学術論文

時間遅れを有する浮遊宇宙ロボットの
遠隔操作システムの安定性の検証下 地 治 彦^{*1} 升 谷 保 博^{*2} 宮 崎 文 夫^{*3}Stability Analysis of Teleoperation System
with Time Delay for Free Flying Space RobotHaruhiko Shimoji^{*1}, Yasuhiro Masutani^{*2} and Fumio Miyazaki^{*3}

This paper investigates the stability of control system for a free-flying space robot which grapples a target satellite with remote teleoperation from the ground. As the robot body is not fixed in an inertial space, the manipulator motion causes the body movement and the target position changes in robot body frame. The operator finds the target motion by the delayed image data and controls the robot. Therefore the closed loop system of the remote teleoperation involves the operator and the communication equipment, which may decrease the stability. Firstly in this paper the operator performance is investigated by experiments using graphical simulation and simple operator model is produced. Using the operator model, stability condition of the closed loop system is derived as the function of conventional and generalized Jacobian matrices. The condition shows that the space robot can be controlled under long communication time delay, if the manipulator status is not close to the singular point. Finally, through experiments on the simulator it is confirmed that the space robot with remote teleoperation can capture the target.

Key Words: Free-Flying Space Robot, Teleoperation, Capture Berthing, Stability Analysis, Time Delay

1. は じ め に

将来の宇宙利用においては、宇宙ステーションや衛星へ燃料を補給したり機器を交換したりする作業が頻繁に必要なことになる。これらの作業は安全性やコストの観点から、マニピュレータと視覚センサを備えた空間移動型の宇宙ロボットによって行われる可能性が高い。この種の宇宙ロボットがターゲットを捕獲する作業は、軌道に浮遊した状態で行うため、マニピュレータを動作させた反動でボディが運動するという特徴があり、地上用のロボットとは異なった制御系の構成となる。すでに我々は、宇宙ロボットがターゲット衛星の近傍に停止した後、ビジュアルフィードバックによって自動でターゲット衛星を捕獲するシステムについて検討し、安定に捕獲できることを示した[1]。しかしながら、実際のシステムでは搭載される計算機の能力やシステム全体の信頼性の問題から、すべての作業を自動で行うのではなく、Fig. 1 に示すように地上からの遠隔操作と自動動作を組み合わせた作業になると予想される。

宇宙ロボットを遠隔操作する場合、地上と軌道上との間の通信には5~10秒程度の時間遅れが発生し操作性が低下する。通

常、操作性の低下を回避するために、時間遅れのある画像ではなく、計算機のなかに構築された時間遅れなく動作する仮想的なロボットの動きを見て操作する方法がとられる。これは予測表示と呼ばれ、この方法を用いると、制御系から時間遅れを含む閉ループがなくなり操作性の低下が抑えられる。しかしながら、固定点を持たない宇宙ロボットの場合、マニピュレータの動作によってボディが運動しターゲットのみかけの位置が時々刻々変化する。予測表示によって時間遅れのないマニピュレータの動きは認識できても、ターゲットの動きは時間遅れのある画像から検出しなければならないため、時間遅れを含む閉ループが発生し操作性が低下する。

これまで、通信時間遅れに着目した研究は盛んに行われており、予測表示等を用いてオペレータの操作を支援することにより、操作性の低下が抑えられることが数多く報告されている(例えば[2][3]など)。また、固定点を持たない宇宙ロボットを宇宙船内などから時間遅れなく遠隔操作する際の操作性の研究が、升谷らによって行われている[4]。しかしながら、通信時間遅れのもとで固定点を持たない宇宙ロボットを遠隔操作する研究はあまり行われていない。

本論文では、通信時間遅れとボディが固定されていないという二つの特徴を持った宇宙ロボットの遠隔操作システムの安定性について検討する。まず、地上のロボットの遠隔操作システムと対比して宇宙ロボットの遠隔操作システムの特徴を示し、時間遅れとオペレータを含めた地上系の特性がシステム全体の

原稿受付 1996年4月17日

^{*1}三菱電機(株)

