

移動ロボットシステムにおける
時間スプライン近似法を用いた知的軌道計画

2007年3月

宮田 淳一

Intelligent Trajectory Planning by Time Based Spline Approach
in Mobile Robot System

March 2007

Junichi MIYATA

目次

1	序論	9
1.1	研究の背景	9
1.2	論文の構成	12
2	移動ロボットシステムのモデリング	14
2.1	移動ロボットの機構	14
2.2	移動ロボットの運動学	15
2.3	移動ロボットの動力学	17
2.4	非ホロノミック拘束	19
2.5	実験システム	21
2.6	2章のまとめ	25
3	移動ロボットのコントローラ設計手法	26
3.1	時間スプライン近似法	27
3.1.1	時間スプライン近似法を用いた各指令値の算出	27
3.1.2	予見制御	29
3.1.3	外乱オブザーバ	30
3.1.4	シミュレーション	33
3.1.5	実験	34
3.2	路面環境を考慮した速度指令値の生成	38
3.2.1	垂直方向の加速度の計算	38
3.2.2	乗り心地の評価	41
3.2.3	最適な速度指令値の計算	41
3.2.4	シミュレーションによる検証	42
3.2.5	実験による検証	45
3.3	3章のまとめ	47
4	灰色予測と流体モデルを用いた軌道計画	48
4.1	本章の概要	48
4.2	灰色予測を使用した追従対象の行動予測	48

4.2.1	灰色理論と灰色モデル	48
4.2.2	原始データの検定	50
4.2.3	灰色予測	51
4.2.4	灰色理論の有効性	53
4.3	流体モデルを用いた軌道計画法	54
4.3.1	流体モデルの概要	54
4.3.2	流体の支配方程式	55
4.3.3	スタッガード格子	56
4.3.4	一般形保存式の離散化	58
4.3.5	u および v 運動方程式	59
4.3.6	圧力補正式	60
4.3.7	SIMPLE 法を用いた軌道計画法	61
4.3.8	シミュレーション	63
4.4	実験結果	87
4.5	従来法との比較	90
4.6	計画軌道の滑らかさに関する検討	91
4.6.1	コントロールボリュームの寸法を細かくした場合	92
4.6.2	中心点を用いてスプライン補間をした場合	95
4.6.3	端点を用いてスプライン補間をした場合	99
4.6.4	流線ベクトルと Ferguson / Coons 曲線を用いた場合	103
4.7	4章のまとめ	110
5	結論	111
A	付録：移動物体の追従手法	113
A.1	本章の概要	113
A.2	移動物体の位置測定	113
A.3	加速度制御系の設計	114
A.3.1	並進加速度指令値の生成	114
A.3.2	回転角加速度指令値の生成	115
A.4	仮想目標を使用した追従	115
A.5	シミュレーション	116
A.6	移動物体が正弦波移動し、静止する場合	116
A.7	実験	118
A.7.1	障害物が存在しない場合	118
A.7.2	障害物が存在する場合	119
A.8	まとめ	120
	謝辞	121

参考文献

122

表 目 次

2.1	Parameter of mobile robot	15
2.2	Robot parameter	17
2.3	Specifications of wheel	22
2.4	Specifications of motor driver	22
2.5	Parameter of experimental robot	23
2.6	Computer and controller board	23
4.1	Allowance zone of $\sigma(k)$	50
4.2	Accuracy of 2 prediction approach	53
4.3	Parameter of general equation	56
4.4	Position estimate of goal	76
4.5	Position estimate of goal	77
4.6	Evaluation of trajectory approach	106

目 次

1-1	Thesis flow	13
2-1	The model of the mobile robot	14
2-2	Mobile robot	21
2-3	Experimental signal flow diagram	24
3-1	Transformation from x-y to x-t	28
3-2	Dividing trajectory	29
3-3	Preview controller	29
3-4	Basic structure of disturbance observer in joint space	32
3-5	Controller	33
3-6	Traget trajectory	34
3-7	Velocity plan	34
3-8	Position response	35
3-9	Acceleration response	35
3-10	Experimental environment	36
3-11	Position response (experiment)	37
3-12	Rotation angle response (RIGHT)	37
3-13	Rotation angle response (LEFT)	38
3-14	The model of the wheel	39
3-15	The reaction force estimation observer	39
3-16	The simulation environment	42
3-17	The simulation result: estimated disturbance value, velocity response and velocity command	43
3-18	The spectrum of each frequency from 0.0 to 1.024 second	44
3-19	The spectrum of each frequency from 2.048 to 3.072 second	44
3-20	Acceleration response	45
3-21	Experimental result (0.65m/s)	46
3-22	Experimental result (0.36m/s)	46
3-23	Experimental result (velocity response)	47

4-1	The relation of proto-sequence and cumulative sequence	49
4-2	Example of allowance zone change by coordinate translate	51
4-3	Grey theory and polynomial approximation	54
4-4	Stagard grid	57
4-5	Segments in discretization	58
4-6	Trajectory planning	62
4-7	Velocity profile	63
4-8	Simulation environment	64
4-9	Control volume	65
4-10	Fluid model	66
4-11	Calculated trajectory	67
4-12	Simulation environment with obstalce	68
4-13	Fluid model with obstacle	69
4-14	Calculated trajectory with obstacle	70
4-15	Simulation1: Position response	71
4-16	Simulation1: Acceleration response	72
4-17	Simulation2: Position response	73
4-18	Simulation2: Acceleration response	74
4-19	Simulation3: Experiment environment	75
4-20	Simulation3: 1st time planned trajectory	78
4-21	Simulation3: 2nd time planned trajectory (at 0.5s)	79
4-22	Simulation3: 3rd time planned trajectory (at 1.5s)	80
4-23	Simulation3: 4th time planned trajectory (at 2.5s)	81
4-24	Simulation3: 5th time planned trajectory (at 3.5s)	82
4-25	Simulation3: 6th time planned trajectory (at 4.5s)	83
4-26	Simulation3: Position response	84
4-27	Simulation3: Acceleration response	85
4-28	An advanced controller based on intelligent trajectory planning	86
4-29	Position response	87
4-30	Acceleration response	88
4-31	Trajectory planning algorithm (Segmentalized control volume)	92
4-32	Position response (Segmentalized control volume)	93
4-33	Acceleration response (Segmentalized control volume)	94
4-34	Spectrum (Segmentalized control volume)	94
4-35	Cubic spline interpolation	95
4-36	Trajectory planning algorithm (Spline interpolation with center point)	96
4-37	Position response (Spline interpolation with center point)	97
4-38	Acceleration response (Spline interpolation with center point)	98
4-39	Spectrum (Spline interpolation with center point)	98

4-40	Select trajectory	99
4-41	Trajectory planning algorithm (Spline interpolation with contact point)	100
4-42	Position response (Spline interpolation with contact point)	101
4-43	Acceleration response (Spline interpolation with contact point)	102
4-44	Spectrum (Spline interpolation with contact point)	102
4-45	Trajectory planning algorithm (Ferguson / Coons curve)	103
4-46	Position response (Ferguson / Coons curve)	104
4-47	Acceleration response (Ferguson / Coons curve)	105
4-48	Spectrum (Ferguson / Coons curve)	105
4-49	Position response No.2 (Spline interpolation with contact point)	107
4-50	Acceleration response No.2 (Spline interpolation with contact point)	108
4-51	Spectrum No.2 (Spline interpolation with contact point)	108
4-52	Position response No.2 (Ferguson / Coons curve)	109
4-53	Acceleration response No.2 (Ferguson / Coons curve)	109
4-54	Spectrum No.2 (Ferguson / Coons curve)	110
A-1	Positional measurement of movement object	114
A-2	Mobile robot pass	116
A-3	Distance between robot and mobile object	117
A-4	Velocity and rotate angler velocity of mobile robot	117
A-5	Experiment result: Distance between robot and target	118
A-6	Experiment result: Robot position response and command	119

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

ロボットの語源は、チェコの劇作家カレル・チャペックが 1920 年に作った戯曲「ロッサム万能ロボット製造会社」^[4]の中で、「ROBOTA」(チェコ語で労働や苦役を意味する)と「ROBOTONIC」(同じく労働者を意味)から、人造人間を意味する「ロボット」を造語したことから始まる。

ロボットは人類の夢であるといえる。古くはギリシャ神話^[5]の青銅の巨人タロス、またはキプロスの王ピグマリオンと恋に落ちる女性像ガラテア、紀元前 8 世紀に作られた最古の叙事詩「イーリアス」^[6]にでてくる黄金の美女もロボットの仲間といえる。日本でも 12 世紀の仏教説話集「撰集抄」^[7]に人間そっくりの人造人間が登場している。このように時代の新旧、洋の東西に関わらず、ロボットは人類に望まれているといっても過言ではないであろう。

自動機械という意味でのロボットが作られたのは、紀元前 1 世紀、古代ギリシャのヘロンが作った自動装置が最初であると言われている。その後、日本では 17 世紀のからくり人形、欧州では時計技術を応用した自動人形が 18 世紀に登場している。1738 年にはパリで自動アヒルが公開され、1796 年に日本で最古のロボット製造技術書「機巧図彙」が出版された。

しかし、実用的なロボットの誕生は 20 世紀まで待たなければならなかった。^{[8][9]} 各種工場で活躍している産業用ロボットの試作機は、1958 年にアメリカのコンソリデータード・コントロール社で開発された。そして 1962 年、アメリカのユニメーション社と AMF 社がプレイバックロボッ

トを製作、実用化に成功したのである。

1960年代はあらかじめ記憶したとおりの作業しかできなかったロボットだが、1970年代に入ると、センサ情報を基に判断・行動するロボットが出現してきた。そして現在は汎用性を高め、学習機能を持たせたロボットが現れている。

このようにロボットは40年という短期間で長足の進歩を遂げ、近年ではAIBOに代表されるペットロボットなど、より人間に近い環境にまで活躍の場を広げてきている。

21世紀に入り、科学技術の発展はますますそのスピードが上がっている。しかしその一方で、さまざまな問題に直面していることも事実である。人口増加による食糧危機や資源の大量消費による枯渇問題、環境破壊による生活環境の劣化や地球の温暖化といった問題がある。また、医学技術の進歩のうえ手に入れた長寿化は社会的にみれば高齢化社会の一因ともなっている。日本において、出生率は2を切り、これにより高齢者を支える若者の減少が問題視されている。これは労働力を高齢者に求めることとなり、人的コストの高騰を招く要因の一つとして考えられる。特に医療の現場では、人手不足が常に言われており、この傾向に拍車がかかることは明白である。

このような状況では、人間に変わる労働力として、ロボットの重要度が増すことは確実である。工場内で用いられる産業用ロボットはロボティクスの発展とともに性能を向上させてきた。単純作業や危険な作業、負担の大きい作業をロボットが行うことにより、生産性を大いに向上させるとともに、人間が危険にさらされる場面を減らし、人間の労働における負担を軽減してきた。また、高度に発達したロボティクスに基づいて進んだ分野として宇宙開発があげられる。このようにロボットは様々な方面で必要とされている。また、従来は工場でしか見ることはできなかったロボットは、我々のより近い場所で見られるようになってきている。掃除ロボットや警備ロボット、ペット型ロボットなど、これからのロボットは人間社会により近い場所での活躍が期待されている。

近年の計算機の高性能化と情報通信技術の進歩により、ロボットのより知能化、小型化が可能となり、我々の生活に欠かせない道具となっていくであろう。例えば、「ITS」と呼ばれる高度道路交通システムでは、運転の自動化が最終的な目標である^{[22][23][24]}。この車両の自律化は普通の車両だけではなく、運搬業での台車や医療現場での車椅子に適用できるのであれば、コストの削減、人間の負担を軽減が期待できるのではないであろうか。

従来の自律移動の研究では、Hu^[37]などのようにロボットの位置を位置指令値に合わせること

に重点が置かれている。^{[36][38][39][40]} また、ITSの研究でも、西山^[22]のように距離を保って走行することが重視されている。その中で速度、加速変化を連続（滑らか）にするという研究は少ない。車両が急激に速度変化を起こすと、スリップなど危険な状態に陥ってしまう。この状態を回避するためには、速度、加速度変化を連続的にする必要がある。

そこで本論文では時間スプライン近似法を用いることにより、速度、加速度が連続的な応答になるようなコントローラの設計の実現を目指した。時間スプライン近似法を用いることにより、位置、速度、加速度指令値を事前に計算することが可能となる。これらの指令値を用いた予見制御を適用することにより、速度、加速度応答を連続的にする制御が可能となる。

時間スプライン近似法を用いるためには、軌道計画を行う必要がある。移動ロボットの軌道計画法としては、山田^[25]やKanayama^[29]などの非ホロノミック系^{[26][27][28][30]}を考慮した軌道生成法、Sekhavat^[31]、Wang^[33]などのポテンシャル法が提案されている。^{[32][34][35]}しかし、ポテンシャル法の計算量はマップを分割したメッシュの個数の2乗になるなど、計算量が多くなってしまう。事前に認識されない障害物の回避には、オンラインで軌道を計画する必要がある。そして、軌道の変更は最小、かつ最短時間で行われなければならないであろう。本論文では、移動ロボットの動作環境を流体が存在すると仮定したモデルを用いた軌道計画法を提案する。流体は環境に応じてその流れを変える。流体の特性を利用して、障害物が存在するなどの環境変動が起こった場合でも、容易に軌道を変更できる軌道計画法を構築する。

時間スプライン近似法を用いたコントローラでは移動ロボットの水平方向の速度、加速度を連続的にすることができる。しかしながら移動ロボットが動作する環境下では路面の影響から垂直方向の速度、加速度変化を考慮しなければならない。この問題を解決するため、本論文では移動ロボットのモータのエンコーダから垂直方向の外力を計算し、フーリエ変換することによって路面からの外力による振動を周波数成分に分解してこの振動を抑制する手法を提案する。ISO2631-1^[10]の規格に基づき、移動ロボットに搭乗する人間に与える影響が少なくなるような速度指令値を計算する。この速度指令値と軌道計画法により、時間スプライン近似法を適用することが可能となり、移動ロボットの水平、垂直方向の速度、加速度変化を連続的にした制御が可能となる。

また医療現場で使用する時、車椅子は人間を追従する必要がある場合が存在する。その場合、車椅子のゴールは固定ではなく動的になる。動的な追従対象物体を追従するためには、動作の予測

を行う必要がある。本論文では追従対象物体の位置予測法として、灰色予測を用いる方法を提案する。

1.2 論文の構成

本論文は5章から構成されている。各章では全て車椅子型二輪移動ロボットを対象としている。車椅子型二輪移動ロボットは駆動に用いるモータは2個のみ搭載しているため、簡単な制御系を組むことができる。

第2章では、本論文で用いる車椅子型移動ロボットについて定式化し、さらに非ホロノミック拘束について整理を行う。運動学方程式から移動ロボットの座標と両輪のモータの関係を公式化する。また、本研究で研究対象とした移動ロボットの実機について示す。

第3章では時間スプライン近似法を用いた軌道追従方法により、加速度変化が連続的になる移動ロボットの動作の実現と、乗り心地の向上のため反力推定オブザーバを使用することで路面からの外力を計算し、フーリエ変換を行うことでISO2631-1に基づいた振動抑制を実現する。搭乗者にとって不快な振動が少ない速度を計算し、移動ロボットの制御に使用する。第3章の手法により、移動ロボットの水平、垂直方向の加速度変化を連続的にする制御を可能とする。

また第4章では、灰色予測を用いた追従対象物体の位置予測法と流体モデルを用いた軌道計画法を提案する。追従対象の動作について灰色予測を用いて確率的に推測することにより、より高度な移動物体追従の実現を目指した。また流体モデルを用いた軌道計画法では、移動ロボットの動作環境に仮想的な流体が存在すると仮定し、その流体の流れを軌道に採用する。この手法により、比較的少ない計算量で軌道生成が可能となる。また、障害物などの環境変動があった場合においても、流体の流れの再計算は容易に行うことができる。

最後に第5章では、各章で得られた知見を総括し、本研究の結論を述べている。

Fig.1-1 に本論文の構成を流れ図にてまとめている。本研究では、第3章にて時間と空間領域を統合する軌道計画法を提案し、さらに第4章において空間領域における知的軌道計画法を導入することによって、移動ロボットシステムの高度な知的軌道計画法を確立している。

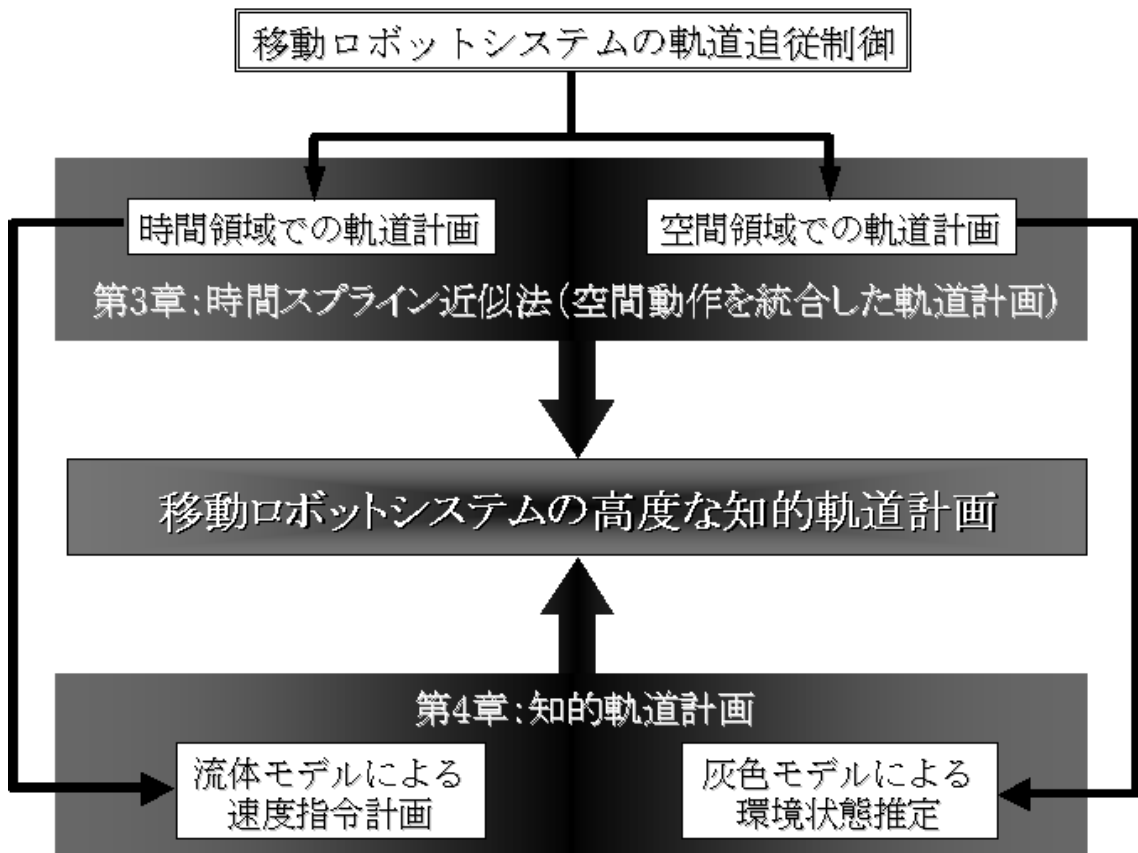


Fig.1-1: Thesis flow

第 2 章

移動ロボットシステムのモデリング

本章では、本論文で用いる 2 輪駆動型移動ロボットのモデル化を行い、そのモデルに基づいた運動学および動力学の関係を定式化する^[21]。

2.1 移動ロボットの機構

本節では、本研究で用いる移動ロボットの機構について説明する。本研究では、Fig.2-1 に示すような車椅子と同等の駆動機構を有するロボットを使用する。

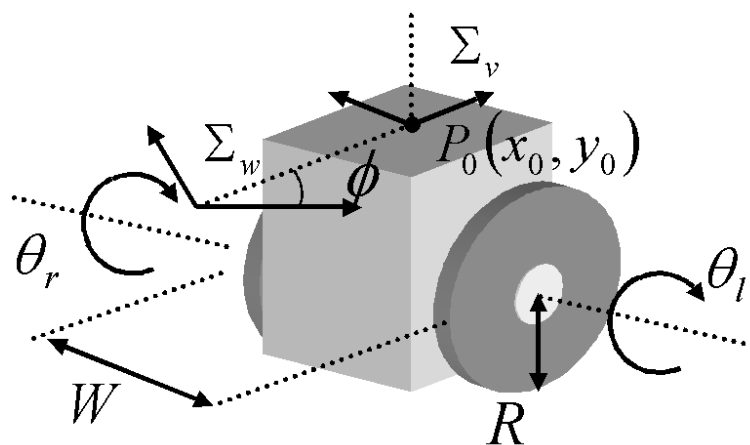


Fig.2-1: The model of the mobile robot

この駆動機構は、左右の車輪が独立して駆動し、その車輪は同一直線上に回転中心を持つ。さらに車体の前方2ヶ所に、走行安定化のための旋回キャストを有している。このロボットは、ステアリング機構を有していないため、2輪の速度差によって旋回運動を行う。

以下で移動ロボットと呼称する場合は、この移動機構を持つロボットを指すものとする。このような移動機構を有するロボットは横方向への運動ができず、ロボットに所望の動作を行わせるには運動学的拘束を考慮した姿勢制御が必要となる。

Table.2.1 に移動ロボットの運動を表す各種パラメータをまとめた。左右駆動輪の中点を移動ロボットの基準点とし、この点に関して制御を行う。また、ロボットの姿勢は ${}^w\mathbf{x}_v = [{}^w x_v, {}^w y_v, \phi]^T$ によって与えるものとする。

Table 2.1: Parameter of mobile robot

Σ_w	World coordinate
Σ_v	Robot coordinate
ϕ	Rotate angle of Σ_v based on Σ_w
${}^w\mathbf{x}_v$	Position of robot on world coordinate $[{}^w x_v, {}^w y_v, \phi]^T$
R	Radius of wheel
W	tread
θ_r	Rotate angle of right wheel
θ_l	Rotate angle of left wheel
$\boldsymbol{\theta}$	$[\theta_r, \theta_l]^T$

2.2 移動ロボットの運動学

運動学および逆運動学関係式は移動ロボットの制御系を構成する際に必要不可欠となる。これらの関係は、両輪のモータの回転角と移動ロボットの位置座標の関係から求めることができる。Fig.2-1 に示すロボットの運動学的拘束を定式化する。

移動ロボットの左右の車輪が空転せず、車体が横滑りしないと仮定する。このとき、ロボット座標系における速度をロボットの進行方向成分を v 、回転方向成分を $\dot{\phi}$ とすると、左右の車輪の回転角速度との関係は、(2.1)、(2.2) 式で表すことができる。

$$R\dot{\theta}_r = v + \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (2.1)$$

$$R\dot{\theta}_l = v - \frac{W}{2}\dot{\phi} \quad (2.2)$$

Σ_v を基準としたロボットの速度 ${}^v\dot{\boldsymbol{x}}_v = [{}^v\dot{x}_v, {}^v\dot{y}_v, \dot{\phi}]^T$ は次のように表せる。

$$v = {}^v\dot{x}_v = \frac{R}{2}(\dot{\theta}_r + \dot{\theta}_l) \quad (2.3)$$

$${}^v\dot{y}_v = 0 \quad (2.4)$$

$$\dot{\phi} = \frac{R}{W}(\dot{\theta}_r - \dot{\theta}_l) \quad (2.5)$$

また、 ${}^w\dot{\boldsymbol{x}}_v$ と ${}^v\dot{\boldsymbol{x}}_v$ の関係は、回転行列 \boldsymbol{R} を用いると (2.6) 式となる。

$$\begin{bmatrix} {}^v\dot{x}_v \\ {}^v\dot{y}_v \end{bmatrix} = \boldsymbol{R}(-\phi) \begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_v \\ {}^w\dot{y}_v \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

幾何学的関係から、次の (2.7)、(2.8) 式が得られる。

$${}^w\dot{x}_v \cos \phi + {}^w\dot{y}_v \sin \phi = v \quad (2.7)$$

$$-{}^w\dot{x}_v \sin \phi + {}^w\dot{y}_v \cos \phi = 0 \quad (2.8)$$

また、(2.3)、(2.4)、(2.6) 式より、

$$\begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_v \\ {}^w\dot{y}_v \end{bmatrix} = \frac{R}{2}\boldsymbol{R}(\phi) \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.9)$$

が得られ、これにより移動ロボットの速度関係式を (2.10) 式で表すことができる。この式が速度次元における移動ロボットの運動学関係式である。

$${}^w\dot{\boldsymbol{x}}_v = \begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_v \\ {}^w\dot{y}_v \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{R}{2} \cos \phi & \frac{R}{2} \cos \phi \\ \frac{R}{2} \sin \phi & \frac{R}{2} \sin \phi \\ \frac{R}{W} & -\frac{R}{W} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_r \\ \dot{\theta}_l \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$= {}^w\boldsymbol{J}_{aco-v} \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.11)$$

(2.11) 式の ${}^w J_{aco-v}$ は世界座標系における移動ロボットの移動速度と駆動輪の回転速度との関係を表すヤコビ行列である。加速度次元における運動学的関係についても (2.11) 式を時間微分することで得られる。

$${}^w \ddot{x}_v = {}^w J_{aco-v} \ddot{\theta} + {}^w \dot{J}_{aco-v} \dot{\theta} \quad (2.12)$$

(2.12) 式の右辺第2項の影響は第1項に比べて十分小さいため、以下では第2項を省略した近似関係を用いる。本論文の第3章以降で示している移動ロボットシステムの制御系は、(2.12) 式に基づいた逆運動学関係式により構成されている。

2.3 移動ロボットの動力学

本節では、移動ロボットの動力学モデルについて定式化を行う。動力学に関するパラメータを Table.2.2 にまとめる。本研究においては、移動ロボットの姿勢変化による慣性変動がなく、駆動輪に外乱オブザーバを適用して外乱を補償するため^[12]、それぞれのアクチュエータの制御は非干渉化されている。よって、ロボットの重心の位置をロボットの中心である Σ_v の原点にあると仮定することができる。

Table 2.2: Robot parameter

m_v	Mass of mobile robot
m_w	Mass of wheel
M	$m_v + 2m_w$
J_v	rotary inertia of z axis on Σ_v
J_m	rotary inertia of z axis in wheel on Σ_v
J_w	rotary inertia of rotate axis in wheel
J	$J_v + m_w W^2 + 2J_m$ rotary inertia direction of mobile robot rotation

運動エネルギー関数は (2.13) 式で定義される。

$$K = \frac{1}{2} M ({}^w \dot{x}_v^2 + {}^w \dot{y}_v^2) + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} J_w (\dot{\theta}_r^2 + \dot{\theta}_l^2) \quad (2.13)$$

右辺第1項が並進運動エネルギー、第2項が車体の回転エネルギー、第3項が車輪の回転エネルギーである。

この運動エネルギー関数を用いて Lagrange 方程式に基づき、ロボットの動力学関係式を導出する。しかし、運動学関係に後述する非ホロノミックな拘束条件が存在するため、積分によって解析的な解が求められない。そこで Lagrange の未定乗数法を用いて、拘束条件を反映させた動力学方程式を導出する。Lagrange の未定乗数法を用いた場合の動力学方程式は次のようになる。

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{E}(\mathbf{q})\boldsymbol{\tau} + \mathbf{A}^T(\mathbf{q})\boldsymbol{\lambda} \quad (2.14)$$

$\boldsymbol{\lambda}$: Lagrange multiplier

\mathbf{q} : generalized coordinate vector

$\boldsymbol{\tau}$: input vector

$M(\mathbf{q})$: inertia matrix

$C(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$: Coriolis force

$\mathbf{g}(\mathbf{q})$: vector of gravitation

$\mathbf{E}(\mathbf{q})$: input translate matrix

\mathbf{A} : constraint matrix

一般化座標を $\mathbf{q} = [{}^w x_v, {}^w y_v, \phi, \theta_r, \theta_l]^T$ と定義すると、ロボットの運動学拘束条件は (2.1)、(2.2) および (2.7)、(2.8) 式から求められる。

$$\mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi & W/2 & -R & 0 \\ \cos \phi & \sin \phi & -W/2 & 0 & -R \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2.15)$$

この拘束行列 \mathbf{A} と一般化座標 \mathbf{q} を用いて Lagrange 方程式を解く。

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\partial K}{\partial q_i} \right) = \tau_i + \sum_j \lambda_j a_{ji} \quad (2.16)$$

(2.16) 式を解くと、以下の式が得られる。

$$M^w \ddot{x}_v = \cos \phi \lambda_1 + \cos \phi \lambda_2 - \sin \phi \lambda_3 \quad (2.17)$$

$$M^w \ddot{y}_v = \sin \phi \lambda_1 + \sin \phi \lambda_2 + \cos \phi \lambda_3 \quad (2.18)$$

$$J \ddot{\phi} = \frac{W}{2} (\lambda_1 - \lambda_2) \quad (2.19)$$

$$J_w \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_r \\ \ddot{\theta}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

上式をまとめると (2.21) 式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} M & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & J_w & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & J_w \end{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} + \mathbf{A}^T \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

今回用いた移動ロボットでは、 $\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{0}$ である。ここから乗数 λ を消去すると、入力トルクと両輪の回転角加速度の関係は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \tau_r \\ \tau_l \end{bmatrix} = R^2 \begin{bmatrix} (\frac{M}{4} + \frac{J}{W^2}) + \frac{J_w}{R^2} & (\frac{M}{4} - \frac{J}{W^2}) \\ (\frac{M}{4} - \frac{J}{W^2}) & (\frac{M}{4} + \frac{J}{W^2}) + \frac{J_w}{R^2} \end{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.22)$$

$$= \mathbf{M}_v \ddot{\boldsymbol{\theta}} \quad (2.23)$$

ここで \mathbf{M}_v は等価慣性行列である。本論文の第3章以降で示しているシミュレーションでは、(2.23) 式に表される動力学モデルを用いている。

2.4 非ホロノミック拘束

本節では、非ホロノミックな拘束の定義とその性質について、実際に移動ロボットの制御を行う観点から整理する。微分幾何学に基づいた解析的な考察は文献^{[13][14][15][16][17][19][20]}を参照していただきたい。

以下では移動ロボットの中心が受ける拘束について考察する。ここで、ロボットの運動は回転ベクトル \mathbf{w} と並進ベクトル $\dot{\mathbf{x}}$ で表すことができる。移動ロボットや車輪は、横方向への運動、す

なわち横滑りができない拘束を受けている。この拘束は (2.24) 式の微分形式で表される。

$$-{}^w\dot{x}_v \sin \phi + {}^w\dot{y}_v \cos \phi = 0 \quad (2.24)$$

この式は積分不可能である。

移動ロボットの運動を表現するための一般化座標 \mathbf{q} を $\mathbf{q} = [{}^w x_v, {}^w y_v, \phi]^T$ と定義すると、(2.24) 式は次のように書き換えることができる。

$$\begin{bmatrix} -\sin \phi & \cos \phi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^w\dot{x}_v \\ {}^w\dot{y}_v \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \mathbf{A}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{0} \quad (2.25)$$

ここで、一般に

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \ddot{\mathbf{x}}, t) = \mathbf{0} \quad (2.26)$$

という微分形式で表現される拘束条件が

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{0} \quad (2.27)$$

という代数方程式に書き換えることが可能なとき、すなわち積分可能なとき、この拘束をホロノミックな拘束と呼ぶ。それ以外の場合、すなわち式の書き換えが不可能、積分不可能な場合、この拘束を「非ホロノミックな拘束」と呼ぶ^[13]。2輪や4輪の移動ロボットや固定点を持たない宇宙ロボットの動作、猫ひねり動作、非駆動関節を含むマニピュレータの動作などが非ホロノミックの一例である。

移動ロボットの運動や車輪の運動は、(2.26) 式の特異な形式である (2.25) 式で表現できるものがほとんどである。本論文で用いる移動ロボットの非ホロノミック拘束に関する積分可能性および可制御性については、文献^[18] にまとめられている。本論文で示している知的軌道計画法では、時間領域において加速度応答まで連続的な応答を実現しており、非ホロノミック拘束による影響を緩和できる手法としても期待できる。しかしながら、提案手法では非ホロノミック拘束を軌道計画へ直接反映したものではなく、非ホロノミック拘束の影響を効果的に低減する軌道計画に関しては今後の課題となっている。

2.5 実験システム

本研究で用いる実験システムについて示す。Fig.2-2 に実験システムの写真を示す。本実験ではアルミ材で構成される2輪駆動型移動ロボットを用いる。

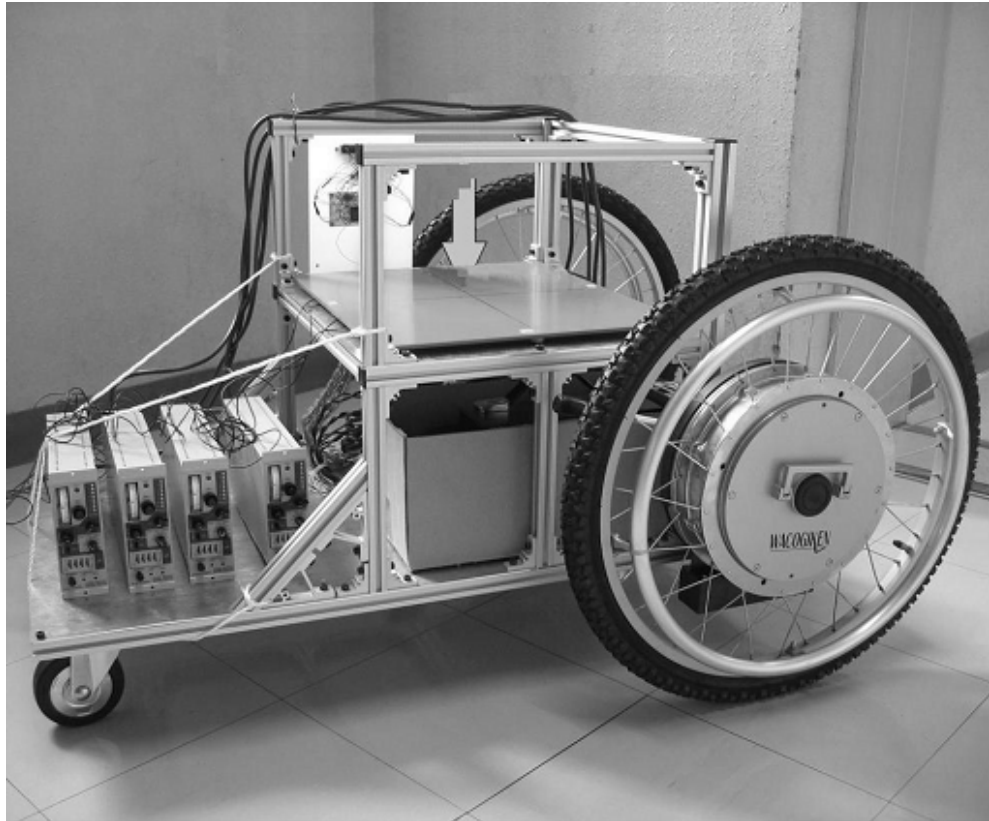


Fig.2-2: Mobile robot

移動ロボットは両輪が独立して制御できる 2 自由度のロボットであり、駆動輪 2 個、補助輪 2 個を有する。制御用 PC にて計算された電流指令値の実現はモータドライバにて行われる。モータドライバは移動ロボットに搭載された DC24V バッテリから電力供給される。モータの仕様、ドライバの仕様をそれぞれ Table.2.3, Table.2.4 に示す。

Table 2.3: Specifications of wheel

Type	AC servomotor
Manufacturer	WACOGIKEN Co.
Type	YB-6989
Declared power	120W
Rated torque	19.1 N·m
Second maximum torque	76.4 N·m
Rated revolution	60 rpm
Maximum revolution	80 rpm
Rated Current	10 A
Rated Power	18.4 V
Second maximum current	40 A
Torque number	2.1 N·m/A
Resolution of encoder (pulse / rotation)	1024

Table 2.4: Specifications of motor driver

Type	AC servomotor driver
Manufacturer	WACOGIKEN Co.
Type	ABH2-208
Rated phase current	26.0 A
Second maximum current	56.6 A
Main power	DC24 V
Command power	-10 ~ +10 V

続いて、実験機のパラメータを Table.2.5 に示す。

Table 2.5: Parameter of experimental robot

R	Radius of wheel	0.26 m
W	tread	0.68 m
M	Mass of mobile robot	25.5 kg
J	rotary inertia direction of mobile robot rotation	2.0 kgm ²
J_w	rotary inertia of rotate axis in wheel	0.64m

次に、制御理論の実装が行われる PC について述べる。本実験では、車椅子型移動ロボットに搭載されたデスクトップ型計算機を用いた。各種制御ボードは拡張 BOX に収納している。Table.2.6 に用いた計算機関連機器の詳細を示す。

Table 2.6: Computer and controller board

PC	CPU	Intel PentiumIII 1.8GHz
Counter board	Type	PCI-6205C
	Manufacturer	Interface Corporation
	Number of input [ch]	8
	Bit number of memory [bit]	24
D/A board	型式	PCI-3329
	Manufacturer	Interface Corporation
	Number of input [ch]	8
	Resolution [bit]	12
	Output range (bipolar) [V]	±5
	Output range (unipolar) [V]	0 ~ 5
DIO board	Type	PCI-2702C
	Manufacturer	Interface Corporation
	Input power [V]	DC 5
	Input current [mA]	0.9
	Response time [μ s]	0.1

