

1. はじめに

理工学分野に含まれる研究課題は多岐にわたっており、宇宙ステーションのフロンティア共同研究の理工学実験という場合には、宇宙ロボットなどの多体系剛体の制御やテレサイエンス、大型構造物や柔軟構造物の振舞い、エネルギーや熱管理、宇宙環境計測、軌道上再補給システム技術なども含まれる¹⁾。しかし、本稿では宇宙環境でも無重力環境に限定し、また筆者の持つ知識分野の制約から力学に関する分野（宇宙ロボット制御や構造物の振舞い）について調査した内容や関連した委員会の活動状況を報告する。はじめにこれまで行われてきた無重力実験の方法を紹介し、そのあといくつかの最近研究された具体例を示す。最後に今後の展望について、筆者の私見を述べる。

2. これまでの無重力実験

2.1 無重力実験の方法

無重力実験の方法としては、(1) 航空機の放物飛行、(2) 水槽内での浮力の利用、(3) 空気浮上、(4) 重力補償機構、(5) 落下実験、(6) 小型ロケット、(7) 宇宙実験が考えられる。これらの方法はすべて(7)以外は(7)を模擬する方法として地上で実施されているものである。また、理工学分野については(6)の方法はほとんど実施されていないので割愛する。ここでは(1)から(5)の方法についてそれぞれの方法を概観し、それぞれの利点と欠点を指摘する。

(1) 航空機の放物飛行

この方法は、宇宙飛行士の訓練や、映画の撮影にも用いられる方法としてよく知られている。実験者が航空機に搭乗することができるため、実験機器をその場で調整したり計測したりすることができる。また、放物飛行を繰り返すことにより実験を効率的に行うことができる。しかし、一回あたりの無重力時間は長くても 20 秒程度であり、無重力の質は航空機のパイロットの技量に大きく依存する。さらに観察座標系を航空機の床に固定すると航空機が放物運動をする間に回転する。日本では MU-300 という実験用トウインジェットがある。このジェットの場合には $10^{-2}g$ の微小重力、20 秒、一日 6、7 回の実験が可能である。

(2) 水槽での浮力の利用

この方法は、宇宙飛行士の船外作業訓練にも用いられる方法としてよく知られている。水の浮力を重力と釣り合わせるにより無重力を模擬するものである。水槽を大きくすることにより、ロボット等の運動空間を大きくすることができ、大規模な実験も可能であ

る。また、時間的な制限もない。しかし、ロボットなどを構成する剛体ごとに浮力と重力をバランスさせるだけではなく、浮力の中心と重心を一致させなければ予期しない回転運動を生じさせてしまう。さらに、水には粘性があり、速い動作では厳密な意味での無重力は模擬できない。このため、動力学の確認実験としては使用できない。また、ロボットは可動部があるにもかかわらず防水構造にしなければならない。

(3) 空気浮上

この方法は平板上で圧縮空気を使うことにより浮上させることにより、2次元空間に限定されるが無重力を実現するものである。この方法は比較的簡単に実現できるため、基礎研究から実証試験までもっとも多く利用されている。動作は2次元に限定されるが、時間的・空間的な制限はない。

(4) 重力補償機構

この方法は上から各リンクをつるして操り人形のように制御したり、平行リンクを使って相対的な位置姿勢を制御する方法がある。時間的な制限がなく、繰り返し同じ条件で実験が可能である。しかし、機構を制御するために複雑な動力学の計算を必要とする。このため、計算に間違いがあると正しい結果が得られず、計算機シミュレーションに似た事情がある。また、動作範囲（特に回転の自由度）は機構の制約上、通常大きくはとれない。

(5) 落下実験

落下実験は自由落下中の装置の中で実験を行うもので、良質の無重力が得られるが、空間的・時間的な制限がある。数秒以上実験ができる設備は限られており、世界でも数箇所しかない。本稿で紹介する実験は日本の地下無重力実験センター（Japan Microgravity Center, JAMIC）、日本無重量総合研究所（Micro-Gravity Laboratory of Japan, MGLAB）で行われたものであり、それぞれ10秒、5秒の無重力実験が可能である。

以下では上に述べた方法と宇宙実験でこれまで行われた理工学実験の具体例について、主に実験方法に重きをおいて述べる。実験結果については詳細を述べないが、資料名を最後に挙げておくのでご参照頂きたい。

2.2 航空機によるもの

(1) 川崎重工など

加藤ら²⁾は実験用航空機 MU-300 を使い、図 1.1 に示すようなカンチレバーの基本構造で長さ 713mm、幅 30mm（バーの部分）または 40mm（関節部）のピンジョイントの展開構造物モデルの振動特性を、構造物の先端に取り付けた加速度センサを用いて無重力下で測定し、重力がダンピング特性に大きな影響を与えることを示している。この研究は後述す

るように落下実験でも行われている。

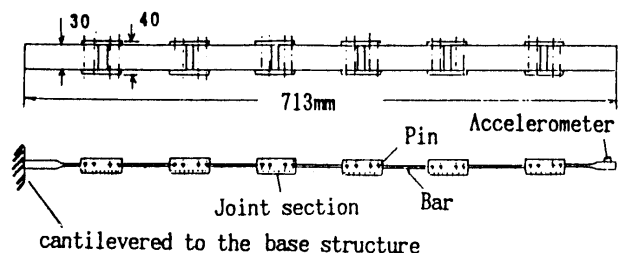


図 1.1 航空機実験に用いられたジョイント構造モデル (文献 2) による)

(2) 東京工業大学と宇宙開発事業団

松永ら³⁾は宇宙ステーション暴露部で再構成可能な歩行型ロボットを研究している。この関節部分の無重力下での動作特性を把握するために MU-300 で実験を行い、モータの電流・角度・温度、エンドエフェクタの加速度などを測定している。図 1.2 に装置を示す。

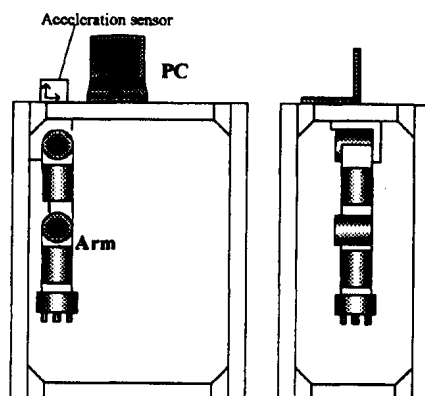


図 1.2 松永らの用いた航空機用実験装置 (文献 3) による)

2.3 水槽によるもの

(1) 米国メリーランド大学の実験

メリーランド大学は、宇宙ロボットの概念的な指針を示した ARAMIS レポートの著者である D. Akin を中心に、以前から水槽を用いた宇宙ロボットの研究が行われてきている。最近では Cohen ら⁴⁾が、水中の浮力中立環境で、可動の補助カメラプラットフォーム (SCAMP: Supplemental Camera Maneuvering Platform) の研究を行った。これは直径 71.1cm、重さ 75.8kg であり、6 個のプロペラを持つ。このカメラの配置によって、作業での強力な道具になると報告している。

