

卒業論文

力情報フィードバック型

ジョイスティックの開発

1 p - 53 ページ 完

平成 13 年 2 月 28 日提出

指導教官

長尾 高明 教授

高知工科大学 知能機械システム工学科

1010163 田中 洋之

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
5.1.1	非干渉行列の理論と結果	46
6	結果・考察	48
6.1	結果	49
6.2	考察	49
7	今後の展望	50
	謝辞	52
	参考文献	53

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には、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を、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、通常的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。そして技術の進歩によって、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できないし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いる。しかし、その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ーの操作画面と数値、現場の映像というかたちでしか操作者には伝わっていない。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ーを利用した。

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ーを動かすときは、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ー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。(今後3軸のジョイスティックを製作予定なので複数の結合が容易なものにした。)

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。

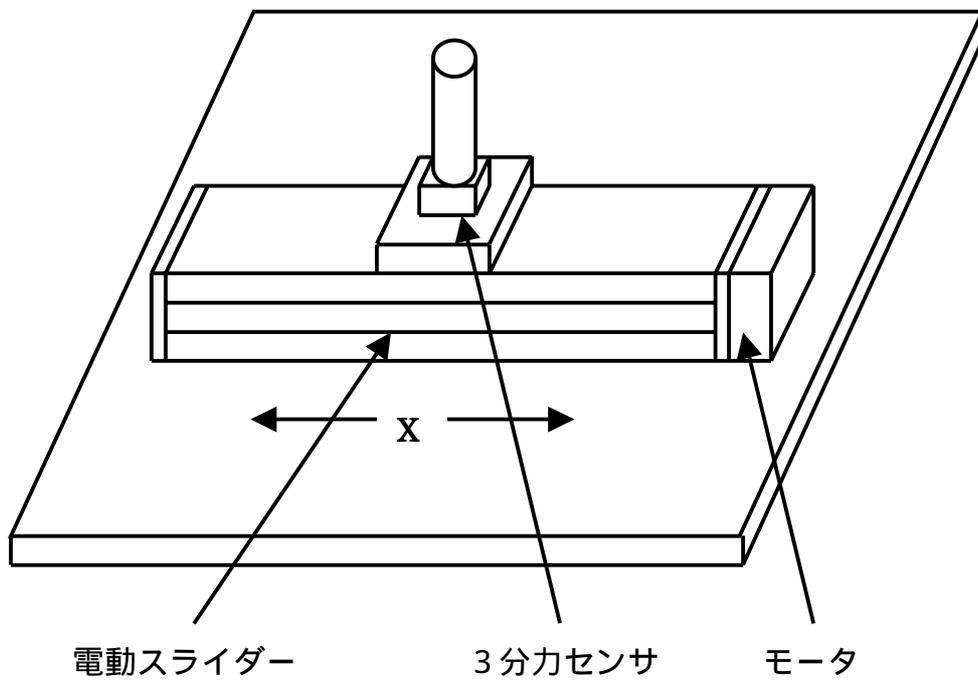


図 3.1 ジョイスティックの概略図



図 3.2 ジョイスティック

力情報フィードバック型ジョイスティックの開発

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ー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。本研究では X 軸だけの 1 軸しかないが、Y,Z の 2 軸を組み合わせ 3 軸方向の移動も可能になる。

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
繰り返し位置決め精度	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°C~+40°C
センサ		HOME, +LS, -LS 3個添付(可動)

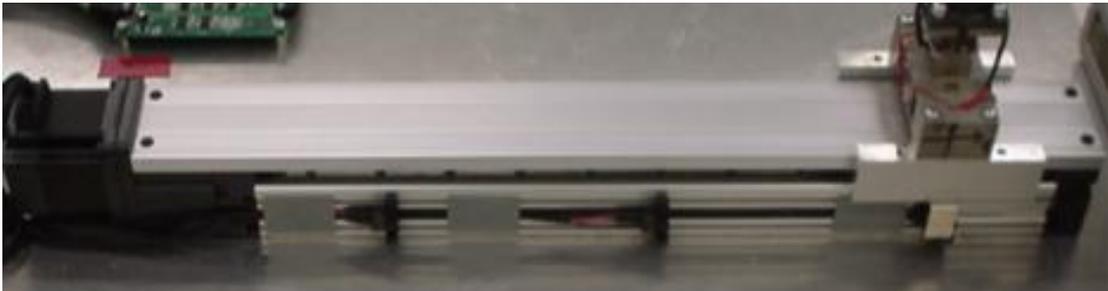


図 3.3 電動スライダー

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	アルミ
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のを使用した。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 (フォトカプラ)	等価入力抵抗	220Ω
	入力電流	7~20mA
	信号電圧	H:4~5V, L:0~0.5V
出力形式 (フォトカプラ・オープンコレクタ)	外部使用条件	DC30V以下、15mA以下
	ドライバ出力	HD26C31相当
冷却方式		自然空冷方式
使用周囲温度		0℃~+50℃
質量		0.8kg



