

平成 25-27 年度戦略的基盤技術高度化事業

「3 次元データを利用した
高信頼性侵入検知システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 経済産業省北海道経済産業局

委託先 株式会社ノア

目次

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
1-2	研究体制	2
1-3	成果概要	4
1-4	当該研究開発の連絡窓口	5
第2章	本論	
2-1	ワンショット 3D スキャナに差分検知機能を付加した組み込みデバイス開発	6
2-2	多色（多波長）化および直交偏光利用による多種類光源および それに対応したカメラの開発	18
2-3	侵入予測アルゴリズムの開発	23
2-4	侵入判定手法の検討	27
2-5	侵入検知システムの試作および評価	29
第3章	全体統括	30

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) 研究開発の背景

自動車製造メーカーでは、自動製造装置における作業者の安全性確保のため、作業エリアへの侵入者検知システムとして、ライトカーテン方式が用いられている。しかし、この従来技術(ライトカーテン)では、複雑な形状の製造装置に対して検知エリアを自在に設定できず、さらに大きな問題点として残留者の検知ができないという課題があった。ノア社が提案する3次元データを利用した侵入検知システムでは、検知率を犠牲にすることなく、検知エリアの自在な設定や残留者検知が可能になり、侵入検知システムの利用品質が向上することから、川下ユーザ(自動車製造現場)からはその実現が強く望まれている。

(2) 研究開発の目的および目標

顧客ニーズから抽出された課題を技術開発により克服することを目的として、川下企業からの侵入検知システムに対する詳細要求値は、

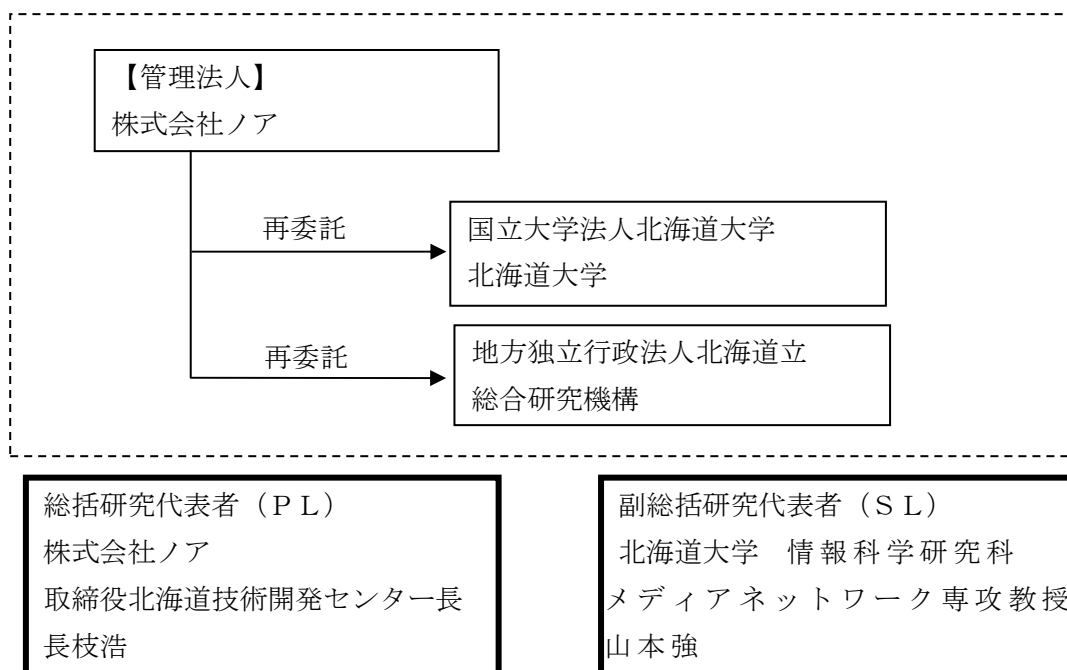
- ①システムの誤検知率 3.4 ppm以下(100万分の3.4以下)
- ②検知の遅延時間 500ms以下
- ③システムの空間誤差 3cm以内(0.5%以内)
- ④システムの連続稼働時間 720時間以上
- ⑤検知エリア外において侵入行動を取る人物に対する警告機能付加(警告の誤作動率は1%程度は許容)

となっている。

本研究開発の目的は、これら川下企業の要求仕様を満たした侵入者・残留者検知システムを実現することとする。また、この目的の実現のために、侵入判定まで組み込んだ3次元データ測定器の開発、多方向から同時に3次元データを取得する装置開発、侵入予測(接近検知)機能の開発、侵入判定アルゴリズム開発を実施し、最終的に川下企業の要求する侵入検知システムを試作することが最終的に達成すべき目標として設定している。

1-2 研究体制

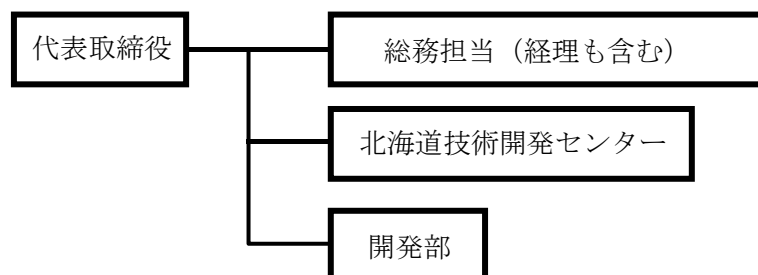
(1) 研究組織 (全体)



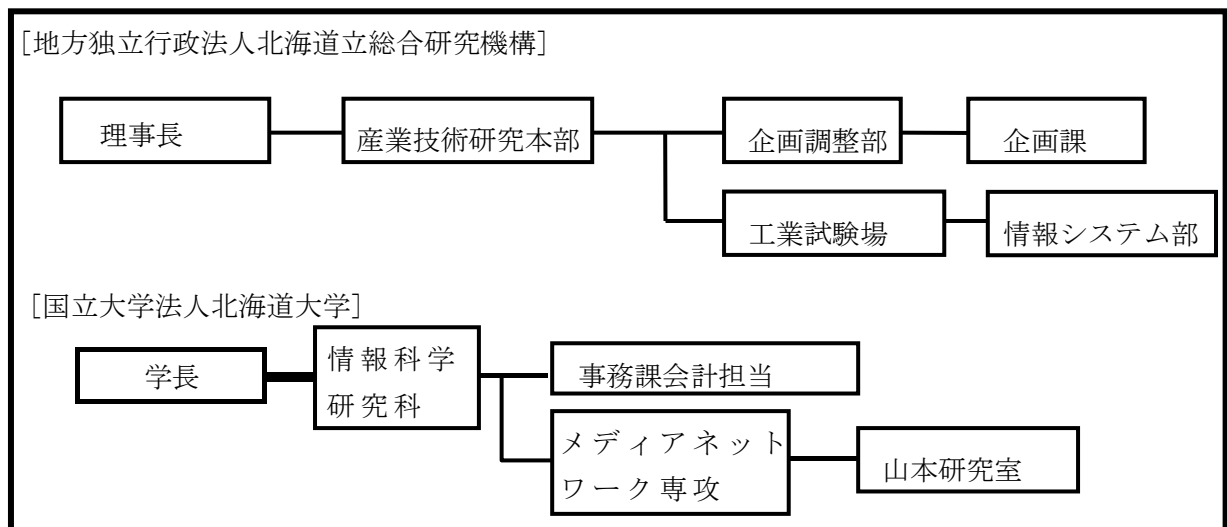
(2) 管理体制

①事業管理者

[株式会社ノア]



②(再委託先)



(3) 管理員及び研究員

【事業管理者】株式会社ノア

①管理員

氏名	所属・役職
太田初	代表取締役社長
太田里美	取締役総務部長
長枝浩	取締役北海道技術開発センター センター長

②研究員

氏名	所属・役職
太田初 (再)	代表取締役社長
長枝浩 (再)	取締役北海道技術開発センター長
石井智	開発部技術開発課長
大久保徹也	エンジニア

【再委託先】※研究員のみ

国立大学法人 北海道大学

氏名	所属・役職
山本強	情報科学研究科メディアネットワーク専攻教授

地方独立行政法人北海道立総合研究機構

氏名	所属・役職
三田村智行	情報システム部 研究主査

1-3 成果概要

2-1 研究サブテーマ①

ワンショット 3D スキャナに差分検知機能を付加した組み込みデバイス開発

目標	<ul style="list-style-type: none"> ・検知の空間誤差 0.5%以下 (5m 先で 2.5cm 以下<3cm) ・データ遅延 300ms 以下 (<システムの検知遅延時間 500ms) ・判定機能付き 3D スキャナ単体装置において、600 回の侵入に対して誤検知なし (2 方向から同時データ取得を想定し、誤検知率は$(1/600) \times (1/600) = 2.8$ ppm <システムの許容誤検知)
成果	<ul style="list-style-type: none"> ・検知の空間誤差 0.2%となり目標達成 (1.5m 先で 3.5mm の誤差を実証) ・データ遅延時間 (平均) 218.5ms となり目標達成 ・デバイス完成後に誤検知率の測定が間に合わず、未達。
目標達成度	達成率 67%

2-2 研究サブテーマ②

多色(多波長)化および直交偏光利用による多種類光源およびそれに対応したカメラの開発

本年度目標	8 種類以上の光源を実現する(4 時分割×2 波長)
成果	<ul style="list-style-type: none"> ・2 波長混在光源を実現した。 ・6 時分割(>目標値 4 時分割) を実現した。
目標達成度	100%達成

2-3 研究サブテーマ③

侵入予測アルゴリズムの開発

目標	検知エリア外の移動者に対して、アラームの誤作動率 1%以下
成果	侵入予測システムの構築は実現した。 誤作動率 1%を実現する目処を得るも、実証には至らなかつた。 (昨年度までに 3%は達成、また、チャンピオンデータでは 1%も達成)
目標達成度	75%達成

2-4 研究サブテーマ④

侵入判定手法の検討

目標	差分検出処理時間 200ms 以下
成果	差分検出処理時間 115ms を実現 (目標達成)
目標達成度	100%達成

2-5 研究サブテーマ⑤

侵入検知システムの試作および評価

本年度目標	(1) 侵入検知システムの試作を行い、 システムの誤検知率 3.4 ppm 以下 (100 万分の 3.4 以下) 検知の遅延時間 500ms 以下 システムの空間誤差 0.5%以内 システムの連続稼働時間 720 時間以上 を実現すること。
成果	(1) 試作品を完成させ、 検知の遅延時間 334ms (目標値 500ms 以下) システムの空間誤差 0.4%(目標値 0.5%以内) を達成。しかし、システムの誤検知率、およびシステムの連続稼働時間の評価は未実施。
目標達成度	75%達成

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社ノア 北海道技術開発センター 長枝 浩

Tel./Fax. : 011-299-9757

E-mail : nagaeda@kknoa.co.jp

第2章 本論

2-1 研究サブテーマ①

ワンショット 3D スキャナに差分検知機能を付加した組み込みデバイス開発

○ 実施内容および実施担当

実施内容	<p>侵入検知のための基本データとなる 3D スキャニング部のデバイス開発を担う。製造現場における侵入を検知するという目的から、以下の目標を掲げデバイス開発に取り組む。</p> <ul style="list-style-type: none">●目標: 検知の空間誤差 0.5%以下(5m 先で 2.5cm 以下<3cm)●目標: データ遅延 300ms 以下(<システムの検知遅延時間 500ms)●目標: 判定機能付き 3D スキャナ単体装置において、600 回の侵入に対して誤検知なし <p>開発内容としては下記となる。</p> <p>(1) 空間誤差を低減するための、光学設計技術および画像処理技術を融合させた技術開発を実施する。最終的には、設計・試作・評価を行い、空間誤差が目標値に達することを確認する。</p> <p>(2) リアルタイムで大量のデータを処理するため、FPGA を前処理デバイスとして利用し、FPGA と CPU の役割分担の最適化を図る。</p> <p>(3) 組み込みデバイスによる機器の信頼性を確認するため、多数回の侵入に対する誤検知評価を実施する。</p>
実施担当	<p>(1) CPU 組み込み設計・開発: ノア</p> <p>(2) FPGA を用いた処理の高速化開発: 北海道立総合研究機構</p> <p>(3) 光学部品配置設計: ノア</p>

