

平成２２年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「石油プラント危険作業代替ロボット組込ソフトウェアに係る開発」

研究開発成果等報告書

平成２３年 ９月

委託者 近畿経済産業局

委託先 知能技術株式会社

目 次

第1章 研究開発の概要.....	1
1－1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	1
(1) 研究の目的.....	1
(2) 研究の概要.....	1
(3) 実施内容.....	1
1－2 研究体制.....	4
(1) 研究組織及び管理体制.....	4
(2) 管理員及び研究員.....	5
(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名.....	6
(4) その他.....	6
1－3 成果の概要.....	7
1－4 当該研究の連絡窓口.....	8
第2章 本論.....	9
2－1 画像処理用機器選定.....	9
(1) 粉塵を模擬した装置の製作.....	9
(2) 様々な画像処理用機器の粉塵に対する性質.....	9
(3) 実際の反応炉で使用できるセンサーの選定.....	11
2－2 ステレオカメラと画像処理の組み合わせ.....	12
(1) ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの開発.....	12
(2) ステレオカメラを用いた物体の判定.....	16
2－3 ステレオカメラとライトを使った位置測定.....	17
(1) LED 光源3次元位置認識ソフトウェアの開発.....	17
(2) ステレオカメラによるLED パネルの傾斜角の測定精度.....	20
2－4 TOF カメラと画像処理の組み合わせ.....	21
(1) TOF カメラによる測距精度の測定.....	21
(2) TOF カメラによるロボットの位置認識と距離認識.....	21
2－5 移動中の位置と障害物までの距離表示のための動画処理と地図データとのリンク.....	23
(1) 地図データと連動したロボットの位置表示.....	23
(2) ロボットの真の位置と地図上での位置.....	26
2－6 機構製造.....	28
(1) 基本設計.....	28
(2) 防爆構造の検討.....	28
(3) 機構製造.....	30
最終章 全体総括.....	31

図 目 次

図 1	透明、粉塵アクリル板の透過率測定の実験装置	9
図 2	可視光カメラによる物体の判定実験の装置	10
図 3	粉塵アクリル板を使用した際の可視光カメラによる物体の判定実験の結果	10
図 4	ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面処理フロー	13
図 5	ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの内部処理フロー	14
図 6	完成したステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面イメージ	14
図 7	ステレオカメラによる距離の測定結果	15
図 8	ステレオカメラを用いた物体の判定の実験装置	16
図 9	LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの画面処理フロー	17
図 10	LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの内部処理フロー	18
図 11	LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの画面	19
図 12	ステレオカメラによる LED パネルの傾斜角の測定実験の装置	20
図 13	TOF 式赤外線カメラ測距精度測定実験の装置	21
図 14	TOF カメラによるロボットの位置認識と距離認識の実験装置	21
図 15	地図データと連動したロボットの位置表示の実験装置	24
図 16	地図データと連動したロボットの位置表示の実験結果 1	24
図 17	地図データと連動したロボットの位置表示の実験結果 2	25
図 18	ロボットの真の位置と地図上での位置の実験結果 1	26
図 19	ロボットの真の位置と地図上での位置の実験結果 2	27
図 20	機構の外形設計図	28
図 21	完成した機構の外観	30
図 22	機構の制御画面	30
図 23	モックアップにおける走行試験の様子	30

表 目 次

表 1	ステレオカメラの製品仕様	12
表 2	ステレオカメラによる距離の測定結果	15

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) 研究の目的

製油所の設備内の作業環境は、揮発性油や水素など爆発の危険性がある物質が多い上、それら物質による爆発・火災を防止するために窒素を充填させ無酸素状態を作っている場所も多い。さらに本研究で対象としている脱硫反応炉（以下反応炉）は、上記条件に加え、粉塵が立ちこめる悪環境である。

このような過酷な環境下の苦渋作業を代替する日本初の「製油所内の防爆移動式作業ロボット」の研究を、知能技術株式会社では 2009 年度から JX 日鉱日石エネルギー株式会社、石油精製設備メンテナンス企業 2 社と共に行ってきた。本研究では、ロボットの最重要課題である①人が入れない危険な環境でロボットに自動的に作業させるために、粉塵の立ちこめる中で 3m 先の物体を判別できる「センサー」と連動した「組み込みソフトウェア」の開発、②そのソフトウェアによって作業をする「ロボット機構」開発を JX 日鉱日石エネルギー株式会社の知見を得ながら行うことで、これまで人が行ってきた人命にかかわる過酷な作業の廃止と、少子高齢社会における苦渋作業のロボットへの代替及び「触媒」を回収し有効利用することを目的としている。

(2) 研究の概要

石油化学プラントは全国で 2,000 箇所を数える。プラントの作業は、揮発性物質やガスなどを使用しているため人命に関わる危険で過酷な作業も多い。作業員を危険・苦渋作業から解放するための無人作業ロボットの導入が望まれている。

本計画は、日本初の製油所用防爆移動式作業ロボットの開発を行う。特に、暗く狭い反応炉内の作業を安全に行うための各種センサーと組み合わせロボット操縦支援組み込みソフトウェア開発を行う。

(3) 実施内容

1) 画像処理用機器選定

知能技術株式会社は、粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で使用できるセンサーとして、可視光および可視光以外の波長域に感度を持つカメラなど複数の画像処理用機器を候補に挙げ、その中から選定した機器を購入する。また、優れたデータを得るために、知能技術株式会社は実験用装置としてセンサー試験用暗箱を購入する。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーはセンサー試験用暗箱内で粉塵を模擬した装置を用いて、画像処理用機器が 3m 先の物体を判定できるかどうか確認する。以上の実験から、知能技術株式会社は、実際の反応炉で使用できるセンサーの選定を行う。

2) ステレオカメラと画像処理の組み合わせ

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で、うまく障害物を避けながらロボットを走行させるためには、周囲の状況を正確に認識する必要がある。これを実現する手段として、2 台のカメラを使いステレオ化して視差画像を作り、動画像の画像処理により距離測定を行い周囲の状況を把握するという方法が有効に機能する可能性がある。

知能技術株式会社はステレオカメラを調査、選定し、選定されたステレオカメラを購入する。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、ステレオカメラから視差画像を作り、画像処理によって距離測定を行うソフトウェアを開発する。知能技術株式会社は、PC へソフトウェアを組み込み、ステレオカメラ装置と連動させ、一般的なオフィス環境で距離認識ができるように調整を行う。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、内部で粉塵を模擬したセンサー試験用暗箱にて、ステレオカメラから粉塵越しに 3m 先の物体を認識できるかどうかを確認する。また、知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、センサー試験用暗箱にてステレオカメラから 1m 先、2m 先、3m 先での距離認識精度の誤差を測定する。以上の実験から、知能技術株式会社は、ステレオカメラの有効性に対する評価を行う。

3) ステレオカメラとライトを使った位置測定

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内においては、ロボットに搭載した可視光カメラなどのセンサーでは周囲の特徴ある物体を捉え、周囲状況を把握する事が十分にできない可能性がある。そこで、反応炉内でロボットの位置を 3 次元で把握する方法として、ロボットの外部からロボットの外観等を利用してロボットの姿勢や向き、距離の認識を行う手法を開発する。

知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、複数のライトをステレオカメラで撮影し、画像処理によって 3 次元の位置および傾きを測定するソフトウェアを開発する。知能技術株式会社は、完成したソフトウェアを PC へ組み込み、ステレオカメラ装置と接続して、オフィス環境で位置認識ができるか確認を行う。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、センサー試験用暗箱にてステレオカメラから 3m 先で、ライトを取り付けたパネルの傾斜角を測定する実験を行い、実際の角度との誤差を測定する。以上の実験から、知能技術株式会社は、ステレオカメラとライトを使った場合の 3 次元位置測定の有効性について評価する。

4) TOF カメラと画像処理の組み合わせ

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内は残触媒で形成されたモノトーンの空間であるため、斜面や凹凸を検出しにくい環境にある。このような反応炉内の状況を把握する手段として、立体視可能な TOF 方式のカメラ (TOF カメラ) が有効に機能する可能性がある。

知能技術株式会社は、TOF カメラを選定し、購入する。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、TOF カメラで撮影した画像から距離分布を作成するソフトウェアの開発を行う。知能技術株式会社は、完成したソフトウェアを PC へインストールし、PC を TOF カメラ装置と接続して、オフィス環境で距離認識ができるか確認を行う。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは内部で斜面を模擬したセンサー試験用暗箱にて、TOF カメラから 2m 先の斜面の

測距精度を測定する。また、知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、実験用ロボットにセンサー試験用暗箱内を走行させ、2m 先を走行するロボットの位置認識と距離認識ができるかどうか確認する。以上の実験から、知能技術株式会社は、反応炉内の状況を把握する手段として TOF カメラと画像処理の組合せの有効性を評価する。

5) 移動中の位置と障害物までの距離表示のための動画処理と地図データとのリンク

知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、反応炉の内部を示す地図情報とこれまで検証をしている 1) から 4) までのカメラを組み合わせ、国立大学法人 東京工業大学の知見を得ながらロボットの位置を把握するシステムを検討する。