最後に上記に述べた各種のシステム間にて、どのような情報の交換があるかを Fig. 2-3 に示す。

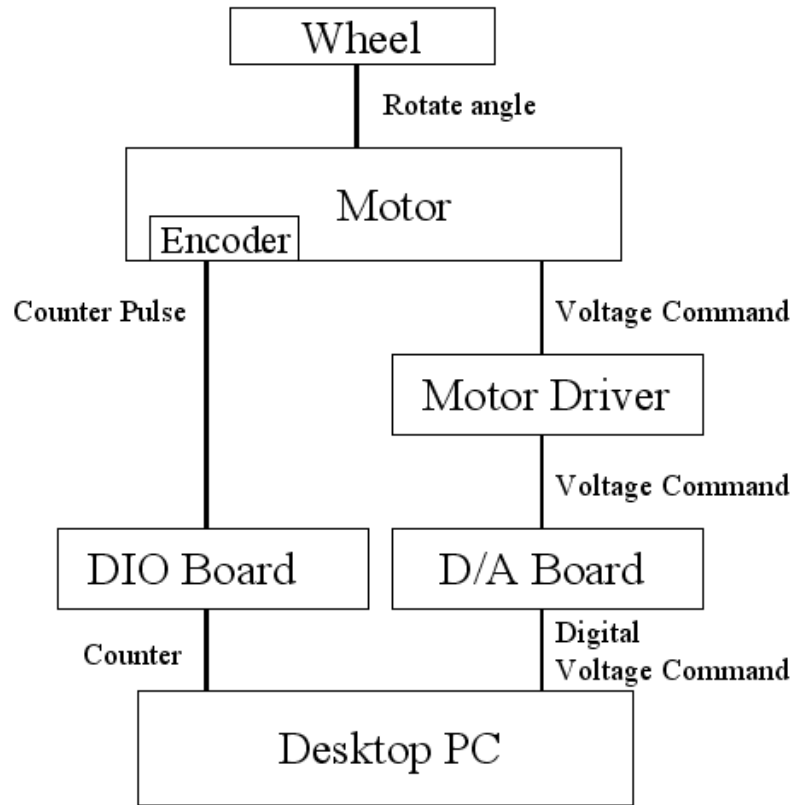


Fig.2-3: Experimental signal flow diagram

2.6 2章のまとめ

本章では、本論文で研究対象とする車椅子型移動ロボットのモデル化を行い、運動方程式、動力学方程式からシミュレーションおよび実機実験制御に必要なヤコビ行列および慣性行列を求めた。次章以降のシミュレーションおよび実機実験は、本章で求めた運動学関係式および動力学モデルに基づいて行っている。また、実験で使用する移動ロボットの実機について、移動ロボットのパラメータおよび使用した実験装置の仕様について簡単に示した。

本章では、移動ロボットシステムの軌道計画の際に問題となる非ホロノミック拘束についても簡単に示したが、本研究で示している提案手法では非ホロノミック拘束の影響を積極的に考慮したものとはなっておらず、同影響の考慮を提案手法に如何に取り込むかに関しては今後の課題となる。

第 3 章

移動ロボットのコントローラ設計手法

移動ロボットの軌道追従において安定した動作を実現するためには、ロボットの速度と加速度の変化を連続的にすることが必要である。そのため、前もって速度、加速度指令値が連続的な変化となるように設計すれば、速度、加速度応答値の変化も連続的なものとするのが可能となり、追従動作の精度向上が期待できる。そこで本研究では、予見制御器を提案し、予め加速度指令値までが連続となるように計画された軌道に対して追従精度が向上する制御を実現している。また軌道の近似手法としては、各点を連続的に通る曲線となり、さらに係数計算のみで曲線方程式が求まることから、スプライン近似法を用いている。ただし、従来手法のように、時間近似関数、空間位置近似関数として時間と空間を個別に分類して適用する近似手法として用いるのではなく、時間と空間のスケールを融合した考え方に基づいてスプライン近似法を用いる点に本提案手法の特長を有している。

また予見制御を用いるためには速度計画が必要となる。本章では、この速度計画のため振動抑制のための指標を設定し、予見制御への適用を試みる。これにより、提案するスプライン近似法に基づいた予見制御の有効性の検証も行う。時間スプライン近似法を用いた軌道追従法や車輪駆動モータへの外乱オブザーバの適用により、移動ロボットの水平方向に対する連続的な加速度変化は保証される。しかしながら、実環境下における外乱は、水平方向だけでなく垂直方向への外乱も考慮する必要がある。すなわち路面から移動ロボットが受ける外力である。移動ロボットとして電動車椅子等を想定した場合、外力により車椅子の搭乗者は不快な思いをすることになる。本章

では、この振動を解析し搭乗者にとって負担の少ない振動となるように最適な速度を生成する速度計画法について示す。この速度計画はスプライン近似法に基づいた予見制御へ直接適用することが可能であり、時間スプライン近似法に基づいた予見制御の有効性が確認できると同時に、適切な速度指令計画を行うことにより、提案する軌道計画法に基づいた高度モーションコントロールの様々な実現が期待できることを示す。^{[2][3]}

3.1 時間スプライン近似法

3.1.1 時間スプライン近似法を用いた各指令値の算出

時間スプライン近似法の式は、 $y = f(x)$ で表される軌道を x 、 y 方向それぞれについて時間単位に分解することにより得られる。時間単位に分割された軌道に対してスプライン近似を行うことにより、そのスプライン近似式から位置指令値、速度指令値、加速度指令値を算出することが可能となる。時間スプライン近似法により、 $y = f(x)$ の軌道は (3.1),(3.2) 式と時間関数の式に変換される。本論文では制御対象の次元は加速度としているため、3次多項式で表す。

$$x = a_x t^3 + b_x t^2 + c_x t + d_x \quad (3.1)$$

$$y = a_y t^3 + b_y t^2 + c_y t + d_y \quad (3.2)$$

ここで t は移動ロボットのサンプリングタイムである。以上のように、軌道の幾何関係式を時間関数で表すことにより、位置指令値、速度指令値、加速度指令値の算出が可能になる。すなわち、時間スケールと空間スケールを同時に考慮した軌道計画が可能となる。

時間スプライン近似法は、次のような手順で構成される。

1. 与えられた速度から、1 サンプリングタイムにおける移動ロボットの移動距離を計算する
2. 計算された移動距離を用いて与えられた軌道を分割し、分割点を設定する
3. その分割点を用いて、与えられた軌道をスプライン近似する

時間スプライン近似法では、計画された速度指令値に応じて軌道を分割する。指令速度値は移動ロボットのスカラーな指令値となる。このため、時間スプライン近似法を用いる場合は速度計

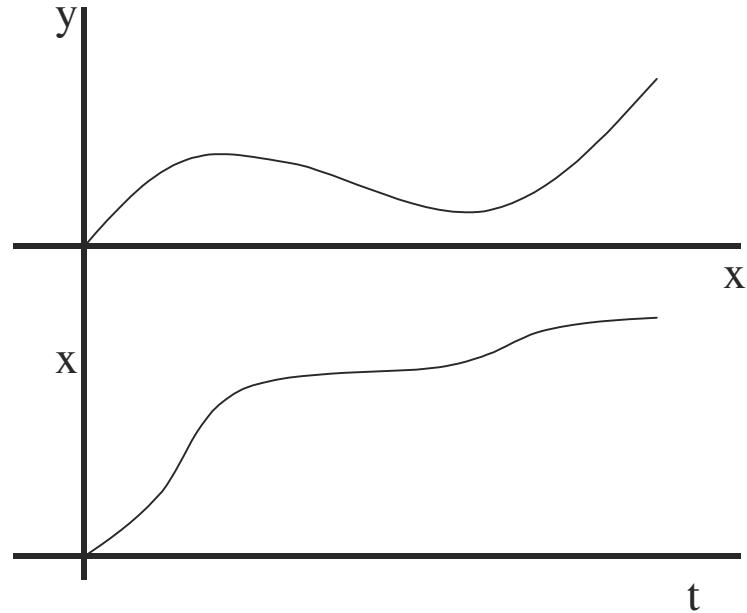


Fig.3-1: Transformation from x-y to x-t

画が必要となる。この多様な環境変動に対して適応可能な速度計画については第4章において詳細に述べる。速度指令値から、1 サンプルタイムで移動する距離 ΔL が計算できる。スプライン近似で用いる分割点の位置は、移動距離 ΔL で軌道を区切ることで与えられる。

この分割点を用いて x 、 y 成分それぞれについてスプライン近似を行う。(3.1) 式、(3.2) 式が3次式のため、分割点を4点選択することにより、(3.1) 式、(3.2) 式の係数 A、B、C、D は求められる。位置指令値 x_{cmd} は (3.1) 式、(3.2) 式の変数 t に現在時刻を代入することにより得ることが出来る。速度指令値 \dot{x}_{cmd} は (3.1) 式、(3.2) 式を1階微分し、変数 t に1 サンプル後の時刻を代入することにより得られる。加速度指令値 \ddot{x}_{cmd} も同様に2階微分を行った式に2 サンプル後の時刻を代入することにより得られる。

$$x_{cmd} = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (3.3)$$

$$\dot{x}_{cmd} = 3at^2 + 2bt + c \quad (3.4)$$

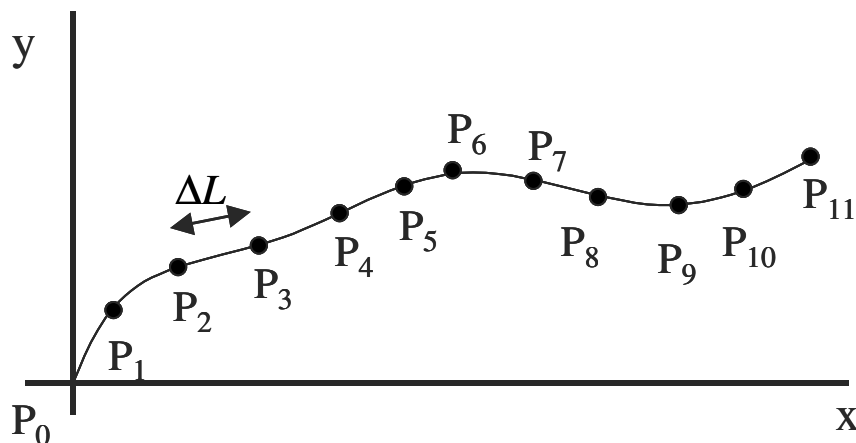


Fig.3-2: Dividing trajectory

$$\ddot{x}_{cmd} = 6at + 2b \quad (3.5)$$

以上のように時間スプライン近似式が得られる。

3.1.2 予見制御

予見制御とは、目標値や外乱の未来情報が分かる場合に、これらの情報を利用して評価関数を小さくするように設計されるものである^[52]。制御系の構造は、元の制御系に目標値の予見フィードフォワード補償を付加したものとなる。予見制御の中身は次の Fig.3-3 のような構成をしている。

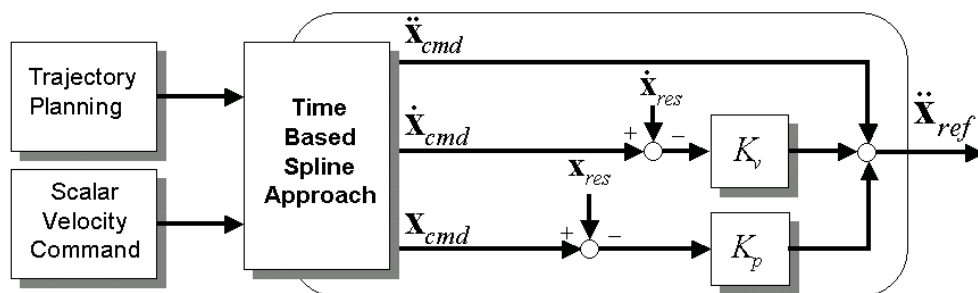


Fig.3-3: Preview controller

加速度参照値は、時間スプライン近似を用いた次の要素から計算される。

1. 現在時刻の位置指令値
2. 1 サンプルタイム後の時刻における速度指令値
3. 2 サンプルタイム後の時刻における加速度指令値

これらの指令値を使うことで、予見制御は成り立つ。従来のPD制御手法と比較して、予見制御手法では制御器にフィードフォワード項が追加されるため、応答が速く、速度・加速度変化も連続的に制御することができる。

3.1.3 外乱オブザーバ

本論文で想定している移動ロボットの制御においては、モデル化に伴う誤差、動作に伴う摩擦、動力学で示される車輪間の干渉項、各パラメータのノミナル値との偏差などをまとめて外乱 T_{dis} として定義する。この T_{dis} は、移動ロボットの駆動輪に作用する外乱となり、 T_{dis} を外乱オブザーバを用いて補償することにより、外乱 T_{dis} に対してロバストな制御系を構成することができる。

(3.6) 式で多自由度システムの動力学を表現する。

$$M\ddot{\theta} + B(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J_{ext}^T F_{ext} \quad (3.6)$$

ここで M は慣性行列、 B はコリオリ力、求心トルク、重力項などの動力学外乱および粘性摩擦やクーロン摩擦などの関節外乱である。 τ は入力トルク、 J_{ext}^T は外力 F_{ext} の作用している位置と関節を結びつけるヤコビ行列である。移動ロボットで車輪に使用しているモータでは、モータのトルク定数 K_t と電圧参照値 V_a^{ref} の積により、入力トルク τ が生成される。

$$\tau = K_t V_a^{ref} \quad (3.7)$$

ここで所望のノミナルシステムを (3.8) 式で与える。ノミナル慣性 M_n を対角行列で与えることにより、モータごとに独立なシステム設計が可能となる。

$$M_n \ddot{\theta} = K_{tn} V_a^{ref} \quad (3.8)$$

このとき、(3.6) 式の動力学方程式は (3.9) 式に書き換えることが出来る。

$$M_n \ddot{\theta} = K_{tn} V_a^{ref} - T_{dis} \quad (3.9)$$

T_{dis} はノミナルシステムにおける外乱で、(3.8) 式と (3.9) 式の差をとることにより定義することが出来る。

$$T_{dis} \equiv (M - M_n) \ddot{\theta} + (K_{tn} - K_t) V_a^{ref} + B + J_{ext}^T F \quad (3.10)$$

(3.9) 式において、電圧参照値およびモータ角加速度応答から外乱 T_{dis} を推定することが出来る。ただし、モータの角加速度はセンサで直接計算することは困難であるので、高域ノイズを考慮してローパスフィルタを通して推定する。

$$\hat{T}_{dis} = G_{LPF} T_{dis} \quad (3.11)$$

推定した外乱を電圧参照値に加えてフィードバックすることにより、外乱に対してロバストな制御系が構成できる^[12]。このときの動力学方程式は (3.12) 式で表される。

$$M_n \ddot{\theta} = \tau_n - G_{HPF} T_{dis} \quad (3.12)$$

ここで $G_{HPF} = I - G_{LPF}$ であり、外乱 T_{dis} が各モータに等価的なハイパスフィルタを通して作用することになる。また G_{LPF} の対角成分に一次ローパスフィルタ $G_{LPF} = \text{diag}\{\frac{g_1}{s+g_1}, \dots, \frac{g_n}{s+g_n}\}$ を選択した場合、一次の外乱オブザーバとなり、Fig.3-4 に示す構成となる。

Fig.3-4 より、電圧指令値に前向きゲイン $M_n K_{tn}^{-1}$ を掛けることにより、加速度を参照値とした加速度制御系の構成となる。

$$V_a^{ref} = K_{tn}^{-1} \tau_n = K_{tn}^{-1} M_n \ddot{\theta}^{ref} \quad (3.13)$$

加速度制御系は対象システムの実慣性などのパラメータを必要とせず、角加速度指令値 $\ddot{\theta}^{ref}$ の生成の過程で運動学（逆運動学）演算のみとなる。したがって対象システムの運動学と動力学を完全に分離して考慮することが出来る。このように外乱オブザーバはシステムのパラメータをノ

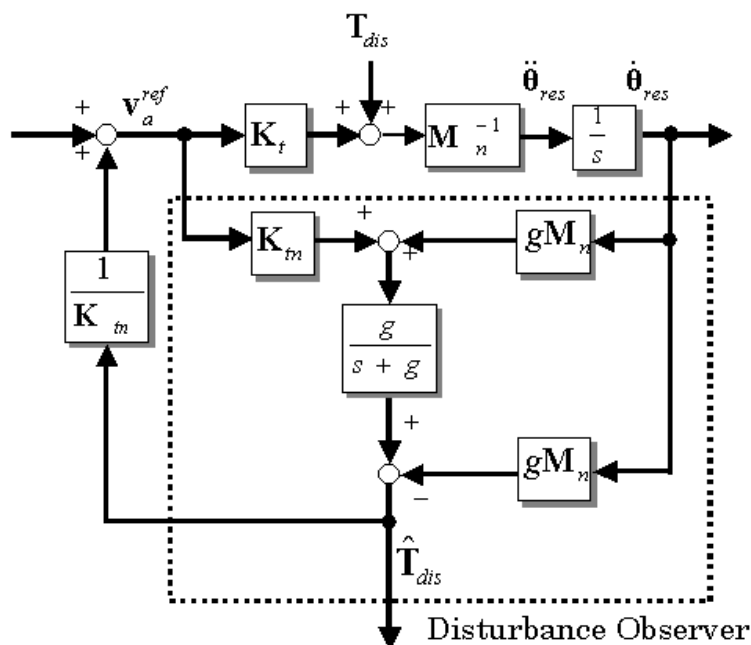


Fig.3-4: Basic structure of disturbance observer in joint space

ミナル化する技術であるといえる。なお、本論文で対象とした移動ロボットは車椅子型移動ロボットのため、モータが回転したとしてもロボットの姿勢は変化しないため、動力学演算を繰り返す行う必要はない。また本論文で使用する移動ロボットは、センサとしてエンコーダのみを持つため、角速度応答値 $\dot{\theta}_{res}$ は、角度応答値の疑似微分を用いている。

これまでに提案した手法を整理し、移動ロボットの軌道追従制御法を以下に示す。

軌道計画から位置情報が得られ、それをもとに時間スプライン近似法が用いられ、位置、速度、加速度指令値が得られる。各指令値と各応答値から予見制御が構成され、回転角加速度指令値が得られ、ロボットに入力される。関節空間の外乱は、外乱オブザーバによって補償される。

時間スプライン近似法を用いるためには軌道計画と速度計画が必要になる。より多様な動作目的を達成するための速度指令計画については、次章において流体モデルを用いた軌道計画法として提案する。

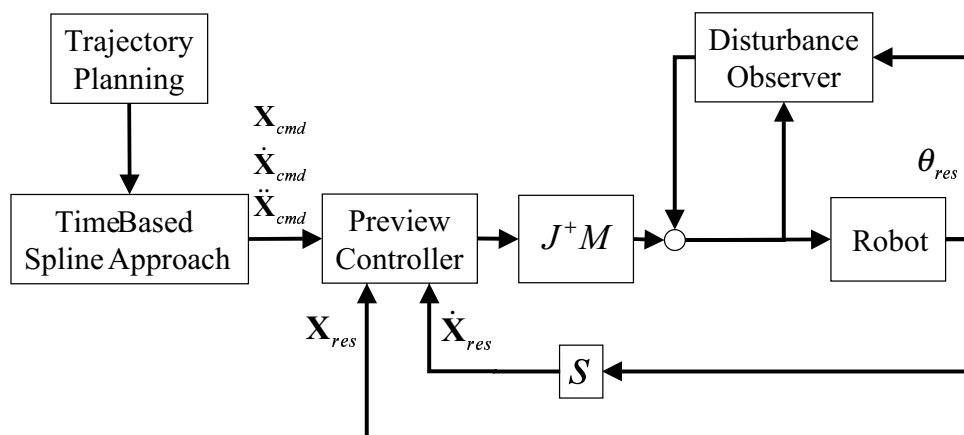


Fig.3-5: Controller

3.1.4 シミュレーション

提案した時間スプライン近似法と予見制御の有効性を確認するために、シミュレーションを行った。シミュレーションでは、図 3-6 に示す軌道を追従することとした。移動ロボットは (2.0m,2.0m) 地点まで直進し、45 度右回転して (2.0m,4.0m) 地点をゴールとする。また、速度計画は図 3-7 とした。最高速度を 1.0m/s、加速度を 1.0m/s² とする。

以上の目標軌道と速度計画を用いて、時間スプライン近似法と予見制御を用いたシミュレーションを実施した。比較として従来から用いられている PD コントローラを用いたシミュレーションも併せて行う。コントローラのパラメータは下記を設定した。

$$K_p = 900$$

$$K_v = 60$$

位置応答結果を Fig.3-8 に示す。同図より、時間スプライン近似法を用いた場合、従来法の PD コントローラよりも目標軌道を正確に追従できていることがわかる。

時間スプライン近似法を用いた場合の加速度応答を Fig.3-9 に示す。Fig.3-9 から、最高加速度は 1.0m/s² 以下であり、連続的な速度指令の生成に応じて速度応答も連続的に変化していること

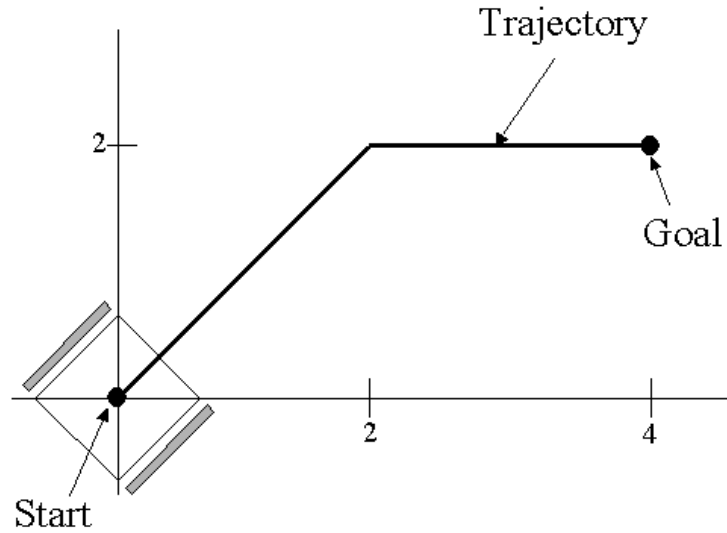


Fig.3-6: Trajet trajectory

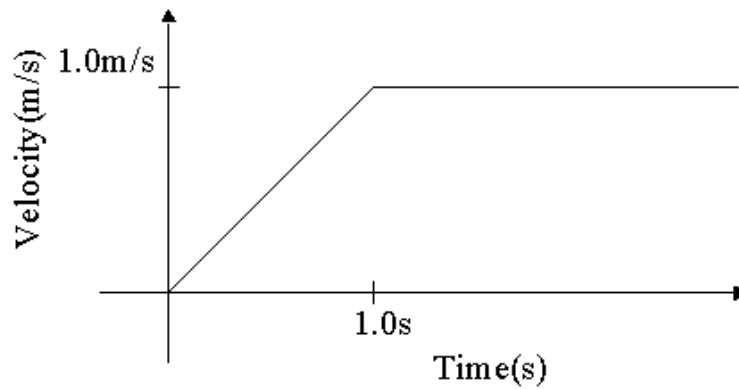


Fig.3-7: Velocity plan

が分かる。

3.1.5 実験

本節では、提案手法の有効性を示すために行った実験結果を示す。実験は以下に示す環境で行った。ゴールをロボット座標系で (1.8m,1.0m) におき、また障害物は、50cm 四方のダンボールとし、ロボットの初期位置から 1.0m 離れた地点に設置した。Fig.3-10 に実験環境の図を示す。

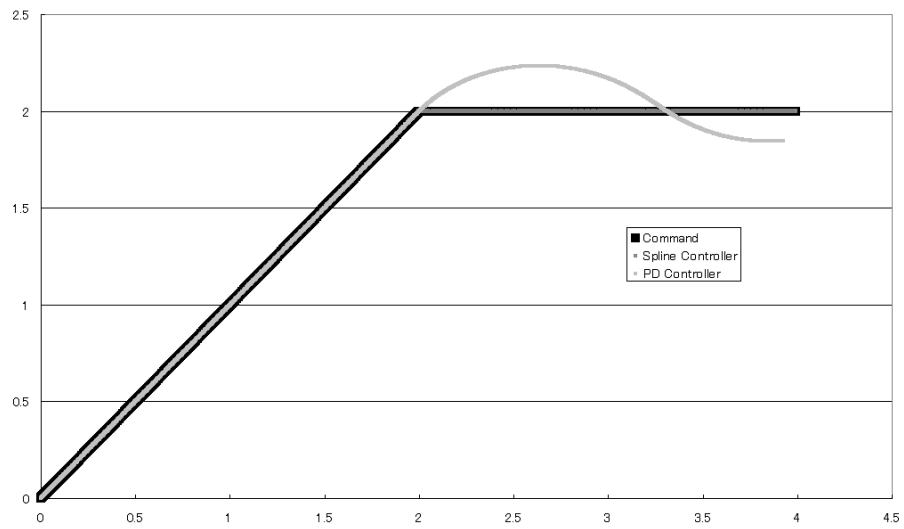


Fig.3-8: Position response

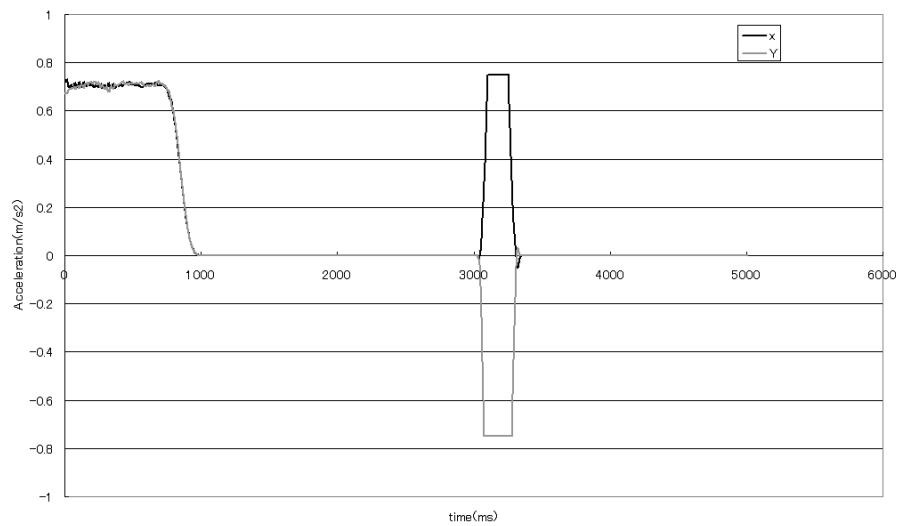


Fig.3-9: Acceleration response

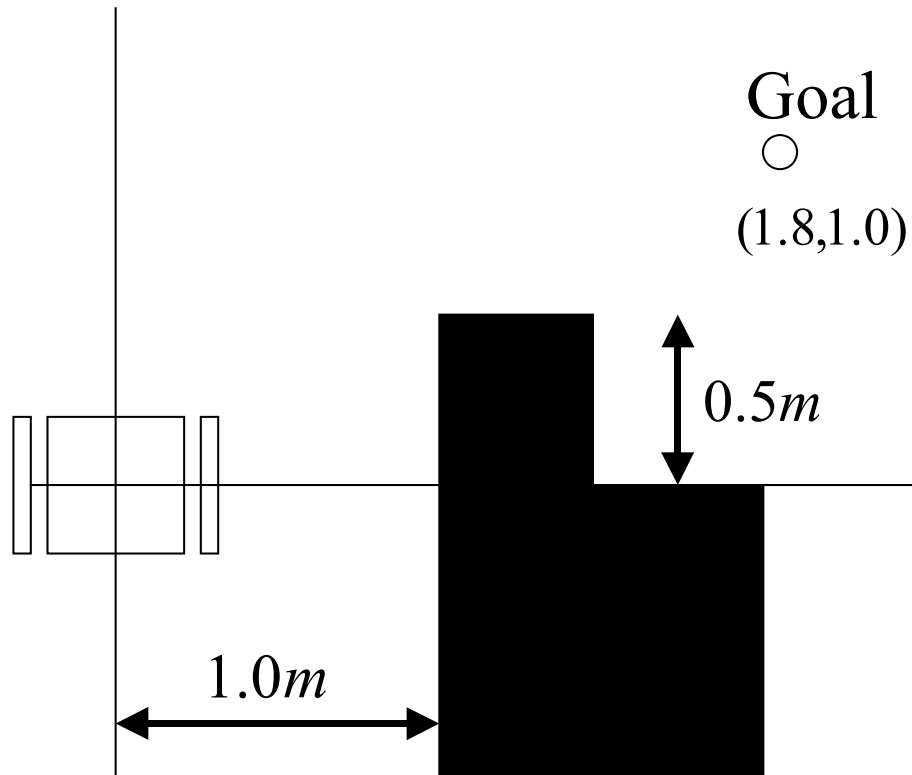


Fig.3-10: Experimental environment

Fig.3-11 に実験結果を示す。エンコーダから得たモータの回転角度から、位置応答値を得た。また左右両輪の回転角応答値を Fig.3-12、3-13 に示す。

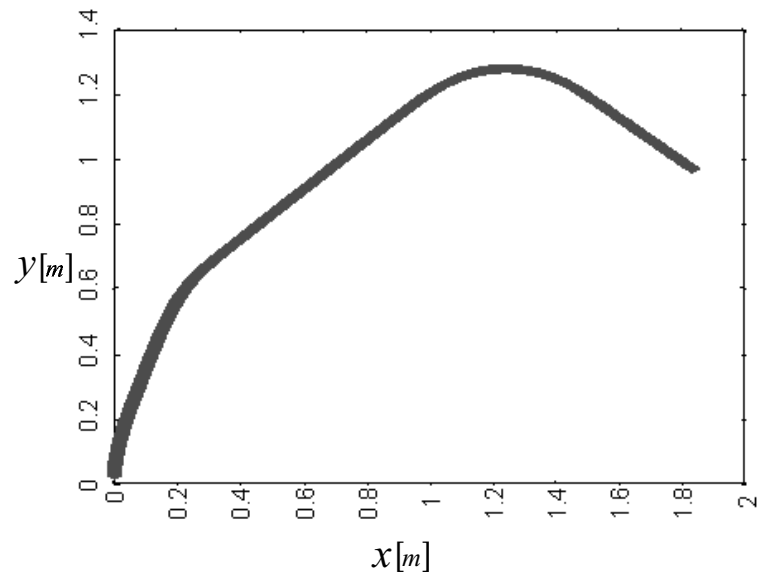


Fig.3-11: Position response (experiment)

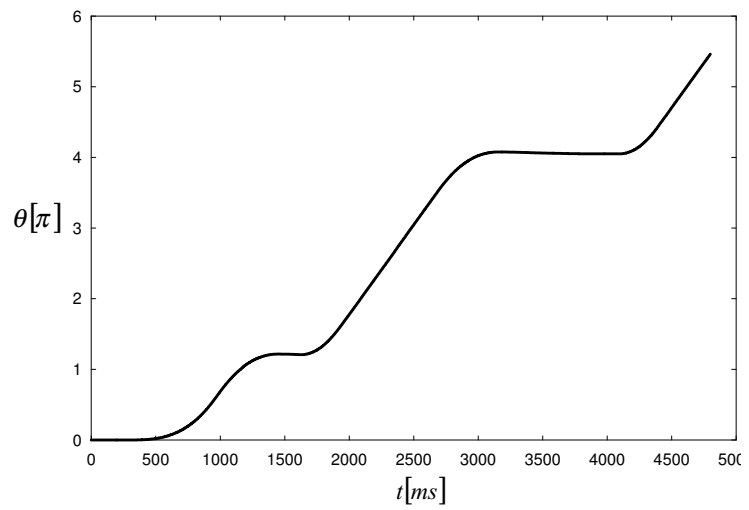


Fig.3-12: Rotation angle response (RIGHT)

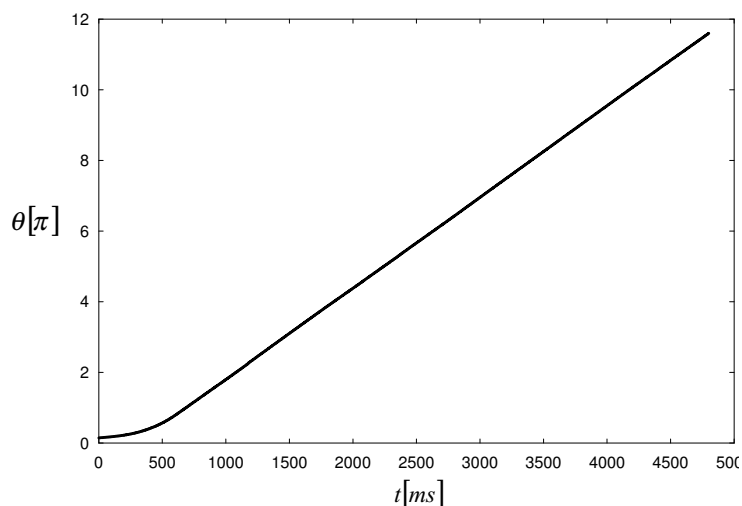


Fig.3-13: Rotation angle response (LEFT)

3.2 路面環境を考慮した速度指令値の生成

時間スプライン近似法の実現には、単位時間あたりの移動ロボットの移動量を知る必要がある。そのため、移動ロボットの速度計画法が必要となる。本節では路面環境を考慮した速度指令値の生成法について示す。さらに、本章の前半で述べた時間スプライン近似法に基づいた軌道計画法と組み合わせることで、路面外乱により生じる移動ロボットの振動を低減できることを数値シミュレーションにより示す。

3.2.1 垂直方向の加速度の計算

移動ロボットが路面から受ける力は Fig.3-14 のようにモデル化できる。

モータに外乱オブザーバを適用しているため、指令速度を一定とすると、路面に凹凸があった場合でもモータの出力回転速度は一定となる。Fig.3-14 のような凹凸があった場合、地面の凸部分から移動ロボットは外乱を受ける。この外乱推定のために、左右それぞれの車輪の駆動モータに Fig.3-15 に示す反力推定オブザーバを適用する。反力推定オブザーバでは、反力外乱のみを推定するため、外乱推定過程において予め同定した摩擦、慣性変動、トルク定数変動の変動が τ_{init} として差し引かれている^[11]。

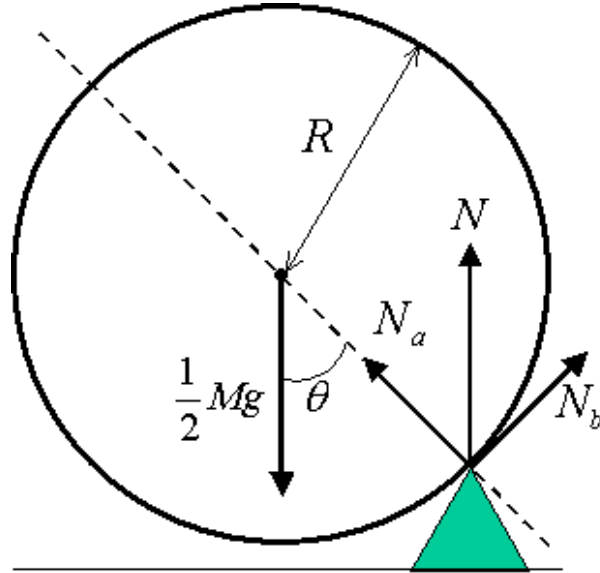


Fig.3-14: The model of the wheel

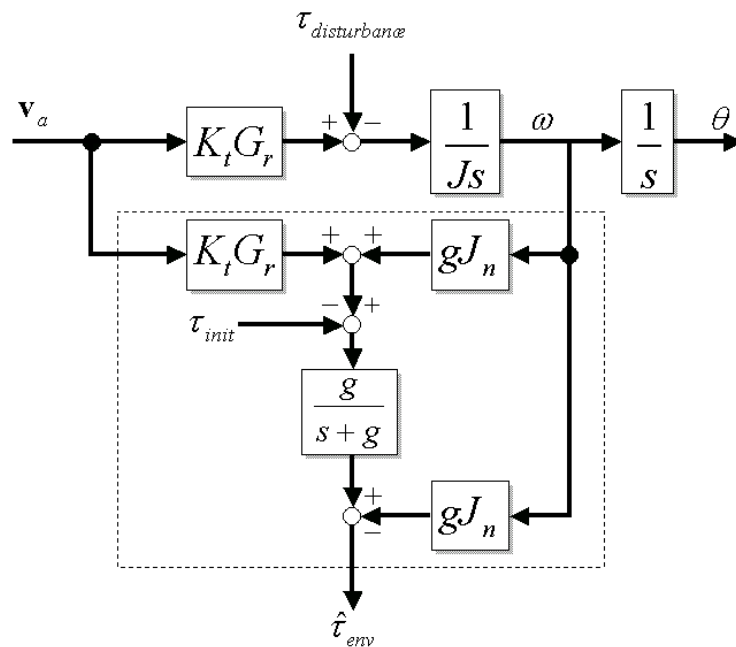


Fig.3-15: The reaction force estimation observer

モータへの入力電流とモータの回転速度応答から外乱トルクを計算する。移動ロボットの車輪には Fig.3-14 から次の外乱が加わると仮定する。

$$N_a = \frac{1}{2}Mg \cos \theta \quad (3.14)$$

$$N_b = \frac{1}{2}Mg \sin \theta \quad (3.15)$$

車輪の接線方向の力によって車軸にかかるトルクが反力推定オブザーバにより $\hat{\tau}_{env}$ として計算される。

$$\begin{aligned} \hat{\tau}_{env} &= RN_b \\ &= \frac{1}{2}MgR \sin \theta \end{aligned} \quad (3.16)$$

