

平成22年度(経済危機対応・地域活性化予備費事業)戦略的基盤技術高度化支援事業

「3次元視覚認識技術による袋状積載物を対象とした

マテリアル・ハンドリングシステムの開発」

研究開発成果等報告書

平成24年1月31日

委託者 経済産業省中国経済産業局

委託先 地方独立行政法人山口県産業技術センター

株式会社 YOODS

旭興産株式会社

株式会社アプライド・ビジョン・システムズ

1	はじめに	1
2	研究の概要	1
2.1	計画名及び認定番号	1
2.2	特定研究開発等の要約.....	1
2.3	特定ものづくり基盤技術の種類・川下産業分野	1
2.4	新成長戦略における戦略分野	2
2.5	事業管理機関	2
2.6	総括研究代表者.....	2
2.7	副総括研究代表者.....	2
3	研究開発の目的と方針.....	3
3.1	目的と方針.....	3
3.2	研究体制	4
4	研究成果報告.....	5
4.1	3次元画像による袋状製品の検知とロボットへの出力.....	5
4.1.1	可視または、近赤外によるパターン投影システム (パターン投影ステレオ3次元位置測定システム)6	
4.1.2	立体 (袋) 検出アルゴリズムの開発.....	13
4.1.3	カメラロボットキャリブレーション.....	16
4.2	3次元視覚認識装置(YJC-3)の開発.....	20
4.2.1	ハードウェアの開発.....	20
4.2.2	FPGA,DSP,CPUの基本ファームウェアの開発.....	23
4.2.3	FPGA最適化ロジックの開発	25
4.2.4	袋状製品認識ロジックのYJC-3への実装.....	26
4.3	マテリアル・ハンドリング用装置(ロボット)の開発.....	27
4.3.1	ロボット本体.....	27
4.3.2	ハンドの開発と設計.....	29
4.3.3	製作、組立、試運転.....	31
4.4	実機検証テストとシステム性能の改善	33
4.4.1	カメラ・照明のセッティングとカメラロボットのキャリブレーション.....	34
4.4.2	実動作テスト.....	39
5	まとめ.....	42

5.1	3次元視覚認識による袋状製品の認識.....	42
5.2	組込型3次元計測装置の開発.....	43
5.3	袋状製品のハンドリング用ハンドの開発.....	44
5.4	本事業で試作した機器概要.....	44

1 はじめに

本報告書は、平成22年度（経済危機対応・地域活性化予備費事業）戦略的基盤技術高度化支援事業に採択された「3次元視覚認識技術による袋状積載物を対象としたマテリアル・ハンドリングシステムの開発」を実施した結果をまとめたものである。

2 研究の概要

2.1 計画名及び認定番号

「3次元視覚認識技術による袋状積載物を対象としたマテリアル・ハンドリングシステムの開発」

（計画認定番号：中国-1012007）

計画実施期間 平成23年1月19日～平成24年1月31日

2.2 特定研究開発等の要約

各種製造業や流通業では、袋状原料の運搬・投入等の3K業務が未だに労働者による人力により行われており、作業者の労働環境に配慮した生産システムへのニーズが高まっている。この研究開発では、専用ハードウェアの上に組込んだ実時間3次元視覚認識ソフトウェア技術とロボットハンド技術により、マテリアル・ハンドリング技術を高度化し、従来自動化が困難であった不規則形状物体に対する自動ピッキング、移載技術を確立する。

2.3 特定ものづくり基盤技術の種類・川下産業分野

- ①主たる技術（1つ）： ①組込用ソフトウェアに係わる技術
- ②従たる技術（該当するもの全て）： ③電子部品・デバイスの実装に係わる技術
- ③研究開発成果の活用を想定している川下産業分野： 産業機械、産業用ロボット

2.4 新成長戦略における戦略分野

- ①グリーン・イノベーションによる環境・エネルギー大国戦略
- ②ライフ・イノベーションによる健康大国戦略
- ③科学・技術・情報通信立国戦略（IT立国）

該当する理由：この事業における研究開発の成果である3次元視覚認識技術による視覚認識は、各種産業における装置の自動化や計測技術に寄与すると考えられることから、上記③の推進に寄与することが期待される。

2.5 事業管理機関

地方独立行政法人 山口県産業技術センター

代表者役職・氏名： 理事長 山田 隆裕

連絡担当者所属役職・氏名： 企業支援部 産学公連携室 室長 川村 宗弘

2.6 総括研究代表者

氏名：原田 寛

所属組織名：株式会社YOODS（山口市）

2.7 副総括研究代表者

氏名：横山 一二三

所属組織名：旭興産株式会社（岩国市）

本研究開発計画に関する問い合わせ担当者
所属 地方独立行政法人 山口県産業技術センター
氏名 川村 宗弘(かわむら むねひろ)
電話 0836-53-5052 FAX 0836-53-5071
E-mail kawamura@iti-yamaguchi.or.jp

3 研究開発の目的と方針

3.1 目的と方針

各種製造業や流通業におけるマテリアル・ハンドリングの改善・効率化は、ボトルネックの改善、在庫レベルの最適化、ムダによる損失の減少、間違いの最小化、セキュリティ強化、破損の最小化につながる重要な課題である。マテリアル・ハンドリングの範疇である、パレット上に積載された袋状の積荷の自動認識・積出し作業については、既にレーザー変位センサを用いてパレット上を走査することにより、積荷の形状を認識する技術等が試験的に採用されているが、レーザー走査に必要な時間が長い、レーザーのハンドリングが難しい、対象物によりレーザーの反射が異なる等の課題も多い。

本研究開発では、図 3.1-1 に示すとおり、ロボットにより原料である袋状積載物の運搬の自動化システムを開発する。自動化の手法として 3 次元視覚認識技術を導入する。3 次元画像を取得するため、2 台のカメラを対象となるパレット上に設置して、2 台のカメラからの画像を合成することにより、リアルタイムに 3 次元画像データを取得する。得られた 3 次元画像データを解析して、最上部の積み出すべき製品を判別して、搬送ロボットに製品形状と位置を指示する仕組みを開発する。

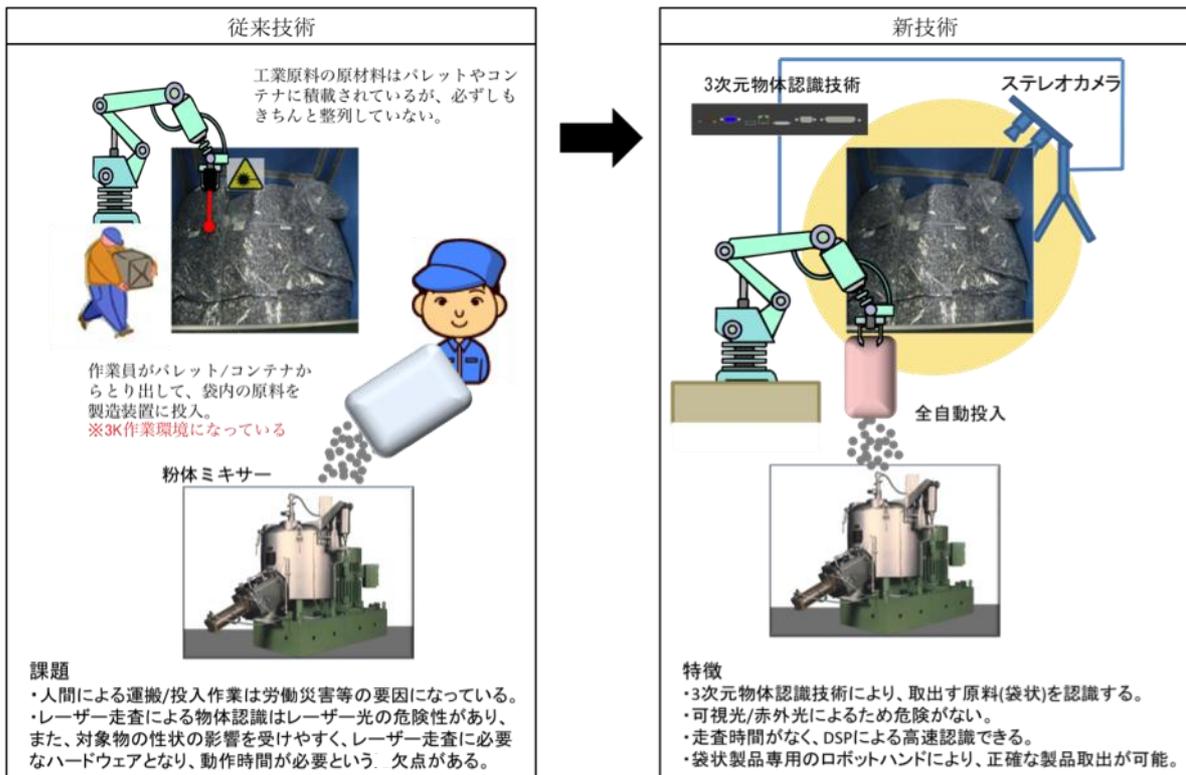


図 3.1-1 マテリアル・ハンドリングシステムの開発概要

3.2 研究体制

研究体制を図 3.2-1 に示す。2 台のカメラから 3 次元画像を取得するソフトウェア・アルゴリズムは、(株)アプライド・ビジョン・システムズが開発を行う。開発されたソフトウェアを(株)YOODS が本事業で独自に開発する画像検査装置 (YJC-3) に組み込む。画像から得られた計測結果に基づいて、袋状積載物をロボットによるハンドリングする装置を旭興産(株)が試作する。山口県産業技術センターは、ロボットの基礎技術を活かしたシステム作りを行う。

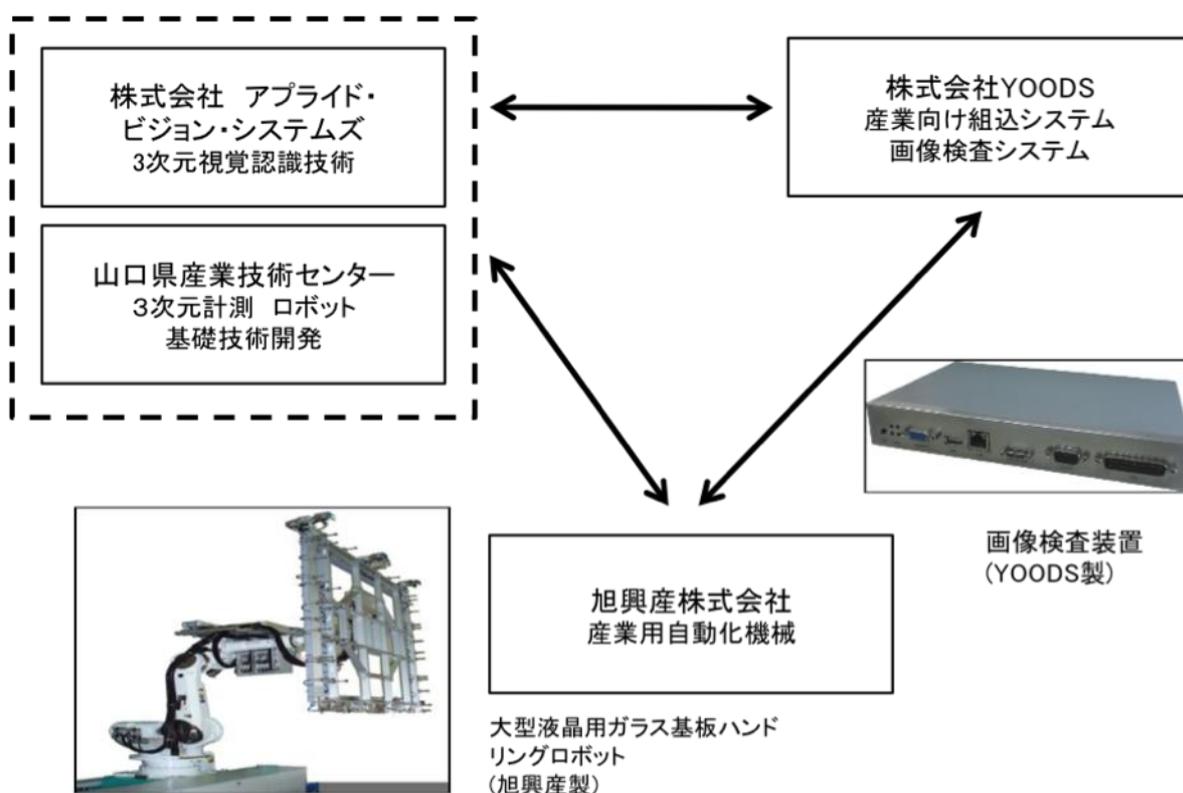


図 3.2-1 研究体制

4 研究成果報告

4.1 3次元画像による袋状製品の検知とロボットへの出力

カメラを用いた対象の3次元計測は、人間の眼の代わりに2つのカメラを用いて行われる。対象を2つのカメラ、すなわちステレオカメラで同時に撮影すると、対象を異なった方向から見た画像が取得できる。画像中の特定位置は、カメラから対象を見る方向を反映する。つまり、それぞれのカメラで同じ対象を見るということは、2つのカメラ間を結ぶ直線の端点から対象を見る角度がわかるということになる。結果、対象の位置を三角測量によって導きだせる。これがステレオカメラを用いた対象の3次元測定の基本原理である（図 4.1-1 ステレオカメラを用いた3次元計測）。これを物体表面全体に適用し、物体全体の3次元位置情報を得たあと、視覚認識等の技術を用い、特定袋の位置、姿勢等を確定するが、実際にはカメラが人の眼のような高いダイナミックレンジ、脳に相当する事前知識等がないため様々な工夫が必要となる。

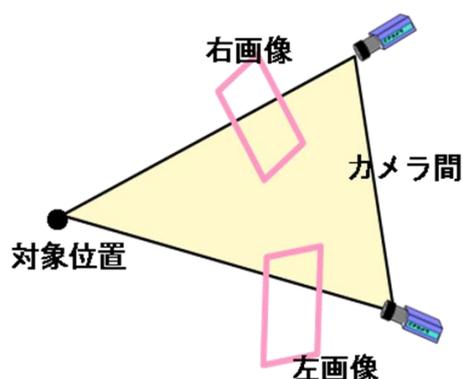


図 4.1-1 ステレオカメラを用いた3次元計測

本事業での3次元視覚認識では、半透明で柔軟な袋物が積層された荷積み状態を対象として、照明等の撮影条件に左右されずに、袋の正確な位置・姿勢を必要な精度で取得し、ロボット側に必要な形式（座標、角度）に変換する必要がある。そこで、本事業では以下の手順で上記の実現を目指した。

- ① パターン投影を用いたステレオ撮影による3次元位置測定システムの開発
- ② 3次元測定データと撮影画像から物体の位置・姿勢を検出する袋物検出アルゴリズムの開発
- ③ 物体の位置・姿勢情報をロボットで使える座標系の値に変換し、ハンドリングに用いるために、カメラ座標からロボット座標への座標変換行列を求めるキャリブレーションシステムの開発