知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、オフィス環境やセンサー試験用暗箱等の図面から地図データを作成する。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、ロボットの位置を検出する方法を用いて、反応炉内においてロボットの 3 次元座標を求めるソフトウェアを開発する。知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、地図データと 3 次元座標をリンクさせ、地図上にロボット位置を表示できるソフトウェアを開発する。知能技術株式会社は、ソフトウェアを PC に組み込み、オフィス環境で正確に位置表示するか確認を行う。知能技術株式会社、有限会社パーソナル・テクノロジーは、オフィス環境またはセンサー試験用暗箱内で地図データと連動してロボットの位置が表示されるか確認を行う。知能技術株式会社は、33° の斜面上にロボットを配置し、ロボットの真の位置と地図上での位置との誤差を測定し、当システムの有効性について評価を行う。

6) 機構製造

知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、JX 日鉱日石エネルギー株式会社とパプ日立工業株式会社の知見を得ながら、最終的な目標である「安息角を形成している不安定な残触媒斜面を崩し、自動的に除去する」ロボットに作り上げる設計を行う。知能技術株式会社は、前記知見を活用し、車体設計、足構造設計、足形状に合わせた駆動装置設計、組み込みソフトウェアからの指令を受け機構を制御する制御装置設計、センサー収納ボックスの設計を行う。反応炉内に持ち込む機器は防爆検定を取得する必要があるため、知能技術株式会社は防爆構造の検討を行う。設計の完成後、知能技術株式会社は機構の試作を行い、簡易なモックアップにて走行試験を行う。JX 日鉱日石エネルギー株式会社と調整の上、可能であれば、知能技術株式会社と有限会社パーソナル・テクノロジーは、完成した機構を用いて実際の反応炉にて 1) から 5) の実験で有効と評価されたセンサーの試験を行う。

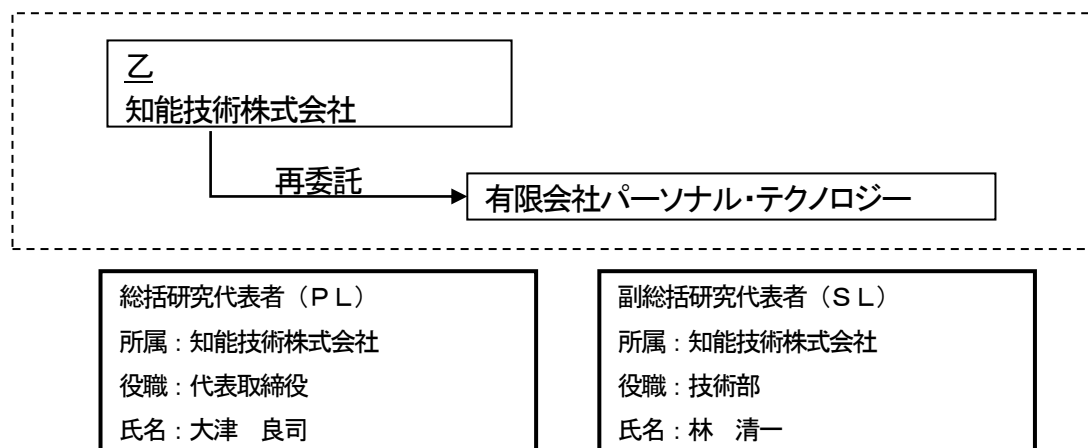
7) プロジェクトの運営・管理（知能技術株式会社）

知能技術株式会社は、研究開発を円滑に推進するため再委託先を指導し、プロジェクト終了時に成果報告を取り纏める。

1－2 研究体制

(1) 研究組織及び管理体制

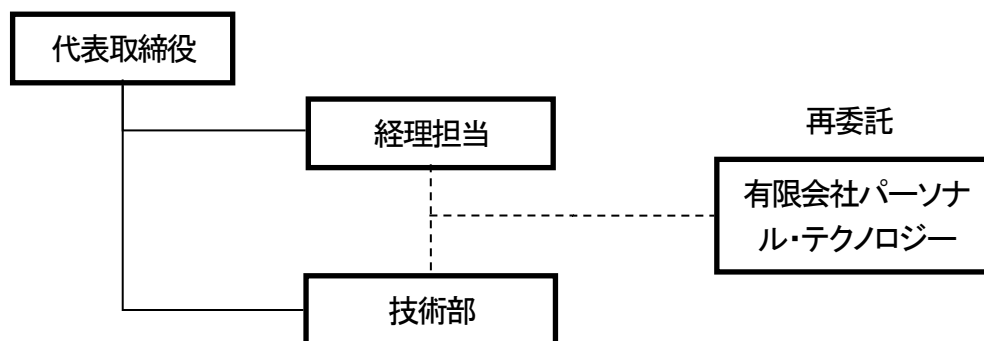
1) 研究組織（全体）



2) 管理体制

① 事業管理機関

[知能技術株式会社]



② (再委託先)

[有限会社 パーソナル・テクノロジー]



(2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】知能技術株式会社

① 管理員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
大津 良司	代表取締役	7)
足立 尚樹	取締役	7)
林 清一	技術部	7)

② 研究員

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
大津 良司(再)	代表取締役	1)～6)
林 清一(再)	技術部	1)～6)
Yohan Breux	技術部	1)～6)

【再委託先】

有限会社 パーソナル・テクノロジー

氏 名	所属・役職	実施内容(番号)
坂本 俊雄	取締役	1)～6)

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

知能技術株式会社

(経理担当者) 取締役
(業務管理者) 代表取締役

足立 尚樹
大津 良司

(再委託先)

有限会社 パーソナル・テクノロジー

(経理担当者) 取締役
(業務管理者) 取締役

坂本 俊雄
坂本 俊雄

(4) その他

(アドバイザー)

JX 日鉱日石エネルギー株式会社

製造技術本部 技術部 製油技術グループ チーフスタッフ

玉置 俊裕

国立大学法人 東京工業大学

大学院理工学研究科 基礎物理学専攻 准教授

實吉 敬二

パブ日立工業株式会社

電子・プラント機器事業部 事業部長

国広 祐司

1-3 成果の概要

1) 画像処理用機器選定

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で使用できるセンサーとして、可視光カメラや近赤外線カメラなど計 5 種類のセンサーを選定し購入した。優れたデータを得るためにセンサー試験用暗箱を製作し、その暗箱内にて実際の反応炉で使用できるセンサーの選定実験を行った。実験に際しては、高透過率アクリル板にトナーを塗布して粉塵を模擬したアクリル板を 10 枚製作して粉塵濃度を変化させることができるようにし、粉塵濃度の違いによる性能の評価も行った。センサー試験用暗箱内にて 5 種類のセンサーそれぞれについて粉塵濃度を変化させながら、3m 先の物体を判定できるかどうか実験を行った結果、粉塵に対するセンサーそれぞれの特徴を把握することができ、粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で使用できるセンサー選定のための大きなヒントを得ることができた。

2) ステレオカメラと画像処理の組み合わせ

当研究に適しているステレオカメラを選定し購入した。ステレオカメラの左右画像から視差画像を作り、画像処理によって距離測定を行うソフトウェアを開発した。次に、センサー試験用暗箱にてステレオカメラから粉塵越しに 3m 先の物体を認識できるかどうかを確認したところ、白色光の透過率が 22%以上の粉塵に対しては物体の認識が可能であり、同一点をポイントして距離を得ることができることが分かった。また、センサー試験用暗箱にて、ステレオカメラから 1m 先、2m 先、3m 先での距離認識精度の誤差を測定したところ、1%未満の精度で距離測定できることが分かった。そのため、反応炉内で使用する際に粉塵が少ない環境であればステレオカメラは有効に機能することが分かった。

3) ステレオカメラとライトを使った位置測定

ステレオカメラで位置認識をさせるターゲットとして、複数の LED ライトを組み合わせ LED パネルを作成した。LED パネルから発せられる光をステレオカメラで撮影し、画像処理によって各 LED 光の 3 次元位置を求めるソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いてオフィス環境で LED パネルの 3 次元位置認識が可能であるか実験を行い、位置認識が可能であることを確認した。

次に、センサー試験用暗箱にてステレオカメラから 3m 先に設置した LED パネルの傾斜角を測定する実験を行い、実際の角度との誤差を測定した。いくつかの改善点が見つかったが、ステレオカメラとライトを使った場合の 3 次元位置測定は有効であることが分かった。

4) TOF カメラと画像処理の組み合わせ

当研究に適している TOF カメラを選定し購入し、TOF カメラで撮影した画像から距離分布を作成するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いて、オフィス環境にてモニターを通じて被写体の距離認識が可能であることを確認した。次に、センサー試験用暗箱にて測距精度の測定実験

