

### 3.4.3 操作環境管理層に属するエージェント

この層に属するエージェントは加工機械一台につき一組のみ存在する。操作情報入力・情報提示層と制御・監視・判定層の間に位置し、複数の操作者に対して加工機械の操作をおこなう環境を開設する。その意味で、ここで言う「操作環境」はこれまで本論文で用いてきた操作環境—加工機械の存在する環境—とは異なる使い方をしている。

この層のエージェントはさらに、すべての情報の流れを統括し、操作情報入力・情報提示層から送られる加工機械の制御情報の排他制御をおこなったり、現在の加工機械の制御権や各操作者の操作優先度の管理をおこなう。具体的には

- 制御情報管理エージェント
- 制御権管理エージェント

から成る。

以下に各エージェントの機能を述べる。

#### (1) 制御情報管理エージェント

制御情報管理エージェントは、サーバ・エージェントがオペレーション・ルームから受け取ったメッセージを実際に加工機械に送るかどうかを決定するエージェントである。

サーバ・エージェントがオペレーション・ルームからメッセージを受け取ると、制御情報管理エージェントはそのメッセージを送り出した操作者およびメッセージに含まれるコマンドを解釈する。同時に制御権管理エージェントから現在の加工機械の制御権の状態を受け取る。

オペレーション・ルームからのメッセージに含まれる可能性のあるコマンドはp.59に示したように以下の通りである。

- 加工機械の制御情報
- 主軸回転速度の変更
- 加工機械の動作倍率の変更
- 生徒役の操作者の操作優先度の変更\*
- 新規に接続要求を出した操作者の接続許可\*
- 加工機械制御用サーバ・エージェントの終了\*

- 操作者グループへの接続要求
- 制御権の獲得 / 開放
- 操作の終了

このうち「\*」をつけたものは教師役の操作者のみを送ることができるメッセージであり、また、加工機械に送る必要があるメッセージは前三者である。

制御情報管理エージェントは、以下のことを調べる。

1. 有効なコマンドかどうか
2. 加工機械に送る必要があるメッセージか
3. 現在加工機械の制御権を誰も奪っていないか
4. (制御権が奪われている場合には) メッセージの送り手か
5. (制御権が奪われており、かつメッセージの送り手ではない場合には) どちらの操作者の操作優先度が高いか

ただし、現在制御権を持っている操作者よりも操作優先度の高い操作者からメッセージが送られた際には、制御権の獲得メッセージのみを受け付けるものとする。

制御情報管理エージェントではこれらの条件判断をおこなうが、実際には条件分岐の途中で不可となった場合にはそこで判断を打ち切り、そのメッセージは捨てる。そして、これらのすべての条件に通ったメッセージのみが加工機械およびその他のオペレーション・ルームに送られる。

## (2) 制御権管理エージェント

制御権管理エージェントは、サーバ・エージェントがオペレーション・ルームから受け取った

- 制御権獲得 / 開放メッセージ
- 操作優先度変更メッセージ

の二つのメッセージを処理する。すなわち、これらのメッセージを処理して自らが保持している制御権情報および操作優先度情報を更新する。

また、このエージェントは、制御情報管理エージェントに対して現在の制御権の状態—獲得されているか否か—を知らせる。制御権が獲得されている場合には、獲得している操作者の情報と同時にその操作優先度も知らせる。

なお、実際には、サーバ・エージェント、制御情報管理エージェント、および、制御権管理エージェントはすべて一つのプロセスの中に存在している。これら三つのプロセスを別々に実行し、それぞれの間をソケットや共有メモリ等の手段で接続することも考えたが、(i) 別々のプロセスに分割することのメリットがないこと、(ii) この操作環境管理層に属するエージェントはその他の階層のエージェントと比較してその機能が単純であること、などの点で一つのプロセスの中にまとめることにした。

サーバ・エージェント部分はループの中を回り続け、ソケットにメッセージが到着していれば、それを読む。そこで読み込まれたメッセージは制御情報管理エージェント部分で解釈され、加工機械に送るべきかどうかはそこで判定される。

これからもわかるように、サーバ・エージェントは、すべての到着メッセージを同等に扱い、メッセージはラウンドロビン (round robin) 方式で到着順に処理される。そのため、3.2節で述べたようにサーバを配置することが必要となる。すなわち、協調加工をおこなう場合には、任意の操作者からのメッセージを同じ頻度で受け取るために、各操作者からの距離は等しいことが望ましい。また、遠隔教育をおこなう場合には、教師役の操作者からのメッセージを生徒役よりも高い頻度で受け取る必要があるために、サーバは教師役の操作者のオペレーション・ルームで動作させることが望ましい。

### 3.4.4 制御・監視・判定層に属するエージェント

この層に属するエージェントは、(i) 操作情報の操作可否を判定すること、(ii) 加工機械を制御すること、(iii) 加工反力を獲得すること、および、(iv) 加工状態を判定し現在の加工状態を監視することを担当する。したがって、各マシン・サイトに一組のエージェント群が存在する。具体的には

- 操作可否判定エージェント
- 加工機械制御エージェント
- 多軸力情報獲得エージェント
- 加工状態判定エージェント

から成る。

以下に各エージェントの機能を述べる。

#### (1) 操作可否判定エージェント

操作可否判定エージェントは、加工機械・工具・工作物の状態を保持し、オペレーション・ルームから送られてきた情報に基づいた操作をおこなってよいかどうかを判定し、すべての条件を満足したメッセージだけを加工機械制御エージェントに送る。

ここで加工機械・工具・工作物の状態とは以下のようなことを指す。

- 「加工機械は動作しているか」 — 加工機械が動作していなければならない
- 「工作物は正しく取り付けられているか」 — 工作物が取り付けられていなければならない
- 「工具は正しく取り付けられているか」 — 工具が取り付けられていなければならない
- 「加工機械の主軸は回転しているか」 — 主軸が回転していないのに工具を動かすのは危険である
- 「加工機械の可動範囲を越えていないか」 — 可動範囲を越えるとシステムにダメージを与える

最後の条件は、たとえば、工作物を取り付けている治具と工具が干渉したりする場合にも可動範囲を越えたと判断する。

これらは2.3.5項で示したフェイルセーフ機能をソフトウェア的に実現したものと考えられるが、もちろん、このエージェントの存在によってハードウェア的なフェイルセーフ機能が不要になるわけではない。なぜなら、ハードウェア的なフェイルセーフ機能は突発的かつ予測不可能な異常に対処することが目的だからである。システムはソフトウェアおよびハードウェアの両面で安全に保つことが望ましい。

## (2) 加工機械制御エージェント

加工機械制御エージェントは、操作可否判定エージェントから受け取った制御情報に基づき加工機械の制御をおこなうエージェントである。ここで言う制御情報とは

- 加工機械の主軸移動指令
- 加工機械の主軸回転数変更指令
- 加工機械の動作倍率変更指令

を指す。実際には、主軸移動指令と主軸回転数変更指令は加工機械に送られるが、動作倍率変更指令は加工機械制御エージェント内に持つ動作倍率情報の変更をおこなうだけであり、加工機械に対しては情報を送らない。

動作倍率情報とは操作者がおこなった操作と加工機械との動作倍率をあらわすものであり、たとえば、動作倍率が100の場合には、操作者がジョイスティックを100(mm)移動させた時に加工機械が1(mm)移動するということを意味する。

現在利用可能な加工機械はおおよそ1( $\mu$ m)程度の最小分解能で動作することが可能であるが、当然ながら人間がおこなう動作の最小分解能はそれに比べて非常に大きくせいぜい1(mm)程度である。したがって、操作者が精密な操作をおこないたい場合のために、このように加工機械の動作倍率を可変とすることでそれを可能としている。

## (3) 多軸力情報獲得エージェント

多軸力情報獲得エージェントは、加工機械に取り付けられた加工反力センシング・テーブルで検出された加工反力をシステム内に獲得するエージェントである。獲得した加工反力情報は、次に述べる加工状態判定エージェントに送られて、おこなわれている加工状態を判定するのに用いられる。

現在の実装では5(kHz)のサンプリング周期で加工反力を獲得しているため、理論的には2.5(kHz)までの加工反力波形を再現することができる。また、

利用している加工機械の最高回転数は6000(rpm)であり、すなわち、回転周期は100(Hz)である。そのため、工具一回転あたり50点の加工反力情報を獲得することが可能であり、本システムの目的から考えるとこれで十分である。

#### (4) 加工状態判定エージェント

加工状態判定エージェントは、多軸力情報獲得エージェントによって獲得された加工反力情報をもとに加工状態を判定し、判定した加工状態情報をオペレーション・ルームの情報提示エージェントに伝送するとともに加工機械制御エージェントにも伝送し、マシン・サイト内での加工機械のフィードバック制御を実現している。

実際の加工状態判定方法については5.3.1項で述べるため、ここでは詳細は省略する。

## 第 4 章

### 操作環境伝送型遠隔加工システムを 構成するハードウェア

本章では操作環境伝送型遠隔加工システムを構成するハードウェアについて、まずその概要を述べる。その後、マシン・サイト側のハードウェア、オペレーション・ルーム側のハードウェア、両者を結ぶ情報伝送システムについて詳述する。

#### 4.1 ハードウェア・システムの概要

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、オペレーション・ルームに存在する操作者の入力した操作情報を情報伝送システムを介してマシン・サイトに送り、マシン・サイトでは伝送された操作情報に応じて対象となる加工機械を制御する。また、マシン・サイトで発生した様々な情報を情報伝送システムを介してオペレーション・ルームに送り、オペレーション・ルームでは伝送された情報を適切な形態で操作者に対して提示する。その意味で、システムは図2.1(p.19)に示すような構成を基本としている。すなわち、操作環境伝送型遠隔加工システム全体のハードウェアは大別して以下の3つに分けられる。

- マシン・サイトを構成するハードウェア・システム
- オペレーション・ルームを構成するハードウェア・システム
- マシン・サイトとオペレーション・ルームとを結ぶ情報伝送システム

実際の操作環境伝送型遠隔加工システムでは、マシン・サイト側のハードウェア・システムを構成する要素として、(i) 操作対象となる加工機械、(ii) 加工反力を獲得する多軸力センサ、(iii) 加工異常が発生した時にシステムを安全側に退避するフェイルセーフ機構、(iv) 加工機械を制御し加工反力を処理する実時間制御器、および、(v) 加工現象を獲得する視覚・音センサ等が配置される。また、オペレーション・ルーム側のハードウェア・システムを構成する要素としては、(i) 操作者が操作情報を入力するとともに操作者に加工反力・加工状態を提示するためのジョイスティック、(ii) 加工している映像を操作者に提示するディスプレイ装置、(iii) 加工音を操作者に提示するスピーカー装置、(iv) ジョイスティックを制御する実時間制御器が用意される。

これらの機能を有する操作環境伝送型遠隔加工システムのハードウェア構成の概要は図2.4(p.35)に示した。

以後、本章では本研究で構築した操作環境伝送型遠隔加工システムについて、その実際の機器構成を示す。

## 4.2 マシン・サイト側のハードウェア

### 4.2.1 外部制御可能な加工機械

現在、加工現場(工場)で用いられている加工機械はその多くがNC(Numerical Control)により制御されている。これは、予め加工のための様々なデータ、たとえば、主軸回転数の設定、主軸の回転開始/停止指令、主軸移動量や移動速度の設定などの情報をNCプログラムとして用意しておき、それを紙テープやフロッピー・ディスク、コンピュータ・ネットワーク等を介して加工機械のコントローラに送ることで加工をおこなうという、いわゆるバッチ処理的な加工であることが多い。一方、操作環境伝送型遠隔加工システムでは、オペレーション・ルームに存在する操作者がマシン・サイトに存在する加工機械での加工中に発生する加工状態をモニタリングしながら、主軸回転数や主軸の移動速度、移動方向等の加工に必要なパラメータをリアルタイムに変更しながら加工を続行する必要がある。

そのため、本研究ではヤマザキマザック(株)製のマシニング・センタVQC-15/40を加工機械に使用した。一般にマシニング・センタは様々な種類の加工を単一の機械で実現する目的で登場した加工機械であり、自動工具交換装置(Auto Tool Changer; ATC)に複数の工具を備えることで多くの加工を自動的におこなうことができる。本研究で使用しているマシニング・センタは、汎用のNCコントローラに加えて特別に外部入出力端子を装備しており、この端子を通じて外部コンピュータから主軸回転数や主軸回転の開始/停止、主軸移動量や移動速度の設定をおこなうことが可能となっている。また、同時に、マシニング・センタから異常信号、主軸回転数、工具位置に関する情報をこの端子から取り出すことも可能である [157]。

このように、外部入出力端子を装備することにより、このマシニング・センタは4.2.4項で示す実時間制御用コンピュータにより外部制御を実時間でおこなうことが可能となり、さらに、実時間制御用コンピュータに与える制御情報を遠隔地から伝送することで、本研究で要求される遠隔地からの加工条件変更機能を実現することができる。

マシニング・センタの概観を図4.1に、仕様を表4.1に示す。



図 4.1 マシニング・センタ (VQC-15/40) の概観

表 4.1 マシニング・センタ (VQC-15/40) の仕様

テーブル寸法	900×410 [mm]
軸移動量	560 [mm] (X軸) 410 [mm] (Y軸) 381 [mm] (Z軸)
位置決め精度	± 3 [ $\mu$ m]
繰り返し位置決め精度	± 1 [ $\mu$ m]
早送り速度	18 [m/min] (X, Y軸) 14 [m/min] (Z軸)
切削送り速度	1 ~ 5000 [mm/min]
主軸回転数	60 ~ 6000 [rpm]
最大主軸トルク	3.6 [kg·m]
工具収納本数	16 [本]
ツール・シャンク形式	MAS BT-40
機械重量	4200 [kg]

#### 4.2.2 加工反力センシング・テーブル

加工の知能化を進める立場 [73,98,103,156-158]では、現在おこなわれている加工の状態を実時間で観測しながら、加工条件を自律的に変更していくことを試みる。一般に、切削力と加工現象とは密接な関係があるため、加工状態を観測するための情報として加工反力が用いられることが多く、そのため、 $x, y, z$ の3軸方向の力および各軸回りのモーメントを測定する多軸力センサが多く用いられている。

本研究で開発した操作環境伝送型遠隔加工システムでも加工反力情報は以下の点で重要な役割を果たす。すなわち、

1. 加工反力の予測提示を実現する上で、実際の加工反力情報と提示した予測加工反力情報の比較をおこない、両者の差が大きい場合に予測に用いるデータ・ベース情報を更新する。
2. 加工反力情報を用いて加工状態を判定し、判定した加工状態を振動として操作者に対して提示する。
3. 加工反力情報に対して情報変換を施すことにより、加工表面の状態を操作者に対して提示する。
4. 加工反力情報に対して情報変換を施すことにより、合成した加工音を操作者に対して提示する。

そこで、本研究においても、加工反力情報を収集する装置として本節に示す加工反力センシング・テーブルを用いる。

一般に、多軸力センサには

1. 力やモーメントの各成分が他の成分と干渉することなく検出できること、
2. 剛性・固有振動数が高く、センサを挿入したことで系の力学特性ができるだけ変化しないこと、
3. 熱の発生にともなう温度ドリフトが小さいこと、
4. センサ本体ができるだけコンパクトであること、および
5. コストが安く信頼性が高いこと

等の機能・仕様が要求される。しかし、これらの要求を満たす加工用の多軸力センサはほとんど市販されていないため、筆者の所属する研究室では独自の

加工反力センシング・テーブルを開発している [126,157]。この加工反力センシング・テーブルは、力検出部に薄肉円筒および薄肉円環を利用することで剛性に関する問題に、内部にフィン構造を作り込み放熱効果を高めることで熱に関する問題に対処したものである。図 4.2 にその概観を、図 4.3 にその断面を表した模式図を示す。また、表 4.2 に加工反力センシング・テーブルの定格および剛性を、表 4.3 に固有振動数を、表 4.4 に非干渉化行列を示す。加工機械の構成部品であるボールネジや直線軸受の剛性が一般に約  $100\mu\text{m}$  程度であることより、この加工反力センシング・テーブルの剛性は十分大きいと言える。

表 4.4 に示した非干渉化行列は、歪出力、 $\epsilon_{F_x}, \epsilon_{F_y}, \dots, \epsilon_{M_z}$  (単位は  $\mu\text{St.}$ ) とテーブルに加えられた力・モーメント成分、 $F_x, F_y, \dots, M_z$  との関係を表したものであり、対角成分に対してその他の成分の値が非常に小さいことより、各軸出力間の干渉が小さいことがわかる。また、歪出力と力・モーメントについて直線性と非ヒステリシス性も良好であった。

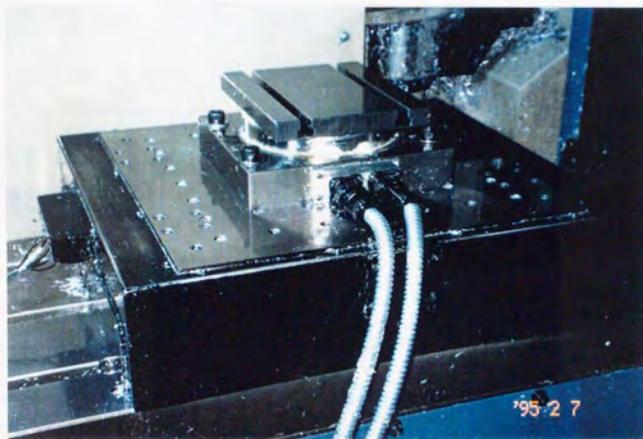


図 4.2 加工反力センシング・テーブルの概観

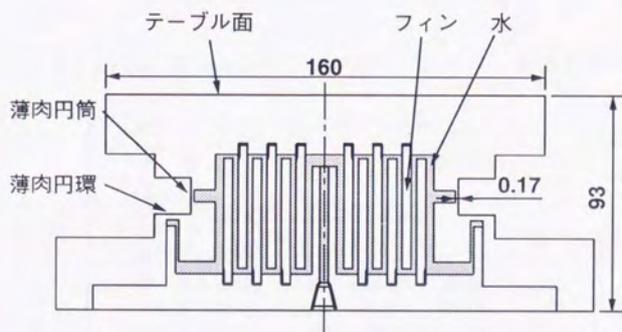


図 4.3 加工反力センシング・テーブルの断面

表 4.2 加工反力センシング・テーブルの定格および剛性

	定格 (N)	力 (N)	変位 ( $\mu\text{m}$ )	剛性 (N/ $\mu\text{m}$ )
x 軸方向	2000	2940	1.5	1960
y 軸方向	2000	2940	1.5	1960
z 軸方向	3000	2940	5.2	565

