法政大学学術機関リポジトリ
HOSEI UNIVERSITY REPOSITORY

PDF issue: 2025-05-10

複素拡張カルマンフィルタを用いたウェイポイントナビゲーションの構築

御園, 祐介 / MISONO, Yusuke

(発行年 / Year)
2009-03-24
(学位授与年月日 / Date of Granted)
2009-03-24
(学位名 / Degree Name)
修士(工学)
(学位授与機関 / Degree Grantor)
法政大学 (Hosei University)

2009 年度 修士論文

複素拡張カルマンフィルタを用いた
ウェイポイントナビゲーションの構築

Development of Waypoint Navigation System by using complex extended Kalman filter

指導教授　小林 一行 准教授

法政大学大学院工学研究科システム工学専攻

学生証番号 07R6132

氏名　御園(ミソノ) 祐介(ユウスケ)

複素拡張カルマンフィルタを用いたウェイポイントナビゲーションの構築

概要

自律型移動ロボットに求められる機能の一つに，あらかじめ決められた複数の地点を巡回し，あるミッションを果たすウェイポイントナビゲーション機能がある．ウェイポイントナビゲーションは，移動ロボット上から見たウェイポイントの位置または方位の把握による長期経路プランニング，外界センシングと障害物回避のための短期経路プランニング，そしてこれら情報に基づく自律制御からなる．ウェイポイントナビゲーションを行うためには，安全確保のため経路上の障害物を検出しその回避経路のプランニングなどを行う必要があり，さらにレーザレーダなどのセンサのインテグレーションが必要になる．センサインテグレーション，状況判断，安全対応が，安定したウェイポイントナビゲーションにおける自律型移動ロボットの重要な課題となる．

このような自律型移動ロボットの技術向上を目指し，1993 年から自律走行車大会(IGVC：Intelligent Ground Vehicle Competition)が開催され，その競技の一つとしてナビゲーション競技が設けられている．ナビゲーションチャレンジとは，GPS による位置検出を想定しエリア内に存在する障害物を避けながら，あらかじめ指定された複数のウェイポイントを何点通過できるか，速さと正確さを競う競技である．

本論では IGVC 大会の環境を用い，これら一連の解決方法に，センサとして GPS とレーザレーダ，ジャイロ，速度計を用い，総合的な状況判断に複素拡張カルマンフィルタをベースとした SLAM アルゴリズムにより高精度なナビゲーションを実現する．さらに，与えられたウェイポイントマップに従い走行しながら，自己軌跡マップ，ランドマークマップを同時に作成する方法を提案し，その有用性を確認する．

Key words：*SLAM アルゴリズム，複素拡張カルマンフィルタ，ウェイポイントナビゲーション，自律走行車大会(IGVC：Intelligent Ground Vehicle Competition)*

Development of Waypoint Navigation System by using complex extended Kalman filter

Abstract

This paper describes an implementation of mobile robot waypoint navigation system which is compliant to Intelligent Ground Vehicle Competition (IGVC) navigation challenge rules. Navigation challenge is one of the IGVC that assume to use GPS navigation system. Based on global waypoint map, the proposed waypoint navigation system incrementally builds both an accurate global trajectory map and global obstacle map by using complex extended Kalman filter. The feature of proposed implementation is employing simple map management algorithm and self-localization and landmark data association. To confirm the validity of proposed waypoint navigation system, an electric wheelchair based mobile robot is used for implementation and tested actual outdoor experiments.

Key words *: SLAM algorithm, extended Kalman filter, waypoint navigation, IGVC*

ー目次ー

第１章　はじめに 1
第２章　IGVC 大会(Intelligent Ground Vehicle Competition) 3
２．１　ウェイポイントナビゲーションチャレンジ 3
２．２　ナビゲーションチャレンジにおけるルール 4
第３章　提案するウェイポイントナビゲーションの概要 5
３．１　ウェイポイントナビゲーションのアルゴリズム 7
３．１．１　走行経路計画 7
３．１．２　ウェイポイントの通過番号の決定 8
３．１．３　ローカル座標系における経路計画 8
３．２　デッドレコニング法による自己位置推定 11
３．３　ウェイポイントナビゲーション 11
３．４　障害物検出 12
３．５　障害物回避と経路の再計画 13
３．５．１　最も手前に回避が必要な障害物が存在し，その後方には障害物が存在しない場合 13
３．５．２　最も手前に回避が必要な障害物が存在し，その後方にも回避が必要な障害物が存在する場合 14
３．５．３　回避の必要がない障害物が最も手前に存在し，その後方に回避が必要な障害物が存在する場合 15
３．６　観測ベクトルと状態ベクトルの定義 16
３．６．１　観測ベクトルの定義 16
３．６．２　状態ベクトルの定義 16
３．７　検出された障害物のローカル座標系とグローバル座標系の対応付け 17
第４章　自己位置と障害物の位置の推定 19
第５章　実験 21
５．１　シミュレーション 22
５．１．１　各センサにランダムなノイズを加算した場合 22
５．１．２　速度計の出力が半分の場合 24
５．１．３　ジャイロセンサにオフセットをのせた場合 25
５．２　実車による実験 26
第６章　むすび 29
参考文献 30
付録 31
謝辞 39
研究業績 41

第１章　はじめに

高齢者の増加により，急激な労働人口の減少が見込まれる日本社会において，清掃ロボットや警備ロボット，搬送ロボットなどの移動ロボットの研究・開発は急務である．現在様々な研究機関・企業により開発が進められている．これらロボットはいずれも，制限された環境，例えば工場内などを前提としており，場所に合わせた自己位置検出のために環境の整備や経路走行学習などが必要となる．これらが不要で，オンライン学習が可能になれば，自律型移動ロボットの適用可能範囲は広まり，我々の日常生活での応用も考えられる．

Photo.1 Mobile robot

自律型移動ロボットに求められる機能の一つに，あらかじめ決められた複数の地点を巡回し，あるミッションを果たすウェイポイントナビゲーション機能がある．ウェイポイントナビゲーションは，移動ロボット上から見たウェイポイントの位置または方位の把握による長期経路プランニング，外界センシングと障害物回避のための短期経路プランニング，そしてこれら情報に基づく自律制御からなる．ウェイポイントナビゲーションを行うためには，安全確保のため経路上の障害物を検出しその回避経路のプランニングなどを行う必要があり，さらにレーザレーダなどのセンサのインテグレーションが必要になる．センサインテグレーション，状況判断，安全対応が，安定したウェイポイントナビゲーションにおける自律型移動ロボットの重要な課題となる．

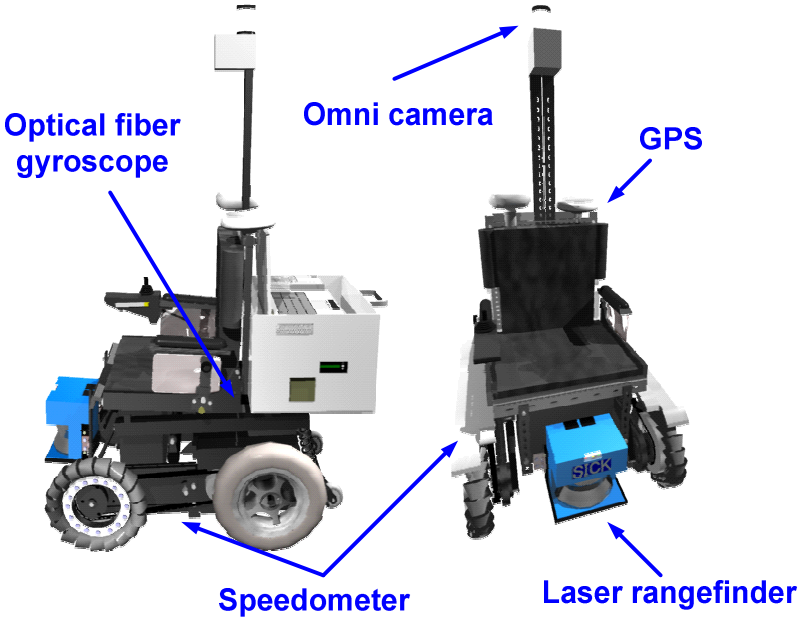


Fig.1 Mobile robot with sensors

第１章　はじめに

自律型移動ロボットの自己位置検出センサとして GPS[1)]が多く利用されてきている．GPS は既設のセンシング環境が利用できる，誤差が累積しない絶対位置の計測が可能であるなど優れた特徴を持つ．しかし，この方法は受信可能な衛星配置や移動に伴う周囲の電波環境によりその精度が左右され易い．そのため，ジャイロや速度計など複数のセンサを併用して自己位置検出の精度を上げている[2)]．

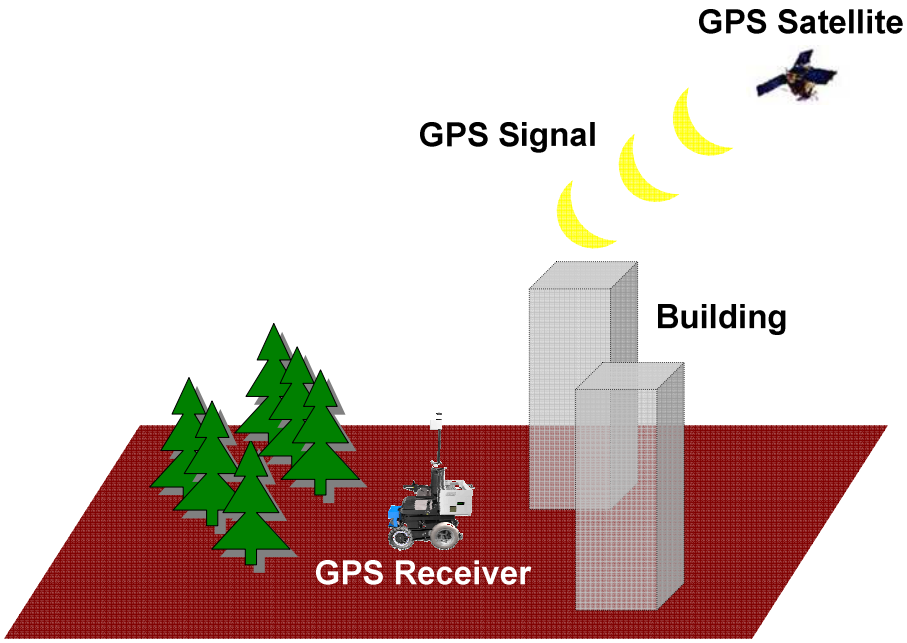


Fig.2 Interrupted GPS Signal by the building

本論では，これら一連の解決方法に，センサとして GPS とレーザレーダ，ジャイロ，速度計を用い，総合的な状況判断に複素拡張カルマンフィルタをベースとした SLAM[3)]アルゴリズムにより高精度なナビゲーションを実現する．さらに，与えられたウェイポイントマップに従い走行しながら，自己軌跡マップ，ランドマークマップを同時に作成する方法を提案し，その有用性を確認する．

第 2 章　IGVC 大会(Intelligent Ground Vehicle Competition)

提案する手法を実証するために，国際自律走行車競技大会（IGVC：Intelligent Ground Vehicle Competition）[4),5)]の環境を用いる．IGVC 大会とは，屋外地上自律走行車に関する国際的な競技会であり，国際自律走行車協会(AUVSI：Association for Unmanned Vehicle Systems International)の主催により毎年アメリカで開催されている大会である．参加する移動ロボットは，移動ロボット上に搭載可能なセンサ情報のみを用い，無線などによる外部からの遠隔制御は行わず，目的に合わせ自律的に走行する．競技種目は 4 つあり，本論ではその競技種目の内の一つであるナビゲーションチャレンジの環境を用いる．

Photo.2 Intelligent Ground Vehicle Competition

2．1　ウェイポイントナビゲーションチャレンジ

IGVC 大会の競技種目の一つにナビゲーションチャレンジが設けられている．ナビゲーションチャレンジとは，GPS による位置検出を想定しエリア内に存在する障害物を避けながら，あらかじめ指定された複数のウェイポイントを何点通過できるか，速さと正確さを競う競技である．Photo.3 は実際のナビゲーションチャレンジの走行風景である．ウェイポイントは，直径 2m の円で表され，円内の一部を通過すればポイントとなる．また，コース内には，複数の静止障害物がランダムに配置されており，これら障害物を避けながら指定されたウェイポイントを通過する必要がある．

Photo.3 IGVC Navigation Challenge

2．2　ナビゲーションチャレンジにおけるルール

IGVC 大会のナビゲーションチャレンジのルールを整理する．

(R1) Fig. 1 にナビゲーション競技のフィールドの例を示す．ウェイポイントは決められたエリア内(100m×100m 程度)に 10 点のウェイポイント座標が緯度・経度で与えられる．最初のスタートウェイポイントのみが指定されており，それ以外のウェイポイントはどの順序で通過してもかまわない．ただし，すべてのウェイポイントを通過した後は，最初のスタートウェイポイントに戻る必要がある．

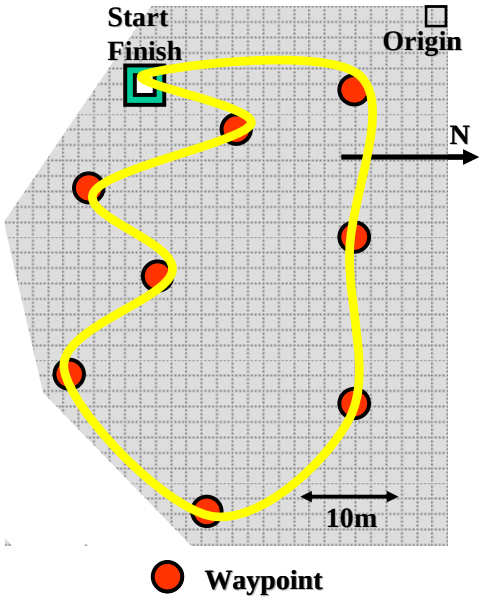


Fig. 3 Example of waypoint map for IGVC navigation challenge field

(R2)　走行環境上にランダムに配置される障害物は静止障害物であり，動く障害物は存在しない．Photo.4 は，実際ナビゲーションチャレンジに使用されている障害物である．

Photo.4 IGVC Navigation Challenge field

以上のルールに加え，走行環境はほぼ二次元平面で近似できるという仮定を基に考える．

第 3 章　提案するウェイポイントナビゲーションの概要

変数を以下に定義する．ここでは，移動ロボットの二次元空間での状態を簡潔に表現するため，x 軸を実数，y 軸を虚数として表す複素形式での表現を用いる．なお，* は共役複素数を表す.

