力・運動混合指令型 モデルベースト宇宙遠隔操作システム*

妻 木 勇 一^{*1}, 内 山 勝^{*1}

A Model-Based Space Teleoperation System Using Mixed Force and Motion Commands

Yuichi TSUMAKI and Masaru UCHIYAMA

It is well known that bilateral control becomes unstable in teleoperation with time delay. To tackle this problem, a model-based teleoperation system was introduced. Forces, reflected from the model on the ground-site, do not depend upon the existing time delay in the system. Unfortunately, such model-based systems strongly depend on the accuracy of the model. In our previous work, we proposed a teleoperation system which is robust with respect to geometric modeling errors. However, our system could not deal with dynamic modeling errors. In this paper, we propose a new approach to the model-based teleoperation, based on mixed force and motion commands. With this approach, both geometric and dynamic modeling errors are tolerable. The experimental results confirm the effectiveness of the approach.

Key Words: Space Robot, Robot, Manipulator, Human Interface, Space Teleoperation, Time Delay, Model-Based System, Virtual Reality

1. はじめに

軌道上のマニピュレータを地上から遠隔操作する宇宙遠隔操作では、数秒の時間遅れが発生することが良く知られている。一方、オペレータに力感覚をフィードバックするバイラテラル制御は、時間遅れが制御ループ内に存在すると不安定になる⁽¹⁾。この問題に対し、Andersonらは受動性の概念からシステムを安定にする方法を提案しているが、一秒以上の時間遅れに対しては実用的な方法とは言えない⁽²⁾。したがって、上記のような宇宙遠隔操作においては、オペレータに直接力感覚をフィードバックすることは困難である。しかし、オペレータの技能に依存するような作業においては、力情報は高い臨場感を得るために重要かつ必要な情報である。そこで、時間遅れを伴う遠隔操作においても、安定に力感覚をオペレータに提示できるモデル介在型遠隔操作システムが提案されている^{(3)~(5)}。この手法は、地上側の計算機内に物理的仮想環境モデルを持ち、そのモデルに基づいて力感覚を返すため、大きな時間遅れが存在しても安定したシステムを構築する

ことができる。ただし、このようなシステムは、正確な仮想環境モデルを必要とする。このため、いくつかのキャリブレーション法が提案されているが、実環境と仮想環境間のモデル誤差を完全になくすことは困難である⁽⁶⁾⁽⁷⁾。したがって、モデル誤差にロバストなシステムの構築が必要となる。モデル誤差には幾何学的誤差と動特性誤差の二つの誤差が考えられる。朝倉らは幾何学的誤差に対応するため、運動値に基づいて力指令を与えるシミュレーション介在型マスタスレーブシステムを構築している⁽⁸⁾。一方、我々は、マスタアーム、スレーブアーム及び仮想環境内の仮想アームを力情報に基づき独立に速度制御することで、幾何学的誤差にロバストなシステムを構築してきた⁽⁹⁾。このシステムでは、オペレータの指示した拘束方向の力がスレーブアームにより正確に実現される。したがって、自動化に不向きなオペレータの技能を必要とする作業に適している。しかし、動特性誤差に対応することはできなかった。

そこで、本論文では、力情報とともにアーム間の運動情報を同時に取り扱う力・運動混合指令型モデルベースト宇宙遠隔操作システムを提案し、幾何学的誤差と同時に動特性誤差にもロバストなシステムを構築する。このような運動と力の情報を同時に用いる制御法

* 原稿受付 1997年8月4日。

^{*1} 正員, 東北大学大学院工学研究科(☎ 980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉01)。

Fig. 1 The concept of model based teleoperation

としては, Chiaverini らが提案したパラレルアプローチが知られている⁽¹⁰⁾. この手法は, 位置制御ループよりも力制御ループに優位性を持たせることで, 過大な力の発生を抑え, 幾何学的誤差に対応することを可能にしている. しかし, この手法も動特性誤差に対応することはできない. 本論文により提案するシステムでは, 仮想アームとスレーブアーム間にある種のインピーダンス特性を持たせることにより, 運動の誤差を力に変換し, 動特性誤差を打ち消す力に利用する. また, このインピーダンスを適当に設定することで, 動特性誤差だけではなく, 幾何学的誤差にもロバストなシステムを構築することができる. 宇宙遠隔操作実験システムを用いて, ORU 交換作業を行い, システムの有効性を検証した.

