

平成 2 1 年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「高度通信サービス技術とリアルタイム映像解析技術を用いた
産業用ロボット向け機能安全システム機構の開発」

研究開発成果等報告書

平成 2 2 年 3 月

委託者 近畿経済産業局

委託先 財団法人新産業創造研究機構

目 次	頁
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 当該プロジェクト連絡窓口	6
第 2 章 UWB 無線（ウルトラワイドバンド無線：超広帯域無線）を使った小型 カメラモジュールの設計・試作	7
2－1 UWB RF 評価基板	7
2－2 カメラモジュール	7
第 3 章 UWB 通信における 1 対 n の無線通信を実現するハードウェアならびに ソフトウェアの開発	9
3－1 開発目標	9
3－2 1 対 n の無線通信プロトコルの実システムへの実装	9
第 4 章 多点リアルタイム映像データ解析プログラムの開発	1 1
4－1 開発の概要	1 1
4－2 開発の内容	1 1
4－3 結果と考察	1 3
第 5 章 リアルタイム映像データ解析プログラムを実行する組込ボードの開発	1 5
5－1 目標	1 5
5－2 PC ベースシステム用画像変換ユニット	1 5
5－3 成果と課題	1 6
第 6 章 上記 4 つのサブテーマ成果から成る産業用ロボット機能安全システムの 検証実験	1 7
6－1 概要	1 7
6－2 内容	1 7
6－3 結果と考察	2 0
第 7 章 ロボット間通信における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発	2 2
7－1 目的ならびに内容	2 2
7－2 結果と考察	2 4

第 8 章	ロボット間通信における耐障害性向上に資する M2M 通信技術の開発	2 5
8-1	概要	2 5
8-2	内容	2 5
8-3	結果と考察	2 6
第 9 章	複数の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの 検証実験	2 7
9-1	概要	2 7
9-2	内容	2 7
9-3	結果と考察	2 9
最終章	全体総括	3 0
10-1	成果のまとめ	3 0
10-2	今後の計画と方針	3 0

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

産業用ロボットの安全は、従来人間の動作領域と機械的に分けることで保証されていたが、今後は共存環境での安全システムが求められる。そのような環境では扉開閉スイッチや、光カーテンセンサ等の従来方式では作業効率を確保しながら十分な安全性を保持するのは困難である。

その対策として、作業環境にカメラを主にした複数台のセンサを配置し、ロボット側の情報も含めて人間とロボットの動作を解析し、危険を検知するシステムを開発する必要がある。

また、複数のロボットが動的に配置や役割を変化させる今後の生産システムにおいて、生産を制御するネットワークはシステムの変更や部分故障への対応性が求められる。

これらの要請に対応するために、①進入・存在検知能力高度化を目的としたリアルタイム映像センシング技術の開発、②進入・存在検知能力高度化を目的としたロボット間高度通信サービス機能の開発を行う。これにより、高度化されたロボット生産システムニーズに対応した技術を獲得する。

人とロボットが共存する製造環境において、ロボットアームと作業員が約0.5m以内の近接状態になった際にカメラ等各種センサによりこの状況を認識・検知してロボットの稼働を停止させることを目指す。

このため、本システムでは、複数のカメラによる画像から人間の位置、姿勢、動作方向等を高速で認識し、ロボット側の情報や補助的センサ類からの情報も総合して危険を察知し、ロボットに警告や指示を出すソフトウェアを開発する。

また、製造ラインの変更や故障に対応し、ダメージを最小化して生産を継続できる制御・通信ソフトウェアを開発する。

本システムは、多数のカメラからの画像情報という膨大な情報量进行处理すること、応用される生産システムは頻繁な配置換え等が想定されることから、その実現策として UWB(Ultra Wide Band：超広域帯無線)を適用した通信システムを開発する。上記目的を実現するための開発サブテーマは、大きく3つの開発テーマとこれらを使った検証試験から構成され、具体的には9つに分けられる。

- 第一は、超高速無線伝送機能を有する小型カメラモジュールの研究開発。この機能は大容量映像データを最小限の遅延で転送する必要がある。当開発はサブテーマ①②に対応する。
- 第二は、ロボット周辺で作業を行う作業員とロボットとの接触回避を目的とした映像解析（追跡）機能ならびに映像解析機能を補完するセンサ情報解析機能の開発。当開発はサブテーマ③④に対応する。
- 第三は、上記の2つの開発成果を 単一ロボットに限定せず複数のロボット間で共有し衝突回避支援機能の精度、信頼性を向上させるためのロボット間通信機能の開発。当開発はサブテーマ⑥⑦に対応する。
- また、上記開発を遂行する過程で実証実験としてサブテーマ⑤⑧を行う。

サブテーマ

- ① UWB無線（ウルトラワイドバンド無線：超広域帯無線）を使った小型カメラモジュールの設計・試作

高速無線伝送機能を有する小型カメラモジュールの設計ならびに試作を行う。データの伝送遅延を最小化するため UWB 無線を活用したカメラモジュールを開発する。

② UWB通信における 1 対nの無線通信を実現するハードウェアならびにソフトウェアの開発

上記①で開発したカメラモジュールから UWB 無線で送信されるデータを受信する機器の開発を行う。1 個の受信機器は、複数のカメラモジュールからの映像をリアルタイムに受信するために UWB 通信における 1 対 n の無線通信を実現する。

③ 多点リアルタイム映像データ解析プログラムの開発

上記①、②で開発した複数の UWB カメラモジュールから伝送される大容量のリアルタイム映像データを受信しロボット周辺における作業者の「存在検知」を行う映像解析プログラムを開発する。ハードウェア資源が限定された組み込みボード環境で当該機能を実現するために既知の映像追跡アルゴリズムを改良し、同時に映像以外の検知用センサ情報も利用して当開発を遂行する。例えば、ロボットアームと人という移動物体の 3 次元空間における現在位置把握により危険状態を判断し必要に応じてロボットへ警告情報（停止命令）を送信する。

④ リアルタイム映像データ解析プログラムを実行する組み込みボードの開発

上記③が稼動する組み込みボードを開発する。

⑤ 上記 4 つのサブテーマ成果から成る産業用ロボット機能安全システムの検証実験

上記①～④の開発サブテーマの成果の機能検証を行う。

⑥ ロボット間通信における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発

高信頼性を有するロボット間通信を実現するための高信頼性マルチキャスト通信機構ミドルウェアを開発する。上記①～⑤で実現する「作業者存在検知情報」、「挙動情報」を、当ミドルウェアを使ってロボット間の情報共有を行う。

⑦ ロボット間通信における耐障害性向上に資するM2M通信技術の開発

上記⑥のミドルウェア・サーバーの障害時には通信サービスが全面的に停止するリスクが在る。サーバー障害発生時にサーバーを使用しないM2M通信に一時的にモード移行する機能を開発する。上記⑥を機能拡張し耐障害性機能の向上を図る。サーバー障害発生時などにロボットコントローラー間の情報交換を一時的に継続可能とする通信機能を検討し、通信機能設計、プロトタイプ開発を今年度に行う。

⑧ 複数の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの検証実験

複数台の産業用ロボットから構成される実験環境を構築する。UWB 受信ジュール搭載高速映像解析用ボードに⑥、⑦で開発した通信ミドルウェア機能を実装し、⑥で開発した高信頼性ミドルウェア・サーバーを使用した実証実験を行う。

⑨ プロジェクトの管理・運営

頻繁な情報交換や推進委員会の運営、日程の管理等、開発を効率的に行うための管理・運営を行う。

1-2 研究体制

財団法人新産業創造研究機構が事業管理者となり、株式会社シンクチューブ、株式会社日本ジー・アイ・ティー、国立大学法人神戸大学が再委託先となる体制を組んだ。図 1.2.1 に体制を示す。また、川下企業として、産業用ロボットメーカーである川崎重工業株式会社にアドバイザーとして、実際の産業用ロボットの動作環境や最終ユーザのニーズなど幅広く情報提供を依頼している。

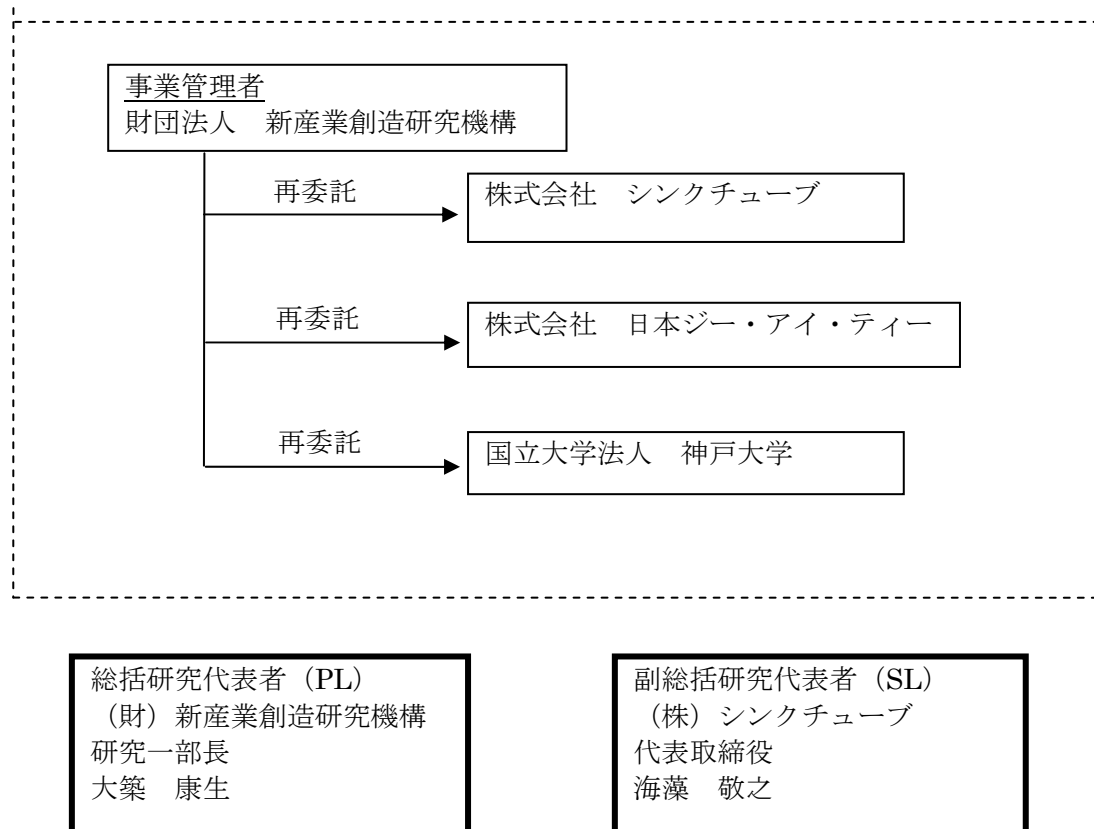


図 1.2.1 研究体制

株式会社シンクチューブは、多点ネットワークの通信や制御のソフトウェアに独自の技術を持つ。株式会社日本ジー・アイ・ティーは、本システムに必要な超広域帯無線に先端的な技術を有している。国立大学法人神戸大学は、視覚認識に高い技術を有している。財団法人新産業創造研究機構は、開発プロジェクトの管理・運営に多くの経験を持つと共に、多数の技術移転アドバイザーによって広い技術に調査・評価能力を有している。以下、各研究サブテーマへの分担を示す。

- ① UWB 無線（ウルトラワイドバンド無線：超広帯域無線）を使った小型カメラモジュールの設計・試作（株式会社日本ジー・アイ・ティー、株式会社シンクチューブ）

日本ジー・アイ・ティーが UWB カメラインタフェースの開発を行い、シンクチューブがシステム要件調査を通じて開発支援を行う。

- ② UWB 通信における 1 対 n の無線通信を実現するハードウェアならびにソフトウェアの開発（株式会社日本ジー・アイ・ティー、株式会社シンクチューブ）

ハードウェアならびにソフトウェアの開発を日本ジー・アイ・ティーが行い、シンクチューブは通信プロトコル設計ならびに評価分析を日本ジー・アイ・ティーと共同で行

う。

- ③ 多点リアルタイム映像データ解析プログラムの開発（国立大学法人神戸大学、財団法人新産業創造研究機構、株式会社シンクチューブ）

神戸大学とシンクチューブが多点リアルタイム映像データ解析プログラムのアルゴリズム開発から、設計、実装、検証（次年度以降継続）をおこない、新産業創造研究機構が関係するセンサ等の調査研究を行う。

- ④ リアルタイム映像データ解析プログラムを実行する組込みボードの開発（株式会社日本ジー・アイ・ティー、国立大学法人神戸大学、株式会社シンクチューブ）

日本ジー・アイ・ティー、シンクチューブ、神戸大学で必要仕様要件を共同で調査検討し、具体的なボード仕様策定および設計を日本ジー・アイ・ティーが行う。（次年度以降新ボードの試作、評価を行う。）

