

GPSを利用した自律移動ロボットの
屋外ナビゲーションのための
測位手法に関する研究

2004年3月

大野和則

概要

著者は Global Positioning System (GPS) を用いた自律移動ロボットの屋外ナビゲーションのための測位手法の開発を行った。本論文では最初に、**1. GPS とオドメトリ**を用いたナビゲーションのための測位手法を提案し、提案手法を実際の移動ロボットに実装し屋外環境でナビゲーション実験を行い、提案手法の有効性を示す。この測位手法を開発する際の技術的な課題は、測位誤差を含む GPS 測位値から誤差の小さな測位値を選び出し、かつ GPS 測位値の誤差を考慮して位置修正に使用することである。著者はこの問題を、**a. オドメトリを基準に GPS の測位誤差を判定し、弁別された GPS 測位値とオドメトリを拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて融合する手法を開発することで解決した。**この提案手法は実験の結果、非常に性質の良い処理であることが確認できたが、高い建物や樹木の付近で測位の精度が低くなるという問題が判明した。

次にその欠点を補うため **2. GPS とレーザー距離計 (Laser Range Finder (LRF))** とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法を提案し、提案手法を実際の移動ロボットに実装し屋外環境でナビゲーション実験を行い、提案手法の有効性を示す。この測位手法を開発する際の技術的な課題は、広大な屋外環境に存在する建物付近のランドマークの地図を正確に簡単に作成することである。著者はこの問題を **b. GPS と LRF とオドメトリを用いて屋外の三次元形状を復元し、その復元形状の中で人手によりランドマーク位置姿勢を指定する手法を開発することで解決した。**

本研究の成果は上述の **1., 2.** の二つのナビゲーションのための測位手法を提案し実現したことである。また、著者が屋外ナビゲーションのための測位手法を構築するにあたり開発した技術的な成果は上述の二点 **a., b.** である。本論文では、これらの要素技術の開発とそれにより実現された自律移動ロボットの屋外ナビゲーションのための測位手法について述べる。

背景と研究目的

本研究では屋外の環境を対象に、自律移動ロボットのナビゲーションのための測位手法の開発を行った。ナビゲーションを行う環境として、自転車、人、車椅子が通りやすいように路面が舗装され、階段や段差は存在せず、道幅は人が往来できる程度あり、路面上には人の往来を妨げる障害は存在しない歩道を対象とした。このような歩道は、郊外にある整備された、町、公園、テーマパーク、大学、工場などの比較的広い敷地面積を持った環境に存在する。本研究では、このような歩道環境を想定してナビゲーションのための測位手法を構築する。また、構築した手法を実際の移動ロボットに実装し、筑波大学構内の歩道環境で提案手法の有効性を評価した。

著者は、対象とする歩道環境でナビゲーションを実現するために、地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いる。この手法は、ロボットが行動する環境の地図をあらかじめ持ち、ロボットはその地図に記載されたランドマークを外界センサを用いて観察することで地図上の自分の位置を正確に把握し、ナビゲーションを実現する方法である。この手法を用いてロボットの位置を把握する場合、位置確認に使用可能なランドマークの情報をあらかじめ地図に記載し、その地図をロボットに持たせる必要がある。しかし、屋内環境に比べて広大な屋外環境では、このような地図位置ベース型ナビゲーション手法を用いた場合、次の二つの問題が障害となり、走行中のロボット位置を把握することが難しかった。

問題 a. 広大な屋外環境では詳細なランドマーク地図の作成には多大な労力を要すること

問題 b. 広大な屋外環境では自己位置の確認に使えるランドマークが存在せず自己位置の確認が困難な場合があること

著者はこれらの問題を Global Positioning System (GPS) を用いることで解決し、自律移動ロボットによる広大な屋外環境のナビゲーションのための測位手法の開発を目指した。

GPS は受信機の外部に存在する GPS 衛星からの電波を用いて地球上の正確な位置を計測可能なセンサである。GPS から得られる測位値をロボットの位置確認に

使用した場合、従来の手法で位置確認に必要なランドマークの観察を行うことなくロボット位置が計測できる。また、ある地点の測位を行う際も、GPS から得られる地球上の正確な位置を用いることで相対的な測位を積み重ねることなく測位が行える。これにより、地図作成にかかるコストを減らせる。また、ランドマークの存在しない環境は逆を言えば周囲に GPS 衛星からの電波を遮る障害物が存在せず、GPS の測位に適している。よって、GPS を用いることで、問題 a. と問題 b. が解決できると考えた。

GPS の測位性能の調査とナビゲーションへの利用方法の検討

本章では二種類の GPS (Global Positioning System) 装置、すなわち Differential GPS (DGPS) および Real Time Kinematics GPS (RTK-GPS) について行った測位性能の調査の結果とナビゲーションのための測位手法への利用方法を検討する。GPS は受信機が静止した状態での測位 (静止測位) と、受信機が移動している状態での測位 (移動測位) では、測位を行える場合と行えない場合があり、かつ測位の精度が異なる。

著者はまず各 GPS 受信機を用いて静止測位の精度と再現性について調べた。RTK-GPS の静止測位時の測位精度を調査するため、地面の上に一辺の長さが既知の三角形を描き、各頂点で静止測位を行った。各測位値間の距離を RTK-GPS から得られた値を用いて計算し、巻き尺で計測した真の距離と比較することで精度を評価した。また、同じ場所に RTK-GPS 受信機を設置し、異なる日、異なる時間に計測した値を比較することで再現性を評価した。この結果、静止測位で RTK 品質で得られた測位値は、精度、再現性ともによいことが分かった。DGPS でも同様の実験を行い、精度と再現性について調べた。その結果、精度、再現性ともに RTK-GPS に比べ悪いことが分かった。

次に、各 GPS 受信機を用いて移動測位の際に、測位を行うことが可能か調べた。その結果、RTK-GPS では、受信機が移動することで建物や樹木の付近で頻繁にサイクルスリップという現象が起こり、その都度初期化が始まり、実験を行った環境の約 30[%] の環境でしか Fix 品質での測位が行えなかった。DGPS では、実験を

行った約 95[%] の環境で Differential 品質で測位を行うことができた。DGPS は測位原理上サイクルスリップが起こることはなく、RTK-GPS に比べ測位誤差は大きい、実時間で変化する位置を記録することが可能であることが分かった。

この結果、測位精度は悪いが、必要な数の衛星が確保できれば移動体の位置を実時間で計測可能であるという理由で、DGPS は実時間に位置が変化する移動体の測位に向いていることが分かった。また、DGPS を移動体の測位に使用する場合は測位誤差の小さな測位値だけを選び出し使用する必要があることも分かった。さらに、静止時の測位精度と再現性は非常に高いという理由で、RTK-GPS は時間がかかっても正確な計測が要求される地図作成に向いていることが分かった。

GPS とオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発

本章では、GPS とオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法を提案する。走行可能な経路だけの情報をロボットにあらかじめ与える。ロボットはオドメトリを用いて走行中の自己位置を推定し、与えられた経路にそって走行制御を行う。しかし、オドメトリには累積誤差がある。この累積誤差を GPS を用いて修正することでナビゲーションを実現する。本研究では性質の異なる二種類の GPS 受信機を用途に合わせて使い分け、ナビゲーションを組み立てる。提案手法の技術的な成果は、RTK-GPS を用いて走行経路の情報だけを計測することで広大な屋外環境の地図を簡単にかつ正確に作成する点と、電波の多重反射 (マルチパス) などの影響で生じた測位誤差を含む DGPS 測位値を使ってロボットの走行中の位置を正確に把握する点である。

RTK-GPS を用いた経路地図作成

従来の地図位置ベース型の位置修正方法では、地図にロボットが走行可能な経路と、位置修正に使用する経路周辺のランドマークの情報を記載する必要があり、地図作成の労力が大きかった。著者はロボットの位置の計測に GPS 受信機から得られる測位値を用いることで、経路だけを地図に記載することを提案する。具体

的には、経路を通過点のリストで表現し、各通過点の絶対位置を GPS で計測し記録する。この際、経路周辺のランドマークの情報をいっさい地図に記入しないことで地図作りの労力を軽減する。各通過点の測位精度は、ロボットの走行の基準となるため、高精度である必要がある。この経路の各通過点の測定に測位精度が数センチメートルといわれる RTK-GPS を用いることで正確な経路の地図を作成する。GPS は電波を用いて位置を計測するため、高い建物付近では誤差の大きな測位値が得られる場合がある。提案手法では、巻き尺で計測した隣接する通過点間の距離と、RTK-GPS で計測した値から計算した隣接する通過点間の距離を比較することで、GPS の各測位値の測位誤差の判定を行った。本手法では、測位誤差の小さい RTK-GPS 測位値だけを用いてロボットの経路地図を作成した。

DGPS を用いた自己位置修正

本研究で用いる車輪型の移動ロボットは、オドメトリの情報を用いて走行中の地図上の位置を推定する。しかし、オドメトリには累積誤差があるため推定誤差が生じる。著者はこの誤差の修正に移動しながらでも即座にその位置を計測可能な DGPS を用いる。しかし、DGPS は RTK-GPS に比べ測位誤差が大きい。さらに、建物や高い樹木の近くでは測位誤差が非常に大きな測位値が得られる。よってオドメトリの累積誤差を修正する場合には、測位誤差の小さい信頼できる DGPS 測位値だけを選びだし、かつ DGPS の測位誤差を考慮してロボット位置の修正を行う必要がある。著者は、オドメトリを基準に DGPS 測位値の信頼性を判断する手法を開発した。また本研究では、DGPS 受信機から出力される位置の値と進行方向の値は、受信機内部での測位原理がそれぞれ異なるため、無相関であると仮定した。本提案手法では、DGPS 測位値の信頼性の判定を位置と進行方向に関して独立に行う。弁別の結果、測位誤差が小さいと判断された DGPS 測位値とオドメトリから得られるロボットの推定位置を拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて融合し、ロボットの実際の自己位置を計算した。

実験による有効性と問題点の検証

提案する屋外ナビゲーションのための測位手法を実機に実装し、対象とする歩道環境で測位実験を行った。実機としては、著者らの研究室で開発された車輪型の移動ロボット山彦「YM2000」を用いた。実験の際は、ナビゲーションの対象環境をいくつかの区間に区切り、提案する手法を用いて各区間でナビゲーションが可能か調査した。その結果、全体の約 80[%] の環境で提案する手法を用いてナビゲーションが可能であることがわかった。これらの実験でナビゲーションができた場合は、提案手法を用いることで誤差の大きい GPS の測位値を取り除き、測位誤差の小さい DGPS 測位値だけを選びだし、オドメトリの累積誤差を修正することで正確なロボット位置を計測した。しかし、ナビゲーションができなかった場合は、測位誤差の大きい DGPS 測位値しか得られず、提案手法を用いて誤差を判断した結果、測位誤差が大きな DGPS 測位値と判断され、ロボット位置を修正することができなかった。その結果、歩道の幅から逸脱し走行を続けることが出来なかった。また、DGPS の測位誤差が徐々に大きくなり、その測位誤差をオドメトリを基準に正確に判断することができず、測位誤差のある DGPS 測位値を用いて位置を修正した結果ナビゲーションを行うことができなかった場合もあった。このような状況は、歩道が高い建物や樹木に囲まれている場合や、それらに非常に接近した場合に頻繁に起こった。今後の課題は、このような測位誤差の大きい測位値が連続して得られる可能性がある高い建物や樹木に囲まれた歩道環境で、ロボットの自己位置を正確に修正する手法を考案することである。

LRF と GPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法

前述した GPS とオドメトリを用いた測位手法は高い建物や樹木に囲まれた歩道環境でのナビゲーションの成功率が低かった。そこで、著者はこのような環境では、周囲に存在する建物や樹木の情報を積極的に使用することでナビゲーションの成功率を上げることを提案する。本章ではとくに、建物付近の歩道環境でのナビゲーションの成功率を上げることを目的として、レーザー距離計 (LRF) を用

いて周囲の建造物の壁面を検出し、ロボット位置を修正する方法を提案する。提案手法の技術的成果は、広大な屋外の環境中に存在する壁などのランドマークの位置・姿勢の情報を簡単にかつ正確に地図に書き込む手法を開発したことと、LRFを用いてロボット前方を三次元的に走査しランドマークとなる壁を高速にかつ安定して検出する手法を開発したことである。

ランドマーク地図作成

広大な屋外環境では、巻き尺等を用いてランドマークとなる壁や段差の位置・姿勢を正確に計測し、地図に記述することは非常に大変な作業であり、一度作成した地図の修正・地図の範囲拡大を行うことは非常に困難である。本手法ではランドマーク地図の作成を半自動で行うことで地図作成の労力を軽減する。具体的には、LRFとGPSとオドメトリを併用して歩道環境の三次元の形状を復元し、復元した三次元形状データを表示したGUI上で壁や段差などのランドマーク位置を人手により指定する方法を提案する。こうすることで壁や段差などの正確な位置・姿勢を個別に計測する手間を省き、容易にかつ正確に地図に書き込むことを実現する。本論文では歩道環境の三次元形状の復元はRTK-GPSとオドメトリのデータを拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて融合・補完することで行う。

LRFを用いたランドマーク検出とロボット位置の修正

著者は、LRFで容易に検出可能な建物の壁と、路肩に存在する段差（下に凹んだ段差、上に凸な段差）をランドマークとして選定した。本研究では、これらの異なる高さに存在するランドマークを発見するためにLRFをロボットの前方斜め下向きに取り付け、ロボットの移動によってロボット前方の空間を三次元的に計測した。本研究で使用するロボットは短距離の移動の場合は、オドメトリを用いることで非常に正確に移動量を計測することができる。LRFでロボットの移動に伴い得られた距離データをオドメトリをベースにつなぐことで、ロボット前方の三次元空間の形状を復元する。復元されたロボット前方の三次元形状から、各ランドマークのロボットからの相対的な三次元位置と姿勢を検出する。検出したランドマークと地図上のランドマーク位置を比較することで、ロボットの推定位置

と実際の位置のずれを検出し、修正する。

実験による有効性の検証

提案する LRF と GPS とオドメトリを用いた測位手法を実際のロボットに実装しナビゲーションを実現した。実験結果から、提案手法を用いて作成したランドマーク地図がロボットの位置修正に使用できることが確認できた。またこれまで成功率の低かった建物付近の歩道環境で安定してナビゲーションが実現できるようになったことが示された。

LRF と GPS を併用したナビゲーションのための測位手法

著者はこれまで提案した、「GPS とオドメトリを用いたナビゲーションのための測位手法」と「LRF と GPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法」は相補的な関係にあると考え、この二つの手法を併用することで、開けた環境でも建物付近の歩道環境でも安定してナビゲーション中のロボット位置を把握できるようになると考える。本章では「LRF と GPS を併用したナビゲーションのための測位手法」を実現することを目指し、二つの測位手法を併用する際に必要な、位置修正を行うタイミングの時間管理について述べる。

結論

本研究では広大な屋外環境でナビゲーションを行うための手法として、地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いた。広大な屋外環境で地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いる場合、**a.** 広大な屋外環境に存在するランドマークの正確な地図を作成するには大変な労力を要すること、**b.** ランドマークの存在しない環境ではロボット位置の確認が行えないことが以前から問題視されてきた。

本研究の特徴は GPS を活用しこれらの問題を解決したことであり、成果は次の二つである。

1. GPS とオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法を提案し、

実環境中でナビゲーション実験を行い、その有効性と限界を示したことである。

この結果、GPSを利用することで、ランドマークを用いることなくロボット位置の修正が可能であることが示された。

2. 上述のGPSとオドメトの問題点を取り除くためLRFとGPSとオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法を提案し、実環境中でナビゲーション実験を行い、その有効性を示したことである。

この結果、GPSの測位誤差が大きくなる建物付近の環境では、LRFを用いて壁を検出しロボット位置を修正することが効果的であることが示された。また、このLRFで観測可能なランドマークの地図の作成にGPSを用いることで正確なランドマークの地図を容易にかつ正確に作成できた。

これらの研究成果を生み出す過程で開発した技術成果としては、a. 測位誤差の小さい信頼できるGPS測位値の選出方法の開発と、b. 正確にかつ容易にランドマーク地図を作成する手法の開発がある。これらの技術的な成果は、広大な屋外環境を移動するロボットの研究において欠くことのできない技術である。

目次

第1章	はじめに	1
1.1	背景と目的	1
1.2	ナビゲーションの概要と問題点への対処	5
1.3	対象とする移動ロボットと環境	9
1.4	従来の屋外ナビゲーションに関する研究	10
第2章	GPSの測位性能の調査とナビゲーションへの利用方法の検討	14
2.1	DGPSとRTK-GPSの測位方法の概要	14
2.2	NMEA形式の出力データからのGPS測位値と測位状態の抽出	16
2.3	RTK-GPSの測位性能調査	18
2.3.1	静止測位	19
2.3.2	移動測位	19
2.3.3	調査結果	21
2.4	DGPSの測位性能調査	22
2.4.1	静止測位	23
2.4.2	移動測位	24
2.4.3	測位状態を用いた測位誤差の判定	26
2.4.4	調査結果	28
2.5	考察	28
第3章	GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発	32
3.1	ナビゲーション手法の概要	32
3.2	RTK-GPSを用いた経路地図作成	36
3.3	自己位置推定と走行制御	39

3.4	DGPS 測位値の選別とロボット位置の修正	41
3.5	実機実験による提案手法の有効性の確認と問題点の検証	44
3.5.1	実験システムのセットアップ	44
3.5.2	提案手法を用いた屋外環境での測位と測位精度の検証	46
3.5.3	提案手法を用いた自律走行実験	48
3.6	まとめ	51
第4章	LRF と GPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法	58
4.1	LRF と GPS とオドメトリを用いた測位手法の概要	58
4.2	レーザー距離計 (LRF)	62
4.3	ランドマーク地図作成	62
4.3.1	ランドマーク地図作成の概要	62
4.3.2	ロボットの位置姿勢導出	64
4.3.3	ロボットの位置姿勢導出の拡張	68
4.3.4	ロボット位置の導出精度の検証	69
4.3.5	屋外環境での形状復元	70
4.3.6	GUIを用いたランドマークの指定とランドマーク地図の作成	72
4.4	LRFを用いたランドマーク検出とロボット位置の修正	73
4.4.1	ランドマーク検出	73
4.4.2	LRFで検出したランドマークの対応付けとロボット位置の修正	76
4.5	実験による有効性の検討	78
4.5.1	実験システムのセットアップ	78
4.5.2	提案する LRF を用いた測位手法の精度検証	79
4.5.3	提案する LRF を用いた測位手法を用いたナビゲーション実験	80
4.6	まとめ	81
第5章	LRF と GPS を併用したナビゲーションのための測位手法	90
5.1	ナビゲーションの概要	90
5.2	複数センサを用いた位置修正のための時間調整	92
5.3	まとめ	93

	xii
第 6 章 結論	94
6.1 本研究の成果	94
6.2 残された課題	96
6.3 まとめ	97
付 録 A 慣性等価楕円のあてはめ	110

目次

1.1	Pictures of some target walkway environments	2
1.2	Plan of walkways in the University of Tsukuba	3
1.3	Autonomous mobile robot “Yamabico YM2000” equipped with DGPS and LRF	4
1.4	Some walkway environments for measurement experiment	9
2.1	RTK-GPS (Trimble 4000SSI)	16
2.2	System configuration of RTK-GPS (Trimble 4000SSI)	16
2.3	DGPS (Trimble DSM12/212)	17
2.4	System configuration of DGPS (Trimble DSM12/212)	17
2.5	Accuracy of RTK-GPS measurement data: $ AB =10[m]$, $ BC =10[m]$, $ AC =20[m]$	20
2.6	Repeatability of RTK-GPS measurement data: a point location is mea- sured by RTK-GPS (trimble 4000SSI) at different time.	20
2.7	Position data measured by RTK-GPS during the receiver moving	22
2.8	Accuracy of DGPS measurement data.	23
2.9	Position data measured by DGPS during the receiver moving	24
2.10	Typical DGPS data near by structures	30
2.11	Displacement and condition of each DGPS measurement data	31
3.1	Autonomous mobile robot “Yamabico YM2000” equipped with DGPS	33
3.2	Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on DGPS and odometry	34
3.3	Path map and measured point by RTK-GPS	37

3.4	Modification of a path map: a point was remeasured because its measurement data had large error.	38
3.5	Modification of a path map: a point position was calculated using the relation with the adjoining anchor points because its position could not be measured by RTK-GPS.	39
3.6	Relation between robot position and DGPS measurement data	40
3.7	Flow of robot position correction based on fusion of DGPS and odometry data	41
3.8	Paths in which the authors tested the position correction method based on GPS and odometry	45
3.9	Walkway environment which is used for validating accuracy of the proposed correction method	47
3.10	Comparison of trajectory of the estimated robot position: A illustrates estimated robot position without correction. B illustrates estimated robot position modified by proposed correction method. C illustrates erroneous DGPS measurement data which were regarded as inaccurate by the proposed collection method. D illustrates final robot position. (each parameters: $l_{xy\,thresh} = 1.6(75\%)$, $\sigma_{x\,gps} = \sigma_{y\,gps} = 3.5[m]$, $l_{\theta\,thresh} = 1.2(75\%)$, $\sigma_{\theta\,gps} = 25[degree]$)	52
3.11	Displacement and condition of each DGPS measurement data	53
3.12	Snapshots of autonomous outdoor navigation using DGPS and odometry	54
3.13	Estimated robot position and DGPS measurement data of autonomous outdoor navigation	55
3.14	Log data of an autonomous navigation	56
3.15	Failure of estimation. Image A and B were observed in walkway environment among building(Fig. 3.8[a \rightarrow b]).	57
4.1	Target landmarks: walls and wayside steps	59
4.2	Navigation path and landmark map for corridor environment	59
4.3	Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on LRF and odometry	60
4.4	Laser range finder (SICK LMS200)	62
4.5	Yamabico "YM2000" for landmark map making	63

4.6	Outline of landmark map making	65
4.7	Bird view of constructed 3D structure	66
4.8	Formulation	67
4.9	Extension of the formulation	70
4.10	Modification and its error	71
4.11	Path of constructing 3D structure	72
4.12	Snapshots of constructed walkway environment 3D structure	82
4.13	Specification of wall type landmark (position and posture)	83
4.14	Map of navigation path and landmarks	83
4.15	Relationship between two LRF measurement data $S(t), S(t + 1)$ and detected landmark l'	84
4.16	Relationship between a estimated robot position $P(t)$, landmark detected by LRF l' and landmark in a map l_k	84
4.17	Paths in which the authors tested the position correction method based on LRF and odometry	85
4.18	Trajectory of estimated robot position and landmark position detected by LRF	85
4.19	Absolute displacement between estimated robot position $P(t)$ and path X_{path}	86
4.20	Autonomous run of the mobile robot based on LRF	87
4.21	Trajectory of estimated robot position and landmark position detected by LRF	87
4.22	Absolute displacement between estimated robot position $P(t)$ and path X_{path}	88
4.23	Autonomous run as the human got on the mobile robot	89
5.1	Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on DGPS, LRF and odometry	91
5.2	Time schedule for data fusions	93
A.1	111

表 目 次

2.1	Types of GPS	15
2.2	NMEA sentences	18
2.3	Static measurement	21
2.4	Repeatability of RTK-GPS measurement data	21
2.5	Statistics of DGPS measurement data at static state: correct position measured by RTK-GPS is (12084.679[m], 24213.255[m]).	23
2.6	Statistics of DGPS measurement data: (true, average, standard deviation)	26
4.1	SICK LMS200	63

第1章 はじめに

著者は Global Positioning System (GPS) を用いた自律移動ロボットの屋外ナビゲーションのための測位手法の開発を行った。最初に、GPS とオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法を提案し、次にその欠点を補うためにレーザー距離計 (Laser Range Finder (LRF)) と GPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法を提案した。また、これらの提案手法を実際のロボットに実装し屋外環境でナビゲーション実験を行い提案手法の有効性を示した。

本章では、本研究で想定する地図位置ベースのナビゲーション手法の概要の説明と、そのための開発すべき要素技術への分割と、屋外を想定しているために生じる問題点を指摘する。著者はそれらの問題を GPS を主体とした要素技術の開発を行うことで解決し、屋外環境におけるナビゲーションのための測位手法を構築する。

1.1 背景と目的

著者は、人間が実現するのが困難な仕事、煩雑な仕事を人に代わり自律的に行う移動ロボットの構築を目指している。具体例としては、重い荷物を人に代わり目的地まで運搬するロボット、初めての場所でも目的地まで案内してくれるロボット、体の不自由な人の行動をサポートするために、車椅子に代わり人を乗せ目的の場所まで自動的に移動を行うことができるロボットなどが挙げられる。これらの仕事を自律的に行うロボットを構築するためには、ロボットが人間により指定された目的の場所に確実に到達する能力を有する必要がある。すなわち、ロボットが目的の場所まで正確に移動する能力 (ナビゲーション能力) と、その移動の過程で遭遇する様々な障害物を回避する能力 (障害物回避能力) を有する必要がある。これら二つの研究課題は、移動ロボットの分野では重要な研究事項として



図 1.1: Pictures of some target walkway environments

いまなお研究が行われている。本研究では屋外の環境を対象に、この二つの能力のうち移動ロボットのナビゲーションのための測位手法の開発を行った。

屋外の環境としては、砂漠、月面、車道、高速道路、農地、荒地、歩道などの数多くの環境がある。著者は人間の日常生活の中で活躍するロボットの構築を考えている。よって、本研究では、ナビゲーションを行う環境として、自転車、人、車椅子、台車等が通りやすいように路面が舗装され、階段や段差は存在せず、道幅は人が往来できる程度あり、路面上には人の往来を妨げる障害は存在しない、歩道の周辺は開けた場所もあれば高い建物や樹木に囲まれた場所も存在する歩道を対象とする。このような歩道は、郊外にある整備された、町、公園、テーマパーク、大学、工場などの比較的広い敷地面積を持った環境に存在する(図 1.1)。本研究では、このような歩道環境でナビゲーションを行うことを想定した移動ロボットの測位手法の開発を目的とする。また、考案した測位手法の有効性を評価する環境として図 1.2 に示す筑波大学構内の歩道環境を選んだ。著者の筑波大学も郊外に存在する大学の一つであり、南北約 3.5[km]、東西約 1.2[km] と非常に広大な敷地内に網の目のように張り巡らされた歩道環境は、これらの特徴を有している。本論文では今後このような広い環境のことを指して "広大" と呼ぶ。評価実験で使用するロボットは、想定する歩道環境を容易に移動できる車輪型の移動機構を有するロボット(図 1.3)とした。

人に身近な環境で安定してナビゲーションを実現する手法として、屋内の環境では、ナビゲーションを行う環境の地図をあらかじめもち、ナビゲーション中はその地図上の自己の位置を常に確認し、計画通りに行動を行う、地図位置ベース型の手法が提案されている。近年活躍する移動ロボットは、その手法を用いることでナビゲーション能力を有し、工場や会社のオフィスや博物館等の比較的狭い屋

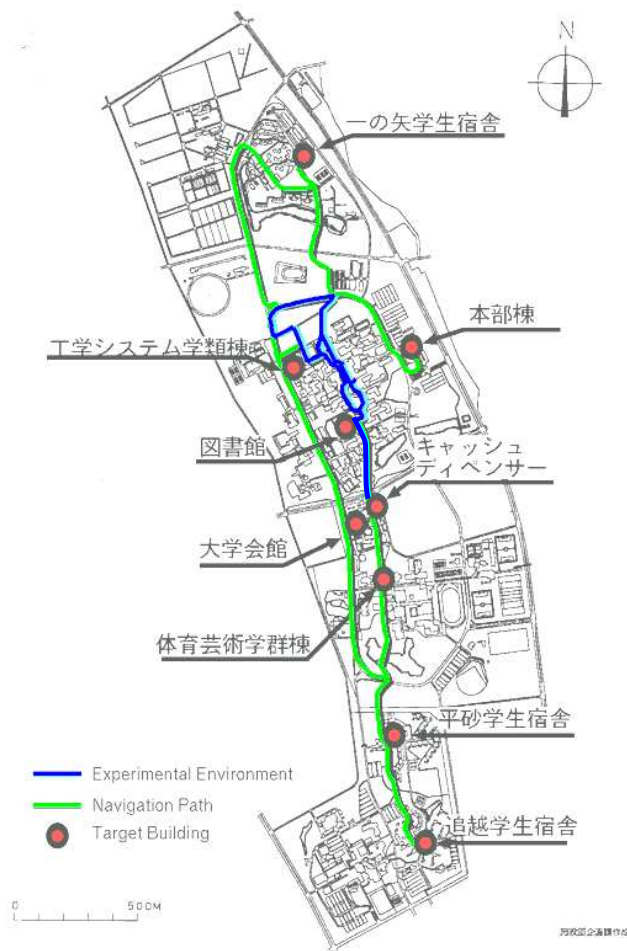


図 1.2: Plan of walkways in the University of Tsukuba

内の環境で目的地への信頼性の良い移動を実現し、食事の運搬 [17]、警備 [15]、博物館 [49, 4] の案内などの仕事を人に代わり自律的に行うことができるようになった。著者は、地図位置ベースの手法を用いて対象とする屋外の歩道環境での測位手法の構築を目指す。

先にも述べた地図位置ベースの手法では、ロボットが走行可能な経路と経路上を走行中のロボット位置を確認するために必要なランドマークの詳細な情報が記載された地図を用い、走行中は常にこのランドマークを観察することでロボット位置を正確に把握し、把握したロボット位置が目的地までの経路上に存在するように走行制御を行うことでナビゲーションを実現した。従来の研究ではこのような

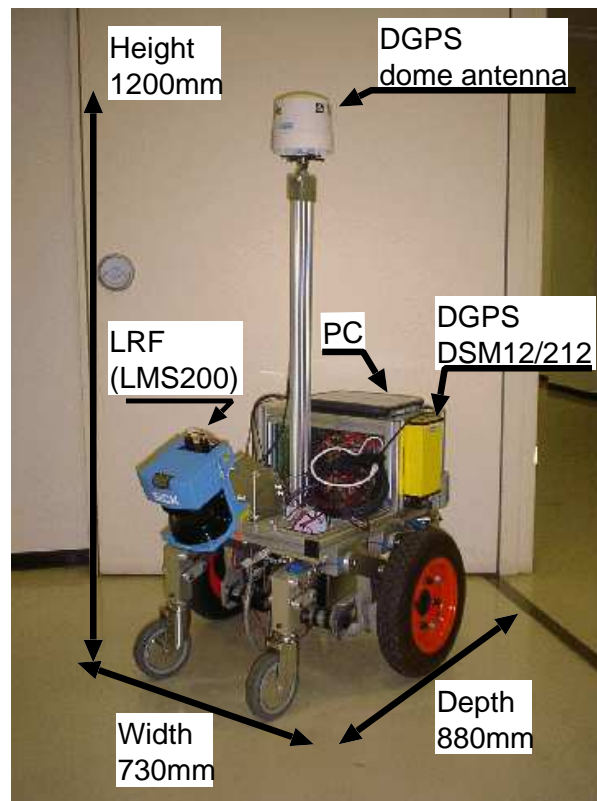


図 1.3: Autonomous mobile robot “Yamabico YM2000” equipped with DGPS and LRF

ランドマークとして部屋や廊下の壁や柱などがよく用いられた [49, 30, 4, 10, 21]。

同手法を用いて広大な屋外環境を走行しているロボットの位置を把握する場合も、位置確認に使用可能なランドマークの情報を記載したランドマーク地図をあらかじめ作成し、ロボットに持たせる必要がある。従来の地図に基づく屋外ナビゲーションの研究では、建物の壁、街路樹、垣根、道とその周辺領域の境界や点字ブロック等がランドマークとして用いられてきた [26, 58, 14, 20, 45, 9, 31]。しかし、屋内環境に比べて広大な屋外環境で、このような地図位置ベース型的手法を用いてナビゲーションを実現させようとする、次の二つの問題が障害となり、走行中のロボット位置を把握することが難しかった。

問題 a. 広大な屋外環境では詳細なランドマーク地図の作成には多大な労力を要すること

広大な屋外環境で三次元的に存在する物体の位置・姿勢を、巻き尺等を用い

て計測した相対的な情報をもとに正確に計測するには、「測量」に匹敵する労力を要する。これにより、広範囲の地図を作成することが容易にはできない。また、環境が変化した際に、その変更部分だけの測位を行うにも相対的な測位の間には矛盾が生じないように慎重に行う必要がある。

問題 b. 広大な屋外環境では自己位置の確認に使えるランドマークが存在せず自己位置の確認が困難な場合があること

ロボットが走行する歩道の周辺には建物や標識や樹木などのランドマークとなりえるものが存在する場所もあるが、場所によっては数十メートル間隔でしかそのようなランドマークが存在しない場所も存在する。このような場所では、ロボットは走行中の位置をオドメトリでしか推定することができず、その累積誤差により走行する歩道から逸脱してしまう。

その結果、ナビゲーションを実現することが困難であった。つまり、ロボットの持つ利便性を屋外の環境で利用するには、これらの問題を解決する必要があり、この点の技術開発がまだ十分ではない。著者はこれらの問題を Global Positioning System (GPS) を用いることで解決し、自律移動ロボットによる広大な屋外環境のナビゲーションの実現を目指した。

