

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「高機能ロボットに用いる力覚センサ（低価格化と組み込み性の向上）の開発」

研究開発成果等報告書概要版

平成23年 9月

委託者 中部経済産業局  
委託先 財団法人富山県新世紀産業機構  
再委託先 株式会社ワコー  
株式会社ワコーテック  
藤堂工業株式会社  
株式会社シーイーシー  
富山県工業技術センター  
富山県立大学

## 目次

第1章 研究開発の概要	1
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	1
1-2 研究体制	3
1-3 成果概要	5
1-4 当該研究開発の連絡窓口	5
第2章 本論	6
①精密プレス加工技術の開発	6
①-1：厚板精密プレス成形技術	6
①-2：接合組立技術	7
①-3：機構部位置決め部の精密加工技術の開発	8
②力覚センサ構造の開発	9
②-1：力検出部の開発設計	9
②-2：機構部の開発設計	10
③信号処理部の開発	11
③-1：力検出回路基板の開発	11
③-2：信号処理回路基板の開発	12
③-3：信号処理ソフト部の開発	13
④FA制御システムソフトの開発	13
④-1：FA制御システムソフトの開発	13
④-2：ロボットシミュレーション	15
⑤センサ評価	15
⑤-1：静特性評価	15
⑤-2：信頼性評価	17
⑤-3：実機評価	19
最終章 全体総括	21

## 第1章 研究開発の概要

静電容量型6軸力覚センサは、従来の歪ゲージ式力覚センサに比べ、構造が簡単で部品点数が少なく、組立から製造までのコストを下げる事ができる。しかしながら、静電容量を用いた検出方式は検出対象部材に高い寸法精度を要求するため、切削加工による製法を余儀なくされていた。本研究の目的は、従来の切削加工により製造されていた静電容量型6軸力覚センサ起歪体部品をプレス加工による製法とすることで、金属材料によるセンサ強度は確保しつつ大幅な低価格化を図るものである。また、力覚センサを使用してロボットを制御するためのインターフェースやアプリケーションソフトウェアをある程度汎用的な形態で用意することでセンサを導入しやすくし、センサの低価格化と併せて市場への普及を図る。

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

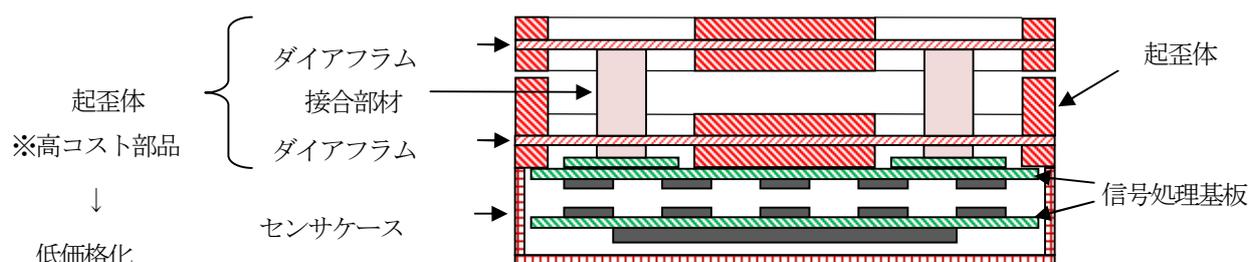


図1 静電容量型6軸力覚センサの構造概要

静電容量型6軸力覚センサの構造を上図に示す。力の印加によるダイアフラムの微小変形を静電容量の変化として検出し、また、過負荷対策として、過剰な変形を押さえるためのストッパ構造を付加している。この方式の利点として、部品点数が少なく組み立ても比較的簡単である点が挙げられる。しかし、変位量が微小なため起歪体の形状および部品間の相互配置に高い精度が必要になる。そのため、従来は機構部品を切削加工により作製しており、コストが高く量産化が困難であるという欠点があった。力覚センサの普及において、機構部品の高信頼性・低価格化・量産化が必須であり、それに適した加工法が金属プレス加工である。

現在、上図における起歪体の一部をプレス加工により作製したプロトタイプを試作しており、その特性は切削加工品と同等であった。しかし、加工精度が必要となるダイアフラムについては切削加工により作製しているため、低価格化の目標まで至っていない。また、起歪体が複数の部材から構成されるため、組立精度が $\pm 50 \mu\text{m}$ と切削加工品に比べ大きく、過負荷時にダイアフラム変形によるストッパの誤動作が起こることが課題として挙げられている。

本研究開発では、プレス加工において、切削加工と同等な精度を確保しつつ、加工面を滑らかな状態にすることが求められる。機構部品は厚板ステンレス鋼板で構成されるため、従来の薄板精密打ち抜き

加工をさらに発展させた対策が不可欠となる。また、機構部品には組み立て時に必要な位置決め部が複数箇所あるため、これらの部位の相対位置精度を確保する成形加工技術も必要となる。

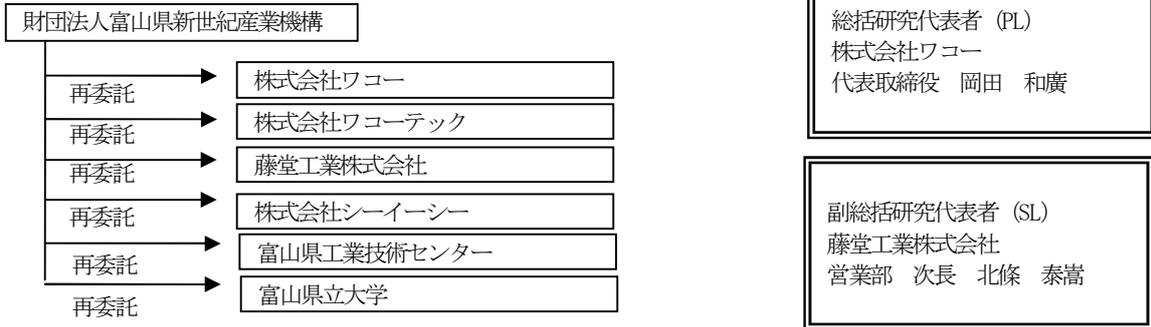
さらに、力覚センサを使用してロボットを制御するためには、ロボット制御用のソフトウェアが必要になる。そのため、ロボットユーザが力覚センサを導入しようとした場合に、ロボット制御・ソフトウェアに対して深い知識を保有している必要があり、実際の導入作業の難易度が非常に高い。本研究開発では、センサの開発に加え、センサが感知したデータからロボットツール先端位置を求める変換式をあらかじめ用意しておくことで、利用者が容易に力覚センサを利用できるアプリケーションを開発する。このアプリケーション開発により、ユーザの力覚センサ導入を容易にし、力覚センサのより一層の普及を目指す。

<技術的目標値>

項目		切削加工品	プロトタイプ (一部プレス加工)	本事業終了時 の目標値	最終目標
定格荷重	力	200N	200N	200N	200N
	モーメント	4Nm	8Nm	4Nm	4Nm
非直線性		±1%FS 以内	±1%FS 以内	±1%FS 以内	±1%FS 以内
出力		Analog/Digital	Analog/Digital	Digital	Digital
サイズ		φ80×H35	φ90×H35	φ80×H25	φ80×H25
部品材質		アルミ合金材料	鉄系材料	ステンレス鋼	ステンレス鋼
ダイアフラム製法		切削加工	切削加工	金属プレス加工	金属プレス加工
ダイアフラム部の部品精度		±10 μm	±10 μm	±10 μm	±10 μm
機構部品製法		切削加工	金属プレス加工	金属プレス加工	金属プレス加工
ストッパ構造の位置精度		±10 μm	±50 μm	±10 μm	±10 μm
価格		190,000 円		100,000 円	50,000 円

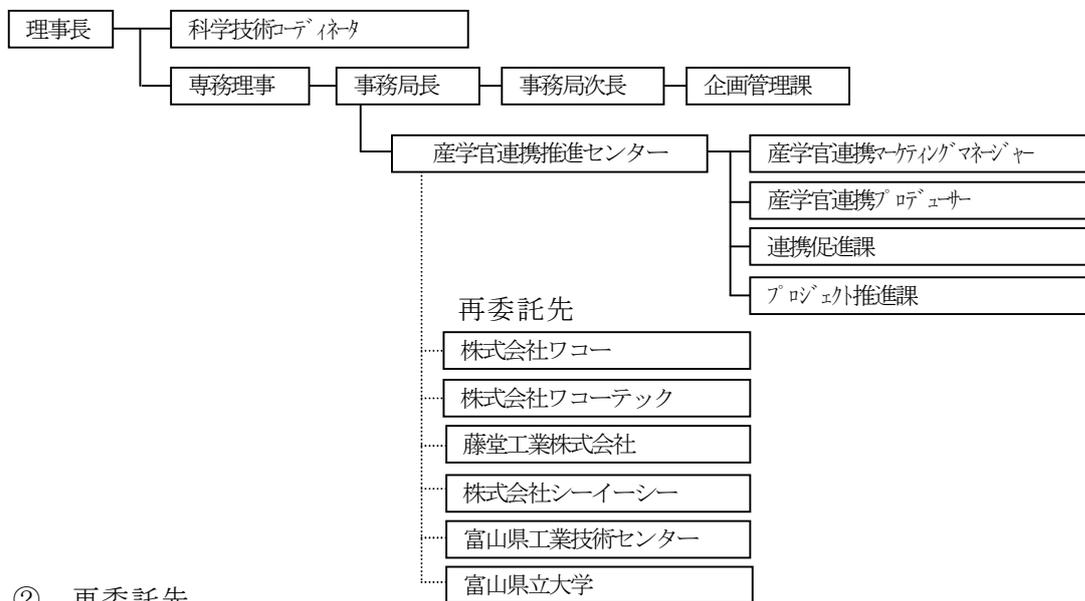
1-2 研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1) 研究組織