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

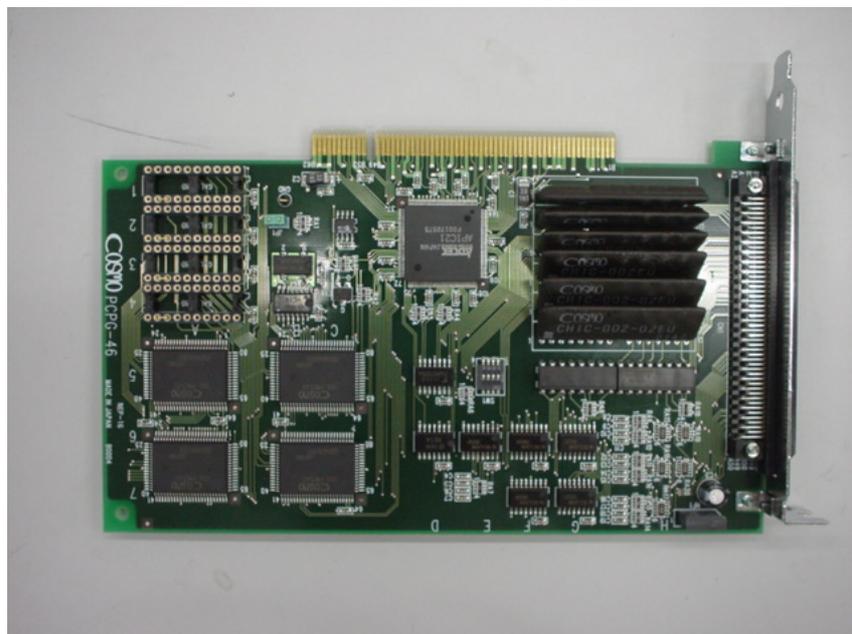


図 3.5 モータ・コントロールボード
(PCPG - 46)

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 Ω ($\pm 5\%$)
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) ($25^{\circ}C$)
誤差	$\pm 0.10\%$ (MAX) ($0^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$) : $\pm 10V$ $\pm 0.15\%$ (MAX) ($0^{\circ}C \sim 50^{\circ}C$) : $\pm 1V$, $\pm 2.5V$, $\pm 5V$
変換時間	チャンネル固定時 : 10 μs チャンネル切替時 (高速モード) ^{*1} : 10 μs チャンネル切替時 (通常モード) : 20 μs
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)

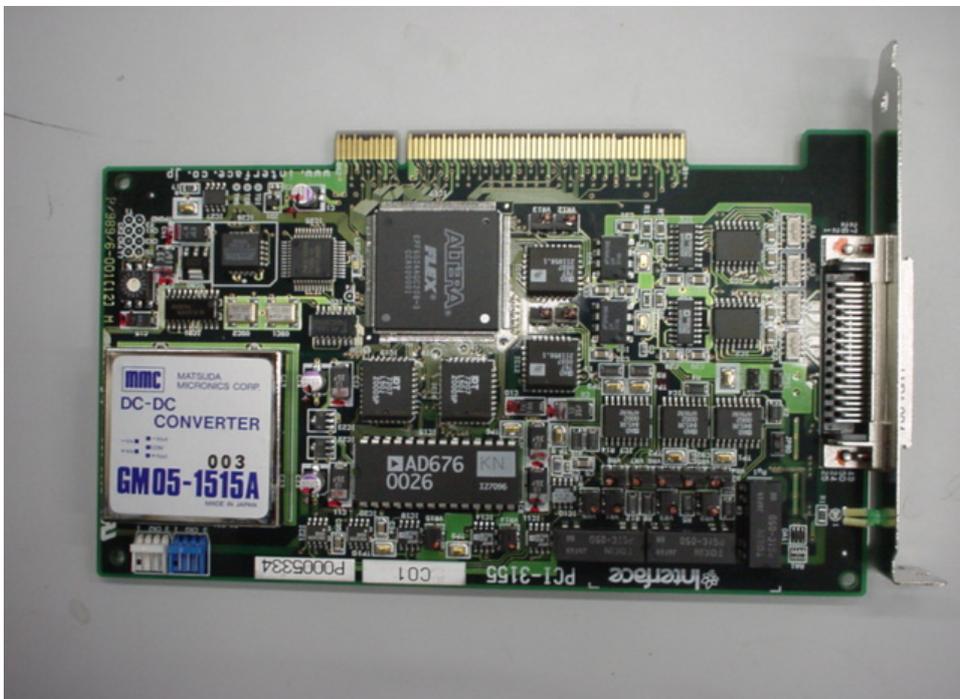


図 3.6 A/D 変換ボード

ストレイン・アンプ

力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	8ch
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,°C)
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:2Vrms 周波数:25kHz又は5kHz リモート機能/全チャンネル…オートバランス ±CAL,オートレンジ、セルフチェック
適用ゲージ抵抗	120Ω～1kΩ
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～10kHz $\pm 10\%$
耐震性	3G(29.4m/s ²)
耐電圧	AC1kV1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°C、20～85%RH以内
電源	AC100V $\pm 10\%$ (AC120、220、240V切り換え可 約80VA DC10.5V～15V,約4A)
質量	約9kg



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力センサを製作した。力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ピエゾ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ると、定格荷重 98 N (10 kgf)の場合、