以下、上記手順毎に開発した内容を報告する。

4.1.1 可視または、近赤外によるパターン投影システム

(パターン投影ステレオ3次元位置測定システム)

パターン投影ステレオ3次元位置測定システムの基本構成は、パターンを投影するプロジェクション機器とステレオカメラ、およびこれらを制御し、測定するコントローラである。したがって、本システム開発においては、これらの構成機器の機種選定と配置設計、および制御、測定プログラムの開発が必要となる。まずは、機種選定と配置設計について示し、次に制御、測定プログラム開発について示す。

4.1.1.1 構成機器の機種選定と配置設計

構成機器の機種選定と配置設計を行うためには、ハンドリング対象とその荷積み状態を決定する必要がある。そこで、本システムの主要なユーザである「粉体ミキサー」を導入している半導体材料メーカーを訪問し、実際の袋物とその荷積み状態を調査した。その結果、袋物は3種類、荷積み状態は2種類あり、それぞれの外形は、図 4.1-2 に示す通りであった。そこで、対象とする袋物の大きさと荷積みの範囲を以下のように設定した。

- 1) 袋物の大きさ：300mm×500mm×100mm
- 2) 荷積みの範囲：1000mm×1000mm×1000mm

上記設定に対して要求される計測精度は±2%以内であり、袋物は平面に積まれているため、平面方向で±6mm以内、奥行方向で±2mm以内と定義される。ここで、ステレオカメラによる計測システムにおける計測精度は、平面方向は、撮影範囲をカメラの画素数で割った分解能で表され、奥行方向は、分解能とカメラ間の距離（基線長）で表される。実際に使用され得る現実的な基線長では、奥行方向の精度はカメラの分解能以上にはならないため、奥行方向での精度である±2mm以内を目標値とした。

パターンを投影するプロジェクション機器の設置における要件は、以下の通りである。

- i) 投影画角
- ii) 投影中心の方向
- iii) 投影光源の明るさ

プロジェクション機器の選定結果については、投影内容に依存するので、次節で示す。

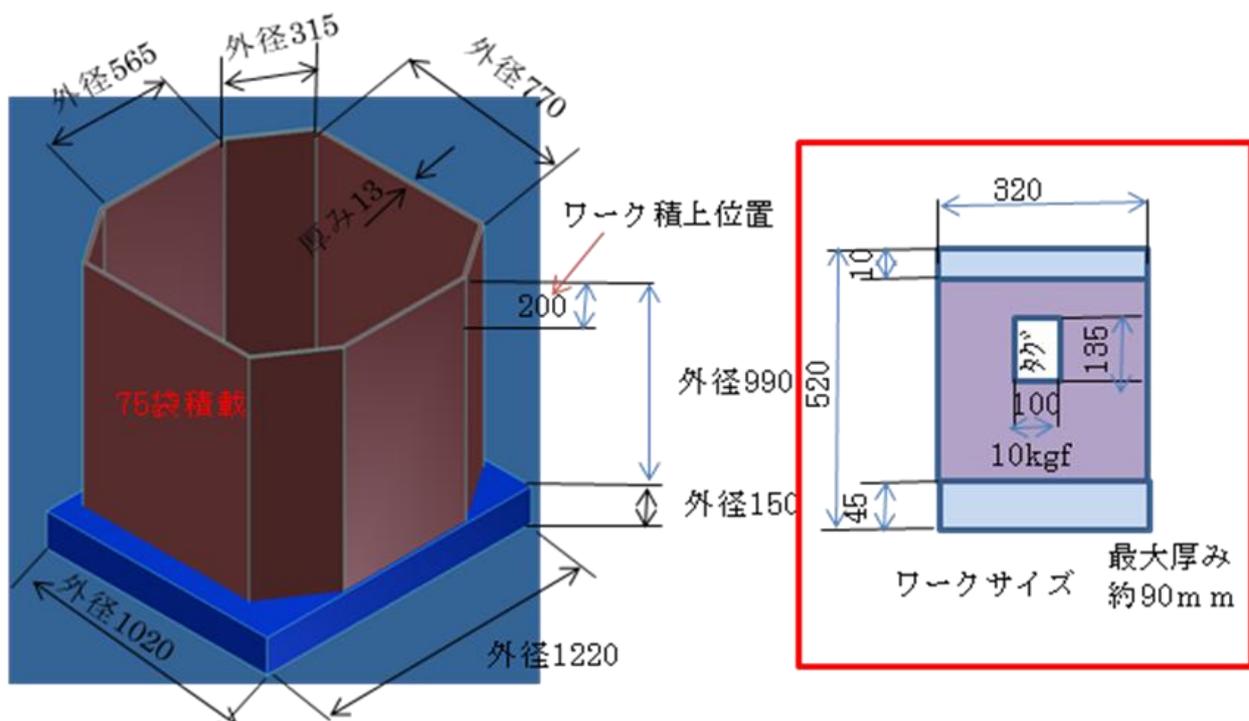
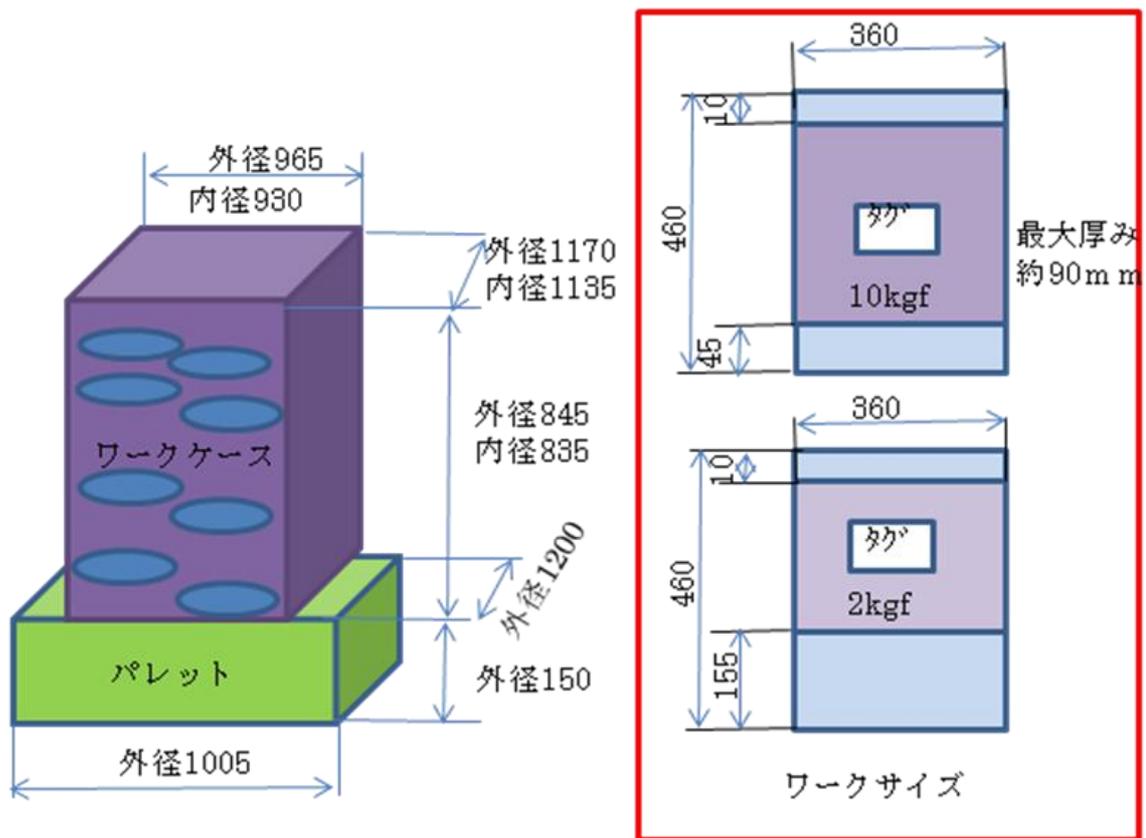


図 4.1-2 対象袋物と荷積み状態の調査結果

一方、ステレオカメラの設置における要件は以下の通りである。

- ① レンズ（画角）
- ② カメラ（画素数、画素ピッチ）
- ③ ステレオカメラの基線長

ステレオカメラの各要件は、以下の手順で求められる

- A) 撮影する範囲が、実用的な距離から視野に入るレンズ画角①を求める。レンズ画角が求まれば、おおよその距離が求められる。
- B) で求められるレンズ画角と距離を基本にして、要求される精度を実現するためのカメラ（画素数、画素ピッチ）②をいくつか選定する。
- C) で選定したカメラ毎に要求精度を実現するためのステレオカメラの基線長③が選定され、実験により最適な設定を決定する。

まず、上記の手順 A)に基づき、レンズ画角を選定した。できるだけ設置をコンパクトにしつつ、2) 荷積みの範囲：1000mm×1000mm×1000mm を視野に入れるためには広角のレンズが望ましいが、広角になるほどレンズの歪みが大きくなるため、極端な広角は好ましくない。検討の結果、対象からの距離が 1500mm～2000mm 程度で、荷積みの範囲が視野に入るレンズ画角の 8mm を選定した。

つぎの手順 B)により、実験用のカメラとして、以下のカメラを用意した。

- | | |
|------------------|--------------------------------|
| イ) Flea2 SXGA | (画素数 1296× 966、画素ピッチ 3.75 μ m) |
| ロ) Flea2 UXGA | (画素数 1600×1200、画素ピッチ 4.4 μ m) |
| ハ) Grashopper 5M | (画素数 2448×2048、画素ピッチ 3.45 μ m) |
| ニ) BASLER 5M | (画素数 2592×1944、画素ピッチ 2.2 μ m) |

手順 C)に示すように、最終的な機種選定と配置設計は実験により決定される。次節以降で示す様々な実験を行った結果、選定した機種は、BASLER 5M で、基線長は、500mm となった。

4.1.1.2 制御、測定プログラムの開発

制御、測定プログラムには以下の内容が含まれる。

- カメラ撮影制御プログラム
- プロジェクション機器制御プログラム
- ステレオ画像からの3次元計測プログラム

カメラとプロジェクション機器は、実際には別途開発される3次元視覚認識装置

(YJC-3)で制御されるため、ここで開発するプログラムは実験を円滑に行うためのものである。まず、カメラ撮影制御プログラムをカメラ付属ドライバとサンプルプログラムを用いて開発し、適用可能性のあるパターン投影ステレオ方式の計測実験を行った。

本事業の計測対象は、半透明を含む柔軟な袋物が積載された荷積み状態である。従来のレーザー変位センサによる方式では、袋表面の透過や反射による計測誤差の影響、広い範囲を走査するために計測時間が増大する問題、レーザー光自体の現場でのハンドリングの問題等の課題があり、これらの課題を解決するパターン投影ステレオ画像からの3次元計測プログラムを開発する。

パターン投影ステレオ画像からの3次元計測プログラムを開発するにあたり、既存のパターン投影3次元計測方式の比較検討を行った。既存の方式は、以下のように分類される。

- 1) コード化パターン光投影法
- 2) 濃度・カラー傾斜パターン光投影法
- 3) ランダムパターン光投影法
- 4) 繰り返しパターン光投影法

上記の比較検討を行った結果、1)、2)は、計測精度が高いメリットはあるが、複数枚のパターンの投影・撮影が必要で、機器構成が複雑になるとともに、処理時間が増え、広い範囲の計測を不得意とするデメリットがあった。これに対し、3)、4)は、1枚のパターン投影・撮影で処理が可能で、機器構成も単純で広い範囲の計測に対応可能であることから、これらの方式を基本に実験で決定することとした。

実験の概要は以下の通りである。

I. 実験用サンプルとして、砂利をビニール袋に詰めたものを用意し、パターンとして、以下のパターンを投影して、計測手法としては、一般的な領域相関プログラムを作成し、比較実験を行った。

- (ア) 赤外線ランダムパターン
- (イ) 可視光白黒ランダムパターン
- (ウ) 可視光濃淡ラインパターン

その結果、今回の使用環境では、(イ)、(ウ)に比べると、赤外線ランダムパターンでは、ステレオ計測に十分な特徴が得られなかったため、以後は、(イ)、(ウ)を実験対象とした。

II. 実験用サンプルとして、主要ユーザである半導体材料メーカーから、実サンプルが届いたので、これを対象として各カメラで要求仕様を満たす基線長を検討する実験を行った。その結果、イ) Flea2 SXGA、ロ) Flea2 UXGA では、基線長を1800mm程度にする必要があり、この状態では、左右のカメラでの見え方の違いが大きすぎ、形状に変形があると、ステレオ相関がとれない問題が確認された。安定してステレオ相関処理をするためには、基線長は800mm以内にする必要があり、この基線長で要求精度を満たすためには500万画素以上のカメラが必要であることが分かった。そこで、カメラの候補をハ) Grashopper 5M、二) BASLER 5Mとして、基線長を決定する実験を行った。最終的に、基線長は、ハ) Grashopper 5Mで400mm、二) BASLER 5Mで500mmという結果を得て、現地には二)を設置した。

III. II で得られたカメラ機種、配置を基本に、(イ) と (ウ) のパターン比較を行った。投影には既存の液晶プロジェクタを使用した。ここで、パターンの差の問題よりも、対象物表面材質に起因するハレーションによる計測結果の抜けが問題となった。これに対しては、以下の対策を行った。

- ① プロジェクタ投影方向とカメラ撮影方向の角度をできるだけ大きくした(25度~45度)
- ② プロジェクタレンズとカメラレンズの前に偏光フィルターを偏光角度が直交するよう設置した
- ③ ステレオ相関手法として新たに正規化(規格化)相関手法を開発した

以上の対策により、ハレーションの影響は完全ではないが、袋を検出するのに問題ない程度に軽減できた。

以上の対策後、(イ) と (ウ) のパターン比較を社内実験、現地実験で様々なデータで比較を行った結果、安定して袋物が検出可能な(ウ)のパターンを採用することに決定した。

IV. カメラ、パターンの決定後、照明装置(プロジェクタ)の機種選定を行った。設置環境と III の設置条件から超広角のプロジェクタに絞り込み、プロジェクタの投影画角、距離を調査した結果、NEC NP-M350XSLJに決定した。

4.1.1.3 パターン投影ステレオ3次元位置測定システム開発の成果

以上の結果、最終的に実験システムとして旭興産岩国工場に構築した「パターン投影ステレオ3次元位置測定システム」を、図 4.1-3 に示す。また、本システムで撮影した画像とその計測結果の3次元点群の表示例を、図 4.1-4 に示す。

