

5.4.3 加工表面提示実験

提案した加工表面の予測・強調提示手法の有効性を調べるための切削実験をおこなった。ここでは提示手法そのものの有効性を確認するため、加工機械の主軸送りの制御はジョイスティックを用いた手動制御ではなくAPTを用いた自動制御とした。

おこなった実験は(i)側面切削の場合と(ii)溝切削の場合の2種類に分かれる。(i)の側面切削は、5.4.1項で仮定した、「工具と工作物との接触が点接触とみなせる」場合に相当する。また、(ii)の溝切削では、この仮定が成り立たない場合にもここで提案した手法が利用可能であることを示すためにおこなった。それぞれについて、実験方法・実験結果・考察を示す。

5.4.3.1 側面切削の場合

実験方法

工作物は加工異常(びびり)が発生しやすいように図5.23に示すような薄物部材を用いた。工作物の材質はA2017(アルミ合金)である。

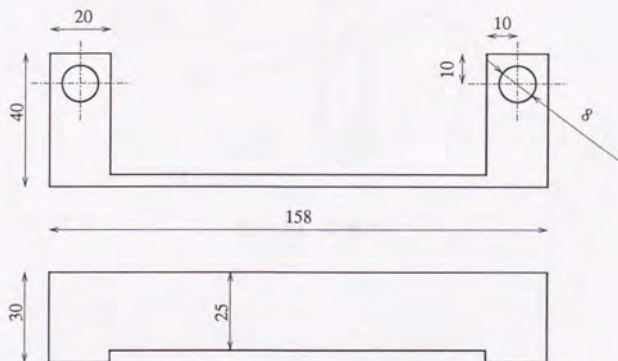


図 5.23 実験に用いた工具の寸法

また、図5.24に示すように x 、 y 、 z 軸を取り、 y 軸の負方向に工具主軸を移動して切削をおこなった。

加工に用いた工具は $\phi 15$ のスクエア・エンドミルで、2枚の切れ刃を持つ。

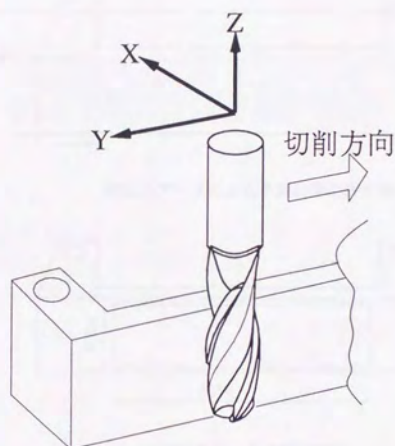


図 5.24 座標系

主軸回転数は6000(rpm)、主軸送り速度は300(mm/min)、切り込み量は1(mm)とした。

実験結果

まず、図 5.25 に表示した画像の範囲を示す。

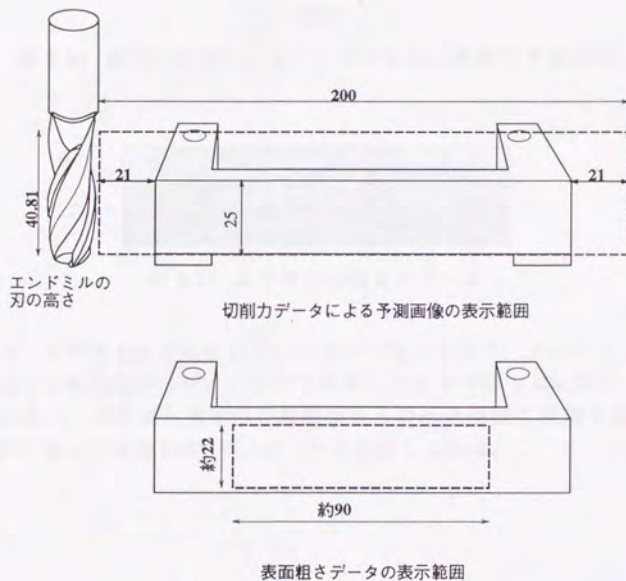


図 5.25 表示した画像の範囲

次に、力覚情報-視覚情報変換によって加工反力から予測した加工表面の状態を図 5.26 に示す。ここでの変換には 5.4.1 項で提案した縦方向範囲内正規化を用いている。また、実際に表面粗さ計を用いて測定した工作物の表面粗さデータを図 5.27 に示す。

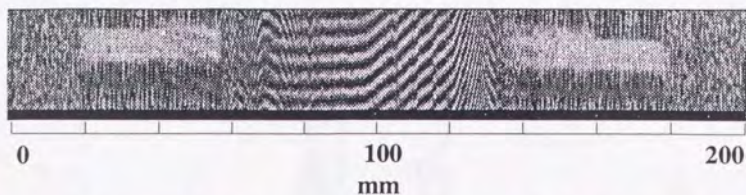


図 5.26 縦方向範囲内正規化を用いた加工表面の予測画像



図 5.27 工作物の表面粗さデータ

さらに、びびり振動が発生している部分の加工反力データのうち、加工表面と垂直な x 軸方向の力データをFFT解析した結果を図5.28に示す。図中の秒数と距離は、それぞれ主軸の移動開始からの経過時間と距離を表しており、距離に関しては図5.26中のスケールにも示してある。

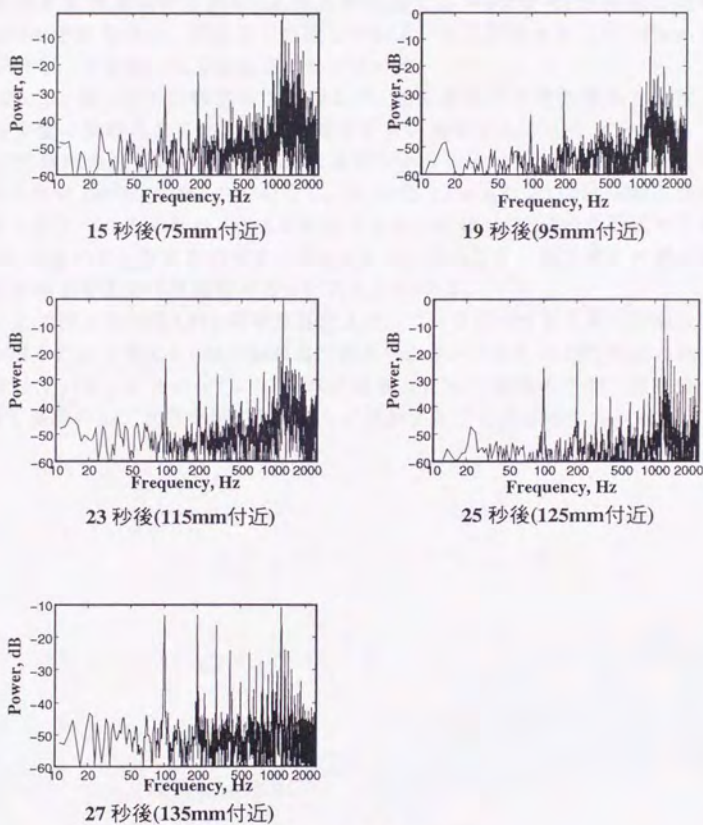


図 5.28 FFT 解析の結果

考察

図 5.25からもわかるように、図 5.26の両端21mm分はまだ実際には切削が開始していない部分であり、図 5.26には多少、ノイズが現れている。その後、主軸の移動開始点から約60mm付近から加工異常(びびり)が発生し始めた図 5.26の予測画面に、振動痕が出現している。加工異常はおよそ137mm付近まで続き、その後、加工は安定になっている。

図 5.26と図 5.27を比較することにより、加工反力から予測提示した加工表面の画像は実際の加工表面の表面粗さと良い相関があることがわかる。

FFT解析の結果は、図 5.28からは多少分りにくいものの、いずれも大きなピークは1202Hzにあった。ただし、27秒後(135mm付近)は既に加工状態が安定になりつつあるため、正常切削時の主軸回転数(100Hz)の倍数成分である200Hz付近のピークの方が大きくなっている。これより、加工異常のびびり振動は主軸回転数の6倍振動であったことがわかる。

ここで図 5.26と図 5.27に再度注目すると、二つの図中で加工異常が発生している部分にはいずれも6本の縞模様が現れており、これらはFFT解析の結果と一致している。したがって、5.4.1項で提案した加工表面の予測・強調提示手法は、実際の加工状態を操作者に対して提示することは有効であると言える。

5.4.3.2 溝切削の場合

実験方法

工作物は図 5.29 に示すような部材を用いた。材質は A2017 (アルミ合金) である。

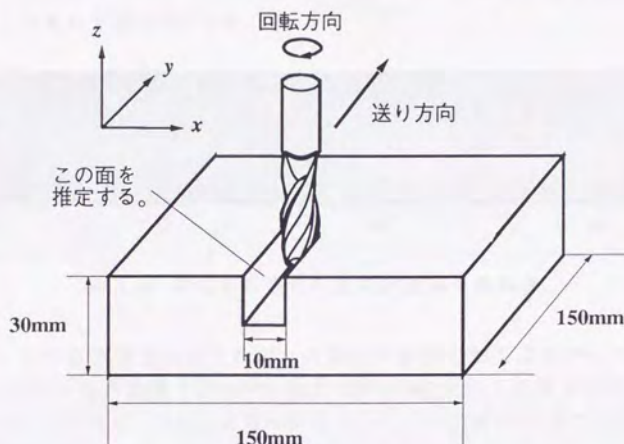


図 5.29 溝切削実験で用いた工作物と座標系

加工に用いた工具は $\phi 10$ のスクエア・エンドミルで切れ刃を2枚持つ。主軸回転数は 6000(rpm)、主軸送り速度は 200(mm/min)、切り込み深さは 14(mm) とした。

図 5.29 に示すように、工作物の主軸移動方向 (y 軸正方向) の長さは 150(mm) であるが、工具は切削開始前後でそれぞれ 10(mm) ずつ余裕を持たせて移動させたため、表示する画像の長さは 170(mm) となっている。

また、加工表面を提示する際に利用する加工反力データは加工表面と垂直な x 軸方向の力データのみとし、加工表面と平行な力成分、すなわち y 軸方向、 z 軸方向の力データは利用しない。

実験結果

図 5.30に示すのが、力覚情報-視覚情報変換によって加工反力(x 軸方向)から予測提示した加工表面の画像である。

さらに、主軸を送り始めてから30mmから33mmの、加工状態が不安定となっている部分を横方向に拡大して表示したものを図 5.31に、工具の送り開始から150mmから153mmの、加工状態が安定となった部分を横方向に拡大して表示したものを図 5.32に示す。

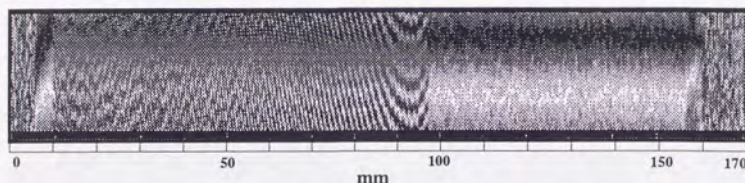


図 5.30 溝切削の場合の加工表面の予測画像

また、この拡大表示したそれぞれの部分の前後の加工反力データ(x 軸方向)をFFT解析した結果を図 5.33に示す。図 5.33中で加工状態が不安定な方のグラフに現れるピークは、主軸回転によるピーク(200Hz)以外では964Hzと1164Hzであった。

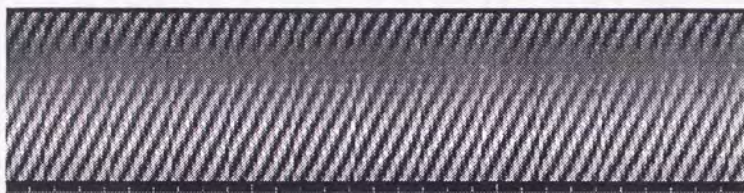


図 5.31 工具送り開始から 30mm ~ 33mm の部分 (加工状態が不安定な部分) を拡大表示した結果

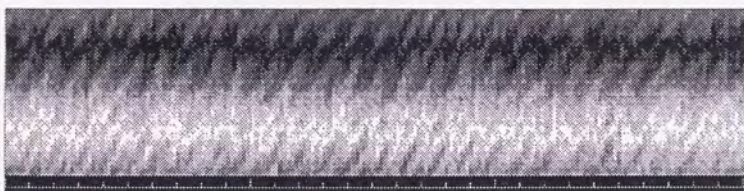


図 5.32 工具送り開始から 150mm ~ 153mm の部分 (加工状態が安定な部分) を拡大表示した結果

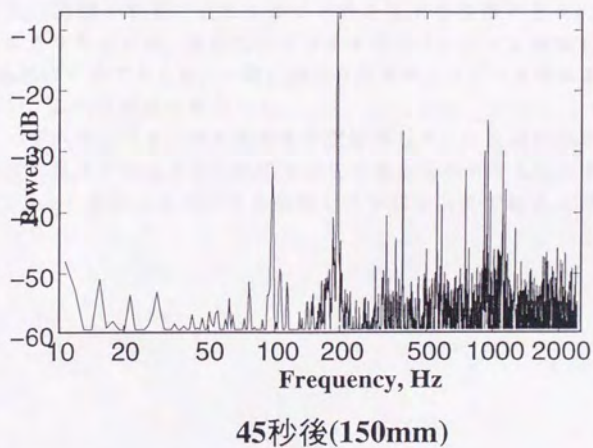
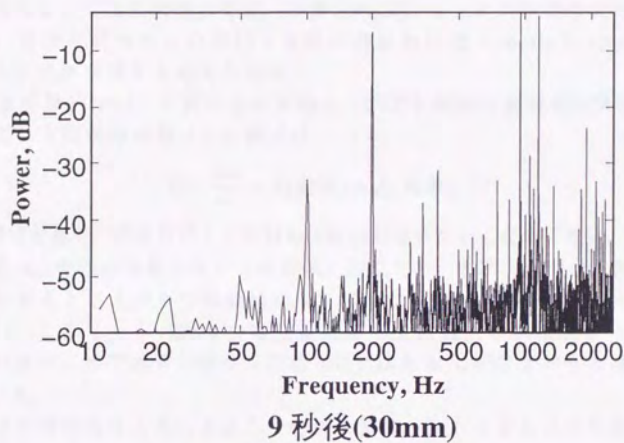


図 5.33 FFT 解析の結果

考察

図 5.30 によって加工状態の安定・不安定の判別は十分におこなえる。

また、実験中に発生したびり振動の周波数は常に 964Hz と 1164Hz であり、これは再生びりと考えられる。

主軸回転数 r (rpm)、工具の切れ刃数 n 、びり振動の周波数 z (Hz) と加工表面に現れる縞模様の数 J との間には

$$J = \frac{60z}{rn} = J_i(\text{整数}) + J_f(\text{端数})$$

という関係があり、再生びりでは振動の位相が遅れていくために $0.5 < J_f < 1.0$ が成り立つ。今回の実験で用いた座標系・加工方向・表示方法では、再生びりが発生すると右上がりの縞模様になるはずであるが、図 5.30 ではそうっていない。これは一刃当たりの送り量に対して画面上の解像度が十分に得られていないためであり、拡大した図 5.31 ではきちんと右上がりの縞模様となっている。

画面上の解像度を工具一刃当たりの送り量に一致させることは技術的には可能であるが、(i) 画面に表示できる画像の幅はコンピュータのディスプレイによって制限されるため、解像度を一致させると一度に表示できる範囲が狭くなる、また、(ii) 狭い範囲で表示させてそれを工具の移動とともに実時間でスクロールさせることは、高速なグラフィクス・エンジンを搭載したコンピュータであれば可能であるが、一般に利用可能なコンピュータの画像処理能力では難しい、という理由で断念した。

しかし、いずれにしても、加工表面を予測提示して、おこなわれた加工の状態を操作者に認識させるという目的は達成できたものと考えられる。したがって、以上から、溝切削においても提案した手法は有効であると言える。

5.5 時間遅れを補償するための加工形状情報の予測提示

視覚は人間の五感の中で最も獲得可能な情報量が多い感覚であり、以下のような特徴を持っている。

- (1) 十分な光量があれば、瞬時に物体の2次元イメージとして位置情報が認識できる。
- (2) 両眼視により立体情報が得られる。
- (3) 遠距離の物体であっても認識することができる。
- (4) 色や輝度による物体の判別が可能である。
- (5) 視野には限界があり、視野内に存在しない物体の情報は獲得できない。
- (6) 視点と注視点との間に障害物が存在すると、欲しい情報が得られない。
- (7) まぶたを閉じると情報が獲得できない。逆に言うと、自分で積極的に情報を遮断することが可能である。

そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムでも視覚情報として5.4節で示した加工表面の予測・強調提示手法と本節で述べる形状情報の予測提示を、実際にマシン・サイトから送られてくる画像情報と同時に提示する。

これまで研究されてきた、また、現在研究されている遠隔操作システムでは、コンピュータ・グラフィクス(CG)を用いた視覚情報の予測提示に関する研究が多数おこなわれている。たとえば、NASAのジェット推進研究所(Jet Propulsion Laboratory; JPL)のW. S. Kimらは、地上局から宇宙ロボットに取り付けられたマニピュレータを用いて遠隔作業をおこなうための視覚情報の予測提示として、操作環境の画像イメージを三次元モデルとして地上局側のコンピュータ上に持ち、操作者が操作をおこなった時のマニピュレータの動作を実際に送られてくる映像上にワイヤフレームとしてスーパー・インポーズして提示するシステムを構築している[54,55]。多くの研究ではこのように実画像とCGを用いた表示をおこなっており、さらに、提示する際に両眼立体視のできるHMD等の装置を使っているものもある。

しかし、これらのシステムで対象としている作業では、基本的に対象物体の形状は変化しない。そのため、対象物体とスレーブ・マニピュレータの形状モデルをオペレーション・ルーム側で保持し、操作情報とそのモデルから対象の位置と姿勢を更新していけばよい。これに対して操作環境伝送型遠隔加工

システムで対象とする作業は加工であり、この場合、対象物体の形状は時々刻々変化する。そこで、5.5.2項で提案するような形状情報の予測提示方法で形状情報を予測し、操作者に対して提示する手法を提案する。

