

オープン CNC マシニングセンタを用いた 遠隔加工システムの研究

指導教員

長尾高明 教授

平成 15 年 1 月 30 日

高知工科大学 修士論文

1055038

木崎 剛

目次

目次

1	序論	5
1.1	本研究の背景と意義	6
1.2	ネットワーク対応型加工システムとは	8
1.2.1	自律分散型ネットワーク	
1.2.2	コンピュータネットワークの利用とその意義	
1.3	本研究の目的	12
1.4	本論文の構成	12
2	遠隔加工システム構成	13
2.1	システムの構成の概要	14
2.2	オープンCNCマシニングセンタ	16
2.3	高速シリアルバス (HSSB)	18
2.4	切削力センサ	19
2.5	力情報フィードバック型ジョイスティック	21
2.5.1	力センサ	21
2.5.2	力センサの性能検定	22
2.6	ネットワークカメラ	26
3	遠隔加工システムの実装	27
3.1	遠隔加工を実現する通信システム	28
3.1.1	CNCと制御コンピュータの接続	28
3.1.2	インターネットを用いた通信	30
3.2	プログラムによる通信システムの実装	31
3.3	切削力センサによる加工力モニタリングと フェイルセーフ	36
3.4	遠隔操作プログラムのインターフェイスとその機能	37
3.4.1	DNS機能	38
3.4.2	ジョイスティックによる操作	39
3.4.3	3次元画像	40
3.4.4	NC転送機能	42
3.4.5	NC転送機能を利用したCAD/CAM からの一貫した加工システム	43

4 操作実験	45
5 結論と展望	49
参考文献	51
謝辞	51
付録	52

第 1 章

序章

1.1 本研究の背景と意義

生産工場では今まで、高い生産性と安定した製品品質を維持するために、生産活動の自動化が追及されてきた。1970年代から各企業は合理化・高効率化を目指し、産業用ロボットやNC(Numerical Controlled)工作機械を工場に導入し、コンピュータのハードウェアやソフトウェアの技術進歩によって、オフィス・オートメーション(Office Automation; OA)やファクトリー・オートメーション(Factory Automation; FA)を実現してきた。さらに、生産システムは、FA化およびFMS(Flexible Manufacturing System)の実現を経て、CIM(Computer Integrated Manufacturing)と呼ばれるコンピュータを中心にオフィスや工場が統合・制御される形態へと発展を続けた。

FAやFMSの導入およびCIMの実現は生産性の向上を促し、多くの企業は低コストで高品質の製品を大量に生産することが可能になった。しかし、国内企業が製品の輸出が拡大すると、アメリカやヨーロッパに生産拠点を移し、現地における生産・販売を目指す現地化戦略や、労働単価の安い東南アジアや中国などに工場を建設して生産コスト削減を図る戦略が多く見られるようになった。さらに、国内においても都市部の地価高騰し始めたため、都市に隣接していた国内の工場も地方へと分散し始めた。この結果、多くの企業では徐々に製品の開発部門と生産部門とが互いに離れた遠隔地に存在するようになってきた。

消費者のニーズも変化し、企業によって供給される、限られた品種の製品を選択しつつ消費することから、他の消費者との差別化、つまり「自分だけのモノが欲しい」という点に変わった。これは企業の立場から見れば製品の多様化を要求されていることを意味している。また、コンピュータ技術の驚異的な発展により、工業製品の多くがメカトロニクス化され、多機能化、高機能化している。同時に次々と新しい技術が導入され、パーソナルコンピュータ分野や携帯電話分野に見られるように、どんどんと新しい製品が市場に送り出される。こうした中で製品を市場に素早く送り出すために、製品設計から加工開始までの製品の開発に伴う時間を短縮することが重要になってきている。

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(本論文では以後「オペレーション・ルーム」と呼ぶ)から、生産部門の工場(以後「マシン・サイト」)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直ちに実物として手にすることが可能となる。さらに、このシステムは、マシン・サイトが日本国内にあるのか、アメリカ、中国、東南アジア、いずれの場所にあっても、操作者が

実際に加工の行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無いとしても、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、自らのアイデアを直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、設計に限らず実際の加工現場などで常時システム状態を監視していなければならないような場合でも、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行える。このシステムの実現により、製品設計から加工開始までの時間ロスを抑えることができ、新しい製品をより迅速に作り出すことができる。また、人間を危険な現場からできるだけ遠ざけ、また世界のどこの場所にしようとも、あたかもその現場にいるかのように、使い方を教える事や、トラブルシューティングを行うことができる。

1.2 ネットワーク対応型加工システムとは

1.2.1 自律分散型ネットワーク

システムの統合を基本概念として、コンピュータネットワークを用いた生産システムとして CIM がある。

CIM では、設計・生産の過程では CAD (Computer Aided Design) を用いて製品設計が行われ、CAM (Computer Aided Manufacturing) を用いて設計情報から加工情報への変換が行われる。CAPP (Computer Aided Process Planning) は、部分形状から加工手順、工程の設計を行うものであり、これらの加えて、統計解析の手法として CAE (Computer Aided Engineering) も用いられる。

これらの設計・生産の過程は当然として、営業や管理部門さらには、部品の供給先やユーザまで含めて、生産に関する広範囲な対象の多種多様なすべての情報を統合し、変化する生産環境への対応を目指すものである。システムの全対象にまたがる情報ネットワークの構築を具体化するための方針として、集中管理型ネットワークが採用され、成果を生み出しているところもある。

システム全体で各種の情報を共有できるということは大きな利点だが、集中管理型であるがゆえの問題点がある。

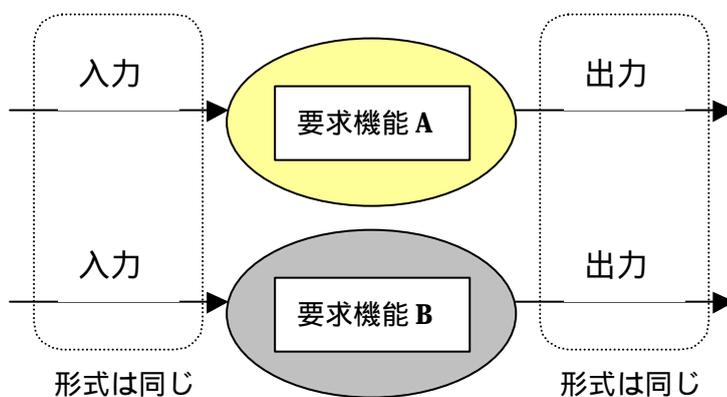
大量生産の製品が設計まで終わって、あとは生産・販売を繰り返すという場合には専用の生産システムを構築し、一定の条件で生産を続ければよく、集中管理型のシステムが非常に有効である。しかし、消費者の多様な嗜好に応えるような多品種少量生産システムや製品の設計過程などでの試作の作成となると、対象によって生産する際の条件の設定が異なる。また、対象によって生産ラインを構成し直したり、システムに要素を付け加える必要がある場合などには、従来のシステムではその影響が全体に波及してしまうため、一部を変更するだけではすまない。このような点で現状の CIM はフレキシビリティに欠ける。

また研究機関での実験装置の作成や、製造業界における開発段階での 設計 試作 設計 試作 といった毎回扱う製品が違うような環境では、なおさら加工システムに要求されるフレキシビリティが増すが、CIM のような集中管理型のシステムは的確ではない。

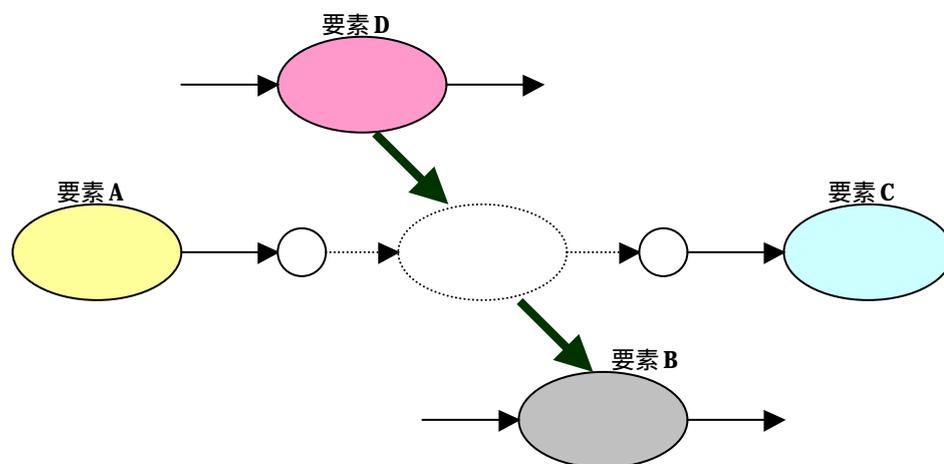
そこで、これらの問題の解決策として、自律分散型システムが考えられる。自律分散型システムとは、システムを構成する要素（加工システムであれば、CAD、コントローラ、データベースなど）が、結びついたネットワークを構成することが可能である。しかしながらそれぞれの要素は他の要素とは独立で機能することができ、得たい機能にあった要素に対して必要な情報をきまった形

式で入力さえすれば各要素が内部で自律的に機能し、出力を吐き出すというシステムである（図 1.1）。

特に自律分散型システムの特徴としてあげられることは、要素同士の親和性が良く、どの要素とどの要素を組み合わせることも可能であること、また、希望する機能によって要素の置き換え（図 1.2）、追加、削除が可能なことである。つまり、多種多様なものを生産する過程で、新たな機能が欲しくなった時や、機能の交換が必要になった時に、その部分だけ変えればよいのである。



（図 1.1）自律分散型の要素



（図 1.2）要素の置き換え

1.2.2 コンピュータネットワークの利用とその意義

システムが自律分散性を有するためにネットワークとして必要な機能の一つとして、ネットワークを構成する上での様々な規則（プロトコル）が確立されていて、それにしがった定型的な入出力が可能なことがある。

また、各工程で情報を共有し、相互間でのアクセスが可能なシステムにおいて、ネットワーク機能に要求されることとしては、工作機械の制御情報だけでなく、センサ情報や加工の知識などの多種多様な情報を取り扱える汎用性も挙げられる。

これらの機能を果たすものとして、普及したコンピュータネットワークが考えられる。以上のようなことより、本研究では、インターネット上で加工システムを構築する。

加工システムをインターネット上に構築することには、

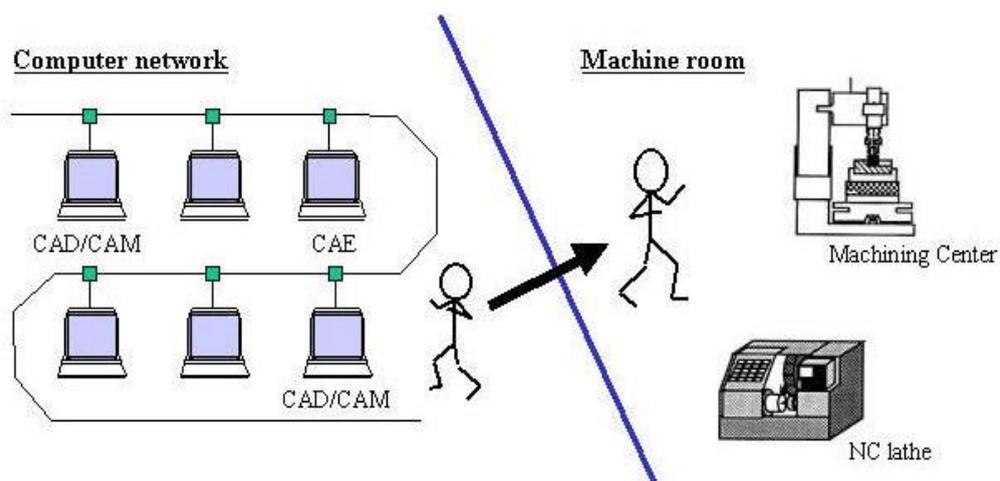
- ・ ネットワークを通じて、遠隔地のコントローラからのアクセスが可能。
- ・ パケットの操作などの通信プロトコルが確立されているために、入出力の形式が決まっていて、システムの要素の中身をあまり意識しなくても、システム構築ができる。したがって、システムの構築が比較的容易である。
- ・ 工作機械でもネットワーク上における一台のワークステーションのように扱える。工作機械に慣れない人間にとってはそれだけでもユーザーインターフェイス面で優れているといえる。
- ・ 世界的に普及しており、多様な情報へのアクセスが可能。したがって、企業や大学の持つ各種データベースへのアクセスが可能。

