技術論文

フリーフライングロボットによる
視覚情報を用いたターゲットの捕獲下 地 治 彦^{*1} 井 上 正 夫^{*1} 土 屋 和 雄^{*2}
中 谷 一 郎^{*3} 川 口 淳一郎^{*3} 二 宮 敬 虔^{*3}Satellite Grappling by Free-Flying Robot Based
on Visual InformationHaruhiko Shimoji^{*1}, Masao Inoue^{*1}, Kazuo Tsuchiya^{*2},
Ichiro Nakatani^{*3}, Jun'ichiro Kawaguchi^{*3} and Keiken Ninomiya^{*3}

This paper deals with a free-flying space robot which grapples a target satellite based on a visual feedback control scheme. As the robot body is not fixed in an inertial space, manipulator motion causes changes in the view of the visual sensor. Therefore the closed loop system for the manipulator controller involves the visual data processing which normally takes long calculation time. We construct a control system which is not explicitly affected by the calculation time and analyze stability of the system. Analysis results show that a stable control system can be constructed in spite of the long calculation time, on condition that the manipulator trajectory which is not close to singular points is settled. Moreover we developed a zero gravity motion simulator which combined a computer simulation and servo mechanisms. An experimental space robot system is constructed and experiments to grapple a target are performed on the simulator. It is confirmed through the experiments that the free-flying space robot automatically grapples the target with the visual feedback control scheme proposed.

Key Words: Free-Flying Space Robot, Visual Feedback, Satellite Grappling, Stability, 0-g Motion Simulator

1. は じ め に

将来の宇宙開発において、マニピュレータを持った自律移動型の宇宙ロボットは、故障した衛星の回収、衛星の各種ユニットの交換、プラットフォームの組立等の作業に不可欠である。この種の宇宙ロボットは無重力空間に浮遊した状態で用いられるため、マニピュレータを動作させた反動でロボットボディが運動し、その位置と姿勢が変化する。したがって、宇宙ロボットではあらかじめ環境モデルを持つことは難しく、センサ情報を使って自律的に作業を遂行できるような制御方式が必要になる。本研究では、ビジュアルフィードバックを用いてターゲットを捕獲する方式について、解析と実験の両面から検討を行った。

これまでに升谷らは、ビジュアルフィードバックによって自動的にターゲットを捕獲する場合の安定性や[1],オペレータ

が画像情報をもとにマニピュレータを遠隔操作する場合の操作性について[2],マニピュレータの手先の偏差を関節角度指令に変換する方法と関連づけて検討している。これらの検討では、視覚処理に要する時間は0とされていたが、自律型の宇宙ロボットの場合、制御ループの中に視覚処理系が含まれるため、視覚処理に要する時間が安定性を低下させる要因となるので、遅れ時間を考慮した検討が重要である。また、Wilcoxら[3]やKomatsuら[4]は宇宙ロボットの地上モデルを構築し、実験的に捕獲可能性を検証している。しかし、前者はロボットボディを慣性空間に固定した実験による自律機能に重点を置いた検証であり、後者はエアータブルを用いた2次元平面内での基礎実験である。

本研究では、まず視覚処理に時間を要する場合でもビジュアルフィードバックが行える制御系の構成を示す。次に、視覚処理に要する時間を考慮して、この制御系を用いる場合の安定性を解析的に検討し、安定に制御できる条件を導く。さらに、我々は既にロボットボディとターゲットの6自由度の相対運動を模擬できるシミュレータを開発しており[5]。このシミュレータ上に宇宙ロボットシステムを構築し、浮遊するターゲットの捕獲実験を行い、捕獲可能性を実験的に検証する。以下では、まず2章で制御系の構成を示し、3章でその安定性を検証

