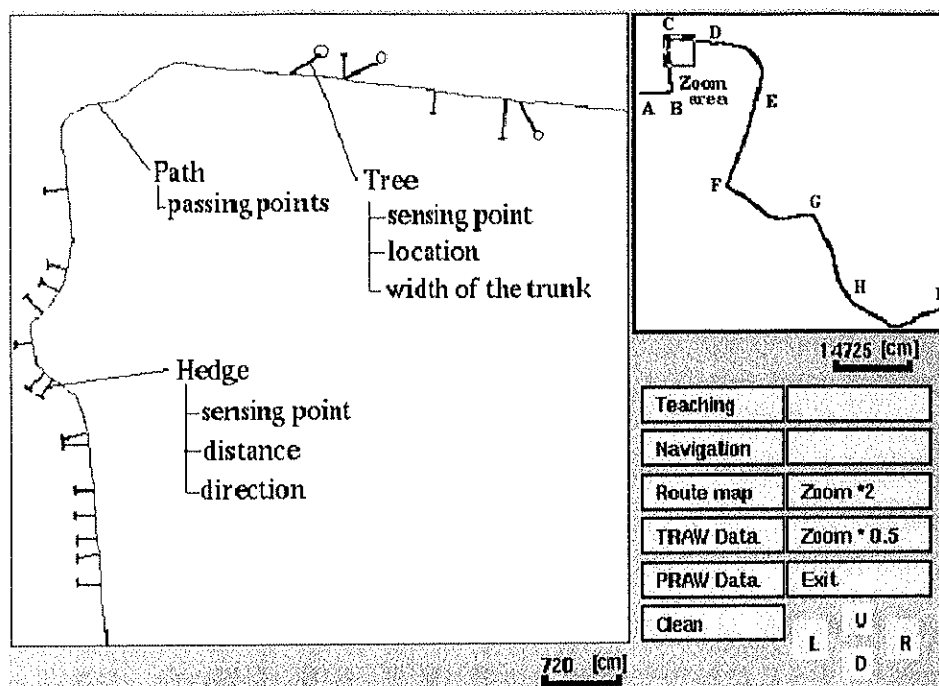


図 10.1: 経路指示に基づいて作成された長距離におよぶ経路・ランドマーク情報

分経路毎に経路を指示してそれを連結して長距離の経路・ランドマーク情報を作成することにした。

部分経路毎の指示結果を連結して、設定した全経路の最終的な指示結果を図示したものが、図 10.1 である。図の右上のサブウィンドウには、設定した走行経路のほぼ全体が指示された結果が示されている。左側のメインウィンドウには、サブウィンドウの四角で囲まれた範囲がズームアップされて表示されている。経路に対して T 字で突き出ているのが生け垣ランドマークを表している。T 字の下の方と経路の接点が生け垣ランドマークの観測地点を表している。そして、T 字の上の横棒が生け垣の位置を表している。また、経路に対して斜めに突き出ている丸をつけてあるものが街路樹ランドマークを表している。生け垣ランドマークと同様に経路との接点が生け垣ランドマークの観測地点を表し、その反対側の棒の先が街路

樹の位置を表している。

経路・ランドマーク情報の獲得結果のデータを整理すると、全走行距離は、1,165,101[mm]であり、データのサイズで表すとおよそ 37K バイトであった。獲得されたランドマークの総数は、192 個であった。その内訳は、街路樹 21 個、生け垣 166 個であった。データのサイズで表すと、街路樹のランドマーク・データが 520 バイトであり、生け垣が約 2.6K バイトであった。したがって、経路とランドマークの情報を合わせた知覚地図の総データサイズは、約 40K バイトであり、十分小さいサイズであることが分かった。

次に、各部分経路毎に生成された経路・ランドマーク情報を解説する。

まず、地点 A から地点 B、および、地点 B から地点 C の経路・ランドマーク情報を図 10.2 に示す。地点 A から地点 B では、生け垣ランドマークが 10 個獲得された。この環境では、左側に柵があり、これが安定して生け垣ランドマークとして認識された。地点 B から地点 C では、生け垣ランドマークが 23 個獲得された。最初の 5m 程度は、前の経路に引続き左側に柵がありそれが生け垣ランドマークとして安定して獲得できるが、その後左側が駐車場になり途中 10m 以上ランドマークがない部分がある。その間、右側に 2 個生け垣ランドマークが獲得されているが、これは、路上駐車中の車である。その後雑草でできた藪と花壇があり、安定して生け垣ランドマークが獲得されていた。次に、地点 C から地点 D、および、地点 D から地点 E の経路・ランドマーク情報を図 10.3 に示す。地点 C から地点 D へは、最初に車道から歩道への段差を乗り越える。その後、20m 近くにわたってランドマークとして獲得されるものがない。20m より先に行ったところに、生け垣が 7 個、街路樹が 6 個ランドマークとして獲得された。地点 D から地点 E は、路面の舗装状態はあまり良くないが、左側の街路樹が安定して街路樹ランドマークとして獲得された。獲得されたランドマークの個数は、街路樹 11 個、生け垣 10 個であった。地点 E から地点 F、および、地点 F から地点 G の経路・ランドマーク情報を図 10.4 に示す。地点 E から地点 F は、走行距離が 185m あるにも関わらず、獲得されたランドマークは、わずかに街路樹が 4 個、生け垣が 3 個であった。その理由は、大きな木が道路全体を覆っていて暗い。また、歩道自体は街路樹に沿っているが、背景も