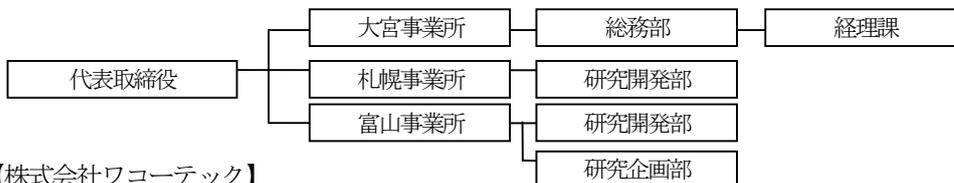
2) 管理体制

① 事業管理機関【財団法人富山県新世紀産業機構】



② 再委託先

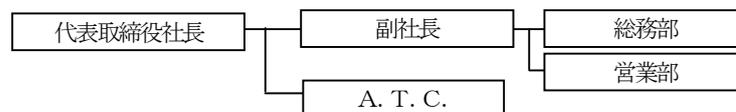
【株式会社ワコー】



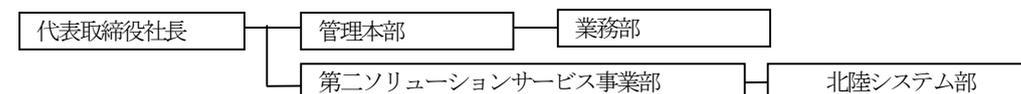
【株式会社ワコーテック】



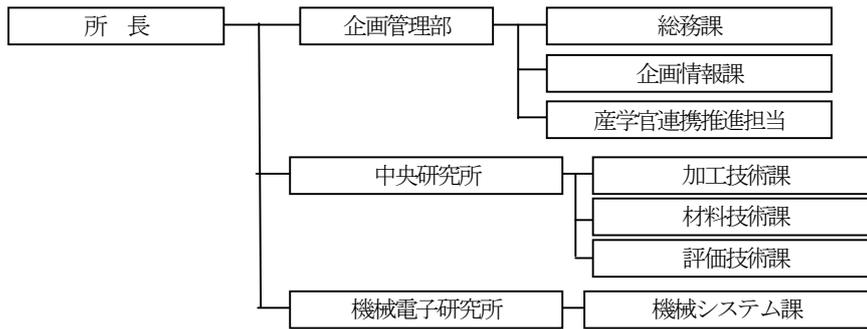
【藤堂工業株式会社】



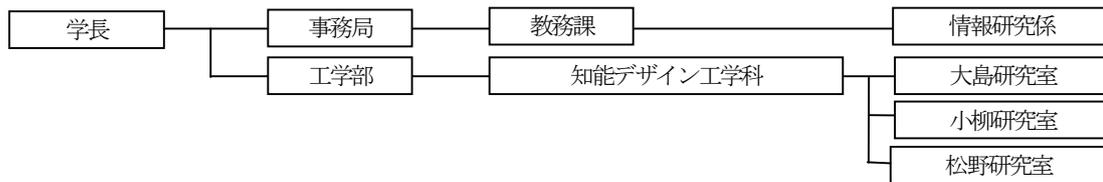
【株式会社シーイーシー】



【富山県工業技術センター】



【富山県立大学】



3) 研究員

株式会社ワコー

氏名	所属・役職
岡田 和廣	代表取締役
江良 聡	札幌事業所 所長
西沖 暢久	富山事業所 研究開発部 主幹研究員
田中 篤	富山事業所 研究開発部 主幹研究員

株式会社ワコーテック

氏名	所属・役職
佐伯 和司	開発部 主任研究員

藤堂工業株式会社

氏名	所属・役職
北條 泰崇	営業部 次長
大井 誠	A. T. Cモールドチーム リーダー
山澤 幸雄	A. T. Cモールドチーム アシスタントマネージャー

株式会社シーイーシー

氏名	所属・役職
高田 利喜	第二ソリューションサービス事業部 北陸システム部 部長代理
高原 満	第二ソリューションサービス事業部 北陸システム部 主査

富山県工業技術センター

氏名	所属・役職
二口 友昭	企画管理部 部長
土肥 義治	中央研究所 材料技術課 課長
角田 龍則	中央研究所 評価技術課 主任研究員
釣谷 浩之	機械電子研究所 機械システム課 主任研究員
川堰 宣隆	企画管理部 産学官連携推進担当 主任研究員

富山県立大学

氏名	所属・役職
大島 徹	工学部知能デザイン工学科・教授
小柳 健一	工学部知能デザイン工学科・准教授
松野 隆幸	工学部知能デザイン工学科・講師

#### 4) アドバイザーおよび協力者

以下の方々に専門的立場から事業の推進についてご指導、ご協力を頂いた。

(アドバイザー)

東京大学 生産技術研究所 教授 柳本 潤氏  
川田工業株式会社機械システム事業部 係長 宮森 剛氏  
澁谷工業株式会社 メカトロ事業部 執行役員 安田 正二氏

(協力者)

株式会社ワコー 富山事業所 所長 林 みゆき

#### 1-3 成果概要

本研究開発は静電容量型6軸力覚センサのFA市場への普及をはかるため、センサ起歪体部品をプレス加工による製法とすることと、ロボットを制御するためのインターフェースやアプリケーションソフトウェアを用意することを主な目的として行われた。

精密プレス技術を用い、ダイアフラム部厚さ及び機能部品形状の寸法精度(含平坦度)±10μmの厚板ステンレス鋼板による総せん断打ち抜き加工を実現した。また、従来ネジで行っていた部品接合の一部をプレスによる結合に替えて作業時間を短縮した。これらのプレス加工方法を実現するため、金型の試作・検証し、力検出部の起歪体構造のシミュレーションに基づき起歪体設計を行い、プレス加工に適したセンサ機構部設計の最適化を図った。

外力によるダイアフラムの微小な変形を静電容量の変化で検出するために、独自の回路技術と基板設計技術を用い、耐ノイズ性や応答性に優れた力-変位検出回路基板を開発した。回路基板は検出電極基板とマイコン基板とで構成され、低発熱で省電力な小型マイコンを使用している。マイコンの信号処理ソフト部では、産業用機器への組込を前提とし、処理の高速化(サンプリング周波数約6kHz)及び各種データ通信方式に対応したマイコン動作ソフトウェアの開発を行なった。

センサ静特性評価では、本センサがロボットへの適用に十分な性能を有しており、力覚センサ製品として優れているものであることが確認できた。温度サイクル・疲労試験・引張強度試験・耐電磁ノイズなどのセンサに加わる外部環境に対する信頼性の評価を行い、本センサが産業分野へ適用しうる信頼性を有していることを確認した。本テーマで開発したセンサ及びFA制御システムソフトをロボットへ適用し、実機での動作を確認した。

上記のように、本研究における目標は概ね達成したが未解決な課題もいくつか残っている。一つは接合方法の改良に対するものであり、ロウ付による接合方法に大きな可能性を確認したものの条件不足により実機への適用には至らなかったことである。もうひとつはロボット制御用アプリケーションが有効性を確認できたものの、ロボット制御装置によっては通信処理が遅くて使えない場合があるという点である。また、今回プレス製作化を適用したのはセンサの核となる部分のみであり、ケース等周辺の補機部品に関しては切削品のままである。これらの課題については今後も追究を続け、更なる低価格化と高性能化を目指し、市場の様々な要求に満足できる製品の開発を進めていく。

#### 1-4 当該研究開発の連絡窓口

研究実施機関 (機関名)	代表者 役職氏名	連絡先
株式会社ワコー	代表取締役 岡田和廣	①所在地：〒933-0816 富山県高岡市二塚 322-5 高岡テクノドーム 203号室 ②連絡担当者：富山事業所 所長林 みゆき ③Tel:0766- 29-2370 ④Fax:0766- 29-2371 ⑤E-mail: m.hayashi@wacoh.co.jp

