

平成21年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「三次元超音波と光の複合化画像処理技術開発によるロボットビジョンセンサの実用化」

研究開発成果等報告書

平成22年3月31日

委託者 近畿経済産業局
委託先 株式会社プロアシスト

「三次元超音波と光の複合化画像処理技術開発によるロボットビジョンセンサの実用化」
研究開発成果等報告書

目次

第1章	研究開発の概要	2
1-1	研究開発の背景・研究目的及び目標	2
1-2	研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）	4
1-3	成果概要	5
1-4	当該プロジェクト連絡窓口	6
第2章	空中用超音波アレイセンサの開発	7
2-1	静電型センサデバイスの概要	7
2-2	試作デバイス	7
2-3	デバイス評価	7
第3章	光学式距離画像センサの開発	10
3-1	光学式距離画像センサの概要	10
3-2	形状が未知の三次元物体の把持点検出	10
第4章	超音波三次元位置計測信号処理技術の開発	14
4-1	ナノ結晶音源を用いたスペクトラム拡散信号処理	14
4-2	ピエゾタイト音源を用いたスペクトラム拡散変復調処理	18
4-3	ナノ結晶音源とアレイセンサのスキャン走査による三次元位置計測	20
第5章	光学式計測と超音波計測の複合化処理エンジンの開発	21
5-1	概要	21
5-2	三次元超音波センサ把持点確認	22
第6章	高速専用 ASIC/FPGA の開発	24
6-1	超音波スペクトラム拡散変復調処理	24
6-2	25チャンネルの超音波遅延加算処理	25
6-3	超音波三次元信号処理用 FPGA の動作確認	36
6-4	画像信号処理用 eASIC	28
6-5	画像信号処理用 eASIC の動作確認	29
第7章	安全エリアフローティング制御技術の開発	32
7-1	安全規格上の位置付け	32
7-2	安全性の確保	32
7-3	安全エリアフローティング制御の概要	37
7-4	安全エリアフローティング制御用超音波センサユニット	38
7-5	安全エリアフローティング制御アルゴリズム	40
7-6	模擬作業エリアでの動作確認	43
第8章	複合ビジョンセンサユニットの開発	44
8-1	超音波センサユニット	44
8-2	光学式センサユニット	44
第9章	全体総括	45
9-1	複数年の研究開発成果	45
9-2	研究開発後の課題・事業化展開	46
	【参考文献】	47

第1章 研究開発の概要

1-1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1-1-1. 研究の背景

わが国製造業は、生産方式が少品種大量生産から多品種変量生産へとシフトし、セル生産方式などの一貫組立作業方式が採用されつつある。また、海外へ展開した工場の日本への回帰の動きも見られ、一層の生産性の向上、品質確保が求められている。また、サービスロボットの分野に於いても市場ニーズに見合った機能と価格を兼ね備えたロボットが提供できれば、労働力不足を補う意味でも巨大な潜在市場が生まれると予測されている。こうした市場を活性化するために、高速、高精度な位置計測が可能で、信頼性・安全性が高く、人との親和性が高いロボットの提供を可能とするロボットビジョンセンサを実用化するものである。

1-1-2. 研究目的及び目標

3次元で高精度なセンシングができる超音波センサと、CCDカメラによる3次元位置計測の、それぞれが持つ特徴を複合した3次元ロボットビジョンセンサを開発する。その実現のために、膨大なデータ群を有機的に結合して超高速で演算処理するアルゴリズムとハードウェアの開発、及び空間で物の位置、形状を高速判定し、透明体や軟弱で壊れやすい被対象物に対しても確実にハンドリングできる情報を瞬時にロボット側に提供する信号処理技術開発を行う。本年度は3年目のプロジェクトの最終年度であり、超音波と光の複合化ロボットビジョンセンサのベースシステムを完成させる。形態は超音波センサと光学的距離画像センサの分離型とし、任意の未知物体を教示なしで把持できるシステムを開発する。また、人とロボットが安全に協働できるため、人最優先でロボットをコントロールするシステムを開発する。

本研究の目的および目標に対する実施結果は以下のとおりである。

① 高感度の空中用静電型アレイセンサの開発

空気中を伝播する超音波は水中や固体中に比べて極めて減衰が大きく、高感度のセンサが求められる。また、アレイ状に配置された各センサの特性が均質で、かつ量産性に優れていることが必要である。さらに、本件研究開発が計画している超音波の符号化信号処理を行うためには超音波帯域以上の周波数帯域で広帯域の応答特性を有するアレイセンサが必要となる。こうした背景から、残留応力の発生が少なく高感度が期待でき、デバイス構造がシンプルで工程が簡単、従って低コスト化が可能で、広帯域の周波数特性が得られることなどから1×5、5×5の静電型アレイセンサを開発する。

【結果】

1×5、5×5の静電型アレイセンサを試作し、感度300mV/paを達成した。また、素子間の感度差5%以内を実現し、周波数特性は100kHzまでフラットな特性を確認した。

② 多値空間コード投影法等による光学式距離画像センサの開発

従来の光学的手段による画像処理では位置計測処理に時間がかかり、黒色物や光沢物の計測に誤差が発生し易くなっていた。これを解決するために、独立行政法人産業技術総合研究所で開発している高機能三次元視覚システムVWをベースにステレオカメラによる任意形状の三次元物体の距離計測および形状計測を可能とし、さらに0.2秒以内の計測時間を目標とする光学式距離画像センサを開発する。

【結果】

ステレオカメラシステムを用い、セグメント法と相関法を併用して三次元座標計測を行い、平行二指ハンドで任意の物体を把持するための点として定義した未知物体の把持点を教示なしで検知することが可能となった。把持点検知に掛かる時間はVGAサイズの8ビットグレースケール画像の取得完了から把持点認識結果出力完了まで150mmS程度になり、当初の目標値0.2秒を達成した。

③ 超音波三次元位置計測信号処理技術の開発

ノイズに強い超音波信号処理を行うためのスペクトラム拡散信号処理と、パルス状の超音波信号により超音波を符号化して送信し、このパルス列単位で三次元超音波信号処理を行うことによりノイズの影響を受けずに位置計測を可能とする信号処理技術を開発する。

また、対象物から超音波の反射波を十分受信できない場合には対象物の近くで音源とセンサを空中でスキャン走査させることにより超音波による三次元位置計測の精度を高める。

【結果】

パルス状の超音波信号を発生する音源(ナノ結晶超音波音源)を用いた超音波位置計測においてスペクトラム拡散信号処理により、ノイズに強い位置計測が可能となった。また、音圧が高いが、残響も長いピエゾタイト音源を用い、この音源に適した音源駆動方法とスペクトラム拡散変復調信号処理の開発によりノイズに強い位置計測が実用可能となった。

また、対象物の近くで音源とセンサを空中でスキャン走査させることにより超音波による三次元位置計測精度を向上するアルゴリズムの開発を行ない実働試験により確認した。

④ 光学的計測と超音波計測の複合化処理エンジンの開発

光学的計測手段が苦手としている光沢のある物体や、透明／半透明な物体の検知には超音波による計測手段を補完的に使用する。光学的計測による捕捉率が設定値を満たさず、超音波計測で一次検知されている場合、超音波によるスキャン走査などの二次検知を必要に応じて行い、超音波と光のデータを複合的かつ補完的に高速・高精度で演算処理し、対象物を捕捉するアルゴリズムを開発する。そのアルゴリズムをソフトウェアと専用ハードウェアで実行する。

【結果】

光学式距離画像センサによる物体の位置計測結果と、超音波センサのスキャン走査により取得した物体の位置計測結果から物体を把持する複合化処理エンジンアルゴリズムを開発し、実験により物体の把持が可能であることを確認した。複合処理エンジンは、1. 光学式計測センサ、2. 超音波位置検出センサ、3. 超音波安全エリアセンサ、4. 把持力センサの4つのセンサからのデータを受信し、5. ロボットマニピレータと6. 二指アクチュエータの動作を統合的に制御する複合処理エンジンである。

⑤ 安全エリアフローティング制御技術開発

人との協働や、人と接するロボットの安全性、親和性を確保するために人の動きを見ながらロボットの動作をコントロールする技術の開発を行う。

【結果】

人とロボットが並んで作業する環境において、共通の作業エリアより人の作業エリアに近いエリアに1×5のレイセンサを1台配置して、人の位置を常時監視し、区分されたエリア内でロボットを停止、待機させる安全エリアフローティング制御の動作が可能であることを確認した。また、1×5のレイセンサを作業エリアに複数台配置し、検出範囲を広げて動作確認を行ったがゴーストの影響で人の検出を行うところまでは行かなかった。継続して検討中。

安衛研で検討中の人間協調型移動機械の安全化検討作業を参考に安全規格との適合性や位置付けを明確にした。

⑥ 高速専用 ASIC 開発

光や超音波を用いた三次元位置計測のための信号処理をハードウェアで高速処理する専用LSIを開発する。

【結果】

カメラの画像データから微分、勾配、エッジデータの演算を行うASICを製作し、カメラ画像をリアルタイムで画像処理できることを確認した。

また、FPGAにより超音波をスペクトラム拡散で変復調し、センサ25素子の遅延加算信号処理を行うアルゴリズムの設計と検証を行った。

⑦ 複合型ビジョンセンサユニット開発

研究開発の各実施項目の成果物を集大成させ、複合型ビジョンセンサユニットとして組み上げる。このユニットはアプリケーションの形態に応じて、超音波音源とアレイセンサの一体型／分離型、超音波センサデバイスと CCD カメラの一体型／分離型などいくつかの形態が考えられるが、本プロジェクトではどれかの一形態をセンサユニットとして完成させる。

【結果】

ステレオカメラと光学式画像処理用ワークステーションと、スキャニング超音波センサユニットと信号処理ボードおよび超音波信号処理用ワークステーションからなる分離型複合ビジョンセンサユニットを開発した。

1－2．研究体制（研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者）

1－2－1．研究組織及び管理体制

1) 事業管理者

株式会社プロアシスト

2) 総括研究代表者

株式会社プロアシスト 代表取締役 生駒京子

3) 副総括研究代表者

独立行政法人産業技術総合研究所 関西産学官連携センター
知的機能連携研究体長 富田文明

4) 再委託先

株式会社 穂高電子技術研究所

株式会社 IngenMSL

独立行政法人 産業技術総合研究所

大阪府立産業技術総合研究所

国立大学法人 大阪大学

5) アドバイザー

立命館大学 情報理工学部 教授 白井良明

松下電工株式会社 生産技術研究所 主査 三高良介

1-2-2. 研究者氏名

氏名	所属・役職
生駒京子 (PL)	(株) プロアシスト 代表取締役
富田文明 (SPL)	(独) 産業技術総合研究所 関西産学官連携センター 知的機能連携研究体長
吉野裕教	(株) プロアシスト ゼネラルマネージャ
西村三千雄	(株) プロアシスト マネージャ
三井利男	(株) プロアシスト マネージャ
真木 啓	(株) プロアシスト
崔 紅国	(株) プロアシスト
上田純哉	(株) プロアシスト
松木 尚	(株) プロアシスト
宝迫皓一	(株) 穂高電子技術研究所 代表取締役
宝迫洋一	(株) 穂高電子技術研究所
李 昇穆	(株) IngenMSL 研究所長
井上幸二	大阪府立産業技術総合研究所 総括研究員
田中恒久	大阪府立産業技術総合研究所 主任研究員
大川裕蔵	大阪府立産業技術総合研究所 主任研究員
金岡祐介	大阪府立産業技術総合研究所 研究員
谷口研二	国立大学法人 大阪大学 工学研究科 教授

1-3. 成果概要

1-3-1. 高感度空中用静電型超音波アレイセンサ

デバイスの変換効率向上及びアレイ素子間の感度差を低減するため、上部電極の pad 部分に TEOS SiO₂ 薄膜を設け、残留応力を考慮してその形状(pattern)を変更することにより、システム全体(変換及び増幅回路を含む、10000 倍増幅)の感度 300 mV/pa を達成した。また、素子間の感度差が向上され、増幅率の微細調整を行うことにより 5%以内の素子間誤差を実現することが可能になった。また、センサの周波数特性は 100kHz までフラットな特性を有することを確認した。一方、デバイスの小型化パッケージングを検討してパッケージングシステムを設計・作製した。変換回路とデバイスを一体化・小型化することによって SNR が向上され、製品化の基盤技術を確保することが可能になった。

1-3-2. 光学式距離画像センの開発

ステレオカメラシステムを用い、セグメント法と相関法を併用して三次元座標計測を行い、平行二指ハンドで任意の物体を把持するための点として定義した未知物体の把持点を教示なしで把持することが可能となった。把持点認識に要する時間は、CPU にデュアルコア Xeon 5450 (3.0GHz)を 2 台、メモリ 3GB を搭載し、OS に Vine Linux 4.2 (Kernel 2.6.16)を用いた環境で、VGA サイズ(640x480 pixel)の 8bit グレースケール画像の取得完了から把持点認識結果出力完了まで 150msec 程度になり、当初の目標値である一物体あたり 0.2 秒を十分に達成した。

1-3-3. 超音波三次元位置計測信号処理技術の開発

音圧が高く、残響が長いピエゾタイト音源に適した駆動方法とスペクトラム拡散変復調信号処理の開発を行い、メインピークに対してサブピークが 1/4 程度の強度で超音波の復調ができることが分かり、ピエゾタイト音源に対してスペクトラム拡散変復調信号処理が実用可能となった。

また、音源の移動と、アレイセンサを複数配置または移動することによって三次元位置計測精度を向上するアルゴリズムの開発を行った。

クロスファンビームの最適指向性設計にとって、生物の学習・進化のモデルである強化学習を用いる方法が有効であることを示した。本報告で開発した強化学習によるアレイセンサの最適設計ツールは、簡単な報酬関数を設計するだけで、近距離での計測または遠距離での計測の場合など、個別の使用状況に応じた望ましいビーム形状やアレイの配置パターンを導出可能であり、設計者にとって柔軟性のある有効な方法である。

1-3-4. 複合化処理エンジンの開発

1. 光学式計測センサ、2. 超音波位置検出センサ、3. 超音波安全エリアセンサ、4. 把持力センサの4つのセンサからのデータを受信し、5. ロボットマニピレータと6. 二指アクチュエータの動作を統合制御し、ロボット作業の状態を管理する複合化処理エンジンを開発した。

1-3-5. 安全エリアフローティング制御技術開発

二次元超音波アレイセンサを安全確認用のセンサとして用い、ロボットと人が安全に協働するためにセンサに求められる安全性能をリスクアセスメントを通して求めた。また、セル生産現場を模擬して作業エリアを複数のエリアに分割して、安全エリアフローティング制御仕様に基づき人とロボットが安全に協働できるための二次元センサの人検知性能を検証した。二次元アレイセンサ1台では人を検知してロボットの動きをコントロールできたが、複数の二次元アレイセンサを連動して検知する場合、ゴーストの問題を解決するという課題が残っている。

1-3-6. 高速専用 ASIC 開発

カメラの画像データから微分、勾配、エッジデータの演算を行う ASIC を製作し、カメラ画像をリアルタイムで画像処理できることを確認した。また、FPGA により超音波をスペクトラム拡散で変復調し、センサ 25 素子の遅延加算信号処理を行うアルゴリズムの設計と検証を行った。

1-3-7. 複合型ビジョンセンサユニット開発

ステレオカメラと光学式画像処理用ワークステーションと、スキャニング超音波センサユニットと信号処理ボードおよび超音波信号処理用ワークステーションからなる分離型複合ビジョンセンサユニットを開発した。

上記の通り、H21 年度に計画していた研究開発をほぼ計画通り実施した。

1-4. 当該プロジェクト連絡窓口

〒541-0043 大阪府大阪市中央区高麗橋 2 丁目 3 番 9 号 星和高麗橋ビル 1 F
株式会社プロアシスト
R & D 本部 本部長 吉野裕教
TEL 06-6231-7288
FAX 06-6231-7261
E-Mail h.yoshino@proassist.co.jp

第2章 空中用超音波アレイセンサの開発

2-1. 静電型センサデバイスの概要

本研究での静電型超音波センサデバイスの基本構造は次の通りである。デバイスの試作は2回行い、1回目の試作デバイスを CMT1、2回目の試作デバイスを CMT2 とする。

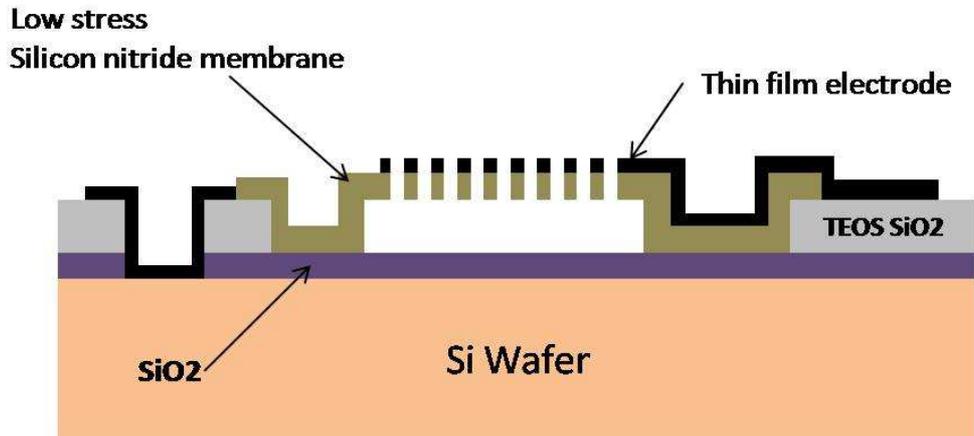


図 2-1-1 静電型超音波センサデバイスの断面図 (CMT1)

項目	仕様
メンブレンの直径	1mm
メンブレンの厚み	1.5 μm
共振周波数	40 kHz
Air gap	2 μm
Air hole ratio	10%

2-2. 試作デバイス (CMT1)

図 2-2-1 は試作したセンサデバイスの素子表面の写真である。また、図 2-2-2 はセンサ素子を 1×5 のアレイ状に配置した 2次元アレイセンサの配置図である。

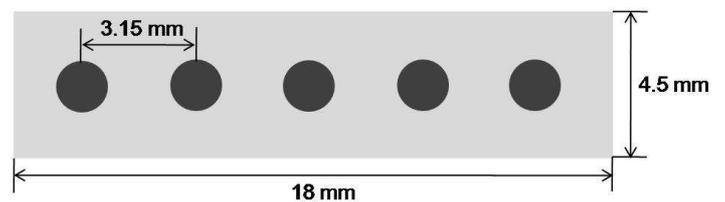
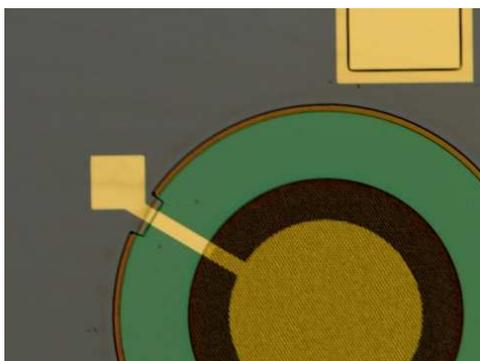


