

平成26年度ものづくり中小企業・小規模事業者等連携事業創造促進事業
(戦略的基盤技術高度化支援事業)(継続事業)

「画像処理による鮮魚用小骨検査システムの開発」

研究開発成果等報告書

平成27年3月

委託者 東北経済産業局
委託先 株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

目次

第1章	研究開発の概要	1
1.1	研究開発の背景・目的・概要	1
1.2	研究体制	2
1.2.1	研究組織	2
1.2.2	管理体制	3
1.2.3	管理員および研究員	5
1.2.4	協力者（アドバイザー）	6
1.3	成果概要	7
1.4	当該プロジェクトの連絡窓口	9
第2章	本論	10
2.1	ハードウェアの開発	10
2.1.1	高安定撮像用搬送ユニットの開発	10
2.1.2	立体画像取得ユニットの開発	12
2.1.3	制御・表示ユニットの開発	13
2.2	ソフトウェアの開発	14
2.2.1	画像処理再合成アルゴリズムの開発	14
2.2.2	自動感度調整アルゴリズムの開発	15
2.3	プロトタイプ製作と検証	19
2.3.1	残骨検査システムプロトタイプ製作	19
2.3.2	システムの検証	19
2.4	実用化試験システムの製作	20
2.4.1	実用化試験システムの製作	20
2.4.2	インラインでの実用化試験	20
第3章	全体総括	23
3.1	研究開発成果	23
3.2	事業化計画	23

第1章 研究開発の概要

1.1 研究開発の背景・目的・概要

PL 法や HACCP の普及により、食品中の異物検査（金属片やプラスチック片等の混入検査）が定着しつつある。社会問題にまで発展した食品中の異物混入事件を契機として、顧客との信頼関係や商品価値の低下を招かないように、異物検査は重要な課題に位置づけられている。

介護食や医療食の食品材料は、上記の異物検査に加えて、鮮魚や食肉中の残骨検査が求められる。現冷凍食品メーカーでは、作業員が一つ一つ X 線投影画像を確認して残骨検査しているため、作業時間の向上が難しく、見落とし等の問題がある。一方で、自身魚のボーンレスやフィッシュポーションの軟骨や小骨は、身と同じような濃さ・写りになるため、現在市場で出回っているインライン型 X 線異物検査機では自動検出が困難とされている。

本事業では、鮮魚の残骨検査を目的としたインライン型 X 線自動検査システムを開発した。国立大学法人東北大学大学院情報科学研究科青木研究室で実用化された位相限定相関法を用いた超高精度画像マッチング技術をベースとして、2つの投影画像から従来技術では検出困難とされた微細な残骨を、インラインでスピーディーに自動検知させるシステムの実現を試みた。本事業により、残骨検査技術の飛躍的な改善を目指すとともに、生産性の高い工場と食に対する安心や安全を図るのが目標である。

開発したシステムは、被検査物である鮮魚加工品を水平方向に一定速度で搬送する「搬送部」と、投影角度の異なる2つの X 線投影画像を取得し、画像処理し結果を表示する「検査部」で構成される。それらを下記の4つの研究テーマに分類して開発を進めた。

「① ハードウェアの開発」では、検査システムの「搬送部」「検査部」の機械的な部分を主とした開発を行った。被検査物を搬送しながら X 線撮影するための高安定撮像用搬送ユニット、異なる投影角度の X 線画像を同時に取り込む立体画像取得ユニット、それら機器の制御および結果を表示させる制御表示ユニットの開発からなる。

「② ソフトウェアの開発」では、当システムのコア技術となる小骨を自動検出させる画像処理アルゴリズムの開発を行った。2つの X 線画像の相関関係により小骨の位置を特定させる画像処理再合成アルゴリズム、そこから小骨を検知させる自動感度調整アルゴリズムの開発からなる。

「③ プロトタイプ機の製作」では、「①」「②」の研究成果をもとにオフラインで使用するプロトタイプ機を設計製作した。それを活用して、小骨検出原理の確認と小骨検出レベルの調査、実用化に向けたハード・ソフトウェアの具体的な課題抽出を主としたシステムの検証を進めた。

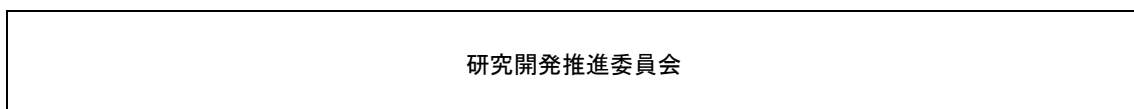
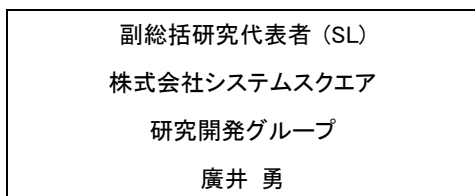
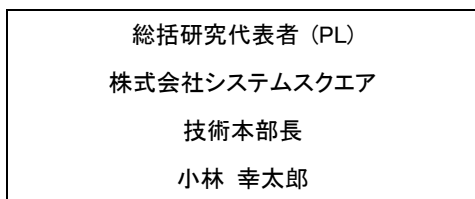
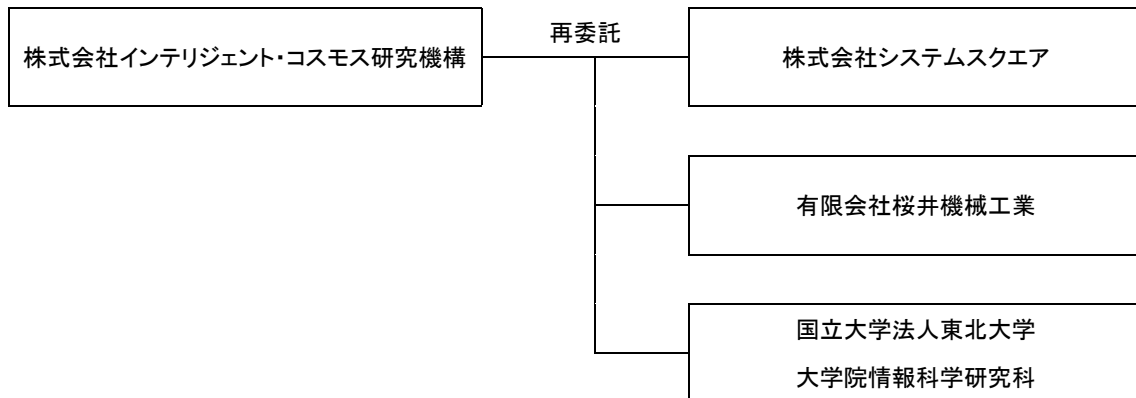
「④ 実用化試験システムの製作」では、プロトタイプ機のシステム検証により得られた諸課題をベースとして、実用的な観点でハード・ソフトウェアを見直し、鮮魚加工現場に導入可能なインライン型の実用化試験システムを設計製作した。さらに、ユーザの協力のもと、実際の加工現場に当システムを導入し、装置の評価や量産を見据えた課題点の抽出を行った。

なお、本事業における技術的目標値は以下の通りとした。

- 1) 検査対象 : 鮮魚切り身・フィッシュポーション
- 2) 処理スピード : 一被検査物当たり検査時間 5 秒以下
- 3) 誤動作率 : 5% 以下
- 4) 検出率 : 小骨径 0.3mm 80% 検出, 小骨径 0.4mm 100% 検出