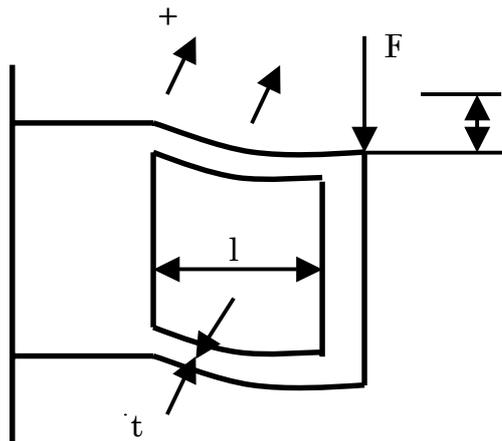
$$\Delta = 0.28\ \mu\text{ m}$$

$$K = 290 \times 10^{-6}\ \text{N}/\mu\text{ m}$$

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

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

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・ゲージはアルミニウム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。カセンサの材質はアルミニウムを使用した。

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。

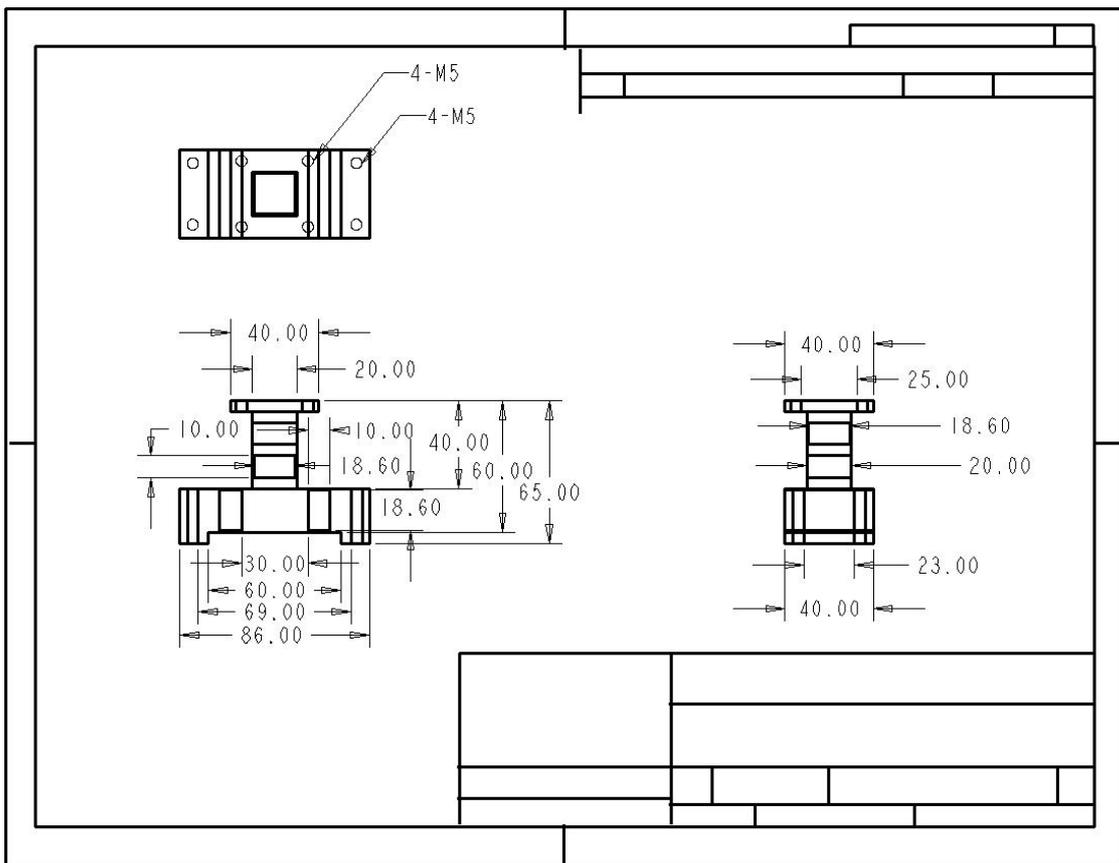


図 4.2 カセンサの設計図

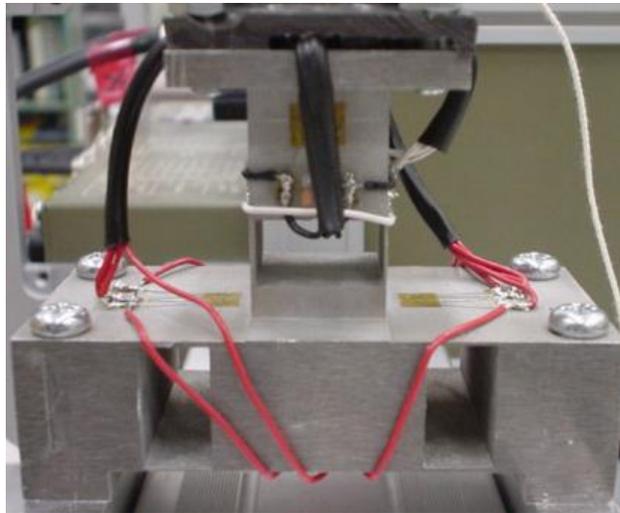
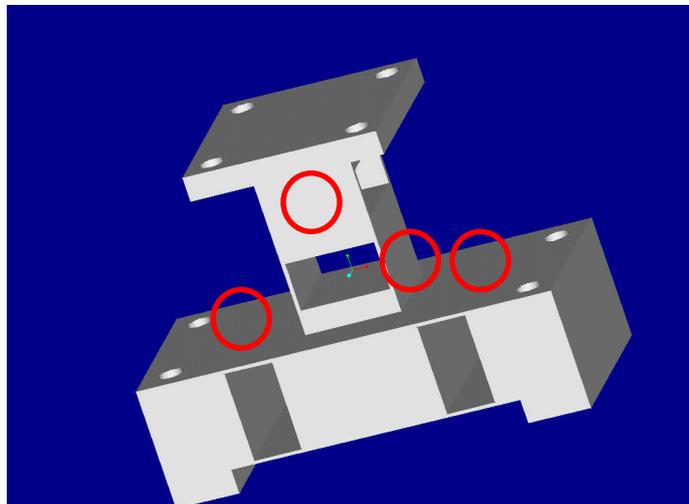


