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

丸 山 次 人^{*1} 飯 田 好 高^{*2} 江 尻 革^{*1} 佐 藤 裕 一^{*1}
神 田 真 司^{*1} 内 山 隆^{*1} 内 山 賢 治^{*3} 藤 井 裕 矩^{*3}

A Real-Time Micro-G Emulation System Using Constant-Tension Suspension for a Space Robot

Tsugito Maruyama^{*1}, Yoshitaka Iida^{*2}, Arata Ejiri^{*1}, Yuichi Sato^{*1},
Shinji Kanda^{*1}, Takashi Uchiyama^{*1}, Kenji Uchiyama^{*3} and Hironori Fujii^{*3}

We describe in this paper a ground based hardware simulation system for emulating a space robot under microgravity condition. The manipulator of the robot is suspended by wires which are kept in vertical direction by suspension arms that follow the motion of the manipulator in real-time. The base of the robot is supported by a six-DOF (degree-of-freedom) mechanism. Free floating emulation is achieved by using a real-time numerical integration of the dynamic and kinematic equations of the manipulator. The gravitational force on the manipulator is compensated by a combination of the force on the base as applied by the six-DOF mechanism and the upward tensile force which is exerted through the wires. By optimizing the manipulator suspension method, the individual wire tensions are kept constant, independent of the manipulator attitude. Experiments show that the Micro-G emulation system is precise enough to emulate three-dimensional motion of a space robot, in a microgravity environment under condition of only 0.28×10^{-2} [G].

Key Words: Micro-G, Space Robot, Constant-Tension, Suspension System, Real-Time Emulation

1. は じ め に

宇宙ステーションやプラットフォームなど、宇宙のインフラストラクチャの構築・運用が必要とされる様々な軌道上作業を、宇宙ロボットで行うことが期待されている。無重力環境で使用される宇宙ロボットでは、産業用ロボットとは異なった三次元運動性能が要求され、柔軟アームの振動制御や衝突時の外力吸収制御など宇宙ロボット特有の制御技術の確立が重要課題となっている。宇宙の無重力環境を地上で模擬することは容易ではないが、宇宙ロボットの実用化には、開発の各段階で目的に適ったシミュレータを用いて、開発した制御技術を評価・検証しながら進めていくことが大切である。開発の初期における作業計画の妥当性を確認

するには、数学モデルに基づく数値シミュレーションを用いる方法が有効である。しかしながら、自由飛行や衝突時における宇宙ロボットの力学的挙動は、正確なモデル化の難しい、機構系の非線形特性によるところが多いため、数値シミュレーションだけでは限界がある。特に後期段階では、実機を用いた宇宙ロボット各部の運動性能・力制御性能の調整評価、さらに、実機やオペレータをループ内に組み込んだ状態での、オペレータの運用訓練やシステム全体の性能評価が求められ、実時間で実行するハードウェアシミュレータが不可欠となる[1]。そこで本研究では、地上において宇宙の無重力環境を長時間模擬的に作り出し、宇宙ロボットの三次元的な運動を繰り返し評価・検証の行える、ハードウェアシミュレータの開発を目的とした。

従来、地上で無重力状態を模擬的に作り出す方法としては、次の五つの方式が用いられている。

- ① 空気または磁気浮上による二次元無重力状態の実現方式、
- ② 落下塔や航空機の急降下を利用した三次元無重力状態の実現方式、
- ③ 水槽内の浮力を利用した三次元無重力状態の実現方式、
- ④ ワイヤなどの吊り下げによる部分的な無重力状態の実現方

原稿受付 1998年5月22日

^{*1}(株) 富士通研究所

^{*2}(株) 富士通静岡エンジニアリング

^{*3}東京都立科学技術大学

^{*1}Fujitsu Laboratories Ltd.

^{*2}Fujitsu Shizuoka Engineering Limited.

^{*3}Tokyo Metropolitan Institute of Technology

式,

- ⑤実ハードウェアと数値シミュレーションによる部分的な無重力状態の実現方式.

ここで, ①文献[2]~[5]は 10^{-3} [G]程度の無重力性能が得られ比較的容易に開発できることから, 研究室レベルで幅広く利用されている方式であるが, 運動が二次元に限定されている. ②文献[6]と[7]は 10^{-2} ~ 10^{-4} [G]程度の無重力性が得られるものの, 模擬時間が数[s]~数10[s]で短いといった欠点をもち, また③文献[8]は比重および流体抵抗の問題があるため, 精密な模擬が期待できない. 以上の理由から, ①~③は検討対象から外す. 次に, ④文献[9]~[11]の方式により, 鉛直方向の重力を打ち消すことは可能であるが, この方式だけで宇宙特有の運動を模擬することは難しい. 特に, 宇宙ロボットのように多くのリンク機構を有する場合には, 数多くのワイヤを必要とするため, 連成振動も生じやすくなり, 制御も非常に複雑になる. 一方, ⑤文献[12]と[13]は, 捕捉作業時の空間的挙動の模擬を目的としているものの, アームの動きはすべて数値計算結果に基づいており, 数式モデルが無重力下におけるアームの自由運動を, どこまで再現できるかといった限界を含んでいる. また, 模擬の自由度数も相対6自由度に限定されている. このように, 本研究で目的とする無重力模擬システムを実現するには, ④と⑤はいずれも単独としては限界がある.

そこで, 今回我々が採用した方式は, ④と⑤を融合して互いの弱点を補うようにしたものである. すなわち, 無重力下における宇宙ロボットアームの自由運動は, アームを三次元的にワイヤで吊り重力を打ち消すことで実現する. 一方反作用運動を含む宇宙ロボット本体の動きは, 本体を6自由度移動機構で支持し, リアルタイム数値シミュレーション結果に基づいて動かすことで実現する. このような方式により, 無重力環境での宇宙ロボットの三次元的な運動を, 実験室レベルで長時間に渡り模擬することのできる, 評価実験用のハードウェアシミュレータを開発した. 本論文では, 三次元吊り方式を特徴とする宇宙ロボットの無重力模擬システムの方式検討, 機構構成, 制御方式, および性能評価について述べている.