原稿受付 1993年3月11日

^{*1}三菱電機株式会社

^{*2}大阪大学工学部

^{*3}宇宙科学研究所

^{*1} Mitsubishi Electric Corporation

^{*2} Faculty of Engineering, Osaka University

^{*3} Institute of Space and Astronautical Science

し、4章で構築した宇宙ロボットの構成とシミュレータ上で行った実験結果を示す。

2. 宇宙ロボットのビジュアルフィードバック制御系の構成

本研究で対象とする宇宙ロボットは、Fig. 1に示すように、視覚を用いた計測機能とマニピュレータを制御する機能を備え、無重力空間に浮遊しているターゲットを自律的に捕獲する。本研究で構成した制御系の構成をFig. 2に示す。

図において、 x は状態ベクトルで、 $x=[r, p]^T \in R^6$ (r :位置ベクトル、 p :オイラー角)とする。また、 $q \in R^l$ (l :マニピュレータの自由度)はマニピュレータの関節角度とする。 x の右肩の i, b は、位置についてはそれぞれ慣性座標系・ボディ固定座標系を原点とするベクトルであることを示し、姿勢についてはそれぞれ慣性座標系・ボディ固定座標系からの回転を示す。また、 x の右下の t, h, b はそれぞれターゲット、ハンド、ロボットボディに関する状態ベクトルであることを示す。

Fig. 2から分かるように、宇宙ロボットのビジュアルフィードバック制御系では、視覚センサが制御ループの中に含まれた構成となる。これは、視覚センサの情報をもとにマニピュレータを制御すると、その動作反力によってロボットボディが運動し、視覚センサの出力が変化するためである。このことは、宇宙ロボットのビジュアルフィードバック制御系の特徴である。

我々は、Fig. 2に示すようにボディ固定座標系における制御

Fig. 1 Block diagram of the experimental space robot system

Fig. 2 Block diagram of the visual feedback system for space robot

と慣性座標系における制御を階層的に組み合わせた制御系を構成した。この制御系では、マニピュレータの関節角度情報を用いてボディ固定座標系に対してハンドの位置を制御する。ボディ固定座標系における制御では、ボディの運動を考慮していないため、慣性空間での手先位置に誤差を生じるが、視覚情報のフィードバックによってこの誤差を零に収束させる。一般に視覚処理には比較的長い時間を要するため、視覚情報のフィードバックだけでは一般化ヤコビ行列[6]を使ったとしても[1]外乱に対してロバストな制御系を得ることが難しい。この制御系は、ボディ固定を仮定した通常のマニピュレータ制御によってロバスト性を高めつつ、慣性座標系におけるハンドの位置決めを行うという考えのもとに構成したものである。

以下では、ボディ固定座標系における位置決めの制御ループを内部ループ、慣性座標系における位置決めの制御ループを外部ループと呼ぶことにする。

3. 制御系の安定性の解析

Fig. 2のように処理時間の長い視覚系が制御ループの中に含まれていると、むだ時間要素となって一般に安定性を低下させる。ここでは、Fig. 2のシステムを線形化して安定性を検討する。

いま手先がターゲットと一致しており、関節変数および状態ベクトルがそれぞれ $\bar{q}, \bar{x}_t^i, \bar{x}_h^b = \bar{x}_b^i$ とする。この状態のまわりで以下のように微小変位を考える。

$$q = \bar{q} + \Delta q, \quad x_t^i = \bar{x}_t^i + \Delta x_t^i \\ x_h^b = \bar{x}_h^b + \Delta x_h^b, \quad x_b^i = \bar{x}_b^i + \Delta x_b^i \quad (1)$$