- ⑤ 上記4つのサブテーマ成果から成る産業用ロボット機能安全システムの検証実験（株式会社シンクチューブ、株式会社日本ジー・アイ・ティー、国立大学法人神戸大学、財団法人新産業創造研究機構）

シンクチューブが実証実験システムの構成と実験を行い、神戸大学、日本ジー・アイ・ティー、新産業創造研究機構が共同で評価を行う。

- ⑥ ロボット間通信における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発（株式会社シンクチューブ、財団法人新産業創造研究機構）

仕様要件の調査をシンクチューブとNIROが共同で行い、設計と開発・実装をシンクチューブが行う。（次年度以降、組込環境における機能検証をシンクチューブが行う。）

- ⑦ ロボット間通信における耐障害性向上に資するM2M通信技術の開発（株式会社シンクチューブ）

シンクチューブが仕様の検討と、PC環境での開発・実装を行うが、本サブテーマは次年度以降に実施する

- ⑧ 複数の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの検証実験（株式会社シンクチューブ、株式会社日本ジー・アイ・ティー、国立大学法人神戸大学、財団法人新産業創造研究機構）

実証システムの検討と構築をシンクチューブが、実証実験の実施をシンクチューブと神戸大と日本ジー・アイ・ティーが、評価をこれらと新産業創造研究機構が行うが、本サブテーマは次年度以降に実施する。

- ⑨ プロジェクトの管理・運営（財団法人新産業創造研究機構）

頻繁な情報交換や推進委員会の運営、日程の管理等、開発を効率的に行うための管理・運営を行う。

各参加機関の研究員と担当サブテーマを以下に示す

財団法人 新産業創造研究機構

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
大築 康生（再）	研究一部長	全体統括、⑤、⑧

株式会社 シンクチューブ

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
海藻 敬之	代表取締役 兼 研究開発部・主席研究員	①、②、③、④、⑤、⑥、⑦、⑧
シエラ ラファエル	研究開発部・主任研究員	③、④、⑤、⑦、⑧
松山 健太郎	研究開発部・研究員	③、④、⑤、⑥、⑦、⑧
宇多小路 泉	取締役 兼 研究開発部・主任研究員	⑤、⑧

株式会社 日本ジー・アイ・ティー

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
伊田 省悟	代表取締役	①、②、④、⑤、⑧
長田 敦史	開発本部・開発部長	①、②、④、⑤、⑧
木原 宏	開発本部・開発課長	①、②、④、⑤、⑧
杉山 雅彦	開発本部・設計部長	①、④
松本 保広	開発本部・開発エンジニア	①、②、⑤、⑧

国立大学法人 神戸大学

氏 名	所属・役職	実施内容（番号）
深尾 隆則	工学研究科 准教授	③、④、⑤、⑧

1-3 成果概要

- ①UWB 無線を使った小型カメラモジュールの設計試作：3年度に渡り UWB RFチップの試作・改良試作を行い、それを用いた改良 UWB 無線カメラモジュールを試作した。性能評価試験を行い、送信性能とダイナミックレンジの向上を確認した。現状は1対2での確認を完了したが、アンテナ指向性による通信角度の制限が残っている。
- ②UWB 通信における1対nの無線通信を実現するハードウェアおよびソフトウェアの開発：1対nの通信プロトコルを完成させて通信ハードウェアに組み込み、1対nの通信機能を確認した。現状は1対2の無線通信を確認しており、今後より多くとの安定した通信が課題である。
- ③多点リアルタイム映像データ解析プログラムの開発：ロボットアームの移動予測情報とステレ

カメラにより映像処理に拠り得た作業位置情報を活用した衝突リスク予測機能 (iVSF 機能※) の開発を行い、映像追跡アルゴリズムを改良した。複数の人間の検出や三次元での精密な衝突判別は今後の課題である。

- ④リアルタイム映像データ解析プログラムを実行する組み込みボードの開発：③で開発した映像追跡プログラムを実装するために開発した組み込みボードで、リアルタイム映像データ解析機能を実証した。現在は基本機能の組込みができています。全ての機能を組み込むには、より高性能のボード開発と、ボード搭載に適したプログラムの改良が課題となります。
- ⑤上記 4 つのサブテーマ成果から成る産業用ロボット機能安全システムの検証実験：周辺領域カメラ、中核領域ステレオカメラ、測域センサ等からなる情報を統合した衝突リスク判定サーバー機能の改良開発を行った。さらに「ロボットアーム移動予測領域」とステレオカメラにより映像処理に拠り得た作業位置情報をもとに衝突リスクを算出するアルゴリズム (iVSF) の検証を行った。
- ⑥ロボット間通信における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発：ロボット間通信用に開発したミドルウェアの高度化を行い、ロボット間連携通信への具体的な応用を試みた。高信頼性を実現するためにサーバーにおけるメッセージ一時蓄積機構を実装し、またサーバー障害時にバックアップサーバーが数秒以内にサービスを引き継ぐための「take over 機能」を開発した。
- ⑦ロボット間通信における耐障害性向上に資する M2M 通信技術の開発：ロボット間の情報交換を一時的に継続可能とする M2M 通信機能を開発した。さらに、サーバーがネットワークに復帰した際には、自動的に高信頼性マルチキャスト通信モードへ復帰するシームレスなモード移行機能を開発し検証を行った。
- ⑧複数の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの検証実験：2 台のロボット、UWB 受信モジュール、周辺領域カメラ映像処理システム、中核領域ステレオカメラ映像処理システム、測域センサとロボット間通信用の高信頼性マルチキャスト通信機能を加えた統合システムを開発し実証実験を行った。
- ⑨プロジェクトの管理・運営：8 回の推進委員会を開催し、研究メンバー相互の情報交換、作業の調整をするとともに、その他適宜個々の課題にたいし打合せをし、また、事務手続き等管理に関しての情報交換を頻繁に行い、開発を効率的に実施した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

氏名：大築 康生

所属・役職：財団法人 新産業創造研究機構 研究一部長

住所：〒650-0047 神戸市中央区湊島南町 1 丁目 5 番 2

電話：078-306-6802

Fax：078-306-6812

E-mail：otsuki@ri.niro.or.jp

第2章 UWB 無線（ウルトラワイドバンド無線：超広帯域無線）を使った 小型カメラモジュールの設計・試作

2-1 UWB RF 評価基板

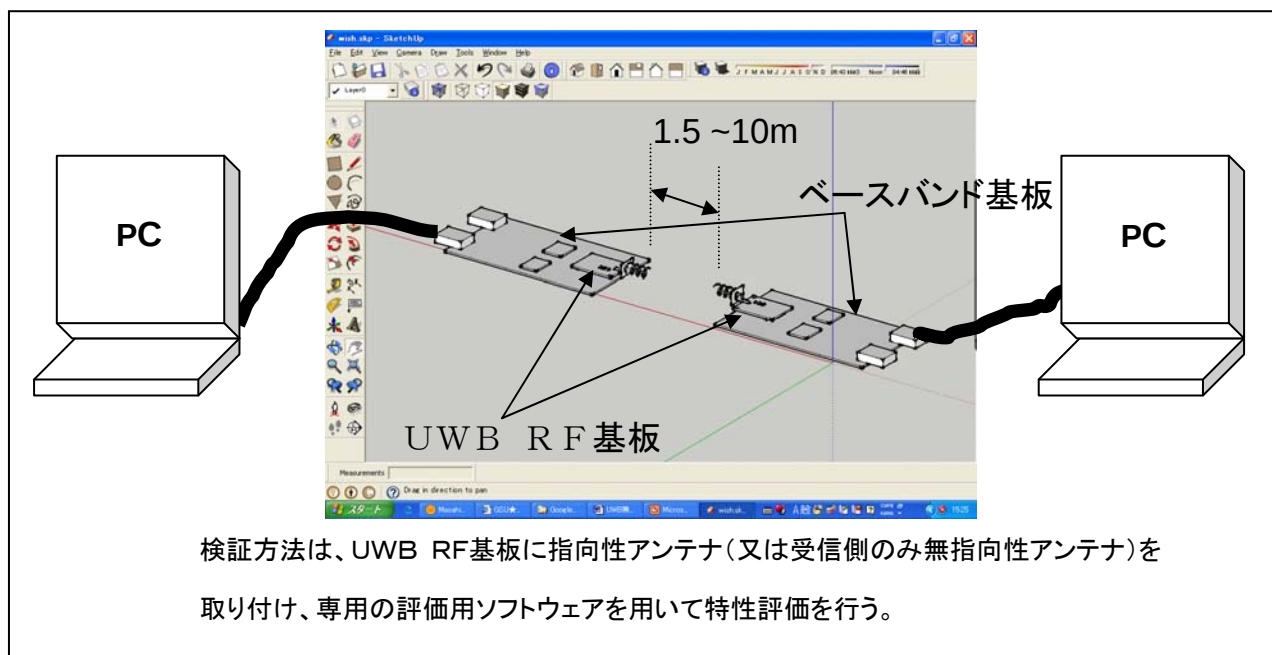
目標は、国内電波法準拠で製品化するためには 7.25GHz から 10.25GHz の帯域を使用する必要があり、この帯域での実用レベルでの通信距離 3～4m 以上の通信距離の確保を目標とした。

試作した評価基板を図 2-1 に、評価テストの構成を図 2-2 に示す。

試験の結果、通信距離は 10m 相当を確保した。電力は 3.3V 入力に対し、送信時 177mA、受信時 200mA と低消費電力を実現した。AGC（Automatic Gain Control）導入により、ダイナミックレンジ 50dB を実現した。



図 2-1 試作 RF 評価基板



検証方法は、UWB RF 基板に指向性アンテナ（又は受信側のみ無指向性アンテナ）を取り付け、専用の評価用ソフトウェアを用いて特性評価を行う。

図2-2 UWB RF 評価基板通信テスト機器構成

2-2 カメラモジュール

当プロジェクトにおけるカメラモジュールの機能目標は以下の通り。

実システム環境においてUWB無線（ウルトラワイドバンド無線・超広帯域無線）の 1 対 n 通信を VGA（Video Graphics Array:640×480 画素）サイズ、30fps（Frames per Second）でコマ落ちなく送受信を行い、画像処置システムへ転送できる事。

図 2-3 に実験システム構成を示す。

実験結果として、1 対 2 での UWB 無線通信を行なう事ができた。

距離と送信モジュール間の受信モジュールから見た角度によっては、受信は良好であり送信中に表示画像にノイズなどは見られない。

現行システムに使用されている指向性の比較的強いヘリカルアンテナを使用した場合送信モジュール間の受信モジュールシステムの構成

モジュールから見た角度が

90 度以上になるとペアリングが出来なくなる。 現行システムに使用したアンテナでは 1 対 n の送受信を行なう場合送受信モジュールのアンテナの放射パターンを考慮した設置が必要であり、設置の自由度を向上させるためには、アンテナの指向性・利得等の更なる検討が必要である。

UWBカメラ・送信モジュール

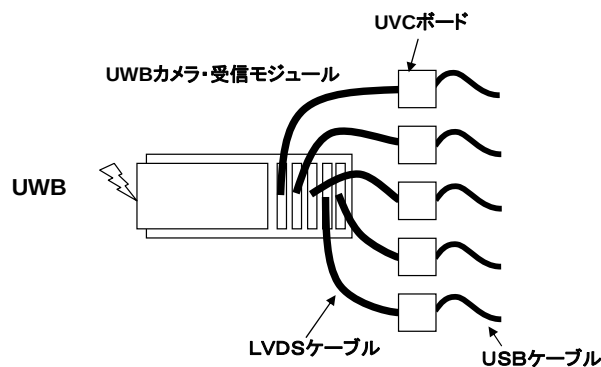
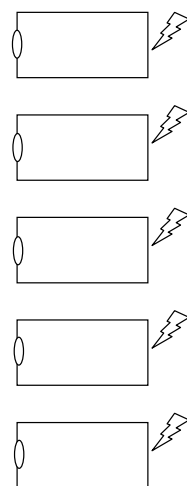


図 2-3 1 対 n UWB カメラモジュール

第3章 UWB 通信における 1 対 n の無線通信を実現するハードウェアならびにソフトウェアの開発

3-1 開発目標

UWB 通信における 1 対 n の無線通信を実現するための、無線通信のアーキテクチャを考案し開発を行う。

3-2 1 対 n の無線通信プロトコルの実システムへの実装

UWB 通信における 1 対 n の無線通信プロトコルの基本構成と仕様を以下に示す。今年度はこの開発・実証済みのものをベースに実機への実装および評価を行う。

通信方式

- TDMA (Time Division Multiple Access) による通信プロトコル

実機へ実装される 1 対 n 用プロトコルの構成

- ペアリング用プロトコル

1 対 n の送受信カメラモジュールが相互に認識 (ペアリング) を行い、TDMA 通信時におけるデータ送受信時はホストとクライアント 1 対 1 通信を可能にする。