[共通変数]

k ：離散時刻（$k=1,\cdots$）

[センシングに関する変数]

$\Delta d(k)$ ：移動ロボットが 1 サンプル時刻で進む距離

$\Delta\theta(k)$ ：移動ロボットが 1 サンプル時刻で回る角度

${}^{W}x_{g}(k)$ ：移動ロボットの自己位置(GPS により計測された位置)

n ：レーザレーダにより検出された障害物の数（$n=1,\cdots,N$）

${}^{L}x_{\ln}(k)$ ：レーザレーダにより検出された n 番目の障害物の位置

ω_{x_g} ：GPS の観測ノイズ

$\omega_{x_{\ln}}$ ：レーザレーダの観測ノイズ

v_{x_p} ：自己位置のシステムノイズ

v_{θ_p} ：進行方向角のシステムノイズ

v_{x_l} ：検出された障害物位置のシステムノイズ

[自己位置に関する変数]

$\theta(k)$ ：移動ロボットの進行方向角

${}^{W}x_{p}(k)$ ：移動ロボットの自己位置

${}^{W}\theta_{p}(k)$ ：移動ロボットの進行方向角

$$= e^{j\cdot\theta(k)} = \cos\theta(k) + j\cdot\sin\theta(k)$$

[ウェイポイントに関する変数]

i ：ウェイポイント番号（$i=1,\cdots,I$）

${}^{W}x_{\omega i}$ ：i 番目のウェイポイントの位置

${}^{L}x_{v}$ ：ローカル座標系における，ローカル経路計画のための仮想ウェイポイントの位置

${}^{L}x_q$ ：離散時刻 k に線形補間により求められた，ローカル座標系上のローカル経路座標

[障害物（ランドマーク）に関する変数]

$d_{\min}$ ：同一の障害物であると判断する距離の閾値

m ：状態ベクトルに登録された障害物の数

${}^{W}x_{lm}(k)$ ：状態ベクトルに登録された m 番目の障害物の位置

d_{obs} ：障害物回避のための，障害物から回避ポイントまでの回避距離

[状態方程式に関する変数]

$\mathbf{X}(k)$ ：状態ベクトル

$\mathbf{y}(k)$ ：観測ベクトル

$\mathbf{F}(k)$ ：状態遷移行列

$\mathbf{H}(k)$ ：観測行列

$\mathbf{v}(k)$ ：システムノイズ

$\boldsymbol{\omega}(k)$ ：観測ノイズ

$\mathbf{G}(k)$ ：駆動行列

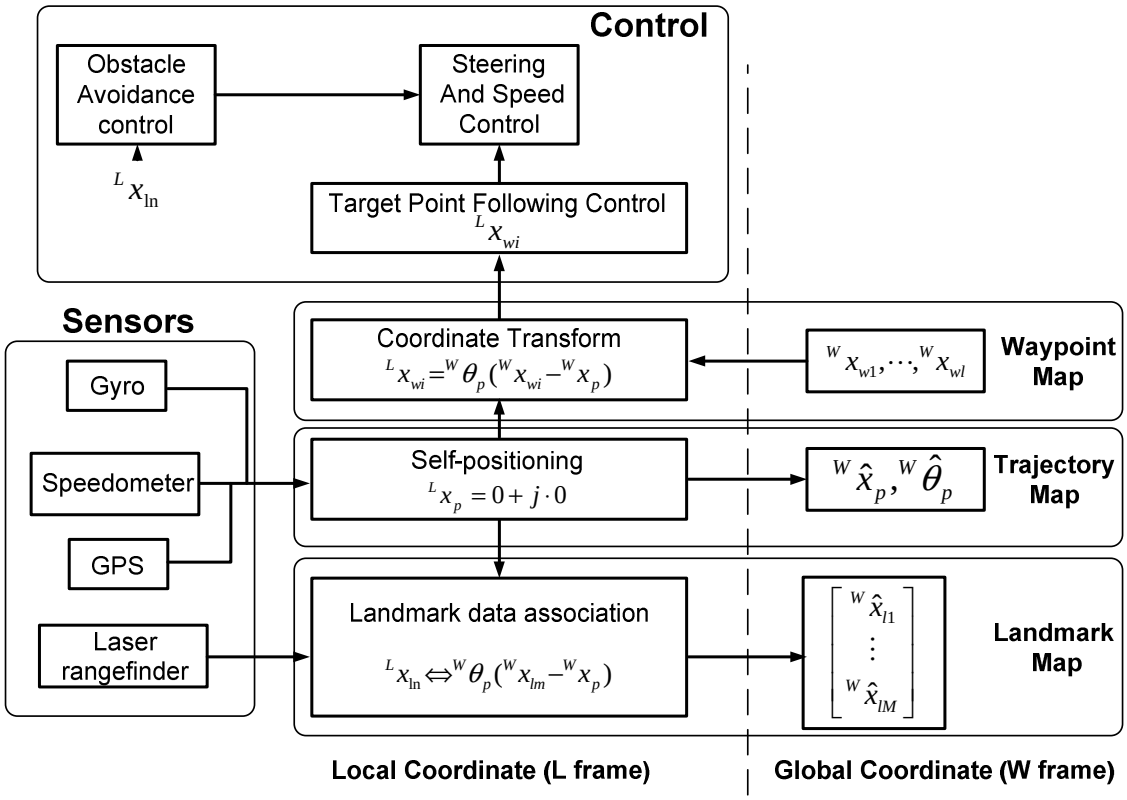


Fig.4 Coordinate for the proposed waypoint navigation system

Fig.4 に提案するウェイポイントナビゲーションシステムの概要を示す．システムは大きく分けて，コントロールブロック，センサブロック，そして 3 つのマップブロックから構成される．センサブロッ

クと 3 つのマップブロックによりウェイポイントナビゲーションの制御のための正確な自己位置推定を行う．この自己位置推定には，SLAM(Simultaneous Localization and Map building)の考え方を適用する．

移動ロボット上には内界センサとして，速度計およびジャイロセンサ，外界センシングとして GPS とレーザレーダを搭載する．センサ情報は，移動ロボットを原点としたローカル座標系 Σ_L を中心とした，ウェイポイントマップ，自己位置マップ，ランドマークマップとウェイポイント初期座標を原点としたグローバル座標系 Σ_W へと座標変換し管理する．

これら複数の変数の座標表現は，変数左肩添え字としてそれぞれ W, L を，また変数右下添え字としてそれぞれ p, w, l をつけて区別する．Table.1 にそれら変数のネーミングルールを示す．例えば，グローバル座標系の移動ロボットの自己位置は，${}^{W}x_p(k)$ として表す．

Table.1 Naming rules for defined variables

	L frame		W frame
${}^{L}x_p$	Speedometer Gyro	${}^{W}x_p$	Trajectory map
${}^{L}x_{wi}$	Target point Steering control	${}^{W}x_{wi}$	Waypoint map
${}^{L}x_{\ln}$	Laser rangefinder Obstacle avoidance	${}^{W}x_{lm}$	Landamark map

3．1　ウェイポイントナビゲーションのアルゴリズム

ここでは，ウェイポイントナビゲーションの基本アルゴリズムについて，走行経路の計画およびウェイポイント間の走行方法について述べる．

3．1．1　走行経路計画

移動ロボットが指定されたポイントに向けて自律走行するためには，走行経路を計画する必要がある．経路計画として，すべてのウェイポイント間を $\Delta d(k)$ により直線やスプライン曲線により線形補間したベクトルを走行経路として用いることが考えられる．この経路を長期経路計画とする．このとき，直線による点列補間が最短経路となる．スプライン曲線による補間は滑らかな経路を生成するが，曲率半径が大きく最適経路とはならない．そこで，すべてのウェイポイントに対し曲率が曲線の長さに比例して変化する滑らかなクロソイド曲線を用いて補間する手法も提案されている [6]．しかし，滑らかな走行経路の計画と移動ロボットの経路への追従は別問題であり，移動ロボットの動特性や走行路面の影響で必ずしも滑らかな走行軌跡を得ることができるとは限らない．このため，経路の追従を目的に経路への軌道追従制御が必要となる．直線または曲線で補完した経路に対し，曲率を考慮した追従法が提案されている [7]．曲率が 0 のとき曲率半径は無限大になり直線とみなすことができることから，曲率を制御し経路への追従を行なう．また点列補完された経路に対し，収束の目標点を定め予見制御により操舵制御を行なう手法が提案されている [8]．これらは，移動ロボットのキネマティクスがベースとなり，モデルベースの追従制御が行なわれている．路面が平坦でかつ車輪のスリップがない場合，提案手法による経路への追従性能を確認した．しかし，屋外環境における走行路面は，常に平坦ではなく起伏がある路面で

の移動ロボットの挙動をモデル化するのは容易ではない．これらの手法による屋外での実験により，移動ロボットの真の挙動とモデルによる姿勢は，誤差を含み経路への追従に対しオフセットが乗ることを確認した．このとき，障害物が存在した場合の経路の再計画は，システムが複雑になるとともに，さらに移動ロボットの挙動を乱しナビゲーションが不安定になると考えられる．ここで提案する走行経路は，リアルタイムで移動ロボットのローカル座標系に計画され，離散時刻 k におけるステアリング角度を得る．

3．1．2　ウェイポイントの通過番号の決定

IGVC Navigation Challenge におけるウェイポイントナビゲーションでは，指定された複数のウェイポイント間を最短距離，または障害物の配置に伴う移動ロボットの走行に関する振る舞いを予測し，通過するウェイポイントの通過番号を決定する．スタート地点に相当する 1 番目のウェイポイント ${}^{W}x_{w1}$ は，グローバル座標系における原点 (0,0) にとる．Fig.5 にウェイポイントマップの一例と通過番号を示す．分かりやすくするために各ウェイポイント間を青線でつなぐ．青線でつないだ距離が最小のものが，最短距離となるウェイポイントの順番となる．移動ロボットは，ウェイポイント番号 i から順番に次のウェイポイントを目標点とし，最終的にスタート地点に帰還する．

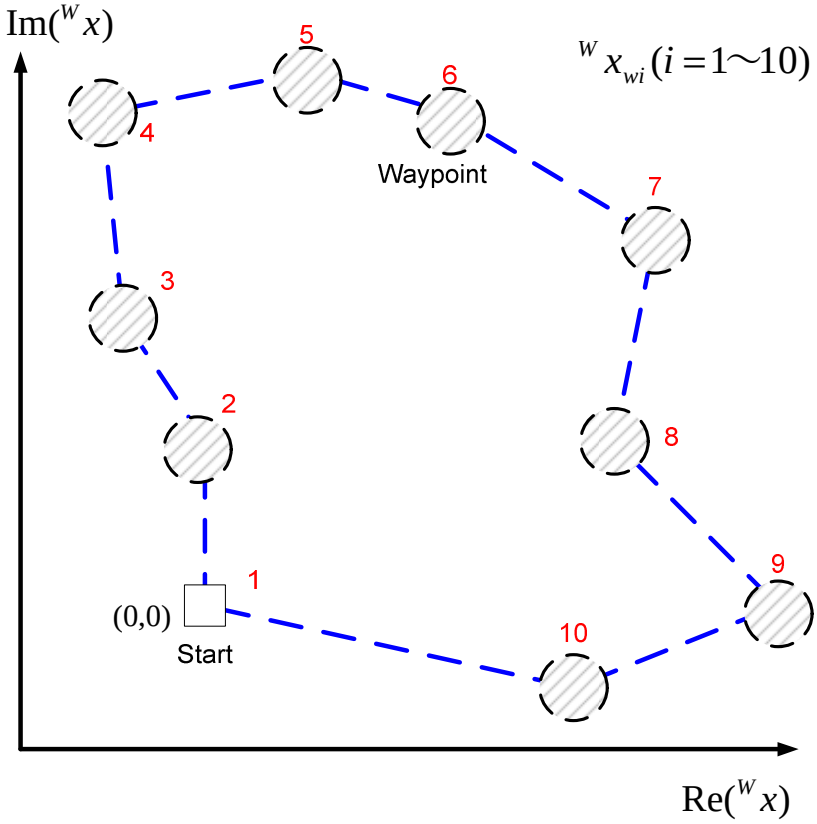


Fig.5 Waypoint map

3．1．3　ローカル座標系における経路計画

各ウェイポイントを通過するために経路を計画する．移動ロボットの挙動を考慮し，移動ロボットのローカル座標系に経路を計画する．ローカル座標系に経路を計画することで，通過目標とするウェイポイントに対しなめらかに収束することができる．