を行い、3m 先まで 1%以下の誤差で測距可能であることを確認した。次に、実験用ロボットにセンサー試験用暗箱内を走行させ、2m 先を走行するロボットの位置認識と距離認識が可能であることを確認した。以上の実験から、反応炉内の状況を把握する手段として TOF カメラと画像処理の組み合わせは有効であることが分かった。

5) 移動中の位置と障害物までの距離表示のための動画処理と地図データとのリンク

ロボットの 3 次元位置を仮想的な空間の中に表示するために、センサー試験用暗箱の図面から地図データを作成した。当該地図データを 3 次元で表示させるために地図表示ソフトウェアを開発した。同ソフトウェアでは、予めモデリングしたおいたロボットやカメラ等を地図内にてリアルタイムで表示させることができるように設計した。次に、LED パネルをステレオカメラで撮影して 3 次元位置を求めるライブラリを応用して、ロボットの 3 次元座標を求めるソフトウェアを開発した。このソフトウェアと先の地図表示ソフトウェアを組み合わせ、地図上にロボット位置をリアルタイムで表示するソフトウェアを開発した。このソフトウェアを用いてセンサー試験用暗箱内で地図データと連動してロボットの位置が正しく表示されることを確認した。次に、センサー試験用暗箱内に触媒の安息角に相当する 33° の斜面を設け、同斜面上にロボットを配置し、ロボットの真の位置と地図上での位置との誤差を測定したところ、様々な配置場所に対して誤差 3%以下の精度で表示可能であることが分かった。従って、当システムは反応炉内で作業するロボットを遠隔操作するための有効な手段であることが分かった。

6) 機構製造

反応炉内で作業するロボットについて、車体設計、足構造設計、足形状に合わせた行動装置設計、組み込みソフトウェアからの司令を受け機構を制御する制御装置設計、センサー収納ボックスの設計を行い、それらの設計に基づいてロボットを製造した。また、当ロボットは防爆化するためには防爆構造について検討を行い、内圧防爆構造、耐圧防爆構造のいずれでも防爆化を実現できることを確認した。また、製造したロボットを用いて簡易なモックアップにて走行試験を行い、概ね順調に動作することを確認した。実際の反応炉内における実験は、反応炉を使用できる期間が当該委託研究期間中に該当しなかったため、実施しなかった。

1-4 当該研究の連絡窓口

〒530-0047 大阪市北区西天満 2 丁目 6-8 堂島ビルディング 414
知能技術株式会社 技術部 林 清一
TEL : 06-6362-1008
FAX : 06-6362-1018

第2章 本論

2-1 画像処理用機器選定

(1) 粉塵を模擬した装置の製作

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で使用するセンサーを選定するために、センサー試験用暗箱内で粉塵を模擬した装置を用いて画像処理用機器が 3m 先の物体を判定できるかどうか確認する。このとき、粉塵を模擬した装置として、アクリル板に黒色トナーを混入させた塗料を塗布した高透過率アクリル合板デブリ加工（粉塵アクリル板）を製作した。透明アクリル板と粉塵アクリル板はいずれも厚さが 5mm のものをそれぞれ 10 枚ずつ用意した。粉塵アクリル板は粉塵環境を模擬するために黒色トナーを透明溶液に 20%配合した塗料をアクリル板に塗布して製作したものを使用した。この粉塵アクリル板がどのような性質を持っているかを調査するために、透明アクリル板と粉塵アクリル板の透過率をそれぞれ測定し、粉塵の透過率を算出した。その際の実験装置を図 1 に示す。

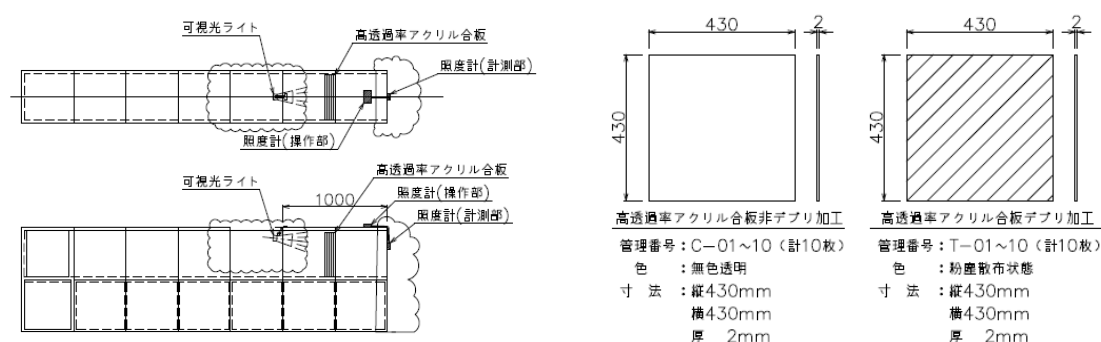


図 1 透明、粉塵アクリル板の透過率測定の実験装置

(2) 様々な画像処理用機器の粉塵に対する性質

センサー試験用暗箱と粉塵を模擬した装置を用いて、様々な画像処理用機器の粉塵に対する性質を調査した。用いた画像処理用機器の一覧を以下に列挙する。

- ・ 可視光カメラ
- ・ 高感度カラーカメラ
- ・ 近赤外線カメラ
- ・ 遠赤外線カメラ
- ・ 紫外線カメラ

上記の画像処理用機器を一台ずつ図 2（図は可視光カメラの例）に示す実験装置に設置して測定を行った。測定結果の一例として、可視光カメラによる粉塵アクリル板に対する物体の判定実験結果を図 3 に示す。

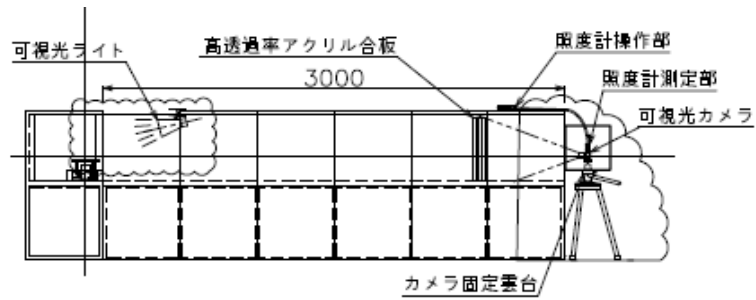


図 2 可視光カメラによる物体の判定実験の装置

アクリル板 厚さ	可視光ライト：白	可視光ライト：緑	可視光ライト：青	可視光ライト：赤	可視光ライト：黄
0					
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					

図 3 粉塵アクリル板を使用した際の可視光カメラによる物体の判定実験の結果

(3) 実際の反応炉で利用できるセンサーの選定

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内で利用できるセンサーを選定するために、センサー試験用暗箱内にて粉塵を模擬した装置を用いて様々な画像処理用機器の性能を測定する実験を行い、粉塵に対して有効なセンサーの選定に至った。これにより、実際の反応炉で利用できるセンサーが判明した。

2-2 ステレオカメラと画像処理の組み合わせ

(1) ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの開発

1) ステレオカメラのアプリケーション開発に係る検討

今回の開発に使用するステレオカメラは、東京エレクトロンデバイス製の TD-BD-SCAM シリーズであり、ベースラインは、134mm である。ステレオカメラの仕様は表 1 のとおり。パソコンへは USB で接続し、Windows または Linux で動作させることができる。

表 1 ステレオカメラの製品仕様

分類	項目	仕様	備考
構成	カメラ数	2 個	ステレオカメラ
	同期	2 つのカメラのフレーム同期がとれる事	
イメージセンサ	センサ種類	1/4.2 型 CCD	富士フイルム社製 MS3102A
	走査方式	プログレッシブスキャン	
	有効画素数	648(H) × 486(V) × 2	出力フォーマット SXVGA
	有効画素エリアサイズ	3.4992mm(H) × 2.6244mm(V)	
光学系	焦点距離/絞り	f=2.1 mm/ F=2.0	モスウェル社製 MD91
	画角	対角：111°、水平：91°、垂直：67°	
	マウント、その他	モスウェル社製 M12,P0.5 レンズ交換可能なこと	
	フォーカス範囲	40cm~∞	
画像処理	出力画像フォーマット	・1280 × 960 (SXVGA) ・640 × 480 (VGA) ・352 × 288 (CIF) ・320 × 240 (QVGA) ・176 × 144 (QCIF)	非圧縮画像データ
	フレームレート	2.3 項参照	
	ホワイトバランス	AUTO ON/OFF	
	規格	USB2.0 HS モード	USB2.0 認証未対応
インタフェース	数量	1 系統	USB ケーブル 2 本のうち、1 本はバスパワー専用ケーブル
	転送方式	画像:バルク転送 標準リクエスト、ベンダリクエスト:コントロール転送	転送帯域最大 40Mbyte/S(瞬間最大)
	電源供給	バスパワー	miniUSB コネクタを 2 個実装 (片方は電源供給のみ)
	コネクタ	54819-0519	モレックス社製
電源	消費電流	約 860mA(SXVGA 2 眼動作時)	電源投入時 5V1A 以上必要
	ケースサイズ	標準：106 × 54 × (35+レンズ突出部) mm 100mm オプション：140mm × 54 × (35+レンズ突出部) mm 134mm オプション：174mm × 54 × (35+レンズ突出部) mm 500mm オプション：540mm × 54 × (35+レンズ突出部) mm	
構造	基板サイズ	CCD モジュール部：40 × 28 × 約 26~27 mm 2 眼カメラ同期ボード：96 × 44 mm	