ロボットが段差を乗り越える瞬間に車輪が浮いた状態では、ロボットの垂直方向にかかる外力 $F_{z_{env}}$ は N_a によって与えられる。 N_a は反力推定オブザーバによって算出された $\hat{\tau}_{env}$ によって計算される。

$$F_{z_{env}} = N_a \cos \theta - \frac{1}{2}Mg \quad (3.17)$$

$$N_a = \sqrt{\left(\frac{1}{2}Mg\right)^2 - \left(\frac{\hat{\tau}_{env}}{R}\right)^2} \quad (3.18)$$

最終的に障害物を乗り越えることによる垂直方向の加速度は、ロボットの質量を M とすると式となる。同式を用いることによって加速度センサを用いずとも路面に対して垂直方向の振動に寄与する路面外乱による等価的な加速度応答を知ることが可能となる。

$$\ddot{x}_{env} = \frac{F_{z_{env}}}{M} \quad (3.19)$$

移動ロボットが Fig.3-14 の障害物を乗り越える場合、車輪の中心は凸部分と車輪の接点を中心とする円軌道を描く。ロボットの進行方向の単位ベクトルを i 、垂直方向の単位ベクトルを k とすると、車輪の中心位置 x 、速度 \dot{x} 、加速度 \ddot{x} は次の式となる。

$$x = iR \sin \omega t + kR \cos \omega t \quad (3.20)$$

$$\dot{x} = iR\omega \cos \omega t - kR\omega \sin \omega t \quad (3.21)$$

$$\ddot{x} = -iR\omega^2 \sin \omega t - kR\omega^2 \cos \omega t \quad (3.22)$$

3.2.2 乗り心地の評価

本章では、時間スプライン近似法に基づいた軌道計画の際に必要な速度指令について乗り心地評価を用いて決定する。乗り心地の評価には、国際規格である ISO2631-1^[10] を用いる。ISO2631-1 では全身がさらされる振動に対して人体に与える影響する度合いを各周波数ごとに定めている。ISO2631-1 では $f_1 = 0.1Hz$ から $f_{37} = 400Hz$ まで、 $\frac{1}{3}$ オクターブごとの周波数について評価を行う。

$$a_i = \sum_t \ddot{x}_{env} e^{-j2\pi f_i n} \quad (3.23)$$

a_i に ISO2631-1 で示された重み関数 W_i を用いて各周波数ごとの重み付けを行い、次の式で合成して乗り心地の評価とする。

$$a_W = \left[\sum_i (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.24)$$

本論文では a_W が以下の条件の時、乗り心地がよいと判定する。

$$1.0 < a_W < 2.0 \quad (3.25)$$

3.2.3 最適な速度指令値の計算

a_W が (3.25) 式を満たさなかった場合、速度を変化させ、その時の a_W を推定する。ロボットの周波数ごとの揺れ加速度 \ddot{x} はモータの角速度 ω^2 に比例する以上から、現在の a_i からモータの角速度が $\frac{1}{3}$ オクターブ遅くなった場合、ロボットの速度 v_0 が v_1 に変化した場合の i 番目の周波数 f_i および振幅 a_i は以下となる。

$$v_1 = kv_0 \quad (3.26)$$

$$f_{i+1} = kf_i \quad (3.27)$$

$$a_{i+1} = k^2 a_i \quad (3.28)$$

以上より a_{W_1} を (3.29) 式により推定することができる。

$$a_{W_1} = \left[\sum_i (W_i a_{i+1})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.29)$$

a_W が (3.25) 式を満たすまで計算を繰り返す。この時繰り返した回数を j とすると得られた推定速度 v_j を速度指令値とする。 j 回繰り返したときの a_{W_j} は次のようになる。

$$a_{W_j} = \left[\sum_i (W_i a_{i+j})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.30)$$

a_{W_j} が (3.25) 式を満たした時の速度は次のようになる。

$$v_j = k^j v_0 \quad (3.31)$$

最終的に得られたこの値を速度指令値として使用する。

3.2.4 シミュレーションによる検証

提案した手法の有効性を確認するため、計算機を用いたシミュレーションを行った。シミュレーション環境を Fig.3-16 に示す。

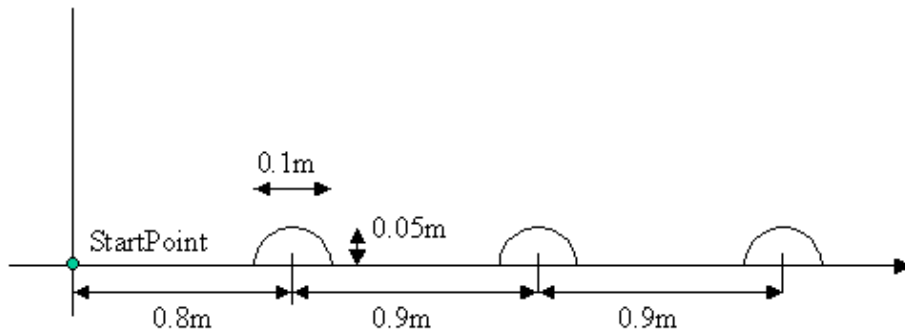


Fig.3-16: The simulation environment

図に示すように平面に半円の障害物があり、移動ロボットはこれを乗り越えるものとする。障害物は 0.9m 間隔で設置され、半径 5cm の半円とした。なお、移動ロボットは指令速度に応じた直進運動をするものと仮定し、初速は 2.0m/s を与えた。また、加速度指令値は 2.0m/s² とした。このときの反力推定オブザーバの外乱推定値と速度指令値を Fig.3-17 に示す。Fig.3-17 から分か

るように、1秒後に外乱推定値から速度指令値を再計算し、最終的に 1.4m/s の速度に安定している。また、速度指令値が変化している箇所において、速度変化は 2.0m/s^2 を保っている。これは時間スプライン近似法を使用したためであり、連続的な速度変化を行ったことがわかる。

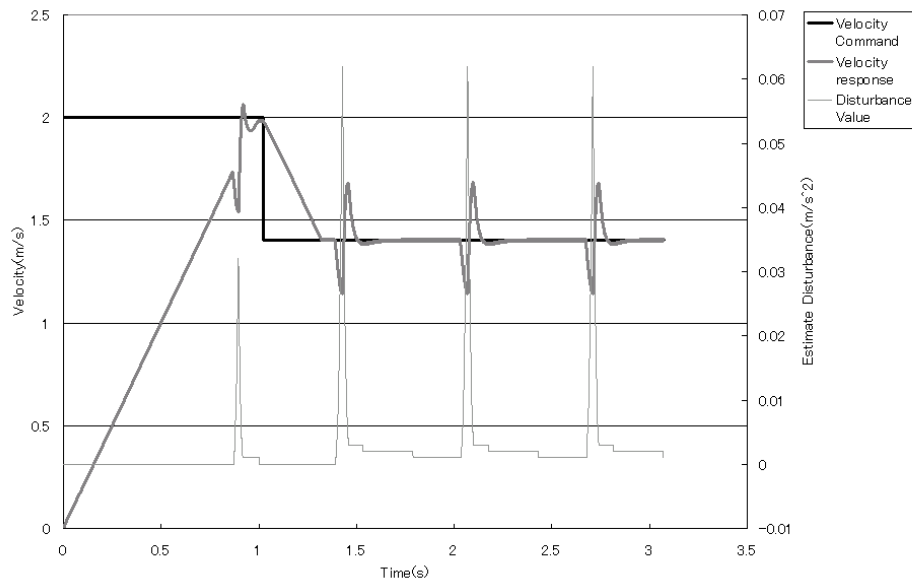


Fig.3-17: The simulation result: estimated disturbance value, velocity response and velocity command

次に外乱推定値をフーリエ変換し、周波数ごとのスペクトルを求める。0～1秒間の周波数ごとのスペクトルを Fig.3-18 に示す。

得られた a_i から a_W を計算したところ、2.26 となった。この結果から速度指令値を減少させ、速度指令値を 1.4m/s に設定した。2～3秒間の周波数ごとのスペクトルを Fig.3-19 に示す。

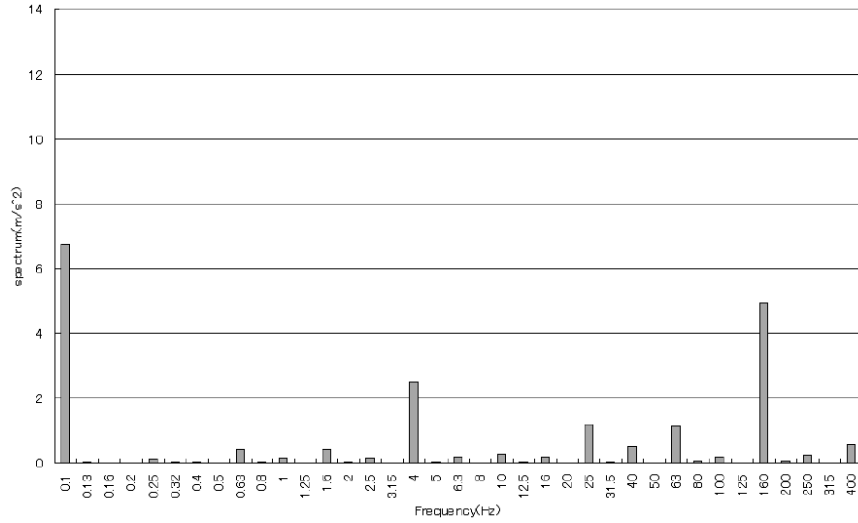


Fig.3-18: The spectrum of each frequency from 0.0 to 1.024 second

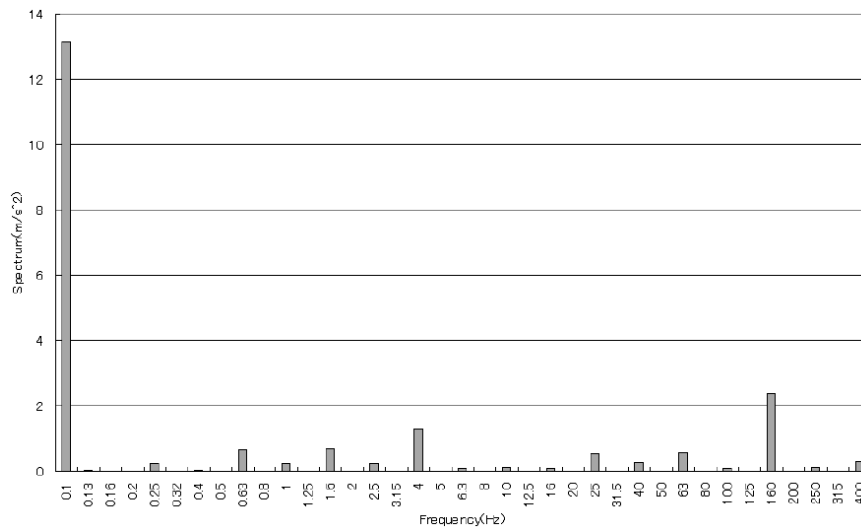


Fig.3-19: The spectrum of each frequency from 2.048 to 3.072 second

Fig.3-19では、0.1Hzのスペクトルは大きくなっているが、ISO2631-1で規定されている影響度の高い周波数領域(3.15~120Hz)のスペクトルは小さくなっていることがわかる。再計算された a_W は1.823となった。以上の結果から、ロボットは垂直方向の加速度を元に最適な速度を計算していることが確認できた。

また、ロボットの加速度応答値はFig.3-20となった。外乱が発生した場合は加速度応答は大きくなっているが、速度指令値の変化時や加速時の値は設定された 2.0m/s^2 が最大となっている。このことから、予測制御により x 方向の加速度を連続的にできていることがわかる。

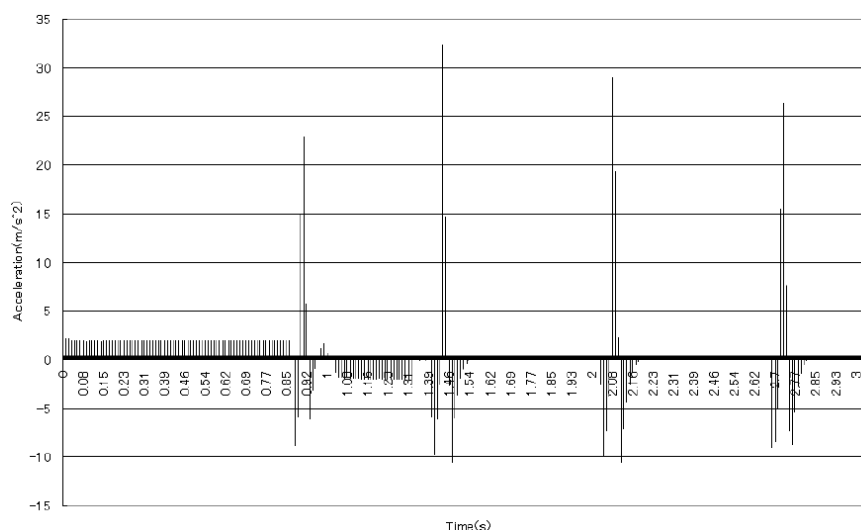


Fig.3-20: Acceleration response

3.2.5 実験による検証

本章では、提案手法の有効性を示すため、本論文で提案したシステムにて実験を行った。実験では移動ロボットに直進移動をさせて、その時の振動を算出し最適な速度を求めるシーケンスを実証した。初期速度指令値として 0.65m/s を与え、直進運動を行った。その結果、最適な速度指令値として 0.36m/s を算出し、その速度指令値に基づいて走行を行った。それぞれの速度指令値における周波数ごとのスペクトルをFig.3-21、Fig.3-22に示す。また、Fig.3-23の速度応答から、ロボットは急激な加速度変動なしに(連続的に)動作していることが分かる。

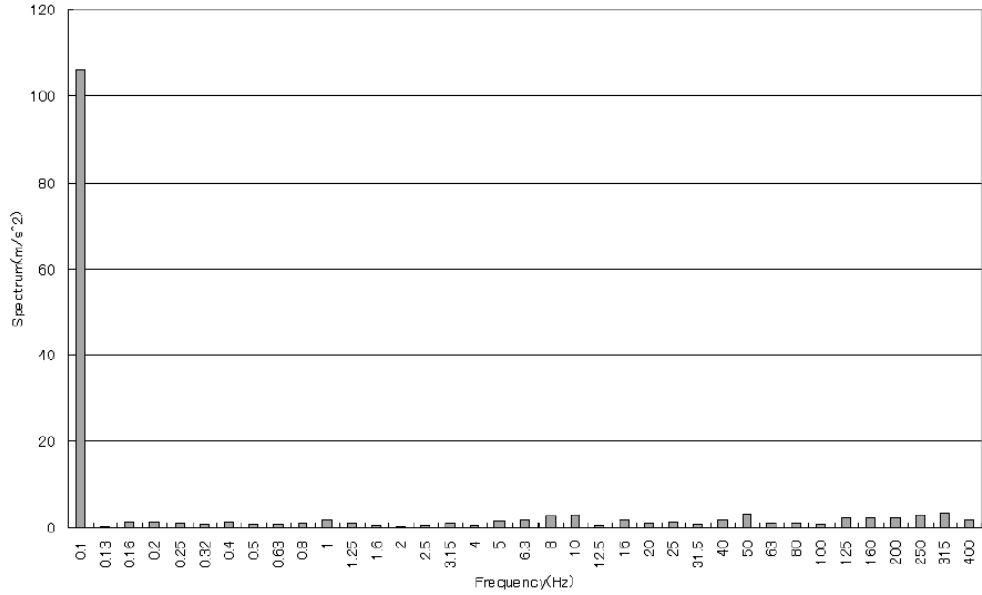


Fig.3-21: Experimental result (0.65m/s)

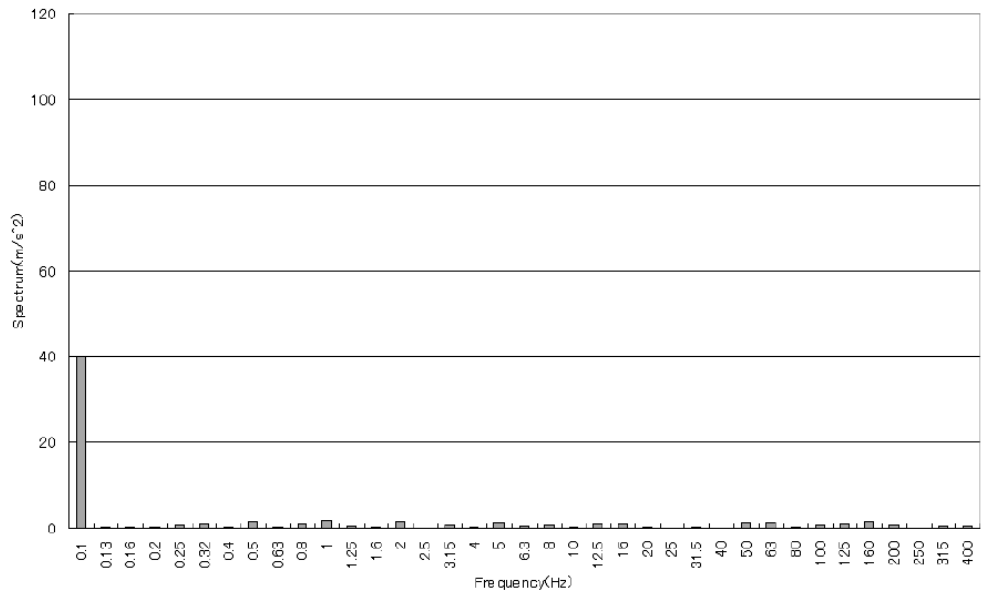


Fig.3-22: Experimental result (0.36m/s)

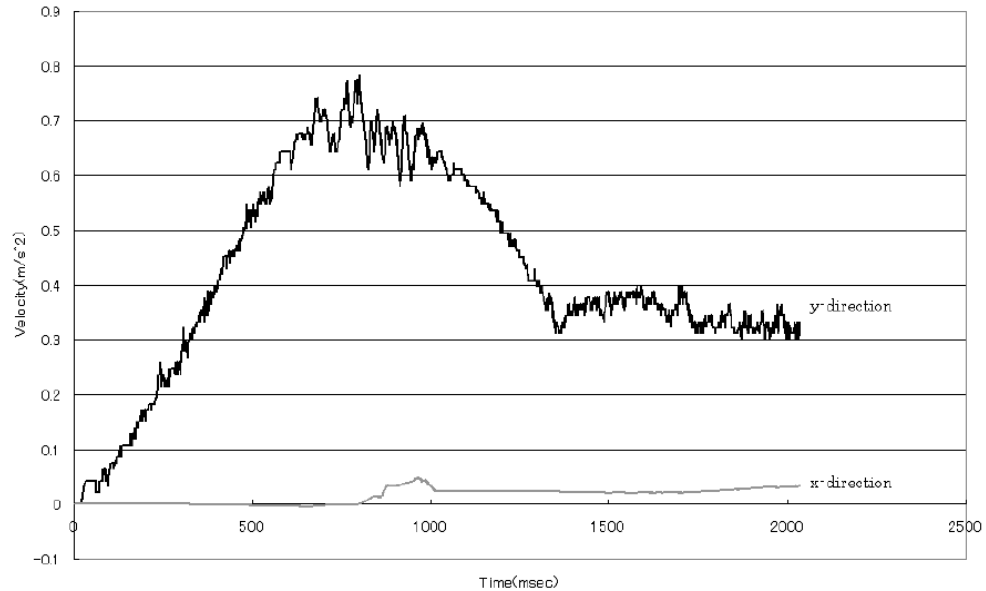


Fig.3-23: Experimental result (velocity response)

3.3 3章のまとめ

本章では、時間スケールおよび空間スケールを統合化した軌道計画法として、予め定められた速度指令計画に基づいた時間スプライン近似法を用いた手法を示した。さらに、軌道計画により事前に求められた位置、速度、加速度指令値で構成された予見制御を適用することで、位置だけでなく速度、加速度変化までが連続的となる軌道追従制御法を示した。提案手法の有効性については、シミュレーションおよび実機実験により確認を行った。

提案する時間スプライン近似法に基づく軌道計画法の有用性を示すため、乗り心地改善制御への応用例についても検証を行った。乗り心地改善制御では、移動ロボットの駆動輪に作用する外乱より、路面から受ける等価的な振動外乱を推定し、この振動外乱情報と ISO 規格に定められている乗り心地評価指標を用いることで、提案する軌道計画法において必要となる速度指令値を定めている。提案する軌道計画法に基づいた乗り心地改善制御の有効性については、周期的な凹凸が存在する路面を仮定した数値シミュレーションと実験により確認した。

第 4 章

灰色予測と流体モデルを用いた軌道計画

4.1 本章の概要

本章では、時間スプライン近似法に基づいた軌道計画を、障害物が存在する環境下での軌道計画と移動物体追従のための軌道計画へ拡張するため、移動追従対象の位置推定と流体モデルを用いた軌道計画法について述べる。本論文において、追従対象は人間のような低速移動物体を想定している。移動ロボットのゴールが静的な物体（停止している人物や定点など）であれば、ゴールまでの軌道を比較的簡単に求めることができる。しかしながら、追従対象が動的な物体であった場合、ゴールの位置も動的に変化するため軌道を計画することが難しくなる。このため、動的に変化する追従対象の位置をその行動から予測し、軌道計画を行う。本論文では追従対象の行動予測に灰色予測^{[41][42]}を用いる。

灰色予測で追従対象の位置を推定後、追従対象までの軌道計画を行う。本論文では軌道計画法として、流体モデルを用いた軌道計画法を提案する。

4.2 灰色予測を使用した追従対象の行動予測

4.2.1 灰色理論と灰色モデル

追従対象の行動モデルの変化を知るために、各サンプリング時に追従対象の測定位置から行動モデルを推定する。追従対象の行動モデルの推定方法として、本論文では灰色理論に基づいた灰

色モデルを使用する。システム分析において、数理解析と評価手法の適用には大量のデータを必要とする。しかしながら、大量のデータがあるにもかかわらず、正確なデータを入手することが困難な状況が存在する。データが完全にわかっている状況を白色、まったくわかっていない状況を黒色とすると、上記の状態は灰色な状態と呼べる。灰色理論では、情報が不足条件下にあるデータが非完璧な状態であって、部分的に既知であるが部分的には未知である状態を灰色と定義し、情報の数値化や数量化を強調して情報内に含まれている数理規則を整理、発見することを目的としている。

灰色理論では、与えられた数列から新しく有意義なデータを算出するために、累加生成法 (Accumulated Generating Operation: AGO) を用いる。取得したデータ数列を原始数列、その中の各データを原始データと呼び、 k 番目の値を $x^{(0)}(k)$ とする。 $x^{(0)}$ を $x^{(1)}$ の第1次 AGO データと定義すると (4.1) 式のように表現することができる。

$$x^{(1)}(k) = \sum_{l=1}^k x^{(0)}(l) \quad (4.1)$$

(4.1) 式を図で表すと Fig.4-1 となる。

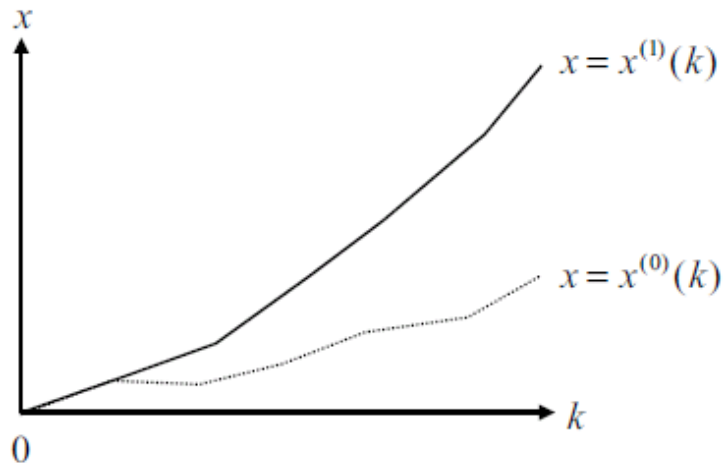


Fig.4-1: The relation of proto-sequence and cumulative sequence

Fig.4-1 に示すように、原始データを単純累加するだけの式であり、その結果、数列の性質として変化する傾向を用意に強調することができる。ただし、原始データは非負である必要がある。一方、

AGO データを原始データに戻すには、累減生成法 (Inverse Accumulated Generating Operation: IAGO) を用いる。(4.2) 式に第1次 IAGO を示す。

$$x^{(0)}(k) = \begin{cases} x^{(1)}(1) & (k = 1) \\ x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k - 1) & (k > 1) \end{cases} \quad (4.2)$$

4.2.2 原始データの検定

灰色予測を行うためには、使用する原始データが予測に用いることが可能かどうか事前検定を行う必要がある。事前検定は(4.3)式に示すクラス間比 $\sigma^{(0)}(k)$ を用いる。ここで、 n は推定に用いる原始データの総数である。

$$\begin{aligned} \sigma(k) &= \frac{x(k-1)}{x(k)} \\ \sigma^{(0)}(k) &\in (e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+1}}) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Table 4.1: Allowance zone of $\sigma(k)$

n=4	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.670320046, 1.491824698]$
n=5	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.716531310, 1.395612425]$
n=6	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.751477292, 1.330712198]$
n=7	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.778800783, 1.284025417]$
n=8	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.800737402, 1.248848869]$
n=9	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.818730753, 1.221402758]$
n=10	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.833752918, 1.199396102]$
n=11	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.846481724, 1.181360413]$
n=12	$\sigma^{(0)}(k) \in [0.857403919, 1.166311440]$

取得した原始データが(4.3)式を満たさない場合は数値変換処理が必要になる。数値変換方法としては、平方変換、対数変換、平滑処理、スケール変換などがある。本論文では歩行する人間を追従する場合を扱っている。人間の歩行速度はそれほど速くなく急激に変化することはないため、本論文では座標変換を用いる。(4.3)式が許容区間内で収まらないケースは、 $x(k-1)$ と $x(k)$ の差が大きいか、もしくは $x(k-1)$ と $x(k)$ の差と比較して $x(k)$ の値が小さい場合である。原始データのサンプリングタイムが短ければ人間の移動速度から考えると $x(k-1)$ と $x(k)$ の差はさほど大

きくはならないことは明らかである。しかしながら追従対象の人間が原点にいた場合、(4.3)式が許容区間に収まらない場合がある。このため、許容区間に収まらなかった場合は座標変換を行い、(4.3)式が許容区間に収まるように調整する。位置推定後、座標再変換を行うことにより、追従対象の位置を計算する。

例えば(4.4)式では、 σ が最小で0.5となり許容区間に収まらない。(4.4)式を+1になるよう座標変換を行うと許容区間に収まる。

$$x_1 = (0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07, 0.08, 0.09, 0.10) \quad (4.4)$$

$$x_2 = (1.01, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, 1.06, 1.07, 1.08, 1.09, 1.10) \quad (4.5)$$

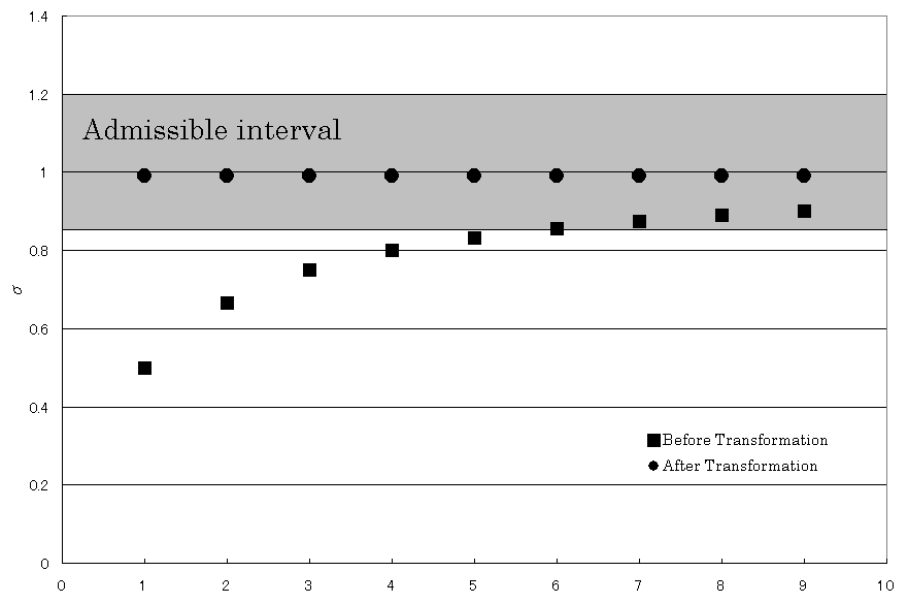


Fig.4-2: Example of allowance zone change by coordinate translate

4.2.3 灰色予測

灰色理論では、観測システムの動的モデルを微分方程式を用いて推定する。このモデルを灰色モデル (Grey Model: GM) と呼ぶ。通常、(4.6)式に示す1階で入力変数が1個のモデルを使用

する。

$$GM(1,1) = \frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4.6)$$

t はサンプル数、 a と b は未定係数であり、観測システムの動特性を決定する。さらに得られた $GM(1,1)$ から観測システムの動作予測を行うことが可能となる。本研究ではこの予測、灰色予測を用いて、追従対象の行動予測値とのずれから行動モデルの変化の大きさを求める。

灰色予測では、観測システムについて事前情報は必要なく、観測される原始データに基づき、観測システムの動的モデルを推定する。このとき必要なデータ数は最小4個であり、複雑な計算を必要とせず計算の高速化を実現できる。移動ロボットの制御は1msのサンプリングタイムで行うため、高速で追従対象物体の位置予測を行う必要がある。

以下に灰色予測の流れについて説明する。

はじめにサンプリングデータを用いやすくするために、(4.6) 式を差分方程式として表す。式 4.6 の第1項を灰色導関数として離散形式で表す。

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = x^{(0)}(k+1) \quad (4.7)$$

このとき (4.6) 式を灰色差分方程式として (4.8),(4.9) 式に示す。

$$x^{(0)}(k+1) = -az^{(1)}(k) + b(k=1,2,\dots,n) \quad (4.8)$$

$$z^{(1)} = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k+1) + x^{(1)}(k)) \quad (4.9)$$

ここで、 n は推定に用いる原始データの総数である。 $k=2,\dots,n$ での $x^{(0)}$ と $x^{(1)}$ の値を (4.8) 式に代入し、(4.10) 式となる。

$$Y = B\phi \quad (4.10)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) & x^{(0)}(3) & \dots & x^{(0)}(n) \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(1)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(3) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n) + x^{(1)}(n-1)) & 1 \end{bmatrix}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} a & b \end{bmatrix}^T$$

ここで(4.10)式の偏差を(4.11)式とおき、 $n \geq 2$ のとき最小自乗法を適用すると(4.12)式の結果を得る。

$$\epsilon = Y - B\phi \quad (4.11)$$

$$\hat{\phi} = \begin{bmatrix} \hat{a} & \hat{b} \end{bmatrix}^T = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (4.12)$$

得られた ϕ を(4.6)式に代入することにより、観測システムの推定を行うことができる。このモデルから原始データを(4.14)式のように予測することができる。

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = (x^{(1)}(1) - \frac{\hat{b}}{\hat{a}})e^{-\hat{a}k} + \frac{\hat{b}}{\hat{a}} \quad (4.13)$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (4.14)$$

4.2.4 灰色理論の有効性

灰色理論の有効性を確認するため、従来の統計手法との結果を比較する。従来の統計手法は3次多項式近似を用いた。モデルとして、 $y = x^2$ の式で表される軌道の推定を行った。追従対象の位置は10ms毎にサンプリングされるものとし、100msごとに100ms後の位置を推定することとした。結果をFig.4-3に示す。

また、2つの予測方法の精度を比較するため、誤差率を(4.15)式を用いて算出した。

$$e = \frac{1}{n} \sum_{k=s-n+1}^s \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\% \quad (4.15)$$

Table 4.2: Accuracy of 2 prediction approach

Grey prediction	7.78%
3 time polynomial approximation	9.63%

Fig.4-3から灰色理論では、追従対象の位置を高い精度で予測していることが分かる。3次多項式は軌道を推定できているように見えるが、Table.4.2に示すように誤差率が高い。これは推定値は軌道上を推定しているが、100ms後の座標の推定値と100ms後の実測値がずれているためである。以上から、灰色理論を用いた推定では100ms後の座標値を高い精度で予測できていることが分かる。これにより、灰色理論の有効性を確認した。

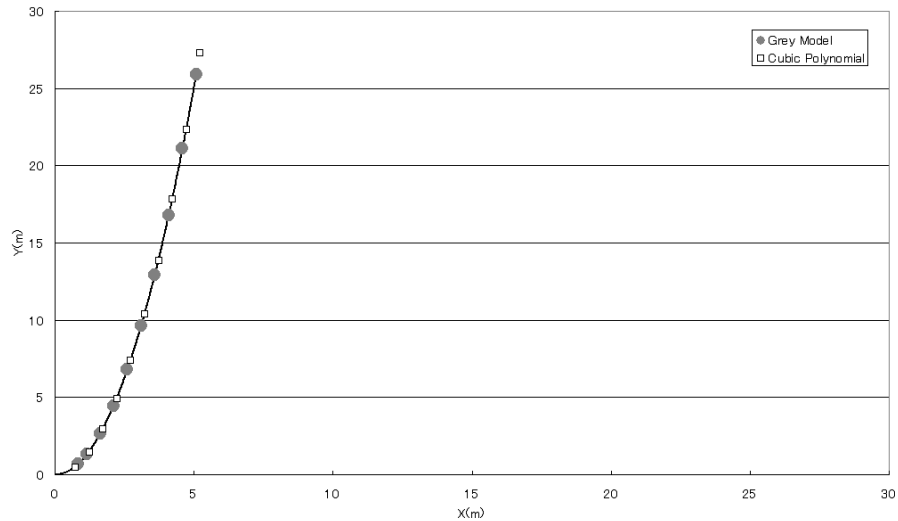


Fig.4-3: Grey theory and polynomial approximation

4.3 流体モデルを用いた軌道計画法

時間スプライン近似法を用いるためには、未来の位置指令値を使用する必要があり、移動ロボットの軌道を計画しなければならない。この時、移動ロボットの動作環境内は静的とは限らず、追従対象や障害物が動的に存在することが多い。リアルタイムに追従対象の位置変更や障害物回避を行うためには、短時間で軌道を再計算することが必要となる。ポテンシャル法や複雑な計算を必要とする軌道計画法では、軌道再計算時間が大きくなってしまふ欠点がある。本研究ではその問題を解決するために流体モデルを使用した軌道生成法を提案する。この手法を用いることにより、追従対象が移動した場合や障害物が存在した場合でも、流体の速度分布を元に軌道生成を行うため、短時間で軌道を生成することが可能となる。

4.3.1 流体モデルの概要

流体モデルでは、ロボットのスタート地点からゴール地点に向けて流れる流体が存在すると仮定して軌道生成を行う。流体は壁（もしくは障害物）から離れるほど、速度が速くなる。この速度が速い地点を、最も安全に（障害物にぶつからずに）ゴールまで到達できる軌道として選択する。

流体は環境に応じて流れを変化させることができる。軌道計画においてこの流体の特性を利用することにより、ゴールの位置が変化することや通路に障害物が存在するなどの環境変化がある場合でも、軌道を変化させることができる。流体速度は計算により導き出せる。また環境が変化した箇所のみ再計算を行うことにより軌道生成が可能なため、従来のポテンシャル法より少ない計算量で最適な軌道を生成できる。本論文では流体モデルの解析として SIMPLE 法 (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations) とスタッガード格子を用いる。この手法により、ロボットの動作環境における流体モデルを構築し、その流れから環境に最適な軌道を生成する。

4.3.2 流体の支配方程式

ある区域内 (コントロールボリューム) を考えると、流れによる流入量、および出入量は等しくなる。X 方向の速度成分 u に関する運動方程式は (4.16) 式で示される。

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho u u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial p}{\partial x} + B_x + V_x \quad (4.16)$$

ここで ρ は密度、 μ は粘性係数、 p は圧力、 B_x は X 方向の体積力 (温度差による浮力)、 V_x は右辺第 1 項以外の粘性項を示す。なお、本論文では流体の厳密な解を求める必要はないため、簡単化のため密度一定で温度変化のない 2 次元非圧縮流体を用いることとする。そのため、 $B_x = 0$ となる。(4.16) 式では圧力が存在する。局所の圧力勾配が流体の運動の駆動力として作用するが、その流体運動は質量保存の制約を受ける。すなわち、コントロールボリュームの流出入量が内部の質量の時間的変化とつりあう必要がある。質量保存式は (4.17) 式となる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho u) = 0 \quad (4.17)$$

なお、本論文では密度一定の流体を仮定しているため、 $\text{div} u = 0$ となる。以上の運動方程式と質量保存式から流体の流速 u を求める。

(4.16) 式および (4.17) 式をテンソル形で書き直すと (4.18)、(4.19) 式となる。

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\nu \frac{\partial u_j}{\partial x_i}) \quad (4.19)$$

ここで ν は流体の動粘性係数で $\nu = \mu/\rho$ である。(4.18),(4.19) 式を一般形保存式で表すと (4.20) 式となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(u\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(v\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) = S \quad (4.20)$$

ここで ϕ は一般従属変数、 Γ は拡散係数、 S は生成項である。質量保存式および運動方程式について、各変数は Table.4.3 で表される。

Table 4.3: Parameter of general equation

Control equation	ϕ	Γ	S
Mass conservation method	1	0	0
u equations of motion	u	ν	$-\frac{\partial p}{\partial x}$
v equations of motion	v	ν	$-\frac{\partial p}{\partial y}$

