

卒業論文

工作機械遠隔操縦用 ジョイスティックの開発

1P - 48P 完

平成 15 年 2 月 2 8 日提出

指導教官 長尾 高明 教授

知能機械システム工学科

1 0 3 0 0 9 9 岡本 太郎

目次

目次

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 1 | 序論 | 4 |
| 1.1 | 研究の背景 | 5 |
| 1.2 | 従来の研究 | 6 |
| 2 | 加工の臨場感通信システム | 7 |
| 2.1 | 臨場感通信システムとは | 8 |
| 2.2 | 臨場感通信システムにおける操作システムの必要性 | 10 |
| 3 | 操作システムの構成 | 11 |
| 3.1 | ハードウェアの構成 | 12 |
| 3.1.1 | ジョイスティック | 13 |
| 4 | 力センサの製作 | 27 |
| 4.1 | 力センサ | 28 |
| 4.1.1 | 力の検出 | 28 |
| 4.1.2 | 力センサの設計に用いる1次変形の計算式 | 30 |
| 4.1.3 | 力センサの製作 | 31 |
| 5 | 力センサの検定 | 35 |
| 5.1 | 力センサの検定実験 | 36 |
| 6 | 結果・考察 | 43 |
| 6.1 | 結果 | 44 |
| 6.2 | 考察 | 44 |
| 7 | 今後の展望 | 46 |
| | 謝辞 | 47 |
| | 参考文献 | 48 |

第 1 章

序論

1.1 研究の背景

最近の急激なハード、ソフトの展開によって、ネットワークの重要性が改めて認識されている。発展したネットワークは人と人との物理的な距離を越えて結びつけるもう1つの道というべき存在になりつつある。加工においても作業者が加工の現場において機械を操作するという従来の方法から加工の現場と作業者を切り離し、ネットワークによって2つの場所を結びつけるという遠隔操作技術が注目されてきている。

加工の現場と操作室を別にすることは、操作の環境を快適なものにできるという利点があるが、利点はそれだけではない。例えば設計者はデザインルームにいながらにして実験的な加工を行なうことができるようになる。また、ネットワークによる情報の標準化は操作者に対してコンピュータの手助けを受け易くするだろう。つまり遠隔操作技術は、これまで機械に近すぎた人はもっと離れるチャンス、機械に遠すぎた人にはもっと近づくチャンスを与えてくれる技術だといえるだろう。

また、技術の進歩は距離的に遠いだけでなく、通常の生活の感覚とはまったく別の物理法則が支配する世界へも足を踏み入れている。電子顕微鏡や走査型トンネル顕微鏡 (Scanning Tunnel Microscope) などの開発により、マイクロあるいは原始レベルの世界を「見る」ことができるようになった。さらにマイクロ・マシンあるいはナノ・ロボットによってこのようなマイクロの世界で物に「さわる」、あるいは「加工する」といったことができるようになってきている。いわゆる「マイクロマシニング」という研究である。マイクロマシニングを行なう際には、実際の音を聞くことは不可能であり、物を触っても感触がわからない。もちろん人間の「感覚」も役に立たない。このような環境では、それらのことをどのように考慮し加工していけば良いのだろうか。

宇宙空間もどんどんと通常の経済原理のなかに組み込まれつつあり、実際に宇宙空間で製品を作ろうという話が冗談ではなくなってきている。しかし、それと地球から宇宙空間の製品を加工する現場にどのように情報を送れば良いのだろうか、また、どのようにして時間の遅れを処理すれば良いのだろうか。

1.2 従来の研究

従来の研究では、加工の現場と操作者を切り離してネットワークで2つの場所を遠隔操作で結びつけ、実際に加工をすることができるようにはなっている。しかし2つの場所を切り離したことで実際の現場での様子はコンピュータの操作画面と数値、現場の映像というかたちでしか操作者には伝わってこない。以上のことから従来の研究では加工の現場と操作者を切り離すことはできても、実際に現場で操作しているように感じさせる加工の臨場感通信システムは完成されていない。

第 2 章

加工の臨場感通信システム

2.1 臨場感通信システムとは

加工の臨場感通信システムとは、工作機械を操作する操作者と、工作機械および被加工物が異なる世界にあるときに、操作者にあたかも目の前で加工をしているように感じさせるシステムです。このシステムを実現するには実際の加工の際に感じているように操作者に感じさせる必要がある。

加工における異なる世界とは人間が備える感覚器官では直接知覚することができない遠隔地や微小世界、あるいは、真空中、宇宙空間、水中等の環境を意味する。これらの世界と人間の存在する空間とを加工反力、加工熱、加工音、加工状態等の情報と機械の制御情報とによって、有機的に結合するのが本システムである。このような環境に設置された対象を加工、操作しようとするとき次のような問題点が生じる。

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

これらの諸問題を克服するシステムが加工の臨場感通信システムである。このシステムを用いることによって、以下のような利点が生じる。

1. 対象となる被加工物がどこにあっても、同じ感覚で操作することができる。
2. 対象となる被加工物がどのような大きさのものであっても、同じ感覚で操作することができる。

2. 対象となる被加工物がどのような大きさで、どこにあっても、同じオペレーションルームで作業をすることができる。

以上の利点をもう少し詳しく見ていく。

1. 操作者と被加工物の位置関係

加工の臨場感通信システムが完成するとオペレーションルームとマシンサイトの物理的な位置関係はもはや問題とはならない。例えばオペレーションルームとマシンサイト対蹠地にあっても操作可能となる。

2. 操作者と被加工物の相対的大きさの問題

従来、微細加工をする際には、電子顕微鏡の画面だけを頼りに加工を行っていたが、本システムが完成するとあたかも手で扱っているかのような加工を行なうことができる。

3. オペレーションルームの同一性

上記の2点を可能とするようなオペレーションルームはそのシステムとしての類似性が強い。従って、1つのオペレーションルームで遠隔地にあるマシンサイトでの加工を行なうことも可能である。