図 4.3 カセンサ



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 $\pm 2\text{kg}$ 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、中部、低部の 3 ヶ所でおこなった。そのときの X, Y, Z 方向のひずみをそれぞれ表とグラフでしめす。

X, Y, Z 方向のひずみの表とグラフを見てもらえればわかるが、それぞれの軸に荷重をかけて歪みが生じているが荷重をかけていない軸でも歪みが生じてしまっている、(この歪みを干渉力という)そこで、この干渉力をなくすためにそれぞれのグラフの線の傾きから、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求めた。非干渉行列の理論と結果は後でしめす。

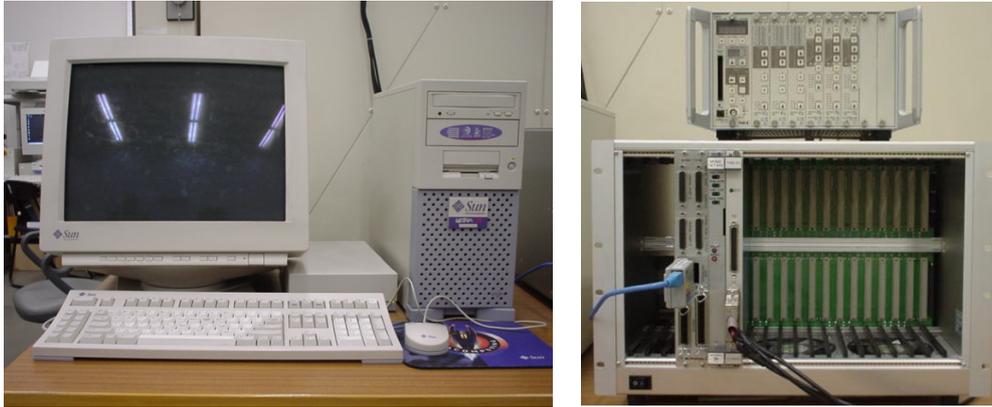


図 5.1 検定用コンピュータ

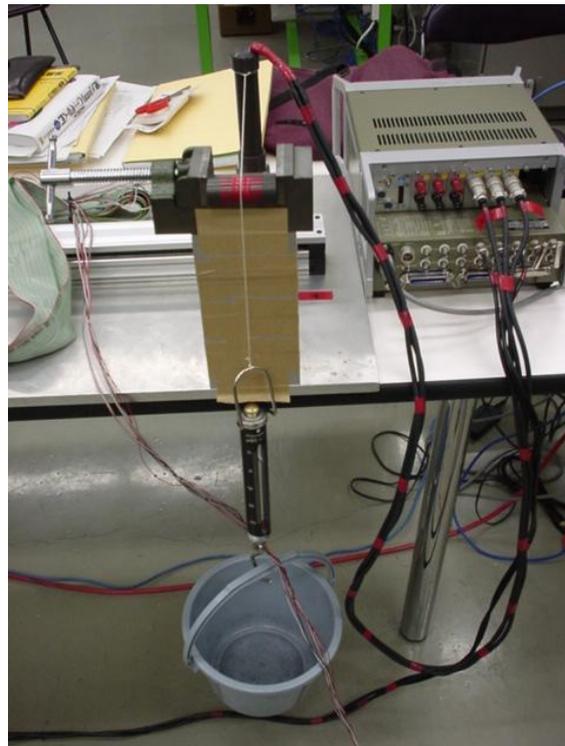


図 5.2 検定方法

力情報フィードバック型ジョイスティックの開発

前ページ図 5.2 検定方法の写真を図 5.3 でしめす。

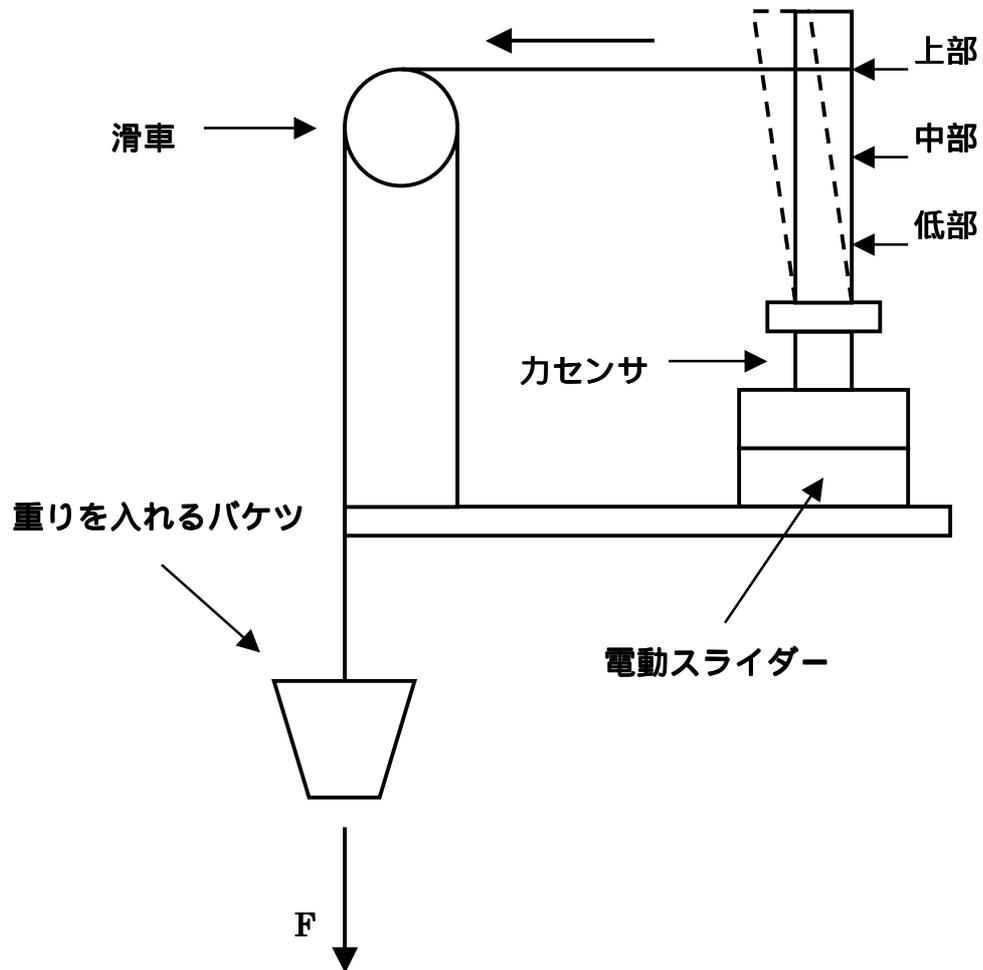