以上のような利点がある。

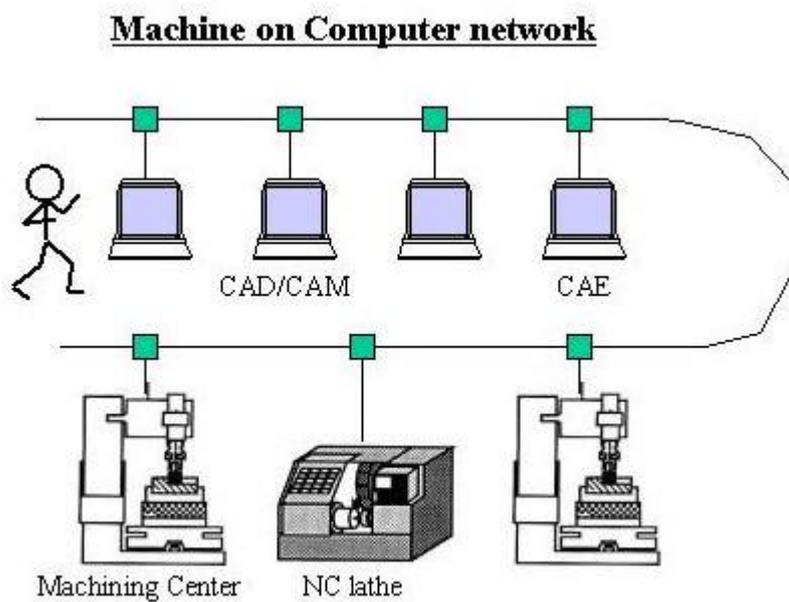
また試作加工という点から見れば、現在では一般に製品の設計は、コンピュータシステム上で CAD/CAM システムを用いて行われ、その情報を試作用の工作機械に渡して加工をしている（図 1.3）。

このようなことを考えれば、図 1.4 のようにコンピュータとコントローラ、工作機械が同じネットワーク上で存在し、コントローラが CAD/CAM で発生した加工情報を用いて、ネットワーク上で加工機械を制御できることは、設計段階のものをすぐにしたいという要求に対して、大変有意義である。

一般に設計者は CAD を日常的に使い、コンピュータは使い慣れているが、工作機械には不慣れであることが多いため、そういう意味でもユーザーインターフェイスに優れているといえる。



(図 1.3) 設計・試作の現状



(図 1.4) 加工機械のネットワーク化

1.3 本研究の目的

本研究では、オープン CNC マシニングセンタを用いたネットワーク（インターネット）を通じた遠隔加工のシステムを構築することを目的としている。内容としては

- ・ 遠隔加工を実現させるための通信システムの構築
- ・ 遠隔操作インターフェイスによる画面上からの遠隔操作
- ・ 力情報フィードバック型ジョイスティックによる操作
- ・ 加工力センサ情報に基づくフェイルセーフ機能の実装
- ・ CAD/CAM による設計から加工までの一貫した加工システムの構築
- ・

以上を本研究のシステム構築における目的にする。

1.4 本論文の構成

第1章では、本研究の背景と目的を述べる。

第2章では、遠隔加工システムにおいて利用したシステム構成について述べる

第3章では、遠隔加工システムの仕組みと実装について述べる。

第4章では、本システムを用いた実験をし、その結果を述べる。

第5章では、結論と今後の展開について述べる。

第 2 章

遠隔加工システムの構成

2.1 システム構成の概要

ここで、本研究システムの構成の概要を述べる。本システムでは、インターネットを用いて、加工機械であるマシニングセンタを操作することを目的としている。操作される側である、加工機械が置いてあるブロックを“マシン・サイト”、操作する側のブロックを“オペレーション・サイト”と呼ぶ。

各ブロックとネットワーク（インターネット）との接点にコンピュータを置き、情報を集中させる。そして、それらコンピュータの相互通信によって遠隔操作を実現している。マシン・サイトのコンピュータを“制御用コンピュータ”、オペレーション・サイトの方を“操作用コンピュータ”とする。

マシン・サイトの構成

操作対象となる加工機械にオープンCNCマシニングセンタを用いる。外部コンピュータから制御可能なオープンCNCと制御用コンピュータとをHSSBと呼ばれる光ファイバーケーブルで結び、各種情報の送受信することによって、マシニングセンタを制御用コンピュータから操作することができる。

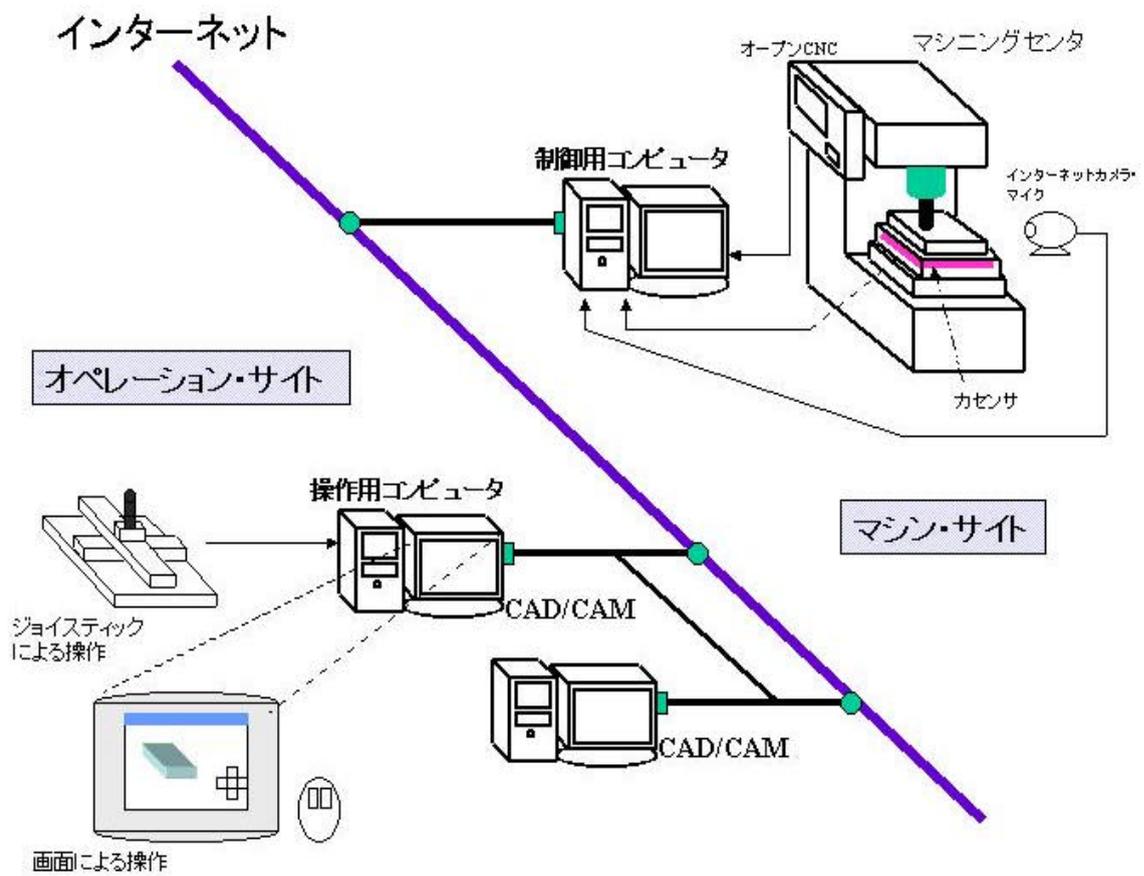
また、加工中の切削力をリアルタイムで測定する、力センサをとりつけ、加工力をモニタリングする。

そして、切削中の視覚情報、聴覚情報をピックアップするために、マイク内蔵のインターネットカメラを使用する。

これらからの情報を、制御用コンピュータによって集約する。

オペレーション・サイトの構成

オペレーション・サイトからは、ほとんどの操作を操作用コンピュータ上で遠隔操作プログラムによって行うが、今回ジョイスティックを製作し、2次元操作を行う。またこちら側のコンピュータには、CAD/CAMなどによって作成されたNCプログラムをCNCにそのまま送信する機能も備えており、設計から加工開始までを素早く一貫しておこなえるシステムを組み込んでいる。詳しい説明は次章で述べる。



(図 2.1) 遠隔加工システムの構成

2.2 オープン CNC マシニングセンタ

本研究で使用するマシニングセンタは、外部コンピュータから制御可能な自動制御装置、オープン CNC(Open Computer Numerical Control)を取り付けたものである。

マシニングセンタは、大阪機工株式会社 (OKK) 製の[VM4-] (写真 2.1)、オープン CNC は FANAC 社製の[Series160i-M] (写真 2.2) を使用した。



(写真 2.1) オープン CNC マシニングセンタの概観

各軸移動量(X×Y×Z)	テーブル寸法	テーブル最大積載量	早送り速度(X,Y×Z)
630×410×460mm	800×410mm	500kg	30×20m/min
主軸回転速度	主軸テーパ	主軸モータ	フロアスペース
6000min ⁻¹	No.40(7/24 テーパ)	7.5/5.5kW	1980×2700

(表 2.1) マシニングセンタ (OKK VM4) の仕様

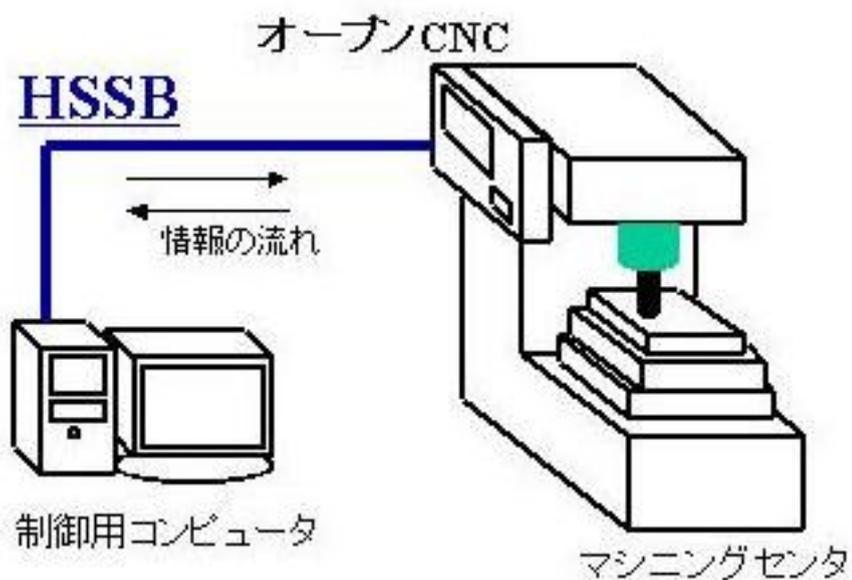


(写真 2.2) オープン CNC <FANAC Series 160i-M>

2 . 3 高速シリアルバス (HSSB: High Speed Serial Bus)