2. モデルベース宇宙遠隔操作システム

2・1 モデルベースシステム 時間遅れを有する遠隔操作においても, オペレータ側のコンピュータに仮想的な物理モデルを構築することにより, オペレータに安定して力感覚を返すことが可能となる. このようなシステムは, 一般にマスターアーム, スレーブアーム, 仮想アームの3つのアームから構成される. 概念図を図1に示す. 図より明かなように, オペレータへの力感覚は仮想モデルに基づいて生成され, 実際のスレーブアームの力情報は直接オペレータにフィードバックされることはない. これにより, 安定した力感覚が提示可能となる. しかし, モデル誤差が存在すると作業を円滑に行うことができなくなる. 以下にモデル誤差について述べる.

2・2 モデル誤差 モデル誤差には次の2種類がある.

Fig. 2 Typical problems due to modeling errors

- 幾何学的誤差 (位置の誤差)
- 動特性誤差 (運動と力の関係に関する誤差)

図2に示すように, 幾何学的誤差が存在する場合, マスタアームの位置に基づきスレーブアームを制御すると, 過大な力が発生したり (Type A), 作業を遂行できない (Type B) などの問題が発生する. そこで, 我々は幾何学的誤差に対応するために, 各アームを互いの位置に拘束されることなく, 独立に制御する遠隔操作システムを提案してきた⁽⁹⁾. このシステムは, 最適接近速度の考えに基づき, オペレータが常に力指令を与えることを特徴とする. スレーブアームは, 接触時には目標力を実現し, 非接触時には目標力を実現するために最適な接近速度を実現する. マスタアームおよび仮想アームも同様に制御することにより, 幾何学的誤差にロバストなシステムを構築できる. しかも, 幾何学的誤差が存在してもスレーブアームは正確にオペレータが加えた拘束方向の力を実現するため, オペレータの技能に依存するような作業に適している.

しかし, オペレータの拘束方向の力を正確に実現するために, 動特性誤差が存在すると, 図2に示すように作業が行えない (Type C) とか, 予想しない加速度が発生する (Type D) などの問題が発生する.

3. 力・運動混合指令型遠隔操作システム

3・1 システム構成 上記の問題点を克服するため, 新たに力・運動混合指令型モデルベース宇宙遠隔操作システムを提案する. 基本的な概念を図3に示す. 図中では, 動特性誤差の一例として摩擦を考えている. 実際の摩擦が仮想環境内に設定した摩擦よりも大きい場合, オペレータが仮想対象物に加えた力をスレーブアームが正確に実現しても, スレーブアームは対象物を動かすことはできない. そこで, 仮想アーム

Fig. 5 Control block diagram of the system

Fig. 3 The concept of our new system

Fig. 4 Command flow in the new system

とスレーブアームの運動の差を力に変換し、動特性誤差を克服する力に利用する。図中 T_d は片道の時間遅

れ、 f_m^{-Td} は時間遅れ後のオペレータがマスターアームに加えた力、 C は仮想アームとスレーブアームの運動の差から導かれる拘束力であり、これが動特性誤差に打ち勝つ力となる。以上のような考えに基づき新しいシステムを構成する。

以下に各アームの制御則を示す。なお、本論文では、ロボットの作業座標を各軸独立に取り扱い、制御方式を定式化する。したがって、以下に示す変数はすべてスカラーである。

- マスタアーム

- － 接触時

$$\dot{x}_m = k_f(f_m - f_{va}) \quad (1)$$

- － 非接触時

$$\dot{x}_m = k_v f_m \quad (2)$$

- スレーブアーム

- － 接触時

$$\dot{x}_s = k_f(f_{ref} - f_s) \quad (3)$$

- － 非接触時

$$\dot{x}_s = k_v f_{ref} \quad (4)$$

$$f_{ref} = f_m^{-Td} + C \quad (5)$$

$$C = k_p(x_{va}^{-Td} - x_s) + k_d(\dot{x}_{va}^{-Td} - \dot{x}_s) \quad (6)$$

- 仮想アーム

- － 接触時

$$\dot{x}_{va} = k_f(f_m - f_{va}) \quad (7)$$

- － 非接触時

$$\dot{x}_{va} = k_v f_m \quad (8)$$

ここで、 $\dot{x}_m$ はマスターアームの手先速度、 f_m はマスターアームにオペレータが加える力、 $\dot{x}_s$ はスレーブアームの手先速度、 f_s はスレーブアームの手先力、 $\dot{x}_{va}$ は仮想アームの手先速度、 k_f は接触時の力制御ゲイン、 k_v は最適接近速度の考えに基づき決定される非接触時の速度ゲイン、 f_{va} は仮想アームの手先力、 f_{ref} はスレーブアームへの力指令、 k_p と k_d はそれぞれ拘束力を発生す