図 5.3 検定方法

$F_x(N)$	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-20.4	-3.4	-15.2
-15	-14.4	-3.2	-11.3
-10	-9.2	-1.7	-6.6
-5	-4.3	-0.1	-1.7
5	3	1.4	3.8
10	7.6	2.4	8
15	11.5	3.4	13.3
20	17	3.6	17.4

表 5.1 X 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒上部)

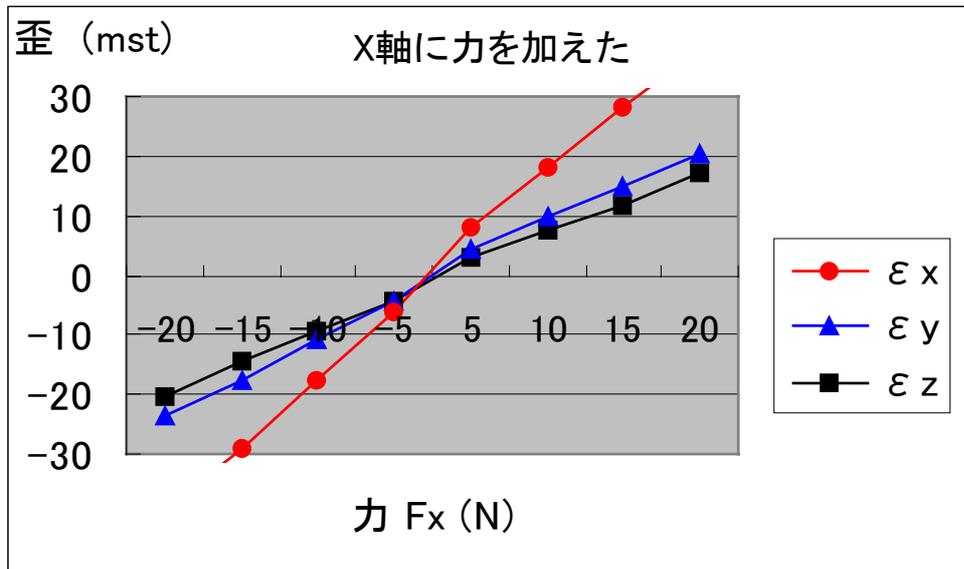


図 5.4 X 軸の歪みの数値をグラフにした (棒上部)

Fy(N)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-25.5	-32	-8.6
-15	-14.3	-23.4	-6.4
-10	-9.7	-14.4	-3.8
-5	-1.8	-6.4	-2.5
5	6.4	8.8	2.1
10	11.5	15.1	4
15	14.6	22.5	6.8
20	18.4	33.7	10.4

表 5.2 Y 軸に荷重をかけた時の歪みの数値(棒上部)