HSSB とは、市販のパソコンと CNC の間を光ファイバケーブルで結合したシステムで、ノイズの影響を受けない高速・広範囲のデータが転送可能である。

本システムでは、制御用コンピュータとオープン CNC を結ぶために使用しており、常にデータをやりとりすることによって、CNC の機能を、コンピュータから操作することができるようになる（図 2.2）。



(図 2.2) HSSB 接続の概念図

2.4 切削力センサ

力センサは、日本キスラー株式会社製の3成分動力計（形式 9257B）を用いた。測定される力は、トッププレートを通して伝えられ、ベース・プレートとトッププレート間に設置された、4個の力変換器に分配される。測定する場合、個々の信号は接続ケーブルによって3成分にまとめられる。

動力計には防錆材が使用されており、水および冷却液の飛沫程度の浸入に対しては保護されている。また、トッププレートには温度の影響を極力抑えるために、断熱コーティングを施している。

精密な測定が可能であり、加工力の測定実験などでよく用いられる。

本研究では、切削力をリアルタイムに測定し、画面表示および過大な切削力が生じた場合、加工の運転を止める為に使用されている。

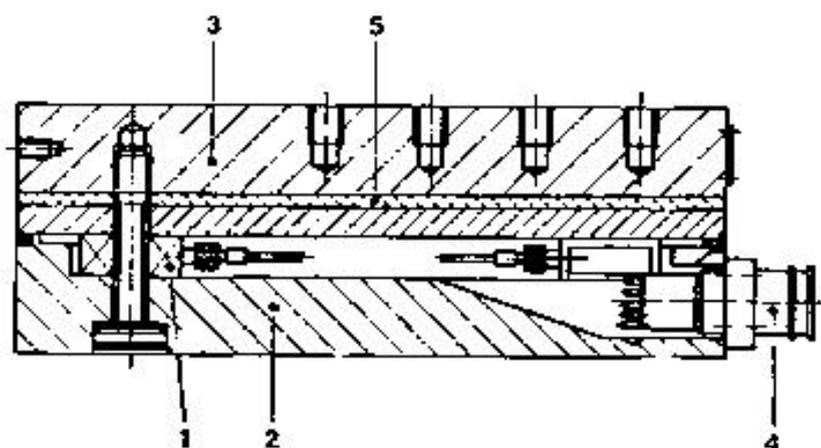
動力計の構造を（図 2.3）に、仕様を（表 2.2）に示す。



（写真 2.3）力センサの概観

寸法		mm	140 × 170
重量		kg	7.3
測定範囲	F_x 、 F_y 、 F_z	kN	-5 ~ 5
感度	F_x 、 F_y	pC/N	-7.5
	F_z	pC/N	-3.5
許容過負荷	F_x 、 F_y	kN	-7.5/7.5
	F_z	kN	-7.5/15
使用温度範囲			0 ~ 70
静電容量		pF	220
設置絶縁			> 10

(表 2.2) 3成分動力計の仕様

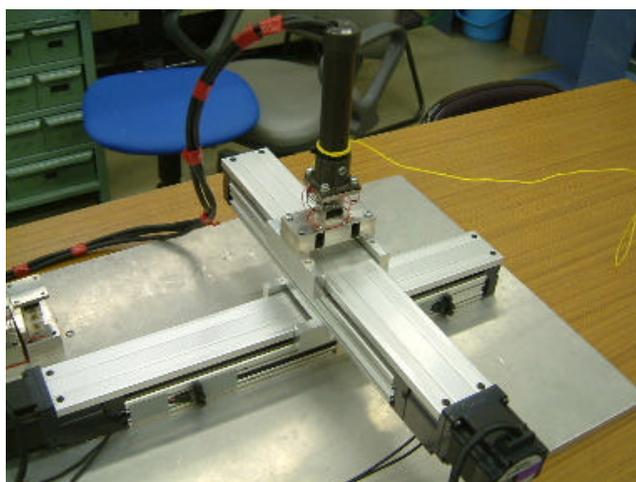


- 1 力変換器
- 2 ベース・プレート
- 3 トップ・プレート
- 4 コネクタ
- 5 断熱コーティング

(図 2.3) 動力計の構造

2.5 力情報フィードバック型ジョイスティック

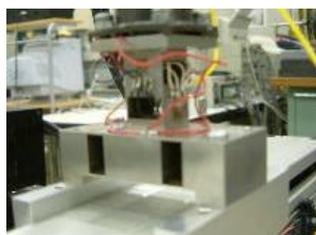
マシニングセンタの直接操作をするために、2次元のジョイスティックを用いた。本研究で製作した2次元ジョイスティックは、マシニングセンタにならって直交座標系を使う。マシニングセンタの座標系は3次元あるわけだが、今回はリアルタイムに直接操作をするシステムの構築を目的にするため、2次元にとどまった。ジョイスティックの概観を(写真2.4)に示す。



(写真 2.4) 2次元ジョイスティックの概観

2.5.1 カセンサ

操作者の手から力を検出するために、3軸力を検出するためのセンサを用いる。操作力の力やモーメントの各成分が他成分との干渉を少なく検出できることや、十分な感度を持ち、剛性に優れていることから、平行平板構造になっている。材質はステンレス鋼(SUS303)である。

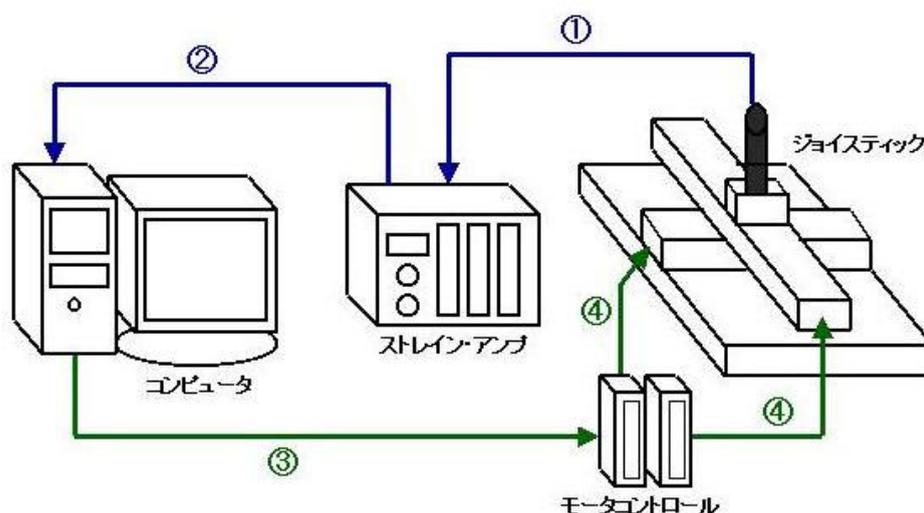


(写真 2.5) カセンサ部

X,Y,Z の 3 軸方向において、いずれも可動部と固定部とを 2 枚の薄板で結んだ構造であり、力やモーメントによって両薄板の表面に直行する方向に生じる力によって、その方向のみに変形し、薄板の根元表面に引っ張り及び圧縮歪みが生じる。このひずみは 2 枚の薄板の根元に合計 4 箇所貼り付けられたひずみゲージにより電気抵抗に変換され、ブリッジ回路で電圧に変換される。

電圧に変換された情報は、ストレイン・アンプを通してコンピュータに送られ、AD ボードによってデジタル値に変換される。

ある一定の電圧がかかると、コンピュータのプログラムによりパルス発生信号が出力され、モーターコントロールによりジョイスティック部が稼動するという仕組みである。以上の概略図を以下の 図 2.4 に示す。

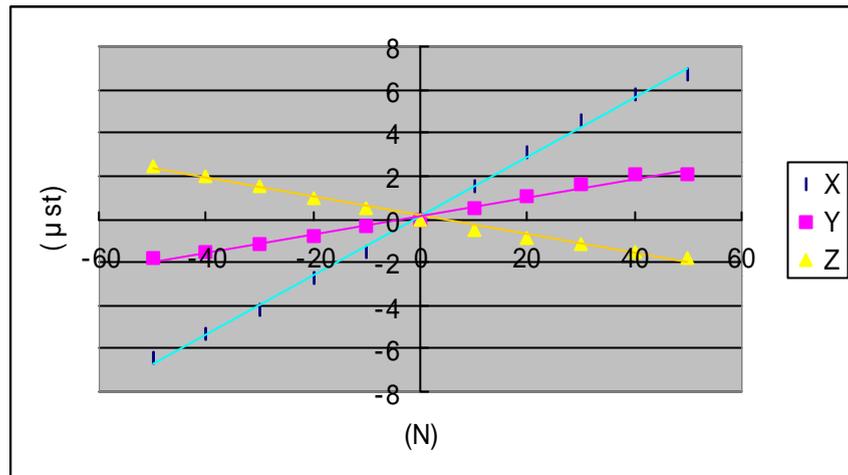


(図 2.4)ジョイスティックの稼動の仕組み

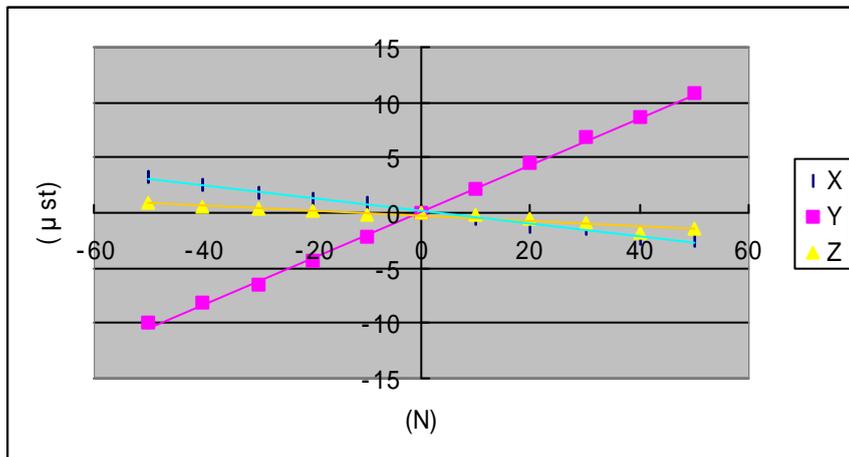
2.5.2 カセンサの性能検定

カセンサはセンサ部の先に操作棒を取り付け、それに力をかけることになる。そのため Z 軸方向は手から与えられた力がそのままカセンサに作用するが、X、Y 方向は手の力がモーメントとしてかかり、荷重のかかっていない軸でも歪みがおきる（干渉）。この力（干渉力）を測定するために、性能検定を行った。

