

食品製造業のスマートファクトリー化に向けた自動計測技術の開発

飯島 俊匡, 藤澤 怜央, 近藤 正一, 本間 稔規

Development of Automatic Measurement Technology for Smart Factories in Food Manufacturing Industry

Toshimasa IJIMA, Reo FUJISAWA, Shoichi KONDOU, Toshinori HONMA

抄 録

食品製造業は北海道経済において重要な役割を担う産業の一つであるが、製造工程における人手作業への依存度が高いため生産性が低いという課題がある。生産性向上のため作業工程の自動化や機械化が求められているが、食品製造業の原材料である農水産物は、工業製品とは異なり形状や品質が一様ではない。そのため、その技術的難易度の高さから農水産物の形状や品質を対象とした自動検査装置の開発、普及は進んでいない現状にある。加えて、食品を扱う全事業者を対象としてHACCPに沿った衛生管理が義務化され、製造工程における継続的な監視と記録が必要となっており、検査情報の電子化や、製造記録・品質記録の自動化が求められている。

そこで本研究では、食品製造業におけるスマートファクトリー化を推進するため、画像情報や分光情報から自動的に原材料の計数や品質検査などを行う計測・解析手法を開発し、現在手作業で行われている検査・管理業務の自動化を実現するための基盤技術を獲得したので報告する。

キーワード：スマートファクトリー、外観検査、異物検出、HACCP

Abstract

The food manufacturing industry is one of the most important industries in the Hokkaido economy, but its high reliance on manual labor in the manufacturing process has resulted in low productivity. The raw materials used in the food manufacturing industry are mainly agricultural and marine products, which are not uniform in shape and quality, so automated inspection systems have not been widely adopted. In addition, all food-related companies are required to follow HACCP for sanitation management, which requires continuous monitoring and recording of manufacturing processes. In order to promote smart factories in the food manufacturing industry, we have developed a measurement and analysis method that enables counting and quality inspection of raw materials based on image and spectral information, and have acquired the basic technology to automate inspection and control operations.

KEY-WORDS : Smart factories, Appearance Inspection, Foreign material detection, HACCP

1. はじめに

食品製造業は、北海道経済において製造品出荷額等が約4割を占める主要産業であるが、製造工程における人手作業への依存度が高いため生産性が低いという課題がある。そのため、重量選別機や色彩選別機などを用いた選別工程の自動化や、金属探知機やX線検査装置などを用いた検品工程の自動化が進められているが、いまだ多くの工程で人手による目視

検査が行われているのが現状である。その理由の一つとして、食品製造業の原材料は主に農水産物であることから、工業製品とは異なり形状や品質が一様ではなく、ある程度のバラツキがある中で農水産物を計測・評価しなければならないことが挙げられる。そのため、その技術的難易度の高さから農水産物の形状や品質を対象とした自動検査装置の開発、普及は進んでいない。

加えて、食品を扱う全事業者を対象としてHACCP (Hazard

事業名：経常研究

課題名：食品製造業のスマートファクトリー化に向けた自動計測技術の開発

Analysis and Critical Control Point：危害要因分析・重要管理点¹⁾に沿った衛生管理が義務化され、製造工程における継続的な監視と記録が必要となっている。現状、検査結果は帳票に手書きで記録することがほとんどであり、人員削減や人手作業による食品汚染リスクを低減するため、検査情報の電子化や製造記録・品質記録の自動化が求められている。

このような課題を解決するための手段としてスマートファクトリーという概念がある。スマートファクトリーとは、一般的に工場内の設備や機器をネットワークで繋いで様々なデータを収集し、そのデータを記録・解析することで可視化や自動化を行い、品質の安定化や生産性の向上などを実現する工場とされている。経済産業省が2017年5月に示した「スマートファクトリーロードマップ」²⁾では、目的別にロードマップが示されており、(1) 品質の向上, (2) コストの削減, (3) 生産性の向上, (4) 製品化・量産化の時間短縮, (5) 人材不足・育成の対応, (6) 新たな付加価値の提供・提供価値の向上, (7) リスク管理の強化の7点を挙げている。そして、IoT、ビッグデータ、AI、ロボットを活用し、エンジニアリングチェーンやサプライチェーンをネットワーク化、最適化、自動化していくことでスマートファクトリー化が達成されるとしている。しかし、これら7つの目的は既製品で対応できる範囲に限られているため、対象に応じた要素技術の開発が不可欠である。

そこで本研究では食品加工工場のスマートファクトリー化に向け、品質検査や管理業務の自動化に用いる計測技術など、食品製造業において生産性や品質を向上するための基盤技術を開発したので報告する。