○ 個別項目の結果

2-1-1 3D スキャン空間誤差の低減開発

本研究開発で前提としているワンショット 3D スキャナの 3D 計測原理は光切断法に基づいており、光源で投影しているパターン 1 つについて着目すると以下の図のようになる。

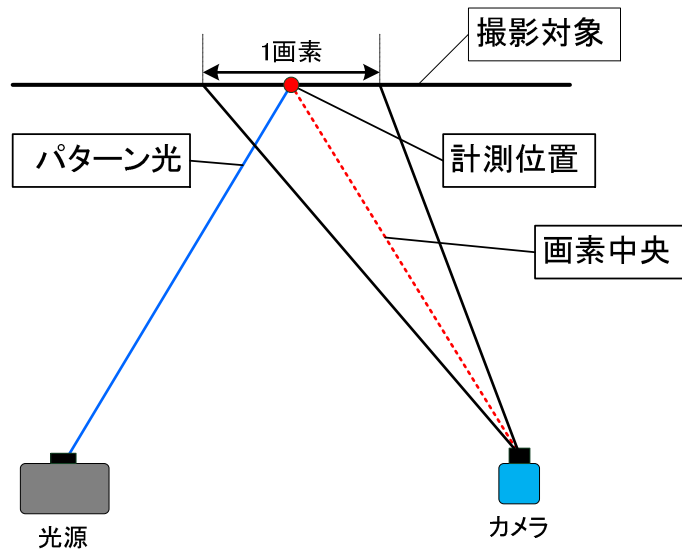


図 2-1-1-1 光切断法による計測時のイメージ

撮影対象上に投影されたパターン光について、カメラ画素上で観測された上記図中赤丸の計測位置について、そのカメラ画像上の画素位置を元にカメラ、光源のレンズ焦点距離、画素サイズ等の内部パラメータとカメラ-光源間の距離と向きによる外部パラメータから、カメラレンズ焦点位置を基準とした計測位置の3次元座標の算出を行っている。

上記図中ではパターン光がカメラ画素中央に撮影された場合の図としているが実際の画像上ではその最小単位である画素内にパターンが撮影されていると判断する事になる。そのためその画素サイズが誤差の範囲となる。1画素での奥行方向の誤差の範囲は以下の図のようになる。

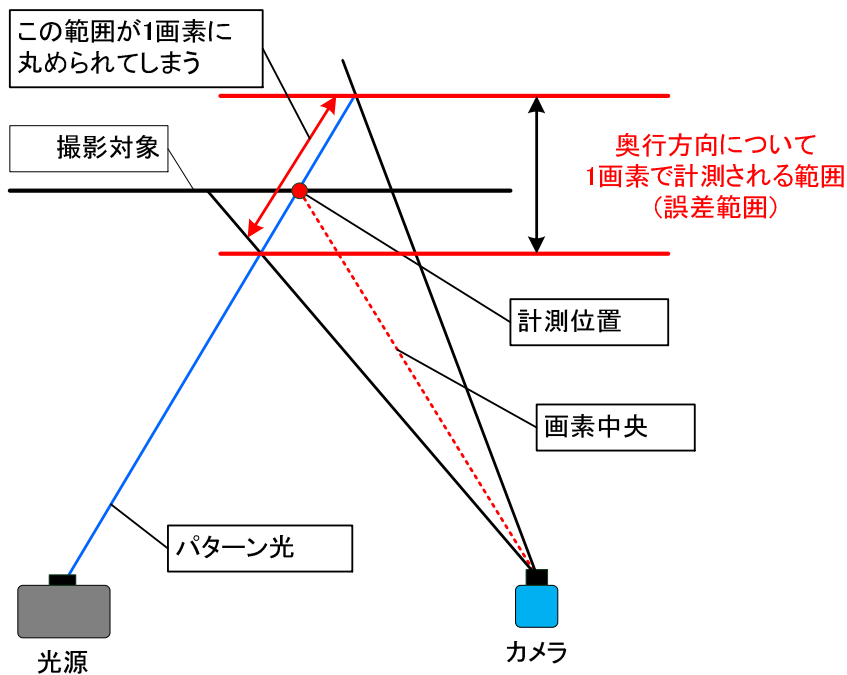


図 2-1-1-2 1画素の奥行方向の誤差の範囲

パターン光は上記図中の赤い矢印で示した範囲についてカメラ画像上の 1 画素で撮影され、その範囲が画像サイズ 1 画素内に丸められ、最終的に計測データの奥行方向の誤差となって現れることとなる。つまり、上記図中の撮影対象が赤い矢印の範囲内で異なる位置にあったとしても、同じ位置として計測される事になる。

この誤差については、カメラ・光源間の距離を変えることで奥行方向の誤差が変わる事がわかっている。

具体的にカメラ・光源間の距離を変えると、どの様に奥行き方向の誤差が変化するか検討を行った。

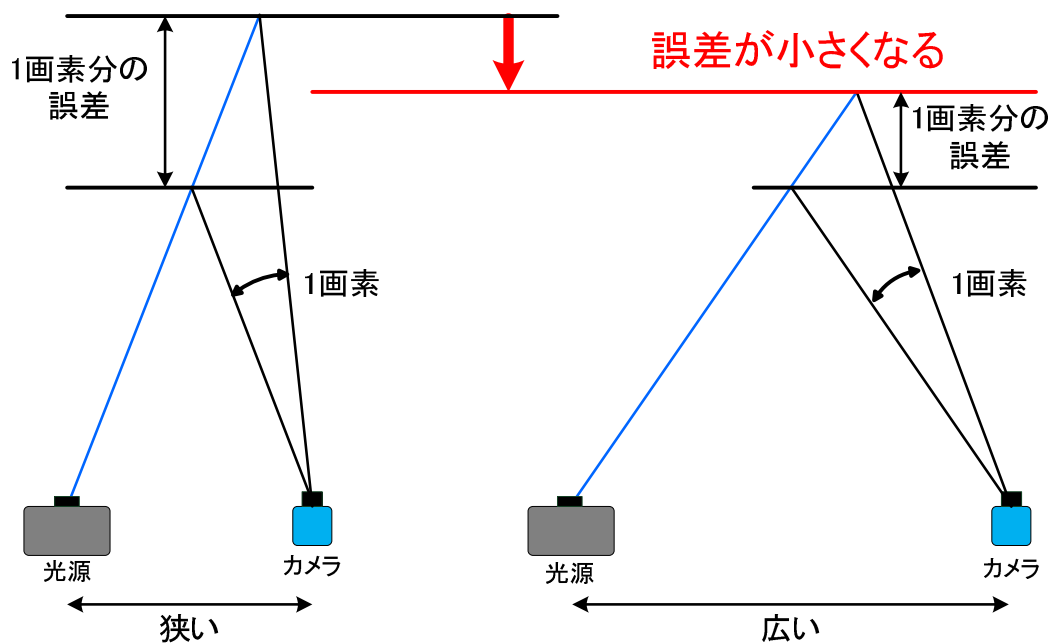


図 2-1-1-3 カメラ光源間の距離を変化させた場合

撮影対象の奥行き方向の位置が同じで、左右方向はカメラ・光源間の中央となる様に光源、カメラの向きを変えつつカメラ・光源間の距離を広げて行くと、光源のパターン光がカメラ側へ傾いていき、同様にカメラの視線の向きについても光源側に傾いていく。それにより上記図の様にカメラ 1 画素で捉える光源の幅が短くなる。そのため 1 画素当たりの奥行き方向の範囲が小さくなる。これによりカメラ・光源間の距離を広げることで奥行き方向の誤差が小さくなる。

ただし、これはスキャナの筐体サイズに直結し、カメラ・光源間の距離をとり過ぎると可搬性や設置性等が犠牲となってしまふ。そのため可搬性や設置性を考慮しおおよそ 300mm 程度を上限の目安とする事とした。

奥行き方向の誤差の原因については解析を行った際に、画素サイズについても関連が有ることがわかっている。

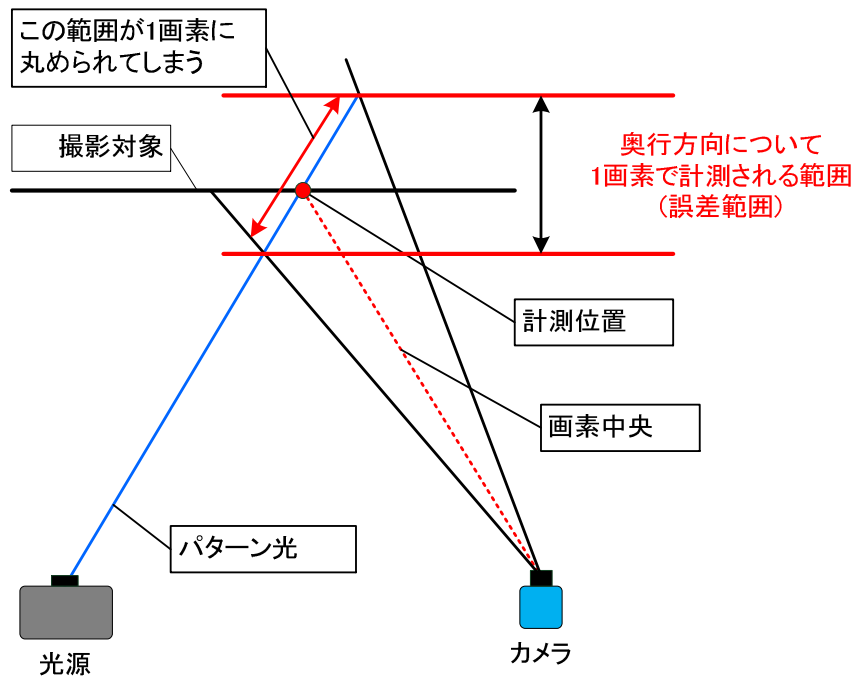


図 2-1-1-4 1画素の奥行方向の誤差範囲

上記図の様に赤い矢印で示した範囲についてカメラ画像上の1画素で撮影され、その範囲が画像サイズ1画素内に丸められ、最終的に計測データの奥行方向の誤差となって現れることとなる。そのため画素サイズを小さくする事でも奥行き方向の誤差を小さくする事が可能である。

画像サイズについては、画素サイズの小さいイメージセンサを搭載したカメラを使用する事となる。その弊害として同等の機能、性能を有するカメラで画素サイズの小さいものは多くの場合、価格が同等以上となる。又、画素サイズが小さくなることで画素の受光面積が減るため光量に対する感度が下がる。そのため同等の受光感度の物を検討した場合やはり価格が同等以上となる等コストアップにつながる。

画素サイズを小さくする事と同等の方法としてレンズの焦点距離を変える方法があり、その効果についても検討を行った。

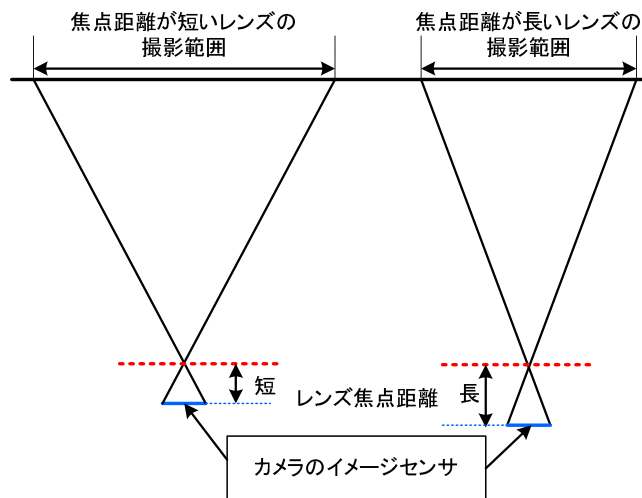


図 2-1-1-5 レンズ焦点距離の違いによる分解能の違い

上記図の左側がレンズ焦点距離が短い場合、右側がレンズ焦点距離が長い場合の撮影イメージとなる。図中の赤い線で示したカメラレンズの焦点位置を基準として同じ距離に離れた対象物を撮影した場合、図左側のレンズ焦点距離が短い場合の撮影範囲は、図右側のレンズ焦点距離が長い場合と比べ広くなる。そのため画素数、画素サイズが同じイメージセンサの場合、画素当たりの撮影範囲は図右側のレンズ焦点距離の長い方が小さくなる。それにより、画素サイズを小さくした事と同じ効果が得られる事が分かった。

