

博士論文

油圧駆動による屋外作業用脚車輪型ロボットの
構成方法に関する研究
(Configuration Method of a Hydraulic Powered
Leg-Wheel Robot for Outdoor Work)

2022年3月

立命館大学大学院理工学研究科
機械システム専攻博士課程後期課程

織田 健吾

立命館大学審査博士論文

油圧駆動による屋外作業用脚車輪型ロボットの
構成方法に関する研究

(Configuration Method of a Hydraulic Powered
Leg-Wheel Robot for Outdoor Work)

2022年3月

March 2022

立命館大学大学院理工学研究科

機械システム専攻博士課程後期課程

Doctoral Program in Advanced Mechanical Engineering
and Robotics

Graduate School of Science and Engineering

Ritsumeikan University

織田 健吾

ODA Kengo

研究指導教員：玄 相昊 教授

Supervisor : Professor HYON Sang-Ho

概要

急斜面，凹凸路面，軟弱地盤などの不整地と呼ばれる作業現場において人間の作業を補助・代替するロボットの実用化は，人手不足による作業の省人化対策，作業者の安全確保の点から期待されている．探査，測定，運搬作業など目的に応じて様々な形状のロボットがあるが，本研究では地上の不整地路面を対象に，マニピュレータなどの比較的大型のパワーツールを用いた重作業を行える油圧駆動ロボットの開発を目指す．そのようなロボットにおいて，従来の車輪・クローラ機構のみでは不整地を縦横無尽に走破することは難しく，不整地でのバランス・移動技術は基盤技術である．本研究では，不整地でバランスをとりつつ移動が可能な「プラットフォーム」の構成方法を考える．

本研究は山間地域で農作業支援を目的とする4脚4輪の油圧駆動ロボット「*Hydrover-II*」と不整地路面で安全な建設作業を目的とする4脚2輪の油圧電動ハイブリッド駆動ロボット「*CRAWHEL*」の2台のロボット開発を通して，具体的なニーズを踏まえつつ普遍的な問題を探り，汎用性のある実用的な構成手法を提案する．

本論文の構成は以下のようになっている．第1章では本研究の目的と背景について述べ，従来の不整地移動ロボットについての問題点や課題について述べる．

第2章では，ロボットに必要と考える特徴を考え設計方針（移動機構，制御方法，アクチュエータ）を定める．移動機構として脚と車輪を組み合わせた，いわゆる「脚車輪機構」を採用する．これは離散的な接地点選択と多様な動作姿勢を持たせられる脚と高効率・高速移動能力をもつ車輪から構成される．これらを使い分けたり，協調して動かすことで様々な地形の踏破が期待できる．制御方法は農機や建機における油圧制御は流量操作による速度・位置制御が一般的であるが，本ロボットでは高い不整地適応性を持たせるために，接地荷重・トラクションを任意に操作可能な全身トルク制御を基盤とする全身運動制御アルゴリズムを実装する．アクチュエータは，大きなパワーを発揮でき，耐久性・耐候性に優れる油圧アクチュエータを採用する．

第3章では，全身トルク制御を基盤とする全身運動制御アルゴリズムについて詳細に述べる．本制御則は車輪のころがり拘束を考慮することで，脚と車輪を協調させながら任意に接触力を発揮できることが特徴である．

第4章と第5章では，試作した「*Hydrover-II*」について詳細に述べる．*Hydrover-II*は4脚，4輪駆動の油圧式ローバーであり，重量は331 [kg]のロボットである．まず第4章では不規則な地形かつ急斜面での移動ロボットに必要な条件から要求仕様を出し，第2章の方針に従ってハードウェア設計を行う．具体的には転倒安定性，踏破性能から十分な静的転倒角，脚の発揮力等を持つように脚機構，アクチュエータの選定を行う．そして運動学的，力学的な解析から要求仕様を達成できることを確認する．

次に第5章では、屋内で行った本ロボットの路面揺動実験と不整地踏破実験の結果を示す。その結果、不規則に動く地面に車輪を密着させながら重心位置とベース姿勢を安定化できることや、簡単なスロープにおいてスリップを起さず踏破できることを示す。

第6章と第7章では、もう一つのロボット構成の例として安全な建設作業のために試作した「CRAWHEL」の設計について詳細に述べる。CRAWHELは低重心・広い支持領域を持つクモ型の4本の脚と、胴体部に2つの大きな車輪を持つ脚・車輪分離型と呼ばれる、重量145 [kg]のロボットである。まず第6章では不規則な地形かつ足場が崩落する地形での重作業を想定し、プラットフォームの位置と姿勢を安定的に操作・維持できることを目標とし、脚機構、車輪機構の設計や制御システムについて説明する。

次に第7章では、第3章で述べた制御アルゴリズムを実装しベースの位置追従実験、足場崩落実験を行った。その結果、プラットフォームの特徴である広い可動性と外乱下でも姿勢を維持できることからロボット構成の妥当性を示す。

第8章では、Hydrover-IIの設計において、摩擦の大きい油圧ギアモータのトルク制御性向上に向けて調査、検討を行う。まず外乱を推定しキャンセルするような入力を入れることによって制御性が向上することをシミュレーションを用いて検証する。次に1軸試験機を制作し、油圧モータを動作させる構成のうち制御性能が劣化している原因の特定を行う。

第9章では、冗長自由度である脚車輪機構の、タイヤの転がりを使った接触点変更を行える方法について検討する。まず、転倒安定性と牽引力を考慮しながら、地形に合わせて能動的に最適姿勢を選択する制御手法について検討する。次にスロープ走行を行うシミュレーションより制御手法の検証を行った。その結果、姿勢や車輪位置を自在に動かすという当初の目標は達成できなかったものの、第3章で述べた全身運動制御に加えて、転倒安定性と牽引力については向上が確認された。

第10章では本論文で得られた成果を要約し、今後の課題と展望について述べる。

謝 辞

学部生から7年間にわたり研究をご指導くださり、未熟な私を叱咤激励してくださいました玄 相昊教授に心から深く感謝いたします。ロボットの開発においては、次の3人のメンバーにご助力していただきました。井田 裕介氏には「*Hydrover-II*」について基礎実験やロボットのシミュレーションモデルを作成していただきました。安井 雄哉氏、黒瀬 裕一郎氏には「*CRAWHEL*」の機械設計、基礎実験を担当していただきました。彼等の献身的なご協力に深く感謝いたします。また、株式会社クボタ様には「*Hydrover-II*」の実機製作に関して大変多くのお力添えをしていただきました。ロボットの实機実験を手伝っていただいた松井 俊樹君、FANG Ningyuan 君、研究の議論を頻繁に行ってくれた KIM Inhwan 君、甲斐 友朗君をはじめとする玄研究室メンバーに心から感謝いたします。機械部品の加工をしていただいた工作センター職員の皆様に対して深く感謝を申し上げます。

目次

	概 要	i
	謝 辞	iii
第 1 章	緒論	1
1.1	本研究の背景	1
1.1.1	農地環境	1
1.1.2	建設環境	1
1.2	研究目的	2
1.3	脚式の作業ロボットに関する従来の研究	3
1.3.1	脚機構	3
1.3.2	脚車輪機構	3
1.3.3	脚クローラ機構	4
1.4	本論文の方法	5
1.5	本論文の構成	7
第 2 章	設計方針	8
2.1	はじめに	8
2.2	移動機構の構成	8
	脚機構の数	8
	クローラ機構 vs 車輪機構	8
	脚と車輪の組み合わせ方	9
2.2.1	脚車輪一体型機構	10
2.2.2	脚車輪分離型機構	12
	ベースの機動性について	15
	脚車輪一体型機構との差異	15
2.3	トルク制御	16
2.3.1	脚関節のトルク制御	16
2.3.2	車輪トルク制御	17

2.4	アクチュエータ	18
第 3 章	トルク制御に基づく全身運動制御	19
3.1	はじめに	19
3.2	概要	19
3.3	受動性に基づく全身運動制御	21
第 4 章	油圧ローバー <i>Hydrover-II</i> の開発	27
4.1	はじめに	27
4.2	要求仕様	28
4.3	機構設計	31
4.4	アクチュエータ選択	33
4.5	静的転倒角	34
4.6	段差踏破能力	36
4.7	油圧パワーユニット	38
4.8	制御システム	38
第 5 章	<i>Hydrover-II</i> を用いたシミュレーション及び実機実験	39
5.1	はじめに	39
5.2	シミュレーション解析	40
5.3	実機実験	44
5.3.1	路面揺動実験	45
5.3.2	片側スロープ踏破実験	47
第 6 章	不整地作業用脚車輪型プラットフォーム <i>CRAWHEL</i> の開発	51
6.1	はじめに	51
6.2	機構設計	51
6.2.1	脚機構設計	52
6.2.2	車輪機構設計	54
6.3	油圧パワーユニット	55
6.4	制御システム	55
第 7 章	<i>CRAWHEL</i> を用いた基礎実験	57
7.1	はじめに	57
7.2	矢状面揺動運動実験	57
7.3	足場崩落実験	60
7.4	胴体位置追従実験	62

第 8 章	油圧ギアモータのトルク制御性	64
8.1	はじめに	64
8.2	外乱オブザーバの実装	66
8.2.1	油圧モータの流量特性と運動方程式	67
8.2.2	状態空間法による外乱オブザーバ	67
8.3	シミュレーション	70
8.4	システム構成	73
8.5	実機実験	74
8.5.1	構成部品の変更と実機実験	74
8.5.2	トルク計測センサの比較	77
8.6	まとめ	79
第 9 章	全身運動制御アルゴリズムの改善	80
9.1	はじめに	80
9.2	概要	81
9.3	目標姿勢の決定	82
9.4	シミュレーション	85
9.5	おわりに	90
第 10 章	結論	91
10.1	結論	91
10.2	今後の課題と展望	94
	参考文献	95

第 1 章

緒論

1.1 本研究の背景

急斜面、凹凸路面、軟弱地盤などの不整地と呼ばれる作業現場において人間の作業を補助・代替するロボットの実用化は、人手不足による作業の省人化対策、作業者の安全確保の点から期待されている。例えば、国内農地や建設現場では以下のような現状がある。

1.1.1 農地環境

近年、日本の農地は農業従事者の減少や高齢化により、耕作放棄地面積が年々増えている。特に傾斜のある中山間地域では、地形的な問題も相まって耕作放棄地面積が平地農業地域より 2 倍以上であり [1]、農地の荒廃が進んでいる。中山間地域は農地全体の 40 % ほどの耕地面積を持ち、農業生産額も全体の 35 % を支えており、日本の農業の中で重要な役割を担っている。また農業分野では年間 400 件程度の死亡事故があり、事故率が高いことも問題となっている。そのため国内農地のうち急傾斜を含む中山間地域では、省力化と安全性向上を目的に、高齢者でも楽に扱える機械、サラリーマンが短時間で作業をこなせる機械、中山間地に適した機械などが求められている [2]。

1.1.2 建設環境

建設現場では高所作業用の移動式クレーン等を利用する際、アウトリガーと呼ばれる油圧で動作する脚をトラックから引き出し土台部分が転倒しないように支えている。これは水平かつ強度のある路面を対象としたものである。ここで軟弱路面の場合は鉄板を敷いて接地圧を減らし、アウトリガーの沈み込みを防ぐ方法や地面に補強工事を行う方法がある。また傾斜面などでアウトリガーを設置する必要がある場合は、ブロックをアウトリガーの下に設置し、嵩上げを行い土台の水平を取る必要がある。こ

これらの作業は、作業環境の準備に時間がかかると同時に、現場の判断によるところが多いため、危険である場合がある。これらの対策を怠ると、高所作業車は重心位置が高いため、転倒につながり多くの人が関わる職場ではあってはならない大事故につながる。実際移動式クレーンの転倒事故は多く、労働災害のうち、移動式クレーンによる死傷者数は全体の 3 割に上る。また従来の方法は地形の変動には有効な対処方法を持っておらず、足場が崩れやすい場所では使用することが出来ない。足場が崩れやすい場所に建機を運用される場面の一つに災害対応があり、不安定な地形での構造物の解体・組立、資材や瓦礫の運搬・撤去を行う機器の導入が求められている [3]。

1.2 研究目的

探査、測定、運搬作業など目的に応じて様々な形状のロボットがあるが、本研究では地上の不整地路面を対象に、マニピュレータなどの比較的大型のパワーツールを用いた重作業を行える油圧駆動ロボットの開発を目指す。そのようなロボットにおいて、従来の車輪・クローラ機構のみでは不整地を縦横無尽に走破することは難しく、不整地でのバランス・移動技術は基盤技術である。本論文は特に、油圧駆動の脚を利用した、重機のためのプラットフォーム（土台）の構成方法を考える。

1.3 脚式の作業ロボットに関する従来の研究

急斜面、大きな凹凸路面は、サスペンションを持つ車輪機構のみでベース姿勢を保ちながらの走破の達成は難しいため、脚機構を使ったロボットが多くある。

1.3.1 脚機構

歴史は古く (例えば Waldron らの Hexapod robot [4], MIT Leg Lab's robots [5]), その中でも、不整地での重作業用の脚式プラットフォームとして注目されているのが、広瀬らの大型四足歩行ロボット TITANXI [6,7] や、三菱重工の急斜面山林用ロボット Landmaster3 [8], 千葉大の 6 脚ロボット COMET-IV [9] である。また ImPACT タフ・ロボティクス・チャレンジにおける「災害対応建設ロボット」の研究グループでは、従来の建設機械と比較して作業性・機動性を高める双腕型の建設ロボットの開発を行っている。その中で、対地適応性の実現のために、アームの一方を脚として使うコンセプトで開発されている [3]。しかし、これらのロボットはいずれも位置制御であり、冒頭で述べたような急激な地形の変形に対応する方法は記述されていない。

最近では、ボストン・ダイナミクス社の油圧式四足歩行ロボットが優れた性能を発揮している。Big Dog [10], LS3, Spot, そして最近のヒューマノイドロボット「Atlas」などのロボットは、単なる不整地への適応にとどまらず、走行、ジャンプ、アクロバティックな動きなど、非常に高度な制御システムを備えている。研究機関でも Semini らの 4 脚ロボット HyQ [11] をはじめとする油圧式の四足歩行ロボットは、現在もいくつかの国の国立研究所で研究されている。

1.3.2 脚車輪機構

著者は脚と車輪を組み合わせた、いわゆる「脚車輪機構」が有望であると考えている。その理由は第 2.2 章で述べるが、既に不整地踏破を目的とした脚車輪ロボットが無数に開発されている。宇宙探査用ローバーにおいては、多自由度の回転関節を持つ脚機構が積極的に導入されている。このうち、脚先に駆動輪のある脚輪機構を有するロボット (ここでは脚車輪一体型と呼ぶ) が盛んに研究されている。

研究事例は無数に存在するが (例えば文献 [12–15] 等), 地上 (1G) での重作業支援に耐えうる比較的大型の機体は、比較的大型の機体は、米国 NASA の ATHLETE [16], ドイツ DFKI の SherpaTT (重量:150 [kg]) [17], ACFR の「MAMMOTH(80kg) [18] などいくつか挙げることができる。

ただし、これらは主に不整地での移動を目的としており、一般的な建機のように重

作業をする目的では開発されていない。地上で建設作業を行うロボットは、Hutter らによる市販のホイールショベル「WalkingExcavator」の自動化の研究 [19] の研究があり、接地圧を制御することにより不整地でもバランスを保ったまま移動することが出来ている。

一方、不整地での高い移動性を目指したロボットとして、胴体から脚と車輪が別々に取り付けられている中野らが開発した脚車輪分離型ロボット [20,21] もある。このロボットは 4 本の脚と 2 つの大きな車輪を持つ電動ロボットであり、脚と車輪を使い分けながら不整地を移動できる。

1.3.3 脚クローラ機構

脚とクローラ機構を併せ持つロボットも存在する。クローラロボットではぬかるんだ土地などにおいて、接地面積の多さから車輪機構より高い走行性がある。代表的な事例として、iRobot 社の PackBot [22]、東北大学などの Quince [23] などがあり、これらのロボットは福島第一原発事故の原子炉建屋内調査に活用されている。しかし、クローラ機構は低圧の接地反応には有効であるが、ベースの位置や姿勢を迅速かつ正確に制御することにはあまり貢献しない。この点については第 2.2 章にて後述する。

1.4 本論文の方法

本研究では、屋外不整地で重作業の可能なロボットのハードウェア構成、ソフトウェア構成方法について検討する。具体的にはロボットの移動機構、アクチュエータ選択、制御方法について先行研究を参考にしながら、設計方針を割り出す。その後、ロボット構成例として、設計方針を元に 2 台のロボットを設計する。1 機体目は農地の凹凸路面や急斜面でも安全に使用できる移動プラットフォームのシステム設計を主眼として農業用脚車輪一体型油圧ローバー *Hydrover-II* の開発と基礎実験について述べる。2 機体目は崩落等の不安定な地形での重作業を目的とした建設用脚車輪分離型ロボット *CRAWHEL* の設計と基礎実験について述べる。建設ロボットにおいては、不整地を素早く移動することよりも、いかなる状況であっても安定に作業を継続するバランスと姿勢を保持することが重要なタスクと設定する。最後にシミュレーションによる解析と実機実験により目標動作が達成できるか検証を行う。研究の進め方を図 10.1 に示す。

本ロボットは、不整地移動・作業において重要と思われる次の特徴を考慮して設計する。：

- (F1) ベース（プラットフォームの胴体部）の安定性と機動性
- (F2) 凹凸路面，急斜面への適合
- (F3) 耐衝撃性・柔軟性
- (F4) 耐久性・耐候性
- (F5) パワーツールを搭載できる可搬重量

ここで **F1** はベース位置と姿勢について述べたもので、ベースに装着されるパワーツール（マニピュレータなど）の操作性，または運転席の乗り心地の問題に直結する。いわば，作業性とモビリティの両立問題である。また一般的に Platform は単独で使用するものではなく，マニピュレータや電動工具（またはアタッチメント）と組み合わせ使用するものである。ここで可動域やトルクを拡張したい場合，マニピュレータ等を改造することは汎用性をさげるため望ましくない。つまり，マニピュレータ，ショベル，ハンマー，クレーン，ドリルなど，建設用の特殊な電動工具の機能を拡張してこそ，プラットフォームの有用性が発揮されると考える。**F2** は，山林での作業フィールドを想定し，極端な凹凸面や急斜面への運動学的，力学的適合性を考慮したものである。**F3** は地形の突発的な変動による地面からの衝撃吸収を想定したものである（サスペンション機能）。**F4**，**F5** は農業用移動ロボットとして汎用機となるためには必要な要素である。これらの特徴を持つロボットを開発する。

本論文では，上記の特徴を達成できるよう以下のような設計方針を取ることとした。

- S1** 主に脚で広い可動域やワークスペースを確保し，場合よってホイールを組み合わせる．**F1～F2**
- S2** アクチュエータの力を制御することで，ロボット全体に適切なコンプライアンスを与える．**F3**
- S3** すでに建機等で，**F4～F5** の実績のある油圧アクチュエータを採用する
- S4** 地面反力（GRF）を操作して，ベースの動的安定性を得る．**F1～F2**

S1-S3 についてはそれぞれ 2.1-2.3 章で，S4 については 3 章で説明する。

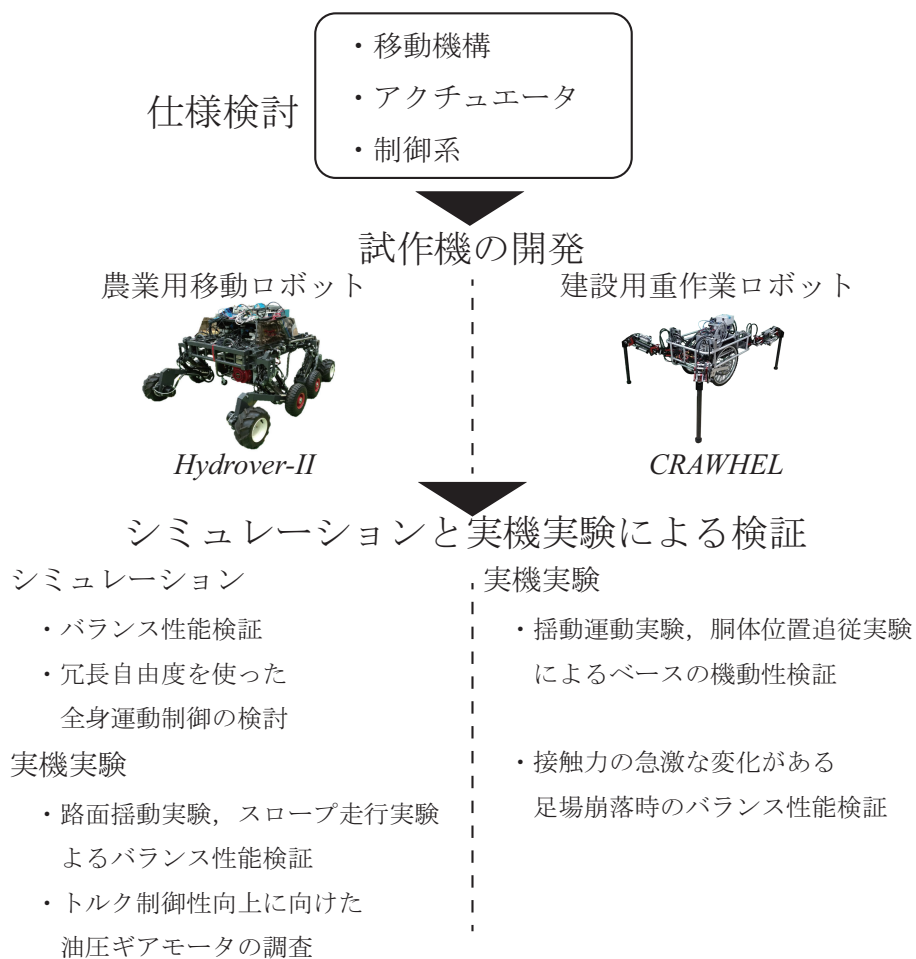


図 1.1 Flowchart of research.

1.5 本論文の構成

本論文は 1.4 章で提示した目的と方法に従って行われた研究の具体的な内容と結果について報告する。本論文は以下のように構成されている。

以下、第 2 章ではロボットに必要な要素を検討し、設計方針について述べる。第 3 章で本ロボットの特徴であるトルク制御を基盤とする制御アルゴリズム全身運動を示す。第 4 章では具体的な要求仕様を決定し、実際に試作したロボットについて、静的転倒角、脚の発揮力等から脚機構、アクチュエータの選定など設計上重要なポイントに焦点を当てて説明する。第 5 章では、屋内で行った本ロボットの路面揺動実験と不整地踏破実験の結果を示す。第 6 章では、我々の研究室で製作した 2 機体目の機構、センシング、制御システム、および油圧コンポーネントについて説明する。第 7 章では、動的なバランスと衝撃吸収を伴実験結果を示す。第 8 章では、油圧ギアモータのトルク制御性能向上に向けた試みのシミュレーション・実機実験の結果を示す。第 9 章では、トルク制御を基盤とする制御アルゴリズム全身運動の改良について述べ、シミュレーション結果を示す。第 10 章では、本研究で得られた結果とその意義についてまとめ、今後の課題について述べる。

第 2 章

設計方針

2.1 はじめに

前章で述べた特徴 **F1**～**F5** を踏まえて定めた本ロボットの設計方針について述べる。第 2.2 章は移動機構の構成について検討する。第 2.3 章はロボット関節制御の方針について検討する。第 2.4 章はロボットに採用するアクチュエータについて検討する。

2.2 移動機構の構成

不整地での移動機構の構成としては、1.3 章で述べた通りであるが、本研究は脚車輪機構を採用する。脚車輪機構は脚の利点（離散的な接地点選択と多様な動作姿勢）と車輪の利点（高効率性と高速移動能力）を併せ持っているからである。脚車輪機構に採用する脚機構の本数、同じ無限回転機構であるクローラ機構との比較、脚と車輪の組み合わせ方について検討する

脚機構の数

準静的な動作で安定した移動が可能な最低限の本数である 4 脚機構を採用した。前述のロボット [10, 11] は動的なトロット歩行で移動することが可能である。しかし転倒を起こすと大事故に繋がり感かねない重作業用の大型ロボットが、不整地上で動歩行を行う必要はないと考える。

クローラ機構 vs 車輪機構

一般に、クローラーは 1) 接触面の連続的な変化と 2) 低い接地圧によって特徴付けられる。1) は特に小型移動ロボットに採用されている「可変クローラー」の凹凸面の踏破性能に現れる。しかし、実際にはクローラー自体の質量が大きく、全身の障害物

を乗り越えてベース姿勢を安定させるのにはあまり寄与しない。2) は崩壊しやすい地形に入るのに確かに有利である。ただし、車両の重量が小さい場合は必要ではなく、むしろ低い接地圧はグリップを低下させることになる。GRF 操作によるバランス制御の観点からも接地圧の一樣分布は好ましくない。

一方、車輪機構はクローラ機構と比べて接地面積が少ないため低い接地圧の特徴はないため、ぬかるみ路面では不利になる可能性がある。しかし CoP 操作によりバランス制御には適していると考え、車輪機構を採用した。

脚と車輪の組み合わせ方

次に脚機構にどのように車輪を取り付けるか考える。取り付けのパターンとしては、

- (a) 脚機構の先端（エンドエフェクタ部）に車輪機構を配置
- (b) 脚機構とは別に車輪機構を配置
- (c) 脚機構の先端以外の部分に車輪機構を配置

が考えられる。対応するイメージ図を図 2.1 に示す。最終的にはこれら 3 つを組み合わせることも考えられるが、それぞれの要素の利点を明確にする必要がある。本論文では車輪機構が脚機構の先端にあるものを脚車輪一体型機構、脚機構とは別に車輪があるものを脚車輪分離型機構と呼ぶことにする。脚機構の途中に車輪があるものは DRC-HUBO+ [24] が採用している。この機構は脚として使うか車輪として使うか選択できるという利点がある。しかし両方同時に利用することは幾何学的に難しいため、新しい動作を生むものではないと考える。以上より、静歩行が可能な 4 脚機構を持つ脚車輪一体型機構、脚車輪分離型機構に絞って詳しく検討する。

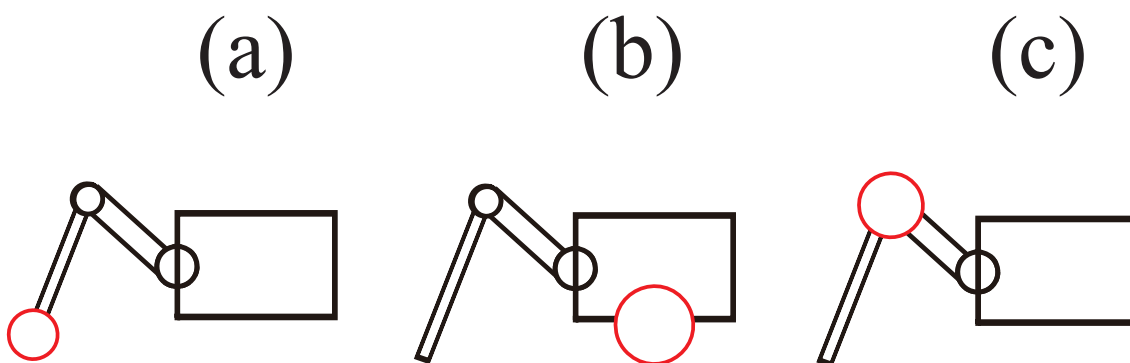


図 2.1 Wheel mounting combination

2.2.1 脚車輪一体型機構

多自由で冗長性の高いシステムであるため転倒・姿勢バランスを保つためにとれる方法は、他の移動台車、脚ロボットより圧倒的に多い。例えば、摩擦係数が低い路面やタイヤが沈下するような路面の場合、ロッカーボギー等の受動関節を使ったロボットでは対応方法が少ない。実際に火星探査機であるオポチュニティー [25] は、ぬかるみでタイヤがスタックし数か月に渡り行動不能となったことがある。しかし、先行研究の脚車輪機構を持つ冗長自由度ロボットでは、次のような移動方法を取ることができる。

- (a) 脚を使った離散的な接地点の選択
- (b) 脚と車輪を協調させホイールベースを変更し、砂地やぬかるみ路面から脱出
- (c) 脚を使用したジャンプ動作による走行中の障害物踏破
- (d) 接触力とトラクションを任意にコントロールし、操縦不能となるスリップ現象を防ぐ

対応する動作を図 2.2 に示す。

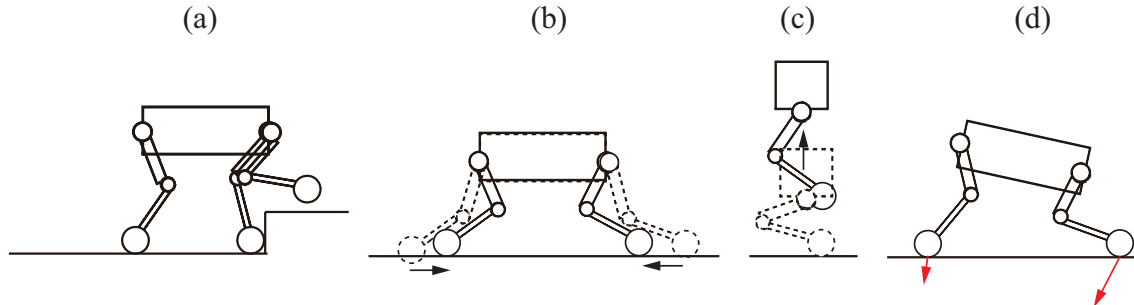


図 2.2 Operation modes: (a) walking; (b) Wheelbase changes. (c) Jump ,(d) Selection of contact force .

前述のロボット [16–18] は車輪を 3 次元空間上の任意の位置で接地できるように 1 脚あたり、5–6 自由度の関節を持っている。本研究で設計する脚車輪ロボットも最終的には、先行研究と同様の自由度にする予定であるが、後述する全身トルク制御の有用性 (図 2.2(d)) について検証をおこなうため、ステアリングを除いた Pitch 軸のみの自由度構成に限定する。本研究で扱うロボットの自由度構成を図 2.3 に示す。各脚はベースから順に股 (Hip) 関節、膝 (Knee) 関節、脚先に駆動輪を持つ、1 脚あたり 3 自由度の構成である。

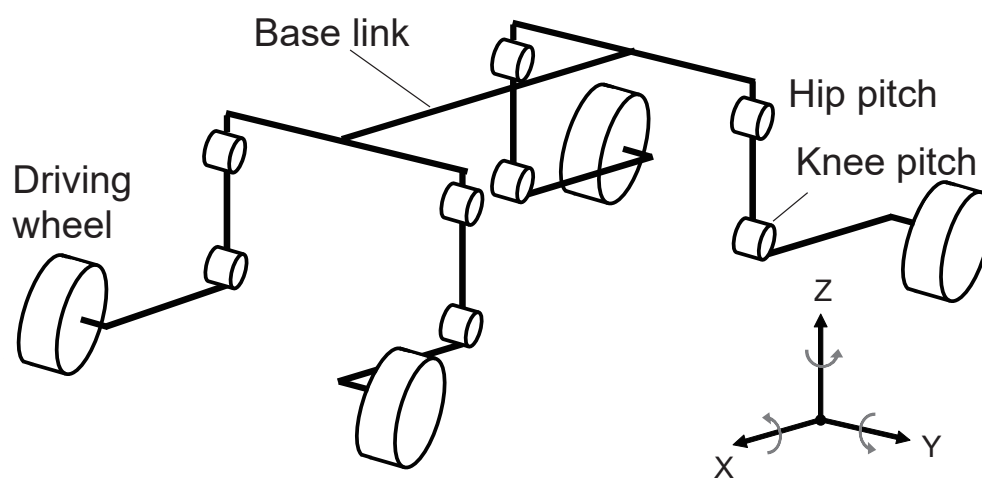


図 2.3 Concept model. The legs have 2 degrees of freedom (DoF) and 1 driving wheel. The total number of DoF is 12,

2.2.2 脚車輪分離型機構

脚と車輪の分離構成は中野ら [21] が最初に提案した。図 2.4 は、大きく分けて 2 つの動作モードを示している。(a) 脚-車輪このモードは、脚と車輪の接触力を適切に配分することで、不整地の踏破能力を最大限に引き出すことを目的としている。足と車輪の接触力を適切に配分することで、不整地の踏破性を最大限に高めることを目的としている。(b) 脚部だけのモードは、必要に応じて車輪を格納し静歩行により、4本の脚で階段を登ったり大きな溝を跨いだりすることができる。これらのモードを組み合わせると、図 2.4 (c) のように様々な段差を昇り降りすることができる。これらの特徴については、中野ら [21] で述べられている。

しかし著者は、この機構が起伏の多い地形での高速移動に適しているとは考えていない。大型ロボットに限ると歩行動作で不整地を高速移動できた例はなく、万が一転倒することを考えると現状現実的とはいえないと考える。そのため常に安定した支持領域を保てる脚車輪一体型機構の方が不整地の高速移動には適すると考える。

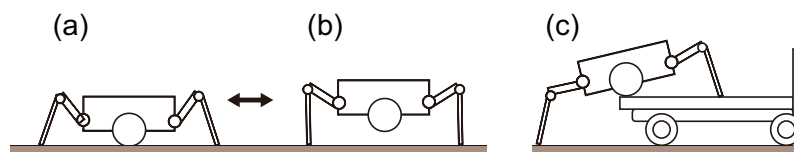


図 2.4 Operation modes: (a) Leg-Wheel Mode; (b) Leg-Only Mode. (c) Motion example of climbing up to a track for long range transportation.

