

# **インターネット利用による放電加工機遠隔制御と ワークの自動測定方式**

**指導教官 小林 和彦 教授**

**知能機械システム工学科  
1010193 浜口 英愛**

## 目 次

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| <b>第1章 緒言</b>                         | 2  |
| 1.1 放電加工について                          | 2  |
| 1.2 インターネット利用による放電加工機遠隔制御について         | 3  |
| 1.3 ワークの自動測定方式の研究について                 | 3  |
| 1.4 遠隔制御とワークの自動測定の関連性                 | 3  |
| <b>第2章 従来技術について</b>                   | 4  |
| 2.1 放電加工制御の変遷                         | 4  |
| 2.2 遠隔操作における従来の技術                     | 6  |
| 2.3 ワークのセットアップにおける従来技術                | 8  |
| <b>第3章 インターネット利用による放電加工機遠隔制御</b>      | 9  |
| 3.1 研究目的                              | 9  |
| 3.2 実験装置                              | 9  |
| 3.3 実験方法                              | 11 |
| 3.3.1 接続の概要                           | 11 |
| 3.3.2 遠隔操作ソフト                         | 12 |
| 3.3.3 D N C 遠隔制御によるデータ転送時間測定法         | 14 |
| 3.3.4 V F モニタによるデータ転送時間の測定法           | 15 |
| 3.4 実験結果                              | 16 |
| 3.4.1 D N C 遠隔制御によるデータ転送時間測定の結果       | 16 |
| 3.4.2 V F モニタによるデータ転送時間の測定の結果         | 20 |
| 3.5 結論および考察                           | 23 |
| <b>第4章 画像認識によるワーク形状の自動測定アルゴリズムの研究</b> | 24 |
| 4.1 研究目的                              | 24 |
| 4.2 開発装置                              | 24 |
| 4.3 検出アルゴリズム                          | 25 |
| 4.4 ワーク座標およびワーク長の検出確認実験               | 30 |
| 4.5 考察                                | 31 |
| <b>第5章 NC装置によるワークの傾き角自動測定</b>         | 32 |
| 5.1 研究目的                              | 32 |
| 5.2 実験装置                              | 32 |
| 5.3 角度検出プログラム                         | 33 |
| 5.4 検出方法                              | 34 |
| 5.5 検出結果                              | 36 |
| 5.6 考察                                | 37 |
| <b>第6章 結言</b>                         | 38 |
| <b>参考資料</b>                           | 39 |

# 第1章 緒言

放電加工は、金型加工を中心に普及はじめ、難加工材料、難加工形状、あるいは放電加工の特質を生かした多くの用途を生み出している。また、数値制御技術も進み、加工速度、精度の向上とともに拡大、発展し、現在では精密加工分野ではなくてはならない加工法になっている。他方、現在は、パソコンの普及とともに、インターネット技術は急速に発展し続けている。本研究は、これからの中堅企業社会で、必要とされるであろうシステムとして、遠隔地（自宅、出張先、取引先）から NC データを作成後、通信回線によりインターネットを通して機械に NC データを送信し、必要に応じて操作を行い、加工状態を確認するといった放電加工の遠隔操作技術についての研究を行っている。

## 1.1 放電加工について

今回の研究対象となる放電加工について簡単に述べておく。

放電加工とは、銅などの柔らかい導電性の材料を工具（電極）として、焼きの入った金属、超硬合金など非常に堅い材料（工作物）を精度よく加工することができる。この場合、工具と材料は直接接触して加工するのではなく、数ミクロンから数十ミクロンの隙間で繰り返し火花放電を発生させることによって、ワークを溶融除去しながら加工する。放電加工は、一つひとつの放電が連続的におこなわれるが、それは 1 秒間に数千ないし数万回の放電を発生させ、それによって生ずる多数の放電痕の累積によって加工が行われる。

一般に、今回の研究でも使用する形彫放電加工とワイヤ放電加工があるが、仕組みは同じであり、ただ、用途に応じた使いができる。

形彫放電加工を簡単に説明すると、通常加工油中で行われ、銅・グラファイトなどの電極を加工したい形状のオス（凸）形に形成し、その電極でワーク上に転写するようにメス（凹）形状を放電加工していく。形彫放電加工の場合は、切削加工、あるいはワイヤ放電などで成形された電極を用い、加工条件に応じたクリアランス制御、電極交換、および位置決めなどがプログラミングの主な役割となっている。

また、ワイヤ放電加工の場合は、連続的に供給されるワイヤ電極を使用し、加工液は主にイオン交換水が使用される。ワイヤ電極は通常 0.03 ~ 0.3mm の径で用途によって種々のワイヤ電極材が開発されているが、取り扱いやすさの点で優れている黄銅線が主に使用される。又、形彫放電加工と違い、ワイヤ電極自体は形状に関する情報を持たないため、プログラミングで糸鋸のように任意の形状に進めながら、ワイヤ電極と加工物の間で放電加工を行うことによって必要な形状を切り取る加工法である。

## **1.2 インターネット利用による放電加工機遠隔制御について**

現段階においては、三菱電機製の放電加工機遠隔操作ソフトにより、インターネット通信により変化する加工状態をモニタリングするとともに、必要に応じて直接機械を操作することができるようとしたシステムは確立している。

しかし、将来、このシステムを応用し、遠方にある機械があたかもすぐ近くにあるかのように操作することに出来る、いわゆるバーチャル加工空間を実現するためには、より細かい条件の遠隔操作あるいはセキュリティシステムなど、いくつか解決すべき問題がある。今回は、データ転送時間についての調査を行った。この研究方法、及び、研究結果については、第3章に詳しく述べる。

## **1.3 ワークの自動測定方式の研究について**

従来のようなワーク基準面を決め機械テーブルに平行にワークをセットアップする作業を改善する必要があり、今回、自動的にワーク座標及び傾きを検出し、セットアップができるようにしたシステムの開発研究を行った。特に、今回は、カメラにより、機械テーブル上に置いたワークを見て、画像処理によりワーク座標を自動で取得できるようにプログラム開発を中心に構築した。この研究については第4章に詳しく述べる。また、NC装置によりワークの傾き角求めた。この研究方法、及び、研究結果については、第5章で詳しく述べる。

# 第2章 従来技術について

## 2.1 放電加工制御の変遷

本研究は、NC 制御技術の発展により、現在技術の本研究へとつながるのでまず、放電加工機における NC 制御技術の変遷について述べてみたい。

NC 装置は軌跡を数値で表現し、この数値に従って駆動装置であるモータなどを動かす位置制御が主な役割であるが、1960 年代に普及しはじめて以来、制御技術、センシング技術が進歩するとともに CAM との連携を深めることによって、高速で高精度な加工を実現できる加工制御に成長してきた。図 2.1 に NC 制御技術の進化の過程を示す。

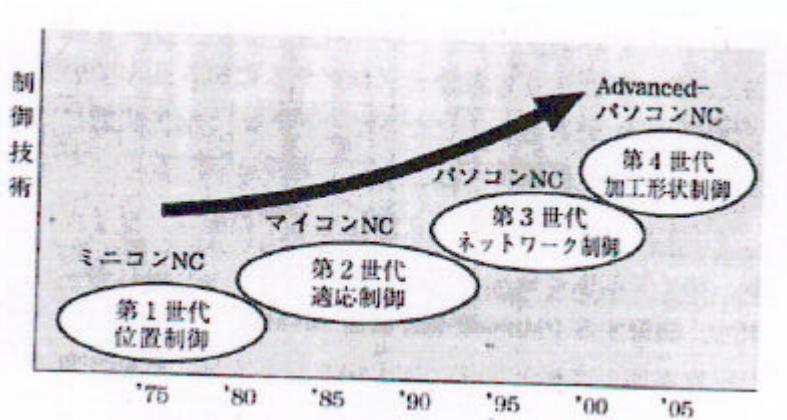


図 2.1 放電加工機の制御技術の変遷

入力された形状情報にモータなどの駆動装置を忠実に位置制御することを主体とした NC 装置を第 1 世代としている。しかしながら、ワイヤ放電加工機はプログラムされた図面形状どおりに位置制御を行うだけでなく、放電加工特有の短絡現象などを回避する最適制御を当初より取り入れてきた。また、金型加工用途が多く、比較的複雑な加工形状のプログラムが一品一様で要求されたため、ミニコン NC 上に自動プログラミングシステムを搭載するなど、すでにこの当時、一般工作機械の進化の方向を示す機能を備えていた。ワイヤ放電加工法は NC 制御技術なしでは工作機械としての活用が困難な加工法であり、そのため NC 制御技術の先駆的役割を果たせたのだと考えられる。

マイクロコンピュータの機能を活用してセシングのための信号処理技術や高精度加工を実現するような各種補正を含めた制御技術が進展し、またヒューマンインターフェイスの発達により操作性が飛躍的に向上し、非熟練作業者が比較的容易に NC 工作機械を操作できるようになった。これを第 2 世代と位置づける。このころになると形状をもった電極の転写加工が大きな比重を占める形彫放電加工機にも、加工条件選択のわずらわしさをなくすため、簡易自動プログラミング、あるいは加工条件データベースを内臓し容易に条件選択が行える NC 装置ができている。形彫放電加工では加工条件表をにらみながら、次々と電気条件を変えて加工を進めていかなければならないが、加工条件と加工結果が内臓されていることで作業性が向上し、さらに搖動の技術によって荒加工から仕上加工まで同一寸法の電極で加工できるようになったことは、形彫放電加工の一層の技術向上になっている。

さらに、セシング技術が進化することによって、それまで加工形状から予測される加工条件、最適送りの条件プログラムに組み込んでいたものが、加工中に加工状態が検出できるようになったため、加工状態に応じた制御ができるようになっている。

また、形彫放電加工においても、加工状態検出において、高度熟練技能者に近い加工ができるファジイ制御を確立している。これらの加工状態制御によって熟練技能者と一般操作者の距離がぐっと縮まることになってきている。現在は、この適応制御技術がさらに進展するとともに、ネットワークを活用したモニタリングや生産管理などを行う第3世代に入っている。これにはPCNC(パソコンNC)の台頭が大きく貢献している。これから放電加工機のNC制御ではネットワーク化のインフラ整備とパソコンベースNCのオープン化により工場内インターネットの構築が可能になり、より木目の細かい管理が可能になる。

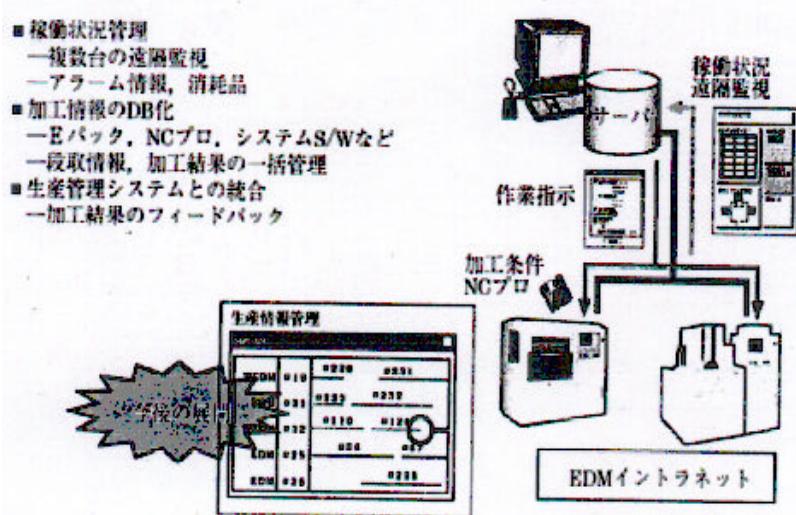


図 2.2 EDM のイントラネットによる遠隔制御

図2.2には、工場内イントラネットの例を示している。この図に示すように機械の稼動状態やスケジュールの管理を行えるほか、作業指示、加工状態の集中モニタリングと加工結果の把握や加工レポートの出力など多くのアプリケーションが考えられる。さらに現場で使用される各社、各種の工作機械及び関連装置の異機種接続が可能となり、トータル管理が容易にできるようになってくるものと思われる。

さらに、インターネットへの展開によって、ユーザと機関との間でトラブルシューティングなどを行う際に、NC装置の詳細な履歴管理や内部情報が遠隔から浩瀚できるようになるために、ダウンタイムを最小にすることが可能になってくる。また、ユーザとメーカーの間では、カタログや最新情報が得られるホームページによるダウンロードサービス、あるいは加工診断サービスなどユーザとメーカーの物理的距離を超えた数多くの用途を考えられ、高度なネットワークサービスが可能になってくる。図2.3には、インターネットを活用したサービスの例を示す。

また、第4世代では、高集積化されたハードウェアをフルに活用し、センサー技術、情報処理技術の進展とあわせて、パソコンとNCの両方の特徴を生かした高度な制御が可能となる。従来の独立して指示だけされたことだけを行う位置制御のための装置から大きく発展して、生産現場のネットワークの単位として機械に、あるいは現場に必要なものを必要とされるときに加工することができ、それぞれの工場にあった形のインテリジェント化とネットワーク化が実現でき、生産性向上に貢献していくものと思われる。