2. 食品加工工場のスマートファクトリー化に向けた課題

食品加工工場の作業工程は、原材料の入荷、保管、加工、梱包、出荷という流れが一般的である(図1)。この生産工程別の状況について、北海道経済産業局は2018年4月に「食品製造業へのロボット導入の促進」³⁾に関する調査報告書



図1 食品加工工場の工程例

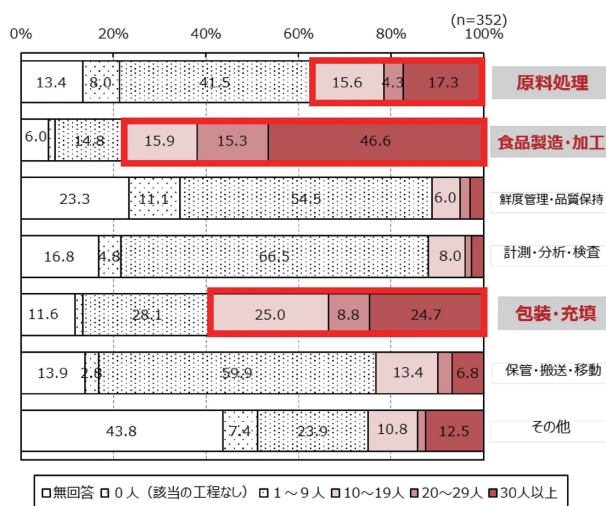


図2 生産工程別の人員分布

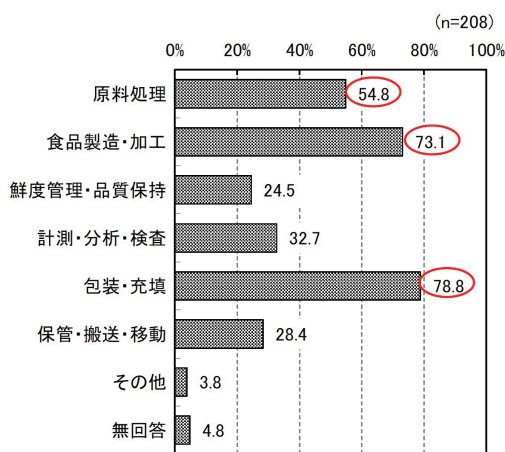
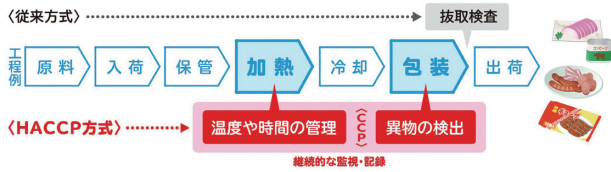


図3 生産工程別の機械導入率

を公表しており、機械化・ロボット化の現状と導入ニーズについてアンケート調査結果を掲載している。これによれば、食品加工工場の生産工程で人手が集中しているのは、多い順に、「食品製造・加工」、「包装・充填」、「原料処理」の3工程だった(図2)。また、専用機械の導入率が高いのは、高い順に「包装・充填」、「食品製造・加工」、「原料処理」であった(図3)。したがって、機械導入率の高いいずれの工程とも、多くの人員が分布していることから、専用機械では自動化・省人化が困難な作業内容が、製造現場に多く残されていることがわかる。

そこで自動化・省人化が困難な作業内容を食品加工に係る業界団体等にヒアリングしたところ、「原料処理」工程で行われる目視による品質検査と原料選別、「食品製造・加工」工程で行われる目視による異物検査が課題として挙げられ、その自動化に課題があることがわかった。同様に、生産管理や衛生管理作業が課題として挙げられた。例えば、HACCPに沿った衛生管理では、原料の入荷から製造、出荷までの各工程において重要管理点を定め、衛生管理状況を継続的に監



(厚生労働省の HACCP リーフレットより)
図4 HACCP に沿った衛生管理

視・記録する仕組みとなっている(図4)¹⁾。

現状の食品加工工場におけるHACCP対応では、各工程の重要管理点を定期的に巡回し、加熱・冷却温度や処理時間、検査結果などを手書きで帳票に記録している場合が多い。そのため、製造装置の表示画面から帳票への転記作業に加え、集約した帳票から製造記録を残すコンピュータへの手入力作業など、転記ミスリスクや作業コストが生じている。

したがって、工場内の製造装置をIoTに対応したものに置き換えることでデジタル化することができれば、生産管理や衛生管理作業の自動化が可能となり、スマートファクトリー化を図ることができる。しかし、既存の製造装置のIoT対応装置への置き換えには多額の費用が必要となることから、その導入が進んでいないのが現状である。そこで、低コストにスマートファクトリー化を実現するため、既存の製造設備をそのまま活用してIoT化する技術が必要となる。