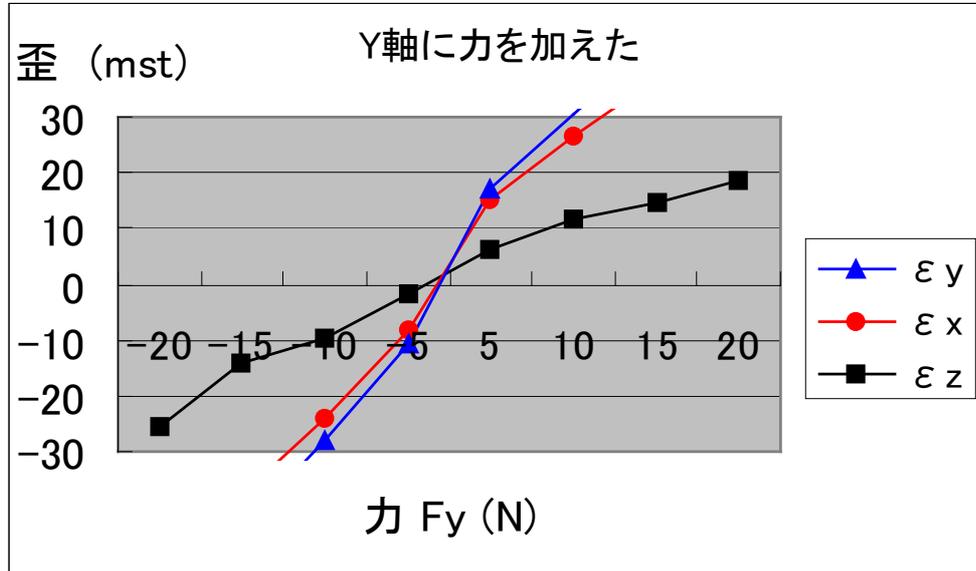


図 5.5 Y 軸の歪みの数値をグラフにした(棒上部)

Fz(N)	ϵx	ϵy	ϵz
-20	-1.5	-1.4	-11.6
-15	-0.6	-1.2	-8.6
-10	-0.5	-0.6	-6.5
-5	-0.3	0.3	-3.4
5	0.5	-0.3	3.4
10	0.3	0.6	6.5
15	0.6	1.2	8.4
20	1.2	1.4	11.6

表 5.3 Z 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒上部)

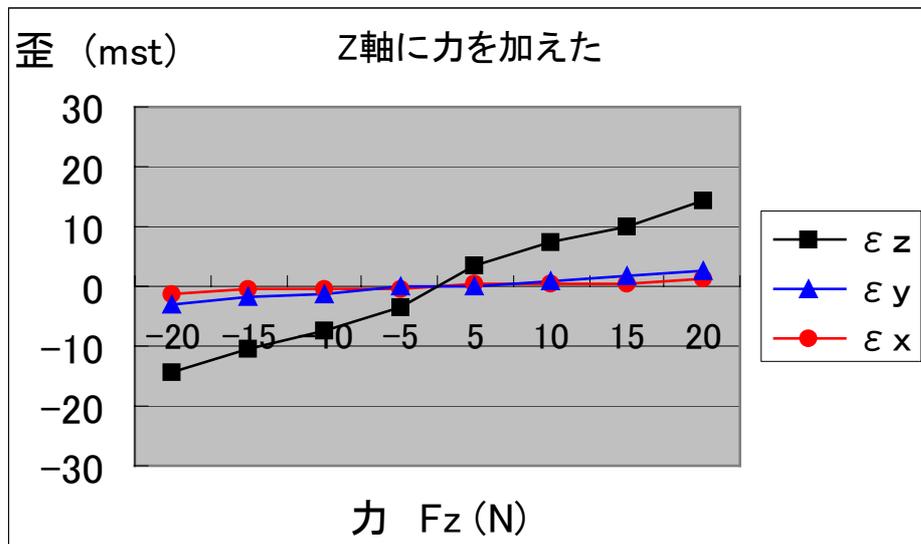


図 5.6 Z 軸の歪みの数値をグラフにした (棒上部)

$F_x(N)$	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-25.7023	-21.8358	-7.7546
-15	-19.6246	-17.0842	-5.1041
-10	-12.1095	-11.4894	-3.2154
-5	-5.6423	-5.384	-1.0858
5	5.9339	6.5603	1.2078
10	12.2319	10.0043	3.4716
15	18.4389	13.7845	5.7839
20	25.0046	21.1562	7.9966

表 5.4 X 軸に荷重をかけた時の歪みの数値(棒中部)

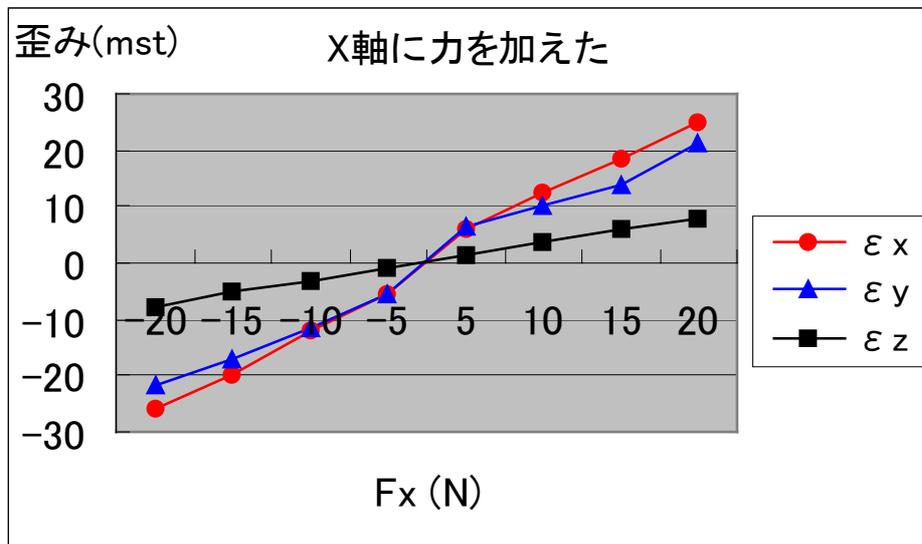


図 5.7 X 軸の歪みの数値をグラフにした(棒中部)