5.5.1 加工作業における形状情報

手作業で加工をおこなう際に、現在おこなっている加工で工作物がどのような形になっているかという情報がなければ、実際に加工をおこなうことは不可能であろう。すなわち、

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

という事実があり、そのため、形状情報が与えられなければ工作物が希望の形状となったか否かを知る手段がない。

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、形状情報を操作者が得るための情報の一つとして、マシン・サイトに設置されたビデオ・カメラで獲得した画像情報を情報伝送システムを介してオペレーション・ルームに伝送し、モニタを通して操作者に提示する。しかし、情報伝送システムを介することによって、そこには情報伝送にともなう時間遅れが存在し、そのために、作業効率は著しく低下することが予想される。すなわち、遠隔操作システムの分野で指摘されている“move and wait”という操作方法を取らねばならないことで作業時間や操作者の疲労度の増大を招く。

“Move and wait”とは、操作者がおこなった操作結果がただちに視覚情報として得られないため、操作者は少し操作をおこなう(move)と、その操作が実際におこなわれ、その結果の映像が提示されるまで待つ(wait)ということを意味し、時間遅れがあるシステムで視覚情報の予測提示がおこなわれない場合には、このような操作方法が必要である。

このような問題に対処するためには、前述のW. S. Kimらのように、遠隔地のマニピュレータおよびその周囲の環境の形状モデルをオペレーション・ルームのコンピュータ内に保持し、操作者がおこなった操作情報を遠隔地に送ると同時に形状モデルの更新にも用い、操作の結果得られる対象物体およびその周囲の環境の変化を実時間で提示することが必要となる。

そこで、遠隔操作システムで提案されているこのような視覚情報の予測提示方法を操作環境伝送型遠隔加工システムでも実現することが、作業時間の

短縮ならびに操作者にかかる負担の低減には重要な意味を持つが、操作環境伝送型遠隔加工システムのように加工を対象とする作業では、作業にともなって対象物(工作物)の形状が時々刻々変化するため、形状モデル自体を時々刻々更新していく必要がある。これは、位置と姿勢を更新するだけの遠隔操作システムの視覚情報の予測提示と比較すると、データ量や計算量が非常に多くなる。

操作環境伝送型遠隔加工システムにおける形状情報の予測提示は、時間遅れの補償のために情報を提示するのであるから、実時間で情報が提示できることは必須の要件であり、応答速度が速くなければこのような情報を提示する意味がほとんどなくなってしまふ。そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムではZマップ方式と呼ばれる方法を用いて、高速に形状モデルを更新し、迅速に形状情報を予測し提示することをおこなう。

5.5.2 Zマップ方式による形状情報予測提示

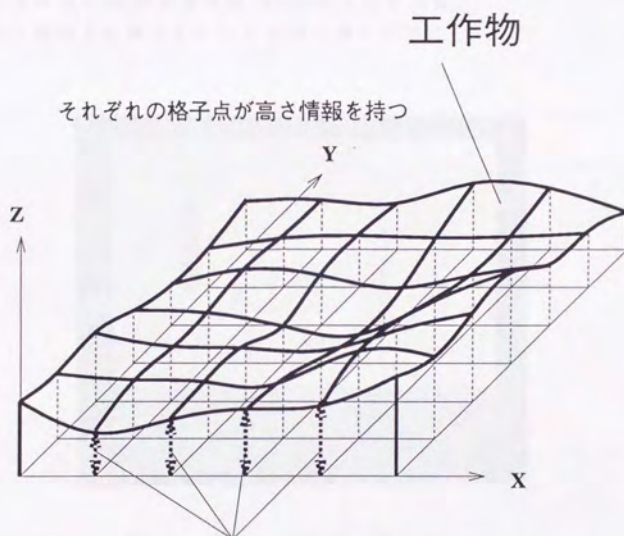
Zマップ方式とは、 x 、 y の2次元配列を用意し、それぞれの配列に高さ情報(z 情報)を持たせたものである。図5.34にその概念を示す。

Zマップ方式の特徴は以下のようなところにある。

1. x 、 y の格子点を多くすれば多くする(格子点の間隔を小さくする)ほどモデルの精度は高くなる。逆に言うと、格子点の間隔が大きいと精度が低い。
2. 原理的に中空の物体を表現することはできない。
3. その他の精密なモデルを用いるのと比べると、論理演算が簡単になり、高速に形状モデルの更新がおこなえる。

1. は一般に高い精度が要求される加工作業にとって大きな問題点である。しかし、人間がコンピュータのディスプレイ上で判断することを考慮すると、人間に対して形状情報を予測提示するという目的は達せられると考えられる。

2. はこのZマップ方式の形状モデルが上面の高さ情報のみを保持していることに起因する。これはZマップ方式を用いることによる限界であるが、しかし、現在の加工機械で加工することのできる自由度を考えると、旋盤を用いた内ぐり加工のような際にしか中空物体を扱うことはなく、マシニング・センタでおこなえる加工の自由度はZマップ方式で十分であるという判断の下にこの方法を採用した。



高さ情報

図 5.34 Z マップ方式の概念図

3. はZマップ方式を用いる積極的な理由である。すなわち、加工をおこなっている際には切削深さが既知であり、この時には、工具が存在する部分の工作物のZ方向の値と切削深さを比較するだけでよい。さらに、加工開始後には工具位置は連続的に変化するため、全体としての格子点が多くても、更新すべき格子点の数はそれほど多くない。そのために演算は高速におこなうことが可能である。

本論文で示す切削実験では、工作物として150(mm)×150(mm)のものをを用い、格子点は75×75(格子点間隔:2(mm))としている。

図 5.35に画面上に提示している画像の例を示す。

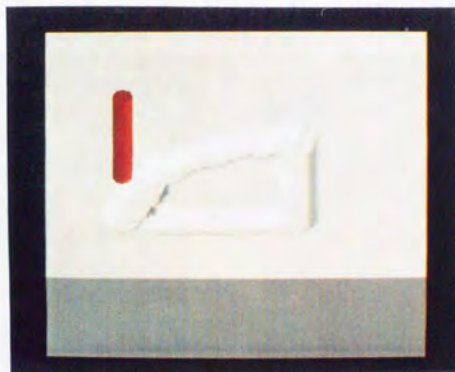


図 5.35 加工形状情報予測提示の例

5.5.3 形状情報提示実験

5.5.3.1 実験方法

工作物は150(mm)×150(mm)×30(mm)のA2017(アルミ合金)とし、 $\phi 10$ のスクエア・エンドミル(2枚刃)を用いて切削深さ8(mm)の溝切削をおこなった。ジョイスティックは z 軸方向の移動を拘束し x 、 y 平面のみ移動可能とした。

実験では操作者に「凸」の字を加工するように伝えて操作をおこなった。この結果得られた加工後の工作物と予測提示した形状を比較する。

5.5.3.2 実験結果および考察

図 5.36に加工後の工作物の様子を、図 5.37に予測提示した形状を示す。



図 5.36 加工後の工作物

形状情報の予測提示について、まず、実時間性に関してはまったく問題のない速度で予測情報を提示することが可能であった。

また、図 5.36および図 5.37を比較すると、実際の加工結果と予測提示した形状情報はよく一致している。さらに、予測提示した形状情報では、写真からではわからない細かな工具の移動も提示できている。

このような細かな移動による切削形状の振動は、マシン・サイトに設置さ

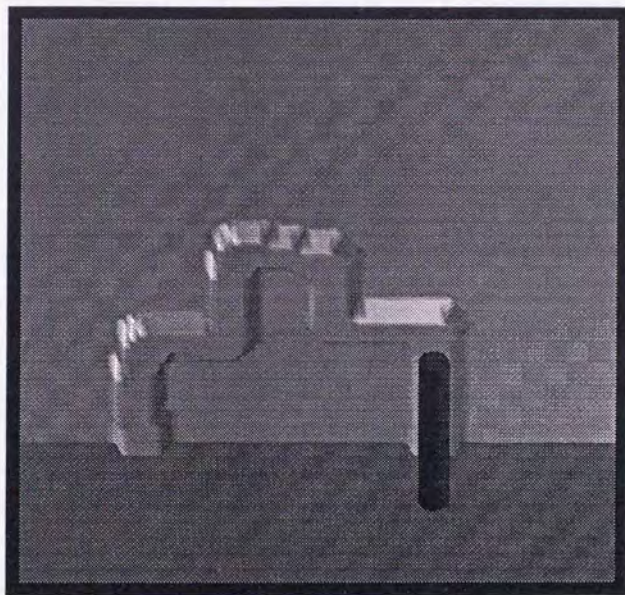


図 5.37 予測提示した形状のイメージ

れたビデオ・カメラでも獲得することのできない情報であり、形状情報を予測提示する意義はここにもある。

今後、コンピュータの性能が向上すれば、格子点をもっと細かく配置することも可能になり、より精密な形状情報を提示することも可能となると思われる。しかし、人間が認識できる以上に形状モデルを精密にすることが有効かどうかについてはわからない。そのような場合には、コンピュータ内部にはより精密なモデルを保持し、それを提示する時に格子点の数を間引いて提示することが有効かもしれないが、それを確認することはできなかった。

5.6 力覚情報-聴覚情報変換に基づく加工音の予測・強調提示

加工をおこなう際に加工音は非常に重要な意味を持つ。たとえば、加工をおこなっている際に、加工機械のそばにいる人間は常に加工しているところを目で見て加工状態を判断しているのではなく、視覚情報と合わせて加工音によって加工状態を認識している。また、加工を開始する際には加工機械のモータ音や主軸の回転する音から加工が始められる状態になったことを知る。

そこで、聴覚情報の特徴を列挙してみる。

- (1) 人間の持つ五感(視覚・聴覚・触覚・味覚・嗅覚)の中で最も支配的な感覚は視覚であるが、視覚は注目している相性についての情報しか得ることができない。それに対して聴覚は、人間の可聴領域である20(Hz)から20(kHz)の周波数で十分な音圧($20(\mu\text{Pa}) \sim 20(\text{Pa})$)さえあれば、音源がどこにあっても認知することができる。
- (2) 視覚は目を閉じるとほとんど機能しなくなるが、聴覚は人間の意思で情報を遮断することはできない。耳を手で塞ぐことができる程度の対処しかできない。
- (3) 人間は周囲の音を常にすべて認識しているわけではない。言い換えると、耳から情報として知覚(perception)していても、それをすべて認識(cognition)しているわけではない。たとえば、新しく聞こえてきた音や必要としている音の情報は認識しているが、長時間変化しない音や不必要な音の情報は認識しなくなる。人間はこのような情報の取捨選択を無意識のうちにおこなっている。
したがって、(2)の性質と合わせて考えると、聴覚情報は操作者に強要せずに情報の提示をおこなえる。
- (4) 音の大きさや音程の差によって、与えられた情報を弁別することが可能である。
- (5) 両耳に振動が伝わる時間差あるいは強度差を利用することで、音像(音源)の定位がある程度可能である。さらに、視覚情報と同時に利用することでは確実に音像定位ができる。
- (6) 各自の経験によって、同じ情報を与えても得られる情報量が変化する。たとえば、これまでに経験したことのある音が提示された時には、それ

が十分に聞こえていなくても不足分を無意識に補うことで聞こえたような感覚が得られる。

聴覚が視覚に対して特に有利な点は、「音源がどこに存在していても」「意識していなくても」情報を獲得できるという点である。操作環境伝送型遠隔加工システムでは積極的に聴覚情報を利用する。

5.6.1 聴覚情報予測提示の基本概念

加工作業中に発生する音情報は

- 加工によって発生する加工音
- 加工機械やその周囲から発生する環境音
- 作業者同士の会話などの音声

に分類できる。

環境音とは、たとえばエア・コンプレッサの駆動音等を意味する。環境音は操作環境の臨場感を高めるためには必要な音情報であるかもしれないが、その他の音と比較するとその重要性はあまり高くなく、また、実際の加工現場においては不快に感じていることも多い。そのため、環境音を積極的に伝送することはしない。

音声は、複数の操作者間、あるいは、マシン・サイトの人間と操作者間等で取り交わされる会話であるが、これは視聴覚情報伝送システムを介して伝送する情報であって、ここでは取り上げない。

本節で取り上げるのは、加工音を予測して提示する手法である。

加工音をさらに分類すると正常切削時の加工音と加工異常が発生した場合の加工音(これを、びびり振動音と呼ぶことにする)とに分けられる。

正常切削音は以下のような状態の判別に有効である。

加工中と非加工中の判別

工具と工作物とが接触していない状態で聞こえる音は主軸の回転する音のみである。また、接触していても工具が移動していない状態では発生する音の大きさは小さい。工具と工作物とが接触し工具が移動している状態では切削にともなって音が発生する。これにより加工中であるか否かを判別することができる。

主軸回転数のおおまかな目安

主軸の回転数の変化は聞こえる音の周波数の変化として知覚される。すなわち、高回転数になるにつれて音の周波数は上がり、回転数が下がると周波数が下がる。これによって主軸の回転数の変化がわかる。熟練者であれば、主軸の回転数そのもののおおまかな目安にもなる。

切削力の大小

切削力が大きくなると、それにとまって加工音の大きさも大きくなる。切削力が小さくなると、加工音も小さくなる。これによって、切削力の大きさを判別ができる。しかし、切削力は加工条件によっても変化するため、切削力の大きさそのものはそれほどはっきりとは分からない。

びびり振動音は、加工異常(びびり)にともなう高周波成分の音を含んでおり、当然ながら加工状態の変化を認識することに有効である。

したがって、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける聴覚情報提示では、正常加工音だけでなく、びびり振動音をも提示することが重要であり、また操作性の向上にも有効であると考えられる。

しかし、現実にはマシン・サイトにおいてマイクロフォンによって獲得した音情報を情報伝送システムを介してオペレーション・ルームに伝送し、それを聴覚情報提示装置によって提示することは、以下のような点で問題がある。すなわち、

(1) 時間遅れの問題

情報伝送システムによって情報を伝送する際には、必ず時間遅れがある。たとえば、人工衛星を利用して視聴覚情報を伝送すると、一度、地上局から人工衛星に向けて情報を送り、それを別の地上局で受け取るまでにおよそ0.5秒程度の時間がかかる。

(2) 情報量の問題

マイクロフォンによって獲得した音情報には、上に述べたような環境音も含まれており、これは積極的に伝送すべき情報ではない。したがって、マシン・サイトで獲得された音情報をそのまま伝送すると伝送する情報量が増大する。

そこで、操作環境伝送型遠隔加工システムでは以下のようにマシン・サイトで発生する加工音情報を予測し、強調して提示する手法を提案する。

まず、前提として、以下に示す提示手法はすべて、加工に際して発生する加工反力情報に対して情報変換を加えて聴覚情報として提示する力覚情報-聴覚情報変換による聴覚情報提示手法である。すなわち、加工反力情報で加工音の情報もあらわすことができると考えている。その根拠は

加工は工具と工作物とを接触させ、工具に力を加えることで工作物の不要な部分を除去することであり、その時に工具と工作物との間に作用する力が加工反力である。この加工反力によって工具や工作物あるいはその周囲の物体は振動する。また、その振動にともなって物体の表面も振動する。これらの振動によって発生する情報が加工音であると考えられる。

ということである。

この前提の下に以下のような3通りの聴覚情報提示をおこなう。

力覚情報-聴覚情報変換に基づく加工音の予測・強調提示手法

(1) 操作者の操作情報からオペレーション・ルームのコンピュータ内に保持している加工の物理モデルによって発生する加工反力を予測し、予測された加工反力の大きさとその時の工具の主軸回転数を基に仮想加工音を生成し、提示する。

(2) 過去に獲得した加工反力情報を予めデータ・ベース化しておき、操作者の操作情報を基にデータ・ベースから適当な加工反力情報を選択し、それを聴覚情報に変換して提示する。

(3) マシン・サイトの力センサで獲得した実際の加工反力情報をオペレーション・ルームに伝送し、それを聴覚情報に変換して提示する。

(1)の手法は、提示するすべての聴覚情報をオペレーション・ルーム側で予測し、強調して提示する手法である。これによって時間遅れは克服できる。しかしながら、発生する加工音を物理モデルから完全に再現することは難しく、そのため、実際の加工音とはまったく異なる音情報となる。これが(1)の欠点である。時間遅れの克服だけに着目すれば最も有効な提示手法である。

(2)の手法は、予め獲得してある加工反力情報を、現在の操作情報から選択し、それを聴覚情報に変換して提示する。そのため、時間遅れは存在せず、また、実際の加工反力情報を聴覚情報に変換して提示するため(1)の手法で問題となったように実際の加工音と異なった音情報となることは少ない。実際の加工音に非常に近い音を再現できる。しかし、あらゆる状況に応じた加工音を再現するためには、提示する加工反力情報をデータ・ベースに保存しておく必要があり、データ・ベースの肥大化を招く。その点がこの提示手法の欠点である。

(3)の手法は、上に述べた通り、実際の加工反力情報をマシン・サイトから伝送して聴覚情報に変換して提示する。したがって、どうしても提示する情報には時間遅れをとめない、これがこの手法の欠点である。しかしながら、(2)の手法の説明でも述べたように実際の加工反力情報を変換するために実際の加工音を極めて良く再現することが可能である。

すべての聴覚情報提示手法を含んだ図を図5.38に示す。

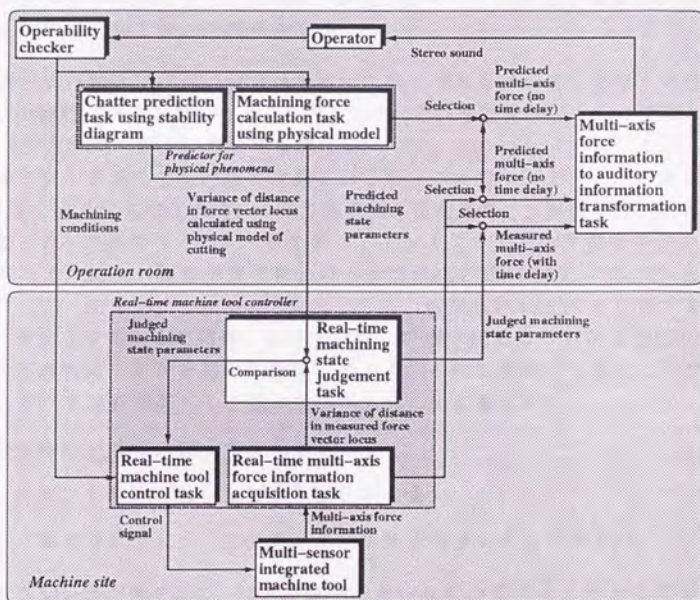


図 5.38 聴覚情報予測提示における情報の流れ

5.6.2 加工の物理モデルに基づく加工音の予測

前項(5.6.1項)では、操作環境伝送型遠隔加工システムにおける聴覚情報の予測・強調提示について、力覚情報-聴覚情報変換を用いる3通りの手法を提案した。そのうちの(2)と(3)では、実際の加工反力情報をそのまま聴覚情報に変換して提示する。実際の変換手法については次項(5.6.3項)で述べる。