液晶プロジェクタと
偏光フィルター

カメラと
偏光フィルター

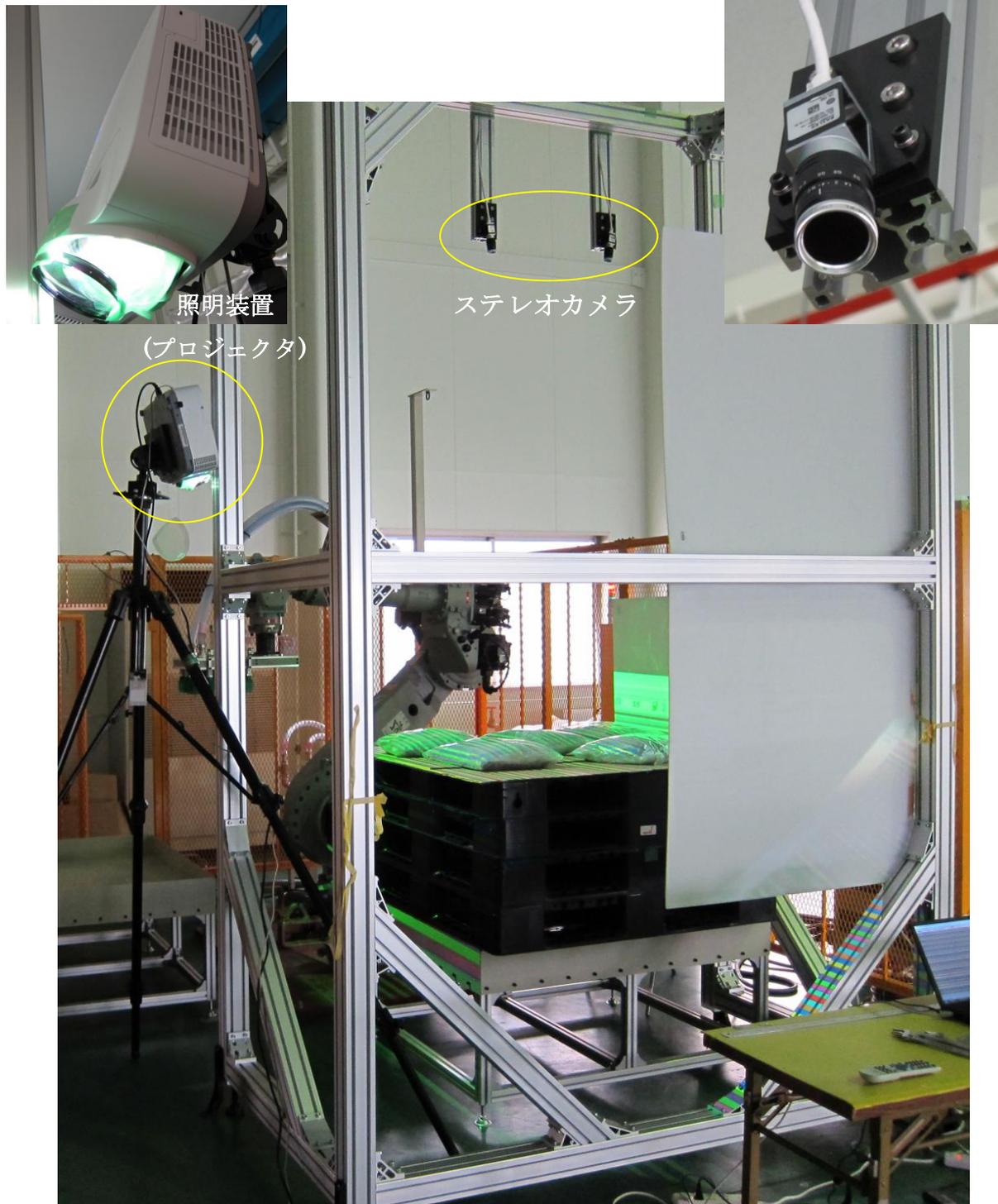
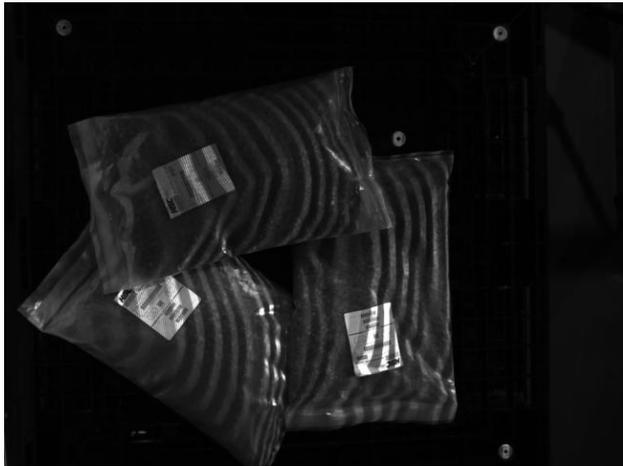
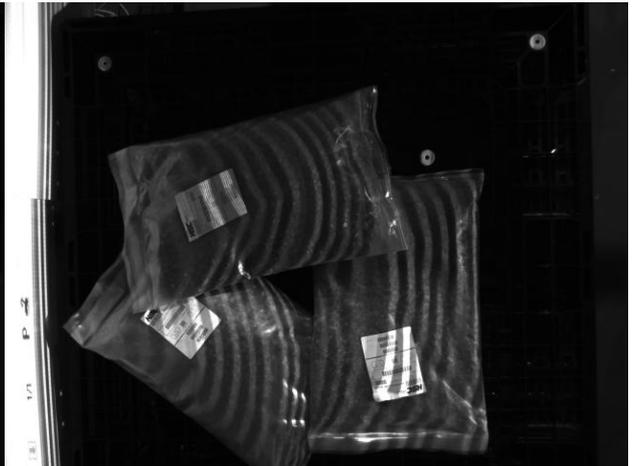


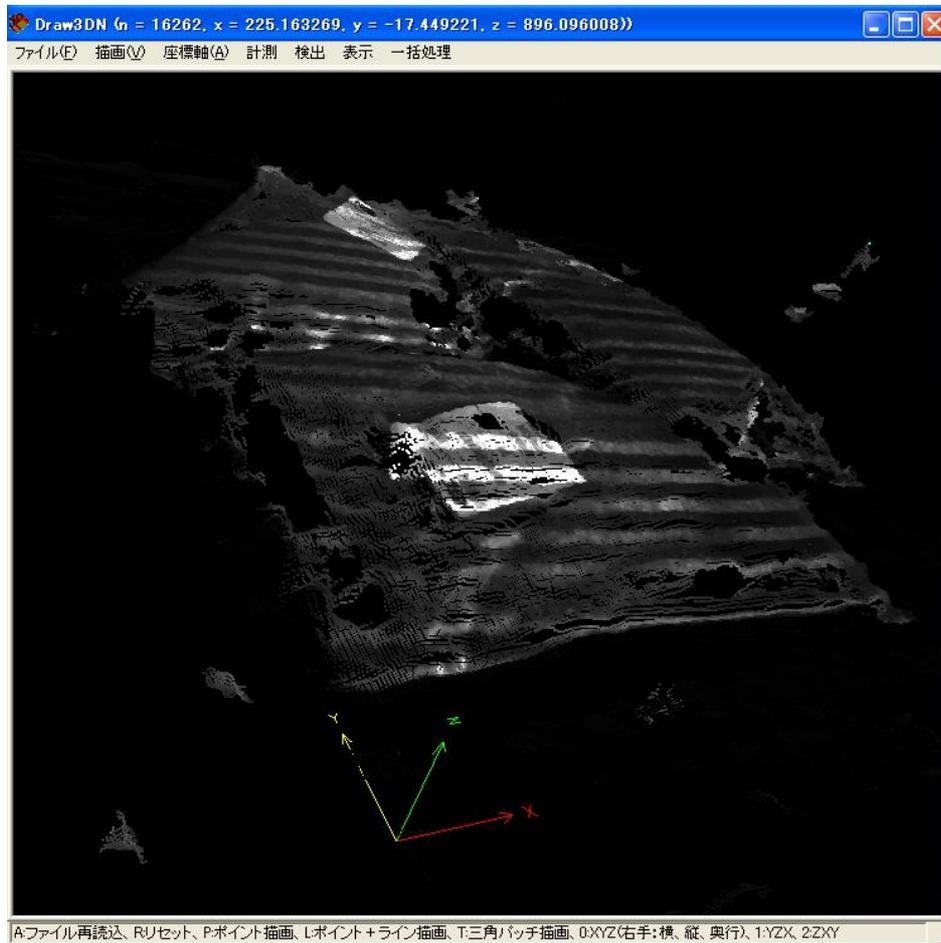
図 4.1-3 パターン投影ステレオ3次元位置測定システム



(1) 撮影画像 (左)



(2) 撮影画像 (右)



(3) 計測結果の3次元点群表示例

図 4.1-4 撮影画像と計測結果の例

図 4.1-3 に示すように、対象となる荷積み範囲をワンショットで撮影し、図 4.1-4 に示すように、対象となる袋物の3次元位置を計測する「3次元パターン投影ステレオ3次元位置測定システム」を構築出来た。

4.1.1.4 パターン投影ステレオ3次元位置測定の精度評価

本システムの目標計測精度は、奥行方向で±2mmである。計測精度の評価を以下の手順で行った。

- 1) 実ワークの最上段を再現するために、置き台の上に樹脂製パレットを置いている状態で撮影し、樹脂製パレットにある4つの白いプラスチック部品の面を計測し、各計測点群の平均値を求める
- 2) 置き台面中央がロボット座標原点と定義されているので、置き台面から樹脂製パレット表面の高さを実測する
- 3) システムによる計測結果と実測値とを比較する

以上により、評価を行った結果、計測値の結果は、4つのプラスチック部品の面の平均値が、643.6mm、644.3mm、643.2mm、643.3mmであったのに対し、実測値は、643mm～645mmであった。この結果から、目標精度を達成した。

4.1.2 立体（袋）検出アルゴリズムの開発

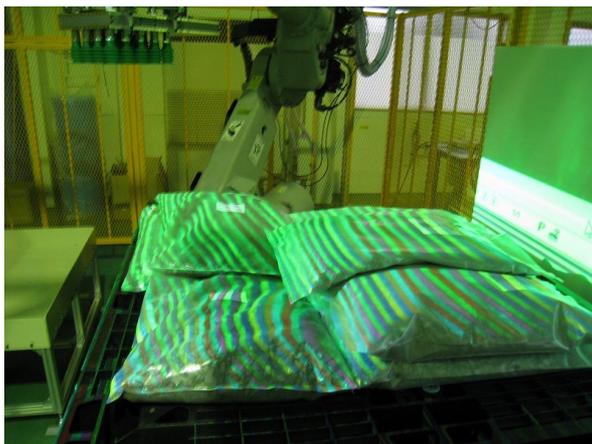
取得された3次元データは、ステレオカメラで見える対象表面全体の3次元位置をピクセル単位で表現している点群である。したがって、個々の袋のデータの集まりとしては分離されておらず、この中からハンドリング対象となる特定の袋だけを分離し、袋の位置・姿勢の情報を取り出す必要がある。この時の立体の位置・姿勢の決定精度は対象袋が極端な形状変化をしていないという前提で、目標を±2%程度とした。

4.1.2.1 立体（袋）検出アルゴリズムの概要

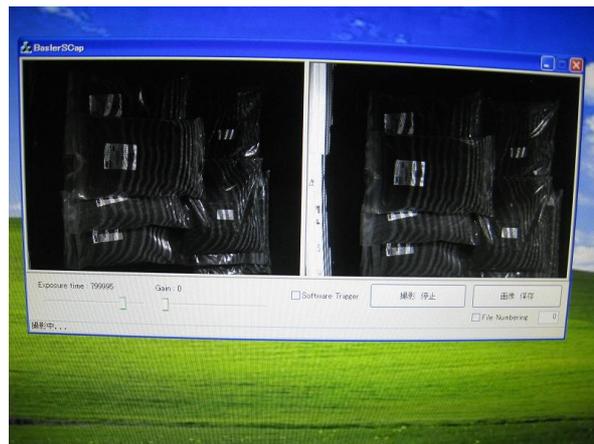
点群からの立体形状の検出について、関連文献を調査した結果、平面や2次曲面、直方体や円筒、球といった基本形状に当てはめて検出する例がほとんどで、1例だけ、点群から法線を求めて、法線の不連続性に基づき、物体を分離する方法があった。これに対し、袋は完全な直方体ではなく、表面や角が周囲からの圧力等により任意形状に変形していると考えられるため、基本形状をそのまま当てはめることは難しい。しかし、袋の表面は折れ曲がる等の極端な変形はないため、滑らかに連続する面が一つの袋の面と仮定することができる。この仮定に基づき、検出された点群から滑らかな点の集合として分類し、得られた点群から袋の位置・姿勢を求めるアルゴリズムを開発した。

4.1.2.2 立体（袋）検出アルゴリズム開発の成果

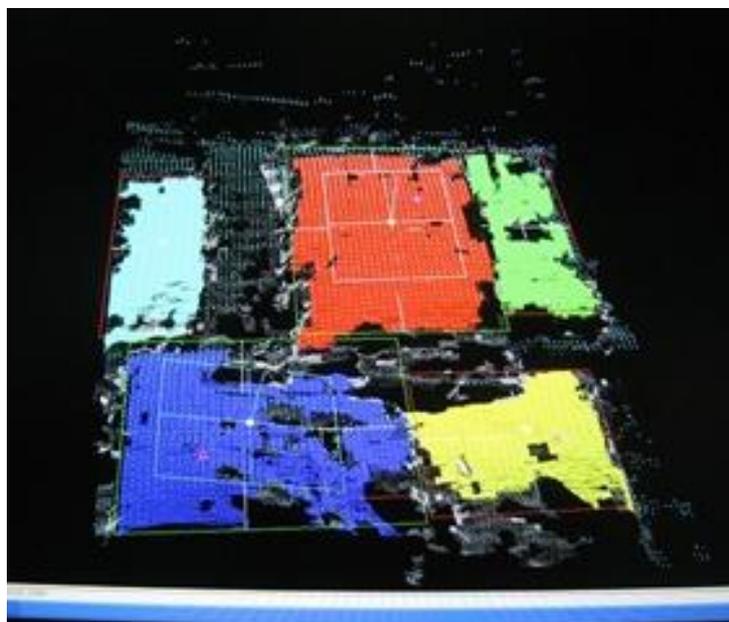
開発したアルゴリズムで検出したメッシュ群と袋の位置・姿勢情報の表示例を、撮影の様子、撮影画像とともに、図 4.1-5 に示す。図 4.1-5 の（3）の色分けされた領域が検出された袋物の領域群で、色分けされた矩形表示は、それぞれ緑色：ハンドリング可の領域の外接矩形、赤色：ハンドリング不可の領域の外接矩形、水色：算出したロボットハンドの領域とアプローチ方向の法線である。



（1）撮影の様子



（2）撮影画像例



（3）計測結果と袋物検出結果の表示例

図 4.1-5 袋物検出結果例

4.1.2.3 立体（袋）検出アルゴリズムの精度評価

本アルゴリズムの目標精度は、±2%程度である。検出位置に関しては、高さ方向は、計測精度に依存するので、達成していると言える。ここでは、ロボットに与える袋物の重心の水平方向の位置と方向、法線の角度について、評価した。