第 3 章　提案するウェイポイントナビゲーションの概要

IGVC におけるウェイポイントナビゲーションにおいて，長期経路を用いて走行する場合，移動ロボットは障害物などの回避により経路を大きく外れた場合，計画経路へ収束するためにステアリング角を大きく切ることになる．これは，移動ロボットの挙動を乱し走行が不安定になる可能性がある．ステアリング角を滑らかに切ることは，ステアリング角に伴う走行速度の減速を極力押さえ，無駄な挙動を抑制することができる．このため Fig.6 に示す，移動ロボットを始点とし目標ウェイポイントに向けたローカル経路を計画する．

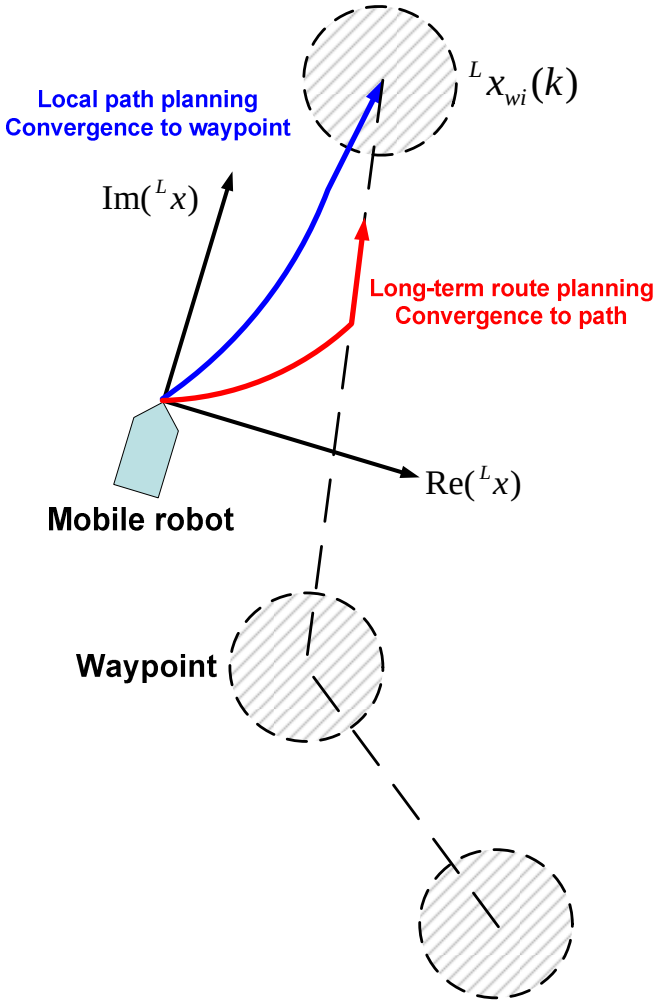


Fig.6 Local path planning convergence to waypoint

長期経路における経路への追従制御と異なり，ローカル経路は目標ウェイポイントへの収束を目標とする．ローカル経路は，離散時刻 k における移動ロボットの姿勢から目標ウェイポイントへ向けた最短経路であり，目標ウェイポイントへの滑らかな収束を実現することができる．さらにローカル座標系での経路計画は，レーザレーダと同様の座標系で行なうことで，障害物回避による経路の再計画を容易に行なうことができ，システムを簡略化することができる．

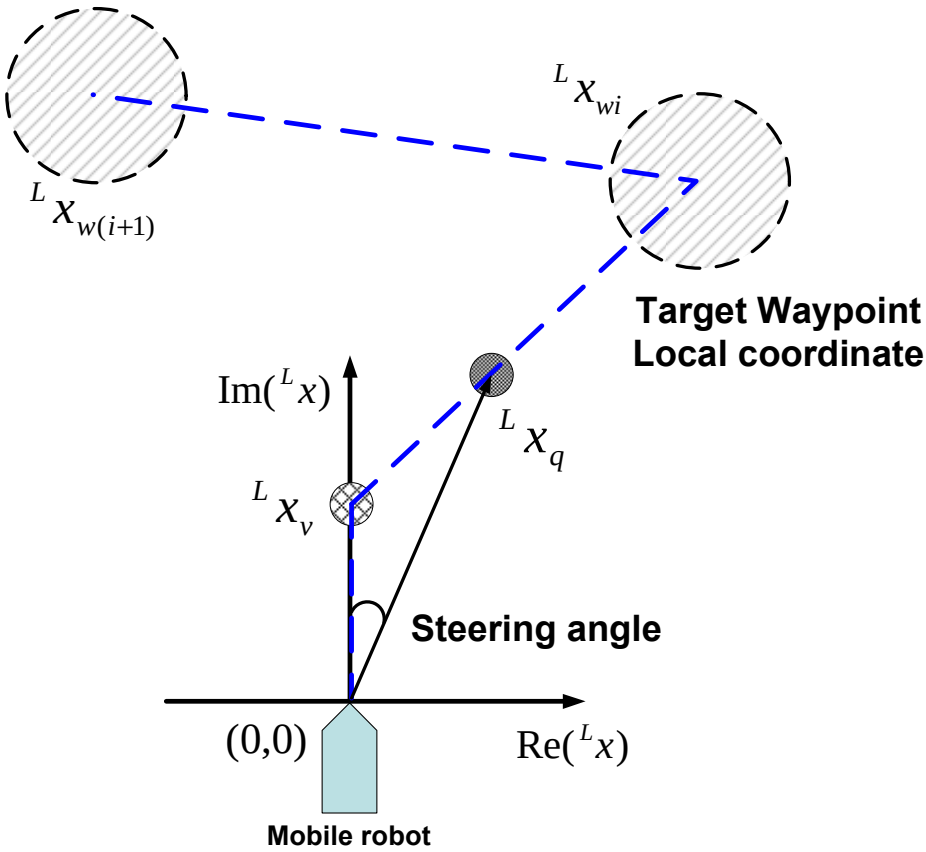


Fig.7 Local path planning

ローカル経路の計画方法を Fig.7 に示す．離散時刻 k におけるローカル経路は，ローカル座標系の原点を始点とし，目標とするウェイポイント $^{L}x_{wi}$ および $i+1$ 番目のウェイポイント $^{L}x_{w(i+1)}$ を通る．さらに，経路の再計画に伴うステアリング角の変化を緩和し滑らかに対応するために，ローカル座標系上に $^{L}x_{v}$ なる点を一点設ける．以上よりローカル経路は，4 点の座標を用いて生成される．ステアリング角を決定するために，4 点の座標を距離 $\Delta d(k)$ の間隔で線形補間する．厳密には，経路への追従を目的としないため，線形補間における間隔は任意の値に設定できる．

3．2　デッドレコニング法による自己位置推定

提案するウェイポイントナビゲーションのために，まずデッドレコニング法による自己位置推定について考える．GPS は，誤差が累積しない自己位置把握センサとして有用であるが，電波を利用するため常に測位可能であるとは限らない．そこで，内界センサを位置推定における補助として用いる．内界センサを使ったデッドレコニング法 [9]は，複素形式で表すと，式(1)，(2)となる．

$$ {}^{W}x_p(k+1) = {}^{W}x_p(k) + \Delta d(k+1)\cdot e^{j\cdot\Delta\theta(k+1)}\cdot {}^{W}\theta_p(k) \qquad (1) $$

$$ {}^{W}\theta_p(k+1) = e^{j\cdot\Delta\theta(k+1)}\cdot {}^{W}\theta_p(k) \qquad (2) $$

3．3　ウェイポイントナビゲーション

Fig.8 にウェイポイントマップ ${}^{W}x_{wi}\,(i=1,\cdots I)$ の例を示す．左図がグローバル座標系，右図がローカル座標系である．ウェイポイント i の位置 ${}^{W}x_{wi}$ は，式(3)により移動ロボットの自己位置を原点としたローカル座標系の位置 ${}^{L}x_{wi}$ に変換する．

$$ {}^{L}x_{wi} = {}^{W}\theta_p^{*}(k)\cdot({}^{W}x_{wi} - {}^{W}x_p(k)) \qquad (3) $$

変換して得られたローカル座標を目的地点 ${}^{L}x_{wi}$ として地点追従法 [10]によりステアリングと速度制御を行う．ウェイポイント i に達したと判断した場合には，$i+1 \rightarrow i$ として新たなウェイポイント i を目標地点として走行する．

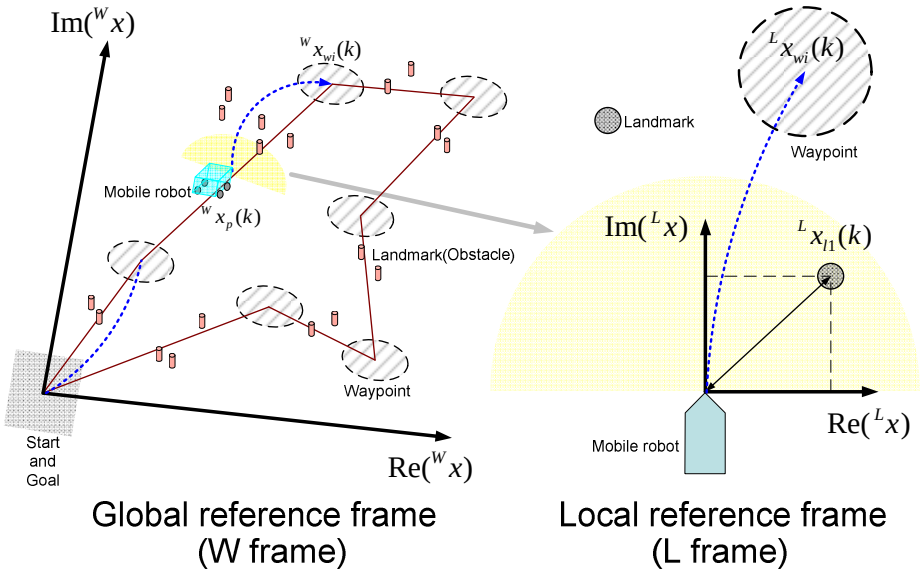


Fig.8 Relation between Global coordinate and Local coordinate for waypoint navigation

3．4　障害物検出

レーザレーダは，(1) 障害物回避のための障害物検出と(2)ランドマークとしての障害物検出の 2 つの役割を兼ねる．

(1)で障害物と衝突すると判断した場合には，地点追従制御を解除し，シンプルな実装法である現在位置と障害物を中心とした衝突半径，それに目標点の位置を考慮し衝突半径外で最短距離となる場所に仮想目標点を設定し，ウェイポイントナビゲーションを行うことで障害物回避を行う．3．5 に詳細を述べる．(2)は，レーザレーダから得られた障害物の位置をグローバル座標系に変換し，ランドマークとして管理する．

Fig.9 に示すようにレーザレーダから得られた障害物の位置 ${}^{L}x_{\mathrm{ln}}$ とグローバル座標における障害物の位置 ${}^{W}x_{lm}$ が対応関係にあるとき，式(4)が成り立つ．

$$|{}^{W}x_{lm}(k)-({}^{W}\theta_{p}(k)\cdot{}^{L}x_{\mathrm{ln}}(k)+{}^{W}x_{p}(k))|<d_{\min} \qquad (4)$$

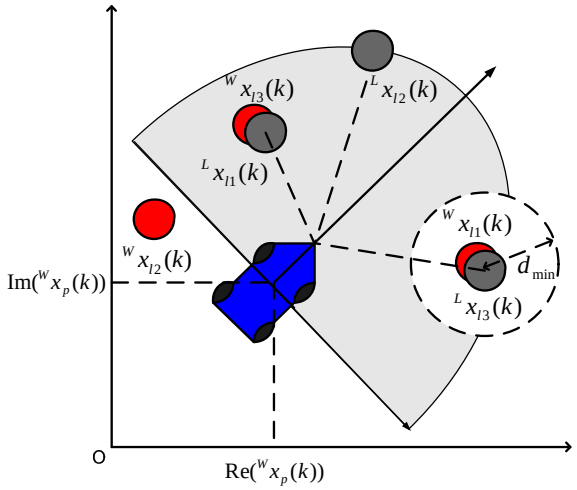


Fig.9 Relationship between detected corresponded landmarks

3．5　障害物回避と経路の再計画

レーザレーダにより，前方領域の物体の探索を行い車両の進行の妨げになる物体に対しては回避処理を行う．クラスタリングにより障害物を特定し，障害物回避を行なう．障害物回避における経路の再計画は，計画したローカル経路上に障害物が存在する場合，また経路付近に存在する場合を考慮し，目標ウェイポイントに最も近くまた他の障害物が存在しない方向に経路を再計画する．最も手前の障害物のみを回避の対象とすると，手前の障害物がレーザレーダにより検知できなくなったとき，初めて次の障害物に対し回避行動を行なうことになる．これは，回避動作の遅れにつながり障害物へ衝突する危険性がある．このため，複数の障害物を同時に認識し走行速度をなるべく落とさずに滑らかに回避することを考える．以下に障害物回避を考える上で考慮すべき点をまとめる．

3．5．1　最も手前に回避が必要な障害物が存在し，その後方には障害物が存在しない場合

Fig. 10-1 に経路上に 1 つの障害物が存在した場合の障害物回避アルゴリズムを示す．

左図の Fig. 10-1-(a)には，経路の右に障害物が存在する場合を示す．クラスタリングにより特定された障害物から計画された経路へ最も距離が最小の地点から垂直な方向に回避距離 d_{obs} 離れた地点を回避ポイントとして定め，回避経路を再計画する．

右図の Fig. 10-1-(b)も同様に経路が再計画される．この場合，経路の右側への回避も考えられるが，できるだけステアリング角を切らず速度の減速を抑えるために左に回避経路を生成する．