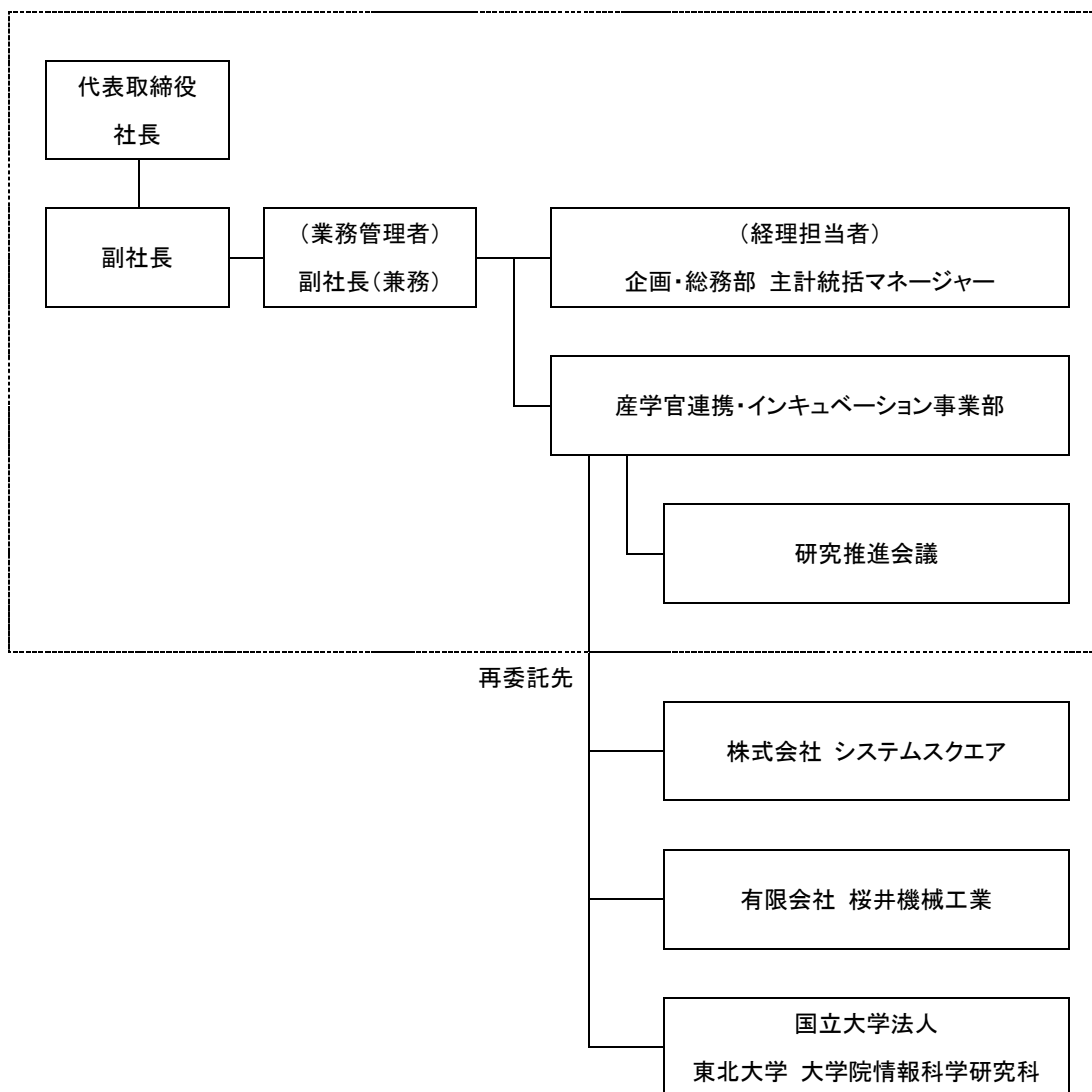
1.2 研究体制

1.2.1 研究組織



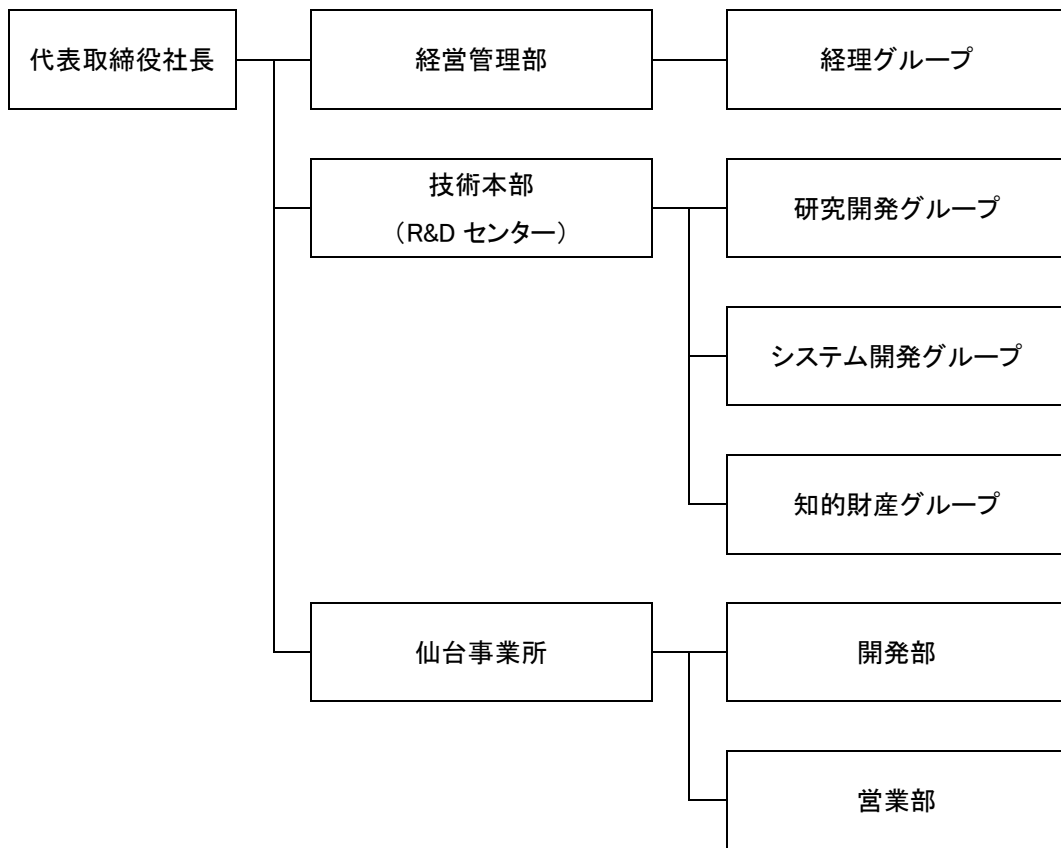
1.2.2 管理体制

① 事業管理機関 [株式会社 インテリジェント・コスモス研究機構]

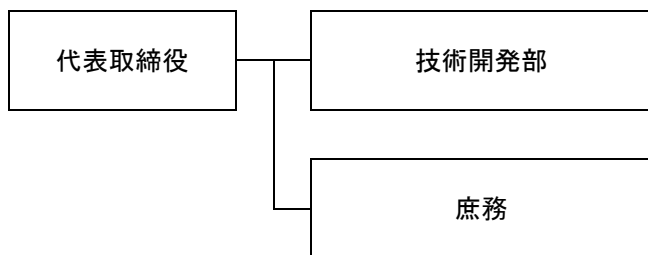


(再委託先)

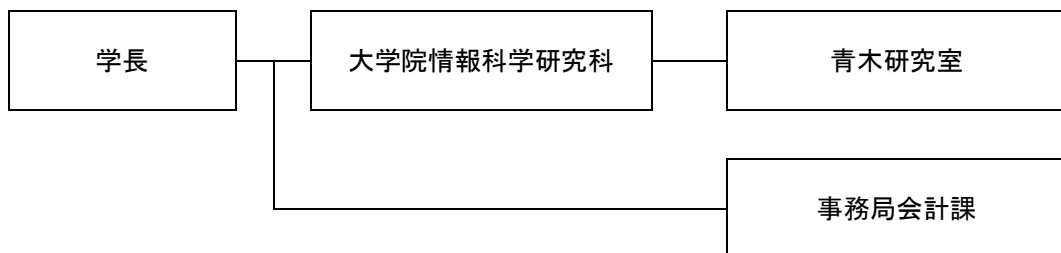
株式会社 システムスクエア



有限会社 桜井機械工業



国立大学法人 東北大学



1.2.3 管理員および研究員

【事業管理機関】

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構

管理員 氏名	所属・役職
猪股 則夫	産学官連携・インキュベーション事業部 統括マネージャー
田村 光男	産学官連携・インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー
三浦 未紀枝	産学官連携・インキュベーション事業部 管理員

【再委託先（研究員）】

株式会社 システムスクエア

氏名	所属・役職
小林 幸太郎	技術本部 本部長
廣井 勇	技術本部 システム開発グループ
池田 倫秋	技術本部 研究開発グループ グループ長
池上 宗利	技術本部 研究開発グループ

