

東京大学大学院新領域創成科学研究科
人間環境学専攻

2022 年度

修士論文

無限軌道式天井移動ロボットの
発進・加速・高速走行の信頼性の向上

2023 年 2 月 7 日提出

指導教員 福井 類 准教授



学籍番号 47216667

江坂 怜

目次

目次	1
図目次	4
表目次	8
1	序論 9
1.1	背景 9
1.2	天井・壁面移動ロボットの関連研究 11
1.3	本研究の目的 23
1.4	本論文の構成 24
2	無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の信頼性向上に必要なアプローチ 25
2.1	天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の要求仕様 25
2.2	発進時の機体と天井面との位置合わせ手段の確立 26
2.2.1	発進の適切な条件 26
2.2.2	発進時の位置合わせ手段 31
2.3	加速中のぶら下がり機構押込/引抜操作タイミングの適正化 32
2.4	高速走行中のロボット挙動解明 34
3	信頼性の高い発進・加速実現のための実装及び性能評価実験 38
3.1	信頼性の高い発進の実現のための自動初期位置調整機能の実装 38
3.2	自動初期位置調整機能の有効性検証実験 38
3.2.1	実験目的・実験方法 38
3.2.2	実験結果 40
3.3	信頼性の高い加速の実現のための押込/引抜タイミングの算出 41
3.4	加速中の押込/引抜タイミング制御の有効性検証実験 42

3.4.1	実験目的・実験方法	42
3.4.2	実験結果および加速成功についての考察	44
3.4.3	加速終了後の走行失敗についての考察	47
4	信頼性の高い高速走行の実現のための履帯挙動計測	48
4.1	履帯挙動計測の要求機能の整理と計測手法の選定	48
4.2	高速走行時の履帯挙動計測の課題と達成アプローチ	50
4.2.1	光学式モーションキャプチャによる履帯挙動計測における課題と 達成アプローチ	50
4.2.2	カメラによるぶら下がり機構挿入位置計測における要求機能と達 成アプローチ	52
4.3	遠心力による履帯膨らみ挙動計測実験	53
4.3.1	実験目的・実験方法	53
4.3.2	実験結果	56
4.4	高速走行中のぶら下がり機構挿入位置計測と衝突への影響分析実験	58
4.4.1	実験目的・実験方法	58
4.4.2	実験結果	58
4.5	履帯挙動計測実験のまとめ	60
5	押込操作タイミング適正化による信頼性の高い高速走行の実現	64
5.1	押込操作タイミング適正化の要求機能	64
5.2	機体速度計測用速度センサの選定	66
5.3	光学式ロータリエンコーダの実装	67
5.4	押込操作タイミング適正化手法	69
5.5	押込/引抜操作タイミング適正化評価実験	73
5.5.1	実験目的・実験方法	73
5.5.2	実験結果	74
6	結論	77
6.1	まとめと知見	77
6.2	将来課題	78
A	付録	79
A.1	部品図	79
	参考文献	80

目次	3
----	---

謝辭	85
----	----

目次

1.1	TOYOTA L&F AGV の外観	10
1.2	OTTO AMR の外観	10
1.3	村田機械株式会社の天井走行台車	10
1.4	明電舎の天井走行台車	10
1.5	VSRF II の外観	11
1.6	Larva の外観	11
1.7	Novel Rolling Sealed Negative Pressure Adsorption Wall-Climbing Robot の外観	11
1.8	Rise-Rover の外観	11
1.9	ASTERISK の外観	12
1.10	Combot の外観	12
1.11	Self-Compliant Track-Type Wall-Climbing Robot の外観	13
1.12	Concrete Wall-Climbing Robot の外観	13
1.13	Screenbot の外観	13
1.14	MoMo 5 の外観	13
1.15	Hangbot の外観	14
1.16	THERMSBOND ROBOT の外観	15
1.17	Waalbot II の外観	15
1.18	HanGrawler 2 の外観	16
1.19	HanGrawler 2 の機構コンセプト	16
1.20	ぶら下がり機構の外観	17
1.21	ぶら下がり機構の動作の流れ	17
1.22	押込/引抜機構の外観	18
1.23	ステッピングモータ “ARM46SAK-PS5” の外観	18
1.24	無限軌道機構駆動部の概観図	19
1.25	BLDC モータ “BLHM230K-15” の外観	19

1.26	旋回テーブルの外観	19
1.27	旋回アーム機構の概観図	20
1.28	旋回テーブルの旋回・ロックの流れ	20
1.29	直進移動機構の概観	21
2.1	測距センサユニット “GP2Y0A51SK0F” の外観	26
2.2	PSD センサを用いたぶら下がり機構押込操作の模式図	27
2.3	PSD センサを用いたぶら下がり機構引抜操作の模式図	27
2.4	発進時の機体の模式図	28
2.5	ぶら下がり機構の初期位置の模式図	28
2.6	PSD センサを用いた押込/引抜操作のフローチャート	29
2.7	PSD センサを用いた押込/引抜操作のタイミングチャート	30
2.8	発進時の初期位置と発進後押込操作までの流れ	30
2.9	ぶら下がり機構の初期位置として考えられる位置	31
2.10	自動初期位置調整機能のフローチャート	32
2.11	タイミング制御における押込/引抜機構と各パラメータの模式図	32
2.12	履帯を持つ走行体の力学モデル	34
2.13	遠心力による履帯の膨らみの模式図	35
2.14	ぶら下がり機構と天井面との距離	35
2.15	走行中のぶら下がり機構の模式図	36
2.16	ぶら下がり機構の挿入位置の関係図	36
3.1	自動初期位置調整機能の概念図	39
3.2	実験時に設定する発進位置	39
3.3	加速中のセンサ反応時及び押込/引抜操作時の速度及び時間	41
3.4	加速中のタイミング制御における押込/引抜機構と各パラメータの模式図	42
3.5	直進移動実験の実験装置の外観	43
3.6	機体に取り付けられたマーカー	43
3.7	加速中のタイミング制御での 1.0 m/s 走行に成功した際の機体挙動と押込/引抜タイミングの一例	45
3.8	従来のタイミング制御で 1.0 m/s の走行に失敗した際の押込/引抜タイミングと PSD センサの値	46
3.9	加速中のタイミング制御での 1.0 m/s 走行に失敗した際の押込/引抜タイミングと PSD センサの値	47
4.1	代表的な物体の位置・姿勢計測手法の比較	49

4.2	光学式モーションキャプチャ (OptiTrack 製 V120 Trio) の外観	50
4.3	履板に取り付けられた3つの小型マーカーの外観	51
4.4	光学式モーションキャプチャカメラの設置位置 (正面図)	51
4.5	光学式モーションキャプチャカメラの設置位置 (上面図)	52
4.6	天井面に取り付けられた目盛りの外観	53
4.7	アクションカム HERO10 Black の外観	53
4.8	原点定義用グラウンドマーカーの設置位置	54
4.9	マーカーの取り付けられた履板と座標系	55
4.10	走行中の各座標位置の一例	55
4.11	マーカーの取り付けられた履板と新たな座標系	56
4.12	履板に取り付けられたマーカーのそれぞれの速度での軌跡	56
4.13	y 方向の偏差の平均値	57
4.14	衝突の有無による履板に取り付けられたマーカーの軌跡の違い	59
4.15	衝突の有無による y 方向の偏差	59
4.16	発進時からの挿入位置のずれの平均値	60
4.17	ぶら下がり機構の挿入成功時と失敗時の比較	60
4.18	押込タイミングの違いによるぶら下がり機構挿入挙動の違い	61
4.19	機体の揺動の模式図	61
4.20	機体の揺動の違いによるぶら下がり機構挿入挙動の違い	62
4.21	機体の揺動を表す時系列データの一例	62
5.1	オシロスコープ (横河電機, DLM2034) の外観	65
5.2	BLDC モータから出力されるパルス間隔	65
5.3	レーザドップラ速度計の外観	66
5.4	光学式ロータリエンコーダの構成図	66
5.5	無限軌道機構駆動部の断面図	67
5.6	光学式ロータリエンコーダ (E6H-CWZ6C 1000P/R 0.5M) の概観	67
5.7	ロータリエンコーダから出力されるパルス間隔	68
5.8	1.0 m/s の走行時の BLDC モータの計測速度	69
5.9	1.0 m/s の走行時のロータリエンコーダの計測速度	69
5.10	1.0 m/s の等速走行中のロータリエンコーダの計測速度	70
5.11	ぶら下がり機構の取り付けられた履板にかかる負荷	70
5.12	速度変動に応じた遅れ計算の概念図	71
5.13	$T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御のフローチャート	73
5.14	0.6 m/s 走行に成功した際の機体挙動を表す時系列データの一例	74

5.15	0.9 m/s 走行に成功した際の機体挙動を表す時系列データの一例	75
A.1	部品図	79

表目次

1.1	天井・壁面移動ロボットの分類	22
1.2	各ロボットの積載荷重と移動性能	22
2.1	測距センサユニット “GP2Y0A51SK0F” の諸元	27
3.1	自動初期位置調整機能の有効性検証実験設定	40
3.2	自動初期位置調整機能の有無条件に対する各初期位置からの発進の成否	40
3.3	モーションキャプチャ V120 Trio の諸元	43
3.4	加速中のタイミング制御有効性検証実験設定	44
3.5	加速処理有効性検証実験結果	44
3.6	加速中のタイミング制御での遅れ時間 T_d	45
4.1	アクションカム HERO10 Black の諸元	53
4.2	履帯挙動計測実験設定	54
4.3	履帯挙動計測実験設定	58
5.1	BLDC モータ/ロータリエンコーダから算出された速度の平均値及び分散値	68
5.2	押込/引抜操作タイミング適正化評価実験設定	73
5.3	押込/引抜操作タイミング適正化評価実験結果	74
5.4	0.6 m/s 走行中繰り返し計算される T_d	75

第 1 章

序論

1.1 背景

トヨタ自動車の生産方式に代表されるジャストインタイム生産システム (Just In Time Production System) は, 現在世界の生産管理分野でのベンチマークの一つとされており, 日本初の代表的な生産方式となっている [1, 2]. これに応じて, 生産現場における搬送においても, 経路の多様化と経路変更の容易化のニーズが高まっている. このニーズを満たすために, 生産現場には Automated Guided Vehicle (AGV) など無人搬送車 (TOYOTA L&F[3], 図 1.1) が活用されている [4, 5]. 日本産業車両協会発表の無人搬送車システムの納入実績によると, 近年は新型コロナウイルスの影響で国内のシステム納入数は減少しているものの, 2009 年に比べ 2019 年の納入数は 3 倍以上増加している [6]. AGV は磁気テープやマーカを用いることで経路を設定し, それらを再配置することで経路変更が可能のため, 経路変更が容易であるといえる. また, 複数台を同時に運用することも可能であるため, 多様な経路設計のニーズも満たすことができる. 近年はこうした AGV に対して, 磁気テープなどのガイドが不要で地図とナビゲーションシステムにより自立走行が可能な Autonomous Mobile Robot (AMR) (OTTO MOTERS[7], 図 1.2) の導入も開始され, 矢野経済研究所によると, 2025 年度の予測出荷台数は 2021 年度に比べ 1.7 倍に増加すると予測されている [8, 9]. AMR はレイアウト変更時に物理インフラの更新が不要であり, AGV よりもさらに経路変更を容易に行うことが可能である. しかし, 地面を走行経路として運搬を行う AGV や AMR は作業員・生産設備のスペースと干渉するため, 作業員との接触事故や生産設備との兼ね合いから多様な経路設計が困難になることが考えられる.

そこでこのような問題に対し, 天井を走行経路とすることで干渉を回避することができ, 搬送経路の多様化が実現できると期待される. 天井を走行経路として部品運搬を行うことができる既存の産業機械として, 天井クレーンや天井走行台車 (村田機械株式会



図 1.1 TOYOTA L&F AGV の外観 [3]



図 1.2 OTTO AMR の外観 [7]



図 1.3 村田機械株式会社の天井走行台車の外観 [10]



図 1.4 明電舎の天井走行台車の外観 [11]

社 [10], 図 1.3), (明電舎 [11], 図 1.4) などがある。これらは天井空間にレールを配置することで地上設備に影響を受けない搬送を実現している。

しかし、これらの天井搬送機械は移動手段にレールを用いるため、搬送経路を変更する際には大規模な施工工事を行う必要があり、頻繁に搬送経路を変更することが難しい。例えば自動車では約四年ごとにフルモデルチェンジを行うため、生産ラインを頻繁に変更する必要がある。このような生産現場においては、既存の天井搬送機械を用いた部品搬送は生産ライン組み換えのコストが大きく不適である。そこでレイアウト変更に対して柔軟に対応可能で、経路変更が容易な天井搬送機械が求められる。天井搬送機械の経路変更を容易化するアプローチとして、次の二つが考えられる。

(a) 運搬機械が天井面を二次元的に移動することで、生産ラインの組み換えを要さず天井一面を移動経路として設計する。

(b) 有軌道型の天井搬送機械の軌道の変更を容易化することで、ライン組み換えのコスト

を低減する。

本研究では，経路変更の容易性を考慮し，経路変更時に搬送機械の運用停止期間をより短縮することが可能な (a) のアプローチを採用する。

1.2 天井・壁面移動ロボットの関連研究

天井・壁面移動ロボットは，主に災害救助・清掃ロボットなどの分野で研究が行われている。そこで，天井面および壁面の二次元移動が可能なロボットについて，その移動手法を比較し，本研究で扱う天井移動ロボットの移動手法の選定を行う。先行研究において，ロボットは次の手法で天井面および壁面に取付いている。

空気吸引による取付き

空気吸引によって取付く壁面移動ロボットとして，図 1.5 に示す Q. Hong らが開発した VSRF II がある [12]。VSRF II は，機体の両端に搭載されている吸盤を交互に吸着さ

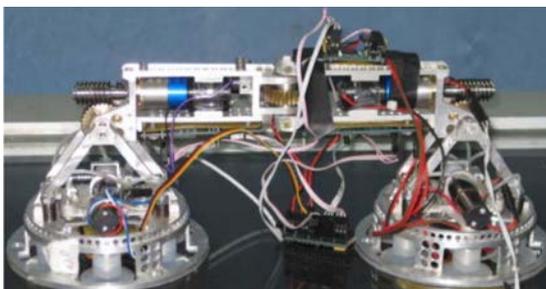


図 1.5 VSRF II の外観 [12]

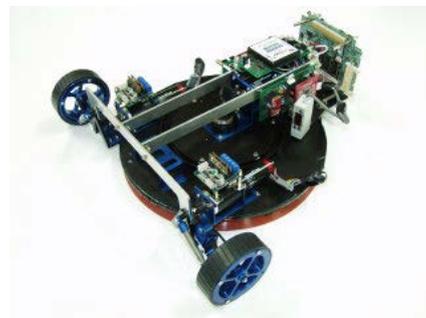


図 1.6 Larva の外観 [13]

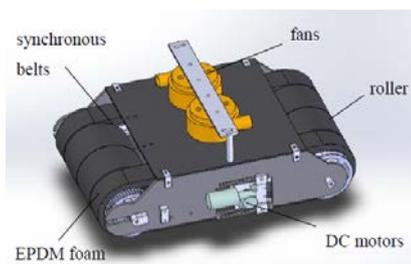


図 1.7 Novel Rolling Sealed Negative Pressure Adsorption Wall-Climbing Robot の外観 [14]

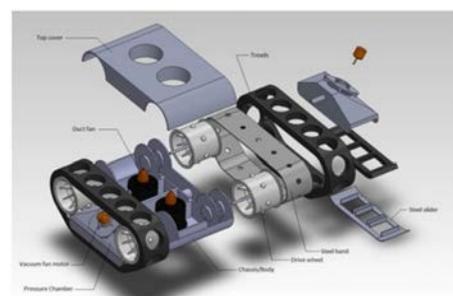


図 1.8 Rise-Rover の外観 [15]

せながら歩行するように移動する。吸盤吸着時に吸盤を振動させることで吸着力の向上に成功し、8 kg の可搬重量を有する。

図 1.6 に示す I. Koo らが開発した Larva は、ファンによって負圧を発生させることで壁面を吸引しながら走行するロボットである [13]。VSRF II と異なり、タイヤによって壁面を連続的に走行することが可能であり、荷重 7 kg のもとの 0.1 m/s での壁面移動を可能としている。

図 1.7 に示す R. Chanchlani らが開発した Novel Rolling Sealed Negative Pressure Adsorption Wall-Climbing Robot は、転がり密閉構造により粗い壁面でも安定して移動することが可能な負圧式の移動ロボットである [14]。荷重 7 kg のもとの 0.078 m/s での壁面移動を可能としている。

図 1.8 に示す J. Xiao らが開発した Rise-Rover は、ファンが内蔵された履帯によって壁面を吸引しながら連続的に移動する [15]。荷重 7.3 kg のもとの 0.5 m/s での壁面移動を可能としている。

磁力による取付き

図 1.9 に示す P. Kriengkamol らが開発した ASTERISK は、六本の足先にそれぞれ電磁石が搭載されており、吸着状態を変更しながら鉄製の壁面、天井を移動する [16]。荷重約 150 kg のもとの 0.01 m/s の速度で移動可能である。

また、図 1.10 に示す G. Lee らが開発した Combot は、履帯によって連続的に壁面を走行可能なロボットである [17]。履帯上には永久磁石が搭載されており、履帯を回転させることで壁面を連続移動することが可能である。また、複数の履帯が組み合わさっており、関節を曲げて移動することにより床平面から壁平面への移動が可能である。荷重 10 kg のもとの最大速度 0.2 m/s での移動が可能である。

同様に履帯によって連続的に壁面を走行可能な移動ロボットに、図 1.11 に示す Y.



図 1.9 ASTERISK の外観 [16]



図 1.10 Combot の外観 [17]

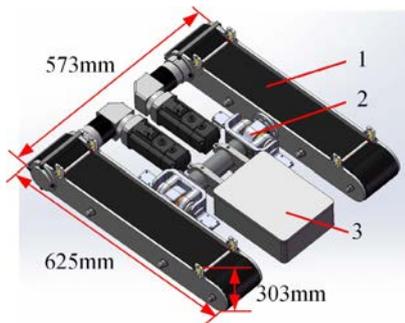


図 1.11 Self-Compliant Track-Type Wall-Climbing Robot の外観 [18]



図 1.12 Concrete Wall-Climbing Robot の外観 [19]

Wang らが開発した Self-Compliant Track-Type Wall-Climbing Robot がある [18]. このロボットは荷重 36 kg のもとで 0.17 m/s での移動が可能である.

図 1.12 に示す O.Howlader らが開発した Concrete Wall-Climbing は、鉄筋コンクリートを検査するためのロボットであり、磁力で鉄筋コンクリート製の壁面に吸着し、タイヤによって連続移動する [19]. 最大 12.8 kg の吸着力を発揮しながら、0.03 m/s の速度での移動が可能である.

機械的取付き

図 1.13 に示す G. Wile らが開発した Screenbot は、ワイヤメッシュの壁面を移動可能なロボットである [20]. Screenbot は荷重を支持することはできないが、六本の足先にフックが付いており、それらをメッシュに引っかけることにより、0.01 m/s の速度で壁面移動する. 同様の先行研究に、J. Xu らが開発した Multi-mode biomimetic wall-climbing robot があり、荷重 1 kg を支えることが可能である [21].



図 1.13 Screenbot の外観 [20]



図 1.14 MoMo 5 の外観 [22]



図 1.15 Hangbot の外観 [23]

図 1.14 に示す T. Satooka らが開発した MoMo 5 は、壁に突起、本体にレールを用いることで移動速度の向上に成功した [22]. 車輪にはオムニホイールを使用しており、前後左右方向の移動が可能である. Momo 5 はこの手法により天井面での移動では 2.5 kg の可搬重量のもとで 0.105 m/s の速度を、壁面での移動では 2 kg の可搬重量のもとで 0.115 m/s の速度を実現した.

図 1.15 に示す福井らが開発した Hangbot は、パンチングメタルで構成された天井面に対し、ぶら下がるための機構を挿入することで機械的に天井面への吸着を行い、それにより最大 35 kg の荷重を支えることが可能である [23]. また、ぶら下がりのための機構を水平並進 2 自由度方向に動かすことができるため、尺取運動をしながら 0.02 m/s の速度で水平並進 2 自由度方向への移動が可能となっている.

粘着力による取付き

図 1.16 に示す L. Wang らが開発した THERMSBOND ROBOT は、温度によって状態が変化するプラスチックの粘着力を利用することで壁面に吸着する [24]. 二本の足を交互に吸着させることで、歩行するように移動し、荷重 7 kg のもとでの壁面移動が可能である.

図 1.17 に示す M. Murphy らが開発した Waalbot II は、粘着性のゴムを利用することで天井面に吸着する [25]. ゴムに備え付けた三つの足を回転させることで連続的に壁面を移動し、荷重 0.1 kg のもとで 0.06 m/s の速度で移動可能である. 同様の先行研究に H. Hariri らが開発した ORION-II があるが、荷重を支持することはできず、0.045 m/s の速度で壁面を移動可能である [26]. また、R. Chen らが開発した Wall climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism は、静電粘着によって壁面に取付き、0.1

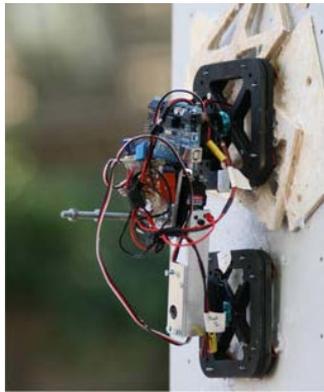


図 1.16 THERMSBOND ROBOT の外観 [24]

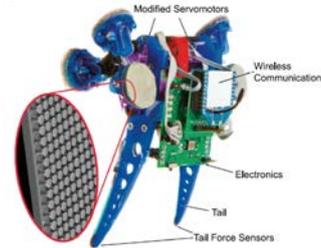


図 1.17 Waalbot II の外観 [25]

m/s で移動できる [27].