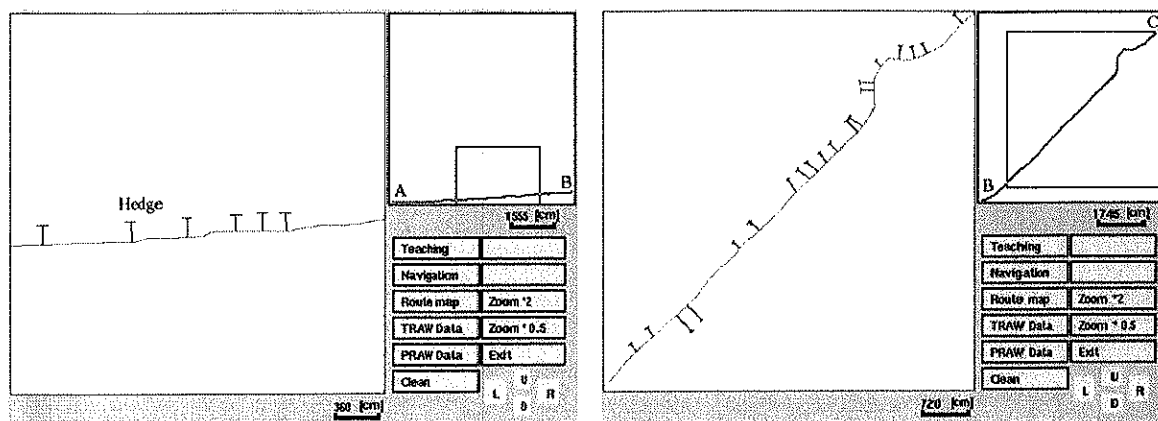


図 10.2: 地点 A から地点 C までの経路・ランドマーク情報

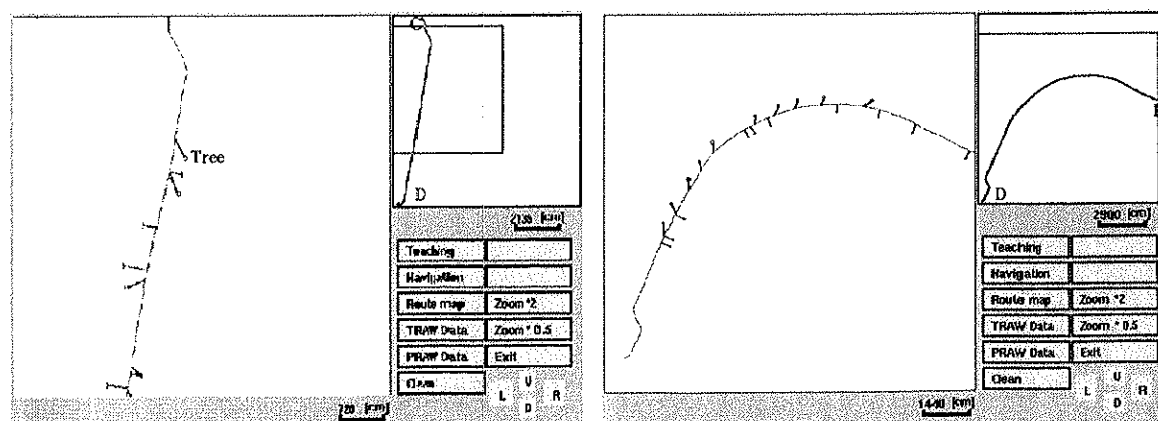


図 10.3: 地点 C から地点 E までの経路・ランドマーク情報

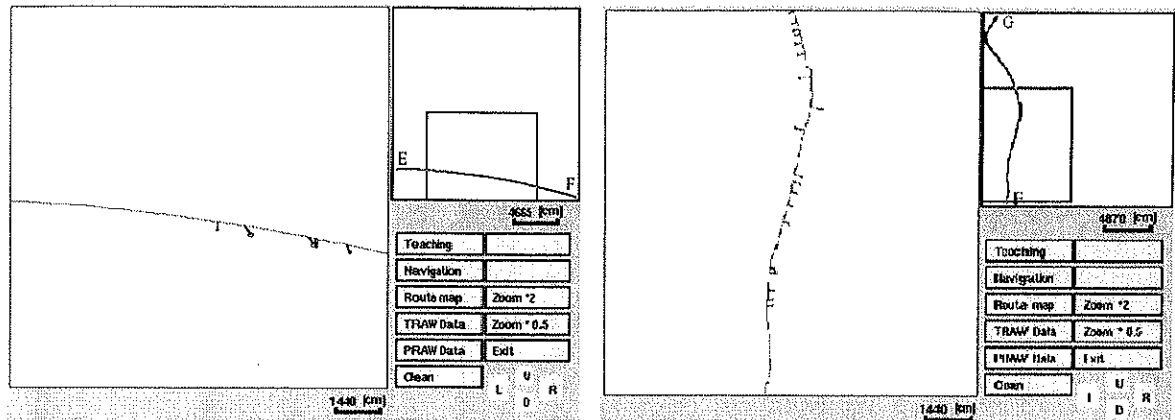


図 10.4: 地点 E から地点 G までの経路・ランドマーク情報

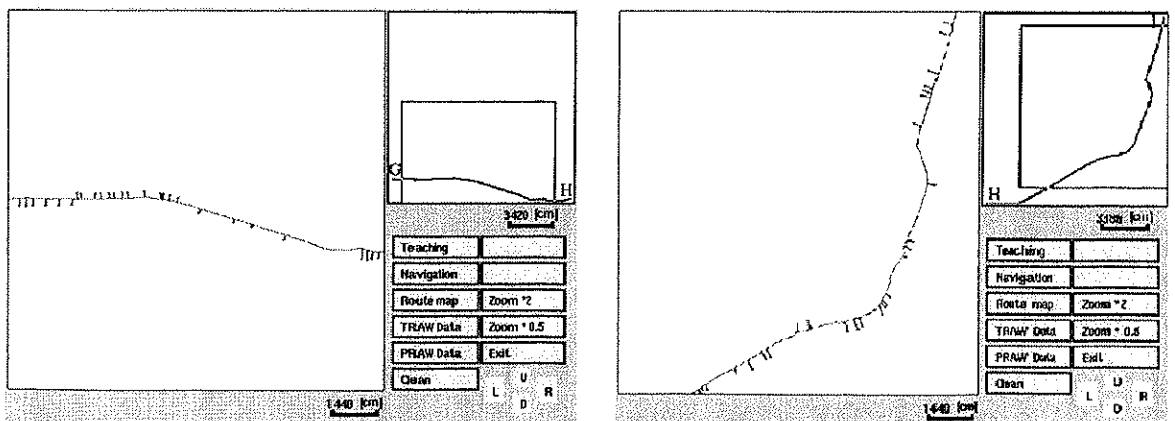


図 10.5: 地点 G から地点 I までの経路・ランドマーク情報

反対側の街路樹になるため、あまり良いランドマークが獲得できないためである。さらに、日陰なので雨が降ったあとの水溜まりが乾きにくいため十分な実験が行えなかった。地点 F から地点 G は、最初の 20m が歩道から車道へ一旦降りて、また、車道から歩道へ登る道になっている。この間ランドマークがない。その後、生け垣が安定してランドマークとして利用できる。獲得された生け垣ランドマークの個数は、42 個であった。最後に、地点 G から地点 H、および、地点 H から地点 I の経路・ランドマーク情報を図 10.5 に示す。地点 G は陸橋の手前であり最初の数メートルは橋の欄干が生け垣ランドマークとして獲得されている。その後左側の藪が適当な頻度で生け垣ランドマークとして獲得されているが、地点 H の手前 30m から 5m にかけて 20m ほどランドマークがない。地点 H から地点 I も適当な頻度で藪が生け垣ランドマークとして認識されているが途中数箇所 10m 以上ランドマークがない箇所があった。

10.2.2 長距離自律ナビゲーション

部分経路毎に、獲得した経路・ランドマークを再生する方式で自律ナビゲーションの実験を行った。地点 A から地点 B を通過して地点 C まで到達する部分経路の連結による長距離ナビゲーションは実現できたが、地点 C を通過直後の段差が機構的に安定して越えられないため、これ以降は連結による長距離走行は実現できていない。障害物に対しては、人間が前方通路を塞いでいる場合は、ロボットの正面方向に向けられた二つの超音波距離センサで確実に停止することができた。

以下に、各部分経路毎に再生による自律ナビゲーションを行った実験状況を整理する。

10.2.2.1 地点 A から地点 B までのナビゲーション

柵が安定してランドマークとして利用でき、高い成功率でナビゲーションが実現できた。また、スタート直後の 5m くらいまでが、車椅子用スロープの外壁になっていてそこが壁ランドマークとして利用でき、初期方位の誤差の修正が安定して行えた。