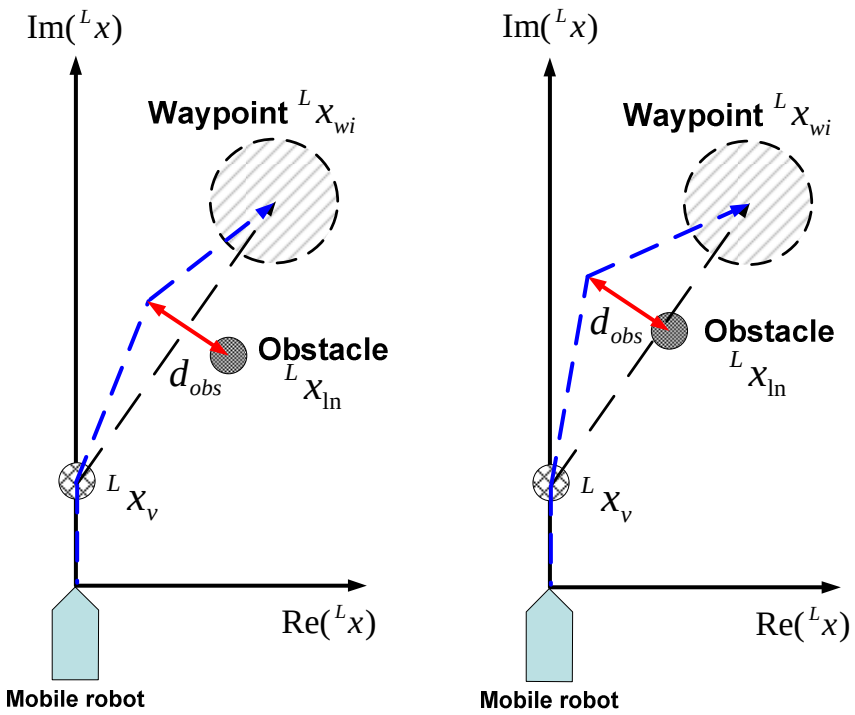


Fig.10-1 Case of observed obstacle (a) lie to the right of generated path, (b) on the generated path

3．5．2　最も手前に回避が必要な障害物が存在し，その後方にも回避が必要な障害物が存在する場合

Fig.10-2 に最も手前に回避が必要な障害物が存在し，その後方にも回避が必要な障害物が存在する場合における経路の再計画を示す．Step1 では，手前の障害物に対し経路を再計画するが，後方の障害物に衝突する危険性がある．このため Step2 において，後方の障害物を含めた回避経路を生成する．滑らかな回避走行を実現するために Step3 で最適な経路に計画する．このとき前方および後方の障害物が経路に対し右側，左側，中央に存在する場合で経路の再計画を考える．

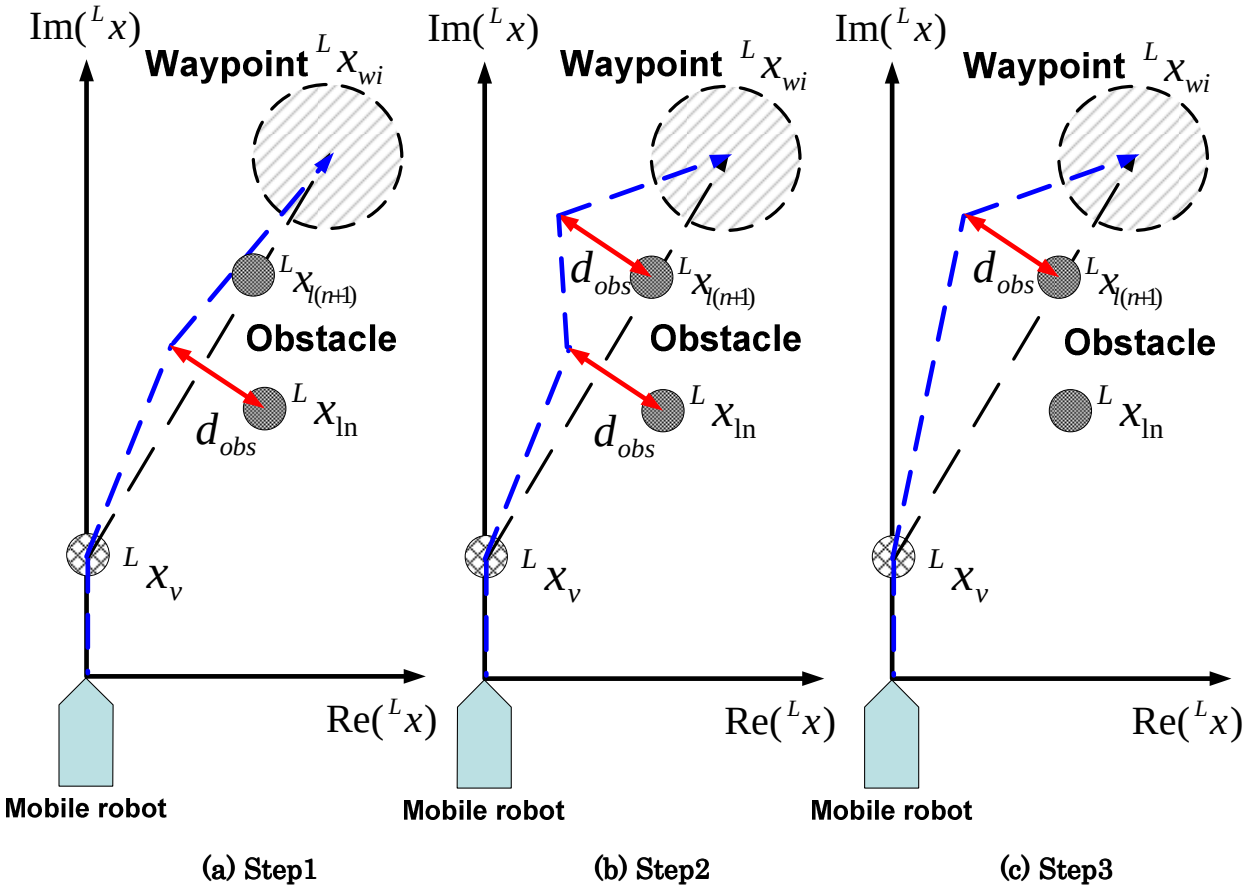


Fig.10-2 Case of two observed obstacles on the course

3．5．3　回避の必要がない障害物が最も手前に存在し，その後方に回避が必要な障害物が存在する場合

Fig.10-3 に回避の必要がない障害物が最も手前に存在し，その後方に回避が必要な障害物が存在する場合の回避経路の再計画を示す．Step1 では，後方の経路に対し回避経路を再計画する．しかし前方の障害物に衝突する危険性がある．このため，Step2 において前方の障害物に対する回避ポイントを決定し，経路を計画する．さらに Step3 において最適な経路を計画するために，左への回避に切り替え経路を再計画する．

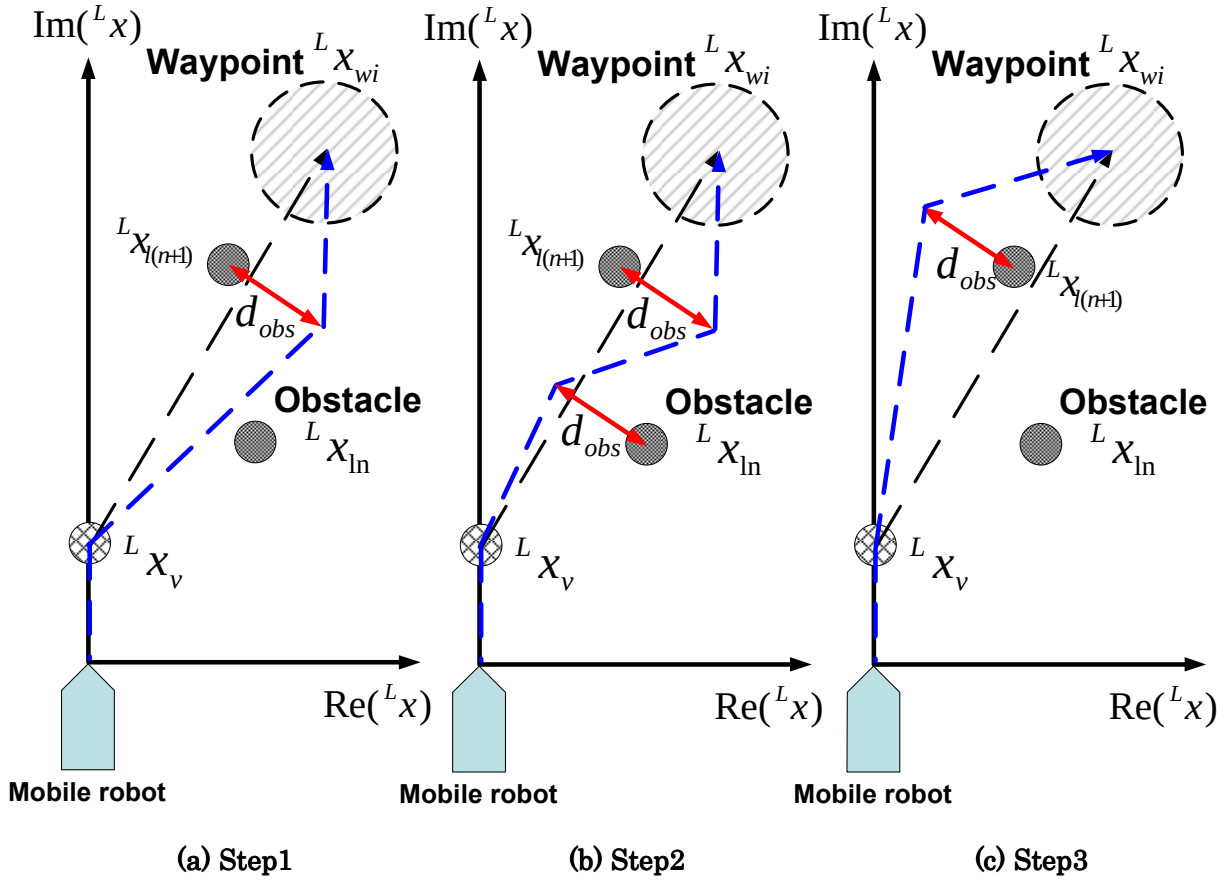


Fig.10-3 Case of two observed obstacles on the course

3．6　観測ベクトルと状態ベクトルの定義

3．6．1　観測ベクトルの定義

移動ロボット上で観測される GPS による自己位置 ${}^{W}x_{g}(k)$ とレーザレーダにより観測される障害物を ${}^{L}x_{\ln}(k)$（$n=1,\cdots,N$）をまとめ観測ベクトル $\mathbf{y}(k)$ とする．

$$\mathbf{y}(k)=\begin{bmatrix} {}^{W}x_{g}(k) \\ {}^{L}x_{l1}(k) \\ \vdots \\ {}^{L}x_{lN}(k) \end{bmatrix} \qquad (5)$$

N は，レーザレーダにより検出された障害物の数を表し，時刻 k により増減する．

3．6．2　状態ベクトルの定義

移動ロボットのグローバル座標系における移動ロボットの位置およびその進行方位，それにグローバル座標系における障害物の位置をまとめ，状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ とする．

$$\mathbf{X}(k)=\begin{bmatrix} {}^{W}x_{p}(k) \\ {}^{W}\theta_{p}(k) \\ {}^{W}x_{l1}(k) \\ \vdots \\ {}^{W}x_{lM}(k) \end{bmatrix} \qquad (6)$$

レーザレーダで検出した障害物の位置 ${}^{L}x_{\ln}(k)$ が式(4)を満たさない場合には，$M+1\rightarrow M$ として状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ に追加する．

3．7　検出された障害物のローカル座標系とグローバル座標系の対応付け

レーザレーダにより検出された数により増減する観測ベクトル $\mathbf{y}(k)$ を表す式(5)とグローバル座標系における障害物の位置を管理する状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ を表す式(6)の関係,

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}(k)\mathbf{X}(k) + \boldsymbol{\omega}(k) \tag{7}$$

ただし,

$$\boldsymbol{\omega}(k) = \begin{bmatrix} \omega_{x_g} \\ \omega_{x_{l1}} \\ \vdots \\ \omega_{x_{lM}} \end{bmatrix} \tag{8}$$

を満たすように, 観測行列 $\mathbf{H}(k)$ のサイズを調整する. グローバル座標系における障害物の位置 ${}^{W}x_{lm}(k)$ とレーザレーダにより観測されたローカル座標系における障害物の位置 ${}^{L}x_{\ln}(k)$ は，一対一に対応するとは限らない．それぞれ以下のルールにより対応を行う.

case1：状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ 対応あり，観測ベクトル $\mathbf{y}(k)$ 対応あり→観測行列 $\mathbf{H}(k)$ の係数で対応する.

case2：状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ 対応なし，観測ベクトル $\mathbf{y}(k)$ 対応あり→状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ を拡張し，対応する観測行列 $\mathbf{H}(k)$ も拡張する.

otherwise：観測ベクトル $\mathbf{y}(k)$ 対応なし→観測行列 $\mathbf{H}(k)$ の係数に含めない.

この 3 つのケースにより対応させる．Table.2 にそのアルゴリズムを示す.