2. 開発コンセプト

2.1 開発の狙い

宇宙ロボットの代表的作業として, ORU交換, 衛星の捕捉, 複腕による組立が計画されており[14], このような軌道上作業を行う宇宙ロボットは, 産業用ロボットと比べて運動性能上, 以下のような問題がある.

- ①宇宙ロボットは産業用に比べ, アクチュエータパワー/アーム重量の比が相対的に小さい. またアームも長く全体に剛性も低い. このため, アームの動きに伴って振動が発生しやすい.
- ②宇宙ロボットは固定されていないため, アームの動きに連動して本体部分に内力が働き, 本体が回転・移動して, 通信の途絶などの重大事態の原因になる[15].
- ③宇宙ロボットは他の対象との衝突により, 相対的な運動量・角運動量の交換が行われ, 系全体が回転・移動して, ②と同様に重大事態の原因になる.

これらの問題を克服して, 宇宙ロボットによる上記のような軌道上作業を実現するには, アームの振動抑制制御, アームと本体

の協調制御, および衝撃力の吸収制御など, 宇宙ロボット特有の制御技術を確立することが重要になる. このような研究開発を進めていくためには, 地上において宇宙ロボットの力学的挙動を模擬するシミュレータが必要になる. ①の剛性の低いアームを動かした場合の振動や, ③の衝突時の外力によるアームの運動など, 比較的速い力学的な応答は, 正確なモデル化の難しい機構系の非線形特性(摩擦やガタなど)によるところが多く, 数値シミュレーションだけでは限界がある. そのため, 実機を用いた, 制御則の評価検証やアームの機械的なインピーダンスの調整評価が必要になる. また, ②のような協調制御に関しては, 実運用に当たり, 実機やオペレータをループ内に組み込んだ状態での, オペレータの運用訓練およびシステム全体の性能評価が必要になる. この場合, 実時間性が要求されるが, 現状の数値シミュレーション技術では, 30自由度以上の機構系の運動シミュレーションを, 実時間で実行することは困難であり, 実機の使用が不可欠となる. 以上のように, 数値シミュレーションだけでは検証できない部分が多々あり, 宇宙ロボットの開発には, 実機を組み込むことのできる, ハードウェアシミュレータの開発が切望されている.

さて, 宇宙ロボット特有の制御技術の研究開発で使用される, 宇宙ロボットの評価実験用のハードウェアシミュレータには, 上記①~③の問題に対応して,

(2-1) 無重力下でのアームの自由運動

(2-2) アーム運動に伴う本体の反作用運動

(2-3) 衝撃力によるアームと本体の反作用運動

の模擬が要求される. 今日, 宇宙ロボットの開発は段階的に進められており, まずアームの振動抑制制御やアームと本体の協調制御技術の確立が求められている. これらの点を考慮して, 本研究で開発する無重力模擬システムでは, (2-1)と(2-2)の模擬の実現を今回の開発目標にした.

2.2 開発の基本方針

本研究では, 三次元的な無重力状態を長時間に渡り実現すると観点から, 吊り方式とリアルタイム数値シミュレーションを融合した方式を採用することにして, 以下の方針を設定した.

(2a) (2-1)は, アームの重力をワイヤで鉛直方向に吊ることで打ち消して実現する. このとき, 機構や制御の複雑さを避けるためにワイヤ本数をできるだけ少なくすること, また, アームの停止時は勿論, 動作時においても高い無重力性とワイヤの鉛直性を確保することが技術的課題となる. 前者は, 関節の鉛直線上を吊る方式+カウンタバランスの採用で, 後者は, 能動的なワイヤの一定張力制御と, アームと吊りアームの同期制御の適用で解決する.

(2b) (2-2)の本体反作用運動は, 本体を6自由度移動機構で支持し, リアルタイム数値シミュレーション結果に基づいて動かすことで実現する. このときの課題は, アームの自由運動への追従性の確保である. これに関して, アーム各関節角データに基づきリアルタイムで反力計算を行い, 本体を動かすことで解決する.

2.3 設計仕様

宇宙ロボットと無重力模擬装置からなる機構部の設計に当たっては, おのおの次のような設計仕様を設定した.

(宇宙ロボット)

(2c) 上記代表的作業への適用を想定して、アームは2本とし、宇宙ロボットの運動制御上の課題がより顕著に現れるように、モータはダイレクトドライブモータを使用し、リンクは剛性の低いものにした。

(無重力模擬装置)

(2d) ワイヤ吊り方式による重力補償精度は、無重力下での宇宙ロボットの運動制御法の研究に必要な精度、有効数字2桁を保証する、 10^{-2} [G]以上を目指す。

(2e) ワイヤを支持する機構部の固有振動数は、共振や制御の遅れを避けるためアームリンク部の基本固有振動数(0.5 ~ 1[Hz])より1桁程度高くする。

(2f) (2d) を達成するために、ワイヤを鉛直に吊る吊りアームの追従精度、および反作用運動における本体の追従精度は、 10^{-2} [G]に影響を及ぼさないオーダを確保する。

以上の設計仕様にに基づき、詳細設計を行った。

3. 吊 り 方 式

3.1 吊り方式の検討

本研究では、アームをワイヤで吊ることにより、重力の影響を打ち消す方式[16]を採用した。一般に、重力を打ち消すためのワイヤ張力値は、吊り位置と全体系の重心位置との相対関係で定まり、リンク機構の姿勢に応じて変化する。