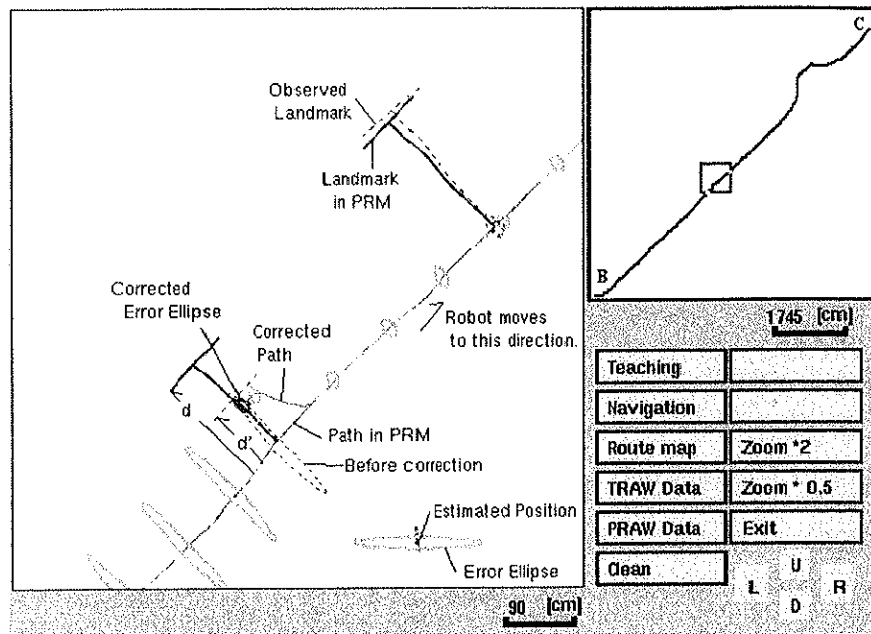


図 10.6: 地点 B から地点 C への自律ナビゲーション時の位置修正の例

10.2.2.2 地点 B から地点 C までのナビゲーション

途中の駐車場で雑草が茂っていない部分を過ぎた直後の生け垣ランドマークによる位置修正が成功の別れ目である。この生け垣ランドマークは、実際には、雑草の藪であるので、教示直後は比較的うまく位置修正が行えるが、教示後数時間後や風が強いときは、あまり信頼性が高くなかった。図 10.6 は、地点 B から地点 C 間の再生による自律ナビゲーション時の位置修正の例を図示したものである。この図 10.6 は、しばらくランドマークがなかったときの位置修正例であり、 d は、教示時記憶された生け垣ランドマークまでの距離を表し、 d' は、今回測定された生け垣までの距離である。 $d-d'$ は、約 60cm もあるが、この方向の位置推定の精度は、それよりも悪いと推定されていたので、このデータを採用し、位置を修正している。ここでの判断が正しかったため、次のランドマークは、ほぼ期待した位置に測定され、その後は推定位置精度が高く保たれている。このケースは、判断が正しかった

例であるが、同じ状況で偶然ランドマークの観測を行うタイミングで、人間がロボットとランドマークの間を横切るようなことが起こると、位置の誤認識を起しナビゲーションに失敗する危険が生じる。

10.2.2.3 地点 C から地点 D までのナビゲーション

最初の車道から歩道にあがる段差が安定して乗り越えられない上に、最初の 20m にランドマークがないためナビゲーションは成功していない。

10.2.2.4 地点 D から地点 E までのナビゲーション

雨が降ったあとの水溜まりが乾きにくいいため十分な実験ができていない。水溜りが乾きにくいのは、路面の舗装状況が悪いことが理由の一つである。教示時に安定して左側の街路樹がランドマークとして認識できているので、最初の 30m 近くランドマークがない区間を除けば安定したナビゲーションができることが期待される。

10.2.2.5 地点 E から地点 F までのナビゲーション

教示時に獲得されるランドマークがあまりに少なく、再生による自律ナビゲーションの実現には至っていない。

10.2.2.6 地点 F から地点 G までのナビゲーション

地点 F を出発してから 20m 以上の間、全くランドマークとして利用できるものがない。その上、F 地点出発直後、車道を横切るため、歩道と車道の境目の昇り降りがあるため位置精度が十分に出ない。しかし、その後、かなり整備された生け垣が続くので、そこからは、安定したナビゲーションが可能であると期待される。

10.2.2.7 地点 G から地点 H までのナビゲーション

橋の欄干や生け垣がランドマークとして使えて安定した走行が実現できた。しかし、地点 H に近付いてくるところで 20m ほどランドマークがないので、地点 H に

は到着するものの精度は良くなかった。

10.2.2.8 地点 H から地点 I までのナビゲーション

生け垣ランドマークとして獲得されているものが藪であり、また、10m 近くランドマークがないところも数箇所あるので、推定位置精度はあまり良くなかった。そのため、時折、大きく修正されながら何とかぶつからないで走っているという状況であった。途中まで走行できたが、地点 I の手前で非常にせまい通路があり、そこを通過するために十分な推定位置精度が出せず地点 I までは到達できなかった。

10.3 実験結果の考察

前節で、実験結果について説明したが、本節では、実験を行った結果分かった問題点について議論する。

10.3.1 教示システムにおける問題

教示システムとして、市販のラジコン用プロポを利用した。無線で操縦できる点は、非常に良いのだが、操縦のレスポンスが悪く、方位の制御が難しくロボットがふらつくという問題に直面した。これは、制御の時間遅れと受信される制御量がオン・オフに近い変化をするためであると考えられる。この問題については、本実験で操縦者であった筆者の操縦操作の熟練によって解決されており、技術的な改善はなされていない。

10.3.2 ランドマーク認識における問題

ランドマークの認識における問題としては、まず、街路樹の検出における背景の影響が挙げられる。街路樹の検出のための画像処理では、街路樹の幹は背景より暗い、幹の両側は画像中の縦線として検出されるなどの街路樹の幹モデルに基づいている。したがって、画像中に縦線が多数発見されるような環境では、街路樹候補となる縦線が多数発見され処理時間が増加したり、誤認識の割合が増えたりする問題

が起こった。一回の処理に時間を要すると、本来、検出すべきだった街路樹を見落とすケースが多くなる。また、街路樹の幹の表面形状によっては、超音波の反射特性の問題で超音波距離センサによる距離測定がうまくいかないケースもあった。

生け垣のランドマークは、超音波距離センサによる距離値のみによって検出しているため、草木の茂みや路肩の盛り土の変化など、環境の変化にはあまり頑強ではなかった。

壁のランドマークが認識されるケースは、地点 A の最初の数メートル以外はほとんどなかったが、設定した環境ではやむを得ない。

また、車道から歩道への乗り越えの前後、距離にして 20m から 40m 近くの区間は、街路樹、生け垣、壁のいずれも存在せず、この区間は、この三つのランドマークだけでは、ナビゲーションに十分なランドマークが確保できなかった。したがって、路肩の境界線や横断歩道もランドマークとして利用する必要があることが明らかとなったが、一方、それによって、ロボットの位置が推定できれば、これらの区間も走行可能になることがわかった。

10.3.3 再生による自律ナビゲーションにおける問題

再生によるナビゲーションが失敗する例としては、しばらくランドマークがなく、次のランドマークが誤認識しやすい、視野外になる、精度が低いような場合であった。最尤推定法による位置修正では、ランドマークを誤認識した場合も推定位置精度が良くなったと誤解してしまうため、一度のランドマークの誤認識が致命的になるという問題がある。したがって、誤認識の危険がある場合は、そのランドマーク情報を利用しないようにした。しかしながら、しばらくランドマークがない状態では、現在の推定位置も信用できないため、その情報を利用せざるを得ない。推定位置に基づくナビゲーションが失敗するのは、主としてこのような場合であった。実験によると、街路樹をランドマークとして利用した場合では、少なくとも 10m 間隔でランドマークが利用できる必要があることがわかった [52]。

