

修士論文

環境もシステムの一部と考える
自律移動ロボットに関する研究
～環境の出現確率とその操作の考察～

平成22年度修了

三重大学大学院 工学研究科

博士前期課程 電気電子工学専攻

加藤 雄一

平成 22 年度 修士論文

環境もシステムの一部と考える
自律移動ロボットに関する研究
～ 環境の出現確率とその操作の考察 ～

専攻 三重大学大学院 工学研究科 電気電子工学専攻
研究室 情報処理研究室

平成 21 年度入学 409M214

氏名 加藤 雄一

目次

第1章	まえがき	1
第2章	本ロボットシステム	3
2.1	ロボットのハードウェア構成	3
2.2	ロボットのソフトウェア構成	5
2.2.1	ベースシステム	5
2.2.2	RCの制御法	6
第3章	自律移動プログラム	7
3.1	経路計画	7
3.2	自己位置の認識	7
3.3	障害物回避	9
3.3.1	エッジの回避	10
3.3.2	危険領域の回避	10
3.3.3	緊急停止	10
3.4	自律移動プログラムのまとめ	12
第4章	環境の機構面に関する調査	13
第5章	環境の認識面に関する調査	15
5.1	GPSの評価	15
5.1.1	GPSの精度調査	15
5.1.2	DGPS受信可能エリアの調査	17
5.2	長経路走行実験	17
5.3	短経路走行実験	20

目次	ii
5.3.1 実験	20
5.3.2 アルゴリズムの問題	22
第6章 むすび	23
6.1 達成した課題	23
6.2 今後の課題	23
謝辞	24
参考文献	25
発表論文	26

図目次

1.1	アプローチの比較	2
2.1	研究に用いるロボット	4
2.2	走行時のロボット	4
2.3	マルチエージェントシステム	5
2.4	RC 制御用信号	6
3.1	グラフ構造地図 (三重大学工学部)	8
3.2	GPS によるナビゲーション	8
3.3	レーザレンジファインダ (LRF)	9
3.4	LRF データ例	9
3.5	エッジの回避	10
3.6	危険領域の回避	11
3.7	緊急停止	11
3.8	<i>Display</i> エージェント (自律移動時)	12
4.1	機構面移動可能地図	14
5.1	GPS デバイスの外観	16
5.2	静止測位実験結果	17
5.3	DGPS 使用不可能領域	18
5.4	長経路走行実験	19
5.5	長経路走行実験結果 (GPS の軌跡)	19
5.6	長経路走行実験結果 (場所毎の復帰不可回数)	20
5.7	短経路走行実験	21

5.8 短経路走行実験結果 (GPS の軌跡)	21
5.9 アルゴリズムの問題	22

表 目 次

5.1 静止測位実験結果	16
5.2 長経路走行実験結果 (試行回毎の復帰不可回数)	19
5.3 短経路走行実験結果 (完走回数)	20

第 1 章

まえがき

本研究は、少ない環境負荷で確実に移動できる自律移動ロボットを作成することを目的とするものである。ロボット研究において、自律移動ロボットの分野の研究は多くなされている。さらに、屋外環境に対する自律移動ロボットの走行大会も国内外を問わず開催されるなど、実環境における自律移動ロボットを対象とする研究・開発も多くなされている [1][2]。これらの研究は、いかなる未知環境においてもロボットの機能のみにより障害を乗り越え走行することを目指すものである（従来研究群 A）（図 1.1(a)）。現時点では、未知の環境において想定される特定の環境に対して成功率を上げることを目的としている。しかし、特定の環境に対して成功率を上げても、実環境では予期せぬ環境の変化があり、想定外の環境になれば環境認識ができなくなるため、実環境での実用化は難しくまだ実用化されていない。

一方、工場内など整備された環境内では、自律移動ロボットはすでに実用化されている [3][4]。これらの分野の研究は、磁気タグや反射板などのセンサやマーカーを周囲環境に設置し、自律移動ロボットあるいは環境を統括するシステムによりそれらの情報を処理することで、ロボットの走行を確実にしようとするものである（従来研究群 B）（図 1.1(b)）。これらのように、周囲環境に手を加えてロボットの走行を支援するものを「環境情報化」といい、近年研究されている [5][6]。しかし、これらの研究では、環境からは十分すぎるほどの情報が与えられており、ロボットの確実な自律走行のための最低限の環境操作に関しては議論されておらず、環境の導入負荷が大きい。

そこで、上記 2 つのアプローチに対して、本研究では、想定される環境の出現確率に焦点を当て、環境操作の有効度を考慮し、自律移動ロボットの機能の改良のみでなく周囲環境も適宜変更すること（図 1.1(c)）を提案する。これにより、ロボットの機能の複雑化を防ぐとともに、導入負荷の小さな

環境操作をすることで、確実な走行の実現を目指す。また、自律移動ロボットの実用化のために有効な環境操作も見つけ出す。

以降、第 2 章では、研究に用いる本ロボットシステムについて述べる。第 3 章では、作成した自律移動プログラムについて述べる。第 4 章では、実環境を自律移動ロボットの機構面に関して調査した結果を述べる。第 5 章では、実環境を自律移動ロボットの認識面に関して調査した結果を述べる。第 6 章では、まとめとして達成した課題と今後の課題を述べる。

