

博士學位論文

論文題目 テザー宇宙ロボットの空間移動
と手先位置姿勢制御

提出者 東北大学大学院工学研究科
航空宇宙工学 専攻

学籍番号 7d 35

氏名 能見 公博

指 導 教 官	内 山 勝 教 授
審 査 委 員 (○印は主査)	○ 内山勝 教授 1 C.パーフ 教授 2 小菅-弘 教授 3 猪岡光 教授 4 D.ネンチフ 教授

- 備考(1) 外国人留学生は、国籍を記入すること。
- (2) 履歴事項は、大学入学から年次にしたがって記入すること。
- (3) 博士課程の修了年月日は、学位記授与式年月日を記入すること。

①

平成 9 年度博士学位論文

テザー宇宙ロボットの空間移動
と手先位置姿勢制御

東北大学大学院工学研究科

航空宇宙工学専攻

能見 公博

平成 10 年 1 月 20 日

目次

1	序論	1
1.1	本研究の目的	1
1.2	研究の背景	2
1.2.1	宇宙構造物の大型化・多様化	2
1.2.2	テザーシステムの歴史	3
1.2.3	宇宙ロボットの実例・概念例	4
1.3	テザーと宇宙ロボットに関する研究の現状	7
1.3.1	テザーに関する研究	7
1.3.2	宇宙ロボットに関する研究	7
	(1) 微小重力に起因する技術課題	8
	(2) 遠隔操作に関する技術課題	8
	(3) 柔軟リンクに起因する技術課題	9
1.4	論文の構成と概要	9
2	テザーロボットシステム	11
2.1	はじめに	11
2.2	テザーに連結された宇宙ロボット	11
2.3	期待されるミッションとテザーの有効性	12
2.4	テザーロボットシステムの定式化	16
2.4.1	解析モデル	16
2.4.2	テザーロボットの運動学と動力学	17
2.5	テザーロボットシステムの研究課題	22
2.5.1	宇宙空間移動に関する課題	22
2.5.2	手先位置姿勢制御に関する課題	23
2.5.3	外乱補償に関する課題	23
2.6	まとめ	24

3	キャスティングによる宇宙空間移動	25
3.1	はじめに	25
3.2	母船搭載マニピュレータによるキャスティング	25
3.3	キャスティングにおける移動軌道修正制御	26
3.3.1	目標軌道と座標系	26
3.3.2	母船搭載マニピュレータの手先位置指令	27
3.3.3	移動軌道修正に関する制御法の評価	29
3.4	シミュレーション	31
3.4.1	パラメータ設定と制御則	31
3.4.2	テザーロボットの移動軌道からの逸脱	33
3.4.3	移動軌道修正制御の有効性	34
3.5	まとめ	35
4	平衡点における手先位置姿勢制御	40
4.1	はじめに	40
4.2	目標地点におけるテザーロボットの動挙動	40
4.2.1	重力と遠心力の近似	40
4.2.2	テザーロボットの安定な平衡点	41
4.2.3	テザー張力とテザーロボットの相互干渉	42
4.3	テザー張力が作用する状態の手先位置姿勢制御	43
4.3.1	テザーロボットの重心に対する運動量	43
4.3.2	一般化ヤコビ行列を用いた制御法	44
4.4	シミュレーション	45
4.4.1	パラメータ設定と制御則	45
4.4.2	シミュレーション結果	46
4.5	まとめ	47
5	テザーロボットの外乱補償	53
5.1	はじめに	53
5.2	テザー連結位置操作による角運動量制御	53
5.2.1	テザー張力による並進運動と回転運動	53
5.2.2	重心回りの角運動量に関する制御法	54
5.3	キャスティングによる移動中の外乱補償	55
5.3.1	パラメータ設定と制御則	55
5.3.2	シミュレーション結果	56

5.4	重力を利用したテザー張力制御における外乱補償	57
5.4.1	パラメータ設定と制御則	57
5.4.2	テザーロボットの移動時における外乱補償	58
5.4.3	安定な目標地点における外乱補償	59
5.5	まとめ	60
6	結論と今後の課題	74
6.1	結論	74
6.2	今後の課題	75
	参考文献	77
	発表論文	85
	謝辞	89
	付録	89
A	記号表	90
B	動力学方程式の導出	94
C	シミュレーションモデル	96

第 1 章

序論

1.1 本研究の目的

近年宇宙開発の著しい進歩にともない，宇宙ロボットの必要性が増してきている．そのなかでも，軌道上作業を行うため，とくに宇宙空間に浮遊するロボットが注目を集めている．この空間浮遊型宇宙ロボットは，自律系として空間を自由に移動できるため，多種多様な作業要求に対応できると期待され，その作業のための制御手法が数多く研究されている．ところで，「テザー」いわゆる「ひも」は軽量かつ収納性がよいため，宇宙空間においての利用が期待されている．そのなかでは，宇宙機の空間移動にテザーを用いることも考案されている．このような背景より，空間浮遊型宇宙ロボットの移動に，テザーを利用することを考える．そのため，大型母船と小型ロボットをテザーにより連結した新しい宇宙機「テザーロボットシステム」を提案する．テザーに連結されたロボットを「テザーロボット」と呼ぶ．

テザーロボットは，推進エネルギーを用いず，テザー張力により宇宙空間を移動でき，母船と離れた位置の対象物に対し作業を行うことができる．その基本的な移動方法は，二通り考えられる．一つは，宇宙ロボットの新しい移動方法である「キャスティング」である．それは，母船搭載マニピュレータを用いてテザーロボットを投げ，テザー張力を作用させて目標地点に到達させる方法である．もう一つは，従来のテザー伸展技術を利用した移動方法である．この方法では，目標地点は軌道中心と母船を結ぶ直線上となる．さらに，外力が作用した場合，テザー張力を利用した制御が可能であると期待できる．空間に浮遊している宇宙ロボットに外力が作用すると，その運動制御に推進装置またはリアクションホイールを用いなければならないが，テザーロボットではこれらの装置を用いずに，テザーを利用することが考えられる．

本研究では，テザーロボットシステムの運用に必要な，基本的な制御法を確立すること

を目的とする。従来、テザーシステムと宇宙ロボットに関する研究は数多く行われており、応用することができる技術も少なくない。そこで、応用することができる技術と新しい技術を明らかにし、とくに推進力としてテザー張力を利用すること、およびテザー張力が作用することによる拘束条件に着目して、システム運用に有効である制御法を考案する。

1.2 研究の背景

人類の宇宙への進出は、1957年初の人工衛星「スプートニク」が旧ソ連により打ち上げられたことから始まる。そして、1961年に初の有人宇宙飛行、1965年に宇宙飛行士の初の宇宙遊泳が行われ、1960年代後半のアポロ宇宙船の月面着陸は、宇宙開拓の劇的な出来事であった。国内においては、1970年に人工衛星「おおすみ」を打ち上げ、世界で四番目の人工衛星自力打ち上げ国となった。そして1990年代に入り、H-II ロケットや各種大型衛星の開発により、技術的に世界最先端に並んだといえる。

1.2.1 宇宙構造物の大型化・多様化

今日では、地球を中心とする軌道上に、人工衛星をはじめとして数多くの宇宙構造物が存在する。これらの宇宙システムは、その機能拡大のために大型化されていく方向にある。現段階では、構造物部材の地上から宇宙空間への搬送は、ロケットの打ち上げに頼らざるを得ない。その積載能力には、大きさ・重量ともに限界があるため、大型宇宙構造物は軌道上において組み立て、または展開されることとなる [1]。組立型は宇宙飛行士の船外活動に依存することが多いが、最近ではロボット技術が導入されるようになり、今後の活躍が期待されている。一方、展開型はラッチ機構や潤滑不良による太陽電池アレイやアンテナの展開不具合事例が数多い [2]。これらの事故は軌道上において対処しなければならないため、軌道上作業は必要不可欠となる。

近年、宇宙構造物に関する新しい概念として、知的適応構造物が注目されている。それは、構造物に課せられたミッション要求に応じて、幾何学的形状や力学的特性を変化させる機構・計測系・制御系を備えた構造物である [3]。これらの制御可能要素を持つ構造物を、NASA (National Aeronautics & Space Administration) の JPL (Jet Propulsion Laboratory) では Adaptive Structure, MIT (Massachusetts Institute of Technology) では Intelligent Structure と呼んでいる。知的トラス構造物の構成要素であるトラス型メカニズムは、回転ジョイントによりリンクが直列に連結されるシリアルリンク型メカニズムに比べ、高剛性・高精度が期待され、ドッキングシステム [4]・スペースクレーン [5] としての利用が検討されている。さらに、1.2.2 節で述べるテザーシステムも、軌道上においてテザーの長さを変化させることにより、システム全体のスケールおよび力学的特性が変

化するので、知的適応構造物と考えることができる。

このように宇宙構造物の大型化・多様化にともない、軌道上サービスが不可欠なものとなってくる。例えば 1973 年 NASA スカイラブ宇宙科学ステーションにおいて、打ち上げ直後自動展開できなかった太陽電池パネルの展開、太陽光の直接照射を遮断するサーマルブランケットの取り付けが行われた。1981 年スペースシャトル初飛行が行われてから、軌道上サービスが一般的となり始めた。1984 年 4 月シャトルマニピュレータにより、軌道上で故障して漂流していた人工衛星（太陽観測衛星）の回収、姿勢制御モジュールの交換等の修理、軌道上への放出が行われた [6]。1993 年 12 月ハブル天体望遠鏡（1990 年 4 月打ち上げ）の太陽電池パネル交換、光学収差補正機器の取り付け等が行われた [7] [8]。1996 年 1 月、日本人宇宙飛行士若田光一氏の操縦するマニピュレータにより、日本が打ち上げた人工衛星 SFU (Space Flyer Unit) の捕獲・回収に成功、さらに実験衛星 OAST-Flyer の放出・回収に成功したことは記憶に新しい [9]。

これらの宇宙空間における軌道上サービスを、永続的で大規模なものとするためには、拠点となる宇宙基地や宇宙プラットフォーム等の大型構造物を建設する必要がある [10]。さらに、構造物の保守点検・推薬補給・機器交換、および拠点間における物資の輸送が必要となる [11]。現在では、宇宙ステーションの建設計画がある。それは、1998 年 7 月に第一回目の打ち上げが行われ、その後、数回にわたる打ち上げにより各部が運搬され、軌道上において組み立てられる。この計画は、米・露・日・加・伊・欧の六機関が参加している国際共同プロジェクトである [13]。その建設は、スペースシャトル等で輸送される構成モジュールを、スペースシャトルや宇宙ステーションのマニピュレータにより取り付け、組み立てられる [12]。

1.2.2 テザーシステムの歴史

宇宙空間でのテザーの利用は、1895 年 Tsiolkovskii により初めて提案されている [14]。そこでは、宇宙船より鎖につながれたおもりを放出し、宇宙船において人工重力をつくりだすこと、および運動量を制御することなどが考えられている。また、地表から静止衛星高度以上に伸ばした搭についても触れている。1910 年 Tsander's は月表面より地球近辺までケーブルを伸展することを考え、その材質についても検討したが、発表されたのは 1978 年のことである。さらに、フィクション作家である Clarke は The Fountains of Paradise のなかで軌道上の搭について、Niven は Ringworld のなかで太陽の回りの回転リングについて描いている。テザーに関する大きなプロジェクトとして Nonsynchronous Skyhook が挙げられる。それは、地球表面にほぼ相対速度ゼロで近づくロングテザーシステムであり、1969 年には Artsutanov [15]、そして 1977 年には Moravec [16] により話題とされている。

テザーの宇宙空間における実証実験は、1965 年ロシアの Korolyev 社において計画されたが、Korolyev の死によりそのプロジェクトは中止された。このため、初のテザー実験は、1963 年に Chobotov により Tsiolkovskii の考えが再検討された後 [17]、1966 年の Gemini-Agena プログラムにおいて、Gemini VI および Gemini VII が Agena Vehicle とつながれた実験である [18]。Gemini VI は 30 [m] 程度のテザーにより連結された Gemini と Agena を回転させることにより遠心力が発生し、相互に引っ張られることが確認された。Gemini VII では Gemini と Agena は局地垂直方向に沿った位置に投入され、初めて重力傾斜安定の予備的实验が行われた。

近年のテザーに関する研究は、1973 年 Grossi's による軌道上アンテナより始まる [19]。1974 年には Smithsonian 天文台の Colombo 教授らにより、テザー衛星による低高度観測の可能性が示された [20]。AMPS (Atmosphere, Magnetosphere and Plasma in Space) Working Group の提案のなかで、彼らは長いロープによりつながれた衛星 (Skyhook) の実現性、テザー伸展に風船を利用することについて述べている。これに対し、MSFC (Marshall Space Flight Center) で行われた研究は、母船と地球との万有引力の差を利用することにより、テザー衛星の伸展・安定化・回収が可能であることを示している [21]。さらに、テザー衛星の飛行安定、低高度飛行にともなう空力加熱、母船との通信問題が議論されている [22]。その後、テザーシステムの計画は具体化され、アメリカ・イタリアの共同プロジェクトである Tethered Satellite System Project がスタートした [23]。

1.2.3 宇宙ロボットの実例・概念例

1.2.1 節に述べているように、軌道上サービスの需要が増してきているなかで、宇宙ロボットはそのキーテクノロジーとなる。宇宙ロボットに関する様々な提案は、1970 年代初めより行われている。これらの宇宙ロボットは、宇宙開発事業団により次のように分類されている [24]。

- ・ 第一世代: 宇宙飛行士が近くから操作する近接操作型ロボット (シャトルマニピュレータなど)。
- ・ 第二世代: 地上からの遠隔操作を基本とし、定型作業等の自律的な実行が可能な部分自律型ロボット (軌道上作業機など)。
- ・ 第三世代: ロボット自身の判断で作業が可能な自律型ロボット (宇宙工場・惑星探査ロボットなど)。

シャトルマニピュレータ SRMS (Space Shuttle Remote Manipulator System) [25] [26] は、最初に実用化された宇宙ロボットである。それは、スペースシャトルのカーゴベイ内

部および近接空間へのサービスを行う。スペースシャトル本体（オービタ）は質量 70 [t]、ロボットアーム（マニピュレータ）は全長 15.3 [m]、重量 400 [kg] の大型六自由度マニピュレータであり、最大約 15 [t] のペイロード操作が可能である（注：搭載可能ペイロードは設計時において 29.5 [t] であったが、打ち上げ直後の緊急着陸安全性確保のため 15 [t] 程度に制限されている）。1981 年スペースシャトルの第 2 回テストフライトにおいて動作確認が行われ、人工衛星の捕獲・修理、大型構造物の組み立て実験などの様々なミッションを行ってきた。

その後、これまでに行われたロボット実験は、次に挙げるものが有名である。

- ・ ロボット技術実験 ROTEX (Robot Technology Experiment) [27]:

1993 年 5 月ドイツの DLR (Deutsche Forschungsanstalt für Luft-und Raumfahrt) が中心に行った。スペースラブ内の実験ラックに組み込まれた全長約 1.4 [m] の六自由度ロボット。シャトルミッションとして与圧室内における宇宙ロボット技術の実証、回転浮遊物体の捕捉を目的としている。宇宙飛行士の近接操作、および地上オペレータの通信回線による遠隔操作により運用された。

- ・ 宇宙実験支援用ロボット Charlotte [28]:

アメリカ McDonnell Douglas Aerospace 社により実施された。ワイヤ長さ調節による空間移動が可能な箱状ロボット。スペースラブ内に取り付けられた実験装置の操作や動作状態の観察を、遠隔操作および自動シーケンスにより行うために開発された。

- ・ マニピュレータフライトデモンストレーション MFD (Manipulator Flight Demonstration) [29]:

宇宙ステーションの JEM (Japan Experimental Module) における JEMRMS (JEM Remote Manipulator System) 子アームに相当するマニピュレータと制御装置のスペースシャトル上実験。JEMRMS の基本設計の妥当性確認、軌道上におけるマニピュレータの操作性・保全性の確認のため、1995 年 8 月に実施された。

この他にも、宇宙科学研究所の開発した再利用可能な科学衛星 SFU (Space Flyer Unit) [30] の第 2 回ミッションにおいて、ターゲット衛星のマニピュレータによる回収実験を実施したことなどが挙げられる。また、今後実験が予定されているロボットとして、次のようなものがある。

- ・ 技術試験衛星 7 型 ETS-VII (Engineering Test Satellite VII) [35]:

宇宙開発事業団が、1997 年 11 月 28 日に H-II ロケットにより打ち上げた。全長約 2 [m] の六自由度ロボットアームを有するチェイサ衛星とターゲット衛星の二機が

ら構成され、高度約 550 [km] の地球周回軌道で運用される。実験は 1998 年 3 月より行われる予定であり、ランデブドッキング・宇宙ロボットの基礎技術習得を目的とする。

- ・宇宙ロボット実験衛星 Ranger [36]:

NASA・Maryland University が共同で開発。各種軌道上実験を行うための双腕 Dextrous Arm, 作業対象をモニタするためのビデオカメラを取り付けた Video Arm, 作業対象に本体を固定するための Grappling Arm の計四本のアームを有する。

さらに、現在計画されている宇宙ステーションの建設・運用に備え、次のようなロボットが開発中である。

- ・可動型サービスセンター MSC (Mobile Servicing Center) [31]:

宇宙ステーショントラス上を移動するカナダのマニピュレータシステム。米国が開発した MT (Mobile Transporter), カナダが開発した SSRMS (Space Station Remote Manipulator System)・SPDM (Special Purpose Dextrous Manipulator) で構成される。

- ・日本実験モジュール遠隔操作マニピュレータシステム JEMRMS [32]:

宇宙ステーションの日本実験モジュール JEM に取り付けられ、爆露部のペイロードサービスを行うマニピュレータ。JEM 補給モジュール・爆露部上の大型実験装置のハンドリングに使用される大型親アーム、爆露部上の小型実験装置のハンドリング等に使用するための小型子アームから構成される。

- ・ヨーロピアンロボットアーム ERA (European Robot Arm) [33]:

宇宙ステーションのロシア担当部分に取り付け予定の ESA (European Space Agency) が開発したマニピュレータ。

このように多くの宇宙ロボット実験が行われ、また予定されているが、予算削減により中止されたプロジェクトも数多い。例えば、NASA による飛行テレロボットサービス機 FTS (Flight Telerobot Servicer) [34] が挙げられる。これは、軌道上組み立て・衛星へのサービスを提供する七自由度二アームのロボットであり、スペースシャトル・宇宙ステーションをベースとする。さらに、推進装置やドッキング機構を備えた軌道上輸送システム OMV (Orbital Maneuvering Vehicle) [37] との組み合わせにより、自由飛行が可能である。さらに、NASA は軌道上サービス衛星 SSS (Satellite Servicing System) [38] など計画していた。また、構想提案されている宇宙ロボットとして、宇宙開発事業団による軌道上作業機 OSV (Orbital Servicing Vehicle) [40], イタリア宇宙事業団 ASI (Italian Space Agency) による軌道上作業機 SPIDER [41], 静止衛星サービス GSV [42] などもある。

1.3 テザーと宇宙ロボットに関する研究の現状

1.3.1 テザーに関する研究

テザーを力学的な立場から考えると、きわめて多くの自由度を持つ。テザーシステムの基本的な力学モデルは、宇宙空間における二つの物体をテザーにより連結されたものとして、Modi らにより定式化されている [43]。その定式化においては三次元モデルを取り扱い、テザーの質量・弾性・たわみ、さらにテザーに連結された剛体の運動を考慮しているが、解析結果は非線形性を考慮していないものである。非線形性を考慮した解析は、Kalaghan [44]・Kohler [45] らにより行われている。このような解析において、連続体であるテザーの取り扱い是非常に難しく、Modi らはガラーキン法、Kalaghan らは質点を連結したモデル、Kohler らは有限要素法により解析を行っており、それぞれ異なる手法を用いている。

ところで、テザーシステムを利用したミッションを行う場合、テザー伸展技術が重要となる。このことに着目し、テザーの質量・弾性・たわみを無視し、テザー張力の影響を受けずに軌道運動している大型母船より、質点と仮定できる大きさの小型衛星を伸展・回収する制御手法が確立されている。例えば、Bainum らにより「線形最適化フィードバック制御」[46]、藤井らにより「ミッションファンクション制御」[47] などが提案されている。前者は、システムの運動方程式を線形化し、評価関数を用いて最適化を行う方法である。後者は、ミッション関数と呼ばれる Liapunov 関数を用いた非線形制御則である。さらに、テザー張力のみによる制御では実際のミッション、とくに回収ミッションは困難であるため、テザー先端の小衛星にスラスタを取り付けること [48] [49]、ブームの先端よりテザーを伸展し、そのブームを操作すること [50] などが研究されている。

最近では、テザー張力を利用したテザー衛星の姿勢制御 [51]、母船の軌道が楕円であることを考慮した場合のカオスの発生 [52]、テザー張力が無い場合の挙動についても研究されている [53]。

1.3.2 宇宙ロボットに関する研究

宇宙においてロボットを利用する場合、非常に幅広い技術が要求される。そのなかでとくに宇宙ロボット固有の問題を整理すると、次のようにまとめられる。

- ・微小重力に起因する技術課題

軌道上では、地上と異なり重力が非常に微小であるため、物体は浮遊状態である。このためベースが固定できず、ロボットアームを動かすことによる反力がベースの運動を誘発し、ロボットアームとベースの相互干渉が発生する。

- ・ 遠隔操作に関する技術課題

とくに、第二世代ロボットは地上からの遠隔操作となる。このため通信時間による遅れは、無視できないものとなる。

- ・ 柔軟リンクに起因する技術課題

宇宙機全般に要求される軽量化は、宇宙ロボットに関しても例外ではない。このため、アームの剛性低下による柔軟性に関する制御問題が発生し、手先の位置決め制御が難しくなる。

以上の技術課題それぞれについて、従来の研究を紹介する。

(1) 微小重力に起因する技術課題

ロボットアームとベースの相互干渉に関する問題を解決する代表的制御法としては、運動量保存則に基づく Dubowsky らにより提案された「仮想マニピュレータ」[54]、および梅谷・吉田らにより提案された「一般化ヤコビ行列」[55]が挙げられる。また、これらの制御法を用いた場合の作業領域についても調べられている。剛体宇宙ロボットの順動力学に関して、山田・土屋らは Kane の運動方程式を適用[56]、梅谷・吉田らは Lagrange の方法により解いている。また、逆動力学の計算アルゴリズムについては Newton-Euler 法[57]、Lagrange 法[58]などがある。さらに、非ホロノミック性による衛星本体の姿勢を積極的に変化させる制御法[59]、マニピュレータの動作反力による姿勢変化を最小とする軌道計画[60][61]、冗長マニピュレータによる衛星本体の姿勢制御[62]、双腕マニピュレータ協調による浮遊物体捕獲[63]などが研究されている。

宇宙システムの地上実験は非常に困難であると考えられているが、空気浮上による宇宙ロボットの平面内実験がいくつか行われている。その先駆的ハードウェア実験は、米国 Stanford 大学において行われている[64]。日本においては、梅谷・吉田らによる一般化ヤコビ行列の検証実験[65]、小松らによる浮遊ペイロード自律回収実験[66]、町田らによる双腕マニピュレータ協調による浮遊物体捕獲実験[67]がある。

(2) 遠隔操作に関する技術課題

Hannaford・Ruoff らの時間遅れのある宇宙ロボットの遠隔操作に関する研究調査により[68][69]、初期の遠隔操作に関する研究において、操作性向上のため通信時間遅れがある系においても、力覚フィードバックが必要であると考えられていたこと、および力覚フィードバックのある系の制御ループに時間遅れがあると、系が不安定になることが知られている。さらに、Hannaford は時間遅れがある遠隔操作で、力覚フィードバックを使用

した場合、およびコンプライアンス制御を併用した場合の Peg-in-hole の作業時間を評価している。また Ruoff は、現在研究されているテレロボットの多くは、リモートサイトに優れた演算能力を持つ計算機が必要であると指摘している。しかし、宇宙機搭載用計算機は耐放射線性の改良に時間を要するため、地上用計算機に比べ格段に演算能力が劣る。このため、現在研究されているテレロボットの実用化には、多くの問題がある。

通信時間遅れのある遠隔地のロボット操作に関する地上実験は、次のようなものが行われている。例えば、Funda らは Teleprogramming 手法を用いて実験している [70]。また、同様な試みを平井らのグループにより、米国西海岸 JPL と日本の電子技術総合研究所、それぞれに設置されたロボットを、それぞれの機関に設置された制御装置に ISDN 回線で接続し、相互に制御する実験を行っている [71]。

(3) 柔軟リンクに起因する技術課題

柔軟リンクに起因する問題は、1970 年代に Book により提起されている [72]。彼は、1979 年に運動学を記述し [73]、1984 年には Lagrange 関数の漸化式表現を用いて動力学を論じた [74]。また、Cannon らは LSS (Large Space Structure) のモデル化に見られる分布定数系としてフレキシブルマニピュレータのモデル化を行い、偏微分方程式をモード展開し、システムの状態方程式を導出している [75]。さらに、Truckenbrodt はフレキシブルマニピュレータを剛体と弾性体の結合によるハイブリッドモデルとして捉え Ritz の方法を用い [76]、Dubowsky らは有限要素法を用いている [77]。

1980 年代半ばからはフレキシブルロボットアームの研究は飛躍的に増大している。最近の傾向としては、三次元運動の考慮 [78]、モデリングの簡素化 [74]、軌道制御 [80]、作業特性解析 [68] などに重点が置かれている。また、宇宙空間において活躍しているシャトルマニピュレータ、および活躍が期待されている宇宙ステーション用ロボットアームなどは、大型なフレキシブルアームの先端に小型マニピュレータを取り付けたシステムである。このようなシステムにおいて、小型マニピュレータの運動の反力によりフレキシブルアームの振動が誘発されることを問題として、振動抑制に関する制御法が研究されている [82] [83]。

1.4 論文の構成と概要

本章では、テザーロボットシステムの研究を行うことを目的として、これまでの宇宙開発について、とくにテザーと宇宙ロボットに重点を置いて調査を行った。

第 2 章 テザーロボットシステム では、テザーロボットシステムの特徴を明らかにするとともに、本システムを用いることが有効であると考えられるミッション例を紹介する。

次に、これらの内容を考慮して、基本的な解析モデルを設定する。このモデルに基づきテザーロボットの動力学方程式を導出し、運動量を求める。また、システムに必要な技術を明確にする。

第3章 キャスティングによる宇宙空間移動 では、無重力空間における宇宙ロボットの移動に関する新しい手法であるキャスティングの提案を行う。まず、キャスティングによる移動方法を説明し、その移動軌道修正に関する制御則の設計、および評価を行う。さらに、キャスティングのシミュレーションを行い、移動軌道修正制御の有効性を検証する。

第4章 平衡点における手先位置姿勢制御 では、軌道上の重力および遠心力とテザー張力による平衡状態におけるテザーロボットの手先位置姿勢制御について論ずる。まず、平衡点の性質を調べ、その後にテザー張力が作用する状態におけるテザーロボットの制御法を提案する。さらに、提案した制御法を用いて手先位置制御・手先姿勢制御、それぞれについてシミュレーションを行う。

第5章 テザーロボットの外乱補償 では、テザーロボットに対する外乱を補償する制御法について論ずる。まず、テザー張力を積極的に利用することにより外乱補償を行う方法を説明し、第4章の制御法に基づく制御則を設計する。そして、キャスティングによる移動中、重力を利用したテザー張力制御による移動中、および移動後、それぞれについて外乱が作用した場合のシミュレーションを行い、外乱補償制御の有効性を検証する。

第6章 結論と今後の課題 では、まず、第2章から第5章までの内容をまとめる。さらに、テザーロボットシステム実用化に関する今後の課題を簡単に述べる。

第 2 章

テザーロボットシステム

2.1 はじめに

本章では、テザーロボットシステムの特徴を明らかにするとともに、運用において必要である新技術を明確にする。また、テザーロボットシステムを用いることが有効であると考えられるミッション例を紹介する。次に、工学的特徴を捉えた仮定を設定し、テザーロボットシステムのモデル化を行う。さらに、テザーロボットの運動エネルギーと位置エネルギーを求め、動力学方程式を導出し、運動量を求める。

2.2 テザーに連結された宇宙ロボット

宇宙船とロボットをテザーにより連結したテザーロボットシステムは、これからの宇宙開発における貢献が期待されている宇宙ロボットに、古くからその有効性が認められ、多くの利用法が提案されているテザーの利点を取り入れた新しい宇宙システムである。ここで、システムの特徴を整理して以下に示す。

- (i) テザーの伸展範囲内において、テザー張力を推進力として利用することができる。

テザーロボットは、空間浮遊型宇宙ロボットと同じように自由飛行が可能であり、さらに従来の問題点について解決することができる。第一点目は、自律系となるロボットが暴走した場合テザーにより拘束でき、ロボットを速やかに回収することが可能である。第二点目は、これまでの空間浮遊型宇宙ロボットの移動および外乱補償は、推進装置による燃料噴射であるため、燃料消費、噴射方向に存在する宇宙機の汚染等の問題があるが、テザー張力制御による移動を可能とすれば、この問題を回避することができる。

- (ii) テザーを介したテザーロボットへのエネルギー供給が可能である。

テザーを介したエネルギー供給が可能であれば、テザーロボット自体はエネルギー源を持つ必要がなくなる。しかし、テザーにエネルギー供給の機能を持たせると、テザーの物理パラメータ・質量・弾性が無視できないものとなり、テザーの挙動がテザーロボットに及ぼす影響が大きくなる。

- (iii) 拘束があるため運動が制限される。

これは、テザーロボットシステムにおいて、テザーロボットがテザーに連結されていることによる短所であり、空間浮遊型宇宙ロボットと比較すると移動範囲が制限されることとなる。例えば、母船に対して構造物の裏側へのロボットの移動、また、複雑な移動・繊細な移動は、テザーによる拘束、テザーが絡まることなどの理由により、非常に困難であると考えられる。

2.3 期待されるミッションとテザーの有効性

前節において明らかにした特徴を考慮して、テザーロボットシステムを用いることが効果的であるミッション例を、図 2.1 ～ 図 2.4 に示す。

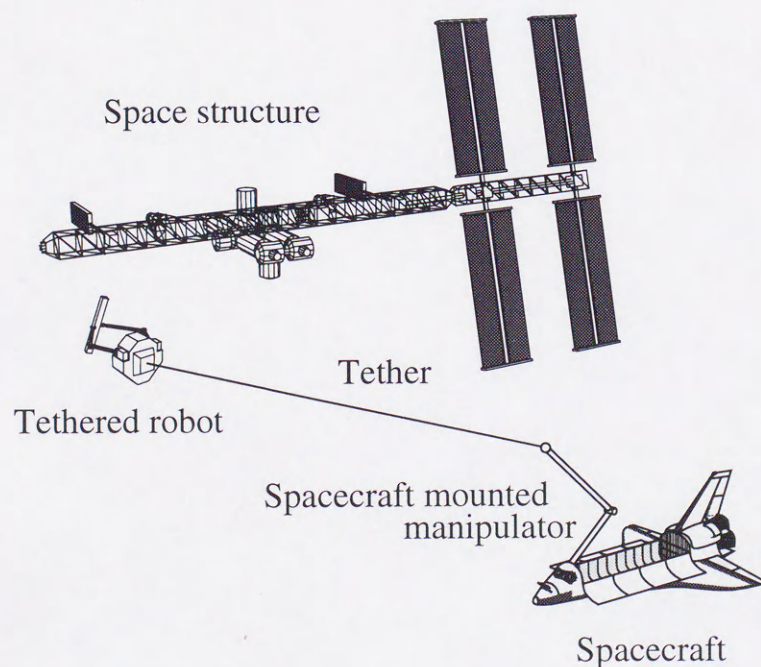


Fig. 2.1: Construction assistance

図 2.1 は、宇宙構造物の建築援助のようすを示す。宇宙船により運搬された建築部材

を、テザーロボットにより建築中の構造物に取り付けている。このミッションでは、まず母船が宇宙構造物に近付き、ある程度離れた位置に停船する。そして、テザーロボットは母船・構造物間を移動し、建築部材を構造物の各所に取り付ける。このとき、テザー張力によるロボットの移動が可能であれば、エネルギー消費、および燃料噴射による建築中構造物の汚染回避の点で非常に有利である。