図 2-2-2 1×5 アレイ素子の配置

図 2-2-1 作製されたセンサデバイスの表面

2-3. デバイス評価

1) デバイス評価のための周辺回路構成

デバイスからの信号は弱いため、センサデバイスの周辺には C/V 変換及び増幅回路を構成して配置した。

2) CMT1 デバイスの感度

デバイスに掛けるバイアス電圧(DC)を変えながら感度変化を測定した結果を次に示す。

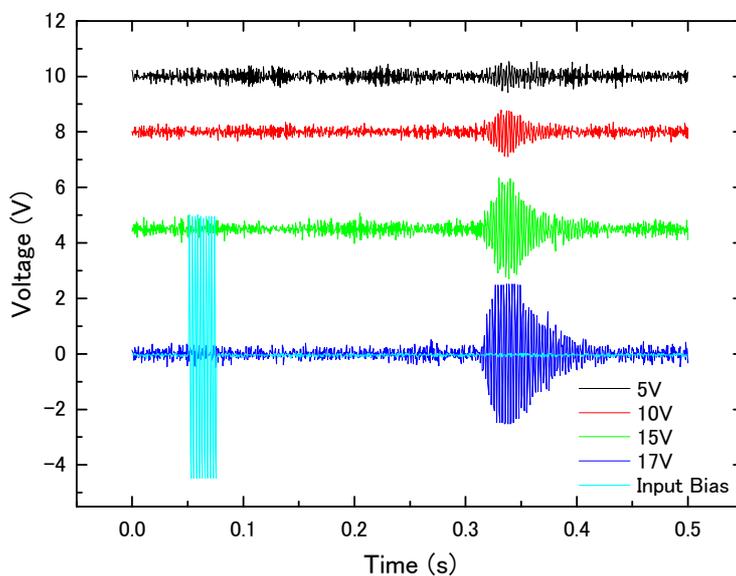


図 2-3-1 DC 電圧変化による受信感度変化

3) CMT1 デバイスの周波数特性

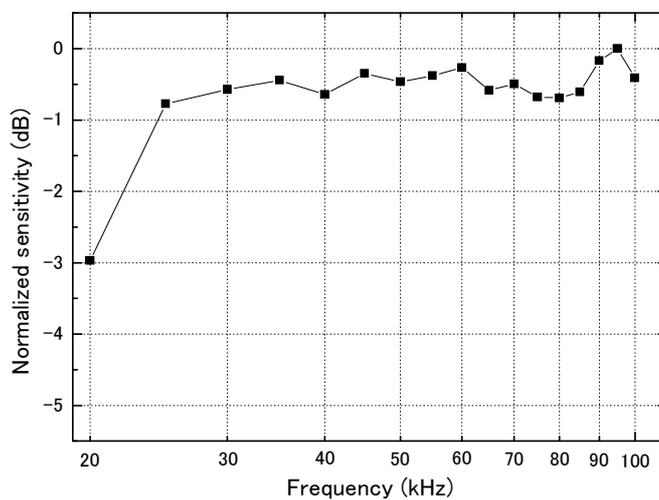


図 2-3-2 周波数変化によるセンサデバイスの感度変化

25kHz から 100kHz までの帯域では比較的平坦な周波数特性を示している。

4) パッケージングの検討

パッケージングの検討として 5ch 分の小型化した変換回路を設計・作製した。下図はパッケージングした 1×5 アレイセンサデバイスの実装図と超音波受信信号を表す。

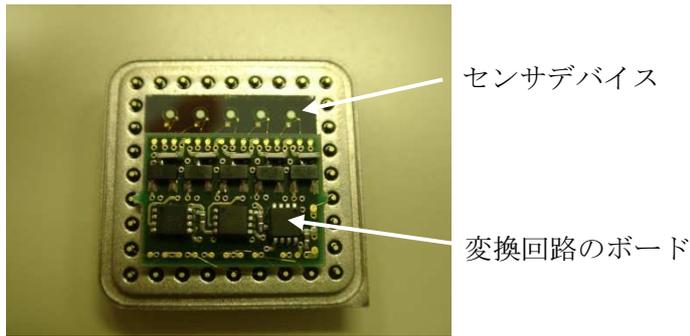


図 2-3-3 1×5 アレイセンサデバイスの実装

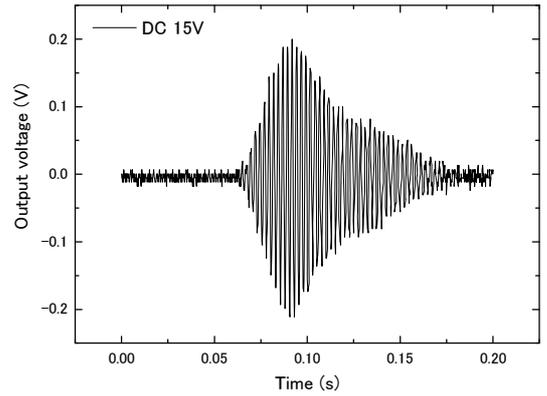


図 2-3-4 小型実装システムの超音波受信結果

5) CMT2 デバイス特性

本研究では、素子間の感度差を防ぐために変換回路の増幅率を微細調整し、TEOS SiO₂ 薄膜の pattern を変更した CMT2 デバイスを作製した。まず、TEOS SiO₂ 薄膜の構造 (pattern) を次のように変更する。



図 2-3-5 TEOS SiO₂ 薄膜を一部変更したセンサデバイス構造断面図

各素子の特性を調べるために、同一条件の測定条件で各素子の感度を測定した。測定条件を次に示す。

音源	村田製 Piezotite
印加電圧	20 V _{pp} (AC), VDC = 18V
周波数	40 KHz
音源とセンサ間の距離	5 cm

測定結果を次に示す。

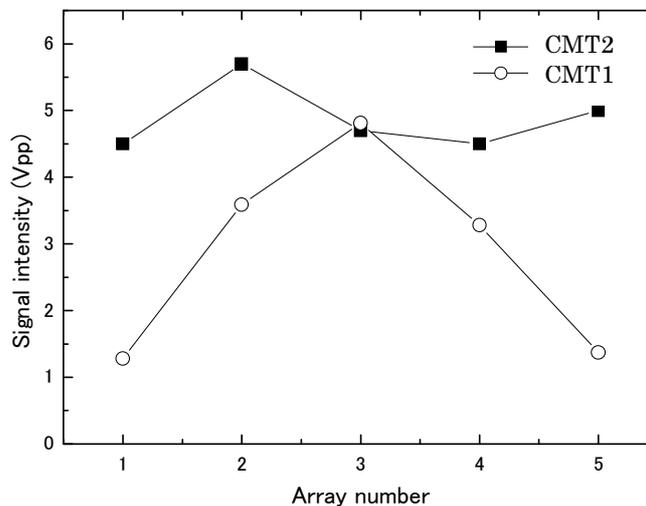


図 2-3-6 CMT1 及び CMT2 デバイスの各素子からの受信信号

図 2-3-6 の結果では、CMT2 デバイスの平均感度が CMT1 に比べて増加され、素子間の感度変化も少なくなっていることが分かる。システム全体（変換及び増幅回路を含む、10000 倍増幅）の感度は 300 mV/pa になり、デバイスのみの感度は約 30 μ V/Pa になった。また、素子間の感度差が向上し、増幅率の微細調整を行うことによって 5% 以内の素子間誤差を実現した。

第 3 章 光学式距離画像センサの開発

3-1. 光学式距離画像センサの概要

光学式距離画像センサでの三次元座標計測方法としては

- ・装置構成が簡便
- ・パッシブな手法であるため計測対象空間に与える影響が最小
- ・時系列に依らない処理のため対象物の動きに影響されない

の 3 点からマルチカメラシステムによるステレオ画像法を採用することとした。また三次元座標計測アルゴリズムには、対象物の輪郭線情報を用いることで線単位で高精度の距離情報を取得可能となるセグメント法と、対象物の距離データを密に得ることで面情報が取得可能となる相関法を併用することとした。

3-2. 形状が未知の三次元物体の把持点検出

3-2-1. 把持点の定義

本研究では未知物体の把持点を、「固定された光学式センサにより検出可能な平行二指ハンドを持つマニピュレータで任意の物体を把持するための点」として以下のように定義することとした。

- ・視線と物体表面の法線のなす角が 90° 程度の 2 点
- ・物体表面の法線が同一直線上に存在する 2 点
- ・2 点の接平面がハンドで把持可能な間隔を持つ
- ・2 点間の物体表面での視線方向への距離がハンドで把持可能な距離を持つ

ただしマニピュレータは物体に対し常に光学式センサの視線方向から接近するものとした。

条件 1 は光学式センサに由来する制約条件であり、条件 2~4 は平行二指ハンドの機構に由来する制約条件である。

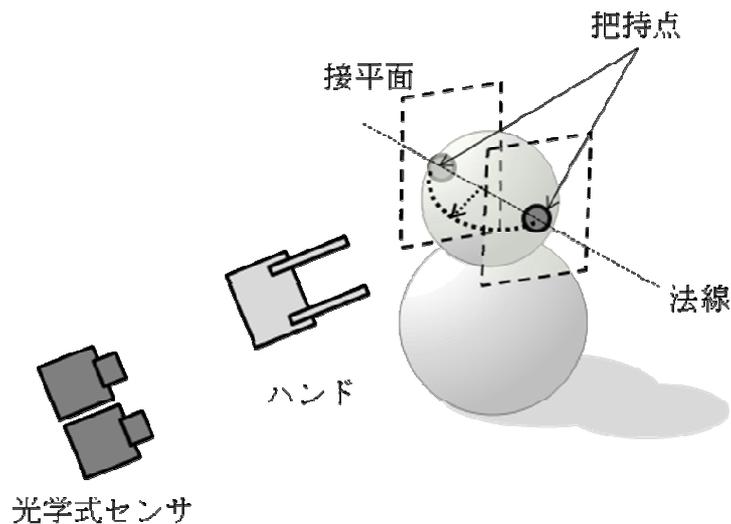


図 3-2-1 把持点の定義

3-2-2. 把持点検出アルゴリズムの概要

把持点検出アルゴリズムは図 3-2-2 に示すように、セグメント法を用いた把持点候補リスト作成、

および相関法を用いた候補リストの検証の2段階に分けることとした。

セグメント法による距離計測から把持点候補リスト作成までのプロセスと相関法による距離計測プロセスはそれぞれ並列に処理され、リスト検証の段階で結果がマージされる。

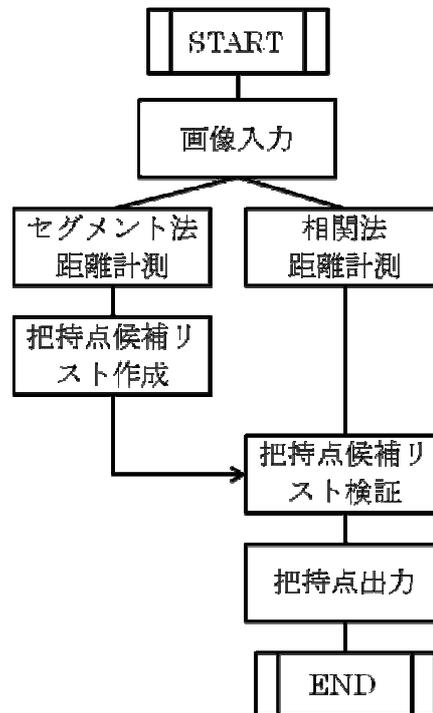


図 3-2-2 把持点検出アルゴリズムの概要

本研究では、境界線付近に存在する把持点候補をセグメント法により高精度に認識し、得られた候補点リストについてそれぞれ相関法により得られる面情報を用いて、法線方向を決定し、把持点の定義を満たすか否かの検証を行うことで、把持点を高速かつ高精度に認識することを試みた。

3-2-3. セグメント法による把持点候補リスト作成

セグメント法による把持点候補リストは、セグメントデータ中に含まれるサンプリング点から以下の条件を満たすものを列挙することで作成した。(図 3-2-3 参照)

1. 候補点 2 点の直線距離(d)が閾値以内
2. 2 点のそれぞれの接線がほぼ平行 (接線同士のなす角= θ)
3. 2 点を結ぶ直線とそれぞれの点の接線がほぼ直交 (直線と接線のなす角= $\phi 1, \phi 2$)
4. 候補点 2 点を結ぶ直線と視線ベクトルがほぼ直交 (直線と視線ベクトルのなす角= σ)

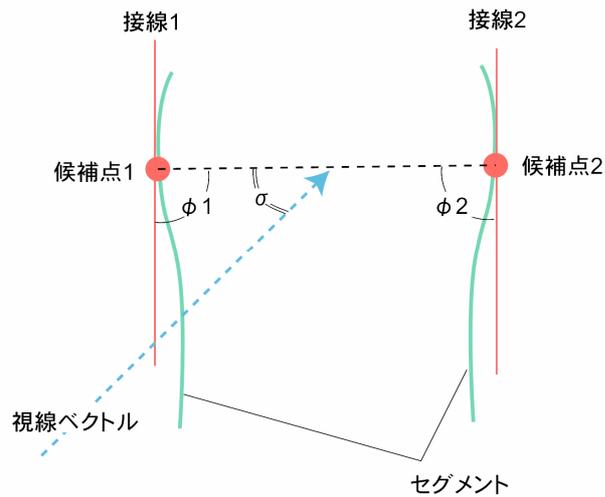


図 3-2-3 把持点候補検出条件

これらは 3-2-1 で定義した把持点の定義 1.~3.をセグメント法により満たすための条件となる。なお、実装においてはそれぞれの閾値を

- 2点間距離: 40mm~90mm (ハンド物理条件)
- 平行条件: $\cos(\theta) \geq 0.99$
- 接線の直行条件: $\cos(\phi n) \leq 0.1$
- 視線ベクトルとの直行条件: $\cos(\sigma) \leq 0.259$

と設定した。

図 3-2-4 に原画像と本アルゴリズムにより作成された把持点候補リストを示す。

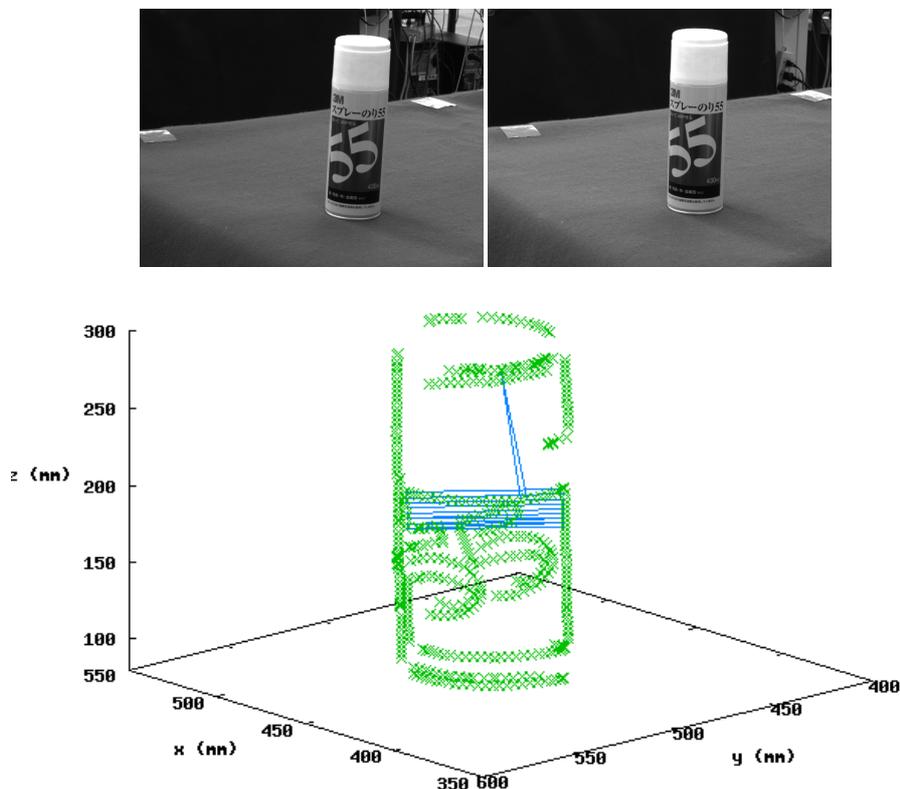


図 3-2-4 把持点候補リスト認識結果

図中、緑の点はサンプリング点、水色の細線は把持点候補同士を結ぶ線を表す。この図より明らかなように、セグメント法による方法では、把持可能な点が十分に検出可能であるものの、缶の上部と胴体部の模様との間のように実際には把持不能な点も同時に検出されている。

3-2-4. 相関法による把持点候補リスト検証

前節で示したように、セグメント法による方法では実際には把持不能な点も把持点候補として認識されることがある。このような候補点を排除するため、セグメント法によりリストアップされた把持点候補を相関法により得られた面情報に基づいて以下の条件で検査することとした。(図 3-2-5 参照)

- ・ 両端の法線方向が外向きにほぼ平行 (法線方向のなす角 $=\lambda$)
- ・ 2点を結ぶ直線と物体表面との距離が閾値以内
- ・ 視線ベクトルを法線とし2点を結ぶ直線を含む平面を一面とする、高さ一定値の直方体内部に物体表面以外の対象物が存在しない

これらは 3-2-1 で定義した把持点の定義 1.~4.を満たす条件となる。加えて検証項目 3.では把持を行うフィンガの幅も考慮し、物体がフィンガに干渉しないことも検査している。

実装においてはそれぞれの閾値を

- ・ 平行条件: $\cos(\lambda) \geq 0.99$
- ・ 直線と物体表面との距離: 0~80.0mm (ハンド物理条件)
- ・ 干渉チェックを行う直方体の高さ: 30mm (ハンド物理条件)

と設定した。

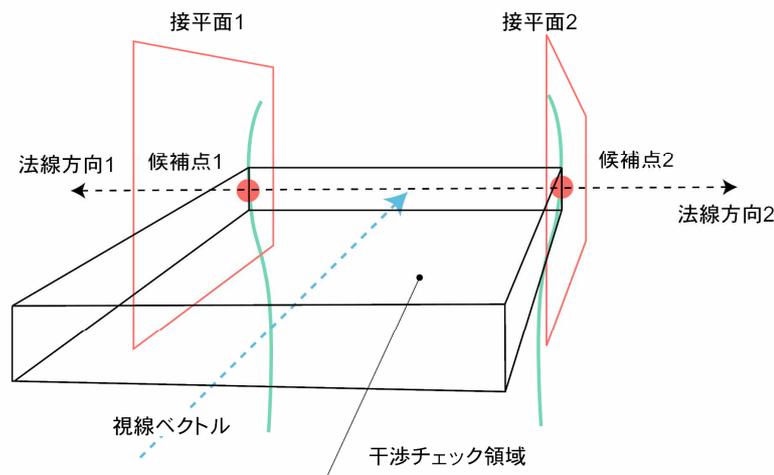
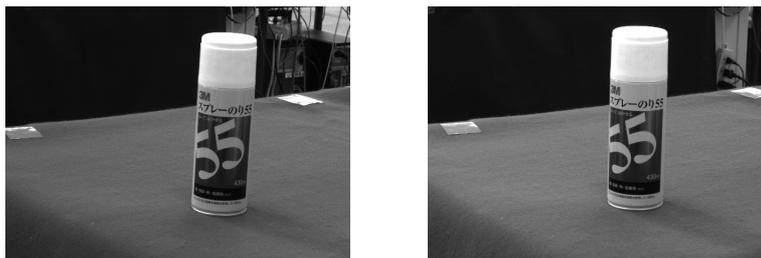