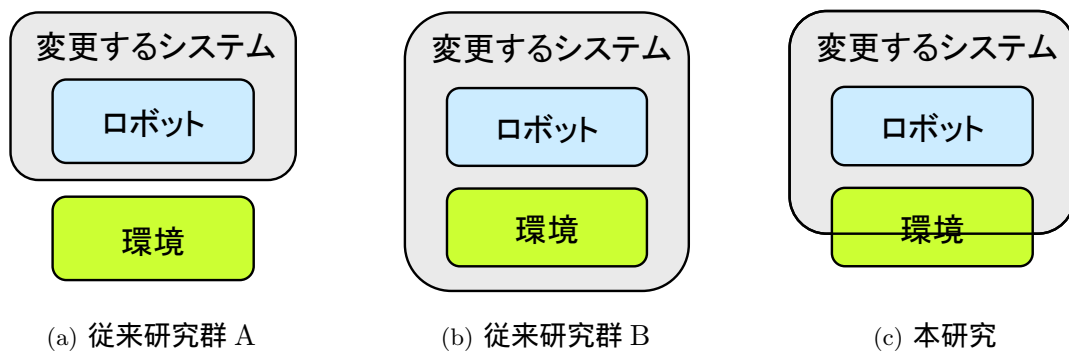


図 1.1: アプローチの比較

第 2 章

本ロボットシステム

2.1 ロボットのハードウェア構成

環境の出現確率の調査及びシステム変更の評価実験をするため、自律移動ロボットを作成する。ロボットを作成するにあたり、簡単な走行機構となるようにする。理由は、簡単な走行機構のロボットでも確実な走行が可能となる有効な環境操作を見つけ出すためである。本研究では、図 2.1(a) に示すロボットを作成した。これは、我々が開発してきた小型自律移動ロボット「MieC」を智能部、一般に市販されている大型 RC を駆動部として備え、「MieC」の指令により大型 RC が動作する。「MieC」と大型 RC に関して、簡単に紹介する。「MieC」は、CPU ボードを持ち、USB メモリに OS として Linux が入っている Linux コンピュータである。USB 接続の無線 LAN キーを通して、外部とデータを通信する。また、CPU ボードから PCI 接続された FPGA が DC モータやエンコーダ、RC 用電波出力回路と信号をやり取りし、動作を実現している。「MieC」は、USB 接続によりセンサを取り付けることが可能であり、本研究に用いる「MieC」には、外界センサとして多くのロボットが標準的に持つ、カメラ、LRF (Laser Range Finder)、GPS を取り付けた。大型 RC は、市販されている 4 輪のものを用い、2 個の DC モータにより前輪がステアリング、後輪の片側が前後進駆動をする (図 2.1(b))。ただし、これらの DC モータやタイヤにはエンコーダ等が取り付けられておらず、実際の回転数は直接測定できない。また、2 つの後輪をつなぐ軸棒は回転しない。

今回は、「MieC」を大型 RC 上に固定して自律走行をさせるが、将来的には、大型 RC 上で複数の「MieC」の移動を可能にし、自由なセンサ配置にできる自律移動ロボットにする予定である。

走行時、ロボットが搭載するものを図 2.2 に示す。電源は、ノート PC 以外は全てラジコン用の 7.2V バッテリにより駆動する。中央の DC-DC コンバータは、無線 LAN ルータの必要とする電源電

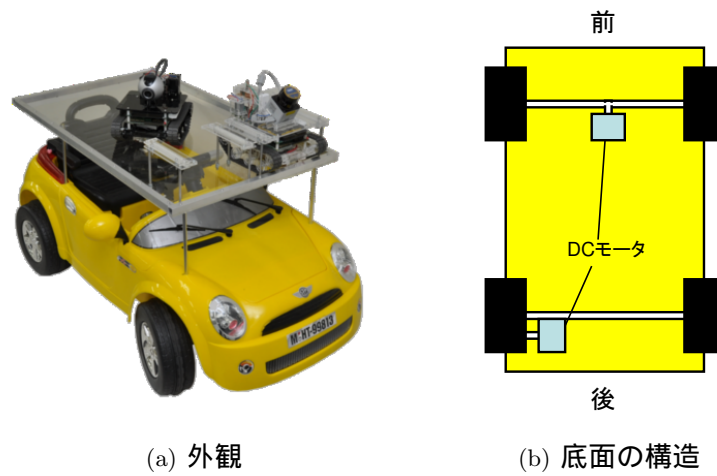


図 2.1: 研究に用いるロボット

圧を供給するために搭載する．無線 LAN ルータによりローカルなネットワークを構築し，ノート PC と 2 台の「MieC」の通信を可能とし，次に述べるマルチエージェントシステムにより，システムを構築する．

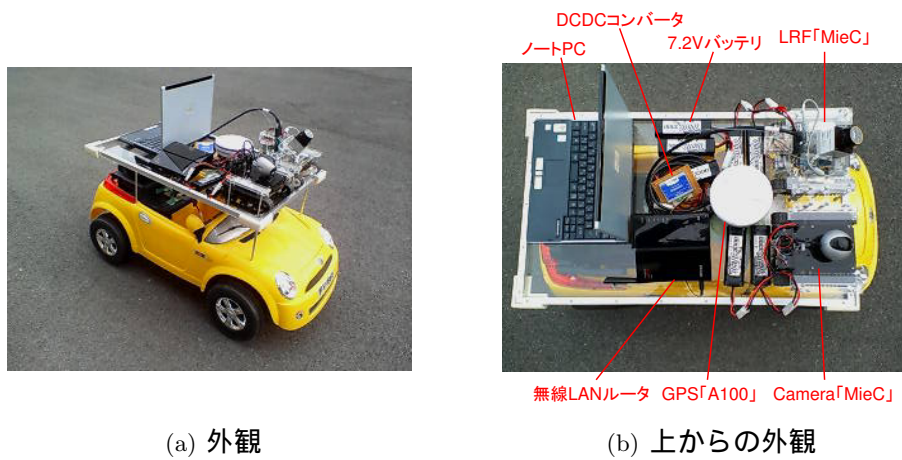


図 2.2: 走行時のロボット

2.2 ロボットのソフトウェア構成

2.2.1 ベースシステム

自律移動ロボットのシステムを開発する際、複数のセンサからの情報を取得し、それぞれ処理を施し、その情報を元にロボットを移動させるため、様々な処理を加えていく毎にシステムの複雑化が懸念される。そこで、本研究では、モジュール性を高めるために、各処理をエージェントとするマルチエージェントシステムとして設計する。今回は、図 2.3 に示すように、6つのエージェントによりシステムを構成した。*Camera*, *LRF*, *GPS* エージェントは、それぞれのセンサからの情報を取得し、処理する。*map* エージェントは、事前に与えた地図データを持ち、経路計画のための処理をする。*RC control* エージェントは、各エージェントからの出力を受け、最終的に RC を操作する。また、*Display* エージェントは、自律走行をさせる上で必要なエージェントではないが、処理の過程を視覚的に理解するため、各エージェントの処理状況を画面表示する。これらのエージェントが相互にデータを通信することにより、自律走行を実現させる。

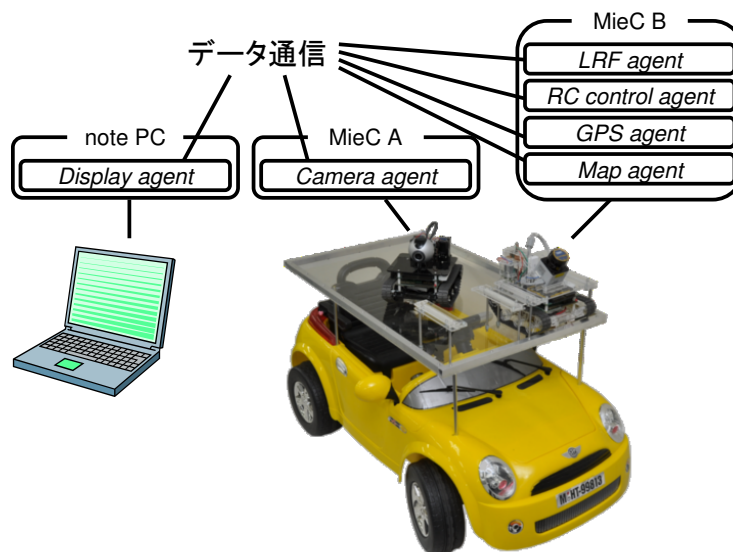


図 2.3: マルチエージェントシステム

2.2.2 RC の制御法

大型 RC は、図 2.4 に示す RC 電波出力回路からの出力波形において、W2 波形を 4 回繰り返した後の W1 波形の個数により、指令を判断する。「MieC」の FPGA 内に指令波形生成回路を作成し、その出力を RC 電波出力回路へ入力し、RC を操作する。操作できる指令の種類は、前輪のみの左右操舵、後輪のみの前後進、それら前輪と後輪の操作の同時操作、停止の 9 種類である。

