宇宙ロボットの遠隔操作力制御システム

内 山 勝* 金 田 悟** 北 垣 高 成***

A Teleoperated Force Control System for Space Robots

Masaru UCHIYAMA Satoru KANEDA Kosei KITAGAKI

For the teleoperation of force controlled space robots in orbit by a human operator on the ground, communication time delay becomes a difficult problem. In this paper, to solve this problem, a new teleoperation control scheme is proposed. In this scheme, the robot has two control modes: velocity and force control modes, either of which is selected automatically according to contact conditions between the robot and its environments. The coefficient that converts the force command into the velocity command is decided based on the analysis of the optimal approach velocity. Since the both control modes are implemented by an on-board computer in orbit, no force reflection to the human operator is needed even in the force control mode. Moreover, to aid the operator's 3D visual perception, it is proposed to use a virtual beam which is generated by a ground computer using a geometrical model. With this aid, operation in the velocity control mode is improved.

Key Words: Space Robot, Teleoperation, Force Control, Autonomous Control, Computer Aided Vision

1. は じ め に

宇宙での活動は安全性の点から、ロボットに行わせることが望ましいが、現在の技術では、要求される作業をロボットが完全に自律的に行うことは困難なため、遠隔操作により人間とロボットを協力させ、互いに他を補いながら作業を行う必要がある。しかし、地上の人間と軌道上のロボットの間の通信には、容量の制限や片道約2秒といわれる通信時間の遅れがあるため、オペレータとロボットの協力の妨げとなる¹⁾。

この問題に対処するため、ロボットがオペレータに代わって部分的に指令を計画する機能²⁾、ロボットとその作業環境の情報を推測し、オペレータに提示する機能³⁾などが考えられている。また、推定された情報を実画像に重ね合わせて表示する手法も提案されている⁴⁾。一般に、遠隔操作システムを設計するとき、具体的にどのよ

うな機能をシステムに持たせるべきかは、要求される作業に依存する。

マニピュレータが環境中の対象物に接触して実行される作業では、この接触動作の安全、確実性が必要で、このため、遠隔操作マニピュレータに力制御機能が必要となる⁵⁾。本論文では、この接触動作に注目し、これを円滑に行うための新しい力制御方式を提案する。すなわち、筆者らがすでに提案している最適接近速度の考え方⁶⁾を接触動作の制御に適用し、速度と力の切り替えを円滑に行う部分自律機能を実現する^{7),8)}。

このシステムでは、オペレータに作業中の反力を直接フィードバックしないため、オペレータはマニピュレータや外部環境に関する3次元位置情報を視覚から取得する必要がある。一般に、3次元位置情報の取得法としては、両眼による方法が研究、開発されているが(例えば、文献9))、宇宙遠隔操作システムでは、先に述べた通信容量の制約により、両眼の画像を直接利用することは困難であると考えられる。そこで、本研究では、単眼による立体視の効果を積極的に利用する方法を新たに提案す

原稿受付 1991年4月3日

* 東北大学工学部 ** 日本電気株式会社

*** 電子技術総合研究所

て、速度制御される。すなわち、

$$v_r = k_a f_r \quad (1)$$

力制御モード（接触モード）：エンドエフェクタと外部環境が接触しているときの制御モードで、 f_r を力制御の目標値とする。すなわち、速度指令 v_r を次式により計算する。 k_f は力フィードバックゲインである。

$$v_r = k_f (f_r - f_s) \quad (2)$$

ゲイン k_f と k_a によって、遠隔操作システムの接触動作の特性が決定する。以下、その決定法について述べる。

2.2 最適接近速度

接触にともなって生じる衝撃力は、マニピュレータの接近速度、質量、対象物体の剛性などの接触条件、および接触後に行われる衝撃力の抑制制御に依存して決まる。これに対して、筆者らは、マニピュレータの接近速度に注目し、対象物体の特性に依存する最適な接近速度を選ぶことで、接触後の力制御の立ち上りを速くし、かつ接触の衝撃力を低く抑える方法を提案している⁶⁾。ここでは、この方法により k_a を決定する。

