卒業論文 2010年度 (平成 22年度)

SJMC:

生活空間における モバイルロボットの障害物回避手法

指導教員

慶應義塾大学環境情報学部

徳田 英幸

村井 純

楠本 博之

中村 修

高汐 一紀

重近 範行

Rodney D. Van Meter III

植原 啓介

三次 仁

中澤仁

武田 圭史

慶應義塾大学 環境情報学部 望月 剣

mochi@ht.sfc.keio.ac.jp

卒業論文要旨 2010年度(平成22年度)

SJMC: 生活空間におけるモバイルロボットの障害物回避手法

近年モバイルロボットの研究が活発に行われており,我々の生活空間にも様々なロボットが普及しつつある.これらは自律走行によって空間上を自由に移動することが可能で,我々人間や周囲の環境等と相互関係を持つことができる.そのため実空間上の物や情報の移動を飛躍的に向上させ,既存のロボットでは提供することのできなかった多くのサービスを実現させてきている.

本研究ではモバイルロボットの要素技術の一つである障害物回避を取り上げた.障害物回避とは,走行中に遭遇する障害物を検知し,適切な動作でそれを回避する技術である.モバイルロボットの普及が進む生活空間はロボットの動作が想定されておらず,人をはじめとする多くの障害物が存在する.そのため環境に存在する障害物の特性も複雑化してきており,ロボットは既存の障害物回避手法を用いることが困難になってきていると言える.

こうした背景を踏まえ,本研究では障害物の回避行動を想定した障害物回避手法 Self-Justification Movement Control (SJMC) Method を提案する.この手法は,移動する障害物が意思を持ち,環境に応じて行動することに着目したものである.人間を筆頭としたこれらの障害物は,周囲の状況を把握して自身にとって最適な移動を行うことができる.ロボットが障害物回避を行うのと同様に,障害物もロボットに対して回避行動を取ると想定することで,走行時における動作効率の向上を試みた.本手法の実現により,既存手法に比べ単純な動作で走行することができ,より複雑な環境である生活空間でも動作が可能となる.

本論文では, SJMC Method が用いる走行速度モデルの検証を行った.評価対象を応答性に優れたロボットに定め,実際にモバイルロボットを試作して SJMC Method を導入している.実験を行い既存手法と比較した結果,特定の障害物に対しては高いパフォーマンスを発揮することに成功した.

慶應義塾大学 環境情報学部 望月 剣

Abstract of Bachelor's Thesis Academic Year 2010

SJMC: Obstacle Avoidance for Mobile Robot in Living Spaces

The mobile robot has been actively researched, and many robots are popular in our living spaces. They can move freely in space by autonomous and human beings can have interactions with them. The dramatic improvement of goods and information movement provides many new services.

This study addressed the obstacle avoidance of mobile robots which is a one of robot technologies. The obstacle avoidance is to detect obstacles encountered while driving, and avoid it by the appropriate behavior. Currently, the living spaces have not focused on behavior of the robot and expect a number of obstacles such as human beings. Presently, obstacle has been complicated so the existing robots having difficulties to avoid obstacles by using old technique.

From the background, this study shows the new obstacle avoidance method, 'Self- Justification Movement Control (SJMC) Method'. The method based on the fact that obstacles are able to act by the situation. These obstacles, such as human beings can understand the situation and decide their movement. As well as, the robot can take evasive action against obstacles, the obstacles possibly take evasive action and the fact leads the improvement of operating efficiency on running. The realization of this method, it can run simply compared to old methods, it is possible to operate in more complex living spaces.

In this paper, we verified velocity model which SJMC Method used. We actually introduced SJMC Method to tested mobile robot about the robot which has excellent response. Comparison with old methods, it succeeded to perform well to specific obstacles.

Ken Mochizuki

Faculty of Environment and Information Studies
Keio University

目次

第1章	序論	1
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	2
1.3	本論文の構成	2
第2章	モバイルロボットと障害物回避	3
2.1	モバイルロボットの普及	4
	2.1.1 特定空間ロボット	4
	2.1.2 生活空間ロボット	5
	2.1.3 利用環境の拡大	5
2.2	モバイルロボットにおける障害物回避	6
	2.2.1 障害物回避の定義	6
	2.2.2 既存の障害物回避手法	8
	2.2.3 障害物回避手法の遷移	12
2.3	生活空間ロボットにおける障害物回避問題	12
	2.3.1 障害物の分類	12
	2.3.2 障害物の変化	13
	2.3.3 既存手法による障害物回避の限界	13
2.4	本章のまとめ	14
第3章	SJMC Method	15
3.1	想定環境	16
	3.1.1 対象環境	16
	3.1.2 対象ロボット	16
3.2	機能要件	17
3.3	アプローチ	17
3.4	SJMC Method の概要	18
	3.4.1 用語の定義	18
	3.4.2 ロボットの走行方法	18

	3.4.3 走行方法の選択	19
3.5	システム設計	22
3.6	走行速度の決定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
	3.6.1 障害物の状態	23
	3.6.2 走行速度のモデル化	23
3.7	走行針路の決定....................................	25
3.8	まとめ	25
第4章	SJMC Method の導入	26
4.1	導入方針	27
	4.1.1 導入目的	27
	4.1.2 導入対象	27
4.2	モバイルロボットの試作	27
	4.2.1 ハードウェアの選定	27
	4.2.2 ロボットの構成	29
4.3	システム構成	30
	4.3.1 走行速度設定モジュール	30
	4.3.2 走行針路設定モジュール	31
4.4	まとめ	32
第5章	実験と評価	33
5.1	実験主旨	34
5.2	走行速度モデルの評価	34
	5.2.1 評価方針	34
	5.2.2 静的障害物の回避	35
	5.2.3 Unstable な動的障害物の回避	37
	5.2.4 Stable な動的障害物の回避	38
5.3	考察	39
5.4	まとめ	39
第6章	結論	40
6.1	今後の課題	41
	6.1.1 走行速度の決定	41
	6.1.2 走行針路の決定	41
6.2	本論文のまとめ	42
参考文献	${f \mathring{\chi}}$	44

図目次

2.1	Kiva Mobile Fulfillment System	4
2.2	DustCart	5
2.3	DustCart のナビゲーションシステム	7
2.4	Mobile Robot Navigation Model	7
2.5	Wavefront Algorithm	8
2.6	The Virtual Force Field Method	9
2.7	The Vector Field Histogram Method	10
2.8	The Vector Field Histogram Plus Method	10
2.9	VFH/VFH+ 法による針路決定	11
2.10	動的障害物回避時の蛇行問題	14
3.1	モバイルロボットの動作環境	18
3.2	領域の設定	20
3.3	SJMC Method における走行制御の流れ	21
3.4	SJMC Mehod のソフトウェア構成	22
3.5	対象障害物の移動・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	23
4.1	Segway RMP 50	28
4.2	URG-04LX LRFs	28
4.3	モバイルロボットの構成	29
4.4	走行針路の決定・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	31
5.1	静的障害物回避の実験環境・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	35
5.2	定数 C に対する走行時間の変化 \ldots	36
5.3	L_{DANGER} に対する走行時間の変化 \dots	36
5.4	Unstable な動的障害物回避の実験環境	37
5.5	障害物との距離に対する直進走行の成功率	38

表目次

2.1	障害物回避手法の遷移	12
2.2	既存手法の比較・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	13
4.1	Segway RMP 50 の仕様	28
4.2	Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder の仕様	28

第1章

序論

本章では,本論文の背景となるモバイルロボットの普及について述べ,その要素技術である障害物回避について触れる.その後,現在のモバイルロボットにおける障害物回避の問題を明らかにし,本研究の目的を示す.最後に本論文の構成を記す.

1.1 本研究の背景

近年モバイルロボットの需要が拡大し、研究開発が進められたことで、多くのモバイルロボットが実用化されてきている。モバイルロボットの普及は特定の分野にとどまらず、我々の生活空間にも広がりをみせており、日常生活でもこれらを目にする機会が増えてきた。モバイルロボットは空間上を自由に動くことができるため、非常に広範囲の人や環境と相互関係を持つことができる。そのため、実空間上の物や情報の移動を飛躍的に向上させ、既存のロボットでは提供することのできなかった多くのサービスを実現させてきている。

本研究では,モバイルロボットが生活空間で活動する際に行う障害物回避について取り上げる. 障害物回避とは,ロボットが走行中に遭遇する障害物を検知し,適切な動作でそれを回避する技術である.モバイルロボットが浸透しつつある生活空間は個々に状況が異なるため,ロボットを導入するにあたり環境側に制約を設けることは難しい.そのため,生活空間のモバイルロボットは様々な環境で動作できることが求められる.今後,モバイルロボットがより日常生活に普及するためには,この複雑な環境で障害物を回避し,動作を行える必要がある.

1.2 本研究の目的

本研究の目的は,生活空間における障害物回避をモバイルロボットの単純な走行で実現し,その 結果より多くのロボットが我々の日常生活で活動できるようにすることである.

生活空間はモバイルロボットの動作が想定されておらず,ロボットが障害物回避を行うのは非常に困難である.例えば,モバイルロボットが都市部の公共空間で活動する場合,ロボットは道の縁石やベンチ,更には移動を行う車両や人間等,様々な障害物を回避しなければならない.このように,生活空間の障害物は複雑な特性を持っている.そのためロボットが障害物回避時に行う走行をより簡潔なものにして,不測の事態にも耐えうるよう設計する必要がある.本研究で上述した目的を達成することで,生活空間におけるモバイルロボットの普及が加速し,我々はより便利で有益なサービスを享受できるようになる.

1.3 本論文の構成

本論文は全6章で構成される.まず2章で本研究の対象とするモバイルロボットについて述べ,既存の手法を説明することで障害物回避の問題に触れる.3章では,2章で取り上げた問題を基に本研究で提案する障害物回避手法について解説する.4章では実験・評価のために試作したモバイルロボットについて説明し,5章でその評価結果を述べる.6章で本論文のまとめを行い,今後の課題について言及する.