また、2002 年のシャトルで行われる RTSX と呼ばれるロボット実験の準備として、水槽での NBV2 と呼ばれるロボットを使った研究が行われている⁵⁾。NBV2 は、露出部はすべて防水されており、地上から供給されるガスにより内圧を高くして水の浸入と水圧による変形を防いでいる。また、地上から電力と光学データとビデオのケーブルを供給されている。

マニピュレータの動作を遅くして水の粘性の影響を小さくしたが、照明条件や違ったり、マニピュレータとエンドエフェクタを浮力中立にするために外部からの力が必要である。

(2) 電子技術総合研究所

小規模であるが電総研でも水の浮力を利用した宇宙ロボットの研究が行われている。岩田ら⁶⁻⁷⁾は小型の2関節からなる1本の腕をもつ宇宙ロボットを製作し、60cm×60cm×60cm程度の水槽の中で宇宙ロボットの腕と姿勢の制御実験を行っている。このロボットはリンク毎に重心を調節できる機構が設けてある。そのロボットを図1.3に示す。それでもリンクごとにバランスをとることの困難さと粘性の影響が指摘されている。また、配線が外部にもあると、壁面に当たると反力が生じたり、配線の動きにより重心の位置がずれたりするので、そのような問題も考慮する必要がある。

2.4 空気浮上によるもの

(1) 電子技術総合研究所

戸田らは圧縮窒素ガスによる8個のスラストと2本の3自由度をもつ宇宙ロボットを製作した。このロボットはロボット自身に搭載された圧縮窒素ガスとエアパッドにより浮上し、スラスト用の圧縮ガスと電源系のバッテリーも搭載しているため全重量は150kgにも達する。エアテーブルとしては鋳物の定盤を用いている。このロボットを用いて故障した衛星の回収作業の模擬⁸⁾、宇宙ステーションのトラスをロコモーションする模擬⁹⁾などの実験が行われた。図1.4に戸田らの宇宙ロボットモデルを示す。

また、岩田ら¹⁰⁾は、小型の10kg程度の3自由度1本の腕を持つロボットを用いて壁面を押すことによる宇宙ロボットの無重力中での移動実験の一部をこの方法で試みている。このロボットは模型用のコンプレッサを搭載し、その圧縮空気で浮上している。このロボットを図1.5に示す。

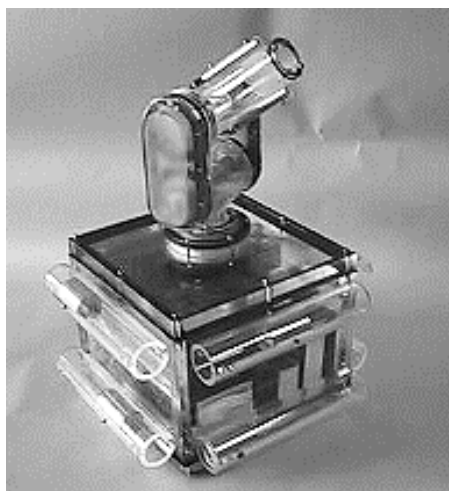


図1.3 岩田らの水中ロボット(文献7)による)

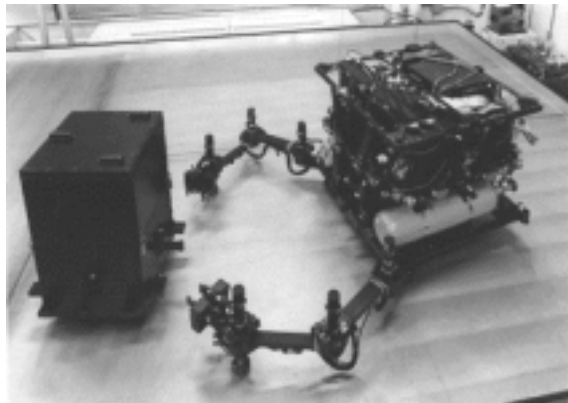


図 1.4 戸田らの宇宙ロボットモデル
(文献 8)による)

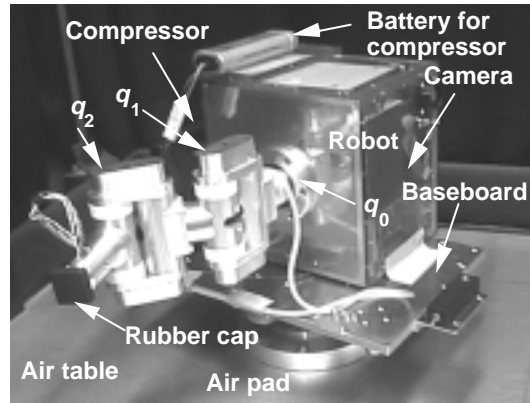


図 1.5 岩田らの空気浮上ロボット
(文献 10)による)

(2) 大阪府立大学

泉田ら¹¹⁻¹²⁾は、コントロールモーメントジャイロ (CMG) とスラスタを使った位置・姿勢制御の研究からはじめ、2本の3自由度をもつ宇宙ロボットを製作し、トラスの組立作業実験を行った。このロボットは CCD カメラでステレオ視ができる。関節ごとにトルクセンサがあり、関節トルクから手先のカトルクが計算できる。手先は1自由度の開閉する指をもつ。エアテーブルとしては面積 2438mm × 1829mm、8mm 厚のガラスを用い、295mm ごとにジャッキで支えられている。電気系と圧縮空気は外部から供給される。このため、上記の電総研のモデルに比べ、80 kg 程度と軽い。図 1.6 にシステムの概要を示す。

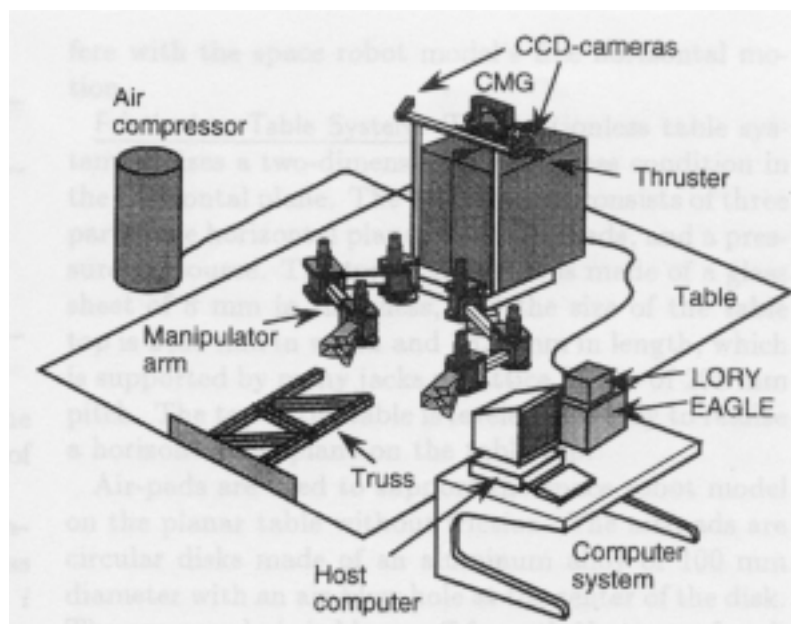


図 1.6 泉田らの宇宙ロボットモデル (文献 12)による)