この方法では、焦点距離の異なるレンズが同価格体で入手可能であるため価格面でのコストアップにはつながらない。ただし焦点距離が異なることで撮影画像の明るさが異なる等の弊害があるが、撮影画像の明るさについてはテストにより現状のカメラとの組み合わせに置いて問題ない事を確認した。

以上の検討内容を元に具体的な数値を用いた検討を行うにあたり条件を以下のように定めた。カメラについては画素サイズ $4.5\mu\text{m}$ とし、カメラレンズは焦点距離 $f=8\text{mm}$ 、 $f=12\text{mm}$ 、 $f=16\text{mm}$ の3種類。

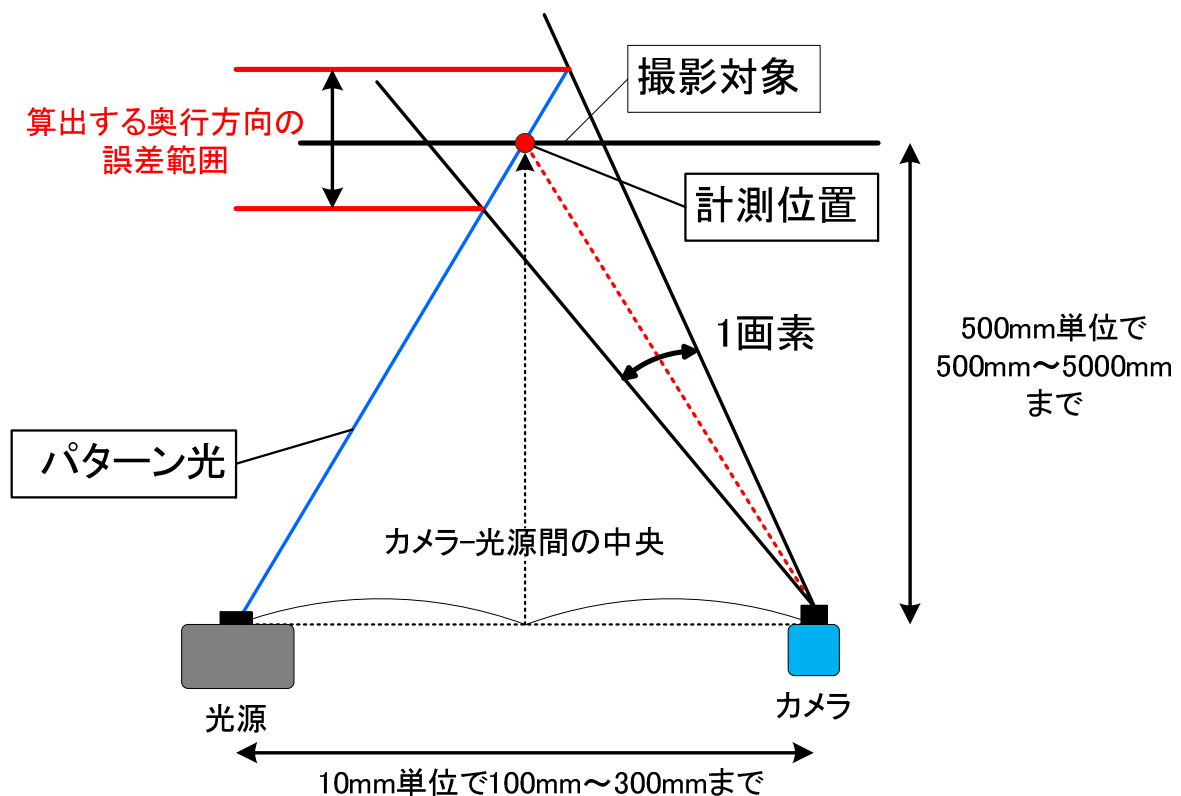
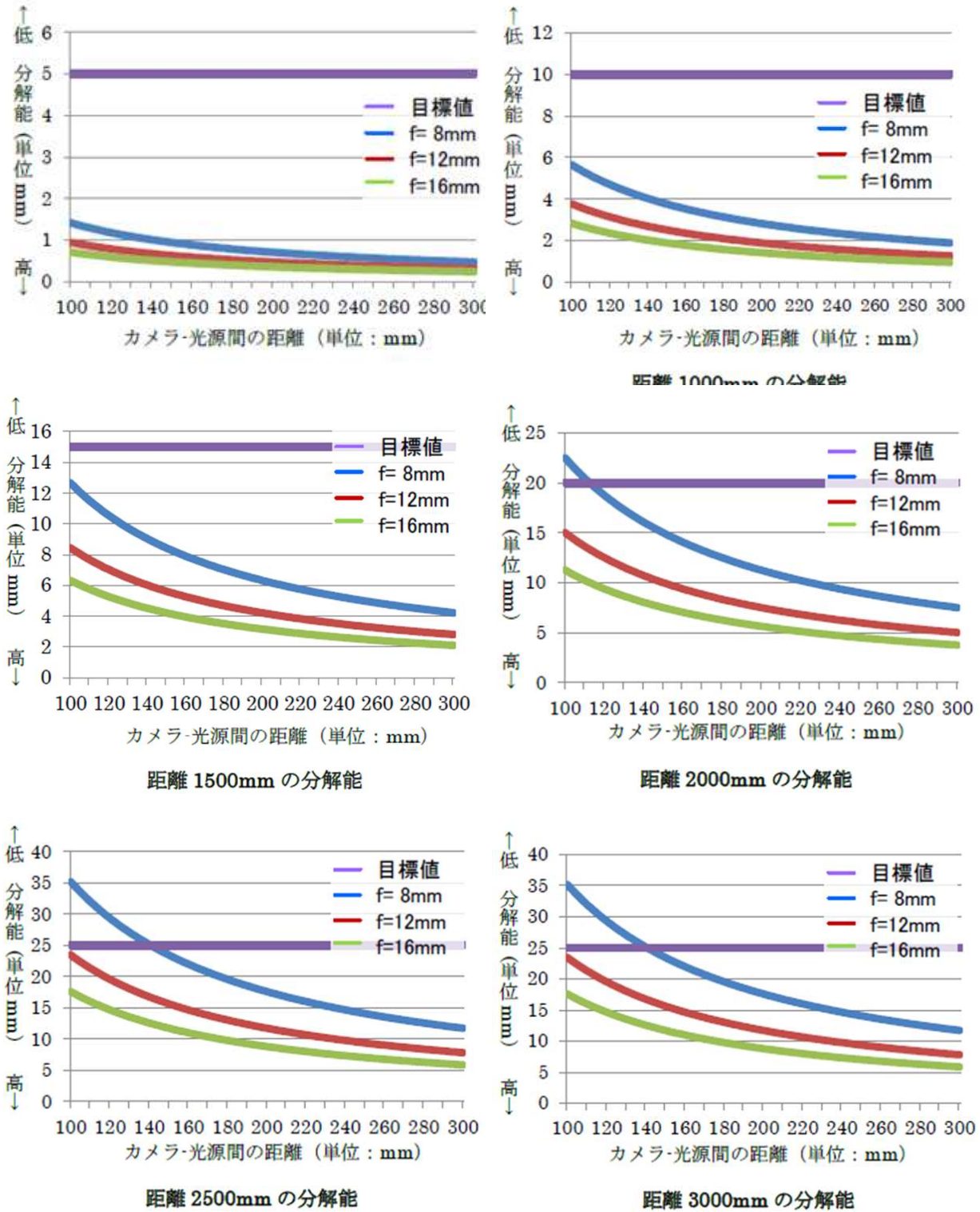


図 2 - 1 - 1 - 6 数値検討の前提条件

計測位置は上記図に示したようにカメラ-光源間の中央位置、撮影対象の奥行方向の距離は 500mm 単位で $500\text{mm}\sim 5000\text{mm}$ 、カメラ-光源間の距離は 1mm 単位で $100\text{mm}\sim 300\text{mm}$ とした。誤差範囲の算出は上記図中の赤丸に示したカメラ-光源間の中央位置となる計測位置がカメラ画素中央となる場合の誤差範囲について算出を行った。