以上のことから、粘着力による取付きは一様に重量物の搬送が困難な手法だと考えられる。

無限軌道式天井移動ロボットの研究

AGV などの無人搬送車と協同するため、本研究で開発を行う天井移動ロボットの要求機能は、(a) 耐荷重性の高い天井への取付き、(b) 電力を要さない天井への取付き、(c) 高速走行が可能な天井への取付きが考えられる。要求機能 (a)、(b) について、耐荷重を大きく設計することが容易であり、天井への取付きに電力を要さず停電時にも取付いた状態を維持可能な手法として、永久磁石または機械的拘束がある。しかし、永久磁石方式による取付きでは、耐荷重を大きく設計するために強力な磁石が必要だが、機体全体の重量増加や移動時の抵抗増加につながるため、高速走行が困難になる。また、大量の磁石を用いる場合には、移動機構の複雑化を招く。機械的拘束による取付きでは、天井への取付き機構により荷重を支持できるため、永久磁石方式による取付き手法に比べ小型で高い耐荷重性を実現することが可能である。

以上の理由から、要求機能をすべて満たす天井移動ロボットを開発するため、本研究では機械的拘束による取付き手法を選択する。以降、機械的拘束による天井への取付き機構のことをぶら下がり機構と呼ぶ。ぶら下がり機構を用いている先行研究として HangBot[23] が挙げられるが、HangBot は尺取虫のように間欠的に加減速を繰り返しながら進むため移動速度が遅いことが課題である。一方で、移動速度の早い天井移動ロボットとして Rise-Rover[15] が挙げられるが、Rise-Rover には、HangBot のような反復移動と比べて高速な移動手法である無限軌道機構が用いられており、0.5 m/s と HangBot の

10 倍以上の速度で移動可能である。しかし、Rise-Rover のような空気吸引による天井取り付け手法は、天井面での耐荷重性が低く重量物の運搬が困難であることが課題である。天井移動ロボットの目標走行速度としては、搬送台車業界での従来の最高速度の基準である 60 m/min を参考に 1.0 m/s を目標性能とする [28]。なお、2020 年 2 月に発行された無人搬送車の安全要求事項を扱う国際規格 ISO 3691-4 : 2020 により、最高速度の制限は削除されている [29]。

これらの課題に対して福井らは、図 1.18 に示す天井移動ロボット HanGrawler 2 を開発した [30, 31, 32, 33]。HanGrawler 2 は図 1.19 のように、ぶら下がり機構を用いて天井面のパンチングメタルに機械的にぶら下がり、無限軌道機構によってぶら下がり機構を連続的に送り出すことで、40 kg の積載重量のもとで 1.0 m/s の速度での直進移動を実現し、90 deg/s の速度での旋回移動を実現した。ぶら下がり機構は押込/引抜機構によって天井面を拘束・解放し、スプロケットによって無限軌道機構が駆動されることで連続的な

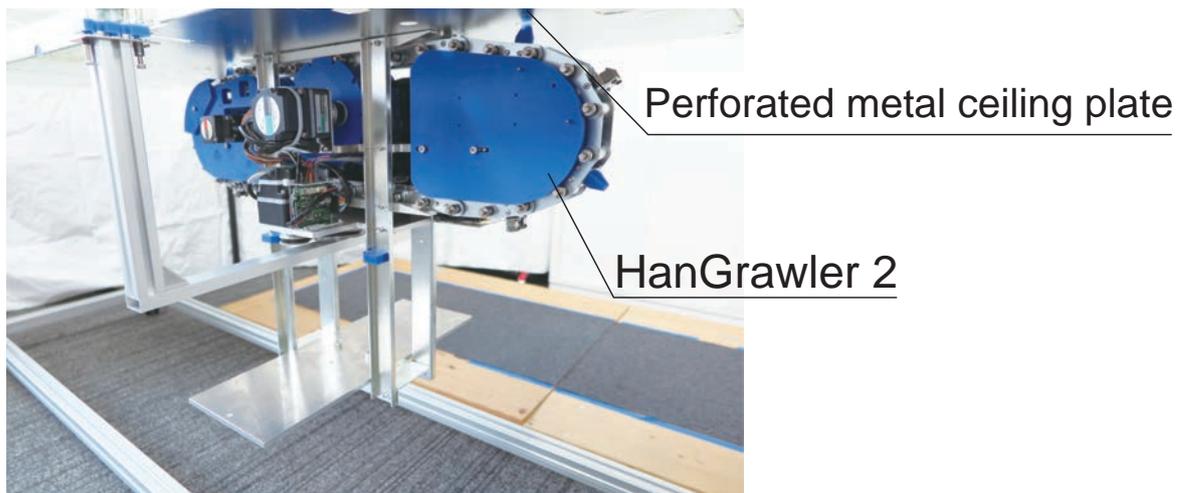


図 1.18 HanGrawler 2 の外観 [32]

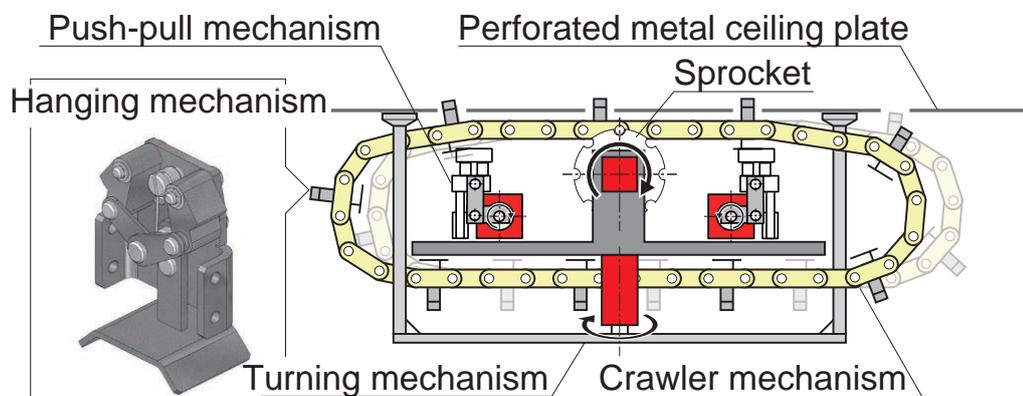


図 1.19 HanGrawler 2 の機構コンセプト [32]

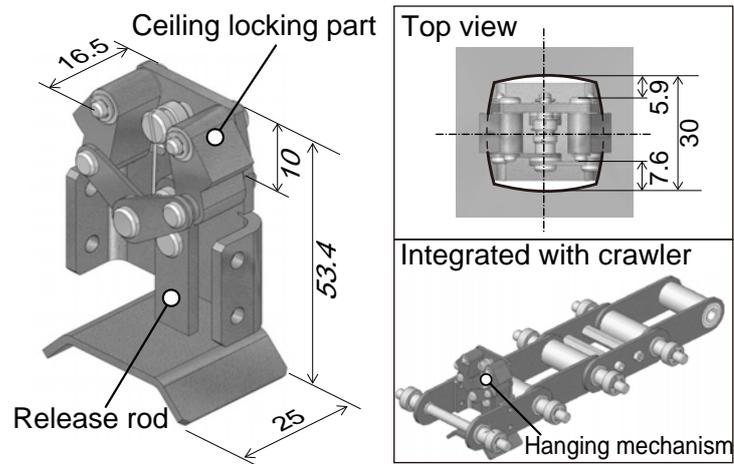


図 1.20 ぶら下がり機構の外観 [32]

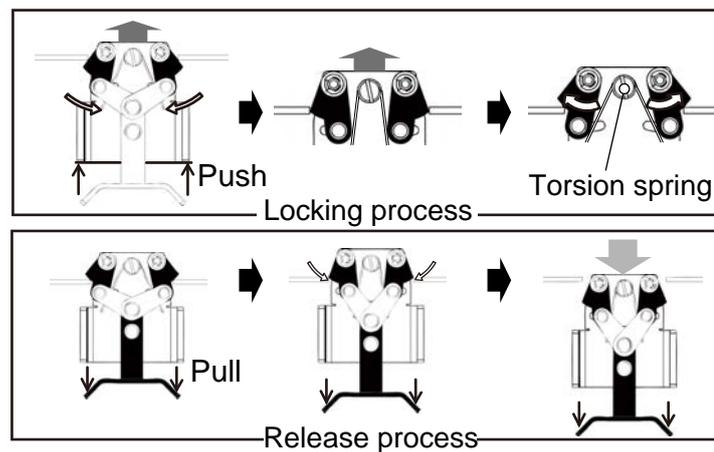


図 1.21 ぶら下がり機構の動作の流れ [32]

移動を実現している。

ぶら下がり機構の外観を図 1.20 に示す。ぶら下がり機構の押込ストロークは 10 mm、進行方向のクリアランスは 5.9 mm である。また、天井孔は幅を 30 mm とし、図 1.20 の上面図に示すように正方形の 4 辺を膨らませた形状をしている。これにより天井孔に調心機能を持たせ、天井孔に対するぶら下がり機構のずれの抑制を狙っている。ぶら下がり機構が天井を拘束/解放する時の様子を図 1.21 に示す。

拘束時は、ぶら下がり機構を天井孔へ押し上げることで、天井孔にぶら下がり機構上部の拘束部が接触する。そして拘束部は、天井孔から力を受けて閉じながら挿入される。押込ストローク分挿入されると、ねじりばねにより拘束部が開き、天井孔に対して拘束される。これにより、HanGrawler 2 は天井に機械的にぶら下がることが可能となる。また、解放時はぶら下がり機構の解放ロッドを下に引抜くことで、天井拘束部が閉じる。さ

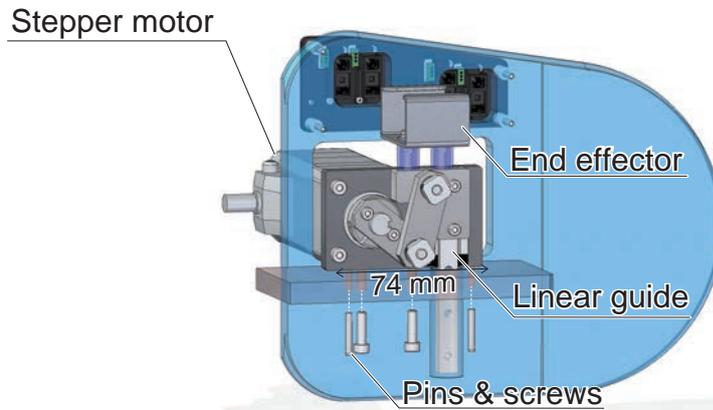


図 1.22 押込/引抜機構の外観 [32]



図 1.23 ステッピングモータ “ARM46SAK-PS5” の外観 [34]

らに引き続けることで、ぶら下がり機構が天井孔から引抜かれ、天井穴から解放される。このように、拘束時は押込のみ、解放時は引抜のみの動作で天井面への拘束/解放が行われる。また、押込/引抜操作を行う押込/引抜機構を図 1.22 に示す。押込/引抜機構のアクチュエータには、細かな角度制御が容易なステッピングモータ (オリエンタルモーター製, “ARM46SAK-PS5”, 図 1.23) を用いた。

続いて、HanGrawler 2 の無限軌道機構の駆動部を図 1.24 に示す。アクチュエータには、ブラシレス DC モータ (オリエンタルモーター製, “BLHM230K-15”, 図 1.25) を用いた。実用化を考えると、長時間の運用が可能である, Factory Automation(FA) 用途での実績が豊富なアクチュエータが適切であると考え、この BLDC モータを採用した。

HanGrawler 2 が天井面を二次元的に移動するために、天井に図 1.26 に示す旋回テーブルを設置している。また、旋回アーム機構の概観図を図 1.27 に示す。アクチュエータはロボット側にのみ搭載しており、旋回テーブル側にはアクチュエータが搭載されていないため、天井面の組み換えによる経路変更が容易となっている。

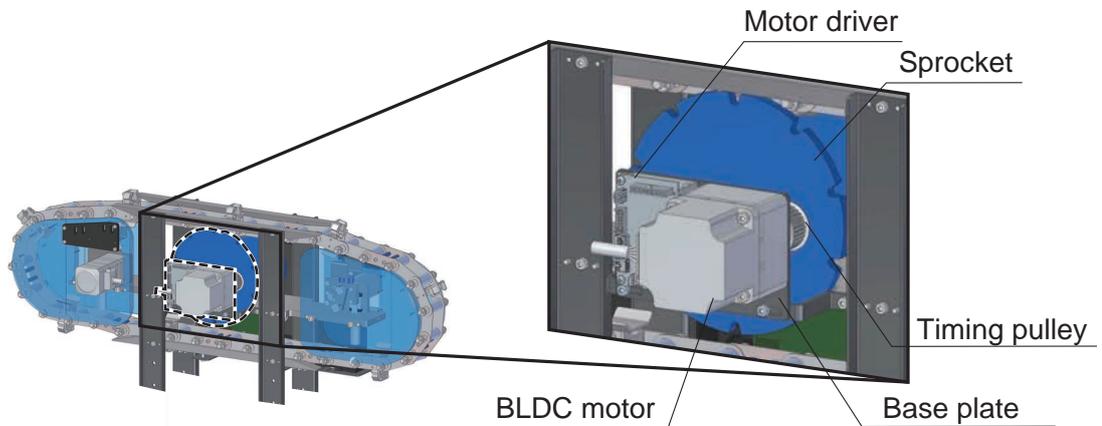


図 1.24 無限軌道機構駆動部の概観図 [32]



図 1.25 BLDC モータ “BLHM230K-15” の外観 [35]

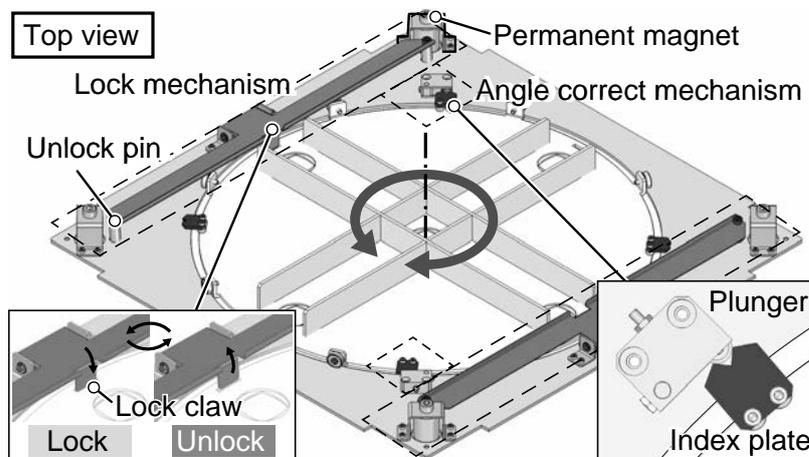


図 1.26 旋回テーブルの外観 [32]

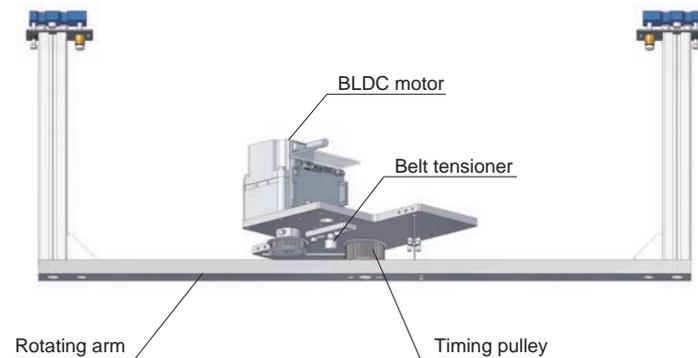


図 1.27 旋回アーム機構の概観図 [32]

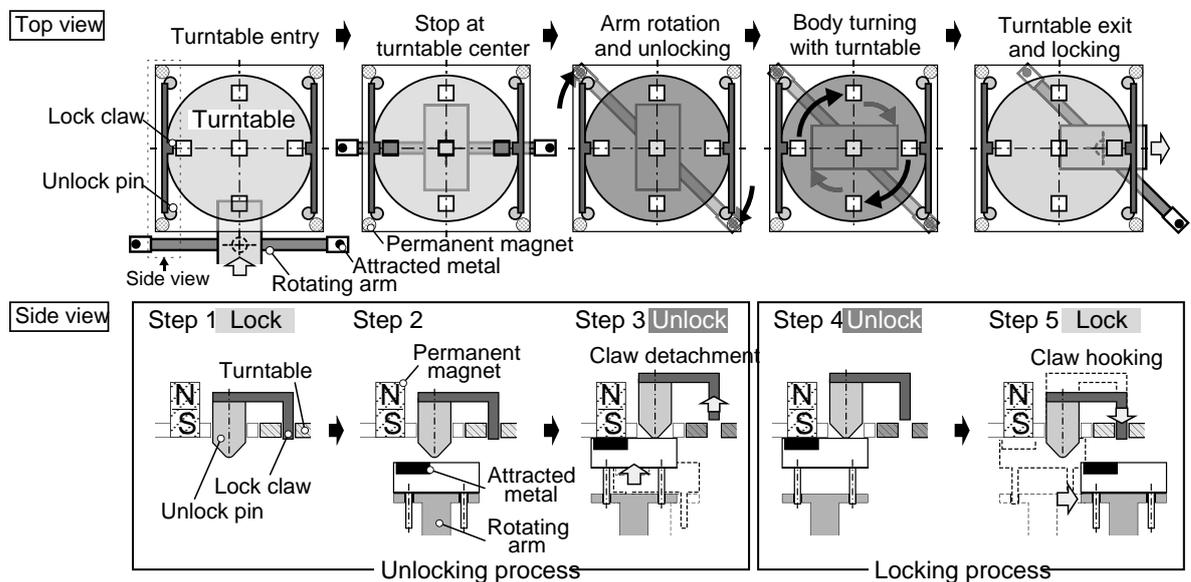


図 1.28 旋回テーブルの旋回・ロックの流れ [32]

ロボットの旋回手順を図 1.28 に示す。このときの旋回テーブルの旋回のロックおよびロック解除機能について、図 1.28 下部に動作の様子を示す。

(Step 1) ロボットが旋回テーブルに進入する。このとき、ロック爪が旋回テーブルをロックしている。

(Step 2) ロボットが旋回テーブルへ進入後、旋回テーブルの中心で停止する。

(Step 3) 旋回アームが所定位置まで回転し、アーム先端の吸着部が永久磁石に吸着する。同時に吸着部がロック解除ピンを押し上げ、ピンにつながったロック爪を押し上げることで、旋回テーブルのロックを解除する。

(Step 4) 旋回アームの回転によって、旋回テーブルごとロボットを回転させる。磁石の吸着力を、旋回テーブルの回転摩擦力より十分大きく設計することで、旋回アームは磁石か

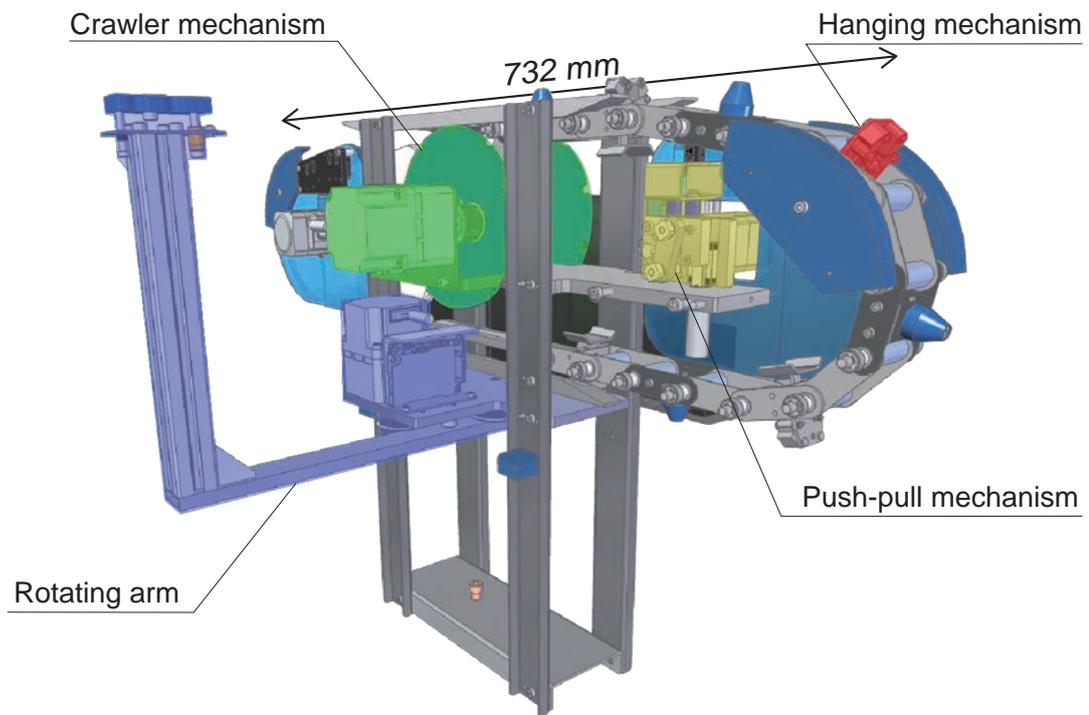


図 1.29 直進移動機構の概観 [32]

ら外れることなく、ロボットを回転させることができる。

(Step 5) ロボットが旋回テーブルから退出することで旋回アームが永久磁石から離れ、ロック爪が落ちることで再度ロックがかけられる。

以上の設計が統合された天井面直進移動機構の概観図を図 1.29 に示す。スプロケットを無限軌道の履帯の軸にかみ合わせ、BLDC モーターで駆動する。モーターの駆動により履帯が連続的に送り出され、履帯に取り付けられたぶら下がり機構が押込/引抜機構によって天井面に拘束/解放されることで直進移動することが可能となる。

これまでに述べた天井・壁面移動ロボットを吸着手法と移動方法について分類し、表 1.1 にまとめた。また、それぞれのロボットの積載荷重と移動速度の性能を表 1.2 にまとめた。表 1.1、表 1.2 により、先行研究で開発された HanGrawler 2 は他の移動ロボットに比べ耐荷重性及び速度性能ともに優れていることがわかる。

表 1.1 天井・壁面移動ロボットの分類

Approach		Movement method	
		Intermittent movement	Continuous movement
Attachment method	Vacuum suction	VSRF II 	Larva  Rise-Rover  Novel rolling sealed Robot 
	Magnetic force	ASTERISK 	Combot  Concrete Wall-Climbing Robot 
	Adhesive force	THERMSBOND 	Waalbot II 
	Mechanical constraint	Screenbot  HangBot 	Momo5  HanGrawler 2 

表 1.2 各ロボットの積載荷重と移動性能

Robot	Payload [kg]	Velocity [m/s]
VSRF II	8	Unverified
Larva	7	0.1
Novel rolling sealed robot	7	0.17
Rise-Rover	7.3	0.5
ASTERISK	150	0.01
Combot	10	0.2
Concrete Wall-Climing	12	0.03
Self-Compliant Track-Type Wall-Climbing Robot	36	0.17
THERMSBOND ROBOT	7	Unverified
Screenbot	Unverified	0.01
Momo 5	2.5	0.115
Hangbot	35	0.02
HanGrawler 2	40	1.0

1.3 本研究の目的

先行研究で開発された天井面への無限軌道を用いた機械的取付き手法による天井移動ロボット HanGrawler 2 は、1.0 m/s の高速走行を実現した。しかし高速走行の成功率は低く、走行中に天井面へのぶら下がりに失敗し走行不可となることが確認されたことから、高速走行の信頼性を向上することが課題である。ここで、信頼性の向上とは従来手法と比べ本研究で取り入れた手法の方が成功率が上昇することと定義する。走行の信頼性を評価するため、走行を発進・加速・高速走行の 3 つの段階に分けて考える。発進においては発進時の機体の初期位置を先行研究では経験的に調整を行っており、発進の実現のための条件が定量的に明らかになっておらず再現性が低い。天井へ機械的にぶら下がる移動ロボットの高速化の先行研究に MoMo5[22] があるが、MoMo5 は壁に突起、本体にレールを用いており、特別な機構を使用することなくぶら下がりが可能となっている。しかし、HanGrawler 2 は押込/引抜操作でぶら下がり機構の拘束/解放をする必要があるため、ぶら下がり手法が MoMo5 とは異なり、発進および加速条件を解明することはできていない。また、高速走行では、走行中にぶら下がり機構が天井面に衝突し、ぶら下がり機構の挿入に失敗することで天井面から機体が落下してしまうことが繰り返し起きているため、高速走行中のロボットの挙動を解明する必要がある。無限軌道を持つ走行体の地面走行時の挙動解析の先行研究として、藤田らが行った単純モデルによる固有値解析がある [36]。しかし、天井面を移動経路とした無限軌道式ロボットは押込/引抜操作により天井面への拘束をしており、高速走行時に無限軌道がどのような挙動を取るかは明らかになっていないため、無限軌道の挙動を計測し高速走行中の挙動を解明することで高速走行の信頼性の向上を目指す。

本研究の目的は無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行それぞれの要求機能を明らかにし、信頼性の向上に必要な達成アプローチを示すことである。実験によってそれぞれの達成アプローチの有効性を評価する。

1.4 本論文の構成

本章では本研究の背景，関連研究とその目的を述べた．2 章では第 1 章で述べた背景をもとに，天井移動ロボットの発進・加速・高速走行における要求仕様と課題を整理し，それらを満たす・実現する設計のアプローチについて述べる．3 章では 2 章で議論したアプローチのうち，発進・加速の実現のための実装方法を示し，実験によりそれらの評価を行う．4 章では高速走行の実現のための観察手法を示し，実験により高速走行時のロボット挙動の解明を行う．5 章では 4 章で明らかとなった高速走行を阻害している挙動について，実験によりそれらの評価を行う．6 章は本論文のまとめである．

第2章

無限軌道式天井移動ロボットの 発進・加速・高速走行の 信頼性の向上に必要なアプローチ

本章では、第1章で述べた背景をもとに、天井移動ロボットの発進・加速・高速走行における要求仕様を整理し、それらを実現するアプローチについて述べる。

2.1 天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の要求仕様

無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行を実現するには、次の三つの要求仕様が存在する。

- (1) 発進時の機体と天井面との位置合わせ手段の確立
- (2) 加速中のぶら下がり機構押込/引抜操作タイミングの適正化
- (3) 高速走行中のロボット挙動解明

(1) について、先行研究では発進前に目測しながら手動で天井面に対する機体の相対位置の位置調整を行っていた。しかしその位置には明確な基準がなく、ぶら下がり機構の検出に用いているセンサの検出範囲に被らないよう経験的に位置調整を行っていたため、発進直後にぶら下がり機構の押込に失敗し走行不可となることが繰り返された。そのため、どのような初期位置からでも失敗しない発進を実現するために、発進を成功させるための適切な条件を明らかにし、機体と天井面との位置合わせ方法を定める必要がある。