2.5 機構を用いたもの

(1) 富士通研究所 / 東京都立科学技術大学

丸山ら¹³⁻¹⁴⁾は三次元吊り方式の宇宙ロボット用模擬システムを開発している。この方式ではアームの自由運動はワイヤで吊り、重力を打ち消すことにより実現する。ロボット本体は6自由度移動機構で保持して動かす。このロボットは2本の6自由度の腕を持ち、それぞれ3本のワイヤで吊られている。ここで使われているモータは運動制御上の課題が顕著に表れるようにダイレクトドライブ方式で、リンクの剛性は低くされている。全体のフレームの大きさは2800mm×3800mm×2000mm(高さ)である。図1.7にシステム全体の概要を示す。

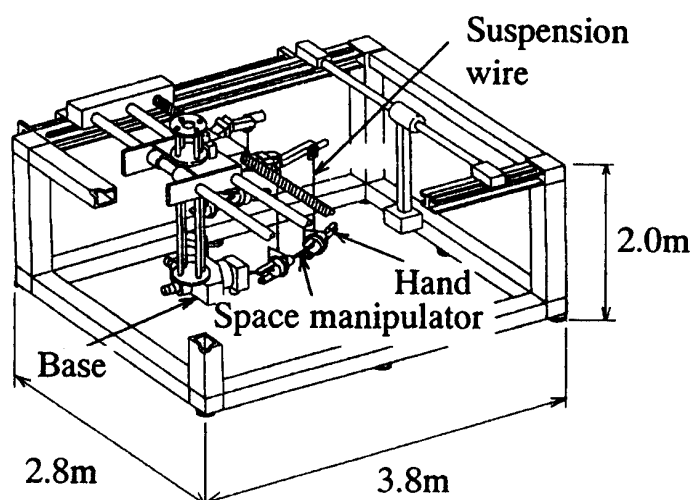


図1.7 丸山らの吊り方式宇宙ロボット(文献14)による)

(2) 三菱電機 / 宇宙開発事業団

下地ら¹⁵⁾は宇宙ロボットが浮遊するターゲットを捕獲するときの空間的挙動を模擬するためにバーシングダイナミクスシミュレータを開発している。これはロボット側の無重力のシミュレーションではなく、対象物の運動を模擬するもので、1軸の並進機構と平行リンク機構で構成されている。6軸のカトルクセンサを介してグラブルフィクスチャを取り付けている。図1.8に概要を示す。

2.6 落下実験によるもの

(1) 電子技術総合研究所

岩田ら⁷¹⁶⁻²¹⁾はJAMICの落下実験施設を使って初めて宇宙ロボットの実験を行い、宇宙ロボットの非ホロノミックな性質を利用した腕と姿勢の同時制御実験を行った。用いられたロボットは、2関節の腕を1本持つだけの簡単なものであった。この実験ではシミュレーションとよく一致した結果が得られている。実験で用いられた実験装置の概要を図1.9に示す。この実験では横置き2分の1ラック(0.87m×0.87m×0.443m)の大きさが使用さ

れた。また、岩田ら⁹⁾は壁面を押すことにより移動する宇宙ロボットの無重力中での移動法を提案し、その実証実験の一部にも落下実験を試みている。このロボットは空気浮上のところで述べたものと同じもので、3関節の1本の腕をもつ。この結果、空気浮上と落下実験で類似した実験結果が得られたと報告されている。さらに群小型衛星の自律的な捕捉・切り離しを目指した通信を含む実験にも着手している^{22,36)}。

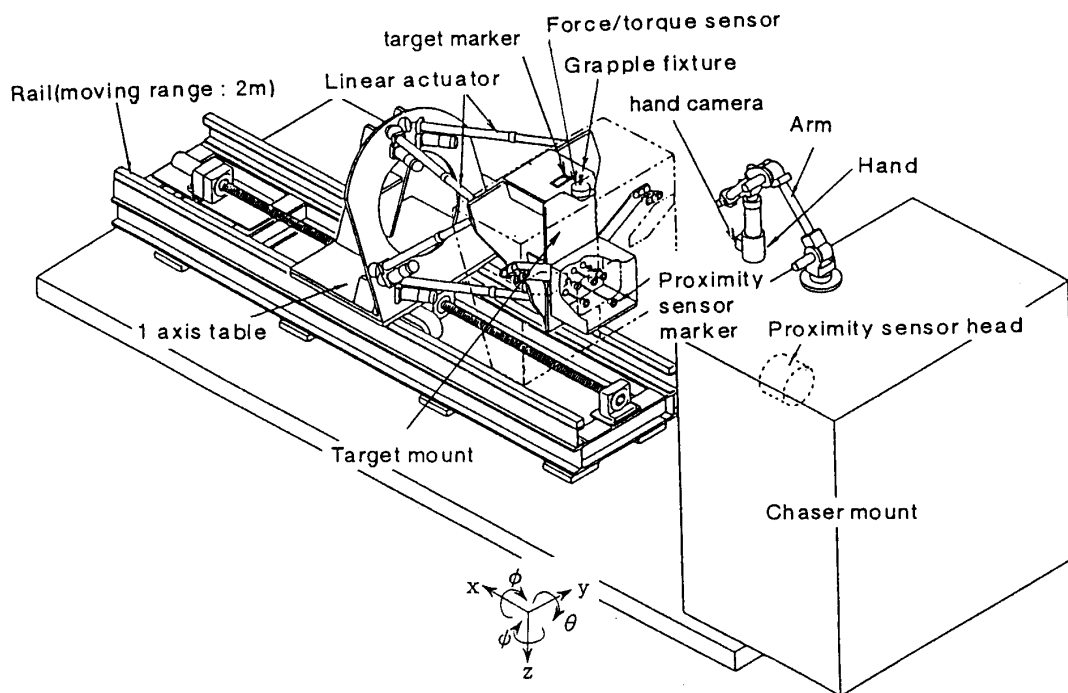


図 1.8 下地らのバーシングダイナミクスシミュレータ (文献 15)による)

