

## 人と安定に力学的相互作用を行うことのできる 仮想環境の実現

### Stable Interaction between Virtual Environment and Human Operator

○竹尾光治, 小菅一弘

○Koji Takeo and Kazuhiro Kosuge

東北大学

Tohoku University

キーワード： 遠隔操作(Teleoperation), 仮想環境(Virtual Environment), ハプティックインターフェイス  
(Haptic Interface)

連絡先： 〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学大学院工学研究科機械知能工学専攻

竹尾光治, Tel: (022)-217-6917, Fax: (022)-217-6917, E-mail: takeo@irs.mech.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

近年, 情報インフラストラクチャの整備が進むにつれ, 遠隔操作技術の様々な分野への応用が考えられてきている<sup>[6][7][8]</sup>. 一般に, ロボットマニピュレータの遠隔操作システムで広く用いられているバイラテラルフィードバック制御では, 通信に時間遅れを伴う場合にシステムが不安定になることが知られている<sup>[1]</sup>. 時間遅れのある状況下でもシステムの安定性を補償する制御系も提案されている<sup>[2][3]</sup>が, 時間遅れが大きい場合には効率的に作業を行うことができないと言難い.

一方, 近年の計算機技術の著しい発達に伴って, 従来, 宇宙開発など特殊な分野でのみ利用が可能であった人工現実感が広く利用できる環境が整いつつある. 現在, 計算機の中に創り出

された仮想的な世界(仮想環境)人との相互作用は, 主として視覚や聴覚を介して行われているが, 人と環境との力学的相互作用を実現するためのハプティックインターフェイスの開発も進んでおり<sup>[9]</sup>, 仮想環境の応用範囲を広げるものとして期待されている. 現在行われているハプティックインターフェイスの研究は, 新しいインターフェイスの開発が主で, 人がハプティックインターフェイスを介して安定に仮想環境と相互作用をするために, インターフェイスや仮想環境をどのように構築するべきかについてはほとんど研究がなされていない.

視覚や聴覚を用いたインターフェイス<sup>[6][7][8]</sup>と異なり, ハプティックインターフェイスを介して人と仮想環境が力学的相互作用を行う場合, 人と仮想環境との間に一種のフィードバッ

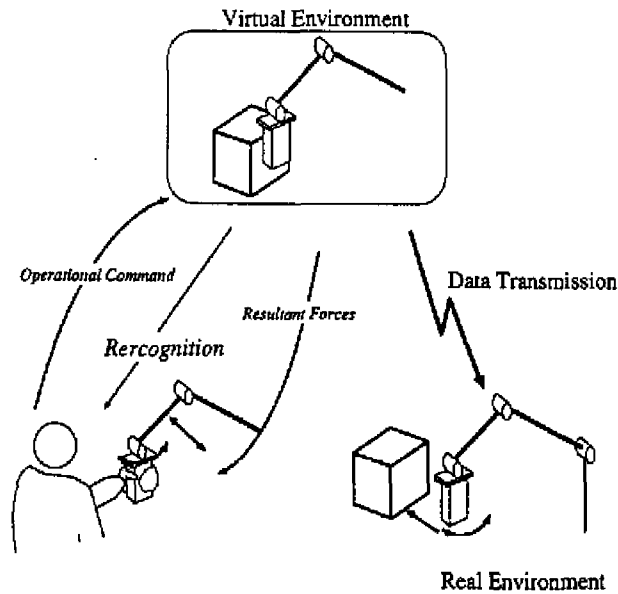


Fig. 1 仮想環境を用いた遠隔操作システム

グループが形成されることになるため、ハプティックインターフェイスの利用を考慮せずに構築された仮想環境では、安定性などの面で不具合が生じることが考えられる。本研究では仮想環境と人が安定に力学的相互作用を行うための仮想環境及びハプティックインターフェイスの構築法を提案する。

## 2. 仮想環境の構築

本稿で考える遠隔操作システムをFig.1に示す。オペレータは仮想環境に対して作業を行いスレーブアームはオペレータの仮想環境に対する作業データを基に実環境に対して作業を行う。

まず、仮想環境における物体の動特性を以下のように定める。

$$F_o + F_e = M_v \ddot{x} + B_v \dot{x} + K_v x \quad (1)$$

なお、

$x$ : 物体の位置, 姿勢を表す一般化座標

$F_o$ : オペレータの操作力

$F_e$ : 環境からの反力

$M_v$ : 物体の慣性マトリクス

$B_v, K_v$ : 環境の粘性, 剛性マトリクス

である。式(1)の動特性は必ずしも実環境における対象物系の実特性である必要はなく、オペレータが作業をしやすい特性を与えることができる<sup>[4]</sup>。