(2) について、先行研究ではロボットの移動が等速運動であると仮定して押込/引抜機構の操作が行われていた。高速走行を行う場合には低速走行する場合に比べてロボットが加速運動する時間が長いため、仮定と異なり加速運動中に押込/引抜機構の操作が求められ

る。そのため確実な加速を実現するために、加速度を考慮して押込/引抜機構の操作タイミングを適正化し、加速中でもぶら下がり機構の挿入に成功することが求められる。

(3) について、高速走行時にぶら下がり機構が天井面に衝突し、走行不可となることが確認されている。その衝突は低速走行時には見られず、高速走行時特有の現象であった。そこで確実な高速走行を実現するために、高速走行中の失敗原因であるぶら下がり機構の天井面挿入時の挙動を解明する必要がある。

以下の節では、それぞれの要求仕様に対するアプローチを述べる。

2.2 発進時の機体と天井面との位置合わせ手段の確立

本ロボットの発進時、経験的に機体の発進位置を決めていたため、発進の適切な条件が明らかとなっていない。そのため、発進直後にぶら下がり機構の押込操作に失敗する原因が不明だった。そこで本ロボットの確実な発進のために、(a) 発進の適切な条件と、(b) 発進時の位置合わせ方法を明らかにする。

2.2.1 発進の適切な条件

本ロボットは、無限軌道に取り付けられているぶら下がり機構を押込/引抜機構を用いて天井面へと拘束/解放している。また、押込/引抜機構の前後には、Position Sensitive Detector (PSD) センサが設置されている。本ロボットには、高い取り付け自由度と広い検出範囲を設定可能な小型測距センサユニット (シャープ製, “GP2Y0A51SK0F”, 図 2.1, 表 2.1) を用いている [37]。

ここで、PSD センサを用いたぶら下がり機構の押込操作の模式図を図 2.2 に、引抜操作の模式図を図 2.3 に示す。PSD センサは、図 2.2 に示すように押込/引抜機構の前後に 2 つずつ計 4 つ並べて取り付けられており、計測範囲内をぶら下がり機構が通過する位置に設置されている。ぶら下がり機構が PSD センサの検出範囲に存在する間、PSD センサ



図 2.1 測距センサユニット “GP2Y0A51SK0F” の外観

表 2.1 測距センサユニット “GP2Y0A51SK0F” の諸元

Item	Specification
Output type	Analog
Rated voltage	4.5 - 5.5 V
Measuring distance range	2 - 15 cm
Measuring cycle	16.5 ms

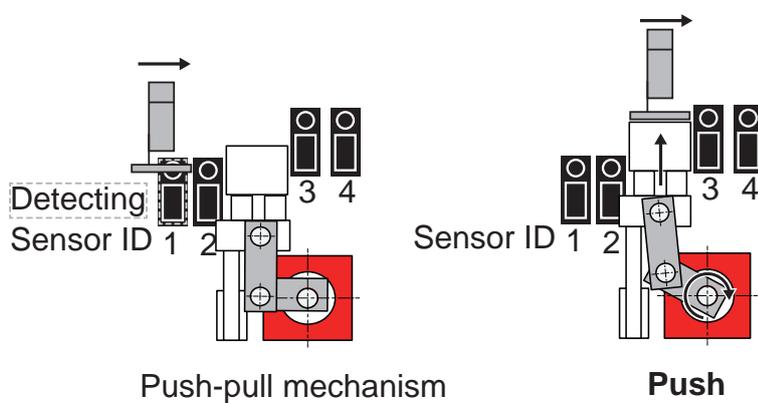


図 2.2 PSD センサを用いたぶら下がり機構押込操作の模式図

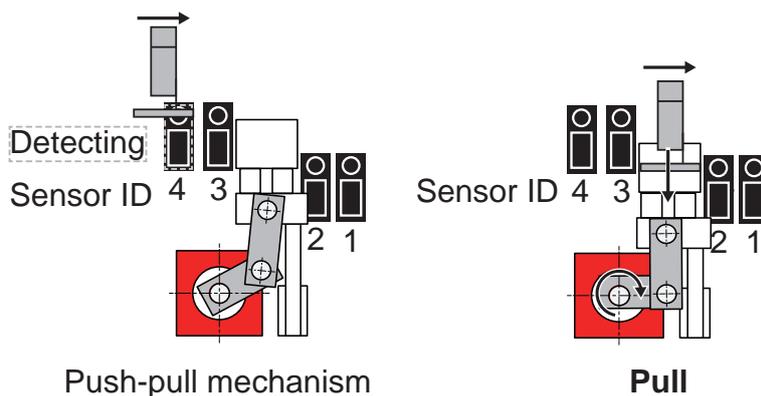


図 2.3 PSD センサを用いたぶら下がり機構引抜操作の模式図

はセンサとぶら下がり機構との距離に比例した値を出力し、ぶら下がり機構が存在しない間は対面のガイドとの距離を出力する。つまり、センサ出力の変化からぶら下がり機構の通過を検出することが可能となる。押込時には図 2.2 に示すように PSD1、引抜時には図

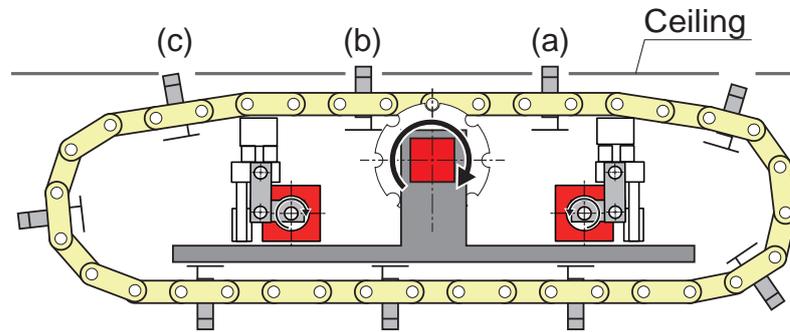


図 2.4 発進時の機体の模式図

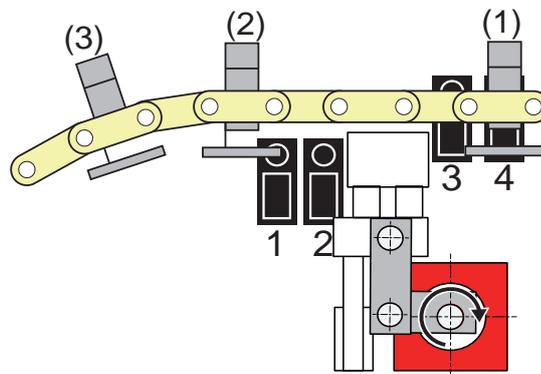


図 2.5 ぶら下がり機構の初期位置の模式図

2.3 に示すように PSD4 の値を用いて、ぶら下がり機構の位置を押込/引抜機構の直前に検出し、押込/引抜操作を行うことで、ぶら下がり機構を天井面に拘束/解放している。

しかし本ロボットは発進直後に、図 2.2 の左図に示すようなぶら下がり機構の位置がまだ PSD センサ検出範囲内であり、押込/引抜機構位置の手前にあるタイミングで押込操作が完了し、実際に押込/引抜機構位置に到達したタイミングでは押込操作が行われないことで、天井面へのぶら下がり機構の拘束に失敗し、走行不可となることがあった。ここで、発進時の本ロボットと天井面との位置関係を表した模式図を図 2.4 に示す。発進時、本ロボットは図 2.4 の (a), (b) の 2 つのぶら下がり機構で天井面に拘束されており、駆動開始後に (c) に示すぶら下がり機構を挿入することで前進動作を実現する。ここで、機体全体が 2 つのぶら下がり機構で天井に拘束され静止している状態から、駆動開始後に最初に天井に挿入されるぶら下がり機構 (c) の押込/引抜機構に対する位置を初期位置と定義する。発進時の初期位置の例を図 2.5 に示す。従来は、図 2.5 の (1), (2) のような初期位置にあるぶら下がり機構を、発進前に手動で (3) に示す位置のような PSD センサ 1 反応

手前位置まで経験的に調整し、発進させていた。しかし、発進を実現するための条件が明らかになっておらず、発進に失敗する原因が不明であった。

ここで、発進時の押込/引抜操作のフローチャートを図 2.6 に、タイミングチャートを図 2.7 に示す。

前進の場合、PSD センサ 1 の出力 l_{front} が閾値 $l_{\text{threshold}}$ 以上の値を出力した時間をぶら下がり機構が通過した時間と判定し、無限軌道機構駆動用の BLDC モータの回転速度から、ぶら下がり機構の通過時の無限軌道の速度 v を検出する。更にその v を用いてぶら下がり機構がセンサ通過時から押込機構到達時までにかかる遅れ時間 T_d を計算し、 T_d 秒間待機した後に、押込機構を駆動する。引抜操作も同様に、センサ通過時の速度 v を用いて T_d を計算し、操作が行われる。 T_d の詳しい計算式については、2.3 節にて示す。

発進開始時にぶら下がり機構が PSD センサ 1 検出位置にある場合には、 $v = 0$ となり、検出後すぐに押込/引抜操作が行われてしまう。その場合、ぶら下がり機構が PSD センサ 1 の位置にいるタイミングで押込操作が行われるため、ぶら下がり機構が天井孔に挿入できず、走行不可となる。つまり、発進時に PSD センサ 1 の反応する位置にぶら下が

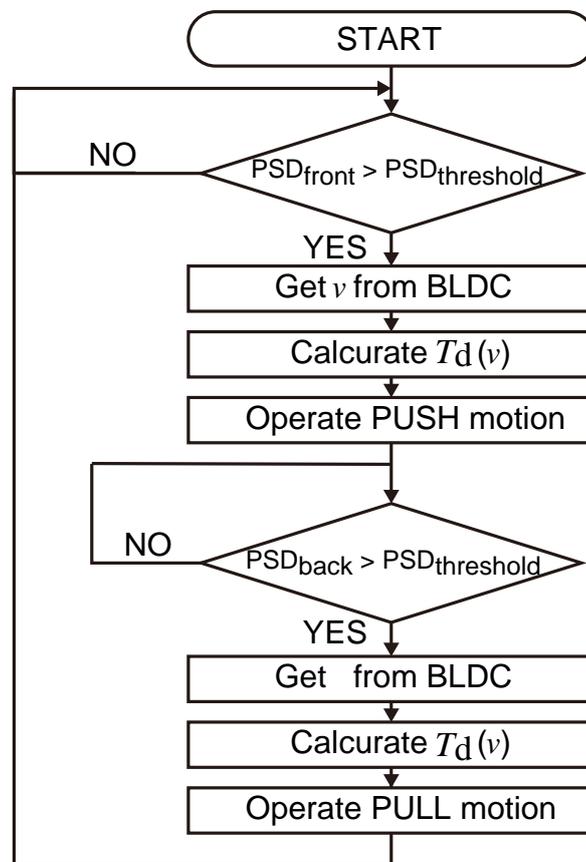


図 2.6 PSD センサを用いた押込/引抜操作のフローチャート

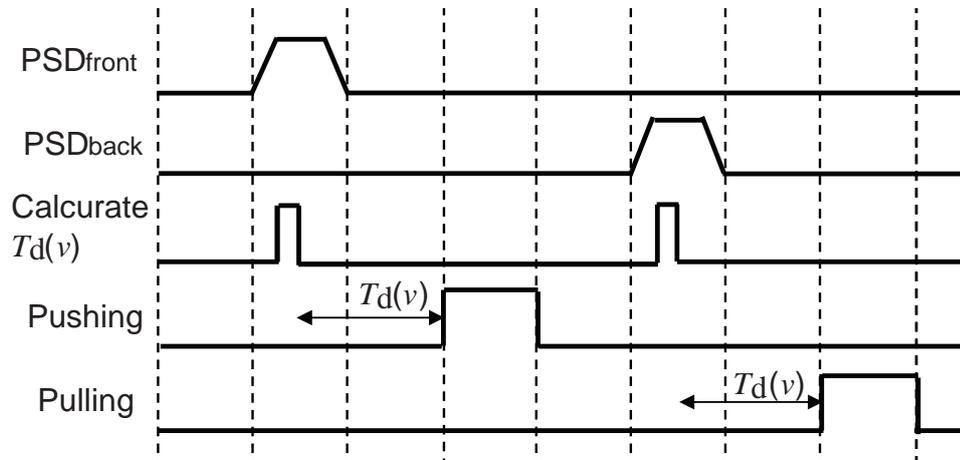


図 2.7 PSD センサを用いた押込/引抜操作のタイミングチャート

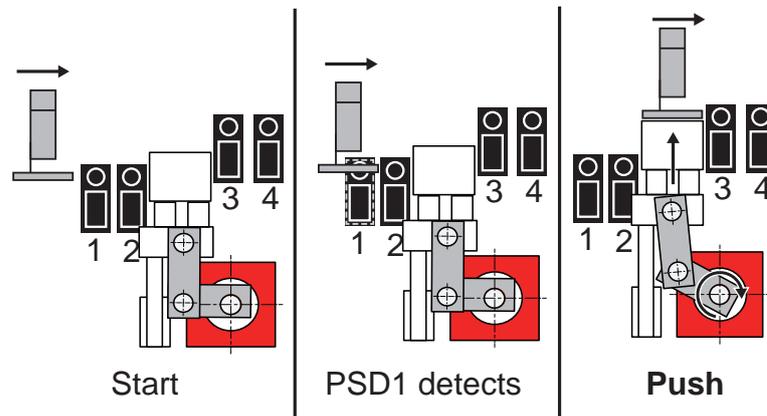


図 2.8 発進時の初期位置と発進後押込操作までの流れ

り機構が存在すると、押込操作のタイミングが適切に行われず、発進に失敗することがわかった。また、発進時のぶら下がり機構の初期位置が PSD センサ 1 よりも押込/引抜機構側にある場合、発進後 PSD センサ 1 の前をぶら下がり機構が通過することがないため、PSD センサ 1 がぶら下がり機構の通過を検出することができず、押込/引抜操作が行われないことがわかった。

以上のことから、本ロボットの発進の実現のためにはぶら下がり機構の初期位置を調整する必要がある。ここで、図 2.8 に発進時の初期位置と PSD センサの関係図を示す。本ロボットは発進時、図 2.8 の左図に示す、初期位置を定義したぶら下がり機構が発進時に PSD センサ 1 よりも手前であり、発進後にぶら下がり機構が PSD センサ 1 を通過することで押込操作に成功する。

2.2.2 発進時の位置合わせ手段

前節より，発進の実現にはぶら下がり機構の初期位置をセンサ検出範囲よりも手前に設定することが必要だとわかった．従来は，ぶら下がり機構の初期位置は経験的に人の手で調整していたが，工場等での本格的な運用を想定した場合，人の手が届かない位置にロボットがいると発進前の位置調整を手動で行うことができないという問題がある．

この問題を解決する方法として，(1) ぶら下がり機構の初期位置調整をせずとも押込操作に成功すること，(2) ぶら下がり機構の初期位置調整を自動で行うことが考えられる．図 2.8 において，ぶら下がり機構の初期位置が PSD センサ 3 や 4 の反応位置にいる場合，すでにぶら下がり機構は押込機構位置を通り過ぎており，発進後に押込操作を行うことができない．よって，(2) のぶら下がり機構の初期位置調整を自動で行うことを検討した．

そのためにはまず，ぶら下がり機構の初期位置を認識する方法及び，初期位置調整方法を考える必要がある．ここで，ぶら下がり機構の初期位置として考えられる位置を図 2.9 に示す．図 2.9 に示すように，HanGrawler 2 のぶら下がり機構の初期位置としては (i)～(iii) の 3 通りある．(i) はぶら下がり機構が PSD センサ 1～4 の検出範囲内にある場合である．この場合は反応したセンサ番号により，初期位置を認識可能である．(ii) はぶら下がり機構が押込/引抜機構位置にある場合である．この場合は PSD センサ 2 及び 3 の検出可能範囲の間にあるため，センサにより初期位置を認識することができない．(iii) はぶら下がり機構が PSD センサ 1 検出範囲よりも手前にある場合である．この場合もどのセンサも反応していないため，初期位置を認識することができない．そこで，(ii)，(iii) のようなセンサが反応していない場合には低速で前進動作を行い，PSD センサが反応し，ぶら下がり機構の通過を検出した後停止することで，初期位置を認識させる．そして初期位置の認識後，図 2.9 の (※) に示す PSD センサ 1 検出範囲よりも手前位置までぶら下がり

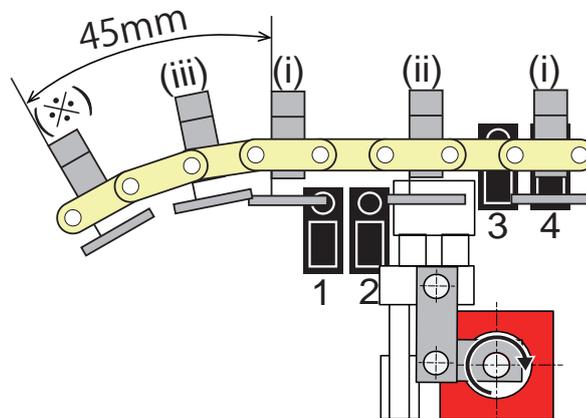


図 2.9 ぶら下がり機構の初期位置として考えられる位置

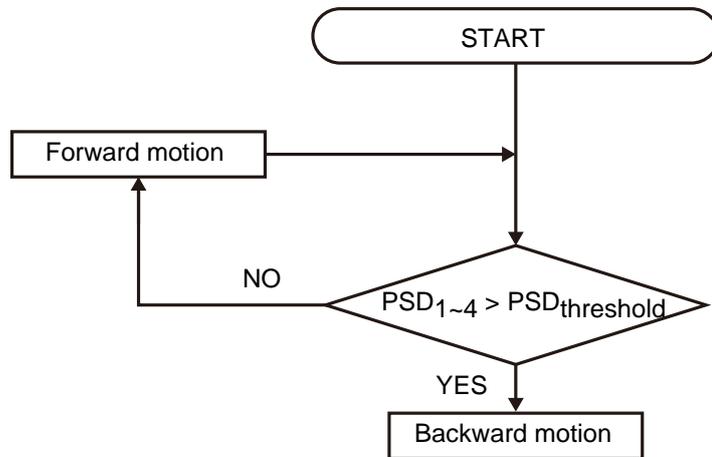


図 2.10 自動初期位置調整機能のフローチャート

機構が移動するように自動で後退動作をすることで、初期位置調整を自動で行うことが可能となる。これら一連の動作を自動初期位置調整機能とする。図 2.10 にこの自動初期位置調整機能のフローチャートを示す。

次章にて自動位置調整機能の実装及びその有効性の検証を行う。

2.3 加速中のぶら下がり機構押込/引抜操作タイミングの適正化

本ロボットは、前述の通り PSD センサを用いてぶら下がり機構の位置を押込/引抜機構の直前に検出し、最適なタイミングで押込/引抜操作を行うことで、ぶら下がり機構を天井面に拘束/解放している。なお、最適なタイミングとは、図 2.11 の右図のようにぶら下

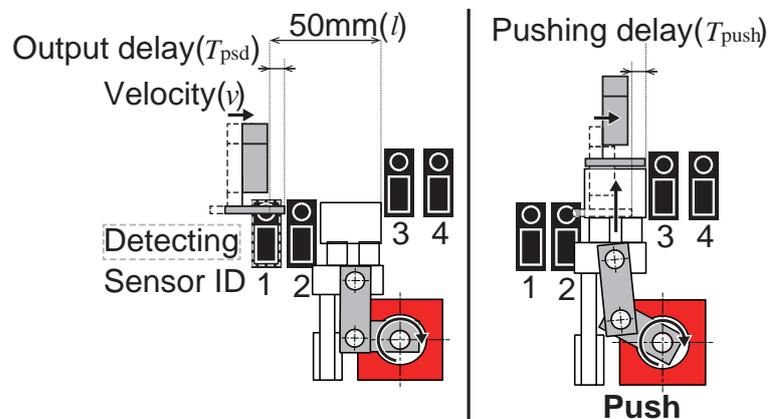


図 2.11 タイミング制御における押込/引抜機構と各パラメータの模式図

がり機構が押込/引抜機構の真上に存在する時を指す。PSD センサの位置と押込/引抜機構の位置は異なるため、ぶら下がり機構の移動速度とセンサ・アクチュエータの遅れを考慮した押込/引抜機構の操作が必要である。PSD センサの検出タイミングから押込/引抜操作をするまでの時間差の算出方法を以下に示す。ぶら下がり機構の速度を v 、PSD センサ 1 から押込/引抜機構までの距離を l とすると、ぶら下がり機構が PSD センサ 1 を通過後に押込/引抜機構の真上に到達する時間 l/v の内、PSD センサ出力の遅れ T_{psd} と押込/引抜操作に必要な時間 T_{push} を考慮する。そこで、PSD センサ 1 が反応してから押込/引抜操作実行の間に、ぶら下がり機構の速度に応じた遅れ $T_d(v)$ を挟む。このような遅れ $T_d(v)$ をもとにぶら下がり機構の押込/引抜操作を行うことで、最適なタイミングでの押込/引抜操作を実現する。本論文ではこの遅れを考慮した押込/引抜操作の制御をタイミング制御と呼ぶ。

$$T_d(v) = l/v - T_{\text{psd}} - T_{\text{push}} \quad (2.1)$$

式 (2.1) のような PSD センサを用いた遅れ計算式は、速度 v が一定、つまり走行が等速運動であると仮定してタイミング計算を行っている。しかし、高速走行時には、目標速度に到達する前の加速段階でぶら下がり機構が PSD センサ 1 を通過するため、加速中に式 (2.1) の計算が行われる。式 (2.1) における速度 v は、PSD センサ 1 がぶら下がり機構の通過を検出した際の無限軌道機構駆動用の BLDC モータの回転速度が代入される。静止状態から高速走行を行うと、一度計算した v の値とその後押込機構到達時の実際の速度との差が大きくなる。そのため、実際に押込/引抜機構に到達するまでの時間に比べて T_d が長く計算されてしまい、押込操作が最適なタイミングに比べ遅れてしまう。

したがって現状のタイミング制御では、加速時に押込操作のタイミングが遅れることがわかる。そこで加速の実現を目指し、加速中であってもぶら下がり機構が押込/引抜機構の真上に存在するタイミングで押込/引抜操作が完了できる加速度を考慮したタイミング制御を実装することでこの問題の解決を目指す。履帯の加速度推定のために、PSD センサがぶら下がり機構の通過を検出した時の履帯駆動用のモータの回転数から機体の速度を算出する。速度算出を PSD センサ 1, 2 でそれぞれ行い、各センサの検出時間の差と算出速度の差からその区間の加速度を求める。ぶら下がり機構の速度及び加速度に応じた遅れ $T_d(v)$ を計算し、押込/引抜操作を行うことで、加速中でも最適なタイミングでの押込/引抜操作を実現できると期待している。

次章にて加速度を考慮したタイミング制御の実装及びその有効性の検証を行う。

2.4 高速走行中のロボット挙動解明

本ロボットは高速走行時、ぶら下がり機構が天井面に衝突し、走行不可となることが確認されている。また、その衝突は低速走行時には見られないため、無限軌道式移動ロボットの高速走行時特有の現象であるといえる。ここで、履帯を持つ走行体の地面走行時の挙動解析として、図 2.12 に示す藤田らが行った単純モデルによる固有値解析がある [36]。この先行研究により、履帯を持つ走行体の上下振動の周期は駆動輪の形状および回転速度に依存していることを示した。しかし、本研究で用いている無限軌道式移動ロボットは、天井面に機械的にぶら下がり、履帯を用いて移動するロボットであり、地面走行時と異なり、天井面との拘束/解放を実現するために押込/引抜操作を必要とすること、天井も振動やたわみといった変形を起こすこと等の理由でモデル解析が困難である。以上のことから、天井面を移動経路とした無限軌道式移動ロボットの高速走行時の挙動は明らかになっておらず、高速走行を実現するためにはこれらを明らかにする必要がある。そこで、高速走行中のロボット挙動に影響を与えている現象について考える。本ロボットの高速走行時に起きている現象として、天井面の振動、機体の揺動、押込/引抜操作タイミングのばらつき、遠心力による履帯の軌跡の膨らみ、ぶら下がり機構の挿入位置のずれが考えられる。