^{*2}大阪大学

^{*3}大阪大学

^{*1}Mitsubishi Electric Corporation

^{*2}Osaka University

^{*3}Osaka University

Fig. 1 Concept of satellite grapple with remote teleoperation

特性に大きく影響することを示す。次にグラフィックスを用いた遠隔操作シミュレータを構築してオペレータの特性を実験的に評価し、その結果を用いてシステム全体の安定条件を導く。最後に遠隔操作シミュレータを用いた実験によって、宇宙ロボットを地上から遠隔操作することで浮遊するターゲット衛星を捕獲できることを確認する。

2. 宇宙ロボットの遠隔操作系の構成

4種類の遠隔操作システムの構成を Fig. 2 に示す。ここで、 $q \in R^n$ (n : マニピュレータの自由度) は関節角度ベクトル、 x は位置ベクトル (r) とロール・ピッチ・ヨー角 (ϕ) からなる六次元の状態ベクトルである。また、 x の右下に記号を付することで、それぞれ Fig. 2 の説明に記したようにどの対象物に関するベクトルであるかを示す。また、 x_t と x_h については、ボディに対する相対的な運動を表す場合には、右肩に b をつけて表す。

Fig. 2 (a) は、オペレータとロボットとの間の通信に制限のない地上のロボットの遠隔操作システムの構成である。オペレータは入力したコマンド x_{hc} に対応するロボットの遅れのない応答 x_t を見ながら作業する。人間が直接操作するかわりに、視覚センサとロボットを介して作業するもので、情報の表示やコマンドの入力を自然な形に近づけることで、安定で操作しやすい制御が可能になる。

これに対し、宇宙ロボットなどの遠く離れた位置にあるロボットを操作する場合、Fig. 2 (b) に示すように、オペレータとロボットの間の通信の時間遅れはむだ時間要素となって、操作性を低下させる。これを改善するために、通常 Fig. 2 (c) に示すように予測表示を用いる構成が採用される。この構成では、 x_{hc} はロボットに送信されるとともに、計算機のなかに構築された仮想ロボットに適用して時間遅れのないロボットの動作 x_{he} を推定し、グラフィックスなどでオペレータに提示する。オペレータが仮想ロボットを見ながら操作することで、時間遅れを含む制御ループがなくなり、Fig. 2 (a) の場合とほぼ同様な制御性能を得られる。

Fig. 2 Comparison of configuration of teleoperation system
 x_t : target position, x_t^b : target position reference to robot body
 x_h : hand position of real robot x_{hc} : hand position command
 x_{he} : hand position of virtual robot x_b : robot body position

しかしながら、本論文で対象とする固定点をもたない宇宙ロボットの場合、Fig. 2 (d) に示すように、マニピュレータが動作した反動でボディが運動するためにロボットに固定したカメラから見るとターゲットが動いて見える。オペレータは時間遅れのある画像を見てターゲットの位置を検出するため、時間遅れを含む制御ループが発生し、オペレータの制御特性と時間遅れの影響を考慮した安定性の検討が必要になる。一般に、ロボットの時定数に比べてオペレータの時定数や通信時間遅れのほうが大きいため、制御系の特性はオペレータや通信時間遅れに強く影響される。

3. 宇宙ロボットの遠隔操作系の構成

グラフィックスを用いた遠隔操作シミュレータを開発した。シミュレータの構成を Fig. 3 に示す。宇宙ロボットとターゲット衛星の運動を数値シミュレーションで求め、ステレオカメラから入力される画像をグラフィックスで模擬して表示する。オペレータは、グラフィックスを見ながら6自由度のジョイスティックから速度指令を入力してロボットを操作し、ターゲットを捕獲する作業を行う。

実験に用いた軌道上のロボットのモデルを Fig. 5 に示す。マニピュレータは6自由度で全長約2.5[m]である。また、画角が90°の2台のカメラを、マニピュレータのベース付近に6[cm]の間隔で x 軸に平行にとりつけている。

グラフィックス表示では、推定したカメラ画像をソリッドモデルで表示するほか、時間遅れのない仮想ロボットの動作をワイ

Fig. 3 Configuration of teleoperation simulator

Fig. 4 Example of graphics display

ヤフレームモデルで重ねて表示する。グラフィックスの表示例を Fig. 4 に示す。グラフィックスは左右のカメラから入力される画像を交互に表示し、オペレータは画像の切り替えに同期した液晶シャッター付きの眼鏡を通してグラフィックスを見ることで立体視する。ターゲットの奥行き方向の位置は、立体視とターゲットの把持部の大きさから認識する。