Fig.1 に示した例の場合、静力学的釣り合いの式は以下のようになる。

$$T_1 = \frac{W(\cos\psi_1 - 3\cos\psi_2)}{2(\cos\psi_1 - \cos\psi_2)} \quad (1)$$

$$T_2 = \frac{W(3\cos\psi_1 - \cos\psi_2)}{2(\cos\psi_1 - \cos\psi_2)} \quad (2)$$

ここで、 T_1 , T_2 は各張力値、 W はリンクの重量、 L は関節間の長さ、 ψ_1 , ψ_2 はリンクの角度を表す。この張力値を宇宙ロボットの姿勢変化に応じて計算して、それに追従するように張力を制御する方式が考えられる。しかし、余分な計算が介在するため、制御は複雑になる。そこで、制御を簡単化するために、一定の張力で重力の影響を全体として打ち消す方法を検討した。その方法として、基本的に次の2方式が考えられる。

Fig.1 Relationship between the tensile force and the angle of incidence

(1) 重心鉛直線上を吊る方式

これは、宇宙ロボットをリンクごとに分解し、おのこのリンクの重心を通る鉛直線上を吊る方式である。この方式ではワイヤの本数は、分解したリンク数に等しくなる。Fig.2 は本方式の原理を示したものである。図から明らかなように、各コンポーネントはその重心を通る鉛直線上を吊られているため、張力は姿勢によらず常に一定となる。重力の影響は、コンポーネントごとに打ち消され、組み上がったリンク機構全体においても重心の影響は存在しない。この場合、各リンクは完全剛体で、かつワイヤは関節の回転に対し常に鉛直性が保たれていなければならない。この方式では、ワイヤ本数はアーム1本当たり3本となる。

(2) 関節鉛直線上を吊る方式

これは、組み上がったリンク機構のおのこの関節の鉛直線上を吊る方式である。この方式では、吊り下げる対象に対する静力学的な釣り合いの方程式が姿勢に依存しないため、結果としてワイヤの張力値が常に一定となる。Fig.3 に示した例の場合、静力学的釣り合いの式は以下のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_0 L_1 &= T_1' L_2, & T_0 + T_1' &= W_1 \\ T_1'' L_3 &= T_2' L_4, & T_1'' + T_2' &= W_2 \\ T_2'' L_5 &= T_3 L_6, & T_2'' + T_3 &= W_3 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 T_i ($i=0 \sim 3$) は各張力値を、 W_i ($i=1 \sim 3$) は各リンクの重量を表す。また、 L_i ($i=1 \sim 6$) は各リンクの重心位置と吊り位置との距離を表す。式(3)より T_i の値は以下の通りとなる。

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= W \\ T_1 &= (L_1 / L_2) W \\ T_2 &= (L_1 L_3 / L_2 L_4) W \\ T_3 &= (L_1 L_3 L_5 / L_2 L_4 L_6) W \\ W &= \frac{W_1 + W_2 + W_3}{1 + \frac{L_1}{L_2} + \frac{L_1 L_3}{L_2 L_4} + \frac{L_1 L_3 L_5}{L_2 L_4 L_6}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Fig.2 Suspension from the center of linked masses

Fig.3 Example of suspension at the joints

このうち、 T_0 はFig.3における左側の固定ボディーを通じて支えられるものであり、上式は、Fig.3に示す以外の任意の姿勢でも成り立つ。したがって、式(4)の各張力値は宇宙ロボットの姿勢によらず常に一定となる。この場合、 T_0 は本体で支持されるとして、この方式でもワイヤ本数はアーム1本当たり3本となる。

3.2 ワイヤ数の検討

ワイヤ本数が多いと機構や制御が複雑になり、特にワイヤ同士の連成振動は非常に厄介な問題となる。これを避けるために、ワイヤ数をできるだけ少なくするような工夫が必要になる。

前節の(1)と(2)の方式において、ワイヤ本数は3本で同じである。しかしながら、(1)の場合には、リンクの重心位置の同定が必要となり、一般に正確に求めるのは難しい。特に、柔軟アームの場合、リンク部分を集中的に吊ると、張力でリンクが曲がり挙動に吊りの影響が現れるため、(1)の方式を適用することができなくなる。一方、(2)の方式ではそのような影響を受けない。そこで、関節鉛直線上を吊る(2)の方式を基本として改良検討を行った。ここでは、Fig.4に示すように、第5関節部分にカウンタバランスを取りつけアーム先端部分の重心がちょうど、第5関節上にくるような構造にした。この場合の、静力学的釣り合いおよび張力は以下の通りになる。

$$\left. \begin{aligned} T_0 L_1 &= T_1' L_2, \quad T_1'' L_3' = T_2 L_4 \\ W_3 L_5 &= W_4 L_6 \\ T_0 + T_1 + T_2 &= W_1 + W_2 + W_3 + W_4 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} T_0 &= W \\ T_1 &= (L_1 / L_2) W \\ T_2 &= (L_1 L_3 / L_2 L_4) W \\ W &= \frac{W_1 + W_2 + W_3 + W_4}{1 + \frac{L_1}{L_2} + \frac{L_1 L_3}{L_2 L_4}} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

前節の議論と同様に、この場合、宇宙ロボットの姿勢が変化しても、 $L_1 \sim L_4$ は変化しないことから、 $T_0 \sim T_2$ 、 W は一定となる。これにより、ワイヤ本数をアーム1本当たり2本に減らすことが可能になった。

