T2R2 東京科学大学 リサーチリポジトリ
Science Tokyo Research Repository

# 論文 / 著書情報
# Article / Book Information

| | |
|---|---|
| 題目(和文) | 宇宙ロボットのテザーを用いた移動手法に関する研究 |
| Title(English) | |
| 著者(和文) | 山隅允裕 |
| Author(English) | Mitsuhiro Yamazumi |
| 出典(和文) | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第9290号,<br>授与年月日:2013年9月25日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:小田 光茂,松永 三郎,大熊 政明,福島 E 文彦,野田 篤司 |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第9290号,<br>Conferred date:2013/9/25,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,, |
| 学位種別(和文) | 博士論文 |
| Type(English) | Doctoral Thesis |

Powered by T2R2 (Science Tokyo Research Repository)

平成25年度　学位論文

# 宇宙ロボットの<br>テザーを用いた移動手法に関する研究

平成25年9月

指導教員　　小田 光茂　教授
副指導教員　松永 三郎　教授

理工学研究科　機械宇宙システム専攻

10D51275　山隅 允裕

# 目 次

**目次** **i**

**第 1 章 序論** **1**
1.1 本研究の目的 . . . . . 1
1.2 本論文の背景 . . . . . 3
1.2.1 宇宙飛行士支援ロボットの概念 . . . . . 3
1.2.2 宇宙飛行士支援ロボットの技術的課題 . . . . . 6
1.2.3 宇宙飛行士支援ロボットの移動手法の研究 . . . . . 8
1.3 本論文の構成と概要 . . . . . 16

**第 2 章 テザー移動ロボット** **18**
2.1 まえがき . . . . . 18
2.2 宇宙ロボットの移動手法 . . . . . 19
2.3 テザーを用いた移動手法の紹介 . . . . . 20
2.4 Tether based locomotion . . . . . 22
2.5 船内環境および船外環境の定義 . . . . . 26
2.6 本論文で扱うモデルと仮定 . . . . . 30
2.7 まとめ . . . . . 34

**第 3 章 テザー移動ロボットの移動制御** **35**
3.1 まえがき . . . . . 35
3.2 地上の CDPM の移動制御 . . . . . 36
3.3 静安定解析に基づく移動制御の提案 . . . . . 37
3.3.1 静安定解析によるモデルベースド制御の提案 . . . . . 37
3.3.2 テザー移動ロボットの静安定解析手法 . . . . . 37
3.3.3 反復法による静安定解導出 . . . . . 38
3.3.4 数値解析による収束性の検証 . . . . . 40
3.4 作業空間による逐次テザー制御手法 . . . . . 41
3.4.1 手法の説明 . . . . . 41
3.4.2 シミュレーション . . . . . 44
3.5 関節空間による定負荷テザー制御手法 . . . . . 51
3.5.1 手法の説明 . . . . . 51
3.5.2 シミュレーション . . . . . 52
3.6 まとめ . . . . . 56

**第 4 章　テザー移動ロボットの地上実験　58**
4.1 まえがき . . . . . 58
4.2 テザー移動ロボットによる移動実験モデルの開発 . . . . . 58
4.2.1 テザー移動ロボットの地上実験方法 . . . . . 58
4.2.2 実験モデル開発のコンセプト . . . . . 60
4.2.3 ハードウェア仕様 . . . . . 61
4.3 静安定解析に基づく移動制御による船内移動模擬実験 . . . . . 61
4.3.1 移動状況の設定 . . . . . 61
4.3.2 静安定状態におけるテザー移動ロボットモデルの評価 . . . . . 63
4.3.3 関節空間による定負荷テザー制御手法による移動実験 . . . . . 65
4.4 まとめ . . . . . 66

**第 5 章　テザー移動ロボットの軌道上実験　68**
5.1 まえがき . . . . . 68
5.2 EVA 支援ロボット技術実証実験 (Robot Experiment on JEM: REX-J) . . 68
5.2.1 ミッション概要 . . . . . 69
5.2.2 REX-J 試験設備概要 . . . . . 70
5.2.3 テザー制御によるロボットの移動実験 . . . . . 74
5.3 REX-J テザー移動実験 . . . . . 77
5.3.1 実験概要 . . . . . 77
5.3.2 REX-J 解析モデル . . . . . 79
5.3.3 REX-J 地上模擬装置 . . . . . 80
5.3.4 テザー長による本体位置の推定とキャリブレーション . . . . . 84
5.4 軌道上実験 . . . . . 86
5.4.1 実験手順 . . . . . 86
5.4.2 定負荷テザー制御の検証 . . . . . 87
5.4.3 繰返し移動の検証 . . . . . 89
5.4.4 軌道上実験の成果 . . . . . 93
5.5 まとめ . . . . . 96

**第 6 章　結論　98**
6.1 結論 . . . . . 98
6.2 今後の課題と展望 . . . . . 99

**AppendixA　略語集　100**

**AppendixB　テザー移動ロボットの地上実験装置に関して　101**
B.1 地上実験装置の概要 . . . . . 101
B.2 宇宙ロボット用リール機構の開発 . . . . . 102
B.3 宇宙用テザーに対する考察 . . . . . 108

**AppendixC Robot Experiment on JEM に関して** **112**
C.1 REX-J の背景 . . . . . 112
C.2 REX-J の搭載機器 . . . . . 113
C.3 テザーフックのハンドレールへの取り付け . . . . . 116

**参考文献** **119**

**研究業績** **126**

**謝辞** **128**

# 第1章　序論

## 1.1　本研究の目的

国際宇宙ステーションの成功によって，21 世紀の宇宙開発は「軌道上における大型宇宙構造物の建造」および「長期間の有人宇宙活動」が主要な課題となっている．大規模な宇宙活動拠点の設置と有人活動の長期化は、従来の小規模な実験・観測に留まっていた宇宙活動を，科学的・工学的な生産活動へと発展させ，将来的には人類の生命活動，経済活動の場へと進化させることになる．

大規模な宇宙活動拠点の建設は，複雑な作業を必要とするため，機械の自動化，無人化，遠隔化が進んだ現在でも，高度な認識力と判断力を有する人間の直接的な介在が必要不可欠である．

特に，軌道上の構造物は，地上と異なる過酷な環境であり，地上との間に大きな時間遅れが生じるため，目視で直接確認を行い，すぐに対応が可能な宇宙飛行士による船外宇宙活動による支援が必要不可欠である．しかし，船外活動は人命を危険にさらす可能性が高く，生命維持のための装置の負荷も問題となっている．また，国際宇宙ステーションの知見から,「長期間の有人宇宙活動」において宇宙飛行士の一人当たり要求される作業は過密であることが判明した．一方で，居住人員の増加に伴う施設の拡大に要する作業量の増加や軌道上への物資輸送のコストの面など，単純な労働力の増員では問題は解決しないことが示唆され，有人宇宙活動における人的資源の省力化が求められている．以上の観点から，今後の宇宙開発において，ロボットによる有人宇宙作業支援は必要不可欠な重要な課題であり，宇宙開発計画において，ロボット技術の役割に対する期待がますます高まりつつある状況にある．

宇宙ロボットが行う有人宇宙活動の支援作業として，外観監視作業や物資の搬入作業，機材の補充作業など，単純であるが繰り返しの移動を要する作業が検討されている．このような作業を行うロボットとして，宇宙飛行士支援ロボットと呼ばれる「作業能力」と「移動能力」の両方を有するロボットが考えられている．宇宙飛行士支援ロボットとは，宇宙飛行士の活動範囲を移動し，搭載したマニピュレータをもちいて作業の支援・代替を行う．作業は船外及び船内の両方が想定され環境によって要求される宇宙仕様は異なるが，いずれの場合もロボットには微小重力環境下において，壁面への衝突や宇宙空間への飛散などの危険性へ有効な対策を備えた広範囲の移動による支援能力が要求されることが想定される．　微小重力環境下において，宇宙飛行士はテザーと呼ばれる紐で施設と結ばれることで安全性を確保し，ハンドレールなどの把持構造を掴むか，ガスの噴出による反作用をもちいて移動する．(Fig. 1.1, Fig. 1.2) 同様の移動が宇宙ロボットに対しても考えられるが，宇宙ロボットの作業技術および移動技術は人間に比べて未発達であり，テザーによって拘束された状態で把持移動もしくは浮遊移動を直接行なうことは困難である．この問題に対

して，ロボット本体を拘束するテザーの長さと張力を制御する手法が提案され，テザーロボットとして検討されている．中でも，軌道上構造物近辺における移動の観点から，宇宙飛行士支援ロボットの移動手法として，ロボット本体を複数本のテザーで拘束し，それらの長さと張力を協調制御して動かす移動手法は，把持移動のように自身を固定しながらも，浮遊移動のように広範囲の空間を移動できる手法として，いくつかの宇宙機関で注目されている．本研究は，その中でも，日本の宇宙航空研究開発機構 (JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency) が提案する，ロボット自身がマニピュレータをもちいてテザーを固定する能力を有する Astronaut Support Robot(Astrobot) に着目し，宇宙ロボットの移動手法として，ロボット自身がテザーによる支持を行い，そのテザーをもちいて空間移動を行う「Tether based locomotion」[1] を確立することを目指す．

紐をもちいて物資を運搬する手法は古くから活用されているが，複数本の紐を協調制御して空間内の移動を行なう Cable Driven Parallel Manipulator (CDPM) [2] は，軽量なシステムに対して高い出力を得られる並列機構の特性と，紐を用いた駆動機器が持つ高い収納性と展開性により広い運用範囲が得られるという特性を活かした新しい運搬機器として研究および開発が行われている．これらは，並列機構と同様適切な協調制御が必要不可欠であるが，紐は圧縮方向の荷重に対して剛性をほとんど有さず，より高度な制御が要求される．加えて，Tether based locomotion 固有の課題として，従来，初期条件が既知で正確に測定された環境の中で適用される CDPM のテザー配置を，ロボットが移動毎に変更するためロバスト性が要求されることや，狭い宇宙施設で使用するためにテザーを展開する領域に制限が生じることが挙げられる．さらに，一番大きな課題として，軌道上の微小重力環境下で適用するために，テザーの緩みによって生じるロボット本体もしくは制御機器への故障リスクに対して対策が必要である．すなわち，「Tether based locomotion」には，宇宙空間における諸問題を解決した新しい CDPM の制御手法が求められる．

本論文は，テザーを用いた宇宙ロボットの移動手法を系統的に明らかにし，「Tether based locomotion」におけるテザーの制御手法を確立する．まず，宇宙ロボットの移動手法として CDPM に着目した際，制御の難解さとテザーの数が最も大きな制約となる．宇宙ロボットは，地上の一般的なロボットのように人間が操作したり監視することは困難であり，遠隔操作もしくは自律運用が要求され，アクチュエータを個々に独立して動かす計算コストが低い制御手法が望ましい．しかし，テザーで拘束された物体の運動は非ホロノミックな拘束を有するため，ロボット本体の運動を考慮に入れ系全体を同時に制御するテザーの協調制御が不可欠であり，一般的に計算コストが高く複雑な制御系を必要とする．宇宙環境で遠隔運用が可能な計算コストの低い制御手法が望まれる．また，CDPM にとってテザーの数は，本体の移動範囲や機体の安定性を大きくし，冗長系として機能し有利に働く反面，テザーが空間を占める割合と増えるため，内部で物資を搬送する場合や障害物がある場合不利に働くなど，用途によって向き不向きがある．Tether based locomotion は，移動範囲や安定性が要求されるが，一方で，人間が働く狭い空間で作業する要求や宇宙空間で使うために故障要因となる駆動源を減らす要望から，テザーは少ないほうがよく，相反する性質を同時に満たさなければならない．

---

[1] ロボットアームをもちいた移動手法 (Arm based locomotion) に対して，テザーを腕や脚の代わりに用いることから，Tether based locomotion と命名されている．

[2] 同様の機構で，parallel wire system や cable parallel robot など複数の名称があるが，本論文では，複数本の紐を協調制御して空間内の移動を行なう手法を Cable Driven Parallel Manipulator で統一する．

そこで，テザーの数を最小としながらも安全性を保ちながら空間を移動する制御手法を確立し，また，宇宙機に適用可能な計算コストの低いテザーの制御則を開発することで，Tether based locomotion の移動制御則とする．CDPM の分野では，空間の自由度に対して制御を行う紐の数が少ない構成を『劣駆動』(under-actuated) と定義している．[3] 一般的に，劣駆動 CDPM は任意の位置，姿勢で空間に固定されないため，安定性が悪く無重力下における運用に適していない．しかし，適切な位置と姿勢で配置することで空間に固定し，任意の方向の外力に対して安定性を保つことができる．

本論文は，無重力下における劣駆動紐 CDPM の制御手法として，常に安定性を保つ位置と姿勢で制御する手法を提案し，宇宙ロボットの移動手法として十分な移動性能を有することを確認する．また，提案手法に対して，宇宙ロボットの遠隔運用へ適用するために，計算コストの低い簡潔な制御を実現する．

まず，宇宙空間を移動するために必要な要素を定義し，テザー移動ロボットの宇宙空間での運用方法を明確にする．次に，空間にロボット本体を固定しながら連続して移動する手法を明らかにし，宇宙空間に適した劣駆動 CDPM の新しい移動制御手法を開発する．さらに，提案手法について，リール機構の協調制御則を提案し，低コスト化による遠隔運用を実現する．これらは，動力学シミュレータによる数値解析や軌道上有人宇宙施設の船内環境を模擬した地上試験にて理論の検証を行う．最後に，本研究を国際宇宙ステーション日本試験棟船外実験プラットフォームにおける有人宇宙作業支援ロボット実証実験”Robot Experiment on JEM (REX-J)”にて検証し，本研究を実際の宇宙環境でロボットに適用したときの有用性を具体的に明らかにする．

## 1.2 本論文の背景

### 1.2.1 宇宙飛行士支援ロボットの概念

宇宙環境で使用されるロボットシステムは，その用途と技術的な分類から，探査ロボット，作業用マニピュレータ，宇宙飛行士支援ロボット [4] の三種類に大別される．宇宙ロボットは，原則として宇宙環境仕様で構成され，遠隔操作による運用が可能であり，高い信頼性と冗長性を備えている．以下で，各宇宙ロボットについて説明する．

宇宙ロボットの起源は，天体探査のための探査プローブの開発に端をはしている．世界最初の宇宙ロボットは，旧ソ連が月面探査のために開発したルノホート (Lunokhod, Fig. 1.3) と呼ばれる無人走行車で，11ヶ月にわたって数 10km 以上を走破し多くの成果を地球へ送った．それに対して，アメリカ航空宇宙局 (National Aeronautics and Space Administration : NASA) も火星探査において探査ローバーを派遣し，2012 年 8 月には総重量 900kg を超えるマーズ・サイエンス・ラボラトリー (Mars Science Laboratory : MSL , Fig. 1.4) による探査を開始している．また，JAXA は，小惑星イトカワの地表を探査するために微小

[3] CDPM の分野では，紐の数と空間の自由度によって『under-actuated』が定義される．一般的な用法と異なるが，本論文では CDPM の記載に従う．

[4] 前節の Astronaut Support Robot(Astrobot) と宇宙飛行士支援ロボットは同義であるが，JAXA の提唱する作業機能と移動機能を両方有する宇宙ロボットを本論文では Astrobot とし，単に有人支援を目的としたロボットは宇宙飛行士支援ロボットと呼称する．

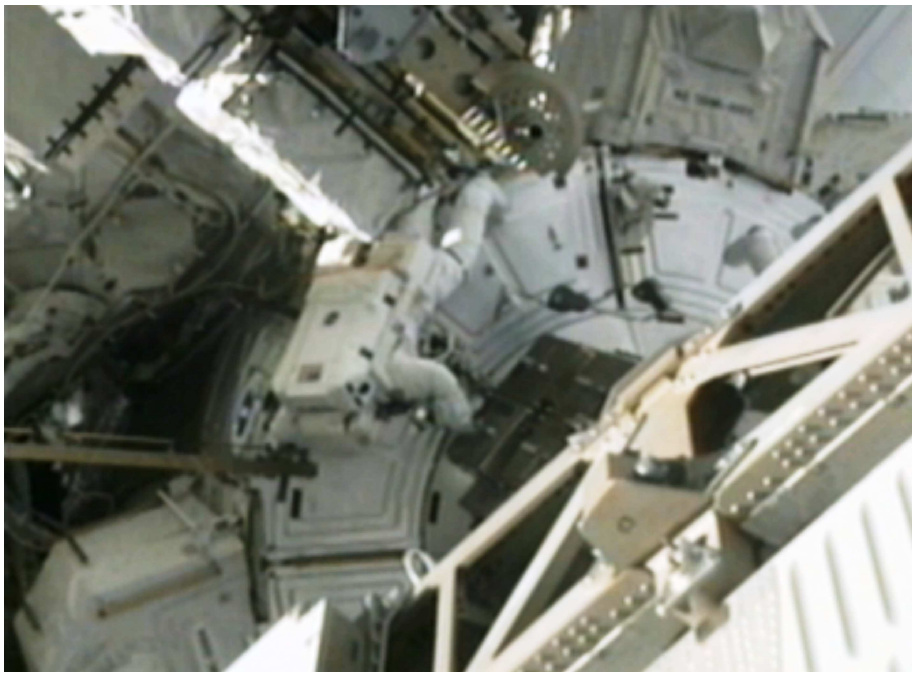


Fig. 1.1 ハンドレール把持移動 ©NASA TV

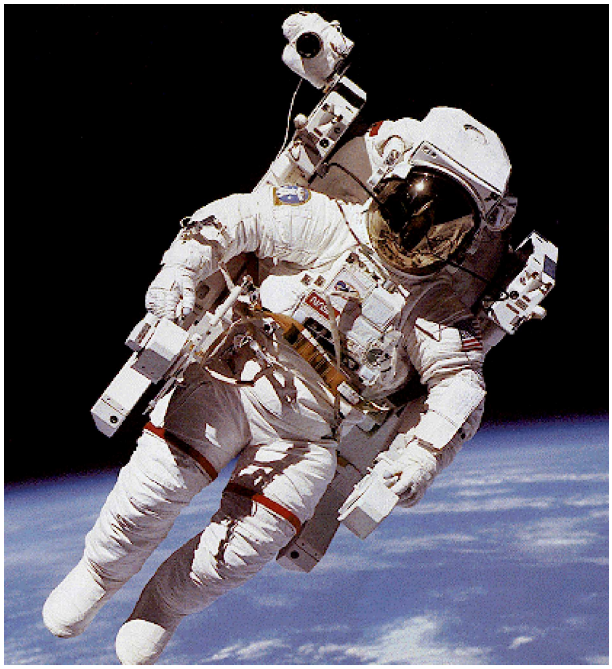


Fig. 1.2 有人飛行ユニット

Table 1.1 宇宙飛行士支援ロボットへの要求と制約

| | |
|---|---|
| 作業性能の要求 | ロボットは，精細作業能力を有し，宇宙飛行士と同等もしくはそれ以上の作業が可能である． |
| 移動性能の要求 | ロボットは，広範囲の移動能力を有し，宇宙飛行士と同等もしくはそれ以上の移動が可能である． |
| 有人支援の要求 | ロボットは，宇宙飛行士と同程度の大きさで構成され，同じ空間で活動が可能である． |
| 環境適合性の制約 | ロボットは，その運用によって宇宙飛行士もしくは環境へ危害を与えてはならない． |
| 故障・誤操作許容の制約 | ロボットは，単一の故障および単一の誤操作によってハザードを発生しない． |
| 緊急対応の制約 | ロボットは，緊急時の対応において宇宙飛行士もしくは環境へ危害を与えない． |

重力環境下で移動可能なミネルバ (MINERVA , Fig. 1.5) と呼ばれる小型のホッピングロボットを開発した．

一方，1960 年代より実用化が始まった産業用ロボットアームの技術は，軌道上長大アームと軌道上マニピュレータ技術として宇宙開発に貢献している．前者は，スペースシャトルに搭載されたシャトル・リモート・マニピュレータ・システム (Shuttle Remote Manipulator System : SRMS) に端を発し，1981 年の STS-2 ミッション以来，大型構造物の運搬や，輸送および外観監視などの多目的な用途で用いられている．後継機である宇宙ステーション・リモート・マニピュレータ・システム (Space Station Remote Manipulator System : SSRMS , Fig. 1.6) は，国際宇宙ステーション (International Space Station : ISS) に設置され，その建造や運用において非常に大きな貢献を果たしている．日本も ISS の日本実験棟 (Japanese Experiment Module : JEM) に設置された「きぼう」ロボットアーム (JEM Remote Manipulator System : JEMRMS , Fig. 1.7) を開発し，ISS の運用へ貢献している．また，欧州宇宙機関 (European Space Agency : ESA) の欧州ロボットアーム (European Robotic Arm : ERA) など小型のマニピュレータをもちいた実験も予定されている．これらは，軌道上で宇宙飛行士により直接操作されているが，SSRMS や JEMRMS の地上管制による操作も行われている．後者については，1997 年のスペースシャトルのミッション STS-85 においてマニピュレータ飛行実証試験 (Manipulator Flight Demonstration : MFD) による軌道上でのマニピュレータ操作実験が行われ，同年に打ち上げられた技術実証衛星きく 7 号 (Engineering Test Satellite : ETS-VII , Fig. 1.8) が遠隔運用による軌道上の衛星捕獲およびマニピュレータをもちいた精細作業の検証を行った．米国のオービタル・エクスプレス (Orbital Express) も 2007 年に同様の実験を行い，ISS でも JEMRMS の子アーム (Small Fine Arm : SFA) をもちいた実験が計画されているが，軌道上での実用的なミッションは検討段階であり，研究開発が進められている．

宇宙飛行士の作業を支援するロボットは，古くは米国の ARAMIS レポートにおいて概念検討がなされている．[4] その概念図では，マニピュレータをもちいた作業能力とスラスタによる移動能力を有する自由飛行ロボットによる大型構造物の建造が検討されている．(Fig. 1.9)　宇宙飛行士の作業を支援，代替を行う場合，ISS の安全基準 [5] および宇宙飛行士へのインタビュー [6] を参考にすると，ロボットは Table 1.1 を満たす必要がある．

現在，宇宙飛行士支援ロボットは，上述した要求と制約を満たす検討例がいくつか提案され，研究開発が進められている．これらのうち，作業性能の要求について成果を挙げている例として，ISS において軌道上の実証実験を行っているカナダ宇宙庁 (Canada Space

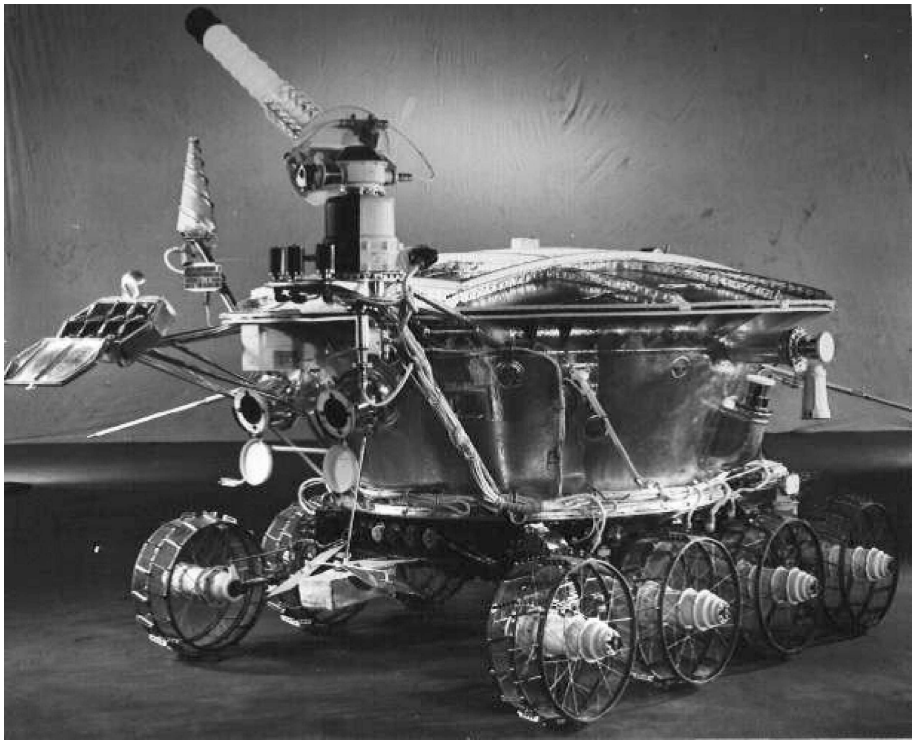


Fig. 1.3 月面車 ルノホート

Agency : CSA) の双椀型ロボット Dextre(Fig. 1.10)[7] や NASA の人型ロボット Robonaut 2(Fig. 1.11)[8] が挙げられる．これらは，人間の腕部を模した 7 自由度のロボットアームと作業ツールを扱うハンド，作業を監視するカメラで構成され，長大アーム先端もしくは船内に固定され，宇宙飛行士の船外作業や船内作業の支援を目的としており，軌道上において簡単な作業を達成している．移動性能の要求については，浮遊移動ロボットの AERCAM(Fig. 1.12)[9] や SPHERES[10]，多腕把持移動ロボットの EUROBOT(Fig. 1.13)[11] および紐懸垂移動ロボットの Charlotte(Fig. 1.14)[13] が地上および軌道上にて研究開発が進められている．[5] 日本では，2000 年初頭に再構成型歩行宇宙ロボット (Reconfigurable Brachiating Space Robot : RBR , Fig. 1.15)[12] による多腕把持移動の地上実験を JAXA と東京工業大学 (東工大)，慶応大学で共同で実施し，一定の成果を挙げている．さらに，上述した要求を満たす宇宙飛行士支援ロボットとして，JAXA と東工大は Astrobot の概念を提唱し，Astrobot の試作機を開発して，2012 年から 2013 年にかけて REX-J ミッションにて技術実証を行った．

### 1.2.2 宇宙飛行士支援ロボットの技術的課題

前小節では，宇宙飛行士支援ロボットの概念とその検討例を説明した．本節では，宇宙飛行士支援ロボットに要求される技術的な課題について言及する．まず，宇宙ロボットに

[5] 本論文では，便宜的に移動手法でロボットを分類している．分類の名称は，論文中に記載されているものを直訳するように努めているが，特に記載がない場合，小田らの論文より引用する．

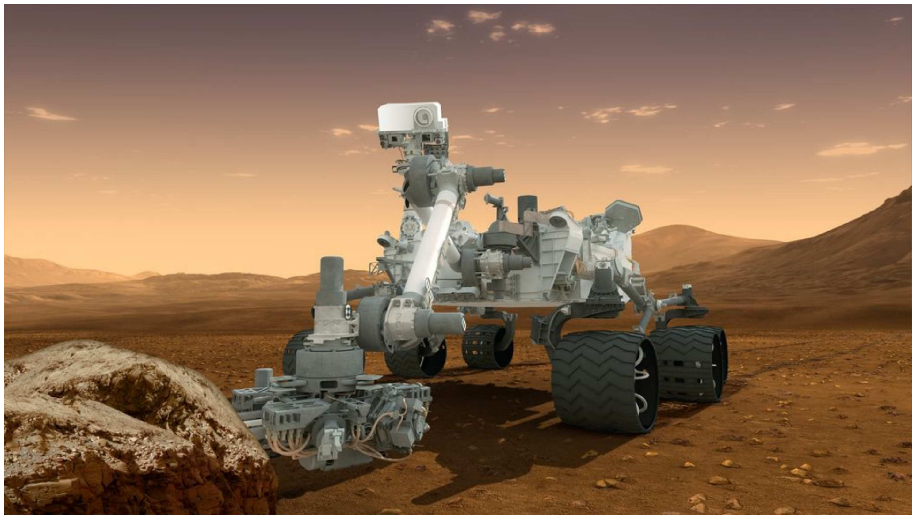


Fig. 1.4 火星探査ローバー　マーズ・サイエンス・ラボラトリー

Fig. 1.5 小惑星探査ローバー　ミネルバ

Fig. 1.6 宇宙ステーションリモートマニピュレータシステム

共通して要求される機能を Table 1.2 に挙げる．

上述した要求に加えて，宇宙飛行士支援ロボットには，Table 1.1 の要求と制約より Table 1.3 に示す機能が求められる．

現在，宇宙飛行士支援ロボットは，Dextre や Robonaut 2 のように作業を行うロボットと AERCAM や EUROBOT，Charlotte のように移動を行うロボットの二種類に分けられる．本研究では，宇宙飛行士支援ロボットの移動機能を対象とする．なお，各研究開発の技術課題は，環境適応機能，故障耐性機能，緊急対応機能を内包し，統合後も全ての機能が達成できるように配慮する．

### 1.2.3 宇宙飛行士支援ロボットの移動手法の研究

以上に述べた技術的課題について，本研究は移動機能の研究開発を行うロボットを対象とし，上述した移動機能と環境適応機能，故障耐性機能，緊急対応機能を有する宇宙ロボッ

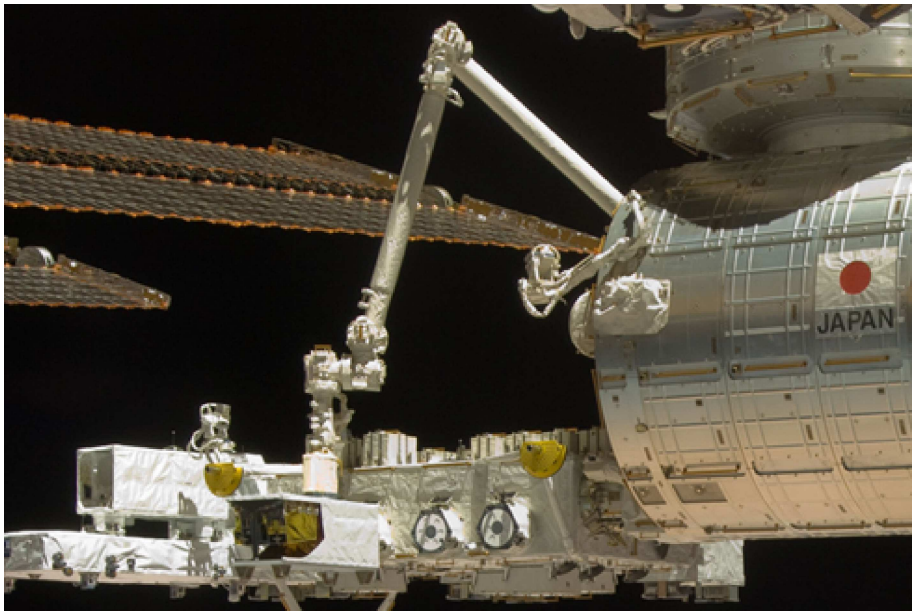



Fig. 1.7 「きぼう」ロボットアーム

Fig. 1.8 技術実証衛星 きく 7 号

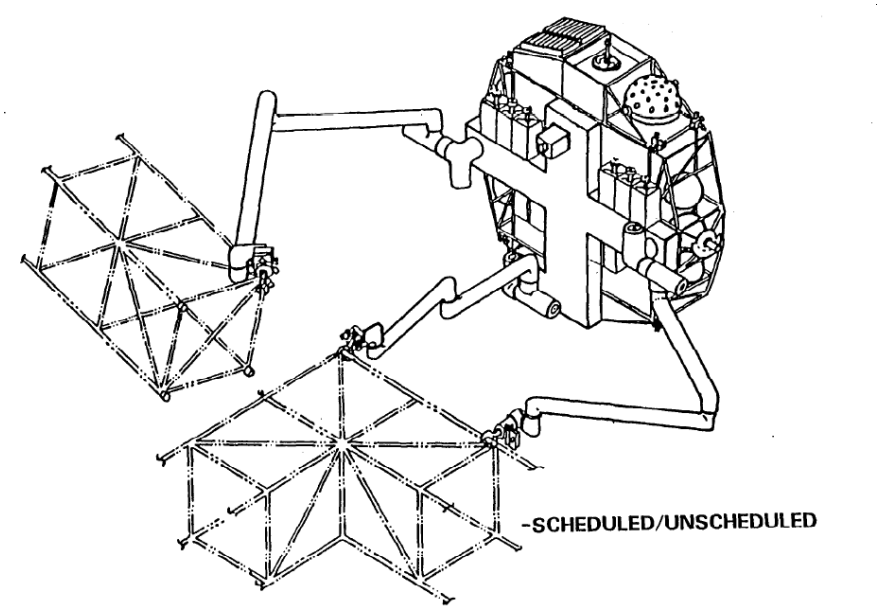



Fig. 1.9 ロボットによる構造物の組立 (ARAMIS - Phase II より抜粋)

Fig. 1.10 双椀型ロボット Dextre

Table 1.2 宇宙ロボットへの機能要求

| | |
|---|---|
| 展開収納機能 | ロボットは，打上げの制約より，構造およびマニピュレータを軌道上にて展開が可能である．また，マニピュレータについて収納する機能を有することが望ましい． |
| 電源管理機能 | 作業中の姿勢変更などにより，電力供給が断たれず運用が可能である．もしくは，保有する内蔵電源にて，所定の作業及び緊急対応が可能である． |
| 通信機能 | ロボットは，施設もしくは地上管制との間で運用に必要な情報の送受信が可能である．運用時に取得する情報量が多い場合は，状況に応じて適切な取捨選択を行い，運用に支障が出ないように制御を施すことが望ましい． |
| 保持機能 | ロボットは，微小重力環境や真空環境などの宇宙環境特有の状況に適合した位置および姿勢の保持が可能である． |
| 振動抑制機能 | ロボットは，マニピュレータの関節剛性に起因する振動について，適切な設計による受動的な減衰もしくは自律制御による能動的な減衰が可能である． |
| 遠隔制御機能 | ロボットは，地上との信号伝達における一秒以上の遅れに対応した遠隔制御が可能である． |
| 自律制御機能 | ロボットは，運用者の負担を減らし，信頼性および安全性を向上させるための自律制御が可能であることが望ましい． |
| 耐宇宙環境適性 | ロボットは，船外活動を行う場合，熱真空環境への適合，耐放射線性，耐原子状酸素など宇宙環境への対策が行われた材料で構成されている．また，ロボットは，伝熱と放射に基づく熱構造設計が十分に施されている． |
| 耐打上適性 | ロボットは，打上による振動に耐える輸送が可能である． |

Table 1.3 宇宙飛行士支援ロボットへの機能要求

| | |
|---|---|
| 作業機能 1 | ロボットは，物資の把持および運搬が可能である． |
| 作業機能 2 | ロボットは，宇宙飛行士がもちいる機器や道具を扱うことが可能である． |
| 作業機能 3 | ロボットは，前述した機器や道具を交換することが可能である． |
| 作業機能 4 | ロボットは，外部と協調して作業を行うことが可能である． |
| 移動機能 1 | ロボットは，船内において空間を移動することが可能であるか，船外において施設の表面および空間を移動することが可能である． |
| 移動機能 2 | ロボットは，自身の大きさを超える範囲を移動することが可能である． |
| 有人支援機能 | ロボットは，船内区画 (2.2m 四方) に搭載が可能である． |
| 環境適応機能 1 | ロボットは，船内もしくは船外の安全基準を満たす． |
| 環境適応機能 2 | ロボットは，外部の物体との接触において柔軟性を有することが望ましい． |
| 故障耐性機能 1 | ロボットは，その動作に対していつでも停止状態へ移行が可能である． |
| 故障耐性機能 2 | ロボットは，制御を有する機器について，冗長系を有することが望ましい． |
| 緊急対応機能 1 | ロボットは，緊急停止時，浮遊して人および環境に危害を加えない対策を施すことが可能である． |
| 緊急対応機能 2 | ロボットは，上述した対策について冗長系の構成が可能である． |

Fig. 1.11 人型ロボット Robonaut 2

トのための移動手法の問題を扱う．

この問題について，前述した浮遊移動ロボット，多腕把持移動ロボット，紐懸垂移動ロボットに加えて，ISS にて SSRMS をもちいて実証された長大アームによる移動，レールによる移動および尺取虫移動が提案されている．これらは，移動機能，作業機能，環境適応機能，故障耐性機能，緊急対応機能など其々得意不得意が存在し，特に後者の SSRMS は，大型構造物の輸送や外観監視に加えて，宇宙飛行士の船外活動の監視を実現しており，その大きさより宇宙飛行士と同等の作業は困難であるが，宇宙飛行士の作業支援によって負担の削減を実現している．これに対し，小田らは宇宙飛行士と同等の作業を行うロボットとして，新たに Astrobot の概念を提唱した．その設計要求を Table 1.4 に示す．また，宇宙飛行士支援ロボットの機能要求との対応を Table 1.5 に示す．Table 1.5 より，宇宙飛行士支援ロボットの移動に必要な機能の大部分満たしていることが分かる．

以上を踏まえた Astrobot の研究として，2006 年より JAXA と東工大は ISS のきぼう船外実験プラットフォーム (Japanese Experiment Module Exposed Facility : JEM) にて軌道上実証実験を計画し，2009 年に船外環境で利用可能な技術実証機を開発，2012 年 7 月に H-2B と HTV の三号機によって軌道上へ打上げられ，ISS の JEM 船外実験プラットフォームにて実験を実施している．

Fig. 1.12 浮遊移動ロボット AERCAM

Fig. 1.13 多腕把持移動ロボット　EUROBOT

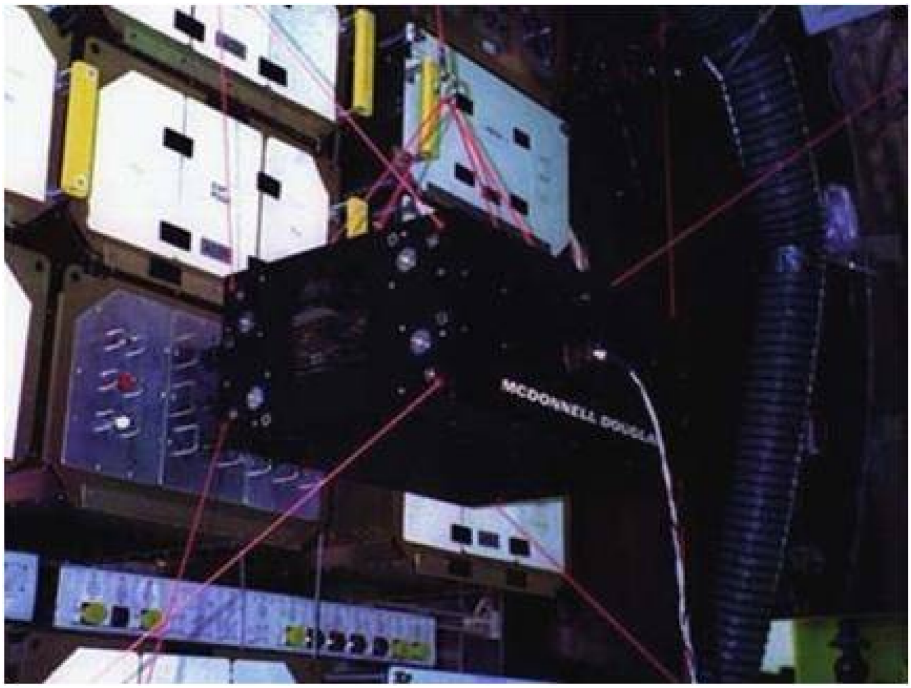



Fig. 1.14 紐懸垂移動ロボット Charlotte

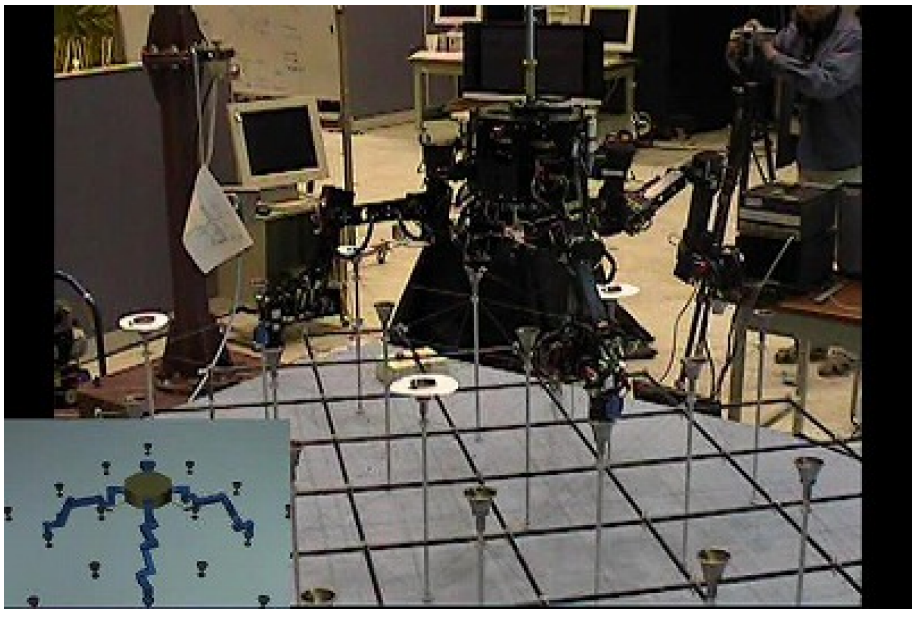


Fig. 1.15 再構成型歩行宇宙ロボット RBR

Table 1.4 Astrobot の設計要求

| | |
|---|---|
| 設計要求 1 | 宇宙飛行士と同等の握力を有するハンド機構を搭載し，宇宙飛行士の道具を扱うことが可能である． |
| 設計要求 2 | 展開および収納が可能な伸展機構によって構成されたロボットアームを有し，本体の遠方において作業が可能である． |
| 設計要求 3 | ロボットは，複数本のテザーを有し，伸展腕によって本体を施設に拘束することが可能である．また，展開したテザーを同様の手順で回収することが可能である． |
| 設計要求 4 | ロボットは，テザーの協調制御によって空間移動が可能である． |

Table 1.5 Astrobot の設計要求と機能要求の対応

| 機能要求 | 設計要求 1 | 設計要求 2 | 設計要求 3 | 設計要求 4 |
|---|---|---|---|---|
| 作業機能 1 | ○ | ○ | | |
| 作業機能 2 | ○ | ○ | | |
| 作業機能 3 | | | ○ | |
| 作業機能 4 | | | | |
| 移動機能 1 | | | | ○ |
| 移動機能 2 | | ○ | ○ | ○ |
| 有人支援機能 | | | ○ | ○ |
| 環境適応機能 1 | | | | |
| 環境適応機能 2 | | ○ | ○ | |
| 故障耐性機能 1 | ○ | ○ | | ○ |
| 故障耐性機能 2 | | | ○ | |
| 緊急対応機能 1 | | ○ | | |
| 緊急対応機能 2 | | | ○ | |

REX-J では，上野らが設計要求 1 を満たす JAXA-THK HAND と設計要求 2 を満たす STEM Robot Arm(SRA) を研究し，地上試験による機能の検証を行った．さらに，軌道上で実証実験を行うために，REX-J へ搭載するためのエンジニアリングモデル (Engineering Model : EM) およびフライトモデル (Flight Model : FM) を開発した．設計要求 3 について，JAXA は宇宙用テザーリール機構のブレッドボードモデル (Bread Board Model : BBM) および FM を開発し，Hand と SRA の EM およびリール機構の BBM 及びロボット本体のシステムの EM をもちいて構成された地上試験を実施し，設計要求 3 をシステムが満たすか検証を行った．

これに対し，筆者は宇宙用テザーリール機構をもちいた協調制御によって設計要求 4 を達成することを目標として，技術実証機の詳細設計審査終了後より，研究を開始した．

本研究では，CDPM の従来研究を参考とし，Tether based locomotion をロボット本体とテザー，外環境における固定点の幾何配置を元にした現在で構成された並列機構でモデル化し，本体の位置及び姿勢とテザー長の関係式を導出する．

次に，テザーが圧縮方向の剛性をもたないため，テザー張力によって記述される CDPM の運動は積分不可であり非ホロノミック系であり，[6] リール機構による張力フィードバック制御では位置，姿勢制御が困難であることから，制御手法としてテザー長の協調制御を

[6] 宇宙ロボットの分野では，非ホロノミック系とは角運動量保存による二階の微分方程式で拘束条件が記述されるシステムを指すことが多い．本論文では，二階の微分方程式では拘束を記述できないが，拘束条件が不可積分である点より，非ホロノミックであると言及した．

対象とする．CDPM の従来研究では，ロボット本体の位置と姿勢より疑似的なヤコビ行列を算出し，テザー長の速度変分を入力とした逆運動学やテザー張力を入力とした逆運動学の近似式をもちいたテザー制御が提案されている．ただし，逆運動学は空間上で拘束されているかを補償せず，逆動力学は 7 本以上のテザーを配置した系しか適用できない．テザーの数が少ない場合は，重力や浮力など，一定の方向に外力が働く環境で空間に本体を固定せずに制御する手法が提案されているのみである．

本研究では，テザーの数が少なくても成立する制御手法を確立するため，静安定状態を空間に固定された状態と定義して，その状態を連続で保ってテザーを制御する静安定解析に基づく移動手法を提案する．本手法は，静安定解析の結果に対してモデルベースド制御を実施する．静安定解析については，計算コストが低いアルゴリズムを開発し，実時間での制御を検証する．

また，提案手法をもちいて任意の位置制御を行なうために，移動経路に対して逐次静安定解析を実施してテザー長の追従制御を行なう「作業空間による逐次テザー制御手法」を [7] を提案し，数値解析によって手法を検証する．さらに，宇宙ロボットの遠隔運用手法に適用するために，ETS-VII で実証された Supervised Tele-operation を参考に，関節空間 [8] において単純な軌跡を描いて移動する定負荷テザー制御手法を提案する．数値解析による検証と地上実験，および，REX-J ミッションにおいて軌道上実証実験にて検証する．

これらの研究成果は，設計要求 3 および設計要求 4 を十分に満たすものとして，REX-J の軌道上実証実験におけるテザー移動実験に適用される．本論文ではそれらの成果も併せて紹介する．

## 1.3 本論文の構成と概要

本論文は以下の 6 つの章より構成される．

第 1 章「序論」では，本研究の目的，背景などについて述べた．

第 2 章「テザー移動ロボット」では，宇宙ロボットの移動手法およびテザーを用いて移動する手法の紹介を行い，本研究で扱う「Tether based locomotion」の概要を説明する．さらに，テザー移動ロボットについて船内移動，船外移動の要求から詳細を定義し，本論文で扱うモデルと仮定を示す．

第 3 章「テザー移動ロボットの移動制御」では，軌道上の移動の課題であるテザーの緩みが生じない移動手法として，静安定解析に基づく移動制御を提案し，テザー移動ロボットの静安定解析手法を明らかにする．さらに，静安定解析によるモデルベースド制御の適用として，作業区間による逐次テザー制御手法と関節空間による定負荷テザー制御手法を示し，シミュレーションによって有効性が示される．

第 4 章「テザー移動ロボットの地上実験」では，テザー移動ロボットの移動制御の検証が可能な微小重力環境を模擬した実験装置を開発し，第 3 章で提案したテザー移動ロボットの移動制御を具体的に確認する．

---

[7] 作業空間 (work space) とは，産業用マニピュレータでもちいられる用語 (JIS B 0134) である．本論文では，基準座標系におけるロボット本体の重心位置を指す．

[8] 関節空間 (joint space) とは，産業用マニピュレータでもちいられる用語 (JIS B 0134) である．本論文では，リール機構のリール回転角より得られるテザーの伸展量を並列機構の関節要素とみなす．

第5章「テザー移動ロボットの軌道上実験」では，REX-J ミッションにおけるテザーによる移動実験において本論文の成果を検証し，宇宙飛行士支援ロボットの実現に向けて得られた成果を報告する．

第6章「結論」では，以上の結論を要約し，今後の課題について述べる．

# 第2章　テザー移動ロボット

## 2.1　まえがき

本章では，テザー移動ロボットの概要と本研究で扱う移動手法について説明する．本論文では，Astrobot の移動機能について説明する場合，とくにテザー移動ロボットと呼称するが，その概念を以下に示す．(Fig. 2.1)

- ロボットは，テザー (紐) による懸架で本体の位置と姿勢を固定する．
- ロボットは，マニピュレータによってテザーの懸架を任意に変更できる．(可変構成)
- ロボットは，テザーの協調制御によって移動する．(テザー移動)

本論文では，上述した概念のロボットにおけるテザー移動の制御側を扱うが，本章ではここで取り扱うテザー移動ロボットについて，明確な定義を行い，その移動のモデル化と仮定を示す．

まず，従来の宇宙ロボットの移動手法を示し，その課題とテザーを用いた移動手法の優位性を説明する．宇宙ロボットは三種類に分類されるとしたが，本研究では，軌道上における有人宇宙活動の支援を主目的としているため，探査ロボットおよび作業用マニピュレータについては触れるのみとし，宇宙飛行士支援ロボットの移動手法である浮遊移動と多腕