具体的に数値を用いた検討結果が以下のグラフとなる。



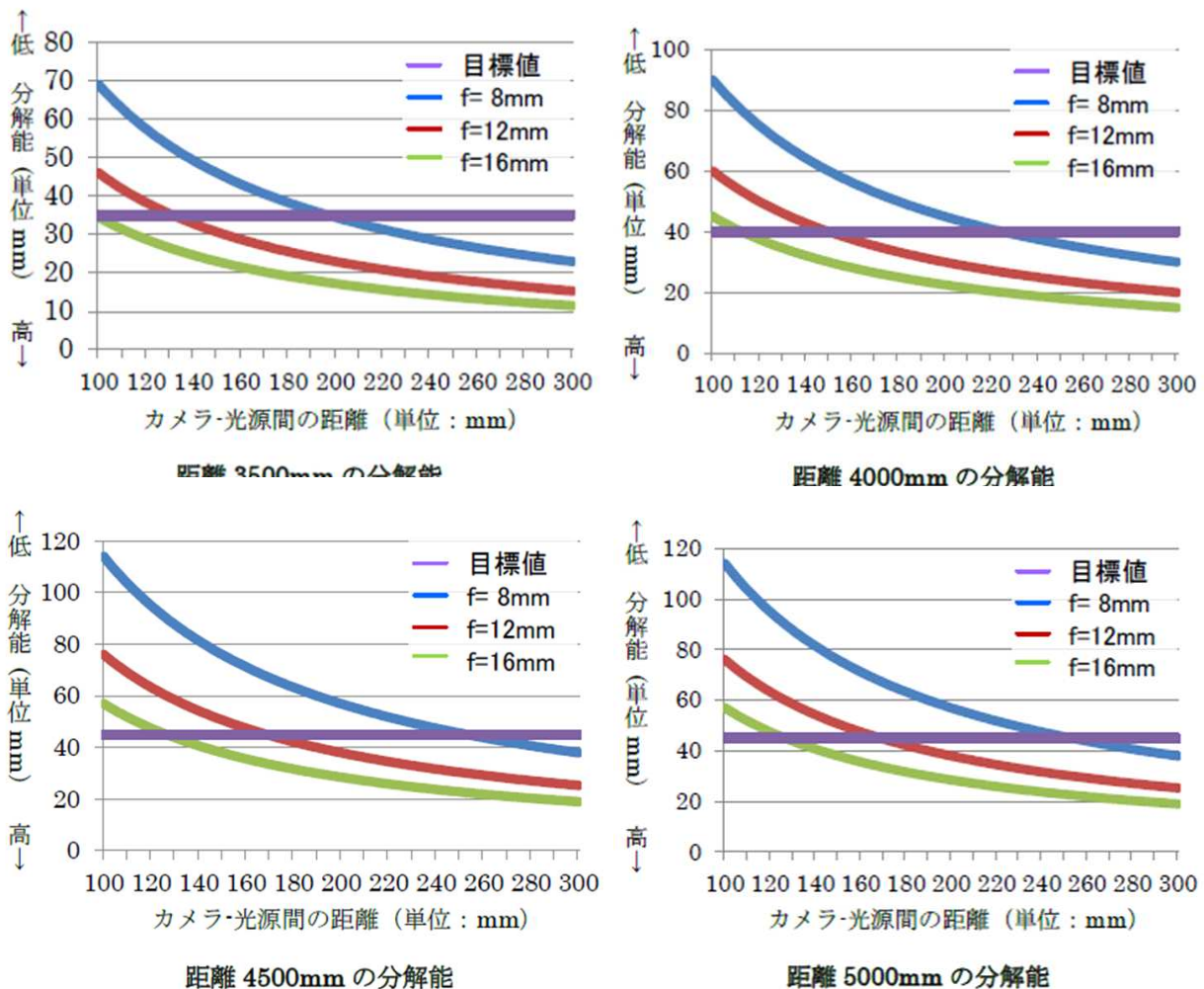


図 2-1-1-7 分解能の検討結果

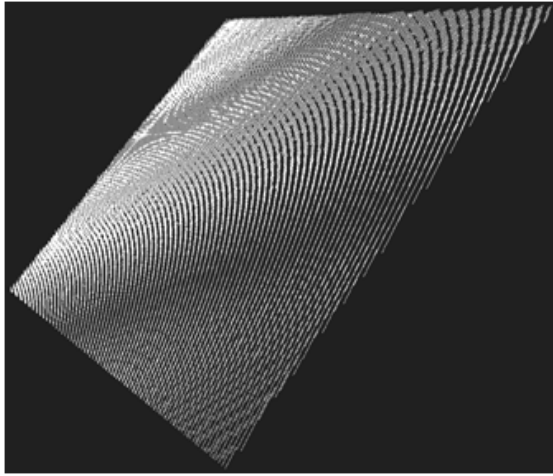
各結果を比較すると距離 5000mm の分解能が一番悪くなっている。距離 5000mm の時の空間分解能が目標としている空間誤差 1%以下となるレンズとカメラ・光源間の距離との組み合わせであれば、距離 5000mm よりも短い位置においても目標としている空間誤差 1%以下を満たすことになる。

結果から距離 5000mm の分解能が目標としている空間誤差 1%以下となるレンズとカメラ・光源間の距離の組み合わせは以下ようになる。

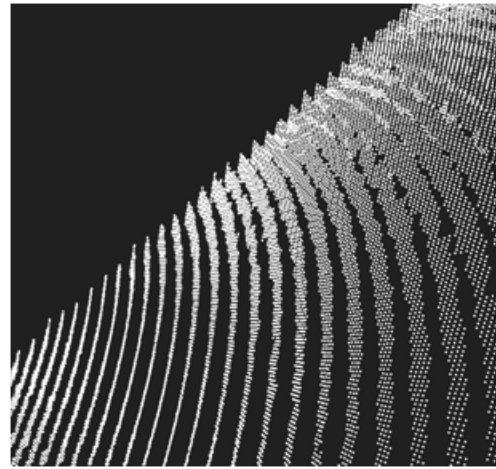
- ・レンズ焦点距離 $f=8\text{mm}$ ではカメラ・光源間の距離約 250mm 以上
- ・レンズ焦点距離 $f=12\text{mm}$ ではカメラ・光源間の距離約 185mm 以上
- ・レンズ焦点距離 $f=16\text{mm}$ ではカメラ・光源間の距離約 140mm 以上

上記の中から分解能、筐体サイズのバランスの良い所と言うことでレンズは焦点距離 $f=12\text{mm}$ の物を採用する事とし、カメラ・光源間の距離は約 200mm とした。

次に、実機にて検証のためカメラレンズ焦点距離 $f=12\text{mm}$ 、カメラ・光源間の距離 200mm で奥行き 1.5m 先の平面のテスト計測を行った。その 3D データを以下に示す。



撮影した 3D データの全体



撮影した 3D データを拡大

図 2-1-1-8 撮影した 3D データ

次に、これらの誤差を見積もるため、Z 値の誤差分布をグラフ化した。その結果を図 2-1-1-9 に示す。

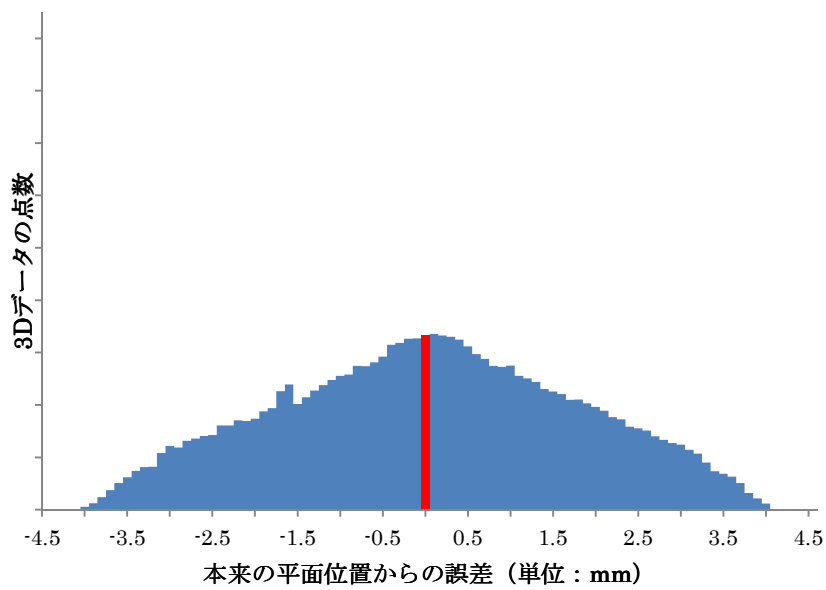


図 2-1-1-9 補正前後の誤差分布

これより誤差が $\pm 4\text{mm}$ の範囲であることがわかる。本来の平面位置は 1500mm なので、誤差比率は $4/1500 \times 100 = 0.27\%$ となり、目標値の 0.5% を十分に達成していることが確認された。

2-1-2 FPGA を用いた処理の高速化開発

2-1-2-1 開発概要

研究項目「ワンショット 3D スキャナに差分検知機能を付加した組み込みデバイス開発」では、3D スキャナ単独で侵入検知を行える機能の開発を行う。侵入検知には、連続して撮影される画像に対する高速な検出処理が必要となるため、本研究では、極めて多量のデータを高速に処理する必要のある画像処理機能を中心に、FPGA を用いてハードウェア処理を行う高速処理モジュールの開発を行った。

ワンショット 3D スキャナでは、プロジェクターにより格子状のラインパターンが投影された対象物の画像をカメラにより取得し、その画像中のパターンと投影したパターンとのずれから、対象物の距離情報を求めている。画像中のパターンは、平滑化処理、微分処理などを組み合わせて検出するが、縦横のラインが交差する点などで、本来連続しているべきラインが分断されることがあるため、様々なフィルタなどを組み合わせた処理手法を開発した。線検出後に行う交点検出処理等についても、ハードウェアによる処理手法を開発し、線検出処理とあわせて回路設計、シミュレーションを行って、動作を確認した。

また、組み込み CPU ボードと FPGA を組み合わせたシステムを構成するために必要な、CPU と FPGA との通信を USB3.0 により行う機能の実装も行った。

PC と FPGA を接続した実験を行い、線や交点の検出処理、通信機能の動作と処理時間を確認した。

2-1-2-2 組み込み CPU ボードと FPGA を組み合わせたシステムの構築

(1) USB3.0 を用いた通信機能の実装

組み込み CPU ボードと FPGA を組み合わせたシステムを構成するためには、CPU と FPGA の間で高速にデータを送受信する機能が必要である。そこで、本研究では、CPU と FPGA 間の通信に、汎用の高速インターフェースである USB3.0 を採用し、FPGA に通信機能を実装した。

(2) PC と FPGA 評価ボードを接続した実験

前述の線・交点検出処理と USB3.0 通信機能を FPGA 評価ボードに実装し、PC と接続して線検出処理と通信機能の確認を行った。

評価ボードは、Altera 社製 Cyclone V E 開発キットを使用した。この開発キットには、Altera 社の低価格帯量産向け FPGA である Cyclone V E A7 が搭載されており、線・交点検出処理と USB3.0 通信機能を実装したときのリソースの使用状況は、表 1 のとおりである。なお、入力画像、出力画像ともに 1024×768 画素、24bit カラーである。

RAM Blocks の使用量が 80%と多くなっているが、このうち 60%は、入力画像の転送が終了するまで FPGA 内に処理結果を保存しておくために使用しているもので、入力画像を受信しながら処理結果の送信を行えば、RAM Blocks の使用量は 20%程度に抑えることができる。

表 FPGA のリソースと使用状況

	Total	Usage
Adaptive Logic Modules (ALMs)	56,480	5,303 (9%)
Logic Array Blocks (LABs)	5,648	1,080 (19%)
RAM Blocks	686	552 (80%)※
DSP Blocks	156	40 (26%)

実験は、

- ①PC から FPGA に入力画像を送信
- ②FPGA で受信した画像に対する線・交点検出処理を行い、結果を PC に送信
- ③PC で処理結果を受信

という処理を行い、PC で受信した処理結果を数値計算で求めた処理結果と比較した。また、この処理を繰り返し行い、処理時間を計測した。

(3) 実験結果

FPGA で処理した結果と数値計算の結果の例を図 2-1-2-10 に示す。線の検出／不検出や端部の長さなどで違いが見られるが、ほぼ同等の結果が得られている。FPGA と数値計算の差は、演算精度の違いなどに起因するものと考えられる。

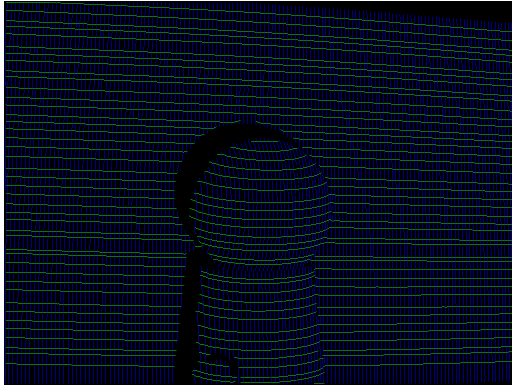
また、処理時間は、PC での送信開始から PC での受信終了まで約 20ms であった。処理時間のほとんどは、データ転送時間であり、PC から FPGA への転送開始から転送終了まで約 11ms、FPGA から PC への転送開始から終了まで約 9ms を要している。FPGA 内部での処理は、1 画面分のデータ受信を待たず、到着したデータから順に行われるため、PC 側の処理を、送信中もデータを受信するように改善すれば、処理時間はおよそ半分に短縮されると見込まれる。



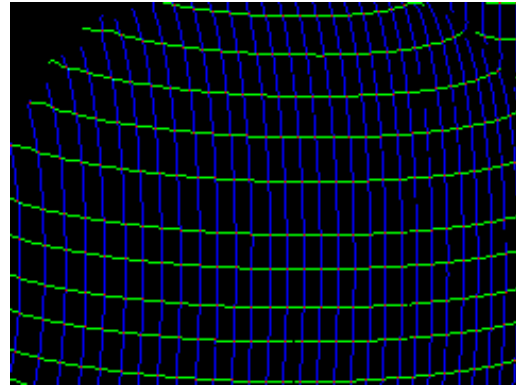
(a) 入力画像



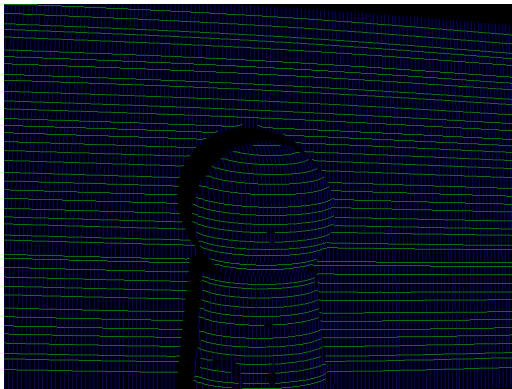
(b) 入力画像(拡大)