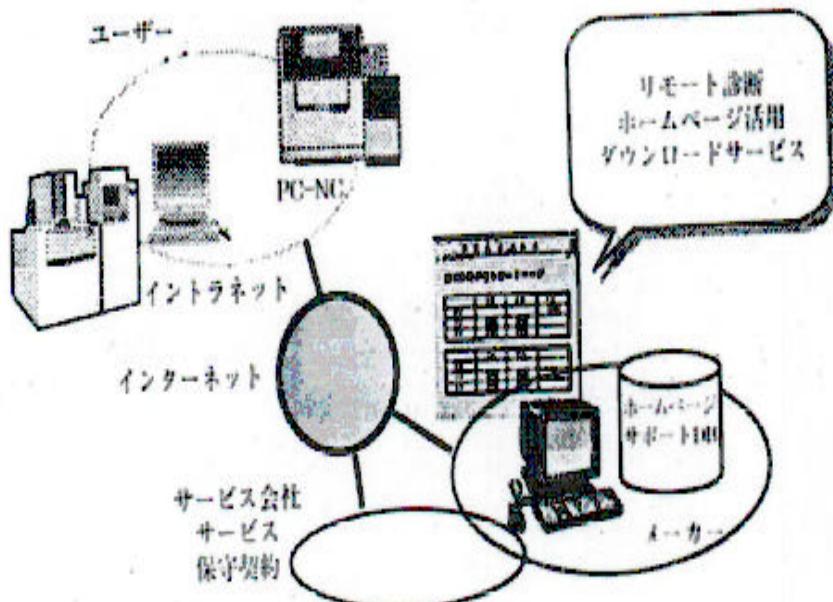


図2.3 EDMのインターネットによる遠隔制御図

## 2.2 遠隔操作における従来の技術

放電加工は、通常の切削加工に比べて、加工条件の選定が多く、かつ、非常に煩雑であるため、適正条件を選択する作業は熟練操作が必要である。また、放電加工は、長時間の加工が多い為、変化に応じた熟練操作が必要になってくる。

その為、従来の技術としては、熟練者を必要としないようワークと電極の間隙が常に最適になるように最適制御を行う方法の技術と、機械をネットワークに接続し、遠距離から操作及びモニタリングする方法が多く研究されてきた。その上で、近年のインターネットを中心とする通信技術は国際的にも発展が目覚しく、この技術を利用し、データ転送及び安全かつ効率よく加工を行う方向へと技術は進んでいる。

また、先ほどの制御技術の変遷でも少しふれたが、近年、パソコンの発達により、形彫・ワイヤ放電加工機を取りまく環境として、加工画面データからの自動NCプログラムの作成が主であった。しかし、最近は、

機械の加工精度の向上

加工スピードの向上

パソコンの処理能力の向上

に伴い単に加工形状用奇跡を作成するだけでなく、

い つ で も  
ど こ で も  
誰 に で も

簡単に高精度の NC プログラム作成でき、どこからでも NC プログラムを機械に入力できる。

簡単に、どこからでも放電加工機を操作し、モニタリングできる  
ということも関連技術として発展している。

それは、つまり、遠隔（自宅、出張先、取引先）から NC データを作成後、電話回線、インターネットを通して機械に NC データを送信し、加工を行い加工の状態を確認するといった方向に進み、従来の技術では、このような機能のソフトが確立している。

参考にこの様子を図 2.4 に示す。

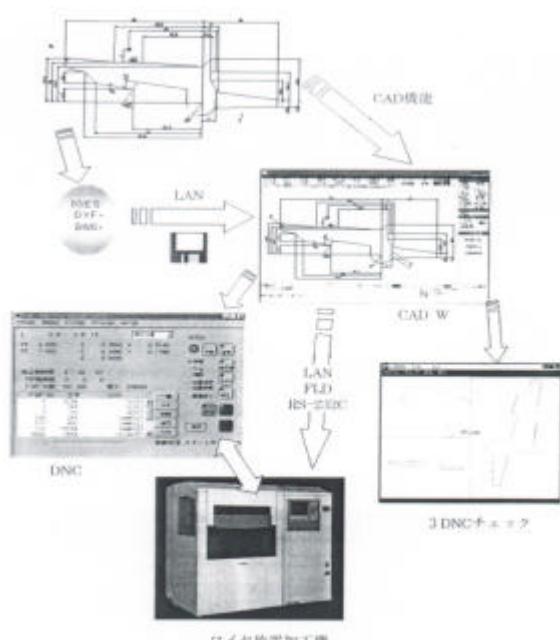


図 2.4 従来の遠隔操作技術の流れ

### 2.3 ワークのセットアップにおける従来技術

放電加工そのものは、電極とワークを精度良くセットアップすれば、その後は、自動加工運転により、加工精度の高い形状加工が可能である。その上で、従来のワークの取り付け方法は、他の工作機械と同じように、機械テーブルにセットアップするワークのX、Y座標基準面は、テーブルの移動方向座標にできるだけ平行にセットアップするのが慣例であり、パレットや特殊治具を利用したり、被加工物（ワーク）のXY座標基準面をできるだけ平行にしたりと、作業時間及び熟練操作の必要性があった。一方、金型加工は、一品加工が多い為、パレットや特殊治具を使うことが少ない。よって、かなりの時間のロスとセットアップの人為的誤差から発生するワーク座標軸・座標原点の誤差が生じていた。本研究で行う技術は、まだ、自動化されていなくて、実現すれば、自動段取りが可能となり、ワークのセットアップと基準だし作業の開放は大きな技術的進歩となる。

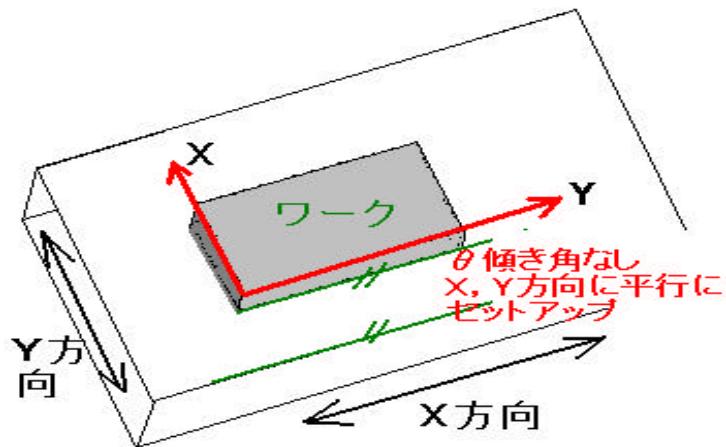


図 2.5 従来のワークのセットアップ

# 第3章

## インターネット利用による放電加工機遠隔制御

### 3.1 研究目的

遠隔操作をする場合、情報の伝達速度が重要な問題になる。早ければ早いほどよいわけであるが、インターネットを利用した場合どの程度の遅れがあるか知っておく必要がある。そこで本研究では遠隔操作におけるデータ転送時間についての測定を行った。

### 3.2 実験装置

本実験に使用した主要なものを以下、図3.1から図3.5に記す。



図3.1 三菱ワイヤ放電加工機 DIAX SX-10

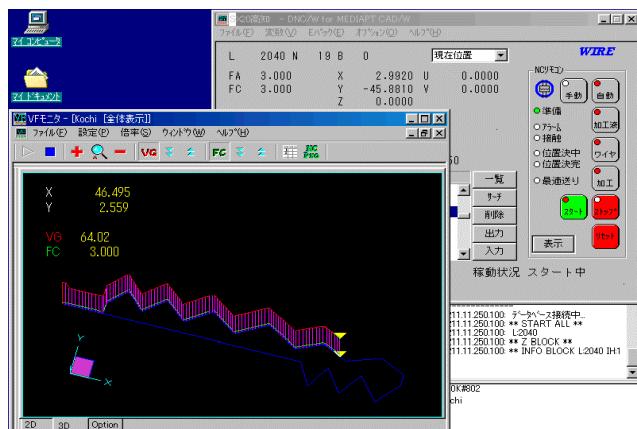


図3.2 遠隔操作ソフト（三菱電機 DNC/VF モニタ）



図 3.3 パソコン ( DELL コンピュータ製 Dimension XPS D333 )



図 3.4 ストップウォッチ ( hanhart 製 )



図 3.5 ConvComputer ( 石垣コンピュータシステム製 CommAssist-C )

### 3.3 実験方法

#### 3.3.1 接続の概要

図 3.6 に示すように、本装置は、パソコンで直接ワイヤ EDM を操作することができる機能 (DNC) および加工電圧、加工速度をモニタすることができる機能とを持った VF モニタと、遠隔操作されるワイヤ EDM で構成されている。DNC/VF モニタとインターフェイス I/F 1、I/F 2 はともに IP アドレスが設定され、ソケット通信が実行される。DNC/VF モニタ側は、学内 LAN と専用回線もしくは電話回線を経由し、ワイヤ EDM 側からは、ISDN と I/F 1, I/F 2 を経由してインターネットにそれぞれ接続されている。

一方最短時間でデータ伝送を行うために研究室 LAN で接続する経路もあり、この三つの経路は切り替えられる。

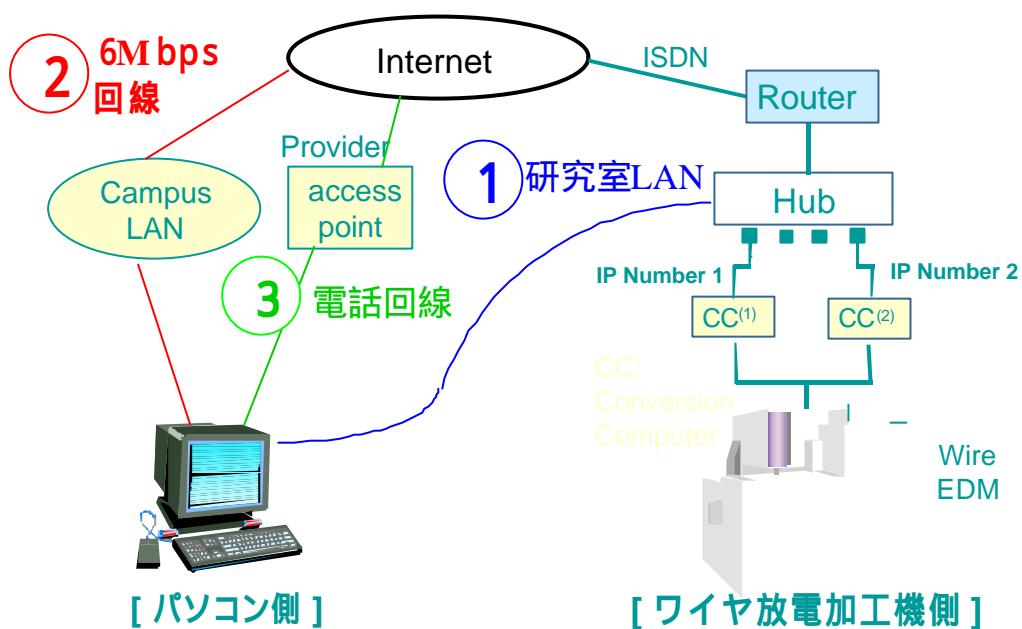


図 3.6 実験を行った遠隔操作の接続形態

### 3.3.2 遠隔操作ソフト

今回は、三菱電機製の放電加工機遠隔操作ソフト(DNC)と監視モニタリングソフト(VFmonitor)についてのデータ転送速度を調査した。図3.7, 3.8, 3.9には、ソフトの概要を示す。

#### (1) DNC遠隔操作ソフトの概要

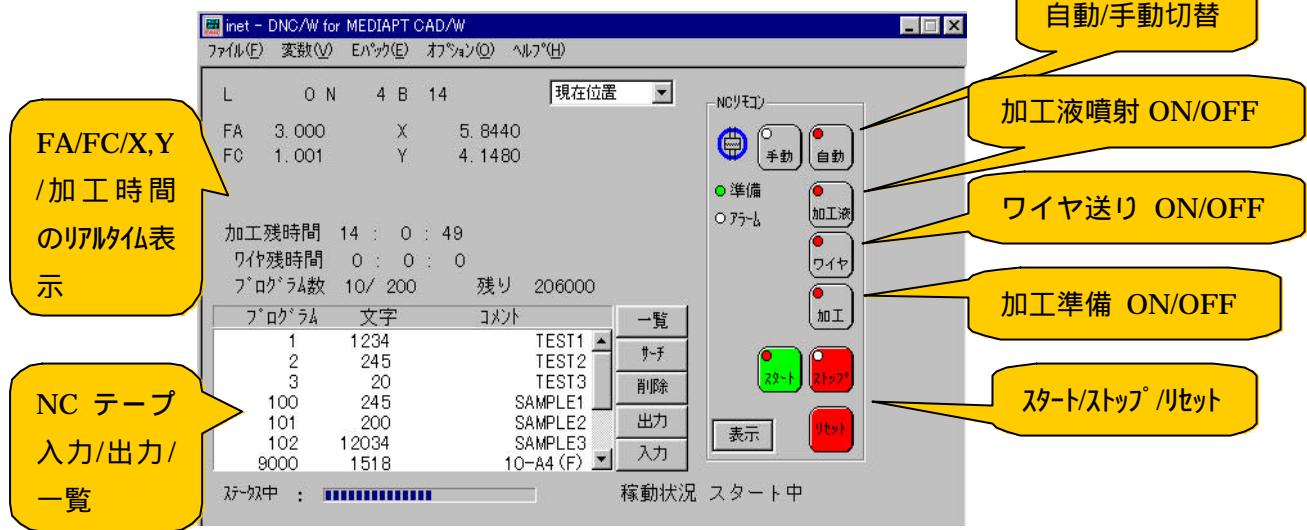


図3.7 遠隔操作ソフト画面 (DNC)

上記のように、NCプログラムの入出力、手動モード/自動モード切換え、手動操作によるワイヤーOn/Off,、加工液On/Off、自動運転の起動/停止/リセット、現在位置、加工時間、アラームなどの表示などの機能を、リアルタイムに遠隔操作が可能である。