ここで想定している母船と宇宙構造物の距離は数百メートルであり、キャスティングによる移動が有効であると考えられる。具体的に 100 [m] 離れている場合に、初速度 2 [m/s] で質量 100 [kg] のテザーロボットが母船を離れ、2 [N] のテザー張力を作用させ続け、100 [s] で目標地点に到達する場合を考える。このとき、軌道上外力を重力のみとすると、母船軌道半径が 1×10^4 [km] 程度である場合、重力および遠心力により発生する最大テザー張力、すなわちテザーを軌道半径方向に 100 [m] 伸展した場合に発生するテザー張力は、0.01 [N] 程度の無視できるオーダーである。

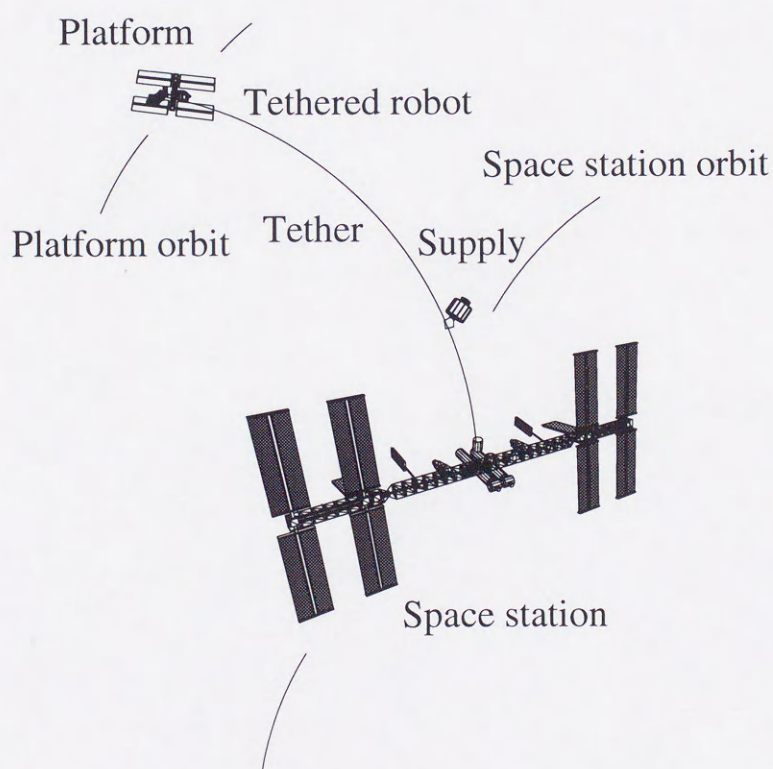


Fig. 2.2: Supply transportation

図 2.2 は、テザーを利用した宇宙空間輸送である。テザーロボットシステムのミッションとしては、母船よりテザーを伸展し、その先端に取り付けられたテザーロボットが母船と異なる軌道上に位置する宇宙構造物をつかむことである。すなわち、異なる軌道上に位置する複数の宇宙機が、テザーロボットにより連結される。

このミッションでは、重力を利用したテザー張力制御が必要となる。具体的に宇宙構造物の軌道が 10 [km] 離れている場合には、軌道半径が 1×10^4 [km] 程度とすると、重力と遠心力により 1 [N] 程度のテザー張力が作用する可能性がある。これに対し、テザーロボットの質量・初速度を 100 [kg]・2 [m/s] としてキャスティングを行う場合、テザー張力は 0.02 [N] 程度にする必要がある。すなわち、重力による影響が大きいため、このミッションにおけるテザーロボットの移動はキャスティング法では不可能であり、重力を利用したテザー張力制御に頼らざるを得ない。

ところで、テザーロボット目標地点の母船に対する相対位置は一定であるが、目標宇宙構造物に対しては時間とともに変化する。また、重力を利用したテザー張力制御ではテザーロボットの移動に軌道周期の時間尺度を要するとともに、その所要時間は予測することが難しい。これらの理由により、テザーロボットの目標地点の軌道と宇宙構造物の軌道が交わる必要がある条件となり、さらに、テザーロボットは目標地点において目標宇宙構造物の接近を待つことが必要となる。

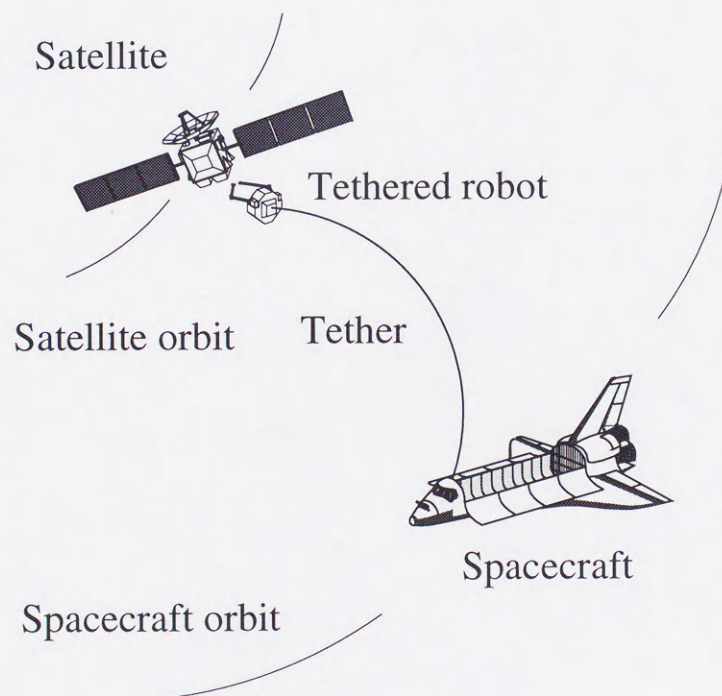


Fig. 2.3: Satellite servicing

図 2.3 は、母船から離れて位置する衛星に対し、メンテナンス・ユニット交換・回収などの作業を行うミッションである。このミッションは二つの状態が想定され、それぞれ長所を有する。

第一は、図 2.1 の宇宙構造物の建築援助と同様に、母船が衛星に近付いた後にキャス

ティングによりテザーロボットを移動させる場合である。この場合は、母船が直接衛星と接触するミッションと比較して、衝突などによる母船または衛星への影響を低減できると、燃料噴射による相互の汚染を避けることなどが期待できる。

第二は、母船は定軌道上に位置し、衛星が異なる軌道上に位置する場合である。このとき、母船軌道から衛星軌道までテザーロボットが移動するので、母船は定軌道運用された状態で、複数の衛星に対しサービスを行うことができる。テザーを伸展している宇宙船が他の目的で運用されている場合、宇宙ステーションやプラットフォームなどからテザーが伸展されている場合、母船が衛星軌道に移動することは好ましくない、あるいは不可能である。このような状態において、この方法はとくに有効である。このミッションでは、重力を利用したテザー張力制御が必要となる。これは、図 2.2 の宇宙構造物のテザー連結ミッションと同様に、テザーロボットは目標地点で衛星の接近を待つこととなり、さらにメンテナンス・ユニット交換等の作業を行う場合は、衛星がテザーロボットの作業範囲内に位置する間に作業を終了しなければならない。

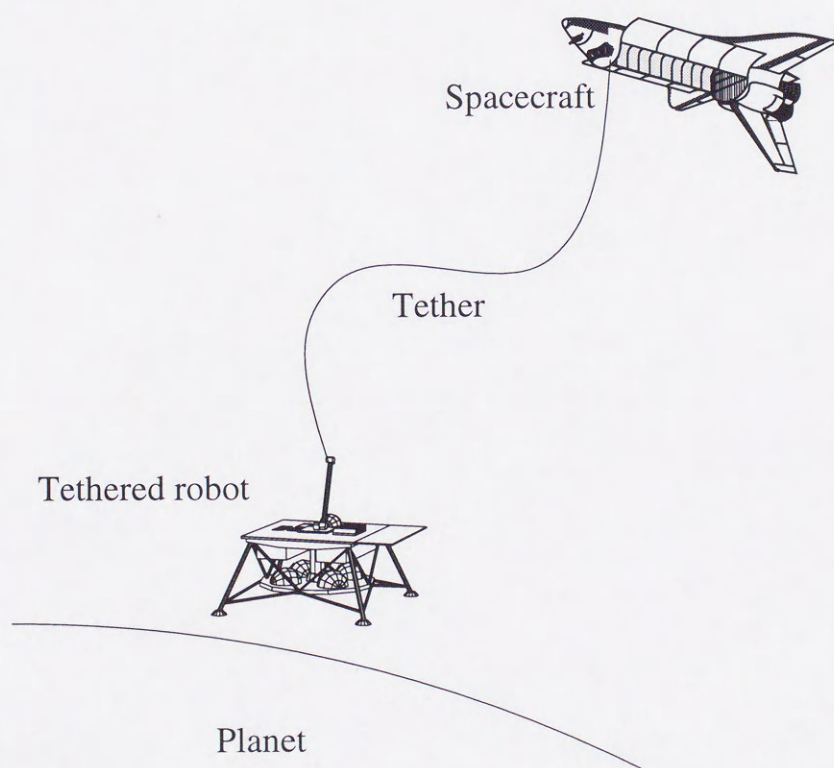


Fig. 2.4: Soft landing

図 2.4 は、月・惑星への軟着陸支援である。テザー張力制御によりテザー先端の着陸機は、月・惑星になめらかに接近できる。そして、軟着陸を行うとき、テザー先端の着陸機は何らかの方法で姿勢制御を行うことが必要となる。テザーロボットシステムでは、着陸

機にロボットアームが取り付けられているので、その操作により姿勢制御を行うことができると考えられる。

このミッションにおけるテザーロボットの移動も、図 2.3 の衛星メンテナンスと同様に、キャスティングと重力を利用したテザー張力制御の二通りが考えられる。例えば、重力が無視できる程度の小惑星などへの軟着陸は、無重力空間における着陸機と小惑星の接触と考えることができ、キャスティングの利用が有効であると考えられる。これに対し、惑星に重力が存在し、母船がその惑星を中心として軌道運動を行っている場合は、重力を利用したテザー張力制御が有効であると考えられる。この場合、着陸時点で着陸機と惑星の相対速度をゼロとする必要があるため、惑星の自転速度を考慮する必要がある。すなわち、母船軌道は静止軌道であることが望ましい。

2.4 テザーロボットシステムの定式化

2.4.1 解析モデル

ここでは、これまでに明らかにしたシステムの特徴を考慮して、基本的な制御法を構築するための解析モデルを定義する。まず、解析における仮定を設定する。

- (i) 軌道上の自然外力は重力のみとする。

軌道上に存在する主な外力として、重力・空力・太陽放射・磁気力が挙げられる。これらの影響は、軌道高度および宇宙機の大きさ・形状・材質に依存するが、宇宙機が軌道運動していることを考慮すると、重力の影響を無視することはできない。また、テザーシステムでは積極的に重力を利用した制御法を用いており、その解析には必要不可欠な外力として扱われる。

- (ii) 母船は円軌道上に固定されている。

テザーロボットに比べ母船は大型であるので、外乱の影響を受けずに安定な軌道運動をしていると仮定する。さらに、母船に対するテザー張力の影響は無視できる程度とする。また、解析の見通しをよくするために、母船軌道は円とする。

- (iii) テザーの質量・伸縮・たわみは無視する。

テザーの質量は、母船およびテザーロボットの質量に比べ、無視できる程度とする。また、伸縮も無視できる程度とすると、テザー張力が作用する状態において、テザーのたわみは発生しない。そして、テザーは母船より伸展・回収され、その長さはテザー張力が作用することにより変化する。

(iv) テザーロボットは剛体と回転関節で構成される。

母船に比べテザーロボットは小型であることを考慮すると、テザーロボットは複数の剛体より構成されると仮定できる。本解析モデルでは、それらの剛体が回転関節により連結されたテザーロボットを設定する。

解析モデルを図 2.5 に示す。軌道中心位置を O_i 、母船重心位置を O_s 、テザー伸展位置を O_e 、テザーとテザーロボットが連結される位置を O_a と定義する。まず、原点が軌道中心 O_i に固定された慣性座標系 Σ_i を定義する。次に、原点を O_s とする母船に固定された座標系 Σ_s を設定する。 Σ_s は直交座標系であり、 x 軸が母船進行方向、 y 軸が軌道面に対し垂直方向、 z 軸が軌道半径方向を指すように設定する。

母船は軌道半径 R 、軌道角速度 Ω で軌道運動しており、 O_i に対する O_s の位置ベクトルを \mathbf{R} 、軌道角速度ベクトルを $\boldsymbol{\Omega}$ とする。重力定数は μ とする。母船におけるテザー伸展位置およびテザーロボットのテザー連結位置について、 O_s に対する O_e および O_a の位置ベクトルを \mathbf{s}_e および \mathbf{s}_0 とする。テザー張力は F (≤ 0)、テザー張力ベクトルは \mathbf{F} とする。

テザーと連結されるテザーロボットは、 $n+1$ 個の剛体により構成される。 O_a においてテザーと連結される剛体を剛体 0 とし、そこから順に連結される剛体を、剛体 1, 剛体 2, ..., 剛体 n として、剛体 n はテザーロボットの手先とする。剛体 $i-1$ と剛体 i は回転関節 i において連結される。ただし、 $i=0, 1, \dots, n$ とする。各剛体の質量および重心回りの慣性テンソルを m_i および \mathbf{I}_i とし、テザーロボットの総質量を w ($=\sum_{i=0}^n m_i$) とする。剛体 i に関して、 O_a および O_i に対する重心位置ベクトルを \mathbf{r}_i および \mathbf{R}_i とする。また、剛体 i の重心回りの角速度ベクトルを、 Σ_i 上において $\boldsymbol{\Omega}_i$ 、 Σ_s 上において $\boldsymbol{\omega}_i$ とする。剛体 0 の姿勢角はオイラー角 $\boldsymbol{\varphi}_0$ ($=[\alpha \ \beta \ \gamma]^T$) を用いて表す。ただし、 Σ_s の $x \cdot y \cdot z$ 軸回りの回転角を $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$ とし、 $()^T$ は転置を表す。さらに、 O_a に対するテザーロボット重心の位置ベクトルを \mathbf{r}_g ($=\sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i / w$)、 O_s に対し \mathbf{s}_g 、 O_c に対し \mathbf{R}_g とする。関節 i ($i \neq 0$) に関して、 O_a に対する位置ベクトルを \mathbf{p}_i 、単位回転軸ベクトルを \mathbf{k}_i 、回転角を ϕ_i 、アクチュエータによる回転力を τ_i とする。そして、関節回転角ベクトルおよび関節回転力ベクトルは、それぞれ $\boldsymbol{\phi}$ ($=[\phi_1 \ \dots \ \phi_n]^T$) および $\boldsymbol{\tau}$ ($=[\tau_1 \ \dots \ \tau_n]^T$) とする。

2.4.2 テザーロボットの運動学と動力学

Σ_s 上においてテザーロボットに作用する外力は、位置エネルギーである軌道上の重力・遠心力、およびテザー張力である。このため、ラグランジュ法による動力学方程式導出が可能である。そこで、テザーロボットの運動エネルギー・位置エネルギーを求める。テ

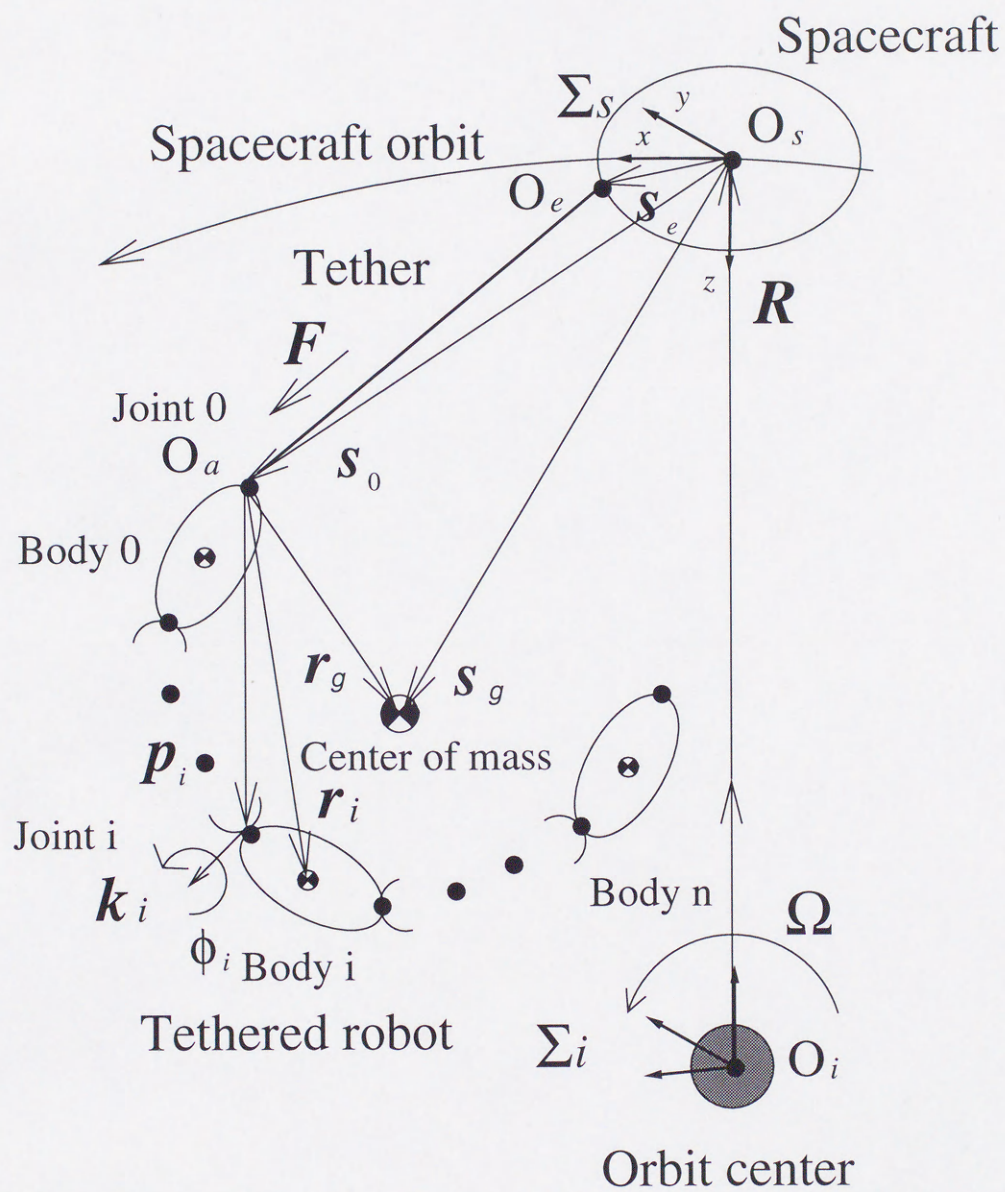


Fig. 2.5: Analytical model

ザーロボットの運動エネルギーは、次のように表される。

$$T_r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \nu_0^T & \dot{\phi}^T & \Omega^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_0 & H_{0\phi} & H_{0\Omega} \\ H_{0\phi}^T & H_\phi & H_{\phi\Omega} \\ H_{0\Omega}^T & H_{\phi\Omega}^T & H_\Omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_0 \\ \dot{\phi} \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

ここで、 $\nu_0 = [\dot{s}_0^T \ \omega_0^T]^T$ は剛体 0 の位置と姿勢に関する速度ベクトルであり、 $(\dot{}) \equiv d()/dt$ とする。また、各行列は以下の通りとする。

$$H_0 = \begin{bmatrix} w\mathbf{E} & w\tilde{\mathbf{r}}_g^T \\ w\tilde{\mathbf{r}}_g & \sum_{i=0}^n \{I_i + m_i \tilde{\mathbf{r}}_i^T \tilde{\mathbf{r}}_i\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 6}$$

$$H_{0\phi} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i \mathbf{J}_{Li} \\ \sum_{i=1}^n \{I_i \mathbf{J}_{Ai} + m_i \tilde{\mathbf{r}}_i \mathbf{J}_{Li}\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times n}$$

$$H_\phi = \sum_{i=0}^n \{J_{Ai}^T I_i J_{Ai} + m_i J_{Li}^T J_{Li}\} \in \mathbb{R}^{n \times n}$$

$$H_{0\Omega} = \begin{bmatrix} w\tilde{\mathbf{R}}_g^T \\ \sum_{i=0}^n \{I_i + m_i \tilde{\mathbf{r}}_i^T \tilde{\mathbf{R}}_i\} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6 \times 3}$$

$$H_{\phi\Omega} = \sum_{i=1}^n \{J_{Ai}^T I_i J_{Li} + m_i J_{Li}^T \tilde{\mathbf{R}}_i\} \in \mathbb{R}^{n \times 3}$$

$$H_\Omega = \sum_{i=0}^n \{I_i + m_i \tilde{\mathbf{R}}_i^T \tilde{\mathbf{R}}_i\} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$$

ただし、 \mathbf{E} は単位行列、 $i = 0, 1, \dots, n$ 、 $(\tilde{})$ は外積を記述する交代行列を表す。任意のベクトル \mathbf{a}_1 と \mathbf{a}_2 の外積ベクトルは、 $\tilde{\mathbf{a}}_1 \mathbf{a}_2$ と表される。また、

$$\epsilon_{ij} = \begin{cases} 1 & (i \geq j) \\ 0 & (i < j) \end{cases}$$

を用いて、

$$\mathbf{J}_{Li} = \begin{bmatrix} \epsilon_{i1} \tilde{\mathbf{k}}_1 (\mathbf{r}_i - \mathbf{p}_1) & \cdots & \epsilon_{in} \tilde{\mathbf{k}}_n (\mathbf{r}_i - \mathbf{p}_n) \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$$

$$\mathbf{J}_{Ai} = \begin{bmatrix} \epsilon_{i1} \mathbf{k}_1 & \cdots & \epsilon_{in} \mathbf{k}_i \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{3 \times n}$$

とする. ただし, $J_{L0} = J_{A0} = \mathbf{0}$ である. ここで, 母船が軌道運動を行わず $\Omega = \mathbf{0}$ と仮定すると, 式 (2.1) は, 外力が作用しない状態における空間浮遊型宇宙ロボットの運動エネルギーの表現式と一致する. テザーロボットを構成する各剛体に作用する重力傾斜トルクを無視すると, 重力は各剛体重心に作用すると仮定でき, テザーロボットの重力に関する位置エネルギーは次のように表される.

$$U_r = -\sum_{i=0}^n \frac{\mu m_i}{\sqrt{\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i}} \quad (2.2)$$

テザーロボットの運動を記述するために必要な変数ベクトルを, 次のように定義する.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} s_0 \\ \varphi_0 \\ \phi \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6+n}$$

ここで, 剛体 0 の姿勢角の時間微分 $\dot{\varphi}$ と姿勢角速度 ω_0 の関係は,

$$\mathbf{C}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos \beta \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \cos \beta \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

を用いると次のように表される.

$$\omega_0 = \mathbf{C}_\varphi \dot{\varphi}_0 \quad (2.3)$$

式 (2.3) を考慮して \mathbf{q} を用い, 式 (2.1)・(2.2) にラグランジュ法を用いると, テザーロボットシステムの運動方程式が次のように求められる.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{0\phi} \\ \mathbf{H}_{0\phi}^T & \mathbf{H}_\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\nu}_0 \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + (\Pi^T)^{-1} \mathbf{h}_r = (\Pi^T)^{-1} (\mathbf{N} + \mathbf{h}_\Omega - \mathbf{g}) \quad (2.4)$$

ここで,

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6+n}$$

は, テザーロボットに作用する外力・内力を表すベクトルであり,

$$\begin{aligned} \mathbf{h}_r = & \frac{d}{dt} \left\{ \Pi^T \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{0\phi} \\ \mathbf{H}_{0\phi}^T & \mathbf{H}_\phi \end{bmatrix} \Pi \right\} \dot{\mathbf{q}} + \frac{d}{dt} \left\{ \Pi^T \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{0\Omega} \\ \mathbf{H}_{\phi\Omega} \end{bmatrix} \Omega \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left\{ \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}^T \Pi^T \begin{bmatrix} \mathbf{H}_0 & \mathbf{H}_{0\phi} \\ \mathbf{H}_{0\phi}^T & \mathbf{H}_\phi \end{bmatrix} \Pi \dot{\mathbf{q}} \right\} - \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left\{ \dot{\mathbf{q}}^T \Pi^T \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{0\Omega} \\ \mathbf{H}_{\phi\Omega} \end{bmatrix} \Omega \right\} \end{aligned}$$

$$h_{\Omega} = \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{1}{2} \mathbf{\Omega}^T \mathbf{H}_{\Omega} \mathbf{\Omega} \right)$$

$$\mathbf{g} = \sum_{i=0}^n \frac{\mu m_i}{\|\mathbf{R}_i\|^3} \left(\frac{\partial \mathbf{R}_i^T}{\partial \mathbf{q}} \right) \mathbf{R}_i$$

とする。また、 $(\ddot{}) \equiv d^2()/dt^2$ であり、

$$\mathbf{\Pi} = \begin{bmatrix} \mathbf{E} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{\varphi} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{E} \end{bmatrix}$$

とする。式 (2.4) において、左辺第一項は慣性項、左辺第二項はテザーロボットの運動により発生するコリオリ力・遠心力であり、右辺はテザーロボットに作用する力である。右辺の外力を表す項、すなわち $\ddot{\mathbf{s}}_0$ および $\dot{\boldsymbol{\omega}}_0$ の行がゼロであれば、並進運動および回転運動は発生しない。この状態において、運動量保存則を適用することができる。

空間浮遊型宇宙ロボットの運動制御を行うとき、運動量が重要となる。すなわち、慣性空間に固定位置を持たないロボット系を、運動量により慣性空間との関係を決定することにより、その運動を制御することができる。この原理はテザーロボットにおいても同様であると考えられる。ここで、並進運動を表す運動量を並進運動量 $\mathbf{P}_s \in \mathbb{R}^3$ 、回転運動を表す角運動量を単に角運動量 $\mathbf{L}_s \in \mathbb{R}^3$ と呼ぶこととし、テザーロボットでは、

$$\mathbf{P}_s = \sum_{i=0}^n m_i \dot{\mathbf{R}}_i \quad (2.5)$$

$$\mathbf{L}_s = \sum_{i=0}^n \{ m_i \tilde{\mathbf{R}}_i \dot{\mathbf{R}}_i + \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i \} \quad (2.6)$$

と表され、並進運動量・角運動量をあわせて運動量と呼ぶ。そして、運動量は次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{P}_s \\ \mathbf{L}_s \end{bmatrix} = \mathbf{H}_0 \boldsymbol{\nu}_0 + \mathbf{H}_{0\phi} \dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{H}_{0\Omega} \mathbf{\Omega} + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ (\tilde{\mathbf{R}} + \tilde{\mathbf{s}}_0) \mathbf{P}_s \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

式 (2.7) において、母船の軌道角速度が無視できる程度 $\mathbf{\Omega} \approx \mathbf{0}$ と仮定でき、テザーロボットに作用する外力の和がゼロである場合、運動量保存則が成り立つ。すなわち、これまでの空間浮遊型宇宙ロボットの制御技術を用いることができる。

2.5 テザーロボットシステムの研究課題

2.5.1 宇宙空間移動に関する課題

テザーロボットシステムの基本的かつ実用性の大きい利点は、テザー張力を作用させることによるテザーロボットの移動である。すなわち、現存の宇宙ロボット運用における推進装置の役割を、テザーが果たすことが可能であると期待される。ここで、テザーロボットの宇宙空間における移動を定義する。母船に対しテザーロボットの重心位置が一定である状態を、「テザーロボットの停止状態」とする。そして「テザーロボットの移動」とは、ある地点で停止状態のテザーロボットを別の地点まで移動させ、停止状態とさせることである。その具体的な移動方法は、二通り考えられる。

第一の方法は、テザーロボットに初速度を与えることにより、目標地点まで移動させる方法である。このとき、母船においては任意の方向への初速度を与えることができるが、それ以外の地点においてはテザー張力による母船方向への速度しか与えることはできない。このため、テザーロボットの移動は以下の二通りに制限される。

(i) 母船から任意の目標地点への移動

(ii) 任意の地点から母船への移動

すなわち、テザーロボットを母船以外の二地点間を移動させる場合、一旦母船に回収する必要がある。まず (i) については、大型である母船搭載マニピュレータを用い、テザーロボットを目標地点に投げ、テザー張力により目標地点で停止させる方法を考える。この方法を「キャスティング」と呼ぶ。キャスティングは、著者らにより 1996 年 20th International Symposium on Space Technology and Science においてはじめて提案されているが、同のような方法を地上において利用することを、通産省機械技術研究所が 1997 年 第 15 回日本ロボット学会学術講演会において発表している [84]。 (ii) は、テザーロボットの母船への回収問題と考えることができる。それは、テザーロボットにテザー張力を作用させることにより母船方向の速度を与え、母船搭載マニピュレータにより速度を有するテザーロボットを捕捉することにより行われる。これらの移動方法は、無重力を仮定できる移動範囲・移動時間であれば非常に有効な手段である。

第二の方法は、従来のテザーシステムに用いられるテザー伸展技術を利用する方法である。テザーロボットの大きさに比較して母船の大きさが大きい本システムでは、Howard nnniversity の Bainum らが提案している線形最適化フィードバック制御 [46]、または東京都立科学技術大学の藤井らが提案しているミッションファンクション制御 [47] が適していると考えられる。本論文では、この方法を「重力を利用したテザー張力制御」と呼ぶ。この方法を用いると、テザーロボットを母船と軌道中心を結ぶ直線上に移動させることが

でき、直線上の任意の位置から別の任意の位置への移動も可能である。しかし、この方法は母船の軌道運動の時間尺度で移動が行われること、移動できる位置が限られることなどの短所がある。すなわち、移動範囲が母船と同軌道上とみなすことができる近距離移動には適さない。

2.5.2 手先位置姿勢制御に関する課題

目標地点到達後のテザーロボットの作業を目的とした手先位置姿勢制御を考えると、テザー張力が作用しない場合にテザーロボットは空間に浮遊している状態であるため、従来の空間浮遊型宇宙ロボットの制御技術を利用できる [54] [55]。キャスティングによる移動を行う場合は、無重力空間と仮定できるミッションであるため、テザーロボットが目標地点に到達した後はテザー張力が必要ない。しかし、重力を利用したテザー張力制御によりテザーロボットを移動させた場合は、目標地点に到達した後も、その位置を維持するためにテザー張力が必要となる。このとき、テザー張力はテザーロボットに対し外力として作用するため、テザー張力によりテザーロボットの運動が誘発され、テザーロボットの手先位置姿勢制御は複雑となる。この問題を回避するためには、テザー張力によるテザーロボットの運動量を発生させないことが必要である。

これと同様な問題を、MIT の Dubowsky [82]・新潟大学の Nenchev [83] らが、柔軟リンク上の剛体ロボットに関する柔軟リンクの振動を発生させない問題として取り扱っている。テザーロボットでは、柔軟リンクをテザーに拡張して取り扱うことにより、有効な制御法が確立できると考えられる。