第2章

モバイルロボットと障害物回避

本章では,本研究の対象となるモバイルロボットのこれまでの進化と現状について概観する.また,モバイルロボットにおける既存の障害物回避手法について触れ,生活空間における障害物回避の問題について論じる.

2.1 モバイルロボットの普及

本節ではモバイルロボットの進化と現状の具体例について触れる.それにより,本研究の対象であるモバイルロボットの利用環境がどのように変化してきたかを説明する.

2.1.1 特定空間ロボット

当初のモバイルロボットは,特定の空間でのみ活動することを想定されたロボットであった.そのため,サービスの導入に新たな環境を構築することも多く,ロボットと環境が統一されたシステムで管理されることが特徴である.

Kiva Systems 社の提案する Kiva Mobile Fulfillment System(MFS)[1] は,現在既に実用化されている新しい物流管理システムである.このシステムは,ネットワーク化された複数のモバイルロボットを利用することで倉庫など屋内における物流管理の効率化を図っている.図 2.1 からも分かるように,MFS で用いるロボットは棚を運搬することによって製品の移動を行う.MFS がロボットに運ぶべき製品と運び先を指示すると,ロボットは該当する製品が収納された棚を探し出し運搬する.この際にロボット同士が連携し,適切なロボットを選択することでロボットの移動効率を上げている.また,MFS はこのような大量の製品の出し入れを通して各製品の回転率を算出することができる.その結果をもとにロボットが製品配置を変更することで,更なる効率化を実現している.同社によると,MFS は従来の倉庫における労働と比較して,二倍から四倍の効率を可能にするという.また,ロボットが活動する領域については照明や空調が不要で,通常の倉庫に比べ50% ものコスト削減が可能になると主張している.

このような特定空間ロボットの出現により,限定された空間内ではあるものの,実空間における物や情報のより効率的な移動が実現された.



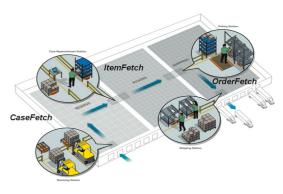


図 2.1 Kiva Mobile Fulfillment System

2.1.2 生活空間ロボット

近年,特定空間ロボットに代わり,我々が生活する空間一般で活動するロボットの研究が進められている.生活空間ロボットは,走行が可能である空間であれば動作環境を選ばずにサービスを提供できる.そのためサービスの導入に際して環境側に複雑な設定を施す必要がなく,比較的容易にロボットを投入できるという特徴がある.

DustCart[2] は,DustBot European project[3] が研究開発を進めているモバイルロボットの一つで,都市部における公衆衛生管理ロボットとして実用化を目指している.このロボットは,各家庭の玄関口でごみを回収し,種別ごとに異なる所定の集積所までごみを運搬する.それと同時に,ロボットに設置された環境センサを用いて温度や湿度,大気汚染の状況をモニタリングし,地図上へのマッピングを行うこともできる.

これまでの特定空間ロボットは活動範囲が限られており、単体のサービスを扱うものも多かった、生活空間ロボットの登場により活動範囲が拡大し、一つのロボットが複数のサービスを提供できるようになってきた、



図 2.2 DustCart

2.1.3 利用環境の拡大

以上から分かるように,従来特定空間で利用されてきたモバイルロボットが生活空間にも普及しつつある.ロボットの利用環境は飛躍的に拡大し,我々が日常的にロボットと関わる状況も出現してきている.これに伴い,物や情報が実空間のより広い範囲で効率良く運搬され,様々なサービスが提供されるようになってきた.

2.2 モバイルロボットにおける障害物回避

本節では,モバイルロボットに関する技術の一つである障害物回避を取り上げる.モバイルロボットにおける障害物回避の手法がどのように改良され,現在に至るかを解説する.

2.2.1 障害物回避の定義

モバイルロボットにおける障害物回避は,モバイルロボット・ナビゲーションの一環として行われる動作である.モバイルロボット・ナビゲーションとは,モバイルロボットが指定された目的地に到達するための一連の動作制御のことである.現在,多くのモバイルロボットが二つの段階を経てナビゲーションを達成している.

1. 経路検索

経路検索は,アプリケーションが要求する目的地までの走行経路を導出する.

ロボットのアプリケーションは,必要に応じてロボットの移動を要求する.その際,経路検索は目的地の地理情報と走行の評価基準を受け取ることになる.評価基準とは,ロボットがどのような基準で経路の検索を行うかを規定するものである.例えば道案内をする場合, "最短経路"や"雨に当たらない"などの評価基準を設定する.モバイルロボットは,走行に必要な地理的情報を地図情報という形で保持していることが多い.目的地と評価基準を指定されると,この地図情報を用いて最適経路の検索を行い目的地までの走行経路を決定する.

2. 経路走行

経路走行は,実際にロボットを移動させる時のロボット制御を行う.

経路検索は決定した経路を単純な細かい経路に分割する.経路走行はこの細分化された経路の終端であるターゲットを,到達すべき地点として受け取る.つまり,経路走行がターゲットへの走行を繰り返すことで,ロボットは最終的に目的地まで到達できる.ロボットは走行時に自身の位置情報を取得することで,走行予定の経路と実際に走行している軌道の誤差を修正する.また,走行中に出現する障害物をセンサ等を用いて検知し,これを回避する.この軌道の修正と障害物の回避を行うことでターゲットへの到達を実現する.

DustCart のナビゲーションシステムは,図 2.3 で示すように三つの階層によって構成されており,上位二層が経路検索,最下層が経路走行を担当している.このシステムでは,目的地までの全経路を検索する高レベルな検索と,一部の区間を検索する低レベルな検索の二つに分けているが,この二つが連携することではじめて経路検索が完結する.このように,経路検索により決定された経路を実際の走行時に調整しながら目的地に到達する戦略が,モバイルロボット・ナビゲーションにおいて一般的に採用される手法となっている.

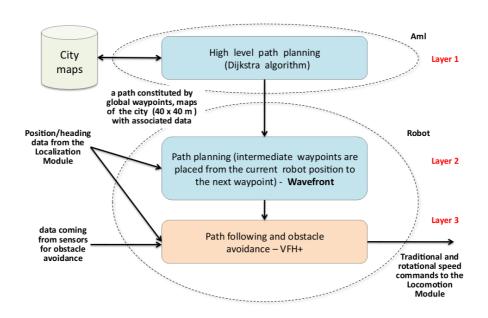


図 2.3 DustCart のナビゲーションシステム

本研究で取り上げる障害物の回避は,この経路走行時に行われるものとして扱う(図 2.4).つまり,指定された経路の走行中に出現する障害物を検知し,それを回避することを障害物回避と呼ぶ.そのため,最終的にターゲットへ到達できることが障害物回避の目的である.



☑ 2.4 Mobile Robot Navigation Model

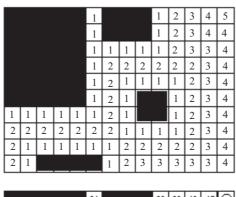
2.2.2 既存の障害物回避手法

障害物回避の手法は,過去に様々なものが考案されてきた.その中で,実際に導入されることの 多い代表的な手法について説明する.

• Wavefront Algorithm

Wavefront アルゴリズム [4] は,経路検索の手法として古くから知られているアルゴリズムである。事前に取得した地図を格子状に分割し,各セルに目的地からの移動距離を付与していくことで経路の検索を行う。この際,各セルに図 2.5 のような重み付けをすることで,ロボットがより最適な経路を検索できるよう補助することが可能である。Wavefront アルゴリズムは,特定の評価関数によって算出した値を各セルに代入することで,その評価基準を満たす経路を検索できるという特徴を持つ。

Wavefront アルゴリズムは本来経路検索のアルゴリズムであるが、障害物を検知するたびに 再計算を行うことで障害物回避に応用されることもある。つまりロボットが障害物に遭遇し た際に、目的地までの経路を検索し直すことで障害物の回避を達成する。この手法は、走行 環境全体の情報に基づいて経路を決定するため、ロボットにとって最適な障害物回避を実現 できる。一方で、障害物を検知するたびに残りの全経路を再計算しなければならないため、 計算コストが高いという問題点がある。



					94				98	39	42	45	Ø
					31				35	98	41	94	47
					28	29	30	91	94	37	496	43	46
					25	26	27	30	99	36	39	42	45
					22	23	26	Ø	32	95	98	41	44
					19	8	ø	厂		36	37	40	43
9	10	11	12	15	18	ø	24	L	\Box	99	36	39	42
6	7	8	11	14	18	20	23	26	29	32	95	98	41
3	4	7	10	46	16	19	22	25	28	31	34	37	40
(91				_	20	23	26	29	32	35	38	41

☑ 2.5 Wavefront Algorithm

• VFF Method

The Virtual Force Field(VFF) Method[5] は,障害物検知の手法である The Histogram Grid world model と,ベクトル場の概念を組み合わせた障害物回避手法である.図 2.6 で示すように,ロボットに対して障害物のあるグリッドからは斥力 $F_{(i,j)}$ が働き,目的地 $({\rm Target})$ からは引力 F_t が働いていると想定することで,ロボットの進行方向 R を算出する.

この手法は障害物の検知と同時にロボットの進行方向を算出することが可能であるため,Wavefront アルゴリズムに比べて動きが滑らかであり,かつ応答性に優れている.一方で,障害物の密度が高い環境ではロボットが斥力 F_r からの影響を強く受けるため,蛇行したり停留したりするという問題も指摘されている.