水平方向の目標精度は、袋物の大きさが300mm×500mmであるため、最大で±10mm程度である。また、方向と法線角度は、±180度を基準として、±3.6度程度である。

精度は以下の手順で評価した。

1) 水平方向の精度評価

- ① 袋物の絶対位置座標を設定するのは困難なため、袋物の中心付近に位置検出用マーカ（ロボットカメラキャリブレーションで使用したものと同様）を置き、袋を移動させて、マーカの位置の相対位置変化と袋重心位置の検出位置変化の誤差を測定精度として求める。

2) 方向（Z軸周りの回転角度）

- ① 袋物の絶対方向を設定するのは困難なため、袋物の上下に位置検出用マーカを置き、袋を水平に回転させて、2つのマーカによる直線の角度変化と袋の検出方向変化の誤差を測定精度として求める。

3) 法線傾き（X軸周りとY軸周りの回転角度）

- ① 袋物の絶対方向を設定するのは困難なため、袋物を傾けた後に、位置検出用マーカを傾けた方向に2か所置き、2つのマーカによる直線の水平に対する角度と袋の法線の各軸の回転角度の誤差を測定精度として求める。

各評価結果は以下の通りである。

1) 水平方向の精度評価

結果の標準偏差から、水平方向（XY方向）の誤差は10mm程度であり、距離では6mm程度で、目標はほぼ達成できた。

2) 方向（Z軸周りの回転角度）

袋のZ軸周りの回転角度と2つのマーカから算出される角度の差は、最大で3.0度であり、目標は達成できた。

3) 法線傾き（X軸周りとY軸周りの回転角度）

袋のX軸、Y軸周りの回転角度とマーカから算出される各角度の差は、最大で1.7度であり、目標は達成できた。

4.1.3 カメラロボットキャリブレーション

カメラはロボットとは異なる架台上に固定されているので、撮影画像から得られた物体の位置・姿勢を表現する値は、カメラ固有の座標系か地上に固定された座標系が得られる。その値のままでロボットがハンドリングすることは出来ないため、ロボットに定義された座標系での値を与える必要がある。このカメラの座標系からロボットの座標系に変換する行列を求めることをカメラロボットキャリブレーションと呼ぶ。この変換精度は、ロボットが極めて精巧という前提で±1%を目標とした。

ここでは、このカメラロボットキャリブレーションに関連して重要な、カメラ固有の座標系と固定された座標系（キャリブレーションパネル座標系）を定義するために、撮影画像から物体位置・姿勢を得るのに必要なカメラの撮像系の情報と、ステレオの2カメラの座標系の関係を求めるカメラキャリブレーションの概要を示す。各座標系とキャリブレーションの関係は、図 4.1-6 に示すとおりである。

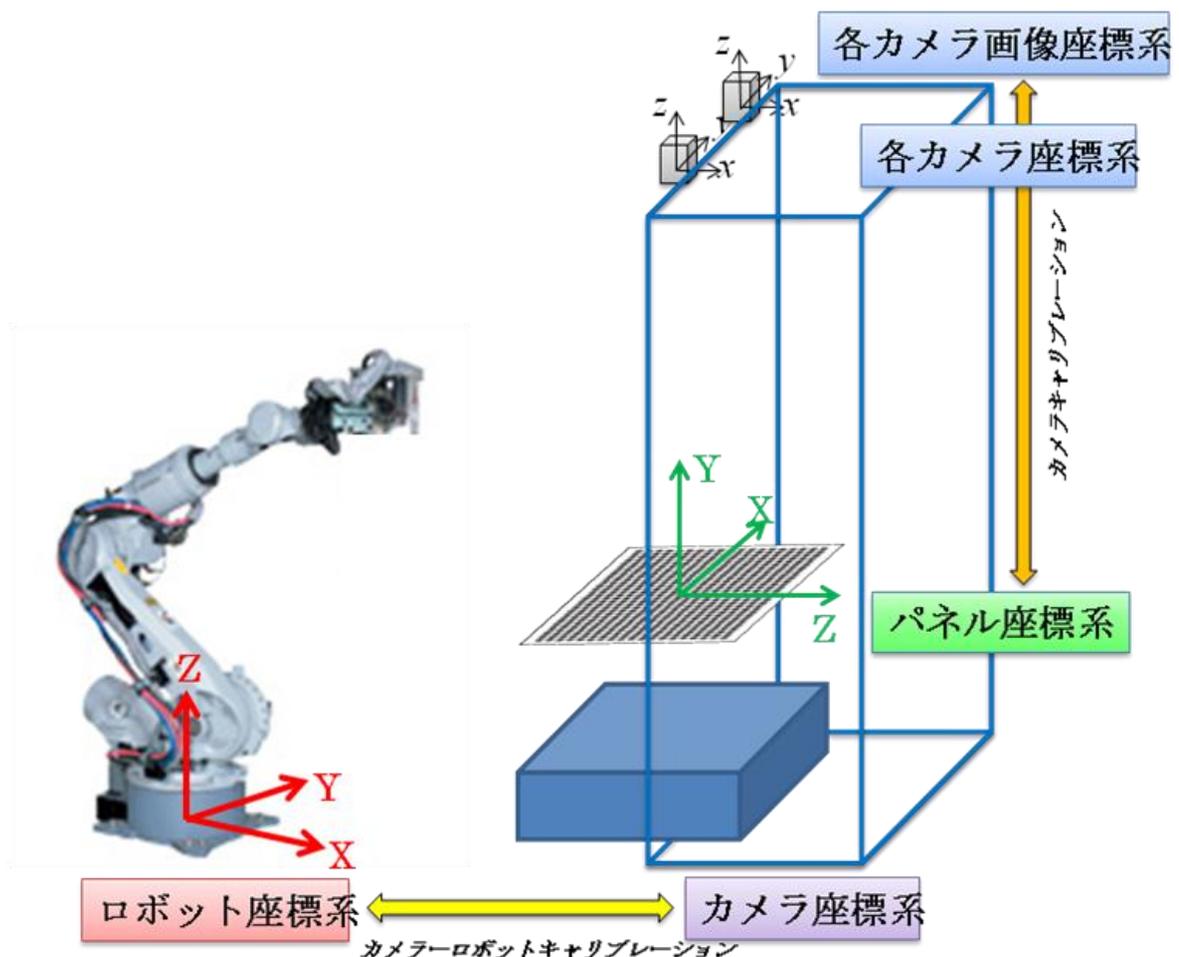
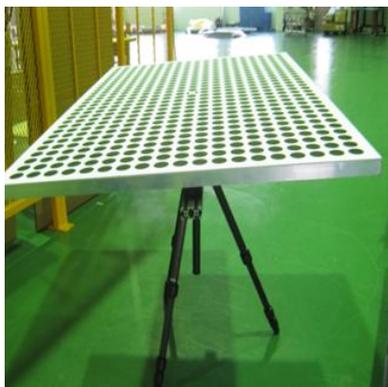


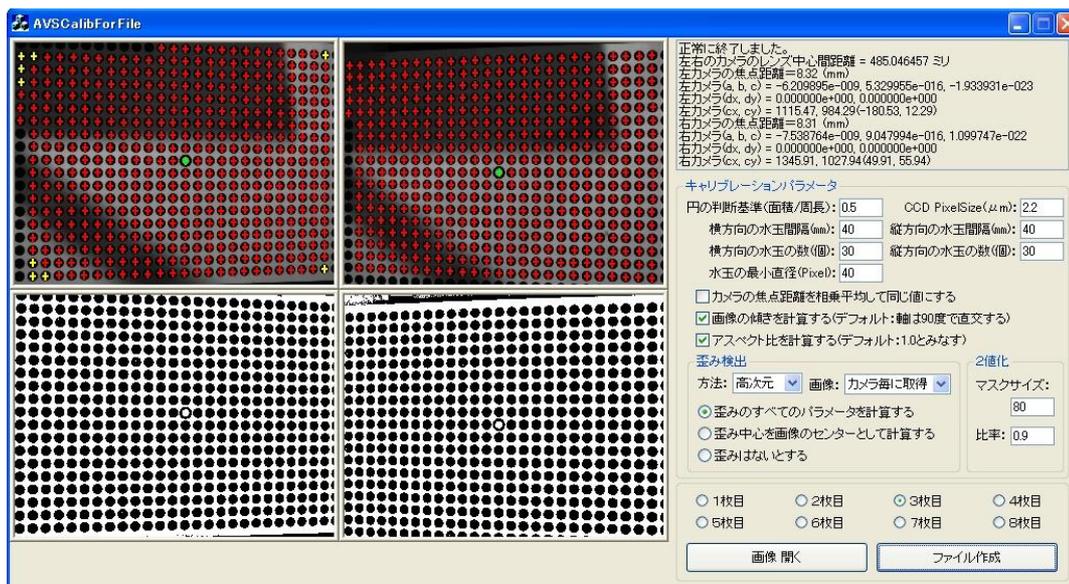
図 4.1-6 各座標系とキャリブレーションの関係

4.1.3.1 カメラキャリブレーション

カメラキャリブレーションは、ステレオ撮影用の2台の各カメラの撮像系の情報と、カメラ間の位置・姿勢の関係を求める。各カメラの撮像系の情報は、一般的に内部パラメータと呼ばれ、焦点距離、画像中心、画像歪み等を含む。また、カメラ間の位置・姿勢の情報は、一般的に外部パラメータと呼ばれ、各カメラの座標系の原点位置と方向である。内部パラメータはカメラ個体毎に求める必要があり、外部パラメータは、設置毎に求める必要があるため、簡易に求める方法が望ましい。本事業では、撮影範囲をカバーする専用のキャリブレーションパネルを設計、製作し、この専用キャリブレーションパネルを8方向に変化させてステレオカメラで撮影し、独自のアルゴリズムで処理することでキャリブレーションを実行可能なソフトウェアを開発した。図4.1-7に専用キャリブレーションパネルとソフトウェアの実行の様子を示す。



(1) カメラキャリブレーションパネル



(2) カメラキャリブレーションソフトウェア実行の様子

図 4.1-7 カメラキャリブレーション

4.1.3.2 ロボットカメラキャリブレーション

ロボットカメラキャリブレーションの作業では、まずカメラで撮影・計算して位置算出が容易な専用マーカを設計した。そのマーカを正確にハンドに取り付け、あらかじめ設定された複数のロボット座標系の位置にロボットを数回動かして、マーカ中心を移動、カメラで撮影することで、ロボット座標とカメラ座標のマーカ中心座標の関係が得られる。この関係により、カメラ座標系からロボット座標系への変換行列を求めることが可能である。図 4.1-8 にそのイメージを示す。

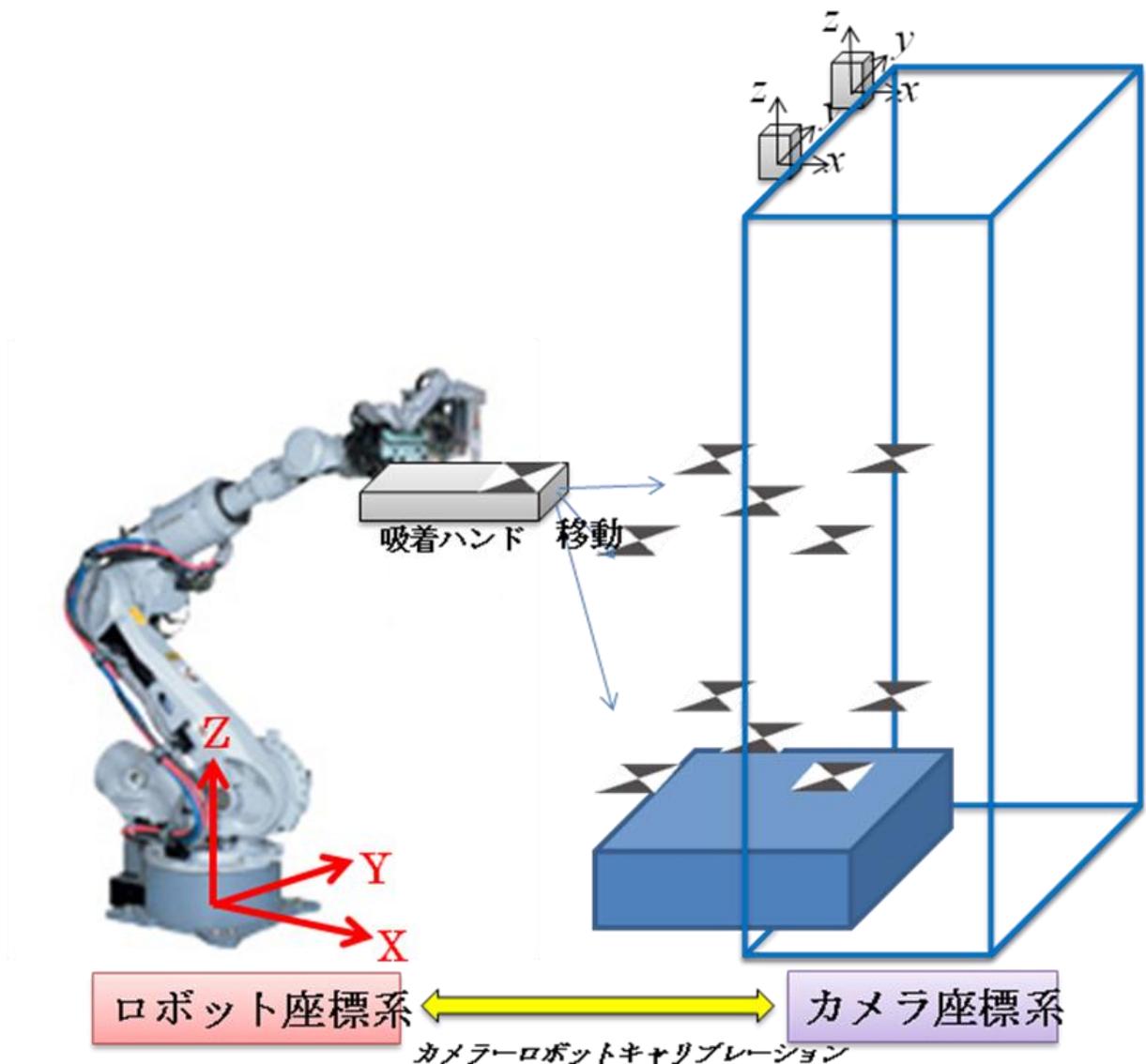


図 4.1-8 カメラロボットキャリブレーションのイメージ

今回設計した専用マーカーおよびそのマーカーをロボットハンドに設置した様子を、図 4.1-9 に示す。



図 4.1-9 ロボット-カメラキャリブレーション専用マーカー

4.1.3.3 ロボット-カメラキャリブレーション開発の成果

ロボット-カメラキャリブレーションを自動実行するために、専用マーカーを撮影した画像から、マーカー中心を自動的に算出し、ステレオ対応探索し、3次元位置を自動で算出するとともに、複数の画像を処理し、その結果に対応するロボットの位置座標を入力することで、カメラ座標系からロボット座標系への変換行列を算出するプログラムを開発した。図 4.1-10 に撮影および画像処理している様子を示す。