10.3.4 部分経路に分割したことで生じた問題

タスクの完全な実現は、まず、部分経路毎の頑強なナビゲーションを実現し、次にそれを連結することで、原理的に可能である。しかしながら、連結地点出発後すぐに良い位置精度を与えるランドマークが存在しない場合、連結によるナビゲーションは、かなり困難であることがわかった。それは、教示の際、ゴールの連結地点に位置・方位ともに正確に停止させることが難しい、かつ、スタートの連結地点にロボットを置く際にも、初期方位があまくなる傾向があるためである。部分経路の連結によりタスクの実現を完成させるには、この連結地点での位置精度の向上を新たに達成しなければならない。

今回の実験では、部分経路の分割地点を、街路樹、生け垣、壁のランドマークが周囲に少ない車道と歩道の交差点付近に配置したため、結果として、部分経路の最初の区間がこの部分にあたりナビゲーションの実験を困難にした。経路の分割は、地図作成実験の都合で行ったもので、全経路を一度に教示したり、分割数を減らしたり、分割する地点をランドマークが多い位置に設定したりすることによって、この問題は避けられると考えられる。

10.3.5 車輪機構等に関する問題

本研究では、位置推定に関する研究に重点を置いたため、機構部分は既にあったものをそのまま利用した。しかし、既存の車輪機構では、車輪径とモータのトルクの問題で越えられない段差が数箇所存在した。それに対しては、より大きな車輪径とより出力が大きいモータを持ったロボットを用いる必要があった。今回利用したロボットでは、駆動輪の前後に配置されており、前の補助輪が大きな段差に乗り上げると駆動輪が浮くという問題も発生した。補助輪の取り付け軸を軟らかくしたり、駆動輪のサスペンションの可動域を大きくしたりすると、駆動輪は浮きにくくなるが、本体が前後方向に振動的になり易いという問題が新たに発生する。

また、路面の水捌けが悪く水溜りが何日も残りやすいため実験可能な日が限られてしまった。実験可能な日を増やし順調に研究を進めるには、生活防水程度のカバー

をする工夫が必要であることが分かった。

10.4 本章のまとめ

本章では、教示・再生方式を用いた長距離ナビゲーションを目標タスクとして設定した筑波大学構内の歩道で実験した結果について報告した。この実験は、街路樹、生け垣、壁の三つのみをランドマークとして利用して行った。その結果、設定した経路のおよそ半分の経路がこの三種類のランドマークで走行できることが明らかになった。

第 11 章

本研究で得られた成果

11.1 本章の概要

本章では、設定したタスクの実現についての成果と一般的な移動ロボットのナビゲーション技術への貢献という二つの観点に分けて、本研究の成果について整理する。

11.2 設定したタスクの実現について

11.2.1 経路・ランドマーク情報の獲得

設定した経路を八分割した部分経路ごとに経路教示を行い、それを連結することで、設定した長距離経路の経路・ランドマーク情報をロボットに保持させることが実現できた。人間が測量で同等の情報をロボットに作って与える場合、膨大な作業量となり現実的ではない。本研究で提案した方法では、人間が行う作業は、ロボットを一度目的地まで連れて行くことだけである。1.2km におよぶ長距離であっても、走行速度 250mm/s のロボットで約 1 時間 20 分の作業で済む。

11.2.2 自律ナビゲーション

獲得した経路・ランドマーク情報を用いた自律ナビゲーションの実験は、地点 A から地点 C までと、地点 G から地点 I の直前までが実現された。地点 C から地点 G の間は、獲得した経路・ランドマーク情報から判断して部分的には自律ナビゲーションが可能であると考えられるが、各部分経路のスタート地点から最初の 20m くらいまでがランドマークのない区間になっているため、自律ナビゲーションの実験は成功に至っていない。

結論としては、目標タスクの実現という観点からは、まだ研究途上である。しかしながら、本研究によって、街路樹、生け垣、壁がランドマークとして利用できるようになり、設定した環境中で距離に換算して約 30 % の自律ナビゲーションが可能であることが実験により確認された。また、獲得した経路・ランドマーク情報から判断して約 20 % については、経路の分割点を配慮すれば、自律ナビゲーションができる見通しがたった。一方、残り約 50 % については、街路樹、生け垣、壁の三つだけでは、自律ナビゲーションが難しいことがわかった。しかし、路肩の境界線、横断歩道をランドマークとして利用するシステムを順次実現し、これらのランドマークについても街路樹、生け垣、壁などと同様の方法で、ロボットの現在位置が推定できるようになれば、目標タスクである大学構内歩道の長距離自律ナビゲーションが完成できる。そのようなアプローチが可能なランドマーク獲得システムの枠組については既に開発し実現されているので、今後、順次、路肩の境界線、横断歩道を検出するランドマーク・エージェントを実現することで目標タスクが完全に実現できると考えられる。

11.3 移動ロボットのナビゲーション技術への貢献

本稿では、目標タスクの実現というタスクオリエンテッドアプローチに基づく実験ロボット工学の観点から研究成果をまとめたが、タスクから離れてみても、一般的な移動ロボットのナビゲーション技術に以下の点で貢献したと考えている。

11.3.1 ロボットの現在位置推定に関する研究

本研究では、推定位置に基づくナビゲーションを実現したが、ナビゲーション方法とは独立の問題として、現在位置を知る能力をロボットに持たせることは、知能ロボットが持つべき基本機能の研究として大変重要である。本研究で開発された路面の凹凸に頑強なデッドレコニングと遡及的現在位置推定法は、この観点からみて大きな意義のある研究成果である。

本研究で開発した路面の凹凸に頑強なデッドレコニングのシステムは、以下の三つの特徴を有している。

1. ロボットの位置のみでなく、その誤差の大きさをも常時推定する。
2. オドメトリと小型のジャイロを併用することにより、車輪のスリップ等による測定誤差の発生を抑え、同時にジャイロセンサの誤差要因であるドリフト誤差の影響もキャンセルする。
3. 冗長センサ系であることを利用して、デッドレコニング系が正常に働いているか否かを知ることができる。

これまでに、オドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニング・システムは、いくつか提案されてはいるが[51][18]、これら三つの機能を全てうまく統合したものはない。

また、本研究で考案した遡及的現在位置推定法は、センサデータの処理には時間を要することを丁寧に扱った方法である。センサデータの処理に時間を要することは本質的な問題でありながら、これまでの移動ロボットの位置推定の研究において、丁寧に扱われた例はあまり多くない。Kosakaらは、拡張カルマン・フィルタを用いた視覚に基づく移動ロボットの屋内ナビゲーションの研究において同様な問題に直面した。そこで、画像処理中に実行された走行コマンドの履歴を保存しておき、処理結果が得られた時点で、まず画像処理を始めた時刻の位置を修正し、次に保持しておいた走行コマンドの履歴を使って現在位置を修正する方法を提案した[65]。また、最近、大阪大学のMoonらも視覚を用いた移動ロボットにおける遡

及的な位置推定の必要性を論じている [66]。これらに対して、本研究で開発した遡及的現在位置推定法による位置推定システムは、デッドレコニングによって連続的に位置を推定する枠組の上に、認識処理に時間を要するセンサデータを間欠的に利用して、より確からしい位置を推定する方法を構築したものである。本方法でも、センサデータ処理後に自己位置を遡及的に修正することをベースとしているが、本方法は、走行制御の方法に依存しない独立した位置推定サブシステムとして実装でき、また、複数のセンサが並列にデータを処理する場合にも、適用可能であるという特徴を有する。これらの特徴は、他の研究にはない。