Fy(N)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-2.1257	-10.4257	-10.5769
-15	-1.4899	-8.1815	-7.8755
-10	-0.397	-5.6078	-4.7101
-5	-0.3869	-1.7085	-2.4803
5	0.6298	2.1649	2.8797
10	1.1799	7.8412	9.0612
15	1.7815	8.0617	9.3584
20	2.0281	10.0871	11.2707

表 5.5 Y 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒中部)

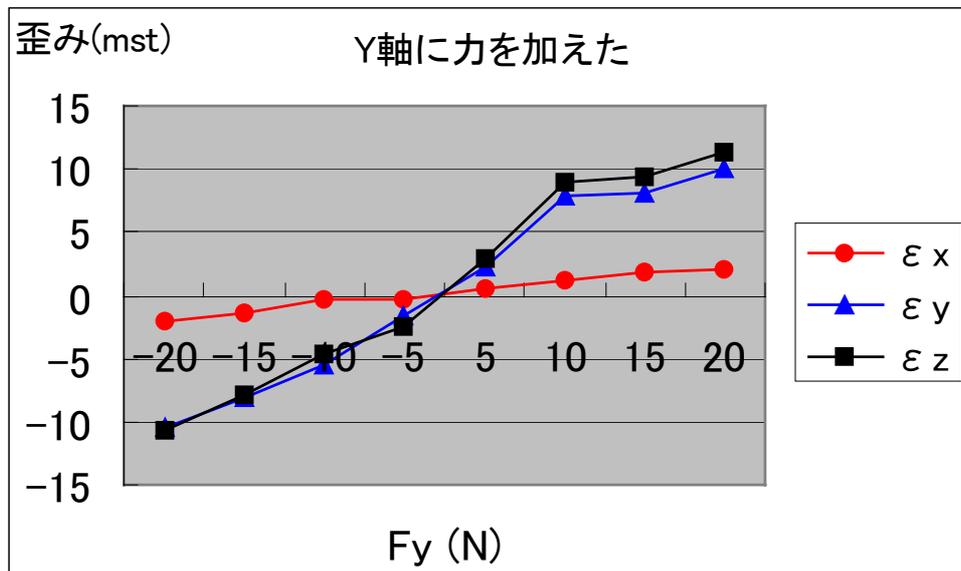


図 5.8 Y 軸の歪みの数値をグラフにした (棒中部)

Fx(N)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-11.8745	-14.1301	-3.7469
-15	-8.5401	-10.5983	-2.8836
-10	-5.9542	-6.8265	-2.1296
-5	-4.5859	-3.1222	-2.3203
5	2.5645	2.8883	0.9169
10	5.3423	7.1877	2.9267
15	9.3947	11.6631	3.5055
20	12.2473	15.8067	4.549

表 5.6 X 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒低部)

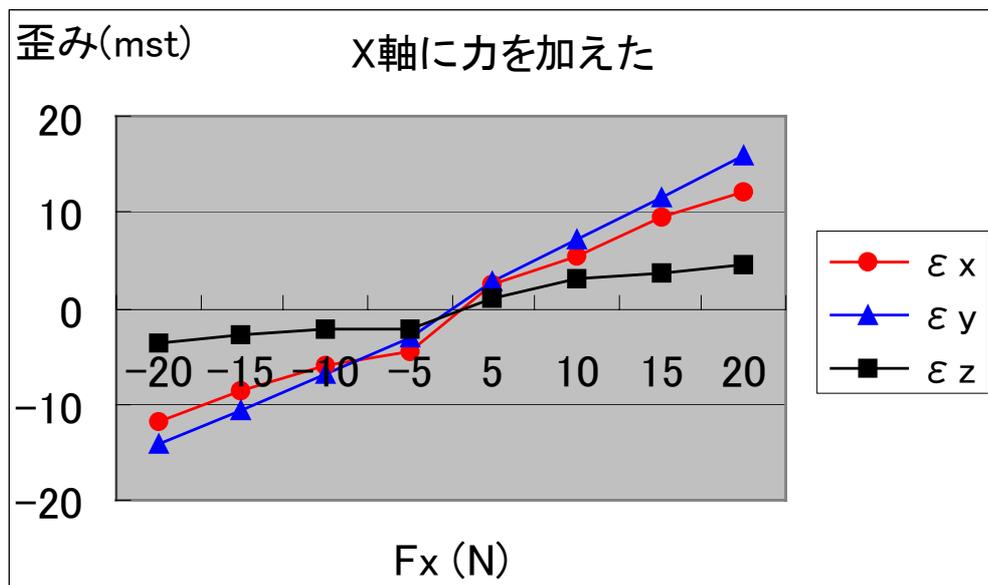


図 5.9 X 軸の歪みの数値をグラフにした (棒低部)