1.2 ナビゲーションの概要と問題点への対処

本研究で想定する地図位置ベース型のナビゲーション手法は以下の通りである。目的地までの経路とランドマークの情報を高さを省いた二次元平面上の情報として記述した地図をロボットに与える。地図上には、ロボットが走行可能な経路が点列として、その周辺のランドマークが二次元平面上の有効線分として記述されている。ロボットは、隣接する点列の間を直線で結ぶことで目的地までの経路を有効線分のリストとして設定する。ナビゲーションの際は、ロボットは目的地までの経路上をオドメトリを頼りに走行する。しかし、オドメトリには累積誤差が存在するため、走行にともない目標経路から離れて走行ようになる。この目標経路と実際のロボット位置の間のズレを外界センサを用いて計測し、修正することでナビゲーションを実現する。

想定する地図位置ベースのナビゲーション手法は以下の三つの部分に分解でき、1.1節で指摘した従来手法の問題点は次に上げる項目のうち1.地図作成と3.外界センサを用いた自己位置修正の部分を工夫することで問題を軽減できると考える。

1. 地図作成

ロボットが走行可能な経路と自己位置の確認に必要な周辺のランドマークの位置・姿勢が正確に記述された高さを省いた二次元の地図をあらかじめ作成する。この地図はロボットの走行制御や自己位置確認の基準となるため、正確にその位置・姿勢を記述する必要がある。巻き尺等を用いた地図作成の手法では、広大な屋外の環境中のランドマークや経路の正確な位置・姿勢を計測し、地図に記述するのに多大な労力を要した。建設やITSの分野では、衛星写真を利用することで正確な地図を作る手法が提案されている。しかし、著者らが入手可能な地図の精度は、0.5～数メートルと言われており、自律移動ロボットのナビゲーションに必要な精度としては不十分であると考えられる。1.1節で指摘した問題a.を解決するためには、巻き尺や衛星写真を用いた地図作成に変わる、広大な屋外環境で正確にかつ容易に地図を作成する手法を開発する必要がある。

2. オドメトリを用いた自己位置推定と目標経路への追従動作

ナビゲーションの際は、ロボットを出発地点におき、人手によりその位置・姿勢を与える。ロボットは、オドメトリを基準に走行中の位置を推定し、その推定された自己位置が常に目標経路上に存在するよう走行制御を行うことでナビゲーションを実現する。本研究で使用する自律移動ロボットは、オドメトリを基準に走行中のロボット位置を推定し目標直線への走行制御を行う機能をすでに有している。著者は、本研究室で開発された Spur と呼ばれる走行制御ソフトウェアを利用することでこの機能を実現する [18]。

3. 外界センサを用いた自己位置修正

オドメトリには累積誤差があるため、走行中のロボットの推定位置と実際の位置の間にはズレが生じる。この結果、ロボットは走行にともない本来追従すべき経路から逸脱する。本研究ではこのズレを外界センサを用いて検出し、オドメトリの誤差を修正する。この修正を繰り返し行うことで、オドメトリ

により推定されたロボット位置の誤差の増大を防止してナビゲーションを実現する。オドメトリを基準とした自己位置の確認と、外界センサを利用した自己位置の修正は拡張カルマンフィルタの枠組みを利用することで実現する。従来の研究では、超音波センサ、LRF、レーザービーコン、ビジョンを外界センサとして利用するケースが多かった [4, 26, 27, 25, 42, 57, 23, 10, 21]。しかし、これらのセンサーを用いた場合、ランドマークの位置・姿勢が正確に記述された地図が必要であった。また、ランドマークが存在しない環境では、ロボット位置の確認を行うことが出来なかった。1.1 節で指摘した問題 a. と問題 b. を解決するためには、屋外環境に適した外界センサ選ぶ必要がある。

著者は GPS を主体として測位手法を開発することで、従来の地図位置ベースの手法の問題 a.、問題 b. の影響を軽減し、屋外環境でのナビゲーションのための測位手法を確立する。

まず最初に、著者は「GPS とオドメトリを用いた自律移動ロボットの屋外ナビゲーションのための測位手法」を提案する。GPS はロボットの外部に存在する GPS 衛星からの電波を用いて地球上の正確な位置を計測可能なセンサである。GPS から得られる測位値をロボットの位置確認に使用した場合、従来の手法で位置確認に必要なランドマークの観察を行うことなくロボット位置が計測できる。また、ある地点の測位を行う際も、GPS から得られる地球上の正確な位置を用いることで相対的な測位を積み重ねることなく測位が行える。これにより、1. 地図作成の際のランドマークの位置の計測等にかかるコストを減らせる。また、ランドマークの存在しない環境は逆を言えば周囲に GPS 衛星からの電波を遮る障害物が存在しない、その様な環境は GPS の測位に適している。よって、GPS を用いることで、1.1 節で指摘した問題 a. と問題 b. が解決できると考えた。

著者は、屋外ナビゲーションの測位手法の構築に適する GPS 受信機を探すため、Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) と Differential GPS (DGPS) の二つの GPS 受信機の測位評価を行った。第2章において、著者らが実施した測位調査結果について述べる。この結果、RTK-GPS は高精度な測位が要求される地図作成に適していることが分かった。また、DGPS は移動体の位置計測に適していることが分かった。これらの結果を踏まえ、第3章では二つの異なる GPS 受信機を用いて構築した「GPS とオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法」について

述べる。また、構築した手法を実機に実装し、屋外環境でのナビゲーション実験を行い提案手法の有効性を検証した。検証結果から、対象とする歩道環境の約80[%]の歩道でナビゲーション可能であり、非常に性質の良い手法であることが分かった。一方、建物や樹木が密集する環境ではナビゲーションの成功率が低いことも分かった。この問題を解決するには、新たな外界センサを用いることにした。

GPSを用いてロボット位置の確認が行えない場所は高い建物や樹木に囲まれた歩道環境であり、周囲にランドマークとなる構造物の壁面や樹木等が存在している。その様な場所では、積極的にそれらをランドマークとして用い、ロボットの位置確認を行うことでナビゲーションの成功率を向上させる。このランドマークの検出に、レーザー距離計(Laser Range Finder (LRF))を用いることにした。理由は、ビジョンや超音波センサに比べ屋外の環境で、日照条件が変化した場合や、物体までの距離が遠い場合でも安定して対象物までの距離が計測できるからである。第4章では、著者の提案する「LRFとGPSとオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法」について述べる。本提案手法では、GPSによる位置修正が行えない建物付近の歩道環境のランドマーク地図を作成し、ほかの場所のランドマーク地図は作成しない。またここで必要とされるランドマーク地図の作成を、GPSの測位値を基準に行う手法を開発することで、従来の巻き尺等を用いていたランドマーク地図作成に比べ正確でかつ容易に行う。具体的にはLRFとRTK-GPSとオドメトリの情報を融合することで歩道環境の三次元形状を復元し、その三次元形状を表示したGUI上で人手によりランドマーク位置・姿勢を指定する手法を開発した。これにより1.1節で指摘した問題a.を回避する。また、提案する手法を実機に実装し、ナビゲーション実験をおこない有効性を検証した。

これまでに第3章と第4章で説明した測位手法により、開けた環境と建物付近の歩道環境における測位手法が構築された。著者はこれらの手法は相補的な関係にあると考え、二つの測位手法を一つの測位システムとして統合する。第5章では、「LRFとGPSを併用したナビゲーションのための測位手法」について説明する。ここでは、二つのセンサによる位置修正をそれぞれ独立に行う際に生じる問題点を指摘し、その解決方針について述べる。第6章では、著者の提案する屋外ナビゲーションのための測位手法を構築するにあたり開発した研究成果について述べる。また残された課題についても触れ、最後にまとめを述べる。



図 1.4: Some walkway environments for measurement experiment

1.3 対象とする移動ロボットと環境

本研究では、著者が所属する研究室で開発された独立二輪駆動型の移動ロボットをもとに著者が屋外ナビゲーション用に改良した移動ロボット山彦「YM2000」(図 1.3)を用いる。ロボットの走行中の位置を計測するセンサとして DGPS (Differential GPS)・レーザー距離計 (Laser Range Finder (LRF))・オドメトリの三つのセンサが搭載されている。本研究で使用する自律移動ロボットはオドメトリを用いて走行中の自己位置 $P(t) = (X, Y, \theta)$ を推定する機能と、その推定ロボット位置を基準に指定された直線 $(x_k, x_{k+1}), x_k = (X_k, Y_k)$ に沿って走行する能力を有している [18, 56, 26, 27]。この自己位置の推定は拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて行う [2]。

この自律移動ロボットがナビゲーションを行う環境として、図 1.2 に示す筑波大学構内の歩道環境を想定する。想定する大学構内の歩道環境は人や自転車が移動

しやすいように路面がタイルやアスファルトで舗装されており、車輪型移動体の走行を妨げる段差や階段などの障害は存在しない。歩道の道幅は最小1.8[m]、平均して約2.6[m]~4.0[m]であり、歩道の所々には広場が存在する。一方、想定する筑波大学構内の歩道環境は南北約3.5[km]、東西約1.2[km]と非常に広大であり、実際の研究開発の段階では研究室のある建物周辺の南北約0.85[km]、東西約0.45[km]の歩道環境を実験環境に設定した。

図1.4に設定した大学構内の歩道環境の一部の写真を示す。図1.4の*i, iv*が建物付近の歩道環境、*ii, iii*が建物付近の比較的開けた歩道環境、*v*が高い樹木に囲まれた歩道環境を表す。著者が設定したこれらの実験環境内には舗装された歩道環境に加え、緩やかな坂道、橋などの多彩な環境が存在し、著者らが想定する学内の歩道環境の特徴を全て有していると考えられる。本研究では図1.3に示す自律移動ロボットに提案する屋外ナビゲーションのためのロボットの測位手法を実装し、図1.4に示す筑波大学構内の歩道環境で実機を用いたナビゲーション実験を行い提案手法の有効性を確認した。

1.4 従来の屋外ナビゲーションに関する研究

屋外ナビゲーションの研究の歴史は古く、数多くの研究が存在する。本節ではその中でも代表的な研究について述べる。これまでに提案された屋外の道環境でナビゲーションを実現する手法としては、路面に存在する線や埋設したビーコンや電磁コイルに走行車両が誘導されることでナビゲーションを行う誘導型や、ロボットが地図上での位置を内外界センサを用いて常に推定する地図位置ベース型などがある。

誘導型のナビゲーション手法

誘導型の手法では、米国のカーネギーメロン大学(CMU)の金出、Thorpeらが開発したNavlabや[20, 45, 44]、ドイツのGraefeらが開発した自律走行車両[14]などによる車道や高速道路での自律走行がよく知られている。これらの研究では、ナビゲーションを行う道の表面に描かれた特徴的な線のモデルや、歩道の境界線の

モデルをあらかじめ持ち、画像処理によりこの特徴を有する道を見つけることで道沿い走行を実現した。車道や高速道路などは車が安全に走行するためのルールにしたがい、線やマークにより走行レーンなどが指定されている。このように整えられた環境では、特徴のモデルを絞り込むことが可能である。しかし、本研究で対象とする大学構内の歩道環境では、人や自転車が通りやすいように整備はされているが、交通ルールのような特別なルールはなく、路面に人を誘導するための線などは描かれていない。よって、すべての歩道環境に当てはまるモデルを定義することができず、その手法を用いて歩道環境でのナビゲーションを実現することは困難である。U.C. Berkeley の富塚らによる知能自動車の研究では、路面に埋め込まれた磁気コイルをセンサで検出し、コイルに沿って走行することで自律走行を実現した [48]。しかし、このような研究では、環境を自律走行車両が走行しやすいように変更しており、すでに存在する歩道環境でナビゲーションを実現するためには環境中にそれらの目印を埋設する必要がある。広大な環境では、大規模な目印の設置作業を行う必要があり、手間と費用がかかる。よって筑波大学構内の歩道のような屋外環境でナビゲーションを実現する手法には向いていない。

GPS を用いない地図位置ベース型のナビゲーション手法

本研究で使用する地図位置ベース型のナビゲーション手法は、内界センサを用いて地図上のロボット位置を推定し、内界センサの累積誤差を、別の外界センサからの情報を用いて修正することでナビゲーションを実現する。この手法は、数多くの屋内外の環境でのナビゲーション手法として使用されており、ナビゲーションを実現する手法としては有効であると著者は考える。本研究では、地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いて広大な屋外環境のナビゲーションを実現する。この手法を用いた研究の一例としては、筑波大の羽田ら [16]、ANU の Alex ら [5] の長時間活動を行うロボットの開発、CMU の Thrun らの博物館の案内を行うロボットの開発 [49, 47]、山梨大の森、小谷らの盲導犬ロボットの開発 [9, 22]、ANU の Durrant-Whyte らの港内で自律走行を行う移動車両の開発 [29] などがある。これらの研究では、視覚システムや、超音波センサ、レーザー距離センサの情報を用いて地図に記載されたランドマークを検出し、位置を修正した。しかし、森、小谷等に

より開発された視覚システムを用いたナビゲーション手法では、太陽光のある昼間の時間帯しか使用することが出来ず、また、日照条件によってはランドマークを確認することができず、ナビゲーションを行うことが困難な場合もあると報告されている。また、筑波大学の羽田等の研究では超音波センサを用いたナビゲーション手法が開発された。しかし、このような超音波を用いた研究の多くは屋内環境を対象としており、屋外の環境で超音波センサを用いてナビゲーションを行うことは非常に難しい。またレーザー距離計を用いたナビゲーション手法においては、建物などの壁の情報を高精度に計測することが可能であり、屋外ナビゲーションにおいても非常に良いセンサーであると考えられる。しかし、建物の壁などのランドマークが存在しない環境ではこの手法を用いてロボット位置を修正することが困難となる。

GPSを用いた地図位置ベース型のナビゲーション手法

GPSを用いた研究としては、東京大学の大前等によるGPS測位値を用いた自動走行車両の走行制御や車間距離の制御が実現されている[39, 40]。他の研究としては北海道大学の木瀬ら[19]や日立の青野ら[1]による農地でのトラクターの自動操縦や、ANUのDurrant-Whyteらによる港での走行車両や大型クレーン等の自動走行の研究や[29, 43]、山梨大学の小谷、森らによる歩行ガイドロボットの研究[11]にもGPSが使われている。これらの従来から存在する研究の多くは、開けた環境で行われたものが多く、かつそのような環境で高精度に測位可能なRTK-GPSを用いた研究が多い。本研究のように高い建物等が存在する環境でGPSを測位センサとして取り扱うことを想定した研究はあまり存在しない。このような建物付近でGPSを用いてロボット位置の測位を行うためには、GPS測位値の測位誤差を判断し、測位誤差の小さなGPS測位値を用いてロボット位置を修正する技術開発は不可欠である。しかし従来のRTK-GPSを用いた手法では、測位誤差の大きなGPS測位値を積極的に取り除くことはあまり提案されておらず、著者の知る限り、ANUのDurrant-Whyteらにより行われた研究にしか見られない[43]。この研究では、港内にある大型クレーンの真下をRTK-GPS受信機が通過する際に得られる測位誤差の大きなGPS測位値を検出する方法が提案されている。本研究ではこの概念をさ

らに発展させた GPS 測位値の誤差の判定を行う。

一方、高い建物や樹木の存在する環境では、測位誤差の大きな GPS 測位値が得られる場合がある。本研究で開発した GPS を用いたロボット位置修正の手法では、著しい測位誤差を含む GPS 測位値をロボット位置の修正に使用しない方針をとっている。高い建物や樹木が密集している歩道環境ではロボットの位置修正に使用可能な測位誤差の小さい GPS 測位値が得られず、ロボットの位置を高い精度で推定し続けることが困難な場合が存在した。しかし、そのような環境では周囲にランドマークとなりえる建物の壁などを多数存在している。よって本研究では GPS の弱点を逆手にとってこのような環境では周囲に存在する壁などをランドマークとして用いることでこの問題を解決する。このように複数の位置修正の手法を統合し、システム全体に冗長性を持たせることで安定した屋外環境での測位を目指す。

第2章 GPSの測位性能の調査とナビゲーションへの利用方法の検討

本章では、二種類の Global Positioning System (GPS) 装置、すなわち Differential GPS (DGPS) および Real Time Kinematic GPS (RTK-GPS) について行った測位性能の調査と、ナビゲーションへの利用の検討について述べる。

本研究を始める際に重松らの私信による GPS に関する知見では、GPS 受信機が静止した状態での測位（静止測位）と、受信機が移動している状態での測位（移動測位）では、測位を行える場合と行えない場合があり、かつ測位の精度が異なるということであった。GPS は GPS 衛星からの電波を用いて測位を行うシステムである。測位精度の違いは GPS 受信機の周囲に存在する、GPS 受信機と GPS 衛星の間を遮る障害物の影響や、測位方式の違いにより生じていると考えられる。著者らは、各 GPS 受信機を用いて実際の筑波大学構内の歩道環境で静止測位・移動測位の調査を行い、GPS が自律移動ロボットのナビゲーションへ利用可能であるか検討を行った。

2.1 DGPS と RTK-GPS の測位方法の概要

GPS は複数の GPS 衛星からの電波を同時に受け取ることで受信機の位置を計測する測位システムであり、2000 年 5 月以降 SA (Selective Availability) が解除され、屋外環境での測位に頻繁に使用されるようになった。本研究で使用した RTK-GPS (Trimble 4000SSI) を図 2.1 に、その測位システム全体の構成を図 2.2 に示す。また、本研究で使用した DGPS (Trimble DSM 12/212) を図 2.3 に、その測位システム全体の構成を図 2.4 に示す。表 2.1 に各 GPS 測位方式の概要をまとめる。GPS の測位

表 2.1: Types of GPS

	Accuracy	Availability	Reference station (RS)
GPS	5 – 10 [m]	No limitation	No use
DGPS	1 – 5 [m]	100 [km] from RS	Geographical Survey Institute in Japan
RTK-GPS	2 – 10 [cm]	100 [km] from RS	Japan Coast Guard

の主な誤差要因は、電波が電離層を通過する際に生じる電波の遅延である。DGPSとRTK-GPSではこの遅延時間を補正し位置を導出する方法が異なる。DGPSではこの遅延時間を地球上の位置が既知である基準局で計測し、その誤差量を補正情報として基準局が配信する。DGPS受信機側では受けとった補正情報を用いて測位値を修正することで測位誤差を1～数メートルに減らす。RTK-GPS受信機は、DGPSと同様にその補正情報を用いて測位の誤差を補正し、かつ各GPS衛星からの波長約20[cm]の電波が受信機に到達するまでの正確な電波の波数と位相を計測することで、数センチメートルの高精度な測位を行う。RTK-GPSの測位においてこの電波の波数を導出することを初期化と呼び、非常に計算時間のかかる作業である。受信機と衛星の間に障害物があられると測位に使用していた衛星からの電波をロストすることになり、その結果この波の数が分からなくなる。この現象をサイクルスリップと呼び、RTK-GPSを用いて高精度の測位を行う場合はサイクルスリップが起こるたびに初期化の作業を行う必要がある。これ以上のそれぞれのGPSの測位手法の詳細な説明は文献[51, 52]に譲る。本研究では、DGPSでは海上保安庁が配信している補正情報を使用し、RTK-GPSでは国土地理院がMCA無線を用いて配信している補正情報を使用した。

本章では、各GPS受信機の静止時と移動時の測位性能の調査結果について述べる。まず次節で各受信機から測位値や測位状況の情報を取り出す方法について述べる。次に、RTK-GPSに関して行った測位性能調査について述べる。具体的には静止測位と移動測位の概要を説明し、静止測位の調査結果と移動測位の調査結果を述べる。次にDGPSに関して行った同様の測位調査結果と、DGPSの建物付近での測位誤差について述べる。最後にこれらの調査結果を踏まえ、GPSのナビゲーションへの使用方法を検討する。



図 2.1: RTK-GPS (Trimble 4000SSI)

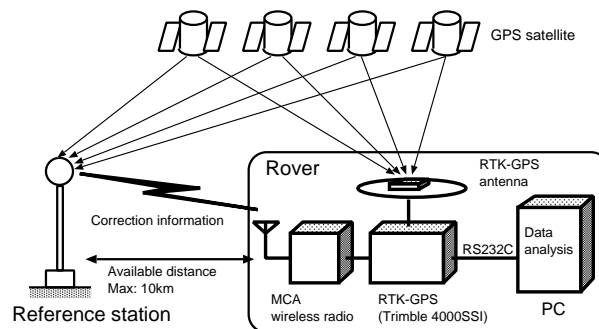


図 2.2: System configuration of RTK-GPS (Trimble 4000SSI)

2.2 NMEA 形式の出力データからの GPS 測位値と測位状態の抽出

RTK-GPS と DGPS 受信機からは 1 秒ごとに測位値と測位に関する情報が RS232C を介し出力される。出力データのフォーマットは、NMEA-0183 で定められたものあり、本稿で使用する NMEA センテンスを表 2.2 に示す。これらのデータは「GGK」、 「GGA」、 「VTG」などの識別文字ではじまる文字列であり、一秒に一回各 GPS 受信機から出力される。これらのデータのうち RTK-GPS 受信機では「GGK」センテンスを解析することで位置 $p_{gps} = (X_{gps}, Y_{gps})$ とその測位状態 (測位低下率 (Position Dilution Of Precision (PDOP)), 測位に使用した衛星数, 測位品質) の計測を行った。RTK-GPS の場合、測位品質は「Fix」、 「Float」、 「単独」が存在し、Fix 解は数センチメートルの精度の測位値であり、Float 解は DGPS 相当の精度の測位値であり、単独解は補正されていない測位値である。また、DGPS 受信機では「GGA」、 「VTG」、 「GSA」を解析することでロボット位置 $P_{gps}(t) = (X_{gps}, Y_{gps}, \theta_{gps})^T$ とその測位状態 (PDOP, 測位に使用した衛星数, 測位品質, 測位モード) を計測した。DGPS 受信



図 2.3: DGPS (Trimble DSM12/212)

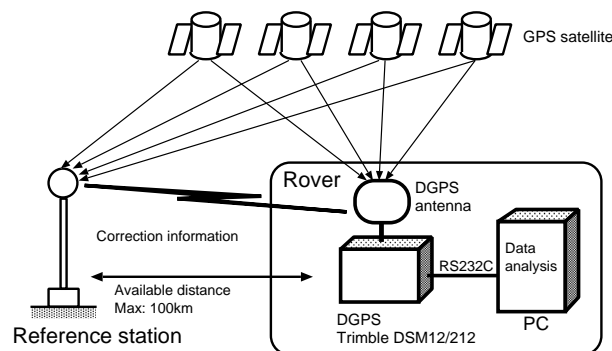


図 2.4: System configuration of DGPS (Trimble DSM12/212)

機の場合、得られる品質は”Differential”と”単独”が存在し、Differential解は補正された測位値、単独解は補正されていない測位値である。補正すると、Float解とDifferential解の測位誤差は同程度であるが測位方式は全く異なっている。GPS受信機の位置 $(X_{gps}(t), Y_{gps}(t))$ は、衛星からの電波の伝播時間 (Time Of Flight (TOF)) を用いて受信機内で計算される。GPS受信機の進行方向 $\theta'_{gps}(t)$ は、衛星からの電波のドップラー効果を用いて計測される。このように同じGPS受信機内部で異なる測位原理を用いて位置と進行方向は計測されている。

各情報は以下の手順で取り出した。出力データのうち、RTK-GPSの場合は「GGK」で始まる文字列を解析することで受信機のWGS-84座標系での経度と緯度と高さが得られる。また、DGPS受信機の場合は、「GGA」で始まる文字列からDGPS受信機が存在する場所のWGS-84座標系での経度と緯度と高さが得られる。これらの経度・緯度・高さの情報を東京データム上の経度と緯度と高さに変換する。次に、地球楕円体表面 (ジオイド) の座標系 $(X_{gps}(t)[m], Y_{gps}(t)[m], Z_{gps}(t)[m])$ に変換する。この座標系の原点は関東9系の原点 (経度 $139^{\circ} 50' 0''.000$, 緯度 $36^{\circ} 0' 0''.000$) とした。Y軸は北向き、X軸は東向きに、Z軸はX-Y平面に垂直に設定した。こ

表 2.2: NMEA sentences

Sentence	Contents
GGK	Latitude, Longitude, Height, Quality (RTK(Fix):3, Differential(Float):2, Single:1, None:0), Number of satellites in use
GGA	Latitude, Longitude, Height, Quality (Differential:2, Single:1, None:0), Number of satellites in use
GSA	Mode(2D:2, 3D:3), Satellite's ID used in position fix, PDOP, HDOP, VDOP
VTG	Speed over ground, Heading direction

うして RTK-GPS の測位値 $p_{gps} = (X_{gps}, Y_{gps})$ と DGPS の測位値 $P(t)$ の (X_{gps}, Y_{gps}) を導出した。VTG ではじまる文字列から、DGPS 受信機の X-Y 平面上での移動速度 ($V_{gps}(t)[km/h]$) と進行方向 ($\theta'_{gps}(t)[deg]$) が得られる。 $\theta'_{gps}(t)$ は北を 0 度とした時計回り 360 度までの値で得られる。著者らはこれを X 軸を 0 度とする反時計回り $\pm 180[deg]$ の値 $\theta_{gps}(t)[deg]$ に変換し、DGPS で計測したロボット位置を $P_{gps}(t) = (X_{gps}(t), Y_{gps}(t), \theta_{gps}(t))^T$ と表記する。

また、GPS 受信機からは測位値と同時にその測位状態の情報 (PDOP、測位に使用している衛星の数、測位品質 (RTK-GPS: Float, Fix or not. DGPS: Differential or not)、測位モード (3D, 2D, or none) も出力されている。RTK-GPS 受信機を使用する際は、「GGK」センテンスを観測することで PDOP と測位に使用した衛星数と測位品質の三つの情報を記録した。DGPS 受信機の使用する際は、「GGA」、「GSA」センテンスを解析することで PDOP、測位に使用している衛星の数、測位品質と測位モードの四つの情報を得た (表 2.2)。一般的には、この測位状態の情報をういて、得られた GPS の測位値が信頼できる測位値かそうでないのか判断する。本研究では、特に DGPS の移動時の測位精度を評価する際にこれらの情報が信頼できる指標かチェックした。

2.3 RTK-GPS の測位性能調査

一般的に RTK-GPS 受信機からは Fix 解と Float 解の二つの品質の測位値が得られ、前者の Fix 解の測位値の測位精度は数センチメートルといわれている。RTK-GPS の測位値の精度を評価するためには、判断の基準が必要となる。しかし、屋外環境で RTK-GPS 受信機より高い精度で測位が可能な計測装置を著者らは所有し

ていない。そこで、著者らはRTK-GPSの静止測位の精度を評価するために、あらかじめ地面上に巻き尺を用いて正確な20[m]の直線を描き、0[m],10[m],20[m]の各点の上にRTK-GPS受信機を設置し、得られた測位値と巻き尺で測った値を比較することで測位性能を調査した。また、同じ場所にRTK-GPS受信機を設置し、異なる日、異なる時間に計測した値を比較することで測位値の再現性を評価した。

次に、RTK-GPS受信機の移動時の測位性能を調査するため、受信機を移動可能な台車に搭載し、実験対象である筑波大学構内を押して移動させ、移動測位が可能であるか調査した。

2.3.1 静止測位

著者らは周囲に高い建物などが存在しない開けた環境の地面の上に20[m]の直線を巻き尺を用いてあらかじめ描き、そのA:0[m],B:10[m],C:20[m]の各点にRTK-GPS受信機を二分間設置し静止測位を行った。こうして各点ごとに計測された120個の測位値の中から、Fix解でかつ測位に使用した衛星数が五つ以上の測位値を選び出し、その平均値を各点の代表値とした。図2.5にRTK-GPSを用いて計測した各点の位置を描画した結果を示す。表2.3には各点の測位値間の距離と角度の真値と計測値を示す。各点の測位値間の距離は真値に対して2[cm]未満の誤差で計測でき、角度 $\angle ABC$ の誤差も0.3[degree]未満で計測でき、幾何学的に非常に正確な形が再現された。次に各点の測位値の再現性について評価した。具体的には計測点Aに、異なる日、異なる時間帯にRTK-GPS受信機を設置し同様の計測を複数回行った。その中の二つの計測結果を図2.6に示す。得られた測位値の統計的性質(平均: \bar{x}, \bar{y} ; 標準偏差: $\sigma_{\bar{x}}, \sigma_{\bar{y}}$)を表2.4に示す。二つのRTK-GPSの測位値はセンチメートルの精度で一致しており、非常に再現性が良いことが分かった。また、その他の計測結果においても同様に精度と再現性が良いことが確認された。

2.3.2 移動測位

移動時の測位性能を調査するために図1.3に示す移動ロボット上にRTK-GPS受信機を設置し、図2.7のAに太線で示す大学構内の歩道環境を人手により押して移動させた。得られた測位値 p_{gps} を描画した結果を図2.7のBに示す。Fix解として

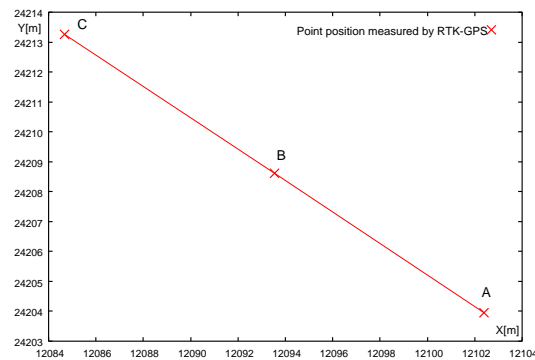


図 2.5: Accuracy of RTK-GPS measurement data: $|AB|=10[m]$, $|BC|=10[m]$, $|AC|=20[m]$.

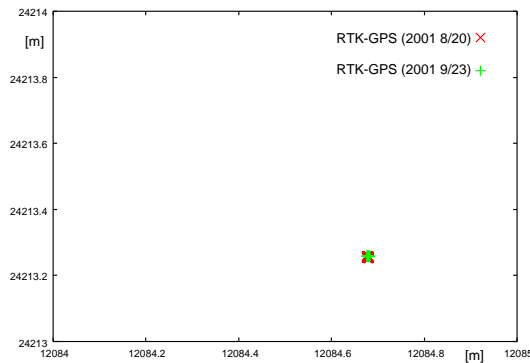


図 2.6: Repeatability of RTK-GPS measurement data: a point location is measured by RTK-GPS (trimble 4000SSI) at different time.