左Col	左Row	右Col	右Row	World X	World Y	World Z	誤差	実測X	実測Y	実測Z	World→実測 X	World→実測 Y	World→実測 Z	File
1251.33	925.48	1327.22	1024.63	23.20	-211.20	-8.96	2.77	0.00	0.00	700.00	-0.10	-0.37	700.61	Ime2
1653.69	502.26	1739.33	585.70	-167.54	-216.97	199.66	2.91	200.00	-200.00	700.00	200.09	-199.92	699.40	Ime2
818.36	505.51	904.25	618.72	232.05	-209.57	182.85	3.03	200.00	200.00	700.00	200.37	200.09	699.99	Ime2
835.66	1359.69	926.56	1450.15	214.92	-208.02	-217.39	2.76	-200.00	200.00	700.00	-200.24	200.11	699.22	Ime2
1668.49	1330.34	1761.44	1442.05	-185.01	-213.92	-200.25	3.09	-200.00	-200.00	700.00	-200.22	-200.23	700.13	Ime2

図 4.1-10 ロボット-カメラキャリブレーション実行の様子

4.1.3.4 ロボット-カメラキャリブレーションの精度評価

図 4.1-10 のプログラムによる変換結果を分析したところ、撮影範囲 1000mm × 1000mm において、その誤差は± 1 mm以内あることから、目標を達成したと言える。

4.2 3次元視覚認識装置(YJC-3)の開発

4.2.1 ハードウェアの開発

本研究開発の目的である3次元画像認識システムを実現するにあたり、従来型のパソコンベースのシステムではなく実際に産業向けに使えるシステムを目指して、組込型3次元画像処理装置(YJC-3)を開発した。

4.2.1.1 要求仕様

産業向けに使えるシステムという前提を踏まえて、3次元画像処理装置に要求される仕様をまとめた。その検討内容を表4.2-1に示す。

表 4.2-1 YJC3 への要求仕様

項目	仕 様
カメラ	最低2台接続可能であること カメラインターフェイスは Cameralink または GigE 500万画素以上のエリアカメラが接続可能
演算速度	パソコンに近いパフォーマンス。パソコンではマルチコアの2GHz-3GHzのCPUが使われている。一方、消費電力は非常に大きくファンレスで動作させることは困難である。組込用として、低消費電力で最大限のパフォーマンスが得られるプロセッサを採用する。 具体的には、2010年秋に TeksInstruments(以下 TI と称す)からリリースされた TMS320C6A8168 をターゲットデバイスとして採用する。このデバイスは MMACS=12000 で浮動小数点演算も可能になっているため、パソコンで開発したシステムの移植が容易であることが期待できる。
FPGA	カメラリンク用に搭載する FPGA では、ある程度カメラから取り込んだ画像の前処理が可能なスペックのものを採用する。本格的に前処理を実施する場合、FPGA にもフレームメモリが必要となるが、今回のシステムでは構成が複雑になりすぎるため、FPGA 単体で処理を行うこととする。
メモリ	YJC-2※の搭載メモリは 64MByte。今回カメラ2台を接続して3次元画像解析を行うことを考慮すると、可能な限りのメモリを搭載するようになりたい。最低でも 512MByte 程度のメモリ搭載を検討する。

※ YJC-2: YOODS 製の2次元画像処理装置

4.2.1.2 外部インターフェイス仕様

表 4.2-1 YJC3 への要求仕様を満足できる YJC-3 の外部インターフェイス仕様を表 4.2-2 にまとめた。

表 4.2-2 YJC-3 外部インターフェース仕様

機能	概要
MPU/DSP	TMS320C6A8168 搭載(ARM Cortex-A8 + C674x DSP) 動作クロック 最大 1.5GHz (試作機は Arm1.2G, DSP1GHz)
OS	Linux
外部記憶媒体	NAND フラッシュメモリ 256MByte SD, マイクロ SD カード
メモリ	DDR3 1GByte(試作機は 512MByte)
カメラインターフェイス	GigE インターフェイス 2ch, CameraLink インターフェイス 2ch ※PoE, PoCL 対応
電源	DC24V
周辺 I/O	<ul style="list-style-type: none"> ・絶縁入力 x8ch ・絶縁出力 x20ch ・シリアルポート x1ch ・USB x2ch, ・トリガ入力, トリガ出力 x2ch(カメラ毎に 1ch) ・エンコーダ(1相) x2ch (カメラ毎に 1ch) ・GigE カメラインターフェイスを使わない場合、イーサネット x2ch, ・入出力状態モニタ用 LED(TRIG, ENC, 絶縁 IO) ・VGA(アナログ RGB) ・DVI ・シリアルコンソール
タッチパネル (オプション I/F)	液晶ユニット 10~12", XGA, タッチスクリーン搭載可能

4.2.1.3 ブロック図

表 4.2-2 YJC-3 外部インターフェース仕様に基づくブロック図を、図 4.2-1 に示す。

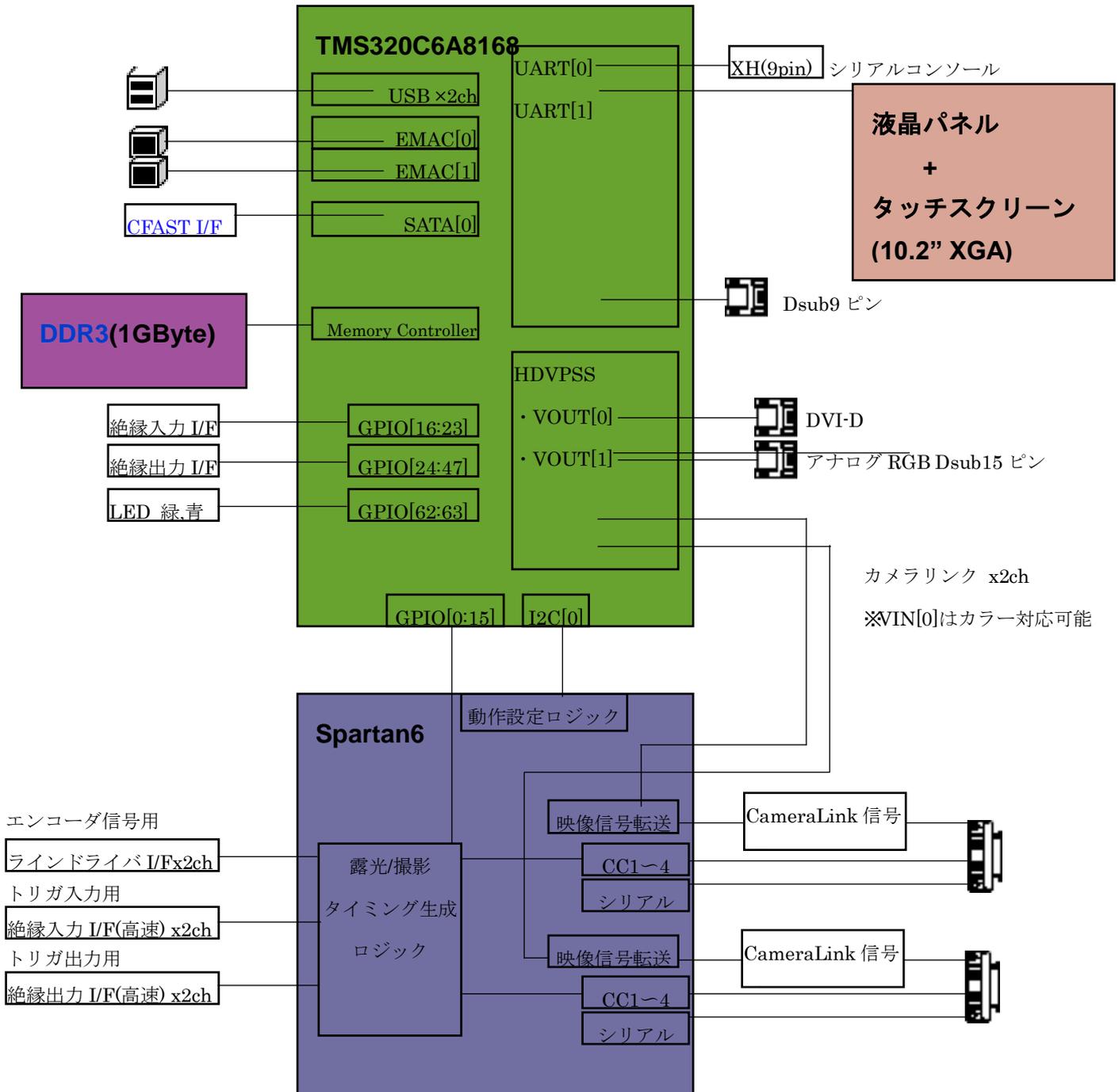


図 4.2-1 YJC-3 のブロック図

4.2.2 FPGA,DSP,CPU の基本ファームウェアの開発

4.2.2.1 FPGA ファームウェア

YJC-3 に搭載した FPGA は XILINX の Spartan6(XC6SLX45)である。図 4.2-2 に示すように、XC6 は複数のデバイスと接続して YJC-3 の中で重要な役割を果たしている。

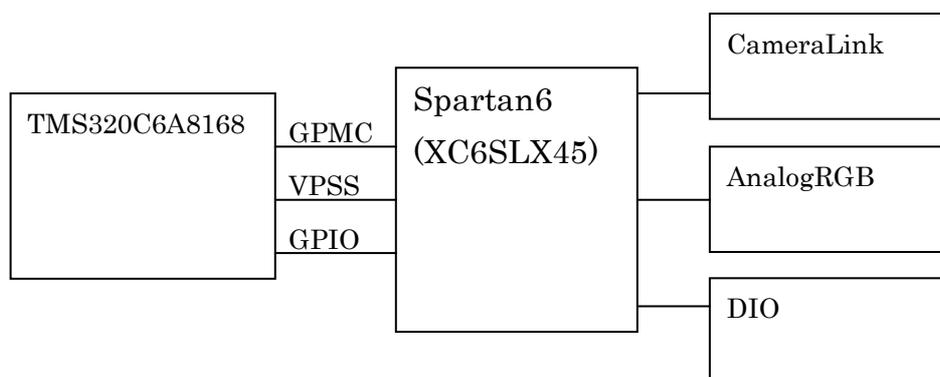


図 4.2-2 Spartan6(XC6SLX45)の接続図

本開発では、XILINX の提供する開発ツール ISE を用いて図 4.2-2 の仕様を満たす回路を VHDL で記述した。

4.2.2.2 GigE Vision への対応

YJC-3 は近年 FA 用カメラでも使用される機会が多くなってきている GigE Vision にも対応できるように、1000Mbps 対応の Ethernet を 2ch 備え、それぞれ PoE(Power on Ether)に対応している。一方、TMS320C6A8168 で GigE Vision を使う為には Linux に搭載されている IP プロトコル実装を用いることになるが、残念ながらカメラメーカーが提供しているドライバは、ほとんどが Windows 用ドライバであり、また Linux 版のドライバが供給されている場合でも x86 CPU 用のバイナリのため、ARM CPU で使うことはできない。

そのため、今回の開発では AIA(Automated Imaging Association)から GigE Vision のプロトコル仕様書入手して、この仕様書にそった実装を行った。この開発により、市販されているほとんどの GigE Vision 対応カメラをメーカー供給のドライバに依存することなく、独自に実装して使うことができるようになった。

4.2.2.3 TMS320C6A8168 の基本システム

(1) ブートローダーの作成

YJC-3 はブートローダーとして U-BOOT を使用する。電源投入後内部 RAM に収めることのできる MLO という必要最小限のブートローダーを起動して、ここで EMIF のコンフィグレーションを実施する。その後、コンフィグレーションされた EMIF に大きなブートローダー(u-boot.bin)を読み込、各種設定を行い、その後、カーネルをメモリに展開してその役目を終了する。今回開発した YJC-3 ではメモリデバイスの種類や容量を実際の設計に合わせて YJC-3 専用のブートローダーを開発した。

(2) カーネルの作成・ドライバの開発

TI から提供されているカーネルソースに YJC-3 用ソースを追加/変更する。実施内容は以下の通りである。

- ・ XC6 に配置したシリアルポート用ドライバ
- ・ XC6 に接続された GPIO 用ドライバ
- ・ SD ドライバのカスタマイズ
- ・ EMAC 2 ポートの初期化

4.2.3 FPGA 最適化ロジックの開発

YJC-3 に搭載する FPGA では、Cameralink 仕様のカメラ映像を、3次元画像認識処理を行う MPU/DSP へ受け渡すために、画像フォーマットを変更すると共に、画像認識処理の前処理として必要とされる画像処理を行う。本システムで必要とされる画像処理としては、「ノイズ除去」や画像の特徴点認識の精度を高めるための「エッジ強調」、レンズなど光学系の歪みを取り除く「アフィン変換」である。

本研究開発では、これらの前処理について、YOODS 製 2次元画像処理装置 YJC-2 を用いて検証した。YJC-2 は 2次元画像処理装置であるが、YJC-3 の開発と平行して FPGA による前処理を検証する必要があるため採用した。尚、搭載している FPGA のロジック規模は違うが、開発したロジックの動作検証には支障がないことを確認している。

Cameralink は、24bit の画像データと 4bit のステータスビットを合わせた 28bit の信号を 4 本の LVDS チャンネルで送信する。本研究開発で検討するモノクロカメラ STC-CL152A/CL33A (センサーテクノロジー社製) では、4 本の信号 (X0, X1, X2, X3) と 1 本のクロック信号が出力される。データビットを抽出するためには、クロック信号 (XCLK) を 7 逓倍する必要がある。画像データのシフト回路とクロックの逓倍回路を含むロジックを FPGA に実装する必要がある。これらのロジックは最適化の必要がないほど単純で、更に YJC-2 に TI 社製パラレル変換チップ DS90CR288A が搭載されていることから、本研究課題での検証ロジックには加えなかった。

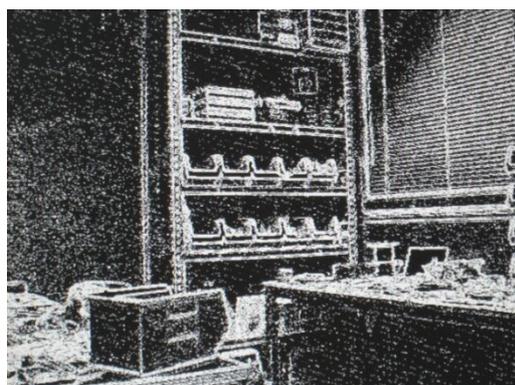
検証ロジックでは、映像入力に対してリアルタイムにエッジ強調処理を行い、MPU/DSP へ出力するため、FPGA の内部 RAM を用いたライン・バッファによる画像処理を行うことにした。