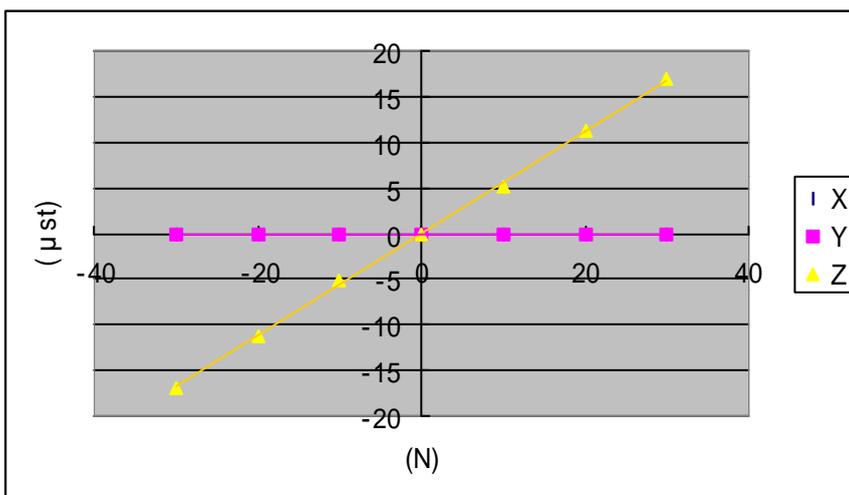
カセンサの検定方法として、X、Y、Z のそれぞれの方向に滑車を使って $\pm 5 \text{ kg}$ の荷重を 1 kg 単位にかけていき、その時の 3 軸方向のひずみを測定するというものである。



(図 2.5)X 方向の測定結果



(図 2.6) Y 方向測定結果



(図 2.7) Z 方向測定結果

グラフでは荷重の方向の成分が大きく、ほぼ直線状になっている。よって一次近似で十分だと思われる。この時の直線の傾きから、力を歪みに変換するマトリクスをつくり、その逆行列を計算することによって非干渉行列をもとめた。

測定される各歪み

$$= (x, y, z)^T$$

ジョイスティックに作用する力

$$P = (P_x, P_y, P_z)^T$$

との間には、

$$P = K \cdot$$

$$= K^{-1} \cdot P \quad C \cdot P \quad \text{ただし、}$$

$$C = \begin{pmatrix} C_{xx} & C_{xy} & C_{xz} \\ C_{yx} & C_{yy} & C_{yz} \\ C_{zx} & C_{zy} & C_{zz} \end{pmatrix}$$

グラフよりこの C が求まり、その逆行列を求めれば非干渉行列 K が分かり、歪みから P の値が計算できる。

求まった非干渉行列は、

$$\begin{pmatrix} 0.7072 & 0.1971 & 0.0012 \\ -0.13171 & 0.4436 & 0.0012 \\ 0.0477 & 0.0334 & 0.1774 \end{pmatrix}$$

になった。

これを、コントロールするプログラムに設定し、ジョイスティックから送られる歪みに掛けることによって、干渉をなくした操作力がフィードバックされ、ジョイスティックをスムーズに動かすことができるようになった。



(写真2.6) モータドライバ LDS1
 電動スライダを制御するためのモータドライバとして、
 オリエンタルモータ社の LDS1 を用いた。
 XY 軸のスライダを制御するために 2 台使われている。



(写真2.7) モータコントロールボード
 コンピュータからモータドライバを制御するた
 めのパルス信号を発信するボード。これには、
 コスモテックス社の PCPG46 を用いた。



(写真2.8) 電動スライダ
 ジョイスティックの移動には、オリエンタルモータ社製の SPF60B10-3SD
 を用いた。これを直交させることにより、XY の 2 軸の移動が可能になった。

2.6 ネットワークカメラ

今回、マシン・サイトのリアルタイムの映像と音をとるために、ネットワークカメラ Logicool 製の Qcam Pro4000 を利用した。これは、USB 接続で、ブラウザによるリアルタイム画像表示や、多種のメッセージともリンクが可能である。本研究で作成したプログラムとは独立し、メッセージを利用して画像と音をオペレーション・サイトから見る、聴くことができる。



(写真 2.9) ネットワークカメラ

第 3 章

遠隔操作のシステムの実装

3.1 遠隔操作を実現する通信システム

遠隔操作を行うにおいて、最も重要なことはリアルタイムに操作側からマシニングセンタに命令を伝え、マシニングセンタからの情報も瞬時に操作側に伝える必要がある。そうでなければ、加工の異常に気づくのが遅れたり、非常停止などの命令も遅れてしまう。こうなるとは、遠隔操作を実現しているとは言い難い。したがって、マシンから操作側までの通信を素早く、リアルタイムに行わなければならない。マシンと操作側までの間には、HSSB 回線、制御用コンピュータ（サーバ）、インターネット回線が存在する。ここでは、遠隔操作を実現する通信のシステムについて説明する。

3.1.1 CNC と制御コンピュータの接続

まず、工作機械を制御するには数値制御している CNC とコンピュータをリンクさせる必要がある。CNC からの主軸の位置情報、実回転数、送り速度などの種々の情報を受け取り、それに加えて、操作コンピュータ側からの加工開始命令、停止命令などが瞬時に CNC 側に伝えて工作機械を動かすことが必要である。

このやり取りをするために、FANUC 社製の CNC に使用することのできる、データウィンドウライブラリを用いる。このウィンドウライブラリは、CNC と HSSB で繋がったコンピュータとの間で、各種データや情報を交換するために用意されたデータウィンドウを扱うための関数群である。32ビット開発環境を持ち、Visual C++、Visual Basic での開発が可能であるため、今回作成したプログラムは全て、Microsoft 社の Visual C++を使用して作成している。

データウィンドウライブラリの主な直接操作の制御の機能を以下に示す。

直接操作関係

適応制御関係

1. 送り速度オーバーライド

送り速度にオーバーライドをかける。0～254%の範囲で自動運転中に送り速度を変化させることができる。

2. 主軸オーバーライド

指定された主軸回転数にオーバーライドをかける。0～254%の範囲で主軸回転数を変化させることができる。

NC 関連制御

3. モード選択信号

- ・編集モード・・・CNC メモリ内の NC プログラムの編集時に使用

- ・リモートモード
- ・メモリモード・・・CNCメモリ内のNCプログラム実行時に使用
- ・MDIモード
- ・ハンドルモード
- ・手動切削送りモード
- ・手動早送りモード
- ・手動原点復帰モード

4．サイクルスタート信号

メモリモード、リモートモード、MDIモードで使用すると自動運転起動状態になり、運転を開始

5．フィードフォールド信号

自動運転中に使用すると、CNCは自動運転休止の状態になり動作を停止。

直接機械制御関係

6．非常停止信号

CNCはリセットされ、非常停止となり、機械の移動が瞬時に停止。

7．主軸正転起動信号

8．主軸逆転起動信号

9．主軸停止信号

10．ATC起動信号

機械熱変形補正・抑制制御

これらの信号を用いることによって、マシニングセンタを運転起動中、または停止中において直接操作することができるようになる。

またこれと同時に、CNC側から、機械の状態、実主軸回転数や送り速度などの情報を受け取る必要がある。これらの機能もこのライブラリに収録されている。

情報送受信関係

制御軸/主軸関係データのリード

絶対位置、相対位置、機械位置、残移動量、実速度

プログラム関係

CNCプログラムのアップ/ダウンロード、照合、サーチ、削除

DNC運転

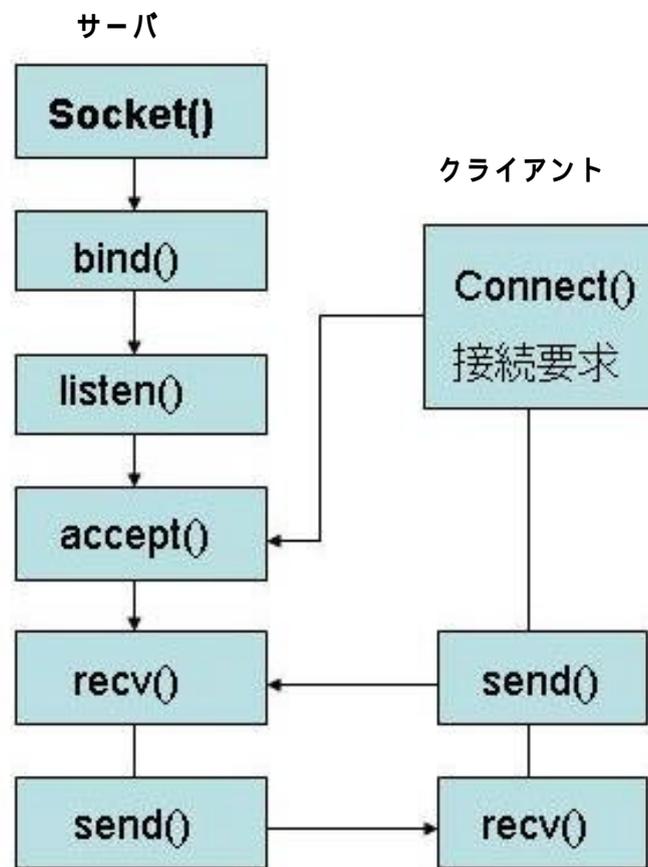
アラーム、操作履歴などのデータのリード など

これをプログラムの関数として実行することによりデータの取得や信号命令を出すことができるようになり、これらを利用することによって、制御用コンピュータからのプログラムでマシニングセンタを操作することができるようになる。

3.1.2 インターネットを用いた通信

前節ではCNCと制御用コンピュータの通信について述べた。次に、制御用コンピュータとネットワークを介して操作用コンピュータとの通信について説明する。本研究では、インターネットを通しての遠隔操作をするために、ソケット通信を用いた。

ソケット通信とは、インターネットで使われるTCP/IPを利用した通信プログラムを容易にするものとして開発され、ネットワーク上に存在するPCに割り当てられた番号で、同じ番号をもったPCはネットワーク上に1つしか存在しない。このIPアドレスは32bitの数字で表記され(例:210.149.0.2)、ドットで区切って表記される。これにより、インターネット上での1対1の相互通信が可能となる。ソケット通信の概念図は(図3.1)である。



(図3.1)ソケット通信の概要

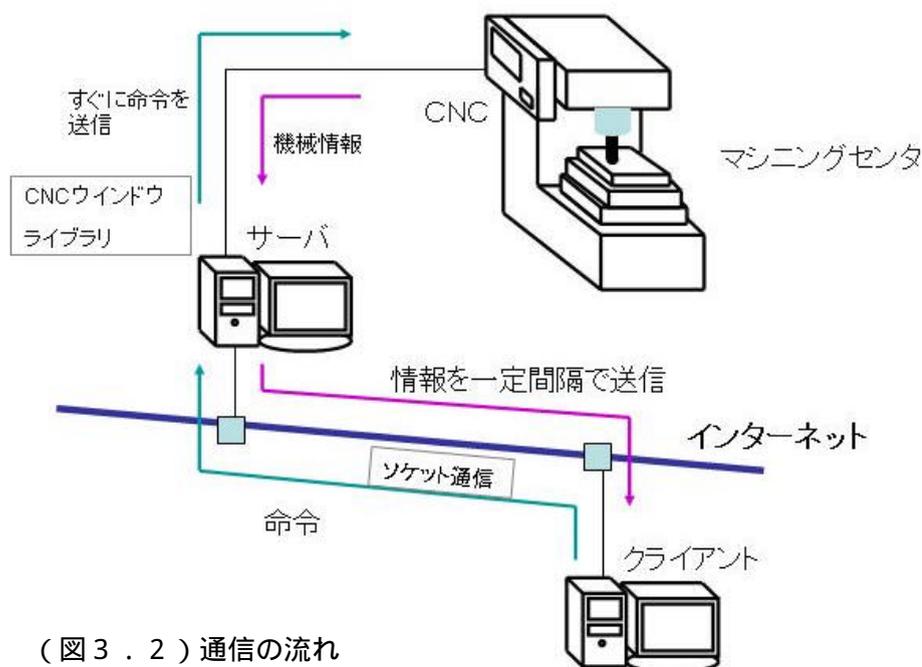
クライアント側からの接続要求をサーバが受け入れると1対1の通信が確立し、相互にデータが送れるようになる。本システムでは、マシン・サイトをサーバとし、オペレーション・サイトからの接続要求で通信システムが成り立つようになっている。