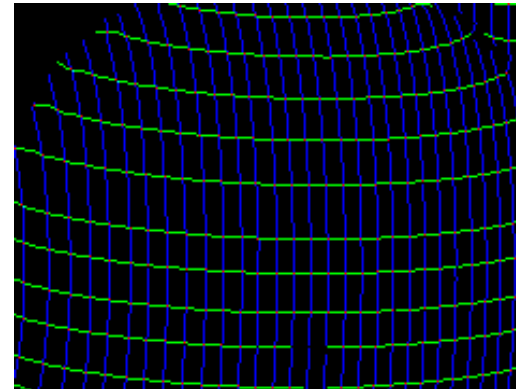
(c)FPGA 処理結果



(d)FPGA 処理結果(拡大)



(e)数値計算処理結果



(f)数値計算処理結果(拡大)

図 2-1-2-10 線検出処理結果の例

2-1-2-3 FPGA 開発のまとめ

本年度は、投影されたパターンを撮影した画像から縦および横方向の線検出を行う安定性の高い処理を開発した。また、線検出処理の後処理である短線消去処理や交点検出処理の開発も行った。これらの処理は、ハードウェア処理との親和性を考慮し、テンプレートを用いたフィルタ処理を中心に構成した。

開発するシステムは、組込み CPU ボードと FPGA を組み合わせたものとなるため、CPU と FPGA との通信機能の実装も行い、FPGA 評価ボードと PC を接続した実験において、線検出処理の結果や処理時間の確認を行った。

処理時間のほとんどがデータ転送時間のため、CPU 側のプログラムを送受信同時に行うよう改善することで処理時間を約半分に短縮でき、FPGA の内蔵 RAM 使用量も大幅に削減可能である。

また、FPGA にカメラの画像を直接入力し、処理時間の短縮と CPU の負担軽減を図ることや、3次元復元処理の一部を FPGA での処理に取り込み処理時間の一層の短縮を図ることが考えられ、今後の課題である。

2-1-4 データ遅延の低減検討および評価

FPGAによる線分検出以降のCPUで行う処理についてもアルゴリズム、処理方法の検討を行い、処理時間の短縮を図った。

処理時間を計測した結果が以下のグラフとなる。

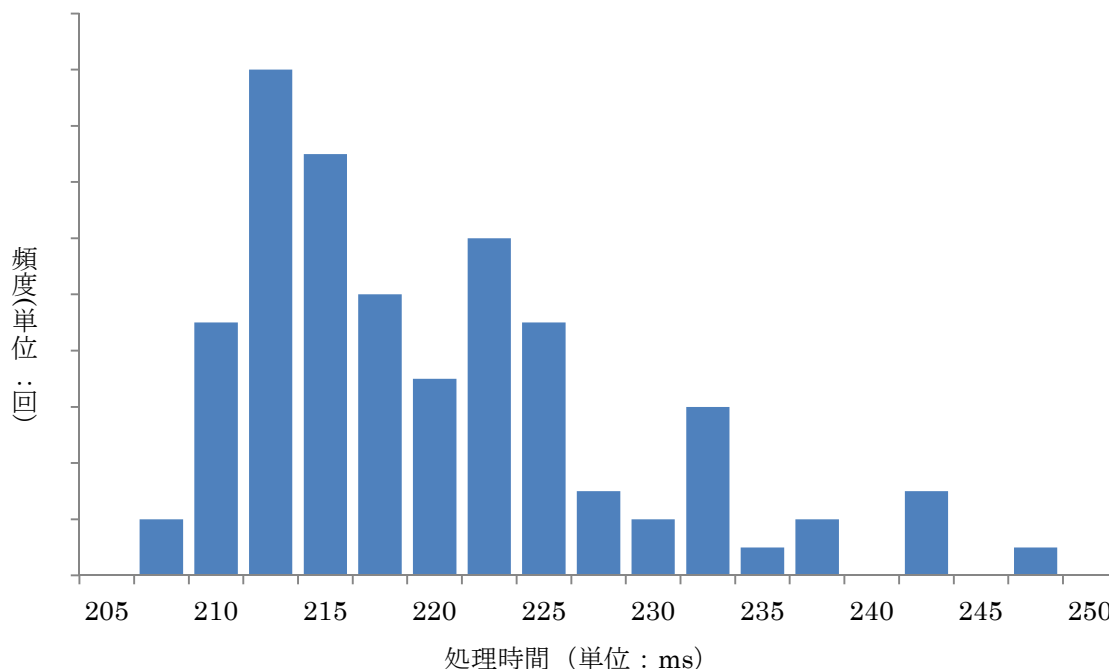


図 2-1-4-1 線分検出-3次元復元の処理時間

グラフ横軸が処理時間 (単位: ms)、縦軸がその回数となる。

処理時間のばらつきはあるが、平均 218.5ms、ワーストケースでも 250ms 以下となっており、目標としているデータ遅延 300ms 以下を達成している。

2-1-5 成果

目標	<ul style="list-style-type: none"> 検知の空間誤差 0.5%以下 (5m 先で 2.5cm 以下 < 3cm) データ遅延 300ms 以下 (< システムの検知遅延時間 500ms) 判定機能付き 3D スキャナ単体装置において、600 回の侵入に対して誤検知なし (2 方向から同時データ取得を想定し、誤検知率は $(1/600) * (1/600) = 2.8$ ppm < システムの許容誤検知)
成果	<ul style="list-style-type: none"> 検知の空間誤差 0.2%となり目標達成 (1.5m 先で 3.5mm の誤差を実証) データ遅延時間 (平均) 218.5ms となり目標達成 デバイス完成後に誤検知率の測定が間に合わず、未達。
目標達成度	達成率 67%

2-2 研究サブテーマ②

多色(多波長)化および直交偏光利用による多種類光源およびそれに対応したカメラの開発

○ 実施内容および実施担当

実施内容	アクティブタイプの 3D スキャナでは、複数の 3D スキャナからの照射光線パターンが重畳されてしまうと、データ取得ができなくなる欠点を有しているため、互いに判別可能なように光学特性が異なる 8 種類の光源を実現することを目標に開発を行う。 光学特性としては、波長、偏光、照射タイミングを 3 種類の検討を実施する。
実施担当	光源の設計および試作： ノア

○ 個別項目の結果

2-2-1 2色パターン光源の設計

2色を混合できる光源を実現すれば、色の組み合わせにより複数種類の光源が実現できる。まず、単色パターン光源+ダイクロイックフィルタによる多重方式を検討した。その結果を光学素子簡易構成図を示す。