エッジ強調は、画像の濃度値が本来は急変しているべき輪郭の部分などで、濃度値の変化が緩やかになっている (=輪郭がぼやけている) 場合に、濃度値の変化を強調する処理である。これは袋状製品の荷積み状態により、画像認識面が奥行き方向に約 700mm の違いが出る本システムにおいて、カメラの焦点距離との関係から輪郭がぼやけた画像が得られた場合に、3次元認識処理時の特徴点の抽出精度を高めるために有効である。

図 4.2-3 に 3×3 フィルターを用いた画像処理例を示す。



(a) 原画像



(b) 処理画像

図 4.2-3 3×3 フィルターによるエッジ抽出処理

ライン・バッファを用いると、厳密には入力画像に対して FPGA から出力される画像は 2 ライン分の遅れが発生することとなるが、Cameralink の画像出力が 30 フレーム/秒であることから、リアルタイムに画像処理可能である。

4.2.4 袋状製品認識ロジックの YJC-3 への実装

測定ロジックの処理手順は以下のようになる。

1. キャリブレーションパラメータ(焦点距離・レンズの歪み等の内部パラメータ及び、カメラの位置や姿勢の外部パラメータ)を推定
2. キャリブレーションパラメータより、平行等位化(Rectification)パラメータを導出.平行等位化を行うとカメラの画素の並びにエピポーラ線が並び、対応点探索が容易になる.
3. 平行等位化パラメータを利用して、撮像画像に対して平行等位化を行う。
4. 左画像上の画素に類似度の高い画素を右画像上から探索する。
5. 得られた視差(左画素に対する右画素のずれ)から奥行きを計算し、カメラを基準とする 3 次元位置情報を取得する。
6. 位置情報から、袋状物体の中心位置、傾きを推定する。
7. 推定された位置、傾きをロボット座標系に変換する。
8. ロボットに対し、移動の命令を出力する。

上記の処理過程において、SIMD 等の積和演算が多数使用されるのは、処理 3, 7 であるが、最も処理時間を要するのは、ステップ 4 である。実時間処理を行うには 4 の高速化が望まれる。

これらのロジックを実行するプログラムを作成した。但し、処理 1 は今回、Windows のアプリケーションとして提供されたので、実装はしていない。

4.3 マテリアル・ハンドリング用装置(ロボット)の開発

4.3.1 ロボット本体

開発したロボットは、あらかじめ決められた位置に、セットされたパレットまたは専用のケースに収納された袋状のワークを、人手を介すること無く自動的に単品で取り出すことを目的とするロボットである。3次元視覚認識システムから送信される袋状積載物の重心の3次元位置情報、面角度の情報などからピッキング・搬送をおこなう。先端部に4.3.2で別途開発設計を行うロボットハンドを取り付ける。

ロボットハンドは概ね30kg程度、袋状積載物重量は20kg程度であるためロボットは50kg以上の可搬性能及び6軸を有することが必要となる。また袋状積載物を格納するパレットサイズが1,800mm×1,600mmであるため、必要な最大リーチが最小2,500mmが必要である。以上の条件を元に検討した結果、安川電機製ES165Dを採用した。図4.3-1参照のこと。仕様については表4.3-1に示す。

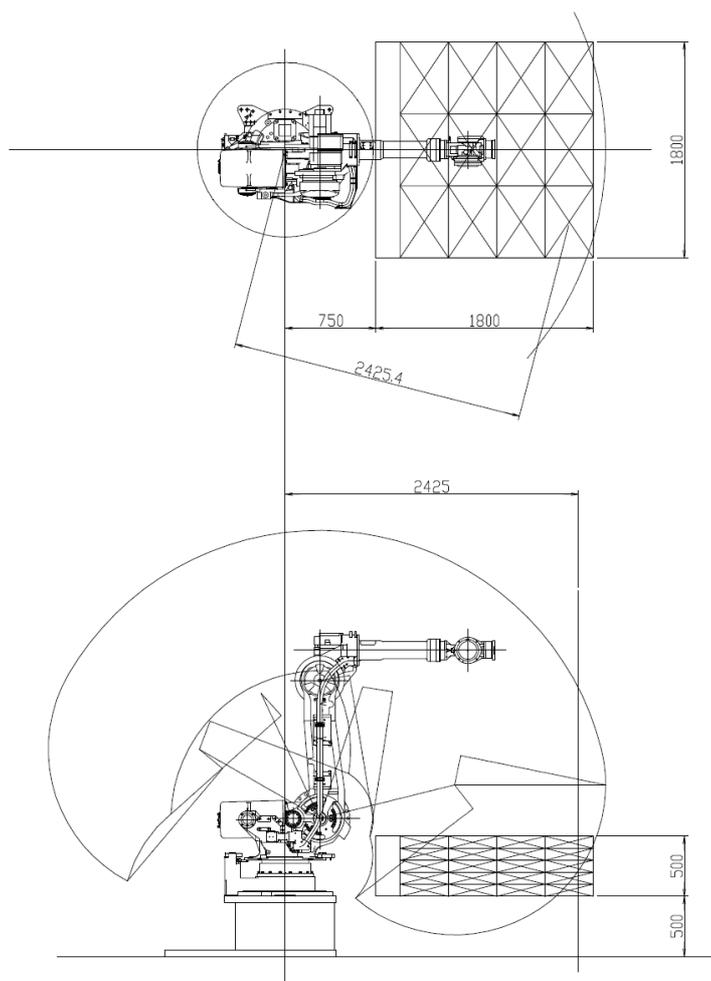


図 4.3-1 ロボット選定における動作エリアの確認

表 4.3-1 安川電機 ES165D 仕様

名称	MOTOMAN-ES165D	
形式	YR-ES0165D-A00	
構造	垂直多関節形(6 自由度)	
可搬質量	165kg[151.5kg] ^{*3}	
繰り返し位置決め精度 ^{*1}	±0.2mm	
動作範囲	S 軸 (旋回)	±180°
	L 軸 (下腕)	+76° ~-60°
	U 軸 (上腕)	+230° ~-142.5°
	R 軸 (手首旋回)	±360° [±205°] ^{*3}
	B 軸 (手首振り)	±130° [±120°] ^{*3}
	T 軸 (手首回転)	±360° [±180°] ^{*3}
最大速度	S 軸 (旋回)	1.92rad/s, 110° /s
	L 軸 (下腕)	1.92rad/s, 110° /s
	U 軸 (上腕)	1.92rad/s, 110° /s
	R 軸 (手首旋回)	3.05rad/s, 175° /s
	B 軸 (手首振り)	2.62rad/s, 150° /s
	T 軸 (手首回転)	4.19rad/s, 240° /s
許容モーメント	R 軸 (手首旋回)	921N・m [868N・m] ^{*3}
	B 軸 (手首振り)	921N・m [868N・m] ^{*3}
	T 軸 (手首回転)	490N・m
許容慣性モーメント (GD ² /4)	R 軸 (手首旋回)	85kg・m ² [83kg・m ²] ^{*3}
	B 軸 (手首振り)	85kg・m ² [83kg・m ²] ^{*3}
	T 軸 (手首回転)	45kg・m ²
本体質量		1100kg
	温度/湿度	0~+45°C/20~80%RH (結露なきこと)
	振動	4.9m/s ² 以下
設置環境		・引火性及び腐食性ガス・液体がないこと
	その他	・水, 油, 粉じんなどがかからないこと ・電氣的ノイズ源が近くにないこと
電源容量 ^{*2}	5.0kVA	

4.3.2 ハンドの開発と設計

4.3.1 のロボットの先端に取り付けるハンドの開発と設計をおこなった。ハンドリングの対象となる袋状積載物は図 4.1-2 において仕様を示すとおりである。袋状積載物は剛性の高いワークと異なり積載状態で変形、不定形である場合が通常である。またハンドリングする際に袋の内容物が移動しさらなる変形や、重心移動により動作が不安定となることを前提とする必要がある。

袋状積載物のハンドリングに求められる要求機能は整理すると以下のとおりである。

- (a) 袋状積載物を持ち上げる際には、袋を傷つけることなく落下などさせない。
- (b) 袋状積載物を移動させる時は、内容物の移動の影響を排除し安定して移動できる。
- (c) 高速のハンドリングができる。

以上の要求仕様を満たす袋状積載物用のハンドを開発、製作するために試作ハンドを製作評価し最終的に要求仕様を満たすハンドが製作できた。表 4.3-2 に試作ハンドの経過を示す。

表 4.3-2 試作ハンドの経過

試作ハンド形式	試作の目的	試作結果の評価	対応
試作ハンド1 	1 袋状積載物重量 10kg を持ち上げるための吸引力の測定。 2 袋状積載物表面の凸凹に追従できる吸着構造の決定（スポンジ密着）	1 面の吸着を行うためには側面のシール確保が吸着性能に大きな影響がある。 2 袋表面の凸凹の追従性が面スポンジでは不十分である。	スポンジによる吸着は採用不可
試作ハンド2 	1 袋吸着用 PAD の評価（ドイツ Schmalz 社）	1 吸着 PAD の吸着性能、シール性能、追従性は使用可能である。 2 吸着による袋包装材へのダメージについては包装材料によるが今回のシリコン袋では傷など問題は発生しなかった。	吸着 PAD を採用する。 設計上の吸着力は 480N 安全率 5。
試作ハンド3	1 実ワークによる吸着性能の確認 2 材料積載状況と吸着性能の確認	1 対象袋状ワークの移載に十分使用できる。 2 積載状況の移載確認を行い機能上の問題はないと判断できた。	PAD の配置による安定吸着を行うため中心部と周辺部

			<p>で高低差をつけることが有効である</p>
<p>試作ハンド4</p> 	<p>1 袋吸着後のロボットハンドの高速移動時に、安定して袋を把持できるアームを追加する。</p>	<p>1 アームによる把持は高速移動において有効である。 2 ハンドの袋状積載物へのアプローチ時において、アームの隣接ワーク及びパレットとの干渉が問題である。</p>	<p>実運用時にアームの干渉を十分配慮する。</p>

試作ハンド4において、対象とする袋状積載物の移載は安定してかつ高速の動作が可能であることが確認することができた。また、袋を吸着し把持することで縦に保持することもわかった。このことは今後、ロボットハンドに袋の開梱機構を取り付けることで、ハンド上での袋の開梱と、ホッパーなどの容器への直接投入が可能である可能性があると考えられる。袋状積載物のハンドリングがより機動的でコスト的に有利となるため、実戦的な適用に期待が持てるものと判断する。

4.3.3 製作、組立、試運転

試作機としてロボット・ハンド・移載部における付帯装置の製作を行った。図 4.3-2 にレイアウト図を、図 4.3-3 に試作した装置外観を示す。製作後、単体検査・組み立て作業を行ない、芯出し据付を実施した。

上記作業の後、単体システムの試運転確認を実施した。ロボットの機能確認とハンドの機能確認を、定格重量における安定性と変形ワークに対する動作の確認を行った。この後、3次元画像処理と連動調整を開始し、接続試験・精度確認を行った。