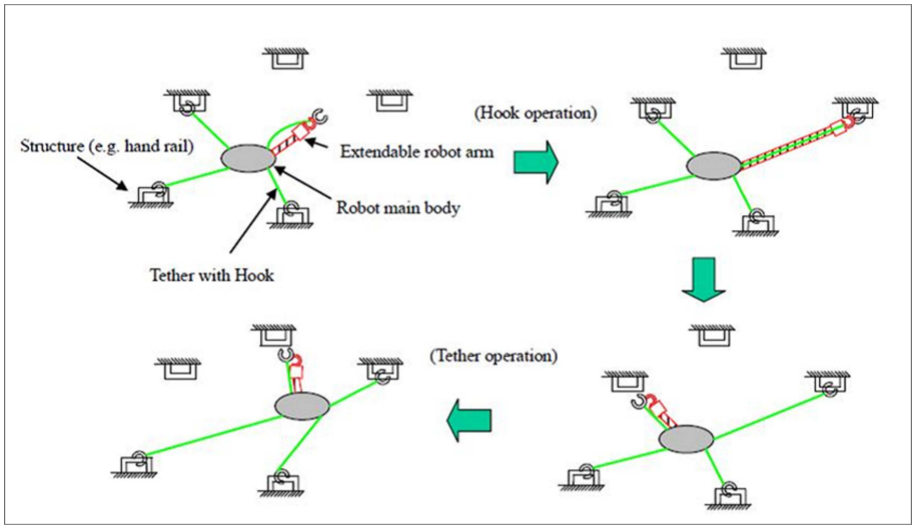



Fig. 2.1　Astrobot Support Robot の移動手法

把持移動と紐懸垂移動および国際宇宙ステーションでもちいられた長大アームによる移動，レールによる移動および尺取虫移動について評価する．

次に，テザーを用いた移動手法について既存の研究を紹介し，テザー移動ロボットの移動手法の体系化を行う．テザーを用いた移動手法の分類は，用途や紐の本数，名称 (テザー，ワイヤー，ケーブル etc...) など多種多様であるが，紐による拘束状態に着目し，テザー移動ロボットの移動手法を紐で構成された並列機構 Cable Driven Parallel Manipulator : CDPM) と定義する．さらに，CDPM の従来研究を紹介し，現状の課題を明らかにする．

以上を踏まえて，テザー移動ロボットの移動を Tether based locomotion と定義する．Tether based locomotion は，一般的な移動ロボットと同様，移動経路の探索と移動体の制御則，移動中の自己位置推定の三種類が要求される．本論文では，Tether based locomotion の移動要素のうち，とくに移動体の制御則を主要な課題とし，テザーの協調制御則を研究することで，宇宙飛行士支援ロボットの移動機能の実現を目指す．

最後に，本論文で扱うテザー移動ロボットの移動モデルとその仮定を示す．本論文では，ロボット本体とテザー，壁面の三つを一つの移動要素とした CDPM モデルをもちいる．CDPM モデルは，紐が緩まない状態を仮定して，紐を圧縮方向は弾性を持たない非線形バネとして定義し，ロボット本体と壁面を剛体として，二つのテザー端点の幾何拘束とテザーのバネ運動方程式，ロボット本体の運動方程式を解くことで，ロボット本体の運動を与える．

## 2.2 宇宙ロボットの移動手法

まず，従来の宇宙ロボットの移動手法として，宇宙飛行士支援ロボットの移動手法を紹介する．なお，惑星探査ローバーの走行技術や作業用マニピュレータを搭載した軌道上衛星のランデブードッキング技術など，厳密には宇宙ロボットの移動手法として紹介する必要があるが，本論文が扱う宇宙飛行士支援とは適用範囲が異なるため，参考文献の紹介にとどめる．[15][16] 宇宙飛行士支援ロボットは，軌道上や小惑星などの微小重力環境下において，宇宙飛行士に代わって物資の運搬や組立，監視．保守，点検などの単調であるが繰り返しを伴う作業を行うことを目的としている．そのために，広い移動範囲，空間移動能力，安全性や耐故障性などが要求されるが，軌道上では地上における信頼性が高い移動手法である車輪による移動ができない．一方，自重の影響を受けないため，地上では実現困難な移動が可能である．SRMS や SSRMS，JEMRMS のような断面積に対して長さが非常に大きなロボットアームが運用できるため，Dextre のように先端へ搭載して移動する手法が実現している．また，浮遊状態で有害性のないガスを噴出し，その反動で移動する AERCAM,SPHERE のような浮遊ロボットも軌道上で実証実験が行われている．[9][10] さらに，地上では可搬重量が自重の 10 分の 1 程度であるため実現が困難な人や猿のような腕をもちいた把持移動を軌道上で実現でき，EUROBOT や RBR のような多椀把持移動が検証されている．[11][12] 同じく，軌道上で懸架によって移動する紐懸垂移動手法についても過去に Charlotte による軌道上実験にて検討された事例がある．国際宇宙ステーションでは，SSRMS は両腕端部に機械的接続に加えて電気的接続を有することで，アーム根元のインターフェースを伝い歩くことでステーション全体で運用が可能であり，これも一種の移動手法といえる．本論文では便宜的に尺取虫方式と呼称する．SSRMS は，太

Table 2.1 従来の宇宙ロボットの移動手法

| Method | Advantage/ Disadvantage / Example |
|---|---|
| 浮遊移動方式 | 移動範囲の制約なし．空間移動可． / 物資の搬送不可．故障時に浮遊し，衝突の危険． / 例) AERCAM(NASA)[9], Spheres(MIT)[10] |
| 長大アーム搬送方式 | 設置が容易． / アーム長が移動範囲を制限．作業能力はアームの剛性に依存． / 例) Dextre(CSA) |
| 台車搬送方式 | 大型物資を搬送可． / 移動範囲が制限．設備投資の負荷大． / 例) SSRMS(CSA) |
| 尺取虫方式 | アーム長より広い範囲を移動可． / 物資の搬送不可．設備投資の負荷大． / 例) SSRMS(CSA) |
| 多腕把持方式 | 宇宙飛行士と同等の移動範囲． / 7 自由度のアームを必要とし，信頼性，耐故障性が課題． / 例) EUROBOT(ESA)[11], RBR(JAXA)[12] |
| 紐懸垂移動方式 | 懸架により信頼性，耐故障性大． / 宇宙飛行士による設置が必要不可欠．例) Charlotte(NASA)[13] |

陽光パドルを設置した梁上を台車に乗って移動する機能も有している．台車による搬送も宇宙飛行士支援ロボットの移動手法といえる．これらの移動の特徴を Table 2.1 に示す．

これらの移動手法は，第 1 章の Table 1.1 にて言及した宇宙飛行士支援ロボットへの要求のうち，移動性能の要求について満たしている．しかし，環境適合性や故障・誤操作許容，緊急対応の制約について，各々個別の課題がある．特に，宇宙飛行士と同じ環境で働く小型の宇宙ロボットについて，浮遊移動方式，多腕把持方式が注目を集めていたが，故障・誤操作許容の制約および緊急対応の制約について大きな課題が残されている．紐懸垂移動方式は，複数本のテザーによって自らが拘束されることから単一の故障や単一の誤操作において安全性が確保され，緊急時もテザーの切断などにより容易に対応が取れる．そのため，宇宙施設の船内移動に適した手法とされてスペースシャトルにおける軌道上実験も実施されていた．紐懸垂移動は宇宙空間の移動に適しているといえるが，一方で，テザーの設置を宇宙飛行士に依存すること，テザーが展開された空間を占有してしまうことが課題となっている．

## 2.3 テザーを用いた移動手法の紹介

前節では，宇宙ロボットの移動手法について紹介し，テザーを用いた移動手法が宇宙ロボットの移動手法として着目されていることを説明した．本節では，宇宙空間におけるテザーの利用と地上におけるテザーを用いた移動手法を紹介する．

宇宙開発において，広範囲の展開が可能で軽量なテザーを用いたシステムは，古くから注目されており，衛星のアンテナの展開構造としてテザーによる張力安定構造が研究され

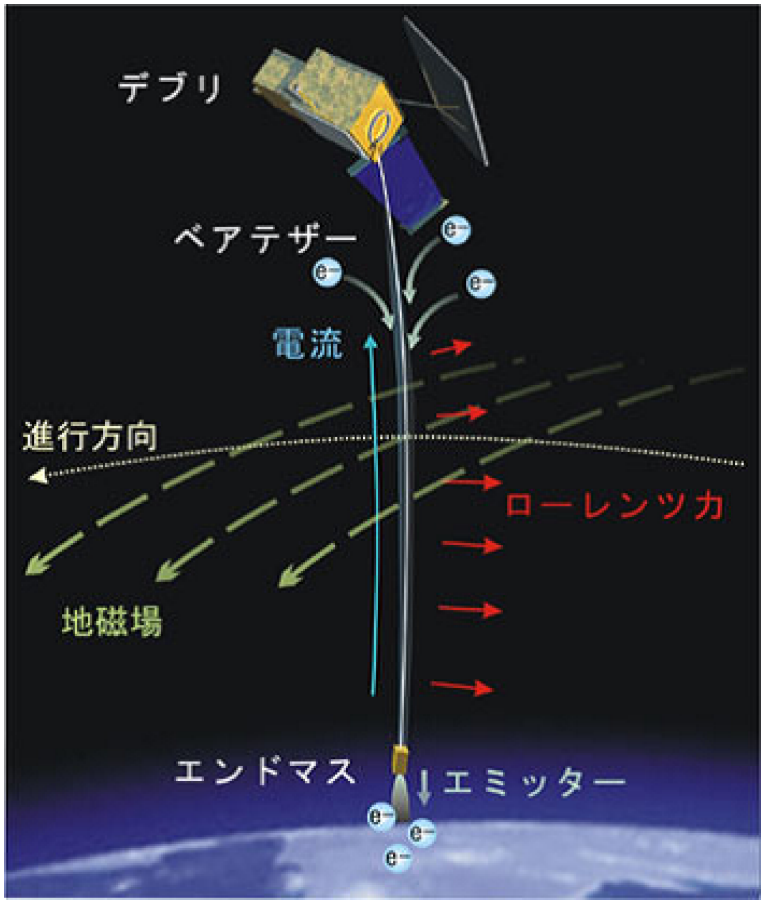



Fig. 2.2　導電性テザー [22]

ている．[17] テザーを用いた宇宙機器の制御システムも研究および開発が進められており，その一例として複数の衛星の協調制御手法においてテザーを用いたフォーメーションフライトが提案されている．[18][19] また，能見らは二台のロボットをテザーで連結し，ロボットアームやリール機構の張力制御をもちいて手先の位置と姿勢を能動的に制御する「テザー宇宙ロボット」を提案し，2013 年に超小型衛星による軌道上実証実験を予定している．[20] 一方，テザーの特徴として他の伸展機構に比べて簡便で小型な機構で非常に広い範囲への展開が可能であることが挙げられるが，その特性を活かして軌道上で数 km 以上の長さを展開し，重力傾斜トルクをもちいた姿勢安定や導電性テザーによる軌道修正など，軌道上独自の利用方法も提案されている．(Fig. 2.2)

これらは，いずれも浮遊した物体同士をテザーで連結しているため，移動体の運動は紐の張力に加えて紐端点の運動と連成している．そのため，非常に小さな張力の影響で大きな変化が生じ，要求される性能として，低張力で数 100m〜数 km と広い範囲へ展開する能力が求められる．一方，前節の紐懸垂移動は，紐の端点は大型の構造物へ固定されるため，移動体の運動は紐に負荷される張力のみに依存する．これは，CDPM と同様のものである．本研究では，宇宙ロボットのテザーを用いた移動を扱うが，その基本原理は地上の CDPM と同じものと考え，無重力下における CDPM の動力学モデルをテザーをもち

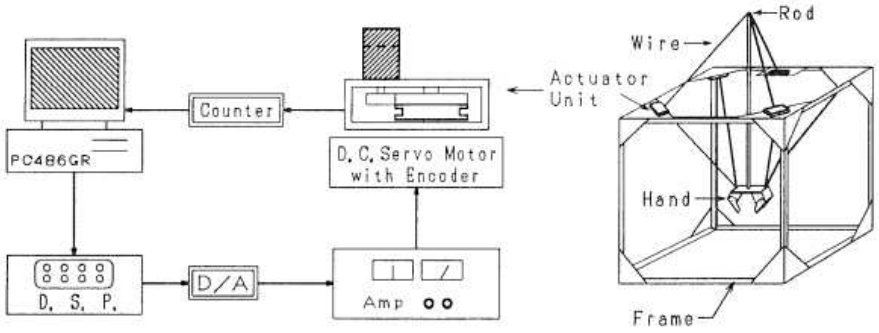



Fig. 2.3 FALCON-7 Ultrahigh Speed Manipulator [24]

いて移動する宇宙ロボットの力学モデルとして扱う.

CDPMは,紐で拘束された移動体と紐を制御するリール機構によって構成される.CDPMは,1980年代にアメリカと日本において,弦材をもちいて構成された並列機構として概念の提案と研究が行われ,ROBOCRANEやFALCON(Fig. 2.3)などロボットが開発された.[23][24] これらはリール機構を移動体の外側に固定して制御する手法が一般的で,広範囲の移動を目的としたシステムと張力制御による力学デバイスの二種類の研究がなされている.移動体の作業空間は,紐を拘束する幾何配置によって規定される. 前者は,スポーツスタジアムの撮像システム (Fig. 2.4) として実用化しており,FASTなど一般的な環境への適用も検討されている.[25] [26] 後者は,並列機構の有する高加速度の制御性と弦材による高い可動範囲を活用して,位置や姿勢,力覚などを高精度に再現するシステムとして研究開発が進められている.[27] [28] 前述した紐懸垂移動ロボットCharlotteは,軽量で簡易的な装置で広い範囲を移動できるCDPMを軌道上の移動手法として検証した例である.

一般的に,CDPMの紐の端部は環境へ固定して,紐を含む全体をシステムとして制御を行う.そのため,ロボット本体の移動範囲は,紐の初期配置に依存する.これに対し,東工大の広瀬らは,紐の端部の配置を能動的に変更して移動範囲を可変にする”ハイパーテザー”を提案し,複数台の移動ロボットにリール機構を搭載して紐を再配置可能な構成を示した.[29] [30] Charlotteも宇宙飛行士による再構成を検討に入れており,再構成による移動範囲の拡張が示唆されている.しかし,軌道上で複数台の移動ロボットを展開する手法について課題があり,また,打上や運用の制約から複数台のロボットを展開することは望ましくない.軌道上の移動手法として確立するためには,ロボット本体が紐の初期配置を能動的に変更し,さらに範囲を拡張できるシステムが必要である.

## 2.4 Tether based locomotion

前節で課題であったテザーの展開方法について,小田らは伸展するマニピュレータによってロボット自身がテザーを設置するAstrobot Suppot Robot (Astrobot)を提案し,テザー

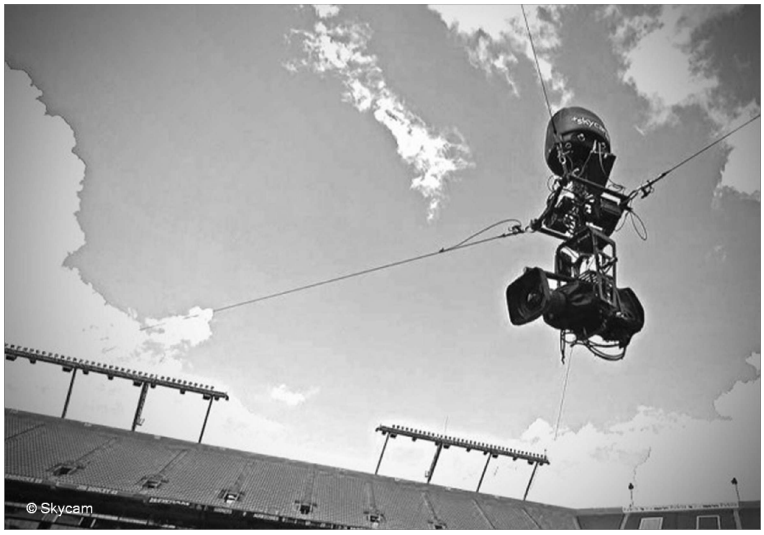



Fig. 2.4 SkyCam

をもちいた宇宙飛行士支援ロボットの移動手法「Tether based locomotion」とした．本節では,「Tether based locomotion」の概念を示し，宇宙飛行士支援ロボットの移動手法としての適性について考察する．

Astrobot は，伸展および収納が可能なマニピュレータとハンドレールなどの壁面の把持部 (宇宙飛行士用ハンドレール) へ取り付け可能なフック機構を有するテザー, その制御を行なうリール機構で構成される．ロボットは以下の手順に従い，船外もしくは船内近傍の空間を移動する．

1. 伸展マニピュレータをもちいて，テザーが取り付けられたフックを把持する．
2. 伸展マニピュレータを伸ばし，遠方のハンドレールなどへフックを固定する．
3. 伸展マニピュレータを収納する．
4. テザーの本数に応じて 1〜3 を繰り返し，ロボット本体をテザーで支持する．
5. リール機構をもちいてテザー長とテザー張力の協調制御を実施し，ロボット本体を移動制御する．
6. 必要ならば，冗長のテザーを用いて本体を支持し，ハンドレールなどへ固定されたフックを伸展マニピュレータで回収する．その後，別のハンドレールに対して 1〜3 の作業を実施し，移動範囲を変更する．

上述した伸展マニピュレータとは，衛星などにもちいられる伸展機構をロボットアームのブームとして利用した新しいマニピュレータである．上野らによって，提案された伸展マニピュレータの性能要求を以下に示す．[35]

代表的な伸展機構として，テレスコープ方式 [36][37] と STEM 機構 [39]，コイラブルマスト [40] が挙げられる．とくに，STEM はハッブル望遠鏡の太陽パドルの伸展機構とし

Table 2.2 伸展マニピュレータの性能要求

| |
|---|
| 5m 先において，最大 75mm（± 32.5mm）の伸展精度 |
| 任意の長さに制御可能 |
| 任意の長さで一定の剛性と保持力があること |
| 先端に電力，通信を供給可能なこと |
| 小型で，伸展率が 10 倍以上 |

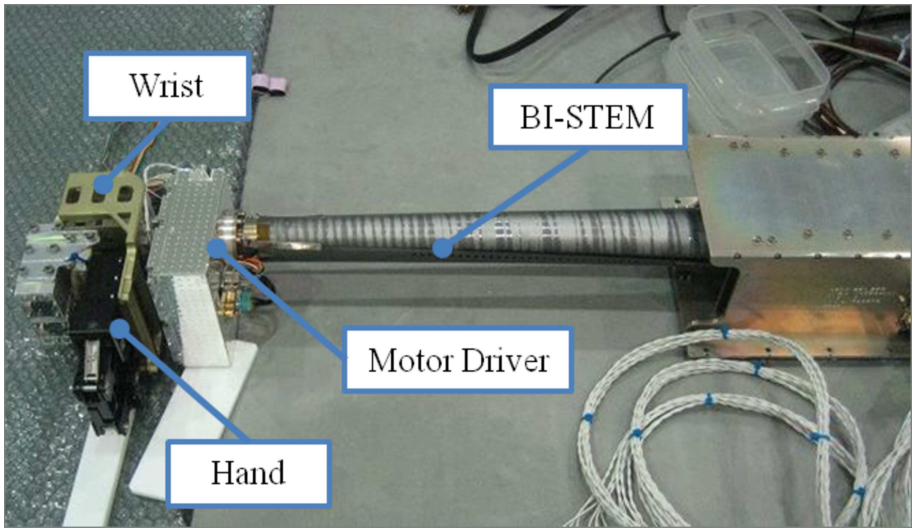



Fig. 2.5 STEM Robot Arm

Table 2.3 Tether based locomotion の機能

| | |
|---|---|
| 移動機能 | 船内および船外において空間を移動できる． |
| 有人支援機能 | 伸展マニピュレータおよびリール機構など搭載機器は小型である． |
| 環境適応機能 | 安全基準を満たした既存のハンドレールをもちいて移動する． |
| 故障耐性機能 | 一つのリール機構が暴走した際に，他のテザーが支持することで本体は暴走しない．また，冗長の構成が容易である． |
| 緊急対応機能 | 本体はテザーで拘束されているため，浮遊飛散しない．また，テザーは複数本あるため，冗長として機能する． |

て採用され，10m 以上の伸展実績がある．これらの伸展機構をもちいたロボットアームの宇宙利用の実績は存在せず，地上において幾つかの研究例が報告されるのみである．[41] [42] 宇宙用ロボットアームとして，テレスコープ方式を採用したものをが概念検討および提案されているが，制振方法やダイナミクスの検討が主であり，実証には至っていない．[43] [44] 東工大と JAXA は Astrobot のための伸展マニピュレータとして，STEM Robot Arm(Fig. 2.5) を開発し，後述する REX-J の軌道上実験にて実証実験を実施した．

Tether based locomotion は，伸展マニピュレータをもちいることで紐懸垂移動の欠点であったテザーの展開をロボット単体でできない点を改善し，なおかつ，紐懸垂移動の有する利点の多くをそのまま継承している．Tether based locomotion は，宇宙飛行士支援ロボットの要求のうち，移動機能，有人支援機能，環境適応機能，耐故障性機能，緊急対応機能の全てを有している．(Table 2.3)

Table 2.4 Tether based locomotion の移動要素

| | |
|---|---|
| 移動経路の探索 1 | ハンドレールなどの固定要素を含む外環境の認識 |
| 移動経路の探索 2 | 移動始点および移動終点間の大まかな移動経路の決定 |
| 移動経路の探索 3 | 移動経路におけるテザー端点の配置とテザーの掛替えの決定 |
| 移動経路の探索 4 | テザー端点の各配置における安定性の評価 |
| 移動体の制御則 1 | リール制御による本体の移動制御 |
| 移動体の制御則 2 | 移動中の安全性の確認 |
| 移動中の自己位置推定 1 | 内界センサによる本体の自己位置推定 |
| 移動中の自己位置推定 2 | 外界センサによる移動体の位置計測 |

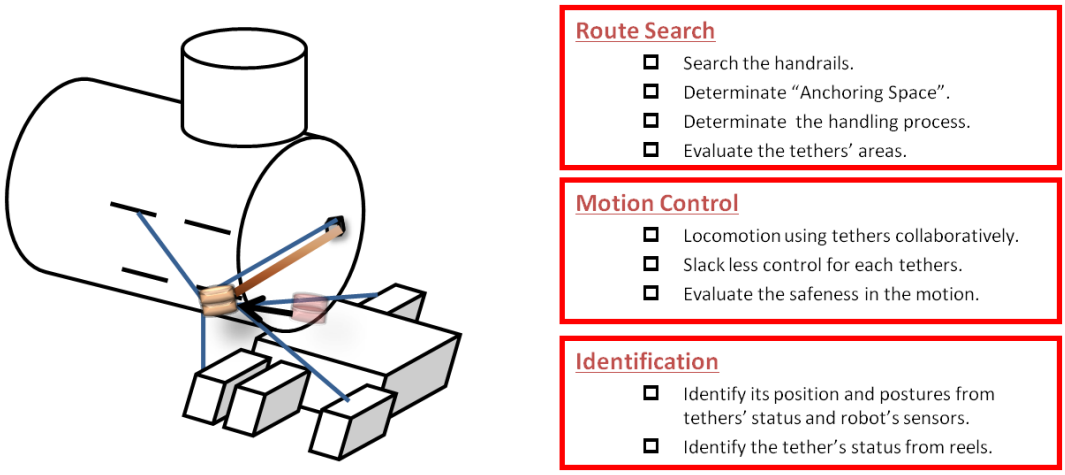



Fig. 2.6 Tether based locomotion の移動要素

これらの利点を有するが，その反面，本手法は柔軟なテザーを用いて移動するため，ロボット本体の姿勢安定性に課題があり，外力に対して位置と姿勢を精度よく保持することは困難である．そのため，精細な作業や大きな力やトルクを要する作業を行う場合は，小型のロボットアームをもちいて本体を固定し，位置と姿勢を安定させる必要がある．

また，ロボット本体が移動するためにはテザーを最低 3 本以上固定する必要があり，運用初期において複雑さを有することは否めない．加えて，ロボット本体よりも大きな物資の運搬は移動中のテザーの干渉を考慮に入れる必要がある．これらは，Tether based locomotion の大きな課題であるが，いずれも作業機能に対する制約であり，軌道上で実証実験を行うことで有用性が確認された伸展マニピュレータをさらに研究開発を進めることで改善が見込まれる．

一方，Tether based locomotion の移動機能について，移動経路の探索と移動体の制御則，移動中の自己位置推定など一般的な移動ロボットと同様の課題を解決しなければならない．Tether based locomotion の移動要素を Table 2.4，Fig. 2.6 に示す．

移動ロボットの外環境の認識は，ハンドレールなどの固定要素と障害物の位置と形状の情報取得が目的の一つとなる．一般的に宇宙ステーションなどの軌道上施設は，SSRMS や JEMRMS，太陽パドルのような形状が変形するものやソユーズ宇宙船や宇宙ステーション補給機のように追加で増設されるものについても，施設全体の詳細な構造情報が入手可能であり，CAD モデルをもちいた詳細な解析が可能である．一方で，宇宙飛行士との協調

作業を行うため，未知環境の認識手法が必要とされるが，地上においてカメラ画像やレーザー測位計をもちいた研究が多くなされており，それらを宇宙ロボットへ適用できる．

移動経路の探索 2 および移動経路の探索 3 は Path Planning の研究に分類される．従来のテザーロボットの Path Planning は，一本もしくは複数本のテザーで拘束されたロボットが障害物のある平面もしくは空間を最適な軌跡で移動する問題である．[45] [46] [47][48] これらは，将来的に船内や船外の接合ハッチの間を移動するなど，障害物回避の課題が生じた場合に重要な課題であるが，テザー移動ロボットは伸展式マニピュレータをもちいてテザー端点の掛け換えを行うため，障害物を避ける配置を選択することで，このような問題を回避できる．

内界センサおよび外界センサをもちいた自己位置推定は，移動ロボットに必要不可欠な技術である．一般的に，内界センサによって連続的に位置推定を行い，外界センサによる修正を与えることで移動を行い，その精度は搭載するセンサに依存する．従来の移動ロボットは，要求される精度や処理速度の関係からジャイロセンサや加速度計，車輪のポテンショメータなどの内界センサと，レーザー測位計やステレオカメラなどの外界センサをもちいて位置推定を行っていた．近年，計算機の処理速度や画像処理技術の向上により，光学センサを内界センサとしてリアルタイムに位置推定にもちいる手法が増えてきている．テザー移動ロボットも同様の位置推定手法の適用が可能である．

上述した要素は移動ロボット共通の課題であるが，一方，移動経路の探索 4 と移動体の制御則 1，移動体の制御則 2 はテザー移動ロボットの固有の移動要素である．本論文では，テザー移動ロボットの移動要素のうち，移動体の制御則を研究することで，Tether based locomotion の移動要素を確立し，Astrobot Support Robot の移動機能の実現を目指す．

## 2.5 船内環境および船外環境の定義

本小節では，宇宙飛行士支援ロボットの研究を行うために環境の定義を行う．宇宙飛行士の作業環境は，軌道上の宇宙船や宇宙ステーション近傍の微小重力環境下の活動と天体表面における低重力環境下の活動の二種類に分類される．Astrobot は，軌道上の無重力環境下の支援を目的としているが，船内活動と船外活動で作業環境は大きく異なる．Tether based locomotion は，環境におけるハンドレールなどの把持部の配置が重要であるため，研究を行う上で船内および船外の作業環境の違いを考慮しなければならない．本論文では，船内環境と船外環境について，それぞれ簡易的なモデル化を実施し，Tether based locomotion における把持部の配置について定性的な評価を与える．

Fig. 2.7 に国際宇宙ステーションの船内の一例を示す．国際宇宙ステーションは，円筒構造の与圧部をモジュールとして，結合部を介して複数連結されている．与圧部の船内は，直径 4.6m の円筒内に幅と高さが 2 m程度の天井と床，壁面で構成されている．船内の壁面には観測機器が設置され，天井，床，壁面には船内移動のためにハンドレール (Fig. 2.8) が設置され，無重力環境であるが上下左右が存在する．これらの空間は，安全の観点から 114cm x 81.3cm の人が通過できる広さを確保する必要がある．なお，ハンドレールは宇宙飛行士によって容易に取り外しが可能な I/F が与えられ，宇宙船船内のハンドレールの配置は，直方体の内壁の任意の点へ設置可能である．以上を踏まえて，船内の移動環境は，天井，床および観測機器がある側の壁面の三面より任意の点を選択して，テザーの配置を

Fig. 2.7 「きぼう」日本実験棟 船内実験室（PM）

Fig. 2.8 ハンドレール (船内)

行うモデルが考えられる．このとき，船内の空間占有率の関係から，8 本以上のテザーで立方体形状に配置することは難しい．従来の CDPM は，立方体もしくは直方体にテザーを展開するものが多く，テザー配置を扱った研究も対称性を有する配置を扱うものが多い．そのため，Tether based locomotion を適用するには任意のテザー配置について新たな評価が必要である．[49] [50]

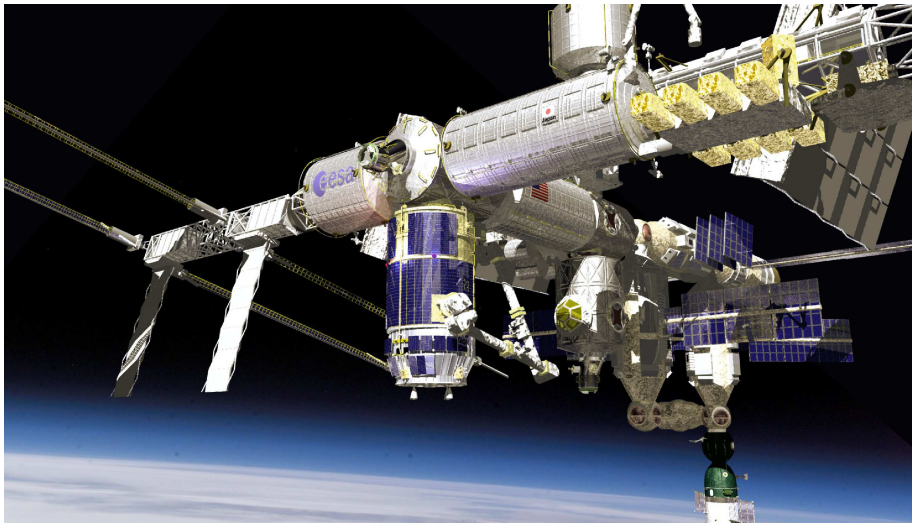


Fig. 2.9　「きぼう」日本実験棟 船内実験室（全体）

Fig. 2.9 に国際宇宙ステーションの外壁の一例を示す．また，将来的な船外作業の環境の一例として，Fig. 2.10 に太陽光発電衛星の組立の一例を示す．船外の移動環境は，有人居住区の与圧部の壁面近傍や，太陽光発電衛星などの軽量構造物の上面，さらに ISS の太陽光パドルや SSPS の構造トラス内部の移動などが考えられる．ISS の与圧部の外壁には，宇宙飛行士の移動用のハンドレールが設置されている．(Fig. 2.11) また，太陽光発電衛星のパドル構造は，輸送コストの観点から軽量化が要求されており，パドルおよびアンテナは従来の平板形状ではなく，枠組みにフィルム状の太陽電池を展開した柔軟構造が検討されている．Astrobot は，これらの外壁や構造へ取り付けられている把持部へテザーを固定することを想定している．実際，ISS の船外ハンドレールなどの把持部や太陽パドルの展開トラス構造は，100N 程度の引張方向の力に対して十分な剛性を有しているため，テザーの取付は可能である．[52] [53] テザーの配置は，壁面近傍の固定は容易であるが，壁面に対して高さ方向の荷重を支える把持部の場所は制限され，移動後の位置で伸展マニピュレータの範囲内にない場合も想定される．以上を踏まえると，Astrobot がテザーを固定できる点は少なく，移動範囲についても制約が大きなことが推測される．詳細は後述するが，空間移動に必要な最小の紐をもちいて，Fig. 2.12 に示すような高さ方向 2 点と平面 2 点を基準とした三角錐を切り替えて移動することで，円筒面や平板上の移動が達成できると考えられる．

船内および船外の環境を考察したところ，従来の CDPM の研究で一般的な 8 本以上のテザーで対称性が高い直方体の頂点上にテザーを配置したモデルを適用することは困難である．そのため，テザー移動ロボットの制御則を検証する上で，テザーの数が少なく配置について汎用性が高い条件で適用できる移動制御則が必要とされる．

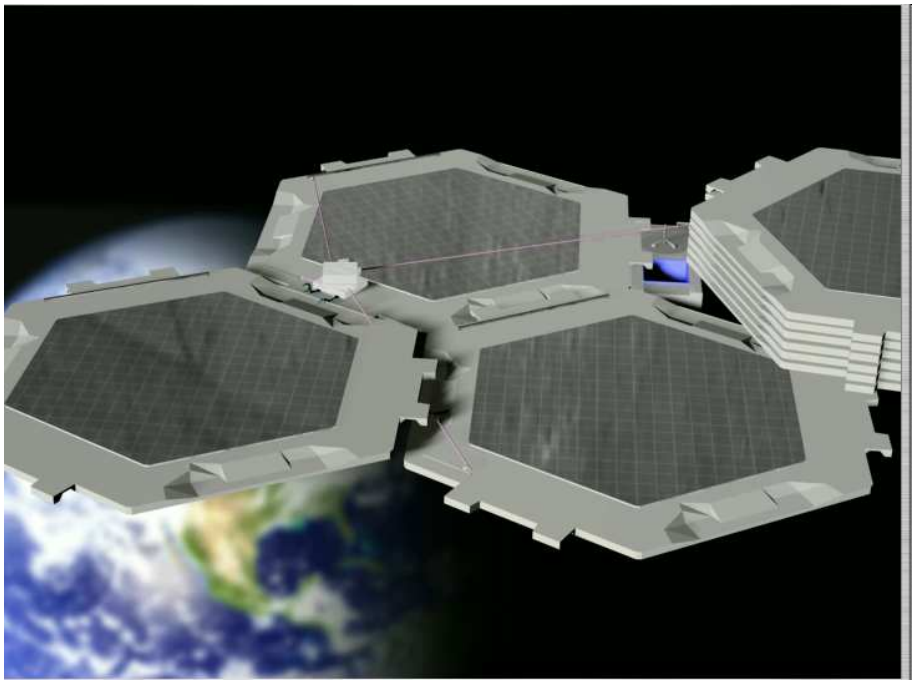


Fig. 2.10　太陽光発電システム　組立イメージ図

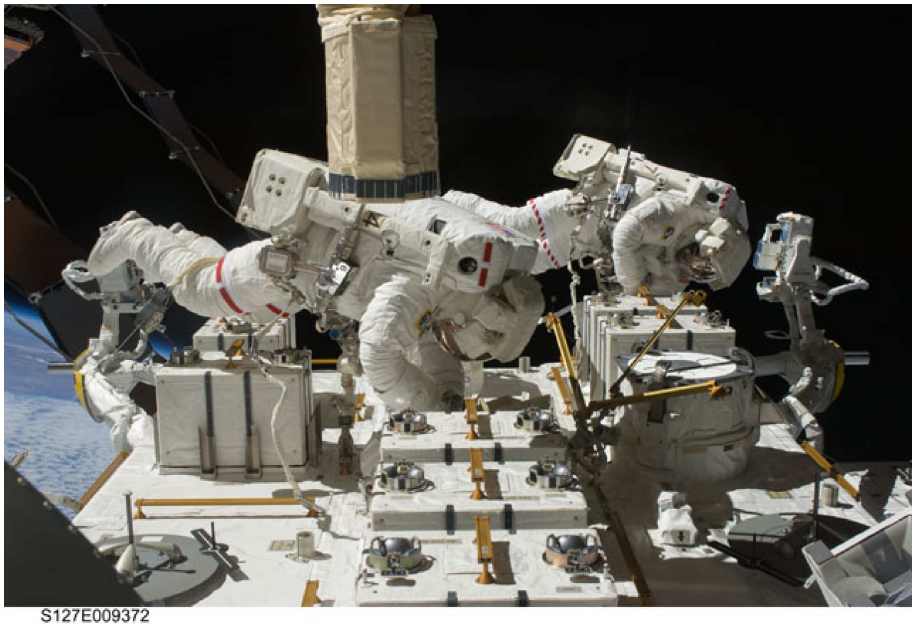



Fig. 2.11　ハンドレール (船外)

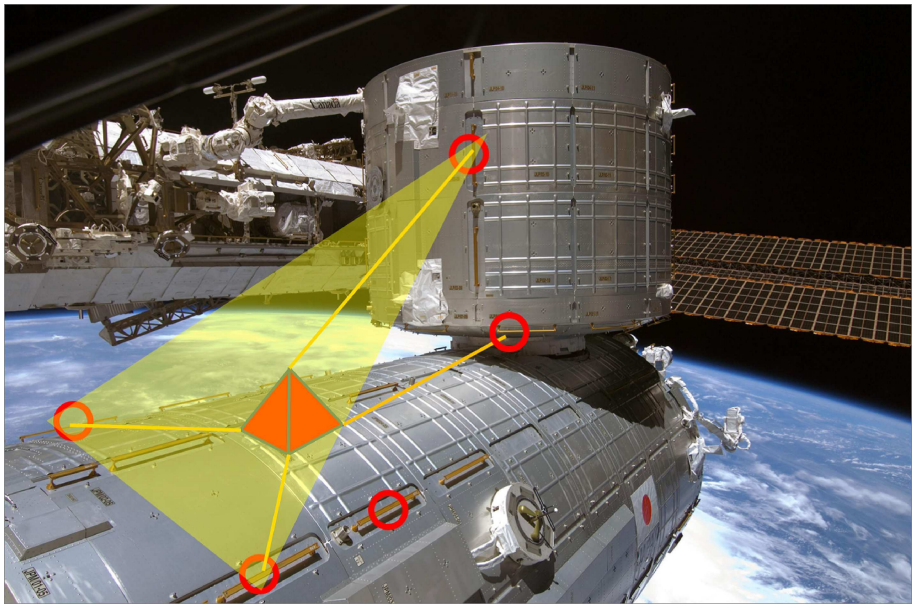


Fig. 2.12　船外移動イメージ図

## 2.6　本論文で扱うモデルと仮定

本小節では，本論文で対象とするテザー移動ロボットの移動モデルを定義する．前節で，Tether based locomotion は Cable Driven Parallel Manipulator の運動と近似できるとし，CDPM の数理モデルを Tether based locomotion の力学モデルと提案した．CDPM の数理モデルは，ロボット本体とテザー，壁面の三要素によって構成される．それぞれについて，剛体や弾性体，多リンク系および柔軟構造物でモデル化される．本論文では基本的な問題設定として，以下の点を仮定する．

1. 壁面は基準座標に固定された剛体とし，テザーの端点は固定とする．
2. ロボット本体は，重心とテザーの端点を内包した剛体と考える．
3. リール機構やマニピュレータの反トルクは，無視する．
4. テザーは，圧縮方向について弾性を持たない非線形バネとし，緩み状態では張力はないとする．
5. ロボット本体，テザー，壁面は慣性空間上で外力の作用しない系とし，力学的保存則が成立する．

仮定 3 について，リール機構やマニピュレータのトルクは本来無視できないが，軌道上作業における反力や反トルクをマニピュレータやリアクションホイール，CMG の協調制御によって打ち消せることが指摘されており，問題の簡略化のために本論文では上述した手法によって無視できるとした．[54]

以上の定義に基づき，本論文では Fig. 2.13 に示す n link 系の数理モデルを扱う．テザーには 1 から n まで数字が割り当てられ，各テザーの端点は本体と壁面へそれぞれ連結され

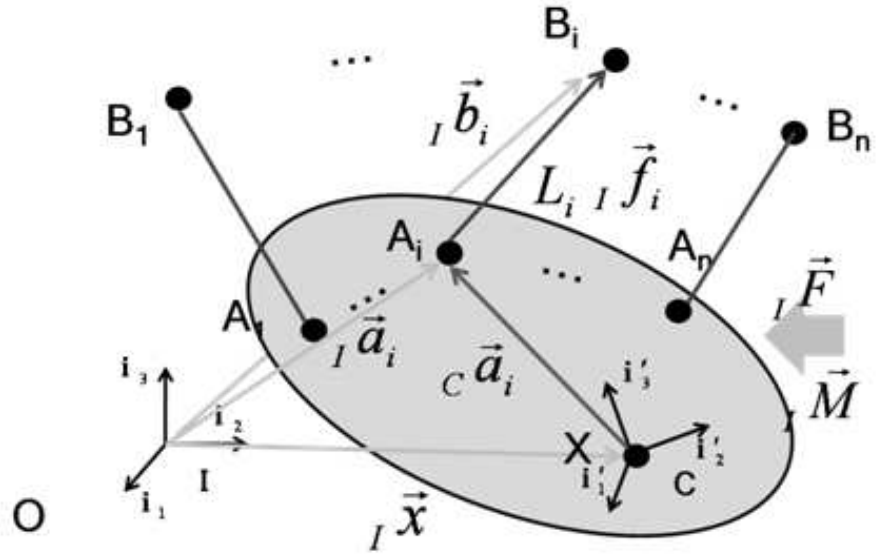



Fig. 2.13 CDPM 数理モデル

る．ロボット本体の位置と姿勢は，慣性座標系 $I : \boldsymbol{i_1}, \boldsymbol{i_2}, \boldsymbol{i_3}$ 上の重心位置 ${}_I\vec{x} = (x, y, z)$ と，重心を原点とするロボット座標系 $C : \boldsymbol{i'_1}, \boldsymbol{i'_2}, \boldsymbol{i'_3}$ で示す．なお，慣性座標とロボット座標系の回転はクォータニオン $\boldsymbol{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4 \quad ]$ もしくは余弦行列 $\boldsymbol{C}$ で表す．また，i 番目のテザーの長さと張力を $L_i$ と ${}_I\vec{f_i}$ で表し，ロボット本体と壁面の端点を $A_i$，$B_i$ として，それぞれの座標を ${}_C\vec{a_i}$ と ${}_I\vec{b_i}$ とする．なお，前の添字は座標系を示す．Fig. 2.13 は一般的な CDPM のモデルとして，外力および外トルクを ${}_I\vec{F}$ と ${}_I\vec{M}$ と定義してある．

CDPM の挙動は，テザーの長さと張力で決まる．一般的に，並列機構は順運動解の導出が難しく，逆運動解の導出は容易である．しかし，テザーを用いることで Eq. 2.1 で示すようにテザーの長さと張力は，本体の位置と姿勢に依存する非ホロノミックな拘束といえる．よって，CDPM の運動はテザー要素のみでは不可積分であり，厳密な解の導出は困難である．なお，Eq. 2.1 中の $L_{i0}$ はテザーの初期長を，$\Delta L_i(f_i)$ は張力による伸びを意味する．

$$
\begin{aligned}
0 &= \left|\left| {}_I\vec{b_i} - {}_I\vec{a_i} \right|\right| + L_{i,0} - L_i - \Delta L_i(f_i) \\
0 &= -(L_i - L_{i0}) + \left|\left| {}_I\vec{b_i} - {}_I\vec{a_i}(\vec{x}, \boldsymbol{q}) \right|\right| - \Delta L_i(L_i, {}_I\vec{x}, \boldsymbol{q}, {}_I\ddot{\vec{x}}, \ddot{\boldsymbol{q}})
\end{aligned} \tag{2.1}
$$

CDPM の挙動に対する厳密な解の導出はできないが，テザーの伸びが長さに比べて十分に小さく，テザーに張力が負荷されてる場合，CDPM の逆運動解は Eq. 2.2 で与えられる．

$$
\boldsymbol{i} = \boldsymbol{J} \begin{bmatrix} {}_I\dot{\vec{x}} \\ \boldsymbol{\omega} \end{bmatrix} \tag{2.2}
$$

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} -{}_I\vec{t}_1{}^T & \left({}_I\vec{t}_1 \times {}_I\vec{a}_1\right)^T \\ -{}_I\vec{t}_2{}^T & \left({}_I\vec{t}_2 \times {}_I\vec{a}_2\right)^T \\ \vdots & \vdots \\ -{}_I\vec{t}_n{}^T & \left({}_I\vec{t}_n \times {}_I\vec{a}_n\right)^T \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

$$\boldsymbol{\omega} = 2 \begin{bmatrix} q_4 & q_3 & -q_2 & -q_1 \\ -q_3 & q_4 & q_1 & -q_2 \\ q_2 & -q_1 & q_4 & -q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \\ \dot{q}_4 \end{bmatrix} \tag{2.4}$$

上式は，テザーの長さの変分を並べたベクトル $\dot{\boldsymbol{l}}$ と，重心位置の並進速度 ${}_I\dot{\vec{x}}$ とロボット座標系の角速度 $\boldsymbol{\omega}$ およびとロボットとテザーの幾何配置を記述した行列 $\boldsymbol{J}$ (Eq. 2.2) との関係式である．なお，ロボット座標系の角速度は，Eq. 2.4 で与えられる．これは，直列機構のヤコビ行列をもちいた逆運動解の導出方法と近似している．行列 $\boldsymbol{J}$ は，テザーの方向ベクトル ${}_I\vec{t}_i$ とロボットの端部の配置 ${}_I\vec{a}_i$ で構成される．

同様に，動力学方程式は Eq. 2.5 で示される．

$$\boldsymbol{M_I} \begin{bmatrix} {}_I\ddot{\vec{x}} \\ \dot{\boldsymbol{\omega}} \end{bmatrix} = \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f} + \begin{bmatrix} {}_I\vec{F} \\ {}_I\vec{M} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$\vec{f}_i = f_i \cdot \frac{{}_I\vec{b}_i - {}_I\vec{a}_i}{\left\| {}_I\vec{b}_i - {}_I\vec{a}_i \right\|} \tag{2.6}$$

上式の $\boldsymbol{M_I}$ は，移動体の質量と慣性を示す質量行列であり，弦材の張力を並べたベクトルを $\boldsymbol{f}^T = \{f_1 \cdots f_n\}$ とする．動力学も $\boldsymbol{J}$ の転置行列を用いた線形方程式で示され，CDPM は簡易的な式でモデル化できる．

以上の数理モデルに対して，本論文で扱うテザーロボットを以下に定義する．

CDPM の従来研究より，紐で拘束された物体の位置制御を行うためには，自由度に加えて 1 つ多くのテザーを必要とされる．すなわち，本体が質点の場合は平面移動では 3 本もしくは空間移動では 4 本，剛体の場合は姿勢を制御するために平面移動では 4 本もしくは空間移動では 7 本のテザーが必要である．なお，テザーの端点で囲まれた空間外への移動や宙返りのようにテザーの向きが反転する姿勢制御はできない．空間移動を行うためにはテザーは 7 本以上必要であるが，有人宇宙施設におけるテザーの固定は，二面もしくは三面から端点を選ぶ必要があるため，7 本も設置することは難しい．また，Tether based locomotion は伸展マニピュレータによる付替えも移動にかかるコストとみなせるため，テザーの数が増えることは移動のコスト増に直結する．そこで，本研究では，テザーの数が空間に固定できる最小の数で移動するロボットとして，Fig. 2.14 に示すようなテザー移動ロボットを目標とする．

テザーの緩みが生じない系を仮定した時，自由度以下のテザーの数で拘束されたロボットの位置，姿勢には制約が生じる．最小の四本で構成された場合，紐の緩みが生じない系

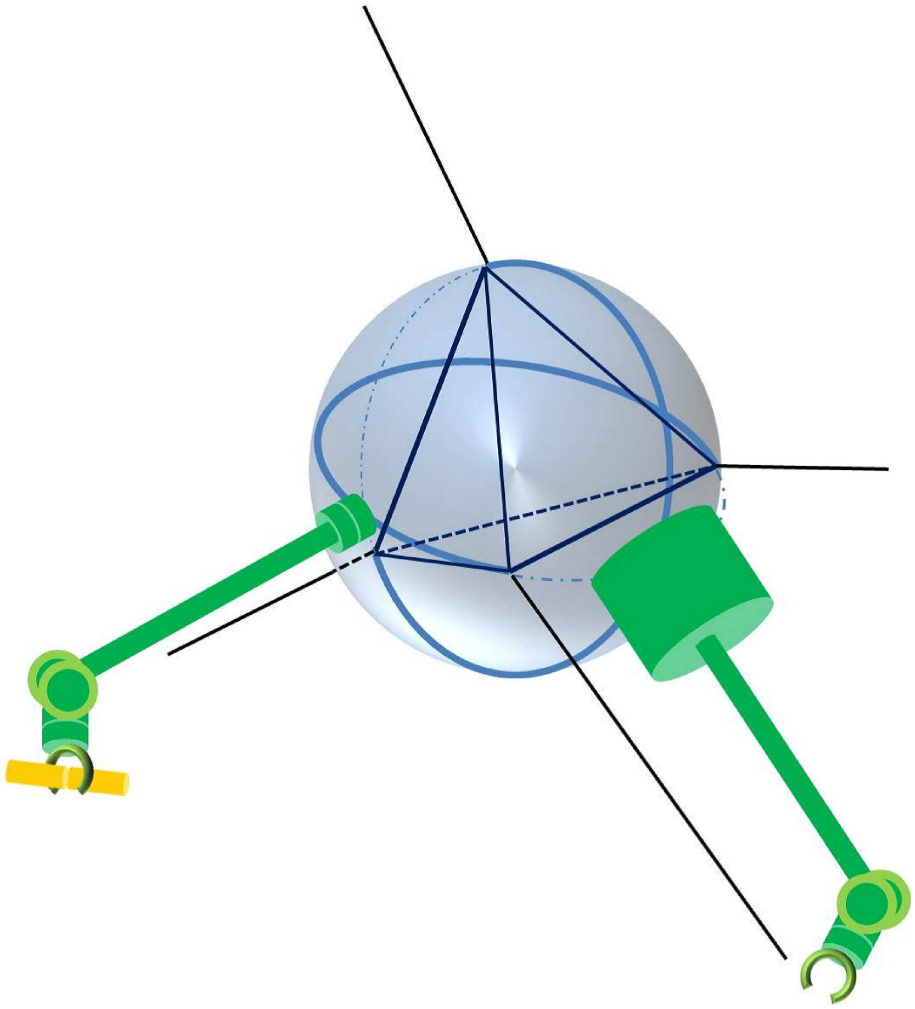


Fig. 2.14　テザー移動ロボット

では剛体が質点と変わらない数で拘束されることからある位置について姿勢は一意に定まる．逆に，ある姿勢では位置は一意に定まり，ロボット本体の位置についてテザーの緩みが生じない系は唯一の解をもつ．そこで，本研究では，空間移動では四本をテザー移動に必要な紐の最小構成として，Tether based locomotion の移動制御則を検討する．

テザー移動ロボットは，物資の運搬や作業を考慮して，マニピュレータを搭載している．物資の運搬や作業時のマニピュレータの操作によって，ロボット本体の重心位置は初期状態と異なる位置にある．そのため，テザー移動ロボットの重心位置は任意の点とし，正四面体の重心点に対して偏差に対して可制御の必要がある．また，計算の簡略化のため，端点の位置誤差やリールのテザー長の伸展誤差はモデルに含まない．それらは，数値解析もしくは実験において，テザーのダイナミクスに影響を与え，テザー張力に含まれる外乱として扱われる．

## 2.7 まとめ

本章の要点を以下にまとめる.