3. 農作物等の外観検査・教示装置の開発

食品加工工場のスマートファクトリー化に向けた課題である目視による品質検査と原料選別の自動化を実現するにあたり、基本的な考え方を図5に示す。

現状、原料の受け入れ工程では、目視により対象物の外観を検査し、手作業で選別等を行っている。目視による外観検査を自動化するためには、画像解析を行うための画像を取得することが第一段階となる。次に、様々な対象物や検査項目に対応可能な画像解析手法や分光計測手法を用いた自動計測技術を開発し、農作物等の欠陥を検出する外観検査を実現する(図5レベル1)。

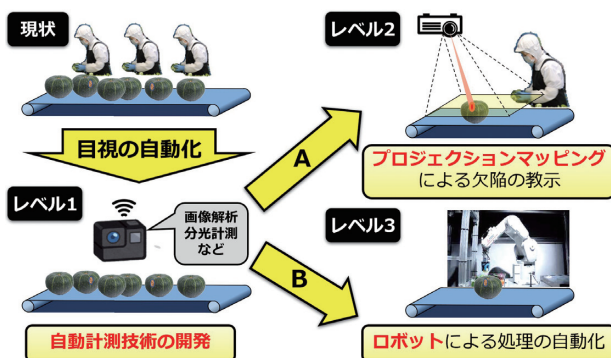


図5 外観検査の自動化に向けた考え方

そして、開発した自動計測技術で検出した欠陥の位置へプロジェクションマッピング技術を用いて光を投影し、作業員へ欠陥の位置を教示することで、現状作業員が行っている「目視+欠陥の判断」を自動化し、作業員の作業負担を軽減することができる(図5レベル2)。さらに、プロジェクションマッピングの工程をロボットで置き換えることで、「選別」の作業も自動化することが可能となり、食品加工工場のスマートファクトリー化を実現できる(図5レベル3)。

このスマート化のプロセスは、経済産業省が示す「スマートファクトリーロードマップ」²⁾に対応している。ロードマップではデータ活用のレベルを3段階に分けて推進していくことを想定しており、レベル1で「データの収集・蓄積」、レベル2で「データによる分析・予測」、レベル3で「データによる制御・最適化」と整理されている。本研究では、レベル1から2までを想定して開発を行った。

3.1 装置の基本構成

道内の複数の食品加工工場にヒアリングした結果、検査工程の自動化はコストや設置場所の観点から、現状設備への変更を最小限とする方向で進めることが望ましいことがわかった。そこで、既存の原料搬送路上にセンサを設置し、対象物を計測して外観検査する構成とした。また、原料が農産物の場合、搬送装置として主に幅1,400mm以内のベルトコンベアやローラーコンベアが使われていることから、幅1,400mmまで対応可能な撮影機構とすることで、汎用性を高めた。

また、目視検査の場合、欠陥の疑いがある対象物は手に取って様々な角度から検査することで検査漏れを防いでいる。そこで、カメラを複数台使用して対象物を複数の方向から撮影し、死角の少ない映像を用いて画像解析することで検査精度の向上を図った。試作機では、解像度3.2Mピクセル(2,048×1,536画素)、フレームレート55fpsで撮影可能なグローバルシャッターのUSB3.0カラーカメラを4台使用し、搬送路の上方及び側方から対象物を撮影できるレイアウトとした。また光源として、LEDライン照明を2本搬送路の斜め上方に配置した。さらに、プロジェクションマッピングを用いて外観検査の結果を搬送路上の対象物(欠陥品)に投影することで、作業員の「目視+欠陥の判断」を自動化し、作業員が視線を動かすことなく欠陥品除去作業に従事できるようにした。試作した外観検査・教示装置を図6に示す。

3.2 馬鈴しょを対象とした外観検査手法の開発

農作物等の外観検査では多種多様な原料が対象となり、その品質判定においては対象ごとに異なる検査項目や判定基準があるため、対象物に応じた自動計測技術が必要となる。ここでは、北海道で生産量の多い馬鈴しょを対象とし、生食用の馬鈴しょ選果場を想定した外観検査を行うための自動計測技術について述べる。