4. オペレータの制御特性

遠隔操作システムでは、オペレータが制御ループのなかに含まれる。オペレータは通信時間遅れとボディの運動のために複雑に運動して見えるターゲットを見ながら操作しなければならず、このような状況下でオペレータがどのような制御特性を示すか明確ではない。そこで、ここではシミュレータを用いた実験によってオペレータの伝達特性を測定し、近似モデルを導く。

予測表示を用いることを前提とすれば、地上系の構成は Fig. 6 となる。Fig. 2 ではオペレータが x_{hc} を出力するとしたが、オペレータが速度指令を入力する場合、厳密には Fig. 6 のようにオペレータは速度指令を入力し計算機が積分して位置指令に変換する。仮想ロボットの応答は任意に設定できるので、理想的な応答とする。

オペレータの特性は、画像の見え方とコマンドの入力方法などによって変化する。画像の見え方は、視覚センサの構成、通

Fig. 5 Robot model for teleoperation simulator

Fig. 6 Configuration of ground system

信時間遅れ、ボディの運動、ターゲットの運動などによって変化する。本研究では、ターゲットの位置がはっきり見える視覚センサから入力された画像を見ながらジョイスティックで速度指令を入力することを前提とし、通信時間遅れ、ボディの運動、ターゲットの運動が地上系の特性に与える影響を考慮する。

4.1 実験方法

Fig. 2 (d) の構成で、 x_t にランダムな運動を入力し、 x_b^t から x_{hc} への応答を測定した。ランダムな運動には、振幅 ± 4 [cm]、周期 64 の M 系列信号を用いた。並びの異なる 3 種類の信号を生成して x , y , z の入力とし、簡単化して姿勢は固定とする。

時間遅れとボディの運動は、(a) 時間遅れなし/ボディ固定、(b) 時間遅れなし/ボディフリー、(c) 時間遅れ 5 秒/ボディフリー、(d) 時間遅れ 5 秒/ボディ固定 の 4 通りの組み合わせについて評価した。ただし、(a) と (d) ではコマンドを入力した後マニピュレータがただちに動くか 5 秒後に動くかという違いはあるが、 x_b^t と x_{he} はみかけ上等しくなる。簡単な実験の結果、(a) と (d) では地上系の応答に特に違いが見られなかったため、以下では (a)~(c) について詳細な検討を行った。

ターゲットの運動は M 系列信号の切り替え間隔を変えることで変化した。切り替えの間隔は、(i) x , y , z : 1.5 秒間隔、(ii) x , y , z : 1.0 秒間隔、(iii) x , z : 1.0 秒間隔/ y : 0.5 秒間隔 の 3 通りとした。(i), (ii), (iii) の順番に運動が速くなり、追跡が難しくなる。ここで、(iii) の条件として、 x , y , z をいずれも 0.5 秒間隔で切り替える設定も試みたがほとんど追従す

ることができなかったので、上記のように (ii) に比べて y だけ切り替え時間を短くする設定とした。

実験は、二人の被験者について、十分に練習を行った後に行った。各試行では、実験開始後 20 秒以降、上記設定 (i) では 96 秒間、(ii) と (iii) では 75 秒間測定した。

4.2 実験結果

実験結果の一例として、上記の (ii) の設定のときに測定された x_t^b と x_{hc} を Fig. 7 に示す。 x , y , z 方向の動きはいずれも同様な傾向を示したので Fig. 7 には y 方向の動きのみ示した。

(a) では $x_t^b = x_t$ となってターゲットは矩形状に動き、ハンドは遅れをもって追従するように動く。(b) では、ハンドをターゲットに接近させようとするときボディの運動によってターゲットは逃げるように動き、さらにこれを追いかけるようにハンドを移動させる。その結果、 x_t^b の振幅は x_t より少し大きくなり、矩形から多少なめらかな曲線状の動きになる。(c) では、実際のターゲットの動きに、5 秒前のボディの動きによって生じたターゲットのみかけの動きが加算される。その結果、ターゲットは設定した M 系列信号よりも高周波の成分を含む運動に見える。