- 従来の宇宙ロボットの移動手法について評価し，環境適合性や故障耐性，緊急対応の制約からテザーを用いた移動手法が適切であることを示した．また，宇宙および地上のテザーを用いた移動手法を紹介し，宇宙飛行士の支援に適用するためには，弦材の初期配置を能動的に変更する機能が必要であることを示した．以上より，伸展するマニピュレータを用いてロボット自身がテザーを設置し，テザーの協調制御で移動する手法「Tether based locomotion」が，宇宙飛行士支援ロボットの移動手法として最適であるとした.

- 「Tether based locomotion」の機能を明らかにし，研究の課題を分類した．とくに，移動体の制御則は，従来のテザーを用いた移動手法と異なり，テザーの付替えに対応した任意のテザー配置で適用されること，船内や船外の環境よりテザーの数が少ないほうが望ましいことから，移動体の構成も含めた全く新しい手法が必要とされると述べ，移動体の制御則の確立を本研究の目標と定めた.

- 本論文では，宇宙飛行士支援ロボットの移動機能を確立するために，(1) 空間に対して本体を拘束できる最小のテザーで支持され，(2) 移動中にテザーの緩みが生じない状態を制御の条件とする，(3)CDPM の数理モデル (ロボット本体、テザー、壁面で構成) を元に運動学および動力学をモデル化することができるロボットを「テザー移動ロボット」と定義し，テザーの制御による移動手法を示すことで,「Tether based locomotion」の移動体の制御則を確立するとした.

# 第3章　テザー移動ロボットの移動制御

## 3.1　まえがき

本章では，テザー移動ロボットの移動制御について議論を展開する．

前章において，テザー移動ロボットの移動制御は，空間に対して本体を拘束できる最小のテザーをもちいて，テザーの緩みが生じない状態を維持しながら移動することが要求されることを示した．一般的に，テザーを用いた移動体の運動は，本体の運動量 (加速度，角加速度) およびテザーの張力と外力で表されるが，テザー張力の方向や大きさは本体の位置と姿勢およびテザー長によって定まるため非ホロノミック系となり，張力によるフィードバック制御では移動制御は困難とされて，従来の研究では，テザーに緩みが生じない状態を制約としたモデルをもちいた逆運動学や逆動力学の解を求め，テザー長を制御することで移動を実現している．テザーが空間の自由度と剛性を併せた 7 本 (平面移動の場合は 4 本) より多い場合，完全拘束 CDPM(および冗長駆動 CDPM) と分類され，任意の位置と姿勢に対して，テザーに緩みが生じない状態が得られるが，テザーがそれより少ない場合 (劣駆動 CDPM と分類)，位置に対して安定な姿勢は制限される．とくに，テザー移動ロボットのように最小のテザーで構成される場合，位置に対して安定な姿勢とテザー長は一意に定まる．通常，劣駆動 CDPM は，重力もしくは浮力などの外力によって，空間に静止させるが拘束して利用することはない．そのため，テザー移動ロボットのように空間に拘束しながら移動を行う劣駆動 CDPM の移動制御には，まったく新しい制御手法が必要とされる．

本章では，空間に拘束された状態として静安定状態を仮定し，数値解析により本体の位置と姿勢を算出してテザー長制御を行う「静安定解析によるモデルベースド制御」を提案し，テザー移動ロボットの移動制御とする．

まず，本論文ではテザー移動ロボットの空間移動制御を対象として，テザー 4 本の最小構成の移動体に対して静安定解を導出する手法として，反復法により運動方程式を満たす位置，姿勢，テザー長およびテザー張力の比を算出する方法を提案し，解の収束性を評価する．次に，モデルベースド制御手法をテザー長制御に適用する方法として，ロボット本体の移動経路に対して静安定解析を逐次行ってテザー長を算出する「作業空間における逐次制御手法」を提案する．また，提案する移動制御手法を宇宙ロボットの遠隔運用に適用するための低コストな制御手法として，移動の始点と終点に対してテザー長を算出し一つを定負荷制御して緩みを補正しつつ残りをテザー長の差分値に対するフィードバック制御する「関節空間における定負荷テザー制御」を提案する．最後に，上述した移動制御手法を検証するため，CDPM の動力学シミュレータを開発して，移動軌跡やテザー長およびテザー張力の変化を評価し，前者が正確な軌道追従制御に適していることと，後者がロバストな制御手法であることを示す．

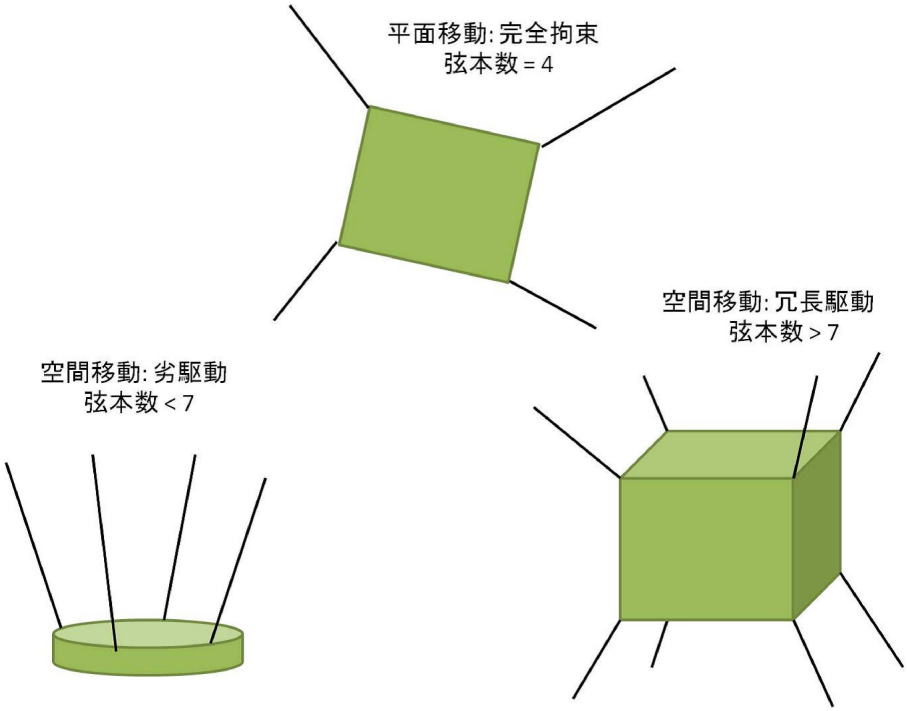



Fig. 3.1 CDPM Class

## 3.2 地上の CDPM の移動制御

CDPM は，紐の数によって制御システムが規定され, 一般的に移動空間の自由度より 1 本多い数で拘束された状態を完全拘束とし，それより多い場合が冗長駆動，少ない場合が劣駆動とされている．(Fig. 3.1)

CDPM モデルをもちいた移動体は，並列機構の特性をもつことから，順運動学および順動力学の解を求めることが困難である．一方，並列機構は逆運動学解を容易に求めることができるが，紐が剛性をもたないことから，単純な幾何情報から逆運動学解が成立しない場合が多い．しかし，紐に緩みが生じない状態の近傍では逆運動解や逆動力学解が成立することが指摘されており，従来の CDPM では紐による拘束を制約とした制御が使われている．[31] [32] [33] CDPM は，完全拘束および冗長駆動と劣駆動とで異なる制御則が適用される．前者は，紐で囲まれた空間の中では任意の位置と姿勢で，紐によって空間に固定することができるため，紐による拘束状態の判定は容易である．たとえば，運動学や動力学の線形写像行列の左零空間ベクトルを評価することで紐の緩み状態を判定し，問題がない場合は逆運動学解を適用する手法が提案されている．[34] 可動範囲の中では任意の位置，姿勢で拘束できることから，張力による伸びは微小であり，逆動力学を適用してモータのトルク制御によって本体の加速度制御などに適用されている．なお，初期位置と姿勢について精度の高い校正が求められるが，校正後は再現性の高い動きを達成する．一方，劣駆動 CDPM の移動体は，空間において位置と姿勢を拘束できる紐の配置が限られており，完全拘束や冗長駆動のように逆運動学解や逆動力学解を用いた解の導出は困難である．そのため，従来の劣駆動 CDPM の移動体は，重力や浮力などの一定方向の外力を用いて，

全ての紐に張力を負荷し，空間に安定させる制御手法をもちいてる．[51][26] これらの手法は，数 m を超える大きなシステムで適用されている．本体の位置や姿勢，端点の誤差に起因する紐の長さや張力の誤差は，自重によって力が釣り合う位置へ自然と調整されるため，ロバスト性が高い制御手法である．これらは，浮力と別方向の外力に対して，位置や姿勢を固定することができないため，無重力環境での利用は望ましくない．

宇宙空間において，テザーに緩みがある状態で拘束されている場合，本体の姿勢が拘束されないため，浮遊してマニピュレータ先端が機器と衝突する危険性やテザーが本体かリール機器内部で絡まる故障事象が発生しうる．

次節では，無重力下の劣駆動 CDPM の制御手法として，空間に本体を固定しながら移動する手法として，静安定解析によるモデルベースド制御を提案し，Tether based locomotion に適した移動制御とする．

## 3.3 静安定解析に基づく移動制御の提案

### 3.3.1 静安定解析によるモデルベースド制御の提案

劣駆動 CDPM は Eq. 2.1 で示されるテザー長の拘束条件に加えて，Eq. 3.1 で示されるテザー張力の拘束条件が要求されるため，CDPM の動力学は不可積分であり，テザー移動ロボットの移動は非ホロノミックな制御系である．

$$f_i(^{\forall}t) \geqq 0 \tag{3.1}$$

非ホロノミックな制御系は，車輪型移動ロボットの移動制御やフリーフライングロボットの先端位置決めなど多くの研究がなされている．[55] [56] [57] 非ホロノミックな制御系の特徴は，フィードバック制御による位置制御が困難なことが挙げられる．[58] [59] 実際，テザー移動ロボットの拘束条件は，一般化座標 $\boldsymbol{u} = (\vec{x}^T, \boldsymbol{q}^T, \boldsymbol{l}^T)^T$ に対して，$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{u}, \dot{\boldsymbol{u}}, \ddot{\boldsymbol{u}}, t) = \boldsymbol{0}$ の形で書き下される．非ホロノミックな拘束が一般化座標とその一階微分の線形方程式で示される場合，フィードバック制御の可制御性を満たす解は存在する．一方，二階微分を含む複雑な拘束を受ける場合，フィードバック則は適用できず，モデルベースド制御や最適制御が必要とされる．[58] [59] [60] [61] [62] [63] [64]

そこで，テザーに緩みが生じない状態を数値解析によって算出することで，劣駆動 CDPM において空間に本体を固定しながらテザーを制御する手法として，ロボット本体の移動を静安定の釣合条件で連続でモデル化する手法を提案する．CDPM の移動速度が十分小さい場合，移動は静力学解で近似できる．劣駆動 CDPM の静安定状態は，テザーは常に張力が負荷されているため，空間にほぼ固定しながら移動しているとみなせる．静安定状態の一般化座標 $\boldsymbol{u}$ を目標値としたテザー制御を連続して行なうことで，Tether based locomotion の移動制御とする．

### 3.3.2 テザー移動ロボットの静安定解析手法

本節では，テザー移動ロボットの静安定解析手法を説明する．静安定状態では加速度および角加速度の成分はすべて 0 となるため，運動方程式 Eq. 2.5 より Eq. 3.2 の線形方程式

が与えられる．

$$\mathbf{0} = \boldsymbol{J}^T \boldsymbol{f} \tag{3.2}$$

ここで，Eq. 3.2 は同次方程式であり解空間を形成するため，張力ベクトル $\boldsymbol{f}$ は一意に定まらない．そこで，両辺を $f_n$ で割り，行列 $\boldsymbol{J}$ および張力ベクトル $\boldsymbol{f}$ の n 番目の成分を抜き出すと以下の式が与えられる．(Eq. 3.3)

$$\mathbf{0} = \begin{bmatrix} -{}_I\boldsymbol{t_1} & \cdots & -{}_I\boldsymbol{t_{n-1}} \\ {}_I\boldsymbol{t_1} \times {}_I\boldsymbol{a_1} & \cdots & {}_I\boldsymbol{t_{n-1}} \times {}_I\boldsymbol{a_{n-1}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1/f_n \\ \vdots \\ f_{n-1}/f_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -{}_I\boldsymbol{t_n} \\ {}_I\boldsymbol{t_n} \times {}_I\boldsymbol{a_n} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

静安定解析は，Eq. 3.3 を満たす一般化座標 $\boldsymbol{u}$ と張力比ベクトル $\boldsymbol{f'}$ を同定する線形逆問題となる．このとき，張力ベクトルを規格化した基準張力 $f_n$ を既知量とし，方程式はテザー長の拘束条件式と運動方程式より導出した Eq. 3.3 と併せて $2n-1$ が与えられることから，一般化座標 $\boldsymbol{u}$ のうち，3 つを定義することで，残りの一般化座標 $\boldsymbol{u}$ と張力比ベクトル $f'$ を同定できる．次節では，一般化座標 $\boldsymbol{u}$ のうち，位置 $\vec{x}$，姿勢 $\boldsymbol{q}$ のいずれかを仮定することで張力比ベクトル $\boldsymbol{f'}$ を導出する手法を示す．

### 3.3.3 反復法による静安定解導出

本節では，位置 ${}_I\vec{x}$，姿勢 $\boldsymbol{q}$ について，それぞれ Eq. 3.3 を評価関数とした反復法によって，静安定解析を行う手法を示す．アルゴリズムの概要を以下に示す．(Fig. 3.2)

**1. 目標値と初期値の設定**

位置，姿勢，テザー長いずれかについて，一般座標系へ目標値を与える．残された位置と姿勢について，初期値を定め，テザー長の拘束条件式よりテザー長とテザーの方向ベクトルを算定する．

**2. 基準張力の設定**

テザーの方向ベクトル同士で互いに内積をとってベクトルとし，その大きさを求める．その値が最も大きなテザーを最も張力が大きいテザーとして基準張力と定める．

**3. 張力比ベクトルの推定**

Eq. 3.3 を並進成分と回転成分に分け，並進成分について逆行列を求めて張力比ベクトルを算定する．

**4. 仮想トルクの算出**

算出した張力比ベクトルを Eq. 3.3 の回転成分に代入し，仮想トルクとして算出する．仮想トルクが十分小さいとき，ロボット本体は静安定状態にあると判定する．

**5. 一般化座標の更新**

仮想トルクが大きい場合，仮想トルクより一般化座標を更新し，アルゴリズムの 2 から 4 を反復する．

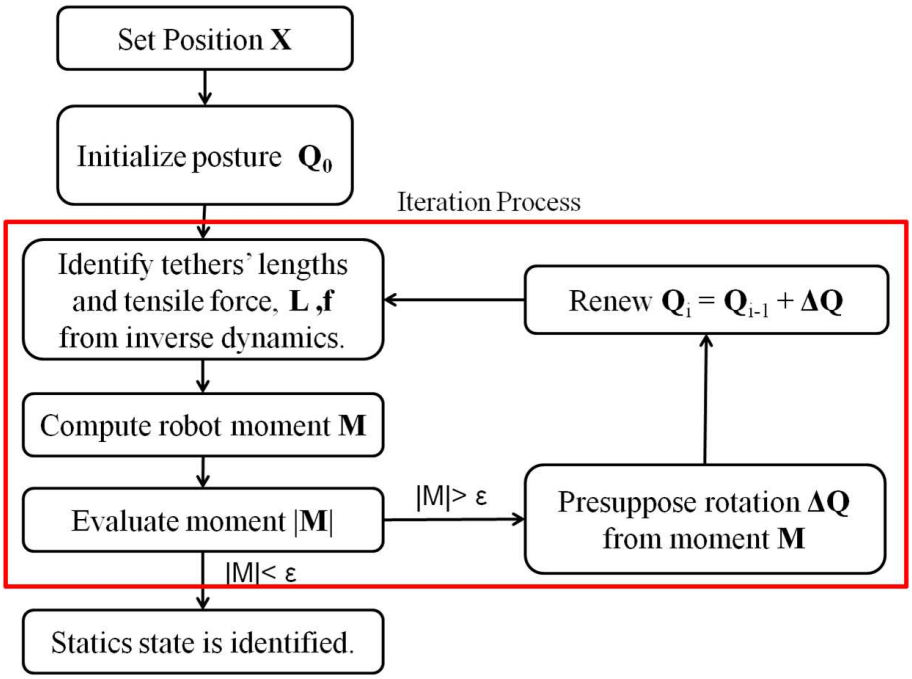



Fig. 3.2 静安定解析の反復法 (位置)

Table 3.1 静安定解析の反復法

| | |
|---|---|
| 位置指定 | 仮想トルクの方向ベクトルを固有軸 $\boldsymbol{a} = (a_1, a_2, a_3)$ として回転角 $\theta$ の回転をロボット本体に加える．ロボット本体の姿勢 $\boldsymbol{q}$ は Eq. 3.6 に示す式によって更新する．アルゴリズムの繰り返しに伴って回転角 $\theta$ を小さくし，静安定の条件を満たしたところで，その姿勢とテザー長を算定値とする． |
| 姿勢指定 | 姿勢に微小変位を加えたとき，位置の変位と仮想トルクとの関係を Fig. 3.3 に示す．線形方程式の逆問題を解くことで，仮想トルクより微小変位を算出する． |

アルゴリズムの 2 では，基準張力を最大張力とすることで，張力比の規格化を行っている．このとき，並進方向の力の釣合いの式 (Eq. 3.4) は，テザーの方向ベクトル $\boldsymbol{t}_i$ の内積をとると Eq. 3.5 の評価式が得られる．このとき，$f_k = f_{max}$ となる k において，$\{(f_k/f_{max})_j\}$ の大きさは最小値をとるため，評価式中の内積の項は最大となる．よって，全てのテザーについて内積をとり，ベクトルの大きさを比較することで張力が最大となるテザーを推定できる．

一般化座標の更新は，位置とテザーの場合は姿勢の微小回転，姿勢の場合は位置の微小変位を行っている．詳細を Table 3.1 に示す．

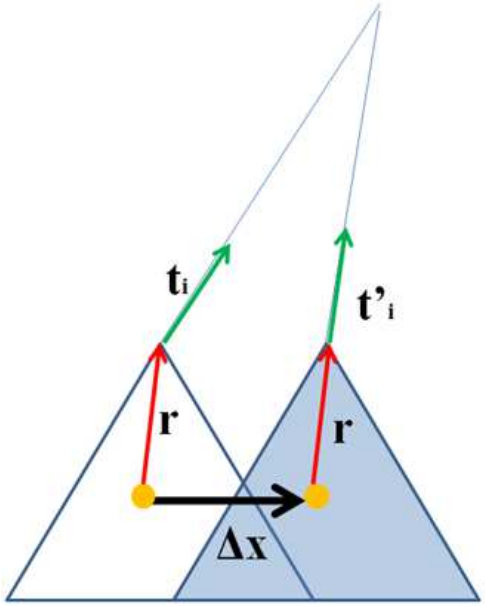
$$\mathbf{0} = f_i \boldsymbol{t}_i + \sum_{i \neq j} f_j \boldsymbol{t}_j \tag{3.4}$$

$$f_i/f_{max} = \{(-\boldsymbol{t}_i \cdot \boldsymbol{t}_j)_j\}^T \{(f_j/f_{max})_j\} \tag{3.5}$$

Table 3.2　シミュレーションモデルの緒言

| 本体質量 | 本体位置 | | |
|---|---|---|---|
| 10kg | [2750,1300,1500] | | |
| 端点 1(本体) | 端点 2(本体) | 端点 3(本体) | 端点 4(本体) |
| [212.1,-367.4,-150] | [-424.3,0,-150] | [212.1,367.4,-150] | [0,0,450] |
| 端点 1(壁面) | 端点 2(壁面) | 端点 3(壁面) | 端点 4(壁面) |
| [0,0,0] | [2250,3900,0] | [4500,0,0] | [2250,1300,7000] |

$$\boldsymbol{q} = \begin{bmatrix} q_1 & q_4 & -q_3 & q_2 \\ q_2 & q_3 & q_4 & -q_1 \\ q_3 & -q_2 & q_1 & q_4 \\ q_4 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \sin(\theta/2) \\ a_2 \sin(\theta/2) \\ a_3 \sin(\theta/2) \\ \cos(\theta/2) \end{bmatrix} \tag{3.6}$$




$$f_i' = f_i$$
$$L_i' = L_i$$
$$\mathbf{t_i}' = \mathbf{t_i} - \Delta\mathbf{x} / L_i$$
$$\mathbf{M}' = \sum \mathbf{r} \times f_i \mathbf{t_i}$$
$$\mathbf{M}' = \sum \mathbf{r} \times f_i \mathbf{t_i}'$$
$$= \sum \mathbf{r} \times f_i (\mathbf{t_i} - \Delta\mathbf{x} / L_i)$$
$$\Delta\mathbf{M} = \left(\sum f_i / L_i \cdot \mathbf{r} \times \Delta\mathbf{x}\right)$$
$$= \left[(f_i / L_i \cdot \tilde{\mathbf{r}})\right]\Delta\mathbf{x}$$

Fig. 3.3　姿勢指定の反復方法

この反復法は，計算機上で計算負荷の少ない解析として静安定解の導出に適用している．次節では，その収束性について評価する．

### 3.3.4　数値解析による収束性の検証

数値解析により，反復法の解の収束性を確認するため，Fig. 3.4 および Table 3.2 に示すテザー 4 本のモデル 4-link Tetrapod Model をもちいたシミュレーションモデルを開発した．

数値解析は，各反復において位置と姿勢の幾何情報よりテザー長とテザー張力比を算出し，仮想トルクを出力する．なお，テザーの伸びは計算の簡略化のため無視する．

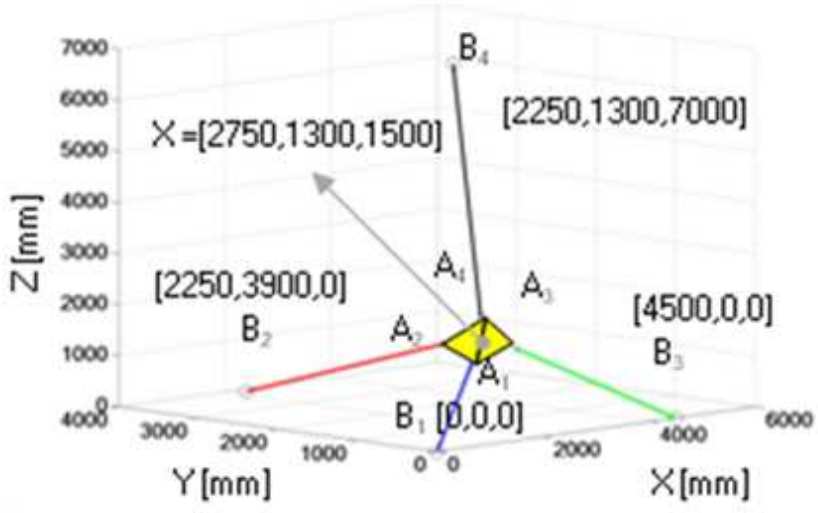



Fig. 3.4 シミュレーションモデル

まず，位置指定の静安定解の導出を検証した結果を Fig. 3.5 に示す．数値解析は，指定した位置について静安定解析を実施し，仮想トルクの閾値が $10^{-3}$，$10^{-4}$，$10^{-6}$ の場合の収束性を評価した．Fig. 3.5 に示すように，反復数と仮想トルクの閾値の対数は負の相関があり，計算コストの低いアルゴリズムといえる．本解析では，初期位置に 90deg の偏差を加えたものについて解析を行い，収束を確認したが，本論文で行う他の全ての実験でも提案する反復法による収束を確認している．

なお，実機での実装を考慮に入れて計算速度について評価を行った結果，$10^{-5}$ を閾値とした場合，汎用的なラップトップ PC で 20〜40msec の速さで収束したことから，30Hz の周期で静安定解析が可能であり，実機をもちいたモデルベースド制御に適用可能である．

次に，姿勢指定の静安定解の導出を検証した結果を Fig. 3.6 に示す．数値解析は，位置指定の静安定解の導出法を用いて算出した静安定解について，位置方向の偏差を加えたものに対して，姿勢を指定して静安定解析を実施し，仮想トルクが $10^{-3}$ 近辺に減少し，静安定解の位置へ収束することを確認した．しかし，$10^{-3}$ から $10^{-2}$ で仮想トルクが収束してしまい，位置指定の導出法に比べて精度に課題が残されている．これは，反復における位置の修正量が仮想トルクの大きさと同じオーダーであること，反復を繰り返すことで，変位の修正量に対してテザー長の変位の影響が無視できなくなったことが挙げられる．微細な偏差を打ち消すためにアルゴリズムの改善が課題である．

## 3.4 作業空間による逐次テザー制御手法

### 3.4.1 手法の説明

本節では，静安定解析によるモデルベースド制御をリール機構の制御へ適用するために，作業空間による逐次テザー制御手法を示す．ロボットの制御は，関節空間，作業空間のい

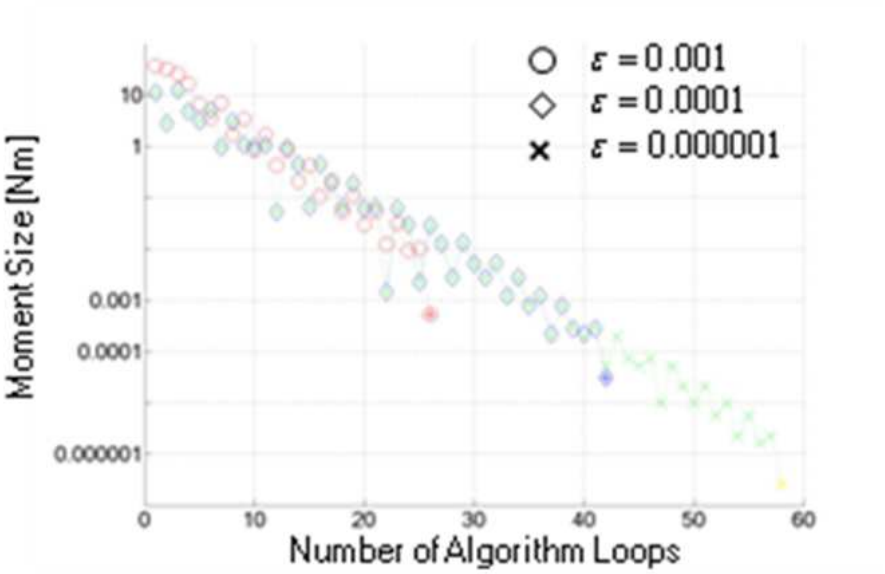



Fig. 3.5 数値解析結果 (位置指定)

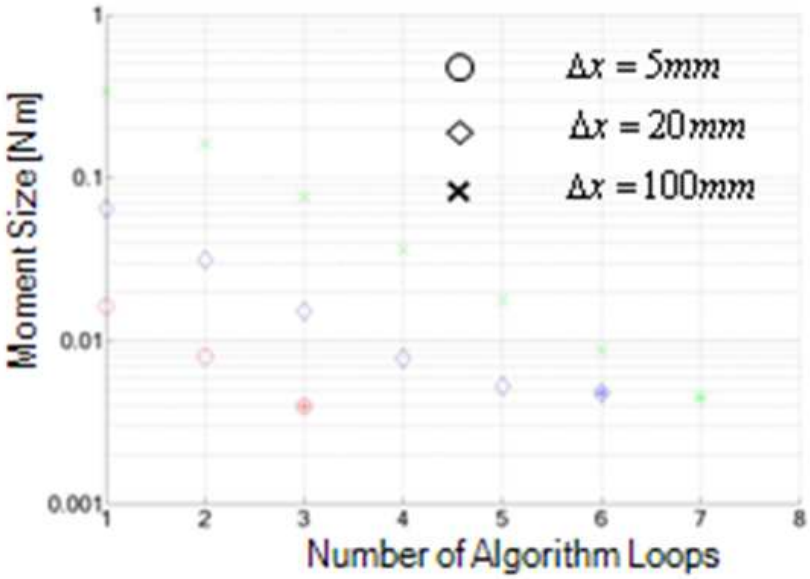



Fig. 3.6 数値解析結果 (姿勢指定)

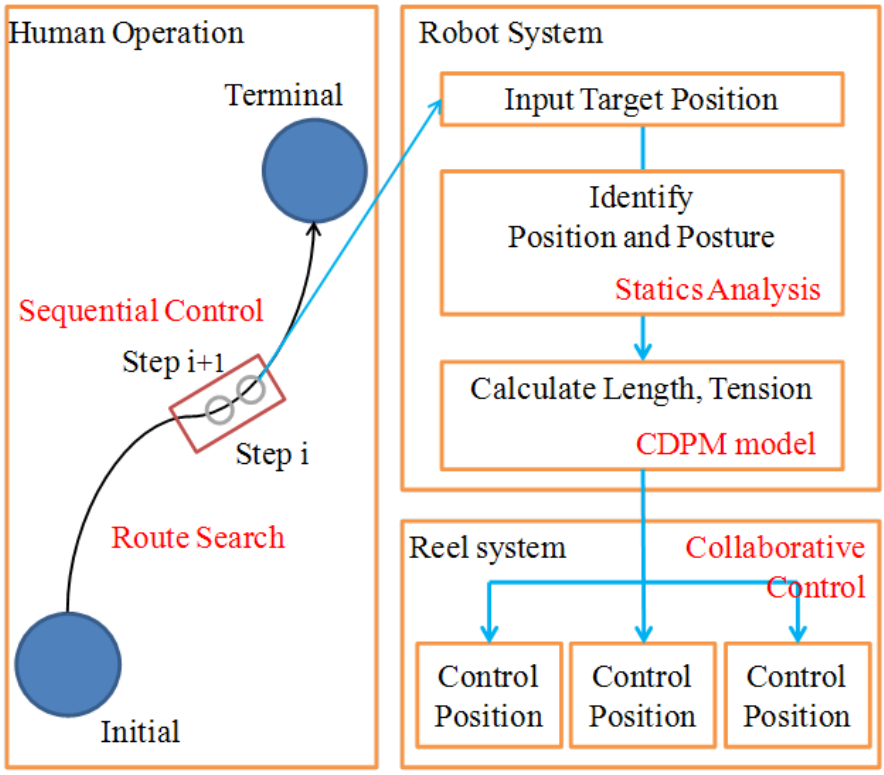



Fig. 3.7　作業空間による逐次テザー制御手法

ずれかで初期値から目標値へ制御履歴を与え軌跡を与えることで行われる．CDPM における関節空間を基準とした制御は，式 Eq. 2.2 の式に対して逆運動解を算出してテザー長の繰り出し速度に対してリール機構をフィードバックする制御が挙げられる．計算が容易でありシステムも単純であるが，移動全体に渡って速度と姿勢について，弦材の緩みや破断について別途検証が必要である．本論文では，静安定解析によるモデルベースド制御を行うが，移動の始点，終点に対する移動軌跡を与え，微小時間で離散化した点を作業空間における目標値として，リール機構の協調制御を逐次実行してテザー移動ロボットの移動制御とする．上述した制御手法を作業空間による逐次テザー制御手法と呼ぶこととし，Fig. 3.7 にアルゴリズムの模式図を示す．

手順の詳細を以下に示す．なお，静安定解析の逐次解析は移動前に作業空間に対して実施し関節空間における制御履歴を算出して記録する方法と移動中に実施し，リアルタイムで補正を掛ける方法が考えられるが，本論文ではリール機構の性能から前者を採用した．

1. マニピュレータによってテザーを展開する．

2. ロボット本体の移動軌跡を経路探索手法より求める．

3. 移動の目標速度より移動軌跡を離散化する．

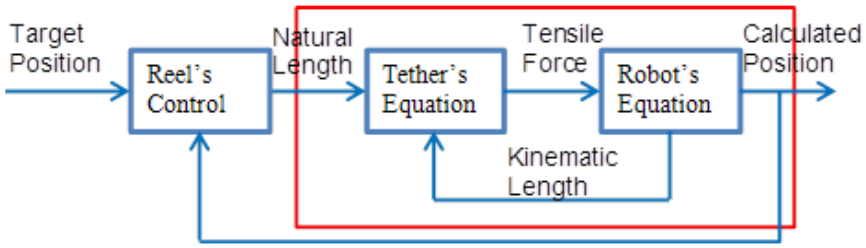



Fig. 3.8 Dynamics Simulator Block Diagram

Table 3.3 シミュレーションモデルの緒言

| 本体質量 [kg] | 慣性モーメント | 移動始点 | 移動終点 |
|---|---|---|---|
| 10 | 0.27 | [1400,-500,1000] | [600,-500,1000] |
| 端点 1(本体) | 端点 2(本体) | 端点 3(本体) | 端点 4(本体) |
| [141.4,-200,0] | [141.4,200,0] | [-141.4,0,200] | [-141.4,0,-200] |
| 端点 1(壁面) | 端点 2(壁面) | 端点 3(壁面) | 端点 4(壁面) |
| [2000,0,1200] | [0,0,800] | [1000,-2000,2000] | [1000,-1000,0] |

4. 離散化した各点について，位置指定の静安定解析を逐次行い，テザー長とテザー張力を算出する．

5. 算出したテザー長とテザー張力を目標値として，リールのフィードバック制御を個別に行う．

一般的に宇宙ロボットの移動は，安全性の観点から移動速度に制約が課せられている．たとえば，JEMRMS は先端移動速度 60mm/s(対象物 600kg 未満) であり，移動による振動を生じない速度に制限されている．そこで，Tether based locomotion をもちいた移動が 50mm/s を達成できるか，離散化によるモデル誤差について次節では数値解析をもちいた検討を行う．

### 3.4.2 シミュレーション

本節では，作業空間による逐次テザー制御手法をもちいた移動制御のシミュレーションを示す．以下に数値解析に用いた CDPM の数理モデルをもちいた動力学シミュレータのブロック図を Fig. 3.8 に示す．動力学シミュレータは，ロボット本体の運動方程式とテザーの物理モデル，リール機構の制御部によって構成される．ロボット本体の運動方程式は Eq. 2.5 に，テザーは Eq. 2.1 および物理モデルで示される．リール機構の制御部は，リール径を $r[mm]$，リール回転角を $\theta[rad]$ として，伸展量は $l_i = r\theta_i$ という簡易的なモデルをもちいた．

本節で扱うシミュレーションモデルを Fig. 3.9 と Table 3.3 に示す．

テザーの物理モデルは，Eq. 3.7 に示すバネダンパ系で近似し，パラメータは REX-J でもちいられたテクノーラ製のテザーを元に，弾性率 $K = 233[N/\%]$ および減衰率 $\gamma =$

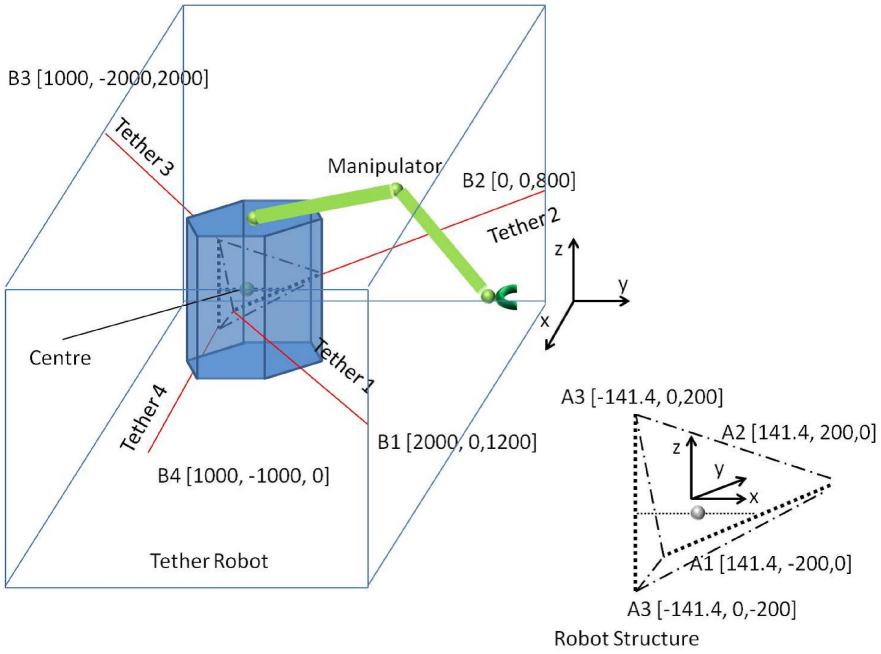



Fig. 3.9 シミュレーションモデル

$250[Ns/m]$ をもちいた．また，本物理モデルにおいて，静安定状態の時にテザーの伸び $\Delta L_i(f_i)$ は，Eq. 3.8 で与えられる．

$$f_i = K \times 100 \times (||{}_I\boldsymbol{b}_i - {}_I\boldsymbol{a}_i|| - (L_i - L_{i0}))/(L_i - L_{i0}) - \gamma \dot{L}_i \tag{3.7}$$

$$\Delta L_i(f_i) = (||{}_I\boldsymbol{b}_i - {}_I\boldsymbol{a}_i||/(1 + f_i/K/100)) \tag{3.8}$$

シミュレーションは直線軌道の移動を想定し，この軌道に沿って静安定解を導出し，リール機構の逐次制御を行う．本体の移動速度を 50mm/sec とし，移動中と移動後 20 秒の経過を観察する．数位解析を行った結果を Fig. 3.10 に示す．移動中のテザー長，テザー張力の履歴および目標軌道と算定された位置の誤差を Fig. 3.11，Fig. 3.12，Fig. 3.13 に示す．

同図より，指定した軌道に沿った移動を達成できていることが分かる．また，Fig. 3.12 より，本制御手法を用いて，テザーの緩みが生じない移動を達成していることがわかる．Fig. 3.13 より，移動開始時と移動終了時 (16 秒) で過渡的な振動が発生している．これは，移動軌跡を与えるに際して等速運動を仮定したためである．そこで，加速および減速を考慮に入れた移動制御を検討する．$6.25mm/s^2$ の等加速と $50mm/s$ の等速運動および $6.25mm/s^2$ の減速を 8 秒ずつ行った移動軌跡について，数値解析を行った結果を Fig. 3.14，Fig. 3.15，Fig. 3.16 に示す．移動軌跡との誤差が低減し，過渡的な振動が生じなくなったことがわかる．

ロバスト性の評価として，リール機構の制御に誤差を与えた場合の数値解析の結果を Fig. 3.17，Fig. 3.18，Fig. 3.19 に示す．モデルベースド制御は前述した速度履歴に従い，各リールは最大 $\pm 1[mm]$ のランダムノイズが加わったと仮定する．このとき，張力には

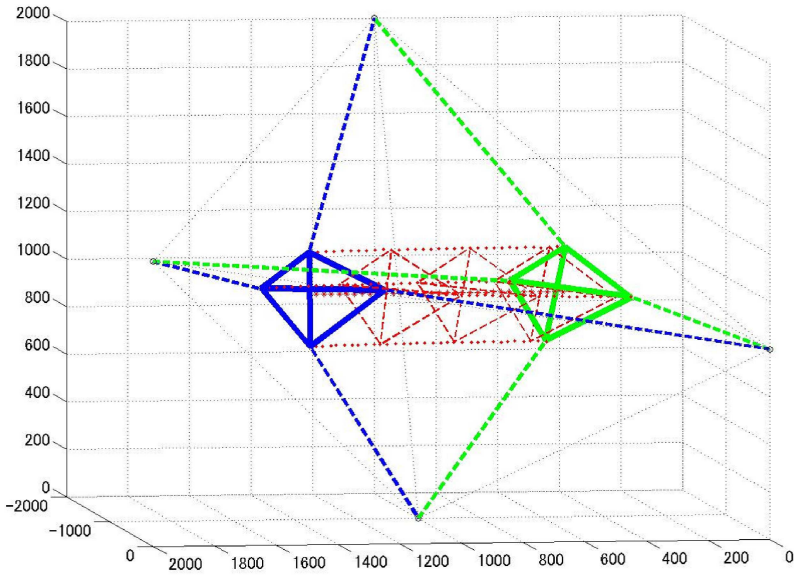



Fig. 3.10　数値解析結果 (移動軌跡)

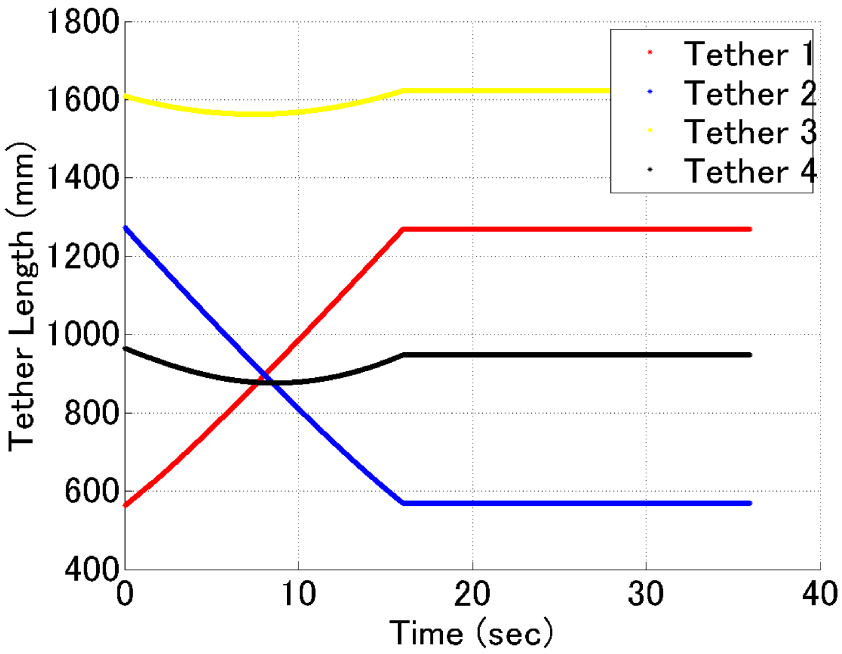



Fig. 3.11　数値解析結果 (テザー長さ)

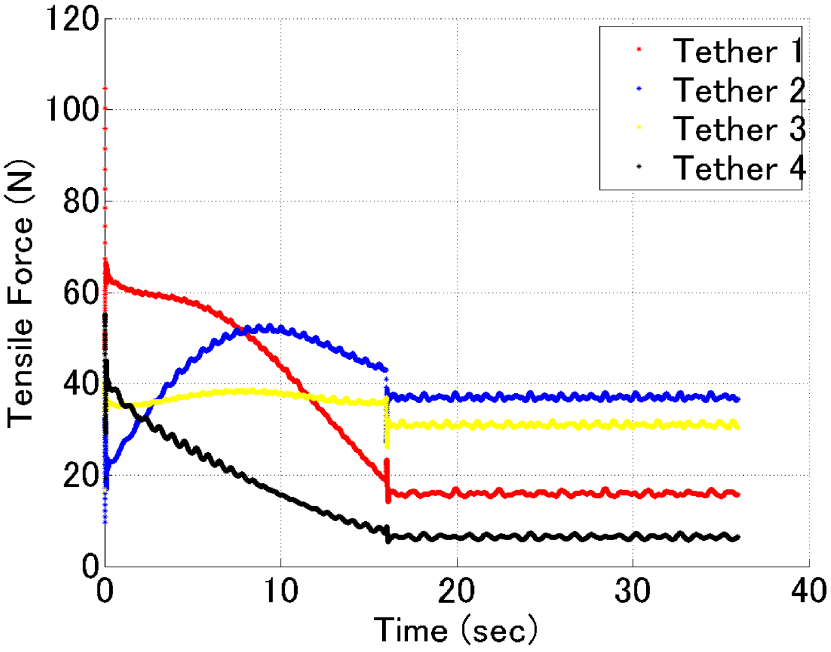



Fig. 3.12 数値解析結果 (テザー張力)

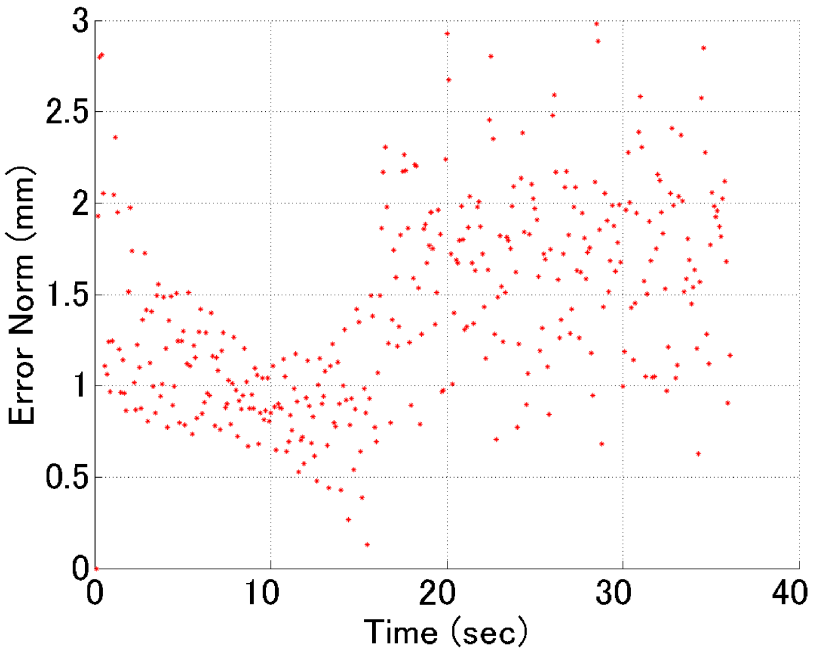



Fig. 3.13 数値解析結果 (目標軌跡との誤差)

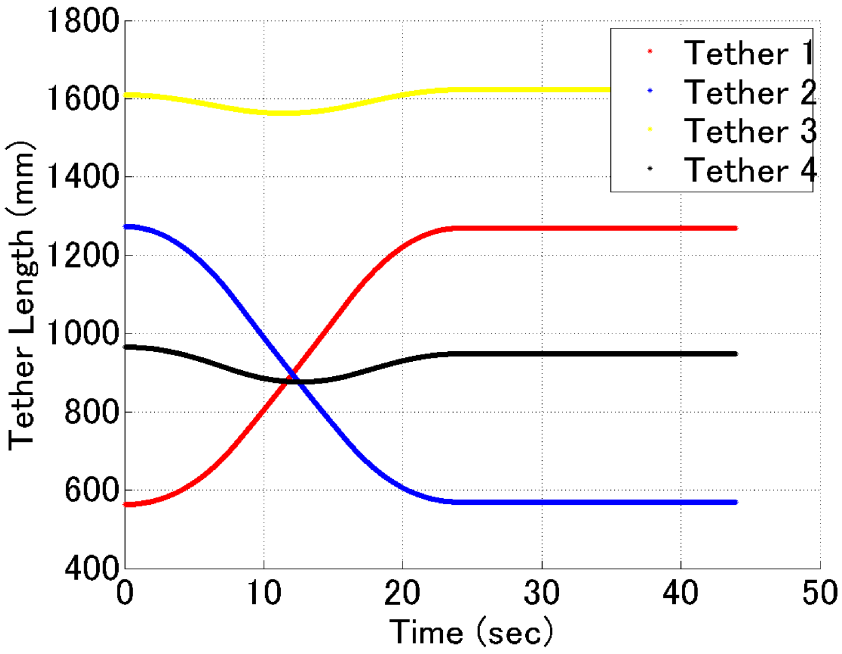



Fig. 3.14 数値解析結果 (テザー長さ)

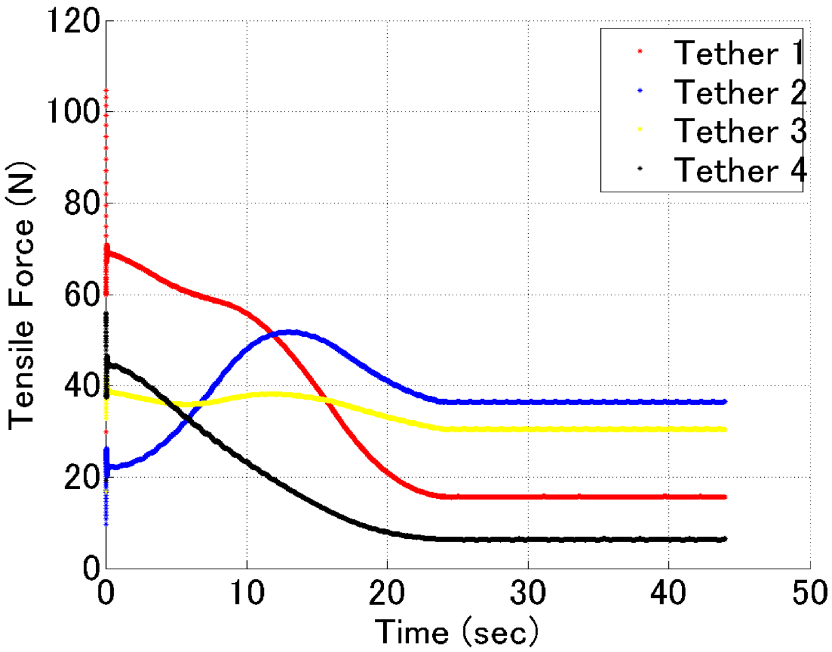



Fig. 3.15 数値解析結果 (テザー張力)