著者はこの機構が不安定な路面で重作業を行うプラットフォームとして適していると考えている。一般的には定点で重作業を行う場合、建機からアウトリガーを伸ばし支持領域を確保する。一般的なアウトリガーでは対処が困難な場面は、1) 限られた足場で十分なベースの可動域を確保出来ないこと、2) 動作中に地形が突然変化した場合の対応であり、図 2.6 はその様子を示している。図 2.6(b) に示されている脚車輪分離型機構では、マニピュレータのワークスペースを拡張するために、ベース姿勢を変更することができる。もう 1 つの重要な目的は、不安定な足場に対応することである。図 2.6(c) に示されているように、アウトリガーでは、巨大な物体が転倒するのを防ぐことは困難である。提案する方法は地面が突然崩壊すると、脚をすぐに着地させて大きな姿勢の変化を防ぎ、続いて車輪が着地し、図 2.6(d) に示すように、ベースの安定を保ったまま地面との接触状態を回復することを目的としている。

脚や車輪、関節の数は自由に選ぶことができるが、ここでは特に Yaw-Pitch-Pitch の 3 つの関節を持ち、2 つの車輪が支持機構を介してベースの真下にあるモデル (図 2.5) に注目する。

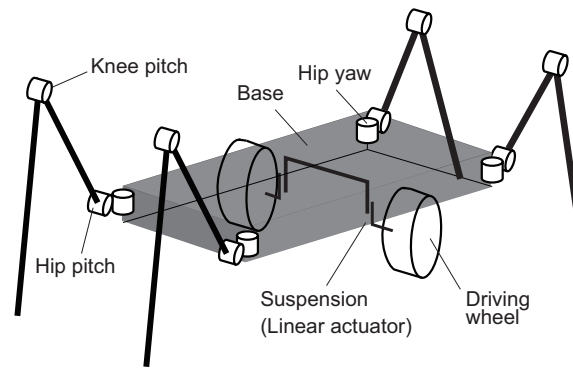


図 2.5 CRAWHEL template model

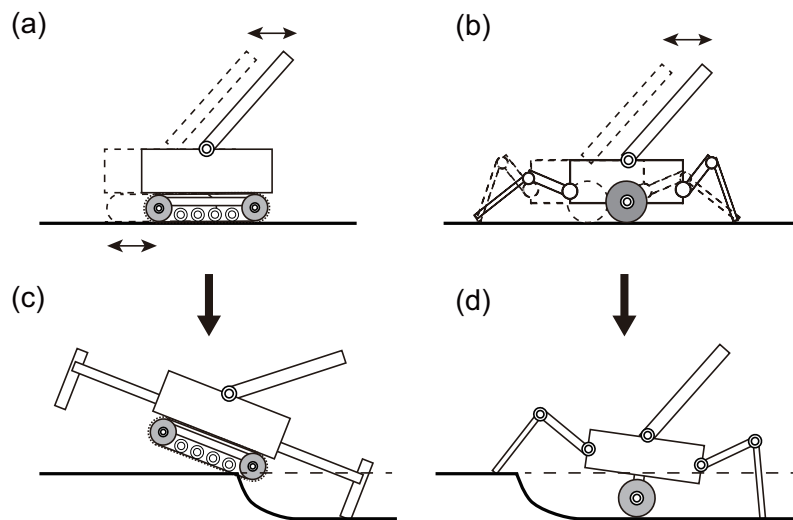


図 2.6 Comparison of (a) conventional platform equipped with outriggers and (b) CRAWHEL, where the RoM of the manipulator is extended; (c) Turn over due to ground subsidence; (d) Ground adaptation with CRAWHEL.

上記のような定点での作業に関する構想は中野らの一連の論文 [20, 21, 26, 27] では取り上げられていない。そのため、開発するロボットには中野らの提案コンセプトに加えて以下の特徴を持たせる。

- (1) 脚については、狭い足場を選択的に動かす必要があり、場合によっては地面の崩落にも対応する必要がある。そのためには、脚の動きが速いこと、軽いこと、力のコントロールができることが非常に重要である。この機能は中野のロボットでは考慮されていない。
- (2) 車輪については、中野らが開発したロボットでは、移動のためのサスペンション機能を主目的としているため、1つのアクチュエータとバネで左右の車輪の接地圧を調整している。一方、本研究では、特殊なサスペンションを用いるこ

となく、最大 6 点の接地反力を能動的かつ独立的に操作する。

脚車輪分離型構造の潜在的なアプリケーションは次のように考える。対応する図を図 2.7 に示す。

- (a) 市販のホイールローダーのように強力な車輪の牽引力と重い重量を使うのではなく、前脚で垂直方向の反力を確保しながら、後脚を伸ばして重量物を押すことができる。
- (b) 地面の接線方向に力を加えることができるため、重いものを牽引することができる。
- (c) ブームリフターの振動制御。脚部関節の高い応答性を利用して、高い水平加速度を発生させることができる。
- (d) 不整地用クレーンのサスペンションシステム
- (e) 大型マニピュレーターを搭載した不整地用プラットフォーム

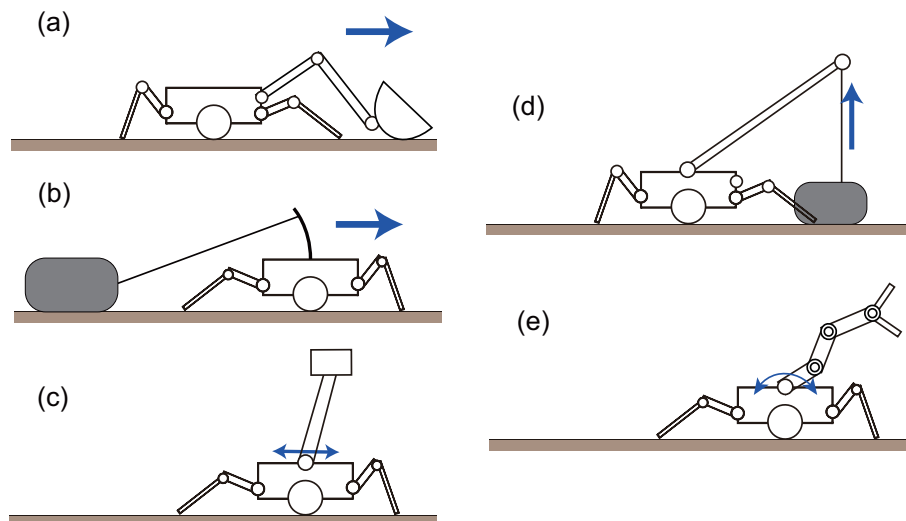


図 2.7 Some application: (a) Earth moving; (b) Towing; (c) Lifter; (d) Crane; (e) Manipulator.

ベースの機動性について

プラットフォームの主な特徴は、脚と車輪を協調的に作動させることにより、ベースの位置と姿勢を制御できることである。ベース姿勢が 0 度のままであると仮定すると、3 点の接地点がある水平運動の動きは図 2.6(b) として表される。後述する CRAWHEL は、バッテリーを含めて 145 [kg] の自重がある。ペイロードを考慮した総重量を 300 [kg] とし、脚と車輪にどれだけのトルクが必要か見積もる。

振幅 A と周波数 ω の \sin 曲線で揺動することを検討する。これが駆動輪のみで行われる場合（ベースが水平に保たれていると仮定）、最大加速に必要な車輪トルクは、単純計算で $\tau = mA\omega^2 \times R$ である。パラメータ $m = 300, A = 0.2, \omega = 6.28, R = 0.3$ の場合、単一ホイールの必要トルクは 355 [Nm] となる。電動モータに、このような高トルクと高応答性を要求することは技術的に困難である。

一方、建設機械に使用される無限回転式の油圧式走行モータは、トルクが高いものの、慣性が大きいために動きが鈍くなる。ただし、油圧式の脚の場合、無限に回転することはできないが、可動域内で十分なトルク（本ロボットでは 0–120 度）を簡単に得ることができる。CRAWHEL の発揮できる足先力については第 6.2.1 章で説明する。

脚車輪一体型機構との差異

脚先に車輪が付いた脚車輪一体型機構のロボットは、歩行ロボットのように脚だけで体重を支える必要があるため、多くのエネルギーを消費する。また、車輪のトルクにより発生する大きな反力に耐えうる脚を設計する必要があるため、脚の慣性が大きくなる。これにより、ロボット全体の重量が増加傾向にあることや、足場崩壊時に脚をすばやく動作させる動作が難しいことから不安定な路面における定点での重作業には脚車輪分離型のほうが適していると考えられる。

2.3 トルク制御

脚車輪ロボットのトルク制御は、脚関節のトルク制御と車輪のトルク制御に分かれる。

2.3.1 脚関節のトルク制御

車輪型ローバーの斜面登坂において、全車輪の接地荷重を制御することの有効性は吉田らによって示されている [28]。本研究が対象とするローバーは脚機構を有しているため 4 輪にかかる荷重を独立に操作できる。また通常の車輛とは異なり、脚式ロボットは脚長を大きく変化させることができる。したがって、前述の **F1**, **F2** を解決するために、脚の可動範囲内の凹凸路面形状に車輪を密着させつつ、車輪から地面に加える力を自在に制御することができれば、姿勢の安定化はもちろん、広いクラスの路面や障害物を柔軟に乗り越えることができると期待される。これは未知の路面形状変化に起因する突発的な衝撃を柔軟に吸収するサスペンション機能 **F3** も含んでいる。例えば、Cordes らは脚先に力センサを装着した 5 自由度の脚輪機構を有する惑星探査車両 SherpaTT を用いて、ベースの姿勢安定化と脚先の力の均衡化を行った不整地移動について発表している [17]。また、妻木らは 6 脚歩行ロボットの脚先にばねを取り付け、ばねの変位から接触力を推定し制御することで、急傾斜での歩行を可能にしている [8]。

これらのロボットは位置制御型であるが、接地点の荷重を制御する方法として関節を直接トルク制御の方が素直である。玄らは複数の接地点に対する最適接触力制御アルゴリズムを提案し、等身大の油圧駆動ヒューマノイドロボットによる不整地バランスを実現している [29] [30]。これは、油圧サーボ弁を用いて 17 軸の関節トルクをアクティブに操作することによって達成された。

本論文においても全身トルク制御方式を採用することとした。多くの位置制御型ロボットは接触点付近に力センサを配置することによって、接触力を制御することができる。しかし関節ごとにトルク制御が出来れば、アクチュエータの力が及ぶ限り、ボディの任意の部位に対して力を分配することができる。例えば、本ロボットには Knee 関節に補助輪が付いており、駆動輪と合わせて最大 8 点を地面と接地して移動できる (第 4.3 章で後述)。この際、新しくセンサを取り付けることなく補助輪への接触力分配が可能となる。

2.3.2 車輪トルク制御

F2 に必要な要素として不整地でスリップを発生させないような力学的な制約がある。スリップは水平床反力の喪失を引き起こし、移動やブレーキなどのコントロールがきかなくなるため、望ましくない。Siegwart らはサスペンション付き電動ローバー CRAB を車輪トルク制御することによって、凹凸路面でのスリップ発生を抑制している [31]。本研究においても車輪のトルク制御を実装する。

2.4 アクチュエータ

本研究は油圧アクチュエータを採用する。油圧アクチュエータは、以下の特徴と利点があるため、ロボットプラットフォームの構築に適していると考えている。

1. 電動式と比べて構造がシンプルで丈夫であり、全天候型のハードウェアを比較的容易に製作できる (F4).
2. 大きなトルクを比較的容易に制御でき、ロボットサイズのスケーリングにも対応できる (F5).
3. 配管を使って遠隔部にパワー伝達が可能であり、高い配置自由度を持つ
4. 安価な圧力センサから関節トルクを推定できる。

このうち項目 4 について補足すると、接地荷重や関節トルクの計測には一般的に力センサが用いられる [17, 29]。しかし耐荷重容量の大きいものはサイズが大きく、高価なため必要最低限の採用とする。一方、圧力センサは小型かつ安価で、許容圧力範囲で用いる限り、耐久性も問題ないため、積極的に採用する。ただし、正しく力を推定するためにはシリンダーピストンの摩擦力への対応が必要となる。

代表的なアクチュエータとして油圧駆動の他に、電動駆動や空気圧駆動があるが、これらをメインのアクチュエータとして選ばなかった理由を述べる。電動モータは単体では大きなトルクを発揮できないため、基本的には減速機が必要となる。しかし減速機の摩擦のため高応答なトルク制御が難しいという問題がある。空気圧駆動は油圧駆動と比べて、圧縮率が高いため、高応答な制御が難しいという問題がある。また両者とも、大型のロボットを設計する際に油圧のように、軽量コンパクトな構成で関節トルク、角速度を発揮できるものがないというも理由の一つである。

第 3 章

トルク制御に基づく全身運動制御

3.1 はじめに

本章ではロボットに実装する全身運動制御について説明する。位置制御型ローバーの運動学的な制御アルゴリズムについては既に多く研究されている [17, 18, 32–34]。例えば、オーストラリア ACFR の Reid らは 4 脚 4 輪の MAMMOTH ローバー（重量: 80 [kg]）を用いて、センサから地形情報を読み取り、逐次運動学計算による不整地踏破実験を行っている [18]。しかし、2.3 章で述べたように関節トルクを制御することで地面への接地荷重を自在に操作できることが重要と考え、論文 [29, 35] を採用した。3.2 章で制御の概要、3.3 章では本アプローチの特徴である、受動性に基づく全身運動制御の内容 [29]、車輪の転がり拘束を考慮した方法 [35] について詳細に述べる。

3.2 概要

制御アルゴリズムは、3 つの部分 **C1**: マヌーバ計画器, **C2**: 全身運動制御器, **C3**: アクチュエータサーボ系から構成されている (図 3.1)。C1 はオペレータが GUI を介してマニュアル操作し、想定または測定した路面に対して脚や車輪をどのように接地させるかを定める。これらは運転モードの選択に相当する。例えば駆動輪のみ油圧的にロックすることや、走行するために一定の目標速度で連続回転させる選択も含まれる。たとえば平地においては、脚機構を持たない乗用車のようなモデルを参考に低重心で全関節をロックし、駆動輪だけで走行するのが最も効率が良い。しかしながら不整地においては、関節を能動的に動かさなければ車高や姿勢を保つことができない。

C1 ではさらに、移動速度と姿勢を決定する。具体的には重心の目標位置 \bar{r}_C 、速度 $\overline{\dot{r}_C}$ とベースの目標姿勢 $\bar{\phi}$ を定める。また、車軸間距離 (ホイールベース) \bar{l} の指定を行う。考えられる運用シナリオの一例として、荷物を運搬して不整地を走行する際はベースの傾きが一定になるように制御し、非運搬時は姿勢制御を無効にすることが考

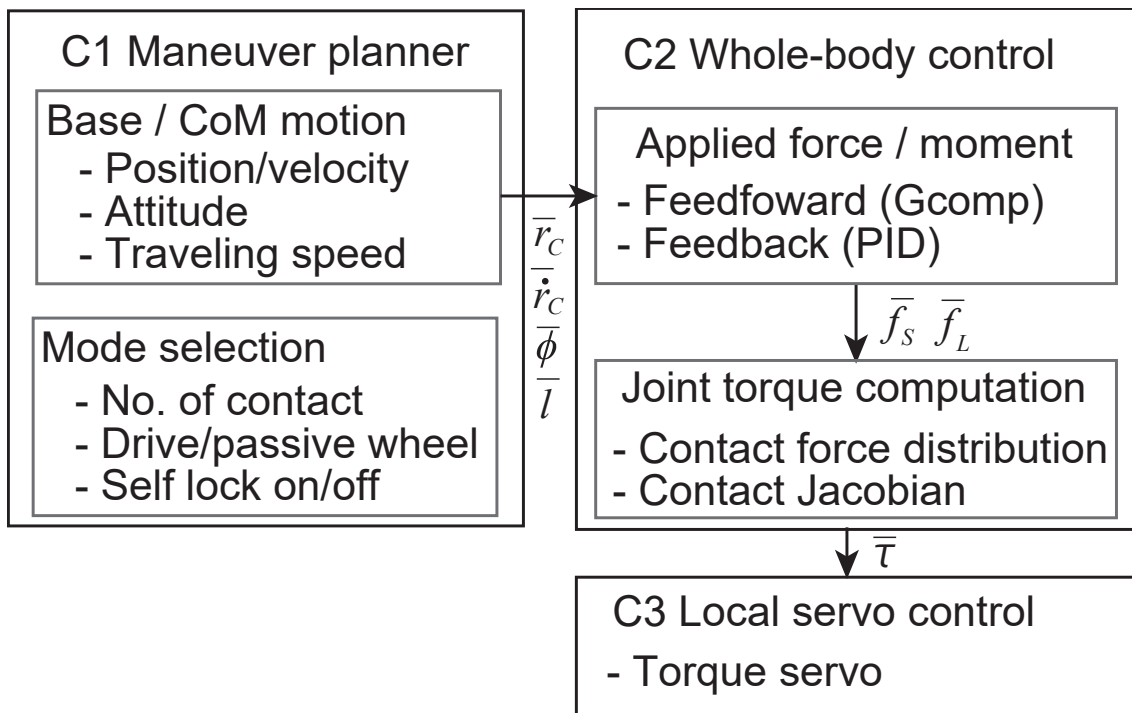


図 3.1 Control framework

えられる。

C2 は **C1** で与えられた目標軌道と重力補償 (Gravity compensation; Gcomp) 項から目標床作用力 (Ground Applied Force; GAF) を決定する。また各脚の目標接触力 \bar{f}_S に分配する。また姿勢の維持に必要なモーメントも計算し各脚の目標接触力 \bar{f}_L とする。それらの目標接触力から目標関節トルク $\bar{\tau}$ を計算する。特に未知外乱や衝撃が加わるときには、アクティブサスペンションのように柔軟に関節を動かす必要がある。詳細は第 3.3 章で述べる。

最後に、**C3** は関節や車輪アクチュエータのローカル制御系で、トルク指令値に定常偏差なく追従するための各種サーボ系が実装される。この設計は **C1** と **C2** とは独立している。性能は用いるアクチュエータによって左右される。

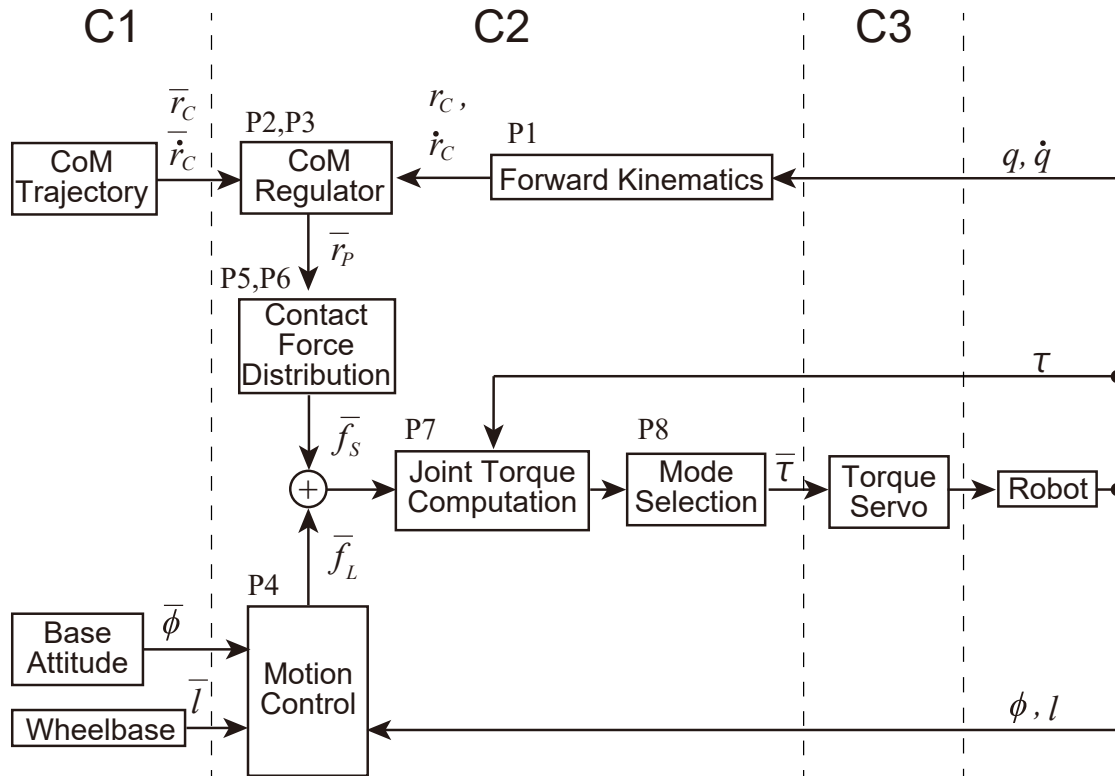


図 3.2 Block diagram: C1 Maneuver planner; C2 Whole-body control; C3 Local servo control

3.3 受動性に基づく全身運動制御

C2 における基本的な制御ルーチンをまとめると次のようになる (図 3.2). :

- (P1) センサ計測値にもとづいて現在の重心位置 $r_C = [X, Y, Z]^T \in \mathbb{R}^3$ とその速度を計算する (座標系の定義は図 3.3 を参照). また, 必要な順運動学計算を行う.
- (P2) 目標重心位置, 速度情報から重心を制御するための目標 GAF $\bar{f}_P = [\bar{f}_{xP}, \bar{f}_{yP}, \bar{f}_{zP}]^T \in \mathbb{R}^3$ を定める (例えば重心位置・速度のフィードバック, 重力補償が代表的である).
- (P3) 床作用力と目標床反力中心点 (CoP) の関係式から, CoP $\bar{r}_P \in \mathbb{R}^3$ を計算する.
- (P4) ベース姿勢角 $\phi = [\phi_R, \phi_P, \phi_Y]^T \in \mathbb{R}^3$ を制御するための垂直発揮力とホイールベースを制御する水平発揮力を設定する. これは各脚で個別に設定される追加制御である. ベース姿勢角の制御は目標姿勢に対する PID 制御より追加の垂直発揮力を決定し, モーメントを発生させている. ホイールベース制御は PD

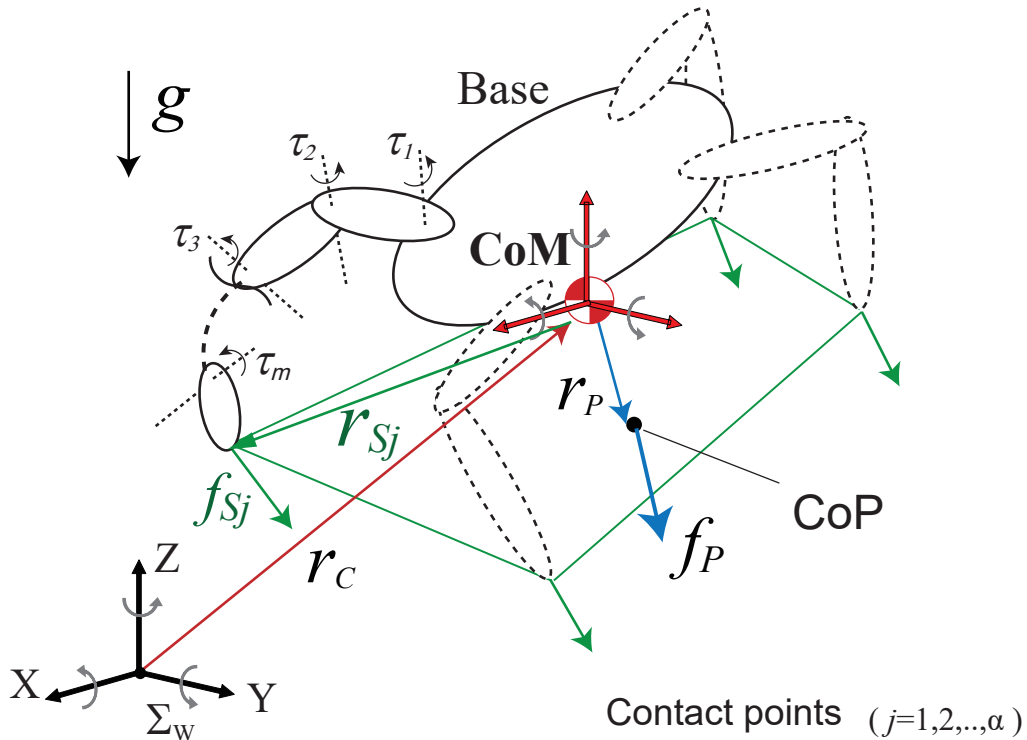


図 3.3 Joint configuration and definition of coordinates. Each ground contact point r_{Sj} is assigned a contact force f_{Sj} . The contact forces f_{Sj} are determined using a desired force f_P applied to the center of pressure (CoP) r_P . The CoP always lies within the supporting convex hull of r_{Sj} .

制御を利用している。

- (P5) アクティブな接触点 r_{Sj} ($j \in \{1, 2, \dots, \alpha\}$) とアクティブな関節 q_i ($i \in \{1, 2, \dots, n\}$) を定め、後述する接触ヤコビ行列 J_{Sj} を構成し、それを縦にスタックしたものを $J_S \in \mathbb{R}^{3\alpha \times n}$ とおく。
- (P6) アクティブな接触点に配分する接触力 $\bar{f}_S \in \mathbb{R}^{3\alpha}$ を、力とモーメントの関係を満たし、かつノルムが最小となるよう決定する。
- (P7) 目標接触力 \bar{f}_S から関節トルク指令 $\tau \in \mathbb{R}^n$ を $\tau = J_S^T \bar{f}_S + D\dot{q}$ によって求める。ここで第 2 項は関節毎の局所減衰項である。
- (P8) 非アクティブな関節に対して適切な処理を行う (油圧ロックをかけるなど)。

次に主要なパートでの具体的な計算について述べる。

(P2, P3)

目標 GAF は以下のようにロボットの目標速度に関する PI 制御で決定する

$$\begin{aligned}
f_{xP} &= m\ddot{\bar{X}}_C - K_{PC}(X_C - \bar{X}_C) - K_{DC}(\dot{X}_C - \dot{\bar{X}}_C) \\
f_{yP} &= m\ddot{\bar{Y}}_C - K_{PC}(Y_C - \bar{Y}_C) - K_{DC}(\dot{Y}_C - \dot{\bar{Y}}_C) \\
f_{zP} &= m\ddot{\bar{Z}}_C - K_{PC}(Z_C - \bar{Z}_C) - K_{DC}(\dot{Z}_C - \dot{\bar{Z}}_C) + mg
\end{aligned} \tag{3.1}$$

また、目標 CoP \bar{r}_P は目標 GAF \bar{f}_P を用いて

$$\bar{r}_{xP} = \frac{\bar{r}_{zP}\bar{f}_{xP}}{\bar{f}_{zP}}, \quad \bar{r}_{yP} = \frac{\bar{r}_{zP}\bar{f}_{yP}}{\bar{f}_{zP}}, \quad \bar{r}_{zP} = -Z_C \tag{3.2}$$

となる。

(P4)

続いて胴体の傾きを制御する姿勢制御について述べる。x 軸, y 軸回りの傾き θ, ϕ の制御は, 重心とロボットの胴体の中心が一致していると仮定し, 重心回り (胴体中心回り) に回転モーメントを発生させて行う。そこで, 姿勢を制御する回転モーメントを発生させる各接触点の目標接触力を決定し, 目標関節トルクを導出する。例えば, 姿勢制御の場合はベースの姿勢 ϕ , 目標姿勢 $\bar{\phi}$, 比例ゲイン K_{PS} より, α 個の Z 方向の力 $f_{zL} \equiv [f_{zL1} \ f_{zL2} \ \cdots \ f_{zL\alpha}]^T \in \mathbb{R}^\alpha$ を決定している。脚車輪一体型機構のようにホイールベースを操作できる場合は, ホイールベース l , 目標ホイールベース \bar{l} , 比例ゲイン K_{PL} より, α 個の X 方向の力 $f_{xL} \equiv [f_{xL1} \ f_{xL2} \ \cdots \ f_{xL\alpha}]^T \in \mathbb{R}^\alpha$ を定める。これらの追加制御は次式のような比例フィードバックで行っている。

$$f_{xL} = -K_{PL}(l - \bar{l}), \quad f_{zL} = -K_{PS}(\phi - \bar{\phi}) \tag{3.3}$$

各脚の重心との位置関係による符号の違い注意して, 各接触点の z 方向の目標接触力として決定する。この符号は, 脚がクロスしているなどの特殊な場合を除けば変化しないため, 本制御則では符号は変化しないと仮定して用いている。

(P5, P6)

GAF と CoP の関係はモーメントのつり合いから以下で表せる。

$$r_{xP} = \frac{\sum_{j=1}^{\alpha} r_{xSj} f_{zSj}}{\sum_{j=1}^{\alpha} f_{zSj}}, \quad r_{yP} = \frac{\sum_{j=1}^{\alpha} r_{ySj} f_{zSj}}{\sum_{j=1}^{\alpha} f_{zSj}} \tag{3.4}$$

$$f_P = \sum_{j=1}^{\alpha} f_{Sj} \tag{3.5}$$

これを行列表記すると次式のようなになる.

$$\begin{bmatrix} r_{xP} \\ r_{yP} \\ 1 \end{bmatrix} f_{zP} = \underbrace{\begin{bmatrix} r_{xS1} & r_{xS2} & \cdots & r_{xS\alpha} \\ r_{yS1} & r_{yS2} & \cdots & r_{yS\alpha} \\ 1 & 1 & \cdots & 1 \end{bmatrix}}_{A_z \in \mathcal{R}^{3 \times \alpha}} \begin{bmatrix} f_{zS1} \\ f_{zS2} \\ \cdots \\ f_{zS\alpha} \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

これを, ノルム最小になるような接触力分配則によって, 式 3.7 のように変形し, 各接触点ごとの接触力を決定する.

$$\begin{bmatrix} \bar{f}_{zS1} \\ \bar{f}_{zS2} \\ \vdots \\ \bar{f}_{zS\alpha} \end{bmatrix} = A_z^T (A_z A_z^T)^{-1} \begin{bmatrix} \bar{r}_{xP} \\ \bar{r}_{yP} \\ 1 \end{bmatrix} \bar{f}_{zP} \quad (3.7)$$

なお, ノルム最小な接触力分配については本手法では接触点が同一平面上にあることを前提としており, 計算負荷が軽くリアルタイム性に優れるという理由で用いている.