4. システム構成

4.1 機構部の構成

2章の方針に基づいて設計した宇宙ロボット用無重力模擬システムの鳥瞰図と外観写真をFig.5に、またその自由度構成をFig.6に示す。Fig.6に示す通り、宇宙ロボットは2本の6自由度多関節アーム ($\theta_{R1} \sim \theta_{R6}$, $\theta_{L1} \sim \theta_{L6}$)と本体からなり、一方、無重力模擬装置は、宇宙ロボットアームを支持する吊り機構部 (ϕ_{R1} , d_{R1} , ϕ_{R2} , d_{R2}) (ϕ_{L1} , d_{L1} , ϕ_{L2} , d_{L2})と、本体部分を支持する本体移動機構部 (X_B , Y_B , Z_B , α_B , β_B , γ_B)とから構成される。この他、対象物の捕捉作業などを想定して、対象物移動機構部を備えている。この結果、システム全体の自由度数は32となる。

4.1.1 宇宙ロボット

ロボットアームは宇宙空間での高機能的な作業を想定して、双腕の6自由度多関節形とした。設計仕様(2c)より宇宙ロボットの

Fig.4 Hybrid suspension

Fig.5 (a) Overview of micro-G emulation system

Fig.5 (b) Photograph of micro-G emulation system

Fig.6 System degrees of freedom

運動制御法の研究などへの使用を考慮して、各関節はダイレクトドライブモータによる駆動とし、リンクは剛性を低くして柔軟性を持たせた。ここで、宇宙ロボットの外観を Fig.7 に、各関節の可動範囲を Table 1 に示す。また、ハンドは簡単な把持動作への適用を考え、2 指の開閉とした。

4.1.2 無重力模擬装置

無重力模擬装置は、吊り機構、本体移動機構、対象物移動機構、およびフレームから成る。ここで、吊り機構の外観を Fig.8 (a) に、ロボットアーム θ_5 軸をワイヤで吊った状態を Fig.8 (b) に示す。また、本体移動機構の可動範囲を Table 2 に示す。

(1) 吊り機構

吊り機構は、ワイヤでアームを吊ることにより、アームにかかる重力を打ち消す役割を担っている。高い重力補償精度を確保するために、次の 2 項目をクリアすることが要求される。

(4a) アームの上下運動に対応して、ワイヤが弛んだり突っ張ったりすることなく、滑らかにワイヤの巻取り巻戻しが行われる。

(4b) アームの水平運動に対して、ワイヤは常に鉛直である。

まず、(4a) を実現する吊り方式としては、Fig.9 に示すように、①風船式、②カウンタバランス式、③定荷重バネ式、④巻取り式の 4 種類が考えられる。風船式、カウンタバランス式、および定荷重バネ式は、基本的に受動方式であり、重力補償用の治具による慣性力が大きくなるため、アームの運動に対する追従性が悪くなり、重力の高い補償精度が期待できない。一方、能動方式である巻取り式は吊り下げ重量の変更に対応しやすく即応性に優れ、小型高精度化が狙える。このような理由から、巻取り式を採用した。巻取り式でのワイヤの吊り位置は、3.2 節の検討結果に基づき、ワイヤの質量の集中している $\theta_3+\theta_4$ 軸と $\theta_5+\theta_6$ 軸の 2 か所とした。なお $\theta_1+\theta_2$ 軸は本体移動機構で支持する。

次に (4b) に対しては、水平面で動く水平多関節形の吊りアーム、ジンバル、および巻胴付きの巻取り機構の構成により解決した。吊りアームは、2 本のワイヤの吊り位置をロボットアームの水平面内に投影した時の動きに追従するように、リアルタイムによる運動学計算結果に基づいて動く。このアームは、1 本当

たり直進 2 軸と屈曲 2 軸の 4 自由度を持ち、直進動作は DC サーボモータとボールネジの組み合わせで、屈曲動作は DC サーボモータとハーモニックドライブギアの組み合わせで実現した。ジンバルは、ロボットの姿勢にかかわらず常に関節重心を吊るために設けた。Fig.10 に示すように、互いに直交する 3 軸方向に回転自在に支持するものである。巻取り機構は、DC サーボモータと

Table 1 Space manipulator specifications

Axis	Range	Max.speed
θ_1	$\pm 160^\circ$	5 rpm
θ_2	$\pm 80^\circ$	5 rpm
θ_3	$\pm 67^\circ$	5 rpm
θ_4	$\pm 155^\circ$	20 rpm
θ_5	$\pm 67^\circ$	20 rpm
θ_6	$\pm 155^\circ$	40 rpm
Size	1592 [mm]	
Link length	$\theta_2-\theta_3=500\text{mm}$ $\theta_3-\theta_5=500\text{mm}$	

Table 2 Base suspension system specifications

Ax	Range	Max.speed
X_B	$\pm 568\text{mm}$	125 mm/s
Y_B	$\pm 836\text{mm}$	200 mm/s
Z_B	$\pm 1027\text{mm}$	200 mm/s
α_B	$\pm 45^\circ$	10 rpm
β_B	$\pm 35^\circ$	10 rpm
γ_B	$\pm 35^\circ$	10 rpm
Frame size	2800(W) $\times$ 3800(D) $\times$ 2000(H)

Fig.8 (a) Photograph of suspension arms

Fig.7 Photograph of base and space manipulators

Fig.8 (b) Photograph of θ_5 joint suspended by a wire

ハーモニックドライブギアにより駆動し、巻取り位置を常に一定に保つために、螺旋上の溝を持つ可動式の巻胴を備えた。これにより、ワイヤを巻取るとき巻胴は回転しながら軸方向に移動し、ワイヤの巻取り位置を常に一定のまゝ一層でワイヤを螺旋状に巻取ることができる。