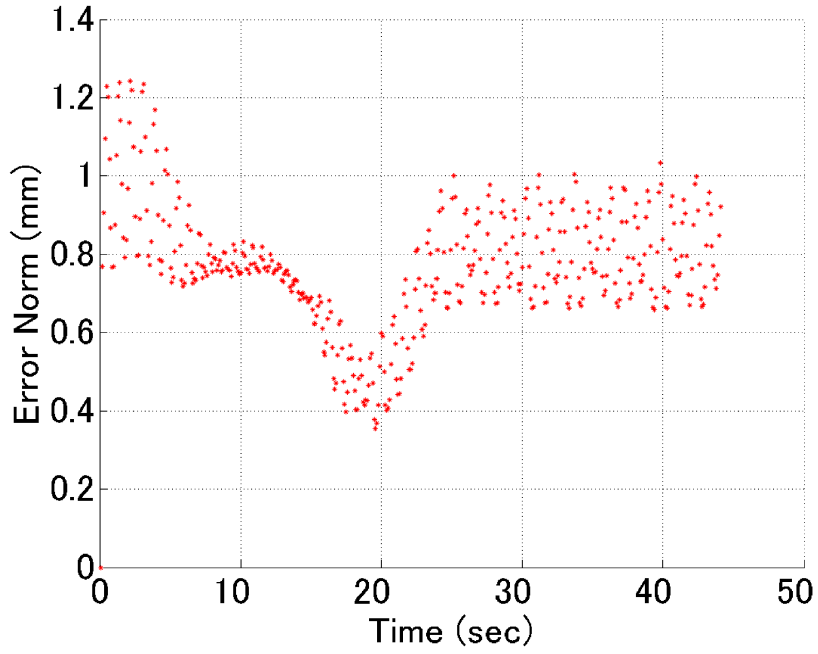



Fig. 3.16 数値解析結果 (目標軌跡との誤差)

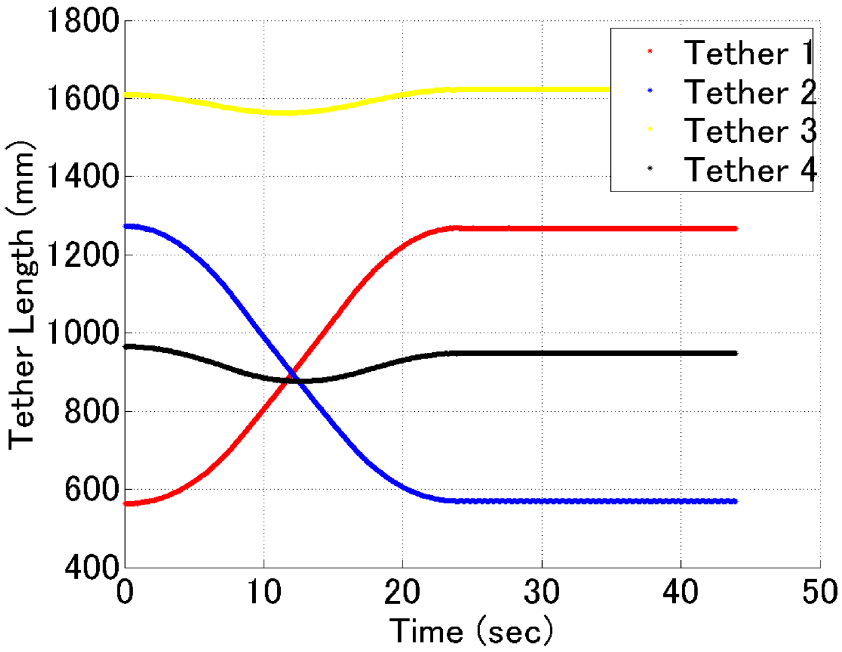



Fig. 3.17 数値解析結果 (テザー長さ)

60N 程度の誤差が生じ，移動後も重心の偏差が 6mm の振動を伴う．しかし，移動中にテザーが緩むことはなく，移動制御として十分なロバスト性を有しているといえる．

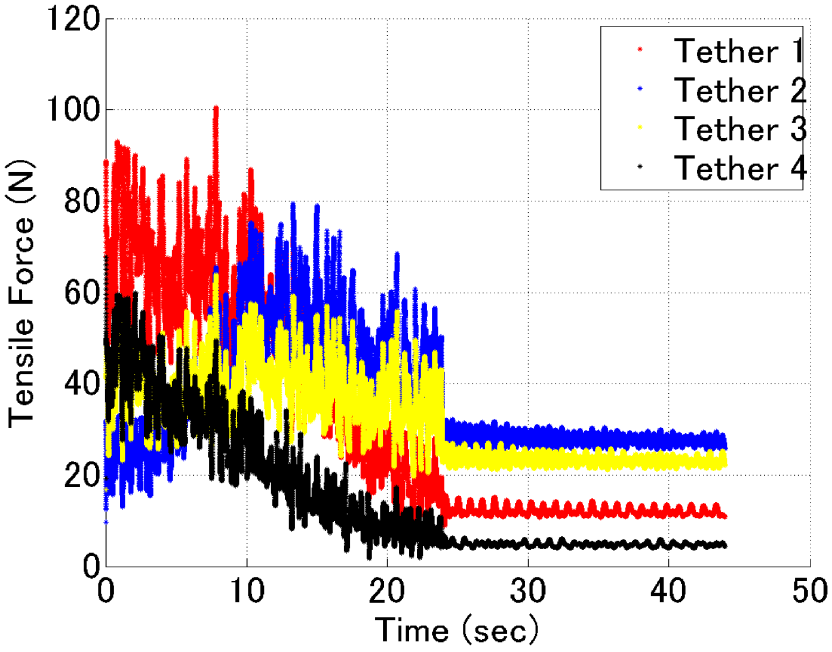



Fig. 3.18　数値解析結果 (テザー張力)

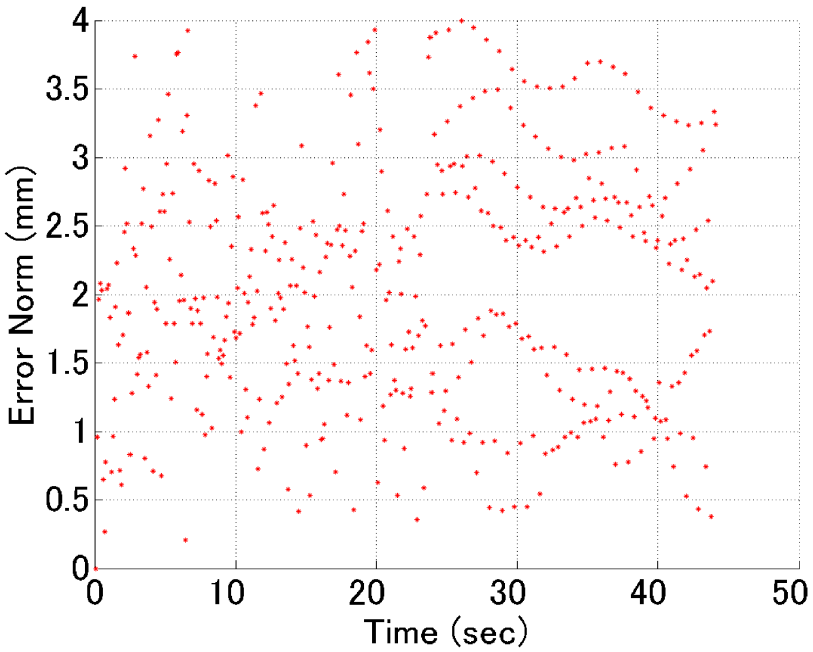



Fig. 3.19　数値解析結果 (目標軌跡との誤差)

このように，静安定解析によるモデルベースド制御を作業空間による逐次テザー制御手法に適用し，加速減速を考慮に入れた速度履歴を与えることで，テザーの緩みを補償した正確な軌道追従制御が可能となる．

## 3.5 関節空間による定負荷テザー制御手法

### 3.5.1 手法の説明

前節では，任意の移動軌跡を選択できる作業空間による逐次制御手法を示し，汎用性が高いテザー移動ロボットの移動制御手法を提案した．反面，Fig. 3.11 および Fig. 3.14 が示すように，リール機構には連続した滑らかな制御が要求される．一般的に，分解速度制御や分解加速度制御などロボットの操作は高い応答性を持つ逐次制御が行われている．しかし，宇宙ロボットのような遠隔操作を行う場合，地上の計算機から直接操作を行うことは困難である．ETS-VII の軌道上実証実験では，事前に地上の試験装置で入力したコマンドに従って関節角を制御する Supervised teleoperation が行われている．REX-J のリール機構も，事前に地上で検証したコマンドに従い，軌道上で目標の長さへ一斉に補間制御を行うことで実施している．しかし，運用制約の関係から，制御は簡易的な位置制御に限定され，逐次制御のような複雑な操作は不可能である．また，作業空間による逐次制御手法はモデル誤差に弱く，テザー端点の位置誤差によって緩みが生じた場合も対処は困難である．そこで，本論文では，REX-J のような簡易的なサーボ機構を搭載したリール機構でも実現できる移動制御則として関節空間によるテザーの制御手法を提案する．前節で言及したが，Tether based locomotion は非ホロノミックな制御系であるため，移動制御において始点と終点のテザー長に対して関節空間上でフィードバック制御を適用することは原則できない．しかし，紐に緩みが生じない場合は一般化座標のうち 3 つを定義すると残りの一般化座標を同定できるという性質があるため，平面移動ではテザーを 2 本，空間移動ではテザーを 3 本の長さを関節空間上で制御することで，作業空間上の始点と終点へロボット本体を移動させることができる．このとき，残された 1 本以上のテザーについては，リール機構の電流制御もしくは張力制御によってテザーに定負荷のフィードバック制御を適用し，緩みに対する補償を行う．このとき，移動中の本体位置と姿勢は指定できないことから，数値解析によって事前に衝突やリール機構の応答性などの確認が必要である．

本手法の概要を以下に示す．

1. マニピュレータによってテザーを展開する．

2. ロボット本体の始点と終点について静安定解析を行い，テザー長とテザー張力を算出する．

3. 始点と終点についてリールの巻き取り量を算出し，その差分を求める．

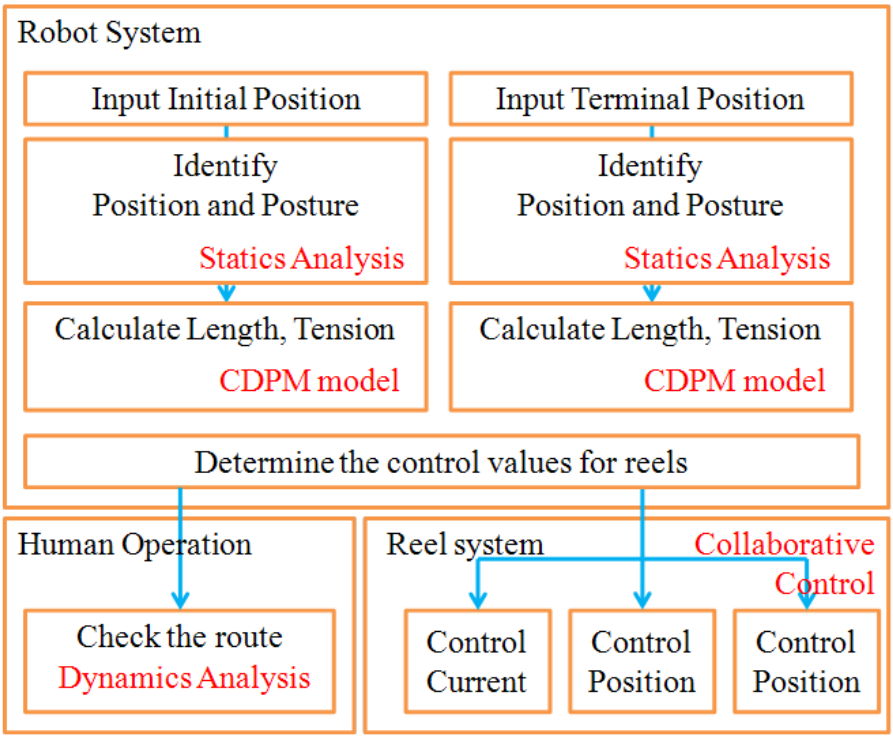



Fig. 3.20 Dynamics Simulator Block Diagram

4. 差分が負，すなわち巻取りを行うリール機構のうち，最も巻取量が大きいリール機構で電流制御もしくは張力制御を実施し，ロボット本体に常に張力を掛ける．

5. ロボット本体の移動時間を算出して，残りのリール機構について同時に差分値が 0 となるように位置制御を行う．

上述した制御手法を関節空間による定負荷テザー制御手法とし，Fig. 3.20 に REX-J のアルゴリズムを示す．

本手法は，REX-J や一般的な宇宙用マニピュレータのような簡易的なサーボ機構しか搭載していないロボットを対象とした制御であるが，逐次制御が可能なリール機構についても，適用可能である．

### 3.5.2 シミュレーション

本節では，動力学シミュレータをもちいた関節空間による定負荷テザー制御手法のシミュレーションを示す．

シミュレーションモデルは，前節と同じ Fig. 3.9 を用い，移動の始点と終点も Table 3.3 と同じとする．前節の解析結果 Fig. 3.14 より，最もリールの巻き取量が多いのはテザー 2

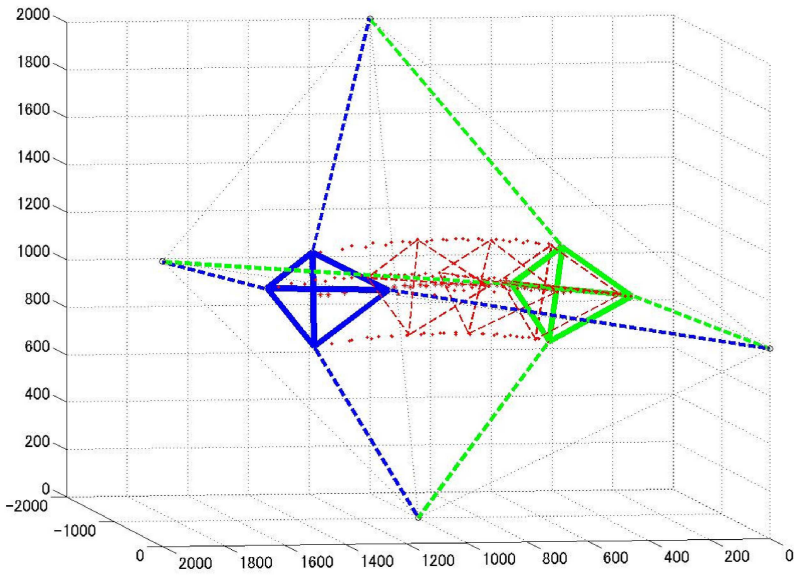



Fig. 3.21 数値解析結果 (移動軌跡)

Table 3.4 シミュレーションモデル (誤差有り) の緒言

| 端点 1(壁面) | 端点 2(壁面) | 端点 3(壁面) | 端点 4(壁面) |
|---|---|---|---|
| [1980,0,1200] | [0,0,850] | [1050,-2000,2000] | [950,-1000,0] |

である．そこで，テザー 2 を張力制御とし，残りのテザーについて位置制御を実施する．移動時間は，前節と同様 16 秒とする．

数位解析を行った結果を Fig. 3.21 に示す．移動中のテザー長，テザー張力の履歴を Fig. 3.22，Fig. 3.23 に示す．

同図より，数値解析の結果は良好といえる．Fig. 3.22 より，他のテザーが線形に変化しているのに対して，テザー 2 は非線形に変化していることが分かる．仮に，テザー 2 についても同様に線形に制御を行った場合，テザーは最大 90mm 以上の緩みが生じ，致命的な故障を引き起こす．

次に，リール機構およびシミュレーションモデルの壁面側のテザー端点に誤差を加えた場合 (Table 3.4) の解析結果を示す．移動の誤差は，終点において $(-20.6[mm], -12.1[mm], 15.9[mm])$ と誤差と同程度のオーダである．テザー張力の履歴 Fig. 3.26 によると，移動後すぐはテザーの緩みが生じていたが，移動中に紐の緩みを補正し，移動経路全体ではほとんど緩みなく移動していることが確認できる．そのため，本手法はロバスト性が高い制御手法といえる．

以上より，関節空間による定負荷テザー制御手法をリールの協調制御に適用することで，遠隔運用が可能な低コストのテザー制御によって，静安定解析によるモデルベースド制御を実現できることを示した．

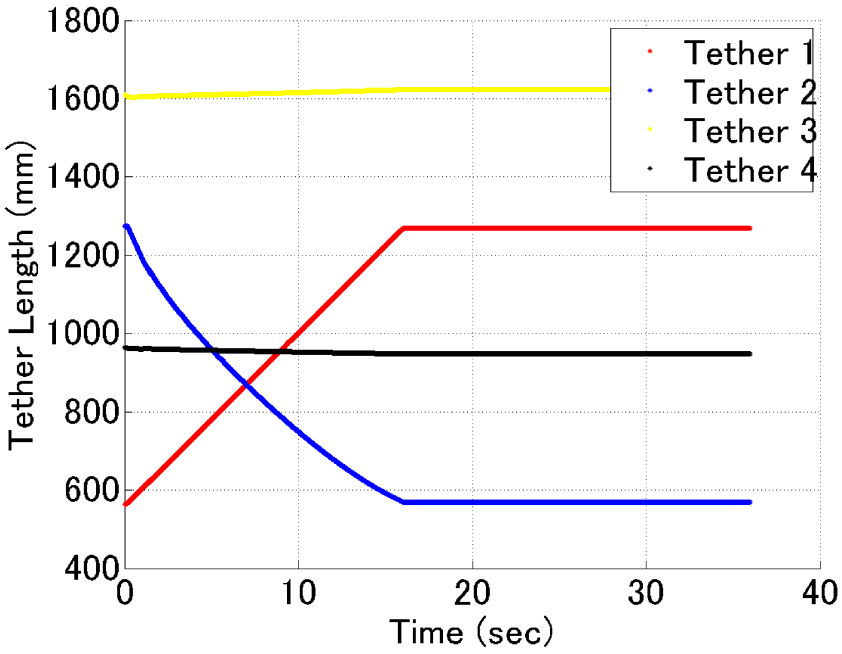



Fig. 3.22 数値解析結果 (テザー長さ)

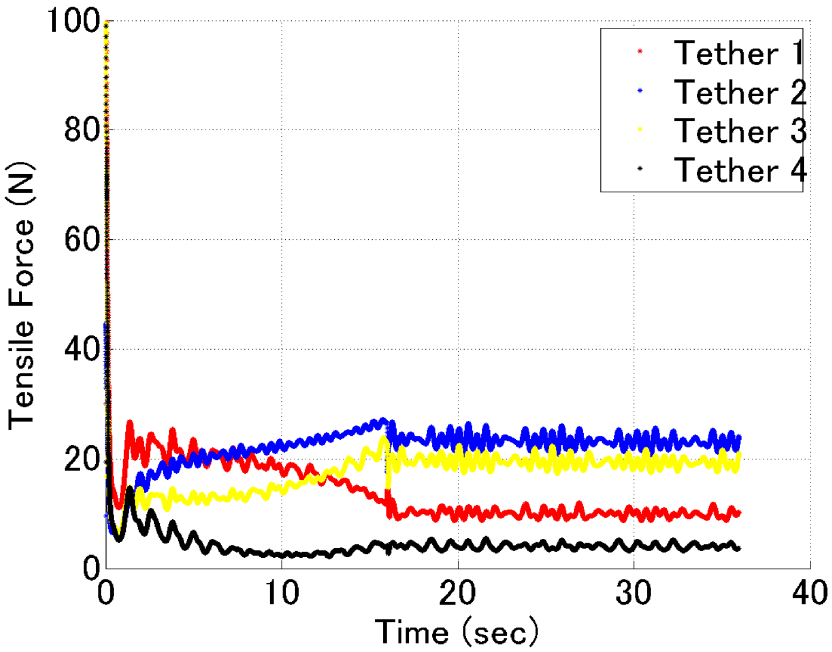



Fig. 3.23 数値解析結果 (テザー張力)

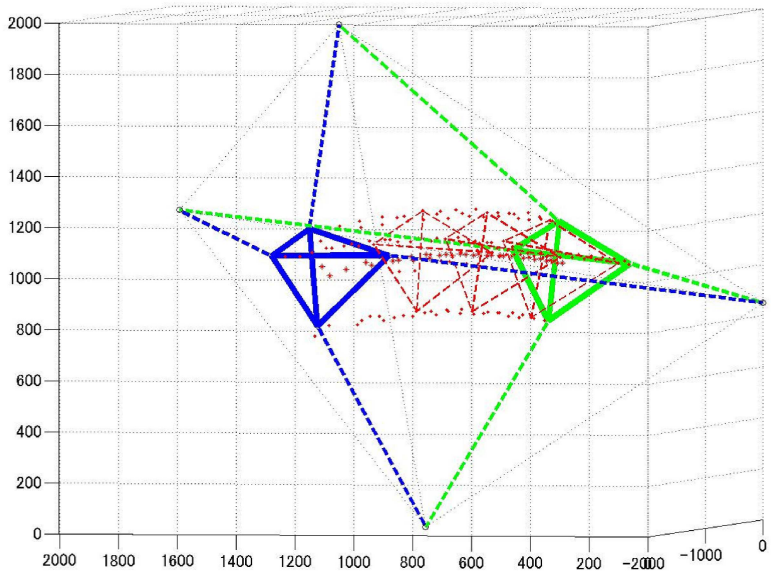



Fig. 3.24 数値解析結果 (移動軌跡)

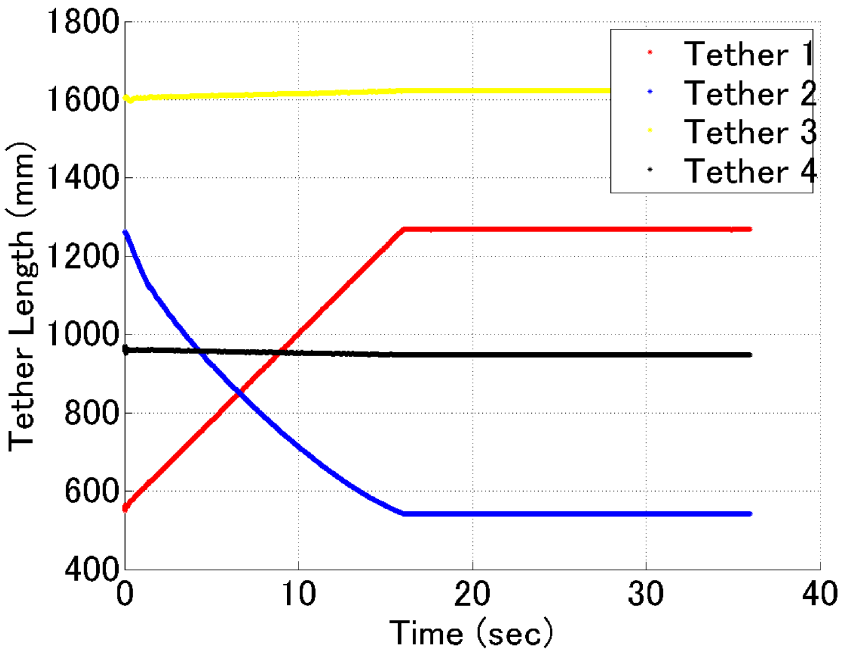



Fig. 3.25 数値解析結果 (テザー長さ)

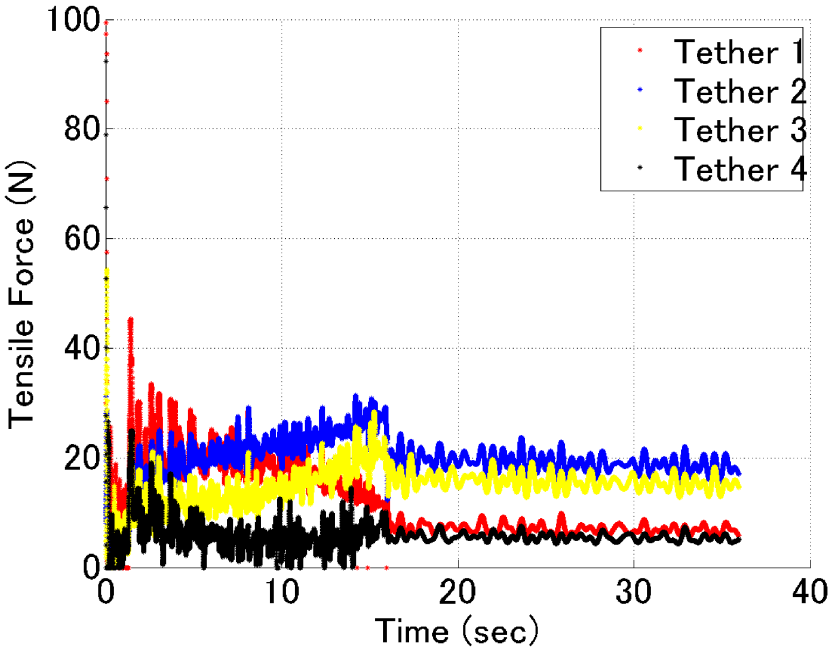



Fig. 3.26 数値解析結果 (テザー張力)

## 3.6 まとめ

本章の要点を以下にまとめる.

- テザー移動ロボットの移動制御には，従来の空間の自由度＋１本以上のテザーで構成された CDPM や重力による補償をもちいた懸架式の移動体の制御則は適用できず，まったく新しいテザーの制御則を必要とすることを述べ， テザーの緩みが生じない状態として静安定の状態を仮定し，目標位置に対する安定姿勢とテザー長をモデルより算出してテザー長制御を行う「静安定解析によるモデルベースド制御」を提案した.

- テザー移動ロボットのの静安定解析手法として，反復法により運動方程式を満たす位置、姿勢、テザー長を算出する方法を提案し，シミュレーションによって解の収束性が対数に比例することを示し，計算コストが少ない手法であることを確認した.

- 静安定解析によるモデルベースド制御をテザー制御に適用する手法として，目標の位置に対する移動軌跡に対して静安定解析を逐次実施しテザー長を制御する汎用性の高い手法として,「作業空間における逐次制御手法」を提案した．テザー移動ロボットの動力学シミュレーションで移動制御を実施し，JEM 船内と同等の空間を対象とした移動範囲において，50mm/s で誤差 1mm 以内の移動を確認している．一方で，モデル誤差やリール誤差について，移動制御の誤差に加えて，テザーの張力の変動に大きく影響を与えることを確認し，本手法を用いた正確な軌道追従制御には，テザーの取付けに起因するモデル誤差の推定が必要と考えられる.

- 地上からの遠隔操作に適した計算コストが少ないテザーの制御手法として，移動の始点と終点に対してテザー長を算出し一つを定負荷制御して緩みを補正しつつ残りをテザー長の差分値に対するフィードバック制御する「関節空間における定負荷テザー制御手法」を提案した．シミュレーションによって提案した制御を確認し，とくにテザー端点の誤差に対して，移動後の誤差は同程度のオーダーであり，移動中および移動後の張力の変動も少ないことから，モデル誤差に対してロバスト性の高い制御手法であることを確認した．

# 第4章　テザー移動ロボットの地上実験

## 4.1　まえがき

本章では，第3章で提案されたTether based locomotionの移動制御の有効性を検証するために，テザー移動ロボットの地上実験を行う．

第2章で述べたように，重力下のCDPMは紐の緩みが自然に補償されるため，紐の緩み補償を課題とするTether based locomotionの移動制御を正しく模擬することは難しい．しかし，宇宙環境で動作するロボットシステムを研究・開発する上で避けて通ることのできない課題であり，軌道上におけるロボットの静力学的もしくは動力学的な挙動および紐の緩みを再現した実験を行うことは欠かすことができない．本研究では，テザー移動ロボットのモデルを高い位置から懸架することで，自重による紐の補償が生じない状態を実現し，実験室内で三次元的に微小重力環境におけるロボットの静力学的な挙動を模擬可能なテザー移動ロボットの移動実験モデルを開発する．

実験では静安定状態におけるテザー移動ロボットモデルの評価を行う．ついで，テザー移動ロボットモデルに関節空間による定負荷制御手法を適用し，Tether based locomotionの実験を行う．

## 4.2　テザー移動ロボットによる移動実験モデルの開発

### 4.2.1　テザー移動ロボットの地上実験方法

地上の実験室において，宇宙空間と同様の微小重力環境を模擬することは困難である．とくに，ロボットに限らず，宇宙機器全般に渡って微小重力環境で受ける特性を考慮に入れて構造や機構が設計されているため，地上では動作が困難なものも少なくない．衛星や軌道上大型構造物，展開機構および宇宙ロボットにとって，いかにして微小重力環境を模擬して実験を行うかが重要な開発要素である．微小重力環境の模擬方法として，Table 4.1に示す6つの方法が考えられる．

Table 4.1のうち上4つは機械的な方法であり，ハイブリッドシミュレーションは数値解析を伴う．なお，公募実験は，模擬ではなく完全な軌道上実験であるが，実験及び運用に大きな制約があるため，微小重力環境の模擬方法に加えた．これらは，各々長所と短所があり，たとえば落下実験や軌道上公募実験は高水準の微小重力環境を提供できるが，実験時間や機械的，電気的な制約が大きく，コストも高い．さらに，実験の機会も限られている．一方，水中実験や空気浮上実験，懸架実験はコストが低く大学や研究所の実験室でも容易に検証できるが，モデルの次元や外乱環境の制約が大きく，実験内容によって適切な選別が必要である．ハイブリッド・シミュレーションは，計算機の処理速度の向上によって，リアルタイムで複雑なシステムの再現が可能となり，宇宙分野，ロボット分野で大い

Table 4.1 微小重力環境の模擬方法

| 手法 | 概要<br>特徴 |
|---|---|
| 落下実験 | 落下塔もしくは弾道飛行する航空機による実験を行う．<br>実験範囲が限られ短時間ではあるが，高水準の微小重力環境を提供する． |
| 水中実験 | 水の浮力を利用し，水中で実験を行う．<br>広い空間で長時間に渡って，水による粘性を伴うが自由度の高い自重補償環境を提供する． |
| 空気浮上実験 | 空気潤滑を利用し，平面上における非接触的にモデルを指示した状態で実験を行う．<br>モデルの次元数の制約を受けるが，物理的な外乱の作用しない環境のける純力学的な挙動を検証できる． |
| 懸架実験 | 実験対象を滑車で懸架し，自重補償を行って実験を行う．<br>広い空間で長時間に渡って自重補償が可能であり，微小重力環境の再現精度は低いが，設備投資が少ない． |
| ハイブリッド・シミュレーション | 数学モデルと機械モデルによる Hardware in the Loop により実験を行う．<br>機械モデルと数学モデルの精度に依存するが，制約がほとんどない微小重力環境を実現できる． |
| 軌道上公募実験 | 超小型衛星，観測ロケットもしくは ISS の公募などの軌道上環境で実験を行う．<br>実験の制約が大きいが，軌道上で単機能および統合的な試験が可能である．近年，大学の研究機関で実際に利用されている． |

に注目を浴びている．しかし，機械モデルと数値解析モデルについて妥当性の検証が必要であり，実環境より取得した情報を元にモデルの校正が必要である．本研究では，テザー移動ロボットモデルの静力学的な挙動と紐の状態の検証を第一とし，広範囲の空間移動を検証するために，懸架実験方式による微小重力環境模擬を行いテザー移動ロボットの移動制御を実施する．

懸架による自重補償は，衛星の展開機構など軌道上で大きな動きを伴う柔軟性を有した構造物の地上試験に適した手法である．一例として，技術試験衛星きく 8 号にて実施された大型アンテナの地上展開実験を挙げる．[65] 全長 20m 以上に及ぶアンテナは，直径 5m の基本モジュールを 14 枚連結し，軌道上で展開して構造とすることで，直径 13m の鏡面アンテナを構成する．本試験では，モジュール数枚で構成されたの小型部分モデルとアンテナ全体それぞれについて地上展開試験が行われた．前者は，カウンターウェイトを有する 24 本の一定張力ケーブルで懸架して構造の質量特性を保持した状態で軌道上の挙動の検証を行った．後者は，固定長ケーブルおよび一定張力ケーブルを吊り下げる端部を移動

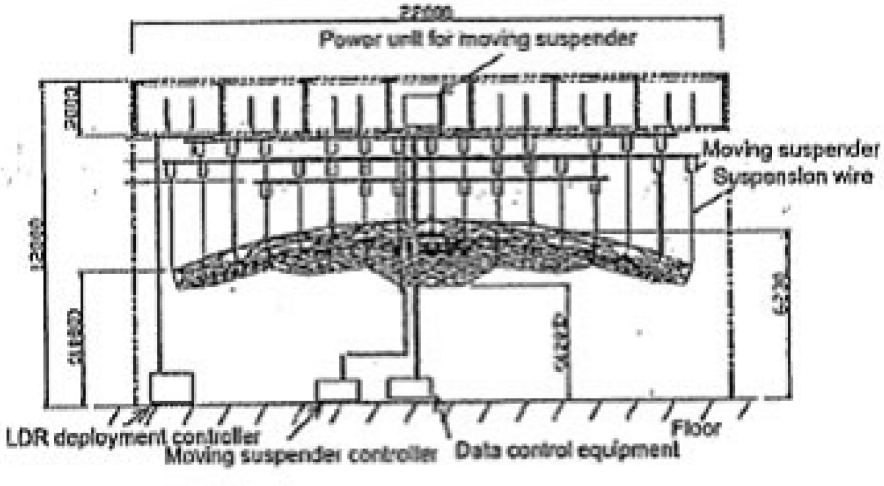



Fig. 4.1 ETS-VIII 搭載用大型展開アンテナの地上展開試験 [65]

式にすることで，広範囲の展開を検証する．(Fig. 4.1)

テザー移動ロボットは，懸架実験を行う構造物に比べて，質量および体積が小さく，構造も剛であるため，一般的なロボット実験で用いられる水中実験や落下実験，空気浮上実験の適用も可能である．しかし，実際は本体の大きさに比例して，柔軟な紐を広範囲に展開して移動するため，移動中の挙動を検証するには前述した実験の適用は困難である．そのため，テザー移動ロボットの移動制御の実験には懸架実験方式を採用する．

テザー移動ロボットの運動特性を明らかにする場合，ロボット本体の運動は，張力によって生じる並進運動と回転運動を再現することが重要であり，質量中心に対して自重補償を行うことが重要である．また，自重を補償する索自体がロボット本体の運動を妨げないように，索の向きが重力と同じ向きになるように配慮する．

本研究では，上述した条件を満たす広範囲の空間に対して自重補償が可能な懸架移動体によるテザー移動ロボットの模擬実験設備を開発した．詳細を次節で説明する．

### 4.2.2 実験モデル開発のコンセプト

広範囲で自重補償が可能なテザー移動ロボットの模擬実験設備を実現するためには，以下の三点を満たす必要がある．

1. 自重補償索は質量中心で固定され，回転方向に対して自由度を有すること．
2. 自重補償索の向きは重力に対してほぼ平行であること．
3. ロボット本体の計測および制御は，テザーと自重補償索以外は非接触で行うこと．

上述した条件を満たす実験モデルの概念を Fig. 4.2 に示す．

地上実験装置は，ロボット本体の構造モックアップとリール装置，宇宙施設の構造モックアップおよび自重を補償するための自重補償索と滑車および錘より構成される．本体の構

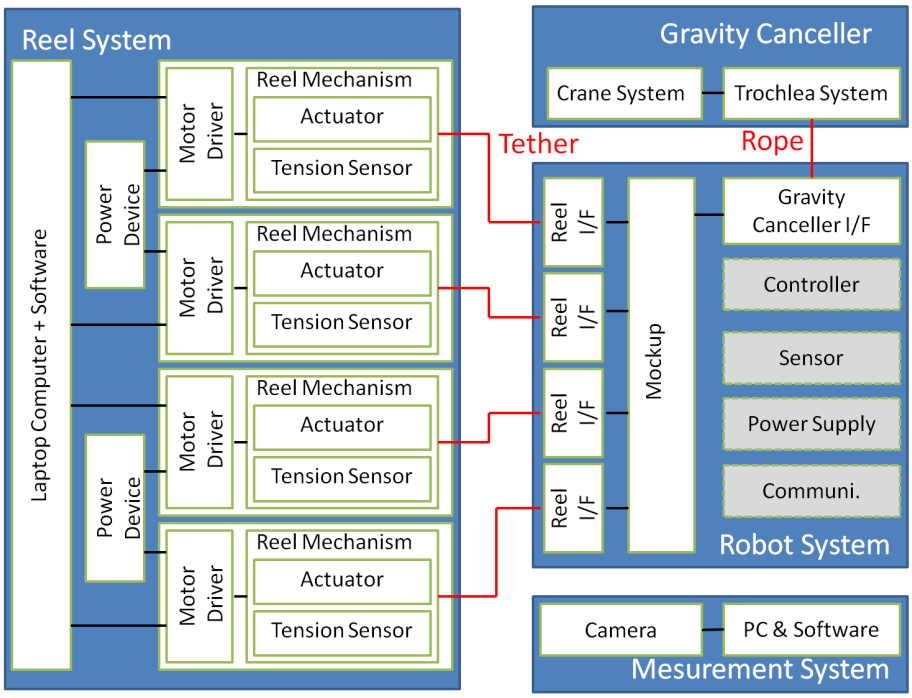



Fig. 4.2 地上模擬装置の概念図

造モックアップは，高さ 8 mの位置から懸架され，1 平方メートルの範囲内で，重力と成す角は 3.5 度未満であり，領域内で最大 6 パーセントの自重補償の誤差が生じる．リール装置は，リール機構とモータコントローラ，制御用 PC および電源によって構成される．本実験では，モータコントローラと制御用 PC および電源の配線を有線で行うために，リール機構は外部へ設置し，ロボット本体にテザーの端部を固定してシステムを構成した．将来的には，制御系および計測系の無線化と構造モックアップ本体への電源積載によりロボット本体のモデルが遠隔操作で運動できるよう発展実験を行えるように模擬実験設備の改修が考えらえる．本構成によって，実験モデルは広範囲で自重補償が可能であり，外乱が少ない移動実験が可能となる．

### 4.2.3 ハードウェア仕様

開発したテザー移動ロボットの模擬実験設備の外観を，Fig. 4.3 に示す．また，ハードウェアの仕様は，Table 4.2 および Table 4.3 に示す．

## 4.3 静安定解析に基づく移動制御による船内移動模擬実験

### 4.3.1 移動状況の設定

本論文では，テザー移動ロボットの模擬実験として，きぼう船内における有人宇宙活動支援のシナリオを想定した移動実験を行う．宇宙飛行士支援ロボットに要求される仕事と

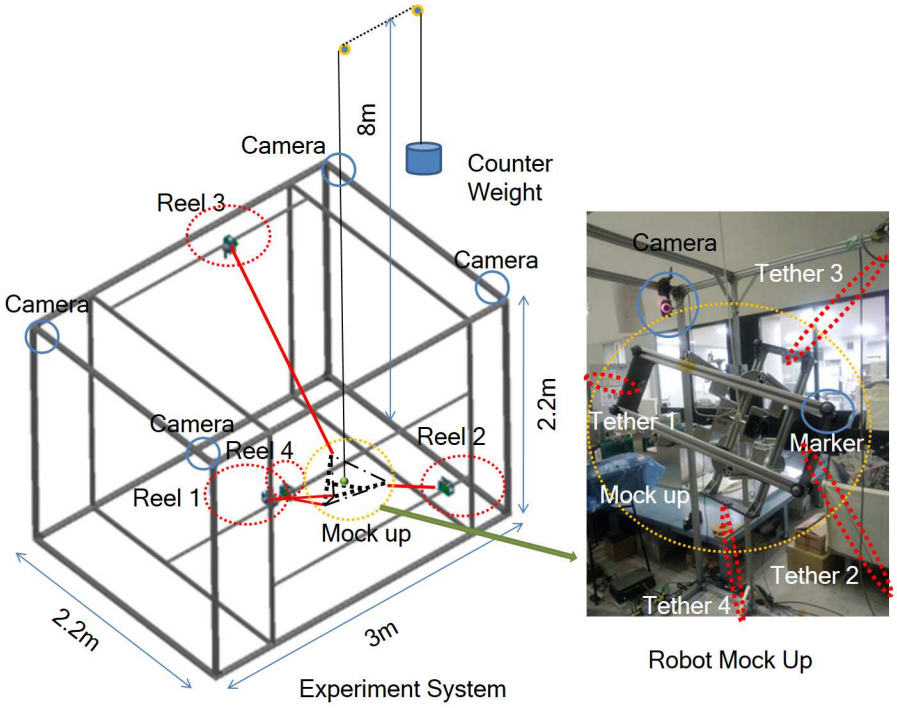



Fig. 4.3 実験装置 外観図

Table 4.2 模擬実験設備の仕様

| | |
|---|---|
| ロボットモックアップ | |
| 大きさ | 406 x 406 x 300[mm] |
| 質量 | 4.5kg |
| 搭載システム | |
| | 重力補償装置 I/F |
| | リール機構 I/F |
| リール機構 | |
| 大きさ | 193 x 103 x 110[mm] |
| 質量 | 1.5kg |
| テザー巻取量 | 0〜2200mm |
| 最大張力 | 75N |
| 張力計測範囲 | 0〜40N |
| 重力補償装置 | |
| 可搬重量 | 20kg |
| 補償範囲 | L1000 x V1000 x H2000[mm] (8m 吊下) |
| 高さ | 最大 |
| 実験設備 | |
| 大きさ | L3000 x V2200 x H2200 [mm] |
| 材質 | アルミフレーム |
| 計測システム | MAC 3D System (NAC Technology) |
| | Osprey (640 x 480 pixel, 245 fps) |

Table 4.3 模擬実験設備 解析モデルの緒言

| 本体質量 [kg] | | | |
|---|---|---|---|
| 4.5 | | | |
| 端点 1(本体) | 端点 2(本体) | 端点 3(本体) | 端点 4(本体) |
| [206,104.5,0] | [-206,104.5,0] | [0,-104.5,206] | [0,-104.5,-206] |
| 端点 1(壁面) | 端点 2(壁面) | 端点 3(壁面) | 端点 4(壁面) |
| [1950,-26,1610] | [50,-26,1610] | [1000,-2070,2134] | [1000,-1074,70] |

Fig. 4.4 Japanese Experiment Module

して，宇宙船内に配置された機器の監視を行う船内活動が挙げられる．実験では，きぼう実験棟内をモデル化した把持部の配置を，施設モックアップ内として設定することで，実運用を想定して移動制御を検証する．きぼう実験棟内には，Fig. 4.4 に示すように天井と床面，壁面に複数のハンドレールが設置され，壁面に実験装置が設置されている．

宇宙飛行士の業務として，試験装置の観察と操作が挙げられるが，ロボットによる代替を行う場合，試験装置が設置されている壁面近傍 (50cm 以内) に接近する必要がある．また，船内の通路は，緊急時の避難経路の確保の観点から 114[cm]x81.3[cm] の空間を空ける必要があり，緊急時にロボットは船内の隅へ移動する必要がある．そこで，きぼう船内をモデル化した試験環境にて，上述した移動が可能か，数値解析による検証を行う．きぼう船内モデルを Fig. 4.5 に示す．ハンドレールと実験装置の配置は，写真やモックアップなどを参考にモデル化した．

### 4.3.2 静安定状態におけるテザー移動ロボットモデルの評価

移動実験にあたって，最初に，静安定状態におけるテザー移動ロボットモデルの評価を行う．テザー移動ロボットモデルの静力学的な挙動を検証するため，釣り合い状態におけ

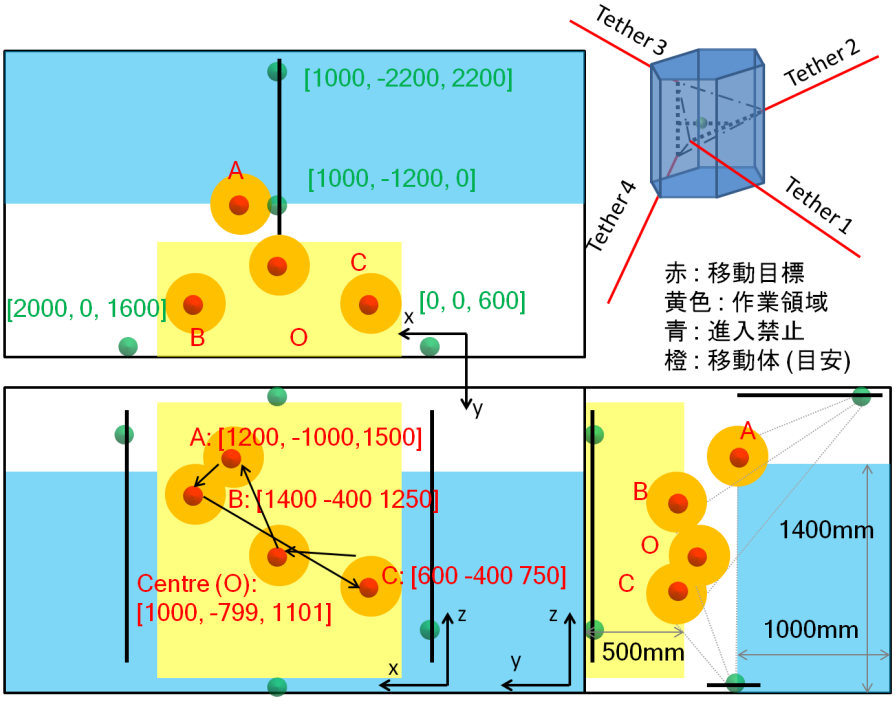



Fig. 4.5 JEM Simulation Model

るロボット本体の位置と姿勢，テザー長を計測，記録し，幾何方程式および静安定解析から理論的に予測されるテザー長を比較する．

テザーが張られた空間内の四カ所 (Fig. 4.5) で以下の手順で張力を負荷し，ロボット本体の位置と姿勢を計測した結果を Table 4.4 に示す．また，この時実測したテザー長を Table 4.5 に示す．

1. 目標位置に対して静安定解析を実施し，テザー長を算出する．
2. 上述したテザー長に 1mm の伸びを加えた値を目標値としてリールを制御する．
3. ロボット本体へテザーを固定する．
4. 固定されたテザーを，一定の電流で巻取るようリールを制御する．
5. テザーに張力が負荷され静安定になった状態で，ロボット本体の位置と姿勢，テザー長を計測する．

テザー長の計測誤差が 10mm 程度に対して，本体位置の目標位置と計測位置の誤差は場所によって異なる．目標位置と観測位置の誤差において，重力方向の成分の誤差が大きく見られるのは，自重補償索を介してロボット本体と錘が摩擦の影響で完全に力がつりあっていないことが原因の一つとして推定される．しかし，空間にテザーで拘束されている状態のテザーの長さは，静安定解析の結果に対して誤差が少ないことから，モデル誤差に対してロバスト性の強い定負荷テザー制御手法を適用することで，移動制御の実験が可能である．

Table 4.4 本体位置の計測結果

| | 目標位置 (x) [mm]<br>計測結果 (x) [mm] | 目標位置 (y) [mm]<br>計測結果 (y) [mm] | 目標位置 (z) [mm]<br>計測結果 (z) [mm] |
|---|---|---|---|
| Centre | 1000<br>989.8 | -799<br>-824.2 | 1101<br>1099.1 |
| Point A | 1200<br>1206.2 | -1000<br>-1004.0 | 1500<br>1454.2 |
| Point B | 1400<br>1339.5 | -400<br>-377.6 | 1250<br>1377.2 |
| Point C | 600<br>595.9 | -400<br>-332 | 750<br>877.2 |

Table 4.5 テザー長の計測結果

| 目標値<br>実測値 | テザー 1 [mm]<br>テザー 1 [mm] | テザー 2 [mm]<br>テザー 2 [mm] | テザー 3 [mm]<br>テザー 3 [mm] | テザー 4 [mm]<br>テザー 4 [mm] |
|---|---|---|---|---|
| Centre | 1098<br>1092 | 1116<br>1120 | 1412<br>1427 | 847<br>850 |
| Point A | 1023<br>994 | 1576<br>1562 | 1036<br>1083 | 1238<br>1216 |
| Point B | 529<br>538 | 1329<br>1312 | 1718<br>1710 | 1238<br>1234 |
| Point C | 1419<br>1396 | 453<br>476 | 2021<br>2010 | 825<br>824 |

### 4.3.3 関節空間による定負荷テザー制御手法による移動実験

本節では，関節空間による定負荷テザー制御手法を模擬実験装置にて検証した結果を示す．本実験の手順を以下に示す．

1. 始点と終点に対して静安定解析を実施し，テザー長を算出する．
2. 最もテザーの伸展量もしくは収納量が大きいリールを電流制御とし，他のリールを位置制御に設定する．このとき，位置制御は 30 秒で停止するように，各速度目標を設定する．
3. 画像計測を開始した後，リール機構の制御を同時に実行する．
4. 位置制御をするリール機構はほぼ同時に停止し，電流制御のリール機構は一定の負荷が加わると停止する．全てのリールが停止したときを移動の終了とする．

区間 B と C の間で関節空間による定負荷テザー制御手法の移動実験を行った結果を Fig. 4.6 および Fig. 4.7 に示す．Fig. 4.6 は，画像解析より求めたロボット本体の計測値と

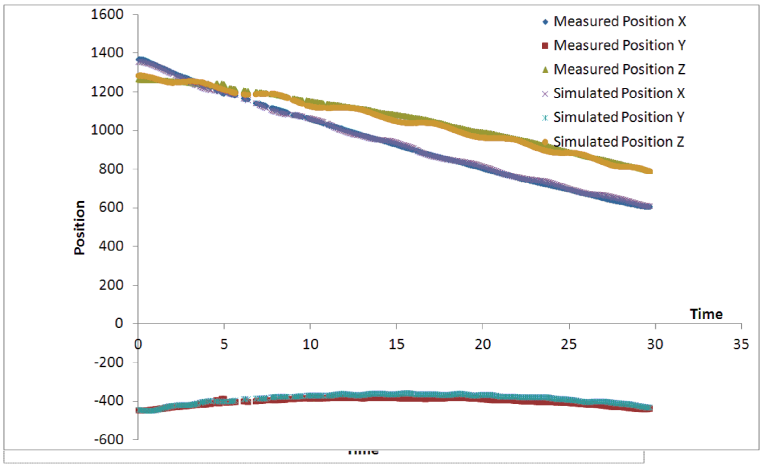



Fig. 4.6 地上実験　移動軌跡 (計測値，解析解)

動力学シミュレータより得られた数値解析解を並べている．Fig. 4.7 には，テザー長の履歴を計測値，解析解およびリールの回転角より算定したテザー長の三種類で比較している．図より実験装置において数値解析と定性的に同じ軌跡を移動していることが分かる．テザー長については，計測値，解析解および算定値について，それぞれ異なる誤差が生じている．計測値と解析解は基本的ある程度の一致がみられるが，一方，計測値と算定値，解析解と算定値に関しては，10mm を超える誤差が確認される．これについて，実験装置と解析モデル間のモデル誤差や画像解析より本体の重心位置を推定した際に生じた計測誤差，さらに自重補償装置による懸架によって生じた捩じれなどが原因として考えられる．今後，より誤差要因を特定し，補正を加えて，これら計測値と解析値，さらに算定値の三種類について，精度が高いシステムの構築を目指す．なお，本実験ではモデル誤差が生じているが，移動中に紐の緩みは発生しないことを確認している．

## 4.4 まとめ

本章の要点を以下にまとめる．

- テザー移動ロボットによる空間移動の実験を行うために，懸架式の自重補償機能を有したテザー移動ロボットの地上実験設備を開発した．実験設備は，ロボット本体モックアップ，リールシステム，自重補償装置および画像計測設備によって構成され，JEM 船内の機器監視に相当する移動範囲において，テザーの支持状態に対して本体の位置と姿勢を再現した実験を実施した．

- 開発した実験設備を用いて，静安定解析によるモデルベースド制御として定負荷テザー制御手法を検証し，数値シミュレーションの結果と実験で計測した結果を比較し同様の結果を得たことを述べている．

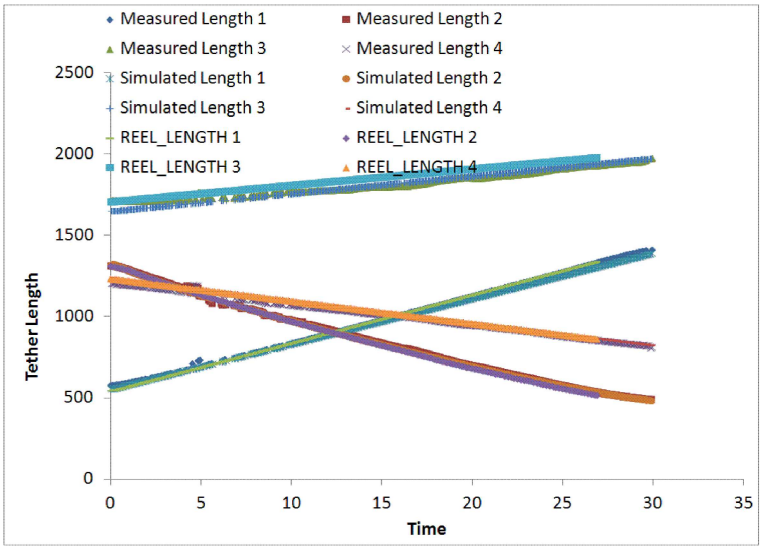



Fig. 4.7 地上実験　テザー長 (計測値，解析解，リール算定値)

# 第5章　テザー移動ロボットの軌道上実験

## 5.1　まえがき

本章では，本論文で提案するテザー移動ロボットの移動制御手法を軌道上実験で検証した結果と,それによって得られた成果について示す.