ただし、ターゲットは慣性空間に静止しており、 $x_t^i = \bar{x}_t^i$ とする。微小変位を用いるとロボットボディとハンドの運動は、

$$\Delta x_b^i = J_b \Delta q \quad (J_b \in R^{6 \times l}) \quad (2)$$

$$\Delta x_h^b = J \Delta q \quad (J \in R^{6 \times l}) \quad (3)$$

のように線形形式で表せる。ここで、 J_b, J は $\dot{q}$ をそれぞれ $\dot{x}_b^i, \dot{x}_h^b$ に変換するヤコビ行列である。特に J はボディが固定された場合の通常ヤコビ行列である。次に、視覚センサはボディの運動によって生じるターゲットのみかけの運動をボディ固定座標系に変換するので、

$$\Delta x_t^b = \begin{bmatrix} {}^b A_i - {}^b A_i [(\bar{r}_t^i - \bar{r}_b^i) \times] \\ 0 \quad {}^b A_i \end{bmatrix} (\Delta x_t^i - \Delta x_b^i) \\ = G_v (\Delta x_t^i - \Delta x_b^i) \quad (G_v \in R^{6 \times 6}) \quad (4)$$

と表現される。ここで、 ${}^b A_i$ は慣性座標系からボディ固定座標系への座標変換行列、 $\bar{r}_t^i, \bar{r}_b^i$ は慣性座標系の原点からターゲットとロボットボディの重心を指すベクトル、 $[r \times]$ は、

Table 1 Parameters of the space robot model

link number	0(body)	1	2	3
mass[Kg]	2000	20	50	50
length [m]	1.0	0.25	2.50	2.50
moments of inertia	2000.	0.1	0.25	0.25
x				
[Kgm ²] y	1000.	0.1	25.	25.
z	1000.	0.1	25.	25.
initial hand position[m]	x : 4.665	y : 0.0	z : -0.915	
initial target position[m]	x : 4.700	y : 0.3	z : 0.0

Fig. 6 Space robot model for the simulation

Fig. 6, Table 1 に示す 3 自由度宇宙ロボットモデルを例にとり、不安定領域の存在位置と、不安定領域における挙動を示す。

まず、式(9)から計算される安定領域を **Fig. 7** に示す。図には xy 平面を示すが、ロボットは軸対象なので図示した領域は円筒状に広がっている。マニピュレータの特異点近傍の、マニピュレータが伸びきった付近と x 軸付近に不安定領域が存在することが確認される（マニピュレータが伸びきった付近の不安定領域は狭く、図からは分からない）。

次に、マニピュレータの軌道の途中に不安定領域が存在する場合の挙動を **Fig. 8, Fig. 9** に示す。Fig. 8 は慣性座標系からみたロボットの動きを 2[秒]ごとに示したもので、Fig. 9 はボディ固定座標系からみた動きと $\|J_b J^{-1} G_v\|$ の変化を示したものである。制御系の構成は Fig. 3 とし、 $k_0=k_1=k_2=30$ 、 $\tau=0.15$ [秒]とした。ハンドとターゲットの距離が大きい場合には、ハンドはターゲットに一度に到達するのではなく、視覚センサの出力をもとに、現在のハンドの位置からボディ固定座標系において 2.5[cm] だけターゲットに接近した位置を目標点として制御し、視覚センサの出力が得られるごとにこの目標点を更新することにより、次第にハンドをターゲットに接近させた。はじめのうちは安定領域にありハンドはターゲットに接近していくが、不安定領域にはいるとロボットボディの動きが大きくなり、ハンドをターゲットに近付けるように制御しているにもかかわらず逆に遠ざかっている。この例では強引に制御を継続した結果、やがてマニピュレータは不安定領域から脱し、ハンドはターゲットに到達したが、実際のシステムでは不安定領域を通過中にマニピュレータやロボットボディが制御困難な

Fig. 7 Stable region of the visual feedback system **Fig. 8** Trajectory of the hand and the target in the inertial frame every 2 seconds(thin line: stable region, thick line: unstable region) **Fig. 9** Trajectory of the hand and the target in the body frame