今後の発展としては、以下のことが期待される。

1. オドメトリとジャイロ以外の内界センサの併用
2. 超音波距離センサとビジョン以外の外界センサの併用
3. 車輪径や車輪間隔 (トレッド) などのシステム・パラメータの校正

本研究では、ロボットの現在位置を求めるためのセンサとして、オドメトリ、ジャイロ、超音波距離センサ、ビジョンを用いた。この四種類のセンサを選択した理由は、タスク特有の環境条件や実装の容易さ、簡潔なシステムの実現という観点からである。しかし、他にも利用可能なセンサ・システムとして、磁気コンパス、速度計、加速度計、GPS、レーザー灯台などが挙げられる。本研究で提案し利用した位置推定法は、内外界センサ融合による位置推定において誤差の大きさと時間の同期を考慮したものであるが、使用するセンサは特に制約していない。磁気コンパス、速度計、加速度計は、オドメトリやジャイロに代替または併用してデッドレコニングで利用でき、GPS やレーザー灯台も一つのランドマーク情報として取り扱うことができるので、これらのセンサ情報も、本研究で提案した位置推定の枠組の中で利用できる。そして、目的に応じて、適切な組み合わせでセンサ融合することにより頑強な現在位置推定が可能になると考えられる。さらに、車輪径やトレッドなどのシステムのパラメータもロボットの位置・方位とともに推定する状態量に含めると、これらのシステム・パラメータの校正も同時にできる [11]。

11.3.2 教示・再生方式によるナビゲーション

本研究では、長距離におよぶ経路・ランドマーク情報の作成作業の軽減の目的で、教示・再生方式によるナビゲーションを利用した。この方式は、屋内でもこの目的のために使え、実用上有効な方法である。また、地図作成作業の軽減の目的以外にも、現在位置の推定という観点からも利点がある。それは、車輪径やトレッドなどのパラメータの誤差の影響を受け難いことである。なぜなら、このようなパラメータの誤差は、教示時と再生時に同じように現れるからである。システム・パラメータの誤差は、偏った誤差であるので、本研究で用いた推定位置の誤差の推定を行う際に仮定している誤差のモデルに反するが、教示・再生方式では、これによる影響が少ない。教示・再生方式では、地面との接触から生じるランダムな誤差のみが影響するので誤差のモデルにあう。

11.3.3 ロボットの内部状態の監視法

移動ロボットのプログラムのデバッグは、多くの場合、振舞いをみただけでは難しい。そこで、本研究では、ロボットが内部でどのような計算が行われているかを監視するモニタを開発した。本研究で開発したモニタは、9600bps、8ビット、ノーパリティのRS232Cのシリアル通信でロボットとデータのやり取りを行っている。これは、標準的なシリアル通信の方式であり、この通信方式を用いれば、各データの中身のフォーマットを統一すれば、他のロボットからも同様に使える。また、ロボット開発者以外の人間にもロボットが何を考えて行動しているかが分かりやすくなるため、結果としてデモ効果も大きかった。

11.4 本章のまとめ

本章では、本研究の成果について、設定したタスクの達成についての成果と一般的な移動ロボットのナビゲーションの研究としての成果の二つに分けて述べた。

第 12 章

結論

本研究では、筑波大学構内歩道における移動ロボットの長距離自律ナビゲーションというタスクの実現を目標に研究を行った。このタスクを実現するための基本戦略として推定位置に基づくナビゲーションを用いた。そして、推定位置に基づく長距離自律ナビゲーションを実現するために、現在位置の推定法に関する研究と経路・ランドマーク情報の記憶方法に関する研究を行った。

現在位置の推定法としては、まず、オドメトリとジャイロのセンサ融合による路面の凹凸に頑強なデッドレコニングを開発した。さらに、デッドレコニングによる推定位置の累積誤差を補正する方法として、デッドレコニングとランドマーク認識の最尤推定法によるセンサ融合を開発した。最尤推定法によるセンサ融合は、従来研究で既に提案されているが、本研究では、処理時間を要するランドマークを有効に活用するために最尤推定法を遡及的に用いて現在位置を推定する方法を考案した。これらの現在位置推定に関する研究の結果、大学構内歩道で生け垣や街路樹をランドマークに利用した自律ナビゲーションを実現した。

経路・ランドマーク情報の記憶については、経路教示に基づいてロボットが自動的に経路・ランドマーク情報を獲得し記憶する方法を考案した。これは、長距離の経路・ランドマーク情報の作成とロボットへの記憶を現実的な作業量で行うための

方法である。ロボットが自動的にランドマーク情報を獲得するには、ロボットが周囲の環境からランドマークとして適切な環境構成物を自分で見つけ出す能力が必要となる。そこで、複数のランドマークを並行観測によって見つけ出すシステムをランドマーク・エージェントの漸進的追加によって実現する方法を開発した。ランドマーク・エージェントとは、ある特定のランドマークを専門に探索するエージェントである。経路教示に基づいて自動生成される経路・ランドマーク情報は、車輪径などのそのロボット固有のシステム誤差などを内包しており、その再生によるナビゲーションは、これらの誤差の影響を受け難いという長所がある。地面と車輪の摩擦など再生によって再現されにくい誤差の影響のみをランドマーク認識によって補正できればよくなるわけである。自律ナビゲーションは、獲得したランドマークを利用して現在位置を推定しながら教示で得た経路を再生するによって実現される。

本研究の成果として、まず、教示による長距離の経路・ランドマーク情報を容易にロボットに記憶させる方法を確立したことである。つぎに、部分経路毎の再生による自律ナビゲーションの実験を行い、いくつかの部分経路について、街路樹、生け垣、壁の三種類のランドマークを利用した自律ナビゲーションが実現できたことである。また、移動ロボット走行中の内部状態を監視するシステムについても開発した。しかしながら、目標タスクの完全な実現には至らなかった。タスクの実現のための残された課題は、路肩の境界線、横断歩道、車道と歩道の段差の位置をランドマークとして利用できるシステムの開発と車輪機構の改良である。また、システムの高度化に伴う必要な電源容量の増加や道幅などに応じた必要な推定位置精度の評価についても考えていく必要がある。

謝辞

本研究は、工学博士 油田 信一 筑波大学電子・情報工学系教授、工学博士 大矢 晃久 筑波大学電子・情報工学系講師のご指導の下で行われたものである。両先生には、研究を進めるに際して、ご多忙にも関わらず時間を惜しまずに熱心に多大なご指導をいただいた。本論文をまとめるにあたり、工学博士 大田 友一 筑波大学電子・情報工学系教授、工学博士 安信 誠二 筑波大学構造工学系教授、芸術学博士 原田 昭 芸術学系教授、工学博士 森 英雄 山梨大学工学部電子情報工学科教授、そして、工学博士 小森谷 清 工業技術院機械技術研究所 ロボット工学部感覚制御研究室長には、適切な助言をいただいた。

本研究を進める上で、工学博士 坪内 孝司 筑波大学電子・情報工学系講師、そして、マルクス・ルーデ 工学博士、永谷 圭司 工学博士をはじめ、筑波大学知能ロボット研究室の諸氏と議論したことは非常に有益であった。本研究は、自立移動ロボットの研究プロジェクトである「山彦プロジェクト」の長年にわたる研究の成果があればこそ初めて実現したものである。特に、工学博士 木元 克美 氏の超音波距離センサによる屋外ナビゲーションの研究は、本研究を始めるきっかけを与えてくれた。また、センサ情報の不確実性を考慮したロボットの位置推定法は、渡辺豊氏から上田暁彦氏へと引き継がれてきた研究の延長線上に実現したものである。これらの先輩諸氏の研究の礎がなければ、本研究は存在し得なかった。