株式会社ワコーテック	代表取締役 岡田和廣	①所在地：〒933-0816 富山県高岡市二塚 322-5 高岡テクノドーム 204 号室 ②連絡担当者：開発部主任 佐伯和司 ③Tel:0766-24-8011 ④Fax:0766-29-2371 ⑤E-mail: k.saeki@wacoh-tech.com
藤堂工業株式会社	代表取締役社長 櫻田喜春	①所在地：〒936-0852 富山県滑川市上島 838 番地 ②連絡先担当者：営業部次長 北條泰嵩 ③電話番号：076-475-1010 ④F A X 番号：076-475-1081 ⑤E-mail: general@tdknet.co.jp
株式会社シーイーシー	代表取締役社長 新野和幸	①所在地：〒930-0004 富山県富山市桜橋通り 2-25 第一生命ビル 3F ②連絡先担当者：北陸システム部 部長代理 高田利喜 ③電話番号：076-441-4381 ④F A X 番号：076-433-0590 E-mail: takata@cec-ltd.co.jp
富山県工業技術センター	所長 榎本祐嗣	①所在地：〒933-0981 富山県高岡市二上町 150 ②連絡先担当者：企画管理部部長 二口友昭 ③電話番号：0766-21-2121 ④F A X 番号:0766-21-2402 ⑤Email :futaku@itc.pref.toyama.jp
富山県立大学	学長 前澤 邦彦	①所在地：〒939-0398 富山県射水市黒河 5180 ②連絡先担当者：工学部知能デザイン工学科 教授大島 徹 ③電話番号 0766-56-7500 内線 408 ④F A X 番号 0766-56-8030 ⑤E-mail :oshima@pu-toyama.ac.jp

## 第2章 本論

### ①精密プレス加工技術の開発

#### ①-1:厚板精密プレス成形技術

(実施担当：藤堂工業株式会社)

##### ①-1-1 研究目的及び目標

精密プレス技術を用い、機能部品形状の寸法精度 $\pm 10\mu\text{m}$ の厚板ステンレス鋼板による総せん断（せん断面が板厚の100%）の打ち抜き加工を行う。厚板ステンレス鋼板の総せん断の打ち抜き加工は困難であり、上記の精度も同時に確保するためには、既存の打ち抜き加工方法では不可能である。この打ち抜き加工方法を実現するための金型の試作・検証を行う。

##### ①-1-2 実験方法

材質 SUS304（ステンレス鋼板）、板厚 3.0mm の機構部部品において総せん断の打ち抜き加工

を行なう。ステンレス鋼板の適正なクリアランスは板厚の7~11%であるが、この条件下では、せん断面が板厚の1/3~1/2程度と少なく、機能を満足することができない。本実験では、機能を満足できるクリアランス及び金型形状の検証を行う。

### ①-1-3 研究成果

通常、せん断面量を大きくするためクリアランスを小さくすると、2次せん断が発生し、総せん断とはならないのだが、切刃部の面取加工により、総せん断に近い状態にすることができた。実験の結果、せん断面は板厚の約90~95%となり、総せん断とはならなかった。切刃部の面取形状によっては、さらに、せん断面量を増やすことができるが、カエリが大きくなった。

また、穴位置精度は $\pm 10\mu\text{m}$ 以内を満足することができた。カエリは次工程の面押し加工によって抑えることができ、機構部の機能を満足できるものとなった。

### ①-2: 接合組立技術

(担当: 藤堂工業株式会社、株式会社ワコー、株式会社ワコーテック)

#### ①-2-1 研究目的及び目標

従来の6軸力覚センサの機構部ではネジ締結面を接着剤で補強しているが、硬化時間が必要なうえ絶対的なせん断強度に劣るという問題点がある。そこで、プレス加工により接合可能な製品形状の検討及び成形を行うとともに、ロウ付けやハンダ付け及び局所的な極小スポット溶接等を用いることにより、機構部の高強度化、部品接合のリードタイムの短縮を図る。

具体的には、既に設計・製作済みのプロトタイプにおける熱変形や材質劣化及び複合部分の均一性についての検証を株式会社ワコーテックが行い、この検証結果を基に株式会社ワコー、藤堂工業株式会社が機構部のプロトタイプの設計を再検討する。仕様範囲内での過負荷に十分耐えうる接合強度の確保と接合組立工程時間の2時間程度への短縮を目指す。

#### ①-2-2 実験方法

機構部の基本設計を基に、従来ネジでの組み付けを行っている部分をプレス接合に置き換える。接合部位の成型や接合はプレス加工により行い、加工時間の短縮を図る。接合する2つの部品をそれぞれ部品Aおよび部品Bとして次の手順で接合する。

- ①部品Aに穴の打ち抜き加工を行なう。
- ②部品Bに押し出し加工により突起部を作る。
- ③部品Aの穴に部品Bの突起をはめ込む。
- ④部品Bの先端を押しつぶし、部品Aの穴に展開させる。

また、株式会社ワコー、株式会社ワコーテックでは、本研究以前に試作検討を行っていたプロトタイプ6軸力覚センサの部品を対象として接合方法の試行を行う。今回の実験においては、ペースト銀ロウおよびペーストハンダを用い、富山県工業技術センターの電気炉を使用して“置きロウ”による作業方法にて行った。

#### ①-2-3 研究成果

プレス加工による接合では、部品Bの突起部が部品Aの穴内面に密着するように展開し、十分な接合力が得られた。また、複数の箇所を同時に接合加工することにより、組立時間の短縮が図れた。

溶接的接合方法としてプロトタイプ6軸力覚センサの部品(SUS304材)を用いてロウ付を試してみたところ、荷重を付加しても接合が外れることも無く、強固に接合することができた。しかしながら作業時の高温のため部材の表面酸化は激しく、量産に当たっては酸化膜の除去処理を検討する必要がある。接合した部材を用いて力覚センサの形態に組上げ、そのセンサ特性

を見てみると従来手法的なカシメ圧入を用いて接合組立を行った場合よりも信号出力特性が大きく改善されており、ロウ付による接合が力覚センサの起歪体構造の組立に非常に有効であることを確認した。次に同じ部材でのハンダ付を試みたが、ステンレス接合用を謳った製品であったにもかかわらず、ペーストハンダが溶融するだけで部材に濡れ馴染んでおらず、手で少し力を加えると外れてしまった。

このとき、加熱による部材表面の酸化を最小に抑える条件の検討も行った。大気中で熱処理を行った金属表面（図2）は変色が激しくムラの発生も確認された。しかし、アルゴン雰囲気での熱処理（図3）ではうすい変色は確認できたがムラは発生しなかった。



図2 金属表面（大気）



図3 金属表面（アルゴン雰囲気）

また、FIB（集束イオンビーム装置）による断面加工をおこない、表面の酸化膜の状態を確認した。大気中の熱処理の断面画像（図4）では約  $0.2\mu\text{m}$  の酸化膜が確認できた。アルゴン雰囲気の断面画像（図5）では酸化膜は確認できず、電気炉内のアルゴン置換が酸化膜の形成を抑制していることを確認できた。

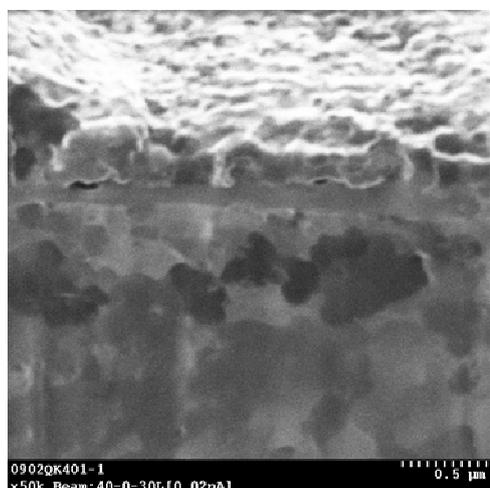


図4 金属断面SIM画像（大気）

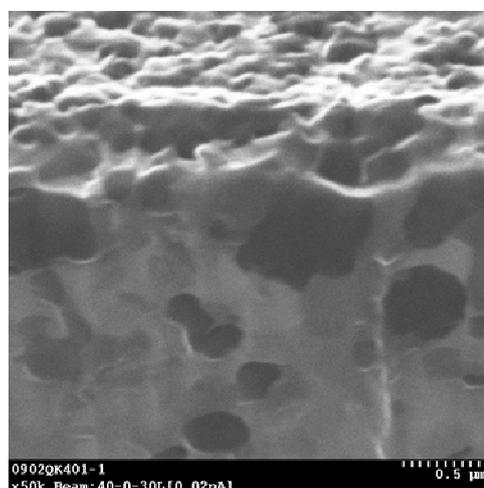


図5 金属断面SIM画像（アルゴン 650°C）

再度、ロウ付接合の有効性が確認されたため、最後にプレス加工製6軸力覚センサの接合組立を実際にロウ付で行って見たが、最初の試作と異なりうまく接合されなかった。その後も、作業条件を幾通りか変えてみたが接合されることはなかった。ロウ材は溶融していたのでフラックスの効きが弱かったと推測されるが、そのように効きが弱まった原因としてステンレス材の不動態Cr成分層が厚く強固過ぎたとも考えられる。本件に関しては今後も継続して追究していくものとする。