3.2 プログラムによる通信システムの実装

タイマー機能

本遠隔操作のシステムにおいて、リアルタイム性が求められる。マシニングセンタがある側、つまりマシン・サイトにある制御用コンピュータは、前に述べた通信システムでいえば、サーバ側である。サーバは、CNCからの加工機械の各種情報を一定間隔で受信し、オペレーション・サイトのコンピュータに送らなければならない。そのため、VisualC++付属のタイマ機能を利用する。

タイマとはある一定の時間が経過するごとにイベントを発生させる機能である。これを用いて CNC とサーバ、及びサーバからクライアントまでの通信を行う。



(図 3.2) 通信の流れ

指定した時間間隔ごとにある処理を行う操作をするために、Windows に一定の間隔でメッセージ (WM_TIMER) を送らせ、それをアプリケーション側に用意したメッセージハンドラで処理するという形で実現する。Visual C++には OnTimer 関数がデフォルトで用意されており、これを利用する。

OnTimer 関数は、SetTimer 関数によって呼び出され、ある一定の間隔で OnTimer 関数が呼び出されるというものである。よって、OnTimer 関数の内部に、送受信を行う処理や関数を入れておくことにより、一定間隔のごく短い時間で受信送信処理を行う

ことができる。Timer 終了時には KillTimer 関数を用いる。

タイマ処理関連の関数の書式と利用法を次に示す。

```
UINT SetTimer (UINT nIDEvent, UINT nElapse, void(CALLBACK EXPORT*
                lpfTimer)(HWND,UINT,UINT,DWORD));
```

戻り値：新しいタイマのタイマ識別子を返す

この値は、KillTimer メンバ関数に渡し、タイマを止めるために使う
エラーの時は 0 を返す。

nIDEvent : タイマの識別子を指定 (0 以外)

nElapse : 割り込みタイミングをミリ秒単位で指定

lpfnTimer : WM_TIMER メッセージを渡す関数を指定。通常は NULL を指定。

説明：システムタイマをインストールし、利用できるようになる。指定したミリ秒単位
で OnTimer メンバ関数が呼び出される。異なる識別子を使うことで、複数のタイ
マを使用できる。

```
void OnTimer (UINT nIDEvent);
```

nIDEvent : タイマの識別子

説明：SetTimer メンバ関数で指定した間隔ごとに、このメンバ関数が呼び出される。

nIDEvent を調べることで、どの SetTimer がセットしたタイマかを識別できる。

```
BOOL KillTimer (int nIDEvent);
```

戻り値：イベントが取り消された場合は非 0 を返す。

nIDEvent : タイマの識別子

説明：直前に呼び出した nIDEvent で指定されるタイマ機能を取り消す。

たとえば、500 ミリ秒ごとに割り込み処理をしたい場合

(1)タイマを設定する (タイマ ID を 1 にする)

```
SetTimer (1, 500, NULL); //500 ミリ秒ごとに OnTimer 関数を呼び出す。
```

(2)割り込みさせたい処理を記述する。

```
Void xxx::OnTimer (UINT nIDEvent)
```

```
{ //希望する処理を記述
```

```
}
```

(3)タイマをクリアする

```
KillTimer(1); //タイマ ID が 1 であるタイマ設定をクリアする。
```

今回作成したプログラムでは、

サーバコンピュータからの受信 (CNC および切削力センサのデータ)

100ミリ秒ごとに受信

サーバコンピュータから CNC への送信

100ミリ秒ごとに送信

サーバーコンピュータからの送信 (操作用 (クライアント) へのデータ)

500ミリ秒ごとに送信

操作用コンピュータの受信

100ミリ秒ごとに受信

操作用コンピュータからの送信

命令があれば随時 (Timer は使わない)

とした。サーバからクライアントへの送信のみを500ミリ秒にした理由については、通信回線がインターネット回線であり、マシニングセンタの各種データを一気に送信するためデータ量が大きく、回線に負担が生じて遅れが生じ、リアルタイム性に欠ける恐れがあるためである。回線状態においては時間間隔を短く、あるいは長くする必要があるかもしれない。また、送受信の最適化などを行うことによって緩和されるかもしれない。この点については今後の課題にしたいと考える。

操作コンピュータからサーバへは、命令情報だけで送信量も少なく、サーバと CNC の間においては HSSB という専用の光ファイバーケーブルが用いられており、回線の遅れや負担などが起こることはまず考えられない。したがって、Timer の時間間隔をもっと短くできるかもしれないが、今回においてはインターネット回線との平衡を保つため、また今段階では、そうする意味もほとんど持たないため、100ミリ秒とする。

データの送受信方法

ここでは、実際に作成したデータの送受信のプログラムを説明する。
マシン・サイト側のサーバとなるコンピュータからは、先に述べた FANUC CNC ウィンドウライブラリからの関数によってデータが取得できる。これを Timer 関数によってごく短い時間間隔で呼び出すわけである。呼び出される Timer 関数の中に、下記のようなプログラムを入れる。

(例：マシニングセンタの機械位置の取得)

```
// Get machine axis position.
okk.GetAxisPosition(POS_MACHINE); ← データの取得関数

sprintf(dummy, "%.3f", (okk.axisPosition[0])*0.001); //X
m_m_zahyo = dummy; ← データ部
m_m_zahyo += "\x0d\x0a\x0d\x0a";

sprintf(dummy, "%.3f", (okk.axisPosition[1])*0.001); //Y
m_m_zahyo += dummy;
m_m_zahyo += "\x0d\x0a\x0d\x0a";

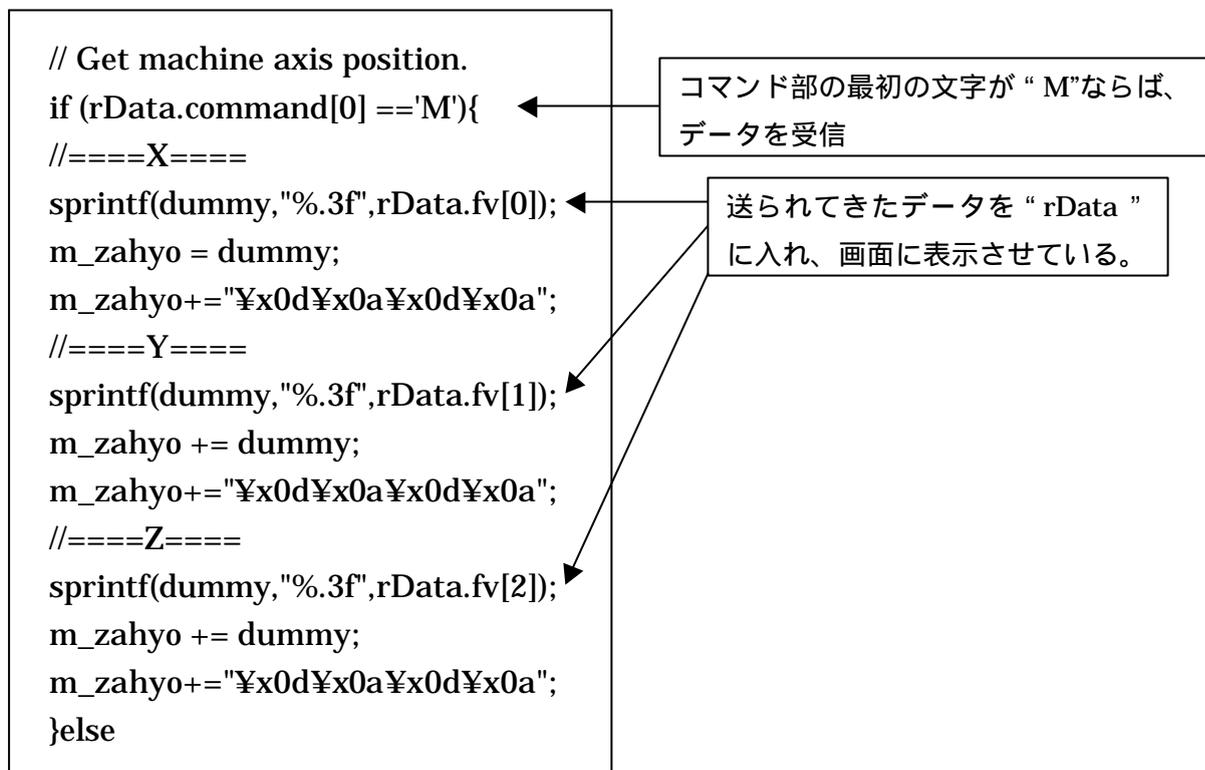
sprintf(dummy, "%.3f", (okk.axisPosition[2])*0.001); //Z
m_m_zahyo += dummy;
m_m_zahyo += "\x0d\x0a\x0d\x0a";
```

この関数によって、機械座標の位置が取得でき、画面に表示する。

ここで取得したデータを、ソケット通信により、オペレーション・サイトのコンピュータに送信する。同じく Timer 関数を用いる。

```
//send to client////////////////////////////////////
sprintf(sData.command, "Machine axis pos. %d", counter); ← コマンド部
sData.fv[0] = double((okk.axisPosition[0])*0.001);
sData.fv[1] = double((okk.axisPosition[1])*0.001); ← データ部
sData.fv[2] = double((okk.axisPosition[2])*0.001);
SockServ.SockWrite(sData); ← ソケットにして送信
////////////////////////////////////
```

このように、送信したいデータをソケットにして相手のコンピュータに送るわけである。1つのソケットは、コマンド部とデータ部に分けられ、受信する際に、コマンド部の最初の文字（ここでは“M”）を判断し、送られてきたデータを処理するわけである。



ここで用いられるデータの型の定義として、送信するほうには“sData”、受信するほうには“rData”という型を作っておき、送りたいデータを“sData”の型に入れて送信し、受信側はそのデータを“rData”に入れて受信するようにしている。このようにしてソケット通信による情報の送受信を行っている。

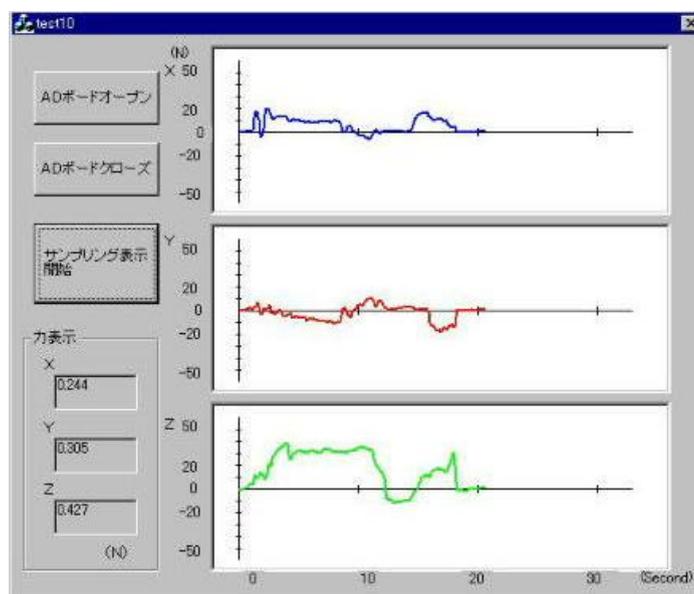
ソケットで送られた情報はそのまま画面上に数値として表示したり、グラフィックの設定値としてもちいられ、オペレーション・サイト側からマシニングセンタの状態がリアルタイムで知ることができる。またオペレーション・サイトからの命令は、ソケットを通してサーバー内のライブラリの関数を動かし、操作命令として実行され、例えば非常停止や主軸の回転数を変えるなどの操作が可能となるのである。