得られた測位値を赤で、Float 解として得られた測位値を緑で描画した。得られたそれぞれの解の割合は、RTK 解が全体の 30.7[%]、Float 解が全体の 61.4[%]、解が得られなかった部分が残りの 7.9[%]であった。移動中に得られる Fix 解の割合が低い理由は、建物や樹木の付近を受信機が通過した際、RTK-GPS 受信機の内部では測位に使用している衛星のロストやサイクルスリップが頻繁に起こり、その都度初期化が必要となった。その結果、実験を行った環境の約 30[%]の環境でしか Fix 解がえられなかった。また、実験に使用した RTK-GPS では、補正情報の受け取りに MCA 無線を用いていたため、連続で 3 分間しか補正情報を受け取ることができず、3 分間ごとに補正情報を送る基準局と GPS 受信機の間で通信を確立する

表 2.3: Static measurement

	true value	measured value
AB	10 [m]	10.0158 [m]
BC	10 [m]	9.995 [m]
AC	20 [m]	20.01 [m]
$\angle ABC$	180 [degree]	179.76 [degree]

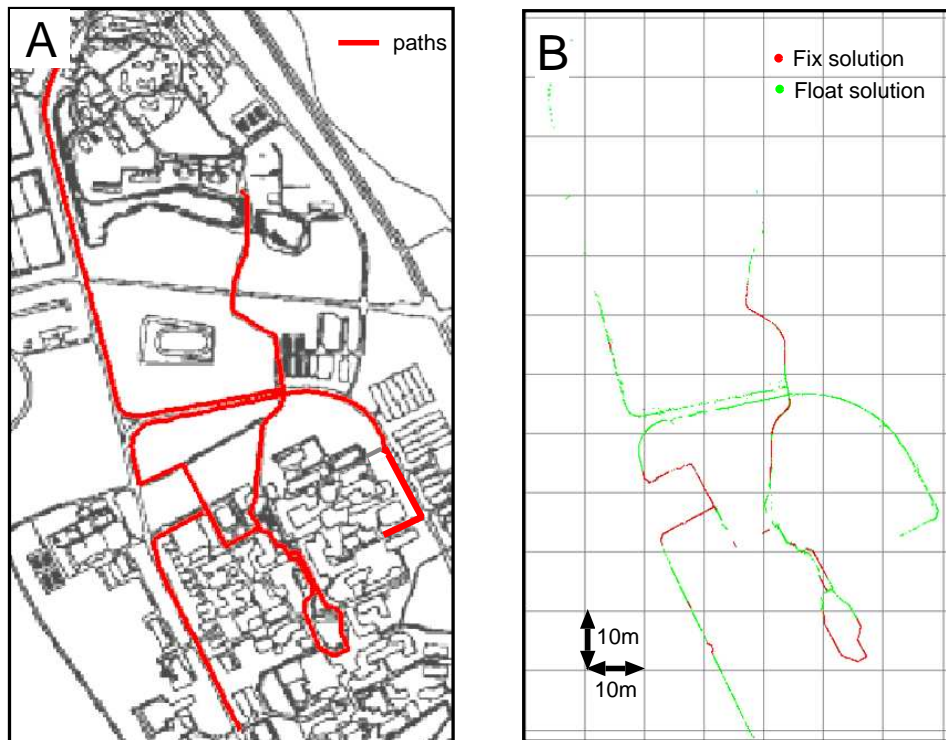
表 2.4: Repeatability of RTK-GPS measurement data

Date	\bar{x} [m]	\bar{y} [m]	$\sigma_{\bar{x}}$ [m]	$\sigma_{\bar{y}}$ [m]
Aug. 20 2001	12084.679	24213.255	0.0014	0.0012
Sept. 23 2001	12084.678	24213.259	0.0013	0.0013

必要があった。この接続が確立できない場合は、次にその接続が確立できるまで RTK-GPS 受信機による測位を行うことができないという問題もあった。また大学の北側の池の周辺では、MCA 無線を用いて補正情報を受け取ることができず全く測位を行うことができなかった。現在もこの原因は分かっていない。一方、移動測位が困難である環境でも、RTK-GPS を用いて静止測位を行う場合は、一度初期が終了すると精度の良い測位値が得られることも分かった。ただしこの MCA 無線の問題は、近年国内で利用可能になった仮想基準点 (Virtual Reference Station (VRS)) が供給する補正情報を携帯電話により受け取る方式を用いることで大幅に改善可能である。

2.3.3 調査結果

周囲に電波の障害物となる高い建物等が存在しない開けた環境における RTK-GPS の静止測位では、非常に高精度で再現性の良い Fix 解の測位値が得られた。しかし、移動時の測位においては、建物などの近くを通過する際に頻繁に初期化が起こり、結果的には、対象とするほとんどの歩道環境で Fix 解の測位値を得ることが困難であった。一方、静止測位においては、移動測位が行えない建物の付近や樹木の下歩道環境でも、初期化が終了すると安定した測位が可能な場合もあることが分かった。よって、RTK-GPS は時間がかかっても正確に測位を行う必要のある地図作成などの作業に適している。



Paths along which the RTK-GPS receiver was pushed

RTK-GPS position data

図 2.7: Position data measured by RTK-GPS during the receiver moving

2.4 DGPSの測位性能調査

DGPSの測位性能の調査は、RTK-GPS受信機の測位値とDGPS受信機の測位値を比較することで行った。DGPSの静止測位性能の調査では、地面上の同じ点にRTK-GPSとDGPSを交互に設置し、それぞれの受信機から得られた測位値の平均と分散を比較した。次にDGPSの移動測位性能の調査では、筑波大学構内の歩道をDGPS受信機を搭載した台車を人手により押して移動し、得られた測位値を記録した。この際、建物付近や樹木のある場所で測位誤差の大きなDGPS測位値が得られた。本研究では、DGPS受信機の移動測位の精度を評価するために、地面上に巻き尺で直線を描き、その直線の端点の位置をRTK-GPSで計測した。次に描いた直線上を正確にDGPS受信機を押して移動し、得られた測位値の誤差をRTK-GPSで測定した直線を基準に評価した。また、2.2節で説明した、測位状態を表す指標

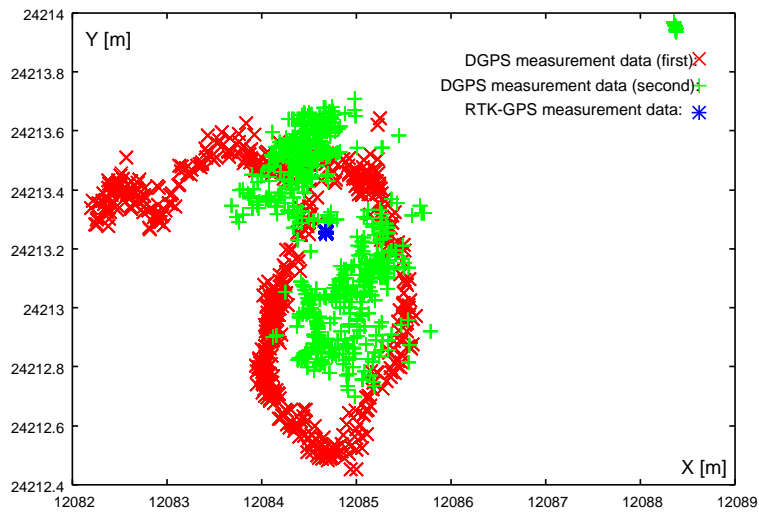


図 2.8: Accuracy of DGPS measurement data.

表 2.5: Statistics of DGPS measurement data at static state: correct position measured by RTK-GPS is (12084.679[m], 24213.255[m]).

	\bar{x} [m]	\bar{y} [m]	σ_x [m]	σ_y [m]	δl [m]
1	12084.214	24213.109	0.854	0.330	0.487
2	12084.723	24213.278	0.567	0.284	0.537

(PDOP, 衛星数, 品質, 測位モード) と測位値の測位誤差との関係も調査した。

2.4.1 静止測位

図 2.8 に DGPS 受信機を地面上の一点に設置し二回、おのこの約三分間計測した DGPS 測位値を示す。表 2.5 に各測位値の平均と分散と RTK-GPS の平均値からのずれを示す。一回目の DGPS 測位値の平均値と二回目の DGPS 測位値の平均値の差は 50[cm] 以上あった。RTK-GPS を真値と考え DGPS 測位値の真値からのずれを計算すると約 50[cm] 程度ずれており、再現性と計測精度ともに RTK-GPS に比べて非常に低いことが分かった。また、DGPS の測位値の分散は RTK-GPS の静止測位の結果に比べ、非常に分散が大きいことが分かった。

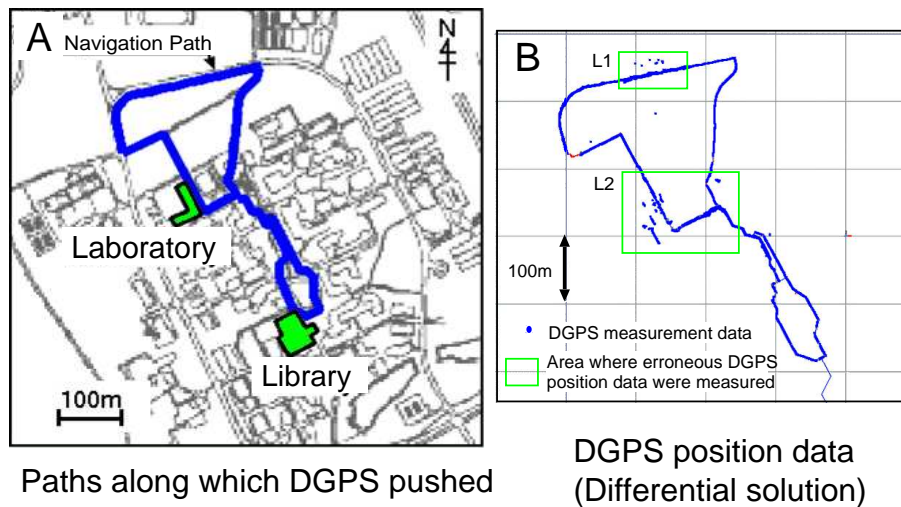


図 2.9: Position data measured by DGPS during the receiver moving

2.4.2 移動測位

DGPS 受信機の移動測位性能を調査するため、DGPS 受信機を図 1.3 に示すロボットに搭載し、図 2.9 の A に太線で示す経路を人手により押して移動させた。こうして得られた GPS の測位値を図 2.9 の B に示す。図 2.9 の B から実験を行った約 95[%] の歩道環境で Differential 品質で測位を行うことができた。DGPS は RTK-GPS と異なり測位原理上サイクルスリップは起こらず、補正情報も専用の LF 帯を用いて受け取っている。そのため、RTK-GPS に比べ測位誤差は大きい、実時間で変化する位置を記録することが可能であることが分かった。一方、図 2.9 の B 中の四角で囲んだ領域 ($L1, L2$) には高い建物や樹木が存在し、その様な高い建物や樹木の付近では、大きな測位誤差を含む DGPS 測位値が得られることが確認できた。これは GPS 衛星からの電波に対して、マルチパスや回折や散乱などが影響していることにより生じていると考える。

著者はさらに実際に得られた測位値を用いて DGPS の測位誤差について考察した。DGPS の測位値の精度を評価する際は、地面上に巻き尺を用いて直線を描き、その直線の両端点の位置を RTK-GPS を用いて正確に計測した。次に、その直線上を DGPS を搭載したロボットを人手により押して移動し、受信機から得られる測位値を実時間で記録した。図 2.10 に、実際の計測で得られた DGPS の典型的な測

位値を示す。実験の際は、図 2.10 の中央の経路上を矢印で示す方向に DGPS 受信機を押して移動した。なお、DGPS の測位値とその誤差はその日その時の GPS 衛星の配置状態によって変化する。したがって、いつどんな時でも必ず図 2.10 で示した誤差が再現されるわけではない。しかし、建物付近では図 2.10 のような測位値の変化や誤差のあらわれ方がしばしば見られる。本研究では DGPS の測位値とオドメトリを拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて融合することでロボット位置を修正する。この枠組みを用いてロボット位置を修正するためには DGPS の測位値の測位誤差が白色ノイズである必要がある。よって、DGPS の測位値がロボット位置の修正に使用可能かどうかの検討は、個々の DGPS 測位値と真値との差を用いて行うのではなく、DGPS 測位値の平均値と真値との差の大きさをを用いて評価した。この平均値と真値との差が小さい場合は DGPS の測位誤差は白色ノイズであると考えロボット位置の修正に使用する。以下、著者は DGPS の測位値の統計的性質（平均と標準偏差）を用いてその測位誤差を評価する。図 2.10 の A は、周囲が開けた環境で得られた DGPS の測位値である。図 2.10 の B, C, D, E は、建物付近の歩道環境で得られた DGPS の測位値であり、電波のマルチパス等の影響により DGPS 測位値には測位誤差が含まれている。それぞれの環境で得られた DGPS の測位値の統計的性質（真値: d, θ ; 平均: $\bar{d}_{gps}, \bar{\theta}_{gps}$; 標準偏差: $\sigma_{d_{gps}}, \sigma_{\theta_{gps}}$ ）を表 2 に示す。表 2 中の変数 d は DGPS の測位値 $P_{gps}(t)$ と目標経路の間の最短直線距離を、 θ はロボット座標系の X 軸を基準にした台車の進行方向を表す。目標直線の位置と傾きは、RTK-GPS で計測した値から計算した。

図 2.10 A の開けた歩道環境で得られた DGPS の測位値は、位置と進行方向の両方の測位値の平均値と真値の差が非常に小さい(表 2 A)。しかし、図 2.10 B で観察された DGPS 測位値は、位置の平均値 \bar{d} と真値 d の差は大きい、進行方向の平均値 $\bar{\theta}$ と真値 θ の差は小さかった(表 2 B)。図 2.10 C で観察された DGPS 測位値は、測位値と目標経路の間の位置のずれが、ロボットの移動に伴い減少した。この場合、位置の平均値 \bar{d} と真値 d の差は比較的大きかった。しかし、進行方向の平均値 $\bar{\theta}$ は真値 θ とほぼ同じ方向を向いており、その差は小さかった(表 2 C)。図 2.10 D では、DGPS の位置と進行方向の測位値がランダムに突然変化し、DGPS の位置と進行方向に関する測位の平均値と真値の間の差は大きかった(表 2 D)。このランダムな変化は、歩道の両側に高い建物が存在する場合によく観察される。図 2.10

表 2.6: Statistics of DGPS measurement data: (true, average, standard deviation)

	GPS Position Data			GPS Heading Direction Data		
	$d[m]$	$\bar{d}_{gps}[m]$	$\sigma_{d_{gps}}[m]$	$\theta[deg]$	$\bar{\theta}_{gps}[deg]$	$\sigma_{\theta_{gps}}[deg]$
A	0	0.07	0.06	117.9	117.4	2.78
B	0	-1.91	2.12	-62.1	-61.3	7.94
C	0	0.89	0.34	28.1	27.7	5.11
D	0	1.32	2.62	28.1	18.3	26.3
E	0	-0.19	0.38	117.9	117.3	7.88

の B と D の様な DGPS の測位値誤差は、電波のマルチパスや測位に使用している衛星数や衛星の組み合わせの変化が原因で起こると考えられる。図 2.10 E の測位値は、歩道の片側に高い建物が存在する環境で得られた。図 2.10 E では、位置の平均値と真値の間の差は小さいとはいえないが、進行方向の差は小さい(表 2 E)。

これらの結果から、ロボット位置の修正に DGPS の測位値を使用する場合は、その測位誤差を判断し、測位誤差の小さな信頼できる測位値だけを用いてロボット位置を修正する必要があることが分かった。さらに、図 2.10 の B, C の様に、DGPS の位置 d に大きな測位誤差が含まれる DGPS 測位値でも、角度 θ の測位誤差は小さい場合があることが分かった。これは (X_{gps}, Y_{gps}) と θ_{gps} では GPS 受信機内部での測位原理が異なるために生じていると想像される(2.2 節)。このことから、DGPS の位置 (X_{gps}, Y_{gps}) の測位誤差が大きく自己位置の修正に適さない場合でも、角度 θ_{gps} の測定値を用いることでロボットの推定自己位置を修正できる可能性があることが分かった。よって、DGPS の測位値の誤差の判定は、位置 (X_{gps}, Y_{gps}) と角度 θ_{gps} に関して別々に行う必要があることも分かった。

2.4.3 測位状態を用いた測位誤差の判定

一般的に、DGPS 受信機から得られた測位値が測位誤差の小さい信頼できる値であるかの判断は、測位の状態を表すパラメータを用いて行う。本研究で使用する DGPS 受信機の説明書には、測位状態が下記の条件を満たす測位値は、測位誤

差がサブメートルの測位値の可能性があると明記されている。

$$\begin{aligned} PDOP &< 4, \\ Quality &= Differential, \\ \text{the number of GPS satellites} &> 5, \\ Mode &= 3D. \end{aligned}$$

著者は記録した DGPS 測位値を用いて測位状態と測位誤差の関係を調べた。この結果、開けた環境ではこの測位状態を用いることで測位誤差の大きな DGPS 測位値を取り除けることが分かった。一方、建物や樹木付近の歩道環境で得られる測位誤差を含む測位値を測位状態だけを用いて完全に排除することは出来ないことも確認できた。図 2.11 に図 2.10 の A, B, C の DGPS 測位値の測位状態と測位誤差の関係を示す。これらの結果からも以下の二つの問題が指摘できる。

1. 著しい測位誤差を含む DGPS 測位値を完全には選別できない

図 2.11 B の左側のグラフ中の、DGPS 測位値の番号が 50–65 と 75–80 の測位状態は上述の条件を満たしている。しかし、これらの DGPS 測位値は非常に大きな位置の誤差を含んでいる。図 2.11 B の左側のグラフ中の DGPS 測位値の番号が 65–75 と 80–90 の測位値状態は上述の条件を満たしていない。しかし、これらの測位値の位置の誤差は測位値番号 50–65 と 75–80 の測位値に比べると小さかった。

2. オドメトリにより推定されたロボット位置の修正に使用可能な DGPS 測位値の減少

高い建物付近では、測位状態が悪くなる傾向がある。つまり、PDOP は大きくなり、測位に使用した衛星数は減少する傾向にあり、上述の測位状態を用いて誤差を判断した場合、ロボット位置を修正する DGPS 測位値がなくなってしまい、位置修正が行えなくなる。具体的には図 2.11 B の右側のグラフ中の番号 50–65 と 75–80 の測位値と図 2.11 C の右側のグラフ中の測位値は、上述の測位状態を満たしていない。しかし、これらの歩道区間では DGPS 測位値の進行方向の値は統計的に見ると性質がよく (図 2.10 B, 表 B)、オドメトリにより推定されたロボット位置を修正するのに使用できる可能性がある。

その他、後述する実験結果中の測位値でも、図3.11 Eの番号0-500の測位値は上述の測位状態の条件を満たしていなかった。しかし、実験の際はそれらのDGPS測位値の位置の値を用いてロボット位置を修正することで正確なロボット位置を保つことができた。

よって著者は、DGPS測位値の測位誤差の判定は、測位状態(PDOPなど)を基準に行うのではなく、別のセンサー情報を基準に行う必要があると考える。

2.4.4 調査結果

DGPS受信機の静止測位の測位精度と再現性はそれほど高くなく、高精度な地図作成の用途には適していない。一方、実時間での移動体の測位には使えるため、移動ロボットの測位センサーとしては適している。しかし、DGPSは建物などの付近で測位誤差の大きな測位値が得られる。よって、DGPSの測位値を移動体の位置修正に使用する場合は、DGPSの測位値の誤差を判断し、測位誤差の小さい測位値を選び出す必要がある。また、この誤差の判定は位置と角度別々に行う必要がある。こうして選ばれた測位誤差の少ない測位値も、少なくとも20[cm]~100[cm]程度の誤差を含んでいる。よってDGPS測位値とオドメトリの融合は各センサーの測位誤差を考慮して行う必要がある。また誤差の判定はDGPS受信機以外のセンサーからの情報を基準に行う必要がある。

2.5 考察

移動ロボットのナビゲーションのための測位手法に必要な要素は、1.2節で述べた1.正確な地図を作成と3.走行中の正確なロボット位置の計測がある。これまでのGPSの測位性能調査の結果から、著者は1.の正確な地図の作成にはRTK-GPSを使用する。理由は、測位の基準となる値は時間がかかっても正確に計測する必要があるからである。また、3.の移動中のロボットの測位にはDGPSが適していると考えられる。理由は、DGPSの測位精度はRTK-GPSの測位精度よりは劣るが、測位に必要な数の衛星が捕捉できていれば測位を続けることができ、サイクルスリップの影響を受けないという利点を持っているため、移動中のロボットの測位には

適すると考えたからである。これらの利点が建物や樹木が近くに存在する学内の歩道環境では重要である。

また、これまでの調査結果から GPS を用いて測位を行う場合、電波の多重反射や衛星の配置により得られた測位値に大きな誤差が含まれる場合があり、得られた測位値が信頼できる値であるか常にチェックし、注意して使用する必要があることが分かった。著者は、RTK-GPS、DGPS 受信機のそれぞれの測位誤差を判定する手法を開発する。また、こうして選ばれた DGPS 測定値とオドメトリを拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて融合する。

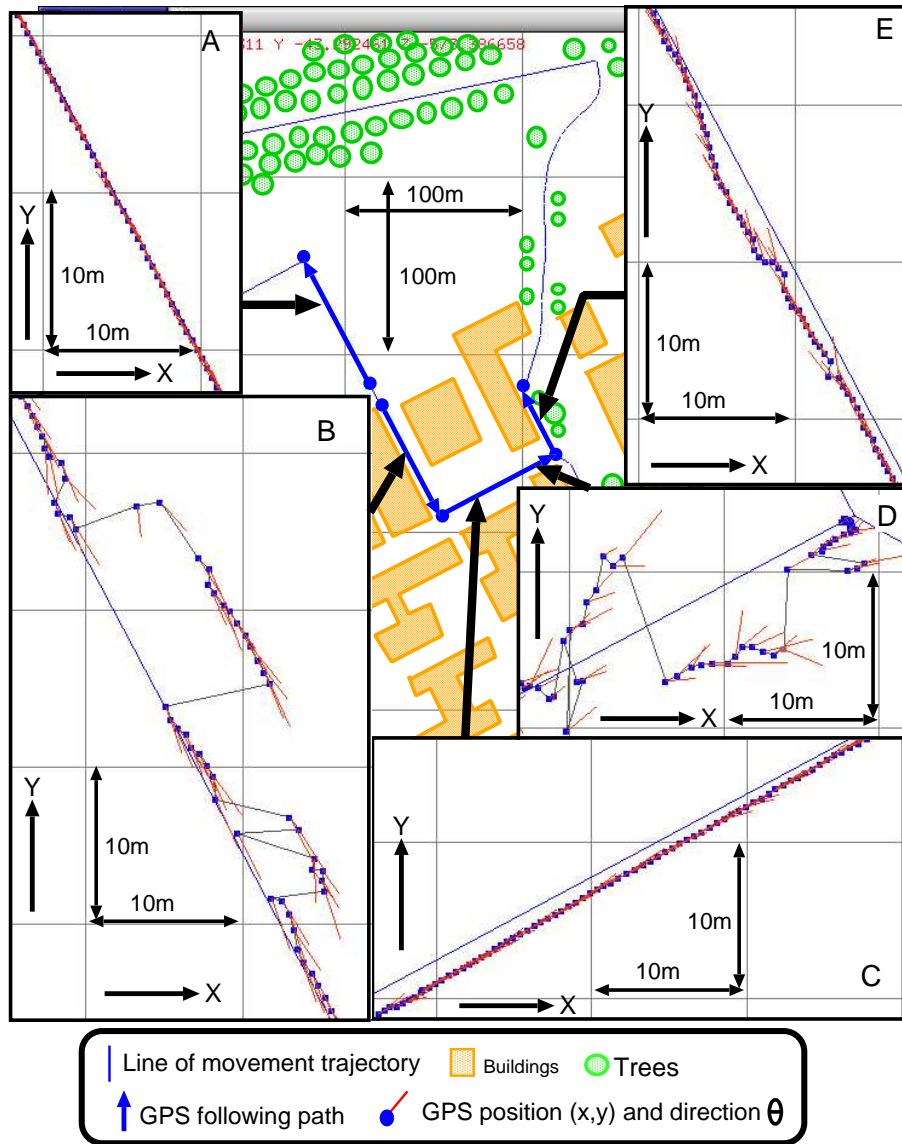


図 2.10: Typical DGPS data near by structures

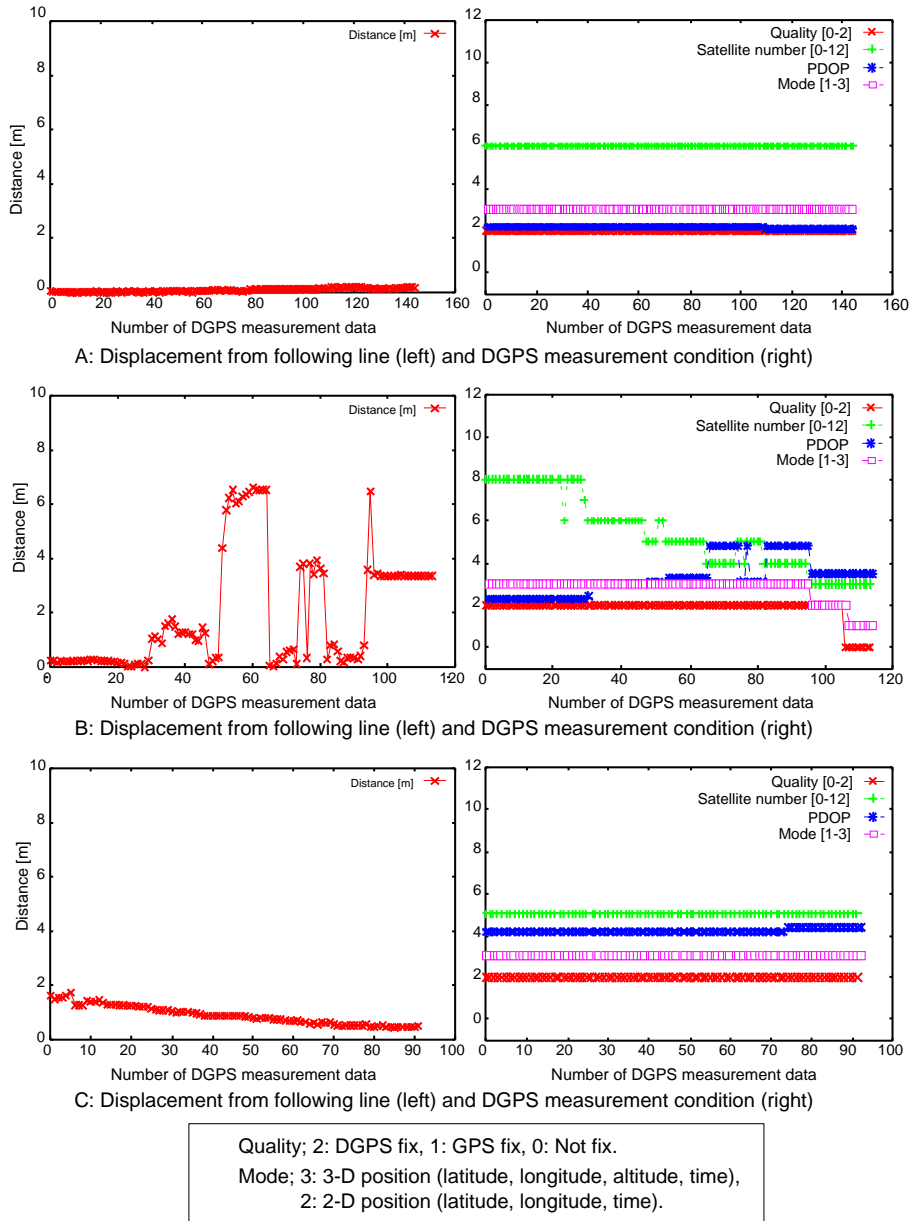


図 2.11: Displacement and condition of each DGPS measurement data

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発

本章では、著者が提案するGPSとオドメトリを用いた地図位置ベースの屋外ナビゲーションのための測位手法について説明する。提案手法では、性質の異なる二種類のGPS受信機を用途に合わせて使い分け、測位手法を構築する。具体的には、RTK-GPSを用いて作成した走行可能な経路の情報をロボットにあらかじめ与える。ロボットはオドメトリを用いて走行中の自己位置を推定し、与えられた経路にそって走行制御を行う。しかし、オドメトリには累積誤差がある。この累積誤差をDGPSを用いて検出し修正する。この確認と修正の作業を目的地まで繰り返し行うことでナビゲーションを実現する。

技術的課題は、測位誤差の小さいRTK-GPS測位値を用いて広大な屋外環境の経路地図を作成する手法の開発と、測位誤差の小さいDGPS測位値だけを選び出し走行中のロボット位置を修正する手法の開発である。

3.1 ナビゲーション手法の概要

本章では異なる二種類のGPSとオドメトリを用いて、1.2節で述べた地図位置ベース型のナビゲーション手法を実現するために必要な測位手法を構築する。また構築した手法を実際の移動ロボット(図3.1)に搭載し、実機によるナビゲーション実験を行い提案する測位手法の有効性を評価する。

GPSとオドメトリを用いたナビゲーション手法は次の通りである。ロボットに走行可能な経路の情報を高さを省いた二次元平面上の点列として与える。ロボットは隣接する点の間を直線で結ぶことで目的地までのナビゲーション経路を設定す

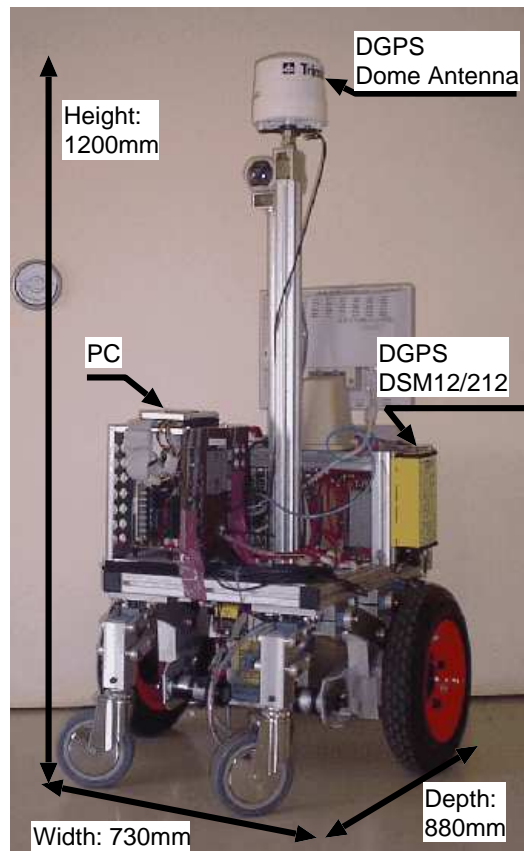


図 3.1: Autonomous mobile robot “Yamabici YM2000” equipped with DGPS

る。この経路の各地点の測位には、高い精度で測位が可能な RTK-GPS を用いる。ナビゲーションの際は、ロボットは目的地までの経路上をオドメトリを頼りに走行する。しかし、オドメトリには累積誤差が存在するため、走行にともない目標経路から離れて走行するようになる。この目標経路と実際のロボット位置の間のズレを DGPS を用いて計測し、修正することでナビゲーションを実現する。

本研究で想定するナビゲーションを実現するためのシステム構成を図 3.2 に示す。この測位システムを 1.2 節で述べた三つの構成要素に分解すると以下の様になり、本研究では 1.RTK-GPS を用いた経路地図作成と 3.DGPS を用いた自己位置修正の開発を行い測位システムを構築した。

1. RTK-GPS を用いた経路地図作成

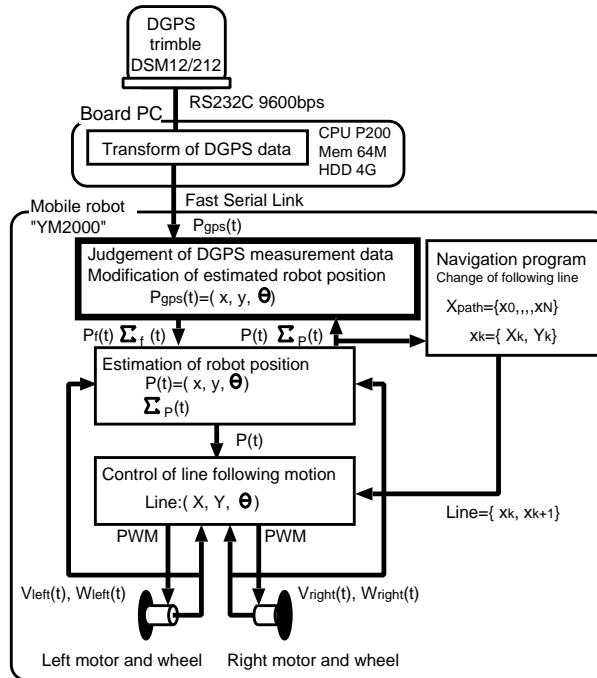


図 3.2: Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on DGPS and odometry

経路の情報は通過点のリスト ($X_{path} = \{x_0, x_1, x_k, \dots, x_n\}, x_k = (X_k, Y_k)$) として表現される。各通過点の地球上の正確な位置 x_k を測位精度が数センチメートルといわれる RTK-GPS を用いて計測する。本手法では、GPS を用いて走行中のロボット位置を計測するため、経路周辺のランドマークの情報をいっさい計測しないことで地図作りの労力を軽減する。各通過点の測位精度は、ロボットの走行の基準となるため、高精度である必要がある。しかし、RTK-GPS も電波を用いて測位を行っており、高い建物付近では誤差の大きな測位値が得られる場合がある。著者は、巻き尺で計測した隣接する通過点間の距離と、RTK-GPS で計測した値から計算した隣接する通過点間の距離を比較することで、RTK-GPS の各測位値の測位誤差の判定を行った。こうして、測位誤差の小さい RTK-GPS 測位値だけを用いてロボットの経路地図を作成した (3.2 節参照)。

2. オドメトリを用いた自己位置推定と目標経路への追従動作

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発35

ナビゲーションの際は、ロボットの初期位置 $P(0)$ と誤差の共分散 $\Sigma_p(0)$ と目的地までの通過点のリスト X_{path} をロボットに与える。ロボットは通過点のリストの隣接する通過点間 x_k, x_{k+1} を直線で結ぶことで目標経路を作成する。ナビゲーション中は、目標直線上にロボット位置 $P(t)$ が常に存在するように走行制御を行い、各目標直線の端点 $x_{k+1} = (X_{k+1}, Y_{k+1})$ に来た際に次の直線に乗り換える。これを目的地まで繰り返し行うことで目的地までの自律走行を実現する。このロボットの走行中の位置 $P(t) = (X, Y, \theta)^T$ の推定にはオドメトリを用いる (3.3 節参照)[18]。

3. DGPS を用いた自己位置修正

オドメトリには累積誤差があるため、オドメトリにより推定された走行中のロボット位置 $P(t)$ には誤差が生じる。著者は、移動しながらでも即座に測位可能な DGPS により計測されたロボット位置 $P_{gps}(t) = (X_{gps}, Y_{gps}, \theta_{gps})^T$ を用いて、オドメトリにより推定されたロボット位置 $P(t)$ を修正する。しかし、DGPS は建物や高い樹木の近くで測位誤差の大きい測位値が得られる。よってオドメトリの累積誤差を修正する場合には、測位誤差の小さい信頼できる DGPS 測位値だけを慎重に選びだし、かつ DGPS の測位誤差を考慮してロボット位置の修正を行う必要がある。本手法では、オドメトリを基準に DGPS 測位値の信頼性を判断する。さらに、著者は、DGPS 受信機から出力される位置の値と進行方向の値は、受信機内部での測位原理がそれぞれ異なるため、無相関であると仮定した。本手法ではこの信頼性の判定を位置と進行方向に関して独立に行うことを提案する。最後に、測位誤差の小さい測位値と判断された DGPS の測位値とオドメトリから得られる推定位置を拡張カルマンフィルタの枠組みを用て融合し、ロボット位置を修正する (3.4 節参照)。

本章では 3.2 節で 1.RTK-GPS を用いた地図作成について、3.3 節で 2 . オドメトリを用いた自己位置推定と目標直線への追従動作の概略について、3.4 節で 3.DGPS を用いた自己位置修正について説明する。3.5 節では提案するナビゲーションのための測位手法を実際のロボットに搭載し屋外で行ったナビゲーション実験について説明する。3.6 節では本提案手法についてまとめる。