導いた支配方程式は非線形項を含むため、用意に解析解を得ることができない。しかしながら支配方程式は対象領域全体を支配すると同時に、対象領域の一部であるコントロールボリュームにおいても成り立つ関係式である。コントロールボリュームが十分に小さな領域の場合、その内部の諸量の変化は線形であると考えても大きな誤差は生じない。したがって対象領域を多数のコントロールボリュームに分割すれば、個々のコントロールボリュームについて線形近似を行った支配方程式の解は、そのコントロールボリューム内に限って真の解を近似できる。上記のように微分方程式によって表された変数の連続的分布に関する情報を、コントロールボリュームの代表点における変数の方程式に書き改めることを方程式の離散化といい、導出された方程式を離散化方程式と呼ぶ。

4.3.3 スタッガード格子

流れの数値解析における場合、運動方程式を解く際に圧力場が必要となる。圧力場は質量保存式から導出する必要があり、いくつかの手法が提案されている。^{[43][44][45][46][47][48]} 本論文は其中で SIMPLE 法を用いる。SIMPLE 法では各速度成分と圧力を直接に扱う方法であり、流体の解析

に広く活用されている。このSIMPLE法では圧力そのものではなくその補正量を従属変数とする圧力補正式を質量保存式として扱う。速度が既知の境界では補正値の勾配が0となり、圧力に関する境界条件の設定が極めて容易になっている点にこの手法の大きな利点がある。本論文では障害物が存在するコントロールボリュームの流速を0に設定する。ロボットの動作環境から軌道計画を導出するための境界条件の設定がし易いことから、本論文ではSIMPLE法を用いる。

圧力補正式より得られる圧力の情報を効果的に運動方程式にフィードバックするには、各速度成分をコントロールボリュームで定義するスタガード格子を採用する必要がある。スタガード格子は矩形格子上での非圧縮流れの計算アルゴリズムに用いられる格子体系である。流体で設定される圧力、温度などのスカラー成分をコントロールボリュームの中心に配置し、流速ベクトル成分はコントロールボリューム境界に配置する。 x 方向の流速成分 u と y 方向の流速成分 v はFig.4-4に示すように配置される。 u 、 v は、元の格子からメッシュ半分ずれた格子のセル中心に配置されていることになる。スタガード格子の利点として圧力や流速の数値振動を防ぐことに有効であることが知られている。^[44]

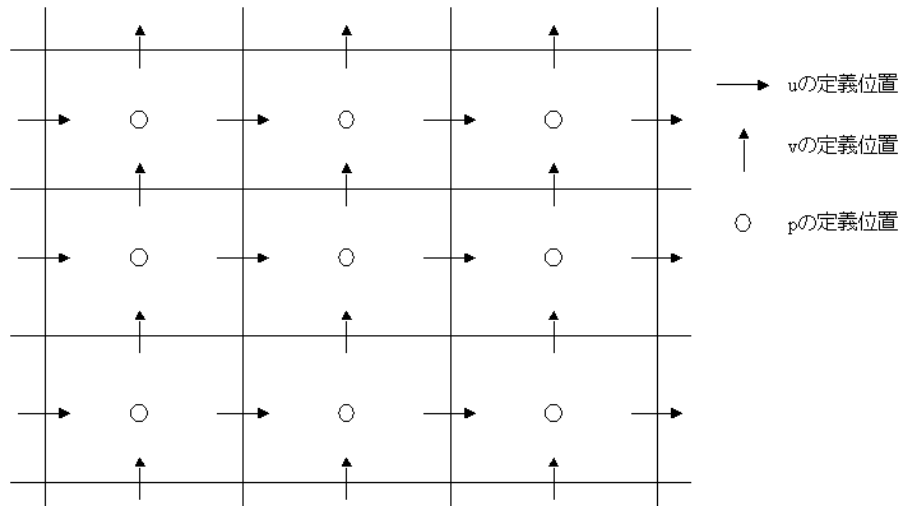


Fig.4-4: Stagard grid

4.3.4 一般形保存式の離散化

スタaggerド格子を使用し、(4.20) 式の離散化を行う。離散化を行うに当たり、Fig.4-5 の実線で囲むスカラーコントロールボリュームに注目する。なお、破線が u コントロールボリューム、一点鎖線が v コントロールボリュームを示す。

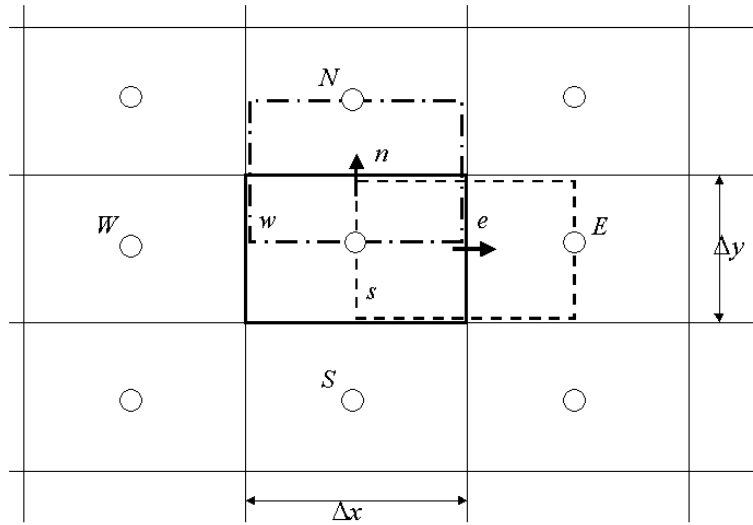


Fig.4-5: Segments in discretization

(4.20) 式を微小時間及びスカラーコントロールボリュームにわたり積分した後、時間刻みで割ると (4.21) 式となる。

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dx dy dt + \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (u\phi) - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} (v\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) dx dy dt \\ = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S dx dy dt \quad (4.21) \end{aligned}$$

(4.21) 式の左辺第 1 項は非定常項、第 2 項は対流及び拡散項、右辺は生成項となる。各項は (4.22), (4.23), (4.24) 式となる。

$$\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \frac{\partial \phi}{\partial t} dx dy dt = \frac{\Delta V}{\Delta t} (\phi_P - \phi_P^O) \quad (4.22)$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e \left\{ \frac{\partial}{\partial x} (u\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (v\phi - \Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) \right\} dx dy dt \\
 = & \Delta y \left\{ u_e \left(\frac{1}{2} \phi_E + \frac{1}{2} \phi_P \right) - \frac{\Gamma(\phi_E - \phi_P)}{\Delta x} - u_w \left(\frac{1}{2} \phi_W + \frac{1}{2} \phi_P \right) - \frac{\Gamma(\phi_P - \phi_W)}{\Delta x} \right\} \\
 & + \Delta x \left\{ v_n \left(\frac{1}{2} \phi_N + \frac{1}{2} \phi_P \right) - \frac{\Gamma(\phi_N - \phi_P)}{\Delta y} - v_s \left(\frac{1}{2} \phi_S + \frac{1}{2} \phi_P \right) - \frac{\Gamma(\phi_P - \phi_S)}{\Delta y} \right\} \quad (4.23)
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \int_s^n \int_w^e S dx dy dt = S \Delta x \Delta y = (S_C + S_P \phi_P) \Delta x \Delta y \quad (4.24)$$

ここで $\Delta V = \Delta x \Delta y$ である。(4.24) 式に見られるように生成項 S は線形化が施されるものとする。(4.21) 式に離散化された (4.22), (4.23), (4.24) 式を代入し、整理すると離散化方程式が得られる。

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_N \phi_N + a_S \phi_S + b \quad (4.25)$$

$$a_E = -\frac{1}{2} F_e + \frac{\Gamma \Delta y}{\Delta x} \quad (4.26)$$

$$a_W = \frac{1}{2} F_w + \frac{\Gamma \Delta y}{\Delta x} \quad (4.27)$$

$$a_N = -\frac{1}{2} F_n + \frac{\Gamma \Delta x}{\Delta y} \quad (4.28)$$

$$a_S = \frac{1}{2} F_s + \frac{\Gamma \Delta x}{\Delta y} \quad (4.29)$$

$$F_e = u_e \Delta y \quad (4.30)$$

$$F_w = u_w \Delta y \quad (4.31)$$

$$F_n = v_n \Delta x \quad (4.32)$$

$$F_s = v_s \Delta x \quad (4.33)$$

$$a_P = \frac{\Delta V}{\Delta t} + a_E + a_W + a_N + a_S + F_e - F_w + F_n - F_s - S_P \Delta x \Delta y \quad (4.34)$$

$$b = S_C \Delta x \Delta y + \frac{\Delta V}{\Delta t} \phi_P^O \quad (4.35)$$

なお、係数 a_P 内の $F_e - F_w + F_n - F_s$ はコントロールボリューム内の質量生成に対応しており、0 となる。

4.3.5 u および v 運動方程式

u および v 運動方程式はスタッガード格子を用いたことにより、コントロールボリュームを東西あるいは南北にずらして考える必要がある。例えば u 運動方程式については、Fig.4-5 において破

線で示した u コントロールボリュームにおいて考える。スカラーコントロールボリュームの e 検査面の中心が速度成分 u の定義点になるため、この定義点を P 、スカラー格子点 E を u コントロールボリュームの e 検査面とみなせる。同様に u コントロールボリュームの w 、 n 、 s 検査面を定義し、 u 運動方程式の積分を実行すると、(4.25) 式と同じ形の方程式が求まる。

$$a_P u_P = a_E u_E + a_W u_W + a_N u_N + a_S u_S + \Delta y(p_w - p_e) + b \quad (4.36)$$

v 運動方程式についても、 v コントロールボリュームについて同様の方法で積分すると、(4.37) 式となる。

$$a_P v_P = a_E v_E + a_W v_W + a_N v_N + a_S v_S + \Delta x(p_s - p_n) + b \quad (4.37)$$

4.3.6 圧力補正式

圧力場が既知であれば、(4.36),(4.37) 式の離散化方程式を用いて運動方程式を解くことができる。SIMPLE 法では圧力補正式を用いることにより、圧力場を算出する。真の速度 u を仮の圧力場 \tilde{p} のもとで運動方程式 (4.36) 式より得た予測値 \tilde{u} とその補正值 u' の和で表す。

$$u = \tilde{u} + u' \quad (4.38)$$

真の圧力 p も同様に設定する。

$$p = \tilde{p} + p' \quad (4.39)$$

(4.38),(4.39) 式を (4.36) 式に代入し、予測値 \tilde{u} と \tilde{p} が u 運動方程式を満たす点を考慮し、 \tilde{u} と \tilde{p} に付随する項目を消去する。

$$a_P u'_P = \Delta y(p'_w - p'_e) \quad (4.40)$$

$$u'_P = d_x(p'_w - p'_e) \quad (4.41)$$

v 運動方程式 (4.37) 式についても同様に考え、(4.42) 式の速度補正式を得る。

$$v'_P = d_y(p'_s - p'_n) \quad (4.42)$$

速度補正式を用いて圧力補正式を求める。

$$a_P p'_P = a_E p'_E + a_W p'_W + a_N p'_N + a_S p'_S + b \quad (4.43)$$

ここで

$$a_E = \Delta y d_{x_e} \quad (4.44)$$

$$a_W = \Delta y d_{x_w} \quad (4.45)$$

$$a_N = \Delta x d_{x_n} \quad (4.46)$$

$$a_S = \Delta x d_{x_s} \quad (4.47)$$

$$a_p = a_e + a_w + a_n + a_s \quad (4.48)$$

$$b = \tilde{F}_w - \tilde{F}_e + \tilde{F}_s - \tilde{F}_n \quad (4.49)$$

4.3.7 SIMPLE 法を用いた軌道計画法

運動方程式および圧力補正式から SIMPLE 法を用いて流体の動作を示すアルゴリズムは以下のようになる。

1. 圧力場 \tilde{p} を推測する
2. \tilde{u} 、 \tilde{v} を得るために運動方程式を解く
3. p' を (4.43) 式から求める
4. (4.39) 式を用いて p' と \tilde{p} から p を求める
5. 得られた p を新しく推測した \tilde{p} とし、収束解が得られるまで繰り返す

以上の方法により各コントロールボリュームの流速 u 、 v は求まる。なお、初期値として移動ロボットの存在するコントロールボリュームにおいて、移動ロボットの向いている方向に流体の速度を与える。移動ロボットの動作環境全体の流速を求めることにより、ロボットが現在いる位置のコントロールボリュームから、追従目標（ゴール）の存在するコントロールボリュームまでの

流れを計算できる。この流れをロボットの軌道とする。障害物が存在した場合、そのコントロールボリュームの流速を0として計算できる。そのため、動的な障害物が存在した場合でも境界条件を新たに設定するだけのため、簡単に軌道を変化させることができる。

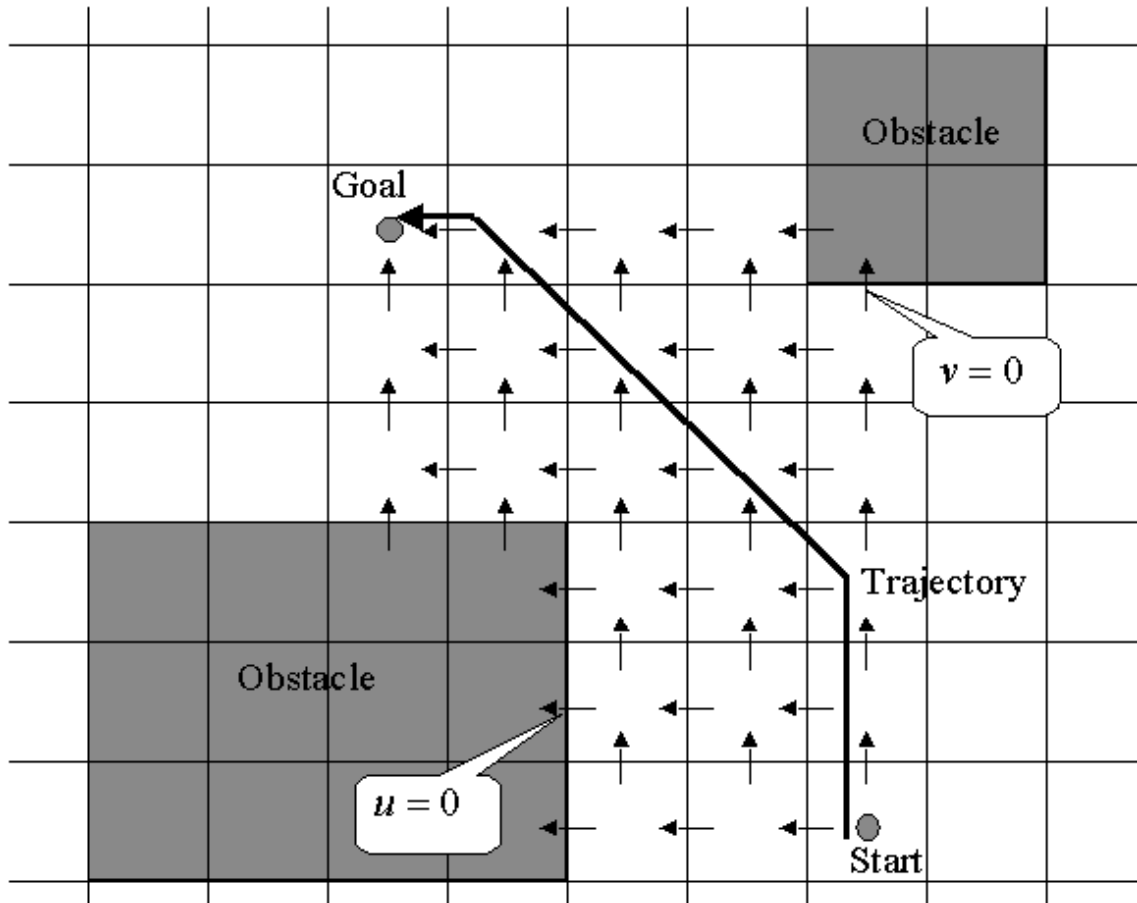


Fig.4-6: Trajectory planning

4.3.8 シミュレーション

本研究で提案した理論の有効性を確認するためにシミュレーションを行った。なお、シミュレーションでは Fig.4-7 の速度プロファイルを使用した。最高速度を 1.0m/s 、加速度を 1.0m/s^2 とした。本論文では、追従対象として人間を想定しているため、人間の歩行速度に近い値を速度プロファイルとして与えた。

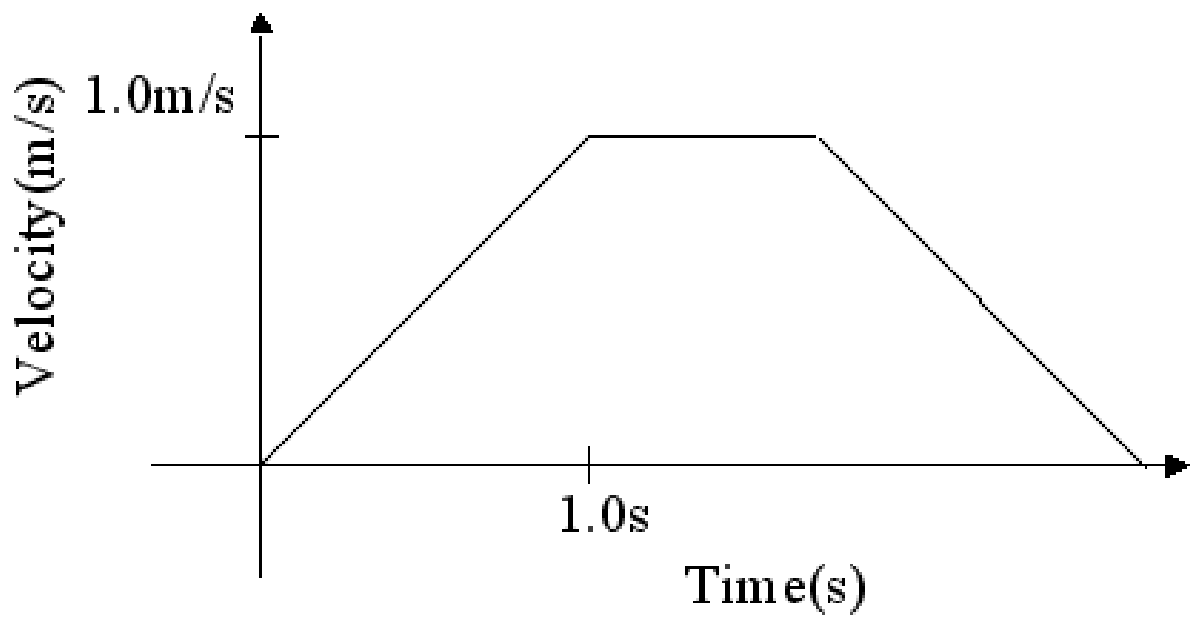


Fig.4-7: Velocity profile

流体モデルの生成

本節では流体モデルを用いた軌道生成のシミュレーション結果を示す。シミュレーション環境は Fig.4-8 とした。

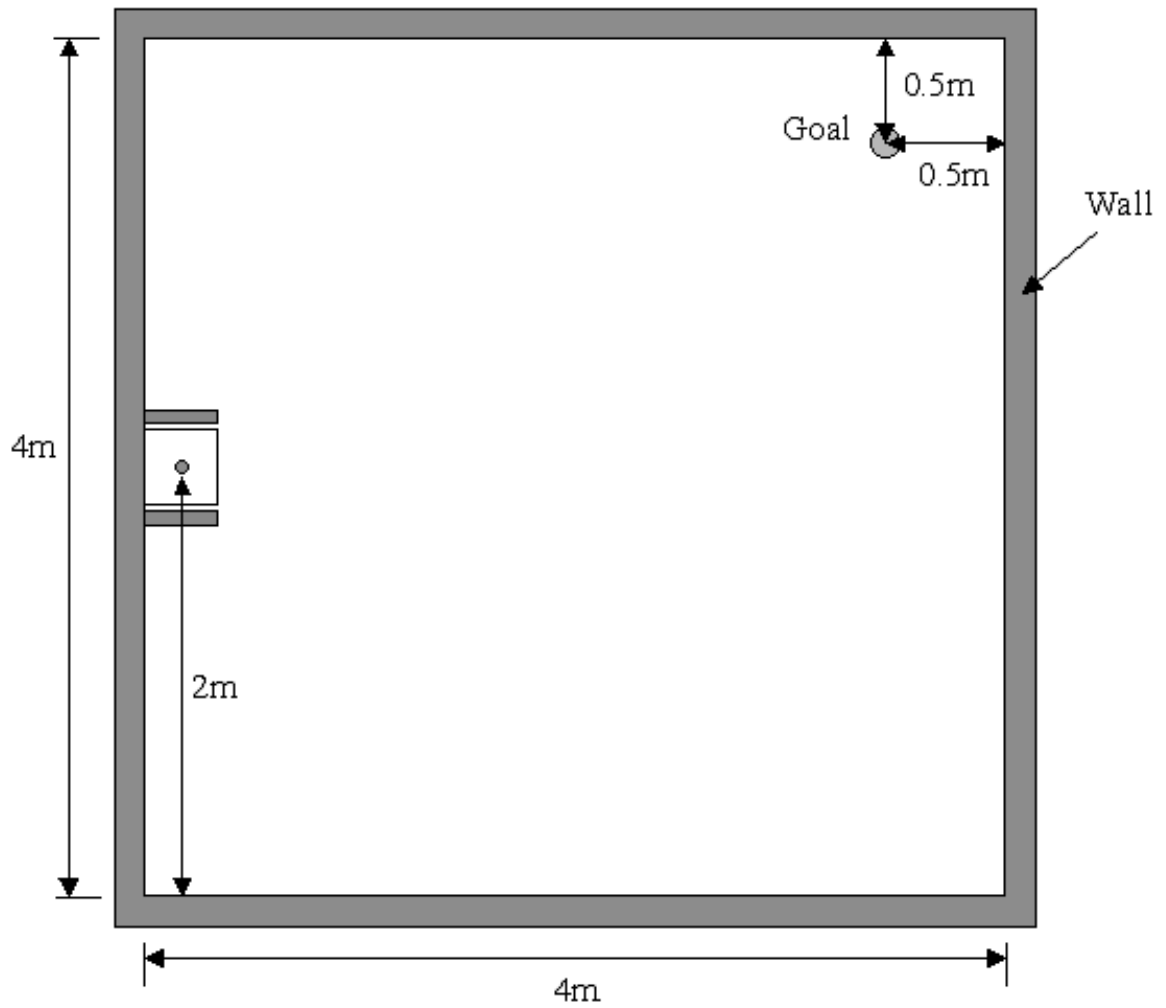


Fig.4-8: Simulation environment

ここでコントロールボリュームの大きさは0.2m とすると、Fig.4-9 のコントロールボリュームとなる。

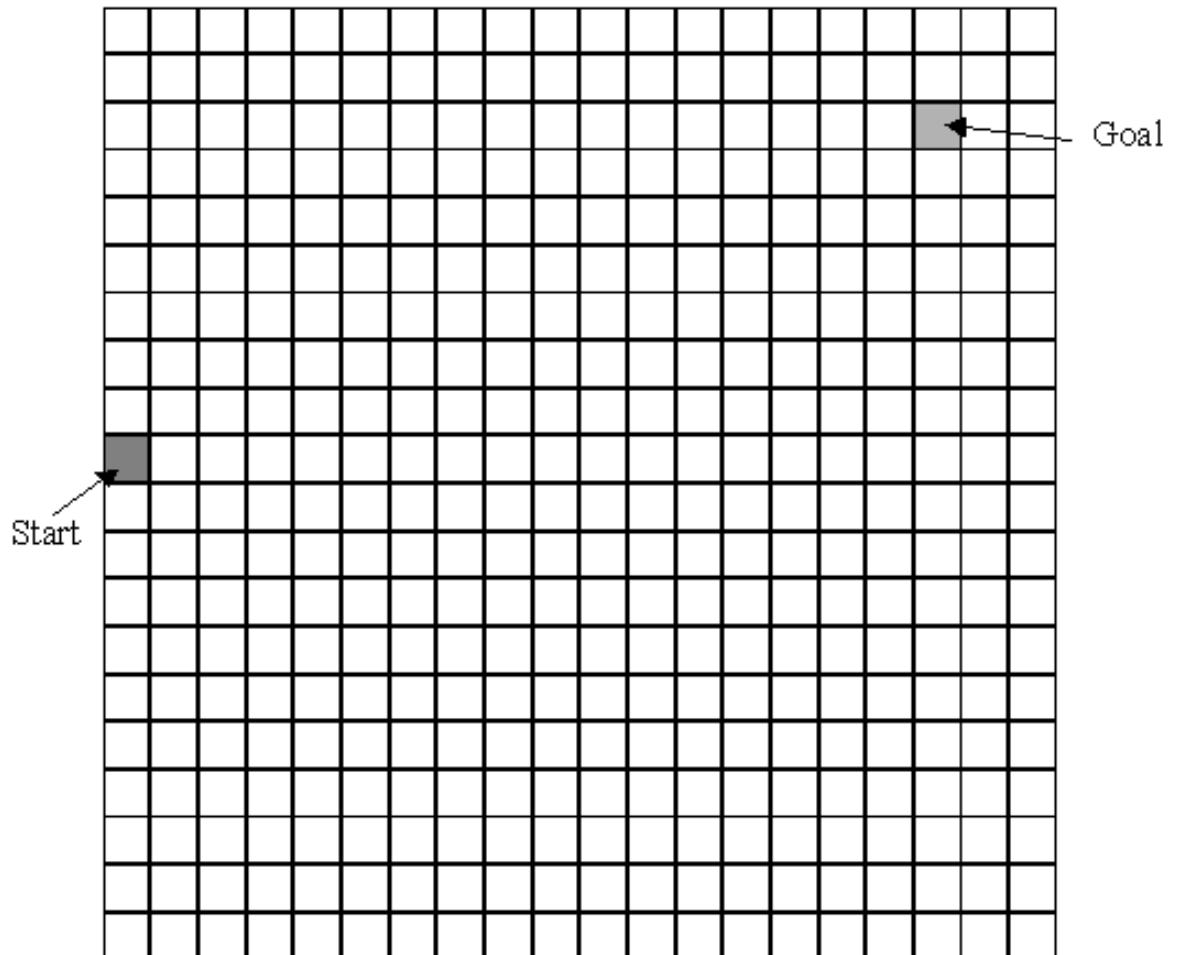


Fig.4-9: Control volume

移動ロボットの存在するコントロールボリュームの初期値として $u=1.0$ を、ゴールの存在するコントロールボリュームの初期値として $u=1.0$ を与えると、各コントロールボリュームにおける流れは Fig.4-10 となった。

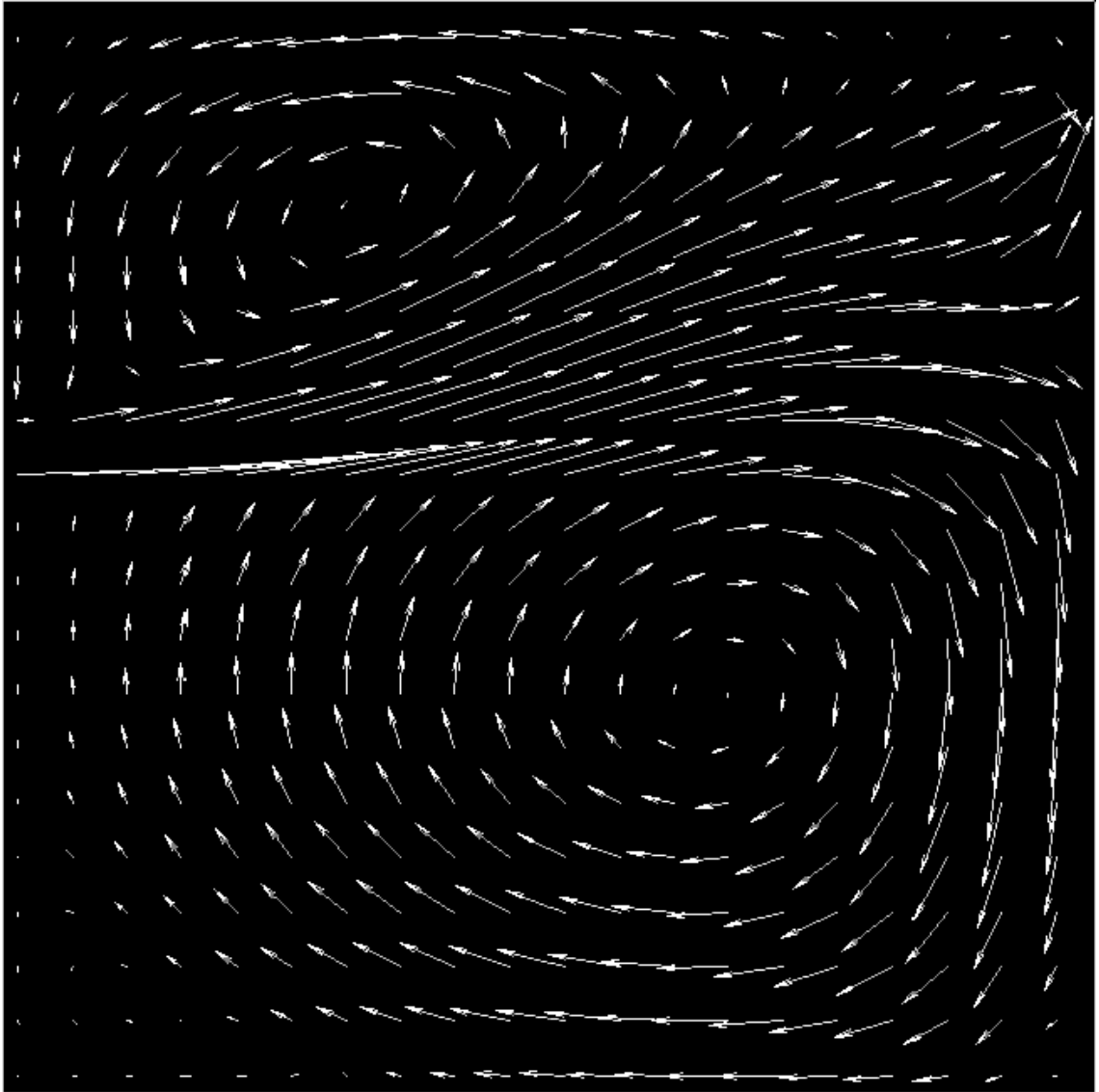


Fig.4-10: Fluid model

Fig.4-10 から、移動ロボットが選択した経路は Fig.4-11 となった。

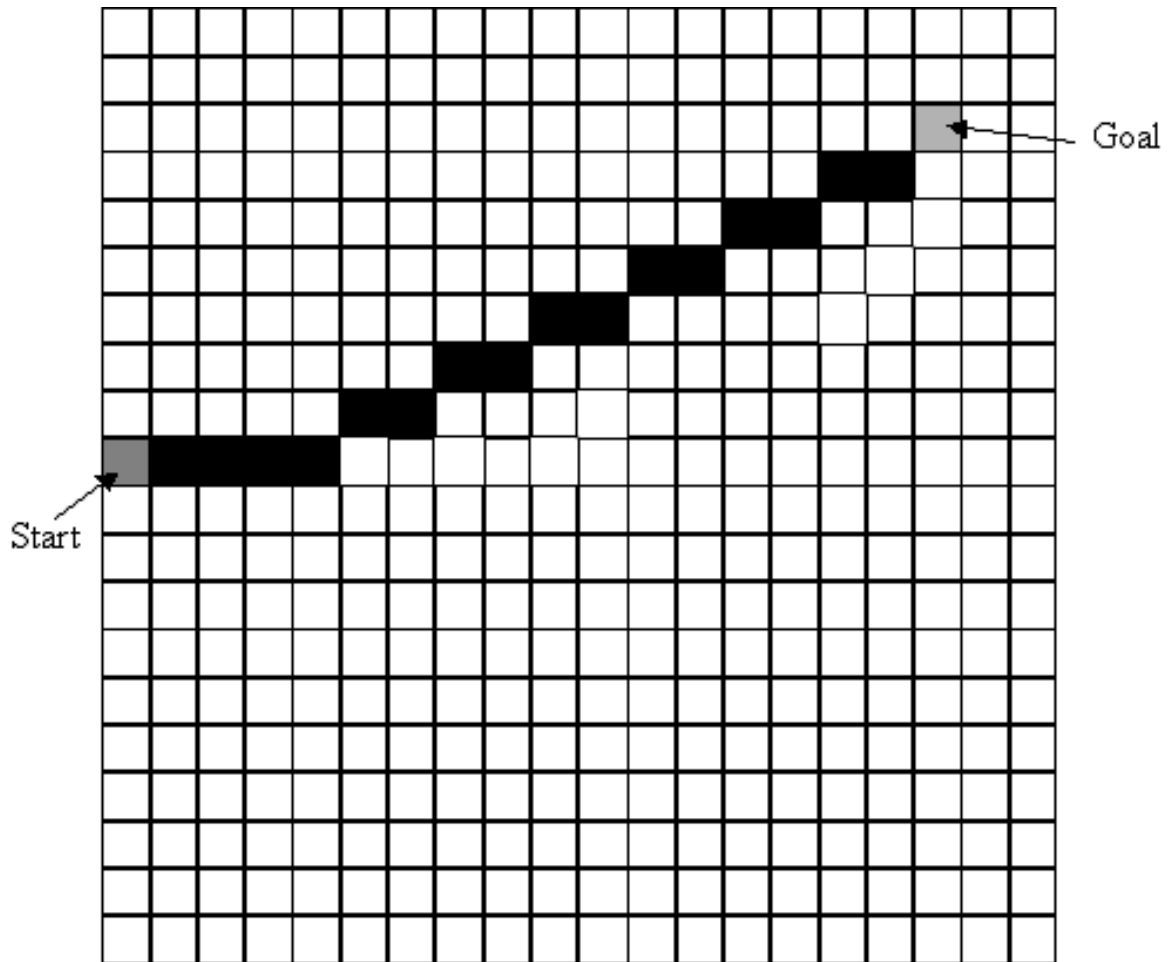


Fig.4-11: Calculated trajectory

次に障害物が設置された場合についてシミュレーションを行った。障害物は Fig.4-12 に示すように設定した。

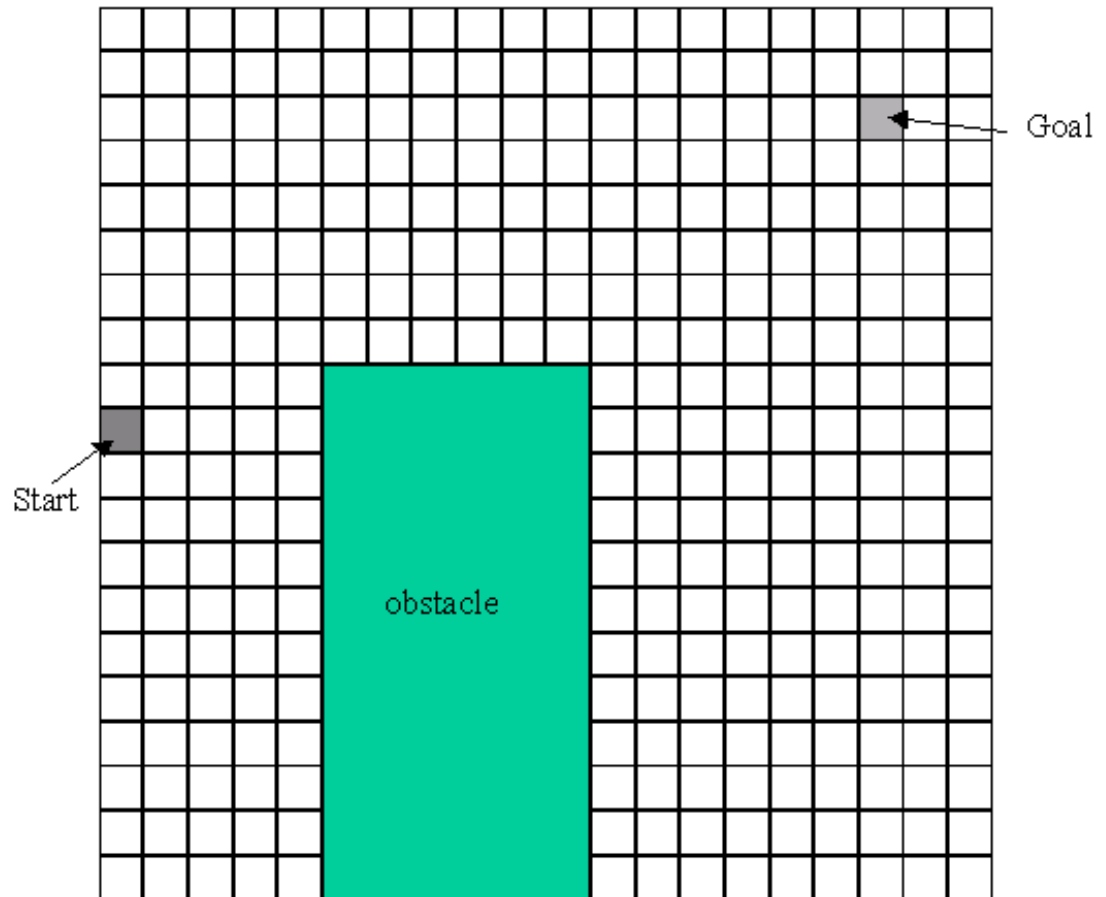


Fig.4-12: Simulation environment with obstacle

移動ロボットの存在するコントロールボリュームの初期値として $u=1.0$ を、ゴールの存在するコントロールボリュームの初期値として $u=1.0$ を与えると、流れは Fig.4-13 となった。