本ステレオカメラの Windows におけるアプリケーション開発環境は、Microsoft DirectShow を使用した構造となっており、その機能や DirectShow フィルタを用いることで、カメラ画像を取得したり、左右の視差画像を選択したりなどといったことができるようになっている。

ここで、今回、ステレオカメラのアプリケーションを実際に開発する際に想定されるカメラ画像取得後の処理内容を考えてみると、まず画像処理が挙げられる。画像処理によって、3 次元座標を得たい目標物を検出し特定する必要がある。次にその得られた目標物の左右視差画像における 2 次元位置からステレオ視の原理を用いて 3 次元座標を得る処理が必要である。実際のアプリケーションにおいては、以下の点が問題となってくる。

- ・ 左右の視差画像における一致点をサーチするロジック
- ・ カメラキャリブレーション
- ・ 精度上の手法やノウハウ

これらの問題については実用上のレベルまで至るのに相当な試行錯誤が予想され、開発期間もそれなりにかかることが考えられるため、これらの部分については独自開発以外の方法を採用した。

2) ソフトウェア設計

ステレオカメラ距離測定ソフトウェアは、ステレオカメラで撮影した画像の任意の 1 点を指定し、その点の 3 次元座標を得るソフトウェアである。

以下、概略仕様を示す。

- ・ ステレオカメラから左右の視差画像をキャプチャする
- ・ 画面にキャプチャ画像を表示
- ・ 左右の視差画像の対応点をマウスでクリックして指定する
- ・ マウスでクリックした位置の 3 次元座標を画面に表示する
- ・ キャプチャ画像の保存、3 次元座標の保存ができる

① 画面処理

画面周りの処理を図 4 に示す。

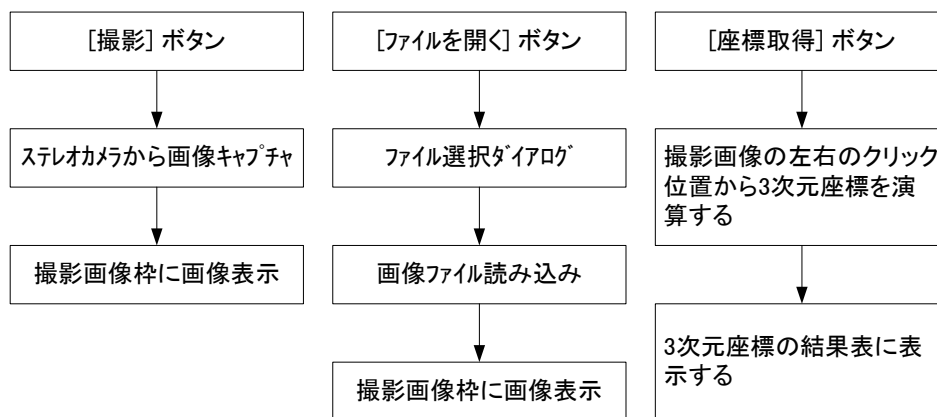


図 4 ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面処理フロー

② 内部処理

内部処理について図 5 に示す。

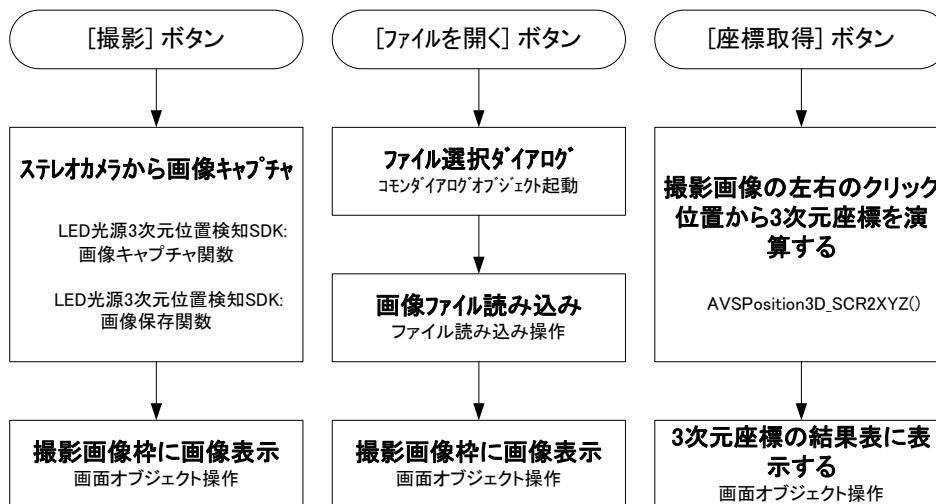


図 5 ステレオカメラ距離測定ソフトウェアの内部処理フロー

3) ソフトウェア開発

本ソフトウェアの開発に用いる開発環境は以下の通りである。

- ・ OS: Windows XP (SP3)
- ・ 開発環境: Visual C++ 2008 Express Edition
- ・ GUI ツール: Qt (VS2008 用パッケージ)

完成したステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面イメージを図 6 に示す。

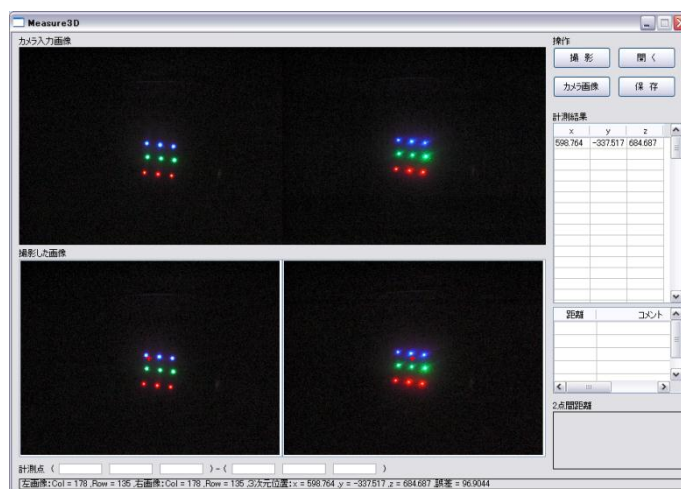


図 6 完成したステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面イメージ

4) ソフトウェアの性能評価

完成したソフトウェアによって距離測定を行った結果を表 2 と図 7 に示す。概ね良好な結果を得ることができた。距離の測定精度は 1%以下となっている。インターフェースは使いやすく出来ており、マニュアルを見ずに操作できる。計測結果には過不足無く数値が表示され、知りたい情報をすぐに得ることができる。このソフトウェアを基に、ステレオカメラを用いた様々なソフトウェアの開発が可能になるだろう。

表 2 ステレオカメラによる距離の測定結果

設定距離	計測結果					平均	標準偏差	平均誤差
	1回目	2回目	3回目	4回目	5回目			
300mm	300.47mm	300.95mm	300.36mm	299.56mm	300.63mm	300.39mm	0.52mm	-0.39mm
500mm	495.77mm	495.80mm	496.19mm	496.91mm	496.96mm	496.33mm	0.58mm	3.67mm
750mm	743.11mm	741.03mm	741.85mm	740.32mm	743.70mm	742.00mm	1.41mm	8.00mm
1000mm	987.57mm	997.18mm	984.19mm	988.25mm	998.68mm	991.17mm	6.38mm	8.83mm
1500mm	1485.40mm	1474.35mm	1489.06mm	1477.47mm	1480.99mm	1481.45mm	5.92mm	18.55mm
2000mm	1992.59mm	1996.91mm	1989.47mm	1944.99mm	1952.89mm	1975.37mm	24.43mm	24.63mm
2500mm	2459.88mm	2448.66mm	2433.80mm	2422.75mm	2417.71mm	2436.56mm	17.63mm	63.44mm
3000mm	2967.32mm	2901.92mm	2930.81mm	2902.53mm	2899.99mm	2920.51mm	29.10mm	79.49mm
3500mm	3350.19mm	3442.58mm	3326.63mm	3450.10mm	3379.70mm	3389.84mm	54.96mm	110.16mm