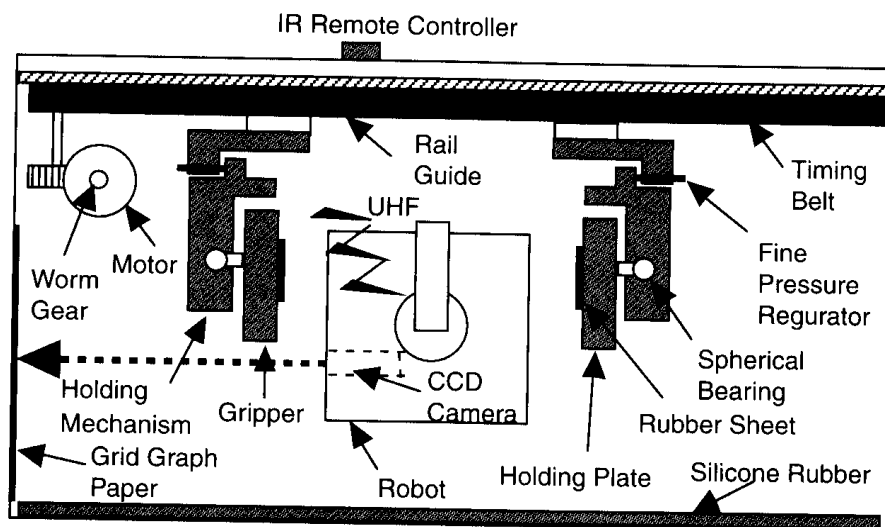


図 1.9 岩田らを用いた落下実験の装置 (文献 7)による)

(2) 東京大学

中村ら^{23,25)}は、宇宙ロボットの視覚フィードバックによる対象物の捕捉実験を JAMIC での落下実験により試みた。ロボットは3関節の腕を1本もち、無線によって制御されるため自身はコンピュータを持たない。このため、軽量化がなされ、全体で約 400 g である。外部に置かれた2つのカメラの映像を用いてロボットの動きを計測し、ロボットを制御する。図 1.10 に実験のシステム構成を示す。

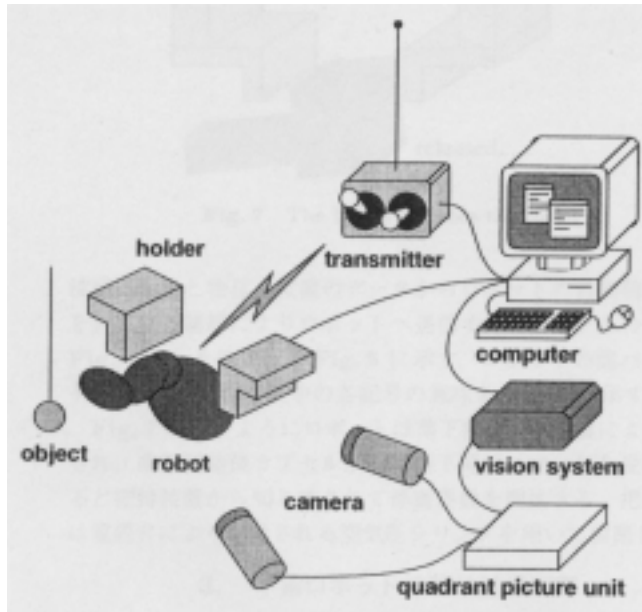


図 1.10 中村らの実験システムの構成 (文献 23) による)

下田ら²⁴⁾は、小惑星探査を念頭におき、重力場が非常に小さい状態での移動法として磁気浮上を利用した微小重力ローバを開発し、JAMIC で実験を行った。このローバは球形 (直径 14 cm, 1 kg) で、内部に4つの電磁石と鉄球を搭載している。電磁石で鉄球に力を加え、その反力で移動する。図 1.11 にローバの構造を示す。

渡辺ら^{25,33-34)}は、磁場を用いて傾斜重力場を模擬し、多体剛体の運動制御も試みている。4つの電磁石を使い、鉄球の運動を無重力中で制御する。対象物の立体視計測を行い、目的の位置に鉄球を誘導し、静止させる実験を行った。図 1.12 に実験システムを示す。

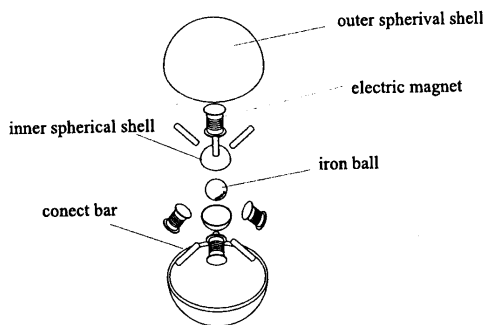


図 1.11 下田らのローバ

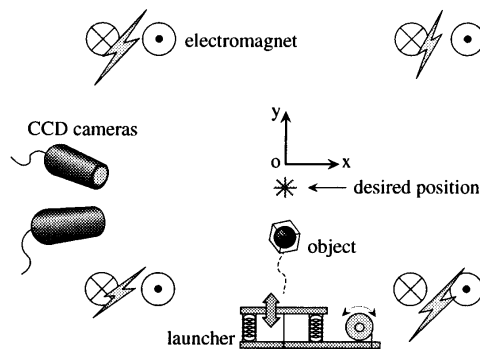


図 1.12 渡辺らの実験システム

(3) 宇宙科学研究所

吉光ら²⁶⁻²⁷⁾は、小天体上での微小重力環境探査ロボットの研究を行っており、その移動メカニズムの検証として JAMIC の落下実験施設を使った実験を行っている。微小重力環境では、通常の車輪による移動は困難であり、内蔵したトルカを用いてホップしながら移動する方法を提案している。この実験用探査機は大きさ $120 \times 96.5 \times 61$ mm の直方体で、質量は 0.55 kg である。図 1.13 に実験システムの概要を示す。

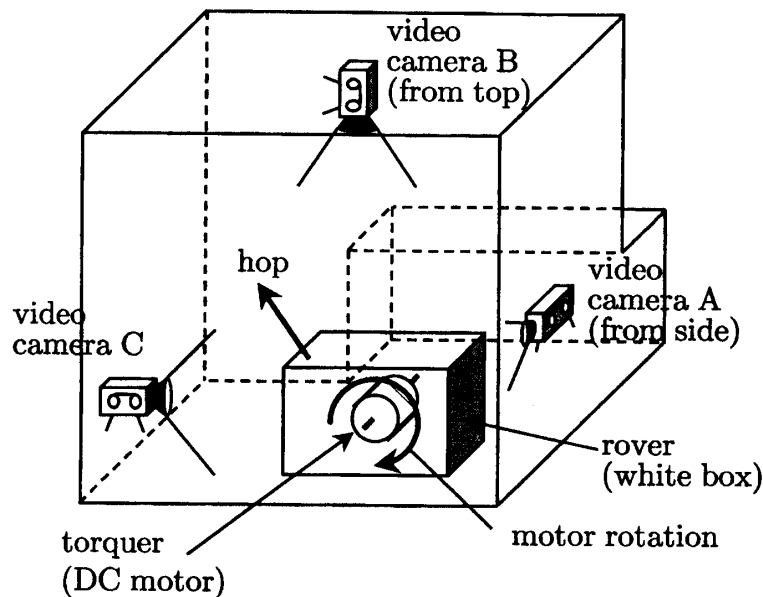


図 1.13 吉光らの実験システム (文献 26) による

久保田ら²⁸⁾は、小天体探査でのサンプルリターンミッションを想定して、小天体上に人工的なマーカをつける方法を研究している。お手玉のような物体を小天体上に落下させてマーカにすることを提案しており、その際のお手玉と小天体表面での衝突について MGLAB で実験を行った。