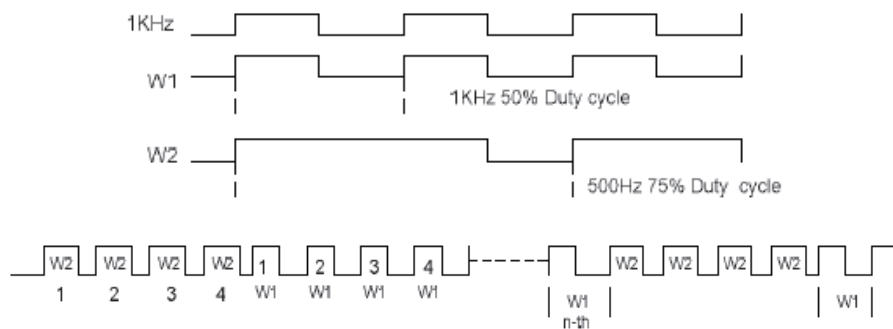


図 2.4: RC 制御用信号

第 3 章

自律移動プログラム

本研究では、実際に自律移動ロボットを走行させて環境の出現確率を調査するにあたり、以下に示す処理に基づく自律移動プログラムを作成した。確実な走行を目指しロボットの機能と環境を適宜変更していくため、最初の自律移動プログラムは可能な限り簡単なもので、走行を行う上で最低限必要であると考えられる処理により構成した。また、今回、カメラはログデータの場面把握のためのみに用い、自律移動プログラムにはカメラによる処理は含めていない。

3.1 経路計画

ロボットの経路計画には、一般的な Point-to-Point 制御を用いる。これは、目的地までの経路上に複数のサブゴールを設定し、サブゴールへの到達及び次のサブゴールを目標値に設定といった処理を繰り返すことで、意図した目的地までナビゲートする方法である。本研究では、図 3.1 に示すグラフ構造を持つ地図をロボットにあらかじめ与え、この制御を実行する。ロボットに開始点と目標点を指定することで、ロボットはサブゴール数が最小になるように経路を設定し、目標点に向けて走行する。

3.2 自己位置の認識

ロボットの自己位置の認識には、GPS を用いる。あらかじめナビゲーションのためのサブゴールの位置情報を地図として与えておき、ロボットは走行中の自身の位置と比較しながら目指すべきサブゴールへ移動する。

GPS によるナビゲーションでは、目標点周囲に定めた目標点許容範囲にロボットが侵入すると、そ



図 3.1: グラフ構造地図 (三重大学工学部)

の目標点へ到達したとみなし, 1 時刻前の位置と現在の位置から算出するロボットの進行方向と目標点への方向のなす角により操舵するか決定する (図 3.2(a)). また, 蛇行運転を防止するため, 以下の処理を追加した. 指令値に時間要素も含め, 微小角操舵及び指令間隔の設定をすることにより, 最大操舵角よりも小さな角度での操舵を可能とした. 過去数点分と現在の位置データをもとに, 最小二乗法によりロボットの移動軌跡を二次曲線へ近似することで, 旋回運動をより早く認識可能にした (図 3.2(b)).

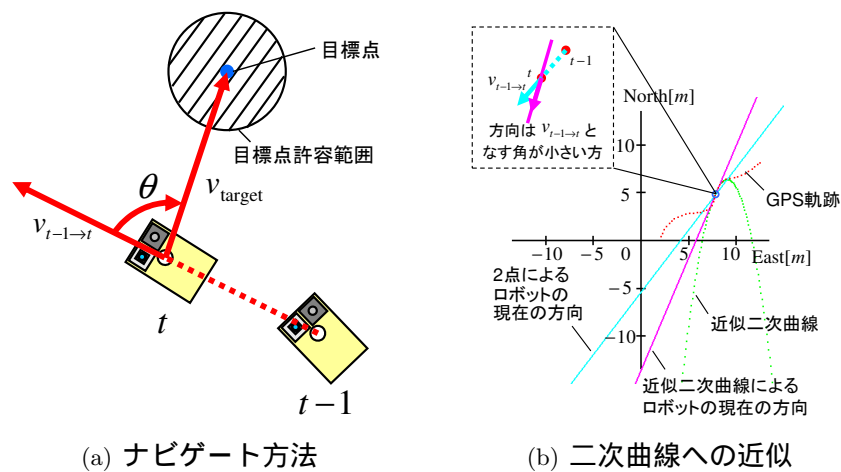


図 3.2: GPS によるナビゲーション

3.3 障害物回避

ロボットの障害物回避には、LRF（北陽電機製 URG-04LX）（図 3.3(a)）を用いる。LRF は、水平にレーザを走査し、その水平面内の前方 240° の方向の距離を取得できる 2D 距離センサである（図 3.3(b)）。今回は、LRF を斜め下に向け、「MieC」に搭載した。その状態において、実環境にて取得可能な LRF のデータ例を図 3.4 に示す。図 3.4(b) における $x-y$ 平面は、LRF の走査平面におけるもので、 x 軸正方向が LRF の右側、 y 軸正方向が LRF の正面となり、本論文では、LRF データのグラフに関して、座標軸をこの向きに統一する。LRF データを用いて、以下に示す 3 つの処理を導入し、簡単な障害物回避を実現した。

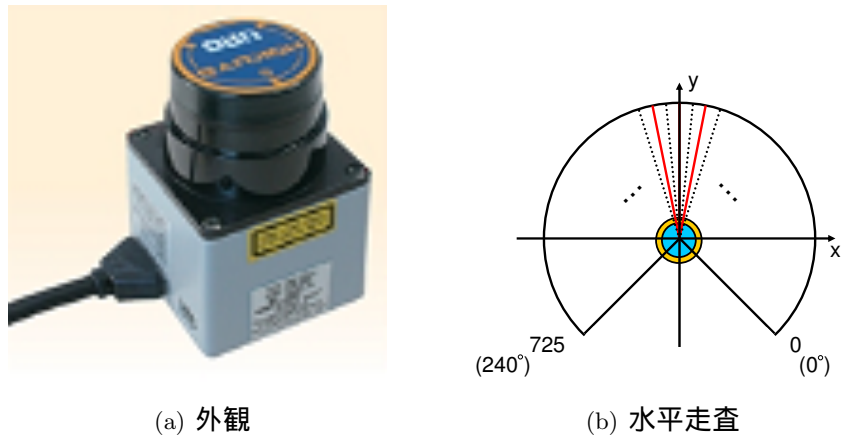


図 3.3: レーザレンジファインダ (LRF)