まず、接触後の力制御系に注目し、接触力 f_s とその平衡値 f_o の2乗偏差

$$J = \int_0^{\infty} (f_s - f_o)^2 dt \quad (3)$$

を評価指標とする。力制御系は接近速度 v を初期条件として含むから、他の条件が一定のとき、この J を最小にする v が存在する。これを最適接近速度 v_{opt} とする。

マニピュレータと外部環境の接触を接触方向についての1次元のばね、質量、ダンパ系と考え、さらに、目標接触力 f_r が一定で、接触後の力制御がP制御と仮定し、この最適化問題を解くと、最適接近速度 v_{opt} がつぎのように求められる⁶⁾。

$$v_{opt} = k_a f_r \quad (4)$$

ここで

$$k_a = \frac{k_v k_f \{c(1 + k_f k_v) + k_v\}}{(1 + k_v k_f) \{c^2(1 + k_v k_f) + km\}} \quad (5)$$

である。 m はマニピュレータの有効質量、 k, c はそれぞれマニピュレータと外部環境の合成ばね係数、合成粘性係数である。また、 k_v は力制御ループ内にある速度サーボのフィードバックゲインである。

(4) 式により、最適接近速度 v_{opt} は目標接触力 f_r に比例することがわかる。この比例係数 k_a を接触が起こりうる外部環境の特性データとして、あらかじめ用意しておき、ある外部環境に接触するとき、この k_a と接触力の目標値 f_r から、最適接近速度 v_{opt} を決定する。本研究の遠隔操作システムでは、マニピュレータを外部環境に接触させようとするとき、オペレータは目標接触

Fig. 3 A geometrical model of a robot and its environments

力 f_r を入力し、接近動作を行う。したがって、(1)式の k_a を(5)式により決定すれば最適接近動作が実現される。

3. 3次元位置情報の提示

3.1 2次元画像による立体視

ロボットの遠隔操作では、オペレータはマニピュレータと作業対象、あるいはマニピュレータが操作するツールと作業対象との3次元相対位置関係を知る必要がある。本システムでは、オペレータはこの情報を1台のTVカメラによる視覚、すなわち単眼視により取得する。人間は、単眼でも陰や物体の重なり具合などから、3次元位置情報を取得する能力を備えている。しかし、一般に、影を作るには照明が必要であり、また、重なり具合で位置関係を知るためには、基準となる物体が必要である。これらの条件を最適に設定することは、一般に難しい。

そこで、本研究では、これらの条件を地上のコンピュータのシミュレーションにより生成し、オペレータを支援する方法を提案する。すなわち、マニピュレータが操作するツール先端から仮想的な光ビームを照射し、対象面にそのスポットを作る。オペレータは、このビームの長さや方向、スポットの位置を見ることにより、幾何的な類推から、ツールと作業対象との相対的な位置関係を認識する。シミュレーションの世界では、作業に都合の良いビームを生成できるので、これを実画像にスーパーインポーズすれば、柔軟性に富むオペレータ支援が実現できる。

本論文では、このビームを仮想ビームと呼ぶ。以下、本研究で用いた仮想ビーム生成のための幾何学モデルとその処理について述べる。

Fig. 4 Perspective transformation of a virtual beam

3.2 仮想ビーム生成のための幾何学モデル

ここでは、仮想ビームの生成に用いるシミュレーションの世界の物体として、Fig. 3 に示すマニピュレータ、エンドエフェクタ、ツール、作業面、および視点となるカメラを考える。各物体の位置、姿勢を記述するために、これらの物体に以下の座標系を固定する。