これらの数々の特徴を持つシステムが加工の臨場感通信システムである。

2.2 臨場感通信システムにおける操作システムの必要性

人間が実際に工具を使って加工する時のことを考えてみると。加工とは根本的に考えてみるならば、「被加工物に工具を接し、力を与え、かつ工具の位置を動かすことによって非加工物に形状を好ましい形状に変化させること」といえるだろう。このとき工具と被加工物を持っているのは手である。手は3次元の位置がわかり、また力覚、触覚、温覚といった感覚を備えている。したがって、手を媒介することによって、位置を直観的に知ることができるのはもとより、加工反力によってもたらされる情報は非常に多くの情報を操作者に与えてくれるだろう。例えば手に返ってくる振動によって加工状態が分かる。また、加工の際の力加減といったものも感覚的に自由に変えることができる。

以上のようなことから操作者の手からの力情報を受け取り、操作者に工具の位置・反力をフィードバックするような装置を導入することによって、加工の臨場感通信システムが完成するのではないかと思われる。

第 3 章

操作システムの構成

3.1 ハードウェアの構成

ここで本年度の研究の用いた操作システムのハードウェアの構成について述べる。操作システムを実現するためには3次元位置を操作者に伝え、また操作者の手からの力を検出する機構が必要である。この部分が3次元ジョイスティック部である。

3次元ジョイスティックはマシニング・センタの座標系が直行座標系であるので、それにあわせて直行座標系とした。各軸はリニアガイド、研磨ボールネジ、ステッピングモータを使用した直動機構を組み合わせた電動スライダを利用した。

人間の力を検出するためには力センサが必要である。本研究では平行平板構造を3つ組み合わせたセンサを製作した。力センサの出力はストレイン・アンプを介してアナログな電圧情報に変換され、A/D 変換ボードに入力されデジタル信号となり、コンピュータに取り込まれる。

また、ジョイスティック側からではなく、コンピュータ側から電動スライダを動かすときは、PCPG46 というモータ・コントロール・ボードと A/D 変換ボードを搭載したコンピュータから直接電動スライダにパルス信号を送り動かすこともできる。

3.1.1 ジョイスティック

本研究で製作したジョイスティックはマシニング・センタにならって直行座標系をつかった。実際には本研究で使用したマシニング・センタでは、X 軸はワークのベット側、Y、Z 軸はツール側が動くようになっているが、ツールを固定した座標系からみればツールが X, Y, Z の 3 次元で移動すると考えられる。図 3.1 にその概略図をしめす。また、図 3.2 に全体の写真をしめす。

直行座標系であるので、各軸は直線運動をする機構が必要となる。そのための機構として電動スライダを使用した。これはそれ自体にステッピング・モータが取り付けられているし複数の結合も可能である。

現在 3 分力・力センサはこのジョイスティックのテーブル上部に取り付けられている。

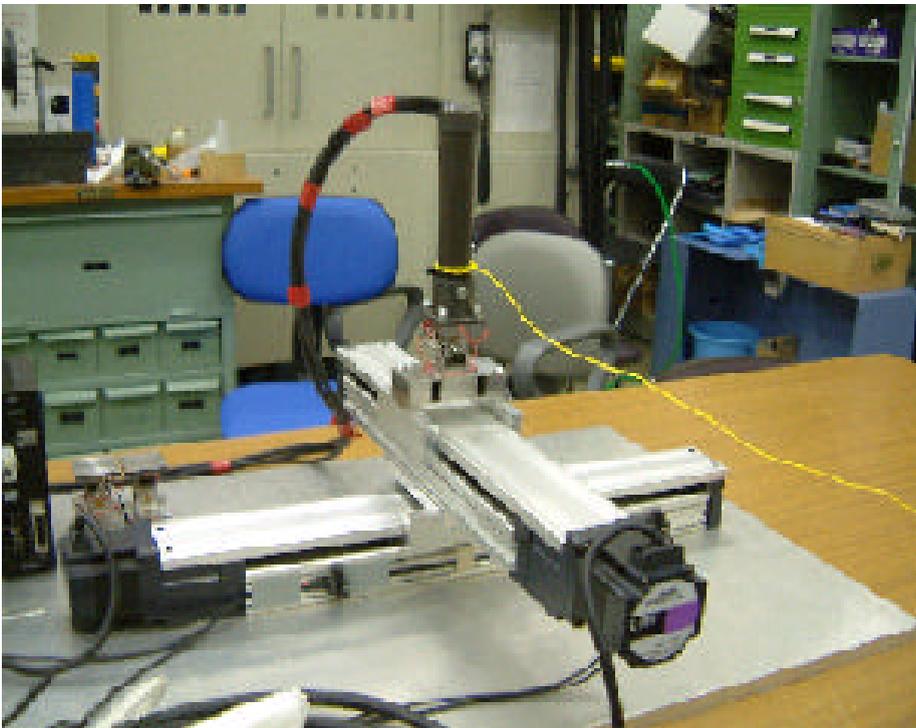


図 3.1 ジョイスティックの図

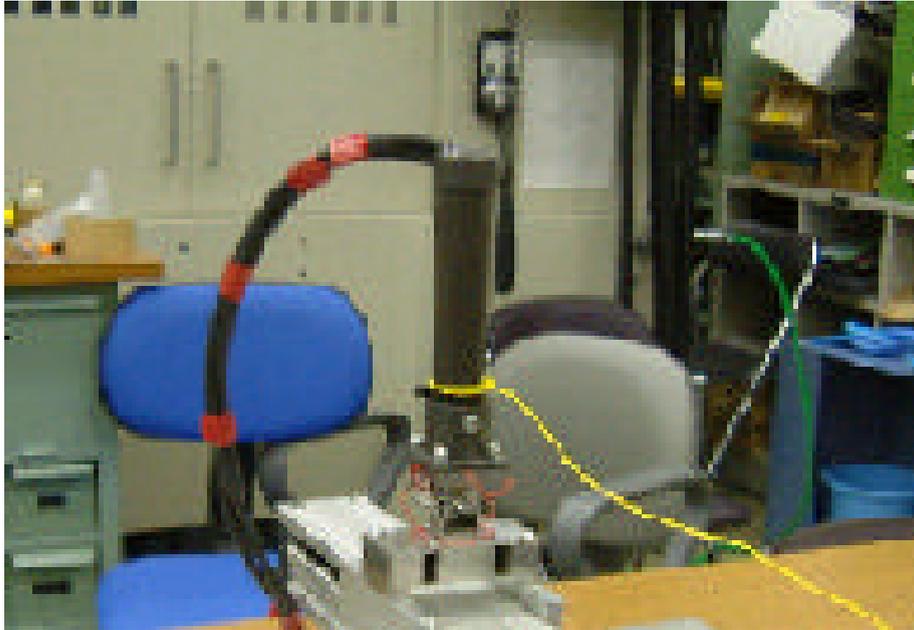


図 3.2 ジョイスティック

電動スライダ

使い易さを重視し、最適な制御をおこなうためにリニアガイド、研磨ボールねじ、ステッピングモータを一体化したオリエンタルモーター社製の SPF60B10 - 3SD を使用した。表 3.1 に電動スライダの仕様をしめす。

