技術論文

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

下 地 治 彦^{*1} 井 上 正 夫^{*1} 稲 場 典 康^{*2} 若 林 靖 史^{*2}

Evaluation of Space Robot Behavior Using Berthing Dynamics Simulator

Haruhiko Shimoji^{*1}, Masao Inoue^{*1}, Noriyasu Inaba^{*2} and Yasufumi Wakabayashi^{*2}

This paper examines feasibility of a space robot system which captures a free-flying target. First, to examine it experimentally, we develop a berthing dynamics simulator (BDS) on which the space robot and the target behave as if they were on orbit. BDS measures force and torque operating on the real hardware, and it calculates the motion of the robot and the target using the detected force, then it drives the servo mechanisms so that they conform to the calculated posture. Next, to examine the feasibility by use of only numerical simulation, we propose a mathematical model. The validity of the model is verified in comparison with the experiments performed on BDS. Finally, it is confirmed that the space robot can automatically capture the free-flying target without yielding excessive force and oscillation by the experiments and the numerical simulation.

Key Words: Space Robot, Real Time Motion Simulator, Capture, Collision

1. は じ め に

宇宙空間を自由に飛行して各種の作業を遂行する宇宙ロボットにとって、浮遊するターゲットを捕獲することは故障衛星の修理や大型宇宙機の組み立てにつながる主要な機能の1つである。アームを用いて捕獲する場合、ハンドとターゲットの間に位置誤差や相対速度が残っているために、衝撃力や振動が発生する。これらを小さく抑えた捕獲方法の開発は重要な課題である。

捕獲時の挙動に関して、これまでに拡張逆慣性行列の概念を用いて衝突前後の速度関係を定式化する研究[1]や、ダイナミクスの解析に基づいた捕獲時の制御方法の研究[2][3]などが行われている。しかしながら、このような解析的な検討だけでは、正確な数学モデルを得ることは難しく、衝撃力や振動を定量的に評価することは困難である。そのため、実際のシステムを開発するには、ハードウェアを用いたより具体的な評価が求められる。これまでにエアテーブルを用いた実験的な研究も行われているが[4][5]、2次元の運動に限定されている。

我々は、まず宇宙ロボットが浮遊するターゲットを捕獲する時の空間的挙動を模擬できる、バーシングダイナミクスシミュレータ(BDS)を開発した。BDSは実ハードウェアと数値シミュレーションを組み合わせたハイブリッド方式を採用してお

り、ハードウェア試験の精度の良さと、数値シミュレーションの空間運動の評価が容易であるという長所をあわせ持っている。また、我々は、数値シミュレーションのみによって挙動を評価できる簡単な数学モデルを提案し、実験との比較によってパラメータに修正を加えれば、この数学モデルを用いて十分に挙動の評価が可能であることを確認した。最後に、BDSを用いた実験と数値シミュレーションによる評価をあわせて行うことにより、宇宙ロボットの実現性を検証した。

本論文では、BDSの構成、数値シミュレーションアルゴリズム、評価試験の結果についてまとめる。

2. BDS の 構 成

BDSは、ロボットが浮遊するターゲットに対して並進：数[cm/s]以下、回転：約0.5[deg/s]以下で相対停止した後、アームによってターゲットを捕獲する時の挙動の評価を目的とする。また、アームの剛性と、ロボットとターゲットの質量から決まる固有振動数が数[Hz]以下のシステムを想定している。

2.1 ハードウェアの構成

システム全体の斜視図と写真をFig. 1とFig. 2に示す。また、主な仕様をTable 1に示す。BDSはチェイサマウント、ターゲットマウント、力センサ、リニアアクチュエータなどからなるシミュレータ部と、チェイサをボディとしアームと視覚センサを備えた宇宙ロボット部から構成されている。

チェイサマウントは床面に固定である。ターゲットマウントは1軸の並進機構と平行リンク機構によって、約2[m]の

原稿受付 1994年6月29日

^{*1}三菱電機(株)