るための比例ゲインとダンピングゲイン, x_{va}^{-Td} と $\dot{x}_{va}^{-Td}$ は時間遅れ後の仮想アームの位置と速度である。

図4に指令の流れに関する概念図を, 図5にシステムのブロック線図を示す。

各アームは, 接触時と非接触時の二つの制御モードを持っており, 手首部に装着された力センサにより, 接触を検出し制御モードを自律的に切替える。以下に本システムの特徴を述べる。

1. 力・運動混合指令型システムである。

(5), (6) 式に示すように, 仮想アームとスレーブアームの運動誤差を力に変換し, これをオペレータがマスターアームに加えた力に足し合わせたものを目標接触力としている。この運動誤差から生じる力 C が動特性誤差に打ち勝つ力となる。運動誤差を力に変換しているため, 次項に示す最適接近速度の考えを適用したシステム構築が可能となる。しかも, 運動誤差を力に変換するためのインピーダンスパラメータを適当に決めることで, 幾何学的誤差および動特性誤差両方に対応することができる。

2. 最適接近速度の考えに基づいたシステムである。

最適接近速度とは, マニピュレータの接近速度に注目し, 対象物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上りを速くし, かつ接触の衝撃力を低く抑える方法である⁽¹¹⁾。この最適接近速度は, 目標接触力に基づき決定されるため, 非接触時も接触時もオペレータは目標接触力を与えるだけで良い。すなわち, オペレータが正確な対象物の位置を知らなくても, スレーブアームは対象物に接触すると, 自律的に制御則を切替え目標接触力を最適に実現することができる。マスターアームおよび仮想アームも同様に制御することで, 幾何学的誤差に強いシステムを構築できる。なお, 接触の判断は, 適当に設定した力データの閾値に基づいて行われる。このため, アームに発生する力がこの閾値の近傍をふらつくと, 制御則が頻繁に切り替わり系が不安定になることが予想される。したがって, 作業に応じた適当な閾値を設定する必要がある。

3・2 緩い拘束力 C C はスレーブアームと仮想アーム間の拘束力を表している。したがって, この拘束力を強く設定すると運動誤差が小さくなるかわりに幾何学的誤差には対応できなくなる。その結果, 過大な力が発生する可能性が高くなる。そこで, 比例ゲインを小さくすることで C を緩やかな拘束力にする。これにより, 幾何学的誤差にも対応可能となり, さらに C に制限を設けることで, 過大な力の発生を防ぎ安全なシステムを構築することができる。また, C を零にすることで, これまで我々が提案してきた幾何学的誤差に

強いシステムと同等になり, オペレータの加えた拘束方向の力を正確に実現することができる。このように, 拘束力 C を適当に設定することで, システムの特性を状況に応じて変えることが可能となる。

なお, 動特性誤差および幾何学的誤差の許容範囲は環境, 作業特性, C の設定等に依存する。しかし, 宇宙遠隔操作においては安全性を確保することが重要であるため, 強い拘束力を用いることは適当ではない。したがって, 許容範囲を越えるモデル誤差が存在する場合には, モデルの更新等, 別途回復措置を取る必要がある。ただし, モデルの更新を行うには誤差量の推定が必要となる。誤差量の推定法としては, 力センサおよび軌道データの履歴あるいはレーザレンジセンサ等のセンサ情報を用いることが考えられるが, ここでは取扱わない。

3・3 仮想力 仮想力 f_{va} は, 以下のように決定する。これにより, 文献⁽⁹⁾⁽¹³⁾ 同様硬い接触感を安定に提示することが可能となる。

・拘束方向

$$f_{va} = f_m \cdots \cdots \cdots (9)$$

拘束方向の速度を零とする。すなわち, 加えた目標力を反力としてそのまま返す。

・可動方向

スレーブアームが理想的に速度制御されると仮定すると, 可動方向の対象物の動特性に基づいた仮想力 f_{va} は次式より表すことができる。

$$f_{va} = M\ddot{x}_{va} + D\dot{x}_{va} + Kx_{va} + B \cdots \cdots \cdots (10)$$