表 4.3 加工反力センシング・テーブルの固有振動数

	固有振動数 (kHz)
x 軸方向	1.25
y 軸方向	1.08
z 軸方向	1.43

表 4.4 加工反力センシング・テーブルの非干渉化行列

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -4.9031 \cdot J_1 \\ -5.2130 \cdot J_2 \\ -3.4029 \cdot J_3 \\ -0.1137 \cdot J_4 \\ -0.1065 \cdot J_5 \\ -0.4351 \cdot J_6 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0114 & 0.0080 & -0.0055 & -0.0058 & -0.0124 \\ 0.0156 & 1.0000 & -0.0084 & -0.0990 & -0.0085 & 0.0012 \\ 0.0035 & 0.0058 & 1.0000 & -0.0159 & 0.0136 & -0.0167 \\ -0.0224 & 0.0026 & 0.0050 & 1.0000 & 0.0138 & -0.0026 \\ 0.0106 & -0.0238 & 0.0286 & -0.0046 & 1.0000 & -0.085 \\ -0.0003 & -0.0255 & 0.0059 & -0.0011 & -0.0109 & 1.0000 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{F_x} \\ \varepsilon_{F_y} \\ \varepsilon_{F_z} \\ \varepsilon_{M_x} \\ \varepsilon_{M_y} \\ \varepsilon_{M_z} \end{pmatrix}$$

ただし、 $J_1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0)$ ,  $J_2 = (0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0)$ , ... とする。

### 4.2.3 フェイルセーフ・テーブル

操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて、加工機械の操作(加工)は人間がおこなう。このようなシステムではヒューマン・エラーを完全に無くすことは不可能である。また、加工異常は予期せずに発生するものであり、このような場合にもシステムは安全側に遷移するように設計されている必要がある。すなわち、ヒューマン・エラーや加工異常によって加工機械やその周囲に取り付けられた各種のセンサが破壊されることなく、システムを安全側に退避させるようなフェイルセーフ機能が必要である。筆者の所属する研究室では、この目的のためにここで紹介するフェイルセーフ・テーブルを開発した[21,157]。

フェイルセーフ・テーブルは、予め設定された荷重(予圧)に達するまでは剛体として働き、予圧以上の過負荷が作用した場合には自らが大きく変位することで過負荷を吸収する機能を持つ(図4.4)。さらに、変位が生じた際には加工機械に非常停止信号を送り、自動的に加工機械の動作を止める機能も

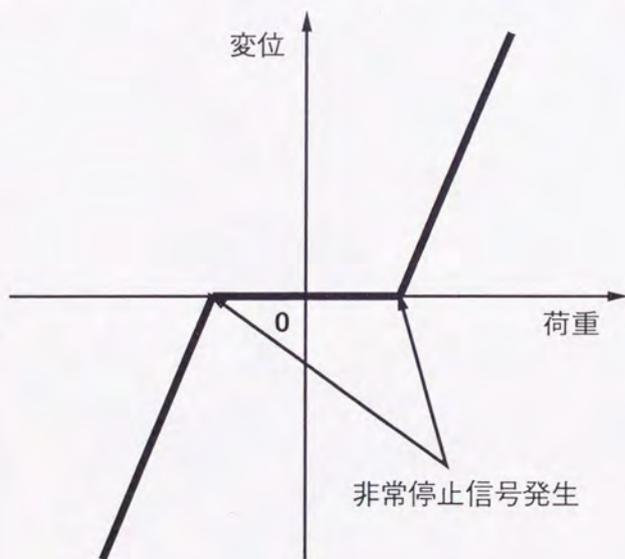


図 4.4 フェイルセーフ・テーブルの力-変位特性

持っている。フェイルセーフ・テーブルの概観は既に図4.2に示してある。その内部は図4.5に示すような構造をしている。

図中に示されているように、 $x$ 、 $y$ 軸方向の複合バネに、それぞれ圧縮と引っ張りの予圧を加えておき、それらを直交する方向に直列に連結することで $x$ 軸方向と $y$ 軸方向のフェイルセーフ動作をおこなわせる。



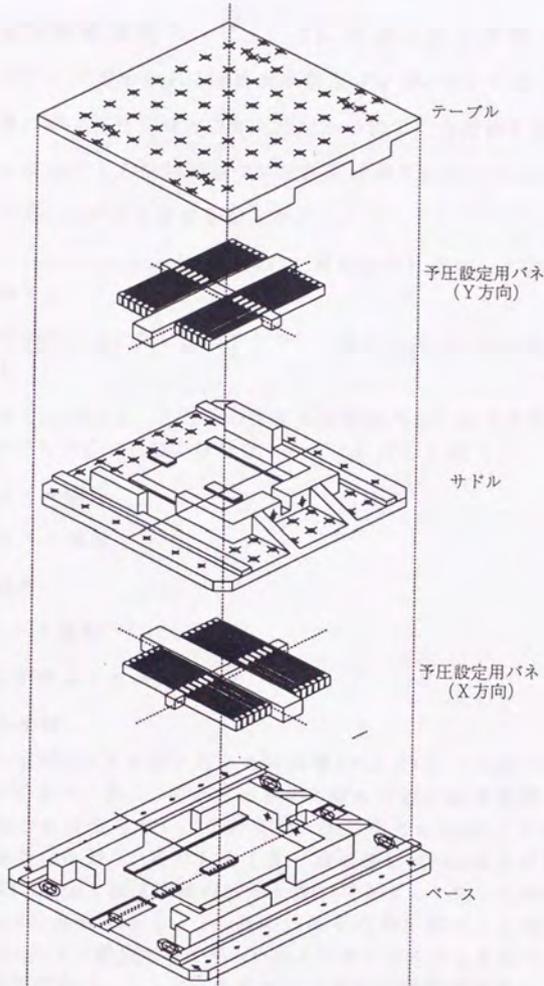


図 4.5 フェイルセーフ・テーブルの構造

#### 4.2.4 実時間制御用コンピュータ

##### 4.2.4.1 実時間制御用コンピュータに要求される機能

マシン・サイトで用いられる実時間制御用コンピュータでは、

- 加工機械に取り付けられた力センサからの加工反力情報を取り込むこと
- 取り込んだ加工反力情報に基づいて加工状態を判定すること
- 他のコンピュータとの通信をおこなうこと
- オペレーション・ルームから送られた制御情報に基づいて加工機械の動作を制御すること
- 加工異常が発生した際に、ソフトウェア的にシステムを安全側に退避させること

が実時間でおこなわれる。これらの作業を実時間でおこなうため、制御用コンピュータのハードウェアおよびソフトウェアに対しては

1. リアルタイム機能
2. マルチタスク機能
3. 入出力機能
4. ネットワーク機能

といった機能が要求される。

##### リアルタイム機能

制御用コンピュータでおこなわれる仕事(タスク)は上に述べたように多岐に渡っており、かつ、それらは個々に極めて短い時間間隔で同時に処理されなければならない。たとえば、加工反力を5kHzのサンプリング間隔で獲得しながら、それらを工具一回転毎に100Hz程度の間隔で処理し、同時に50Hzで加工機械の制御と他のコンピュータとの通信をおこなう、といった具合である。これらの作業を円滑に進めるために、制御用コンピュータ上で動作するオペレーティング・システムにはリアルタイム機能が必要である。さらに、上記のような時間間隔で各タスクを正確に起動するため、用いられるクロックの速度も高速かつ正確であることが要求される。

### マルチタスク機能

制御用コンピュータでおこなわれるタスクは、リアルタイム機能のところでは述べたように、センサ情報の獲得や計算、加工機械の制御、他のコンピュータとの通信など複数のタスクが並行して実行される。したがって、制御用コンピュータ上で動作するオペレーティング・システムにはマルチタスク機能が必須である。さらに、マルチタスクの処理をおこなう上で、各タスクの実行優先度を設定する機能、イベント発生による割り込みで割り込み処理をおこなう機能、複数のタスクに対してCPUの占有時間を割り当てるタイム・スライス処理の実現などの機能も、このマルチタスク機能に含めて考えることができる。

### 入出力機能

操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて、制御用コンピュータはそれ単独で動作するものではなく、必ず外界と情報の入出力をおこなうことが必要である。たとえば、力センサによって検出された加工反力情報をA/D変換器を通して入力したり、ネットワークを介して受け取った加工機械の制御情報をパルス・ジェネレータによって加工機械に出力したりする。そのため、制御用コンピュータは入出力機能を備えていなければならない。

### ネットワーク機能

操作環境伝送型遠隔加工システムのマシン・サイトは、複数のオペレーション・ルームから操作をおこなうことが可能となっている。そのためのソフトウェア群の構成に関する議論は第3章でおこなった。そこでも述べたように、マシン・サイトの制御用コンピュータ上で動作するプロセスはサーバ・エージェントとプロセス間通信によって接続し、オペレーション・ルームからの制御情報を受け取る。したがって、制御用コンピュータはコンピュータ・ネットワークに接続されている必要があり、オペレーティング・システムにはネットワーク・プログラミング機能が実装されていないなければならない。

さらに、加工現場で使用されることを考えると、実時間制御用コンピュータには上に挙げた機能以外にも (i) 耐環境性、(ii) 信頼性、(iii) 拡張性などの性能も必要である。特に拡張性については、(a) オープン・システムとしてハードウェア設計が可能であること、(b) ネットワークへの対応が可能であること、(c) CPUや各種の入出力機器を増設・接続可能であることが挙げられる。オープン・システムのハードウェアとしては、現在、標準バスを採用する傾向

にある。現在主な標準バスとしては、PC/ATで広く使われているISA(*Industry Standard Architecture*)やEISA(*Extended ISA*)、ボード・コンピュータで広く用いられているVME(*Versa Module Europe*) busなどがある。特にVMEbusはモトローラ、モステック、シグネティクス/フィリップス、トムソンCSFが中心となって共同開発したものであり、現在ではその拡張性・汎用性のために実質的にボード・コンピュータの標準となっている[44]。標準バスを使用することは、汎用のDSP(Digital Signal Processor)ボードや各種のI/Oボードを利用することができるため、機能性・経済性の点でも有利である。ネットワークへの応用の点では、現在、工場内LANで用いられているMAP(*Manufacturing Automation Protocol*)の利用も考えられるが、オペレーション・ルームとの接続で広域ネットワーク(Internet)をも利用することを考えると、TCP/IPを用いる方が効率的である。

#### 4.2.4.2 マシン・サイトで用いた実時間制御用コンピュータの構成

以上の機能を満たす実時間制御用コンピュータとして、操作環境伝送型遠隔加工システムではVMEbusを用いたボード・コンピュータを採用した。CPUにはモトローラ社のM68040(クロック速度50MHz)を使い、CPUボードはモトローラ社製のMVME167Bを用いた。メモリは16Mbytes搭載している。ネットワーク・ボードにはモトローラ社製のMVME712Mを使い、Ethernetに接続している。また、パラレルI/Oボードは株式会社アパルデータ製のTVME-342を、A/Dコンバータ・ボードはインターニクス株式会社製のPVME-301を、カウンタ・ボードはコスモシステム社製のVPC-44を利用している。パルス・ジェネレータ・ボードは、筆者の所属する研究室で製作したものである。これらすべてのボードを一台のラックに組み込まれたVMEbusに挿している。

実時間制御用コンピュータでは、リアルタイム・マルチタスキングOSとしてWind River Systems, Inc. のVxWorksを使用している。VxWorksは

##### 1. リアルタイム・オペレーティング機能

高速なコンテキスト・スイッチングが実現されており、さらに、タスクのリスケジューリングや割り込み処理などが柔軟におこなえる。

##### 2. マルチタスク管理機能

メッセージ・キューやパイプを使ったタスク間での同期・非同期通信が容易におこなえ、また、セマフォを用いたタスク間の排他制御が容易に実現できる。さらに、タスクの優先度を自由に設定できることで思い通り

のスケジューリングでマルチタスクでの動作がおこなえる。

### 3. ネットワーク機能

BSD UNIXとソース互換のソケットを介して、他のVxWorksシステムやUNIXシステムとネットワーク透過な通信を実現可能である。具体的には、TCP/IPによるプロセス間のソケットによる接続だけでなく、ネットワーク上のファイル・サーバのハード・ディスクをNFS(Network File System)によってアクセスしたり、rshを用いたりリモート・コマンドの実行、rloginを用いた他のマシンへのリモート・ログイン、RPC(Remote Procedure Call)による遠隔手続き呼び出し等が可能である。

### 4. 入出力機能

UNIX標準のbuffered I/Oを含むソース互換の高速で柔軟な入出力が可能である。

### 5. デバッグ機能

VxWorksでは、ソース・プログラムをUNIXマシン上で作成し、UNIXマシン上でクロス・コンパイルしたりロケータブル・オブジェクト・モジュールを、リンキング・ローダでネットワークを介してロードしながらダイナミック・リンキングをおこなう。そのため、モジュール単位でコンパイル、ロード、実行、デバッグが可能である。また、ソース・レベルでのデバッグや特定タスクへのブレーク・ポイントの設定、シングル・ステップ実行等もおこなえる。

というような特長を持ったリアルタイムOSである。

実時間制御用コンピュータでは、(i)加工反力センシング・テーブルで測定された加工反力情報を歪増幅器で増幅し、A/Dコンバータ・ボードを介して取り込む、(ii)パルス・ジェネレータ・ボードによって加工機械の制御パルスを出力する、(iii)パラレルI/Oボードから加工機械の動作モード信号を出力する、(iv)加工機械に取り付けられたマグネスケールで検出した実際の移動量をカウンタ・ボードを介して取り込む、(v)ネットワークボードによってネットワークに接続し、オペレーション・ルームからの制御信号を受け取ったり、加工反力情報や加工状態情報を送り返したりする、といった作業を、複数のタスクにより実時間でおこなっている。

#### 4.2.5 その他のハードウェア

マシン・サイトには、これまでの説明で述べていないハードウェアも存在する。それらについて、ここで述べる。

##### (1) 歪増幅器

加工反力センシング・テーブルに荷重が加わると薄肉円筒部および薄肉円環部に表面歪が生じ、そこに貼付されたストレイン・ゲージの内部抵抗が変化する。そのため、ストレイン・ゲージで組まれたブリッジ回路の出力電圧が変化し、その電圧の変化から荷重の値がコンピュータで計算される。歪増幅器は、その電圧変化を増幅する装置であり、日本電気三栄株式会社の6M84を用いている。同様の歪増幅器はオペレーション・ルームのジョイスティックに取り付けられた力センサの出力の増幅にも用いられている。

##### (2) 加工映像獲得用ビデオ・カメラ

加工機械の工具と工作物の付近の映像を獲得するために、加工機械の $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向にそれぞれ最低一台ずつのビデオ・カメラを設置した。型式は様々であるが、ほとんどすべてソニー株式会社の家庭用8mmビデオ・カメラを用いている。

また、カメラに附属しているマイクロフォンを加工音の集音に用いた。家庭用ビデオ・カメラに附属しているため、このマイクロフォンは周囲の音のレベルに応じて集音レベルが変化してしまう。たとえば周囲が静かになると自動的に集音レベルを上げて小さな物音でも集音可能となるが、周囲が騒がしいと集音レベルが自動的に下がり大きな音のみが集音される。そのため、本来ならば、加工音の集音用に専用の高性能マイクロフォンを用意して、それによって獲得される音を提示することが望ましいと思われる。

##### (3) 映像・音声切り替え装置

複数のビデオ・カメラで獲得した様々な方向からの映像をオペレーション・ルームに伝送する際に、送りだし画面および音声を切り替えるために切り替え装置を用いた。利用した切り替え装置は、ソニー株式会社のデジタルSEG XV-D1000および日本ビクター株式会社のAVセレクターJX-S300である。

実際には、XV-D1000は、入力映像3系統(各々S-VIDEOとComposite)と音声4系統、出力映像2系統(各々S-VIDEOとComposite)と音声2系統のエフェクタで、映像に関しては入力3系統のうちの2画面のオーバーラップやワイプ、モザイク処理、マルチ画面表示などをおこなうことができる。

JX-S300は、入力が映像・音声とも4系統(このうち映像3系統がS-VIDEO対応)、出力が映像・音声とも2系統(映像はすべてS-VIDEO対応)さらにモニタ出力1系統(S-VIDEO対応)のセレクタであり、入力1系統を1系統の出力に、あるいは入力1系統を2系統の出力に同時に出力することが可能である。

### 4.3 オペレーション・ルーム側のハードウェア

#### 4.3.1 力覚・触覚情報提示装置(2+1次元ジョイスティック)

##### 4.3.1.1 ジョイスティック開発の背景

筆者の所属する研究室では1991年1月16日早朝(日本時間)に、アメリカ合衆国 Washington D.C. の George Washington University から東京大学工学部8号館の地下1階実験室に設置された加工機械(マシニング・センタ)を操作し加工をおこなう遠隔加工実験をおこなった。この際、加工機械の操作は図4.6に示すようなコンピュータ・ディスプレイ上のコントロール・パネルを用いてマウスとキーボードからの入力でおこなった。

この実験では、加工機械を実際に操作したことがない人間でも、コントロール・パネルを用いて加工機械を容易に制御し加工できることは確認できたが、それ以上に、次に述べるような問題点が表面化した。それは

コンピュータ・ディスプレイ上に表示されたコントロール・パネルを用いて入力された工具の移動情報のうち、移動方向の正負を誤って入力するミスが何度も発生した。

ことである。

この原因として、以下のような理由が考えられた。

##### メンタル・モデルの不一致

たとえば、東京から送られてきた映像で得られる工具と工作物との位置関係から、

- 工具を+方向に移動させれば正しい加工経路となるのか(この場合、相対的に工作物は-方向に移動する)
- 工作物を+方向に移動させればよいのか(この場合、相対的に工具は-方向に移動する)

ということ、操作者の頭の中で判断させたため、加工機械の座標系と操作者が思い描いた座標系の整合性が取れていないと、工具が操作者の意図したのと逆方向に進むことになる。すなわち、加工機械の座標系と操作者が加工機械に対して持つメンタル・モデルが一致していないためにエラーが発生した。