有限会社 桜井機械工業

氏名	役職・所属
松橋 英隆	技術部長

国立大学法人 東北大学

氏名	役職・所属
伊藤 康一	大学院情報科学研究科 助教

【経理担当者及び業務管理者】

【事業管理機関】

株式会社 インテリジェント・コスモス研究機構

(経理担当者) 企画・総務部 主計統括マネージャー 高橋 徹
(業務管理者) 取締役副社長 坂本 昭敏

【再委託先】

株式会社システムスクエア

(経理担当者) 経営管理部 経理グループ 浅野 正明
(業務管理者) 技術本部長 小林 幸太郎

有限会社桜井機械工業

(経理担当者) 庶務

平 久枝

(業務管理者) 代表取締役

桜井 勝博

国立大学法人東北大学

(経理担当者) 大学院情報科学研究科会計係 係長

日野 邦裕

(業務管理者) 大学院情報科学研究科 教授

青木 孝文

【研究推進会議 委員】

氏名	所属・役職	備考
小林 幸太郎	株式会社システムスクエア R&D センター 技術本部長	PL
廣井 勇	株式会社システムスクエア 技術本部 システム開発グループ	SL
山田 清貴	株式会社システムスクエア 代表取締役	
池田 倫秋	株式会社システムスクエア 技術本部 研究開発グループ グループ長	
池上 宗利	株式会社システムスクエア 技術本部 研究開発グループ	
桜井 勝博	有限会社桜井機械工業 代表取締役	
松橋 英隆	有限会社桜井機械工業 技術部長	
青木 孝文	東北大学 副学長 (大学院工学研究科情報科学研究科 教授)	
伊藤 康一	東北大学大学院工学研究科情報科学研究科 助教	
手島 和哉	株式会社大冷 品質管理課 サブリーダー	アドバイザー
鹿野 満	東北大学大学院工学研究科 IIS 研究センター特任教授	アドバイザー
太田 晋一	宮城県産業技術総合センター情報技術開発班 研究員	アドバイザー
坂本 昭敏	株式会社インテリジェント・コスモス研究機構 取締役副社長	
猪股 則夫	同 産学官連携インキュベーション事業部 統括マネージャー	
田村 光男	同 産学官連携インキュベーション事業部 プロジェクト・マネージャー	

1.2.4 協力者 (アドバイザー)

氏名	所属・役職	主な指導・協力事項
鹿野 満	東北大学大学院工学研究科 情報知能システム(IIS)研究センター	製品の技術的評価, 用途開発の助言
太田 晋一	宮城県産業技術総合センター	画像処理技術全般の指導と助言
手島 和哉	株式会社大冷品質管理課 サブリーダー	川下企業の観点からの要求条件, マーケット動向の助言

1.3 成果概要

【① ハードウェアの開発】

「①-1 高安定撮像用搬送ユニットの開発」

本事業で開発目標とした検査システムはインライン型であったため、被検査物を搬送しながら X 線撮影させる必要があった。一種のコンベア構造を採用し開発を進めたが、駆動系からの振動やコンベアベルトのスリップによる搬送速度のバラツキは、被検査物の姿勢のずれを引き起こし、撮像画像をぼやけさせる原因となった。そこで、駆動系の設計及びコンベアベルトの選定基準を見直し、目標とした振動幅 $\pm 0.1\text{mm}$ 、搬送速度の変動 $\pm 0.5\%$ 以内に収まる構成・構造を見出した。ここで得られた技術を、「④実用化試験システム」の「搬送部」に集約させた。

「①-2 立体画像取得ユニットの開発」

投影角度の異なる 2 枚の X 線画像を撮影するためのユニット開発を行った。合成アルゴリズム処理における計算時間や精度の観点から、最適な X 線投影角度を幾何学で求める手法を検討し、実験的に妥当性を証明した。また、X 線受光センサの設定パラメータ最適化手法を確立させ、現在市販されている目視用残骨検査機よりもコントラスト比が 1.6 倍ほど高いことを示した。

「①-3 制御・表示ユニットの開発」

「①-1 高安定撮像用搬送ユニット」と「①-2 立体画像取得ユニット」を、「③ プロトタイプ」で統合した際に必要となる制御・表示システムを開発した。2 つの X 線受光センサで撮影された画像データに前処理を加え、一つの PC に集約させるシステムを検証し、「④実用化試験システム」にその技術を取入れた。また、動作シーケンスから画像表示に至るまでの組み込みソフトウェアを実装し、動作の自動化を実現させた。

【② ソフトウェアの開発】

「②-1 画像処理再合成アルゴリズムの開発」

2 枚の X 線画像から立体情報へ再構築するアルゴリズムを確立した。この処理には、予め補正值を求める必要があったが、一度の撮影で算出できる手法を見出した。さらに、前処理として追加したアルゴリズムによって高速化を図り、目標である 1 商品当たり処理時間 5 秒以下を達成した。

「②-2 自動感度調整アルゴリズムの開発」

「②-1 画像処理再合成アルゴリズム」より得られた立体情報をもとに、小骨を自動検知させる手法を検討し、技術を確立させた。さらに、調整パラメータの数を 1/3 程度に減少させる処理を導入し、現場作業員のパラメータ設定の負担軽減に貢献した。

「③ プロトタイプの製作と検証」

「③-1 残骨検査システムプロトタイプの製作」

投影角度の異なる 2 枚の X 線画像を同時撮影可能な、オフライン型のプロトタイプ機を設計・製作した。このプロトタイプ機は「① ハードウェアの開発」の各々のテーマの検証確認および、検査システムとしての検証・課題抽出に活用した。

「③-2 システムの検証」

プロトタイプ機によって、被検査物を搬送させながら投影角度の異なる 2 画像を取得でき、画像取得システムとして問題無いことを確認した。また、X 線受光センサの設置制限のため当初、駆動・従動・アイドラローラの計 4 本からなる搬送構造を採用した。検討を進めた結果、駆動・従動ローラ径を大きくすることで、アイドラローラを省いた構成が実現できると判明した。実用化試験システムの設計仕様には、この構成を取入れた。

「④ 実用化試験システムの製作」

「④-1 実用化試験システムの製作」

「①ハードウェアの開発」と「③プロトタイプの製作」で得られた基礎データや課題点の分析・対策等により装置の基本要素技術を固め、実用化試験システムを設計・製作した。システムのコストダウンを目的として、X 線受光センサおよびコンベアの調整機構を見直し、合わせて約 450 万円のコストダウンをする見通しを立てた。

「④-2 インラインでの実用化試験」

ユーザ協力のもと、実用化試験システムを鮮魚加工現場で実際に使用し、装置の使用実績・不具合点の抽出、残骨検出感度の調査を実施した。小骨検出アルゴリズムの計算時間は目標である 5 秒以内を実現できていた。ただし、誤検知率が 100%であり、5%の目標値に全く届かなかった。現場で使用していたときの X 線画像を撮り溜め、画像処理アルゴリズムを再検討した。その結果、誤検知率 5%が実現でき、小骨検知率を $\phi 0.3\text{mm}$ が 50%、 $\phi 0.4\text{mm}$ が 80%まで改善させた。今後、研究を継続して目標達成を目指したい。

1.4 当該プロジェクトの連絡窓口

株式会社インテリジェント・コスモス研究機構
〒989-3204 宮城県仙台市青葉区南吉成 6-6-3
電話 022-279-8811 (代)
担当：田村 光男

株式会社システムスクエア
〒940-2127 新潟県長岡市新産 3-5-2
電話 0258-47-1377 (代)
担当：小林 幸太郎

第2章 本論

2.1 ハードウェアの開発

2.1.1 高安定撮像用搬送ユニットの開発

被検査物を移動させながら X 線撮影するために、高安定な搬送ユニットを開発した。X 線画像の撮影再現性の観点から、振幅 $\pm 0.1\text{mm}$ 、搬送速度の変動 $\pm 0.5\%$ 以内を目標とした。

実験を始める前に、振幅や速度変動等を測定する手法が必要であった。ロータリエンコーダや変位センサ等を駆使して測定方法を確立させた。

また、搬送速度は次のように決定した。本事業では、一被検査物当たり検査時間 5 秒以下という技術的目標値があった。自動的な残骨検査では、判定結果（残骨ありとなし）により、ラインを振分ける機器（選別機）を設置する可能性が高い。被検査物のサイズを 500mm と仮定し、選別の動作時間を搬送される時間と同程度であると考え、 $(0.5\text{mm}+0.5\text{mm}) / (5/60\text{sec}) = 12 \text{ m/min}$ となる。ここでは余裕を考えて、10~15m/min の搬送速度を想定して実験を進めた。