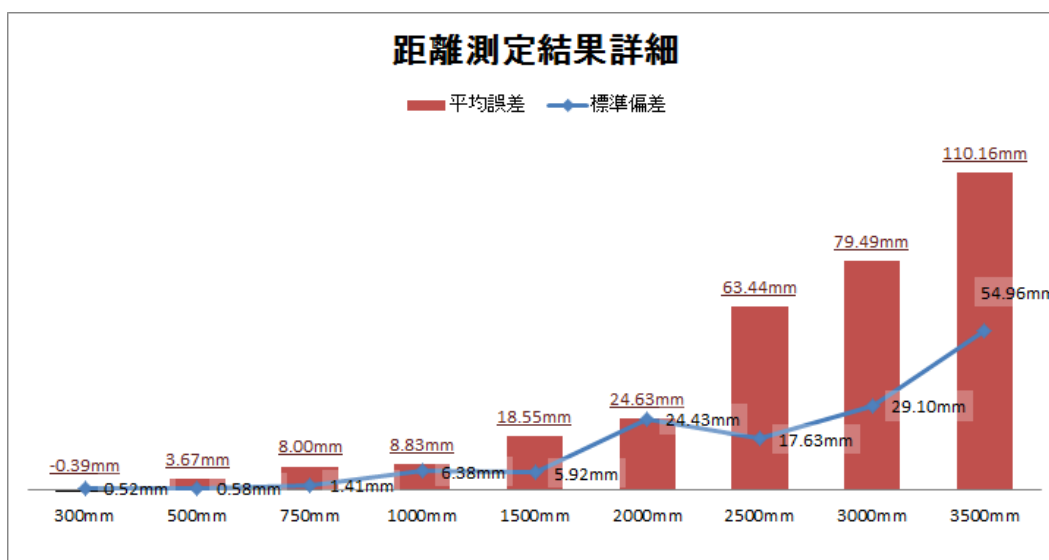


図 7 ステレオカメラによる距離の測定結果

(2) ステレオカメラを用いた物体の判定

粉塵が立ち込める薄暗い反応炉内で、うまく障害物を避けながらロボットを走行するためには、周囲の状況を正確に認識する事が必要である。これを実現する手段としてステレオカメラの有効性を調査する。また、粉塵の透過しやすさや見た目の見えやすさなど照度の違いによる特性も調査するために可視光ライト白を点灯させる。センサー試験用案箱と粉塵を模擬した装置を用いて物体を可視光ライト白で照らし、ステレオカメラから粉塵越しに 3m 先の被写体を認識できるかどうか検証した。

実験装置は以下の模式図 (図 8) のとおり設置した。ステレオカメラと被写体との間に粉塵アクリル板を挿入して粉塵環境を再現する。粉塵アクリル板は暗渠ボックス入口から 500mm の位置に設置した。ステレオカメラはカメラ固定雲台の上に設置しており、レンズ面とセンサー試験用暗箱との距離、およびレンズ中心位置の高さはそれぞれメジャーにより測定した。またセンサー試験用暗箱の被写体側の端は閉じられており光が入り込まないが、カメラ側は解放されているのでカメラ側には暗幕を掛けてほぼ完全な暗箱を作った。

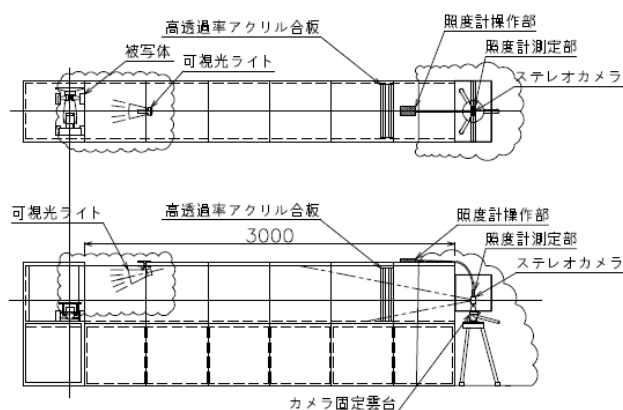


図 8 ステレオカメラを用いた物体の判定の実験装置

本実験では、ほぼ完全な暗箱の中で 3m 先に設置した被写体を可視光ライトで照らして、カメラで撮影するという方法で実験を行った。被写体は常に同じ位置に設置され、暗渠ボックス入口上部に照度計も設置されている。ステレオカメラ画像の出力はパソコンにインストールしたソフトウェア上に表示され、任意のタイミングで記録することが出来るのでパソコンに画像データとして保存した。粉塵アクリル板は 1 枚ずつ追加するという方式で粉塵の濃度を段階的に調整し、その時々撮影および照度測定を行った。

粉塵アクリル板 3 枚目までは 3m 先の物体をкаろうじて認識する事ができるが、粉塵アクリル板 4 枚目以降は物体の判別が不可能となる。そのため 4 枚目以降では、対象物の距離を測定することができなくなった。ステレオカメラの距離測定精度は、3m 先まで 1% 以下の誤差で測定可能であるため、十分有効であると言えるが、粉塵環境下においてステレオカメラをそのまま使用する場合、粉塵の濃度が薄い場合には有効性を発揮するが、濃度が濃い場合には有効とは言えないことが分かった。

2-3 ステレオカメラとライトを使った位置測定

(1) LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの開発

1) ソフトウェア設計

LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアは、ステレオカメラで LED ボードを撮影し、自動的に光源を検知し、各 LED 光源の 3 次元位置を取得し、さらに LED ボードの傾きを求めるソフトウェアである。以下、概略仕様を示す。

- ・ ステレオカメラから左右の視差画像をキャプチャする
- ・ 画面にキャプチャ画像を表示
- ・ 自動的に LED 光源の 3 次元座標を取得し、画面に表示する
- ・ LED 光源の 3 次元座標から LED ボードの傾きを計算し、画面に表示する

認識するターゲットとなる LED 光源は、9 個の砲弾型 LED が格子状に並んでおり、各ポイントには赤、青、緑の 3 色の LED が取り付けられている。スイッチボックスが付属しており、それによってそれぞれの色やポイントを任意に点灯できる。

画面周りの処理を図 9 図 10 に、内部処理をに示す。

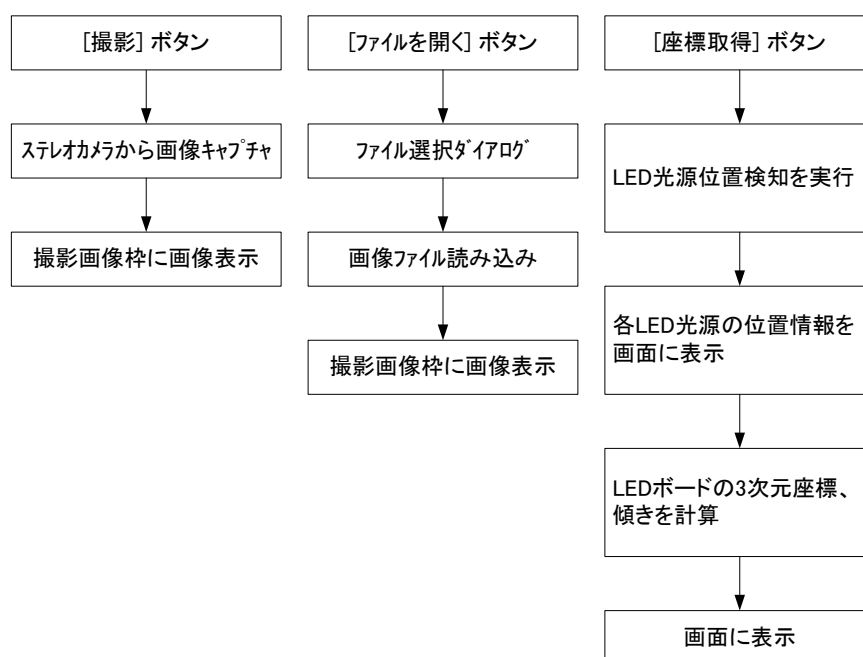


図 9 LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの画面処理フロー



図 10 LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの内部処理フロー

2) ソフトウェア開発

本ソフトウェアの開発に用いる開発環境は以下の通りである。

- ・ OS: Windows XP (SP3)
- ・ 開発環境: Visual C++ 2008 Express Edition
- ・ GUI ツール: Qt (VS2008 用パッケージ)