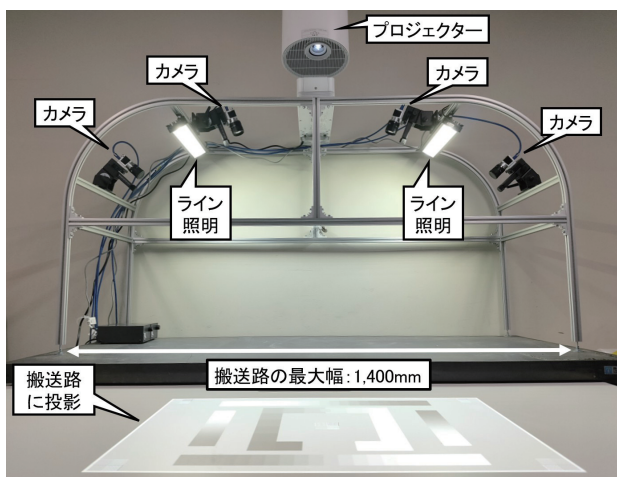


図6 試作した外観検査・教示装置

選果場では一般的に、馬鈴しょはローラーコンベア等を用いてバラ積み（重なりがなく密集した状態）で搬送され、その途中で目視による手選別が行われている。実験環境では、ベルトコンベアに馬鈴しょをバラ積みし、図6に示す外観検査・教示装置を用いて画像を取得した。上部カメラ及び側方カメラからの撮影例を図7に示す。

馬鈴しょの計数や個体ごとの欠陥検出を行うためには、個々の馬鈴しょを分離して1個ずつ認識する必要がある。ここでは深層学習を用いた画像の領域分割手法であるMask R-CNN⁴⁾を用いて馬鈴しょを個体分離した。Mask R-CNNは、入力画像からニューラルネットワークによって抽出した物体（ここでは馬鈴しょ）の特徴量をもとに、物体の位置検出、領域分割及び種類の分類を同時に行う手法である。事前に馬鈴しょの画像を学習させたモデルを利用し、Mask R-CNNを用いて個々の馬鈴しょを認識し、個体分離した結果を図8に示す。

馬鈴しょの個体分離については約98%の正答率が得られており、実用上の問題はないことを確認した。なお、Mask



図7 馬鈴しょの撮影例（左：上方カメラ，右：側方カメラ）



図8 馬鈴しょの認識結果（左：上方カメラ，右：側方カメラ）

R-CNNによる領域分割は、学習モデルを用意すれば汎用的に利用することが可能である。ブロッコリーの花蕾を学習させたモデルを用いて、ブロッコリーの花蕾を識別した結果を図9に示す。このように、Mask R-CNNは多種多様な農作物等の外観検査において、個体分離に有効であることを確認した。

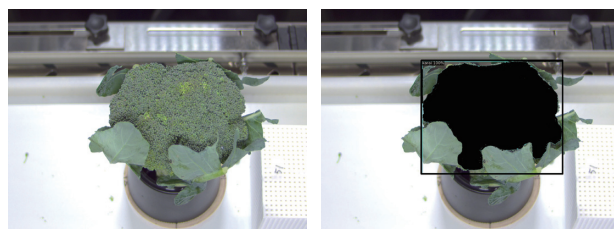


図9 ブロッコリーの識別例（左：撮影画像，右：花蕾の抽出）

次に、画像解析により馬鈴しょの欠陥を検出する手法について検討した。馬鈴しょ選果場での目視による手選別では、病害や腐れ、異形などの有無を各個体の状態を見て判断している。ここでは、馬鈴しょの欠陥の一つである緑化（馬鈴しょ表面が緑色に変色したもの）を対象とし、撮影して得られたカラー画像から緑化した個体を識別する方法を開発した。具体的には、撮影画像から馬鈴しょを個体分離した後、画面に写る全ての馬鈴しょ表面のRGB分布を解析する。画面全体に対して緑成分が相対的に高い領域を全体緑化領域とし、個々の馬鈴しょ内で緑成分が相対的に高い領域を個別緑化領域としたとき、これら全体緑化領域と個別緑化領域が一定面積以上を占める個体を緑化個体と識別した。図7の撮影画像から緑化個体を識別した結果を図10に示す。なお、他の欠陥である病害や腐れ、異形等については、それぞれ異なる識別手法が必要であることから別の研究で取組を進めている。



図10 緑化個体の識別（左：上方カメラ，右：側方カメラ）

前述した緑化個体の識別のように、1台のカメラ画像のみを用いて馬鈴しょの欠陥を検出する場合、その方向から撮影した画像に欠陥が写っていないと欠陥検出は不可能である。解決方法として、複数のカメラを用いて対象物を多方向から撮影し、得られた複数の画像のいずれかに欠陥を捉える方法と、対象物をローラーコンベア等で搬送する際に転動させ、全周の画像を撮影して欠陥を捉える方法が考えられる。前者の方法では異なる方向から撮影した複数の画像群に対して、後者の方法では転動する馬鈴しょを短い時間間隔で撮影した複数の画像群に対して処理を施し、異なる画像に撮影さ