天井にぶら下がって静止していた機体が発進することで、天井面は慣性により機体の進行方向とは逆の方向に動いて振動する。しかし、機体も天井面と一体となって振動しているため、履帯に取り付いているぶら下がり機構と天井孔との相対位置は変化していない。そのため、天井面の振動のぶら下がり機構の衝突への影響は小さいと考えられる。

機体の揺動及び押込/引抜操作タイミングのばらつきについては、高速走行時特有の現象ではないため、高速走行時にのみ起きる衝突への影響は小さいと考えた。

そこで高速走行中にのみ発生している現象であり、衝突への影響が大きいと考えられる

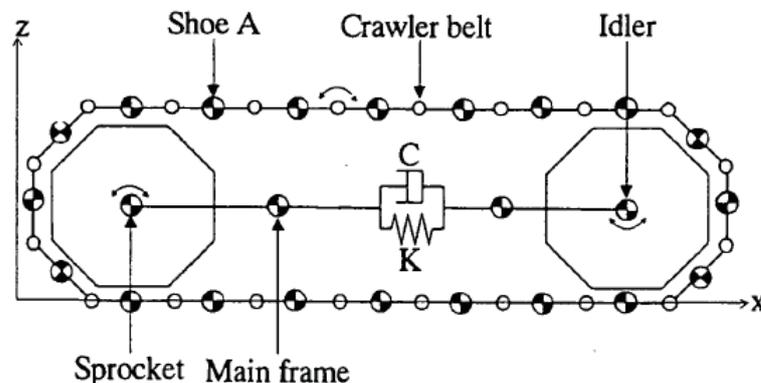


図 2.12 履帯を持つ走行体の力学モデル

以下の 2 つの現象について、履帯及びぶら下がり機構の挙動を解明することで検証を行い、高速走行時のぶら下がり機構と天井面との衝突の原因解明を目指す。

- (1) 遠心力による履帯の膨らみ
- (2) ぶら下がり機構の挿入位置のずれ

遠心力による履帯の軌跡の膨らみ

本来ぶら下がり機構は、衝突せずに天井孔に挿入される。しかし、図 2.13 のように、高速走行中に履帯の軌跡が遠心力で膨らんでいることでぶら下がり機構と天井との間の猶予がなくなり、ぶら下がり機構が天井孔の淵と衝突しているのではないかという仮説を立てた。ここで、図 2.14 に、押込機構手前の位置におけるぶら下がり機構と天井面との距離を示す。

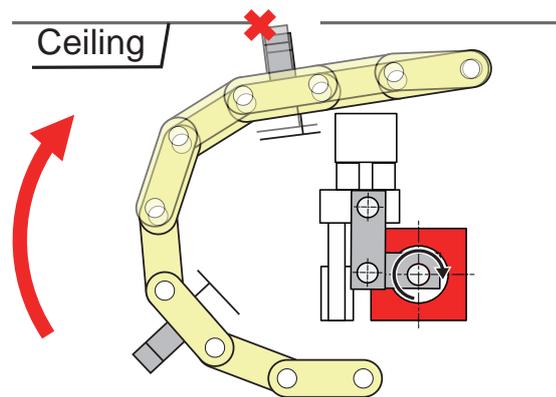


図 2.13 遠心力による履帯の膨らみの模式図

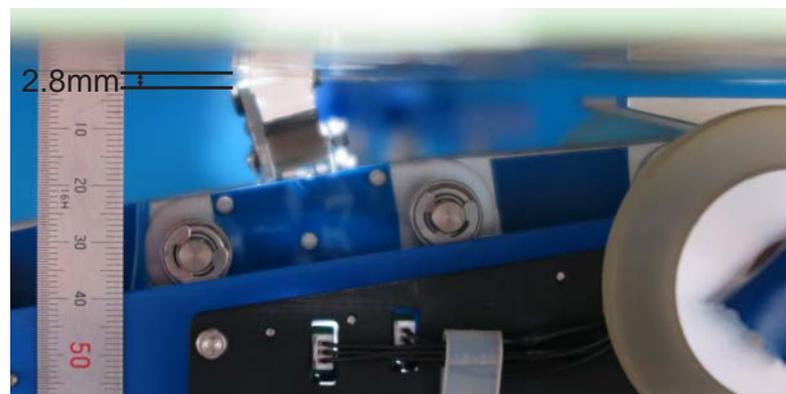


図 2.14 ぶら下がり機構と天井面との距離

図 2.14 のように、押込機構手前の位置において、ぶら下がり機構と天井面との距離は 2.8 mm 隙間があることがわかる。この仮説では、遠心力による履帯の軌跡の膨らみにより、ぶら下がり機構の軌跡が 2.8 mm 以上膨らむことで、押込機構到達前にぶら下がり機構が天井面に衝突したと仮定した。履帯の高速走行時の挙動を実際に計測した研究はこれまでなく、本研究では高速走行時の履帯の挙動を実際に計測することでこの仮説の検証を行う。

ぶら下がり機構の挿入位置のずれ

図 2.15, 図 2.16 に、ぶら下がり機構の挿入位置のずれの現象を説明した図を示す。ぶら下がり機構は履帯で繋がっているため、挿入済みのぶら下がり機構の天井孔に対する相対位置（図 2.15 内 (1)）は次に挿入するぶら下がり機構の天井孔に対する相対位置（図 2.15 内の (2) に示す）に影響を与えている。ここで、図 2.16 に実験系全体を上から見た

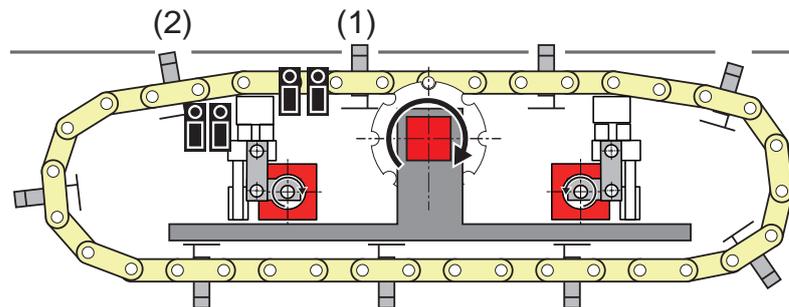


図 2.15 走行中のぶら下がり機構の模式図

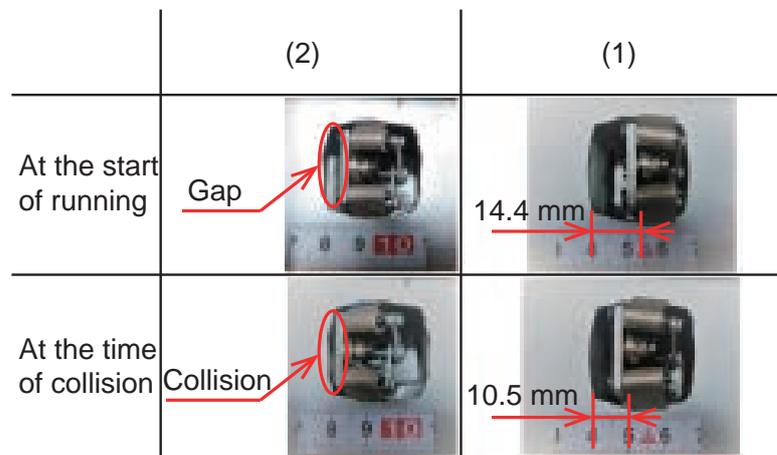


図 2.16 ぶら下がり機構の挿入位置の関係図

第2章 無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の信頼性向上に必要なアプローチ37

ときのぶら下がり機構と天井孔の写真を示す。図 2.16 の (1) 列は図 2.15 内の (1) の位置における、挿入済みのぶら下がり機構と天井孔との位置関係を示す。図 2.16 の (2) 列は図 2.15 内の (2) の位置における、次の挿入するぶら下がり機構と天井孔との位置関係を示す。また、上の行は走行開始時の位置関係、下の行は衝突する際の位置関係を示している。まず、図 2.16 の (2) 列を見ると、走行開始時、次に挿入するぶら下がり機構と天井孔の淵には隙間が空いているが、衝突時はその隙間がなく、赤丸で囲った部分で衝突が起きている。次に、(1) 列を見ると、挿入済みのぶら下がり機構 (1) と天井孔との距離が、走行開始時の 14.4 mm に比べ 3.9 mm 進行方向へずれている。開始時と衝突時でこのような位置ずれが生じていることから、ぶら下がり機構の挿入時の位置ずれが衝突に影響を及ぼしていると考えられる。実際に手でぶら下がり機構の挿入位置を図 2.15 に示す 10.5 mm 以下までずらしたところ、上記に示す衝突が繰り返し確認された。そこで、衝突時と挿入成功時で天井孔に挿入されるぶら下がり機構の挿入位置を計測・比較することでこの仮説の検証を行う。

以上の仮説を検証するため、4 章にて履帯挙動及びぶら下がり機構挿入位置を光学式モーションキャプチャ及びカメラを用いて計測を行い、高速走行中の天井面挿入時のロボット挙動を解明する。

第3章

信頼性の高い発進・加速の実現のための実装及び有効性検証実験

本章では、2.2、2.3節で議論したアプローチに基づいた、発進・加速の実現のための実装とその有効性検証実験について述べる。

3.1 信頼性の高い発進の実現のための自動初期位置調整機能の実装

2.2節により、発進時にぶら下がり機構が特定の初期位置でないと HanGrawler 2 は発進に失敗することが明らかとなり、その解決アプローチとして自動初期位置調整機能を提案した。本節では具体的な初期位置調整機能の実装について議論する。初期位置は各種センサが反応する4パターン及びどのセンサも反応しない2パターンの計6パターン存在するため、それぞれについて発進前に行う動作を検討した。その様子を図3.1に示す。図3.1に示すように、(1)~(4)の各種センサが反応した場合には反応したセンサに応じて一定量の自動後退を行い、どれも反応しない場合には(5)、(6)のように前進動作を行い、センサが反応次第反応したセンサに応じて自動後退を行うよう実装した。

以上のような、初期位置を自動で認識し、適切な初期位置まで後退を行う自動初期位置調整機能を実装した。次節にてその有効性を検証する。

3.2 自動初期位置調整機能の有効性検証実験

3.2.1 実験目的・実験方法

本実験では前節に示した自動初期位置調整機能により、どのような初期位置でも発進が可能であるかを検証する。具体的には、自動初期位置調整機能の有無を実験パラメータと

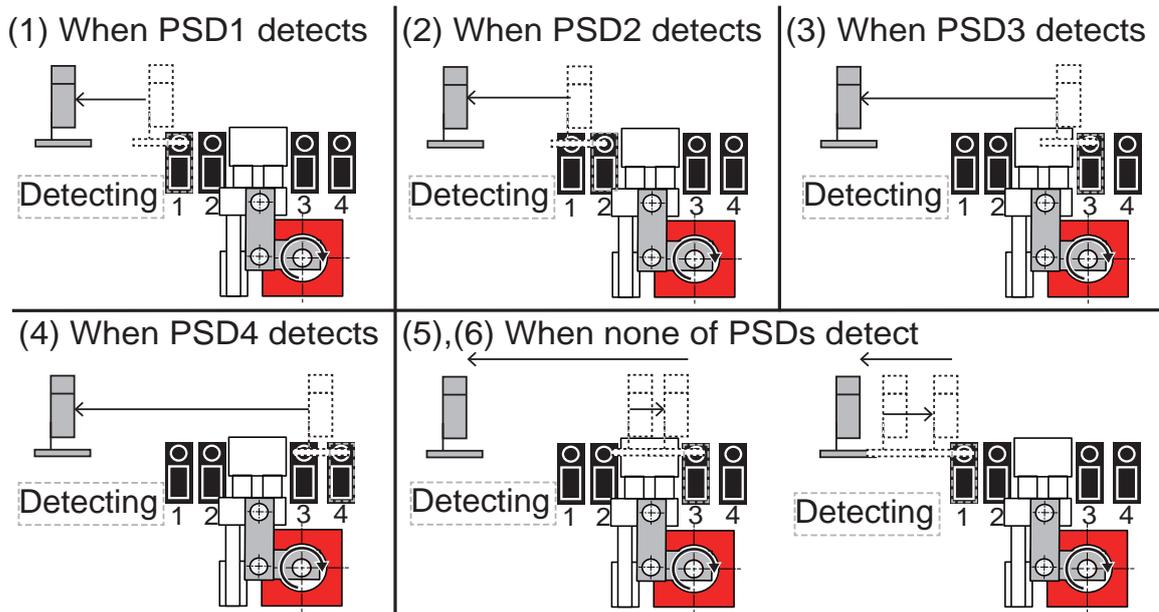


図 3.1 自動初期位置調整機能の概念図

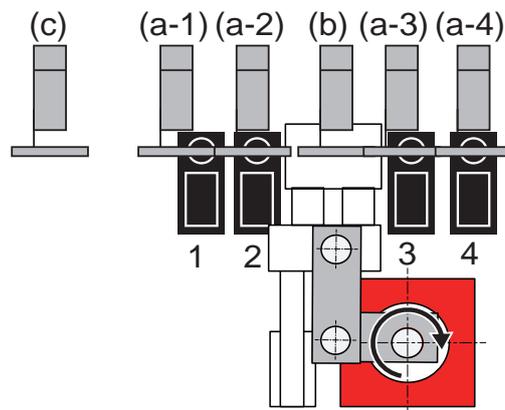


図 3.2 実験時に設定する発進位置

して変化させ、それぞれ発進を複数回行い、その成功回数を比較することで実装した機能の有効性を検証する。ここで、発進成功とは前進するとき一番最初に挿入すべきぶら下がり機構が天井孔への挿入に成功することと定義する。また、図 3.2 に、本実験で行う発進位置全てを示す。本実験では、どのような初期位置からでも発進可能であるかを検証するため、各種センサが反応している位置 (a-1)~(a-4)、及びセンサの反応していない 2 つの位置 (b), (c) にて実験を行う。実験は各条件で 3 回ずつ行い、押込/引抜操作を定量評価するために PSD センサの値と押込/引抜操作時刻をマイクロコントローラに記録する。なお、実験設定を表 3.1 に示す。

表 3.1 自動初期位置調整機能の有効性検証実験設定

Item	Value
Travel speed	0.3 m/s
Initial position	(a-1) ~ (a-4),(b),(c)
Number of trials	3 times
PSD sensor value	Micro-controller log

3.2.2 実験結果

本実験の実験結果を表 3.2 に示す。自動初期位置調整機能を搭載しない場合、(c) の PSD センサ 1 反応手前位置からの発進では発進に成功している。また、(a-1) PSD センサ 1 反応位置では、発進後即座に押込/引抜操作が行われるため失敗し、(a-2)~(a-4) の PSD センサ 2~4 反応位置及び、(b) の押込機構位置では、発進後 PSD センサ 1 の検出範囲をぶら下がり機構が通過しないため、センサがぶら下がり機構の通過を検出できず、発進に失敗している。つまり、自動初期位置調整機能がない場合は予想通りに (c) 以外の場合で発進に失敗している。逆に (c) の場合だけ自動初期位置調整機能の有無に関わらず成功したということから、発進時にぶら下がり機構の初期位置が PSD センサ 1 よりも履帯の回転方法に対して手前である必要があるという仮説が正しかったといえる。

自動初期位置調整機能を搭載した場合、(a)~(c) のどの位置から発進を開始しても発進に成功した。したがって本実験により、自動初期位置調整機能の有効性を示した。

表 3.2 自動初期位置調整機能の有無条件に対する各初期位置からの発進の成否

		Automatic adjustment	
Velocity	Position	On	Off
0.3m/s	(c) Before PSD1 detection	3/3	3/3
	(a-1) PSD1 detection	3/3	0/3
	(a-2) PSD2 detection	3/3	0/3
	(b) Between PSD2 and PSD3	3/3	0/3
	(a-3) PSD3 detection	3/3	0/3
	(a-4) PSD4 detection	3/3	0/3

3.3 信頼性の高い加速の実現のための押込/引抜タイミングの算出

HanGrawler 2 が高速走行を行う場合、加速中に押込/引抜操作が適切なタイミングで行われず、走行に失敗することが 2.3 節より明らかとなり、その解決アプローチとして機体の加速度を推定し、その情報をタイミング制御に組み込むことにした。具体的には PSD センサ 1 と 2 を使用し、それぞれがぶら下がり機構通過を検出した時、履帯の駆動に用いている BLDC モータの回転数から HanGrawler 2 の速度 v_1 , v_2 を求める。そして走行開始からそれぞれが検出するまでの経過時間 t_1 , t_2 を用いて式 (3.1) から加速度を計算する。

$$\alpha = \frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} \quad (3.1)$$

センサ反応から押込/引抜操作までの加速中の速度変化の一例を図 3.4 に示す。図 3.4 は横軸が経過時間、縦軸が速度であり、図中の面積がその区間に移動した距離を示している。PSD センサ 2 によるぶら下がり機構の通過検出時 (t_2) から、押込/引抜操作完了までにかかる時間を T とすると、PSD センサ 2 検出位置から押込位置までの距離 l_2 は、図 3.4 における斜線部分の面積であるため、

$$l_2 = \frac{1}{2}\alpha T^2 + v_2 T \quad (3.2)$$

と求まる。この式を T について整理して式 (3.3) より T を求める。

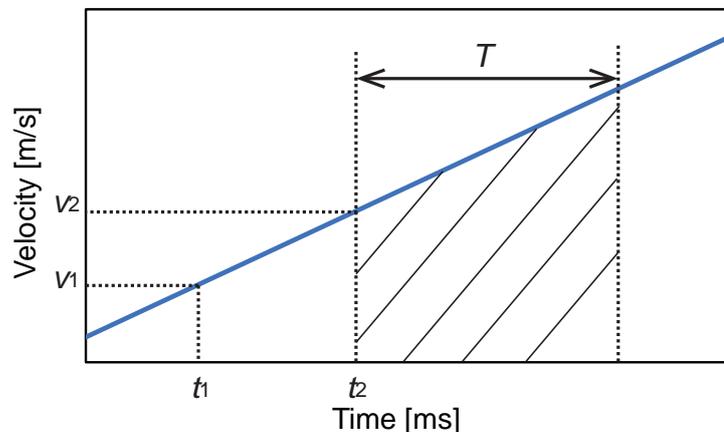


図 3.3 加速中のセンサ反応時及び押込/引抜操作時の速度及び時間

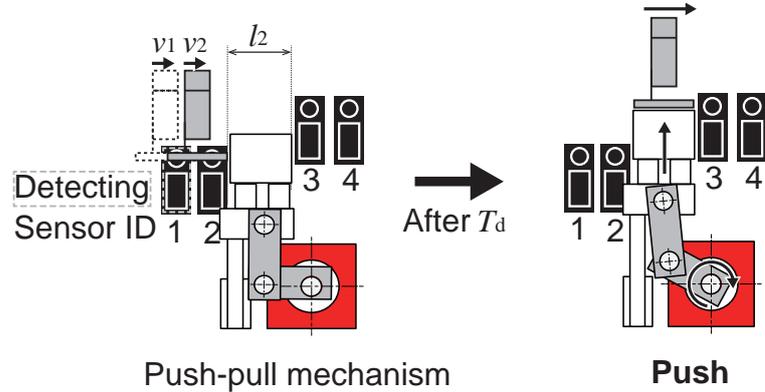


図 3.4 加速中のタイミング制御における押込/引抜機構と各パラメータの模式図

$$T = \frac{-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2\alpha l_2}}{\alpha} \quad (3.3)$$

この時間 T に対して、センサ及びモータの遅れを考慮して、式 (3.4) より T_d を求める。

$$T_d = \frac{-v_2 + \sqrt{v_2^2 + 2\alpha l_2}}{\alpha} - T_{\text{psd}} - T_{\text{push}} \quad (3.4)$$

また、2章で示した従来のタイミング計算式を再度式 (3.5) に示す。

$$T_d(v) = l/v - T_{\text{psd}} - T_{\text{push}} \quad (3.5)$$

従来のタイミング計算とは異なり、2つの速度を用いて加速度を算出し T_d の計算を行うことで、加速中であっても図 3.4 に示すようにぶら下がり機構が押込/引抜機構の真上に存在するタイミングで押込/引抜操作が完了すると期待される。加速時のみこの処理を加え、定速走行時は従来通り式 (3.5) より計算される T_d の遅れを挟むことで失敗しない加速を目指す。本論文ではこの加速度を考慮した押込/引抜操作の制御を加速中のタイミング制御と呼ぶ。

3.4 加速中の押込/引抜タイミング制御の有効性検証実験

3.4.1 実験目的・実験方法

本実験では、従来のタイミング制御と加速中のタイミング制御を実験パラメータとして変化させ、HanGrawler 2 を走行させたときの両者の加速及び走行成功の回数を比較することで、前節に示したアプローチの有効性を検証する。ここでの「加速成功」とは、静止状態から目標速度到達時に落下せず走行を続けていることを指し、「走行成功」とは、静

止状態から直線移動距離 1.5 m を落下せずに走行することを指す。実験装置を図 3.5 に示す。実験中の機体の挙動を測定するためにモーションキャプチャによって機体を計測する。機体には図 3.6 のように 4 つのマーカーを設置し、マーカーによって得られるリジッドボディを機体の代表剛体として位置や速度、姿勢を測定する。実験で使用したモーションキャプチャの諸元を表 3.3 に示す。なお、実験設定を表 3.4 に示す。

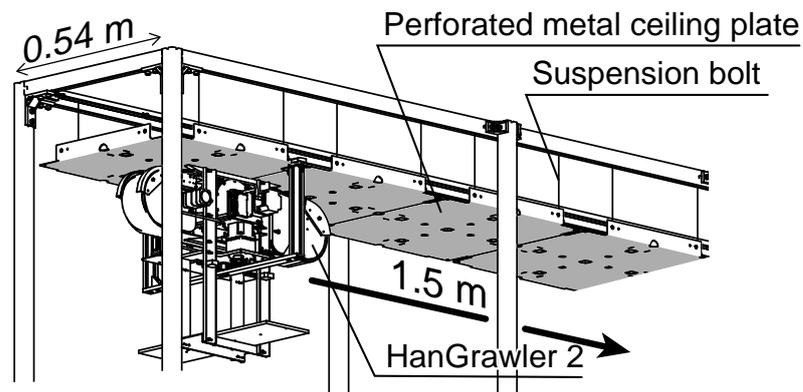


図 3.5 直進移動実験の実験装置の外観

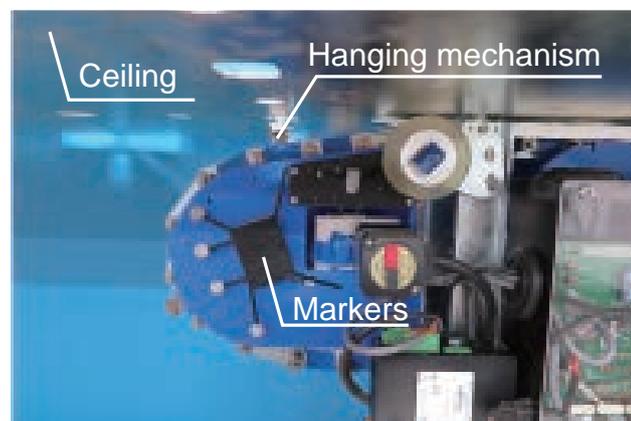


図 3.6 機体に取り付けられたマーカー

表 3.3 モーションキャプチャ V120 Trio の諸元

Item	Specification
Measuring range	47°×43°
Resolution	640×480 pixel
Frame rate	120 fps

表 3.4 加速中のタイミング制御有効性検証実験設定

Item	Value
Travel distance	1.5 m
Travel speed	0.3,0.6,1.0 m/s
Number of trials	5 times
Measurement of travel distance	Motion capture
PSD sensor value	Micro-controller log

表 3.5 加速処理有効性検証実験結果

		Timing Control during acceleration	
Velocity	Success	On	Off
0.3m/s	Acceleration success	5/5	5/5
	Running success	5/5	5/5
0.6m/s	Acceleration success	5/5	1/5
	Running success	4/5	0/5
1.0m/s	Acceleration success	4/5	0/5
	Running success	2/5	0/5