- データ送受信用 TDMA プロトコル

N 個ある送信カメラモジュールを時分割にクライアントとして割り当て、ホストとクライアント間で 1 対 1 通信を可能にするプロトコル。

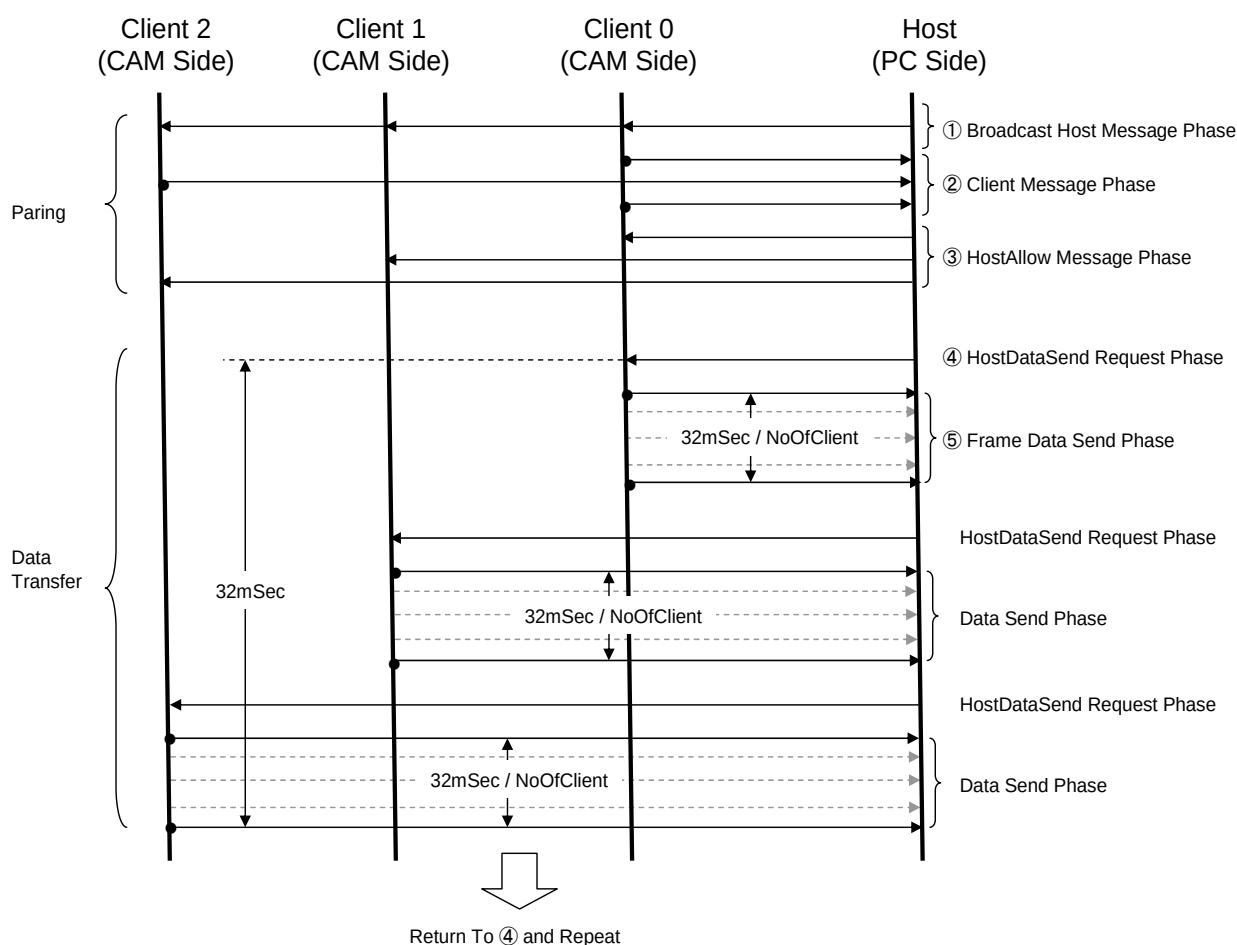


図 3-1 TDMA による通信プロトコルの概要

実システムへ対応した UWB 通信における 1 対 n の無線通信プロトコルを完成させ実システムへの実装を行った。

開発した UWB 通信における 1 対 n の無線通信プロトコルを使い、実システム上で 1 対 n の無線通信を行なうことが出来た。

- 実システム上で 1 対 2 の構成にて問題なく動作する事を確認した。
- 理論上は

$$t(\text{ミリ秒}) < T(\text{ミリ秒})$$

の条件で 1 対 n 通信は可能だが、N 数が大きくなるに従って実システムにおいては通信品質を考慮し、TDMA スケジューリング上でタイムマージンの設定が必須であると考え

$$t(\text{ミリ秒}) < T(\text{ミリ秒}) \times \alpha(\text{タイムマージン係数})$$

t : クライアント 1 台あたりの通信占有時間 (理想通信状態で最小 2.3 ミリ秒)

T : TDMA スケジューリング上の一台あたりの割り当て時間

1 フレーム時間 (=32 ミリ秒) ÷ クライアント台数 (N)

α : 通信品質を考慮したタイムマージン係数

通信プロトコルとしての製品化への課題は、これを使った実システム環境でのより安定した 1 対 n 通信を提供する事にあり、その為には前述したタイムマージン値や設定方法の確立が必須である。これを求めるに 1 対 n の構成において様々な通信環境下でのより多くの実験を行い、その実験結果にもとづいたインプリメンテーションが必要だと考える。

第4章 多点リアルタイム映像データ解析プログラムの開発

4-1 開発の概要

複数の UWB カメラモジュールから大容量リアルタイム映像データの受信を前提に、ロボット周辺における作業者の「存在検知」を行う映像解析プログラムを開発する。映像追跡アルゴリズムを開発し、さらに検知用センサー情報も利用して信頼性のあるリアルタイムシステムの構築を目指す。また、ロボットアームの移動予測情報とステレオカメラにより映像処理に抛り得た作業者位置情報を活用した衝突リスク予測機能（iVSF 機能*）の開発を行い映像処理アルゴリズムの高度化を図る。これらを通じて「ロボットアームと作業員が約 0.5m 以内の近接状態になった際にカメラ等各種センサーによりこの状況を認識・検知してロボットの稼動を停止させることを目指す」とする当プロジェクト目標を実現する映像データ解析プログラムを実現する。当サブテーマ開発において UWB カメラモジュールは未完であったために、有線カメラを使用して実施した。

*：iVSF 機能：Intelligent Virtual Safety Fence 機能。

4-2 開発の内容

作業者の存在検知を行うアルゴリズムを構築する上で、既存の安全フェンスに換えて、映像を用いて構成する基本アルゴリズムである仮想安全フェンス（VSF：Virtual Safety Fence）の構成を H20 年度までに実現した。H21 年度は VSF をさらに進めて、ロボットアームの現在の 3 次位置と移動速度（移動ベクトル）情報をリアルタイムに算出するインテリジェント仮想安全フェンス（iVSF）を構築した。iVSF の構成を図 4-1 に示す。複数のカメラと測域センサ等の組合せで、検出の確実性を高めている。

システムの開発は周辺領域とコア領域に分けられている。周辺領域は作業者の動く領域で、単眼カメラで監視される。コア領域はロボットの置いてある近傍であり、精度の高い監視や追跡が必要となるため、ステレオカメラを用いて監視される。

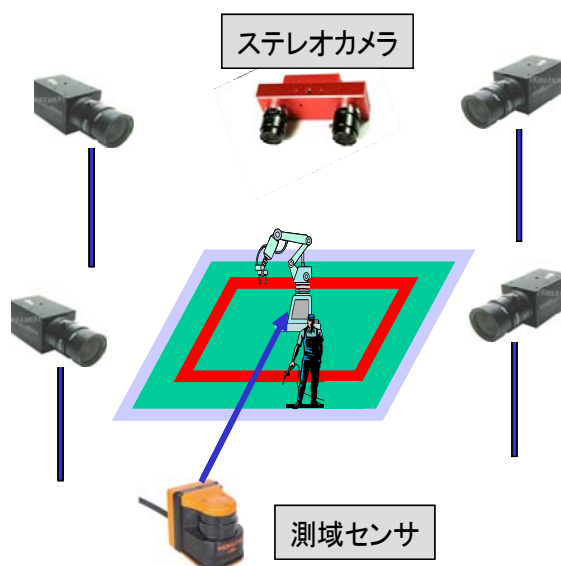
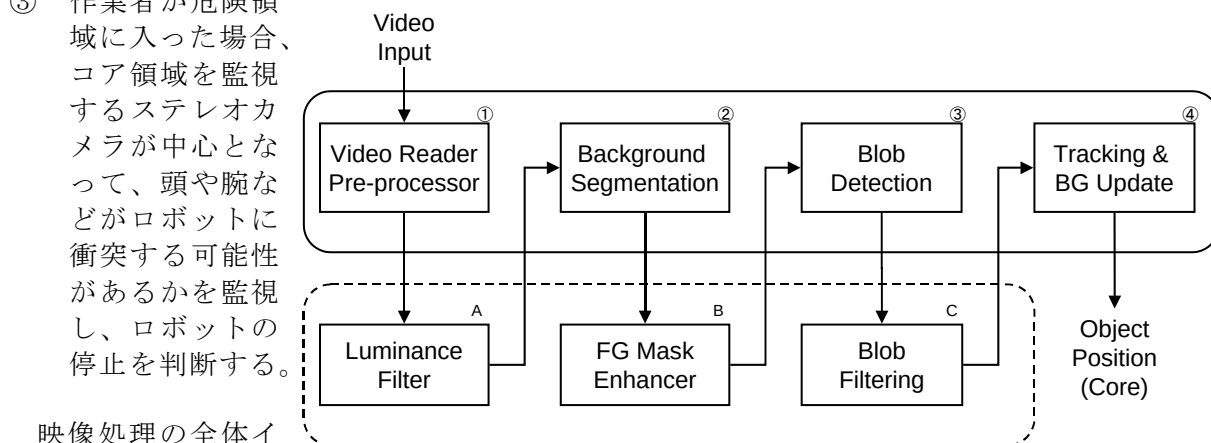


図 4-1 iVSF の構成

基本的に作業の流れは次の 3 段階から成る。

- ① 危険領域を取り囲む周辺領域で、周辺領域に入った動体（作業者）を背景差分法・対象検出により発見し、追跡し、動体の位置などの情報を得る。
- ② 動体がロボットの近傍に近づくと、ネットワーク上で、周辺モジュールがコアモジュールに動体の位置情報を送出し、追跡のハンドオーバーを行う。
- ③ 作業者が危険領域に入った場合、コア領域を監視するステレオカメラが中心となって、頭や腕などがロボットに衝突する可能性があるかを監視し、ロボットの停止を判断する。



映像処理の全体イメージを図 4-2 に示す。

図 4-2 映像処理のイメージ

周辺モジュールからの情報受信・連動と接続されたステレオカメラ・ロボットインタフェースからの情報を処理し、作業員接近状況を判定してロボットの稼動制御を行うコアモジュールのメインプロセスとモジュールに接続されたインタフェースの構成を図 4-3 に示す。



図 4-3 コアモジュールプログラムプロセス

図 4-4 に危険領域を設定している状況、図 4-5 に移動体が危険領域に入ったのを検出した状況を示す。

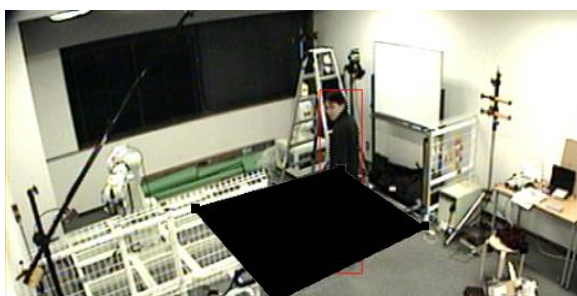


図 4-4 危険領域の表示（黒い部分）



図 4-5 危険領域に侵入の検出（赤の枠）

本システムでは作業員を正確に検出することを目的とするが、当初無かった物体が入り込んだり、ロボットが動作したりすると、作業員と混同する恐れがある。このため、静止体として背景に含めたり、ロボットの動作は移動体とは認めない処理をすることで、作業員のみを検出できるようになった。図 4-6 ではロボットが動作をしているが、作業員のみを検出している。



図 4-6 ロボットが動作している状況で作業員のみを検出する

衝突検知は、作業効率や装置の設置効率の観点から、できるだけ無駄がないようにする必要がある。このため、作業員の腕がロボットの上面にかかっている場合でも衝突の危険性は無いとして、その

ような判断機能を追加した。図 4-7 に例を示す。左図は作業員の腕がロボットアーム横か下面にある場合で、衝突検知がなされている。右図は、作業員の腕がロボット情報にあることを検知して、衝突警報は出していない。