## (2) VF モニタの概要

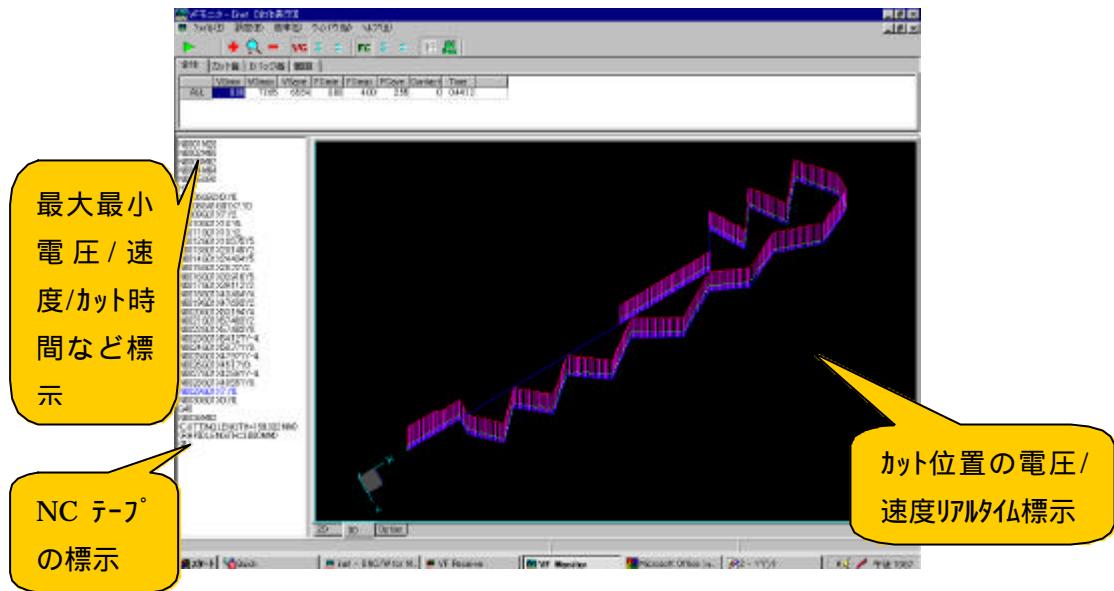


図 3.8 遠隔モニタリング 3D 画面 (VFmonitor)

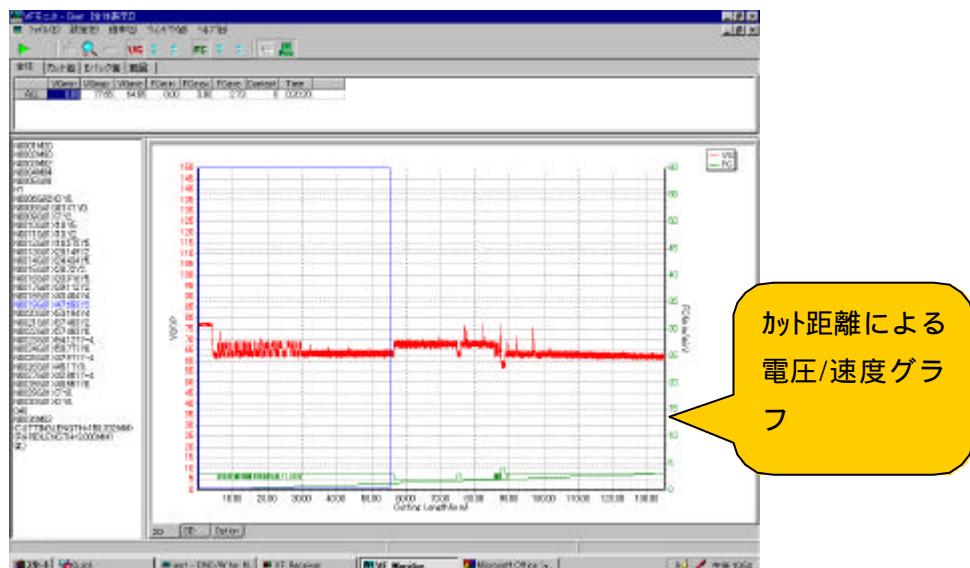


図 3.9 遠隔モニタリング 2D 画面 (VFmonitor)

NC テープ走行位置における電圧・速度の 2D・3D におけるリアルタイム表示、最大・最小の電圧、速度 及び 加工時間 などの解析がリアルタイムに解析可能である。

### 3.3.3 DNC 遠隔制御による遠隔制御データ転送時間測定法

(1) はじめに、測定する対象の操作を決定する為に、次の各コマンドにおける操作を測定した。

自動/手動切替操作による応答時間

(a) 実際に機械が反応するまでの時間を測定した。

(b) DNC に完了信号が帰ってくるまでの時間を測定した。

ワイヤ送り On/Off による応答時間

(a) 実際に機械が反応するまでの時間を測定した。

(b) DNC に完了信号が帰ってくるまでの時間を測定した。

ただし、 , , (a), (b)において一定の割合で推移し、変化が見られない時は、代表して (b)についての調査を行うこととする。

(2) まず、研究室 LAN 接続(PC-EDM)について調査を行う。

30回の測定を行い、その平均通信時間を求める。

(3) 本実験においては、インターネット内をデータが往復する正味の時間を求めたいので、NC 装置・周辺機器などにかかる処理時間を除くインターネットの通信時間を以下求めていくことにする。

その計算式は、

“ インターネットの通信時間 =

6 Mbps 回線 or 電話回線 - 研究室 LAN “

(5.8sec)

である。

(4) インターネットを通した接続

6 Mbps の専用回線での接続(PC-6Mbps 回線-Internet-ISDN-EDM)について調査を行う。

1日4回、朝 9:00 ~ 昼 14:00 ~ 夕 18:00 ~ 夜 23:00 ~ の各時間帯について、それぞれ、10回のデータの平均値を求める。

(5) インターネットを通した接続

電話回線での接続(PC-電話回線-Internet-ISDN-EDM)についての調査を行う。

専用回線での調査と同じく、朝・昼・夕・夜 1日4回の各時間帯を調査し、それぞれ、10回のデータ平均値を求める。

(6) プロバイダの違いによる測定

プロバイダを3個所変えて、調査をおこなった。

### 3.3.4. VF モニタによるデータ転送時間測定法

( 1 ) VF モニタについても、DNC 同様、電圧・速度のモニタリング対象があるが、両方の伝達速度はほとんど同じであるため、今回は、機械側の速度を変化させ、パソコンへ表示されるまでの伝送時間を測定する。

( 2 ) まず、研究室 LAN 接続(PC-EDM)について調査を行う。

10回の測定を行い、その平均通信時間を求める。

( 3 ) ここからは、DNC と同じように、本実験において、インターネット内をデータが往復する正味の時間を求めたいので、NC 装置・周辺機器にかかる処理時間を除くインターネットの通信時間を以下求めていくことにする。

その計算式は、

“ インターネットの通信時間 =

6 Mbps 回線 or 電話回線 - 研究室 LAN “

(5.8sec)

である。

( 4 ) インターネットを通した接続

6 M の専用回線での接続(PC-6Mbps 回線-Internet-ISDN-EDM)について調査を行う。

1日 4 回、朝 9:00 ~ 昼 14:00 ~ 夕 18:00 ~ 夜 23:00 ~ の各時間帯について、それぞれ、10回のデータの平均値を求める。

( 5 ) インターネットを通した接続

電話回線での接続(PC-電話回線-Internet-ISDN-EDM)についての調査を行う。

専用回線での調査と同じく、朝・昼・夕・夜 1日 4 回の各時間帯を調査し、それぞれ、10回のデータ平均値を求める。

### 3.4 実験結果

#### 3.4.1 D N C 遠隔制御によるデータ転送時間測定の結果

(1) はじめに、操作コマンドを決定する為に、4種類の通信時間の調査を行った。

その結果を表3.1, 3.2に記す。(各30回測定の平均値)

表3.1 自動/手動切替 応答時間

|                 | 時間帯    | (1)ネット経由<br>(秒) | (2)LAN<br>(秒) | (1)-(2)<br>(秒) |
|-----------------|--------|-----------------|---------------|----------------|
| (a)機械が反応するまでの時間 | 09:00~ | 4.39            | 2.81          | 1.58           |
|                 | 14:00~ | 4.32            |               | 1.51           |
|                 | 18:00~ | 4.42            |               | 1.61           |
|                 | 23:00~ | 4.14            |               | 1.33           |
| (b)完了信号が帰るまでの時間 | 09:00~ | 7.57            | 5.84          | 1.73           |
|                 | 14:00~ | 9.07            |               | 3.23           |
|                 | 18:00~ | 7.66            |               | 1.82           |
|                 | 23:00~ | 7.63            |               | 1.79           |

表3.2 ワイヤ送り 応答時間

|                 | 時間帯    | (1)ネット経由<br>(秒) | (2)LAN<br>(秒) | (1)-(2)<br>(秒) |
|-----------------|--------|-----------------|---------------|----------------|
| (a)機械が反応するまでの時間 | 09:00~ | 4.38            | 2.83          | 1.55           |
|                 | 14:00~ | 4.78            |               | 1.95           |
|                 | 18:00~ | 4.39            |               | 1.56           |
|                 | 23:00~ | 4.00            |               | 1.16           |
| (b)完了信号が帰るまでの時間 | 09:00~ | 7.58            | 5.69          | 1.88           |
|                 | 14:00~ | 10.89           |               | 5.19           |
|                 | 18:00~ | 7.62            |               | 1.92           |
|                 | 23:00~ | 7.48            |               | 1.79           |

自動/手動切替 及び ワイヤ送りのON/OFFについて、それぞれ、機械が反応するまでの時間と機械が反応してPCに返ってくるまでの時間 を測定したが、転送時間は、ほとんど変化がみられなかった為、こらから代表して、自動/手動切替の機械が反応してPCに返ってくるまでの時間 を調べることにした。

#### (2) 研究室 LAN接続(PC-EDM)についての調査結果

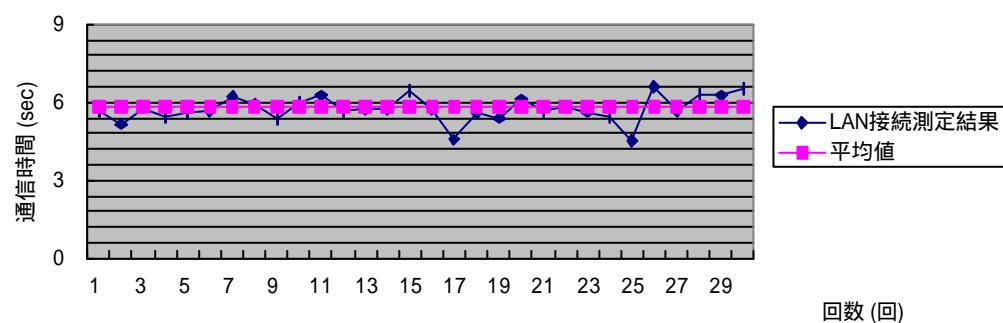


図3.10 LAN接続通信時間

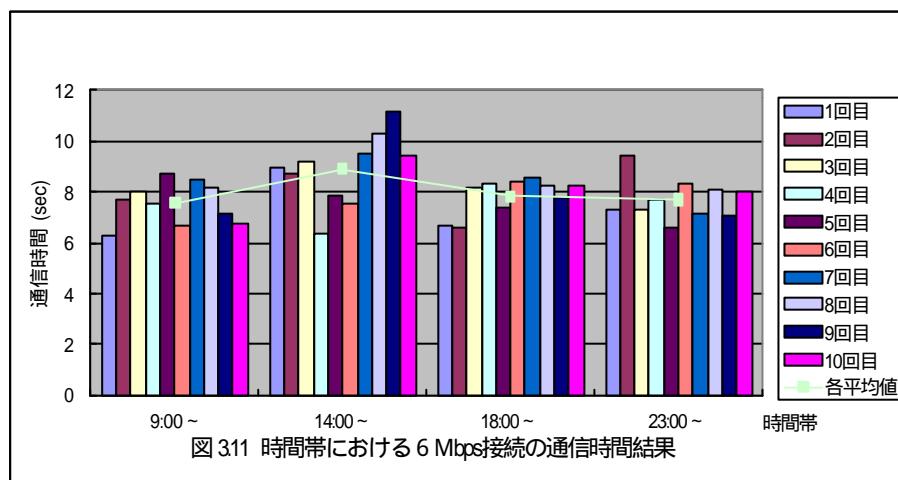
図3.10からも分かるように、30回の測定結果、直接LAN接続の平均通信時間は、5.8秒であった。

(3) インターネットを通した接続として、  
6 Mbps の専用回線での接続 (PC-6Mbps-Internet-ISDN-EDM) についての調査結果  
朝昼夕夜の一日 4 回、各 10 回ずつ測定した。その結果を、表. 3.3 に示す。