3.4.2 実験結果および加速成功についての考察

本実験の加速成功回数・走行成功回数を表 3.5 に示す。走行速度が 0.3 m/s の場合、加速度の考慮の有無にかかわらず、1.5 m の区間の走行に成功した。次に、0.6 m/s の場合、従来のタイミング制御の場合では 5 回中 1 回しか加速に成功していないが、加速中のタイミング制御では 5 回とも加速に成功している。1.0 m/s では、従来のタイミング制御の場合では加速に 1 度も成功せず、加速中のタイミング制御により加速に成功している。したがって、本実験により加速度を考慮した加速中のタイミング制御は有効であり、これにより高速走行への加速の成功率が高まった。

続いて、加速中のタイミング制御によって具体的に T_d の計算結果がどのように変化したのかを分析する。図 3.7 に、加速中のタイミング制御で 1.0 m/s の走行に成功した際の走行データの一例を示す。図 3.7 の上部は横軸が時間で縦軸が移動距離および速度のグラフであり、モーションキャプチャで計測された移動距離及びそこから得られた移動速度を示している。下部はタイミング制御に用いている PSD センサの出力値及び押込/引抜機

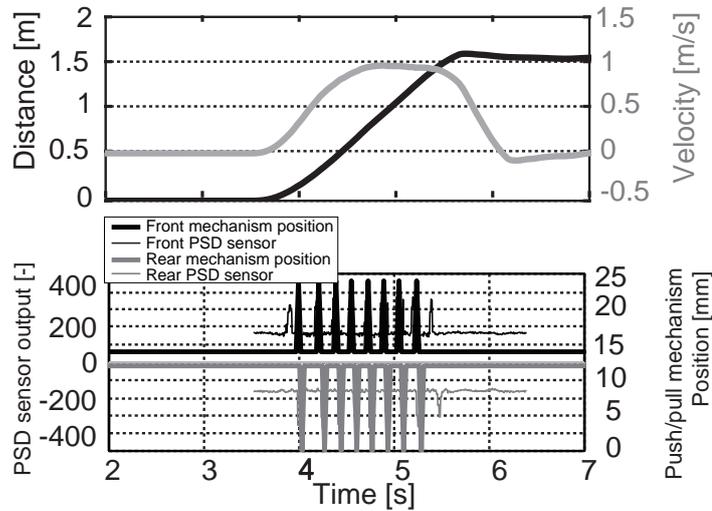


図 3.7 加速中のタイミング制御での 1.0 m/s 走行に成功した際の機体挙動と押込/引抜タイミングの一例

表 3.6 加速中のタイミング制御での遅れ時間 T_d

Trial	1st Pushing delay [ms]	1st Pulling delay [ms]
1	87	76
2	78	49
3	111	45
4	68	-
5	78	55
Average	84.4	56.3
σ	16.3	13.8

構に対する操作指令値を示している。HanGrawler 2 が前進する際、前側の押込/引抜機構は正の方向に押込まれ（下側グラフの濃い実線）、後ろ側の押込/引抜機構は負の方向に引抜かれる（下側グラフの薄い実線）。なお、PSD センサは 240 を閾値として、閾値を超えたタイミングをぶら下がり機構が通過したタイミングとしている。

また表 3.6 に、加速中のタイミング制御で 1.0 m/s 走行において 1 度目に PSD センサが反応してから押込操作が行われる時間 T_d を 5 試行分まとめ、同様に引抜操作においても 5 試行分まとめた。なお表 3.6 では、4 回目の走行時に 1 度目の引抜に失敗したため測定データはなしとした。この表 3.6 より、1 度目の押込操作までの遅れ時間の平均値が 84.4 ms であり、引抜操作の遅れ時間の平均値が 56.3 ms であることから、1 度目の押込操作までの遅れ時間に比べ、引抜操作の遅れ時間の方が小さくなっていることがわかる。遅れ時間の計算のパラメータは速度及び加速度であるため、遅れ時間が小さくなってい

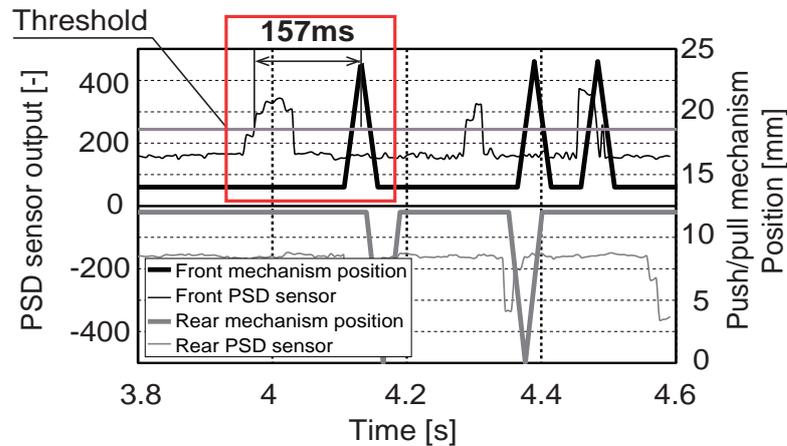


図 3.8 従来のタイミング制御で 1.0 m/s の走行に失敗した際の押込/引抜タイミングと PSD センサの値

るといことは、ロボットが 1 度目の押込/引抜操作を行う際には加速中であることがわかる。

続いて、図 3.8 に、従来のタイミング制御で 1.0 m/s の走行に失敗した際の実験で得られたデータを示す。このデータは、図 3.8 内の赤枠で囲っている 1 度目の押込に失敗し落下したものである。図 3.8 の赤枠内に注目すると、PSD センサが閾値である 240 を超えセンサがぶら下がり機構の通過を検出した後、約 157 ms 後に押込操作が行われている。表 3.6、図 3.8 の 1 度目の押込における遅れ時間 T_d を比較すると、従来のタイミング制御で算出された遅れ時間 T_d に比べ、加速中のタイミング制御による T_d の方が小さくなっていることがわかる。加速中のタイミング制御では、加速度を考慮することによって T_d が小さくなることを期待しており、期待通りの結果であるといえる。以上のことから、加速を考慮した加速中のタイミング制御によって遅れ時間 T_d が加速度に応じて算出されることで、加速中でも押込/引抜操作が適正化され、1.0 m/s の高速走行において加速の成功率が 0/5 から 4/5 に上昇したことが明らかになった。

最後に、1.0 m/s への加速に失敗した際のデータを図 3.9 に示す。この走行では 1 回目の押込操作に成功後、引抜操作に失敗し加速に失敗した。図 3.9 において引抜操作前に PSD センサの値が閾値を超えたのち、約 30 ms 後に引抜操作が行われている。表 3.6 より、1 回目の引抜操作の際の遅れ時間の平均値は 56.3 ms であり、平均値に比べ 26 ms 以上早く引抜操作をしたために失敗している。この遅れ時間計算は式 (3.4) より求めており、PSD センサ 2 通過時の速度が大きな値を取り、加速度が大きくなったことから T_d が非常に小さくなったと考えられる。

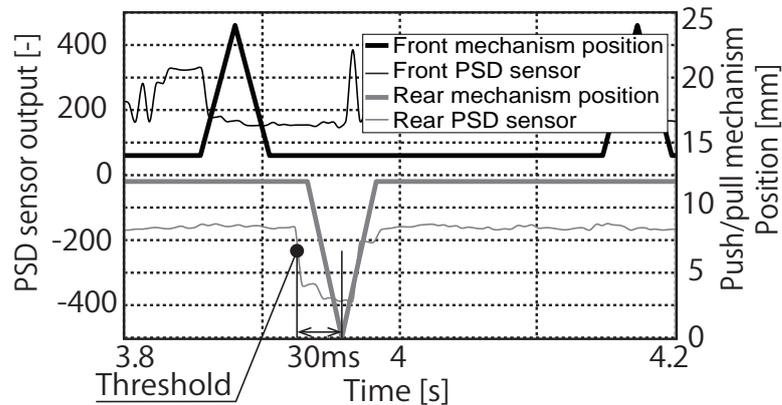


図 3.9 加速中のタイミング制御での 1.0 m/s 走行に失敗した際の押込/引抜タイミングと PSD センサの値

3.4.3 加速終了後の走行失敗についての考察

本実験の実験結果である表 3.5 に示すように、加速中のタイミング制御での 1.0 m/s の走行において、加速に成功した回数が 5 回中 4 回なのに対し、実際に 1.5 m の走行に成功したのは 5 回中 2 回であった。つまり、加速終了後の等速中の走行時の方が失敗の頻度が高く、走行の信頼性を向上させるためには等速走行中の失敗の減少が課題である。加速後の等速走行中の失敗では、押込操作の際にぶら下がり機構が天井面に衝突していることが確認された。この衝突の原因としては、2.4 節に示したように履帯の挙動が未解明であるため、複数の要因が考えられる。以上のように、HanGrawler 2 の高速走行を実現するためには、発進及び加速に成功するだけでなく、高速走行中のロボット挙動を解明する必要がある、次章でその解明について述べる。

第 4 章

信頼性の高い高速走行の実現のための履帯挙動計測

本章では、2.4 節で議論したアプローチに基づいた、無限軌道式天井移動ロボットの高速走行時の履帯挙動計測の具体的手法の検討および計測実験について述べる。

4.1 履帯挙動計測の要求機能の整理と計測手法の選定

本研究における無限軌道式天井移動ロボット高速走行時の挙動計測対象は、2.4 節に示した通り履帯挙動及びぶら下がり機構挿入位置である。履帯挙動計測の目的は、高速走行時の履帯軌道の膨らみを計測することで、2.4 節に示した高速走行時のぶら下がり機構と天井面との衝突の仮説を検証することである。そこで本研究では、天井面を走行している HanGrawler 2 のうち、ぶら下がり機構が取り付けられた履板単体の挙動を計測することで仮説の検証を行う。HanGrawler 2 の走行中、天井により機体が隠れてしまうため計測可能な範囲が限られる。そのため、履板の計測における要求機能は、(1) 3次元空間での位置・姿勢を高精度で計測可能、(2) 狭い空間を高速に移動する機械構造の位置・姿勢を計測可能な 2 つが考えられる。これらの要求機能を満たす物体の 3次元計測手法を検討する。本論文では、代表的な物体の位置・姿勢計測手法である慣性センサ、カメラ、光学式モーションキャプチャによる計測を比較し選定する。

慣性センサは、主に身体運動計測などで用いられている計測手法である [38]。この手法では、小型の慣性センサを搭載することで、簡易かつ計測範囲に制限されずに回転・並進運動を計測可能である。一方、得られた角速度を積分して位置・姿勢を推定するため、出力に含まれるドリフト誤差が蓄積し、計測時間の経過とともに精度が低下するデメリットがある。

カメラを用いた 3次元計測には主に 2 台のカメラを用いたステレオカメラ法が用いら

れている [39]. 2 台のカメラを離して設置し, 2 つの画像から得た視差から測定対象までの距離計測を行う計測手法である. [40]. しかしステレオカメラ法では, ステレオ画像上での正確な特徴点探索が難しいこと, キャリブレーションにより 2 台のカメラの位置関係を計測する必要があるというデメリットがあげられる [41].

光学式モーションキャプチャによる計測では, 球状の反射マーカを取り付けることで, 簡易に位置を 3 次元的に計測できる [42]. この計測方法では, 専用カメラから近赤外線を照射し, 反射マーカが光を反射することでマーカの位置を認識し, 複数台のカメラを用いることで, 三角測量の原理によりマーカの三次元情報を算出可能となる [43]. 一方, キャリブレーションやマーカ貼り付けなどの計測準備の煩雑さや, 周辺物の反射光の影響などでオクルージョンが発生してマーカが認識できないと計測できないというデメリットがあげられる.

以上 3 つの代表的な計測方法を比較した図を図 4.1 に示す. 本研究では要求機能 (1) 位置・姿勢を高精度で計測可能, を満たしている光学式モーションキャプチャを選択する. しかし, 計測対象である HanGrawler 2 は天井面という狭い空間を移動経路とするため, 一般的な光学式モーションキャプチャでは (2) 狭い空間を高速に移動する機械構造の位置・姿勢を計測可能という要求機能を満たすことができない. そこで, 3 台のカメラがユニット化されている光学式モーションキャプチャ OptiTrack 製 V120 Trio (図 4.2[44]) を用いることとした. このモーションキャプチャはカメラ同士の位置関係が固定されており, カメラ同士の座標が既知のためキャリブレーション不要で計測可能であり, 三脚を用

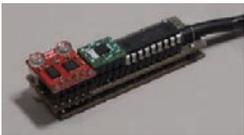
Requested Function	Inertial sensor [37] 	Stereo Camera [38] 	Motion Capture [42] 
(1) Highly accurate measurement	✗ Low accuracy due to position estimation by acceleration integration	△ Difficult to find accurate feature points	○ High-precision 3D measurements can be easily made using markers
(2) Capable of measuring in confined spaces	○ Not limited in measurement range	△ Can be measured by capturing it in the angle of view	△ Can be measured by capturing it in the angle of view

図 4.1 代表的な物体の位置・姿勢計測手法の比較



図 4.2 光学式モーションキャプチャ (OptiTrack 製 V120 Trio) の外観

いて機体正面に設置することで天井面を走行する HanGrawler 2 の計測が可能となる。

4.2 高速走行時の履帯挙動計測の課題と達成アプローチ

本計測では高速走行時の主な挙動として、2.4 節に示した 2 つの仮説を検証する。遠心力による履帯挙動の膨らみの計測には光学式モーションキャプチャによる計測を行う。また、ぶら下がり機構の挿入位置のずれの計測には、天井面を上から観察し、天井孔との相対位置を計測可能な方法が求められる。そこで光学式モーションキャプチャによる計測ではなく、天井面にカメラを設置し計測することとした。それぞれの計測における課題と達成アプローチを次節に示す。

4.2.1 光学式モーションキャプチャによる履帯挙動計測における課題と達成アプローチ

光学式モーションキャプチャによる履帯挙動計測において、以下の 3 つの課題が考えられる。

- (1) マーカーの貼り付け方法
- (2) 光学式モーションキャプチャカメラの設置位置
- (3) マーカーの誤認識防止方法

それぞれの課題に対する達成アプローチを以下に示す。

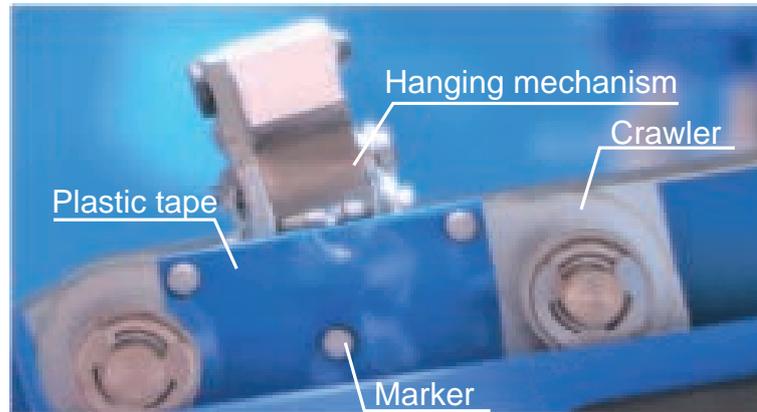


図 4.3 履板に取り付けられた 3 つの小型マーカーの外観

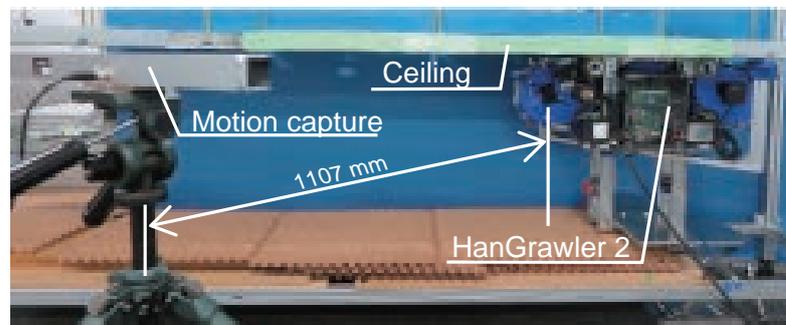


図 4.4 光学式モーションキャプチャカメラの設置位置（正面図）

マーカーの貼り付け方法

光学式モーションキャプチャで位置・姿勢を計測するためには、最低 3 つのマーカーを認識させる必要がある。また、履帯を構成する履板のマーカー設置可能範囲は 39×20 mm である。一般的に用いられている反射マーカーは直径が 9~14 mm であり、設置範囲内にこのマーカーを 3 つ設置すると、マーカー間の距離が短くそれぞれのマーカーを区別することができない。そこで、直径 3 mm の小型マーカーを使用し、設置範囲内に独立して認識可能な 3 つのマーカーの設置に成功した。図 4.3 にマーカーを設置した図を示す。

光学式モーションキャプチャカメラの設置位置

履帯は機体と一緒に前進するため、機体に対して正面の位置にカメラを設置すると発進時にマーカーを認識できていても、走行中にモーションキャプチャカメラに対してマーカーが隠れてしまう恐れがある。なお、反射マーカーがカメラに認識されるためには、そ

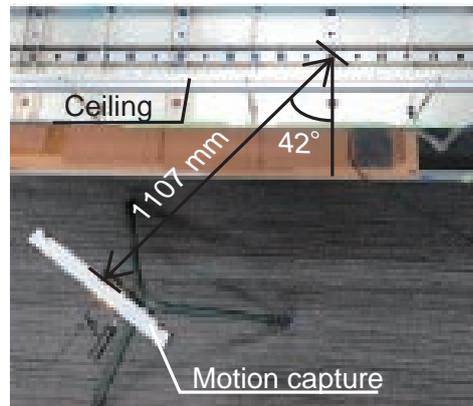


図 4.5 光学式モーションキャプチャカメラの設置位置（上面図）

れが画角内で既定のピクセル以上になるようにカメラを対象物に接近させる必要がある。そこで実験中にマーカーを認識し続けられるように、計測箇所の天井孔に対し、距離 1107 mm、角度 42° の位置にカメラを設置した。図 4.4 に実験系の正面図、図 4.5 に実験系の上面図を示す。

マーカーの誤認識防止方法

モーションキャプチャカメラは近赤外線を照射し、反射マーカーからの反射で位置を認識している。しかし、HanGrawler 2 は金属部品を多く含むため、機体の金属部品が近赤外線を反射しマーカーと誤認識されてしまう恐れがある。そこで履板の金属面を可能な限りビニールテープ（日東電工製，“E50292 590J”）で覆い反射を少なくした。また、露光時間を $10 \mu\text{s}$ まで短くし、金属からの反射光が入りにくくすることで、マーカーの誤認識を防止した。

4.2.2 カメラによるぶら下がり機構挿入位置計測における要求機能と達成アプローチ

カメラによるぶら下がり機構挿入位置計測の要求機能として、天井面からのカメラ映像からぶら下がり機構挿入位置を定量的に評価可能であることがあげられる。そこで、図 4.6 のように、天井面に目盛を貼り付け、その位置を定量的に評価可能とした。

計測を行うカメラは、複数台を天井面に設置するため小型で軽量のアクションカム GoPro HERO10 Black を用いた。表 4.1 に諸元を、図 4.7 に外観をそれぞれ示す。



図 4.6 天井面に取り付けられた目盛りの外観

表 4.1 アクションカム HERO10 Black の諸元

Item	Specification
Frame rate	~ 240 fps
Resolution (60 fps)	3840×2160
Focal length	16 ~34 mm



図 4.7 アクションカム HERO10 Black の外観

4.3 遠心力による履帯膨らみ挙動計測実験

4.3.1 実験目的・実験方法

本実験で検証したい仮説は、高速走行中に履帯の軌跡が遠心力で膨らみ、それによってぶら下がり機構と天井面との隙間がなくなり、ぶら下がり機構が天井孔の淵と衝突してい

表 4.2 履帯挙動計測実験設定

Item	Value
Travel speed	0.1, 1.0 m/s
Number of trials	10 times
Crawler measurement	Motion capture
PSD sensor value	Micro-controller log

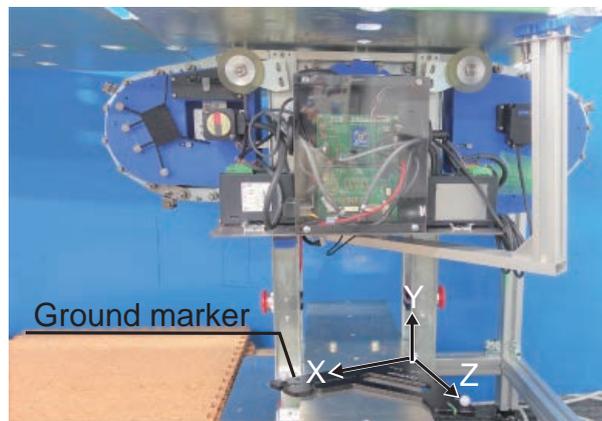


図 4.8 原点定義用グラウンドマーカーの設置位置

るというものである。この仮説を検証するため、ぶら下がり機構の挿入に成功している区間の履帯の軌跡を光学式モーションキャプチャを用いて計測し、異なる速度による履帯の軌跡の違いを分析する。なお、実験設定を表 4.2 に示す。

本計測では図 4.8 のように機体の天板位置にモーションキャプチャの原点定義用のグラウンドマーカーを設置し、この軸を系の絶対座標系としている。履帯の軌跡を計測するためには、機体に対する履板の相対位置を計測する必要がある。そこで履板 1 枚に 3 つの小型マーカーを、機体に 4 つのマーカーを取り付け、マーカーによって得られるリジッドボディを履板・機体の代表剛体とし、図 4.9 のようにマーカーの取り付けられた水色の履板が機体の左端にいるときのそれぞれの座標を記録する。なお、このときの機体に対する履板の位置を原点位置と定義する。以下の式 (4.1) から、原点座標位置の履板の、機体に対するベクトルが求まる。

$$\vec{A} = (X_{S0} - X_{H0}, Y_{S0} - Y_{H0}, Z_{S0} - Z_{H0}) \quad (4.1)$$

また、走行中の各座標位置の一例を図 4.10 に示す。機体座標 H_1 と式 (4.1) より求まる \vec{A}

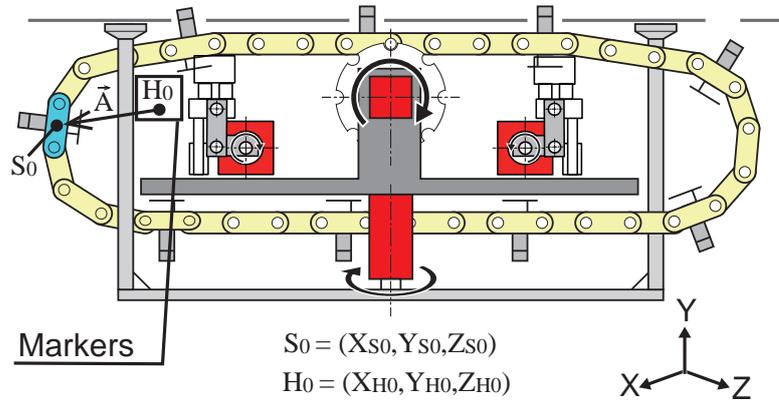


図 4.9 マーカーの取り付けられた履板と座標系

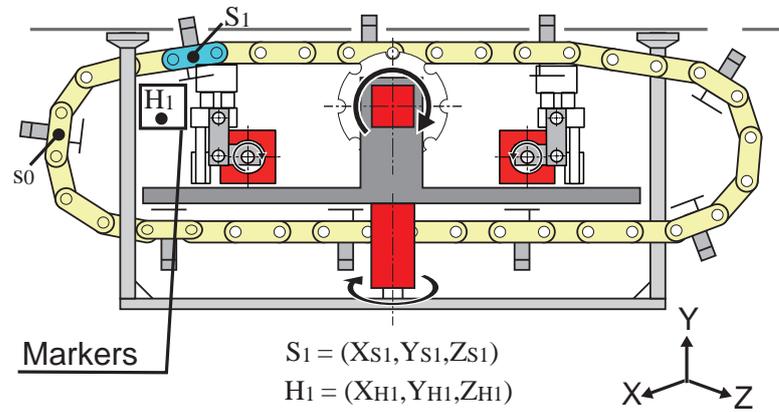


図 4.10 走行中の各座標位置の一例

との和により，図 4.10 における s_0 （走行中の機体に対する履板の原点位置）の座標が式 (4.2) より求まる．

$$s_0 = H_1 + \vec{A} = (X_{H_1} + X_{S_0} - X_{H_0}, Y_{H_1} + Y_{S_0} - Y_{H_0}, Z_{H_1} + Z_{S_0} - Z_{H_0}) \quad (4.2)$$