また、環境の明るさが変化すると画像処理に影響が出るが、照度変動対策を講じている。

その他、レーザー方式の測域センサや光電センサ等の情報も併せて状況を検討し、映像信号のみの判断のリスク対策を行っている。



図 4-7 作業員の腕とロボットの位置関係で危険性を判断する

これら機能を入れた衝突検知機能を図 4-8 に示す。

- ① 本来ロボット自身が構成する領域（青）に増して iVSF 領域（緑）を生成する。
- ② ロボットの移動により速度が生じると制動後静止する位置に向かって iVSF 領域が拡張する。
- ③ この領域に上面カメラから得られた作業者の手の領域（赤）が接触するとロボットは制動動作を行う。制動後のロボットの移動を画像に描き足すことで衝突前に静止したかどうか確認できる。

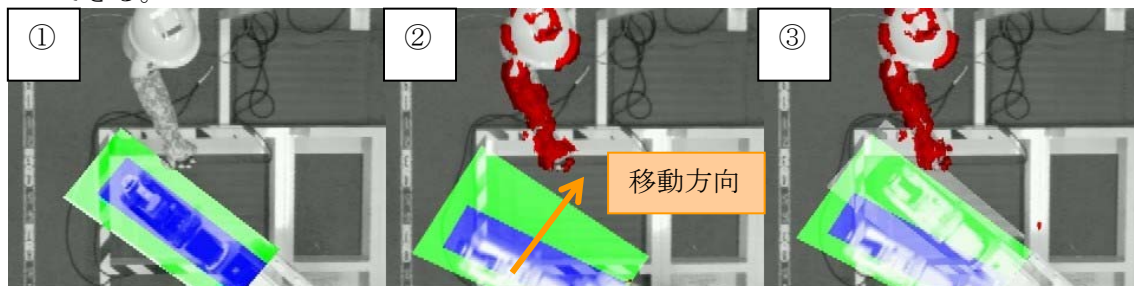


図 4-8 iVSF 生成動作状況

4-3 結果と考察

成果を以下に示す。

- ① 映像追跡アルゴリズムの改良
 - H19 年度と H20 年度の成果を基に、現場環境をより考慮した映像追跡アルゴリズムの改善を行った。また、アルゴリズムを組み合わせで全体システムを構成した。さらに新たな機能の追加を行い、その有効性を確認した。
 - 統合システムのモジュール化により拡張性や柔軟性の高い機能を実現し、設定を容易にしたことで、様々な環境に対応が可能である。
- ② 現場環境を考慮した開発、ロバスト性と信頼性の向上
 - 環境変化に対応できるよう画像処理アルゴリズムの再構築と調整を行った。
 - ロバスト性の向上を図るため、環境変化（照度、レイアウト等）に対応した機能を実装した。この新しい機能を追加したことによって、より現場環境に近い動作状況でのシステムの有効性を確認できた。
 - カメラ映像に加え、その他の検知用センサー（測域センサー）から得られる情報も利用し、さらにシステムのロバスト性を向上させた。
- ③ ロボットアームの移動情報を活用した動的な衝突リスク判定アルゴリズム開発
 - ロボットアームの移動予測情報とステレオカメラから得られる作業者位置情報を活用し

た、衝突リスク予測機能（iVSF 機能）の開発を行った。

④ ステレオカメラによる検出アルゴリズムの向上。

- ステレオカメラを利用することで作業員のヘルメットや作業着に付けられたマーカ等を利用し、人物の向き、位置を含めた検出を行えることが確認できた。また、得られた 3 次元的位置情報を利用することで、より高度な危険検出アルゴリズムの改良を行い、その有効性を確認した。

第5章 リアルタイム映像データ解析プログラムを実行する組込みボードの開発

5-1 目標

多点リアルタイム映像データ解析プログラムが稼動する組込みボードを開発する。

組込みボードは多点リアルタイム映像データ解析プログラムを動作させることを目標としていたが、映像データ解析プログラムの開発期間と移植性を考慮し、PC ベースのシステムで進めることにした。そのため本組込みボードではハードウェア的な動作検証を中心に行い、UWB カメラモジュールと PC ベースシステムを繋ぐための画像変換ユニットを別途開発することとした。

5-2 PC ベースシステム用画像変換ユニット

全体システムの中での画像変換ユニットの位置付けを図 5-1 に示す。

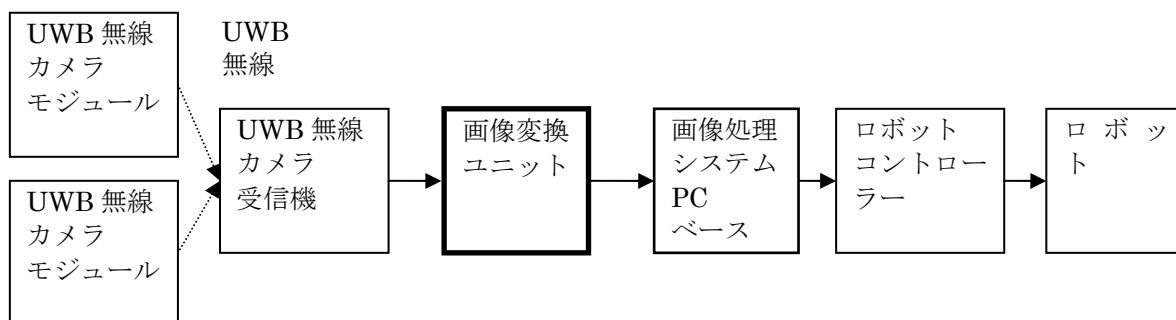


図 5-1 システム機構全体の構成

UWB 無線カメラの出力はデジタル YUV で PC ベースシステムに接続するためには専用の画像キャプチャーユニットが必要となる。市販品で適合するものが見当たらないため、新規に開発することにした。汎用性を考慮し、PC とのインターフェースには USB を採用することにした。また UVC (USB Video Class) 規格に準拠するものとした。これにより PC は Windows や Linux の特別なデバイスドライバを必要としない。構成を図 5-2 に、試作機を図 5-3 に示す。

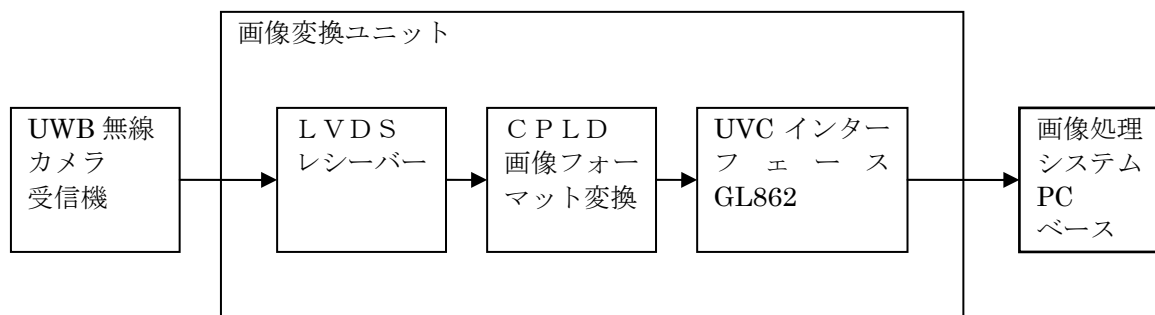


図 5-2 画像変換ユニットの構成



図 5-3 試作機外観 (左) と評価システムに組み込んだ様子(右)

評価システムの構成を図 5-4 に、処理の流れを図 5-5 に、処理例を図 5-6 に示す。リアルタイム画像の前処理に DSP を採用し、後処理には PowerPC（米国フリースケール社の CPU）を採用している。①から入力されたカメラからの画像は画像処理ボード実装基板で前処理され処理済みのデータ②がイメージプロセッサボード実装基板に送られ後処理される。多点リアルタイム映像データ解析プログラムのアルゴリズムの概略に従い、DSP で背景画像の差分処理を行い、その後、進入検知等を目的としたオブジェクト検出を行う。

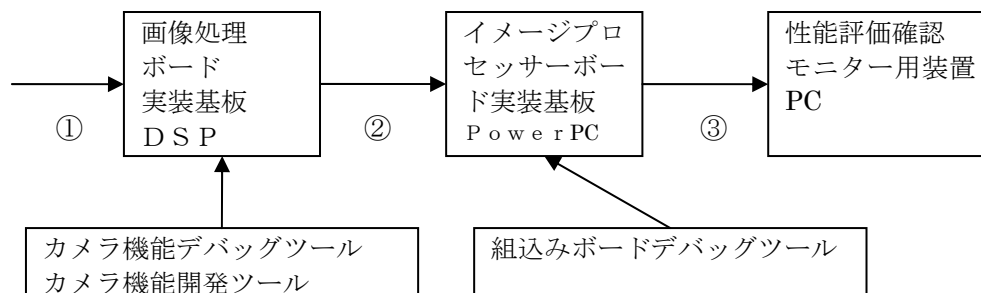


図 5-4 システム構成

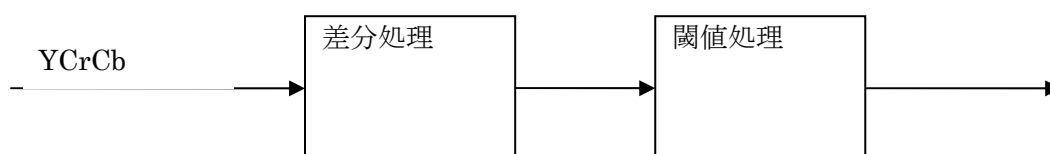


図 5-5 差分処理の流れ



図 5-6 背景画像と現在画像および差分画像

5-3 成果と課題

多点リアルタイム映像データ解析プログラムは本年度も引き続き PC ベースでシステムの動作検証をすることになったため組込みシステムはハードウェアの動作評価のみとしたが、処理カメラ数に依存しない DSP 並列処理システムの効果は確認できた。

組込みに適したシステムを追求し、DSP や PowerPC などを用いたため、開発するコードの規模が大きくなり、ソフトウェア開発担当にとって相当な負荷があった。

また、初年度 PC ベースでシステム検証を先行して行った際に開発したソフトウェアを組み込みシステムに移植する際、大きく改変する必要が生じ、ソフトウェア開発の負荷が高くなり、結果として今回のプロジェクトではシステムの稼働の確認を優先するため本年度も継続して PC ベースのシステムでの検証に重点を置くことになった。そのため現段階では組込みシステムではハードウェアの動作を検証するソフトウェアの開発に留まることとなった。

今回は限られた期間および予算での開発であったため PC ベースシステムでのソフトウェア開発に重点を置いたが、製品化に際してはコストおよび物理的サイズを考慮した場合、これらの課題は乗り越えねばならないものであり、そのためにはソフトウェア開発のリソースは十分確保しなければならないと考える。

第6章 上記4つサブテーマ成果から成る産業用ロボット機能安全システムの検証実験

6-1 概要

第2、3、4、5章のサブテーマ成果に基づく統合機能検証を行うための実証実験システムの構築、検証実験を行った。周辺領域カメラ、中核領域ステレオカメラ、測域センサ等からなる情報を統合した衝突リスク判定サーバー機能の開発を行った。さらに「ロボットアーム移動予測領域」とステレオカメラにより映像処理に抛り得た作業者位置情報をもとに衝突リスクを算出するアルゴリズム (iVSF) の検証を行った。

6-2 内容

多様な実験パターンで検証が行える様に、図6-1の様なシステムを構築した。

- ① 周辺カメラの映像を Linux 処理ボードにてキャプチャーし (周辺モジュール)、そのボード上で実施計画のサブテーマ③ (4章) にて開発された映像解析プログラムを実行する
- ② ①にて解析された結果がマルチキャスト通信でコアモジュールに送られる。
- ③ 配信された周辺カメラと測域センサから得られる入退出情報、ステレオカメラ画像是コアモジュールに集約し、モジュール内プログラムにより作業者存在解析が行われる。
- ④ ロボットコントローラよりロボットの動作状況を取得し、ロボット衝突予測領域の iVSF (Intelligent Virtual Security Fence) を生成する。また、処理結果に応じてロボットを停止あるいは再稼動する指令がコアモジュールよりロボットコントローラへ送られる。(iVSFの定義ならびに算出方法など詳細については4章参照)
- ⑤ システムの稼動状況はディスプレイおよびパトライトにて確認できる。