Σ_0 : 基準座標系

Σ_H : エンドエフェクタ座標系

Σ_T : ツール座標系

Σ_P : 作業面座標系

Σ_V : 視点座標系

基準座標系 Σ_0 はマニピュレータのリンク 0 の座標系にとる。エンドエフェクタ座標系 Σ_H はマニピュレータのエンドエフェクタに固定した座標系である。その位置、姿勢は、マニピュレータの関節角度より計算できる。ツール座標系 Σ_T はエンドエフェクタで把持した対象物に

固定した座標系で、その原点はその対象物に対する作業の代表点とする。例えば、ピンを挿入する作業では、Fig. 3 のようにピンの先端を原点とし、ピン挿入作業の対称性からピンの軸方向に座標軸をとる。 Σ_T の Σ_H に対する位置、姿勢は、把持した対象物の形状とその把持状態によって定まる。これは何らかの手段によって既知であるとする。作業面座標系 Σ_P は、作業対象となる環境中の物体の代表面を xy 平面とし、その中心を原点、法線方向を z 軸とする座標系である。作業対象の位置、姿勢は、基準座標系 Σ_0 に対して既知であると考え。視点座標系 Σ_V は、視点の位置を原点とし、視線の方向を x 軸とする座標系で、同様に、 Σ_0 に対して、その位置、姿勢は既知であると考え。

これらの座標系間の位置、姿勢の関係の記述には、同次変換行列を用いる。

Fig. 5 Configuration of an experimental setup

Fig. 6 A photograph of an experimental setup

3.3 仮想ビームの生成

仮想ビームを生成する場合、まず、その発生点と方向を指定する必要がある。ビームの発生点の位置ベクトルを $\mathbf{x}_A$ 、ビームの方向を $\mathbf{u}$ とすると、ビームの方程式は

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_A + s\mathbf{u} \quad (6)$$

となる。 $\mathbf{x}$ はビーム上の点の位置ベクトル、 s はパラメータである。

つぎに、仮想ビームと作業面の交点、すなわち、作業面上でのスポットの位置を表すベクトル $\mathbf{x}_B$ を求める。スポットは作業面座標系 Σ_P の xy 平面上にあるから、 Σ_P で成分表示した $\mathbf{x}_B$ の z 座標は 0 である。 Σ_P で成分表示した $\mathbf{x}_B$ を ${}^P\mathbf{x}_B$ とすると

$$0 = [0, 0, 1] {}^P\mathbf{x}_B \quad (7)$$

となる。一方、(6) 式を Σ_P で成分表示すると

$${}^P\mathbf{x} = {}^P\mathbf{x}_A + s {}^P\mathbf{u} \quad (8)$$

となる。 ${}^P\mathbf{x}_B$ は (8) 式上の点であるから、(8) 式の ${}^P\mathbf{x}$ を (7) 式の ${}^P\mathbf{x}_B$ に代入し、 s について解くと、スポット上の s が

$$s = - \frac{[0, 0, 1] {}^P\mathbf{x}_A}{[0, 0, 1] {}^P\mathbf{u}} \quad (9)$$

と求められる。これを (6) 式に代入すると $\mathbf{x}_B$ を得る。すなわち

Fig. 8 An image of a virtual beam

Fig. 7 A TV image of a teleoperated task

$$\mathbf{x}_B = \mathbf{x}_A - \frac{[0, 0, 1] {}^P\mathbf{x}_A}{[0, 0, 1] {}^P\mathbf{u}} \mathbf{u} \quad (10)$$

ビームの発生点と作業面上のスポットを透視変換し、結果を画面上で結べば、仮想ビームの像が得られる。この様子を Fig. 4 に示す。透視変換の視点、すなわち、カメラの位置、姿勢が与えられれば、その画面内のビームの位置、姿勢は容易に計算される。