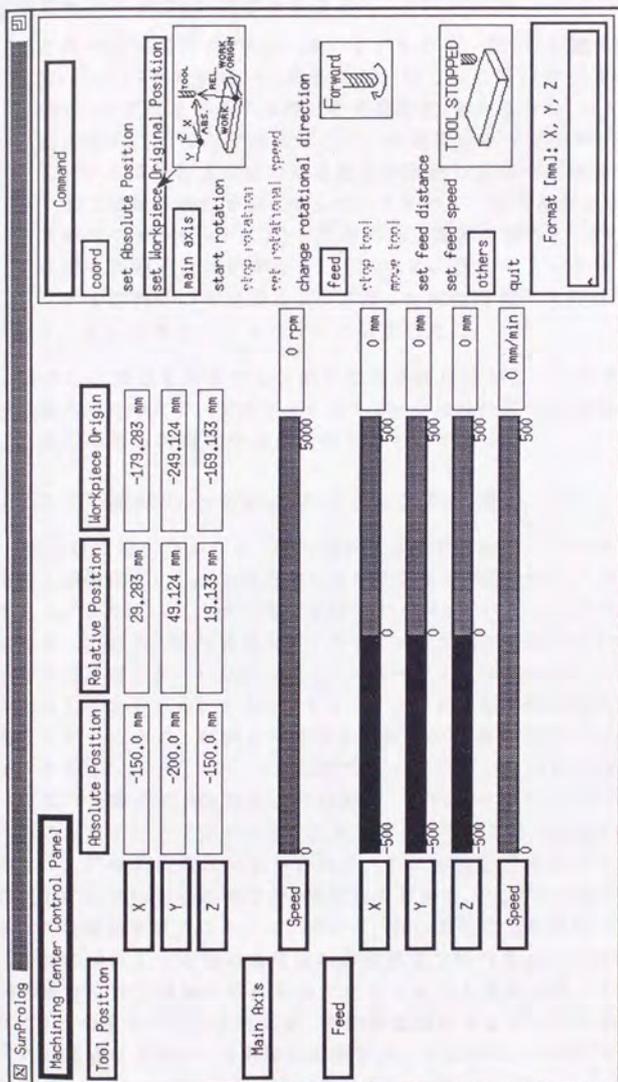


図 4.6 MC コントロール・パネル

### 非直観的インタフェースによるエラー

これは上記の理由(メンタル・モデルの不一致)とも関係するが、コントロール・パネルを用いた操作では、加工中に操作者が入力するのは基本的に (i) 工具を移動する軸とその移動量(方向も含む)および(ii) 工具の移動速度の二つのみである。これらの数値をマウスやキーボードから入力し、その情報を遠隔地である加工機械側の実時間制御器に伝送することで加工機械の操作をおこなった。すなわち、操作者のおこなう操作(マウス操作やキーボード入力)と実際の加工機械の動作(工具の移動)との間には何ら直観的な対応がなく、そのため、たとえメンタル・モデルが正しくても操作者の不注意によって誤った制御情報が入力される可能性があり、実際にそのようなエラーが発生した。

これらの問題を解決する目的で開発されたのがここで示すジョイスティックであり、その点で、このジョイスティックは操作環境伝送型遠隔加工システムにおける最も特徴的な装置とすることができる。

#### 4.3.1.2 開発したジョイスティックの思想

4.2.1項で述べたように、操作環境伝送型遠隔加工システムで操作対象とする加工機械は、 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向の直交する3自由度を持つマシニング・センタである。したがって、加工機械を操作するジョイスティックの自由度をそれに合わせることで、操作者はジョイスティックと加工機械の動作を一对一に対応付けることができ、したがって、上に述べたような理由による操作ミスは防げるものと考えられる。また、ジョイスティックと加工機械との動作が一对一に対応しているため、制御プログラムの開発は容易になるという利点も生まれる。そこで、ジョイスティックは直交する3方向の自由度を持つ構成とする。

また、人間が工具を自分の手に持ち、工作物をもう一方の手に持って加工をおこなうことを想定すると、工具を持った手は工具の移動に、工作物を持った手は工作物の位置決めに使われる。これが机上での作業であれば、工作物は机上面と平行な平面内での2次元的な移動を、工具はそれと垂直な方向の1次元的な移動をおこなう。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムで加工機械の操作をする時にも同様の作業感覚で操作をおこなえれば、操作者は違和感なく加工機械の操作をおこなえるものと思われる。そこで、ジョイスティックの直交する3自由度を、平面的な操作をおこなうための2自由度と、それと垂直な方向の1自由度に分割する。すなわち、このジョイスティックは

- 工作物の位置決め作業をイメージした、2自由度を持つ2次元ジョイスティック
- 工具の移動作業をイメージした、1自由度を持つ1次元ジョイスティック

という二つのジョイスティックの組で3次元の自由度を実現するものであり、そのため、このジョイスティックは2+1次元ジョイスティックと呼ばれている。ここで「イメージした」という表現を用いたのは、実際には工作物や工具の移動をおこなう自由度はそれぞれの加工機械によって異なるものであり、たとえば、4.2.1項に示した加工機械では、工作物を載せたテーブルは $x$ 軸方向の自由度のみを持ち、工具を取り付けた主軸部分が $y$ 軸方向および $z$ 軸方向の自由度を持つため、 $y$ 軸方向の動作をおこなった時に実際に移動するのは工作物ではなく工具の方だからである。

#### 4.3.1.3 ジョイスティックの概要

図4.7に、2+1次元ジョイスティックの概観を示す。



図 4.7 2+1次元ジョイスティックの概観

図4.7で、左側に設置されているのが2次元ジョイスティック、右側が1次元ジョイスティックである。これは右利きの人間が左手で工作物の位置決め

をし、右手で工具の操作をおこなうことを想定したものであって、当然、左利きの人間が操作する場合には左右を入れ換えることも可能である。

ジョイスティックの直線運動は、リニア・ガイドとボールねじによって実現され、2次元ジョイスティックは、このリニア・ガイドを直角に配置して平面内の動きを実現している。ジョイスティックの駆動には、速度制御型のドライバによって制御されるD.C.モータが使われている。このD.C.モータはオプティカル・エンコーダ一体の非常に小型なモータである。

いずれのジョイスティックにもそのジョイスティックの移動方向に応じた力センサが取り付けられており、操作者が加えた操作力を測定することが可能となっている。すなわち、2次元ジョイスティックにはそれが動作する2方向の力を検出する2軸力センサが、1次元ジョイスティックには、それが動作する1方向の力を検出する1軸力センサが取り付けられている。力センサによって検出された力情報は、歪増幅器で増幅された後A/Dコンバータを介してオペレーション・ルームの実時間制御用コンピュータに取り込まれ、制御用コンピュータ内でジョイスティックの移動速度情報に変換される。移動速度情報はD.C.モータのドライバにD/Aコンバータを介して送られるとともに、マシン・サイトの加工機械制御情報としてマシン・サイトにも伝送される。

さらに、2次元ジョイスティックの操作部には、偏心カムの取り付けられたモータが内部に組み込まれており、このモータの回転数を制御することで操作者の触覚に振動を与えることが可能となっている。これは加工機械側で検出された加工状態を操作者に対して提示することを目的としたもので、詳細については5.3節で述べる。

#### 4.3.1.4 ジョイスティックを構成する要素

##### (1) カセンサ

操作者が操作部に加えた力を検出するために、2次元ジョイスティックには2軸力を測定可能な、1次元ジョイスティックには1軸力を測定可能な力センサをそれぞれ搭載している。力検出部には平行平板構造を用い、各軸方向とも4枚のストレイン・ゲージを薄板端部に貼付し、この4枚でブリッジ回路を構成している。この平行平板部に荷重が加わった時に薄板端部に生じる表面歪を貼付したゲージによって検出し、それぞれのゲージに生じる抵抗値の変化で生じるブリッジの出力電圧の変化を歪増幅器によって増幅し、A/Dコンバータを介して実時間制御用コンピュータに取り込む。なお、2次元ジョイスティックは、力センサの上部にとりつけられた操作部を握って操作をおこ

なうため、実際には力センサにかかるモーメントを測定している。

力センサの材質はA7075(超々ジュラルミン)で、人間が操作をおこなう時に操作部に作用する力を見積り、その定格荷重は50(N)程度に設定した。また、人間が操作しやすいようにジョイスティックそのものを小型化したため、力センサ自体も小型化する必要があった。センサを小型化することは複雑な加工を必要とするので、加工には筆者の所属する研究室のワイヤ放電加工機を用いた。

製作した力センサの諸元を表4.5に示す。

表 4.5 ジョイスティック用力センサの諸元

	定格 (N)	出力 ( $\mu\text{st./N}$ )	分解能 (mN/ $\mu\text{st.}$ )
x 軸方向	50	23.9	41.8
y 軸方向	50	29.8	33.6
z 軸方向	50	20.3	49.3

ここで、 $x$ および $y$ 軸は2次元ジョイスティック用力センサで検出する力の方向を、 $z$ 軸は1次元ジョイスティック用力センサで検出する力の方向をそれぞれあらわしている。

ジョイスティックに取り付けられた力センサの概観を図4.8に示す。

図4.9～図4.11に力センサの検定結果を、表4.6に非干渉化行列を示す。

表 4.6 ジョイスティック用力センサの非干渉化行列

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.0410 \cdot J_1 \\ 0.0328 \cdot J_2 \\ 0.0482 \cdot J_3 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1.0000 & 0.0043 & 0.0000 \\ -0.0101 & 1.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \end{pmatrix}$$

ただし、 $J_1 = (100)$ ,  $J_2 = (010)$ ,  $J_3 = (001)$  とする。

2次元ジョイスティック用の力センサについては、図4.9、図4.10のいずれの結果も、荷重を加えた方向の歪出力成分だけが大きく出力が得られており、干渉はほとんどない。図4.9～図4.11のすべてのグラフにおいて、その出力は荷重に対して線形に変化しており、ヒステリシスはほとんど見られない。この傾向は表4.6にも見受けられる。また、 $x$ 、 $y$ 軸方向の力を検出するセンサと $z$ 軸方向の力を検出するセンサは別々であるから、当然、行列の(1,3)、(2,3)、

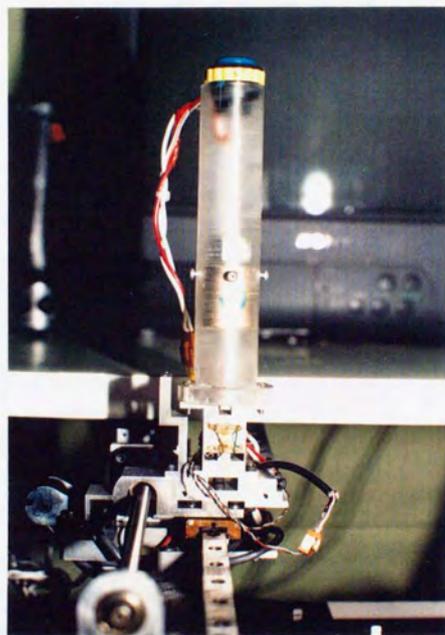


図 4.8 ジョイスティックに取り付けられた力センサの概観

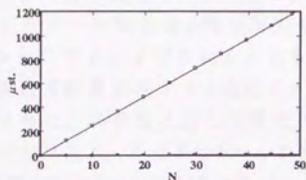


図 4.9 ジョイスティック用力センサの検定(x軸)

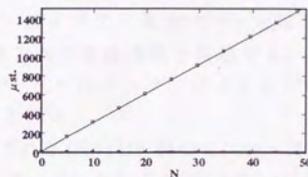


図 4.10 ジョイスティック用力センサの検定(y軸)

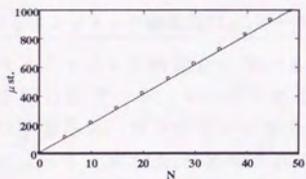


図 4.11 ジョイスティック用力センサの検定(z軸)

(3,1)、(3,2)の各成分は0.0000となっており、互いに干渉することはない。

### (2) リニア・ガイドおよびボールねじ

ジョイスティックの直線運動を実現するのがリニア・ガイドとボールねじである。リニア・ガイドを利用することで、ジョイスティックの直進性は向上し、また、市販のリニア・ガイドとボールねじを利用することで、高剛性のジョイスティックを低コストで製作することが可能となる。

2次元ジョイスティックでは、剛性上の問題から $y$ 軸方向は2本のリニア・ガイドを平行に設置し、その間にボールねじを配置する。 $x$ 軸方向のリニア・ガイドとボールねじは $y$ 軸方向のリニア・ガイド上に配置され、 $y$ 軸方向のボールねじでドライブされるとともに $x$ 軸方向の直線運動を実現する。 $z$ 軸方向の直線運動を実現する1次元ジョイスティックのリニア・ガイドとボールねじは平行に、水平面に対して垂直に設置される。

用いたリニア・ガイドとボールねじはいずれも(株)THK製のミニチュアLMガイドRSR12VMUU+220LMおよびミニチュア・ボールねじW0802MA-1PY-C3Z1である。

ボールねじのストロークは150(mm)あるが、実際には10(mm)の余裕を見て、ジョイスティックのストロークは各軸方向140(mm)とした。

### (3) ジョイスティック駆動用D.C.モータおよびモータ・ドライバ

ジョイスティックの駆動に用いるモータは、オプティカル・エンコーダ一体型の小型D.C.サーボ・モータである。モータは $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向それぞれに一つずつ配置され、カップリングを介してボールねじと結合され、モータ・ドライバによってその回転が制御される。モータ・ドライバは速度制御型のドライバであり、5.2節で述べるように、加工反力を操作者に対して提示するのにジョイスティックは速度制御されるため、この目的とも合致している。

使用したモータは山洋電気製のD.C.サーボ・モータR301-011E17であり、モータ・ドライバは山洋電気製の速度制御型D.C.サーボ・モータ用ドライバPDT-A01-15およびVFコンバータPTC-01-25である。

モータに附属しているオプティカル・エンコーダは、A・B・C相のパルスを出力するもので、このパルスを実時間制御用コンピュータのカウンタ・ボードでカウントすることにより現在のジョイスティックの位置を検出することができる。出力パルスは一回転あたり500カウントで、ボールねじのリードが1(mm)であるから、位置の検出は2( $\mu$ m)単位でおこなえる。

また、モータ・ドライバは速度制御型であるため、速度信号を0(V)として

も多少モータが回転することが確認されている。そのため、位置制御ループを速度制御ループの外側に実装することが必要である。VFコンバータはオプティカル・エンコーダから得られるパルスの周波数を電圧に変換し、モータ・ドライバにフィードバックすることで速度制御をおこなっている。

#### (4) その他

これまでの説明で出てこなかったジョイスティック回りの装置について述べる。なお、A/Dコンバータやカウンタ・ボード等は、4.3.4項の実時間制御用コンピュータの項で取り上げる。また、2次元ジョイスティックの操作部に取り付けられた振動情報提示用の偏心モータについても、5.3.2項で述べる。

#### 押しボタン

2次元ジョイスティックおよび1次元ジョイスティックの操作をおこなう場合には、操作者は操作部の上部(2次元ジョイスティック)あるいは側面(1次元ジョイスティック)に取り付けられた押しボタンを押しながら操作をおこなわなければならない。これは何かのはずみに手がジョイスティックに触れて加工機械が思わぬ動作をすることを避けるためである。実際には、操作者が操作部を握った時に自然に押せる位置にボタンを配置してあるため、ボタンを押す行為が作業の妨げになることはない。

#### 光電スイッチ

ジョイスティックの起動時に各軸の原点位置を校正するため、また、ジョイスティックが想定されたストロークを越えて動作しないようにハードウェア・リミットをかけるため、ボールねじの両端付近に光電スイッチを設けてある。起動時には、まず $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸の順にゆっくりとジョイスティックを負方向に移動させ、光電スイッチが作動したことをシステムが検知した瞬間の位置を各軸の負方向の最大位置(-70(mm))と定める。そして、その位置からそれぞれの正方向に70(mm)だけ進んだ点を各軸の原点とする。また、操作時にはプログラム内で現在のジョイスティックの位置は把握しているものの、何らかの理由でそれがずれた時に備え、光電スイッチが作動したことをシステムが検知すると、モータ・ドライバが速度信号を0(V)とするようにしてある。

### 4.3.2 視覚情報提示装置

操作環境伝送型遠隔加工システムにおける視覚情報の提示は、

- マシン・サイトに設置されたテレビ・カメラによって獲得され、情報伝送システムを介してオペレーション・ルームに伝送されて提示される実画像
- 操作者がおこなった操作をもとにオペレーション・ルームのコンピュータで予測した工作物と工具との位置関係および工作物の形状情報のコンピュータ・グラフィクス(Computer Graphics; CG)
- マシン・サイトで測定された加工反力情報に基づいて予測された工作物の加工表面のCG

がある。

まず、実画像に関して、人工衛星やアナログ電波回線を視覚情報の伝送に用いた場合には、市販のテレビ・モニタで提示した。基本的に、オペレーション・ルームで受け取った画像をそのまま提示するだけであり、外部入力端子さえ利用できればよい。もちろん、(i) 鮮明な画像が表示できる方がよい、(ii) できるだけ画面が大きい方がよい、と言った要求はあるが、装置自体に特殊な仕様が必要となることはない。そのため、この場合の提示装置の仕様は省略する。

一方、コンピュータ・ネットワークを介して視覚情報を伝送した場合には、その他の視覚情報、すなわち、工作物の形状情報や加工表面情報のCGを表示するのと同じコンピュータ・ディスプレイ上に、実画像も提示した。

CGによる視覚情報を提示するのに用いたコンピュータは、Silicon Graphics Inc. (SGI) 製のワークステーション *Indy* である。SGI社のワークステーションのグラフィクス能力は非常に優れており、CGの分野では広く使われている。また、CGを容易に実現するためのソフトウェア・インタフェース、Open GLを標準で使うことが可能である。

Open GLはオペレーティング・システムやウィンドウ・システムに依存しないため、*Indy*上でOpen GLを用いて開発したアプリケーションは、その他のプラットフォーム、たとえばPC用オペレーティング・システムのWindows NT上にも表示できるし、またソフトウェアも容易に移植することが可能である。そのため、その他のグラフィクス・ライブラリと比較するとソフトウェアの再生産性にも優れていると言える。

さらに、*Indy*がその他のワークステーションと大きく異なるのは、Ethernet (AUI/10Base-T)に加えてISDNを直接利用可能な点である。通常、ISDNを利

用する場合には、TA(Terminal Adapter)を介さなければならないが、IndyのISDNポートはTAを内蔵しているために、ISDNケーブルを直接Indyに接続して利用することができる。そのため、Internetが利用できないような場合でも、2台のIndy同士をISDNで接続し、オペレーション・ルームとマシン・サイトとの間で情報伝送をおこなうことができる。

### 4.3.3 聴覚情報提示装置

操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて提示される聴覚情報は

- マシン・サイトに設置されたマイクロフォンによって獲得され、情報伝送システムを介してオペレーション・ルームに伝送され提示される加工音
- 加工反力情報に情報変換を施して得られるオペレーション・ルームのコンピュータで予測された仮想加工音

である。実際には、複数の操作者で協調加工をおこなう際にはこれに、操作者間でやりとりされる会話も提示されるが、これは情報伝送システムを介して伝送される前者の情報と同列に扱うことにする。

マシン・サイトから送られる加工音は、人工衛星やアナログ電波回線を情報伝送に用いた場合には、市販のテレビ・モニタ附属のスピーカあるいは同じく市販の外部スピーカを利用して提示した。コンピュータ・ネットワークを介して伝送する場合には、4.3.2項で示したIndy上で動作するアプリケーションを用いて伝送し、Indyのオーディオ出力端子から外部スピーカに出力した。