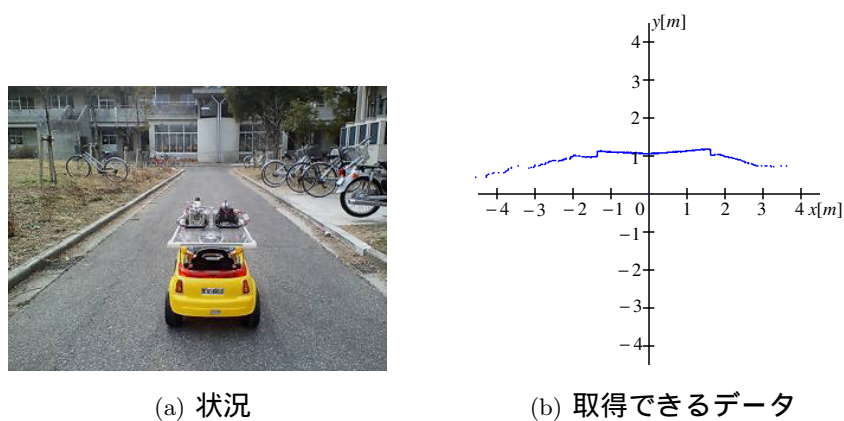


図 3.4: LRF データ例

3.3.1 エッジの回避

走行道路上に縁石や障害物が存在した場合、走査平面において y 方向の変化が急になる (図 3.5(a)). これを利用し、道路の左右の境界点を検出し、その x 座標値により回避する。また、境界点の検出には、[7] でも用いられている図 3.5(b), 図 3.5(c) に示す方法を用いる。中心から左右に検査し、対象点に対しその次の数点が 1 点も角度範囲内に存在しなかった場合に、対象点を境界点と認識する。

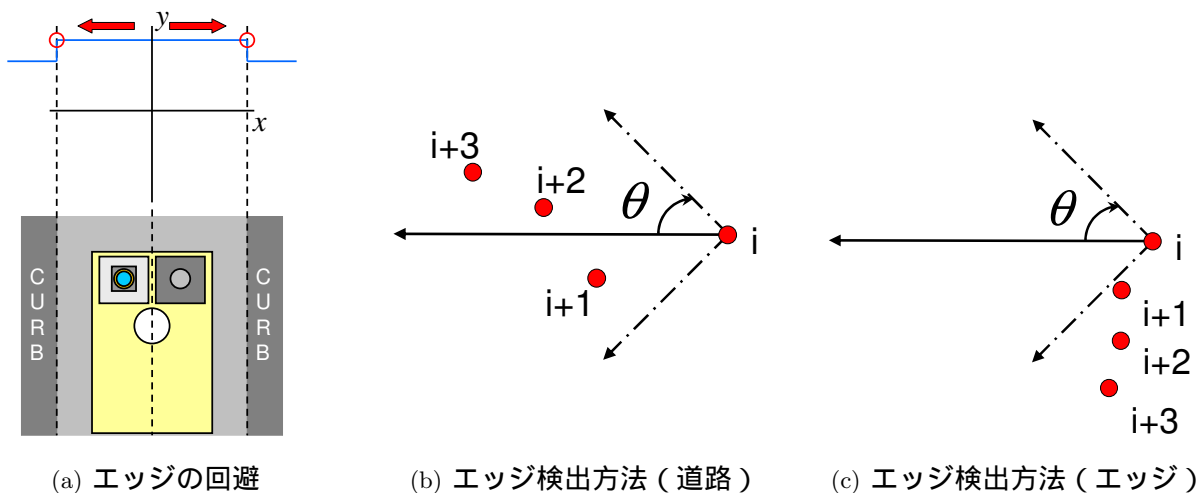


図 3.5: エッジの回避

3.3.2 危険領域の回避

y 座標が道路の LRF データと閾値以上異なる点を危険点とし、左右の危険点の個数に応じて、危険点の多い領域を回避する (図 3.6(a)). また、左右の危険点数の合計が閾値以上となった場合、移動不可能と判断して停止する。図 3.6(a) 中の A により、危険点の探索範囲が変更可能であり、今回 A は 35 cm とした。道路領域の検出では、 y 軸方向に一定の幅を持った領域を移動させ、領域内に含まれる LRF データの数が最も多い領域を道路領域とする (図 3.6(b)).

3.3.3 緊急停止

図 3.7 に示すロボットの前方のある範囲を緊急停止領域とし、この領域内に LRF データが検出された場合、回避不可能であると判断して停止する。図 3.7 中の A ~ D により、緊急停止領域が変更可能であり、今回は、A は 15 cm、B は 35 cm、C は 70 cm、D は 50 cm とした。

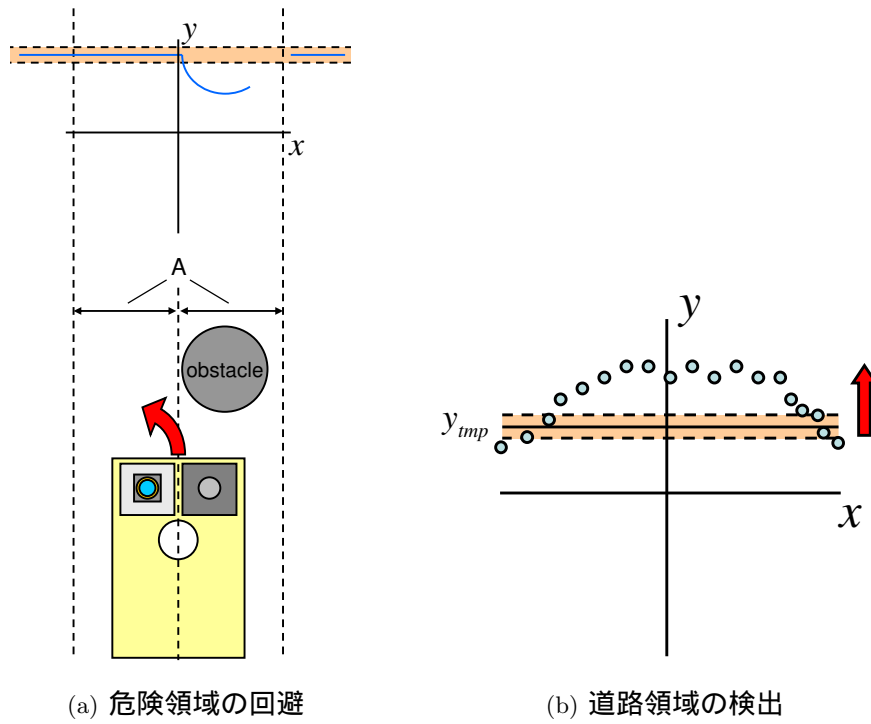


図 3.6: 危険領域の回避

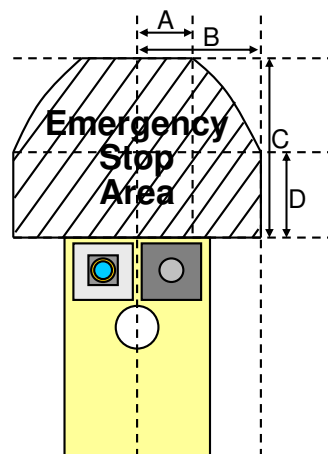


図 3.7: 緊急停止

3.4 自律移動プログラムのまとめ

作成した自律移動プログラムでは、地図から経路を生成し、GPS により自己位置を認識して LRF により障害物を回避しながら目的地までの走行を目指す。ただし、GPS による経路追従動作は、LRF による障害物回避動作が何も実行されない場合にのみ実行される。また、将来的な自由なセンサ配置を想定し、停止動作後に移動軌跡に応じる後退動作もするものとする。後退動作時、今回は人手で安全性を確保する。走行中の各処理の様子を表示している *Display* エージェントの様子を図 3.8 に示す。なお、図 3.8 の右に縦に並んでいる 5 つのウィンドウは、各サーバのターミナル画面であり、*Display* エージェントのものではない。