表 3.1 電動スライダの仕様
(オリエンタルモーター SPF 60B10 - 3SD)

| | | |
|------------|-----------|-------------------------|
| ストローク | mm | 300 |
| 最大速度 | mm/s | 500 |
| 水平方向最大可搬質量 | kg | 10 |
| 最大負荷モーメント | N・m(kgfm) | Mp:35 My:23 Mr:9 |
| 最大推力 | N(kgf) | 80 |
| 最大励磁保持力 | N(kgf) | 80 |
| 繰返し位置決め精度 | mm | ±0.01 |
| 分解能 | mm/step | 0.01 |
| ロストモーション | mm | 0.03以下 |
| 質量 | kg | 4.2 |
| 使用周囲温度 | | 0 ~ +40 |
| センサ | | HOME, +LS, -LS 3個添付(可動) |

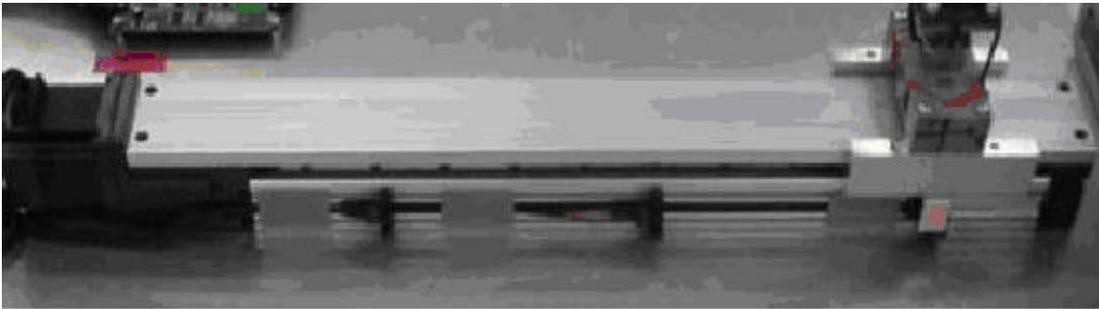


図 3.3 電動スライダー

力センサ

操作者の手からの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。3次元ジョイスティック自体がストローク400mm程度であることや人間の手が使うものであることを考えると、なるべくコンパクトなサイズにせざるをえない。このセンサは研究室のワイヤ・カット放電加工機を用いて製作した。力センサの仕様を表 3.2 に示す。実際に使用する場合にはセンサの上部にプラスチックの棒を装着し、それを持って操作することになる。

力センサの製作と検定方法は 4 章と 5 章でのべる。

表 3.2 力センサの仕様

| | |
|----|----------------------|
| 材質 | ステンレス |
| 構造 | 平行平板構造 |
| 定格 | 2 [kgf] |
| 出力 | X軸 170 [μ st.] |
| | Y軸 337 [μ st.] |
| | X軸 116 [μ st.] |

モータ・ドライバ

電動スライダを制御するためのモータ・ドライバとして同じくオリエンタルモーター製を使用した。
このモータ・ドライバの仕様を表 3.3 にしめす。

表 3.3 モータ・ドライバの仕様
(オリエンタルモーター LDS1)

| | | |
|-------------------|--------|----------------------|
| 電源入力 | 電圧 | 100V ~ 115V相当 |
| | 周波数 | 50/60Hz |
| | 電流 | 5A |
| 駆動方式 | | 正弦波 PWM方式 |
| 最大入力パルス周波数 | | 250kHz |
| 入力形式 | 等価入力抵抗 | 220 |
| (フォトカプラ) | 入力電流 | 7 ~ 20mA |
| | 信号電圧 | H:4 ~ 5V, L:0 ~ 0.5V |
| 出力形式 | 外部使用条件 | DC30V以下、15mA以下 |
| (フォトカプラ・オープンコレクタ) | ドライバ出力 | HD26C31相当 |
| 冷却方式 | | 自然空冷方式 |



図 3.4 モータ・ドライバ

モータ・コントロールボード

PCPG - 46 はで最高出力周波数 4.096MPPS 及び速度オーバーライト、移動量オーバーライト、直線加減速、自動 S 字 (放物線) 加減速を実現した、PCI バス対応の高機能 4 軸モータコントロールボードである。このボードの仕様を 3.4 表にしめす。

対応モータは、ステッピングモータ及びサーボモータ。

表 3.4 モータ・コントロールボードの仕様 (コスモテックス PCPG46)

| | |
|--------|--|
| 専有アドレス | 64アドレス使用 |
| 外形寸法 | 106.68 × 174.63mm (コネクタ部、パネル部含まず) |
| 入力電源 | DC + 5V ± 0.25V |
| 消費電流 | Min 200mA Max 1000mA |
| 制御機能 | PRESET PULSE DRIVE (指定パルス数ドライブ) CONTINUOUS DRIVE (連続ドライブ) SIGNAL SEARCH 1,2 DRIVE (信号検出ドライブ) 最高出力周波数...4.096MPPS 速度オーバーライド機能 移動量オーバーライド機能 直線加減速機能 自動S字加減速機能 出力パルス数管理用28Bit Counter内蔵 (各軸毎) フィードバックパルス数管理用28Bit Counter内蔵 (各軸毎) 偏差量自動算出機能 急停止機能 (入力信号、コマンド書き込み 何れも可能) 減速停止機能 (コマンド書き込み) リミット停止機能 (急停止、減速停止 何れも可能) 最大4軸制御 (同時ドライブ可能) |
| 出力信号 | パルス出力等...ラインドライバによる差動出力 ドライバ制御出力...フォトカプラによるオープンコレクタ出力 |
| 入力信号 | 機械系入力及び汎用入力... + 12 ~ 24V フォトカプラ入力 |

| | |
|----------|--|
| | ドライバステータス入力...+12~24V フォトカプラ入力 フィードバックパルス入力...ラインレシーバーによる差動入力 |
| 使用可能ドライバ | ステッピング及びサーボモータドライバ パルス列入力型(1パルス/2パルス 何れも可能) 差動入力、フォトカプラ入力、TTL入力型 |