次に、マスターアームについて考える。前述した一般化座標  $x$  を用いてマスターアームの動特性が次式で表されるものとする。

$$\tau = M_m \ddot{x} + G_m(x, \dot{x}) \quad (2)$$

なお、

$\tau$ : アームへの一般化入力

$M_m$ : アームの慣性マトリクス

$G_m$ : コリオリ力, 遠心力などの非線形項

である。式(1), 式(2)より、次式のように  $\tau$  を与えることで、マスターアームは式(1)のような見かけの動特性を持ち、オペレータは、式(1)のダイナミクスを通して作業を行うことになる。

$$\begin{aligned} \tau &= M_m \ddot{x} + G_m(x, \dot{x}) - F_o \\ &= M_m \{ M_v^{-1} (F_o + F_e) - M_v^{-1} (B_v \dot{x} + K_v x) \} \\ &\quad - F_o + G_m(x, \dot{x}) \end{aligned} \quad (3)$$

## 3. システムの安定性

オペレータが式(3)のように制御されたマスターアームを用いて仮想環境に対して作業を行うことを考える。一般に、人間の動特性を同定することは困難なため、このような人間が介在するシステムにおいて安定性を保証することは難しい。本節では、システムを受動性の概念に基づいて提案したシステムの安定性について考察する。

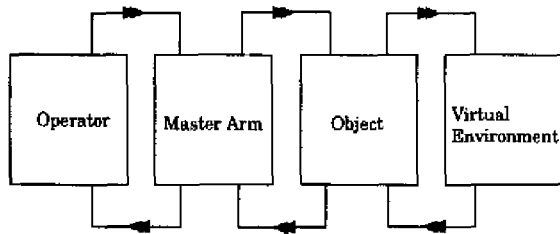


Fig. 2 システムのネットワークダイアグラム

通常、オペレータがシステムを不安定にするような操作を故意に行うことはないと考えられるので、いま、一般性を失うことなくオペレータは受動性の条件を満たすと仮定することができる。また、式(1)、式(2)のような動特性を持つように制御されたマスターアームもそれぞれ受動性の条件を満たすので、オペレータを含めたシステムはFig.2に示すように受動的なサブシステムが直列接続したものとしてあらわすことができる。したがって仮想環境における物体と環境との間の干渉力を受動的に生成することによってすべてのサブシステムが受動性の条件を満たすので、システム全体が受動的となる。従って受動性の観点からシステムは安定であることがいえる。

#### 4. まとめ

本稿ではハプティックインターフェイスを用いて人と安定に力学的相互作用を行うための仮想環境の構築法を提案した。提案する手法ではシステムの受動性の概念を用いて制御系を構成するため、オペレータを含めてシステムを安定に構築することができる。

#### 参考文献

[1] R. J. Anderson and M. W. Spong: "Bilateral control of teleoperators with time delay", IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 34, No. 5, pp. 494-501 (1989).  
 [2] B. Hannaford: "A design framework for teleoperators with kinesthetic feedback", IEEE Transactions

on Robotics and Automation, Vol. 5, No. 4, pp. 426-434 (1989).

[3] K. Kosuge, T. Itoh and T. Fukuda: "Scaled telemanipulation system with communication time delay", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2019-2024 (1996).  
 [4] K. Kosuge, K. Takeo, T. Fukuda, et al.: "Unified approach for teleoperation of virtual and real environment, -manipulation based on reference dynamics-", Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 938-943 (1995).  
 [5] T. Kotoku, K. Takamura and K. Tanie: "A virtual environment display with constraint feeling based on position/force control switching", Proceedings of 3rd IEEE International Workshop on Robots and Human Communication, pp. 255-260 (1994).  
 [6] 光石, 正田, 寺谷, 堀他: "インターネットを用いたテレ・マニファクチュアリングの試み", 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol. 2, pp. 633-634 (1994).  
 [7] M. Mitsuishi, T. Hori, H. Kuzuoka and M. Teratani: "Cooperative tele-machining and tele-handling system for multiple operators - towards a tele-technology transfer system -", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1706-1713 (1996).  
 [8] M. Mitsuishi, N. Sugita, T. Nagao and Y. Hata-mura: "A tele-micro machining system with operational environment transmission under a stereosem", Proceedings of the 1996 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2194-2201 (1996).  
 [9] T. Yoshikawa and A. Nagura: "A touch and force display system for haptic interface", Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3018-3024 (1997).