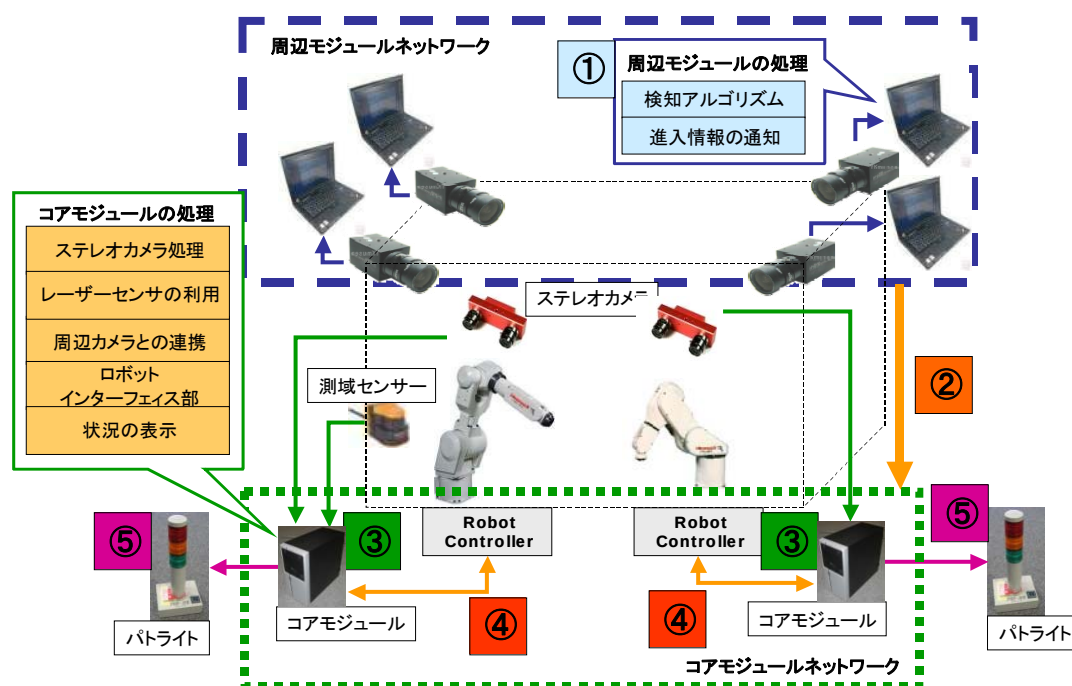


図 6-1 検証実験システム系統図

周辺モジュールでの検出結果をステレオカメラが接続されたコアモジュールに送出するアルゴリズムの開発及びそれを用いたコアモジュールでの検出アルゴリズムを開発し、検証実験を行った。周辺モジュールとコアモジュールの連携についての概念図を図6-2に示す。

- ① ロボットが稼動中、4章にて開発された画像処理アルゴリズムを用いて、複数の周辺モジュールがロボット近傍に設定した危険領域に接近する人物を監視し、人物位置をマルチキャスト通信でコアモジュールに通知する。人物位置は前もって計算した周辺モジュールとコアモ

- ジュールの画像上の対応関係を表すホモグラフィ行列によって変換され、コアモジュールのカメラ画像位置として通知する。(次の節を参照)。
- ② 周辺モジュールがロボット近傍の危険領域に進入した人物を検出するとコアモジュールに通知し、コアモジュールの作業者検知機能を用いて作業者を特定できた場合のみ、システムのモードを **WARNING** に遷移して、引き続きコアモジュールのステレオカメラを用いて監視を行う。コアモジュールの作業者検知機能が作業者を特定できなかった場合、コアモジュールは突入とみなして直ちにシステムのモードを **ALERT** に遷移し、ロボットを停止するように働きかける。
 - ③ コアモジュールにて接触判定領域 (iVSF) に接触する人物を検出した時点で、システムのモードを **ALERT** に遷移させ、ロボットを停止するようロボットインターフェースに指令を送る。
 - ⑥ 周辺モジュール、コアモジュールともに危険領域に人物を検出せず安全と判断した時点で、システムのモードを **NORMAL** に遷移させ、ロボットを再稼働させる。

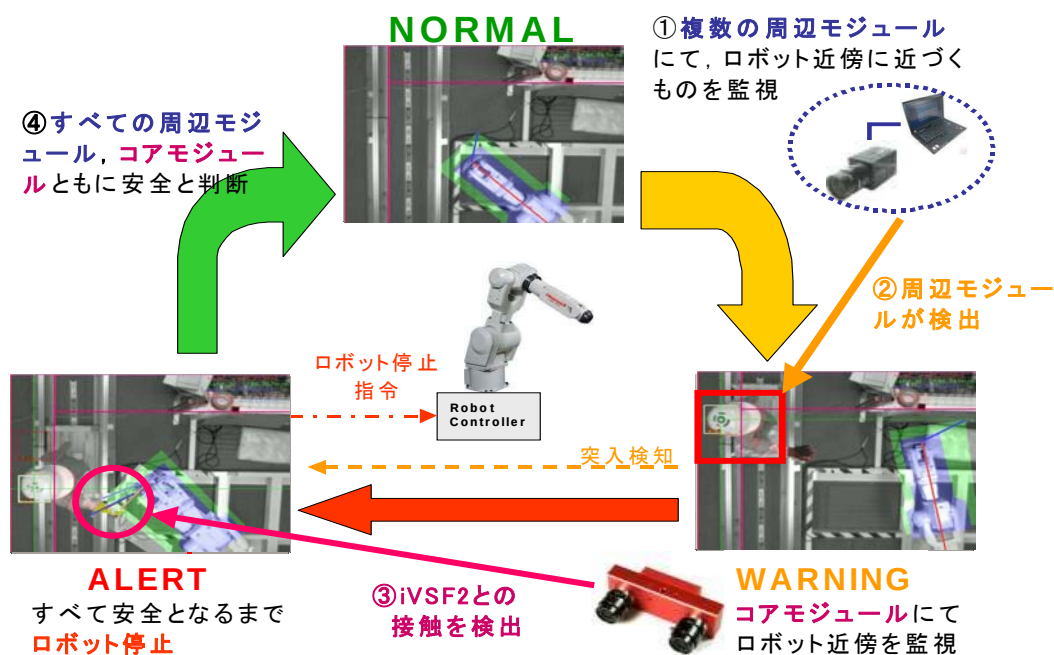


図 6-2 周辺モジュールとコアモジュールの連携

測域センサの情報はステレオカメラと同様、コアモジュール上で取得され、計測した障害物、移動物情報をカメラ情報と照らし合わせ、作業者をカメラで認識しているか（検出、追跡、距離計測しているか）をチェックし、出来ていない場合はロボットを停止するという多重機構を構成するために利用している。これはカメラを産業用途に用いるためには信頼性を確保するために、重要であると考えられる。今年度はさらに信頼性の向上のため、周辺モジュールとの連携を試みた。今回使用したのは北陽電機製測域センサ URG-04LX (図 6-3) である。

実験室の中にセンサ 2 台とカメラ 2 台を設置した。センサ作業者の足だと思われる動体を検出の上、周辺カメラモジュールにその位置情報を変換した後、送信し、周辺モジュールではその情報をカメラ映像により検出を統合し二重確認ができ、システムのロバスト性の向上につながる。

作業者進入検知を目的としてヘルメットや手先などにつけるマーカーに関する検証を行った。

Tangible Object placement codes (以下 TopCode と呼ぶ) は図 6-4 で示すような黒白のサークルで構成され比較的負荷の低い計算処理で識別が可能なシンボルである。同図に示すようにヘルメット上部に TopCode を



貼ることで作業者存在とその位置を高精度で認識可能であることを検証実験を通じて確認した。

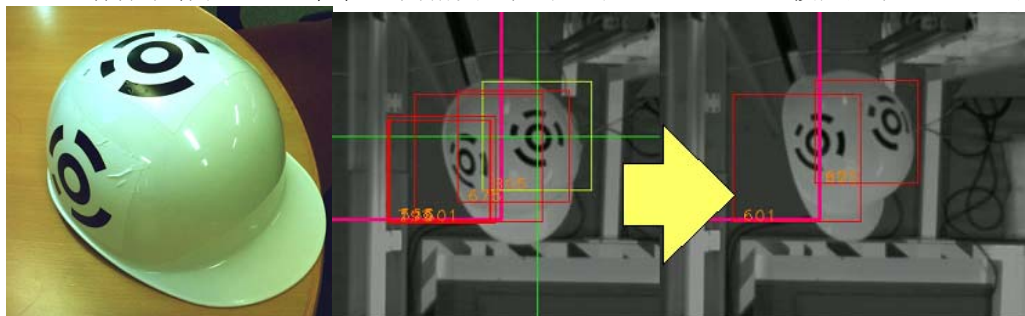


図 6-4 使用したヘルメットと追跡状況

続けて、TopCode を利用した作業者追跡機能の開発ならびに検証を行った。

頭部領域の追跡については頭頂部のように特徴的な高さを持つ場合の検出は良好であった。

一方で、腰を曲げる・しゃがむなど身長が変動して周囲の高さと同じになると別の領域が結合し、追跡領域が拡大することが確認された。図 6-5 に検知の例を示す。

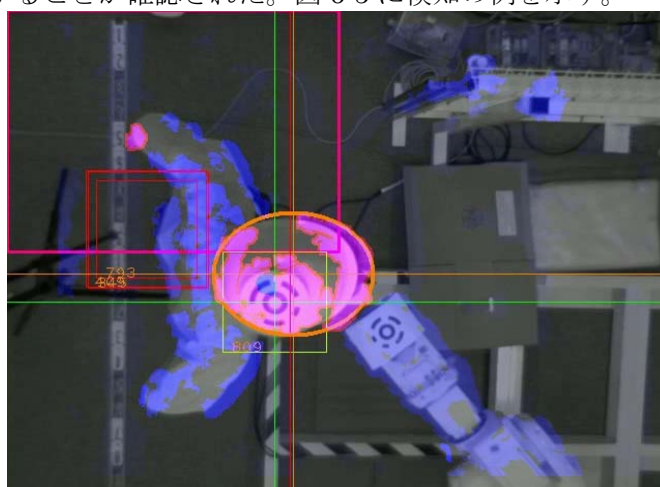


図 6-5 作業者領域検知状況

作業者とロボットアームの衝突リスクをリアルタイム判定を行う iVSF 機能をコアモジュールに組み込むためにロボットコントローラ・インターフェースの改良開発を行った。また停止処理を高速化する目的で接点制御装置をコアモジュールに追加し、停止処理をハードウェアで行う改良開発を図った。コアモジュール接続詳細図を図 6-6 に示す。

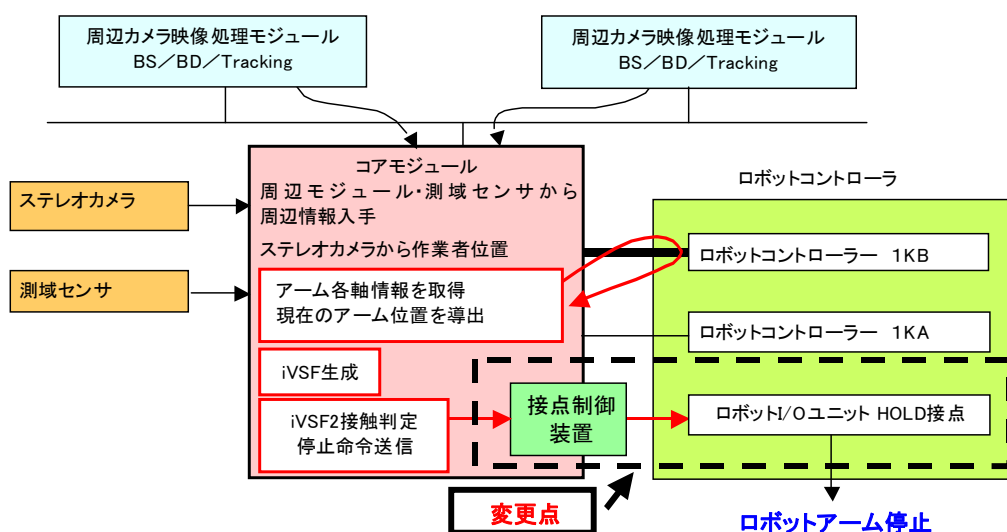


図 6-6 コアモジュール接続詳細図

ロボットアームと作業者の距離が 500mm においても必ず接触回避可能であることを検証する目的で、図 6-7 のように、ロボット動作範囲と交差する位置に作業者ダミーの手を設置し、ロボットを外側から移動して衝突させる。

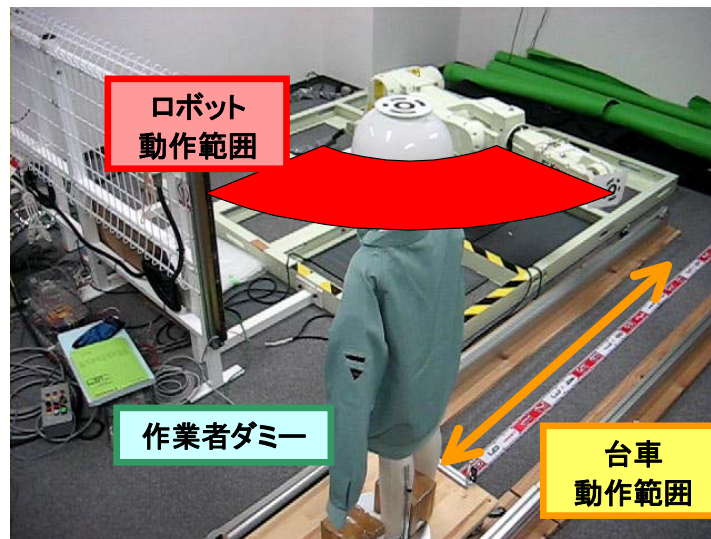


図 6-7 作業者ダミー配置風景

実際の実験では、iSVF 値に余裕を取って両者間の距離が 800mm まで接近したと判断した時点で HOLD 信号を発信する実験を行った。実験時の状況を図 6-8 に示す。