図 3-2-5 把持点候補検証条件

図 3-2-6 に本アルゴリズムにより認識された把持点を示す。



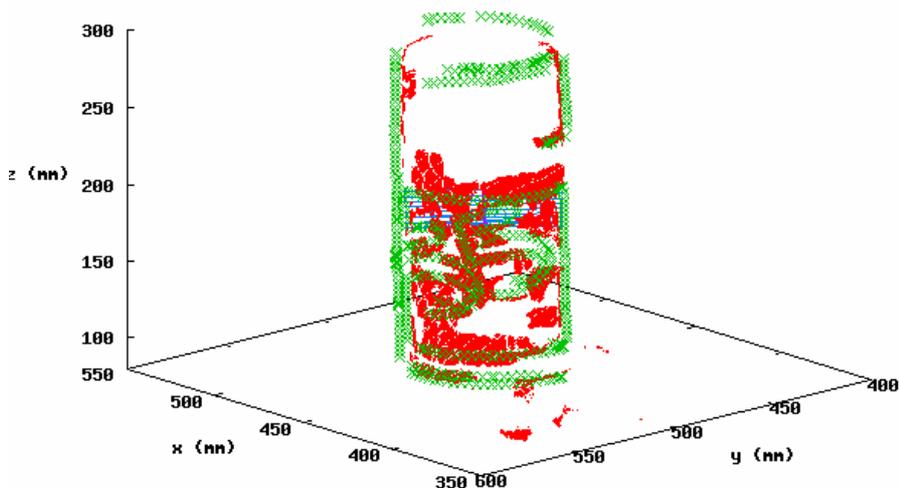


図 3-2-6 把持点認識結果

図中、緑の点はセグメント法によるサンプリング点、赤の点は相関法により認識された面、水色の細線は把持点同士を結ぶ線をそれぞれ表す。

この図よりセグメント法による方法で検出されていた把持不能な点が面情報を用いた検証により排除され、相関法による把持点候補リストの検証が有効に機能していることがわかる。

3-2-5. 把持点認識速度

把持点の認識速度は、CPU にデュアルコア Xeon 5450 (3.0GHz)を 2 台、メモリ 3GB を搭載し、OS に Vine Linux 4.2 (Kernel 2.6.16)を用いた環境で、VGA サイズ(640x480 pixel)の 8bit グレースケール画像の取得完了から把持点認識結果出力完了まで、time コマンドによる 5 回測定平均で約 630msec であった。ただし本実験ではデバッグを容易にするため、セグメント法・相関法間のデータ受け渡しをファイルベースで行っており、IO に起因するオーバーヘッドが約 81%を占めていた。このことよりプロセス間通信にオーバーヘッドの少ない方法を用いてプログラミングを行った場合に把持点認識に要する時間は、同環境で 150msec 程度になるものと推論され、当初の目標値である一物体あたり 0.2 秒を十分に達成したものと考えられる。

第 4 章 超音波三次元位置計測信号処理技術の開発

4-1. ナノ結晶音源を用いたスペクトラム拡散信号処理

4-1-1. 概要

超音波を用いた距離の計測は、送信側から単純に 1 パルスの音波を發振し、対象物からの反射をセンサで観測すれば、その時間差から距離の推定が可能である。しかし、この測定方法では、反射された音波と同等かそれ以上の音圧を有する音源が近くに存在する場合、測定は困難である。生産現場などでは金属同士があたる音や機械の動作音など種々の超音波ノイズが発生するため、超音波による位置計測システムを生産技術用ロボットに搭載することを考えると、現場の環境音から目的の音を抽出する仕組みが必要になる。そこで、送信波に対し符号化によるスペクトラム拡散を施し、受信した音波に対し復号化を行うことにより、目的の音波のみの情報を抽出することで耐ノイズ性の向上を目指す。また、音波は対象物の形状や向きにより反射方向が決定され、計測時に必ずしも反射波が得られるとは限らない。そこで様々な角度から超音波を發振し、それら反射波を受信出来るように送信側を複数用意することが考えられる。その場合に必要とされる多重化方式についても検討した。

4-1-2. スペクトラム拡散信号処理の原理

先ずナノポーラスシリコン熱誘起超音波エミッタ(NPSUS)を用いたスペクトラム拡散信号処理について検討した。これはシリコンの薄膜抵抗体に数 μs のパルス幅で数アンペアの電流を流し、瞬間的に発熱させることにより、超音波を発生するものである。その超音波波形例を図 4-1-1 に示す。パルスの電圧を 1.5V、パルス幅を 5 μs に設定した場合の音圧は、距離 40cm において約 80mPa である。

図 4-1-1 のように NPSUS では単発に近い波形を作り出す。しかしながら、音源の特性上、一般のスペクトラム拡散で用いられる位相反転した波形を作り出すことは不可能である。そこで、1、0 の符号を用いた拡散を行う場合、0 に対応した逆位相の波形を作り出すかわりに、図 4-1-2 のような駆動パルス列を用いておよそ半波長の遅延 (10 μs 程度) をかけることで符号 0 に対応させる。

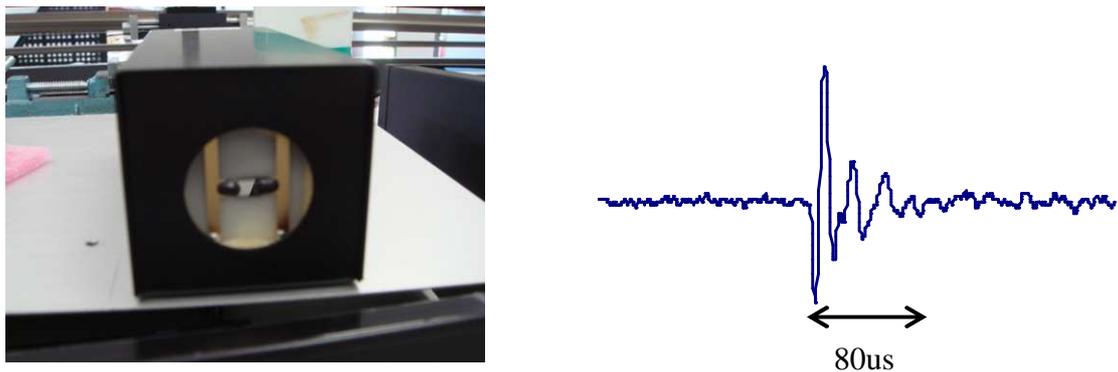


図 4-1-1. 音源と超音波波形 (B&K マイクロホンにより測定)

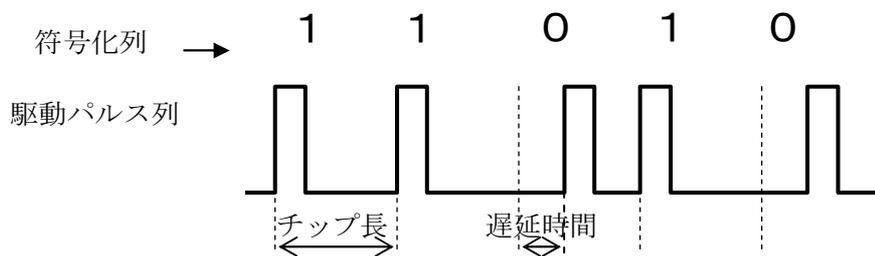


図 4-1-2. 符号化方式

4-1-3. 符号化と復号化

上で述べた拡散符号の機能を果たす数列で、容易に作製できるものに M 系列がある。M 系列はある段数のシフトレジスタを巡回的に排他的論理和をとることにより生成される、1 と 0 からなる数列である。シフトレジスタの段数により系列のビット数が決まり、 n ビットでは符号化列は $2^n - 1$ 個の数列となる。M 系列の生成法は規則的であるが、発生した系列は質のよい擬似乱数 (pseudo noise : PN) となることがわかっている。また、復号には M 系列がもつ自己相関関数の特性を利用しており、M 系列は自身を巡回的にシフトしたものとの相関が弱く、自分自身と完全に一致したときのみ強い相関がみられるという性質がある。この性質より、受信信号と、あらかじめ測定した同じ系列で変調された参照用の信号との相関をとることで復号化を行う。

4-1-4. 実験

上記の M 系列を用いて超音波の符号化を行い、スペクトラムの拡散を確認するための実験を行った。実験は音源に図 4-1-1 の NPSUS、センサに Knowles 社製超音波センサ (SPM0204UD5) を使用した。以下で示すデータはセンサからの信号をオペアンプで 22 倍に増幅し、1 MHz のサンプリングでオシロスコープに取り込んでいる。図 4-1-3 に符号化していない受信波形を示す。これは 80 μs 毎に等間隔で NPSUS 音源を 15 回駆動したものである。図 4-1-4 に符号化スペクトラム拡散した例を示す。4bit (符

号列：15)のM系列(チップ長80 μ s、符号0の遅延時間11.5 μ s)でNPSUS音源を駆動している。これら時間波形のFFT解析を行った。図4-1-5が符号化をかけていないときのスペクトラムで12.5kHz(80 μ sの逆数)を基本とした鋭いスペクトルで構成されていることが分かる。図4-1-6では、超音波波形に符号化を施すことによってスペクトラムが拡散していることがわかる。

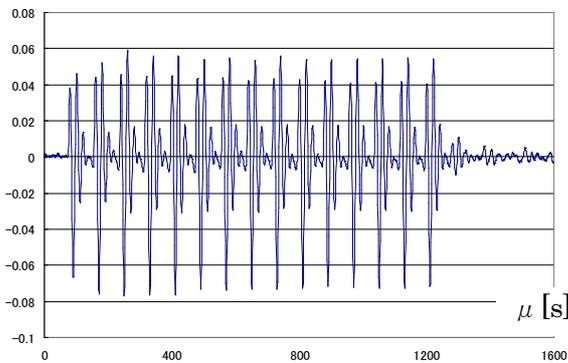


図4-1-3. 時間波形(符号化なし)

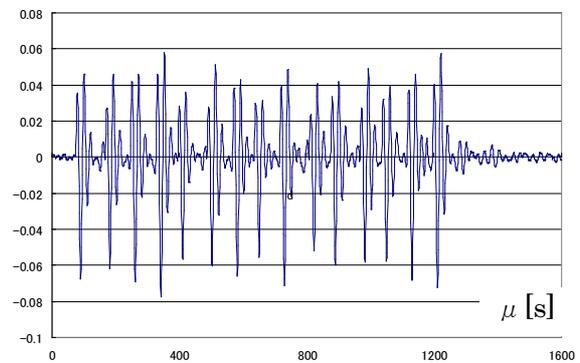


図4-1-4. 時間波形(符号化あり)

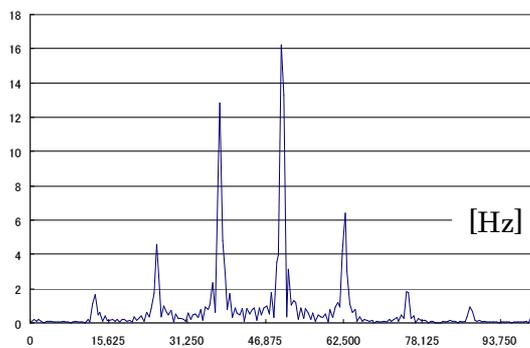


図4-1-5. 符号化なしのパワースペクトル

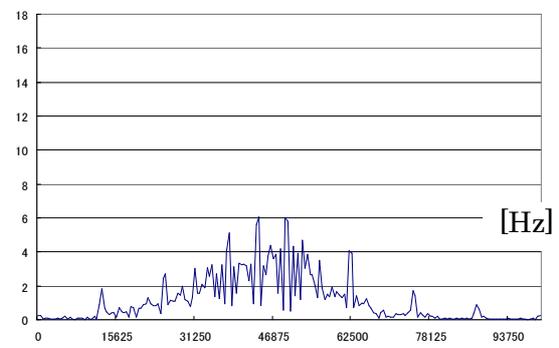


図4-1-6. 符号化ありのパワースペクトル

次に、M系列により符号化された信号の自己相関をとることで復号が可能か確認するための実験を行った。NPSUS音源とセンサを50cm離して正対させ、4bitのM系列、80 μ sのチップ長、符号0遅延11.5 μ sの条件で直接波を測定した。測定した直接波の自己相関を図4-1-7に示す。また、符号化を施さない場合の自己相関を図4-1-8に示す。図4-1-7のようにM系列で符号化された受信信号の自己相関をとると位相の一致した点でのみ大きなピークをみせる。この大きなピークの位置が超音波パルス列を発信し始めてから音波が到達するまでの時間を表わすことになり、反射波の場合には反射体までの距離がわかる。一方、符号化を行わない場合は大きなピークが多数あらわれるため、どのピークが真の時間を表すかの判定が難しく、反射体の位置を検出することは困難である。

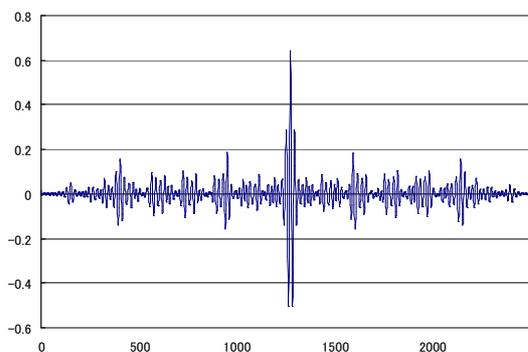


図4-1-7. 自己相関 (符号化あり)

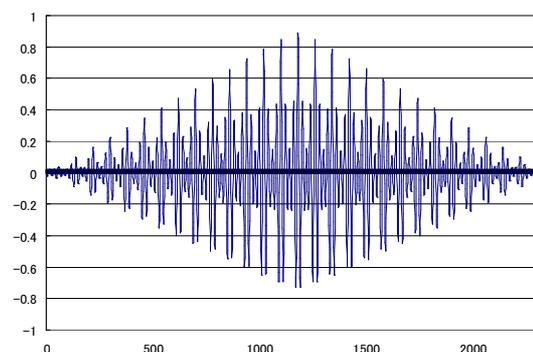


図4-1-8. 自己相関 (符号化なし)

信号の多重化について検討するためにチップ長を変更した符号化波形間の相互相関をとり、その値の比較を試みた。実験には 72us から 88us まで 1 us 毎にチップ長を変更し相互相関を求めた。その結果、チップ長の差が 4 us 以上になれば、相互相関の値は小さくなることがわかった。図 4-1-9 は 4 ビットで同じチップ長 (80us) どうしの相関波形で、2 番目に大きいサブピークは最大のピークの 24% 程度である。図 4-1-10 は、チップ長が 80us と 88us の異なるものの相関であり、大きなピークは現れないが小さなピークが無数にある。その中で最大のピークは、同じチップ長同士 (図 4-1-9) の最大ピークの 22% 程度である。また、図 4-1-11 は 6 ビットで 80us の符号化信号の自己相関である。ビット長を増加させると、自己相関のサブピークの大きさはあまり変化がみられず、20% 以上である。しかし、異なるチップ長同士の小さなピークは図 4-1-12 のように 15% 以下となり、4bit の相互相関値と比較すると顕著な減少がみられた。

これらのことから、異なるチップ長を持つ符号化超音波を用いることにより、相互相関の値を小さく出来るので、同時に複数の音波を用いても音波の識別が可能であることがわかる。また、ビット数を大きくすれば、より識別性が向上する。ただし、その場合は積和次数が大きくなり、リアルタイム化が困難になる。(例えば 4 ビットから 6 ビットにすると、積和次数はほぼ 4 倍になる)



図 4-1-9. チップ長 80us の自己相関(4bit) 図 4-1-10. チップ長 80us、88us の相互相関(4bit)



図 4-1-11. チップ長 80us の自己相関(6bit) 図 4-1-12. チップ長 80us、88us の相互相関(6bit)

これらの実験から、NPSUS 音源より発振する超音波に対し M 系列による符号化を施すと、図 4-1-6 にみられるようにスペクトルの拡散が確認できた。また、図 4-1-7 に示すように M 系列により符号化された信号の自己相関をとることで復号化を確認することができた。さらに、信号の多重化をはかるために符号化におけるパラメータであるビット長とチップ長を変更する実験を行った。多重化において重要な相互相関の値をみると、ビット数の大きい方が値は低く多重化に適している。

4-1-5. ノイズ環境下における測定実験

スペクトラム拡散信号処理を適用した試作システムの耐ノイズ性を評価するための実験を行った。試作システムは、NPSUS 音源部から発信された符号化超音波信号を 5 個のセンサアレイで検出する。検出された信号は 1000 倍の増幅とハイパスフィルタ (カットオフ 10 kHz) 処理後、AD コンバータ (サンプリング速度 500kHz) を通して信号処理用 FPGA (Field Programmable Gate Array) に入力される。FPGA では、M 系列符号生成、復号化のための相関演算、遅延加算等の信号処理の他、AD 等の制御および PC との通信などを行う。



図 4-1-13 ホワイトノイズ環境下の位置測定実験

実験の外観を図 4-1-13 に示す。この実験では、反射体の位置を測定中にスーパーツイータスピーカからホワイトノイズを発生させ、どの程度のノイズまで反射体の位置を正確に計測できるかを調べるにより、計測システムの耐ノイズ性を評価する。ホワイトノイズはパルスジェネレータのノイズ発生機能を用いた。音圧はパルスジェネレータの電圧を変更することにより、調節が可能である。

ノイズを重畳しない場合の PC の測定画面と反射波形を図 4-1-14 に示す。測定画面の中で、正対した 40cm の距離に物体が正しく認識されていることがわかる。また、オシロスコープ上に反射波をはっきりと確認できる。次にスピーカから信号波形の最大 5 倍の音圧を持つホワイトノイズを重畳すると、図 4-1-15 のように反射波がオシロスコープ上で全く確認できなくなった。しかし、PC の画面ではノイズ混入以前と同じ位置に物体を検出している。200 回連続測定を行っても、5 倍のノイズによる位置の誤計測は起こらなかった。

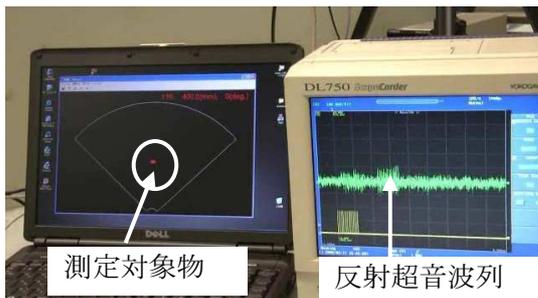


図 4-1-14 符号化超音波による位置計測

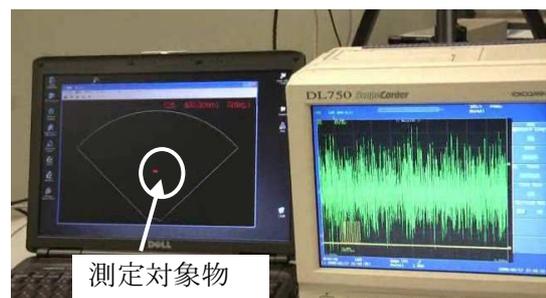


図 4-1-15 符号化超音波にノイズを重畳した場合の位置計測

符号拡散のため 15 発の超音波パルスを用いているため、等価的に 15 回の平均化処理を行っていると考えることができるので、符号拡散を用いない単発パルスの場合に比べて S/N が約 4 倍向上すると考えられ、最大 5 倍程度までの耐ノイズ性の向上は妥当な結果であるといえる。

以上の通り、M 系列で符号化された信号をリアルタイムに復号化し、その信号から反射体の 2 次元位置情報を抽出する小型ハードウェアシステムを構築し、スペクトラム拡散信号処理を組み込むことにより、単発のパルスでは測定が困難となるノイズが重畳された場合でも、測定が可能であることを示した。