一方、(1)では加工の物理モデルを用いて加工反力を求めるため、そのままでは計算量が膨大になり、現実的ではない。そこで、本項では加工の物理モデルに基づく加工音の予測手法を示す。

加工音情報と加工反力情報は基本的に同じ周波数の情報である。そこで、加工の物理モデルを用いて加工反力を求め、それを聴覚情報として提示する。

加工の物理モデルについては既に5.2.1項(p. 150)において示したが、この物理モデルを用いて実時間で計算をおこなうことはコンピュータの能力的に難しい。また、各加工条件、つまり切削幅、切削深さ、主軸回転数、主軸送り速度といった条件ごとにデータを蓄積しておくこともデータ量が多い。

そこで、加工の物理モデルにおける切削抵抗の式(5.1)を～式(5.3)を単純化し、5.3.1項でおこなったのと同じように「切削抵抗は $S_z^{1-\alpha}$ に比例する」という仮定をする。この結果、各切削幅および切削深さごとに加工反力の波形を加工の物理モデルを用いて計算しておき、それを蓄積しておくことで、実際にそれを聴覚情報として提示する際には、その波形を

- 振幅は $S_z^{1-\alpha}$ に比例して変化させる
- 周期は主軸回転数に比例して変化させる

という単純な計算によって仮想加工音を提示できることになる。

図5.39および図5.40に、加工の物理モデルを用いて計算した加工反力の大きさの時間的な変化を示す。図5.39は主軸回転数を一定にして主軸送り速度を変化させた場合の加工反力の大きさの変化であり、図5.40は一刃あたりの送り量を一定にして主軸回転数を変化させた場合の加工反力の大きさの変化である。なお、計算の際には、材質A2017(アルミ合金)の工作物を $\phi 10$ のスクエア・エンドミルを用いて切削深さ10(mm)の溝切削した時の加工反力情報から求めた物理モデルを用いている。

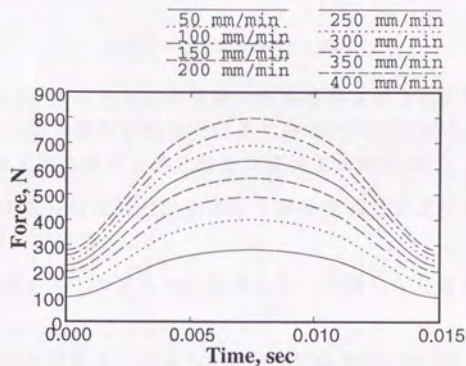


図 5.39 主軸回転数一定(2000(rpm))で送り速度を変化させた場合の物理モデルから求めた切削力波形

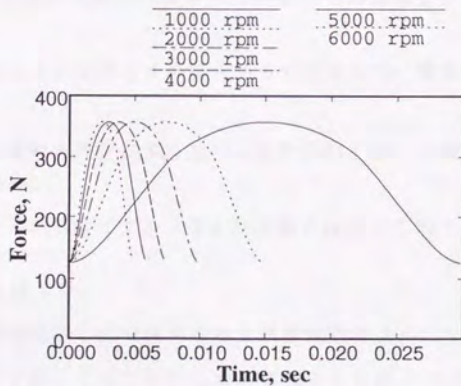


図 5.40 一刃あたりの送り量一定(0.02(mm/edge))で主軸回転数を変化させた場合の物理モデルから求めた切削力波形

5.6.3 力覚情報から聴覚情報への変換提示手法

加工反力情報の波形 $f(t)$ は一般的に次の式で表すことができる。

$$f(t) = \sum_{i=1}^{\infty} \alpha_i \sin(\omega_i t + \phi_i)$$

正常切削であれば、 α_i の値は ω_i が主軸の回転数およびその倍数成分の近辺で大きな値を取り、それ以外の部分ではそれほど大きくないと考えられる。

このような加工反力情報を聴覚情報に変換する際には

- コンピュータ上に時系列の数値として獲得された加工反力情報をそのままD/A変換して出力する。
- 加工反力情報に対して人為的に変換を施して得られた情報をD/A変換して出力する。

という2通りの方法が考えられる [68, 69, 77-79, 83, 84, 86-88, 93]。

前者は、

- (i) 必要な装置(D/Aコンバータ、増幅器、スピーカ)さえ用意すればよい
- (ii) コンピュータの計算能力にほとんど依存せずに情報を提示することが可能である
- (iii) 得られた加工反力をそのまま提示するだけなので、情報がほとんど欠落しない
- (iv) 加工反力をそのまま提示するため、実際の加工音と比較的似た傾向の音を提示できる。

という利点があり、本論文でおこなった実験では主にこちらの方法で聴覚情報を提示した。

それに対して後者は、

- (i) システム側で提示したい情報のみを強調提示できる
- (ii) 不要な情報を削ることで提示したい情報のみを提示できる

という利点がある。しかし、「人為的な変換」の手法としては様々なものが考えられるため、それを必要に応じて選択することは素人には難しいという点が欠点である。

以下に、本研究の中で実際に試みた変換方法を参考までに示す。

(1) 力の絶対値に音の大きさを比例させる変換

加工反力の波形を $f(t)$ とすると、その絶対値 $\|f(t)\|$ をある一定の周波数の振幅に比例させて提示する変換方法である。単純に言えば、力の強弱が音の強弱に変換される。式で書くと次のようになる。

$$\Phi(t) = \alpha \|f(t)\| \sin(\omega_n t + \theta_n)$$

(ただし α と θ_n は定数、 ω_n は主軸回転数から決める)

人間の聴覚は3(kHz)前後が最も感度が高いが、耳に不快感を与えないように、あまり高周波成分は用いずに1(kHz)以下の周波数を用いる方がよい。 α の値はできるだけ大きい方が望ましいが、加工異常が発生した場合などには加工反力が非常に大きな値を取ることがあり、そのような場合には人間にとって不快だけでなく聴覚情報提示装置の破壊を招くこともある。したがって、注意して設定する必要がある。

(2) 力の絶対値に音の周波数を比例させる変換

加工反力の波形を $f(t)$ とすると、その絶対値 $\|f(t)\|$ をある一定の振幅の周波数に比例させて提示する変換方法である。つまり、力の強弱が音の高低に変換される。式で書くと次のようになる。

$$\Phi(t) = A_n \sin((\beta \|f(t)\| + \gamma)t + \theta_n)$$

(A_n 、 β 、 θ_n は定数、 $\gamma = 2\pi \times 20$)

周波数で変換する場合、可聴域が20(Hz)以上という条件から γ の値は $2\pi \times 20$ 以上に設定する必要がある。人間の聴覚は同じ音圧レベルであっても周波数によってその感度が異なるため、この変換方法を用いても力の増大にしたがって音が大きくなったように感じられる。

(3) 上記の(1)および(2)を同時に用いた変換

加工反力の波形を $f(t)$ とすると、その絶対値 $\|f(t)\|$ を振幅と周波数に比例させて提示する変換方法である。この時、力の強弱が音の強弱および高低に変換される。式で書くと次のようになる。

$$\Phi(t) = \alpha \|f(t)\| \sin((\beta \|f(t)\| + \gamma)t + \theta_n)$$

上記の(1)および(2)で述べた性質を合わせ持っており、そのため、力の増大にしたがって感じる音量の増加は、(1)にくらべて非常に大きい。

第 6 章

操作環境伝送型遠隔加工実験

第5章までに述べてきたシステムの概念、ソフトウェア構成、ハードウェア、および、情報提示手法を統合することで、操作環境伝送型遠隔加工システムが構築される。

本章では、構築したシステムを用いておこなった操作環境伝送提示実験・遠隔加工実験・遠隔教育実験・遠隔協調加工実験の結果を示す。それぞれの実験の目的は以下の通りである。

(1) 情報予測・強調提示実験

情報伝送にともなう時間遅れがほとんどないシステム構成とし、第5章で提案した情報の予測・強調提示手法の有効性を確認する目的でおこなった。

(2) 遠隔加工実験

第4章で示したハードウェア・システムを用いて情報伝送にともなう時間遅れのある遠隔地から実際に加工をおこなえることを確認する目的でおこなった。

(3) 遠隔教育実験および遠隔協調加工実験

本研究で目指す「複数の人間同士の知識の伝承と共有」が構築したシステムを用いることで実現できることを確認する目的でおこなった。

なお、すべての実験において、加工機械が存在するマシン・サイトは東京大学工学部8号館地下1階の、筆者の所属する研究室の持つ実験室であり、そのため、個々の実験でマシン・サイトに関する説明は省略する。

6.1 情報予測・強調提示実験

構築したシステムを用いて、提案した情報の予測・強調提示手法の有効性を確認する目的でおこなった実験について述べる。

6.1.1 振動による加工状態提示実験

まず、はじめに6.1.1.1と6.1.1.2に共通する事項を述べ、その後、各実験について述べる。

実験の概要

オペレーション・ルームは、東京大学工学部8号館地下1階の、筆者の所属する研究室の持つ実験室とした。ここは

- 互いの音声を直接聞くことはできない
- 互いの映像を直接見ることはできない

という条件を満たす。

マシン・サイトに設置されたビデオ・カメラおよびマイクロフォンで獲得した画像情報と加工音情報は、有線でオペレーション・ルームに伝送してテレビ・モニタによって提示した。以下ではこれらの情報を「実画像(情報)」「実音声(情報)」と呼ぶ。

実験の目的

この実験の目的は、5.3節で述べた振動による加工状態の強調提示手法を用いて加工をおこない、その有効性を調べることにある。

実験内容

工作物・工具・加工条件は表6.1に示す通りである。また、工具経路を図6.1に示す。工具経路が設定されているため、ジョイスティックによって制御可能なのは工具の送り速度のみである。この時、操作者には加工反力情報は予測提示される。

以下、 y 軸正方向に進む時の経路を *path 1*、 x 軸正方向に進む時の経路を *path 2*、 y 軸負方向に進む時の経路を *path 3*と呼ぶ。

表 6.1 実験で用いた工作物・工具・加工条件

実験で用いた工作物の諸元	
寸法	150(mm)×150(mm)×30(mm)
材質	A2017 (アルミ合金)
実験で用いた工具	
種類	スクエア・エンドミル
工具径	φ8
切れ刃数	2枚刃
加工条件	
主軸回転数	6000(rpm)
切削方式	溝切削
切削深さ	12(mm)

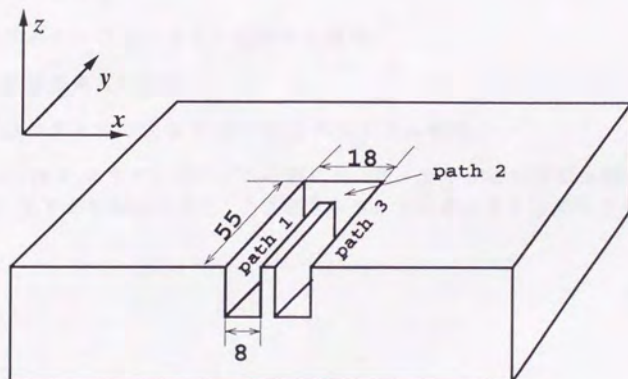


図 6.1 この実験で扱う工具経路

6.1.1.1 遠隔地で獲得した画像情報および加工音情報を提示した場合

条件設定

実画像・実音声・加工反力が提示されているという前提の下で、

1. 触覚によって加工状態を提示した場合(1)
2. 触覚によって加工状態を提示した場合(2)
3. 加工状態に関する情報を提示しなかった場合

という3通りの条件を設定した。加工状態提示の(1)および(2)は、それぞれ

(1) 加工状態指数を提示

(2) 力ベクトルの軌跡の重心からの距離の分散値を提示

を意味する。

実験結果

各条件の下での

- 加工状態指数
- 力ベクトルの重心からの距離の分散値
- 主軸送り速度の変化
- 重心ベクトルの大きさ(加工反力の大きさに相当)

を図 6.2～図 6.4に示す。それぞれの図において、左上が加工状態指数、右上が分散値、左下が主軸送り速度、右下が重心ベクトルの大きさのグラフである。

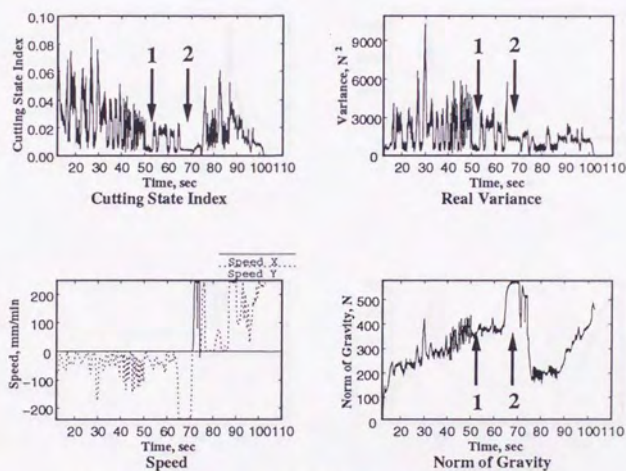


図 6.2 触覚によって加工状態を提示した場合 (1)

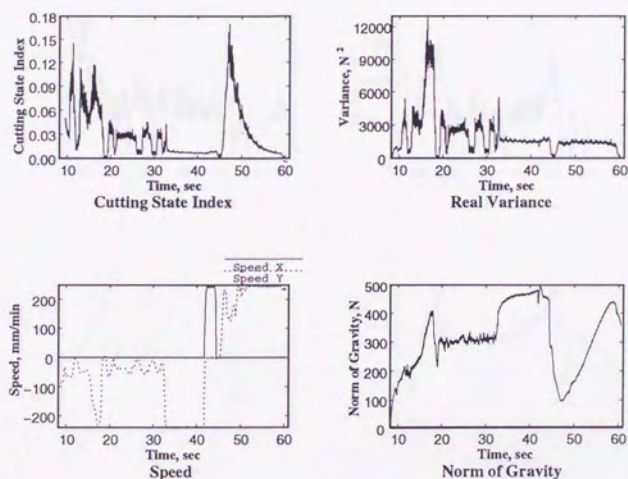


図 6.3 触覚によって加工状態を提示した場合 (2)

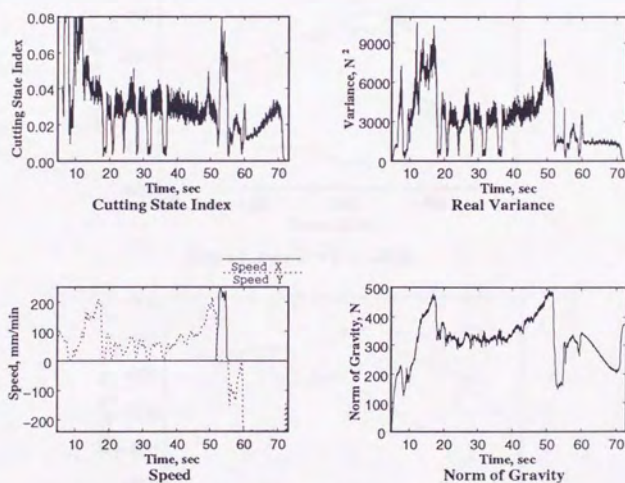


図 6.4 加工状態に関する情報を提示しなかった場合

考察

まず、図 6.2 について考察し、加工状態指数の有効性を示す。

図 6.2 の中で、加工開始から 53 秒および 68 秒の時点における加工状態をそれぞれ「状態 1」「状態 2」とする。この時、状態 2 における速度は状態 1 における速度よりも大きな値となっている。それに応じて分散値も状態 2 の方が大きな値を取っている。すなわち、分散値だけから判断すると状態 2 の方がより加工異常の度合いが大きいと判定される。

ところが、図 6.5 を見ると、これらは図より判断する限りにおいて加工異常の度合いは同程度だと考えられる。実際、それぞれの加工状態指数の値は

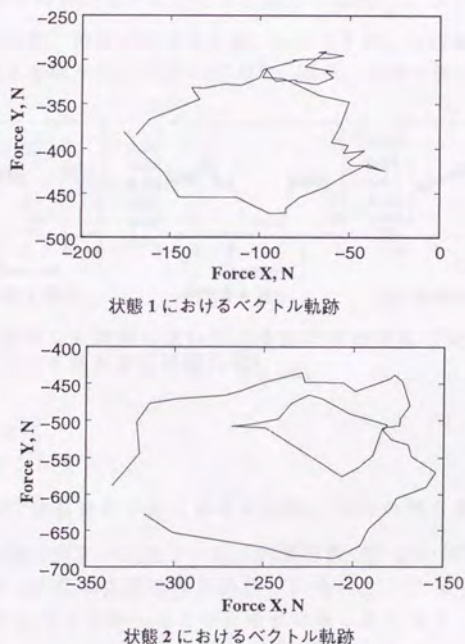


図 6.5 状態 1 および 2 における力ベクトルの軌跡

0.003(状態 1)と 0.004(状態 2)となっている。つまり、状態 2 は加工反力の値自

体が大きいために分散値の値も大きな値となり、実際の加工状態よりも異常と判断されやすい。しかし、加工状態指数による判定だとこのように主軸の移動速度が変化してもその影響を排除できるため、加工状態をより正確に判断することが可能となる。すなわち、

主軸の送り速度(一刃当たりの送り量)が変化する場合に加工状態を比較・判断するためには加工状態指数が有効である

と言える。

次に、提示した情報の違いによる加工状態の変化について考察を加える。

図 6.2～図 6.4は加工時間が異なるため、path 1 を加工中のある5秒間の加工状態指数のデータを取り出して図 6.6に示す。図中、左から順に図 6.2～図 6.4の

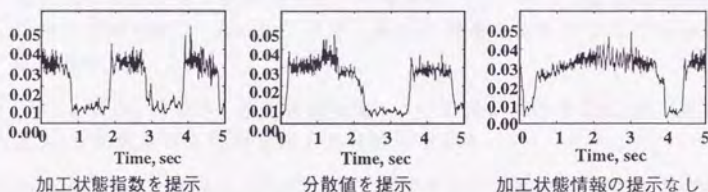


図 6.6 提示した情報の違いによる加工状態指数の変化(縦軸はいずれも加工状態指数)