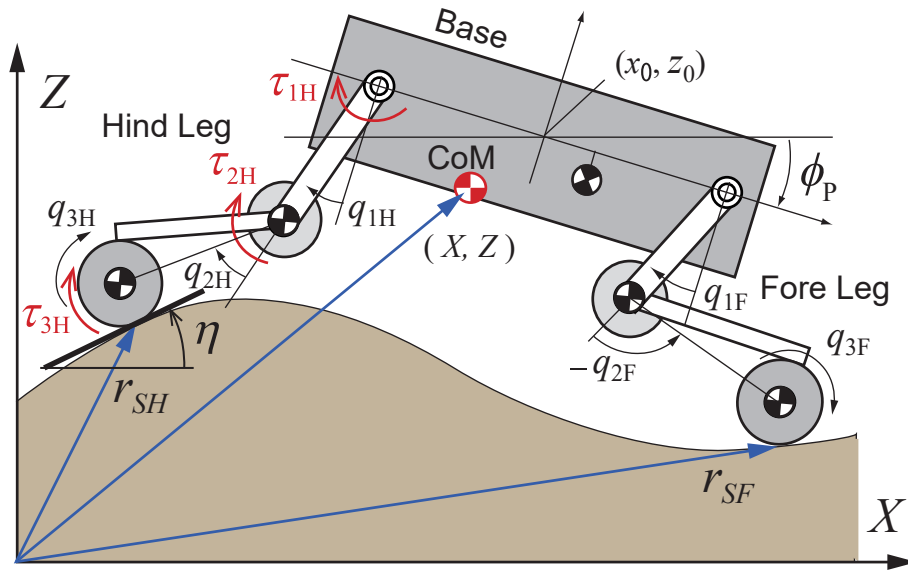


図 3.4 Definition of coordinates of the model projected onto the XZ plane. The position vector from world coordinate to each Joints' point are defined r_1 and r_2 . The position vector of ground contact point r_S depends on the wheel rolling.

(接触ヤコビ行列の導出)

このアルゴリズムの詳細と効果は文献 [29, 30] で述べた通りであるが，脚車輪一体型機構のようなロボットに適用するためには若干の修正が必要である．ここでは文献 [35] で提案された上記制御の拡張方法について述べる．図 3.4 のような XZ 平面モデルを用いて説明する．駆動輪を含めた全身トルク制御に用いるヤコビ行列は，車輪の転がり接触に対応しなくてはならない．車輪半径を ρ とし，車輪の路面との第 j -接触点 r_{Sj} における路面の水平面からの局所的な傾斜角を η_j とする．図 3.4 の平面モデルでは，前脚の場合は $j = F$ ，後脚の場合は $j = H$ であるが，実際に本研究で扱うロボットは前後左右に脚があるので， $j = FR, FL, HR, HL$ の 4 種類となる．

車輪と路面との間に滑りがないと仮定すると，車輪の接地点の速度 $\dot{r}_{Sj} = [\dot{x}_{Sj}, \dot{z}_{Sj}]^T$ は，車輪の回転速度 $\dot{\theta}_j$ と次のような関係を満たす．

$$\dot{x}_{Sj} - \rho \cos \eta_j \dot{\theta}_j = 0 \quad (3.8)$$

$$\dot{z}_{Sj} - \rho \sin \eta_j \dot{\theta}_j = 0 \quad (3.9)$$

これはノンホロノミックな速度拘束条件となり，制御アルゴリズム (P5) におけるヤコビ行列 J_{Sj} は

$$J_{Sj} = \frac{\partial}{\partial \dot{q}_j} \begin{bmatrix} \dot{x}_{Sj} - \dot{x}_C - \rho \cos \eta_j \dot{\theta}_j \\ \dot{z}_{Sj} - \dot{z}_C - \rho \sin \eta_j \dot{\theta}_j \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

によって求める．ここで， $q_j = [q_{1j}, q_{2j}, q_{3j}]^T \in \mathbb{R}^3$ は第 j -接触点に関する駆動関節

座標で, $\theta_j = \phi_P + q_{1j} + q_{2j} + q_{3j}$ は車輪の絶対角である. なお, r_{Sj} と r_C にはベースの絶対姿勢 ϕ_P (非駆動の一般化座標) と質量パラメータが含まれるため, そのヤコビ行列 J_{Sj} にもそれらは含まれることに注意されたい.

(注意 1)

手続き (P7) において, 関節のダンピングの付与は必須である. そうしないと, 関節冗長性から生じる内部運動が発生するからである. 適切なダンピング値は運動に依存するが, およその目安として, 各リンクのイナーシャに比例した値としている. ただし, 駆動輪は機敏に動いてほしいため, 低めの値を設定している. ただし, 油圧アクチュエータの内部摩擦が極めて大きい場合は, 制御によるダンピングを課す余地はほとんどなく, 逆に, 摩擦補償を行うことが望ましいと考える.

(注意 2)

良好な接触状態を得るためにはスリップ (滑り) を考慮しなければならない. スリップが生じた場合, その結果は車体の位置・姿勢の変化として表れる. 本研究では, 車体の位置・姿勢, 車輪間距離はセンサによって計測し, フィードバック制御によって安定化を図っている. ただし, 大きなスリップからのリカバリーが可能かどうかは保証できず, 未検証である. そのため本論文では極力スリップが起こらないよう, 接地圧とトラクションを任意に扱えるロボット作成を行う. 万が一スリップが起こった際の対処は, ステアリング等の制御も含めて今後詳細に検討する必要がある.

第 4 章

油圧ローバー *Hydrover-II* の開発

4.1 はじめに

2 章で述べた設計方針から、第 4.2 章では要求仕様を決定し、第 4.3 章と第 4.4 章では設計したロボットの説明、第 4.5 章と第 4.6 章では要求仕様で設定した機能の解析について述べる。油圧ローバー *Hydrover-II* の基本スペックを表 4.1 に示す。

開発したローバーは 4 本の脚機構でベース部分が支持されている、全油圧駆動の Wheel-On-Leg Rover である (図 4.1)。

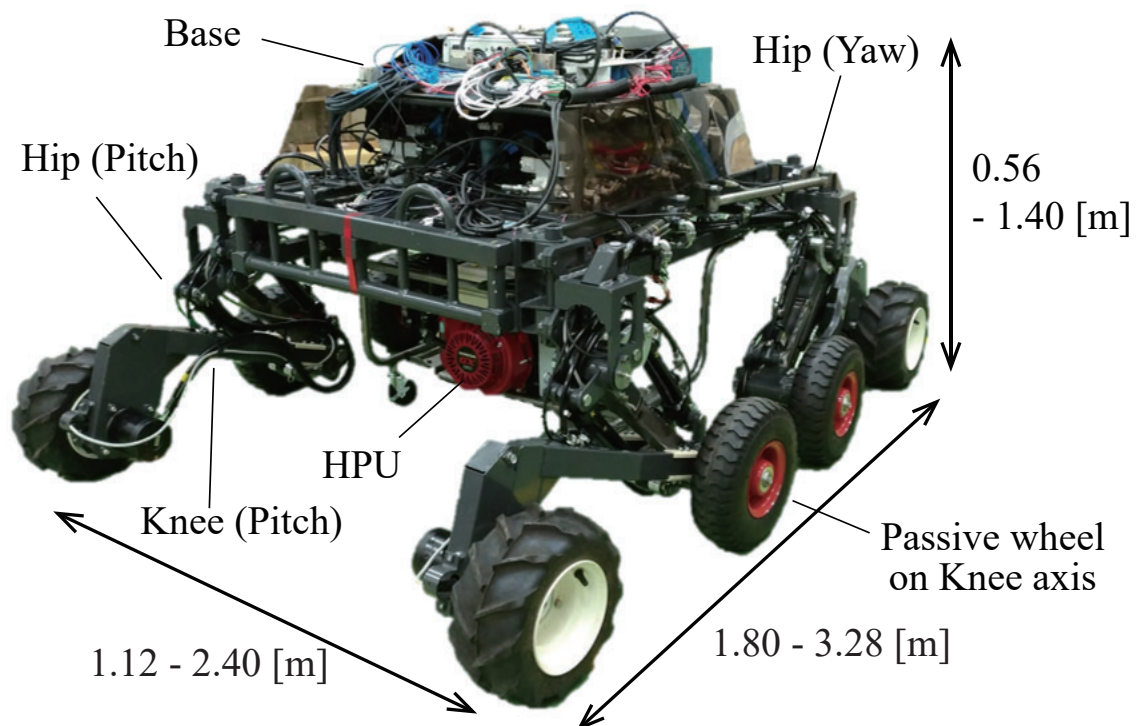


図 4.1 *Hydrover-II*

4.2 要求仕様

農業用モバイルベースを設計するにあたって、走破する地形を検討した。中山間地域の代表例は緩傾斜地域（斜度 8~15 [deg]）、急傾斜地域（斜度 15~20 [deg]）であり、ロボットはこの地域でベース姿勢を安定させたまま荷物・作業機の運搬することが求められる。倒木等のある極端な凹凸路面をベース姿勢の安定を保ちながら移動することも必要である。また、田畑として利用できる限界の傾斜は 35 [deg] [36] とされているため、本ロボットはこの傾斜角度以内で転倒しないことが必要である。

ロボットが満たすべき最小限の機能として、最初に具体的な 4 点の仕様を決定した。：

- (T1) 接地点の動的な外乱に対して、脚部の可動範囲内でベース姿勢の水平を保てること（許容揺動幅 ± 10 [deg]）。
- (T2) 斜度 35 度においてロボットが転倒しない、斜度 20 度でもベースの水平を維持しながら走行できること。
- (T3) 静歩行時にベースの水平を保ったまま脚長の半分の高さの段差を踏破可能なこと。
- (T4) 軽トラックで運搬可能なサイズ、重量であること。

T1 は F1 に関して、T2, T3 は F1, F2 に関しての具体的な仕様である。T3 の脚長とは、駆動輪を除く Pitch 軸関節のリンク長さとして定義する。T4 は農家で広く活用されている軽トラックに積んで運搬することを想定している。サイズは $2(\text{全長}) \times 1.4(\text{幅}) \times 2(\text{高さ})$ [m] に収まり、最大積載重量の 350 [kg] 以内を達成することを目標とする。T1 に関しては第 3 章で述べた制御則により対処し、第 5 章で検証する。T2 に関しては第 4.5 章、T3 に関しては第 4.6 章でそれぞれ検討する。T4 に関しては第 4.3 章で検討する。

本ロボットでは各脚毎に接地荷重とトラクションを分配し、凹凸路面等の不整地路面で各接地点のトラクションを最適化できる機能の実装を目指している。

本ロボットと近いアプローチはスイス ETH, MOOG 社, Menzi Muck AG 社が共同で行った研究である [19]。これは Walking Excavator と呼ばれる市販のホイールショベル（重量: 940 [kg]）に対して、脚の関節にトルク制御を適用することで、不整地走行に必要な複雑なマニュアル操作を自動化する試みであった。しかし、著者らが知る限り、脚部のみ接地荷重を制御、車輪のみトルクを制御できるロボットはあるが、全身トルク制御可能な油圧ローバーは存在せず、そのような目的で機体を一から設計製作した事例もない。

表 4.1 Overall specifications of *Hydrover-II*

Mass	331 [kg] (Leg: 38 [kg] \times 4, Engine : 48 [kg])
Size	Base High : 1000 [mm] Width : 700 [mm] Depth : 1200 [mm] Leg Length : Upper 400 [mm], Lower 590 [mm] Drive wheel Radius : 240 [mm] Passive wheel Radius : 140 [mm]
DoF	12DoF (3 DoF \times 4)
Actuator	Hydraulic cylinders with proportional valves \times 8 Hydraulic motors with servo valves \times 4
Sensor	Position transducer \times 8, Pressure sensor \times 24, Encoder \times 4, Gyro sensor \times 1, Inclinometer \times 1

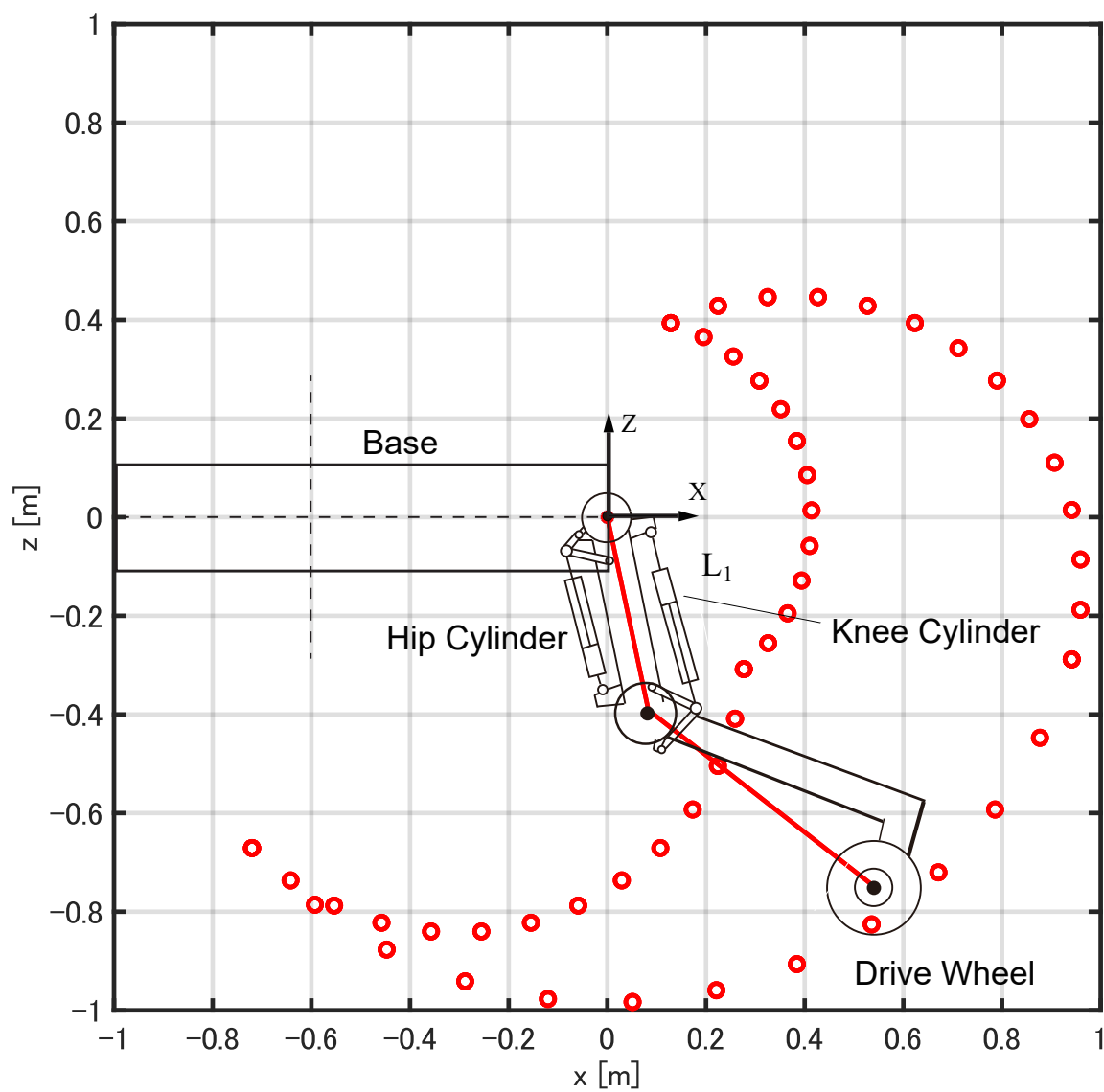


図 4.2 Structure and workspace of the leg (quarter model)

4.3 機構設計

本ロボットは不整地を縦横無尽に移動しつつ重作業することを目的とするため脚車輪一体型機構を選択する。2次試作機 *Hydrover-II* を図 4.1 に、基本スペックを表 4.1 に示す。これは1次試作機の問題点（トルク制御性、脚構造の強度不足等）を解決し、軽量化したモデルである。1次試作機については文献 [37] を参照されたい。本ロボットは4本の脚機構で支持されており、Hip 関節、Knee 関節は油圧シリンダーで駆動する。脚先には油圧モータで駆動するタイヤが接続されている。合計の駆動自由度は12である。（Hip 関節に Yaw 軸も備わっているが、本論文の実験では使われていない。）

Hydrover-II では Knee 関節軸に自由回転する受動輪を取り付け、そこで地面と接地することができるようにした。これは、補助輪も使った多様な走行姿勢を取ることや、接触点を増やして関節への負荷を分散する狙いがある。

本ロボットの脚機構を図 4.2 に示す。油圧シリンダと関節は4節リンク機構によって機械的に接続されている。可動範囲は肩から前後に ± 1 [m]、下方に 1 [m]、上方に 0.5 [m] 程度である。本ロボットは脚機構により可動域を確保することで、図 4.3 のような多様な姿勢を取ることができる。(a) は基本姿勢で、(b) はベース高さが最高の姿勢である。(c)(d) はともに受動輪を床に接触させた状態でホイールベースを最小、最大にとった姿勢である。(e) は軽トラック荷台への乗り上げの様子を示している（足の上げ下げ等のいくつかの動作をラジコン操作に割り当てて、手動で行っている）。段差高さは 0.65 [m] である。

ベース長と脚長はなるべく前後脚の全可動域において干渉することが無いようにしつつ、2 [m] の荷台に Fig1 のように脚を折りたたんで収納できるようなパラメータを決定し、ベース長は 1.2 [m]、脚長は 1 [m] となるように設計した。脚の各リンク長は、上記で決定した脚長、踏破高さの解析と、標準的な設計手順に従って求まるシリンダサイズを考慮し、最小限の数値を求めた。車輪を除く脚長は、図 4.3(c) のように脚を折りたたんで軽トラックの荷台に積むことを想定し、1 [m] 程度に収まるよう設計した。本ロボットは図 4.3(c) の姿勢時、 $1.8(\text{全長}) \times 1.12(\text{幅}) \times 0.56(\text{高さ})$ [m]、また重量も 350 [kg] 以内であるため T4 は達成できている。

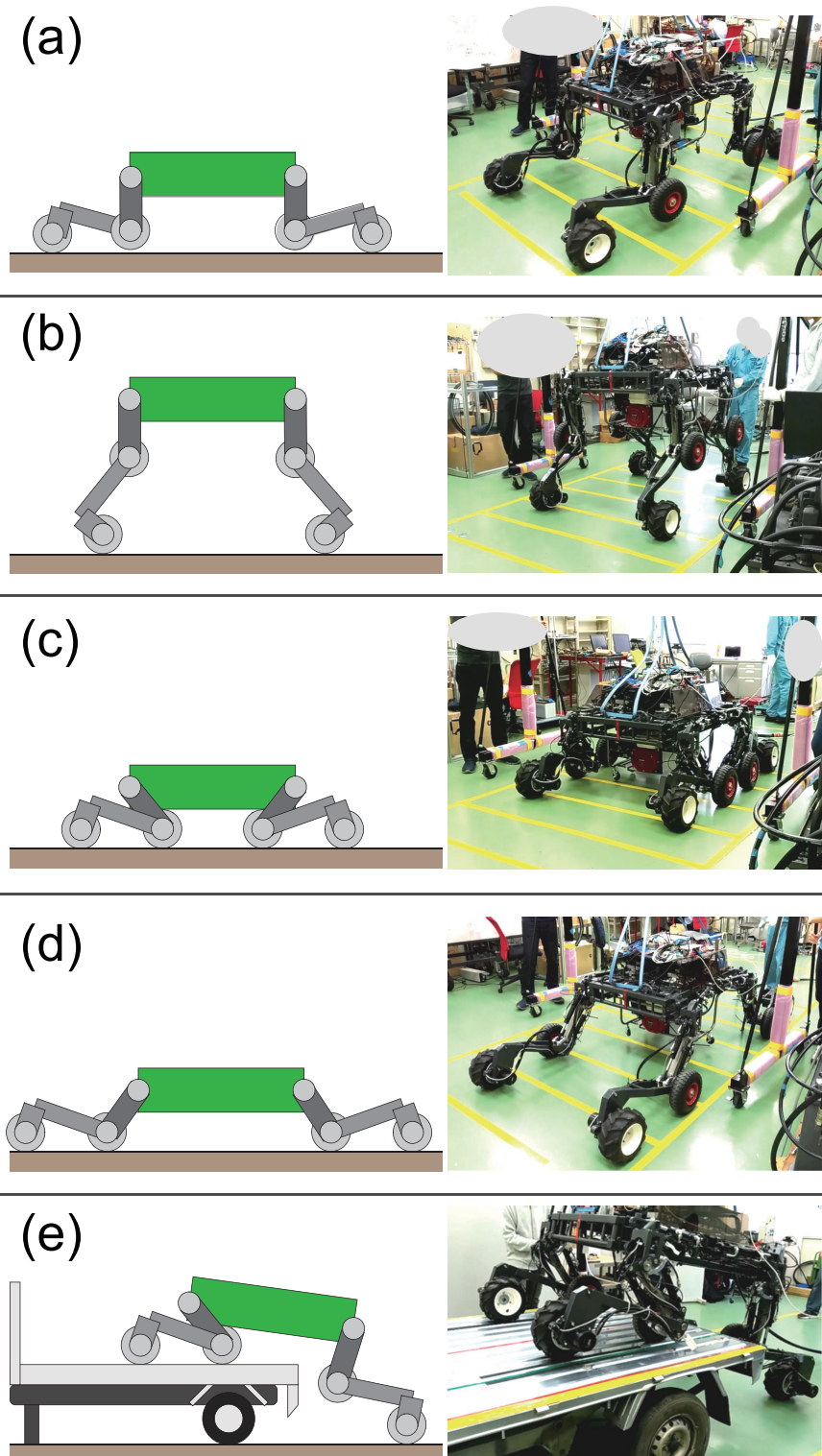


図 4.3 Typical operation modes: (a) Normal, (b) Rise, (c) Crouch and (d) Bow. The bottom (e) shows the robot climbing to a mini truck carrier where the motions are manually commanded by operators

4.4 アクチュエータ選択

アクチュエータのサイズとリンクパラメータはロボットの運動学と基本的な運動パターンを想定して決定した（具体的には第 4.5 章～第 4.6 章で述べる）。また、全体的な寸法バランスを考慮し、シリンダーはピストン径 32 [mm]、ロッド径 18 [mm] の片ロッドシリンダーを選定した。各コンポーネントは 21 [MPa] で運用できるようにしているが、本ロボットの実験では供給圧力は 15 [MPa] で使用する。この場合、シリンダーは押し方向で 12064 [N]、引き方向で 8247 [N] の理論推力を発揮する。一方、車輪の駆動には油圧ギアモータを採用した。

シリンダーを駆動するためのバルブとして、小型で比較的安価な比例弁（最大流量は 10 [L/min]）である WANDFLUH 社の NG3-Mini を選定した。この比例弁の応答性は 10 [Hz] に満たないので、フィードバック制御で期待できる最高の周波数も数 Hz に限られる。バルブ方式の油圧駆動系はバックドライブしないため、力を制御するためにはフィードバック制御は必須であり、アクチュエータの応答性は極めて重要なファクターである。しかし、本ロボットの駆動輪はゴムタイヤであり、空気圧によるコンプライアンス性を持つため、アクチュエータの力制御の帯域を必要以上に上げる必要はないと判断した。以上から、本研究では、低コストで作動油の汚染の影響を受けにくいという長所を重視して、脚関節駆動用アクチュエータについては比例弁を採用した。後に示す実験から、結果として、この判断は間違っていないことがわかった。

一方、車輪に用いている油圧ギアモータは上述の比例弁では良好なトルク制御性を得ることが困難であった。（これについては、第 8 章で詳しく調査している。）そのため、同ロボットの過去の実験 [35] では、速度制御の結果だけが示された。そこで、車輪についてはサーボ比例弁（Parker 社製 D1FP）を使用することで、全身トルク制御を評価することを試みた。サーボ比例弁は応答性が高いが、高価でコンタミネーションにも弱いため、最終的に採用されるとは考えていない。今回はあくまでも評価のための暫定措置である。

上記いずれの場合も市販のバルブを利用しているが、最終的にはバルブは独自開発する計画である。それぞれ、どの程度の帯域が必要かについては、今後、理論的な解析が必要である。

以上のように選定したコンポーネントに基づいて、供給圧力 15 [MPa]、バルブの最大流量 10 [L/min] における理論的な関節仕様を計算した結果を表 4.2 にまとめる。

4.5 静的転倒角

Hydrover-II の静的転倒角を図 4.4 に示す。静的転倒角とは一様な斜面においてロボットが転倒しない最大傾斜角度であり、重心の地面への投影点 (CoG) が支持多角形の 1 辺にある状態が静的転倒角である。また脚配置が変わった場合でも重心位置 (CoM) は変化しないものとし、基準姿勢時の重心位置で解析を行っている。ここでは ψ は傾斜角度、 θ は斜面へのロボットの進入角度である。

破線が基準姿勢での転倒角を示している。参考までに Hip 関節の Yaw 軸を使用し、静的転倒角を最大化する姿勢 (胴体高さは基準姿勢と同じ) をとった場合の転倒角を一点鎖線で示す。Yaw 軸の可動範囲は基準姿勢を 0 度として左右に 45 度ずつである。実線はタイヤと地面の静止摩擦係数 μ に対しての摩擦角 (物体が斜面を滑るときの最小傾斜角度) である。

スリップが発生しないと仮定すると基準姿勢では θ が 0 度の場合 (斜面と正面) に約 70 度の傾斜まで、 θ が 90 度の場合 (斜面と横向き) に約 45 [deg] の傾斜まで転倒しない。また静的転倒角が最大となる姿勢をとった場合は全ての進入角度において約 70 度の傾斜まで転倒しない。よって **T2** については 35 度の傾斜においても、摩擦係数によってはスリップが発生する可能性はあるが、静的転倒角には余裕があることが分かる。また図 4.4 の右図に示すように、20 度の斜面においても、ベース姿勢の水平が保てることを確認した。これらの単純な計算結果はあくまでも目安であり、実際にはシミュレーションや実機を通じて検証される。

表 4.2 Joint specifications at 15 MPa supply pressure or 10 L/min output flow

	Hip	Knee	Wheel
Range of motion [deg]	-50/70	5/135	∞
Max torque [Nm]	627.3	836.0	130
Max speed [deg/s]	398	742	660

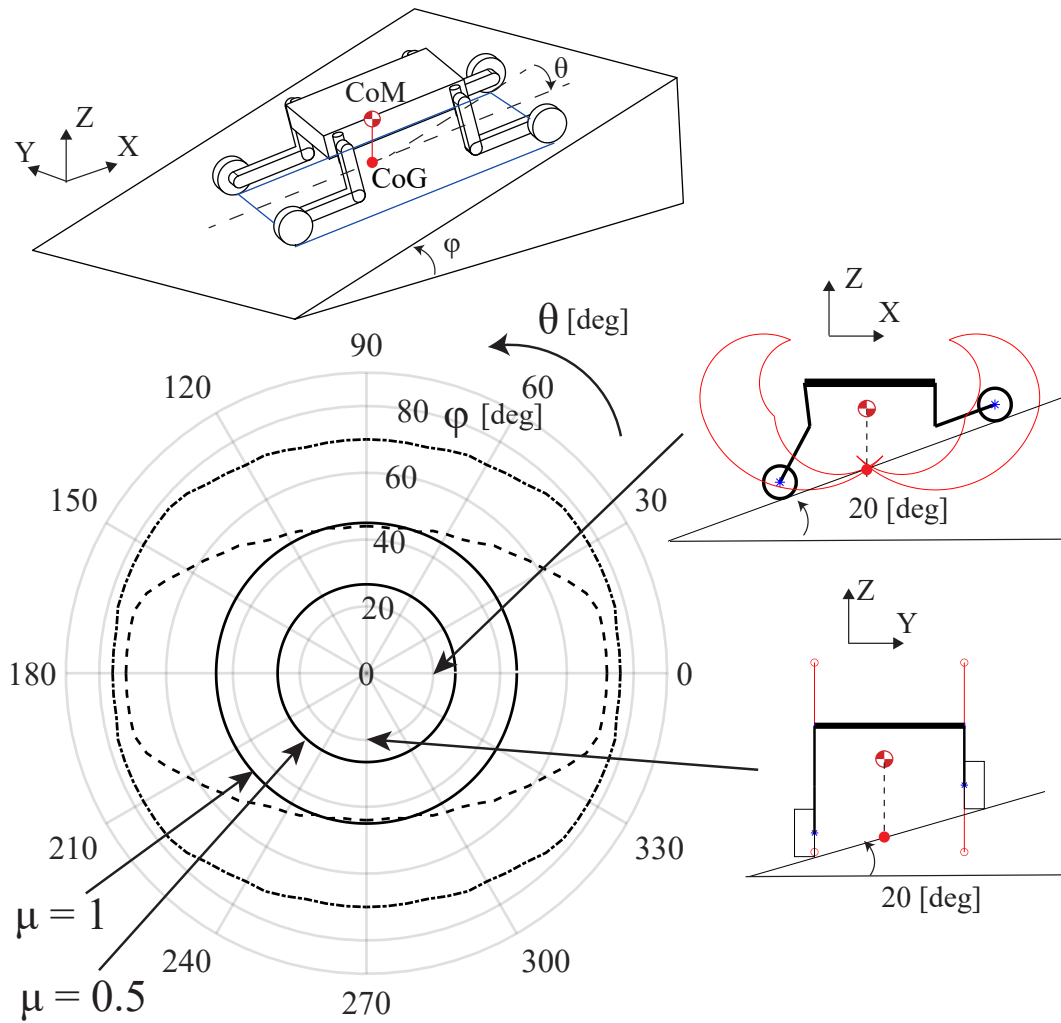


図 4.4 Static tipping angle on a flat slope. where ψ is the slope angle and θ is the angle of entry between the slope and the base. The dashed line is the performance in the reference posture, and the dash-dot line is the maximum stable posture for each slope condition (the torso height is the same as the reference posture). The solid line is the angle of friction between the tire and the ground relative to the coefficient of static friction (μ).