Table.2　$\mathbf{X}$ and $\mathbf{H}$ matrix update algorithm

```
for n=1:N
  check = 0;
  for m=1:M
    if (|^W x_lm(k) − (^W θ_p(k)·^L x_ln(k) + ^W x_p(k))| < d_min )
     // case 1
      check = 1
      Change H matrix coefficient satisfy following relation
          ^W x_ln(k) = ^W θ*_p(k)(^W x_lm(k) − ^W x_p(k))
    end
  end
  if (check == 0)
   // case 2
    check = 2
    ^W θ_p(k) ^L x_ln(k) + ^W x_p(k) → ^W x_l(M+1)(k)
     Expand X and H matrix satisfy following relation
        ^W x_ln(k) = ^W θ*_p(k)(^W x_l(M+1)(k) − ^W x_p(k))
         M+1 → M
  end
  if (check == 0)
    // case 3 do nothing
  end
end
```

第 3 章　提案するウェイポイントナビゲーションの概要

一般に，観測行列$\mathbf{H}(k)$の大きさは，障害物の登録数Mとレーザレーダによる障害物の検出数Nで決まり行列サイズは$(N+1)\times(M+2)$と変化する．観測ノイズ$\boldsymbol{\omega}$も観測ベクトルに合わせ変化させる．

観測行列$\mathbf{H}$と状態ベクトル$\mathbf{X}$の対応関係の具体例を Fig.11 に示す.

$$
N \updownarrow \begin{bmatrix} {}^{W}x_{g}(k) \\ {}^{L}x_{l1}(k) \\ {}^{L}x_{l2}(k) \\ {}^{L}x_{l3}(k) \end{bmatrix}
\qquad
\begin{bmatrix} {}^{W}x_{p}(k) \\ {}^{W}\theta_{p}(k) \\ {}^{W}x_{l1}(k) \\ {}^{W}x_{l2}(k) \\ {}^{W}x_{l3}(k) \end{bmatrix} \updownarrow M
\qquad
\begin{array}{l} {}^{L}x_{l1}(k) \Leftrightarrow {}^{W}x_{l3}(k) \\ {}^{L}x_{l3}(k) \Leftrightarrow {}^{W}x_{l1}(k) \end{array}
$$

$$
\underbrace{\qquad\qquad\qquad\qquad}_{M+1}
$$

$$
N \updownarrow \begin{bmatrix} {}^{W}x_{g}(k) \\ {}^{L}x_{l1}(k) \\ {}^{L}x_{l2}(k) \\ {}^{L}x_{l3}(k) \end{bmatrix}
=
\begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
-{}^{W}\theta_{p}^{*}(k) & 0 & 0 & 0 & {}^{W}\theta_{p}^{*}(k) & 0 \\
-{}^{W}\theta_{p}^{*}(k) & 0 & 0 & 0 & 0 & {}^{W}\theta_{p}^{*}(k) \\
-{}^{W}\theta_{p}^{*}(k) & 0 & {}^{W}\theta_{p}^{*}(k) & 0 & 0 & 0
\end{bmatrix}
\begin{bmatrix} {}^{W}x_{p}(k) \\ {}^{W}\theta_{p}(k) \\ {}^{W}x_{l1}(k) \\ {}^{W}x_{l2}(k) \\ {}^{W}x_{l3}(k) \\ {}^{W}x_{l4}(k) \end{bmatrix} M+1 \updownarrow
$$

$$
\mathbf{y}(k) \qquad\qquad \mathbf{H}(k) \qquad\qquad \mathbf{X}(k)
$$

Fig.11 Example of $\mathbf{X}$ matrix and $\mathbf{H}$ vector coefficients according to global and local landmark coordinates association

ここでは，$N=3, M=3$で，${}^{L}x_{l1}(k)\Leftrightarrow{}^{W}x_{l3}(k)$，${}^{L}x_{l3}(k)\Leftrightarrow{}^{W}x_{l1}(k)$の対応(case 1)がある例である．

この場合グローバル座標の障害物${}^{W}x_{l2}(k)$は，ローカル座標系に対応がないので無視する(otherwise).

グローバル座標系で未登録の障害物がローカル座標${}^{L}x_{l2}(k)$にある(case 2)には，Fig.11 に示すように状態ベクトル$\mathbf{X}$と観測行列$\mathbf{H}$を拡張し対応する．

第 4 章　自己位置と障害物の位置の推定

自己位置推定と障害物の対応付け[11]は，複素拡張カルマンフィルタ[12]により行う．複素拡張カルマンフィルタを使う理由は以下の通りである．

(1) xy 座標を 1 つの複素変数として扱える．
(2) 実数型拡張カルマンフィルタに比べると，計算量の面で有利である．
(3) センサノイズの設定で，実数型では x 軸，y 軸に独立したノイズの量を設定するのに対し，複素型ではノイズ半径として設定するため，ノイズの性質からも合理的に表現が可能である．

式(3)を用いローカル座標系に変換したウェイポイントマップを基に移動ロボットのステアリングと速度の制御を行う．走行中に得られたデータは，移動軌跡マップとランドマークマップとして再構成される．走行時に新たな障害物を発見した場合には M を増やし，新たに状態ベクトル $\mathbf{X}(k)$ を拡張していく．離散状態方程式は，

$$\mathbf{X}(k+1)=\mathbf{F}(k+1)\mathbf{X}(k)+\mathbf{G}(k+1)\mathbf{v}(k) \tag{9}$$

ただし，

$$\mathbf{G}(k+1)=\begin{bmatrix} e^{j\cdot\theta(k)} & j\cdot\Delta d(k+1)\cdot e^{j\cdot\theta(k)} & 0 \\ 0 & j\cdot e^{j\cdot\theta(k)} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\mathbf{v}(k)=\begin{bmatrix} v_{x_p} \\ v_{\theta_p} \\ v_{x_l} \end{bmatrix} \tag{11}$$

と定義する[6]．なお，ルール(R2)より状態ベクトルに含まれるグローバル座標系の障害物の位置は変化しない．

$${}^{W}x_{lm}(k+1)\cong{}^{W}x_{lm}(k) \qquad (m=1,\cdots,M) \tag{12}$$

そこで，状態遷移行列$\mathbf{F}(k)$は，式(1),(2),(12)より

$$\mathbf{F}(k)=\begin{bmatrix} 1 & \Delta d(k)\cdot e^{j\cdot\Delta\theta(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e^{j\cdot\Delta\theta(k)} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & & 0 \\ \vdots & \vdots & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & & 1 \end{bmatrix} \tag{13}$$

となる．状態ベクトル$\mathbf{X}(k)$に新たな障害物の位置が追加された場合には，状態遷移行列$\mathbf{F}(k)$も$(M+2)\times(M+2)$として拡張し対応させる．式(7),(9)により，構成される状態方程式，観測方程式を基に複素拡張カルマンフィルタにより処理することで，状態ベクトル$\mathbf{X}(k)$のグローバル座標系における自己位置と障害物（ランドマーク）の位置を推定できる．

第 5 章　実験

移動ロボットのシミュレーションおよび屋外での実験を行いその有効性を実証する．

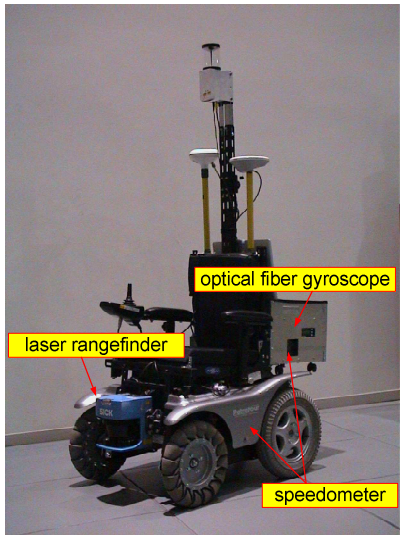
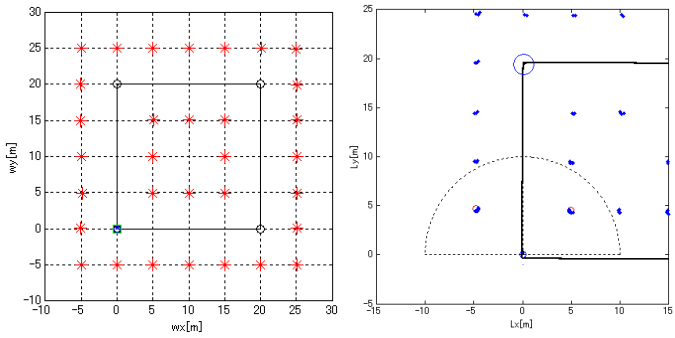


Photo.5 Mobile robot

Photo.5 にシミュレーションおよび実装のモデルの実験システムを示す．移動ロボットは，電動車いすをベースとした車両を用い，車両前方にレーザレーダ，左右に車輪の速度計，車両中心部にジャイロセンサを搭載している．レーザレーダは SICK 社製 LMS200 を用いた．角度分解能は 0.5°，進行方向を 0°とした場合±90° の角度範囲で最大 80m までの障害物の距離を cm オーダーで計測可能である．車両の制御周期はレーザレーダ，速度計およびジャイロセンサからのデータ取得時間を含め，サンプリング間隔 0.15s である．車両の直進時における最大速度はシミュレーションでは 6km/h，実車による屋外実験では 3km/h に設定した．なお設定速度は，最大速度であり入力ステアリング角度により変速する．



(a) Global coordinate　　(b) Local coordinate

Fig.12 Simulated waypoint navigation course

Fig.12 にシミュレーション環境を示す．(a)はグローバル座標系，(b)はローカル座標系である．格子状の点線は，グリッドを表す．星印は障害物の位置，丸印がウェイポイント，実線は目標走行経路を示す．ここでは，障害物の最小横幅を 0.2m と想定し，最大計測距離を 10m とした．

5．1　シミュレーション

ウェイポイントナビゲーションにおける自己位置推定について，理論値と精度を比較するために，移動ロボットの走行およびレーザレーダに関するシミュレータを作成し，提案する手法とデッドレコニング法のみを適用し検証を行った．ここでは特に極端な例として，GPS からの信号が受信できないという想定でシミュレーションを行った．ここではウェイポイントを正方形上に 4 点配置し，障害物を 32 点配置している．両手法で，シミュレーション環境内を 5 周させる．

システムノイズの分散$\sigma^2\{v_{x_p}\}$は，ギヤ比より求めた速度計のパルスの最小間隔（距離分解能）から，

$$\sigma^2\{v_{x_p}\} = (2\pi \times 0.175 \times 0.017/182 \times 0.055)m^2 = 1.8 \times 10^{-3} m^2$$

となり，$\sigma^2\{v_{\theta_p}\}$は, ジャイロの最小分解能から

$$\sigma^2\{v_{\theta_p}\} = (0.03 \times \pi/180 \times 0.5)^2 rad^2 = 6.854 \times 10^{-9} rad^2$$

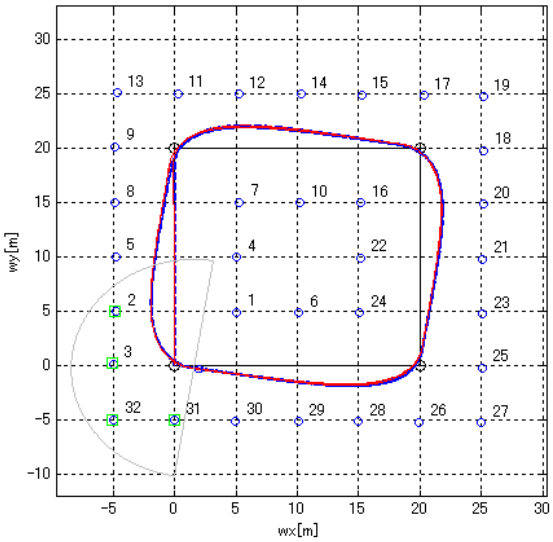
と求めることができる．

速度計，ジャイロセンサおよびレーザレーダにランダムなノイズを加え，それぞれの場合について検証を行なう．各センサに加えるノイズは，MATLAB の randn 関数を用いて正規分布の乱数を用いる．速度計およびジャイロセンサは，離散時刻kにおけるセンサ出力に加算するため，ジャイロセンサおよび速度計によるセンサのサンプリング間隔の積分値に含まれる誤差が平均 0 の正規ノイズとは限らない．レーザレーダは，時間に無相関はセンサであり，レーザレーダにより観測された${}^L x_{\ln}(k)$と移動ロボットまでの距離データにランダムなノイズを加える．ノイズに関して以下の状況をシミュレーションにより検証する．

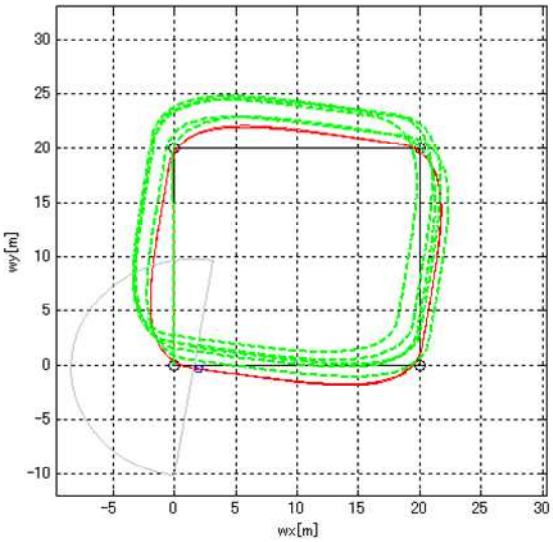
5．1．1　各センサにランダムなノイズを加算した場合

速度計に-1.0〜$1.0 m/s$程度，ジャイロセンサに-1.0×10^{-3}〜$1.0\times10^{-3} rad$程度，レーザレーダに-1.0×10^{-2}〜$1.0\times10^{-2} m$程度のノイズを加えた．速度計およびジャイロセンサには．大きめなノイズを設定した．レーザレーダに関しては，センサ内部の回転機構により微小な振動を生じているため，厳密な誤差の定義は難しい．設定した誤差は，レーザレーダの計測距離（物体までの距離）に関係なくすべての距離データに加算するものとする．

