

# テレ・マシニングにおける操作システムの研究

東 豊一郎・光石 衛・割澤 伸一 (東京大学・工学部)

**Abstract:** This paper describes a tele-machining system using a three degree-of-freedom joystick to enhance the user interface. In the proposed system, the control mode is switched in accordance with the desired mode of operation of the master-slave system. Position and speed information from the joystick is mapped to the motion of the machining center while the tool is approaching to the workpiece. Sensed information portraying the state of the cutting operation is transferred in the opposite direction, to the joystick system, by mapping the multi-axis force information obtained in the cutting zone while the machining operation is actually being executed.

**Keywords:** tele-machining system, three degree-of-freedom joystick, master-slave system, force information, machining state communication, user interface

## 1. はじめに

人工現実感技術やテレ・オペレーション技術の進歩によりオペレーション・ルームとマシン・サイトとが空間的に異なる場所にあつたり、人間が通常存在する世界とは全くスケールが異なつたり、あるいはその世界を支配する物理法則が違ふ世界であつたりしても、そこで物を操作・加工することが可能になりつつある。このようなシステムにおいて、あたかもその場にいるかのような感覚で加工ができるシステムが必要とされている。この環境を実現するシステムを本論文では加工の臨場感通信システム [1~7] とよぶ。本論文では加工の臨場感通信システムの操作性を向上させるために力覚を用いた操作システムについて述べる。

これまでもテレ・イグジスタンスやテレ・プレゼンスを実現するため、マスタ・スレーブ・システムの開発が行なわれてきた [8~11]。マスタ・スレーブ・マニピュレータにおいてスレーブが物を掴んだ時にマスタ側に反力として適切に返ってくるようなバイラテラル・システムを実現するため、マスタとスレーブの位置偏差で両方を位置制御す

る対称型や、マスタ側は力の偏差による力制御をスレーブ側は位置の偏差による位置制御をおこなう力帰還型などが研究されている。また、さらによい特性の制御を目指して開発された方法にインピーダンス制御型がある [12~14]。本論文では、テレ・マシニングシステムにおける操作システムの必要性、加工モードの分類、各モードに対応した制御方法を述べる。また、テレ・マシニング・システムのハードウェアおよびソフトウェアの構成法について述べる。

## 2. 加工の臨場感通信システムとは

加工の臨場感通信システムとは、操作者と加工機械および工作物が異なる世界にあるときに、操作者にあたかもその場で加工をしているかのように感じさせるシステムである。

さて、本論文において「加工における異なる世界」とは、人間が備える感覚器官では直接知覚することができない遠隔地や微小世界、あるいは、真空中、宇宙空間、水中等の環境を意味する。これらの世界と人間の存在する空間とを

---

Operation System for Tele-Machining  
MITSUISHI Mamoru, HIGASHI Toyochiro, WARISAWA Shin'ichi  
(Faculty of Engineering, the University of Tokyo)

加工反力、加工熱、加工音、加工状態（視覚）等の情報と機械の制御情報とによって、有機的に結合するのが本システムである。このような環境に設置された対象を加工、操作しようとするとき次のような問題点が生じる。

1. 対象が遠隔地に存在する場合、通信が光速であっても無視できない遅れ時間を生じる。
2. 対象が真空中に存在する場合には、工作物から加工音が伝わってこない。
3. 微小世界では支配する物理法則が異なる。具体的には、慣性力よりも摩擦や粘性力、静電気力の影響が大きくなり、人間が通常存在する世界の感覚では微小世界の対象を自由に操作できない。

これらの諸問題を克服するシステムとして加工の臨場感通信システムを実現する。このシステムを用いることによって、以下の利点が生じる。

1. 対象となる工作物がどこに存在していても、同じ感覚で操作することができる。
2. 対象となる工作物がどのような大きさのものであっても、同じ感覚で操作することができる。
3. 対象となる工作物がどのような大きさで、どこにあっても、同じオペレーション・ルームで作業をすることができる。