履帯の軌跡計測のため，マーカーの取り付けられた履板の新たな座標設定を図 4.11 に示す． xy 座標における y 軸方向の変位は，絶対座標系 XYZ における Y 軸方向の変位と一致している．そのため x 軸方向の変位は，絶対座標系 XYZ における XZ 平面の変位と一致する． XZ 平面にて，式 (4.2) より求まる原点座標と図 4.10 に示す走行中の履板の座標との二点間距離から，図 4.11 に示す機体に対する履板の x 軸方向の変位が式 (4.3) より求まる．

$$\sqrt{(X_{S_1} - (X_{H_1} + X_{S_0} - X_{H_0}))^2 + (Z_{S_1} - (Z_{H_1} + Z_{S_0} - Z_{H_0}))^2} \quad (4.3)$$

これらを整理して，走行中の xy 座標系における機体に対する履板の相対位置は，

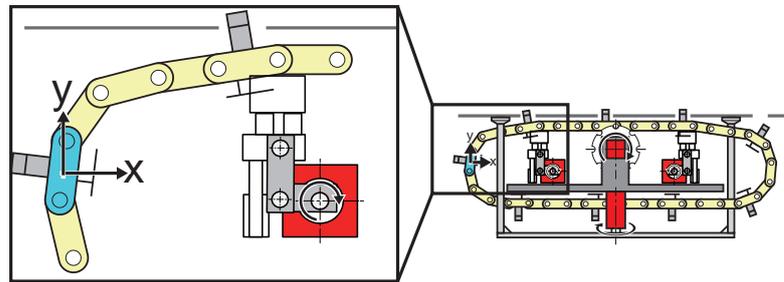


図 4.11 マーカーの取り付けられた履板と新たな座標系

$$S_1 = (\sqrt{(X_{S1} - (X_{H1} + X_{S0} - X_{H0}))^2 + (Z_{S1} - (Z_{H1} + Z_{S0} - Z_{H0}))^2}, Y_{S1}) \quad (4.4)$$

と求まる．本研究ではこのようにして機体に対する履板の相対位置を計測した．

4.3.2 実験結果

本実験の実験結果の一例を図 4.12 に示す．図 4.12 は横軸に x 座標，縦軸に y 座標を取ったグラフであり，0.1 m/s と 1.0 m/s それぞれの速度でのマーカーの設置された履板の機体に対する相対的な軌跡を示している．本計測では，押込機構付近の軌跡を精度よく計測できるように，図 4.5 のように機体に対し角度を付けてカメラを設置したため， $x = 0 \sim 50$ mm 付近の押込に関与していない位置ではマーカーが欠落することがあり精度は保証されていない．この領域は図 4.12 において斜線でハッチングをかけている．また，

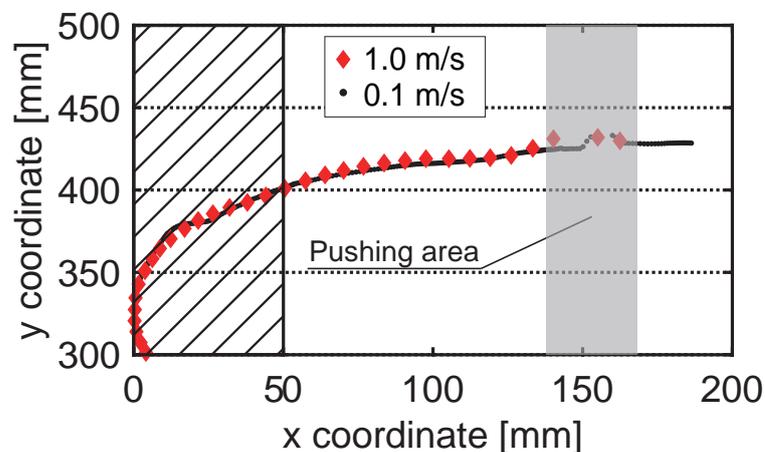


図 4.12 履板に取り付けられたマーカーのそれぞれの速度での軌跡

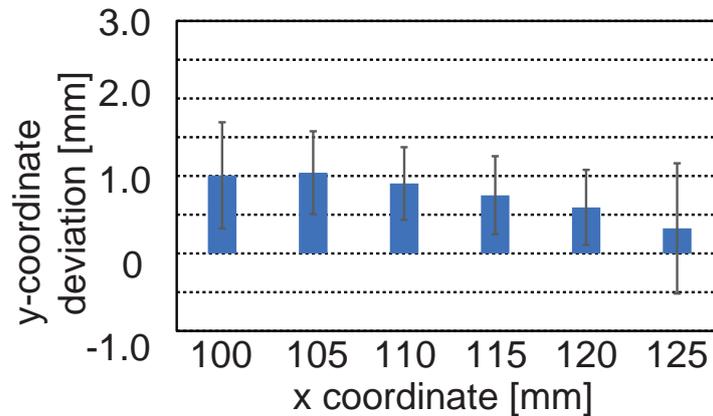


図 4.13 y 方向の偏差の平均値

押込操作が行われる押込機構付近 ($x = 140 \sim 170$ mm) の位置は灰色で表している。1.0 m/s の高速走行では、0.1 m/s の場合よりも x 座標において手前の位置からマーカーの y 座標の値が急激に大きくなっていることから、押込操作が始まっているといえる。押込のタイミングは移動速度に応じて変化するため、灰色の区間での軌跡の違いは設計通りの動作を示している。

続いて高速走行時に、仮説通り高速走行時のほうが低速走行時よりも履帯の軌跡が膨らんでいるかどうかの分析を行う。履帯挙動の膨らみ量を定量的に評価するため、押込操作による軌跡変化がない $x = 100 \sim 125$ mm の位置での移動速度の違いによる y 座標の偏差を x 座標の値 5 mm ごとに算出し、計測 10 回分の平均値を比較した。この平均値と標準偏差を図 4.13 に示す。式 (4.5) に、偏差の平均値の計算式を示す。

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{10} (y_{i,v=1.0} - y_{i,v=0.1}) \quad (4.5)$$

図 4.13 より、偏差の平均値は全ての位置で正の値を示しており、最大 1.0 mm ($x=105$) の偏差があることがわかった。つまり高速走行では低速走行に比べ履帯が膨らんでいるといえる。また、押込機構手前の $x=125$ mm の位置では、その偏差の平均値が 0.3 mm であることがわかった。 $x=125$ mm の位置において、天井面とぶら下がり機構との距離は 2.8 mm であり、本実験で計測された遠心力による履帯の挙動の膨らみ量の平均値は 0.3 mm であることから、高速走行中、仮説通り履帯の挙動は膨らんでいるものの、ぶら下がり機構と天井面との隙間である 2.8 mm に比べ膨らみ量は微小であることから、履帯の挙動の膨らみは衝突に直接関係していないことがわかった。

4.4 高速走行中のぶら下がり機構挿入位置計測と衝突への影響分析実験

4.4.1 実験目的・実験方法

本実験で検証したい仮説は、発進時に比べぶら下がり機構の挿入時の天井孔に対する相対位置がずれることで、ぶら下がり機構が挿入時に天井孔に衝突しているというものである。この仮説を検証するため、本実験では高速走行中に衝突する場合と衝突しない場合の2種類の走行を行い、光学式モーションキャプチャ及び天井面に設置したカメラで計測を行った。なお、カメラは図 4.7 に示す GoPro を 1 回目に挿入が行われる孔から 1 台ずつ、計 4 台設置した。なお、実験設定を表 4.3 に示す。

4.4.2 実験結果

本実験の実験結果の一例を図 4.14 に示す。図 4.14 は、横軸に x 座標、縦軸に y 座標を取ったグラフであり、マーカーを設置した履板の機体に対する相対的な軌跡の違いを示している。図 4.14 より、衝突なしの場合の軌跡では、灰色の押込区間で軌跡が急上昇しているため、押込が行われている。しかし、衝突ありの場合の軌跡では灰色の区間での急上昇がみられないため、押込が正常に作動していないことがわかる。押込時にぶら下がり機構が天井面に衝突すると、履板が y 軸方向に押込まれないため、軌跡の急上昇が発生しなかったと考えられる。

また、衝突の有無による履帯の軌跡の違いを分析するため、押込操作による軌跡変化がない、 $x = 100 \sim 125$ mm の位置での移動速度の違いによる y 座標の偏差を式 (4.5) と同様に x 座標の値 5 mm ごとに算出し、計測 5 回分のデータを図 4.15 に示す。なお、図 4.15

表 4.3 履帯挙動計測実験設定

Item	Value
Travel speed	1.0 m/s
Number of trials	5 times
Crawler measurement	Motion capture
Insertion position measurement	GoPro

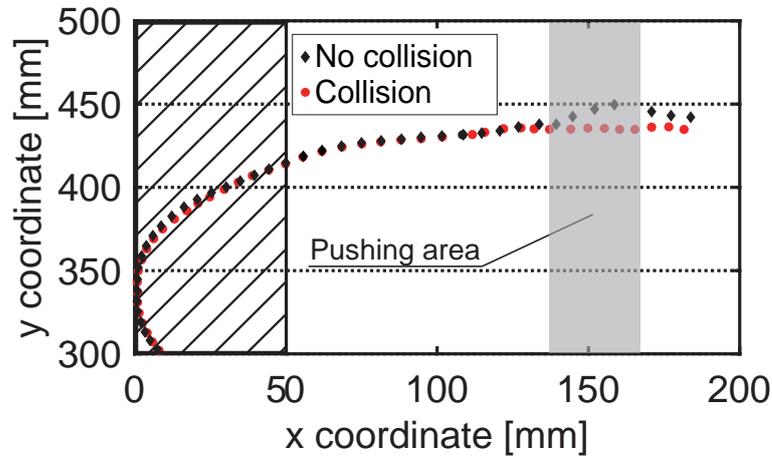


図 4.14 衝突の有無による履板に取り付けられたマーカーの軌跡の違い

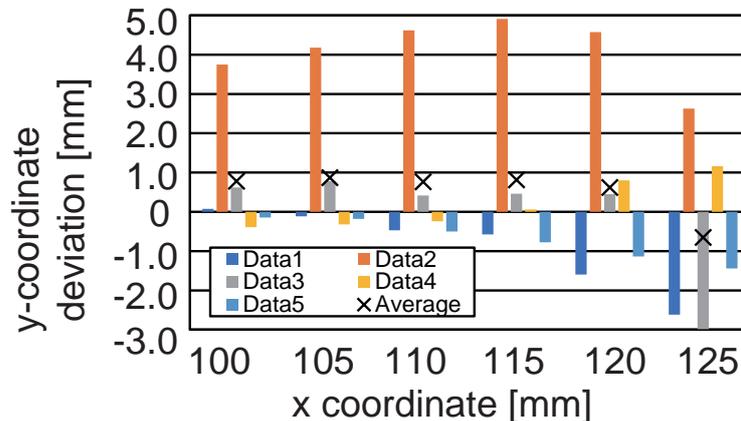


図 4.15 衝突の有無による y 方向の偏差

は、横軸に x 座標、縦軸に y 座標の偏差を取ったグラフであり、偏差が正であると衝突時の履帯の方が膨らんでいることを示しており、各 x 座標における 5 回分の偏差の平均値を \times で示している。図 4.15 より、 $x = 125$ mm の位置で偏差の平均値が負、つまり押込機構手前では衝突していないときの方が軌跡が膨らんでいることから、衝突と履帯の膨らみには因果関係が薄く、他に支配的な要因があると考えられる。

本実験では、3 回目の押込時に衝突していたため、図 4.16 にその一つ手前である 2 回目の押込時に挿入したぶら下がり機構の、挿入時の天井孔に対する相対位置の計測 5 回分の平均値を示す。図 4.16 より、衝突時の挿入位置は衝突していないときに比べ平均値が進行方向へずれていることがわかった。しかし、2.4 節の図 2.16 に示す衝突する際の天井孔に対する相対位置である 10.5 mm と比べると、衝突時の相対位置には 3 mm 以上猶予がある。したがって、衝突が起きる時のぶら下がり機構の位置ずれに比べて微小であったため、ぶら下がり機構の挿入時の位置ずれが衝突に影響を及ぼしているという仮説は正しく

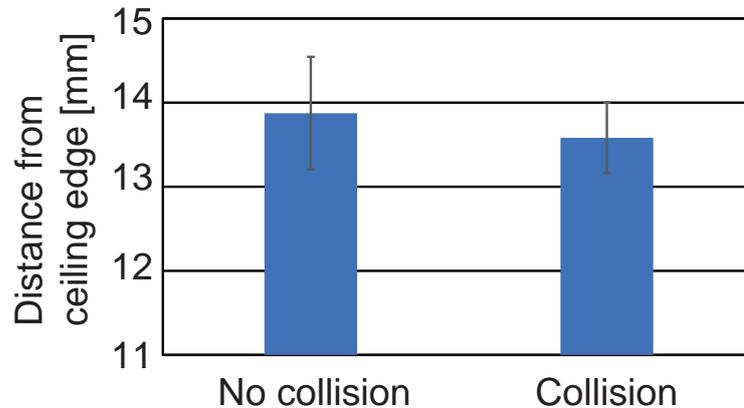


図 4.16 発進時からの挿入位置のずれの平均値

ないことがわかった。

4.5 履帯挙動計測実験のまとめ

4.3, 4.4 節に示した実験を通して、遠心力による履帯の膨らみ、ぶら下がり機構の挿入位置のずれという 2 つの現象は、どちらもぶら下がり機構と天井面との衝突の原因といえるほど影響が大きくはないことが判明した。従って他の要因が存在すると考えられるため、これまでの実験結果から新たな要因を考察する。4.4 節の実験における、GoPro を用いてぶら下がり機構の挿入を天井面の上面から撮影した映像の一例を図 4.17 に示す。図 4.17 の上の行は衝突して挿入に失敗した際の映像を、下の行は衝突せず挿入に成功した際の映像を示している。図 4.17 は GoPro で撮影した映像をコマ送りしたものであり、コマ間隔は 16.7 ms である。この図より、衝突の有無にかかわらず、挿入の 3 コマ手前まではどちらのぶら下がり機構も穴の淵との間に隙間があることがわかる。しかし、右の 2 コマ

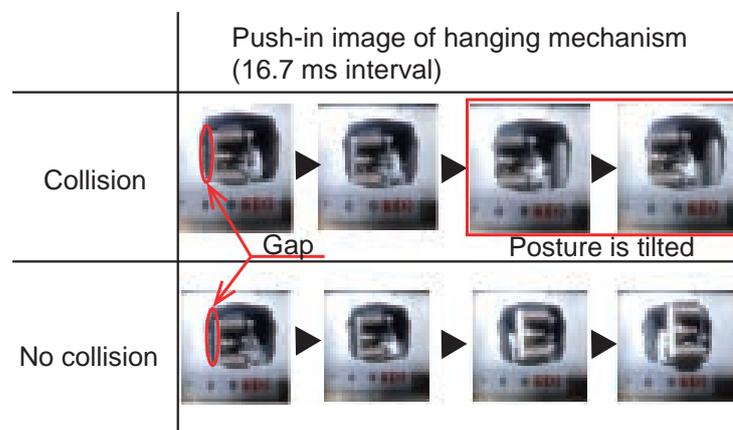


図 4.17 ぶら下がり機構の挿入成功時と失敗時の比較

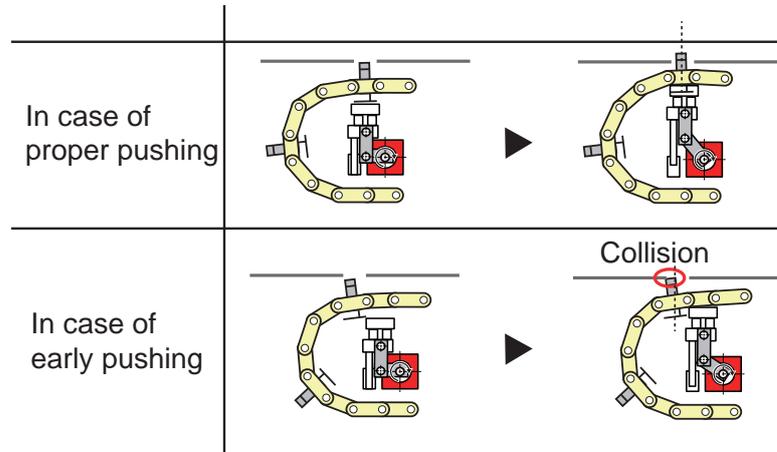


図 4.18 押込タイミングの違いによるぶら下がり機構挿入挙動の違い

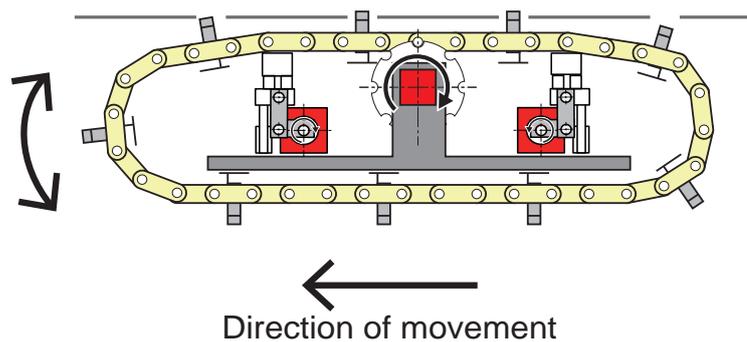


図 4.19 機体の揺動の模式図

を見ると成功時はぶら下がり機構が穴に対し垂直に押し込まれ穴へ挿入されるが、衝突時は図 4.17 の上の行のように穴の淵に向かって姿勢が傾いて挿入されているように見える。

以上のことから、衝突は挿入時のぶら下がり機構の姿勢の傾きによるものと考察した。挿入時、ぶら下がり機構の姿勢が傾く原因としては、押込機構の押込タイミングが早いことや、走行時に機体が揺動していることが要因と考えられる。

はじめに、押込タイミングが早い場合について考える。図 4.18 に、押込のタイミングの違いによるぶら下がり機構の挿入挙動の違いを示す。図 4.18 の上の行は適切なタイミングで押込が行われた際の挙動を、下の行は押込タイミングが早い場合の挙動を示している。この図に示すように、適切な押込が行われた場合、ぶら下がり機構は天井面に対し垂直に挿入されるが、押込タイミングが早い場合、図 4.17 の衝突時の結果のように天井面に対し姿勢が傾いたまま挿入される。

続いて、走行時の機体の揺動について考える。走行中の機体は図 4.19 に示す矢印のよ

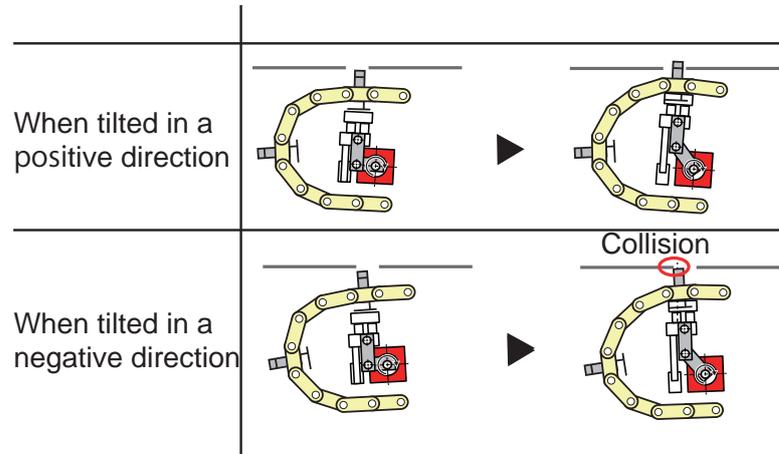


図 4.20 機体の揺動の違いによるぶら下がり機構挿入挙動の違い

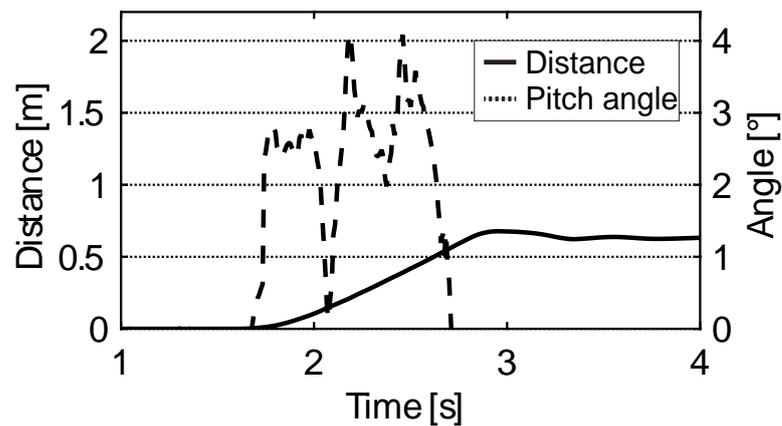


図 4.21 機体の揺動を表す時系列データの一例

うに揺動しており、この方向を pitch 方向と定義する．ここで時計回りに回転する方向を pitch 方向の正の向きとする．図 4.20 に、機体の揺動の違いによるぶら下がり機構の挿入挙動の違いを示す．図 4.20 の上の行は機体が正の向きに傾いている状態で挿入が行われた際の挙動を、下の行は機体が負の向きに傾いている状態で挿入が行われた際の挙動を示している．図 4.20 より、図 4.17 の衝突時の結果のような向きに姿勢が傾いたまま挿入されるのは、機体が負の向きに傾いている場合であることがわかった．ここで、4.4 節での実験で得られた走行中の機体の揺動の一例を図 4.21 に示す．図 4.21 では、横軸に時間を縦軸に機体の移動距離及び機体の pitch 角を示している．この図 4.21 より、走行開始時機体は正の向きに傾き、その後も正の方向に傾きながら走行していることがわかる．つまり機体は正の向きに傾き続けているため、負の向きに傾いている場合の衝突は発生することはない、機体の揺動はぶら下がり機構の姿勢の傾きによる衝突の原因とはいえないことがわかった．

以上より，ぶら下がり機構と天井面との衝突原因として，押込タイミングが早すぎることによるぶら下がり機構の姿勢の傾きがあげられる．そこで次章で緻密なタイミング制御を行うことでぶら下がり機構と天井面との衝突を防止できるとの仮説のもと，緻密なタイミングのための実装及び評価実験を行う．

第 5 章

押込操作タイミング適正化による信頼性の高い高速走行の実現

4.4 節の実験より、押込操作タイミングが早すぎることで挿入するぶら下がり機構の姿勢が傾き、天井孔の淵に衝突する可能性が高いことが議論された。本章では、この衝突を防ぐために押込操作タイミングを適正化するアプローチの検討及びその実装を行い、実装したアプローチの有効性検証実験について述べる。

5.1 押込操作タイミング適正化の要求機能

HanGrawler 2 の押込操作タイミングは以下の式 (5.1) より計算され履帯速度を推定してタイミングの計算に用いている。式中における変数は履帯速度のみであるため、タイミングが早くなる要因として、履帯速度が関与している可能性が高い。履帯速度は HanGrawler 2 の無限軌道機構駆動用の BLDC モータの出力パルスを元に算出している。モータの回転に同期してモータ出力軸が 1 回転する間に 30 パルス出力される。現在のタイミング制御では、そのパルス間隔を利用して BLDC モータ回転数を式 (5.2) のように計算し、式 (5.3) から機体速度を求めている。なお、BLDC モータから出力される周波数を f 、モータの回転数を N 、機体速度を v 、 sprocket 直径を R 、タイミングプーリの変速比を H 、ギアヘッド減速比を G とする。

$$T_d(v) = l/v - T_{psd} - T_{push} \quad (5.1)$$

$$N = f/30 \times 60 \quad (5.2)$$

$$v = \frac{N/60\pi RH}{G} \quad (5.3)$$



図 5.1 オシロスコープ（横河電機，DLM2034）の外観

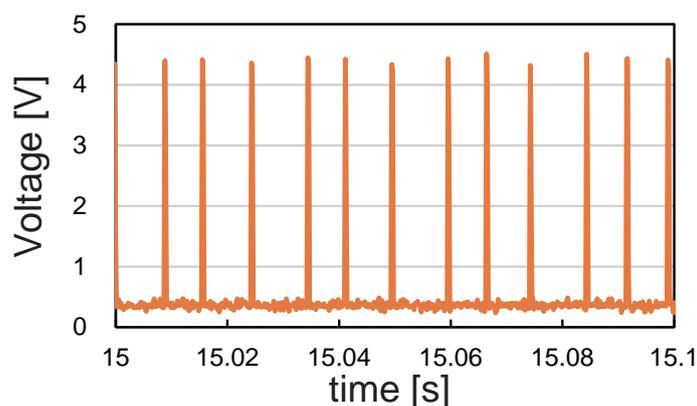


図 5.2 BLDC モータから出力されるパルス間隔

押込操作タイミング適正化のためには、履帯速度を正確に計測する必要がある。そこで BLDC モータの出力パルスを元に算出される履帯速度の正確性を確認するため、パルスの出力をオシロスコープで測定する。0.1 m/s の速度で機体を走行させたときのマイコンに入力されるモータからのパルスをオシロスコープ（横河電機，DLM2034，図 5.1）で計測した。サンプリングレートは 6250 Hz である。その結果を図 5.2 に示す。

モータのパルスが出力されると電圧が上昇する。0.1 秒間のパルスの様子であるが、目視で確認できる程度にパルス間隔にはばらつきがあることがわかる。タイミング制御では、このパルス間隔のみを用いて速度計算をしているため、パルス間隔のばらつきにより計測速度にばらつきが生じ、押込/引抜操作のタイミングにばらつきが生じると考えられる。

以上から、本機構で用いている BLDC モータから出力されるパルスの間隔は等間隔でなく、緻密なタイミング制御を行うためには速度を正確に計測するための新たなセンサを実装する必要があることがわかった。

5.2 機体速度計測用速度センサの選定

実装する新たなセンサの要求機能は、(1) 出力パルスが等間隔であること、(2) 小型で現在の機構に取り付けられることである。

速度を計測可能なセンサとして非接触型、接触型の 2 種類のセンサが考えられる。非接触型センサの代表的なものとして、図 5.3 に示すレーザドップラ速度計があげられる [45]。レーザ光が移動物体に照射された際に移動物体から散乱された光の周波数が変化するというドップラー効果を利用しており、光を散乱するあらゆる物体の速度計測が可能である [46]。しかし、レーザ光源やフォトダイオード、レンズなど多くの光学部品を高精度にアライメントする必要があるため、大型になってしまうのがデメリットである。

小型の接触型センサの代表的なものには、図 5.4 に示す光学式ロータリエンコーダがある。光学式ロータリエンコーダは、LED 光源と光検出器、エンコーダディスクで構成さ



図 5.3 レーザドップラ速度計の外観

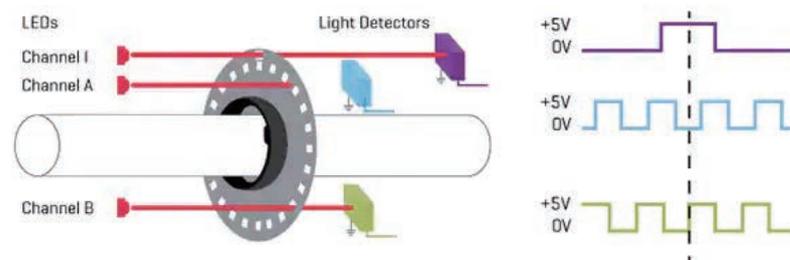


図 5.4 光学式ロータリエンコーダの構成図

れており、ディスクには透明及び不透明なスリットが交互に並んでいる [47]。軸の回転に伴い LED ライトが遮断され、矩形波出力として出力されることで軸の回転数を計測可能である。しかし、ディスクに汚染物質が付着すると精度が低下すること、LED の寿命により使用できなくなることなどのデメリットがある..