図 6-8 衝突判定試験の一例。図中赤線が本試験の測定距離。

ロボット停止後のロボット先端部と衝突領域（黄色領域）の重心とを結ぶ図 6-8 中の赤線の距離を評価した。この実験の結果として、信頼度 99%で $301.707 \pm 61.235\text{mm}$ の距離を残してロボットアームは停止していることが確認できた。すなわち、ロボットの停止距離は約 500mm であり、このことから、上記 500mm という目標値を達成したと判断した。iSVF の機能として、ロボット速度がより低い場合は、500mm よりも近いところで衝突回避動作に入るのので、作業者とロボットが無駄なく安全距離を保ちながら作業を行うという目標を達成できた。

6-3 結果と考察

周辺カメラモジュールとコアカメラモジュールを連携させ、実験を行い、システムが正しく稼動したことを確認できた。さらに、他センサ情報（測域センサ）の使用はコアモジュールでの使用に加えて、周辺モジュールにも適用し、作業者等の検出を二重確認し、システム稼動のロパス

ト性をさらに向上した。

また、コアモジュールにおける動的な接触判定領域を生成することで作業者とロボットがより接近した状態での協業を可能にした。作業者存在検知能力をコアモジュールにも搭載し、作業者のより詳細な情報を収集・共有できるようになった点も大きな特長である。周辺カメラモジュールに関しても進入検知性能の向上や他センサ追加による複合化を行い、コアモジュール管轄外領域からの移動物体検知において大きな成果を得ることができた。周辺カメラモジュールとコアモジュールとのより高度な連携機能の可能性を見出すことができた。

また、本プロジェクト開始にあたり「人とロボットが共存する製造環境において、ロボットアームと作業員が約 0.5m以内の近接状態になった際にカメラ等各種センサによりこの状況を認識・検知してロボットの稼動を停止させることを目指す」を目標として掲げたが、この目標値を達成することができた。

第7章 ロボット間通信における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発

7-1 目的ならびに内容

高信頼性を有するロボット間通信を実現するための高信頼性マルチキャスト通信機構ミドルウェアの開発を行い、開発した機能を使用してロボット間連携通信への具体的な応用を試みた。高信頼性を実現するためにサーバーにおけるメッセージ時蓄積機構を実装し、またサーバー障害時にバックアップサーバーが数秒以内にサービスを引き継ぐための「take over 機能」を開発した。

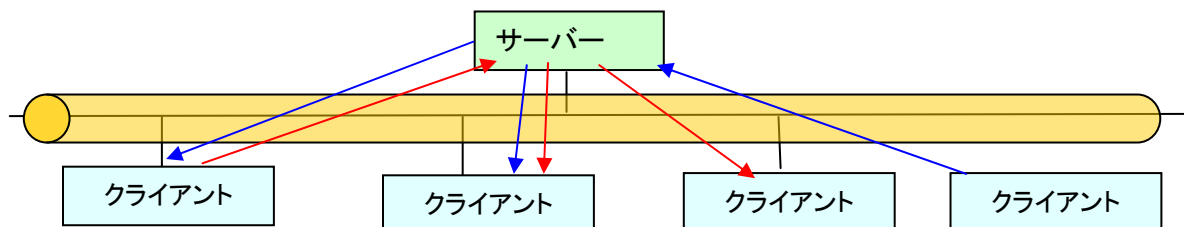


図 7-1 論理チャネルを使ったマルチキャスト・メッセージ配信

ロボット間通信では図 7-2 で示すような各ロボットを制御する統合処理システム同士が、高信頼性マルチキャスト通信機構ミドルウェアを使用してリアルタイムに情報交換を行える仕組みを開発した。

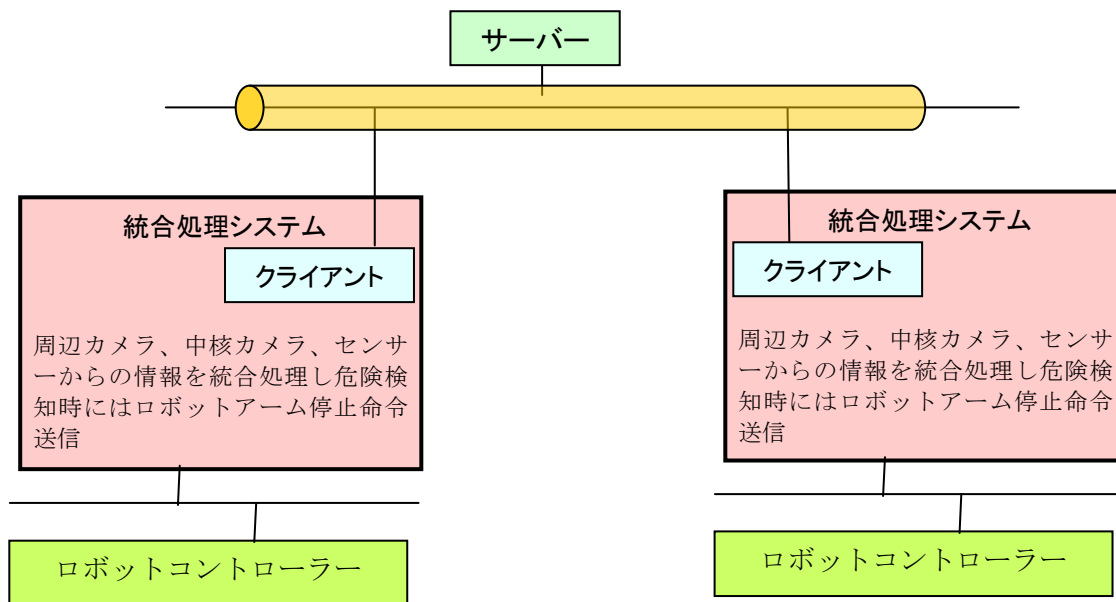


図 7-2 高信頼性マルチキャスト通信機構を使ったロボット間通信システム

サーバー障害時にバックアップサーバーが数秒以内にサービスを引き継ぐための「take over 機能」を設計・開発を行った。また複数サーバーが存在する環境ではプライマリー（主）サーバーを決定する方式が必要となるがこの方式を開発した。開発成果は 2 台のサーバーを並行稼働させ検証を行った。当初はサーバーのアドレス（複数サーバーの場合は複数アドレス）をクライアント側に事前登録する形式を採用していたが、設定作業負担を軽減する目的でサーバー（1 つまたは複数）を自動検出する仕組みを開発した。

図 7-3 に示すように、各ロボットを制御する統合処理システムの主要機能である中核カメラシステムから高信頼性マルチキャスト通信機構を使う目的で、インターフェース改良開発を行った。中核カメラシステムは以下の黄色個所の機能を果たすソフトウェアから構成されており、各ブロック

は C++言語で作成されたオブジェクトとして存在している。高信頼性マルチキャスト通信機構は、中核カメラシステムの1ブロックとして位置付けるために、C++言語による Wrapper 機能を開発し中核カメラシステム内で使用するための API を整備した。

接触検知し緊急停止を行う場合、直近の1台のロボットのみを停止するのではなく、近隣の複数ロボット同時に制動し、作業者の安全を高めるシステムとして開発、検証を行った。

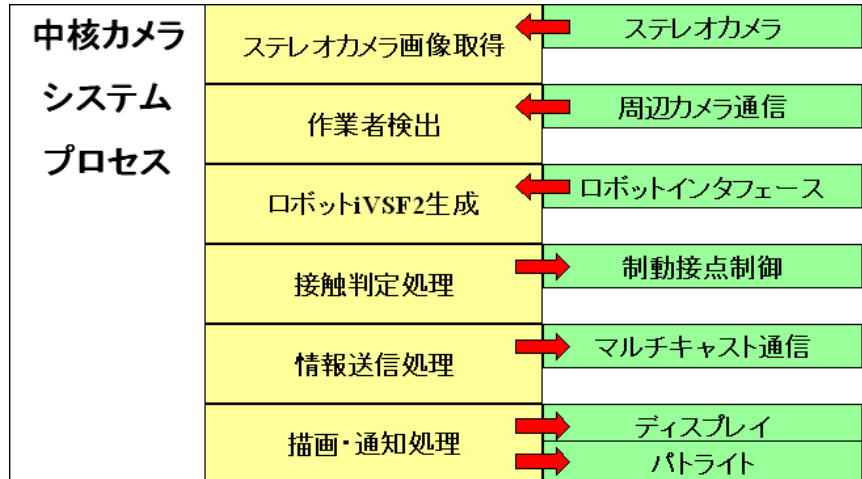


図 7-3 統合システムの実装機能

実装方法：

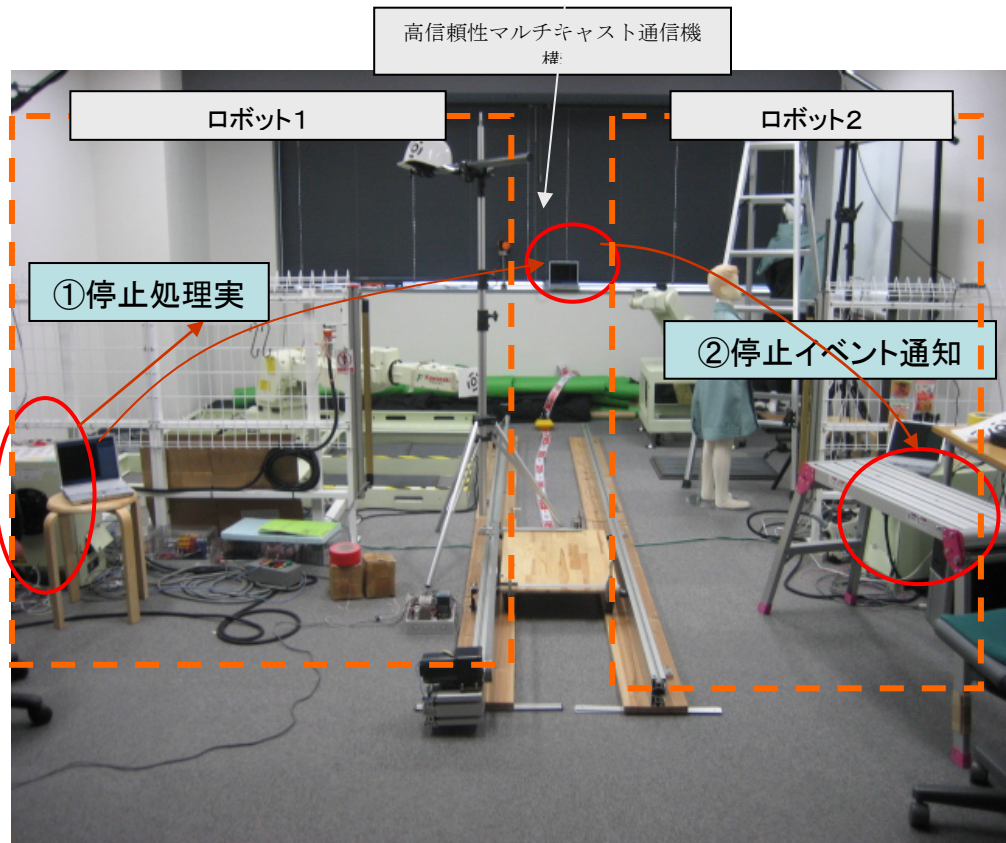
- 制動接点制御用の論理チャンネルを生成する。
- 近接するロボットはこの論理チャンネルへ登録（プログラムから自動的登録処理実行）
- 接触検知したロボットは当論理チャンネルへ「緊急停止イベント」を送信する。
- 送信された「緊急停止イベント」は登録されている他のロボットへリアルタイム通知「緊急停止イベント」を他ロボットから通知された周辺ロボットの制動は、「減速」、「停止」など多様な対応が考えられるが今回の検証では単純に「停止」させることとした。

検証方法：

以下図 7-4 に示す実験室の2台のロボットシステムを使い検証を行った。各ロボットの中核処理システムに高信頼性マルチキャスト通信機構（クライアント機能）を実装して実行し、1台のPCに高信頼性マルチキャスト通信機構（サーバー機能）を実装して実行した。

一方のロボットに作業者ダミーを接触領域まで移動してロボットに制動動作を実行させると、他方のロボットが直ちに制動処理に入ること、その際の遅延はほとんど存在しないことを確認した。