検討に用いた搬送ユニットを図 1 に示す。駆動ローラ、従動ローラ、アイドルローラ 2 本から構成されるコンベア構造とし、振幅や速度変動を抑制するよう、モータの選定、ドライブ方式、ローラ形状等に至るまで最適化を図った。

図 2 に振幅変位（高さ方向）の測定結果を示す。周期的に変動しており、約 20 秒毎に変位が大きい。このグラフを解析し、数水準ほど追加実験した結果、コンベアに剛性の低い箇所があったこととコンベアベルトの特性が影響して変位が大きくなったことがわかった。また、搬送速度変動の測定結果を図 3 に示す。この変動を標準偏差で計算すると 2σ で約 0.6% であった。この結果を FFT 解析した結果、駆動・従動ローラの回転すなわち偏心により、バラツキが発生していると判明した。

以上の測定結果のまとめを表 1 に示す。振幅（幅方向）はほぼ目標値が達成できた。振幅（高さ方向）や速度変動は目標値に若干届かなかったが、原因が解明できていたため、実用化試験システムの設計にその情報をフィードバックさせた。

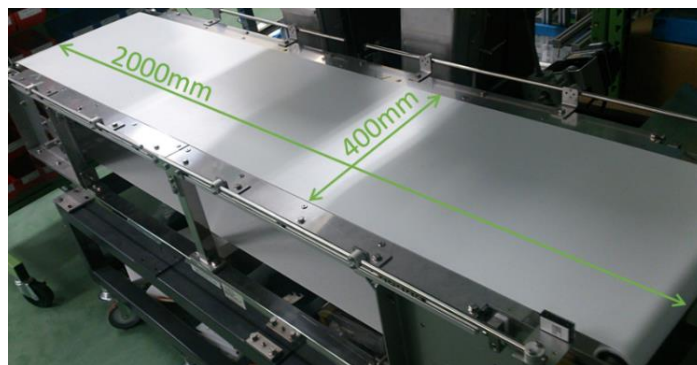


図 1 検討に用いた搬送ユニットの外観と主な寸法

表1 搬送ユニットの目標値と測定結果のまとめ

		目標値	測定結果
振動幅	幅方向	±0.1mm	±0.05mm
	高さ方向		±0.12mm
搬送速度変動		±0.5%	±0.6%

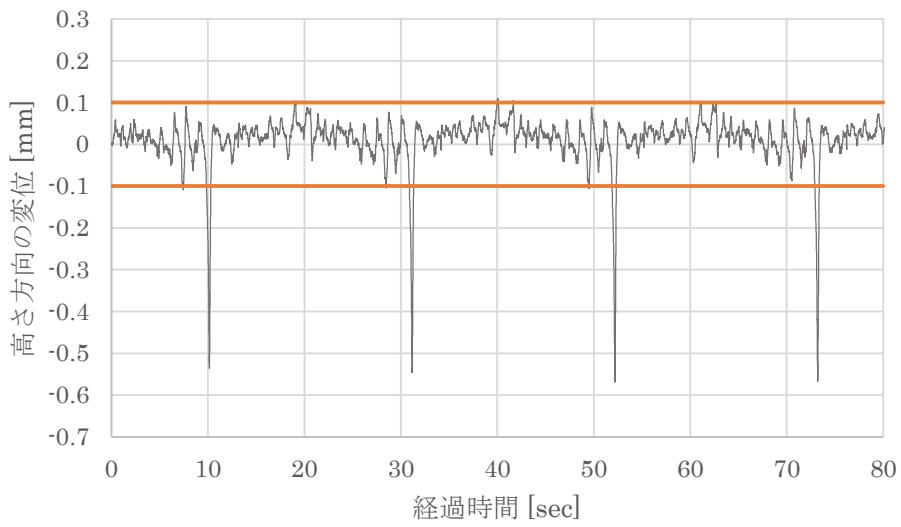


図2 振動幅（高さ方向の変位）の測定結果

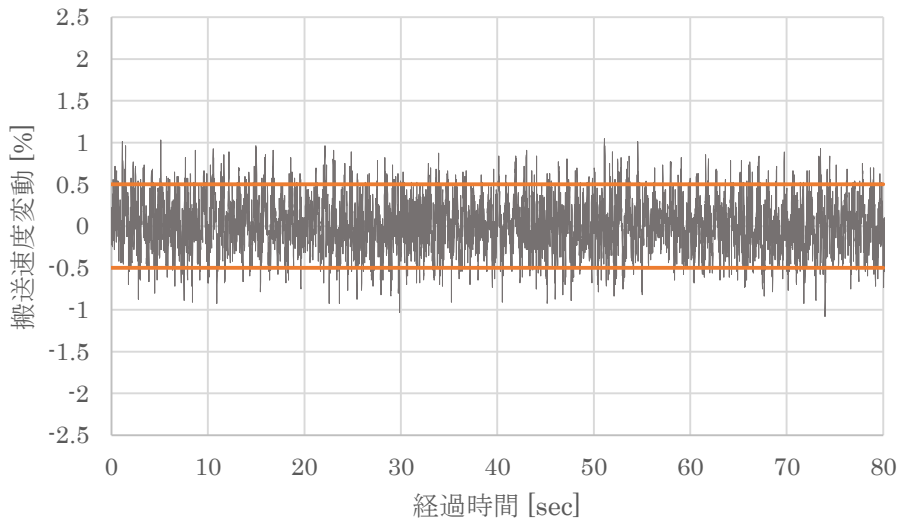


図3 搬送速度の測定結果

2.1.2 立体画像取得ユニットの開発

立体情報を取得するために、投影角度の異なる X 線画像 2 枚を撮影するユニットを開発した。ここでは、受光素子が線状に並べられた X 線受光センサを用いて、搬送させながら撮影する構造を採用した。採用理由について下記に記す。

X 線受光センサの種類は大きく分けて 2 種類存在する。一つは、1 度の撮影で 2 次元画像を取得できる、フラットパネルまたはエリアセンサである（以下、総じてエリアセンサと呼ぶ）。人間のレントゲン撮影はこの方式が採用されている。もう一つは、受光素子が線状に並べられたラインセンサである。このセンサは、センサ自身または被写体が移動しなければ、2 次元画像を得ることが出来ない。

本事業でエリアセンサを用いる場合、ボケなく高精度な X 線撮影をするために、被写体を静止させなければいけない。コンベアには移動・停止を繰り返す間欠運転が求められるが、耐久性に不安があった。さらに、一被検査物当りの検査時間 5 秒が技術的目標であることから、2.1.1 で試算された搬送速度 12m/min よりも更に高速に動作させる必要がある。被検査物である鮮魚は工業製品のように安定した形状ではないため、姿勢を変えずに高速に移動・停止させることは困難であると考えた。以上のことから、後者のラインセンサを用いた撮影システムを採用した。このラインセンサでは、先に述べたようにセンサ自体もしくは被写体を移動させなければ撮影できず、また精度が求められる。ここでは、2.1.1 で説明した高安定動作可能な搬送ユニットを使用することで、この問題を解決させた。

図 4 に開発したシステムの模式図を示す。X 線源と受光センサを 2 対とし、被検査物はその間を搬送されると同時に、撮影されるようにした。X 線源は搬送方向に対して傾いており、この投影角度により立体情報へ変換される（図 4(b)参照）。投影角度が大きければ立体情報の精度が高くなるが、計算コストの増大や計算ミスが多くなるデメリットがある。そこで、最低限必要な立体情報の精度をもとに X 線の投影角度を算出し、「プロトタイプ機」を活用して妥当性を検証した。