### ①-3: 機構部位置決め部の精密加工技術の開発

（担当：藤堂工業株式会社）

### ①-3-1 研究目的及び目標

力覚センサ機構部にはストッパ構造を採用しており、通常の厚板打ち抜き加工では切断面が荒く寸法精度が悪いため、目標値を満たすプレス加工が困難である。これに対し、精密打ち抜き加工法により、上部機構部と下部機構部の組立寸法精度を安定して確保できるプレス加工技術の確立を目指す。2部品の組立時に、各々の機能部位の相対精度 $\pm 50 \mu\text{m}$ 以内を確保することを目指す。

### ①-3-2 実験方法

上部機構部を構成する2部品、及び下部機構部を構成する2部品は、それぞれ前述①-2項の様(に)プレスによる結合を行う。この結合部位と他の機能部位の相対位置精度を確保できるような部品形状とし、金型構造は部品の位置決めがし易い構造とする。また、部品間の結合部がずれないように、結合部位(穴部と突起部)のはめ合い精度を確保する。

### ①-3-3 研究成果

結合部形状が穴である部品Aの場合、結合用穴の精度確保、並びに結合用穴と他の機能部位の相対位置精度が必要となる。結合部が突起形状である部品Bの場合、結合用突起部の精度確保、並びに結合用突起部と他の機能部位の相対位置精度が必要となる。それぞれ金型の位置決め機構を工夫することで、異なる加工部位の位置精度 $\pm 30 \mu\text{m}$ 以内の確保ができた。また、結合用穴と結合用突起部のはめ合い精度を $\pm 15 \mu\text{m}$ 以内とすることで、組立精度の確保が可能となった。

## ②力覚センサ構造の開発

### ②-1: 力検出部の開発設計

(担当: 株式会社ワコー、藤堂工業株式会社)

#### ②-1-1 研究目的及び目標

力覚センサのダイアフラムが変形することで生じる内部応力が材質の疲労耐力よりも大きいと、センサ起歪体部品の塑性変形が生じ、検出特性が悪化してしまう。そのため、使用定格範囲内での変位量最大化と内部応力最小化並びに寸法小型化の全てのバランスを取る必要がある。そこで、力検出部の変位-応力分布シミュレーション技術(FEM解析ソフトAnsys)を活用して、プレス加工に適した形状で、なおかつ最大変位時の発生応力が材質の疲労耐力よりも十分に小さくなる(20%程度)よう起歪体構造の設計を行う。株式会社ワコーは、力検出部の起歪体構造のシミュレーションを実施し、それに基づき起歪体設計を行う。藤堂工業株式会社は、プレス加工に適した力検出部起歪体設計の最適化を図る。

#### ②-1-2 実験方法

プレス加工を前提とした場合、板材からの打ち抜き成形が主工程となるため部品形状は平板に近いほどコスト的にも精度的にも都合がよい。従来のワコー製静電容量型力覚センサはダイアフラム型起歪体を用いていたため部品に凹凸が多くプレス加工には不向きであった。本研究テーマにおいてプレス加工による6軸力覚センサを実現するため、よりプレス加工に適したビーム型起歪体を新たに用いてプレス加工への対応を行うこととした。このビーム型起歪体構造は全て平板状の単純形状部品で構成されており、プレス加工への対応が容易であるうえ、低背で薄型のセンサを実現できる。

ビーム型起歪体モデルのFEM解析を行って各軸荷重による変形を把握して、目標定格荷重200Nと4Nmを満足できる形状で構造設計を進めた。設計したビーム型起歪体は四方に配した板バネ-ビームブロック対の下端部8ヶ所の変位量とその組み合わせをモニターすることで各軸方向の荷重を算出することが可能なものである。変位のモニター手段にはワコーテックで

技術を構築した高速高分解能な変位検出が可能な静電容量型検出方式を用いることとする。

### ②-1-3 研究成果

本研究におけるセンサ目標定格荷重 200N と先の FEM 解析から使用する板バネ材の厚さは  $t0.7$  とした。この起歪体構造は受力体や固定体といったフレーム剛体部分と弾性変形を受け持つ板バネとが別体構造であるため、使用する板バネ材の厚さを変更することでセンサ定格荷重の変更には柔軟に対応可能であるうえ、変更に伴うコストも最小で済むという特長がある。本形状を基に藤堂工業においてプレス加工への対応が行われた。

### ②-2: 機構部の開発設計

(担当：株式会社ワコー、藤堂工業株式会社)

#### ②-2-1 研究目的及び目標

センサ構造において力検出部を支える支持部、過負荷対策としてのストッパ構造及びケースの開発設計を行う。上記同様に、機構部のシミュレーション技術 (FEM解析ソフトAnsys) を活用して、プレス加工に適した形状で、高い強度と組立の容易さを有するよう設計の最適化を行う。特にストッパの強度はセンサの検出定格荷重の10倍程度を確保することを目標とする。

#### ②-2-2 実験方法

本研究テーマにおいてプレス加工による6軸力覚センサに適用するストッパ機構については、極力市販の一般的な機構用標準部品を組み合わせて実現するようにした。具体的にはボルトやナットを各方位に配置して、対向部品との間隙をストッパ機能として用いた。これにより高い部品精度を必要とせず、高機能かつ低コストな本研究テーマの趣旨に沿ったものとなった。

センサの下側起歪体等は筒状のケースで保護され、センサ中央にはケーブルやホースを貫通配置するための $\phi 15$ の穴が空けられている。この円環形状の実現のため通常センサ内部中央に配されるマイコン処理回路はセンサ外側のコネクタケース内に内蔵されることになった。センサの外径 $\phi 80$ とマウント用ボルト位置P.C.D $\phi 63$ でのM6ネジ4点固定はいずれもロボットのツール取付フランジのJIS規格に則ったものであり、これらの形状的特徴は全てロボットへの適用を前提としている。

#### ②-2-3 研究成果

実際に製作したプレス加工製6軸力覚センサの外観を図6に示す。今回の製作にあたり、接合組立にはネジ締結と接着との併用で行った。



図6 センサ外観

今回の組立には日程的に治具を十分用意できなかったため、手作業での組立となった。将来

の量産化をふまえ、作業時間の短縮や製品個々のバラツキを抑えるためにも今後は治具類の充実に図っていきたい。

### ③信号処理部の開発

#### ③-1:力検出回路基板の開発

(担当：株式会社ワコーテック)

##### ③-1-1 研究目的及び目標

本力覚センサは外力によるダイアフラムの微小な変形を静電容量の変化で検出するものである。そのために、静電容量の変化を計測するための検出回路基板を設計する必要がある。独自の回路技術と基板設計技術を用い、S/N 比70dB、応答周波数2kHz、耐ノイズ性や応答性に優れた力-変位検出回路基板を開発する。また、組立を簡略化するためのフレキシブル基板の設計を行う。

##### ③-1-2 実験方法

静電容量による検出原理を図7に示す。機構部にターゲット基板を固定し、対向する位置に検出電極基板を設置する。このように検出電極を配置して電極間の静電容量を検出することで、機構部の変位を検出する。このとき、ターゲット基板には電極パターン、検出電極基板には、電極パターンと検出回路を設ける。