3.2 RTK-GPSを用いた経路地図作成

ナビゲーションの際にロボットが追従走行する経路 X_{path} は、 $X-Y$ 二次元平面上の通過点 x_k のリストとしてロボットに与えられる。図 3.3 に、著者が RTK-GPS を用いて作成した経路地図を示す。この経路地図は全部で 160 個の通過点で構成されている。図 3.3 は読み手が分かりやすいように隣接する通過点の間を直線で補完している。これらの通過点は以下の方策に従い選ばれた。曲線で構成された歩道 (図 3.3 A): ナビゲーションを行う歩道環境には、ところどころ曲線で構成された歩道が存在する。そのような歩道では、曲線を直線で近似できる程度の間隔で測定点をもうけた。地図の北側 (図 3.3 A) の歩道環境では、歩道の曲線を近似するために最小 5[m] の間隔で測定点を設けた。規則正しく整備された歩道 (図 3.3 B): 学内の建物の近くの歩道環境は、まっすぐな歩道を規則正しく組み合わせることで構築されている。このような整備された歩道環境では、主に各歩道が交差する交差点 (L 字型, T 字型, Y 字型) の中心に測定点を設けた。また長いまっすぐな歩道区間では、その経路上にいくつかの測定点を設けた。こうして選ばれた全ての測定点の地面上の位置に白いスプレーで目印をつけ、その位置を RTK-GPS 受信機を用いて三分間静止測位した。

2.3 節で述べたが、RTK-GPS からは "Fix" 解と "Float" 解の二つの異なる測位品質の測位値が得られる。"Fix" 解は測位精度が数センチメートルの測位値であり、"Float" 解は DGPS の測位精度とほぼ同じかそれ以上の測位精度の測位値である。RTK-GPS 受信機から出力される「GGK」センテンスを解析することで RTK-GPS の測位値 $p_{gps}(t) = (X_{gps}(t), Y_{gps}(t))$ とその測位品質 (Fix, Float or other) が得られる。本研究では、静止測位で得られた RTK-GPS 測位値の "Fix" 解の平均値 $p_{\bar{gps}} = (\bar{X}_{gps}, \bar{Y}_{gps})$ を各点 x_k の位置とした。しかし、RTK-GPS も電波を用いて測位を行っているため、建物壁による電波の多重反射等の影響で平均値 $(\bar{X}_{gps}, \bar{Y}_{gps})$ に著しい測位誤差が含まれる場合がある。よって、各点 x_k の測位値 $(\bar{X}_{gps}, \bar{Y}_{gps})$ が正しい値か判断し、正しい測位値だけを用いて経路地図を作成する必要がある。

一般的には、RTK-GPS の測位値が得られた時の測位状態 (PDOP、測位に使用した衛星数、など) を用いて、測位値に著しい誤差があるか判断する。しかし、測位状態を用いただけでは、完全に測位誤差を含む測位値を判断することが出来なかつ

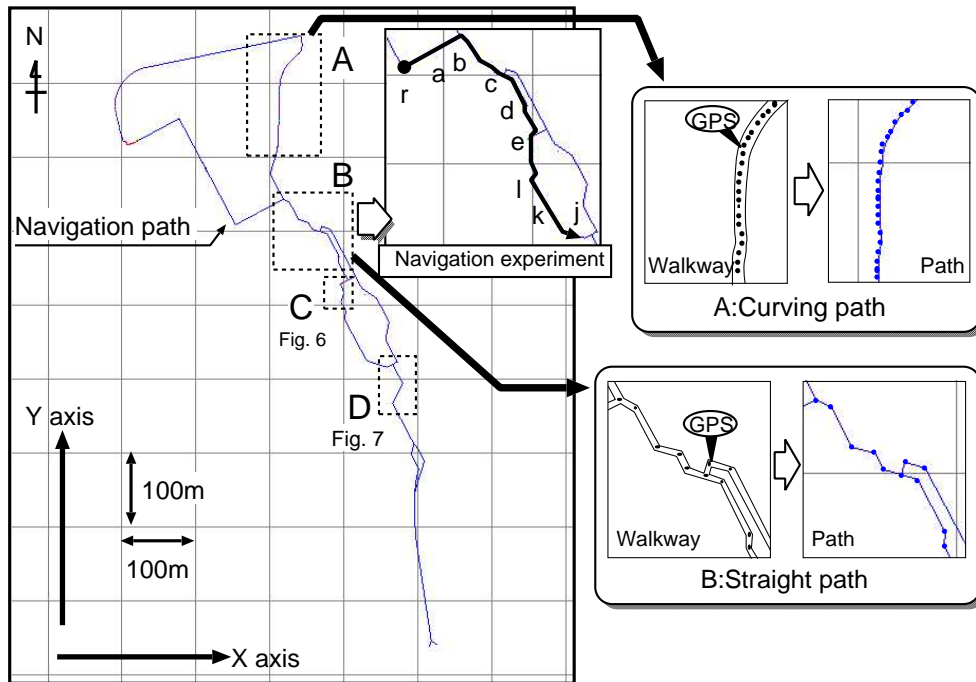


図 3.3: Path map and measured point by RTK-GPS

た。そこで著者は、巻き尺を用いて測定した隣接する各点の間の距離を用いて各測位値が正しい値であるか判断した。具体的には、RTK-GPSの測位値から計算により求めた隣接する各点の間の距離と、巻き尺で測定した距離を比較し、各値の間に50[cm]以上のずれが生じた場合もう一度その原因となる地点の位置をRTK-GPSを用いて計測し直した。図3.3 Cの場所で、上述の方法を用いてRTK-GPSの測位値の誤差を検出し、計り直した結果を図3.4に示す。

さらに、場所によっては”Fix”解が得られない場合があり、その様な場所では次の方法で位置を計測した。

- a. 著者の観察では、“Float”解のなかにも”Fix”解に近い精度を持った測位値が存在し、精度は数センチメートルから数十センチメートル程である。歩道幅が3[m]よりも広い歩道で”Fix”解が得られない場合は、このような小さな測位誤差を含む”Float”解を用いた。この際、経路の歪みを軽減するために上述の巻き尺を用いた測定値との比較も行い、一番もっともらしい測位値を用いた。

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発38

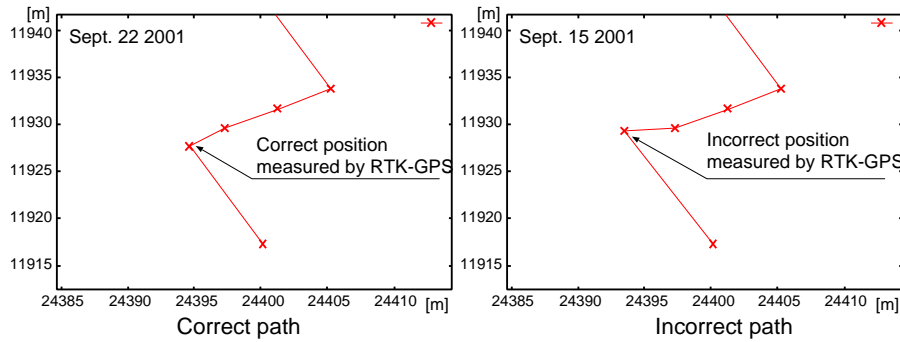


図 3.4: Modification of a path map: a point was remeasured because its measurement data had large error.

- b. 正確な”Float”解や”Fix”解が得られない場合や、歩道幅が3[m]以下で正確な測位を行う必要がある場合は、測定したい地点と隣接するすでに正確な位置が分かっている地点との幾何学的な関係を用いて計算する。図3.5にこの手法を用いて修正した結果を示す。図中の地点 $p3, p4, p5$ は同じ直線上の点であり、 $p3$ は周囲に高い建物が存在するためその位置を RTK-GPS を用いて計測することが出来なかった。この場合、 $p3$ の位置は式 (3.1) を用いて計算により導出した。

$$\vec{p}_3 = \vec{p}_5 + \frac{|\overrightarrow{p_5 p_3}|}{|\overrightarrow{p_5 p_4}|} (\vec{p}_4 - \vec{p}_5) \quad (3.1)$$

\vec{p}_5, \vec{p}_4 は RTK-GPS 受信機を用いて計測した位置であり、 $|\overrightarrow{p_5 p_3}|$ は巻き尺を用いて計測した各点の間の距離である。

著者は、このようにして広大な屋外環境の正確な経路地図を作成した。このような広大な環境の地図を作成する際、従来の巻き尺等を用いた相対位置の計測を順に続けて行き最終的に地図全体を作るのと異なり、地球上の正確な位置が計測可能な RTK-GPS の測位値を用いることで、計測ミスや環境の変化により生じた再計測等が迅速に行えた。このように地球上の正確な位置が計測できる RTK-GPS の導入により経路地図の作成を効率的に行うことが出来たと著者は考える。

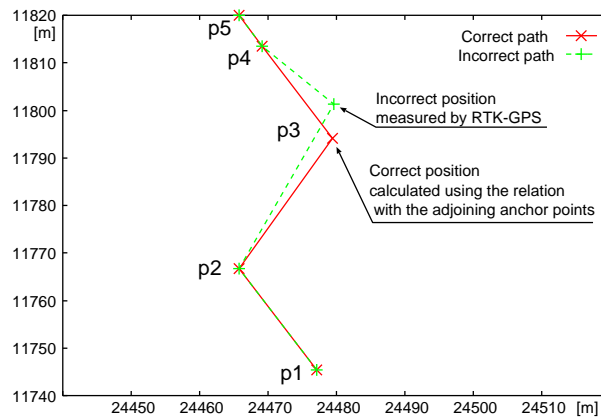


図 3.5: Modification of a path map: a point position was calculated using the relation with the adjoining anchor points because its position could not be measured by RTK-GPS.

3.3 自己位置推定と走行制御

ナビゲーションの際、ロボットはオドメトリを用いて走行中のロボット位置 $P(t) = (x(t)[m], y(t)[m], \theta(t)[degree])^T$ とその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を計測する。オドメトリとはロボットの左右のタイヤの回転数を積算することで、ロボット位置 $P(t)$ を計測するセンサである。タイヤの回転数は、左右の車輪を駆動するモータに取り付けられたエンコーダの出力するパルス数をカウントすることで数える。オドメトリから得られるロボット位置の座標系は、GPSと同じ座標系に設定した(図 3.6)。拡張カルマンフィルタの枠組みを用いることで $P(t)$ と $\Sigma_P(t)$ は式(4.1)と式(4.2)として定式化される¹。

¹オドメトリのモデルはナイフエッジモデルとして構築されており、横滑りは考慮しないモデルになっている。

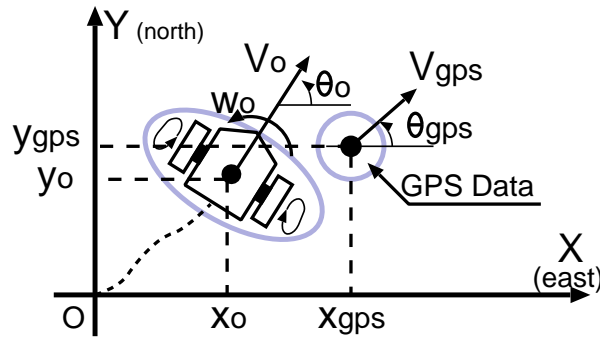


図 3.6: Relation between robot position and DGPS measurement data

$$P(t + \tau) = P(t) + \tau \begin{pmatrix} V(t) \cos(\theta(t)) \\ V(t) \sin(\theta(t)) \\ \omega(t) \end{pmatrix}, \quad (3.2)$$

$$\Sigma_P(t + \tau) = J(t)\Sigma_P(t)J(t)^T + K(t)\Sigma_V K(t)^T + \Sigma_N, \quad (3.3)$$

$$\Sigma_P(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_o}(t)^2 & \sigma_{xy_o}(t) & \sigma_{x\theta_o}(t) \\ \sigma_{xy_o}(t) & \sigma_{y_o}(t)^2 & \sigma_{y\theta_o}(t) \\ \sigma_{x\theta_o}(t) & \sigma_{y\theta_o}(t) & \sigma_{\theta_o}(t)^2 \end{pmatrix},$$

ここで τ はサンプリング間隔であり、 $V(t), \theta(t), \omega(t)$ はそれぞれロボットの移動速度、進行方向、角速度を表す。 $J(t)$ は $P(t)$ の X, Y, θ に関するヤコビアンであり、 $K(t)$ は $P(t)$ の V, ω に関するヤコビアンである。 Σ_V はオドメトリの計測誤差を、 Σ_N は計算の丸め誤差を表す。 Σ_V と Σ_N はロボットごとに異なるため、実際に実機を動かした際に得られた $P(t)$ と $\Sigma_P(t)$ がもっともらしくなる値を設定した [56]。サンプリング時間ごとに式 (4.1) と式 (4.2) を計算することで、ロボットの推定位置とその誤差分散を更新する。

こうして得られたロボット位置 $P(t)$ が常に目標直線 (x_k, x_{k+1}) 上に存在するように走行制御を行い、 x_{k+1} にたどり着いた時点で次の目標直線 (x_{k+1}, x_{k+2}) に乗り換える。この直線乗り換えを目的地点に到着するまで繰り返し行い、目的地にたどり着く。しかし、オドメトリには累積誤差があり、この誤差を修正する必要がある。

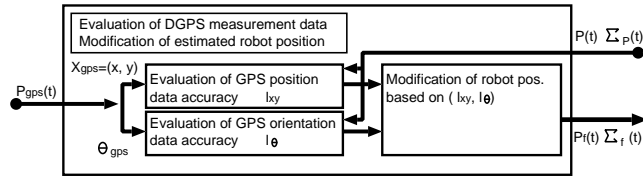


図 3.7: Flow of robot position correction based on fusion of DGPS and odometry data

3.4 DGPS 測位値の選別とロボット位置の修正

本節では、著者が提案する 3.3 節で述べたオドメトリにより推定されたロボット位置を DGPS 測位値を用いて修正する方法を示す。図 3.7 に提案手法の処理の流れを示す。ロボットの走行距離が短い時、オドメトリの累積誤差は小さく信頼できる値である。ロボットが舗装された路面上を走行している場合は歩道と車輪間のスリップはあまりないと仮定すると、オドメトリからは連続的なロボット位置が得られる。よって、著者はオドメトリを用いて DGPS 測位値の測位誤差が大きいか、測位誤差が小さいか判断できると考える。

DGPS 測位値の妥当性を評価するために、著者はオドメトリで推定したロボット位置 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を基準に DGPS 測位値 $P_{gps}(t)$ の対数尤度 l を計算した。もし l が小さい場合、DGPS 測位値 $P_{gps}(t)$ は信頼できる測位誤差の小さい測位値と見なせる。一方、もし l が大きい場合、DGPS 測位値 $P_{gps}(t)$ は信頼できない測位誤差の大きい測位値と見なせる。測位誤差が小さいと見なせる DGPS 測位値 $P_{gps}(t)$ を用いてオドメトリにより推定されたロボット位置を修正する。この際、著者は DGPS 測位値の位置 $X_{gps} = (x_{gps}, y_{gps})^T$ と角度 θ_{gps} の値は測定原理が異なるという理由で無相関であると仮定した。よって、提案手法では位置の対数尤度 l_{xy} と角度の対数尤度 l_{θ} を式 (3.4) と式 (3.5) を用いて独立に計算する:

$$2l_{xy}(t)^2 = (X_{gps}(t) - X_o(t))^T (\Sigma_o(t) + \Sigma_{gps})^{-1} (X_{gps}(t) - X_o(t)), \quad (3.4)$$

$$X_o(t) = (x_o(t), y_o(t))^T,$$

$$\Sigma_o(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_o}(t)^2 & \sigma_{xy_o}(t) \\ \sigma_{xy_o}(t) & \sigma_{y_o}(t)^2 \end{pmatrix},$$

$$\Sigma_{gps}(t) = \begin{pmatrix} \sigma_{x_{gps}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_{gps}}^2 \end{pmatrix},$$

$$2l_\theta(t)^2 = (\theta_{gps}(t) - \theta_o(t)) (\sigma_{\theta_o}^2(t) + \sigma_{\theta_{gps}}^2)^{-1} (\theta_{gps}(t) - \theta_o(t)). \quad (3.5)$$

ここで、 $X_o(t), \Sigma_o(t), \theta_o(t), \sigma_{\theta_o}(t)$ はオドメトリから得られた $P(t)$ と $\Sigma_P(t)$ の部分行列であり、 $\Sigma_{gps}, \sigma_{\theta_{gps}}$ は 2.4.2 節で述べた DGPS の測位誤差の調査結果をもとに著者が決めた一定値である (具体的な数値は 3.5.1 節参照)。式 (3.4) と (3.5) を用いて DGPS 測位値の対数尤度 $l_{xy}(t)$ と $l_\theta(t)$ を計算する場合、DGPS の測位誤差が大きいため、オドメトリの推定誤差に加え DGPS の誤差も考慮して計算を行っている [12]。DGPS 測位値の位置と角度の値は、それぞれの対数尤度 $l_{xy}(t), l_\theta(t)$ が閾値 $l_{xy\,thresh}, l_{\theta\,thresh}$ よりも小さい場合、測位誤差の小さい信頼できる値であると見なす。判定の厳しさは、この閾値 l_{thresh} の値で決まり、閾値が小さすぎると DGPS 測位値の誤差の判定は非常に厳しく行われる。著者は、著しい測位誤差を持った DGPS 測定値を取り除くことが目的であるため、 $l_{xy}(t)$ と $l_\theta(t)$ には大きな一定値を設定した ($l_{xy\,thresh} = 1.6$ (約 75[%]), $l_{\theta\,thresh} = 1.2$ (約 75[%]))。この閾値は著者が経験的に決めた値である。測位誤差の小さな DGPS 測位値が得られた場合、拡張カルマンフィルタの枠組みでは最尤推定の式 (3.6) と (3.7) を用いてオドメトリにより推定されたロボット位置とその誤差分散を修正する:

$$\hat{P}_f(t) = P(t) + \Sigma_f(t) W_{gps}^{-1} (P_{gps}(t) - P(t)) \quad (3.6)$$

$$\Sigma_f(t) = (\Sigma_P(t)^{-1} + W_{gps}^{-1})^{-1}. \quad (3.7)$$

$\hat{P}_f(t), \Sigma_f(t)$ は修正後のロボット位置とその誤差分散行列を表し、修正前のロボット位置 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を修正後の $\hat{P}_f(t), \Sigma_f(t)$ で置き換えることでロボット位置は修正される。提案手法を用いて DGPS の測位値の測位誤差の判定を行う

と、判定結果の組み合わせは $l_{xy}(t)$ と $l_{\theta}(t)$ の値に応じて四通り存在する。 $P_{gps}(t)$ と W_{gps}^{-1} をこれらの組み合わせに応じて以下の様に変更し式 (3.6) と (3.7) を計算することで、測位誤差の少ない DGPS 測位値だけを用いてロボット位置とその誤差分散を修正する：

1. $l_{xy}(t) < l_{xy\,thresh}$ かつ $l_{\theta}(t) < l_{\theta\,thresh}$ の場合

$P_{gps}(t), W_{gps}^{-1}$ は DGPS の位置と角度の値を用いて次の様に定義される。

$$\begin{aligned} P_{gps}(t) &= (x_{gps}(t), y_{gps}(t), \theta_{gps}(t))^T, \\ W_{gps}^{-1} &= \begin{pmatrix} \sigma_{x\,gps}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y\,gps}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\,gps}^2 \end{pmatrix}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

2. $l_{xy}(t) < l_{xy\,thresh}$ かつ $l_{\theta}(t) > l_{\theta\,thresh}$ の場合

$P_{gps}(t), W_{gps}^{-1}$ は DGPS の位置の値だけを用いて次の様に定義される。

$$\begin{aligned} P_{gps}(t) &= (x_{gps}(t), y_{gps}(t), 0)^T, \\ W_{gps}^{-1} &= \begin{pmatrix} \sigma_{x\,gps}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y\,gps}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1}. \end{aligned} \quad (3.9)$$

3. $l_{xy}(t) > l_{xy\,thresh}$ かつ $l_{\theta}(t) < l_{\theta\,thresh}$ の場合

$P_{gps}(t), W_{gps}^{-1}$ は DGPS の角度の値だけを用いて次の様に定義される。

$$\begin{aligned} P_{gps}(t) &= (0, 0, \theta_{gps}(t))^T \\ W_{gps}^{-1} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\theta\,gps}^2 \end{pmatrix}^{-1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

4. $l_{xy}(t) > l_{xy\,thresh}$ かつ $l_{\theta}(t) > l_{\theta\,thresh}$ の場合

オドメトリにより推定されたロボット位置とその誤差分散を DGPS 測位値を用いて修正しない。

提案手法を用いることで、誤差の少ない正確な DGPS 測位値をオドメトリを基準に選別し、選別された正確な DGPS 測位値だけを用いてオドメトリにより推定されたロボット位置とその誤差分散を修正する。

3.5 実機実験による提案手法の有効性の確認と問題点の検証

提案する屋外ナビゲーションのための測位手法を実機(図 3.1)に実装し、図 3.8 に示す筑波大学構内の歩道環境において提案手法の測位精度の検証と、自律走行実験を行った。3.5.1 節で実験に使用したロボットシステムとそのセットアップについて述べる。3.5.2 節で本提案手法の精度を評価するために行った実験について述べる。最後、3.5.3 節で提案手法を用いて行った学内歩道環境における自律走行実験の結果を述べる。

3.5.1 実験システムのセットアップ

実験には、著者の研究室で開発された車輪型の移動ロボット「山彦 YM2000」(図 3.1)を用いた。このロボットの特徴として、凹凸の存在する屋外の環境でも安定して走行できるよう大型の車輪を有している点と、路面とタイヤの間でスリップが生じないように車輪のトルク制御を行っている点である [18]。本実験で使用した移動ロボットのシステム構成を図 3.2 に示す。本ナビゲーションシステムは独立の CPU ボード上で動作する複数のプロセスから構成されている。主なプロセスは、オドメトリからロボット位置を推定し推定位置が目標直線上に存在するよう走行制御を行う Spur[18]、外界センサーにより得られたロボット位置を用いてオドメトリにより推定されたロボット位置を修正する POEM[56]、経路地図通りに追従直線を切り替えるナビゲーションプログラムである。本研究で使用した CPU ボードは CPU として Transputer を用い、ボード間の通信は Transputer Link とよばれる 10[Mbps] の高速なシリアル通信を用いて行う [28]。このように高速なシリアル通信を用いることで、各プロセス間の通信の遅れはほぼ無視できる。また、Spur や POEM は拡張カルマンフィルタの枠組みを用いてロボット位置を推定・修正する

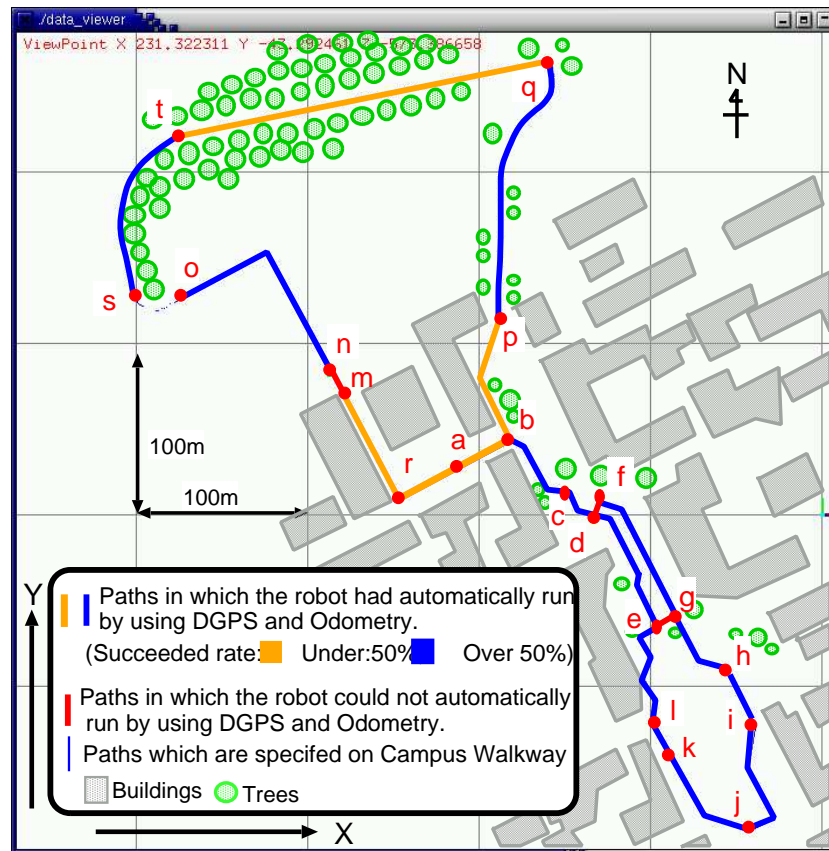


図 3.8: Paths in which the authors tested the position correction method based on GPS and odometry

ソフトウェアであり、これらは本研究室で独自に開発されたものである。また、図 3.7 の DGPS の測位誤差の判定と位置修正の処理は、DGPS 測位値が得られた時刻 t_{gps} とその測位誤差を判断して位置を修正する時刻 $t_{gps} + dt$ が計算機内部で生じる遅延により異なる。本研究ではこの計算機内部での時間遅れを遡及的位置修正の手法を用いることで解消する [26, 27]。この手法を用いることで、DGPS の測位誤差の判定が終わった際、判定が終わった時刻 $t_{gps} + dt$ から DGPS 測位値を受け取った時刻 t_{gps} にまでさかのぼりロボット位置を修正することが可能になる。

また、移動ロボットの両車輪はともに空気タイヤであり、タイヤの空気が抜けることで車輪の半径が変化してしまう。このようにタイヤの車輪径などのパラメータが実際の値と異なってしまうと、ロボットはオドメトリを用いて与えられた目

標直線に追従できなくなる。著者は、本実験を行う前に必ずオドメトリの両タイヤの車輪径 l_r, l_l と両車輪の間の距離 T (トレッド) の調整を行った。

DGPSの測位値の測位誤差を判断するための式(3.4)と式(3.5)の計算には、 $\sigma_{x_{gps}} = 0.3[m]$, $\sigma_{y_{gps}} = 0.3[m]$, $\sigma_{\theta_{gps}} = 10[degree]$ を用いた。また、測位誤差が小さいと判断された DGPS 測位値を用いてロボット位置を修正するための式(3.8)と式(3.9)と式(3.10)の計算には $\sigma_{x_{gps}} = 3.5[m]$, $\sigma_{y_{gps}} = 3.5[m]$, $\sigma_{\theta_{gps}} = 45[degree]$ を用いた。このように判定と修正の際に異なる DGPS 測位値の標準偏差を用いる理由は、DGPS 測位値の測位誤差の判定は正確に行い、DGPS 測位値を用いたロボット位置の修正は測位値を疑いながらゆっくりと行う必要があると考えたからである。それを実現する一つの方法として、著者は異なる大きさの標準偏差を使い分けた。

3.5.2 提案手法を用いた屋外環境での測位と測位精度の検証

本研究では、地球上の正確な位置が分かっている直線上を人手によりロボットを押して移動させ、提案手法を用いて移動中のロボット位置を計測した。もし提案手法によりロボット位置が正確に計測できていれば、その値は追従した直線と一致するはずである。本研究では計測されたロボット位置の直線からのズレを用いて精度を評価した。

まず、歩道中央の地面に幅 2[cm] の細いガムテープを用いてロボット押して移動する経路を直線で描き、その直線の両端の位置を RTK-GPS を用いて正確に計測した。図 3.8 中の $[a \rightarrow b \rightarrow c]$ が本実験で使用した経路であり、図 3.9 に各 a, b, c 点付近で撮影した歩道環境の画像を示す。図 3.9 の各画像中の歩道中央に存在する線が、実際に地面に貼り付けたガムテープである。このようにして地球上の正確な位置がすでに分かっている経路上(図 3.8 中の $[a \rightarrow b \rightarrow c]$ (86[m]))を、人手によりロボットを押して移動させた。移動中、ロボット内部では提案手法により常にオドメトリを用いてロボット位置 $P(t)$ を推定し、離散的に得られる DGPS 測位値 $P_{gps}(t)$ を用いてロボット位置を修正した。こうして計測されたロボット位置 $P(t)$ を 0.1[sec] おきに全て記録した。

図 3.10 A に、直線上を人手により手で押した際にオドメトリだけを用いて計測したロボット位置 $P(t)$ とその誤差楕円を示す。図 3.10 A 中の誤差楕円とは、式

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発47

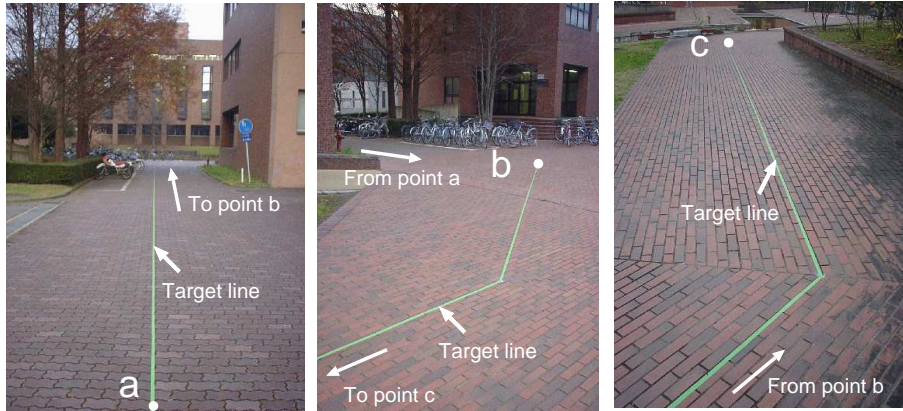


図 3.9: Walkway environment which is used for validating accuracy of the proposed correction method

(3.11) を満たす X をつなげることで描かれる等確率線のことである。

$$(X - X_o[t])^T \Sigma_o^{-1} (X - X_o[t]) = 1. \quad (3.11)$$

押されたロボットの最終到達地点は図 3.10 A 中の c 地点であり、オドメトリだけで推定されたロボット位置は c 地点から 4.5[m] も離れた場所に存在していた。図 3.10 B に 3.4 節で述べた提案手法を用いて走行中のロボット位置を修正した結果を示す。図 3.11 の A と B に、DGPS 測位値と、提案手法により推定されたロボット位置の追従直線からのずれのグラフを示す。図 3.11 中の番号 500–900 の DGPS 測位値の位置の値は、著しい測位誤差を含んでいた (図 3.10 C)。図 3.11 の C に式 (3.4) を用いて計算された DGPS 測位値の位置の対数尤度 l_{xy} を、図 3.11 の D に式 (3.5) を用いて計算された角度の対数尤度 l_θ の値の変化を示す。図 3.11 の C から、図 3.11 中の番号 500–900 の DGPS 測位値の位置の値は、 l_{xy} を用いることで測位誤差が大きいと判断され、ロボット位置の修正には使用されなかった。この結果、測位誤差の小さな DGPS 測位値だけを用いてオドメトリにより推定されたロボット位置を修正することができた。提案手法により推定・修正されたロボット位置の追従直線からのズレは、平均では 50[cm] 未満であり、最大でも 85[cm] 未満であった。また、到達地点 c での、推定されたロボット位置と実際のロボット位置の間のズレは 43[cm] であった。なお著者らの経験では、この歩道環境は DGPS を用いた

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発48

位置推定が最も困難な歩道環境の一つである。実験で用いた歩道の幅は約3[m]以上であり、提案手法を用いてその道幅からロボット本体がはみ出さない十分な精度でロボット位置を推定できた。また、その他の建物付近の歩道の幅は約2.6[m]以上あるため、提案手法を用いることで走行中のロボット位置の把握が可能であることが分かった。

図3.11のEに各DGPS測位値の測位状態(PDOP, 測位モード, 測位に使用する衛星数, 測位品質)を示す。この位置修正実験で、もしDGPSの測位誤差を測位状態(2.4.3節参照)を用いて判断した場合、全体の47[%]の測位値しか測位状態の条件を満たしておらず、残りの53[%]の測位値はロボットの位置修正には使われないことになる。しかし、実験では、測位状態を用いて測位誤差があると判断されたDGPS測位値の74[%]がロボット位置の修正に使われた。特に、図3.11のAの番号0-500のDGPS測位値を用いることで、ロボット位置を効果的に修正できたと著者は考える。つまり、建物付近の歩道環境においては、測位状態を用いたDGPS測位値の測位誤差の判定より本提案手法の方が効果的に動作するといえる。

3.5.3 提案手法を用いた自律走行実験

著者は提案する屋外ナビゲーションのための測位手法を実際のロボット(図3.1)に実装し、筑波大学構内の歩道環境で自律走行実験を行った。歩道周辺には高い建物に囲まれた場所や、高い樹木に囲まれた場所や、周囲が開けた環境が存在する。ナビゲーション中のロボットの移動速度は最大40[cm/sec]に設定した。図3.8に自律走行実験を行った歩道環境を示す。提案手法を用いてロボットが自律的に区間の出発地点から目的地点まで一度でも走行できた歩道環境は図3.8中の $[r \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow l \rightarrow k \rightarrow j]$, $[r \rightarrow m]$, $[n \rightarrow o]$, $[b \rightarrow p]$, $[f \rightarrow g \rightarrow h \rightarrow i \rightarrow j]$, $[q \rightarrow p]$, $[s \rightarrow t]$, $[t \rightarrow q]$ の歩道区間であり、これは全体の約80[%]の歩道区間である。