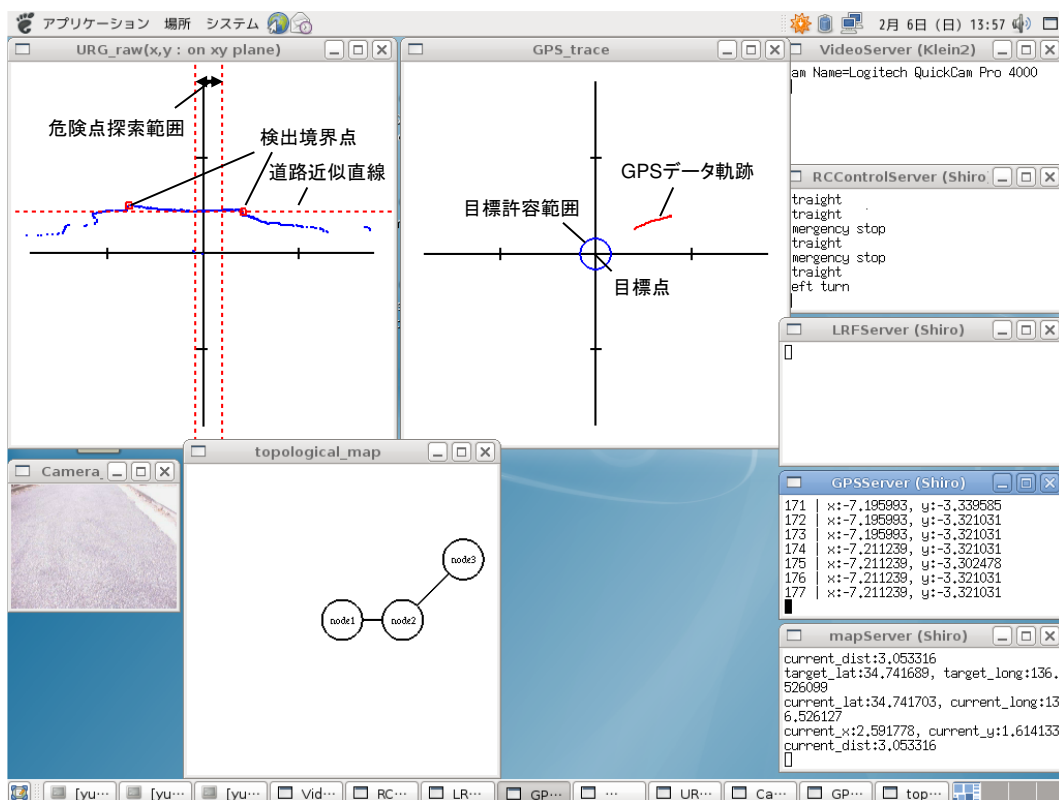


図 3.8: *Display* エージェント (自律移動時)

第 4 章

環境の機構面に関する調査

今回、自律移動ロボットの周囲環境を調査する場所として、三重大学工学部を対象とした。周囲環境による問題には、機構系によるものと認識系によるものに大別できる。機構系の問題とは、自律移動ロボットが段差などにより機構的にそもそも移動することができないことによる問題とする。用いる自律移動ロボットは、駆動部がラジコンであり簡単な走行機構をしているため、これが移動可能であれば一般の自律移動ロボットも移動可能である。

実施した機構系の問題の調査に関して述べる。実施内容としては、ロボットを手動で操作し三重大学工学部内を走行させ、機構的に走行が不可能な場所を調査した。その結果を図 4.1 に示す。調査結果より、ロボットが通れない領域も多数あったが、建物間の移動を考えた場合、支障が出ない程度であった。建物によっては、ドアに段差があり侵入できないものもあった。しかし、工学部内において、そのような建物は 1 つであったので、1ヶ所にだけ段差スロープを設置するなどの対策をすれば、三重大学工学部内の建物間の移動は機構系では問題がなくなると推測できる。