複数ロボットを含むシステム全体



における各種の位置情報を管理する座標系として複数ロボット共通の世界座標を導入した。その世界座標を用いて各ロボットアームの位置、動きをリアルタイムにトラッキングし、隣接するロボットアームの位置関係をリアルタイムに把握するシステムを開発し検証を行った。

7-2 結果と考察

論理チャンネルに基づくマルチキャスト通信機能を開発し単体機能検証ならびにロボット環境における2つのケースで検証を行い期待された成果を得ることができたことを確認した。

今回のロボット環境では2つの要件で当機能を活用したが、要件に応じて論理チャンネルを追加する際に必要となる作業は軽微であり、ロボット間通信におけるシステム開発ツールとしての有効性を確認することができた。

第8章 ロボット間通信における耐障害性向上に資するM2M通信技術の開発

8-1 概要

前章（7章）で開発した高信頼性マルチキャスト通信機構は有効であるが、サーバー障害発生時、サーバー保守作業時などには通信サービスは全面的に機能停止に陥る可能性がある。よってサービスレベルは低下しつつも通信サービスそのものは続行可能とする仕組みが必要となる。この目的でロボット間の情報交換を一時的に継続可能とする M2M 通信機能の研究開発を実施した。さらに、サーバーがネットワークに復帰した際には、自動的に高信頼性マルチキャスト通信モードへ復帰するシームレスなモード移行機能を開発し検証を行った。

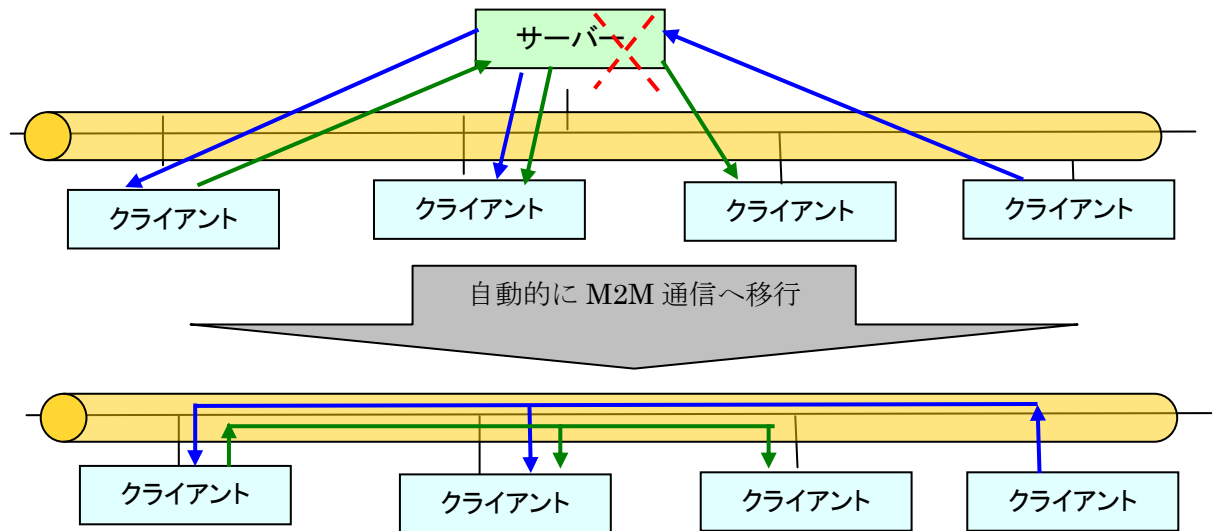


図 8-1. M2M 型ロボット間通信の概要

8-2 内容

サーバー機能を一切使用しない純粋な M2M モデルを開発した。利点はクライアント環境の簡便さであり課題点は送信データを一時的に保管する「信頼性向上機能」等には制限がある点である。前章サブテーマの成果である高信頼性マルチキャスト通信機能のバックアップ機能として使用する場合においてはこのモデルが一般的には適切であると結論づけられる。

次に高信頼性マルチキャスト通信機能と M2M 通信機能をシームレスに連携させる仕組みの開発を実施した。この検証にあたっては、両モードをシームレスに自動変換することと、そのモード変換に要する時間（通信サービスが一時的に停止する時間に等しい）を計測した。

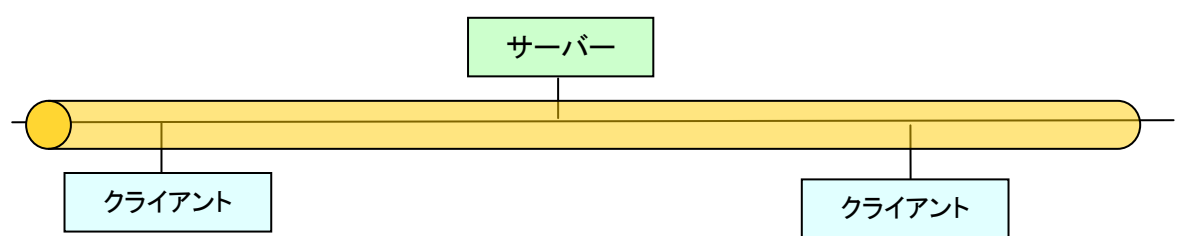
接触検知し緊急停止を行う 1 台のロボットから「緊急停止イベント」を M2M 通信機能にて発信し、近隣ロボット側ではイベント情報を受信して「緊急停止」を行う。

- 全てのロボットのアプリケーション・プログラムは制動接点制御用の論理チャネル送受信登録を行う。（サーバーは存在しないので、ローカル・システムで認識するのみ）
- 接触検知したロボットのアプリケーション・プログラムは制動接点制御用の論理チャネルへ「緊急停止イベント」を送信する。
- 他のロボットのアプリケーション・プログラムは制動接点制御用の論理チャネルから「緊急停止イベント」を受信する。（登録していない論理チャネルのデータは受信することはない）

上記検証を通じて、M2M 通信を活用した複数ロボット間で緊急停止等の信号情報リアルタイム伝達の実現できていることを確認した。また、複数ロボット環境においてロボット間で各ロボットアームの座標情報をグローバル座標で伝達しあう仕組みを開発した。

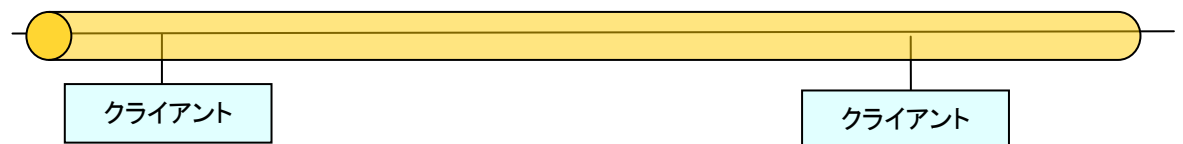
前章で述べたサーバー機能を用いたロボット間通信システムと本サブテーマの成果である M2M ロボット間通信システムを状況に応じてシームレスに切り替える機能を開発しその検証を行った。

時刻：T1



時刻：T2 サーバー障害発生（またはサーバーがネットワークから一時離脱）

時刻：T3 M2M 通信に切り替え



時刻：T4 サーバー復帰

時刻：T5 M2M 通信からサーバー型通信へ切り替え

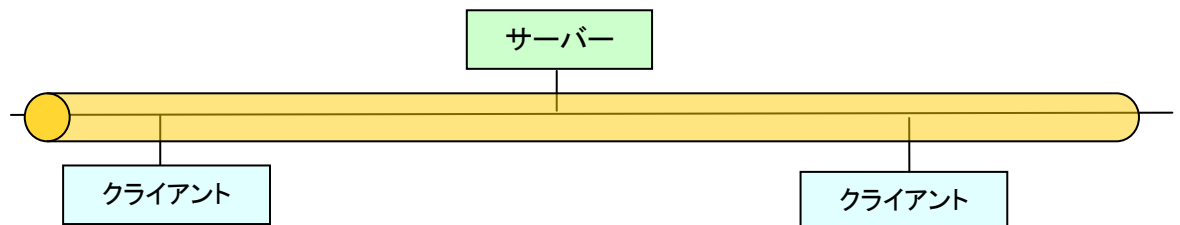


図 8-2 高信頼性マルチキャスト通信機能と M2M 通信機能の自動変換機能

検証を通じて以下の結果が得られることを確認した。詳細は図 8.2.3 を参照。

- T2～T3（高信頼性マルチキャスト通信機能から M2M 通信機能へのモード遷移に要する時間）
モード移行に 3～4 秒を要する。一方、モード移行に伴いデータ損失が発生する時間も 3～4 秒である。
- T4～T5（M2M 通信機能から高信頼性マルチキャスト通信機能へのモード遷移に要する時間）
モード移行に 2～3 秒を要する。一方、モード移行に伴いデータ損失が発生する時間は 1 秒以下。

8-3 結果と考察

論理チャンネルに基づくマルチキャスト通信機能を M2M 通信を基盤に開発し、この成果の単体機能検証ならびにロボット環境における 2 つのケースで検証を実施した。また前章で記述したサブテーマ「高信頼性マルチキャスト通信機能」と「M2M 通信機能」を状況に応じてシームレスに自動変換する仕組みを実現しその有効性を確認し当初の目標を達成することができた。

第9章 複数の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの検証実験

9-1 概要

複数台の産業用ロボットから構成される実験環境を構築する。2 台のロボット、UWB 受信モジュール、周辺領域カメラ映像処理システム、中核領域ステレオカメラ映像処理システム、測域センサとロボット間通信用の高信頼性マルチキャスト通信機能を加えた図 9-1 に示す統合システムを開発し実証実験を行った。図 9-1 における各番号の説明は 6 章参照。

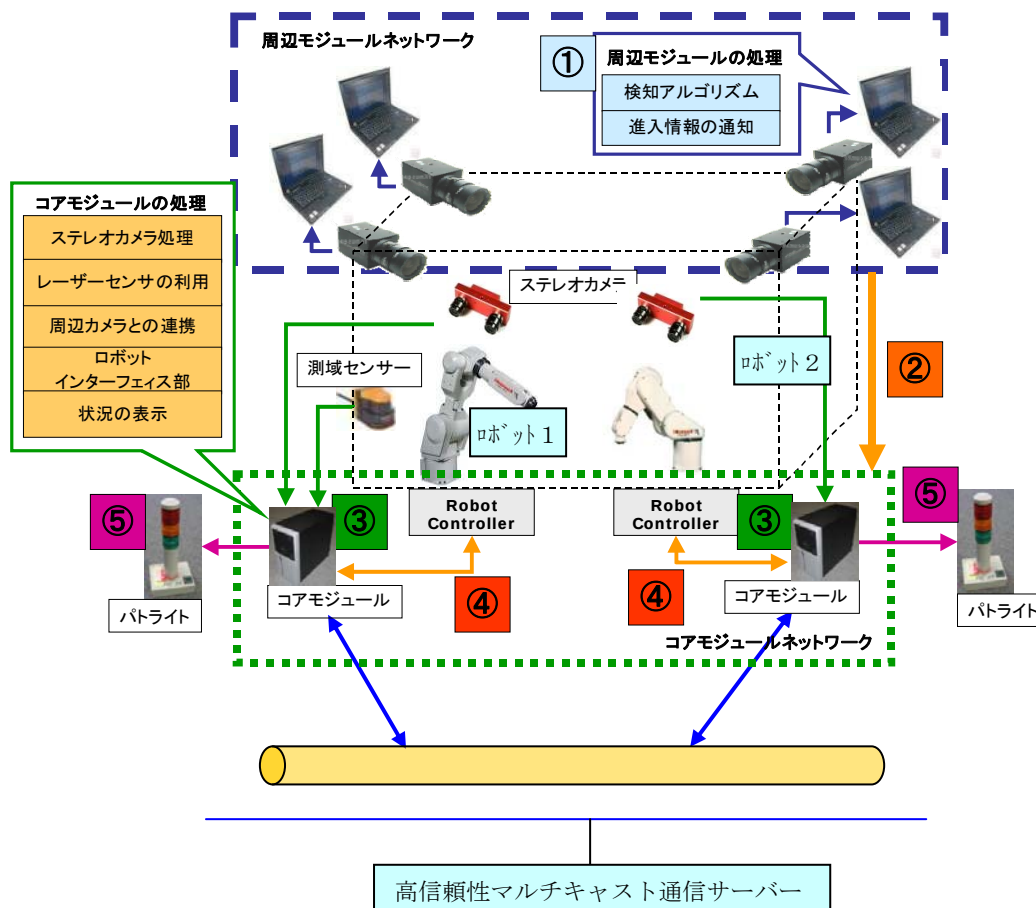


図 9-1 複数ロボット検証実験システム系統図

9-2 内容

6 章で記述した実験システムにロボット間通信用の高信頼性マルチキャスト通信機能を加え図 9-1 に示した複数ロボット検証実験システムを構築し、以下の開発検証を行った。