4. 実験システム

4.1 構成

実験システムの構成を Fig. 5 に、全景を Fig. 6 に示す。本システムは著者らが開発した研究用ロボットシステム ARS/A¹¹⁾ 上に実現されている。システムの統括は 32 ビットのホストコンピュータにより行われる。マニピュレータは 16 ビットのサーボコンピュータにより制御される。マニピュレータとしては、6 軸の多関節型産業用ロボットを用いている。その手首部には力制御のための 6 軸力覚センサが装着されている。ジョイスティックには同様な 6 軸力覚センサを用いている。その信号は A/D 変換器からホストコンピュータに入力される。オペレータへの視覚フィードバックは TV カメラにより行う。カメラの視点は固定とする。オペレータのコンソール部とマニピュレータの間には遮蔽板が置かれ、両者は分離される。

遠隔操作システムは、Fig. 1 のシステムをもとに構成する。仮想ビームの計算に必要なマニピュレータの関節角度は、軌道上より送られてくるデータを用いる。ディ

Fig. 9 A peg-in-hole task

Fig. 10 Performance index J vs. velocity/force gain k_a

スプレイ上に表示された視覚情報をもとに、オペレータは、ジョイスティックにより指令を入力し、送信する。なお、ジョイスティックの力とモーメントの分離は難しいため、キーボードにより力またはモーメントを指定し、各瞬間には3軸の力またはモーメントを送信する。選択されない力またはモーメントの指令は0とする。

本実験では、ハードウェアの制約により仮想ビームを実画面に重ねて表示できない。そこで、仮想ビームは別画面に表示し、オペレータは実画面と仮想ビーム画面を同時に見ながら3次元位置関係を認識する。実画面の例を Fig. 7 に、そのときの仮想ビーム画面を Fig. 8 に示す。なお、実画面を生成するカメラの位置、姿勢と仮想ビーム画面を生成するカメラの位置、姿勢は、両画面内のマニピュレータの動きがオペレータにとって一致す

るように設定する。

4.2 通信時間遅れのシミュレート

地上と軌道上の間の通信時間遅れを T とすると、マニピュレータと作業環境の状態は、時間 T だけ遅延してオペレータに届く。それを受けたオペレータからの指令は、さらに時間 T だけ遅延してマニピュレータに届く。つまり、一方の側がある状態を取ってから、それに対するもう一方の側からの反応が戻ってくるまでに合計 $2T$ の時間がかかる。本研究では、オペレータとロボットの間形成されるフィードバックループの挙動を問題としている。したがって、行きと戻りのそれぞれの遅れがどのような値でも、合計が $2T$ なら、結果は同じであると考ええる。そこで、本実験では、通信時間遅れ T を情報量の少ない操作指令の遅れに集約し、これを $2T$ とし、画像伝送の遅れは0とする。

5. 実験

5.1 対象作業

対象作業としてピン挿入作業を選ぶ。この作業は、Fig. 9 に示すように、以下の3つの作業要素により構成される。

Approach: ピンを初期位置からホール近くまで移動させる作業

Search: ピンをホール近くに接触させながら、ホールまで滑らせる作業

Fig. 11 Examples of contact forces and moments (without a virtual beam)

(a) Communication delay = 0.0 s, (b) Communication delay = 2.5 s.

Fig. 12 Task completion time vs. communication delay (without a virtual beam)

Insertion: ピンをホールに挿入する作業

Approach は視覚フィードバックを伴う無拘束移動, Search は視覚フィードバックを伴う拘束移動, Insertion は視覚フィードバックを伴わない拘束移動である。このように、この作業はそれぞれ性格の異なる基本的な作業要素により成り立っているため、遠隔操作システムの特性分析に適している。

実験で使用したピンの直径は 20 mm、長さは 50 mm である。これに対するホールのすきま比は 1% である。実験の再現性を高めるため、ピンはハンドにより把持するのではなく、手首の力覚センサの先に固定する。

本実験におけるオペレータ指令は、Fig. 3 の基準座標系 Σ_0 で成分表示される。 Σ_0 の z 軸は Σ_P の z 軸に平行である。なお、この設定はあくまで便宜上のもので、作業内容により容易に変更できる。