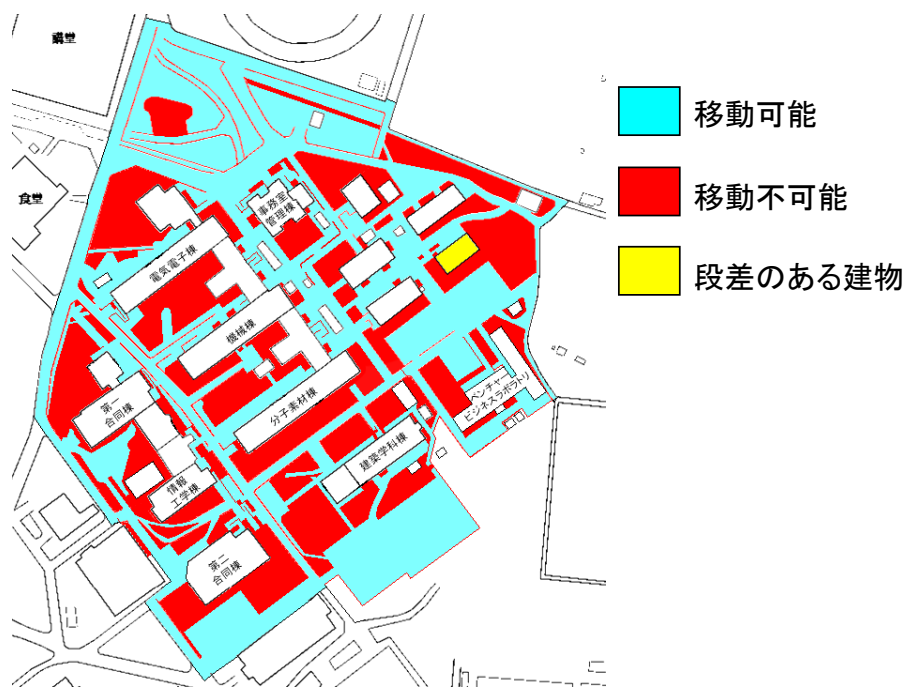


図 4.1: 機構面移動可能地図

第 5 章

環境の認識面に関する調査

本章では、自律移動ロボットの認識系の問題の調査に関して述べる。認識系の問題の調査では、実際にロボットを自律移動させ、発生した問題を整理する。

5.1 GPS の評価

5.1.1 GPS の精度調査

環境の認識面に関して調査するに先立ち、用いる GPS を評価する。本研究では、自律移動ロボットの大会などで多く用いられている GPS ユニットである Hemisphere 製の A100 (図 5.1(a)) を用いる。A100 は、衛星からの電波のみで位置を計測する一般的な単独測位モードと、位置が既知の基準局が発信する補正情報を利用し精度を高めた位置を計測する DGPS モードにより計測することが可能である。通常 DGPS モードで受信を試み、不可能な場合に単独測位モードに自動的に切り替わる。GPS をナビゲーションのために用いる際、位置情報の精度が重要であるため、事前に A100 の精度実験を実施した。また、同時に A100 の優位性を確認するため、他の GPS ユニットと精度を比較した。比較した Globalsat 製の ND-100 (図 5.1(b)) と CANMORE ELECTRONICS 製の GT-730F/L (図 5.1(c)) は、市販されている GPS ユニットであり、A100 が 20 万円程度であるのに対し、4,000 円程度と低価格である。また、これら 3 つの GPS ユニットは、全て NMEA-0183 フォーマットにてデータを出力する。

実験では、三重大学機械工学棟の屋上にて各 GPS ユニートを固定し、1 分毎に 300 回の測位データを記録した。また、A100 に関しては、屋上にて位置を変更し、単独測位モードと DGPS モードの双方を測定した。その結果を図 5.2 及び表 5.1 に示す。なお、図は x 軸正方向が東、 y 軸正方向が北



図 5.1: GPS デバイスの外観

であり、本論文では、GPS データのグラフに関して、座標軸をこの向きに統一する。結果より、市販されている GPS ユニットでは、自律移動ロボットのナビゲーションのための十分な精度が得られなかった。一方、A100 では、DGPS モードの場合、80 cm 以内の誤差しか生じないため、2 m 程度の狭い道路の中心で測定した場合でもほぼ全ての計測点が道路上をとらえることができ、ナビゲーションのための十分な精度が得られた。また、単独測位の場合でも、3 m よりも少し大きい幅の道路の中心で測定した際はほぼ全ての計測点が道路上を捉えることができるため、走行させる道路によるが、ナビゲーションのための十分な精度が得られた。

表 5.1: 静止測位実験結果

	A100(DGPS)	A100	ND-100	GT-730F/L
平均 E [m]	0.263	0.569	2.610	1.692
標準偏差 σ [m]	0.149	0.354	1.874	1.074
$E + 3\sigma$ [m]	0.710	1.631	8.232	4.914
最大誤差 [m]	0.727	1.940	11.927	6.155

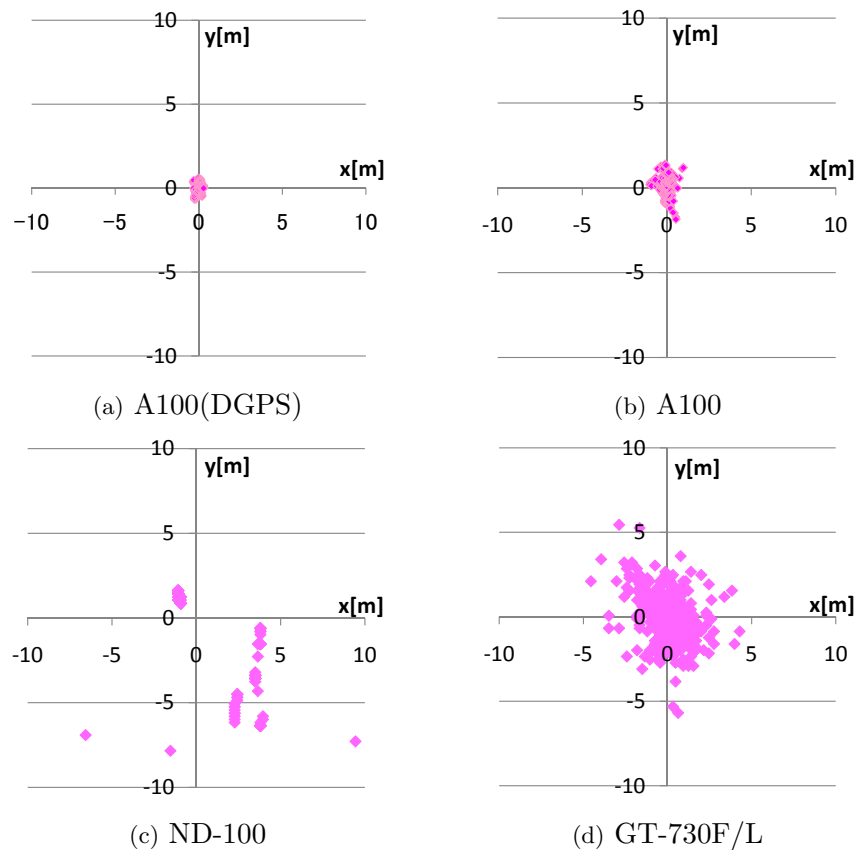


図 5.2: 静止測位実験結果

5.1.2 DGPS 受信可能エリアの調査

GPS の精度評価実験の結果から、用いる GPS ユニット A100 は、DGPS 測位にてナビゲーションのための十分な精度があった。そこで、次に、三重大学工学部において DGPS 測位が利用可能である範囲を調査した。実施内容としては、GPS ユニット A100 を手で持ち、機構面に関する調査結果の移動可能領域を歩き、DGPS 測位が可能である場所を調査した。結果を図 5.3 に示す。結果として、ほとんどの場所において DGPS 測位が利用可能であった。測定不可能であった原因は、上方が木・屋根で覆われている、狭い場所で左右に大きな建物がある等が原因であった。

5.2 長経路走行実験

ロボットを自律移動させる経路として、機械工学棟と事務室管理棟を往復することを想定し、図 5.4 に示す経路を設定した。経路を 4 回ロボットに自律移動させ、復帰が不可能となった場合には手