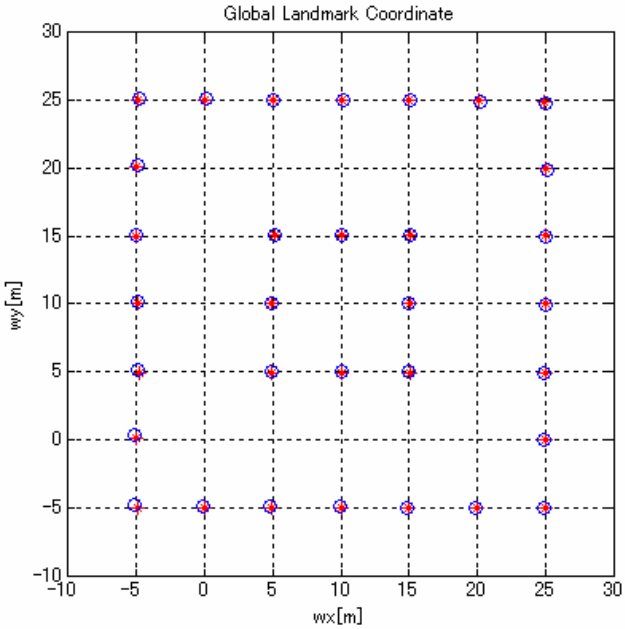
Fig.13-1(a)に提案する手法による推定結果，Fig.13-1(b)にデッドレコニング法のみによる自己位置推定結果を破線で示す．実線はノイズを加えていない移動ロボットの真の走行軌跡を示す．2 週目以降は同様の障害物として判断し状態ベクトル$\mathbf{X}(k)$に新たに追加される障害物はない．Fig.13-1（c）にランドマークの真の設定値を＊印で，推定されたランドマーク座標を丸印で示す．丸印の右肩添え字はランドマーク ID であり，状態ベクトルに追加された順番である．



(a) Proposed method



(b) Dead reckoning method



(c) Obstacles and estimated landmark by proposed method

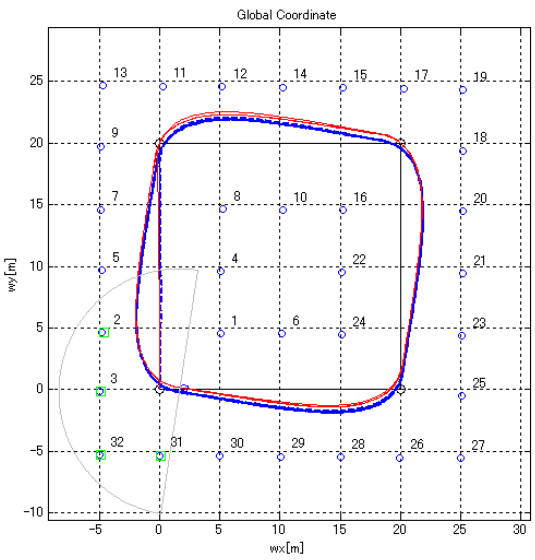
Fig.13-1 Simulation results

Fig.13-1(b)のデッドレコニング法のみでは，周回を重ねる度に誤差が累積している．理論値と比較すると，x 軸方向，y 軸方向ともに最大 2m 以上の誤差が確認できた．それに対し Fig.13-1(a)の提案する手法では，障害物の位置により補正することで誤差をキャンセルし理論値とほぼ一致している．x 軸方向，y 軸方向ともに最大で 0.25m の誤差しかなく，正確な自己位置軌跡が推定されている．Fig.13-1(c)においても生成されたランドマークの座標は, 同様に極めて真の値に近く最大で 0.25m 程度の誤差が確認できた.

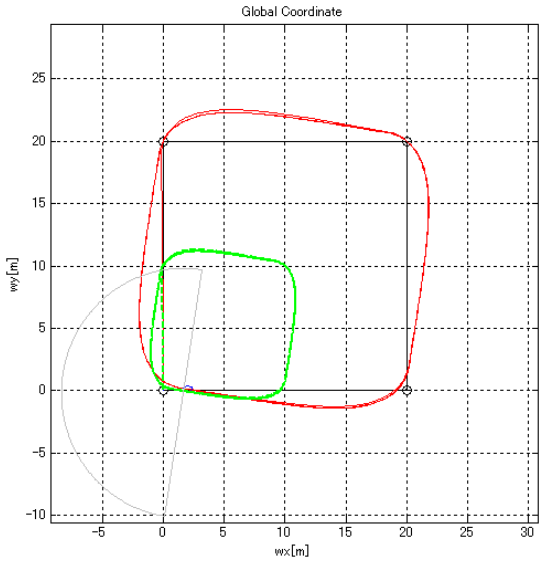
5．1．2　速度計の出力が半分の場合

車両に搭載している速度計は，車両の左右の車輪に対してそれぞれ独立に設置されている．速度計の出力は，左右の速度の平均を車両の走行速度として得ている．ここでは，速度計の片方が何らかの原因で出力が低下した場合を考える．速度は，片方のみの出力となり 2 で除算した値がセンサ出力として取得される．ジャイロセンサおよびレーザレーダに加算するノイズは 5．1．1 と同様である．

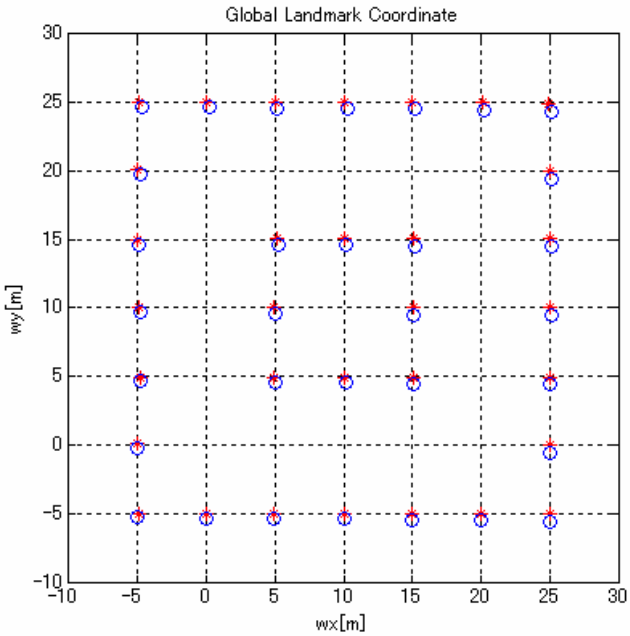
Fig.13-2(a)に提案する手法による推定結果，Fig.13-2(b)にデッドレコニング法のみによる自己位置推定結果を破線で示す．Fig.13-2(c)にランドマークの真の設定値を＊印で，推定されたランドマーク座標を丸印で示す．



(a) Proposed method



(b) Dead reckoning method



(c) Obstacles and estimated landmark by proposed method

Fig.13-2 Simulation results

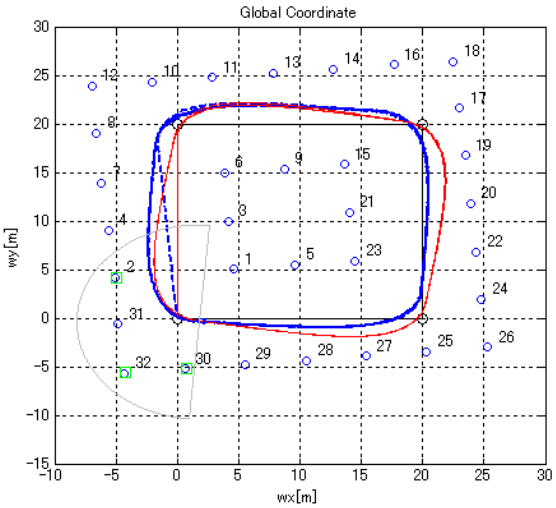
速度計の出力が半分のために Fig.13-2(b)に示す結果は，大きく真の値からずれていることがわかる．一方，Fig.13-2(a)の提案する手法では，速度計による誤差がキャンセルされ高い推定精度を維持していることがわかる．しかし，5．1．1 の結果と比較すると，推定精度が低下していることがわかる．

また Fig.13-2(c)では，推定精度の低下から，最大で 0.5m 程度の誤差が確認できた．Fig.13-2(a)でも同様の誤差が確認できる．

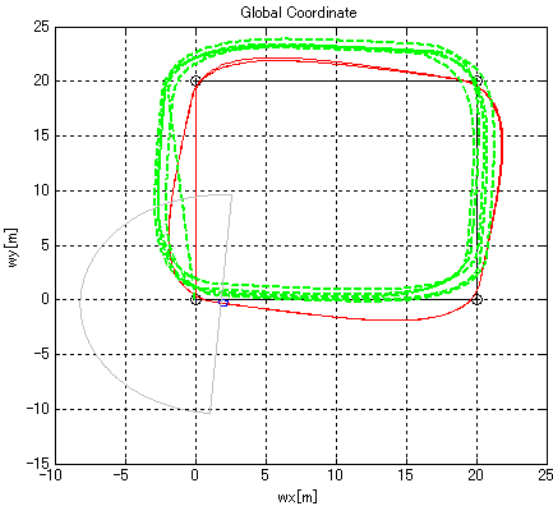
5．1．3　ジャイロセンサにオフセットをのせた場合

ここでは，ジャイロセンサにオフセットをのせた場合のシミュレーションを行った．オフセット値は 0.1rad であり，スタート地点におけるジャイロセンサのイニシャライズ後，0.1rad 程度ずれてスタートした状況である．なお，速度計およびレーザレーダに加算するノイズは 5．1．1 と同様である．

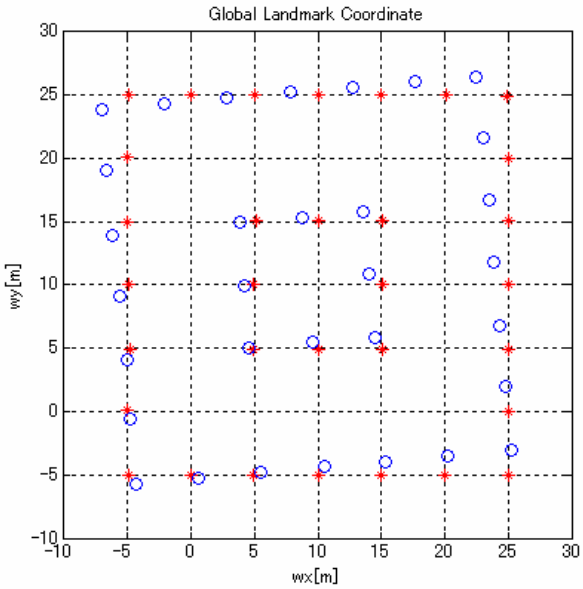
Fig.13-3(a)に提案する手法による推定結果，Fig.13-3(b)にデッドレコニング法のみによる自己位置推定結果を破線で示す．Fig.13-3(c)にランドマークの真の設定値を＊印で，推定されたランドマーク座標を丸印で示す．



(a) Proposed method



(b) Dead reckoning method



(c) Obstacles and estimated landmark by proposed method

Fig.13-3 Simulation results

Fig.13-3(a)，(b)に示す結果より，両手法共に真値から大きくずれていることがわかる．提案する手法では，グローバル座標系およびローカル座標系間の座標変換にジャイロセンサの出力を直接用いているため，ジャイロセンサの出力に加えたオフセットが影響し大きなずれを生じる結果となった．

5．2　実車による実験

Photo.5 に示す移動ロボットを用いて，実環境における本手法の妥当性を検証する．実験環境は Photo.6 に示す林である．障害物とする樹木の直径はナビゲーションチャレンジ競技に用いられる障害物とほぼ同じである．

Photo.6 Waypoint navigation course (trees as obstacles)

実験の前処理として手動によりウェイポイントを 17 点設定した．周回数は 1 回とし，全走行距離は 178m であった．Fig.14 はここで得られたウェイポイントマップである．Fig.14 のウェイポイント座標を入力し，リアルタイムで提案する手法を適用したウェイポイントナビゲーションを行う．手動による走行結果を自律ナビゲーションにより再現できるかを検証する．

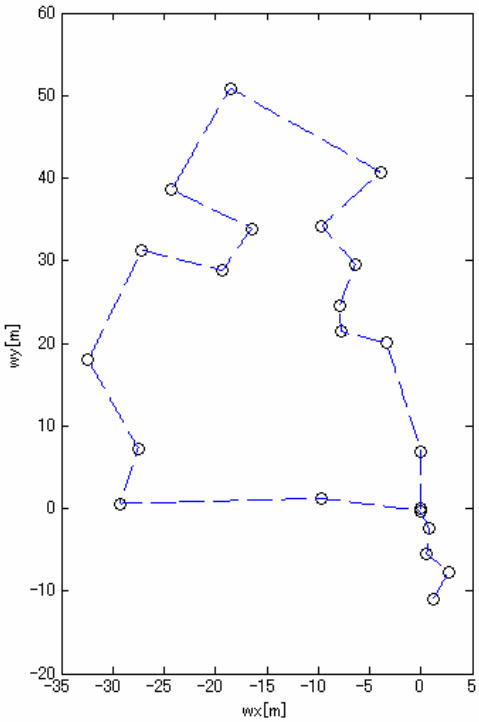


Fig.14 Waypoint map of outdoor experimentation

Photo.7 Outdoor experimentation

Fig.15 に走行結果を示す．青破線は提案する手法よる自己位置推定結果，赤実線はデッドレコニング法のみによる結果である．

デッドレコニング法のみでは，落ち葉が多く車輪がスリップしやすい環境のため大きく誤差が累積している． x 軸方向， y 軸方向ともに最大で 3.0m 以上の誤差が確認できた．それに対し，提案する手法では高精度に自己位置を推定してスタート地点に帰還することができた．スタート地点から走行し帰還した際の誤差は，0.5m 以下であることを確認した．提案した対応付けおよび観測行列を用いたマップ管理は，実環境においても適用可能であり，Fig.15 に示す推定精度から 86 個の障害物に対し正しく対応付けがなされた．