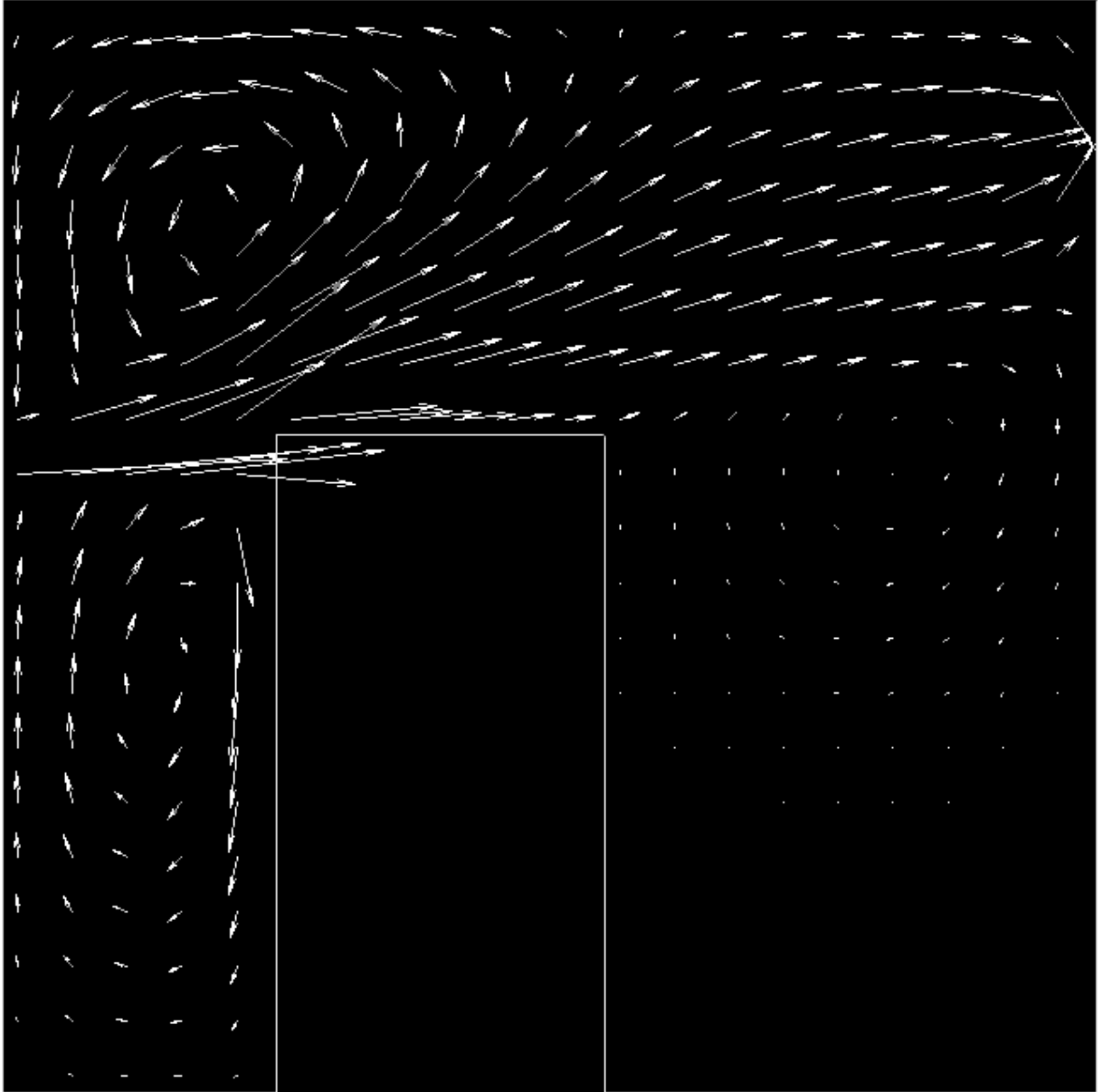


Fig.4-13: Fluid model with obstacle

Fig.4-13 から、移動ロボットが選択した経路は Fig.4-14 となった。

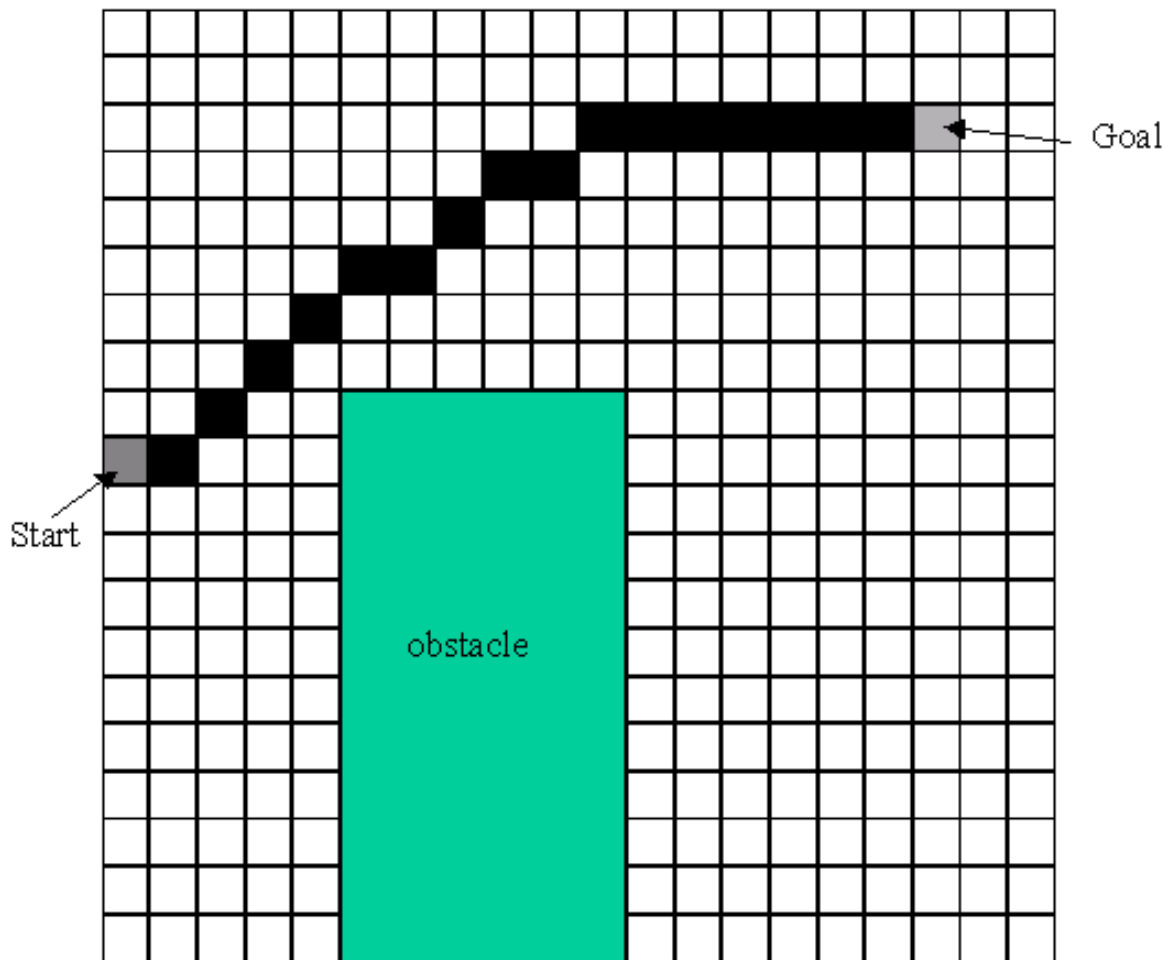


Fig.4-14: Calculated trajectory with obstacle

シミュレーション結果から、障害物がある場合でも流体を用いることにより、回避軌道を選択できていることが分かる。

次に得られた軌道を移動ロボットが追従するシミュレーション結果を示す。シミュレーションは下記の3種類を実施した。

1. 追従目標が静止状態で、障害物が存在しない場合
2. 追従目標が静止状態で、障害物が存在する場合
3. 追従目標が動作状態で、障害物が存在する場合

移動ロボットの速度計画は、最高速度を 1.0m/s, 加速度を 0.5m/s^2 とした。

追従目標が静止状態で、障害物が存在しない場合

シミュレーション環境は Fig.4-8 に示す環境で行った。

この時の計画軌道と走行軌跡を Fig.4-15 に示す。Fig.4-15 から、移動ロボットは計画軌道を追従していることが分かる。

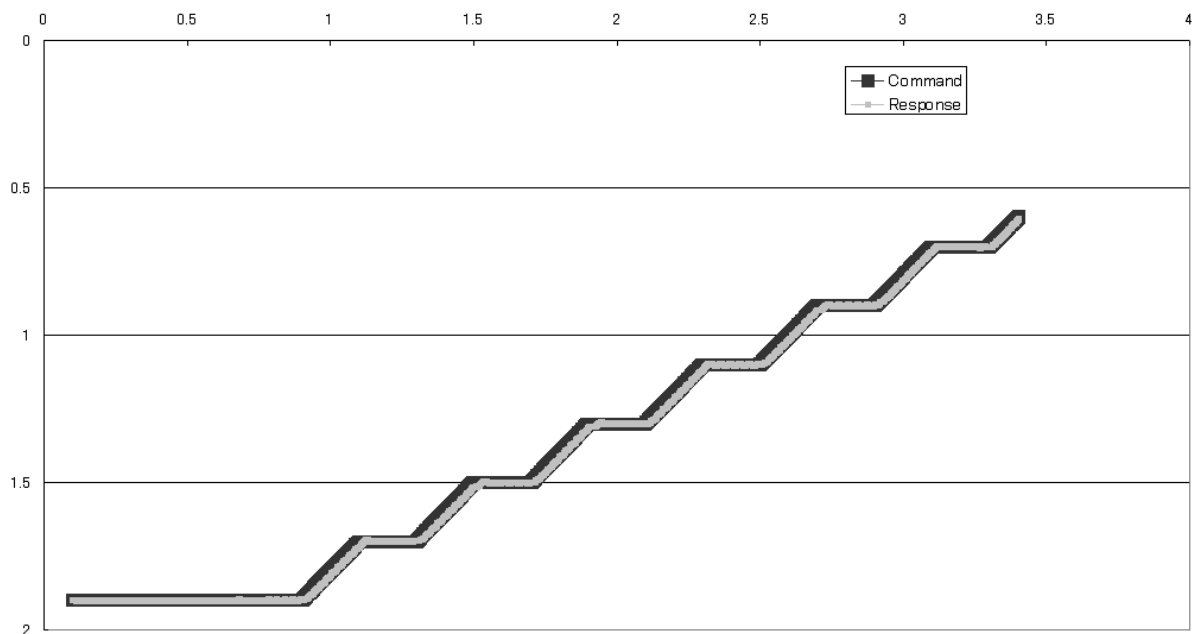


Fig.4-15: Simulation1: Position response

また、加速度応答を Fig.4-16 に示す。

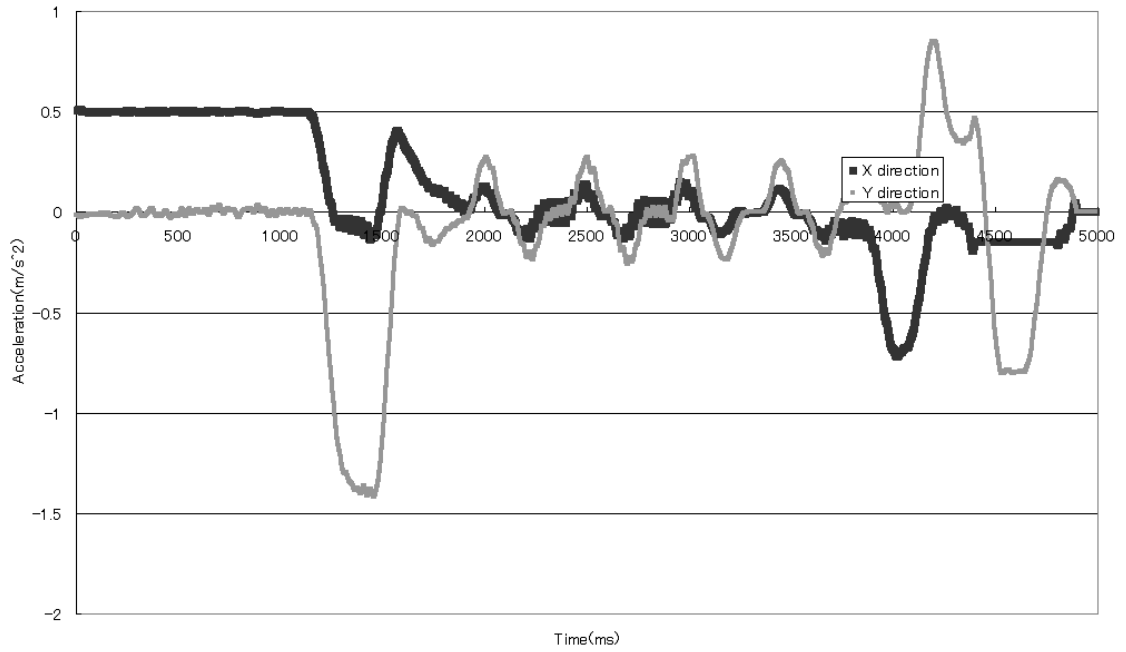


Fig.4-16: Simulation1: Acceleration response

Fig.4-16 から、時間スプライン近似法に基づいた軌道計画により動作指令を生成しているため、加速度変化は連続的であることがわかる。

追従目標が静止状態で、障害物が存在する場合

シミュレーション環境は Fig.4-12 に示す環境で行った。

この時の計画軌道と走行軌跡を Fig.4-17 に示す。Fig.4-17 から、移動ロボットは計画軌道を追従していることが分かる。

また、加速度応答を Fig.4-18 に示す。Fig.4-18 から、加速度変化は連続的であることがわかる。

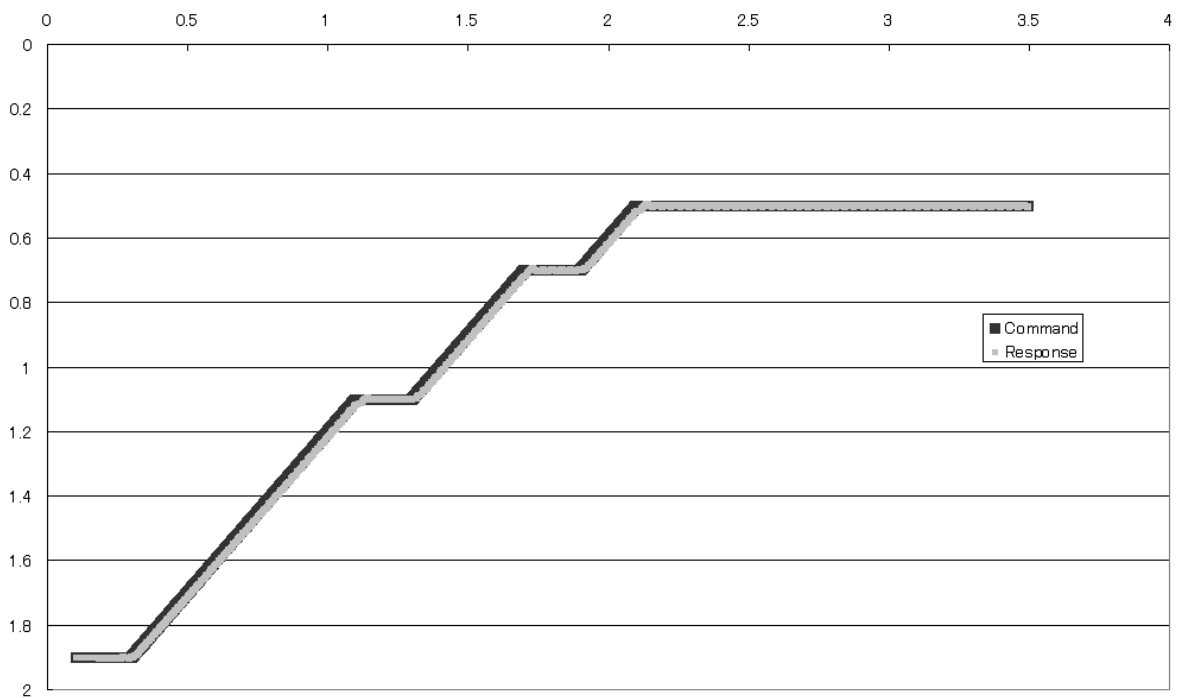


Fig.4-17: Simulation2: Position response

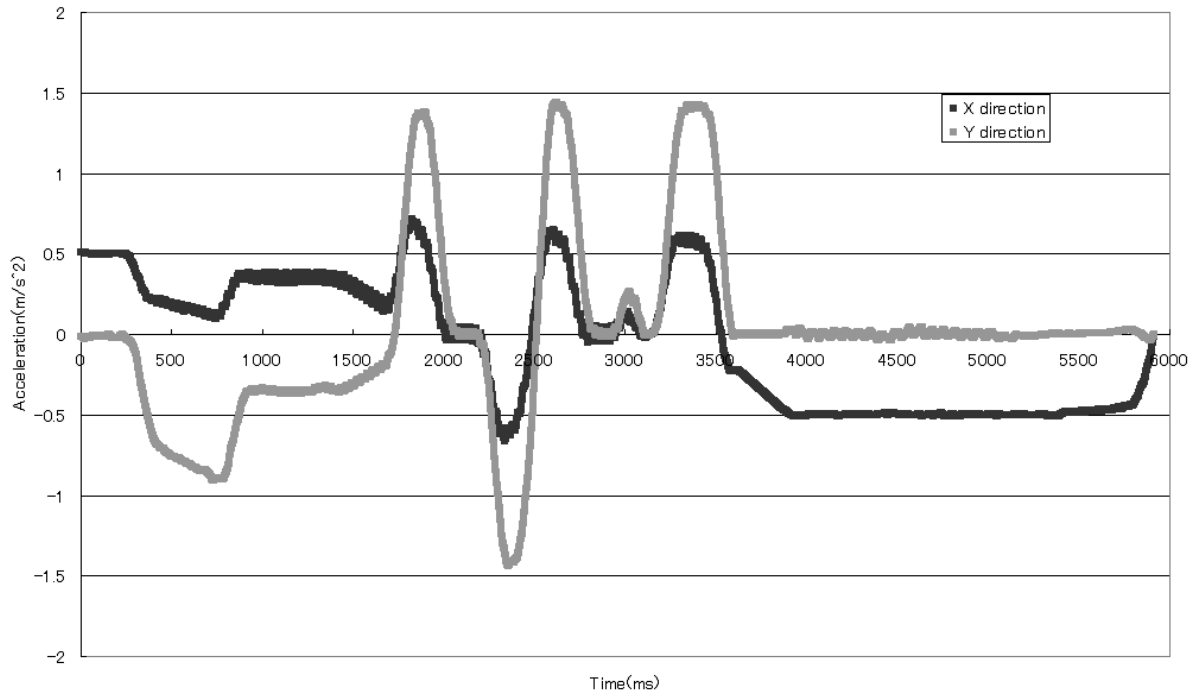


Fig.4-18: Simulation2: Acceleration response

追従目標が動作状態で、障害物が存在する場合

本シミュレーションでは、ゴールの位置が移動すると仮定する。-X方向,Y方向にゴールがそれぞれ0.2m/sの速度で移動する。

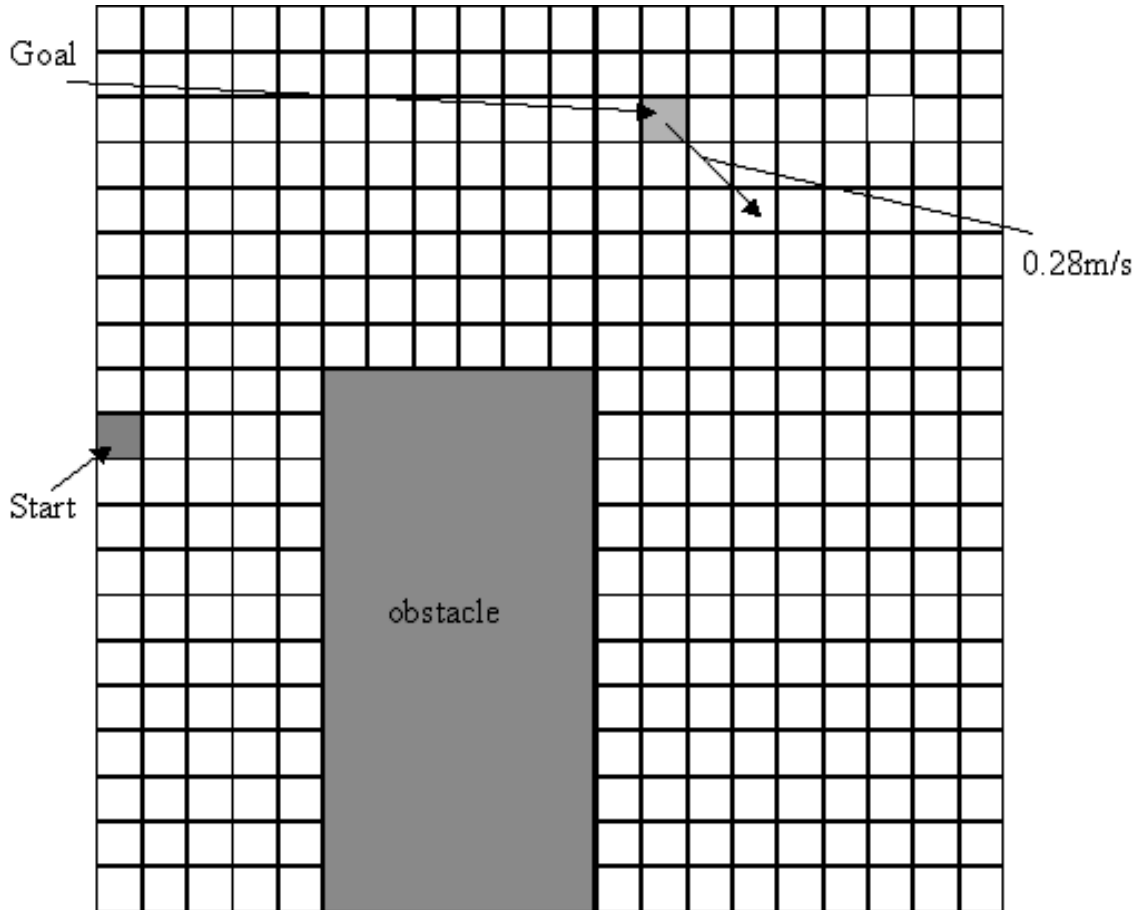


Fig.4-19: Simulation3: Experiment environment

本シミュレーションでは、0.01 秒ごとに 0.1 秒先のゴールの位置推定を行った。推定結果は以下となった。

Table 4.4: Position estimate of goal

Pass time	Present position (grid position)	Estimate position after 0.1 second (grid position)
0.1	2.520,0.520(12,3)	2.538,0.540(12,3)
0.2	2.540,0.540(12,3)	2.558,0.560(12,3)
0.3	2.560,0.560(12,3)	2.578,0.581(12,3)
0.4	2.580,0.580(12,3)	2.598,0.600(12,3)
0.5	2.600,0.600(12,3)	2.618,0.621(13,4)
0.6	2.620,0.620(13,4)	2.638,0.641(13,4)
0.7	2.640,0.640(13,4)	2.658,0.661(13,4)
0.8	2.660,0.660(13,4)	2.678,0.681(13,4)
0.9	2.680,0.680(13,4)	2.698,0.701(13,4)
1.0	2.700,0.700(13,4)	2.718,0.721(13,4)
1.1	2.720,0.720(13,4)	2.738,0.741(13,4)
1.2	2.740,0.740(13,4)	2.758,0.761(13,4)
1.3	2.760,0.760(13,4)	2.778,0.780(13,4)
1.4	2.780,0.780(13,4)	2.798,0.800(13,4)
1.5	2.800,0.800(13,4)	2.818,0.820(14,5)
1.6	2.820,0.820(14,5)	2.838,0.840(14,5)
1.7	2.840,0.840(14,5)	2.858,0.860(14,5)
1.8	2.860,0.860(14,5)	2.878,0.880(14,5)
1.9	2.880,0.880(14,5)	2.898,0.900(14,5)
2.0	2.900,0.900(14,5)	2.918,0.920(14,5)
2.1	2.920,0.920(14,5)	2.938,0.940(14,5)
2.2	2.940,0.940(14,5)	2.958,0.960(14,5)
2.3	2.960,0.960(14,5)	2.978,0.980(14,5)
2.4	2.980,0.980(14,5)	2.998,1.000(14,5)
2.5	3.000,1.000(14,5)	3.018,1.020(15,6)
2.6	3.020,1.020(15,6)	3.038,1.040(15,6)
2.7	3.040,1.040(15,6)	3.058,1.060(15,6)
2.8	3.060,1.060(15,6)	3.078,1.080(15,6)

Table 4.5: Position estimate of goal

Pass time	Present position (grid position)	Estimate position after 0.1 second (grid position)
2.9	3.080,1.080(15,6)	3.098,1.100(15,6)
3.0	3.100,1.100(15,6)	3.118,1.120(15,6)
3.1	3.120,1.120(15,6)	3.138,1.140(15,6)
3.2	3.140,1.140(15,6)	3.158,1.160(15,6)
3.3	3.160,1.160(15,6)	3.178,1.180(15,6)
3.4	3.180,1.180(15,6)	3.198,1.200(15,6)
3.5	3.200,1.200(15,6)	3.218,1.220(16,7)
3.6	3.220,1.220(16,7)	3.238,1.240(16,7)
3.7	3.240,1.240(16,7)	3.258,1.260(16,7)
3.8	3.260,1.260(16,7)	3.278,1.280(16,7)
3.9	3.280,1.280(16,7)	3.298,1.300(16,7)
4.0	3.300,1.300(16,7)	3.318,1.320(16,7)
4.1	3.320,1.320(16,7)	3.338,1.340(16,7)
4.2	3.340,1.340(16,7)	3.358,1.360(16,7)
4.3	3.360,1.360(16,7)	3.378,1.380(16,7)
4.4	3.380,1.380(16,7)	3.398,1.400(16,7)
4.5	3.400,1.400(16,7)	3.418,1.420(17,8)

Table.4.4、4.5 から、ロボットはゴールのメッシュ位置が変更になる度に軌道の再計算を行った。その結果を Fig.4-20 から Fig.4-25 に示す。Fig.4-20 ~ Fig.4-25 に示すように、移動ロボットは1秒おきに移動する追従物体の位置から軌道を再計算していることが分かる。

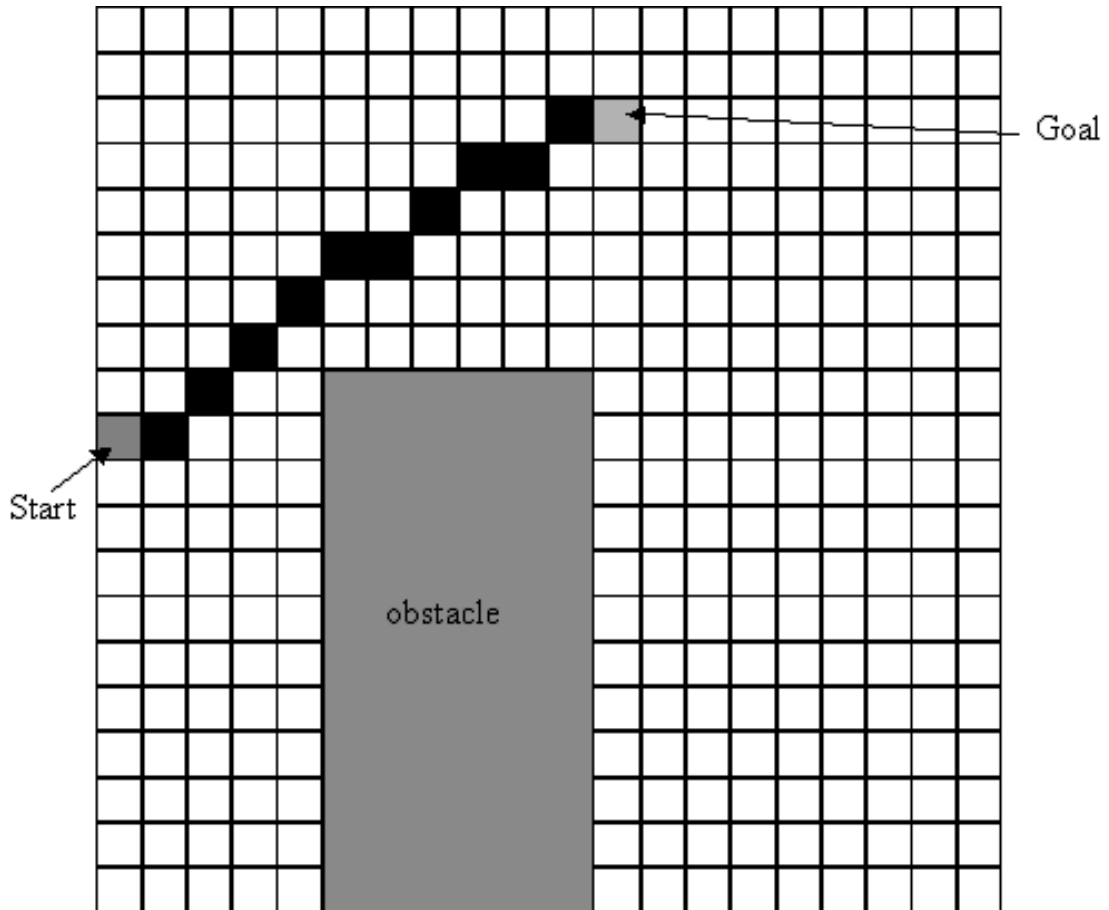


Fig.4-20: Simulation3: 1st time planned trajectory

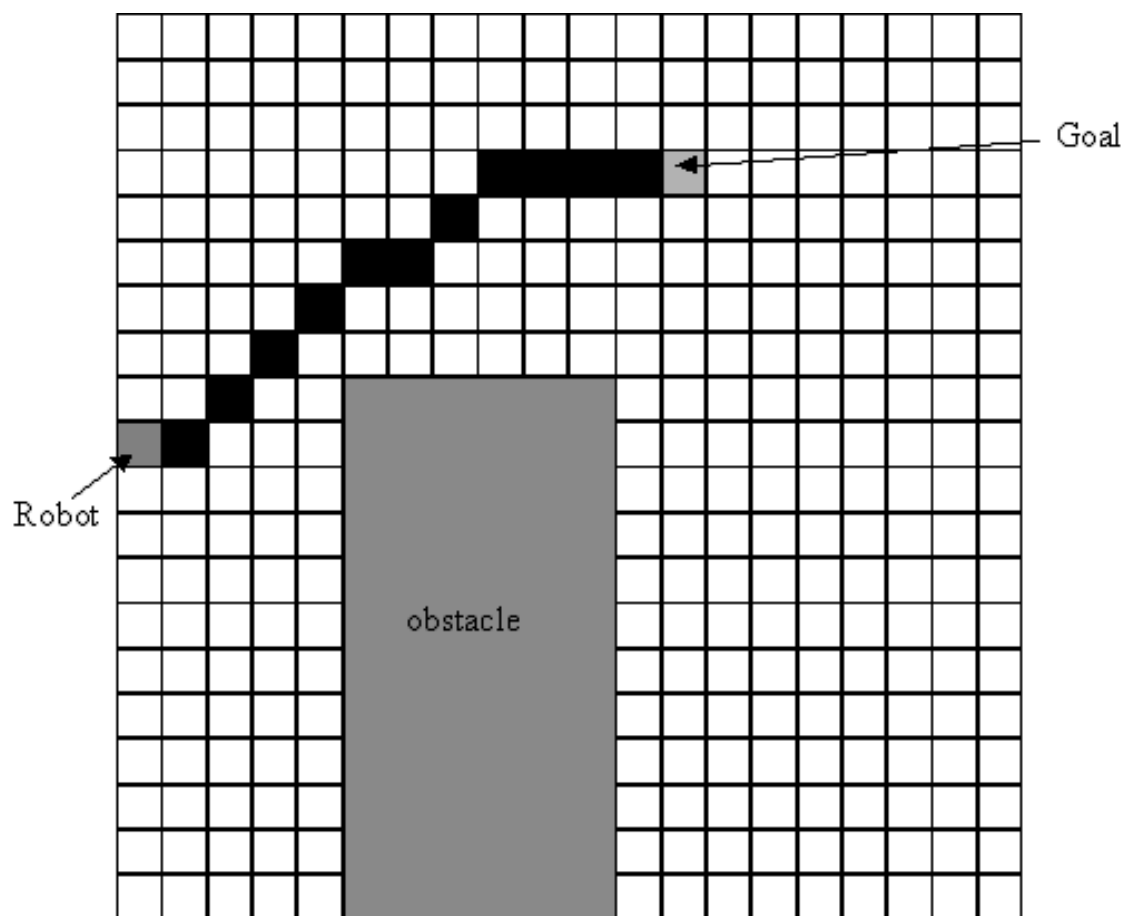


Fig.4-21: Simulation3: 2nd time planned trajectory (at 0.5s)

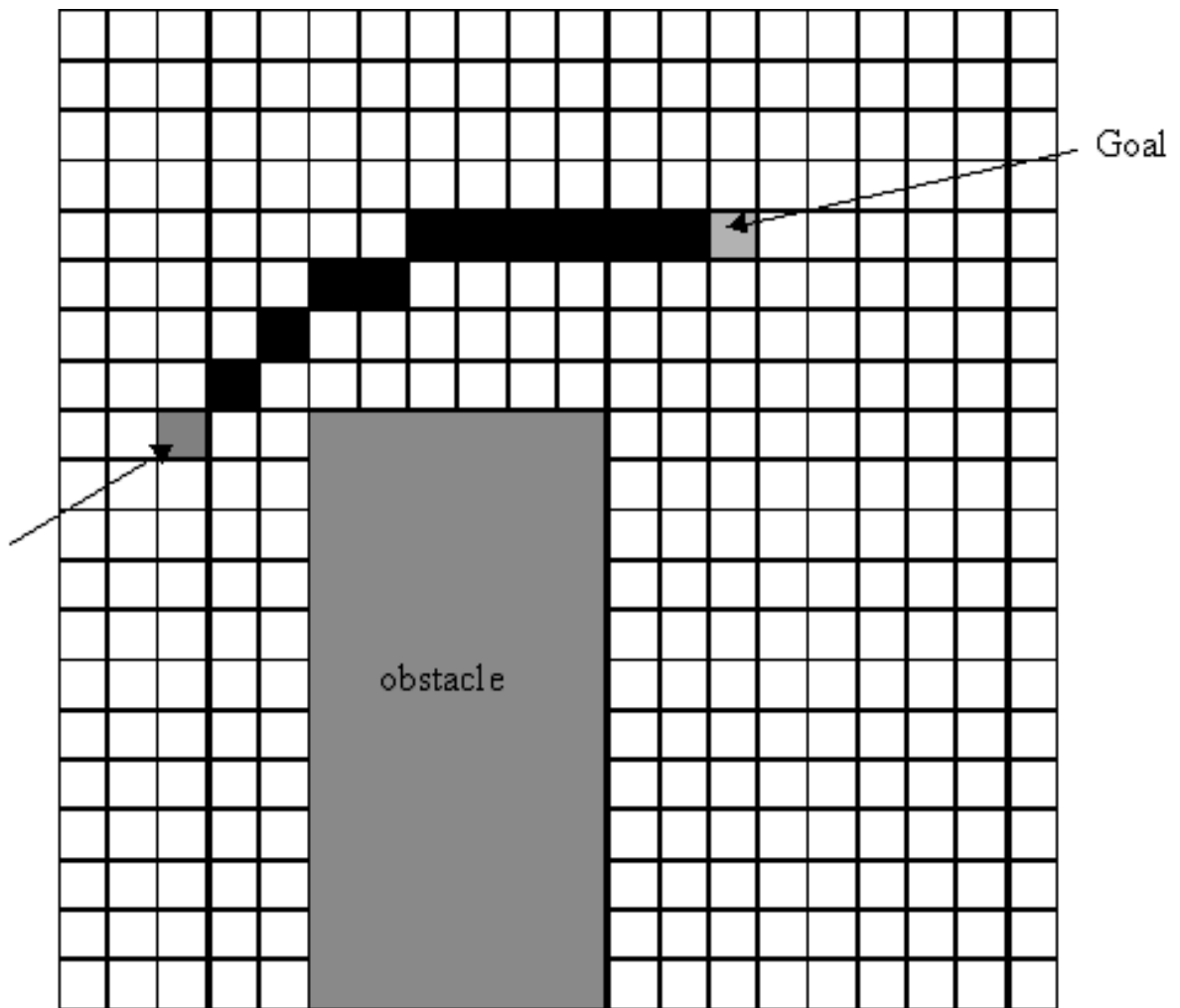


Fig.4-22: Simulation3: 3rd time planned trajectory (at 1.5s)