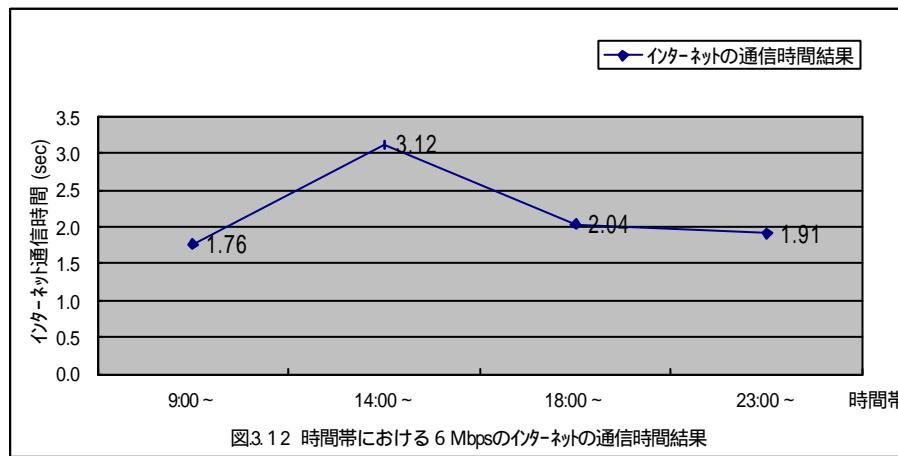
表.3.3 各時間帯における 6Mbps 接続の通信時間結果

|      | Time Zone |         |         |         |
|------|-----------|---------|---------|---------|
|      | 9:00 ~    | 14:00 ~ | 18:00 ~ | 23:00 ~ |
| 1 回目 | 6.32      | 9.00    | 6.69    | 7.29    |
| 2    | 7.69      | 8.75    | 6.60    | 9.43    |
| 3    | 8.03      | 9.23    | 8.16    | 7.32    |
| 4    | 7.55      | 6.36    | 8.36    | 7.73    |
| 5    | 8.76      | 7.89    | 7.35    | 6.63    |
| 6    | 6.67      | 7.53    | 8.39    | 8.34    |
| 7    | 8.53      | 9.51    | 8.59    | 7.17    |
| 8    | 8.17      | 10.28   | 8.23    | 8.06    |
| 9    | 7.12      | 11.16   | 7.76    | 7.07    |
| 10   | 6.76      | 9.46    | 8.27    | 8.05    |
| 単純平均 | 7.56      | 8.92    | 7.84    | 7.71    |
| 標準偏差 | 0.83      | 1.38    | 0.72    | 0.80    |

それを、グラフ化すると図 3.11 のようになる。



実験方法で述べたように、インターネットの通信時間（周辺機器などの処理時間を除いた時間）にしたもののが図 3.12 である。



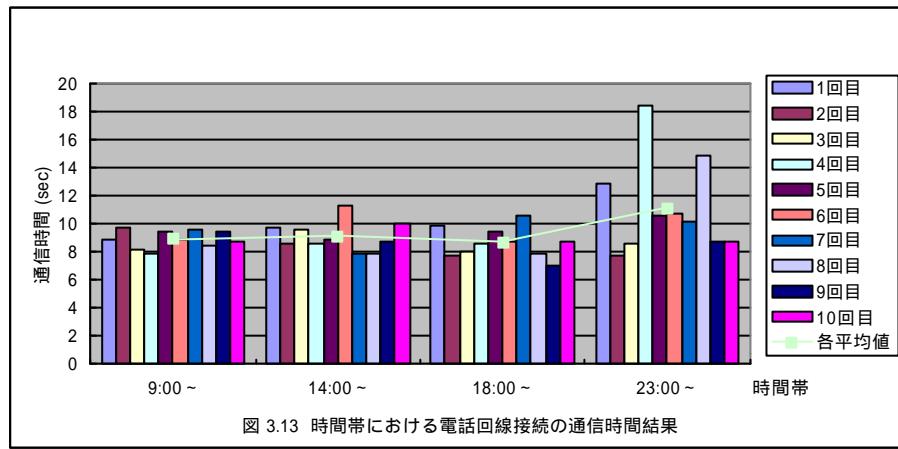
(4) インターネットを通した接続として、

電話回線(最大 54 kbps)での接続(PC-電話回線-Internet-ISDN-EDM)についての結果、朝昼夕夜、一日 4 回、各 10 回ずつ測定した。その結果を、表 3.4 に示す。

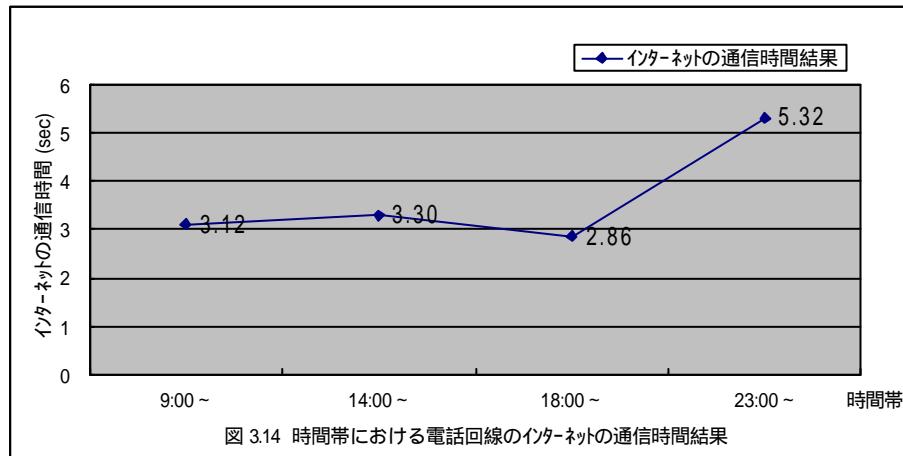
表. 3.4 時間帯における電話回線接続の通信時間結果

|      | Time Zone |         |         |         |
|------|-----------|---------|---------|---------|
|      | 9:00 ~    | 14:00 ~ | 18:00 ~ | 23:00 ~ |
| 1 回目 | 8.88      | 9.69    | 9.91    | 12.8    |
| 2    | 9.76      | 8.63    | 7.74    | 7.69    |
| 3    | 8.2       | 9.59    | 7.96    | 8.5     |
| 4    | 7.89      | 8.5     | 8.64    | 18.45   |
| 5    | 9.43      | 8.85    | 9.46    | 10.56   |
| 6    | 8.89      | 11.33   | 8.76    | 10.74   |
| 7    | 9.51      | 7.86    | 10.51   | 10.16   |
| 8    | 8.46      | 7.85    | 7.89    | 14.86   |
| 9    | 9.48      | 8.78    | 7.07    | 8.68    |
| 10   | 8.69      | 9.96    | 8.7     | 8.72    |
| 単純平均 | 8.92      | 9.10    | 8.66    | 11.12   |
| 標準偏差 | 0.62      | 1.06    | 1.06    | 3.37    |

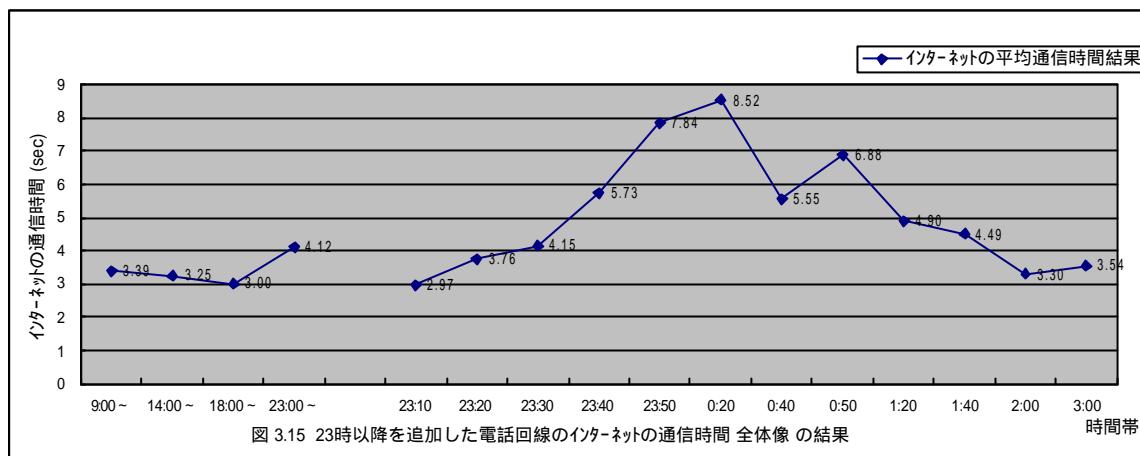
それを、グラフ化すると、図 3.13 のようになる。



同じく、インターネットの通信時間にしたもののが、図 3.14 である。

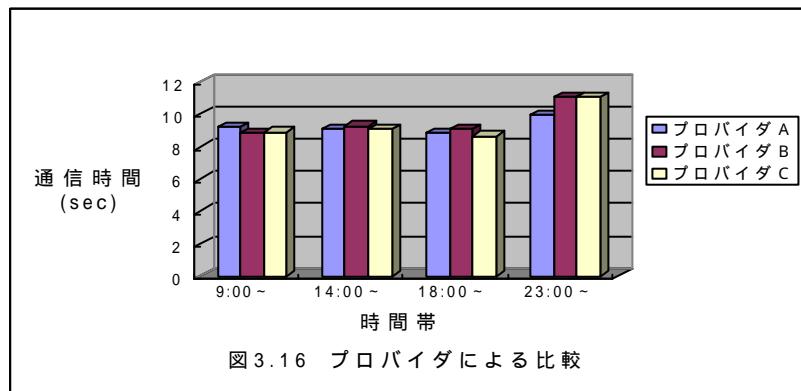


このデータから、23時以降に極端に通信時間が高くなる傾向を示したので、23時について、追求して調査を行った。次の図3.15には、23時以降10分おきに3時まで調査を行ったデータを加えた、電話回線の通信全体像を示す。



この結果、0:20頃に通信時間が最もかかり、その後、下降していくことが確認された。

また、プロバイダによる、通信時間の差も考えられるので、3箇所のプロバイダについて、朝・昼・夕・夜同じように調査をおこなった。その結果を、図3.16に示す。



その結果、プロバイダによる通信時間の変化はほとんどみられないことがわかった。

### 3.4.2 VF モニタによるモニタリングの結果

( 1 ) 実験の手法でも述べたが、電圧・速度のモニタリング対象があるが、両伝送時間ともほとんど同じである為、今回は、機械側から速度を変化させパソコンへ表示されるまでの伝送時間について測定を行った。

( 2 ) 研究室 LAN接続 (PC - EDM)についての調査結果

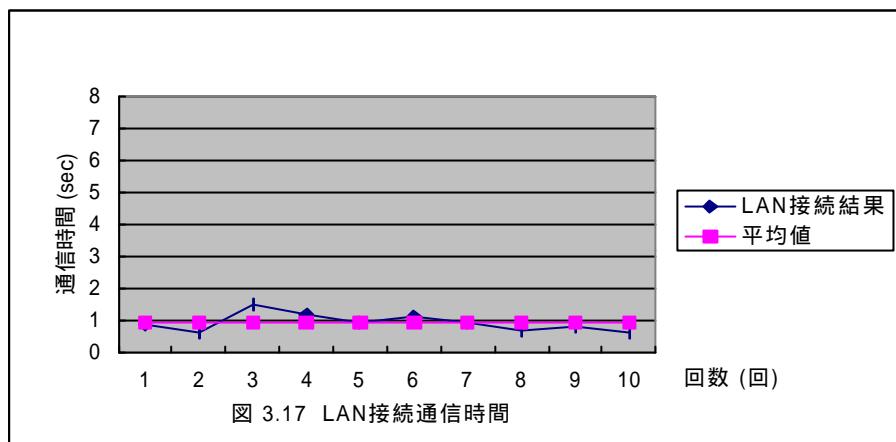


図.3.17 からも分かるように、10回の測定結果、直接 LAN 接続の平均通信時間は、0.9秒 であった。

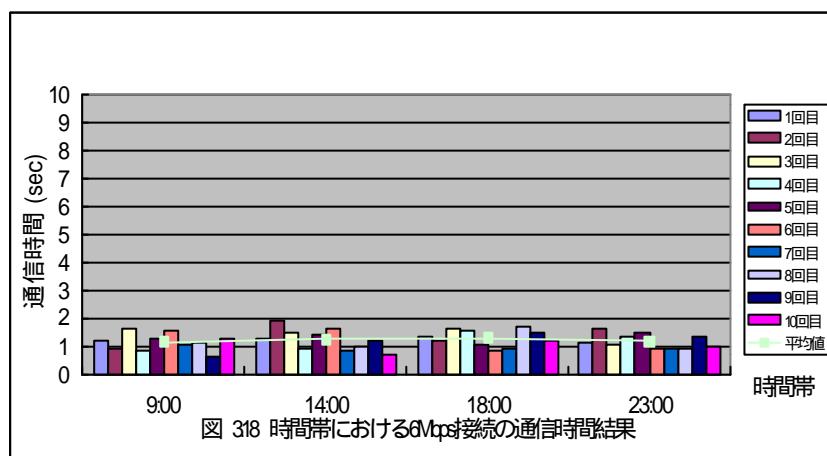
(3) インターネットを通した接続 として、6 Mbps の専用回線での接続 (PC-6Mbps-Internet-ISDN-EDM) についての調査結果