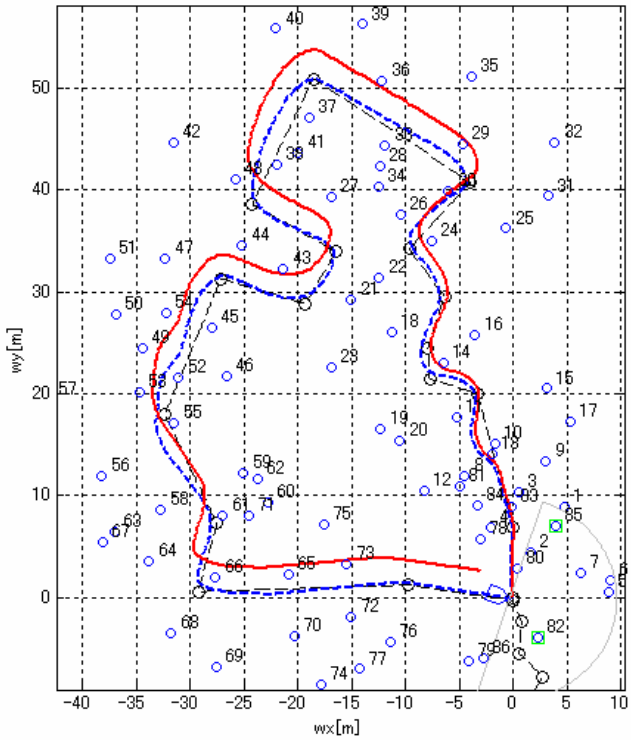


Fig.15 Result of mobile robot trajectory and detected landmarks at global coordinate map

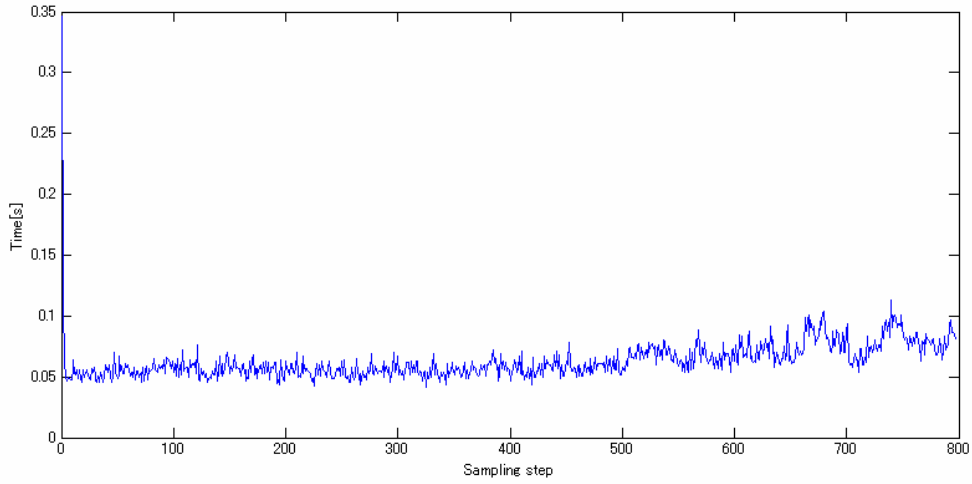


Fig.16　processing time of proposed method system at time k

Fig.16 に示す処理時間は，GUIDE 結果表示をなくしたシステムの処理時間である．なお，各センサからデータ取得にかかる時間を含まない．離散時刻 $k=1$ の時点では，提案する手法の初期設定に伴う処理により大きな値をとっている．それ以降は，およそ 0.05sec 付近を維持している．ナビゲーション後半は，ランドマーク数の増加に伴い処理時間に増加が見られる．さらに，障害物回避に伴う処理時間が加わるため一時的に増加した様子がわかる．

第 6 章　むすび

本論では，ナビゲーション競技におけるウェイポイントナビゲーションシステムの開発について述べた.

対象とするナビゲーションチャレンジにおいて，不安定な要素である GPS の補助としてコース中に複数点在する未知な障害物をランドマークとし，レーザレーダにより観測することで移動ロボットの自己位置軌跡マップおよびランドマークマップをリアルタイムで生成する方法を提案した.

シミュレーションにより，速度計とジャイロセンサおよびレーザレーダから得たデータを複素拡張カルマンフィルタにより融合することで，より高精度なウェイポイントナビゲーションが可能であることを確認した.

さらに，実車による屋外環境で提案する方式の妥当性を検証し，実環境において適用可能であることを確認した.

参考文献

1) Boon C. Low, D. Wang:GPS-Based Path Following Control for a Car-Like Wheeled Mobile Robot With Skidding and Slipping, IEEE Trans.on Control Systems Technology, **16**-2, 340/347 (2008)
2) Y. Miyazaki, M. Imamura, R. Tomitaka, K. Kobayashi, K. Watanabe：Outdoor waypoints navigation for intelligent wheelchair by using Differential GPS and INS, Proc. of SCIS and ISIS 2004, TUP-4-5, (2004)
3) L. M. Paz, P. Jensfelt, J. D. Tardos, and J. Neira：EKF SLAM updates in 0(n) with divide and conquer SLAM, IEEE Int. Conf. Robot. Autom, 1657/1663 (2007)
4) Intelligent Ground Vehicle Competition [Online]　Available：http://www.igvc.org
5) T. Sasaki, H. Iikura, K. Kobayashi, K. Watanabe：A study of environment recognition for Intelligent Ground Vehicle Competition, Prof. of SICE annual Conference 2005, Aug, 3590/3593 (2005)
6) S. Qiu, H. Makino, H. Suda, Y. Yokoyama：Free Curve Interpolation Using Clothoid, JRSJ, **8**-6, 40/47
7) 金山裕, C. Thomas Wu：プログラマブルパーソナルロボットのための移動ロボット用標準言語, Interface Apr, 158/163 (1999)
8) 大前学, 藤岡健彦 ：DGPS を利用した絶対位置情報に基づく自動車の自動運転システムに関する研究, 日本機械学会論文集, **98**-1358, 211/218 (1999)
9) 小林, 宗像, 渡辺, 村西：差動 GPS を用いた複合車両航法について, 計測自動学会論文集, **31**-7, 880/888 (1998)
10) 小林：図解ロボット入門　ロボットモデリング, オーム社 (2007)
11) M.W.M.G. Dissanayake, P.Newman, S. Clark, H.F.Durrant-Whyte, and M. Csorba：A solution to the Simultaneous Localization and Map Building(SLAM) Problem, IEEE Transactions on Robotics and Automation, **17**-3, 229/241 (2001)
12) 西山：離散周波数スペクトル推定における複素カルマンフィルタの実カルマンフィルタの有用性について, 計測自動制御学会論文集, **27**-7, 776/783 (1991)

付録

本論で提案したウェイポイントナビゲーションの検証実験に用いた自律型移動ロボットについて述べる．車両のベースは，関東自動車株式会社製の 4WD 車いすを用い，各種センサを搭載することで様々なアプリケーションが実行可能である．

付録(A)　自律型移動ロボットの制御方法

この自律型移動ロボットは，関東自動車株式会社製の 4WD 車いす Patrafour をベースとし，オムニディレクショナルカメラ，レーザレーダ，D-GPS，ジャイロセンサ，速度計を搭載した自律走行車である．各センサへの電源供給と接続を Fig.A-1 に示す．

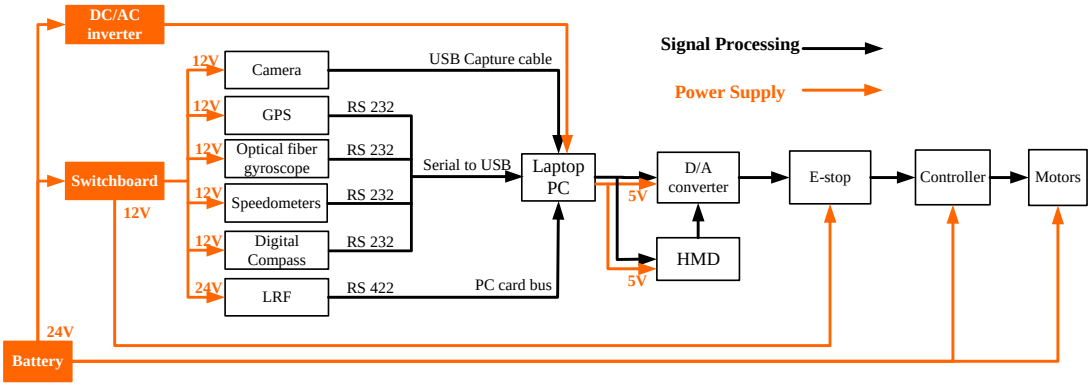


Fig.A-1 Inner system of mobile robot

車両の制御方法は，PC に接続した D/A コンバータ(CONTEC DAI12-4 USB GY)によりアナログ信号を車両コントローラに入力することで走行制御が可能となる．入力電圧に対する車両の振る舞いは，Patrafour の仕様であり Fig.A-2 に示す．Fig.A-2 はマニュアル値であり，実際は若干のずれがある．その差は 0.1V 程度であるが，車両の動作は大きく変わってくる．Fig.A-2 より Patrafour への入力信号は 3 系統あり，前後進信号，左右進信号，中立電圧である．車両の制御は，PC に適切な電圧値を指定することで行うことができる．ここでは，車両の速度 V_{in} とステアリング角 θ_{in} を入力することで適切な電圧値に変換し車両を制御する方法を示す．なお，指定する電圧値に Fig.A-2 と異なる場合があるが，実験的に確認した値である．

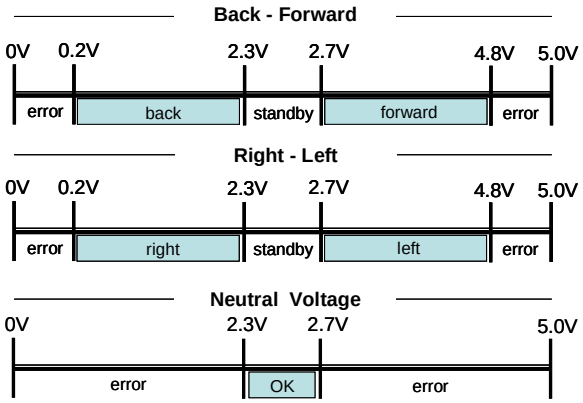


Fig.A-2 Control signal of mobile robot

付録

(Step 1)　入力速度V_{in}と電圧V_{spd}の関係式

入力速度V_{in}と電圧V_{spd}に関する関数を定義する．Fig.A-2 より前進電圧V_{spd}の最小値は 2.7V，最大電圧は 4.8V であることから，これらに入力速度V_{in}(0～1.7m/s)を割り当てる．車両コントローラ内部での計算式が不明なため，割り当ては実験的に走行させ試行錯誤することで関係式を割り出す．今回は，二次関数 f_{spd} により関係式を定義する． x 軸を速度， y 軸を電圧値としたとき，

$$V_{spd} = f_{spd}(V_{in}) \tag{A-1}$$

となる．(A-1)式は，(0,2.7)，(1.2,4.5)，(1.7,4.7)を指定し多項式近似により係数を求める．ここで，(0,2.7)は，速度 0 m/s のとき 2.7V，(1.2,4.5)は速度 1.2 m/s のとき 4.5V，(1.7,4.7)は速度 1.7 m/s のとき 4.7V であることを示す．なお，中間の値(1.2,4.5)は調整可能である．これより二次関数 f_{spd} は，

$$V_{spd} = -0.6471 \cdot V_{in}{}^{2} + 2.2765 \cdot V_{in} + 2.7 \tag{A-2}$$

となる．

(Step 2)　入力ステアリング角度θ_{in}と電圧V_{theta}の関係式

入力ステアリング角度θ_{in}と電圧V_{theta}に関する関数を定義する．関数の導出方法は Step1 と同様である．右折と左折に関する関数を f_{theta}として一つの関係式に定義することもできるが，車両の特性上，右折に関する式と左折に関する式が対象とは限らない．このため，右左折別に関数を定義する．右折に関する一次関数 f_{Rtheta}，左折に関する一次関数 f_{Ltheta}

$$V_{Rtheta} = f_{Rtheta}(\theta_{in}) \tag{A-3}$$

$$V_{Ltheta} = f_{Ltheta}(\theta_{in}) \tag{A-4}$$

を定義する．(A-3)式は，(0,π/2)，(2.2,0.3)を指定し，多項式近似により係数を求める．これより右折に関する関数 f_{Rtheta} は，

$$V_{Rtheta} = -1.2096 \cdot \theta_{in} + 2.2 \tag{A-5}$$

(A-3)式は，(0,-π/2)，(2.8,4.7)を指定し，関数 f_{Ltheta} は，

$$V_{Ltheta} = -1.2096 \cdot \theta_{in} + 2.8 \tag{A-6}$$

となる．

(Step 3)　電圧V_{spd}と電圧V_{theta}の関係

Step 1 で求めた電圧V_{spd}は，直進時における最大速度である．前進電圧V_{spd}に固定のままステアリング電圧V_{theta}を入力すると，車両を正常に制御することができない．このため，ステアリング電圧V_{Rtheta}およびV_{Ltheta}に比例し電圧V_{spd}を決定する．例えば，右折電圧のレンジの最大値は 2.2V であるから，求めたV_{Rtheta}で除算することで比率(%)を求める．

このとき，前進電圧V_{spd}に対して同じ比率を乗算し求めた値を電圧V_{Rtheta}に対する電圧V_{spd}とする．左折に関しても同様に求める．

以上により車両を制御する入力信号を決定することができる.