5.2 最適接近速度の測定

本論文の遠隔操作システムでは、作業に必要な知識として、最適接近速度を求める変換係数 k_a が必要である。ここでは、実験によりこの係数を決定する。

まず、力フィードバックゲイン f_r を力制御が安定に行えるように定め、そのゲインを用いたシステムに対して、(3) 式の評価指標 J が最小となるように k_a を決定する。ここでは、ピンをホール近傍の作業面に垂直方向から接触させる実験を行い k_a を決定する。与えられた目標接触力 f_r に対して、変換係数 k_a を変えながら接触実験を行い、そのときの接触力と平衡力を測定し、数値積分により J を計算する。そして、この値が最小となるように k_a を決定する。

実験結果を Fig. 10 に示す。本実験では、力制御ゲインは $k_f = 1.3 \text{ mm/s/N}$ とした。いくつかの異なる目標接触力 f_r について実験を行ったが、 J を最小にする k_a は、 f_r によらないことがわかった。この結果から、 $k_a = 1.0 \text{ mm/s/N}$ とした。

Fig. 13 Task completion time vs. communication delay (with a virtual beam)

5.3 仮想ビームによる支援なしの作業実験

視覚情報として TV カメラ画像のみを用いて実験を行った。実験は、0.0 s ~ 2.5 s の間の 7 種類の通信時間遅れについて、各 5 回繰り返し作業を行うもので、この実験を 3 人の被検者について各 2 回行った。最初の 1 回を練習とし、2 回目のデータを本データとした。なお、接触の判断のためのしきい値は、各軸共通とし、力については 1 N、モーメントについては 0.1 Nm とした。

本実験では、オペレータは、まずピンをホール作業面上方に位置決めし、つぎにピンをホール作業面に接触させる動作に移る。こうすることにより、オペレータは、ピンの作業面への押し付け力を意識してジョイスティックに指令を与えることができ、ホール作業面への最適接近速度が実現される。

作業性の評価は、過去に行われたピン挿入作業の研究¹²⁾にならない、接触力および作業時間の評価により行った。各評価結果は同様の傾向を示した。

一例として、ある被検者の 2 回目の実験で、通信時間遅れがそれぞれ、0.0 s、2.5 s の場合の接触力の測定結果を Fig. 11 に示す。図にはピンに作用した各軸方向の接触力を示している。接触力は基準座標系 Σ_0 で成分表示している。 F_{sx}, F_{sy}, F_{sz} は接触力の x, y, z 成分、 N_{sx}, N_{sy}, N_{sz} は接触モーメントの x, y, z 成分である。横軸には、Approach, Search, Insertion の各作業要素の推移も示している。この実験結果より、接触力の大きさが通信時間遅れの有無に影響を受けないことがわかる。これは、接触力の制御がロボットの側で自律的に行われていることの効果を示すものといえる。

また、作業時間による評価は、通信時間遅れ (communication delay) に対する各作業要素の 5 回の平均作業時間 (task completion time) を求めることにより行った。Fig. 12 にある被検者の 2 回目の実験結果を示す。通信時間遅れに対して全作業時間が直線的に増大していることがわかる。通信時間遅れが 2.5 s のときの全作業

時間は53sである。しかし、その増加を各作業要素について見ると、視覚フィードバックに依存する Approach と Search において著しいことがわかる。視覚フィードバックによらない Insertion では作業時間の著しい増加は見られない。これは、力制御をロボット側で自律的に行っていることの効果を示すものである。

5.4 仮想ビームによる支援ありの作業実験

前節と同様の条件で、仮想ビーム画面をTVカメラ画像と併用した実験を行った。実験は、0.0s~2.5sの間の7種類の通信時間遅れについて、各5回繰り返す行うもので、これを3人の被検者について各3回行った。最初の1回を練習とし、残りの2回を本データとした。

実験の評価は前節と同様に行った。各評価結果は同様な傾向を示した。

その一例として、ある被検者の3回目の実験の作業時間による評価結果を Fig.13 に示す。この結果から、TVカメラ画像のみのときと同様、通信時間遅れに対して作業時間が直線的に増大していることがわかるが、その増大の傾きは小さく、通信時間遅れが2.5sのときでも全作業時間は28sに収まっている。これより、仮想ビームによる支援画像の有効性が確認される。