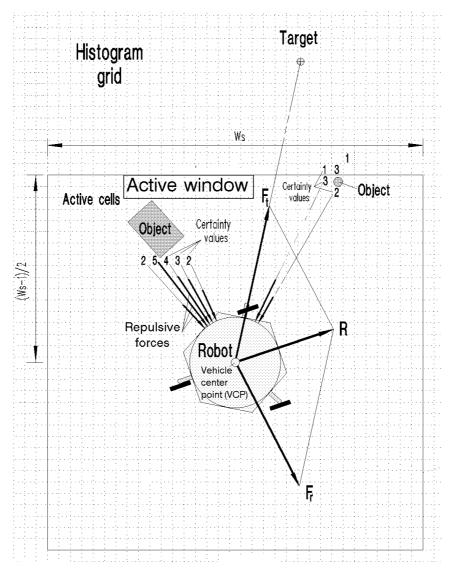
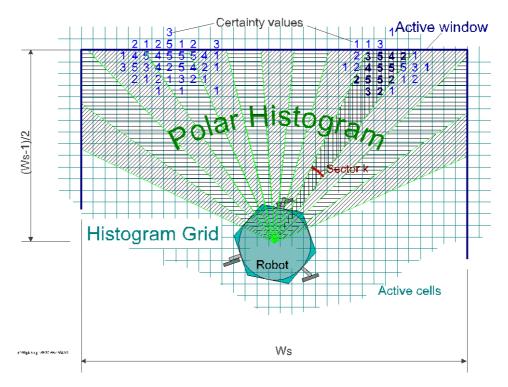


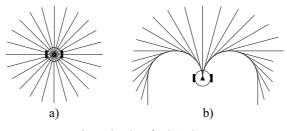
図 2.6 The Virtual Force Field Method

• VFH/VFH+ Method

The Vector Field Histogram (VFH) Method[6] は,The Polar Histogram と呼ばれるデータ構造を用いることで VFF 手法の問題点を改善した障害物回避手法である.ロボットの周囲を図 2.7 のように 72 のセクター (Polar Histogram) に分割し,各セクターに存在する障害物の密度を計算する.そして,障害物の密度が低いセクターから目的地(Target)の方向に最も近いセクターを進行方向に選択する.更に,この針路変更時に生じる図 2.8 のような惰性運動を考慮することで,信頼性と動作性をより高めた VFH+ Method[7] も考案されている.



☑ 2.7 The Vector Field Histogram Method



Approximation of trajectories: a) without dynamics, b) with dynamics

図 2.8 The Vector Field Histogram Plus Method

この二つの手法は,図 2.9 で示すように検知した障害物の情報を Polar Histogram に変換してから針路決定を行うことで,VFF 手法では行えなかった多数の障害物回避も可能にした.そのため,現在最も一般的な障害物回避手法となっている.

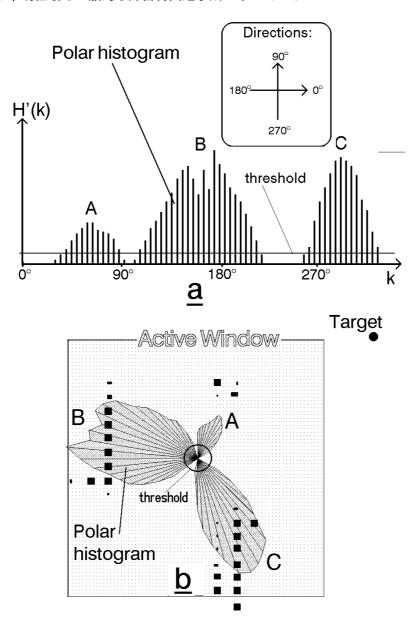


図 2.9 VFH/VFH+ 法による針路決定

2.2.3 障害物回避手法の遷移

モバイルロボットの障害物回避手法は,Wavefront アルゴリズムから VFF 手法,VFH/VFH+手法へと改良が進められ,より移動性や応答性,信頼性の高い手法が考案されてきた.表 2.1 に,障害物回避手法の遷移を示す.

手法	特徴	備考
Wavefront	経路検索手法から	計算コストが高い
	障害物の回避に応用された手法	
VFF	Wavefront アルゴリズムに比べ	蛇行や停留現象が起こる場合がある
	動作性と応答性に優れた手法	
VFH/VFH+	VFF 法の問題点を改善して	現在最も一般的な手法の一つ
	動作性と信頼性をより高めた手法	

表 2.1 障害物回避手法の遷移

2.3 生活空間ロボットにおける障害物回避問題

前節で解説したように,モバイルロボットにおける障害物回避手法はより効率性や精度の高い手法が考案されてきている.しかし,既存の手法は現在普及が進む生活空間ロボットにおいて十分な障害物回避手法とは言えない.本節では,生活空間ロボットで既存の障害物回避手法を用いた際に生じる問題点について述べる.

2.3.1 障害物の分類

モバイルロボットの利用環境が特定空間から生活空間へと拡大していくにつれ,環境に存在する 障害物も多様化する傾向にある.本研究では生活空間の障害物を静的障害物と動的障害物に分類する.以下で,二つの障害物の定義を行う.

• 静的障害物

ベンチや植え込みといった移動を伴わない障害物を本論文では静的障害物と呼ぶ.静的障害物は常に特定の位置に存在し,位置座標の変化がほとんどない.但し,ロボットが位置情報を事前に保持している場合は経路検索の段階で認識できるため,静的障害物とは呼ばない.

動的障害物

人や車両といった移動を伴う障害物を本論文では動的障害物と呼ぶ.特定の場所に存在する ものではなく,位置情報が頻繁に変化する.

2.3.2 障害物の変化

上述したように,生活空間の障害物の状態は複雑化し,ロボットはより厳しい動作環境を想定する必要に迫られている.以下に,障害物の特筆すべき変化を二点挙げる.

動的障害物の増加

特定空間と比較して,生活空間における動的障害物の割合は圧倒的に増加している.この主な原因は,生活空間に人間をはじめとする多くの移動体が存在することにある.そのため,より公共性の高い空間で動的障害物の割合が増加する傾向を持つ.

障害物密度の上昇

障害物密度に関しても、特定空間に比べて飛躍的に上昇した.これは、障害物の絶対数が増加したことに起因するところが大きく、ロボットの活動が考慮されていない環境ほど高い密度となることが多い.

2.3.3 既存手法による障害物回避の限界

前節で取り上げた既存の障害物回避手法が有効である環境を,障害物の分類と密度という二つの評価軸から比較すると表 2.2 のようになる.

分類	密度	Wavefront	VFF	VFH/VFH+
静的	低い			
	高い	×	×	
動的	低い	×		
	高い	×	×	

表 2.2 既存手法の比較

既存の障害物回避手法は,主に静的障害物を扱う回避手法である.動的障害物に対しても,任意の時刻 t において座標 $P_{(x,y)}$ に存在する静的障害物とみなして計算処理を行っているにすぎない.そのため,ロボットと障害物の進行方向が重複した際,図 2.10 のように蛇行したり,衝突してしまうという問題がある.また,障害物の移動に伴ってロボットの針路が頻繁に変化し,安定した経路を確保できないという問題も発生する.更に,障害物の密度が高いことで前述のような問題の発生率も上昇し,効率の良い障害物回避を行うことができない.

以上の理由から,生活空間の障害物を既存の手法で網羅することは難しく,生活空間に適した回 避手法は存在しないと言える.

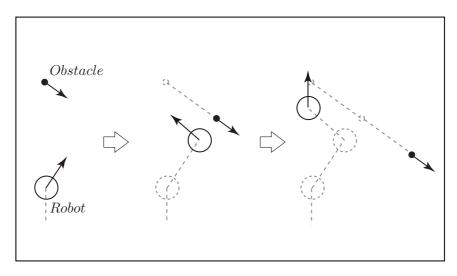


図 2.10 動的障害物回避時の蛇行問題

2.4 本章のまとめ

本章では,本研究の対象であるモバイルロボットのこれまでの進化と現状を述べた後,モバイルロボットにおける障害物回避手法の現状と問題について論じた.現在,モバイルロボットの利用環境が特定空間だけでなく生活空間にまで拡大しつつある.その中で,従来の障害物回避手法が生活空間における効率の良い障害物回避手法とは言えないことを示した.

第3章

SJMC Method

本章では、生活空間におけるモバイルロボットの障害物回避手法 Self-Justification Movement Control(SJMC) Method について述べる.はじめに想定環境をまとめ,機能要件を整理した後,それに対するアプローチと本手法の詳細について説明する.

3.1 想定環境

本節では、SJMC 手法の想定環境について述べる.

3.1.1 対象環境

本手法は生活空間での動作を目的としている.

例えば大学のキャンパスやオフィスビルのロビーでは,比較的広い空間を人々が自由に行き交う.一方で,市街地の歩道や病院の廊下などでは比較的狭い空間を人や物が特定の方向に移動している.本研究では,対象とする環境を空間の広さや障害物の行動パターンで限定せず,ロボットが物理的に走行可能である空間一般を扱う.なお,生活空間における障害物の特徴は次節で詳しく説明する.

3.1.2 対象ロボット

本手法は,汎用的なモバイルロボットを対象とする.外観や特定のアクチュエータの有無などに 捉われずに導入できることが前提条件であるため,SJMC 手法の要求するロボットの機能は以下の 三点のみである.

- 1. 精密な走行制御を行えること
- 2. 地理情報が取得できること
- 3. 物体検知が行えること

一番目は,ロボットのプリミティブな走行制御に関する機能である.厳しい動作環境である生活空間ではロボットが走行可能な経路も限られており,リアルタイムに正確な走行制御が行えることは必須条件である.具体的には,細かい設定角度で方向転換が行え,かつ指定された距離を正確に前進できることが必要である.更にこれらの制御を同時に行えることで,狭い旋回半径での針路変更が可能であることが求められる.

二番目は、地理情報の取得に関する機能である。モバイルロボットにおける障害物回避は、指定されたターゲットに到達することを保証する。そのため、ロボットはターゲットとの位置関係を常に把握していなければならない。具体的には、自身の位置情報を絶対座標もしくは相対座標で持ち、指向する方位を認識できる必要がある。この二つの機能を持つことで、ロボットはターゲットとの相対的な位置関係を得ることができる。

三番目は、物体検知の機能である.ロボットは障害物を回避するにあたり、環境に存在する物体の検知を行わなければならない.具体的には、ロボットを基準とした物体の相対座標を計測して、それらの分布を把握できることが望まれる.また、動作環境に依存することを避けるため、この機能をロボットのみで完結させなければならない.