図 3.5 モータ・コントロールボード
(PCPG - 46)

A/D 変換ボード

ストレインアンプを通して、電圧に変換された力センサの出力を読み取るために A/D 変換ボードを使用した。使用した A/D 変換ボードはインターフェイス社の PCI 315 である。このボードの仕様を表 3.5 に示す。

本研究で使用したストレイン・アンプの出力が $\pm 10V$ であるので、A/D ボードも $\pm 10V$ のモードを使用した。

表 3.5 A/D 変換ボードの仕様
(インターフェイス PC - 3155)

| | |
|-----------------------|--|
| 入力チャンネル数 | シングルエンド16チャンネル、差動8チャンネル |
| 入力形式 | マルチプレクサ方式 |
| 入力レンジ | バイポーラ : $\pm 1V, \pm 2.5V, \pm 5V, \pm 10V$ |
| 入力インピーダンス | 10M ($\pm 5\%$) |
| 入力保護 | ボードの電源ON時 : $\pm 35V$ |
| | ボードの電源OFF時 : $\pm 20V$ |
| 分解能 | 16ビット |
| AD変換器 | 使用素子 :AD676J相当品 |
| 相対精度 | $\pm 2LSB$ (MAX) (25) |
| 誤差 | $\pm 0.10\%$ (MAX) (0 ~50) : $\pm 10V$ |
| | $\pm 0.15\%$ (MAX) (0 ~50) : $\pm 1V, \pm 2.5V, \pm 5V$ |
| 変換時間 | チャンネル固定時 :10 μ s |
| | チャンネル切替時 (高速モード) ^{*1} :10 μ s |
| | チャンネル切替時 (通常モード) :20 μ s |
| アナログトリガ ^{*2} | トリガレベル設定値 (電圧) :2レベル |
| | 比較電圧をDAにて設定 ($\pm 10V$ (MAX)) |
| | アナログトリガ出力 (TTL) ^{*4} :1点 |
| FIFO容量 | 32768サンプル/ボード |
| 対応バススロット | PCIローカルバス (Rev.2.1以上) |

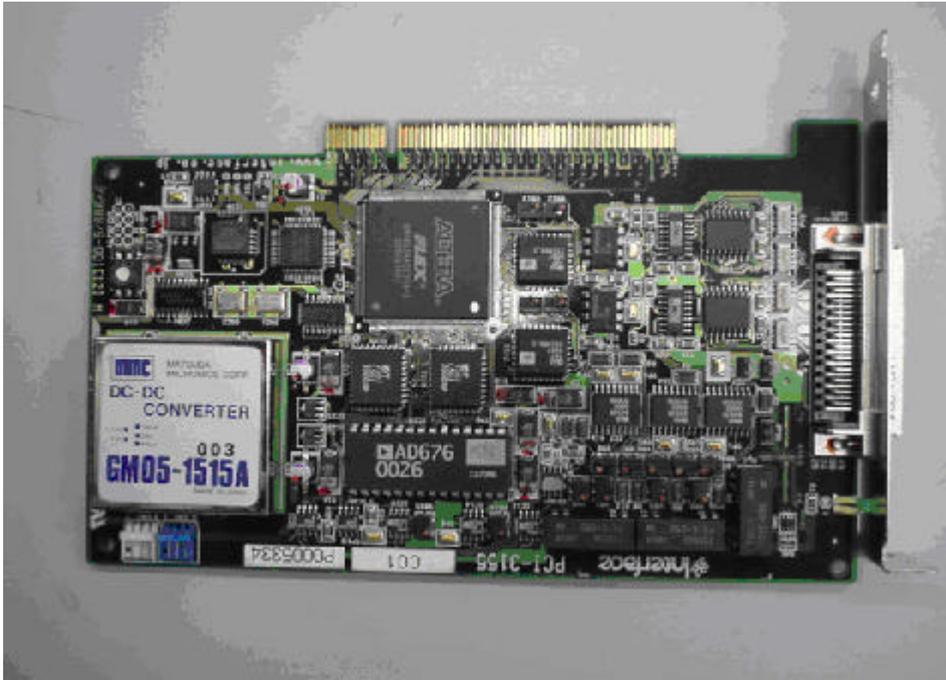


図 3.6 A/D 変換ボード

ストレイン・アンプ

カセンサはストレイン・ゲージをつかって出力するが、それを電圧に変換するためにストレイン・アンプを使用した。使用したアンプの仕様を表 3.6 にしめす。

使用したストレイン・アンプは $\pm 10V$ の出力をするが、A/D ボードの入力電圧にちょうど $\pm 10V$ のモードがあったため、直接ストレイン・アンプの出力を A/D ボードに入力している。

表 3.6 ストレイン・アンプの仕様

| | |
|-----------|---|
| 実装チャンネル数 | 8 ch |
| 表示部 | 表示桁数...4桁LED 変換回数...約3回/秒 単位自動表示... (V,ACV.) |
| メモ리카ード部 | シグナルコンディショナの設定値の記憶、再設定 (4通り) |
| モニタ出力部 | モニタチャンネルセレクトスイッチにより選択されたチャンネルのアナログ出力が取り出せる。 同時に、表示部に出力される。 |
| 外部インタフェース | GP IB、RS 232C 標準装備 (同時使用不可) 外部インターフェイスを利用して、ユニットの各設定、ステータスの読み出し可能 (指定CH、グループ、全CH) |
| 同期用出力 | ブリッジ電源...電圧 2V rms 周波数 25 kHz又は 5kHz リモート機能/全チャンネル...オートバランス \pm CAL,オートレンジ、セルフチェック |
| 適用ゲージ抵抗 | 120 ~ 1k |
| 平衡調整方式 | 抵抗自動バランス |
| 平衡調整範囲 | 抵抗分 \pm 約2% ($\pm 10000 \times 10^{-6}$ ひずみ) |
| 電圧感度 | 200×10^{-6} ひずみ入力にて5V以上 (VAR最大) |
| 測定範囲 | 200、500、1k、2k、5k $\times 10^{-6}$ ひずみ/FS、OFF (VAR最大、BV=2V) |
| 非直線性 | $\pm 0.2\%$ FS以内 |
| 周波数特性 | DC ~ 10 kHz $\pm 10\%$ |
| 耐震性 | 3G (29.4m/s ²) |
| 耐電圧 | AC 1 kV 1分間：コンディショナ入力端子~ケース間 |
| 使用温度湿度範囲 | -10 ~ 40 、20 ~ 85%RH以内 |