完成したステレオカメラ距離測定ソフトウェアの画面イメージは図 11 の通り。

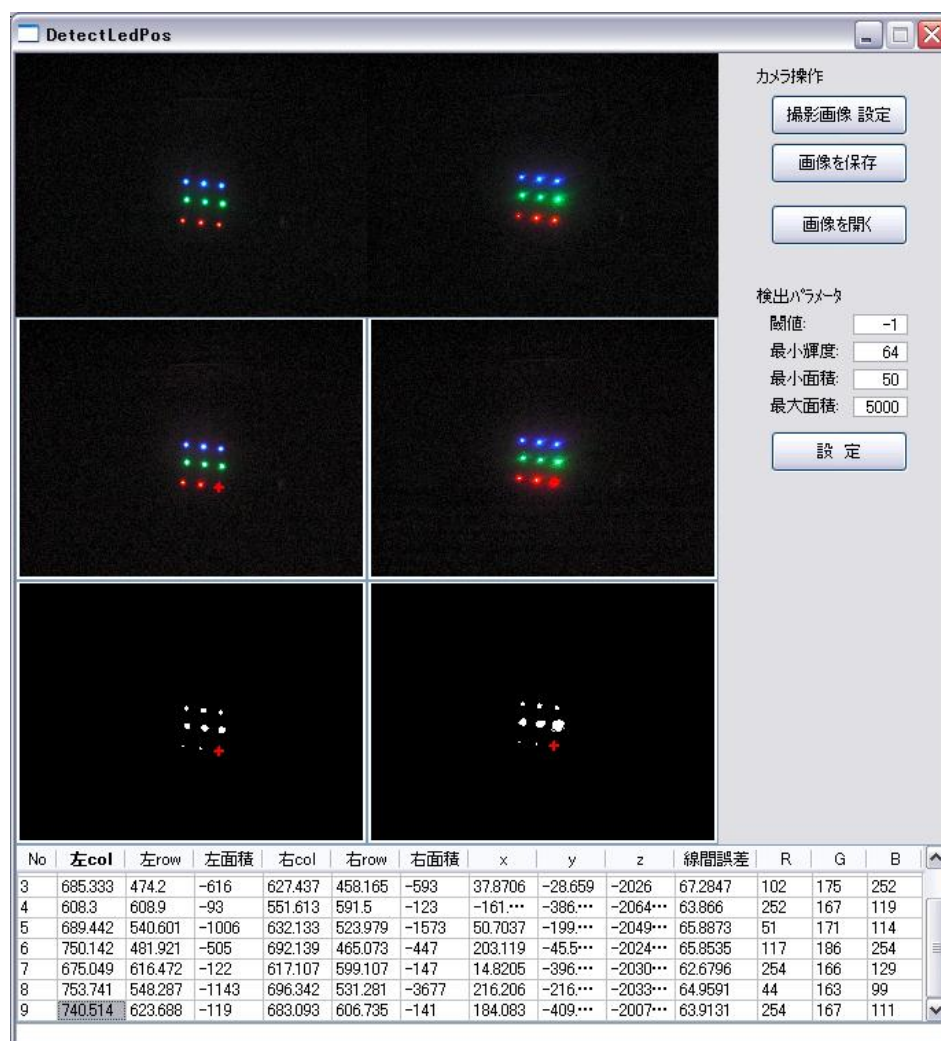


図 11 LED 光源 3 次元位置認識ソフトウェアの画面

3) ソフトウェアの性能評価

完成したソフトウェアによって LED 光源の 3 次元位置認識を行い、概ね良好な結果を得ることができた。

(2) ステレオカメラによる LED パネルの傾斜角の測定精度

粉塵が立ちこめる薄暗い反応炉内においては、ロボットに搭載した可視光カメラなどのセンサーでは周囲の特徴ある物体を捉え、周囲状況を把握する事が十分にできない可能性がある。そこで、反応炉内でロボットの位置を 3 次元で把握する方法として、ロボットの外部からロボットの外観等を利用してロボットの姿勢や向き、距離の認識を行う手法を開発する。そのための実験として、センサー試験用暗箱にてステレオカメラから 3m 先で、ライトを取り付けたパネルの傾斜角を測定する実験を行い、実際の角度との誤差を測定した。図 12 に装置の模式図を示す。

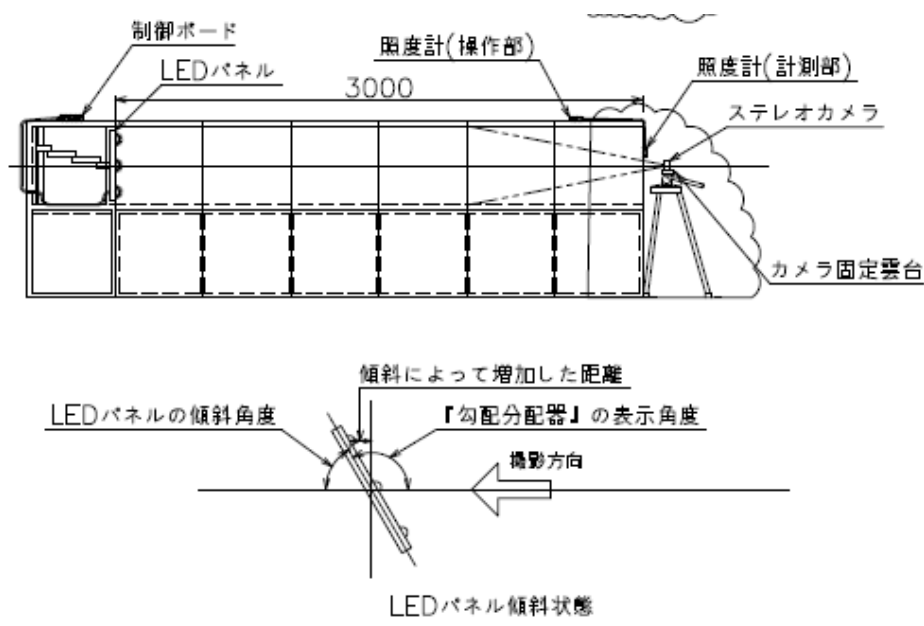


図 12 ステレオカメラによる LED パネルの傾斜角の測定実験の装置

LED 光源を点灯させ、ステレオカメラから各 LED までの距離を測定する。その距離データから傾斜角を算出し、実測の角度との誤差を算出する。傾斜角に関しては 10° ごとに 6 パターン計 54 組のデータを採取した。また、9 個の LED 光源の 3 次元位置を用いた傾斜角の推定には最小二乗法を用いた。

実験の結果、本方式による 3 次元位置の測定は有効な手段であると判断した。

2-4 TOF カメラと画像処理の組み合わせ

(1) TOF カメラによる測距精度の測定

TOF カメラから 3m、2m、1m 離れた場所に被写体を置き、メジャーで実測した値と開発した TOF カメラのソフトを用いて測定した値とを比較した。実験装置の模式図を図 13 に示す。

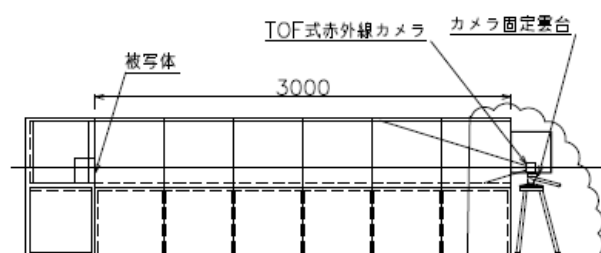


図 13 TOF 式赤外線カメラ測距精度測定実験の装置

実験の結果、2m 先の測距誤差は 0.1% 以下であることが分かった。粉塵越しにどの程度の性能が発揮されるかが問題であるが、まずは良好な結果を示したと言える。

(2) TOF カメラによるロボットの位置認識と距離認識

センサー試験用暗箱内にて実験用ロボットを走行させ、2m 上から TOF カメラと距離分布を作成するソフトウェアを用いてその様子を測定し、2m 先を走行するロボットの位置認識と距離認識ができるかどうかを確認した。

実験装置の模式図を図 14 に示す。実験装置には天井と四方の面すべてに暗幕がはられ光が遮断されるようになっている。天井中央部にはカメラ固定雲台が設置されており、そこに TOF カメラを取り付けて使用する。また、床面は可動式水平勾配板にて傾斜角度を設定することができる。

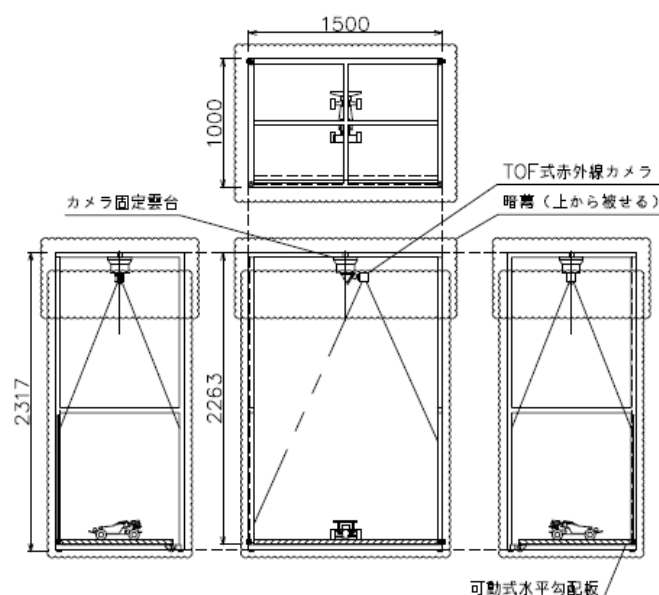


図 14 TOF カメラによるロボットの位置認識と距離認識の実験装置

ロボットの位置認識を確認する実験は、センサー試験用暗箱にて勾配分配器を使用して可動式水平勾配板の傾斜角を「0°」「10°」「20°」「30°」に設定し、各々の状態で実験用ロボットを認識できるかどうかを距離分布を作成するソフトウェアを用いて確認することで実施した。その結果、それぞれの傾斜角度の状態で実験用ロボットを認識できることを確認した。