3.2 機能要件

生活空間に存在する障害物は二つの特徴を持つ.一つは動的障害物が非線形運動を行うことである.動的障害物は意思を持ち,環境に応じて行動を決定することができるため,非常に複雑な動きをする.もう一つは障害物の絶対数が多く,密度が大きく変化することである.環境に存在する動的障害物の割合が高いため,一時的にロボットの走行経路がなくなるほど密集することもある.

これらの特徴から、生活空間での障害物回避に際していくつかの問題に直面する.まず、全ての障害物を個別に認識し、行動予測を行うことは困難である.上記のような環境において、ロボットに内蔵されたセンサのみで個々の障害物を識別し、行動を解析することは現実的ではない.次に、頻繁に針路を変更しながら障害物を回避していく手法には限界がある.障害物の絶対数が多いため、針路を変更してもすぐに他の障害物と遭遇することが予想される.以上の問題を踏まえて整理すると、生活空間での障害物回避を達成するには以下の機能要件を満たす必要がある.

- 全ての障害物を個別に識別する必要がないこと
- 動的障害物の正確な行動予測を必要としないこと
- 少ない針路変更で障害物回避を行えること

3.3 アプローチ

以上の機能要件を満たすために,本研究では動的障害物の回避行動を想定した走行手法を提案する.これは,動的障害物が意思を持ち,環境に応じて行動することに着目したものである.動的障害物も,自らの移動に支障を来たす場合はその障害物を回避しようとする.この障害物の回避行動はロボットが遭遇する障害物においても例外ではない.そのため,ロボットは全ての障害物を完全に回避する必要はないと考えた.

本手法では、ロボットが走行中に障害物と遭遇してもすぐには回避行動を起こさない. ロボットを減速させ、障害物が回避行動を行ってロボットの進路から外れることを期待する. また、障害物が停滞していた場合も同様に接近を行い、障害物の回避行動を誘発しようと試みる. この動作により障害物がロボットを認識し、回避行動が行われれば、ロボットは障害物の回避を行わなくて済むことになる. これらの行動を行った後に、依然障害物がロボットの進路に停滞していた場合はロボットが障害物を回避する. つまりこのアプローチは、障害物がロボットを回避することを期待しながら動作制御を行うことで、ロボットの負担を軽減しようとするものある. 本アプローチは以下の特徴を持つため、前述の機能要件を満たしていると言える.

- 対象障害物を絞るため、全ての障害物を個別に識別する必要がない
- 障害物の回避行動を期待するため,正確な行動予測は必要ない
- 回避行動が期待できない時のみ障害物回避を行うため必要最低限の針路変更で済む

3.4 SJMC Method の概要

本節では,前節で説明したアプローチの実現方法を述べる.はじめにロボットの走行方法を取り上げ,それらをどのように選択するか議論する.

3.4.1 用語の定義

図 3.1 はモバイルロボットの動作環境を図式化したものである.以下では,ロボットの速度ベクトルを $\overrightarrow{v_R}$ とし, $\overrightarrow{v_R}$ で運動するロボットが将来描くと予想される軌跡の領域を D と定義する.続いて,n 個の障害物の集合 O に含まれる任意の障害物を o_i ,ロボット R との距離を l_{Ro_i} と表す.また,指定されたターゲットを T とする.

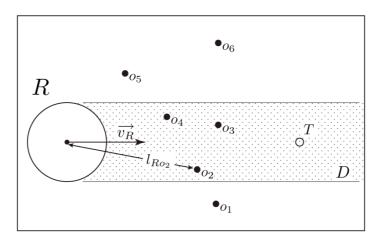


図 3.1 モバイルロボットの動作環境

3.4.2 ロボットの走行方法

本手法では二つの走行方法を用いてロボットの走行を制御する.

• 直進走行

直進走行とは,ロボットが常にターゲットに向かって前進する走行方法である.つまり,ターゲット T が常に D の内部に存在するよう動作制御を行う.この直進走行が,本手法における基本の走行方法となる.

• 旋回走行

旋回走行とは,ロボットが左右どちらかに旋回しながら進む走行方法である.そのため,ロボットは前進だけでなく針路の変更も行う.この走行方法は,障害物を回避する際に用いられる走行方法で, $\overrightarrow{v_R}$ を T の方向に戻すことで直進走行へと移行できる.

3.4.3 走行方法の選択

ロボットが二つの走行方法を選択する際,障害物との相対的な位置関係を判断基準とする.まず,本手法では対象とする障害物 o_f を,領域 D に存在する障害物 o_i の中で最も距離 l_{Ro_i} が小さいものと定義する.つまり,対象障害物をロボットの進路に存在する直近の障害物一つに絞り込む.その上で,図 3.2 のようにロボットの周辺を三つの領域に分割し,対象障害物 o_f がどの領域に存在するかを調べて走行手法を決定する.このように対象障害物を一つに絞ることで,ロボットは障害物を回避するたびに次の障害物へ対象を変更していくこととなり,一度に行う計算コストを削減することができる.以下に各領域でのロボットの動作を解説する.なお, o_f は式の簡略化のため以降では o として扱う.

• Danger Zone

式 (3.1) を満たす時,本手法では障害物が Danger Zone に存在するという.

$$\{l_{Ro} \mid l_{Ro} \le L_{DANGER}\} \tag{3.1}$$

対象障害物 o が Danger Zone に侵入した場合,ロボットは障害物を回避するために旋回走行を行う.ロボットは針路の変更を開始してから実際に方向転換するまでに,走行速度に応じた制動時間を要する.そのため,Danger Zone に侵入した障害物を検知しそれを回避するためには,障害物との間に所定の距離が必要となる. L_{DANGER} は,ロボットが針路を変更し対象障害物を回避するのに十分な距離を設定しなければならない.

Caution Zone

式 (3.2) を満たす場合,本手法では障害物が Caution Zone に存在するという.

$$\{l_{Ro} \mid l_{Ro} > L_{DANGER} \land l_{Ro} \le L_{CAUTION}\} \tag{3.2}$$

o が Caution Zone に存在した場合,ロボットは Danger Zone に障害物が侵入しないよう 監視しながら直進走行を行う.対象障害物が Danger Zone に到達することが予想される場 合はロボットを減速させ,その障害物が回避行動を行って領域 D から退出することを期待 する.そのため $L_{CAUTION}$ には,対象障害物が回避行動を完了するのに十分な距離を設定 する必要がある.

• Safety Zone

式 (3.3) を満たす場合,本手法では障害物が Safety Zone に存在するという.

$$\{l_{Ro} \mid l_{Ro} > L_{CAUTION}\} \tag{3.3}$$

o が Safety Zone に存在する場合,ロボットは直進走行を行う.Safety Zone の障害物はロボットの走行に支障を来さないため,ロボットは障害物を意識する必要がない.このことから,Safety Zone の障害物に関しては検知を行わなくても良いと言える.

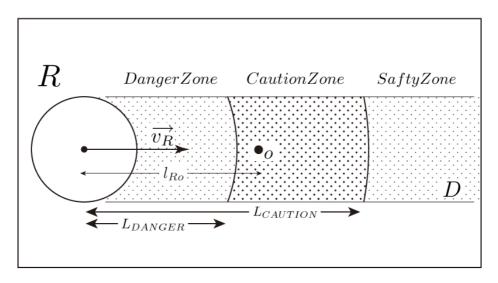


図 3.2 領域の設定

このように,ロボットは対象障害物との相対的な位置関係を基準に自らの振る舞いを変化させ, 直進走行と旋回走行の二つの走行手法を使い分ける.これらを整理すると,以下の三つの判定に よって走行方法を選択することができる.

1. 針路判定

はじめにロボットは針路判定を行う.

針路判定とは、ロボットの進行方向が最適な方向であるかを判定するものである.ロボットの針路がターゲットの方向を向いている場合はそのまま直進走行を続けることが理想であるため、下で説明する回避判定に次の判断を委ねる.一方ロボットの針路がターゲットの方向でない場合は、より短い走行距離でターゲットに到達するために、針路を変更してターゲットの方向を指向することが望まれる.そのため、旋回走行を行いロボットの進行方向をターゲットに向けるよう指示する.

2. 回避判定

次に回避判定を行う.

回避判定は,ロボットが障害物に対して回避行動を起こすべきであるかを判断するものである.まず,ロボットは前方に存在する対象障害物の相対位置を調べる.対象障害物が Danger Zone に存在した場合は障害物を回避しなければならないため,旋回走行を行い回避 行動を行うよう指示する.それに対して対象障害物が Caution Zone もしくは Safety Zone に存在する場合,ロボットはそのまま直進走行を継続できることが望ましい.障害物との距離に応じて走行速度を設定し,対象障害物が Danger Zone に侵入する前に領域 D から退出できるよう指示する.

3. 終了判定

最後に終了判定を行う.

終了判定はロボットがターゲットに到達したかを判定するものである.ターゲットに到達した場合は走行を終了し,ロボットが次のターゲットを与えられるまで待機する.ターゲットに到達していない場合は再び針路判定と回避判定を行い,ロボットにとって最適な走行手法を選択するよう指示する.

つまり, SJMC 手法では上記の動作をターゲットに到達するまで繰り返しすことで目的を達成する.この一連の流れをフローチャートとして図 3.3 に示す.