筆者が現在職務として担当している感性評価構造モデル構築特別プロジェクトの専任教官である、五十嵐 浩也 芸術学系 教授、岡崎 章 芸術学系 講師、松原 克也 電子・情報工学系の皆様には、博士論文の執筆に関して深いご理解を頂いた。

現 ANU の松本吉央君や大阪電通大の吉岡孝君をはじめ、ロボットのデモや学会

を通して知りあった友達は、研究を行う上で大変励みになった。

また、大学院在学中、学費を仕送りしてくれた両親や生活資金の手助けとなるアルバイトの機会を提供してくださった日立建機(株) 訓練校の皆様ありがとうございました。

最後に、妻 佐代子は、いつも明るい笑顔で心の支えになってくれて、苦しい時や気持ちが落ち込んだときに、何度も立ち直らせてくれました。

上記の皆様をはじめ、ここに書ききれないこれまでに世話になった全ての方々に対して、この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 袴田 和則、金本 准一、堀井 浩司、菅原 雄介、有木 孝夫. 「自律移動型ロボットの警備分野への応用」. 第 14 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1:143-144, 1996.
- [2] 藤崎 正昭、内山 隆. 「高齢者・障害者用食事搬送自動ロボットシステム」. 日本ロボット学会誌, 14(5):7-11, 1996.
- [3] A. Mandow, J. M. Gomez de Gabriel, J. L. Martinez, V. F. Munoz, A Ollero, and A. Gracia-Cerezo. "The Autonomous Mobile Robot AURORA for Greenhouse Operation". *IEEE Robotics and Automation Magazine*, pages 18-27, 12 1996.
- [4] 広瀬 晋也. 「ダンプトラックの無人フリート走行システム」. 建設の機械化, pages 51-35, 1993.
- [5] 小谷 信司、清弘 智昭、森 英雄. 「視覚障害者のための歩行ガイドロボットの開発」. 映像情報メディア学会誌, 51(6):878-885, 1997.
- [6] 永谷 圭司. 「タスクオリエンテッドアプローチによる自律移動マニピュレータの研究」. 筑波大学工学研究科博士論文, 1997.
- [7] 渡辺 豊、油田 信一. 「車輪型移動ロボットのデッドレコニングシステムにおける位置データの誤差」. 第 6 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pages 347-350, 1988.

-
- [8] 渡辺 豊、油田 信一. 「位置推定の精度を管理する移動ロボットのデッドレコニングシステム」. 第5回 知能移動ロボットシンポジウム予稿集, pages 159–163, 1990.
 - [9] Y. Watanabe and S. Yuta. "Position Estimation of Mobile Robots with Internal and External Sensors Using Uncertainty Evolution Technique". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2011–2016, 1990.
 - [10] 渡辺 豊. 「自律移動ロボットのための自己位置推定システム」. 筑波大学理工学研究科修士論文, 1992.
 - [11] 上田 暁彦、油田 信一. 「外界センサのポジショニングに基づく車輪型移動ロボットのデッドレコニング系のキャリブレーション」. 第9回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 3:917–918, 1991.
 - [12] 上田 暁彦、油田 信一. 「内外界センサのデータ融合に基づく車輪型移動ロボットのポジショニング」. 日本ロボット学会第10回学術講演会予稿集, 1:85–88, 1992.
 - [13] 上田 暁彦. 「センサデータ融合による移動ロボットのポジショニングシステム」. 筑波大学理工学研究科修士論文, 1993.
 - [14] 上田 暁彦、油田 信一. 「移動ロボットの位置推定サブシステム」. 第3回ロボットシンポジウム予稿集, pages 49–54, 1993.
 - [15] 西沢 俊広. 「レーザー反射板をランドマークとして用いた自立移動ロボットのための自己位置自動修正システム」. 筑波大学理工学研究科修士論文, 1996.
 - [16] J. Borenstein and L. Feng. "Correction of Systematic Dead-reckoning errors in Mobile Robots". *Proceedings of IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 569–574, 1995.

-
- [17] J. Borenstein. "Internal Correction of Dead-reckoning Errors With the Smart Encoder Trailer". *Proceedings of IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 127–134, 1994.
- [18] 小森谷 清、大山 英明. 「光ファイバージャイロを利用した移動ロボットの位置推定の一手法」. 日本ロボット学会誌, 14(4):532–537, 1996.
- [19] B. Barshan and H. F. Durrant-Whyte. "An Inertial Navigation System for a Mobile Robot". *Proceedings of IEEE/RSJ International conference on Intelligent Robots and Systems*, 1:2243–2248, 1993.
- [20] 田代 健治、太田 順、林 遠球、新井 民夫. 「人工ランドマークの最適配置設計法」. 日本ロボット学会誌, 14(6):138–144, 1996.
- [21] 春日 知恵. 「デジタル標識パターンを用いた自己位置同定法」. 日本ロボット学会誌, 12(6):79–84, 1994.
- [22] Toshihiro Aono, Yuuji Matsuda, Takayuki Kamiya, and Keiji Seino. "Position Estimation using GPS and Dead Reckoning". *Proceedings of IEEE/SICE/RSJ International conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent systems*, pages 533–540, 1996.
- [23] 小森谷 清、大山 英明、谷 和男. 「移動ロボットのためのランドマーク観測計画」. 日本ロボット学会誌, 11(4):533–540, 1993.
- [24] Kiyoshi Komoriya, Eiimei Oyama, and Kazuo Tani. "Planning of Landmark Measurement for the Navigation of a Mobile Robot". *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:1476–1481, 1992.
- [25] J. J. Leonard and H. F. Durrant-whyte. "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(3):376–382, 1991.

-
- [26] Y. Tonouchi, T. Tsubouchi, and S. Arimoto. "Fusion of Dead-reckoned Positions with a Workspace Model for a Mobile Robot by Bayesian Inference". *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:1347–1354, 1994.
- [27] Akio Kosaka and A. C. Kak. "Fast vision-guided mobile robot navigation using model-based reasoning and prediction of uncertainty". *Computer Vision, Graphics, and Image Processing - Image Understanding*, pages 271–329, 1992.
- [28] 松本 吉央、稲葉 雅幸、井上 博允. 「視野画像列を利用した経路表現に基づくナビゲーション」. 日本ロボット学会誌, 15(2):74–80, 1997.
- [29] 黒須 崇司、大矢 晃久、油田 信一. 「画像による移動ロボットのポジショニングと誘導」. ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 講演論文集, pages 1178–1183, 1994.
- [30] 大野 孝之. 「画像列の教示による自律移動ロボットのナビゲーション」. 筑波大学理工学研究科修士論文, 1996.
- [31] 宮下 敬宏、石黒 浩、辻 三郎. 「t-net: 実環境における正確な移動ロボットの誘導と環境構造の獲得」. 日本ロボット学会誌, 14(7):72–79, 1996.
- [32] H. Ishiguro, K. Nishikawa, and H. Mori. "Mobile Robot Navigation by Visual Sign Patterns Existing in Outdoor Environment". *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2:636–641, 1992.
- [33] K. Nishikawa and H. Mori. "Rotation Control and Motion Estimation of Camera for Road Following". *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2?:1313–1318, 1993.
- [34] 西川 和弘、森 英雄. 「簡潔な経路情報を基にした移動ロボットの誘導法」. 日本ロボット学会誌, 12(8):105–113, 1994.