4-2. ピエゾタイト音源を用いたスペクトラム拡散変復調処理

4-2-1. 概要

超音波を使った位置計測において、超音波に変復調を施すことで耐ノイズ性を高めることができるが、共振型の音源には適用されていなかった。共振型は高い音圧を得られるが、超音波を短い間隔で連続的に送信する変調には不向きであった。しかし、測定距離を伸ばすためには音圧の高い音源が望ましい。ここでは、共振型の音源に対して不要な共振を抑制する駆動方式で変復調を施し、雑音に強い送受信方法を開発する。

4-2-2. 音源駆動

図 4-2-1 は 40kHz に相当するパルスを 2 回音源に与える D/A 用の波形である。図 4-2-1 は図 4-2-2 で駆動された超音波を観測した波形である。超音波センサは Knowls 社製 (SPM0204UD5) を使用している。共振型の音源である piezoelectric 音源に共振周波数の駆動波形を与えると高い音圧を得られるが、共振が減衰するまで時間がかかる。不要な共振は変調や位置計測にとって好ましくない。音源の駆動後に共振を抑えるように電圧をかけることで減衰するまでの時間を短縮可能であることがわかっている。図 4-2-3 は音源に 2 回パルスを与えた後に不要な共振を抑制するように位相の異なるパルスを与えている。図 4-2-3 は図 4-2-2 で駆動された超音波を観測した波形である。図 4-2-3 は図 4-2-1 と比べて最大振幅は 5/8 程度に減少するが、共振が抑制されていることが分かる。

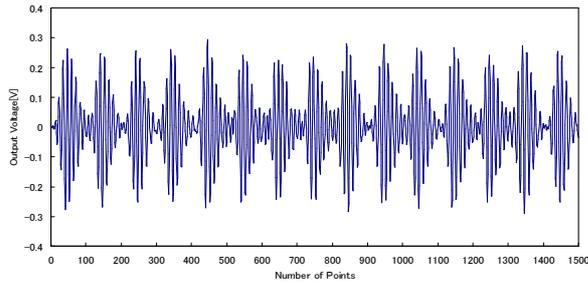


図 4-2-7 参照波形

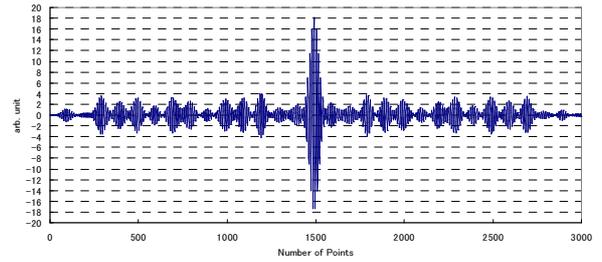


図 4-2-8 自己相関

4-3. ナノ結晶音源とアレイセンサのスキャン走査による三次元位置計測

4-3-1. 概要

センサアレイの複数配置は複数のセンサアレイを同時に利用し、計測精度の向上を図るものであるが、ここでは、同一のセンサアレイユニット(5CH)を移動させて複数回計測することで同等の処理を行う。計測するたびに遅延加算処理を行い、計測点ごとの最大強度を示す方位、距離を記録する。

4-3-2. 実験

センサアレイを移動させるための装置として XY プロッタを使用した。XY プロッタに搭載したセンサと音源を移動させながら、図 4-3-1 に示しているアルミ角パイプ&スパナと、図 4-3-2 に示しているプラスチック製の球について位置計測実験を行った。X 軸、Y 軸ともに 3mm 間隔で 20 回の計 400 回の移動と計測を繰り返し、1 回の計測毎に遅延加算で求めた位置を表示したものが図 4-3-3 と図 4-3-4 である。

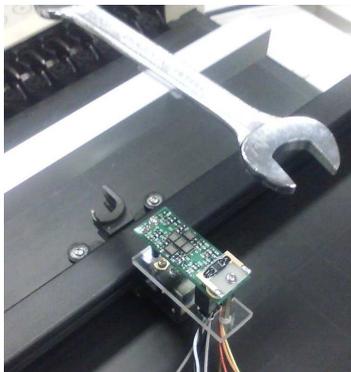


図 4-3-1 アルミ角パイプとスパナ



図 4-3-2 プラスチックの球

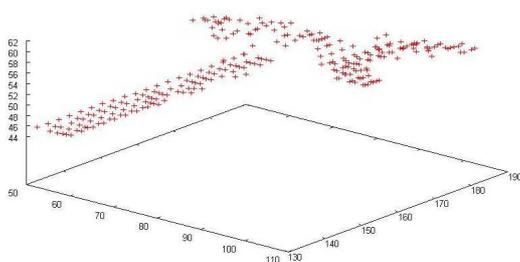


図 4-3-3 計測結果(アルミ角パイプとスパナ)

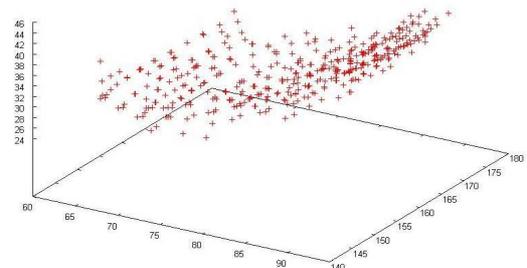


図 4-3-4 計測結果(プラスチックの球)

アルミ角パイプ、スパナ、プラスチックの球の三次元形状がアレイセンサのスキャン操作により確認できた。

第5章 光学式計測と超音波計測の複合化処理エンジンの開発

5-1. 概要

5-1-1. 光学式計測について

光学式計測は CCD カメラ 3 台を三脚により固定設置したカメラで物体の計測を行っている。そのため、物体を置く位置によっては一方の把持点はカメラから見えるが、もう一方の把持点はカメラによって捉えられずに推定で求める場合がある。

5-1-2. 超音波計測について

上記の場合に光学式センサでの画像処理から推定した把持点をロボットマニピレータの手先につけた測定位置を自由に選択できる 3 次元超音波位置センサによって把持点位置を確認する。把持する物体の周囲を上下左右に走査することにより、把持点近辺の形状を確認する。今回の開発では産業用ロボットマニピレータ (PA10-7C) の手先の三次元超音波位置センサによる把持位置確認後に二指ハンドによる物体の安定した把持動作を確認した。また人間とロボットの共存環境での作業を想定し、15cm 間隔の警戒エリアに入った人間の身体を超音波二次元センサで検知し、ロボットマニピレータが安全確保のため停止し、人間の身体が警戒エリアからなくなるとロボットマニピレータが動作を再開することを今回構築した実験環境で確認した。

5-1-3. 複合化処理エンジンについて

複合化処理エンジンは 1. 光学式計測センサ、2. 超音波位置検出センサ、3. 超音波安全エリアセンサ、4. 把持力センサの 4 つのセンサからのデータを受信し、5. ロボットマニピレータと 6. 二指アクチュエータの動作を統合制御するエンジンであり、ロボットマニピレータの状態を管理している。図 5-1-1 に光学式計測を行うカメラと三次元超音波位置検出センサの配置を示す。

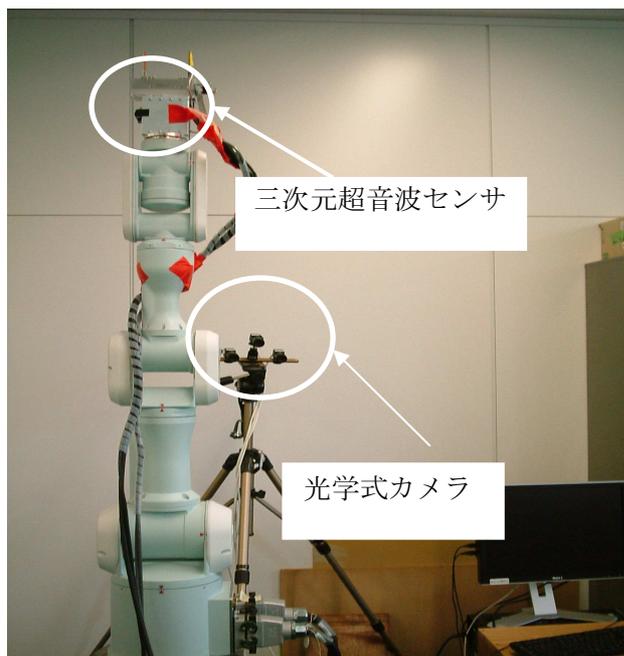


図 5-1-1 産業用ロボットマニピレータ PA10-7C と三次元超音波センサ、光学式カメラ配置

5-2. 三次元超音波センサ把持点確認

5-2-1. センサ外観、取り付けについて

以下の図に示す様に三次元超音波センサは二指のアクチュエータのマニピレータから見て左側に1セット取り付けた。その外観を図5-2-1に示す。

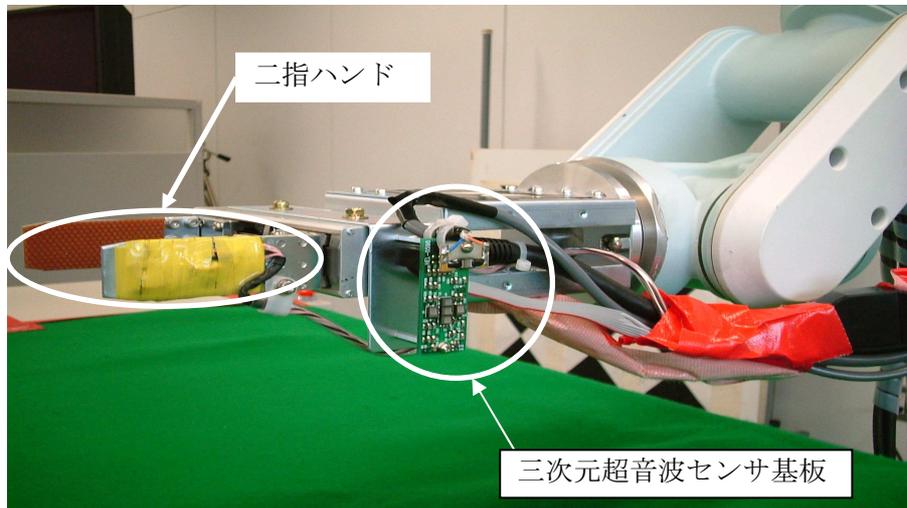


図 5-2-1 三次元超音波位置センサのマニピレータ手先上の配置

5-2-2. 超音波位置センサ走査範囲

光学センサから受信した把持点をを中心のマニピレータの手先を位置姿勢制御で図 5-2-2 の矢印の順に周囲上下左右を走査して 3 次元超音波センサを発信し、受信後に所定のピッチで移動させる。この場合 5X5 の 25 点を走査し、測定する場合の走査順を示している。走査範囲、間隔は設定で可変にしている。

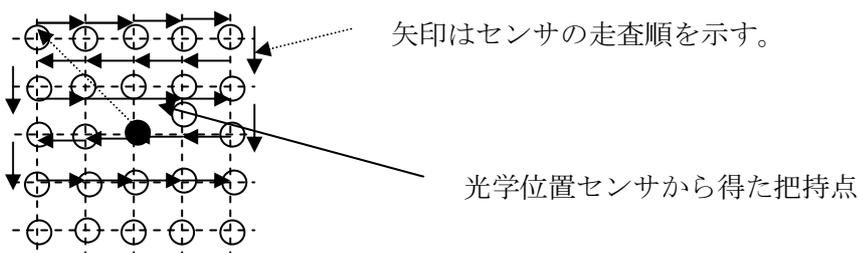


図 5-2-2 超音波位置センサの走査方法 (○は測定点を示す。)

光学把持点を確認する時の三次元超音波位置センサの位置についてはセンサが反射レベルが最大の座標位置を返す仕様のため、センサ位置を先ず最初に光学把持点からの反射レベルが最大で返って来ると想定できる位置で測定することを試みた。音源と受信センサの距離の midpoint の位置を光学把持点の真上にセットした時にその点から鏡面反射が最大になると考えられる。三次元超音波センサの音源と受信センサ及び光学把持点との関係を図 5-2-3 に示す。

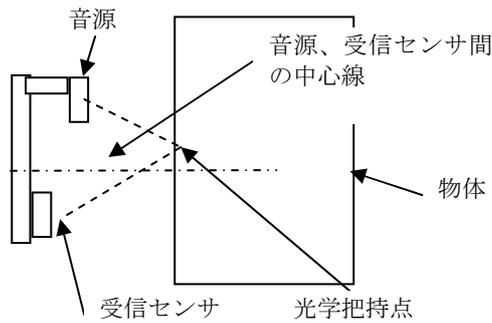


図 5-2-3 光学把持点からの反射波が最大になると想定する測定位置

5-2-4. 三次元超音波位置センサ走査のための手順について

手先に付けた三次元超音波位置センサを光学把持点を中心に走査するためのロボットマニピレータの動作手順は以下である。

- 1 光学把持点の要求
- 2 光学把持点の取得
- 3 左把持点の確認のための走査
- 4 左の照合計算
- 5 物体上へマニピレータ移動
- 6 マニピレータの手先回転 W2 180 度回転
- 7 右把持点の確認のための走査
- 8 把持準備動作
- 9 物体の把持

左側の把持点を確認後、手先に三次元超音波位置センサが 1 つあるので、6 の手順で手先を 180 度回転して後に、右側の把持点を確認する。

5-2-5. 三次元超音波センサ測定結果

図 5-2-4 は直径 65mm Φ スプレー缶を光学把持点を中心にピッチ間隔 15mm 毎に X-Z 平面内で 17X17 回走査して得られたピーク点の座標を X-Y-Z 平面内でプロットしたデータである。光学把持点との差は左 1.57mm、右 2.25mm であった。

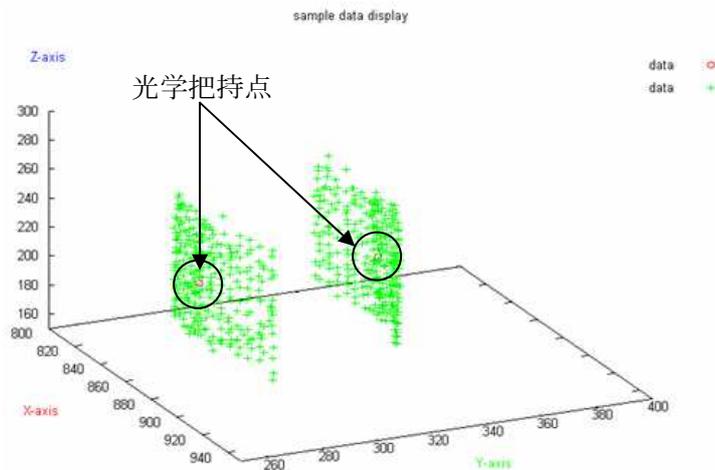


図 5-2-4 17X17 回走査して得られたピーク点の座標 (500ml スチール缶)

緑色の+が三次元超音波センサによるピーク値を示した座標点 (アーム座標変換後) 赤色の○が光学計測から得られた光学把持点をプロットしている。

5-2-6. 光学把持点と超音波位置計測の照合計算について

超音波三次元センサで測定したピーク位置座標値と光学計測で求めた光学把持点間の距離が想定できる誤差範囲内であれば把持可能と判定する。

具体的には以下の計算を行い判定を行う。

光学把持点 (X_0, Y_0, Z_0) と超音波三次元センサで測定したピーク位置の座標値 (X_i, Y_i, Z_i) との距離を D_i とする。

$$D_i * D_i = (X_i - X_0) * (X_i - X_0) + (Y_i - Y_0) * (Y_i - Y_0) + (Z_i - Z_0) * (Z_i - Z_0) \quad \text{式 3}$$

を計算する。 $D_i * D_i$ を全ての測定点の数だけ計算し、その値が最低になる i を見つける。その i に対して $\text{Min}(D_i * D_i) < 8.4\text{mm}^2$ (超音波の半波長) の場合に判定照合を OK として把持する。