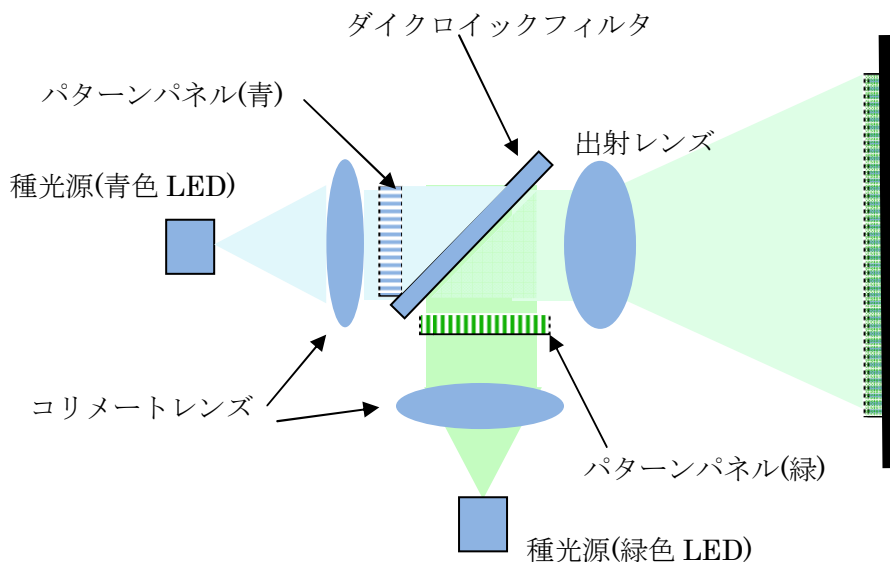


図 2-2-1-1 光学素子簡易構成図

この簡易構成を元に、下記の視点から設計を行った結果を下記に示す。

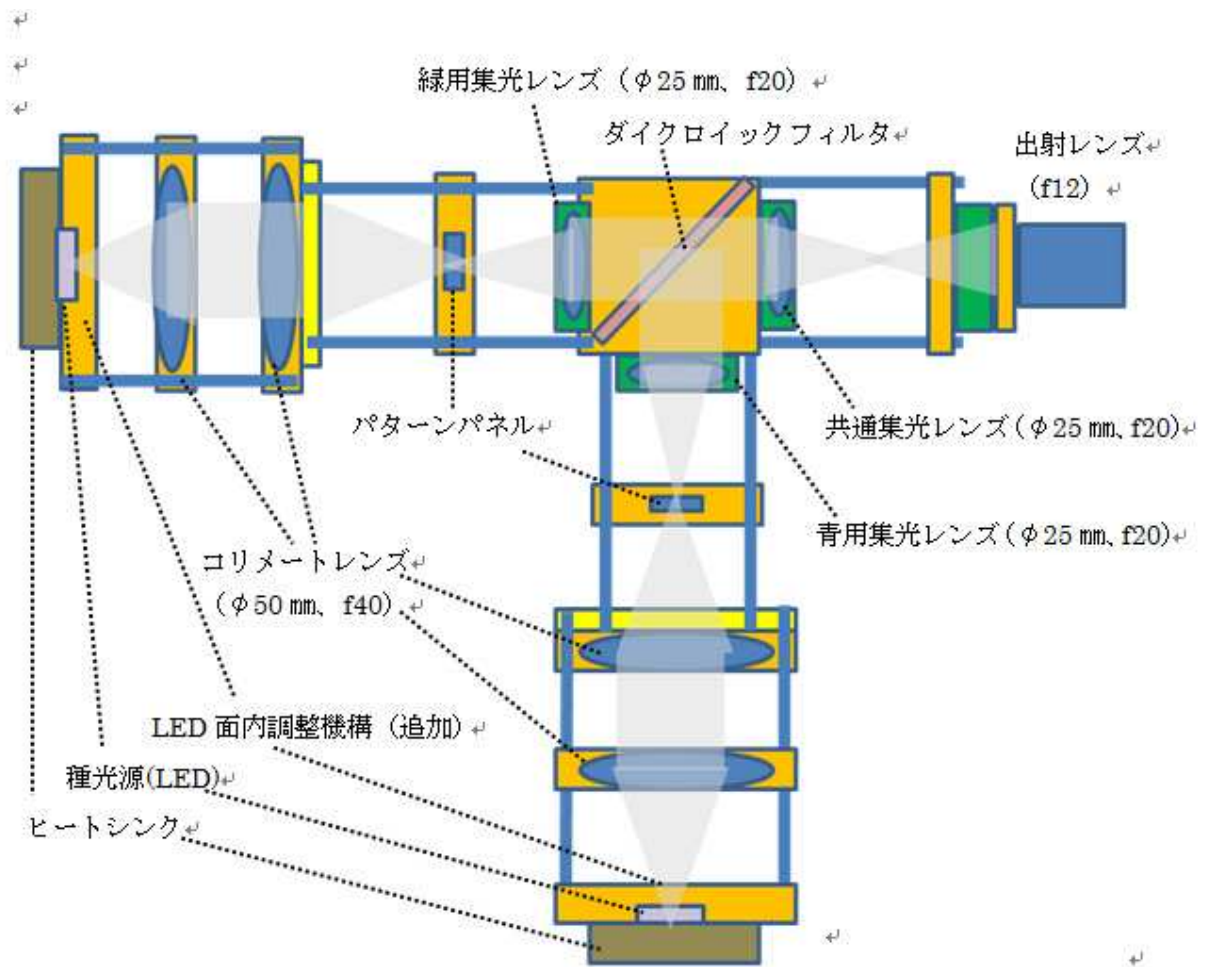


図 2-2-1-2 光源の部品構成図

この設計を元に作製した光源の写真を図 2-2-1-3 に、この光源から得られた照射パターンを図 2-2-1-4 に示す。

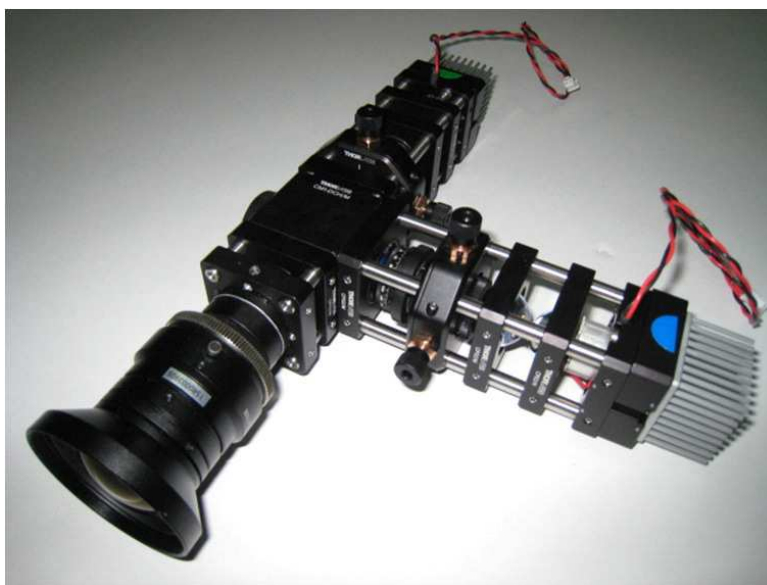


図 2-2-1-3 試作した 2 色光源

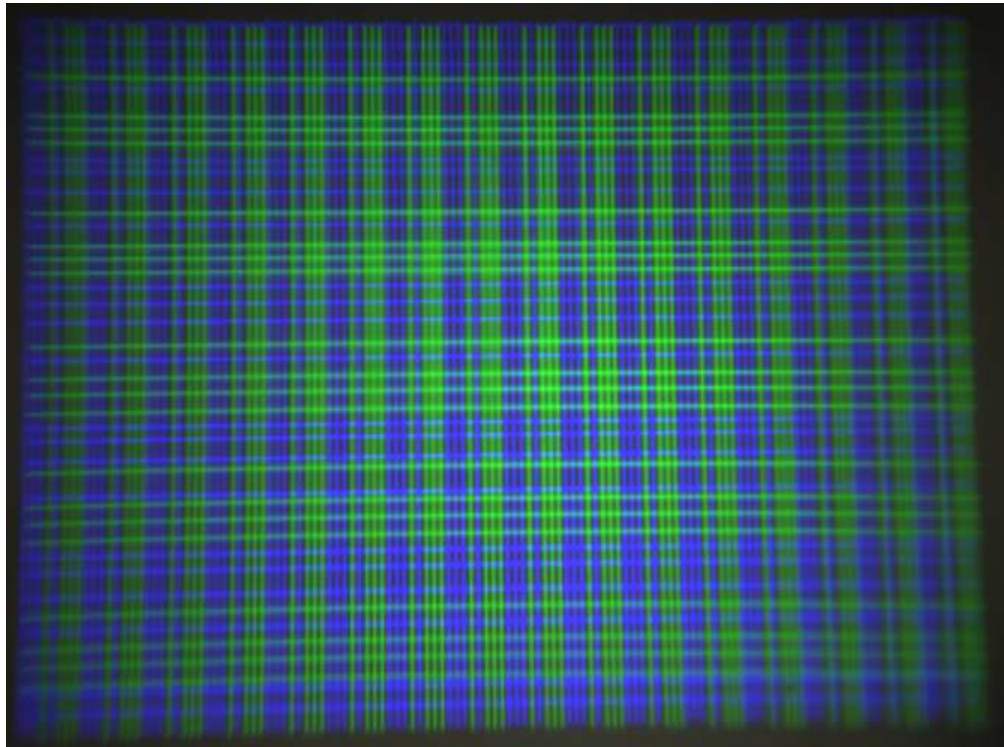


図 2-2-1-4 得られた照射パターン

2-2-2 時分割多重手法の検討

波長多重以外の 2 種類の多重を確保するための多重方式として、時間的に信号を分割する、時分割多重方式について検討した。下記図 2-2-2-1 にカメラシャッタータイミングと光源のパルスタイミングの概念図を示す。通常、1 フレーム (30fps の場合 33ms) に 1 回のシャッター ON、および光源については連続光 (パルス化しない) という構成の 3D スキャナに対して、1 フレームに 2 回のシャッター ON、光源はそのシャッターに同期させたパルス化を行う。1 台目のスキャナが光線を照射し、シャッターを ON にしている間は、2 台目のスキャナは光線を OFF、シャッターも OFF に、2 台目のスキャナが光源、シャッターが ON の時は、逆に 1 台目が OFF になるため、自分の光源パターン以外を取得することはなく、互いの信号を多重化できる。

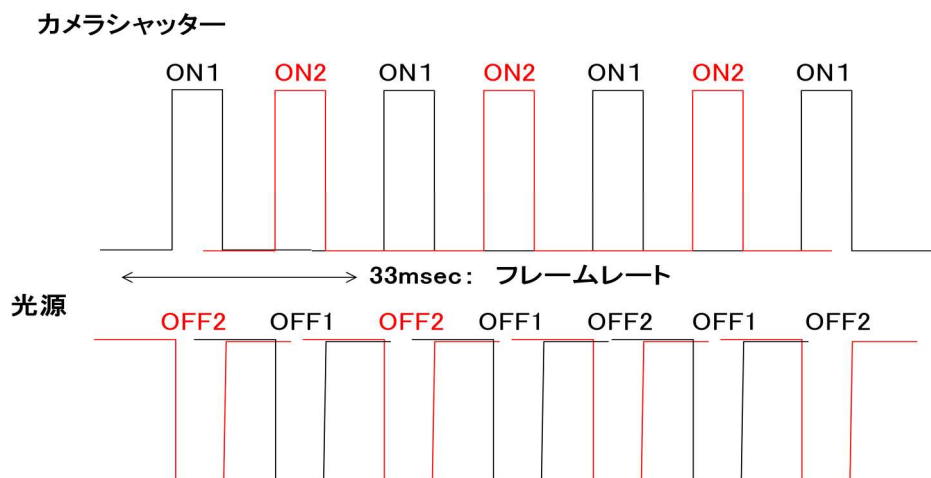


図 2-2-2-1 カメラシャッターと光源パルスのタイミング

このアルゴリズムを 3D スキャニングシステムに組み込み、時分割多重の検証を行った。
 図 2-2-2-2 に実験系、図 2-2-2-3 に実験結果を示す。

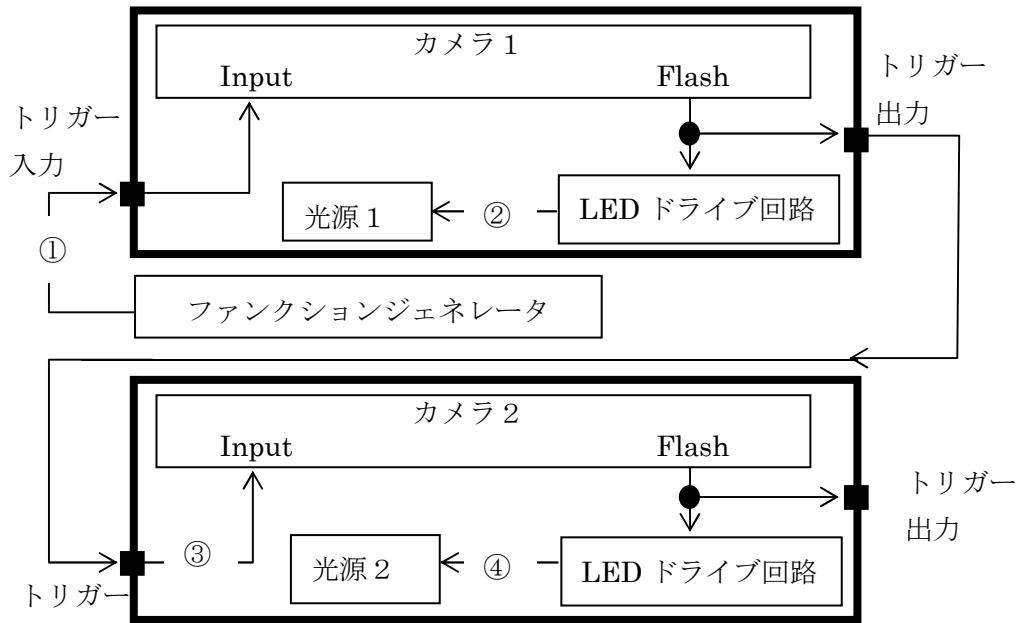


図 2-2-2-2 実験系 (①~④の信号をオシロスコープで測定)



図 2-2-2-3 各部の信号波形 (横軸のフルスケールが 100msec , 縦軸の 1 目盛りが 1V)

光源パルス幅 5ms を実現できていることがわかる。2 台での実験となったが、上記の結果から、想定している 1 フレーム 33ms 内には、6 パルスが挿入できる (6 パルス×5ms < 33ms) ため、6 時分割が可能であることが実証された。

2-2-3 成果

本年度目標	8 種類以上の光源を実現する(4 時分割×2 波長)
成果	<ul style="list-style-type: none">・ 2 波長混在光源を実現した。・ 6 時分割(>目標値 4 時分割) を実現した。
目標達成度	100%達成

2-3 研究サブテーマ③

侵入予測アルゴリズムの開発

○ 実施内容および実施担当

実施内容	リアルタイム 3次元データを利用し、対象物の速度および方向ベクトルを算出し、検知エリアへ到達時間を予測、その時間が規定以内であればアラームを出力する。対象物速度および方向ベクトルの規定アルゴリズムの検討、侵入までの許容時間設定についての検討を行う。
実施担当	侵入予測アルゴリズムの検討： 北海道大学

○ 個別項目の結果

2-3-1 危険領域侵入検出の基本的考え方

危険領域侵入検出をシステムとして設計する場合、その用途によって根本的な考え方が異なる。危険領域侵入検出システムの考え方は大きく以下の2種類に分類することができる。

(ア)悪意の侵入検出システム(意図のある侵入の検出)

(イ)善意の侵入検出システム(意図の無い侵入の検出)

「悪意の侵入検出」は防犯や捜索を意図して設計されるシステムであり、侵入物(侵入者)は積極的に排除する方向で検出することが求められる。一方、「善意の侵入検出」は危険領域以外での行動はなるべく自由に行うことが求められ、意図しない危険領域侵入を防止するという方向で侵入検出をすることが求められる。

従来の危険領域侵入検出システムは悪意の侵入検出を目的としたものが多く、善意の侵入検出に求められる侵入者の行動の自由が考慮されることは少なかった。しかし、今回の研究において求められているのは作業空間での意図しない危険領域侵入の防止という「善意の侵入検出」であり、それに適合した新しい危険領域侵入検出の開発が求められることになる。

善意の侵入検出では以下の機能が求められる。

(ア)危険領域はなるべく狭く定義可能(限定的危険領域設定)

(イ)危険領域以外での行動の自由を妨げない(安全領域での行動の自由)

(ウ)意図しない侵入を予測する機能

次に、侵入検出能力を時間軸で分類する。危険領域への侵入は物理法則で拘束される時空間の現象であり、慣性の法則や時間連続性が成立している。これを考慮すると、予測的な危険領域侵入判定が可能になる。予測を含めた侵入判定基準として以下の3レベルを考察する。

(ア)領域境界を横断したことの検出(0次検出)