朝昼夕夜の一日 4 回、各 10 回ずつ測定した。その結果を、表 3.5 に示す。

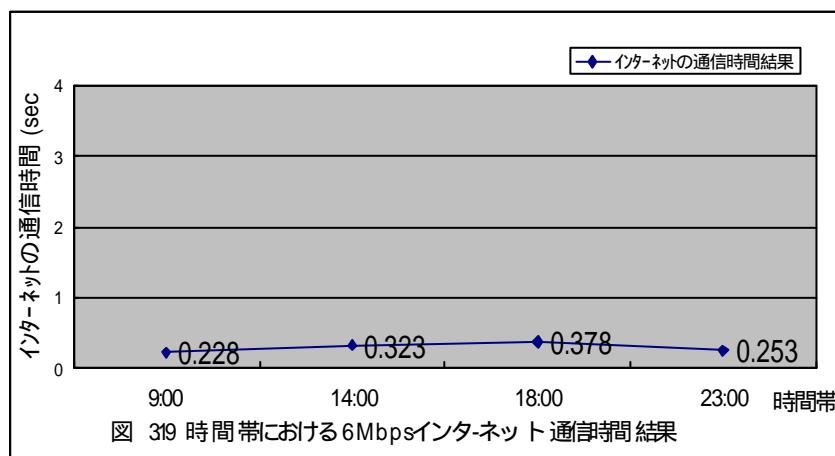
表 3.5 各時間帯における 6Mbps 接続の通信時間結果

|      | Time Zone |       |       |       |
|------|-----------|-------|-------|-------|
|      | 9:00      | 14:00 | 18:00 | 23:00 |
| 1    | 1.19      | 1.28  | 1.33  | 1.14  |
| 2    | 0.9       | 1.89  | 1.22  | 1.59  |
| 3    | 1.59      | 1.5   | 1.59  | 1.02  |
| 4    | 0.83      | 0.91  | 1.52  | 1.33  |
| 5    | 1.23      | 1.39  | 1.08  | 1.44  |
| 6    | 1.55      | 1.62  | 0.85  | 0.93  |
| 7    | 1.06      | 0.84  | 0.92  | 0.89  |
| 8    | 1.09      | 0.97  | 1.66  | 0.93  |
| 9    | 0.6       | 1.16  | 1.47  | 1.35  |
| 10   | 1.29      | 0.72  | 1.19  | 0.96  |
| 平均   | 1.13      | 1.23  | 1.28  | 1.16  |
| 標準偏差 | 0.31      | 0.38  | 0.28  | 0.25  |

それを、グラフ化すると 図 3.18 のようになる。



同じように、インターネットの通信時間にしたもののが、図. 3.19 である。



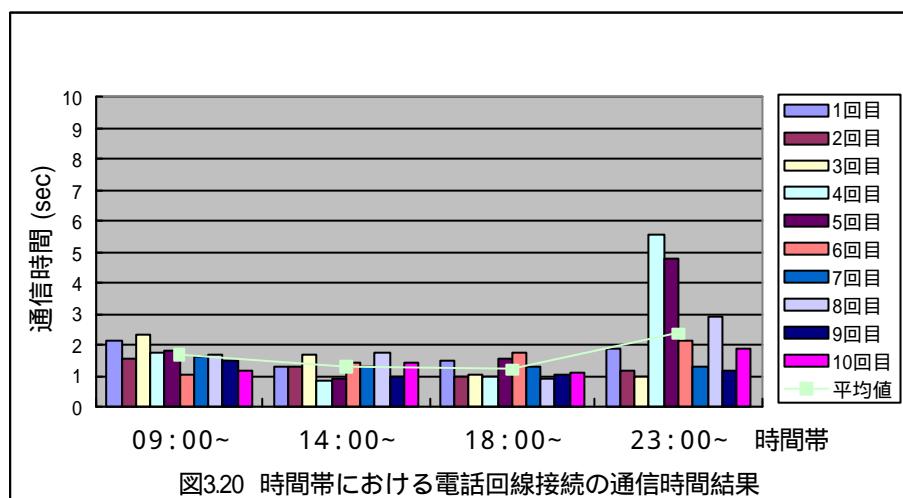
(4) インターネットを通した接続 として、電話回線（最大 54Kbps）での接続 (PC-電話回線-Internet-EDM)についての結果

朝昼夕夜の一日 4 回、各 10 回ずつ測定を行った。その結果を、表. 3. 6 に示す。

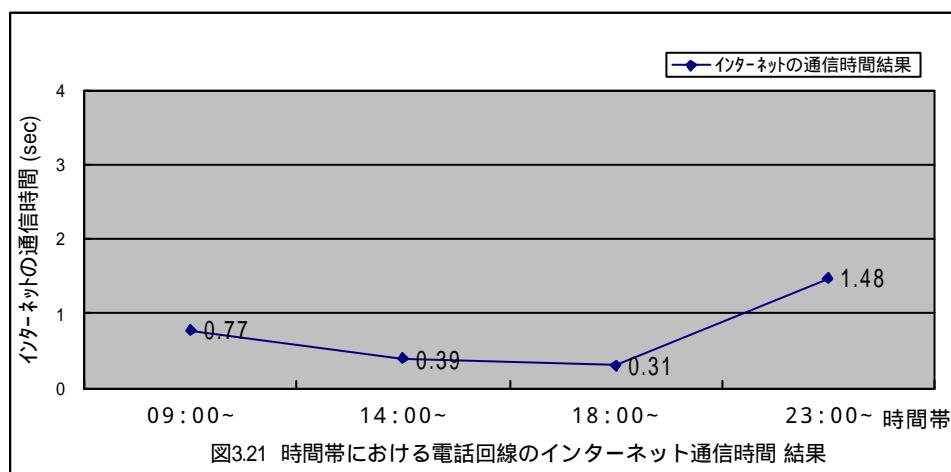
表 3.6 時間における電話回線接続の通信時間結果

|      | Time Zone |        |        |        |
|------|-----------|--------|--------|--------|
|      | 09:00～    | 14:00～ | 18:00～ | 23:00～ |
| 1回目  | 2.16      | 1.29   | 1.49   | 1.87   |
| 2    | 1.58      | 1.31   | 0.99   | 1.19   |
| 3    | 2.36      | 1.69   | 1.02   | 0.97   |
| 4    | 1.74      | 0.83   | 0.98   | 5.56   |
| 5    | 1.83      | 0.89   | 1.55   | 4.8    |
| 6    | 1.07      | 1.46   | 1.73   | 2.13   |
| 7    | 1.61      | 1.33   | 1.33   | 1.33   |
| 8    | 1.69      | 1.73   | 0.89   | 2.9    |
| 9    | 1.5       | 0.97   | 1.02   | 1.17   |
| 10   | 1.2       | 1.46   | 1.13   | 1.88   |
| 平均   | 1.67      | 1.30   | 1.21   | 2.38   |
| 標準偏差 | 0.35      | 0.31   | 0.27   | 1.58   |

それを、グラフ化すると、図 3.20 のようになる。



同じく、インターネット通信時間にしたもののが、図 3.21 である。



### 3.5 結論 および 考察

#### (1) D N C の遠隔制御について

1. 遠隔操作の結果、インターネット通信時間は

(1)専用回線 ( 6 M b p s ) で接続の場合は、約 1 . 9 sec であった。

(2)電話回線の場合は約3.1secであった。

2. 通信時間は時間帯に大きく影響を受けていた。

とくに電話回線を使用する場合は 2 時 ~ 3 時までは非常に  
回線が混雑するようである。

3. 今回の実験から、インターネット経由の通信時間は専用回線  
で平均して小さい時間で操作が可能であり、特に放電加工の  
ような比較的加工現象の遅い加工には、有用であると分かつ  
た。

#### (2) V F モニタのモニタリングについて

1. モニタリングの結果、インターネットの通信時間は

(1)専用回線 ( 6 M b p s ) で接続の場合は、約 0.298sec であった。

(2)電話回線の場合は約0.49secであった。

2. やはり、電話回線を使用する場合は 2 時以降に回線が混雑するようである。

3. 今回の実験から、V F モニタのインターネットの通信時間は

全体的に、1秒以下で非常に高速であることがわかった。

また、専用回線のほうが、安定して推移することがわかった。

V F モニタにおいても、放電加工機へのモニタリングは非常に  
有用であることが確認された。

# 第4章

## 画像認識によるワーク形状の自動測定アルゴリズムの研究

### 4.1 研究目的

放電加工の遠隔操作を行う上で、段取り作業であるワークのセットアップについては、従来おこなってきた機械テーブルにできるだけ平行にセットアップするという方法では、大変困難である。そこで、本研究は、無造作にテーブル上に置いたワークの形状を自動で測定し、ワークの位置決めができるることを目的としている。

よって今回は、画像解析ソフト(Sherlock32)を使用し、図4.1に示すコーナー部のワーク座標とワーク長について検出するアルゴリズムの開発を行った。

また、作成したソフトでの確認実験を行った。

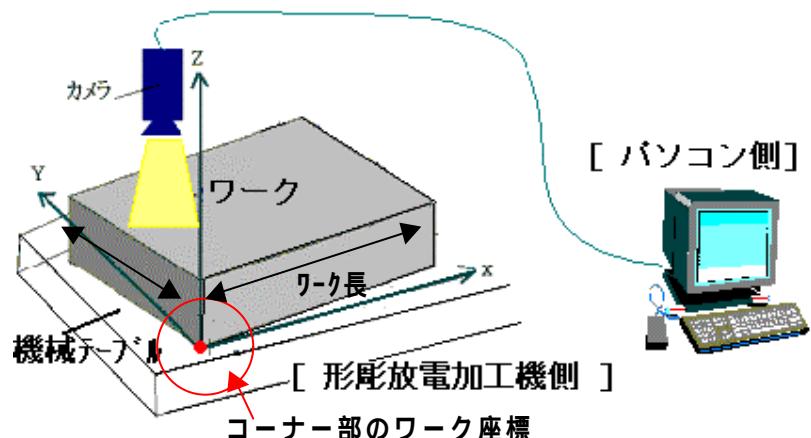


図4.1 ワーク座標及び傾き角自動検出の概要

### 4.2 開発装置

本実験に使用した主要なものを、以下の図4.2から図4.4に示す。



図4.2 パソコン (DELL コルピュータ製 OptiPlexGX1)



図 4.3 カメラ ( SONY 製 EVI-G20 ) 1 台

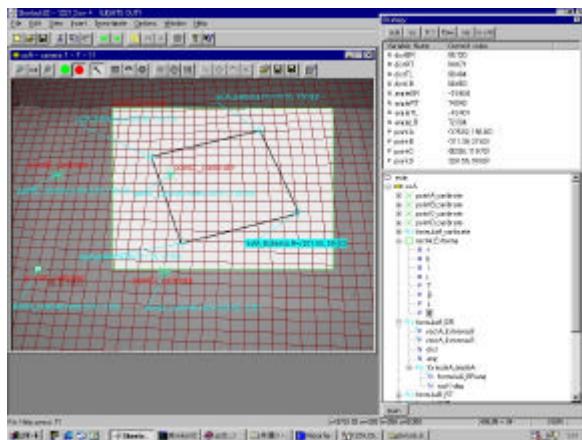


図 4.4 画像処理ソフト ( Imaging Technology 社製 )

### 4.3 解析アルゴリズム

(1) 次の 4 種類の解析ライブラリツールを使用し作成した。

表 4.1 ワーク座標検出方法 4 パターン

|  | 解析ライブラリ  | カメラアングル           |
|--|--|-------------------|
|  | フィルタ 4 辺からそれぞれ 1 個めの黒いフロブを検索 ( Exrima )                | 被加工物に対して<br>真上から  |
|  | エッジの輪郭ピクセルの形状を登録してそれを<br>サーチするパターンマッチング ( SmartSarch ) | 被加工物に対して<br>斜め上から |
|  | フィルタ 4 辺からそれぞれ 1 個めの黒いフロブを検索 ( Exrima )                | 被加工物に対して<br>斜め上から |
|  | エリアのエッジの境目に直線を引く<br>( HVLine )                         | 被加工物に対して<br>斜め上から |

## (2) 作成した4種類のワーク座標検出ソフトについて順に説明する。

### プログラム Exrima による処理

これは、ワーク（被加工物）に対して、真上のカメラから見たイメージ（2次元的）である。以下、プログラムの流れを、図4.5から図4.7と共に、説明していく。

#### プログラムの流れ

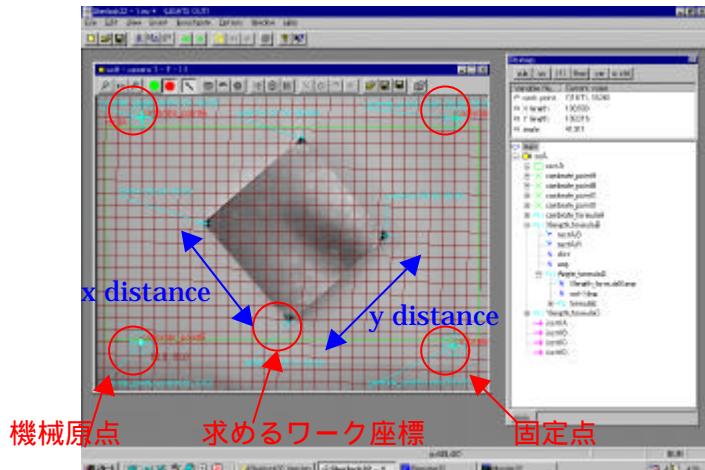


図 4.5 カメラからの Live 映像

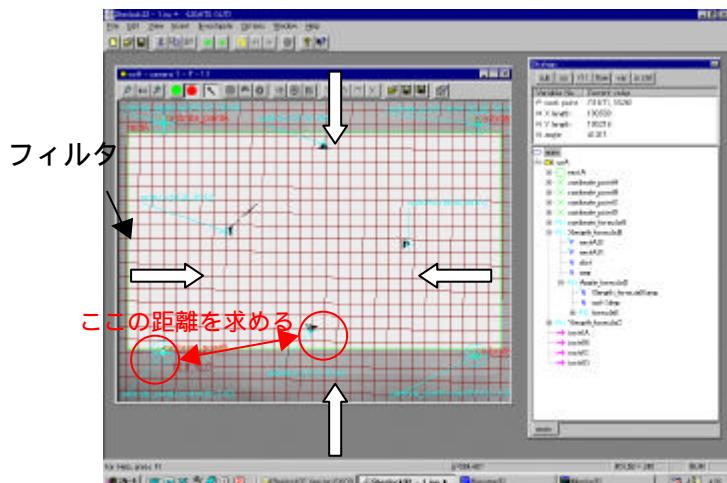


図 4.6 処理画像

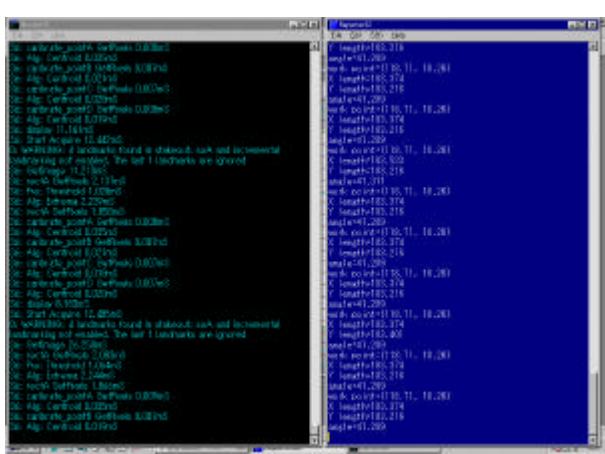


図 4.7 出力画面

#### 事前処理（より確実にエッジをとたえるため）

- 反射光を考慮してワークに着色を加えた。

#### 前処理

- テーブル上の機械原点を(0,0)とし、その平面における固定点3点を加え、合計4点を取り、ピクセル値から実際値に変換を行う。又、万一、カメラが動いたとき、その処理対象も補正する機能も加えた。