なお、Search において時間遅れの影響がほとんどなく、作業が短時間で完了しているのは、仮想ビームの支援により、Approach の終了時点において、ピンがホールに対して Search の必要がほとんどないほど高精度に位置決めされるためである。また、Approach において、仮想ビームの支援による効果が時間遅れが大きいくほど大きくなっているのは、時間遅れが小さいときには、オペレータはジョイスティックの指令に応答するピンの動きを見て、これよりピンとホールの位置関係を想像し、空間感覚を取得できるためであると考えられる。時間遅れが大きくなると、オペレータのこの能力は劣化し、仮想ビームによる支援が効果を発揮する。

6. お わ り に

軌道上の宇宙ロボットをオペレータが地上より遠隔操作する場合を想定し、そのとき問題となる通信時間遅れの問題を克服するための新しい遠隔操作力制御システムを提案した。このシステムでは、最適接近速度の考え方を適用し、速度制御モードと力制御モードをマニピュレータと作業環境の接触状態に応じて自動的に切り替えるため、オペレータへの力フィードバックを必要とせず、ロボット側でローカルに力制御が行われる。このため、通信時間遅れの影響をほとんど受けず、良好な操作性が

確保される。

また、このシステムの視覚フィードバックを補助する目的で、仮想ビームという幾何学モデルによって生成されたシミュレーションの世界の光ビームを用いる方法を提案し、非接触作業における操作性の向上を実現した。

以上の考え方の有効性を時間遅れをシミュレートした遠隔操作実験システムにより確認した。

謝 辞

実験にご協力頂いた東北大学大学院学生妻木勇一君ならびに学部学生中里浩幸君（現在大学院学生）に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 渡辺一郎, 内山 隆, “宇宙実験用テレオペレーションシステム”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.6, pp.759-764, 1989.
- 2) 平井成興, 佐藤知正, “極限環境とテレロボット”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.6, pp.739-744, 1989.
- 3) 山下 忠, 池田 広, 門司竜彦, 加藤了三, “コンピュータ支援遠隔操作のシミュレーション実験: 操作性向上の評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.2, pp.188-196, 1990.
- 4) 松井俊浩, 塚本享治, “マルチメディアディスプレイを用いた統合型遠隔ロボット制御法”, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.4, pp.301-310, 1988.
- 5) G. Hirzinger, “Robot Learning and Teach-In Based on Sensory Feedback,” Robotics Research: The Third International Symposium, The MIT Press, pp.155-163, 1986.
- 6) 北垣高成, 内山 勝, “外部環境に対するマニピュレータの最適接近速度”, 日本ロボット学会誌, Vol.8, No.4, pp.413-420, 1990.
- 7) K. Kitagaki and M. Uchiyama, “Generating Appropriate Approach Velocities to the Environment in Robot Teleoperation,” Proc. IEEE Int. Workshop on Intelligent Robots and Systems, pp.731-736, 1988.
- 8) M. Uchiyama and K. Kitagaki, “Teleoperation of a Force Controlled Robot Manipulator Without Force-Feedback to a Human Operator,” Proc. 2nd European In-Orbit Operations Technology Symposium, pp.173-179, 1989.
- 9) 館 暁, 荒井裕彦, “テレグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価”, 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.4, pp.314-326, 1989.
- 10) 藤井澄二, “サーボマニピュレータの問題”, 日本機械学会誌, Vol.59, No.449, pp.476-479, 1956.
- 11) 北垣高成, 内山 勝, “研究用ロボット制御システム ARS/A,” 日本ロボット学会誌, Vol.7, No.5, pp.475-481, 1989.
- 12) 小沢邦昭, “組立作業における手先の機能に関する基礎的研究”, 東京工業大学修士学位論文, 1973.