検出波形を図8に示す。図中に示した波形のように、静電容量  $C_t$  が変化することで発振周波数が変化する。

この方式の特長として以下が挙げられる。

- ・寄生容量等の影響を受けにくい
- ・パルスによる処理のため、対ノイズに優れる
- ・出力にノイズに対するフィルタ処理が不要なため、応答周波数を高くできる

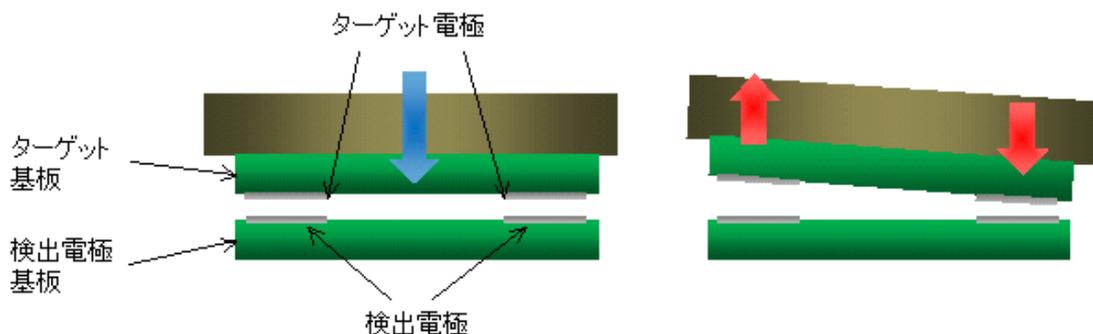


図7 検出原理

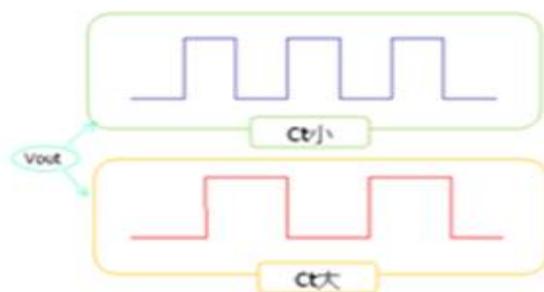


図8 検出波形

### ③-1-3 研究成果

ターゲット基板、検出電極基板をそれぞれ図9のように設計した。ターゲット基板は2層、検出電極基板を4層基板で設計し、図10のように試作を行った。

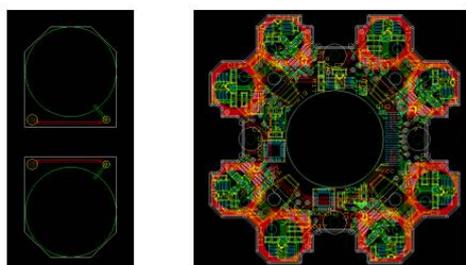


図9 基板設計

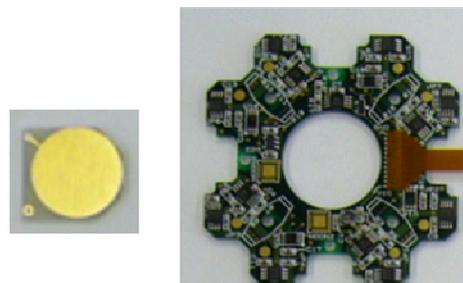


図10 基板試作（外観）

### ③-2: 信号処理回路基板の開発

(担当：株式会社ワコーテック)

#### ③-2-1 研究目的及び目標

力検出回路基板の出力信号を加工するための信号処理回路基板を設計する。独自の回路技術と基板設計技術を活用し、マイコンによる直接パルス入力とデジタルシリアルデータ出力の出来る信号処理回路基板を開発する。特に、小型（12mm×12mm）で低消費電流（50mA）なマイコンを使用することで、信号処理基板を小さく低発熱な応用性の高いものとする。

#### ③-2-2 実験方法

回路構成を図11に示す。検出基板からのパルス出力をマイコンに入力し、力検出値に変換する。また、マイコンにプログラムをダウンロードすることで、感度、温度特性、他軸感度を補正し、出力する。出力形態としては、14bitの数値をUSBで出力する。

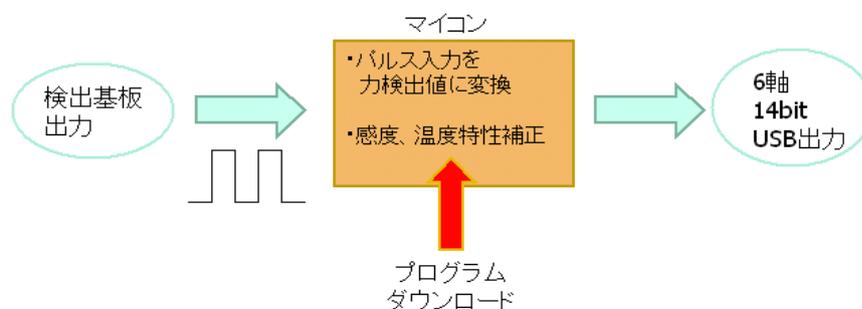


図11 回路構成

#### ③-2-3 研究成果

図12のように設計し、図13のように試作した。4層基板として設計・試作した。



図12 基板設計

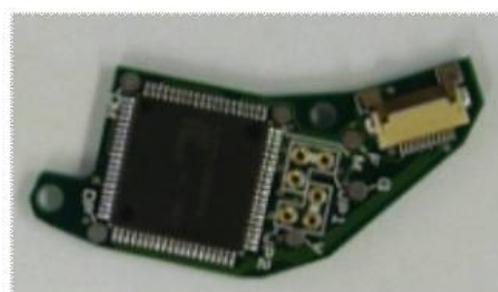


図13 基板試作（外観）

### ③-3:信号処理ソフト部の開発

(担当：株式会社ワコー)

#### ③-3-1 研究目的及び目標

産業用機器への組込を前提とし、信号処理基板上のマイコン処理の高速化(サンプリング周波数6kHz)、及び各種データ通信方式に対応したマイコン動作ソフトウェアの開発を行う。

#### ③-3-2 実験方法

今回使用したマイコン (SH7136) のクロック周波数は、従来使用品のマイコン (SH7285) の約 60%のため、ソフト的な高速化が必要。そこで、下記の対策を実施した。

- (1) タイマ割り込みの頻度を減らす。
- (2) 補正処理をセンサ特性に合わせ簡略化する。
- (3) センサの入力処理における浮動小数点演算を固定小数点演算に変更する。

次にデータ通信方式に関しては、次のように対応を行う。

- (1) フォーマット：独自バイナリ、16進テキスト
- (2) プロトコル：連続データ方式、単データ方式
- (3) ハード I/F：RS422、Ether、USB

#### ③-3-3 研究成果

下記のとおり高速化を実現し、目標を達成することができた。

特に、Ether 接続 1ksps サンプリングで同期性を保ってデータを取得できることを確認した。

サンプリング周波数： 1.0ksps (単データ、16進テキスト、RS422/USB/Ether (UDP))

5.8ksps (連続データ、独自バイナリ、RS422/USB/Ether (TCP))

データ通信方式に関しては、フォーマット、プロトコル、ハード I/F のすべての組み合わせで、問題なく通信できることを確認した。

### ④FA 制御システムソフトの開発

#### ④-1:FA 制御システムソフトの開発

(担当：株式会社シーイーシー、株式会社ワコー)

#### ④-1-1 研究目的及び目標

ロボットとPCを繋ぐためのインターフェースとして多くのメーカーのロボット制御装置に利用されているTCP/IPを使用する。ただし、TCP/IPでのプロトコルについては各社で異なっているため、すべてを汎用化することはできない。

株式会社シーイーシーは、個々のメーカーごとに専用ライブラリを開発し、ライブラリの切り替えるだけでメーカーに対応可能なロボット制御用アプリケーションを開発する。

株式会社ワコーは、センサ用ライブラリを開発する。制御用としてPCとの同期性を高めたプロトコルを実装し、最小1msec サンプリングに対応する(Etherの場合)。また、伝送速度を高めたプロトコルも実装し、最小0.15msec サンプリングに対応する。ロボットに対しては100msec 以内のデータ転送を行えることを目標とする。

#### ④-1-2 実験方法

開発した制御用アプリケーションは以下の表1に示すモジュールで構成されている。

モジュール名称	説明
RCFMS.exe	アプリケーション本体 (Robot Controlled by Force/Moment Sensor) センサデータを取り込み、ロボットへ移動量情報を送信する。
RcfmsMemory.dll	センサ・ロボットのデータを格納する共有メモリを管理するモジュール
Settings.dll	センサやロボットの条件設定ダイアログを管理するモジュール
VirtualFMS.dll	ソフトウェアでエミュレートしたセンサ機能を実装したモジュール
FMS_IF.dll	センサデータ受信モジュール
RBT_IF_****.dll ※	各社毎のTCP/IP通信を制御するロボットドライバモジュール

表1 ロボット制御用アプリケーション構成モジュール

表中の※で示したロボットドライバは、以下の4つのものを用意しており、制御アプリケーションは動的に所望のロボットドライバを切替えて利用する。

- ・RBT\_IF.dll : 雛形ドライバ。(実ドライバ、これをコピーし固有の機能を実装)
- ・RBT\_IF\_Nachi\_V1.dll : A社用ドライバ。  
TCP/IPソケット通信により、移動時間・移動量を制御装置の変数に書き込むドライバ。(制御装置はロボット言語で実行)
- ・RBT\_IF\_Motoman\_V1.dll : B社用ドライバ。  
B社提供のAPIを利用し、直接、移動命令を発行するドライバ。
- ・RBT\_IF\_Motoman\_V2.dll : B社用ドライバ。  
B社提供のAPIを利用し、移動速度・移動量を制御装置の変数に書き込むドライバ。(制御装置はロボット言語で実行)

制御においては、1 サンプル以内で“センサ入力 → 制御処理 → アクチュエータ出力”のデータフローを完了させる必要がある。そこで、PC との同期性が高く、制御プログラム側でサンプリング周波数を決めることができるよう、単データ方式を使う。

また、当初は DLL 等の専用ライブラリを開発することを考えたが受信機器、特に Linux-PC 等においては OS の種類がとて多く、主要なものだけに限定したとしても、それらに一つ一つ対応することは費用対効果が小さい。そこで、専用ライブラリ等を使用しなくても済むような仕組みを考えた。

#### ④-1-3 研究成果

制御アプリケーションのセンサ、及びロボットとの通信周期の性能を測定した。いずれも、5msec のサンプリング周期で安定して処理されており、ロボットに対して100msec 以内でデータ転送を行うという目標を達成した。ただし、ロボットとの通信周期はロボット制御装置の側の処理時間に依存するため、100msec 以内のデータ転送を行うためには制御装置の通信処理時間が90msec程度かそれ以下である必要がある。