一方、オペレーション・ルームのコンピュータ上で力覚情報-聴覚情報変換によって得られた仮想加工音は、次に述べる実時間制御用コンピュータのD/Aコンバータを介して外部スピーカに出力した。必要であれば、D/Aコンバータとスピーカとの間にアンプを挿入して信号を増幅したが、この場合も、スピーカ自体には特別な機能は必要ではない。

#### 4.3.4 実時間制御用コンピュータ

オペレーション・ルームで用いられる実時間制御用コンピュータでは、

- 操作者が加えた操作力をジョイスティックに取り付けられた力センサから取り込むこと
- ジョイスティックの移動量をオプティカル・エンコーダから取り込み、ジョイスティックの速度を計算すること
- ジョイスティックの速度から加工反力を予測し、それに基づいてジョイスティックの速度指令値を決定すること
- ジョイスティックの速度指令値をモータ・ドライバに出力すること
- ジョイスティックの移動量を加工機械の制御情報としてマシン・サイトに伝送すること
- マシン・サイトから伝送された加工状態情報に基づいて、ジョイスティックの操作部の偏心モータを回転させ操作者に振動を提示すること

が実時間でおこなわれる。既に4.2.4項でも述べた用に、これらを実現するためには

1. リアルタイム機能
2. マルチタスク機能
3. 入出力機能
4. ネットワーク機能

が必要である。

##### 4.3.4.1 オペレーション・ルームで用いた実時間制御用コンピュータの構成

そこで、オペレーション・ルーム側の実時間制御用コンピュータとして、INMOS社のトランスピュータ(Transputer)をCPUに用いたマルチCPUシステムを利用した。トランスピュータは複数のトランスピュータをlinkで接続することでプログラムの並列実行が可能なCPUである。使用したトランスピュータはIMS T805(30MHz)で、3つのトランスピュータをlinkで接続してい

る。ネットワークにはIMS B300というトランスピュータ・ゲートウェイを用いてEthernetに接続した。

トランスピュータ・システムは起動時にEthernetを経由して制御用プログラムをホスト・コンピュータから転送し、プログラムの実行はホスト・コンピュータ側端末から制御する。実験用のシステムでは、ホスト・コンピュータとしてSun Microsystems Inc.社のSparc Stationおよび筆者の所属する研究室で組み上げたIBM PC/AT互換機(ただしOSはBSD/OS)を利用した。ホスト・コンピュータとトランスピュータ・システムの間でTCP/IPプロトコルによる通信ができればホスト・コンピュータとトランスピュータ・システムとを遠隔地に存在させることもできるが、実際にはほとんどの場合にPCを持ち運ぶことで対処したため、遠隔地からの起動は減多におこなっていない。

利用したトランスピュータ・システムは以下のような構成から成る。

#### 1. トランスピュータ・モジュールボード

トランスピュータ・プロセッサ1つとメモリ(DRAM)を搭載したボードである。株式会社竹中製作所の製品で、プロセッサはいずれもT805(30MHz)を使用し、メモリの容量によって2MBのものを一枚(TECPM-010-805-302)、4MBのものを二枚(TECPM-010-805-304)使っている。

#### 2. サーボ制御モジュールボード

D.C.サーボ・モータのドライバを制御し、また、モータに附属しているオプティカル・エンコーダからのパルスを入力をおこなうボードであり、株式会社竹中製作所のTECIT-040を用いている。

#### 3. デジタル入出力インタフェースボード

ジョイスティックの操作部に取り付けられた操作ボタンからの入力をおこない、また、各軸の両端に取り付けられた6個の光電スイッチからの入力も受け取っている。株式会社竹中製作所のTECIT-031を用いている。

#### 4. アナログ入力インタフェースボード

操作者が加えた操作力情報を力センサから歪増幅器を介して取り込むのに、株式会社竹中製作所のTECIT-030-010を用いている。

#### 5. アナログ出力インタフェースボード

トランスピュータで予測した加工反力情報あるいは過去に蓄積した実際の加工反力情報に情報変換を施して得られた仮想加工音を出力するのに、株式会社竹中製作所のTECIT-030-001を用いている。

トランスピュータ・システムでは、(i) 操作者が加えた操作力を歪増幅器で増幅し、アナログ入力インタフェースボードから取り込む、(ii) サーボ制御モジュール・ボードからエンコーダのパルスを入力し、ジョイスティックの速度を求める、また、サーボ・モータのドライバにサーボ制御モジュールを介して速度指令信号を出力する、(iii) ジョイスティックの速度をもとに発生する加工反力を予測する、(iv) 力覚情報-聴覚情報変換によって仮想加工音を生成し、アナログ出力インタフェースボードを介してスピーカに出力する、(v) ネットワークを介してマシン・サイトのプロセスと情報の送受信をおこなう、といった作業を3つのトランスピュータに分割し、複数のタスクによって実時間でおこなっている。

なお、トランスピュータで動作するプログラムの開発はINMOS社のトランスピュータ用ANSI Cツールキットを用いている。

## 4.4 情報伝送システム

操作環境伝送型遠隔加工システムを構築する際には、これまで述べてきたマシン・サイトとオペレーション・ルームとの間で相互に情報を伝送するための情報伝送システムが必要である。ここでは、本研究で利用した情報伝送システムについて述べる。

### 4.4.1 操作情報伝送システム

ここでいう操作情報とは、主に

- 操作者が操作情報入力装置(力覚情報提示装置)を通じて入力した、加工機械に対する移動情報、および、
- 加工機械側の加工反力センシング・テーブルで検知した加工反力情報やそれに基づいて求められた加工状態指数

を指す。前者はオペレーション・ルーム側の実時間制御用コンピュータからマシン・サイト側の実時間制御用コンピュータに、後者はその逆に伝送される情報であり、したがって、操作情報伝送回線とは、最低限、2台の実時間制御用コンピュータより構成されるコンピュータ・ネットワークと位置付けることができる。実際には、以下のコンピュータ・ネットワークを状況に応じて使い分けた。

#### 4.4.1.1 ローカル・エリア・ネットワーク(LAN)

現在、東京大学工学部では、その基幹に通信速度100Mbpsの光ファイバ・ケーブルを用いたLANが張られており、工学部の各建物内のケーブル(10Base5規格あるいは10BaseT規格;通信速度はいずれも10Mbps)とブリータ(Brouter)を介して接続されている。また、筆者の所属する研究室では、館内のケーブルとは別に10Base5規格の同軸ケーブル(Ethernet)を建物内地下2階から地上5階まで張り、ワークステーションをゲートウェイとしたサブ・ネットワークを構築している。そこで、マシン・サイト、オペレーション・ルーム双方が東京大学内に存在する場合には、このサブ・ネットワークおよび工学部LANを操作情報伝送回線に用いた。なお、上記の通信速度は公称値であり、実際には、複数台のコンピュータが同時にパケットを送出しようとすることによって衝突(collision)が発生するため、得られる通信速度は公称値よりも低い。

#### 4.4.1.2 The Internet

Internet は、アメリカ合衆国で1970年代中頃から国防総省高等研究計画局(Defense Advanced Research Projects Agency; DARPA)の資金援助によって研究が始められたARPANETをその祖とする、全世界の様々なローカル・エリア・ネットワークやワイド・エリア・ネットワークの相互接続によって構成されたコンピュータ・ネットワークである[12]。Internetにおいては、その通信規約(プロトコル)としてTCP/IP(Transmission Control Protocol / Internet Protocol)が主に用いられており、さらに、カリフォルニア大学Berkeley校によって開発されたBerkeley UNIXの特徴の一部として提供されたソケット(socket)を、接続されている多くのコンピュータでサポートしているため、遠隔地に存在するコンピュータであっても共通のインタフェースを用いて通信をおこなうことが可能となっている。本研究では、オペレーション・ルームが東京大学外に存在する場合には主にInternetを操作情報伝送回線に用いた。Internetを用いた場合の通信速度は、ネットワーク自体の回線速度と同時にネットワーク上を流れるパケットの総量にも影響されるため、定量的な評価をすることは難しいが、およそ数10～数100Kbps程度と言われている。

#### 4.4.1.3 公衆電話回線によるIP接続

現在、公衆電話回線(アナログ電話回線)は多くの場所で比較的安価に利用可能な通信設備である。また、ISDN回線によるデジタル通信回線も利用可能な範囲は広がりつつある。これらを用いるとInternet経由では直接接続できない2地点間のコンピュータをIP接続することができる。すなわち、公衆電話回線とモデムを利用してプライベートなコンピュータ・ネットワークを容易に構築することが可能であり、このような目的のためにSLIP(Serial Line IP)やPPP(Point to Point Protocol)と呼ばれるプロトコルが規定されている。公衆電話回線によるIP接続の利点は、Internetを用いた場合のように、通信速度が経由するネットワークの伝送能力(バンド幅)やネットワークの混雑状況によらず、2地点間の回線速度と使用するモデムの性能のみに依存する点である。たとえば、現在、日本とヨーロッパとの間には両者間を直接接続するコンピュータ・ネットワークが存在しない。そのため、Internetを利用して日欧のコンピュータ同士を接続する場合には、すべてのデータがアメリカを経由して送受信される。すなわち、この時、日本とヨーロッパとの間の伝送速度は、主に、日米間、アメリカ国内、および、米欧間のネットワークの状況に依存して変化し、また、多くのネットワークを経由するためにパケットの消失

(packet loss)と再送も頻繁に発生する。このような場合にも、公衆電話回線を用いて日欧のコンピュータを直接IP接続することにより、信頼性の高い伝送を実現することができる。この場合の伝送速度は、特にアナログ回線の場合には使用するモデムの性能にも左右されるが、数Kbps～数十kbps程度、デジタル回線でN-ISDN(Narrowband ISDN)の基本インタフェース(2B+1D)を用いた場合、B channel一本で64Kbps、2本のB channelを同時に使用した場合で128kbpsである。また、23B+Dや30B+DといったBチャネル・インタフェースを用いれば1.5Mbps～2Mbpsの通信もおこなえ、さらに今後普及が期待されるB-ISDN(Broadband ISDN)が利用可能となれば、より高速かつ広帯域の回線が利用でき、150Mbpsや600Mbpsといった通信速度での通信も可能となる[2]。

#### 4.4.2 視聴覚情報伝送システム

操作環境伝送型遠隔加工システムにおける視覚情報および聴覚情報とは、主に、マシン・サイトにおいて収集されてオペレーション・ルームに送られる、実際の加工状態(加工画面や加工音)である。しかし、実際には、オペレーション・ルーム側の操作者とマシン・サイト側の人間との間でのコミュニケーションをおこなうために、双方向の情報伝送を実現することが必要である。ただし、遠隔加工をおこなう際、マシン・サイトからオペレーション・ルームへの情報伝送には、実際の加工状態を伝送するために、できるだけ品質のよい、また、1秒間あたりのフレーム数の多い回線を利用することが望ましいが、一方、オペレーション・ルームからマシン・サイトへの情報伝送には、オペレータの細かい動作を伝送する必要はないため、それほど高い品質やフレーム・レートの回線は要求されない。本研究では、以下の視聴覚情報伝送システム(媒体)を状況に応じて使い分けた。

##### 4.4.2.1 人工衛星(通信衛星)

通信衛星を視聴覚情報伝送媒体として利用する場合には、一般にアナログ回線とデジタル回線を選択することが可能である。アナログ回線では一般に1秒間あたり30枚とかなり高品質、高フレーム・レートの画像を伝送可能である。一方、デジタル回線では利用する回線によって様々な伝送速度(64Kbps、1.5Mbps等)で画像を伝送することができるが、伝送速度の制限により、1秒間あたりの画像は3~5枚と非常に少ない。したがって、マシン・サイトからオペレーション・ルームへの情報伝送にはアナログ回線を、オペレーション・ルームからマシン・サイトへの情報伝送にはデジタル回線を用いることが望ましい。ただ、実際にはコストその他の点から双方向デジタル回線を利用せざるを得ない場合もあり、このような場合には、本研究の特長とする視聴覚情報の予測提示が大きな意味を持つことになる。実験では、太平洋上のインテルサット通信衛星(アナログ/デジタル)やアメリカ国内の通信衛星(アナログ/デジタル)、文部省の保有する教育用通信衛星(デジタル)等を利用した。なお、地上局から衛星に、また衛星から地上局に情報を伝送する際の時間遅れが0.25秒程度あるため、一度、衛星を経由する毎におよそ0.5秒程度の時間遅れが発生する。

#### 4.4.2.2 アナログ電波回線(マイクロ波)

アナログ電波回線(マイクロ波)は、通信衛星同士、あるいは、通信衛星と地上中継局との間で通信をおこなう際にも利用されるが、対向する二つのアンテナを用いることで、衛星を経由しない短・中距離間の画像・音声情報の伝送を実現することができる。

#### 4.4.2.3 有線回線(光ファイバ・ケーブル)

筆者の所属する研究室の地下1階実験室、地下2階実験室、5階研究室、および、機械系3学科の学科計算機室(5階)の間には、画像・音声情報伝送用の光ファイバ・ケーブルが敷設されており、アナログの画像と音声をデジタル情報に変換することにより、互いの部屋間での画像・音声情報の伝送が可能となっている。建物内での実験ではこの有線回線を利用して視聴覚情報の伝送をおこなった。

#### 4.4.2.4 コンピュータ・ネットワーク(LAN, Internet)

コンピュータ・ネットワークを用いた視聴覚情報伝送は、一般にIPマルチキャストと呼ばれる通信技術とそのためのアプリケーションを用いて実現される。マルチキャスト・アプリケーションでは、マルチキャスト・アドレスと呼ばれるIPアドレス(Class D)を指定することで、そのアドレスを指定しているその他の複数ホストとの間で視聴覚情報を相互に伝送し合う仕組みになっている。また、アドレスの指定として相手ホストのIPアドレスを指定すると、両者間でのユニキャスト(一対一)通信もおこなえるが、この場合には、指定されていないホストから通信内容を見たり聞いたりすることはできない。本研究では、研究室のサブ・ネットワーク内で実験をおこなう場合には、前述の有線回線と並行してサブ・ネットワーク内に閉じたマルチキャスト通信を、サブ・ネットワーク外との通信が必要な場合にはユニキャスト通信を利用して視聴覚情報の伝送をおこなった。視聴覚情報のコンピュータへの取り込みおよび表示は、Silicon Graphics Inc.製のワークステーションIndyを用い、マルチキャスト・アプリケーションとしては、Xerox Palo Alto Research Center(PARC)で開発されたビデオ会議ツール *nv* および Lawrence Berkeley Laboratory(LBL)で開発された音声会議ツール *vat* を利用した。

## 第 5 章

### 操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報提示

本論文で構築する操作環境伝送型遠隔加工システムは、オペレーション・ルームに存在する操作者が遠隔地のマシン・サイトにある加工機械を、直接その場で加工機械を操作しているかのような操作感を有しながら操作することを可能とするシステムである。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムを構築する上で

操作者に対してどのような情報をいかにわかりやすく提示するか

ということが非常に重要な意味を持つ。この情報提示とその提示手法こそが、操作環境伝送型遠隔加工システムの最も特徴的かつ重要な要素である。

操作環境伝送型遠隔加工システムで想定している操作者は、必ずしも加工機械の操作や加工自体に習熟した人間ではない。加工に関する初心者であっても、操作環境伝送型遠隔加工システムを利用することで容易に加工機械を操作できるようにする必要がある。そのため、マシン・サイトで生じている加工現象をそっくりそのままオペレーション・ルームで再現することは必ずしも適切とは言えない。なぜなら、このような情報提示をおこなうことは、加工の熟練者であれば非常にわかりやすく操作しやすいかも知れないが、初心者にとっては加工現象を認識することが難しいからである。また、逆も真であり、全ての情報を初心者にはユーザ・フレンドリに提示した場合、熟練者にとっては加工をおこなっている操作感が得られないであろう。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報提示を議論するためには、その情報提示によって目指すところを明確にしておく必要がある。

本章では、まず操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報提示の基本概念を述べる。具体的には、加工において人間が利用していると思われる感覚についての考察をおこなう。その後、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて特徴的な(i)情報の予測提示と(ii)情報の強調提示、および、(iii)情報変換法について5.1節でまとめる。

その後、5.2節～5.6節において操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報提示の手法を個別に示す。

## 5.1 操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報提示の基本 概念

### 5.1.1 加工における人間の感覚

一般に、人間は外界で発生している現象を自らの備える多くの感覚(sensation)を利用することで知覚(perception)し、そこで知覚した情報とこれまでに自分が身につけてきた多くの知識によって認知(cognition)する。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて提示する情報を選択し、また、それを提示する情報提示手法を考えるために、人間が自らの手で加工をおこなっている際に利用している感覚を考察しておくことは非常に意義がある。

そこで、加工をおこなう際に人間が利用している感覚に関して、人間の持つ五感、すなわち、視覚・聴覚・嗅覚・触覚・味覚に加え、力覚と温覚について以下で考えてみる。

#### 視覚

- 工作物の表面の状態や大きさから材質・重量などの材料の性質を予測する。
- 工作物と工具との位置関係を三次元的に認識し、工具の位置決めをおこなったり工作物付近まで工具を早送りする。
- 人間が普通に有する三次元感覚によって、あるいは、対象となる工作物を様々な方向から観察することによって、現在おこなっている加工の状況を知る。
- 加工中の工具の状態を監視し、工具の折損を検知する。また、加工によって生じる切屑の状態から現在の加工状態を知る。
- 加工の結果、加工表面にあらわれる振動痕などから、おこなわれた加工の状態を知る。

#### 聴覚

- 加工機械のモータ音や主軸の回転音などにより、切削可能な状態を検知する。
- 加工の途中に聴こえる加工音から現在の加工状態を判断する。

#### 嗅覚

- 切削の際に用いられる切削油の匂いで加工状態を判断する。また、木工の場合には工作物そのものの切屑からの匂いで加工状態を判断する。

#### 触覚

- 工具と工作物との接触によって発生する振動により加工状態を判断する。
- 加工後に加工表面を指で触り、その凸凹によっておこなわれた加工の状態を知る。
- 加工後に工具の刃に触れることで工具の状態(折損・欠損・摩耗等)を知る。

#### 味覚

- 加工に関して味覚はあまり大きな役割は果たしていないと思われる。

#### 力覚

- 工具と工作物との接触によって発生する加工反力により加工状態を判断する。
- 加工反力の大きさにより工作物の材質を判断する。
- 加工反力に対抗する力を加えることで工具を動かし、加工をおこなう。