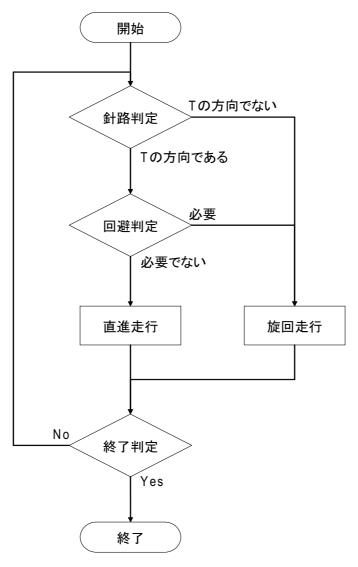


図 3.3 SJMC Method における走行制御の流れ

3.5 システム設計

SJMC 手法を実際にロボットへ導入する際は,図 3.4 で示すソフトウェア構成となる.

走行方法選択モジュールは,経路検索が算出したターゲットの情報を基に各判定を行い,状況に適した走行方法を選択する.はじめに針路判定と回避判定を行って走行方法を決定し,走行制御モジュールにそれを伝える.走行制御モジュールが一連の動作を終えると本モジュールは走行結果を受け取るので,終了判定を行い経路走行が完了したか判断する.終了した場合は経路検索のモジュールへ走行結果を通知し,終了していない場合は一連の動作を繰り返す.

走行制御モジュールは,ロボットが走行する際の具体的な速度と針路を制御する.走行速度設定 モジュールと走行針路設定モジュールの算出した値を取得し,この値をロボット制御機構に走行要 求として伝えることで,ロボットを実際に走行させることができる.

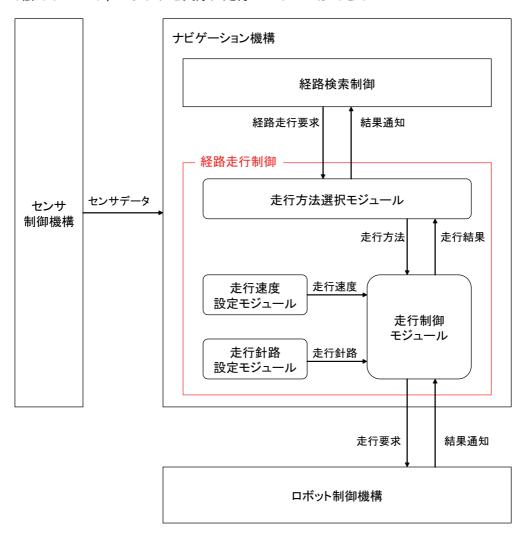


図 3.4 SJMC Mehod のソフトウェア構成

3.6 走行速度の決定

SJMC 手法は対象障害物の状況に応じて走行速度を変化させることで,ロボットの走行効率を上げている.本節ではこの走行速度の算出方法について説明する.

3.6.1 障害物の状態

走行速度を算出するにあたって,まずはじめに障害物の行動を分類する必要がある.本手法では 障害物を以下で示す二つの状態に分類した.

• Stable

障害物が領域 D 内で停止している状態である.静的障害物に関しては全て Stable な障害物であると説明できる.動的障害物がロボットの存在に気付き移動を開始した場合,障害物の状態は Unstable に遷移する.

• Unstable

障害物が移動している状態である.障害物が領域 D 内で停止したり,D の外に出ない移動を繰り返す場合は Stable に遷移する.

3.6.2 走行速度のモデル化

図 3.5 は , ロボットの速度ベクトル $\overrightarrow{v_R}$ を基に対象障害物 o の移動を図式化したものである .

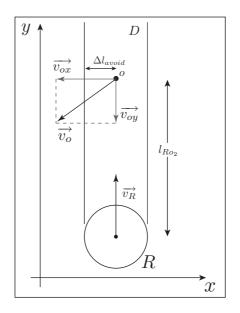


図 3.5 対象障害物の移動

ロボットの走行速度 $|\overrightarrow{v_R}|$ をモデル化するにあたり,障害物の移動を定義する必要がある.本節では $\overrightarrow{v_R}$ の方向を y 軸方向とした.その上で o の速度を v_o とし,x 軸,y 軸それぞれに分解したものを v_{ox} , v_{oy} と定義する.更に,o が領域 D から退出する時の最短距離を Δl_{avoid} とおく.また,以降ではロボットの方向が y 軸方向と定められているため,ロボットの速度 $|\overrightarrow{v_R}|$ を単に v_R と表記している.これらを用いて以下の走行速度モデルを構築した.

1. Stable モデル

o が Stable の時は,ロボットが o に接近することで o の回避行動を誘発しようと試みる.いま、o がロボットを認識し,回避行動を起こすことが期待できる時間を t_{aware} とし,o が D から退出するのに要する時間を t_{avoid} すると,速度 v_R を式 (3.4) のように表せる.

$$t_{avoid} = \frac{\Delta l_{avoid}}{v_{ox}}$$

$$v_R \cdot (t_{aware} + t_{avoid}) + v_{oy} \cdot t_{avoid} \le l_{Ro} - L_{DANGER}$$
(3.4)

これは, $t_{aware}+t_{avoid}$ でロボットとoが行うy軸方向への移動の総和が, $l_{Ro}-L_{DANGER}$ を超えないようにしたものである.つまり,oが Caution Zone に存在している間に回避行動が完了するよう速度設定を行っている. $t_{aware}+t_{avoid}>0$ であるから,式 (3.5)が導かれ,ロボットの速度が得られる.

$$v_R \le \frac{l_{Ro} - L_{DANGER} - v_{oy} \cdot t_{avoid}}{t_{aware} + t_{avoid}}$$
(3.5)

2. Unstable モデル

o が Unstable の時 , ロボットは o が領域 D の外に出るのを待ちながら直進走行を行う . Stable モデルと同じ考え方で , ロボットの速度を式 (3.6) のように表せる .

$$t_{avoid} = \frac{\Delta l_{avoid}}{v_{ox}}$$

$$v_{oy} \cdot t_{avoid} + v_R \cdot t_{avoid} \le l_{Ro} - L_{DANGER}$$
(3.6)

また, $t_{avoid} > 0$ であるから,変形すると式(3.7)が導かれ,ロボットの速度が得られる.

$$v_R \le \frac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{t_{avoid}} - v_{oy} \tag{3.7}$$

以上が SJMC 手法における走行速度モデルである.対象障害物 o の状況に応じて式 (3.5) と式 (3.7) を使い分けることで,走行速度の設定を行うことができる.

3.7 走行針路の決定

SJMC 手法の概要でも述べた通り,本手法における走行針路の変更は二つの意味を持つ.一つは障害物を回避するために,ロボットの針路をターゲットの方向から外す針路の変更である.対象障害物が回避行動を起こすことが期待できない場合,ロボットは障害物を回避するために旋回走行を行う.もう一つは,直進走行で効率の良い走行をするために,ロボットの針路をターゲットの方向に戻す針路の変更である.回避行動によってロボットがターゲットの方向を向いていない時は,ロボットの針路をできるだけターゲットの方向に修正するよう旋回走行を行う.いずれの目的にせよ,ロボットが針路の変更をする場合は,できるだけターゲットの方向に近接した針路を新たな針路として選択することが望ましい.そのため,本手法では用途に合わせて振る舞いを変える必要はなく,一つの針路決定機構を構築すれば良い.

ロボットはまず周囲の障害物の分布を調べ,針路の変更を行える方向を候補として把握する.候補として挙げられる方向とは,ロボットが針路を変更した際に障害物が $Danger\ Zone\$ に存在しない方向である.ロボットが針路を変更すると,同時に領域 D の範囲も変化する.新たな針路で遭遇する対象障害物が $Danger\ Zone\$ に存在した場合,再度針路の変更をしなければならないため効率の良い走行とは言えない.新たな領域に存在する障害物の,ロボットとの相対的な位置関係を調べることで,ロボットが指向すべき方向を検索する.

方向転換が可能な候補を把握したら,次にその候補の中から最適な方向を新たな針路として選択する.ロボットはターゲットに向かって最短距離を走行し,より短い時間で到達することが要求される.そのためロボットが次の針路として選択する方向も,ターゲットの方向に最も近いものとなる.但し,ターゲットの方向に近接する候補を選択することで,同じ障害物に対して何度も接近することは効率的であるとは言えない.一度ロボットが回避行動を行わないと判断した障害物に対して再度指向することはせず,たとえターゲットの方向に最も近接した方向であっても選択しないようにする.

以上の方法により,ロボットはより効率的な針路を選択することができる.ロボットが回避行動を採用した場合も,速やかに針路をターゲットの方向に戻して直進走行を行えるようにすることで,最低限の針路変更に抑えることが可能となる.

3.8 まとめ

本章では,生活空間におけるモバイルロボットの障害物回避手法 SJMC 手法について述べた. SJMC 手法は,障害物の回避行動を期待することで走行時の動作効率を向上させようとするものである.本手法は直進走行と旋回走行と呼ばれる二つの走行方法で構成され,障害物との相対位置によって行動方針を選択することを示した.また,上記の走行方法を実現するために必要な,走行速度と走行針路の算出方法についても詳しく議論した.

第4章

SJMC Method の導入

本章では,SJMC 手法のロボットへの導入について述べる.まず,本論文での導入方針について目的と対象を定める.その後ロボットの構成を明らかにし,導入したシステムの詳細について解説する.

4.1 導入方針

本節では,本論文におけるSJMC手法の導入目的と対象について説明する.

4.1.1 導入目的

本論文では走行速度モデルの検証を導入目的とした.

前章で述べたように,SJMC 手法は動的障害物の回避行動を期待しながらロボットの制御を行うことで,針路変更の削減を試みる.つまり,ロボットが走行速度を調節することで,対象障害物をロボットの進路から退出させることが本手法の採る戦略である.そのため,走行速度の設定は本手法において最も重要な要素である.本論文では,検証の対象を走行速度モデルに絞った.具体的には人を動的障害物と設定し,移動する人間に対してロボットがどのように振舞うか実験し,評価する.試作したロボットでモデルの妥当性を検証することが本論文における導入目的である.

4.1.2 導入対象

本論文では,導入対象を応答性に優れたロボットと定めた.