ここで, M, D, K は対象物のインピーダンスパラメータ, B は摩擦力である。

ただし, マスターアームには, ギア比が高くバックドライバビリティのないものを用いる。このようなアームは, 外乱に強い安定した速度制御を実現することができるため, 安定した硬い接触感を実現することが可能となる。このように, 仮想環境内での接触感仮想反力に基づいてマスターアームの運動を変化させることによりオペレータに与えられる。

3・4 パラレルアプローチとの比較 Chiaverini らにより提案されたパラレルアプローチは, 力制御部と位置制御部が並列に構成されている⁽¹⁰⁾。また, 幾何学的誤差が存在しても最終的に目標力を達成できるよう力制御部に I 制御を取り入れ, 力制御ループを上位に位置付けることを特徴としている。しかし, 動特性誤差を取扱うためには, 目標力とは異なる力が必要となるため, この手法では, 動特性誤差に対応することはできない。一方, 今回提案する手法は, 式 (3), (5), (6) より以下のように表すことができる。

Table 1 Control parameters

Terms	Translation	Rotation
k_{opt}	$0.6 \times 10^{-3} \text{ (m/s)/N}$	0.1 (rad/s)/Nm
k_f	$1.2 \times 10^{-3} \text{ (m/s)/N}$	0.05 (rad/s)/Nm
k_p	$0.3 \times 10^3 \text{ N/m}$	$0.87 \times 10^{-3} \text{ Nm/rad}$
k_d	0.0 N/(m/s)	0.0 Nm/(rad/s)
C_{max}	10 N	0.5 Nm

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_s &= k_f(f_m^{-Td} + k_p(x_{va}^{-Td} - x_s) \\
 &\quad + k_d(\dot{x}_{va}^{-Td} - \dot{x}_s) - f_s) \\
 &= k_f k_d(\dot{x}_{va}^{-Td} - \dot{x}_s) + k_f k_p(x_{va}^{-Td} - x_s) \\
 &\quad + k_f(f_m^{-Td} - f_s) \dots\dots\dots (11)
 \end{aligned}$$

このように、本手法はパラレルアプローチと似た形となるが、力制御をP制御のみで行っているために、運動誤差を動特性誤差に打ち勝つ力として積極的に利用することが可能である。

4. 実験

提案するシステムの有効性を確かめるため、宇宙遠隔操作実験システム⁽¹²⁾を用いて ORU 交換作業を行った。本実験システムの概要を図 6 に示す。本システムは 3 軸直交型のマスターアーム、および 6 自由度のスレーブアームより構成しており、各アームの手先部には 6 軸のフォーストルクセンサが装着してある。各アームの制御周期はそれぞれ 10 ms と 20 ms である。ビデオカメラから得られた映像はビデオレートでスーパーインポーズボードを通してコンピュータグラフィックスと重ねて表示される。画像の遅延は模擬していないが、指令データを往復の時間遅れ分遅らせることにより、画像遅延と同等の効果をj得ている。

図 7 に実験に用いた作業台を示す。実験では、ORU の重さを人為的に仮想 ORU のほうが 300 g 軽くなるよう設定して行った。実際の軌道上では無重力状態であるため、ORU の重量の違いは慣性の違いとして影響するだけで、重力が作用する地上ほどの影響はない。しかし、地上実験においては、重量の違いは動特性誤差として適当なため、本システムの有効性を検証する作業として本作業を選んだ。人為的な幾何学的誤差は導入していないが、後述する実験結果からも明らかのように、キャリブレーションにより除去できない幾何学的誤差が数 mm のオーダーで存在している。実験で用いたパラメータを表 1 に示す。時間遅れは 5 秒を設定した。実験では、図 8 に示すように、ORU を移動させる作業を行った。

実験結果を図 9, 10 に示す。図 9 は、各アームの位置を示している。スタート地点の位置がマスターアームおよび仮想アームとスレーブアーム間で異なっているこ

Fig. 6 Experimental system for space teleoperation ARS/A

Fig. 7 A general view of the experimental mock-up

Fig. 8 ORU exchanging task

とから、幾何学的誤差が存在することがわかる。また、スレーブアームと他のアームとの z 方向の位置誤差は実際の ORU の重量が仮想 ORU よりも 300 g 重いために生じたものである。すなわち、この z 方向の位置誤差が動特性誤差に打ち勝つ力を生み出している。最終的な各アームの位置を見ると、各アームがそれぞればらばらに動いていることがわかる。これは、各アームが環境にならって動いた結果であり、幾何学的誤差にも対応していることがわかる。