^{*2}宇宙開発事業団

^{*1}Mitsubishi Electric Corporation

^{*2}National Space Development Agency of Japan

Fig. 1 Overall system configuration

Fig. 2 Photo of the berthing dynamics simulator

接近動作と近傍での6自由度の運動を行う。ターゲットマウントの上部には6軸の力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。アームはこのグラブルフィクスチャを把持する。

アームは、6自由度で長さは約1.3[m]である。DCサーボモーターとハーモニックギアを組み合わせで駆動する。

ハンドは筒状で、内部に3本の指を備える[7]。まず、3本の指でグラブルフィクスチャの棒状部分をやわらかくつまみ、その後閉じた指をゆっくりとハンドの奥の方へ引き込むことでハンドの筒とグラブルフィクスチャのプレートを強く押しつけて固定する。このような構造とすることで、大きな把持領域と衝撃の小さい把持を実現した。

視覚センサとして、ハンドの筒部に取り付けた手先カメラ、チェイサマウント上部に取り付けた2台のモニタカメラ、および近傍センサを備える。手先カメラとモニタカメラは今回の試験ではモニタ専用である。

近傍センサは、LED光を照射してコーナークューブリフレ

Table 1 Principal specification of Berthing Dynamics Simulator

simulator part	degree of freedom		6
	motion range (target mount)		x : 2.0 [m] y, z : ± 0.2 [m] ϕ, θ, ψ : ± 20 [deg]
	resolution of force sensor		Force : 0.05 [N] Torque : 0.001 [Nm]
	processor		TMS 320 c 25 $\times$ 2
	calculation cycle		1 [KHz]
	Mechanism		Ball screw, Stewart's Platform
robot part	arm	length	1.3 [m]
		degree of freedom	6 + 1 (hand)
		processor	68040 + TMS 320 c 25
	proxi- mity sensor	accuracy (*1)	x : 0.011 [m] y, z : 0.002 [m] ϕ, θ, ψ : 0.5 [deg]
		calculation cycle	4 [Hz]
		processor	68020

*1: at the point where the distance is 1[m]

クタで反射した光を CCD カメラで捕え、画像を処理して位置と姿勢を精度良く求めるセンサである。

2.2 動作原理

BDS の動作原理を Fig. 3 に示す。

まずロボットを実際に動作させ、その時ハンドとターゲットの間に生じた力をセンサで計測する。次に、この計測値を用いて、あらかじめ設定しておいた数学モデルにしたがって、計算によってチェイサとターゲットの動きを推定する。ここでは、チェイサとターゲットはそれぞれ浮遊する剛体としてモデル化した。任意のモデルに対応可能である。最後に、推定した運

Fig. 3 Principal of the simulator operation

動をチェイサに対するターゲットの相対運動に変換し、位置決め機構を駆動して実現する。

ただし、BDSではハンドとグラブルフィクスチャが接触している時の挙動の評価を目的としており、アームに比べチェイサの質量が大きいことから、アーム自体の動作反力によって生ずるチェイサの運動は無視できると仮定し、ハンドとグラブルフィクスチャ間に生じた力による運動のみ模擬する。

2.3 計算機の構成

アーム制御、近傍センサの処理、シミュレータ部の制御に、あわせて5個のCPUを用いている。

アーム制御では、68040を用いて軌道を生成し、アーム制御用のTMS 320 C 25を用いて軌道への追従制御を行った。近傍センサ処理には68020を用い、パラレル通信によって計測値をアーム制御用の68040に送った。処理時間は、0.25[s]以上であれば任意に設定できる。

シミュレータ部の制御では、運動を高速に解くことが精度を高めるキーポイントである。デジタルサーボ用のプロセッサ(TMS 320 C 25)と運動を解くプロセッサ(TMS 320 C 25)を別に備えることで1[KHz]の演算サイクルを実現した。ただし、サーボ回路の遅れのため、シミュレータの動作帯域は約10[Hz]である。