まず，伸展マニピュレータとテザー機構を有するロボットを遠隔操作によって運用するREX-J ミッションで実施されるテザーを用いた移動実験の概要として，軌道上においてテザー 3 本による平面移動の検証が行われることを説明し，上述した実験に本論文が提案するテザー移動ロボットの移動制御則が適用される理由を述べる.

次に，実験において，ロボット本体の質量中心の位置に起因する移動中の面外方向の振動や捩れ方向の振動について，地上で検証が困難であり，REX-J の軌道上実験によって有意義な検討ができること，テザー端点の取り付けや遠隔運用など，テザー移動ロボットの運用で生じる課題について，実際に検証することができることなど，本実験の課題とそれに対して得られる成果について述べ，REX-J テザー移動実験に対する本研究の意義を説明する.

軌道上実験に当たって，第 3 の成果を参考として REX-J の解析モデルを開発する．また，REX-J ミッションにおいて地上模擬装置の開発を担当し，REX-J 解析モデルに対して妥当性の検証を実施する．また，REX-J の運用を支援するために，テザー長から本体位置を推定する手法を提案し，軌道上の移動実験より得られたデータの評価手法とする.

軌道上実験では，遠隔制御に適したテザー長制御として定負荷テザー制御をもちい，軌道上の移動制御の実証および繰り返し移動における精度の検証を実施し，テザー移動ロボットの移動制御手法の有効性を確認し，目標位置への移動における精度について定量的な評価を実施する.

最後に，REX-J の軌道上実験において，宇宙飛行士支援ロボットの実現に対して得られた成果についてまとめる.

## 5.2　EVA 支援ロボット技術実証実験 (Robot Experiment on JEM: REX-J)

本小節では，REX-J ミッションの概要と試験設備について紹介し，軌道上での移動実験について概要を説明する.

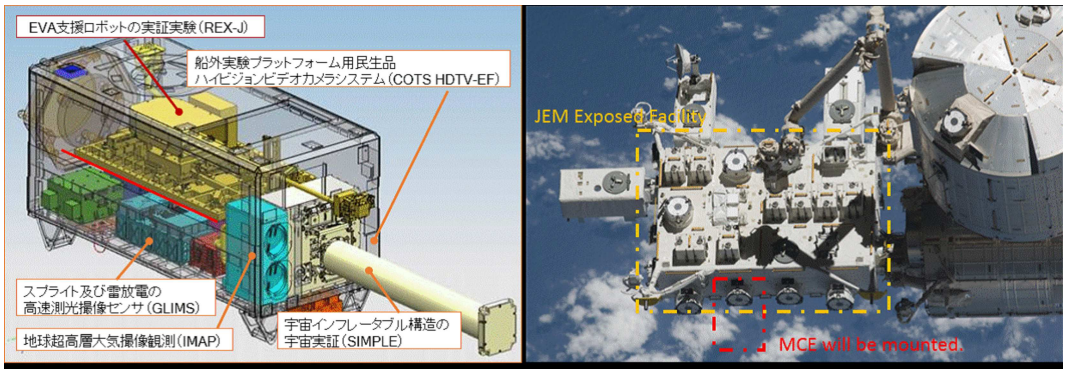



Fig. 5.1 Multi mission Consolidated Equipment

### 5.2.1 ミッション概要

「EVA 支援ロボットの実証実験」は，2007 年に船外実験プラットフォームミッション第 2 期利用におけるポート共有実験装置 (Multi-mission Consolidated Equipment : MCE, Fig. 5.1) として採択された軌道上ミッションである．[66] Fig. 5.2 にミッションの開発および運用期間を示す．REX-J ミッションは採択から詳細設計審査の期間で，主に移動実験に関して概念設計および基本設計が修正されている．これは，当初船外を移動する実験を予定していたが，JEM との調整により，安全を配慮してロボット本体を MCE 内部に完全に格納することを要求されたためである．上述した設計変更によって，搭載システムは小型化および一部機能の省略が行われ，実験装置の内部をテザー三本で同一平面上に支持されて移動する実験へ変更された．そのため，移動実験に関係する機器の開発期間は 2009 年 9 月から 2010 年 11 月と短く，ミッション装置を用いた運用者による地上実験は実施されていない．2012 年 7 月に日本の H2-B ロケットと宇宙ステーション補給機 (H-II Transfer Vehicle, HTV) によって ISS へ打上げられ，JEM へ設置された．その後，2012 年 9 月から 2013 年 6 月にかけて軌道上環境で実験が行われた．

本ミッションは，宇宙飛行士の船外活動を支援するロボット技術の確立を目的とし，その要素技術として伸展マニピュレータとテザーを用いた移動手法の実証に焦点があてられている．Fig. 5.3 に示される運用計画に従い，以下の二点の機能について検証された．

筆者は，2009 年度よりテザー移動ロボットに関する研究を開始し，2010 年度から REX-J の運用メンバーの一員として，移動実験におけるテザーの制御手法の設計および開発期間の関係で困難であったミッション機器をもちいた運用検証を代替するための REX-J 地上模擬装置の開発に携わり，2012 年の移動実験の運用を担当した．

本章では，テザー制御によるロボットの移動実験について詳細を述べる．なお，REX-J の伸展マニピュレータについては付録を参照されたい．

- テザーフックのハンドレールへの取り付け（Fig. 5.4）
- テザー制御によるロボットの移動実験（Fig. 5.5）

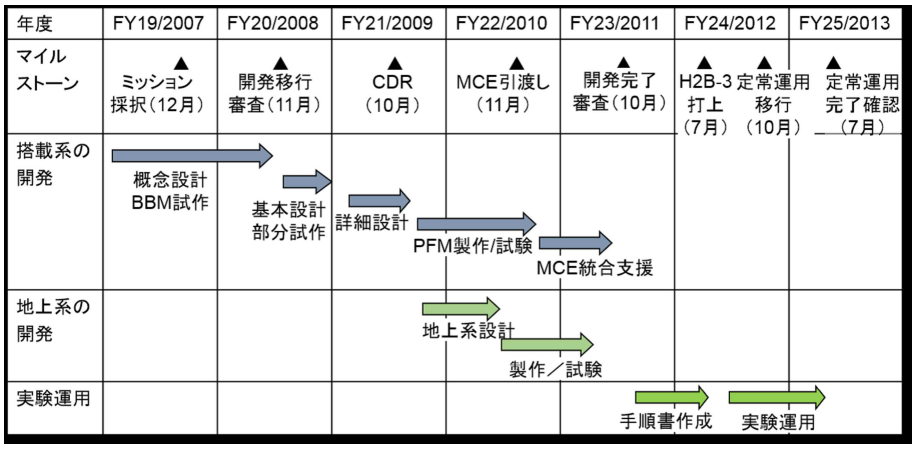



Fig. 5.2 REX-J 開発/運用期間 [67]

Table 5.1 REX-J 計測機能

| | |
|---|---|
| モータ | モータ回転角 (10Hz)<br>モータ電流 (1Hz) |
| モータドライバ | 加速度センサ (10Hz)<br>温度センサ (1Hz) |
| カメラユニット | アナログカメラ (NTSC)<br>温度センサ (1Hz) |

### 5.2.2 REX-J 試験設備概要

REX-J の試験設備 (ロボット本体とベースプレートで構成) を Fig. 5.6 に示す．ロボットは，伸展マニピュレータを搭載した上段とフック機構およびリール機構を搭載した下段による層構造で構成される．上段と下段は，回転機構によって連結されている．ベースプレートには，ハンドレールとリール機構，外部カメラが搭載され，REX-J の移動実験に利用される．制御システムは，本体の奥に配置され，MCE のバス機器より電源および通信を受け，ケーブルを介して REX-J の本体に搭載された機器およびベースプレート上の機器と接続されている．

REX-J のシステム構成図を 5.2.2 に示す．搭載された機器は，制御システム (Micro Processing Unit： MPU) の直下にあるモータドライバユニット (Motor Driver： MDR) によって管理され，ISS/JEM の運用設備を介して，地上より直接操作する．MPU は 10Hz の周期で各機器と通信し，センサデータの取得，モータ制御およびカメラパラメータの設定等を行う．搭載機器は，伸展マニピュレータ，リール機構，本体回転機構，外部カメラの四つである．伸展マニピュレータは，REX-J ハンド，手首機構，伸展機構に分けられる．REX-J のセンサは，モータドライバとカメラユニットに搭載されている．(Table 5.1) なお，REX-J のリール機構は張力計測機器を搭載する予定であったが，開発期間が短く十分な校正が間に合わなかったため，運用において使用されなかった．

REX-J の運用設備を Fig. 5.8 に示す．REX-J は，宇宙飛行士による直接操作を介さずに地上からの遠隔運用で実験が行われる．運用には，ISS および JEM の通信回線の一部

| | ID | 動作モード／実験内容 | サクセスレベル |
|---|---|---|---|
| 1ヶ月目 | 1. REX-J 起動、電気系初期点検 | | ミニマムサクセス |
| | 2. 基本機能動作確認 | | |
| | 2a | 小型カメラ調整・確認 | |
| | 2b | 手首／ハンドのロンチロック解除 | |
| | 2c | 伸展アームの伸展機能確認 | |
| | 2d | ハンドの動作確認 | |
| | 2e | 手首の動作確認 | |
| | 2f | 本体回転機構ロック解除 | |
| | 2g | 本体回転機構の動作確認 | |
| 2ヶ月目 | 2h | マクロコマンド機能確認 | フルサクセス |
| 3ヶ月目 | 3. 伸展式ロボットアームによる実験 | | |
| | 3a | 伸展アームのキャリブレーション | |
| | 3b | 伸展アームの振動評価 （MCE 内部で実施） | |
| | 3c | テザーフックの固定解除 | |
| | 3d | ロボットハンドによるテザーフック把持 | |
| | 3e | テザーフックのハンドレールへの取付け | |
| 4ヶ月目 | 4. テザー支持による実験 | | |
| | 4a | ロボット本体の固定解除 | |
| | 4b | テザーによるロボット本体の支持 | |
| | 4c | テザー支持状態での伸展アーム動作時の挙動把握 | |
| | 5. テザー制御によるロボット移動実験 | | |
| | 5a | ロボット本体の待機位置への移動 | |
| | 5b | テザー制御によるロボットの移動実験 | |
| 5ヶ月目 | 6. 応用実験 | | エクストラサクセス |
| | 6a | 伸展アーム伸展状態でテザー制御したときの挙動把握 | |
| | 6b | ロボット本体が懸垂状態でハンドレールを把持 | |
| 6ヶ月目 | 7. MCE 外部へのロボットアーム伸展実験 | | |
| | 7a | 伸展アームの MCE 外部への伸展および振動特性評価 | |
| | 7b | 小型カメラによる周辺画像取得 | |

Fig. 5.3 REX-J 運用計画 [67]

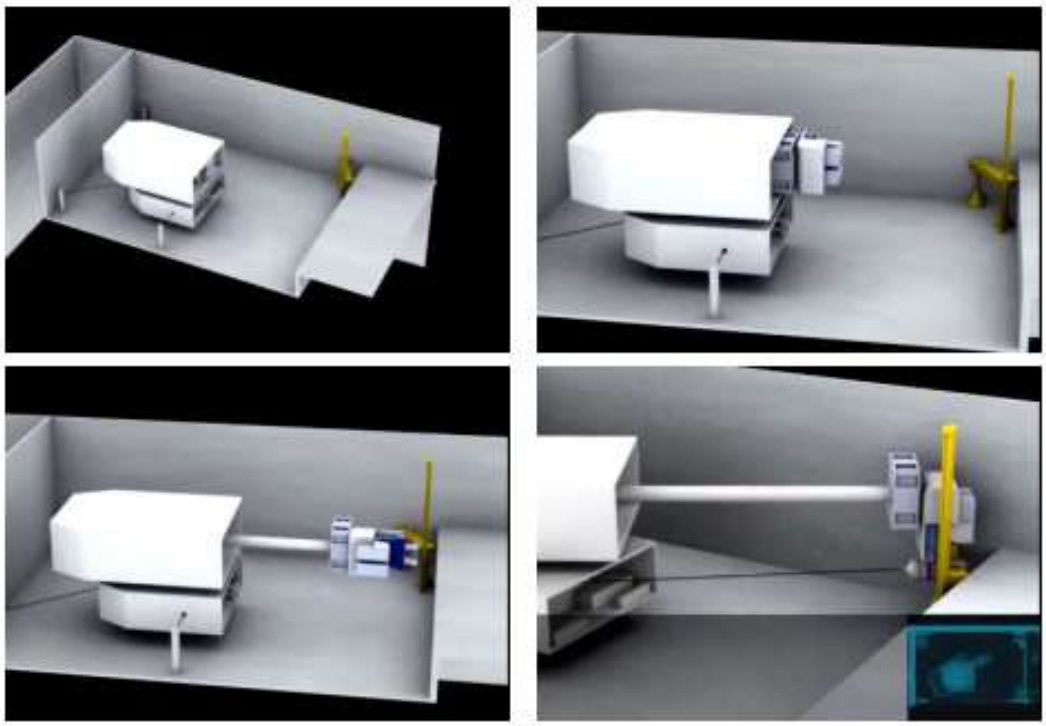


Fig. 5.4 テザーフックのハンドレールへの取り付け

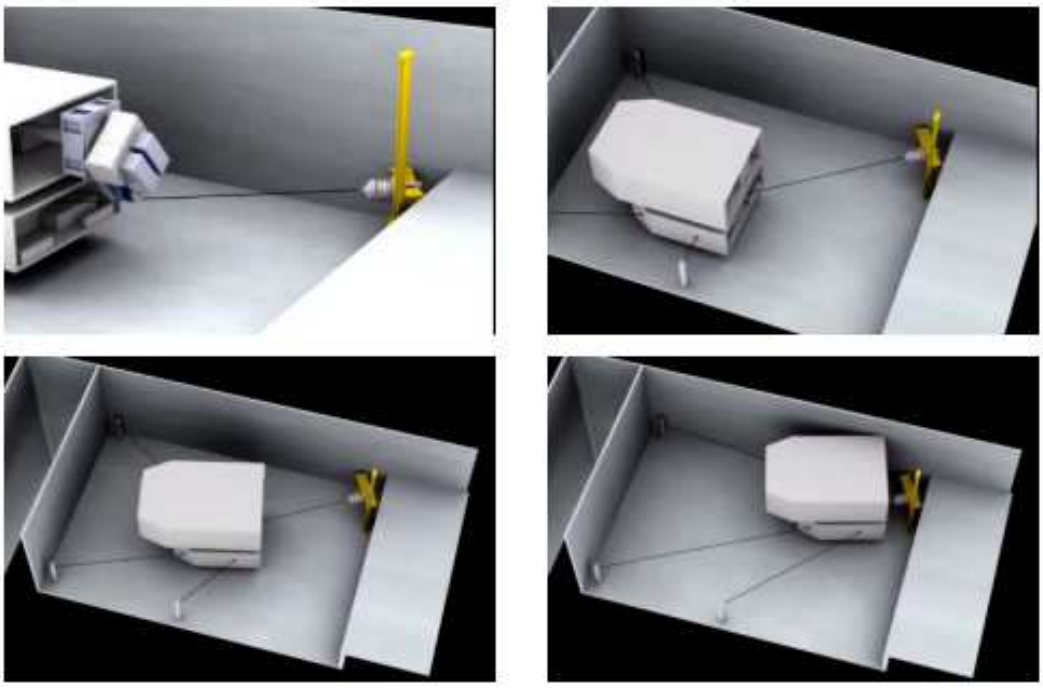


Fig. 5.5 テザー制御によるロボットの移動実験

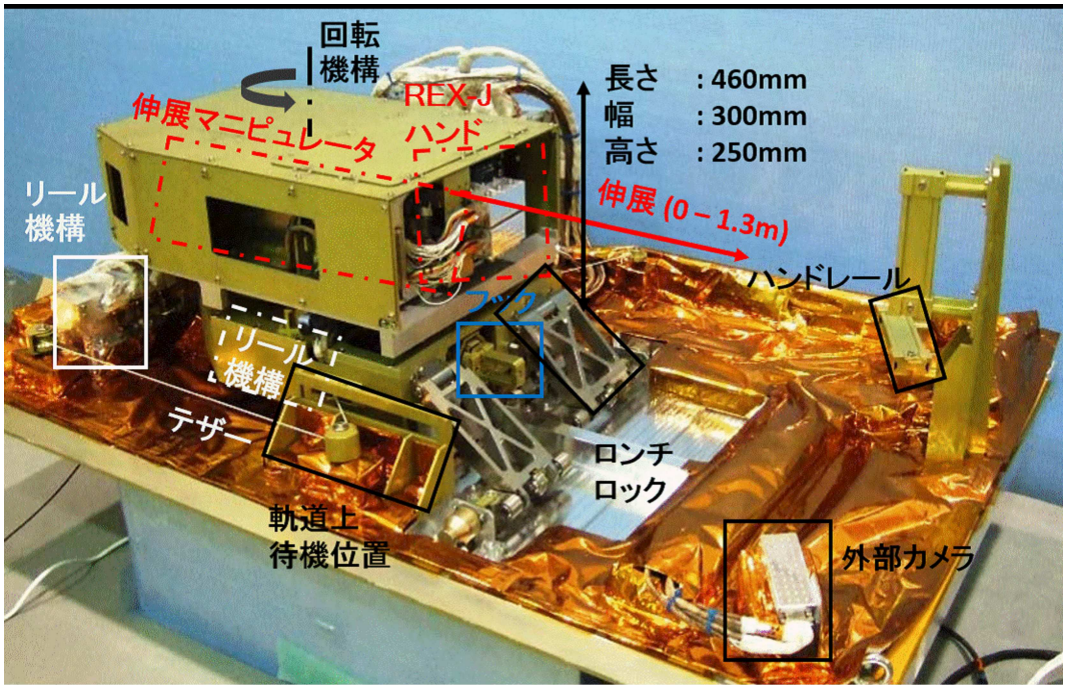



Fig. 5.6 REX-J Flight Model

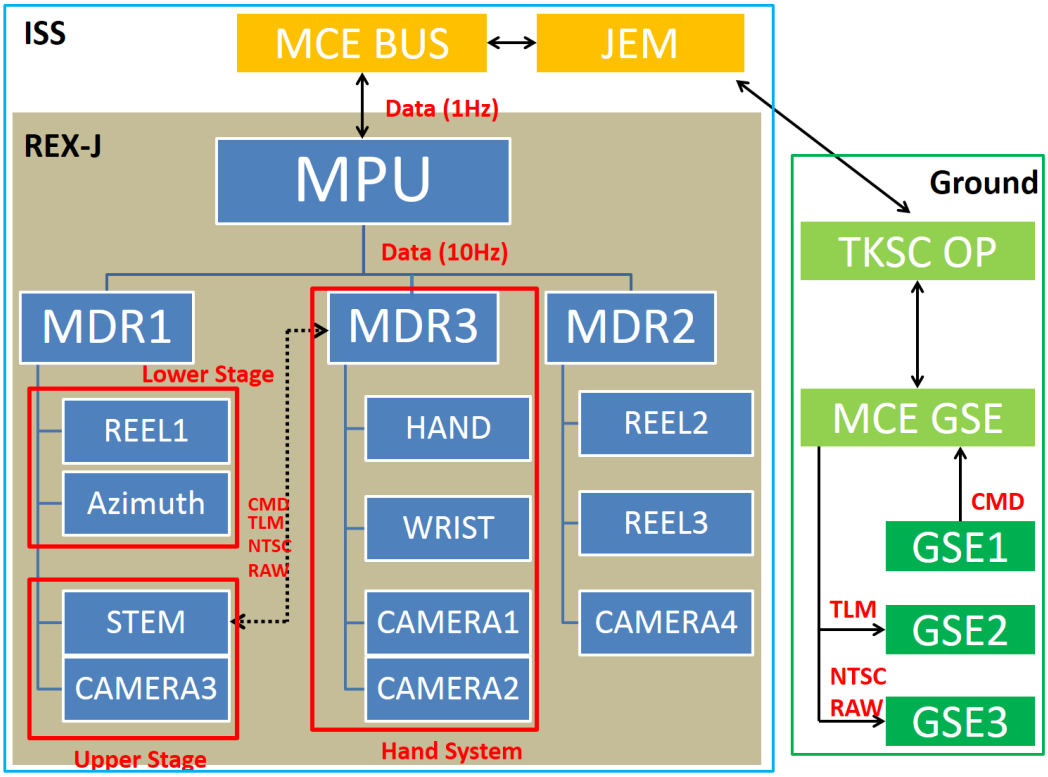



Fig. 5.7 REX-J システム構成図

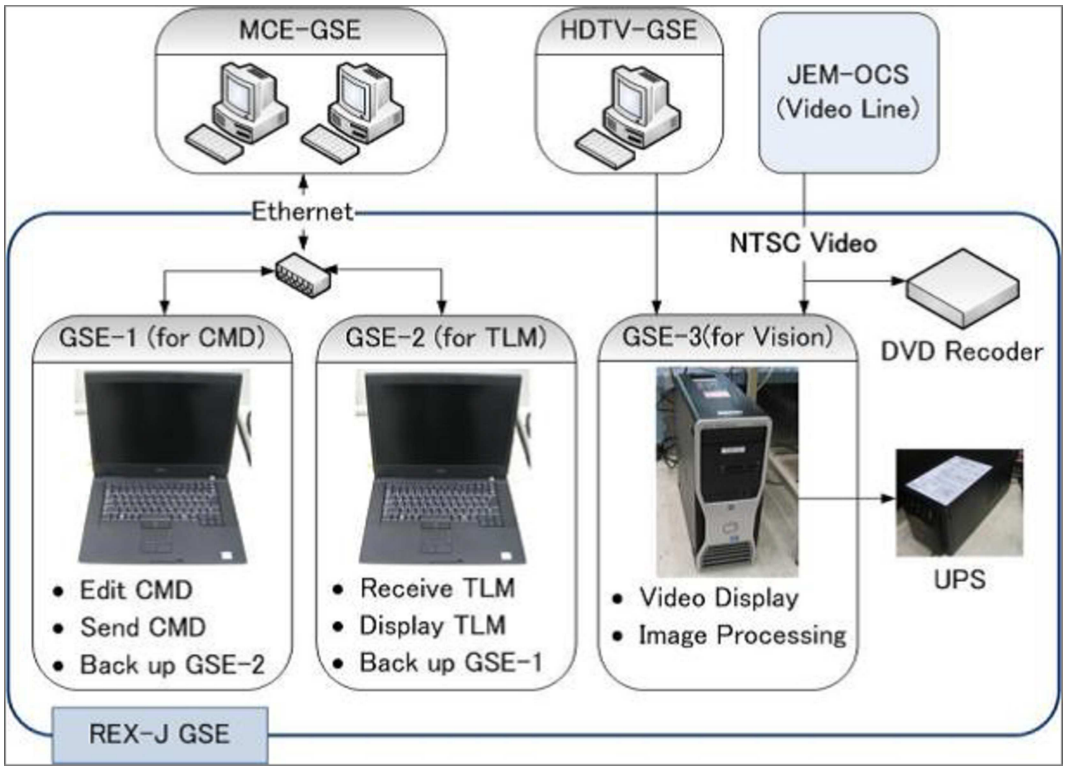



Fig. 5.8 Tele-operation system

が割り当てられるが，安全規定を満たすため，JEM の地上運用設備の一部である MCE-GSE(Ground Support Equipment : GSE) に接続された REX-J の運用コンソールにて操作される．運用コンソールより送られたコマンドは，MCE および JEM の各オペレータによる承認を受けて，軌道上へ転送される．軌道上と地上間の通信遅れに加え，ISS/JEM の運用体制の管理特有の時間遅れを併せると，一つのコマンドに対して数十秒の時間遅れが生じる．そのため， REX-J の搭載機器は，モータおよびカメラを操作する単純な命令を組み合わせたコマンドの組み合わせを事前に地上から登録し，実行コマンドの送信によって動作するマクロ機能で実行される．上述した理由により，REX-J のテザー移動はフィードフォワード制御による計算コストの低い制御手法を必要としている．

### 5.2.3 テザー制御によるロボットの移動実験

REX-J は，Fig. 5.1 に示されるミッション機器をもちいた MCE の箱の中をロボットが移動する実験である．本ミッション機器は，Fig. 5.9 に示されるように，ロボット本体と船外環境を模擬したベースプレート，制御システム (MPU) によって構成され，ベースプレート上のハンドレールに対するテザーの固定およびテザー長制御によるベースプレート上の移動によって，テザーによる移動を検証する．

試験設備の主要緒言を Table 5.2 に示すが, 設備の大きさと消費電力は MCE の搭載における制約で厳しく制限されている．本実験では, ロボット本体に搭載されたマニピュレー

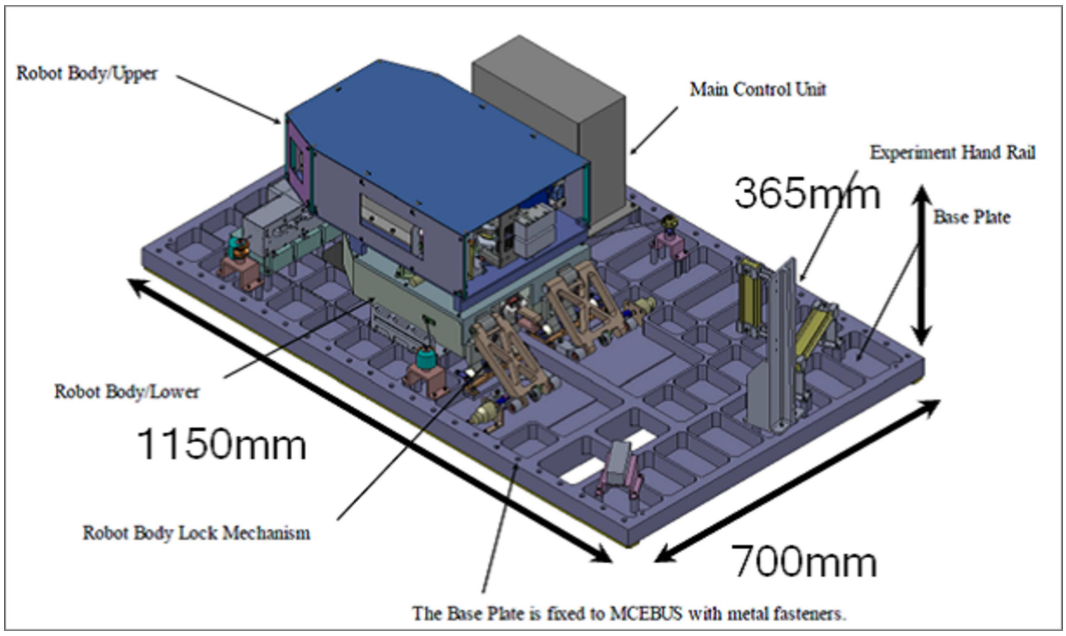



Fig. 5.9 REX-J onboard system

タをもちいて自律的に移動範囲を展開すること技術実証の実証が目的であり，ロボット本体はフックを備えたリール機構と伸展マニピュレータを搭載している．それらが占める体積は大きく，試験環境に対して本体が大型化してしまったため，テザーを用いた移動について移動範囲が制限され，リール機構の搭載は三台が限界であり，本ミッションの移動実験は，Fig. 5.10 の模式図で示されるコンフィギュレーションで，移動範囲を平面内に限定して移動機能を検証する．試験設備は，マニピュレータの伸展方向を前面，ベースプレートを底面とし，打上げ時に後方で固定されているロボットは，固定解除後ベースプレート前面を浮上して移動する．本体の前面には，1 台のリール機構 (A1) が搭載され，マニピュレータによってフック (B1) がベースへ固定される．ベースプレートには，リールが二台搭載され，プーリ機構 (B2, B3) を介して，本体右側面と後部 (A2, A3) へ連結されている．さらに，ベースプレートと本体左側面 (B4, A4) は，一本のテザーで連結されている．A1-A4 は本体上の同じ高さの位置に設置され，B2-B4 およびハンドレールはベースプレートから同じ高さに配置されている．外力が働かない場合，ロボットは同一平面上を移動すると仮定できる．

一般的に，平面上をテザー長制御で移動する場合，4 本以上のテザーが必要とされる．よって，三本のテザーを用いて平面を移動する場合，本論文で扱うテザー移動ロボットの移動制御則が必要とされる．

本実験において，想定される課題を以下に示す．

1. 重心位置が移動に与える影響の評価
2. 面外方向の振動が移動に与える影響の評価
3. テザー端点の誤差が与える影響の評価

Table 5.2 REX-J 試験設備の主要緒言

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| 大きさ (全体)<br>大きさ (ロボット本体) | 1150mm × 700mm × 365mm<br>460mm × 300mm × 250mm |
| 質量 | 83kg (ロボット本体: 27kg) |
| 消費電力 | 最大 62W |
| 運用軌道 (ISS 軌道) | 高度:約 400km , 軌道傾斜角:51.6 度 |
| ISS 設置位置 | JEM 船外実験プラットフォーム 8 番ポート |

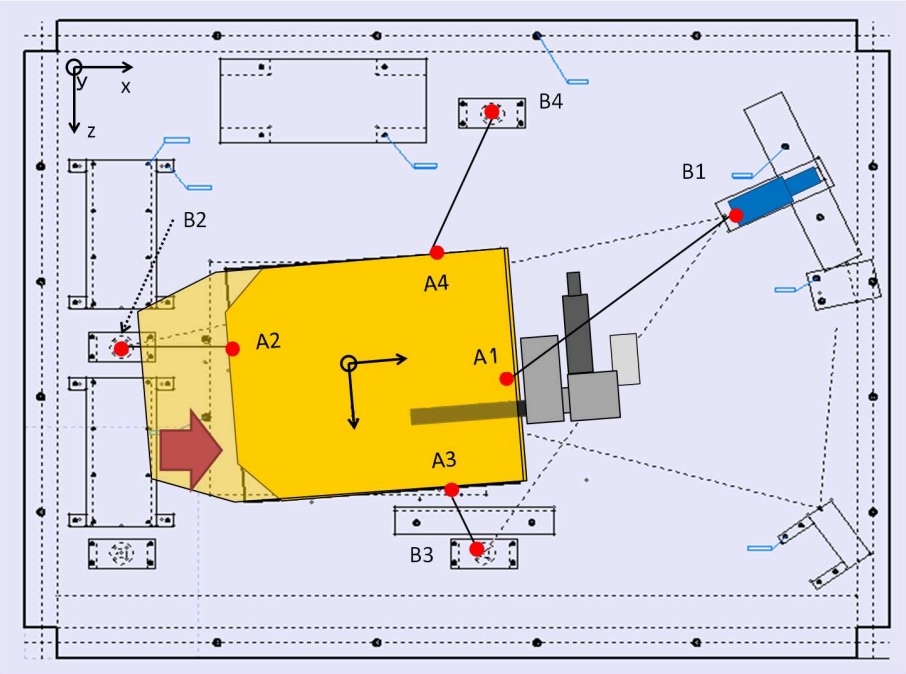



Fig. 5.10 REX-J 移動実験 (模式図)

4. 遠隔運用に適した制御手法の要求

前者二つは，ロボットの面外方向の移動および姿勢の傾きに対して運動が拘束されていないことに由来する．第 4 章の試験装置では，動力学な挙動を検証することが困難であり，本実験で得られた結果を定性的，定量的に評価することで，テザー移動ロボットの制御における振動について正確な評価が可能となる．

また，テザー端点の誤差は，マニピュレータによってテザーを固定，再固定するテザー移動ロボットに固有の課題である．第 3 章のシミュレーションの結果より，テザー端点の誤差がモデルベースド制御に与える影響は無視できない．特に，テザー長制御のみで移動を行う逐次テザー制御手法において，モデル誤差はテザーの緩みによる故障の要因となりうる．緩みを補償する定負荷制御においても，モデル誤差は本体の位置精度に影響し，連続移動で誤差が拡大することが考えられる．実際に伸展マニピュレータで固定されたフックを端点とした状況でテザーによる移動が与える影響を評価することで，伸展マニピュレータ，フック機構，リール機構などのハードウェアに対する改善点が明らかとなる．

加えて，REX-J ミッションは，地上からの遠隔運用で実施する．地上実験と異なり，機器の運用は予め設計が決まっているコマンドおよびテレメトリで行うため，定量的な情報を常に取得できるとは限らない．第 3 で提案した遠隔運用に適したテザーの制御手法が実際に有効であるか，本実験で明らかになる．

本論文では，REX-J の挙動を再現するため，動力学シミュレータと地上実験装置を開発し，軌道上実験の予備実験として検証を行う．さらに，軌道上の移動実験で得られた結果を評価し，提案する静安定解析によるモデルベースド制御の有効性を確認する．最後に，REX-J の実験で得られた知見から，将来のロボットに必要な要求を明らかにする．

## 5.3 REX-J テザー移動実験

### 5.3.1 実験概要

本節では，REX-J ミッションのテザーによる移動実験について概要を説明する．定常運用において，移動実験は移動前および移動後の状態によって三つに区分される．

1. 壁面支持→本体移動→テザー支持 (Fig. 5.3, 4b)
2. テザー支持→本体移動→壁面支持 (Fig. 5.3, 5a)
3. テザー支持→本体移動→テザー支持 (Fig. 5.3, 5b)

実験 4b，テザーによるロボット本体の保持機能確認は，壁面 (ロンチロック) で支えられた状態から，テザーによって支持された状態へ移行する実験である．(Fig. 5.11) ロボット本体は，スリットを有する壁面に嵌った状態で打ち上げられる．前面のロンチロックを解除後は，テザー 2 の張力と壁面の抗力による力の釣り合いによって支持されている．その状態で，テザー 1 を巻取りながら，テザー 2 と 3 を伸展させることで，テザーのみで支持された状態へ移行する．次に，実験 5a 軌道上待機位置 (軌道上保管位置) へのロボット本体移動を実施する．(Fig. 5.12) REX-J は MCE の共同ミッションの一つであり，運用は隔週で行われる．移動実験が週を跨ぐ場合，運用終了後に，安全のためにスリットを有する壁面に本体の一部を収納し，テザー 3 の張力および壁面で本体の運動を抑制するための保管位置へ移動する．テザー 3 を巻取りながら，テザー 1 を伸展させることで，テザーのみで支持された状態へ移行する．このとき，実験 4b および実験 5a の壁面支持は，テザー長からテザーの緩みの有無を判断することが難しく，設計資料より最適なテザーの長さを決定する．一方，テザーの支持状態については，REX-J の解析モデルより静安定解析を実施し，テザー長を算出できる．実験 4b,5a は，算出したテザー長の差分値を伸展し，巻取は電流制御で追従してテザーを制御する．

本研究では，静安定解析によるモデルベースド制御の検証として，実験 5b 目標位置へのロボット本体移動を担当し，テザー制御によるロボットの移動制御について，テザーの緩みがなく精度の高い移動を目指す．Fig. 5.12 に示すように，移動の始点に対して終点を与え，定負荷テザー制御をもちいて，ベースプレート上を移動する．なお，REX-J では電流制御による巻取操作を定負荷制御とし，運用毎に巻取するテザーを確認して移動実験を行う．

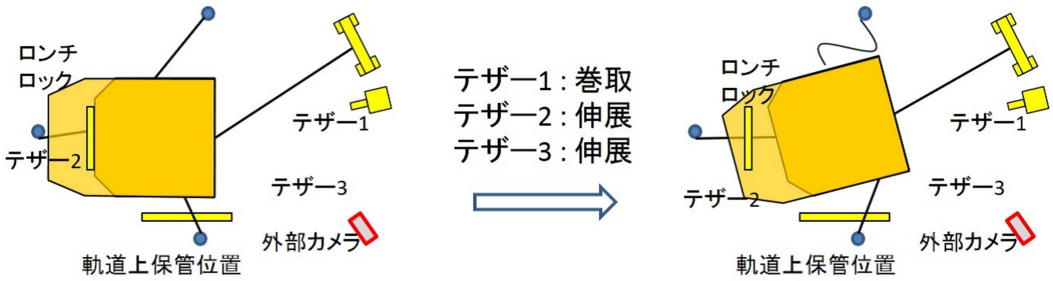



Fig. 5.11 壁面支持→本体移動→テザー支持

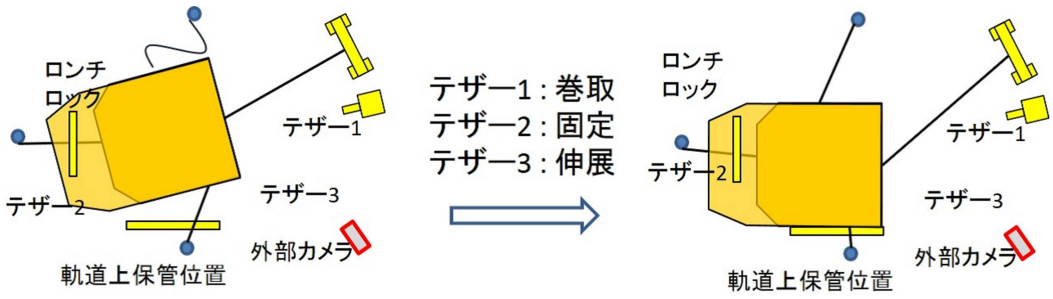



Fig. 5.12 テザー支持→本体移動→壁面支持

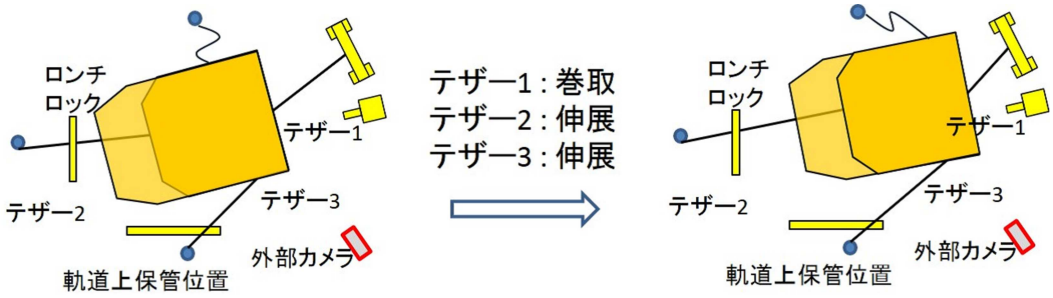



Fig. 5.13 テザー支持→本体移動→テザー支持

REX-J の移動実験では，静安定解析による制御値の算出が重要な役割を占めている．第 3 章および第 4 章にて，静安定解析によるモデルベースド制御の有効性について確認しているが，一方で，モデルによる誤差の影響が無視できない点が指摘されている本研究では，静安定解析のための REX-J 解析モデルを開発し，軌道上実験の運用コマンドを検証する地上模擬装置をもちいて妥当性の検証およびモデル誤差の低減を試みる．また，REX-J のテレメトリには，本体位置と姿勢を客観的に評価する指標は含まれていない．軌道上でモデルベースド制御による連続運用を行った場合，誤差の蓄積によって制御ができなくなることが懸念される．そこで，テレメトリより算出したテザー長から本体の位置，姿勢を推定し，移動制御の結果と比較して適宜修正を加えることで，モデルベースド制御による誤差の拡大を防ぎ，連続した運用による影響の評価を試みる．

### 5.3.2 REX-J 解析モデル

実験にあたり，第 3 章を参考として，REX-J 解析モデルを開発した．解析モデルは，Fig. 5.14 に示すようにロボット本体，テザー，壁面によって構成される．このとき，解析モデルの座標系は，ロボット本体の質量中心に原点を固定した機体座標系と，ベースプレートの左上に原点を固定したベースプレート座標系の二種類で表し，それぞれ打上げ時の姿勢を基準として，伸展マニピュレータの伸びる方向を X 軸，上段から下段の方向へベースプレートに下ろした垂線を Z 軸，X 軸と Z 軸の外積を Y 軸とした直交座標系で定義されている．

解析モデルは，本体の質量と慣性行列およびテザーの端点の座標を初期値として与える必要がある．本実験では，設計図面および打上げ前に実施された機能確認試験で得られた値を解析モデルの緒言とする．ただし，慣性行列については，運用中のマニピュレータ先端の位置や姿勢が異なる点，内部のハーネスについて詳細な情報が得られなかったため，外形と質量から直方体の剛体と近似して慣性モーメントを算出した．この近似により，軌道上における動力学的な特性に対する再現性に課題となるが，静安定解析については角運動量の項が零となるため問題がないと推測できる．また，外部から電源と通信を供給するケーブルや受動的なテザーが外力として影響を与えることが考えられたが，運用制約とのトレードオフの過程でテザーの張力に比べて影響はほとんどないと判断され，運動に与える影響は少ないとされた．そのため，解析モデルには受動的なテザーおよびケーブルのモデル化は省略している．

Table 5.3 REX-J 解析モデルの緒言

| 本体質量 $M$[kg] | 慣性モーメント (Ixx) | 慣性モーメント (Iyy) | 慣性モーメント (Izz) |
|---|---|---|---|
| 26.78 | 0.3403 | 0.6731 | 0.6117 |
| 端点 1(本体)$A_1$ | 端点 2(本体)$A_2$ | 端点 3(本体)$A_3$ | 端点 4(本体)$A_4$ |
| [185.8,33.7,49.56] | [-132.2,-17.8,49.56] | [-128.8,158.2,49.56] | [128.4,-153.8,49.56] |
| 端点 1(壁面)$B_1$ | 端点 2(壁面)$B_2$ | 端点 3(壁面)$B_3$ | 端点 4(壁面)$B_4$ |
| [907.7,246.7,-63] | [177.5,380.0,-63] | [617.5,645.0,-63] | [627.5,80,-63] |

REX-J のロボット本体は，リール機構が下段に搭載されていること，上段に伸展マニピュレータを搭載していることから質量中心はテザーで囲まれた平面の面外に位置されている．また，テザーの配置が Y 軸正方向に偏っているため，本体側の端点で囲まれた領

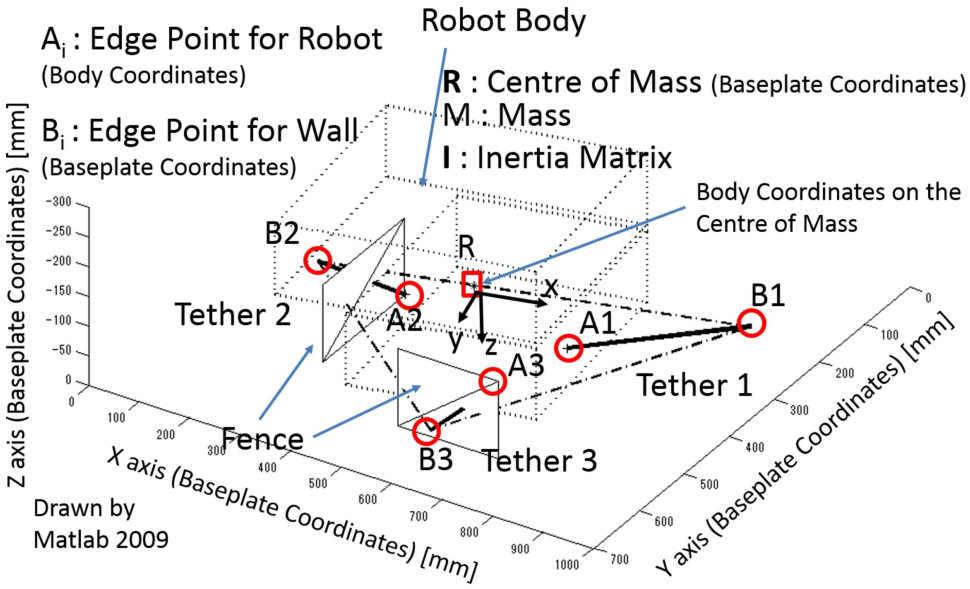



Fig. 5.14 REX-J 解析モデル

域外に質量中心がある．(Fig. 5.15) 一般的な CDPM はテザーで囲まれた領域内部，とくに重心位置に質量中心を置く場合が多く，REX-J のような配置は設計的に不安定といわれている．しかし，REX-J 解析モデルについて第 3 章の静力学解析を移動範囲内で適用した結果，3 次元の解析アルゴリズムと同様のもので十分な収束性を示すことを確認した．REX-J の軌道上実験により，移動中の振動の評価を行うことで，物資搬出などの質量中心が大きく変わる場合のケーススタディが期待できる．

### 5.3.3 REX-J 地上模擬装置

本小節では，地上模擬装置を用いた REX-J 解析モデルの校正および軌道上実験の手順修正について説明する．地上模擬装置は，Fig. 5.16 に示す

装置は，各搭載機器の BBM および EM で構成されている．伸展マニピュレータおよび本体移動は，自重の影響で正確な計測は困難である．そのため，ロボット本体もしくは手先先端に自重を支える台車を設け，並進方向の運動および回転の運動を観察する．なお，軌道上実験装置と異なり，試験装置上面に搭載されたカメラをもちいて，画像解析による位置および姿勢の計測が可能である．本実験は，面外方向の振動を考慮できないが，定負荷テザー制御によって移動する本体の位置や姿勢，テザー長について実機と近い値を計測でき，REX-J 解析モデルの検証には十分な性能を有する．