4.6 段差踏破能力

Hydrover-II は脚機構を持つため、歩行動作により車輪機構のみの場合よりも高い踏破性能を持っている。そこで静的な移動方法である静歩行を対象に *Hydrover-II* の踏破性能を検討する。本節ではロボットがベース姿勢を水平に保ちながら踏破できる高さを幾何学的、力学的に検討する。ロボットが段差踏破を行う際の動作イメージ図と脚姿勢毎の発揮可能な力を図 4.5 に示す。

図 4.5 上段は段差踏破する際の代表的な姿勢と、その際の CoG と支持多角形を示している。段差踏破は低速で行い、動的な運動要素は無視できるとする。動作手順はまず、前脚を順番に段差の上に置き (1 の姿勢)、前輪 2 脚が段差に登ったのち、駆動輪を使って前進する。次に後脚の踏破は補助輪を使って 4 点支持し (2 の姿勢)、最後に前輪のタイヤを使って後脚駆動輪が接地できる位置まで前進する (3 の姿勢)。

図 4.5 下段は油圧シリンダで駆動する Hip, Knee 関節を対象とし、黒点で囲った可動域内で XZ 軸各方向に力を発揮できる範囲 (21 [MPa] で運用時) を矢印の長さで示している。動作イメージ図の姿勢との対応をアルファベットで示している。ロボットは前後対称であるため後輪 C の姿勢は前後反転してグラフに描画している。グラフ右下の矢印は XZ 軸各方向のスケールバーである。解析では、脚は無質量脚とし脚先の発揮力に必要な関節トルクを、ヤコビ行列を使って求めている。求めた関節トルクから 4 節リンクのモーメントアームや片ロードシリンダの押し引き方向を考慮して、必要なシリンダ推力を算出している。

静歩行するためには約 330 [kg] (3237 [N]) の自重を最低限 3 脚で自重を支える必要があり、3 等分するとして一脚あたり約 1100 [N] の鉛直床反力を発生する必要がある。(1 の姿勢では重心から各接地位置まで水平距離は前脚が後脚 2 脚のほぼ 2 倍であるため Pitch 軸のモーメントも釣り合う計算である。) 踏破時のいずれの姿勢においても自重を支える力を発揮可能であることがわかる。また 2 の姿勢では後脚の補助輪を使って自重を支えている。この姿勢は特異点となり機構のみで荷重を支えられるため力学的な計算は行っていない。

T3 の設計指標では脚の半分となる 0.495 [m] を超えることを目指しており、この時の高さは 0.56 [m] であるため目標を達成出来ていると判断できる。

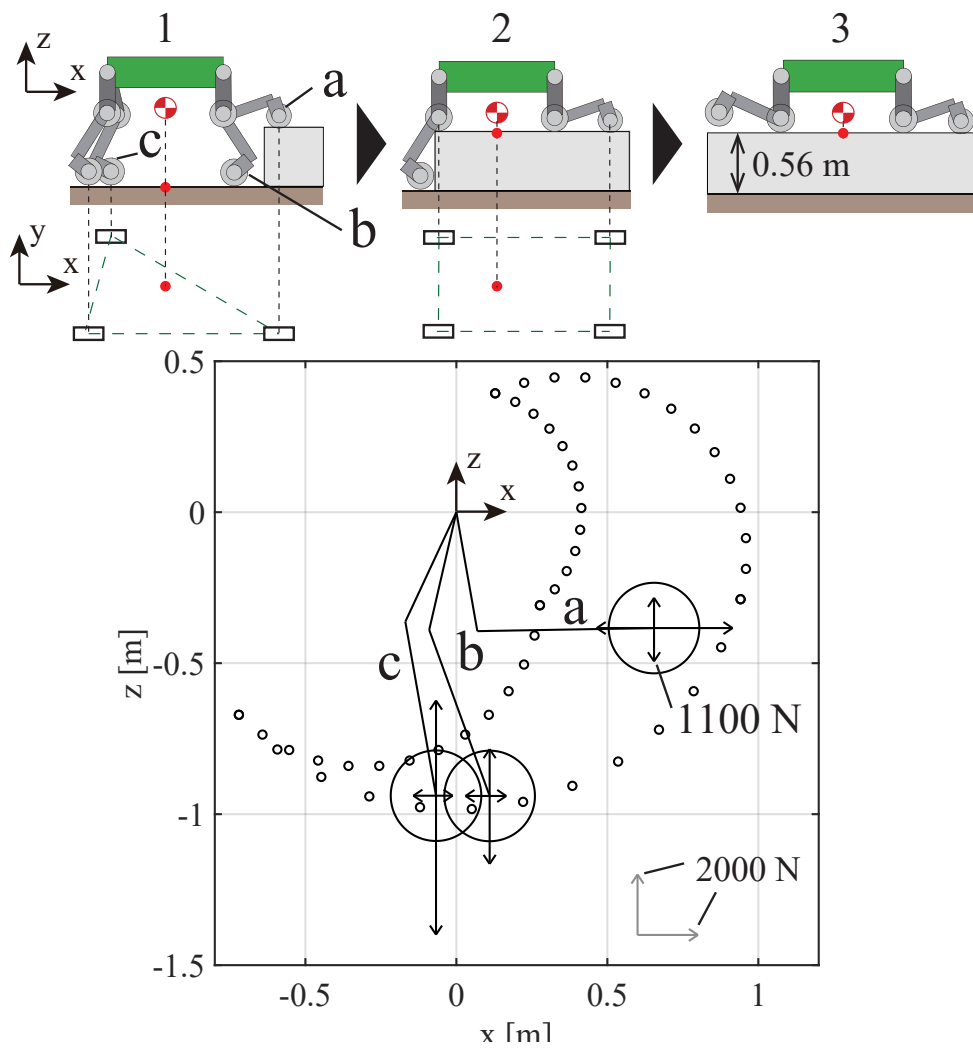


図 4.5 The animation shows the steps to climb a step. The graph shows the force that can be exerted on the XZ axis in the animated leg posture.

4.7 油圧パワーユニット

試作したロボットのシステムは、上で述べたロボット機構とセンサに加えて、油圧パワーユニット (HPU)、実時間コントローラ、そのホスト PC から構成されている。屋外走行においてはエンジン駆動 HPU を用いる。本論文の屋内実験では外部据え置き一般的な産業用 HPU を 2 台利用している。これらは脚、車輪用に 1 台ずつ用意し、供給圧力 15 [MPa] 時、最大流量約 10 [LPM] 発揮可能である。

油圧回路は標準的な開回路であり、全関節分のバルブを一つのマニホールドに集約し、そこからホースで各アクチュエータに HPU で生成した流体動力を伝えている。また、各アクチュエータの両ポートの圧力、HPU の供給圧とタンク圧を圧力センサで取得している。

4.8 制御システム

実時間コントローラは機体上部中央にマウントされており、シングルタイマータスクで全ての計算を行う。ベースの Pitch と Roll の姿勢を測定するためのジャイロセンサと傾斜計も同じ場所に取り付けており、相補フィルターを使って絶対姿勢を推定している。シリンダーには位置トランスデューサが内蔵されており、運動学計算から関節角度を求めている。走行モータの回転速度は簡易的な光学式エンコーダのパルス変化量から推定している。実時間コントローラには外部ホスト PC が Ethernet ケーブルで接続されており、グラフィカルユーザーインターフェース (GUI) とデータログが提供されている。本論文で示す実験における制御周期は 1 [ms]、データ取得サンプリング周期は 10 [ms] である。

第 5 章

Hydrover-II を用いたシミュレーション及び実機実験

5.1 はじめに

本章では，開発したハードウェアを検証するためのシミュレーションと，いくつかの初期実験を行う．5.2 章では，ロボットモデルならびに制御アルゴリズムによって得られる理想的な挙動を予め把握するために，動力学シミュレーションを行った．5.3 章では，実機を用いた基礎実験として，シーソーを使った路面揺動実験と片側スロープ踏破実験（スロープ傾斜角 20 [deg]，高さ 300 [mm]）の基礎的な実験結果を示す．

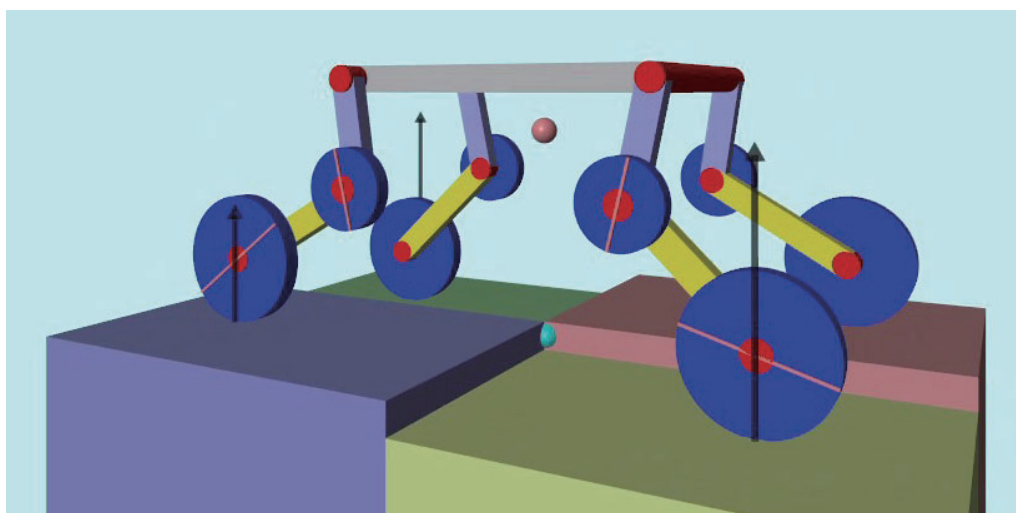


図 5.1 3D simulator

5.2 シミュレーション解析

実機のスペックを考慮し、シミュレーションでは動的に形状が変化する路面におけるバランス・姿勢維持制御の結果を示す。シミュレータは MATLAB SimScape Multibody [38] を用いて構築した。外観を図 5.1 に示す。ロボットの車輪と地面の間には接触判定を設けている。現時点ではプラントモデルには油圧要素を含めておらず、各関節のトルクを直接操作している。

動的に形状が変化する路面におけるバランス・姿勢維持制御の結果を示す。ここでは図 5.1 のように、駆動輪が接地している 4 つの色分けされたタイルが上下に動くようプログラムされている。このときロボットは重心とベース姿勢を基準値に安定化しようとする。それが成功するためには、駆動輪とタイルとが良好に密着保持される必要がある。第 3.3 章に述べた各手続きにおける設定は以下の通りである：

- 手続き (P2) における目標 $GAF\bar{f}_p$ は、重心目標値に対する単純な PD フィードバック制御で与えている。XYZ 各方向の比例ゲインは順に 3×10^4 , 9×10^3 , 1×10^4 [N/m] とし、微分ゲインは順に 9×10^3 , 5×10^3 , 2×10^3 [Ns/m] である。
- 手続き (P3) における目標 $CoP\bar{r}_p$ は、それが支持領域 (4 点からなる多角形) を越えないように制限を設けている。
- 手続き (P4) のベース姿勢制御のための垂直発揮力の調整は PD フィードバック制御で与えている (Pitch, Roll ともに比例ゲインは 300 [N/deg] とし、微分ゲインは 30 [Ns/m] とした)。
- 手続き (P5) において、車輪と地面との接触点をアクティブな接触点として扱い ($\alpha = 4$)、駆動輪を除く関節を能動関節とする。
- 手続き (P7) における減衰係数は脚関節に 3 [Nms/deg] を設定している。

シミュレーションの様子を図 5.2 に示す。このシミュレーションでは Pitch 軸のみ制御を行い、Yaw 軸は固定している。ここで 4 つのタイルは振幅 0.05 [m]、周期 2 [s] の COS 波で上下させている。最初の 2 秒間は前後、その後の 2 秒間は左右、次に対角に 2 秒間、最後に 90 度の位相差を付けて同時に上下させているが、動くタイルに対して GAF が常に正であることから、車輪が密着していることがわかる。

各状態の時間推移を示したグラフを図 5.3 に示す。グラフは上から順に、重心の前後位置、左右位置、Base の姿勢角、接触力の目標値 (Z 方向)、各足の上下動の変位を示している。上下する路面の動きに対して、目標 CoP を前後または左右にシフトさせ、荷重を最適に分配することにより、結果的に脚が上下に協調的に動き、姿勢変動

が抑えられている様子が見える。

今回は理想的なトルク制御を仮定したシミュレーションであるが、実際の油圧システムには大きな遅れが存在するため、上記のフィードバックゲインでは不安定になることが予想される。油圧モデルを含めた詳細な検討は今後の課題である。

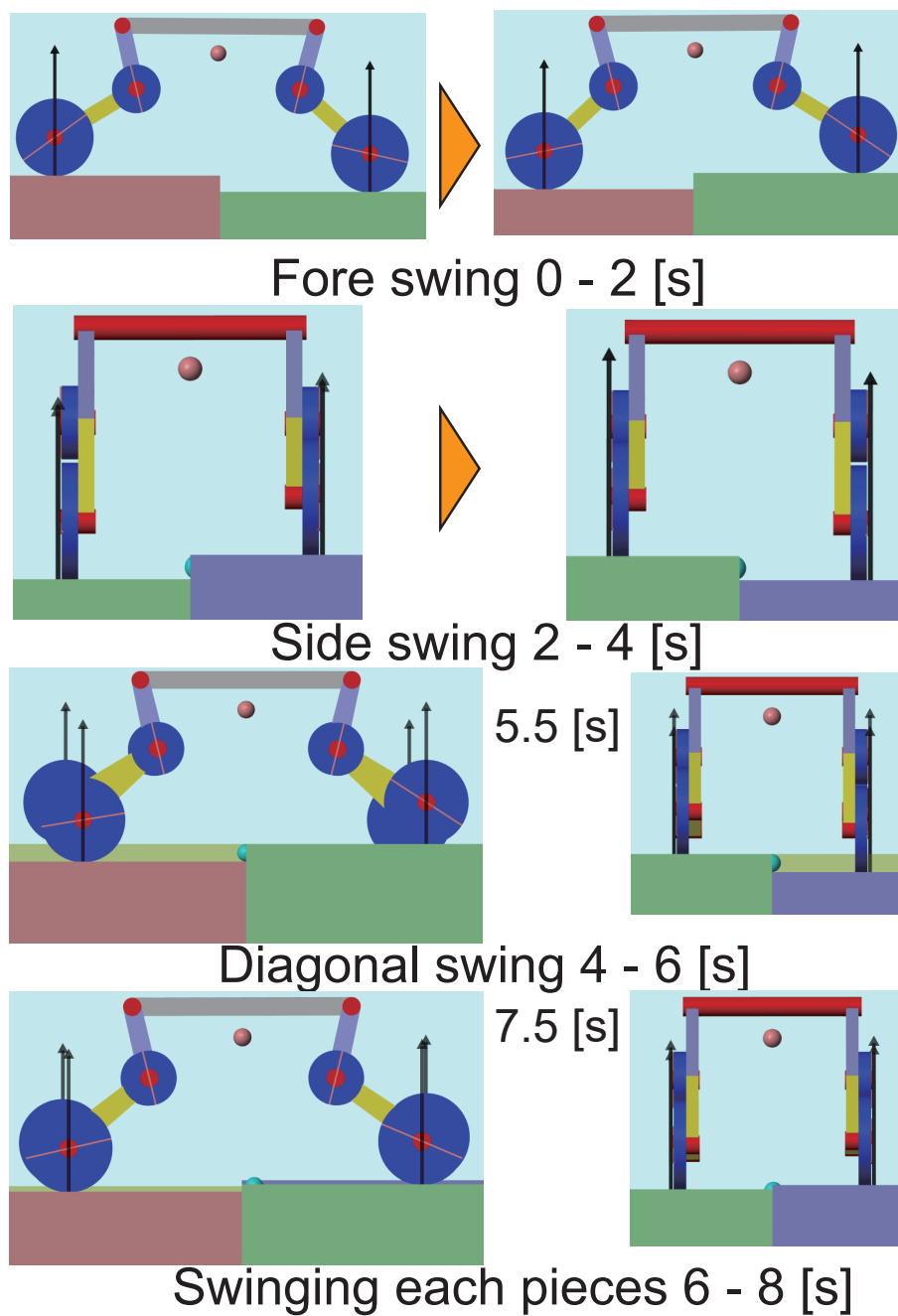


図 5.2 Compliant posture maintenance on four vertically-swinging tiles. The front and back tiles move alternately for 0 – 2 [s], then the left and right tiles move alternately for 2 – 4 [s]. Then, the four tiles move diagonally for 4 – 6 [s], Finally, all the tiles moves reciprocally with 90 [deg] phase shift for 6 – 8 [s].

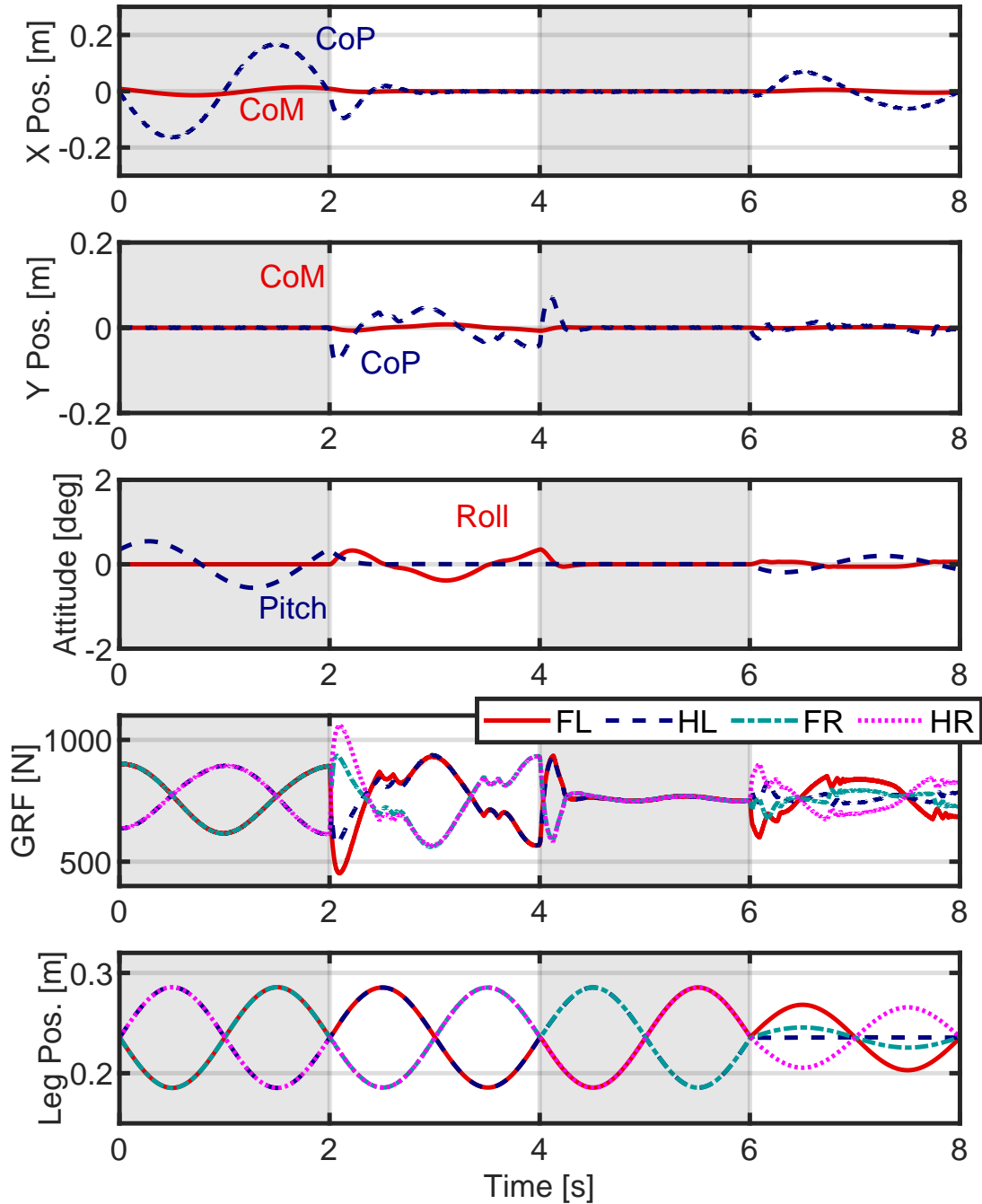


図 5.3 Time history of the robot states during the compliant posture maintenance on four vertically-swinging surfaces. Index 'FL', 'HL', 'FR' and 'HR' represents 'Fore Left', 'Hind Left', 'Fore Right' and 'Hind Right' respectively.

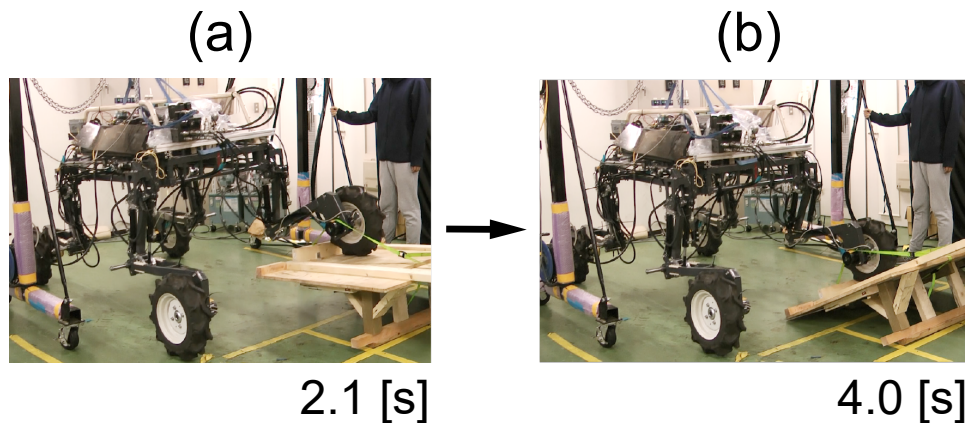


図 5.4 Compliant posture maintenance on vertically swinging seesaw:When the seesaw is moved up(a) and down(b)

5.3 実機実験

本節では実機を用いた基礎実験として、シーソーを使った路面揺動実験と片側スロープ踏破実験（スロープ傾斜角 20 [deg], 高さ 300 [mm]）の基礎的な実験結果を示す。第 3.3 章に述べた各手続きにおける設定は以下の通りである：

- 手続き (P2) における X 軸の目標重心位置に使う PI 制御のフィードバックゲインは P ゲイン 1000 [N/m], I ゲイン 100 とし, 目標重心速度制御に使う PI 制御のフィードバックゲインは P ゲイン 1000 [N/m], I ゲイン 700 とする. Z 軸の重心位置制御で使う PD 制御のフィードバックゲインは, P ゲイン 2000 [N/m], D ゲイン 100 [Ns/m] とする.
- 手続き (P4) のベース姿勢制御の PID ゲインは Roll,Pitch 共にそれぞれ 15, 0.5, 1 とした. ホイールベース制御の PD 制御のフィードバックゲインは, それぞれ 2000, 50 とした.
- 手続き (P5) において, 車輪と地面との接触点をアクティブな接触点として扱い ($\alpha = 4$), 全 Pitch 軸関節を能動関節とする.

脚関節と油圧モータの供給圧力はそれぞれ 15 [MPa], 14 [MPa] としている. また路面揺動実験時にはジャイロセンサを取り付けていなかったため, 胴体姿勢角は傾斜計のみから求めている. 片側スロープ踏破実験は傾斜計とジャイロセンサから胴体姿勢角を推定している.

5.3.1 路面揺動実験

T1 の動的な姿勢安定性を確認するために、シーソーを用いた路面揺動実験を行った。ロボットの左前脚 (FL) を、垂直方向に 0.24 [m]、水平方向に 0.18 [m] 変動する木製の大きなシーソーの上に置き、シーソーを上下に動かした。実験の様子を図 5.4 に示す。(a)(b) はそれぞれシーソーにより車輪を持ち上げた時、降ろした時の様子ある。シーソーの上下動は計 6 回行い、最初の 2 回は左前脚 (FL) を、垂直方向に 0.2 [m]、周波数は 0.3 [Hz] で動作させ、残りの 4 回は垂直方向に 0.24 [m]、周波数は 0.5–0.6 [Hz] で動作させた。手続き (P2) では X 軸は重心位置制御 (PI 制御) のみの指令とした。目標重心位置は 0 [m]、目標 CoM 高さは 0.6 [m]、目標胴体姿勢は 0 [deg] に設定した。

主な状態の時系列データを図 5.5 に示す。上から重心位置、ベース姿勢、両前脚タイヤ中心軸の位置差分、前脚の目標接触力、左前脚 (FL) の関節トルクのグラフを示している。目標値は *.d と表記している。1 秒からシーソーを動かし、1 周期ごとにグラフ背景の色を変更している。

上下するシーソーに対して目標接触力が常に地面を押し付ける方向に出ていることがわかる。また、圧力センサから推定した関節トルクは概ね目標値に追従している。したがって、実床反力は直接測定していないが、目標接触力の逆向きの力が正しく発生していると推察される。重心高さ Z は動作開始時に 0.06 [m] ほど追従誤差が発生しているが、シーソーの動作によって追従誤差が悪化することはなかった。Roll 軸は最大 6 [deg]、Pitch 軸は最大 4 [deg] 程度の誤差であり目標値に追従しており、適切な接触力分配によって姿勢変動が抑えられている。またシーソー動作時に脚関節のトルクが振動しているが、これはシリンダー内部の摩擦によるもので、シリンダーのロッドに振動が伝わっているわけではない。シーソーは人力で動作させているが、これを今後自動化することにより、様々な振幅・周波数に対するサスペンション性能を把握することを検討中である。

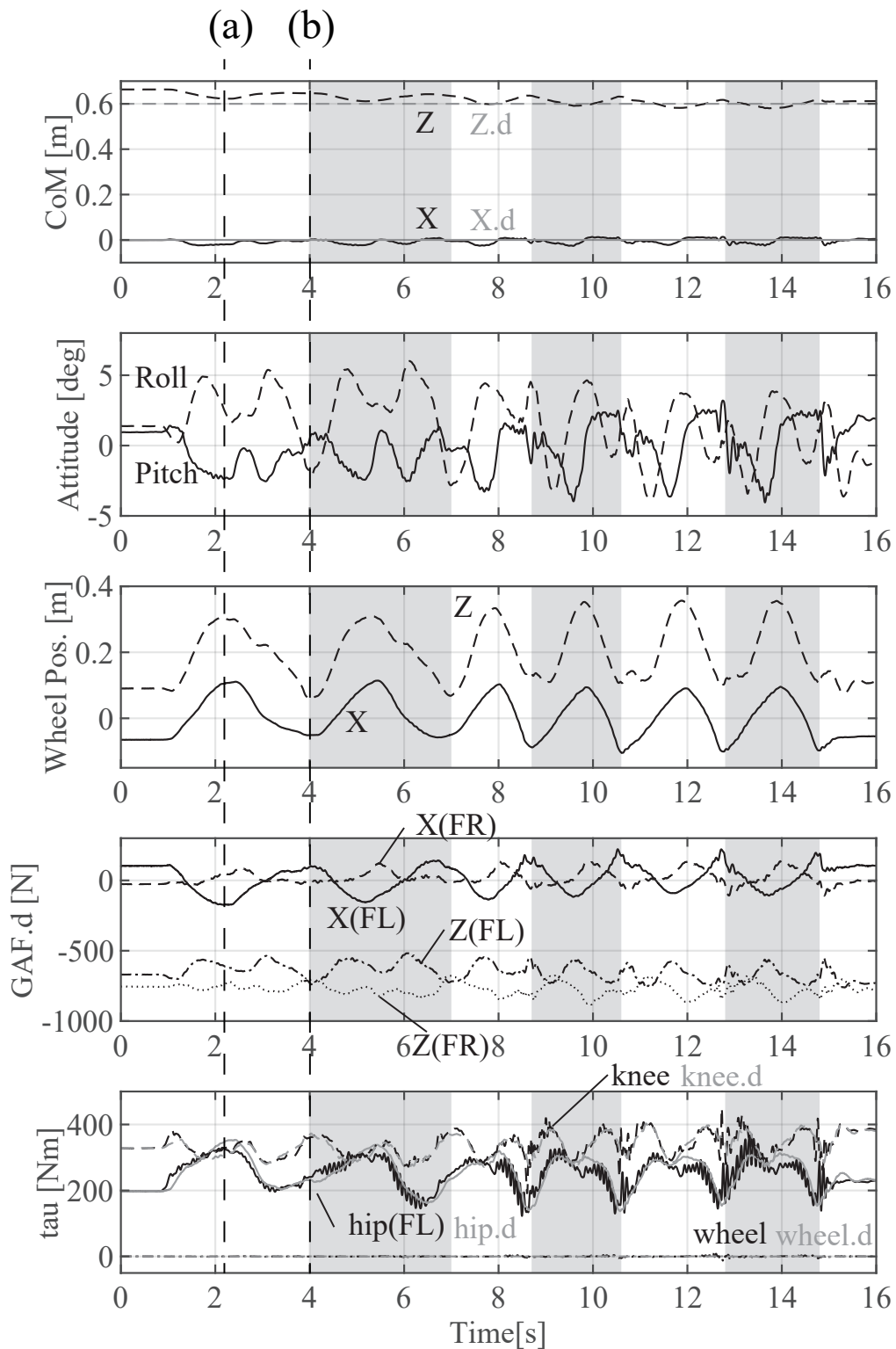


図 5.5 Time history of the robot states during the compliant posture maintenance on vertically-swinging surfaces. Index 'FL', 'HL', 'FR' and 'HL' represents 'Fore Left', 'Hind Left', 'Fore Right' and 'Hind Right' respectively

5.3.2 片側スロープ踏破実験

開発したロボットの不整地への移動能力を示すため、**図 5.6** に示す台形状のスロープ（傾斜角 20 度，最大高さ 300 [mm]）を用いたスロープ踏破実験を行った．手続き (**P2**) では X 軸は重心速度制御 (PI 制御) のみの指令とした．ただし，重心速度の推定精度が低いため，本実験では車輪の平均速度をフィードバック値としている．現在は関節角度変位から重心速度を推定しているが，今後は IMU センサを組み合わせたセンサフュージョンによって重心速度を推定する予定である．

ロボットの目標速度は台形速度曲線を与え前進は 0.3 [m/s]，後進は -0.3 [m/s]，等加速運動時は ± 0.15 [m/s²] を与えている．目標 CoM 高さは 0.6 [m]，目標胴体姿勢は 0 度に設定した．本実験では接触ヤコビ行列の導出に必要な車輪の接地角度 η は，斜面踏破のタイミングにオペレータがマニュアル操作で与えた．実際のスロープ走破時，接地角度 η は 0 度から 20 度にジャンプする．しかし接地点の変化に伴って目標トルクが急激に変化すると，ロボットの挙動が振動的になることがあるため，斜度変更は 0 度から 20 度に 1 秒かけて滑らかに変化させている．

実験の様子を**図 5.7** に示す．ロボットは 1–12.2 秒まで前進し右前脚 (FR) でスロープを登り，14.9–25.9 秒では後進しスロープを下っている．(a)(d) は平地走行時（前進，後進），(b)(c) はスロープ踏破時（上り，下り）である．

主な状態の時系列データを**図 5.8** に示す．上から水平速度，ベース姿勢，右前脚 (FR) の関節角度，前脚の目標接触力，右前脚の関節トルクのグラフを示している．図の灰色背景はスロープの斜度情報を与えた時間である．姿勢誤差は Roll 軸が最大 6.2 度，Pitch 軸が最大 5.8 度程度である．

ロボット動作時 (2 秒，16 秒周辺) に目標速度への追従が出来ていない．この理由は油圧ギアモータは摩擦が大きく，タイヤ出力軸のトルクと圧力センサから推定したト

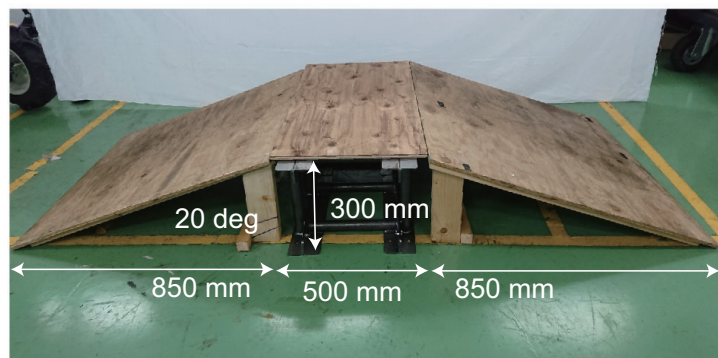


図 5.6 Dimensions of a simple slope used for experiments.