中の5秒に相当する。

これらのグラフを見ると、

- いずれも加工状態指数の値はおおよそ0.005～0.05の間を変化している
- 加工状態指数が大きい状態から加工状態指数が小さい状態に変化するまでの時間は、(i) 加工状態指数を提示した場合、(ii) 分散値を提示した場合、(iii) 加工状態を提示しなかった場合の順に長くなる

という傾向が読みとれる。ここで、加工状態指数は加工の安定度をあらわすものであり、加工状態指数が大きいほど加工が不安定な状態、すなわち、加工異常の度合いが大きいことをあらわす。

最初に述べたように、この実験では操作者に

- 実画像情報
- 実音声情報
- 予測された加工反力情報

を常に提示し、その上で

1. 加工状態指数を振動として提示
2. 力ベクトルの重心からの距離の分散値を振動として提示
3. 加工状態に関する情報を何も提示しない

という3通りの条件で実験をおこなっており、上記のグラフから読みとれる傾向から、

- 操作者が提示された情報から加工状態を認識し、加工異常が発生したと判断してからそれに対処するまでの時間は、(i)の加工状態指数を提示した場合が最も短く、(iii)加工状態に関する情報を何も提示しない場合が最も長い
- (i) および (ii) の場合、操作者は触覚によって加工状態の変化(加工異常の発生)を知覚してから直ちにその対処ができる
- (i) と (ii) を比較すると、実際の加工状態をよく表現できる(i)の方が有効に働いている。
- (iii) の場合には、加工状態は主に実音声の変化からしか認識できず、そのために対処するまで時間がかかる。

ということがわかる。すなわち

操作者に対して加工状態を提示する手段として、触覚に振動を提示する方法は視覚や聴覚よりも有効である。さらに、触覚として提示する情報は、実際の分散値を提示するよりも加工状態指数の方が有効である

ということが言える。

6.1.1.2 遠隔地で獲得した画像情報のみを提示した場合

条件設定

実画像および加工反力を提示し、実音声を提示しない前提の下で、

1. 加工状態指数を触覚に提示した場合
2. 実際の分散値を触覚に提示した場合

という2通りの条件を設定した。加工音と加工状態が提示されない場合には、操作者が加工異常の発生に気付かず、何も対処できない可能性が高いため、加工状態を提示しないという条件による実験はおこなわなかった。

実験結果

各条件の下での

- 加工状態指数
- 力ベクトルの重心からの距離の分散値
- 主軸送り速度の変化
- 重心ベクトルの大きさ(加工反力の大きさ)

を図6.7と図6.8に示す。左上が加工状態指数、右上が分散値、左下が主軸送り速度、右下が重心ベクトルの大きさのグラフである。

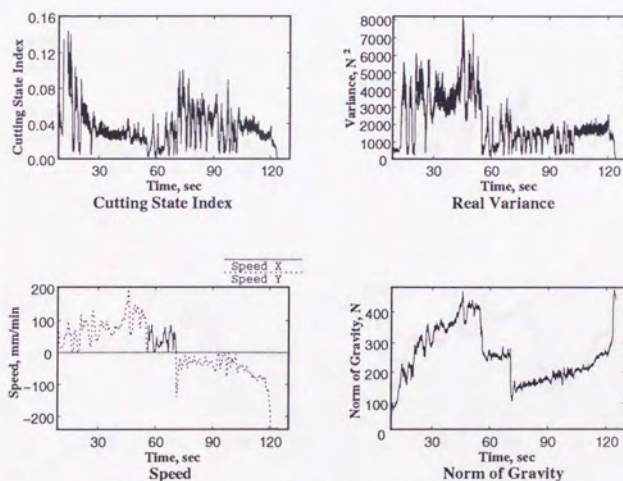


図 6.7 加工状態指数を触覚に提示した場合

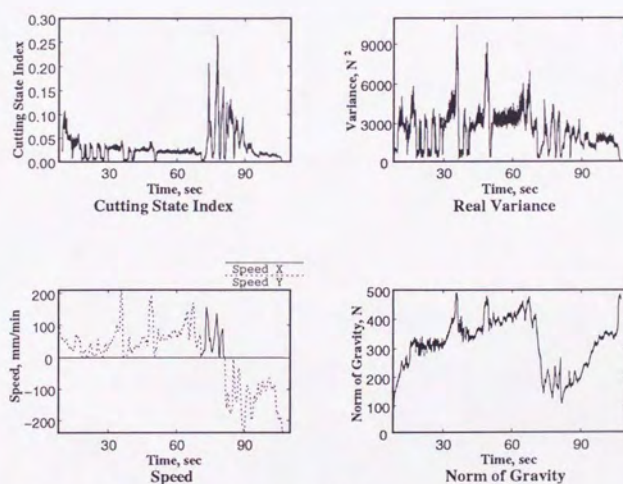


図 6.8 実際の分散値を触覚に提示した場合

考察

図 6.7 と 図 6.8 それぞれについて、6.1.1.1 の結果と比較すると加工状態指数の値が多少大きくなっているものの、目立って大きく異なっていることはなく、実音声が表示されない場合でも、触覚に提示される振動によって加工状態を判断し、加工機械の操作がおこなえることがわかった。

また、2通りの条件での比較では、加工状態指数を提示した方が加工状態指数の値が小さくなっており、ここでも加工状態を提示する際に加工状態指数を用いることが有効であると言える。



図 6.7 加工状態指数の推移



図 6.8 加工状態指数の推移

6.1.2 形状情報・聴覚情報・力覚情報・触覚情報の予測提示

6.1.2.1 メンタル・ストレスによる評価

人間は外界からの刺激に対して様々な生体情報を無意識に発している。この情報には、たとえば、脳波や皮膚抵抗値、筋電活動などがあり、これらを測定することでその時に人間が受けた刺激を評価することが可能である。

そこで、本研究でも、心拍に現れるR波(図6.9)の間隔の変動量によって、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った際の操作者のメンタル・ストレスを測定することを試みた。

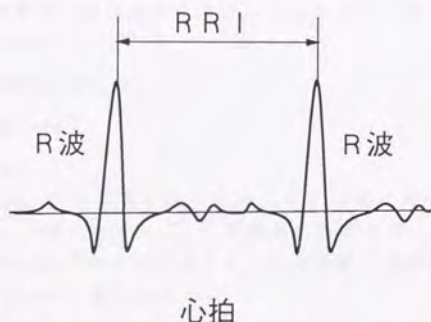


図 6.9 心電図に見られるR波およびその間隔RRI

一般に、R波の間隔(R-R interval; RRI)は人間がリラックスしている時には大きく変動し、緊張するとRRIが一定に近くなる傾向があることがわかっている。そこで、RRIを測定し、その分散値RRVを計算すれば、測定時に人間がどのようなメンタル・ストレスを感じているか知ることができる。すなわち、人間がリラックスしている際にはRRIが大きく変動するためにRRVの値も大きくなり、緊張するとRRIが一定の値に近付くためRRVは小さな値を示す。

心拍の測定方法は胸部に電極を取り付けたり、適切な場所で血流の変化を調べたりすることで測定可能であるが、そのような測定装置を身につけることでも操作者はメンタル・ストレスを感じるため、できるだけ非接触・無拘束の条件で測定をおこなうことが望ましい。そこで、本研究では耳たぶに流れる血流の変動を赤外ダイオードとフォト・トランジスタで測定する方法を採った。

6.1.2.2 形状情報・聴覚情報・力覚情報・触覚情報の予測提示実験

実験の概要

オペレーション・ルームは、6.1.1項でおこなった実験と同じ地下実験室とした。マシン・サイトに設置されたビデオ・カメラおよびマイクロフォンで獲得された実画像と実音声は、有線でオペレーション・ルームに伝送されテレビ・モニタを通じて操作者に提示した。

実験の目的

時間遅れがほとんどない状況で構築したシステムを用いて加工をおこなひ、第5章で提案した情報提示手法を用いて提示した情報のみで操作をおこなった場合と、実画像・実音声提示された場合とを比較する。

ここでは、それぞれを

- 仮想環境に対する加工
- 実環境に対する加工

と呼ぶことにする。

この実験により、仮想環境に対する加工と実環境に対する加工の間で操作性に大きな違いが現れなければ、時間遅れがあるシステムになった場合でも、本論文で提案した情報提示手法によって操作者に実環境と同じような操作性を提供できるものと考えられる。

実験内容

工作物・工具・加工条件を表6.2に示す。実験では z 軸方向の動作を拘束し、 xy 平面内で工具を動かして加工をおこなった。工具経路は設定せず、操作者には「コ」の字を描くことのみ要求し、その他の制約はまったくおこなわなかった。

実験は

1. 形状情報・聴覚情報・力覚情報・触覚情報の予測提示をおこなう「仮想環境に対する加工」
2. マシン・サイトから送られてくる実画像・実音声を提示した「実環境に対する加工」

の2通りの条件でおこない、それぞれについて操作者のRRIを測定する。そして、実験終了後にRRVを計算し、操作者の感じたメンタル・ストレスによって操作性を評価する。

表 6.2 実験で用いた工作物・工具・加工条件

実験で用いた工作物の諸元	
寸法	150(mm)×150(mm)×30(mm)
材質	A2017 (アルミ合金)
実験で用いた工具	
種類	スクエア・エンドミル
工具径	φ10
切れ刃数	2枚刃
加工条件	
主軸回転数	6000(rpm)
切削方式	溝切削
切削深さ	8(mm)

実験結果

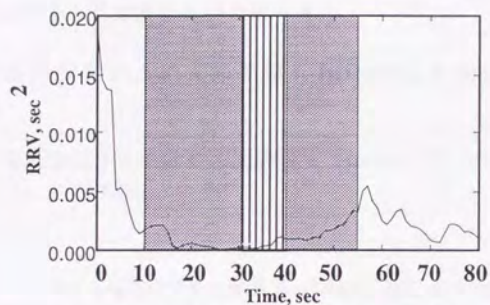
図 6.10 にそれぞれの実験における RRV の時間変化を示す。網目で主軸の移動軸をあらわしている。また、網目のかかっていない白地の部分では操作していない。

考察

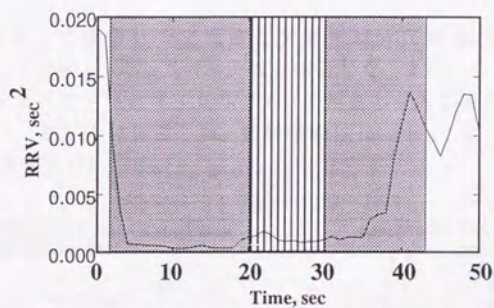
図 6.10 より、操作者が操作をおこなっている最中には RRV が非常に小さい値となっており、いずれの環境に対する加工であっても、操作者が緊張していることがはっきりとわかる。

また上下のグラフを比較すると、仮想環境に対する加工時と実環境に対する加工時では、両者の間に明確な差は見られない。つまり、仮想環境に対して加工をおこなう時と時間遅れのない実環境に対して加工をおこなう時のメンタル・ストレスは同じような傾向および同じような値を示している。

この結果、メンタル・ストレスの観点からすれば、仮想環境に対する加工と実環境に対する加工とで操作性はほぼ等しいと考えてよい。すなわち、時間遅れが存在する場合にも、本論文で提案した情報提示手法によって時間遅れが無い実画像情報や実音声情報を提示された場合と同程度の操作感が得られると考えられる。



仮想環境に対して操作した場合



実環境に対して操作した場合

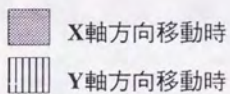


図 6.10 提示した情報の違いによる操作者の RRV の時間変化

6.2 遠隔加工実験

構築したシステムを用いて実際に遠隔地からの加工がおこなえることを確認する目的でおこなった実験について述べる。

6.2.1 情報伝送システムに人工衛星・Internetを用いた遠隔加工実験

ここでは、情報伝送システムに人工衛星とInternetを用いておこなった遠隔加工実験について述べる。

実験の概要

オペレーション・ルームはアメリカ合衆国 Washington D.C. の George Washington University に設置した。操作対象は4.2.1 項で述べた加工機械および筆者らの研究室で開発した微細加工システムとした。なお、ここでは微細加工システムを用いた実験については言及せず、加工機械を用いた遠隔加工実験のみにについて述べる。

マシン・サイトで獲得した実画像と実音声は人工衛星(デジタル回線; 1.5Mbps)を使ってオペレーション・ルームに伝送した。また、オペレーション・ルームにもビデオ・カメラとマイクロフォンを用意し、人工衛星を使って映像と音声をマシン・サイトに伝送した。制御情報はInternetを介して伝送した。情報伝送経路を図 6.11 に示す。

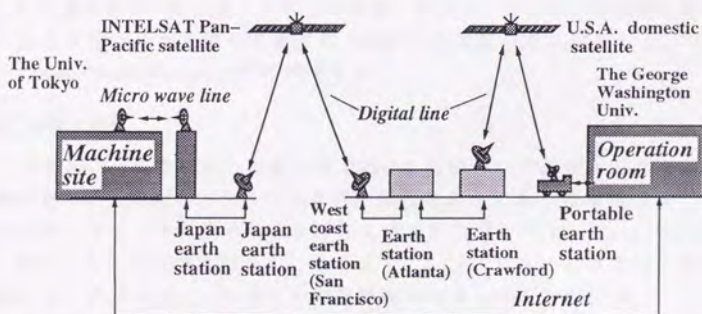


図 6.11 遠隔加工実験で用いた情報伝送経路

マシン・サイトの加工機械の周辺には x 、 y 、 z の三方向にビデオ・カメラを設置し、操作者からの指示によってそれらを切り替えることで様々な方向からの画像情報を操作者に提示した。

実験の目的

この実験の目的は

- 時間遅れを大きく含む系の中で、与えられた視覚情報と聴覚情報で正しく加工がおこなえるか確認すること
- オペレーション・ルーム側の構成を変化させることなく、加工機械と微細加工システムという二つのスケールのまったく異なる操作対象を操作できるか確認すること
- システムに欠けている情報を見つけること

である。

実験の内容

実験内容は、 x 、 y 軸方向に対しては拘束せずに自由に操作できるようにし、また、 z 軸方向に対しては最大切削深さのみ制限を加え、ジョイスティックを用いて操作者の意図した通りの加工をおこなうことである。

操作者にはマシン・サイトから伝送される実画像と実音声、およびオペレーション・ルームのコンピュータで予測された加工反力を提示する。

3人の操作者が、時間遅れのある実画像、実音声、および、時間遅れなく提示される予測加工反力のみを頼りに“IWL”の3文字を順に加工した。“IWL”とは“Inter-World Laboratory”の略である。

実験の結果と考察

この実験は、実際にはこの章で示す様々な実験の中で最初におこなわれた実験である。そのため、システム自身、現在のように多くの機能を有しているわけではなく、予測提示される情報も加工反力だけであった。しかしながら、そのような状態で実験をおこなうことで、システムに欠けている機能を確認することができた。以下にその実験結果をまとめ、考察する。

はじめに、実験で制御情報の伝送に用いたInternetに関する情報を挙げる。オペレーション・ルームとマシン・サイトとの接続は20のネットワーク、19のゲートウェイを介しておこなわれた。パケットの伝送時間は往復で平均

230(ms)程度、バケットの消失率はおおよそ6~10%程度であった。図6.11に示したように、映像と音声の情報伝送は人工衛星を二つ介しておこなっており、それにとまう時間遅れは人工衛星を一度経由するたびに0.5(s)程度である。したがって、オペレーション・ルームの操作者がジョイスティックを操作してからその情報がマシン・サイトに送られ、その情報を基に加工機械が動作をおこなってその映像と音声はマシン・サイトに送り返されるまでの総合的な遅れ時間にとって支配的なのは映像と音声の情報伝送にとまう時間遅れであると考えられる。

本実験では加工機械の操作は実画像・実音声・予測加工反力のみでおこなったが、情報伝送にとまう時間遅れのために操作者が操作を止めてから2秒程度加工機械が動作を続ける現象が確認され、そのために操作者が予期していたより過剰に加工がおこなわれることが多かった。そのため、工具と工作物との位置情報をオペレーション・ルーム側のシステムで保持し、予測提示する必要があると認識した。

その一方で、操作システムとして2+1次元ジョイスティックを用いることで、操作者は自らの直観によって実際のおこなわれる加工が予測でき、また、加工機械を操作したことのない素人であっても容易に加工をおこなえることが確認できた。

さらに、加工機械を用いた遠隔加工においては、一方向からの画像情報を提示するだけでは操作者は加工をおこなうことができず、直交する三方向に設置したカメラからの画像を切り替えることで工具と工作物との位置関係を知ることができた。

6.2.2 情報伝送システムにISDNを用いた遠隔加工実験

ここでは、情報伝送システムにISDNを用いておこなった遠隔加工実験について述べる。

実験の概要

オペレーション・ルームはドイツKarlsruheのUniversität Karlsruheに設置した。操作対象は4.2.1項で述べた加工機械および筆者らの研究室で開発した電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope; SEM)内のマイクロ・マシニング・センタとした。特に加工機械を用いた実験では本来の加工だけではなく、工具の代わりに簡単な開閉機構を持つハンド・システムを搭載して煉瓦を積み重ねる操作実験もおこなった。この操作実験は建設現場におけるブロックの積み上げ作業の遠隔操作を模したものである。ただし、このハンドの操作およびマイクロ・マシニング・センタによる微細加工は本論文の対象とは外れるため、ここでは遠隔加工に関する実験についてのみ述べる。

マシン・サイトとオペレーション・ルームの間をISDN回線によって接続し、ISDN回線によってすべての情報を伝送した。すなわち、マシン・サイトからは実画像、実音声、加工状態情報をISDN回線経由で送り、オペレーション・ルームからは制御情報をISDN回線を用いて伝送した。使用したISDN回線は2B+1Dの基本回線である。実験で用いたシステムの構成を図6.12に示す。

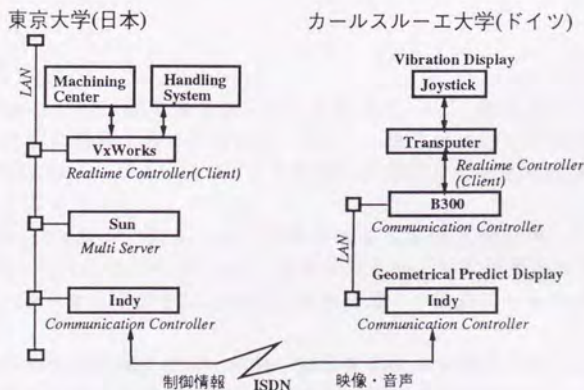


図 6.12 遠隔加工実験で用いたシステムの構成

図に示した通り、ISDN回線の両端にはSGI社のIndyを接続した。これは、IndyがISDNのTA端子を持っており、ISDN回線を直接Indyに入力することができるためである。これによってISDN回線を用いたPPP接続を実現した。Indyに附属のPPP用daemonは、通常は一本のB channel(64kbsp)で接続をおこなっており、回線を流れる伝送情報量の増加・減少に応じて自動的にもう一本のB channelを用いた接続をおこなったり接続を切ったりする機能を持っている。