図 3.7 ストレイン・アンプ

第 4 章

カセンサの製作

4.1 カセンサ

本操作システムに最低限必要な力情報は3軸力である。そこで3軸力の検出が可能で小型のカセンサを製作した。カセンサは平行平板をもちいたもので、各軸とも4ゲージとした。

4.1.1 力の検出

加工で生じている力を検出することは、現象の解明を求めるにせよ、制御系を構築するにせよ、必須の事柄である。加工で生じる力はもともと多分力である。このため、X,Y,Zの3軸方向の力や3軸まわりのモーメントをそれぞれの成分に分離して検出する多軸力センサは、従来の力学現象の解明に用いられてきた。一方近年になって、ロボット、加工機械、建設機械などの力制御、作業状況の把握、遠隔操作などでも多軸力センサの必要性が高まってきた。これは、たとえば、力による加工においては、工具と被加工物との間に作用している力は、方向についても、位置についても本質的に3次元であり、そこで作用している力の位置や大きさを知るには、工具側から検出するにせよ、被加工物側から検出するにせよ、本来、力の3軸方向の各成分とモーメントの3軸まわりの各成分、合計6成分を検出しなければならないからである。別のいい方をすれば、工具と被加工物のどちら側からであれ、加工で生じている3分力と3モーメントが検出できれば、加工で生じている力の大きさや方向がわかるだけでなく、そこで生じている現象を正しく把握することができ、ひいては適切な制御ができることになる。

このような目的に使用される多軸力センサには、実に多くのことがらが要求される

力やモーメントの各成分が他成分の干渉なく検出できること。

剛性・固有振動数が高く、センサを挿入したことで系の力学特性ができるだけ変わらないこと。

十分な感度をもつこと。

センサ自体が運動部分に取り付けられることが多いので、軽量でコンパクトなこと。

長期安定性、耐環境性に優れること。

コストが安く信頼性が高いこと。 などである

このような多くの要求を満たすセンサとして、平行平板構造がある。その多くは、これらの構造にひずみゲージを組み合わせたものである。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にのみ変形し、薄板の根元表面に引張りおよび圧縮のひずみが生じる。このひずみは2枚の薄板の根元の合計4ヶ所に貼りつけられたひずみゲージで電機抵抗に変換され、ブリッジ回路で電圧に変換される。このようにして、平行平板構造は1軸方向の力をほかの力やモーメント成分の干渉を受けずに検出することができる。これらの構造は、上述の ~ の諸要求を満たすほかに、

構造の重ね合わせにより任意の多軸力センサを容易に構成することができる。

ひずみゲージ以外のほかの変換素子や piezo 素子などの能動素子との組み合わせが可能である。

などの特徴を持っている。

4.1.2 カセンサの設計に用いる 1 次変形の計算式

ここで、平行平板を用いたカセンサの設計の参考になるように、平行平板構造を用いたカセンサの設計に用いる 1 次変形の計算式を図 4.1 にしめす。例えば、S45C (調材質) の角棒に端部から 5mm の所に $l=1\text{ mm}$, $t=0.35\text{ mm}$ になるようにワイヤカットで角穴をあけ、薄板の根元にひずみゲージを貼ってカセンサをつくと、定格荷重 98 N (10 kgf) の場合、

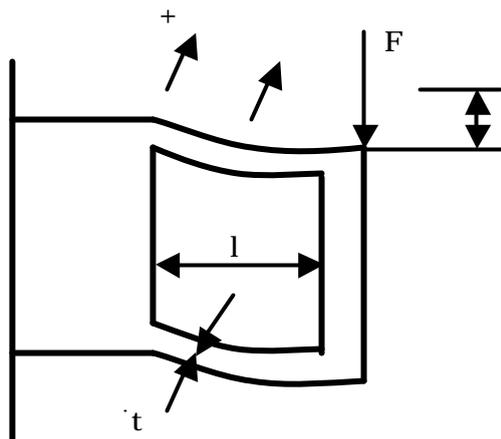
$$=0.28\ \mu\text{ m}$$

$$=290 \times 10^{-6}$$

$$K = 353\text{ N}/\mu\text{ m} (36 \cdot \text{ kgf}/\mu\text{ m})$$

$$F = 754\text{ Hz}$$

となる。これを実際につくってみると、種々の簡略化や製作誤差にもかかわらず、出力(約 4)、剛性、固有振動数とも、この簡略計算の約 80%程度のものが得られ、平行平板構造の性能が優れていることがわかる。



幅 : b

可動部質量 : m

縦弾性係数 : E

たわみ $= \frac{Fl^3}{2Ebt^3}$

根元のひずみ $= \frac{3Fl}{2Ebt^2}$

剛性 $K = \frac{2Ebt^3}{l^3}$

固有振動数 $f = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2Ebt^3}{ml^3}}$

図 4.1 1 次変形の計算式

4.1.3 カセンサの製作

カセンサは第 4 章の 1.2, 1.3 を参考にし、3 次元ジョイスティック用に設計した。

操作システムに最低限必要な力情報は 3 軸力である。そこで 3 軸力を検出が可能で小型のカセンサとして平行平板構造を 3 つ組み合わせたものを製作し、各軸とも 4 ゲージとした。

カセンサは 3 軸方向の平行平板構造を小さなサイズに設計したためかなり複雑な加工をしなければならなかったが、コストや時間の問題や研究室に複雑な加工ができるワイヤカット放電加工機があったため自作することにした。使用したストレイン・ゲージはステンレス用の薄膜ゲージであるミネベア製の B FAE 2S 12 T23 を使用した。カセンサの材質はステンレスを使用した。