#### Calibration 4 Point + Landmark

#### 3. フィルタ

#### Threshold 2 値化処理

#### 4. 解析ライブラリ

Exrema フィルタの4辺から1個目の黒いプロップを探索

#### 4. 計算

2 point distance 2点間の距離  
(左図 BR BL)

Rad -> Deg

#### 6. 出力

#### work point

(左図 点 B より機械原点に対するワーク原点)

#### X distance

(BR よりワークの縦の長さ)

#### Y distance

(BL よりワークの縦の長さ)

## プログラム SmartSearch による処理

これは、ワーク（被加工物）に対して、斜めからのカメラから見たイメージである。

以下、プログラムの流れを、図 4.8 から図 4.10 と共に、説明していく。

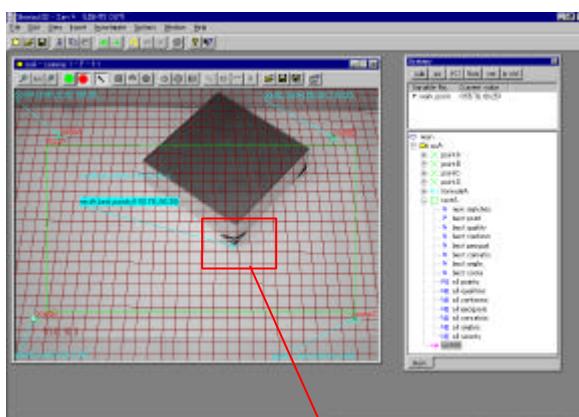
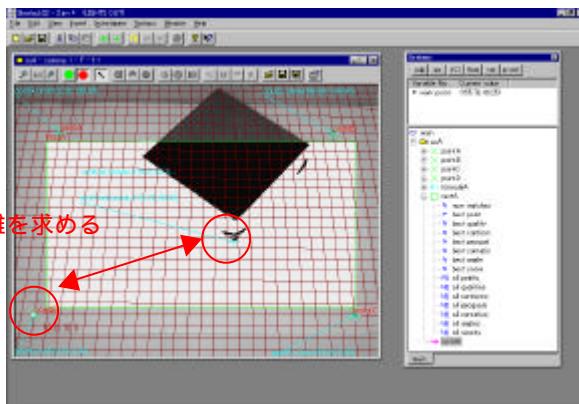


図 4.8 カメラからの Live 映像



この輪郭ピクセルを登録



ここの距離を求める

図 4.9 処理画像

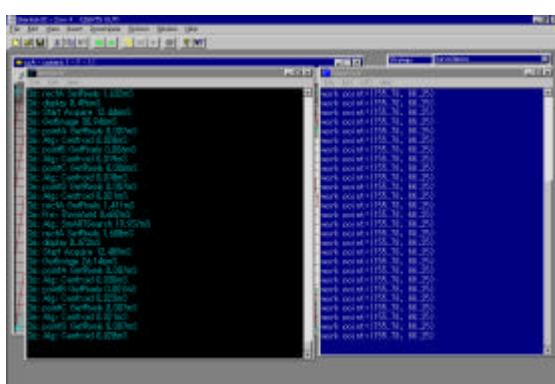


図 4.10 出力画面

### プログラムの流れ

#### 事前処理

- ワーク原点には特殊なマークの着色をつける。

#### 前処理

- (同じ)
- Calibration + LandMark

#### 3. フィルタ

(同じ)

Thresh Old 二値化フィルタ

#### 4. 解析ライブラリ

SmartSerch – Geoserch

指定パターンの輪郭ピクセルを登録し、パターンマッチングを行う。

その後、エリアサーチをテール全体にする。

#### 5. 出力

work point

## プログラム Extrima による処理

これは、ワーク（被加工物）に対して、斜めからのカメラから見たイメージである。以下、プログラムの流れを、図 4.11 から図 4.13 と共に、説明していく。

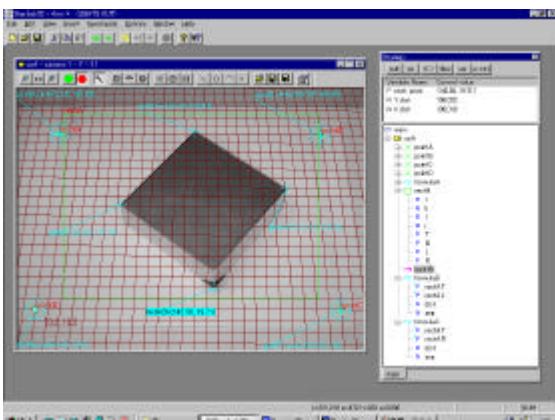


図 4.11 カメラからの Live 映像

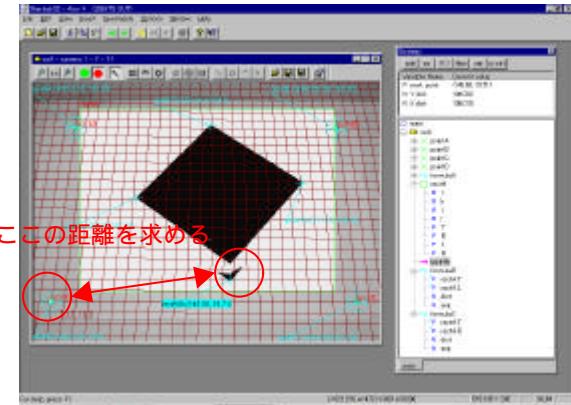


図 4.12 処理画像

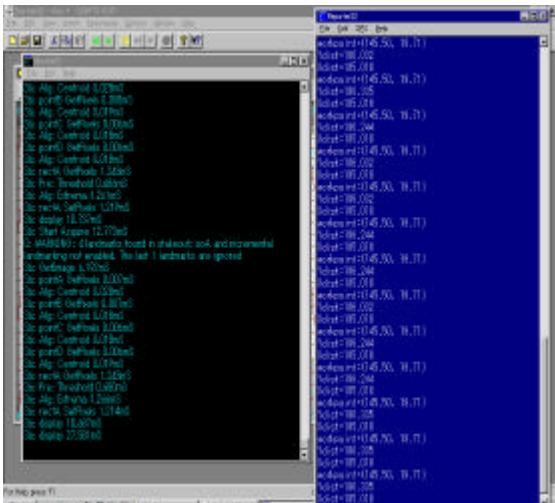
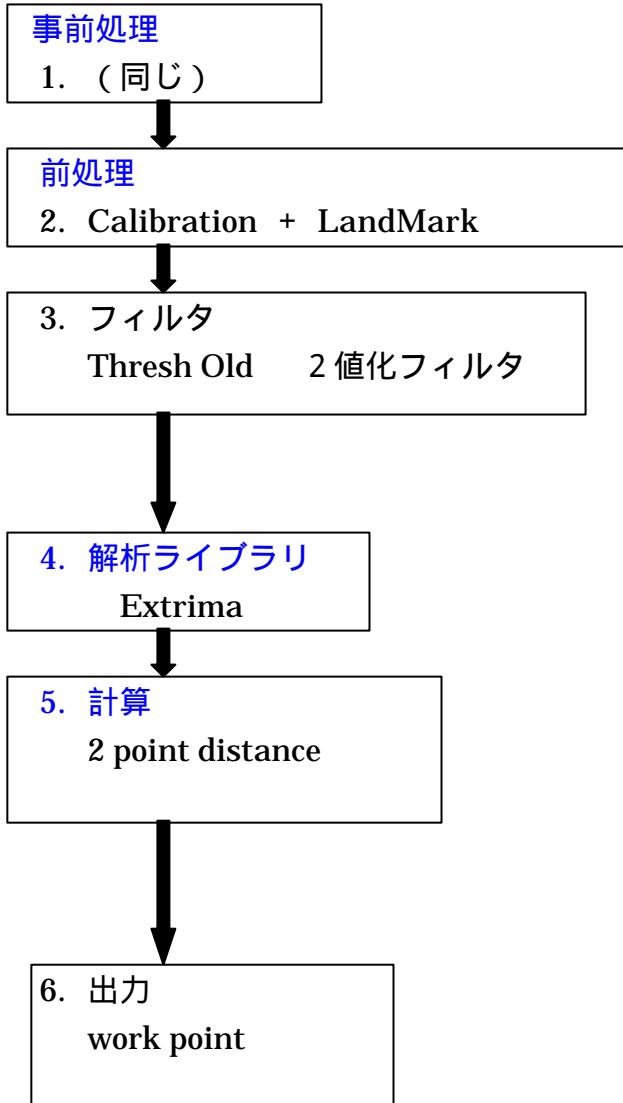


図 4.13 出力画面

### プログラムの流れ



## プログラム HLine による処理

ワーク（被加工物）に対して、斜めからのカメラから見たイメージである。以下、プログラムの流れを、図 4.14 から図 4.16 と共に、説明していく。

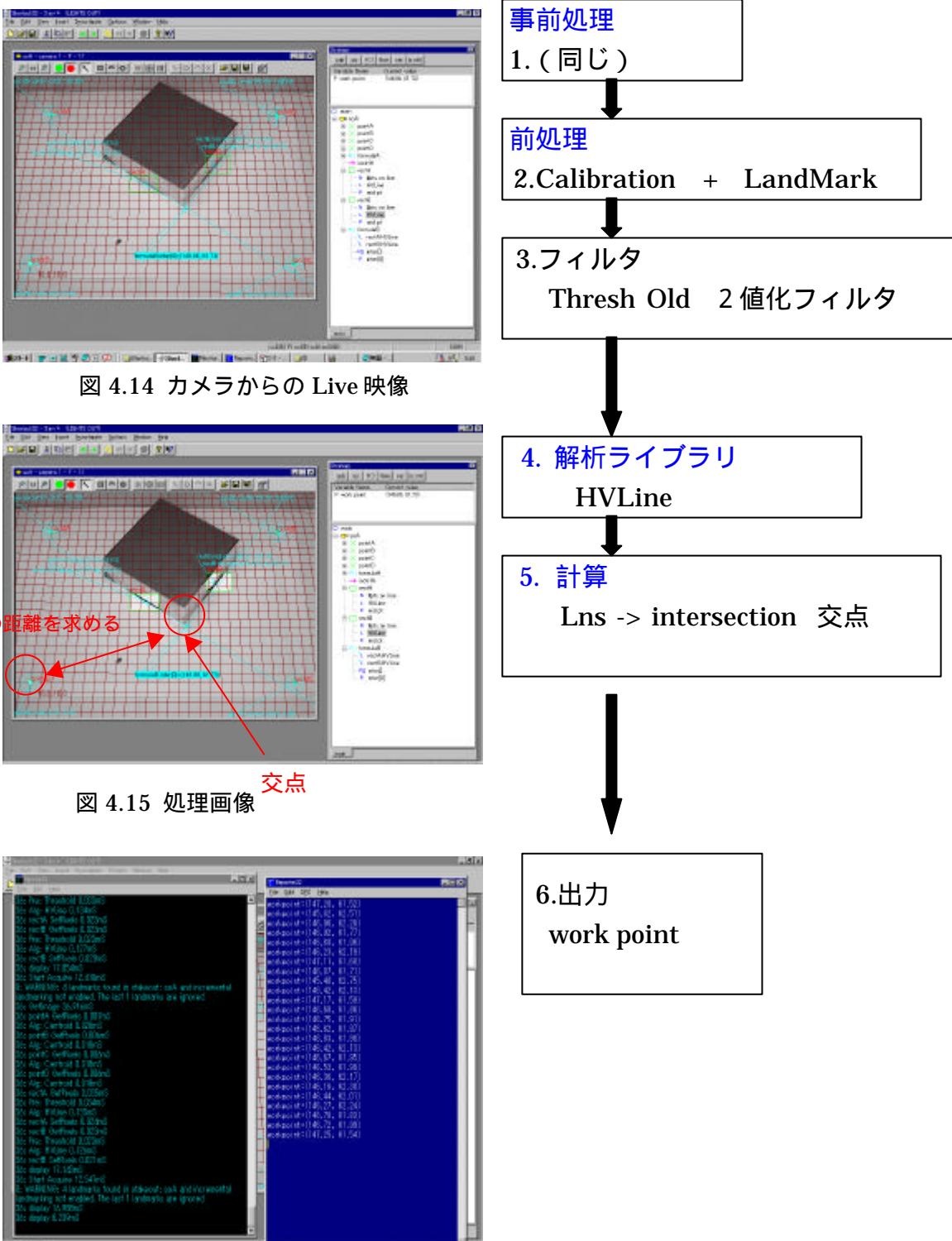


図 4.16 出力画面

#### 4.4 ワーク座標およびワーク長の検出確認実験

今回作成した4種類の解析アルゴリズムを用いて、コーナー部のワーク座標およびワーク長について検出を行った。検出結果について、以下に示す。

|   |  |
|---|--|
| <p><b>プログラム</b></p> <p><b>実際位置</b></p> <p>work point=(119 , 20)<br/>X length=100<br/>Y length=100</p> <p><b>処理結果（10回平均）</b></p> <p>work point=(118.71 , 18.26)<br/>X length=103.374<br/>Y length=103.216</p> <p><b>処理時間合計（1回にかかる）</b></p> <p>66.67 msec</p> | <p><b>プログラム</b></p> <p><b>実際</b></p> <p>work point=(156 , 68)</p> <p><b>処理結果（10回平均）</b></p> <p>work point=(155.78 , 66.25)</p> <p><b>処理時間合計（1回にかかる）</b></p> <p>91.536 msec</p> |
| <p><b>プログラム</b></p> <p><b>実際</b></p> <p>work point=(145 , 20)</p> <p><b>処理結果（10回平均）</b></p> <p>work point=(145.50 , 19.71)</p> <p><b>処理時間合計（1回にかかる）</b></p> <p>58.54 msec</p>   | <p><b>プログラム</b></p> <p><b>実際</b></p> <p>work point=(145 , 65)</p> <p><b>処理結果（10回平均）</b></p> <p>work point=(147.20 , 61.52)</p> <p><b>処理時間合計（1回にかかる）</b></p> <p>57.531 msec</p> |