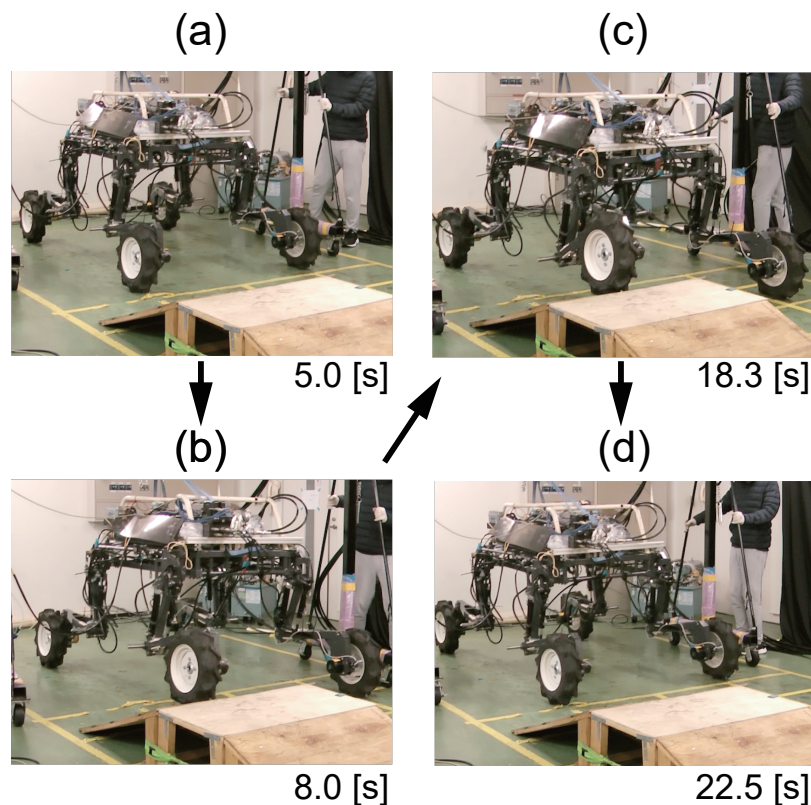


図 5.7 Experiment of slope climbing test;(a)Moving forward on level ground;(b)climbing up the slope;(c)climbing down the slope;(d)Moving backward on level ground

ルクに一定の誤差があるためである．解決方法として外乱オブザーバ等を実装し，制御入力によって積極的に摩擦の影響を相殺する方法を検討している．

図 5.7(a) では速度・姿勢誤差はほぼないが，スロープ踏破時の図 5.7(b)(c) では最大 0.2 [m/s] の速度誤差， 5 度の姿勢誤差が発生している．この問題は，手続き (P7) については斜面情報を考慮したトルク分配が出来ているものの，手続き (P2) や (P6) で斜面情報を考慮して目標 GAF や各脚の接触力を決定していないことが原因と考える．またスロープを下り終わるタイミング (21 秒周辺) では速度が追従しているが，その後斜面から平地に接地点が変わった図 5.7(d) では最大 0.15 [m/s] の速度誤差が発生している．これは 21 秒周辺で重心速度制御 (PI 制御) の I 項の影響により，前脚 X 軸の目標接触力が最大 140 [N] と大きな値となり，接地点が平地に変わった際に加速してしまったことが影響している．この問題も斜面情報を考慮していないため，斜面踏破時に余計な目標接触力を発生させていることが原因と考える．これらの解決方法として，斜面情報の適切なフィルタリングに加え，二次計画法 (QP) を用いた接触レンチの最適化をする手法を検討している [39]．

本節の路面揺動実験，片側スロープ踏破実験の両方で各関節のトルク制御が出来ていることを確認した．またトルク制御により，路面形状に応じて車輪を適切に密着させつつ，車輛のベース姿勢を安定化（**T1**）できることを確認した．本制御方法においては，関節角度指令は与えないためシーソーに乗せた脚や，スロープに乗り上げた脚の関節が大きく動いている．これは変化する環境負荷に応じて全身が柔らかく協調して動いていることを示している．

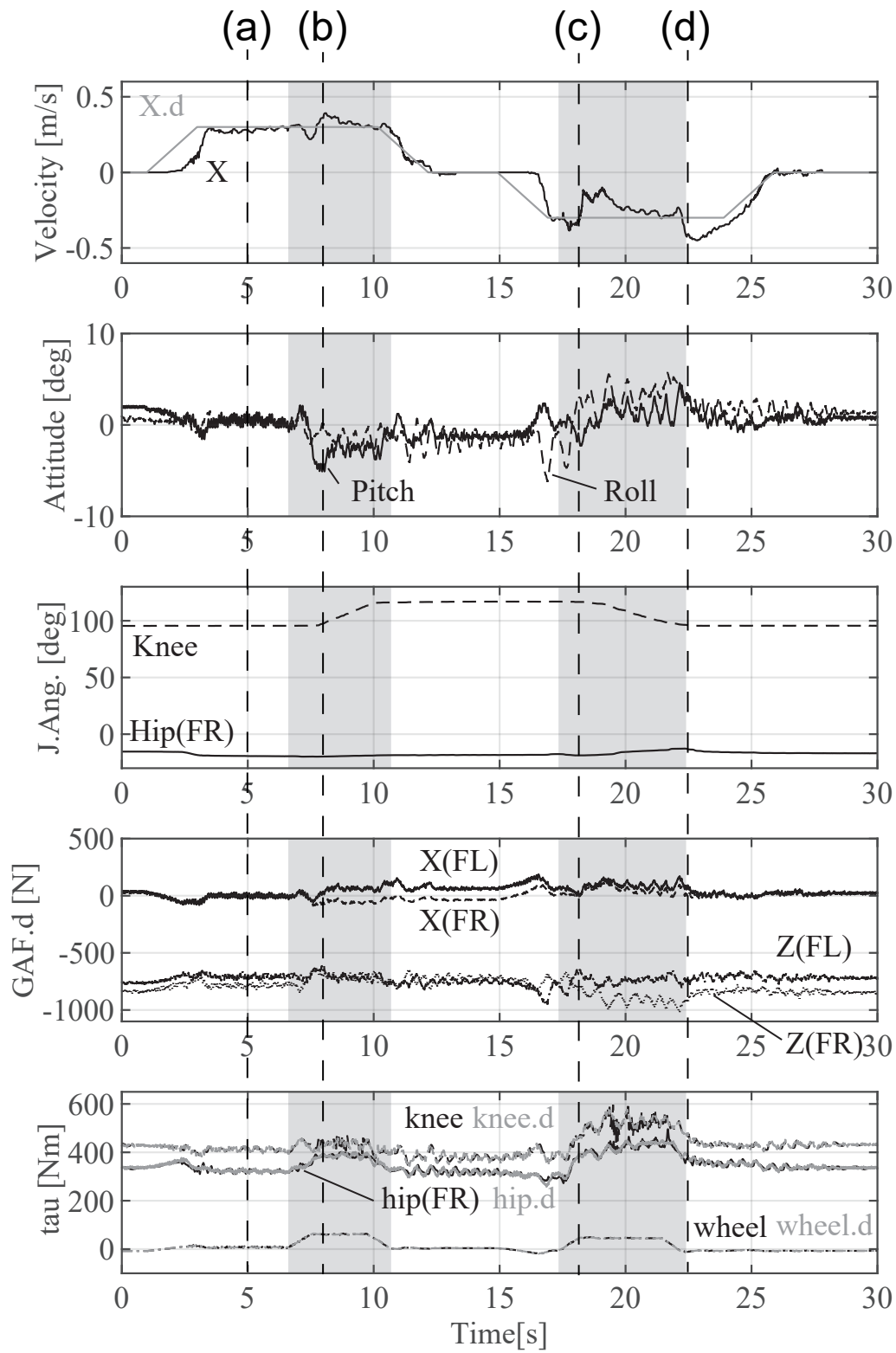


図 5.8 Time history of the states during the slope climbing test on experiment.

第 6 章

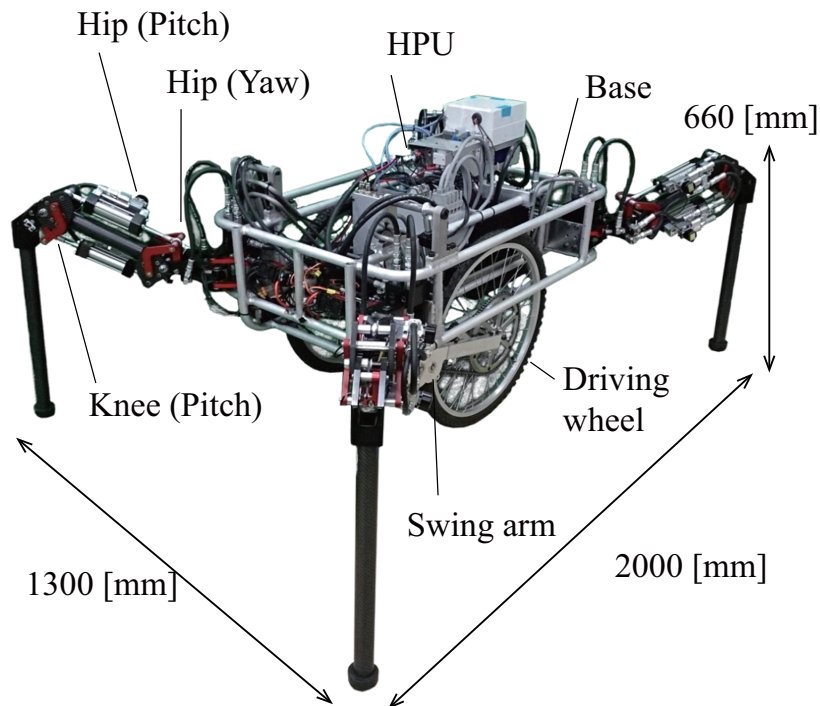
不整地作業用脚車輪型プラットフォーム *CRAWHEL* の開発

6.1 はじめに

この章では、開発した *CRAWHEL* の機構設計、制御システムについて説明する。2 章で述べた設計方針から、6.2 章では脚車輪分離型機構の詳細な設計について述べる。6.3 章ではロボットに搭載している油圧パワーユニット、6.4 章では制御システムについて述べる。

6.2 機構設計

本ロボットは定点での重作業を目的とするため、脚車輪分離型機構を採用した。ロボットの外観を図 6.1 に示す。ロボットの主な仕様を表 6.1 に示す。ロボットの重量は 145 [kg] であり、油圧シリンダーで駆動される 4 本の脚と 2 つの車輪を持ち上げるスイングアーム、電動モータで駆動される 2 つの車輪の合計 16 自由度を有している。各シリンダに力センサ（ロードセル）、各関節軸にポテンショメータ、ベースの姿勢を検出するための慣性計測ユニット（IMU）を備えている。本ロボットは実験を容易にするため比較的小型であるが、油圧駆動のためサイズをスケールアップすることも比較的容易である。*CRAWHEL* では、建設機械に広く採用されている低コストの工業用油圧部品とは対照的に、高性能の油圧サーボアクチュエータを採用している。また力センサについては、耐久性の面から今後ロードセルから圧力センサによる推定に変更する予定である。

図 6.1 *CRAWHEL*表 6.1 Main specifications of *CRAWHEL*

Weight	145 [kg]
Size	Height : 660 [mm] Width : 1300 [mm] Length : 2000 [mm]
Total DoF	16(Leg 3 × 4, Wheel 2, Swing arm 2)
Joint torque(at 10 [MPa]) /Range of motion	Hip(Yaw) : 180–235 [Nm]/120 [deg] Hip(Pitch) : 225–255 [Nm]/ 120 [deg] Knee(Pitch) : 225–255 [Nm]/ 120 [deg] Swing arm : 605– 695 [Nm]/ 50 [deg] Wheel : 201.6 [Nm]/ ∞ [deg]
Actuator	Single-rod hydraulic cylinder Electric motor
Power supply	Battery powered hydraulic pump (Gear pump w/ 4.8 [kW] motor) Nominal pressure : 7–8 [MPa]
sensors	IMU/Potentiometer/Load cell
Payload (Leg mode)	334 [kg] (theoretical value)

6.2.1 脚機構設計

脚部機構の構造を 図 6.2(a)(b) に示す。脚部の関節は、基部を起点に Yaw-Pitch-Pitch 軸で構成されている。各関節は 4 節リンク機構を用いて油圧シリンダーの直動

運動を回転運動に変換している。4 節リンク機構はどの姿勢でもなるべく高いモーメントアームを保持できるように最適化している（平均値 48 [mm]）。コンセプトにある動的なバランスを実現するために、脚のフレームは炭素繊維強化プラスチック（CFRP）とジュラルミンで構成されている。1 脚の重量は約 6 [kg] で、全質量のわずか 4.5 % である。脚部のリンク長は、大腿部が 330 [mm]、下肢部が 660 [mm] となっている。パラメータは、重力方向（ベース姿勢が水平の場合）に自重の半分を発揮でき、必要な関節トルクを最小限に抑えることができる広い地面接触領域を持つように、包括的に計算および最適化されている。

図 6.3 は、供給圧力が 21 [MPa] の場合に、可動域で水平方向および垂直方向に加えることができる力を示している。胴体が水平のときにほとんどの負荷を支える Pitch 軸を対象に解析した。青色に近づくにつれて利用可能な力の最大値が高くなり、第 2 章に記載されている必要な仕様を満たしている。

機敏な脚を備えたプラットフォームの利点は、その欠点と密接に関連する。プラットフォームは脚が細いため、つま先の地面との接触面積が小さく、表面圧力が高くなり、軟弱な地面への対応が困難になる。また、がれきなどのくぼみに深く突き刺さると、抜けにくい場合がある。最悪の場合、脚が折れる可能性がある。このような状況を回避するためには、事前に接地点を選択する必要がある。ただし、地面が崩壊した場所に深い穴がないという保証はない。考えられる対策は、特定のサイズの軽量で硬くて平らな足を取り付けることである。この問題が現在の本研究の課題である。

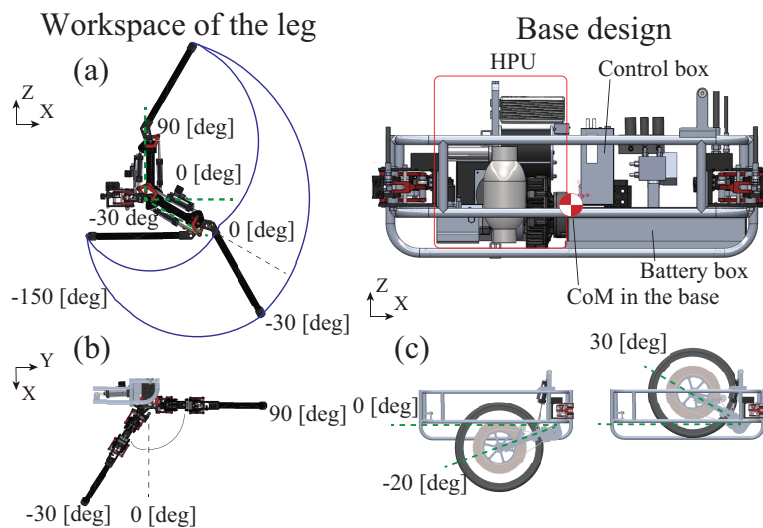


図 6.2 Workspace of the leg and structure of chassis and swing arm.

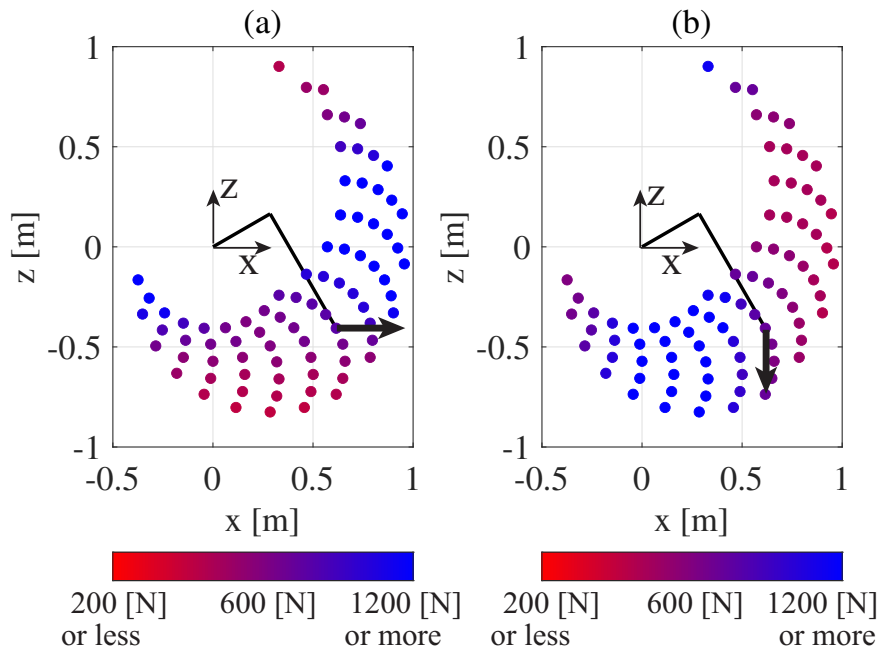


図 6.3 Available (a) Horizontal and (b) vertical force of one leg within the workspace at 21 MPa supply pressure.(The origin is the position of the Hip joint).

6.2.2 車輪機構設計

ホイールには直径 0.6 [m] の自転車車輪を採用している．アクチュエータには高出力ブラシレスモータを採用し，歯車とスプロケットによって 30 : 1 に減速している．理論的には，時速 33 [km] で走行できる．各車輪の地面の最大駆動力は，車輪あたり 672 [N] である．車輪のスリップを考慮しない場合，両方の車輪で 71 度の丘を登ることができる．

ホイールは，油圧サーボアクチュエータ（脚で使用されているのと同じトルク制御アクチュエータ）に接続されたスイングアーム（図 6.2(c) に表示）によって駆動している．車輪は（図 6.2 (c)）のように，スイングアームによって胴体に完全に収納された状態から，車輪の半径分を底面から出す状態まで動かすことができる．スイングアームは平均 1500 [N] の力を発揮可能で，ロボットが 6 点で接地されている場合，脚のみの場合と比較して可搬重量を 2 倍にすることができる．

6.3 油圧パワーユニット

ロボットは、脚の油圧サーボアクチュエータを駆動するための HPU が装備されている。HPU は、コンパクトで軽量、かつ静かであると同時に、安定性と高効率を提供する必要がある。HPU には 2 つの機能がある。1 つ目は軽量ピストン式加圧リザーバーである。その結果、ロボットの姿勢変化に依存しない安定した吸気を実現している。二つ目は、電気モータによるポンプ制御である。アクチュエータには、市販のノズルフラップ式サーボバルブが装備されている。サーボバルブは、構造上バルブを閉じていても漏れが発生するため、高圧で使用するとエネルギー損失が大きくなる。ギアポンプは電気モータで駆動しており、負荷に応じて圧力を自動的に調整できるため、効率が向上し同時に静粛性が確保される。

HPU の最大供給圧力は 21 [MPa]、最大流量は 17 [L/min] である。また、HPU には、最大出力動作状態で 20 分間連続動作するのに必要な容量のリチウム電池を搭載することができる。

6.4 制御システム

第 3 章で説明した制御モジュール **C1**–**C3** は、*CRAWHEL* のリアルタイム制御システムに実装されている。この節では、概要を説明する。図 6.4 に示すように、1 つは上位レベルのコントローラ (PC1) 用、もう 1 つは中間レベルのコントローラ (PC2) 用の 2 つの PC と、アクチュエータを駆動する複数のサーボコントローラで構成される。これらはイーサネットを介して UDP 通信により接続されている。

PC1 サーバーは **C1** および **C2** として、ロボットの現在の状態とコマンド値に基づいて、目標関節トルク (力制御用) と目標関節角度 (位置制御用) を計算して保存している実時間制御システムを搭載した PC2 と通信する。トルクサーボコントローラ **C3** は、16 ビットマイクロコントローラにより実装されている。最大 10 [kHz] のタイマタスクでセンサ値の取得とアクチュエータの制御を実行する。これらは、関節トルク制御を実現するための重要な要素である。

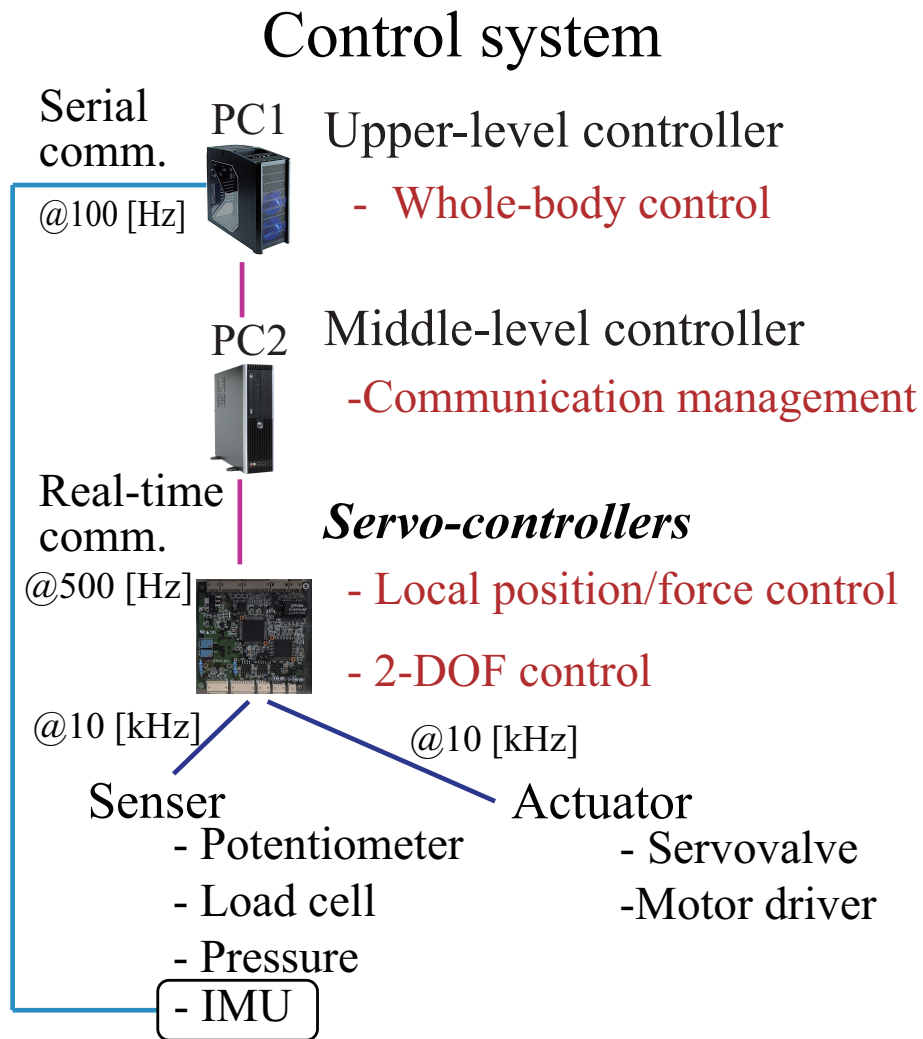


図 6.4 Overview of the control system

第 7 章

CRAWHEL を用いた基礎実験

7.1 はじめに

本章では、開発したハードウェアを検証するためのいくつかの初期実験を行う。これらは、(a) 矢状面揺動運動実験、(b) 足場崩落実験、および (c) 胴体位置追従実験である。ホイールのトルク制御は開発中であるため、すべての実験はパッシブホイール条件下で実施した。外部 HPU からの供給圧力は 10 [MPa] に設定した。CoM 位置とベース位置のフィードバックゲインは、実験に応じて手動で設定した。

7.2 矢状面揺動運動実験

揺動動作の振幅と周波数は、それぞれ 0.15 [m] と 1 [Hz] に設定し、目標 CoM 高さは 0.4 [m] に設定した。重心位置制御で使う XYZ 軸各方向のフィードバックゲインはそれぞれ 1000, 1000, 1000 [N/m], D ゲインの場合はそれぞれ 0, 100, 100 [Ns/m] に設定した。姿勢制御は、ピッチ軸とロール軸共に目標角度を 0 度とし、PD 制御則の P ゲインを 30 [N/deg], D ゲインを 0 とした。

この実験では、ロボットは脚車輪モードで動作させた。各スイングアームには、プラットフォームの重量の 1/6 を支えるための目標トルクを与えた。各脚のヨー軸は位置制御により 0 度に固定している。これにより横方向の安定性が失われるため、本実験では実験者がロボットを支え、横方向の力を相殺することで転倒を防いでいる。また、脚が滑るのを防ぐために、地面に木製の足場を取り付けた。機械の重量をスイングアームによって部分的に補償する場合、本実験のように大きな接線力を発揮するためには足場が必要となる。

図 7.1 に実験の様子を、図 7.2 に結果を示す。ロボットは、10–50 [mm] の小さなオフセットと位相遅れで、目的の軌道に追従出来ている。姿勢の誤差も 5 度未満に収まっている。ローカルサーボコントローラと IMU の通信遅延を改善することで、さ

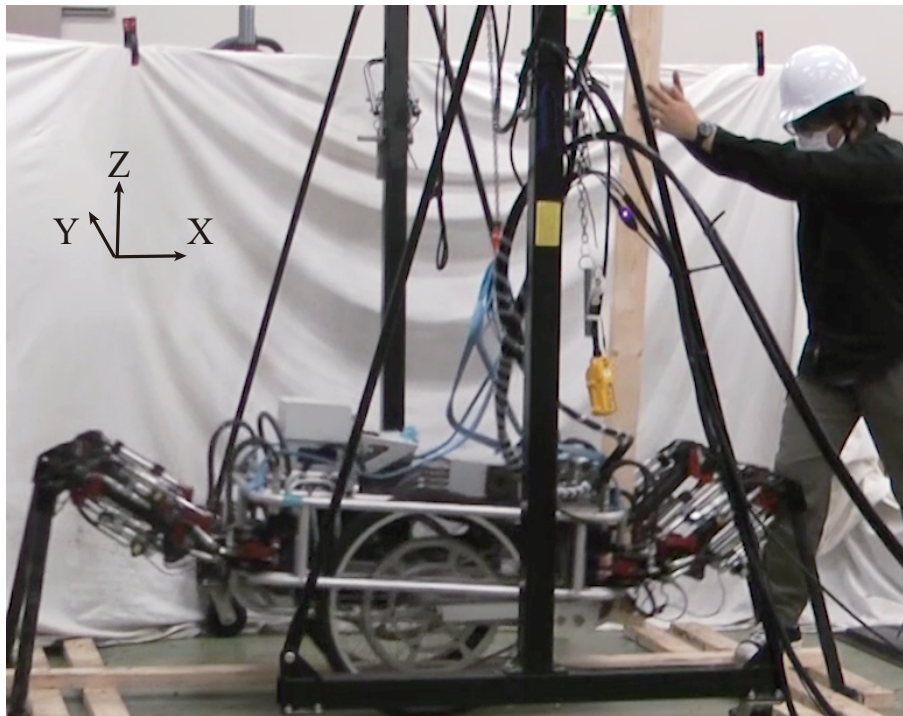


図 7.1 Experimental result of fast sway tracking test.

らに削減できると考えている。

一方、垂直 GAF は、特に 0.1~0.6 秒の間で、左右の脚の間に大きな違いがあることがわかる。これは、脚の配置が完全に対称ではなく、重心までの距離が近いほど、目標接触力が大きくなるためである。さらに、FL の垂直 GAF は、接触の喪失を防ぐために、0.18~0.34 秒の間制限をかけている。脚車輪分離型機構を採用することにより、高速な胴体運動を達成できることが確認できた。

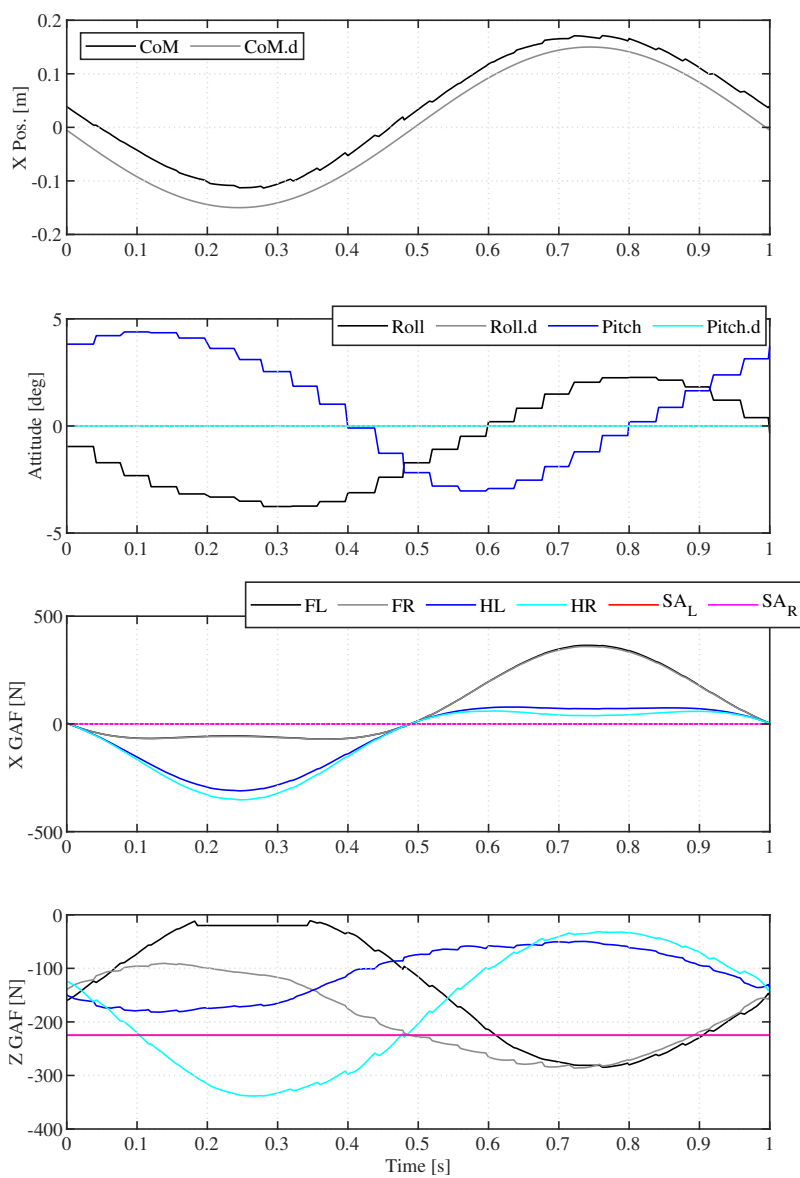


図 7.2 Experimental result of fast horizontal sway with 1 [Hz]: [Top] Horizontal position of the CoM (X) and its target value ($CoM.d$); [Second] Base orientation; [Third] Desired horizontal GRF; [Bottom] Desired Vertical GRF

7.3 足場崩落実験

プラットフォームのコンセプトを証明するために、足場を崩落させバランス性能を確認した。実験では垂直方向に 0.5 [m]、水平方向に 0.27 [m] 変動する木製の大きなシーソーの上に、ロボットの後脚を配置した。実験者がシーソーを離すと、ロボットは力制御でシーソーを押しながら素早く着陸しバランスを維持することができるかを確認した。目標 CoM の高さは 0.4 [m]、目標胴体姿勢は 0 度に設定した。重心位置制御で使う XYZ 軸各方向のフィードバックゲインは、P ゲインをそれぞれ 1000, 1000, 1500 [N/m] とし、他は前の実験と同様に設定した。この実験では足場は使用していない。

図 7.3 に実験の様子を示している。ロボットはバランスを保つために力制御でシーソーを押しながら素早く着地を行っている。結果を図 7.4 に示す。ロボットが地面に着地するとすぐに、CoM の位置が前後に約 160 [mm] 変化した。その後、X 軸、Y 軸は約 3 秒、Z 軸は約 2 秒で目標位置に収束した。最大変位量はピッチ軸が約 7 度、ロール軸が約 1.8 度であり、最終的には約 3 秒で元の角度に収束した。この結果から、コンセプト通り地面の滑落に適応し、動的なバランスが行えることが確認出来た。

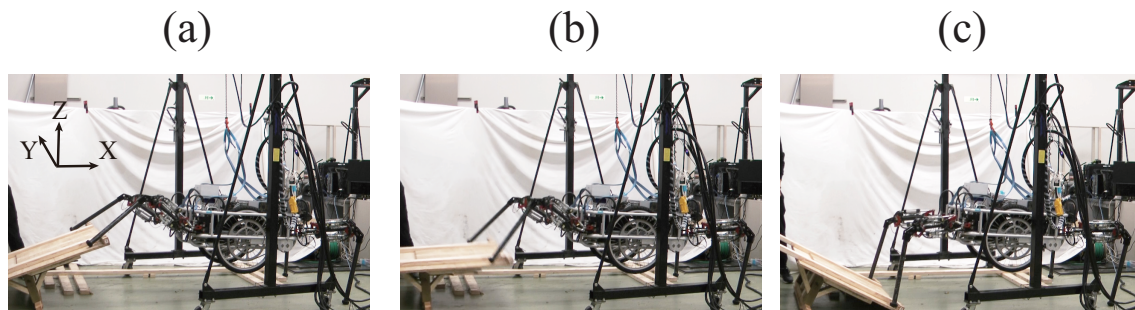


図 7.3 Experimental result of collapsing test: (a) The human operators suddenly released the seesaw (time is 0.1 [s]); (b) While the seesaw is moving fast, the two front feet keep contact with the seesaw by force control; (c) The seesaw lands (time is 0.43 [s]), and the robot could maintain its balance.