本研究では、先に示した (2) の要求機能を満たしている光学式ロータリエンコーダを選定した。

5.3 光学式ロータリエンコーダの実装

HanGrawler 2 の無限軌道機構の駆動部の断面図を図 5.5 に示す。無限軌道機構の速度を計測するために、駆動軸にロータリエンコーダを取り付けた。ロータリエンコーダには、アブソリュート型とインクリメンタル型があるが、本機構では相対角度を計測する必要があるため、インクリメンタル型で分解能が 1000 のロータリエンコーダである、

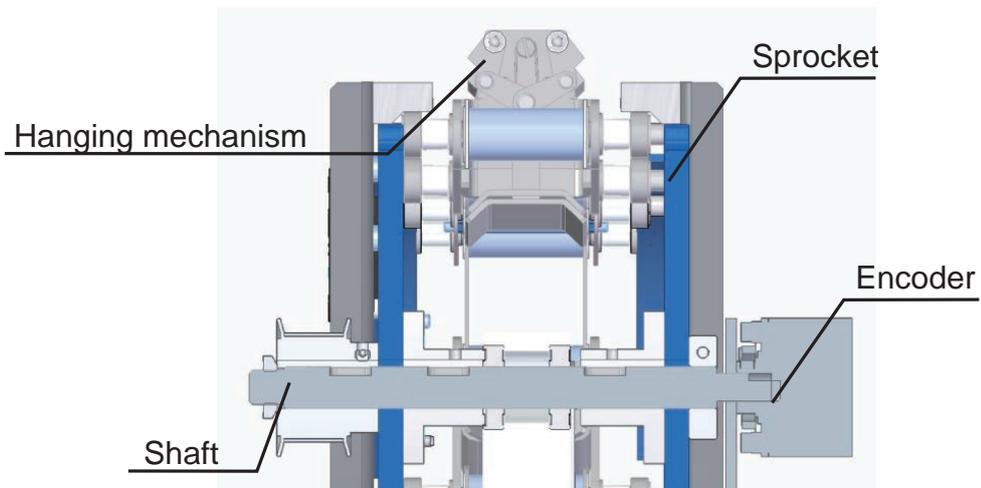


図 5.5 無限軌道機構駆動部の断面図

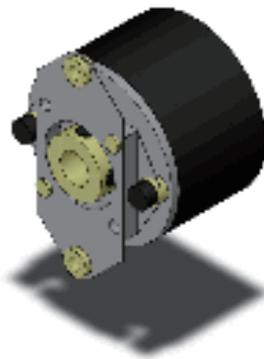


図 5.6 光学式ロータリエンコーダ (E6H-CWZ6C 1000P/R 0.5M) の概観 [48]

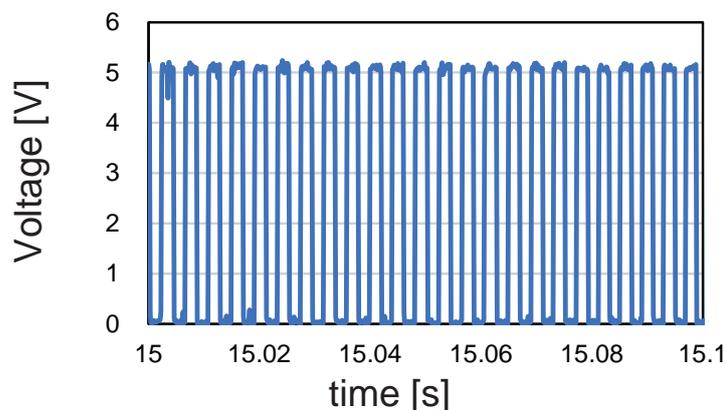


図 5.7 ロータリエンコーダから出力されるパルス間隔

表 5.1 BLDC モータ/ロータリエンコーダから算出された速度の平均値及び分散値

	Encoder	BLDCmotor
Number of peaks	22	12
Average [m/s]	0.109	0.110
σ [m/s]	0.003	0.017

Omron 製”E6H-CWZ6C 1000P/R 0.5M”を採用した。このエンコーダを駆動軸に取り付けることで、駆動軸が 1 回転する間に 1000 パルス出力される。パルスの周期を T とすると機体速度は式 (5.4) のように求めることができる。

$$v = \pi R/T \quad (5.4)$$

ロータリエンコーダを取り付けた状態で 0.1 m/s の速度で機体を走行させたときの、マイコンに入力されるモータからのパルスをオシロスコープで計測した結果を図 5.7 に示す。ロータリエンコーダの出力グラフは見た目からパルスのばらつきは判断できない。

BLDC のパルスと比較した結果を表 5.1 に示す。なお、発進から十分時間が経ち、等速走行中の 0.1 秒間のデータをまとめている。これらの比較より、算出される平均速度にはほとんど差がみられないが、標準偏差は従来の速度計測手法である BLDC モータの出力結果に比べ 1/5 になっていることがわかる。このことより、ロータリエンコーダを実装することにより、ばらつきを低減させ、精度よく速度計測が可能になったと期待される。

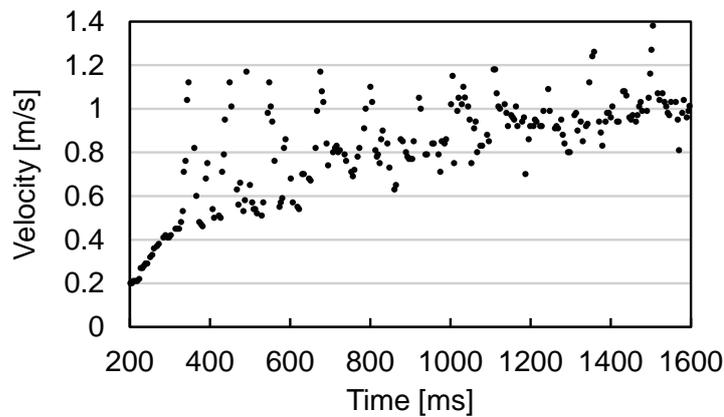


図 5.8 1.0 m/s の走行時の BLDC モータの計測速度

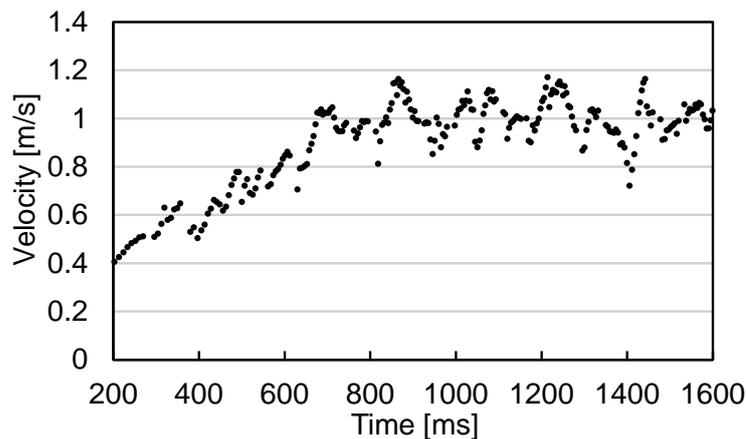


図 5.9 1.0 m/s の走行時のロータリエンコーダの計測速度

続いて実際に 1.0 m/s の走行をした際の、BLDC モータ及びエンコーダで速度を計測した際の結果を図 5.8、図 5.9 にそれぞれ示す。図 5.8 に示す BLDC モータから出力されるパルスから算出された速度では、図 5.9 に示すエンコーダから出力されるパルスから算出された速度に比べばらつきが大きいことがわかる。よってこれらの図を比較することで、特に 200~800 ms の範囲の加速段階においてエンコーダによる速度計測により計測速度のばらつきを低減し、精度よく速度計測が可能となったことがわかる。

5.4 押込操作タイミング適正化手法

図 5.9 のデータの中で、走行開始から十分に時間が経過し加速が完了した等速走行を行っている際のエンコーダによる計測速度のデータを図 5.10 に示す。図 5.10 に示すように、等速運動をしている区間にて速度が±約 20 % 程度変動していることが読み取れる。

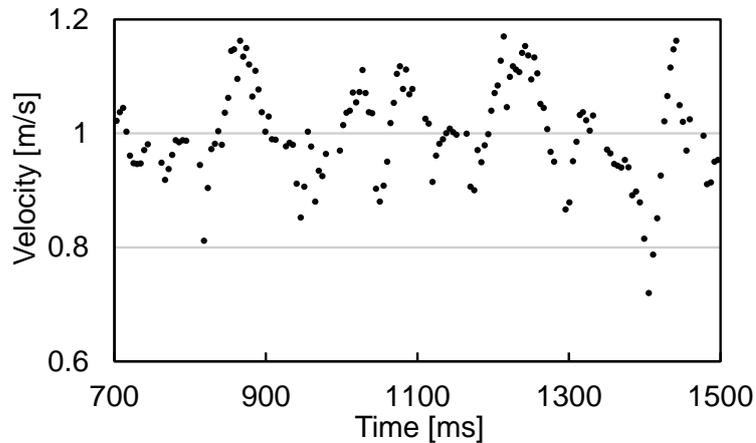


図 5.10 1.0 m/s の等速走行中のロータリエンコーダの計測速度

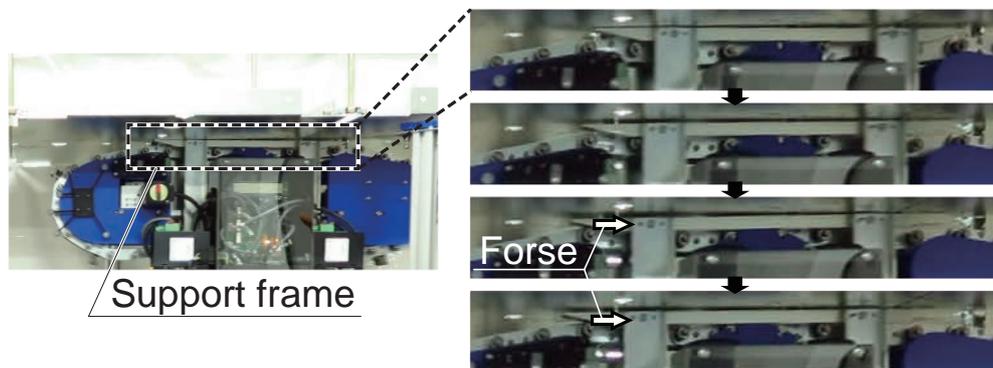


図 5.11 ぶら下がり機構の取り付けられた履板にかかる負荷

このような速度変動が起きている原因として考えられる現象を図 5.11 に示す。図 5.11 は、直前にぶら下がり機構の挿入に成功したタイミングでの機体における履帯と天井支持フレーム部分を拡大したものである。この図 5.11 に示すように、履帯の回転に伴い、天井支持フレーム部分に履帯の軸受が衝突し、その際、機体に進行方向とは反対の向きに力がかかる。このような負荷の発生時、速度が低下すると考えられる。また、軸受部分が天井フレーム部分を通り抜けると負荷から解放され、その際には速度が上昇すると考えられる。以上のような負荷の発生、解放を繰り返すことで、等速運動をしている区間でも速度変動が繰り返し起きていると考えた。しかし、本ロボットの履帯駆動に用いている BLDC モータの負荷の変動による速度変動率は、 $\pm 0.2\%$ 以下である [49]。そのため上記に示す負荷変動だけでは土約 20% ほどの大きな速度変動は発生しないと考えられ、詳しい速度変動の原因については未解明であり将来課題とする。

続いてこの速度変動による押込/引抜操作タイミングへの影響について考える。本ロボットの押込/引抜操作タイミング制御は式 (5.1) に示す通り履帯速度を用いて計算され

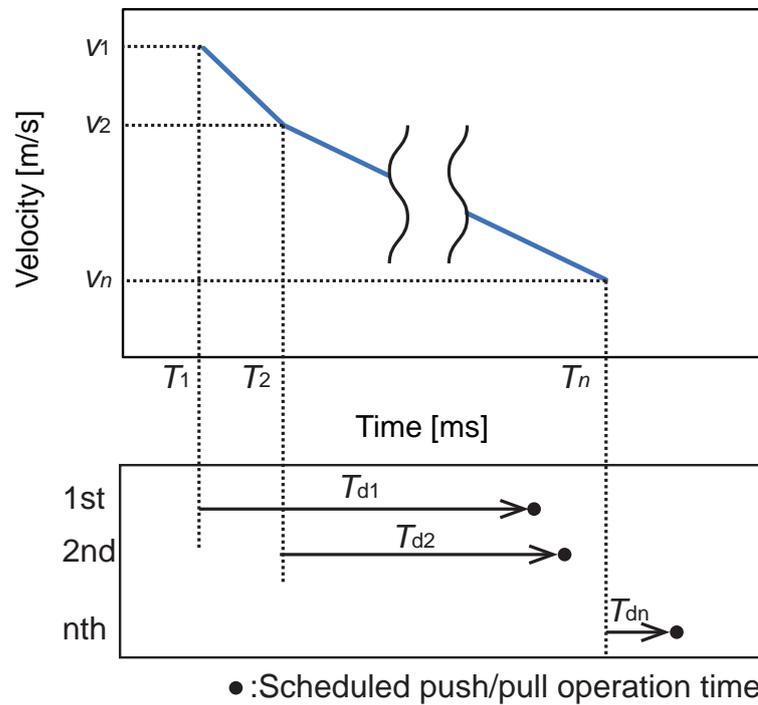


図 5.12 速度変動に応じた遅れ計算の概念図

ている。したがってこのような速度変動が発生している場合、等速運動をしていると仮定した制御式である式 (5.1) では、ある一点の速度情報だけを用いると適切なタイミングとならず押込/引抜操作のタイミングにばらつきが生じる。このばらつきにより押込操作が早く行われた場合には、前章の図 4.18 のようなぶら下がり機構の姿勢の傾きが生じ、天井孔の淵との衝突が発生する。以上から、速度変動が発生している場合でも適切なタイミングで押込/引抜操作が行える制御を実装する必要がある。

そこで、速度変動が発生している場合でも適切に押込/引抜操作が可能なよう、PSD センサが反応したタイミングだけでなく、その後も繰り返し遅れ $T_d(v)$ を繰り返し計算し、速度が変動した際にはその速度に合わせて遅れ $T_d(v)$ を変化させるタイミング制御を実装した。その仕組みを図 5.12 に示す。図 5.12 の上図は横軸が時間で縦軸が移動速度のグラフであり、面積がロボットの移動距離を示している。下図はある時刻で計算された $T_d(v)$ と押込引抜操作予定時刻を表しており、センサ反応時に 1 度目の $T_d(v)$ 計算が行われ、押込引抜操作予定時刻が設定される。その後速度が減少した際に繰り返し $T_d(v)$ が計算され押込引抜操作予定時刻を後ろにずらすことで、速度変動に対応している。1 回目の計算時は、現在の速度 v_1 、現在の時刻 T_1 、現在の位置から押込/引抜機構までの距離 l_1 から、

$$T_{d1}(v) = l_1/v_1 - T_{psd} - T_{push} \tag{5.5}$$

と $T_{d1}(v)$ が求まる．そして図 5.12 の下図のように $T_{d1}(v)$ 秒後に押込/引抜操作予定時刻が設定されている．2 回目の計算時は，速度 v_2 ，時刻 T_2 から，現在の位置から押込/引抜機構までの距離 l_2 は

$$l_2 = l_1 - \frac{(v_1 + v_2) \times (T_2 - T_1)}{2} \quad (5.6)$$

となり，遅れ $T_{d2}(v)$ は

$$T_{d2}(v) = l_2/v_2 - T_{\text{push}} \quad (5.7)$$

と求まる．そして図 5.12 の下図のように押込/引抜操作予定時刻を $T_{d2}(v)$ 秒後に変更する．同様にして， n 回目の計算時は，速度 v_n ，時刻 T_n から，現在の位置から押込/引抜機構までの距離 l_n は

$$l_n = l_{n-1} - \frac{(v_{n-1} + v_n) \times (T_n - T_{n-1})}{2} \quad (5.8)$$

となり，遅れ $T_{dn}(v)$ は

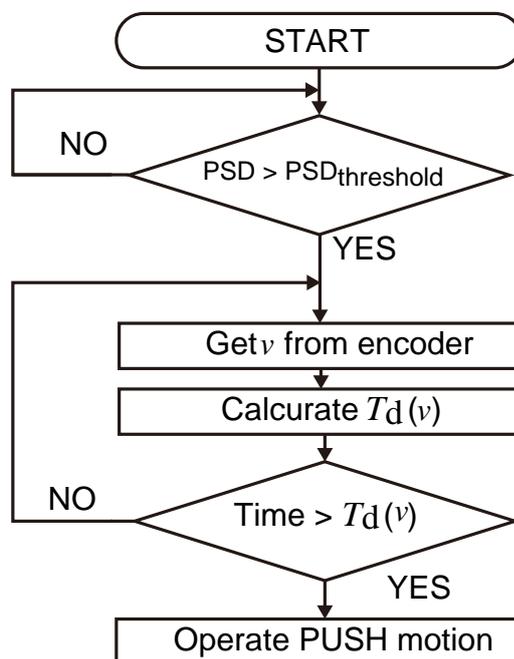
$$T_{dn}(v) = l_n/v_n - T_{\text{push}} \quad (5.9)$$

と求まり，図 5.12 の下図のように押込/引抜操作を行う予定時刻を $T_{dn}(v)$ 秒後に変更する．このように，遅れ $T_d(v)$ を何度も繰り返し計算することで，速度変動にも対応して押込/引抜操作を行う予定時刻を変更し適切なタイミングで押込/引抜操作が行えると期待される．本論文ではこのようなタイミング制御を $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御と呼ぶ． $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御のフローチャートを図 5.13 に示す．

しかし $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御は，PSD センサ 1 反応から押込/引抜操作までに猶予がある場合にのみ可能である．1.0 m/s の高速走行時，遅れ $T_d(v)$ は

$$T_d(v) = l/v - T_{\text{psd}} - T_{\text{push}} = 50/1.0 - 25 - 25 = 0\text{ms} \quad (5.10)$$

となるため，1.0 m/s の高速走行時には繰り返し計算を行う猶予がない．繰り返し計算を行う猶予を増やすためには，PSD センサと押込/引抜機構間の距離 l を長くする必要があるが，本論文では $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御の有効性の検証が目的のため，繰り返し計算が可能な 0.9 m/s を高速走行として扱い， $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御の有効性の検証実験を次節にて行う．

図 5.13 $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御のフローチャート

5.5 押込/引抜操作タイミング適正化評価実験

5.5.1 実験目的・実験方法

前節までに示した，ロータリエンコーダの実装及び， $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御により，押込/引抜操作タイミングを適正化できていると期待される．そこで本実験では，0.6, 0.9 m/s で走行を行い，実装したタイミング制御の有効性を検証する．実験設定を表 5.2 に示す．

表 5.2 押込/引抜操作タイミング適正化評価実験設定

Item	Value
Travel distance	1.5 m
Travel speed	0.6, 0.9 m/s
Number of trials	10 times
Measurement of travel distance	Motion capture
PSD sensor value	Micro-controller log

5.5.2 実験結果

本実験の実験結果を表 5.3 に示す。表 5.3 に示す通り、0.6 m/s では 10 回中 9 回、0.9 m/s では 10 回中 10 回走行に成功したため、ロータリエンコーダの実装及び、 $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御により、押込/引抜操作タイミングを適正化することの有効性を示し、失敗しない高速走行を実現した。

また、図 5.14、図 5.15 に モーションキャプチャにより計測した、0.6、0.9 m/s での走行に成功した際の走行データの一例を示す。これらの図は 横軸が時間で縦軸が移動距離のグラフであり、モーションキャプチャで計測された移動距離及びそこから得られた移動速度を示している。

図 5.14 を見ると、0.6 m/s の走行では、加速が完了した 3.3 s 付近では 0.6 m/s よりも速度が超過し、その後で速度変動が起きていることがわかる。同様に図 5.15 より、0.9