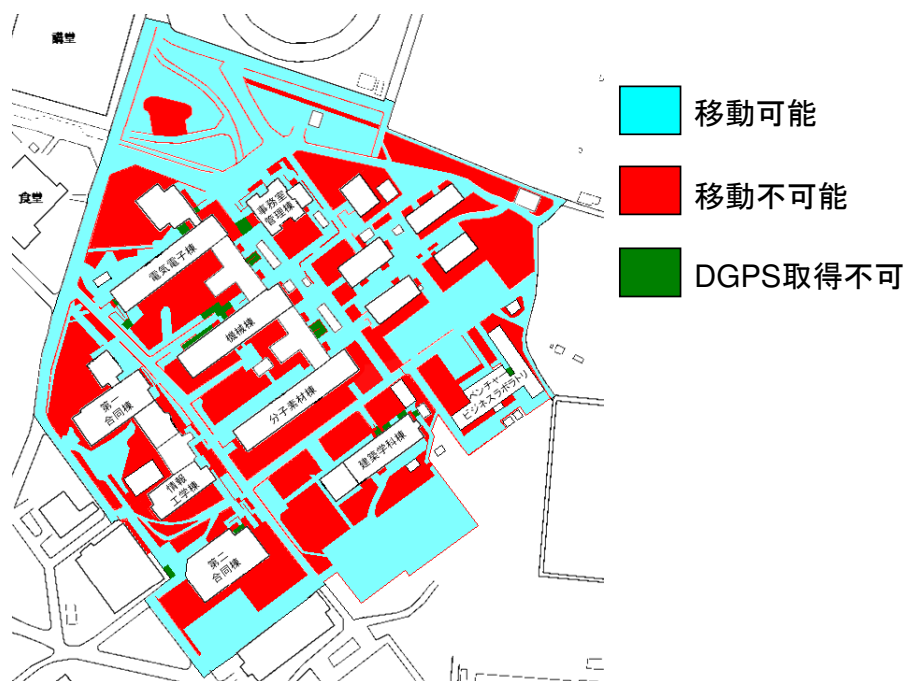


図 5.3: DGPS 使用不可能領域

を加え、手を加えた場所を記録した。走行させた際の GPS の軌跡を図 5.5 に、各試行回中で手を加えた場所の数を表 5.2 に、各場所で手を加えた回数が試行回数 4 回中何回発生したかを図 5.6 に示す。結果より、完全な自律走行のみで完走することは一度もできなかった。しかし、数回手を加えるだけで完走できたため、実環境でロボットを走行させるために、単純なプログラムでも十分に走行が可能であると推測できる。復帰不可能になった原因を解析した結果、環境による問題としては、GPS データが受信不能になる、経路外の段差スロープへ乗り上げてしまうといった問題が発生した。GPS データが受信不能になる問題は、今回の経路上で常に発生したのは事務室管理棟の前のみなので、そこに進行方向のわかるマーカを設置するなどの対策が考えられる。経路外の段差スロープへ乗り上げてしまう問題は、今回の経路中隣接していた段差スロープは 2ヶ所だけであり、今後、建物間の移動の際には通らなければならないものもあるため、段差スロープ自身の認識が容易となるマーカを付加するなどの対策が考えられる。復帰不可能になった原因で、環境以外による問題としては、蛇行運転の発散やエッジ方向への前進が発生する場合があった。これらは、自律移動プログラムのアルゴリズムに問題があると考えられるため、次にスタート近くの比較的失敗の多かった経路にて走行実験を実施し、問題を解明する。

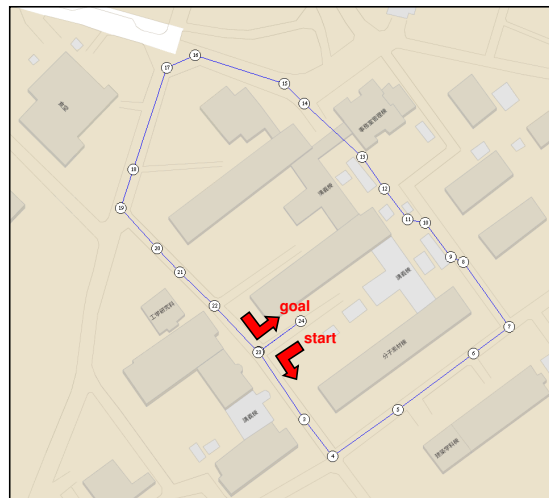


図 5.4: 長経路走行実験

表 5.2: 長経路走行実験結果 (試行回毎の復帰不可回数)

試行回	復帰不可回数
1	6
2	3
3	7
4	4

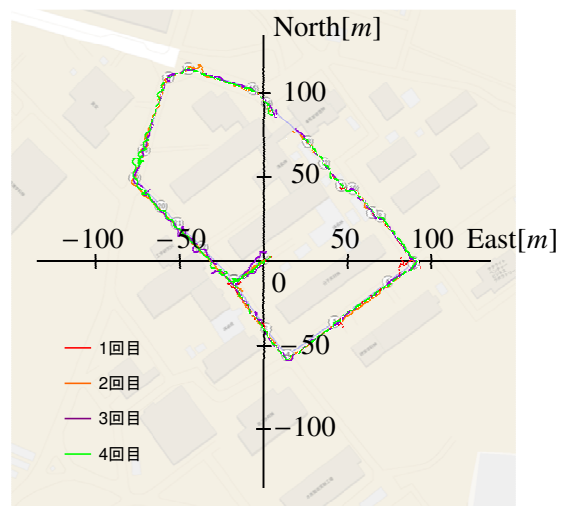


図 5.5: 長経路走行実験結果 (GPS の軌跡)



図 5.6: 長経路走行実験結果 (場所毎の復帰不可回数)

5.3 短経路走行実験

5.3.1 実験

アルゴリズムの問題を解明するための経路として、図 5.7 に示す経路を設定した。経路を 10 回ロボットに自律移動させ、復帰不可能となった場合、その試行回を失敗とし、その場で終了した。走行させた際の GPS の軌跡を図 5.8 に、完走回数の結果をを表 5.3 に示す。結果より、10 回中 8 回完走することができ、頻繁に復帰不可能にはならなかった。2 回の試行回の失敗原因となったアルゴリズムの問題の解析を次に示す。

表 5.3: 短経路走行実験結果 (完走回数)