実験の目的

この実験の目的は

- 時間遅れをともなって提示される実画像情報および実音声情報とともに、時間遅れなく形状情報を提示することで、操作者が過剰な操作をおこなわずに加工できるか確認すること
- 帯域の限定されたISDN回線によって構築した独自のネットワークを用いて視覚・聴覚・制御情報を相互に伝送した場合でも、Internetを用いた場合と同様の操作性が得られることを確認すること
- オペレーション・ルーム側の構成を変えることなく、開閉機構を持つハンド・システムと加工機械とを操作できるか確認すること

である。

実験の内容

実験内容は、6.2.1項でおこなったのと同様に、 x 、 y 軸方向に対しては拘束せずに自由に操作できるようにし、また、 z 軸方向に対しては最大切削深さのみ制限を加え、ジョイスティックを用いて操作者の意図した通りの加工をおこなうことである。

操作者にはマシン・サイトから伝送される実画像と実音声、およびオペレーション・ルームのコンピュータで予測された加工形状情報を提示する。さらに、マシン・サイトから加工状態情報を伝送し、振動によって加工状態を提示する。

なお、限られた帯域を視覚・聴覚・制御情報等で分割して使うため、ある情報の伝送量を増加させるとその他の情報伝送に支障が生じる。そこで、操作をおこなう上では特にマシン・サイトからオペレーション・ルームへの視覚情報の伝送が重要であると考え、視覚情報および聴覚情報についてはマシ

ン・サイトからオペレーション・ルームへの一方向のみとした。さらに、聴覚情報については通信量を下げて視覚情報に優先的に帯域を割り当てた。オペレーション・ルームからマシン・サイトへの意思伝達にはUNIX上のtalkコマンドを利用して文字情報のみでおこなった。

実験の結果と考察

はじめに、画像・音声・制御情報の伝送に用いたISDN回線に関する情報を示す。既に述べたようにISDN回線の両端をSGI社のIndyに接続し、その回線上でPPPによるネットワークを構築した。通常は通信速度64(kbps)のB channel一本で接続しているが、伝送する情報量が増加すると自動的にもう一本のB channelが接続され、計128(kbps)の回線となる。また、伝送情報量が低下すると自動的に一方のB channelの接続は切られる。

ISDNを経由したオペレーション・ルームとマシン・サイトとの間でのパケットの通信時間は往復で平均763(ms)であった。Internet経由の場合、オペレーション・ルームとマシン・サイトとは21のネットワーク、20のゲートウェイを介して接続されており、Internet経由でも同様の測定をした結果、こちらは往復で平均546(ms)であった。ただし、オペレーション・ルーム側の制御用コンピュータ等は、Ethernetを用いて臨時に構築したネットワークに接続しており、外部とはISDN回線のみでつながっているため、Internet経由での測定はオペレーション・ルームの、Internetにアクセス可能な別のコンピュータを用いた。

実験中の伝送時間の推移およびパケットの到達率を図6.13に示す。

図6.13中、左側の上下がISDN回線に関するパケット通信の往復時間およびパケットの到達率を示し、右側がInternet経由のデータである。測定はUNIXのpingコマンドを用いておこなった。それぞれの経路に対して5秒間隔で120個のデータを送信し、それらが戻ってくるまでの時間と戻ってきたパケットの総数によりグラフを作成している。なお、往復時間については総データの平均値を時系列で結び、かかった時間の最短値・最長値もエラー・バー式に合わせて示している。

図からもわかるように、ISDN経由の通信時間はInternet経由の場合に比べて時間がかかっているものの、そのばらつきは小さい。また、パケットの到達率に関しては、実験の最中にPPPによる接続が3回切断されて0%になり、その前後で小さくなってはいるが、Internet経由のパケット到達率が50～60%前後で推移していることに比べるとISDN経由の方が高い値を示すことが多く、時間によっては到達率が100%となっている。これはパケットが通過する

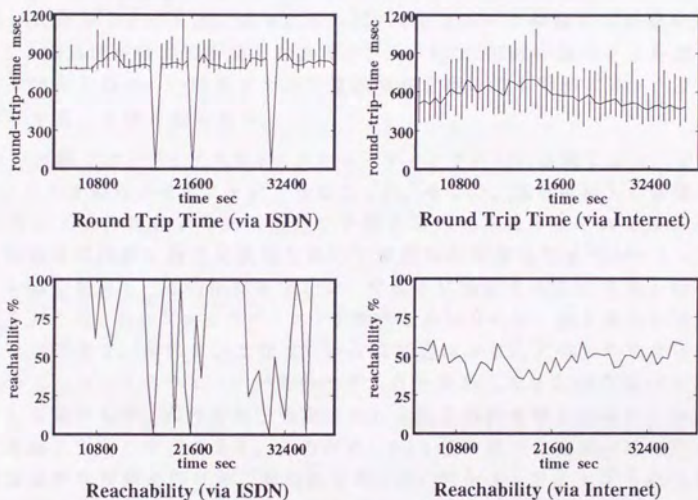


図 6.13 パケットの伝送時間と到達率の推移

routerがISDN回線の両端の2台だけであるのに対し、Internet経由では通過するrouterが20台に上ることが原因であると考えられる。また、今後広帯域のISDN回線(B-ISDN)が利用可能となれば両者の通信速度も逆転するであろう。

本論文を執筆している1995年現在、日本とヨーロッパ(この実験の場合にはドイツ)との間を直接結ぶコンピュータ・ネットワークは存在せず、日欧に存在するコンピュータ間での通信は必ずアメリカ合衆国のネットワークを経由しておこなわれる。そのため、両者間での通信には合衆国内のネットワークのトラフィックが影響を及ぼす。しかしながら、ISDN回線を用いて独自のネットワークを構築すれば、その他のネットワークの影響を受けることなく通信をおこなうことが可能である。さらに、ネットワークが届いていない場合でも、2地点間を結ぶ遠隔加工も実現できる。ISDN回線の場合よりも通信速度は下回るものの、一般のアナログ電話回線を用いても同様にネットワークを構築することは可能である。

この実験では、ジョイスティックのモータ・ドライバの故障により、ジョイスティックを動作させることはできなかった。そこで、通常は加工の物理モデルを用いて操作情報から加工反力を予測するのであるが、それを逆に用いて、操作部に加わる操作力情報を用いて仮想の制御情報をオペレーション・ルーム側で生成し、その情報をマシン・サイトに伝送することで加工機械の制御をおこなった。ジョイスティックが動作しないために、加工反力を提示することができず、操作をおこなっている臨場感はほとんど得られなかった。

しかし、ジョイスティックが動作せず、自分がおこなった操作量がわからないにも関わらず、操作者は予測提示された加工形状情報を参考にしながら加工をおこなうことができた。そのため、6.2.1項で述べた実験の時に生じたような過剰な移動操作はおこなわれなかった。マシン・サイトから送られてくる実画像は時間遅れがおおよそ10秒程度あったため、実際に操作をおこなう時にはほとんど予測提示された形状情報のみを頼りに作業し、実画像は作業をおこなった後で確認する程度にしか利用しなかった。

加工状態情報は、マシン・サイトからオペレーション・ルームに伝送され、振動として提示された。操作者は振動によって加工異常の発生を知ることができ、たとえ時間遅れが存在していても、加工状態を提示することは有効であった。

この実験の結果わかったことを以下にまとめる。

- 情報伝送に時間遅れをともなうような場合には、加工形状情報を予測提示する機能が不可欠である。これにより、実画像情報が非常に遅れて提

示されても過操作等の異常発生は抑えられる。しかし、実際におこなわれた加工の結果を操作者に対して提示することも必要である。すなわち、遠隔加工をおこなう際には少なくとも画像情報をマシン・サイトからオペレーション・ルームに伝送する必要がある。

- ISDN回線によって構築したネットワークで視覚・聴覚・制御情報を相互に伝送し合うことで、Internetを利用した場合と同様の操作がおこなえた。ただし、帯域が64~128(kbps)に制限されているために、視覚情報を実時間で伝送し提示することはできなかった。

今後広帯域の通信回線(B-ISDN)が利用可能となれば通信速度は現在よりも上がるであろう。また、現在は不安定なコンピュータ間の接続も安定するものと思われる。そうすれば、この実験で観察された

- 送られてくる視覚情報が非常に遅いために操作感が低下する
- 音声情報が途切れ途切れに送られてくるためにオペレーション・ルームとマシン・サイトとの間での意思の伝達が困難である
- 操作をおこなっている最中にネットワークが切れることがある

といった問題点は解消されるものと考えられる。

6.3 遠隔教育実験および遠隔協調加工実験

構築したシステムによって「複数の人間同士の知識の伝承と共有」が実現可能であることを確認する目的でおこなった遠隔教育実験および遠隔協調加工実験について述べる。

実験の概要

オペレーション・ルームは千葉県幕張にある放送教育開発センタ(NIME)と茨城県つくば市の筑波大学に設置した。以下では、放送教育開発センタを「オペレーション・ルームI」、筑波大学を「オペレーション・ルームII」と呼ぶ。制御情報はInternetを介して伝送した。視覚情報および聴覚情報に関しては、マシン・サイト(東京大学)とオペレーション・ルームIとの間は人工衛星を用いて、マシン・サイトとオペレーション・ルームIIとの間はInternetを介して伝送した。オペレーション・ルーム間の視覚情報・聴覚情報の伝送はマシン・サイトを經由しておこなった。なお、使用した人工衛星ETS-Vは回線速度64kbpsのデジタル回線の通信衛星である。

また、オペレーション・ルームIにはタッチ・パネルを装備したコンピュータを配置し、タッチ・パネルを用いて描いた絵や文字を送信画面上にスーパー・インポーズできるようにした。

操作者に対しては実画像・実音声・予測加工反力のみを提示し、その他の予測情報は提示していない。

実験で用いたソフトウェアの構成は、第3章で述べたマルチ・エージェント・システムとなっている。

実験の目的

この実験の目的は、本論文で構築したシステムを用いて、本研究の目指す「複数の人間同士の知識の伝承と共有」が実現可能であることを確認することである。

実験の内容

以下に示す3通りの実験をおこなった。

遠隔教育実験(1)

はじめに、マシン・サイトに存在する加工機械の熟練者が、設置されているビデオ・カメラに向かって身振りと言葉によって各オペレーション・

ルームに存在する加工機械の初心者加工機械の座標系を説明する。初心者はその説明を聞いて指示される操作をおこない加工機械を操作する。なお、初心者に対する教示は各オペレーション・ルーム毎に別々におこなった。

遠隔教育実験(2)

はじめに、オペレーション・ルームIに存在する加工機械の熟練者が、オペレーション・ルームIのジョイスティックを用いてオペレーション・ルームIIに存在する加工機械の初心者加工機械の座標系を説明する。初心者は熟練者がおこなった操作とその結果生じる加工機械の動作によって加工機械の座標系に関する知識を得て、その後、熟練者からの声の指示にしたがって加工機械を操作する。

遠隔協調加工実験

オペレーション・ルームIおよびオペレーション・ルームIIに存在する加工機械の初心者が、タッチ・パネルを用いて描いた絵や言葉を交わすことで相談して予め加工する形状を決め、加工をおこなう。

実験に参加した初心者は実験当日に初めてジョイスティックを操作し、さらに、加工機械を実際に見たことのない人間である。

また、オペレーション・ルームIIでは、遠隔教育実験(1)および(2)で別々の初心者を用意した。オペレーション・ルームIもIIも、遠隔協調加工実験で操作をおこなった初心者は、遠隔教育実験(1)に参加した人間である。

なお、いずれの実験でも、オペレーション・ルームI側の操作者を教師役としてサーバ・エージェントに扱わせた。

実験の結果と考察

まず、視覚・聴覚情報伝送にともなう時間遅れは片道で

- 人工衛星経由: およそ1(s)
- Internet 経由: およそ3~5(s)

であった。ただし、いずれの場合も画面の更新頻度が低いため正確には測定できなかった。また、制御情報伝送の時間遅れは往復で

- マシン・サイト \longleftrightarrow オペレーション・ルームI: 平均156(ms)
- マシン・サイト \longleftrightarrow オペレーション・ルームII: 平均77(ms)

であった。

遠隔教育実験(1)および(2)では、熟練者からの教示後、初心者はジョイスティックを用いて容易に加工機械を操作し、熟練者からの指示にしたがって加工をおこなうことが可能であった。

ただ、操作者に提示している情報は実画像・実音声・加工反力のみで加工状態が提示されておらず、一方、操作者は可能な限り速くジョイスティックを動かそうとするために、しばしば加工異常が発生し、熟練者がそれを指摘するという傾向が見られた。

協調加工実験では、タッチ・パネルを用いた絵による相談が有効であった。また、オペレーション・ルームIIの操作者が誤操作をしそうになった時に、オペレーション・ルームIの操作者が介入することで、所望の加工を実現できた。

いずれの実験においても、加工機械の座標系と同じ座標系を有する2+1次元ジョイスティックを用いることで加工機械の初心者でも容易に加工機械の制御をおこなえることが確認できた。

また、操作者からは、自分がおこなった操作とそれに対する視覚・聴覚情報との時間差が大きくなると不安に感じ、操作に困難をとまなうという感想を得た。

以上を考察した結果を述べる。

- 構築したシステムを用いることで、加工機械の初心者には加工機械の操作方法を教示することは可能である。
- 構築したハードウェア・システムは、初心者にとっても加工機械が容易に制御できるという点で有効である。
- 操作者からの感想から、マシン・サイトから伝送される実画像は、初心者にとって自分がおこなった操作の結果が提示されるだけの存在でしかないものと考えられる。
- 熟練者であれば気付く加工音の変化に初心者は気付かないことがある。この理由としては、(i)実験で用いた聴覚情報伝送システムの品質が十分ではなかった、(ii)加工音を提示する装置の品質が十分ではなかった、(iii)そもそも加工音は初心者にとって重要な意味を持たない、等が考えられる。
- 協調加工をおこなう際には、コンピュータ上に電子化された情報も有効である。しかし、この実験の結果から、電子情報だけで十分だとは言えない。

- サーバに持たせた排他制御機能は、協調加工をおこなう際に有効に動作した。

現在世界的規模で富・知識・技術の偏在が大きな問題となっている。新しい技術は富や知識を持つ国からのみ発信され、その他の国や地域から画期的な技術が出現する可能性は極めて低い。しかし、実際には世界中のあらゆる国や地域から新しい技術が同時多発的にあらわれ、世界が全体として活性化していくことが望ましい。このような状況を創り出すためには、人間同士の知識の共有や伝承を実現する必要があると考え、本研究では特に「加工」を取り上げて、加工に関する知識の共有と伝承を可能とするシステムの構築を目指した。その結果をまとめたのが本論文である。

複数の人間が加工に関する知識を共有し伝承するためには、実際に加工機械の操作をおこない、そして、加工をおこなっている際に発生する様々な現象を体験することが非常に重要である。しかし、本研究で対象としているのは互いに遠隔地に離れた複数の人間と加工機械であり、それゆえ次に示すような機能が必要であると考えた。すなわち

- 操作者に提示する操作環境情報を獲得し伝送する情報獲得・伝送機能
- 獲得した情報から「加工の臨場感」を再現するのに必要な情報のみを抽出し圧縮する情報抽出・圧縮機能
- 情報伝送にともなう時間遅れを補償するための現象予測機能
- センサによって獲得できる情報には限度があるため、獲得可能な情報に情報変換を施して仮想の加工情報を生成して提示する情報変換・提示機能
- 異常が発生した時にシステムを安全側に退避させるフェイルセーフ機能
- 過去の操作履歴および加工履歴を基に加工現象を学習する学習機能

これらの機能のうち、本論文では特に、(i) 現象予測機能、(ii) 情報変換・提示機能を取り上げて実装した。

複数の操作者が一台の加工機械を制御するためには、各操作者毎に操作情報入力装置が必要であり、さらに、加工機械を含めてシステム全体のハードウェアの制御をおこなうことを考えると、システム全体を単一のプロセスで制御することは不可能であり、必然的に制御用プロセスはシステム内に複数個存在することになる。そして、これらのプロセスが協調して作業をおこなうためには互いに自分以外のプロセスの状態を知り、また、自分の状態を自分以外のプロセスに知らせる必要がある。この時、自分を含めてシステム内に存在するプロセスの数が n 個あり、すべての通信をPeer-to-Peer接続により

実現しようとする、システム内で必要な接続本数は nC_2 本である。一見してわかるように、これは n が増加すると膨大な数になる。その結果、システムは破綻するであろう。また、破綻しないまでもプログラミングが困難であり、また、複数の操作者が同時に加工機械を操作しようとした時に各プロセス間で保持する情報の不整合が起こる。そこで、エージェントという概念を導入し、それを階層的に配置する考え方を提案した。そして、階層の最上位にサーバ・エージェントを導入することにより、様々な利点が得られることがわかった。それは以下のような機能が実現できることである。

- 伝送情報のカプセル化の実現
- 伝送情報間の競合管理と排他制御の実現
- プログラミングの簡略化の実現
- 各サイトの内部構造の隠蔽とそれによる独立性の実現

それぞれのエージェント群はそれぞれ動作すべき場所が規定されており、その配置が問題となることがわかった。この問題を解決するためにも個々のプロセスをエージェントと捉える考え方は有効であり、また、動作場所が規定されないプロセスを動作させる場所を変えることによってシステムの性格が変えられることも明らかになった。

本論文で構築したハードウェアで最も特徴的なのは2+1次元ジョイスティックである。これは次の思想の下に開発した。

- 人間が直観的に操作できること。そのために、加工機械の持つ x 、 y 、 z よりなる直交座標系と同じ自由度を有すること
- 人間が手で作業をおこなうのと同様に、片手で2次元の位置決めをおこない、もう一方の手で1次元の工具の動作を実現できること

単に加工機械の制御を人間の手で直接おこなうだけであれば、このようなジョイスティックは必要ない。3次元マウスのような入力デバイスでも操作はできるであろうし、押しボタンやダイヤルのような単純な装置でもいいであろう。しかし、本研究で目指すのは