2.5.3 外乱補償に関する課題

空間浮遊型宇宙ロボットに外乱が作用すると、並進運動・回転運動が誘発される。その並進運動を補償するためには推進装置、回転運動を補償するためには推進装置またはリアクションホイールが必要となる。これに対しテザーロボットシステムでは、外乱によるテザーロボットの運動を補償するために、テザー張力を利用できると考えられる。すなわち、前節ではテザー張力によりテザーロボットの運動量が発生しないことを目的としたが、ここでは、外乱補償のためにテザー張力を積極的に利用することを目的とする。

この方法はテザー張力を利用するため、キャスティングおよび重力を利用したテザー張力制御によるテザーロボットの移動中、重力を利用したテザー張力制御による移動後については可能であるが、キャスティングによる移動後は不可能である。このように、テザーロボットにテザー張力が作用しない状態では、従来の空間浮遊型宇宙ロボットに用いられる手法と同様な方法が必要となる。

ところで、テザーシステムのテザー先端の小衛星の外乱補償に関する研究としては、東京大学の中村らが角運動量制御法に基づく制御法を提案しているが [51]、ロボットアームを用いた制御法は目下のところ見当たらない。

2.6 まとめ

本章では、まずテザーロボットシステムの特徴を明らかにするとともに、ミッション例を紹介した。そして、テザーロボットシステムの特徴を工学的に捉え、基本的な制御法を構築するために必要な条件を考慮して、解析モデルを設定した。また、テザーロボットに作用する外力は、位置エネルギーにより表現できる力とテザー張力のみであることを考慮して、ラグランジュ法によりテザーロボットの動力学方程式を導出した。さらに、運動制御を行う場合に重要となる運動量を求めた。求められたテザーロボットの運動を記述する式に関して、従来の空間浮遊型宇宙ロボットの表現形式との比較を行い、その特徴を明らかにした。最後に、システムに必要である新しい制御技術を明確にした。それは、次のようにまとめられる。

- (i) キャスティングによるテザーロボットの宇宙空間移動に関する制御技術
- (ii) テザー張力が作用する状態におけるテザーロボットの先端位置姿勢に関する制御技術
- (iii) テザー張力を利用したテザーロボットの外乱補償に関する制御技術

第 3 章

キャスティングによる宇宙空間移動

3.1 はじめに

本章では，母船搭載マニピュレータを用いたテザーロボットの移動方法「キャスティング」について論ずる．まず，キャスティングの提案を行うとともに，その方法について説明する．そして，キャスティングにおける移動軌道修正に関する基本的な制御則の設計を行う．移動軌道修正の評価を行った後に，キャスティングのシミュレーションを行い，その有効性を検証する．

3.2 母船搭載マニピュレータによるキャスティング

キャスティングは図 3.1 に示す三つのフェーズから構成され，次の通り行われる．

フェーズ (1): 母船搭載マニピュレータを動かし，テザーロボットに目標地点方向の速度を与える．

フェーズ (2): 母船搭載マニピュレータの手先より，テザーロボットを切り離す．

フェーズ (3): 母船搭載マニピュレータの手先位置の動きにより，適当なテザー張力をテザーロボットに作用させて目標地点に到達させる．

フェーズ (1) は，テザーロボットが母船搭載マニピュレータの手先に取り付けられた状態である．このため，テザーロボットを含めたパラメータを用いて，母船搭載マニピュレータの制御を行うことができる．そして，母船搭載マニピュレータの制御により，テザーロボットが目標地点方向への速度を得た後に，フェーズ (2) を行う．フェーズ (3) ではテザーロボットが目標地点へ正確に移動できるように，テザー張力を作用させる．

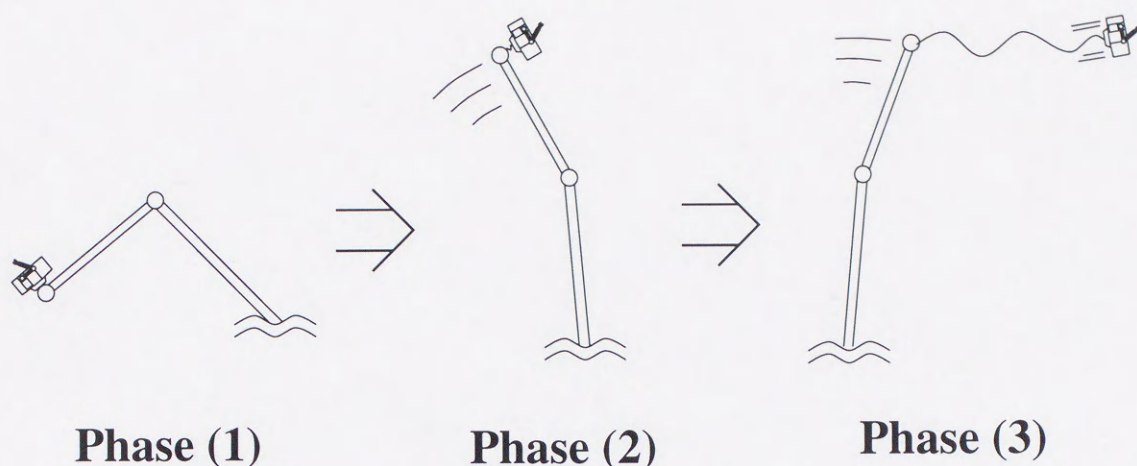


Fig. 3.1: Casting strategy

キャスティングの課題は、テザーロボットを目標地点へ正確に到達させることである。テザーロボットが目標地点に正確に到達できない要因としては、テザーロボットの回転運動、テザーの弾性、さらに母船搭載マニピュレータの追従性・柔軟性などが挙げられる。そこで、フェーズ (3) においてテザーロボットを目標移動軌道に追従させる制御法を提案する。

3.3 キャスティングにおける移動軌道修正制御

3.3.1 目標軌道と座標系

キャスティングにおけるテザーロボットの基本的な移動制御則を設計するため、2.4 節において設定した解析モデルに、さらに以下に示す仮定を追加する。

- (i) キャスティングは無重力空間で行われる ($\Omega = 0$, $\mu = 0$).
- (ii) 母船は慣性空間に固定されている ($\Sigma_s = \Sigma_i$).
- (iii) テザーロボットは質点とする ($s_g = s_0$).

図 3.2 に示す通り、 x 軸がテザーロボットの目標移動軌道と平行となるように Σ_s を設定する。母船搭載マニピュレータは剛体で構成されていると仮定し、その手先位置はテザー伸展位置 O_e となり、 Σ_s の原点 O_s に対する位置ベクトルは s_e である。外乱が発生することを考慮すると、図 3.2 に示す解析モデルにおけるテザーロボットの運動方程式は、式 (2.4) より次の通り表される。

$$w\ddot{s}_g = F + \delta \quad (3.1)$$

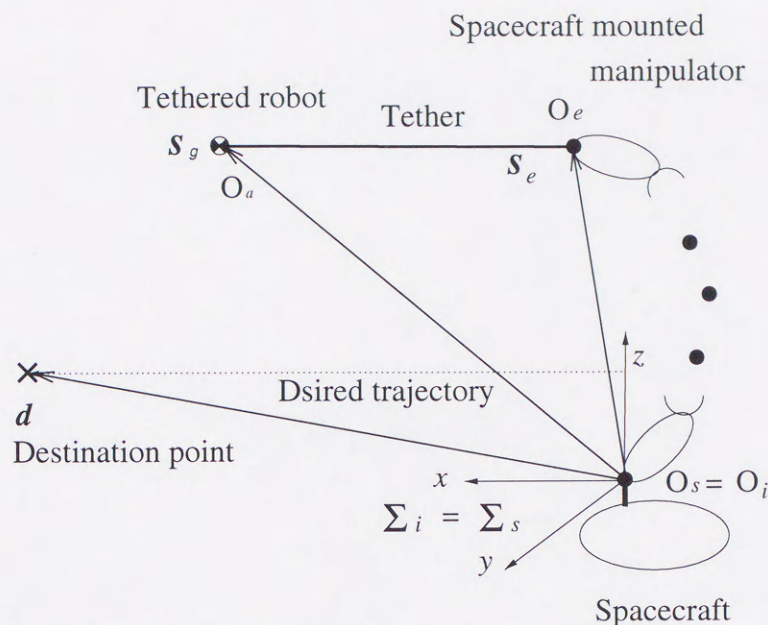


Fig. 3.2: Casting model

ここで、 δ は外乱を表す．式 (3.1) より，無重力空間においてテザーロボットに初速度を与え，その後テザー張力を作用させることにより，任意の目標地点に移動させることが可能であると考えられる．ここでテザー張力 \mathbf{F} の操作は，テザー伸展位置 s_e を変化させることにより行うことができる．また， Σ_s 上におけるテザーロボット重心位置・目標地点・テザー伸展位置・テザー張力・外乱に関するのベクトルの各成分を次の通りとする．

$$\mathbf{s}_g = \begin{bmatrix} s_{gx} \\ s_{gy} \\ s_{gz} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{d} = \begin{bmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{s}_e = \begin{bmatrix} s_{ex} \\ s_{ey} \\ s_{ez} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} f \\ g \\ h \end{bmatrix}, \quad \delta = \begin{bmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{bmatrix}$$

3.3.2 母船搭載マニピュレータの手先位置指令

移動制御は基本的に，テザーロボットの位置と速度のフィードバックにより，母船搭載マニピュレータの手先位置およびテザー張力を制御入力として決定することにより行う．ここでは，その制御系を設計する．

テザーは，母船のテザー伸展位置とテザーロボットのテザー連結位置を結んでいる．この直線とテザー張力の方向が等しいことより，次の関係式が成り立つ．

$$-\frac{\mathbf{F}}{F} = \frac{\mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_e}{\|\mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_e\|} \quad (3.2)$$

ただし， $\|\cdot\|$ はベクトルの長さを表す．式 (3.2) より，テザーロボットの位置を考慮し，母船搭載マニピュレータの手先位置を動かすことにより， \mathbf{F} を操作できることがわかる．

まず、目標テザー張力 F_d を次のように設定する.

$$F_d = \begin{bmatrix} f_d \\ -w \{K_{av} \dot{s}_{gyz} + K_{ap} (s_{gyz} - d_{yz})\} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ただし、 K_{av} および K_{ap} は制御ゲイン、また、

$$F_d = \begin{bmatrix} f_d \\ g_d \\ h_d \end{bmatrix}, \quad s_{gyz} = \begin{bmatrix} s_{gy} \\ s_{gz} \end{bmatrix}, \quad d_{yz} = \begin{bmatrix} d_y \\ d_z \end{bmatrix}$$

とする. 式 (3.3) を用いることにより、 y 軸・ z 軸成分に関しては $d_y \cdot d_z$ からの逸脱を補償できる. また、 x 軸成分に関しては最終的に $s_{gx} = d_x$ となるように、 $s_{gx} \cdot \dot{s}_{gx}$ および d_x の関数として f_d を与える. その具体例については、3.4 節で述べる.

次に、式 (3.3) で表されるテザー張力を与えることができる母船搭載マニピュレータの手先位置を求める. ところで、目標とするテザー張力を得るためには、 s_g を通り F に平行な直線上に母船搭載マニピュレータの手先が位置することが必要条件となる. このため、手先位置 s_e の二成分を制御すればよいことがわかる. また、テザーロボットの目標移動軌道からの逸脱の修正は、 y 軸・ z 軸方向の母船搭載マニピュレータの手先位置に大きく依存している. これらのことを考慮して、 s_{ex} が与えられているとして $s_{ey} \cdot s_{ez}$ の目標値を設定する. 式 (3.2) において $s_0 = s_g$ として x 軸に着目し、

$$\frac{F}{f} = \frac{s_e - s_g}{s_{ex} - s_{gx}} \quad (3.4)$$

であることを考慮すると、以下に示す母船搭載マニピュレータ手先位置の指令値 s_e^c により、式 (3.3) で表される F_d が得られることがわかる.

$$s_e^c = s_g - \frac{1}{f_d} (s_{gx} - s_{ex}) F_d \quad (3.5)$$

式 (3.3)・(3.5) より求められる目標値を用いて、フェーズ (3) における制御を行う. 母船搭載マニピュレータの手先位置制御は、次に示す計算トルク法により求められる回転力 τ_c を、各関節に与えることにより行なう.

$$\tau_c = h_c + M_c J_c^{-1} \{ -\dot{J}_c \dot{q}_c + K_{cv} (\dot{s}_e^c - \dot{s}_e) + K_{cp} (s_e^c - s_e) \} \quad (3.6)$$

ただし、 h_c はコリオリ力・遠心力、 M_c は慣性行列、 J_c はヤコビ行列、 q_c はジョイント角ベクトルを表す. そして、制御ゲインである K_{cv} および K_{cp} により、目標手先位置に対する追従性が決定さる. この制御に関するブロック線図を図 3.3 に示す. ここで、 c は母船搭載マニピュレータのジョイント角と手先位置の幾何学的関係を表す.

式 (3.7) に追従するように制御するために必要なテザー張力の y 軸・ z 軸成分を $g_d \cdot h_d$ として、次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} g_d \\ h_d \end{bmatrix} = -2\zeta_a \left(1 - \frac{1}{2}\zeta_a t_\delta\right) e^{-\zeta_a t_\delta} \delta_{yz} \quad (3.8)$$

これより、 $t_\delta = 0$ において $|g_d| \cdot |h_d|$ は最大となり、その後は減少していくことがわかる。ここで、 $|\cdot|$ は絶対値を表す。

次に、テザーロボットの移動中に与えることができるテザー張力について調べる。その方向は、母船搭載マニピュレータの作業範囲により制限される。ここでは、テザー張力の x 軸成分が与えられている場合に、操作可能な y 軸・ z 軸成分を求める。母船搭載マニピュレータの追従誤差が無視できる場合、操作可能なテザー張力の y 軸・ z 軸成分を $g_p \cdot h_p$ として、式 (3.2) より $s_e \cdot s_g$ の成分を用いて次のように表される。

$$\begin{bmatrix} g_p \\ h_p \end{bmatrix} = \frac{f_d}{s_{ex} - s_{gx}} \begin{bmatrix} s_{ey} - s_{gy} \\ s_{ez} - s_{gz} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

式 (3.9) より、 $|s_{ey} - s_{gy}|$ および $|s_{ez} - s_{gz}|$ に比例して $|g_p|$ および $|h_p|$ が得られることがわかる。また、 $|s_{ex} - s_{gx}|$ が大きい程 $|g_p|$ および $|h_p|$ は小さくなることもわかる。すなわち、母船搭載マニピュレータの作業範囲が小さいほど、またテザーロボットが母船から離れるほど、与えることができるテザー張力の y 軸・ z 軸成分は小さくなることがわかる。

式 (3.8) からわかるように、移動軌道の修正に必要なテザー張力は式 (3.3) の制御ゲインに大きく依存する。また、式 (3.9) で表されるように、与えることができるテザー張力が制限されるため、提案している制御法により許容できる外乱の範囲は制限される。そのため、制御ゲインと許容外乱の関係を明らかにすることが重要であるが、式 (3.8)・(3.9) はともに時間の関数であるため、理論的に考察することは困難である。また、実際の許容外乱を求めることは、母船搭載マニピュレータの追従誤差、目標テザー張力の x 軸成分 f_d などに複雑に依存しているため困難である。そこで、式 (3.9) で表されるテザー張力の y 軸・ z 軸成分の最大値を $|g_m| \cdot |h_m|$ として、外乱に対する移動軌道修正の必要条件を表す次式について、数値例により調べる。

$$\begin{bmatrix} |g_d| \\ |h_d| \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} |g_m| \\ |h_m| \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

ところで、 y 軸・ z 軸成分の制御は独立であるので、ここでは式 (3.10) の y 軸成分についてのみ調べる。 $|g_d|$ は式 (3.8) より求める。 $|g_m|$ は $f_d \cdot s_{ex}$ および $|s_{ey} - s_{gy}|$ の最大値 s_{em} が与えられている条件で、 s_{ex} の関数として式 (3.9) より求める。外乱はフェーズ (2) で発生すると仮定し、

$$f_d = 2 \text{ [N]}, w = 100 \text{ [kg]}, s_{ex} = 0 \text{ [m]}, s_{em} = 2 \text{ [m]}$$

と設定する．これらのパラメータは，後のキャスティングシミュレーションのパラメータを考慮して選んでいる．外乱は，

$$\delta_y = \frac{1}{\zeta_a} \text{ [Ns]} \quad (t_\delta = 0)$$

のインパルス外乱とする．結果を図 3.4 に示す． $|g_m|$ の値を実線で示す．ただし， s_{gx} は等加速度 f_d/w で減速する．また， $|g_d|$ の値を $\zeta_a = 0.2 \text{ [1/s]}$ について点線で， $\zeta_a = 0.3 \text{ [1/s]}$ について破線で， $\zeta_a = 0.4 \text{ [1/s]}$ について鎖線で示す．これらの結果より， $t_\delta = 0$ において δ_y が与えられた場合の修正は， $\zeta_a = 0.3, 0.4 \text{ [1/s]}$ では可能であるが， $\zeta_a = 0.2 \text{ [1/s]}$ では不可能であることがわかる．すなわち，制御ゲインが大きいほど修正は短時間に行われるが許容外乱が小さくなり，制御ゲインが小さいほど許容外乱は大きくなるが，ある値以下になると軌道修正中に制御不可能となる．

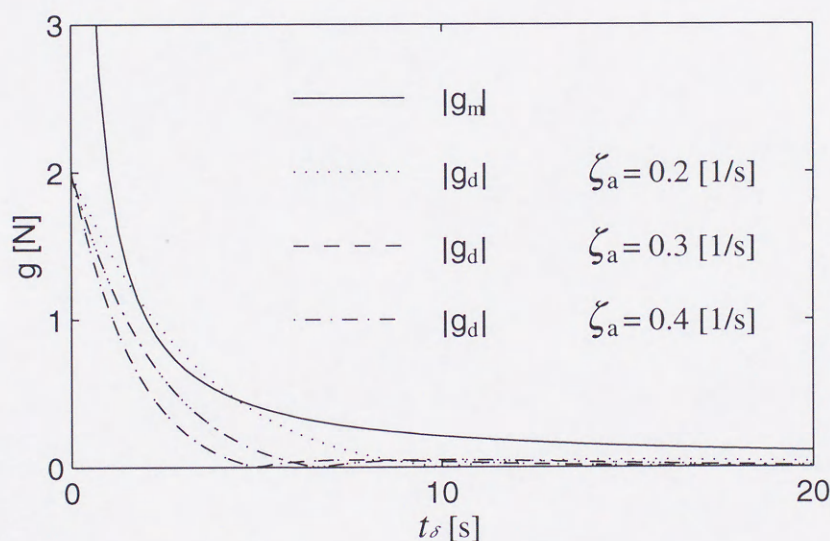


Fig. 3.4: Permissible disturbances for trajectory adjustment

3.4 シミュレーション

3.4.1 パラメータ設定と制御則

提案している移動軌道修正制御を用いて，キャスティングのシミュレーションを行う．3.3 節における制御ゲインの設定を用いることにより， y 軸・ z 軸成分の制御は独立となることを考慮して，ここでは xy 面内のキャスティングについて調べる．また制御法の検

証を行うために、何らかの外乱を必要とする。そこで、母船搭載マニピュレータの追従性による手先位置誤差に着目する。その理由は以下の通りである。テザー張力の作用線上にテザーロボットの重心が位置すれば、テザーロボットの回転運動とテザー張力は干渉しない。この状態はテザーロボット自身の運動により可能であると考えられる。テザーの弾性の影響については、母船搭載マニピュレータの追従性・柔軟性の影響に対して小さいと考えられる。また、母船搭載マニピュレータの柔軟性は手先位置誤差の要因の一つである。本シミュレーションの目的は誤差の要因を調べるのではなく、誤差の影響を補償する制御法の検証であるので、追従性のみによる手先位置誤差を考える。

母船搭載マニピュレータの追従誤差はフェーズ (2) に大きく影響を及ぼすので、フェーズ (2) を行う基準を以下に示す二通り設定し、テザーロボットの目標移動軌道からの逸脱量について調べ、その逸脱を修正する制御法の有効性について検証する。

- (i) 時間について $t = t^*$ となった時点
- (ii) 手先速度について $\dot{s}_{ex} = \dot{s}_{ex}^*$ となった時点

ただし、 $()^*$ はフェーズ (2) の設定値を表す。

テザーロボットの質量 w は、前章と同じ値とする。母船搭載マニピュレータは二リンクで構成されており、各リンクの長さ l_{ci} 、質量 m_{ci} 、重心回りの慣性モーメント I_{ci} を次の通り設定する ($i = 1, 2$)。

$$l_{ci} = 2 \text{ [m]}, \quad m_{ci} = 10 \text{ [kg]}, \quad I_{ci} = 20 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

その制御は式 (3.6) を用い、制御ゲインについて以下に示す設定を行い、追従誤差が発生するようにする。

$$K_{cv} = 2E \text{ [1/s]}, \quad K_{cp} = E \text{ [1/s}^2\text{]}$$

移動軌道修正制御において、目標テザー張力の x 軸成分は、

$$f_d = w \frac{\dot{s}_{gx}^2}{2(s_{gx} - d_x)} \quad (3.11)$$

とし、目標移動軌道からの逸脱を修正するための目標テザー張力に関する y 軸・ z 軸成分のフィードバックゲインを決定するパラメータは、次の通りとする。

$$\zeta_a = 0.3 \text{ [1/s]}$$

目標地点は次の通り設定する。

$$(d_x, d_y) = (100, 2) \text{ [m]}$$

さらに、フェーズ (2) の時間を次の通り設定する。

$$t^* = 1 \text{ [s]}$$

このとき，母船搭載マニピュレータの手先位置・速度は以下の設定を目標値とする．

$$\left(s_{ex}^*, s_{ey}^* \right) = (0, 2) \text{ [m]}, \quad \left(\dot{s}_{ex}^*, \dot{s}_{ey}^* \right) = (2, 0) \text{ [m/s]}$$

3.4.2 テザーロボットの移動軌道からの逸脱

まず，母船搭載マニピュレータの追従誤差が，テザーロボットの移動軌道に及ぼす影響について調べる．母船搭載マニピュレータの初期値を，次の通り設定する．

$$\mathbf{s}_e(0) = (-1, 2) \text{ [m]}$$

ただし，() 内は時間を表す．この状態より，フェーズ (2) を目標状態としてフェーズ (1) を行う．フェーズ (2) を行った後は，フェーズ (3) において

$$\mathbf{s}_e^c = (0, 2) \text{ [m]}$$

とする．すなわち，テザーロボットの移動軌道は修正されない．

表 1 にフェーズ (2) の状態を示す．表 2 に最終状態 ($\dot{s}_{gx} = 0$ となる時点) の結果を示す．各表において， t_2 はフェーズ (2) が行われた時間， t_f はミッション終了時間 ($\dot{s}_{gx} = 0$)

	Desired	(i)	(ii)
$t_2 \text{ [s]}$	1.00	1.00	1.36
$s_{gx}(t_2) \text{ [m]}$	0.00	-0.53	0.054
$s_{gy}(t_2) \text{ [m]}$	2.00	2.00	2.00
$\dot{s}_{gx}(t_2) \text{ [m/s]}$	2.00	1.26	2.02
$\dot{s}_{gy}(t_2) \text{ [m/s]}$	0.00	-0.0025	-0.0057

Table 1 Condition at phase (2)

を表す．また，各パラメータの () 内は時刻を表す．さらに，図 3.5 にフェーズ (2) 付近，図 3.6 に全体の結果を示す．各図において，点線は目標値（母船搭載マニピュレータの追従誤差が無い場合）を示し，破線は前節の (i) の場合，実線は (ii) の場合を示す．また，図 3.5 においてフェーズ (2) の位置を，図 3.6 においてテザーロボットの最終位置を，設定値について *，(i) について x，(ii) について o により示す．

図 3.5 における母船搭載マニピュレータの追従誤差が，図 3.6 に示すようにテザーロボットの移動軌道に影響をおよぼし，目標地点に到達できないことがわかる．そして，フェーズ (2) を行う基準を (ii) とする方が，その影響は小さくなることがわかる．

	Desired	(i)	(ii)
t_f [s]	101	62.3	100.5
$s_{gx}(t_f)$ [m]	100	37.06	98.34
$s_{gy}(t_f)$ [m]	2.00	1.72	1.55
$\dot{s}_{gx}(t_f) \times 10^{-4}$ [m/s]	0.00	3.68	3.50
$\dot{s}_{gy}(t_f) \times 10^{-3}$ [m/s]	0.00	-3.30	-2.00

Table 2 Deviation from the destination point
without control

3.4.3 移動軌道修正制御の有効性

図 3.6 に示されるテザーロボットの目標移動軌道からの逸脱に対し、提案している制御法の有効性を検証する。すなわち、テザーロボットの位置・速度のフィードバックによる移動軌道修正制御を行う。キャスティングの最終状態を表 3 に示す。また、図 3.7 にテ

	Desired	(i)	(ii)
t_f [s]	100	165.9	102.5
$s_{gx}(t_f)$ [m]	100	100	100
$s_{gy}(t_f)$ [m]	2.00	2.00	2.00
$\dot{s}_{gx}(t_f) \times 10^{-5}$ [m/s]	0.00	4.33	7.82
$\dot{s}_{gy}(t_f) \times 10^{-8}$ [m/s]	0.00	1.94	0.78

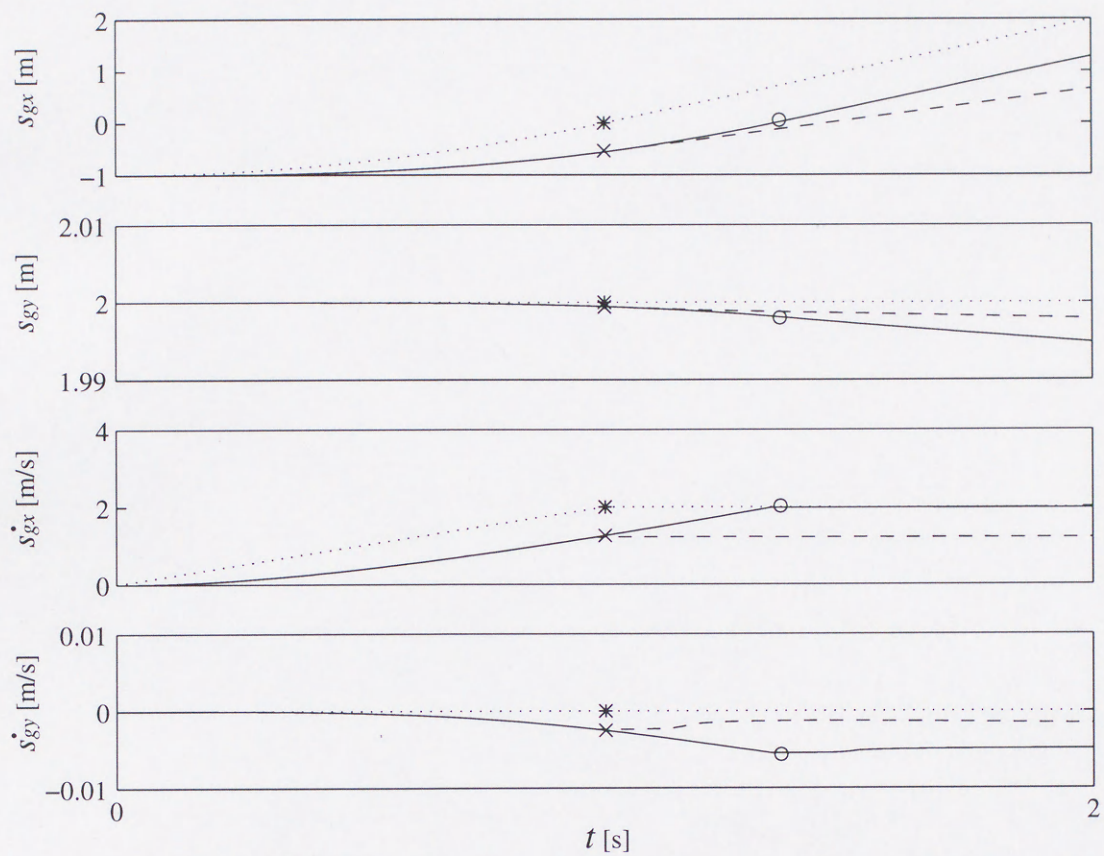
Table 3 Deviation from the destination point
with control

ザーロボットの移動軌道について、図 3.8 に母船搭載マニピュレータの手先について、点線は目標値を示し、破線は前節の (i) について、実線は (ii) についての結果を示す。最終位置を、設定値について＊、(i) について×、(ii) について○により示す。

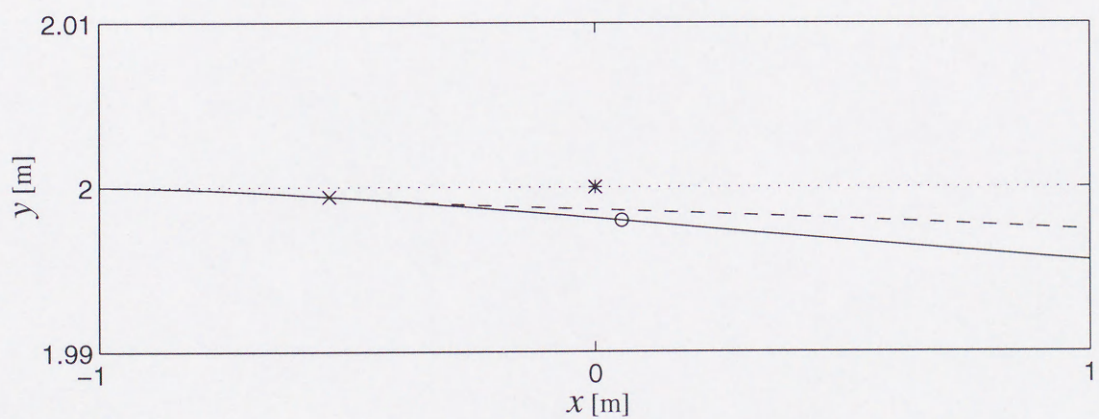
これらの結果より、提案している制御法によりテザーロボットは目標地点に正確に近付き、到達した時点で停止できることがわかる。テザーロボットの移動軌道はフェーズ (2) の基準により異なるが、到達地点はほぼ一致している。また、各結果において振動成分が見られる。この現象は、テザーロボットに作用するテザー張力の目標値に対する追従誤差に起因している。

3.5 まとめ

本章では，無重力空間におけるテザーロボットの移動方法を提案した．それは，母船搭載マニピュレータを用いたキャスティングにより，テザーロボットを移動させる方法である．そして，キャスティングにおいて移動軌道修正を行う制御法を提案した．それは，テザーロボットの位置・速度をフィードバックすることにより行い，母船搭載マニピュレータの手先位置・テザー張力の目標値を制御入力として決定する．まず，提案した移動軌道修正制御により許容できる外乱について検討した．そして，母船搭載マニピュレータの作業範囲が小さいほど，テザーロボットが母船を離れるほど，許容できる外乱が小さくなることを理論的に示した．さらに，テザーロボットが移動しているとき，移動軌道修正に必要なテザー張力，および与えることができるテザー張力，それぞれの変化について明らかにした．さらに，制御ゲインの設定が許容外乱と密接に関係していることを，数値例を用いて示した．次に，外乱の発生要因を母船搭載マニピュレータの追従誤差とし，キャスティングのシミュレーションを行った．その結果より，テザーロボットが母船から離れる時点での速度が，到達地点の精度に大きく影響を及ぼすことが確認された．そして，提案した移動軌道修正制御は有効であることが検証された．