以上の利点をもう少し詳しく見ていく。

### (1) 操作者と工作物の位置の関係

加工の臨場感通信システムが完成するとオペレーション・ルームとマシン・サイトの物理的な位置関係はもはや問題とならない。オペレーション・ルームとマシン・サイトとが地球上のどこに存在していても、あるいは、宇宙空間に存在していても操作可能となる。これによって、世界中から場所を問わず加工を行なうことが可能となる。

### (2) 操作者と工作物の相対的大きさの問題

従来、微細加工をする際には、例えば電子顕微鏡による視覚情報のみを頼りに加工を行なっていたが、本システムが完成するとあたかも手で扱っているかのような加工を行なうことができる。これにより、マイクロあるいはナノ・テクノロジーの分野が実用化され、誰もが容易に加工・組立・操作を行なうことが可能となる。

### (3) オペレーションルームの同一性

テレ・マシニングおよびマイクロ・ハンドリングを可能とするオペレーション・ルームは類似性が強い。従って、一つのオペレーション・ルームで遠隔地にあるマシン・サイトでの加工を行なうことも可能であるし、マイクロ・マシニングやハンドリングを行なうことも可能となる。

これらの特徴を持つシステムが本論文で提案する加工の臨場感通信システムである。

本論文では加工の臨場感通信のうち、特にマルチセンサ融合型マシニング・センタの遠隔操作システムについて述べる。図1にマシニング・センタを遠隔操作する際のシステム概念図を示す。

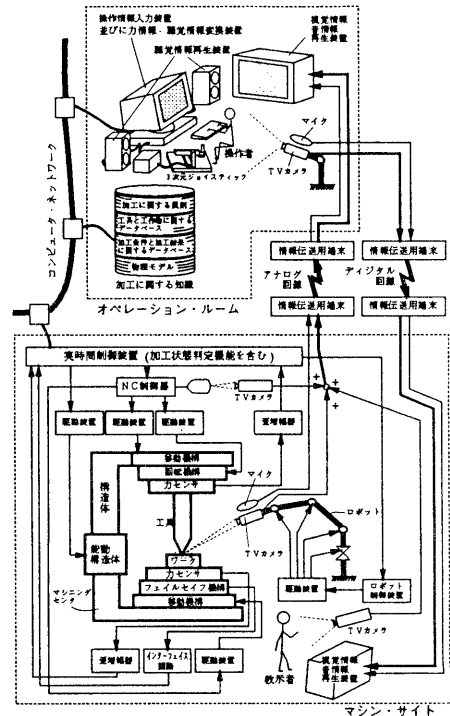


図1: マルチセンサ融合型マシニング・センタの遠隔操作システム

## 3. テレ・マシニング・システムにおける操作システムの必要性

オペレーション・ルームからの操作をワークステーションのディスプレイ上のパネルで方向・距離を入力することによって行なう場合には、マシニング・センタの座標系を理解していなければならない。このため、誤操作が発生する可能性が高い [15,16]。

この問題を解決するため、人間が実際に工具を使って加工する時のことについて考察する。加工とは「工作物に工具を接し、力を与え、かつ工具と工作物との相対的運動によって工作物を目的の形状にする操作」といえる。原始的には工具と工作物を持っているのは手である。手は3次元の位置がわかり、また力覚、触覚、温覚といった感覚を備えている。したがって、手を媒介することによって、位置を直観的に知ることができることはもとより、加工反力によってもたらされる情報は非常に多くの情報を操作者に与

えている。たとえば、手に返ってくる振動によって加工状態が分かる。また、加工の際の力加減といったものも感覚的に制御することができる。

そこで操作者の手からの力情報を受け取り、操作者に工具の位置や反力をフィードバックするような装置を導入することによって、加工の臨場感通信システムのユーザ・インタフェースを向上させる。