距離認識を確認する実験は、センサー試験用暗箱にて可動式水平勾配板を「0°」に設定し、設置したセンサー試験機の距離を距離分布を作成するソフトウェアを用いて測定することで実施した。その結果、TOF カメラと距離を距離分布を作成するソフトウェアを使用して距離を計測することが可能であることを確認した。

以上の結果から、TOF カメラと画像処理の組合せは有効であると判断した。

2-5 移動中の位置と障害物までの距離表示のための動画処理と地図データとのリンク

(1) 地図データと連動したロボットの位置表示

ステレオカメラで LED パネルを撮影し、その位置情報をセンサー試験用暗箱を模擬した地図上に表示するソフトウェアを開発した。このシステムを評価するために、LED パネルを搭載したセンサー試験機をセンサー試験用暗箱にて走行させ、ステレオカメラと同ソフトウェアを用いてセンサー試験機の位置が地図上に正しく表示されるか実験を行った。このとき用いた実験装置を図 15 に、実験結果を図 16、図 17 に示す。

図 16、図 17 に示したとおり、センサー試験機がデジカメ撮影画像と 3D Map 画面 1 及び 2 の同じ位置に表示されている。従って、本システムが正常にセンサー試験機の位置を認識し、その位置を地図上に正しく表示することが確認できた。

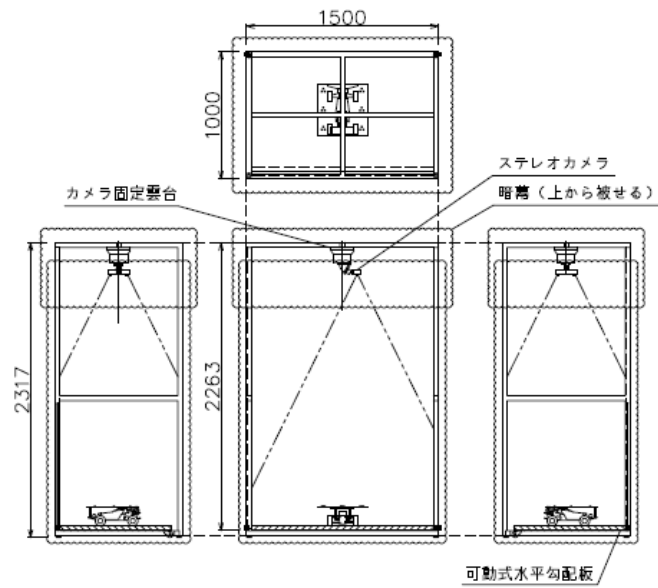


図 15 地図データと連動したロボットの位置表示の実験装置

番号	デジカメ撮影画像	3D Map 画面1	3D Map 画面2
1			
2			
3			
4			

図 16 地図データと連動したロボットの位置表示の実験結果 1

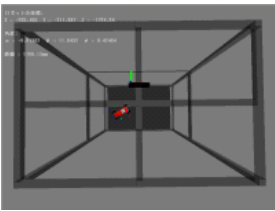
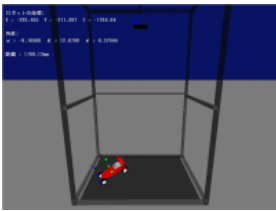
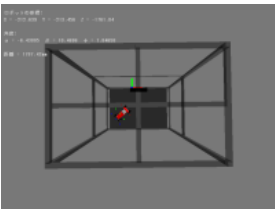
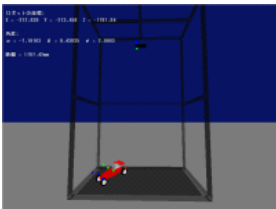
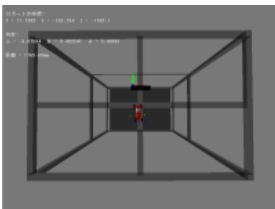
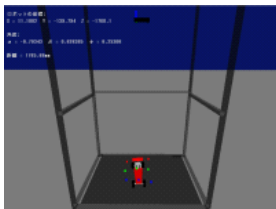
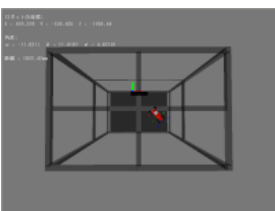
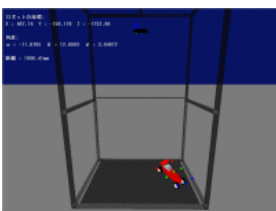
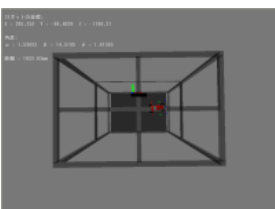
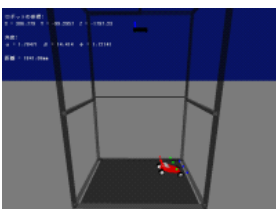
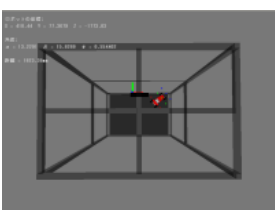
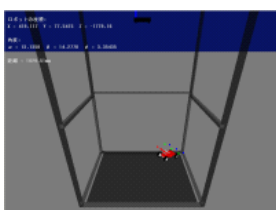
番号	デジカメ撮影画像	3D Map 画面1	3D Map 画面2
5			
6			
7			
8			
9			
10			

図 17 地図データと連動したロボットの位置表示の実験結果2

(2) ロボットの真の位置と地図上での位置

センサー試験用暗箱の可動式水平勾配板を調整して 33° の斜面を作り、その上で LED パネルを搭載したセンサー試験機を走行させる。このようにして、可動式水平勾配板上の様々な位置に移動させたセンサー試験機の位置を (1) のシステムの測定機能を用いて測定することで、ロボットの真の位置と地図上での位置との誤差を求めた。実験装置は図 15 と同様だが、可動式水平勾配板の傾きが 33° に設定されている点異なる。

実験結果を図 18 および図 19 に示す。ロボットの 3 次元位置の実測は困難であったため高さ方向のみの測定とし、これに併せて地図上での位置測定も高さ方向 (Z 軸) のみとした。

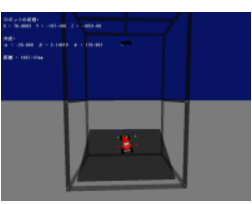
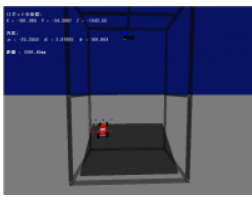
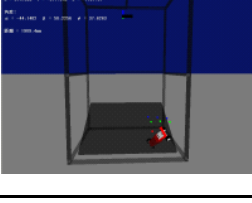
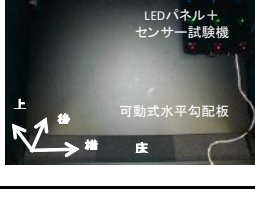
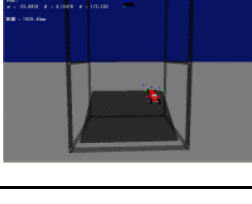
番号	デジカメ撮影画像	3D Map 画面	実測値 (mm)	Z軸の座標値 (mm)	平均値 (mm)	差分 (mm)
1			1667	-1653.89 -1648.43 -1651.51 -1649.02 -1654.88 -1649.39 -1649.72 -1661.30 -1658.85 -1649.33	-1652.63	14.37
2			1568	-1543.55 -1549.62 -1546.05 -1546.05 -1546.90 -1546.05 -1546.05 -1544.66 -1547.59 -1547.83	-1546.44	21.57
3			1781	-1749.57 -1740.81 -1745.83 -1746.15 -1741.87 -1748.67 -1744.37 -1741.90 -1741.97 -1737.07	-1743.82	37.18
4			1776	-1781.37 -1789.66 -1781.37 -1781.37 -1781.37 -1789.66 -1789.66 -1781.58 -1779.34	-1784.50	-8.50
5			1557	-1540.40 -1539.68 -1546.68 -1542.67 -1550.74 -1544.75 -1542.00 -1553.27 -1554.61 -1549.22	-1546.40	10.60