モバイルロボットの走行制御には,リアルタイム性が求められる.激しく変化する走行環境において迅速な障害物検知を行い,リアルタイムに走行制御を行えることは必須である.障害物回避時にこれらを実現するためには,ソフトウェアとハードウェアの双方でコストを削減する必要がある.ソフトウェア面については,計算コストを削減しなければならない.ロボットの制御システムは,物体検知センサによって取得されたデータを基に計算処理を行うことで障害物を認識する.障害物を正確に認識することが障害物回避において重要である一方,複雑な計算プロセスは時間的なコストが生じ,応答性を損なう結果となる.ハードウェア面については機器連携コストを削減しなければならない.ロボットの信頼性を向上させるには,複数のセンサを用いることで多くの外部情報を取得することが望まれる.しかし,多数のセンサ情報を用いることは,機器同士の通信による時間的なコストを上げることとなってしまう.以上の二点を考慮して,本論文ではより少ない機器で動作し,かつ計算コストの低いシステムの導入を目指した.そのため,試作したロボットに関しても,物体検知センサを一つのみ搭載してシステムを構築した.

4.2 モバイルロボットの試作

本節ではSJMC 手法の導入に当たり実際に試作したモバイルロボットについて解説する.

4.2.1 ハードウェアの選定

前述した条件を満たすロボットを作成するため,以下のハードウェアを選定した.

• ロボット・プラットフォーム

本論文では,ロボットのプラットフォームとして Segway RMP 50 を選択した.Segway RMP 50 (図 4.1) は,Segway Inc.[8] が提供するモバイルロボット・プラットフォームである.このモバイルプラットフォームは耐久性・信頼性に優れており,モバイルロボット用アプリケーションの研究開発にもしばしば利用されている.本論文では,平面での低速走行に適したタイプである RMP 50 を用いる.表 4.1 にその仕様を示す.



表 4.1 Segway RMP 50 の仕様

	Units	RMP 50
Speed	km/h	0 - 6
Gradability	deg	0
Max Range	km	6
Weight	kg	27
External Dimension	cm	56x69x41

• 物体検知センサ

物体検知用センサには , Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder を選択した .

URG-04LX(図 4.2)は,北陽電機株式会社 [9] が製作したスキャナ式レンジセンサ(測域センサ)である.高精度かつ高分解能で 240° の広視野を持ち,モバイルロボットの障害物検知に用いた際の特性を明らかにする研究も行われている [10].光走査型のため明るさの変化に影響を受けず,また小型で軽量かつ省電力であることから,本論文では物体の検知に本製品を用いた.表 4.2 にその仕様を示す.



 $\boxtimes 4.2$ URG-04LX LRFs

表 4.2 Hokuyo URG-04LX Laser Rangefinder の仕様

Units	URG-04LX
m	4.0
mm	1
deg	240
deg	0.36
scans/sec	10
	USB/RS-232C
KB/sec	12,000(USB)
	19.2-750(RS-232C)
mm	50x50x70
kg	0.16
W	4(maximum)
	m mm deg deg scans/sec KB/sec mm kg

• システム統括機器

最後に,システム統括機器として Thinkpad X301 を用いた.

本論文の実装では,上で述べた二つの機器を直接統括機器に接続し,一括してこれらの機器を制御する手法を採っている.統括機器は常に物体検知センサの情報を取得し,ロボットの走行進路に存在する障害物の状況を把握する.そして取得した情報を基に最適な走行方法を選択し,直接ロボット・プラットフォームに制御命令を送信する.その結果,統括機器は状況に応じてより迅速なロボットの動作制御を行え,前述した複数の機器連携による処理速度の低下も抑えることができる.

4.2.2 ロボットの構成

図 4.3 は、本論文で実際に試作したモバイルロボットである.図からも分かるように、制御機器はロボット・プラットフォームの上部に直接搭載した.重心を下方に設定し、プラットフォームと制御機器が一体となって動くようにすることで安定した走行を実現している.また、試作したロボットでは物体検知センサをロボットの高位置に設置した.プラットフォームの基底部から円柱を垂直に立て、円柱の上部に物体検知センサを固定することで、センサの位置はロボットの接地点から一メートル程の高さとなっている.本論文では人を対象に検証を行うため、センサを低い位置に設置すると脚の複雑な動きにより正確な物体検知を行うことができない.そのため、センサの位置を人間の上半身の高さとなるようにすることで、物体のより正確な検知を可能にした.

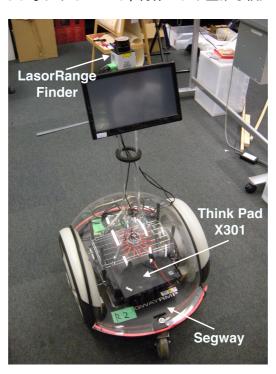


図 4.3 モバイルロボットの構成

4.3 システム構成

試作ロボットには,前章で示した設計を用いて SJMC 手法を導入した (図 3.4). 本節では詳細 な説明が必要な走行速度設定モジュールと走行進路設定モジュールの二つについて解説する.

4.3.1 走行速度設定モジュール

走行速度の決定は、ロボットの上部に取り付けられた物体検知センサを用いた、物体検知セン サは 240° の視野角でレーザによるスキャンを行い, センサから物体までの距離を測定する. 走行 速度設定モジュールは、このデータをリアルタイムに取得して障害物の認識を行い、障害物の距 離に応じて走行速度を調節する、導入対象で述べたように、本論文では物体検知センサを一つの み用いてシステムを実現させる.そのため,対象障害物の状態を認識し,それが Stable であるか Unstable であるかを判断するのは困難である、本論文ではこのことを考慮し、走行速度モデルを 簡略化することで導入を可能とした.以下で,走行速度モデルの簡略化について論じる.

走行速度モデルは,対象障害物の状況に応じて式(3.5)と式(3.7)を使い分けることを前章で解 説した.しかし,動的障害物は意思を持って移動し,進行を妨げる物体に対しては回避行動を取る 傾向にあるため,ロボットへの接近速度は極めて小さいことが予想される.そのため, v_{oy} を 0 に 近似することが可能である.

$$v_{oy} \approx 0 \tag{4.1}$$

式 (4.1) を式 (3.5) と式 (3.7) に代入すると,以下の式が導かれる.

$$v_R \le \frac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{t_{aware} + t_{avoid}} \tag{4.2}$$

$$v_R \le \frac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{t_{aware} + t_{avoid}}$$

$$v_R \le \frac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{t_{avoid}}$$

$$(4.2)$$

この二つの式の異なる点は、分母に t_{aware} を持つかどうかの違いのみである $.t_{aware}$ は、対象 障害物がロボットを認識し、回避行動を起こすことが期待できる時間である、当然の事ながら、対 象障害物が Stable の場合は期待できる時間が代入され, Unstable のときは 0 となる.

$$v_R \leq rac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{t_{aware} + t_{avoid}}$$

$$\left\{ egin{array}{l} t_{aware} \geq 0 & (対象障害物が \, Stable \, \mathfrak{o} とき) \\ t_{aware} = 0 & (対象障害物が \, Unstable \, \mathfrak{o} とき) \end{array}
ight. \eqna{(4.4)}$$

上でも述べたように、本論文の実装ではロボットの状態を判断するのは困難である、従って、 t_{aware} の値を定数化し,どちらの状態に対しても対応できるようにする必要がある.また,動的障 害物は状態に関わらず、ロボットが近くまで接近したときに回避行動を行うと考えられる、そのた め障害物が回避行動を完了するのに要する時間 t_{avoid} に関しても,ロボットとの距離に関係なく殆

ど等しい値になると仮定した.以上の理由から,式 (4.4) の分母である $t_{aware}+t_{avoid}$ を定数 C と置くことができ, v_R は最大となることが期待されるため式 (4.5) を導くことができる.

$$v_R = \frac{l_{Ro} - L_{DANGER}}{C}$$

$$(C = t_{aware} + t_{avoid})$$
(4.5)

本論文ではロボットの進路に存在する直近の物体を対象障害物とみなした.従って,センサから取得した値の中でロボットの進路内でかつ最も小さい値を有効な値として選択する.そして,選択された値を式 (4.5) に代入することで走行速度を求める.また,最高速度を人の歩行速度よりやや遅い時速3 km と定め,算出された値が最高速度を超えた場合はこの速度で走行するようにした.

4.3.2 走行針路設定モジュール

走行針路の決定にも,物体検知センサを利用した.走行針路設定モジュールは,取得したセンサ情報から走行の妨げとなる対象障害物を認識する.そして,この対象障害物がロボットの進路から外れるように針路を変更することで障害物を回避する.本論文の導入目的は走行速度モデルの検証であるため,本モジュールに関しては必要最低限の実装を行った.

図 4.4 は本モジュールの処理状況を図式化したものである.本論文での実装は,物体検知センサから取得した情報を一度グラフに変換する.このグラフに閾値を設定し,閾値よりも大きな値を持つ角度の中から最もターゲット (0°) の方向に近い角度を新たな針路に設定する.前章で論じたように,SJMC 手法は対象障害物が Danger Zone に侵入する場合に針路を変更する.そのため,本モジュールの実装においても閾値は L_{DANGER} に設定した.これにより,ロボットは対象障害物を常に Danger Zone の外に保って走行可能となる.

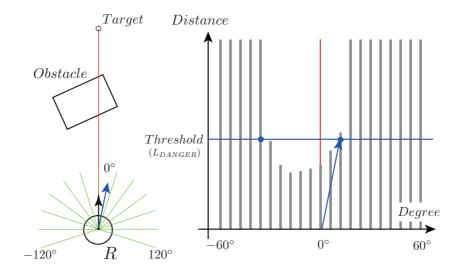


図 4.4 走行針路の決定

4.4 まとめ

本章では,SJMC 手法のロボットへの導入方針を述べ,試作したロボットとシステムについて解説した.本論文では導入目的を走行速度モデルの検証とし,導入対象を応答性に優れたモバイルロボットと定めた.その上で,導入条件を満たすよう作成した各モジュールを詳説し,走行速度モデルの簡略化について議論した.