図3.12に図3.8中の経路 $[r \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e \rightarrow l \rightarrow k \rightarrow j]$ で行った自律走行実験のいくつかのスナップショットを示す。図3.12の画像中の番号は時間の経過した順番を表している。この実験では、移動ロボットは著者の所属する研究室のある筑波大学第三学群工学システム学類棟前から大学中央の図書館までの全長約360[m]をナビゲーションすることができた。また、到達地点でのロボットのズレ

は、約 30[cm]であった。図 3.12 中でロボットが歩道の中央付近を走行しているのは、著者が歩道の中央を通る経路を指定したからである。図 3.13 にこのナビゲーション実験で記録された DGPS 測位値と提案手法により推定されたロボット位置を示す。図 3.14 の A にこの走行実験中に記録された DGPS 測位値と推定されたロボット位置の経路からのズレの変化を、図 3.14 の B に記録された DGPS 測位値の位置の対数尤度 l_{xy} を、図 3.14 の C に記録された DGPS 測位値の角度の対数尤度 l_{θ} を示す。図 3.13 の B では、提案手法を用いることで測位誤差の大きな DGPS 測位値を検出し、ロボット位置の修正には使用しなかった(図 3.14 中の A, B, C の番号 800–1000 の測位値)。図 3.14 の A のグラフでは 50[cm] を超える位置修正が起っていないため、著者は DGPS を用いたロボット位置の修正量はおおよそ 50[cm] 以内であると考え。したがって、提案手法を用いることで、走行中のロボット位置は約 50[cm] 程度の精度で推定できていると考える。

図 3.14 の C を観察すると、ロボットが角を曲がるたびに対数尤度のピークが現れており、ロボットが回転動作中は DGPS 測位値の角度の値を用いて位置を修正していない。さらに、歩道区間 $[l \rightarrow k]$ (図 3.12 中の画像 9 – 12) には、長い坂道が存在している²。本実験では、提案手法を用いることでこのようなスロープを通過することができた。そのほかのナビゲーションに成功した実験での目標経路からのズレは、目測ではあるが平均して約 50 [cm] 以内、最大でも約 70 [cm] 以内であった。

著者らはナビゲーションの再現性を確認するため、同様のナビゲーション実験をこれらの歩道環境で繰り返し行った。その結果、ナビゲーションの成功率が非常に低い歩道環境が存在することが分かった。図 3.8 にナビゲーションの成功率が 50[%] 未満の歩道をオレンジ色で示す³。ここで北側の樹木に囲まれた歩道区間(図 3.8 中の $[s \rightarrow t]$, $[t \rightarrow q]$)でのナビゲーションの成功率が低いのは、歩道の幅が 1.8[m] しかなく提案手法の測位精度ではまだ不十分であるためである。図 3.8 から対象とする歩道環境の中で高い建物に囲まれた歩道でのナビゲーションの成功率が低いことが分かった。著者はこの原因について考察した。図 3.15 の A に図 3.8

²坂道区間 $[l \rightarrow k]$: 傾斜 5.3 [degree], 高低差 2.95[m], 斜面の長さ 31.8 [m]; 坂道区間 $[h \rightarrow i]$: 傾斜 3.9 [degree], 高低差: 2.5 [m], 斜面の長さ 36.9 [m]

³各歩道区間ごとに実験を行った回数が異なるため 50[%] を成功率の高い低いの判断基準とした。

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発50

中の $[r \rightarrow a]$ の経路で、図 3.15 の B に図 3.8 中の $[a \rightarrow b]$ の経路で観察されたロボット位置の誤修正の結果を示す。図 3.15 は、経路上を人手によりロボットを押して移動させた際に提案手法により得られたロボット位置と DGPS 測位値である。これらの歩道環境は高い建物に囲まれており、失敗の原因として以下の二つが考えられる:

1. 長時間測位誤差の大きな DGPS 測位値しか得られなかったためオドメトリを基準とした測位誤差の判定の信頼性が低くなった

本提案手法では、測位誤差の大きな測位値はオドメトリにより推定されたロボット位置の修正には使用しない。図 3.15 の A のように測位誤差の大きな DGPS 測位値しか得られない場合、DGPS 測位値を用いてオドメトリの累積誤差を修正することができない。この結果、測位誤差が大きなロボットの推定値とそこ誤差分散を基準に DGPS 測位値の誤差判定を行い、測位誤差の大きな DGPS 測位値を誤って測位誤差が小さいと判断し、位置修正に使用することがある。よって、測位誤差の小さな DGPS 測位値が長時間得られない環境では、本提案手法を用いた場合ナビゲーションの成功率が低下する。

2. 徐々に誤差が大きくなる DGPS 測位値を提案手法では誤差のある測位値と判断できなかった

図 3.15 の B の場合では、曲がり角付近で DGPS の測位誤差が徐々に大きくなっている。このような徐々に大きくなる測位誤差を持った DGPS 測位値を、オドメトリを基準に判断することは非常に困難である。この実験では、誤差のある測位置と判断できなかった結果、誤ってロボット位置を修正し、追従経路から逸脱した。

結果として、追従した直線とロボットの推定位置の間のズレが、図 3.15 の A では最大 4.0[m]、図 3.15 の B では最大 3.5[m] にまで達している。一度このような状況が起こると、実際の走行時はロボットは歩道から逸脱して走行することになり、場合によっては周囲の壁などに激突する。このような問題は建物や樹木付近ではしばしば起こった。

3.6 まとめ

本章では、GPSとオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法を提案した。最初に(i)想定するGPSとオドメトリを用いたナビゲーションの概要と、想定するナビゲーションを実現するために必要な要素技術について述べた。次に、その要素技術の一つである、(ii)RTK-GPSを用いた地図作成について述べた。ここでは、RTK-GPSの測位誤差を巻き尺の値を基準に判断し、正確な経路地図を作成する方法について説明した。次に、(iii)オドメトリを用いた自己位置推定と目標直線への追従動作の概略について説明した。次に、(iv)DGPSを用いた自己位置修正について述べた。ここでは、DGPSの測位誤差をオドメトリを基準に判断し、測位誤差の小さいDGPS測位値を用いてロボット位置を修正する方法を開発した。最後に、(v)提案するこれらの測位手法を実機に実装しその有効性と精度を検証した。この結果、提案手法を用いることで対象とする歩道環境の約80[%]の歩道環境でナビゲーション可能であることが分かった。これにより提案手法が非常に優れた手法であることが分かった。一方、実験を繰り返し行う中で判明した本提案手法の問題点も明らかにした。

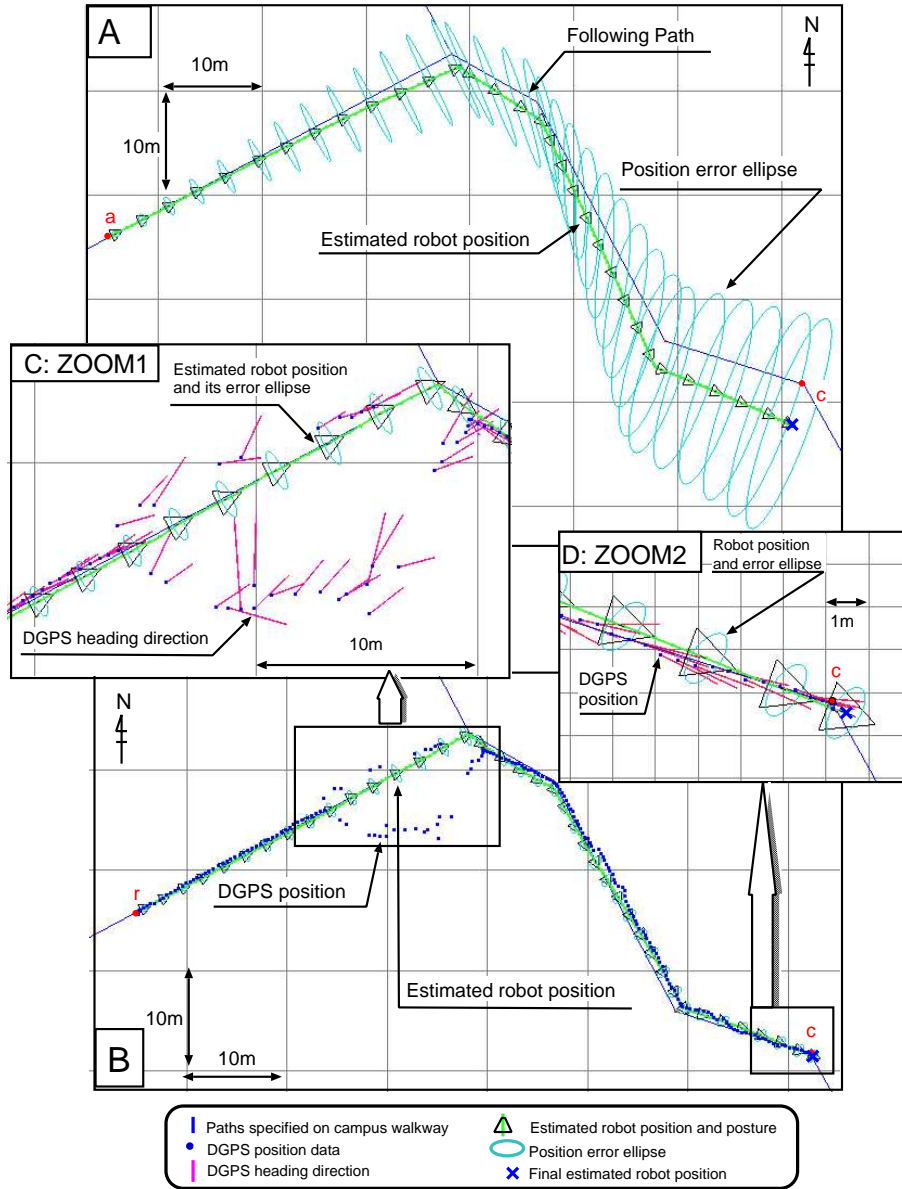


図 3.10: Comparison of trajectory of the estimated robot position: A illustrates estimated robot position without correction. B illustrates estimated robot position modified by proposed correction method. C illustrates erroneous DGPS measurement data which were regarded as inaccurate by the proposed collection method. D illustrates final robot position. (each parameters: $l_{xy\text{thresh}} = 1.6(75\%)$, $\sigma_{xgps} = \sigma_{ygps} = 3.5[m]$, $l_{\theta\text{thresh}} = 1.2(75\%)$, $\sigma_{\theta gps} = 25[degree]$)

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発53

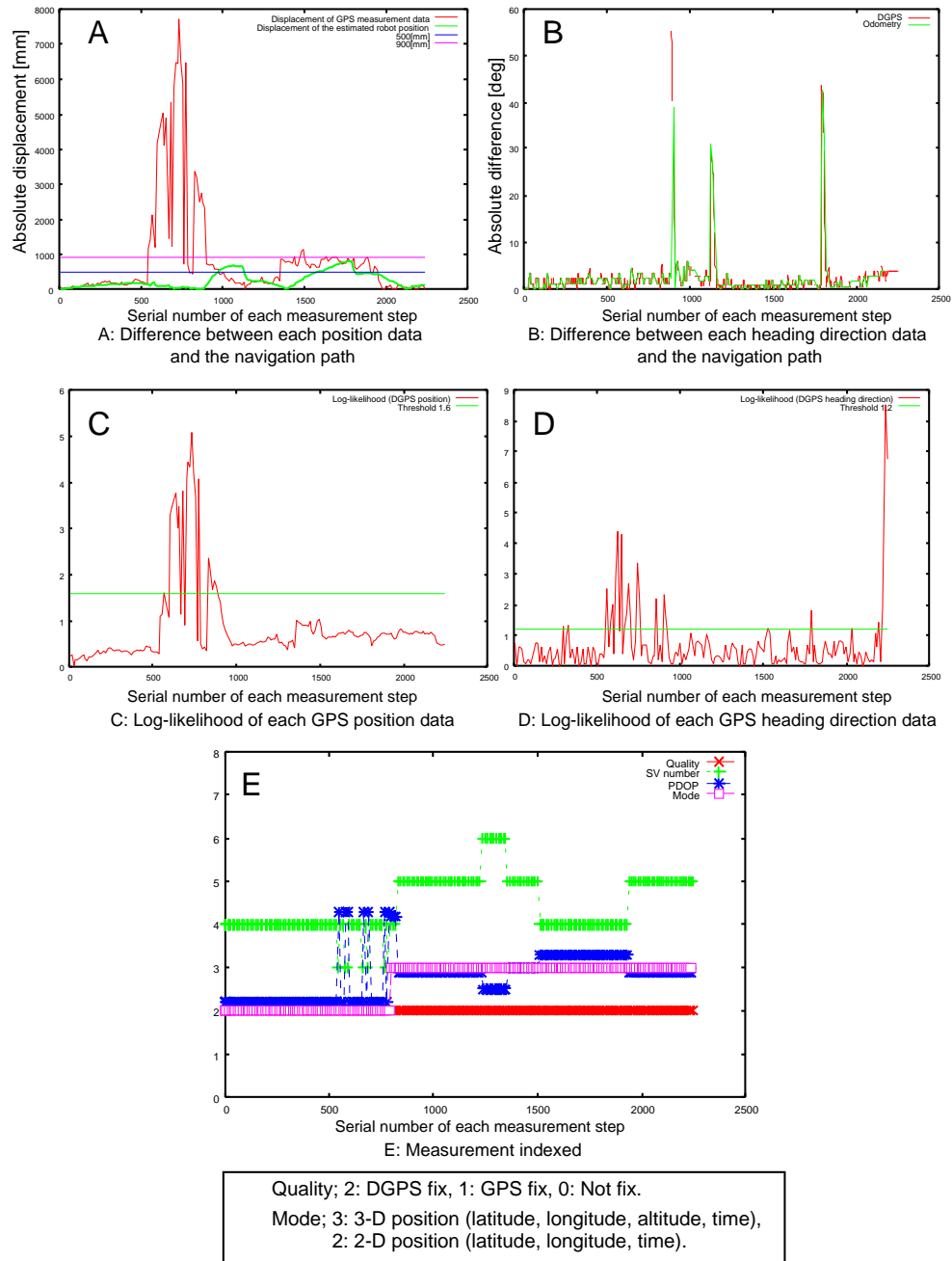


図 3.11: Displacement and condition of each DGPS measurement data

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発54



図 3.12: Snapshots of autonomous outdoor navigation using DGPS and odometry

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発55

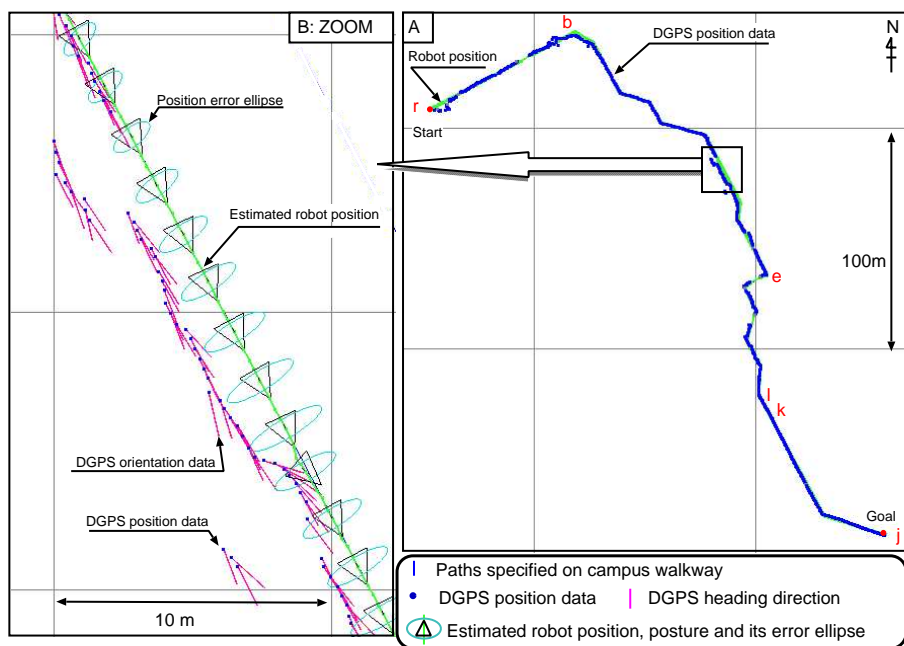
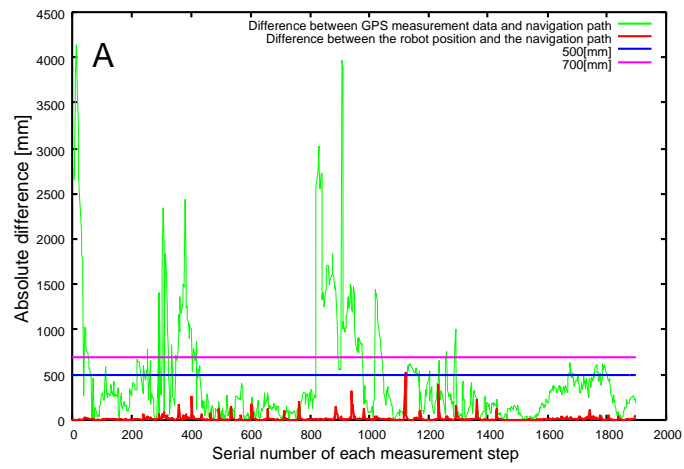
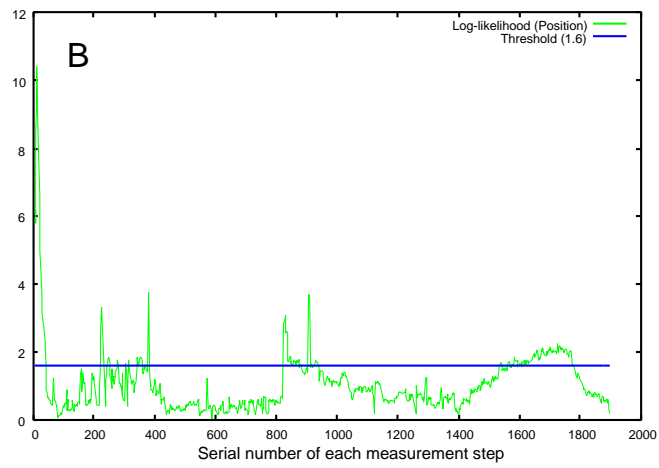


図 3.13: Estimated robot position and DGPS measurement data of autonomous outdoor navigation

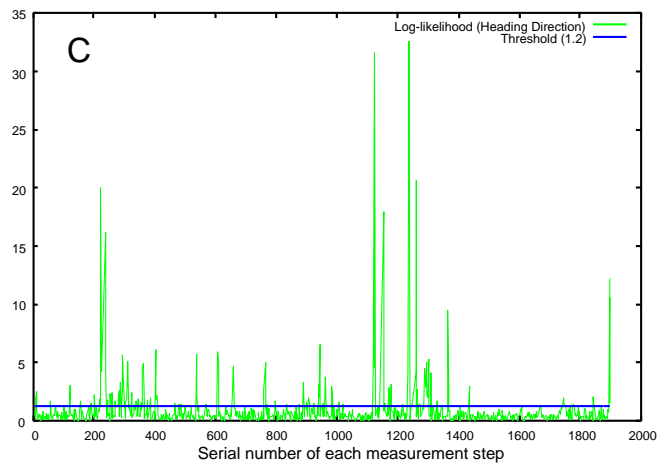
第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発56



A: Difference between each position data and the navigation path



B: Log-likelihood of each GPS position data



C: Log-likelihood of each GPS heading direction data

☒ 3.14: Log data of an autonomous navigation

第3章 GPSとオドメトリを用いた屋外環境におけるロボットの測位手法の開発57

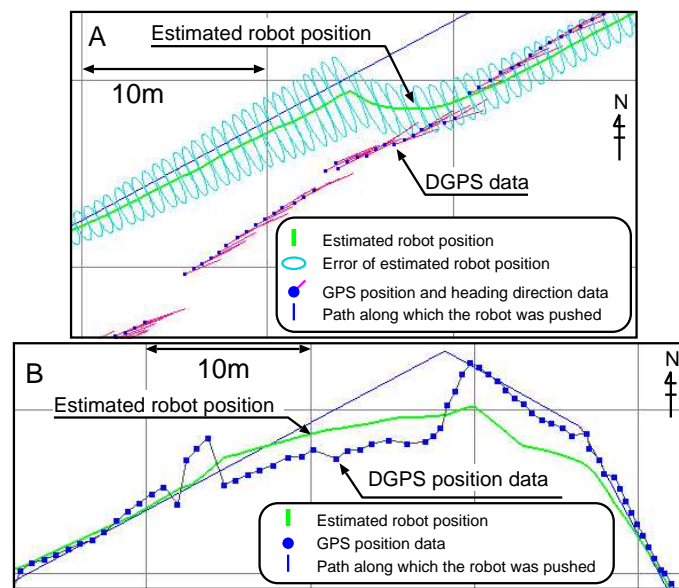


図 3.15: Failure of estimation. Image A and B were observed in walkway environment among building(Fig. 3.8 [a → b]).

第4章 LRFとGPSとオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での測位手法

本章では、レーザー距離計 (Laser Range Finder (LRF)) を用いて歩道周辺に存在する壁などのランドマークを検出し位置修正を行うことで建物付近の歩道環境でのナビゲーションの成功率を向上させる。技術的な課題は、広大な屋外環境で正確なランドマーク地図を容易に作成する手法の開発と、LRFを用いた安定したランドマーク検出の手法の開発である。

4.1 LRFとGPSとオドメトリを用いた測位手法の概要

前章で提案した測位手法では高い建物や樹木の付近では正確な測位を行えない場合があり、その結果、そのような環境においてはナビゲーションの成功率が低かった。そこで、本研究では、建物付近の歩道環境でナビゲーションを行う場合、歩道周辺に存在する構造物の壁や路肩の段差等 (図 4.1) をランドマークとして地図に登録し、走行中はLRFを用いてランドマークを検出しロボット位置を修正する。こうすることで建物付近の歩道環境で安定した測位を実現する。本章では、特に構造物の壁面をランドマークとして設定し、構造物の壁面の地図とLRFを用いた位置修正を行う。また、本章で提案するLRFを用いたランドマーク検出と位置修正の手法は単体で用いるのではなく、実際の屋外ナビゲーションの際は第3章で説明したGPSを用いたナビゲーション手法と組み合わせることで、開けた環境でも建物付近の歩道環境でも安定したナビゲーションが行える手法になると考える。

想定するナビゲーションの概要は次の通りである。図 4.2 に屋内環境で使用されている経路とランドマークの記述された地図を示す [30]。本研究でも同様に、口

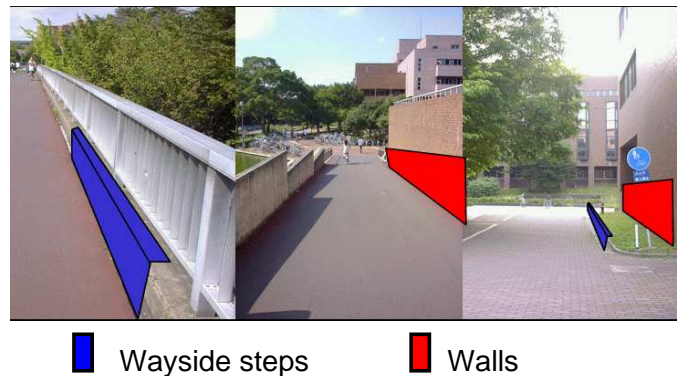


図 4.1: Target landmarks: walls and wayside steps

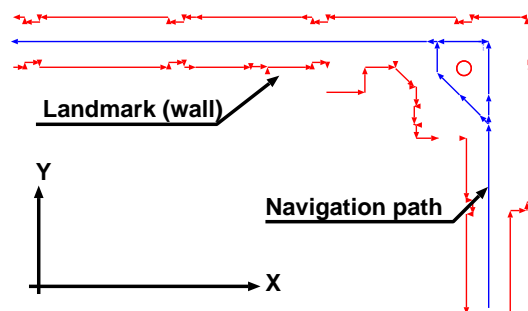


図 4.2: Navigation path and landmark map for corridor environment

ロボットが走行可能な経路 X_{path} と経路周辺の構造物の壁などのランドマークの位置姿勢 $L = \{l_0, l_1, \dots, l_N\}, l_k = (x_s, x_e)$ が書き込まれた地図をあらかじめロボットに与える。 l_k は壁などを表す有効線分であり、著者は進行方向左側を占有物が存在する占有区間、右側をロボットが通行可能な非占有区間とした。ナビゲーションの際、ロボットはオドメトリを用いて走行中のロボット位置 $P(t) = (X, Y, \theta)^T$ を推定し、その推定自己位置が走行経路上に存在するよう走行制御を行う。しかし、オドメトリには累積誤差があるため、走行にともないロボットの推定位置が真の値からずれる。本手法では、ロボットは常に LRF を用いて周囲に存在するランドマークを探索する。ランドマークが検出された場合は、検出されたランドマーク l' が地図に記載されているランドマークのリスト L 中のどれに対応するか対応付けを行う。対応付けが行われなかった場合は、またランドマークの探索を行う。対応付けが行われた場合は、ランドマークを基準とした地図上でのロボット位置のズレを計算

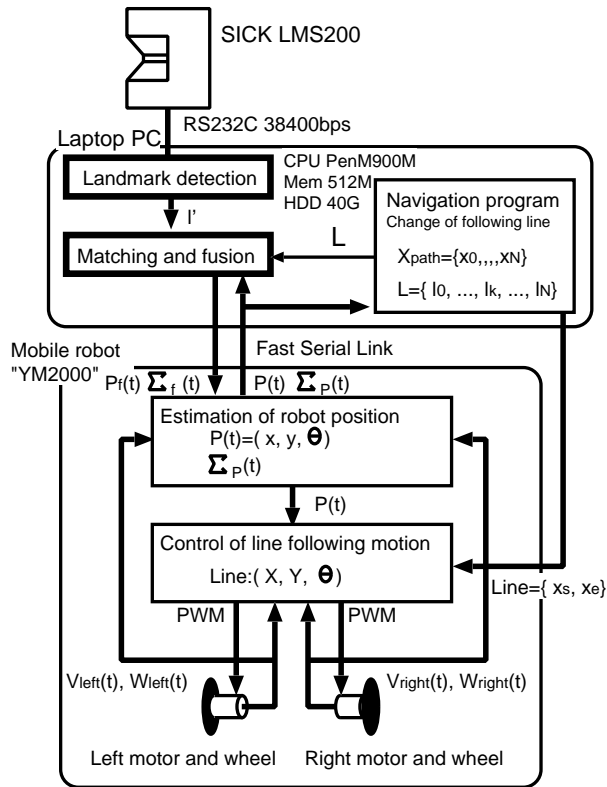


図 4.3: Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on LRF and odometry

する。この計測されたロボット位置のズレを用いてロボット位置 $P(t) = (X, Y, \theta)^T$ を修正する。この修正を頻繁に行うことで正確なロボット位置を保持し、建物付近の歩道環境でのナビゲーションの成功率を向上させる。

本研究で想定するナビゲーションを実現するための測位システムの構成を図 4.3 に示す。この LRF を用いたランドマーク検出と位置修正の手法は主に、**1. 経路とランドマーク地図の作成**、**2. オドメトリを用いたロボット位置推定と目標直線への追従制御**、**3. LRF を用いたランドマーク検出と位置修正**に分割でき、**2. オドメトリを用いたロボット位置推定と目標直線への追従制御**は第 3 章ですでに説明した通りである。その他の詳細は以下の通りである。

1. 経路とランドマーク地図の作成

ロボットが走行可能な経路とロボットが位置修正に使用可能なランドマーク

の情報を記載した地図を作成する。ナビゲーションの際は作成した地図をロボットに与える。この地図に記載する経路は3.2節で説明した1.RTK-GPSを用いた経路地図作成の手法を用いて作成する。一方、1.1節で問題a.として指摘したように広大な屋外環境でランドマークの地図を作成するには大変な労力が必要となり、この作業を正確かつ簡単に行う必要がある。本研究ではこのランドマーク地図の作成を、RTK-GPSとLRFとオドメトリを用いて歩道環境の三次元形状を復元し、三次元形状を表示したGUI上で人手によりランドマークの位置・姿勢を指定することで実現する。著者はランドマークとして建造物の壁面を設定した。三次元形状の復元とGUIを用いたランドマークの指定の詳細は4.3節で説明する。ナビゲーションの際、こうして作成した経路とランドマークの地図をロボットに与える。

3. LRFを用いたランドマーク検出と位置修正

走行中のロボット位置 $P(t) = (X, Y, \theta)^T$ はオドメトリを用いて計測する。ロボットは走行中つねにLRFを用いて周囲のランドマーク l' を検出し、ランドマークが検出されるたびに地図に記載されたランドマークのリスト L の中から対応するランドマーク l_k を探す。この対応づけの作業を行うことでロボット位置のズレを検出し、修正を行う。地図に建物付近のランドマークだけを記載することで、建物付近でこの手法を用いてロボット位置を修正する。本研究ではランドマークとして建造物の壁を選び、この壁を線ランドマーク $l_k = (x_s, x_e)$ として地図に記載する。またLRFによるランドマーク検出も線ランドマークとしてロボット周囲の壁を検出し、ロボット位置を修正する。このランドマーク検出と位置修正に関する詳細は4.4節で説明する。

本章では、4.2節で本研究で使用するLRFについて説明する。次に、4.3節で1.経路とランドマーク地図作成のうちランドマーク地図作成について述べ、4.4節で3.LRFを用いたランドマーク検出と位置修正について述べる。4.5節では提案するナビゲーションのための測位手法の有効性を確認するための行った実験結果について述べる。



図 4.4: Laser range finder (SICK LMS200)

4.2 レーザー距離計 (LRF)

本研究では図 4.4 に示す SICK 社製の LRF(LMS200)を用いる。この LRF の測位性能を表 4.1 に示す。測位距離は最大 32[m]、距離分解能はミリメートル、測位視野は 0–180[degree]、測位角度分解能は 0.5[degree] の距離計である。本研究では SICK とノート PC とのデータのやり取りに通信スピードを 38400[bps] に設定した RS232C を用いるため、一回の測位に約 300[msec] かかる。このうち距離計内部で測定に要する時間は約 30[msec] 程であり、残りは測定値の転送に要する時間である。本章ではこれ以降、時刻 t に SICK から得られる測位値を $S(t)$ と表記する。

$$S(t) = \{s_0(t), s_1(t), \dots, s_j(t), \dots, s_{360}(t)\}, j = (0, \dots, 360).$$

$S(t)$ は 0.5[degree] ごとの 361 個の測距値 $s_j(t)$ の集合である。こうして得られた LRF の測定値 $S(t)$ を、ロボット位置 $P(t)$ と LRF の取り付け位置・姿勢を考慮して三次元空間内に投影した後の測定値を $S'(t)$ と表記する。

$$S'(t) = \{s'_0(t), s'_1(t), \dots, s'_j(t), \dots, s'_{360}(t)\}, j = (0, \dots, 360).$$

$S'(t)$ は 361 個の三次元空間内の点 $s'(t) = (x, y, z)$ で構成される。

4.3 ランドマーク地図作成

4.3.1 ランドマーク地図作成の概要

著者が提案するランドマーク地図作成の概要は次の通りである。

表 4.1: SICK LMS200

Range	0 – 32[m]
Measurement resolution	1[mm]
Angle	0 – 180 [degree]
Angular resolution	0.50 [degree]
Transfer rate	38.4 [kbps]

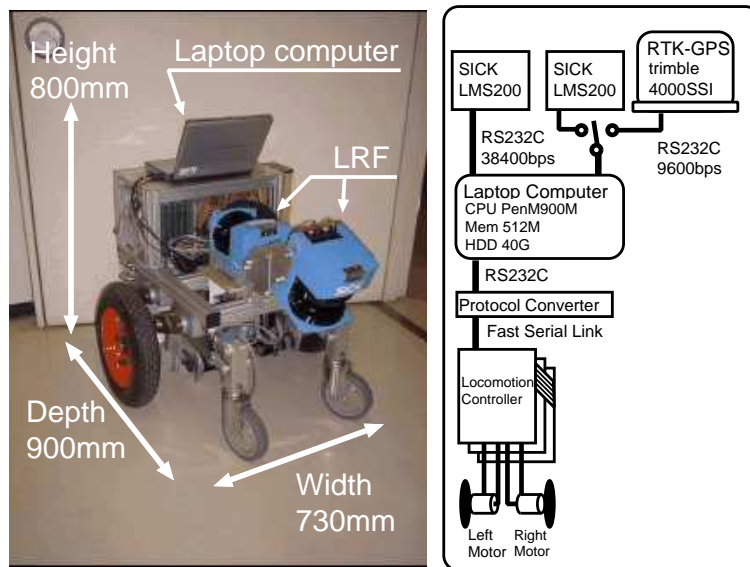


図 4.5: Yamabico "YM2000" for landmark map making

1. 移動ロボット (図 4.5) をランドマーク地図を作成したい歩道に沿って移動させる (図 4.6. A)。ロボットには二つの SICK 社製 LRF (LMS200) が搭載され、一方は前方斜め下向きに、もう一方は上向き垂直に設置されている。ロボットは移動中に得られる、LRF とオドメトリの情報を常に記録し続ける。また、移動中は数十メートルおきにロボットを停止させ、その正確な位置を RTK-GPS を用いて計測する。
2. 前述の計測終了後、全ての情報を統合し三次元形状を復元するために、オドメトリと RTK-GPS の情報を融合しロボットの正確な移動軌跡をまず復元する。この軌跡に LRF で計測した距離情報を組み合わせることで、歩道とそ