姿勢になりやすく、不安定領域にはいることは避けなければならない。

4. 捕獲実験

実験的に捕獲可能性を検証するために、シミュレータ上に視覚装置とマニピュレータを備えた宇宙ロボットモデルを構築し、捕獲実験を行った。

4.1 宇宙ロボットシミュレータの構成

シミュレータは、Fig. 10 に示すように宇宙ロボットとターゲットの2つの部分からなる。駆動機構によって、宇宙ロボットの部分は上下に動き、ターゲットの部分は前後左右に動くとともに3軸まわりに回転する。関節角度センサでマニピュレータの動きを計測し、これをもとに数値シミュレーションでロボットボディの運動を算出する。計算結果にしたがって駆動機構を動かすことによって、無重力空間における相対運動を模擬する。

4.2 宇宙ロボットシステム

(1) ハードウェアの構成

ロボットは、1個のマニピュレータと2個のCCDカメラからなる。

マニピュレータは全長約1[m]で7自由度である。各関節は

Fig. 10 6-Axis zero gravity simulation system

Fig. 11 Image coordinate system

AC サーボモーターで駆動し、エンコーダで角度を検出する。

Fig. 11 に示すように、2台のCCDカメラはターゲットに取り付けた4個のLEDをとらえる。LED像とその周囲のコントラストは十分強く、容易にLED像を抽出できる。カメラ台はそれぞれパン・ティルト機能を備え、ターゲットを追尾する。使用したレンズの焦点距離は8.5[mm]、画像の分解能は300[画素]×240[画素]、カメラの取り付け間隔は70[cm]である。

マニピュレータの制御と視覚処理は異なる計算機で行い、通信で情報を伝達する。マニピュレータの制御用の計算機は68020/68881(16[MHz])の下位にTMS 320c25を配した構成であり、視覚処理用の計算機は68020/68881(16[MHz])の下位にTMS 32010を配した構成である。

(2) 視覚認識(フィルタを用いた計測)

以下に示すフィルタ処理と、次項に示すフィルタ出力の補正を組み合わせることにより、ロボットボディに対するターゲットの位置・姿勢を算出し、その算出結果を用いてマニピュレータを制御する。

ターゲットのモデルは既知とする。計測精度を高めるために、拡張カルマンフィルタを用いて画像中のLED像の位置からターゲットの位置と姿勢を算出する。

状態ベクトルは、

$$\mathbf{x} = [\mathbf{r}_g, \mathbf{p}, \dot{\mathbf{r}}_g, \dot{\mathbf{p}}]^T \in \mathbf{R}^{12} \quad (10)$$

とした。ここで、 $\mathbf{r}_g, \mathbf{p}$ はそれぞれターゲットの重心位置ベクトルとオイラー角を表す。

観測ベクトルは、

$$\mathbf{z} = [\dots, x_{li}, y_{li}, \dots, x_{ri}, y_{ri} \dots]^T \in \mathbf{R}^{m+n} \quad (11)$$

とした。 $(x_{li}, y_{li}), (x_{ri}, y_{ri}), m, n$ はそれぞれ左右の画像中のLED像の座標、認識された個数で、 m と n は入力された画像に応じて増減する。幾何学的に位置と姿勢を算出した結果を観測ベクトルとする方法と比較すると、式(11)の観測ベクトルを用いると複数の特徴点の情報を適切な重みで評価できるし、マニピュレータの動作中にいくつかのLED像がマニピュレータの影になった場合、観測ベクトルと対応する行列の次数を変えるだけで処理方式自体は変更せずに対応できるという利点がある。

ダイナミクスモデルは、本来マニピュレータの動作反力によるロボットボディの運動も含めなければならないが、計算負荷を軽減するため、ロボットボディは固定され、ターゲットのみ自由運動するとした。この場合ロボットボディの運動はダイナミクスモデルのエラーとなるが、マニピュレータの運動速度が大きくない場合には安定した計測が可能である。また、観測モデルは透視変換を表す。

ダイナミクスモデルと観測モデルはいずれも非線形となるので、拡張カルマンフィルタを構成した。

(3) 視覚認識(フィルタ出力の補正)