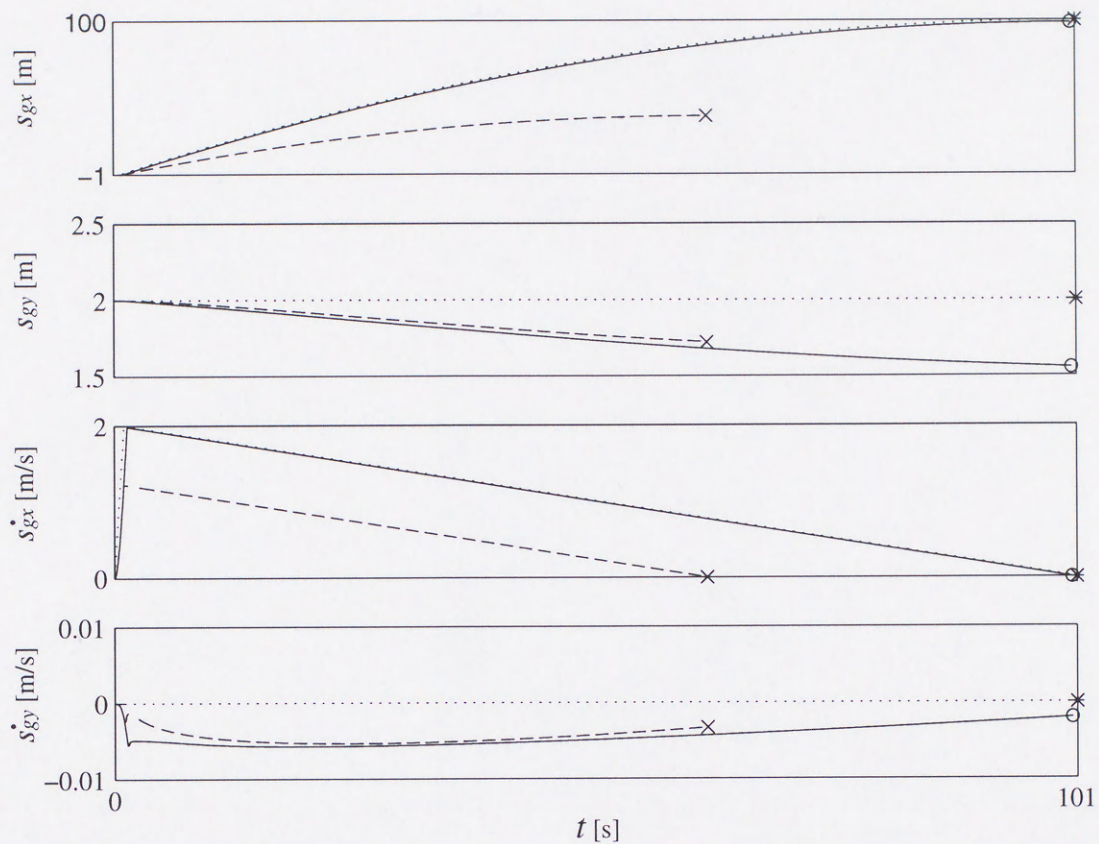
(a) Point mass state time history



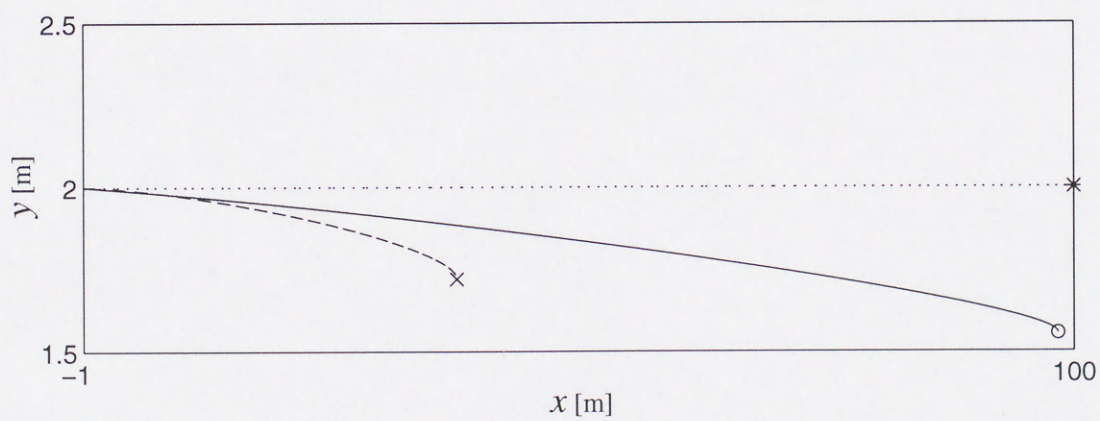
(b) Path of the point mass

Fig. 3.5: Deviation in phase (2)

(..... desired motion - - - for case (i) — for case (ii))



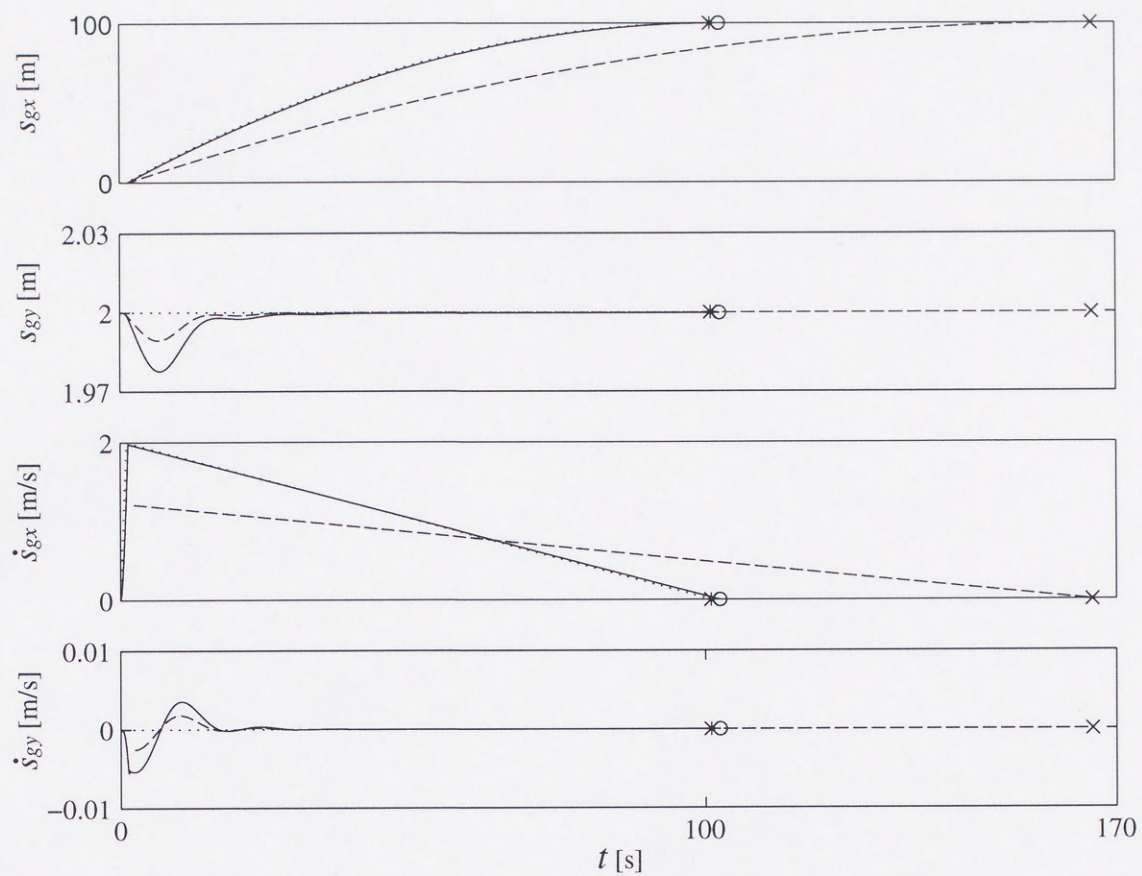
(a) Point mass state time history



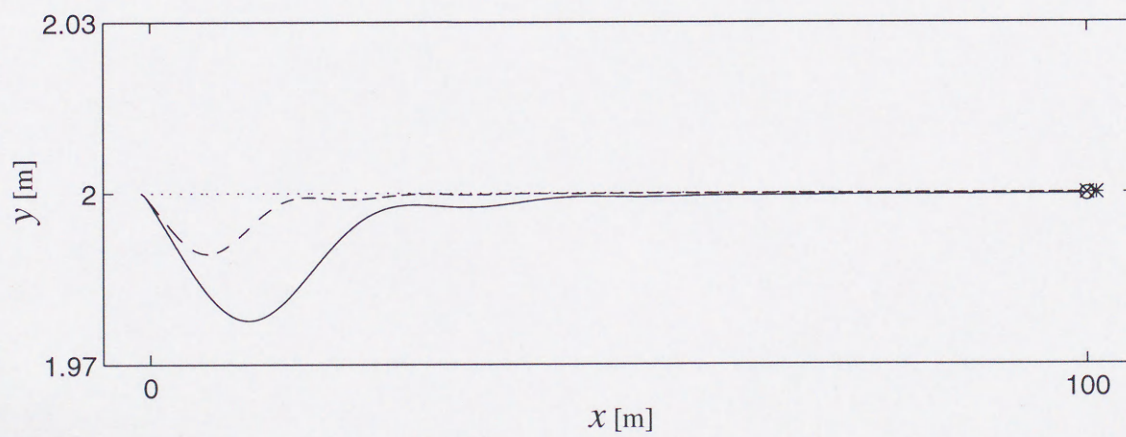
(b) Path of the point mass

Fig. 3.6: Deviation from the desired trajectory without trajectory adjustment control

(..... desired motion - - - for case (i) — for case (ii))



(a) Point mass state time history



(b) Path of the point mass

Fig. 3.7: Simulation of casting

(..... desired motion --- for case (i) — for case (ii))

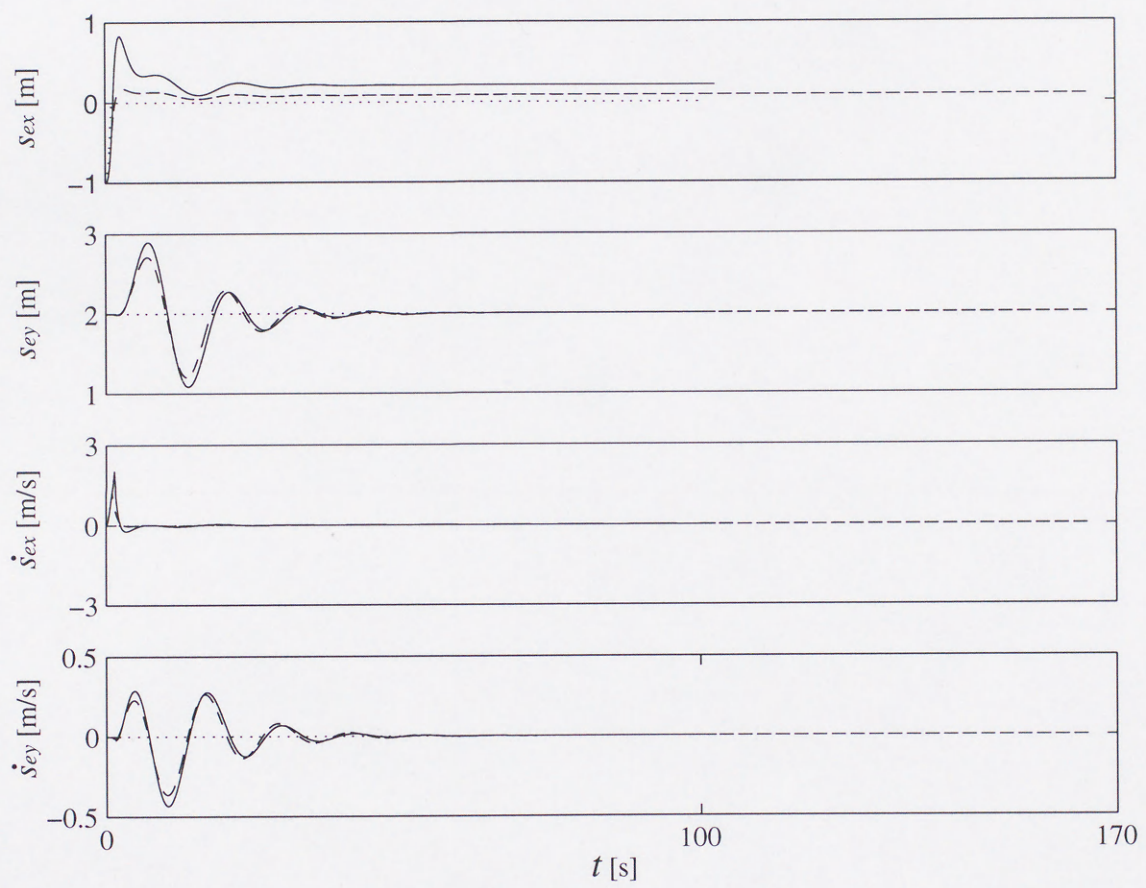


Fig. 3.8: Manipulator end-point state time history during casting

(..... desired motion - - - for case (i) — for case (ii))

第 4 章

平衡点における手先位置姿勢制御

4.1 はじめに

ここでは、重力を利用したテザー張力制御によりテザーロボットを目標地点に移動させた後の、平衡点におけるテザーロボットの作業について論ずる。このとき、目標位置を維持するためにテザー張力が必要となり、テザー張力が作用する状態におけるテザーロボットの手先位置姿勢制御法が必要となる。本章では、この点を考慮した従来の宇宙ロボットの技術とは異なる新しい制御手法を提案する。そして、提案した制御法を用いたシミュレーションを行う。

4.2 目標地点におけるテザーロボットの動挙動

4.2.1 重力と遠心力の近似

重力を利用したテザー張力制御が有効であるのは、テザーロボットの移動距離が十分に長い場合である。この場合、母船およびテザーロボットの大きさは、テザー長さに対し無視できる程度として解析を行うことができる。これより、テザーロボットに関して次の近似を行うことができる。

$$m_i (\mathbf{R} + \mathbf{s}_0 + \mathbf{r}_i)^T (\mathbf{R} + \mathbf{s}_0 + \mathbf{r}_i) \gg \| \mathbf{I}_i \| \quad (4.1)$$

$$\mathbf{R} + \mathbf{s}_0 + \mathbf{r}_i \approx \mathbf{R}_g \quad (4.2)$$

式 (4.1) は、テザーロボットに作用する重力および遠心力が、テザーロボットを構成する各剛体の重心に作用することを、また、式 (4.2) はそれらの大きさおよび方向が等しくなることを表している。このため、テザーロボットに重力傾斜トルクは発生しない。すなわ

ち、重力および遠心力はテザーロボット重心に作用すると考えることができる。式 (4.1)・(4.2) による近似を行うことにより、式 (2.4) において母船が軌道運動することによる遠心力および重力は次の通り近似できる。

$$h_{\Omega} \approx \frac{\partial}{\partial \mathbf{q}} \left(\frac{w}{2} \Omega^T \tilde{\mathbf{R}}_g^T \tilde{\mathbf{R}}_g \Omega \right) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{g} \approx \frac{\mu w}{\|\mathbf{R}_g\|^3} \left(\frac{\partial \mathbf{R}_g^T}{\partial \mathbf{q}} \right) \mathbf{R}_g \quad (4.4)$$

4.2.2 テザーロボットの安定な平衡点

近似式 (4.3)・(4.4) を用いると、第 2 章において導出した運動方程式 (2.4) において、外力が発生しない条件は次の通り表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F} \\ \mathbf{0} \\ \boldsymbol{\tau} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w\mathbf{E} \\ w\tilde{\mathbf{r}}_g \\ \sum_{i=0}^n m_i \mathbf{J}_{Li} \end{bmatrix} \left(\tilde{\Omega}^2 + \frac{\mu}{\|\mathbf{R}_g\|^3} \mathbf{E} \right) \mathbf{R}_g = \mathbf{0} \quad (4.5)$$

式 (4.5) において、第一列目および第二列目は剛体 0 に関する位置および姿勢に外力が及ぼす影響を表しており、第三列目は関節に作用する内力を表している。第三列目は、任意のジョイントトルクにより満足されるので、平衡点は次の二通りが考えられる。

$$\tilde{\Omega}^2 + \frac{\mu}{\|\mathbf{R} + \mathbf{s}_g\|^3} \mathbf{E} = \mathbf{0} \quad (4.6)$$

$$(\tilde{\mathbf{s}}_0 - \tilde{\mathbf{s}}_e) \mathbf{R}_g = \tilde{\mathbf{r}}_g \mathbf{R}_g = \mathbf{0} \quad (4.7)$$

式 (4.6) は重力と遠心力がつり合う点を表し、テザーロボット重心が母船と同軌道上に位置する状態である。この点において必要とされるテザー張力とテザーロボットの関節トルクは、 $\mathbf{F} = \mathbf{0}$ 、 $\boldsymbol{\tau} = \mathbf{0}$ であり、不安定な平衡点である。

式 (4.7) で表される平衡点は式 (3.2) を考慮して表されており、母船におけるテザー伸展位置・テザーロボット重心位置・テザー連結位置が、全て軌道中心を通る軌道面内同一直線上に存在しなければならないことを表している。テザーロボットを質点と仮定した場合の安定な平衡点が、軌道中心とテザー伸展位置を結ぶ直線上であることは、すでに知られている [46]。この質点に関する平衡点は、物理的に次のように説明できる。テザーロボット重心に作用する軌道上の重力・遠心力ベクトルは、軌道中心とテザーロボット重心を通る直線と一致する。これより、テザーがこの直線と一致していれば、テザー張力により軌道上の重力・遠心力を補償することができる。すなわち、テザーロボット重心に作用する外力の和はゼロとなり、平衡状態となる。テザーロボット重心がその安定な平衡点を

維持するためには、さらにテザー連結位置がテザーロボット重心とテザー伸展位置を結ぶ直線上に位置することが必要がある。また、このとき必要とされるテザー張力とテザーロボットの関節トルクは、 $\Omega = [0 \quad -\Omega \quad 0]^T$ であることを考慮すると、式(4.5)より次の通り求められる。

$$F = w \left| \Omega^2 - \frac{\mu}{\|R_g\|^3} \right| \quad (4.8)$$

$$\tau = -\sum_{i=0}^n m_i J_{Li}^T \left(\tilde{\Omega}^2 + \frac{\mu}{\|R_g\|^3} E \right) R_g \quad (4.9)$$

以上の考察より、式(4.6)は不安定な平衡点、式(4.7)は安定な平衡点を表す。

4.2.3 テザー張力とテザーロボットの相互干渉

テザーロボット重心が安定な平衡点に位置する状態において、テザーロボットがその状態を維持する条件を表すために、式(3.2)および $\tilde{r}_g r_g = 0$ である関係を考慮して、次に示す新しい変数を定義する。

$$\lambda = \tilde{r}_g \frac{F}{F} = \tilde{r}_g \frac{s_0 - s_e}{\|s_0 - s_e\|} = \tilde{r}_g \frac{s_g - s_e}{\|s_0 - s_e\|} \quad (4.10)$$

式(4.10)で表される変数を用いることにより、外力による回転力がテザーロボットに発生しない条件は、次のように表される。

$$\lambda = 0 \quad (4.11)$$

式(4.11)は、テザーロボット重心が平衡点に位置する状態において、その平衡状態を維持するための必要条件である。ところで、安定な平衡状態においては、テザー張力によりテザーロボットの重心位置は一定に維持される。すなわち、

$$\dot{s}_g = \dot{s}_e = \text{一定} \quad (4.12)$$

であることがわかる。また、式(4.11)を満足するためには、 r_g と $s_g - s_e$ が平行であることが条件となるため、スカラー量である $\|s_0 - s_e\|$ には依存しない。これより、式(4.10)における時間の関数は $r_g (= s_g - s_0)$ のみとなり、テザー連結位置を操作することにより条件式(4.11)が常に満足される状態を維持して、テザーロボットを動かすことが可能となる。

4.3 テザー張力が作用する状態の手先位置姿勢制御

4.3.1 テザーロボットの重心に対する運動量

テザーロボットの重心位置が式 (4.7) を満足し、さらにテザー連結位置が式 (4.11) を満足すると、テザーロボットに作用する外力・外力トルクの和はゼロとなり、運動量保存則が成り立つ。すなわち、近似式 (4.3)・(4.4) を用い、式 (2.7) において、

$$H_{0\Omega} = w \begin{bmatrix} \tilde{R}_g^T \\ \tilde{r}_g^T \tilde{R}_g \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

と近似すると、

$$P_s = L_s = \text{一定} \quad (4.14)$$

が成り立つ。この運動量保存則に基づき、テザーロボットの手先位置姿勢制御を考える。まず、運動量についてその特徴を明らかにする。

テザーロボット重心の並進運動量 $P_m \in \mathbb{R}^3$ および Σ_s の原点 O_s に対する角運動量 $L_m \in \mathbb{R}^3$ は、次のように求められる。

$$\begin{bmatrix} P_m \\ L_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w \dot{R}_g \\ w \tilde{R}_g \dot{R}_g \end{bmatrix} = w \begin{bmatrix} E \\ \tilde{R} + \tilde{s}_g \end{bmatrix} \dot{s}_g + w \begin{bmatrix} -(\tilde{R} + \tilde{s}_g) \\ -(\tilde{R} + \tilde{s}_g)^2 \end{bmatrix} \Omega \quad (4.15)$$

近似式 (4.1)・(4.2) および式 (4.13) を用い、式 (2.7) と式 (4.15) の差を求めると次式が得られる。

$$\mathcal{L}_r = \begin{bmatrix} P_r \\ L_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_s - P_m \\ L_s - L_m \end{bmatrix} = H_0 \begin{bmatrix} -\dot{r}_g \\ \omega_0 \end{bmatrix} + H_{0\phi} \dot{\phi} \quad (4.16)$$

ここで、ある系を構成する各剛体の並進運動量の総和は系の重心の並進運動量となるため、 $P_s = P_m$ が成り立つ。また、 L_s と L_m の差は、テザーロボットの重心に対する角運動量を表す。このため、テザーロボットに外力トルクが作用しなければ、

$$L_s - L_m = \text{一定} \quad (4.17)$$

となる。これらの物理的特徴を考慮すると、式 (4.11) の拘束条件下において次式が成り立つ。

$$\mathcal{L}_r = \begin{bmatrix} 0 \\ \text{一定} \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

式 (4.18) を用いると、テザーロボットの初期状態が安定な平衡状態であるとすれば、 $\mathcal{L}_r = 0$ として手先位置姿勢制御を行うことが可能である。

4.3.2 一般化ヤコビ行列を用いた制御法

式 (4.10) に用いられる変数の各成分を、次の通り定義する.

$$\boldsymbol{\lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \\ \lambda_z \end{bmatrix}, \quad \mathbf{r}_g = \begin{bmatrix} r_{gx} \\ r_{gy} \\ r_{gz} \end{bmatrix}$$

ところで式 (4.10) に示されるように, $\boldsymbol{\lambda}$ は \mathbf{s}_g を法線ベクトルとする面内に存在する. このため, 4.2 節の式 (4.7) で表される安定な平衡点において, $\boldsymbol{\lambda}$ と z 軸が一致することはない. すなわち, 式 (4.11) は $\lambda_x = \lambda_y = 0$ により満足される. これより条件式 (4.11) は, 式 (4.10) の $x \cdot y$ 成分により次のように表される.

$$\begin{bmatrix} \lambda_x \\ \lambda_y \end{bmatrix} = \frac{1}{\|\mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_e\|} \begin{bmatrix} r_{gy}(s_{gz} - s_{ez}) - r_{gz}(s_{gy} - s_{ey}) \\ r_{sz}(s_{gx} - s_{ex}) - r_{gx}(s_{gz} - s_{ez}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

式 (4.18) および式 (4.19) を用いて, テザーロボットの運動制御則を導出する. まず, テザーロボットの指令速度ベクトルを次のように表す.

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{\nu}_e \\ \dot{\lambda}_x \\ \dot{\lambda}_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}_{st} \begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{r}}_g \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} + \mathbf{J}_{mt} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (4.20)$$

ここで, $\boldsymbol{\nu}_e$ はテザーロボットの制御目的により設定され, 作業空間における速度指令ベクトルである. そして, \mathbf{J}_{st} および \mathbf{J}_{mt} は次の通り表される.

$$\mathbf{J}_{st} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_s \\ \mathbf{J}_\lambda \quad \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_\lambda = \frac{1}{\|\mathbf{s}_0 - \mathbf{s}_e\|} \begin{bmatrix} 0 & -(s_{gz} - s_{ez}) & (s_{gy} - s_{ey}) \\ (s_{gz} - s_{ez}) & 0 & -(s_{gx} - s_{ex}) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{J}_{mt} = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_m \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

ただし, \mathbf{J}_s および \mathbf{J}_m は $\boldsymbol{\nu}_e$ に依存して決定される. 式 (4.18) より得られる関係式,

$$\begin{bmatrix} -\dot{\mathbf{r}}_g \\ \boldsymbol{\omega}_0 \end{bmatrix} = -\mathbf{H}_0^{-1} \mathbf{H}_{0\phi} \dot{\boldsymbol{\phi}} + \mathbf{H}_0^{-1} \mathcal{L}_r \quad (4.21)$$

を式 (4.20) に代入すると, 指令速度ベクトルの関係式が次の通り得られる.

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \dot{\lambda}_x \\ \dot{\lambda}_y \end{bmatrix} = J_g \dot{\phi} + J_{st} H_0^{-1} \mathcal{L}_r \quad (4.22)$$

ここで,

$$J_g = J_{mt} - J_{st} H_0^{-1} H_m$$

は一般化ヤコビ行列 [55] である. 式 (4.22) よりわかるように, テザー連結位置操作のために指令速度ベクトルが二成分増える. これより, テザーロボットが平衡点において安定状態を維持して手先位置姿勢制御を行うためには, 二自由度の冗長性が必要であることがわかる. 式 (4.22) を用いて, $\dot{\lambda}_x = \dot{\lambda}_y = 0$ として制御を行うことにより, 安定な平衡状態を維持したテザーロボットの運動制御が可能となる.

4.4 シミュレーション

4.4.1 パラメータ設定と制御則

ここでは, 提案した制御法を用いて, 軌道面内 (xz 面内) におけるシミュレーションを行う. 本システムでは, 重力, 遠心力およびテザー張力の影響を考慮する必要がある. そのため, 動力学方程式を用いて, ルンゲクッタ法による数値シミュレーションを行う. 重力を利用したテザー張力制御を利用するとき, 母船およびテザーロボットの大きさはテザー長さに対し無視できる程度であるので, 2.4 節の解析モデルにおいて母船における重心位置 O_s とテザー伸展位置 O_e は一致していると仮定する. すなわち, $s_e = 0$ とする.

テザーロボットの運動に関する拘束条件式 (4.11) はベクトルの外積を表しており, xz 面内においてはスカラー量 λ_y により表される. このため, テザー連結位置制御には, 一自由度の冗長性が必要となる. また, 手先位置制御には, 二自由度必要である. そこで, 四リンク三関節の三自由度テザーロボットを考える. 各剛体は軸周りの慣性モーメントが 0 のリンクとし, I_i は重心回りの慣性モーメント, l_i は関節 i と $i+1$ を結ぶ直線距離を表し, その直線上の中央に重心がある ($i = 0, 1, 2, 3$). そして, 関節 0 はテザー連結位置, 関節 4 は手先位置 $p_e (= [p_{ex} \ p_{ez}]^T)$ とする. リンクパラメータは次の通り設定する.

$$m_i = 10 \text{ [kg]}, \quad l_i = 1 \text{ [m]}, \quad I_i = 10 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

シミュレーションにおいては次に示す制御則を用い, 計算トルク法による制御を行う.

$$\ddot{\phi}^c = \zeta_v \left\{ J_g^{-1} \left(\begin{bmatrix} \nu_e \\ \dot{\lambda}_y \end{bmatrix} - J_s H_s^{-1} \mathcal{L}_r \right) - \dot{\phi} \right\} \quad (4.23)$$

ここで、 $\ddot{\phi}^c$ は逆動力学方程式に与える目標加速度である。また、テザー連結位置制御は、

$$\dot{\lambda}_y = \lambda_y^c - \lambda_y \quad (4.24)$$

と設定する。さらに、 λ_y の目標値 λ_y^c 、および制御ゲイン ζ_v を次の通り設定する。

$$\lambda_y^c = 0, \zeta_v = 1$$

式 (4.23) で表される制御則に上記の ζ_v の設定を用いた場合、目標値に対する追従誤差は無視できる程度である。その結果、初期状態において $\mathcal{L}_r(0) = \mathbf{0}$ であれば、常に $\mathcal{L}_r(t) = \mathbf{0}$ が成り立つ。ただし、() 内は時間を表す。これより、制御則は式 (4.23) より次のように書き換えられる。

$$\ddot{\phi}^c = \zeta_v \left(\mathbf{J}_g^{-1} \begin{bmatrix} \nu_e \\ \dot{\lambda}_y \end{bmatrix} - \dot{\phi} \right) \quad (4.25)$$

母船の軌道半径 R 、重力定数 μ を、次の通り設定する。

$$R = 1 \times 10^4 \text{ [km]}, \mu = 3.99 \times 10^{14} \text{ [m}^3/\text{s}^2]$$

テザー張力はテザーロボット重心が平衡点を維持できるように、次の通りとする。

$$F = -3 w \Omega^2 \ell$$

テザーロボットの初期値は、その重心は安定な平衡点に位置しており、式 (4.7) を満足するように次の通りとする。

$$s_{gz}(0) = 1000 \text{ [m]}, s_{gx}(0) = 0 \text{ [rad]},$$

$$\dot{s}_{gx}(0) = 0 \text{ [m/s]}, \dot{s}_{gz}(0) = 0 \text{ [rad/s]},$$

$$\Phi_0(0) = -\frac{1}{3}\pi, \Phi_1(0) = \frac{2}{3}\pi, \Phi_2(0) = 0, \Phi_3(0) = -\frac{2}{3}\pi \text{ [rad]},$$

$$\dot{\Phi}_i(0) = 0 \text{ [rad/s]},$$

$$p_{ex}(0) = 0, p_{ez}(0) = 1002 \text{ [m]}$$

ただし、 Φ_i は Σ_s 上におけるリンク i の姿勢角とする ($i = 0, 1, 2, 3$)。また、この初期条件のもとで $\mathcal{L}_r(0) = \mathbf{0}$ である

4.4.2 シミュレーション結果

まず、次に示す手先位置制御を行う。

$$\begin{aligned}
\text{(i)} \quad p_e^c &= \begin{bmatrix} p_{ex}(0) + 0.5 \frac{t}{t_e} \\ p_{ez}(0) \end{bmatrix} \\
\text{(ii)} \quad p_e^c &= \begin{bmatrix} p_{ex}(0) \\ p_{ez}(0) + 0.5 \frac{t}{t_e} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

ただし, t_e は最終時間を表し, $t_e = 200$ [s] とする. そして, 目標軌道に追従するように次の速度指令を与える.

$$\nu_e = p_e^c - p_e \quad (4.26)$$

この設定により, テザーロボットの先端位置は Σ_s の各軸に平行に動くこととなる. 図 4.1 および図 4.2 に, 200 [s] 間におけるテザーロボットの動きを, 50 [s] 間隔に示す. これらの結果より, 先端位置は目標軌道に正確に追従していることがわかる. また, テザー連結位置は式 (4.11) を満足する位置, ここでは z 軸に沿って動いている. すなわち, 提案している制御法が有効であり, テザーロボットの重心位置は, テザー張力により一定に維持されていることが確認できる.