それらの、4種類の解析を行った結果からコーナー部のワーク座標(x, y)とワーク長について実際の座標と画像処理で求めた座標位置との誤差を抽出した。また、解析1回にかかった処理時間についても調査した。その結果を表.4.2に示す。

表. 4.2 ワーク座標の実際の位置と検出位置の誤差 及び 処理時間

|                  | x座標  | y座標  | ワーク長  | 処理時間  |
|------------------|------|------|-------|-------|
| ①真上からのExtrima    | 0.29 | 1.74 | 3.295 | 66.67 |
| ②斜めからのSmartSerch | 0.22 | 1.75 |       | 91.54 |
| ③斜めからのExtrima    | 0.5  | 0.29 | 5.72  | 58.54 |
| ④斜めからのHVLine     | 2.2  | 3.48 |       | 57.53 |

## 4.5 考察

今回は、決められた固定点からワークのコーナー部の座標を求めるようにした。解析方法は、前処理、フィルタ処理、解析ライブラリ、計算、出力の順に行った。

特に、以下の画像解析ライブラリの3種類を使用し、解析アルゴリズムの開発を行った。  
Extrema はフィルタ4辺から1つめの黒い点を探す処理。  
SmartSerch は、特殊な形状の着色を加え、そのピクセルの輪郭形状を記憶させパターンマッチング処理。

HVLine は、サーチするエリア内を白と黒にして、その境目に直線を引く。もう1本直線を引きその直線の交点からワーク座標を求める処理。

これらの画像解析ライブラリから、4種類のアルゴリズムについて、実際に解析を行なった結果、HVLine 処理以外の処理では、ワーク座標は2ミリ以内の誤差での検出が可能であった。また、処理時間についての調査も行った結果、全て1秒以内であり高速であった。

今後、ワークおよび照度などの違う条件に対して、フィルタ処理を加えていく処理が必要はあるが、今回の結果から、ワーク座標検出を行う解析アルゴリズムはほぼ固まった。

# 第5章

## NC 装置によるワークの傾き角自動測定

### 5.1 研究目的

ワークの位置決めを行う際、第4章で求めたワーク座標の他に、ワーク傾き角が必要である。つまり、傾き角が求められることによって、現在のNC装置で座標回転計算をして加工形状が求められ、加工を行なうことができるようになる。

また、求めるワークの傾き角の精度は、非常に高精度が必要になり、その検出方法は安全に実行される必要がある。

従って、今回は放電加工機のNC制御装置と測定子を用いての角度の検出を行った。

### 5.2 実験装置

本実験に使用した主要なものを、以下の図5.1から図5.4に示す



図5.1 三菱形彫り放電加工機 DIAX VX-10

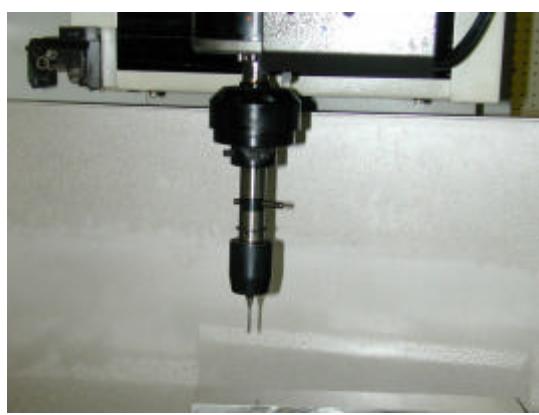


図5.2 パピ-テスタ（ミツトヨ製）



図 5.3 ダイヤルゲージ (TECLOCK 製)



図 5.4 アングル ブロックゲージ (フジツール製)

### 5.3 角度検出プログラム

実験を行う前に、放電加工機の NC 制御装置を利用し、角度検出を行うための、プログラムを作成した。まず、プログラムの角度検出の考え方について述べる。

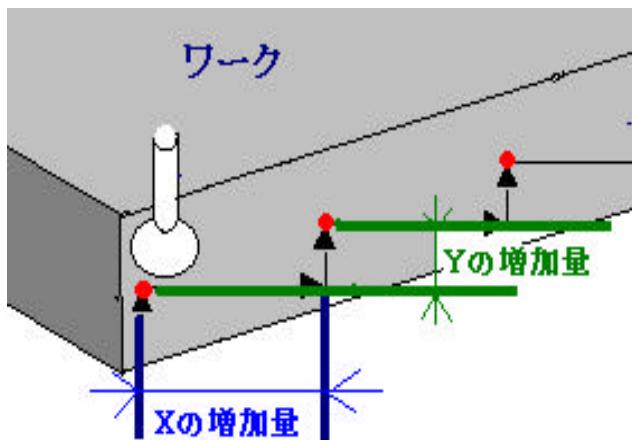


図 5.5 ワーク傾き角検出の理論

図 5.5 に示すように、測定子を用いて、ある Y 座標の位置でワーク端面位置決めを行い、つぎに X 軸方向に規定の距離を移動させて、再びワーク端面位置決めを行う。  
この X 軸方向の距離と 2 つの端面位置決めの座標データにより、次の式が成立する。

$$\tan \theta = \text{y 軸方向の端面位置の差} / \text{x 軸距離}$$

そこで、 $\theta$  が十分小さいときは  $\tan \theta \approx \theta$  であるから、角度  $\theta$  が求まる。

この関係を用いて、自動測定プログラムを作成した。(参考資料を参照)

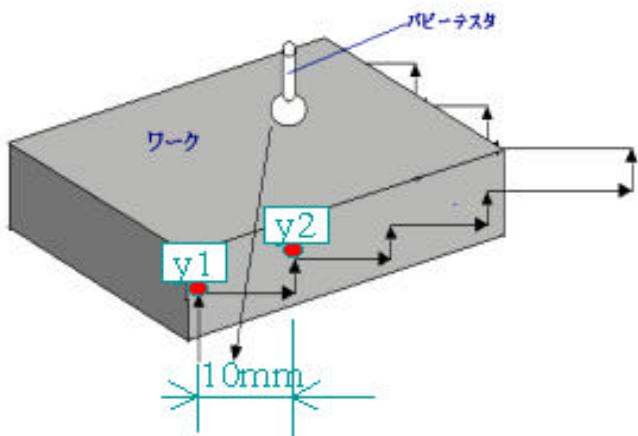
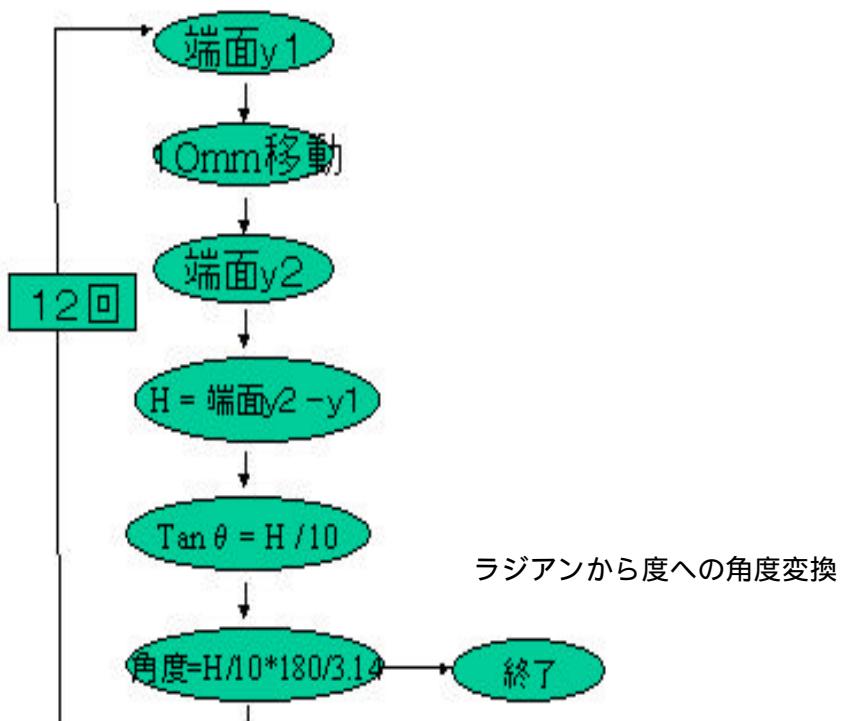


図 5.6 傾き検出

また、プログラム全体の動きとしては、図 5.6 のように、ワークの 2 面で 7 回づつの端面位置ぎめを行い、その結果から、12 個のワーク傾き角を求めた。また平均値も同時に計算で求めた。その一連の動作のフローチャートを図 5.7 に示す。



## 5.4 検出方法

ブロックゲージとダイヤルゲージを用いて、0.002mm 以内の精度で、平行だしを行い、基準角を作り、ワークをその傾き角にセットアップする。

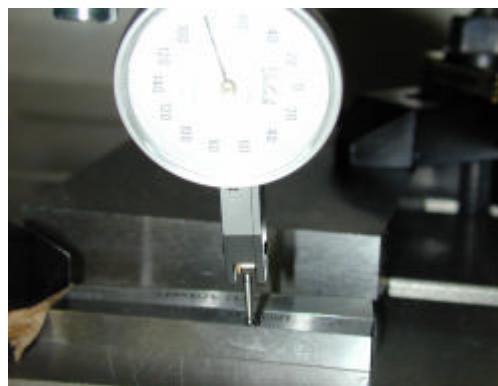


図 5.8 基準角の設定作業

放電加工機の電極側に測定子を取りつけ、NC 制御装置により作成した NC プログラムを実行し、2 面に 7 回ずつの端面位置決めを自動でとり、隨時、角度に変換してゆく。

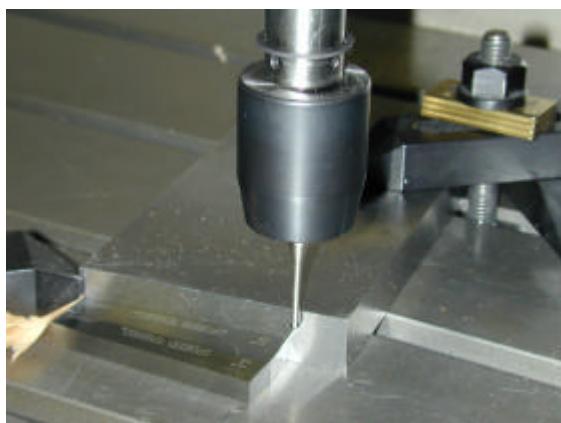


図 5.9 連続角度検出の様子 1

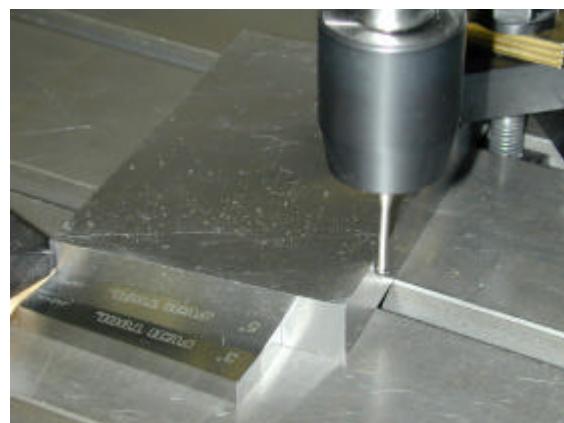


図 5.10 連続角度検出の様子 2

以上の操作を行い、ワークの傾き角検出を行った。今回は、1°から20°まで1°ずつ検出を行うことにした。最後に、放電加工機のメモリ内に、検出結果を表示した様子を図 4.27 に示す。

|    |        |    |
|----|--------|----|
| 4  | 364    | 19 |
| 5  | 0.057  | 20 |
| 6  | 20.805 | 21 |
| 7  | 20.691 | 22 |
| 8  | 20.691 | 23 |
| 9  | 20.691 | 24 |
| 10 | 20.691 | 25 |
| 11 | 20.691 | 26 |
| 12 | 20.748 | 27 |
| 13 | 20.748 | 28 |
| 14 | 20.691 | 29 |
| 15 | 20.748 | 30 |