操作者が自らの手を動かして加工をおこない、加工を体験し、加工に関する知識を身につけられること

であって、単純に「操作がおこなえること」だけを目的としているわけではない。それゆえ、ジョイスティックのように自らが手を動かすことで加工をおこない、また、それによって加工反力を感じられるようなデバイスが必要なのである。

知識は単に教えられるだけで身につくものではない。自らが実践し、それを体験して初めて知識と呼べるであろう。したがって、加工に関する知識の共有や伝承を目指す操作環境伝送型遠隔加工システムでも、操作者に加工を体験させられる機能が必要である。この機能を本論文では操作環境伝送機能と呼び、その実現を目指した。本システムで問題となるのは、(i) 操作対象が遠隔地に存在するために情報伝送にともなう時間遅れがあること、(ii) センサによって獲得した情報をそのまま提示すると必要な情報が知覚しにくいこと、(iii) センサによって獲得できない情報があることである。そのために情報の予測提示、情報の強調提示、および情報変換法を提案し、これらに基づいて

- 加工反力情報の予測提示機能
- 加工状態の振動による強調提示機能
- 力覚情報-視覚情報変換による加工表面の予測・強調提示機能
- 加工形状情報の予測提示機能
- 力覚情報-聴覚情報変換による加工音の予測・強調提示機能

という情報提示機能をシステムに実装した。情報変換法に基づく情報提示では、情報変換をおこなうための情報源として力覚情報を用いている。これは、加工力が加工における本質であり、その他の様々な情報がすべて加工力が原因となっていることとは無関係ではない。

提案したシステムの概念、ソフトウェア、ハードウェアおよび情報提示手法を統合して操作環境伝送型遠隔加工システムを実現した。実現したシステムを用い、様々な状況で加工実験をおこなった。時間遅れがほとんどない状況でおこなった仮想環境に対する加工では、実際の画像情報や加工音情報を提示した場合と同程度のメンタル・ストレスを操作者に与えることがわかった。メンタル・ストレスが同程度ということは、実際の画像情報あるいは加工音情報を仮想環境と交換しても操作性は変わらないということである。したがって、提案した情報提示手法が有効であることが言えた。時間遅れがある場合の遠隔加工実験では、形状情報の予測提示の必要性が認識された。また、情報伝送経路によらず、同じオペレーション・ルームの構成により様々な

場所から操作・加工がおこなえることが確認できた。さらに、本研究の目的である「知識の共有と伝承」の実現可能性を調べる遠隔教育・協調加工実験では、構築したシステムを用いて初心者でも容易に加工機械の操作がおこなえることが確認できた。また、熟練者からはわからない初心者特有の情報認識に関する知見が得られた。

本研究では、加工に関する知識の共有と伝承を可能とするシステムの構築を目指した。しかし、構築したシステムの適用範囲は、これに留まるものではない。たとえば、加工機械を容易に利用する環境を提供することで、設計者が自らの頭に思い描くイメージを自分の手で加工することが可能となる。これは、人間の創造性支援システムの一形態と考えることができる。

さらに、遠隔地に離れた複数操作者による共同作業が可能となることで、現在、多くの企業に求められているコンカレント・エンジニアリングや加工のグローバル・ネットワーク化が実現できる可能性も秘めている。そのシナリオはこうである。

一般に、製品の開発は、非常におおまかではあるが、(i) 企画、(ii) 仕様決定・設計、(iii) 試作・評価、および、(iv) 生産・販売、といういくつかの段階に分類できる(もちろん、この他にも原材料の選定や詳細設計、生産ラインの設計・製作、物流手配等のプロセスが存在する)。従来、個々の工程は前段のプロセスが完了してから後段にその成果が渡されて作業を進めるというウォーターフォール(waterfall; 滝)方式の形態を取るが多かった。しかし、コンカレント・エンジニアリングを実現するためには、様々な活動を並行しておこなえることが重要である。特に(ii)の仕様決定・設計と(iii)の試作・評価の段階は、試作した部品の評価によっては再度設計段階に戻って仕様を変更する必要がある、この段階を短縮することは全工程に要する時間の短縮にとって非常に重要な意味を持つ。これは「ラビッド・プロトタイプینگ(Rapid Prototyping)」あるいは「ラビッド・マニファクチャリング(Rapid Manufacturing)」と呼ばれるコンカレント・エンジニアリングを実現するための要素技術の一つであり、その実現が早急に望まれている。企業における設計・開発部門と実際に加工をおこなう生産部門(工場)とは次第に分離される傾向にあるため、両者の間での協調作業は非常に難しくなっている。

さらに問題なのは、設計に携わる者の加工・生産に関する知識が乏しいことである。加工機械や生産システムの自動化・知能化・無人化を推し進めた結果、人間が機械を直接操作して加工をおこなうことが少なくなり、加工は

いわゆる「職人技」となった。この傾向は企業に限らず大学等の教育機関でも見られる。日頃からCADに触れ、その操作に習熟してはいるものの、実際に加工をおこなう段になると、CADデータを元に生成されたNCプログラムを加工機械に流し込むことで事足りる。そのため、加工機械あるいは加工それ自体がブラックボックス化しているのが現状である。このように加工をブラックボックス化してしまうと、加工に関する知識が設計者に対してフィードバックされないため、本来ならば設計段階で考慮・解決すべき問題が加工段階まで持ち越され、その結果、ラピッド・プロトタイピングの目指す試作期間の短縮は望めなくなる。逆説的ではあるが、システム自体を智能化することによって人間に対して知識をフィードバックしなくなると、かえって開発期間の長期化を招く場合もあるのである。これを解決するためには、もう一度、加工の原点に立ち帰って人間—設計者—を教育し直す必要がある。

互いに離れた場所に分散しつつある設計・開発部門と生産部門との間を情報通信回線で結び、設計・開発部門の存在する空間から生産部門の工場に存在する加工機械を遠隔地から操作できるようにすることで、オペレーション・ルームの設計者は自らの頭に浮かぶアイデアをただちに実物として手にすることが可能となる。これにより、設計者はブラックボックス化した加工機械に触れる機会を再度持てるようになり、自らが直接的に加工に携わることで加工に関する知識を得ることが可能となる。これは、これまで進められてきた自動化の流れとは逆行する方向ではあるが、かと言って、NC化以前の手動加工の時代にそのまま逆戻りするわけでもない。その点でこのシステムは「人間と加工機械との新たな関係を創造するシステム」とでも言えよう。さらに、このシステムは、たとえばオペレーション・ルームが東京にある場合でも、マシン・サイトが日本国内にあるのか、アメリカ・東南アジア・ヨーロッパ、いずれの場所にあるのか、操作者が実際に加工のおこなわれている場所を意識する必要がない。したがって、ある特殊な加工機械が世界にただ一つしかないとしても、準備さえすれば、実際にその機械のある場所に操作者が赴くことなく、特殊機械を用いた加工をおこなえる。

このような生産システムは従来型の生産形態に新たな可能性を与える。つまり、従来おこなわれてきた「生産システムの国際化」をさらに押し進めた「加工のグローバル・ネットワーク」の実現である。従来の「国際化」はあくまでも生産・販売拠点の国外への移転に留まっていた。しかし、加工機械の遠隔操作が可能となると、前述したように、設計者は加工機械の存在する場所を意識することなく、自らのアイデアをただちに実物として加工できる

ようになり、製品開発における設計・試作段階の期間短縮が望める。また、設計者同士が遠隔地に離れていても、複数のオペレーション・ルームから一つの加工機械を操作することで、実物体を用いたアイディアの交換や協同作業が実現できる。さらに、設計に限らず実際の加工現場などで常時システムの状態を監視していなければならないような場合でも、時差を有効に利用することで世界中から24時間体制で監視し、異常が発生した場合でも遠隔地から回避動作がおこなえる。すなわち、遠隔加工システムは、単にコンカレント・エンジニアリングを実現するだけでなく、従来、国家間の問題や摩擦を生んできたハードウェア密着型の「国際化」を、双方の国家がその利益を享受することができる「資源としての国際化」へと変化させられるシステムとしてその発展が期待できる。

第 8 章 結論

第 8 章

結論

本書之目的在於探討我國目前之經濟發展現況，並分析其未來之發展趨勢。本書共分八章，第一章為緒論，第二章至第七章分別探討我國之經濟發展現況，第八章為結論。本書之結論如下：

一、我國目前之經濟發展現況，可分為三個階段：第一階段為經濟起飛期，第二階段為經濟成長期，第三階段為經濟成熟期。

二、我國目前之經濟發展現況，可分為三個階段：第一階段為經濟起飛期，第二階段為經濟成長期，第三階段為經濟成熟期。

三、我國目前之經濟發展現況，可分為三個階段：第一階段為經濟起飛期，第二階段為經濟成長期，第三階段為經濟成熟期。

本論文では、遠隔地に存在する加工機械を臨場感を持って操作し加工をおこなうことを可能とする操作環境伝送型遠隔加工システムの構築をおこなった。現在世界的規模で問題となっている富・知識・技術の偏在を解消するためには人間同士の知識の共有や知識の伝承が必要であることを示し、操作環境伝送型遠隔加工システムが「加工に関する知識の共有と伝承」を実現するシステムとしてその解決策の一つとなり得ることを主張した。また、システムを構築する上で必要となる機能・システム構成を示した上で、それらを統合して管理するソフトウェアの構築法および本研究で構築したハードウェアの構成を示した。さらに、操作環境伝送型遠隔加工システムでは操作者に対して提示する情報とその提示方法が重要であることを指摘し、様々な感覚器官に情報を総合して提示する提示手法を提案した。その後、構築したソフトウェア、ハードウェア、および、情報提示手法を用いた遠隔加工実験をおこない、その有効性を示した。

- 人間同士で知識を共有し、また知識を伝承するためには、コンピュータ上の電子情報の共有だけではなく、実際にモノを操作し、その操作感覚を共有あるいは伝承することが重要である。特に作業の対象を「加工」に限定した場合、実際に加工をしている際の臨場感、すなわち加工機械のそばにいれば得られる視覚・聴覚・触覚・温覚などの感覚情報を操作者に提示することが重要である。
- 遠隔地に存在する加工機械を操作し加工をおこなうため、また操作者に加工の臨場感を提示するためには、(i) 加工の際に発生する現象をセンサによって獲得し伝送する機能、(ii) 獲得した情報から必要な情報を抽出し圧縮する機能、(iii) 情報伝送にともなう時間遅れを補償するために発生する現象を予測する機能、(iv) 得られた情報に対して積極的に情報変換を施して提示する機能、(v) 異常が発生した際にシステムを安全側に退避させるフェイルセーフ機能、(vi) 作業履歴を基にシステム自体が学習をおこなう機能が必要である。
- 複数の操作者が一台の加工機械を同時に操作するシステムではシステムを制御するソフトウェアの役割が重要である。本システムの制御ソフトウェアは複数のプロセスから構成されるが、従来のPeer-to-Peer接続によるプロセス間通信では本システムのプロセス群に要求される多対多の通信を実現するのは困難である。そこで、マルチ・エージェントの概念を用いた柔軟性のあるソフトウェアの構築をおこなった。具体的には情報の

流れを統括するサーバ・エージェントを導入し、これにより各サイトが自律的に動作することが可能となった。また、すべての情報の流れをサーバ・エージェントが管理するために各サイト間での競合解消や排他制御も可能となった。

- マルチ・エージェント・システムとして実装したプロセス群は、個々のプロセスの配置が重要である。すなわち、様々な機能を持つプロセスには動作すべき場所が規定されたプロセスと規定されないプロセスがあり、動作場所が規定されたプロセスが規定された場所で動作していない場合にはシステムの性能が低下する。また、動作場所が規定されないプロセスはそれを動作させる場所によって協調加工に適した配置や遠隔教育に適した配置が実現できる。これらはプロセスをマルチ・エージェント化することによって実現できた機能である。
- 操作者が直観的な操作をおこなえるユーザ・インタフェースを提供することで、初心者でも容易に加工機械の操作をおこなうことができると考え、加工機械と同じ直交座標系を有するジョイスティックを開発した。これにより、操作者のおこなう操作と加工機械の動作とを直観的に結び付けることが可能となった。
- 操作者が操作環境の臨場感を感じながら加工に関する知識を身につけるためには、操作環境で発生する現象を操作者に「わかりやすく」提示することが重要である。また、情報伝送にともなう時間遅れを予測によって補償し、センサによって獲得可能な情報に情報変換を施すことで獲得できない情報を生成し、強調して提示することも必要である。そこで、(i) 時間遅れ補償型力覚情報提示手法、(ii) 加工状態の振動による強調提示手法、(iii) 加工表面の状態を力覚情報-視覚情報変換によって提示する予測提示手法、(iv) 工具と工作物との位置関係を予測して提示する形状情報予測提示、(v) 加工反力情報に力覚情報-聴覚情報変換を施して加工音を予測し提示する手法を提案し、システムに実装した。
- 情報変換法による情報提示では、様々な情報変換を試みた結果、加工反力を基にして得られる加工表面の画像と加工音が効果的であり、加工においては加工反力が重要な役割を担っていることが再確認できた。また、本システムを用いて操作をおこなう場合には、提示する加工反力をおよそ30～50(N)程度とした時に最も操作しやすいという知見も得た。これはおよそ操作者が加え得る力の30～50%である。

- これらに基づいて操作環境伝送型遠隔加工システムを構築し、遠隔加工・遠隔教育・協調加工実験をおこない有効性を調べた。その結果、情報伝送回線として様々な媒体(Internetや電話回線、アナログ回線、人工衛星等)を用いた場合でも、システムはその基本構成を変更することなく動作した。これにより、提案したハードウェアおよびソフトウェアは汎用的であることが確認できた。
- 遠隔加工実験では、提案した手法に基づいて提示された情報は遠隔地から操作をする上で有効であった。すなわち、マシン・サイトで獲得される実際の加工音や画像が提示されない場合であっても、時間遅れなく予測提示された視覚・聴覚・力覚情報等を頼りに遠隔加工をおこなうことが可能であった。しかし、視覚情報については予測提示された形状情報だけでは不十分で実際の加工結果を提示することが必要であるという知見も得た。
- 熟練者の教示の下に、加工機械の初心者であっても、ジョイスティックと提示された情報によって加工機械を容易に操作することが可能であった。さらに、複数の操作者によって協調加工がおこなえることも確認した。この結果、本研究で構築したシステムを用いれば遠隔地間に離れた複数の人間が同時に一台の加工機械を操作することができ、これによって加工に関する知識が共有できることがわかった。また、操作者の中の一人が教師であれば加工に関する知識が伝承できることも示せた。すなわち、本研究の目的である複数の人間同士の知識の共有と伝承は本システムによって実現可能であり、本研究のアプローチが正当であったことが確認できた。
- 本研究ではその対象として「加工」を取り上げ、遠隔地の加工機械を臨場感を持って操作し加工がおこなえるシステムをハードウェアとソフトウェアの画面から構築してきた。しかし、このシステムの概念は加工に限ったものではなく、より汎用性を持つものである。すなわち、加工だけではなくマイクロ・サージェリや建設ロボットの遠隔制御等様々な適用が可能である。今後それぞれの作業内容に応じたハードウェアおよび情報提示手法を開発していくことで、本システムの概念はより広い分野での利用が期待できる。

以下に各章の結論を示す。

第1章

現在、世界的規模で富・知識・技術の偏在が問題となっており、これらを解消するためには人間同士で知識を共有し、また、伝承することが必要である。対象を「加工」に限定すると、加工に関する知識の共有・伝承を実現するためにはコンピュータ上の情報の共有だけではなく、遠隔地に離れた複数の人間が一台の加工機械を共有し、実際の加工を通して知識を共有したり伝承したりすることが有効である。さらに、その時に発生している現象を操作している人間に「わかりやすく」提示することが必須である。この提示された現象の臨場感によって、人間は加工に関する知識を身につけることが可能となる。

第2章

操作環境伝送型遠隔加工システムでは、人間が遠隔地から加工機械を操作することを可能とする。これにより、複数の人間同士で知識の共有や伝承をおこなうことが可能となり、さらに、加工機械を容易に扱えるために人間の創造性を支援することにもつながる。このようなシステムを構築するためには、(i) 情報獲得・伝送機能、(ii) 情報抽出・圧縮機能、(iii) 現象予測機能、(iv) 情報変換・提示機能、(v) フェイルセーフ機能、(vi) 学習機能が必要である。これらの機能を備えた操作環境伝送型遠隔加工システムの基本構成を示した。

第3章

操作環境伝送型遠隔加工システムを制御するソフトウェアに従来型のプロセス間通信の概念を適用すると破綻をきたすことを指摘し、個々のプロセスを機能分離されたエージェントと考えてソフトウェア構成をマルチ・エージェント化することで明解な接続形態が実現可能であることを示した。また、各エージェントを適切な場所で動作させることの必要性を述べ、システムの情報の流れを統括するサーバ・エージェントの動作する場所によって、提案したシステムは様々な目的のシステムとして利用可能となることを明らかにした。

第4章

第2章で提案した操作環境伝送型遠隔加工システムの基本構成に基づいて、実際に実装したハードウェアの構成を示した。操作環境伝送型遠隔加工シ

システムを構成するハードウェアは、(i) マシン・サイト側のハードウェア、(ii) オペレーション・ルーム側のハードウェア、(iii) 両者を結ぶ情報伝送システムの3つに大別され、それぞれについてハードウェアの構成と個々の仕様を示している。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の中で最も特徴的かつ重要なものが2+1次元ジョイスティックである。加工機械の直交座標系と同じ自由度を持つこのジョイスティックにより、操作者は加工機械を直観的に操作することができ、操作者に余計な負担をかけることなく操作がおこなえたとともにヒューマン・エラーの発生を抑えることができる。

第5章

操作環境伝送型遠隔加工システムを構築する上で、操作者に加工の臨場感を与えるためには、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重要である。そこで、加工の際に人間が利用している感覚について考察した。また、操作環境伝送型遠隔加工システムでは情報伝送に時間遅れをとれない、センサによって獲得することのできない情報も提示する必要があるため、(i) 発生する現象を予測し、(ii) 強調して提示すること、および、(iii) 情報変換によって獲得できない情報を生成して提示することの重要性を主張した。この主張に基づき