図 4.2 で 3 軸力カセンサの設計図をしめす。

図 4.3 で 3 軸力カセンサの写真をしめす。

図 4.4 でストレイン・ゲージを貼った場所をしめす。

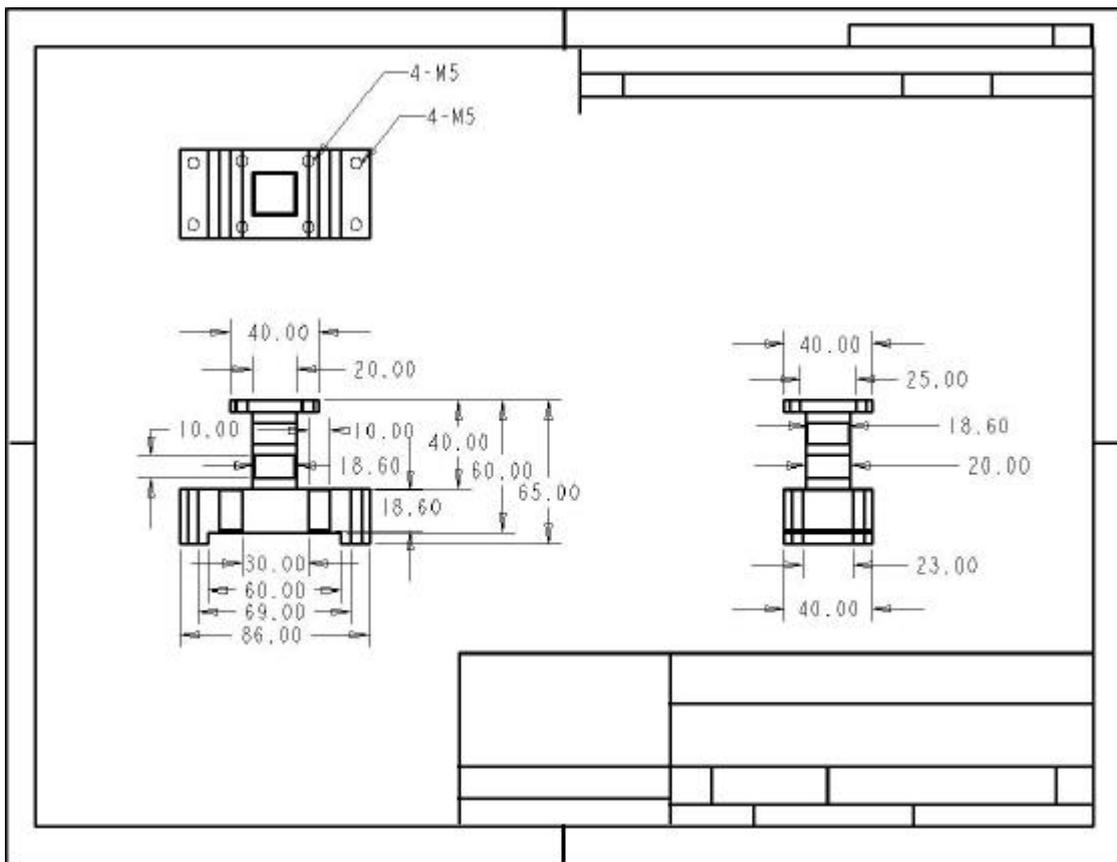


図 4.2 カセンサの設計図

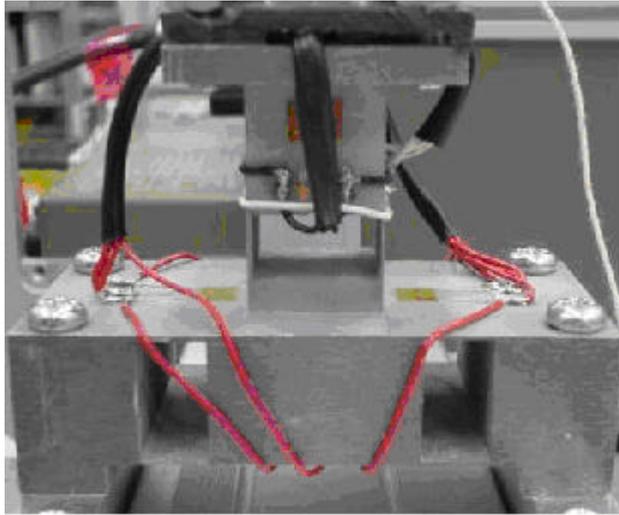
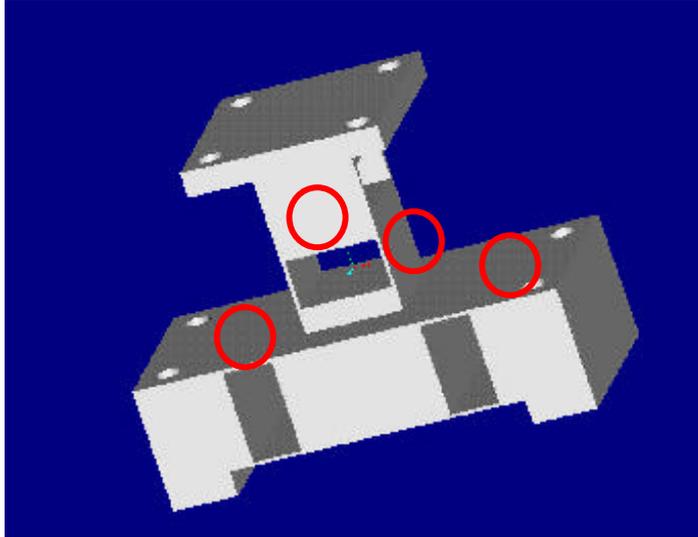


図 4.3 カセンサ



で囲んでいる所がゲージを貼った場所

図 4.4 ストレイン・ゲージを貼った場所

第 5 章

カセンサの検定

5.1 カセンサの検定実験

カセンサの検定をおこなった。検定方法は X, Y, Z のそれぞれの方向に滑車を使って 1 k g から 5 k g までの荷重をかけ、そのときの出力を測定するというものである。カセンサはセンサの先に棒を取り付け、それに力をかけることで X, Y 方向の力を測定することができるが、Z 軸はそれができないので棒の先に荷重をかけられるように器具を製作した。検定する力はおもりを使い、測定はストレイン・アンプを通し、A/D ボードとカウンタ・ボードを搭載した PC でおこなった。