次に, 先端姿勢制御を行う. 先端姿勢を表すベクトルを $\Phi_e = [\Phi_2 \ \Phi_3]^T$ と設定し, 目標姿勢角を Φ_e^c とする. ここでは, リンク 3 の姿勢を一定に維持した状態で, リンク 3 の姿勢を次の通り変化させる.

$$\begin{aligned}
\text{(iii)} \quad \Phi_e^c &= \begin{bmatrix} \Phi_2(0) \\ \Phi_3(0) + \frac{\pi t}{6 t_e} \end{bmatrix} \\
\text{(iv)} \quad \Phi_e^c &= \begin{bmatrix} \Phi_2(0) \\ \Phi_3(0) - \frac{\pi t}{6 t_e} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

そして, 目標姿勢角に追従するように次の速度指令を与える.

$$\nu_e = \Phi_e^c - \Phi_e \quad (4.27)$$

図 4.3 に (iii), 図 4.4 に (iv) の結果を, 50 [s] 間隔に示す. これらの結果より, リンク 3 の姿勢を維持した状態でリンク 4 は目標姿勢角に正確に追従していることがわかる. また, テザー連結位置およびテザーロボットの重心位置は, 先端位置制御のシミュレーション結果と同様にそれぞれの条件を満足しており, 提案している制御法が有効であることが確認できる.

4.5 まとめ

本章では, テザー先端の安定な平衡点において, テザーロボットの先端位置姿勢制御法について論じた. まず, 軌道上の重力・遠心力, およびテザー張力が, テザーロボットに

及ぼす影響を調べた。そして、テザー張力により安定な平衡状態を維持できるのは、軌道中心と母船のテザー伸展位置を結ぶ直線上にテザーロボット重心とテザー連結位置が位置することが条件となることを説明した。この結果を踏まえて、一般化ヤコビ行列を用いた制御法を提案した。それは、テザーロボット重心とテザー伸展位置を通る直線上にテザー連結位置を拘束した状態で、テザーロボットを制御する手法である。その制御を用いるためには、三次元空間においてテザーロボットは二自由度の冗長性を必要とする。この手法を用いると、テザーロボットが運動している場合でも、常にテザーロボットに作用する外力の和がゼロとなるため、安定な平衡状態が維持される。そして、手先位置制御・手先姿勢制御に関する軌道面内シミュレーションを行った。

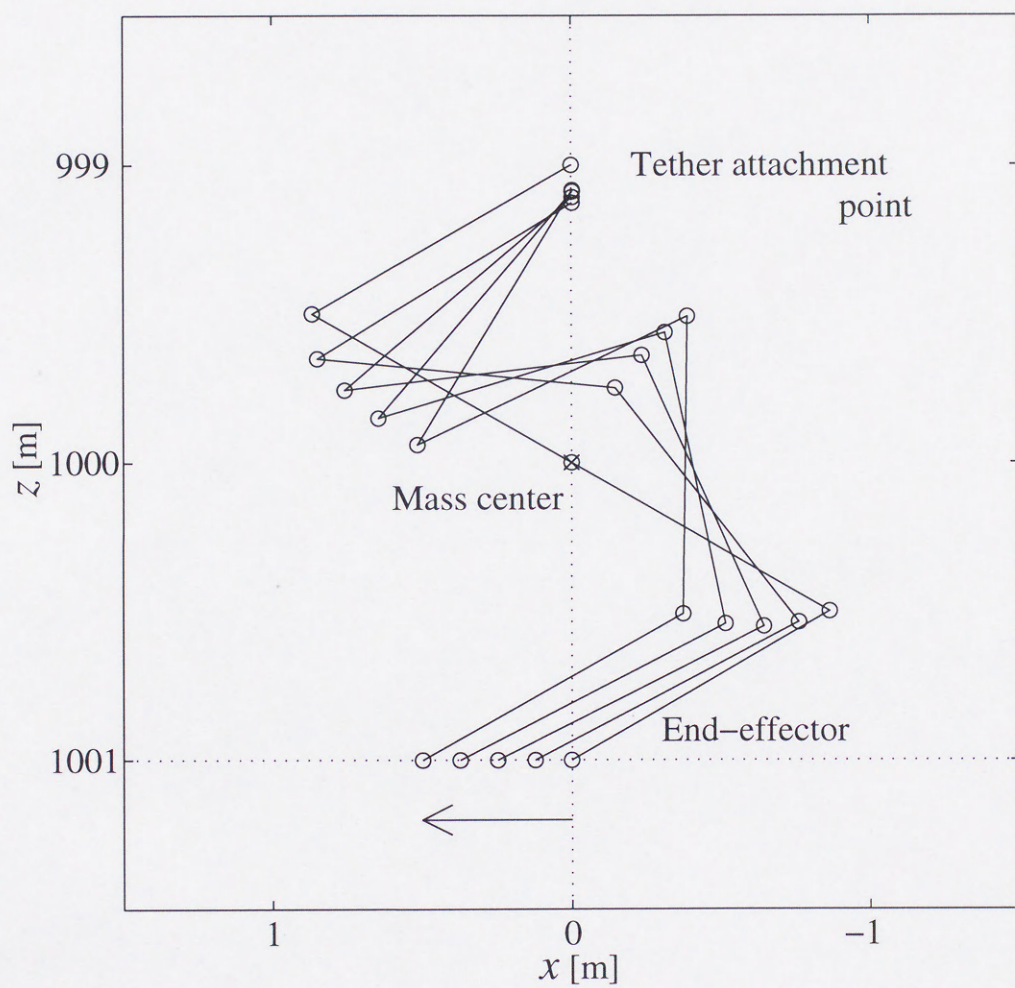


Fig. 4.1: End-effector path tracking (i)

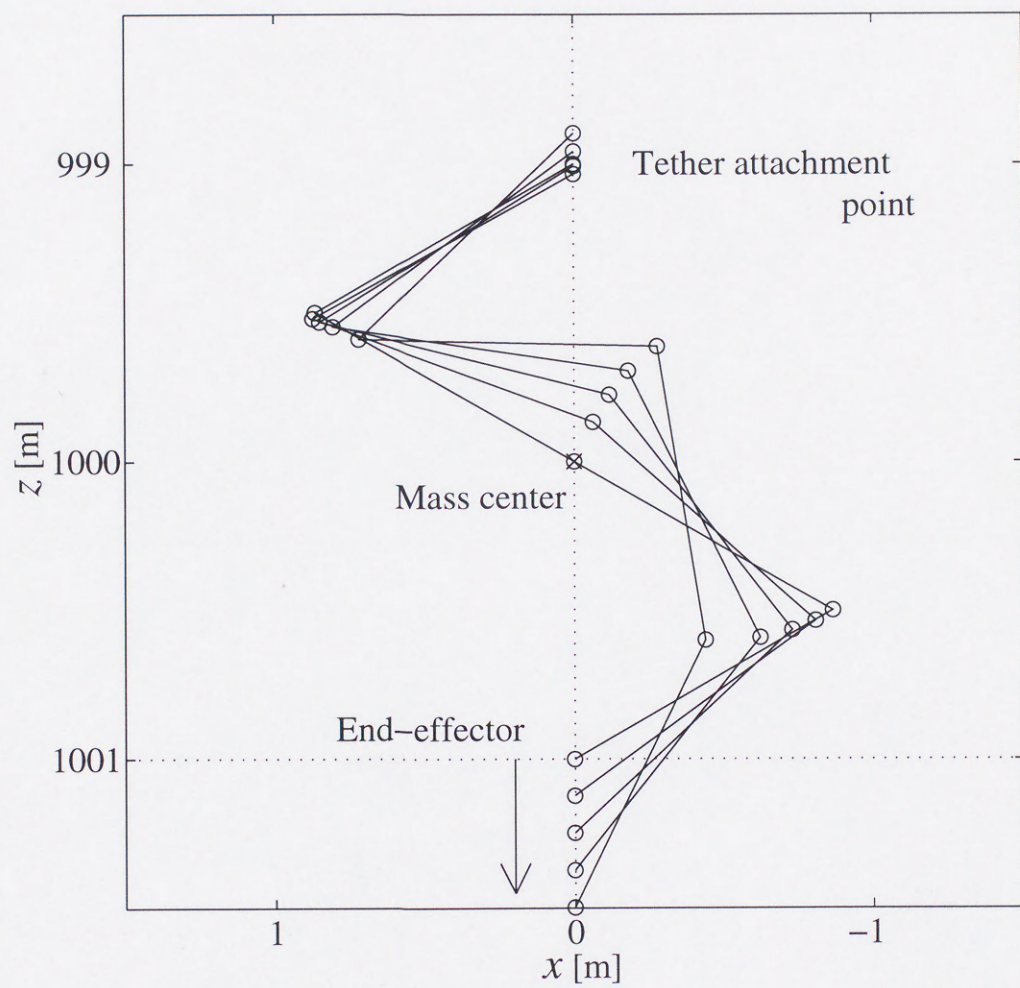


Fig. 4.2: End-effector path tracking (ii)

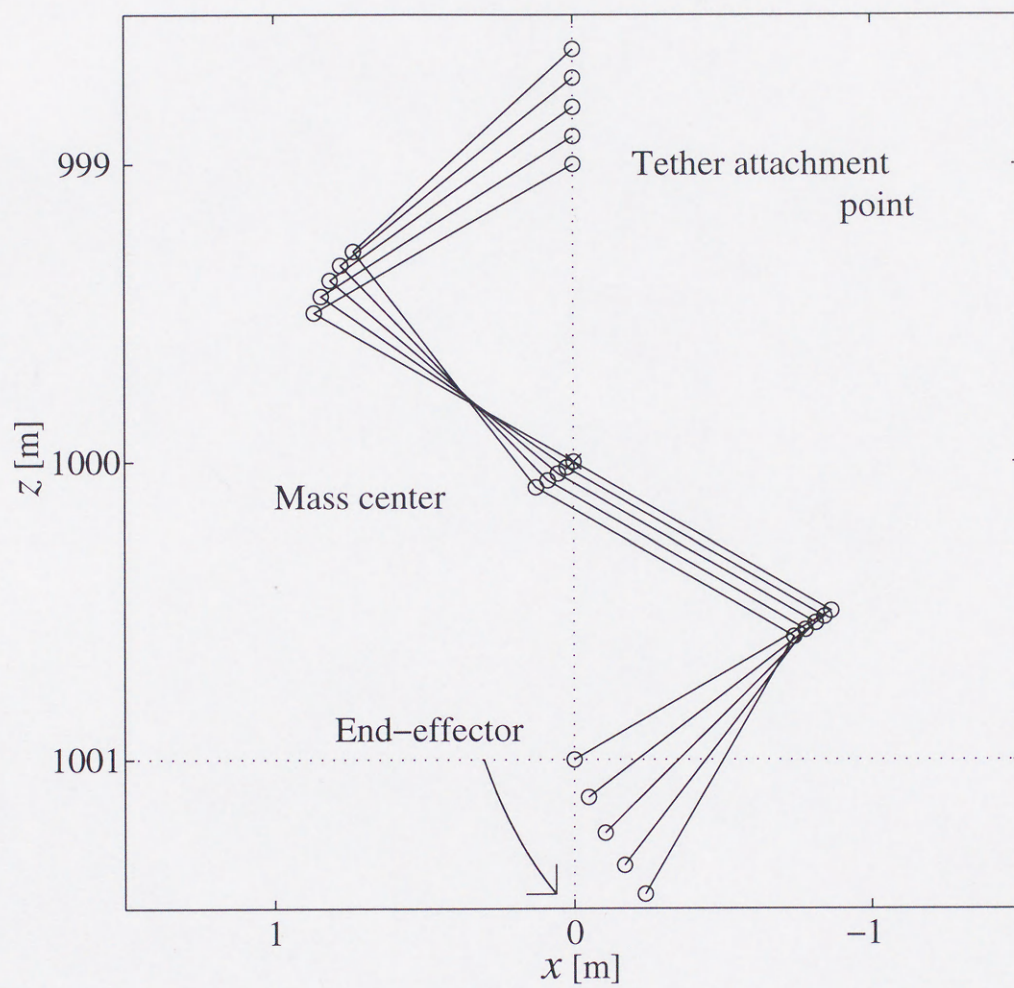


Fig. 4.3: End-effector attitude control (iii)

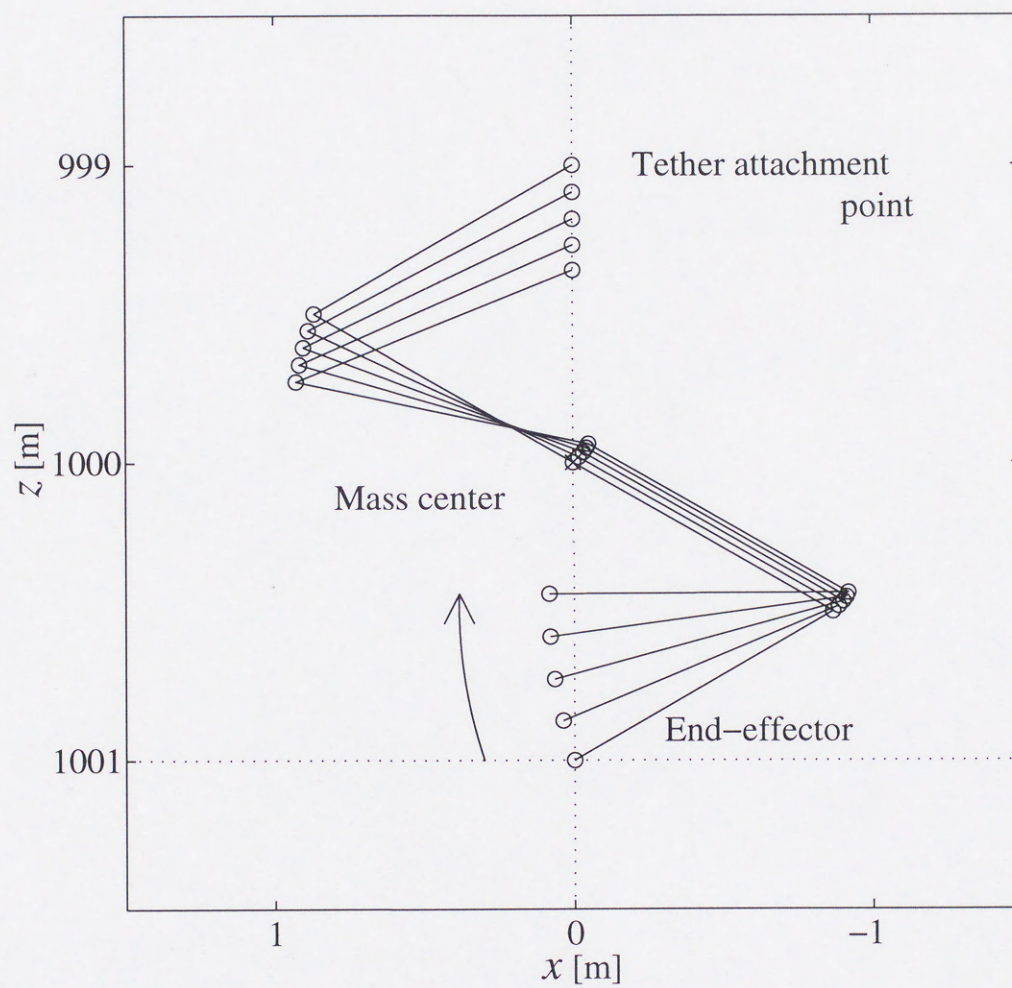


Fig. 4.4: End-effector attitude control (iv)

第 5 章

テザーロボットの外乱補償

5.1 はじめに

本章では，テザーロボットに作用する外乱に対する補償制御について論ずる．空間浮遊型宇宙ロボットでは，外乱に起因する運動を補償するために，推進装置・リアクションホイールなどが必要である．ここでは，テザーロボットシステムの利点を活用し，テザー張力を積極的に利用することによる外乱補償を考える．そして，キャスティングによる移動中，重力を利用したテザー張力制御による移動中および移動後について，考案した手法を用いてシミュレーションを行い，外乱補償制御の検証を行う．

5.2 テザー連結位置操作による角運動量制御

5.2.1 テザー張力による並進運動と回転運動

テザーロボットの運動を制御するとき，その運動量が重要となる．テザーロボットの並進運動量は重心の運動量 \mathbf{P}_c ，角運動量は式 (4.16) を考慮して重心回りの角運動量 \mathbf{L}_r により表すことができる．ここで，運動量は外力が作用することにより変化することに着目し，テザー張力により変化する運動量の変化を考えるため，重心の運動に関する方程式，および重心回りの回転運動に関する方程式を求める．

テザーロボット重心の並進運動に関する運動エネルギー，および重力による位置エネルギーは次のように表される．

$$T_w = \frac{w}{2} \left(\dot{\mathbf{s}}_g^T \dot{\mathbf{s}}_g + \boldsymbol{\Omega}^T \tilde{\mathbf{R}}_g^T \tilde{\mathbf{R}}_g \boldsymbol{\Omega} + 2 \dot{\mathbf{s}}_g^T \tilde{\mathbf{R}}_g \boldsymbol{\Omega} \right) \quad (5.1)$$

$$U_w = - \frac{\mu w}{\sqrt{\mathbf{R}_g^T \mathbf{R}_g}} \quad (5.2)$$

式 (5.1)・(5.2) を用いたラグランジュ法により、テザーロボット重心の運動方程式が次のように求められる。

$$w\ddot{s}_g - w\dot{s}_g\dot{\Omega} + w\left(\frac{\mu}{\|R_g\|^3}E + \tilde{\Omega}^2\right)R_g = F \quad (5.3)$$

式 (5.3) は制御入力となる F により、重力を利用したテザー張力制御を用いて重心位置 s_g を制御することができる。また、 $\Omega \neq 0$ の場合はキャスティング法により、重心位置 s_g が制御できる。すなわち、テザーロボットの並進運動量 P_c の制御が可能となる。

次に、テザー張力により発生する回転力について調べる。近似式 (4.1)・(4.2) を用いると、テザーロボットに作用する回転力は、外乱が発生しない場合テザー張力のみに依存すると考えられる。ここで、テザーロボットを関節が固定された剛体と仮定すると、重心回りの回転運動に関する方程式は次のように表される。

$$I_r\dot{\omega}_r = \tilde{r}_g F \quad (5.4)$$

ただし、テザーロボットは関節が固定された剛体と仮定していることを考慮し、 I_r を重心回りの慣性テンソル、 ω_r を回転角速度ベクトルとする。式 (5.4) の右辺は、式 (4.10) で定義される変数を用いると、次のように表される。

$$\tilde{r}_g F = F\lambda \quad (5.5)$$

式 (5.5) よりテザー張力による回転力の大きさは、テザー張力 F と λ により決定されることがわかる。 λ はテザー連結位置を操作することにより、その大きさを制御することができる。テザー張力 F は、テザーロボットの並進運動の制御において決定されるので、 λ の操作によりテザーロボットの重心回りの回転運動を制御する。これより、重心回りの角運動量 L_r の制御が可能となる。

ところで、テザーロボットの移動に関する制御則は、テザーロボットが質点であると仮定して設計されている。この制御則は式 (4.11) が満足されていれば、テザーロボットが質点でない場合も同様に用いることができる。しかし、重心回りの回転運動を制御する場合 $\lambda \neq 0$ となるため、移動軌道に影響を及ぼすと予測される。また、回転運動は式 (5.5) に基づき制御されるので、テザーロボット重心の運動制御により、得られる回転力が異なることがわかる。すなわち、テザーロボット重心の運動と重心回りの回転運動は相互干渉しており、独立に制御することができないため、同時に行わなければならない。

5.2.2 重心回りの角運動量に関する制御法

テザーロボットの重心回りの角運動量制御は λ の操作により行う。そこで、第 4 章 4.3 節で考案した式 (4.22) で表される制御法を用い、角運動量フィードバックによる λ の制

御を行なうことにより、回転運動を制御する。このとき、第4章の安定な平衡点での運動と異なり、前節でも説明しているようにテザーロボットの並進運動がともなうため、 s_e および s_g が変化する。しかし、テザーロボットの関節の運動制御では、 s_e および s_g を制御することは不可能である。このため、 s_e および s_g は一定とした制御法を用いると追従誤差が発生する。このとき、この追従誤差を含めて外乱補償が可能であるため、式(4.22)を用いた制御法は有効であると考えられる。

ところで、第4章4.3でも述べているが、 λ は s_g を法線ベクトルとする面内に存在する。すなわち、テザー張力により s_g 回りの回転力を発生させることは不可能である。このため、 s_g 回りの角運動量を制御するためには、推進装置・リアクションホイールなどの制御装置が必要となる。この幾何学的関係を考慮して、 λ の指令値 $\lambda^c (= [\lambda_x^c \ \lambda_y^c \ \lambda_z^c]^T)$ を次のように設定する。

$$\begin{bmatrix} \lambda_x^c \\ \lambda_y^c \end{bmatrix} = \zeta_\lambda \begin{bmatrix} L_{rx} \\ L_{ry} \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

ここで、 ζ_λ は制御ゲイン、 $L_r = [L_{rx} \ L_{ry} \ L_{rz}]^T$ である。第4章で導出した一般化ヤコビ行列(4.22)による速度制御を用いて、 λ を式(5.6)に追従させることにより、角運動量制御を行う。

5.3 キャスティングによる移動中の外乱補償

5.3.1 パラメータ設定と制御則

ここでは、キャスティングによる移動におけるテザーロボットの外乱補償について検証する。移動に関する制御は、第3章においてテザーロボットを質点と仮定して行ったシミュレーションと同様に設定し、とくにテザーロボットが空間移動を行っているフェーズ(3)におけるシミュレーションを行う。

テザーロボットの制御は手先の姿勢維持および角運動量制御を目的とする。姿勢維持制御に一自由度、角運動量制御に一自由度必要となるので、三リンク二関節のテザーロボットを用いる。各リンクの重心はその中央にあり、パラメータは次の通り設定する ($i = 0, 1, 2$)。

$$m_0 = m_1 = 30 \text{ [kg]}, \quad m_2 = 40 \text{ [kg]}, \quad l_i = 1 \text{ [m]},$$

$$I_0 = I_1 = 30 \text{ [kgm}^2\text{]}, \quad I_2 = 40 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

ただし、各リンクの重心はその中央に位置する。ここで、テザーロボットの総質量 $w (= m_0 + m_1 + m_2)$ は、第3章の質点の重さと一致する。テザーロボットの角運動量および

姿勢制御には、式 (5.6) と第 4 章 4.4 節のシミュレーションで用いた式 (4.23)・(4.24) による計算トルク法を用い、テザーロボットの速度指令および制御ゲインは次の通り設定する。

$$\nu_e = \Phi_2^c - \Phi_2 \quad (5.7)$$

$$\zeta_v = 1$$

初期値は次の通りとする。

$$\Phi_i(0) = 0 \text{ [rad]}, \dot{\Phi}_i(0) = 0 \text{ [rad/s]}$$

ただし、() 内は時間を表す。

シミュレーションではフェーズ (3) を行うため、フェーズ (3) の初期値として第 3 章の表 1 の結果を用い、母船搭載マニピュレータの手先位置、およびテザーロボットのテザー連結位置を次の通りとする。

$$s_{ex}(0) = s_{0x}(0) = 0.054, s_{ey}(0) = s_{0y}(0) = 2.00 \text{ [m]},$$

$$\dot{s}_{ex}(0) = \dot{s}_{0x}(0) = 2.02, \dot{s}_{ey}(0) = \dot{s}_{0y}(0) = -0.0057 \text{ [m/s]}$$

キャスティングのシミュレーションにおける外乱の発生要因は、移動軌道修正制御およびテザーロボットの姿勢・テザー連結位置制御における指令値への追従誤差である。

5.3.2 シミュレーション結果

シミュレーションは、テザーロボットの制御を次の二通りで行い、それぞれの結果を比較する。

- (i) 角運動量制御を行う場合 ($\zeta_\lambda = 0.5$)
- (ii) 角運動量発生抑制のみ行う場合 ($\zeta_\lambda = 0$)

図 5.1 にテザーロボット重心の移動軌道について、図 5.2 に母船搭載マニピュレータの手先について、さらに、図 5.3 にテザーロボット重心の並進運動量 $P_m (= \|\mathbf{P}_m\|)$ 、テザーロボットの重心に対する角運動量 L_{ry} 、およびテザーロボットの手先姿勢 Φ_2 の時刻歴を示す。それぞれの図において、実線は (i) について、点線は (ii) についての結果を示す。ここで、目標地点は母船より 100 [m] 離れており、テザーロボットの到達時間は $t \approx 100$ [s] であることが式 (3.11) より予測されるが、結果では少し短い時間に終了している。これは、ミッションに要する時間が、外乱に依存しているためである。

図 5.1 および図 5.2 より，母船搭載マニピュレータの手先位置およびテザーロボット重心の移動軌道は，(i) の方が逸脱量が少し大きいことがわかる．これより，角運動量制御を行うことは，移動軌道修正制御に影響を及ぼすことが確認できる．すなわち，テザー連結位置を操作するため，テザーロボットに作用するテザー張力の方向が変化するため，テザーロボット重心の運動が変化する．しかし，(i) および (ii) において，テザーロボットに作用するテザー張力の大きさは等しいため，並進運動量の変化は等しいことが，図 5.3 より確認できる．

図 5.3 より，角運動量制御を行う (i) の方が角運動量の変化量が少なく，手先姿勢の変化も小さいことがわかる．(ii) では，角運動量の変化量が大きいため，手先姿勢の変化も大きい．すなわち，考案した角運動量制御法が有効であることを示している．ところで，(ii) は角運動量制御を行っていないので，(i) より角運動量の変化量が多いが，最終的には角運動量が抑制されている．その理由は，次のように考えられる．テザーロボットの角運動量が発生すると，テザー連結位置が連結直線から逸脱する．その結果，テザーロボットにはテザー張力により外力トルクが作用する状態となるが，その方向は角運動量の発生による回転運動の方向と逆である．すなわち，角運動量が増幅することではなく，減少することとなる．

5.4 重力を利用したテザー張力制御における外乱補償

5.4.1 パラメータ設定と制御則

ここでは，第 4 章におけるシミュレーションと同様に $s_e = \mathbf{0}$ として，重力を利用したテザー張力制御を用いた場合の外乱補償を，軌道面内シミュレーション (xz 面内) により検証する．

テザーロボットの制御は前節のキャストイングと同じとし，三リンク二関節のテザーロボットを用いる．各リンクの重心はその中央にあり，パラメータは次の通り設定する ($i = 0, 1, 2$)．

$$m_i = 10 \text{ [kg]}, l_i = 1 \text{ [m]}, I_i = 10 \text{ [kgm}^2\text{]}$$

ただし，各リンクの重心はその中央に位置する．初期値は次の通りとする．

$$\Phi_i(0) = 0 \text{ [rad]}, \dot{\Phi}_i(0) = 0 \text{ [rad/s]}$$

制御法は，速度指令として式 (5.6)・(5.7) を用い，第 4 章 4.4 節のシミュレーションで用いた式 (4.23)・(4.24) で表される計算トルク法を用いる．

母船の軌道パラメータも、第4章4.4節のシミュレーションと同じ値とする。テザー張力制御には、従来のテザー伸展技術を用いる。テザー伸展技術の代表的な方法は、線形最適化制御 [46] およびミッションファンクション制御 [47] が考えられる。線形最適化制御は簡単なアルゴリズムであるが、テザーロボット重心が軌道面外に逸脱した場合はミッションファンクション制御の方が有利である。本シミュレーションは軌道面内で行うので、簡単なアルゴリズムである線形最適化制御を用いる。

ここで、母船重心とテザーロボット重心の距離を ℓ 、母船の軌道中心位置と母船重心位置を結ぶ直線と、母船重心とテザーロボット重心位置を結ぶ直線のなす角度を θ と定義する。そして、 ℓ^c を ℓ の指令値として次に示す制御則を用いる。

$$F = w \{ \zeta_1 \Omega^2 (\ell^c - \ell) - \zeta_2 \Omega \dot{\ell} - \zeta_3 \Omega^2 \ell^c \theta - \zeta_4 \Omega \ell^c \dot{\theta} - 3 \Omega^2 \ell^c \} \quad (5.8)$$

ただし、 $\zeta_1 \sim \zeta_4$ は制御ゲインであり、評価関数を用いて得られる次の値とする [46]。

$$\zeta_1 = 7.359, \zeta_2 = 5.638, \zeta_3 = 3.070, \zeta_4 = 1.769$$

5.4.2 テザーロボットの移動時における外乱補償

ここでは、テザー伸展・回収の二通りを次の条件で行う。

$$(a) \text{ 伸展: } \text{if } \ell^c < \ell_e \text{ then } \ell^c = \ell(0)e^{t/t_e} \text{ otherwise } \ell^c = \ell_e,$$

$$\ell(0) = 100, \ell_e = 1000 \text{ [m]}, t_e = 2000 \text{ [s]}$$

$$(b) \text{ 回収: } \text{if } \ell^c > \ell_e \text{ then } \ell^c = \ell(0)e^{-t/t_e} \text{ otherwise } \ell^c = \ell_e,$$

$$\ell(0) = 1000, \ell_e = 100 \text{ [m]}, t_e = 2000 \text{ [s]}$$

ここで、 ℓ_e は母船重心とテザーロボット重心間の最終目標距離を表す。伸展・回収それぞれについて、テザーロボットの制御を次の二通りで行う。

$$(i) \text{ 角運動量制御を行う場合 } (\zeta_\lambda = 1)$$

$$(ii) \text{ 角運動量発生抑制のみ行う場合 } (\zeta_\lambda = 0)$$

シミュレーションにおける外乱の発生要因は、キャスティングの場合と同様に、テザーロボットの姿勢・テザー連結位置制御における指令値への追従誤差となる。

図5.4 および図5.7に、(i)のテザー連結位置の軌跡、およびテザーロボットの姿勢を示す。テザーロボットの姿勢はそれぞれ次の時間における姿勢を、倍率100/1の大きさで表す。

$$t = 0, 4000, 6000, 15000 \text{ [s]}$$

図 5.5 および図 5.8 は、テザーロボット重心の並進運動量 $P_m (= \|P_m\|)$ 、テザーロボットの重心に対する角運動量 L_{ry} 、およびテザーロボットの手先姿勢 Φ_2 の時刻歴を、図 5.6 および図 5.9 にテザーロボット重心の移動軌道について示す。それぞれの図において、実線は角運動量制御を行う場合 (i)、点線は角運動量制御を行わない場合 (ii) を表す。

まず、角運動量制御について、図 5.5 および図 5.8 の結果より考察する。(i) では、テザー連結位置操作を行い角運動量を積極的に制御しているので、角運動量が効率よく抑制されている。その結果、角運動量の発生量が (ii) に比べ無視できる程度であることがわかる。(ii) では角運動量制御は行われていないが、テザー連結位置が母船重心とテザーロボット重心を結ぶ直線上に位置するように制御が行われている。このため、角運動量を抑制することはできないが、キャスティングの場合と同様にテザー連結位置は連結直線に戻ろうとするため、最終的には角運動量が抑制されている。これより、テザー伸展・回収時における角運動量制御を用いた外乱補償が効率的であることが検証された。

また、図 5.6 および図 5.9 の結果より、テザー張力制御によるテザーロボットの伸展・回収において、テザーロボットの移動に対し、リンクの運動は影響を及ぼしていないことがわかる。すなわち、(i)・(ii) とともにテザーロボット重心の移動軌道は一致している。この理由は、テザー長さがテザーロボットの大きさに比較して十分に長いため、テザー連結位置を操作した場合に変化するテザー張力の方向は無視できる程度であるためと考えられる。

5.4.3 安定な目標地点における外乱補償

テザーロボットが重力を利用したテザー張力制御により目標地点に移動した後に、外乱が発生した場合の外乱補償について検証する。テザーロボットの重心に関する初期値は、

$$\ell(0) = 1000 \text{ [m]}, \theta(0) = 0 \text{ [rad]}, \dot{\ell}(0) = 0 \text{ [m/s]}, \dot{\theta}(0) = 0 \text{ [rad/s]}$$