(ii) の設定の場合について、 x_t^b を入力とし x_{hc} を出力とした周波数応答を、一人の被験者について Fig. 8 に示す。周波数応答は、各実験ごとに 10 次の AR モデルを用いて推定したモデルから周波数応答を求め、各周波数ごとに 10 回の応答を平均した。もう一人の被験者については、Fig. 8 に示す応答よりもわずかに高周波領域まで追従できる傾向が見られたが、似通った結果が得られた。なお、 x , y , z 相互間の伝達特性は、ゲインが自己への伝達特性の $1/3 \sim 1/10$ の大きさであったので、以下では各自由度は独立として扱う。

Fig. 8 は (a)~(c) の設定の場合に測定された結果を重ねて示しているが、特性の違いは特に見られない。さらに、Fig. 8 に

は、むだ時間要素と一時遅れ要素の積で表した次の式の応答をあわせて示しているが、ほぼ一致している。

$$G_g = e^{-T_o s} (sI + K_o)^{-1} K_o \quad (1)$$

Fig. 7 Trajectory of target and hand command (y -direction) (solid line: hand command, dotted line: target)

Fig. 8 Frequency characteristics of ground system (solid line: estimated operator model, dashed line: fixed body/time delay 0[s], dotted line: unfixed body/time delay 0[s], dashdot line: unfixed body/time delay 5[s])

Fig. 9 Frequency characteristics of ground system (1) interval 0.5[s] for y and 1.0[s] for x, z (2) interval 1.5[s] for x, y, z (solid line: estimated operator model, dashed line: fixed body/time delay 0[s], dotted line: unfixed body/time delay 0[s], dashdot line: unfixed body/time delay 5[s])

ここで、 $T_o = 0.4$, $K_o = \text{diag}[1.0, 2.0, 1.0]$ である。ただし、詳しく見ると、測定結果ではゲインの減少の割合は20[dB/decade]よりもやや小さく、オペレータは単なる比例要素ではなく高い周波数になる程速度に反応してわずかにゲインを高める特性を有していると考えられる。

Fig. 9 には、M 系列の切り替え時間を (i) および (iii) とした場合の x_t^b から x_{hc} への周波数応答を示す。いずれの場合も x , y , z は同様な傾向を示したので、**Fig. 9** には x についてのみ示す。**Fig. 8** と同様に、式 (1) で表される応答をあわせて示す。ただし、**Fig. 9** (1), (2) において T_o はそれぞれ 0.4 秒と 0.6 秒、 K_o はそれぞれ $\text{diag}[0.5, 1.0, 0.8]$ と $\text{diag}[1.3, 2.0, 2.0]$ である。**Fig. 8** と **Fig. 9** から、ターゲットの運動速度が速くなると位相の遅れが増すとともにゲインが低下する傾向が見られる。これは、ターゲットの動きが速くなって作業が難しくなると、オペレータが自然にゲインを低下させたためと考えられる。ボディの運動の有無や時間遅れによっても作業の難易度は変わるが、その変化はターゲットの運動を変化させた実験に比べて小さかったために、はっきりした伝達特性の違いが現れなかったと考えられる。

5. 遠隔操作システムの安定性

5.1 宇宙ロボットの運動の定式化

前章で求めたオペレータの特性を用いて遠隔操作システム全体の安定性について検討する。

まず、以下で用いる行列の間の関係を簡単にまとめる。すでに梅谷ら [5] によって宇宙ロボットの運動学が以下のように定式化されている。ボディの速度 v_b 、慣性系に対するハンドの速度 v_h 、ボディに対するハンドの速度 v_h^b と、 $\dot{q}$ の間には以下の関係がある。なお、 $v = [r, \omega]^T \in R^6$ (ω : 角速度) で、ベ

クトルの上の $\cdot$ は時間微分を表す。

$$v_b = \dot{J}_b \dot{q} \quad (2)$$

$$v_h = J_{bh} v_b + J \dot{q} \quad (3)$$

$$v_h^b = J \dot{q} \quad (4)$$

ここで、 J はボディ固定の通常のマニピュレータのヤコビ行列である。 J , $\dot{J}_b$, J_{bh} はいずれも q の関数である。式 (2) と式 (3) から v_b を消去すれば、