カセンサの先に長さ約 150mm の棒を取り付けている。検定はこの棒の上部、低部の 2 ヶ所でおこなった。そのときの X, Y, Z 方向の歪みをそれぞれ表とグラフでしめす。



図 5.1 検定用コンピュータ



図 5.2 検定方法

前ページ図 5.2 検定方法の写真を図 5.3 でしめす。

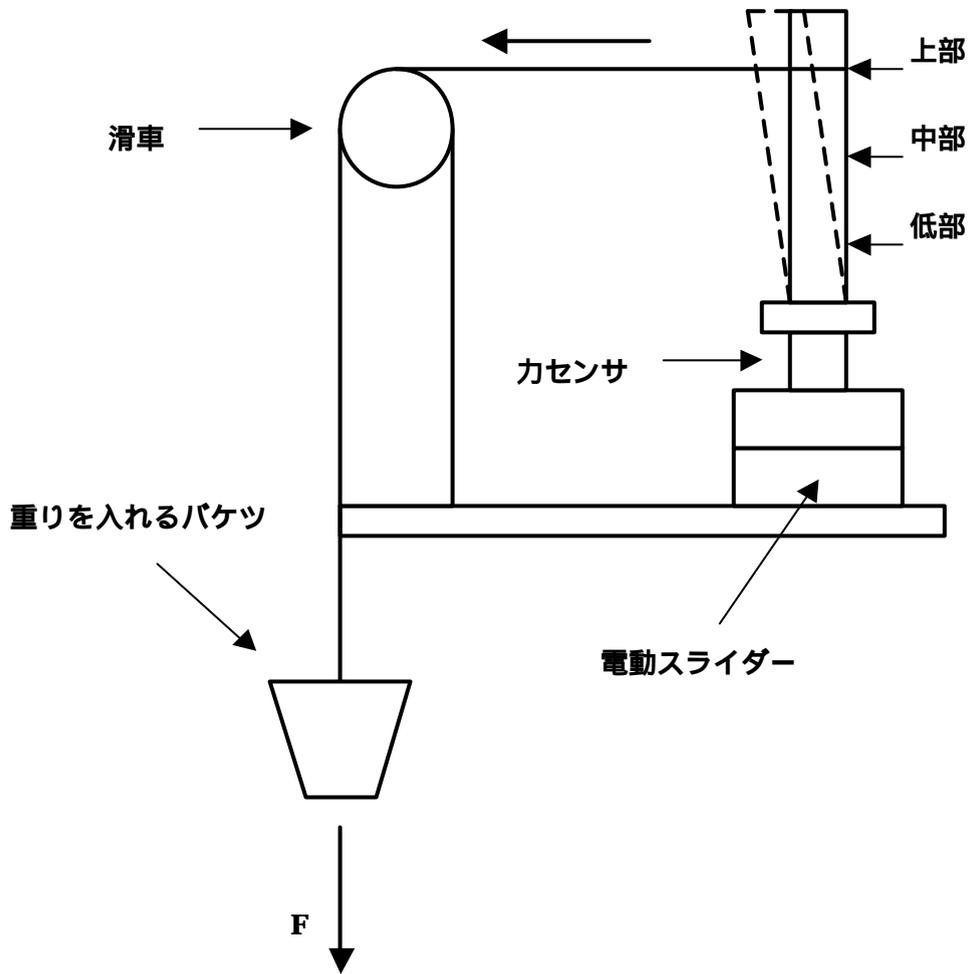


図 5.3 検定方法

| Fx(N) | X | Y | Z |
|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.193111 | 2.534778 | -3.25487 |
| 2 | 0.578111 | 3.925111 | -8.97931 |
| 3 | 1.03 | 4.674222 | -14.176 |
| 4 | 1.377111 | 5.374889 | -18.4049 |
| 5 | 1.663556 | 5.836 | -22.4804 |

表 5.1 X 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒上部)

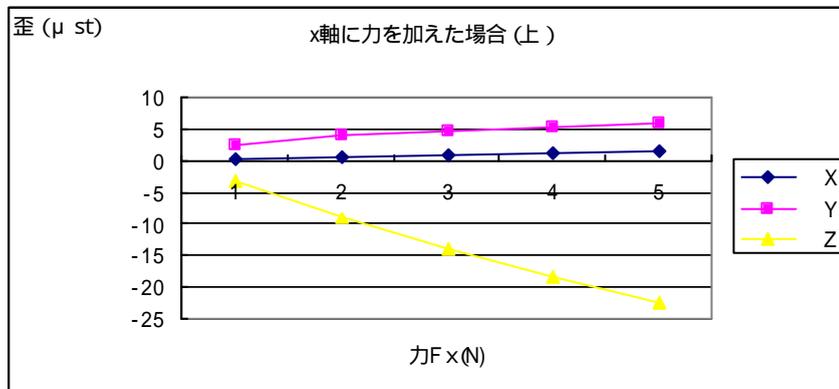


図 5.4 X 軸の歪みの数値をグラフにした (棒上部)

| Fy(N) | X | Y | Z |
|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.340889 | -1.731 | 3.665022 |
| 2 | 0.774222 | -1.88767 | 5.231356 |
| 3 | 1.291667 | -2.00656 | 6.3958 |
| 4 | 1.555222 | -2.65544 | 8.005133 |
| 5 | 1.983667 | -3.36322 | 9.480133 |

表 5.2 Y 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒上部)