(イ)境界領域までの距離による危険度の検出(1次検出)

(ウ)境界領域に到達するまでの予測時間による検出(2次検出)

従来の危険検出は0次検出を基本としているが、侵入者の位置情報がより精密に測定できるならば、1次検出、2次検出を併用することにより、より精度の高い危険領域侵入検出が可能になる。予測的な1次、2次検出は安全領域での行動の自由を確保したうえでの、善意の侵入検出に対して有効であると考えられる。

2-3-2 深度画像の解析による危険領域侵入検出の高度化

動画（時系列）の深度画像を獲得することで、深度画像の時間変化を観測できる。それをを用いることで、単なる領域侵入の検出（0次判定）だけでなく、危険領域までの距離による侵入リスク判定（1次判定）、距離と移動速度による侵入予測時間によるリスク判定〔2次反転〕が可能になる。図2-3-2-1に深度画像（X-Z断面）状に設定された危険領域と深度データの最前面とからリスクを算定する概念図を示す。

図4で示すように、深度画像のX-Y座標で任意にZ値の危険領域を設定することができる。ここで危険領域は深度センサーの原点から、設定されたZ値($O_z(X,Y)$)以下の領域と定義される。遠方が安全領域で、手前に危険領域が設定されているものとする。

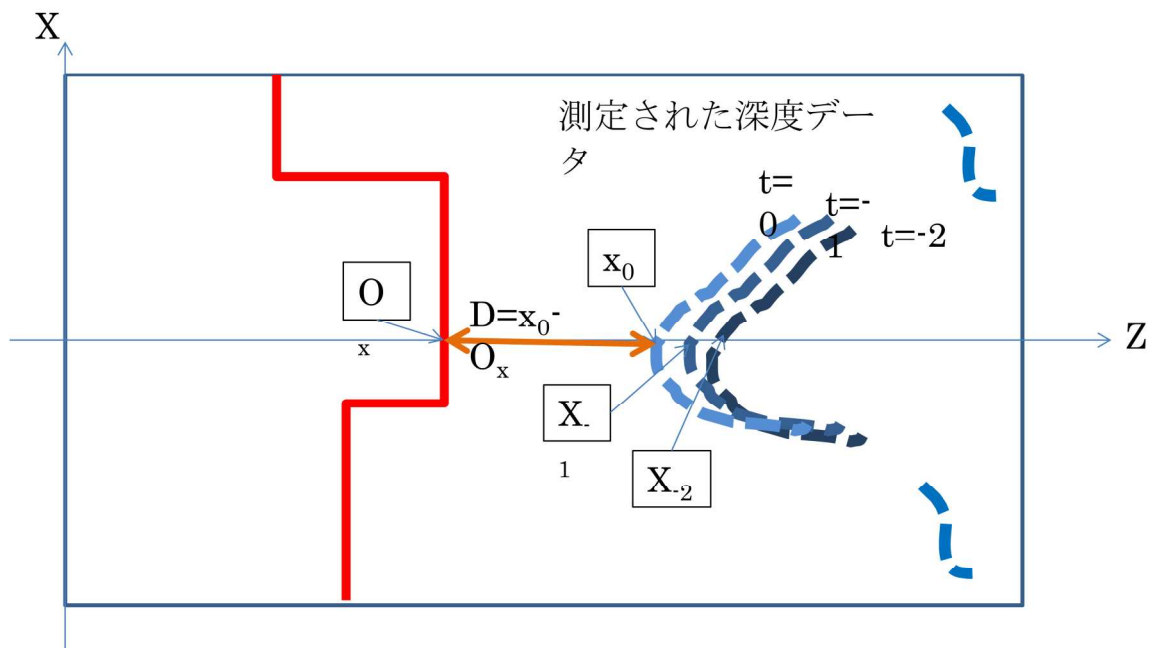


図2-3-2-1 リスク判定の高度化

リスク指数を用いることで、安全領域での行動自由を保った上で意図しない侵入に対して早期に警報を出すことが可能になる。特に2次リスク指数による危険検出では、危険領域ぎりぎりまで接近する場合でも、ゆっくり慎重に接近すれば直前まで警報なく近づけることになる。人間の意図を考慮した危険検出は危険領域近傍で作業する善意の作業員に対して行動の自由を高めることができる。図2-3-2-2, 図2-3-2-3, 図2-3-2-4 図2-3-2-5は2次リスク判定を用いて対象物の接近と後退を検出した例である。R2の値が正（接近）と負（後退）によってマークを色分けしており、深度画像ではリスクが判別できないがR2での評価によってどちらが危険度が高いかを区別できている。



図 2-3-2-2 (上) 接近する人の深度画像

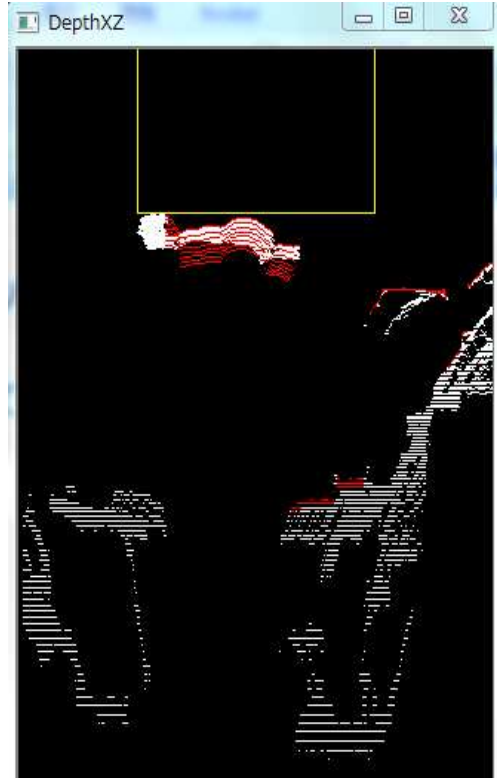


図 2-3-2-2 (右) R2 のが正 (接近) の部分
部分を赤でマーク



図 2-3-2-2 (上) 接近する人の深度画像

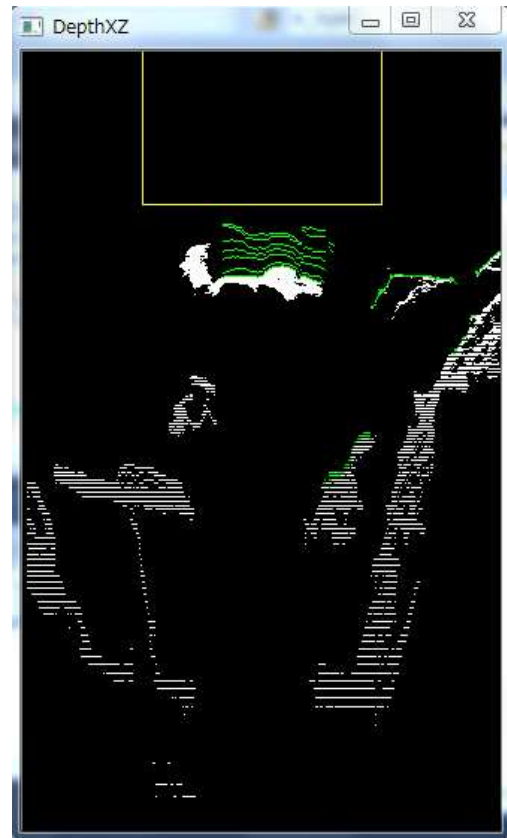


図 2-3-2-2 (右) R2 のが正 (接近) の部分を
緑でマーク

2-3-3 誤検出の統計的特性

試作システムを長時間動作させて MTBF の計測を行った。実験環境では数時間以上動作させても誤動作は観測されないため、単純な侵入判定アルゴリズムであっても十分な信頼性は確保できていることがわかった。同時に、人体部位（手、足）などの侵入に対しては確実な侵入判定が行えているため、当初目標とした 99%以上の精度は十分に得られていることが確認できた。

誤動作の特徴を調べるため、誤動作が多発する環境を人為的に作成し、1万回のサンプリングを行ってその特性を調査した。実験では、1万フレームに対し 290 回の誤検出を観測した。誤検出があった場合に、危険領域内に存在するボクセル数をカウントし、そのヒストグラム分布を計算した。実験例では 250 ボクセル程度の小さなブロックノイズが多発しており、人体などの大型侵入物とは観測パターンが異なるので、侵入物体のサイズをボクセル数カウントなどで計測し、閾値処理を行うことによりこの種のノイズは避けられることがわかった。

このノイズの発生原因であるが、パターンが小さいことと、短時間パターン（1-2 フレームのみ存在）することから、空中のダストや近傍物体の鏡面反射などが原因と推定される。

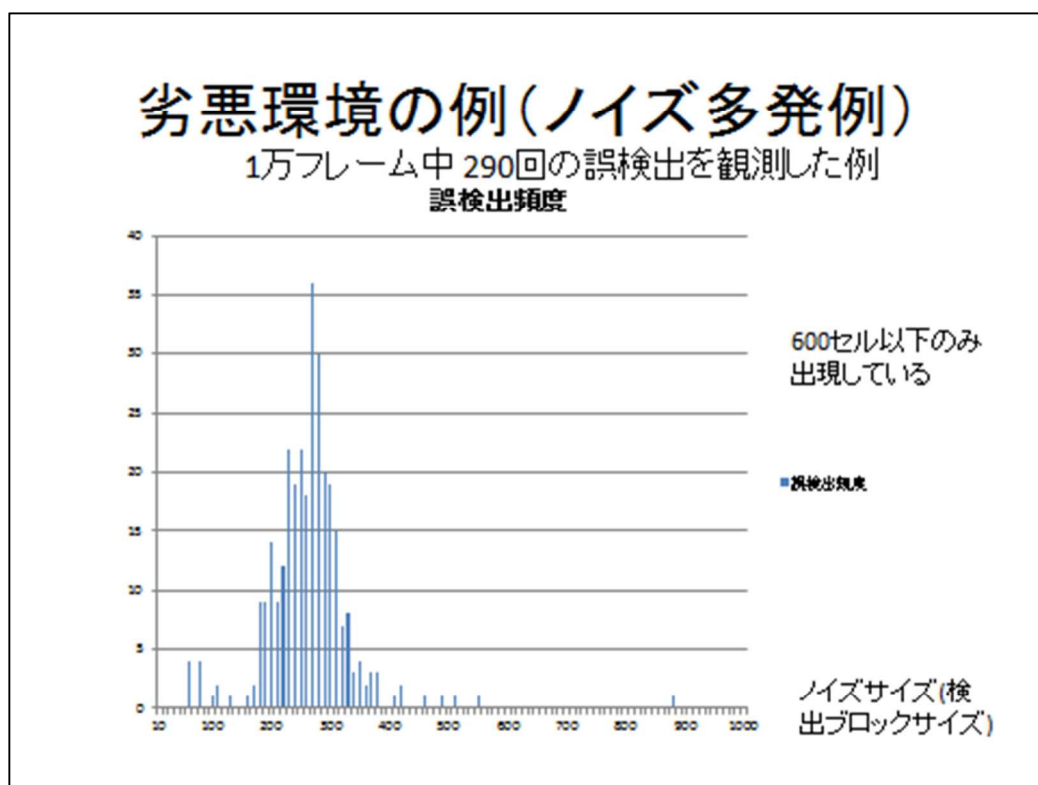


図 2-3-3-1 誤検出頻度のヒストグラム

2-3-6 成果

目標	検知エリア外の移動者に対して、アラームの誤作動率 1%以下
成果	侵入予測システムの構築は実現した。 誤作動率 1%を実現する目処を得るも、実証には至らななかつた。 (昨年度までに 3%は達成、また、チャンピオンデータでは 1%も達成)
目標達成度	75%達成