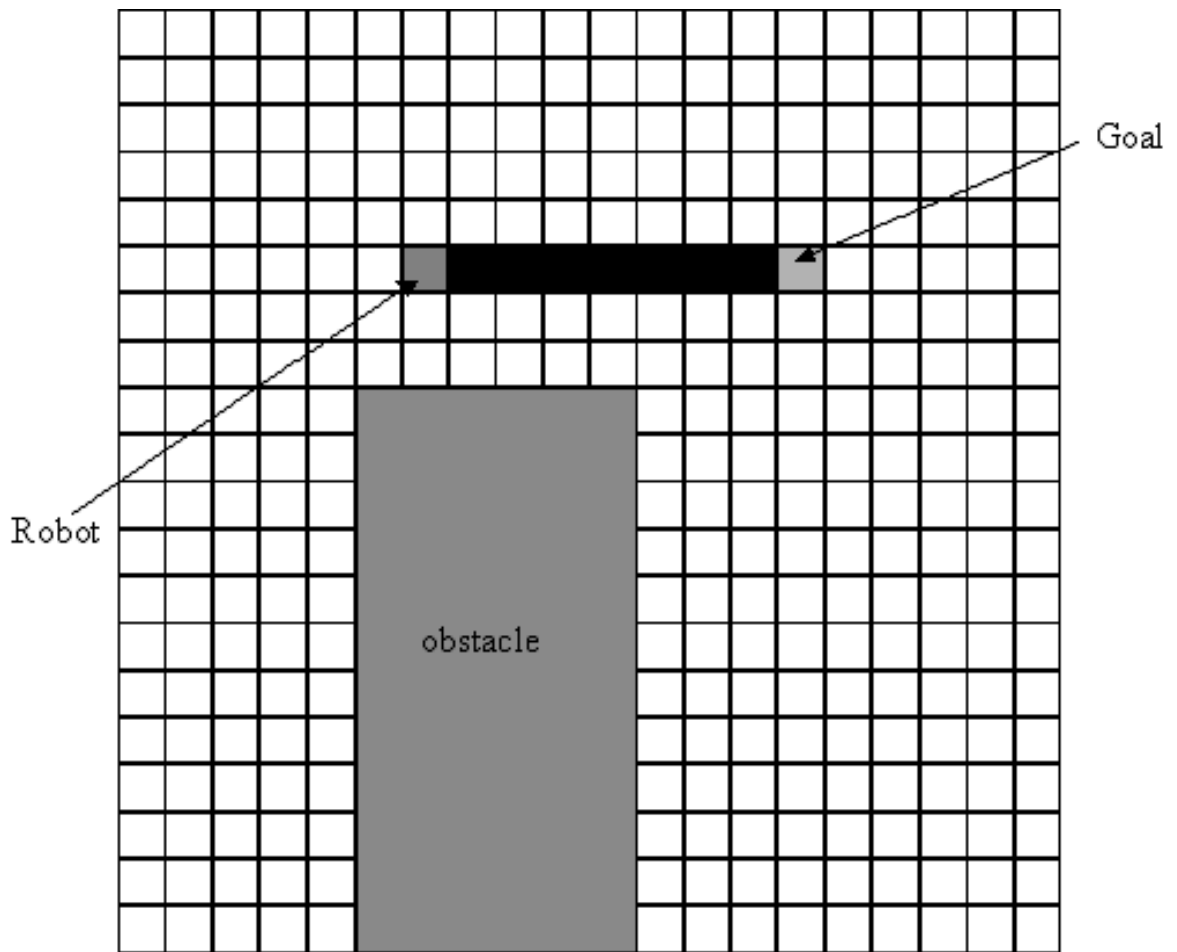


Fig.4-23: Simulation3: 4th time planned trajectory (at 2.5s)

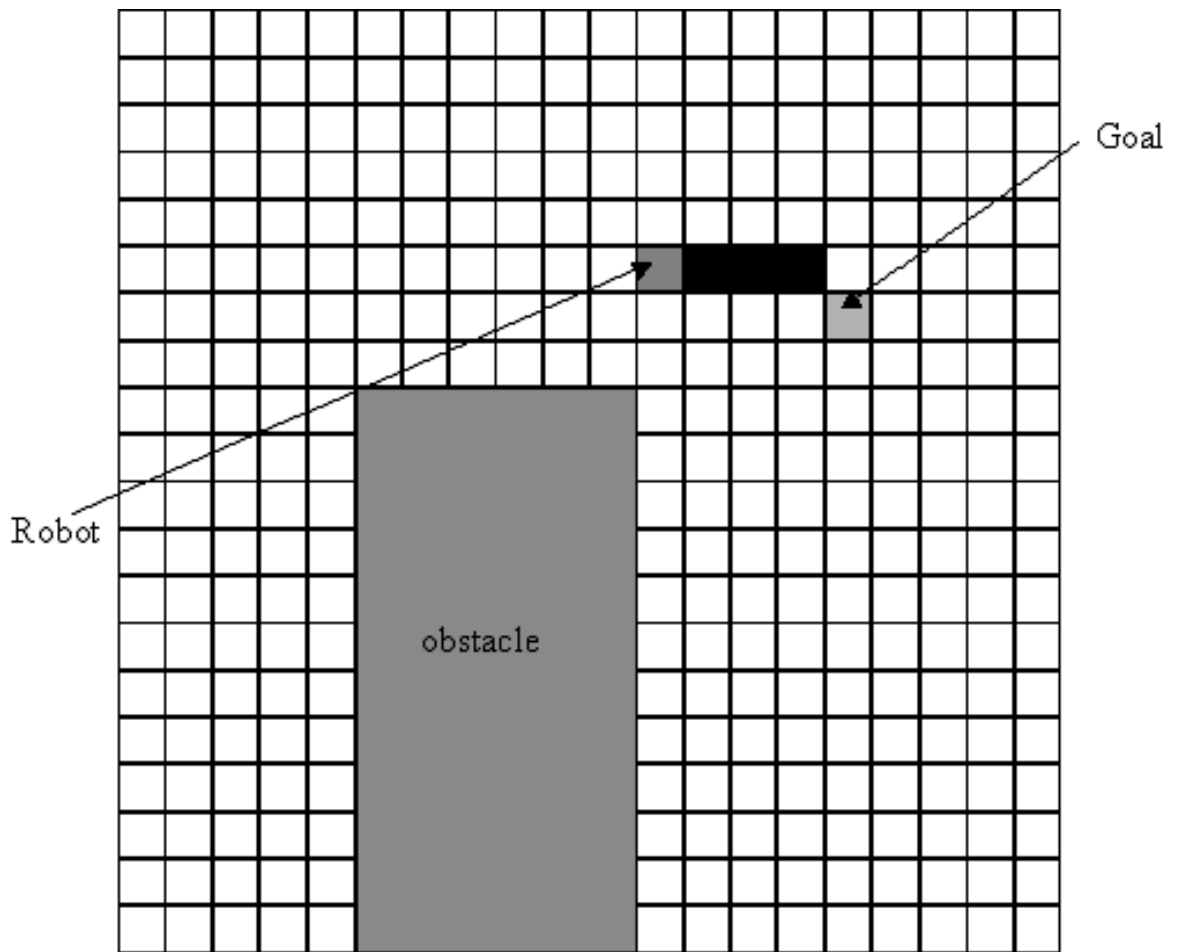


Fig.4-24: Simulation3: 5th time planned trajectory (at 3.5s)

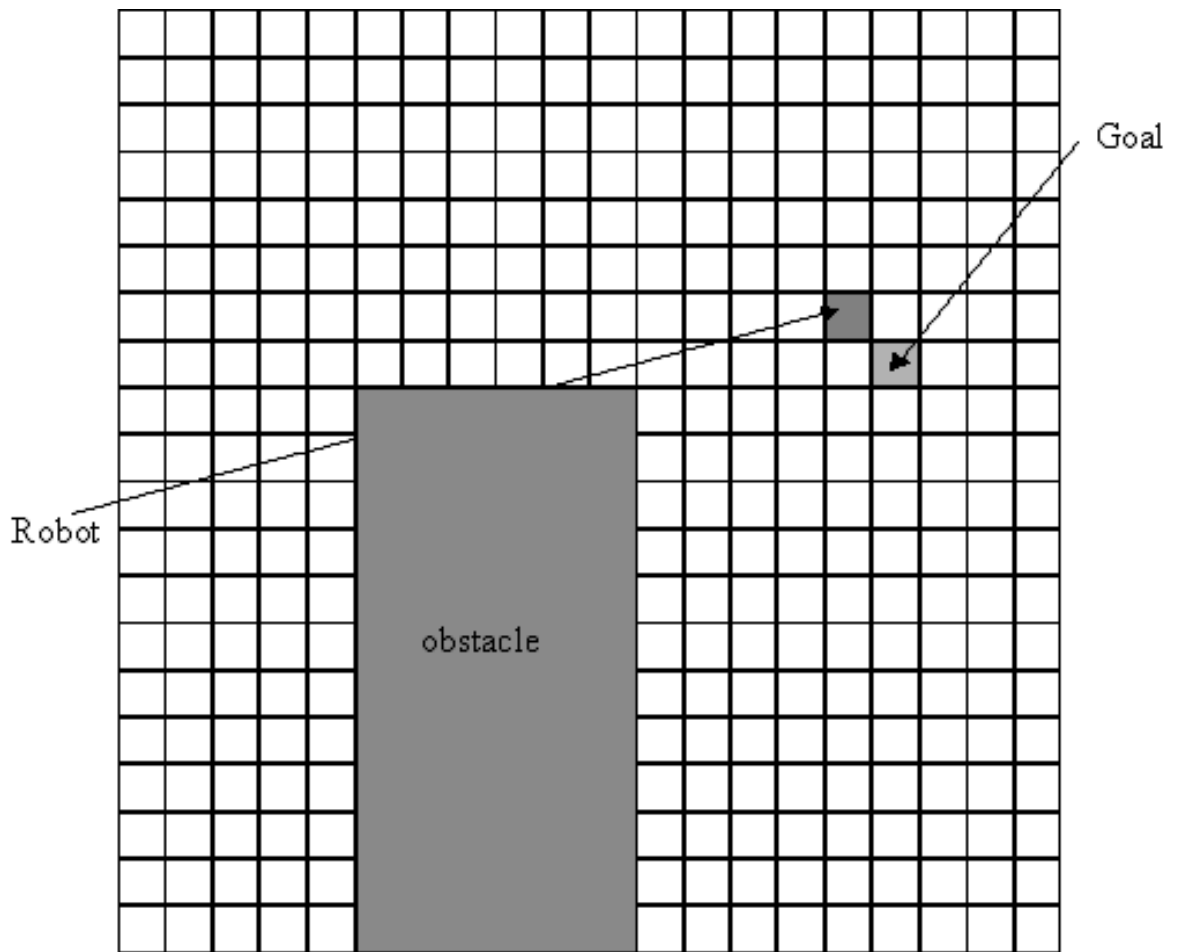


Fig.4-25: Simulation3: 6th time planned trajectory (at 4.5s)

この時の計画軌道と走行軌跡を Fig.4-26 に示す。Fig.4-26 から、移動ロボットは計画軌道を追従していることが分かる。

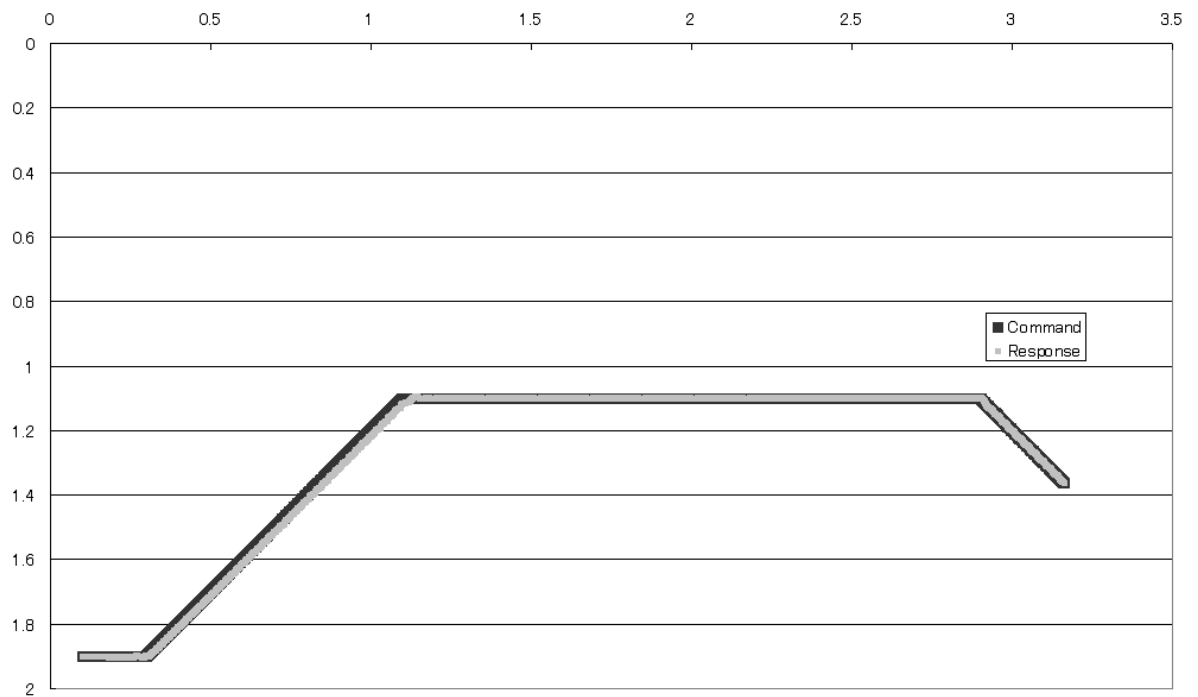


Fig.4-26: Simulation3: Position response

また、加速度応答を Fig.4-27 に示す。

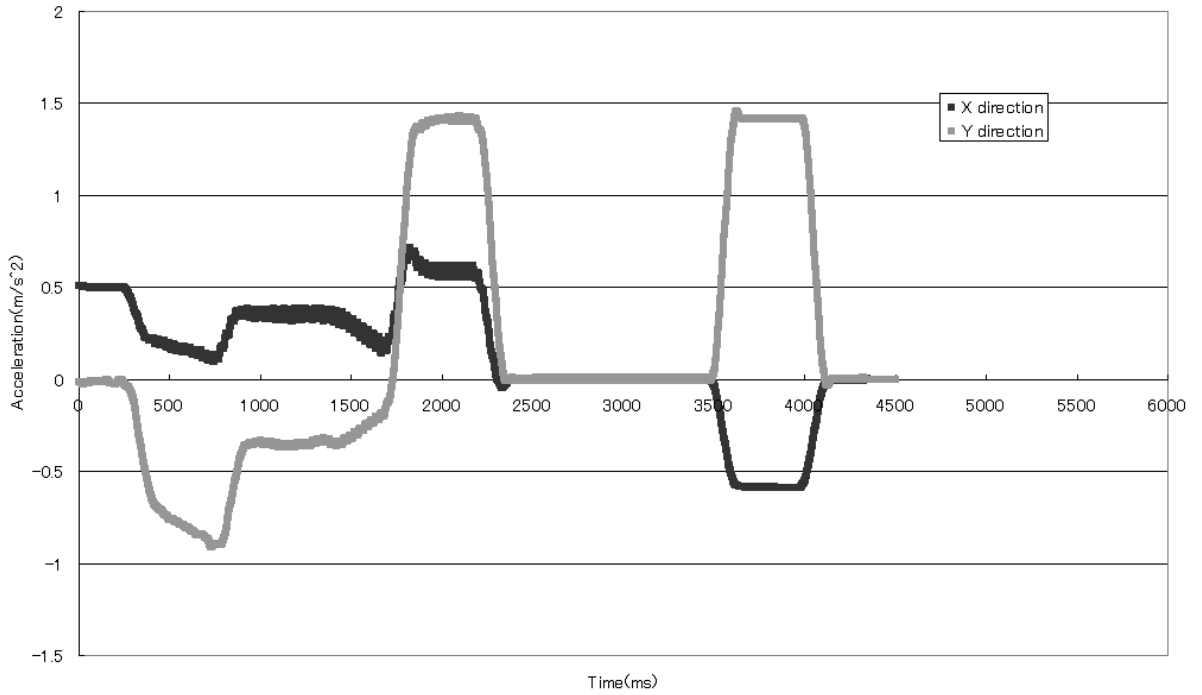


Fig.4-27: Simulation3: Acceleration response

Fig.4-27 から、加速度変化は連続的であることがわかる。

4.4 実験結果

提案手法である流体モデルを用いた軌道生成法の有効性を確認するため、実機を用いて実験を行った。実験では静的障害物のある環境で、追従対象は移動しない場合とした。Fig.4-29 に実験結果・位置応答を示す。またロボット座標系における加速度応答を Fig.4-30 に示す。なお、本ロボットの加速度は、1ms 単位でモータのエンコーダから計測される車輪の回転角からロボットの位置を算出し、その値を2階微分することにより求めている。

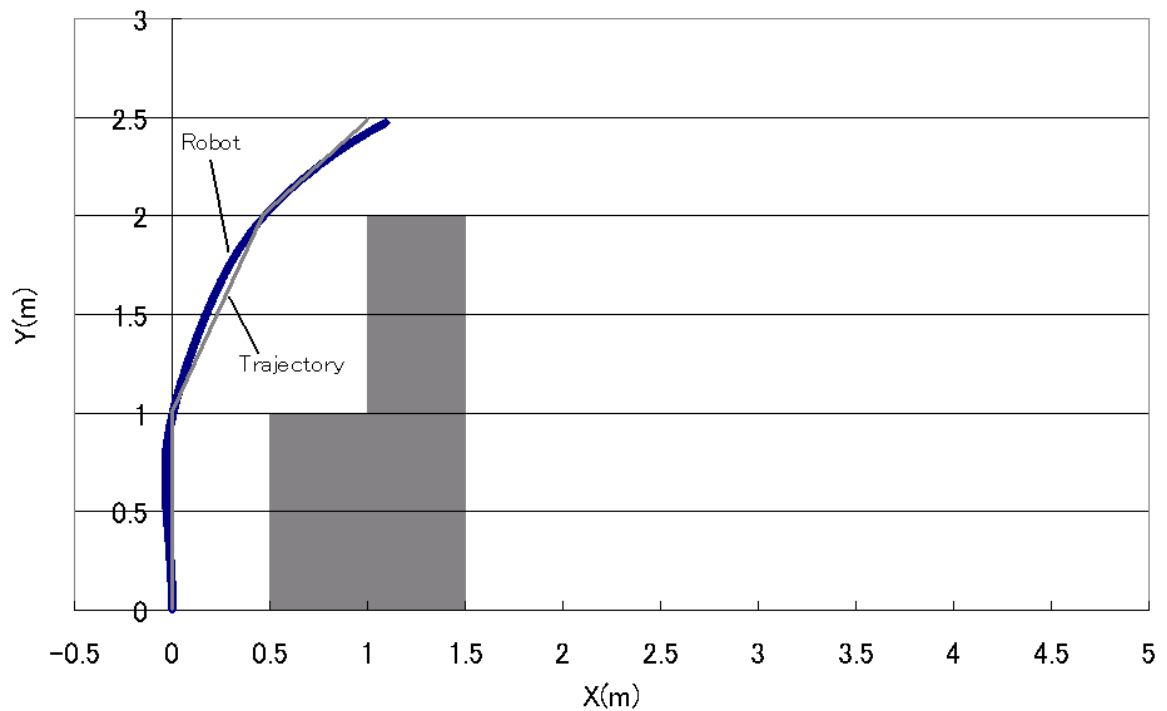


Fig.4-29: Position response

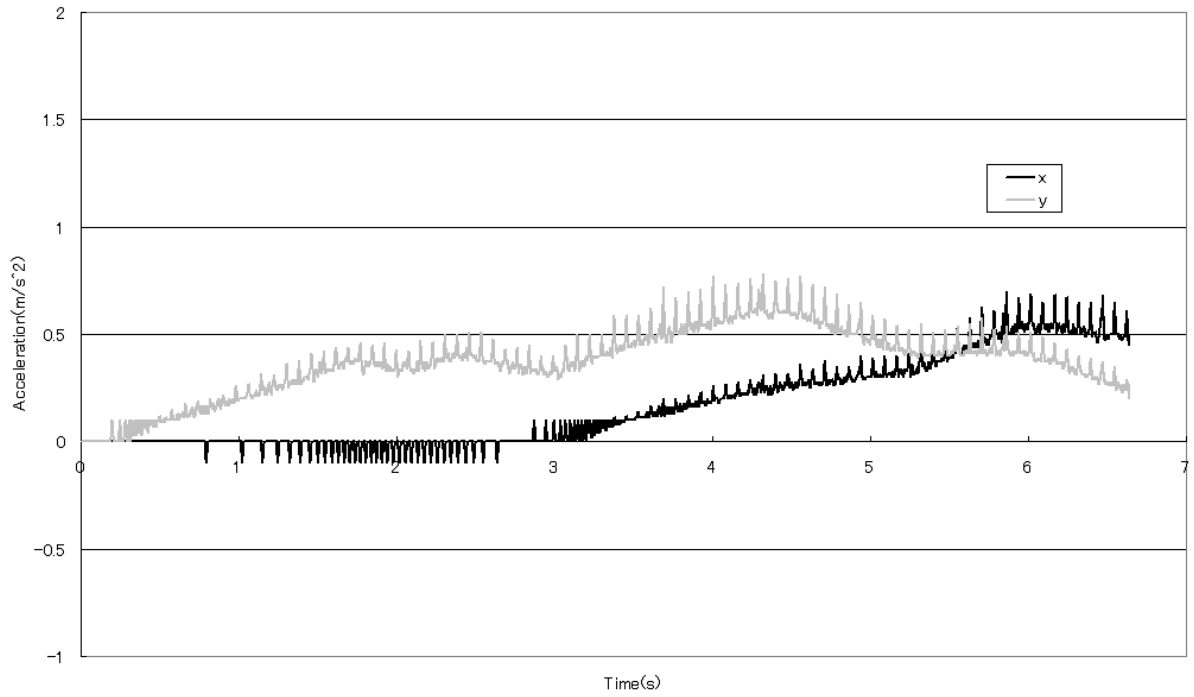


Fig.4-30: Acceleration response

Fig.4-29の実験結果から、流体モデルを用いた軌道計画法により、障害物を回避する軌道を生成していることが分かる。これは、流体モデルを使用することにより、障害物を回避し、かつスタート地点からゴール地点まで最も時間のかからない軌道を選択していると考えられる。

Fig.4-29から、移動ロボットは生成された軌道を追従していることが分かる。また Fig.4-30から、X、Y方向への加速度が連続的に変化していることが分かる。X、Y方向とも、加速度応答値は最大で約 0.8m/s^2 となっている。特に Fig.4-30では、約3秒後からX方向に変化しているが、加速度変化は連続的になっている。事前に入力された位置、速度、加速度指令値で構成された予見制御により、位置だけではなく速度、加速度変化が連続的にすることができていることが分かる。以上のことより、提案した流体モデルを使用した軌道計画法と、時間スプライン近似法による軌道追従制御の妥当性を確かめた。

4.5 従来法との比較

流体モデルを使用した軌道計画法の有効性として、従来法であるポテンシャル法^{[49][50]}との比較を行う。ポテンシャル法は引力ポテンシャル U_w と斥力ポテンシャル U_o に分けられる。

$$U_w = A\sqrt{(x_r - x_g)^2 + (y_r - y_g)^2} \quad (4.50)$$

$$U_o = A\frac{e^{-\alpha K}}{K} \quad (4.51)$$

ここで A 、 α は定数、 x_r 、 y_r はメッシュの位置、 x_g 、 y_g は目標点の位置、 K は障害物とメッシュの距離を示す。

本論文では、曲がり角や壁、移動物体などの障害物が存在する環境における移動ロボットの軌道生成法を提案している。移動ロボットの動作範囲をメッシュで区切っているが、各々のメッシュについて全ての障害物からの式 (4.51) で示される斥力ポテンシャルを計算する必要がある。実験で示したように移動ロボットが通路を走行する場合は、メッシュの多くが障害物となり、ポテンシャル法を用いた場合は計算量が膨大になってしまう。実験環境では全体のメッシュの数は300であるが、そのうち障害物（壁）のメッシュは190ある。ポテンシャル法の場合、全ての障害物から受ける斥力ベクトルを各々のメッシュについて計算した場合、 110×190 の計算回数が必要になる。流体モデルを用いた場合、障害物の存在するコントロールボリュームのパラメータは境界条件として計算する必要がないため、最大で110個のコントロールボリュームについて計算を行うのみでよい。コントロールボリュームのパラメータは3つであり、パラメータを解法する式数は4つであることから、最小で110の計算回数で軌道の計算が可能である。実際には収束解を求める必要があるため反復計算を行うが、障害物から遠いコントロールボリュームでは反復計算の回数が少なく、平均で10回程度の反復計算で流体モデルの構築を行っている。

以上から環境変動の大きい（通路や移動障害物など）場合、流体モデルを使用した軌道生成法ではポテンシャル法に比べて計算量を少なくできる。

4.6 計画軌道の滑らかさに関する検討

Fig.4-15 に示したようにシミュレーションや実験で計画された軌道はコントロールボリュームの中心を通るように計画されているため、計画軌道は連続的ではない。この問題を解決するために、計画軌道について下記の場合における考察を行った。

1. コントロールボリュームの寸法を細かくし、軌道の変化を小さくする
2. コントロールボリュームの中心点を通る軌道をコントロールボリュームごとにスプライン補間を行う
3. コントロールボリュームの端点を通る軌道をコントロールボリュームごとにスプライン補間を行う
4. コントロールボリュームの端点と流線ベクトルを使用し Ferguson / Coons 曲線により軌道を生成する

4.6.1 コントロールボリュームの寸法を細かくした場合

Fig.4-15 に示したようにシミュレーションでは、コントロールボリュームは一辺 20cm としている。このコントロールボリュームの寸法を細かくすることにより、軌道の変化量を小さくできる。この時のアルゴリズムは Fig.4-31 となる。

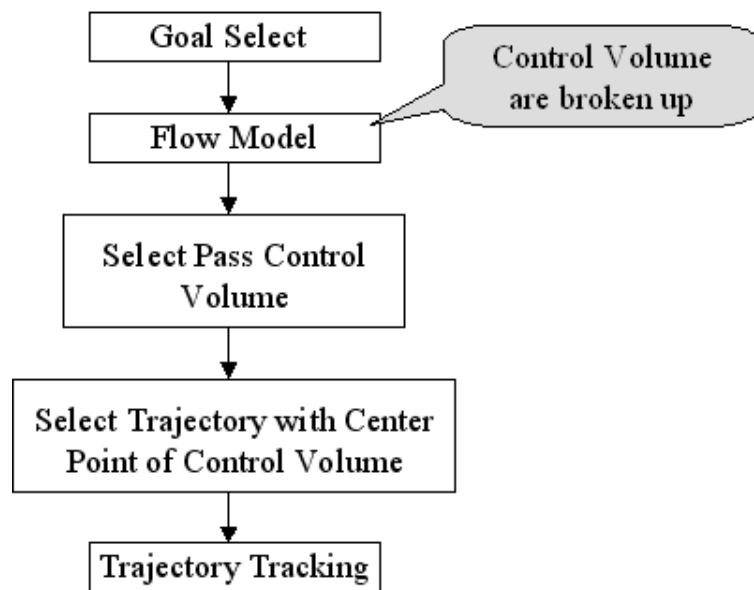


Fig.4-31: Trajectory planning algorithm (Segmentalized control volume)

アルゴリズムの変更部分は流体モデルを適用する環境の変更となる。本節では Fig.4-8 のシミュレーションに対して、コントロールボリュームの寸法を $1/4$ (一辺 5cm) にした場合のシミュレーションを行った。このため、コントロールボリュームの個数が 16 倍になり、流体モデル構築の計算量は細分化する前と比較して、16 倍増加することになる。

位置指令値と位置応答値を Fig.4-32、加速度応答を Fig.4-33 に示す。

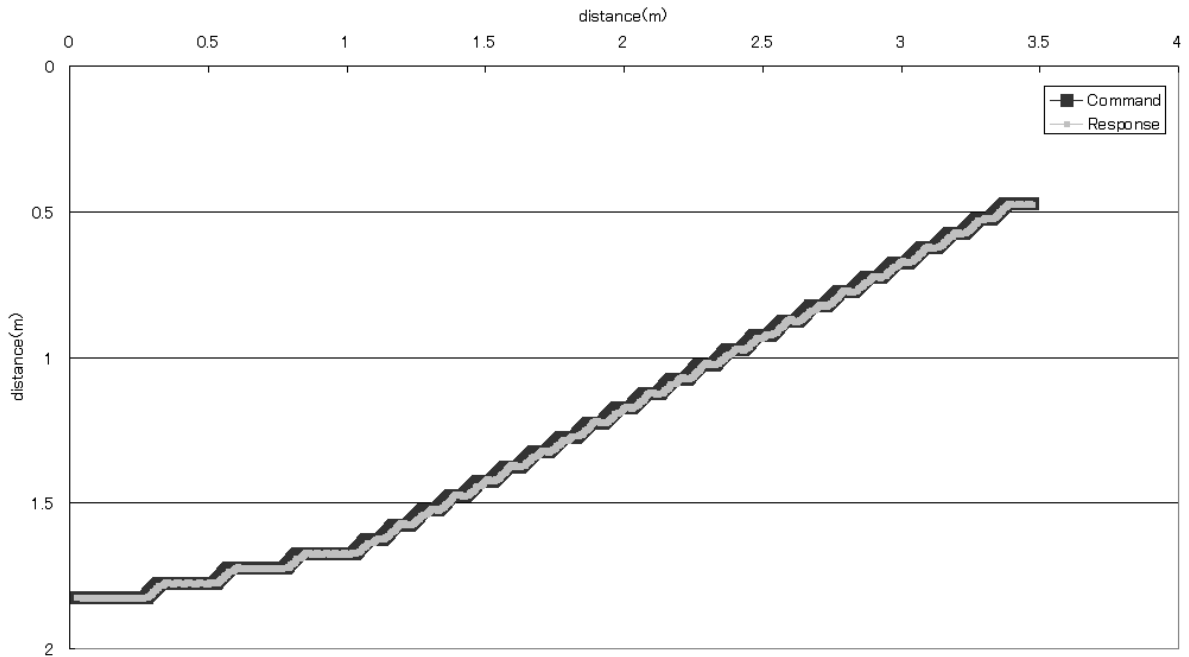


Fig.4-32: Position response (Segmentalized control volume)

Fig.4-32 の位置応答では、Fig.4-15 と比較して細かく位置変化しながらゴールに到達していることが分かる。Fig.4-33 の加速度応答では、Fig.4-16 と比較すると、1 秒後の加速度が抑えられていることが分かる。しかしながら、コントロールボリュームを細分化したためロボットの曲がる回数が多くなり、加速度変化の頻度は多くなっている。また Fig.4-32 と Fig.4-15 では軌道の形状が異なり、ゴール直前の加速度応答が異なる結果となっている。

得られた加速度応答に対し、FFT 解析を行い、ISO2631-1 で示された水平面に対する評価を 3 章と同様に行った。この時のスペクトルは Fig.4-34 となり、評価値は x 方向が 182.2、 y 方向が 311.4 となった。なお ISO2631-1 では評価値の判定基準がないため、本論文では他の軌道生成法との比較にのみ用いる。Fig.4-34 から、ISO2631-1 で規定されている水平面に対する振動周波数のうち、特に重みが高い 10Hz 以下においてスペクトルが高いことが分かる。本シミュレーションの軌道では、2~4 秒間の軌道がほぼ同じ形となっているため、この区間の周波数帯が強調されている。

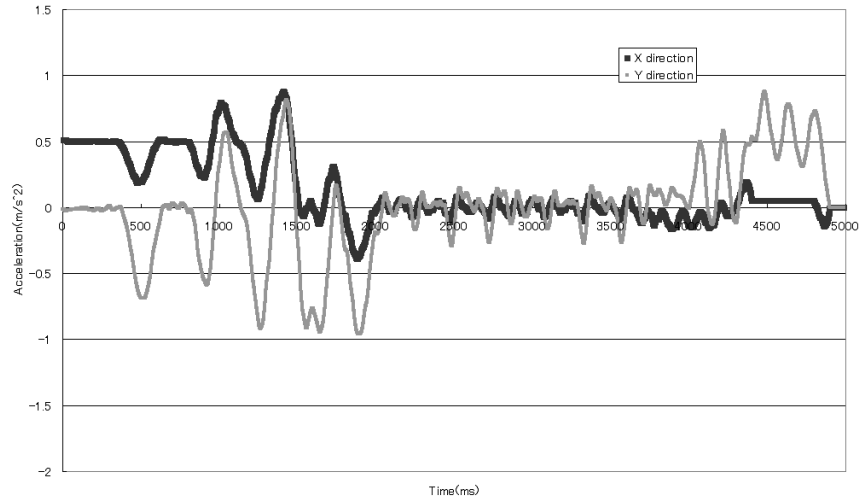


Fig.4-33: Acceleration response (Segmentalized control volume)

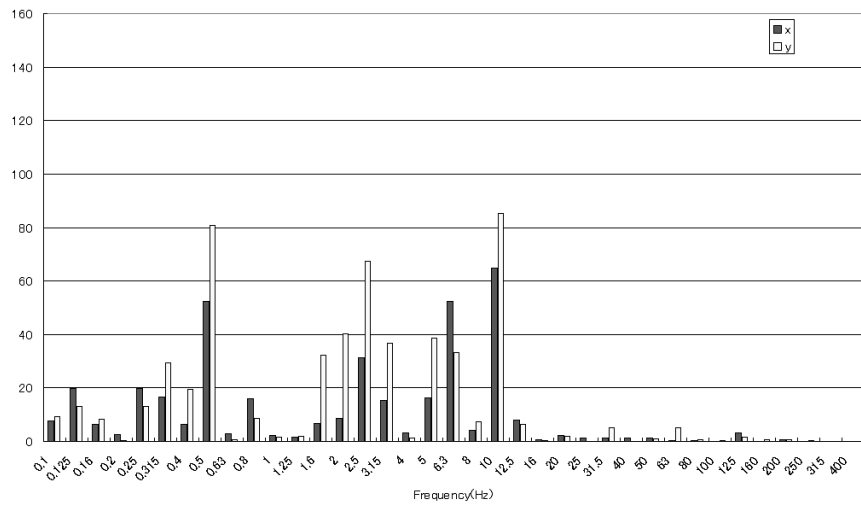


Fig.4-34: Spectrum (Segmentalized control volume)

4.6.2 中心点を用いてスプライン補間をした場合

本節では、コントロールボリュームの寸法を変更せず、得られたコントロールボリュームの中心点を用いて、コントロールボリュームごとにスプライン補間を行った。3次スプライン補間を使用し、各コントロールボリューム間の補間式を軌道として使用した。

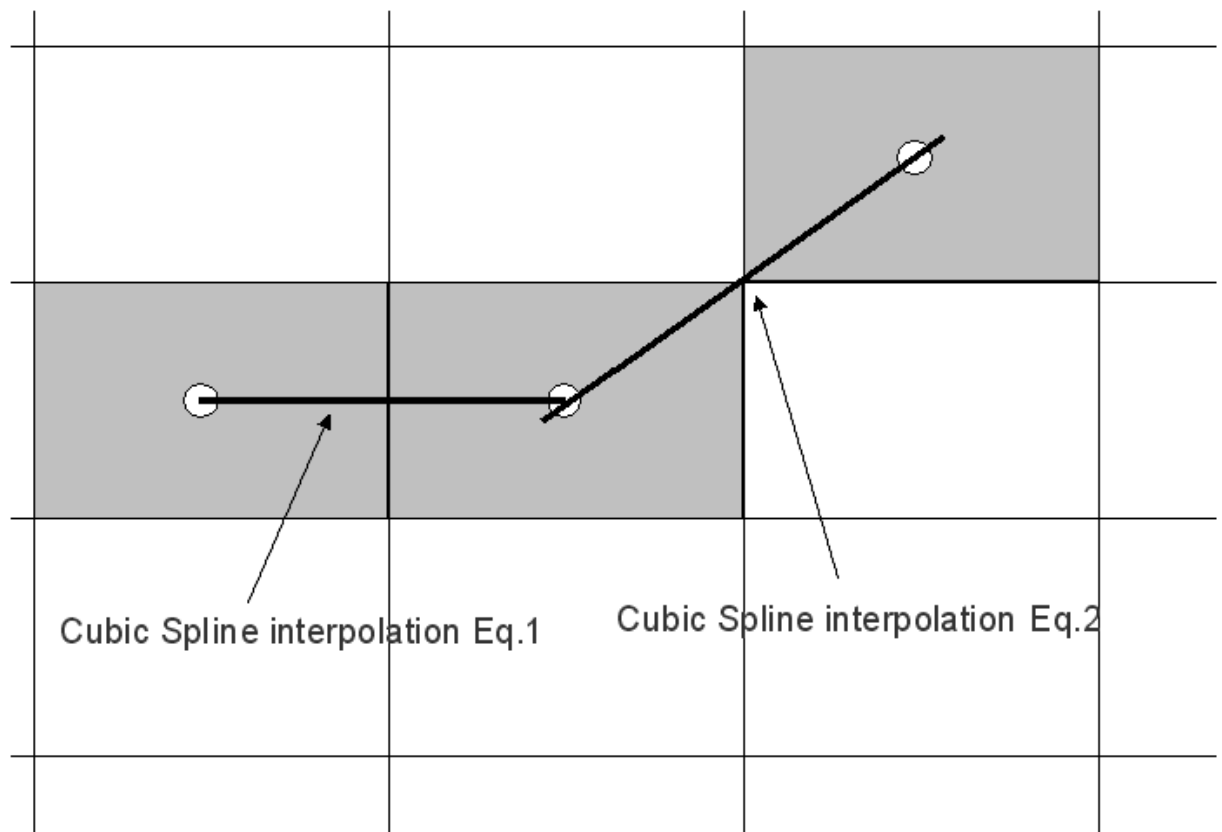


Fig.4-35: Cubic spline interpolation

この時のアルゴリズムは Fig.4-36 となる。

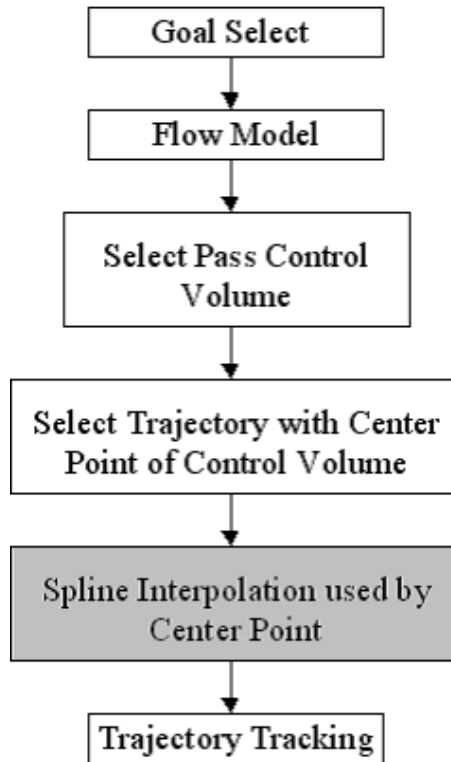


Fig.4-36: Trajectory planning algorithm (Spline interpolation with center point)