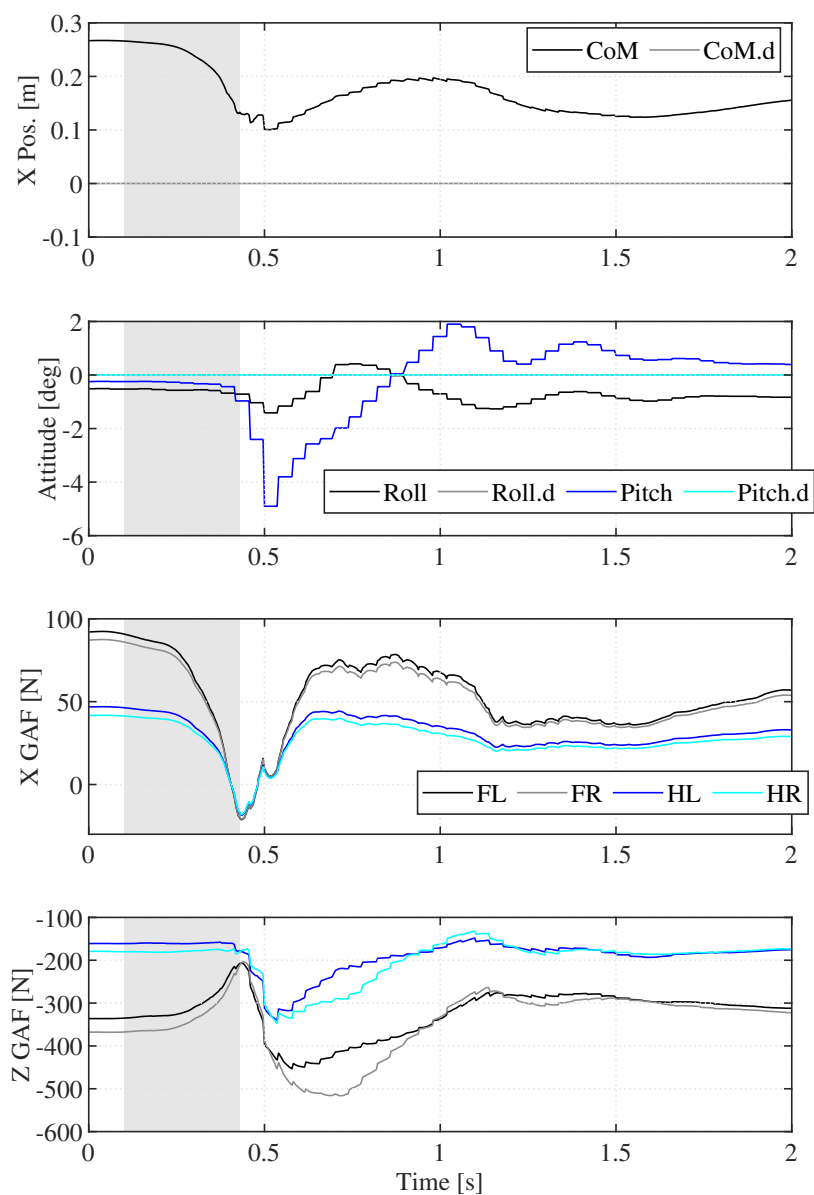


図 7.4 Time evolution of the ground collapsing test. The human operators increased the inclination of the seesaw, then released it at 0.1 [s]. The touch-down time is 0.43 [s]. The top graph shows the CoM, and the second shows the attitude. The GAFs at the right side legs are larger than those at the left-side because the robot is tilted to the right.

7.4 胴体位置追従実験

ベースの位置と姿勢の可制御性を確認するために、脚のみのモードで胴体位置追従実験を行った。目標の円軌道半径は 0.1[m]、周波数は 0.5 [Hz] とし、目標姿勢は 0 度とした。目標 CoM 高さは 0.4 [m] に設定した。重心位置制御で使う XYZ 軸各方向のフィードバックゲインは、P ゲインをそれぞれ 2000, 2000, 300 [N/m]、D ゲインがすべて 100 [Ns/m]、姿勢制御の P ゲインはすべて 30 [N/deg] と設定した。この実験では地面との接地点が動かないように木材の足場を使用し、脚を固定している。

結果を図 7.5 に示す。グラフの左側が XY 平面上の CoM の軌跡、右側が X と Y の各成分の時系列である。X で約 30 [mm]、Y で約 15 [mm] の振幅誤差があり、どちらも位相が約 45 度遅れている。また、ピッチ軸の変動は約 1 度、ロール軸の変動は約 2.5 度である。

実験では位置の誤差は避けられないが、その大きさは支持領域よりはるかに小さいため問題ではないと考える。低速の追従作業でも定常的な誤差が残ることや、一部の関節ではトルクの追従に問題があることなどが分かった。これは今後、ハードウェア（各ジョイント周辺の機械部品）とトルクサーボシステムを改良することで解決する予定である。また、壊れやすい力センサを圧力センサに置き換えることも今後の課題である。今後、様々な実験を行い、このプラットフォームのコンセプトを検証していく。

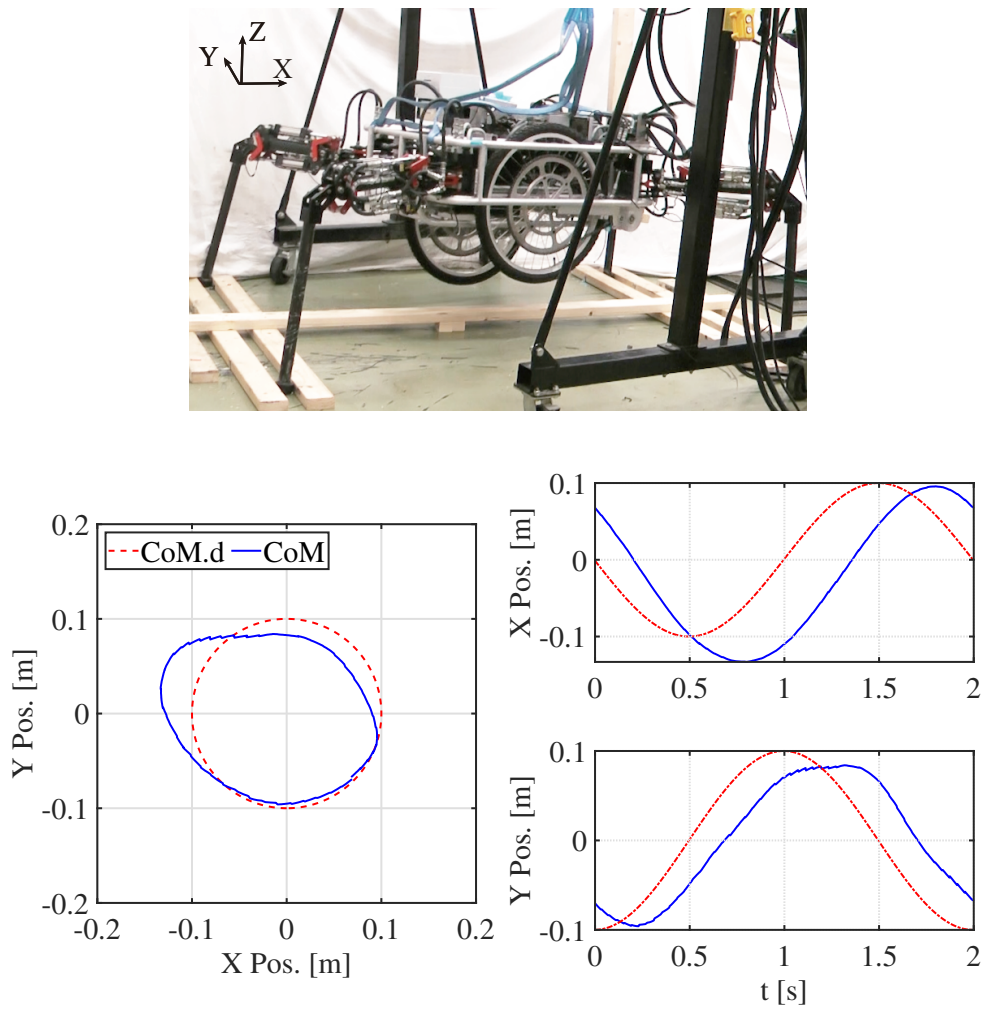


図 7.5 Experimental result of fast circular tracking test. Large delay deviation from the target is found. Controllability of the base position:(c)

第 8 章

油圧ギアモータのトルク制御性

8.1 はじめに

*Hydrover-II*の脚関節は安価な比例弁とシリンダーから構成され、実験によりトルク制御を使った柔軟なバランスが達成できている。しかし駆動輪を動作させる油圧ギアモータと比例弁の組み合わせでは、モータの摩擦等によりトルク制御性に問題があったため、駆動輪のみサーボ弁を使用していた。*Hydrover-II*で比例弁を使用した際の油圧走行実験時の油圧モータのトルク変化を図 8.1 に示す。この実験では脚関節を位置制御により初期姿勢に固定し車輪のみ同一の目標トルクを手動で与えトルク制御を行い、図 8.1 は左脚の前後車輪の目標トルクとの比較である。トルク制御は圧力センサから推定したトルクを基に PID 制御を行っている。このように車輪部のトルク制御を行うと、トルクが振動的になる。

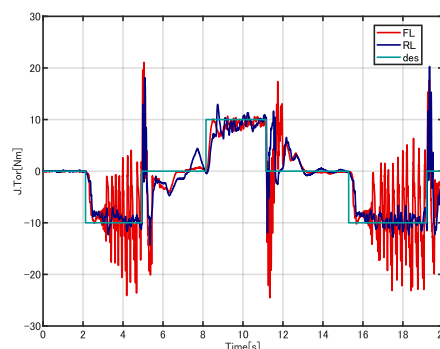


図 8.1 Results of driving test of *Hydrover-II* using proportional valve

そこで本章では、外乱オブザーバによる外乱除去方法を油圧制御システムに適用しシミュレーションによりトルク誤差を減少させられるか検討する。また *Hydrover-II*と同じ比例弁、配管構成を持つ 1 軸の試験機を製作し、トルク性能劣化の原因がどこ

にあるのか原因を調査する。トルク制御が出来ない原因として、

1. 摩擦等の非線形性を持つ油圧モータに対して単純な PD 制御と応答の遅い比例弁では制御できない
2. 流量弁とモータ間にある中継ホースの弾性により制御性能が劣化している (*Hydrover-II* では比例弁からモータまでの中継ホースが 2 [m] 近くある)
3. 出力軸に大きな摩擦があるギアモータの場合、圧力センサによるトルク推定では計測方法に問題がある

などが考えられる。そこで 1 軸の試験機を使い、以下の方法で原因を調査する。

1. 比例弁と高応答なサーボ比例弁による比較
2. 中継ホースを実機で採用している 2 [m] のものと 0.75 [m] のもので比較
3. 圧力センサを使ったトルク制御とトルクセンサを使った場合のトルク追従性の比較

8.2 外乱オブザーバーの実装

油圧システムの非線形項を除去する方法の 1 つとして外乱オブザーバがある。LEE ら [40] は油圧シリンダーに対して外乱オブザーバとフィードバック線形化を組み込むことによりロバスト性の向上を図っている。これは梅野らの外乱オブザーバの論文 [41] に油圧ダイナミクスに対するフィードバック線形化制御を加えたものであり、目標入力からシリンダ内流量までの非線形項を除去する狙いである。フィードバック線形化 +DOB により、モデル化誤差や外乱負荷がある場合に性能が向上することを確認している。また IIT と東芝 [42] も同様にフィードバック線形化と外乱オブザーバを使ったものがある。フィードバック線形化により目標入力から圧力変動までの非線形項を除去している。それに加え、外乱オブザーバを 2 つ使い、機器の摩擦などの外乱、油圧システムでの外乱をそれぞれ除去している。シミュレータにおいてモデル化誤差がある場合にフィードバック線形化制御のみよりも、外乱オブザーバを加えたほうが良い制御性能となることを確認している。

外乱オブザーバーを実装するにあたり、油圧サーボ弁 (Moog type30) によって動作し、負荷を慣性負荷と粘性負荷のみとするプラントモデルを想定した。想定するモデルの回路図を図 8.2 に示す。

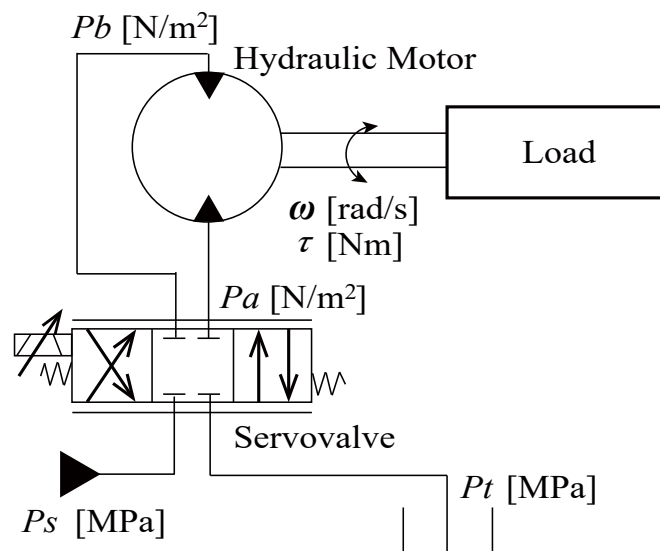


図 8.2 Circuit diagram

8.2.1 油圧モータの流量特性と運動方程式

まず油圧モータの有効トルク τ は、単位角度当たりの押しおけ容積を D_m 、油圧モータの流入側、流出側の圧力をそれぞれ P_a 、 P_b とすると次式で表される。

$$\tau = D_m(P_a - P_b) \quad (8.1)$$

ただし、トルク損失はないものとする。次に油圧モータの運動方程式は、負荷の慣性モーメントを J 、回転粘性抵抗係数を B_a 、回転角速度を ω とすると次式で表される。

$$\tau = J \frac{d\omega}{dt} + B_a \omega \quad (8.2)$$

次に油圧モータに流入出する流量は作動油の体積弾性係数を β_e 、管路とシリンダの片側容積を V_0 とすると次式で表される。

$$\begin{aligned} q_a &= D_m \omega + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dP_a}{dt} \\ q_b &= D_m \omega - \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dP_b}{dt} \end{aligned} \quad (8.3)$$

ここで q_a は油圧モータへの流入側、 q_b は流出側の流量である。ただし、ここでは漏れ抵抗はないものとする。最後に油圧バルブの数式モデルについて述べる。サーボ弁に流れる流量と入力電流 i の関係は供給圧力を P_s 、タンクポートの圧力を P_t とすると

$$\begin{aligned} q_a &= k_v i \sqrt{P_s - P_a} \\ q_b &= k_v i \sqrt{P_b - P_t} \end{aligned} \quad (8.4)$$

となる。ここで k_v はバルブ定数である。

8.2.2 状態空間法による外乱オブザーバ

まず線形状態方程式を求める。式 (8.4) の q_a 、 q_b をバルブ中立点周辺でテイラー展開により一次近似し、平均値を取ったものを平均流量 q_m とすると

$$q_m = k_1 i - k_2 P_L \quad (8.5)$$

ここで

$$\begin{aligned} k_1 &= K_v \sqrt{\frac{P_s - P_{L0}}{2}} \\ k_2 &= \frac{K_v i_0}{2\sqrt{2(P_s - P_{L0})}} \\ P_L &= P_a - P_b \end{aligned}$$

となる. ここで P_{L0} , i_0 はそれぞれ平衡状態の差圧と入力電流であり, $P_t = 0$ として計算した. 油圧モータに流入出する平均流量 $q_m = \frac{(q_1+q_2)}{2}$ は式 (8.3) より,

$$q_m = D_m \omega + \frac{V_0}{2\beta_e} \frac{dP_L}{dt} \quad (8.6)$$

となる. 式 (8.1), 式 (8.2), 式 (8.5), 式 (8.6) より, 次のような状態方程式, 観測方程式を得る.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B(u + d) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (8.7)$$

ここで

$$\begin{aligned} x &= \begin{bmatrix} \omega & P_L \end{bmatrix}^\top \\ A &= \begin{bmatrix} -\frac{B_a}{J} & \frac{D_m}{J} \\ -2D_m \frac{\beta_e}{V_0} & -2k_2 \frac{\beta_e}{V_0} \end{bmatrix} \\ B &= \begin{bmatrix} 0 & 2k_1 \frac{\beta_e}{V_0} \end{bmatrix}^\top \\ C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & D_m \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ここで制御入力 u は入力電流 i とし, 制御入力と外乱が同じ場所に加わる入力外乱 d を想定している. 次に外乱モデルを考慮した拡張状態方程式を導出する. 外乱モデルは

$$\begin{aligned} \dot{x}_d &= A_d x_d \\ d &= C_d x_d \end{aligned} \quad (8.8)$$

本研究では未知の一定外乱が加わっているものとし $A_d = 0$, $C_d = 1$ とする. 拡大状態方程式を構成すると

$$\begin{aligned} \dot{x}_a &= A_a x_a + B_a u \\ y &= C_a x_a \end{aligned} \quad (8.9)$$

ここで

$$\begin{aligned} x_a &= \begin{bmatrix} x \\ x_d \end{bmatrix} \\ A_a &= \begin{bmatrix} A & BC_d \\ 0 & A_d \end{bmatrix} \\ B_a &= \begin{bmatrix} B & 0 \end{bmatrix}^\top \\ C_a &= \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \\ H_d &= \begin{bmatrix} 0 & C_d \end{bmatrix} \end{aligned}$$

となる. A と C が可観測なため次のような外乱オブザーバを構成した.

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_a &= A_a \hat{x}_a + B_a u - L(C_a x_a - y) \\ \hat{d} &= H_d \hat{x}_a \end{aligned} \tag{8.10}$$

ここで L はオブザーバゲインであり, 最適レギュレータを用いて求めた. 最適レギュレータの評価関数を式 8.11 に示す.

$$J = \int_0^{\infty} (x_a)^T Q x_a + u^T R u dt \tag{8.11}$$

ここで Q, R は重み行列である. これを時間積分していくことで外乱を推定した. 制御の概要図を図 8.3 に示す. ここで τ_d はプラントに加わる外乱トルクである.

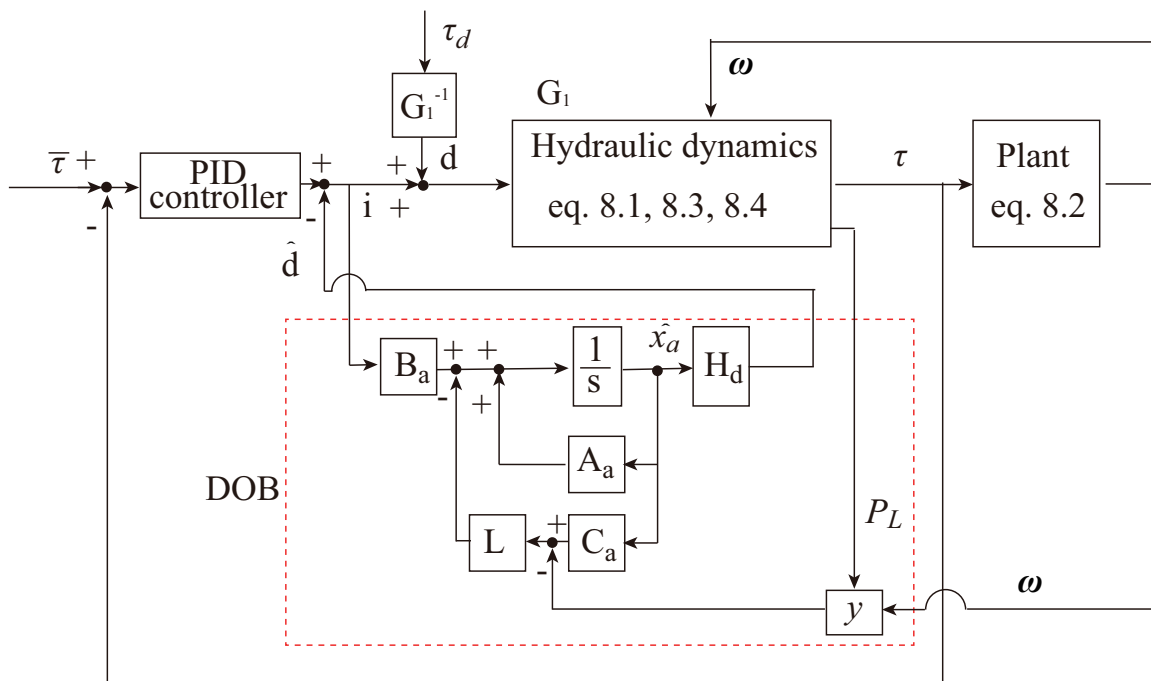


図 8.3 Block diagram of motor controller using disturbance observer

8.3 シミュレーション

外乱オブザーバによる推定ができていないか確認を行った。シミュレーションは matlab simulink を用いて行った。油圧モータは油圧サーボ弁 (Moog type30) によって動作し、入力外乱が加わった場合に制御性能が向上しているか確認を行った。油圧モータを PID 制御で制御したものと PID+DOB 制御をしたもので比較を行った。オブザーバゲインを決定する評価関数の重みは $Q = \text{diag}([100 \ 1000 \ 10000])$, $R = 1$ とした。以下のパターンでシミュレーションを行う。

(D1) 目標トルクを sin 軌道とし、インパルス信号の入力外乱が加わる場合

(D2) 目標トルクを sin 軌道とし、sin 波信号の入力外乱が加わる場合

ここで、インパルス信号の入力外乱は 1 秒ごとに 0.05 秒間最大入力の 20 % の外乱が加わり続ける。また、sin 波信号の入力外乱は振幅が最大入力の 20 %、周期が 5 Hz の外乱が加わる。

D1 の結果を図 8.6 に示す。0.5 秒、1.5 秒時点で外乱が加わっており、グラフ (d) より外乱が推定できていることが分かる。外乱が加わっていないときにも推定値が出ているのは、外乱オブザーバで考慮していないモデルの非線形項である。また制御入力 (c) を見ると外乱をキャンセルするような制御入力が出ており、結果 PID 制御のみでは 30 [Nm] 程度あったトルク追従誤差 (b) を 10 [Nm] ほどに減少出来ている。目標トルクとの二乗平均平方根は DOB なしの場合 6.9, DOB がある場合は 2.8 となった。

D2 の結果を図 8.5 に示す。こちらも PID 制御のみでは最大 30 [Nm] ほどあったトルク追従誤差 (b) を 5 [Nm] 程度に減少出来ている。目標トルクとの二乗平均平方根は DOB なしの場合 17.6, DOB がある場合は 2.8 となった。

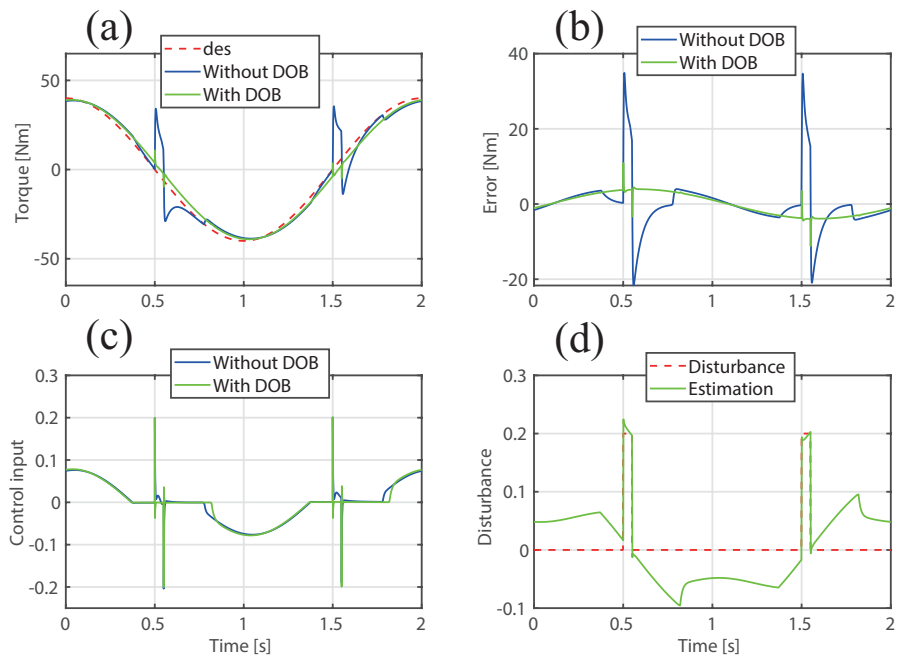


図 8.4 Time history of torque control with input disturbance(D1).The target torque was given by a sine wave (40 [Nm], 0.5 [Hz])

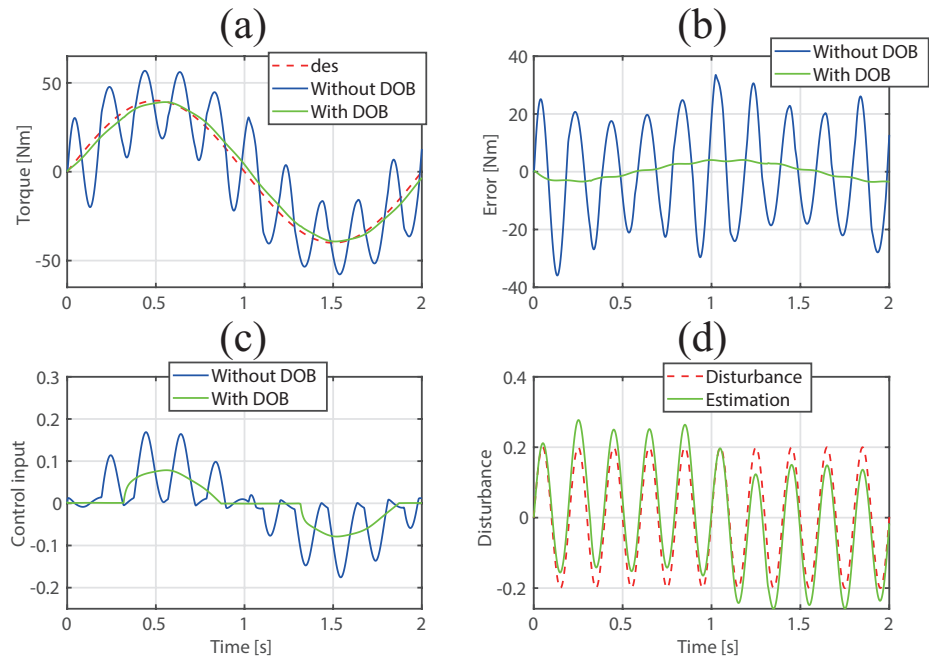


図 8.5 Time history of torque control with input disturbance(D2).