-
- [35] 加藤 晋. 「知能移動ロボットに関するシステムの研究」. 明治大学博士学位請求論文, 1993.
- [36] Jill D. Crisman and Charles E. Thorpe. "SCARF: A Color Vision System that Tracks Roads and Intersections". *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 9(1):49–58, 1993.
- [37] 後藤 吉正. "ドライビングパイプライン: 屋外移動ロボットにおけるパイプラインアーキテクチャ". 日本ロボット学会誌, 9(2):9–20, 1991.
- [38] Charles E. Thorpe, editor. "*Vision and Navigation: The Carnegie Mellon Navlab*". Kluwer Academic Publisher, 1990.
- [39] 津川 定之. 「自動車の自動運転システム」. 日本ロボット学会誌, 13(7):52–55, 1995.
- [40] K. Kluge and C. Thorpe. "Representation and Recovery of Road Geometry in YARF". *Proceedings of Intelligent Vehicles*, pages 114–119, 1992.
- [41] V. Grafe et al. "Detection of passing vehicle by a robot car driver". *Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pages 391–396, 1991.
- [42] Dean A. Pomerleau. "ALVINN: An Autonomous Land Vehicle in a Neural Networks". *Technical Report CMU-CS-89-107*, 1989.
- [43] E. Krotkov and R. Simmons. "Autonomous Walking in Natural Terrain: A Retrospective on the Performance of the Ambler". *Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics*, pages 85–90, 1993.
- [44] R. Chatila and S. Fleury et al. "Autonomous Navigation in Natural Environment". *Proceedings of International Symposium on Experimental Robotics*, pages 4–14, 1993.

-
- [45] . [特集] 大地とロボット. 日本ロボット学会誌, 12(7):1-83, 1994.
- [46] T. Nishizawa, A. Ohya, S. Yuta, and T. Takigawa. "A Development of Autonomous Tractor for Agricultural Field - Positioning system and Its Experiment ". *Proceedings of SECOND WAC, International Symposium on Robotics and Manufacturing*, 1996.
- [47] 皿田 滋. 「鉋山と作業移動型ロボット」. 日本ロボット学会誌, 13(7):38-40, 1995.
- [48] J. Borenstein and Y. Koren. "Real time obstacle avoidance for Fast Mobile Robots in Cluttered Environments". *Proceedings of IEEE International conference on Robotics and Automation*, 1:572-577, 1990.
- [49] A. Ohya, A. Kosaka, and Avi Kak. "Vision-Based Navigation of Mobile Robot with Obstacle Avoidance by Single Camera Vision and Ultrasonic Sensing". *Proceedings of International conference on Intelligent Robots and Systems*, 1997.
- [50] 坪内 孝司、浪花 智英、有本 卓. 「移動ロボットのためのランドマーク観測計画」. 日本ロボット学会誌, 12(7):111-119, 1994.
- [51] J. Borenstein and L. Feng. "Gyrodometry: A New Method for Combining Data from Gyros and Odometry in Mobile Robots". *Proceedings of International conference on Robotics and Automation*, 1:423-428, 1996.
- [52] Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya, and Shin'ichi Yuta. "Positioning by tree detection sensor and dead reckoning for outdoor navigation of a mobile robot". *Proceedings of International conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent systems*, pages 653-660, 1994.
- [53] Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya, and Shin'ichi Yuta. "Non-stop outdoor navigation of a mobile robot - Retroactive positioning data fusion with a

- time consuming sensor system -". *Proceedings of International conference on Intelligent Robots and Systems*, 1:130-135, 1995.
- [54] 「ジャイロスター取扱説明書 (ENC-05D)」. (株) 村田製作所.
- [55] 有本 卓. 「カルマン・フィルター」. 産業図書, 1977.
- [56] 大野 孝之、大矢 晃久、油田 信一. 「送受信回路の改良による超音波センサの測距性能の向上」. 日本ロボット学会第 12 回学術講演会予稿集, 3:1093-1094, 1994.
- [57] 日下部 稔、油田 信一. 「自律移動ロボットのためのバンパ機能を有する接触センサの開発」. 日本ロボット学会第 14 回学術講演会予稿集, pages 643-644, 1996.
- [58] 油田 信一、飯島 純一. 「自律移動ロボットの制御系のアーキテクチャ」. 第 8 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pages 967-970, 1990.
- [59] S. Yuta and J. Iijima. "State Information Panel for Inter-Processor Communication in an Autonomous Mobile Robot Controller". *Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, (1516), 1990.
- [60] 木元 克美. 「機能分散アーキテクチャを有する自律移動ロボットの行動制御」. 筑波大学工学研究科博士論文, 1995.
- [61] S. Iida and S. Yuta. "Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots". *Proceedings of IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems*, pages 212-217, 1991.
- [62] 前山 祥一. 「移動ロボットの自律行動プログラム開発支援のための音声合成システム」. 筑波大学情報学類卒業論文, 1993.

- [63] 前山 祥一. 「移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのポジショニング」. 筑波大学工学研究科修士論文, 1995.
- [64] Shoichi Maeyama, Nobuyuki Ishikawa, and Shin'ichi Yuta. "Rule based filtering and fusion of odometry and gyroscope for a fail safe dead reckoning system of a mobile robot". *Proceedings of International conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent systems*, pages 541–548, 1996.
- [65] A. Kosaka, M. Meng, and A. C. Kak. "Vision Guided Mobile Robot Navigation Using Retroactive Updating of Position Uncertainty". *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2:1–7, 1993.
- [66] I. Moon, J. Miura, Y. Yanagi, and Y. Shirai. "Planning of Vision-Based Navigation for a Mobile Robot under Uncertainty". *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pages 1202–1207, 1997.

付録

ジャイロのバイアス・ドリフトの推定

オドメトリとジャイロによる角速度の測定値を各々,

$$\hat{\omega}_o[t] = \omega_o[t] + w_{\omega_o}[t] \quad (12.1)$$

$$\hat{\omega}_g[t] = \omega_g[t] + \epsilon[t] + w_{\omega_g}[t] \quad (12.2)$$

とする. ここで, $\epsilon[t]$ は, ジャイロのバイアス・ドリフト, $w_{\omega_o}[t]$ と $w_{\omega_g}[t]$ は, 各々平均値が0のオドメトリとジャイロによる測定の誤差である.

両者がいずれもロボットの角速度 $\omega[t]$ を測定しているとみなせる場合, すなわち, $\omega[t] = \omega_o[t] = \omega_g[t]$ とみなせる場合,

$$\begin{aligned} \delta[t] &= \hat{\omega}_g[t] - \hat{\omega}_o[t] \\ &= \epsilon[t] + w_{\omega_g}[t] - w_{\omega_o}[t] \\ &= \epsilon[t] + w_\delta[t] \end{aligned} \quad (12.3)$$

となり, $w_\delta[t]$ は, 平均値0の白色雑音とみなせ, $\delta[t]$ からドリフトが観測できる. さて, ジャイロのバイアスは, 連続的に滑らかに変化するので, ジャイロのバイアスを2次の積分系にモデル化し,

$$\begin{bmatrix} \epsilon[t+\tau] \\ \varepsilon[t+\tau] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon[t] \\ \varepsilon[t] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_\epsilon[t] \\ w_\varepsilon[t] \end{bmatrix} \tau \quad (12.4)$$