実験室内に 2 台の産業用ロボットを設置し、統合検証を行うための実験システムを開発した。作業員の役割を果たすダミー人形をロボットへ向けて繰り返し移動させるための簡易移動台車を、駆動モータを利用して製作した。

図 9-2 に示す実験室の 2 台のロボットシステムを使い検証を行った。各ロボットの中核処理システムに高信頼性マルチキャスト通信機構（クライアント機能）を実装して実行し、1 台の PC に高信頼性マルチキャスト通信機構（サーバー機能）を実装して実行した。一方のロボットに作業員ダミーを接触領域まで移動してロボットに制動動作を実行させると、他方のロボットが制動処理に入ること、その際の遅延はほとんど存在しないことを確認した。

ロボットと作業員の衝突回避に加えて、近接する複数ロボット同士の接触回避も重要な課題である。図 9-3 のように、高信頼性マルチキャスト通信機能ならびに M2M 通信機能を使用して実験室内の 2 台のロボット間でアームの 3 次元位置をリアルタイム監視するシステムを開発し、ロボットアームの位置関係と動き、さらに作業員の位置と動きを一つの画面内で統合表示できていることを確認した。

また、UWB カメラモジュールを使用した周辺カメラシステムの機能も検証した。

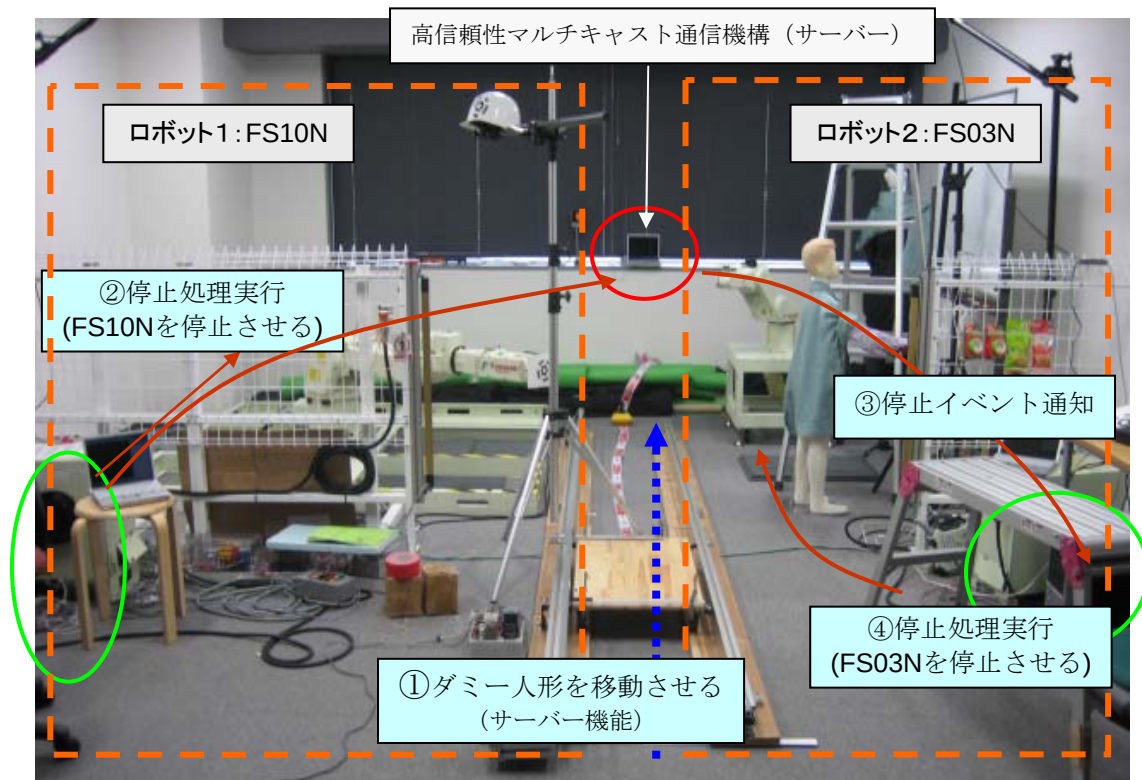


図 9-2 2 台のロボットでの緊急停止制動機能連携実証システム

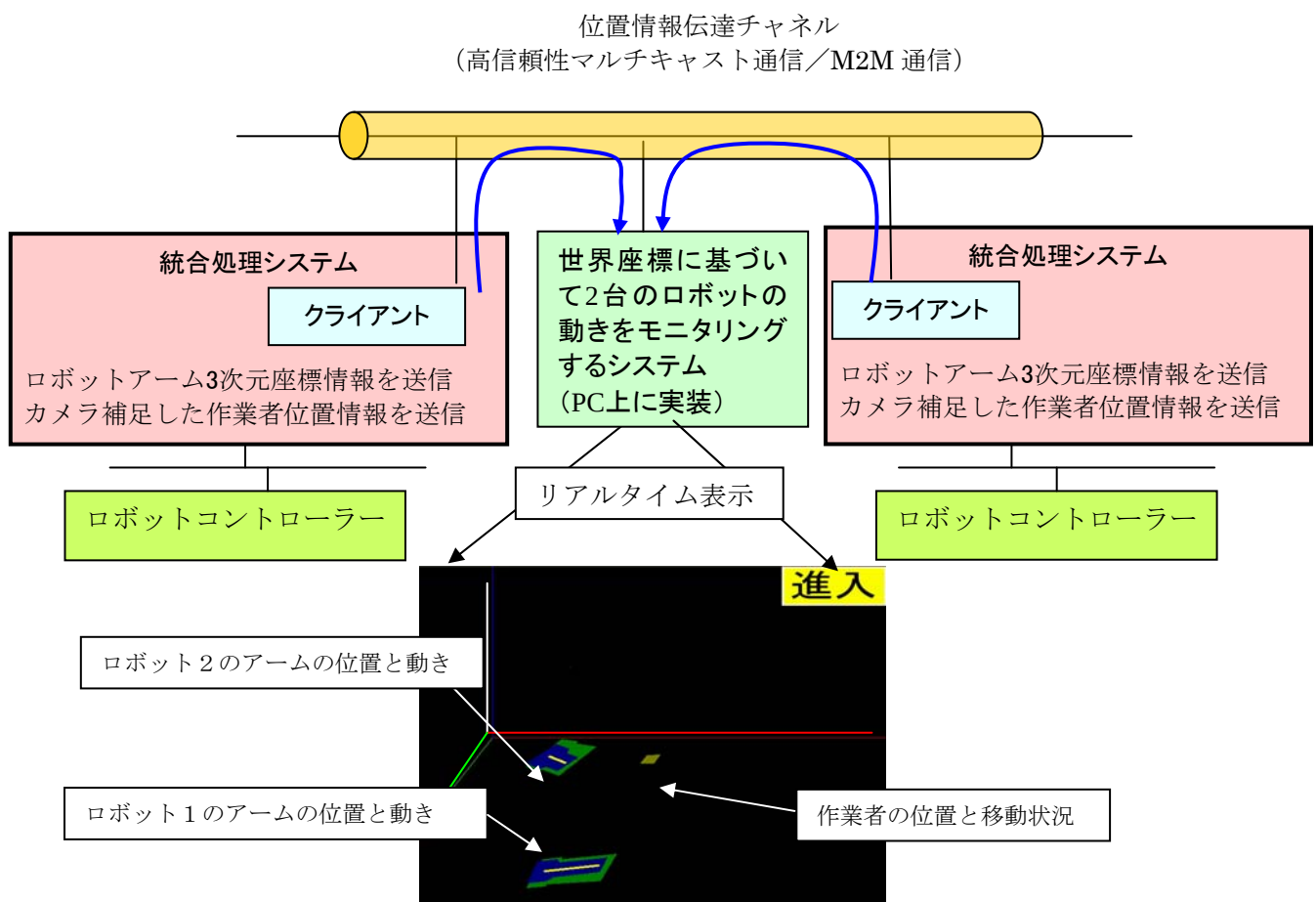


図 9-3 複数ロボットの動作監視総合表示システム

9-3 結果と考察

当研究開発プロジェクトは①進入・存在検知能力高度化を目的としたリアルタイム映像センシング技術の開発、②進入・存在検知能力高度化を目的としたロボット間高度通信サービス機能の開発 を目標に進めてきた。①は主として 6 章に記述した内容の検証を通じて目標を達成できたことを確認した。

一方、当サブテーマでは、①における UWB カメラモジュールの検証とロボット間通信システムを使った複数ロボットにまたがる「業用ロボット向け機能安全システム機構」の検証を実施した。

UWB カメラモジュールについては、UWB カメラモジュールから受信した映像処理を行いその結果から全体システム画像処理部の一部として役割を果たすことができることを確認した。

また、ロボット間通信システムを使った複数ロボット環境での検証については、前述のとおり「連携制動」と「統合 3 次元表示アニメーション」の 2 つのケースについて検証を行い良好な結果を得ることができた。当該ロボット間通信システムの特長は、「拡張性に富んでいる」ことであり、今回試した 2 ケース以外に、ロボット間での新たな通信要件が生じた際に極めて容易にその要件を満たせる点にあり今後さらなる活用方法を検討していきたい。

最終章 全体総括

10-1 成果のまとめ

本開発では、平成 19～21 年度で各サブテーマについて技術開発、改良・高度化を行うと共に、2 台の産業用ロボットから構成される環境における機能安全システムの検証事件を行い、概ね当初の開発目標を達成した。具体的には、

- ① 3 年間の開発結果を基に、全体構想を検証し、システムに必要な構成要素や仕様まとめた。
- ② 上記仕様を基に要素技術開発を行った。試作を行って、試作機の機能、性能の評価を行った。
- ③ 超高速無線伝送機能を持つ小型カメラモジュールは、試作と評価試験により、1 対 n の無線伝送を実証した。
- ④ 安全認識機能に関しては、ロボットアームの移動予測情報とステレオカメラにより映像処理に拠り得た作業員位置情報を活用した衝突リスク予測機能（iVSF 機能）の開発を行い、映像追跡アルゴリズムを改良した。産業用ロボットを使用した実験で、本方式の有効性を実証した。
- ⑤ 複数のロボット間における高信頼性マルチキャスト通信機構の開発および耐障害性向上に資する M2M 通信技術に関してはミドルウェアを開発し、2 台の産業用ロボットによりその機能を実証した。また、マルチキャスト通信システムの特許出願を行った。
- ⑥ 開発成果をまとめ、今後の事業化へ向けての課題抽出と開発方針を検討した。

10-2 今後の計画と方針

今年度は平成 19、20 年度の成果を元に各サブテーマの開発を完成させると共に全体システムを取りまとめ、概ね開発目標を達成した。しかしながら、事業化を考えるとまだいくつかの課題が残されている。

具体的には、視覚認識技術が本システムのコアとなるが、実環境に近い「複数ロボット環境／複数作業員」環境に対応するための機能向上実現には、以下のような課題がある。

- ・ カメラや周辺のセンサ類の効率的配置法の獲得：これは、コスト低減のため、なるべく少ない機器で必要機能を実現させるものである。
- ・ 環境変化(照明、レイアウトなど)に対応したロバスト性の向上：本開発で従来よりロバスト性が向上したが、実作業環境下ではより大きな、または急激な変化の可能性がある、ロバスト性の向上が求められる。
- ・ 作業員の詳細認知：人間とロボットが共存する環境で、衝突回避を図るのに、不要な安全領域の設定は作業効率や空間利用効率を低下させる。今回開発した領域設定方式は優れたものであるが、作業員の領域計算では体の外周そのものよりは大きめになっている。過大な計算負担にならずに人体外周になるべく近い領域検出法の開発が望まれる。

超高速無線伝送システムについては、1 対 n の UWB での無線通信を実現したが、同じく以下の課題がある。

- ・ 通信の領域の拡大：現状のアンテナでは指向性が強いことから、通信の角度が限られている。広く利用するにはアンテナの指向性・利得等の改良が望まれる。
- ・ 耐久性・安定性の向上：今回開発した回路、基板は開発目標の機能・性能を実証したが、長時間、厳しい環境で動作する検証までは行っていない。実用化に向けてはこの検証が必要になる。

これら課題は今後各メンバーの連携を取りながら補完研究として取り組んでいく方針である。

また、改良研究を続けながら、プロトタイプを市場に出してゆく。その場合、今回開発したトータルシステムとしての事業化が最終目的ではあるが、安全基準の整備進捗状況や顧客の設備導入のタイミングなど、実績を上げるのが遅れる要因もある。そこで、要素技術でも事業化できるものは積極的に並行して開発していきたい。具体的には、UWB 無線通信システムや、自動監視システムなどが上げられる。まずは部分的にでも実績を作り、それをくみ上げて全体システムの実績作りにつなげたい。そのために、各種展示会への出展や、セミナー類での発表、開発技術が応用できる新規プロジェクトへの参画等を積極的に進めたい。