まず，地上模擬装置を用いて，実験 4b と 5a の壁面支持からの移動とテザー支持状態からの移動の二種類について検討を行い，テザー 3 本による制御では，テザーの緩みが生じ，

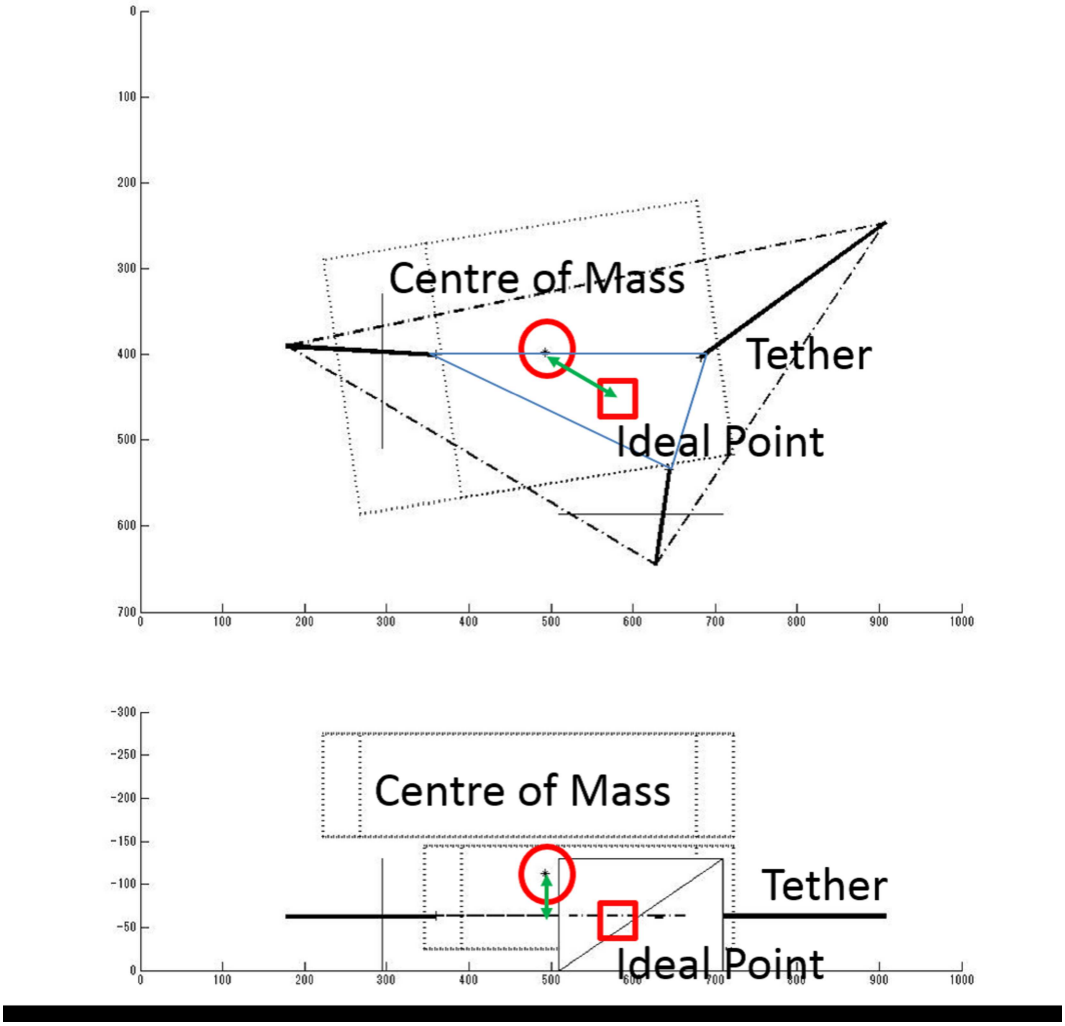



Fig. 5.15 REX-J 重心位置

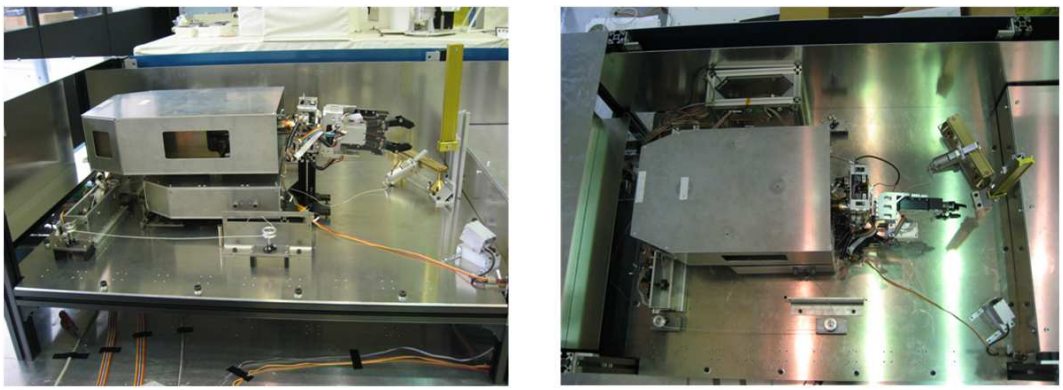


Fig. 5.16 REX-J Ground Test bed

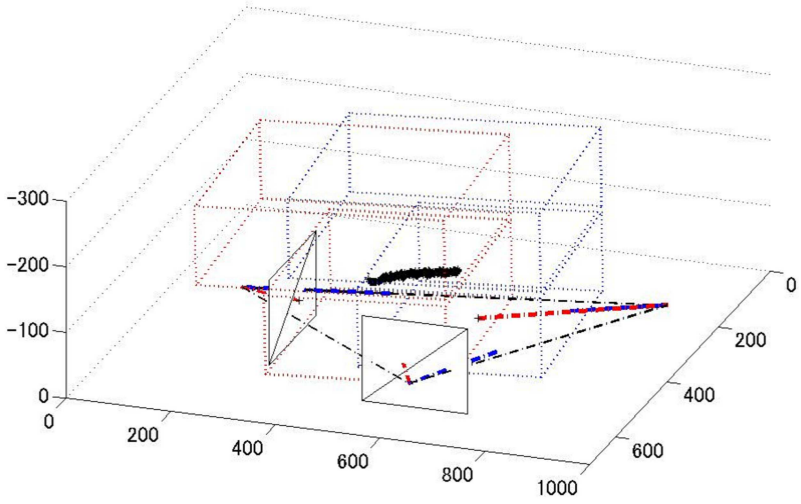



Fig. 5.17 REX-J 解析モデルによるテザー移動 (移動軌跡)，赤：始点，青：終点

移動後に誤差が生じることを確認した．また，当初予定していたフックの固定位置 (ハンドレール中央) では，移動中に滑りによって固定点がずれる現象を確認し，移動後，REX-J 解析モデルをもちいたテザー端点の推定が必要であることを明らかにした．本結果より，軌道上実験において，壁面からテザー支持状態への移動はテザー 1 本を固定してテザー 2 本による制御で移動し，また，移動後のテザー長よりフックのずれがないか確認を行う作業を運用手順の一部へ導入することとなった．

次に，テザー支持状態間の移動を，REX-J 解析モデルと地上模擬装置の両方で実験し，結果を比較する．検討した移動例の一部を以下に示す．Fig. 5.17 および Fig. 5.18 は，移動実験の始点と終点および Dynamics Simulator によって得られた移動軌跡である．この結果を元に定負荷テザー制御を実施した結果を Fig. 5.19 に示す．

移動中の軌跡とテザー長について，シミュレーションの結果と比較したものを Fig. 5.20 および Fig. 5.21 に示す．なお，テザー長は画像計測より求めた端点間の距離から算出したものである．

Fig. 5.20 によると，誤差 3mm 以内の範囲で精度良く移動していることがわかる．これは，Fig. 5.21 で示されるテザー長の誤差と同じオーダーの誤差であり，電流制御によって定負荷で巻取を行っているテザー 1(青線) の誤差がほとんどないことから，REX-J 解析モデルを用いることで地上模擬装置の挙動を良く推定できることが分かる．これより詳細なモデルの構築については，REX-J の設計仕様と地上模擬装置の間で設計が一部異なること，台車による摩擦の影響など複合的な要素を一つ一つ反映する必要があり，軌道上実験の解析モデルをもちいた検証の限界と考えられる．

なお，地上実験を実施し，REX-J 解析モデルの結果と比較することで，Table 5.3 に示す緒言の一部および軌道上実験の運用について修正事項がいくつか見られた．中でも，プーリ機構やフック機構のアライアンスの評価，本体内部のテザーの取り回しなどのテザー端部の位置情報が移動における位置精度に大きな影響を与えている．軌道上実験において，

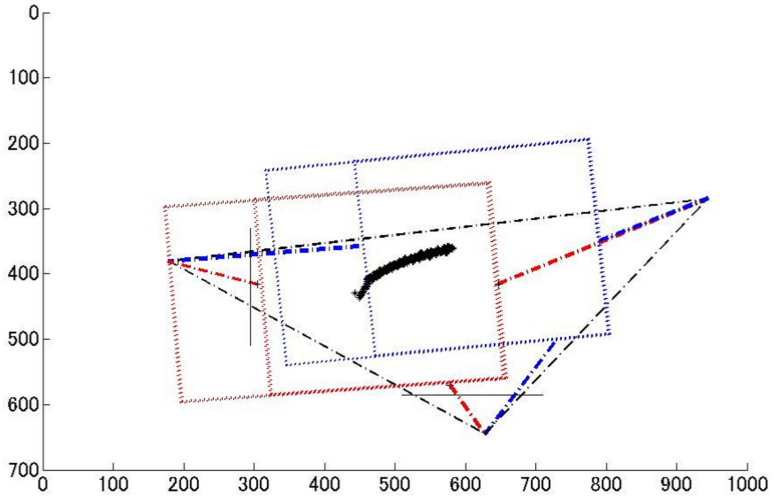



Fig. 5.18 REX-J 解析モデルによるテザー移動 (鳥瞰図)，赤：始点，青：終点

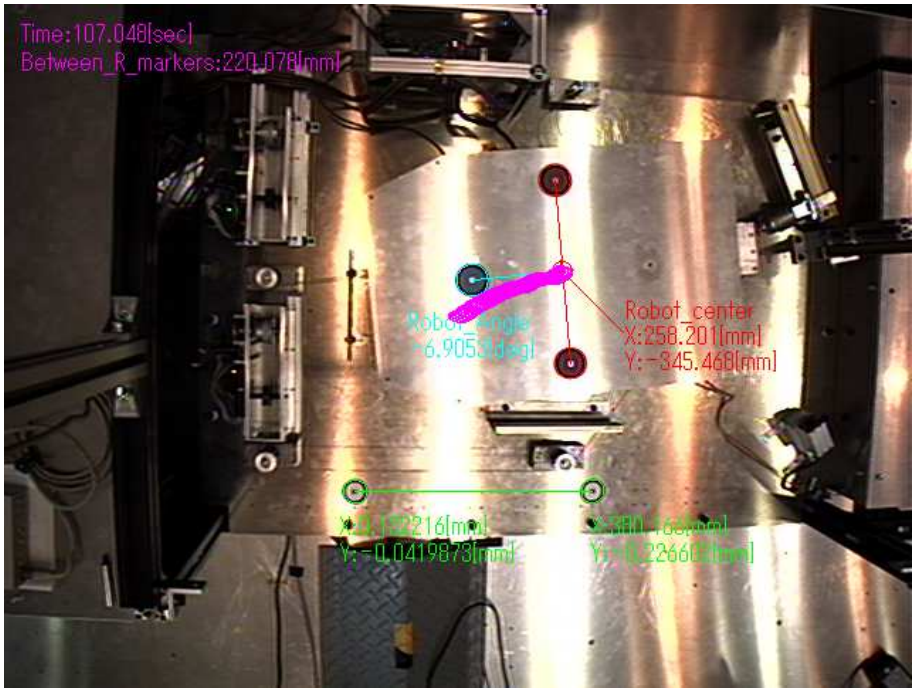



Fig. 5.19 地上模擬装置によるテザー移動，青：マーカ軌跡

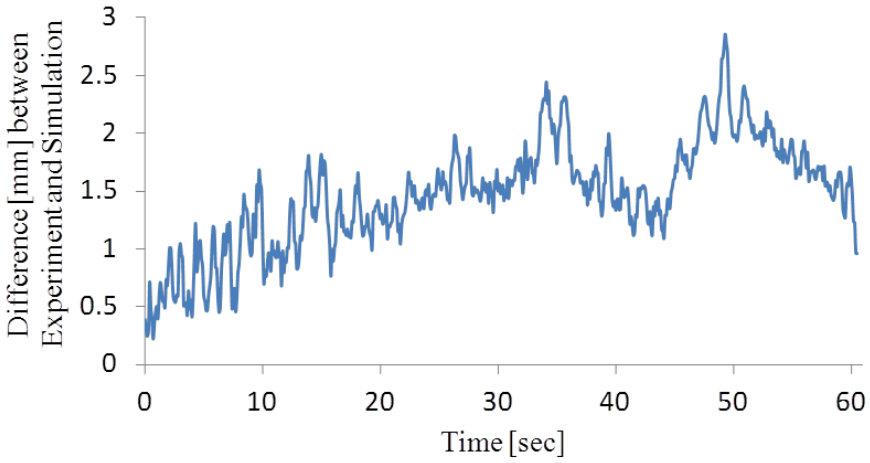



Fig. 5.20 数値解析との比較 (重心位置との偏差)

これらの要因を事前に特定し解析モデルへ反映できたことは幸いである．ただし，リール機構や筐体内部を複雑に取り回しされるテザーを正確にモデル化することは困難であり，軌道上実験では地上模擬装置と異なる端点を設定する必要が考えられる．REX-J 解析モデルと地上模擬装置で得られた実験結果を比較した際，プーリ機構や本体内部のテザーの取り回しについては，図面より容易に修正できる．しかし，フック機構のずれなど設計図面に現れない誤差については，一般的には，端部を直接計測するか誤差を許容する設計を必要としている．もしくは，観測結果から誤差を推定し，逆問題を解くことで解析モデルを修正するキャリブレーションが行われる．

これに対して，次節ではテザー長による本体位置の推定と，それを用いたキャリブレーション手法について言及する．

### 5.3.4 テザー長による本体位置の推定とキャリブレーション

一般的に，並列機構は任意の制御値から本体の位置，姿勢を決定する運動学解の導出が困難である．CDPM は，静安定状態を初期条件として，Eq. 2.3 の一般化逆行列で運動学解を導出することができる．ただし，Eq. 2.3 の行列項は位置と姿勢によって逐次算出するため，誤差により発散する傾向にある．

それに対して，状態量より算出されるテザー長 $l_i(\vec{x}, \boldsymbol{q})$ と観測したテザー長 $\hat{l_i}$ は一致することから，CDPM のキャリブレーション手法として，$l_i(\vec{x}, \boldsymbol{q})$ と $\hat{l_i}$ の差分値を評価した誤差の最適化手法による幾何的な解法が指摘されている．本論文では，REX-J の本体位置推定手法として，Eq. 5.2 に示す幾何方程式から得られる誤差を並べた評価式 $\boldsymbol{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \cdot, \delta_n]$ に対して，matlab の非線形最適化手法である Levenberg-Marquardt アルゴリズムをもちいて解析を行った．なお，Eq. 5.2 中の $\delta_I\vec{b}_i$ はテザー端点の誤差量を，$k_{reel}$ はリール機構のテレメトリと回転角との比例定数を表し，$e_i$ はリール内部の型ずれや重なりで生じるテザー長のずれ量を示す．通常，$\delta_I\vec{b}_i$ と $err_i$ は 0 とする．

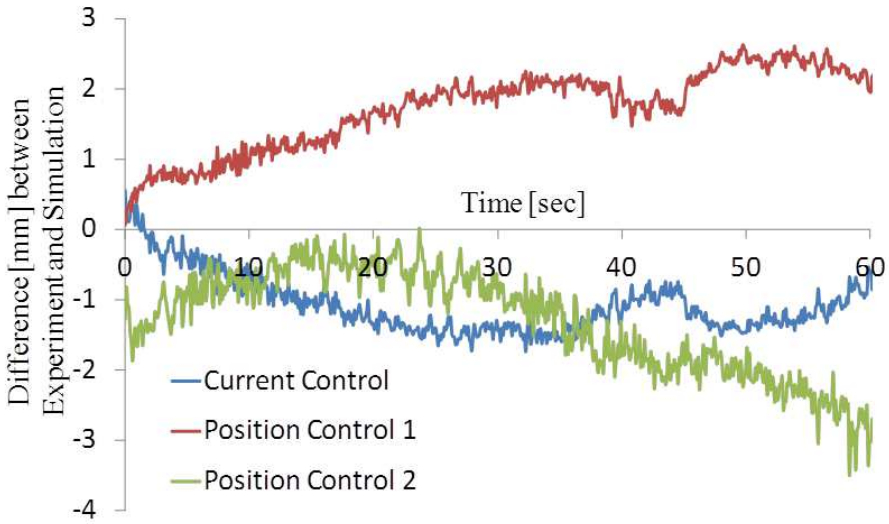



Fig. 5.21 数値解析との比較 (テザー長との偏差)

$$\delta_i = \left|\left|{}_I\vec{b}_i + \Delta\vec{{}_Ib}_i - {}_I\vec{x} - \boldsymbol{C}^T{}_C\vec{a}_i\right|\right| - k_{reel}\theta_i + e_i \tag{5.1}$$

$$\tag{5.2}$$

このとき，姿勢の微小変化でテザーの端点が大きく移動するため，最適化するパラメータに姿勢を含むと発散する．そこで，解析する対象を静止状態もしくは等速移動時と制限し，静安定解析を評価式の計算の中で逐次実施することで，位置 $\vec{x}$ を未知数として解析を行うことで，安定化を図った．本手法は，Levenberg-Marquardt アルゴリズム中で静安定解析を実施するため，解の同定に時間を要する．また，解析モデルやテザー長に誤差が含まれている場合，計算が発散する．そこで，その発散を防ぐために，前述した誤差項 $\Delta\vec{{}_Ib}_i$ と $e_i$ を適宜挿入した．ただし，誤差項の挿入を行う場合，複数の点で計測した誤差項を評価式で同時に解析する必要がある．

地上模擬装置で解析モデルにプーリ機構の直径を考慮に入れていないとき，移動経路から 20 点を抽出して解析を行うことで，プーリ機構の直径が誤差要因であることを特定できた．また，フック機構の固定点のずれについても，比較的精度が高い誤差の推定が可能であった．

一方，テザー長のずれ量を誤差要因とする場合，正しいテザー長に誤差を推定する場合があり，軌道上実験で利用する場合は注意が必要である．REX-J では，電流制御を行うリール機構について位置精度の信頼性が低かったことから，電流制御を行ったテザー長に対して誤差を推定し，本体位置と推定する．

Table 5.4 REX-J 計測機能

| | |
|---|---|
| 初期運用<br>(1 日半) | 壁面支持→テザー支持およびテザー支持→壁面支持の実証<br>リール機構の動作確認および軌道上での挙動の確認 |
| 定負荷テザー制御の検証<br>(1 日半) | 定負荷移動制御による移動精度の確認<br>REX-J 解析モデルに対するキャリブレーション |
| 繰返し移動の検証<br>(2 日間) | 定負荷移動制御の連続運用による移動誤差の評価<br>テザーによる本体位置推定手法をもちいた移動誤差低減手法の検証 |
| JEMRMS による撮影<br>(2 日間) | MCE 上部開口窓よりロボット本体の移動を撮影 |
| テザー 4 本移動の検証<br>(1 日間) | 本体に締結されたテザーを用いた移動を検証 |

## 5.4 軌道上実験

本小節では，REX-J の軌道上実験の詳細を示し，軌道上の結果より無重力下の劣駆動 CDPM に対する定負荷テザー制御手法の移動精度を示す．また，軌道上で同一箇所を繰り返し移動する実験を行った結果から，前節で示したテザー長による本体の位置推定手法の適用が定負荷テザー制御手法による連続移動に有効であることを示す．

### 5.4.1 実験手順

REX-J のミッションにおいて，テザー移動は 8 日間の運用期間を割り当てられ，計 31 回の移動実験を行った．移動実験は，運用期間によって Table 5.4 の 5 種類に分類される．とくに，定負荷テザー制御の検証と繰返し移動の検証については，本論文で新規に提案した手法をもちいて，テザー移動ロボットの移動制御を検証するための実験である．初期運用および JEMRMS による撮影は，保管位置への移動による充電機能や外部機器との協調運用などのロボットシステム構築に向けた JAXA ミッションである．テザー 4 本移動は，REX-J に締結された固定長のテザーを用いて，擬似的に完全拘束 CDPM を構成し，完全拘束 CDPM で定負荷テザー制御を行った場合の挙動を確認することを目的としている．

これらの実験について，実験の運用体制と研究の関連性を Fig. 5.22 に示す．

移動実験では，最初に，本体の位置，姿勢およびテザーの緩み状態の有無の判定など，REX-J の軌道上の状況を推定する．状態の推定には，テレメトリより算出したテザー長，画像情報，REX-J の CAD モデルならびに，前節の REX-J 解析モデルを用いたテザー長による本体推定手法を用いる．

次に，運用担当者と状態を確認した後，移動範囲を決め，それに適した定負荷制御手法に必要なパラメータを決定する．このとき，パラメータは設計仕様および機能確認試験の結果および REX-J 解析モデルの動力学シミュレータより，適切な移動速度を検討する．

最後に，運用担当者に確認頂いた後，REX-J の運用によってテレメトリおよび画像データを取得する．実験時は運用に同伴し，テレメトリと推定値が異なる場合の評価を行う．

本実験では，REX-J の軌道上の状況推定と移動制御のパラメータについて，前節で提案した手法を採用し，合計 31 回の移動実験を担当した．結果，軌道上移動実験は無事終了し，2013 年 7 月の定常運用完了審査会によって，REX-J のミッション完了が承認され，「伸展マニピュレータとテザーによる移動技術」が実証された．

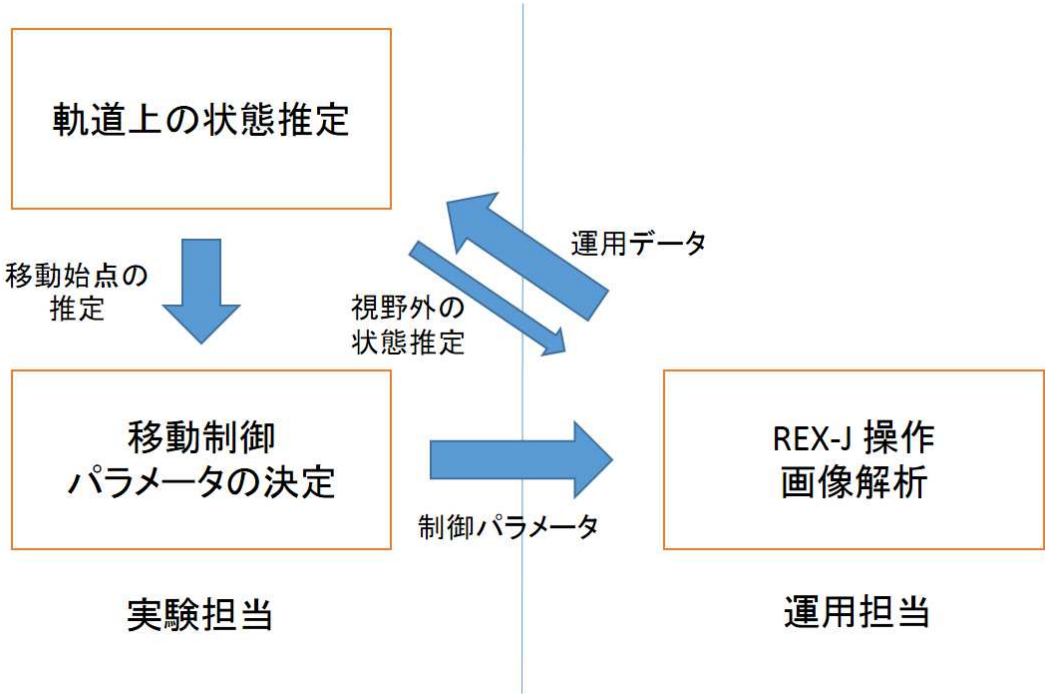



Fig. 5.22 実験と運用体制

次節より，実験結果の詳細を説明する．

### 5.4.2 定負荷テザー制御の検証

REX-J の移動実験は，外界センサを有していないため，テレメトリより得られるモータの回転角および，そこから算出するテザー長は，移動を重ねるごとに誤差が蓄積されることが予想される．そのため，移動実験の初期において，REX-J の解析モデルの妥当性および必要であればキャリブレーションを実施する必要がある．また，REX-J の解析モデルをもちいた定負荷テザー長制御を実施し，REX-J の運用において最も条件が良い時の位置制御の精度を検証する必要がある．

そこで，移動実験の初期運用時に壁面支持→テザー支持の移動と，テザー支持→壁面支持の移動の間に，テザー支持→テザー支持の移動を行ない，上述した項目の検討を行う．

まず，壁面支持→テザー支持の移動後の本体位置を前節でもちいた本体位置の推定で導出した．このとき，REX-J の解析モデルは，テザーフック固定時の画像と CAD モデルよりフック機構の位置を推定して校正したモデルを用いている．

次に，算出した位置を始点として，ロンチロックに固定された位置から前方に 72mm，上方に 15mm 移動した位置への移動制御に必要なパラメータを REX-J 解析モデルをもちいて算出し，軌道上の移動実験を実施した．

実験結果より得られた本体位置の画像を Fig. 5.23 に示す．Fig. 5.23 の右の画像はカメラ歪みを除いたもので，左の画像は，REX-J の設計図面より作成した REX-J の試験装置全体を再現した 3D CAD モデルである．本体位置，姿勢，手先は移動制御後の推定位置

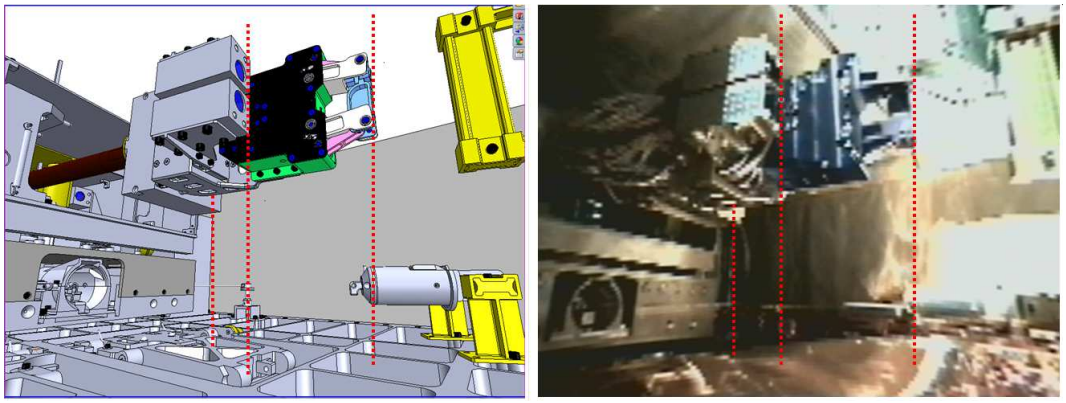


Fig. 5.23　定負荷テザー制御の検証 視野解析

である．カメラの視野角中央において，本体に搭載されたハンドと周囲の絵の配置がよく一致していることから，想定通りの位置に移動していることがわかる．

Fig. 5.24 には，テザー長より推定した本体位置の移動履歴と REX-J 解析モデルについて動力学シミュレータをもちいて求めた移動経路を比較したものである．なお，図中の縦軸と横軸は，REX-J 解析モデルの座標に準拠する．二つの軌跡の距離は，離れていて最大誤差 1mm 以内である．移動経路は非線形な弧を描き，全経路にわたってほぼ同様の軌跡を描いていることから，REX-J 解析モデルのテザー端点についても，よくモデル化できていることがわかる．これは，Fig. 5.25 の履歴からも同様のことがいえる．なお，Fig. 5.25 は横軸に時間を取っているため，リールの回り始めと止まるときは，動力学シミュレータより得られた解析解との間に誤差が確認できる．ただし，地上実験装置の結果が誤差 3mm 以内であったことから，軌道上のほうが推定精度がよいといえ，定負荷テザー制御についても良い精度で位置制御ができることが示されている．

定負荷移動制御の検証では，ハンドレールへ接近する移動を含めた計 8 回の移動を行なった．各移動制御の目標位置と，テザー長より推定した本体位置とを Fig. 5.26 に記載する．図中の縦軸と横軸は，REX-J 解析モデルの座標に準拠する．図中の (72,-15) 付近の誤差がある移動結果は，壁面支持からテザー支持への移行および Fig. 5.27 に示される (150,-80) からの移動の結果である．壁面支持からの移動については，誤差が生じることが地上模擬装置の実験から指摘されている．また，Fig. 5.27 の移動については，画像よりロボット本体が傾いていることが観測できる．REX-J 解析モデルおよびテザー長の本体位置推定手法は，静安定解析を前提としており，同一平面上にあるテザー 3 本の引張力で機体が傾くことは考えづらい．これは，移動中のテザー長から本体位置の推定を行った場合，REX-J 解析モデルによって予測した経路と異なっていたことからも明らかである．この原因として，REX-J のロボット本体と制御機器をつなぐケーブルが原因と推測される．ただし，ケーブルの剛性などの情報はないため，REX-J の解析モデルへ反映させることは困難である．ただし，この傾きは検証初期の本体が箱の奥側を移動したときには観測されなかったことから，ハンドレール近傍で強く影響するものと予測される．そのため，以後の運用では，ケーブルによる捻じれが生じない範囲として，ある程度ハンドレールより離れた位置を移動することにした．

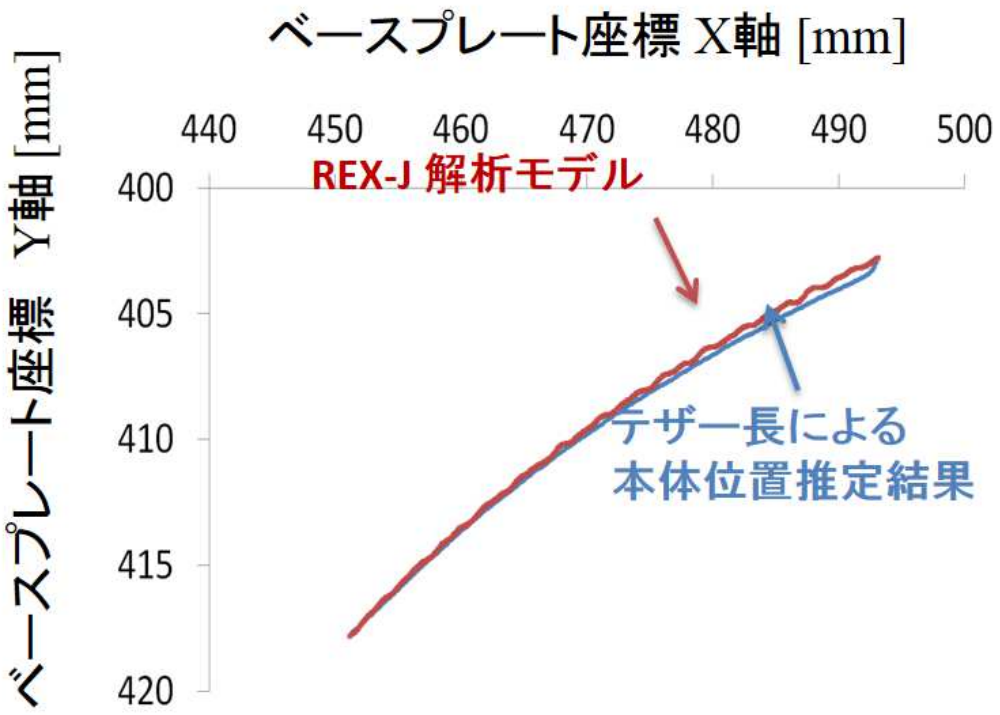



Fig. 5.24　定負荷移動制御の検証 REX-J 解析モデルと本体位置推定の比較

本実験の結果から，運用で用いている REX-J の解析モデルの妥当性と，その限界が示された．また，今回検証する機会はなかったが，テザー長より本体位置を推定する手法がよく移動を表しており，キャリブレーションなどにも適用が可能であることが確認できた．さらに，REX-J の解析モデルが異なる場合を除いて，テザーの支持状態から支持状態へ移動する場合に，定負荷テザー制御手法を用いることで，位置精度がよい移動制御ができることを確認した．

次節では，テザー支持状態で連続移動を行なった場合の移動誤差の蓄積を検証する．

### 5.4.3　繰返し移動の検証

軌道上でテザーを用いて移動する場合，伸展マニピュレータによるテザーの展開時を除いて，テザーはリール機構によって連続して操作される．このとき、リール機構の回転角だけでは繰返しの伸展および巻取操作によって，伸展量の制御値と出力に誤差が含まれることが懸念される．実際，REX-J のリール機構は，機構が簡易的なこともあり，繰り返し操作によって一定の誤差がのることが機能確認試験にて報告されている．

そこで，テザー移動実験として，移動制御の連続操作によって生じる誤差の拡大について，定量的な評価を行うために，複数の目標位置を繰り返し移動する実験を行った．運用時間の関係より，ベースプレート上の三点を二周時計回りに運動する．REX-J 解析モデルの鳥瞰図より移動経路の模式図を Fig. 5.28 に示す．図中の軌道上保管位置，軌道上移

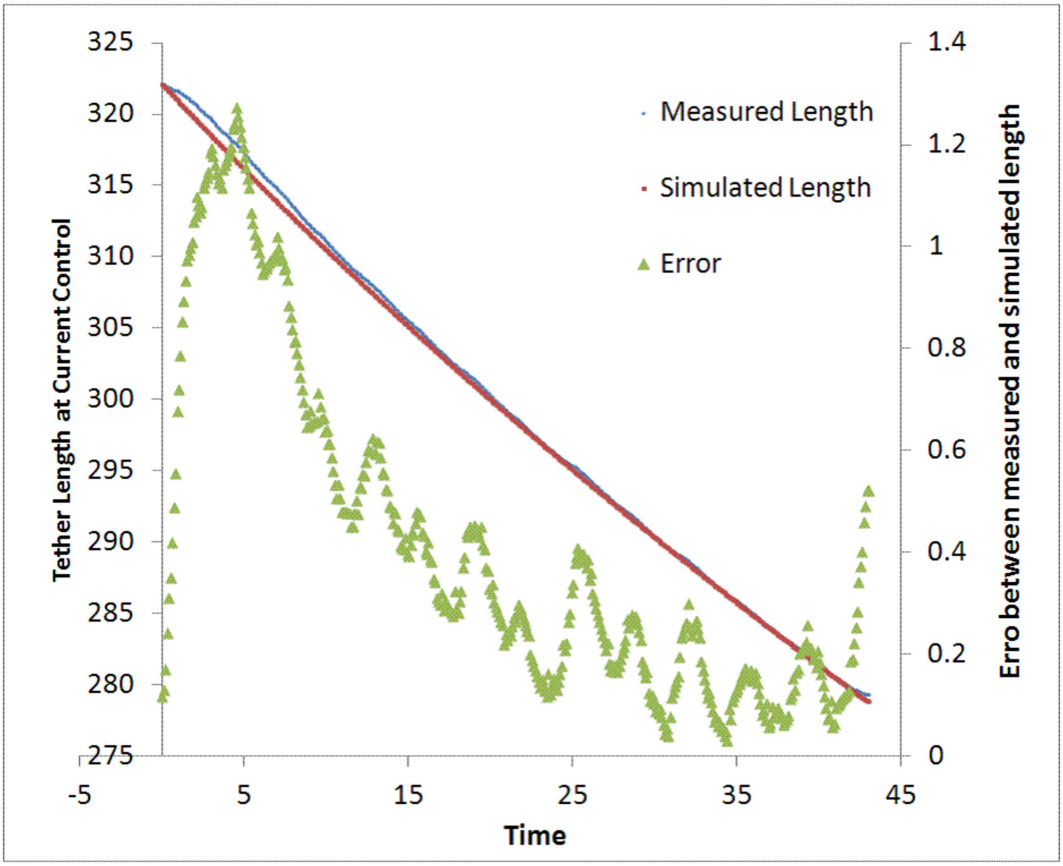



Fig. 5.25 定負荷移動制御の検証 電流制御の伸展長履歴と解析モデルとの比較

動起点は，壁面支持→テザー支持における目標位置である．繰り返し移動実験は，点 A，点 B，点 C の三箇所を順番に移動する．

繰り返し移動実験では，二種類の移動制御を検証する．一つ目は，点 A，点 B, 点 C の移動制御のパラメータは，移動前に事前に生成し，移動後の位置について補正を行わず移動する連続操作である．もう一つは，各移動毎に本体位置の推定を実行し，各点について独立してパラメータを決定する逐次操作である．前者は，パラレルマニピュレータのエンドエフェクタの位置決めと同じであり，後者は，移動ロボットなどで一般的な移動方法である．REX-J はパラレルマニピュレータと同じ構成であるが，モデル誤差が大きいため，内界センサで移動するロボットと同じ問題を抱えている．本実験によって，どちらの特性が強いか判断し，定量的な評価を行い，今後の機器の開発や運用の指針とする．

実験結果を，Fig. 5.29 と Fig. 5.30 に示す．各図の表記は，Fig. 5.26 と同様である．連続操作の Fig. 5.29 より，移動を重ねるにあたって，明らかに誤差が拡大していることが分かる．一方，逐次操作の Fig. 5.30 は，目標位置に対する誤差は生じているが，一定の範囲内に収まっていることが分かる．Fig. 5.31 は連続操作と逐次操作の誤差を比較した図である．Fig. 5.31 より，連続した動作では，テザー長による本体位置推定による誤差の低減が有効であることがわかる．

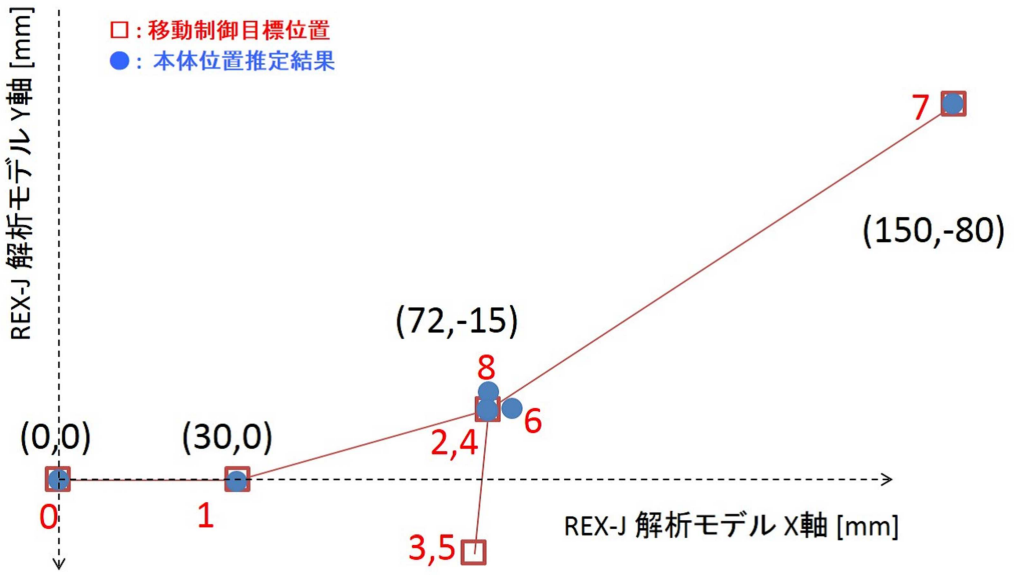



Fig. 5.26 定負荷移動制御の検証 移動履歴と位置精度

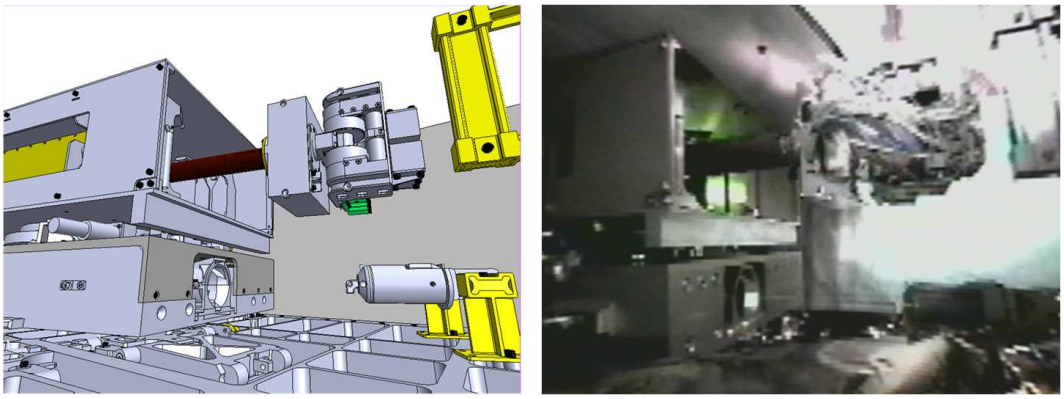


Fig. 5.27 定負荷移動制御の検証 視野解析 2

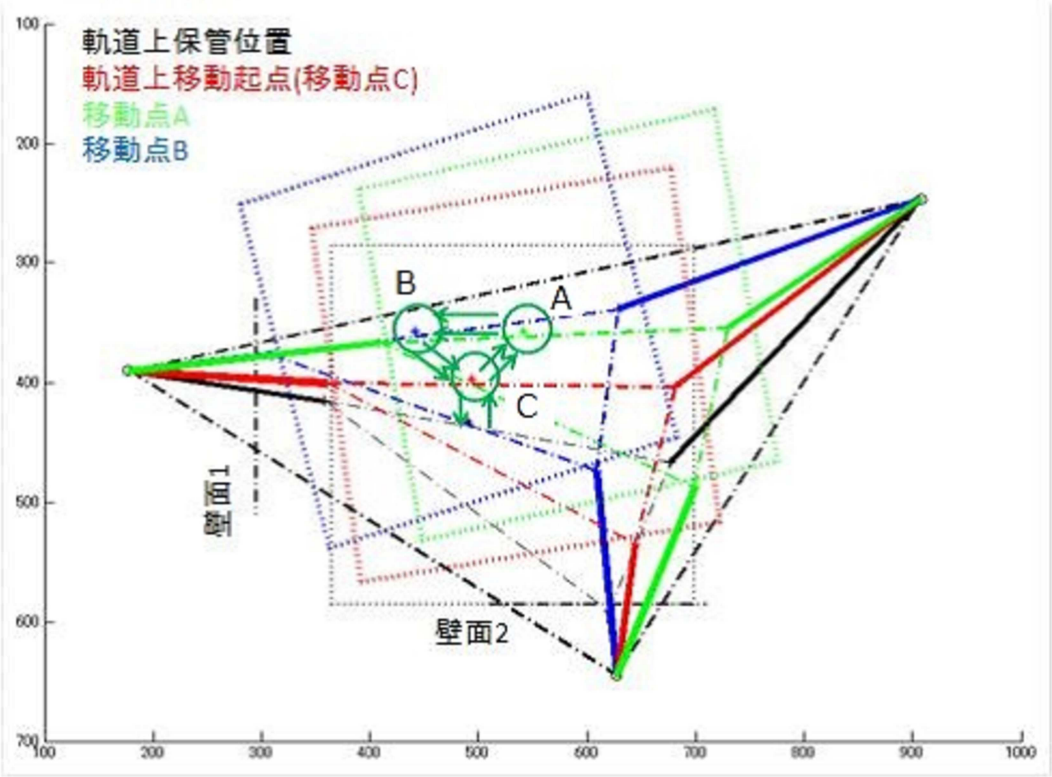



Fig. 5.28　繰返し移動の検証　移動軌跡

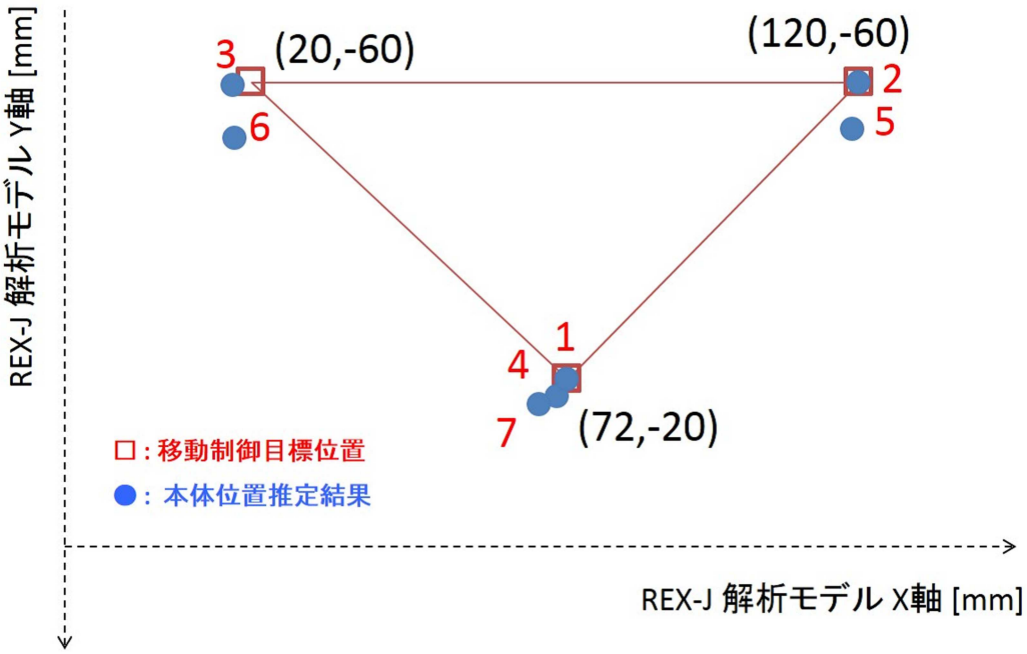



Fig. 5.29　繰返し移動の検証 移動履歴と位置精度 (連続操作)

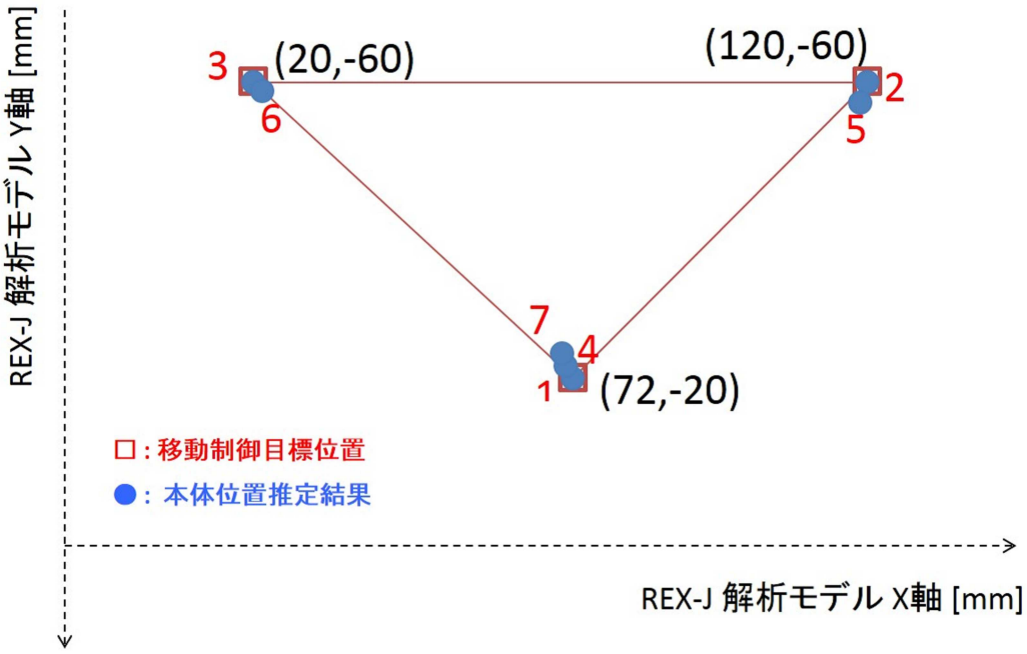



Fig. 5.30　繰返し移動の検証 移動履歴と位置精度 (逐次操作)

### 5.4.4　軌道上実験の成果

REX-J ミッションは，2013 年 7 月の REX-J 定常運用完了確認会において，予定した全ての実験を実施し，計画していた課題が達成されたことが認められた．

本ミッションのテザー移動実験において確認された成果を以下に箇条書きする．各項目は，それぞれ順を追って説明する．

- テザー移動ロボットの移動制御を軌道上で実証した．
- 無重力下における移動時の振動を観測し，制御に対する影響がないことを確認した．
- 軌道上の暴露環境における宇宙用テザーの繰返し使用を確認した．
- 遠隔操作による移動の課題を明らかにした．

まず，テザー移動ロボットの移動制御の軌道上実証は，世界初の試みである．テザーを用いたロボットによる移動は，Charlotte という先例があるが，テザーの数が 8 本と自由度よりも多い数で拘束されているため，地上での検証例があり，軌道上実験は確認の意味合いが強い実験であった．一方，テザー移動ロボットの移動制御は，重力や浮力，自重補償装置の摩擦の影響などの影響を除いた状態で，テザーのみで本体を空間に拘束することが目的であり，軌道上の検証は必要不可欠である．REX-J ミッション機器は，3 本のテザーで平面上に本体を支持する構成であり，本論文の第 3 章および第 4 章で対象とした空間移動とは構成が異なるが，要求される移動制御は同じであり，テザー移動ロボットの移動制御の軌道上実証として十分である．