(2) 本体移動機構

本体移動機構の役割は、スラストなどによるロボット本体の動きの模擬、およびアームの動きによる本体の反作用運動を模擬することである。本体移動機構は、アームの動きに応じてリアルタイムで計算した結果に基づいて動作し、 $X_B, Y_B, Z_B, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B$ 軸の6自由度を有する。自由度の順番は、本体側から、 $\gamma_B, \beta_B, X_B, \alpha_B, Y_B, Z_B$ とした。これは、本体移動に伴うロボットアームの動きと、それに追従する吊りアームの動きとを同時に実現するために、 α_B, Y_B, Z_B の3自由度を共有化したからである。 X_B 軸方向はDCサーボモータ、ハーモニックドライブギアおよびボールネジにより、 Y_B, Z_B 軸方向はACサーボモータとボールネジにより、また $\alpha_B, \beta_B, \gamma_B$ 軸方向はDCサーボモータとハーモニックドライブギアの組み合わせにより実現した。

(3) 対象物移動機構

宇宙ロボットによる対象物の捕捉作業を想定し、対象物を各辺300 [mm]の立方体とし、2指のハンドで把持できるように突起を付けた。また、本体移動機構と同様に、 $X_T, Y_T, Z_T, \alpha_T, \beta_T, \gamma_T$ 軸の6自由度を有し、駆動方法も同じである。

(4) フレーム

フレームは、本体移動機構、対象物移動機構を支えるものです法は、2,800 (W)×3,800 (D)×2,000 (H) [mm]とした。

4.2 制御部の構成

Fig.11に示す通り、制御システムは、ワークステーション (Sun-4/330)、CPUボード (micro-SPARC)、DSPボード (MB8764) からなる階層的な構成とした。

ワークステーションは、システム全体の制御を行っており、CPUボードは、制御アルゴリズム部の計算と、リアルタイムOSのVxWorksを用いてDSPボードおよび張力制御ボードのデータ入出力管理を行っている。つまり、CPUボードの配下において、宇宙ロボットアーム、吊り機構、本体移動機構、対象物移動機構などのモータはDSPを通じて、また、巻取りモータはアナログ

Fig.9 Suspension system mechanisms

Fig.10 Gimbals

Fig.11 Configuration of control system

Fig.12 Procedure of control algorithm

回路を通じて、サーボ制御系を構成している。各モータのサンプリングタイムは、0.2 [ms]である。

Fig.12に、制御アルゴリズムの処理の流れを示す。ここでは、アームの運動生成、ならびに、アームの動きに伴った吊りアームの同期制御と反作用による本体運動制御のための、順／逆運動学・動力学をリアルタイムで計算し、吊りアームや本体への指令値を生成している。サイクルタイムは10 [ms]である。

5. 制 御 方 式

5.1 巻取り機構の制御方式の検討

5.1.1 張力検出機構

ワイヤ張力の代表的な検出方式は、**Fig.13**に示すように、①電流センサ式、②歪みゲージ式、③トルクセンサ式、④ロードセル式の4種類がある。③と④ではトルクセンサやロードセルが可動部に設置されているため、リード線の絡みや断線などの問題がある。また①はトルクと電流間の非線形性の影響で精度が悪いという問題がある。結局、張力を高精度で安定に計測でき、ワイヤガイド兼用となる②の方式を採用した。

5.1.2 巻取り機構の構成

巻取り機構は**Fig.14**に示す通り、CPUボード、アナログ制御回路、モータドライバ、ハーモニックドライブ付DCサーボモータ、吊りワイヤ、張力センサで構成した。

まず張力センサによって検出された張力は、アンプを通して制御回路に入力される。制御回路は、張力が一定になるようにトルク指令を計算してモータドライバに出力し、モータをトルク制御する。CPUボードはDIOを通じて制御指令やブレーキのオンオフなどを行う。

張力の検出機構は、鉛直方向の張力を、ワイヤのガイドを兼ねた段違いプーリによって水平方向分力に変換し、この分力をプー

Fig.13 Wire tension measurement mechanism

リの支柱を兼ねる板バネに貼った歪みゲージによって検出する構造とした。**Fig.15**は、ワイヤに吊した荷重と張力センサ出力の関係を測定した結果であり、本システムで使用する荷重域(6~10 [kg])において線形性が良好であることを確認した。

5.1.3 一定張力制御方式

(1) 制御対象のモデル化

制御系の設計に当たって、各要素の動特性を測定しモデル化を行った。モータおよび張力センサのBode図を**Fig.16**と**Fig.17**に示す。各Bode図から次のような伝達関数モデルが得られた。

Fig.14 Suspension system overview

Fig.15 Result of load vs tension sensor output

Fig.16 Result of bode diagram of the suspension motor

Fig.17 Bode diagram of the tension sensor

$$\begin{aligned}
 \text{モータ系: } G_1(s) &= \frac{\dot{\theta}(s)}{i_e(s)} = \frac{K_0}{s + \alpha_1} \\
 \text{センサ系: } G_2(s) &= \frac{y_e(s)}{\dot{\theta}(s)} = \frac{s + \alpha_2}{\delta_2 s^2 + \gamma_2 s + \beta_2} \\
 \text{全体: } G_0(s) &= G_1(s)G_2(s)
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$[K_0 = 201, \alpha_1 = 6.28, \alpha_2 = 0.628, \delta_2 = 0.0232, \gamma_2 = 3.50, \beta_2 = 131]$$

ここで、張力値 y_e 、モータトルク電流 i_e は、おのこの平衡状態 y_o, i_o からの変動分を示し、また $\dot{\theta}$ はモータの角速度である。状態変数 x と制御入力 u を

$$x = [y_e, \dot{y}_e, \dot{\theta}]^T, u = i_e$$

とすると、このときの状態方程式表現は

$$\begin{aligned}
 \dot{x}(t) &= Ax(t) + bu(t) \\
 y(t) &= Cx(t)
 \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 \\ 0 & 0 & a_4 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} 0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \\
 C &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 a_1 &= -\frac{\beta_2}{\delta_2}, \quad a_2 = -\frac{\gamma_2}{\delta_2}, \quad a_3 = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\delta_2} \\
 a_4 &= -\alpha_1, \quad b_1 = \frac{K_0}{\delta_2}, \quad b_2 = K_0
 \end{aligned} \quad (9)$$