#### 4. 加工における操作システムの特徴

ここでは、マシニング・センタを用いた切削加工および研削加工について考える [17]。表 1 にマシニング・センタで主に用いられる加工について示す。

まず、マシニング・センタの動作状態には加工を行なっている時と早送り時があるが、一般に移動速度が異なる。加工時には工具の送り速度はさほど大きくないが、早送り時にはすみやかに目的の位置まで工具を移動させることが目的であるため工具の移動速度は通常大きい。また、加工中でも加工の種類によって工具の移動方向が制限されることが多い。たとえばドリル加工で鉛直方向のみに工具を動かすことがほとんどである。

工作機械の位置精度と人間の手の精度を比べれば、あきらかに手の精度が低い。そのため手の動きをそのままマシニング・センタに伝えても満足な加工が行なえるとは思えない。そこで双方の精度の差を補うためには手の動きを縮小して伝えたり、ある自由度については動作を拘束したり、また、プログラミング等によって精度よく動作させる必要がある。

表 1: マシニング・センタの動作

動作状態		送り方向	拘束される自由度	移動速度	
早送り中		任意	なし	大	
		鉛直方向	水平平面		
		水平平面	鉛直方向		
加工中	切削加工	ドリル加工	鉛直方向	小	
		フライス加工 (スクエア エンドミル)	水平平面		鉛直方向
	加工	フライス加工 (ボール エンドミル)	任意		なし
			水平平面		鉛直方向
		鉛直方向	水平平面		
	研削加工	任意方向	なし		

つぎにマシニング・センタを制御する方法について述べる。マシニング・センタの動作次の2つに大別される。

- 「早送り中」: 工具と工作物が離れている。
  - 「加工中」: 工具と工作物が接しており、両者の間に加工力と加工反力が働いている。
- 「早送り中」は工具と工作物が接触していない。したがっ

て、人間の手からの力情報に従ってなんらかの方法で工具を移動させればよい。

「加工中」はさらに2つのモードに分けられる。切削加工の場合には工具の移動方向や速度を指定する。つまり「位置制御」である。一方、本論文で提案する操作システムでは操作者の手からの力情報を検知し、また反力を返すアクチュエータを持っている。したがって、手から操作システムを通じて工作物に加工力が伝え、これによって工作物が加工され、反加工力を送り返す、といった「力制御」を行なうことも可能である。研削加工ではこのモードが有用である。

位置制御による加工では、工具の移動開始位置、終了位置を加工の操作システムを用いて指定することによって操作性が向上することが考えられる。実際に加工を始めると加工の操作システムは指示を与えることはできないが、工具位置をトレースして操作者に工具位置情報を伝えたり、加工状態が悪化した場合には振動を操作者に伝えることによって危険であることを伝えろといった情報提示装置として積極的に用いる。

#### 5. 操作システムの制御

前節で述べたように、マシニング・センタの制御モードは、早送り(加工反力を発生しない動作)、位置制御加工、力制御加工の3つに大別される。ここでは、これらの制御に必要な制御法を述べる。

- 加工反力を発生しない動作モード

「加工反力を発生しない動作」モードでは工具と工作物とが接触していない。すなわち、加工機械はオペレーション・ルーム側からの位置制御や速度情報によるオープン・ループである。したがって、オペレーション・ルーム側で操作者の手からの力情報あるいは位置情報を工具の位置情報に変換して加工機械に送ればよい。

ここでは、マシニング・センタを「重い」感じで動作させることを考える。通常、工作機械は歯車や潤滑油などの粘性項が大きいので、速度は力に比例するというモデルを用いる。すなわち、

$$V_s = \frac{F - F_c}{B_s}$$

である。ここで  $V_s$  は工作機械の送り速度、 $F$  は操作者の手の力、 $F_c$  は操作者に対する反力、 $B_s$  は粘性係数を表している。