第 6 章 高速専用 ASIC/FPGA の開発

6-1. 超音波スペクトラム拡散変復調処理

6-1-1. 概要

スペクトラム拡散方式を用い、雑音耐力の強い 3 次元超音波信号処理を実現する。25ch 超音波スペクトラム拡散変復調処理のための回路設計を行った。

6-1-2. 超音波スペクトラム拡散変復調処理回路構成

超音波スペクトラム拡散変復調処理回路の BLOCK 図を図 6-1-1 に示す。

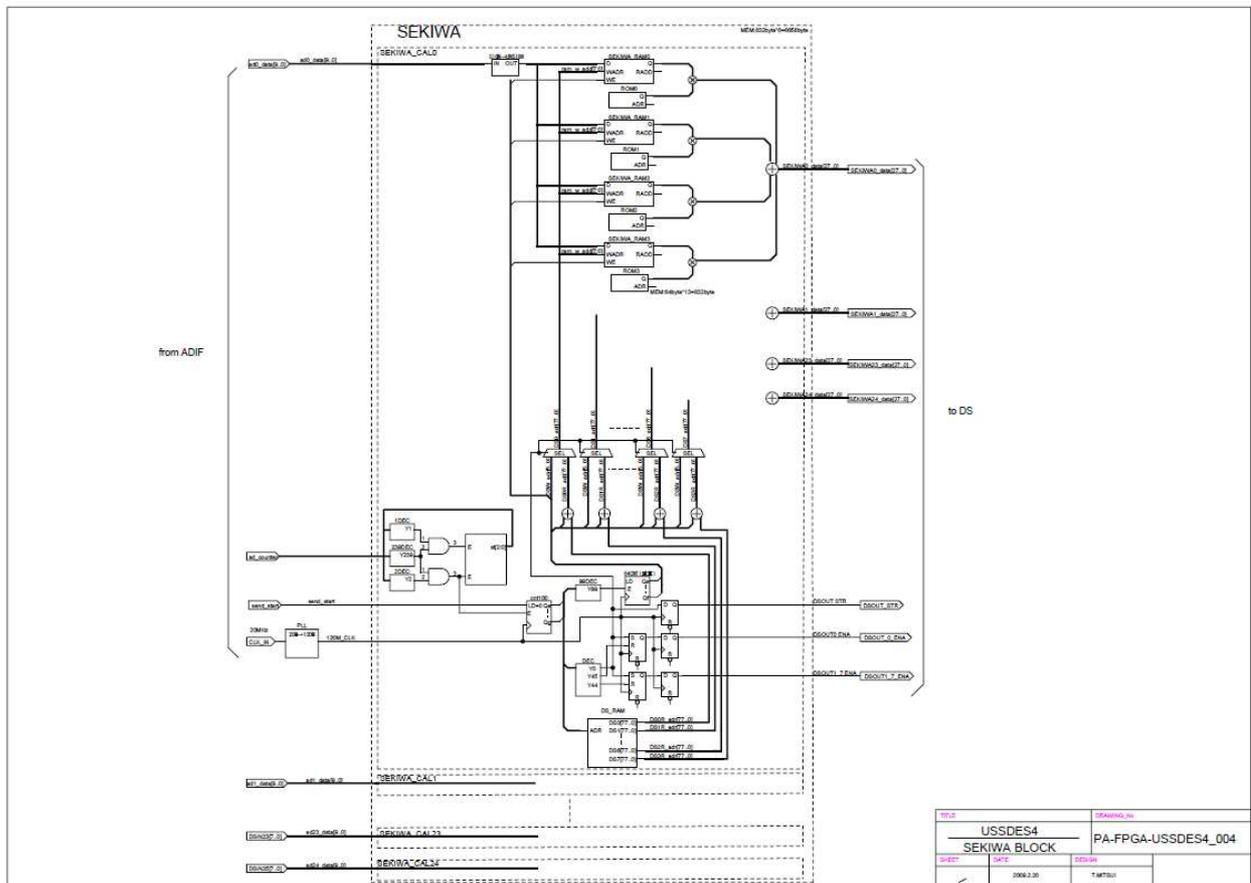


図 6-1-1 超音波スペクトラム拡散変復調処理回路の BLOCK 図

6-2. 25チャンネルの超音波遅延加算処理

6-2-1. 概要

超音波スペクトラム拡散変復調処理から出力した 25CH の信号の、反射物の距離と方位を計算する遅延加算処理回路の設計を行った。

6-2-2. 25チャンネルの超音波遅延加算処理回路構成

25チャンネルの超音波遅延加算処理回路の BLOCK 図を図 6-2-1 に示す。

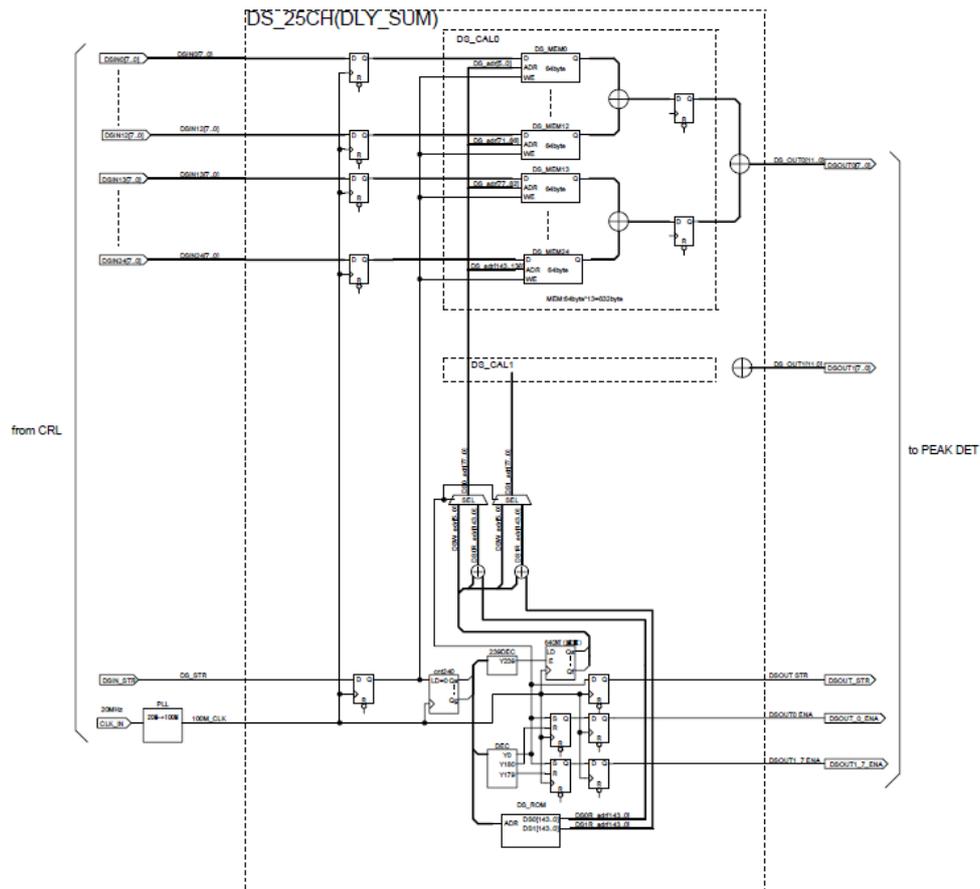


図 6-2-1 25チャンネルの超音波遅延加算処理回路の BLOCK 図

スペクトラム拡散信号処理回路の処理は、サンプリング周期が 2 μ sec、処理速度が 120MHz であるため、遅延加算回路も同様の仕様での処理に変更する必要がある。この仕様変更に伴い、25CH 化の遅延加算回路は、従来の 8 並列処理から 2 並列処理に回路を縮小した回路で構成することができ、回路規模の縮小と S RAM の小容量化が計られた。S RAM の深さは、遅延加算の最大および最小の遅延量 = ± 16 bit より 6bit とし、従来の回路と同一となる。

遅延テーブルの ROM は、数量を 4 から 2 に少なくできるが、データ幅が 14.4 bit、アドレスは 8 bit に変更する必要があるが、ROM データに関しては、トータル的には従来と同じ容量となる。

加算回路の処理速度が 120MHz であるため、超音波スペクトラム拡散変復調処理回路と同様に、エンベデッド乗算器を用いるなど、内部遅延を最大限考慮した高速化設計を計る必要がある。

6-2-3. 25チャンネルの超音波遅延加算テーブルの計算

遅延加算処理用の遅延時間を予め計算しておいて、チャンネル毎の遅延時間をテーブルから読み取って適用する。

今回計算に使用したセンサー配置を、図 6-2-2 に示す。

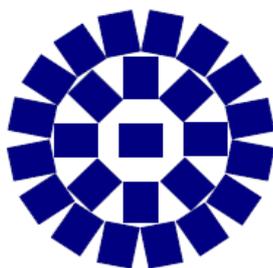


図 6-2-2 センサー配置図

遅延加算テーブルの計算方法は、図 6-2-2 のセンサー配置から各センサーの座標を求め、原点に配置されたセンサーからの遅延距離の計算結果を音速 (340 m/s) で割り、25 チャンネルのセンサーに対する遅延時間を計算する。計算は、方位精度 5° で $\pm 45^\circ$ の方向に対し行なうと、x、y 方向で $19 \times 19 = 361$ の計算値となり、従って、25 々のセンサーそれぞれに対して 361 の計算結果が得られる。

得られた計算結果の遅延量を、サンプリング周期当りの遅延量に換算することで、遅延加算テーブル用 ROM の読み出しサイクルに相当する遅延加算テーブルを設計できる。

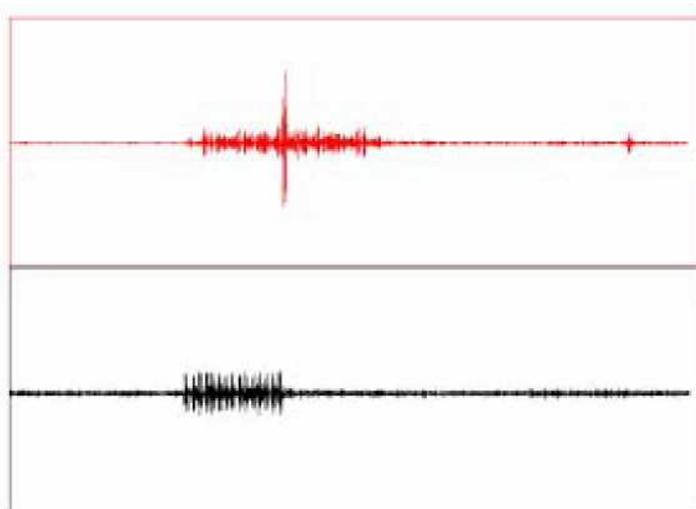
6-3. 超音波三次元信号処理用 FPGA の動作確認

6-3-1. 概要

超音波スペクトラム拡散変復調処理を用い、雑音耐力の強い 3 次元超音波信号処理を FPGA を用いて実現した。動作確認した結果を以下に報告する。

6-3-2. 超音波スペクトラム拡散変復調処理回路の動作確認結果

超音波スペクトラム拡散変復調処理回路の入出力波形を図 6-3-1 に示す。



上段：出力信号 (スペクトラム拡散復調信号)

下段：入力信号

図 6-3-1 超音波スペクトラム拡散変復調処理回路の入出力波形

入力信号は、M 系列 3 段の波形であり、広いスペクトラムとなっているが、超音波スペクトラム拡散復調処理回路を通過すると、1 本のピークを持ったスペクトラムが現れており、回路が正しく復調動作をおこなっていることがわかる。

6-3-3. 超音波遅延加算処理回路の動作確認結果

超音波遅延加算処理回路の

図 7-3-2 に方位 0° の遅延加算処理回路出力波形

図 7-3-3 に方位 5° の遅延加算処理回路出力波形

図 7-3-4 に方位 45° の遅延加算処理回路出力波形

を示す。

測定した障害物は、 0° （真正面）にあり、遅延加算処理回路を通過した後は、 0° にピークをもった波形が現れ、 $\pm 5^\circ$ から振幅が減衰していき $\pm 45^\circ$ ではピークが現れていない。以上より、遅延加算処理回路が正しく動作していることがわかる。

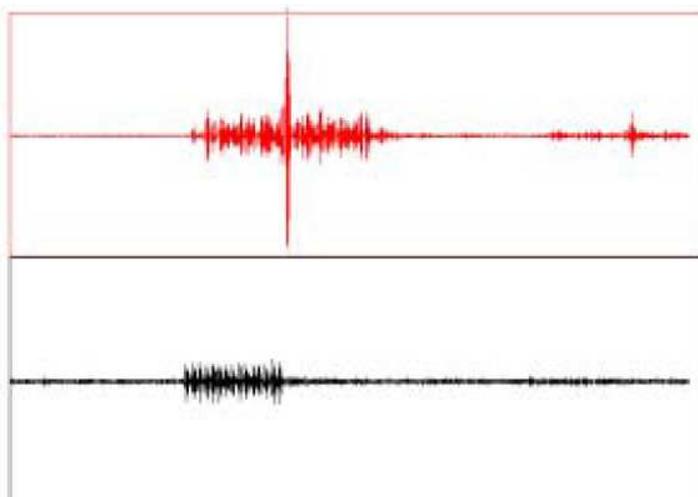


図 6-3-2 方位 0° の遅延加算処理回路出力波形

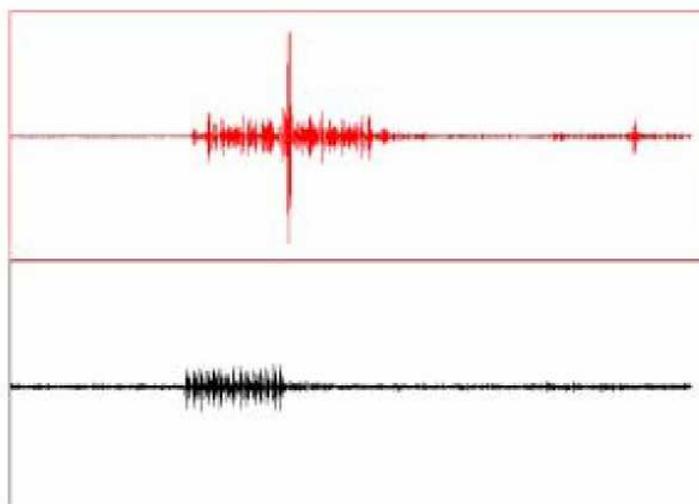


図 6-3-3 方位 5° の遅延加算処理回路出力波形

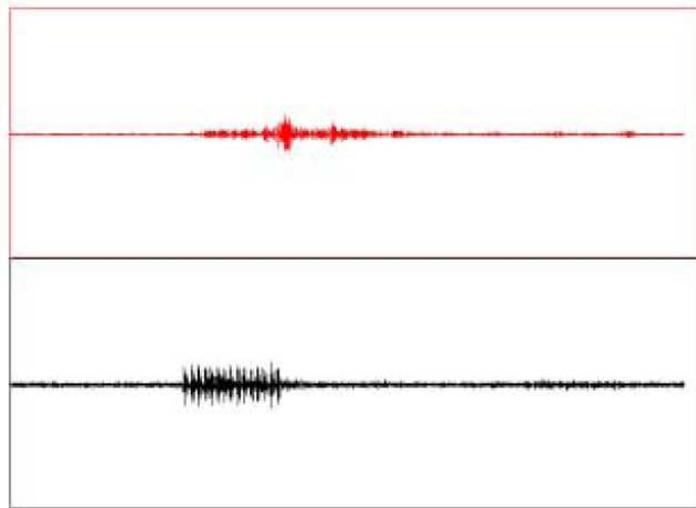


図 6-3-4 方位 45° の遅延加算処理回路出力波形

6-4. 画像信号処理用 eASIC

6-4-1. 概要

カメラ画像信号処理用 ASIC の試作チップを生産、評価基板を製作しチップの評価を行った。ASIC デバイスとして採用したのは eASIC 社製 Nextreme シリーズ NP750LX。単一 VIA 層のみをカスタマイズする開発手法により初期コストの低減を実現したストラクチャード ASIC である。評価基板は画像処理のリアルタイム性を目視で確認できることを主眼において開発、処理画像の評価を行った。

6-4-2. eASIC 試作

Nextreme シリーズの最小規模デバイスである NP750LX のパッケージは 128 ピン TQFP のみが用意されている。

開発当初 SSO(Same time Switching On)の基準値を満たさず、ユーザー IO の空きポートを IO 電源ポートに割り当てることで所定のパッケージにアサインすることができた。



写真 6-4-1 ASIC チップの外観

6-4-3. 評価基板の開発

試作した eASIC を評価するための基板は、カメラで画像を撮り込みながら処理データを重畳させた映像をモニターに出力する構成で、処理データを目視で確認すると同時にハードウェアによる処理のリアルタイム性を体感的に確認できるような構成とする方針で製作した。

対応カメラはノンインターレース倍速アナログカメラのみ。

評価基板は最終的に次図のブロック図のような構成に落ち着いた。

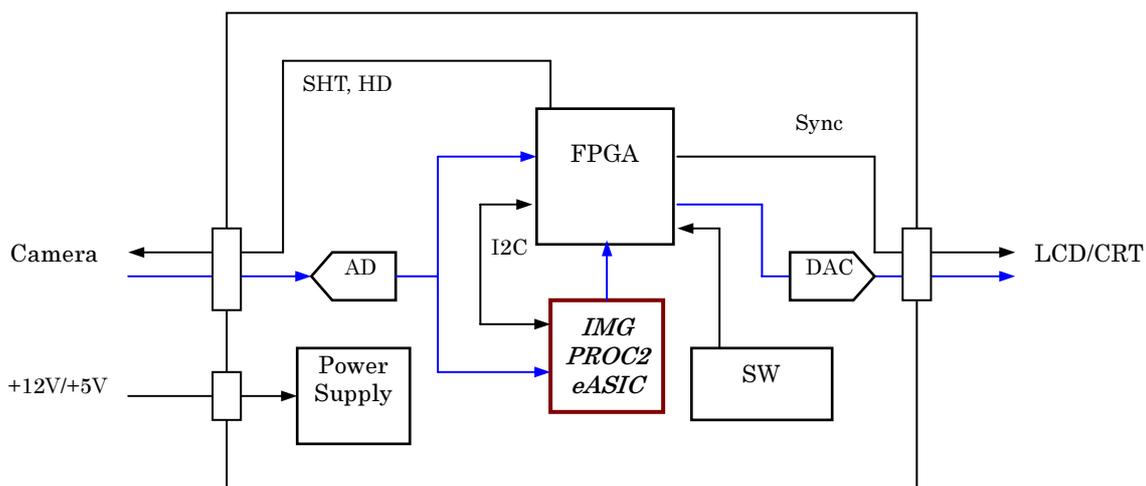


図 6-4-1 評価基板ブロック図

6-4-4. 評価基板の製作

評価基板は6層のプリント基板で製作した。

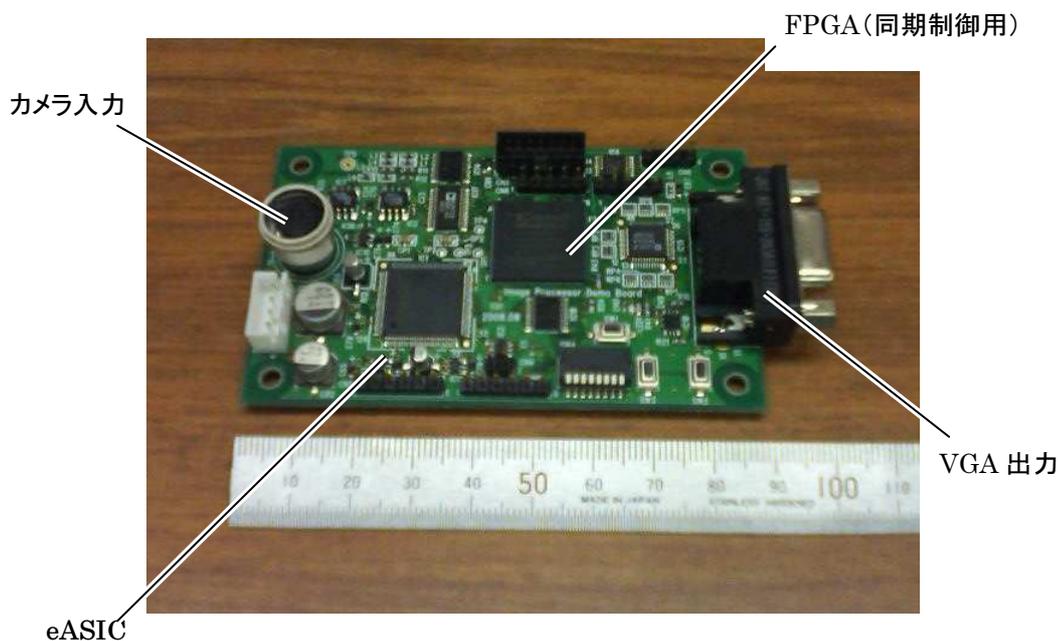


写真 6-4-2 評価基板外観

6-5. 画像信号処理用 eASIC の動作確認

6-5-1. 基本画像による動作確認 1 ～ 円の画像処理

シグナルジェネレータによるテストパターンを入力し基本的な画像の処理を行わせた。

円画像は外周部分に全方位へ変化する画像パターンを持つため、処理機能の方向特性を評価するのに適する。

円画像の処理結果を次図に示す。全周囲のエッジ抽出が正常に行えており、このことから処理回路に偏った方向特性がないことが言える。

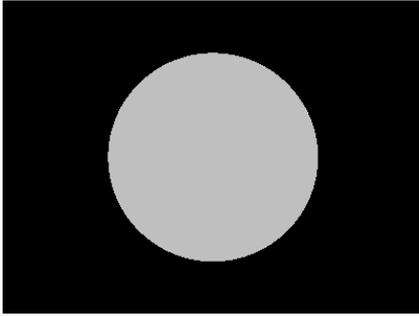


図 6-5-1 円の元画像

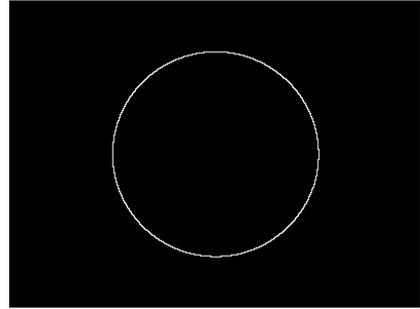


図 6-5-2 円の微分画像

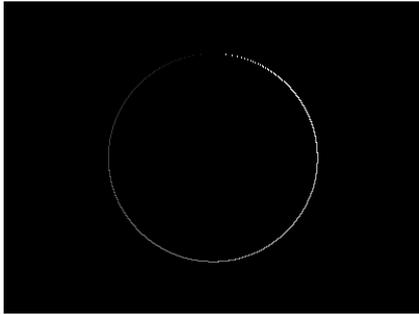


図 6-5-3 円の方向抽出

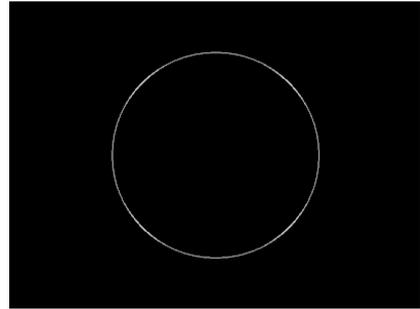


図 6-5-4 円のエッジ抽出

6-5-2. 基本画像による動作確認 2 ～ 点画素の画像処理

同様にシグナルジェネレータによる点画素のテストパターンを入力して処理を行わせた結果を次図に示す。

テストには $1 \times 1\text{pix}$ 、 $2 \times 2\text{pix}$ 、 $4 \times 4\text{pix}$ の各サイズで背景色と階調の異なるパターンを用いた。結果では、黒背景で $2 \times 2\text{pix}$ サイズのエッジ抽出ができていない。