とする。ここでは、外乱の発生要因をテザーロボットの手先と対象物の接触であると想定して、テザーロボットの手先位置 p_e に、次に示す二種類のインパルス外乱を与える。

$$(a) \quad \delta_x(0) = 1 \times 10^{-1}, \delta_z(0) = 0 \text{ [Ns]}$$

$$(b) \quad \delta_x(0) = 0, \delta_z(0) = 1 \times 10^{-1} \text{ [Ns]}$$

ここで、 δ_x および δ_z は、それぞれ x 軸および z 軸方向のインパルス外乱を表す。それぞれについて、テザーロボットの制御を次の二通りで行う。

(i) 角運動量制御を行う場合 ($\zeta_\lambda = 1$)

(ii) 角運動量発生抑制のみ行う場合 ($\zeta_\lambda = 0$)

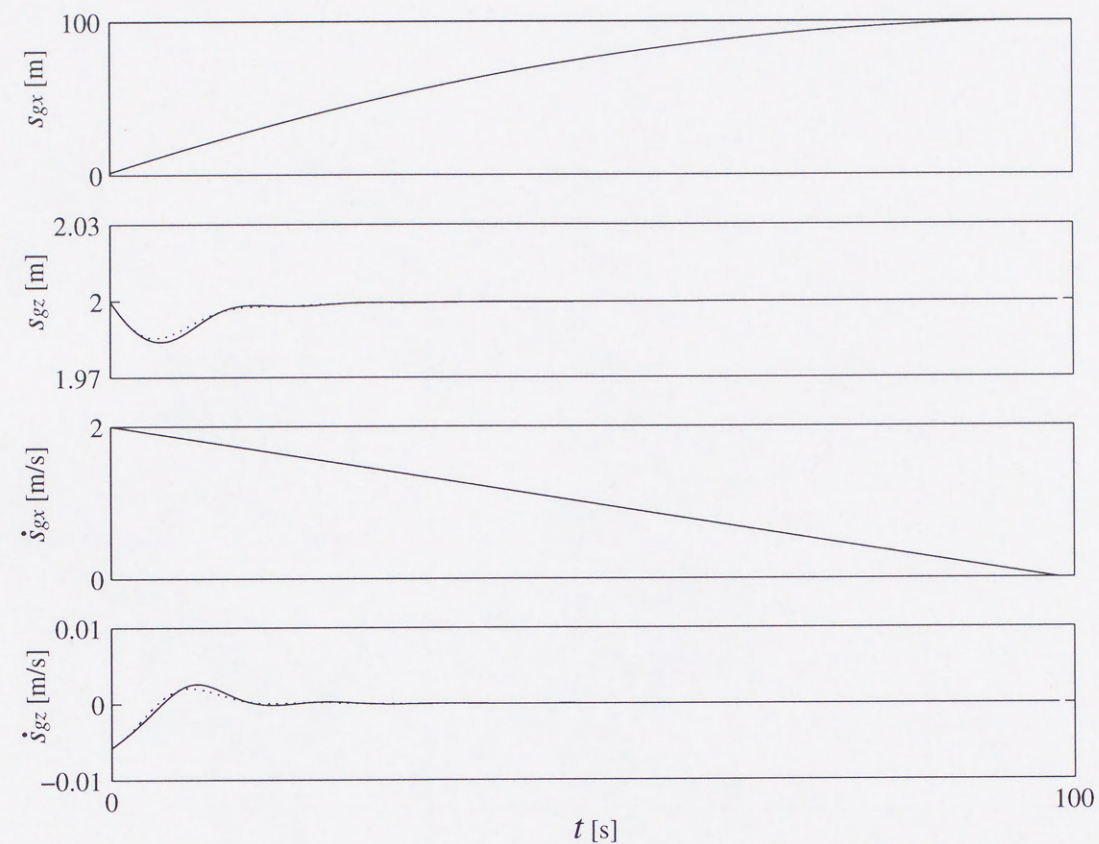
図 5.10 に (a) の結果について、図 5.12 に (b) の結果について、テザーロボット重心の並進運動量 P_m ($= \|\mathbf{P}_m\|$)、テザーロボットの重心に対する角運動量 L_{ry} 、およびテザーロボットの手先姿勢 Φ_2 の時刻歴を、図 5.11 および図 5.13 にテザーロボット重心の移動軌道について示す。

(a) ではインパルス外乱の作用線がテザーロボット重心を通るので、角運動量の発生は無視できる程度である。(b) では並進運動量・角運動量がともに発生しており、並進運動量は角運動量に比べ、その補償に長い時間がかかることが分かる。また、(i) と (ii) を比較すると、角運動量制御を行う場合は姿勢角の変化量が大きいが、角運動量は効率よく抑制されていることがわかる。これより、安定な平衡点に位置するテザーロボットに外乱が発生した場合にも、角運動量制御が有効であることが検証された。

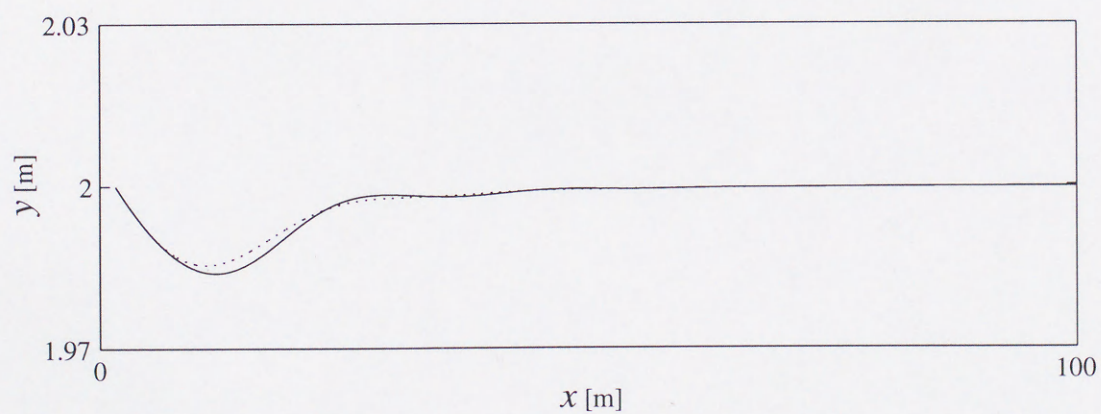
また、図 5.11 および図 5.13 の結果より、(i)・(ii) ともにテザーロボット重心の移動軌道は一致していることがわかる。これは、伸展・回収に関するシミュレーションと同じ理由である。

5.5 まとめ

本章では、テザーロボットのテザー張力を利用した外乱補償について論じた。それは、テザー張力を積極的に利用し、テザーロボットの並進運動量および重心回りの角運動量を制御することによる方法である。並進運動量は、キャスティング法、または重力を利用したテザー張力制御による移動技術により、補償することができる。角運動量は、テザー連結位置を操作し、テザー張力により発生するテザーロボットに対する外力トルクを制御することにより、補償することができる。これらの運動量を同時に制御することにより、外乱補償が可能となる。提案した手法を用いてシミュレーションを行い、キャスティングによる移動中、重力を利用したテザー張力制御による移動中および移動後について、その有効性を検証した。さらに、シミュレーション結果より、キャスティングでは角運動量制御がテザーロボット重心の移動軌道に影響を及ぼすこと、重力を利用したテザー張力制御を用いた場合、角運動量制御による回転運動の補償に比較して、並進運動の補償には時間を要することが確認された。



(a) The mass center state time history of the tethered robot



(b) Path of the mass center of the tethered robot

Fig. 5.1: Simulation of tethered robot casting

(..... for case (i) — for case (ii))

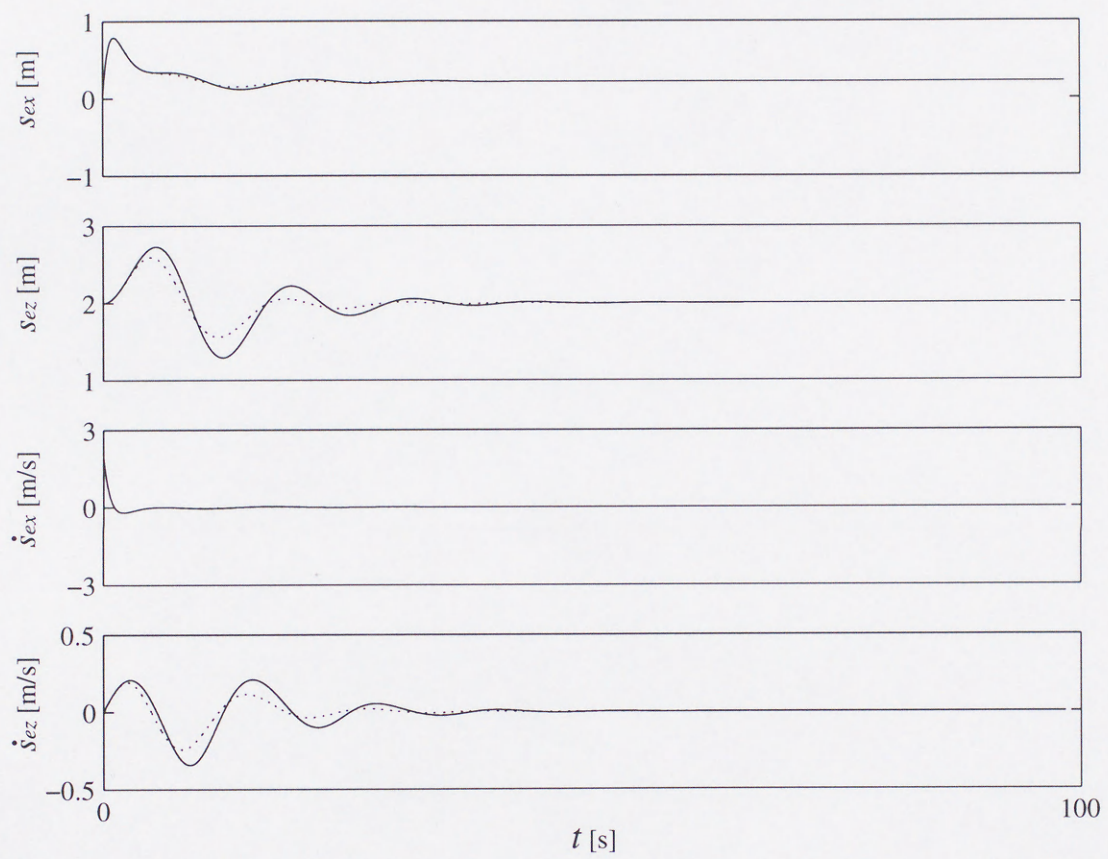


Fig. 5.2: Manipulator end-point state time history during tethered robot casting

(..... for case (i) — for case (ii))

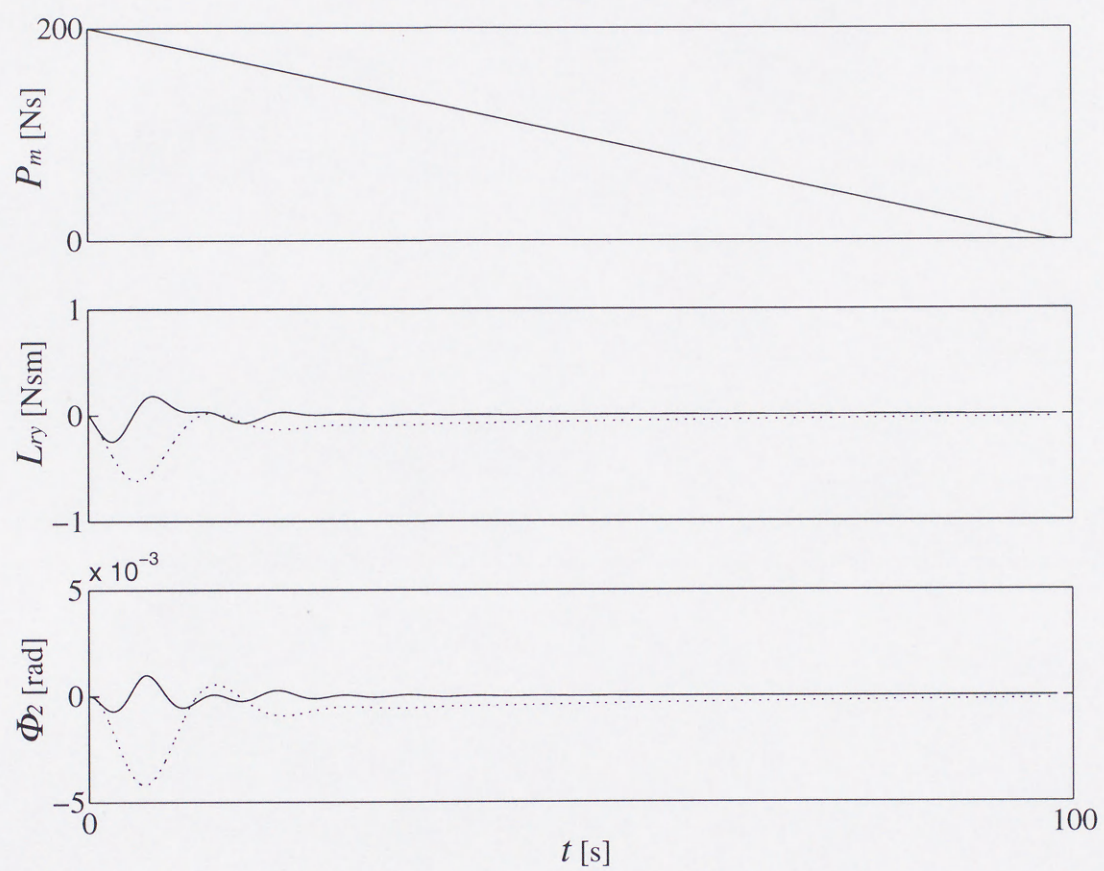


Fig. 5.3: Momentum and end-effector attitude state time history during tethered robot casting

(..... for case (i) — for case (ii))

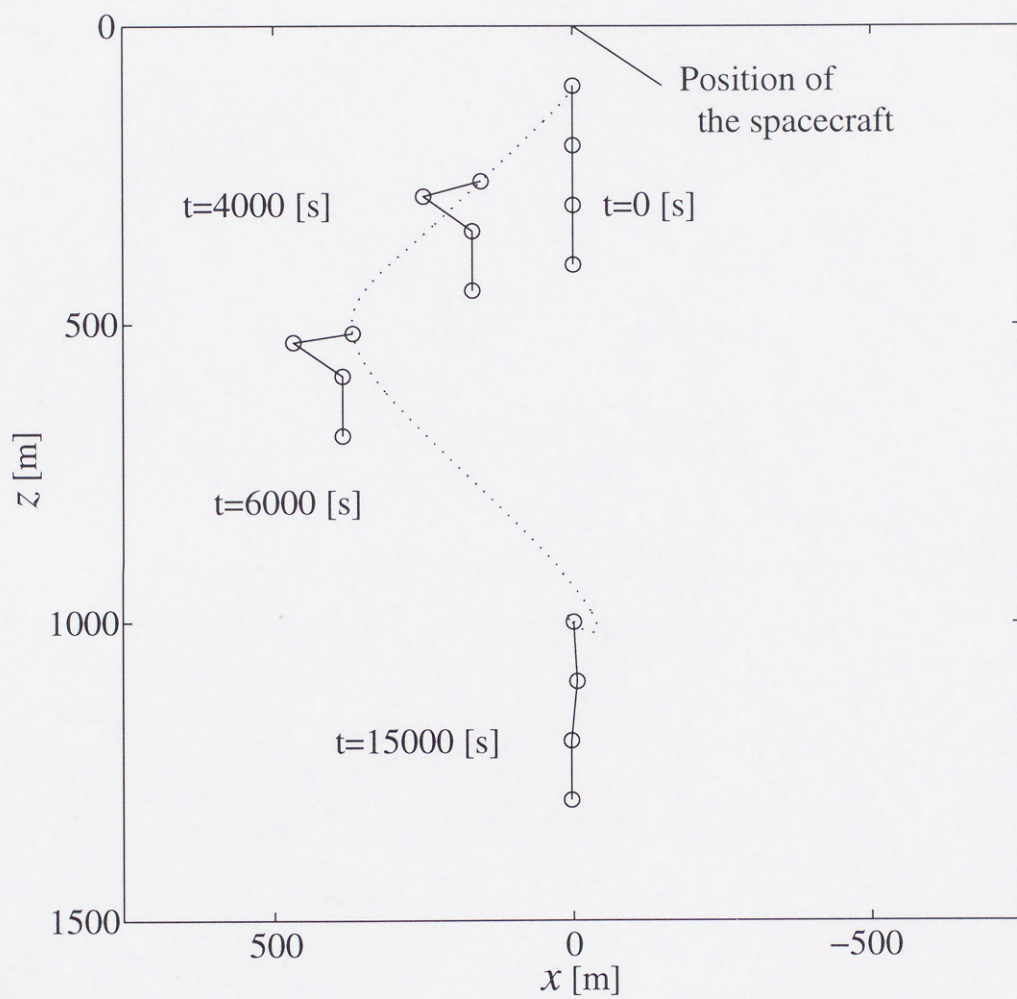


Fig. 5.4: Trajectory of the tether attachment point and motion of the tethered robot during deployment

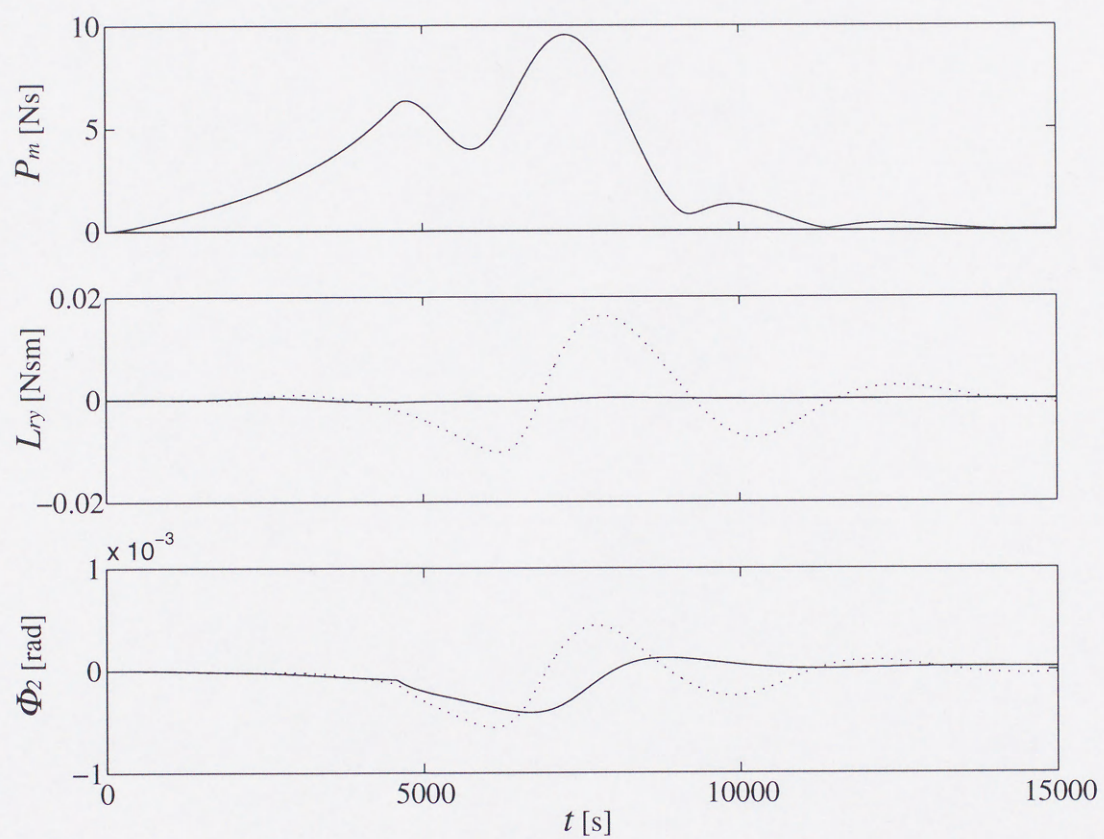


Fig. 5.5: Momentum and end-effector attitude state time history during deployment

(..... for case (i) — for case (ii))

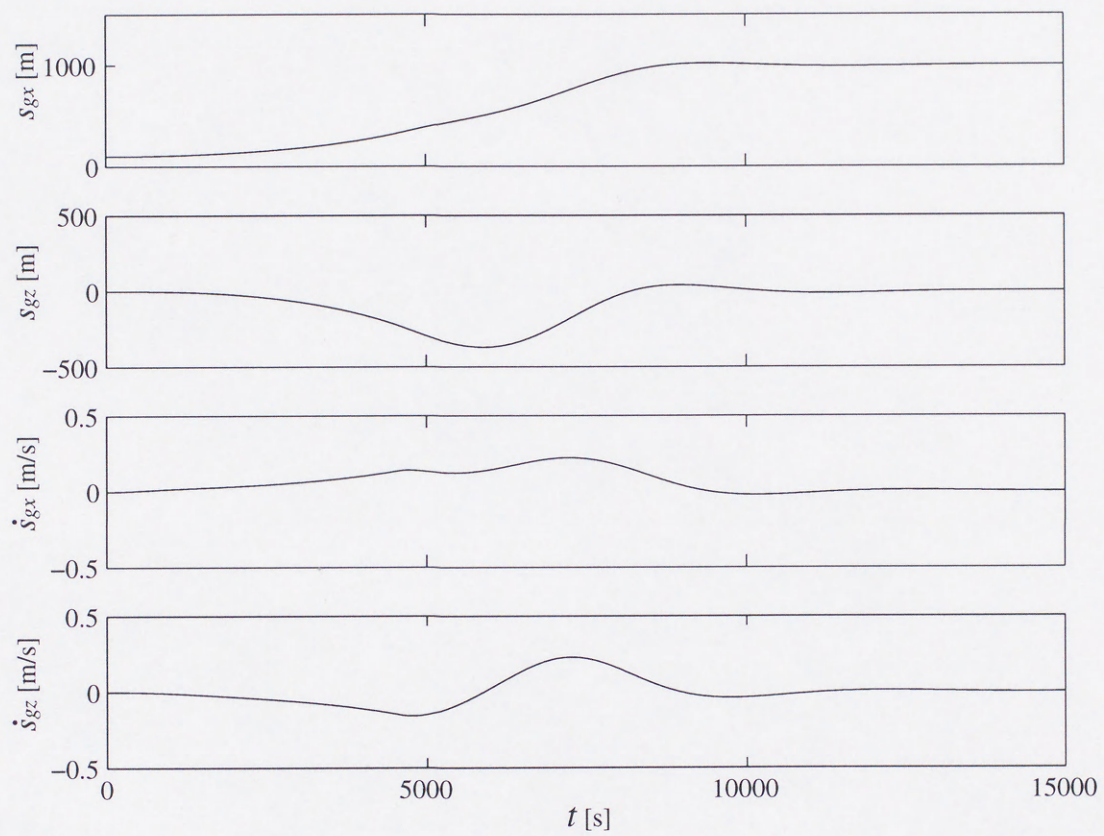


Fig. 5.6: The mass center state time history of the tethered robot during deployment

(..... for case (i) — for case (ii))

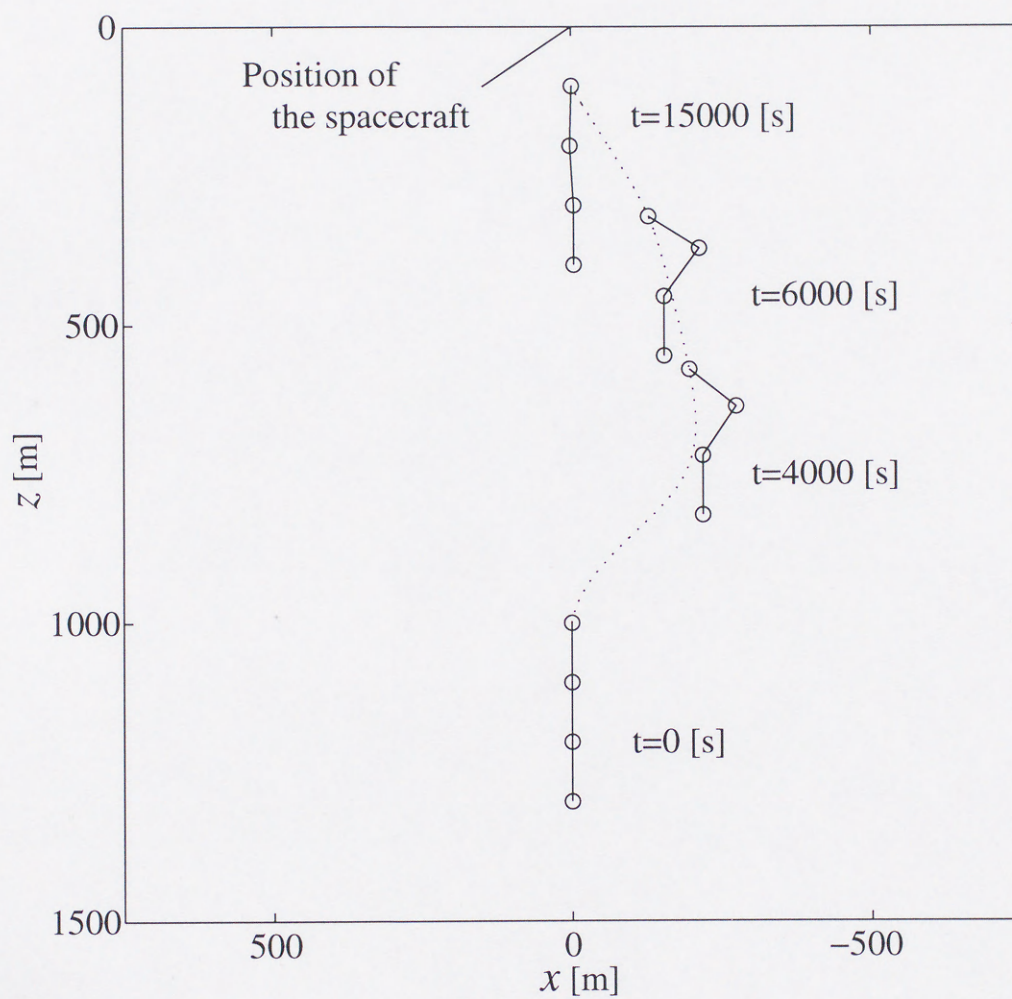


Fig. 5.7: Trajectory of the tether attachment point and motion of the tethered robot during retrieval

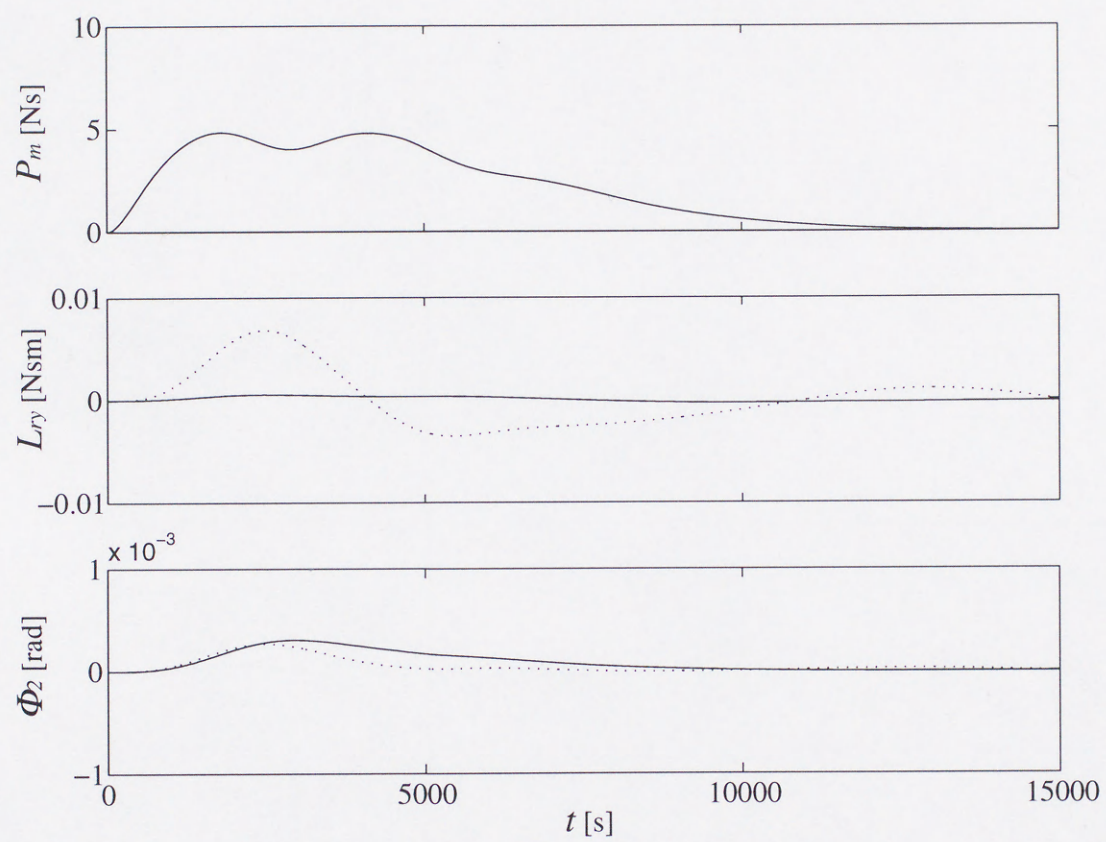


Fig. 5.8: Momentum and end-effector attitude state time history during retrieval

(..... for case (i) — for case (ii))

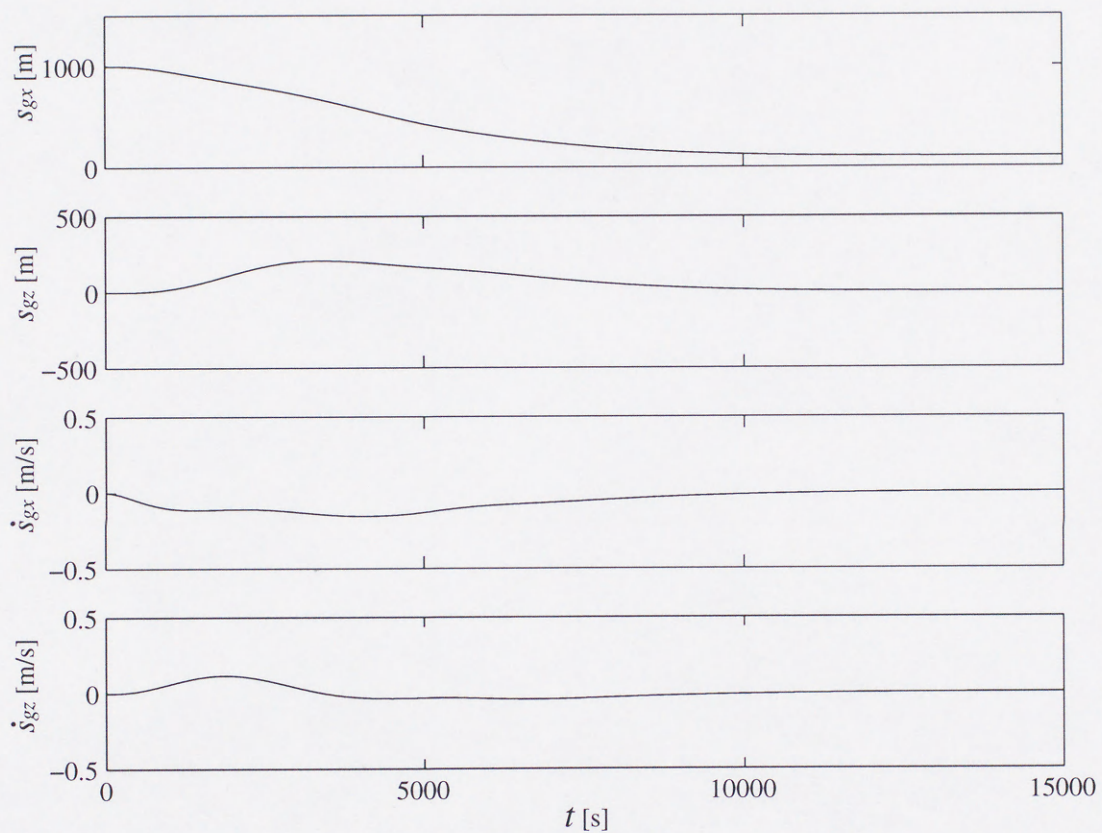


Fig. 5.9: The mass center state time history of the tethered robot during retrieval