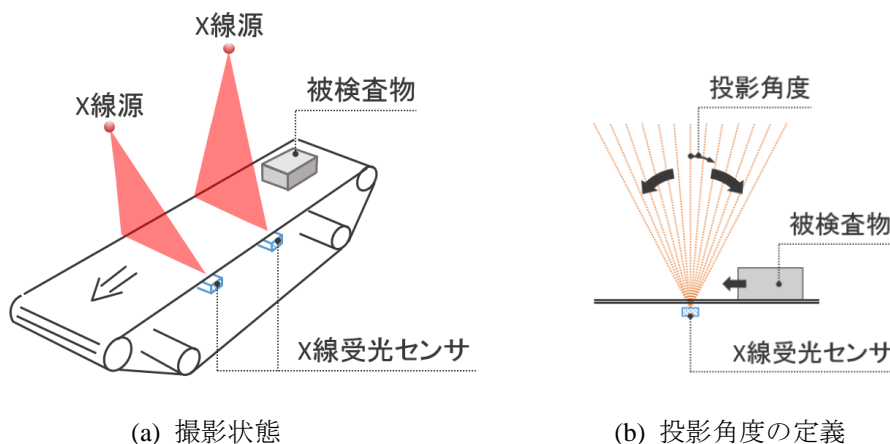
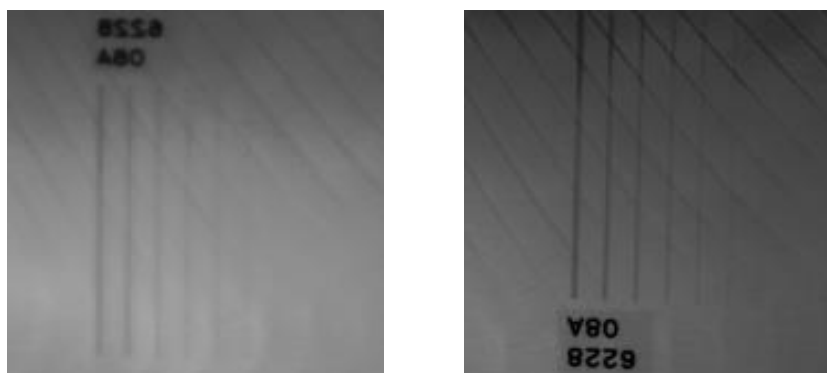


図 4 立体情報取得のためシステム外観図



(a) エリアセンサ

(b) ラインセンサ

図5 エリアセンサとラインセンサの画像比較（サーモンとペネトラメータ）

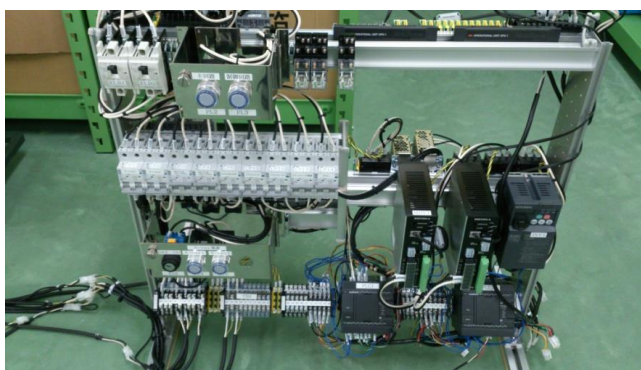
またこの開発では、エリアセンサを用いた場合と比較して約 80%以上になる撮影条件の選定が目標の一つであった。X 線源と被検査物、X 線受光センサの位置、搬送状況から設定パラメータの最適化手法を検討し、その方法を確立させた。図5に、サーモンの切り身にペネトラメータ（透過度計 08A）を載せて X 線撮影した画像を示す。エリアセンサよりも高いコントラストだとわかる。コントラスト比を算出した結果、エリアセンサよりも 1.6倍ほど高かった。これにより、目標の達成を確認した。

2.1.3 制御・表示ユニットの開発

「高安定撮像用搬送ユニット」と「立体画像取得ユニット」を、「プロトタイプ」で統合した際に必要となる制御・表示システムを開発した。2つの X 線受光センサで撮影された画像データに前処理を加え、Ethernet で一つの PC に集約させるシステムを実装・検証した。製作したユニットの一部を図6に示す。動作シーケンスから画像表示に至るまでの統合組み込みソフトウェアを実装し、動作の自動化を実現させた。I/O 制御は主に PLC を用いてラダー図で作成した。



(a) 制御・表示用 PC



(b) 電源および制御機器

図6 制御・表示ユニットの一部

2.2 ソフトウェアの開発

2.2.1 画像処理再合成アルゴリズムの開発

ここでは、異なる投影角度で撮影された2枚のX線画像から、残骨を立体的に捉えるアルゴリズムの実現を目標とした。

X線画像から残骨を立体的に抽出するためには、画像同士の相関を求める必要があった。図7に立体化の原理を示す。異なる角度から撮影すると、奥行きに応じて積分される位置が変化する。底面を基準とすると、画像1と画像2を重ね合わせることで異物の視差すなわち奥行きを特定できる。

立体情報へ再構築させる処理には、一種の領域ベースマッチングを用いた。この処理は画像全体で対応付け可能であるが、計算時間が長いという課題があった。そこで、前処理にエッジ検出を導入し、計算量を減らすことで、目標である5秒以内に収めることができた。

鯖のX線画像を図8に示す（※実際の残骨検査の場合、図のように多くの小骨は残っておらず、頭の部分も除去されている）。この画像を用いて、立体情報へ再構築した結果を図9に示す。魚の腹骨が抽出され、小骨が立体的に見えているのが分かる。

また、X線源、受光センサ、被検査物の位置、設置角度の関係が2つの画像間で異なることから、予め補正値を求める必要があった。キャリブレーションパターンを幾つか試作・検証し、一度の撮影で補正値を算出できるパターン形状・手法を確立させた。