拡張カルマンフィルタを用いることによって、カメラ座標系における計測精度は高められるが、マニピュレータの取り付け誤差や関節角度の初期化の誤差は除去できない。

本研究では、マニピュレータのハンドに取り付けられたLEDを視野内に捕えることによりハンドの位置を計測し、これと関節角度から計算されるハンドの位置を比較することによ

Fig. 12 Trajectory generation using the target state information acquired by the vision system

ってこのような誤差を補正した。この方法は事前にキャリブレーションを行うよりも簡単であると同時に、捕獲位置付近で十分な精度が得られるという利点がある。位置と姿勢の両方を補正することが可能であるが、手先のマーカ配置が複雑になるので、ここでは捕獲のために重要度の高い位置の補正のみを行った。

(4) マニピュレータの制御

視覚系で算出される r_o と p からターゲットの捕捉棒の位置と姿勢を算出し、捕捉棒を捕捉するように制御する。3章に示したように、マニピュレータ制御は関節角度情報を用いてボディ固定座標系に対して制御する。マニピュレータの動作反力によるボディの運動の影響は、視覚情報に基づいて繰り返しハンドの位置を修正することで補正する。

実験では3章の検討と異なり、ハンドとターゲットの不慮の衝突を避け、かつ最終フェーズではターゲットの捕捉棒に垂直な方向から接近することで確実に捕獲できるように、位置については、中間目標点 A, B を経由してターゲット位置 C に至らせた (Fig. 12)。A, B, C は視覚系からターゲットの位置が得られるたびにその位置を修正する。姿勢については、A, B のような中間目標点は設けず、直接 C に至らせた。ただし、捕捉棒は軸対称なので軸回りの運動には追従しない。また、視覚系からターゲットの情報が得られるごとに、ハンドの現在の状態から A, B, C に少し接近した状態を一時的な目標点として制御することで、ハンドの接近速度を制限した。

(5) 捕獲実験

シミュレータを動作させて、マニピュレータの動作反力によるロボットボディの運動を模擬した状態で、浮遊するターゲットの捕獲実験を行った。前章に示した不安定領域では制御が困難なため、不安定領域にはいらないようにパラメータを設定した。

視覚処理の周期は約 500 [m 秒], マニピュレータの制御周期は約 1 [m 秒] である。ロボットボディの質量を 3450 [Kg], 主慣性モーメントを 7800, 4100, 5900 [Kg m^2] と設定した。マニピュレータは肘から手首にかけたリンクにのみ慣性があるととし [5], その質量を 100 [Kg], 主慣性モーメントを 200, 20 [Kg m^2] と設定した。初期状態は、ロボットボディは慣

(a) Position of the target handle and the hand in the body frame

(b) Orientation of the target handle and the hand in the body frame

Fig. 13 Results of the satellite grapple experiment (thin line : target handle, thick line : hand)

性空間に静止し、ターゲットの運動はコーン角 10 [度], スピンドル約 1 [rpm] のニューテーションとした。

実験中のターゲットの捕捉棒とハンドの位置及び姿勢の変化を Fig. 13 に示す。位置について、前節で示した軌道の通り中間目標点 A, B を通過し、C に到ってターゲットを捕捉していることが分かる。姿勢についてはマニピュレータの動作を開始後、まもなくハンドとターゲットの姿勢は一致し、これを維持していることが分かる。マニピュレータが大きく動いた前後では、ロボットボディの動きも大きくなり、視覚を用いた計測に誤差を生ずるため、ハンドの姿勢に 2~3 [度] の誤差が生じている。しかし、この誤差はハンドの形状によって吸収できる大きさなので捕獲に特に支障はない。また、ターゲットを捕獲する前後では、マニピュレータの影になってターゲット上の LED が見えなくなったが、安定して計測が継続されている。

この実験の結果、ここで設定したように不安定領域を含まないようにハンドの軌道を設定すれば、ボディが固定された通常のマニピュレータと同一の制御方式でも、視覚センサが間欠的に出力する情報をもとに、ターゲットの捕獲が可能であることが確認された。また、誤差や、視覚センサ用のマーカの隠蔽が発生する場合でも、本研究で試作したシステムでは、特に支障を来たことなく捕獲が可能であることが確認された。