図 18 ロボットの真の位置と地図上での位置の実験結果 1

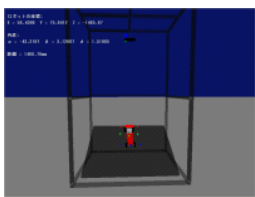
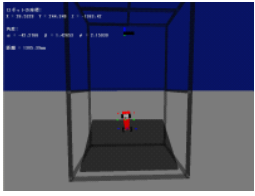
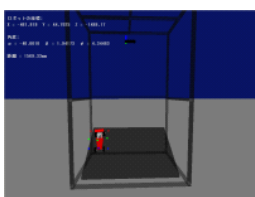
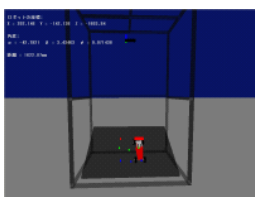
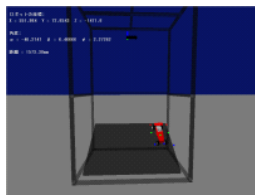
番号	デジカメ撮影画像	3D Map 画面	実測値 (mm)	Z軸の座標値 (mm)	平均値 (mm)	差分 (mm)
6			1466	-1465.67 -1466.45 -1465.67 -1466.45 -1465.67 -1466.45 -1466.45 -1466.45 -1466.45 -1466.45	-1466.22	-0.22
7			1358	-1363.42 -1363.42 -1365.55 -1365.55 -1364.15 -1361.10 -1364.03 -1364.03 -1362.50 -1363.73	-1363.75	-5.75
8			1486	-1499.17 -1499.68 -1499.84 -1500.73 -1498.84 -1498.35 -1499.68 -1501.26 -1498.84 -1498.84	-1499.42	-13.42
9			1630	-1603.94 -1602.02 -1601.33 -1605.48 -1602.85 -1601.33 -1606.13 -1602.85 -1605.48 -1601.33	-1603.27	26.73
10			1492	-1471.60 -1469.44 -1463.14 -1466.15 -1469.90 -1464.60 -1463.14 -1467.34 -1461.01 -1462.40	-1465.87	26.13

図 19 ロボットの真の位置と地図上での位置の実験結果2

以上の結果から、誤差 3%以下の精度で地図上に位置表示可能であることが分かった。従って、当システムは有効であると判断した。

2-6 機構製造

(1) 基本設計

1) 駆動方式の選定

過去の研究成果より、駆動方式はクローラ型とした。

2) 除去装置の選定

過去の研究成果より、除去装置はブレードザー型ブレードとした。

3) 補助除去装置

過去の研究成果より、補助除去装置として噴射ノズルを備えることとした。

4) 外形図

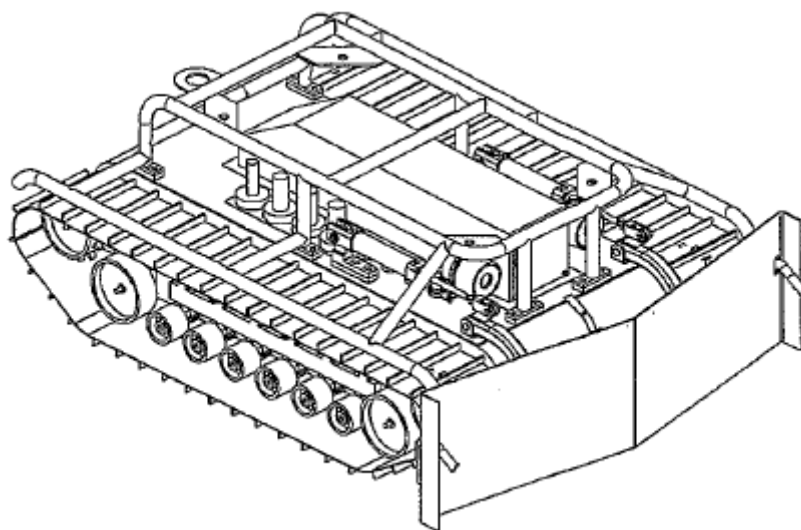


図 20 機構の外形設計図

(2) 防爆構造の検討

反応炉内に持ち込む機器は「防爆検定」を受ける必要がある。ロボットの防爆検定取得を受けた事例は無いため、本研究では製油所内で実用可能なロボットにするための検討を行った。

1) 検討範囲

触媒拔出作業ロボットを爆発性ガス雰囲気中使用するため、防爆に関する調査、および日本の防爆検定に合格するための検討を、以下の範囲で行った。対象とした防爆規格と保護構造は次のとおり。検定機関は産業安全技術協会（TIIS）を対象とした。

① 『工場電気設備防爆指針』（国際規格に整合した技術指針）

JNIOSH-TR-No. 43 (2008)

内圧防爆

② 『工場電気設備防爆指針』（国際規格に整合した技術指針）

J NIOSH-TR-No. 43 (2008)

耐圧防爆

③ 『工場電気設備防爆指針』（ガス蒸気防爆 2006）

ISSN 0911-8063

内圧防爆

④ 『工場電気設備防爆指針』（ガス蒸気防爆 2006）

ISSN 0911-8063

耐圧防爆

2) 防爆構造の可否

仕様書に基づき、防爆化への調査、規格適合性を検証した結果、以下のとおり防爆保護構造に適合するロボットを実現可能であることを確認できた。

- ① 対象ロボットは、内圧防爆構造、耐圧防爆構造のいずれでも防爆化を実現できる。ただし、規格の要件に適合させるために、後述する設計を行う必要がある。
- ② 内圧防爆構造は、保護ガスを供給して内圧をかけることが特徴のため、耐圧防爆構造に比べ小型軽量にすることができるが、保護ガスを供給するチューブが必要になるため移動性などに制約がある。
- ③ 耐圧防爆は、内圧防爆のようにロボットの動きの制約がないが、火炎逸走などの対策のため容器の隙間管理や構造が大きくなるので、内圧防爆構造と同一容積のロボットとした場合、内圧防爆構造のそれに比べ、多少大きく、また、重くなる。
- ④ また、日本に現存する規格が 2 種類あることに関し、どちらの規格を採用して検定を申請することが可能であるが、世界的な潮流からは IEC 規格に準拠した『工場電気設備防爆指針』（国際規格に整合した技術指針）に適合させ、申請することとする。

3) 防爆機器の製作上の注意

① 検定合格証との一致

申請事項、合格証の内容は、全てを正確に機器（製品）に展開することが必要である。よって、製作のための基準書（仕様書や図面等）は、合格証の内容が全て網羅されていることと、それに基づき合格した内容で忠実に製作することが要求される。

② 品質管理と検査

あらかじめ届出ている「製造検査設備等の概要届」にある検査組織と検査規定に従い実施する。

③ 取扱説明書

製品には、製品の原理、仕様や取扱要領を示す取扱説明書を添付する。その取扱説明書には、防爆機器を安全に取り扱うための要領や注意事項を掲載することが必要である。特に、国際整合防爆指針は、規格に取扱説明書への掲載すべき項目が規定されている。

また、同指針で検定を受ける際は、製品に添付する取扱説明書も提出することを TIIS から要求される。

(3) 機構製造

上記の内圧防爆に準拠した機構を製造し、簡易なモックアップにて走行試験を実施した。完成した機構の外観を図 21 に、その制御画面を図 22 に、モックアップにおける走行試験の様子を図 23 に示す。機構はモックアップ内にて順調に動作した。除去装置とセンサーの取り付け位置やモーターのパワー等に関する課題も見つかったが、今回見つかった課題については今後の検討項目としたい。



図 21 完成した機構の外観



図 22 機構の制御画面



図 23 モックアップにおける走行試験の様子

最終章 全体総括

製油所の反応炉内という過酷な環境下の苦渋作業を代替する日本発の「製油所内の防爆移動式ロボット」の開発を目指して、ロボットの最重要課題である①人が入れない危険な環境でロボットに自動的に作業させるために、粉塵の立ちこめる中で 3m 先の物体を判別できる「センサー」と連動した「組み込みソフトウェア」の開発、②そのソフトウェアによって作業をする「ロボット機構」開発を JX 日鉱日石エネルギー株式会社の知見を得ながら行うことで、これまで人が行ってきた人命にかかわる過酷な作業の廃止と、少子高齢社会における苦渋作業のロボットへの代替及び「触媒」を回収し有効利用することを目的として、本研究開発に取り組んできた。

本研究開発を通じて非常に貴重なデータと多くの知見を得ることができた。画像処理用機器選定では、これまで知ることが出来なかった粉塵の波長依存性を知ることができ、粉塵の立ちこめる薄暗い反応炉内において有効なセンサーの選定を可能にした。ステレオカメラと画像処理の組み合わせにおいては、粉塵越しに対象物の認識が可能であれば、かなり正確な 3 次元位置の認識が可能であることが分かった。また、ステレオカメラとライトを使った位置測定では、ライトを画像処理で自動的に認識して 3 次元位置を測定可能であることや、複数のライトを組み合わせることで精度を高めることができたことが分かった。また、このような複数の座標を用いて精度を高める手法は続く TOF カメラと画像処理の組み合わせにおいても応用でき、反応炉内の状況の把握も期待できる結果が得られた。移動中の位置と障害物までの距離表示のための動画処理と地図データとのリンクにおいては、地図ソフトウェア上にロボットの位置がリアルタイム表示させることができ、人が入ることができない環境下において遠隔操作を行うための最初のステップを踏み出すことができた。最後に、機構製造においては、機構を製造することによって、触媒という特殊な環境下で動作する車体や足構造、制御装置に対して得難い情報を得ることができた。また、防爆についても検討を行い、この機構において防爆化が可能であることが確認できた。

このような研究開発の成果が得られたことにより、製油所の反応炉内という過酷な環境下の苦渋作業を代替する「製油所内の移動式防爆ロボット」を開発することが可能となった。今後は、本格的な導入に向けた開発を進めていく。