センサから制御アプリケーションの動作する PC への通信には、基本的にライブラリは用意しないでアプリ側で簡単な処理を記述して対応する。これにより、OS の依存性を解消した。ただし、補助的にソースコードライブラリを提供する。また、仮想 COM ポート化することにより I/F (RS422, USB, Ether) のハードウェア依存性を解消した。これらは実際に Linux (Ubuntu) でテスト用アプリを作成し、問題なく通信できることを確認した。

## ④-2: ロボットシミュレーション

(担当: 株式会社シーイーシー)

### ④-2-1 研究目的及び目標

ロボット制御するためにはロボット言語と呼ばれるマクロによるプログラミングが必要になる。このプログラミングによってセンサデータを取り込み実際にロボットの動作を制御できるようになるが、実機で動作検証を行うには試行錯誤を繰り返す必要がある。そこで、上記のロボット制御用アプリケーションにロボットの動作を3D表示で検証可能なシミュレーションを開発することで、力覚センサを組み込んだロボット実機での検証時間の短縮を図る。

### ④-2-2 実験方法(開発内容)

3DシミュレータのVirFit (自社製品) に対してOPC severを経由してRCFMS.exeを接続するアプリケーションを開発する。力覚センサからVirFitまでのデータの流れを以下の図14に示す。

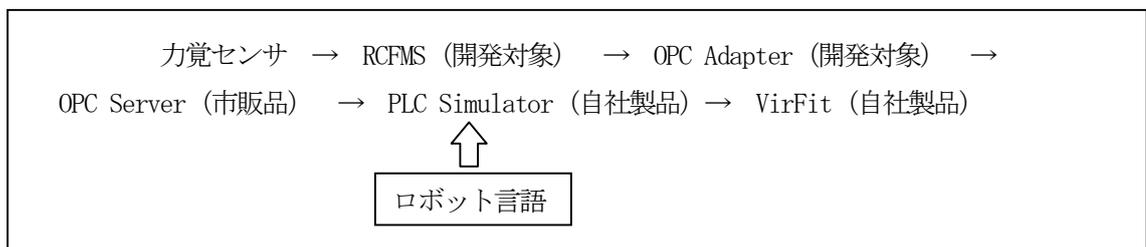


図14 センサからVirfitまでのデータの流れ

力覚センサのデータはロボット言語の変数としてPLC Simulatorに取り込まれ、ロボット言語のプログラムの実行結果をPLC SimulatorがVirFitへ送信することでロボットの動作を3Dでディスプレイ表示できるようになる。

### ④-2-3 研究成果

力覚センサが出力するデータをロボット言語の変数として取り込むことができるようになったため、動作検証を3Dの仮想空間上でシミュレーションすることが可能になった。

今回はSlimに準拠したロボット言語で検証を行ったが、ロボットメーカーによってはロボット言語の方言が存在しており、特にC社製やD社製のロボットではそのまま使用する事ができない。したがって今後はこれらのロボットメーカー専用のオプションを開発する必要がある。

今回VirFitへのデータの流れをOPCSever経由としたため、OPCインターフェースを持つ他のアプリケーションと力覚センサが接続可能となった。この事は力覚センサの利用範囲拡大に有効である。

## ⑤ センサ評価

### ⑤-1: 静特性評価

(担当: 株式会社ワコー、株式会社ワコーテック)

#### ⑤-1-1 研究目的及び目標

センサの基本的な性能である感度特性ならびに温度特性の評価を行う。現有設備及び高荷重計測システムを利用した測定技術を駆使し、感度特性 (感度、ノイズ、直線性、他軸感度) や温度特性といったセンサ基本性能の評価を行い、目標仕様に対する達成度を確認する。

#### ⑤-1-2 実験方法

感度特性の評価にあたって測定の自動化による安定した測定結果と作業安全の確保を図るため、我々は図15に示すような高荷重計測システムを製作した。本装置においては所定荷重

を与える手段として値付済みのウェイト（錘）を用いており、同じウェイトを使用する限り確実に付加荷重を再現するため測定結果の安定性や再現性に秀でている。使用するウェイトの重量は電子天秤等で前もって高精度計測ができるので、装置が与える荷重の絶対精度も非常に高く、高性能な力覚センサの評価システムにふさわしい能力のものとなっている。

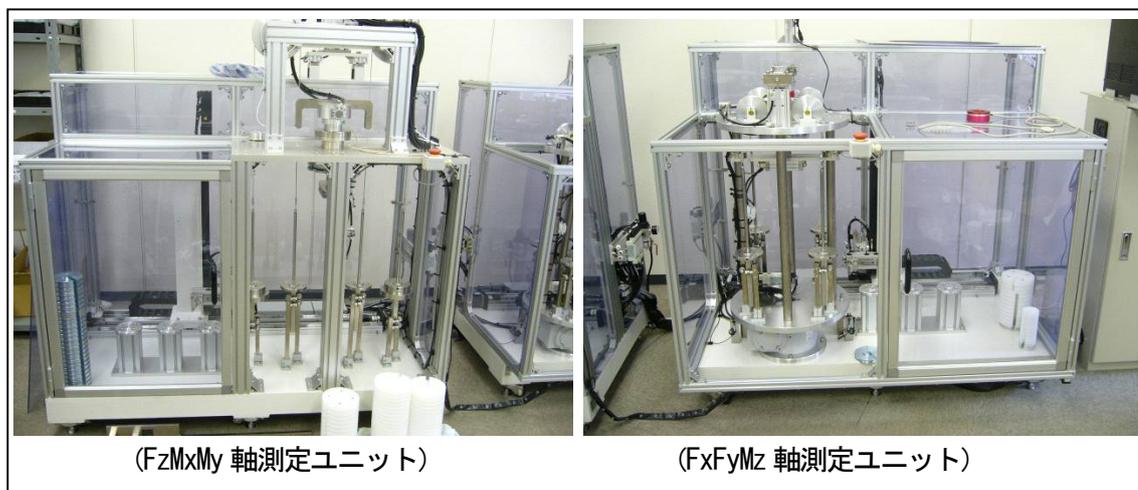


図 15 高荷重測定システム外観

温度特性についてはワコー所有の恒温槽を用いて行った。

### ⑤-1-3 研究成果

各軸方向の感度について測定した結果を図 16 に示す。評価範囲は目標定格の 200N と 4Nm のレンジで行った。本評価結果より今回製作したプレス製 6 軸力覚センサの有する力感度特性が目標仕様を達成していることが確認できた。このとき、静止ノイズの最も大きかった Fz 軸出力における静止ノイズの量は 0.26%FS(rms)と低く良好な特性が得られた。

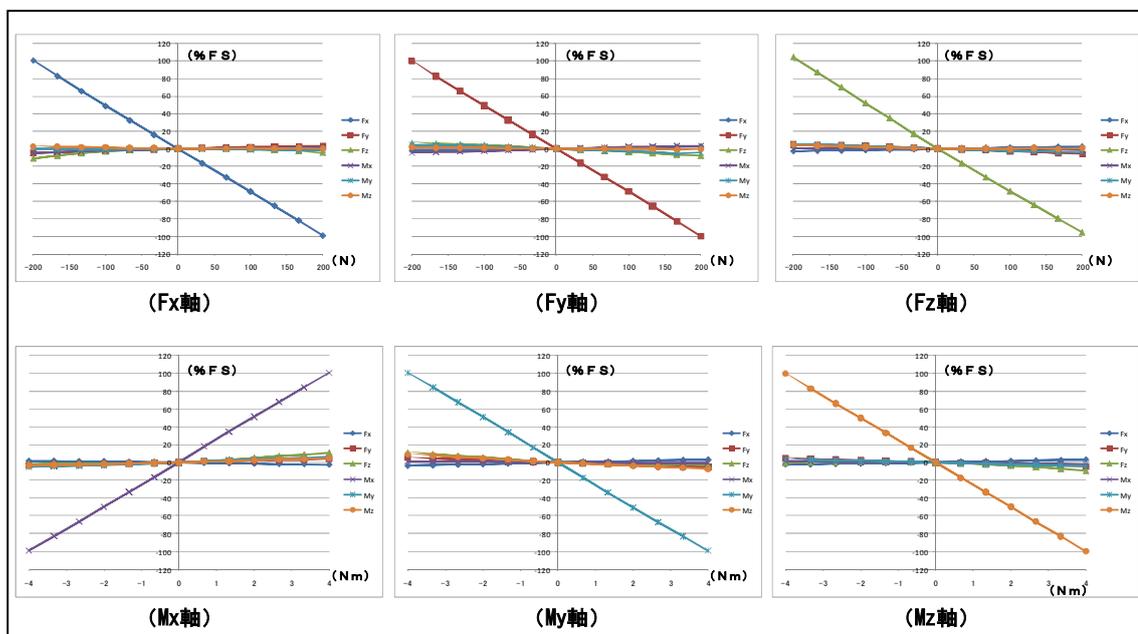


図 16 感度特性測定結果；目標定格荷重

本センサはマイコン基板がセンサ外側のコネクタケース側に内蔵されているためマイコンの発熱がセンサ検出部へ与える影響が少なく、図 17 のように非常に良好なセンサ温度特性が得られた。また、センサを冷間起動してから周囲の環境温度に馴染むまでの通電変動特性につ