3.3 切削力センサによる加工力モニタリングとフェイルセーフ

加工中の切削力をリアルタイムで知ることは、とても重要である。なぜなら、加工中に何らかの事故が起これば、加工物や工具に多大の力がかかり、加工機械の破損につながる恐れがあるからである。考えられる要因として、工具の破損、切削液の中断、非切削部分のワークへの工具の衝突、外部からの衝突、そしてプログラムミスなどが予想される。事故が起きた場合、加工機械の破損につながるまえに、瞬時に加工運転を止める必要がある。これがフェイルセーフの目的である。

今回、力センサを用いて、加工力をリアルタイムで測定し、予期しない多大な加工力が生じた場合瞬時に機械を止めるフェイルセーフ機能を作成した。しかし、今回利用した力センサは切削力を精密に測定する、実験用の測定装置であり、フェイルセーフ目的の力センサとしては適当ではないが、システムを構築する目的であるため利用することにした。実際にはマシニングセンタには実装はしないが、制御用コンピュータに接続し、ある一定の力以上が力センサにかかる、プログラムで判断し、機械に非常停止命令を出すことにした。

以下の図は、切削力センサを用いて、リアルタイムにモニタリングをするために作成したプログラムである。

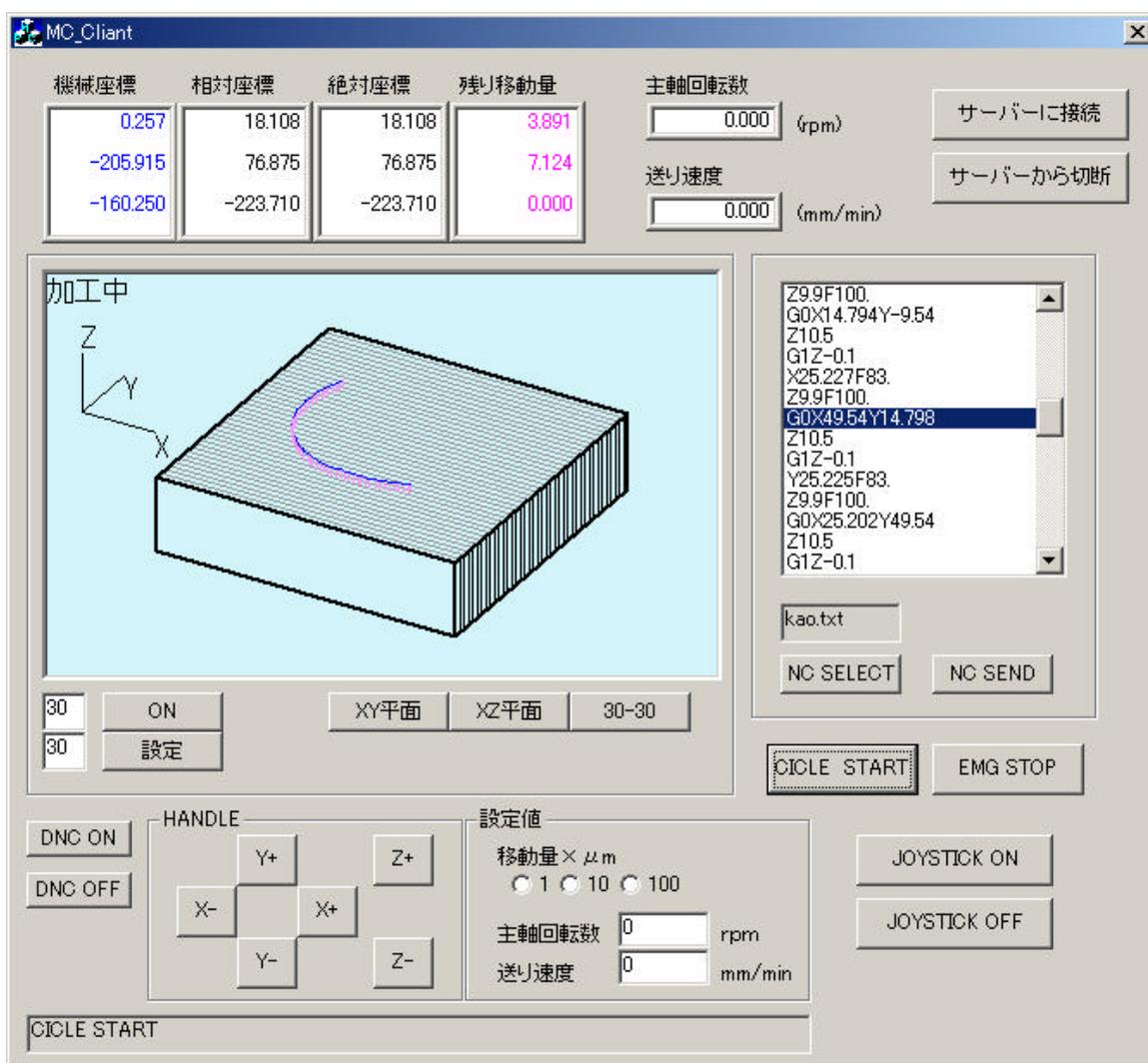


(図 3.3) 加工力モニタリング画面

3.4 遠隔操作プログラムのインターフェイスとその機能

今回、遠隔操作のプログラムの開発には、Microsoft Visual C++6.0 を使って作成した。インターフェイスは初心者でも機械を動かせるような分かりやすい表示を心がけて作成した。サーバ側が待ち状態ならば、このインターフェイスプログラムがあれば、インターネットにつながっている環境であれば、世界中どこからでも研究室のマシニングセンタを動かすことができる。

図3.4は 遠隔操作のインターフェイス画面である。

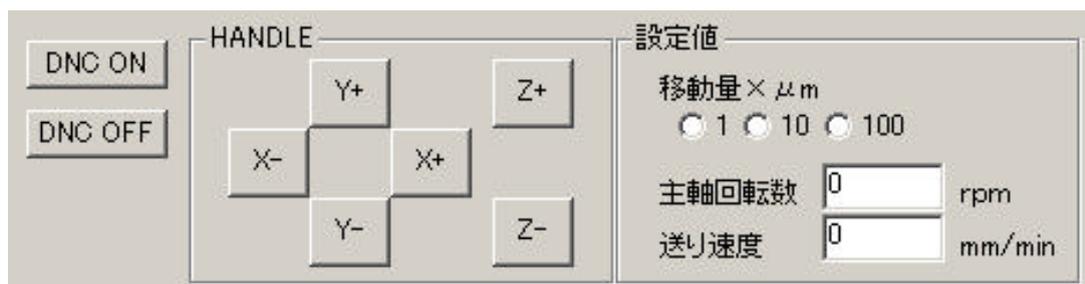


(図 3 . 4) 遠隔操作インターフェイス画面

3.4.1 DNS 機能

DNS とは Direct Numerical Control の略で直接数値制御という意味である。一般的にマシニングセンタら工作機械は、NC プログラムを CAD/CAM などで作成し、CNC に登録することによって、プログラム通りに自動運転をする。しかし、加工の準備の段階において、ある地点に工具位置を合わせたいときなどは、ハンドルなど手動操作により主軸の位置を動かすことになる。本研究での遠隔操作で工作機械の直接操作をしたい場合、ハンドルに変わる何らかの動かす手段が求められると同時に、主軸の回転数や送り速度の変化などを行う必要がある。この点を解決するのが DNS 機能である。

DNS の機能とは、NC プログラム 1 行分を送ると、その分だけ主軸の状態が変化することになる。本研究で用いたマシニングセンタは 1 μ 単位で主軸を X、Y、Z の 3 軸に動かすことができるため、DNS を用いて 1 μ からの主軸の移動、主軸回転数、送り速度の変化が可能になっている。



(図 3 . 5) DNC 運転モード

上のインターフェイスにより、DNC を ON にすると DNC 操作が可能になり、指定した移動量に応じて主軸位置が動く。主軸回転数、送り速度も入力することによって変えることができ、結果的に遠隔操作がボタン 1 つで可能になる。

下記は DNS ON の状態による CNC への送信プログラムの内容の例である。

```
else if (rData.command[0] == 'X'){
    sprintf(dummy, "S %.0f rpm F %.0f mm/min X 方向へ %.3f mm 動かします",
    rData.fv[1], rData.fv[2], rData.fv[0]);
}
```

これも同様にソケットを用いて送られる。設定した情報が NC プログラム化されて、CNC に一行ずつ送られ、操作ができるようになる。

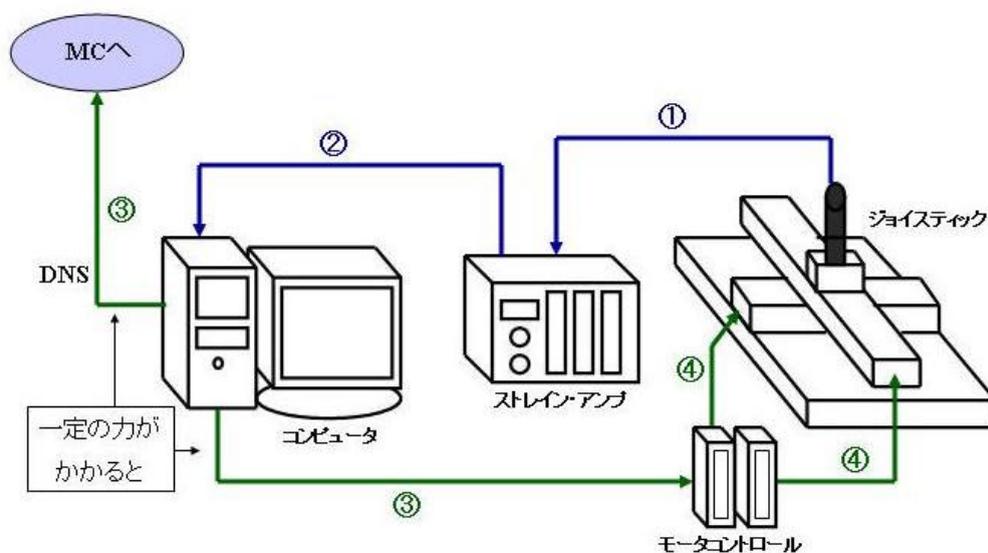
3.4.2 ジョイスティックによる操作

インターフェイスのボタンによる遠隔操作を DNS 機能であるのと同様に、ジョイスティックによる遠隔操作も DNS をもちいる。下のジョイスティックが使える状態でジョイスティックモードが ON になると利用できるようになる。



(図 3.6) ジョイスティックを含めた DNC 機能

第 2 章で説明した、力情報フィードバック型ジョイスティックを用いて、力センサ部の力情報がモータコントロール部へと伝わりジョイスティックが動くと同時に、プログラム内でも、ある一定の力がかかると、力のかかった方向へ動くように DNS 機能が作用する。たとえばジョイスティックを Y+ へと動かすと DNS によりマシニングセンタの主軸部も Y+ 方向に動く。これにより、ジョイスティックによって、マシニングセンタの主軸を思うように操作できるようになる。