2.4 相対運動の計算アルゴリズム

力センサの出力を用いてチェイサとターゲットの運動を推定する計算のうち、力センサで測定した力とトルクを、チェイサとターゲットに作用する力とトルクに変換するまでの計算方法を以下に示す。力とトルクを算出した後、チェイサとターゲットの運動を推定し、サーボ系を駆動するまでの計算は、文献[6]と同様である。

力センサから出力される力とトルクをそれぞれ ${}^iF_s (\in R^3)$ 、 ${}^iQ_s (\in R^3)$ とする。ベクトルの左肩の*i*, *t*, *c*は、そのベクトルがそれぞれ慣性座標系、ターゲット座標系、チェイサ座標系で表わされていることを示す。ターゲットとチェイサに作用する力 ${}^i f_t$, ${}^i f_c (\in R^3)$ は、慣性座標系からターゲット座標系および

Fig. 4 Transformation of the detected force and torque

チェイサ座標系への座標変換行列 ${}^iA_t$, ${}^iA_c (\in R^{3 \times 3})$ を用いて、次式のように求められる。

$${}^i f_t = {}^i A_t {}^t F_s \quad (1)$$

$${}^i f_c = -{}^i A_t {}^t F_s \quad (2)$$

Fig. 4に示すように、ハンドとグラブルフィクスチャの接触点は力センサの中心からずれているため、力センサで感じるトルクは

$${}^i Q_s = {}^i q_s + {}^i c \times {}^i F_s \quad (3)$$

である。ここで、 ${}^i q_s$, ${}^i c (\in R^3)$ はそれぞれ接触点に加わるトルク、力センサの中心から接触点を指すベクトルである。式(3)より、各衛星に作用するトルク ${}^i q_t$, ${}^i q_c (\in R^3)$ は以下のようになる。

$${}^i q_t = ({}^i b + {}^i c) \times {}^i F_s + {}^i q_s = {}^i b \times {}^i F_s + {}^i Q_s \quad (4)$$

$$\begin{aligned} {}^i q_c &= -{}^i A_t \{ ({}^i a + {}^i c) \times {}^i F_s + {}^i q_s \} \\ &= -{}^i A_t \{ {}^i a \times {}^i F_s + {}^i Q_s \} \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 ${}^i a$, ${}^i b (\in R^3)$ はそれぞれチェイサとターゲットの重心から力センサの中心を指すベクトル、 ${}^i A_t (\in R^{3 \times 3})$ はターゲット座標系からチェイサ座標系への座標変換行列である。

以上からわかるとおり、各衛星に作用する力とトルクは、接触点位置に依存することなく、センサで検出される信号と各衛星重心間の相対距離だけから計算できる。

${}^i f_t$, ${}^i q_t$, ${}^i f_c$, ${}^i q_c$ からチェイサとターゲットの相対位置・姿勢を求める計算は文献[6]と同じである。また、文献[6]と同様にシミュレータの安定化補償も付加している。

2.5 ロボットの制御則

宇宙ロボットの基本動作は、接近、捕獲、運搬、放出の4種類である。各々の動作の制御則を以下に示す。

接近動作では、近傍センサの情報を使って、ハンドをグラブルフィクスチャの位置に移動させる。近傍センサの出力は間欠的に与えられるので、その間は直線補間してハンドの軌道を設定する。

捕獲動作では、アームを固定した後ゆっくりハンドを閉じる。アームの制御によってハンドをターゲットと同じ速度で移動させながら把持すれば衝撃力の低下が見込まれるが、衛星の

運動制御機能によってチェイサとターゲットの相対速度は数[cm/s]程度に抑えられることを前提とし、また次節に示すBDS上で正確な挙動の評価が行える条件を考慮して、アームを固定した状態での捕獲とした。また、宇宙環境で精度良く使用できる力センサが得られない場合を考えて、力制御による衝撃緩和は行わない。このようにまったく緩衝制御を行わないことは乱暴に思われるが、4章に示すように実験によって問題ない方式であることが確認された。