アルゴリズムの変更部分は中心点の選択後に軌道のスプライン補間処理を追加した箇所となる。そのためアルゴリズム変更に伴う計算量の増加量は、スプライン補間処理のみとなる。

位置指令値と位置応答値を Fig.4-37、加速度応答を Fig.4-38 に示す。

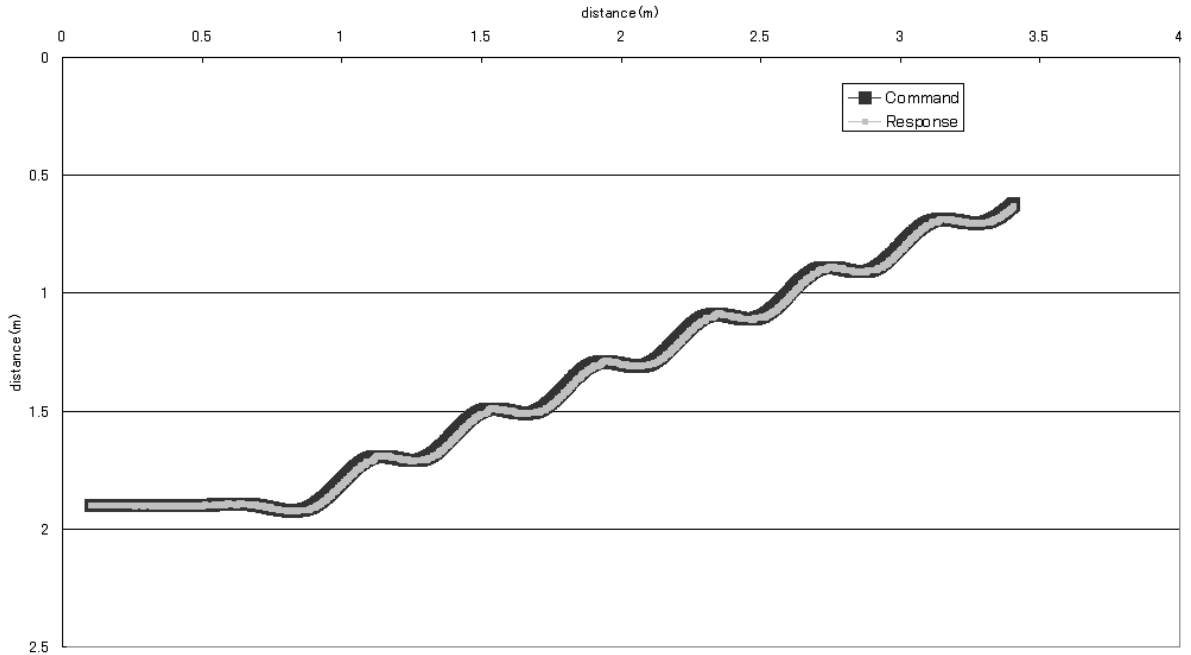


Fig.4-37: Position response (Spline interpolation with center point)

Fig.4-37 から、スプライン補間により各コントロールボリュームを 3 次方程式で接続する軌道が生成できていることが分かる。Fig.4-38 の加速度応答では Fig.4-16 と比較して、急激な加速度変化が発生していないことがわかる。しかしながら最高加速度は 1.6m/s^2 と高くなっている。これは、コントロールボリュームの中心を選択してスプライン補間を行っているため、変化量が大きくなっているためと推察される。

周波数応答は Fig.4-39 となり、評価値は x 方向が 285.6、 y 方向が 174.9 となった。Fig.4-39 から、0.5Hz のスペクトルが特に高くなっていることが分かる。これは、Fig.4-38 で現れている 1 秒後と 4 秒後の加速度変化が強く出ているためであると考えられる。評価値では x 方向については、0.5Hz の影響により Fig.4-34 より大きくなっている。 y 方向の評価値は 1Hz 前後の周波数が抑えられているため、小さくなっている。

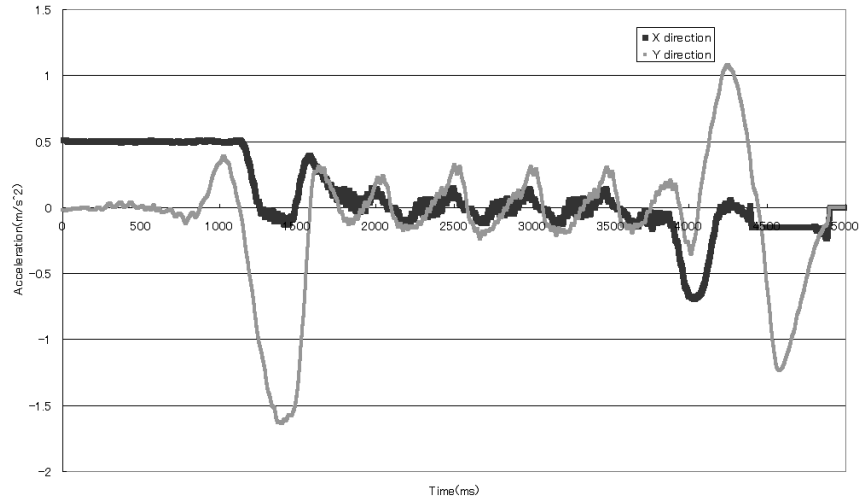


Fig.4-38: Acceleration response (Spline interpolation with center point)

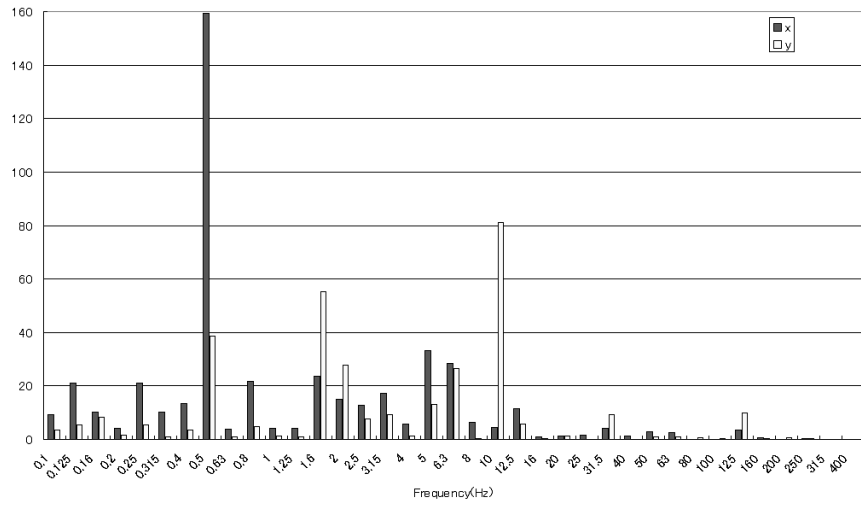


Fig.4-39: Spectrum (Spline interpolation with center point)

4.6.3 端点を用いてスプライン補間をした場合

本節では、コントロールボリュームの寸法を変更せず、得られたコントロールボリューム同士の端点を用いて、コントロールボリュームごとにスプライン補間を行った。コントロールボリュームの中心ではなく、端点を軌道近似の点列として使用することにより、より滑らかな軌道が得られる。

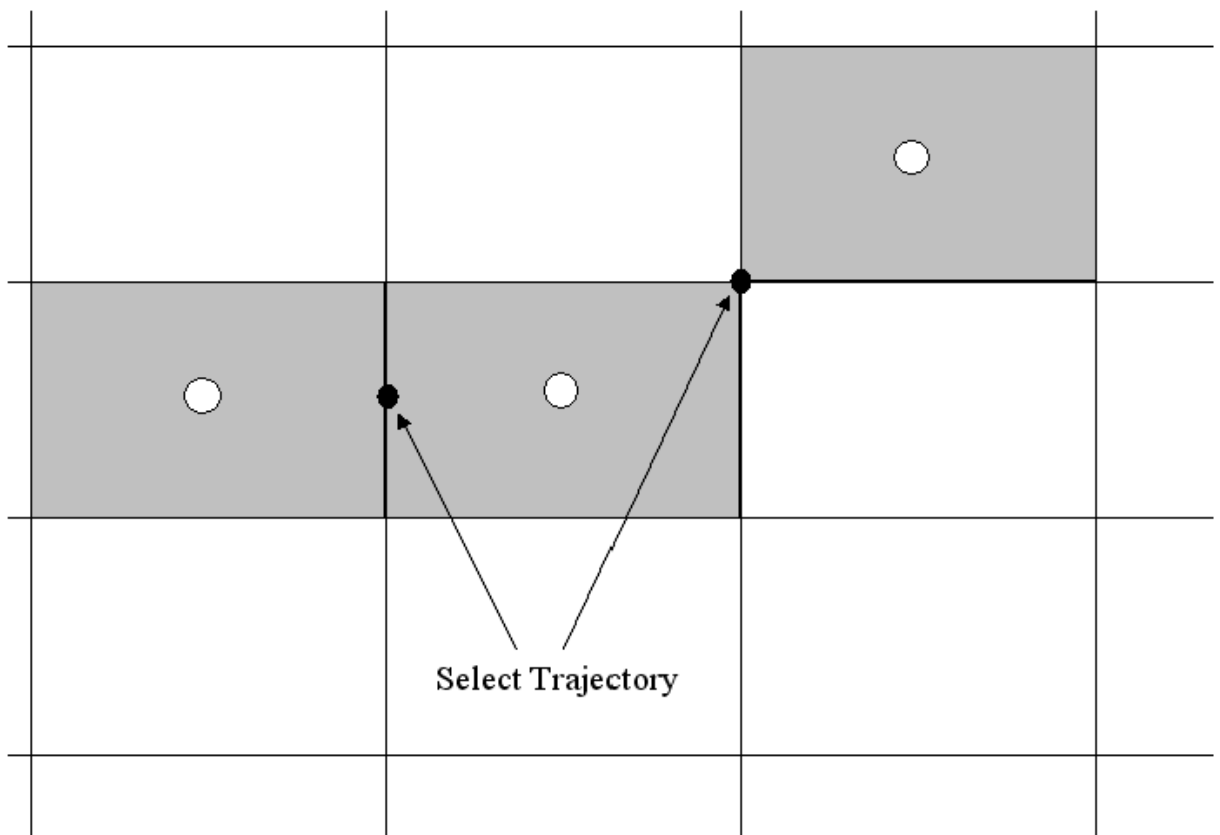


Fig.4-40: Select trajectory

この時のアルゴリズムは Fig.4-41 となる。

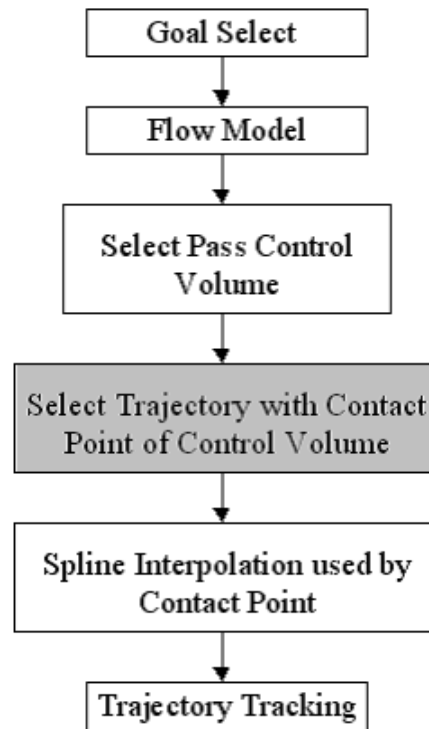


Fig.4-41: Trajectory planning algorithm (Spline interpolation with contact point)

アルゴリズムの変更部分は軌道として中心点を選択するか端点を選択するかの違いのため、前節と同様となる。

位置指令値と位置応答値を Fig.4-42、加速度応答を Fig.4-43 に示す。

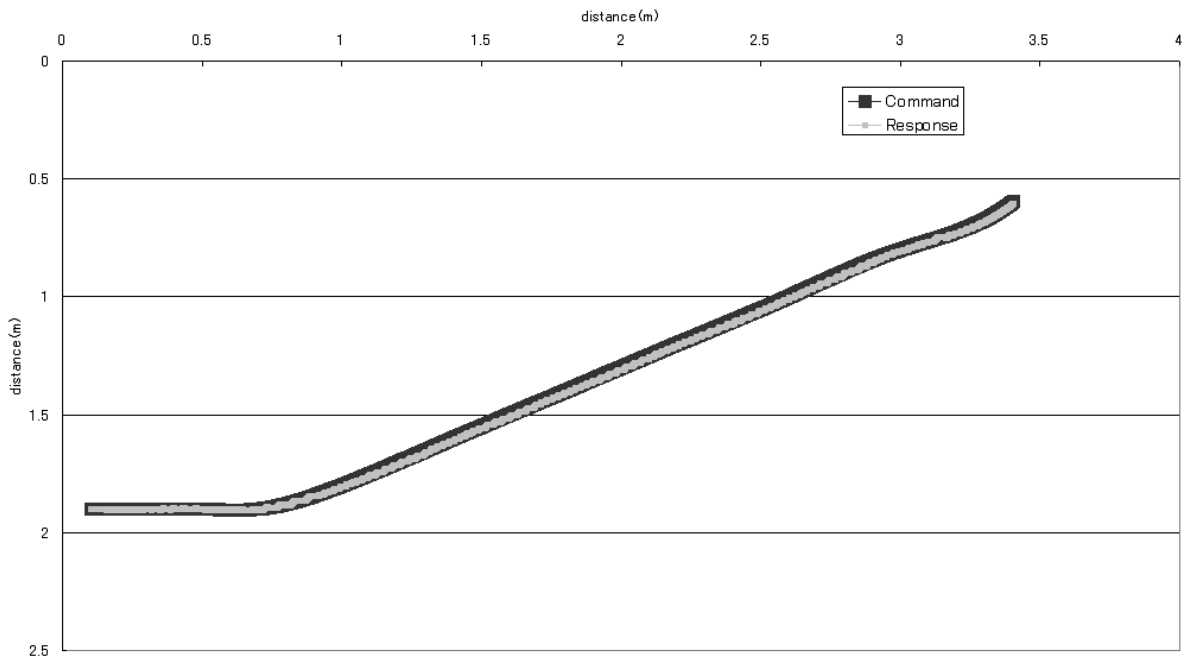


Fig.4-42: Position response (Spline interpolation with contact point)

Fig.4-42 の位置応答では、ほぼ直線の軌道を生成していることが分かる。Fig.4-43 の加速度応答では、最高加速度が 0.6m/s^2 程度と低く抑えられていることが分かる。周波数応答は Fig.4-44 となり、評価値は x 方向が 283.8、 y 方向が 128.5 となった。Fig.4-39 と同様に 0.5Hz のスペクトルが高くなっている。Fig.4-43 の加速度応答の変化量が抑えられているため、スペクトルも小さくなっている。

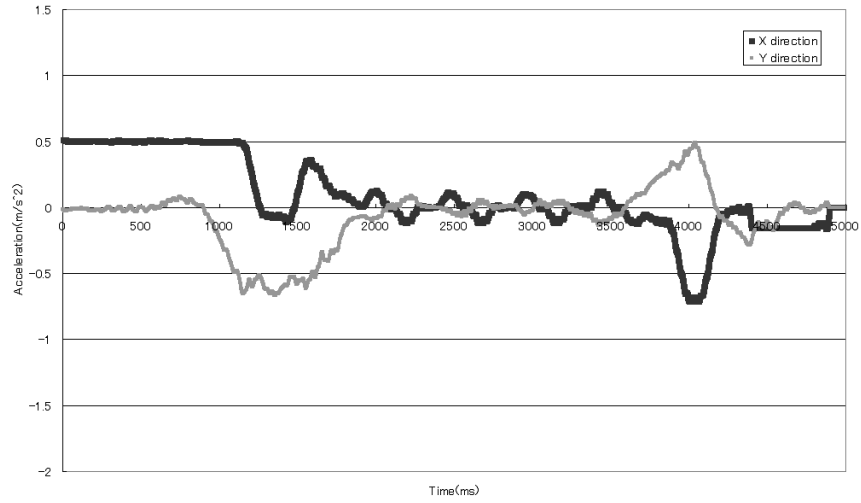


Fig.4-43: Acceleration response (Spline interpolation with contact point)

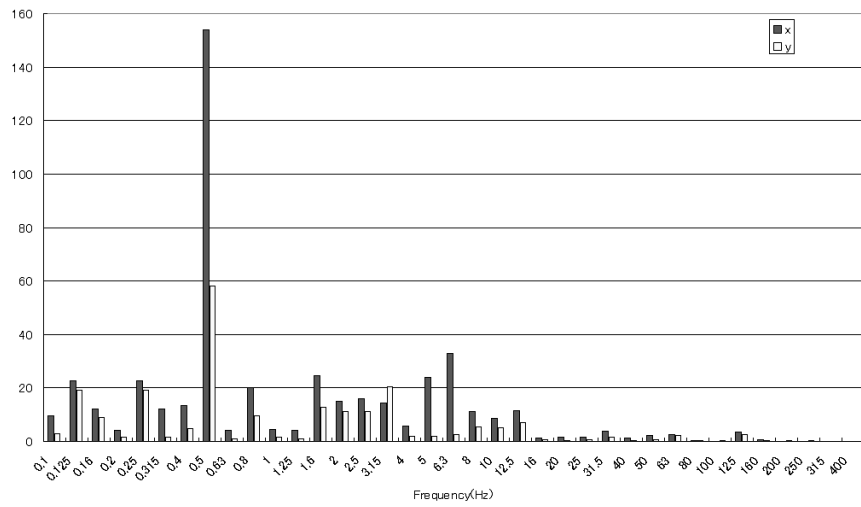


Fig.4-44: Spectrum (Spline interpolation with contact point)

4.6.4 流線ベクトルと Ferguson / Coons 曲線を用いた場合

本節では、流体モデルを使用した際に得られている、各コントロールボリュームに設定されている流線ベクトルを活用する軌道生成を行った。Ferguson / Coons 曲線^[53]では、始点の終点の位置、およびそれぞれの速度により曲線の方程式を決定する。流線ベクトルを活用することにより、より正確に障害物回避を実現することができる。本論文で Ferguson / Coons 曲線を使用した理由としては、簡単な計算で曲線方程式が求まること、選択した点を通過すること、速度成分を有するため流体モデルで算出した流速を用いることが可能なためである。

この時のアルゴリズムは Fig.4-45 となる。

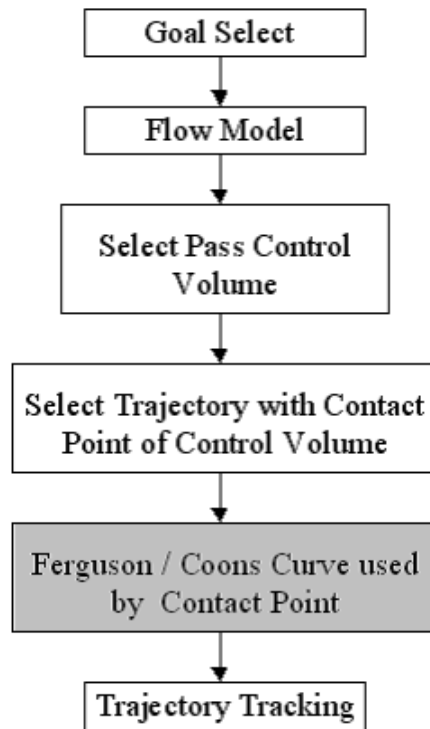


Fig.4-45: Trajectory planning algorithm (Ferguson / Coons curve)

Ferguson / Coons 曲線では始点、終点のパラメータを使用するだけで曲線方程式が求まるため、計算量は軌道として用いるコントロールボリュームの個数だけ増えることとなる。

位置指令値と位置応答値を Fig.4-46、加速度応答を Fig.4-47 に示す。

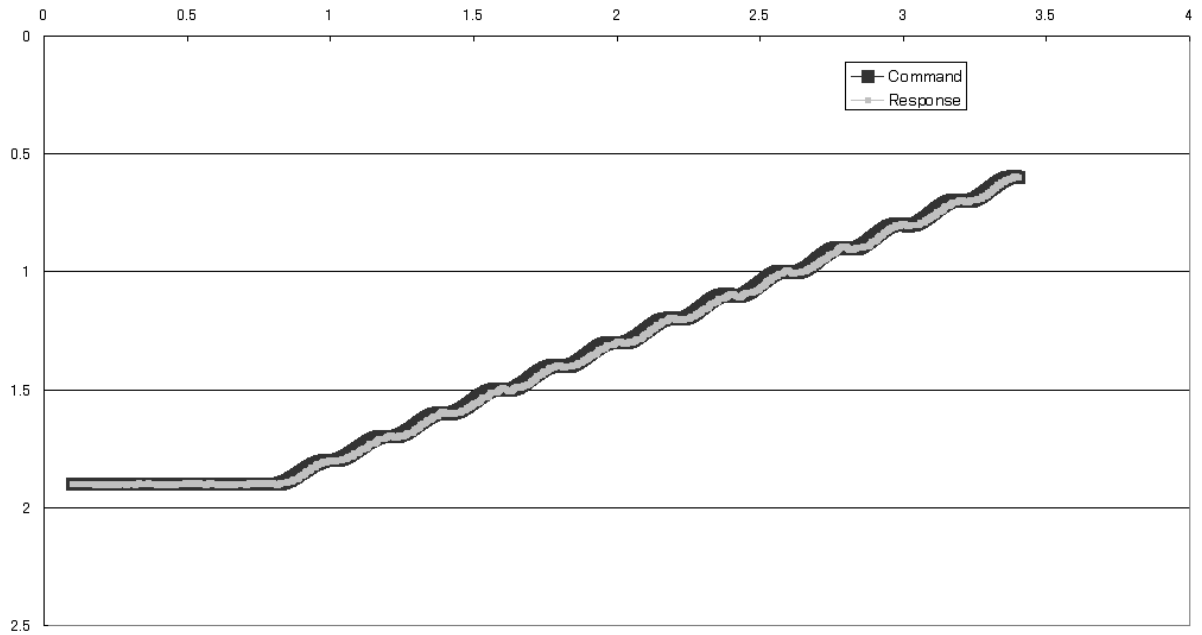


Fig.4-46: Position response (Ferguson / Coons curve)

Fig.4-42 より位置変化の多い軌道となるが、Fig.4-32、Fig.4-37 より位置変化が少ない軌道となっている。Fig.4-47 では、1秒後の直線運動から回転を始めるとき、 y 方向に大きな加速度が生じている。また、終点はコントロールボリュームの中心点としているため、回転半径が小さくなり、加速度が大きくなっている。周波数応答は Fig.4-48 となり、評価値は x 方向が 284.5、 y 方向が 154.8 となった。Fig.4-44 と同様に 0.5Hz のスペクトルが高くなっている。

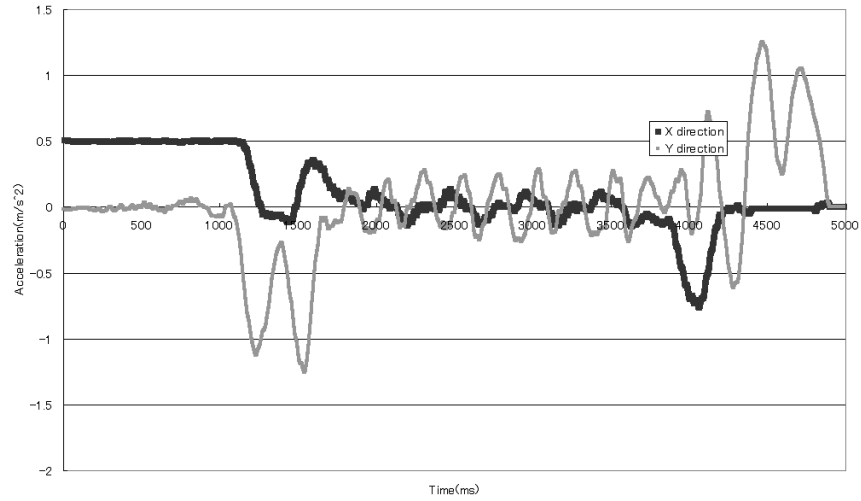


Fig.4-47: Acceleration response (Ferguson / Coons curve)

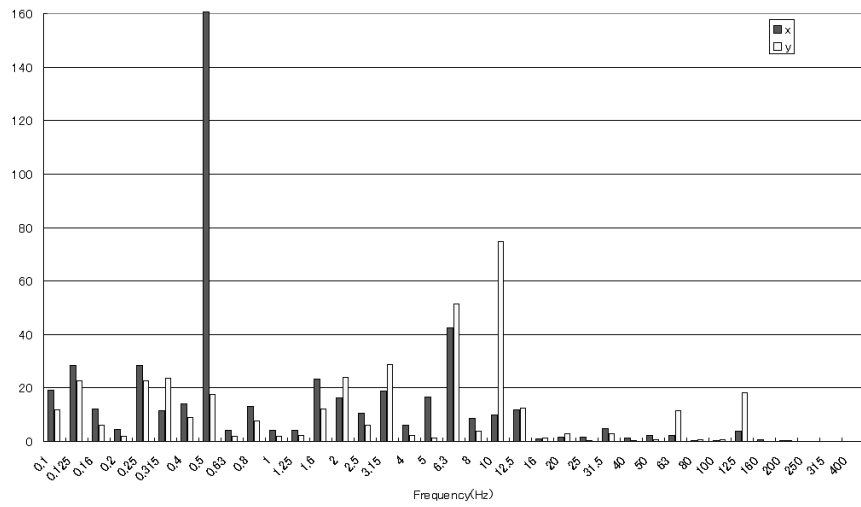


Fig.4-48: Spectrum (Ferguson / Coons curve)

計画軌道の最適化について、4つの手法について示した。そのまとめを Table.4.6 に示す。

Table 4.6: Evaluation of trajectory approach

項目	設定値を使用した近似			設定値と流線ベクトルを使用した近似
	細分化	スプライン補間 (中心)	スプライン補間 (端点)	流線と Ferguson / Coons 曲線
位置変化				
加速度変化				
最大加速度				
スペクトル解析 (ISO による 評価値 $[\sqrt{x^2 + y^2}]$)	× (360.8)	(334.9)	(284.0)	(323.9)
計算量	×			
総合評価	×			

Table.4.6 に示したように、本論文で提案した流体モデルを使用した軌道計画法では、端点を使用したスプライン補間を使用して軌道の近似を行う方法がもっとも適当である。

流線と Ferguson / Coons 曲線を使用した軌道近似では、流体モデルの適用により求めた流線ベクトルを活用して軌道を計画できるため、計算量が少ない利点があるが、軌道を3次方程式で表したため回転が多く、加速度応答が悪くなっている。それと比較して端点を使用した場合は軌道は滑らかに設計され、回転の少ない指令値を与えることが可能となっている。

障害物が存在し複雑な軌道が計画される場合の検証のため、端点をスプライン補間した軌道と流線および Ferguson / Coons 曲線を使用した場合について、Fig.4-19 のシミュレーションを行った。それぞれの位置応答、加速度応答、スペクトルを示す。

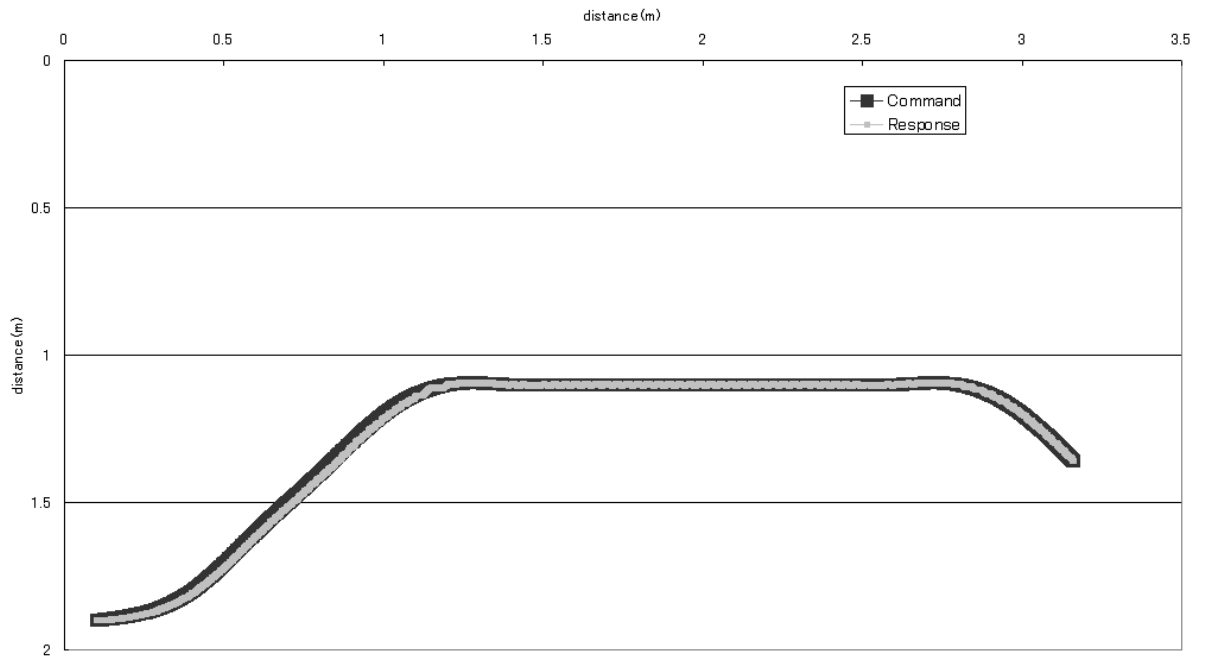


Fig.4-49: Position response No.2 (Spline interpolation with contact point)

評価値は端点スプライン補間の場合が $x : 150.5, y : 199.7$ 、Ferguson / Coons 曲線の場合が $x : 136.0, y : 426.1$ となった。位置応答、加速度応答、スペクトルのいずれも端点スプライン補間を行った場合が良い結果となっている。以上から障害物があり、軌道が複雑になる場合においても端点を用いたスプライン補間による軌道近似が、位置応答、加速度応答を滑らかにすることができる手法である。

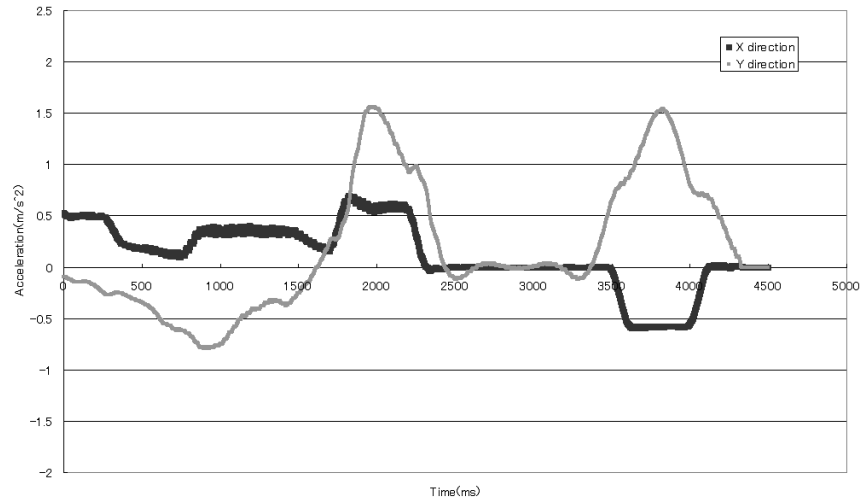


Fig.4-50: Acceleration response No.2 (Spline interpolation with contact point)

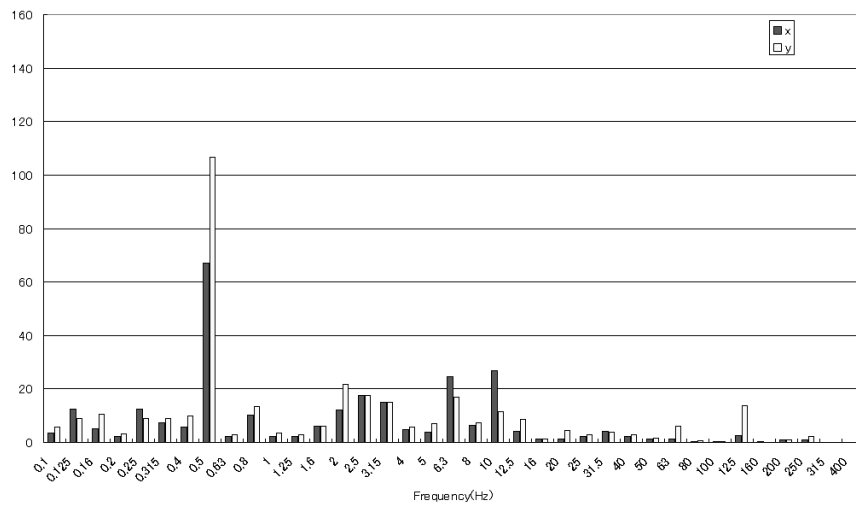


Fig.4-51: Spectrum No.2 (Spline interpolation with contact point)

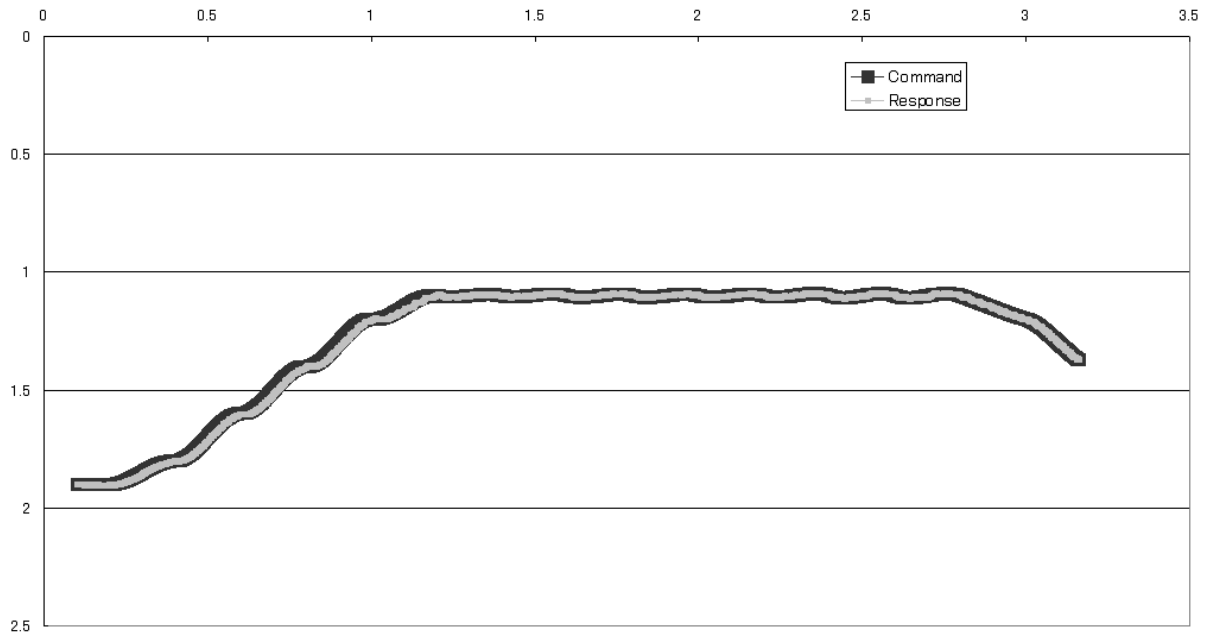


Fig.4-52: Position response No.2 (Ferguson / Coons curve)

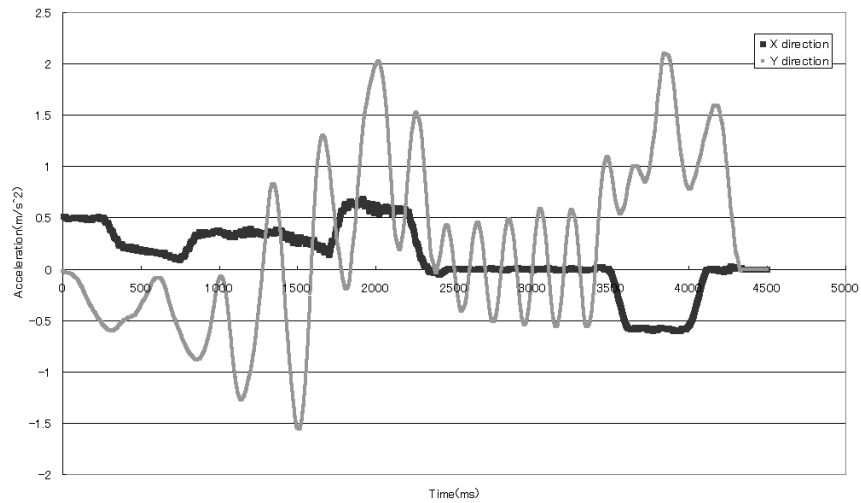


Fig.4-53: Acceleration response No.2 (Ferguson / Coons curve)