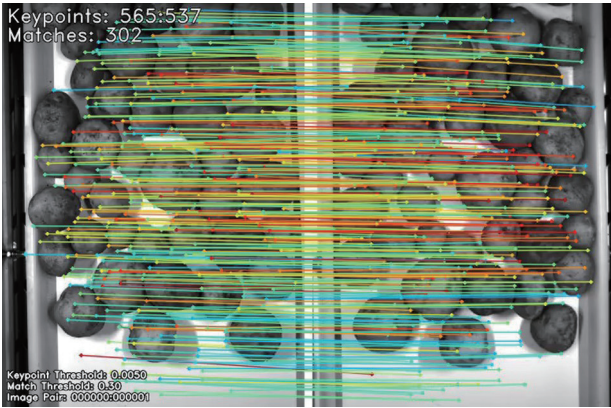


図 11 SuperGlue を用いた画像間の対応付け

れた同一の馬鈴しょ同士を対応づける必要がある。

そこで当場がこれまでに開発した多視点画像解析手法⁵⁾を活用した。具体的には、複数の画像に写る個々の馬鈴しょについて、撮影された方向が異なっている場合でもそれぞれの画像に撮影された同一の馬鈴しょを対応付けることが可能な特徴点マッチングアルゴリズムであるSuperGlue⁶⁾を用いた。異なる方向のカメラから撮影した馬鈴しょをSuperGlueにより対応付けした例を図11に示す。

異なる画像間で馬鈴しょを対応付けすることができれば、一方の画像又はある時点の画像で欠陥を検出した馬鈴しょについてその位置を追跡することが可能となる。図12はプロジェクションマッピングを用いて欠陥のある馬鈴しょへ光を照射し、その位置を作業者へ教示した例である。

本研究では、馬鈴しょを対象とし、欠陥については緑化のみを対象とした。しかし、本研究で開発した外観検査・教示装置は汎用的な構造としており、病害や腐れなど緑化以外の欠陥検出や、他の農作物の欠陥検出にも適用可能と考える。

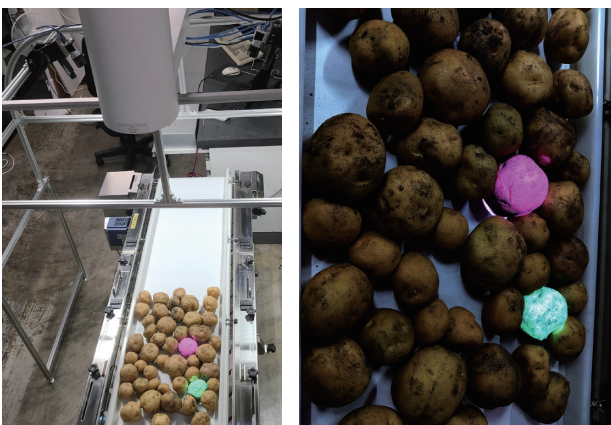


図 12 プロジェクションマッピングによる品質検査結果の教示

4. 鮭フレークに混入した小骨検出手法の開発

食品製造・加工の工程で行われる目視による異物検査手法について、魚を原料とした食品加工の場合、その異物として

は寄生虫をはじめ魚の骨や皮、血合い部分などが対象となる。加工工程で異物は全て取り除く必要があるが、それらは魚の身内部に存在する場合もあることから、異物検出の自動化の難易度は非常に高く、多くの人手に依存しているのが現状である。

そうした魚の加工食品のうち、鮭フレークでは加熱した鮭の身をほぐした後、小骨等の異物を作業者が目視で取り除く作業を繰り返し行っている(図13)。鮭の身をほぐした状態であれば、鮭の身の表面上に異物となる小骨が露出しやすくなる。そこで、鮭フレーク加工工程における小骨検出技術の開発に取り組んだ。



図 13 左：鮭フレークの検査工程 右：鮭の身と骨(異物)

4.1 検査対象の光学特性

まず、図13の鮭フレークの画像からわかるように、鮭のほぐした身と骨は色や形状が近いこともあり、可視画像を用いた異物検出は難易度が高いことが想定された。そこで、分光分析を用いて鮭の身と骨を識別する方法を検討するため、図14で示す計測光学系を構築し、鮭の身と骨それぞれについて波長365nmのUV(紫外領域)LED光源で紫外光を照射したときの蛍光スペクトルを計測した(図15)。その結果、鮭の身と骨は波長450nm付近で蛍光強度に大きな差が生じることがわかった。また、鮭の身と骨について波長365nm及び375nmのUV LED光源に対する分光反射特性を計測した結果、波長365nm付近で分光反射強度が高くなり、鮭の身の方が骨よりも強度が高くなった(図16)。