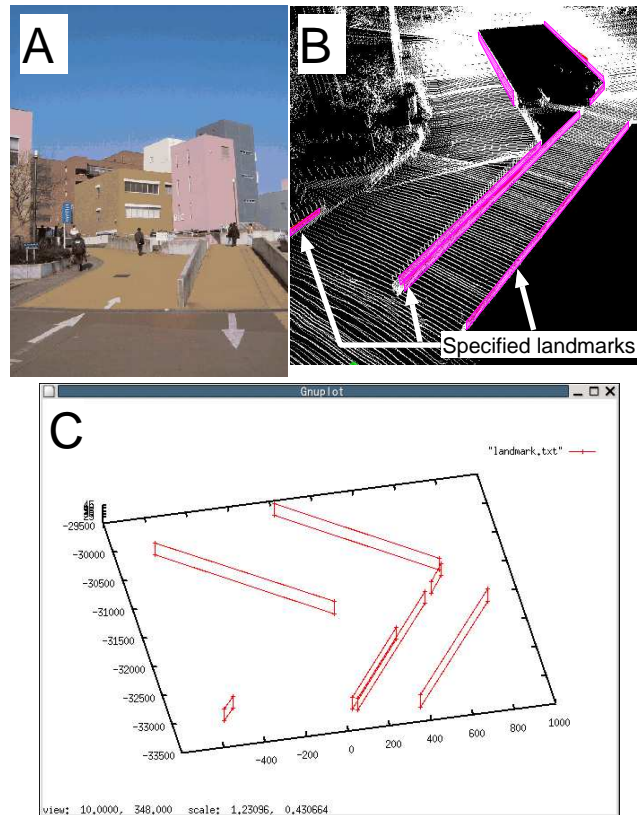
の周辺の物体の三次元形状を復元する(図4.6. B)。

3. 復元した歩道環境の三次元形状を計算機のディスプレイ上にGUIを用いて表示し、操作者はGUI上に表示された物体の三次元形状の上で、形状や各物体の位置関係を確認しながらランドマークとなる壁や路肩の段差の三次元空間内の位置・姿勢を指定する(図4.6. B)。このランドマーク位置の指定は、復元した三次元形状内で各ランドマークの候補の位置を自動検出し、その検出結果のなかでもっともらしい壁の候補を人手により選択し繋げることでランドマークの位置姿勢を指定する。こうすることで、操作者は容易にランドマークの指定を行う。
4. GUIを用いて指定した各ランドマークの情報に基づき、自律移動ロボットのナビゲーションに使用可能なランドマーク地図を作成する(図4.6. C)。

三次元形状復元の処理では、LRFの距離の測定値を導出されたロボットの各位置姿勢を基準に三次元空間内に投影する。この処理の際、導出されたロボット位置姿勢に誤差が含まれると図4.7.のCに示すように復元した後の形状が歪んでしまう。したがって、ロボット位置を導出する際は、これらの測定誤差や歪みをなるべく取り除く必要がある。本研究では、RTK-GPSの測位値を用いることでオドメトリから得られるロボット位置の測定誤差や歪みを取り除き、図4.7. Dに示す幾何学的に矛盾の少ない三次元形状を復元する。

4.3.2 ロボットの位置姿勢導出

本研究では、ロボットが走行した軌跡上の各時刻の位置姿勢を導出する問題を、出発地点と到達地点の二点間でのロボット軌跡の事後推定の問題として定式化する。図4.8に二点間をロボットが移動したときの軌跡推定の処理の流れを示す。ロボットを経路のスタート地点におき、出発地点でのロボット位置姿勢 $P(0) = (X_s, Y_s, \theta_s)$ を測位誤差数センチメートルのRTK-GPSを用いて計測する。 (X_s, Y_s) はRTK-GPSの測定値の平均値を使用し、 θ_s はロボットの進行方向の出発地点とは異なる点にRTK-GPSを設置し計測した平均値 (X'_s, Y'_s) と、先に計測した (X_s, Y_s) の逆正接(arc-tangent)を用いて計算する。次に経路に沿ってロボットを押して移動させ、移



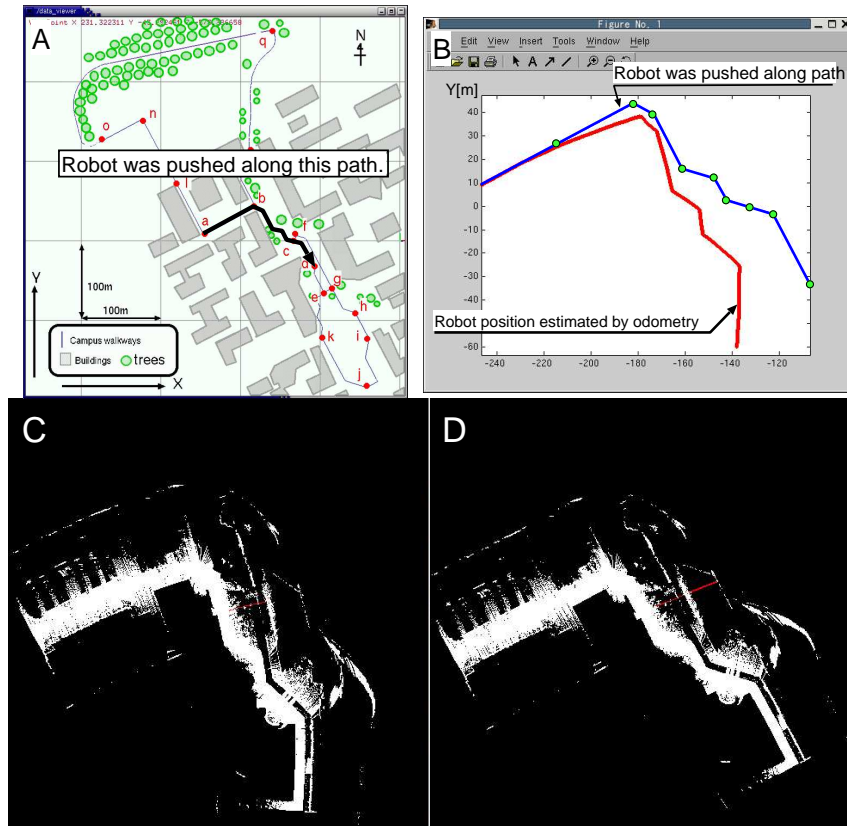
A:Environment of landmark construction
 B:3D environment structure and specification of wall type landmark
 C:Landmark map

図 4.6: Outline of landmark map making

動中にオドメトリから得られる移動量 $dx(t) = (V(t), \omega(t))^T \{t = 0, 1, \dots, n-1\}$ を常に記録する (図 4.8. A)。ここで $V(t)$ は時刻 t における並進速度、 $\omega(t)$ は回転ヨー角速度である。 n サンプルング時刻後、ロボット位置 $P(n) = (X(n), Y(n), \theta(n))$ にロボットを停止させ、RTK-GPS を用いて停止地点の位置 (X_g, Y_g) を正確に計測する。到達地点でのロボット位置姿勢 $P'(n)$ は、 $P(n)$ と $P_{gps}(n) = (X_g, Y_g, (\theta_g = unknown))^T$ を融合することで導出される¹(詳細、4.3.3 章参照)。

ここで、ロボットの出発地点での位置姿勢 $P(0)$ を初期値とし、オドメトリで計

¹RTK-GPS 受信機が静止した状態では θ_g を計測することが出来ない。そのため $\theta_g = unknown$ として計算する。



A: Campus plan and data recording path.
 B: Trajectory estimated by odometry.
 C: Robot positions and orientations are not modified.
 D: Robot positions and orientations are modified.

図 4.7: Bird view of constructed 3D structure

測された移動量 $dx(t)$ を用いて、現在の時刻 t から次の時刻 $t+1$ のロボット位置姿勢 $P(t) \rightarrow P(t+1)$ を式 (4.1) を用いて計算する (図 4.8. B)。この際、それぞれの推定値の誤差分散を式 (4.2) を用いて計算する。この式 (4.1),(4.2) は EKF (Extended Kalman Filter) の枠組みで自己位置を推定する式として一般的に知られている [56]。

$$P(t+1) = P(t) + \tau \begin{pmatrix} V(t) \cos(\theta(t)) \\ V(t) \sin(\theta(t)) \\ \omega(t) \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

$$\Sigma_{P(t+1)} = J(t)\Sigma_P(t)J(t)^T + K(t)\Sigma_V K(t)^T + \Sigma_N, \quad (4.2)$$

τ はサンプリング間隔を、 $J(t)$ は $P(t)$ の x, y, θ に関するヤコビアンを、 $K(t)$ は $P(t)$

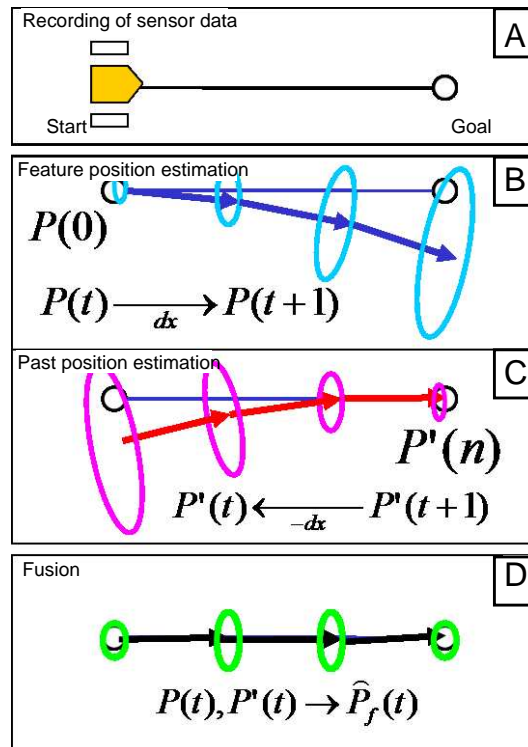


図 4.8: Formulation

の V, ω に関するヤコビアンを表す。 Σ_V は移動量 $dx(t)$ の誤差分散を、 Σ_N が計算の丸め誤差の誤差分散を表す。

次に、最後に到達した地点での位置姿勢 $P'(n)$ を初期値とし、現在の位置姿勢にロボットがたどり着くための、一つ前のロボットの位置姿勢 $P'(t+1) \rightarrow P'(t)$ を式 (4.3) を用いて計算する (図 4.8. C)。同様に式 (4.4) を用いてその推定誤差分散を計算する。

$$P'(t) = P'(t+1) - \tau \begin{pmatrix} V(t) \cos(\theta(t)) \\ V(t) \sin(\theta(t)) \\ \omega(t) \end{pmatrix}, \quad (4.3)$$

$$\Sigma_{P'(t)} = J'(t+1)\Sigma_{P'(t+1)}J'(t+1)^T + K'(t+1)\Sigma_V K'(t+1)^T + \Sigma_N. \quad (4.4)$$

$J'(t+1)$ は $P'(t+1)$ の x, y, θ に関するヤコビアンを、 $K'(t+1)$ は $P'(t+1)$ の V, ω に関するヤコビアンを表す。

出発地点を基準として推定された時刻 t でのロボット位置姿勢 $P(t)$ と、到達地点を基準に推定された時刻 t でのロボット位置姿勢 $P'(t)$ は、同じ時刻におけるロボット位置の推定値を表しており、二つの推定値は同時に起こり得る値である。よって、 $P(t)$ と $P'(t)$ を最尤推定の式 (4.5),(4.6) を用いて融合することで、より確からしいロボットの推定位置姿勢とその誤差分散を計算する (図 4.8. D)。

$$\hat{P}_f(t) = P(t) + \Sigma_f(t)\Sigma_{P'}(t)^{-1}(P'(t) - P(t)), \quad (4.5)$$

$$\Sigma_f(t) = (\Sigma_P(t)^{-1} + \Sigma_{P'}(t)^{-1})^{-1}. \quad (4.6)$$

この結果、全ての時刻 t でのロボット位置姿勢 $\hat{P}_f(t)$ を導出する。この手法では、上述の計算を行う際は $P(t), P'(n)$ の誤差分散の初期値 $\Sigma_P(0), \Sigma_{P'}(n)$ に限りなく小さな値を設定できる場合に有効である。

4.3.3 ロボットの位置姿勢導出の拡張

実際のランドマーク地図作成の際は、一度に数百メートルの歩道環境の地図を作成したい。本研究では次の手順で測定を行った (図 4.9)。

1. 地図を作成する経路の出発地点 S から到達地点 G の間、数十メートル (10[m] ~ 30[m]) おきに計測点をもうけ、経路を細かい区間に区切った。
2. ロボットを人手により地図を作成する経路に沿って移動させ、各計測地点にたどり着くたびにロボットを停止させ、その位置を RTK-GPS を用いて計測した。
3. 得られた全ての LRF の測定値、オドメトリにより計測されたロボットの移動量 $dx(t)$ と RTK-GPS の測定値をロボット上に搭載した計算機で記録した。

各時刻における通過軌跡上のロボットのもっともらしい位置姿勢を事後に推定する際は、与えられた初期位置 $P(0)$ と計測により得られたロボットの移動量 $dx(t)$ から、最初の計測地点 (時刻 t_1) までのロボット位置姿勢 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を式 (4.1),(4.2) を用いて推定する。こうして推定された時刻 t_1 のロボット位置 $P(t_1)$

をRTK-GPSの測位値 $P_{gps}(t_1) = (X_{gps}(t_1), Y_{gps}(t_1), (unknown))^T$ と W_{gps}^{-1} (式(4.7))を用いて修正する。

$$W_{gps}^{-1} = \begin{pmatrix} \sigma_{x_{gps}}^2 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{y_{gps}}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}^{-1}. \quad (4.7)$$

修正は、 $P_{gps}(t_1), W_{gps}^{-1}$ を $P'(t_1), \Sigma_{P'}^{-1}(t_1)$ とし式(4.5),(4.6)を計算することで実現される。この結果、計測地点でのロボットの位置姿勢 $\hat{P}_f(t_1)$ とその計測誤差分散 $\Sigma_f(t_1)$ が導出される。導出された $\hat{P}_f(t_1)$ を時刻 t_1 の真のロボットの位置姿勢、 $\Sigma_f(t_1)$ をその計測誤差分散と見なし、この値を初期値として同様の計算を行い、次の計測点 t_2 でのロボット位置姿勢 $\hat{P}_f(t_2)$ を計算する。この推定・修正を最後の到達地点まで繰り返し行い、各計測点 $\{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ でのロボット位置姿勢を導出する。

式(4.5)の計算では、 θ_{gps} に関する共分散行列の対角項を無限大としその逆行列を計算することで、無限大に設置した項に相当する対角項が0となり、RTK-GPSの静止測位では直接計測できない θ_{gps} を無視してロボットの位置姿勢を修正できる。また、オドメトリを用いてロボット位置を推定する際の推定誤差分散の相関項の影響で、RTK-GPSから得られる位置の情報だけでロボットの位置姿勢の全てを修正できる。

こうして得られた $P(0), \hat{P}_f(t'), t' = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ を、各測定地点における真のロボット位置姿勢とすることで、この長い経路を複数の二点間の問題に分割できる。各区間ごとに前章で述べた方法を用いてロボットの位置姿勢を導出することで、全体としてもっともらしいロボットの位置姿勢を導出する。

4.3.4 ロボット位置の導出精度の検証

提案手法では、設定した計測地点を通過する任意の経路をロボットを押して移動させればよい。ここでは、位置導出の誤差を検討するために、約83[m]の経路を実際の地面の上に白いテープを用いて描き、その上をロボットを人手により正確に押して移動した。その際得られたオドメトリとRTK-GPS測位値をもとにロボットの位置姿勢を提案手法を用いて導出した。この実験ではオドメトリから得られる移動量を0.1[sec]ごとに記録し、出発点以外の途中二点と到達点の合計3

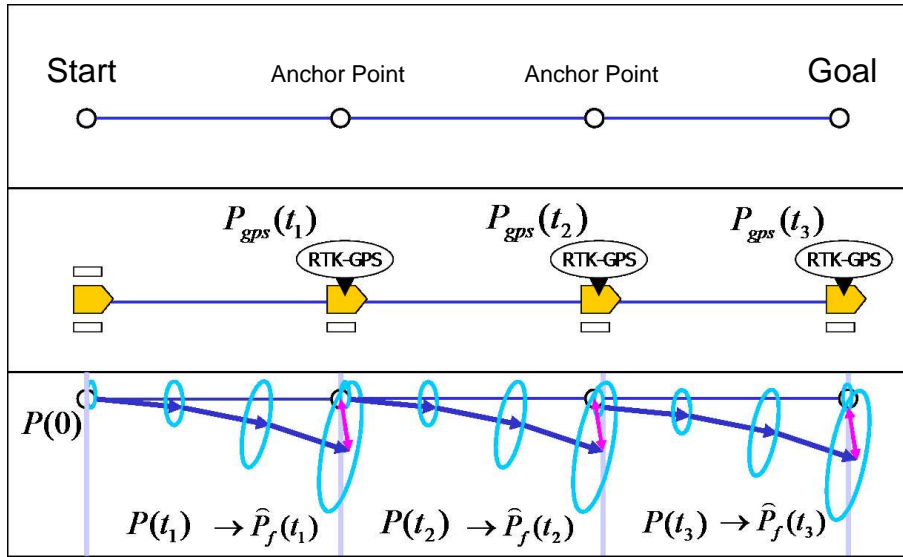
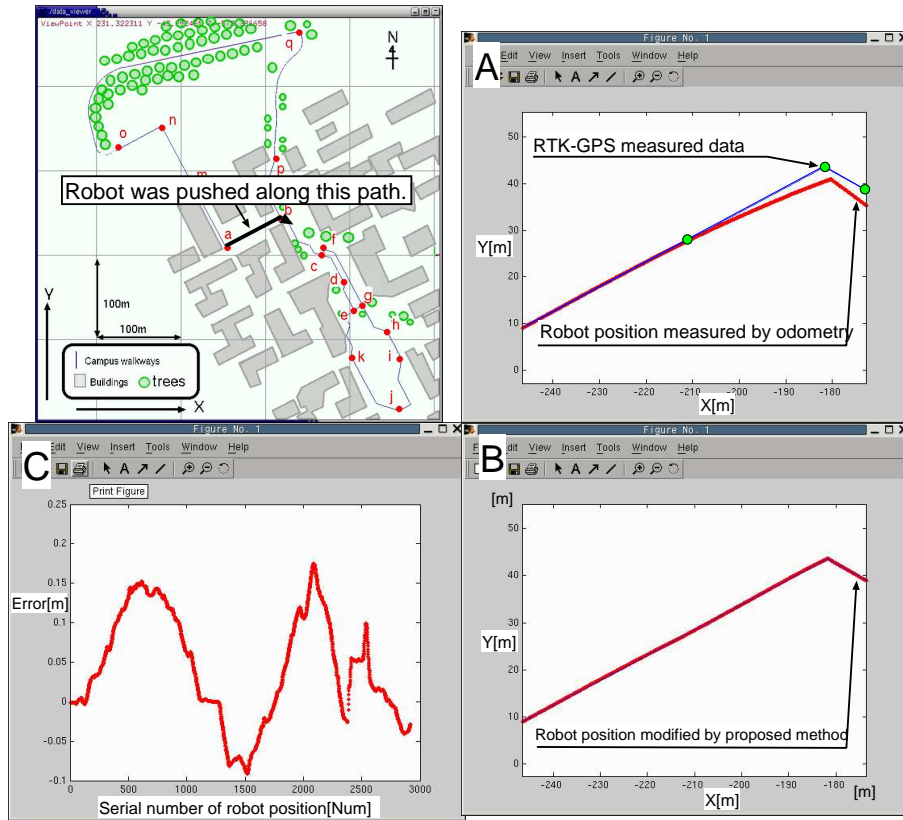


図 4.9: Extension of the formulation

点で RTK-GPS の測位値を記録した。図 4.10. A に RTK-GPS の測位値とオドメトリの値を示す。提案手法を用いてロボットの位置姿勢を導出した結果を図 4.10. B に示す。本実験では約 2900 点のロボット位置姿勢に関して修正を行った。またこの修正の誤差を判断するために、導出されたロボット位置と追従した経路の最短距離を計算した結果を図 4.10. C に示す。この最短距離のグラフから、導出されたロボット位置の導出誤差は 20[cm] 以内の範囲に収まり、誤差の統計的な性質は平均:4.28[cm]、標準偏差:6.80[cm] であった。ちなみにこの実験で最大のずれを記録した経路の区間の長さは約 36[m] であり、対象とするナビゲーション環境のなかで最も長い経路区間のうちの一つである。このことから、提案手法を用いて学内全体のロボットの走行位置姿勢を導出した場合、20[cm] 以内の精度で走行中のロボット位置が導出できるといえる。

4.3.5 屋外環境での形状復元

実際の屋外の歩道環境で図 4.5 に示す移動ロボットを用いて計測を行い、提案手法を用いて環境の三次元形状を復元した。オドメトリから得られるロボットの移動量 $dx(t)$ を 0.1[sec] ごとに、LRF の距離情報を 0.5[sec] ごとに取得した。



A:Odometry and RTK-GPS data.
 B:Robot position modified by the proposed method.
 C:Error of modified robot position.

図 4.10: Modification and its error

図 4.11. A に環境の三次元形状を復元した経路の地図上の位置を、図 4.11. B に全経路を五つの部分に分けて計測した際に得られたオドメトリと各計測地点での RTK-GPS の測定値を、図 4.11. C に提案手法を用いて導出したロボットの位置姿勢を示す。提案する手法を用いて導出した各ロボットの位置姿勢に LRF の情報を合成し、復元した環境の三次元形状のスナップショットを図 4.12 に示す。また、提案手法を用いて復元された三次元形状の映像は [60, 61] で閲覧することが可能である。このように幾何学的にもっともらしい、かつ歪みの少ない三次元形状を復元した。ランドマーク地図を作成する歩道環境は、高さを含む三次元の情報として復元されている。このよう三次元で形状を復元することで、壁がどこにあるのか、

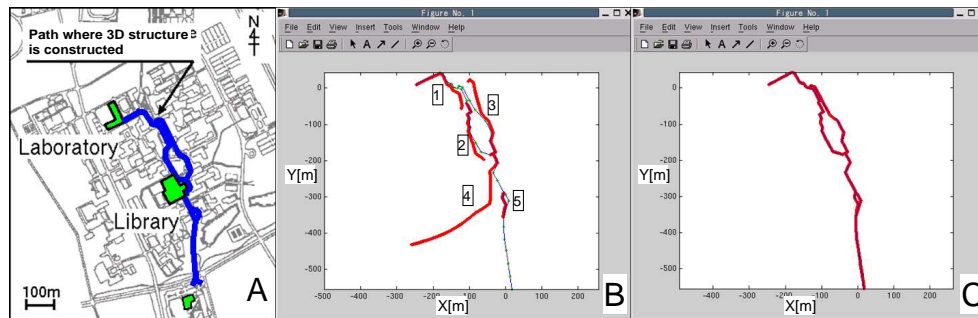


図 4.11: Path of constructing 3D structure

段差といった微妙なランドマークがどこにあるのかを人間が正確に判断できるようになった。

4.3.6 GUIを用いたランドマークの指定とランドマーク地図の作成

本研究では、ランドマークを全て線ランドマークとして取り扱う。歩道環境の三次元形状を表示した GUI 上で、次の手順で人手によりランドマーク位置を指定した。図 4.13 に駐輪場の壁の位置を指定する様子を示す。

1. ランドマークの候補となる面 (壁の面など) を自動で検出し、GUI 上に表示 (図 4.13. A, B)。
2. 人手により GUI 表示を切り替え検出結果が誤検出でないことを確認。
3. ランドマークの両端に存在する候補の面を人手により指定し、候補の面の間をつなげることでランドマーク位置を指定 (図 4.13. C)。

ランドマーク候補の検出は、面の法線ベクトルを用いた平面検出で行っているが、詳細は 4.4.1 節で説明する図 4.6. C に GUI 上でランドマークとなる壁を指定し、その三次元位置を表示した結果を示す。このようにして作成したランドマーク地図と、先に作成した経路地図 [38] を組み合わせて作成した経路とランドマークの情報を含む環境地図の一例を図 4.14 に示す。この図は、著者の研究室がある建物から大学中央の図書館までの、360[m] の歩道環境の経路とランドマークを記述した地図である。

三次元形状を用いないでランドマークの位置を指定する場合、壁のような特徴を有した物が本当の人工的な壁なのか、壁に立てかけられている看板なのか、壁の前におかれていた段ボールなのか、剪定した直後のたまたま壁のように見える樹木なのか判断することが困難であった。しかし、提案手法では人間の目で見た際に正確に三次元形状を把握することができるため、このような曖昧さを減らすことができ、かつ、各ランドマークの情報を巻き尺等で直接計測する場合と比較して、容易にその位置姿勢を指定し正確なランドマーク地図を構築できるようになったと著者は考える。

4.4 LRFを用いたランドマーク検出とロボット位置の修正

著者はLRFを用いて検出するランドマークとして構造物の壁面や路肩の段差を想定している。本章では構造物の壁面をランドマークとして設定し、このようなランドマークを線ランドマークとして取り扱う。LRFを用いた壁面検出の方法を4.4.1節で述べる。次に検出したランドマーク l' がランドマークリスト L 内のどれに対応するかの対応付けを行い、対応する地図上のランドマークが見つかった場合、線ランドマークとして拡張カルマンフィルタの枠組みを用いてロボット位置を修正する。

4.4.1 ランドマーク検出

本研究では、LRFをロボット前方斜め下向きに設置しロボットが移動することでロボット前方の空間を三次元的に走査する。異なるサンプリング時刻 t と $t+1$ に得られた二組のLRFの測位値 $S(t), S(t+1)$ とロボット位置 $P(t), P(t+1)$ を用いて構造物の壁面の検出を行う。得られた $S(t), S(t+1)$ を計測時のロボット位置 $P(t), P(t+1)$ とLRFの取り付け位置姿勢を考慮して三次元空間内の測定値 $S'(t), S'(t+1)$ に変換する。図4.15に二組のLRFの測定値 $S'(t), S'(t+1)$ を用いてロボットの右側の壁をランドマークとして検出する様子を示す。ある測定値 $s_j(t)$ に隣接する測定値 $s'_{j-n}(t), s'_j(t+1), s'_{j-n}(t+1), (n > 0)$ 間を直線で結び、二組の三角パッチを構成する。

各三角パッチの法線を用いて構造物の平面の候補を検出する。ロボットの左側の壁を検出する時は $s'_{j+n}(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1), (n > 0)$ を用いる。この際、測定値 $s'_j(t)$ と $s'_{j\pm n}(t)$ の間の距離が一定値以上になる n を導出し $s'_{j\pm n}(t)$ を隣接する測定値として用いる理由は、この間の距離が短いと LRF の測位誤差の影響が無視できなくなり、平面の法線ベクトルを正確に導出できなくなるからである。本研究では $s'_j(t)$ から 10[cm] 以上離れた点を $s'_{j\pm n}(t)$ とした。構造物の壁面の候補として検出された平面が同じ場所に複数存在する場合、その集合を XY 二次元平面上に射影し当てはまる平面を求めた。その結果、 XY 二次元平面上での壁 $l' = (X_{l'}, Y_{l'}, \theta_{l'})$ が検出される。

具体的な処理の流れは以下の通りである。

1. $S(t)$ と $P(t)$ を各サンプリング時間ごとに計測し、 $S(t)$ を $S'(t)$ に変換する。
2. LRF の測位値 $S'(t)$ が二つ以上記録され ($t > 1$) かつ、ロボットの移動量 $|P(t) - P(t-1)|$ が 10[cm] 以上である場合、以下の手順で左右の壁検出を行う。

2.1 ロボット本体の左側の壁を検出

2.1.1 ロボットの進行方向の左側に存在する壁を探す。 $j = 180$ (90[degree]) にセットし、 $j < 361$ の条件を満たすうちは以下の処理を繰り返す。

2.1.2 $s'_j(t)$ と $s'_{j+n}(t)$ の間が 10[cm] 以上になる最小の n を求める。

2.1.3 三角パッチ $Tri1: \{s'_{j+n}(t), s'_j(t), s'_{j+n}(t+1)\}, Tri2: \{s'_j(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1)\}$ を作成し、各三角パッチの法線 h_1, h_2 を計算する。

2.1.4 二つの法線 h_1, h_2 が地面と平行か調べる。 h_1, h_2 が Z 軸と交差する角度が ± 10 [degree] 以内の場合、平行であると判断する。 h_1, h_2 共に平行であると判断された場合、以下の手順で壁の候補かチェックし登録する。

2.1.4.1 登録されている壁の候補がない場合は、壁の候補 C_l に $\{s'_j(t), s'_{j+n}(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1)\}$ を登録する。登録後、2.1.4.2 の処理を飛ばし 2.1.4.3 へ移動する。

2.1.4.2 すでに登録されている壁の候補 C_l がある場合その壁の候補との傾きの差と距離を計算し、傾きの差が小さく、かつ距離が近い場

合は同じ壁を検出したとして壁の候補の点列 C_l に $\{s'_j(t), s'_{j+n}(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1)\}$ を登録する。そうでない場合は登録しない。この傾きと距離は、 C_l と $\{s'_j(t), s'_{j+n}(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1)\}$ にそれぞれ慣性等価楕円を当てはめることで計算される(付録 A: 式 (A.8), 式 (A.9), 式 (A.15) 参照)。計算の結果、 C_l の傾き θ_l と重心 G_l 、 $\{s'_j(t), s'_{j+n}(t), s'_j(t+1), s'_{j+n}(t+1)\}$ の傾き $\theta_{s'}$ と重心 $G_{s'}$ が導出される。 θ_l と $\theta_{s'}$ の差が $\pm 10[\text{degree}]$ で、 $G_{s'}$ と (G_l, θ_l) の最短距離が $10[\text{cm}]$ 以内であった場合、同じ平面を検出したと判断した。

2.1.4.3 C_l に一定個数の候補点が集まったらもう一度慣性等価楕円を当てはめ $l'_i = (X_{l'_i}, Y_{l'_i}, \theta_{l'_i})$ を計算し、このループ処理を抜ける。本研究では 12 個以上の点 $s'_j(t)$ が C_l に含まれる時に左の壁の検出処理を終了した。

2.1.5 $j = j + n$ を計算し 2.1.1 に戻る。

2.2 ロボット本体の右側の壁を検出

2.2.1 ロボットの進行方向の右側に存在する壁を探す。 $j = 180$ ($90[\text{degree}]$) にセットし、 $j > 0$ の条件を満たすうちは以下の処理を繰り返す。

2.2.2 $s'_j(t)$ と $s'_{j-n}(t)$ の間が $10[\text{cm}]$ 以上になる最小の n を求める。

2.2.3 三角パッチ $Tri1 : \{s'_j(t), s'_{j-n}(t), s'_{j-n}(t+1)\}$, $Tri2 : \{s'_j(t), s'_{j-n}(t+1), s'_j(t+1)\}$ を作成し、各三角パッチの法線 h_1, h_2 を計算する。

2.2.4 二つの法線 h_1, h_2 が地面と平行か調べる。 h_1, h_2 が Z 軸と交差する角度が $\pm 10[\text{degree}]$ 以内の場合、平行であると判断する。 h_1, h_2 共に平行であると判断された場合、以下の手順で壁の候補かチェックし登録する。

2.2.4.1 登録されている壁の候補がない場合は、壁の候補 C_r に $\{s'_j(t), s'_{j-n}(t), s'_j(t+1), s'_{j-n}(t+1)\}$ を登録する。登録後、2.2.4.2 の処理を飛ばし 2.2.4.3 へ移動する。

2.2.4.2 すでに登録されている壁の候補 C_r がある場合その壁の候補との傾きの差と距離を計算し、傾きの差が小さく、かつ距離が近い場

合は同じ壁を検出したとして壁の候補の点列 C_r に $\{s'_j(t), s'_{j-n}(t), s'_j(t+1), s'_{j-n}(t+1)\}$ を登録する。ここでも [2.1.4.2] と同様に慣性等価楕円を当てはめ、 C_r の傾き θ_r と重心 G_r 、 $\{s'_j(t), s'_{j-n}(t), s'_j(t+1), s'_{j-n}(t+1)\}$ の傾き $\theta_{s'}$ と重心 $G_{s'}$ を計算する。 θ_r と $\theta_{s'}$ の差が $\pm 10[\text{degree}]$ で、 $G_{s'}$ と (G_r, θ_r) の最短距離が $10[\text{cm}]$ 以内であった場合、同じ平面を検出したと判断した。

2.2.4.3 C_r に一定個数の候補点がたまったらもう一度慣性等価楕円を当てはめ $l'_r = (X_{l'_r}, Y_{l'_r}, \theta_{l'_r})$ を計算し、このループ処理を抜ける。本研究では12個以上の点 $s'_j(t)$ が C_r に含まれる時に右の壁の検出処理を終了した。