となる。

(2) 補償器の設計

補償器の設計の目標は、次のいずれの場合においても張力を一定に保ち、重力を補償することである。

- ①停止中
- ②アームが鉛直方向に動作した場合
- ③アームが鉛直方向に外力を受けた場合

補償器は、PID補償器を基本とし、応答性を悪化させるセンサ系のプーリにおける摩擦に対しては、巻取りモータの速度フィードバックにより摩擦補償する構成とした。設計仕様 (2e) より、アームリンク部の基本固有振動数は 0.5 ~ 1 [Hz] に設計していることから、リンクの振動に対し制御も共振もしないようにするために、巻取り制御機構の帯域を 5 ~ 10 [Hz] になるように PID 補償器のゲインを決定した。速度フィードバックゲイン f_x は、巻取りモータの角速度の減衰係数が零となるように $f_x = \alpha_2 / \beta_2$ に選んだ。補償器を以下に示す。

Fig.18 Block diagram of the tension control system

ドバックにより摩擦補償する構成とした。設計仕様 (2e) より、アームリンク部の基本固有振動数は 0.5 ~ 1 [Hz] に設計していることから、リンクの振動に対し制御も共振もしないようにするために、巻取り制御機構の帯域を 5 ~ 10 [Hz] になるように PID 補償器のゲインを決定した。速度フィードバックゲイン f_x は、巻取りモータの角速度の減衰係数が零となるように $f_x = \alpha_2 / \beta_2$ に選んだ。補償器を以下に示す。

$$u(t) = -f_p y_e(t) - f_i \int_0^t (y_e(\tau) - f_x \dot{\theta}(\tau)) d\tau - f_d \dot{y}_e(t) \quad (10)$$

以上の結果により、制御系全体のブロック図は、Fig.18 のようになりこの補償器をアナログ回路で実現した。

5.2 ダイレクトドライブモータの制御

宇宙ロボットのアームを構成する 12 個のダイレクトドライブモータは、PID 制御 + FF 制御で駆動している。これらのアクチュエータは、減速機を使用していないため負荷変動が大きく、PID 制御だけでは安定な制御は難しい。そこで、モータが加減速するときは加減速電流補償を、一定速で動いているときは摩擦補償をフィードフォワードで加えることにより、速応性の良い安定な動きを実現した。

5.3 減速機付きモータの制御

本体部分を支持する本体移動機構部 ($X_B, Y_B, Z_B, \alpha_B, \beta_B, \gamma_B$) と、4 自由度の吊りアーム 2 本 ($[\phi_{R1}, d_{R1}, \phi_{R2}, d_{R2}]$, $[\phi_{L1}, d_{L1}, \phi_{L2}, d_{L2}]$) と、対象物の合計 20 個のモータは、PID 制御で駆動している。これらのアクチュエータは、減速機を使用しているため負荷変動が小さいので、PID 制御で十分に安定な動きが実現できた。

6. 無重力性の評価実験

(2-1) の無重力下でのアームの自由運動の模擬性能は、主に巻取り機構の無重力性とワイヤの鉛直性に依存する。また (2-2) のアームの運動に伴う本体の反作用運動の模擬性能は、本体移動機構の追従性に支配される。そこで、本システムの無重力性を、以下の 3 種類の実験を行って評価した。

6.1 一定張力制御による巻取り機構の無重力性の評価

Fig.14 に示した実験装置を用いて以下の実験を行った。アームの代わりに同質量 W (5.92 [kg]) の重りを吊し、その上に小さな

重り w (140 [g]) で一定外力を与え、外乱に対する吊り機構単体のステップ応答を測定した。実験結果を Fig.20 に示す。(a)はPID制御の場合、(b)はPID制御 + 速度帰還補償を行った場合である。無重力補償精度 δ G/G を、Fig.20 から求めた加速度の値 a を用いると次式より計算できる。

$$\left| \frac{\delta G}{G} \right| = \left| \frac{(W+w)\alpha - wG}{(W+w)G} \right| \quad (11)$$

(a) では 0.87×10^{-2} [G]、さらに(b)では 0.28×10^{-2} [G]の値が得られた。摩擦に対する速度帰還により無重力補償精度の一層の改善を図ることができ、単体で設計目標 (2d) の 10^{-2} [G]以上の性能を達成することができた。Fig.21は、外乱に対する巻取り機構

Fig.19 Integrated system experiment

Fig.20 Stepwise constant acceleration experiment result

Fig.21 Bode diagram of the suspension arm movement

単体の周波数特性を示している。これにより、巻取り機構単体の周波数帯域は 8 [Hz]となり、設計目標 (2e) を達成できた。

6.2 吊りアームの水平面内での追従性の評価

ワイヤを鉛直に保つには、宇宙ロボットの関節角度、角速度、角加速度から運動学を解き、吊りアームの位置を求める必要がある。Fig.22は、Fig.19に示すように、巻取り機構を一定張力で制御した状態でアームの第1関節～第3関節を原点位置から $\theta_{L1} = 0.5$, $\theta_{L2} = -0.2$, $\theta_{L3} = 0.7$ [rad]まで動かしたときの、実測値 (実線) とシミュレーション値 (破線) を示したものである。この場合の最大誤差は $\phi_{L1} = 7.1 \times 10^{-3}$, $\phi_{L2} = 8.64 \times 10^{-4}$ [rad], $d_{L1} = 1.33 \times 10^{-4}$, $d_{L2} = 3.25 \times 10^{-5}$ [m] である。これらの値はワイヤの長さ約 1m (鉛直方向) に対する水平方向の誤差であり、ワイヤの鉛直角度誤差に換算すると、それぞれ 0.4, 0.05, 7.6×10^{-6} , 1.8×10^{-6} [deg.]となる。最大鉛直誤差 0.4 [deg.]を無重力補償精度に換算すると、 0.24×10^{-4} [G]となり、6.1節の無重力補償精度を左右するものではないことが確認できた。