と表す。ここで、 τ は、サンプリング時間間隔である。

$$\mathcal{E}[t] = \begin{bmatrix} \epsilon[t] \\ \varepsilon[t] \end{bmatrix}, w[t] = \begin{bmatrix} w_\epsilon[t] \\ w_\varepsilon[t] \end{bmatrix} \quad (12.5)$$

$$\mathcal{P}[t] = \begin{bmatrix} \sigma_\epsilon[t]^2 & \sigma_{\epsilon\varepsilon}[t] \\ \sigma_{\epsilon\varepsilon}[t] & \sigma_\varepsilon[t]^2 \end{bmatrix} \quad (12.6)$$

$$\mathcal{W}[t] = \begin{bmatrix} \sigma_{w_\epsilon}[t]^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{w_\varepsilon}[t]^2 \end{bmatrix} \quad (12.7)$$

$$\mathcal{A} = \begin{bmatrix} 1 & \tau \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (12.8)$$

とおくと、 $\mathcal{E}[t]$ の推定量 $\hat{\mathcal{E}}[t]$ は、カルマン・フィルタを用いて以下のように推定できる。

$$\hat{\mathcal{E}}[t]^+ = \hat{\mathcal{E}}[t]^- + K[t](\delta[t] - C\hat{\mathcal{E}}[t]^-) \quad (12.9)$$

$$K[t] = \mathcal{P}[t]^- C^T (C\mathcal{P}[t]^- C^T + \sigma_\delta^2)^{-1} \quad (12.10)$$

$$\mathcal{P}[t]^+ = (I - KC)\mathcal{P}[t]^- \quad (12.11)$$

$$\hat{\mathcal{E}}[t + \tau]^- = \mathcal{A}\hat{\mathcal{E}}[t]^+ + \bar{w}[t]\tau \quad (12.12)$$

$$\mathcal{P}[t + \tau]^- = \mathcal{A}\mathcal{P}^+[t]\mathcal{A}^T + \mathcal{W}[t]\tau^2 \quad (12.13)$$

ここで、 $-$ は、融合前の値であり、 $+$ は、融合後の値である。いま、 $t=0$ でバイアスを測定し、これを0とおいてその後の測定を行うことにすれば、 $\hat{\mathcal{E}}[0] = 0$ となる。ここで、 $\mathcal{P}[0]$ と \mathcal{W} の各パラメータは、ジャイロのドリフト及びセンサデータの実測値より値を決めることになるが、この推定系では、時々刻々、観測データが得られるので、適当な大きめの値を与えておけば良い。なお、オドメトリとジャイロの値が大きく異なり、オドメトリが角速度を測定していないと判断される場合は式(12.9),(12.11)において、 $\hat{\mathcal{E}}[t]^+ = \hat{\mathcal{E}}[t]^-$ 、 $\mathcal{P}[t]^+ = \mathcal{P}[t]^-$ とする。

研究業績

発表論文

1. 学術雑誌

- (a) Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta : "Autonomous Mobile Robot System for Long Distance Outdoor Navigation in University Campus", Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.9 No.5, pp.348-353.
- (b) 前山 祥一, 大矢 晃久, 油田 信一 : 「移動ロボットの屋外ナビゲーションのためのオドメトリとジャイロのセンサ融合によるデッドレコニング・システム」日本ロボット学会誌 Vol.15 No.8, pp.84-91, 1997.
- (c) 前山 祥一, 大矢 晃久, 油田 信一 : 「移動ロボットのための遡及的現在位置推定法 - 処理時間を要する外界センサデータの利用 -」日本ロボット学会誌 Vol.15 No.7, pp.115-121, 1997.

2. 査読のある国際学会

- (a) Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta : "Positioning by tree detection sensor and dead reckoning for outdoor navigation of a mobile robot", Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligence Systems, pp.653-660 (1994.10)

- (b) Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta : "Non-stop outdoor navigation of a mobile robot - Retroactive positioning data fusion with a time consuming sensor system-", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, vol.1, pp.130-135 (1995.8)
- (c) Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta : "Outdoor landmark map generation through human assisted route teaching for mobile robot navigation", Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robot and Systems, pp.957-962 (1996.11)
- (d) Shoichi Maeyama, Nobuyuki Ishikawa and Shin'ichi Yuta : "Rule based filtering and fusion of odometry and gyroscope for a fail safe dead reckoning system of a mobile robot", Proceedings of IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligence Systems, pp.541-548 (1996.12)
- (e) Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta : "Long distance outdoor navigation of a mobile robot by playback of Perceived Route Map", Preprints of Fifth International Symposium on Experimental Robotics, (1997.6). (Proceedings は、Springer-Verlag より、1998 年 4 月頃発行される予定.)

国内の学術講演会における口頭発表

1. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「超音波センサと画像の相補的統合による屋外ランドマークの検出」, 第4回ロボットセンサシンポジウム予稿集, pp.25-30 (1994.3)
2. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「街路樹検出センサとデッドレコニングの融合による屋外移動ロボットのポジショニング」, 第4回ロボットシンポジウム予稿集, pp.269-274 (1994.5)

3. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「街路樹をランドマークとしたポジショニングによる移動ロボットの屋外走行実験」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'94 講演論文集, pp.305-308 (1994.6)
4. 前山祥一, 油田信一, 「自律移動ロボットの行動プログラム開発支援のための音声モニタシステム」, 第7回知能移動ロボットシンポジウム講演論文集, pp.154-155 (1994.9)
5. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「時間遅れのある外界センサ情報とデッドレコニング情報の融合による移動ロボットのポジショニング」, 第12回ロボット学会学術講演会講演論文集 (1), pp.277-278 (1994.11)
6. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「複数のランドマーク情報の並列処理を有効利用する移動ロボットの位置推定法」, 第5回ロボットシンポジウム予稿集, pp.81-86 (1995.5)
7. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「移動ロボットの現在位置推定機能のシミュレーション」, ロボティクス・メカトロニクス講演会'95 講演論文集, vol.(a), pp.441-444 (1995.6)
8. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「移動ロボットのための屋外環境における経路地図の表現法とティーチング」, 第13回ロボット学会学術講演会講演論文集 (2), pp.575-576, (1995.11)
9. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「経路教示中にランドマーク地図を自動生成するためのセンシング戦略」 ロボティクス・メカトロニクス講演会'96 講演論文集 pp.421-424, (1996.6)
10. 前山祥一, 大矢晃久, 油田信一, 「屋外ルートマップの自動生成におけるランドマーク認識の並列化」, 第14回ロボット学会学術講演会講演論文集 (2), pp.503-504, (1996.11)

ビデオ・プロシーディングス

1. 前山 祥一, 大矢晃久, 油田信一「移動ロボットの現在位置推定機能のシミュレーション」
ROBOMECH'95 Video Proceedings, 日本機械学会 (1995)
2. Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta "Outdoor Navigation Using Natural Landmarks by Teaching-Playback Scheme"
IROS'97 Video Proceedings, (1997)

その他

1. 石川信行, 前山 祥一, 油田信一, 佐々木忍, 鈴木勝男, 「ジャイロとオドメトリを併用した移動ロボット位置推定の評価実験」, 原子力用人工知能クロスオーバー研究中間報告, 日本原子力研究所, (1997.5)
2. Shin'ichi Yuta, Keiji Nagatani and Shoichi Maeyama : "Realizing a Robust Navigation Function on a Small Size Autonomous Mobile Robot", Proceedings of International Workshop on Some Critical Issues in Robotics, (1995.10)

筑波大学附属図書館



1 00990 12423 3

本学関係