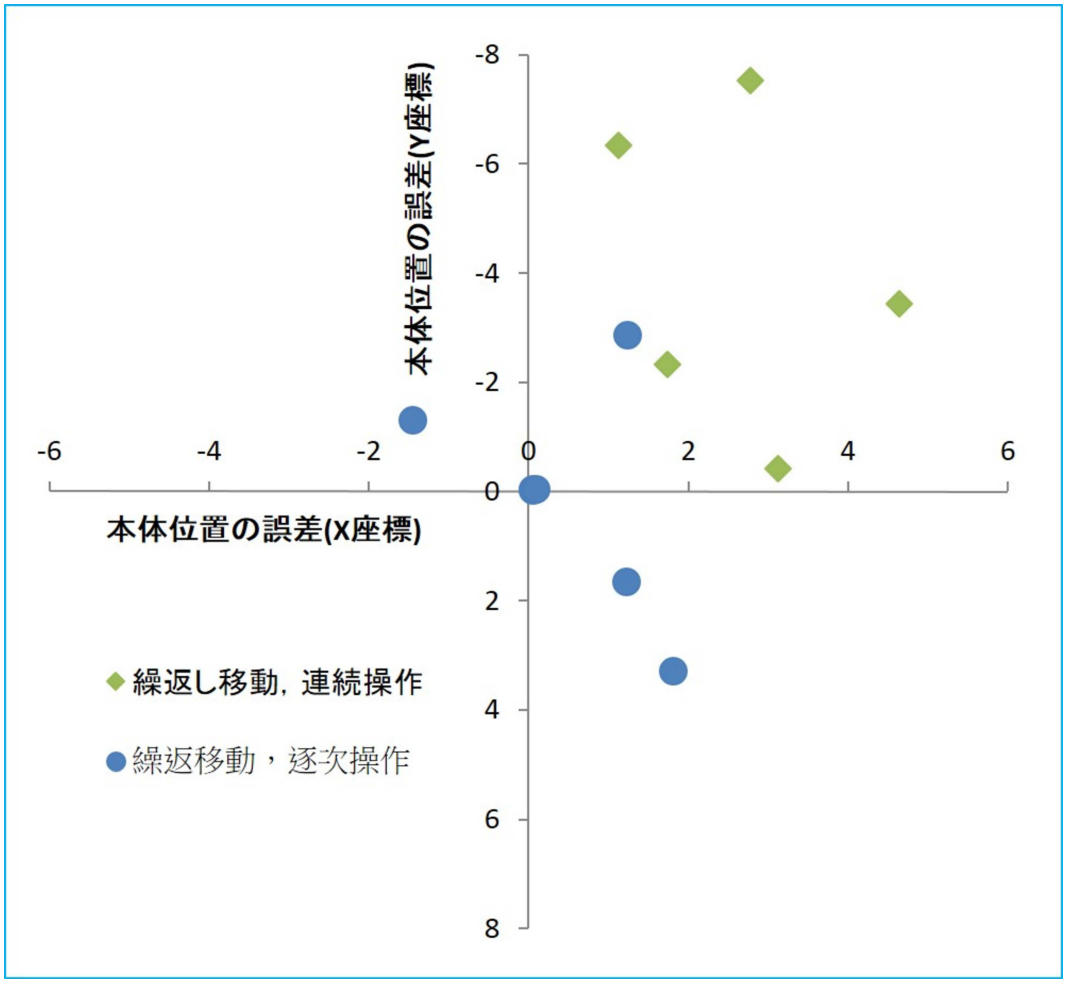



Fig. 5.31　繰返し移動の検証 誤差の比較

すなわち，静安定解析によるモデルベースド制御によって，本体を空間に拘束しながら微小重力環境で移動できることが確認されたことから，今後は，テザー移動ロボットでより発展的な制御手法を検証する際，本論文の制御手法とシミュレーション上で比較することで，軌道上に適用可能か否かを評価することができる．

次に，移動開始時および終了時に静安定解析のモデルと一致しないことに起因して生じる本体の振動について，軌道上の移動実験の画像と本体に搭載された加速度センサのテレメトリから，制御に大きな影響を与える振動が生じないことを確認した．これは，第 3 章のシミュレーションにおいて確認された加速および減速時の振動が生じること，REX-J の本体のようにテザーの固定点で囲まれた範囲の外に質量中心がある場合にテザーの支持が励起しないこと，さらにケーブルなどの外乱要因で振動しないことを，重力や摩擦の影響で減衰しない条件で確認することができた．

すなわち，一般的に不安定といわれているテザーで支持された物体が，静安定状態によるモデルベースド制御を適用することで，移動ロボットとして問題がない範囲で搬送できることを示している．

さらに，2012 年の 7 月から 2013 年の 6 月にかけて，REX-J のミッション機器は MCE の開口窓を介して暴露環境に晒されており，とくにテザーフックのハンドレール固定以後は，テザーに対して常に張力が掛けられた状態が保たれている中，宇宙用テザーとそれを用いたリール機構が著しく特性を落とすことなく，テザー長制御に利用できることを確認している．地上において，宇宙用テザーにおける原子状酸素や放射線に対する評価は行ったが，直射日光による日照時と日陰時の温度環境の変化に対して数十日以上の期間，張力を負荷した状況で試験した例はなく，軌道上で利用するロボットに適用する素材として十分な性能を有することを実証した．

すなわち，テザー移動ロボットの構成要素の一つであるテザーについて信頼性が確認されたことで，テザー移動ロボットの耐宇宙環境性について実証したことを意味する．

最後に，REX-J のミッションは，ISS において宇宙飛行士が介在しない初めての独立したロボット実験である．運用は，ISS および JEM の通信系統を利用するために，JEM の管制設備のコマンドおよびテレメトリの介在を委託する形で行われており，一般的なロボット実験と比べて，制約が多い体制であった．将来的に，テザー移動ロボットは同様の宇宙飛行士を介在しない条件で運用されることから，本実験で生じた課題は，今後の重要なレッスンズラーンドである．以下に課題を箇条書きする．

- 通信リソースの制約から，計測機器の制約が大きく，運用中に生じた事象に対して，考察する材料が少なかった．
- 軌道上の試験機器に対する地上の検証やテレメトリの定義に対する考察が足りなかった．
- 運用中に，ロボットの状態を可視化し，テレメトリに対してリアルタイムで評価する体制が整っていなかった．

筆者は，REX-J の詳細設計審査後にミッションメンバーに参加したため，試験装置に搭載する観測機器やテレメトリの定義について，JEM の運用側やメーカーに対する交渉を知らないため詳細を述べることは困難であるが，軌道上の通信リソースの制約から十分な情報を地上に送ることが困難であるために，本体位置を計測する機器や，分解能が高い加速度や張力の計測装置，実験装置全体を観測できる撮像装置など，一般の移動実験で制御則を検証する環境に不可欠な装置を REX-J のミッションでは搭載できなかった．

結果，実験結果は定性的な評価がほとんどであり，精度の高い定性的な評価は限定されている．とくに，本体位置や張力の計測ができなかったことから，宇宙用テザーの日照および日陰時の張力変動や伸びの定量的な評価を行うことができなかったことが，宇宙環境の利用における大きな反省点である．本実験では，マーカレス画像に対する位置推定手法の確立やテザー長による本体位置の推定手法の提案など，限られたテレメトリや画像情報から有意義な実験結果を推定する努力が行われている．今後は，テザー移動ロボットの設計に通信リソースの制約を考慮に入れ，計測手法も考慮に入れた制御や機器の開発が不可欠といえる．

また，本実験では，開発期間の関係でリール機構をはじめ，ミッション機器の繰返しの動作などの詳細な特性についてデータが得られなかった．そのため，運用のテレメトリに対して，誤差要因の特定が困難であり，制御則の定量的な評価が難しいものとなった．ま

た，テレメトリの工学値変換のモデルについて実験による妥当性の評価が十分に行われておらず，運用中にモデルの修正が必要となる箇所があった．これは，本来の開発期間に対して，概念設計が長引いたために生じた弊害と考えられる．地上の実験と異なり，打上げ時期という期限が決まっている宇宙実験における課題であり，長期間の検証はコスト増に繋がるなどプロジェクト管理においてデメリットがあるため，プロジェクトマネージメントの難しい点である．

運用中のロボットの可視化やテレメトリのリアルタイムの評価については，本研究に関係する箇所であり，REX-J の移動実験では筆者が手動で行っていた．これは，テザー長による本体位置の推定手法について，誤差要因を経験的に選択して推定していたためである．統計的手法をもちいてリアルタイムで本体位置を算出することが望ましかったが，運用までに十分な検証ができず，運用中および運用後に結果の評価を行っていた．これは，連続した運用を妨げる要因として，大きな反省点である．今後，軌道上で自律運用もしくは遠隔運用を行う上で，ロボットの可視化やテレメトリのリアルタイム評価技術を確立することが望ましい．

すなわち，これらは実際の軌道上実験で得られた重要な知見であり，従来の衛星の運用とは異なる課題として，今後の宇宙飛行士支援ロボットの開発における研究を明らかにしたことになる．

以上より，本研究が貢献した移動実験で得られた四つの成果は，テザー移動ロボットの開発に大きく寄与するものであり，軌道上実験は宇宙飛行士支援ロボットの実現に対して必要であったといえる．

## 5.5 まとめ

本章の要点を以下にまとめる．

- REX-J ミッションにおけるテザー 3 本による平面移動は，本論文が提案する最小構成のテザーで移動するロボットの移動制御手法が要求されることを述べ，軌道上実験により本論文の有効性を確認するために，テザーによる移動制御における目標位置へのテザー長制御について評価することを述べた．

- 軌道上実験のために，REX-J の解析モデルと地上模擬装置を開発し，運用に向けて検証を実施した．

- 軌道上実験において，REX-J の本体位置を観測できないことが，定負荷テザー長制御を適用する上で課題となったことから，テザー長より本体位置を推定する手法を提案し，軌道上の実証実験に適用した．

- 遠隔制御に適した定負荷テザー制御をもちいて REX-J ミッションの移動実験を実施し，目標位置への移動制御を実証した．また，繰り返し移動について，連続して移動する場合と本体位置の推定結果による補正を逐次加えて移動する場合について，定量的な評価を行い，テザー長による本体位置の推定によって精度が向上することを示した．

- REX-J ミッションにおけるテザー移動実験において，(1) テザー移動ロボットの移動制御を軌道上で実証し，(2) 無重力下における移動時の振動を観測し，制御に対する影響がないこと，(3) 軌道上の暴露環境における宇宙用テザーの繰返し使用が可能であることを確認し，(4) 遠隔操作によるテザー移動ロボットの課題が明らかになったことから，得られた成果は本研究の目的である宇宙飛行士支援ロボットの実現に対して，大きく貢献したことを述べた．

# 第6章　結論

## 6.1　結論

本論文では,「無重力下における劣駆動 CDPM の移動制御」を念頭に置き，これを可能とするようなテザー移動ロボットの移動制御を確立することを目指し，研究を展開した．宇宙ロボットのテザーを用いた移動手法について，従来の手法との違いを明確にして，課題を明らかにして有用な結論を得た．以下に，各章ごとの要点を整理する．

**第 2 章 テザー移動ロボット**

宇宙ロボットの移動手法として，マニピュレータをもちいてテザーを展開し，テザーの協調制御によって移動する「Tether based locomotion」の移動手法について具体的に明らかにし，テザー移動ロボットを紐をもちいた並列機構系である Cable Driven Parallel Manipulator としてモデル化した．また，紐に緩みが生じない系を仮定することで，本来複雑であるテザーの制御を簡潔なモデルで定義し，運動学・動力学の基礎式を示した．

**第 3 章 テザー移動ロボットの移動制御**

Tether based locomotion に要求されるテザーの緩みが生じない移動制御手法として，静安定解析によるモデルベースド制御手法を提案した．Tether based locomotion では，有人宇宙施設で移動を行うために従来の CDPM と異なるテザーの配置が要求されることから，無重力下における劣駆動 CDPM のために紐の緩みがない系として劣駆動 CDPM の静安定解析をもちいた手法を新しく提案し，モデルベースド制御手法として適用した．また，提案手法をもちいたリール機構の協調制御を行う方法として，任意のテザー配置において移動軌跡の設定が容易な作業空間による逐次テザー制御手法と，簡易的なリール制御系でも実装が可能な関節空間による定負荷テザー制御手法を提案した．CDPM の動力学シミュレータを開発し，提案した手法を検証した．

**第 4 章 テザー移動ロボットの地上実験**

提案手法を検証するために，船内環境を模擬した地上試験設備を開発した．地上試験設備について解析モデルを設計して CDPM の動力学シミュレータをもちいた解析を行い，地上試験設備をもちいた移動実験の結果を検証した．

**第 5 章 テザー移動ロボットの軌道上実験**

EVA 支援ロボット技術実証実験 (REX-J) にて，提案手法の検証を行った．提案手法を検証するために，REX-J の解析モデルを設計し，CDPM の動力学シミュレータをもちいたシミュレーションで運用に必要なコマンドを検証し，REX-J 地上試験装置をもちいた地上実験によって有効性と安全性を確認した．実際に軌道上にて同様の実験を検証し，移動を確認した．

## 6.2 今後の課題と展望

本論文では，Tether based locomotion に着目して，テザー移動ロボットを定義し，テザー長の協調制御による移動制御を達成した．移動制御の概念として静安定解析によるモデルベースド制御を提案し，テザーの協調制御則として，逐次テザー制御手法と定負荷テザー制御手法の二種類を示した．特に，定負荷テザー制御手法は，軌道上の微小重力環境を模擬した地上実験で検証し，テザーによる低コストな移動制御を達成した．本研究の成果は，REX-J ミッションにおけるテザーによる移動実験で実証され，宇宙ロボットの移動手法の研究においてテザー移動ロボットの分野が開拓された．

テザー移動ロボットは，従来のテザーを用いたロボットと異なり，(1) テザーは空間に拘束するために必要な最小の数で構成されるが，(2) 移動中も適切なテザー長の制御によって本体が空間へ拘束されることから，軌道上のようなテザーの固定に関して制約がある環境下での運用や複数台のロボットによる協調作業の適用など応用が考えられる．

テザー移動ロボットは，当該分野で例がない新規の研究であり，今後の発展が望まれる．本論文では移動制御について扱い，静安定解析によるモデルベースド制御を基準としたテザー長制御を提案した．その中で，数値解析や地上実験の結果，本体の移動開始時および停止時に，静安定のモデルと実際の挙動が異なることから振動が見受けられた．また，モデル誤差によって，移動中の誤差や移動後の振動が励起することが判明している．

これに対して，ロボット本体の加速度や角加速度，テザーの張力などを計測して，テザー移動ロボットの動力学モデルによるモデルベースド制御による振動抑制などの発展研究が考えられる．一方，モデル誤差に対しては，REX-J の軌道上実験で提案したテザー長を用いた本体位置推定手法を応用した定負荷テザー制御手法によるモデル誤差の推定など，キャリブレーションについて研究が望まれる．

また，本論文では Tether based locomotion の制御手法を対象としたが，宇宙ロボットの移動手法として確立するために，テザー固定のための外環境の認識や移動経路の探索について，地上の移動ロボットの技術を宇宙ロボットへの適用が考えられる．

今後は，本体位置と姿勢およびテザー端点の推定手法の獲得による移動ロボットしての精度の向上や，テザー張力制御をもちいたより信頼性が高くロバスト性のある制御手法の確立，テザー端点を固定するための伸展マニピュレータやリール機構の開発など，システムに対する要素技術の開発によって移動手法の習熟が求められる．

これらの研究によって，安全性，信頼性を確立することで，将来の宇宙開発におけるロボットの移動手法として技術を確立し，ますます拡大する人類の宇宙開発へ貢献することが望まれる．

# AppendixA　略語集

Astronaut Support Robot (Astrobot)
Bread Board Model (BBM)
Cable Driven Parallel Manipulator (JAXA)
Canada Space Agency (CSA)
Engineering Model (EM)
European Robotic Arm (ERA)
European Space Agency (ESA)
Engineering Test Satellite (ETS-VII)
Flight Model (FM)
Ground Support Equipment (GSE)
Global Lightning and Sprite Measurement Mission (GLIMS)
Ionosphere,Mesosphere,upper Atomosphere, and Plasmasphere mapping (IMAP)
International Space Station (ISS)
Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
Japanese Experiment Module (JEM)
Japanese Experiment Module Exposed Facility (JEM-EF)
JEM Remote Manipulator System (JEMRMS)
Multi-mission Consolidated Equipment (MCE)
Manipulator Flight Demonstration (MFD)
Micro Processing Unit (MPU)
Motor Driver (MDR)
National Aeronautics and Space Administration (NASA)
Reconfigurable Brachiating Space Robot (RBR)
Robot Experiment on JEM (REX-J)
Small Fine Arm (SFA)
Space Inflatable Membranes Pioneering Long-term Experiments (SIMPLE)
STEM Robot Arm (SRA)
Shuttle Remote Manipulator System (SRMS)
Space Station Remote Manipulator System (SRMS)
STEM Robot Arm (STEM)
Tsukuba Space Center (TKSC)

# AppendixB　テザー移動ロボットの地上実験装置に関して

Appendix B では，第 4 章の地上実験で開発した地上実験装置について説明する．実験装置全体について説明した後，主要な構成機器であるリール機構について述べる．本実験で用いたリール機構は，REX-J のリール機構を参考に，宇宙ロボットのテザー移動に適した改良を施したものである．最後に，リール機構で使用するテザーについて，考察した結果を補足として示す．

## B.1　地上実験装置の概要

地上実験装置の外観を Fig. B.1 に示す．

実験装置は，幅 3m，奥行 2.2m，高さ 2.2m の枠組みで構成された施設モックアップに対して，リール機構を任意の位置に配置し，テザー移動ロボットの移動制御の実験を行うことができる．テザー移動ロボットのモックアップには，400mm 立方に収まる正四面体

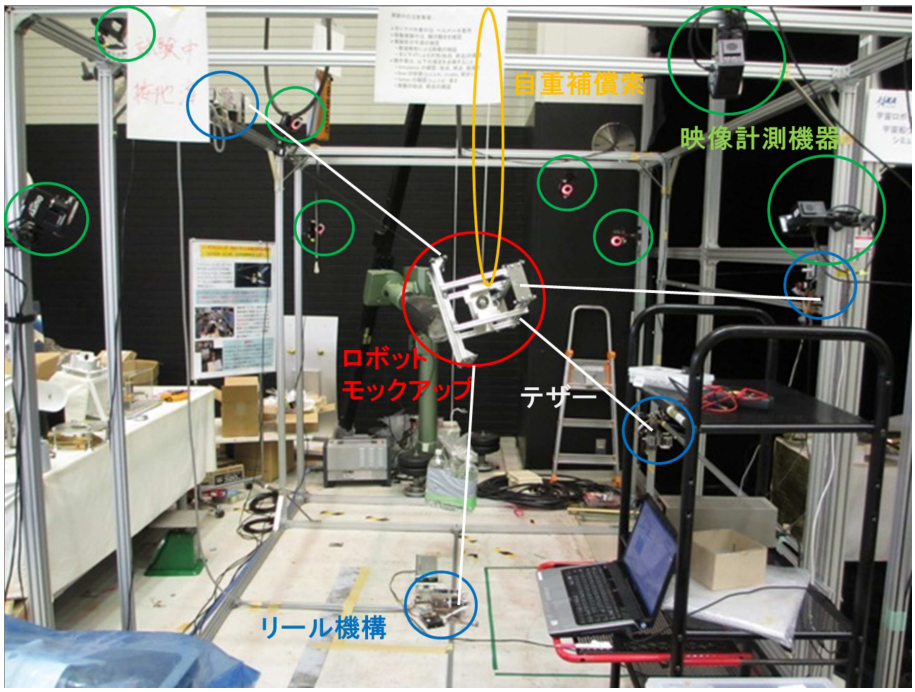



Fig. B.1　実験装置全景

形状の頂点の位置にテザーの拘束点をもつアルミフレームで構成された構造モデルを用いる．電源や通信のケーブルの干渉を避けるために，リール機構や観測機器はモックアップの外部に設置し，テザーの端点と自重補償索のみ連結されているが，**??**の左下の CAD 図面で示すように，リール機構を 4 台搭載したロボットシステムによる移動実験の検証も可能である．自重補償索は，高さ 10m の屋内でクレーンによって吊られた滑車をもちいて行なう．滑車による釣合は，モックアップの運動が反対側の錘りに影響し，上空で吊られた滑車が回転するなど課題があり，今後は定張力バネをもちいた方式による検討も必要である．モデルの運動は施設モックアップに設置されたナックイメージテクノロジー社提供の映像計測機器システムをもちいて記録する．なお，ロボット本体の位置と姿勢は計測するがフィードバック制御には用いない．今後の課題として，船内設備に搭載したカメラシステムより取得した本体の位置，姿勢の計測結果を加えた制御手法の構築が挙げられる．

## B.2　宇宙ロボット用リール機構の開発

本節では，テザー移動ロボットの要素技術であるリール機構に必要な機能について考察し，地上実験のために開発したリール機構をもちいた試作機による検証の結果を示す．

リール機構は，テザーなどの弦材を型枠 (ドラム，スプール) に巻き取ることで収納する装置である．釣具や紡績機器，クレーンなどの重機など非常に多くの分野で使われる機器である．用途は多様であるが，リール機構は大別すると弦材の展開方向によって二種類に区分される．一つは，型枠の直径方向へ弦材を繰り出すドラム方式で，展開及び収納を繰り返す用途で用いられる．一般的に，ドラムは弦材の繰り出しに応じて回転し，その回転を制御することで弦材の伸展を調整する．一方，型枠の軸方向へ弦材を繰り出すスプール方式は，非常に小さな抵抗で大量の弦材を繰り出す用途で用いられる．こちらは，弦材の繰り出しに対してスプールの抵抗はほとんどなく，紡績機器や釣り用のリールは，周囲に弦材を巻き取るための機構を別途搭載している．

宇宙用のテザーリールは，一般的にスプール方式のリール機構が多い．宇宙のような微小重力環境下では，わずかな放出力で数 km に渡るテザーの展開が可能であり，軌道上での広範囲の展開実験も行われている．[70] また，導電性テザーによる衛星の軌道制御がデブリ回収の手段として研究が進められており，日本でも数 km のテザーを放出するための簡易的で軽量な機構の開発，テザーの選定が行われている．これらは，如何に抵抗が少なく，かつ長距離を展開できるかが要求され，スプール方式のリール機構が採用されている．

一方，ロボットや衛星の制御や張力制御による絡まり補償を有する展開機構の開発として，ドラム型の宇宙用テザーリールも開発されている．[71] [72] [73] [74] これら宇宙用テザーリールの特徴として，張力制御の機能に加えて紐の緩みを補償する機構を搭載していることが挙げられる．宇宙では，重力の影響がほとんどないため，紐の先端についている錘に張力を加え続けることは困難である．導電性テザーのように数 km の展開を行う場合，重力傾斜トルクはリール機構の張力制御と釣り合うが，一般的な用途ではなんらかの外力を与え続けない限りテザーは緩む．このとき，機構内部への絡まりを防ぐため，宇宙用テザーリール機構には内力を常に掛け続ける機構が要求される．

テザー移動ロボットの場合，複数本のテザーで外壁と拘束されるため，リール機構の緩みは，本体や他のリール機構など他の要素が原因で発生する場合がある．本論文では，静

安定解析によるモデルベースド制御にて，緩みが生じない状態を制御によって達成したが，移動始めや停止時等の加減速を伴う箇所では，テザーとその張力は大きく振動し，モデル誤差が大きい場合は緩みが生じてしまう．また，伸展マニピュレータを用いたテザーの伸展では，マニピュレータの剛性が弱く，また，伸展速度の線形性が悪かったため，テザーと手先を同時に同期させると手先が曲がるというハザードが懸念され，伸展時はテザーを緩めるという運用方法がとられていた．リール機構から脱落しない範囲で緩めてはいたが，リール機構の構造を考えると好ましくなく，実際，以後のテザー長の伸展において誤差が生じる要因となった．

そこで，テザーの緩み補償機能を有するリール機構を開発することで，信頼性，安全性を高める方法を検証するため，以下のリール機構を開発した．

リール機構の設計要求を以下に示す．

1. 2m 程度の伸展長を有し，繰り返し精度を維持する．
2. 張力計測機能を有する．
3. 受動的な機構によるテザーの緩み補償を有する．
4. 搭載機器は簡略で，従来のリール機構に納まる大きさとする．
5. 張力制御時，人間の手先やマニピュレータでテザーを引き出すことができる．

伸展長と張力計測機能は，地上模擬装置によるテザー移動の検証に必要な機能である．テザーの緩み補償を受動的な機構としたのは，宇宙機器は信頼性の観点からアクチュエータの数を減らすことが要求されるためである．さらに，簡略で従来のリール機構に納まる小型な装置としたのは，将来的にロボットへ統合する際，リール機構の大きさが制約となるためである．

上述した設計要求より，REX-J のテザーリール機構の BBM の設計資料を元に受動的な緩み補償機構を追加し，Fig. B.2 に示す宇宙用テザーリールの試作機を開発した．

受動的な緩み補償機構の仕組みを以下に示す．本研究では，受動的な緩み補償として古典的な手法であるダンサーロール方式を採用した．ダンサーロールとは，Fig. B.3 に示すような外力が加わったプーリ機構で紐に張力を付加する機構である．テザー端部の変位による張力の変動に対して，力の釣合からプーリの変位によって張力を制御する．一般的に，錘によって荷重を付加する受動的な定荷重ダンサーロールと，エアシリンダーやバネを用いた可変荷重ダンサーロールの二種類が存在する．リール機構には，バネをもちいた可変荷重ダンサーロールを採用し，バネの変位を計測することで張力計測および張力制御を行なう．バネの変位の計測による張力制御のため，二次遅れ系となり制御の応答速度は良くないが，張力制御を行なっていない場合も，張力の変動に対して受動的に補償するため，宇宙用テザーリールに適した方式といえる．

Fig. B.4 に，バネ方式のダンサーロールの数学モデルを示す．テザーの繰出量は，リールの回転角に加えて，ダンサーロール位置によって定まる．また，テザーの張力は，プーリに作用する力に加えて，バネの変位が影響する．摩擦の影響が無視できるとき，テザー張力はバネの変位，変化量，その時間微分によって一意に定まるため，バネの変位をポテ

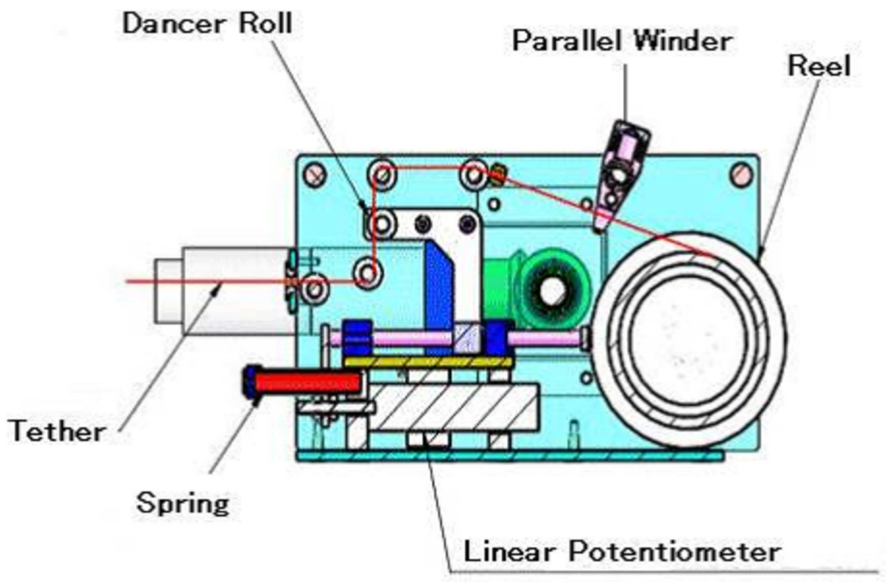



Fig. B.2　テザーリール機構試作機の CAD 図

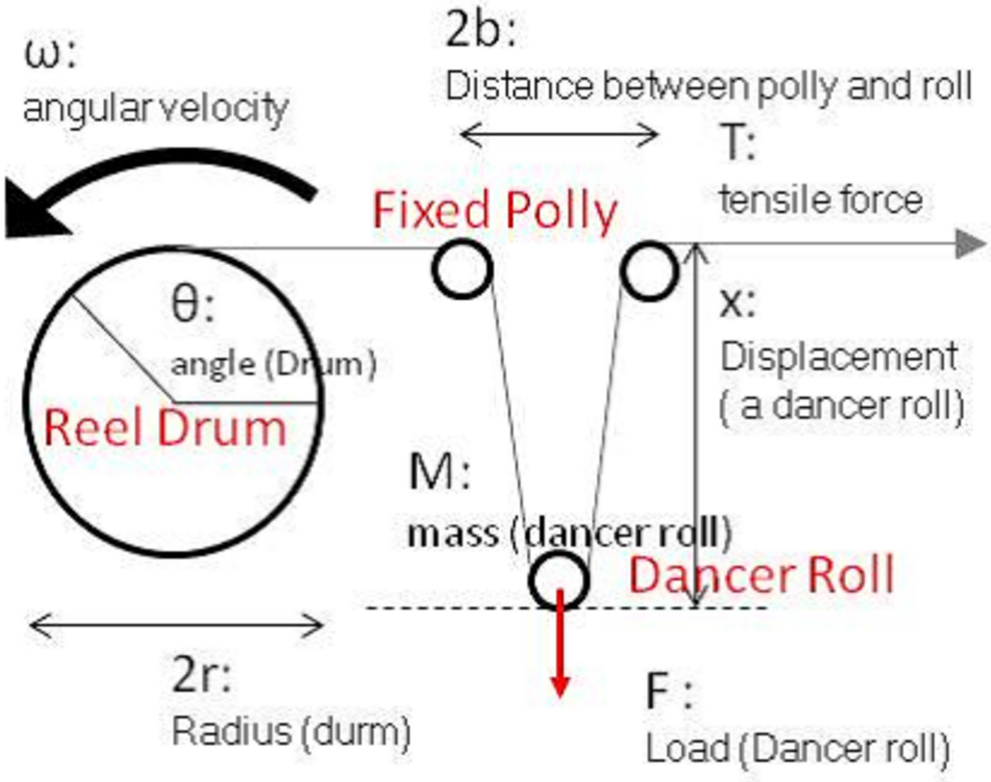
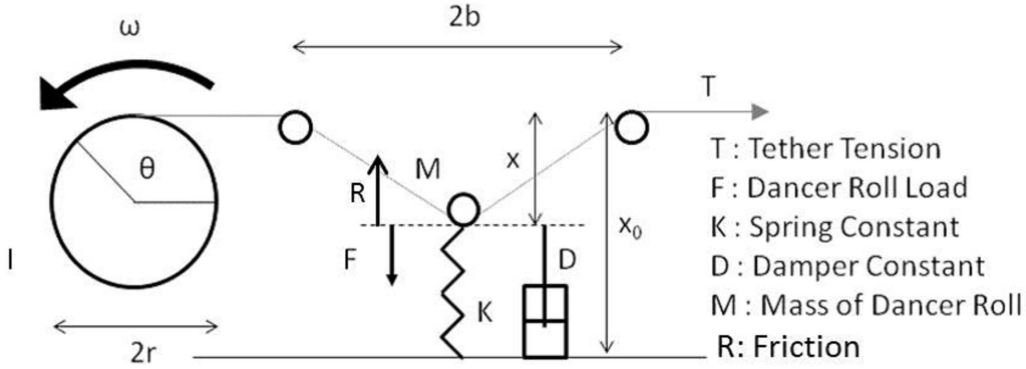



Fig. B.3　ダンサーロール方式　概略図




θ : Rotational Angle
ω : Angular Speed
r : Reel Radius
I : Reel Inertia moment

2b : Distance between guide pulleys
x : Distance between spring and guide pulley
$x_0$ : Spring Natural Length Spring

$$L = \int r\omega dt + L_0 + 2\sqrt{x^2 + b^2}$$

$$T = 2F\sqrt{x^2 + b^2}/x$$

$$F = M\ddot{x} + D\dot{x} + Kx - R$$

Fig. B.4 ダンサーロール数学モデル

ンショメータで計測することで張力を計測することができる．このことから，バネの変位を参照値としたリール回転角による張力制御系が構築できる．

以上を踏まえて，Fig. B.5 に示すダンサーロール機構を設計し，リール機構へ搭載した．プーリに作用する力をバネ力のみと近似した場合，設計したリール機構のバネの変位と張力の関係を Fig. B.6 に示す．機構を小さくするため，プーリ間の距離 $b$ を大きくしたため，バネの変位と張力の関係は非線形性が強いが，k=1.8 のバネを選定することで，0N～30N の範囲で線形性が強く，比較的分解能が大きい計測が可能である．それを搭載したリール機構の諸言を refFig: Reel Data に示す．

実際に，Fig. B.8 に示す実験装置を用いて実験装置の張力を計測した結果を Fig. B.9 に示す．

ヒステリシスが大きく，特に高い張力の域で問題が多い．これは，静止摩擦力が原因である．設計した機構は，張力が負荷されるとプーリ機構の摺動部に摩擦力が負荷される機構となっている．このため，張力によって静止摩擦力の上限が大きくなり，張力の変化を吸収するためである．静止摩擦力の影響を考慮に入れたモデルを設計し，張力の計測結果に改善は見られたが，摺動部については気温や液体潤滑剤の塗布状況で条件が変わってくるため，プーリ機構の摺動部がバネの軸方向と一致するように設計変更が必要である．

同様の理由で，張力制御について検証できなかったが，バネの変位に対してリール回転

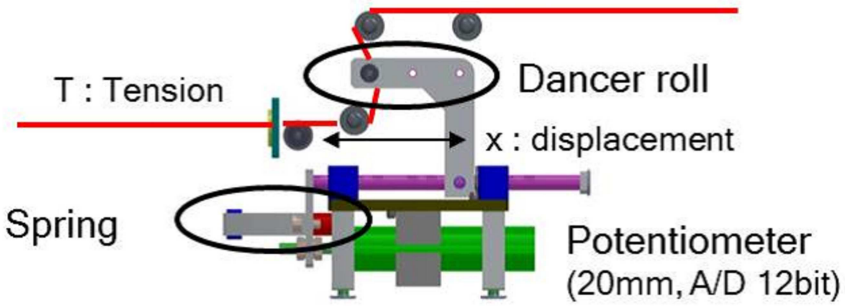



Fig. B.5 Dancer Roll CAD Model

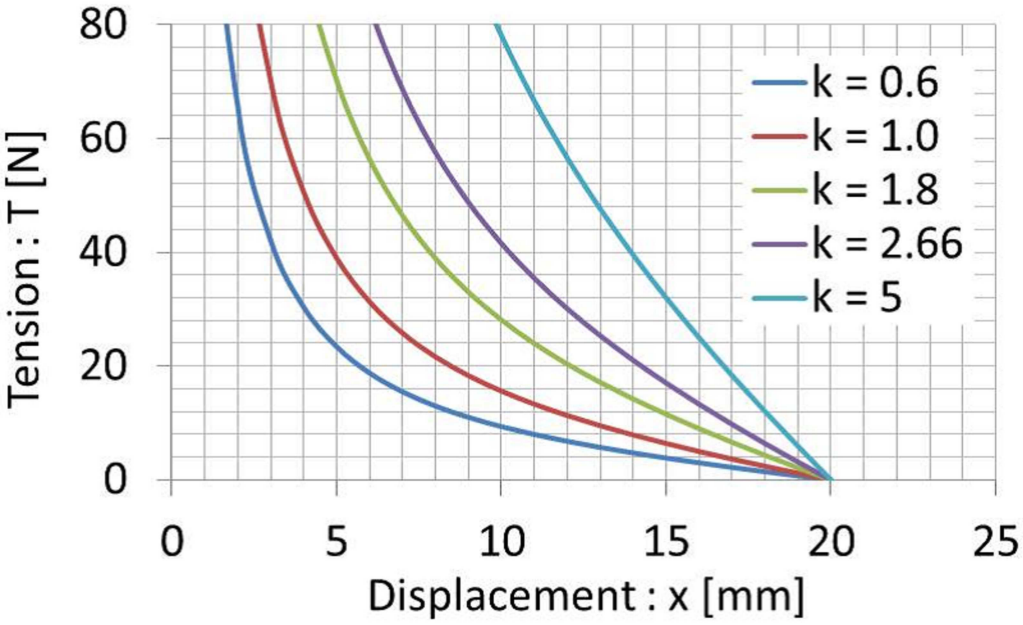



Fig. B.6 バネ変位-張力のモデル

| | Design values (Request values) |
|---|---|
| Volume and Mass | 193mm x 103mm x 110mm<br>1.5kg |
| Reel Speed | 53mm/s ( > 50 mm/s) |
| Maximum Tension | 75N ( > 70N) |
| Tension Control Range | 40N (> 30N) at x = 5mm |
| Compensation Range | 7mm (5 mm) : From 15N to 0N |
| Motor | Maxon Motor EC max-30 (24V, 40W)<br>Gear 318:1 |

Fig. B.7　リール機構　諸言

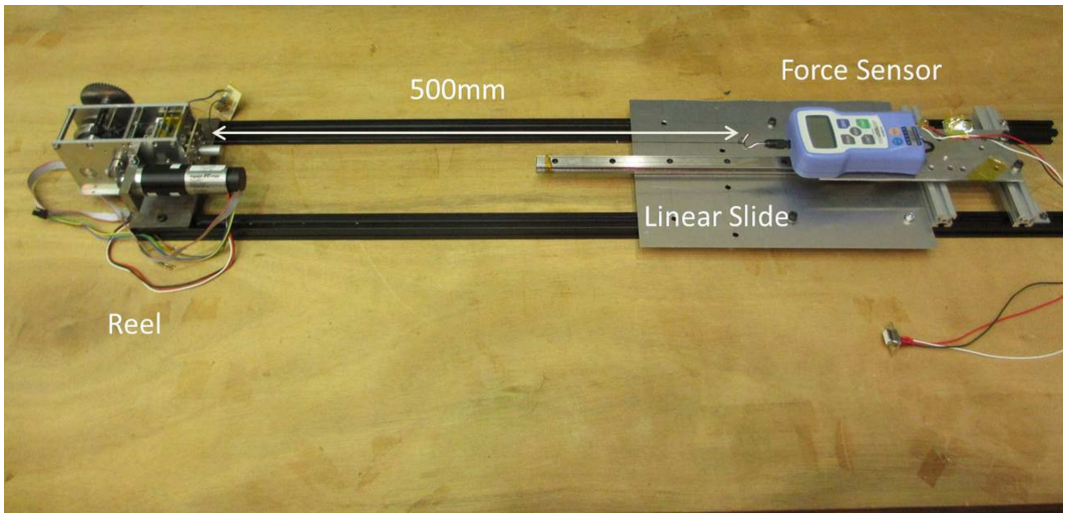



Fig. B.8　リール機構　実験装置

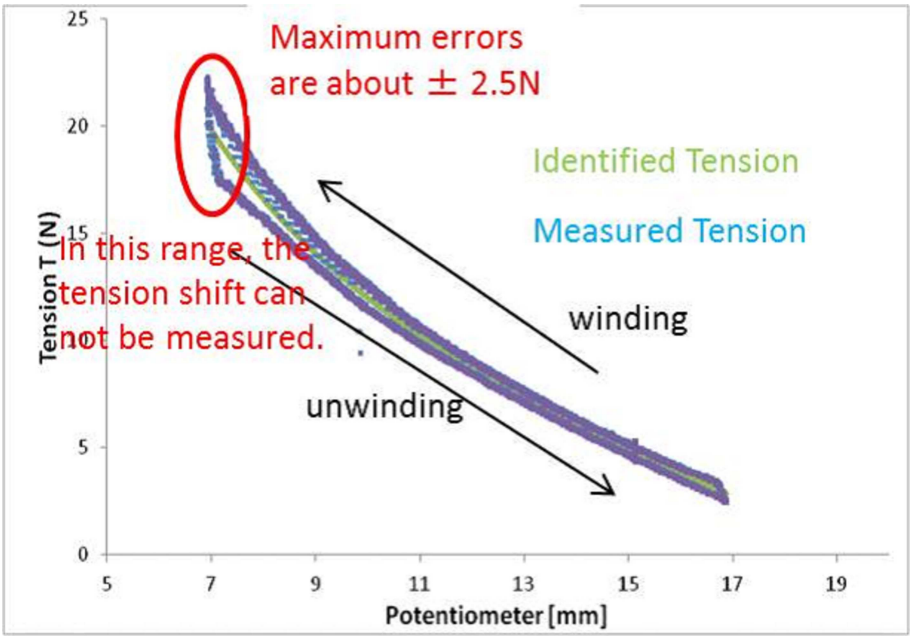



Fig. B.9　張力計測結果

角をフィードバック制御することで，人間の手で滑らかにテザーを引き出すことに成功し，宇宙用テザーリールの設計要求は，改善は必要であるが一応満たしたといえる．地上実験装置では，電流制御の代わりに張力制御を適用し，電流制御よりも滑らかな定負荷移動制御を達成している．

今後は，機構面の設計変更によって，張力計測の精度を検証したのち，ダンサーロール方式に適した制御手法の開発が望まれる．

## B.3　宇宙用テザーに対する考察

本節では，宇宙飛行士支援に要求される機械特性よりテザーの材料を検討し，金属ワイヤと有機繊維について評価を行った結果を示す．

宇宙において，弦材は宇宙飛行士の安全索として用いられるため，英語で「つなぎなわ」を意味するテザー (tether) と呼称されている．第 2 章で紹介したテザーフォーメーションフライト，テザー推進，導電性テザーも本体の衛星に弦材を固定し，その張力を積極的に利用することから全てテザーと呼称されている．本論文で提案する移動体を「テザー移動ロボット」と呼称するのは，上述した理由に由来する．テザーには，宇宙環境での使用を考慮に入れ，熱環境の変動による疲労破壊，放射線および原子状酸素による材料の劣化，巻取による曲げ応力への耐性が要求される．さらに，テザー推進や導電性テザーでは，数 km の展開が要求されることから，軽量で非常に大きな張力強度を有する材料が求められ，導電性の有無なども考慮する．一方，テザー移動ロボットは，展開距離がたかだか数メートルであり，負荷される荷重も地上の CDPM に比べて小さい．そこで，テザー移動ロボットのに適した宇宙用テザーの選定は，宇宙環境で使用できる地上の弦材について，宇宙ロ

ボットに要求される機械特性を評価することで行う．

宇宙飛行士支援に要求される機械特性は，作業内容によって大きく変わるが，いずれの作業においても有人宇宙施設に適用される安全基準を満たす必要がある．ここでは，宇宙飛行士支援に要求される機械特性として，ISS の EVA の安全基準について記載されている”SSP 30256: Extravehicular Activity (EVA) Standard Interface Control Document”[52] の EVA Induced Loads(Fig. B.10，Fig. B.11) を参照する．

| DESIGN LIMIT LOAD TYPE | LIMIT LOAD | TYPE OF LOADING | DIRECTION | CATEGORY OF STRUCTURE | APPLICATION COMMENTS |
|---|---|---|---|---|---|
| EVA Handrail/ Handhold– Primary Translation Path | 220 $lb_f$ | Quasi–static load applied over 3.0 inch length of handrail or handhold at worst location | Any direction | Handrails, handholds and supporting structure | This load applied to the primary translation path used by the crewmember to return to the airlock. This path is identified in Section 3.9. |
| Handrail/ Handhold Moment– Primary Translation Path | F=100 $lb_f$ M=600 in–lb | Quasi–static concentrated load at worst location | Apply 100 lb resultant force in any direction simultaneously with the bending moment. Bending moment applied as a couple of two opposing handhold forces separated by six inches. | Handrails, handholds and supporting structure | This load applied to the primary translation path which is the primary path used by the crewmember to return to the airlock. This path is identified in Section 3.9. |
| Handrail/ Handhold– Secondary Translation Path | 187 $lb_f$ | Quasi–static load applied over 3.0 inch length of handrail or handhold at worst location | Any direction | Handrails, handholds and supporting structure | This load applied to the secondary translation path. |
| Crew Tether Attach | 200 $lb_f$ | Quasi–static load applied to crew Tether Loop Attachment | Any direction | Crew tether loops/handrail tether point, attach hardware and support structure | |
| EVA Kick–Off, Push–Off Force of Tethered Crew Member | 200 $lb_f$ | Quasi–static concentrated load over a 3.0 inch diameter circular area at worst location | Perpendicular to and directed toward surface | All primary and secondary structure inside or near (within 24”) a translation path or worksite | This maximum kick–off or push–off load applies where the crew member is using the hardware to provide a reaction point during translation. |

Fig. B.10 EVA Induced Loads (SSP 30256, Table 3.1.3-1 より引用)

資料によると，宇宙飛行士がハンドレールを掴んで移動する場合，ハンドレールへ負荷が許容される荷重の最大値は 220lbf(100kgf) と規定されている．よって，宇宙飛行士が把持するハンドレールへテザーを取り付けることから，テザーに要求される耐力は 100kgf が適当である．

JIS 規格 (G3540) によると，ステンレスワイヤ (SUS304，1×7) の破断荷重は，ロープ径 1.0mm で 105kgf，1.5mm で 230kgf である．依り線の種類を変えた結果を Table B.1 に示す．ステンレスワイヤは，いずれの依り線を用いる場合も，1.5mm の径が適当である．

同様に，有機繊維について評価を行う．一般的に有機繊維は耐熱性および耐放射線性が

| DESIGN LIMIT LOAD TYPE | LIMIT LOAD | TYPE OF LOADING | DIRECTION | CATEGORY OF STRUCTURE | APPLICATION COMMENTS |
|---|---|---|---|---|---|
| Inadvertent kick, bump | 125 $lb_f$ | Quasi–static, concentrated load over a 0.5 inch diameter circular area | Any direction | Secondary structure near (within 24") a translation path or worksite | This is an accidental impact. It should be applied to hardware near (within 24") translation paths and/or worksites. |
| Force Application (EVA Handling Load) | 45 $lb_f$ (35 in–$lb_f$ for connector panels for mate/demate of connector) | Quasi–static concentrated load over a 1.25 inch radius circular area | Any direction | ORUs and non–structural closures and covers (including shields, cables, cable connector brackets, cable connector panels, cable clamps) | This load can be applied anytime to any hardware by the EVA crew member when in a foot restraint. All hardware must be designed to this load as a minimum. This force would be applied by the palm of the glove, tip of a boot or knee. |
| EVA load for design of PFR supporting structure | 274 $lb_f$ force; 4200 in–lb moment | Quasi–static loads applied at PFR socket to structure interface | Force in any direction; moment about any axis | All structure on which a foot restraint is attached | Force and moment applied simultaneously. |
| EVA tool tether attach point | 75 $lb_f$ | Concentrated load–pull (tension) | Any direction | Any structures supporting tool tether attach points | |
| Hatches | 187 $lb_f$ | Quasi–static concentrated load over a 3.0 inch diameter circular area at worst location | Any direction | Hatches | |
| Tool Impact | 125 $lb_f$ | Concentrated load on a 0.06 inch radius circular area | Any direction | Windows and exposed glass surfaces | |

Fig. B.11 EVA Induced Loads (SSP 30256, Table 3.1.3-1 より引用)

Table B.1 ステンレスワイヤの破断荷重 (JIS G3540)

| 線種 | ロープ径 | 破断荷重 |
|---|---|---|
| SUS304, 1×7 | 1.0mm | 1.03 kN |
| SUS304, 1×7 | 1.5mm | 2.26 kN |
| SUS304, 1×19 | 1.0mm | 0.941 kN |
| SUS304, 1×19 | 1.5mm | 2.11 kN |
| SUS304, 7×7 | 1.5mm | 1.67 kN |

好ましくないが，芳香族ポリイミド (ポリイミド)，芳香族ポリアミド (アラミド)，超高分子量ポリエチレン (Ultra High Molecular Weight Polyethylene : UHPE) に代表されるエンジニアリングプラスチックの中には耐熱性，耐放射線性を有して軌道上でもちいることができる材料がある．たとえば，ポリイミドフィルム「カプトン (R)」は宇宙機器で実績を挙げている．また，ポリアミド系繊維である「ノーメックス (R)」と「ケブラー (R)」は宇宙服の材料として使用されている．REX-J では，宇宙用テザーとしてパラ系アラミド繊維「帝人テクノーラ (R)」を使用している．REX-J で使用されたテザーの公称値は，直径 1.2mm で引張強さが 1.15kN と，宇宙飛行士支援の機械特性を十分満たしている．

ステンレスワイヤと有機繊維について引張強度を基準とした評価を行ったが，Tether based locomotion に要求されるテザーの機械特性として，巻取時およびリール内のテザー配線における曲げの評価も必要である．宇宙用テザーとして直径 1.5mm のステンレスワイヤを適当としたが，曲率が大きな曲げに対して塑性変形もしくは繊維の破断を生じる可能性がある．また，REX-J テザーについても，耐摩耗性の向上のため，ポリエステルのスリーブを外層に有するが，それによって曲げによる塑性変形が確認されている．そのため，テザーの曲げについても機械特性の評価が必要である．本項では，地上の弦材の曲げに対する安全規格をもちいて検討を行う．

弦材をもちいた安全規格として，クレーンの安全基準が挙げられる．一般社団法人日本クレーン協会が制定した「クレーン構造規格」の第二十条には，ドラム等の直径について安全基準が設定されており，曲げについて機器と弦材の直径の比を基準とする評価指標を与えている．本規格を地上実験装置に適用すると，提案する手法は同条におけるつりあげ装置等の等級の A に区分され，ステンレスワイヤーおよび REX-J テザーは同条の三グループに相当することから，リール内部のシーブ (ドラムもしくはプーリ) の直径とテザーの直径の比が 25 以上であることが望ましい．