Fy(N)	ϵ_x	ϵ_y	ϵ_z
-20	-3.5159	-5.8311	-7.6978
-15	-2.7891	-3.9497	-5.3716
-10	-2.0642	-3.1159	-4.8242
-5	-0.8517	-1.6158	-2.5204
5	0.8289	0.9703	1.4367
10	1.9512	1.8566	3.3316
15	2.6439	3.1981	5.4283
20	3.0455	4.8815	6.4125

表 5.7 Y 軸に荷重をかけた時の歪みの数値 (棒底部)

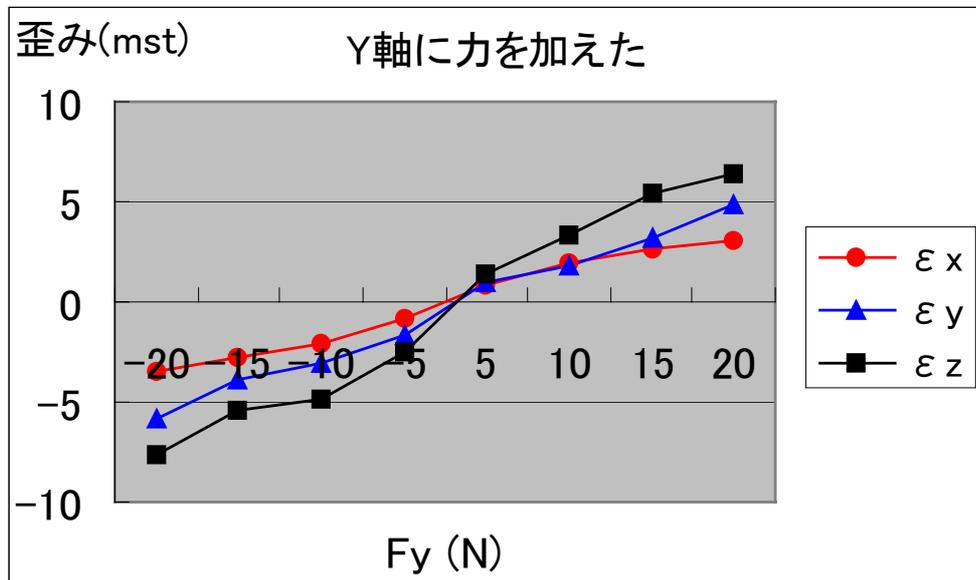


図 5.10 Y 軸の歪みの数値をグラフにした (棒底部)

5.1.1 非干渉行列の理論

測定される各歪み $= (x, y, z)^T$ と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

$$P = K \cdot C \cdot P$$

の関係がある。対し

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

この定数行列 C を求めれば、その逆行列 K が求められ、歪み から力 P が計算できる。

前ページのそれぞれのグラフから傾き (行列 C) を計算しそれを干渉行列の公式に代入して非干渉行列 (行列 K) を求めた。結果は次ページへ

求めた非干渉行列をしめす

$$K = \begin{pmatrix} 0.677901 & 0.631918 & 0.646861 \\ 0.146495 & 0.731912 & 0.0117303 \\ 0.893385 & 0.324264 & 0.924933 \end{pmatrix}$$

表 5.8 棒上部のグラフの傾きから求めた非干渉行列の数値

$$K = \begin{pmatrix} 2.74325 & 3.16682 & 2.48652 \\ 4.74535 & 6.98904 & 3.97623 \\ 3.21224 & 5.34266 & 4.44684 \end{pmatrix}$$

表 5.9 棒中部のグラフの傾きから求めた非干渉行列の数値

$$K = \begin{pmatrix} 1.86105 & 3.30746 & 2.48652 \\ 4.35472 & 4.74815 & 4.00717 \\ 2.21932 & 1.89164 & 0.269018 \end{pmatrix}$$

表 5.10 棒低部のグラフの傾きから求めた非干渉行列の数値

第 6 章

結論・考察

6.1 結論

5章で求めた非干渉行列の数値(棒上部)をジョイスティックを動かすプログラムに組み込んでみたが、干渉力は完全にはなくならなかった。

6.2 考察

干渉力が完全にならなかった原因に次のことがあげられる。

ストレイン・ゲージ(歪みゲージ)を貼る場所が悪い。

干渉力のデータ数が少なすぎる。

3分力・力センサの精度がよくない。

力センサの検定方法が悪い。

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。Y,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。

ストレイン・ゲージ（歪ゲージ）を貼る場所を検討する。（ANSYS など）
干渉力のデータ数を大量にとる。

力センサの検定方法を正確にする。（検定器具をきちんと製作する）

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。

Y,Z 軸を購入し 3 軸にする。

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。

今回の研究では、とりあえず動かすことだけを目標に進められてきたものなので、設計段階で精度を求めるような設計になっていなかったために大きな干渉力が生じたのだろう、このセンサで、このまま研究を進めて行くよりも新しいセンサを製作して研究を進めて行ってもらいたい、その方が経験にもなるし、なにより正確な操作が可能になると思われる。

謝辞

本研究は、長尾高明教授と李軍旗助教授の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、李軍旗助教授には、貴重な御助言、ご指導を頂きました。

学部4年の大谷さん、木崎さん、現田さん、更谷さん、福見さん、増吉さん、小林研究室の橋本さんには、多くのご協力を頂きました。

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

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.