6.3 アーム運動に伴う本体移動機構の追従性の評価

宇宙ロボットの関節角度、角速度、角加速度から動力学を解き反力による本体移動機構の移動量を求めた。Fig.23は6.2節と同じ実験での、本体移動機構の実測値 (実線) とシミュレーション値 (破線) を示したものである。これより、最大誤差は、 $X_B = 9.48 \times 10^{-4}$, $Y_B = 8.7 \times 10^{-5}$, $Z_B = 2.20 \times 10^{-3}$ [m], $\alpha_B = 1.5 \times 10^{-3}$, $\beta_B = 9.2 \times 10^{-4}$, $\gamma_B = 2.31 \times 10^{-4}$ [rad]である。これらの値はサーボ制御系の誤差であり、6.1節の無重力補償精度を左右するものではない。

6.4 考 察

アームの自由運動模擬 (2-1) に関して、6.1節から巻取り機構の無重力性は単体で 0.28×10^{-2} [G]を得ることができ、また6.2節からワイヤの鉛直からのずれによる影響は小さいことが確認できた。また、本体の反作用運動模擬 (2-2) については、6.3節から本体移動機構の追従性は、サーボ制御系の誤差程度で極めて小さいことを確認した。

本システムの総合的な無重力性は、(2-1) と (2-2) を模擬した状態でのアームの動きにより評価できる。Fig.24は、6.2節の実験を行ったときのアームの動きの実測値 (実線) とシミュレー

Fig.22 Suspension arm movement

Fig.23 Base suspension system movement

Fig.24 Space manipulator movement

ション値(破線)を示したものである。10%程度の誤差と定常偏差が残っているのは、ケーブルの影響によるものである。これについては、姿勢に応じてフィードフォワード的にトルクを入力することでこの影響を排除して、誤差を低減できることを確認しており、当初目標(2d)の有効数字2桁、 10^{-2} [G]以上の無重力性を確保できる見込みである。

さらに、本体の実時間精度などを含むシステム全体の模擬性能を評価するために、本来不変であるべきロボットの質量中心の変動について調べた。Fig.25は、6.2節の実験を行ったときの質量中心の変動量を、2乗ノルム距離で示したものである。機構系の摩擦などに起因する応答遅れで、移動開始時に最大5 [mm]程度変動しているものの、定常状態における質量中心の変動量は2 [mm]以下に収まっている。アームの動きに伴う、本体の移動量に対する比率としては、約10%に相当する。したがって、システム全体の模擬性能としては、定常時約10%の誤差が見込まれるといえる。

Fig.25 Position error of the mass center on the robot

7. ま と め

本論文では、宇宙ロボット評価実験用のハードウェアシミュレータとして、三次元吊り方式を特徴とする無重力模擬システムを開発し、以下の成果を得た。第一に、無重力下でのアームの自由運動を実現するために、関節鉛直線上を吊る方式を提案し、機構的には、吊りアーム、ジンバル、巻取り機構からなるハードウェアを開発した。また、制御的には、アームの上下運動に対するワイヤの巻取り巻戻しは、ワイヤの一定張力制御方式により実現し、アームの水平運動に対するワイヤの鉛直性保持は、リアルタイムによる運動学計算に基づき吊りアームを同期制御することで実現した。第二に、アームによる反作用運動を含む本体運動模擬は、本体を6自由度移動機構で支持し、リアルタイムによる動力学計算に基づき制御することで実現した。

これらにより、当初目標とした宇宙ロボットの基本運動性能の内、アームの自由運動と本体の反作用運動の模擬を実現して、アームの振動抑制制御やアームと本体の協調制御の研究に適用することが可能となった。

今後は、まず宇宙ロボットアームの各関節にトルクセンサを組込み、衝撃力による模擬を実現して機能拡張を図りこのシステムの性能を総合的に評価すると共に、宇宙ロボットの運動制御法の研究や実機への評価検証に適用していく予定である。

謝辞 最後に、本装置の開発にご協力いただいた富士通株式会社小林睦司氏、宇宙のダイナミックシミュレーションについて貴重なご助言をいただいた(株)富士通研究所故原田和之主任研究員、および評価実験でご協力いただいた東京都立科学技術大学藤井研究室の学生の皆様、特に米岡秀治氏((現)理想科学株式会社)に深く感謝致します。

参 考 文 献

- [1] 梅谷 他:宇宙におけるロボティクスおよびオートメーション研究フォーラム—成果報告書—。(財)宇宙環境利用推進センター, 1989.
- [2] H.L. Alexander and R.H. Cannon: "An Extended Operational- Space Control Algorithm for Satellite Manipulators," Journal of Astronautical Sciences, vol.38, no.4, pp.473-486, 1990.
- [3] 梅谷, 吉田, 藤森, 岡村: "自由浮遊する宇宙用ロボット・モデルによる対象物の捕獲制御実験", 日本ロボット学会誌, vol.7, no.6, pp.725-731, 1989.
- [4] Y. Murotsu, S. Tsujio, A. Mitsuya and K. Senda: "An Experimental System for FreeFlying Space Robotics and Its System Identification," Proc. of AIAA Guidance, Navigation and Control Conf, pp.1899-1909, 1991.
- [5] 小松, 植之原, 飯倉, 三浦, 下山: "自律型宇宙ロボット地上実験装置ASROTの開発", 日本ロボット学会誌, vol.8, no.6, pp.712-720, 1990.