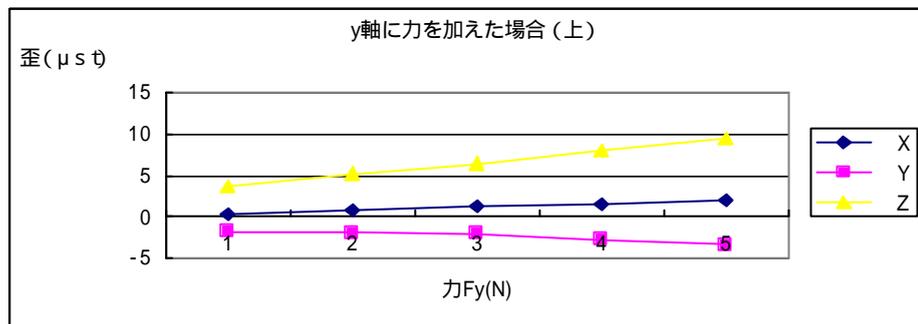


図 5.5 Y 軸の歪みの数値をグラフにした (棒上部)

| Fx(N) | X | Y | Z |
|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.528556 | 2.123222 | -1.49931 |
| 2 | 0.507111 | 2.739444 | -3.92153 |
| 3 | 0.904667 | 3.594 | -6.39709 |
| 4 | 1.207333 | 3.794889 | -8.7682 |
| 5 | 1.471 | 3.828667 | -10.5038 |

表 5.3 X 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒低部)

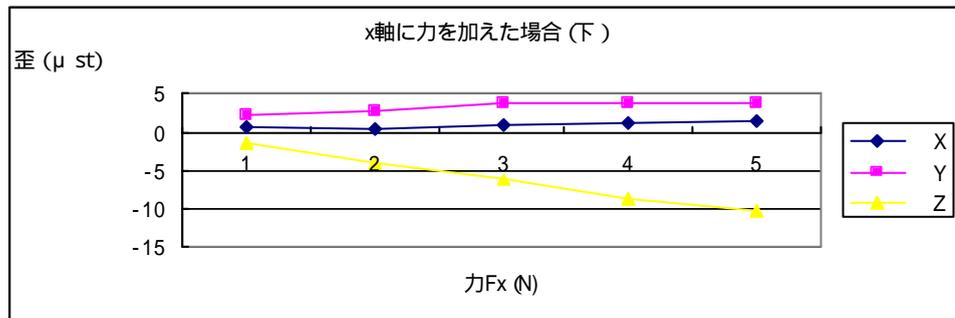


図 5.6 X 軸の歪みの数値をグラフにした (棒低部)

| Fy(N) | X | Y | Z |
|-------|----------|----------|----------|
| 1 | 0.340889 | -1.731 | 3.665022 |
| 2 | 0.774222 | -1.88767 | 5.231356 |
| 3 | 1.291667 | -2.00656 | 6.3958 |
| 4 | 1.555222 | -2.65544 | 8.005133 |
| 5 | 1.666667 | -2.66667 | 9.166667 |

表 5.4 Y 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒低部)

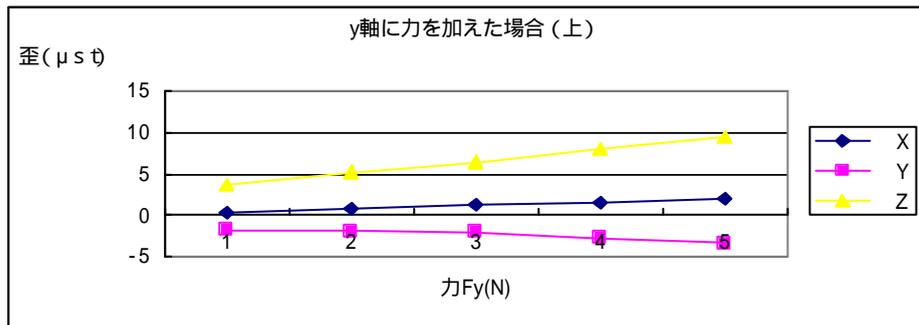


図 5.7 Y 軸の歪みの数値をグラフにした (棒低部)

第 6 章

結論・考察

6.1 結論

本研究では干渉力により x 軸と y 軸とで歪みに大きな差がでた。そのため、有効となるデータが少なく非干渉行列を求め、プログラムに組み込み、干渉力を完全になくすところまで研究が進まなかった。

6.2 考察

原因は次のことがあげられる。

- 1．ストレイン・ゲージ（歪みゲージ）を貼る場所が悪い。
- 2．干渉力のデータ数が少なすぎる。
- 3．3 分力・力センサの精度がよくない。
- 4．力センサの検定方法が悪い。
- 5．X, Y 軸はモーメントを考慮しなければならなかった。

第 7 章

今後の展望

今後の展望としては、干渉力をなくすこと。Z 軸を加え 3 次元ジョイスティックを製作すること。の 2 つがあげられる。

この 2 つを完成させるには次の事項が必要になると思われる。

- ・ ANSYS などを使い、ストレイン・ゲージ（歪ゲージ）を貼る場所を検討する。
- ・ 干渉力のデータ数を大量にとる。
- ・ 検定器具を見直し、力センサの検定方法を正確にする。
- ・ X, Y 軸のモーメントを考慮する。
- ・ センサ部分を製作しなおす。
- ・ Z 軸を新たに組み込み、3 軸にする。
- ・ 非干渉行列を求め、プログラムに組み込む。

以上の事項を参考にして今後の研究を進めて行けば良いのではないか。

本研究では、干渉力をなくすために有効となるデータがとれなかった。根本からもう一度見なおさなければならない。上記の事項をみなおし、実現させれば問題は解決すると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導、ご協力をいただきました。

本研究は、長尾高明教授のご指導を受け学び研究したものです。

研究全般にわたり、長尾高明教授には、貴重な御助言、御指導を頂きました。

終始御指導をいただいた同教授には厚く御礼申し上げます。

院生の上條さん、木崎さん、更谷さん、学部4年の高谷君には終始並々ならぬ御指導と励ましをいただき、研究において多大な御協力をいただきました。

小林研究室の院生の橋本さん、松井さん、和田さん、白倉さんには、研究における助言、ご協力そして日常生活におきまして大変お世話になりました。

学部4年の浅田君には、実験装置の片付けを手伝っていただきました。

小林研究室の小山君、静君には日頃の研究生生活においてお世話になりました。

共同研究者である川村太一君とは、研究全般にわたってお互い協力し合い、励ましあってきたおかげで研究を進めることができました。

以上、多くの方々に支えられてこの論文を書き上げることができました。

お世話になった方々に深く感謝致します。

参考文献

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”朝倉書店、2000.