2.2.5 $j = j - n$ を計算し 2.2.1 に戻る。

2.3 検出した壁 l'_r, l'_l に対応するものが地図に登録されているランドマーク L 内に存在するか調べ、対応するものが見つかった場合ロボット位置を修正する。対応付けと位置修正の処理の詳細は 4.4.2 節で述べる。

3 1.にもどる。

この構造物の壁面の検出とそれを用いた位置修正を繰り返し行うことで、建物付近の歩道環境において走行中のロボット位置を正確に計測する。

4.4.2 LRFで検出したランドマークの対応付けとロボット位置の修正

LRFで検出した構造物の壁 $l' = (X_{l'}, Y_{l'}, \theta_{l'})$ がランドマークのリスト L 中のどの線ランドマーク l_k に対応するか以下の手順でチェックした。図 4.16 にロボット位置 $P(t)$ と LRFで検出したランドマーク l' と地図に記述されたランドマーク l_k の関係を示す。

1. L から一つの線ランドマーク $l_k = \{x_s, x_e\}$ を取り出す。
2. 線ランドマーク l_k の傾き θ_{l_k} と $\theta_{l'}$ が同じ方向を向いているか調べる。ここでは $d\theta = \theta_{l_k} - \theta_{l'}$ を計算し、 $d\theta$ が $\pm 30[\text{degree}]$ 以内であった場合同じ方向を向

いていると判断する。同じ方向を向いている場合は、次の処理へ進む。向いていない場合は1.に戻る。

3. 式(4.8)を解くことで $l_k = \{x_s, x_e\}$ と l' の交点 P_c 導出する。この際、交点の位置を表す係数 q が $0 < q < 1$ の条件を満たす場合、交点 P_c は線ランドマーク l_k 上に存在する。交点 P_c が線ランドマーク上に存在する場合次の処理に進む。存在しない場合は1.に戻る。

$$\begin{aligned} P_c &= x_s + q(x_e - x_s), \\ (P_c - l')^T (x_e - x_s) &= 0. \end{aligned} \quad (4.8)$$

4. l' と交点 P_c の距離 $dist'$ を計算する。この距離が以下の式(4.9)を満たすときランドマーク l_k と LRF により検出された構造物の壁面 l' は同じものであると見なす。

$$1.65^2 > dist' \sigma_{yLC}^2 \text{dist}'^{-1} \quad (4.9)$$

σ_{yLC} とはランドマーク l_k を基準に設定した Local Coordinate (LC) 座標系でのロボットの Y 軸方向の標準偏差である (図 4.16)。この式(4.9)は一般的にマハラノビス距離として知られている。1.65 という値は LRF で検出した構造物の壁面 l' の位置誤差の 90[%] の範囲に壁 l_k が存在している場合を意味する。ここで l' の誤差はオドメトリにより推定されたロボット位置の誤差を用いた。

この結果、LRF で検出した l' の地図上での真の位置姿勢 l_k が分かる。この位置姿勢のズレは、オドメトリにより推定されたロボット位置に誤差があるために生じている。この位置姿勢のズレを逆算し、ロボット位置を修正する。本研究では以下の手順で位置の修正を行った。

1. $P(t)$ と LRF で検出した l' の最短距離 d_l を計算する。

2. 走行中のロボット位置は、LC座標系のX軸から距離 d_l 離れた場所に存在する。よってLC座標系上でのY軸方向のロボット位置のズレが分かったことになり、 d_l' を用いてロボットの位置を修正することが可能である。本研究ではこの位置修正はPoemの位置修正の関数を用いることで実現した。具体的には $\text{Poem_fuseR_y_LC}(y, \sigma_y)$ を用いて行き、各引数にはそれぞれ $y = -d_l'$ と $\sigma_y = \sigma_{LRF}$ を代入した。

上述の手法で、LRFで検出した構造物の壁面 l' とランドマークリスト L に登録されるランドマーク l_k の対応付けを行った場合、 l_k の数が増えると対応付けの処理にかかる時間が多くなる。そこで、実際の処理では、目的地までの経路 X_{path} を目標直線 $\{x_k, x_{k+1}\}$ のリストに分割し、その各目標経路ごとにその周辺に存在するランドマークのリスト L' を L から取り出す。この作業は走行前に行い、走行中は追従している目標直線の周辺にあるランドマークのリスト L' を用いて上述の対応付けの処理を行うことで、冗長な計算を少なくした。

4.5 実験による有効性の検討

提案するLRFを用いた測位手法の有効性を検証するために提案手法を実機(図1.3)に実装し図4.17に示す建物付近の歩道環境で、精度の評価と自律走行実験を行った。4.5.1節で実験に使用するロボットシステムとそのセットアップについて述べる。4.5.2節で本提案手法の測位精度を評価するために行った実験について、4.5.3節で提案手法を用いて行った建物付近の学内歩道環境における自律走行実験の結果を述べる。

4.5.1 実験システムのセットアップ

図4.3に実験で使用するロボットのシステム構成図を示す。本実験では、ロボットの行動統括と位置修正を行うプログラムがノートPC上のプロセスとして実装されている。本研究では、従来のTransputerボード用に作られたプログラムをノートPC上で動作させ、かつノートPC外部のTransputerボード上のプロセスと通信を行うために著者の所属する研究室で開発された $LxSystem$ を用いた [62]。また、本

研究で使用したLRFは、ノートPC上のプロセスが送る測定値を取り込む依頼をRS232C経由で受け取り、その後測定を行い、その測定値をRS232C経由でノートPCに送る。この測定を開始してから、実際にすべての測定値をノートPC上のプロセスが受け取るには約300[msec]かかる。本研究ではこのデータ転送により生じる時間遅れを遡及的位置修正の枠組みを用いることで解決した[26, 27]。

実験に使用するロボットは3.5.1節と同様に実験前には必ずオドメトリの調整を行った。調整の際は、LRFが水平になるようにタイヤの空気圧を調整した。またLRFで検出した壁 l' を用いてロボット位置を修正する際の σ_{LRF} は500[mm]とした。

4.5.2 提案するLRFを用いた測位手法の精度検証

3.5.2節と同じ環境で提案手法を用いたロボット位置の修正を行った。具体的には、地球上の位置が分かっている経路上(図4.17[$a \rightarrow b \rightarrow c$])を人手によりロボットを押して移動し、得られたロボット位置を記録した。図4.18に記録されたロボット位置と、各位置姿勢で検出された構造物の壁を示す。3.5.2節ですでに述べた様に、経路[$a \rightarrow b \rightarrow c$]上をロボットを人手により押して移動させた際に、オドメトリだけでロボット位置を計測すると、最終到達地点で約4.5[m]のズレが生じた(図3.10 A)。図4.18では提案手法を用いてロボット位置を修正することで、目標直線から逸脱することなくロボット位置を計測できた。

提案手法を用いてロボット位置が正確に計測できていれば、得られたロボット位置は追従した直線と一致するはずである。本研究ではロボット位置の直線からのズレを用いて提案手法の精度を評価した。図4.19のAに目標直線からのロボット位置のズレの絶対値を、図4.19のBに目標直線からのロボットの進行方向のズレの絶対値を示す。これらの図から、ロボット位置は約40[cm]未満の精度で、角度は約5[degree]未満の精度で計測されていることが分かる。また、図4.19中の番号1100–1500の間はランドマークとなる構造物の壁が存在しないためロボット位置を修正できなかった。その結果、この区間でのロボット位置の経路からのズレが大きくなった。一方、番号500–1000の区間では、GPSを用いた測位手法ではロボット位置安定して正確に計測することが困難であったが、本提案手法では周囲に

存在する壁を検出することでGPSを用いた測位手法よりも安定した計測が実現できた。最終到達地点 c での計測されたロボット位置と真値の間のズレは約 32[cm]であった。これらの結果から、本提案手法を用いることで、経路 $[a \rightarrow b \rightarrow c]$ 上をロボットが自律走行可能であることが分かった。

4.5.3 提案するLRFを用いた測位手法を用いたナビゲーション実験

本章で提案した測位手法を実機に実装し、図4.17の経路 $[a \rightarrow b \rightarrow c]$, $[b \rightarrow p]$, $[r \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow e]$ でナビゲーション実験を行った。これらの経路では、3章で述べたGPSを用いた計測手法ではナビゲーションの成功率が低かった。図4.20に図4.17の経路 $[a \rightarrow b \rightarrow c]$ で行った自律走行実験の様子を示す。図4.21に自律走行時の走行軌跡と、LRFで検出したランドマーク位置を示す。ここでロボットの軌跡が最終地点の c まで届いていないのはナビゲーションプログラムにより手前で止まるように設定されていたためであり、手押し実験と同じ精度で目的の位置に到達できた。また、自律走行時の追従直線からのロボット位置のズレの絶対値を図4.22のAに、角度のズレの絶対値を図4.22のBに示す。図4.22中の a' , b' , d' の付近でロボットは目標直線を乗り換えているため、このような大きな変化が現れている。また c' の大きな変化は、 b' 付近からこの場所までロボットの位置を修正するためのランドマークが存在しないため、それまでに累積した誤差を一度に修正したために生じた変化である。LRFを用いてロボット位置を修正する際のロボットの位置に関する修正量は 30[cm] 以内であった。このようにGPSの測位が安定して行えない構造物の近くでは、LRFを用いることで安定した自律走行が実現できた。 $[a \rightarrow b \rightarrow c]$ の経路での成功率を評価すると、10回の実験で 100[%] の確率で自律走行が行えた。

このように建物付近の歩道環境では構造物の壁までの距離を計測することでロボット位置を安定して計測することが可能になり、同時にロボット位置を正確に測位できるようになった。本研究では、提案するLRFを用いた建物付近の歩道環境におけるロボットの位置修正の手法の有効性を示すため、ロボット上に人が乗った状態での自律走行の実験を行った。ロボットの両車輪は空気タイヤであるため、人が乗ることによりロボットを支えるタイヤの車輪径の値がモデルの値と異なり、

修正を行わない限り歩道上を走行することはできない。図4.23に人乗り実験のスナップショットを示す。このように、人が乗っている時でも乗らずに自律走行している時と同様、歩道から逸脱することなく走行することができた。

4.6 まとめ

本章では、LRFを用いた建物付近の歩道環境での測位手法を提案した。まず最初に (i) 想定するナビゲーションの概要を述べ、次に (ii) 広大な屋外の環境で正確にかつ簡単にランドマークの地図を作成する方法を開発した。ここでは、広大な屋外の三次元形状をLRFとRTK-GPSとオドメトリを用いることで作成し、GUIを用いて半自動でランドマーク位置の指定をおこなうことでこの問題を解決した。次に、(iii)LRFを用いて構造物の壁面を検出し位置修正を行う手法を開発した。最後にこれらをロボットに実装し、屋外の環境で提案する測位手法の有効性・精度を検証した。これにより、LRFとGPSとオドメトリを用いて復元した歩道環境の三次元形状をもとに作成したランドマーク地図を用いてロボットが十分に走行可能であることが分かった。また、その精度は、GPSとオドメトリを用いた測位手法よりも高いことが分かった。よって、本提案手法を用いることで、建物付近の歩道環境で安定した測位が実現できた。



図 4.12: Snapshots of constructed walkway environment 3D structure

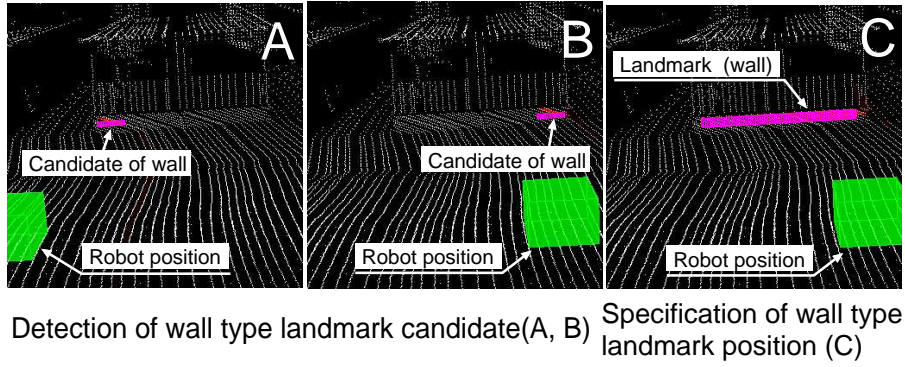


図 4.13: Specification of wall type landmark (position and posture)

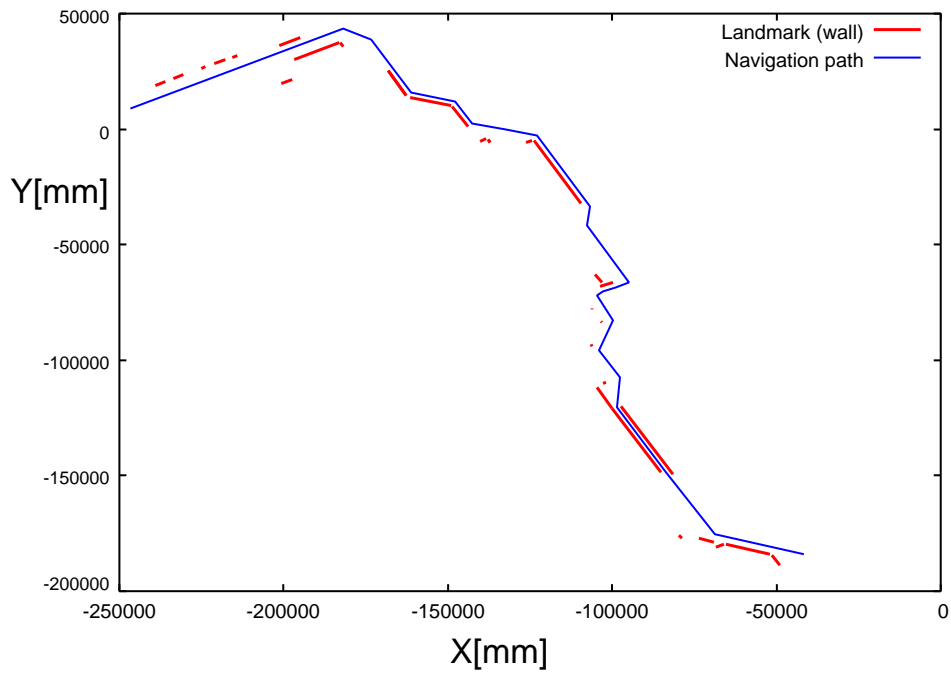


図 4.14: Map of navigation path and landmarks

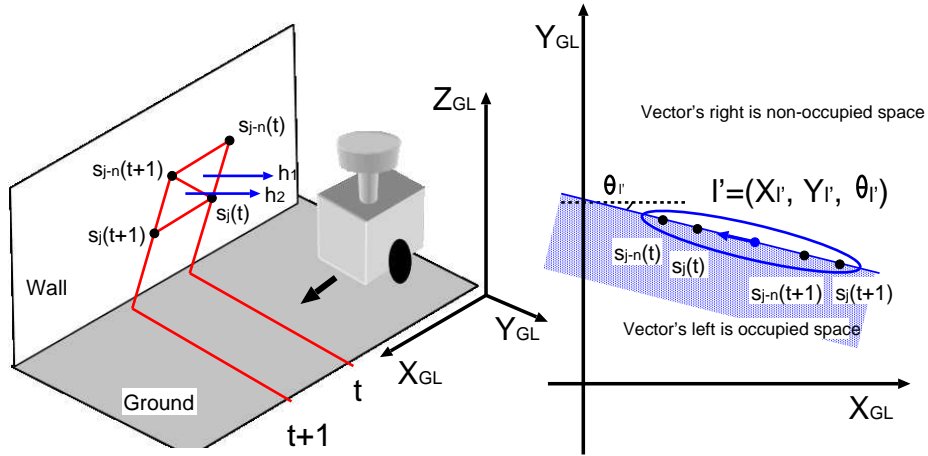


図 4.15: Relationship between two LRF measurement data $S(t), S(t+1)$ and detected landmark l'

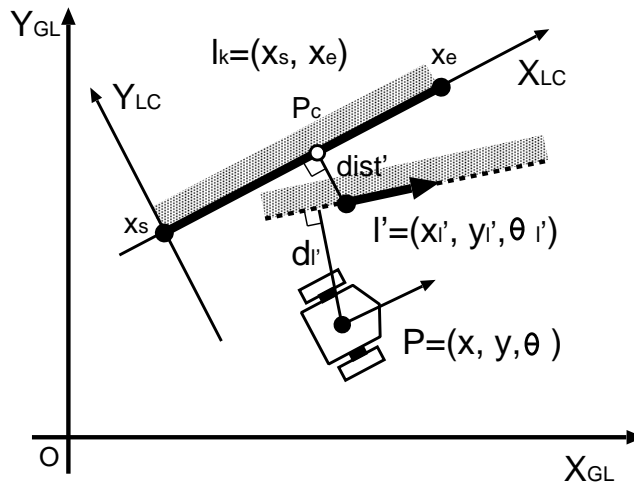


図 4.16: Relationship between a estimated robot position $P(t)$, landmark detected by LRF l' and landmark in a map l_k

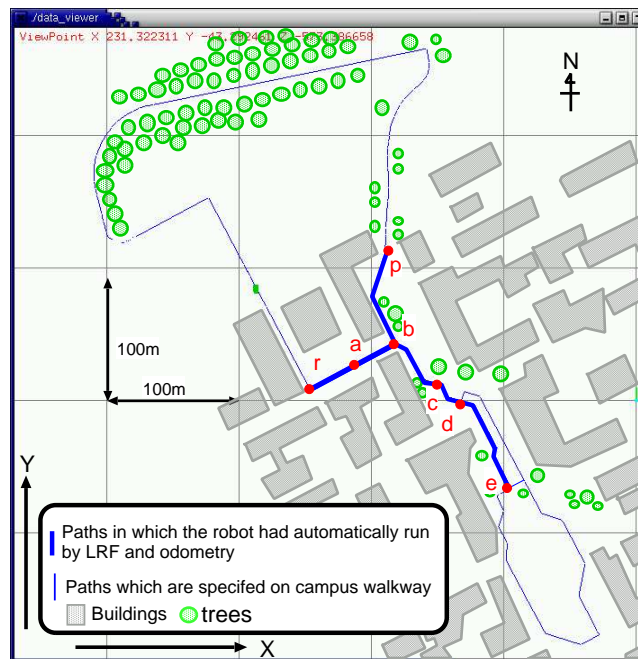


図 4.17: Paths in which the authors tested the position correction method based on LRF and odometry

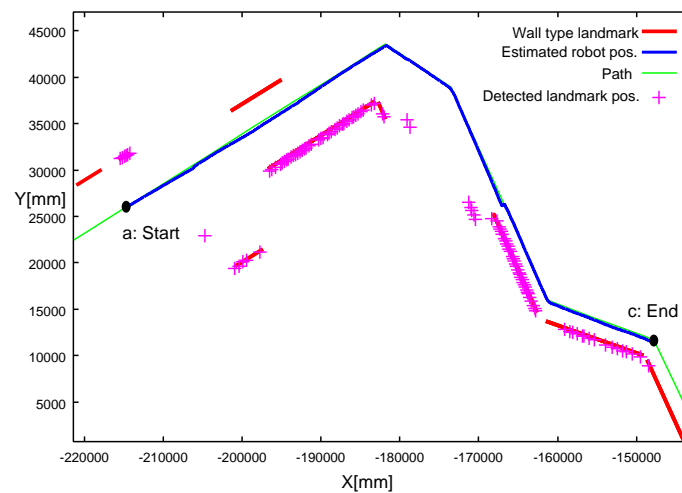
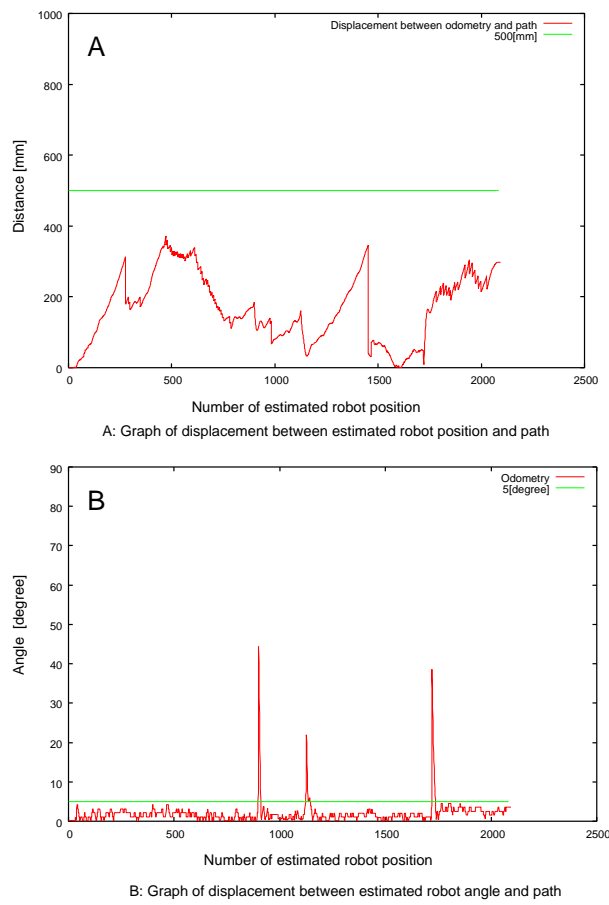


図 4.18: Trajectory of estimated robot position and landmark position detected by LRF



⊗ 4.19: Absolute displacement between estimated robot position $P(t)$ and path X_{path}

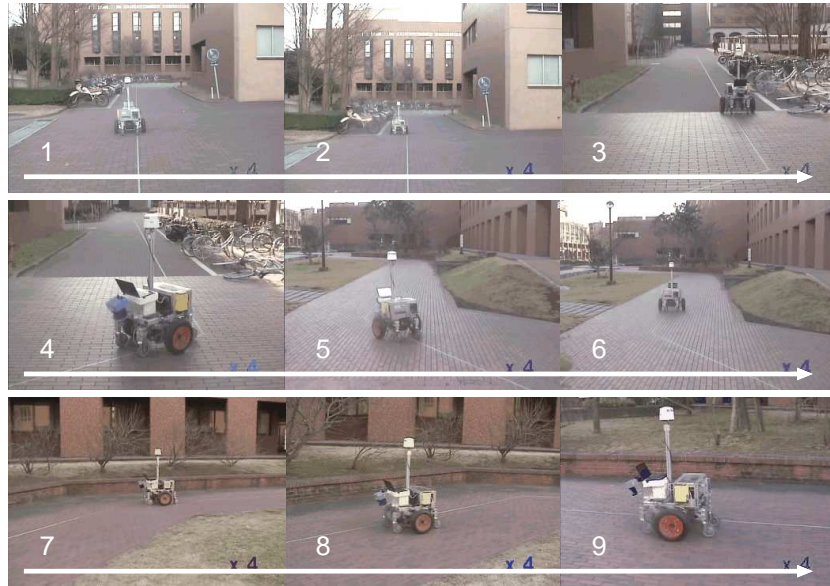


図 4.20: Autonomous run of the mobile robot based on LRF

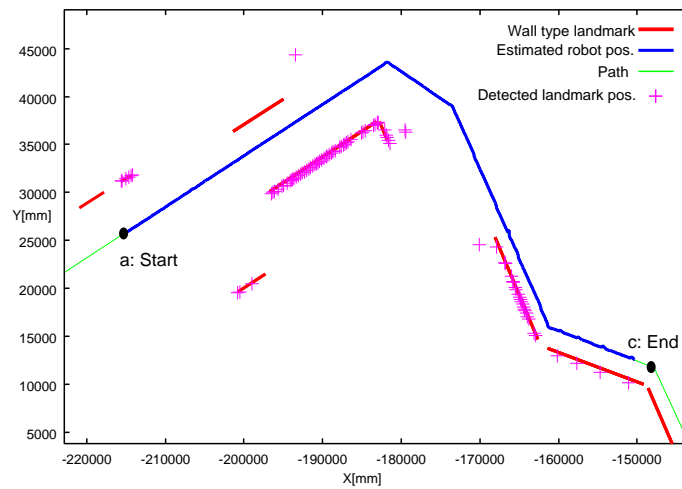
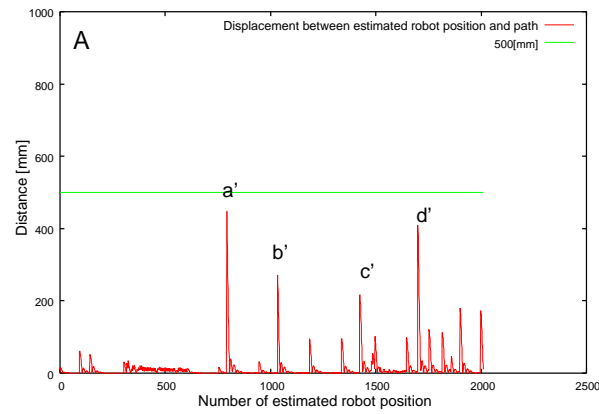
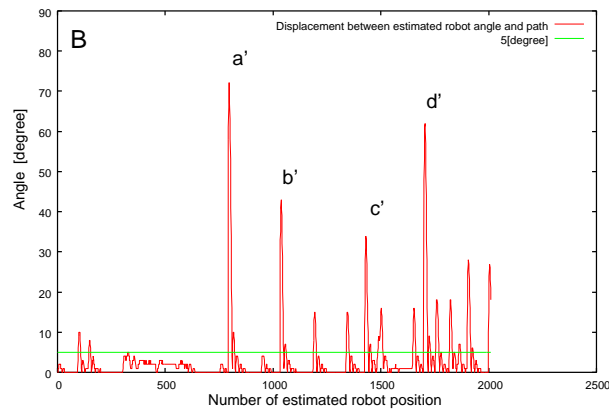


図 4.21: Trajectory of estimated robot position and landmark position detected by LRF



A: Graph of displacement between estimated robot position and path



B: Graph of displacement between estimated robot angle and path

図 4.22: Absolute displacement between estimated robot position $P(t)$ and path X_{path}

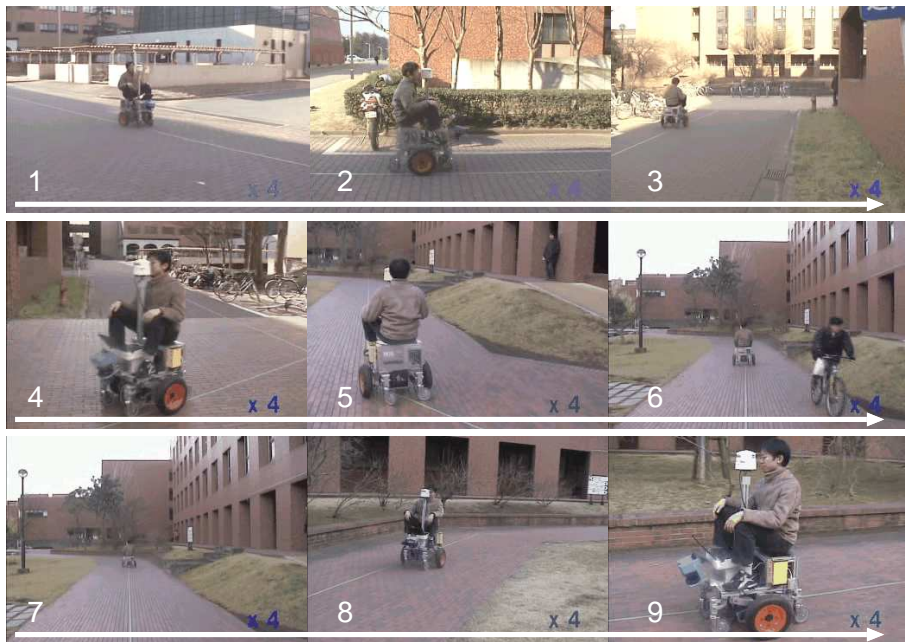


図 4.23: Autonomous run as the human got on the mobile robot

第5章 LRFとGPSを併用したナビゲーションのための測位手法

本章では第3章と第4章で説明したそれぞれの測位手法を統合して、開けた歩道環境と建物付近の歩道環境の双方で安定したナビゲーションを実現するための方針を述べる。検討すべき点は、二つの異なるセンサ情報を用いて位置を修正する際に、お互いの修正が重複しないように時間調整を行うことである。

5.1 ナビゲーションの概要

本章では、大学構内の周囲が開けた歩道環境と建物付近の歩道環境の間をスムーズに安定してロボット位置を計測できる測位手法の開発を目指す。第3章で述べたGPSとオドメトリを用いた地図に基づく測位手法と、第4章で述べたLRFとオドメトリを用いた地図に基づく建物付近の歩道環境での測位手法は相補的な関係にあり、この二つの手法を統合することで、開けた環境でも建物付近の歩道環境でも安定して測位が行える手法を開発する。

著者の提案する測位の流れは次の通りである。ロボットにあらかじめロボットが走行可能な経路 X_{path} とその周辺に存在するランドマーク L が記述された地図を与える。ロボットは、オドメトリにより推定された自己位置 $P(t)$ に基づき経路 X_{path} 上を目的地に向かって走行しする。しかし、オドメトリには累積誤差が存在し、走行距離が長くなるにつれこの誤差が無視できなくなる。開けた環境では、DGPSの測位値 $P_{gps}(t)$ を用いてその誤差を修正する。一方周囲に建物などが存在する環境では、DGPS測位値の測位誤差が大きい場合がある。その場合は、LRFで周囲の構造物の壁面 l' を検出することでロボット位置を修正する。DGPSの測位値とLRFの測位値を用いてロボット位置を修正する際、各測位値の誤差の判定をオドメトリから得られるロボット位置 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_p(t)$ を基準に行うことで、複

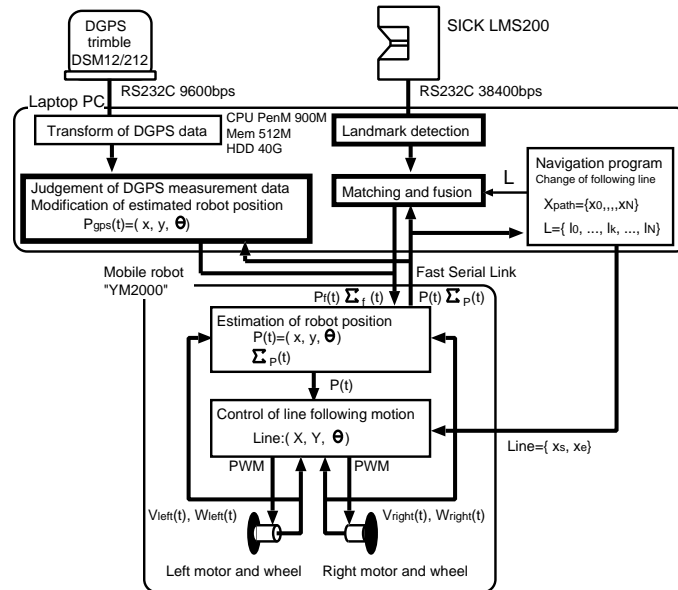


図 5.1: Measurement system for a mobile robot outdoor navigation based on DGPS, LRF and odometry

雑な処理機構を構築することなく DGPS 測位値と LRF の測位値を用いてロボット位置 $P(t)$ を修正する。

上述の測位手法を実現するための測位システムの構成を図 5.1 に示す。この測位システムを 1.2 節で述べた三つの構成要素に分解すると、1. 経路とランドマーク地図の作成、2. オドメトリを用いたロボット位置推定と目標直線への追従制御、3. DGPS と LRF を併用した自己位置修正に分解することができる。1., 2. は第 3 章、第 4 章ですでに述べた方法を用いる。本章では 3. DGPS と LRF を併用した自己位置修正の開発を行い測位システムを構築する。詳細は次の通りである。

3. DGPS と LRF を併用した自己位置修正

オドメトリにより推定されたロボット位置 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_p(t)$ の累積誤差を DGPS の測位値 $P_{gps}(t)$ と LRF で検出した構造物の壁面 l' の情報を用いて修正する。この修正は拡張カルマンフィルタの枠組みを用いて行う。DGPS 測位値は開けた環境では測位誤差の小さな測位値が得られロボット位置の修正に使用できるが、建物付近の歩道環境では測位誤差の大きな測位値が得られロボット位置の修正に使用できない場合がある。一方、そのような環境で

はLRFで構造物の壁面を検出し位置を修正することが可能である。よって、GPS測位値を用いてロボット位置を修正することが困難である建物付近の歩道環境では、LRFの測位値を用いることでロボット位置とその誤差分散を修正し、常に正確なロボット位置を把握する。

このように複数のセンサ情報を用いてロボット位置を修正する際の技術的課題は、GPSとLRFによる位置修正が競合しないように位置修正を行う時間を調整することである。次節ではその時間調整について述べる。

5.2 複数センサを用いた位置修正のための時間調整

図5.1にLRFとGPSを併用した測位システムの構成を示す。ここでは異なる二つのセンサの情報を用いてロボット位置を修正する。一般的にセンサ情報を用いてロボット位置を修正する場合、センサ情報の処理に時間がかかるため、センサを用いてランドマークを観測した時刻 t とセンサ情報を処理しロボット位置を修正する時刻 $t+dt$ が異なる。この問題を解決するために、著者は遡及的位置推修正の枠組みを用いる [26, 27]。

遡及的位置修正の枠組みでは、センサ情報を受け取った時刻 t で、ロボットの位置修正に必要なロボット位置 $P(t)$ やその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を記録する。また、時刻 $t+dt$ までのロボット位置の時間更新量を記録する。時刻 $t+dt$ でロボット位置を修正する場合は、時刻 t までさかのぼってロボット位置を修正し、時間更新量の分だけロボットを進めることで、センサ処理にかかる時間遅れを考慮して位置修正を行うことができる。