図 5.11 検出角度表示

## 5.5 実験結果

実験手法で述べたように、 $1^{\circ}$ から $20^{\circ}$ まで $1^{\circ}$ ずつ、それぞれ12回の検出を行った。結果データについては、参考資料にのせておく。そして、傾き角の検出結果と基準角を比較したものを図5.12に示す。ただし、傾き角の検出結果は、12回の平均値をとった。

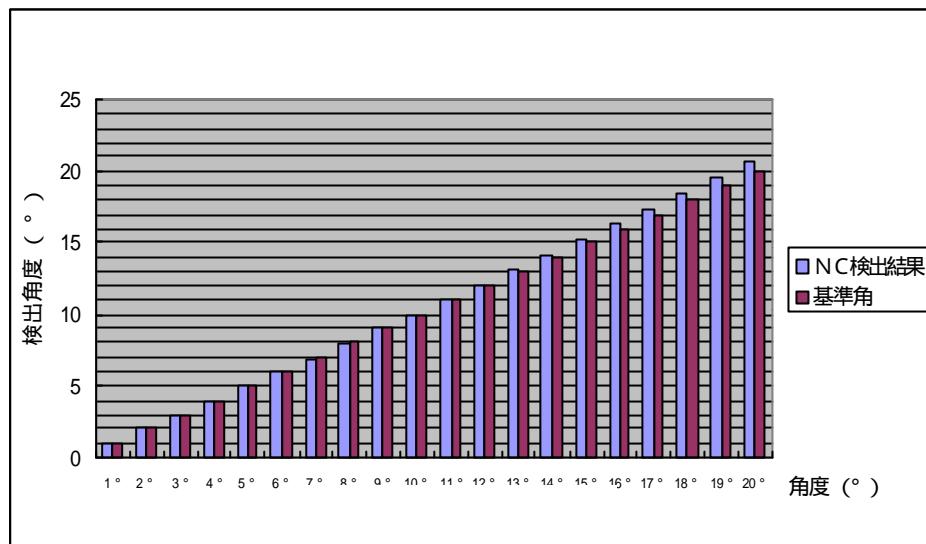


図 5.12 基準角に対しての NC 検出結果

特に、検出角と基準角との差の角度を表したものを図 5.13 に示す。

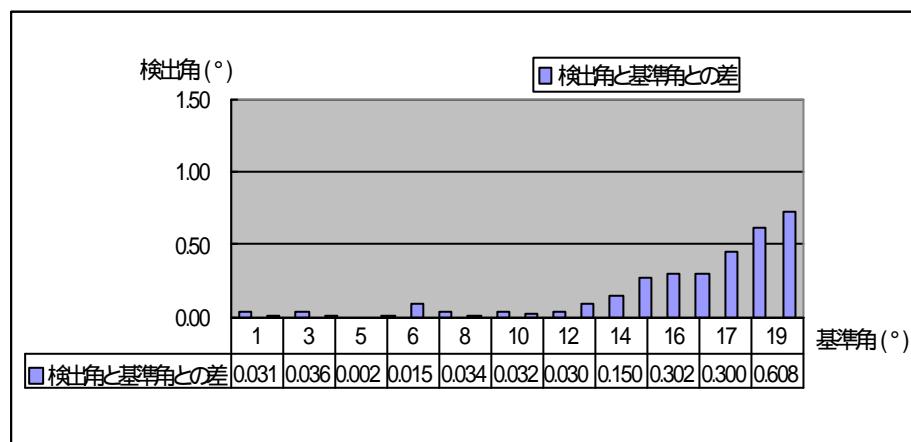


図 5.13 検出角と基準角の差

また、12回の検出結果のばらつきについて図 5.14 に示す。

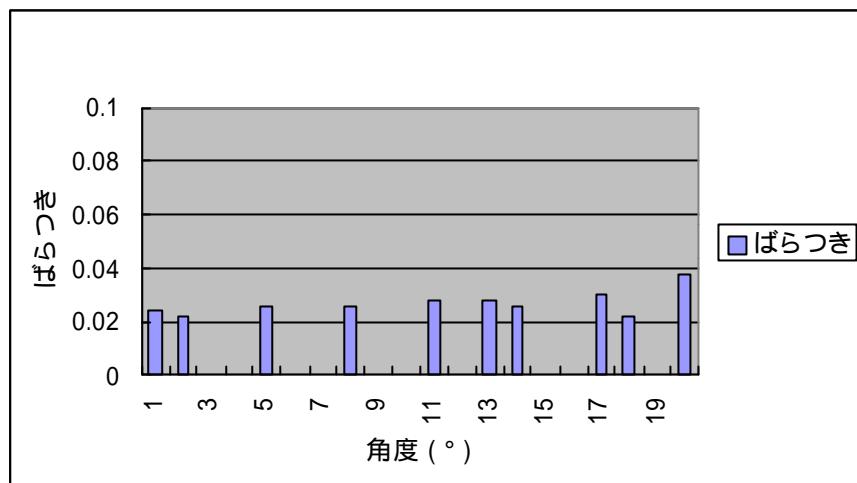


図 5.14 ばらつき

## 5.6 考察

- 1 . 今回は、自作の NC プログラムにより角度検出を行なった。プログラムについては、自動で 12 回の連続端面位置決めを行ない角度変換をしてゆくことが可能である。
- 2 .  $1^\circ \sim 20^\circ$ までの基準角と検出角の角度差を求めた結果、 $12^\circ$ までは  $0.036^\circ$  以内の誤差であった。 $13^\circ \sim 20^\circ$ については、角度差が、 $0.091^\circ \sim 0.724^\circ$ となり、大きな誤差となった。
- 3 . また、各角度に対する検出角のばらつきについては、角度に関係なくばらつく結果となり、ワークの面粗さによるものと思われる。
- 4 . 今後は、いくつかの面粗さの違うワークにおいて、傾き角がどれだけ精度良く検出できるかを比較していく必要があると考える。

## 第6章 結言

インターネットの遠隔操作研究は、データ転送の途中に何らかの外乱が入り、安全性の面で問題が発生する可能性があると考えられたので、今回のインターネットによる通信時間の測定を行うにいたった。実験の結果、専用回線でのインターネット通信時間は、思ったより速かったので、とくに放電加工機のような加工進行が比較的遅い加工では、加工状態の監視と、それに基づく遠隔操作は、非常に有効性が高いといえる。

又、画像処理によるワーク座標位置決めに関しては、今回、4種のソフト開発を中心を作成し、ほぼワーク座標検出への応用できるライブラリは確定した。今後、照度やワークによる違いなどの条件に対応して、新たなフィルタ処理を加える必要があるが、それらをクリアできれば、より完全な解析が可能となる。

ワークの傾き角検出については、これも最初の段階としてプログラムの作成を中心に行った。よって、NCで自動的に傾き角度の検出を連続的に行うことが可能となった。実験では比較的面あらさのないワークを使って実験を行ったが、傾き角度12°付近までは、ほぼ確実に角度を検出することが可能であった。また、これも、今後、面あらさの違うワークに替え、その比較をする必要があると思われる。

インターネットについては、近年ブロードバンドと呼ばれる高速大容量のインターネットサービスなどが、昨年から一気に広がりを見せている。現在のアナログ電話回線（最大56Kbps）、ISDN（64Kbps）、ADSL（1.6Mbps）、CATV（約800Kbps）そして光ファイバー（10Mbps）というように、一気にさまざまな方式で高速ネット時代を迎えようとしている。その上で、遠隔操作は非常に有用であり、高速になるほどより多くのデータ転送が短時間で可能になるであろうし、またコスト面においても実用的なものになるであると考えられる。

したがって本研究は、将来、放電加工機のワーク座標自動位置決めの下に、実用性の高いインターネットを利用した遠隔操作を実現できるようにすることが最終目的であり、それにはこれからも種々な問題点を改善し、実現に向けて研究を続ける必要がある。

本研究を行なうにあたって、指導教官である小林和彦教授をはじめ、実験を共同で行なった研究室の方々には、心より感謝申し上げる。

### 参考文献

- 斎藤長男 監修 放電加工のしくみと100%活用法：技術評論社
- 江尻正員 監修 画像処理産業応用総覧 上巻：フジテクノシステム
- 電機加工学会全国大会 1999：電機加工学会

## 参考資料

### 傾き角検出NC プログラム

|                       |                 |
|-----------------------|-----------------|
| G91;                  | G01X10.0M25;    |
| G29Y1;                | G29Y1;          |
| G14Y1;                | G14Y1;          |
| G01X10.0M25;          | G103AH3BH1CH2;  |
| G29Y1;                | G105AH4BH3C10;  |
| G14Y2;                | G104AH9BH4CH5;  |
| G103 AH03 BH2 CH1;    |                 |
| G105AH4BH3C10;        | G01X10.0M25;    |
| G105AH5B180.C3.14159; | G29Y1;          |
| G104AH6BH4CH5;        | G14Y2;          |
|                       | G103AH3BH2CH1;  |
| G01X10.0M25;          | G105AH4BH3C10;  |
| G29Y1;                | G104AH10BH4CH5; |
| G14Y1;                |                 |
| G103AH3BH1CH2;        | G01X10.0M25;    |
| G105AH4BH3C10;        | G29Y1;          |
| G104AH7BH4CH5;        | G14Y1;          |
|                       | G103AH3BH1CH2;  |
| G01X10.0M25;          | G105AH4BH3C10;  |
| G29Y1;                | G104AH11BH4CH5; |
| G14Y2;                |                 |
| G103AH3BH2CH1;        | G01X40.0M25;    |
| G105AH4BH3C10;        | G01Y30.0;       |
| G104AH8BH4CH5;        | G29X-1;         |

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| G14X1;          | G01Y10.0M25;    |
| G01Y10.0M25;    | G29X-1;         |
| G29X-1;         | G14X1;          |
| G14X2;          | G103AH3BH2CH1;  |
| G103AH3BH1CH2;  | G105AH4BH3C10;  |
| G105AH4BH3C10;  | G104AH15BH4CH5; |
| G104AH12BH4CH5; | G01Y10.0M25;    |
| G01Y10.0M25;    | G29X-1;         |
| G29X-1;         | G14X2;          |
| G14X1;          | G103AH3BH1CH2;  |
| G103AH3BH2CH1;  | G105AH4BH3C10;  |
| G105AH4BH3C10;  | G104AH16BH4CH5; |
| G104AH13BH4CH5; | G01Y10.0M25;    |
| G01Y10.0M25;    | G29X-1;         |
| G29X-1;         | G14X1;          |
| G14X2;          | G103AH3BH2CH1;  |
| G103AH3BH1CH2;  | G105AH4BH3C10;  |
| G105AH4BH3C10;  | G104AH17BH4CH5; |
| G104AH14BH4CH5; | G01Y10.0M25;    |
|                 | %               |

## ワークの傾き角検出結果

|      | 1 °      | 2 °      | 3 °      | 4 °   | 5 °      |
|------|----------|----------|----------|-------|----------|
| 1回目  | 0.969    | 1.938    | 2.964    | 3.99  | 4.959    |
| 2回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 3回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 4.959    |
| 4回目  | 0.912    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 5回目  | 1.026    | 1.938    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 6回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 4.959    |
| 7回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 8回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 9回目  | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 10回目 | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 11回目 | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 12回目 | 0.969    | 1.995    | 2.964    | 3.99  | 5.016    |
| 平均   | 0.969    | 1.986    | 2.964    | 3.990 | 5.002    |
| 標準偏差 | 0.024305 | 0.022187 | 7.19E-08 | 0     | 0.025779 |

| 6 °   | 7 °   | 8 °      | 9 °   | 10 °     |
|-------|-------|----------|-------|----------|
| 5.985 | 6.897 | 7.923    | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.923    | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.923    | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.98     | 9.006 | 10.032   |
| 5.985 | 6.897 | 7.966    | 9.006 | 10.032   |
| 0     | 0     | 0.025779 | 0     | 2.03E-07 |

| $11^\circ$    | $12^\circ$    | $13^\circ$    | $14^\circ$    | $15^\circ$    |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 11.001        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.053        | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.053        | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.053        | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| 11.058        | 11.97         | 13.11         | 14.193        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.053        | 14.193        | 15.276        |
| 11.058        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| 11.058        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| 11.001        | 11.97         | 13.11         | 14.193        | 15.276        |
| 11.058        | 11.97         | 13.11         | 14.136        | 15.276        |
| <b>11.020</b> | <b>11.970</b> | <b>13.091</b> | <b>14.150</b> | <b>15.276</b> |
| 0.028065      | 0             | 0.028065      | 0.025779      | 2.03E-07      |

| $16^\circ$    | $17^\circ$    | $18^\circ$    | $19^\circ$    | $20^\circ$    |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 16.302        | 17.271        | 18.468        | 19.608        | 20.805        |
| 16.302        | 17.271        | 18.468        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.271        | 18.411        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.271        | 18.411        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.748        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.748        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.691        |
| 16.302        | 17.271        | 18.468        | 19.608        | 20.748        |
| 16.302        | 17.271        | 18.468        | 19.608        | 20.748        |
| 16.302        | 17.328        | 18.468        | 19.608        | 20.748        |
| <b>16.302</b> | <b>17.300</b> | <b>18.459</b> | <b>19.608</b> | <b>20.724</b> |
| 4.07E-07      | 0.029767      | 0.022187      | 0             | 0.038108      |