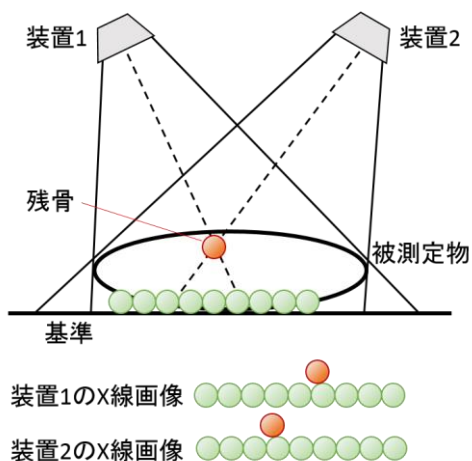


図7 2つのX線画像から残骨の奥行きを特定する方法

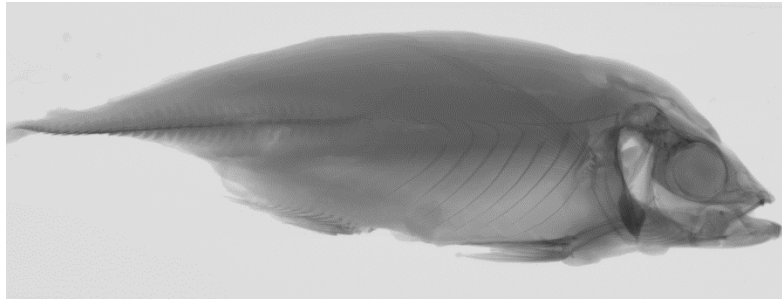


図 8 鯖の X 線投影画像

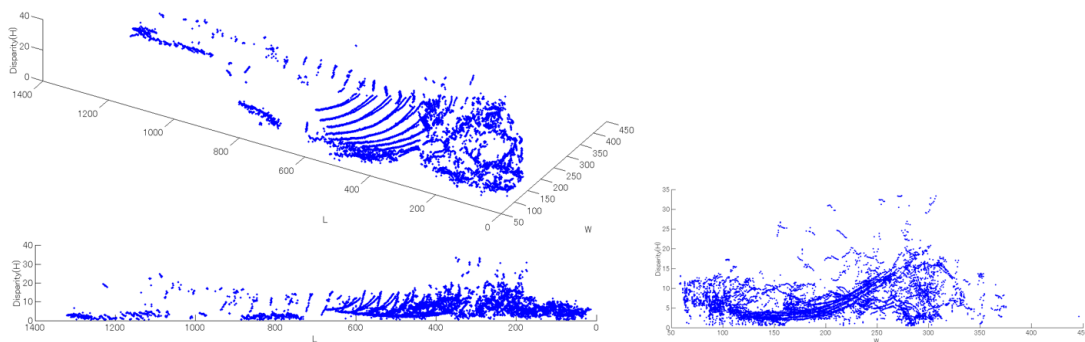


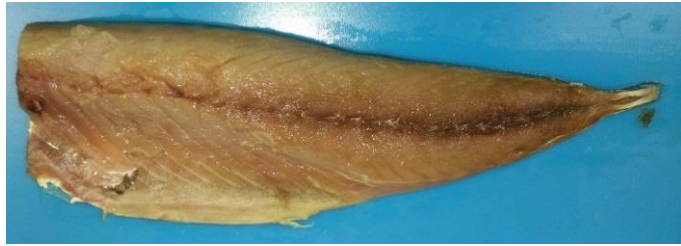
図 9 X 線画像から立体情報へ再構築した結果

2.2.2 自動感度調整アルゴリズムの開発

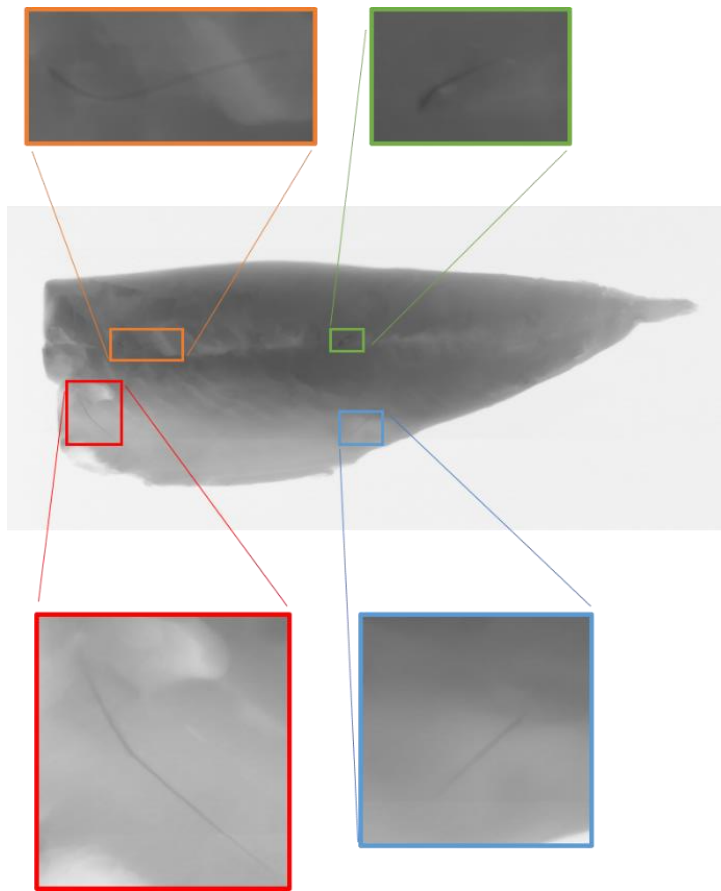
鮮魚の X 線画像から小骨を検出させる手法は、ロー/ハイパスフィルタによる強調処理と 2 値化を組み合わせた画像処理が多い。ただし、この処理のみで小骨を検出させようとすると、それよりもコントラスト差が大きい身の凹凸や縁の部分を誤検出してしまう。そのため、小骨を自動検出させることは困難とされている。

本事業では、「2.2.1 画像処理再合成アルゴリズム」で得られた立体情報を用いて小骨を自動検出させる手法を考案した。鯖、サーモン、スケソウダラに考案した手法を施した結果を図 10, 11, 12 に示す。低いコントラストの小骨が、比較的良く検出できているのが分かる。図 11 では、ペネトラメータ（小骨相当）もあわせて撮影したが、 $\phi 0.25\text{mm}$ まで自動検出できているのを確認した。

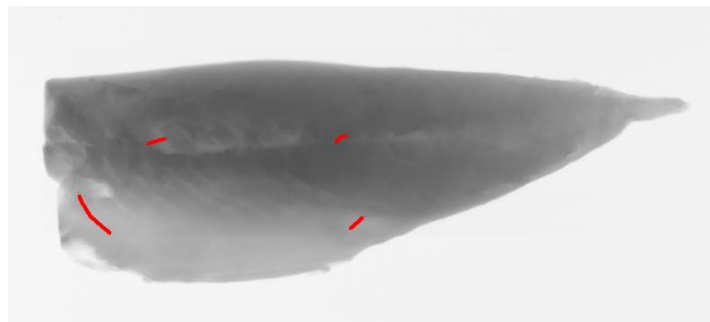
また、「2.2.1 画像処理再合成アルゴリズム」では、前処理にロー/ハイパスフィルタと 2 値化を組み合わせたエッジ検出を導入した。このフィルタ処理では 8 つのパラメータを予め決定する必要があった。そのため、現場の作業員では調整が難しいと懸念された。エッジ検出処理を見直し、3 つのパラメータのみで同様以上の処理効果が得られるアルゴリズムを取入れた。実際には、そのうちの 2 つのパラメータのみ調整が必要であり、設定が各段に容易となった。



(a) 鯖の写真



(b) 鯖の X 線画像

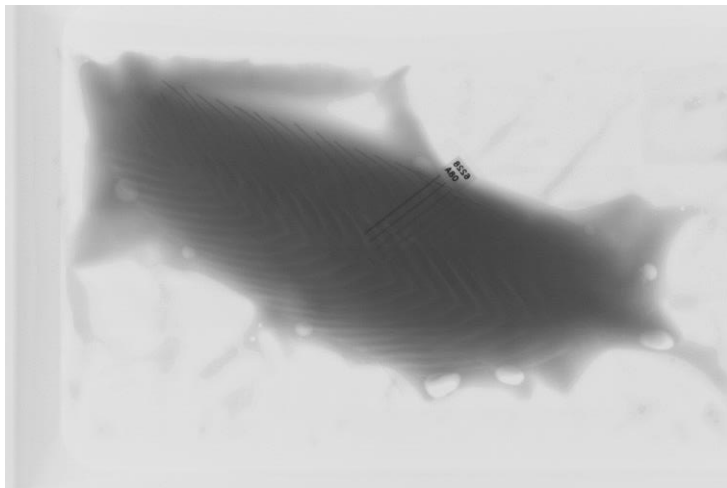


(c) 小骨検出例 (赤色が自動検出された箇所)

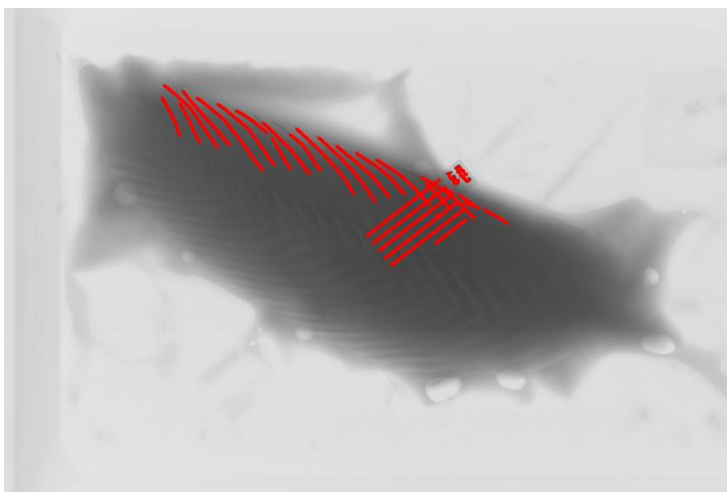
図 10 立体情報を用いた小骨検出の例(1/3)