いてもマイコンの熱の影響を受けにくい構造的利点により、実用上では変動がほとんど気にならないレベルにあった。

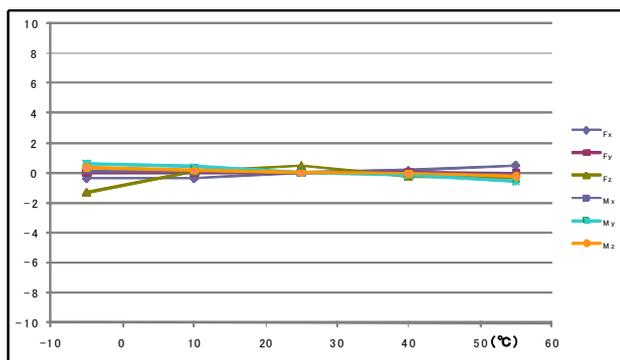


図 17 温度特性測定結果

以上のように、今回製作したプレス製 6 軸力覚センサの静特性を評価したところ本センサがロボットへの適用に十分な性能を有しており、力覚センサ製品として優れているものであることが確認できた。

## ⑤-2: 信頼性評価

(担当：株式会社ワコー、富山県工業技術センター)

### ⑤-2-1 研究目的及び目標

本センサが産業分野へ適用しうる信頼性を有していることを確認する。温度サイクル・疲労試験・引張強度試験・耐電磁ノイズなどのセンサに加わる外部環境に対する信頼性の評価を行う。

### ⑤-2-2 実験方法

本センサについて表 2 に示す各信頼性試験項目の評価を行なった。

No.	試験項目	試験条件	試験時間	試験目的
1	温度サイクル試験	0°C (30min 保持) ⇔ 50°C (30min 保持)	20 サイクル	高温や低温の環境変化の影響に対する耐性を評価。
2	疲労試験	定格荷重	10 万回	繰り返し荷重を受けた場合の機械的な耐性を評価。
3	引張強度試験	破壊まで荷重		破壊する荷重を調査
4	耐電磁ノイズ試験	4-1; 放射エミッション測定 4-2; 雷サージ試験 4kV		機器から放射される電磁波の測定 機器の高電圧に対する耐性を評価

表 2. 信頼性試験項目

### ⑤-2-3 研究成果

#### 1. 温度サイクル試験

温度サイクル付加前後の変動を図 18 に示す。変化量は 1.0%FS 以下と非常に小さく、この負荷サイクルでは全く問題無いといえる。

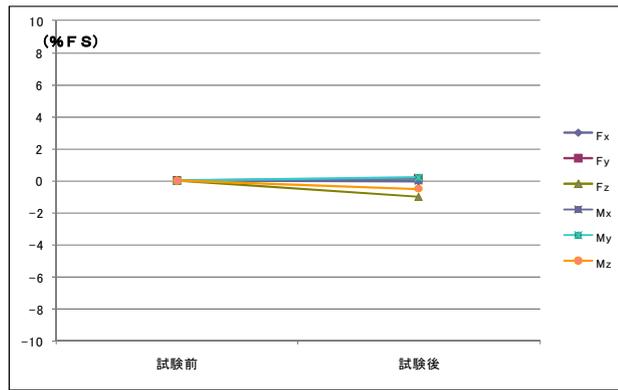


図 18 温度サイクル試験結果

## 2. 疲労試験

図 19 は疲労試験前後の出力変化量を示す。試験後の出力変化量は、10%FS以内であり目標値を満足できた。

## 3. 引張り強度試験

図 20 は引張り方向の負荷に対する力センサの出力値を示す。X 方向に引張った場合、300N でストoppaが機能し、それ以降は、負荷の増加にともなうセンサ出力の増加が抑えられることを確認できた。しかし 1100N 付近から出力曲線の傾きが大きくなっており、この時点でストoppaも変形したと考えられる。Z 方向に引張った場合、500N でストoppaが機能し、センサ出力の増加抑えられている。他の軸については、6000N 付近で出力異常となった。最終的に Z 軸方向に 10000N まで負荷したが、センサの破断は確認できなかった。

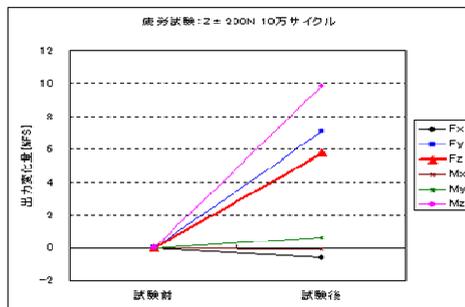


図 19 疲労試験結果

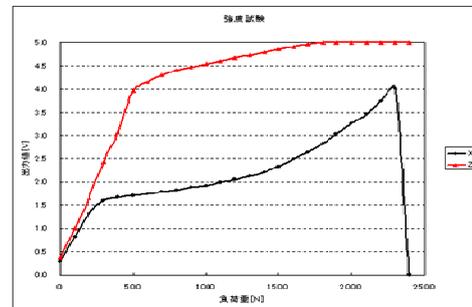


図 20 引張強度試験結果

## 4. 耐電磁ノイズ試験

### 4-1. 放射エミッション測定

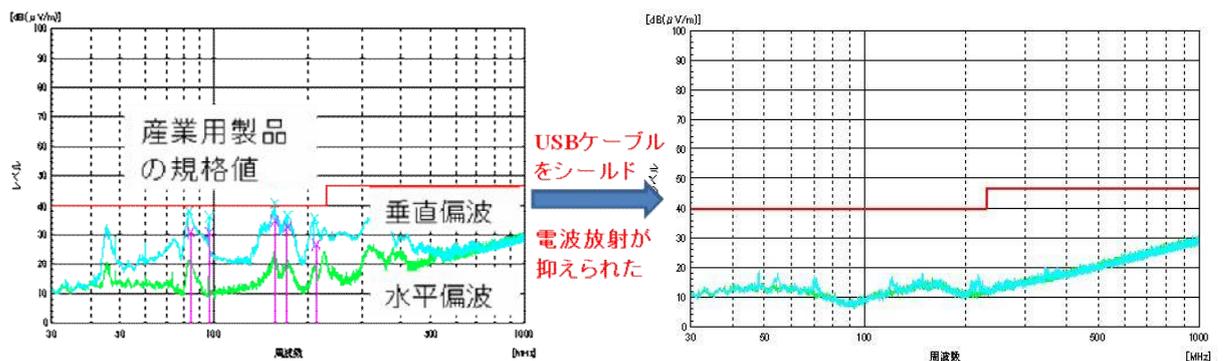


図 21 放射エミッション試験結果

図 21 は放射エミッションの測定結果を示す。センサを起動させた状態で放射される電波を測定したところ、産業用製品の規格値 (CISPR11 CLASS\_A) は超えていないが垂直方向の偏波が確認できた。通信線を完全にシールド材で覆うことで電波の放射が抑えられた。センサそのものからはほとんど電波放射がないことを確認した。

#### 4-2. 雷サージ試験機

図 22 のように力センサの電力線 (L1-L2 間) に落雷などの高エネルギーを想定して 4kV の電圧を印加した。印加後センサの特性を確認したところ異常は確認できなかった。(IEC 規格のレベル 4 に相当)



図 22 雷サージ試験

### ⑤-3: 実機評価

(担当：株式会社ワコー、株式会社ワコーテック、株式会社シーイーシー、富山県立大学)

#### ⑤-3-1 研究目的及び目標

本センサが実用的な性能を発揮できるかをロボット実機により確認する。本テーマで開発したセンサ及びFA制御システムソフトについて、ロボット実機へ適用し評価を行う。

#### ⑤-3-2 実験方法

制御アプリケーションにより、力覚センサとA社制御装置、及び力覚センサとB社制御装置の通信を実行し、ロボットフランジ面に取り付けたセンサ付きのツールを操作することでロボット実機でのダイレクトティーチング動作を確認した。A社制御装置は、ワコーに設置してある小型ロボットで確認した。B社制御装置はバリトリ用のロボットで制御装置はA社製だが、ロボット自体はB社オリジナルの5軸ロボットである。

さらに、M社製ロボットに取り付けた状態で所定の作業動作を実施し、既存のセンサと同等の情報が取得可能か調査した。評価対象の6軸力覚センサ (USB出力) と比較するセンサはN社製の力覚センサを用いた。実施するコネクタの押し込み作業においては、コネクタピンの硬さによって挿入作業成功時には特異な挿入反力が計測されることがわかっている。図23に実験システムの外観を示す。比較する各力覚センサが縦に続いて配置されているため同じ力 (挿入反力) を同時に計測することとなり、正確な比較ができる。