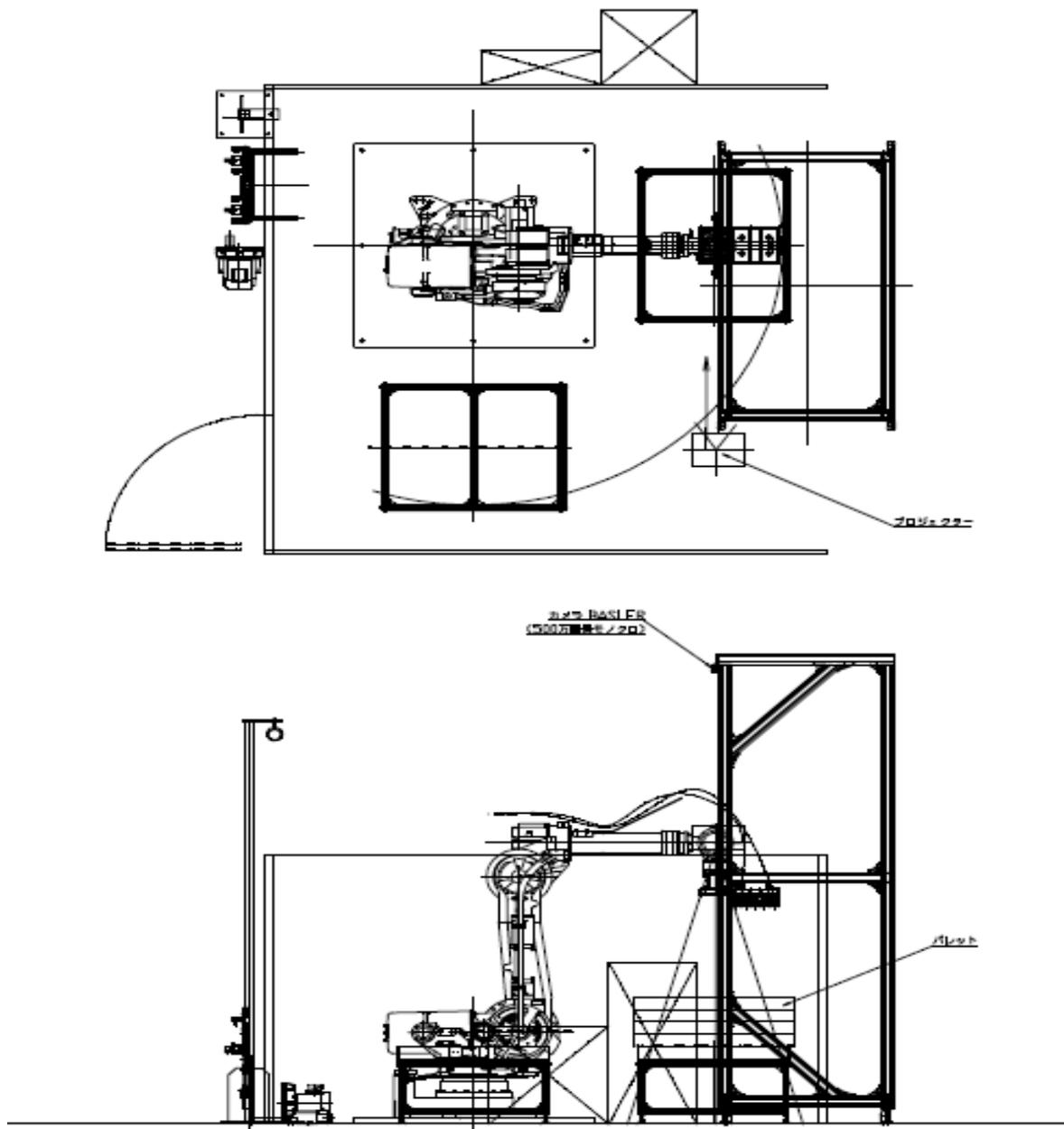


図 4.3-2 レイアウト図



図 4.3-3 試作装置外観

4.4 実機検証テストとシステム性能の改善

図 4.4-1 に本システムの実機検証試験の流れを示す。以下にそれぞれの個別の作業を示す。

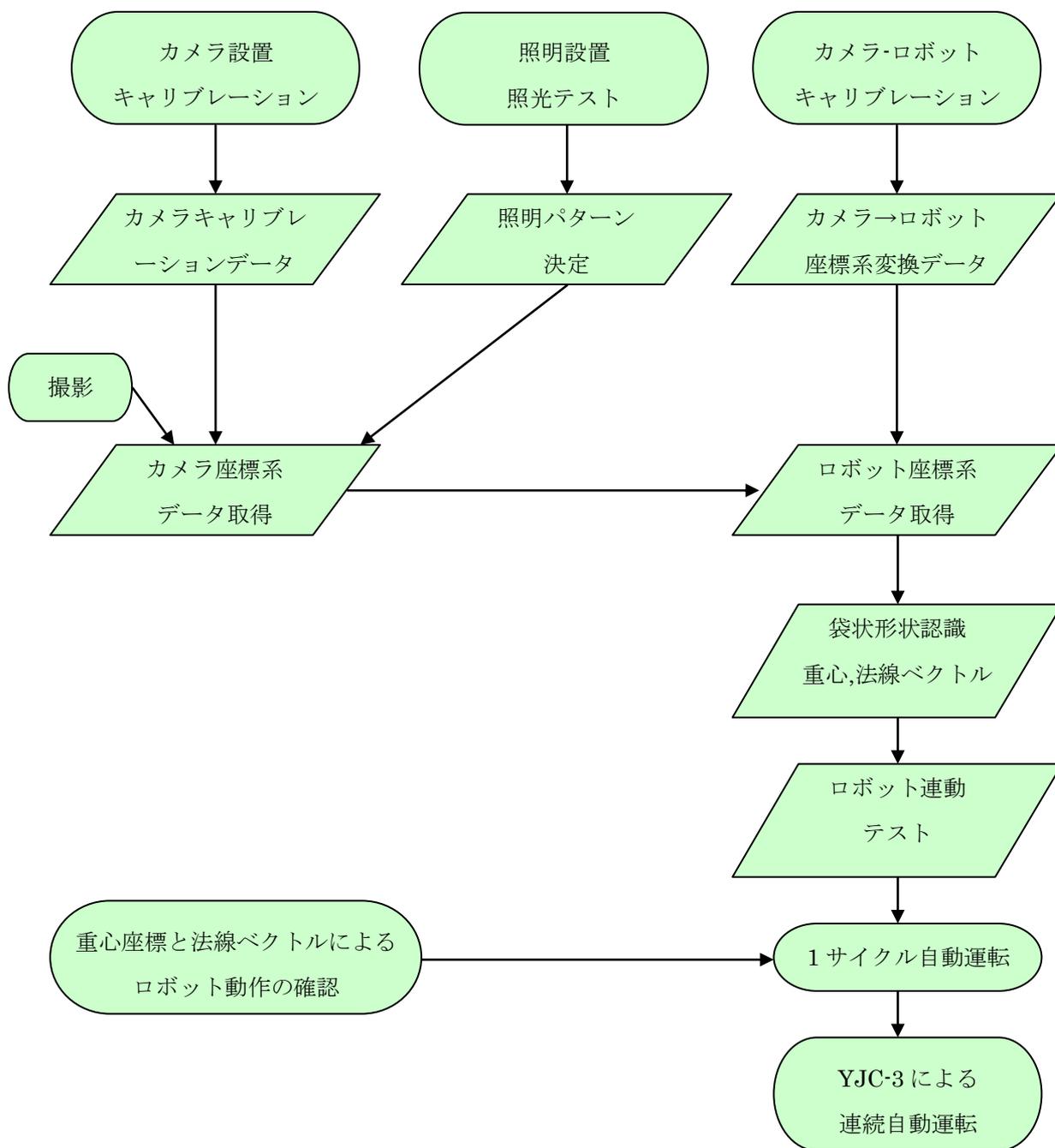


図 4.4-1 実機検証テストの流れ

4.4.1 カメラ・照明のセッティングとカメラ-ロボットのキャリブレーション

4.1 で述べたようにこのシステムでは、製品の外観により製品に照射する照明を選定する必要がある。カメラの分解能と設置位置，照明の位置と種類を実際の製品の種類や状態に合わせて、いくつか試しながら、最適なセッティングを求める。また、外乱による精度の変化等についても検討を行う。

1) カメラの設定

(1) ワーク架台、カメラ架台の寸法及び位置関係(図 4.4-2)

- ・ワーク架台 全長 1146.4mm
幅 946.4mm
高さ 580mm (ワーク置き底は 476mm)
- ・カメラ架台 全長 2000mm
幅 1100mm
高さ 3500mm

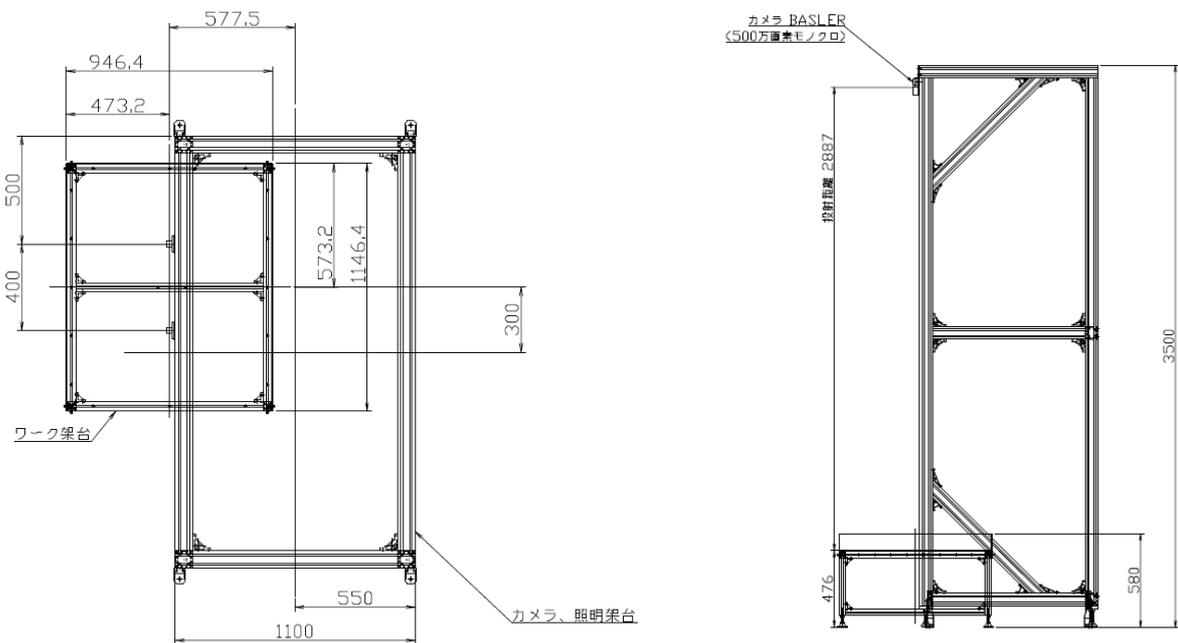
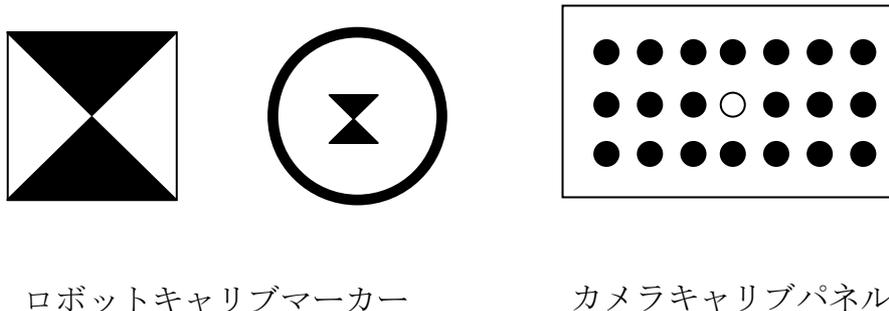


図 4.4-2 ワーク及びカメラ架台

(2) 使用機器

- ・使用カメラ Basler (500 万画素) × 2
- ・照明装置 NEC NP-M350XSJ
- ・その他使用機器 キャリブレーションマーカークャリブレーションパネル



ロボットキャリブマーカークャリブレーションパネル

カメラキャリブパネル

図 4.4-3 ロボットキャリブマーカークャリブレーションパネル

(3) カメラ設定

- ・2つのカメラの設置

2つのカメラをワークの中心より設置

- ・カメラキャリブレーション

キャリブレーションパネルをワーク架台に置き、ワーク視野をカバーするように2つのカメラの位置関係を調整する。パネルをある高さから、左カメラ向き、右カメラ向き、水平、左傾、右傾、上傾、下傾の状態時をカメラで撮影し、開発したカメラキャリブレーションソフトウェアにより、カメラの焦点距離、歪み補正等の値を求める。(外部パラメータと内部パラメータの決定)

- ・ロボットーカメラキャリブレーション

ロボットハンドに取り付けたキャリブレーションマーカークャリブレーションパネルをある高さへ配置し、ワーク架台中心から縦、横方向にそれぞれ同距離の位置へ移動させそれぞれカメラで撮影する。この撮影画像とロボット位置情報を入力として、開発したロボットーカメラキャリブレーションソフトウェアにより、カメラ座標系とロボット座標系の変換行列を求める。以上により撮影した画像から3次元復元した結果をロボット座標系に変換し、送ることが可能となる。

図 4.4-4 にテスト実験におけるキャリブレーション位置を示す。

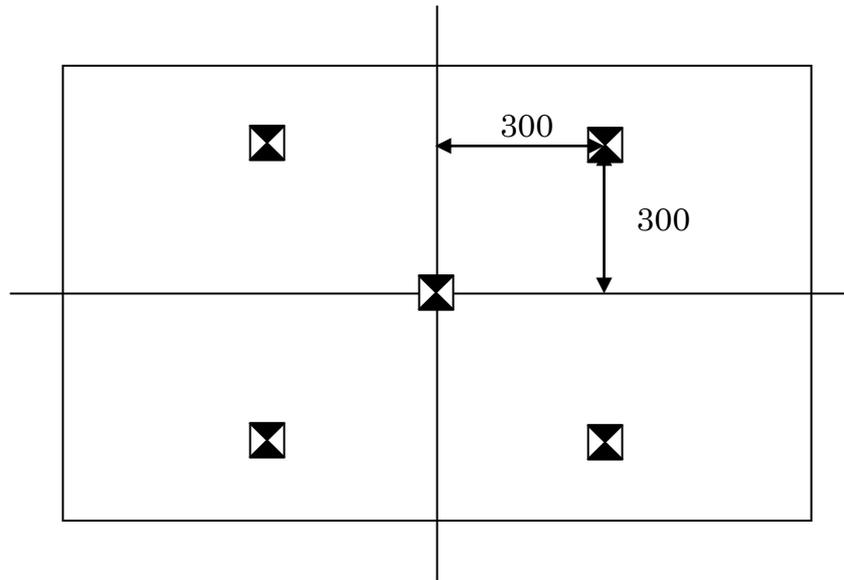
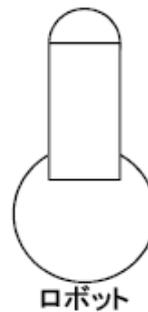
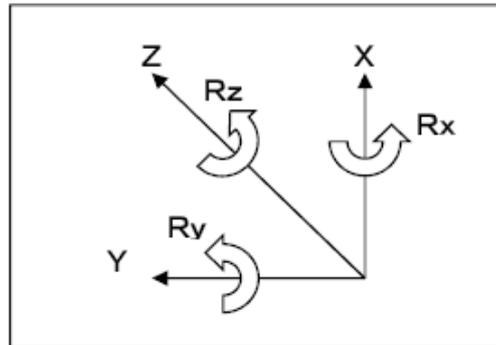


図 4.4-4 テスト実験でのキャリブレーション位置

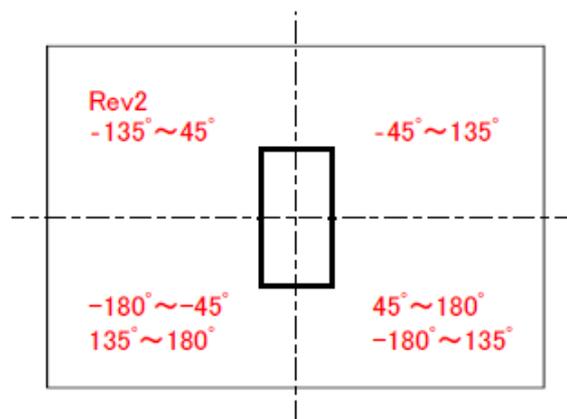
下図にロボットとの座標系の基本的な設定条件を示す。

1. 座標系



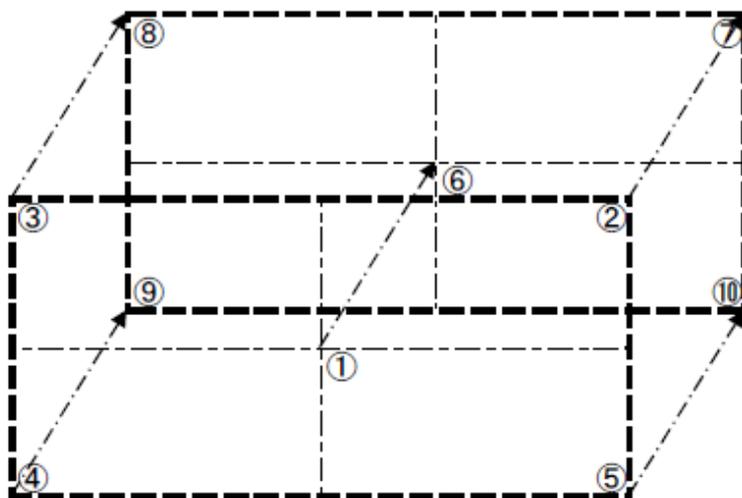
- ※X軸はロボットから離れる方向をX+とする
- ※Y軸はロボットの左方向をY+とする
- ※Z軸は上昇方向をZ+とする
- ※X, Y, Z軸の右ネジ方向をRx, Ry, Rzの+方向とする

2. 基準ワーク



- ※底面の中心部でのワーク取出を全て0(0,0,0,0,0)の基準とする
- ※この基準位置よりずれた量をカメラよりデータの書込みを行う

3. キャリブレーション



上記①～⑩の位置にロボット先端に取り付けたマーカーを移動し、カメラ座標を決定する。

4.4.2 実動作テスト

実際に、パレットに積載された袋状積荷を搬送ロボットでとり出すことができるか、動作確認試験を行う。座標や形状の検出精度と最適化と、搬送ロボットのハンドや取出方法の最適化を行い、実用に耐えられる性能が発揮できるかどうかを確認する。実現した実動作については添付の動画において示す。対象の袋状積載物の画像認識についていくつかのパターン結果を示す。これらの認識結果に基づき自動移載が可能である。