(..... for case (i) — for case (ii))

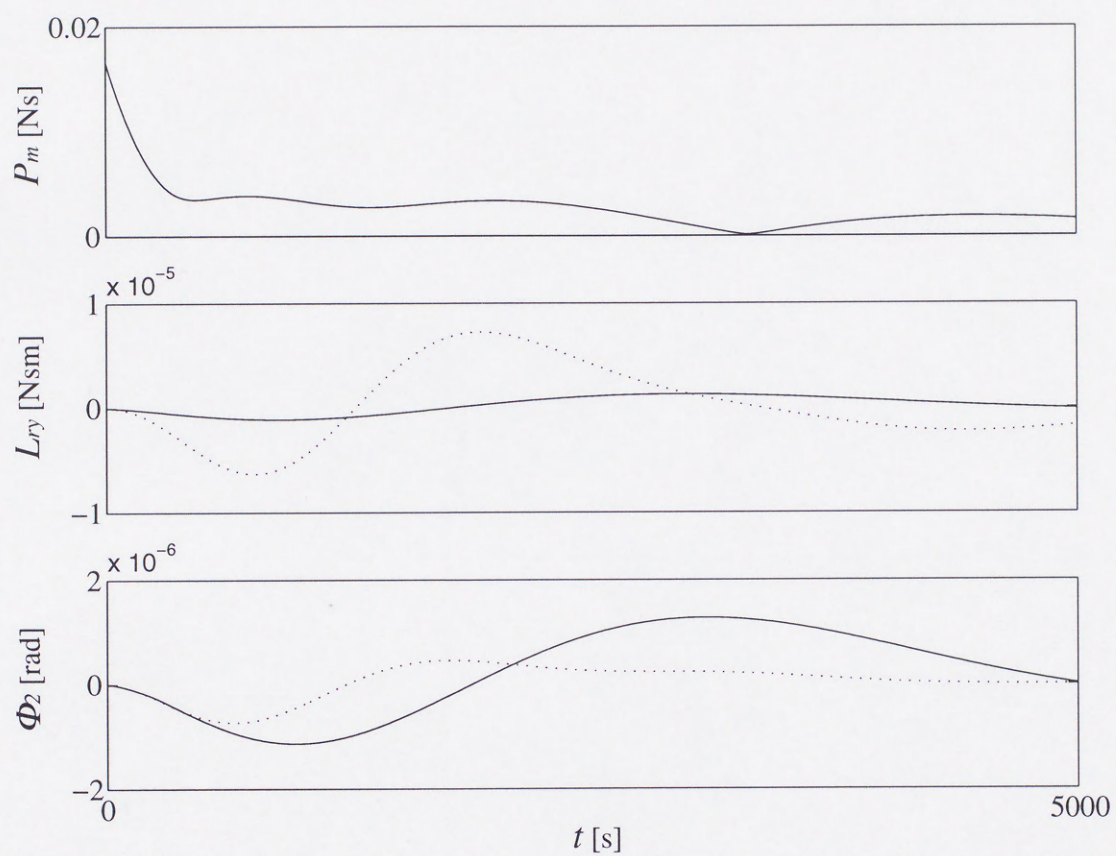


Fig. 5.10: Momentum and end-effector attitude state time history during compensation for disturbance (a)

(..... for case (i) — for case (ii))

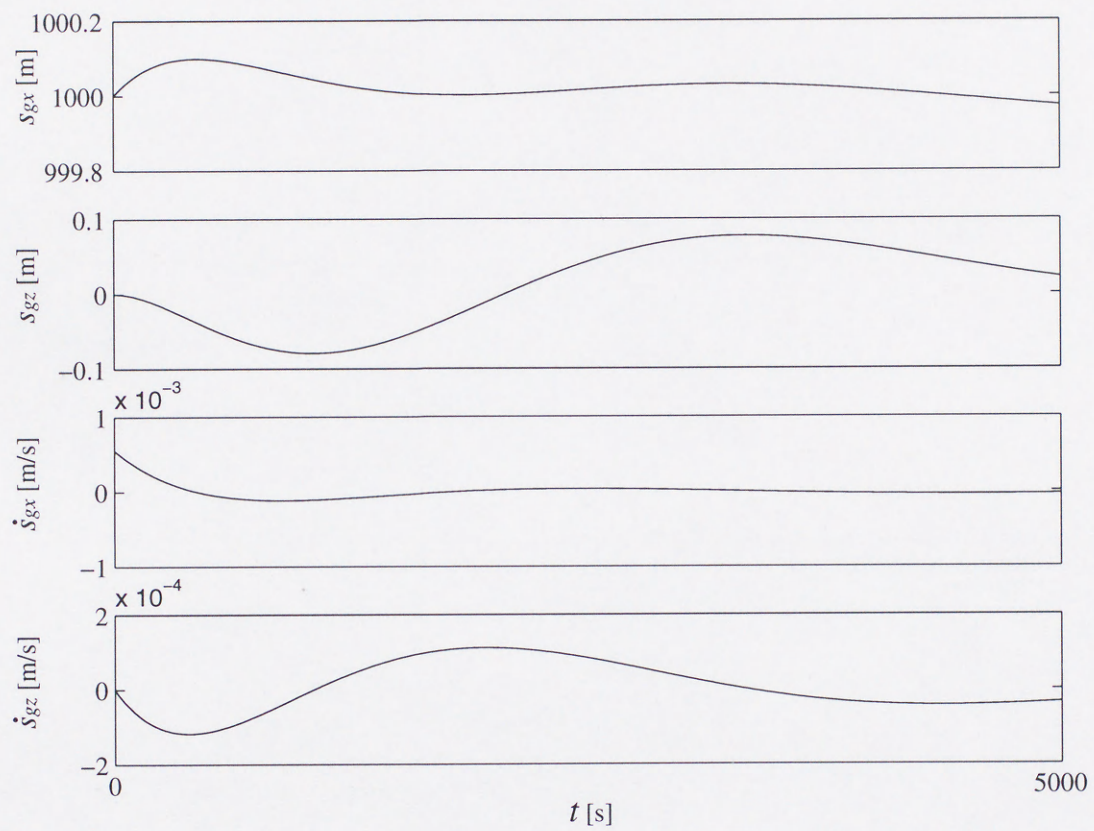


Fig. 5.11: The mass center state time history of the tethered robot during compensation for disturbance (a)

(..... for case (i) — for case (ii))

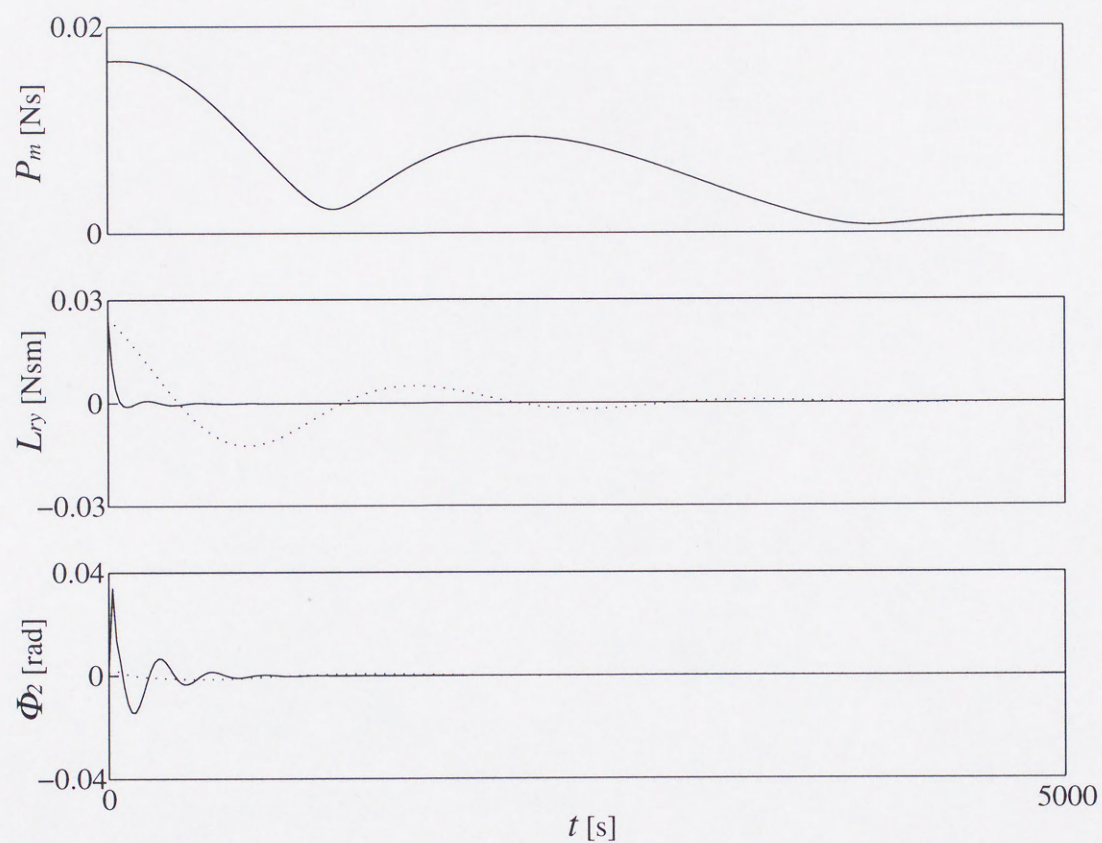


Fig. 5.12: Momentum and end-effector attitude state time history during compensation for disturbance (b)

(..... for case (i) — for case (ii))

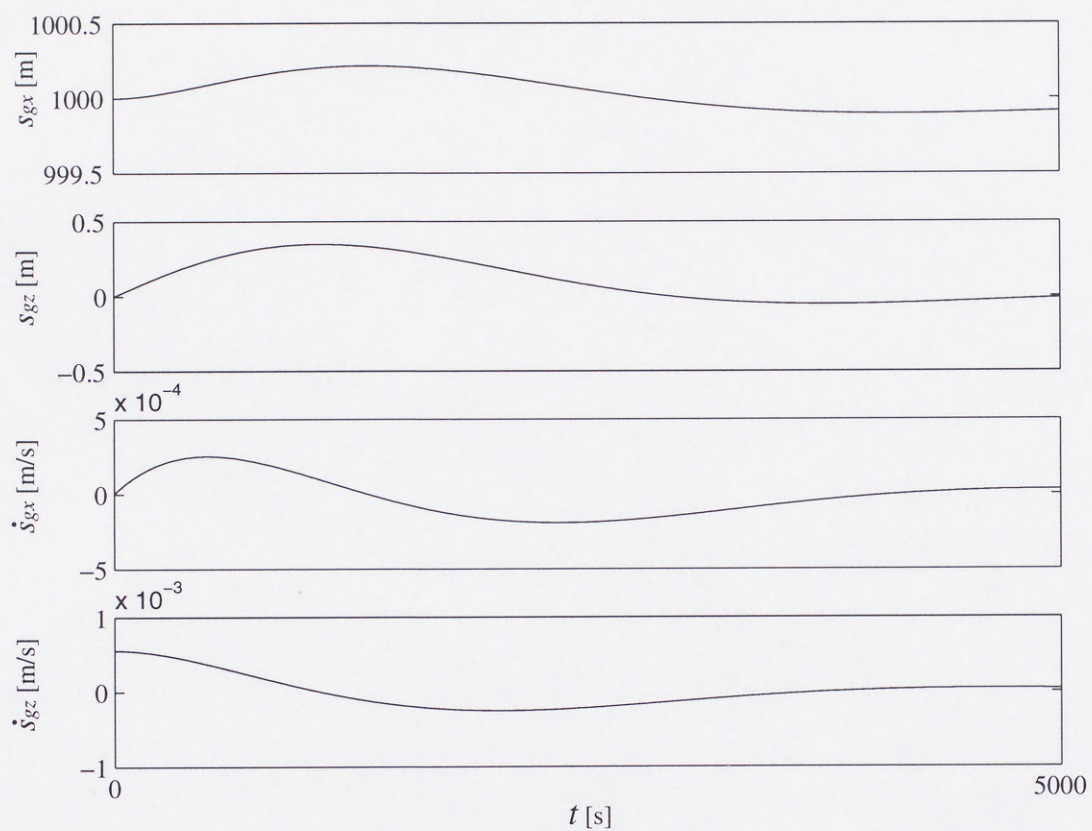


Fig. 5.13: The mass center state time history of the tethered robot during compensation for disturbance (b)

(..... for case (i) — for case (ii))

第 6 章

結論と今後の課題

6.1 結論

本論文では、新宇宙機であるテザーロボットシステムを提案し、その物理的特徴を明らかにした後に、基本的な制御法を提案した。

第 2 章 テザーロボットシステムの定式化 では、テザーロボットシステムの工学的特徴を明らかにし、次に示す運用に必要な技術を明らかにした。

(i) テザーロボットの宇宙空間移動技術

- ・ 重力を利用したテザー張力制御による移動方法
- ・ 軌道修正制御を用いたキャスティングによる移動方法（新技術）

(ii) テザーロボットの手先位置姿勢制御技術

- ・ テザー張力が作用する状態における手先位置姿勢制御技術（新技術）
- ・ テザー張力が作用しない状態における手先位置姿勢制御技術

(iii) テザーロボットの外乱補償に関する制御技術

- ・ テザー張力を利用した外乱補償に関する制御技術（新技術）
- ・ テザー張力が作用しない状態における外乱補償に関する制御技術

これらの技術のうち、新技術と記した技術は従来の宇宙ロボットとは異なる新しい手法が必要となる。これらのテザーロボットシステムに関する新しい技術を、各章において制御法の提案およびシミュレーションによる検証を行い、以下に示す結論を得た。

第 3 章 キャスティングによる宇宙空間移動 では、母船搭載マニピュレータを用いてテザーロボットを投げ、テザー張力を作用させることにより目標地点で停止させるキャス

ティング、およびその移動時における移動軌道修正制御法を提案した。まず、移動軌道修正制御に関する評価を行い、その有効性は、母船搭載マニピュレータのパラメータおよび制御ゲインに大きく依存することを説明した。そして、キャスティングのシミュレーションを行った。その結果より、テザーロボットが母船から離れる時点での速度が、到達地点の精度に大きく影響を及ぼすが、提案した制御法を用いることにより目標地点に正確に到達することが確認された。

第4章 平衡点における手先位置姿勢制御 では、軌道上の重力・遠心力による安定な平衡点に位置する状態の、テザーロボットの手先位置姿勢制御法について論じた。その安定な平衡状態は、軌道中心と母船のテザー伸展位置を結ぶ直線上にテザーロボット重心とテザー連結位置が位置することが条件となることを明らかにした。そして、軌道中心とテザー伸展位置を通る直線上にテザー連結位置を拘束した状態で、テザーロボットの手先位置姿勢制御を行う手法を提案した。その制御法を用いるためには、テザーロボットに冗長自由度を必要とする。この手法を用いると、テザーロボットが運動している場合でも、安定な平衡状態が維持される。

第5章 テザーロボットの外乱補償では、テザーロボットに作用する外乱に対する補償制御について論じた。テザー張力がテザーロボットに作用する状態において、テザー張力を積極的に利用し、テザーロボットの並進運動量および重心回りの角運動量を制御する方法である。これらの制御法を用いてシミュレーションを行い、キャスティングによる移動中、重力を利用したテザー張力制御による移動中および移動後について、その有効性を検証した。さらに、シミュレーション結果より、キャスティングでは角運動量制御がテザーロボット重心の移動軌道に影響を及ぼすこと、重力を利用したテザー張力制御を用いた場合、角運動量制御による回転運動の補償に比較して、並進運動の補償には時間を要することが確認された。

6.2 今後の課題

本論文では、テザーロボットのテザー張力による移動および外乱補償に関して、基本的な方法について論じた。これより、従来の宇宙ロボットにおける推進装置・リアクションホイールの役割を、テザーが果たすと考えることができる。ここでは、テザーロボットシステムの実用化に関する今後の課題について、簡単に述べる。

まず、実運用においてテザー張力のみによる運用は限界があると考えられ、テザーとともに推進装置・リアクションホイールを併用することが現実的である。その理由は次のように考えられる。まず、キャスティングにおいて、テザー張力はテザーロボットに母船方向の外力しか与えることができない。このため、目標地点到達後のテザー張力を利用した

制御が不可能である。次に、重力を利用したテザー張力制御を行う場合、テザーは非常に長く伸展されるので、テザー先端位置の制御精度は低いものとなる。このような問題に対応するために、推進装置・リアクションホイールを併用した場合でも、燃料消費量が大幅に削減できる。すなわち、移動に必要な力の大部分はテザー張力を利用しており、燃料噴射は精度を高めるために使用する。また、リアクションホイールは外乱を吸収することによりエネルギーが増加し、燃料噴射によるアンローディングが必要となるが、その際の燃料消費量も削減できる。

また、テザーロボットの作業に着目したとき、テザーの挙動がその作業効率を低くする場合もある。このような場合は、テザーロボットが目標地点に到達した後、または接近した後に、テザーよりテザーロボットを切り離すことが望ましい。切り離した後は、従来の空間浮遊型宇宙ロボットと同様な手法により制御できる。そして、作業後は再度テザーロボットをテザーに取り付けて回収、または移動する。テザーと連結されていない状態では、推進装置・リアクションホイールを用いる必要があるが、移動に消費する燃料と比較すると極少量でよいと考えられる。

これらの内容を考慮して実用化するためには、まずミッションの目的を明らかにし、運用形態を明確にする必要がある。その運用形態に基づいて、具体的なハードウェアの設計を行うこととなる。

参考文献

- [1] 名取, “宇宙構造物工学の概要”, 土木学会論文集, Vol 410/I-12, pp. 1-16, 1989.
- [2] M. T. Freeman, “Spacecraft On-Orbit Deployment Anomalies: What Can Be Done,” *IEEE Aerospace and Electronic System Magazine*, Vol. 8, No. 4, pp. 3-15, 1993.
- [3] 名取, “知的適応構造物の概念”, 第 14 回造船学会夏期講座「新しい造船学」, pp. 47-63, 1988.
- [4] Y. Matsuzaki, H. Huruya, F. Kuwao, and K. Takahara, “Docking/Separation Test of Two Dimensional Truss Structure with Variable Geometries,” in *Proceedings of the AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 1865-1870, Long Beach, CA, April, 1990.
- [5] T. R. Sutter, H. G. Bush and R. E. Wallsom, “An Adaptive-Truss Space Crane Concept,” in *Proceedings of the AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, pp. 2117-2125, Long Beach, CA, April 1990.
- [6] B. R. MaCullar, “Solar Maximum Repair Mission,” in *Proceedings of the AIAA /NASA Symposium on the Space Station*, AIAA-83-7088, Arlington, VA, July 18-20, 1983.
- [7] N. J. Bahr and S. V. DePalo, “Making the Hubble Space Telescope Servicing mission safe,” in *Proceedings of the 43rd Congress of International Astronautical Federation*, IAF-92-0380, Washington DC, August 28-September 5, 1992.
- [8] J. R. Asker, “So far, HUBBLE Checks out Well,” *Aviation Week and Space Technology*, Vol. 138, No. 1, pp. 42-47, 1993.
- [9] 狼・梅谷・松本・吉田, “ミッションスペシャリスト・若田光一宇宙飛行士に聞く”, 日本ロボット学会誌, Vol 14, No. 7, pp. 919-926, 1996.

- [10] 今井・他, “共軌道プラットフォームのシステム概念”, 第 33 回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 97-98, 1990.
- [11] SAIRAS 実行委員会, 第 1 回宇宙用人工知能・ロボット・オートメーションシンポジウム予稿集, 1987.
- [12] K. Krukewich, et al., “The system engineering approach to the integration of the space station remote manipulator system on the international space station,” in *Proceedings of the 46th Congress of International Astronautical Federation*, IAF-95-T.2.02, Oslo, Norway, October 2-6, 1995.
- [13] J. M. Lenorovitz, “So Much Hardware So Many Nations,” *Aviation Week and Space Technology*, Vol. 140, No. 14, pp. 42-45, 1994.
- [14] K. E. Tsiolkovskii, *A Way to Stars*, Moscow, Izdatelstvo, AN SSSR, 1961 (in Russian).
- [15] Yu. N. Artsutanov, “To Space Without Rockets,” *Znaniye-Sila*, No. 7, p. 25, 1969 (in Russian).
- [16] H. Moravec, “A Non-Synchronous Orbital Skyhook,” *Journal of the Astronautical Sciences*, Vol. 25, pp. 307-332, 1977.
- [17] V. A. Chobotov, “Gravity Gradient Excitation of a Rotating Cable-Counterweight Space Station in Orbit,” *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 30, pp. 547-554, 1963.
- [18] D. D. Lang and R. R. Nolting, “Operation with Tethered Space Vehicles,” *Gemini Summary Conference*, NASA SP-138, pp. 55-66, Houston, Texas, February 1-2, 1967.
- [19] M. D. Grossi, “A ULF Dipole Antenna on a Spaceborn Platform of the PPEPL Class,” Letter Report to Marshall Space Flight Center, Contract NAS 8-28203, 1973.
- [20] G. Colombo, et al., “The ‘Skyhook’: A Shuttle-Borne Tool for Low-Attitude Research,” Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts, Report in Geoastronomy, No. 4, 1974.
- [21] C. C. Rupp, “A Tether Tension Control Law for Tethered Subsatellite Deployed along Local Vertical,” NASA TMX-64963, Marshall Space Flight Center, 1975.

- [22] W. P. Baker, J. A. Dunkin, Z. J. Galaboff, K. D. Johnston, R. R. Kissel, M. H. Rheinfruth and M. P. L. Siebel, "Tethered Subsatellite Study," NASA TMX-73314, Marshall Space Flight Center, 1976.
- [23] M. B. Nolan, et al., "Shuttle Tethered Satellite Program," *35th International Astronautical Congress*, Paper No. 84-437, Lausanne, Switzerland, October 7-13, 1984.
- [24] 宇宙開発事業団筑波宇宙センター宇宙機システム開発室, "第二世代宇宙ロボット—部分自律化の検討—", 昭和 63 年度研究成果報告書, TK-SS0122, 1988.
- [25] B. A. Logan, "Shuttle payload deployment and retrieval system," in *Proceedings of the AIAA 1982 Guidance and Control Conference*, pp. 449-455, AIAA-82-1580, 1982.
- [26] R. Ravindran and K. H. Doetsch, "Design aspects of the shuttle remote manipulator control," in *Proceedings of the AIAA 1982 Guidance and Control Conference*, pp. 456-465, AIAA-82-1581, 1982.
- [27] G. Hirzinger, B. Brunner, J. Dietrich and J. Heindl, "Sensor-based space robotics — ROTEX and its telerobotics features," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol 9, No. 5, pp. 649-663, 1993.
- [28] P. L. Swaim, et al., "The Charlotte Intra-Vehicular Robot," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 157-162, Pasadena, CA, October 18-20, 1994.
- [29] M. Nagatomo, et al., "Space Robotic Experiment in JEM Flight Demonstration," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 149-152, Pasadena, CA, October 18-20, 1994.
- [30] 二宮・中谷・斎藤・川口, "フリーフライヤによる衛星の回収実験について", 第 1 回宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム講演集, pp. 145-148, 1987.
- [31] D. A. Bassett, et al., "Canadian Space Agency (CSA) Mobile Servicing System Assembly, Checkout and Operation," in *Proceedings of the 46th International Astronautical Congress*, IAF-95-T.3.04, Oslo, Norway, October 2-6, 1995.
- [32] T. Matsueda, et al., "Development of Japanese Experiment Module Remote Manipulator System," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial*

Intelligence, Robotics and Automation in Space, pp. 183-186, Pasadena, CA, October 18-20, 1994.

- [33] S. Kampen, et al., "The European Robotic Arm and its Role as part of the Russian Segment of the International Space Station Alpha," in *Proceedings of the 46th International Astronautical Congress*, IAF-95-T.3.03, Oslo, Norway, October 2-6, 1995.
- [34] H. McCain, "FTS: NASA's first dextrous telerobot," in *Proceedings of the 1st International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 37-40, Kobe, Japan, 1990.
- [35] M. Oda, I. Kawano, F. Yamagata, "ETS-VII (Engineering Test Satellite # VII)-a Rendezvous docking and Space Robot Technology Experiment Satellite," in *Proceedings of the 46th International Astronautical Congress*, IAF-95-T.2.01, Oslo, Norway, October 2-6, 1995.
- [36] University of Maryland, *Space Systems Laboratory Annual Program Review*, January 14, 1993.
- [37] W. Snoddy, et al., "Use of the Orbital Maneuvering Vehicle (OMV) for replacement and retrieval of spacecraft and platforms," AAS 86-041.
- [38] G. M. Levin, "An overview of the office of space freight satellite servicing program plan," in *Proceedings of the 38th International Astronautical Congress*, IAF-87-35, Brighton, U.K., October 10-17, 1987.
- [39] D. L. Akin, M. L. Minsky, et al., "Space Application of Automation, Robotics and Machine Intelligence system (ARAMIS)," *MIT Report for NASA Contract*, NASA-CR-162081, 1982.
- [40] M. Honma and M. Oda, "The Orbital Servicing Vehicle," *NASA Conference on Rendezvous and Docking*, 1989.
- [41] S. Pipp, "ASI's space automation & robotics program: the second step," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 125-135, Pasadena, CA, October 18-20, 1994.
- [42] 八坂, "静止サービス衛星 (GSV) の技術的要件", 第5回宇宙ステーション講演会予稿集, pp 101-102, 1991.

- [43] V. J. Modi and A. K. Misra, "On the deployment dynamics of tether connected two-body systems," *Acta Astronautica*, Vol. 6, pp. 1183-1197, 1979.
- [44] P. N. Kalaghan, D. A. Arnold, G. Colombo, M. D. Grassi, L. R. Kirschner and O. Orringer, "Study of the Dynamics of a Tethered Satellite System (Skyhook)," Final Report Contract NAS 8-32199, Smithsonian Institute, Astrophysical Observatory, Cambridge, Massachusetts, March 1978.
- [45] P. Kohler, W. Maag, R. Wehrli, R. Weber and H. Brauchli, "Dynamics of a System of Two Satellite Connected by a Deployable and Extensible Tether of Finite Mass," Contract Report, ESTEC Contract 2992/76/NL/AK(SC), Vols. 1 and 2, October 1978.
- [46] P. M. Bainum and V. K. Kumar, "Optimal control of the Shuttle Tethered Subsatellite system," *Acta Astronautica*, Vol. 7, No. 6, pp. 1333-1348, 1980.
- [47] H. Fujii and S. Ishijima, "Mission-Function Control for Deployment and Retrieval of a Subsatellite," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 12, No. 2, pp. 243-247, 1989.
- [48] D. M. Xu and V. J. Modi, "Thruster-Augmented Active Control of a Tethered Subsatellite System During Its Retrieval," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 9, No. 6, pp. 663-672, 1986.
- [49] D. J. Pines, A. H. Flotow and D. C. Redding, "Two Nonlinear Control Approaches for Retrieval of a Thrusting Tethered Subsatellite," *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, Vol. 13, No. 4, pp. 651-658, 1990.
- [50] V. J. Modi, P. K. Lakshmanan and A. K. Misra, "On the Control of Tethered Satellite System," *Acta Astronautica*, Vol. 26, No. 6, pp. 411-423, 1992.
- [51] 鯉沼・中村, "テザー張力を用いた小型衛星の姿勢制御 —アンダーアクチュエーテッド力学系の非線型制御—", 第14回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp 257-258, 1996.
- [52] H. A. Fujii, W. Ichiki and R. Idogawa, "A Study on the Tethered Subsatellite System by using Nonlinear Analysis," *20th International Symposium on Space Technology and Science*, Paper No. ISTS-96-c-09, Gifu, Japan, May 19-25, 1996.

- [53] S. Bergamaschi, "Tether Motion After Failure," *The Journal of the Astronautical Science*, Vol. XXX, No. 1, pp. 49-59, 1996.
- [54] Z. Vafa and S. Dubowsky, "The Kinematics and Dynamics of Space Manipulators: The Virtual Manipulator Approach," *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 1, No. 2, pp. 14-22, 1986.
- [55] Y. Umetani and K. Yoshida, "Resolved Motion Rate Control of Space Manipulators with Generalized Jacobian Matrix," *IEEE Transaction on Robotics and Automation*, Vol. 5, No. 3, pp. 303-314, 1989.
- [56] 山田・土屋, "宇宙における剛体多体システムの定式化", 日本機械学会論文集 (C編), Vol 53, No. 491, pp. 1598-1606, 1987.
- [57] T. Yoshikawa, Y. Yokokohji and T. Toyoshima, "Efficient Computational Algorithm for Trajectory Control of Multi-Arm Space Manipulator," in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, Kobe, Japan, November 18-20, pp. 303-306, 1990.
- [58] 土屋・渡辺・山田, "剛体多体系の運動方程式ラグランジュ形式による定式化", 日本機械学会論文集 (C編), Vol. 58, No. 549, pp. 1366-1370, 1992.
- [59] Y. Nakamura and R. Mukherjee, "Nonholonomic Path Planning of Space Robots via Bi-Directional Approach," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Cincinnati, May 13-18, pp. 1764-1769, 1992.
- [60] Z. Vafa and S. Dubowsky, "Minimization of Spacecraft Disturbance in Space Robotic Systems," in *Proceedings of the 11th Annual AAS Guidance and Control Conference*, Keystone, AAS-88-006, 1988.
- [61] 山田・土屋, "宇宙ロボットのハンドの運動軌道と本体の姿勢変動について", 計測自動制御学会論文集, Vol. 28, No. 3, pp. 347-382, 1988.
- [62] 吉田・Nenchev・梅谷, "宇宙用冗長マニピュレータのモデリングと制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 26, No. 12, pp. 1421-1426, 1990.
- [63] 岩田・戸田・町田, "双腕飛行ロボットの協調制御による接近マヌーバ", 日本航空宇宙学会誌, Vol. 39, No. 435, pp. 513-521, 1991.