#### 温覚

- 加工機械のモータなどから発生する熱、工具と工作物との間の摩擦によって発生する熱などの輻射により加工状態を知る。

人間は、ここで示したように自らの備える感覚器官から得られる情報を基にして加工をおこなっている。この時、これらの感覚は人間にとって決して独立に認識されるものではなく複数の感覚器官によって知覚された複数の情報を組合せ、さらにこれまでに自らの得た知識や経験によって総合的な判断を下している。

加工においても上記のように様々な感覚を知覚しているが、これらの感覚情報をすべて提示する必要はないと思われる。具体的には、嗅覚と温覚につ

いて、これらを提示しなくても、その他の感覚情報によってこれらを補うことができるのではないかと思われる。

そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムでは

- 視覚情報
- 聴覚情報
- 触覚情報
- 力覚情報

の4つの感覚情報を取り上げ、これらを操作者に対して適切に提示することを目標とする。

### 5.1.2 情報の予測提示

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、マシン・サイトとオペレーション・ルームとを情報伝送回線によって結ぶ。オペレーション・ルームに存在する操作者が入力した操作情報は情報伝送回線を介してマシン・サイトに送られ、マシン・サイトに存在する加工機械は送られてきた操作情報にしたがって制御される。加工機械でおこなわれた加工情報はマシン・サイトに設けられた様々なセンサによってシステムに獲得され、情報伝送回線を介してオペレーション・ルームに送られる。オペレーション・ルームでは、受け取った情報を操作者に対して適切に提示する。

このように、情報伝送回線を介した制御をおこなう場合、たとえ通信が光速でおこなわれたとしても、そこには必ず情報伝送にともなう時間遅れが存在する。操作環境伝送型遠隔加工システムの場合にはさらに、慣性の大きな加工機械を制御対象とするため、加工機械自身にも制御信号を受け取ってから実際に動作を開始するまでに動作遅れが存在する。システムの中にはその他にも、動作遅れをとまなう要素は多々存在する。したがって、操作者がシステムに対して何らかの操作をおこなうと、

1. 操作者の入力した操作情報をマシン・サイトに送り出すまでの、オペレーション・ルーム内のシステムに起因する遅れ時間
2. オペレーション・ルームからマシン・サイトに情報を伝送する際の情報伝送にともなう遅れ時間
3. マシン・サイト内で加工機械に制御信号を送るまでに存在する遅れ時間
4. 加工機械が制御信号を受け取ってから実際に動作を開始するまでの遅れ時間
5. マシン・サイト内のシステムが加工状態をセンサによって獲得し、オペレーション・ルームに送り出すまでの遅れ時間
6. マシン・サイトからオペレーション・ルームに情報を伝送する際の情報伝送にともなう遅れ時間
7. マシン・サイトから受け取った情報を操作者に対して提示するまでの、オペレーション・ルーム内の遅れ時間

のすべてが合計されただけの時間が経過してから操作の結果が操作者に対して提示される。同様の考察は R. P. Paul らも [141] の中でおこなっている。この

中には、加工機械の動作遅れのようにシステムの特性から前もってその遅れ時間を予測可能なものも存在するが、一方で、操作環境伝送型遠隔加工システムで情報伝送回線として利用している *Internet* のように時々刻々状況が変化するために時間遅れの予測が不可能なものもある。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける時間遅れを前もって完全に予測することは不可能である。

R. J. Anderson らの報告 [3] によれば、力フィードバックの場合、時間遅れが 0.1 秒のオーダーを越えると操作性が低下し、システムの安定性が落ちる。同様に視覚や聴覚に関しても、現在知覚している視聴覚情報と自分がおこなっている操作との間の時間差が大きくなると、人間の持つメンタル・モデルとの相違から作業感覚が低下すると言われている(これは「空間失調」と呼ばれる)。すなわち、運動系と感覚系の間で情報の動機が取れていなければならず、したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムには、オペレーション・ルームの操作者がおこなった操作に対して遠隔地であるマシン・サイトで発生する現象を予測し時間遅れなくその現象を提示する情報の予測提示機能が必要である。

一般に、時間遅れ補償型の情報提示をおこなう時には、トレイグジスタンス分野でおこなわれているように、操作対象の存在する環境をオペレーション・ルームのコンピュータ内に構築し、その構築された仮想の操作環境に対して操作者が操作をおこなう。オペレーション・ルームのコンピュータでは操作者のおこなった操作を自らの保持する仮想環境に対して施し、発生する様々な情報を予測し操作者に提示する。したがって、この情報提示に関して情報のループは完全にオペレーション・ルーム内に閉じたループを構成しており、そのため、時間遅れのない情報提示をおこなえる。

このような情報の予測提示をおこなう場合にしばしば問題となるのは、オペレーション・ルームのコンピュータ内に構築した仮想操作環境が現実世界をどの程度再現したものとなっているかということである。当然、現実世界を極めて精緻に再現していれば、それに基づいて予測提示した情報は現実世界で発生する現象をよく表現できていると言えるし、もし一致の度合いが低ければ予測提示された情報は何の意味も持たない情報であることもありうる。

もちろん、現実世界を完全に再現することは非常に困難であるし、また仮に再現できたとしても、それを基にして予測をおこなうことは現在のコンピュータの処理能力から考えても時間やコストがかかる。したがって、この現実世界のモデル化と予測された情報の現実との一致度とはトレードオフの関係にあると考えられる。

ただし、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける情報の予測提示では、その操作対象とする現象が加工であり、5.2.1項で示すように加工現象をモデル化することは比較的容易におこなえる。その点で、一般的なテレイグジスタンス・システムのように一般的な環境を対象とするシステムとは異なり、操作環境伝送型遠隔加工システムではオペレーション・ルームのコンピュータ上に仮想操作環境(加工)を構築することは容易におこなえる。本論文で提案する予測情報提示では、この仮想操作環境によって予測された加工反力を積極的に利用する。

### 5.1.3 情報の強調提示

人間は自らの有する感覚器官で知覚できない情報を認識することはできない。すなわち、知覚できない情報は存在していないのと同じことである。しかし、そのような情報であっても、何らかの形で適切に提示することが可能であれば、それによって知覚可能な情報量が増え、現象をより詳しく認識できるようになる。

たとえば、暗闇の中では人間は周囲の情報を視覚によって獲得することは不可能であるが、赤外線領域の情報まで獲得可能なカメラを利用してその情報を提示することで、人間は暗闇でも視覚情報を知覚して周囲の状態を認識し、行動することが可能である。また、オーディオ機器に取り付けられているレベル・メータは現在聴いている音の大きさを視覚に提示する役割を果たす。それぞれの周波数に応じた音量を示すレベル・メータであれば、その情報を基にして音の成分の強弱を自分の好みに合わせて調整することも可能である。

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、操作者と加工機械とが互いに異なる空間に存在しているため、操作者がマシン・サイトの状態を知覚する手段はシステムから提示される情報しかない。そのため、操作環境伝送型遠隔加工システムで操作者に対して提示する情報には、操作者がマシン・サイトの状況を正しく認識できるように情報が要求される。逆に、マシン・サイトの状況を操作者が認識できるのであれば、操作環境伝送型遠隔加工システムの情報提示では必ずしもマシン・サイトの状況をそのまま操作者に対して提示する必要はないということも言える。

すなわち、マシン・サイトに設置されたセンサによって獲得可能な情報であっても、それを提示することが必ずしもマシン・サイトの状況を人間が認識するのに必要ではない情報は提示する必要はないし、また、提示することでかえって操作性の低下を招くような情報はむしろ提示すべきではない。たとえば前者では、マシン・サイトに設置されたマイクロフォンで収集されたマシン・サイトの雰囲気音(エア・コンプレッサの動作する音や加工機械の発するモータ音)が考えられるし、後者は5.2.2項で述べるように大きく変動する加工反力が挙げられる。

また逆に、もし操作者が加工機械のそばにいたとしても知覚できない情報であったり、知覚できたとしてもその情報がノイズに紛れて知覚しにくいような情報であっても、それを提示することで操作者がマシン・サイトの状況を理解しやすくなるのであれば、操作者が知覚可能な情報として、あるいは

操作者が知覚可能なレベルの情報として、そのような情報は強調して提示するべきであろう。これが情報の強調提示の基本概念である。

たとえば、工具に伝わる振動がある。もちろん自らの手で工具を持って加工をおこなうような場合には、工具を伝わってくる振動を感じることは可能であるし、これは加工状態を認識するのに非常に有効である。しかし、自動化された加工機械を用いて加工をおこなう時には、たとえ加工機械のそばにいたとしても工具の振動を感じることはできない。その情報は加工音に含まれる高周波成分の音の強弱で判断するしかない。もしここで工具に伝わる振動を音だけではなく振動としても知覚することが可能であれば、操作者は現在おこなわれている加工の状態をよりはっきりと認識することが可能であろう。さらに、操作者が加工の知識を持たない素人であったとしても、加工音中の高周波の音の強弱だけでは加工状態の変化を認識することはできないかもしれないが、そこに振動というより積極的に触覚情報に訴えかける情報が提示されていれば、音だけを提示された場合よりもはっきりと加工状態を認識できるであろう。

また、加工をおこなった際の加工表面の状態は、おこなわれた加工の状態を知るのに有効な情報である。つまり、加工表面にはっきりとした縞模様が生じていれば何らかの加工異常が発生したことがわかる。しかし、加工表面を加工している最中に観察することは不可能であり、加工終了後にしか観察できない。操作環境伝送型遠隔加工システムの場合はさらに、操作者が直接加工表面を観察することは不可能であり、カメラによって獲得した画像としてしか加工表面を見る手段は存在しない。この場合、加工終了後の加工表面は切削油や切屑によって覆われているため、カメラによって直接観察することはできないし、もし観察可能であったとしても、一般にカメラの分解能はそれほど高くないため、詳細な加工表面の状態を得ることはできない。この時にも、何らかの形で加工表面の状態を実時間で操作者に強調して提示することができれば、操作者は現在自分がおこなっている操作(加工)とその時に加工表面の状態を知覚することで加工現象をより詳細に認識することが可能となる。

加工音にしても、マシン・サイトでマイクロフォンによって獲得した音情報にはエア・コンプレッサの動作音や加工機械のモータの発する音のようなマシン・サイトの雰囲気音も含まれており、純粹に加工によって発生する音のみを聞きとることは難しい。そのような場合でも、それ以外の音成分を排除して加工音成分だけを強調して提示することができれば、操作者はよりはっきりと加工状態を認識できるはずである。

## 5.1.4 情報変換法

操作環境伝送型遠隔加工システムを実現する技術の中で最も重要な技術の一つが、各種センサから獲得した情報を操作者が知覚できる感覚情報に変換して提示する情報変換法である。ここでもう一度図2.3を引用する。

		操作者に提示する情報				
		視覚	聴覚	触覚	力覚	温覚
操 作 環 境	視覚センサ	●				
	空気中音 情報センサ	○	●			
	力センサ	◎	◎	●	●	
	熱センサ	○				●
	変形センサ		◎			
	表面振動 センサ		◎	●		

図 5.1 センサ情報の変換と提示

通常は図5.1の●印に示すように、画像情報は視覚情報に、音情報は聴覚情報に、力情報は力覚情報に、熱情報は温覚情報に提示される。しかし、このような一対一対応の情報提示では、センサによって獲得が可能な情報を提示することしかできない。すなわち、何らかの情報を操作者に対して提示したければ

- その情報を獲得するためのセンサを、情報を獲得可能な場所に配置する。
- 現実世界での情報獲得を諦め、コンピュータ上に構築した仮想世界を用いて発生する情報を生成し、それを操作者に対して提示する。

という二通りの解決策しかない。

たしかに前者は適切なセンサを適切な場所に配置することで実現は可能であるが、実際にはそのようなセンサが実在していなかったり、実在していても非常に高価なために余計なコストがかかったり、あるいはセンサが存在していても情報を獲得するためのセンサの配置場所がなかったりする。また、後者は完全にコンピュータ上で現実世界をシミュレートするため、構築した仮想世界のモデルが現実世界と整合性が取れていなければ、操作者に対して提示する情報は何ら現実世界の状態を表現するものとは言えず、一般に現実世界と高度に整合性の取れた仮想世界の構築は非常にコストがかかる。

これに対し、ここで述べる情報変換法は

利用可能なセンサによって獲得された情報に対して情報変換を施し、センサがないために実際には観測できない情報を生成して操作者に提示する

という情報提示手法である。これは、上に述べた従来型の一対一対応の情報提示に対して多対多対応の情報提示の手法ということもできる。そして、この情報提示手法は、上に述べた一対一対応の場合の二通りの解決策に見られる欠点をいずれも克服している。つまり、

- 現在利用可能なセンサから得られる情報に対して情報変換を施すため、新たにセンサを配置する必要がない。
- 情報変換した結果得られる情報は、仮想的に生成した情報ではあるが、その根本には現実世界から獲得された情報があるため、単にコンピュータ上でシミュレートした結果得られたものではなく、多少なりとも現実世界の情報を反映したものである。

という点で、いずれも上に述べた解決策の欠点を克服している。

現在も、たとえばオーディオ機器のレベル・メータで音の大きさを視覚情報に提示したり、人工現実感・テレロボティクス分野で力センサの情報をグラフ化してコンピュータのディスプレイ上に実時間で表示することなどは実際におこなわれている。そして、理論的にはこの表に示したすべての欄を埋める情報変換手法が考えられるが、必ずしもこれらすべてが意味を持つわけではない。

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、これまでに図5.1における◎印に示したような情報変換法に基づく情報提示の可能性を探ってきた。具体的には

1. 力センサから得られた力情報をコンピュータ・ディスプレイ上に実時間でグラフ化して提示する力覚情報-視覚情報変換
2. 力センサから得られた力情報を正規化し、それによって加工表面の状態を予測し強調して提示する力覚情報-視覚情報変換
3. 力センサから得られる力情報の大きさを正弦波の周波数や振幅に対応付けて音として提示する力覚情報-聴覚情報変換

4. 変形センサから得られた加工機械の変形情報を音として提示する変形情報-聴覚情報変換
5. 表面振動センサから得られた加工機械表面に生じる振動を音として提示する振動情報-聴覚情報変換

等をおこなってきた。本論文では、これらの様々な情報変換手法のうち、操作環境の状態をよくあらわし遠隔加工をおこなう上で非常に有効であった

- 力覚情報-視覚情報変換に基づく加工表面の予測・強調提示
- 力覚情報-聴覚情報変換に基づく加工音の予測・強調提示

の各手法について、5.4節および5.6節で述べる。

筆者は、この二つの情報変換提示手法がいずれも力覚情報を基にしていることに注目したい。

加工をおこなうということは、工具を工作物に接触させて力を加えることで工作物から不要な部分を取り除き、所望の形状に変形させることである。加工においては工具と工作物との間に作用する加工力(加工反力)が非常に重要な役割を果たし、その他の情報はすべてこの加工力が原因となって発生するものである。すなわち、加工力は加工における本質であり、その意味で、力センサによって獲得された力情報を情報変換の基礎情報とすることは、変換の結果得られた情報が加工現象を的確にあらわすことになると考えられる。

## 5.2 加工の物理モデルを用いた力覚情報の予測提示

一般に人間が有する感覚の中で、力覚と触覚は視覚・聴覚等の他の感覚と決定的に異なる性質をもっている。すなわち、視覚や聴覚が極めて受動的な感覚であるのに対し、力覚と触覚は人間自身の能動的な身体の動きを必要とする点である。このように運動系と感覚系の兼ね合いの中で認識がおこなわれるという観点に立つ研究分野はハプティクス(Haptics)と呼ばれ、人工現実感の分野では、たとえばMargaret Minskyの“Sandpaper”や岩田らの「フォース・ディスプレイ」[47,48,149]、製品ではVPL Research社のデータグローブ(Data Glove)がある[60]。

ここで、人間が工具を自分の手に持って加工をおこなう場合を考えてみると、この時、人間は自らが手を動かすことによって工具を動かし、それによって発生する工具と工作物との間の加工反力を直接的あるいは間接的に感じる。加工において感じられるこの力覚・触覚情報は、加工をおこなっている人間にとって

- 反力の発生/消滅 → 加工の開始/終了
- 反力の変化 → 工作物の材質の変化・加工状態の変化
- 振動の発生 → 加工異常の発生

といった加工現象の判断基準となっている。

もし、これらの情報を人間が知覚することなく加工がおこなわれるとすれば、人間が普段触覚情報に頼っている空間内での物体の位置や姿勢の知覚、空間内での精密な位置決めがおこなえないだけでなく、

加工とは、工作物に工具を接し、力を与えかつ工具の位置を動かすことによって工作物から不要な部分を取り除き、工作物を希望の形状に変化させることである

という人間の持つ経験的事実と反することになり、極めて不自然な作業感覚となることが予測できる。

したがって、力覚・触覚情報は加工を遂行する上で非常に重要な役割を果たしており、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて力覚・触覚情報を操作者に提示する機能は不可欠であると思われる。

しかし、操作環境伝送型遠隔加工システムで扱う工具はスクエア・エンドミルのような回転工具であり、回転工具による加工では、たとえ加工条件が

一定であっても工具にかかる加工反力の方向と大きさは時間的に大きく変動する。これは回転工具の複数の切れ刃と工作物とが工具の回転にもなって離合を繰り返すことに起因する。そのため、通常のバイラテラル・マスタ・スレーブ・システムで用いられているように、スレーブ・マニピュレータにかかる反力をそのまま操作者側のジョイスティックで再現するような制御をおこなうことは適当ではない。以下ではこの問題を解決するための力覚情報提示手法を提案し、実験によってこの手法の有効性を確認する。

### 5.2.1 加工の物理モデル

本研究で対象とする「加工」とは様々な加工法の中で切削加工と呼ばれる加工法であり、これは「工具と工作物との相対運動によって工作物に対して機械的な力を作用させてこれを局部的に破砕し、切屑を出しながら工作物を希望の形状・寸法・仕上げ面粗さに仕上げる行為」と捉えることができる。ここで、理想的な状態を仮定すれば、加工には通常の物理法則を適用することが可能であり、その切削機構を解析することによって、工具や切削条件に基づいたパラメータを用いて加工を表現することができるはずである。この時、理想状態の「加工」は完全に計算機上で表現することができる。これを本論文では加工の物理モデルと呼ぶ。

加工の物理モデルはそれを用いる用途に応じて多くの異なるものが研究されているが、操作環境伝送型遠隔加工システムでは割澤 [157] が提案したエンドミルに関する加工の物理モデルを用いることにした。これは図 5.2 を幾何学的・力学的に解析することによって得られるモデルである。