運搬動作では、アームの手先に台形速度分布の運動を与え、ターゲットを所定の位置に移動させる。

放出動作では、アームを固定して指を開き、静かにターゲットを分離させる。ハンドを移動させながら指を開くことによってターゲットに初速度を与えたい場合もあるが、微妙な接触状態の制御は難しく、予期しない運動を生じる可能性が高いため、ここではアームは固定して行う。

宇宙ロボットと地上との間の通信には数[s]の時間遅れがあり、地上からのコマンドによってすべての作業を行うことは難しい。試作した宇宙ロボットでもこの点を考慮し、近傍センサの情報をもとにロボット自身が作業の状態をモニタし、各タスクの進行状況を判断しながらあらかじめ設定したシーケンスに沿った自動動作を行う。

2.6 BDSの試験性能

BDS上の挙動が軌道上の挙動と一致するためには、次の2つの条件を満たさなければならない。

- (1) 数値シミュレーションとサーボ機構を組み合わせて、チェイサとターゲットの相対位置を遅れなく実現できる。
- (2) ロボットの実機と一致している。

(1)について、ロボットとターゲットの運動を支配すると考えられる系の最低次の固有振動数は、ターゲットの質量とアームの剛性から最大でも1~2[Hz]程度と推定されるのに対し、シミュレータ部の制御帯域は約10[Hz]で固有振動数に比べて十分大きいので、(1)の条件は満たされている。

(2)について、さらに細かく分解すると、(i)衛星のモデル(ii)接触箇所の形状、(iii)ロボットの運動周波数、(iv)ロボットの制御特性の4項目がBDSと実機で一致しなければならない。

(i)について、現在は剛体のモデルを用いたが、柔構造を含むモデルの使用も可能である。(ii)について、ハンドとグラブルフィクスチャを実機と同一形状とすることで一致させることができる。(iii)について、ロボットの運動周波数は、主にアームとハンドを併せた剛性に依存する。アームの剛性は、通常各関節の減速機の剛性が支配的であるので、減速機に実機と同等品を用いることでアームの剛性を一致させることができる。また、ハンドについては、実機と同等品を用いることで、その剛性を一致させることができる。

(iv)について、アームコントローラの特性と、ギアのバックラッシュの影響がある。アームは無重力環境での使用を前提に設計されており、コントローラの特性を一致させることは難しい。ただし、ブレーキや強力な関節のサーボによって、関節を固定してコントローラの特性が陽に影響しない状態での試験では、その特性は一致したとみなせる。また、バックラッシュについて、地上では重力のためにあまり発生せず、評価が難し

い。ただし、バックラッシュは衝撃力を低減する効果を持つので、その影響を無視して試験を行っても安全側への寄与となり、問題は少ないと考えられる。

以上のように、(i)(ii)(iii)については、容易に実機に近い設定が可能であるが、(iv)については、定量的な評価を行うためにはBDS上で行う試験に制限を加えなければならない。(iv)の制限は前節のロボットの制御則に反映させた。

3. 数値シミュレーション

BDSを用いた実験と相補的に用いて開発効率を高めるために、ハードウェアを用いずに数値シミュレーションだけで挙動を評価する簡単な数学モデルを提案する。ただし、接触時の挙動はもともと複雑で、完全な数学モデルを得ることが難しいので、ここでは実験と比較しながらパラメータを変更して数学モデルを修正した後、実際の評価に用いる方法をとる。提案した数学モデルの妥当性は4章で確認する。

捕獲時の挙動に限定して、以下の仮定のもとにシミュレーションを行った。仮定1：アームのリンク部の弾性変形は関節の弾性変形に比べて小さく無視できる。仮定2：アーム部の質量と慣性モーメントは無視できる。仮定3：各部のダンパで発生する力はバネで発生する力に比べて小さい。仮定4：ハンドとグラブルフィクスチャの剛性と減衰係数は6軸独立である。仮定1, 4は構造に依存するが、通常のシステムでは近似的に成立していると考えられる。また、仮定2, 3は、捕獲時の運動に限ればその速度は小さく、近似的に成り立っている。