- [64] R. Koningstein, M. Ullman and R. H. Cannon Jr., "Computed Torque Control of a Free-Flying Cooperative-Arm Robot," *NASA Conference on Space Telerobotics*, Pasadena, 1989.
- [65] Y. Umetani and K. Yoshida, "Theoretical and Experimental Study on In-Orbit Capture Operation with Satellite Mounted Manipulator," in *the Proceedings of the XIth IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, Tsukuba, Japan, July 17-21, pp. 137-142, 1989.
- [66] 小松・植之原・飯倉・三浦・下山, "自律型宇宙ロボット地上実験装置 ASROT の開発", 日本ロボット学会誌, Vol 8, No. 6, pp. 712-720, 1990.
- [67] 町田・戸田・岩田, "飛行テレロボットの研究— 2次元近接オペレーションテストベッド", 第33回宇宙科学技術連合講演会講演集, pp. 286-287, 1989.
- [68] B. Hannaford, "Ground Experiments Toward Space Teleoperation with Time Delay," *Teleoperation and Robotics in Space*, ed. by S. B. Skaar and C. F. Ruoff, Published by AIAA, 1994.
- [69] C. F. Ruoff, "Overview of Space Telerobotics," *Teleoperation and Robotics in Space*, ed. by S. B. Skaar and C. F. Ruoff, Published by AIAA, 1994.
- [70] J. Funda et al., "Teleprogramming: Toward Delay Invariant Remote Manipulation," *Presence*, Vol. 1, No. 1, MIT Press, Winter, 1992.
- [71] M. Hirata et al., "Design of Teleproperation System with a Force-Reflecting Real-time Simulator," in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 125-135, Pasadena, CA, October 18-20, 1994.
- [72] W. J. Book, O. Maizza-Neto and D. E. Whitney, "Feedback Control of Two Beam, Two Joint System with Distributed Flexibility," *Transaction of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 97, No. 4, pp. 424-431, 1975.
- [73] W. J. Book, "Analysis of Massless Elastic Chains with Servo Controlled Joints," *Transaction of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 101, No. 3, pp. 187-192, 1979.
- [74] W. J. Book, "Recursive Lagrangian Dynamics of Flexible Manipulator Arms," *International Journal of Robotics Reserch*, Vol. 3, No. 3, pp. 87-101, 1984.

- [75] R. H. Cannon Jr. and E. Schmitz, "Initial Experiments on the End-Point Control of a Flexible One-Link Robot," *International Journal of Robotics Research*, Vol. 3, No. 3, pp. 62-75, 1984.
- [76] A. Truckenbrodt, "Truncation Problems in the Dynamics and Control of Flexible Mechanical Systems," *In 8th IFAC Congress*, pp. XIV60-XIV65, 1981.
- [77] W. H. Sunada and S. Dubowsky, "On the Dynamics Analysis and Behavior of Industrial Robotic Manipulators with Elastic Members," *Transaction of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 105, No. 1, pp. 42-51, 1983.
- [78] 吉川・他二名, "2本のフレキシブルリンクを有する3自由度マニピュレータのモデリングと制御", *日本ロボット学会誌*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-10, 1991.
- [79] 吉川・細田, "仮想的な剛体リンクと受動関節を用いたフレキシブルアームのモデリング", *計測自動制御学会論文集*, Vol. 27, No. 12, pp. 1389-1395, 1991.
- [80] 細田・吉川, " n 自由度フレキシブルアームの逆動力学", *日本ロボット学会第9回学術講演会予稿集*, pp. 435-438, 1991.
- [81] S. Tosunoglu, S. H. Lin and D. Tesar, "Accessibility and Controllability of Flexible Robotic Manipulators," *Transaction of ASME, Journal of Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 114, pp. 50-58, 1992.
- [82] M. A. Torres and S. Dubowsky, "Path-Planning in Elastically Constrained Space Manipulator Systems," in *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 812-817, Atlanta, Georgia, 1993.
- [83] D. N. Nenchev, K. Yoshida and M. Uchiyama, "Reaction Null-Space Based Control of Flexible Structure Mounted Manipulating Systems," in *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 4118-4123, Kobe, Japan, 1996.
- [84] 有隅・神徳・小森谷, "キャスティングマニピュレーションに関する研究(スイング動作実験)", *日本ロボット学会第15回学術講演会予稿集*, pp. 681-682, 1997.

発表論文

誌上発表

- [1] 吉沢・曄道・安川・能見, “一端で周期的に面内加振される弦の面外横振動”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 59, No. 560, pp. 969-975, 1993.
- [2] 能見, “下端に質量を持つ弦の共振点通過現象”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 63, No. 610, pp. 1835-1841, 1996.
- [3] 能見・D. N. Nenchev・内山, “キャスティングによるテザーロボットの宇宙空間移動”, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 64, No. 618, 1998 (掲載予定) .
- [4] 能見・D. N. Nenchev・内山, “テザー先端の平衡点付近におけるテザーロボットの
手先位置・姿勢制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), (投稿中) .

国際会議発表

- [1] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Dynamics and Control of a Large Spacecraft with Flexible Appendages in Gravitational Field,” in *Proceedings of the Korea Automatic Control Conference*, pp. 368-371, Seoul, Korea, October 23-25, 1995.
- [2] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Tethered Robot Casting in Space,” in *Proceedings of the Twentieth International Symposium on Space Technology and Science*, pp. 486-491, 1996.
- [3] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Tethered Robot Casting in Space,” in *Proceedings of the 11th International Astrodynamics Symposium*, pp. 265-270, Gifu, Japan, May 19-25, 1996.
- [4] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, “Control of a Tethered Robot System Using a Spacecraft Mounted Manipulator,” *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, Paper No. AIAA-96-3897 San Diego, CA, July 29-31, 1996.

- [5] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Motion of a Tethered Robot System in Gravitational Field," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Motion and Vibration Control*, pp. 400-405, Chiba, Japan, September 2-6, 1996.
- [6] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Trajectory Planning and Feedforward Control of a Tethered Robot System," in *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 1530-1535, Osaka, Japan, November 4-8, 1996.
- [7] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Motion Control of a Tethered Space Robot," in *Proceedings of the US-Japan Graduate Student Forum in Robotics*, pp. 105-108, Osaka, Japan, November 8, 1996.
- [8] M. Nohmi and M. Uchiyama, "Dynamics and 3-Axes Control of a Spacecraft with Flexible Structures," in *Proceedings of the 35th IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 2695-2700, Kobe, Japan, December 11-13, 1996.
- [9] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Path Planning for a Tethered Space Robot," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 3062-3067, Albuquerque, NM, April 20-25, 1997.
- [10] M. Nohmi, D. N. Nenchev and M. Uchiyama, "Dynamics and Control of a Tethered Robot System," in *Proceedings of the International Symposium on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, pp. 107-1012, Tokyo, Japan, July 14-16, 1997.

国内講演会発表

- [1] 能見・曄道・吉沢, "弦の面外振動に及ぼす弦下端の質量の影響", 日本機械学会第70期全国大会講演論文集, No. 920-78, pp. 2101-2103, 長野, 1992年9月30日.
- [2] 能見・内山・吉沢, "下端に質量を持つ弦の面外振動(共振点通過現象)", 日本機械学会東北支部一関地方講演会講演論文集, No. 951-2, pp. 17-19, 一関, 1995年8月24-25日.
- [3] 能見・内山, "柔軟付属物を持つ宇宙構造物の軌道上重力場における振動と制御", アストロダイナミクスシンポジウム, in *Proceedings of the 5th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, pp. 287-292. 宇宙科学研究所, 1995年8月24-25日.

- [4] 能見・内山・D. N. Nenchev, “柔軟付属物を持つ三軸衛星の姿勢・振動の制御”, 第39回宇宙科学技術学術連合講演会講演集, pp. 359-400, 大阪, 1995年10月31日-11月2日.
- [5] 能見・内山, “テザーを利用した宇宙ロボットの提案と挙動解析”, 第13回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 397-398, 東京, 1995年11月3-5日.
- [6] 能見・内山, “軌道上で重力トルクを受ける大型宇宙構造物の挙動解析”, 日本機械学会第8回計算力学講演会講演論文集 95-4, pp. 231-232, 長野, 1995年11月15-17日.
- [7] 能見・D. N. Nenchev・内山, “テザー・ロボット・システムの軌道上における位置制御”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, No. 96-2, pp. 604-607, 宇部, 1996年5月20-21日.
- [8] 能見・D. N. Nenchev・内山, “テザーロボットの制御と挙動解析”, アストロダイナミクスシンポジウム, in *Proceedings of the 6th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, pp. 12-17, 宇宙科学研究所, 1996年7月15-16日.
- [9] 能見・D. N. Nenchev・内山, “マニピュレータによるテザーロボットキャスティング”, 第40回宇宙科学技術学術連合講演会講演集, pp. 89-90, 盛岡, 1996年10月28-30日.
- [10] 能見・D. N. Nenchev・内山, “母船搭載マニピュレータによるテザーロボットのキャスティング”, アストロダイナミクスシンポジウム, in *Proceedings of the 7th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, pp. 102-107, 宇宙科学研究所, 1997年7月28-29日.
- [11] 能見・D. N. Nenchev・内山, “テザー張力制御によるテザーロボットの移動における姿勢維持制御”, アストロダイナミクスシンポジウム, in *Proceedings of the 7th Workshop on Astrodynamics and Flight Mechanics*, pp. 108-113, 宇宙科学研究所, 1997年7月28-29日.
- [12] 能見・D. N. Nenchev・内山, “テザーに連結された宇宙ロボットの伸展時における姿勢制御”, 日本機械学会第2回ロボティクスシンポジウム予稿集, pp. 253-258, 東京, 1997年8月2-3日.
- [13] 能見・D. N. Nenchev・内山, “宇宙ロボットのキャスティングにおける移動と姿勢の協調制御”, 第15回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 683-684, 東京, 1997年9月12-15日.

- [14] 能見・D. N. Nenchev・内山, “ロボットアームを用いたテザー連結位置操作によるテザー衛星の姿勢維持制御”, 第41回宇宙科学技術学術連合講演会, 論文 No. 97-12-28, 札幌, 1997 年 10 月 20-22 日.

謝辞

本論文は、平成 7 年 4 月より平成 10 年 3 月までの 3 年間にわたり、東北大学大学院工学研究科航空宇宙工学専攻 宇宙機システム学講座において、筆者が行った研究をまとめたものである。

本研究遂行にあたり、常に懇切丁寧な御指導および御鞭達を賜った東北大学大学院工学研究科 内山勝教授、Dragomir N. Nenchev 助教授（現・新潟大学工学部教授）に、謹んで謝意を表す。また、本論文をまとめるに際して、有益な御助言および御討論をいただいた東北大学大学院工学研究科 Chul Park 教授、小菅一弘教授、東北大学大学院情報科学研究科 猪岡光教授に心からの謝意を表す。

本研究に関連して、宇宙システムの実機について御教授いただいた科学技術庁航空宇宙技術研究所 松本甲太郎氏、宇宙開発事業団 小田光茂氏に謝意を表す。また、研究室において御協力いただいた宇宙機システム学講座の方々、および学会等において活発に御討論下さった方々に謝意を表す。

最後に、博士後期課程在籍中の家族からの生活支援に対し、深い感謝を明記させていたきたい。

Appendix A

記号表

本文中の解析において用いた主な記号の一覧を示す。ただし、説明文中において i, j は整数, A は任意の行列, a は任意のベクトル, a は任意のスカラー量とする。

$C_\alpha \cdot C_\beta \cdot C_\gamma$: 剛体 0 の姿勢に関する $x \cdot y \cdot z$ 軸回りの回転行列

$C_\varphi \cdot \Pi$: 剛体 0 の軸回りの回転角速度と姿勢角速度を関係づける行列

F : テザー張力ベクトル

F_d : キャスティングにおける目標テザー張力ベクトル

$H_0 \cdot H_{0\phi} \cdot H_\phi$: テザーロボットの運動を記述する行列

$H_{0\Omega} \cdot H_{\phi\Omega} \cdot H_\Omega$: テザーロボットへの重力・遠心力の影響を記述する行列

I_i : 剛体 i の重心回りの慣性テンソル

I_r : テザーロボット全体の重心回りの慣性テンソル

$J_{Ai} \cdot J_{Li}$: 剛体 0 に対する剛体 i の姿勢・重心位置に関するヤコビ行列

J_c : 母船搭載マニピュレータのヤコビ行列

J_g : テザーロボットの一般化ヤコビ行列

$J_m \cdot J_s$: 空間浮遊型宇宙ロボットの手先位置姿勢に関するヤコビ行列

$J_{mt} \cdot J_{st}$: テザーロボットの手先位置姿勢に関するヤコビ行列

J_λ : テザーロボットのテザー連結点に関するヤコビ行列

$K_{ap} \cdot K_{av}$: 移動軌道修正のフィードバックゲイン (キャスティング)

$K_{cp} \cdot K_{cv}$: 母船搭載マニピュレータのフィードバックゲイン (キャスティング)

$L_s \cdot P_s$: テザーロボットの総並進運動量・総角運動量ベクトル

$L_m \cdot P_m$: テザーロボット重心の運動量・角運動量ベクトル

$L_r \cdot P_r$: テザーロボットの重心に対する運動を表す運動量ベクトル

- M_c : 母船搭載マニピュレータの慣性行列
 N : テザーロボットに作用する力ベクトル
 R : 軌道中心に対する母船の重心位置ベクトル
 R_g : 軌道中心に対するテザーロボットの重心位置ベクトル
 R_i : 軌道中心に対する剛体 i の重心位置ベクトル
 \mathcal{L} : テザーロボットの重心に対する並進運動量と角運動量
 Φ_e : 手先となる剛体の母船固定座標系に対する姿勢角を表すベクトル (シミュレーション)
 Ω : 母船の軌道角速度ベクトル
 Ω_i : 慣性座標系に対する剛体 i の姿勢角速度ベクトル
 c : 母船搭載マニピュレータの手先位置と関節角の関係式
 d : キャスティングにおける母船重心に対するテザーロボットの目標地点の位置ベクトル
 g : 重力ベクトル
 h_c : 母船搭載マニピュレータのコリオリ力・遠心力
 h_r : テザーロボットの運動により発生するコリオリ力・遠心力
 h_Ω : 母船固定座標系上において軌道運動により発生する遠心力
 k_i : 関節 i の回転軸を表す単位ベクトル
 p_e : テザー連結位置に対するテザーロボットの手先位置ベクトル
 p_i : テザー連結位置に対する関節 i の位置ベクトル
 q : テザーロボットの位置・姿勢を記述するベクトル
 q_c : 母船搭載マニピュレータの位置・姿勢を記述するベクトル
 r_i : テザー連結位置に対する剛体 i の重心位置ベクトル
 r_g : テザー連結位置に対するテザーロボットの重心位置ベクトル
 s_e : 母船重心位置に対するテザー伸展位置ベクトル
 s_g : 母船重心位置に対するテザーロボットの重心位置ベクトル
 s_0 : 母船重心位置に対するテザー連結位置ベクトル
 δ : 外乱を表すベクトル
 λ : テザーロボット重心とテザー連結位置の関係を表すベクトル
 ν_0 : テザーロボットの剛体 0 に関する速度ベクトル
 ν_e : テザーロボットの制御目的に依存する指令速度ベクトル
 ϕ : テザーロボットの関節回転角ベクトル
 φ_0 : 剛体 0 の姿勢角ベクトル

- τ : テザーロボットの関節トルクベクトル
- τ_c : 母船搭載マニピュレータの関節トルクベクトル
- ω_i : 剛体 i の姿勢角速度ベクトル
- ω_r : テザーロボット全体の姿勢角速度ベクトル
- O_a : テザーロボットのテザー連結位置
- O_i : 母船の軌道中心位置
- O_e : 母船におけるテザー伸展位置
- O_s : 母船の重心位置
- F : テザー張力
- I_i : テザーロボットのリンク i の慣性モーメント (シミュレーション)
- I_{ci} : 母船搭載マニピュレータのリンク i の慣性モーメント (シミュレーション)
- P_m : テザーロボットの並進運動量の大きさ (シミュレーション)
- R : 母船の軌道半径
- $T_r \cdot U_r$: テザーロボットの総運動エネルギー・総位置エネルギー
- $T_w \cdot U_w$: テザーロボット重心の運動エネルギー・位置エネルギー
- Φ_i : 母船固定座標系に対するテザーロボットのリンク i の姿勢角ベクトル (シミュレーション)
- Ω : 母船の軌道角速度
- $f \cdot g \cdot h$: テザー張力ベクトルの $x \cdot y \cdot z$ 軸成分
- $f_d \cdot g_d \cdot h_d$: キャスティングでの目標テザー張力ベクトルの $x \cdot y \cdot z$ 軸成分
- $g_m \cdot h_m$: キャスティングにおける移動軌道修正に必要なテザー張力ベクトルの $y \cdot z$ 軸成分
- $g_p \cdot h_p$: 母船搭載マニピュレータにより与えることが可能なテザー張力ベクトルの $y \cdot z$ 軸成分
- l_i : テザーロボットの関節 i と関節 $i+1$ の距離
- l_{ci} : 母船搭載マニピュレータの関節 i と関節 $i+1$ の距離
- ℓ : 母船重心とテザーロボット重心間の距離
- ℓ_e : 母船重心とテザーロボット重心間の最終目標距離
- m_i : テザーロボットの剛体 i の質量
- m_{ci} : 母船搭載マニピュレータのリンク i の質量
- s_{em} : 母船搭載マニピュレータの手先可動範囲の最大値

- t : 時間
- t_e : 制御指令値に関する時刻パラメータ (シミュレーション)
- t_f : キャスティングの最終時刻 (シミュレーション)
- t_δ : 外乱が与えられた時点からの経過時間 (軌道修正制御評価)
- t_2 : キャスティングのフェーズ (2) の時刻 (シミュレーション)
- w : テザーロボットの総質量
- Σ_i : 慣性座標系
- Σ_s : 母船固定座標系
- $\alpha \cdot \beta \cdot \gamma$: 剛体 0 の $x \cdot y \cdot z$ 軸回りの回転角
- ζ_a : キャスティングの軌道修正制御ゲインを決定するパラメータ
- ζ_v : テザーロボットの関節トルク制御ゲインを決定するパラメータ
- ζ_λ : テザーロボットの角運動量制御に関する制御ゲイン
- $\zeta_{1 \sim 4}$: テザー張力制御に用いるフィードバックゲイン
- θ : 軌道中心方向に対する母船重心とテザーロボット重心を結ぶ直線の軌道面内振れ角
- μ : 重力定数
- τ_i : 関節 i の回転軸回りのトルク
- ϕ_i : 関節 i の回転軸回りの回転角

Appendix B

動力学方程式の導出

第 2 章 2.4 節における動力学方程式の導出について説明する.

まず, 解析モデルにおいて定義しているテザーロボットの各剛体の重心位置ベクトルと, その時間微分である速度ベクトルの関係は, 次のように整理される.

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R} + \mathbf{s}_0 + \mathbf{r}_i \quad (\text{B.1})$$

$$\dot{\mathbf{R}}_i = \tilde{\boldsymbol{\Omega}}(\mathbf{R} + \mathbf{s}_0 + \mathbf{r}_i) + \dot{\mathbf{s}}_0 + \tilde{\boldsymbol{\omega}}_0 \mathbf{r}_i + \mathbf{J}_{Li} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (\text{B.2})$$

$$\boldsymbol{\Omega}_i = \boldsymbol{\Omega} + \boldsymbol{\omega}_i \quad (\text{B.3})$$

$$\boldsymbol{\omega}_i = \boldsymbol{\omega}_0 + \mathbf{J}_{Ai} \dot{\boldsymbol{\phi}} \quad (\text{B.4})$$

また, テザーロボットの運動エネルギーは, 次のように定義される.

$$T_r = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n m_i \dot{\mathbf{R}}_i^T \dot{\mathbf{R}}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n \boldsymbol{\Omega}_i^T \mathbf{I}_i \boldsymbol{\Omega}_i \quad (\text{B.5})$$

ベクトルの関係式 (B.1) ~ (B.4) を式 (B.5) に代入することにより, テザーロボットの運動エネルギーを表す式 (2.1) が得られる.

次に, 剛体 0 の姿勢角の時間微分 $\dot{\boldsymbol{\phi}}$ と姿勢角速度 $\boldsymbol{\omega}_0$ の関係について説明する. 剛体 0 の姿勢角に関して, オイラー変換によるそれぞれの回転変換行列は, 次のように表される.

$$\mathbf{C}_\gamma = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}_\beta = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$C_\alpha = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \end{bmatrix}$$

これらの回転変換行列を用いると、剛体 0 の姿勢角速度は次の通り表される。

$$\omega_0 = C_\gamma C_\beta \begin{bmatrix} \dot{\alpha} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + C_\gamma \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{\beta} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} \quad (\text{B.6})$$

これより、剛体 0 の姿勢角の時間微分 $\dot{\varphi}$ と姿勢角速度 ω_0 の関係式 (2.3) が得られる。

ラグランジュ法を用いるために、式 (2.3) を考慮して q を用いると、式 (2.1) は次のように表される。

$$T_r = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} \dot{q}^T & \Omega^T \end{bmatrix} \Pi^T \begin{bmatrix} H_0 & H_{0\phi} & H_{0\Omega} \\ H_{0\phi}^T & H_\phi & H_{\phi\Omega} \\ H_{0\Omega}^T & H_{\phi\Omega}^T & H_\Omega \end{bmatrix} \Pi \begin{bmatrix} \dot{q} \\ \Omega \end{bmatrix} \quad (\text{B.7})$$

式 (2.2) ・ (B.7) より、テザーロボットシステムの運動方程式が次のように求められる。

$$\begin{aligned} & \Pi^T \begin{bmatrix} H_0 & H_{0\phi} \\ H_{0\phi}^T & H_\phi \end{bmatrix} \Pi \ddot{q} + \frac{d}{dt} \left\{ \Pi^T \begin{bmatrix} H_0 & H_{0\phi} \\ H_{0\phi}^T & H_\phi \end{bmatrix} \Pi \right\} \dot{q} + \frac{d}{dt} \left\{ \Pi^T \begin{bmatrix} H_{0\Omega} \\ H_{\phi\Omega} \end{bmatrix} \Omega \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial q} \left\{ \frac{1}{2} \dot{q}^T \Pi^T \begin{bmatrix} H_0 & H_{0\phi} \\ H_{0\phi}^T & H_\phi \end{bmatrix} \Pi \dot{q} \right\} - \frac{\partial}{\partial q} \left\{ \dot{q}^T \Pi^T \begin{bmatrix} H_{0\Omega} \\ H_{\phi\Omega} \end{bmatrix} \Omega \right\} \\ & - \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{1}{2} \Omega^T H_\Omega \Omega \right) + \sum_{i=0}^n \frac{\mu m_i}{\|R_i\|^3} \left(\frac{\partial R_i^T}{\partial q} \right) R_i = N \end{aligned} \quad (\text{B.8})$$

式 (2.3) を考慮して式 (B.8) を整理すると、式 (2.4) が得られる。

Appendix C

シミュレーションモデル

本論文において行ったシミュレーションは、汎用ソフトウェア MATLAB (The Math Works, Inc.) を用いたルンゲクッタ法による数値計算により行った。MATLAB は行列形式の演算を行うことができるため、テザーロボットの動力学方程式は以下に示す手順で導出した。

まず、 n リンクのテザーロボットに関するラグランジアンを次のように表す。

$$L = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n m_i \dot{\mathbf{R}}_i^T \dot{\mathbf{R}}_i + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^n I_i (\Omega + \dot{\Phi}_i)^2 + \sum_{i=0}^n \frac{\mu m_i}{\sqrt{\mathbf{R}_i^T \mathbf{R}_i}} \quad (\text{C.1})$$

ただし、 $\Phi_n = \phi_0 + \dots + \phi_n$ とする。ここで、

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial \dot{\mathbf{R}}_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}} = \frac{\partial \dot{\mathbf{R}}_i}{\partial \mathbf{q}} \quad (\text{C.2})$$

であることを考慮すると、ラグランジュの方程式は次のように表される。

$$\begin{aligned} & \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}} \right) - \left(\frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}} \right) \\ &= \sum_{i=0}^n \left\{ m_i \ddot{\mathbf{R}}_i \frac{\partial \dot{\mathbf{R}}_i}{\partial \dot{\mathbf{q}}} + I_i \frac{d}{dt} (\Omega + \dot{\Phi}_i) \frac{\partial (\Omega + \dot{\Phi}_i)}{\partial \dot{\mathbf{q}}} - \frac{\mu m_i}{\|\mathbf{R}_i\|^3} \left(\frac{\partial \mathbf{R}_i^T}{\partial \mathbf{q}} \right) \mathbf{R}_i \right\} \end{aligned} \quad (\text{C.3})$$

各シミュレーション設定に基づき、 $\mathbf{R}_i \cdot \ddot{\mathbf{R}}_i \cdot \partial \mathbf{R}_i / \partial \mathbf{q} \cdot \partial \dot{\mathbf{R}}_i / \partial \dot{\mathbf{q}}$ を求め、式 (C.3) に代入して整理すると次に示す動力学方程式が得られる。

$$\mathbf{B}_1(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}_2(\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{N} \quad (\text{C.4})$$

ただし、 $\mathbf{B}_1(\mathbf{q})$ および $\mathbf{B}_2(\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}})$ は、それぞれ () 内の時間に依存する変数により決定される行列であり、 \mathbf{q} は \mathbf{q} の成分である。この式を用いて、 $\mathbf{q} \cdot \dot{\mathbf{q}}$ の初期値を与えることにより、ルンゲクッタ法による数値計算を行うことができる。

MATLAB のプログラムでは、 $\ddot{\mathbf{R}}_i$ における $\ddot{\mathbf{q}}$ の係数を記入することにより $\mathbf{B}_1(\mathbf{q})$ を、 $\mathbf{R}_i \cdot \partial \mathbf{R}_i / \partial \mathbf{q} \cdot \partial \dot{\mathbf{R}}_i / \partial \dot{\mathbf{q}} \cdot \ddot{\mathbf{R}}_i$ および $\ddot{\mathbf{R}}_i$ における $\ddot{\mathbf{q}}$ を含まない項により $\mathbf{B}_2(\mathbf{q}\dot{\mathbf{q}})$ を数値的

に計算することができる。ここでは、各シミュレーション設定における \mathbf{q} と \mathbf{N} および $\mathbf{R}_i \cdot \dot{\mathbf{R}}_i \cdot \ddot{\mathbf{R}}_i$ を示す。

(i) キャスティング

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} s_{gx} & s_{gy} & \phi_0 & \cdots & \phi_n \end{bmatrix}^T \quad (\text{C.5})$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} f & g & \tau_1 & \cdots & \tau_n \end{bmatrix}^T \quad (\text{C.6})$$

$$\mathbf{R}_0 = \begin{bmatrix} s_{gx} \\ s_{gy} \end{bmatrix} + \frac{l_0}{2} \begin{bmatrix} \cos \Phi_0 \\ \sin \Phi_0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.7})$$

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} \begin{bmatrix} \cos \Phi_{i-1} \\ \sin \Phi_{i-1} \end{bmatrix} + \frac{l_i}{2} \begin{bmatrix} \cos \Phi_i \\ \sin \Phi_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.8})$$

$$\dot{\mathbf{R}}_0 = \begin{bmatrix} \dot{s}_{gx} \\ \dot{s}_{gy} \end{bmatrix} + \frac{l_0}{2} \dot{\Phi}_0 \begin{bmatrix} -\sin \Phi_0 \\ \cos \Phi_0 \end{bmatrix} \quad (\text{C.9})$$

$$\dot{\mathbf{R}}_i = \dot{\mathbf{R}}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} \dot{\Phi}_{i-1} \begin{bmatrix} -\sin \Phi_{i-1} \\ \cos \Phi_{i-1} \end{bmatrix} + \frac{l_i}{2} \dot{\Phi}_i \begin{bmatrix} -\sin \Phi_i \\ \cos \Phi_i \end{bmatrix} \quad (\text{C.10})$$

$$\ddot{\mathbf{R}}_0 = \begin{bmatrix} \ddot{s}_{gx} \\ \ddot{s}_{gy} \end{bmatrix} + \frac{l_0}{2} \left(\ddot{\Phi}_0 \begin{bmatrix} -\sin \Phi_0 \\ \cos \Phi_0 \end{bmatrix} - \dot{\Phi}_0^2 \begin{bmatrix} \cos \Phi_0 \\ \sin \Phi_0 \end{bmatrix} \right) \quad (\text{C.11})$$

$$\begin{aligned} \ddot{\mathbf{R}}_i = \ddot{\mathbf{R}}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} \left(\ddot{\Phi}_{i-1} \begin{bmatrix} -\sin \Phi_{i-1} \\ \cos \Phi_{i-1} \end{bmatrix} - \dot{\Phi}_{i-1}^2 \begin{bmatrix} \cos \Phi_{i-1} \\ \sin \Phi_{i-1} \end{bmatrix} \right) \\ + \frac{l_i}{2} \left(\ddot{\Phi}_i \begin{bmatrix} -\sin \Phi_i \\ \cos \Phi_i \end{bmatrix} - \dot{\Phi}_i^2 \begin{bmatrix} \cos \Phi_i \\ \sin \Phi_i \end{bmatrix} \right) \end{aligned} \quad (\text{C.12})$$

第 3 章では Φ_i を含まずに $l_i = 0$ として、第 5 章では $n = 3$ として、シミュレーションを行っている。

(ii) 重力を利用したテザー張力制御

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \ell_0 & \theta_0 & \phi_0 & \cdots & \phi_n \end{bmatrix}^T \quad (\text{C.13})$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} F & 0 & \tau_1 & \cdots & \tau_n \end{bmatrix}^T \quad (\text{C.14})$$

$$\mathbf{R}_0 = R \begin{bmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{bmatrix} + \ell_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} + \frac{l_0}{2} \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_0) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_0) \end{bmatrix} \quad (\text{C.15})$$

$$\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \end{bmatrix} + \frac{l_i}{2} \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_i) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_i) \end{bmatrix} \quad (\text{C.16})$$

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{R}}_0 = & R \Omega \begin{bmatrix} -\sin \Omega t \\ \cos \Omega t \end{bmatrix} + \dot{\ell}_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} + \ell_0 \dot{\theta}_0 \begin{bmatrix} -\sin \theta_0 \\ \cos \theta_0 \end{bmatrix} \\ & + \frac{l_0}{2} (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_0) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_0) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_0) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{C.17})$$

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{R}}_i = & \dot{\mathbf{R}}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_{i-1}) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \end{bmatrix} \\ & + \frac{l_i}{2} (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_i) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_i) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_i) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (\text{C.18})$$

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{R}}_0 = & -R \Omega^2 \begin{bmatrix} \cos \Omega t \\ \sin \Omega t \end{bmatrix} + \ddot{\ell}_0 \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} + 2\dot{\ell}_0 \dot{\theta}_0 \begin{bmatrix} -\sin \theta_0 \\ \cos \theta_0 \end{bmatrix} - \ell_0 \dot{\theta}_0^2 \begin{bmatrix} \cos \theta_0 \\ \sin \theta_0 \end{bmatrix} \\ & + \frac{l_0}{2} \left((\ddot{\theta}_0 + \ddot{\Phi}_0) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_0) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_0) \end{bmatrix} - (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_0)^2 \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_0) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_0) \end{bmatrix} \right)\end{aligned}\quad (\text{C.19})$$

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{R}}_i = & \ddot{\mathbf{R}}_{i-1} + \frac{l_{i-1}}{2} \left((\ddot{\theta}_0 + \ddot{\Phi}_{i-1}) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \end{bmatrix} \right. \\ & \left. - (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_{i-1})^2 \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_{i-1}) \end{bmatrix} \right) \\ & + \frac{l_i}{2} \left((\ddot{\theta}_0 + \ddot{\Phi}_i) \begin{bmatrix} -\sin (\theta_0 + \Phi_i) \\ \cos (\theta_0 + \Phi_i) \end{bmatrix} - (\dot{\theta}_0 + \dot{\Phi}_i)^2 \begin{bmatrix} \cos (\theta_0 + \Phi_i) \\ \sin (\theta_0 + \Phi_i) \end{bmatrix} \right)\end{aligned}\quad (\text{C.20})$$

ここで、母船重心とテザー連結位置の距離を ℓ_0 、母船の軌道中心位置と母船重心位置を結ぶ直線と、母船重心とテザー連結位置を結ぶ直線のなす角度を θ_0 とする。第 4 章では $n=4$ として、第 5 章では $n=3$ として、シミュレーションを行っている。