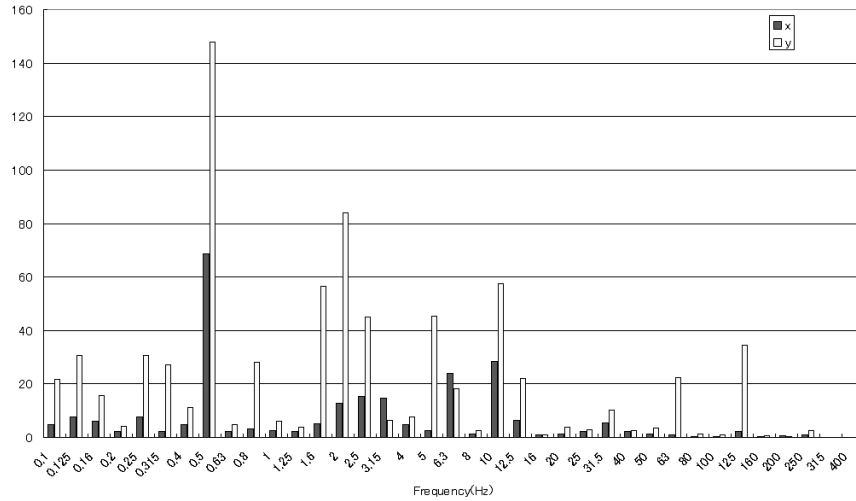


Fig.4-54: Spectrum No.2 (Ferguson / Coons curve)

4.7 4章のまとめ

本章では灰色予測を用いて追従対象の動作予測を行い、流体モデルを用いて軌道生成を行う手法について提案した。灰色予測を用いた追従対象の動作予測では、微分方程式を用いて動作について定式化し、追従対象の動作予測を高確率で行うことが可能となった。得られた追従対象の位置から、流体モデルを用いて軌道生成を行う。流体モデルを使用した軌道計画法は、環境変動が発生した場合でも少ない計算量で軌道の再計算が可能であること、流線が軌道となるため滑らかな軌道が生成できることが特徴となる。また、得られた計画軌道を滑らかにするために4つの手法について提案し、それぞれについてシミュレーションを行い有効性の確認を行った。その結果、端点を使用したスプライン補間を用いた軌道近似法が本論文では最適であると結論づけた。数値シミュレーションと実機を用いた実験により、提案手法の有効性を確認した。

第 5 章

結論

本論文では、環境変動が発生する環境において、車椅子型二輪移動ロボットを用いて、目標物体に追従する方法について述べた。

2章では本論文で研究対象となる移動ロボットのモデル化を行い、運動学方程式、動力学方程式を求めることにより、移動ロボットの速度とモータ回転角度の関係式であるヤコビ行列、および Lagrange 方程式からモータの入力トルクと両輪の回転角速度の関係式を導出した。ヤコビ行列を用いることにより、非ホロノミック拘束を受ける二輪型移動ロボットのモーションコントロールを可能とした。

3章では移動ロボットのモーションコントローラとして、時間スプライン近似法を用いたコントローラの設計方法と路面環境を考慮した速度指令値の生成方法について提案した。時間スプライン近似法では、従来から提案されている軌道の位置スプライン近似ではなく、時間に対するスプライン近似を行うことにより、位置指令値、速度指令値、加速度指令値の算出が容易となる。この3つの指令値を用いて予見制御を構成することにより、加速度変化が連続的な動作の実現を可能とした。

時間スプライン近似法を用いるためには速度計画が必要であり、その手法として路面環境を考慮した速度指令値の生成方法を提案した。実際に移動ロボットが動作する路面環境には凹凸のような外乱が必ず存在する。本手法ではその外乱をスペクトル解析することにより定量的に判定し、ISO 規格に基づいて外乱をからうける影響を最小にする速度指令値の生成を実現した。上記の手

法から、位置変化だけではなく、加速度変化も考慮したモーションコントロールの実現を可能とした。

4章では灰色予測を用いた移動物体の位置予測と流体モデルを用いた軌道計画法について提案した。移動ロボットを移動物体に追従させる場合、現実には追従対象が不動である場合は少ない。本研究ではその対策として追従対象の位置推定を行った。その手法として灰色モデルを用いた予測を提案した。灰色予測は大量のデータを元に追従対象の動作を微分方程式で表し、追従対象の位置を高い確率で推定できた。

追従対象の位置推定後、軌道生成を行う。本研究では流体モデルを用いた軌道生成方法を提案した。流体力学では、障害物がある場合などあらゆる環境において流体の流れをシミュレートする技術は確立されている。その手法を利用して、障害物などがある環境において流体モデルを適用し、その流線を軌道に採用することでゴールまで連続した軌道を計算することができる。流体モデルでは環境をコントロールボリュームに区切ることにより、環境変動があった場合には変化したコントロールボリュームだけ再計算を行う。このため、環境変化時の軌道再計算量は小さいものとなる。また、流体モデルを用いることにより、移動ロボットがゴールに向けた連続的な軌道を生成することができる。本研究では、従来用いられなかった流体力学の理論を用いて軌道計画を行い、その有効性を証明した。また計画された軌道に対し、複数の軌道近似法を提案し、それぞれについてシミュレーションを行い検証を行った。その結果として本研究では端点を使用したスプライン補間が軌道近似法として最適であると結論付けた。

本研究では移動ロボットが実際の環境で動作する場合を想定した軌道計画法とモーションコントロールについて提案した。提案手法についてはシミュレーションや実機を用いた実験により有効性の確認を行った。今後の課題としては、未知の障害物の検知や環境変動の推定などが考えられる。実際に移動ロボットを運用する場合には、あらゆる環境変動に対応したコントロールが必要になると考えられる。シミュレーションで与えた速度プロファイルは、軌道の直線部分や回転部分に関わらず設定されている。このため、ロボットの回転時に大きな加速度が働いている。この問題については速度プロファイルの与え方により解決できると考えられる。軌道の形状に応じた速度プロファイルの与え方は、今後の課題となる。

第 A 章

付録：移動物体の追従手法

A.1 本章の概要

本章では幾何学的なアプローチを用いた移動物体の追従手法を述べる。^[1] 目標とする移動物体までの相対距離および相対角度の計測し、移動物体とロボットの相対位置関係の情報に基づいた加速度制御系の設計法について示す。

A.2 移動物体の位置測定

移動物体の位置情報は、センサ情報により移動ロボットと移動物体の相対的な位置関係として取得される。

センサは Fig.A-1 で示されるように、移動ロボットの車輪の回転軸上に左右 1 器ずつ設置されている。この 2 器のセンサは移動物体に持たせた発信器との距離を計測する。このセンサ情報に基づいて、移動ロボットと移動物体との相対距離と相対方向を計測する。

ここで D_R 、 D_L は、発信機と左右のセンサまでの距離、 D_{ob} は移動ロボットの基準点と対象物体との相対距離とする。このとき、相対距離 D_{ob} 、および相対角度 ψ は、幾何学的関係に基づく距離平均と余弦定理より (A.1)、(A.2) 式となる。

$$D_{ob} = \frac{D_R + D_L}{2} \quad (\text{A.1})$$

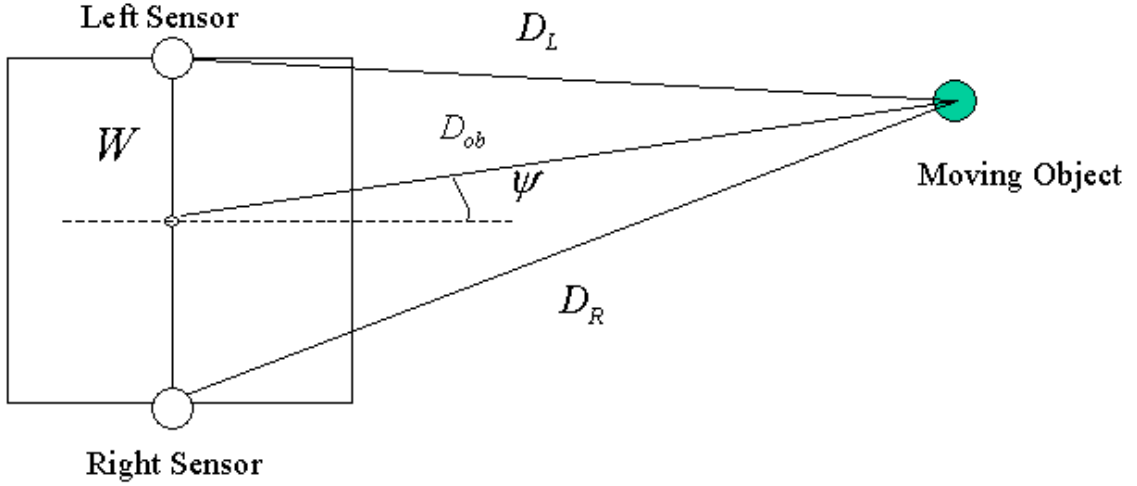


Fig.A-1: Positional measurement of movement object

$$\psi = \arccos\left(\frac{4D_{ob}^2 + W^2 - 4D_L^2}{4WD_{ob}}\right) - \frac{\pi}{2} \quad (\text{A.2})$$

以上より、移動物体と移動ロボットとの相対位置関係の情報ができ、移動ロボットの世界座標における位置情報と組み合わせることによって移動物体の絶対位置情報も取得可能となる。

A.3 加速度制御系の設計

A.3.1 並進加速度指令値の生成

移動物体と移動ロボットとの相対運動の情報に基づいて、ロボットの中心、すなわちロボットの基準点 $P_0 = \boldsymbol{x} = (x_0, y_0)$ の加速度指令値の生成を行う。ここで、 V_r を相対速度、 D_{cmd} を設定距離と定義する。相対速度 V_r は相対距離 D_{ob} の疑似微分で算出される。ロボットの加速度指令値 $|\ddot{\boldsymbol{x}}_{cmd}|$ は、ロボットと移動物体との距離 D_{ob} 、相対速度 V_r 、設定距離 D_{cmd} に基づいて、(A.3) 式により決定される。ここで K_p 、 K_v はそれぞれ位置ゲイン、速度ゲインを表す。

$$|\ddot{\boldsymbol{x}}_{cmd}| = K_v V_r + K_p (D_{ob} - D_{cmd}) \quad (\text{A.3})$$

(A.3) 式では、第1項が移動物体の速度にロボットの速度を合わせ、第2項が移動物体との距離

を設定距離に保つ役目を果たす。この並進加速度指令値 $|\ddot{x}_{cmd}|$ を相対角 ψ に基づいて方向成分に分配し、 $\ddot{x}_{cmd} = [\ddot{x}_{0_cmd}, \ddot{y}_{0_cmd}]^T$ を生成する。

A.3.2 回転角加速度指令値の生成

対象角成分に関してはPD制御に基づいた角加速度制御系を構成する。

ロボットの方向角指令値 ψ_{cmd} 、および方向角速度指令値 $\dot{\psi}_{cmd}(=0)$ と、ロボットの方向相対角応答値 ψ_{res} 、 $\dot{\psi}_{res}$ との偏差から $\ddot{\phi}_{cmd}$ を決定する。

$$\ddot{\phi}_{cmd} = K_{pd}(\psi_{cmd} - \psi_{res}) - K_{vd}\dot{\psi}_{res} \quad (A.4)$$

ここで K_{pd} 、 K_{vd} はそれぞれ方向角 ψ に関する位置ゲイン、速度ゲインである。簡単化のため相対角度 ψ の情報に基づいて、絶対座標における角加速度指令値 $\ddot{\phi}_{cmd}$ を生成している。

A.4 仮想目標を使用した追従

移動ロボットが追従を開始した段階で、移動物体までの距離が設定距離よりも離れている時、モータの回転角加速度指令値は急激に変化してしまう。その事態を避けるために仮想目標を設定し、その仮想目標を移動物体に近づけることにより、速度の変化が滑らかな追従を実現する。仮想目標の初期位置は、移動ロボットから移動物体の方向へ設定距離分前方に設置する。仮想目標の移動速度は (A.5) 式となる。

$$V_{vir} = V_{ob} + K_{ov}D_{vir} \quad (A.5)$$

V_{vir} が仮想目標の速度、 V_{ob} が移動物体の速度、 K_{ov} はゲイン、 D_{vir} が仮想目標から移動物体までの相対距離である。ゲイン K_{ov} は移動物体に追いつくために要する、所望の時間の逆数である。この式により軌道追従を終え、移動物体追従を再開した時の速度変化を小さくすることができる。

この計算された値をもとに仮想目標の位置を算出し、仮想目標を追従することによって移動物体の追従を行う。

A.5 シミュレーション

本章で提案した幾何学的な関係を用いた追従手法の確認としてシミュレーションを行った。ここでは移動物体が正弦波移動し、静止する場合を想定し、その結果を示す。

A.6 移動物体が正弦波移動し、静止する場合

移動ロボットの初期位置、初期姿勢を $(0.0, 0.0, 0.0)$ 、移動物体の初期位置、初期姿勢を $(0.5, 0.0, 0.0)$ とし、移動物体を $(0.5, 0.3 \sin(\omega t))$ の速度で正弦波移動を 6 秒間させた。この時の移動ロボットの軌跡を Fig.A-2 に、移動物体と移動ロボットの距離を Fig.A-3、移動ロボットの車輪の回転角速度を Fig.A-3 に示す。

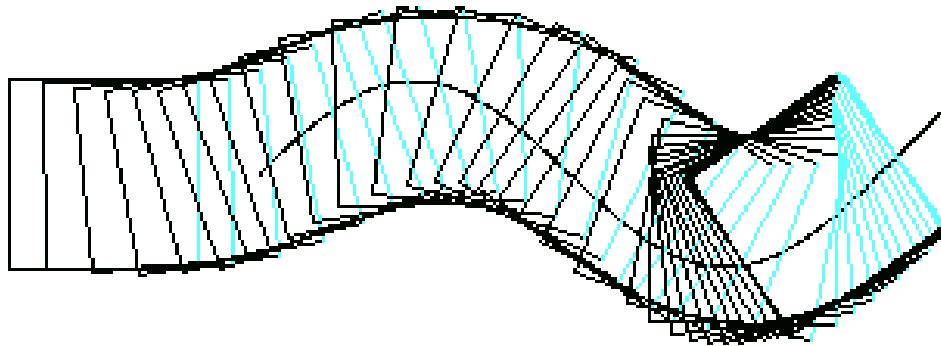


Fig.A-2: Mobile robot pass

移動ロボットが正弦波を正確に追従し、移動物体との距離も保たれていることが認められる。しかしながら移動ロボットの速度は大きく変化していることがわかる。

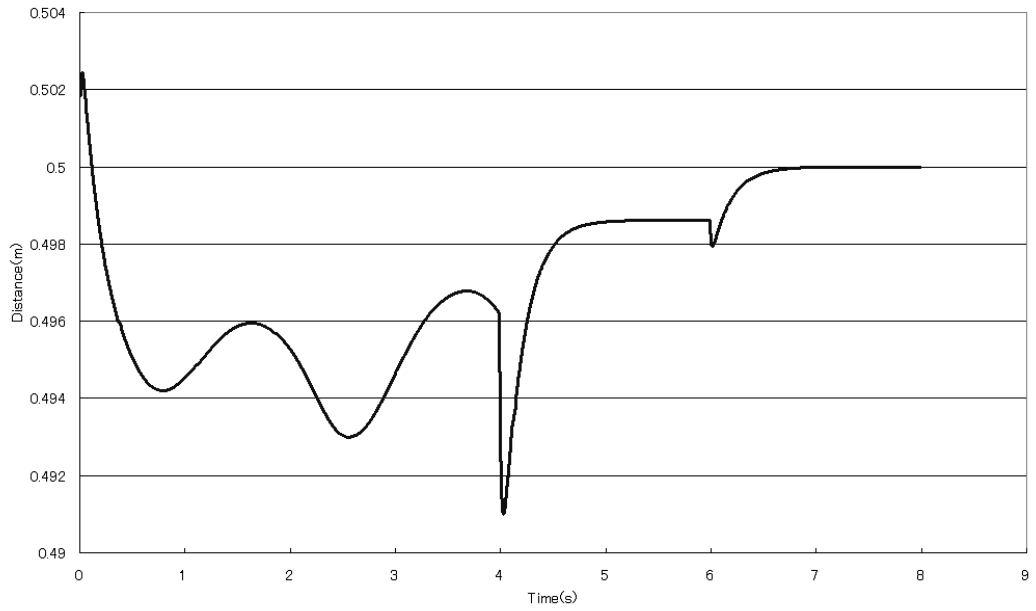


Fig.A-3: Distance between robot and mobile object

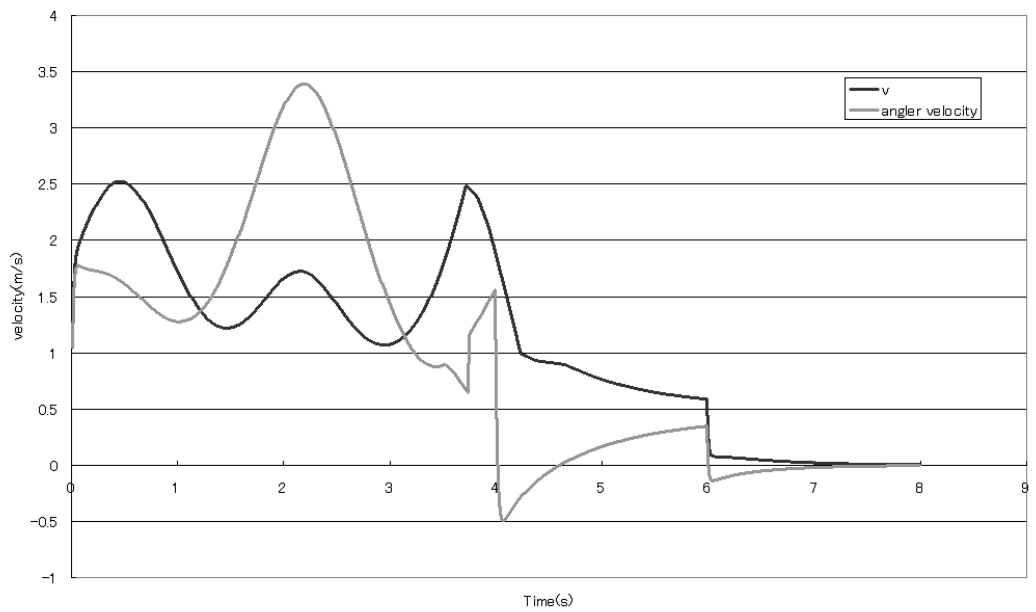


Fig.A-4: Velocity and rotate angler velocity of mobile robot

A.7 実験

本章で提案した追従法の有効性を実証するため、実機による実験を行った。本章では実験システムの説明、および実験結果を示す。

A.7.1 障害物が存在しない場合

本論文で提案した追従法の有効性を確認するため、移動物体の追従について実機による実験を行った。追従対象の人間はロボットの前方 1.4m に位置し、8 秒後に 0.5m 移動した。なお、ロボットと追従対象との設定距離は 1m とした。そのときの移動物体とロボットの距離を Fig.refexp3-1 に示す。Fig.refexp3-1 から、ロボットは 1m の制限距離を守って、移動物体を追従していることが分かる。

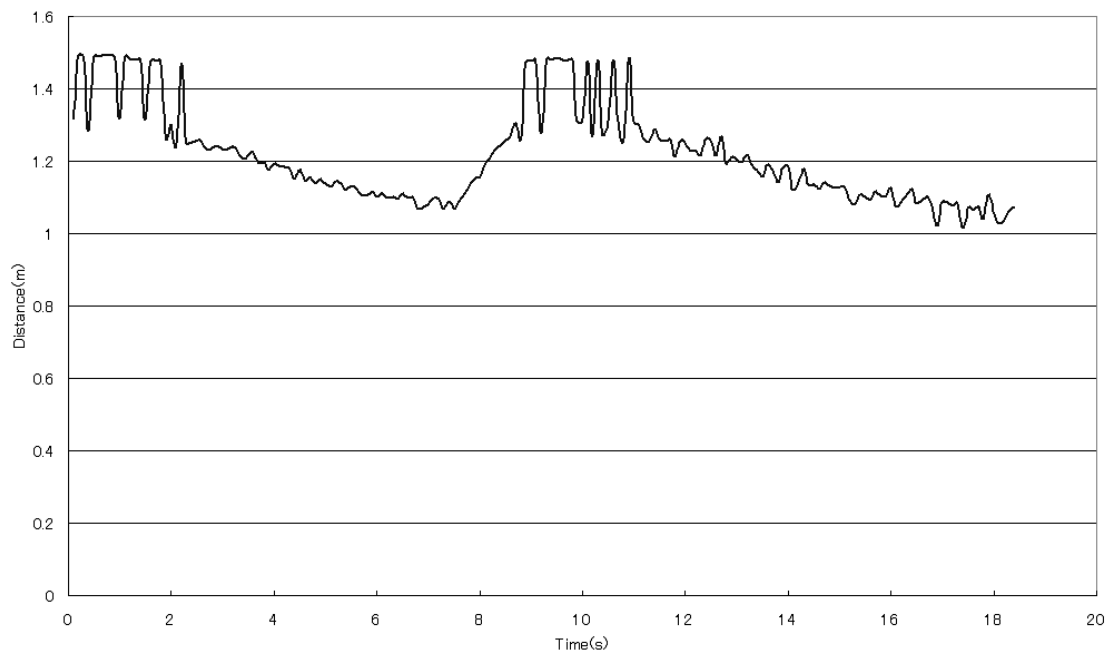


Fig.A-5: Experiment result: Distance between robot and target

A.7.2 障害物が存在する場合

障害物が存在する場合、障害物回避の軌道を生成、それを正確に追従し、再び移動物体を追従する実験を行った。そのときの移動ロボットの位置指令値と位置応答値を Fig.A-6 に示す。この時の設定距離は 0.5m、仮想ゴールは (3.0,1.0) に設定した。移動ロボットは障害物を回避する軌道を生成し、それを正確に追従したことがわかる。さらに、仮想ゴールに到達し障害物を回避した後、移動物体追従を再開していることが分かる。これらの結果より、本手法によって障害物の回避とその後の移動物体追従の再開が実現できることが確認された。

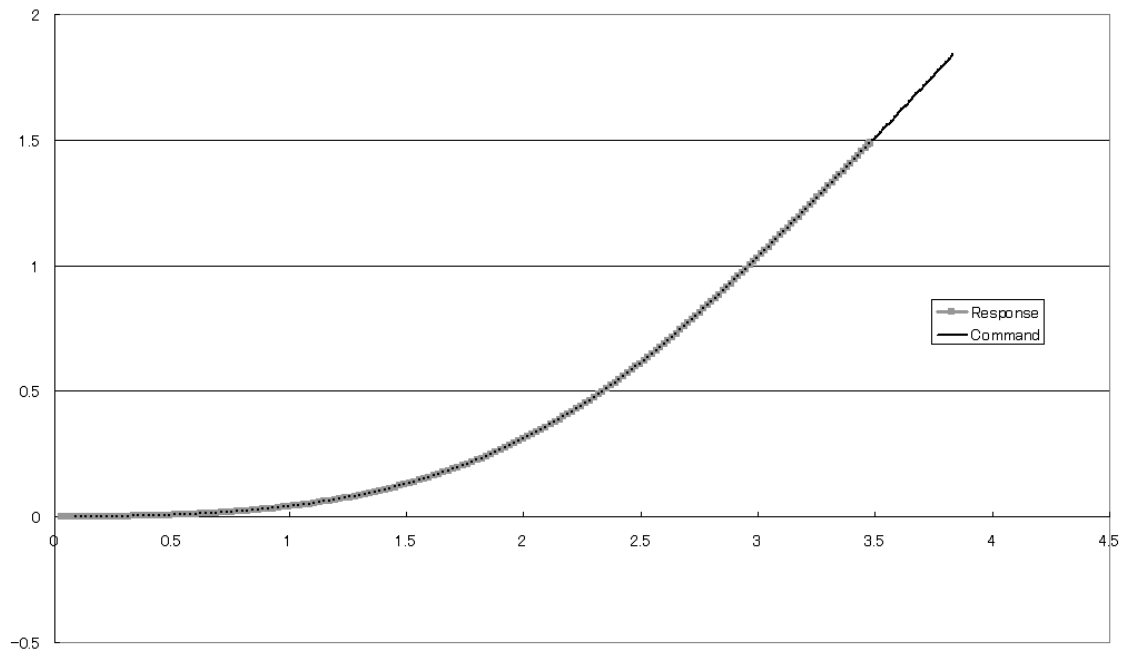


Fig.A-6: Experiment result: Robot position response and command

A.8 まとめ

本章では、外界センサからの距離データに基づいて、移動物体との相対運動を計算し、その値をもとに移動物体の追従を行う手法を提案した。さらに単純な直線追従だけでは追従できない環境下における動作を想定し、動的に仮想目標の設置と軌道計画を行うことにより障害物の回避動作とその後の移動物体追従の再開を実現する手法を提案した。本手法の特徴を下記に示す。

- 移動物体の追従と障害物回避の両立が可能となる
- ロボットの位置変化、速度変化は大きく変化している
- 移動物体が急激に変化した場合、ロボットの動作も急激に変化してしまう

加速度が大きいと、移動ロボットはエネルギーを大きく使用してしまい、かつ搭乗する人間や搬送する荷物などにも大きなダメージを与えてしまう。次章では加速度変化を滑らかにする手法を提案する。

謝辞

慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科村上研究室で本研究活動を行ったこの6年間半の研究で多くの方々の御指導、御鞭撻により、ここに本論文を執筆することができました。本論文を執筆するに当たり、常日頃より温かく熱心に御指導と御鞭撻賜りました慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科助教授 工学博士 村上俊之先生に深く感謝いたします。

本論文をまとめるにあたり、貴重なご教示を賜りました慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授 工学博士 沢孝一郎先生に厚く御礼を申し上げます。

本論文の具体的な内容に関し、多くの有意義な御助言と御教授を賜りました慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科教授 工学博士 大西公平先生に感謝の念に耐えません。

本論文をまとめるにあたり、多くの有意義な御助言を賜りました慶應義塾大学理工学部システムデザイン工学科助教授 工学博士 矢向高弘先生に心から感謝いたします。

本研究を遂行するにあたり、多くの御協力と御指導を頂きました、村上研究室の方々、大西研究室の方々、沢研究室の方々、先輩方に厚く御礼申し上げます。

また、在職しながら博士課程に進むことを認めて頂いた株式会社東芝 交通車両情報システム部 開発設計第三担当の方々に感謝いたします。

最後に、博士課程研究生活を支えて頂いた妻と息子に心より感謝いたします。

皆様方の御支援、御協力により有意義な研究を行うことができ、集大成として本論文を完成させることができました。この経験を糧にして社会に貢献して行ければと考えております。本当に有難う御座いました。

参考文献

- [1] Junichi Miyata, Toshiyuki Murakami, Kouhei Ohnishi: "An Approach to Tracking Motion of Mobile Robot for Moving Object" 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, pp.2249-2254, 2000
- [2] Junichi Miyata, Toshiyuki Murakami, Kouhei Ohnishi: "Determination of Time Based Spline Trajectory and its Application to Continuous Circular Path Planning in Mobile Robot" 5th Franco-Japanese Congress 3rd European-Asian Congress Besancon 2001 - France, pp.231-235, 2001
- [3] 宮田淳一, 村上俊之, 大西公平: "時間スプライン近似法を用いた自律移動ロボットの軌道追従制御" IEEJ. 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.7, pp778-783, 2003
- [4] カレル・チャペック (千野 栄一訳): "ロボット (R.U.R)" 岩波文庫
- [5] ヒュギーヌス (松田 治, 青山 照男訳): "ギリシャ神話集" 講談社学術文庫
- [6] ホメーロス (呉 茂一訳): "イーリアス" 岩波文庫
- [7] 西尾 光一: "撰集抄" 岩波文庫
- [8] 篠崎 晃: "メカトロニクス・ロボット" 一ツ橋書店, 1982
- [9] 中 英昌: "ロボットのことがわかる本" 日本実業出版社, 1983
- [10] ISO2631-1: "Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements" International Organization for Standardization, 1997

- [11] T. Murakami, F. Yu and K. Ohnishi Torque Sensorless Control in Multi-Degrees-of-Freedom Manipulator IEEE. Trans. on Industrial Electronics Vol.40, No.2, pp259-265, 1993
- [12] 大西 公平: "外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール" 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.4, pp.486-493, 1988
- [13] 中村 仁彦: "非ホロノミックロボットシステム 第一回" 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.4, pp.521-528, 1993
- [14] 中村 仁彦: "非ホロノミックロボットシステム 第二回" 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.5, pp.655-662, 1993
- [15] 中村 仁彦: "非ホロノミックロボットシステム 第三回" 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.6, pp.837-844, 1993
- [16] 中村 仁彦: "非ホロノミックロボットシステム 第四回" 日本ロボット学会誌, Vol.11 No.7, pp.999-1005, 1993
- [17] 中村 仁彦: "非ホロノミックロボットシステム 第五回" 日本ロボット学会誌, Vol.12 No.2, pp.231-239, 1994
- [18] 服部 仁: "非滑り拘束力・アーム姿勢および関節トルクリミットを同時に考慮した移動マニピュレータの制御" 慶應義塾大学大学院理工学研究科 修士論文, 1993
- [19] 池田 貴幸, 南 澤槿, 美多 勉: "浮遊機械のノンホロノミック可変拘束制御の提案と収束性の検討" 日本ロボット学会誌, Vol.18 No.6, pp.847-855, 2000
- [20] 三平 満司: "非ホロノミック系のフィードバック制御" 計測と制御, Vol.36 No.6, pp.396-403, 1997
- [21] Xiaoping Yun, Yoshio Yamamoto: "Internal Dynamics of a Wheeled Mobile Robot" Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems Yokohama, Japan - July 26-30 1993, pp.1288-1294, 1993
- [22] 西山 康宏: "追従制御技術" 計測と制御, Vol.36 No.3, pp.184-186, 1997

- [23] 伊東 敏夫: "追突防止技術" 計測と制御, Vol.36 No.3, pp.187-189, 1997
- [24] 藤岡 健彦: "自律運転システムにおける制御技術" 日本ロボット学会誌, Vol.17 No.3, pp.328-333, 1999
- [25] 山田 克彦: "非ホロノミック系の軌道生成" 計測と制御, Vol.36 No.6, pp.390-395, 1997
- [26] 岩村 誠人, 山本 元司, 毛利 彰: "非ホロノミック Caplygin System の近似最適軌道計画" 日本ロボット学会誌, Vol.17 No.5, pp.742-749, 1999
- [27] Wu Weiguo, Chen Huitang, Woo Peng-Yung: "Optimal Motion Planning for a Wheeled Mobile Robot" Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan - May 1999, pp.41-46, 1999
- [28] W.L.Xu, B.L.Ma, S.K.Tso: "Curve Fitting Approach to Motion Planning of Nonholonomic Chained Systems" Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan - May 1999, pp.811-816, 1999
- [29] Yutaka J.Kanayama, Fariba Fahroo: "A New Line Tracking Method for Nonholonomic Vehicles" Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico - April 1997, pp.2908-2913, 1997
- [30] A.M.Shkel, V.J.Lumelsky: "On Optimal Nonholonomic Paths in a Limited Space" Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico - April 1997, pp.2908-2913, 1997
- [31] S.Sekhavat, M.Chyba: "Nonholonomic Deformation of a Potential Field for Motion Planning" Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan - May 1999, pp.817-822, 1999
- [32] Rajesh rajamani, Seibum B.Choi, J.Karl Hedrick: "Design and Experimental Implementation of F Control for a Platoon of F Automated Vehicles" Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division, pp.681-689, 1998

- [33] Yunfeng Wang, Gregory S. Chirikjian: "A New Potential Field Method for Robot Path Planning" Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation San Francisco, CA - April 2000, pp.977-982, 2000
- [34] Gabriel Ramirez, Said Zeghloul: "A New Local Path Planner for Nonholonomic Mobile Robot Navigation in Cluttered Environment" Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics and Automation San Francisco, CA - April 2000, pp.2058-2063, 2000
- [35] Jorge Dias, Carlos Paredes, Inacio Fonseda, Helder Araujo, Jorge Batista, Anibal T. Almeida: "Simulating Pursuit with Machine Experiments with Robots and Artificial Vision" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.14 No.1, pp.1-18, 1998
- [36] Leopoldo Jetto, Sauro Longhi: "Development and Experimental Validation of an Adaptive Extended Kalman Filter for the Localization of Mobile Robots" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15 No.2, pp.219-229, 1999
- [37] Huosheng Hu, Dongbing Gu, Michael Brady: "Outdoor Navigation of a Mobile Robot with Multiple Sensors" SPIE, Vol.3210, pp.13-22, 1998
- [38] F. Diaz del Rio, G. Jimenez, J.L. Sevillano, S. Vicente, A. Civit Balcells: "Generalization of Path Following for Mobile Robots" Proceedings of the 1999 IEEE International Conference on Robotics and Automation Detroit, Michigan - May 1999, pp.7-12, 1999
- [39] 吉岡 孝, 登尾 啓史, 富永 昌治: "移動ロボットのセンサベースナビゲーションについて" 日本ロボット学会誌, Vol.19 No.8, pp.991-1002, 2001
- [40] 王 輝宇, 深尾 隆則, 足立 紀彦: "非ホロノミック移動ロボットの適応トラッキング制御" 日本ロボット学会誌, Vol.19 No.2, pp.271-276, 2001
- [41] DENG JL: "CONTROL-PROBLEMS OF GREY SYSTEMS" Systems & Control Letters, Vol.5, pp.288-294, 1982
- [42] 永井 正武: "わかる灰色理論と工学応用方法" 共立出版, 2004

- [43] スハス・V. パタンカー: ”コンピュータによる熱移動と流れの数値解析” 森北出版, 1985
- [44] 越塚 誠一: ”インテリジェント・エンジニアリング・シリーズ 流体力学” 培風館, 1997
- [45] 香月 正司, 中山 顕: ”熱流動の数値シミュレーション 基礎からプログラムまで” 森北出版, 1990
- [46] J. H. ファーツィガー: ”コンピュータによる流体力学” シュプリンガーフェアラーク東京, 2003
- [47] 林 健次, 遠山 洋, 二之宮 弘: ”パソコンによる流れ解析” 朝倉書店, 1986
- [48] 基礎流体力学編集委員会: ”基礎流体力学” 産業図書, 1989
- [49] P. Vadakkepat, K. C. Tan, and M. Wang: ”Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning” Congress of Evolutionary Computation, pp. 256-263, 2000
- [50] D. H. Kim and S. Shin: ”Local path planning using a new artificial potential function configuration and its analytical design guidelines” Advanced Robotics 20, pp. 115-135, 2006
- [51] Jose Neira, Juan D. Tardos, Joachim Horn, Gunther Schmidt: ”Fusing Range and Intensity Images for Mobile Robot Localization” IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.15 No.1, pp.76-84, 1999
- [52] 飯野 穰他: ”予見・予測制御” 計測と制御, Vol.39 No.5, pp.311-320, 2000
- [53] 三浦曜: ”CAD・CG 技術者のための NURBS 早分かり” 工業調査会

研究業績目録

1. 定期刊行誌掲載論文（主論文に関連する原著論文）

- (1) 宮田淳一, 村上俊之, 大西公平, ”時間スプライン近似法を用いた自律移動ロボットの軌道追従制御”, IEEJ. 電気学会論文誌 D, Vol.123, No.7, pp778-783, 2003
- (2) 宮田淳一, 村上俊之, ”流体モデルを用いた自律移動ロボットの軌道追従制御”, IEEJ. 電気学会論文誌, 2007年3月号

2. 定期刊行誌掲載論文（その他の論文）

なし

3. 国際会議論文

- (1) J. Miyata* and T. Murakami, ”An Approach to Path Planning Based on Fluid Model in Mobile Robot”, The 2005 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata2005) pp.1362-1367, 2005
- (2) H. Niki*, J. Miyata and T. Murakami, ”Power Assist Control of Electric Bicycle Taking Environment and Rider’s Condition into Account”, SPIE2005 PROCEEDINGS OF SPIE on CD-ROM Optomechatronic Technologies 20055-7 December 2005 Sapporo, Japan CD-ROM, Vol.6052, pp.60520H1-H8, 2005

4. その他の国際会議発表

- (1) J. Miyata*, T. Murakami and K. Ohnishi, "An Approach to Tracking Motion of Mobile Robot for Moving Object", International Conference on Industrial Electronics (IECON'01), pp.2249-2254, 2000
- (2) J. Miyata*, T. Murakami and K. Ohnishi, "Determination of Time Based Spline Trajectory and its Application to Continuous Circular Path Planning in Mobile Robot", 5th France-Japan Congress, pp.231-235, 2001

5. 国内学会発表

- (1) 村上俊之, 開田有紀子, 宮田淳一, "電動車椅子における力センサレスパワーアシスト制御～動作モードの認識と速度型パワーアシスト制御への応用～", 第6回計測自動制御学会制御部門大会, pp.867-870, 2006
- (2) 宮田淳一, 村上俊之, "移動ロボットによる移動物体追従制御", 産業計測制御研究会, IIC-01-22, pp.127-132, 2001
- (3) 宮田淳一, 村上俊之, "時間スプライン近似を用いた移動ロボットの軌道追従制御", 第44回自動制御連合講演会, pp.478-481, 2001

6. その他

- (1) J. Miyata, T. Murakami and K. Ohnishi, "Trajectory Tracking Control of Mobile Robot by Time-Based Spline Approach", Electrical Engineering in Japan, Wiley Inter Science, Vol.151, No.4, pp.65-71, 2005