- 加工の物理モデルを用いた力覚情報の予測提示手法
- 振動による加工状態の強調提示手法
- 力覚情報-視覚情報変換に基づく加工表面の予測・強調提示手法
- 時間遅れを補償するための加工形状情報の予測提示手法
- 力覚情報-聴覚情報変換に基づく加工音の予測・強調提示手法

を提案した。これらはいずれもそれ単独の実験あるいは第6章で述べる総合実験によってその有効性が確認できた。

第6章

第5章までに述べてきたシステムの概念、ソフトウェア、ハードウェア、情報提示手法を統合して操作環境伝送型遠隔加工システムを実現し、それを用いた

- 情報予測・強調提示実験
- 遠隔加工実験
- 遠隔教育実験・協調加工実験

をおこなった。情報予測・強調提示実験により、提案した情報提示手法の有効性が確認できた。そして、いずれの実験でも操作者は提示された情報を頼りに遠隔地に存在する加工機械を容易に操作し加工をおこなうことが可能であった。また、熟練者からの教示によって加工機械の初心者でも加工機械を容易に操作できること、および、本システムを用いて複数操作者による協調加工が可能であることを確認した。

第7章

構築したシステムについて考察し、総括をおこなった。また、今後、操作環境伝送型遠隔加工システムが果たす役割について展望を示した。

謝辞

本論文は、東京大学工学部産業機械工学科生産システム工学研究室において筆者を中心にした研究グループがおこなった研究をまとめたものであります。本論文を完成させるにあたっては、多くの方々の御協力と御指導をいただきました。謹んで、ここに感謝の意を表します。

指導教官である長尾高明教授には、筆者が学部4年生で研究室に配属されてからの6年間に渡り、終始並々ならぬ御指導と励ましをいただきました。

畑村洋太郎教授には、平素から設計に関する知識を御指導いただき、また、本論文の構成に関して貴重な御意見をいただきました。

井上博允教授には、本論文に関して数々の有益な御助言をいただきました。

佐藤知正教授には、本論文を深く御検討いただき、貴重な御指導をいただきました。

館璋教授には、本論文をまとめるにあたり有益な御意見をいただきました。

光石衛助教授には、筆者の研究室での研究・生活全般において平素より御指導と御鞭撻をいただきました。

東京大学工学部産業機械工学科生産システム工学研究室の先輩、同輩、後輩の皆様方には、筆者の研究室在籍中、様々な面で多くの御協力をいただきました。

西保木宏男助手、中島信行助手には、開発したシステムで用いた部品の加工および物品購入に際し御相談にのっていただきました。

奥村努助手には、筆者とともに研究室の計算機環境の整備をしていただくとともに、制御プログラムについて貴重な助言をいただきました。

割澤伸一氏(現在、東京工業大学精密工学研究所助手)には、筆者の研究室在籍中(学部4年～博士課程1年時)、制御プログラムの開発に貴重な御助言をいただくとともに研究生生活の手本として非常に有益な時間を過ごさせていただきました。

播本昌之君(現在、日本電気株式会社)には、システムの立ち上げ時から非常に御尽力いただきました。彼のプログラム能力、交渉能力には何度となく助けていただきました。特に、1992年、1994年の遠隔加工実験の際には、彼の技術力を遺憾なく発揮していただきました。筆者の大学・大学院での生活を通じての良き友人であります。

小林和雄君(現在、日本電装株式会社)には、システムのハードウェア構築にあたり貴重な助言をいただきました。

疋田智治君(現在、日本電信電話株式会社)には、加工形状情報の予測提示に関して筆者のアイデアを忠実に実装していただくとともに、筆者が開発した制御プログラムの移植をおこなっていただきました。

石井賢二君(現在、日本電気株式会社)には、加工表面の予測提示に関して筆者のアイデアを忠実にプログラムに実装していただきました。

修士課程2年の寺谷匡生君には、ジョイスティックの製作をしていただくとともに、システム全体の構成について、日々、良き討論の相手になっていただきました。

修士課程1年の長徳裕司君には、加工状態の提示に関してジョイスティックの改良をしていただきました。

その他にも、研究室の皆様方には、遠隔加工実験の際に、実験準備や当日の作業等、貴重な時間を割いて手伝っていただきました。

また、筑波大学構造工学系講師の葛岡英明氏および葛岡研究室の皆様には、CSCWに関する輪講を開いていただくとともに複数操作者による遠隔協調加工実験の協同実験をおこなっていただきました。

本研究は筆者個人の力では到底成し得なかったものであり、多くの先輩方、同輩および後輩の皆様方との、まさに時間を越えた協同作業の結果生まれたものであります。ここに感謝の意を表し、厚く御礼申し上げます。

最後になりましたが、長きにわたる筆者の学生生活・研究生活を影で支えてくれた両親に深く感謝いたします。

- [1] David L. Akin, Marvin L. Minsky, Eric D. Thiel, and Clifford R. Kurtzman, "Space Applications of Automation, Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS) - Phase II," Technical report, NASA Contractor Report 3734, National Aeronautics and Space Administration (NASA), 1983.
- [2] 秋山 稔 (監修), 池田佳和, 松本潤, 藤岡雅宣, 菊田弘之, "ISDN 絵とき読本 (改定増補版)," オーム社, 1992.
- [3] Robert J. Anderson and Mark W. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol.34, No.5, pp.494-501, 1989.
- [4] 荒井 栄司, 劉 継紅, "協調設計のための設計者グループの組織化とコミュニケーション," 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集, Vol. 4, pp.297-299, Tokyo, Japan, 1994.
- [5] 新井 健生, "マイクロテレロボティクス," 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.822-827, 1993.
- [6] 新井 健生, 中野 栄二, "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イブ制御," 日本ロボット学会誌, Vol.4, No.5, pp.469-479, 1986.
- [7] 浅間 一, "マルチエージェントロボットシステム研究の動向と展望," 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.428-432, 1992.
- [8] A. K. Bejczy, "Teleoperation : The Language of the Human Hand," In *Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp.32-43, Tokyo, Japan, 1992.
- [9] M. Ben-Ari, "Principles of Concurrent Programming (邦訳: 並行プログラミングの原理 (渡辺 栄一訳, 啓学出版)),", Prentice Hall, 1982.
- [10] Martin Buss and Hideki Hashimoto, "Hand Manipulation Skill Modeling for the Intelligent Cooperative Manipulation Systems—ICMS," In *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS'94)*, Vol. 2, pp.1234-1241, München, Germany, 1994.
- [11] 千々岩 健児, 長尾 高明, 木内 学, 畑村 洋太郎, "機械製作法通論 (下)," 東京大学基礎工学双書, 東京大学出版会, 1982.

- [12] Douglas E. Comer, "Internetworking With TCP/IP Vol. I: Principles, Protocols, and Architecture (邦訳: TCP/IP によるネットワーク構築 (第2版) Vol. I: 原理・プロトコル・アーキテクチャ (村井純・楠本博之訳, 共立出版)),", Prentice Hall, 1991.
- [13] Douglas E. Comer and David L. Stevens, "Internetworking With TCP/IP Vol. III: Client-Server Programming And Applications [BSD Socket Version] (邦訳: TCP/IP によるネットワーク構築 Vol. III: クライアント-サーバプログラミングとアプリケーション (村井純・楠本博之訳, 共立出版)),", Prentice Hall, 1993.
- [14] "The First CIRP International Workshop on Concurrent Engineering for Produce Realization," In *Annals of the CIRP 1992, Report from CIRP Seminars*, Vol.41/2, pp.743-745, Tokyo, Japan, 1992.
- [15] Eugene S. Ferguson, "Engineering And The Mind's Eye (邦訳: 技術屋の心眼 (藤原良樹・砂田久吉訳, 平凡社)),", The MIT Press, 1992.
- [16] 藤井義也, 岩部洋育, "ねじれ刃エンドミルの切削過程," 昭和56年度精機学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.808-810, Saitama, Japan, 1981.
- [17] 福田収一, "コンカレントエンジニアリング," 計算力学とCAEシリーズ8, 培風館, 1993.
- [18] Per Brinch Hansen, "Operating System Principles (邦訳: オペレーティング・システムの原理 (田中穂積・真子ユリ子・有沢誠訳, 近代科学社)),", Prentice Hall, 1973.
- [19] 播本昌之, "情報の予測強調提示に基づく遠隔臨場感加工システムの研究," 1993年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1994.
- [20] 橋本秀紀, "人工現実感とロボット—知能化作業支援システムの提案—," 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7, pp.903-908, 1992.
- [21] 畑村洋太郎, 割澤伸一, 加藤賢一, 光石衛, 長尾高明, "フェイルセーフテーブルの開発," 1992年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.797-798, Fukuoka, Japan, 1992.
- [22] 疋田智治, "操作環境伝送型操作加工システムの研究," 1994年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1995.

- [23] 正田 智治, 長徳 裕司, 光石 衛, 寺谷 匡生, 長尾 高明, “テレ・マシニングにおける加工状態の振動による提示システムの試み,” 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.437-438, Okayama, Japan, 1995.
- [24] 正田 智治, 光石 衛, 堀 俊夫, 長尾 高明, “多軸力を用いた実時間加工表面提示の試み,” 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.69-70, Tokyo, Japan, 1995.
- [25] 平井 成興, “Shared Autonomy の理論,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.788-793, 1993.
- [26] 廣瀬 通孝, “広がる人工現実感の技術,” 精密工学会誌, Vol.57, No.8, pp.1315-1320, 1991.
- [27] 廣瀬 通孝, “人工現実感とコラボレーション,” 計測と制御, Vol.30, No.6, pp.457-464, 1991.
- [28] Gerd Hirzinger, Bernhard Brunner, Johannes Dietrich, and Johann Heindl, “Sensor-Based Space Robotics—ROTEX and Its Telerobotic Features,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.649-663, 1993.
- [29] 樋渡 涓二 (編), “視聴覚情報概論,” 昭晃堂, 1987.
- [30] 堀 俊夫, “異世界間を結ぶ操作加工システムの力覚情報提示に関する研究,” 1992年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1993.
- [31] 堀 俊夫, 播本 昌之, 割澤 伸一, 光石 衛, 長尾 高明, “実時間加工状態判定法に基づく遠隔加工におけるバイラテラル制御,” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.709-710, Yokohama, Japan, 1993.
- [32] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, “遠隔臨場感操作加工システムにおける加工状態の力覚による提示の試み,” 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.65-66, Kyoto, Japan, 1993.
- [33] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, “テレ・マイクロ・ハンドリングにおける操作者の姿勢理解に基づく視覚情報提示,” 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.845-846, Fukuoka, Japan, 1994.
- [34] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, “遠隔臨場感操作加工システムにおける加工状態の力覚による提示の試み(第2報),” 1994年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.291-292, Tokyo, Japan, 1994.

- [35] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, “遠隔操作・加工システムにおける操作者の行動理解と情報提示,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH) '95 講演論文集, pp.528-530, Kawasaki, Japan, 1995.
- [36] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, “操作者の行動理解に基づくマイクロ・ハンドリング用視覚情報獲得/提示システム,” 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.515-516, Tokyo, Japan, 1995.
- [37] 堀 俊夫, 光石 衛, 長尾 高明, 石井 賢二, “操作環境伝送型生産システムにおける情報変換法に基づく加工表面予測提示の試み,” 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.223-224, Nagano, Japan, 1994.
- [38] 堀 俊夫, 光石 衛, 割澤 伸一, 長尾 高明, “加工の物理モデルを用いた時間遅れ補償型力覚情報提示の試み,” In *Human Interface, News and Report*, Vol.8/2, pp.241-246, Tokyo, Japan, 1993.
- [39] 星宮 望, 石井 直宏, 塚田 稔, 井出 英人, “生体情報工学,” 森北出版, 1986.
- [40] 茨木 俊秀, 福島 雅夫, “最適化の手法,” 情報数学講座 14, 共立出版, 1993.
- [41] 井越 昌紀, “人工現実感の製造業への応用,” 精密工学会誌, Vol.57, No.8, pp.1339-1342, 1991.
- [42] 井越 昌紀, 館野 寿丈, “エージェントモデルによる人間統合生産システム,” 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.113-114, Okayama, Japan, 1995.
- [43] 稲垣 公夫, “NECにおけるコンカレント・エンジニアリングへの取り組み,” 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, Vol. 4, pp.684-685, Tokyo, Japan, 1993.
- [44] “特集 最適なVMEシステムの構築,” インタフェース, No.191,, 1993.
- [45] 石井 威望, “日本型技術が世界を変える,” PHP 研究所, 1991.
- [46] 石井 裕, “CSCWとグループウェア—協創メディアとしてのコンピュータ—,” ヒューマンコミュニケーション工学シリーズ, オーム社, 1994.
- [47] 岩田 洋夫, “フォースディスプレイ,” 計測と制御, Vol.30, No.6, pp.472-477, 1991.

- [48] 岩田 洋夫, “人工現実感とフォースディスプレイ,” 精密工学会誌, Vol.57, No.8, pp.1326-1329, 1991.
- [49] 岩田 洋夫, “人工現実感のもたらすメカトロニクスの新展開,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会'92講演論文集, Vol. A, pp.903-907, Kawasaki, Japan, 1992.
- [50] 海保 博之, 原田 悦子, 黒須 正明, “認知的インタフェース,” 新曜社, 1991.
- [51] 関念 磨聡, “多軸力-音変換法に基づく加工の臨場感通信システムの試み,” 1991年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1992.
- [52] 関念 磨聡, 光石 衛, 割澤 伸一, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, “多軸力-音変換法に基づく加工の臨場感通信システムの試み,” 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.137-138, Shizuoka, Japan, 1991.
- [53] Won S. Kim, “Developments of New Force Reflecting Control Schemes and an Application to a Teleoperation Training Simulator,” In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp.1412-1419, Nice, France, 1992.
- [54] Won S. Kim, “Graphical Operator Interface for Space Telerobotics,” In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp.761-768, Atlanta, Georgia, U.S.A., 1993.
- [55] Won S. Kim and Antal K. Beczy, “Demonstration of a High-Fidelity Predictive/Preview Display Technique for Telerobotic Servicing in Space,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.698-702, 1993.
- [56] 小林 和雄, “遠隔臨場感微細操作加工システムの研究,” 1993年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1994.
- [57] G. Kovács, I. Mezgár, and E. Szelke, “Application of Concurrent Engineering in Design for One-of-A-Kind Production,” In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp.956-961, Nice, France, 1992.
- [58] George L. Kovács and István Mezgár, “Concurrent Engineering : A Way to Design Intelligent Manufacturing Systems,” In *Proceedings of the 1992 JAPAN/USA Symposium on Flexible Automation —A Pacific Rim Conference—*, Vol. 1, pp.461-466, San Francisco, U.S.A., 1992.

- [59] F.L. Krause, "Distributed Product Design," In *Annals of the CIRP 1994*, Vol.43/1, pp.149-152, Singapore, 1994.
- [60] Myron W. Krueger, "Artificial Reality II," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.
- [61] Yasuo Kuniyoshi, Masayuki Inaba, and Hirochika Inoue, "Seeing, Understanding and Doing Human Task," In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp.2-9, Nice, France, 1992.
- [62] 葛岡 英明, "遠隔地間空間型共同作業の支援に関する研究," Doctor's thesis, 東京大学, 1991.
- [63] 葛岡 英明, 割澤 伸一, 大村 裕子, 光石 衛, 廣瀬 通孝, 石井 威望, "加工の臨場感通信システムの人間工学的考察," 1990年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.501-502, 1990.
- [64] C. Andrew Lawn and Blake Hannaford, "Performance Testing of Passive Communication and Control in Teleoperation with Time Delay," In *Proceedings of the 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 3, pp.776-783, Atlanta, Georgia, U.S.A., 1993.
- [65] Lars Lindberg, "Notes on Concurrent Engineering," In *Annals of the CIRP 1993*, Vol.42/1, pp.159-162, Edinburgh, Scotland, 1993.
- [66] Andrew Liu, Gregory Tharp, Lloyd French, Stephen Lai, and Lawrence Stark, "Some of What One Needs to Know About Using Head-Mounted Displays to Improve Teleoperator Performance," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.638-648, 1993.
- [67] 光石 衛, "人工現実感技術を用いた異世界間の操作・加工システム," 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.7, pp.909-920, 1992.
- [68] Mamoru Mitsuishi, "Auditory and Force Display of Key Physical Information in Machining/handling for Macro/Micro Teleoperation," In *Workshop on "Force Display in Virtual Environments and Its Application to Robotic Teleoperation" at 1993 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.137-169, Atlanta, Georgia, U.S.A., 1993.

- [69] 光石 衛, “遠隔微細作業,” 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.533-534, Fukuoka, Japan, 1994.
- [70] 光石 衛, 播本 昌之, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, “聴覚情報への変換による異世界間の情報伝達システム,” 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.439-442, Ishikawa, Japan, 1992.
- [71] 光石 衛, 播本 昌之, 堀 俊夫, 長尾 高明, “遠隔臨場感加工における予測情報提示システム,” 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.67-68, Kyoto, Japan, 1993.
- [72] 光石 衛, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, “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, Tokyo, Japan, 1991.
- [73] Mamoru Mitsuishi, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Hirochika Inoue, “Development of a User Friendly Manufacturing System,” In *Proceedings of International Conference on Manufacturing Systems and Environment*, pp.167-172, Tokyo, Japan, 1990.
- [74] 光石 衛, 東豊一郎, 割澤 伸一, “テレ・マシニングにおける操作システムの研究,” In *Human Interface, News and Report*, Vol.7/2, pp.289-294, Tokyo, Japan, 1992.
- [75] 光石 衛, 疋田 智治, 播本 昌之, 堀 俊夫, 小林 和雄, 寺谷 匡生, 長尾 高明, “インターネットを用いた操作環境伝送型テレマクロ/マイクロ操作加工システムの構築,” 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.221-222, Nagano, Japan, 1994.
- [76] 光石 衛, 疋田 智治, 寺谷 匡生, 堀 俊夫, 播本 昌之, 長尾 高明, “インターネットを用いたテレ・マニファクチャリングの試み,” 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.633-634, Fukuoka, Japan, 1994.
- [77] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Bruce Kramer, “Operational Environment Transmission for Manufacturing Globalization,” In *Proceedings of 1994 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation —A Pacific Rim Conference—*, pp.379-382, Kobe, Japan, 1994.
- [78] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, Tomoharu Hikita, Masao Teratani, and Takaaki Nagao, “The User Interface for a Tele-Machining System with

- Operational Environment Transmission Capability," In *Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'95)*, pp.42-48, Waseda, Japan, 1995.
- [79] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, Tomoharu Hikita, Masao Teratani, Takuro Watanabe, Hirofumi Nakanishi, and Bruce Kramer, "Experiments in Tele-handling and Tele-machining at the Macro and Micro Scales, using the Internet for Operational Environment Transmission," In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 1995 (IROS '95)*, Vol. 2, pp.13-20, Pittsburgh, U.S.A., 1995.
- [80] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, and Takaaki Nagao, "Predictive Force Display for Tele-Handling/Machining System," In *Proceedings of the 2nd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'93)*, pp.160-164, Tokyo, Japan, 1993.
- [81] 光石 衛, 堀 俊夫, 長尾 高明, "遠隔臨場感操作加工における力覚情報提示システムの開発," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH)'93 講演論文集, pp.574-579, Sapporo, Japan, 1993.
- [82] 光石 衛, 堀 俊夫, 長尾 高明, "時間遅れ補償と加工状態提示とを特徴とする遠隔臨場感操作加工システム," 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.799-802, Tokyo, Japan, 1993.
- [83] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, and Takaaki Nagao, "Predictive Information Display for Tele-Handling/Machining System," In *Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems 1994 (IROS '94)*, pp.260-267, München, Germany, 1994.
- [84] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, and Takaaki Nagao, "Using Predictive Information Display for Operational Environment Transmission in a Tele-Handling/Machining System," In *Proceedings of 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'94)*, pp.299-304, Nagoya, Japan, 1994.
- [85] 光石 衛, 堀 俊夫, 長尾 高明, "情報予測強調提示を特徴とするテレ・マニユファクチャリング・システム," 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.631-632, Fukuoka, Japan, 1994.