力のデータを見ると、オペレータが加えた力を時間

Fig. 9 Position of each arm

(a) Force of the master arm (command)

(b) Force of the slave arm (reaction)

Fig. 10 Forces of the master and slave arms

遅れ後にスレーブアームがほぼ実現していることがわかる。制御則からわかるように、本システムでは位置誤差が存在するとスレーブアームは正確な力を実現することができない。これは、スレーブアームの x および y 方向に生じている力の原因でもある。スレーブアームに現われている自由空間における一定の力は ORU の重さを表している。一方、自由空間でオペレータがマスターアームに加えている力は、仮想 ORU の重さを支える力とスレーブアームを動かすための力の合力である。提案するシステムは、最適接近速度の考えに基づいているので、非接触方向にはオペレータがマスターアームに加えた力を実現する最適速度が各アームの手先で実現される。オペレータから見ると速度に応じた力を感じるようになる。最適接近速度は比較的遅いので操作感がやや重くなるものの、オペレータは自由空間において目標力を自由に操作することができる。なお、実験においては、動特性誤差によりスレーブアームと仮想アーム間に発生する位置誤差の方向 (z 方向) が、作業に影響を与えない方向であったため、比較的作業性が良かったと考えられる。しかし、動特性誤

差により生じた位置誤差が大きな影響を与える可能性もある。したがって、作業によっては、動特性誤差によって生じる位置誤差が幾何学的誤差の許容範囲内に入るよう、十分注意が必要である。

5. おわりに

動特性誤差に対応するために、緩やかな運動の拘束力を従来のシステムに取り入れることを提案した。この結果、位置誤差が生じるとスレーブアームはオペレータが加えた力とは異なる力を発生するものの、作業を環境の動特性に合わせて遂行することができる。また、 C の設計によっては、従来提案してきたシステムを実現することも可能であり、提案する手法は従来のシステムを自然に拡張したものとなっている。さらに、 C を適当に設定することにより、状況に適したシステム特性を与えることができる。人為的に動特性誤差を与えた ORU 交換作業実験を行い本手法の有効性を検証した。最適な C の設計論は今後の課題とする。

文 献

- (1) W. R. Ferrel, Delayed Force Feedback, *IEEE Trans. on Human Factors Electronics*, **HFE-8**, (1966) 449-455.
- (2) R. J. Anderson and M. W. Spong, Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, *IEEE Trans. on Automatic Control*, **34-5**, (1989) 494-501.
- (3) 館・榎, インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (I), 日本ロボット学会誌, **8-3**, (1990) 241-252.
- (4) 神徳・谷江・横井・藤川, 仮想環境におけるバイラテラルマスタ・スレーブテレオペレーションに関する基礎実験, 計測自動制御学会論文集, **28-6**, (1992) 750-759.
- (5) 中里・妻木・内山・リー, 地上モデルからのカフィードバックを用いた宇宙テレロボティクス実験, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1992) 489-492.
- (6) W. S. Kim et al., Commercialization of JPL Virtual Reality Calibration and Redundant Manipulator Control Technologies, *Proc. of the Int. Symp. on Artificial Intelligence, Robotics and Automation in Space*, (1994) 23-26.
- (7) 大山・常本・館・井上, 仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法, 日本ロボット学会誌, **12-2**, (1994) 272-281.
- (8) 朝倉・番場・松日・神徳・谷江・高宗, 作業時の操作性向上を目指したシミュレータ介在型マスタスレーブシステム, 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1994) 979-980.
- (9) 妻木・星・成瀬・内山, 幾何学的モデル誤差にロバストなモデルに基づいた宇宙遠隔操作システム, 日本ロボット学会誌, **15-7**, (1997) 1025-1033.
- (10) S. Chiaverini and L. Sciacivco, The Parallel Approach to Force/Position Control of Robotic Manipulators, *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, **9-4**, (1993) 361-373.
- (11) K. Kitagaki and M. Uchiyama, Optimal Approach Velocity of an End-Effector to the Environment, *Advanced Robotics*, **8-2**, (1994) 123-137.
- (12) K. Kitagaki and M. Uchiyama, Robot Control System ARS/A for Research, *Int. J. of Robotics and Mechatronics*, **2-5**, (1991) 404-410.
- (13) Y. Tsumaki and M. Uchiyama, A Model-Based Space Teleoperation System with Robustness against Modeling Errors, *Proc. of 1997 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Albuquerque, New Mexico, (1997) 1594-1599.