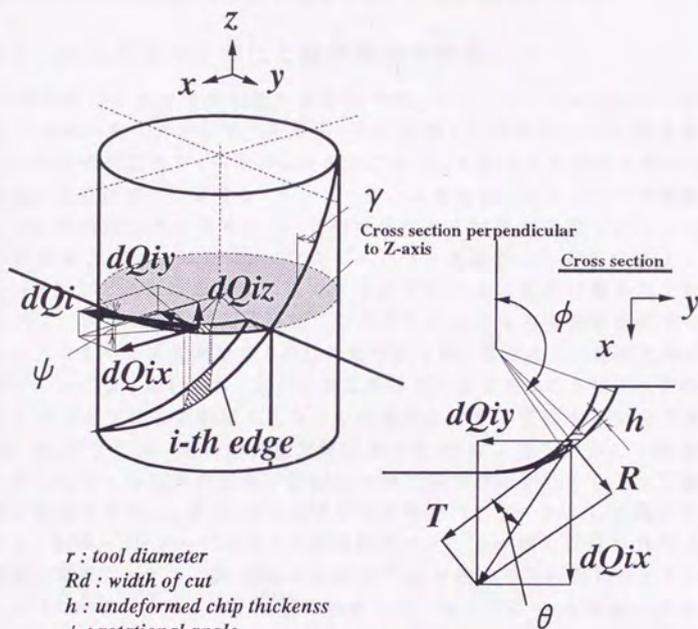
詳しい計算過程は [157] に譲るが、 $i$  番目の切れ刃に作用する各軸方向の切削抵抗  $Q_{ix} \sim Q_{iz}$  は

$$Q_{ix} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \left[ \frac{r}{\tan \gamma} C S_z^{1-\varepsilon} \sin^{1-\varepsilon} \phi \cos \left\{ \tan^{-1}(a S_z \sin \phi + b) \right\} \times \sin \left\{ \phi - \tan^{-1}(p S_z \sin \phi + q) \right\} \right] d\phi \quad (5.1)$$

$$Q_{iy} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \left[ \frac{r}{\tan \gamma} C S_z^{1-\varepsilon} \sin^{1-\varepsilon} \phi \cos \left\{ \tan^{-1}(a S_z \sin \phi + b) \right\} \times \cos \left\{ \phi - \tan^{-1}(p S_z \sin \phi + q) \right\} \right] d\phi \quad (5.2)$$

$$Q_{iz} = \int_{\phi_a}^{\phi_b} \frac{r}{\tan \gamma} C S_z^{1-\varepsilon} \sin^{1-\varepsilon} \phi \sin \left\{ \tan^{-1}(a S_z \sin \phi + b) \right\} d\phi \quad (5.3)$$

とあらわされる。ここに、 $\phi$  は工具の回転角、 $r$  は工具の半径、 $\gamma$  はねじれ角、 $S_z$  は一刃あたりの送り量をあらわし、 $C$  と  $\varepsilon$  は工具形状や工作物の材質



- $r$  : tool diameter
- $Rd$  : width of cut
- $h$  : undeformed chip thickness
- $\phi$  : rotational angle
- $dQ_i$  : infinitesimal cutting force of the  $i$ -th edge
- $dQ_{ix}$  : infinitesimal cutting force of the  $i$ -th edge for  $x$ -axis
- $dQ_{iy}$  : infinitesimal cutting force of the  $i$ -th edge for  $y$ -axis
- $dQ_{iz}$  : infinitesimal cutting force of the  $i$ -th edge for  $z$ -axis
- $\psi$  : angle between  $dQ_i$  and  $xy$ -plane
- $\theta$  : angle between tangential force  $T$  and  $dQ_i \cos \psi$
- $\gamma$  : helix angle

図 5.2 エンドミルの切削モデル

によって決まる定数、 $a$ 、 $b$ 、 $p$ 、 $q$ は未知パラメータである。

割澤はこれを数値積分によって解き、さらに実験により得られた加工反力情報を用いてパラメータを決定している。その結果得られた物理モデルによる加工反力は実際の加工反力と極めて良い一致を見せている。

### 5.2.2 加工反力の平滑化と操作環境の同定

一般的なバイラテラル制御システムでは、スレーブ・マニピュレータに加えられた反力をマスタ・マニピュレータに伝達し、操作者にそのまま提示することで操作反力のフィードバックをおこなう。そのための制御方式として、対象型・力逆送型・力帰還型・インピーダンス制御型・ハイブリッド制御型などの様々な制御方式が提案され、その可能性や有効性が確認されている。これらの制御方式は、スレーブ・マニピュレータに加わった力をマスタ・マニピュレータでどれだけ忠実に再現できるかという点に重点が置かれている。

しかし、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける力覚情報提示では、これらの方式をそのまま適用するのは適切ではない。なぜなら、回転工具によって切削をおこなう場合には、たとえ加工条件が一定であっても加工反力の方向と大きさが工具の回転とともに時間的に大きく変動するからである。

図5.3に示すのは、図の縦軸正方向( $y$ 軸正方向)に工具を動かして溝切削をおこなった時に得られた工具一回転分の加工反力データのうち、加工機械の主軸と垂直な平面( $xy$ 平面)内の力成分を時間をパラメータとして描いた曲線である。割澤ら[99,156-158]はこの加工反力ベクトルが描く曲線を力ベクトルの軌跡と定義しており、図5.3はその軌跡の $xy$ 平面への正射影になっている。以下で「力ベクトルの軌跡」と言う場合には、すべてこの $xy$ 平面への正射影をあらわすこととする。

この力ベクトルの軌跡を見てもわかるように、加工反力は工具一回転中に $-100 \sim 200(\text{N})$ の間を大きく変動している。さらに、切れ刃が2枚あり主軸回転数が $2000(\text{rpm})$ であることから、これは約 $66(\text{Hz})$ の周波数の振動である。問題が力の大きさだけであれば、これは従来型のバイラテラル制御方式においても考慮されているように、力の尺度を変えること( $\text{scaling}$ )によって解決できるが、これらの制御方式では振動に関して何も考慮していないため、そのまま操作環境伝送型遠隔加工システムに適用することはできない。

そこで、本論文では大きく変動しながら回転する加工反力を滑らかな力覚情報として操作者に提示する手法を提案する。具体的には以下のようにして変動する加工反力を平滑化し、それを操作者に対して提示する。

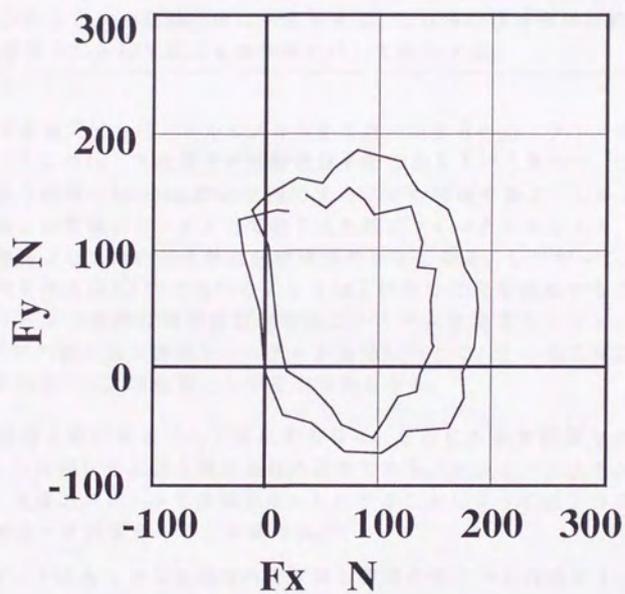


図 5.3 時間的に変動する加工反力ベクトルの軌跡

## 変動する加工反力の平滑化手法

工具が一回転する間に加工反力ベクトルが描く力ベクトルの軌跡の重心を求め、加工反力ベクトル空間における重心ベクトルのノルムをその間の加工反力の代表値とみなす。さらに、ここで求めた重心ベクトルの方向は工具の移動方向と一般に異なるため、重心ベクトルを原点の回りに回転させて、その方向を工具の移動方向に一致させる。これらの情報操作の結果得られる加工反力を操作者に対して提示する。

変動する加工反力ベクトルのノルムを工具一回転分の力ベクトルの軌跡の重心のノルムに均して高周波の振動成分を除去するという意味で、この手法は加工反力情報にlow-pass filterを適用することと同値である。しかし、加工反力情報を計算機にデータとして取り込む前にフィルタをかけると、工具の回転周波数よりも高い周波数成分が獲得できなくなる。したがって、フィルタをかける方法は5.3節で述べるような加工状態の変化を検知することが不可能になる点で操作環境伝送型遠隔加工システムは望ましくない。そのため、すべての加工反力情報をシステムが獲得した上で、その加工反力を平滑化するという、ここで提案した手法が有効となる。

力覚情報を操作者に対して提示するには、さらに大きな問題点が存在する。それは情報伝送に伴う時間遅れの存在である。テレラグジスタンスの分野では、遠隔のロボットを自律ロボットとすることによって以下のような手法で時間遅れを吸収することを試みる。

ロボットはあらかじめ環境内を探索し環境のモデルを作成する。このモデルが遠隔のオペレータ支援コンピュータシステムに送られ、コンピュータはモデルとオペレータの状態から適切かつ臨場的な視聴覚や触覚力感覚などの情報提示を行う。オペレータはこの臨場的疑似環境に対して作業し、その状況のエッセンスが遠隔のロボットに送られる。ロボットはテレラグジスタンスモードではこの送られた指令を解釈して作業するとともに、必要に応じて環境のモデルを追加したり修正したりする。指令どおり行くと不都合な場合にはモデルが正しくないわけで、安全な状態で停止し、新しいモデルを推定し、状態とモデルをオペレータに送る。オペレータは新しいモデ

ルに基づく臨場的疑似環境に対して作業しなす。こうして、実際には計算量の問題やモデルの推定など多くの未解決の問題を含むが、理論的には時間的拡張が可能となる。(館 [143](pp.468)より)

この方法を実現する上で最も難しいのは操作環境の同定(identification)とそれに基づくモデルの構築である。テレイグジスタンス分野で実現しようとしている遠隔操作システムでは、操作環境が多岐に渡るため、操作環境を最初から完全に同定することは困難である。しかし、操作環境伝送型遠隔加工システムではその操作環境を「加工」に特化しており、そのため、5.2.1項でも示したように物理モデルを比較的容易に得ることができる。そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける時間遅れのない力覚情報提示を実現するために以下の手法を提案する。

#### 時間遅れ補償型力覚情報提示手法

加工の物理モデルを用いて操作環境を予めオペレーション・ルームで同定し、オペレーション・ルームのコンピュータ内に仮想の操作環境を構築する。操作環境伝送型遠隔加工システムを用いて遠隔加工をおこなう操作者は、構築された仮想の操作環境に対して操作をおこなう。オペレーション・ルームのコンピュータでは、操作者の入力した操作情報および自らが保持する仮想操作環境からマシン・サイトで発生する加工反力を予測し、操作者に対して予測した加工反力を時間遅れなく提示する。

この手法は以下に示す利点を持つ。

- 力覚情報提示に関する情報がオペレーション・ルーム内に閉じたループを形成するため、ほとんど時間遅れなく力覚情報を提示することが可能である。すなわち、時間遅れはオペレーション・ルームのシステムのみ依存し、マシン・サイトや情報伝送回線の影響をまったく受けない。
- オペレーション・ルームと同じ物理モデルをマシン・サイトでも保持しておくことにより、マシン・サイトで獲得した実際の加工反力を物理モデルと比較し、現実とモデルとの差異がそれほど大きくなければマシン・サ

イトからオペレーション・ルームに力覚情報を伝送する必要がない。これは限られた情報伝送量の回線を用いている場合には非常に重要である。

上記のような手法で力覚情報を提示する場合、重要なのは工具の送り速度(一刃あたりの送り量)とその時の加工反力(重心ベクトルのノルム)との関係である。したがって、実際には力覚情報を提示するために図5.4に示すような関係がわかっているならば、ジョイスティックの移動速度から加工機械の移動速度を知ることができ、その情報と図5.4の関係を用いて発生する加工反力を予測することが可能となる。

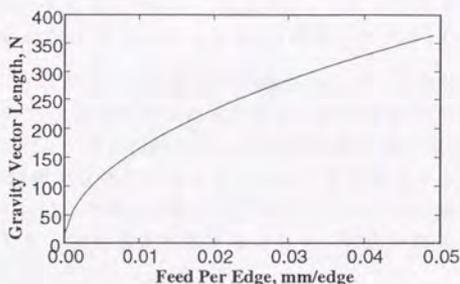


図 5.4 工具の速度(一刃あたりの送り量)と加工反力(重心ベクトルのノルム)との関係

加工機械の動特性をメカニカル・インピーダンスとしてとらえる時、弾性項はほとんど無視してもかまわないと考えられる。また、実際には無駄時間要素および慣性項の影響が大きいが、これらをジョイスティックにフィードバックすることは操作性の低下を招くと考えられる。そこで、粘性項のみを操作者に対して提示する制御方式を用いる。この時、速度ベクトルと力ベクトルとは線形の関係にある。ここで言う力ベクトルは、操作者がジョイスティックに加えた力  $F_J$  と仮想の加工反力  $F_C$  の偏差であり、さらに、加工反力は非常に大きな値をとるので  $\alpha$  という scale factor をかけて、 $F_J - \alpha F_C$  と速度ベクトルが線形関係にあると考える(式(5.4))。

$$\dot{\mathbf{x}} = K(F_J - \alpha F_C) \quad (5.4)$$

ここで、 $\mathbf{x}$  はジョイスティックの速度ベクトルをあらわし、 $K$  は粘性係数の逆

数を意味する定数である。実際には $K$ は各軸方向で同一ではないために行列としてあらわされるべきであるが、単純化のために各軸方向で一定とした。

具体的な制御方式をまとめると以下のようなになる。

1. 操作者からジョイスティックに何も力が加えられていない場合には、ジョイスティックは移動しない。したがって加工がおこなわれず、加工反力も発生しない。
2. 操作者からジョイスティックに力が加えられると、その力に応じてジョイスティックの速度が式(5.4)より決定され、その速度指令がジョイスティックの各軸のモータに伝えられ、ジョイスティックが動作を開始する。動作開始の瞬間には加工反力ベクトル $F_0$ は $0$ (零ベクトル)とする。
3. ひとたびジョイスティックの操作が開始されると、以後は、直前のサンプリングにおいて決定されたジョイスティックの速度ベクトルのノルムおよび制御コンピュータが保持している送り速度と加工反力(重心ベクトルのノルム)の関係を記述したマップを用いて仮想の加工反力(スカラー量)が決定され、さらに、その加工反力とジョイスティックの速度ベクトル方向の単位ベクトルとの内積を計算することで、仮想の加工反力ベクトルが決定される。
4. 操作者がジョイスティックに加えた操作力(ベクトル量)と3で決定された仮想の加工反力ベクトルを式(5.4)に代入することでジョイスティックの速度ベクトルを決定し、ジョイスティックの各軸のモータを駆動する。ただし、万が一、操作力よりも仮想の加工反力ベクトルの方がノルムが大きくなった場合には、ジョイスティックの目標速度は $0$ (零ベクトル)とする。
5. 以後、ジョイスティックに操作力が加えられている限り、3と4が繰り返される。

なお、加工機械の制御器(NCコントローラ)は移動量によって加工機械の制御をおこなうため、基本的には加工機械はジョイスティックとの位置偏差による位置制御しかできない。しかし、単位時間あたりの移動量をジョイスティックのそれと合わせて変化させることにより速度制御的な効果を持たせる。ただし、オペレーション・ルームから見た場合、加工機械の制御はopen loop制御である。

以上の概要を図5.5に示す。



### 5.2.3 力覚情報提示実験

この実験は、加工の物理モデルを用いて力覚情報を予測提示するジョイスティックの制御方式の有効性を確認する目的でおこなった。これにより実際の加工反力と物理モデルから予測した仮想加工反力の関係を調べ、その操作性を確認する。

#### 5.2.3.1 実験方法

実際の加工反力と加工の物理モデルから予測し操作者に提示した仮想加工反力との関係を調べる目的で実験をおこなった。オペレーション・ルームとマシン・サイトは同じ室内とした。加工状態の映像は提示しないが、加工が同一空間でおこなわれているため加工音は聞くことができる。

実験で用いた工作物(図5.6)はS45Cで、工具は $\phi 5$ のスクエア・エンドミル(図5.7)を用い、工具の主軸回転数は2000(rpm)、切削深さは2.0(mm)とした。また、式(5.4)における $\alpha$ を1.0、0.5、0.2、0.1、0.02、0.01と変化させ、操作者が操作しやすい条件を探すことを試みた。



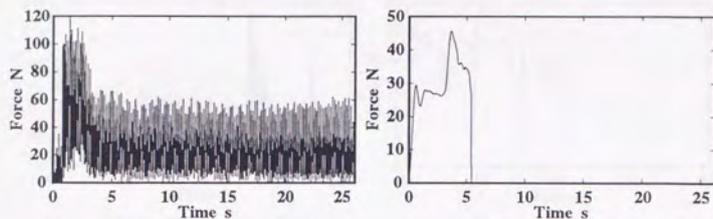
図 5.6 実験で用いた工作物



図 5.7 実験で用いた工具

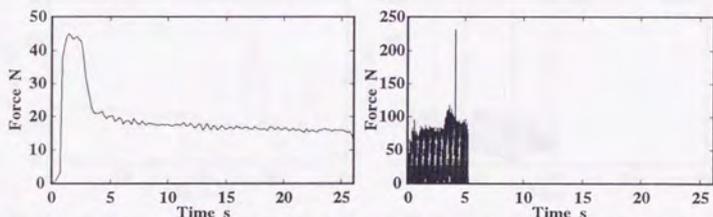
## 5.2.3.2 実験結果

図 5.8～図 5.13に $\alpha$ を1.0から0.01まで段階的に変化させておこなった実験の結果を示す。



測定したカデータのノルム

ジョイスティックに加えられた力

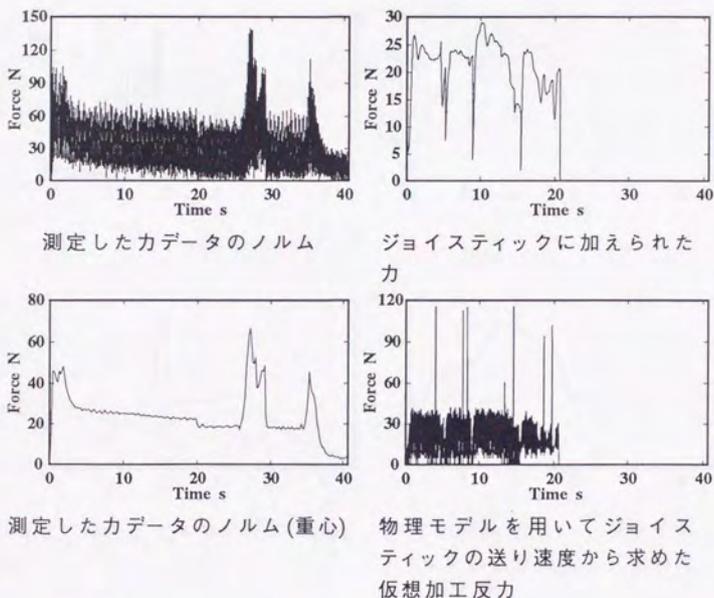


測定したカデータのノルム(重心)