- [86] Mamoru Mitsuishi, Toshio Hori, and Takaaki Nagao, "Predictive, Augmented and Transformed Information Display for Time Delay Compensation in Tele-Handling/Machining," In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.45-52, Nagoya, Japan, 1995.
- [87] 光石 衛, 小林 和雄, 畑村 洋太郎, 佐藤 知正, 長尾 高明, "多軸力情報-聴覚情報変換法に基づく遠隔臨場感微細操作加工システム," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, pp.526-528, 1993.
- [88] Mamoru Mitsuishi, Kazuo Kobayashi, and Bruce Kramer, "Information Transformation-Based Tele-Micro-Handling/Machining System," In *Proceedings of IEEE Micro Electro Mechanical Systems -An Investigations of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Robotic Systems- (MEMS'94)*, pp.303-308, Oiso, Japan, 1994.
- [89] Mamoru Mitsuishi, Kazuo Kobayashi, Takaaki Nagao, Yotaro Hatamura, Tomomasa Sato, and Bruce Kramer, "Development of tele-operated micro-handling/machining system based on information transformation," In *Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems'93 (IROS'93)*, pp.1473-1478, Yokohama, Japan, 1993.
- [90] 光石 衛, 小林 和雄, 佐藤 知正, 長尾 高明, "情報変換法に基づくテレ・マイクロ・ハンドリングシステム," 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.145-146, Kyoto, Japan, 1993.
- [91] 光石 衛, 小林 和雄, 佐藤 知正, 長尾 高明, "臨場感を有する遠隔微細操作・加工システムの構築," 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.1037-1040, Tokyo, Japan, 1993.
- [92] Mamoru Mitsuishi, Kazuo Kobayashi, Takuro Watanabe, Hirofumi Nakanishi, and Takaaki Nagao, "Development of a Micro Machining/Testing System with a Fixed View/Operational Point," In *Proceedings of 9th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering*, pp.432-435, Cincinnati, U.S.A., 1994.
- [93] 光石 衛, 小林 和雄, 渡辺 拓郎, 中西 泰文, 渡辺 博義, "臨場感を有するテレ・マイクロ・サージェリ・システムの開発," 日本機械学会第71期通常総会講演会講演論文集, pp.561-563, 1994.

- [94] 光石 衛, 小林 和雄, 渡辺 拓郎, 中西 泰文, 渡辺 博義, “不動工具中心注視を特徴とするテレ・マイクロ・サージェリ・システムの試み,” 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.253-254, Nagano, Japan, 1994.
- [95] Mamoru Mitsuishi, Kazuo Kobayashi, Takuro Watanabe, Hirofumi Nakanishi, Hiroyoshi Watanabe, and Bruce Kramer, “Development of an Inter-World Tele-Micro-Surgery System with Operational Environment Information Transmission Capability,” In *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.3081-3088, Nagoya, Japan, 1995.
- [96] 光石 衛, 小林 統, 割澤 伸一, “聴覚情報を用いたテレ・マシニング・システム,” In *Human Interface, News and Report*, Vol.7/2, pp.307-312, Tokyo, Japan, 1992.
- [97] 光石 衛, 葛岡 英明, 堀 俊夫, 長尾 高明, “コンピュータ・ネットワークを用いた複数操作者による遠隔協調加工システム,” 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH) '95講演論文集, pp.1372-1375, Kawasaki, Japan, 1995.
- [98] Mamoru Mitsuishi, Takaaki Nagao, Yotaro Hatamura, Bruce Kramer, and Shin'ichi Warisawa, “A Manufacturing System for the Global Age,” In *Proceedings of Eighth International IFIP WG5.3 Conference (PROLAMAT'92)*, pp.841-852, Tokyo, Japan, 1992.
- [99] Mamoru Mitsuishi, Takaaki Nagao, Yotaro Hatamura, and Shin'ichi Warisawa, “Real-Time Machining State Detection Using Multi-axis Force Sensing,” In *CIRP Annals 1992*, Vol.41/1, pp.505-508, Aix-en-Provence, France, 1992.
- [100] 光石 衛, 長尾 高明, 畑村 洋太郎, 割澤 伸一, 播本 昌之, 堀 俊夫, 東 豊一郎, 杉下 寛, “3次元ジョイスティックを用いた工作機械の臨場感遠隔操作システム,” 1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.707-708, Yokohama, Japan, 1993.
- [101] 光石 衛, 寺谷 匡生, 正田 智治, 堀 俊夫, 小林 和雄, 長尾 高明, “力覚情報予測強調提示のための2+1自由度マスタ・マニピュレータの開発,” 1994年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.219-220, Nagano, Japan, 1994.
- [102] 光石 衛, 寺谷 匡生, 堀 俊夫, 長尾 高明, “遠隔地間の複数操作者による協調作業可能な操作環境伝送型操作加工システム,” 1995年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.435-436, Okayama, Japan, 1995.

- [103] Mamoru Mitsuishi, Shin'ichi Warisawa, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Bruce Kramer, "A User-Friendly Manufacturing System for "Hyper-Environments"," In *Proceedings of 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1, pp.25-31, Nice, France, 1992.
- [104] Mamoru Mitsuishi, Shin'ichi Warisawa, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Bruce Kramer, "Trial of a Remote Reality-Based Manufacturing System in Japan Operated from the United States," In *Proceedings of 1992 Japan/U.S.A. Symposium on Flexible Automation -A Pacific Rim Conference-*, pp.1491-1498, San Francisco, U.S.A., 1992.
- [105] Mamoru Mitsuishi, Shin'ichi Warisawa, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Bruce Kramer, "Human-Friendly Operating System for Hyper-Environments," *Journal of Robotics and Mechatronics*, Vol.4, No.2, pp.167-178, 1992.
- [106] 光石 衛, 割澤 伸一, 東 豊一郎, 小林 統, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, "多軸力・立体音情報を用いたテレ・マシニング・システム," 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 (ROBOMECH)'92講演論文集, Vol. B, pp.345-350, Kawasaki, Japan, 1992.
- [107] Mamoru Mitsuishi, Shin'ichi Warisawa, Toyochiro Higashi, Osamu Kobayashi, Yotaro Hatamura, Takaaki Nagao, and Bruce Kramer, "A Tele-Machining System Using Multi-Axis Force Data and Stereo Sound Information," In *Proceedings of 1st IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'92)*, pp.227-234, Tokyo, Japan, 1992.
- [108] 光石 衛, 割澤 伸一, 関念 鷹聡, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, "超環境を結ぶヒューマン・フレンドリな生産システム," 第7回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム, pp.179-186, 1991.
- [109] 光石 衛, 割澤 伸一, 葛岡 英明, 畑村 洋太郎, 長尾 高明, "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, Sapporo, Japan, 1990.
- [110] 光石 衛, 割澤 伸一, 長尾 高明, 畑村 洋太郎, "臨場感をもつ対蹠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, Tokyo, Japan, 1991.
- [111] Mamoru Mitsuishi, Takuro Watanabe, Hirofumi Nakanishi, Toshio Hori, Ryosuke Asai, and Hiroyoshi Watanabe, "A Tele-micro-surgery System That

- Shows What the User Wants to See," In *Proceedings of 4th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (RO-MAN'95)*, pp.237-246, Waseda, Japan, 1995.
- [112] Mamoru Mitsuishi, Takuro Watanabe, Hirofumi Nakanishi, Toshio Hori, Hiroyoshi Watanabe, and Bruce Kramer, "A Tele-micro-surgery System across the Internet with a Fixed Viewpoint/Operation-Point," In *Proceedings of IEEE/RJS International Conference on Intelligent Robots and Systems 1995 (IROS '95)*, Vol. 2, pp.178-185, Pittsburgh, U.S.A., 1995.
- [113] 光石 衛, 渡辺 拓郎, 中西 泰文, 渡辺 博義, "操作環境伝送型テレ・マイクロ・サージェリ・システム," 第12回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.537-538, Fukuoka, Japan, 1994.
- [114] 光石 衛, 渡辺 拓郎, 中西 泰文, 渡辺 博義, "テレ・マイクロ・サージェリ・システムの構築," 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.509-510, Tokyo, Japan, 1995.
- [115] 光石 衛, 渡辺 拓郎, 中西 泰文, 渡辺 博義, "テレ・マイクロ・サージェリ・システムの試み," 日本機械学会第72期通常総会講演会講演論文集, pp.315-316, 1995.
- [116] 村山 長, 大場 史憲, 小川 昭, "コンカレント・エンジニアリングのための協調作業グループの動的構成法," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, Vol. 4, pp.629-631, Tokyo, Japan, 1993.
- [117] 長尾 高明, "産業システム経済学," 東京大学機械工学2, 東京大学出版会, 1993.
- [118] 仲義輝, 小野里 雅彦, 岩田 一明, "設計・生産のための協調意思決定構造に関する研究(第2報) —意思決定構造の記述—," 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.11-12, Tokyo, Japan, 1995.
- [119] 中島 裕生, "設計と製造を統合するコンカレントエンジニアリング方法論," 日本機械学会第70期通常総会講演会講演論文集, Vol. 4, pp.621-623, Tokyo, Japan, 1993.
- [120] OpenGL Architecture Review Board (Jackie Neider, Tom Davis, and Mason Woo), "OpenGL Programming Guide The Official Guide to Learning OpenGL,

- Release 1 (邦訳: タイトル同じ, アジソン・ウェスレイ), Addison-Wesley Publishing Company, 1993.
- [121] Donald A. Norman, "The Psychology of Everyday Things (邦訳: 誰のためのデザイン? (野島久雄訳, 新曜社)), Basic Books Inc., 1990.
- [122] 野呂影勇 (編集委員長), "図説エルゴノミクス," 日本規格協会, 1990.
- [123] 太田 博, 川合 忠雄, 吉野 岳志, 葉 建明, "振動解析による切削異常の検知 (第1報 びり振動の検知)," 日本機械学会論文集 (C編), Vol.57, No.540, pp.260-265, 1991.
- [124] 太田 孝史, 岡部 英幸, 光石 衛, 長尾 高明, "実験的安定限界線図に基づく動的経路修正システムの構築," 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1095-1096, Tokyo, Japan, 1995.
- [125] 岡部 英幸, 太田 孝史, 光石 衛, 長尾 高明, "実験的安定限界線図に基づく加工条件設定の試み," 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1093-1094, Tokyo, Japan, 1995.
- [126] 奥村 努, 中尾 政之, 畑村 洋太郎, "加工発熱に対処した6分力センシングテーブルの開発," 1993年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.873-874, Kyoto, Japan, 1993.
- [127] 大村 裕子, 葛岡 英明, 制澤 伸一, 光石 衛, 廣瀬 通孝, 石井 威望, "生産システムにおけるCSCWの人間工学的評価手法の提案," 第6回ヒューマン・インタフェース・シンポジウム, pp.105-108, 1990.
- [128] 小野里 雅彦, 薮崎清ヒベルト, 岩田 一明, "コンカレントエンジニアリングにおける協調プロセスに関する研究," 1995年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.13-14, Tokyo, Japan, 1995.
- [129] 大島 正光, 大久保 克夫, "人間工学," 経営工学ライブラリー 8, 朝倉書店, 1989.
- [130] 大里 延康, "分散協調システム—分散AI・並行オブジェクト・人工生命—," 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.4, pp.450-456, 1992.
- [131] Richard P. Paul, Craig P. Sayers, and Matthew R. Stein, "The Theory of Teleprogramming," 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.782-787, 1993.

- [132] 榊 泰輔, 館 暁, “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.
- [133] 榊 泰輔, 館 暁, “インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム (III) (一般化したシステムによる理想的なバイラテラル応答特性の実現),” 日本ロボット学会誌, Vol.10, No.3, pp.418-421, 1992.
- [134] S. E. Salcudean, N. M. Wong, and R. L. Hollis, “A Force-Reflecting Teleoperation System with Magnetically Levitated Master and Wrist,” In *Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 2, pp.1420-1426, Nice, France, 1992.
- [135] 佐藤 知正, “テレロボティクス研究の動向,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.777-781, 1993.
- [136] Thomas B. Sheridan, “Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control,” The MIT Press, 1992.
- [137] Thomas B. Sheridan, “Space Teleoperation Through Time Delay: Review and Prognosis,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol.9, No.5, pp.592-606, 1993.
- [138] S. Smith and J. Tlustý, “An Overview of Modeling and Simulation of the Milling Process,” *Journal of Engineering for Industry, Trans. of ASME*, Vol.113, pp.169-175, 1991.
- [139] G. Sohlenius, “Concurrent Engineering,” In *Annals of the CIRP 1992, Keynote Paper*, Vol.41/2, pp.645-655, Aix-en-Provence, France, 1992.
- [140] Mark W. Spong, “Communication Delay and Control in Telerobotics,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.803-810, 1993.
- [141] Matthew R. Stein, Richard P. Paul, Paul S. Schenker, and Eric D. Paljug, “A Cross-Country Teleprogramming Experiment,” In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems'95 (IROS'95)*, Vol. 2, pp.21-26, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., 1995.
- [142] 鈴木 元, “メディアによる協同作業支援,” 原島 博, 廣瀬 通孝, 下條 信輔 (編), *bit 別冊 仮想現実学への序曲 — バーチャルリアリティドリーム —*, chapter 5, pp.166-172, 共立出版, 1994.

- [143] 館 暲, “トレイグジスタンス,” 計測と制御, Vol.30, No.6, pp.465-471, 1991.
- [144] 館 暲, “トレイグジスタンスと人工現実感,” 精密工学会誌, Vol.57, No.8, pp.1321-1325, 1991.
- [145] 館 暲, “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.
- [146] 館 暲, “人工現実感,” 日刊工業新聞社, 1992.
- [147] 館 暲, “テレロボティクスの世界,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.770-772, 1993.
- [148] 館 暲, “トレイグジスタンス—実世界と仮想世界を結ぶロボットの遠隔臨場制御—,” 原島 博, 廣瀬 通孝, 下條 信輔 (編), *bit 別冊 仮想現実学への序曲* —バーチャルリアリティドリーム—, chapter 3, pp.117-122, 共立出版, 1994.
- [149] 館 暲, 廣瀬 通孝 (監修 / 著), “バーチャル・テック・ラボ,” 工業調査会, 1992.
- [150] 館 暲, 榊 泰輔, “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.
- [151] 高田 祥三, “コンカレントエンジニアリングとそれを支える技術,” 日本機械学会第 70 期通常総会講演会講演論文集, Vol. 4, pp.678-680, Tokyo, Japan, 1993.
- [152] 竹下 拓利, 稲崎 一郎, “アコースティックエミッションセンサを用いたフライス加工状態の自動監視,” 精密工学会誌, Vol.59, No.2, pp.269-274, 1993.
- [153] 戸川 隼人, “UNIX ワークステーションによる科学技術計算ハンドブック,” chapter 8, pp.466-469, サイエンス社, 1992.
- [154] Yujin Wakita, Shigeoki Hirai, and T. Kino, “Automatic Camera-work Control for Intelligent Monitoring of Telerobotic Tasks,” In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems'92 (IROS'92)*, pp.1130-1135, Raleigh, 1992.
- [155] Yujin Wakita, Shigeoki Hirai, and Kazuo Machida, “Intelligent Monitoring System for Limited Communication Path: Telerobotic Task Execution over Internet,” In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on*

- Intelligent Robots and Systems'95 (IROS'95)*, Vol. 2, pp.104-109, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A., 1995.
- [156] 割澤 伸一, “ユーザ・フレンドリ・マニュファクチャリング・システムの研究,” 1990年度東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻修士論文, 1991.
- [157] 割澤 伸一, “多軸力情報を用いた知能化生産システムの研究,” Doctor's thesis, 東京大学, 1994.
- [158] 割澤 伸一, 光石 衛, 長尾 高明, 畑村 洋太郎, “力センサを用いた実時間加工状態判定システム,” 1991年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.135-136, Shizuoka, Japan, 1991.
- [159] 藪崎 清 ヒベルト, 小野里 雅彦, 岩田 一明, 荒井 栄司, “設計・生産におけるコンカレントエンジニアリングのためのコミュニケーションシステムに関する研究—複数ユーザ間でのコミュニケーションプロトコルとコミュニケーションの実現,” 日本機械学会 第3回設計工学・システム部門講演会講演論文集, pp.354-359, Tokyo, Japan, 1993.
- [160] 横小路 泰義, “マスタ・スレーブ制御の理論,” 日本ロボット学会誌, Vol.11, No.6, pp.794-802, 1993.
- [161] 吉田 真, 岡崎 哲夫, 河田 悦生, 管村 昇, 鉄谷 信二, 戸井田 徹, “ヒューマンマシンインタフェースのデザイン,” 分散協調メディアシリーズ 2, 共立出版, 1995.
- [162] 吉川 恒夫, 横小路 泰義, “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.
- [163] CIM/FA 事典 編集委員会 (編), “CIM/FA 事典,” 産業調査会事典出版センター, 1991 (再版).