第5章

実験と評価

本章では,ロボットに導入したシステムの実験と評価について論じる.冒頭で実験主旨を説明し,本論文で行った実験の内容に触れる.続いて評価結果を解説し,最後に評価結果に対する考察を述べる.

5.1 実験主旨

前章で説明したように,本論文では応答性に優れたモバイルロボットを試作し,SJMC 手法の提 案する走行速度モデルの検証を行った、そのため試作したモバイルロボットに関しても、物体検知 センサを一つのみ搭載し,機器同士の連携コストを最低限に抑えている.

本論文で行う実験は、この限られた資源で動作するロボットに走行速度モデルを導入した際に、 生活空間での障害物回避において有効な動作を行うか検証するものである.今回はロボットの対象 **障害物を一つに絞り**,静的障害物と動的障害物それぞれに対してロボットがどのように振舞うか実 験を行った.試作したロボットを使用し,既存の障害物回避手法である VFH+ 手法と比較するこ とで、設定環境での静的障害物回避と動的障害物回避の有効性について考察した、

走行速度モデルの評価 5.2

本節では,走行速度モデルの評価について述べる.

5.2.1 評価方針

前章で説明した通り,走行速度モデルは計算コスト削減のために簡略化した式(4.5)を用いる. 式からも分かるように , 定数 C は Stable な動的障害物がロボットを認識し , 回避行動を開始する ことが期待できる時間と,実際に回避行動を行いロボットを回避するのに要する時間を足し合わせ た値である.そのため,当然のことながら定数 C の値が大きいと走行速度が遅くなり,C の値が 小さいと高速で走行できる.低速で走行した場合は,Stable な動的障害物に対して回避行動を誘 発できる可能性が高くなる反面,静的障害物に対しても非常に低速で走行することになり効率の良 い走行であるとは言えない.一方,高速で走行した場合は障害物の回避行動を誘発することは期待 できず,針路変更の回数が増加し,こちらも効率の良い走行を行えない可能性がある.これらを簡 潔に整理すると,以下のようになる.

C が大きい時 :針路変更の回数は減少するが,低速で走行することになる C が小さい時 :高速で走行できるが,針路変更の回数が増加する

このことから,導入したモデルの C の値を変化させ,ロボットが各障害物を適切に回避できる か検証することを走行速度モデルの評価とした. 具体的には, はじめに静的障害物回避の実験を行 い, ${
m VFH}+$ 手法と比較して妥当と言える C の値を特定する.その後特定した C の値で動的障害物 回避の実験をし,動的障害物に対してどの程度有効であるか検証した.尚,比較対象として用いた m VFH+ 手法に関しても , m SJMC 手法と同じく最高速度を時速 m 3km に設定した .

5.2.2 静的障害物の回避

図 5.1 は静的障害物回避の実験を行った環境である.

本論文で用いた VFH+ 手法による障害物回避システムは,障害物を回避するのに 2m の距離を必要とした.つまり,2m 先の障害物を検知すると,針路の変更を行い回避走行を開始する.そのため,空間の中央に試作したロボットとほぼ同じ大きさの静的障害物を設置し,そこから 2.7m 離れた地点をロボットの走行開始地点に定めた.そして,走行開始から障害物回避を完了するまでの時間を計測し,比較評価を行った.

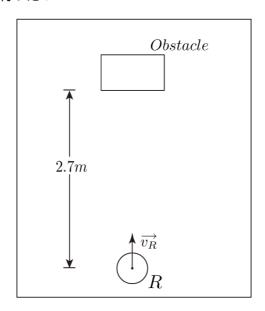


図 5.1 静的障害物回避の実験環境

最初の実験として,走行速度モデルにとって適切な C の値を調べる.はじめに VFH+ のシステムで定めた障害物回避の開始距離である 2m を, L_{DANGER} の距離として設定した.そして,C の値を変化させ,VFH+ 手法と SJMC 手法の走行時間を比較した.図 5.2 はその結果である.尚,グラフの数値は各 C の値について 10 回ずつ計測した平均値を用いた.

グラフから読み取れるように,C=2.5 までの走行時間は殆ど変わらない.これは,本システムでの最高速度を時速 3km と定めているためである. $C\leq2.5$ の値においては,算出される走行速度が最高速度を超えるため,全て同じ速度で走行することになってしまうからである.また $C\geq2.7$ の値に関しては,定数 C の値が増加するのに比例して走行時間も増加している.当初の予想通り,C の値の増加とともに走行速度が遅くなることで,走行時間は増加する結果となった.

それに対して,VFH+ 手法は 6.7 秒と短い走行時間となった.これは両システムの特徴によるもので当然のことであるが,SJMC 手法に関しても著しく走行時間が増加することは望ましくない.そのため,本論文では VFH+ システムにおける走行時間の 1.5 倍に当たる 10.05 秒を目安とし,それよりも短い時間で走行する C=2.7,2.9,3.1 を妥当な値として選択した.

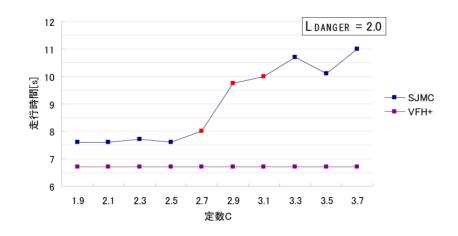


図 5.2 定数 C に対する走行時間の変化

次に,本システムにおける適切な L_{DANGER} の値を調べた.先の実験で選択した定数の値を利用し,それぞれの値に対して L_{DANGER} の数値を変化させて走行時間を取得した.図 5.3 がその結果である.ここで得た数値も,各 C の値について 10 回ずつ計測した平均値である.

グラフの通り,走行時間は L_{DANGER} の値が大きくなるほど短くなった.これは, L_{DANGER} の値が小さくなるとその分直進走行を行う距離が長くなり,対象障害物の回避行動を期待した走行の時間が増加するためである.また,C の値によって走行時間が著しく変化するといったことも見られず,軒並み減少していることが分かる.

前節でも述べたように, ${
m SJMC}$ 手法はできるだけ針路変更を行わず,更に走行速度を上げることが求められる.そのため,できる限り L_{DANGER} の距離を短くし,かつ走行時間が短い C を選択する必要がある.以上の理由から,この実験でも上で述べた ${
m VFH}+$ システムの 1.5 倍の走行時間を目安とし,C=2.7, $L_{DANGER}=1.9m$ を適切な値として選択した.

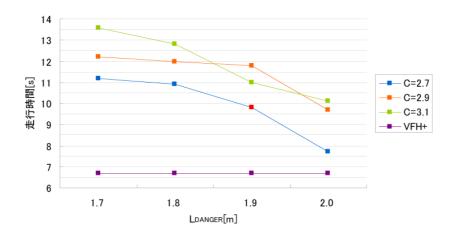


図 5.3 L_{DANGER} に対する走行時間の変化

5.2.3 Unstable な動的障害物の回避

本論文では、動的障害物を生活空間における最も出現率が高く、かつ重要な障害物である人間に特定した.人を動的障害物とし、それをロボットの走行進路に侵入及び退出させることで、VFH+手法とSJMC手法を導入した試作ロボットがどのような行動を起こすか観察し、比較を行った.具体的には、それぞれの手法が移動する障害物に対してどの程度まで近づくことが可能であり、針路変更せずに直線走行を継続できるかを調べる.今回の実験は、初期段階の実験として動的障害物を一つに絞った.対象障害物に対して実際に走行速度モデルが機能するかを検証している.

図 5.4 は, Unstable な動的障害物回避の実験を行った環境である.

まず動的障害物の移動開始地点をロボットの左前方に定めた.そして,図で示すように縦 $1.5\mathrm{m}$,横 $1.8\mathrm{m}$ 前方へ障害物をロボットに接近するように移動させる.本論文で導入した走行速度モデルは簡略化されているため,移動する障害物のロボット方向への接近速度を変数に用いていない。そのため,ロボットは自身に接近する障害物の移動速度を考慮して走行速度を定めることができず,実験環境で障害物が起こすような動きに対しては最も相性が悪いと言える.動的障害物回避の実験ではこの動きを検証の対象にすることで,厳しい環境設定においてもモデルが妥当であることを確かめる.実際には,障害物の移動開始地点からロボットまでの距離 L を変化させ,ロボットが針路を変更して対象障害物を回避するか,針路の変更を行わず直進走行のみで回避を完了するかを調べた.つまり,対象障害物の距離によって直進走行のみで回避する確率がどのように変化するかを,既存の手法と比較評価した.

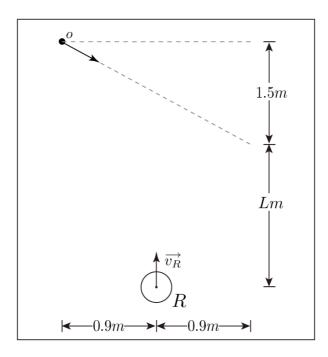


図 5.4 Unstable な動的障害物回避の実験環境

図 5.5 はその結果である.尚,成功率は各距離に対して 7 回ずつ行った際の数値である.グラフからも分かるように,どちらの手法も障害物との距離が近くなると直進走行の継続が困難になる傾向にある.しかし,VFH+ 手法が $2.7\mathrm{m}$ までのみ直進走行を行うのに対し,SJMC 手法は $1.3\mathrm{m}$ まで直進走行を行うことができ,明らかに高いパフォーマンスとなることが確認できた.このことから,本手法は既存の手法に対して移動する障害物に関しては優れていると言える.