- 位置制御加工モード

あらかじめ工具の経路が決まっている場合には、マシニング・センタおよび3次元ジョイスティックとも位置制御のオープンループとなる。この場合、3次元ジョイスティックに設けられた力センサは加工の開始・終了の指令などには使用するが、力センサに操作者が作用させる力によって、加工力が変化するという制御は行なわない。また、加工機械に組み込まれた力センサ

からの情報によってびびりが生じていると判定された場合には故意に3次元ジョイスティックの位置制御に外乱を加えて振動を起こさせ、びびりの臨場感を伝える。

#### ● 力制御加工モード

このモードでは、加工力を伝え、かつ加工反力を手で受けて加工をしていく、という意味から考えて、いわゆるバイラテラル制御が適用できる。

インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システムを用いて力制御を行なうが、ここではマスタとスレーブの間のコミュニケーションを表す式を力帰還型に設定し、力帰還型の制御を行なう。

本論文で用いたマシニング・センタは位置制御によってしか制御ができないため、力を位置情報あるいは速度情報に変換しなければならない。ここでは「加工反力を発生しない動作モード」と同様に、粘性項が大きく速度が力に比例するモデルを適用する。

## 6. 操作システムのハードウェア

操作システムを構築するためには、オペレーション・ルーム側に力センサと位置センサとアクチュエータとをもった操作用のハードウェアが必要である。また、マシン・サイト側の工作機械にも同様に力センサと位置センサを搭載し、外部からその動作を制御できる必要がある。操作者側のハードウェアとして、3次元ジョイスティック(図2、3)を製作した。

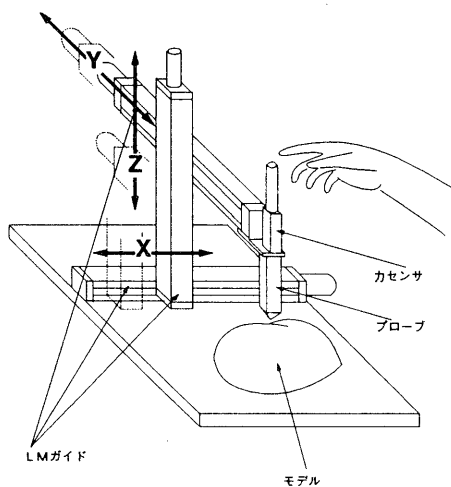


図2: 3次元ジョイスティック

3次元ジョイスティックはマシニング・センタの座標系が直交座標系であるので、それにあわせて直交座標系とした。各軸はリニア・ガイドとボールネジを使用した直動機構を組み合わせたLMガイドを用いている。LMガイドは構造

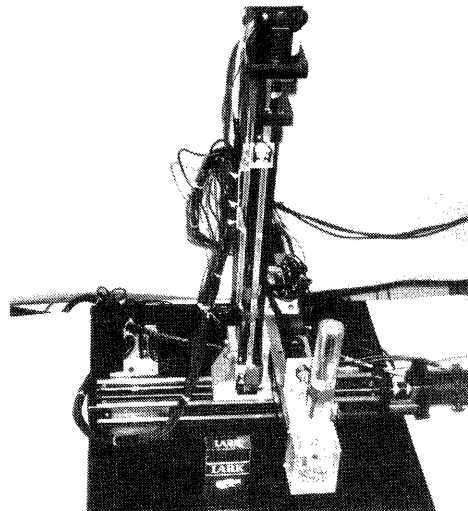


図3: 3次元ジョイスティック

体を兼ねるため、全体の構造が簡単になる。ジョイスティックの動作は速度制御型のモータ・ドライバにより、DCサーボ・モータを駆動することによって行なう。

人間の力を検出するためには力センサが必要である。本論文では平行平板構造を3つ組み合わせた歪ゲージ式センサを製作した。力センサからの出力はA/D変換され、制御用コンピュータに取り込まれる。