名取らは、JAMIC を使って、膜面膜型太陽電池アレイの収納・展開実験を行い、「逆折れ」現象の解明を行った^{32,35)}。また、スピン展開構造物の挙動についても実験を行った³³⁻³⁵⁾。これはスピンによる遠心力を利用して柔軟な膜面を展開・安定化させ、アンテナ鏡面を構築するというものである。

(4) 九州大学

外本³³⁻³⁶⁾は、柔軟マニピュレータ系の挙動と制御について、JAMIC で実験を行った。柔軟体を取り扱うには正確な数学モデルが必要であるが、種々の要因により数学モデルは確立されていない。そこで実験により確立しようとしたものである。また、対象物との接触時の力の伝播モデルについても検討した。このとき、対象物を回転させて挙動を観察した。

(5) 北海道大学

高野ら²⁹⁾は、宇宙用大型展開構造物としてインフレータブル構造物に注目し、インフレータブルチューブの展開実験を JAMIC で行っている。この用途は連星型燃焼実験衛星を念頭においており、直径 15 mm、長さ 220 mm のポリエチレンチューブに窒素ガスを送り込むことにより実験された。

高橋ら³⁰⁾は、インフレータブルチューブを利用した小型衛星のウェークシールド用のディスクを念頭に、10 分の 1 モデル (実験モデルは直径 200 mm) を作成し、展開実験を JAMIC で行っている。周囲に直径 4 mm のポリエチレンチューブを用い、それに紙を張った構造である。図 1.14 に実験装置を示す。

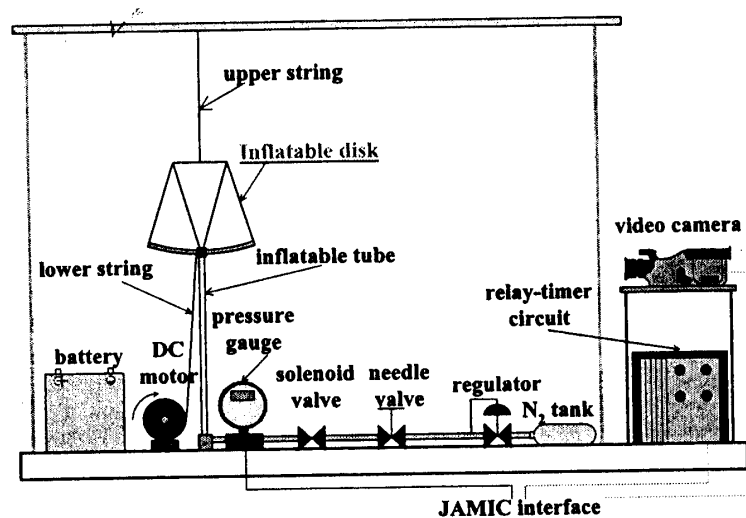


図 1.14 高橋らの実験装置 (文献 30) による)

(6) 日本飛行機

山城³⁴⁻³⁵⁾は、小型衛星をロケットから切り離すペイロード放出装置について、スピンを与えながら安定して放出する方法を JAMIC で実験を行った。ワイヤの張力の制御実験をまず行い、次にスピンを与えるためにヘリカルスプリングとボウ式スプリングを用いた実験を行った。

(7) 川崎重工など

航空機を使った実験のところでも述べた展開構造物について、JAMIC の落下実験施設を使った実験も行われている²⁾。ただし実験モデルは違っており、全体で長さ 600mm、幅 40mm の大きさになる 2 枚の長方形プレート、加振機、ギャップ調整機構で構成され、両端に加速度センサが取り付けられている。モデルはワイヤでつるされてセットされている。加振機はモデル中央に取り付けられ、全体を加振する。この実験装置を図 1.15 に示す。

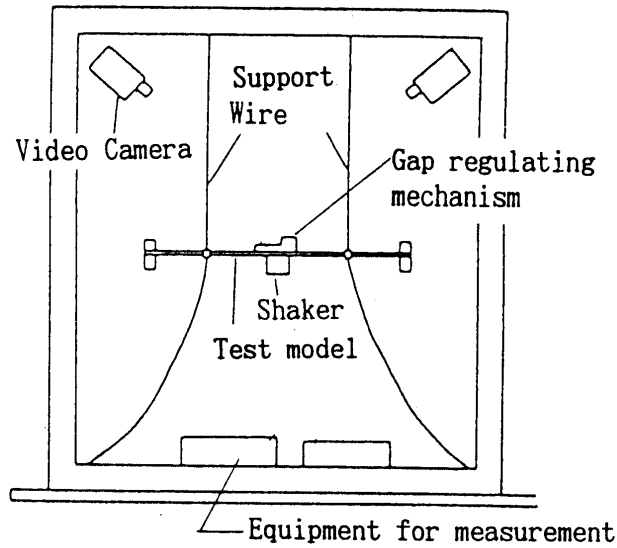


図 1.15 落下実験に用いられたジョイント構造モデル (文献 2)による)

(8) 北海道工業大学

竹沢ら³⁷⁾は小型衛星システムの研究を行っているが、その一環としてドッキング・切り離し機構の実験を JAMIC で行っている。レーザ距離計を使い、対象物との距離を測りながら小型衛星の捕捉を行う実験を行っている。小型衛星の目標速度は 1cm/s とした。図 1.16 に実験で用いられた切り離しプレートとドッキング固定機構を示す。