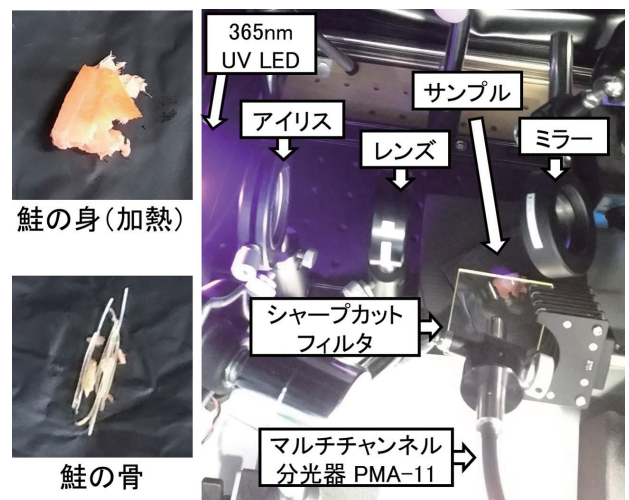


図 14 左：計測対象 右：構築した計測光学系

同様に波長365nm及び385nmのUV LED光源に対する分光反射特性を計測した結果、波長450nm付近で鮭の骨の方が身よりも分光反射強度が高くなることわかった(図17)。

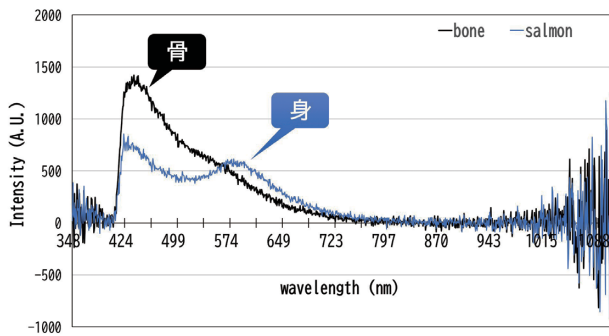


図 15 UV LED 光源 (365nm) 励起での蛍光スペクトル

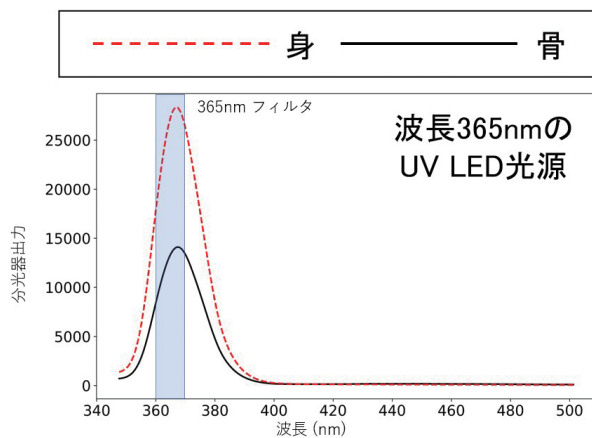


図 16 UV LED 光源 (365nm) における分光反射特性

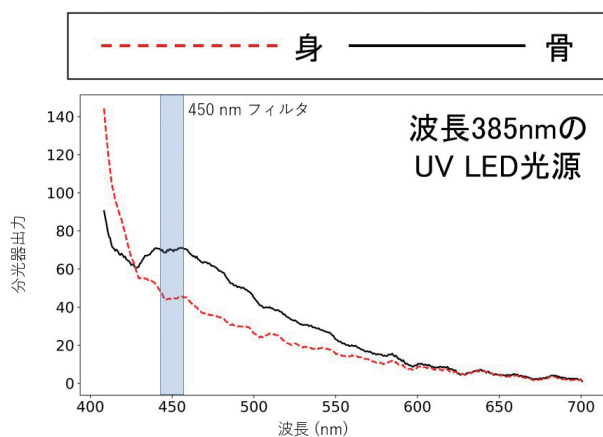


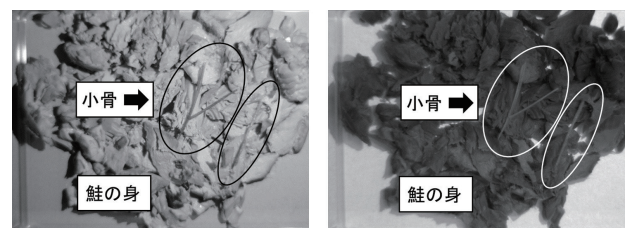
図 17 UV LED 光源 (385nm) における分光反射特性

4.2 小骨検出手法の開発

前節で得られた鮭の身と骨の光学特性から、それぞれの光源に対して、透過中心波長が365nmと450nmのバンドパスフィルタを通して分光画像を撮影した(図18)。その結果、