$$v_h = \hat{J} \dot{q} \quad (\hat{J} = J + J_{bh} \dot{J}_b) \quad (5)$$

が得られる。 $\hat{J}$ は一般化ヤコビ行列である。

5.2 線形化した制御系モデルの導出

ハンドがターゲット位置に到達した状態を平衡点と考え、平衡点からの微小変位を用いて線形化し安定性を検討する。以下では、平衡点からの微小変位を表すベクトルの前には Δ をつける。前節の議論ではベクトルを表示する座標系を限定しなかったが、ここでは、ハンドの姿勢と一致した座標系で考える。平衡点を考えているので、この座標系はターゲットの姿勢とも一致する。一般に ω と $\dot{\phi}$ は一致しないが、この座標系で考えれば、 $\omega_h = \dot{\phi}_h$ および $\omega_t = \dot{\phi}_t$ が成り立ち、 $v_h = \dot{x}_h$, $v_t = \dot{x}_t$ などとなる。したがって、 $\dot{q}$, v_h , v_t について成り立つ関係は、そのまま Δq , Δx_h , Δx_t について成り立つ。

このことを用いて、まず軌道上のロボットの線形化した表現を求める。軌道上のロボットは、慣性系に対する情報を得ることは難しいので、地上から送信される Δx_{hc} をボディに対するハンドの位置と姿勢の指令とみなし、次式のように行列 C を用いて手先の誤差を各関節の速度指令に変換し、各関節ごとに速度フィードバックを行うとする。

$$\Delta \dot{q}_c = C(\Delta x_{hc} - J \Delta q) \quad (6)$$

ただし、ここで式 (4) を用いた。また、各関節の速度フィードバックのゲインは十分に大きく、 $\Delta \dot{q}_c$ に等しい速度がただちに実現されると仮定し、

$$\Delta q = \int \Delta \dot{q}_c dt \quad (7)$$

とする。式 (6) と式 (7) より、 Δx_{hc} から Δq への伝達関数は、

$$\Delta q = (sI + CJ)^{-1} C \Delta x_{hc} \quad (8)$$

である。ここで、軌道上のロボットの時定数が閉ループの他の構成要素の時定数に比べて小さいことに注目して簡単化する。前章で求めたように地上系の時定数は約 0.5~2 秒で、通信の時間遅れも一般に 5~10 秒と推定されるのに対し、軌道上系の時定数は通常数十 [m] 秒である。したがって、軌道上のロボット単体の制御系が安定になるように C が設定されている場合、短時間の過渡的な応答を無視すれば、軌道上のロボットの特性は理想的なダイナミクスで近似できる。すなわち、軌道上では Δx_{hc} が到着するとただちに対応した Δq が実現されるとみなすことができ、ロボットの特性を最終値定理より、

$$\Delta q = \lim_{s \rightarrow 0} s(sI + CJ)^{-1} C \frac{\Delta x_{hc}}{s} = J^{-1} \Delta x_{hc} \quad (9)$$

Fig. 10 Linearized block diagram of remote teleoperation system

と簡単化できる。

次にマニピュレータの動作反力を考慮したターゲットの運動の表現について考える。式 (3) によれば v_b によってハンドに $J_{bh}v_b$ の運動が生じる。このことは逆に、ボディから見るとターゲットには v_b によって $-J_{bh}v_b$ を生じることを示している。式 (2) を用いると、ターゲット自体の運動 Δx_t とあわせて、ボディに対するターゲットの運動は次式で与えられる。

$$\Delta x_t^b = \Delta x_t - J_{bh}\dot{J}_b\Delta q \quad (10)$$

以上の関係と式 (1) を用いると、線型化した制御系のブロック線図は Fig. 10 のように得られ、一巡伝達関数は、

$$G = e^{-\tau_s} J_{bh}\dot{J}_b J^{-1} (sI + K_o)^{-1} K_o \quad (11)$$

となる。ただし、 $\tau = 2T + T_o$ で、 I は単位行列である。

5.3 安定性の解析

式 (11) は非線型な時間遅れ要素を含んでいるので、スモールゲイン定理を用いて安定条件を求める。スモールゲイン定理によれば、安定であるための十分条件は、

$$\sup_{\omega} \sigma\{G(j\omega)\} < 1 \quad (12)$$

である。ここで、 $\sigma\{G\}$ は $G^T G$ の最大固有値である。各作用素のうち、明らかに

$$\sup_{\omega} \sigma\{e^{-\tau_s}\} \leq 1, \quad \sup_{\omega} \sigma\{(sI + K_o)^{-1} K_o\} \leq 1 \quad (13)$$