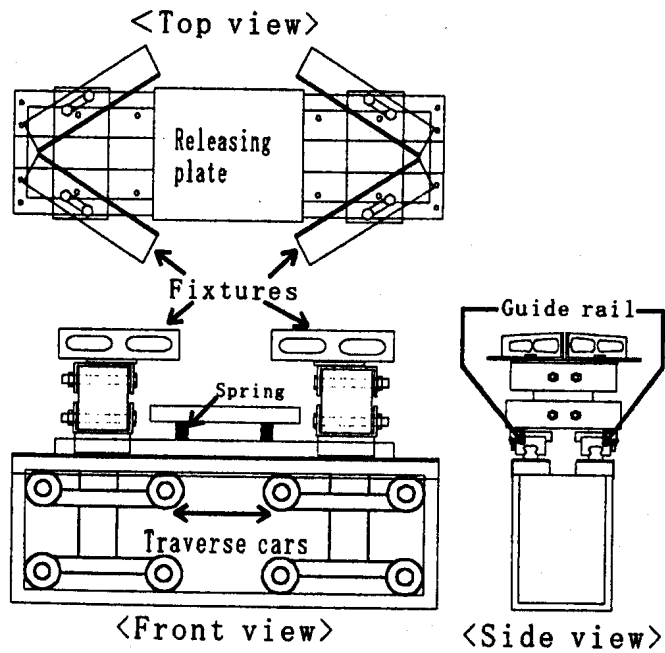


図 1.16 竹沢らの切り離しプレートとドッキング固定機構 (文献 37)による)

2.7 宇宙実験

宇宙ロボットの宇宙実験の場合，遠隔にあるロボットを制御するというテレロボティクスの観点と，無重力環境での運動制御という2つの観点がある．ここでは無重力環境に注目して概観することにする．

(1) ROTEX³⁸⁾

1993年4月にスペースシャトル STS-55 で行われたヨーロッパで最初のロボットの宇宙実験である．組立作業，電気プラグの脱着，浮遊物体の捕捉などが行われた．この研究では主にテレロボティクスの観点から研究がされたようであるが，遠隔操作で関節の制御やセンサベースのハンドコントローラが無重力化でもうまく働くかということが無重力環境下での課題であったようである．

(2) 宇宙開発事業団等 (MFD)³⁹⁾

マニピュレータ飛行実証試験 (Manipulator Flight Demonstration, MFD) は国際宇宙ステーションの日本実験棟の打上げに先立ち，その構成要素のうち重要で技術的に高度な精密作業用ロボットアームの飛行実証試験をスペースシャトルを利用して行ったものである．この試験に供されるアームは日本初の宇宙ロボットアームである．このアームは微小重力環境下で作動するように設計されており，地上での3次元6自由度の試験が困難なことや，微小重力下での関節機構の摩擦抵抗や噛み合い状態の確認が地上では困難であることから実際に微小重力環境下で試験が行われた．この実験は1997年8月7日から19日にかけてスペースシャトルディスカバリー号で行われた．図1.17にMFDのコンフィギュレーションを示す．

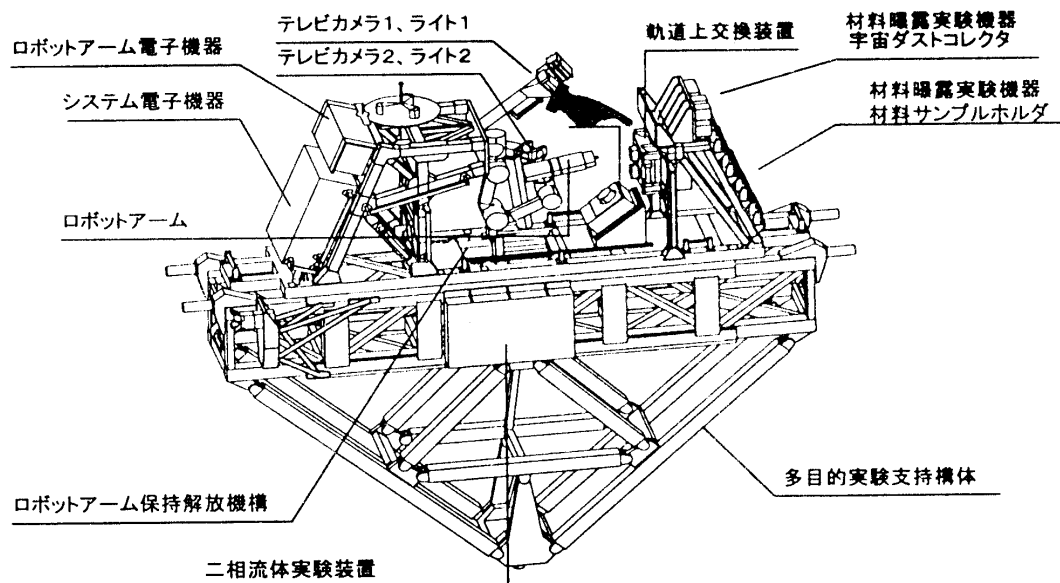


図 1.17 MFD のコンフィギュレーション

(3) 宇宙開発事業団等(技術試験衛星7型, ETS-VII)⁴⁰⁻⁴²⁾

ETS-VII を使った理工学分野の宇宙実験としては、大きく分けてランデブ・ドッキング実験とロボット実験に分けられ、さらにロボット実験は無重力での運動実験とテレロボティクスに関わる実験に分けられる。これらの実験のうち、特に無重力に関わるものについて紹介する。

ランデブ・ドッキング実験は、打上げ、軌道変換、相対接近、最終接近、ドッキングの5つのフェーズに分類されるが、無重力環境が大きな意味を持つのはそのうちの相対接近、最終接近およびドッキングのフェーズであると思われる。相対接近フェーズにおいてはGPS 相対航法により、Hill 方程式のC-W(Clohessy-Wiltshire)解に基づくC-W 制御則を用いてVIC(Velocity Increment Cutoff)制御を実施する。最終接近フェーズにおいては高精度レーザレーダRVR(Rendezvous Radar)を用いて相対航法を行い、チェイサ衛星をターゲット衛星の方向に指向させるLOS(Line Of Sight)指向制御⁴³⁾が実施される。ドッキングフェーズにおいては近接センサを用いて相対6自由度制御が実施される。いずれの実験も許容値を上回る性能を確認して成功している。

ロボット実験において無重力環境と関連の深い実験として、ロボットアームと衛星姿勢の協調制御⁴⁴⁾と姿勢に外乱を与えない制御の実験⁴⁵⁾が挙げられる。前者は腕の運動によって起こる姿勢変動を予測して衛星の姿勢制御系を使って姿勢を制御する実験である。このために力学に基づいて予想される角運動量をフィードフォワードで補償し、さらに誤差分をフィードバックで補償する方法がとられた。後者は追加実験として実施されたもので、姿勢変動を起こさないような腕の動作経路を計画し、実際に検証するというものである。実験の結果、腕の動作中にほとんど姿勢変動は起こさなかった。また、通産省の実験において、力センサベースの制御が無重力のために都合がよかったこと、地上試験で得られたデータベースが一部適用できなかったこと、把持開放時に対象物の挙動を考えた戦略が必要であることが指摘されている。