以上の仮定のもとに、Fig. 5のようにアーム、ハンド、グラブルフィクスチャの剛性と減衰が、ハンドに集中したモデルを用いてシミュレーションを行う。

ハンドとグラブルフィクスチャ間に生じる力とトルク f ($\in \mathbf{R}^6$) は、アーム、ハンド、グラブルフィクスチャをあわせた弾性変形 Δx ($\in \mathbf{R}^6$)、剛性 K ($\in \mathbf{R}^{6 \times 6}$)、減衰係数 D ($\in \mathbf{R}^{6 \times 6}$) を用いて

$$f = K\Delta x + D\dot{\Delta x} \quad (6)$$

と与える。 K と D はいずれもアーム、ハンド、グラブルフィクスチャの剛性 K_a , K_h , K_g ($\in \mathbf{R}^{6 \times 6}$) と減衰係数の関数であるが、ここでは仮定3より各部の減衰係数を無視して K を定めた。すなわち、 K は K_a , K_h , K_g から

Fig. 5 Simplified space robot model for the numerical simulation

Fig. 6 Mathematical model (hand configuration)

Fig. 7 Mathematical model (hand stiffness model)

$$\mathbf{K} = (\mathbf{K}_a^{-1} + \mathbf{K}_h^{-1} + \mathbf{K}_g^{-1})^{-1} \quad (7)$$

と与えた。ただし、 $\mathbf{K}_a$ は、 $\mathbf{f}$ によってアームの関節に生じた弾性変位 $\Delta\theta \in \mathbf{R}^6$ 、 $\mathbf{f}$ によってアーム先端に生じた弾性変位 $\Delta x_a \in \mathbf{R}^6$ 、ヤコビ行列 $\mathbf{J} \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ 、関節剛性 $\mathbf{K}_j \in \mathbf{R}^{6 \times 6}$ の間の関係

$$\begin{aligned} \mathbf{J}^T \mathbf{f} &= \mathbf{K}_j \Delta\theta \\ \mathbf{f} &= \mathbf{K}_a \Delta x_a = \mathbf{K}_a \mathbf{J} \Delta\theta \end{aligned} \quad (8)$$

から、

$$\mathbf{K}_a = (\mathbf{J} \mathbf{K}_j^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1} \quad (9)$$

と与えた。緩衝材を介さずにグラブフィクスチャは直接ターゲットに固定されているので、 $\mathbf{K}_g^{-1} = 0$ とした。またハンドについては、Fig. 6 に示すようにバネとダンパで支持された指をアクチュエータで閉じるモデルとし、剛性 $\mathbf{K}_h$ は仮定 4 より各軸独立で Fig. 7 に示すように時間によって変化するモデルとした。

減衰係数 $\mathbf{D}$ は、機器の特性から正確に決定することは難しいので、シミュレーション結果と実験結果を比較して与えた。

ハンドとターゲット間に作用する力とトルクが求まった後の計算は BDS に用いた計算と同様である。

4. 評価試験

数値シミュレーションに用いた数学モデルの妥当性の検証、捕獲時の衝撃力の評価、ハンドの誘導から放出に至る制御アルゴリズムの検証の 3 つを目的として評価試験を行った。評価試験に用いた主なパラメータを Table 2 に示す。

Table 2 Space robot model for experiment

Space Robot	Mass [kg]	2000.
	Principal moments of inertia [kgm ²]	3000., 1500., 3000.
	Link parameters [m]	[−0.38, 0.0, −0.8] (*1) [0.0, 0.0, 0.0] [0.0, 0.0, −0.43] [0.0, 0.0, −0.43] [0.0, 0.18, 0.0] [0.18, 0.0, 0.0] [0.0, 0.0, −0.43] (*2)
Target	Mass [kg]	500.
	Principal moments of inertia [kgm ²]	500., 300., 500.