であるので、結局、安定条件は、

$$\sigma\{J_{bh}\dot{J}_b J^{-1}\} = \sigma\{I - \dot{J}J^{-1}\} < 1 \quad (14)$$

と与えられる。ここで、式の変形に式 (5) を用いた。これは、すでに導いたビジュアルフィードバックを用いてターゲット衛星を捕獲する場合の安定条件 [1] と一致する。

式 (14) において、マニピュレータの姿勢の変化に伴う、 J_{bh} 、 $\dot{J}_b$ の変化は小さく、 J^{-1} が支配的である。すなわち、ある宇宙ロボットのモデルが定まった場合、 J^{-1} が大きくなるマニピュレータの特異点近傍を除いて安定な制御が可能である。また、宇宙ロボットのモデルと安定領域の大きさの関係について、

Fig. 11 Robot model for stability analysis

マニピュレータに対するボディの慣性が大きいほど $\sigma\{\dot{J}_b\}$ が小さくなり、安定領域が広がる。

なお、式 (14) には $e^{-\tau_s}$ が含まれていないことから分かるように、時間遅れの大きさに関係なく安定な条件を示している。安定性に及ぼす時間遅れの影響を調べるために、時間遅れがない場合の安定条件を導く。地上系の伝達特性に含まれるむだ時間 T_o も 0 とし $\tau = 0$ とすれば、Fig. 10 の制御系は線形となる。式 (9) を用いれば運動方程式は以下で与えられる。

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_{hc} &= -K_o(J_{bh}\dot{J}_b J^{-1} + I)\Delta x_{hc} + K_o\Delta x_t \\ &= -K_o\dot{J}J^{-1}\Delta x_{hc} + K_o\Delta x_t \end{aligned} \quad (15)$$

この場合、安定条件は、

$$Re\{\lambda(K_o\dot{J}J^{-1})\} > 0 \quad (16)$$

である。ここで、 $\lambda\{\cdot\}$ は行列の実部が最小の固有値を表す。 K_o はオペレータがコマンドを入力する際のゲインを表す対角行列であるが、第 4 章で求めたように各要素間の差は小さい。 $K_o = kI$ ($k > 0$) と近似すれば式 (16) の安定条件は

$$Re\{\lambda(\dot{J}J^{-1})\} > 0 \quad (17)$$

となり、式 (14) と同様にロボットの慣性とマニピュレータの姿勢の関数として表される。

5.4 数値例

Fig. 11 に示す平面 3 自由度マニピュレータについて、ハンドの姿勢は x 軸に平行でかつ第 2 関節の角度は正であるという条件を設定した場合に、式 (14) と式 (17) で与えられる領域をそれぞれ Fig. 12 (a) と Fig. 12 (b) に示す。このロボットでは、特異点は、点 (0.2[m], 0[m]) と、この点を中心として半径 2[m] の円周上にあるが、Fig. 12 (a) から安定な制御が保証されない領域はこれらの特異点近傍に広く分布することが確認される。また、Fig. 12 (a) と Fig. 12 (b) を比べると、時間遅れが加わったために安定に制御できる領域が狭められる様子が確認される。

5.5 考察

式 (14) で与えられる安定条件の意味を考える。 $\sigma\{G\}$ はもと

$$\sigma\{G\} = \max_{|x|=1} |Gx| \quad (18)$$

という意味を持つ。式 (5) と式 (9) より

$$\Delta x_h - \Delta x_{hc} = (\dot{J}J^{-1} - I)\Delta x_{hc} \quad (19)$$

Fig. 12 Stable region of remote teleoperation

Fig. 13 Experiment of satellite grappling with remote teleoperation (trajectory of hand and target)