3. これからの展望

近年、構造物の知能化が話題となっている³¹⁾。宇宙構造物でもそのような話題があり、平成11年度から(財)宇宙環境利用推進センターに名取通弘宇宙科学研究所教授を委員長とする「構造知能化の基礎研究調査委員会」が発足している³⁶⁾。この中では材料と構造の挙動と制御の研究、知能ロボットシステムの研究、通信を含む知能機械システムの研究に整理され、相互に関連しながら検討されている。今後は宇宙構造物も知能化し、周囲にある宇宙ロボットや、構造物に取り付けられた多くのセンサが分散・協調したシステムが研究されていくことになるだろう。

無重力実験もこれまでは動力学を検証するという利用法で、流体や燃焼の研究者が考えている「物理現象の評価に使うもの」という概念のもとにあったが、今後は動力学分野が

らは「協調作業の戦略の評価にも使う」、もっと言うと「知的な作業戦略（ソフトウェア）の評価に使う」ということも考えられる。

このような先駆的な研究として、岩田らが行っている落下実験施設を利用した群小型衛星の切り離し作業の通信実験がある。これは小型衛星が切り離しのタイミングや方法について相互に通信して最適化を図るものであり、人工知能分野の分散人工知能やマルチエージェントの研究⁴⁶⁾とも関連してくる学際的な内容となっている。

4. まとめ

2.1節で述べた方法ごとに、長所・短所、実験例を表1.1にまとめる。この表からわかることは、宇宙ロボットの研究に関しては2.1に示したすべての方法が試みられており、それぞれの長所・短所を組み合わせ、補完することで総合的な研究が全体として行われているのがわかる。また、構造物については3次元の大型のものでの評価が本来求められており、2.1のいくつかの方法については試みられていないが、さまざまな工夫をして地上での実験がなされていることがわかる。今後の展望では、これまでなされてきたハードウェア中心の研究から、情報科学の成果を取り入れたソフトウェアを含む広く学際的な取り組みが今後予想されることを述べた。

表 1.1 本稿の総括

方法	長所	短所	具体例	実施者
航空機の放物飛行	その場での調整可. 繰り返し可.	1回あたり短時間. 質が悪い. 観察座標系が動く.	展開構造物 宇宙ロボット	川崎重工 東工大・NASDA
水槽での浮力の利用	時・空間的制約ない.	バランスが難しい. 粘性. 防水構造.	カメラプラットフォーム 宇宙ロボット	メリーランド大学 メリーランド大学, 電総研
空気浮上	実験が容易. 時・空間的制約ない.	2次元に限られる.	宇宙ロボット	電総研, 大阪府立大
重力補償機構	時間的制約ない.	制御が難しい. 空間的制約.	宇宙ロボット (展開構造物の試験)	富士通・都立科技大, 三菱電機・NASDA
落下実験	質がよい. 観察座標系固定.	時・空間的制約.	宇宙ロボット 小型衛星 柔軟アーム 展開構造物 小天体探査機 衛星切り離し装置	電総研, 東大 電総研, 道工大 九大 宇宙研, 川崎重工, 北大 宇宙研, 東大 日本飛行機
宇宙実験	理想的な環境.	機会が制限.	ROTEX MFD ETS-VII	DLR NASDA, 通総研, 航 技研など NASDA, 電総研, 通 総研, 航技研, 東北 大など

参考文献

- 1) 科学技術庁，宇宙開発事業団，(財)宇宙環境利用推進センター：“フロンティア共同研究成果報告”，CD-ROM，1998.
- 2) Kato, S., Muragishi, O., Natori, M., Matsuzaki, Y. and Iwasaki, A.: "Dynamics Characteristics Experiments of Joint Structures under Simulated Zero-Gravity Environment," 19th International Symposium on Space Technology and Science, ISTS 94-b-14, Yokohama, Japan, May 15-24, 1994.
- 3) Matunaga, S., Hayashi, R., Yamamoto, H., Sawada, H., Mori, M., Ui K. and Ohkami, K.: "Architecture and Design for System of Reconfigurable Brachiating Space Robot," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 14-17 August 2000, Denver, Co, AIAA-2000-4380.
- 4) Cohen, R., Hunt, T. and Seeliger, O.: "Vision Based Control and Navigation of an Underwater Telerobot," AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, July 29-31, 1996, San Diego, CA, AIAA 96-3899.
- 5) Parish, J. C.: "Planning for the Ranger Telerobotic Shuttle Experiment On-orbit Operations," AIAA 2000-5291, AIAA Space 2000 Conference, 19-21, September, 2000, A00-42877.
- 6) Iwata, T., Machida, K., Toda, Y. and Kawada, M.: "Development of Space Robot Models for Underwater Experiments," Proceedings of 21st International Symposium on Space Technology and Science, Sonic City, Omiya, Japan May 24-31 1998, Paper No. 98-c-09, pp. 587-592.
- 7) 岩田，村上，樹神，沼尻，鈴木，川田，戸田，町田：“センサ/動作データベースを用いた宇宙ロボットの腕・姿勢同時制御実験”，電子技術総合研究所彙報，Vol. 62, No. 2, pp. 113-131, 2000.
- 8) 戸田，岩田，町田，大塚，福田，鳥生：“宇宙用自由飛行テレロボットの研究 - 地上実験モデルの試作 - ”，日本航空宇宙学会誌，Vol. 40, No. 467, pp. 652-659 1992.
- 9) 福田，松日楽，戸田，町田，岩田：“双腕を有する宇宙ロボットによるトラス構造物上のロコモーション”，日本ロボット学会誌，Vol. 17, No. 1, pp. 140-149, 1999.
- 10) Iwata, T. and Murakami, H.: "Moving Method of Space Robot Pushing Walls," Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 12, No. 4, pp. 334-342, 2000.
- 11) 泉田，室津，長岡，三ツ矢：“宇宙ロボット実験システムのための位置姿勢制御”，日本ロボット学会誌，Vol. 16, No. 6, pp. 824-831, 1998.
- 12) Senda, K., Murotsu, Y., Mitsuya, A., Adachi, H., Ito, S., Shitakubo, J. and Matsumoto, T.: "Hardware Experiments of Space Truss Assembly by Autonomous Space Robot," AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 14-17 August 2000, Denver, Co, AIAA paper No. AIAA-2000-4377.