(a) サーモンの写真

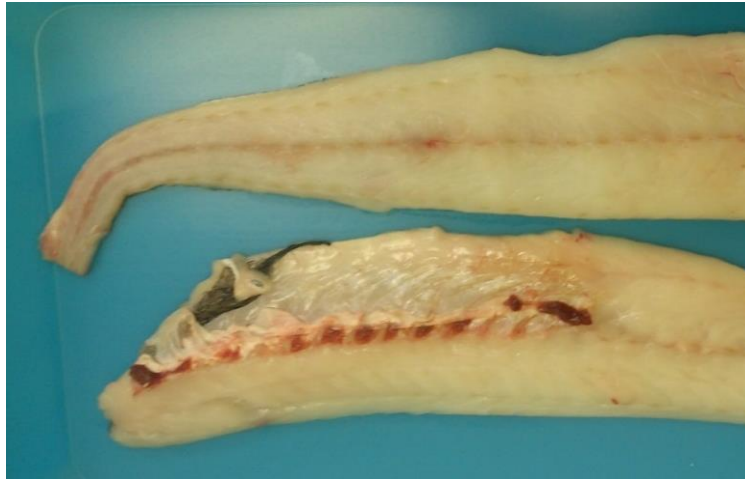


(b) サーモンの X 線画像

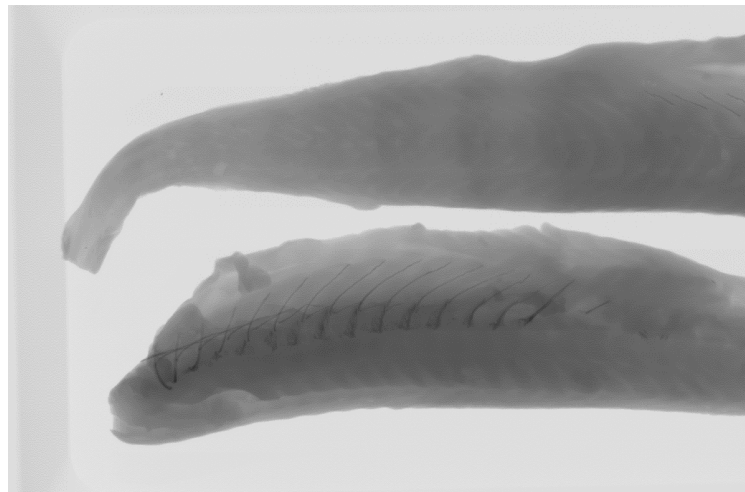


(c) 小骨検出例（赤色が自動検出された箇所）

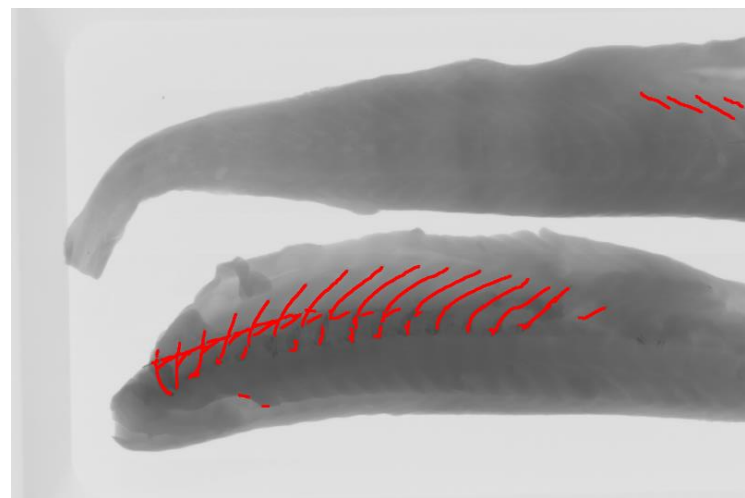
図 11 立体情報を用いた小骨検出の例(2/3)



(a) スケソウダラの写真



(b) スケソウダラの X 線画像



(c) 小骨検出例（赤色が自動検出された箇所）

図 12 立体情報を用いた小骨検出の例(3/3)

2.3 プロトタイプの製作と検証

2.3.1 残骨検査システムプロトタイプの製作

2方向のX線画像を同時に撮影可能な、オフライン型のプロトタイプ機を設計・製作した。このプロトタイプ機は「高安定撮像用搬送ユニット」、「立体画像取得ユニット」、「制御・表示ユニット」のを組み合わせて製作したものである。各テーマの実験確認および、検査システムの検証・課題抽出に用いた。各テーマに対する結果は、それぞれの節で説明した。このプロトタイプは予定通り、24年度末に完成した。

2.3.2 システムの検証

X線源（X線焦点）と被検査物（被写体）、X線受光センサ（検出器）の位置関係で、像の見え方が大きくかわる。図13(a)にその説明図を示す。 L_2 が長いと検出器での像は大きくなり、短いと像は小さくなる（被検査物のサイズに近づく）。図のように、検出器に投影される像の大きさを算出するときは、X線の焦点の大きさを0と考える場合が多い。

しかし実際、焦点には大きさがあり、そのサイズは数 μm ～数 mm まで様々である。一般的に、焦点の大きさと各要素の位置関係によって、図13(b)のように検出器の像がぼやけてしまうことが知られている。このぼやける領域は、 L_2 が長いほど大きくなり、短いほど小さくなる。

以上のぼやける現象について、理論と当プロトタイプ機を活用した検証を繰り返した。その結果、上記のぼやける現象の他に、コントラストの低下を招く現象・条件を見出した。この確立させた計算手法を用いて、技術的目標値 $\phi 0.3\text{mm}$ の小骨の検出感度の向上に寄与するよう、ぼやけおよびコントラストに対して有効な、各要素の位置関係の最適化を図ることができた。

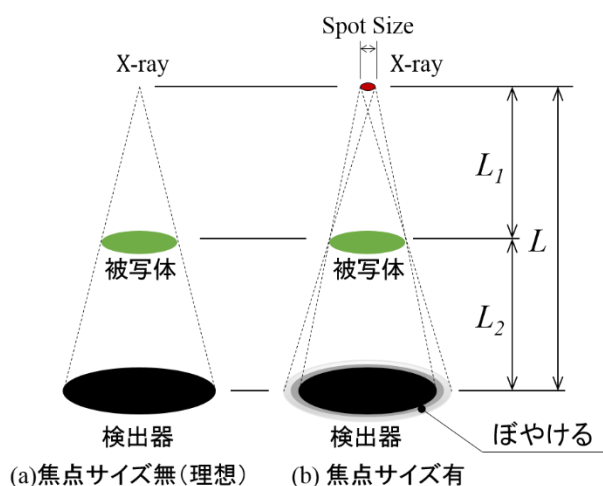


図13 X線焦点の大きさと被写体、検出器の位置によるぼやけ

また、X線受光センサの設置制限のため当初、駆動・従動・アイドラローラの計4本からなる搬送構造を採用した。検討を進めた結果、駆動・従動ローラ径を大きくすることで、アイドラローラを省いた構成が実現できると判明した。ローラの本数が少なくなると、コンベアベルトの蛇行調整が容易になり、ローラ周辺の加工・据え付けに対して高い精度が求められず、有益に作用する。「④」実用化試験システムの設計仕様には、この構成を取入れた。

2.4 実用化試験システムの製作

2.4.1 実用化試験システムの製作

「①ハードウェアの開発」と「③プロトタイプ製作」で得られた基礎データを解析し、課題点から装置の基本要素技術を固め、インライン型の実用化試験システムを設計・製作した。図14に装置の外観を示す。この装置は、鮮魚加工現場で導入できるように、X線遮蔽や安全性、耐水性を含めた機能を有する。

搬送部分は、先に述べた通り、駆動・従動ローラの2本構成とした。コンベアベルトを取り外して洗浄できるように着脱機構を取入れた。「検査部」では、プロトタイプ機の検討で得られた投影角度に固定して撮影する構造とした。

完成した翌年度、装置のコストダウンを目的として、X線受光センサおよびコンベアの調整機構を見直し、合わせて約450万円のコストダウンの見通しを立てた。



図14 実用化試験システムの外観写真

2.4.2 インラインでの実用化試験

ユーザ協力のもと、鮮魚加工現場で実用化試験システムを実際に使用し、システムの課題点の抽出、残骨検出感度の調査を実施した。ここでは図15に示す鮭フィレを下記の作業フローにより検査した。

まず、捌いて骨抜きしたフィレ2切れをトレーに載せ、実用化試験システムに投入する。投入されたフィレは、搬送されながら装置内で2方向からX線撮影される。その後、下流側で受け取られ、X線画像と実物を目視で対比しながら、小骨の混入状況を確認する。残骨があれば骨抜き専用のプライヤーで抜き取り、検査・残骨除去されたものが後行程に渡される。図16に作業フローを模式的に描いた図を示す。

上記のような使い方において、実用化試験システムに2つの機能の実装が必要であった。一つは、下流側に外付の大型ディスプレイを配置したことである。実用化試験システムはインライン型の自動検査システムを目指した装置である。そのため、本体に取付けられたタッチパネル付LCDにて、パラメータ設定から撮影されたX線画像の確認に至るまでPCを介した全ての調整が行えるように設計されている。しかしながら、実物を対比できるほどLCDの画面サイズが大きくなり、解像度も高くない。作業のしやすさも相まって、下流側にX線画像を対比できる大型の高解像度ディスプレイとトレーを置く場所を用意した。