5. おわりに

無重力空間に浮遊する宇宙ロボットがビジュアルフィードバックによってターゲットを捕獲する場合、マニピュレータの動

作反力によってロボットボディの運動が変化するため、視覚系を内部に含む制御ループが構成される。一般に視覚処理にはマニピュレータの制御に比べて長い時間を要するため、制御ループの中にあるとむだ時間要素となって安定性を低下させる。

本論文では、視覚処理に長い時間を要する場合でも視覚情報を用いた位置決めができるように、ボディ固定座標系における制御と慣性座標系における制御を階層的に組み合わせた制御系を構成した。この制御系では、マニピュレータの関節角度情報を用いて地上のロボットと同様にボディ固定座標系に対してハンドの位置を制御しつつ、間欠的に得られる視覚センサの情報を用いて徐々にハンドの位置を修正することで、ハンドをターゲットに到達させる。この制御系の安定性について解析的に検討した結果、マニピュレータの特異点近傍を避けるような軌道を設定すれば、視覚処理に長い時間を要する場合でも安定な制御が可能で、浮遊するターゲットを捕獲できることを示した。また、宇宙ロボットシミュレータ上に、1個のマニピュレータと2個のCCDカメラを備えた宇宙ロボットモデルを構築し、3次元の無重力空間を模擬した状態で、同様の制御系を用いた捕獲実験を行った。その結果、実験的にも提案した制御系を用いてターゲットの捕獲が可能であることを確認した。

本論文では、故障した衛星等の比較的ゆっくり運動するター

ゲットを想定して検討したが、今後は高速に運動するターゲットにも適応できるように、視覚処理やマニピュレータの制御方式の検討を行っていく予定である。

最後に処理アルゴリズムの検討等にご助言いただいた三菱電機山田克彦氏、実験装置の設計製作に協力していただいた三菱電機荻内賀義氏、福島一彦氏に感謝します。

参 考 文 献

- [1] 升谷, 宮崎: 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. 8, pp. 647-655, 1989.
- [2] 升谷, 宮崎: 浮遊宇宙ロボットの遠隔操作性の評価, 第8回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 425-426, 1990.
- [3] B. Wilcox, K. Tso et al: Autonomous sensor-based dual-arm satellite grappling, Proc. of the NASA Conf. on Space Tele-robotics, vol.3, pp. 307-316, 1989.
- [4] T. Komatsu, M. Uenohara et al: Development of An autonomous space robot for retrieving a satellite, Proc. of the 18th Int. Symp. on Space Technology and Science, vol. 1, pp. 1169-1174, 1992.
- [5] 下地, 井上他: 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.
- [6] 梅谷, 吉田: 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加速度制御, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 4, pp. 63-73, 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)

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)

土屋和雄 (Kazuo Tsuchiya)

1943年8月9日生。1968年京都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。1990年大阪大学工学部教授。人工衛星や宇宙ロボットの制御の研究などに従事。工学博士。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)

中谷一郎 (Ichiro Nakatani)

1944年7月4日生。1972年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(電子工学)。1981年、宇宙科学研究所入所。同研究所において、人工衛星や宇宙ロボットの制御の研究などに従事。工学博士。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会などの会員。

川口淳一郎 (Jun'ichirou Kawaguchi)

1955年9月24日生。1983年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(航空工学)。同年、宇宙科学研究所入所。同研究所において、人工衛星や宇宙ロボットの制御の研究などに従事。工学博士。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会などの会員。

二宮敬虔 (Keiken Ninomiya)

1940年8月17日生。1968年東京大学大学院工学系研究科博士課程修了(電子工学)。同年、宇宙科学研究所入所。同研究所において、宇宙用電子機器、人工衛星の制御の研究などに従事。工学博士。計測自動制御学会、日本航空宇宙学会などの会員。