分光画像上では微差となっているが、365nmのバンドパスフィルタで得られた画像(図18左)では、鮭の身に対して骨の輝度が低くなっており、450nmのバンドパスフィルタで得られた画像(図18右)では、身に対して骨の輝度が高くなっていることが確認できた。しかし、その2組の分光画像だけでは鮭の身と骨の輝度差が小さく、正しく分離できない場合があった。そこで、UV LED光源の波長とバンドパスフィルタの組み合わせを4組(光源365nm+フィルタ365nm, 光源375nm+フィルタ365nm, 光源365nm+フィルタ450nm, 光源385nm+フィルタ450nm)に増やして4枚の分光画像を取得し、4枚の分光画像に対して機械学習の手法の一つであるランダムフォレストを用いてデータ解析を行うことで、鮭の身と骨の分離を可能とした。

カラーカメラで撮影した可視光の画像(図19)では、小骨を検出することが困難であったが、開発した手法を用いることで、図20のように鮭フレークから小骨を検出できることを確認した。



左: 光源 365nm + フィルタ 365nm 右: 光源 385nm + フィルタ 450nm
図 18 得られた分光画像

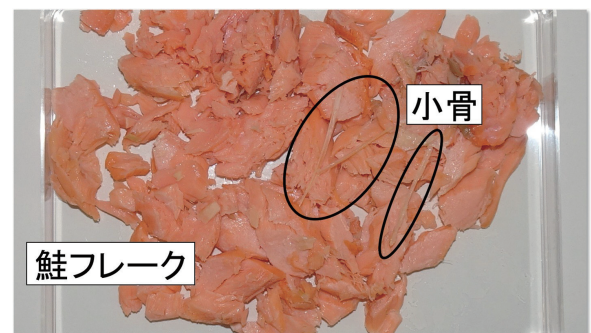


図 19 カラーカメラで撮影した鮭フレークと小骨の画像

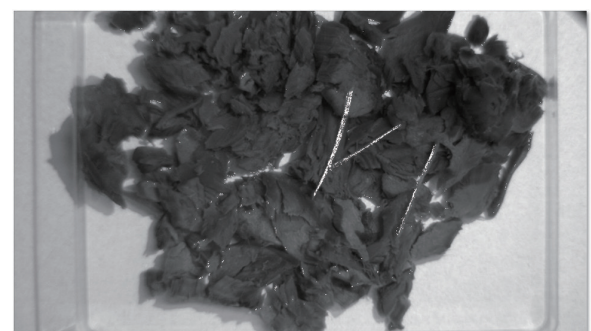


図 20 鮭フレークに混入した小骨の検出結果

5. 検査・管理業務の自動化技術の開発

5.1 道内食品製造企業における検査・管理業務の現状

道内の複数の食品製造企業にヒアリングした結果、生産管理や衛生管理に係わる作業が年々増加しており、特に大手スーパーマーケットやコンビニエンスストア向けのプライベートブランド商品では、報告用のレポート数が非常に多く、現場及び管理者に対する負担が大きくなっていることがわかった。加えて、HACCPに沿った衛生管理に対応するため、HACCPに対応した生産設備やセンサの活用を検討しているものの、既存設備の更新や管理工程の大幅な変更が必要となることから、コスト面に課題がありHACCP対応機器類の導入が進んでいないことがわかった。

そこで、既存の設備と管理工程のまま、生産管理情報や衛生管理情報をモニタリングし、自動記録する方法について調査した。

5.2 既存設備のメーター表示の読み取り

食品加工工場の製造工程では、生産管理や衛生管理のための情報を帳票（記録表）に手書きで記入し、作業終了後に当日分の帳票を集め、その記録情報をコンピュータに手入力する方法が多い。図21に、漬物製造工場におけるHACCPにもとづく衛生管理に必要なモニタリング記録のうち、重要管理点の一つである加熱殺菌工程の帳票の例を示す。

CCPのモニタリング記録		保管期限 記録日より1年間				
工程	加熱殺菌	記録担当者	工試 太郎			
管理基準 (CL)	加熱槽内を 85°C以上、20分間以上に保つ					
モニタリング方法	加熱担当者は槽内が80°C以上になったことを確認し、開始・終了 (20分後) 時間と温度を確認し記録する					
年 月 日	製品名	開始温度	開始時刻	終了温度	終了時刻	確認者
23/6/6	白菜漬切	85.1 °C	10:05	85.7 °C	10:37	倉反 島
23/6/6	福神漬	85.2 °C	11:09	85.9 °C	11:42	本間