しかし、遡及的位置修正の枠組みのなかで二つのセンサ情報を用いてロボット位置を修正する場合、それぞれのセンサが情報を受けとってから位置修正が終わるまでの時間が重複しないように時間管理を行う必要がある。そこで、著者は一つのノートPC上に二つの位置修正プログラムを動作させ、ノートPCの内部時計を用いて時間を管理することでこの問題を解決する。図5.2に二つのセンサの処理時間を記したタイムラインを示す。DGPS受信機からは1[sec]ごとに自動でデータが送られてくるため、データを受け取った時刻をセンサ情報を受け取った時刻 t_{gps} とした。この時刻 t_{gps} でPOEM3のPoem_sence_start()関数を発行することで

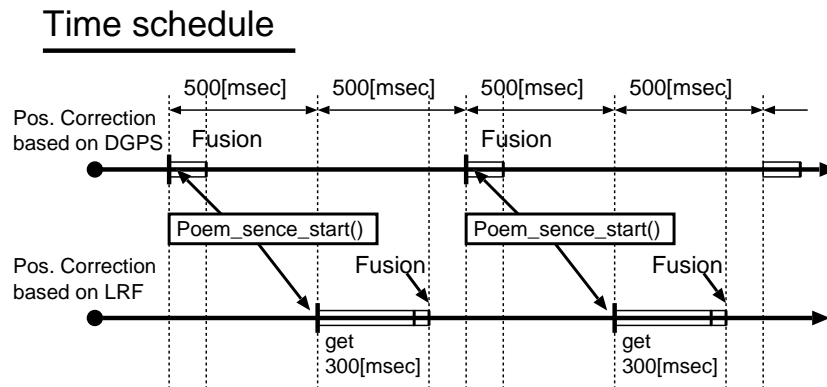


図 5.2: Time schedule for data fusions

時刻を記録する。そしてセンサ情報を処理し、DGPS 測位値が信頼できる値であった場合ロボット位置を修正する。その後、 t_{gps} から 500[msec] 後に LRF に距離を測位する命令を送りつけ、その時刻 t_{LRF} を `Poem_sence_start()` を用いて記録する。約 300[msec] かけて LRF の測定値を受け取り、壁 l を検出する。壁が検出でき、かつ信頼できる場合はロボット位置の修正に使用する。このようにそれぞれの処理が重ならないようにすることで、異なる二つのセンサ情報を、遡及的位置修正の枠組みを用いて融合することが可能になる。

また、それぞれのセンサ情報の信頼性はロボット位置 $P(t)$ とその誤差分散 $\Sigma_P(t)$ を基準に行っているため、第 3 章と第 4 章で説明した位置修正の方法を変更を加えずにそのまま本章で提案する測位システムに組み込むことが可能である。

5.3 まとめ

本章では GPS を用いた位置修正と LRF を用いた位置修正の統合の方針を述べた。二つの相補的な性質を持った測位手法を一つの測位手法として統合することにより、開けた環境でも建物付近の環境でも継ぎ目のない正確なロボット位置の計測が行えるようになると思う。本章では特にそれぞれのセンサによる位置修正の時間帯が重ならないように位置修正のタイミングを調整する方針を述べた。こうすることで、二つのセンサ情報を用いてロボット位置を修正できるようになる。

第6章 結論

本研究では、自律移動ロボットによる広大な屋外環境でのナビゲーションのための測位手法に関する研究を行った。本章では、研究成果と残された課題について述べ、最後にまとめる。

6.1 本研究の成果

本研究では広大な屋外環境でナビゲーションを行うための手法として、地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いた。広大な屋外の歩道環境でナビゲーションを実現するためには、走行中の正確なロボット位置を把握することが重要である。地図位置ベース型のナビゲーション手法を用いる場合、通常ではランドマークを観測することで位置の確認を行う。そのため、広大な屋外環境でこの手法を用いる場合、**a.** 広大な屋外環境に存在するランドマークの正確な地図を作成するには大変な労力を要すること、**b.** ランドマークの存在しない環境ではロボット位置の確認が行えないことが以前から問題視されてきた。

本研究の特徴は、GPS を活用してこれらの問題を解決したことである。本研究における研究成果と、それを実現するにあたり開発した技術的な成果は以下の通りである。

成果 1. GPS とオドメトリを用いた屋外ナビゲーションのための測位手法を提案し、実環境中で実機による実験を行い、その有効性と限界を示したこと

著者は、静止状態で高精度に測位が可能な RTK-GPS と移動時のロボットの測位に適する DGPS の二つの GPS 受信機を使い分けることで、測位手法を構築した。

まず、RTK-GPS から得られる地球上の正確な位置の情報をロボットの経路作成に利用することで、ロボットが走行可能な経路の計測・修正が容易に行えるようになった。また、DGPS を用いることでランドマークを用いることなくロボット位置を修正することが可能となった。この測位手法の構築における技術的な成果は、(i) 測位誤差の存在する DGPS 測位値から測位誤差の小さな測位値を弁別し、弁別された DGPS 測位値の誤差を考慮して位置修正を行う手法を開発したことである。これにより DGPS 測位値を用いて走行中のロボット位置を測位できるようになった。

成果 2. LRF と GPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境における測位手法を提案し、実環境中で走行実験を行い、その有効性を示したこと

上述の GPS とオドメトリを用いた測位手法の問題点を解決するために、本測位手法を考案した。GPS を用いて正確な測位が行えない環境は、周囲にランドマークとなるものが豊富に存在する場合が多い。著者は、主に構造物付近での安定した測位を実現するために、LRF を用いた構造物の壁面の検出とそれにもとづく位置修正を行った。このために、広範囲に存在するランドマークの情報を正確にかつ容易に地図に書き込む手法を開発した。本手法の構築における技術的な成果は、(ii) LRF と GPS とオドメトリを用いて歩道環境の三次元形状を復元し、復元した形状を表示した GUI 上で人手によりランドマークの位置姿勢を指定する手法を開発したことである。これにより、建物付近の歩道環境のランドマーク地図を正確にかつ簡単に作成することが可能となり、GPS では安定した測位を行うことが困難であった建物付近の歩道環境でも、LRF を用いて安定した自律走行が可能であることを示した。

著者は、屋外の環境で測位を行うためには今後も GPS を用いることは必要不可欠であると考え。また、これらの研究の過程で開発した技術成果 (i),(ii) は広大な屋外環境を移動するロボットの研究において欠くことのできない技術であると考え。

6.2 残された課題

本論文では、開けた環境や建物付近の歩道環境を対象とした測位手法を開発し、最後にその統合方針を述べた。しかし、現段階ではGPSを用いた位置修正とLRFを用いた位置修正を併用し、開けた環境でも建物付近の歩道環境でも測位が可能なシステムの構築には至っていない。このシステムの構築が残された課題である。

また、対象環境のうち高い樹木が密集する歩道環境での安定した測位を実現するまでには至っていない。本論文で提案した測位手法を用いて、そのような環境でもロボット位置を計測することは可能であるが、測位精度が低くナビゲーションの成功率が低くなると考える。しかし、このような樹木が密集した環境では、従来から樹木の幹を見つけて位置を修正する方法が提案されている [27]。従ってそのような環境でも、建物付近の歩道環境で著者が行ったようにLRFを用いて観測可能なランドマーク選び、著者らの構築した測位手法につけ加えることで、対処できると考える。

また、本研究では行うことができなかった今後の研究課題は以下のものがあげられる。1,2,3はまだ明らかになっていない今後の課題であり、4,5はやればできるが著者はまだ行っていない研究課題である。

1. GPSの移動測位の精度評価

DGPSの測位値は、移動値と静止時で測位精度が異なっているように著者は思う。これはGPSに関する重松らの私信とも一致している。本研究では移動中のロボットの正確な位置を計測することができなかったため、この評価を行うことができなかった。

2. ロボットの初期位置と初期姿勢の自動推定

著者の構築した測位手法では、ロボットの初期位置と姿勢は人手により与えた。しかし、GPSの測位値等の使用により、この初期位置と姿勢を自動的に導出することが望まれる。

3. 路面の変化を考慮した走行系と制御系の構築

本研究では路面は平らな平面であると仮定し、ロボットの走行系を構築した。しかし、実際の屋外の環境は平面ではなく、路面自体が傾いている場合が多

い。本研究ではGPSを用いることでこの影響をかなり軽減できたと考える。しかし、完全に取り除くことはできないため、ロボット位置の推定精度が特定の場所で大きくなることが観察された。本研究ではこの点に関する研究はまだ行っていない。

4. オドメトリの自動調整機能

本研究では実験を行うたびにロボットのオドメトリの調整を人手により行った。この作業を人手により行うのはかなりの労力を必要とした。このようなオドメトリの自動調整に関する研究はいくつか存在し、これらの研究を参考にオドメトリの自動調整機能をロボットに付加する必要がある。

5. ロボットの防水加工

屋外で実験を行っている最中に急な天候の変化により、雨が降ってきた時は慌てて実験を中止しロボットを安全な場所に避難させる必要があった。現状のロボットの多くは、防水加工を施されたものは少なく、今後これらの対応策を考える必要があると考える。

本研究の目標である屋外を自由に動き回れるロボットを構築するためには、これらの課題を解決する必要があると著者は考える。

6.3 まとめ

本研究では、屋外環境で活動するロボットの構築に必要不可欠な、屋外環境での測位手法の構築を行った。本研究で培った技術は、現在開発されている盲導犬ロボット、車椅子ロボット、案内ロボット、警備ロボットが広範囲な屋外環境で自律的に行動し、人の手助けを行う際の基盤技術になる。また、本測位手法を用いることで、初めて訪れた公園、郊外の町、テーマパーク等の敷地内でも、地図を書き換えるだけで目的の動作を行うことができるようになり、より多くの場面でロボットの持つ利便性を活用できるようになる。近い将来そのようなロボットが登場することを期待する。

謝辞

本研究は、工学博士 坪内孝司 筑波大学機能工学系助教授の御指導のもとで行われたものである。同助教授には、本研究を進めるにあたり、ご多忙であるにも関わらず時間を惜しまずに数多くの研究上の議論、論文執筆、発表準備等におつき合いいただきました。

また、本論文をまとめるにあたり、工学博士 安信誠二 筑波大学機能工学系教授、農学博士 瀧川具弘 筑波大学農林工学系助教授、工学博士 三浦純 大阪大学工学研究科助教授には適切な助言をいただきました。

本研究を進める上で工学博士 油田信一 筑波大学機能工学系教授、工学博士 大矢晃久 筑波大学電子・情報工学系助教授には数多くの有益なご指導と、ご援助を承りました。

また、五洋建設株式会社の重松文治氏には、私にとって未知であった GPS を使用するにあたり、多くの助言と機器の援助をしていただきました。博士(工学) 前山祥一 大阪電気通信大学講師には修士課程の研究においてご指導いただき、数多くのご意見をいただきました。博士(工学) 小柳栄次郎 桐蔭横浜大学助教授には自律移動ロボット「YM2000」のハードウェアを作成するにあたり適切なアドバイスをいただきました。

また、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金 基盤研究(B) 課題番号 13560130 によって行なわれました。

筑波大学大学院生命環境科学研究科の鈴木ゆかり氏には公私において支えになっていただきました。彼女の存在がなければ私のロボットが屋外環境で動くことはなかったと確信しております。

知能ロボット研究室のメンバーの皆さんにもお世話になりました。ここで全ての方のお名前をあげることは出来ませんが、ロボットの行動プログラムを作成するにあたり有用な LxSystem を提供していただいた吉田智明氏、Poem のバグ修正

に付き合っていたいただいた三澤正志氏、またセンサー機構を設計する際に助言をいただいた竹内栄次郎氏らには感謝しております。また、昼夜を問わず研究上の議論や雑談に応じていただいた、友納正裕氏、竹岡年延氏、山崎公俊氏、入江清氏、中川健司氏、白木健一氏、田中章愛氏にも感謝しております。今後、ロボ研メンバーである彼らの研究がますます発展することを心から期待しております。

また、私が大学および大学院在学中に学費を仕送りしていただいた両親と祖母の惜しみない援助には特に感謝しております。

上述の皆様をはじめ、ここでは書ききれない数多くの方の助けがあったからこそ、ここまで来ることができたと確信しております。この場を借りて深い感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Toshihiro Aono, Kenjiro Fujii, Shintaro Hatsumoto and Takayuki Kamiya, “Positioning of vehicle on undulating ground using GPS and dead reckoning,” Proc. of the 1998 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, pp. 3443– 3448, May. 1998.
- [2] 有本 卓. 「カルマンフィルタ」. 産業図書, 1977
- [3] K. O. Arras, N. Tomatis and R. Siegwart, “Multisensor on-the-fly Localization Using Laser and Vision,” Proc. of IEEE Int’l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 462– 467 (2000)
- [4] K. O. Arras, R. Philippsen, N. Tomatis, M. de Battista, M. Schilt and R. Siegwart, “A Navigation Framework for Multiple Mobile Robots and its Application at the Expo.02 Exhibition,” Proc. of IEEE Int’l Conf. on Robotics and Automation, pp. 1992– 1999 (2003)
- [5] D. Austin, L. Fletcher, A. Zhelinsky, “Mobile Robotics in the Long Term - Exploring the Fourth Dimension-,” IEEE J. of Robotics Research, 19(11), 972–999, 2000.
- [6] H. Baltzakis and P. Trahanias, “Closing Multiple Loops while Mapping Features in Cyclic Environments,” Proc. of IEEE Int l Conf. on Intelligent Robots and Systems, pp. 717– 722, 2003.
- [7] D. Bouvet and G. Garcia, “Civil-engineering articulated vehicle localization: solutions to deal with GPS masking phases,” Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation, San Francisco, CA, Apr. 2000.

- [8] D. Bouvet and G. Garcia, “Improving the accuracy of dynamic localization systems using RTK GPS by identifying the GPS latency,” *Proc. of the 2000 IEEE International Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2525– 2530 (2000).
- [9] Hsiaojing Chen and Hideo Mori, “Sign Pattern Detection on Shaded Road,” *Proc. of 1989 IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (1989), pp. 350 – 357
- [10] F. Chenavier and J. L. Crowley, “Position Estimation for a Mobile Robot Using Vision and Odometry,” *Proc. of 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 2588– 2593 (1992).
- [11] 近山裕一, 小谷信司, 森英雄, “RTK-GPS による歩行ガイドロボットの位置計測,” *ロボティクス・メカトロニクス講演会’01 講演論文集*, 講演 No.1, No.1P1-J4, 2001 年.
- [12] Hugh F. Durrant-Whyte, *Integration Coordination and Control of Multi-Sensor Robot Systems*, Kluwer Academic Publishers, USA; 1988, pp. 113.
- [13] H. F. Durant-whyte, “Uncertain in Robotics,” *IEEE J. of Robotics and Automation*, vol. 4, no. 1, pp. 23– 31 (1988).
- [14] V. Greafe and K. D. Kuhnert,, “Towards a vision based robot whith a driver’s license,” *Proc. of Int.Symp. on Intelligent Robots and Systems*, (1988), pp. 627 – 632
- [15] 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, pp. 143– 144, 1996 年.
- [16] 羽田 靖史. “自律移動ロボットの長時間活動に関する研究,” 平成 14 年度筑波大学大学院博士課程工学研究科博士論文, 2003.
- [17] 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) pp. 7– 11, 1996 年.

- [18] S. Iida and S. Yuta, "Vehicle Command System and Trajectory Control for Autonomous Mobile Robots," Proc. of IEEE/RSJ International Conf. on Intelligent Robots and System (IROS'91), Vol. 1, pp 212–217, Nov. 1991, Japan.
- [19] 木瀬道夫, 野口伸, 石井一暢, 寺尾日出男, "農用ロボットの制御のためのセンサフュージョンアルゴリズム," ロボティクス・メカトロニクス講演会'01 講演論文集, 講演 No.2, No.2P2-J9, 2001 年.
- [20] K. Kluge and C. Thorpe, "Representation and Recovery of Road Geometry in YARF," *Proc. of Intelligent Vehicles*, (1992), pp. 114 – 119
- [21] A. Kosaka, M. Meng and A. C. Kak, "Vision Guided Mobile Robot Navigation Using Retroactive Updating of Position Uncertainty," Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, vol. 2, pp. 1– 7 (1993).
- [22] 小谷 信司, 清弘 智昭, 森 秀雄. 「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.
- [23] J. J. Leonard and H. F. Durant-whyte, "Mobile Robot Localization by Tracking Geometric Beacons," IEEE Trans. on Robotics and Automation, vol. 7, no. 3, pp. 376– 382 (1991).
- [24] J. Leonard, J .D. Tardós, S. Thrun and H. Choset eds., Workshop Notes of the ICRA Workshop on Concurrent Mapping and Localization for Autonomous Mobile Robots, IEEE Int l Conference on Robotics and Automation, 2002.
- [25] F. Lu and E. Milios, "Globally consistent range scan alignment for environment mapping," *Autonomous Robots*, vol. 4 pp. 333– 349 (1997).
- [26] Shoichi Maeyama, Akihisa Ohya and Shin'ichi Yuta, "Non-stop outdoor navigation of a mobile robot," Proc. of 1995 IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS'95), pp. 130–135 (1995).
- [27] 前山祥一 "大学構内歩道における移動ロボットの長距離ナビゲーションに関する研究," 平成 10 年度筑波大学大学院博士課程工学研究科博士論文, 1999

- [28] Takeshi Miyai and Shin'ichi Yuta, "Design and Implementation of Distributed Controller and its Operating System for Autonomous Mobile Robot Platform," International Conference on Field and Service Robotics (FSR'97), pp. 342– 347, (1997)
- [29] E. Nebot and H. F. Durrant-Whyte, "High Integrity Navigation Architecture for Outdoor Autonomous Vehicles," IEEE J. of Robotics and Autonomous Systems, Vol. 26, pp. 81– 97 (1999).
- [30] 小倉 知樹“自律移動ロボットのための地図管理・経路プランニングシステムの開発,”平成 10 年度 筑波大学 大学院 博士課程 工学研究科 修士論文 (1999-3)
- [31] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, "A Mobile Robot Campus Walkway Following with Daylight-Change-Proof Walkway Color Image Segmentation," *Proc. of 2001 IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, (2001), pp. 77 – 83
- [32] 大野 和則, 坪内 孝司, 重松分治, 油田 信一, “大学構内の歩道環境における自律移動ロボットの屋外ナビゲーション -RTK-GPS の試用と経路地図の作成 -,” 第 7 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 19-24, 2002 年.
- [33] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, "Trial Outdoor Navigation based on Map by Fusion of DGPS and Odometry," *Proc. of 20th Robotics Society of Japan*, (To Appear), Oct, 2002, Japan, (In Japanese).
- [34] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu and Shin'ichi Yuta, "Localization and Navigation based on DGPS and Odometry Data Fusion in Campus Walkway between Buildings," *Robotics Symposia, Proc. of 8th Robotics Symposia*, (Now Printing), Mar, 2003, Japan, (In Japanese).
- [35] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, "Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based

- on DGPS and Odometry Data Fusion,” Proc. of IEEE Int’l Conf. on Robotics and Automation, Spt. 2003, (Accepted).
- [36] 大野 和則, 坪内 孝司, 油田 信一, “自律移動ロボットによる地図に基づく安定した屋外ナビゲーションの構想,” 第 21 回日本ロボット学会学術講演会, 2003 年 9 月, 東京.
- [37] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin’ichi Yuta, “Mobile Robot Navigation based on DGPS and Odometry in Campus Environment,” Proc. of Int’l Conf. on Field and Service Robotics, (FSR’03), pp. 189 – 194 (2003). (Preprint)
- [38] Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu and Shin’ichi Yuta, “Proper use of GPS for Outdoor Navigation by an Autonomous Mobile Robot,” Proc. of IAS-8, 2004 (Accepted).
- [39] Manabu Omae and Takehiko Fujioka, “Differential GPS-based Position Measurement and Steering Control for Automatic Driving,” Trans. of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol. 65, No. 634, pp. 211– 218, 1999, (In Japanese)
- [40] M. Omae, T. Fujioka and K. Miyake, "Relative position measurement of neighboring vehicles using DGPS and inter-vehicle communication," JSAE Review 22, pp.75-80,2001
- [41] H. Rauch, F. Tung and C. Striebel, “Maximum Likelihood Estimates of Linear Dynamic Systems,” J. of American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 3(8), pp. 1445– 1450 (1965)
- [42] R. C. Smith and P. Cheeseman, “On the Representation and Estimation of Spatial Uncertainty,” Int. J. of Robotics Research, vol. 5, no. 4, pp. 56– 68 (1986).
- [43] Salah Sukkarieh, Eduardo M. Nebot and Hugh F. Durrant-Whyte, “A High Integrity IMU/GPS Navigation Loop for Autonomous Land Vehicle Applications,” IEEE Trans. on Robotics and Automation, Vol. 15, No. 3, pp. 572– 578, Jun, 1999.

- [44] Charles E. Thorpe, “ Chapter 2 Vision and Navigation The Carnegie Mellon Navlab,” *Kluwer Academic Publishers*, (1990), pp. 9
- [45] C. Thorpe, M. H. Hebert, T. Kanade and S. A. Shafer, “Vision and Navigation for the Carnegie-Mellon Navlab,” *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, (1992), pp. 362 – 373
- [46] Richard Thrapp, Christian Westbrook and Devika Subramanian, “Robust localization algorithms for an autonomous campus tour guide,” Proc. of the 2001 IEEE International Conf. on Robotics and Automation, (ICRA’01), pp. 2065– 2071, May. 2001.
- [47] S. Thrun, “Probabilistic Algorithms in Robotics,” *Journal of AI Magazine*, Vol. 21, Number 4, pp. 93– 109 (2000)
- [48] M. Tomizuka, “Mechatronics: from the 20th to 21st century,” *CONTROL ENGINEERING PRACTICE* 10 (8): 877-886, AUG. 2002.
- [49] S. Thrun, M. Beetz et.al, “Probabilistic algorithms and the interactive museum tour-guide robot minerva” *Int. Journal of Robotics Research*, Vol. 19(11), pp. 972– 999, 2000.
- [50] S. Thrun, M. Diel and D. Hashnel, “Scan Alignment and 3-D Surface Modeling with a Helicopter Platform,” *Preprints of Int’l Conf. on Field and Service Robots*, pp. 89– 94 (2000)
- [51] 土屋淳, 今給黎哲郎, “GPS 測量と基線解析の手引き,” 東京:日本測量協会, 1994 年 12 月.
- [52] 土屋淳, 辻宏道 “新・GPS 測定の基礎,” 社団法人:日本測量協会, 2002 年 9 月.
- [53] 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
- [54] Matthew A. Turk, David G. Morgenthaler, Keith D. Gremban and Martin Marra, “VITS – A Vision System for Autonomous Land Vehicle Navigation”, *IEEE*

- trans.Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 10, No. 3, (1988), pp. 342–361
- [55] R. Wallace, K. Matsuzaki, Y. Goto, J. Crisman, J. Webb and T. Kanade, “Progress in Robot Road-Following,” *Proc. of 1986 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Vol. 3,(1986), pp. 1615 – 1621
- [56] Y. Watanabe and S. Yuta, “Estimation of Position and its Uncertainty in the Dead Reckoning System for the Wheeled Mobile Robot,” 20th ISIR, pp. 205– 210, 1989.
- [57] C. W. Wing, “Location Estimation and Uncertainty Analysis for Mobile Robot,” *Proc. of 1988 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 1230– 1235 (1988).
- [58] Tomoaki Yoshida, Akihisa Ohya and Shin’ichi Yuta, “Braille Block Detection for Autonomous Mobile Robot Navigation,” *Proc. of IEEE Int l Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pp. 633 – 638 (2000).
- [59] S. Yuta, S. Suzuki and S. Iida, “Implementation of a small size experimental selfcontained autonomous robot,” *Proc. of Int. Workshop on Robots and Systems*, pp. 212– 217, (1991)
- [60] http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/~kazunori/Movie/Lib_loop2.1.mpg (Small size, 17MB)
- [61] http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/~kazunori/Movie/Lib_loop2.2.mpg (Large size, 27MB)
- [62] LxSystem, <http://www.roboken.esys.tsukuba.ac.jp/yos/cvsweb/index.cgi/LxSystem/>

研究業績

学術論文

- 大野 和則, 坪内 孝司, 前山 祥一, 油田 信一, “カラー画像を用いた歩道領域の認識と自律移動ロボットによる歩道沿い走行,” 日本機械学会論文集, (採録予定)
- Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, and Shin'ichi Yuta, “DGPS and Odometry based Outdoor Navigation of a Mobile Robot,” *Advanced Robotics*, (Accepted)

査読付き国際会議

1. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi and Shin'ichi Yuta, “Outdoor Map Building Based on Odometry and RTK-GPS Positioning Fusion”, *Proc. of IEEE Int'l Conf. on Robotics and Automation*, 2004 (Accepted)
2. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu and Shin'ichi Yuta, “Proper use of GPS for Outdoor Navigation by an Autonomous Mobile Robot”, *IAS-8 (Intelligent Autonomous Systems)*, 2004 (Now printing)
3. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, “Mobile Robot Navigation based on DGPS and Odometry in Campus Environment”, *Proc. of Int'l Conf. on Field and Service Robotics*, pp. 189 – 194, Jul. 14 – 16 2003 (Preprint)
4. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Bunji Shigematsu, Shoichi Maeyama and Shin'ichi Yuta, “Outdoor Navigation of a Mobile Robot between Buildings based

on DGPS and Odometry Data Fusion”, Proc. of IEEE Int’l Conf. on Robotics and Automation, pp. 1978 – 1984, Sept. 14 – 15, 2003

5. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Shoichi Maeyama and Shin’ichi Yuta, “A Mobile Robot Campus Walkway Following with Daylight-Change-Proof Walkway Color Image Segmentation”, 2001 IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS’2001), Vol. 1, pp. 77–83, Oct 29 – Nov 3, 2001, Hawaii
6. Kazunori Ohno, Takashi Tsubouchi, Shoichi Maeyama and Shin’ichi Yuta, “Campus Walkway Following of an Autonomous Mobile Robot based on Color Image”, Proc. of 2000 IEEE/RSJ Inc. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS’2000), Vol. 3, pp. 1690 – 1695, Nov 2000, Takamatsu Japan

査読付き国内会議

- I. 大野 和則, 坪内 孝司, 油田 信一, “屋外環境の三次元形状データに基づくランドマーク地図作成”, 第9回 ロボティクスシンポジウム予稿集, 2004年3月, 那覇 (印刷中)

査読なし国内会議

- a. 大野 和則, 坪内 孝司, 油田 信一, “屋外移動ロボットのための LRF を用いた構造物壁面の地図作成と自己位置修正”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’04, 2004年5月, 名古屋
- b. 大野 和則, 坪内 孝司, 油田 信一, “自律移動ロボットによる地図に基づく安定した屋外ナビゲーションの構想”, 第21回日本ロボット学会学術講演会, 2003年9月, 東京
- c. 大野 和則, 坪内 孝司, 重松文治, 油田 信一, “DGPS とオドメトリを用いた樹木に囲まれた歩道環境での自己位置推定”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 ’03 講演論文集, 講演番号: 1P1-1F-C4, 2003年5月, 函館

- d. 大野 和則, 坪内 孝司, 重松文治, 前山 祥一, 油田 信一, “DGPS とオドメトリを用いた建物付近の歩道環境での自己位置推定とナビゲーション”, 第 8 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 276 – 282, 2003 年 3 月, 浜松
- e. 大野 和則, 坪内 孝司, 重松文治, 前山 祥一, 油田 信一, “DGPS とオドメトリを用いた地図に基づく屋外ナビゲーションの試行”, 第 20 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2002 年 10 月, 大阪
- f. 大野 和則, 坪内 孝司, 重松文治, 前山 祥一, 油田 信一, “大学構内の歩道環境における自律移動ロボットの屋外ナビゲーション-RTK-GPS の試用と経路地図の作成-”, 第 7 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 19 – 24, 2002 年 3 月, 上田市
- g. 大野 和則, 坪内 孝司, 前山 祥一, 油田 信一, “自律移動ロボットによる歩道沿い走行 –色情報の生成と歩道領域の分割–”, 第 6 回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 348 – 353, 2001 年 3 月, 伊豆修善寺
- h. 大野 和則, 坪内 孝司, 前山 祥一, 油田 信一, “自律移動ロボットによる屋外ナビゲーション –第一報、色画像による学内歩道沿い走行–”, ロボティクス・メカトロニクス講演会 0 0’, 講演番号: 2P1-46-074, 2000 年 5 月, 熊本
- i. 大野 和則, 坪内 孝司, 前山 祥一, 油田 信一, “自律移動ロボットのための色画像による屋外歩道領域の抽出”, 第 17 回日本ロボット学会学術講演会, 予稿集 pp. 623 – 624, 1999 年 9 月, 東海大学

付録A 慣性等価楕円のあてはめ

LRFにより得られた壁からの反射点の点列 $C = \{s'_j(t)\}$ を XY 平面に射影し慣性等価楕円をあてはめ、その主軸の傾き θ_{wall} と重心 G を求める方法を以下に説明する。LRF 測定値 $s'_j(t) = (x_j, y_j, z_j)$ は三次元のデータである。この三次元データから XY 二次元の情報を用いて $g(x_j, y_j)$ を定義する (式 (A.1))。

$$g(x_j, y_j) = \begin{cases} 1 & (x_j, y_j) \in C \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

図 A.1 に各 LRF の測定値 $g(x_j, y_j)$ と得られる慣性等価楕円の関係を示す。ここで、座標 $g(x_j, y_j)$ のモーメントを以下のように定義する。

(1) 0 次モーメント

$$m_{00} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) \quad (\text{A.2})$$

(2) 1 次モーメント

$$m_{10} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) x_j \quad (\text{A.3})$$

$$m_{01} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) y_j \quad (\text{A.4})$$

(3) 2 次モーメント

$$m_{20} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) x_j^2 \quad (\text{A.5})$$

$$m_{11} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) x_j y_j \quad (\text{A.6})$$

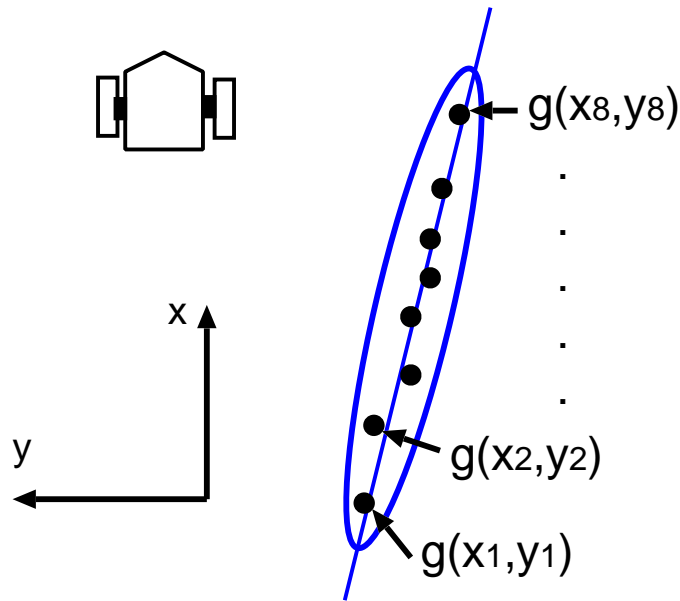


図 A.1:

$$m_{02} = \sum_{j=1}^m g(x_j, y_j) y_j^2 \quad (\text{A.7})$$

壁の反射点の座標の0次、1次モーメントが式(A.2)～(A.4)で表されるとき、座標値の重心 $G = (x_g, y_g)$ は以下の式で表される。

$$x_g = \frac{m_{10}}{m_{00}} \quad (\text{A.8})$$

$$y_g = \frac{m_{01}}{m_{00}} \quad (\text{A.9})$$

さらに重心まわりの2次モーメントは以下の式で表される。

$$M_{20} = m_{20} - \frac{m_{10}^2}{m_{00}} \quad (\text{A.10})$$

$$M_{11} = m_{11} - \frac{m_{10}m_{01}}{m_{00}} \quad (\text{A.11})$$

$$M_{02} = m_{02} - \frac{m_{01}^2}{m_{00}} \quad (\text{A.12})$$

座標値の重心 $G = (x_g, y_g)$ を通る直線で、その直線のまわりの慣性モーメント (2 次のモーメントの次元を持つ) が最小になるような直線 (慣性主軸) の方程式は次式 (A.13) で表される。

$$y - y_g = a(x - x_g) \quad (\text{A.13})$$

ただし

$$a = \begin{cases} \frac{1}{2M_{11}} \{M_{02} - M_{20} + \sqrt{(M_{02} - M_{20})^2 + 4M_{11}^2}\} & (M_{11} \neq 0) \\ 0 & (M_{11} = 0 \text{ かつ } M_{20} > M_{02}) \\ \infty & (M_{11} = 0 \text{ かつ } M_{02} > M_{20}) \\ \text{不定} & (M_{11} = 0 \text{ かつ } M_{20} = M_{02}) \end{cases} \quad (\text{A.14})$$

ここで直線の方程式の傾きより壁の傾きの角度 θ_{wall} を求める。

$$\theta_{wall} = \tan^{-1}(a) \quad (\text{A.15})$$

以上。