*1 : vector from center of mass of chaser 1st joint

*2 : vector from last joint to tip of hand

4.1 数値シミュレーションに用いた数学モデルの妥当性の検証

初期位置誤差無し、相対速度 x 方向にのみ 8[mm/s]、指を閉じる時間 4[s] とした場合、ターゲットに生じる力とトルク、およびターゲットの位置と姿勢の変化を Fig. 8 に示す。実線は実験結果、点線はシミュレーション結果である。ここで、 ϕ, θ, ψ は、 x, y, z 軸回りの順番に回転したオイラー角である。

実験では捕獲時にモーターの回転がほとんど観測されていないことから、シミュレーションではアームの剛性として減速器の剛性のみを用い、肩に近い関節から 21000, 21000, 21000, 3400, 3400, 2000[Nm/rad] とした。ハンドの剛性とアーム部全体の減衰係数は、実験結果と比較しながら、並進はそれぞれ 3500[N/m], 500[Ns/m], 回転は 70[Nm/rad], 25[Nms/rad] と与えた。これらのパラメータを用いると、図のように、定性的にも定量的にも実験結果とよく一致するシミュレーション結果が得られた。

ハンドの剛性は、構造から予測される値に比べて小さいが、これはハンドとグラブフィクスチャの間のがたの影響で等価的に低下したものと考えられる。このように、数値シミュレーションによって実験とよく一致する結果が導かれたことで、3 章に示した数学モデルを用いてロボットの評価が可能であることが確認された。

4.2 捕獲時の衝撃力の評価

ある宇宙ロボットの構造が定まった場合、捕獲時に発生する衝撃力と振動は、ハンドの初期位置誤差、相対速度、ハンドの指を閉じる時間によって変化する。これらのパラメータを変化させて捕獲実験を試みた。初期位置誤差、相対速度、指を閉じる時間を変えた場合に生じる衝撃力を Fig. 9~11 に示す。

図からわかるように、パラメータを変えることで衝撃力は変化するが、その大きさは 15[N] 以下となっており、許容荷重に比べて十分小さく問題ないことがわかる。

また、図には実験結果と数値シミュレーション結果を併記しているが、よく一致しており、数値シミュレーションによって衝撃力の推定が行えることがわかる。例えば、他のパラメータ

Fig. 8 Experimental results during capture

solid line : experiment, broken line : numerical simulation

Fig. 9 Impact force v.s. hand position error (relative velocity : 0, time for closing finger : 4[sec])
○ : simulation, □ : experiment Fig. 10 Impact force v.s. hand relative velocity against the target (hand position error : none, time for closing finger : 4[sec])
○ : simulation, □ : experiment Fig. 11 Impact force v.s. grasping speed of finger (relative velocity : 0, hand position error : 12[mm])
○ : simulation, □ : experiment

は固定したまま把持領域を ± 0.02 [m]から ± 0.04 [m]に拡大した場合、発生する衝撃力は約21[N]と推定され、この場合でも許容荷重に比べて十分小さいことがわかる。

4.3 制御アルゴリズムの検証

宇宙ロボットはターゲットを捕獲した後、アームを用いてターゲットを移動して固定したり、また逆に放出する作業を行わなければならない。ここでは、視覚情報を用いたハンドの接近から捕獲、運搬、放出にいたる一連の動作を安定して行えるか検証する。

初期位置誤差を各軸7[mm]、姿勢誤差を各軸まわりに1[deg]、相対並進速度を各軸3[mm/s]、相対角速度を0とした時の実験結果をFig. 12に示す。

把持終了後と運搬中(加速度 ± 2 [mm/s²]、最大速度1[cm/s])に振動が発生するが、振幅が小さくしだいに減衰しており特に問題とはならない。この結果から、大きな振動や荷重が加わることなく、ロボット自身が近傍センサの情報をもとに各動作の進行状況を監視しながら、一連の動作を自動的に実行できることが確認された。

Fig. 12 Experimental results of the target states from approaching to releasing

5. おわりに

浮遊ターゲットを捕獲する宇宙ロボットでは、捕獲時の衝撃力と振動への対処が重要な課題である。本研究では、まず捕獲時の宇宙ロボットとターゲットの運動を模擬するBDSを開発し、これらの課題に対して実験的な検討を行った。BDSでは、ハードウェアを用いて捕獲時に生じる力をセンサで測定し、この力を用いて運動を推定するので、空間的な挙動を正確に評価することが可能である。また、数値シミュレーションに