- [6] 岩田, 樹神, 沼尻, 菊田, 村上: “落下施設を用い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.
- [7] 景山: “航空機による微小重力実験”, 第8回有人宇宙飛行技術シンポジウム講演集, pp.5-6, 1995.
- [8] H. Weigl and H.L. Alexandar: “Robot Free-Flyers in Space Extravehicular Activity,” Proc. of SPIE Conf. on Cooperative Intelligent Robotics in Space 3, vol.1829, pp.458-469, 1992.
- [9] 吉田, 広瀬, 小川: “Passive/Active サスペンションシステムを用いた3D無重力シミュレータの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.13, no.8, pp.1186-1189, 1995.
- [10] 赤尾, 谷沢: “無重力試験装置の開発”, 第4回宇宙構造物研究会, pp.147-151, 1988.
- [11] Y. Xu, B. Brown, M. Friedman and T. Kanade: “Control System of Self-mobile Space Manipulator,” Proc. of the 1992 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.866-871, May 1992.
- [12] 下地, 井上, 土屋, 二宮, 中谷, 川口: “6軸サーボ機構を用いた宇宙ロボット用シミュレータシステム”, 日本ロボット学会誌, vol.8, no.2, pp.144-151, 1990.
- [13] 下地, 井上, 稲葉, 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.
- [14] T. Iwata et al.: “Concept of Testbed Model for the 2nd Generation Space Robot”, Proc. of the SAIRAS '89, AI-13, pp.78-81, 1989.
- [15] R.W. Longman, R.E. Lindberg and M.F. Zedd: “Satellite-Mounted Robot Manipulators-New Kinematics and Reaction Moment Compensation,” The Int. Journal of Robotics Research, vol.6, no.3, pp.87-103, 1987.
- [16] Y. Sato, A. Ejiri, Y. Iida, S. Kanda, T. Maruyama and T. Uchiyama: Using Constant-Tension Suspension for a Space Manipulator,” Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sacramento, California, pp.1893-1900, April 1991.

丸山次人 (Tsugito Maruyama)

1952年3月6日生。1980年東北大学大学院工学研究科電気および通信工学専攻博士課程修了。工学博士。同年(株)富士通研究所に入社。現在同所ペリフェラルシステム研究所主管研究員, 東京工業大学大学院知能システム科学専攻客員助教授(兼務)。現在までに, 三次元ビジョン, 宇宙ロボットの自律制御, 介護支援ロボット, 情報機器制御などの研究に従事。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

江尻 革 (Arata Ejiri)

1963年5月4日生。1987年東京工業大学工学部機械工学科卒業。1989年同大学大学院理工学研究科機械工学専攻修士課程修了。同年(株)富士通研究所に入社後, ロボットの機構系および制御系の研究開発に従事。現在, ペリフェラルシステム研究所自律システム研究部に所属。

(日本ロボット学会正会員)

神田真司 (Shinji Kanda)

1960年1月11日生。1984年筑波大学大学院修士課程修了。同年(株)富士通研究所に入社。ロボット用小型ハンド, 視覚システム, 宇宙ロボット, 介護支援ロボットの開発に従事。現在, ペリフェラルシステム研究所自律システム研究部に所属。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

内山賢治 (Kenji Uchiyama)

1966年10月3日生。1995年東京都立科学技術大学博課程修了, 博士(工学)。同年東京都立大学大学院工学研究科機械工学専攻助手, 現在に至る。これまでに宇宙ロボットの制御およびマイクロマシンの研究に従事。精密工学会, 日本航空宇宙学会, 米国航空宇宙学会(AIAA)の会員。

飯田好高 (Yoshitaka Iida)

1958年12月12日生。1982年慶應義塾大学工学部機械工学科卒業。同年(株)富士通研究所に入社。以後, パルスモータ, モジュール型ロボット, 衛星搭載用冷却器, 宇宙用ロボット, 制御系CADシステム, 三次元CADの開発に従事。現在(株)富士通静岡エンジニアリング第3開発統括部に所属。

佐藤裕一 (Yuichi Sato)

1958年7月14日生。1986年京都大学大学院理学研究科博士課程修了。理学博士。同年(株)富士通研究所に入社。以来, AI, 自動制御, ロボット工学, シミュレーション分野の研究開発に従事。現在, ペリフェラルシステム研究所主任研究員として, 機械系設計支援システムの製品化を進めている。情報処

理学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

内山 隆 (Takashi Uchiyama)

1947年12月19日生。1973年東京工業大学大学院修士課程修了。同年(株)富士通研究所に入社。ロボット制御, 視覚システムの研究とともに, 極限作業ロボット・宇宙用ロボット・介護ロボットの開発プロジェクトに従事。現在, Mプロジェクト部長。工学博士。東京工業大学大学院知能システム科学

専攻客員教授(兼務)。計測自動制御学会, 精密工学会の会員。第1回日本ロボット学会技術賞(1990), 第2回日本ロボット学会実用化技術賞(1997)受賞。

(日本ロボット学会正会員)

藤井裕矩 (Hironori Fujii)

1944年4月6日生。1972年京都大学大学院工学研究科博士課程修了。同年東京都立工科短期大学講師。以後, 助教授, 教授を経て, 1986年東京都立科学技術大学航空宇宙システム工学科教授となり現在に至る。主に宇宙インストラクチャの力学と制御などの研究に従事。工学博士。1993年日本航空宇宙学会論文賞受賞。米国航空宇宙学会(AIAA)ならびにカナダ航空宇宙学会(CASI)アソシエイト・フェロー, 米国宇宙学会(AAS), ニューヨーク科学アカデミー, 日本航空宇宙学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会などの会員。