試行回数	完走回数
10	8

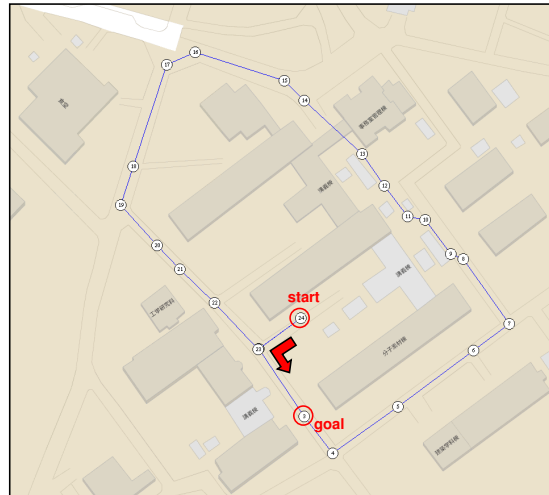


図 5.7: 短経路走行実験

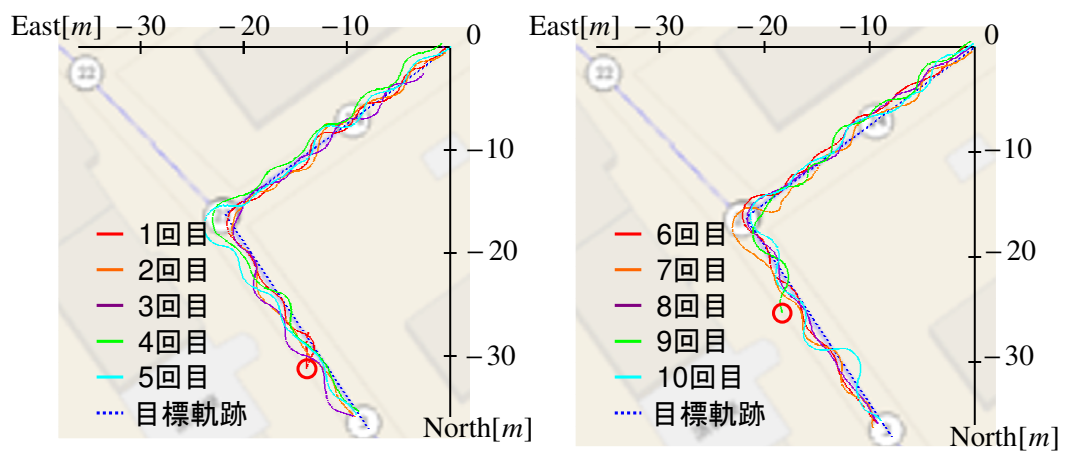


図 5.8: 短経路走行実験結果 (GPS の軌跡)

5.3.2 アルゴリズムの問題

短経路走行実験の結果から得られたアルゴリズムの問題を図 5.9 に示す．ロボットの軌跡を二次曲線に近似する際、近似曲線が急で頂点が点間に存在する場合に、目標点から離れていくのに近づいていると誤認識してしまう問題が発生していた．これは、近似方法に誤りがあった問題であり、対策としては、急な曲線の場合には二次曲線近似を採用せず 1 時刻前の点からのベクトルを使用する、 x 軸方向に頂点をもつ二次曲線も考慮する、ロボットの進行方向を y 軸とする座標系にて近似する、カルマンフィルタを使用するなどが考えられる．また、短経路走行実験時、GPS データの取得毎に二次曲線へ近似しているが、それでも 10 回中 8 回完走できたため、この問題は稀に発生する問題であった．

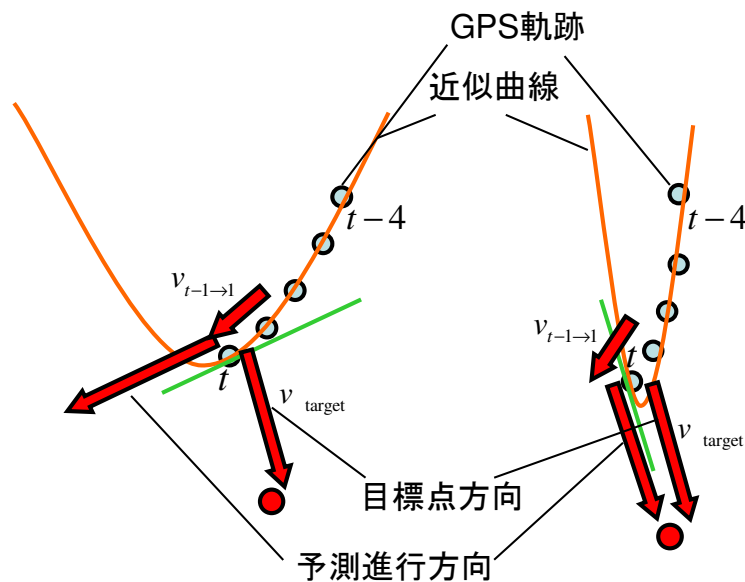


図 5.9: アルゴリズムの問題

第6章

むすび

6.1 達成した課題

自律移動ロボットの実用化に向けて、環境の出現確率に焦点を当て、環境とロボットの機能の双方をシステムとして捉えた自律移動ロボットシステムの開発を提案した。環境の出現確率の調査及びシステム変更の評価実験をするため、実際に走行させるロボット及びそのベースシステムを作成した。簡単な自律移動プログラムを作成し、実環境にて走行させ、走行上の問題を調査した。

6.2 今後の課題

ほとんどの建物間の移動には、スロープや段差スロープを通行する必要があったので、スロープ走行を実現するための自律移動プログラムを構築する。調査対象の環境を増やし、さらなる環境の出現確率の調査及び問題の整理を進める。調査した結果をもとに、ロボットの機能あるいは周囲環境に変更を加えることで確実な走行を実現し、その変更を評価する。最終的には、ロボットが確実に移動するための最低限の環境操作を見つけ出し、将来ロボットが活動する場所における有効な環境操作を提案する。

謝辞

本研究の遂行および修士論文の執筆にあたり，野外自律移動ロボットの研究のきっかけを与えて頂いた，三重大学工学部電気電子工学科電子設計システム研究室の篠木剛元教授，研究を引き継いで頂き日頃多くのご指導とご助言を賜りました，三重大学工学部機械工学科メカトロニクス研究室の松井博和助教に謹んで感謝の意を表します．また，日頃お世話になりました，三重大学電気電子工学科情報処理研究室の鶴岡信治教授，高瀬治彦准教授，川中普晴助教に深く感謝いたします．さらに，共に研究に携わりご助言を賜りました，情報処理研究室の柴田信雄氏，佐野裕基氏，メカトロニクス研究室の森敦紀氏，早川朋志氏，及び，両研究室の大学院生，卒業研究生の皆様に深く感謝いたします．

参考文献

- [1] NEDO 技術開発機構 情報・システム部：“DARPA アーバン・チャレンジ決勝結果”，NEDO 海外レポート，No.1012，2007
- [2] 油田信一，水川真，橋本秀紀：“つくばチャレンジのねらいと成果”，計測自動制御学会誌，Vol.49，No.9，2010
- [3] 村井亮介，酒井龍雄，上松弘幸，中嶋久人，三谷宏一，北野斉：“自律移動ロボット群による搬送システムの実用化”，日本ロボット学会誌，vol.28，No.3，pp.311-318，2010.
- [4] 関淳也，青山元，石川和良，石村左緒里，和田迫鉄矢，足立佳儀，薩見雄一，横田和隆，尾崎功一，山本純雄：“視覚によるライン・トレースと磁気タグの併用による走行制御を用いた搬送ロボットの開発”，日本ロボット学会誌，vol.27，No.8，pp.833-841，2009.
- [5] 村上剛司，長谷川勉，木室義彦，千田陽介，家永貴史，有田大作，倉爪亮：“情報構造化環境における情報管理の一手法”，日本ロボット学会誌，vol.26，No.2，pp.192-199，2008.
- [6] 木室義彦，荒屋亮，有田大作，家永貴史，村上剛司，楊智梅：“ロボット地理空間情報システム R-GIS”，日本ロボット学会誌，vol.27，No.8，pp.868-876，2009.
- [7] 松下純輝，三浦純：“距離データと画像データの時系列統合による道路境界推定と走行制御”，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007 予稿集，2A2-E09，2007.

発表論文

(1) 加藤雄一，松井博和，篠木剛：“環境を含む自律移動ロボットナビゲーションシステムの開発”，
平成 22 年度電気関係学会東海支部連合大会，中部大学，2010.8.30