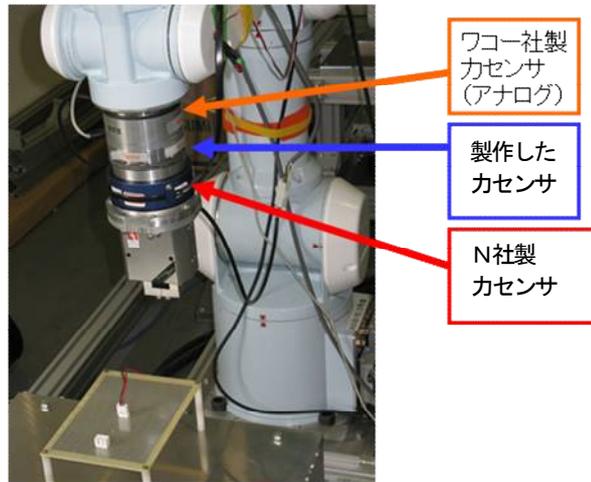


図 23 コネクタ挿入反力の計測

### ⑤-3-3 研究成果

今回製作した制御アプリケーションを用いてのA社制御装置については、RBT\_IF\_Nachi\_V1. dllを利用して行った。その結果、センサ先端のツールを操作すると追従してロボットの軸が移動し、センサ荷重の強弱にも反応した。このときの通信サンプリング周期は100msecであり、力覚センサによる荷重制御を利用したダイレクトティーチング動作が実現できた。

B社制御装置については、2つのロボットドライバを用意しており、それぞれについて動作を確認した。なお、B社制御装置の場合はB社提供ライブラリのレスポンスが遅いため、制御アプリケーションはデータ送信のみでの検証とした。まずRBT\_IF\_Motoman\_V1. dll（移動命令を発行するドライバ）を利用した検証ではアプリケーション側の通信サンプリング周期を400msecとし、一回の移動時間が0.5秒程になるような設定とした。動作自体は非常にスムーズに追従してロボットの軸が移動するが、サンプリング周期が400msecであることから、その分のタイムラグが発生してしまう。つまり、ロボットの反応に0.4秒程度の遅れが生じる結果となった。次にRBT\_IF\_Motoman\_V2. dll（移動情報を制御装置の変数に書き込むドライバ）を利用した検証であるが、ライブラリの処理性能が平均で1178msecだったためアプリケーション側の通信サンプリング周期は1500msecとした。この場合も、RBT\_IF\_Motoman\_V1. dllの場合と同様にタイムラグが発生するが、2秒程度の遅れが生じるためセンサから手を離しても2秒ほど惰走してしまう結果となった。

上記検証結果より、A社制御装置では6軸力覚センサによるダイレクトティーチング動作を問題無く実現できたが、B社制御装置についてはライブラリの性能のためTCP/IPによる制御は困難であった。B社制御装置への対策としては、TCP/IP通信による制御でなくハードワイヤによるI/O信号で送信する方法が考えられる。そうすれば、送信時間はほぼ0になり、アプリケーション側のデータ送出処理時間は、1msecも掛からないので、通信サンプリング周期を5msecにまで短縮しても動作可能であることを確認した。

ロボットのコネクタ押し込み作業における挿入反力を力センサにより測定した結果を図24に示す。作業開始して1秒後くらいから挿入作業が開始され、4.5秒付近で作業が完了しており、その後は速度制御によって力センサの上限値になるまで移動している。コネクタピン形状によって、挿入作業中に挿入反力が上下動していることが確認できた。リファレンスとして用いたN社製力覚センサと同等の出力が得られており、デジタル通信を用いることで、アンテナ効果によるノイズが抑えられていることも確認できた。

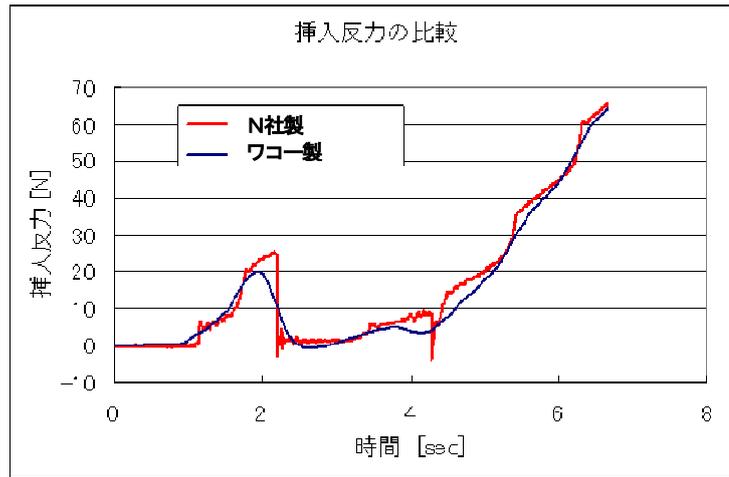


図 24 挿入反力計測結果の比較

## 最終章 全体総括

ワコー製の静電容量型6軸力覚センサは低コストな検出系とストッパ配備による頑丈さを備え、精密作業工程等を行う産業ロボット分野の力制御に適した製品である。しかしながら力覚センサのこの分野への普及を図るにはさらなる低価格化が要求される。また、力覚センサを使用してロボットを制御するには専用のソフトウェアが個別に必要となるため、実際の導入作業の難易度が高い。

本研究開発では、プレス加工による製法とすることでセンサ強度は確保しつつ低価格化を図るとともに制御用のインターフェースやアプリケーションソフトウェアを用意して導入しやすくすることで、市場への普及を目指した開発を行い、以下の成果を得ることができた。

### ①精密プレス加工技術の開発

ステンレス厚板の総せん断打ち抜き加工において加工条件の最適化と後工程の工夫により目標精度を達成した。加えて、プレスによる結合を用いて接合作業時間の短縮とコストダウンを図った。また、機構部の核となる起歪体構造部品の接合にロウ付法を試行してその可能性を確認した。プレスによる結合工程においては、結合部品間の位置精度や結合用形状と他の機能部位との位置精度を確保するため、金型の位置決め機構を工夫することで目標を達成した。

### ②力覚センサ構造の開発

プレス加工を前提として、センサ構造は平板状部品で構成されるような設計とした。弾性変形を生じる部品についてはFEM解析により寸法と配置を最適化している。ストッパ機構については調整式とし、加工精度に機能が左右されにくいものとした。センサ中央部にはφ15の穴を配してロボットへの適用を広げている。

### ③信号処理部の開発

安定な静電容量検出が可能な回路とし、配線の工程も簡単なものとした。検出した信号の処理はマイコンでデジタル演算するが、小型なマイコンを用いてセンサ外部に配置することでセンサ内部のスペースを確保した。マイコン動作ソフトウェアにおいては、クロックの低さを補うためプログラムでの工夫により、高速な処理を実現した。

### ④FA制御システムソフトの開発

ロボットとPCを繋ぐためのインターフェースとしてロボット制御装置専用のライブラリ切替で広く対応可能なロボット制御用アプリケーションを開発した。力覚センサの出力をロボット言語の変数として取

り込めるようになったため、動作検証を仮想空間上での3Dシミュレーションを用いて行うことが可能となった。

#### ⑤センサ評価

実際に製作したセンサを用いて静特性の評価を行ったところ、本センサがロボットへの適用に十分な性能を有しており、力覚センサ製品として優れているものであることが確認できた。さらに、外部環境に対する信頼性評価試験を行い、本センサが産業分野へ適用しうる信頼性を有していることを確認した。制御アプリケーションにより力覚センサとロボット制御装置との通信を実行し、ロボット実機でのダイレクトティーチング動作を確認した。

#### 【研究開発後の課題と今後の事業展開について】

本研究における目標は概ね達成したが未解決な課題もいくつか残っており、今後も解決に向けてさらなる追究を続ける。特に、ロウ付による接合方法には大きな可能性を確認できたので、加工条件の最適化により安定した接合を必ず実現させたい。このことはセンサ性能と生産性の向上に大きなブレイクスルーとなるとみている。また、ロボット制御用アプリケーションが有効性を発揮できない状況においても、代替手段として提案できるようなワイヤードI/O接続法を確立することでより柔軟で広いセンサ適用を可能とさせたい。

今後は、上記の残課題の解決を進めるとともに、事業化を目指してユーザーにサンプルの貸し出しを行なうことで市場のニーズに合った商品開発を進めていく。また、それによりユーザー側から要求される様々な条件の信頼性試験を実施し、量産へ向けての製品の信頼性をさらに向上させる。加えて、本事業での成果に満足することなく、更なるコストダウンを図り量産化を目指すこととしている。今回プレス製作化を適用したのはセンサの核となる部分のみであったため、周辺の部品にもプレス化を導入する余地がある。これらを通じて更なる低価格化と高性能化を目指し、市場の様々な要求に満足できる製品の開発と提供を行うこととする。