- 13) Sato, Y., Ejiri, A., Iida, Y., Kanda, S., Maruyama, T., Uchiyama T. and Fujii, H.: "Micro-G Emulation System Using Constant-Tension Suspension for a Space Manipulator," Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, April, 1991, pp. 1893-1900.
- 14) 丸山, 飯田, 江尻, 佐藤, 神田, 内山, 内山, 藤井: "三次元吊り方式による宇宙ロボット用無重力模擬システムの開発", 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 6, pp. 828-838, 1999.
- 15) 下地, 井上, 稲場, 若林: "バーシングダイナミクスシミュレータを用いた宇宙ロボットの挙動評価", 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 1, pp. 127-133, 1995.
- 16) 岩田, 村上, 樹神, 沼尻, 鈴木: "落下施設を使った宇宙ロボットの腕・姿勢同時制御実験", 日本航空宇宙学会誌, Vol. 45, No. 527, pp.705-712, 1997.
- 17) 岩田, 樹神, 沼尻, 菊田, 村上: "落下施設を使ったロボットの運動実験", 日本ロボット学会誌, Vol. 13, No. 8, pp. 1206-1209, 1995.
- 18) Iwata, T., Ueno, S. and Murakami, H.: "Experiments on Space Robot Arm Path Planning Using the Sensors Database, Part II," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 23, No.4, pp.739-742, 2000.
- 19) Iwata, T., Kodama, K., Numajiri F. and Murakami, H.: "Experiments on Space Robot Arm Path Planning Using the Sensors Database," Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol. 22, No.4, pp.573-578, 1999.
- 20) Iwata, T., Murakami, H., Kodama, K., Numajiri F. and Suzuki, T.: "Simultaneous Control Experiment of Orientation and Arm Position of Space Robot Using Drop Shaft," Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Science, Vol. 41, No. 528, pp. 46-53, 1998.
- 21) Iwata, T. and Murakami, H.: "Experiments on Space Robot Motion Control Using Genetic Algorithm," Space Forum, Vol. 6, No. 1-4, pp. 381-388, 2000.
- 22) Iwata, T., Murakami, H., Kodama, K., Numajiri, F., Suzuki, T., Takeshita Y. and Toda, Y.: "Communication Experiments between Satellites Flying in Formation Using a Drop Shaft," Drop Tower Days 2000 in Bremen, 57-59, 2000.
- 23) 中村, 渡辺, 荒木: "宇宙ロボットの自由落下無重力実験 - 小空間における実験法と視角計測-", 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 7 pp. 974-982, 1999.
- 24) Shimoda, S., Nakamura, Y. and Watanabe, Y.: "Development of a Micro-Gravity Rover using Internal Magnetic Levitation," 宇宙環境利用国際シンポジウム IN SPACE '99 講演論文・要旨集, pp. 173-179, 1999.
- 25) 渡邊: "微小重力環境における非線形効果を利用した宇宙多体系の運動制御", 東京大学大学院工学系研究科学学位論文, 1998.
- 26) 吉光, 久保田, 中谷, 足立, 斎藤: "小天体探査ホッピンググローバの無重力実験", 日

本航空宇宙学会誌 , Vol. 48, No. 555, pp. 105-110, 2000.

- 27) Yoshimitsu, T., Kubota, K., Nakatani, I., Adachi, T. and Saito, H.: "Analysis on Hopping Mechanism by Microgravity Experiments," Drop Tower Days 2000 in Bremen, pp. 63-65, 2000.
- 28) Kubota, T., Sawai, S., Kawaguchi, J., Yoshimitsu, T., Yoshizawa, N. and Ninomiya, K.: "Analysis on Collision Mechanism under Micro-Gravity Environment," Drop Tower Days 2000 in Bremen, 79-81, 2000.
- 29) 高野, 永田, 工藤: "インフレーターチューブの無重力環境における展開シミュレーション", 日本機械学会論文集 (C 編), Vol. 65, No. 633, pp. 244-250, 1998.
- 30) Takahashi, K., Nagata, H. and Kudo, I.: "Simulation for Deployment of an Inflatable Disk Orbit," Journal of Spacecraft and Rocket, Vol. 37, No. 5, pp. 707-708, 2000.
- 31) Kishi, T.: "Japanese Scientific Technology and Material Research -Smart Materials and Structural Systems-, " 宇宙環境利用国際シンポジウム IN SPACE '99 講演論文・要旨集, pp. 38-53, 1999.
- 32) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: "微小重力環境下での剛体力学の基礎研究", NEDO-ITK-9607, 1997.
- 33) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: "微小重力環境下での剛体力学の基礎研究", NEDO-ITK-9707, 1998.
- 34) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: "微小重力環境下での剛体力学の基礎研究", NEDO-ITK-9708, 1999.
- 35) 名取, 岩田: "ロボットおよび構造物の微小重力下でのふるまい", 宇宙環境利用国際シンポジウム IN SPACE '99 講演論文・要旨集, pp. 73-81, 1999.
- 36) 新エネルギー・産業技術総合開発機構: "構造知能化の基礎研究", 平成 11 年度調査報告書, NEDO-ITK-9907, 2000.
- 37) Takezawa, S., Satori, S. and Takebayashi, S.: "Experimental Study of Rendezvous Docking Mechanism for Microsatellite under the Microgravity," Proceedings of International Symposium on Space Technology and Science (ISTS) 2000, pp.1238-1242.
- 38) Brunner, B., Hirtinger, G. and Heindl, J.: "Multisensory Shared Autonomy and Tele-Sensor-Programming--Key Issues in the Space Robot Technology Experiment ROTEX," Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 2123-2139, Yokohama, Japan, July 26-30, 1993.
- 39) 宇宙開発事業団, 科学技術庁航空宇宙技術研究所, 郵政省通信総合研究所, 東京工業大学, 株式会社東芝, 株式会社日立製作所, 石川島播磨重工業株式会社: "マニピュレーター飛行実証試験 (MFD) シンポジウム前刷集", 1998.

- 40) 小田 (編): "ミニ特集「技術試験衛星 VII 型 (ETS-VII) における宇宙ロボット / ランデブ・ドッキング実験」", 計測と制御, Vol. 38, No.11, 1999.
- 41) 吉田 (編): "特集「ETS-VII における宇宙ロボット実験」", 日本ロボット学会誌, Vol. 17, No. 8, 1999.
- 42) 河野, 空野, 小山, 中村: ランデブ・ドッキングの誘導制御技術 - ETS-VII ランデブ・ドッキング実験系の設計 - ", 日本ロボット学会誌, Vol. 14, No. 7, pp. 935-939, 1996.
- 43) 山田, 吉河, 吉田, 小山: "宇宙機間の相対運動の制御", 計測自動制御学会論文集, Vol. 30, No. 10, pp. 1225-1233, 1994.
- 44) 小田: "衛星搭載ロボットアームと衛星姿勢の協調制御 - ロボットアーム動作時の衛星の姿勢安定の保証 - ", 日本ロボット学会誌, Vol. 15, No. 4, pp. 590-600, 1997.
- 45) Yoshida, K., Hashizume, K., Nenchev, D. N., Inaba, N. and Oda, M.: "Control of a Space Manipulator for Autonomous Target Capture -ETS-VII Flight Experiments and Analysis-", AIAA-2000-4376, AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, A00-37131, 14-17 August, 2000, Denver, CO.
- 46) Weiss, G. (Ed.): "Multiagent Systems A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence," The MIT Press, 1999.