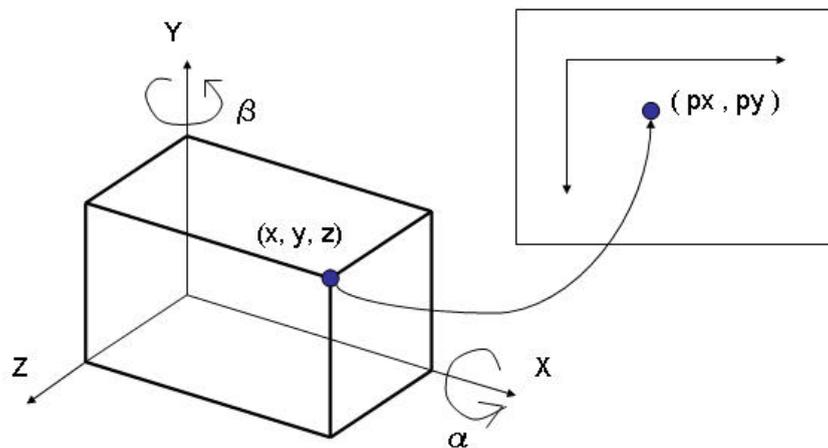


(図 3.7) ジョイスティックを用いた操作

3.4.3 3次元画像

加工中の工具位置の状態を知るために、3次元の画像を作成した。マシニングセンタにはウェブカメラが取り付けられているが、切削中は加工液がでるため見にくくなり、また画像には色ははっきりとつけることができるため、とても見やすい。また加工過程もわかることから、3次元画像を作成することにした。

マシニングセンタの主軸位置はX、Y、Zの3軸により構成されており、画像に表すにはそれを2次元にしなければならない。これを直すために次の方法を用いた。

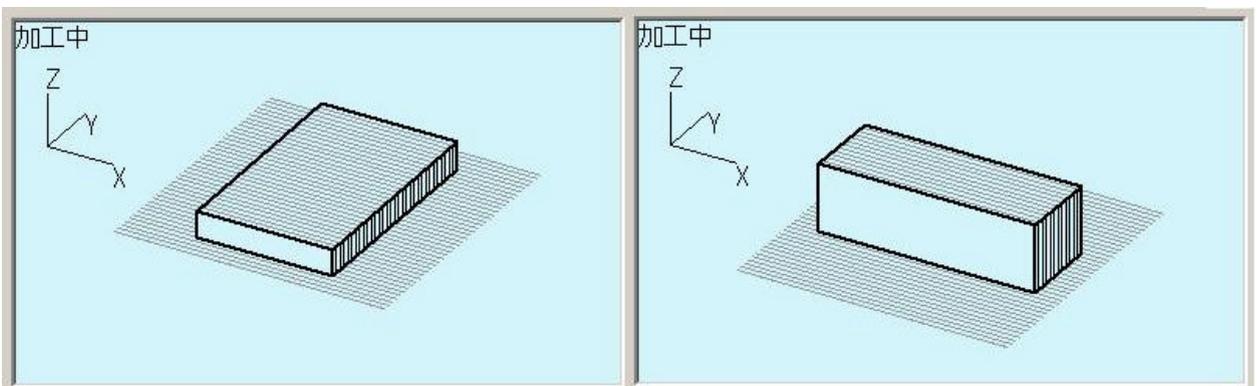
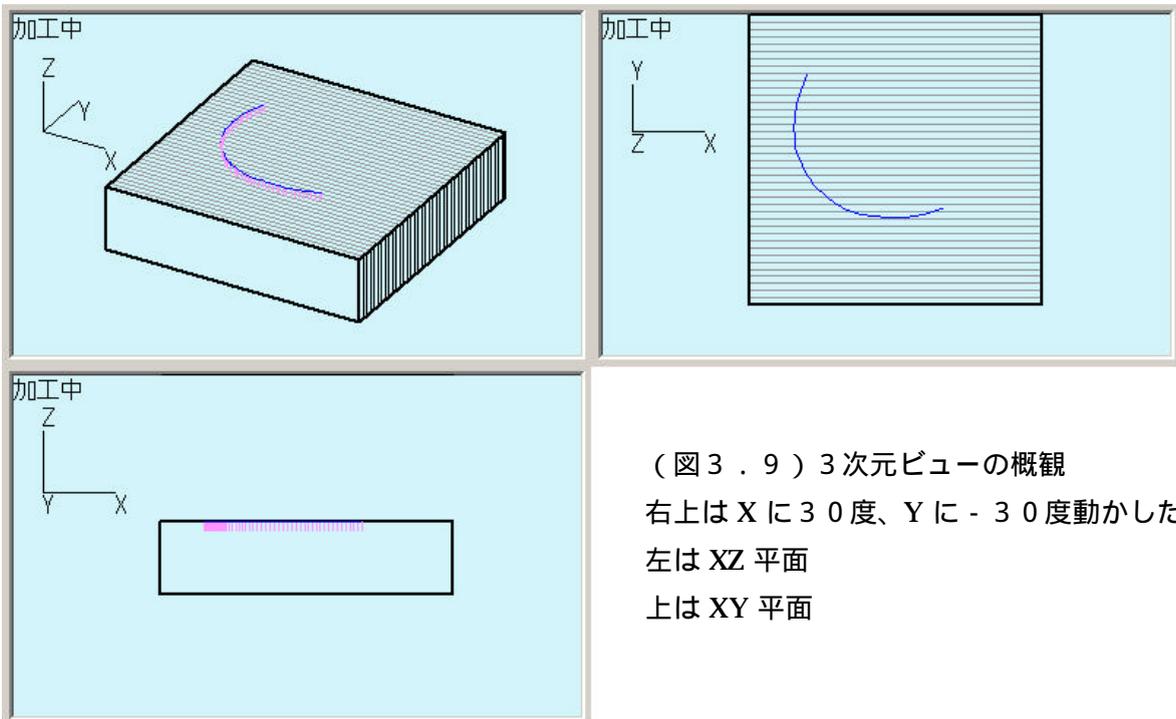


(図3.8) 軸測投影

3次元図形を2次元平面に表現する方法として、立体をx、y、z軸回りに回転し、それをx-y平面に投影する軸測投影という方法を用いた。簡単のためにz軸回りは回転せず、x軸回りに、y軸回りに、回転した場合に立体にある点(x、y、z)をx-y平面に軸測投影して得られる座標(px、py)は、次式になる。

$$\begin{aligned} px &= x \cdot \cos(\alpha) + z \cdot \sin(\alpha) \\ py &= y \cdot \cos(\beta) - (-x \cdot \sin(\beta) + z \cdot \cos(\beta)) \cdot \sin(\beta) \end{aligned}$$

この式をプログラムに使用し、CNCから受け取った主軸位置(x、y、z)を代入し、得られる点(px、py)を画像に描く。この式の、の角度を変えることによって、画像を立体的に見ることができるようになった。



(図3.10)

陰線処理

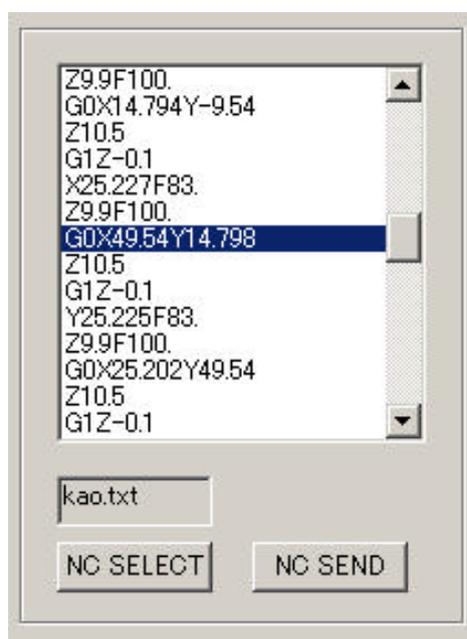
前方の面の後ろに隠れて見えない線を消す陰線処理を施している。陰線処理の方法は各種あるが、ここでは極めて単純な方法である max-min 法を用いている。描く図形を必ず手前から書いていき、以後に描く点が、前にいた点群の最大値と最小値の間（点群の内側）にあれば、その点は表示せず、逆に前に描いた点群の外にあれば、その点を表示させている。

3.4.4 NC 転送機能

CNCのウィンドウライブラリによって、CNC内のメモリ内にあるNCプログラムのアップ/ダウンロード、照合、サーチ、削除することができる。これを利用してオペレーション・サイト側からCNCに直接NCプログラムを送信する機能を作成した。

これは、NCプログラムの1行ずつソケット化し、CNCに送っている。もしNCプログラム上で使用のできない文字があれば、その行でストップしエラー表示を出す。また、通信上の何らかの要因で送信エラーが生じた場合もストップがかかり、エラー表示を出す。同じプログラム番号であれば、コンピュータが判断し、CNC上の同じプログラム番号の位置に上書きされる。

下の図はインターフェイス上のNCプログラム送信の機能である。NC SELECT ボタンで、コンピュータ内のNCデータファイルを検索し、上の画面に表示する。そしてNC SEND ボタンでNCプログラムをマシン・サイトのCNCに直接送ることができる。



(図3.11) NC 転送機能

3.4.5 NC 転送機能を利用した CAD/CAM からの一貫した加工システム

NC 転送機能によって、CAD/CAM などから作成した NC プログラムを直接 CNC に送信し、インターフェイスよりそのまま加工をスタートすることによって、設計から加工までの一貫した素早い加工システムが構築できる。これを利用することによって、設計者は加工機械の存在する場所を意識することなく、自らのアイデアを直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、設計に限らず実際の加工現場などで常時システム状態を監視していなければならないような場合でも、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行える。

設計から加工開始までの簡単な流れは以下の通りである。

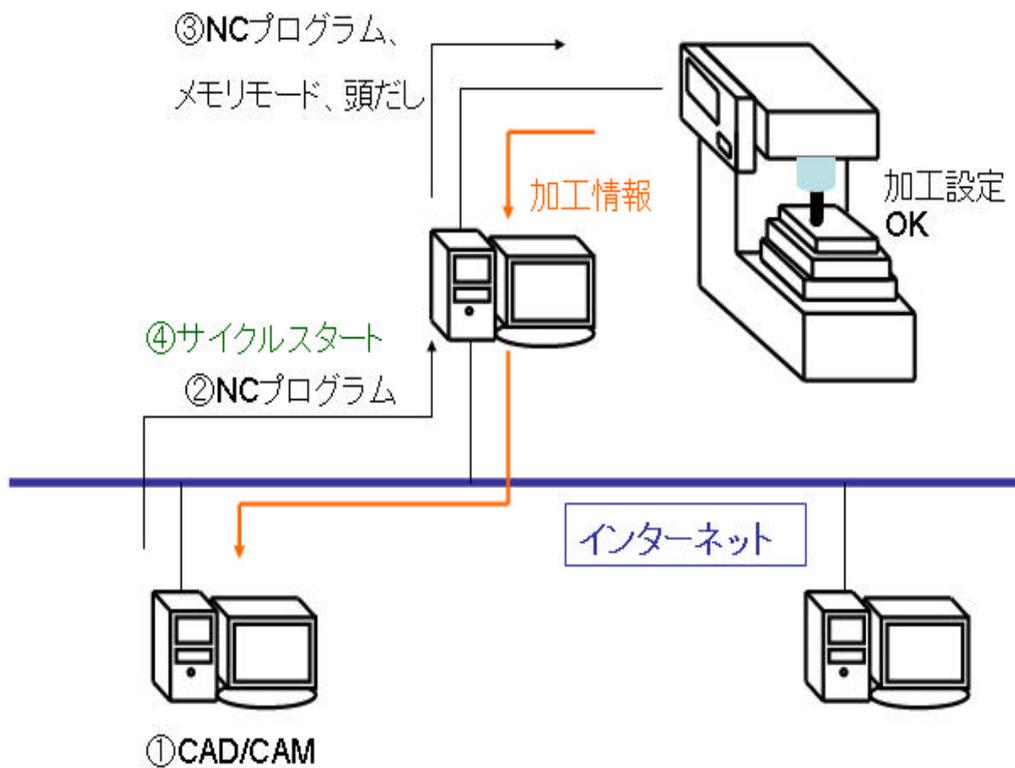
CAD/CAM から設計、NC プログラム化
NC 転送機能を用い、CNC に直接送信
CNC メモリーモード、及び NC プログラムの頭出し
(マシン・サイトで、加工物をセット、原点設定がされているならば)
サイクルスタートにより加工開始