表 5.3 押込/引抜操作タイミング適正化評価実験結果

Velocity [m/s]	Success rate
0.6	9/10
0.9	10/10

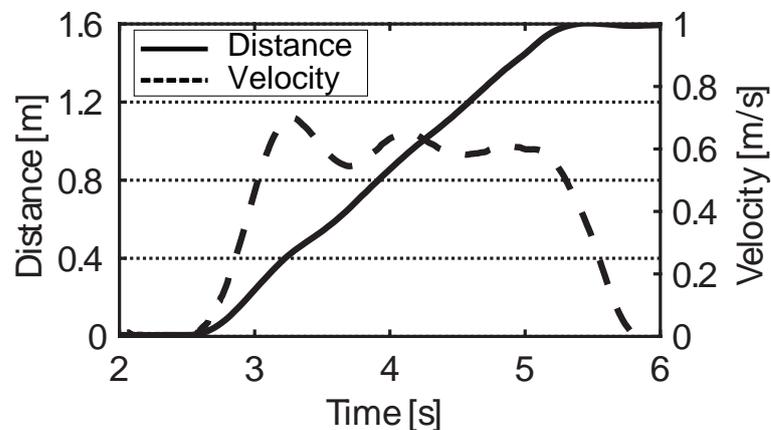


図 5.14 0.6 m/s 走行に成功した際の機体挙動を表す時系列データの一例

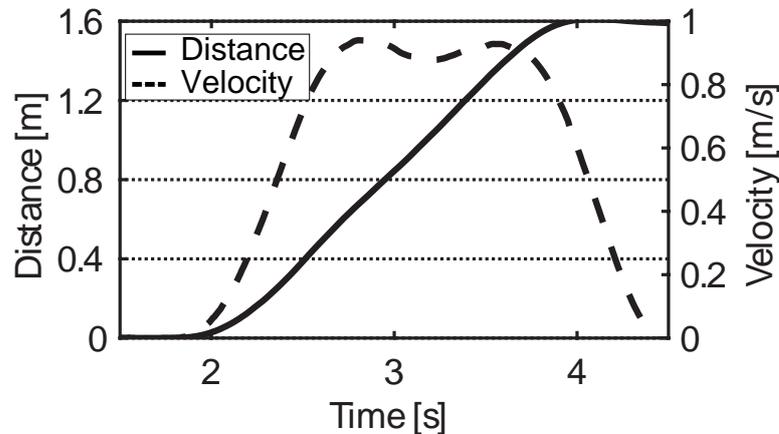


図 5.15 0.9 m/s 走行に成功した際の機体挙動を表す時系列データの一例

表 5.4 0.6 m/s 走行中繰り返し計算される T_d

	Current time [ms]	V1 [m/s]	Distance remaining [mm]	Td [ms]	Pushing time [ms]
1st	901.2	0.6	50	33.3	934.5
2nd	901.5	0.6	35	33.2	934.7
3rd	910.0	0.59	30	25.9	936.0
4th	918.6	0.57	26	20.6	939.2
5th	927.0	0.56	22	14.3	941.3
6th	935.5	0.52	18	9.4	944.9
7th	944.0	0.48	14	3.9	947.9

m/s の走行時にも、加速終了後に速度変動が起きていることがわかる。以上のことから、高速走行中には速度変動が起きていることが確認された。

続いて、0.6 m/s 走行時のある押込操作をした際の、センサ反応した際の速度 v_1 及び $T_d(v)$ 、それらから算出される押込操作指令予定時刻と、反応から一定間隔おきに繰り返し計算される $T_d(v)$ 及び押込操作指令予定時刻を表 5.4 に示す。なお時刻とは発進時からの経過時間のことを指す。表 5.4 に示す通り、センサ通過時に一度目の $T_d(v)$ 計算が行われ、押込操作指令予定時間は 934.5 ms となっている。これが図 5.12 における $T_{d1}(v)$ である。その後押込操作直前まで合計 7 回の繰り返し $T_d(v)$ の計算が行われ、押込操作直前の 7 回目の計算時には速度が 0.48 m/s とセンサ通過時に比べ 0.8 倍に変動しているが、その変動に対応し押込操作指令予定時刻を 947.9 ms と増加することで対応している。従来手法では、934.5 ms のタイミングで押込操作が行われるため、今回の適正化された押込操作予定時刻 947.9 ms に比べ 13.4 ms（距離で表すと約 8 mm）早く押込操作が行われる。このような場合に押込操作が早すぎることによるぶら下がり機構と天井面との衝突が起きていると考えられ、今回の提案手法のように速度変動に対して押込操作直前まで $T_d(v)$ を更新することで操作タイミング適正化に成功した。以上のことから、 $T_d(v)$ 繰り

返し計算によるタイミング制御の有効性を示し、高速走行の信頼性の向上に成功した。

第6章

結論

生産現場における搬送機械において、経路の多様化と経路変更の容易化のニーズが高まっている。また、作業者及び生産設備との兼ね合いから、それらとの干渉を回避できる天井搬送機械が必要とされている。このようなニーズに対し、先行研究では機械的に天井面にぶら下がり、無限軌道機構を用いて移動することで重量物の運搬が可能な天井移動ロボットが開発された。本研究では、先行研究で開発された無限軌道式天井移動ロボット“HanGrawler 2”について、発進・加速の実現のための条件解明と高速走行時の挙動観察により、無限軌道式天井移動ロボットの発進・加速・高速走行の信頼性の向上を目指した。

6.1 まとめと知見

HanGrawler 2 の失敗しない発進の実現のためには、発進時に PSD センサよりもぶら下がり機構が履帯の回転方向に対して手前側にあり、センサが反応していない状態で発進を行う必要があることを明らかにした。従来は発進前に経験的に人の手でぶら下がり機構の位置調整を行っていたが、失敗しない発進の実現のために、センサの反応しない位置範囲を定量化し、発進前に測距センサの反応の有無で自己位置を認識するアプローチを実装し、自動初期位置調整機能としてまとめた。実験を通してこの機能により発進可能な位置にぶら下がり機構を自動で調整し、どのような初期位置からでも発進可能としたことを明らかに示した。

HanGrawler 2 の失敗しない加速のためには、履帯の速度及び加速度を考慮した押込/引抜タイミングの制御が有効であると仮説を立てた。2つの測距センサを用いて通過時間及び速度から履帯の加速度を求め、それを考慮した新しいタイミング制御を実装し、実験を通してその有効性を示した。

HanGrawler 2 は高速走行中、ぶら下がり機構を挿入する際に天井面と衝突し、走行に失敗することが確認されていた。そこで、失敗しない高速走行の実現のために、無限軌道

機構を用いた天井面へのぶら下がり機構を有する移動ロボットの高速走行時の支配的な挙動をモーションキャプチャ及びカメラを用いて計測した。

モーションキャプチャによる計測結果から、低速走行時と高速走行時の履帯の鉛直方向の位置を比較することで、履帯が高速走行時に遠心力で膨らんでいることを示した。しかし、その膨らみ量はぶら下がり機構と天井面との距離に比べ微小であり、履帯の膨らみはぶら下がり機構が天井面に衝突した原因ではないことがわかった。

天井上からのカメラによる計測により、天井穴に挿入済みのぶら下がり機構の挿入位置と天井面との相対位置は、発進時に比べずれが生じていたことがわかった。しかし、そのずれの大きさは衝突に至る量に比べ微小であり、挿入時の位置ずれは衝突の原因ではないことがわかった。

これらの実験の結果、押込タイミングが早すぎることでぶら下がり機構の姿勢が天井孔に対して傾いたまま挿入され、ぶら下がり機構が天井面に衝突していることがわかった。またエンコーダを実装し正確に速度を計測したことにより、HanGrawler 2 は等速運動をしている区間でも速度変動が起きていることが判明し、速度変動にも対応可能な $T_d(v)$ 繰り返し計算によるタイミング制御を実装した。0.6, 0.9 m/s の走行実験により、速度変動に対して押込操作直前まで $T_d(v)$ を更新することで対応し、高速走行の信頼性が向上した。

本研究により、無限軌道を有し機械的にぶら下がる走行体の発進・加速・高速走行において最も影響の大きいパラメータは押込/引抜操作タイミングであり、それらの適正化により信頼性を向上させることができることがわかった。

6.2 将来課題

本研究の将来課題は、天井へのぶら下がり機構を有する移動ロボットに用いられる無限軌道機構の走行中の履帯挙動のモデル化、等速で走行しているときの速度変動の原因解明である。

本研究を通して、高速走行中に履帯が遠心力で膨らんでいること、また、ぶら下がり機構の挿入位置がずれていることが確認された。本格的な運用では、本実験環境のような短距離走行ではなく、長距離の走行が考えられる。そのためこれらの挙動のモデル化を行い、長距離走行の際の課題を解決できるようにすることが必要である。

また、5章にて本ロボットの等速運動をしている際に、速度が±約 20% 変動していることが確認された。この変動の原因については解明できていないため、速度変動の原因を明らかにする必要がある。

付録 A

付録

A.1 部品図

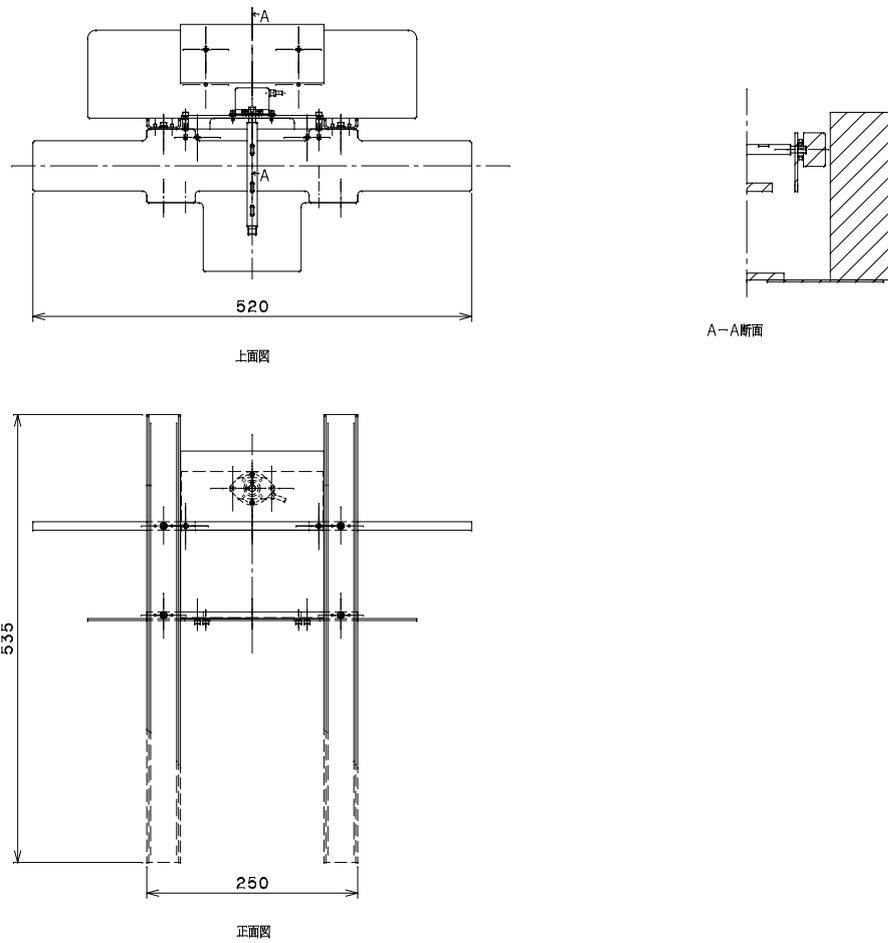


図 A.1 部品図

参考文献

- [1] Y. Monden. *TOYOTA Production System: An Integrated Approach to Just-In-Time*. 4th ed., Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [2] 川中考章, 山下洋史, 尾上恭吾. ジャストインタイム (jit) 生産システム. 第12回横幹連合コンファレンス, 2021.
- [3] Road sorters. [Online]. Available: http://www.toyota-lf.com/products/detail/road_sorter/, Accessed on: Jan. 3, 2023.
- [4] Iris F. A. Vis. Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operation Research*, Vol. 170, No. 1, pp. 677–709, May 2006.
- [5] G. Ullrich. *Automated Guided Vehicle Systems: A Primer with Practical Applications*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [6] 無人搬送車システム納入実績 (年次: 1986年以降). [Online]. Available: http://www.jiva.or.jp/xls/AGVS_Stat.xls, Accessed on: Dec. 30, 2022.
- [7] 自動搬送ロボット (AMR) otto. [Online]. Available: <https://smart-logistics.altech.jp/amr/otto/s>, Accessed on: JAN. 3, 2023.
- [8] AGV と AMR (自動搬送ロボット) の違い. [Online]. Available: <https://smart-logistics.altech.jp/amr/column/agv-amr.html>, Accessed on: JAN. 3, 2023.
- [9] AGV/AMR (搬送ロボット) 市場に関する調査を実施 (2022年). [Online]. Available: https://www.yano.co.jp/press-release/show/press_id/3047, Accessed on: JAN. 3, 2023.
- [10] 村田機械株式会社. 天井走行搬送システム sky rav. [Online]. Available: <https://logistics.muratec.net/jp/products/skyrav/>, Accessed on: Jan. 2, 2023.
- [11] 株式会社 明電舎. 無人搬送システム天井走行台車 (MST1・MST3). [Online]. Available: https://agv.meidensha.co.jp/agv_factory/factory-02.html, Accessed on: Jan. 2, 2023.
- [12] Q. Hong, R. Liu, H. Yang, and X. Zhai. Wall climbing robot enabled by a novel

- and robust vibration suction technology. In *Proceedings of IEEE International Conference on Automation and Logistics*, pp. 331–336, Shenyang, China, 2009.
- [13] Y. K. Song, C. M. Lee, I. M. Koo, D. T. Tran, H. Moon, and H. R. Choi. Development of wall climbing robotic system for inspection purpose. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1990–1995, Nice, France, 2008.
- [14] J. Zhou, L. Xu, J. Liu, W. Yan, W. Zhang, and Y. Zhang. Proceedings of international conference on robotics and control engineering. In *Design and Analysis of a Novel Rolling Sealed Negative Pressure Adsorption Wall-Climbing Robot*, pp. 84–90, Nanjing, China, 2022.
- [15] J. Xiao, B. Li, K. Ushiroda, and Q. Song. Rise-rover: A wall-climbing robot with high reliability and load-carrying capacity. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp. 2072–2077, Zuhai, China, 2015.
- [16] P. Kriengkamol, K. Kamiyama, M. Kojima, M. Horade, Y. Mae, and T. Arai. New tripod walking method for legged inspection robot. In *Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, pp. 1078–1083, Harbin, China, 2016.
- [17] G. Lee, G. Wu, S. H. Kim, J. Kim, and T. W. Seo. Combot: Compliant climbing robotic platform with transitioning capability and payload capacity. In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 2732–2742, Saint Paul, MN, USA, 2012.
- [18] Y. Wang, X. Zhang, M. Zhang, L. Sun, and M. Li. Self-compliant track-type wall-climbing robot for variable curvature facade. *IEEE Access*, Vol. 10, pp. 51951–51963, 2021.
- [19] Faruq Howlader, M. D. Omar, and Traiq Pervez. Sattar. Novel adhesion mechanism and design parameters for concrete wall-climbing robot. In *Proceedings of SAI Intelligent Systems Conference*, pp. 267–273, London, UK, 2015.
- [20] G. D. Wile, K. A. Daltorio, E. D. Diller, L. R. Palmer, S. N. Gorb, R. E. Ritzmann, and R. D. Quinn. Screenbot: Walking inverted using distributed inward gripping. In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1513–1518, Nice, France, 2008.
- [21] Jiajun Xu, Linsen Xu, Jinfu Liu, Xiaohu Li, and Xuan Wu. A multi-mode biomimetic wall-climbing robot. In *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, pp. 514–519, Munich, Germany, 2018.
- [22] 里岡樹, 山添大丈, 李周浩. 再構成可能な知能化空間に突起とレールを用いた mobile

- module の動作改善. 第 20 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2019), 第 20 巻, 2019.
- [23] R. Fukui, H. Morishita, T. Mori, and T. Sato. Hangbot: A ceiling mobile robot with robust locomotion under a large payload (key mechanisms integration and performance experiments). In *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 4601–4607, Shanghai, China, 2011.
- [24] L. Wang, L. Graber, and F. Iida. Large-payload climbing in complex vertical environments using thermoplastic adhesive bonds. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 29, No. 4, pp. 863–874, Apr. 2013.
- [25] Michael P. Murphy, Casey. Kute, Yiğit.Mengüç, Metin. Sitti. Waalbot II: Adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives. *International Journal of Robotics Research*, Vol. 30, No. 1, pp. 118–133, Jan. 2011.
- [26] Hassan H. Hariri, Darren C. Y. Koh, Hoong Ching Lim, Audelia G. Dharmawan, Van Duong Nguyen, Gim Song Soh, Shaohui Foong, Roland Bouffanais, Hong Yee Low, and Kristin L. Wood. Orion-ii: A miniature climbing robot with bilayer compliant tape for autonomous intelligent surveillance and reconnaissance. In *Proceedings of IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, pp. 1621–1626, Singapore, 2018.
- [27] R. Chen, R. Liu, and H. Shen. Design of a double-tracked wall climbing robot based on electrostatic adhesion mechanism. In *Proceedings of IEEE Workshop on Advanced Robotics and its Social Impacts*, pp. 212–217, Tokyo, Japan, 2013.
- [28] 中央労働災害防止協会. 無人搬送車安全対策研究委員会報告書. 1989.
- [29] ISO 3691-4:2020. Industrial trucks - safety requirements and verification - part 4:driverless industrial trucks and their systems. 2020.
- [30] 福井類, 佐野勝哉, 中尾政之. 重量物を運搬可能な天井面二次元移動ロボットのための高速直進移動機構の開発. 第 22 回ロボティクスシンポジウム, pp. 26–33, 2017.
- [31] 満留慶介. 無限軌道式天井移動ロボットの旋回機構に関する研究. 東京大学卒業論文, 2016.
- [32] 山田雄大. 重量物を運搬可能な無限軌道式天井移動ロボットの高速化と安定化の研究. 東京大学修士論文, 2020.
- [33] Rui Fukui, Yudai Yamada, Keisuke Mitsudome, Katsuya Sano, and Shin'ichi Warisawa. Hangrawler: Large-payload and high-speed ceiling mobile robot using crawler. *IEEE Transactions on Robotics*, (Accept).
- [34] α STEP 用モーター ARM46SAK-PS5. [Online]. Available: <https://www.>

- orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=ARM46SAK-PS5, Accessed on: Jan. 3, 2023.
- [35] ブラシレスモーター BLH シリーズ BLHM230K-15. [Online]. Available: <https://www.orientalmotor.co.jp/products/detail.action?hinmei=BLHM230K-15>, Accessed on: Jan. 3, 2023.
- [36] 藤田勝久, 前田和生, 木村哲也. 履帯構造を有する移動体の走行時における履帯振動の解析. 日本機械学会年次大会講演論文集, 第 2000 巻, 2000.
- [37] 測距センサユニット (1) PSD, 2PD タイプ, GP2Y0A51SK0F. [Online]. Available: <https://jp.sharp/products/device/lineup/selection/opto/haca/diagram.html>, Accessed on: Jan. 3, 2023.
- [38] 近藤亜希子, 土岐仁, 廣瀬圭. 慣性センサを用いた身体運動計測における 3 次元姿勢推定法に関する研究. 日本機械学会論文集 (C 編), 第 70 巻, 2013.
- [39] ステレオカメラとは? [Online]. Available: <https://www.macnica.co.jp/business/maas/columns/134429/>, Accessed on: Jan. 1, 2023.
- [40] 牛丸貴之, 笹木亮, 池本有助, 小原治樹. 移動ロボットによる床面の傾斜を考慮したステレオカメラ法位置計測. 2011 年度精密工学会秋季大会, 2011.
- [41] 野中隼矢, 梅田和昇, P.Sarathak. ラインレーザを用いたステレオカメラによる高精度 3 次元計測. ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, 2022.
- [42] 春名弘一, 昆恵介, 稲垣潤, 佐藤洋一郎. マーカーレスモーションキャプチャによる三次元動作解析の応用例. 日本義肢装具学会誌, 第 35 巻, 2019.
- [43] 佐藤眞平. モーションキャプチャシステムの計測原理と運用上の留意点. 計測自動制御学会, 第 59 巻, 2020.
- [44] V120: Trio. [Online]. Available: <https://www.optitrack.jp/products/camera/trio.html>, Accessed on: Jan. 1, 2023.
- [45] 事業領域. [Online]. Available: <https://global.canon/ja/business/industrial.html>, Accessed on: Jan. 1, 2023.
- [46] 森田伸友, 野上大史, 日暮栄治, 伊藤高廣, T.Cargen, 澤田廉士. マイクロレーザドップラ速度計の開発. エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 2015.
- [47] エンコーダ技術の利点と妥協点を検討. [Online]. Available: <https://www.digikey.jp/ja/articles/weighing-the-advantages-and-tradeoffs-of-encoder-technologies>, Accessed on: Jan. 1, 2023.
- [48] インクリメンタル型外形 ϕ 40(中空軸) e6h-cwz6c 1000p/r 0.5m. [Online]. Available: <https://www.fa.omron.co.jp/product/item/2743/>, Accessed on: Jan. 1, 2023.

- [49] ブラシレスモーター BLH シリーズ - 特徴. [Online]. Available: https://www.orientalmotor.co.jp/products/speed_control/blh_new/features/#tab_series01, Accessed on: Feb. 2, 2023.

謝辞

本研究を進めるに当たり、たくさんのご支援とご協力を頂きました。感謝の意を表し、この場にて謝辞を述べさせていただきたいと思えます。

割澤先生には、研究会等での発表の際に、工学的な表現や論理手順など多くの鋭いご指摘をいただきました。学会発表などの対外発表の際に非常に参考になりました。コロナ禍ということもあり、中々お話しする機会がなかったのは残念に思えます。誠にありがとうございました。

福井先生には、2年間指導教員として何かと気にかけていただき、大変お世話になりました。研究室に配属されたばかりで右も左も分からなかった頃、オンライン飲み会などで先輩方との交流の機会をいただき大変助かりました。研究の進め方や発表資料の添削、設計・実装方法の相談など、数多くのことを学ばせていただきました。特に報連相の大切さについては、とても身に染みて理解しました。この2年間で多大なご迷惑をおかけしたと思いますが、研究内容についての相談を気軽にできたのは、先生が寛大な心で温かくご指導して下さったからだと思えます。社会に出てからも、先生からご教授いただいたことを心に留めて精進していきたいと思っております。2年間誠にありがとうございました。

米谷先生には、研究会で多くのご指摘をいただきました。私の研究内容について鋭い指摘や的確なアドバイスをしてくださったことが印象に残っております。コロナ禍ということもあり、中々お話しする機会がなかったのは残念に思えます。誠にありがとうございました。

伴先生には、研究会で多くのご指摘をいただきました。私の研究テーマや研究の方向性について、的確なアドバイスをしてくださったことが印象に残っております。コロナ禍ということもあり、中々お話しする機会がなかったのは残念に思えます。誠にありがとうございました。

秘書の皆様には、物品購入の書類手続きなど、様々な手続きのサポートを手厚くしていただきました。特に本木さんには、財務書類の提出時に非常にお世話になりました。Slack で書類手続きに関する質問をした際にも親身にお答えくださり誠にありがとうございました。何かと気を配って下さったおかげで、2年間の研究生活を無事乗り切ることができそうです。

エスケー工業の半澤様には、ロボットの部品の手配をしていただきました。実験前に発注を掛けてしまった関係で、早めの納期を希望してしまいましたが、快くこちらの希望を受けてくださり納期の調整をしていただき誠にありがとうございました。

研究室の学生の皆様にも大変お世話になりました。

吉田さんには、直属の先輩として様々なところで助けていただきました。最高学年でありながらも、あふれ出る親しみやすさを持つその姿から、色々なことを学ばせてもらいました。特に HanGrawler 2 について悩んでいる際に、吉田さんに相談することで解決したことが数えきれないほどありました。また、学会提出や論文の提出など、締め切りが近い時に添削のお願いを快諾してくださり大変助かりました。吉田さんのご指導の上で、この研究が成り立っています。誠にありがとうございました。

山田さんには、本研究の引継ぎなどで大変お世話になりました。お仕事でお忙しい中、質問した際にはすぐにご回答くださり誠にありがとうございました。

石黒さんには、研究を進めるにあたっての資料の作成や、実験計画書の書き方などで大変お世話になりました。誠にありがとうございました。

横村さんには、研究内容に関する相談や、就活の相談をさせていただきました。特に就活については、スカウトサイトの紹介など非常にお世話になりました。誠にありがとうございました。

同期の後藤君、研究に関する相談や、部品の追加工など色々お世話になりました。就職してもまた会おう。

同期の雨貝君、同じタイミングで研究室に配属されたこともあり、何かと相談に乗ってくれてありがとうございました。就職してもまた会おう。

最後に、私の大学生活を支えてくださった両親に、心から感謝の意を表します。ありがとうございました。

令和5年1月 江坂 怜

以上

修士論文

2023年2月7日 提出

学生証番号 47-216667 江坂 怜