操作システムはその性格上、リアルタイムに制御プログラムを実行する必要がある。本論文では操作システムの制御にリアルタイムOSを使用している。MC 68030を採用した制御コンピュータはイーサネット・ポートが装備されていて、ネットワーク環境で他のコンピュータから使用することができる。

本論文で用いた加工機械(マシニング・センタ)は、直行する3軸方向の力を測定できる力センサをもち、また外部のコンピュータからその動作を制御が可能である。さらに、工具の位置を外部コンピュータが知ることができるようになっている。すなわち、インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システムを実現可能としている。

テレ・マシニング・システムの全体的な構成としては、マシン・サイトに存在するビデオカメラとマイクで取り込まれた視覚情報と聴覚情報をそれぞれ専用の回線を通じてオペレーション・ルーム側に送る。また、操作者の加工の指令やビデオカメラを取り付けたロボットへの指示、マシニング・センタの力情報といった情報はワークステーションおよびリアルタイム制御用コンピュータを使い、コンピュータ・ネットワークを通じて伝達される。

## 7. 操作システムのソフトウェア

本論文で示す加工の臨場感通信システムのソフトウェア・システムでは複数のプロセスが同時に動いている。そのうち、「マシニング・センタのコントロール」、「加工力の測定」、「加工の操作システムの制御」、「カメラ搭載ロボットの制御」といったハードウェアに密着したプログラムはリアルタイム処理が可能なハードウェア上で動作する。一方、画面表示やキーボード、マウスからの入力を管理するプロセスは、一般には、オペレーション・ルームにある操作用のワークステーション上で行なわれる必要があるが、本論文では環境として Xwindow System を採用しているため TCP/IP を利用した Ethernet を通じて X Window System の X プロトコルでやりとりをすればよいためオペレーション・ルームのワークステーション上で動作している必要はない。各プロセスは UNIX のソケットを利用し、見かけ上多対多の通信が可能なサーバを介して通信を行なっている。

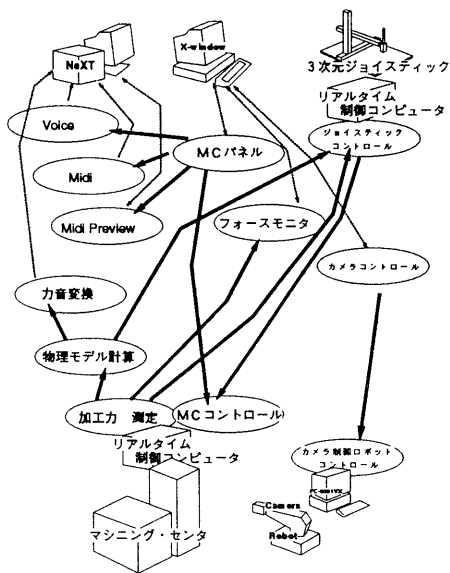


図4: テレ・マシニング・システム

## 8. 実験および今後の課題

本論文で述べた3次元ジョイスティックによる操作システムを用い、実際に遠隔操作実験を行ない、系がスムーズに動作することを確認した。

今後以下の問題点を解決しなければならない。

本論文ではオペレーション・ルームとマシン・サイトを結ぶコンピュータ・ネットワークとしてイーサネットを使っている。そのため、近距離であっても時間遅れが発生する可能性が大きい。また、マシニング・センタは質量が大きく、動作指令を与えてから実際動くまでに数100ms程度の

時間遅れがある。さらに今後、衛星回線を用いた実験を行なう場合にはさらに時間遅れが増大する。工具の移動量・速度をあたえる位置制御では、時間遅れがあっても加工自体は問題がないが、力制御モードを使った場合には、時間遅れによって操作性が低下することが予想される。このような問題を解決する必要がある。

## 9. おわりに

本論文では、臨場感通信機能をもつテレ・マシニング・システムにおける操作システムの必要性、動作モードの分類、各モードに対応した制御方法を述べた。また、これを実現するハードウェア、ソフトウェア・システムの構築法を示した。実験により、システムの有効性と今後解決すべき問題点を抽出した。