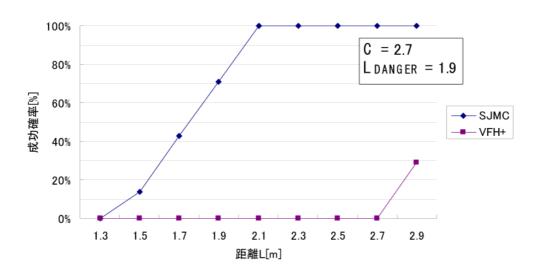


図 5.5 障害物との距離に対する直進走行の成功率

5.2.4 Stable な動的障害物の回避

先に行った実験から分かるように,本論文で導入した走行速度モデルは静的障害物の回避に VFH+ 手法の約 1.5 倍の時間を要する.そのため,Stable な動的障害物の回避行動を期待して,これ以上走行速度を遅めることは現実的ではない.つまり,Stable な動的障害物に対して接近し,その障害物がロボットを認識して回避行動を開始したとしても,その障害物とロボットが $2.1 \mathrm{m}$ 以上離れているか,障害物がロボットから遠ざかる回避行動を起こさない限りロボットは直進走行を継続できない可能性がある.動的障害物が複数存在する生活空間で,障害物が $2.1 \mathrm{m}$ 以上離れたロボットを認識し,回避行動を起こすことは限らない.ロボットは更に障害物に近づいて回避行動を期待するべきである.

本論文で行った実験から、試作したロボットの構成と導入した走行速度モデルでは、Stable な動的障害物の回避行動を誘発するのは困難であることが分かった、従って、この点に関しては再度検討する必要がある。

5.3 考察

以上の実験から,本論文で試作したロボットと導入した SJMC 手法は,静的障害物と Unstable な動的障害物に対してはある程度妥当な走行を行えることが分かった.具体的には,静的障害物については既存手法である VFH+ 手法と比較して 1.5 倍の走行時間に抑えつつ,Unstable な動的障害物については非常に高いパフォーマンスを発揮することに成功した.一方,Stable な動的障害物に関してはこれ以上走行速度を遅めて障害物の回避行動を期待することは難しく,回避行動の誘発を行うことは厳しいことが明らかになった.この点については走行速度モデルとロボットの構成を再度検討する必要があり,次章でも詳しく述べる.

5.4 まとめ

本章では、ロボットに導入したシステムの実験と評価について述べ、最後に考察を行った.本論文で試作したロボットと導入したシステムは、静的障害物と Unstable な動的障害物に対しては優れた走行が可能であると評価できた一方、Stable な動的障害物に対しての走行は妥当であるとは言えず、検討の余地を残すことが明らかとなった.

第6章

結論

本章では今後の課題について述べ,最後に本論文のまとめを行う.

6.1 今後の課題

本節では実験・評価を行った結果出てきた課題と,本論文では評価を行わなかった走行針路の決 定について議論する.

6.1.1 走行速度の決定

前章で触れたように,本論文で導入した走行速度モデルでは,Stable な動的障害物の回避行動を誘発させることは困難である.この問題を解決するためには,対象障害物の状態によって走行速度を変化させ,ロボットが適切な振る舞いを行えるようにすることが求められている.そのためには,障害物の状態を把握し,対象障害物が Stable な障害物なのか,それとも Unstable な障害物であるのか認識する必要がある.

以上の理由から, SJMC 手法における走行速度モデルは二つの点を改善する必要がある.一つは,障害物の状態を認識できるようにすることである.ロボットは,障害物が静止しているのか,移動しているのかを見極めなければならない.また,対象障害物が移動している場合は,どちらの方向にどれぐらいのスピードで移動しているのかを把握できることが求められる.そのためには物体検知センサが二つ以上必要である可能性もあり,またセンサの種類に関しても見直す必要があるかもしれない.この問題は,ロボットの構成も再度検討するべきものであり,ハードウェアとソフトウェアの双方の面から検討すべき課題であると言える.二つ目は, t_{aware} の適切な値をもう一度検討することである. t_{aware} は Stable な動的障害物がロボットに気付き、回避行動を起こすことが期待できる時間である.そのため,当然その時間には個体差があると考えられる.また,ロボットを認識するのに要する時間も一様であるとは考えにくく,ロボットと障害物の距離が近くなるほど t_{aware} の値が小さくなることが予想される.ロボットと対象障害物の関係性についてより深い考察を行うことで,生活空間における障害物回避を実現することができると思われる.

6.1.2 走行針路の決定

SJMC 手法を実際に生活空間での障害物回避手法として用いるためには,走行針路の決定に関しても検討する必要がある。本論文で作成したシステムは,対面する障害物を回避する際の針路決定についてのみ触れられており,再びターゲットの方向へ旋回し,直進走行へ復帰する点に関しては十分な議論がなされていない。多くの障害物が存在する生活空間で,一度変更した針路を再び元に戻し,いかにターゲットの方向を向いて直進走行を行うかは,解決しなければならない重要な問題の一つである。走行速度モデルと同様に障害物の状況をモデル化し,モデルに基づいたロボットの構成とシステムの構成を考えることが期待される。

この走行針路の決定に関する種々の問題を解決し,走行速度モデルの改善を行えた時,はじめて SJMC 手法が生活空間での障害物回避手法であると言える.走行速度モデルと走行針路モデルを ロボットに導入し,SJMC 手法として実証実験を行うことが,今後の最も重要な課題である.

6.2 本論文のまとめ

本論文では,生活空間におけるモバイルロボットの障害物回避手法である SJMC Method について述べた.近年モバイルロボットの利用環境が特定空間だけでなく生活空間にまで拡大しつつあり,物や情報が実空間のより広い範囲で効率良く運搬され,様々なサービスが提供されるようになってきた.このような状況の中,従来の障害物回避手法は効率的であるとは言えず,新しい回避手法を模索する必要が出てきている.

この問題を解決するために,本研究では障害物の回避行動を想定した障害物回避手法 SJMC Method を提案した.本研究では,動的障害物が意思を持ち,環境に応じて行動することに着目している.つまり,障害物が回避行動を起こすことを期待しながらロボットを制御することで,障害物回避の効率化を図ろうとするものである.本手法の実現により,既存手法に比べ単純な動作で走行することができ,より複雑な環境である生活空間でも動作が可能となる.

本論文では、SJMC Method が用いる走行速度モデルを検証するために、実際にモバイルロボットを試作し、実験・評価を行った.その結果、静的障害物や Unstable な障害物に対しては優位性を示すことができたが、Stable な障害物に対しては現状での実現は難しいことが明らかになった.そのため、今後の課題としてこの走行速度モデルの再検討と走行針路モデルの作成を行うことが必要であるという結論に至った.将来は、この課題の解決により生活空間での障害物回避を実現し、経路走行を達成できることを目指す.

謝辞

本研究の機会を与えてくださり,絶えず丁寧なご指導を賜りました,慶應義塾大学環境情報学部教授徳田英幸博士に深く感謝致します.また本研究を進めるにあたり,環境情報学部准教授高汐一紀博士,環境情報学部専任講師中澤仁博士には貴重なご助言を賜りましたことを厚く御礼申し上げます.

慶應義塾大学徳田研究室の諸先輩方には,折りに触れ貴重なご助言とご指導を頂きました.特に,本研究の草稿時から最後の最後まで付きっきりでご指導頂いた,慶應義塾大学政策・メディア研究科後期博士課程の生天目直哉氏に感謝の気持ちと御礼を申し上げたいと思います.

そして、研究生活を共に過ごし、日常の議論を通じて多くの知識や示唆を頂きました KMSF・HORN 両研究グループの皆様に感謝致します。中でも、無数の雑務を嫌な顔一つせずに引き受けてくれた慶應義塾大学環境情報学部三年西條晃平氏、西山勇毅氏、同期として様々な面でお世話になった慶應義塾大学総合政策学部四年前期瀧本拓哉氏、お互い切磋琢磨し、励ましあった慶應義塾大学環境情報学部四年 Nguyen Thuy Le 氏には本当に助けられました。また研究グループが異なるものの、同じ研究会の同期として、更には良き友人として支えあった慶應義塾大学環境情報学部四年鵜飼佑氏にも御礼申し上げます。

加えて,研究を通じて活発な議論にお付き合い頂き,精神的にも支えて下さった多くの友人に感謝します.特に,英訳を手伝って頂いた皆様方にお礼を申し上げたいと思います.

最後に,四年間の研究生活を支えてくれた両親,妹に深く感謝し,謝辞にかえさせて頂きます.

2011年2月11日 望月剣

参考文献

- [1] Kiva Systems. Kiva MFS, January 2011. http://www.kivasystems.com/.
- [2] G. Ferri, A. Mondini, A. Manzi, B. Mazzolai, C. Laschi, V. Mattoli, M. Reggente, T. Stoyanov, A. Lilienthal, and P. Dario. DustCart, a Mobile Robot for Urban Environments: Experiments of Pollution Monitoring and Mapping during Autonomous Navigation in Urban Scenarios. In submitted to ICRA Workshop on Networked and Mobile Robot Olfaction in Natural, Dynamic Environments, 2010.
- [3] DustBot European project. DustBot, January 2011. http://www.dustbot.org/.
- [4] S.M. LaValle. Planning algorithms. Cambridge Univ Pr, 2006.
- [5] J. Borenstein and Y. Koren. Real-time obstacle avoidance for fact mobile robots. *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on*, Vol. 19, No. 5, pp. 1179–1187, 2002.
- [6] J. Borenstein and Y. Koren. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on*, Vol. 7, No. 3, pp. 278–288, 2002.
- [7] I. Ulrich and J. Borenstein. VFH+: Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. In Robotics and Automation, 1998. Proceedings. 1998 IEEE International Conference on, Vol. 2, pp. 1572–1577. IEEE, 2002.
- [8] Segway Inc. Segway RMP 50, January 2011. http://www.segway.com/.
- [9] Hokuyo Automatic Co. Ltd. LRFs, January 2011. http://www.hokuyo-aut.co.jp/.
- [10] Y. Okubo, C. Ye, and J. Borenstein. Characterization of the Hokuyo URG-04LX laser rangefinder for mobile robot obstacle negotiation. *Unmanned Systems Technology XI*, Orlando, FL, 2009.