図21 衛生管理用モニタリング帳票の記入例

このような帳票が、製造ラインごとに行われる生産管理情報の記録や、各重要管理点のモニタリング記録のために多数記入されている。帳票への記入は、製造工程のモニタリング箇所を定期的に巡回し、時計や温度センサーの表示、製造設備のメーターやインジケータ等を目視して行っているため、それらのメーター表示等をデジタル化して自動的に記録することで効率化を図ることができる。このような機能を有する市販のソフトウェアを調査したところ、数社からメーター読み取りのサービスが提供されていることがわかった。そこで、それらのサービスが食品加工工場に適用可能かどうか評価した。

当該サービスは、スマートフォンのカメラでメーターを撮

影し、クラウドに設置された画像解析サーバを用いてメーターから数値データを取得する仕組みとなっており、図22で示すようなアナログ針のメーターや回転メーター、デジタル表示のメーター等に対応している。既存の製造設備のメーターを対象として試験した結果、数値データのデジタル化が容易に行え、帳票記録の自動化に有効であることを確認した(図23)。

しかし、食品加工工場において帳票記入の対象となるメーターは多岐にわたり、装置の稼働状況を示すパイロットランプやインジケータなど、メーター表示ではない設備の記録や、2針アナログメーターや複数項目が表示されるメーターなど、既製サービスでは対応していないもの(図24)も多く、機能の追加が必要であることがわかった。



図22 既製のサービスで読み取り可能なメーター例



図23 メーター読み取りサービスによる自動記録



図24 既製サービスで読み取り不可能なメーター例

したがって、食品加工工場で帳票記録の自動化を実現するためには、既製サービスのAPI利用に加え、未対応のメーター類を読み取る機能のAPI開発が必要となる。システムの構成としては図25に示すとおりで、引き続き開発を進める予定である。

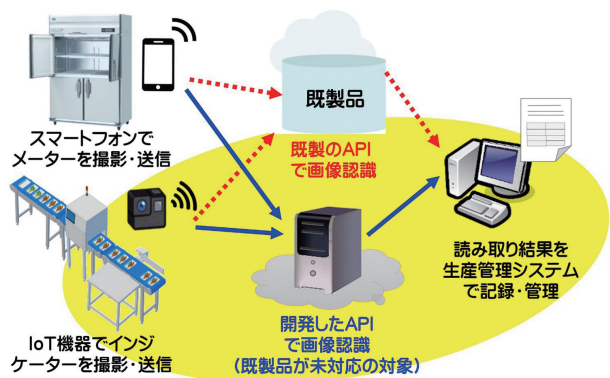


図 25 食品加工工場の自動モニタリングシステム

視点画像解析技術の開発」, 北海道立総合研究機構工業試験場報告 No.320, (2021)

- 6) P.E. Sarlin, D. DeTone, et al., “SuperGlue: Learning Feature Matching with Graph Neural Networks”, CVPR, (2020)

6. おわりに

本研究では、農作物等の外観検査・教示装置を試作し、馬鈴しょを対象とした実証試験を行った結果、良好な結果を得ることができ、実用化への見通しを得た。また、鮭フレークの異物混入について、分光画像解析により鮭の身から異物となる小骨を検出する手法を開発し、異物検出の自動化が可能であることを確認した。さらに、食品加工工場において生産管理や衛生管理のモニタリングを自動化するためには、既製のメーター読み取りサービスの利用に加え、追加機能の開発が必要であることがわかった。

以上のように、食品加工工場のスマートファクトリー化を推進するため、画像情報や分光情報から原材料の計数や品質検査などを実現する自動計測技術を開発するなど、検査・管理業務の自動化を実現するための基盤技術を獲得した。

生産者団体からの要望が強い馬鈴しょとブロッコリーについては、引き続き技術開発を行い自動検査工程の実用化を目指す。

引用文献

- 1) 厚生労働省, 「HACCPに沿った衛生管理の制度化について」, 2021年6月1日施行, https://www.mhlw.go.jp/stf/seisakunitsuite/bunya/kenkou_iryuu/shokuhin/haccp/index.html
- 2) 経済産業省中部経済産業局, 「スマートファクトリーロードマップ」, 2017年5月31日改訂, https://www.chubu.meti.go.jp/b21jisedai/report/smart_factory_roadmap/
- 3) 経済産業省北海道経済産業局, 「食料品製造業へのロボット導入の促進」, 2018年4月17日, <https://www.hkd.meti.go.jp/hokis/20180417/>
- 4) Kaiming He, Georgia Gkioxari, et al., “Mask R-CNN”, CV, (2017)
- 5) 飯島俊匡・岡崎伸哉・本間稔規, 「外観検査のための多