次に外乱トルクが加わった場合にも制御性能が向上しているか確認を行った。先ほどと同様に PID 制御で制御したものと PID+DOB 制御をしたもので比較を行った。

オブザーバゲインを決定する評価関数の重みは $Q = \text{diag}([1 \ 1 \ 1]), R = 1$ とした。目標トルクを \sin 軌道とし、インパルス信号のトルク外乱が加わった。ここでインパルス信号の外乱トルクは 0.5 秒ごとに 0.05 秒間 50 [Nm] の外乱が加わり続けるよう設定した。

結果を図 8.6 に示す。DOB を実装した方法は、外乱印加時に制御入力により大きい値を示しており、結果 PID 制御のみでは最大 15 [Nm] 程度あったトルク追従誤差 (b) を 10 [Nm] 以内に減少出来ている。しかし、0.5 秒から 0.8 秒、1.5 秒から 1.8 秒付近で振動が見られる。これは制御入力に加わる外乱として推定する際、トルク外乱に加えて非線形項を持つプラントの影響 (図 8.3 の G_1^{-1}) も受けているからと考える。目標トルクとの二乗平均平方根は DOB なしの場合 3.3, DOB がある場合は 3.1 となった。いずれの場合も DOB を適用することで、目標トルクへの追従性が向上した。

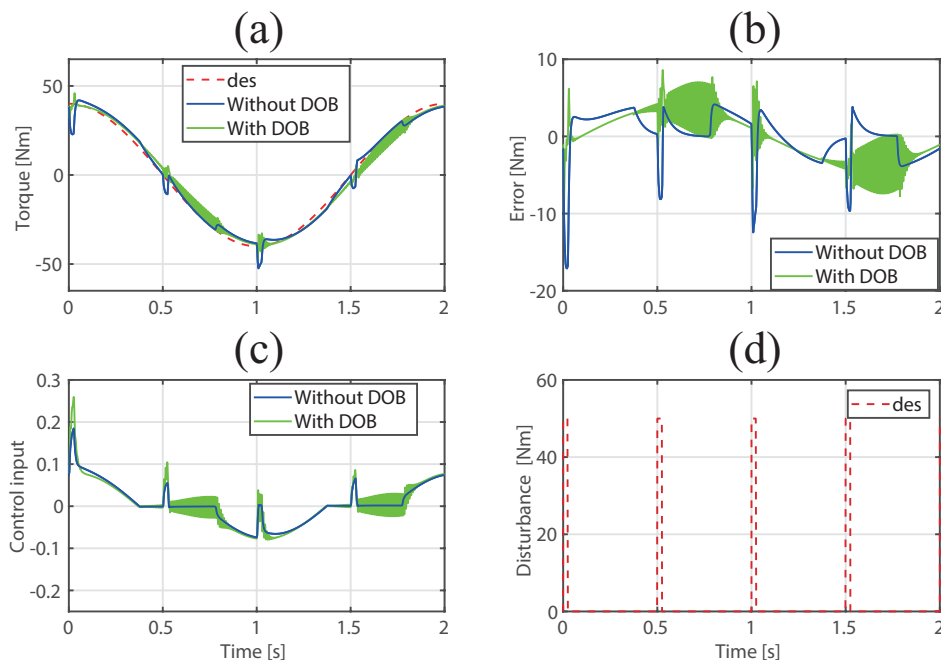


図 8.6 Time history of torque control with input disturbance. The target torque was given by a sine wave (40 [Nm], 0.5 [Hz])

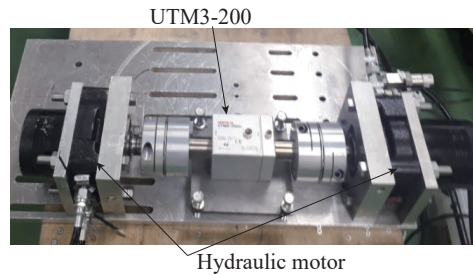


図 8.7 Overall view of experimental apparatus

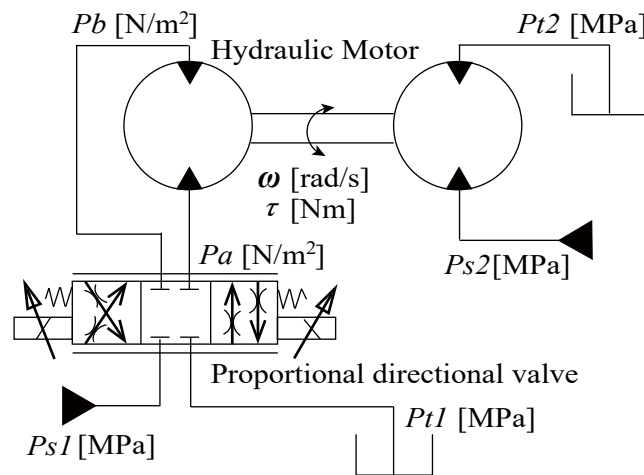


図 8.8 Circuit diagram of experimental equipment

8.4 システム構成

実験装置の概要図を図 8.7 に示す。また、実験装置の回路図を図 8.8 に示す。実験装置は流量制御弁とつながった油圧モータ（図 8.7 左）に負荷装置として油圧モータ（図 8.7 右）を取り付け、その中間にトルクセンサを設置している。正確なトルクを計測するため油圧モータ試験機に±200 [Nm] まで計測できるトルクセンサ UTM3-200 を選定した。トルクセンサには 3200 パルスの光学エンコーダが搭載されているため、角度、角速度も計測している。油圧モータの油流入口、流出口に圧力センサを取り付けており差圧によりトルクを推定することができる。このとき 2 次のバターワース型ローパスフィルタ（カットオフ周波数 10-40 [Hz] 程度）を使ってセンサ値のノイズ除去を行っている。負荷用のモータには別途油圧ポンプと繋がっており負荷トルクを生成することが可能である。

8.5 実機実験

8.5.1 構成部品の変更と実機実験

バルブやホース長さの違いによるトルク追従性の差について検証を行う。負荷モータには圧力を加えず、負荷は負荷用モータ内部のギア等の摩擦のみとした。実験のパターンは 4 パターン行い、最初の 3 つは± 10 [Nm] の目標トルクを sin 波状に 0.5 [Hz], 1 [Hz], 1.5 [Hz] の順に与える。最後に step 状の目標トルクを 2.5 秒の間隔で± 10 [Nm] 与えた。実験はいずれも供給圧力 10 [MPa] で行った。

制御則は PID 制御とし、ゲインは比例弁を比例ゲイン 1, 微分ゲイン 0.001, 積分ゲインを 0.5 とし、サーボ比例弁を比例ゲイン 0.03, 微分ゲイン 0.0, 積分ゲインを 0.1 とした。それぞれ以下の部品を使用した。

- (Plan1) K2 で使用している比例弁 + 1.95 [m] ホース
- (Plan2) サーボ比例弁 + 0.75 [m] ホース
- (Plan3) サーボ比例弁 + 1.95 [m] ホース

実験結果を図 8.9~8.11 各実験での誤差二乗平均平方根を表 8.1 にまとめた。計測範囲は 10 秒である。これらの実験より比例弁では周波数応答が低いため、摩擦の大きな汎用油圧モータをトルク制御できていないことが分かる。サーボ比例弁ではほぼ追従できているが、モータが回転する瞬間は静止摩擦から動摩擦に変わるのに加えて、流量が必要になるためトルク追従性が落ちているのが分かる。また、ホース長変更による性能変化はほとんど見られなかった。

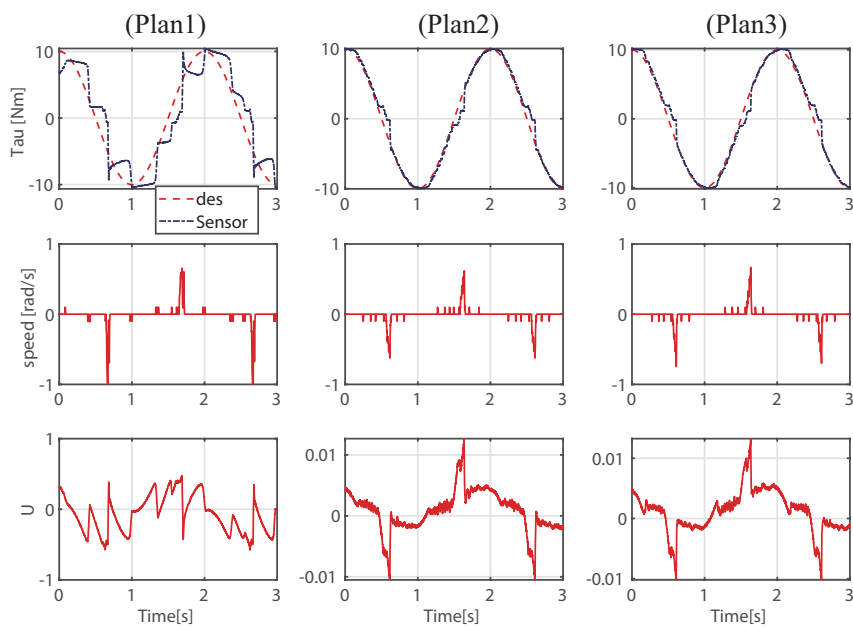


図 8.9 Time history of torque control. The target torque was given by a sine wave (10 [Nm], 0.5 [Hz]). The control input range is -1 to 1 . :[Top]Torque ;[Middle]Angular velocity ; [Bottom]Control input.

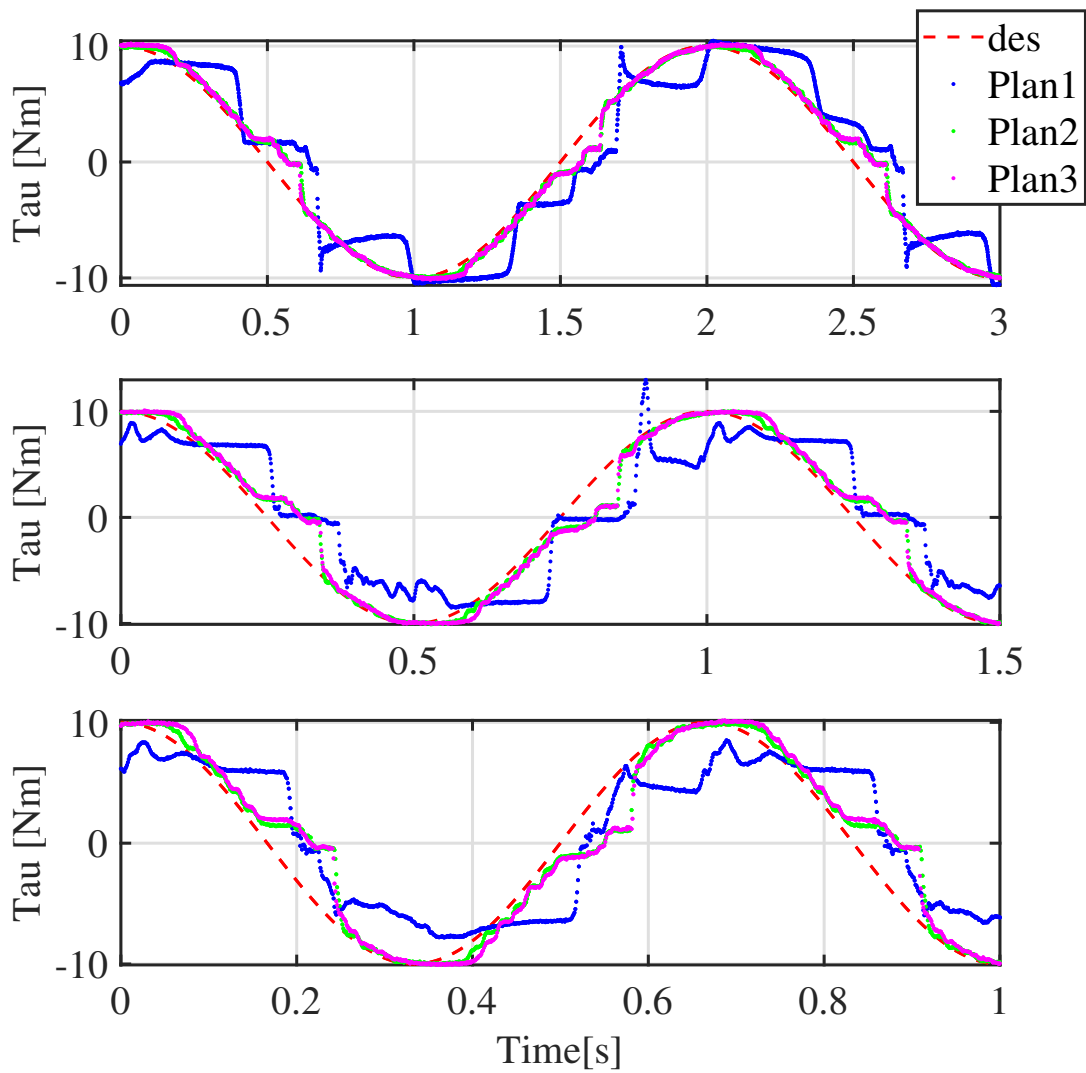


図 8.10 Time history of torque control. The target torque was given by a sine wave (10 Nm). :[Top] 0.5 [Hz] ;[Middle] 1 [Hz] ; [Bottom] 1.5 [Hz]

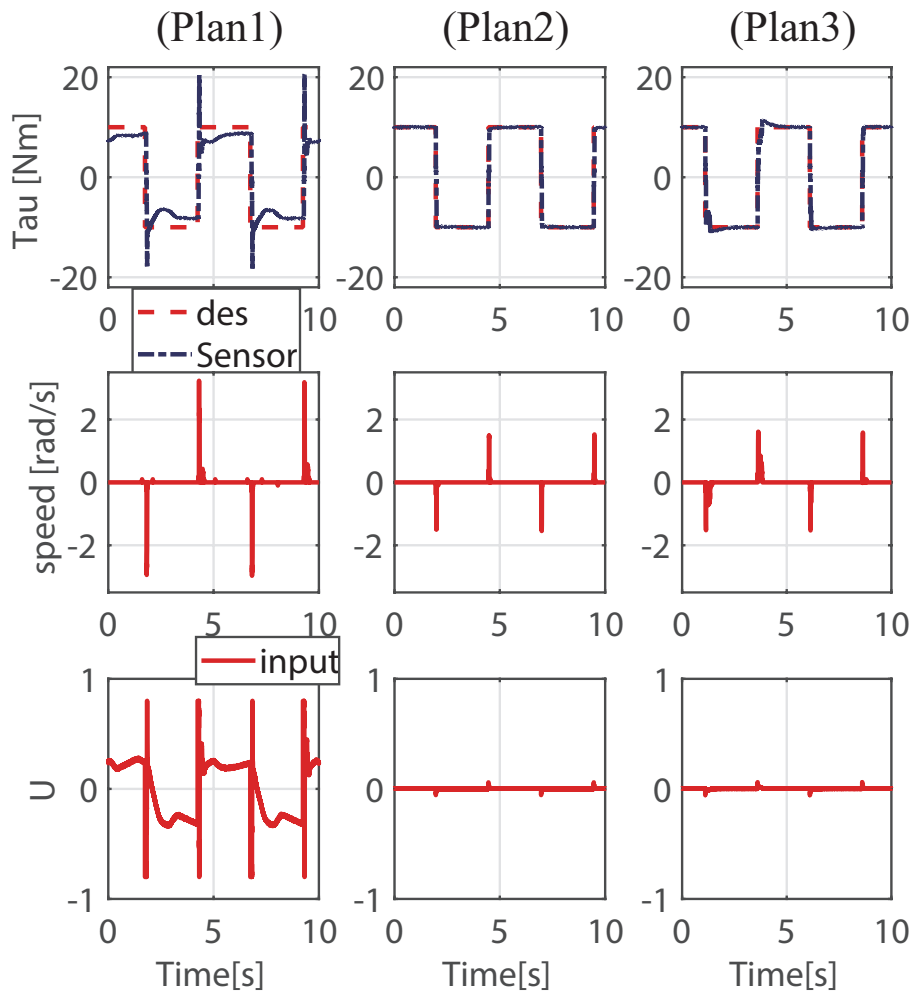


図 8.11 Time history of torque control. The target torque was given by a step response. :[Top]Torque ;[Middle]Angular velocity ; [Bottom]Control input.

表 8.1 Root mean squared

	Plan1	Plan2	Plan3
0.5 [Hz]	2.55	0.86	0.90
1 [Hz]	3.44	1.56	1.61
1.5 [Hz]	3.54	2.14	2.23
Step response	3.66	1.42	1.61

8.5.2 トルク計測センサの比較

トルク計測方法による制御性能の違いを検証した。トルクセンサの値を使ったフィードバック制御 (Plan1) と圧力センサの値から推定したトルクを使ったフィードバック制御 (Plan2) とで比較を行った。制御則は PI 制御+角速度に対するダンパ項

とした。PI 制御のゲインは比例ゲイン 0.1, 微分ゲイン 0.1 とした,

実験結果を図 8.12 に示す。各実験での誤差二乗平均平方根を表 8.2 にまとめた。計測範囲は 10 秒である。圧力センサの値から推定したトルク情報では大幅に性能劣化が見られた。

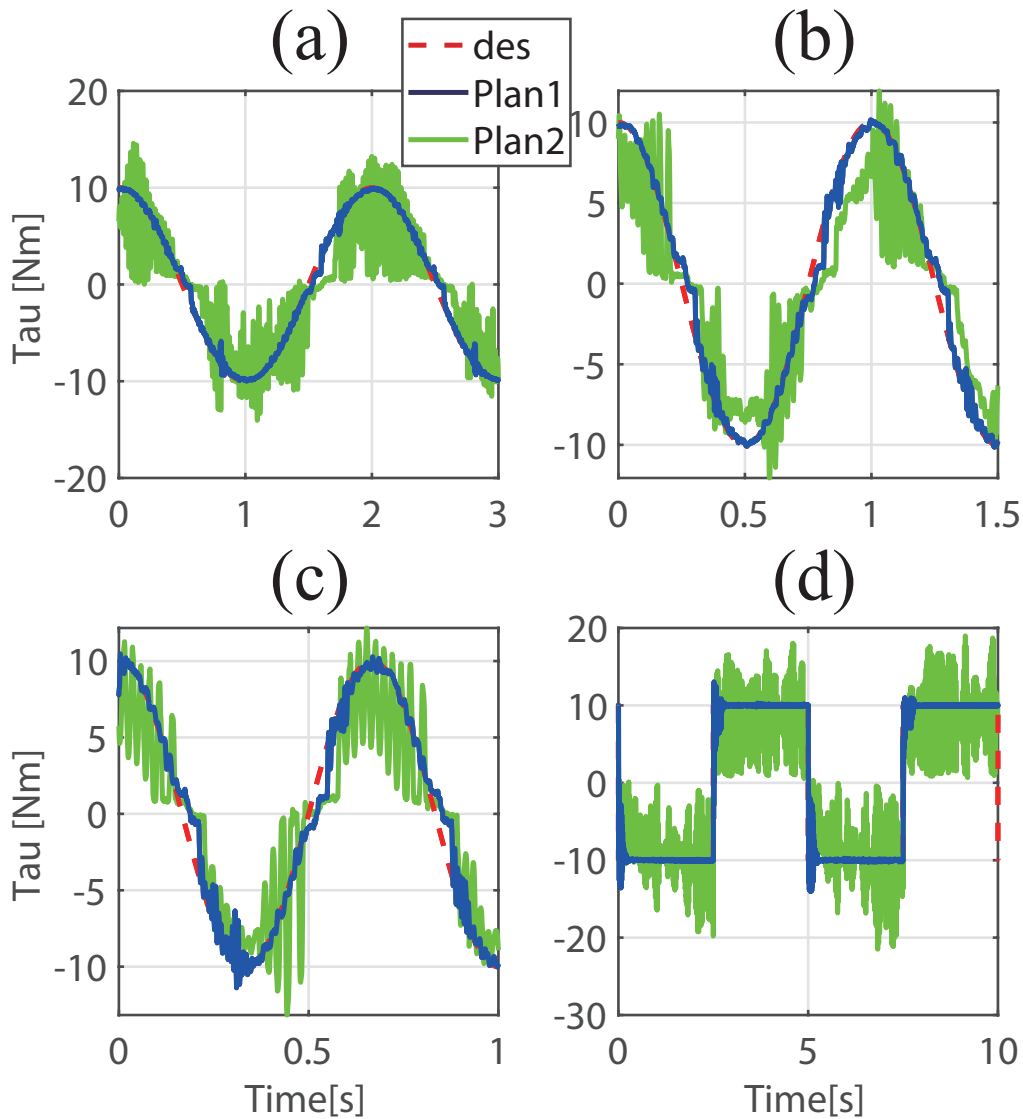


図 8.12 Time history of torque control.. : (a) 0.5 Hz, (b) 1 Hz, (c) 1.5 Hz, (d) Step response.

表 8.2 Root mean squared

	Plan1	Plan2	Plan3
0.5 [Hz]	0.41	0.58	0.45
1 [Hz]	2.50	1.19	0.73
1.5 [Hz]	1.72	3.61	1.08
Step response	1.79	1.88	1.27

8.6 まとめ

シミュレーションより，入力外乱や外乱トルクに対して，外乱をキャンセルするような入力を加えトルク誤差を削減できることを確認した．また 1 軸試験機を作成し制御性能が劣化している原因箇所の特定を行った．検証内容は高応答なサーボ比例弁との比較，制御弁からアクチュエータまでのホース長，トルクの取得センサに絞って比較を行った．その結果，ホース長についてはほとんど影響が見られないことが分かった．しかしモータ内の圧力センサから推定したトルクは，出力軸に取り付けたトルクセンサによる実測値と大きく乖離することを確認した．

今後はシミュレーションでのみ確認した外乱オブザーバの実機検証や圧力センサからトルクを推定する方法を検討する．さらに並行して油圧モータ・汎用バルブの詳細解析を行う．汎用バルブの解析は具体的に，開ループ系での伝達関数を実験から割り出す予定である．これらの特性を考慮したシミュレータを作成することで効率的に制御則やトルク推定方法の検討を行う．

第 9 章

全身運動制御アルゴリズムの改善

9.1 はじめに

脚車輪一体型ロボットは多自由で冗長性の高いシステムであるため転倒回避や姿勢バランスを保つためにとれる方法は、他の移動台車、脚ロボットより圧倒的に多い。多くの地形で脚と車輪を協調させ安全かつ汎用的に使える制御システム、アルゴリズムが必要である。脚の接地点を増やし多点接触制約を考慮するかどうかで難易度が変わるため研究のステップとしては下記の 2 段階に分けた S1). 車輪の接触数を変更せずにベース姿勢や、ホイールベースを変更し、転倒安定性と牽引力を最適化する油圧ローバーの全身運動制御を目指す。S2.) 車輪の接触数の変更等の多点接触問題を考慮した全身運動制御を考える。

本章では S1 について取り組み、S2 は今後の課題とする。第 3 章ではロボットの姿勢と目標発揮力をもとに接触力分配の最適化を行っていたが、追加で以下部分を考慮する

- 目標姿勢はヒューリスティックに規定値を与えており、この部分も最適化することによって、運動性能の向上を目指す。
- 接触力分配においてタイヤと地面の滑りを考慮する。

最初の試みとして、Grand らのベース姿勢とトラクションを最適化するローバーの制御方法 [43] の実装を行った。

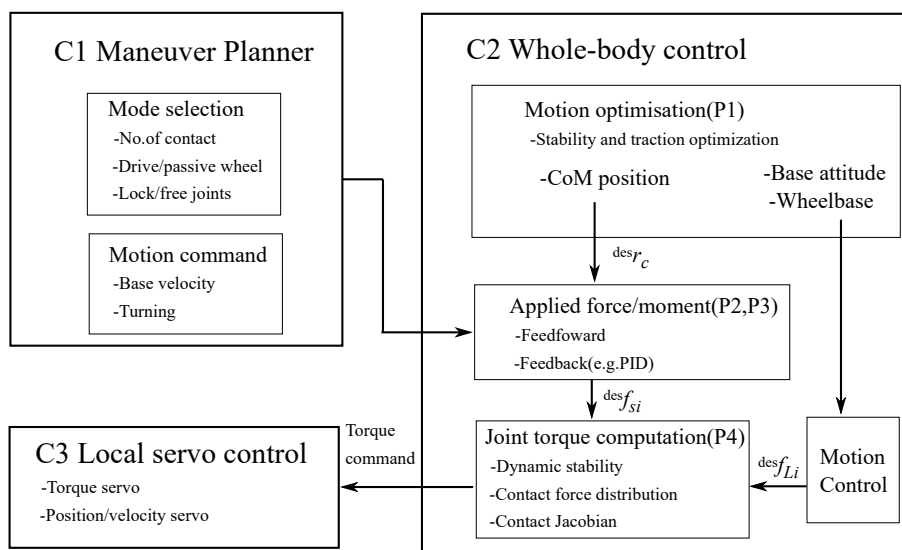


図 9.1 Control framework

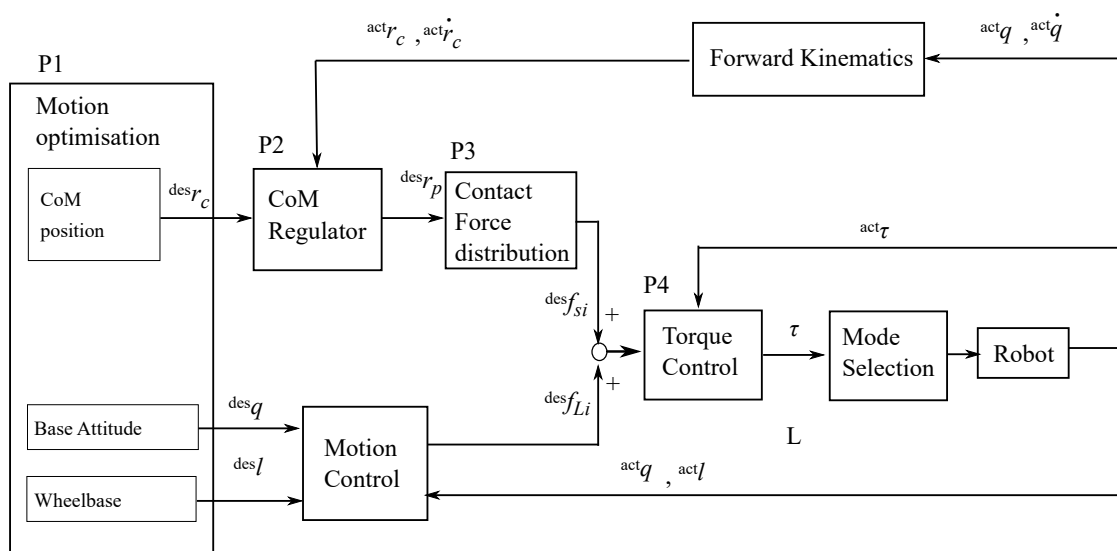


図 9.2 Block diagram

9.2 概要

制御アルゴリズムの全体を図 9.1 に示す。これは以下の 3 つの部分から構成されている

- (C1) マヌーバ設計器
- (C2) 全身運動制御器
- (C3) トルクサーボ系

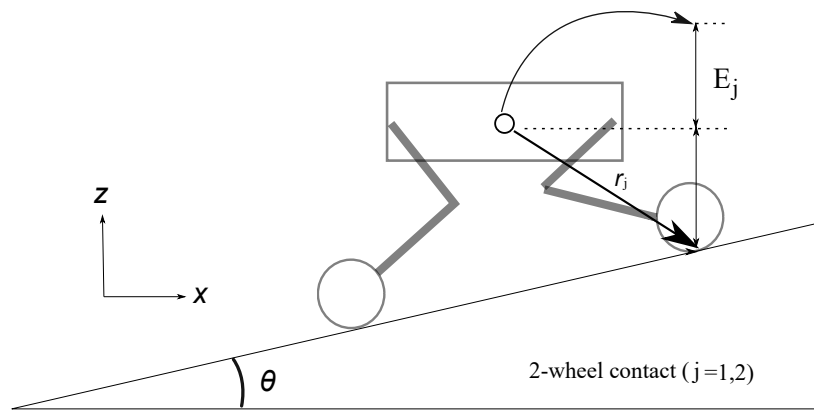


図 9.3 Definition of coordinates at 2D model.

C1 では進行方向や移動スピードを決定する．また想定した路面に対して接地させる車輪の決定，関節や車輪を油圧的にロックするなどの運動モードを決定する．C2 転倒安定性を考慮してロボット姿勢の最適化を行い，次に摩擦制約を考慮した全身関節トルクを計算する．

C2 の制御ルーチン（図 9.2）は以下のようにになっている．

- (P1) 転倒安定性と牽引力を最大化させるような最適姿勢を sequential quadratic programming(SQP) により算出
- (P2) 目標床作用力の決定（第 3.3 章の P2 と同様）
- (P3) 目標床作用力について摩擦制約を考慮した二次計画問題を解き各脚の目標接触力を算出
- (P4) 各関節の目標トルクを算出（第 3.3 章の P7 と同様）

第 3 章から大きく変更を加えた P1 について以下で述べる．

9.3 目標姿勢の決定

文献 [43] の方法を実装した．まず転倒安定性に関する評価関数を設定する．各接触点ごとの転倒安定の指標は「Energy Stability Margin」[44] を使い，次式のように定義する

$$E_j = \sqrt{r_{jx}^2 + r_{jz}^2} - \sqrt{r_{jz}^2} \quad (9.1)$$

ここで r_{jx} , r_{jz} はそれぞれベースから各接触点までの x 軸, z 軸のベクトルである．ベースのみに質量があると仮定すると，図 9.3 では E_j の部分になり，静的な釣り合い式ではローバーが前方向に転倒するのに必要な位置エネルギーと同等となる．

次に牽引力に対する評価関数を設計する．接地面に対して接触力 $F_j = (F_{jt}, F_{jl}, F_{jn})$ を考え，各車輪の接触面での接線力 F_{jt}, F_{jl} と垂直力 F_{jn} の比として ρ_i を示す．

$$\rho_j = \frac{\sqrt{F_{jt}^2 + F_{jl}^2}}{F_{jn}} \quad (9.2)$$

トラクション効率は，各車輪と地面の接触で発生するスリップに関連している．スリップしないようにするには，各比率 ρ_i の最大値を最小化することと同等である． μ をホイールと地面の摩擦係数とすると， $\rho_i \geq \mu$ のときにスリップが発生する．上記のトラクション効率を求めるのに必要な目標接触力の求め方を以下に示す．タイヤのスリップ場がない場合の地面に対する各接触点の速度は，

$$0 = \mathbf{v} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_j + \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (9.3)$$

となる．ここで \mathbf{v} はベース速度， $\boldsymbol{\omega}$ はベース角速度， $\dot{\mathbf{q}}$ は関節角速度を表す． \mathbf{J} はヤコビ行列である．これを整理すると

$$\mathbf{L}\mathbf{v}_p = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad (9.4)$$

ただし

$$\mathbf{v}_p = \begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \boldsymbol{\omega} \end{pmatrix}$$

$$\mathbf{L} = -(\mathbf{R}_j \quad -\mathbf{R}_j\mathbf{S}(\mathbf{r}_j))$$

ここで $\mathbf{S}(\mathbf{r}_j)$ は外積演算子のスキュー対称行列であり \mathbf{R}_j はベースに関する接触フレームの回転行列である．ベースの目標発揮力 \mathbf{w}_t と足先発揮力 F_j の関係は次のように表される．

$$\mathbf{L}^\top F_j = \mathbf{w}_t \quad (9.5)$$

F_j を決定するために擬似逆行列を使用して次式を求める．

$$F_j = (\mathbf{L}^\top)^+ \mathbf{w}_t \quad (9.6)$$

式 9.2 と式 9.6 を使ってトラクション効率を算出する．

最後に，転倒安定性と牽引力を最適化させる評価関数を以下のように設定する．

$$h(x) = \sum_{j=1}^n \left(\frac{K_s}{E_j^2} + K_\rho \rho_j^2 \right) \quad (9.7)$$

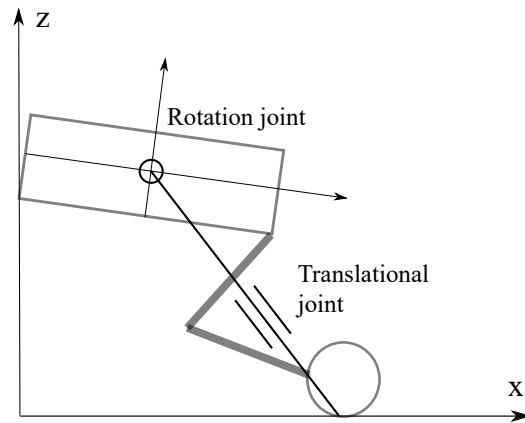


図 9.4 Definition of coordinates at 2D model.

ここで K_s と K_ρ は重み係数, n は接触点の数である. この関数を最小化するように SQP を使って解くことにより最適姿勢を決定する. 具体的にはベースの高さ, ホイールベース r_{jx} が決定される.

転倒安定性と牽引力を最大化させる方法は文献 [43] を参考にした. しかしこの方法は胴体高さ, ホイールベースなどの決定をなるべく小規模の最適化問題として扱うことが出来る代わりに, 関節角度情報を使わないため, 正確には牽引力を最適化は出来ていないと考える. つまり図 9.4 のように, 3 関節アームを回転関節と直動関節の 2 自由度アームで近似していることと同じとなり, \mathbf{L} はこの 2 自由度アームのヤコビ行列と同等である.