物理モデルを用いてジョイスティックの送り速度から求めた  
仮想加工反力

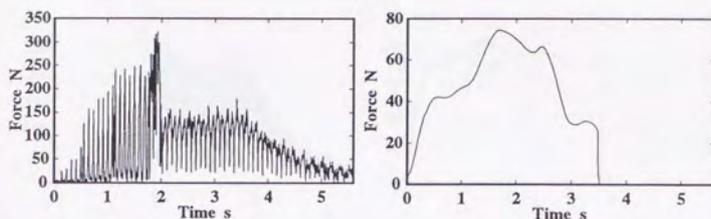
工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: X軸正方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削
反力の倍率 $\alpha$	: 1.0倍		

図 5.8 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その1)



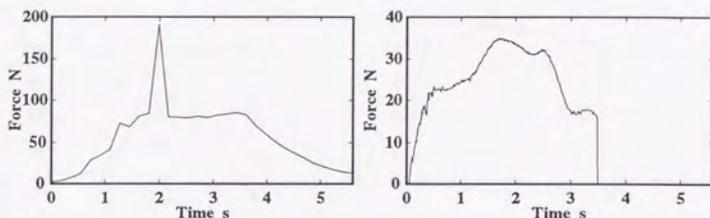
工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: X軸正方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削
反力の倍率 $\alpha$	: 0.5倍		

図 5.9 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その2)



測定したカデータのノルム

ジョイスティックに加えられた力

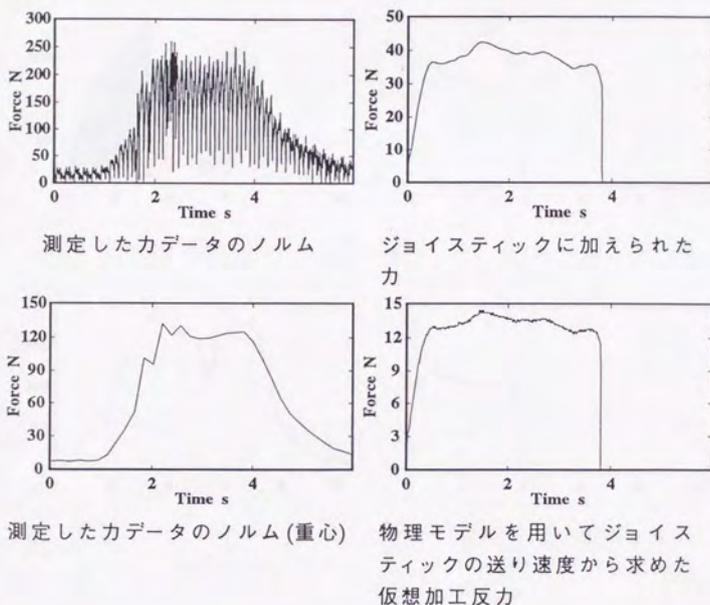


測定したカデータのノルム(重心)

物理モデルを用いてジョイスティックの送り速度から求めた仮想加工反力

工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: X軸正方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削
反力の倍率 $\alpha$	: 0.2倍		

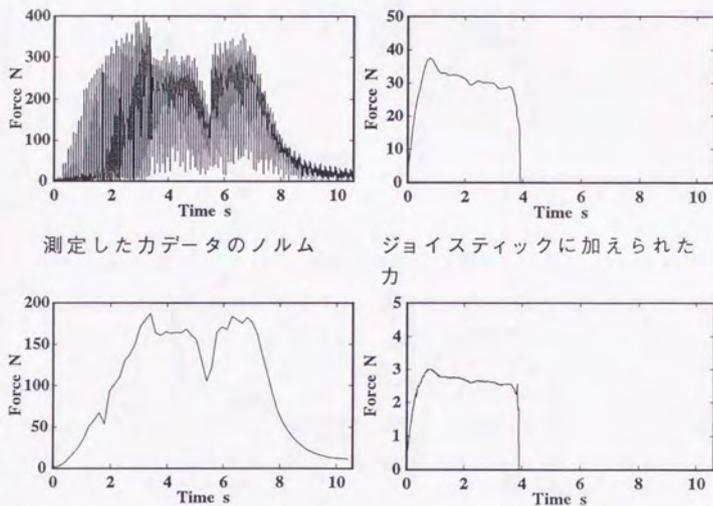
図 5.10 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その3)



工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: X軸正方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削

反力の倍率  $\alpha$ : 0.1倍

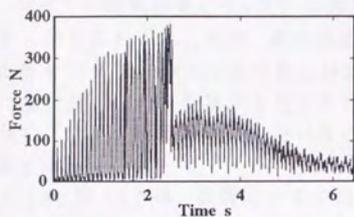
図 5.11 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その4)



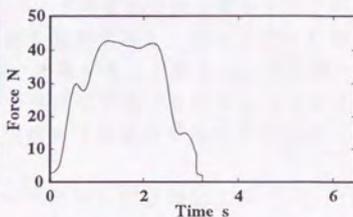
測定したカデータのノルム (重心) 物理モデルを用いてジョイスティックの送り速度から求めた仮想加工反力

工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: Y軸負方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削
反力の倍率 $\alpha$	: 0.02倍		

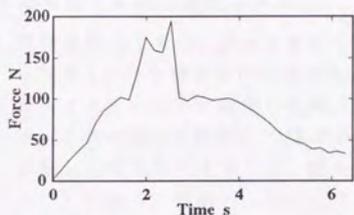
図 5.12 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その5)



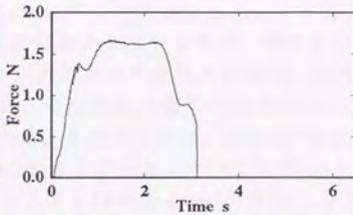
測定したカデータのノルム



ジョイスティックに加えられた力



測定したカデータのノルム(重心)



物理モデルを用いてジョイスティックの送り速度から求めた仮想加工反力

工具直径	: 5(mm)	刃数	: 2枚
工具形状	: スクエア・エンドミル	主軸回転速度	: 2000(rpm)
送り方向	: Y軸正方向	切り込み深さ	: 2(mm)
切削幅	: 5mm	切削形式	: 溝切削

反力の倍率 $\alpha$ : 0.01倍

図 5.13 加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示実験 (その6)

### 5.2.3.3 考察

まず、測定した生の力データのノルムのグラフ(左上)と工具が一回転する間の力ベクトルの軌跡の重心ベクトルのノルムのグラフ(左下)を比較すると、すべての実験結果について、生の力データの変動成分が除去されていることがただちにわかる。また、両者の波形を比較すると、生の力データのノルムと重心ベクトルのノルムの間には強い相関があると言える。したがって、5.2.2項で提案した「変動する加工反力の平滑化手法は有効であると言える。

次に、加工の物理モデルを用いた力覚情報予測提示手法の有効性について考察する。

図5.8と図5.9では、物理モデルを用いて予測した仮想加工反力(右下)が振動しており、また、これらは実際の加工反力のノルムとほとんど一致していない。実際に操作をおこなった人間からの報告により、これは以下に述べることが原因であると推定される。

1. 操作を開始する時、ジョイスティックは静止しているため、操作者がジョイスティックを動かすにはそれほど大きな力を必要としない。しかし、ジョイスティックを動かし始めると、その速度に応じた仮想加工反力がジョイスティックに対して提示される。その大きさは、図5.8の場合には予測した加工反力と等しく、図5.9の場合には予測した加工反力 $\times 0.5$ であり、この場合、予測した加工反力の大きさはおよそ50(N)程度になる。
2. ジョイスティックの制御は5.2.2項で述べた通り、操作者がジョイスティックに与えた力と仮想加工反力の差によって速度が決定されるため、操作者がジョイスティックに一定の力を与えていても、仮想加工反力が提示されると必然的にジョイスティックの速度が低下する。ここで問題としている二つのケースでは、仮想加工反力はおおよそ25~50(N)程度であるため、最初にジョイスティックに与えられた力がそれほど大きくない場合にはジョイスティックが停止する。
3. ジョイスティックの速度が低下すると、操作者は自分が望んだ速度で操作をしようとして与える力を大きくする。一方、速度が低下すると仮想加工反力は小さくなるため、ここで両者の力の差は非常に大きくなり、ジョイスティックの速度は上がる。その結果、次に予測される仮想加工反力はさらに大きくなる。
4. この状況が繰り返される結果、仮想加工反力は大きな振幅で振動し、操作者はジョイスティックの制御が不可能となる。

実際、図 5.8 や図 5.9 では、操作者はできるだけ操作を続行しようとしたがついには操作不可能な状態となってしまった。また、ジョイスティックの移動速度が上記の理由で不規則に振動したため、加工機械の制御が追い付かなくなり操作終了後もしばらく加工機械は動き続けた。

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、操作環境(加工現象)をそのまま提示することは必ずしも適切ではなく、操作者が「わかりやすい」「操作しやすい」情報提示を実現することが重要である。そこでもう一度図 5.8 と図 5.9 を見ると、操作者がジョイスティックに加えた力(右上)を仮想加工反力(右下)が越えており、これらの実験が上記のような結果となったのは、仮想加工反力を提示する scale factor  $\alpha$  が適切ではなかったことが原因であると考えられる。

この点に注意して図 5.10 と図 5.11 を見ると、こちらの仮想加工反力は操作者がジョイスティックに加えた力に対してその大きさが常に 30 ~ 50% 程度となっている。この場合、操作者の加えた力の一部が加工反力に対抗するのに使われ、残りの力が加工に費やされる。この二つの実験の時には、操作者は思い通りにジョイスティックを制御し加工をおこなうことができた。すなわち、「操作者が加工反力を感じながら加工をおこなう」という操作環境伝送型遠隔加工システムにおける力覚情報提示の本来の目的が実現された。

また、図 5.12 と図 5.13 では、仮想加工反力は操作者がジョイスティックに加えた力の数 ~ 10 数% 程度となっている。この時には操作者がジョイスティックをかなり自由に操作することが可能であったが、その反面、仮想加工反力をほとんど感じられなかった。

以上より、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける力覚情報提示では

操作者に対して提示する仮想加工反力は、操作者の発揮できる力の数 10% 程度の力として提示することが望ましい。操作者はこの程度の大きさの反力が提示される時に限って操作をしている実感を得ることができる。操作者の発揮できる力よりも反力が大きくなる場合には系は発振し、また、反力が小さ過ぎる場合には操作者に操作している実感を伝えることはできない。

という知見が得られた。

次に、時間遅れ補償とその効果について考察する。

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、マシン・サイトとオペレーション・ルーム間での情報伝送の時間遅れを補償するために加工の物理モデルを用いてオペレーション・ルームのコンピュータ上に仮想操作環境を構築し、操作者はこの仮想環境に対して操作を施す。仮想環境から操作者に対して提示され

る情報は、時間遅れなく提示されることは必須であるが、必ずしも現実の加工現象と完全に一致している必要はなく、操作者にとって「わかりやすい」「操作しやすい」情報であることが要求される。

この観点から図5.8～図5.13を見ると、結果的に系が発振した図5.8と図5.9を除けば、その他の4つの実験では実際の加工反力の大きさの点で多少のずれはあり、また、波形も完全に相似ではないものの、比較的良く実際の加工反力を予測できている。さらに、情報の流れがオペレーション・ルームで閉じているために、操作者がジョイスティックを操作すると同時に仮想加工反力が操作者に提示され、そこには時間遅れはほとんどない。また、仮想加工反力の予測には操作者がジョイスティックに加える力情報が主に用いられているため、仮想加工反力には実際の加工反力ほど振動成分が含まれず、その結果、安定して操作をおこなうことが可能となっている。

これらの点より、本論文で提案した

加工の物理モデルを用いてオペレーション・ルームのコンピュータ上に仮想操作環境を構築し、操作者が仮想環境に働きかけることで時間遅れなく加工反力を提示する手法

の有効性が確認できたと言える。

### 5.3 振動による加工状態の強調提示

加工の知能化を進める立場では、加工状態をインプロセスで実時間に測定しようとする試みはこれまでも広くおこなわれてきた(たとえば[123,152,158])。また、ここで加工異常が検知された場合に実時間で加工条件を変更して加工を正常に戻すこともおこなわれている[99,124,125,156,157]。

これに対し、操作環境伝送型遠隔加工システムでは加工機械の操作を人間がおこなうため、加工異常が発生した場合の加工条件の変更は操作者自身がおこなう必要があり、そのため、操作者に対して加工状態を提示する機能が必要である。

一般に、加工異常は工具の振動(びびり)という形態で観測されることが多く、これは加工反力の高周波成分として検出可能である。しかし、5.2節で提案した力覚情報提示では、変動する加工反力を平滑化して提示するため、加工状態を力覚として操作者に提示することはそのままでは不可能である。そこで、偏心カムを取り付けた振動モータをジョイスティックの操作部に組み込み、加工異常に起因するびびり振動を同じ振動という形態で操作者の触覚に提示する手法を提案する。

ここで、加工状態を振動として提示するのは、工具を手を持って直接加工をおこなう時と同じ操作感覚を操作者に与えられることだけが要因ではなく、触覚が以下に述べるような特徴を持っているからである。

感覚について考える時、重要なのは主に(i)知覚可能な刺激の周波数範囲、(ii)異なる刺激量の刺激を与えた時の弁別能力、(iii)知覚可能な刺激が与えられた時の反応速度、および、(iv)単位時間あたりの感覚情報処理能力であり、触覚に関して(i)~(iv)は以下のようにになっている[29,122]。

#### (i) 知覚可能な周波数範囲

振動については、感知可能な周波数範囲は0.1~3000(Hz)である。ただし、1(Hz)以下の緩慢な振動は動揺として区別されることもある。

#### (ii) Weber比

たとえば振動刺激・聴覚について周波数弁別に関するWeber比[29]は

	Weber比	周波数領域
振動覚	0.2~0.25	20~300Hzにおいて
聴覚	0.001~0.003	1000Hz以上において

であり、振動覚の周波数弁別能力は聴覚に比べるとかなり悪い。また、強度弁別閾は圧刺激でも振動刺激でもおよそWeber比は0.1～0.2の範囲にある。

### (iii) 反応速度

視覚・聴覚・触覚に関してその反応速度は以下のようになっている。

	反応時間 (ms)
視覚	150 ~ 225
聴覚	120 ~ 185
触覚	115 ~ 190

これを見る限り、触覚は視覚や聴覚と比べて反応速度が速い。ただし、反応速度は作業環境や刺激強度、疲労、練習などによって強く影響を受けるし、刺激が繰り返されることにより反応時間が長くなる傾向にあることが知られている。

### (iv) 短時間あたりの情報処理能力

視覚・聴覚・触覚の情報処理能力を以下に示す。

	情報処理能力 (bit/sec)
視覚	~ $10^7$
聴覚	~ $1.5 \times 10^6$
触覚	~ $0.2 \times 10^6$

これより、触覚情報の単位時間あたりの処理能力は視覚や聴覚よりも多少劣ることがわかる。

これからもわかるように、触覚はその他の視覚や聴覚に対してそれほど有利な点を多く持っているわけではない。しかしながら、操作環境伝送型遠隔加工システムでは加工状態の変化を迅速に操作者に知覚させることが重要であり、その点で(iii)に示した反応速度の項が意味を持つ。

#### 5.3.1 実時間加工状態判定法

一般に、加工反力情報を用いて加工状態を判定する場合、FFTを用いた周波数分析が利用されることが多い。しかし、回転工具を用いた加工の場合、主軸回転と切れ刃の数にしたがって切削力が周期的に変動するため、FFT解析の

結果には加工異常を示す振動の周波数成分だけでなく、主軸回転にともなう周波数成分およびその倍数成分にもピークがあらわれ、これらをコンピュータ上で判別するのは非常に困難である。また、FFT解析は実時間性に乏しい。

これに対し、割澤らは力ベクトルの軌跡の分散を用いた実時間加工状態判定法を提案し [158]、加工異常を実時間で検知して自律的に加工条件を変更していく知能化生産システムを示した [156,157]。操作環境伝送型遠隔加工システムでは、この実時間加工状態判定法に対してさらに修正を加えた修正型実時間加工状態判定法を、操作者に対して加工状態を提示するための加工状態の判定基準に用いる。

スクエア・エンドミルを用いて溝切削をおこなった場合について、(i) 正常切削、(ii) びびりをともなった切削、および、(iii) 物理モデルにより計算した場合の力ベクトルの軌跡をそれぞれ図 5.14、図 5.15、図 5.16 に示す。

力ベクトルの軌跡を見ると、正常切削時の軌跡は滑らかな円形を描いているが、びびりをともなった場合の軌跡は高周波成分の重畳により鋸刃状になっている。実時間加工状態判定法では、この形状の違いを定量化して加工状態の判定に用いる。具体的には力ベクトルの軌跡の分散を考える。すなわち、工具一回転分の力データから力ベクトルの軌跡の重心  $G$  を求め、この重心から各測定点への距離の分散  $V(|F_i - G|)$  を計算する。そして、この分散の大小およびその経時変化によって加工状態を判定する。

しかし、実時間加工状態判定法で用いられる加工反力ベクトルは、実際には p.150 の式 (5.1) 等に示した通り、工具一刃あたりの送り量  $S_z$  に依存して変化するため、純粋に加工状態をあらわす指標としては用いにくい。すなわち、ある  $S_z$  を想定して分散値の大小で加工状態を判定しようとしても、 $S_z$  が想定された値よりも小さければ加工異常が発生しても異常とみなされなかったり、その逆に、 $S_z$  が想定値よりも大きければ正常切削でも加工異常とみなされてしまう。