リール機構におけるテザーの曲げの要因は，ドラム巻取，繰出機構，内部配線のためのプーリ機構および機体本体のテザー端点である．このうち，繰出機構および機体本体のテザー端点は，紐の折れ角度によって曲率を疑似的に計算できるが，テザーの線径に対して十分大きいといえる．よって，テザーの曲げは，ドラムおよびプーリの直径を考慮すればよく，ステンレスワイヤの場合は 37.5mm 以上，REX-J テザーの場合は 30mm 以上が望ましい．

# AppendixC　Robot Experiment on JEMに関して

Appendix C では，本論文の構成および成果について無視できない REX-J ミッションについて，背景の説明と搭載機器の詳細を説明する．

## C.1　REX-J の背景

REX-J は，2006 年に JEM 船外実験プラットフォームの第二期利用ミッションの公募に対して，EVA 作業支援ロボットの技術実証を目的として提案されたミッションである．EVA 作業支援ロボットは，第 1 章で述べた Astrobot に分類され，物資の搬送や機器の監視という単調な繰返し作業を支援代替することを目的としたロボットである．

REX-J ミッションは，Fig. C.1 に示す JAXA の宇宙ロボットの研究ロードマップにおける軌道上有人支援ロボットとして位置し，将来の軌道上構造物の建造や有人宇宙施設の保守点検など，幅広い分野への応用が期待されている．

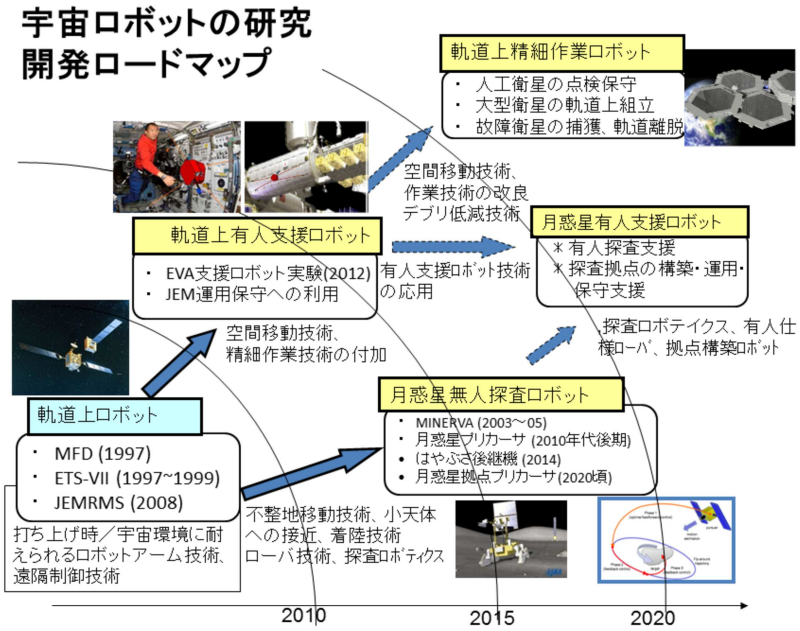



Fig. C.1　宇宙ロボットの研究ロードマップ (C) JAXA

そのためには，広範囲の空間移動技術が必要不可欠であり，従来の移動手法では達成が困難なことから，伸展するマニピュレータとテザーを用いた新しい移動手法「Tether based locomotion」を提案し，日本発の宇宙新規技術として技術の確立を目指すものである．

REX-J は，JEM 船外実験プラットフォームの第二期利用ミッションの限られたリソースで成果を挙げるために，MCE 内部で「Tether based locomotion」の要素技術である「伸展マニピュレータの開発と軌道上における特性の評価」と「テザーを用いた移動技術の確立」を検証する．

REX-J の試験装置の詳細は，第 5 章にて言及している．そこで割愛した搭載機器の緒言について，以下で説明する．また，本文では移動実験について詳細を説明したが，伸展マニピュレータを用いたテザーフックのハンドレールの取り付けについて，本章で述べる．

## C.2　REX-J の搭載機器

### 伸展式ロボットアーム

離れた位置に設置されているハンドレールへテザーを連結，脱着するための展開収納が可能な伸展マニピュレータは本移動手法の重要な要素技術であるが，このような宇宙用アームは従来の研究には存在しない．そこで，REX-J のミッションのために東工大と JAXA は STEM 機構をもちいた伸展式ロボットアーム (SRA: STEM robot arm) が新規に開発された．Fig. C.2 SRA は地上検証モデルでは 2m の伸展を確認しているが，フライトモデルは運用制約の関係から 1.3m の伸展性能をもつ．[35] なお，SRA は先端に作業用のロボットハンドを搭載するために，電気的接続のための I/F を有している．

### 高出力精細作業用ロボットハンド

宇宙飛行士の作業能力を実現するためには，人間と同等の握力が要求されることが指摘されて，精細作業用ロボットハンドの機能要求として，小型軽量かつモジュール化された高出力が求められている．そこで，上野らは直動機構をもちいた把持指機構を提案し，高出力の把持力を実現した JAXA-THK ハンドを JAXA と THK(株) と共同開発した．[69] REX-J では，上述した把持指機構を採用した REX-J Hand(Fig. C.3) を開発し，差動歯車による二自由度の手首機構と併せて，伸展マニピュレータを構成している．(Fig. C.4)

### リール機構

REX-J の試験設備には，有人宇宙施設を模擬するために，ISS の船外に設置されるハンドレールと同等のものが設置されている．ロボット本体には，宇宙機器に採用されている伸展素材を構造としたロボットアームを搭載し，ハンドレールにフックが付いたテザーを着脱し，テザーを巻き取ることで本体の位置を固定する．なお，フック機構には宇宙飛行士用フック機構と同様，プッシュ式の開閉機構が搭載され，人間の握力と同等の力で握ることで開閉される．(Fig. C.5) リール機構の主要緒言を Table C.1 に示す．リール機構は巻崩れを防止する機構を有しており，テザーの伸展量と回転角の間のヒステリシスは一定

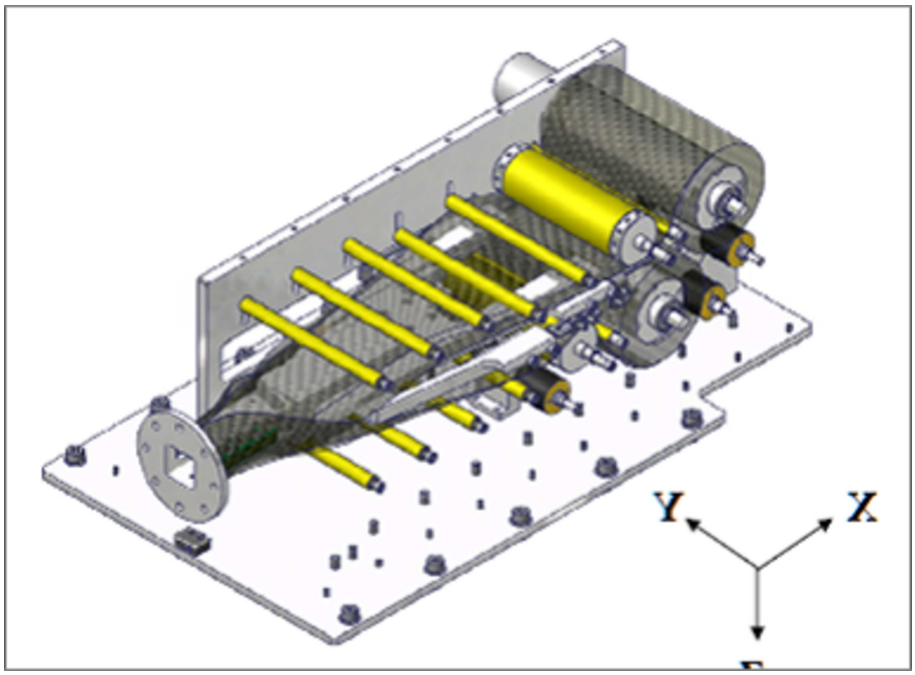



Fig. C.2 STEM Robot Arm Mechanism

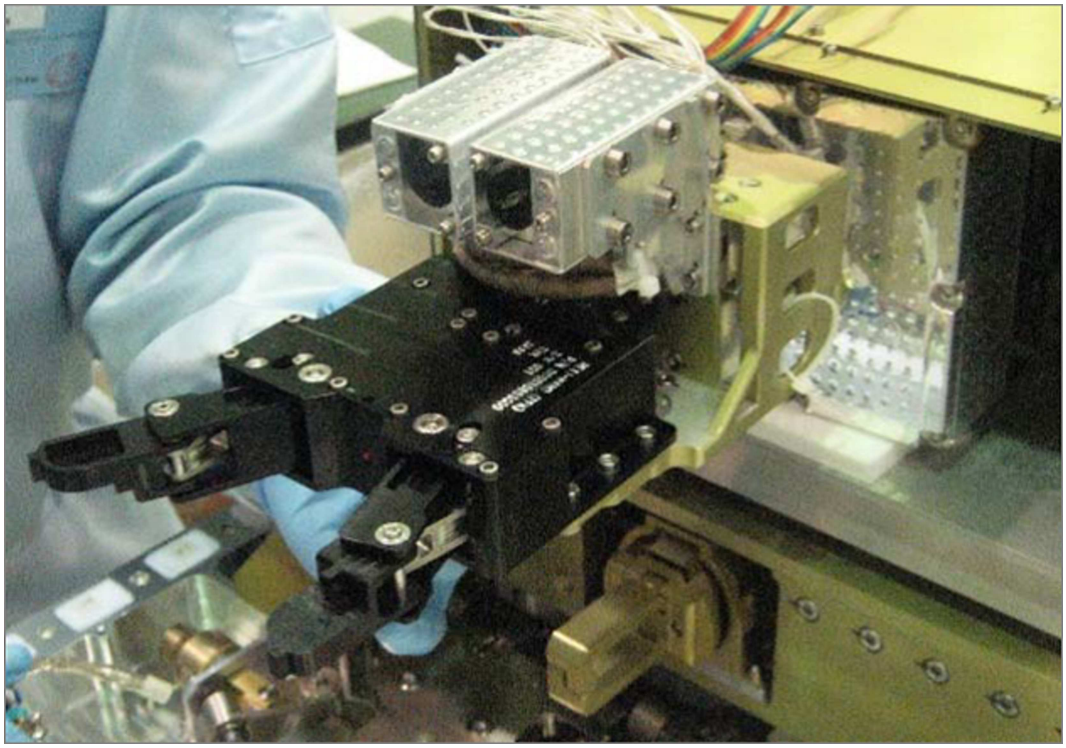


Fig. C.3 REX-J Hand System

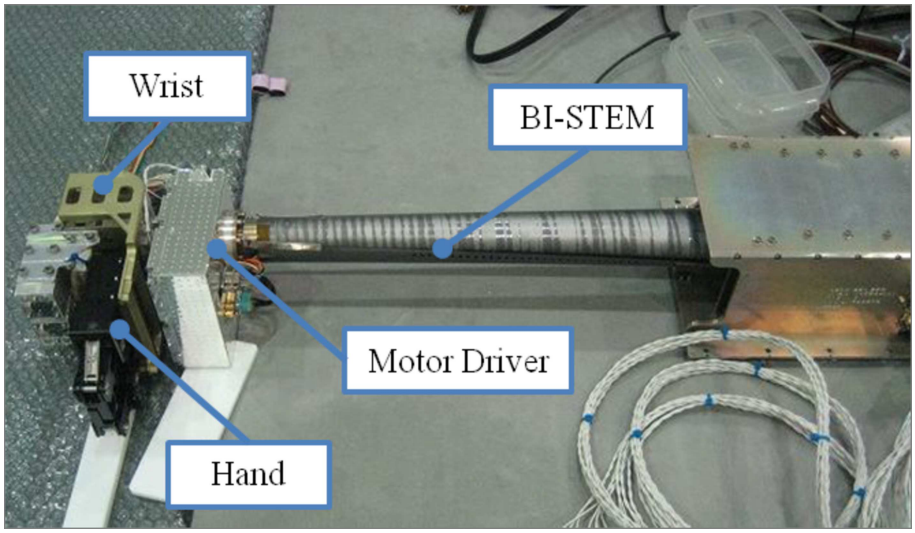



Fig. C.4 PFM of STEM robot arm

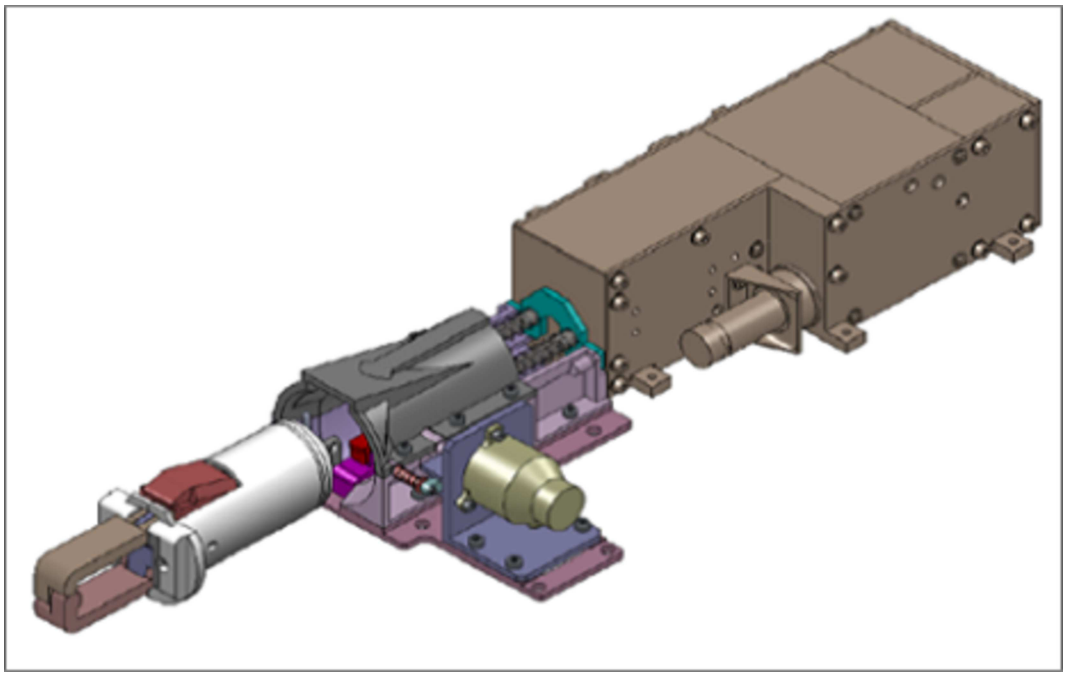


Fig. C.5 3D-CAD model of tether reel and hook

に保たれるように配慮されているが，試験設備の内部を複数のプーリ機構を介して展開することやフック機構がハンドレールに対して剛に結合されていないことから，移動制御ごとに誤差がのることが指摘されている．また，運用の制約から機器の電流制御の計測値は1Hz で与えられるため，トルクの推定は困難である．

Table C.1 REXJ リール機構の緒言

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| 大きさ | L199mm × W107mm × H60mm |
| 質量 | 0.9kg |
| 巻き取り速度 | 10.0mm/s (ノミナル) |
| 保持張力 | 175N |
| 駆動アクチュエータ | ブラシレス DC モータ |
| テザー | テクノーラ T240B ($\phi$1.2$mm$) |
| | 引張強さ 1150N |

## C.3 テザーフックのハンドレールへの取り付け

REX-J の運用期間では，伸展マニピュレータの軌道上実証として，伸展アームのキャリブレーションと伸展アームの振動評価を行い，搭載された全ての機器を用いて，テザーフックのハンドレールへの取り付けを実施した．Fig. C.6 は，軌道上で SRA の伸展量および補助モータの校正を行うために，ベースプレートへ固定されたハンドレールを REX-J ハンドで把持する実験である．フック機構を把持して，ハンドレールへ固定するためには，伸展マニピュレータ先端に対して，正確な制御が必要である．そのため，軌道上打上げ時に，SRA および REX-J Hand の機構部が破損し，入力に対して出力が異なっていないか確認し，必要であれば補正を与えなければならない．また，伸展式ロボットアームは，ブーム素材の CFRP をドラムに巻き取って収納しているが，軌道上で硬くなり，想定したトルクで伸展もしくは巻取りできない可能性が懸念されていた．そこで，トルクをアシストするためのモータが搭載されていたが，そのトルク値について軌道上で校正を行う必要があった．

伸展アームのキャリブレーションは，運用期間の二ヶ月目に実施され，期間内に無事終了し，SRA および REX-J HAND の動作に問題がないことが確認された．

同様に，軌道上で熱誘起振動や手先の反トルクによる SRA のアーム部の振動が懸念されていたが，伸展アームの振動評価の結果，十分な剛性を有していることが確認された．

上述した実験を踏まえ，フック機構を伸展マニピュレータで把持し，ベースプレートのハンドレールへ固定する実験が，運用期間の二ヶ月目に実施された．

本実験の手順を以下に示す．

1. 本体のロンチロックの固定を外し，フック機構の固定を解除する．
2. 伸展マニピュレータを操作し，フック機構を把持する位置へ移動する．
3. バネによって押出し力が与えられたフック機構をリール機構の制御で前に繰り出す．
4. ハンドによって，マニピュレータを把持する．このとき，フックの開閉を画像で確認する．
5. フックが開いた状態で，テザーリールのテザーを緩め，本体の上段を回転させる．
6. 同様に，テザーリールのテザーを緩めながら，伸展マニピュレータを伸展させる．

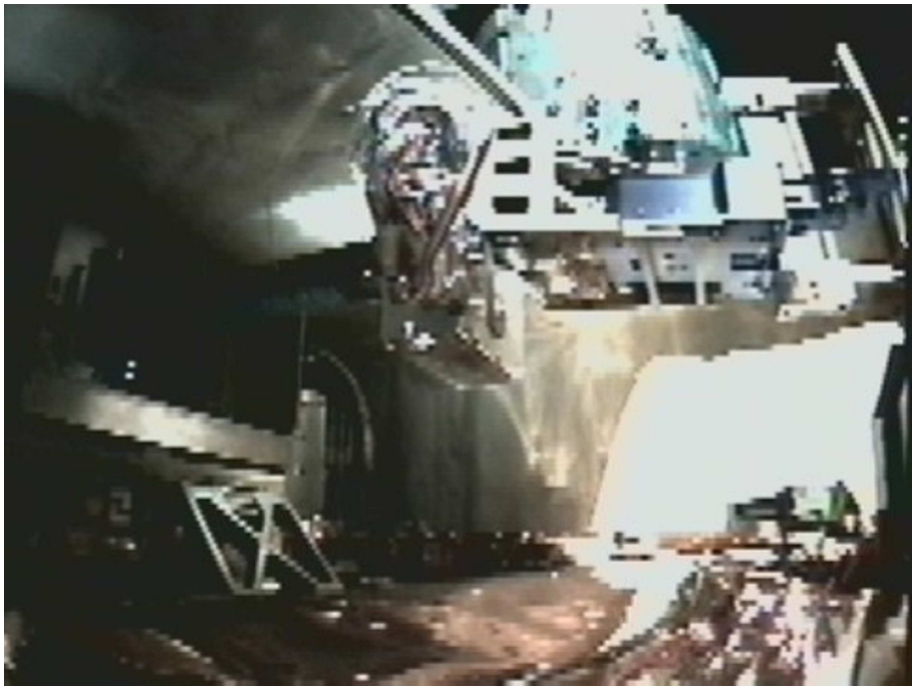


Fig. C.6 運用: 3a. 伸展アームのキャリブレーション

7. ハンドレールにフックが接触したことを確認した後，ハンドの把持を緩め，フックを閉じる．

8. フックが閉じ，ハンドレールに固定されたことを確認した後，フックからハンドを離し，伸展マニピュレータを収納する．

Fig. C.7 に，運用中の画像を示す．

上述した手順では，伸展マニピュレータの伸展時にテザーを緩めているため，内部で絡まりや脱落が起きる危険性があった．これは，地上模擬装置を用いた実験で，伸展マニピュレータの伸展速度が一様でないため，リール機構との速度同期で運用することができなかったためである．運用では，リール機構の直径から脱落しない伸展量を算出し，マニピュレータの伸展とテザーの繰出しを細かく分けて運用が行われた．しかし，コマンド一つあたりのタイムラグが大きく，運用判断も逐次必要なことから，非常に時間を伴う運用であった．今後，マニピュレータをもちいてテザーを展開する場合，マニピュレータの引き出しに追従する形で繰り出し可能な張力制御を有するリール機構の開発が必要不可欠である．

本論文の地上実験装置で扱った受動的なテザーの緩み補償を有するリール機構は，張力制御の精度や応答速度は悪いものの，人間の手で引き出すことができる．Tether based locomotion に搭載するリール機構として課題は多いものの，一つの指標を示せたといえる．

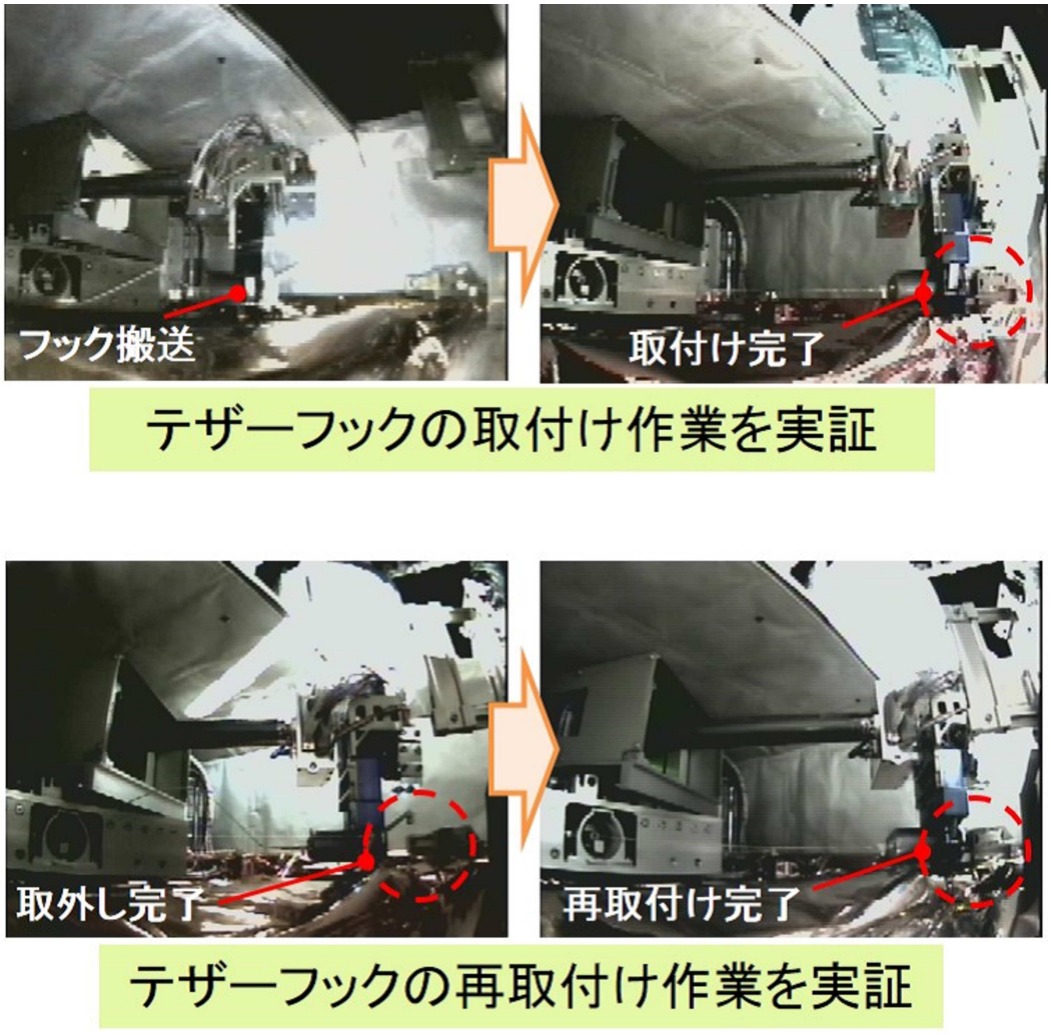



Fig. C.7　運用: 3e. テザーフックの取り付け

# 参考文献

[1] : Rod McGregor, Layi Oshinowo
Flight 6A: Deployment and Checkout of the Space Station Remote Manipulator System (SSRMS)
i-SAIRAS,2001

[2] : T. Matsueda, K. Kuraoka, K.Goma, T. Sumi, R. Okamura
JEMRMS system design and development status
Proc. of Telesystems Conference 1994 IEEE National, Atlanta, GA, USA , 26-27 Mar 1991, pp 391-395

[3] : M. Oda
Experiences and lessons learned from the ETS-VII robot satellite
Robotics and Automation, 2000. Proc. ICRA '00. IEEE International Conference on, Volume.1, CA, USA, 2000, pp 914-919

[4] :
Space Application of Automation, Rootics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS) phase II
NASA-CR-3734 3736 , 1983

[5] :
Safety Policy and Requirements for Payloads Using the International Space Station
NSTS-1700.7B ISS Addendum , 1989

[6] : M. Oda
Tethered robot which moves along a large space structure
Proc of the Space Science and Technology Symposium, Paper ID: 1D03, 2007, Sapporo, Japan

[7] :
STS-123 Press Kit
NASA, Mar., 2008

[8] : Robert O. et al
Robonaut: NASA ' s Space Humanoid
Intelligent Systems, vol 15 no4, pp.57 -63, 2000

[9] :Steven E. Fredrickson, Larry W. Abbott, Steve Duran, J. David Jochim, J. William Studak, Jennifer D. Wagenknecht, and Nichole M. Williams
Mini AERCam: development of a free-flying nanosatellite inspection robot
Proc. SPIE, Vol. 5088, 97, 2003

[10] : Saenz-Otero, A, Miller, D W
The SPHERES ISS Laboratory for Rendezvous and Formation Flight
5th International ESA Conference On Guidance, Navigation and Control Systems, paper 29, Frascati, Italy, 2002

[11] : F. Didot et al
Eurobot Underwater Model : System Overview, Tests Results & Outlook
Proc. of 9th International Symposium on Artificial Intelligence. Robotics and Automation in Space, Los Angeles, California, Feb 26-29, 2008

[12] : R. Hayashi, S. Matunaga, and Y. Ohkami
Capability Evaluation of Reconfigurable Brachiating Space Robot
Industrial Electronics Society 2000, IECON2000 26th Annual Conference of the IEEE, Vol.4, pp2461-2466, Nagoya Japan, 2000

[13] : Swaim, P.L, and Thompson. J.T. and Campbell P.D.
TheCharlotte, Intra-Vehicular Robot
Proc. Int. Symp. AI,Robot.Autom. Space, Jpn, 1996. pp. 157-162.

[14] :Mitsushige ODA, Hirotaka SAWADA, Masahiro YOSHI, Kazuya KONOUE, Hiroki KATO, Satoshi SUZUKI, Yusuke HAGIWARA and Taihei UENO
Proposal of a Tethered Space Walking Robot - REX-J: Robot Experiment on JEM -
TRANSACTIONS OF THE JAPAN SOCIETY FOR AERONAUTICAL AND SPACE SCIENCES, SPACE TECHNOLOGY JAPAN, Vol. 7(2009)

[15] : 久保田孝
惑星別探査ローバ
日本ロボット学会誌, vol 21, no.5, pp468-471, 2003

[16] : I. Kawano et.al.
First result of autonomous rendezvous docking experiments on NASDA ' s ETS-VII satellite
Proc. of 49th International Astronautical Congress, 1998, Melbourne, Autralia, IAF-98-A3.09

[17] : Meguro, A., Harada, S. and Watanabe, M.
An Ultra-Light Large Antenna Reflector for Communication Satellites
54th International Astronautical Congress, IAF-03-I.1.06, 2003.

[18] ：森 治, 松永三郎
群型テザード衛星システムの回転運動制御
日本航空宇宙学会 論文集, Vol.50, No.578, 2002, pp.109-117.

[19] ：Chung, S.-J., Slotine, J.-J. E., and Miller, D. W.
Nonlinear Model Reduction and Decentralized Control of Tethered Formation Flight
Journal of Guidance, Control, and DynamicsDynamics, Vol. 30, No. 2, 2007

[20] ：能見公博
テザー宇宙ロボットの空間移動と手先位置姿勢制御
博士学位論文，東北大学，平成 10 年

[21] ：M. Nohmi
Mission Design for Pico-Satellite “Space Tethered Autonomous Robotic Satellite II”
62th International Astronautical Congress, IAF-10-B4.06B, 2010.

[22] ：K. Kashihara, Mengu Cho, S. Kawamoto
Ground Experiments and Computer Simulations of Interaction Between Bare Tether and Plasma
IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 36, page 2324 - 2335, 2008.

[23] ：Albus, J. S., Bostelman, R. V., Dagalakis, N. G.
The NIST ROBOCRANE, A Robot Crane
Journal of Robotic Systems, July, 1992

[24] ：Kawamura S, Choe W, Tanaka S, Pandian S.R
Development of an ultrahigh speed robot FALCON using wire drive system
Robotics and Automation, vol1, pp.215-220, 1995

[25] ：Cone, LL
Skycam, an aerial robotic camera system
Byte, Vol. 10, pp. 122-132, 1985

[26] ：B.Zi , By.Y. Duan, J.L. and Du, H. Bao
Dynamic modeling and active control of a cable-suspended parallel robot
Journal: Mechatronics , vol. 18, no. 1, pp. 1-12, 2008

[27] ：Masahiro ISHII, Makoto SATO
A 3D Spatial Interface Device Using Tensed Strings
PRESENCE, Vol. 3, No. 1, pp. 81-86, 1994.

[28] ：Robert L. Williams II.
CABLE-SUSPENDED HAPTIC INTERFACE
International Journal of Virtual Reality, Vol. 3, No. 3, pp. 13-21, 1998

[29] : Fukushima, E.F. Kitamura, N. Hirose
A new flexible component for field robotic system
Robotics and Automation, Proc of the ICRA, vol. 3, pp. 2583 - 2588, 2000

[30] : Masataka Suzuki, Shinya Kitai, Shigeo Hirose
Advanced Child Unit of "Anchor Climber" Using Modified Internally-balanced Magnet
2008 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp.1489-1494 (2008)

[31] : Landsberger, Samuel Ernest.
Design and construction of a cable-controlled, parallel link manipulator
Thesis(M.S.) , Massachusetts Institute of Technology, 1984

[32] : H. Kino, T. Yahiro, F. Takemura and T. Morizono
Robust PD Control Using Adaptive Compensation for Completely Restrained Parallel-Wire Driven Robots: Translational Systems Using the Minimum Number of Wires Under Zero-Gravity Condition
IEEE Trans on Robotics, Vol. 23, Issue 4, pp803-812, 2007

[33] : E. Ottaviano, M. Ceccarelli, P. Pelagalli
A performance analysis of a 4 cable-driven parallel manipulator
in: 006 IEEE International Conferences on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), 7-9 June, Bankok, Thailand, 2006

[34] : R G Roberts, T Graham, J M Trumpower
On the inverse kinematics, statics, and fault tolerance of cable - suspended robots
Journal of Robotic Systems, Vol.:15, Issue: 10, pp: 581-597, 1998

[35] : 上野泰平
宇宙飛行士支援・代替ロボットのための伸展式ロボットアームと作業用ハンドの研究開発
博士学位論文，東京工業大学，平成 22 年

[36] : Humphties, M. E.
A Mechanical Drive for Retractable Telescopic Masts
Proceedings of the 15th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA CP-2423, May (1986), pp. 13-29

[37] : M.W. Thomson
Deployable and Retractable Telescoping Tubular Structure Development
The 28th Aerospace Mechanisms Symposium, pp.323-338, 1993

[38] : Humphties, M. E.
A Mechanical Drive for Retractable Telescopic Masts

Proceedings of the 15th Aerospace Mechanisms Symposium, NASA CP-2423, pp.13-29, 1986

[39] : RimottF.P.J
Storable Tubular Extendible Member: A Unique Machine Element
Machine Design, Vol.37, No.28, pp. 156-163, 1965

[40] : Dave Gross, Dave Messner
The Able Deployable Articulated Mast - Enabling Technology for the Shuttle Radar Topography Mission
33rd Aerospace Mechanisms Symposium, pp15-29, 1999

[41] : Saitou T
Mechanism of Manipulator
Japan Patent, 2008-49419

[42] : Gun-Shing Chen, Ben kW
Adaptive Truss Manipulator Space Crane Concept
Journal of Spacecraft and Rockets, Vol.30, no. 1, 1993

[43] : Romero, I, Vignjevic, R
Deployable space manipulator closed-loop control, ideas and possibilities of using GPS as a sensor
Advances in Space Research, vol.30, no.2, pp. 419-425, 2002

[44] : Hokamoto S., Kuwahara M., Modi V., Misra AK
Control of a flexible space-based robot with slewing-deployable links
AIAA/AAS Astronaynamics Conference, (1996), San Diego, CA, pp. 506-513

[45] : Patrick G. Xavier
Shortest Path Planning for a Tethered Robot or an Anchored Cable
Proceedings of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, Detroit, Michigan, pp.1011-1017

[46] : Susan Hert and Vladimir Lumelsky
The Ties that Bind Motion Planning for Multiple Tethered Robots
Proceedings of IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pages 2734-2741, May 1994

[47] : Susan Hert and Vladimir Lumelsky
Moving Multiple Tethered Robots between Arbitrary Configurations
IEEE TRANSACTIONS ON ROBOTICS AND AUTOMATION, VOL.15, NO.4, AUGUST 1999

[48] : Susan Hert and Vladimir Lumelsky
Motion Planning in R3 for Multiple Tethered Robots
International Conference on Intelligent Robots and Systems-Volume 2, 1995

[49] ：武田 行生 , 舟橋 宏明
パラレルワイヤ駆動機構における運動伝達性の評価
日本機械学會論文集. C 編 67(663), 3554-3560, 2001-11-25

[50] ：田所 諭 , 西岡 伸介 , 木村 哲也 , 服部 元史 , 高森 年 , 前田 潔
冗長駆動ロボットのケーブル配置の基本設計に関する研究
日本機械学會論文集. C 編 66(647), 2247-2254, 2000-07-25

[51] ：Alan Lytle, Fred Proctor and Kamel Saidi
Control of Cable Robots for Construction Applications
Parallel Manipulators, towards New Applications, pages 1-20, 2008

[52] ：
Extravehicular Activity (EVA) Standard Interface Control Document
SSP-30256, 1997

[53] ：Knight Norman F.Jr., Elliott Kenny B. ,Templeton Justin D., Song Kyongchan, Rayburn Jeffery T.
FAST Mast Structural Response to Axial Loading Modeling and Verification
53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, pp.31, 2012

[54] ：吉田 和哉
宇宙用ロボット・マニピュレータの運動制御
博士学位論文，東北大学，平成 2 年

[55] ：Laumond, J.-P. , O. L. Hertzberger, and F. C. A. Groen, eds
Feasible trajectories for mobile robots with kinematic and environment constraints
Intelligent Autonomous Systems pp. 346-354, 1987

[56] ：升谷 保博, 宮崎 文夫
宇宙用マニピュレータのセンサフィードバック制御
日本ロボット学会誌, vol 7, no. 6, 647-655, 1989

[57] ：梅谷 陽二, 吉田 和哉
一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用ロボットマニピュレータの分解速度制御
日本ロボット学会誌, vol 7, no.4, p327-337, 1989

[58] ：Brockett, R.W.
Asymptotic stability and feedback stabilization
Differential Geometric Control Theory, pp.181-191, Birkhauser, Boston, 1983

[59] ：中村仁彦
非ホロノミック系制御研究の展望
計測と制御, vol 36, no. 6, pp384-389, 1997

[60] ：中村仁彦
非ホロノミック系制御研究の展望
日本ロボット学会誌 11(4), 41-48, 1993

[61] ：中村仁彦
非ホロノミックロボットシステム第 1 回 非ホロノミックなロボットって何
日本ロボット学会誌 11(5), 55-62, 1993

[62] ：中村仁彦
非ホロノミックロボットシステム 第 3 回 幾何学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御
日本ロボット学会誌 11(6), 69-76, 1993

[63] ：中村仁彦
非ホロノミックロボットシステム 第 4 回 動力学的な非ホロノミック拘束の下での運動
日本ロボット学会誌 11(7), 67-73, 1993

[64] ：中村仁彦
非ホノロミックロボットシステム 第 5 回 動力学的な非ホロノミック拘束の下での運動制御
日本ロボット学会誌 12(2), 63-71, 1994

[65] ：Akio Tsujihata, Koji Terada, Akira Meguro, Motofumi Usui, Kyoji Shintate
Large Deployable Reflector (LDR) onboard Engineering Test Satellite VIII (ETS-VIII)
Intelligent Autonomous Systems pp. 346-354, 1987

[66] ：JAXA HP
Multi-mission Consolidated Equipment (MCE)
http iss.jaxa.jpenkiboexpefmce

[67] ：
EVA 支援ロボット実証実験 (REX-J) ミッション　プレスキット
JAXA, Dec., 2009

[68] ：Atsushi Ueta, Mitsushige Oda
A Ground-Based Operation System for EVA Support Robot Experiments
i-SAIRAS, 093 , 2010

[69] ：上野泰平, 小田光茂
宇宙精細作業ハンド用操作指の開発
日本ロボット学会誌，vol 28, no. 3, 349-359, 2010

[70] ：N.H. Stone, C. Bonifazi:
The TSS-1R Mission; Overview and Scientific Context
Geophysical Research Letters, 25 (1998), pp.409-412

[71] ： Yoshimura Shoichi, Okamoto Osamu:
An experimental study of tether reel system: A laboratory model
National Aerospace Laboratory Technical Report 1176T, August 1992

[72] ：Murali Krishna, John Bares, Ed Mutschler:
Tethering System Design for Dante II
Proceedings., 1997 IEEE International Conference on, On page(s): 1100 - 1105 vol.2 Volume: 2, 20-25 Apr 1997

[73] ：松永　三郎, 山中　富夫, 芦田　宏樹, 西田　淳一, 中谷　幸司, 森　治:
微小重力下におけるテザーサンプリング用リール機構の機能評価実験
Space Utilization Research: Proceedings of the Twenty-third Space Utilization Symposium, pp. 109-112, 2007

[74] ：M.A. Minor, C.R. Hirschi, R.O. Ambrose:
An Automated Tether Management System for Microgravity Extravehicular Activities
in ICRA 2002. 2002. Washington DC.

# 業績リスト

## 会誌掲載論文

- 山隅允裕，小田光茂，中西洋喜，”EVA 支援ロボット技術実証実験「REX-J」におけるテザーの協調制御による移動実験”, 機械学会論文集, 日本機械学会，C 編，[投稿中]
- Mitsuhiro Yamazumi, Mitsushige Oda, ”Tether based locomotion for astronaut support robot - Introduction of Robot Experiment on JEM -”, Journal of Robotics and Mechatronics, vol. 25, no.2, pp306-315, 2013

## 国際学会発表

- Mitsuhiro Yamazumi , Mitsushige Oda,”NON-GRAVITY UNDER-ACTUATED CONTROL METHODS OF TETHER BASED LOCOMOTION FOR ASTRONAUT SUPPORT ROBOT”, i-SAIRAS, 05A-04, Torin, 2012
- Mitsushige Oda, Atsushi Ueta, Masahiro Yoshii, Hiroki Nakanishi, Mitsuhiro Yamazumi,”Development Status of the REX-J mission, Astronaut support robot experiment on the ISS/JEM”, International Astronautical Federation, IAC-11-A5.3-B3.610, Cape town, 2011
- Mitsushige Oda, Masahiro Yoshii, Hiroki Nakanishi, Hiroki Kato, Atsushi Ueta, Satoshi Suzuki, Mitsuhiro Yamazum, ”TETHER BASED ASTRONAUT SUPPORT ROBOT EXPERIMENT, REX-J TO BE CONDUCTED ON THE ISS/JEM”, International Astronautical Federation, IAC-11-C1.7.10, Cape town, 2011
- Mitsushige Oda, Masahiro Yoshii, Hiroyuki Nakanishi, Hiroki Kato, Atsushi Ueta, Yuusuke Hagiwara, Mitsuhiro Yamazumi, ”Preparation of the REX-J Mission to Demonstrate Technologies for the Astronaut Support Robot”, The 29th International Symposium on Space Technology and Science, d-7, Okinawa, 2011
- Mitsuhiro Yamazumi , Mitsushige Oda, Naoyuki Miura, Taihei Ueno, ”a space mobile robot using tethered moving methods. - study of tether’s location and robot’s locomotion capability -”, International Astronautical Federation, IAC-10C1.4.7, Prague, 2010

- Mitsuhiro Yamazumi , Mitsushige Oda, Naoyuki Miura, Taihei Ueno, "Spatial Locomotion of Tether Based Robot", i-SAIRAS, 114, Sapporo, 2010

## 国内学会発表

- 山隅允裕，中西洋喜，小田光茂，西田 信一郎 ，加藤裕基，渡邊恵佑，上田敦史，吉井正広，鈴木悟史, "REX-J におけるテザーを用いた宇宙ロボットの移動実験", 第 57 回宇宙科学技術連合講演会，1M01，米子，2013
- 山隅允裕、小田光茂, "テザーをもちいた宇宙飛行士支援ロボットの移動に関する研究", ロボティクス・メカトロニクス講演会，テザーをもちいた宇宙飛行士支援ロボットの移動に関する研究，静岡，2012
- 小田光茂, 吉井正弘, 中西洋喜, 加藤裕基, 上田敦史, 西田信一郎, 鈴木悟史, 山隅允裕, "EVA 支援ロボット実証実験（REX-J) の打ち上げ", 第 56 回宇宙科学技術連合講演会，2A14，大分，2011
- 山隅允裕，小田光茂, "宇宙ロボットのテザーをもちいた移動手法における位置同定に関して", 第 55 回宇宙科学技術連合講演会，1J04，愛媛，2011
- 小田光茂, 吉井正広，中西洋喜，加藤裕基, 上田敦史，鈴木悟史，萩原裕介，山隅允裕, 平野大地, "EVA 支援ロボット実証実験（REX-J) の開発状況", 第 54 回宇宙科学技術連合講演会,3B06，静岡,2010

## その他

- 大西　有希，山隅　允裕，天谷　賢治, "任意形状ホイールに対するひずみゲージを用いた 6 分力逆解析", 日本機械学会論文集，日本機械学会，A編， 1460-1467，2009
- 秋山恭平，Paul Iliffe，　稲川慎一，川久保学，西田淳一，水沼慎太郎，木佐允彦，山隅允裕，石坂和也，森下拓往，牟田梓，松下将典，松永三郎, "東京工業大学　小型衛星開発プログラム 2009", UNISEC-WS 2009, 横浜, 2009
- 山隅允裕, 天谷賢治, 大西有希, 岸本喜直, "逆解析を用いたひずみゲージからのホイール 6 分力計測手法の開発", 計算力学講演会，806，金沢，2009
- 山隅允裕，天谷賢治, "逆解析を用いたホイールの六分力計測法", 計算力学講演会, 241, 沖縄, 2008

# 謝辞

本論文の最後にあたり，多くの方々にご指導，ご支援を頂きましたこと，ここに謹んで感謝の意を表します.

まず，本研究の機会を与えて下さり，研究にあたって常に暖かなご指導とご鞭撻を賜った，東京工業大学理工学研究科機械宇宙システム専攻 小田光茂教授に対して，深謝申し上げます．平成二十三年度まで宇宙航空研究開発機構主任研究員の職務を兼務し多忙な中，修士課程進学より四年間に渡って指導教員として研究指導を頂き，また，筑波の宇宙センターにおける研究環境の手配やRAなどの生活支援といった多方面に渡るご支援を頂きました．特に，先生がプロジェクトマネージャを務められたEVA支援ロボット実証実験のプロジェクトに学生ながらも参加でき，博士課程最後の年には研究成果を軌道上で試す機会を頂きました．幼少よりの夢であった宇宙開発の現場に直接携われたことは、私にとって本当に素晴らしい経験となりました．研究やプロジェクトで得た経験を，今後の社会人としての生活へ活かしていきたいと思います．昨年度より，東工大教授として新しい道を歩まれた先生の今後のさらなる躍進を祈り願っております.

また，本論文をまとめるにあたり，懇切な指導および貴重なご意見をいただいた同学同専攻の松永三郎連携教授，野田篤司連携准教授，大熊政明教授，福島 E. 文彦準教授に深く感謝しております．とくに，副指導教官である松永教授には，修士一年前期において松永研究室の居室に在籍させていただきお世話になりました．短い期間でありましたが，活発な議論が催される各種のゼミや，学生主導で行われる衛星開発，私自身も携わる機会を頂いたARLISSプロジェクトなど，多くのことを学び経験する機会を頂きました．深くお礼申し上げます．現在，東工大より宇宙科学研究所に移られて，ますますご活躍とのこと拝聴しております．今後も日本の宇宙開発に貢献される御姿を応援しております.

宇宙航空研究開発機構の西田信一郎氏，加藤裕基氏，上田敦史氏，渡辺恵佑氏，星亜友美氏，株式会社エイ・イー・エスの吉井正広氏，鈴木悟史氏には，研究生活およびREX-Jプロジェクトを始めとする実験室の業務において大変お世話になりました．業務として働かれている皆様の中で，社会経験の乏しい学生の私が参加させていただきご迷惑おかけすることが多かったと思いますが，暖かく見守っていただきましたこと感謝しております．仕事の姿勢や言動など重要なことから些細なことまで非常に多くの学ぶべき点がありました．今後の社会人生活において，身となり糧となるよう尽力する次第です.

昨年度まで宇宙航空研究開発機構に在籍され，今年度より東京工業大学小田研究室の助教に就任された中西洋喜氏には，論文執筆にあたって非常にお世話になりました．論文の直接のご指導に加え，日常においても東北大で助教をされていた時の豊富な経験を伝授いただき，学生として一つも二つも大きくなれたと思います．今後は，小田研究室に留まらず，本学の学科や専攻の宇宙分野を大いに支え頂けますこと期待しております.

東京工業大学小田研究室および松永研究室の秘書である藤沢まり氏には，研究や学生生

活を送る上での事務手続きを初め多くのことを助けていただき，感謝の言葉が尽きません．筑波在住で大岡山を離れているため，色々とご迷惑をお掛けしたこと大変恐縮しております．それでも親切で丁寧な支援を頂きましたこと，本当にありがとうございます．

旧 JAXA 連携講座の卒業生である上野泰平氏，萩原裕介氏，三浦尚幸氏，久我楽南氏には，研究室在籍時に非常にお世話になりました．私が研究生活を続けるにあたって，先輩諸氏の影響は非常に大きく，先輩方が卒業され学生が私一人の時期がありましたが，先輩方の功績に負けないようにという気持ちが大きな支えでした．また，REX-J のプロジェクトは先輩方のご尽力の賜物であり，運用の年に私が携わり研究成果を試せたこと，本当に感謝しております．

東北大学吉田研究室の平野大地氏には，修士在学時の唯一の同期ということで，研究生活および私生活において多くの刺激を受けました．研究室の中に限らず，国際学会 i-SAIRAS への参加や JAXA の学生派遣プログラムなど様々な行事を一緒に過ごしました．彼の仕事は手際が良く，かつ非常に丁寧であり学ぶことが多く，一つの目標でありました．これからも学術の道を進み，日本を超え，世界の宇宙開発を盛り上げていただきたいと思います．

また，現在，小田研究室に在籍している学生たちのおかげで，最後の一年半を非常に楽しく過ごすことができました．窓がない研究室に私一人が取り残されて半年が経った後，荒川清一郎氏，武井悠人氏，本田瑛彦氏の三人が筑波に来た時，恥ずかしながら非常に喜んだことを覚えております．三人には公私に渡ってお世話になりました．あまり良い先輩ではなかったと思いますが，何か良い面があったら参考に，悪い面はぜひ反面教師として，学んでいただけましたら幸いです．とくに，博士課程へ進学した武井氏，本田氏は，優秀な JAXA の職員方と共同研究をし，多くのことを吸収していただきたいと思います．荒川氏は今年度より同じ会社の動機となります．今後ともよろしくお願いします．修士一年生の吉川健人氏は，小田研究室初めての学部生ということで，今までの学生の中で最も苦労したと思います．あまり力になれなかったこと申しわけありません．引き続き所属する吉川氏には，ぜひ苦労した点を今年度以降の学生に伝えていただければと思います．今年度より研究室に加わった唐鎌聡太郎氏，田中優一郎氏，濱島大輝氏は短い間ですが，共に過ごせてよかったです．今年度から大岡山での研究室が立ち上がりましたが，中西助教を中心に吉川氏と四人で盛り上げていただきたいと思います．また，昨年度在籍した趙慶鎬氏は同じテザー移動ロボットを研究していることから，多くの研究を手伝って頂きました．ありがとうございます．他の研究室に移られましたが，ここで学んだことを活かして活躍していただきたいと思います．

東工大では，学部でお世話になった天谷研究室の学生やサークルの友人，修士でお世話になった松永研究室の学生には，博士課程在籍中も様々な方面でお世話になりました．大岡山と離れる環境にあったこともあり，その繋がりは大きな支えでした．一言ですが御礼申し上げます．

博士課程一年時，インターンでお世話になった三菱スペースソフトウェア株式会社の皆様には，そこで学んだ経験を研究活動及び REX-J のプロジェクトにて活かすことができました．この場を借りてお礼申し上げます．

最後に，経済状況が悪い時期に博士課程に進学するという我儘を何も言わずに認めてくださった両親に感謝の言葉を述べて謝辞とさせていただきます．

2013 年 9 月吉日