9.4 シミュレーション

MATLAB を使った関節 6 自由度の平面シミュレータを作りシミュレーションを行った。(図 9.5) 本シミュレーションでは油圧要素の計算は行っておらず, 各関節に直接トルク値を指示して操作している。シミュレーションは第 3 章の制御則と今回新しく設計したもので比較した。P1 のベースの目標発揮力 \mathbf{w}_t は前後の脚ごとに設定する必要がある。並進力, 垂直力, 回転トルクをそれぞれ $mg/4$, $mg/2$, $mg/6$ と一定値で与え, 前後のベースに発生させる目標発揮力は同様とした。ただし P1 で設定するベースの目標発揮力は最適姿勢を決定するために使用し, 実際に接触力を決定するのは, P2, P3 の手順で行うことに注意されたい。

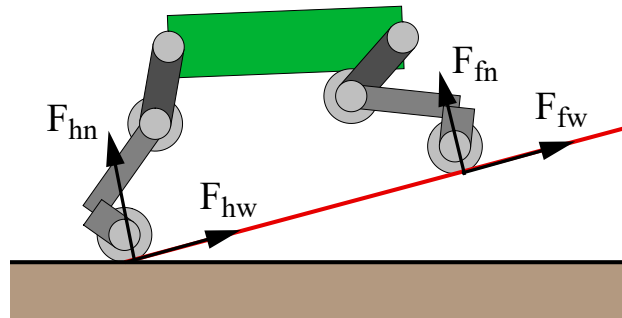


図 9.5 2D simulator

従来の制御手法で得られたロボットの挙動を図 9.6,9.7 に示す。図 9.6 によると 4.3 秒までは平地を走行しており, そこから斜度 15 度の斜面を登っている。ベース高さの誤差は 6 [cm], ベースの姿勢の誤差は 2 度, x 軸方向の目標速度の誤差は 0.28 [m/s] となっている。ホイールベース追従誤差は 50 [cm] 程度である。

図 9.7 では上から P1 で考慮する転倒安定性 E_j , トラクション効率 ρ_i , 一番下が P3 で制約条件として使う, スリップ条件である。 E_j は斜面踏破時に 0.29, ρ_i は 0.88 となっている。ここで E_j は大きい値が望ましく, ρ_i は小さい値が望ましい制約条件として使う, 接触を保つための関係式は

$$f_1 = F_{fn}, \quad f_3 = \mu_f F_{fn} - F_{fw} \quad (9.8)$$

$$f_2 = F_{hn}, \quad f_4 = \mu_h F_{hn} - F_{hw} \quad (9.9)$$

$$f \geq \mathbf{o}, \quad f = [f_1, \dots, f_4]^\top \quad (9.10)$$

となる。ここで F_{fw} , F_{hw} は接触面の接線力, F_{fn} , F_{hn} は接触面の垂直力である。全ての f が常に 0 を下回らないことが, スリップしない条件となる。本シミュレータで

はスリップを表現していないため摩擦係数 μ を 0.3 とした場合，従来の制御則で斜面踏破が可能かをグラフにした．グラフでは f_3 , h_4 が 0 を下回っていることがわかる．

今回の制御手法で得られたロボットの挙動を図 9.8,9.9 に示す．図 9.8 によると 4.3 秒までは平地を走行しており，そこから斜度 15 度の斜面を登っている．ベース高さの誤差は 1 [cm]，ベースの姿勢の誤差は 0.1 度，x 軸方向の目標速度の誤差は 0.28 [m/s] となっている．ホイールベース追従誤差は 60 [cm] 程度である．斜面踏破時にホイールベースの目標値の変更は見られるが，ベース高さの変更は見られない．

図 9.9 では上から P1 で考慮する転倒安定性 E_j ，トラクション効率 ρ_i ，一番下が P3 で制約条件として使う，スリップ条件である． E_j は斜面踏破時に 0.35, ρ_i は 0.69 となっている．ここで E_j は大きい値が望ましく， ρ_i は小さい値が望ましい．よって従来の制御則より，転倒安定性とトラクション効率が良くなっていることが分かる．スリップ条件も全て 0 以上であることが分かる．

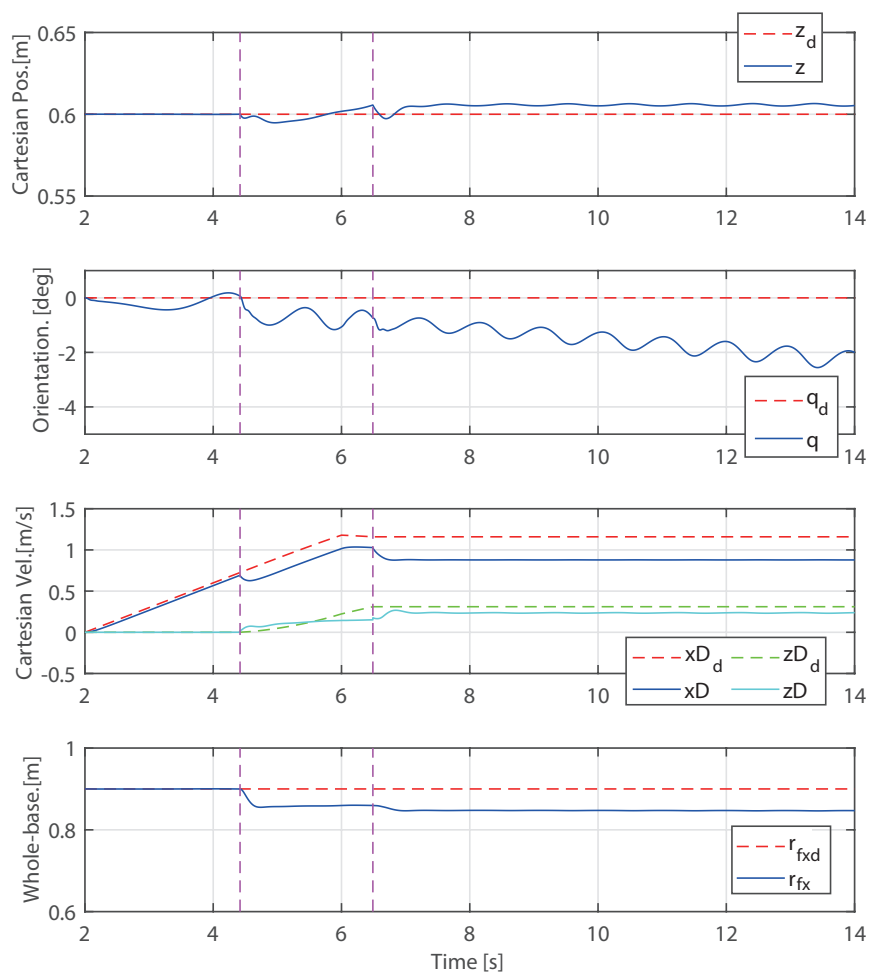


図 9.6 Time history of the states during the slope climbing test on simulation. The vertical pink lines are the moment when the front and rear wheels hit the slope

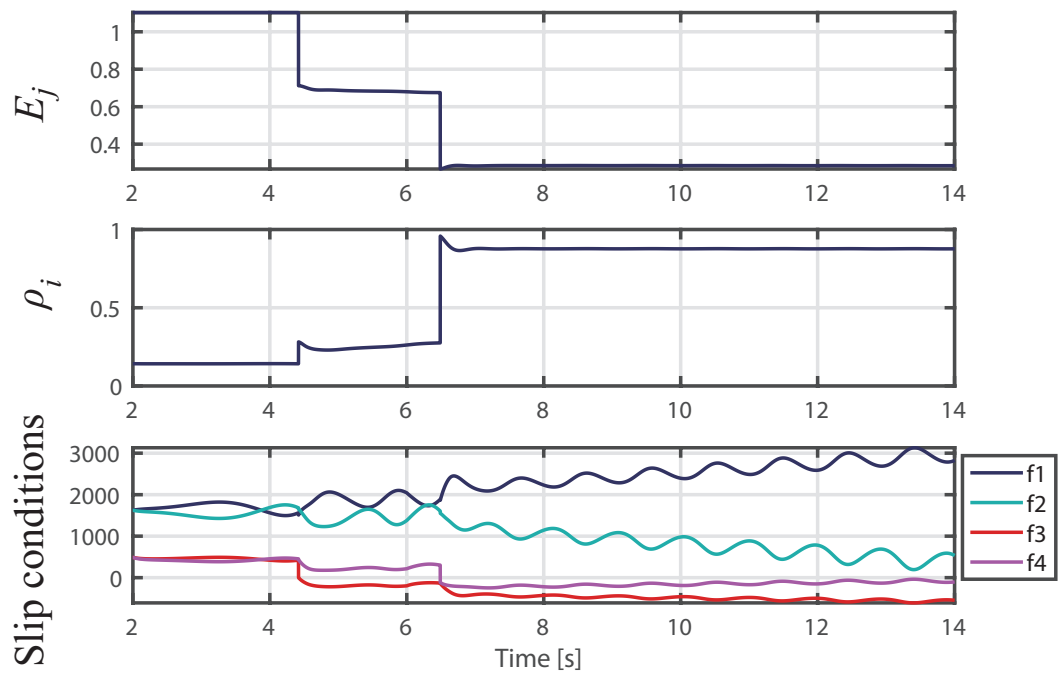


図 9.7 Time history of the states during the slope climbing test on simulation.
:[Top] E_j ;[Middle] ρ_i ; [Bottom] Slip conditions

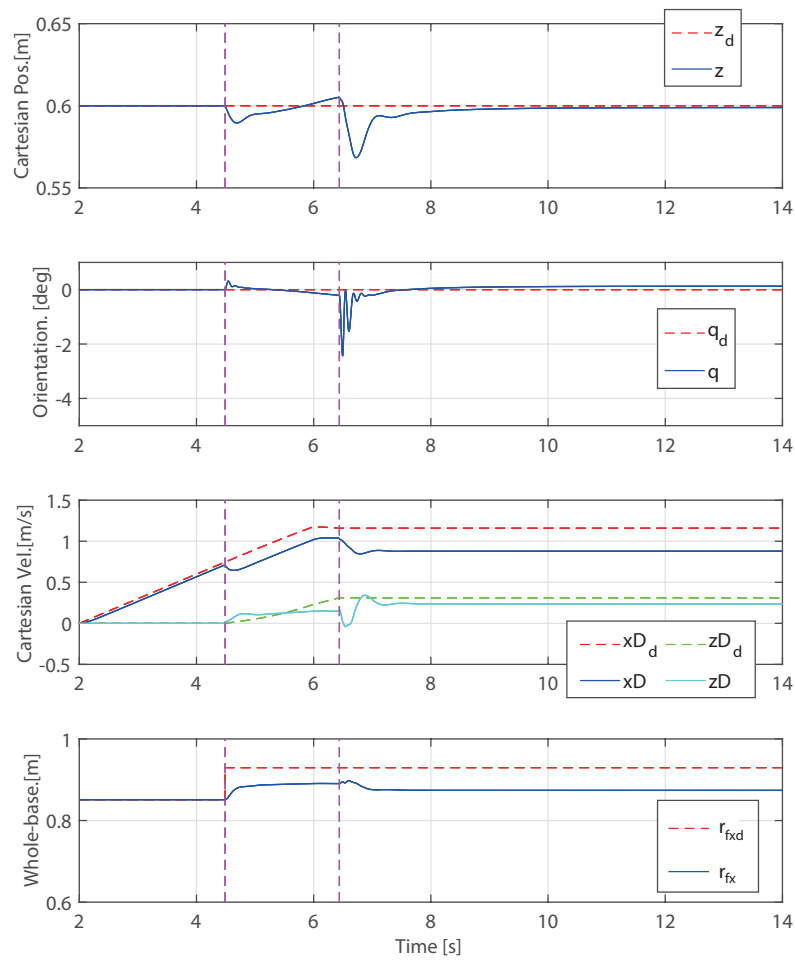


図 9.8 Time history of the states during the slope climbing test on simulation. The vertical pink lines are the moment when the front and rear wheels hit the slope

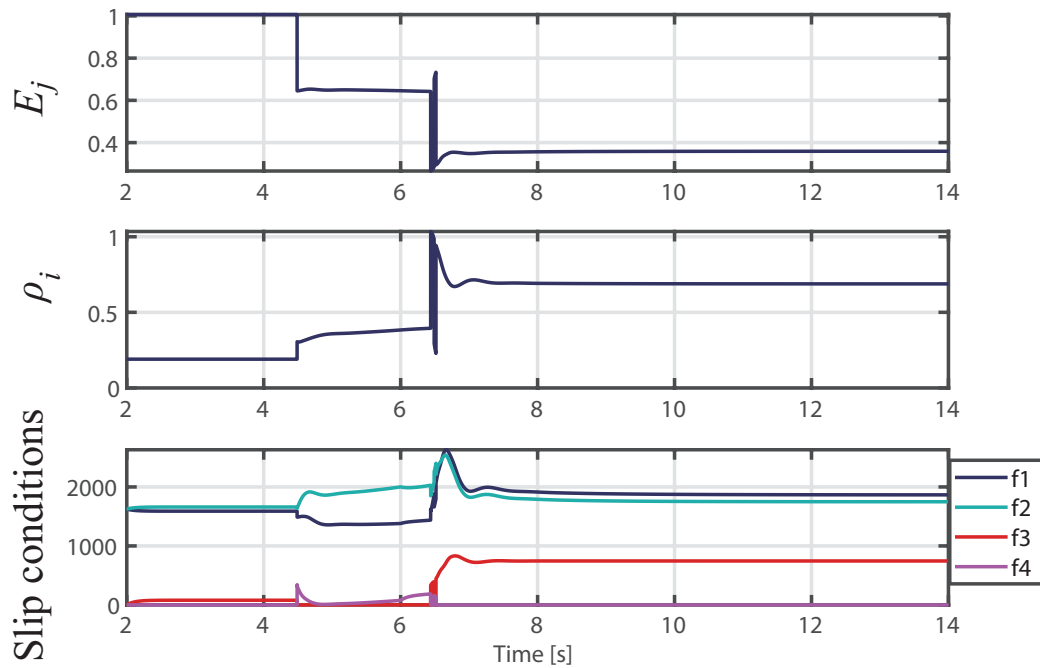


図9.9 Time history of the states during the slope climbing test on simulation.
 :[Top] E_j ;[Middle] ρ_i ; [Bottom] Slip conditions

9.5 おわりに

今回は脚車輪ロボットの脚車輪協調のバランス制御として Grand らによる方法を平面シミュレータに実装をおこなった。安定性と牽引力は向上したものの、ベース姿勢とホイールベースの双方の目標位置を変更するような動きは生まれていない。この目標関数の評価だと牽引力向上と安定化が相反する条件であったためと考える。今後は評価関数の設計方法やベースの目標発揮力 w_i の設定等の改良や姿勢の最適化について別の方法を調べ試みる予定である。

第 10 章

結論

10.1 結論

本論文は、地上の不整地路面でバランスを保ちつつ、マニピュレータなどの比較的大型のパワーツールを用いた重作業を行える油圧駆動プラットフォームの構成方法を提案した。研究方法を図 10.1 に再度示す。

まず、ロボットに必要なと考える特徴を考え設計方針を定めた。ハードウェア構成では、移動機構・アクチュエータ選択の基本的な考え方を説明した。移動機構は不整地において高い踏破能力を持つ脚車輪機構を採用した。代表的な脚構成として脚車輪一体型機構の持つ多様な動作方法と、脚車輪分離型機構の持つベースの機動性や崩落路面への適応について紹介し、不安定な地形での移動・重作業にどのように役立つ可能性があるのか説明した。アクチュエータ選択は耐久性、耐候性が高く、大きなトルクを比較的容易に扱える油圧アクチュエータを採用した。ソフトウェア構成については、従来の農機や建機における油圧制御は流量操作による速度・位置制御が一般的であるが、高い不整地適応性を持たせるために、接地荷重・トラクションを任意に操作可能な最適接触力制御を実装することにした。最適接触力制御は関節ごとのトルク制御をする必要があるため、ロードセルや圧力センサを用いてアクチュエータのトルク制御を実現している。

具体的なロボット構成例として、2 台のロボットを開発した。4 脚 4 輪油圧ローバー *Hydrover-II* は、農地の凹凸路面や急斜面でも安全に使用できる移動プラットフォームのシステム設計を主眼とした。*Hydrover-II* は重量 331 [kg]、油圧駆動の 4 つの脚と脚先に駆動輪を持つ合計 16 自由度のロボットである。まず、急斜面農地での利用を考えて、20 度の斜面でもベースの水平を保てること、35 度の斜面でも転倒しない転倒安定性を持つこと、脚長の半分の高さの段差を踏破できる性能を持つことなど、いくつか具体的な要求仕様を決定した。次に、設計方針に従って機構、アクチュエータの選定について検討した。移動機構は脚車輪一体型機構を選択し、アクチュエータは脚機

構に安価な比例弁とシリンダー，駆動輪にサーボ比例弁と油圧ギアモータを採用した。機構設計にあたっては，静的転倒角の調査で傾斜路面における転倒安定性を，足先発揮力から静歩行時の踏破性能を調査し，要求仕様が満たしていることを確認した。次にシミュレーション解析を用いた，動的に形状が変化する路面におけるバランス・姿勢維持制御性能を確認した。その結果，各脚に接触力を適切に分配することにより，バランス・姿勢を保ったまま変化する環境負荷に柔軟に対応できることを示した。

最後に，開発したローバーに，文献 [35] で示した全身運動制御アルゴリズムを実装し，室内にて基礎実験を行った。その結果，不規則に動く地面に車輪を密着させながら重心位置とベース姿勢を安定化できることや，簡単なスロープにおいてスリップを起さず踏破できることを示した。踏破速度は現段階では 0.3 [m/s] という低い値に留まっているものの，類似研究 [17] [19] と同等かそれ以上である。脚車輪ロボットの全関節にトルク制御を適用し不整地移動した例は，電動ロボットでは最新の優れた例 [45] があるものの，油圧駆動式の大規模ロボットでは著者らが初である。

脚車輪分離型油圧ロボット *CRAWHEL* は，崩落等の発生する不安定な地形でも，作業ツールに必要な力を発生させながら位置と姿勢を安定的に維持できる，重作業プラットフォームのシステム設計を主眼とした。*CRAWHEL* は重量 145 [kg]，体重の大部分を支える 2 つの大きな車輪と，油圧駆動の 4 つの脚を持つ合計 16 自由度のロボットである。設計方針に従って機構，アクチュエータ，油圧パワーユニット，リアルタイム制御システムの設計について説明した。脚機構は，路面崩落に対して素早く新しい接地点に脚を動かすことができるよう軽量に設計することにした。脚のフレームを CFRP とジュラルミンで構成することで 1 脚あたり全質量のわずか 4.5 % となった。アクチュエータは高速高応答なサーボ弁+シリンダを選択した。

開発したロボットを使い，室内にて胴体の位置追従性やバランス性能を確認するための基礎実験を行った。矢状面揺動軌道，円軌道追従実験から，ロボットがベース位置の可動性と制御性を持つことを示した。足場崩落実験からは，地面が不規則に動いたり強い外乱が加えられても，ロボットがベースの位置と姿勢を維持できることを示した。本研究で示した方法にしたがってリンク機構と油圧アクチュエータを設計・選定すれば，大小様々なロボットを構成可能であり，脚の本数や車輪の取付方法が変わっても，本論文で述べた制御システムとアルゴリズムは適用可能である。

Hydrover-II の設計において，摩擦の大きい油圧ギアモータと比例弁の組み合わせでは関節トルク制御が達成できなかったため，外乱オブザーバによる外乱除去方法をシミュレーションにより検討した。シミュレーションより，入力外乱や外乱トルクに対して，外乱をキャンセルするような入力を加えトルク誤差を削減できることを確認した。また 1 軸試験機を作成し制御性能が劣化している原因箇所の特定を行った。検証内容は高応答なサーボ比例弁との比較，制御弁からアクチュエータまでのホース長，

トルクの取得センサに絞って比較を行った。その結果、ホース長についてはほとんど影響が見られないことが分かった。しかしモータ内の圧力センサから推定したトルクは、出力軸に取り付けたトルクセンサによる実測値と大きく乖離することを確認した。今後はシミュレーションでのみ確認した外乱オブザーバの実機検証や圧力センサからトルクを推定する方法を検討する。

第 3 章で述べたトルク制御による全身運動制御を拡張する方法についても検討した。この方法は転倒安定性や牽引力を最適化できるようなロボットの姿勢を非線形最適化手法により決定した。これによりホイールベースや胴体姿勢の変更など、脚車輪ロボットの冗長自由度を効果的に利用することを狙った。斜面を走行するシミュレーションにより検証を行った。その結果は、転倒安定性と牽引力は従来手法より向上したものの、ベース姿勢とホイールベース双方を能動的に動かすことは出来なかった。今後は最適化のための評価関数の変更するなどして改良する。

以上のように、本論文は不整地での移動と重作業のための構成方法に焦点を絞って実現方法を具体的に示し、地上の不整地路面で運用可能な重作業用「プラットフォーム」の実現への端緒を拓いた。

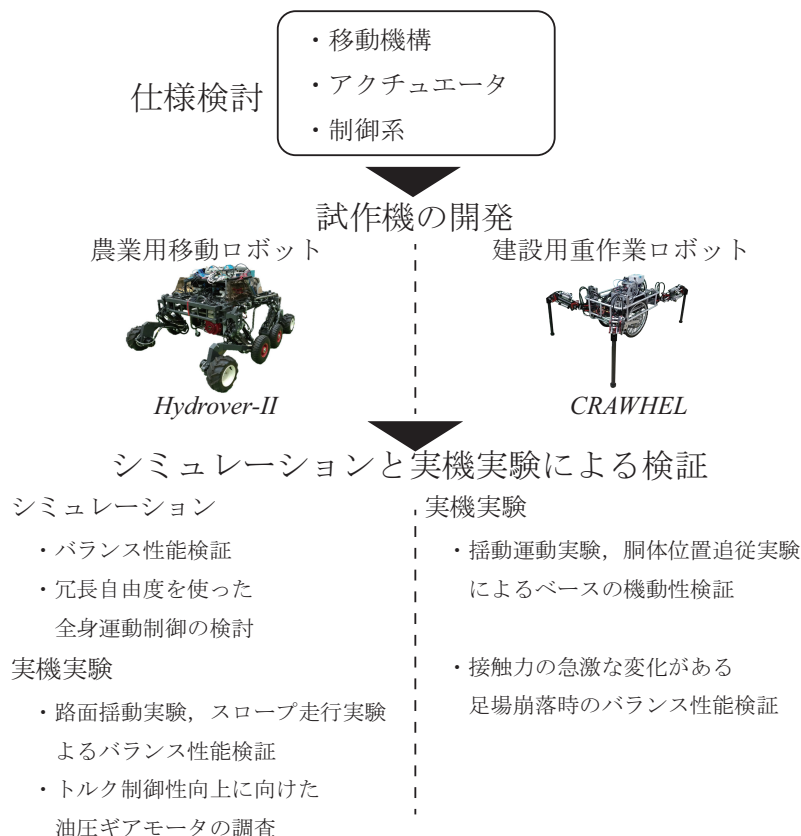


図 10.1 Flowchart of research.

10.2 今後の課題と展望

設計したロボットについて、実機のトルク制御系を改善しつつ、急激な凹凸路面に対する適用限界について、油圧系を組み込んだシミュレーション解析や実機実験により調査する予定である。ソフトウェア構成に関してトラクションを最大化するような制御アルゴリズムや受動輪も含めた走行制御については今後検証していく予定である。冗長性のある脚配置や接地点の変更などの上位プランニングについても、踏破性能やハードウェア構成論に直接影響するため、引き続き取り組む。軟弱路面を含む様々な屋外不整地環境 [46] [47] 踏破に適した機構、制御アルゴリズムについても明らかにしたい。

長期的には、ロボットの自由度構成に関して脚車輪構造や本数の影響やアクチュエータの動特性まで考慮する必要があると考え、それらを積極的に活用したシステム構成論を構築したい。また、油圧ロボットの構成方法として重要となる、効率の良い油圧回路構成方法についても取り組んでいきたい。

参考文献

- [1] 農林水産省：荒廃農地の現状と対策について。2020.
- [2] 独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構：NEDO ロボット白書。第5章，第1節，2014.
- [3] H. Yoshinada, et al : Dual-Arm Construction Robot with Remote-Control Function, in Disaster Robotics: Results from the ImPACT Tough Robotics Challenge. Springer, 2019, pp.195–264.
- [4] Waldron K, Vohnout V, Pery A, McGhee R : Configuration Design of the Adaptive Suspension Vehicle. The International Journal of Robotics Research, vol. 3, no. 2, pp. 37–48, 1984.
- [5] Raibert M. Legged Robots that Balance, The MIT Press, 1986.
- [6] Tsukagoshi H, Hirose S, Yoneda K : Maneuvering operations of a quadruped walking robot on a slope. Advanced Robotics. vol.11, no.4, pp.359–375, 1997.
- [7] Hodishima R, Doi T, Fukuda Y, Hirose S, Okamoto T, Mori J : Development of TITAN XI: a quadruped walking robot to work on slopes. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015, pp. 792–797.
- [8] 妻木 俊道, 阿部 誠一郎, 千葉 健吉：“6脚歩行機械 Landmaster3 の開発”，日本ロボット学会誌, vol. 24, no. 7, pp. 851–860, 2006.
- [9] 奥 雅希, 楊 虎哲, 朴 光日, 原田 勇司, 安達 健司, Barai Ranji, 酒井 悟, 野波 健蔵：“油圧駆動型6脚ロボット COMET - IV の開発-第1報: 基本設計とシステム構成-”，ロボティクス・メカトロニクス講演会 2007, 2A2-G01, 2007.
- [10] Raibert M, Blankespoor K, Nelson G, Playter R : Bigdog, the Rough-Terrain Quadruped Robot. IFAC World Congress, 2008, vol. 41, no. 2 pp. 10822–10825.
- [11] C. Semini, N. G. Tsagarakis, E. Guglielmino, M. Focchi, F. Cannella, and D. G. Caldwell : Design of HyQ - a hydraulically and electrically actuated quadruped robot. Journal of Systems and Control Engineering, vol.225, no.6,

- pp. 831-849,2011.
- [12] 広瀬茂男, 青木実仁, 三宅潤: “対地適応型 4 クローラ走行車 HELIOS-II の開発”, 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 2, pp. 283–291, 1992.
 - [13] 広瀬茂男, 竹内裕喜: “ローラウォーカー: 新しい脚-車輪ハイブリッド移動体の提案”, 日本機械学会論文集 C 編, vol. 62, no. 599, pp. 2758–2764, 1996.
 - [14] M. Takahashi, K. Yoneda, and S. Hirose : Rough Terrain Locomotion of a Leg-Wheel Hybrid Quadruped Robot. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1090-1095, 2006.
 - [15] 妻木俊道, 本田瑛彦, 加藤裕基, 藤岡紘: “4 クローラ型不整地踏破ロボットの開発 –可変構造型の検討と中間試作機による踏破性能の評価–”, 日本ロボット学会誌, vol. 34, no. 7, pp. 422–431, 2016.
 - [16] B. H. Wilcox, T. Litwin, J. Biesiadecki, J. Matthews, M. Heverly, J. Morrison, J. Townsend, N. Ahmad, A. Sirota, and B. Cooper : Athlete: A Cargo Handling and Manipulation Robot for the Moon. Journal of Field Robotics, vol. 24, no. 5, pp. 421–434, 2007.
 - [17] F. Cordes, A. Babu, and F. Kirchner : Static Force Distribution and Orientation Control for a Rover with an Actively Articulated Suspension System. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 5219–5224, 2017.
 - [18] W. Reid, F. J. Perez-Grau, A. H. Goktogan, and S. Sukkarieh : Actively Articulated Suspension for a Wheel-on-Leg Rover Operating on a Martian Analog Surface. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 5596–5602, 2016.
 - [19] M. Hutter, P. Leemann, G. Hottiger, R. Figi, S. Tagmann, G. Rey, and G. Small : Force Control for Active Chassis Balancing. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, vol. 22, no. 2, pp. 613–622, 2017.
 - [20] H. Kimura, E. Nakano and Y. Nonaka : Development of Leg-Wheel Robot and Cooperational Motion of Legs and Wheels. JRSJ, vol. 10, no. 4, pp. 520–525, 1992 (Japanese).
 - [21] E. Nakano and S. Nagasaka : Leg-Wheel Robot: A Futuristic Mobile Platform for Forestry Industry. International Workshop on Advanced Robotics, 1993, pp. 109–112.
 - [22] iRobot Corporation. iRobot Introduces Next-Generation Explosive Ordnance Disposal Robot. <https://investor.irobot.com/news-releases/news-release-details/irobot-introduces-next-generation-explosive-ordnance-disposal>.

-
- [23] E. Rohmer, T. Yoshida, K. Ohno, K. Nagatani, S. Tadokoro and E. Konayagi : Quince: A Collaborative Mobile Robotic Platform for Rescue Robots Research and Development. *Advanced Mechatronics*, pp. 225-230, 2010.
- [24] J Lim, I Lee, I Shim et al : Robot System of DRC-HUBO+ and Control Strategy of Team KAIST in DARPA Robotics Challenge Finals. *Journal of Field Robotics* , vol. 34, no. 4, pp. 802–829, 2017.
- [25] R. Lindemann, D. Bickler, B. Harrington, G. Ortiz and C. Voothees : Mars Exploration Rover Mobility Development. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 19–26, 2006.
- [26] Y. Dai, E. Nakano, T. Takahashi, and H. Ookubo : Motion Control of Leg-Wheel Robot for an Unexplored Outdoor Environment. *IEEE/RSJ IROS*, 1996, pp. 402–409.
- [27] S. Nakajima, E. Nakano and T. Takahashi : The Motion Control Method for a Leg-wheel Robot on Unexplored Rough Terrains. *JRSJ*, vol. 22, no. 8, pp. 1082–1092, 2004 (Japanese).
- [28] 吉田和哉：“月惑星探査ロボットの研究開発における課題 –走行力学の観点からの考察–”，*日本ロボット学会誌*, Vol. 27, No. 5, pp. 506–509, 2009.
- [29] S. Hyon, J. G. Hale, and G. Cheng : Full-Body Compliant Human-Humanoid Interaction: Balancing in the Presence of Unknown External Forces. *IEEE Transactions on Robotics*, vol.23, no.5, pp.884–898, 2007.
- [30] 玄相昊：“複数の接地部分と冗長関節を有するヒューマノイドロボットの受動性に基づく最適接触力制御”，*日本ロボット学会誌*, Vol.27, No.2, pp.178–187, 2009.
- [31] A. Krebs, F. Risch, T. Thueer, J. Maye, C. Pradalier, and R. Siegwart : Rover control based on an optimal torque distribution - Application to 6 motorized wheels passive rover. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 4372–4377, 2010.
- [32] K. Iagnemma, A. Rzepniewski, and S. Dubowsky : Control of a Robotic Vehicles with Actively Articulated Suspensions in Rough Terrain. *Autonomous Robots*, vol. 14, pp. 5–16, 2003.
- [33] C. Grand, F. Benamar, and F. Plumet : Motion kinematics analysis of wheeled-legged rover over 3D surface with posture adaptation. *Mechanism and Machine Theory*, vol. 45, pp. 477–495, 2010.
- [34] M. Taroukh, H. Ho, and A. Bouloubasis : Systematic kinematics aAnalysis and balance control of high mobility rovers over rough terrain. *Robotics and*

- Autonomous Systems, vol. 61, pp. 13–24, 2013.
- [35] Hyon, S., Ida, Y., Ishikawa, J. and Hiraoka, M : Whole-Body Locomotion and Posture Control on a Torque-Controlled Hydraulic Rover. IEEE Robotics and Automation Letters, vol.4, no.4, pp. 4587–4594, 2019.
- [36] 農業土木学会：農業土木ハンドブック 改訂六版. 2000.
- [37] Hyon. S., Ida. Y, Ueda. K, Ishikawa. J, and Hiraoka. M : Development of HYDROVER: A Torque-Controlled Hydraulic Rover. FSR 12th Conference on Field and Service Robotics, 2019.
- [38] Mathworks 社, Simscape Multiboty, <https://jp.mathworks.com/products/simmechanics.html>.
- [39] 平山 健太, 廣澤 望, 玄 相昊：“トルク制御型油圧 2 足歩行ロボットにおける受動性に基づく床反力制御による不整地歩行”, 日本ロボット学会誌, vol. 38, no. 1, pp. 104–112, 2020.
- [40] Ill-yeong LEE, Tae-hyung KIM and Sae-ryung CHOI : HYDRAULIC SERVO SYSTEM USING A FEEDBACK LINEARIZATION CONTROLLER AND DISTURBANCE OBSERVER - SENSITIVITY OF SYSTEM PRAMETERS -. Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, pp. 307-312 ,2008.
- [41] Umeno, T. Kaneki, T. and Hori, Y., Robust : Servo System Design with Two Degrees of Freedom and its Application to Novel Motion Control of Robot Manipulators. IEEE Trans. Ind. Electron., vol.40, no.5, pp.473-485., 1993
- [42] Hiroaki Kuwahara, Fujio Terai, Claudio Semini et al : A Design Method of A Robust Controller for Hydraulic Actuation with Disturbance Observers. International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), 2016.
- [43] C. Grand et al : Stability and Traction Optimization of a Reconfigurable Wheel-Legged Robot. The International Journal of Robotics Research, vol. 23 No. 10, pp. 1041–1058, 2004.
- [44] C. A. K. Dominic A. Messuri : Automatic Body Regulation for Maintaing Stability of a Legged Vehicle During Rough-Terrian Locomotion. IEEE Journal of Robotics and Automation, vol. 1-3, pp. pp.132–141, 1985.
- [45] M. Bjelonic, C. D. Bellicoso, Y. Viragh, D. Sako, F. D. Tresoldi, F. Jenelten, and M. Hutter : Keep Rollin’ —Whole-Body Motion Control and Planning for Wheeled Quadrupedal Robots. IEEE Robotics and Automation Letters, vol.4, no.2, pp. 2116–2123, 2019.
- [46] 室達郎：テラメカニクス—走行力学—. 技報堂出版, 1993.

- [47] 大槻真嗣, 若林幸子, 石上玄也, 須藤真琢: “Jaxa の探査ローバ開発の現状”, 日本ロボット学会誌, vol. 32, no. 5, pp. 408–411, 2014.