4.4.2.1 段積み

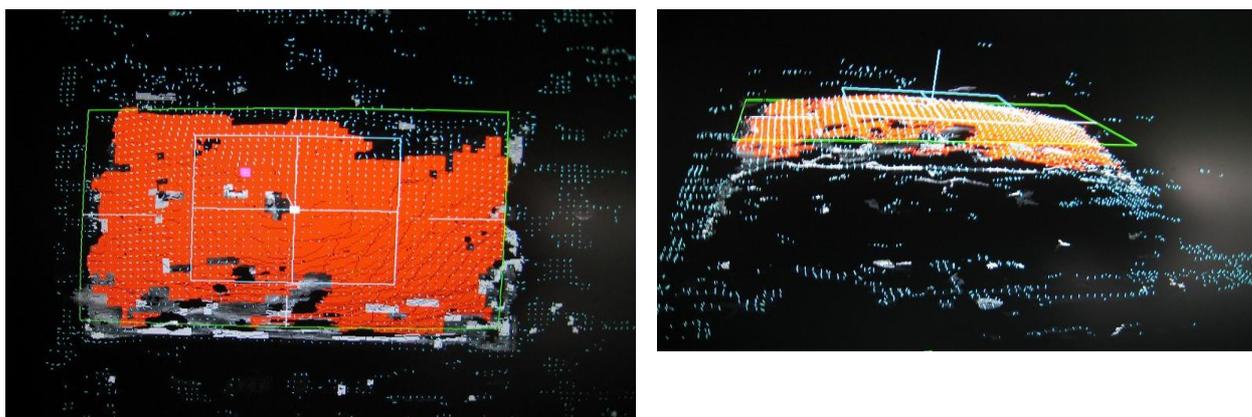


図 4.4-5 対象物が 1 つの場合の認識例

最初に最も単純なパターンでの認識を行った(図 4.4-5)。緑色の線が事前にセットしてある袋の外形寸法で、水色の枠の中心が検知した袋の重心位置で、水色の枠はその重心位置を含む面の法線ベクトルを計算する領域になっている。

この結果では、袋のほぼ全域を認識して、法線も正しく検出していることがわかる。実際にこのデータからロボット座標系に変換した重心位置と法線ベクトルデータを、ロボットに送信して、ロボットハンドによる搬出動作を確認した。また、一回の撮影→袋認識データの出力に必要な時間は約 10 秒であった。これは Core i7 プロセッサ搭載の PC を使った結果である。

4.4.2.2 重なりあった袋状積載物

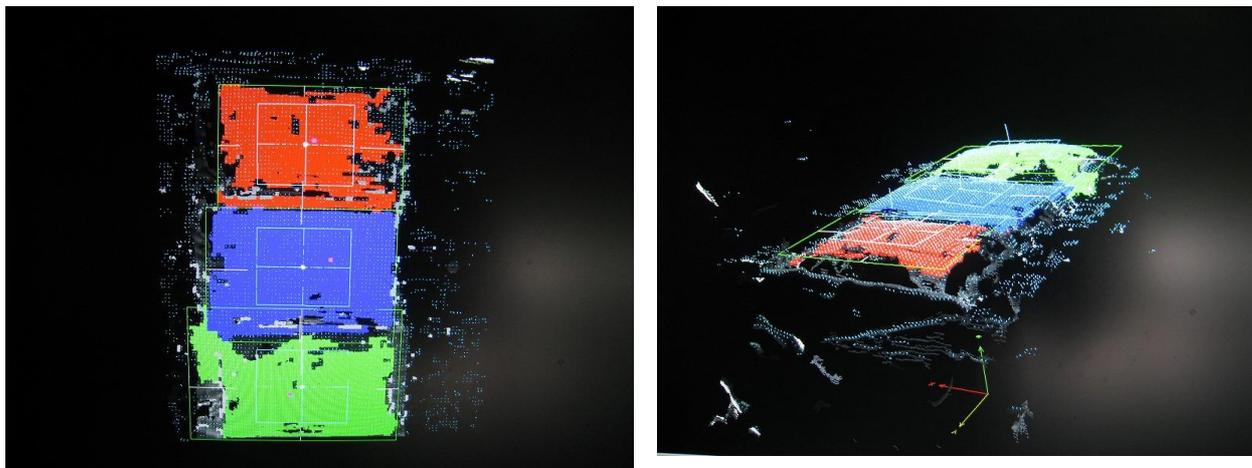


図 4.4-6 対象物が重なり合った場合の認識例

図 4.4-6 に、袋が重なり合った場合の認識結果を示す。ここでは緑で着色された袋の一部が青い袋の下にもぐり込んでいるため、ロボットハンドで吸着しても搬出できない可能性が高い。このようなケースでは、緑色に着色された部分が袋の面として認識できているものの、事前にプリセットした袋の形状と比較して欠けが大きく、他の袋と重なっていると判断して、この袋を搬出対象としない。

このケースの場合でも、以下の流れ出袋を認識するため、最終的には3つの袋が問題なく搬出される。

- (1) 最も凸部の座標が高い位置にある赤い袋を搬出する。
- (2) 赤い袋が無くなった状態の画像を再度撮影して、再度袋認識のロジックを起動する。
- (3) 緑の袋は青い袋の下に入っているため、青い袋を搬出する。
- (4) 緑の袋だけになった状態で再度撮影→袋認識のロジックを実行
- (5) 緑の袋は完全に表に出ている状態のため、問題なく搬出される。

4.4.2.3 ランダムに積まれた袋状積載物

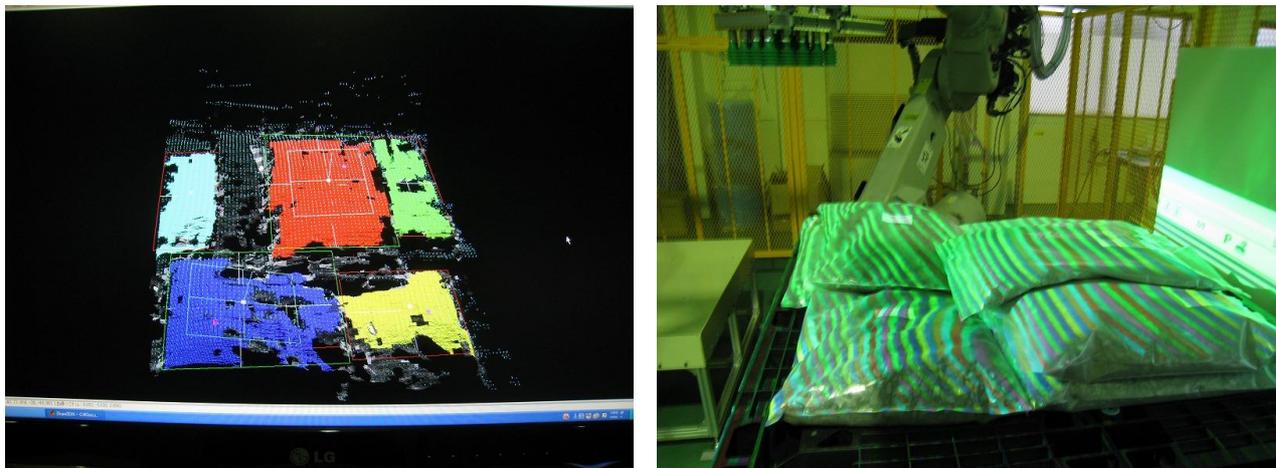


図 4.4-7 対象物が重なり合った場合の認識例

最後に船積みで輸入された袋の実際の状態に近い荷姿にして、搬出試験を行った。この状態を図 4.4-7 に示す。3次元解析された解析画面と写真の画面が 90° ずれている。このような状態でもすべての袋が問題なく搬出されることを確認できた。

4.4.2.4 YJC-3 による動作テスト

開発した袋状製品認識ロジックと座標変換ロジックを YJC-3 に搭載して、YJC-3 からロボットシステムに計算結果を出力できるようにした。YJC-3 のメモリ不足のため DSP で相関計算ができないため ARM 側の neon を使った。メモリ不足は画像処理プロセスにも影響して、一連の動作をオンメモリで処理できなかったため、当初計画していたパフォーマンスが発揮できず、画像サイズを 1/4 にして対応したが、それでも撮影→解析のタクトタイムが 20 秒程度必要になった。

連続動作テスト時に、この画像解析処理時間を吸収して連続的に動作させるため、ハンドがひとつの袋を搬出するタイミングで、撮影を実行して次に搬出する袋を求める作業に入るように、1 サイクルのプロセスを調整することにより、ロボットはほとんど停止することなく連続的に袋を搬出できることを確認した。

実際のシステムでは、YJC-3 に搭載するメモリを 1GByte 以上として DSP の能力をフルに活用できるようにすることにより、袋認識に必要な時間を半分以下に短縮できる。

5 まとめ

本研究開発では、各種製造業や流通業における、袋状積載物の原料運搬・投入等の3K 業務を主体とした作業者の労働環境を改善する生産システムの実現を目指し、専用ハードウェアの上に組込んだ実時間3次元視覚認識ソフトウェア技術とロボットハンド技術により、マテリアル・ハンドリング技術を高度化し、従来自動化が困難であった不規則形状物体に対する自動ピッキング、移載技術を確立した。

本研究開発の成果は、大きく分けて以下の項目となる。

- 1) 3次元視覚認識による袋状製品の認識
- 2) 組込型3次元計測装置の開発
- 3) 袋状製品のハンドリング用ハンドの開発

以下に各項目の結果を示す。

5.1 3次元視覚認識による袋状製品の認識

本事業での3次元視覚認識では、半透明で柔軟な袋物が積層された荷積み状態を対象として、照明等の撮影条件に左右されずに、袋の正確な位置・姿勢を必要な精度で取得し、ロボット側に必要な形式（座標、角度）に変換する必要がある。そこで、以下の開発を実施し、それぞれ目標を達成した。

- ① パターン投影を用いたステレオ撮影による3次元位置測定システムの開発
- ② 3次元測定データと撮影画像から物体の位置・姿勢を検出する袋物検出アルゴリズムの開発
- ③ 物体の位置・姿勢情報をロボットで使える座標系の値に変換し、ハンドリングに用いるために、カメラ座標からロボット座標への座標変換行列を求めるキャリブレーションシステムの開発

以上の開発により、対象となる積載された袋状製品を撮影した画像データから、事前に算出した各種キャリブレーション情報を用いて、計測、認識を行い、検出された位置・姿勢情報をロボットへの指示データに変換するソフトウェアおよびパターン投影ステレオ撮影システムを実現した。なお、本ソフトウェアは、次節の組込型3次元計測装置に実装可能なアルゴリズムとして設計、開発した。

本システムでは、事前の知識情報としては、袋の概略サイズのみである。これに対し、従来の大半のロボットは、予めロボットにティーチング（動作の教示と記憶）して、ロボットはその決められた動作の繰り返しを実行していた。しかしながら、このティーチング作業は専門の技術者のみで可能で、作業時間も無視できない。また対象

物の位置、形状、種類が変わった時は、再度のティーチングを行わなければ使用できないなど不都合が多く見られた。本研究でハンドリングの対象とした袋状積載物は事前に位置や形状を決めることができない。このような比較的自由度の高い対象物に対しても、ティーチングレスが実現可能となった。また、現在市販され使用されている画像認識技術は、大半が事前に決められたパターン・モデルとの照合を行い、対象物を認識している。パターン・モデルデータとしては、2次元データ、3次元データのいずれの場合もパターン・モデルと対象物の撮影画像データ、計測データとの相関を演算し最も近い相関を判定している。しかしながら、袋状積載物は不定形であり、変形するため事前にパターン・モデルを設定できない。(無限にパターンがある。)袋状積載物は従来の画像認識手法では対応できない。今回の対象物の特性を考慮したアルゴリズムにより、従来の画像認識技術を革新し、実動作を実現できた。このようなアプローチを基に対象物の特性情報とそれに適したアルゴリズムをデータベース化しておくことで、袋に限定されない電線やゴム部品など柔軟物のハンドリングも自動ハンドリングの対象の視野に入れることが可能となると確信する。

5.2 組込型 3次元計測装置の開発

組込型 3次元計測装置については、これまで圧倒的なパフォーマンスを持つインテル系 CPU を搭載したパソコンが使われてきた 3次元ステレオ相関計算処理に、ARM/DSP コアを適用して、ファンレスの組込型システム「YJC-3」を完成した。

従来の 3次元計測システムは、カメラ部分だけは組込型でも解析はパソコンで実行していた。元々 OA 用に開発されてきたパソコンロボット制御等の産業用途に用いることは、長期間安定的に動き続けるという要求を満たすことができず、また故障した場合等に代替機を用意することが難しい。今回開発した YJC-3 は、ファンレスでかつ低消費電力で動作するので発熱が少なく、パソコンを使った場合に発生しやすい故障が発生しにくい。その一方で、DSP を搭載することにより低消費電力にもかかわらずパソコンに近い計算速度が得られ、同じコアに搭載された ARM CPU によりパソコンに近い外部インターフェイスを提供している。

YJC-3 は実際に産業組込用途に使えるように、外部インターフェイス機能を考慮して設計している。画像インターフェイスは、現在主流の CameraLink と今後主流になると思われる GigE Vision のいずれにも対応し、周辺機器とのインターフェイスとしてシリアル、DIO、3次元認識用パターン照光用のディスプレイポートも備えており、この形を原形としながら、より小さな組込用画像解析システムにも対応できる。

今回、予測していなかったメモリ不足により YJC-3 のパフォーマンスをフルに活かすことができなかったが、今後、YJC-3 の内部に組み込む 3次元画像解析システムを、よ

りシェイプアップして、高速かつ低消費電力の組込システムとして完成させていく。

5.3 袋状製品のハンドリング用ハンドの開発

ロボットによる安定した袋状製品のハンドリングに適した専用のハンドを開発することができた。袋状製品を傷つけることなく、安定して高速にハンドリングが可能となった。特に本研究におけるハンドの特筆する項目は以下のとおりである。

- a) 袋状製品のハンドリングに適した吸着 PAD の選定と上下差をつけた配置、分割チャンバーなどを考案し実現した。
- b) 吸着後の移動時の安定性を確保するために機械的把持機構を装備し、移載の高速化を実現した。

この機械的把持は、今後袋状製品の立て起こしを可能としハンド上での開梱自動化、内容物投入を他設備を設けることなくホッパーなどへの投入を行うことなど将来への期待がおおきい。

5.4 本事業で試作した機器概要

本事業で試作したシステムの全体図を図 5.4-1 に示す。製品化が期待出来るものは次の通りである。

(1) ロボットハンドリングシステム

不規則に配置されている個々の袋状積載物を認識し、袋状積載物に適したロボットハンドによるハンドリングをティーチングレスで行う。

(2) 画像処理装置 (YJC-3)

今回試作した 3次元認識を行うことが出来る画像処理装置で、2台のカメラ接続が可能。また、従来の画像処理装置(YJC-2)に比較し、高速化を図った。



図 5.4-1 本事業で試作したシステム