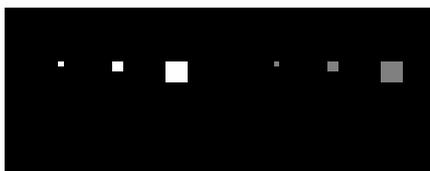


図 6-5-5 円の元画像

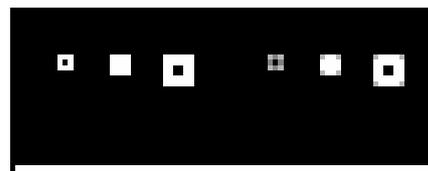


図 6-5-6 円の微分画像

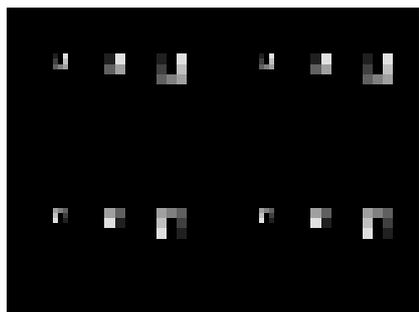


図 6-5-7 円の方向抽出

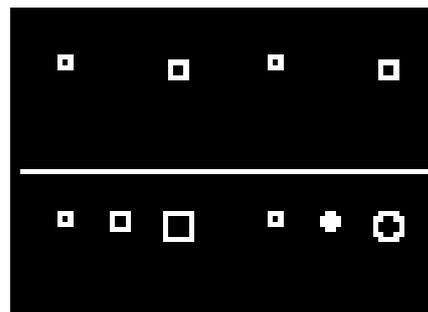


図 6-5-8 円のエッジ抽出

6-5-3. 自然画像の処理

次図にカメラから自然画像を撮り込みながら処理を行わせた映像のサンプルを示す。サンプルではFPGAの機能により、抽出したエッジを元画像にオーバーレイ表示させている。



図 6-5-9 自然画像の処理 (エッジ オーバーレイ)

6-5-4. 考察

黒背景で2x2ピクセルサイズの点画素が抽出できなかったことについて考察する。

これはエッジ抽出の際下図のように3画素分の微分データを参照した場合にエッジとして判定されるパターンに該当しないため、エッジとして抽出されないものと考察される。

一方白背景の場合では微分データの配列が逆のパターンとなり、エッジとして判定されている。

このようなパターンでは、方向データに基づいて手前側にある座標のエッジにフラグを立てる処理を併用することでエッジ検出の改善が見込める。

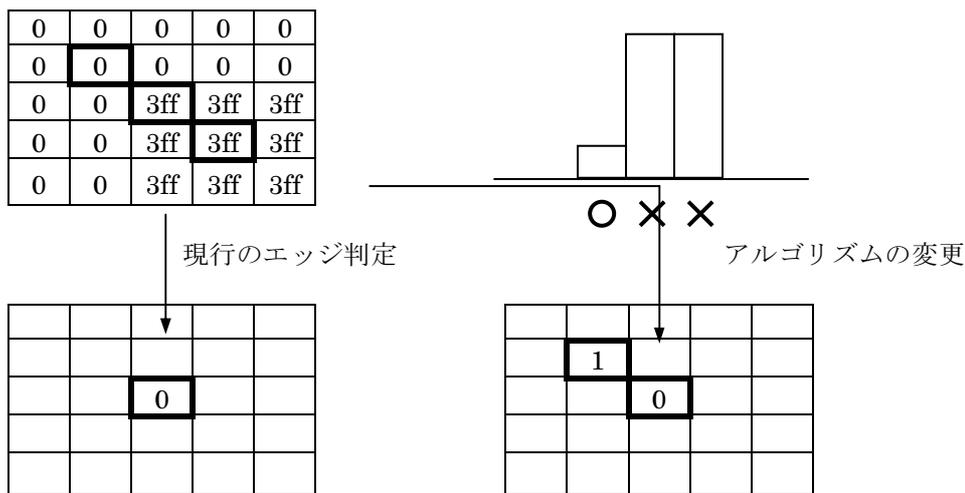


図 6-5-10 エッジ検出改善案

ただし今回採用したデバイス NP750LX ではブロック RAM リソースを使いきっており、エッジデータ用にラインバッファを増設するにはさらに大容量のデバイスを選択することになる。

エッジ検出についてはエッジ延長など他の処理が絡むこともあり、当チップで処理させた微分・方向データをもとに、エッジ処理は後段のプロセスに行わせるのも1つのソリューションと考える。

第7章 安全エリアフローティング制御技術の開発

7-1. 安全規格上の位置付け

7-1-1. 人間と共存・協調するロボットの安全規格

現在、ロボットビジネス推進協議会を中心に、いまだ世界にない人間と共存・協調するサービスロボットの安全基準作りや普及に向けた活動が行われているが、我々は安全エリアフローティング制御技術を取り込んだ超音波センサを用いて、こうしたロボットの安全確保を行う方策について提案する。

7-2. 安全性の確保

7-2-1. 安全方策

ロボットの安全確保は、単に安全エリアフローティング制御により実現されるものではなく、従来の機械安全確保の考え方に基づいて達成しなければならない。これまで通り、安全を確保するため、安全方策の手順に従ってリスクを低減して行く。

安全設計の手順は

① 本質安全設計

本質的に安全な設計方策によるリスクの低減

② 安全防護

ガード保護装置によるリスクの低減

フェールセーフの設計思想

機械装置に異常が発生した場合、被害を最小限にする設計

フルプルーフの設計思想

誤った操作をしても、危険にさらされないような設計

センサは安全防護のための手段であり、危害の発生確率を低減させる効果があるが、センサをたくさん付けても根本対策にはならないことに注意する。

③ 使用上の情報

使用上の情報によるリスクの低減

付属文書、取扱説明書、危険状態表示、警告

7-2-2. 想定する使用環境

安全エリアフローティング制御を適用するロボットが使用される環境を、セル生産工程の組立作業において部材の供給を行うと想定する。

動作範囲・環境	想定作業	対人環境	操作・制御
<ul style="list-style-type: none">● セル生産現場● 固定位置でマニピュレータ移動● 6~7 軸動作	<ul style="list-style-type: none">● 定常作業<ul style="list-style-type: none">・ 組立・ 部材供給・ メニュー設定● 非常作業<ul style="list-style-type: none">・ 保守点検・ トラブル処理	<ul style="list-style-type: none">● 特定の人との協働<ul style="list-style-type: none">・ 同セル作業員・ 監視者	<ul style="list-style-type: none">● 自律● 始動、停止操作● ティーチング

表 7-2-1

7-2-3. 危険源

上記使用環境のなかで、想定される各種危険源を抽出し、安全の方策を立てる。

危険源

- ・ ロボットマニピレータと作業者との衝突
- ・ ロボットマニピレータに作業者が挟まれる
- ・ 外から侵入した他の作業者や監督者がロボットマニピレータと衝突
- ・ ロボットハンドが把持したワークが落下し作業者の手を押し潰す
- ・ エリアセンサの故障
- ・ ソフトウェアの暴走

7-2-4. リスクアセスメント

予測可能な誤使用を明確にし、危険源を特定する。リスクを見積り、リスク評価を行ないリスクが低減されたか判定する。①本質的安全設計でリスク低減を行う、②本質的安全設計でリスクが低減できないときは安全防護によるリスク低減を行う。さらに③安全防護策で低減できないリスクが残るときは使用上の情報によりリスクを低減する。これを繰り返し、許容されるレベルにまでリスクを低減して行く。

(1) リスクアセスメント 1

リスクアセスメントにあたり、ロボットの使用上の制限やリスクの見積／評価基準を明確にする。

ロボットのリスクアセスメント／リスク低減

株式会社プロアシスト

対象ロボット名称		実施者		実施日																																																																																																							
セル生産協働ロボット				第 回:																																																																																																							
ライフサイクル該当段階	試運転、設定、運転、トラブル処理・修理、保守、処分	分析方法(ツール)	積算法(一部加算法を適用)																																																																																																								
使用上の制限	意図した使用	リスクの見積／評価基準 算出式: リスク点数(R) = 危害の酷さ(S) × 危害の発生確率(Ph) 判定基準: $3 \leq R \leq 6$ 十分低い／無視できる(リスク低減は不要) $7 \leq R \leq 14$ 低い～中程度／条件付受容／検討を要する(リスク低減を推奨) $15 \leq R \leq 44$ 高い／受容できない(リスク低減が必要)																																																																																																									
	き合理的使用に用見で	<table border="1" style="display: inline-table; margin-right: 20px;"> <thead> <tr><th colspan="2">危害の酷さ(S)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>4</td><td>重大障害(長期間治療)</td></tr> <tr><td>3</td><td>医療措置(短期回復)</td></tr> <tr><td>2</td><td>応急手当で回復</td></tr> <tr><td>1</td><td>無傷／一時的な痛み</td></tr> </tbody> </table> <table border="1" style="display: inline-table;"> <thead> <tr><th colspan="2">リスク低減の優先順位</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>危険源の除去／酷さの低減</td></tr> <tr><td>2</td><td>暴露排除／頻度低減</td></tr> <tr><td>3</td><td>事象発生確率低減</td></tr> <tr><td>4</td><td>回避／危害の制限／教育</td></tr> </tbody> </table>			危害の酷さ(S)		4	重大障害(長期間治療)	3	医療措置(短期回復)	2	応急手当で回復	1	無傷／一時的な痛み	リスク低減の優先順位		1	危険源の除去／酷さの低減	2	暴露排除／頻度低減	3	事象発生確率低減	4	回避／危害の制限／教育																																																																																			
	危害の酷さ(S)																																																																																																										
4	重大障害(長期間治療)																																																																																																										
3	医療措置(短期回復)																																																																																																										
2	応急手当で回復																																																																																																										
1	無傷／一時的な痛み																																																																																																										
リスク低減の優先順位																																																																																																											
1	危険源の除去／酷さの低減																																																																																																										
2	暴露排除／頻度低減																																																																																																										
3	事象発生確率低減																																																																																																										
4	回避／危害の制限／教育																																																																																																										
時意図間制し限た空間／	<ul style="list-style-type: none"> 起動時電源断時マニピュレータは真一直線状に固定 起動後は作業完了でホームポジションへ移動する ロボットマニピュレータの移動速度制限 マシンエリア: フリー速度 待機エリア : 50mm/s 協働エリア : 20mm/s 人の位置とロボットの動作 <人の位置> <ロボットの動作> 警戒エリア: 協働エリアや待機エリアにいたらそのまま動かない 協働エリア: 待機エリアで待機する、協働エリアにいたらそのまま動かない 協働エリアを出て待機エリア以内に接近: 人から150mmの距離を確保して接触を回避する 	<table border="1" style="margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr><th colspan="4">危害の発生確率(Ph = F + Ps + A)</th></tr> <tr><th colspan="2">暴露頻度時間(F)</th><th colspan="2">危険事象の発生確率(Ps)</th><th colspan="2">回避可能性(A)</th></tr> </thead> <tbody> <tr><td>4</td><td>常時/連続的</td><td>4</td><td>高い(起こりやすい)</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>動作中頻繁/長時間</td><td>3</td><td>ありえる</td><td>3</td><td>不可能</td></tr> <tr><td>2</td><td>動作中数回/短時間</td><td>2</td><td>可能性あり</td><td></td><td></td></tr> <tr><td>1</td><td>まれ/瞬間的</td><td>1</td><td>低い(まれ)</td><td>1</td><td>条件付で可能性あり</td></tr> </tbody> </table> <table border="1"> <thead> <tr><th colspan="2"></th><th colspan="10">危害の発生確率(Ph)</th><th></th></tr> <tr><th colspan="2"></th><th>3</th><th>4</th><th>5</th><th>6</th><th>7</th><th>8</th><th>9</th><th>10</th><th>11</th><th></th><th></th></tr> </thead> <tbody> <tr><td rowspan="4">危害の酷さ(S)</td><td>1</td><td>3</td><td>4</td><td>5</td><td>6</td><td>7</td><td>8</td><td>9</td><td>10</td><td>11</td><td rowspan="4">←リスク低減推奨</td><td rowspan="4">←リスク低減必要</td></tr> <tr><td>2</td><td>6</td><td>8</td><td>10</td><td>12</td><td>14</td><td>16</td><td>18</td><td>20</td><td>22</td></tr> <tr><td>3</td><td>9</td><td>12</td><td>15</td><td>18</td><td>21</td><td>24</td><td>27</td><td>30</td><td>33</td></tr> <tr><td>4</td><td>12</td><td>16</td><td>20</td><td>24</td><td>28</td><td>32</td><td>36</td><td>40</td><td>44</td></tr> </tbody> </table>			危害の発生確率(Ph = F + Ps + A)				暴露頻度時間(F)		危険事象の発生確率(Ps)		回避可能性(A)		4	常時/連続的	4	高い(起こりやすい)			3	動作中頻繁/長時間	3	ありえる	3	不可能	2	動作中数回/短時間	2	可能性あり			1	まれ/瞬間的	1	低い(まれ)	1	条件付で可能性あり			危害の発生確率(Ph)													3	4	5	6	7	8	9	10	11			危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	←リスク低減推奨	←リスク低減必要	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44
危害の発生確率(Ph = F + Ps + A)																																																																																																											
暴露頻度時間(F)		危険事象の発生確率(Ps)		回避可能性(A)																																																																																																							
4	常時/連続的	4	高い(起こりやすい)																																																																																																								
3	動作中頻繁/長時間	3	ありえる	3	不可能																																																																																																						
2	動作中数回/短時間	2	可能性あり																																																																																																								
1	まれ/瞬間的	1	低い(まれ)	1	条件付で可能性あり																																																																																																						
		危害の発生確率(Ph)																																																																																																									
		3	4	5	6	7	8	9	10	11																																																																																																	
危害の酷さ(S)	1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	←リスク低減推奨	←リスク低減必要																																																																																															
	2	6	8	10	12	14	16	18	20	22																																																																																																	
	3	9	12	15	18	21	24	27	30	33																																																																																																	
	4	12	16	20	24	28	32	36	40	44																																																																																																	

(2) リスクアセスメント 2

ロボットの初期の状態の危険源を洗い出し、リスクを見積もる。見積の基準は前ページの基準に従う。
 リスク点数Rが10～32点となり15点以上のリスクに対してはリスクの低減が必須、7点以上のリスクに対してはリスクの低減を推奨するとの基準にしているため、この場合は全ての危険源に対して安全対策を取る必要がある。

ロボットの初期リスクアセスメント(安全に係わる機能がついていない状態)

株式会社プロアシスト

危険源同定						リスク見積り						
段階	No.	危険源	危険状態/危険事象	危険区域	対象者	危害の 酷さS	危害の発生確率Ph			リスク 点数R	備考	
							頻度F	確率Ps	回避A			
運転	1	ロボットマニピレータと身体との衝突	ロボットの作業エリア内に作業者が侵入してロボットと接触	作業エリア	要員	4	8	3	2	3	32	
運転	2	ロボットマニピレータと身体との衝突	他の作業業者や監督者が作業エリア外から侵入しロボットと接触	作業エリア周辺	第三者	4	8	2	3	3	32	
運転	3	部材と手との衝突 押し潰し	ロボットが供給する部材をリリース前に手を挿入して部材に潰される	作業エリア	要員	2	5	2	2	1	10	
運転	4	エリアセンサの故障	作業業者の侵入が検知できずにロボットと衝突	作業エリア	要員	4	7	3	1	3	28	
運転	5	ソフトウェアの暴走	ロボットが暴走し作業業者と衝突	作業エリア	要員	4	6	2	1	3	24	

安全対策

- 危険源1：①マニピレータの移動速度を制限し、回避可能な速度にまでおとす
 ②作業エリア内の区分ごとに安全確認型人検知センサを設置し、ロボットを止める/回避させる
 ③ロボットが人の作業エリアに接近するときは警告音を発する
- 危険源2：①作業エリアの外に向かって安全確認型人検知センサを設置し、ロボットを止める/回避させる
 ②ロボットが人の作業エリアに接近するときは警告音を発する
- 危険源3：①作業エリア内の区分ごとに安全確認型人検知センサを設置し、ロボットを止める/回避させる
 ②ロボットが人の作業エリアに接近するときは警告音を発する
- 危険源4：①マニピレータの移動速度を制限し、回避可能な速度にまでおとす
 ②フェールセーフの安全確認型センサを採用する
 ③複数のセンサを設置する
- 危険源5 ①ウォッチドッグによる異常検知機能を持たす
 ②作業エリア内の区分ごとに安全確認型ロボット検知センサを設置し、ロボットの電源を強制遮断する
 ③ロボットが人の作業エリアに接近するときは警告音を発する

(3) リスクアセスメント 3

前記の安全対策を取り、リスクを低減した後、再度リスクの見積りを行うと、下表の通りリスク点数が許容範囲内の6点となった。ここで重要な点は安全確認型のセンサを採用すること、またそれら安全部品がカテゴリ3※1の安全性能を持つことである。この安全確認型のセンサとして2次元、3次元の超音波アレイセンサは、距離と方位が分かるため常に確認しながらコントロール可能になるために要求を満たす。

また、カテゴリ3の安全性能を実現するためには超音波クラウドセンサタイプ※2のセンサを採用すれば良いことになる。これらの結果、ロボットの残留リスクは許容可能なリスクに留まり、安全性を高めるセンサとして使用可能になる。

※1：単独の故障が安全機能の低下を招かないように設計されており、かつ故障が自動で判定されるセンサをいう

※2：群状のアレイセンサをひとつにまとめて信号処理を行うタイプのセンサをいう

ロボットのリスク低減後のリスクアセスメント

株式会社プロアシスト

初期リスク分析結果				リスク低減			再リスク見積り							
段階	No.	危険源	リスク点数R	優先順位	保護方策(メーカーによる工学的手段)	危害の酷さS	危害の発生確率Ph			リスク点数R	制御関連部の安全性能	残留リスク方策(ユーザに依存)	備考(参照規格類等)	
							頻度F	確率Ps	回避A					
運転	1	ロボットマニピレータと身体との衝突	32	1	マニピレータの移動速度の制限	2		1	2	1	6	Cat.3	手順書	センサの安全カテゴリはCat.3を満たすことが必要
				3	作業エリア内の区分ごとに人検知センサを設置し、ロボットを止める、回避させる	2	3	1	1	1				
				4	警告音を発する	3	3	2	1					
運転	2	ロボットマニピレータと身体との衝突	32	3	作業エリアの外に向かって人検知センサを設置し、ロボットを止める、回避させる	2	3	1	1	1	6	Cat.3	手順書	センサの安全カテゴリはCat.3を満たすことが必要
				4	警告音を発する	3	2	3	1					
運転	3	部材と手との衝突押し潰し	10	3	作業エリア内の区分ごとに人検知センサを設置し、ロボットを止める、回避させる	2	3	1	1	1	6	Cat.3	手順書	センサの安全カテゴリはCat.3を満たすことが必要
				4	警告音を発する	3	2	2	1					
運転	4	エリアセンサが故障しロボットマニピレータと身体との衝突	28	1	マニピレータの移動速度の制限	2		1	1	1	6	Cat.3	手順書	センサの安全カテゴリはCat.3を満たすことが必要
				3	安全確認型センサの採用	2	3	1	1	1				
				3	複数のセンサの設置	3	2	1	1					
運転	5	ソフトウェアが暴走しロボットマニピレータと身体との衝突	24	1	ウォッチドッグによる異常検知	2		1	1	1	6	Cat.3	手順書	センサの安全カテゴリはCat.3を満たすことが必要
				3	作業エリア内の区分ごとにロボット検知センサを設置し、ロボットの電源を遮断する	2	3	2	1	1				
				4	警告音を発する	3	2	1	1					