よって挙動を評価するための簡単な数学モデルを提案し、実験結果と比較しながらモデルを修正すれば、このモデルを用いた数値シミュレーションによって十分挙動の評価が行えることを確認した。いろいろな条件で捕獲実験と数値シミュレーションを行い、大きな衝撃力を発生することなく捕獲できることを確認した。また、視覚情報をもとにハンドをターゲットに接近させ、ターゲットを捕獲、運搬、放出する実験を行い、安定して自動的に一連の動作を実行できることを確認した。

本研究で用いたロボットシステムは、具体的な実システムと直接対応するものではないが、ある構成をとれば正常に動作するシステムを構築できることを確認したことで、将来の実ロボットシステムの実現性の見通しを得た。今後は、さらに実験とシミュレーションによる評価を並行して進めることで、信頼性の高い宇宙ロボットシステムの開発を進めていきたい。

最後に、BDSの製作に協力いただいた三菱電機生産技術センターの福島一彦氏、同社鎌倉製作所中川潤氏に感謝いたします。

参考文献

- [1] 吉田, 指田, 梅谷: "逆慣性行列を用いた浮遊リンク系の衝突運動の定式化", 日本ロボット学会誌, vol. 11, no. 3, pp. 410-418, 1993.
- [2] 吉河, 山田: "宇宙ロボットの浮遊物体捕捉時の制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92講演論文集, vol. A, pp. 695-698, 1992.
- [3] 山田: "宇宙ロボットの物体捕捉時の制御について", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'91講演論文集, vol. B, pp. 279-282, 1991.
- [4] Toda Y., Iwata T., Machida K., et al: "Satellite Retrieving Experiment of Free Flying Telerobot," Proc. of 17th Int. Symp. on Space Technology and Science, pp. 1175-1180, 1992.
- [5] Komatsu T., Uenohara M., Iikura S., et al: "Development of An Autonomous Space Robot for Retrieving A Satellite," Proc. of 17th Int. Symp. on Space Technology and Science, pp. 1169-1174, 1992.
- [6] 井上, 中川, 有馬: "ドッキングダイナミクスシミュレータの開発", 計測自動制御学会論文集, vol. 28, no. 11, pp. 1306-1313, 1992.
- [7] 小山, 吉本, 吉田他: "テレオペレーションによる軌道上作業実験", 宇宙用人工知能/ロボット/オートメーションシンポジウム'89講演集, pp. 226-229, 1989.

下地治彦 (Haruhiko Shimoji)

1962年5月2日生。1987年東京大学大学院工学系研究科修士課程修了(産業機械工学)。同年三菱電機(株)入社。同社中央研究所において、宇宙ロボット、ランデブドッキング用センサの開発などに従事。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

稲場典康 (Noriyasu Inaba)

1964年3月21日生。1987年東京大学工学部航空学科卒業。同年宇宙開発事業団入社。現在、技術研究本部技術開発部総合システム開発室。日本航空宇宙学会の会員。

井上正夫 (Masao Inoue)

1953年9月26日生。1978年九州大学大学院工学系研究科修士課程修了(航空工学)。同年三菱電機(株)入社。同社中央研究所において、人工衛星の姿勢制御、磁気軸受、宇宙ロボットの開発などに従事。工学博士。計測自動制御学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)

若林靖史 (Yasufumi Wakabayashi)

1952年2月2日生。1976年電機通信大学物理学部修士課程修了。同年宇宙開発事業団入社。1978年から同社筑波宇宙センター誘導制御開発室において、三軸姿勢制御技術・ランデブドッキング技術・宇宙ロボット技術の研究に従事。現在、同技術研究本部システム技術開発部総合システム開発室主任開発部員。日本航空宇宙学会会員。

(日本ロボット学会正会員)