## 参考文献

- [1] 光石, 葛岡, 割澤, 畑村, 長尾, “加工の臨場感通信システムの試み,” 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.503-504, 1990.
- [2] 光石, 割澤, 長尾, 畑村, “異なる世界を結ぶ加工システム,” 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.611-612, 1991.
- [3] 光石, 長尾, 畑村, “臨場感をもつ遠隔地からの加工システムの試み,” 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.609-610, 1991.
- [4] 光石, 割澤, 閑念, 畑村, 長尾, “超環境を結ぶヒューマン・フレンドリな生産システム,” 7th Symposium on Human Interface, pp.179-186, Kyoto, Japan, 1991.
- [5] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., Nagao, T. and Kramer, B., “A User-Friendly Manufacturing System for Hyper-Environment,” *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nice, France, 1992 (will appear).
- [6] Hatamura, Y., Nagao, T., Mitsuishi, M., Nakagawa, G., Sugishita, H. and Kramer, B., “A Fundamental Structure for Intelligent Manufacturing and Its Application to a Machining Center,” *The Eighth International IFIP WG5.3 Conference (PROLAMAT'92)*, Tokyo, Japan, 1992 (will appear).
- [7] Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y. and Warisawa, S., “Real-time Machining State Detection Using Multi-axis Force Sensing,” *Annals of the International Institution for Production Engineering Research (CIRP Annals)*, 41, 1992 (will appear).
- [8] 高瀬, 若松, “知能的テレオペレーションシステムの構成法とその要素応用,” *日本ロボット学会誌* Vol.2, No.6, pp.566-575, 1984.

- [9] 古田, 小管, “ 仮想内部モデルに基づくマスタスレーブ  
マニピュレータの制御,” 計測自動制御学会論文集, Vol.24,  
No.2, pp.176-182, 1988.
- [10] 古川, 横小路, “ マスタ・スレーブシステムの操作性と  
安定性の解析,” 第5回日本ロボット学会学術講演会予  
稿集, pp.109-112, 1987.
- [11] 新井, 中野, “ 異構造マニピュレータ間におけるバイラ  
テラルマスタスレーブ,” 日本ロボット学会誌, Vol.4,  
No.5, pp.469-479, 1986.
- [12] 館, 榊, “ マスタスレーブロボットにおける力制御シ  
ステムの設計法” 日本ロボット学会誌, Vol.9, No.6,  
pp.766-772, 1991.
- [13] 館, 榊, “ インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・シ  
ステム (I) – 基本原理と伝送遅れへの応用 –,” 日本ロ  
ボット学会誌, Vol.8, No.3, pp.241-252, 1990.
- [14] 榊, 館, “ インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・シ  
ステム (II) – 操作感の変更と操作能力の拡張 –,” 日本  
ロボット学会誌, Vol.8, No.3, pp.253-264, 1990.
- [15] Mitsuishi, M., Nagao, T., Hatamura, Y., Kramer, B.  
and Warisawa, S., “A Manufacturing System for the  
Global Age,” *The Eighth International IFIP WG5.3  
Conference (PROLAMAT'92)*, Tokyo, Japan, 1992  
(will appear).
- [16] Mitsuishi, M., Warisawa, S., Hatamura, Y., Nagao, T.  
and Kramer, B., “Trial of a Remote Reality-Based  
Manufacturing System in Japan Operated from the  
United States,” *1992 Japan-USA Symposium on Flex-  
ible Automation*, San Francisco, U.S.A. 1992 (will  
appear).
- [17] Mitsuishi, M. et al., “Development of a User Friendly  
Manufacturing System,” *Proc. Intern. Conf. on  
Manufacturing Systems and Environment (MSET'91)*,  
pp.111-118, Tokyo, 1990.