7-3. 安全エリアフローティング制御の概要

ロボットアームと人間の協働において、安全性を確保するため作業領域を以下の図7-3-1のように分割する。

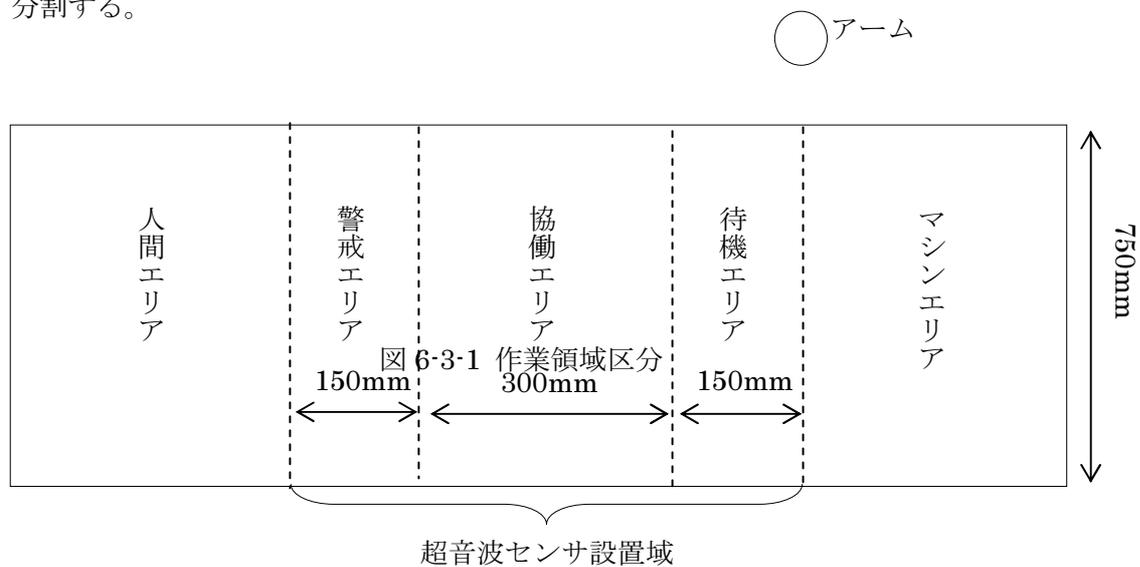


図 7-3-1 作業領域区分

以下、各エリアについて説明する。

マシンエリア：把持物体の置かれるエリアであり、ロボットマニピレータはこの領域で、把持物体の把持点のスキャン、把持動作などの既定の作業を行う。物体はマニピレータの先端の可動範囲以内に置くものとする。

人間エリア：作業者が作業を行う領域。

協働エリア：ロボットマニピレータと作業者が協働するエリア。ロボットマニピレータは把持物体をこの領域にリリースし、作業者はこの領域から物体を移動させる。把持物体のリリース場所はここのエリアの中央とする。

待機エリア：マシンエリア外で動作中のロボットマニピレータが、作業者の位置を確認し、安全でなければ、退避または一時停止するエリアである。

警戒エリア：作業者の進入により、マシンエリア外で動作中のロボットマニピレータに動作制限がかかり始める領域である。

警戒エリアと協働エリアには超音波センサを設置し、作業者の侵入を検知させる。

超音波センサは警戒エリアと協働エリアに渡り5台を設置する方法（図7-3-2）と、警戒エリアだけに市販の二次元センサ1台を設置する方法（図7-3-3）を実施した。

5台を設置する場合センサとセンサとの間隔は150mmに設置する。

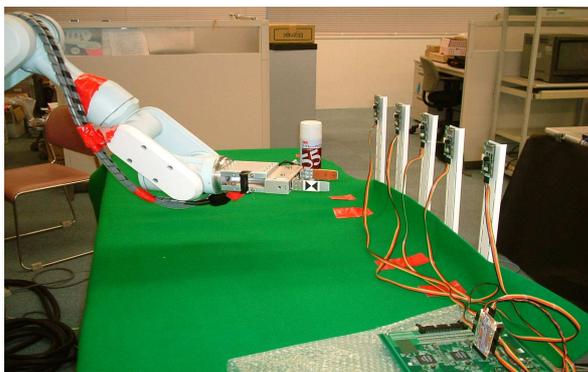


図 7-3-2 二次元センサ 5 台を設置した実施例



図 7-3-3 二次元センサ 1 台を設置した実施例

7-4. 安全エリアフローティング制御用超音波センサユニット

安全エリアフローティング制御の警戒エリアや協働エリアへの作業者の侵入の検出に超音波を使用した。以下に超音波センサユニットについて記述する。

7-4-1. 二次元センサ5台の場合

(1) システム構成

図7-4-1に二次元センサ5台の場合のシステム構成図を示す。

超音波センサユニット5台と信号処理ユニット（SONIC-ROBO基板）1台から構成されている。そして、超音波センサユニットは15cm間隔で配置されている。

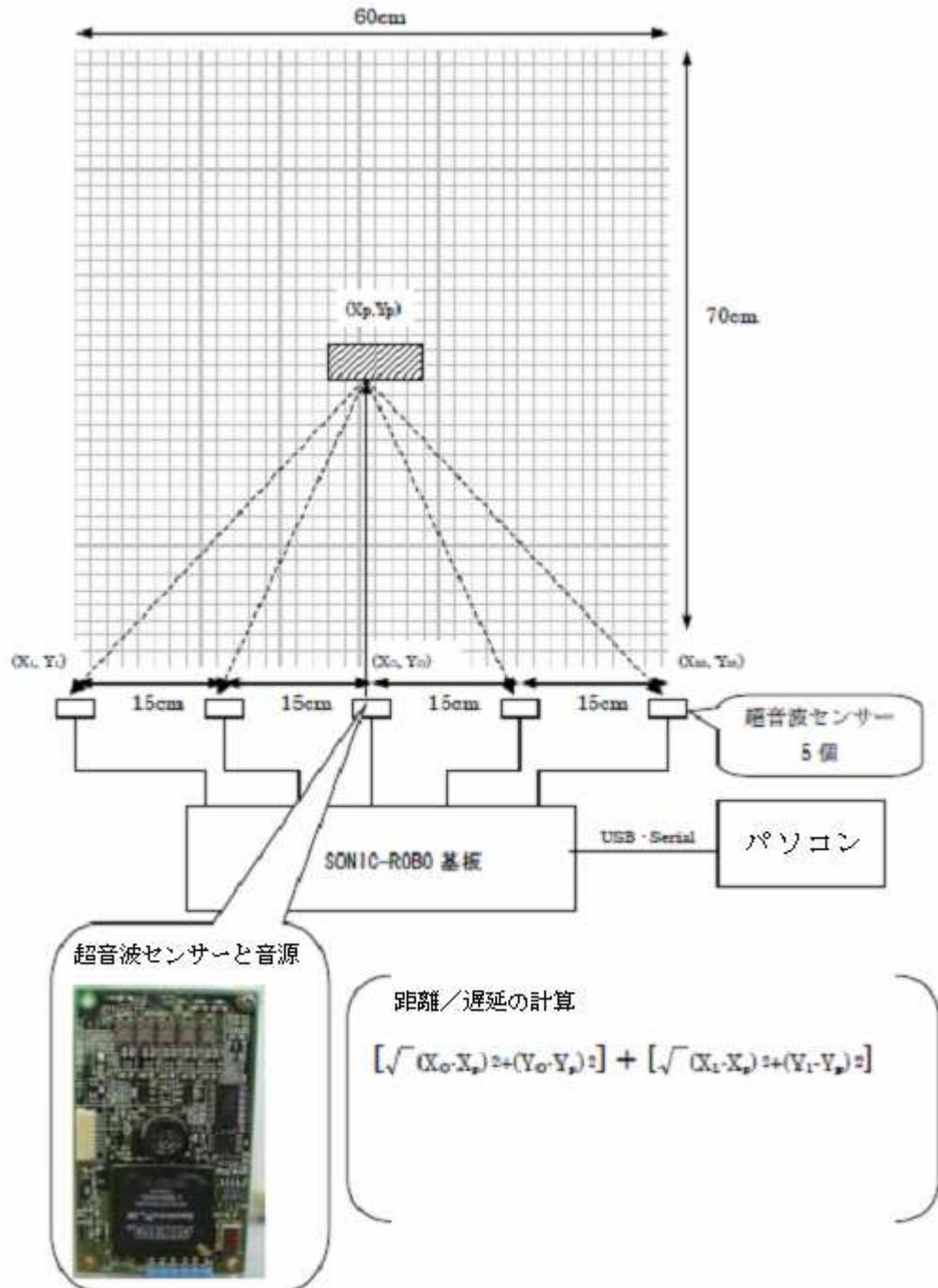
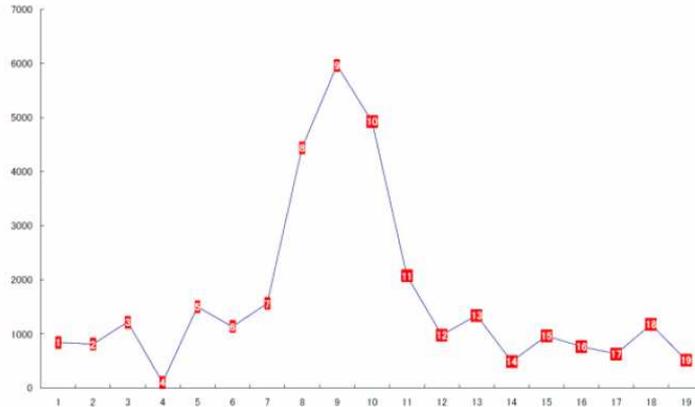


図7-4-1 二次元センサ5台の場合のシステム構成

全超音波センサユニットは信号処理ユニット（SONIC-ROBO基板）へデータを送信する。信号処理ユニットでは、全超音波センサユニットからのデータを集約し1×25個のセンサとして信号処理を行う。

(2) 検出精度と検出方位

各超音波センサユニットに5ヶのセンサが実装され、そして超音波センサユニット5台で全体が構成されていることより、超音波センサは合計25個となる。超音波センサ25個を使用することと超音波センサを15cm間隔で配置することにより、方位精度1°が実現できる。図7-4-2は方位VS振幅(2次元センサ5台の場合)を示し、正面に反射物体がある場合を表す。



横軸：方位（単位degree） 図中の数字10が方位0°（正面） 左端が-9° 右端が+9°
縦軸：振幅

図7-4-2 方位VS振幅（二次元センサ5台の場合）

5台の超音波センサユニットの音源は、図7-4-3の①から⑤の順番に発振する。図7-4-3は、±9°の検出方位を各音源を基準に記載したものであり、警戒エリア、協働エリア、待機エリアのほぼ全域をカバーしていることがわかる。

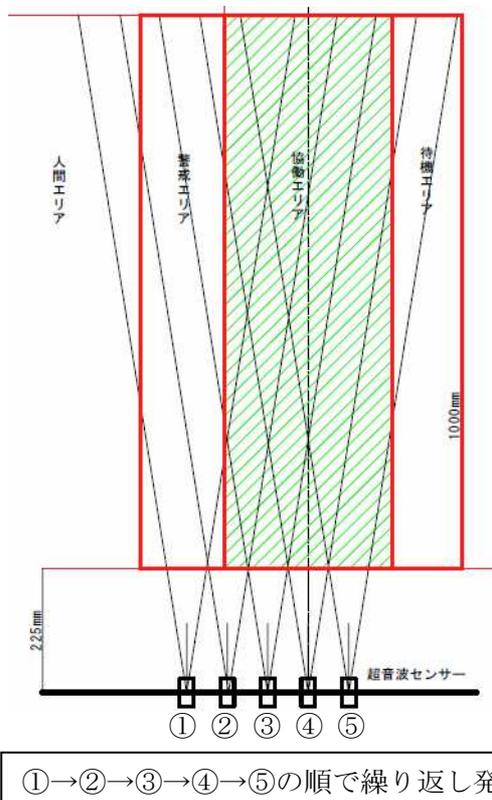


図7-4-3 二次元センサ5台のセンサ配置図と全検出範囲

7-4-2. 二次元センサ1台の場合

二次元センサ1台の場合は、

- ・検出距離：最大 700mm（最大 1500mm）
- ・検出幅：音源発生 の原点から $\pm 49^\circ$ の範囲（極座標）で検出
- ・方位精度： 7°

の性能となる。

音源にコーンを付け、広範囲の検出角を絞ることで広範囲からの反射波を遮断し、感度を上げた。

1台の場合は、音源と超音波センサとの距離が短いため距離補正は行わず遅延加算処理を行い、超音波センサユニットで全ての信号処理が完結する。したがって、PCから直接超音波センサユニットに測定開始の命令を行うとともに、データも直接PCへ送信する。

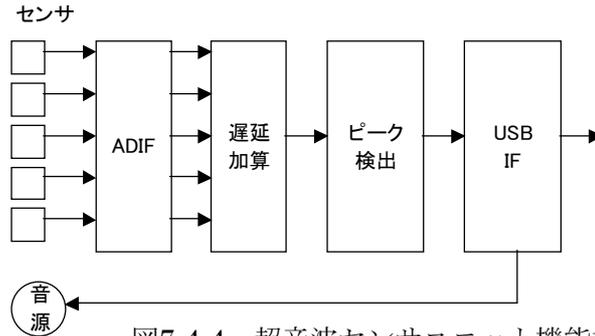


図7-4-4 超音波センサユニット機能構成図

7-5. 安全エリアフローティング制御アルゴリズム

作業者とロボットマニピレータの動作位置により、ロボットマニピレータには安全確保のための制御を行う。作業者の位置は超音波センサにより常時監視し、その結果をマニピレータ制御側に通知する。

7-5-1. 超音波データ信号処理について

1) 二次元センサ5台の場合

超音波データは左側の超音波センサを原点とし、右端のセンサ方向をx軸、作業台の奥行方向をy軸とするx、y平面のサイズ40×65（分解能15mm）のセル毎の信号強度で表わされ、それぞれのセンサ毎このようなデータを持っている。

① リファレンス計測

ロボットマニピレータの基本姿勢の状態初期環境から反射する超音波データを10回取得し、そのセル毎の平均値を求めたのがリファレンスデータとなり、センサ毎にリファレンスデータを有する。

② リファレンス差分

通常アームの動作中取得したセンサ毎の超音波データから対応するリファレンスデータとの差分を求め、初期環境から変化した超音波の反射波を得る。（セル毎の差分）

③ 1段階目の閾値設定

ノイズ軽減のためリファレンス差分データから閾値を決める。

④ データの合成

5台のセンサのデータ（1回目閾値差分データ）を対応するセル毎に加算する。

⑤ 移動平均

合成データの5点移動平均を求める。

⑥ 以上の処理データからさらに2段階目の閾値を決める。

結果が0より大きければ、そのセルに障害物（人間）があると判定する。

以上の信号処理結果、実際ロボットマニピレータを動作させた場合、作業者が人間エリアにおいて、マニピレータが協働エリアに近づいたところで図7-5-1のような結果が得られた。

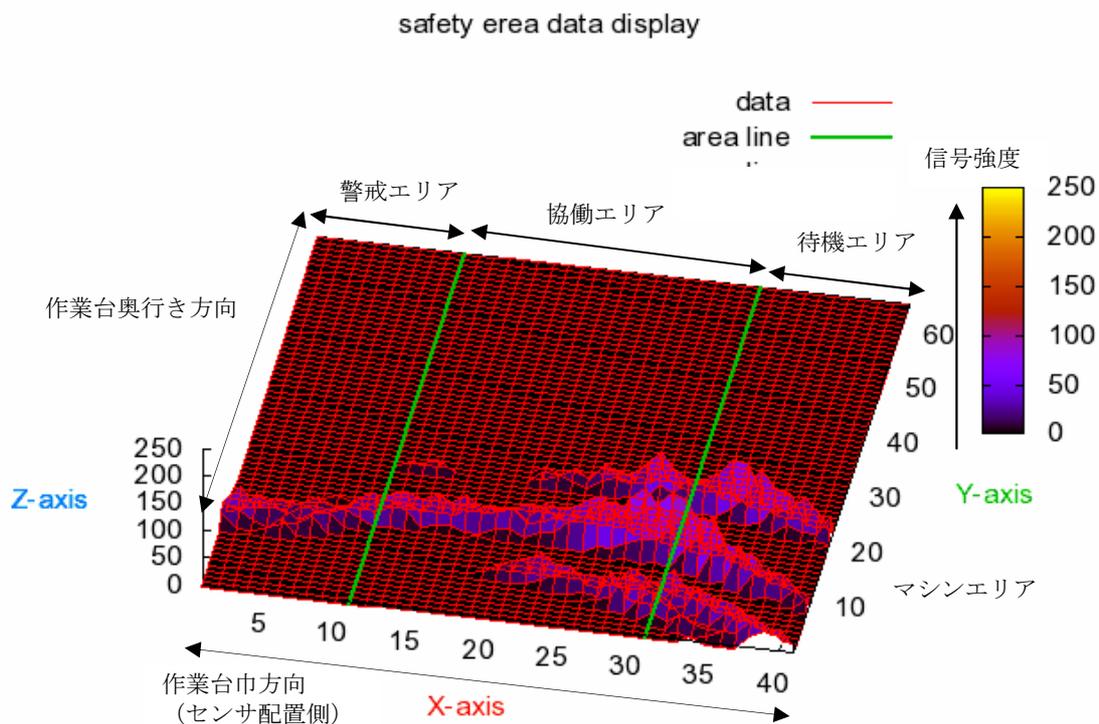


図 7-5-1 センサ 5 台の場合の検出結果

上の図のように、作業台の幅方向に広い範囲に渡ってゴーストが見られる。作業者が警戒エリアに侵入していないにも関わらず、侵入していたように検知する。閾値を調整してゴーストを無くす場合、人間による超音波の反射強度がマニピレータからの反射強度より小さいため、今回は作業者が侵入しても検知できなくなる。

■ 考察

観察したゴーストについてその原因と対応を検討する。

測定では5つのセンサ基板から順番に超音波を発信する。(左端から右端まで)

5つのセンサ基板の取り付け位置は設定パラメータにより遅延加算処理の計算に渡す。

またセンサ基板は作業台にねじ留めする構造である。

ここでセンサ基板間隔の設定値と実際にセンサ基板を取り付けた間隔は数mmの誤差が出ると構造上考えられる。受信センサは5chで5個あり、特にセンサ基板間隔の信号は数mmの誤差があると適切に計算された位置から位相がずれた信号を重ね合わせている可能性が高い。これがゴーストの一つの原因と考えられる。