であるから、式 (14) の安定条件は、地上系が送信した指令と実際のハンドの運動の間に

$$|\Delta x_h - \Delta x_{hc}| < |\Delta x_{hc}| \quad (20)$$

の関係を要求している。

また、本章では式 (1) で表されるオペレータのモデルを用い、式 (13) によって簡単化することで係数 K の大きさを特に考慮することなく検討してきたが、前章で示したように、ターゲットの動きが複雑になるとオペレータは自然に K を小さくする特性を持っている。マニピュレータが不安定領域に接近した場合には操作が難しくなるため K を小さくし、その結果全体のゲインも小さくなって安定な方向に向かう。式 (17) には K が含まれないことから、式 (17) が満たされない領域ではオペレータが K を小さくしても安定に制御することはできないが、式 (17) は満たすが式 (14) は満たさないという中間の領域は、通信時間遅れの大きさによってはオペレータが操作しづらいと感じ、本来オペレータが持っている性能よりも K を小さくすることで、操作性は低下するがほぼ安定性は確保される領域と考えられる。

6. 遠隔操作によるターゲット衛星の捕獲実験

実際にターゲット衛星を捕獲できることを確認するために、遠隔操作シミュレータを用いて、通信時間遅れが5秒のときにニュートン法を用いたターゲットを捕獲する実験を試みた。ロボットは Fig. 5 のモデルを用いた。ターゲットは安定領域に存在する。ロボットボディに固定した座標系から見た捕獲動作中のターゲットとハンドの動きを Fig. 13 に示す。ハンドが徐々にターゲットに接近していくことが確認された。なお、この実験ではハンドがターゲット位置に収束するまでに100秒以上かかっており、第4章で求めたオペレータの特性から予測される時間に比べてかなり長くなっているが、これはこの実験では位置だけでなく姿勢の制御も行っており、作業内容が難しくなるとオペレータの制御ゲインが低下したためと考えられる。

7. おわりに

固定点を持たない宇宙ロボットの遠隔操作システムでは、マニピュレータが動作した反動でロボットボディが運動するために、予測表示を用いても、通信系とオペレータが閉ループのなかに含まれた構成となる。本論文では、通信時間遅れやオペレータの特性を考慮した制御系の安定性の検討を試みた。

本研究では、まず、グラフィックスを用いた遠隔操作シミュレータを開発し、シミュレータを用いた実験によってオペレータを含む地上系のダイナミクスを測定した。その結果、地上系はむだ時間要素と一時遅れ要素の積として近似されることを示した。次に、この結果を用いて制御系全体の安定性について検討し、ボディを固定した通常のヤコビ行列と一般化ヤコビ行列を用いて表される安定条件を導いた。この安定条件はマニピュレータの姿勢が特異点に接近すると制御系が不安定になる可能性があることを示しており、オペレータにマニピュレータの特異点からの距離の情報を提供するなどの方法によって、特異点に接近することを回避すれば、長い通信時間遅れがある場合でも安定に作業を進めることができる。また、回避すべき領域の大きさは、宇宙ロボットの質量特性によって変化するとともに、時間遅れの大きさによっても変化することを示した。さらに、遠隔操作シミュレータを用いて、安定領域でニュートン法によるターゲット衛星を捕獲する実験を試み、安定して捕獲できることを確認した。

参考文献

- [1] 下地, 井上, 土屋, 中谷, 川口, 二宮: “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”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.3, pp.444-450, 1994.
- [2] W.S. Kim, F. Tendick, S.R. Ellis and L.W. Stark: “A comparison of position and rate control for telemanipulations with consideration of manipulator system dynamics,” IEEE Journal of Robotics and Automation, vol.RA-3, No.5, pp.426-436, 1987.
- [3] L. Conway, R.A. Volz and M.W. Walker: “Teleautonomous Systems: Projecting and Coordinating Intelligent Action at a Distance,” IEEE Trans. of Robotics and Automation, vol.RA-6, no.2, pp.146-158, 1990.
- [4] 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.
- [5] 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.327-337, 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。同年三菱電機(株)入社。1996年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。三菱電機にて、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。博士(工学)。計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

宮崎 文夫 (Fumio Miyazaki)

1952年8月28日生。1979年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程中途退学。同年大阪大学基礎工学部助手。1986年同助教授。1991年同教授となり現在に至る。この間1987年～1988年米国カリフォルニア大学客員準教授。ロボットの知能化に関する研究に従事。博士(工学)。システム制御情報学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

升谷 保博 (Yasuhiro Masutani)

1963年4月12日生。1989年大阪大学大学院基礎工学研究科博士課程中退。同年大阪大学基礎工学部助手。1995年同講師となり、現在に至る。センサーベースロボティクス(特に、宇宙ロボット)の研究などに従事。博士(工学)。計測自動制御学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)