この流れで、一貫した加工をすることができることになる。

CAD/CAM で作成された NC プログラムは NC 転送機能により、マシニングセンタを制御する CNC に送られ、CNC 内の内部メモリに記憶される。また、送信がエラーなく完了すると自動的に、今送られた NC データが取り出され、頭だしされ実行可能な状態となる。また CNC もメモリーモードになり (加工実行時にはメモリーモード、編集時にはエディットモードなどがある) すぐに NC プログラムを用いて加工できるような待ち状態になるようにプログラムしている。この状態で操作側から、サイクルスタートボタンが押されると (サイクルスタート命令が送られると) すぐに加工開始をすることができるようになる。

加工開始からは、インターフェイス画面で、加工機械の動作を監視することができ、加工状態や、プログラムの進み具合を知ることができる。また、加工異常が起こったならば、瞬時に止めることもできる。

ただしこれには条件がある。マシン・サイト側での加工物が確実にセットされており加工原点、加工位置原点が測定されており、CNC に確実に登録されているなら利用することができる。これは、現段階では前にも述べたように、製品の試作などの場合に同じ形の加工物を加工する場合など、特に有効ではないだろうか。



(図 3 . 1 2) NC 転送機能を利用した CAD/CAM からの一貫した加工システムの流れ

第 4 章

操作実験

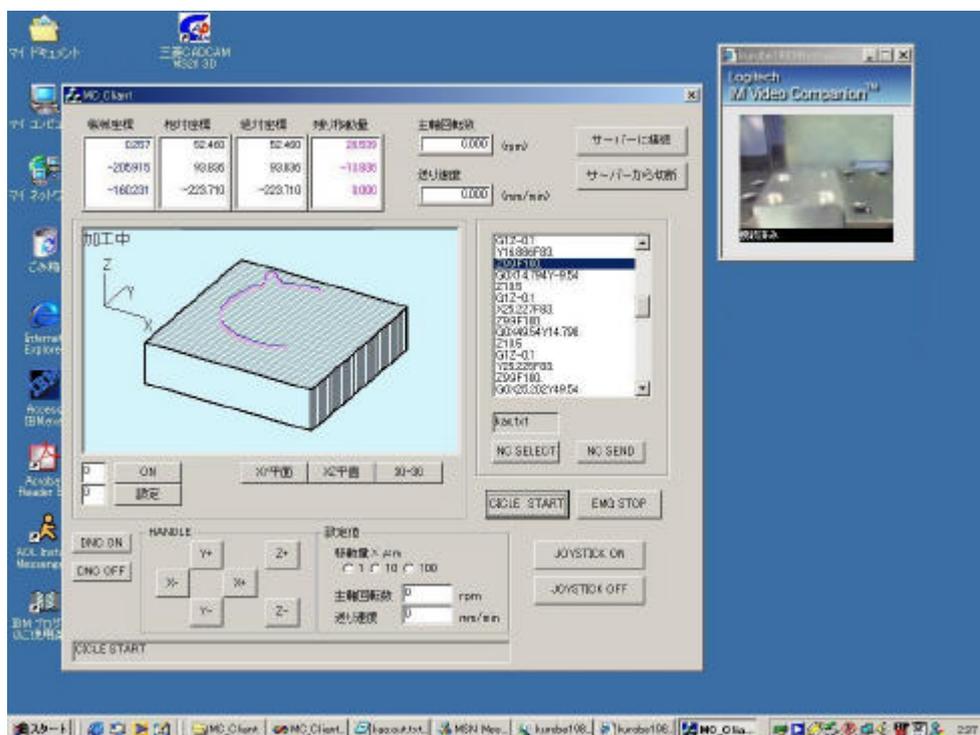
4. 実験

遠隔操作の操作性を確かめるために実験を行った。

ただし今回は、マシニングセンタに研究用の測定装置などが取り付けられているため実際に動かすことはできないが、マシンロックをかけてマシニングセンタ自体は動かさないが、CNC 上の数値は変化させるようにして、CNC までのシミュレーションを行うことにより実験を行った。また、外部からの遠隔操作はあきらめ、研究室のネットワーク内で行った。ネットワークはインターネットと同様の回線が使われており、ここで操作ができれば、外部のインターネットに繋がったコンピュータからでも操作可能である。

遠隔加工システムの実験

下の画面は、遠隔操作時の操作側からのインターフェイスである。右上の画像は、マシニングセンタ内に取り付けてある、インターネットカメラによりリアルタイムで撮影した画像である。CAD で作成した NC プログラムを、画面上右の NC プログラム転送機能によって CNC に送り、サイクルスタートをかけることによってマシニングセンタが自動運転をしているところである。またこの際、一時停止機能も動作し、加工途中で非常停止をかけ、命令が CNC に届いていることが確認された。座標値はスムーズに変化し、3次元の画像も問題なく動いている。ただ、命令を出してから機械が反応するまでは、わずかな時間ではあるが多少の時間のずれが確認された。このリアルタイム性の問題は今後の課題としたい。



DNC 運転による実験

DNC 運転を用いて、画面上のボタンから機械を直接動かす実験を行った。DNCON ボタンを起動すると DNC モードに切り替わる。ボタンからの操作で、X,Y,Z のいずれも $1\ \mu\text{m} \sim 100\ \mu\text{m}$ 単位でプラス方向マイナス方向とも正常に動いた。また主軸回転数、送り速度も画面上で数値を入力することによって変化し、正常に動くことが確認された。

ジョイスティックによる実験

DNC 機能を用いたジョイスティックによる実験も行った。DNC が正常に動いたためジョイスティックも XY 軸共正常に動いたが、ジョイスティックの操作性に問題があり、予期せぬ方向に動くなどということが起こった。これは、ジョイスティックの力センサ部の構造上の問題、歪みゲージの貼りの問題、非干渉行列が完全ではなかったなどが考えられる。ジョイスティックの動いた方向へマシニングセンタの数値も動いたことから、システム的には大きな問題はないといえる。

切削力センサによるフェイルセーフの実験

マシンサイト側で切削力をはかる力センサをとりつけ、事故により多大な力がかかった場合、瞬時に機械を停止させるシステムの実験をおこなった。今回はマシニングセンタの稼働が、他の研究の状況により使うことができなかったため、実際手から力をかけ、モニタリングの画面を見ながら実験を行った。ある一定の力をかけると XYZ 共に機械に非常停止がかかることが確認された。

考察

マシニングセンタからの加工情報や操作側からの命令は確実に届くことから、本研究の通信システムにおける問題はほとんどないと考えられる。ただ、上でも述べたように多少の時間の遅れが生じたことは、リアルタイム性を求める上で問題である。今回は研究室内での実験であったが、外部からや、外国など離れた場所から遠隔操作した場合、どのくらい時間遅れが生じるのか、今後の課題にして調べる必要があると思われる。また回線の状況に応じて、情報量を制限するなどの改善をすることによりリアルタイム性を確保できるかもしれない。

またジョイスティックにおいて、操作性の問題が生じた。今後、力センサ部の改良や歪みを確実に検出できるようにしなければならない。またジョイスティックを“力情報フィードバック型”にした理由として、将来的に加工反力を操作側に伝え、実際に自分の手で加工しているように、よりリアルな加工システムを作るためである。これには切削力センサからの加工時の力を操作側に伝える必要があるが、上でも述べたようにリアルタイム性が問題となってくる。これには、操作側での加工過程の予想システムにより、

切削力とリアルタイムな画像を予想表示させる必要があるかもしれない。これも今後の課題にする必要がある。

切削力センサについては、ただこれは単純に大きな力がかかると止まるというものであり、今後まだまだ改善の余地がある。例えば工具破損などで、びびりが生じた場合、通常とは違う力がかかりそれを発見して機械を停止させるなどである。これには、多くの条件での切削力を調べ、データベース化する必要がある。また、加工事故から機械停止までの時間も問題になってくる。これは事故から停止までの間の瞬間の時間でも事故の被害を拡大させるからである。これも今後の研究の必要があるのではないかと思われる。今回は単純なシステムであるが、これからこれにオプションを加えてより確実なシステムづくりを期待したい。

第 5 章

結論と展望

本研究では次の事柄を行った。

- 1) 遠隔加工を実現させるための通信システムの構築
- 2) 遠隔操作インターフェイスの作成と、画面上からの遠隔操作
- 3) 力情報フィードバック型ジョイスティックによる操作
- 4) 加工力センサ情報に基づくフェイルセーフ機能の実装
- 5) CAD/CAMによる設計から加工までの一貫した加工システムの構築

- 1) において HSSB を用いた CNC のウィンドウライブラリを用いた通信と、ソケットを使ったインターネットによる通信によって構築することができた。
- 2) において、自動運転、非常停止などの操作と、DNS を用いたマシニングセンタの直接操作、3次元画像の作成、NC プログラム転送機能を作成し、それを利用して操作することが可能になった。
- 3) において、DNS をもちいて、ジョイスティックによるマシニングセンタの操作をすることができた。
- 4) において、実装することはできなかったが、システムを作ることができた。
- 5) NC プログラム転送機能を利用して、設計から加工までの一貫した加工システムを構築することができた。

マシニングセンタを用いた遠隔加工システムの基本的な部分は構築することができたが、まだまだ改善の余地を含んでいる。今後の展望として、

- ・ 加工原点の設定の自動化
加工原点の設定は手動で行ったためこれが実現すれば、完全な自動化を図ることができる。
- ・ 力情報フィードバック型ジョイスティックを用いて、加工力を感覚で感じながら操作するシステム
- ・ 通信システムの改善
- ・ 操作における時間遅れの研究

などが挙げられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、担当教員である長尾高明教授には、研究全般で多くのご助言、ご指導をいただきました。

同じ研究室で、修士2年の更谷さん、上條さんには研究の事でのアドバイスや学生生活におけるいろいろな面でお世話になりました。

修士1年の小林さん、学部4年のみなさん、小林研究室の皆様方にも大変お世話になりました。

また、12年度までおられた、李軍旗先生には、学部の時に研究やプログラムなどの面で大変お世話になりました。

以上の方々に深く感謝し、厚くお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] 長尾高明、畑村洋太郎、光石 衛、中尾政之
“ 知能化生産システム ” 株式会社朝倉書店 2000
- [2] 李 軍旗
“ オープンアーキテクチャ CNC を用いたセンサ情報に基づく知能化加工システムの研究 ” 平成10年度 東京大学学位論文
- [3] 堀 俊夫
“ 操作環境転送型遠隔加工システムの研究 ”
- [4] 東 豊一郎
“ 加工の臨場感通信システムにおける操作システムの研究 ” 平成3年度 東京大学卒業論文
- [5] 橋口 誠
“ NC 旋盤を用いたセンサ情報に基づく知能化加工システムの構築 ” 平成6年度 東京大学卒業論文