今後の対応としてはセンサ基板の取り付けは正確に位置決めできるリニアスライダ等を利用し、そこにセットできる構造にして測定し、誤差による影響を検証することが必要と考える。

2) 二次元センサ 1 台の場合

超音波データは角度範囲 $\pm 49^\circ$ 、角度分解能 7° 、距離範囲が1500mmまで、分解能60mmの極座標での信号強度で表わされる。二次元センサ音源にコーン角度35度を設置、マニピレータが近づいた場合の反射の影響を軽減させる。

① リファレンス計測

ロボットマニピレータの基本姿勢の状態超音波データを50回取得し、その平均値をリファレンスデータとする。

② リファレンス差分

通常のマニピレータの動作中取得した超音波データからリファレンスデータの差分を求める。

③ 移動平均

リファレンス差分データの5点移動平均を求める。

④ 閾値差分

移動平均データから閾値差分を取得し、0以上であれば、対応する角度、距離に障害物（人間）があると判定する。判定には極座標を平面座標に変換し、平面座標で警戒エリア外であれば判定を行わない。

結果、実際ロボットマニピレータを動作させた場合、マニピレータが協働エリアに入ってもマニピレータからの反射の影響は見られなかった（図7-5-2）。

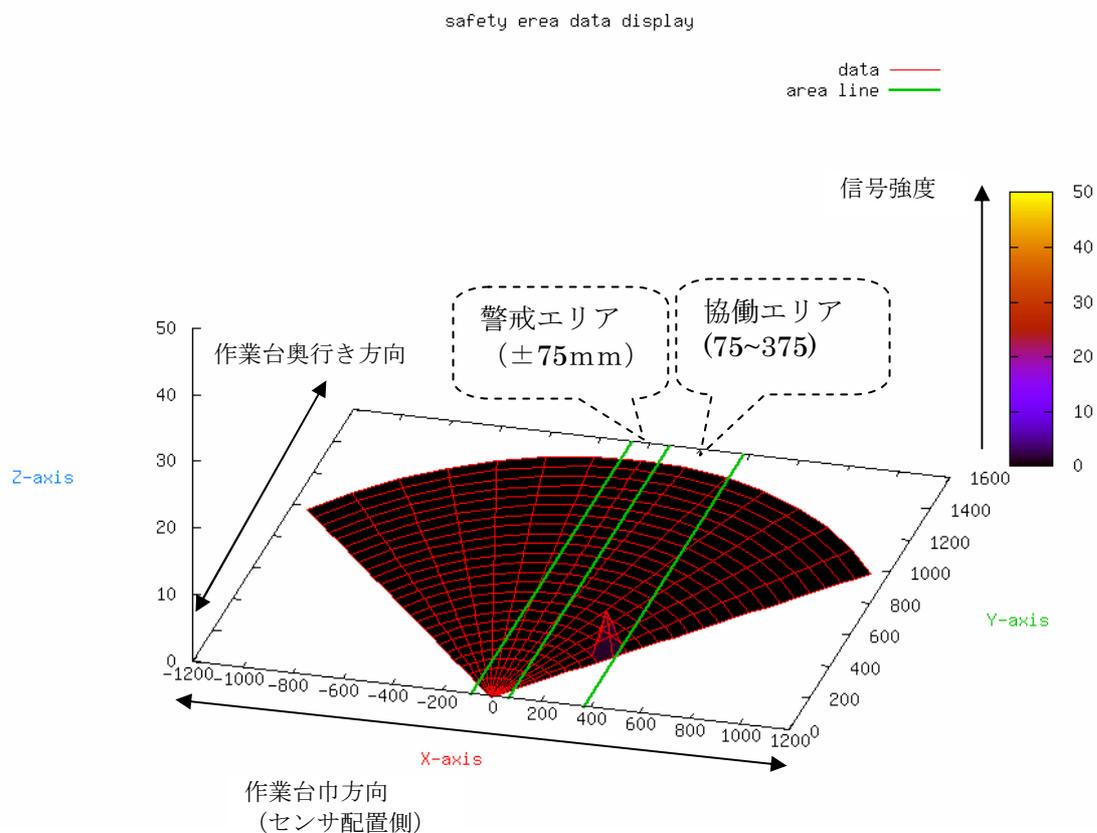


図 7-5-2 マニピレータが協働エリアに進入した場合

次にマニピレータがリリース位置にあり、作業者が警戒エリアに侵入したときの結果を図7-5-3に示す。

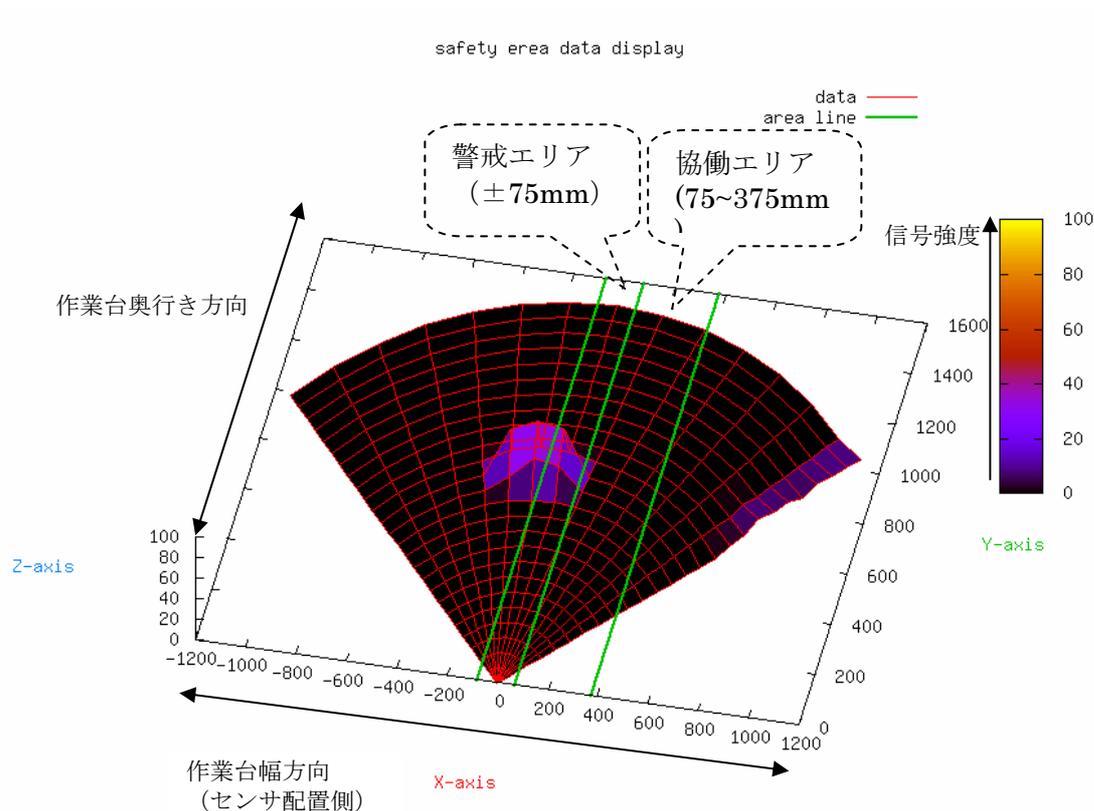


図 7-5-3 作業者が警戒エリアに進入した場合

以上の結果から市販の二次元超音波センサ1台で作業者とアームが区別でき、作業者の警戒エリアへの侵入を検知することが確認できた。

7-5-2. 安全検知によるロボットの制御

■ 作業者が人間エリアにいる場合

ロボットマニピレータは動作中のエリアに関わらず、既定の動作を続ける。作業者が人間エリアにいるという判定は、人間エリアに3秒間連続いることを条件とする。

■ ロボットマニピレータがマシンエリアで動作中の場合、作業者の位置に関わらず既定の動作を続ける。

■ ロボットマニピレータが待機エリアまた協働エリアで動作中の場合、作業者が警戒エリアに侵入したら一時停止し、作業者が人間エリアに戻れば既定の動作を再開する。

■ 安全のためロボットマニピレータの先端の動作速度はエリア毎に設定する。速度レベルはマシンエリアが一番速く、次に待機エリア、協働エリアが一番遅い順に設定した。

今回はそれぞれ50、30、20mm/secに設定した。

7-6. 模擬作業エリアでの動作確認

■ マニピレータが初期位置で把持点情報を取得しスキヤニング、把持、待機エリアの初期位置へ戻るまで、作業者の位置に関係なく停止することなく連続的な動作が確認できた。

■ マニピレータが待機エリアでリリース方向に移動中、作業者が警戒エリアに進入したら、マニピレータは一時停止し、作業者が人間エリアに戻って、3秒以上経ってからリリース方向への移動を再開することが確認できた。作業者の警戒エリアへの侵入は、手の進入と体の進入両方とも検知できた。作業者の警戒エリアへの侵入がなかった場合は、停止することなく既定の動作を継続することが確認できた。

- マニピレータが協働エリアでリリース位置に移動中、作業者が警戒エリアに進入したら、マニピレータは一時停止し、作業者が人間エリアに戻って、3秒以上経ってから直前の動作を再開することが確認できた。作業者の警戒エリアへの侵入がなかった場合は、停止することなく既定の動作を継続することが確認できた。
- マニピレータが協働エリアでリリース動作完了後待機エリア方向へ戻る時、作業者が警戒エリアに進入したら、マニピレータは一時停止し、作業者が人間エリアに戻って、3秒以上経ってから直前の移動を再開することが確認できた。作業者の警戒エリアへの侵入がなかった場合は、停止することなく既定の動作を継続することが確認できた。
- マニピレータがリリース動作を完了し、待機エリアで初期位置（把持点情報取得位置）へ戻る時、作業者が警戒エリアに進入したら、マニピレータは一時停止し、作業者が人間エリアに戻って、3秒以上経ってから直前の移動を再開することが確認できた。作業者の警戒エリアへの侵入がなかった場合は、停止することなく既定の動作を継続することが確認できた。
- ロボットマニピレータの手先が各エリアで設定した速度レベルで動作することが確認できた。

以上、一連の動作が繰り返されることが確認できた。

第8章 複合ビジョンセンサユニットの開発

三次元超音波と光の複合化画像処理によるロボットビジョンセンサとして開発した複合型ビジョンセンサはロボットのマニピレータ先端に取り付け、スキャン走査により把持対象物の把持点の3次元位置情報を確認する超音波センサユニットと、ステレオカメラにより把持点の3次元位置情報を教示なしで算出する光学式センサユニットからなり、光学式センサユニットからの把持点情報により超音波センサユニットがその把持点を確認することにより、確実に把持することができる。今回完成した複合ビジョンセンサユニットは超音波センサと光学センサの分離型となっている。

8-1. 超音波センサユニット

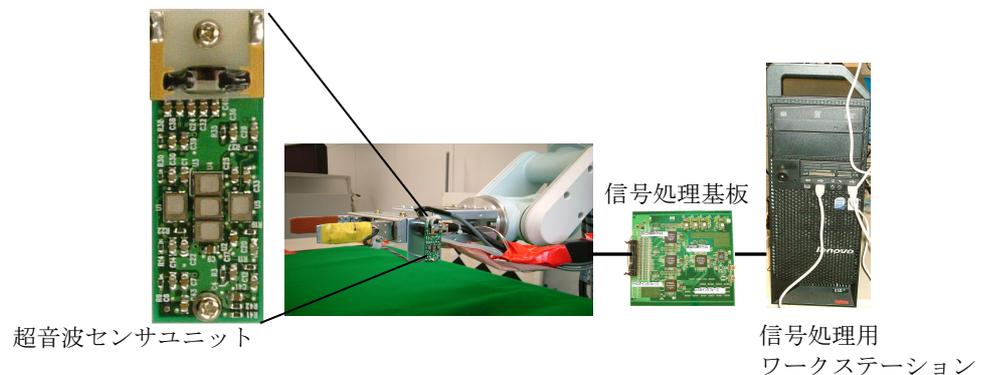


図 8-1-1 超音波センサユニット

8-2. 光学式センサユニット



図 8-2-1 光学式センサユニット

第9章 全体総括

9-1. 複数年の研究開発成果

研究項目	担当	目標	成果
① 超音波アレイセンサの開発	IngenMSL	一般的 MEMS 量産プロセスで作製可能な高感度で広帯域周波数特性を有する 1×5、5×5 の静電型アレイセンサの開発。	1×5、5×5 のデバイスを試作し、感度 300 mV/pa を達成した。また、素子間の感度差 5%以内を実現。また、周波数特性は 100kHz までフラットな特性を確認した。
② 光学式センサの開発	産総研	任意の形状の三次元物体の形状計測を計測開始から把持点認識完了まで 0.2 秒/物体で計測する光学式センサの開発。	ステレオカメラシステムを用い、セグメント法と相関法を併用して三次元座標計測を行い、未知物体の把持点を教示なしで把持することが可能となった。把持点認識に要する時間は、VGA サイズの 8bit グレースケール画像の取得完了から把持点認識結果出力完了まで 150msec 程度になり、当初の目標値である一物体あたり 0.2 秒を達成。
③ 超音波信号処理技術開発	・大阪大学 ・産技研 ・プロアシスト	ナノ結晶音源、ピエゾタイト音源によるスペクトラム拡散変復調処理の開発。音源とセンサのスキニング走査による三次元位置計測アルゴリズムの検討。クロスファンビームを用いた複数の超音波センサの最適配置の実用化提案。	ナノ結晶音源、ピエゾタイト音源によるスペクトラム拡散変復調信号処理の開発を行い、超音波スペクトラム拡散変復調信号処理が実用可能となった。また、音源とアレイセンサを移動することによって三次元位置計測精度を向上するアルゴリズムの開発を行い実機による動作確認を行った。また、クロスファンビームの最適指向性設計のため強化学習によるアレイセンサの最適設計ツールを開発。簡単な報酬関数を設計して、近距離、遠距離での計測に、個別の使用状況に応じた望ましいビーム形状やアレイ配置パターンのシミュレーションが可能。
④ 光&超音波複合化処理エンジンの開発	プロアシスト	光学式距離画像センサによる高速物体位置計測結果と、超音波音源とセンサの複数配置やスキニング走査により取得した物体の位置計測結果から、各々を補完しあうアルゴリズムを検討・試作する。	1.光学式計測センサ、2.超音波位置検出センサ、3.超音波安全エリアセンサ、4.把持力センサの4つのセンサからのデータを受信し、5.ロボットマニピレータと6.二指アクチュエータの動作を統合制御し、ロボットマニピレータの状態を管理する複合化処理エンジンを開発した。
⑤ 安全エリアフローティング制御技術開発	プロアシスト	安全規格との適合性や位置付けを明確にする。複数配置した二次元超音波センサを用い人を監視し、区分されたエリア内で移動速度や停止、回避などロボットを制御する。	二次元超音波アレイセンサに求められる安全性能をリスクアセスメントを通して求めた。セル生産現場模擬環境でフローティング制御仕様に基づき人とロボットが安全に協業できるための二次元センサの人検知性能を検証。二次元アレイセンサ 1 台で人を検知してロボットの動きをコントロールできた。二次元アレイセンサを複数台連動して検知する場合、ゴースト問題の解決が必要。
⑥ 高速専用 ASIC 開発	プロアシスト	FPGA による超音波三次元位置計測の論理回路設計と動作確認、及び光画像処理専用 ASIC の製作と動作確認を行う。	スペクトラム拡散方式変・復調、センサー25素子の遅延加算等の超音波信号処理回路のFPGA化を実現。カメラの画像データから微分、方向、エッジの演算を行なう ASIC 素子を開発し、カメラ画像をリアルタイムで処理した。
⑦ 複合型ビジョンセンサユニット開発	・プロアシスト ・穂高電子	超音波センサと光学的距離画像センサの分離型とし、任意の未知物体を教示なしで把持できるシステムを開発する。	ステレオカメラと光学式画像処理用ワークステーションと、スキニング超音波センサユニットと信号処理ボードおよび超音波信号処理用ワークステーションからなる分離型複合ビジョンセンサユニットを開発した。概略 500g の把持力を検知して把持可能となった。

表 9-1-1 研究開発成果（各項目別）

9-2. 研究開発後の課題・事業化展開

9-2-1. 超音波アレイセンサ

一般的 MEMS 量産プロセスで高感度、広帯域周波数特性、均一特性の静電型超音波アレイセンサの基盤技術を確立した。今後、変換回路を一体化した実用型小型パッケージングを開発することにより、超音波信号処理用のデバイスとして実働評価が必要である。

9-2-2. 光学式センサ

光学式センサの把持点検出は当初の検出速度の目標をほぼ達成した。今後、低コストで、複雑な形状・性状物体、バラ積み物体の把持点を教示なしで高速検知するための実用化研究開発を行う。

9-2-3. 超音波信号処理技術

残響の長いピエゾタイト音源を用いたスペクトラム拡散変復調信号処理の実用化が可能となり、二次元、三次元超音波センサを用いた光や熱や音などの環境ノイズに強い、障害物、人・物などの移動体、侵入者などを検知する用途への実用化を検討する。

9-2-4. 光&超音波複合化処理エンジン

光センサとこれを補完する超音波センサのスキャニング走査による物体検知の有効性が確認され、異なるセンサの複合化制御処理技術として応用する。

9-2-5. 安全エリアフローティング制御技術

引き続き複数の二次元センサの信号をまとめて処理する超音波クラウドタイプセンサのゴースト問題を解決し、カテゴリ 3 の安全性能を実現するセンサとして実用化に取り組む。

9-2-6. 高速専用 ASIC

画像処理の基本となる微分、勾配、エッジ処理を行う ASIC として実用する。

9-2-7. 複合型ビジョンセンサユニット

大型の分離型の複合ビジョンセンサから、それぞれ小型・安価で使いやすい実用型のビジョンセンサを目指した実用化開発に取り組む。

【参考文献】

- (1) 松下電工技報 Aug.2002 「位相ソフト法による高速高精度 3次元計測技術」
三高良介、濱田長生
- (2) 電子情報通信学会論文誌 A Vol.J90-A NO.6 「PN 符号パルス圧縮とビームフォーミング技術を用いた超音波立体視センサ」
犬伏裕基、高橋紀行、朱 弘博、谷口研二
- (3) 日本応用数理学会 2008 年度年会講演予稿集 「マルチコアプロセッサを用いた I-SVD 法の並列化について」
豊川博己、木村欣司、高田雅美、中村佳正
- (4) 日本応用数理学会 2008 年度年会講演予稿集 「数式処理における並列計算について」
木村欣司、中村佳正
- (5) 日本応用数理学会 2008 年度年会講演予稿集 「マルチコアプロセッサを用いたバイナリ配布可能な BLAS の並列化」
澤 勇太、須田礼仁
- (6) 植物工場学会誌 第 14 卷 第 1 号 別刷(2002) 「人間協調型農業用ロボットの外界センシングシステム(第 1 報)」
門田充司、鐘ヶ江修司、毛利健太郎、難波和彦、近藤 直
- (7) 植物工場学会誌 第 14 卷 第 2 号 別刷(2002) 「人間協調型農業用ロボットの外界センシングシステム(第 2 報)」
門田充司、鐘ヶ江修司、毛利健太郎、難波和彦、近藤 直
- (8) 農業機械学会誌 61(2) 81~90 1999 「農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 1 報)」
門田充司、近藤 直
- (9) 農業機械学会誌 61(2) 91~100 1999 「農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 2 報)」
門田充司、近藤 直、中司憲持
- (10) 農業機械学会誌 61(3) 73~81 1999 「農業用ロボットのマン・マシン協調システム(第 3 報)」
門田充司、近藤 直