そこで、式 (5.1) ~ 式 (5.3) であらわされる切削抵抗がそれぞれ  $S_z^{1-\epsilon}$  に比例するという仮定のもとに、以下のように重心ベクトルと分散を簡略化する。

$$|G| = C_g S_z^{1-\epsilon} \quad (5.5)$$

$$V(|F_i - G|) = C_v S_z^{2(1-\epsilon)} \quad (5.6)$$

ここに、 $C_g$  と  $C_v$  はそれぞれ工具や工作物によって決まる定数である。そして、これらを用いて

$$M = \frac{V}{|G|^2} \quad (5.7)$$

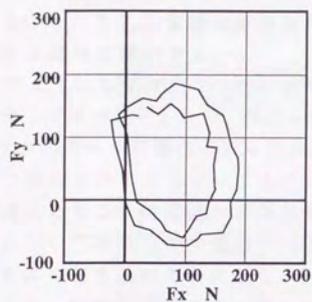


図 5.14 正常切削時のカベクトルの軌跡

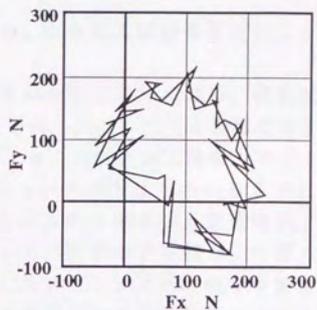


図 5.15 びびり切削時のカベクトルの軌跡

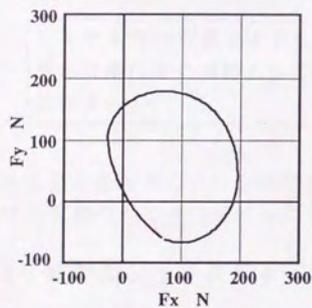


図 5.16 物理モデルによるカベクトルの軌跡

であらわされる加工状態指数 (Machining State Index) を定義する。理論 (物理モデル) 上は加工状態指数  $M$  は定数  $C_v/C_g^2$  であるが、実際には、分散値に振動成分  $V_{vib}$  が含まれることによって

$$M = \frac{V}{|G|^2} = \frac{C_v}{C_g^2} [\text{定数}] + \frac{V_{vib}}{C_g^2} [\text{変動成分}]$$

となる。これで  $S_z$  の影響は排除されたため、この加工状態指数を加工状態を判定する基準に採用する。

このようにしてマシン・サイトで判定された加工状態指数は、情報伝送回線を介してオペレーション・ルームに伝送され、次項に述べる振動型ジョイスティックのモータ制御に用いられる。このとき、実際に加工異常がマシン・サイトで検知されてからジョイスティックのモータが振動を始めるまでには情報伝送にともなう時間遅れが存在する。これは操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて本論文で主眼の一つとしている「情報の予測提示」の観点からすると本来望ましいことではない。しかしながら、システム側で予測が可能であるような加工異常であればそれはシステム側で予め加工条件を修正して加工異常が発生しないようにできるはずである。

すなわち、本論文で提案する加工状態の強調提示は

システム側で予測できずに発生してしまった加工異常を、速やかに操作者に振動として通知し、加工条件の変更を操作者に促す

ということを目的としているのであり、その意味でこの部分に存在する時間遅れは不可避のものとして扱うことにする。

### 5.3.2 振動型ジョイスティックの構築と加工状態の強調提示

電動ドリル等を用いて加工をおこなう際に、人間は手に伝わる振動や加工反力で加工状態を認識する。しかし、5.2節で提案した力覚提示手法では加工反力を平滑化して提示するため、振動を伝えることはできない。一方、触覚は視覚や聴覚に比べて反応速度が早いという特徴を持っているため、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて加工状態の変化を操作者に対して提示するのに触覚情報は有効であると思われる。すなわち、

- 回転工具 (ドリル等) による加工と同じような操作感が得られる。

- 力覚情報とは独立して微小な振動で加工状態の変化を提示できる。
- 視覚や聴覚よりも反応速度が速く、さらに、操作をおこなっている手に直接的に情報を提示できるため、加工異常が発生した場合に素早い対応が期待できる。

といった利点がある。そこで、操作者に対して振動情報を提示可能なジョイスティックを製作した。それを図5.17に示す。

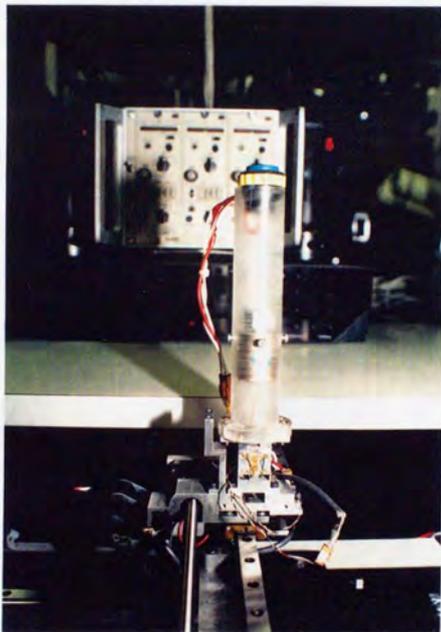


図 5.17 製作した振動型ジョイスティックの操作部

また、その操作部の図を工具の振動と対比させる形で図5.18に示す。これらの図からもわかるように、操作部には偏心カムを取り付けたモータが搭載されている。使用したモータは市販のもの(マブチモータ; RE-280)である。このモータの回転数を変化させることで加工状態の変化を操作者に対して提示する。モータの回転数の設定は以下のように設定した。

モータの回転数とモータの駆動電圧との間にはほぼ比例関係が成り立つため、マシン・サイトから送られてきた加工状態指数  $M$  を電圧値  $E$  に変換し、実時間制御器のD/Aコンパータを介してモータの駆動電圧を制御する。変換には

$$E = 46.0 \times M + 1.5$$

という変換式を用いた。これらの数値は  $M$  の加工中の変動範囲 ( $0 < M < 0.2$ ) とモータの定格 ( $2 < E(V) < 5$ ) を考慮して決めた。

### エンドミル 振動型ジョイスティック

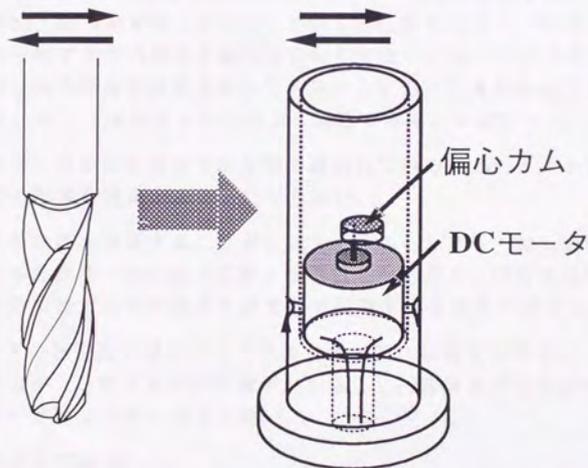


図 5.18 振動型ジョイスティック

#### 5.3.3 加工状態提示実験

加工状態を振動として提示する加工状態提示実験については、6.1節で述べる。

#### 5.4 力覚情報－視覚情報変換に基づく加工表面の予測・強調提示

切削加工をおこなっている最中に知りたい情報の一つに加工状態がある。すなわち「現在、どのような状態で加工がおこなわれているか」という情報である。そして、加工の結果得られる工作物の加工精度も加工にとって重要な意味を持つ。ただし、ここで言う「加工精度」とは、正常な工具経路で加工をおこなった場合に、途中で発生した加工異常によって加工表面にあらわれる振動痕や表面粗さを指す。

たとえば、加工時の工具の振動は、それによって発生する加工表面の振動痕を操作者に予想させることができ、このための情報提示手法については既に5.3節で述べた。しかし、この情報(振動による加工状態提示)でわかるのはあくまでも「加工中」の加工状態の変化であって、実際に加工をおこなった結果得られる加工表面がどのようなになっているかはわからない。この目的のためにはやはり加工表面の状態を操作者に対して提示することが必要である。

ところが、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて実際の加工表面の状態を操作者に対して提示するのは非常に困難である。なぜなら

1. 実際の加工表面は切削油や切屑等で覆われているため、カメラで直接加工表面の映像を獲得することはできない。
2. 仮に直接映像を獲得することが可能であったとしても、加工表面にあらわれる振動痕は一般に非常に細かな模様となるため、現在利用可能なカメラの分解能ではその細かな状態まで獲得することはできない。
3. 当然、工作物を加工機械から外せば加工表面の状態を獲得することは可能であるが、これは非常に手間がかかる上に、遠隔地からその状態を確認したいという目的には合わない。

という理由からである。

そこで、加工表面の状態を視覚情報としてカメラで獲得する方法は操作環境伝送型遠隔加工システムでは用いず、加工表面の状態と強い相関があると考えられる加工反力の情報を元に、加工表面に現れる振動痕を予測し、それを視覚情報として強調して操作者に対して提示する方法を提案する。

ただし、ここで言う予測とは、現在の状態から将来発生することを予期する意味での予測ではなく、既に発生したが現在は観測できないことを操作者に対して予め提示するという意味での予測である。

## 5.4.1 加工表面の予測原理

ここでは工具と工作物の加工中の接触を点接触と仮定する。図 5.19 はスクエア・エンドミルを用いて側面切削をおこなっている際の様子を示したものである。工具が回転することにより、工具と工作物との接触点は下から上に

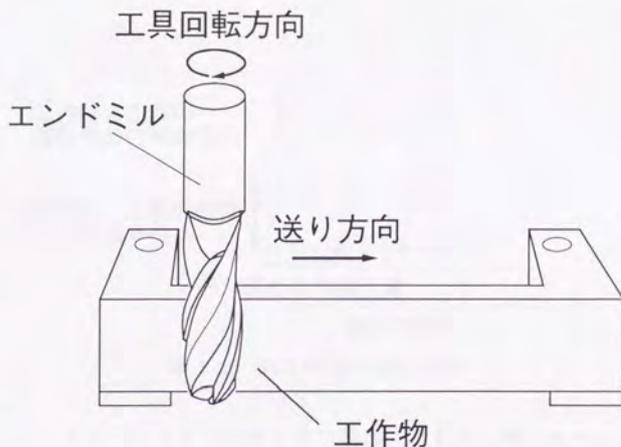


図 5.19 スクエア・エンドミルによる側面切削

移動し、それとともに工具は送り方向に移動する。ここで、

$$F = k \cdot x \quad (5.8)$$

と単純化して考える。ただし、 $F$  は加工反力を、 $x$  は切り込み深さを、 $k$  は定数である。この単純化は、ある時刻における加工反力と切削量とが線形の関係にあることを仮定していることを意味する。これによって、適当な  $k$  を設定することで加工反力から切削量を推測し、この推測された切削量  $x$  を操作者に対して提示する。

ただ、人間が実際に加工表面を見た場合でも、この切削量の変化による凸凹は非常にスケールが小さい上に振動周期が短いため、奥行き情報として把握することはほとんどないものと思われる。つまり、実際には、この加工表面の凸凹をその表面で生じる光の反射量の違いによる明暗で判断しているの

ではないかと考えられる。

そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける加工表面状態の提示においても、力情報を8bitのグレイ・スケール値に変換し、その情報をその時点での接触点に描画することにした。そのイメージを図5.20に示す。図に示す黒

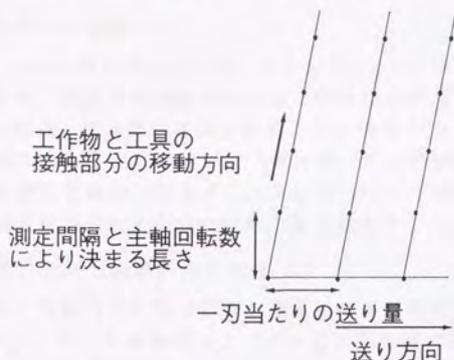


図 5.20 加工表面の提示方法

点がデータのサンプリング点でありかつ描画点である。深く切削した場合には人間の目には黒く見え、切削量が小さい場合には白く見えると考えられるので、加工反力が大きいほど黒く、小さいほど白く見えるようにグレイ・スケール値を割り当てて表示するようにした。

加工反力からグレイ・スケール値への変換では、表示されるイメージが実際の加工表面の状態を良く近似できていることが重要であるが、それ以外にも以下に示すような注意をおこなう必要がある。すなわち、

- グレイ・スケール値の範囲が人間の感覚に合っていること
- 情報量の減少をできるだけ少なくすること
- 実時間で処理がおこなえること
- 振動状態がはっきりと判別できること

である。逆に言えば、これらの要求が満たされていれば、加工表面と表示したイメージとの間に多少のずれがあったとしても加工状態の監視・加工結果の認知という目的は果たすことが可能である。

具体的な変換方法は以下の3つを実装した。

#### 単純正規化

加工中に得られた加工反力情報について、加工後に総データを走査し、その最小値と最大値を用いて正規化をおこなう。

#### 縦方向範囲内正規化

図 5.21の左側に示すように、スクエア・エンドミルの切れ刃が2枚ある場合には、工具が半回転する毎に上向きに刃が工作物を削りとっていく。その結果、図 5.21の右側に示すような断面が形成される。再生びりり現象はこの断面形状の波形が一定時間、同じ周波数で出現するため、この断面波形を強調し提示する。具体的にはこの縦方向1本に相当する範囲の加工反力データの中での最小値と最大値を用いて正規化をおこなう。

#### 閾値を設けた縦方向範囲内正規化

縦方向範囲内正規化はびりり現象時の切削断面以外に、無切削時の加工反力データにあらわれるノイズや正常切削時の加工反力も強調して提示される。正常切削時の加工反力は、おこなわれた加工の精度を加工表面の状態を提示することで操作者に知覚させるという目的から考えれば、特別に強調する意義はそれほどなく、また、人間の視覚で判断をおこなう場合、感覚的に実際の工作物表面との一致が難しくなる。そこで、縦方向範囲内の正規化をおこなう際に切削力データに適当な閾値を設けておき、その範囲での加工反力の最大値が閾値を下回った場合には閾値と最小値との間で正規化をおこなう。

単純正規化は実装上はもっとも簡単な方法であるが、総データを走査することは加工後にしかおこなえないため、実時間での提示には不向きである。閾値を設けた縦方向範囲内正規化は、縦方向範囲内正規化の問題点を解決しているように見えるが、閾値を決めることは加工反力の絶対値によって加工状態の安定判別をおこなうことに相当し、これは5.3.1項において指摘したように、加工条件によって変動するために適切ではないと考えられる。また、閾値を決めること自体、勘と経験が必要であるために難しい。

そこで、本論文の以後の議論では縦方向範囲内正規化を用いることにする。この方法は加工反力の位相特性をもっともよくあらわす手法である。

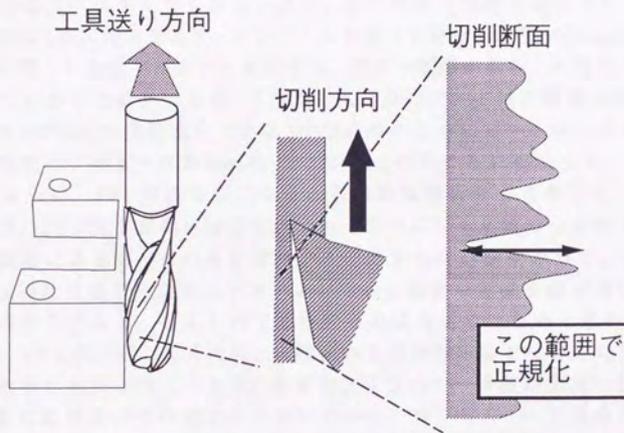


図 5.21 縦方向範囲内正規化の概要

#### 5.4.2 その他の加工状態監視手法との比較

ここでは、本論文で提案する加工表面の予測提示手法とその他の加工状態監視手法との比較をおこなう。比較の対象としては、現在広く用いられているFFT解析による方法と、5.3.1項で示した割澤らによる実時間加工状態判定法を取り上げる。

一般に、FFT解析では振動波形中に含まれるスペクトル分布が数値的に得られるため、詳細な解析には有用である。しかし、分布中に複数のピークがあらわれた場合に、それらの意味も含めて波形のピークをコンピュータで自動的に検出させ実時間で処理させるといったことには向いていない。また、ある瞬間のスペクトルでしかないので、その時間的履歴は分かりにくい。

図5.22は2枚刃のスクエア・エンドミルを用いて主軸回転数6000(rpm)で切削した時に得られた加工反力データのうち、びびり振動が発生した時間帯のデータをFFTにかけた結果である。2枚刃の工具なので、主軸回転数6000(rpm)、すなわち100(Hz)の倍数成分である200(Hz)のところにピークが一つ存在し、びびり振動によるピークが964(Hz)と1164(Hz)のところに存在する。

このように、FFT解析をおこなうと数値的な解析をおこなうことは可能であるが、FFT演算自体に時間がかかり、さらにピークを持つ意味も含めてびびり振動によるピークのみを検出するにはさらに時間がかかる。したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムにとって重要な意味を持つ実時間性という観点からすると、やはりFFTを用いるのは適切ではないと思われる。

一方、5.3.1項で示したように、実時間加工状態判定法では非常に簡便に加工状態の安定判別がおこなえる。必要な加工反力データ数が工具一回転分がよく、また計算量がそれほど多くないために、コンピュータで実時間に安定判別をおこなわせて加工機械の実時間制御をおこなわせることには有効である。しかし、安定と不安定の判別に用いる閾値の設定が困難であり、また、結果として得られる値が持つ物理的な意味が明確ではないという問題がある。

これらに対し、5.4.1項で提案した手法は正常切削時の加工反力に対して明らかに大きな振動成分が発生するとその周波数に応じた画像が得られるため、安定・不安定の判別は簡便におこなえる。また、振動成分の大きさと正常切削時の加工反力の大きさとの相対的な関係によって画像のパターンの明確さが連続的に変化するので、安定か不安定かという1 bitの情報ではなく、曖昧な領域での判断にも用いることができる。そして、閾値のように加工前に予め経験によって設定しなければならない数値を用いる必要がないため、加工の知識を持たないものにとっても容易に扱うことが可能である。

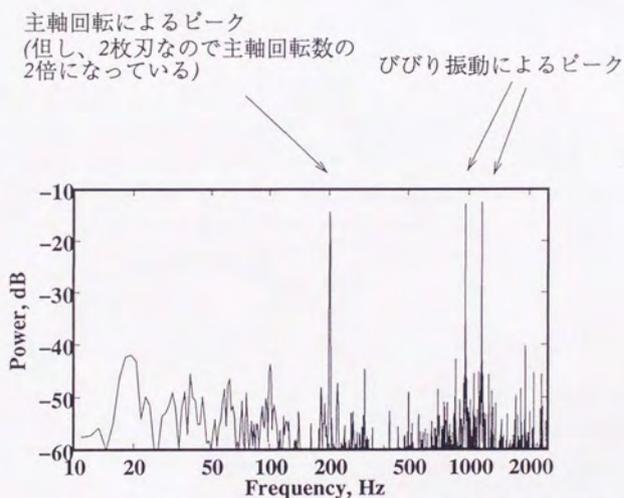


図 5.22 びびり振動が発生した時の加工反力データの FFT 結果

ただし、ここで提案した手法はコンピュータによる実時間での安定状態の判別には向かない。そのような安定状態の判別とそれに基づく加工機械の実時間制御に関しては、加工の知能化に関する分野において解決されるべき問題であると筆者は考える。本手法はあくまでも、操作環境伝送型遠隔加工システムにおいて操作者に対して加工の結果現れる加工表面の状態を提示するための手法に過ぎないことに注意する必要がある。