2-4 研究サブテーマ④

侵入判定手法の検討

○ 実施内容および実施担当

実施内容	目標としている存在検知判定による遅延 200ms 以下を実現すべく、処理の高速化開発として下記を実施した。 (1) 検出アルゴリズム開発 (2) グラフィック処理の工夫による CPU の負担の軽減検討
実施担当	アルゴリズムの設計検討・プログラム実装・評価：株式会社ノア

○ 個別項目の結果

2-4-1 差分検出処理の高速化

2-4-1-1 概要

検出アルゴリズム自体の改善による短縮化検討、および、コンピュータ処理の軽減による CPU 負担を軽減することによる高速化検討の 2 つを行い目標達成を実現したので下記にて報告する。

2-4-1-2 グラフィック処理の工夫による CPU の負担の軽減検討

CPU の処理速度が上がれば処理を高速化が実現するが、現時点で入手可能なハードウェアを使用するという制限の中では、CPU の負担を軽減することにより全体処理の効率化を図ることができる。今回、本システムの核となる差分検出処理以外の部分（主にユーザインターフェイスに関わる部分）における処理を軽減することにより、CPU 負担の軽減を図る。

● 対処項目

・ 描画更新頻度の低減

現状、30fps で描画更新を行っているが、更新頻度を半分（15fps）に減らしても、「見た目」には問題なし。（差分検知は、30fps で実施している）

・ 描画更新タイミングの最適化

CPU に負担がかかる差分検出している最中については、描画処理を停止する。この場合も、差分処理は常に行っているわけではないため、「見た目」に対する影響は少ない。

・ 描画データの削減

差分検出は、VGA（640×480）のデータ点数により行っており、現状、描画も同じデータ数で行っているが、描画のみを QVGA（320×240）とすることで、描画データを 1/4 に削減する。多少の画質劣化は生じるが、存在検知検出箇所を示す、という目的には十分な画質は確保できる。

これらの対処を行った結果、描画処理に伴う描画データのコピー頻度およびデータ量が削減でき CPU の処理負荷を低減させることができ、差分検出判定時の描画による処理遅延はほとんどなくなった。（図 2-4-1-3）

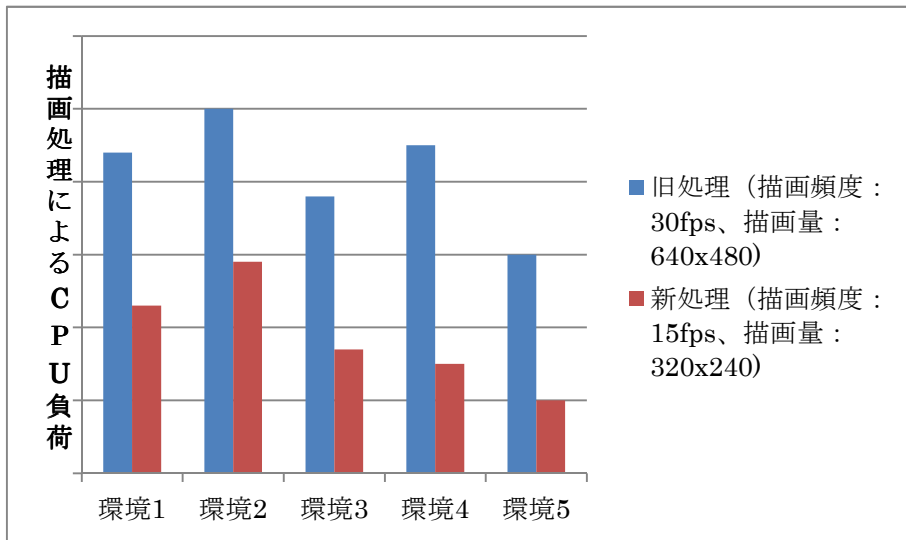


図 2-4-2-1 描画処理による CPU 負荷率

2-4-3 結果

差分検知処理時間の測定を行った結果を、図 2-4-3-1 (差分検知にかかるトータル時間) に示す。開発により、1 フレームの処理時間が短縮、処理に必要なフレーム数も削減され、総処理時間 115ms と目標である 200ms 以下を達成することが出来た。

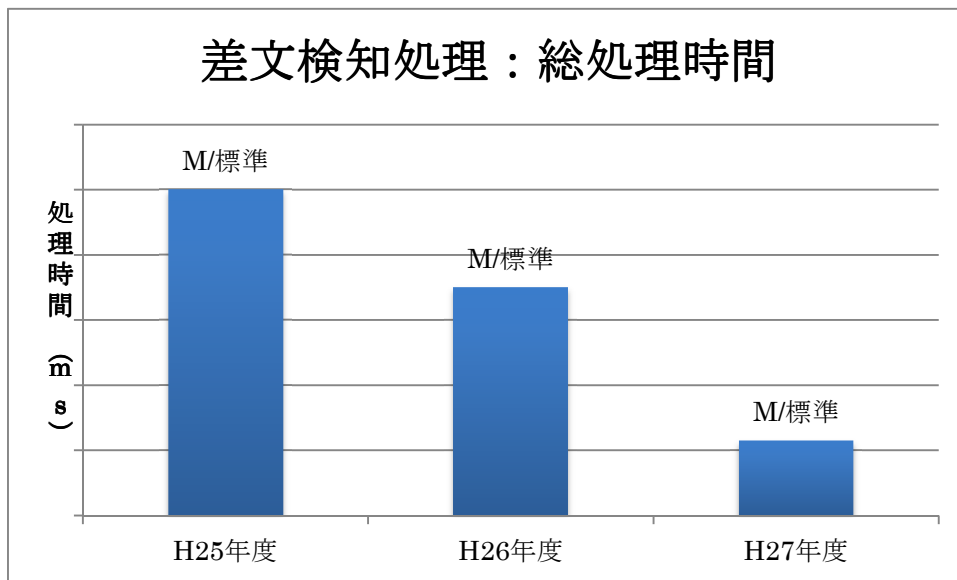


図 2-4-1-5 差分検知処理総所要時間

2-4-4 成果

目標	差分検出処理時間 200ms 以下
成果	差分検出処理時間 115ms を実現 (目標達成)
目標達成度	100%達成

2-5 研究サブテーマ⑤

侵入検知システムの試作および評価

○ 実施内容および実施担当

実施内容	システム設計を開始し、システムの試作にも着手する。
実施担当	(1) システムの設計・実装・評価：株式会社ノア (2) システムのデモンストレーション：株式会社ノア

○ 個別項目の結果

2-5-1 成果概要

2-1～2-4項において開発されたハードウェアの確立に伴い、侵入検知システムを、3Dスキャナを中心とした自作のハードウェアによる構成で試作・評価した。また、本開発により実現された侵入検知システムの一部を利用する存在検知システムを、アドバイザーのトヨタ自動車の工場に試験的に設置し、実用性の評価まで行うことができた。

2-5-1 侵入検知システムの設計・実装・評価

侵入検知システム試作機の設計を行った。3DCADにより設計を行った試作機外観を下図に示す。

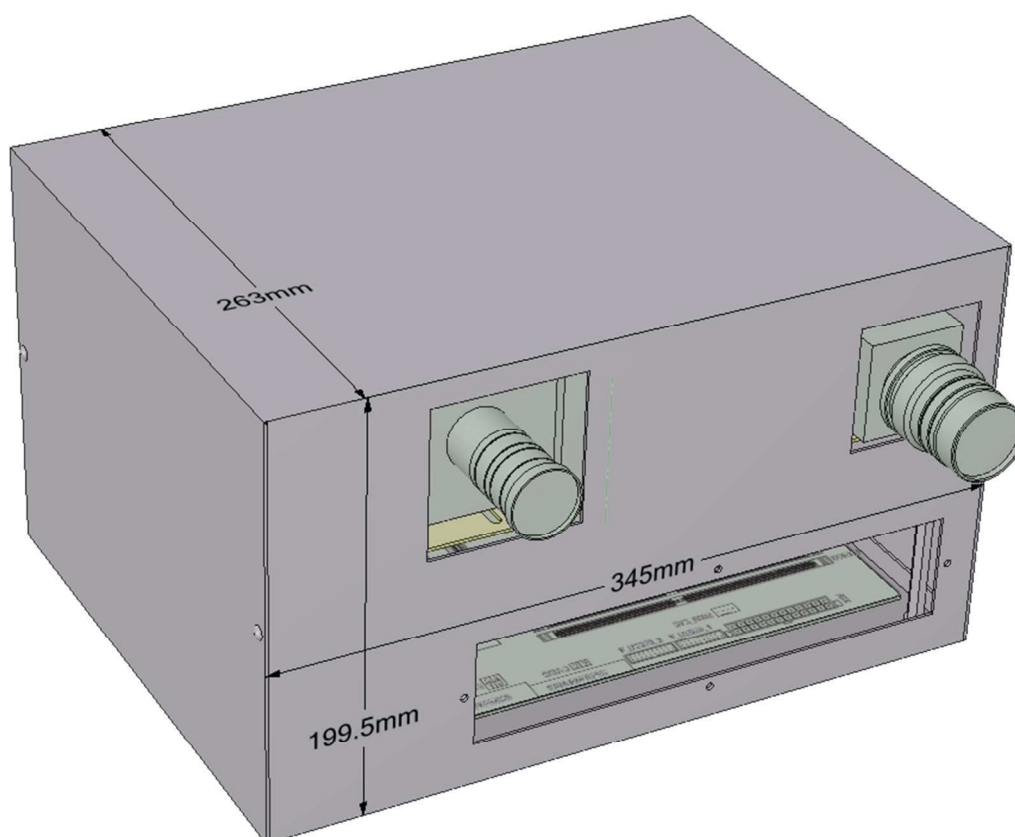


図2-5-1-1 3DCADで設計を行った試作機

筐体のサイズは345mm×199.5mm×263mm（幅 x 高さ x 奥行）となった。実際に試作した侵入検知システム試作機の写真を以下に示す。



図 2-5-1-2 作製した侵入検知システム

評価項目として予定していた、システムの誤検知率、検知の遅延時間、システムの空間誤差、システムの連続稼働時間のうち、評価できたのが検知の遅延時間およびシステムの空間誤差のみであり、試作品完成が事業終了間際であったため、比較的長期の時間を要するシステムの誤検知率評価およびシステムの連続稼働時間評価に着手することができなかった。下記に評価結果を示す。

項目	目標値	結果
検知の遅延時間	500ms 以下	334ms
システムの空間誤差	0.5%以内	0.4%

2-5-3 成果

本年度目標	(1) 侵入検知システムの試作を行い、 システムの誤検知率 3.4 ppm 以下 (100 万分の 3.4 以下) 検知の遅延時間 500ms 以下 システムの空間誤差 0.5%以内 システムの連続稼働時間 720 時間以上 を実現すること。
成果	(1) 試作品を完成させ、 検知の遅延時間 334ms (目標値 500ms 以下) システムの空間誤差 0.4%(目標値 0.5%以内) を達成。しかし、システムの誤検知率、およびシステムの連続稼働時間の評価は未実施。
目標達成度	75%達成

第3章 全体統括

3-1 概要

プロジェクト内で進捗のばらつきが大きな事業となった。実施計画に掲げた当初目標の達成に加え、アドバイザをはじめとする顧客候補者の声を聴きながら、柔軟に方向性を修正したことが原因と考えている。その分、未達事項も発生してしまい、難しいかじ取りが必要とされたが、結果として、事業化近くまで到達することができたことから、当初想定していた以上の成功となったと考えている。

3-2 成果

- ・ほぼ当初想定していた通りの侵入検知システムを実現することができた。
- ・当初目標としていた数値に満たなかったり、最終的な評価を行うことができなかった項目も存在しているが、今後の追加開発で達成する見込みは得ている。
- ・事業期間内にも、進捗が早かった開発項目については、顧客候補者におけるデモンストレーションを進めることができた。本システムの有用性に高い評価を得たとともに、細部にわたる要求を知ることができた。

3-3 今後の事業展開

まずは上記のデモンストレーションにおいて高い評価をいただいたユーザ候補者における採用を目指し、追加開発を進める。