もう一つは、下流側に押ボタンスイッチと、上流側に投入可の通知用LEDを設置したことである。目視検査の時間は5~10秒程度であるが、残骨除去の作業が発生すると更に10秒以上掛かる。そのため、上流側から絶え間なくフィレの載ったトレーを投入し続けると、下流側でX線撮影されたトレーが溜まり、X線画像と実物の対比が困難になる。そこで、下流側に押ボタンスイッチを配置した。残骨検査・除去が完了し、次のトレーを検査するときボタンを押す。このとき、上流側に設置されたLEDが点灯する。上流側の作業員は、LED点灯を確認した場合のみ投入するようにした。このような作業フローを構築することで、効率的に残骨検査・除去作業を進めることができた。

装置についての評価結果は以下の通りである。現場では、毎日1回コンベアベルトを取外し、水を使用した清掃・洗浄を実施した。評価期間は約1ヶ月あったが、その間、コンベアベルトの片寄り調整は一度も行わなかった。これは、ベルト着脱時の再現性が比較的良好だったことを意味する。また、X線画像に乱れは生じなかったことから、高安定に搬送できていた。

一方、画像処理の方の評価は以下の通りである。まず、処理時間は目標である5秒以内を実現できていた。ただし、誤検知率が100%であり、5%の目標値に全く届かなかった。このときのX線画像を撮り溜め、画像処理アルゴリズムを再検討した。まず、まず始めに、評価の対象となる小骨を分別し、正確な検知率、誤検知率の算出手法を確立させた。次に、検出アルゴリズムを見直した。ここでは、評価期間に間に合わなかった処理アルゴリズムも併せて検討した。以上の結果、誤検知率5%が実現でき、小骨検知率を $\phi 0.3\text{mm}$ が50%、 $\phi 0.4\text{mm}$ が80%まで改善させた。図17に小骨検出した例を示す。鮭は身が厚いため、全体的に濃く写る。それに対して、小骨は確認できないくらいのコントラストである(強調処理をかけ、拡大表示すれば確認可能)。その条件下でも、的確に小骨を捉えられているのが分かる。

目標の小骨検出率は、 $\phi 0.3\text{mm}$ が80%、 $\phi 0.4\text{mm}$ が100%であるので、若干届かなかった。今後、研究を継続して目標達成を目指したいと考えている。



図 15 鮮魚加工現場で検査した対象（鮭フィレ）

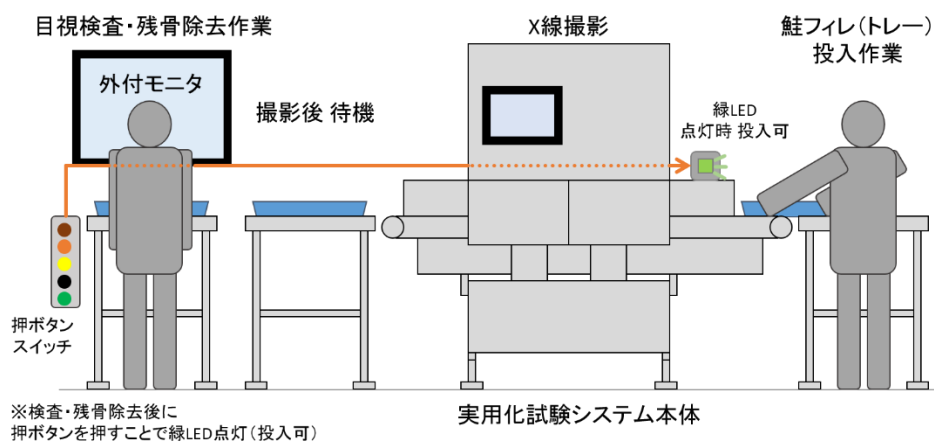


図 16 実用化試験システムを用いた目視検査の作業フロー

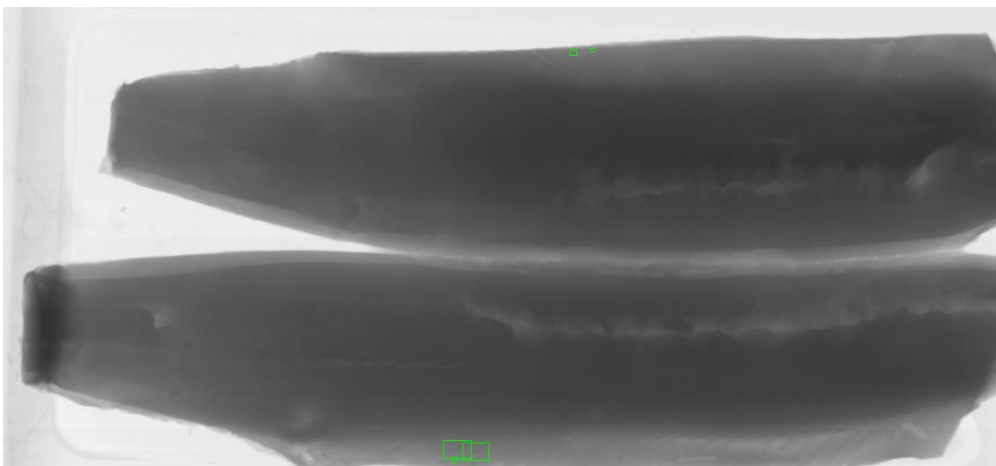


図 17 鮭フィレの残骨検査の例（緑枠内に残骨が存在）

第3章 全体総括

3.1 研究開発成果

「①ハードウェアの開発」では基礎データの採取・分析を、「③プロトタイプ機の製作」では課題抽出・検証データを蓄積させた。それらをもとに、インラインで導入テスト可能な「④実用化試験システム」を完成させた。搬送部分については、目標である速度安定性 $\pm 0.5\%$ 、振動 $\pm 0.1\text{mm}$ 以内に収め、目標通りの性能を達成させた。さらに、ユーザ協力のもと、「④実用化試験システム」を鮮魚加工現場で実際に使用し、データ収集と分析・課題抽出をした。湿気が高く、装置が水で洗浄されるような環境においても、搬送部分や検査部分に大きな問題は発生せず、安定した動作実績を得ることができた。

上記と平行して遂行した「②ソフトウェア開発」では、2画像を用いた小骨検出手法を確立させた。上記の鮮魚加工現場において撮影した画像を活用して、一商品当たり検査時間5秒以下、誤検知率5%以下の目標を満たしているのを確認できた。一方で小骨検知率は、 $\phi 0.3\text{mm}$ が50%、 $\phi 0.4\text{mm}$ が80%程度と、目標である80%と100%を達成できなかった。今後、研究を継続して目標達成を目指したい。

3.2 事業化計画

冷凍切り身魚（骨ありなしあわせて）の販売額は、2004年に165.5億円であったが、2010年には344億円となり増加傾向にある。一方で、骨なし魚が好まれる65歳以上の高齢者の人口推移は、2004年で2488万人が、2010年には2948万人と、6年間に460万人も増加している。今後も高齢者の人口は増え続け、5年後の2020年には現在よりも200万人増加することが予想されている。冷凍切り身魚の市場拡大を高齢者の人口増加をもとに概算すると、これから5年間で70億円の増加が見込まれ、冷凍切り身魚の市場規模は400億円以上へと拡大が予測される。

骨なし魚の市場は業務用以外に、病院、学校、高齢者施設などの給食で需要が拡大してきた。今後は在宅介護等高齢者向け弁当宅配、家庭用の冷食としても需要が見込まれる。アジア新興国も高齢化が進行し、欧米でも骨なし魚のニーズが高まりつつある。そのため骨なし魚の市場の拡大と共に、鮮魚用小骨検査機の市場規模は現在の何十倍にも増加することが見込まれる。本事業では骨なし食品を扱う国内大手食品メーカを顧客対象に考えているが、今後は海外の食品メーカからの需要も見込まれる。

将来的には上記のような食品分野だけでなく、工業製品にも応用・展開を考えている。例えば、自動車を構成する部品の割れ・キズ・空洞をインラインで全数検査することがそれに当たり、自動車産業分野における生産プロセスの大幅な向上の実現に寄与できるものと確信する。すなわち、国内製造業の15%を占める関連産業出荷額40兆円市場規模の一躍を担うことも夢ではないと考えている。

リサイクル適性：A