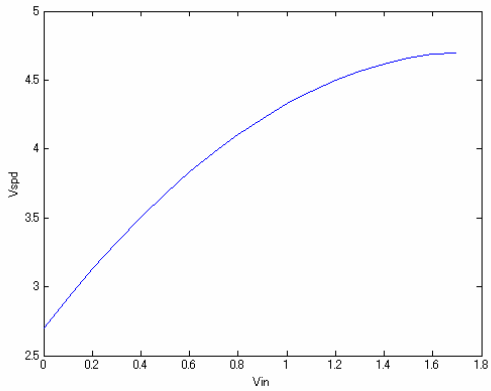
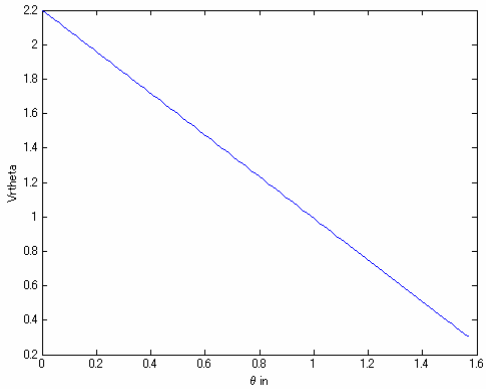
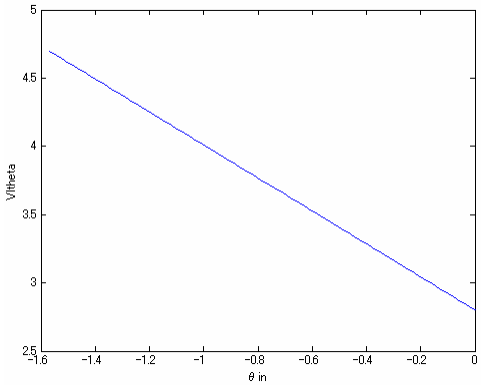


Fig.A-3 Input speed V_{in} and voltage V_{spd}



(a) θ_{in} - V_{Rtheta}



(b) θ_{in} - V_{Ltheta}

Fig.A-3 Input steering θ_{in} and voltage V_{theta}

付録

付録(B)　自律移動ロボットのベース車体緒言

関東自動車株式会社製 4WD 電動車いす　Patrafour

Table B-1 Patrafour introductory pages

形式・種類		KMC-0001 型・KMC
寸法 (mm)	前兆×全幅×全高	長 980×幅 625×高 930
	アームレストクッション高さ	シート上面より 150 から 300　5 段階調節
重量 (Kg)	本体	70
	バッテリ含む	100
前輪径(前後輪空気入りタイヤ) (mm kpa)		後輪 3.00-8-4PR（径 350　空気圧 294～314）
フレーム構造及び寸法(mm)		上下分割式：シート，アームレスト，レッグパイプ着脱 シート幅 390　シート奥行き 400　バックレスト高さ 435
リクライニング		5 段階調節機構(85～105 度)
駆動方式		4 輪駆動
制動方式		モータ発電及び電磁ブレーキによる制動方式
制御方式		ジョイスティックコントローラによる全方向電子制御方式
駆動モータ		DC ブラシレス　24V　280W×2(30 分定格)
バッテリ		LC-XC1238AJN 形鉛蓄電池
充電器		電子タイマー付自動充電方式(車載可能)
受電時間		8～12 時間
速度		最高速　6km/h 速度切り替え 3 段階：3.0，4.5，6.0（4.5～6.0 変更可）
連続走行距離(km)		算出条件：常温で乗車重量 75kg，最高速度，平坦路直進時，バッテリ新品満充電から 70%放電まで 30km
実用登坂角度(度)		10
段差乗越高さ：前進時		80
溝乗越幅(mm)		100
最小回転半径(mm)		測定条件：フットレストの最も外側の軌跡 790
使用者最大体重(kg)(積載物含)		100 以下

付録(C)　Laser rangefinder 緒言

Table C-1 Laser rangefinder introductory pages

角度分解能	0.25 度/0.5 度/1 度　設定可能
外形寸法	155×210×156mm （W×H×L）
インタフェース	RS232/RS422
レーザ保護クラス	1（本質的に安全）
最大角度	180 度
使用周囲温度	0 度～＋50 度
保護構造	IP65
測定距離(m)	80
分解能(mm)	10
応答時間	53ms/26ms/13ms 角度分解能による
保管周囲温度	-30 度～＋70 度
電源電圧	24V　DC±15%　（最大リップル 500mV）
スイッチング出力	PNP3 点;代表値 24V　DC
システム誤差	代表値±15mm
伝送速度	9.6/19.2/38.4/500 kbps
重量	約 4.5kg
備考	＊　ＬＭＳ200 は，レーザレーダのように周囲を 2 次元的にスキャンする，非接触レーザ測定システム． ＊　温度範囲 0 度～50 度で作動し，アクティブ・スキャニング・システムのため，パッシブの機器のようにターゲットを必要としない． ＊　レーザを照射するため，照射部分の汚れなどは計測不可能とみなしエラーが返される．具体的に，太陽光による西日，至近距離による計測，粉塵による汚れ，雨水による水滴などは，計測を妨げエラーが返される．なお，レーダレーダのレーザビームはガラス等の物体は反射せず通過するため計測は不可能．

付録

付録(D)　Optical fiber gyroscope 緒言

Table D-1 Optical fiber gyroscope introductory pages

項目	単位	規格
外観寸法	mm	88×88×65
インタフェース	―	RS232C
角速度測定範囲	deg/s	±100
角度測定範囲	deg	±360
電源電圧	V	＋10～＋18
最小検出感度	deg/s	0.05 以下
角速度直線性	%	±1.0 以内
零点ドリフト	deg/h	10 以下
起動時間	min	1 以内
電源消費電流	mA	500 以下
使用温度	℃	-10～70
使用湿度	%	20～80RH，結露しないこと
保存温度	℃	-20～70
保存湿度	%	10～80RH，結露しないこと

付録

付録(E)　速度計緒言

１．　一定時間あたりのパルスの検出

一定時間(0.008 秒)につきロータリーエンコーダから,

82　48　48　32　76　48　49　10　13　(意味；R00 L01)

となるアスキーコードが出力される.コンピュータ上でのサンプリング時間をロータリーエンコーダのサンプリング時間以上に設定した場合,

82　48　48　32　76　48　49　10　13　82　48　48　32　76　48
49　10　13　82　48　48　32　76　48　48　10　13　…　49　10

というように複数のパルス信号が出力される．そのため，まず“R”である“82”の位置を検出する．“R”から“R”までの間を新しいデータと置く．求めたデータの場所から 1～2 ずれた部分を符号判別，十進数変換した数を右のパルス，5～6 ずれた部分を符号判別，十進数変換した数を左のパルスとする．求められたパルスデータの位置において検出された数を繰り返し，得られたパルスの合計を右の合計パルス，左の合計パルスとする．

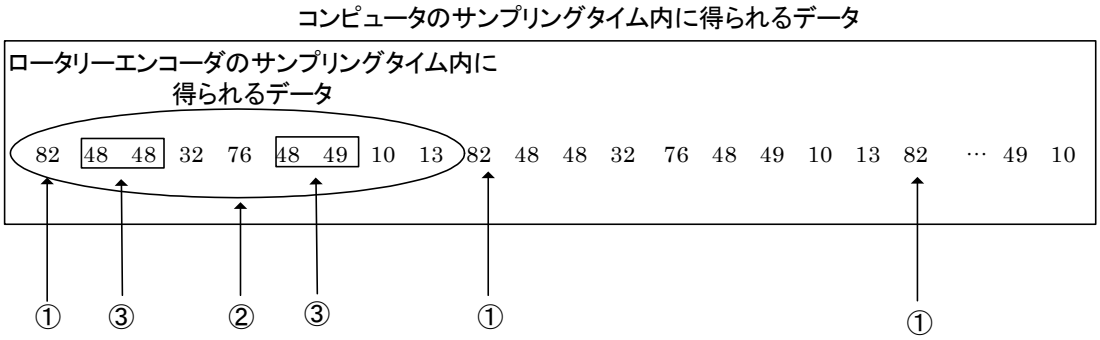


Fig.E-1 Pulse data format

２．　パルスからの速度変換

後輪の外輪 A の半径を a(m)，後輪の内輪 B の半径を b(m)，ゴム C の半径を c(m)とした場合，後輪の内輪 B が 1 回転する時ゴム C はb/c 回転する.そのためゴム C が 1 回転する時後輪の内輪 B はc/b 回転する．ここで後輪の内輪 B が 1 回転する時$2\pi a$ (m)進むので，ゴム C が 1 回転した時$2\pi a \cdot c/b$ (m)進むことになる.

ここでゴム C が 1 回転した時に発生するパルス数を測定した結果,左が 182(パルス/回転),右が 184(パルス/回転)となる．そこで 1 パルスあたり左は$2\pi ac/182b$ (m)，右は$2\pi ac/184b$(m)進む.よって,

$$左速度＝平均パルス\times\frac{2\pi a\times c}{182\times b}\times\frac{1}{0.008}$$

$$右速度＝平均パルス\times\frac{2\pi a\times c}{184\times b}\times\frac{1}{0.008}$$

となる(0.008(s)；ロータリーエンコーダのサンプリングタイム)．ここで a=0.175(m)，b=0.055(m)，左のゴムの半径 c=0.0165(m)，右のゴムの半径 c=0.017(m)なので,

付録

$$左速度＝平均パルス\times\frac{2\pi\times0.175\times0.0165}{182\times0.055}\times\frac{1}{0.008}$$

$$右速度＝平均パルス\times\frac{2\pi\times0.175\times0.017}{184\times0.055}\times\frac{1}{0.008}$$

となる．(実際には実験値である 182，184 を実験により変化させて精度を増す).

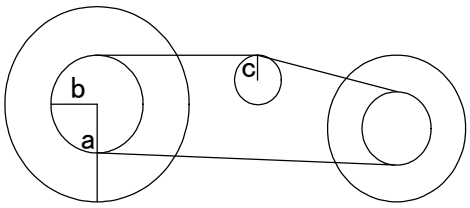


Fig.E-2 Gum, inner ring of rear wheel and radius of outer ring

謝辞

本研究を進めるにあたり，適切なご指導や助言をいただいた渡辺嘉二郎教授，小林一行准教授に深く感謝申し上げます．両先生方には学部 4 年から 3 年間，Intelligent Ground Vehicle Competition というすばらしいチャンスを与えて頂き，また大会出場に当たり多方面からサポートして頂きました．特に小林先生には，不勉強な私を技術的な面でサポートしていただき，本研究の遂行ならびに本論文の作成にあたり多大な有益なる御指摘，御助言を頂きました．重ねて感謝申し上げます．

また，なにかと至らぬ私に数々の助言とご指導をして下さった天野心先輩，安藤幹大先輩，久保田淳一先輩，佐々木健義先輩，清水学先輩，樽床祐樹先輩，小竹亮太郎先輩にも感謝の意を表します．

そして，どんな仕事も嫌がらずに率先してやってくれて常にムードメーカー的存在でいてくれたリーダーざきさん，じっくりと妥協せず仕事をこなしビークル班を支えてくれた大西くん，研究でもプライベートでも一番楽しめる存在でありいつも迷惑をかけてしまったごっちゃん，常に冷静な観点をもちメンバーに足りない色をくれたすぎさん，同じビークル班としてだけではなく，友人として公私共に楽しく有意義な時間をみんなで共有できたことに心より感謝しております．

後輩ながら厳しく適切な指摘や御指導をして頂いた沢辺航君には，心より感謝するとともに，次期チームリーダーとして沢辺君のますますのご活躍とご発展を心より期待しております．そして，ビークル班の活躍は内海恒亮君，酒井健至君，塩田知史君，深澤卓君，福田芳久君，古巣謙太君の大会に向けた直向な努力の賜物だと確信しております．

最後に大学生活という自由な時間を与えて頂き，そして勉学に集中できる環境を提供して頂いた両親に何よりも感謝し，心より深く御礼申し上げます．

諸先生方ならびにビークルメンバーのさらなる発展を願い，そして益々の御健康と御活躍を祈願し，謝辞とさせていただきます．

法政大学大学院工学研究科　システム工学専攻　小林研究室
御園　祐介

謝辞

研究業績

研究業績

2006 年度（学部 4 年）

【国内会議】

御園祐介，樽床祐樹，小竹亮太郎，小林一行，渡辺嘉二郎：SLAM による自律ナビゲーションシステムの開発，第 28 回ファジィワークショップ(首都大学東京)

2007 年度（修士 1 年）

【国際会議】

Misono Yusuke, Yoshitaka Goto, Yuki Tarutoko , Kazuyuki Kobayashi, Kajiro Watanabe “Development of laser rangefinder-based SLAM algorithm for mobile robot navigation”, SICE Annual Conference 2007 (Kagawa University, Kagawa, JAPAN)

2008 年度（修士 2 年）

【国内会議】

御園祐介，小林一行，渡辺嘉二郎：IGVC におけるウェイポイントナビゲーションシステム，第 31 回ファジィワークショップ(法政大学)