

じゃがいもの不用部除去システムの開発

井川 久, 中西 洋介, 川島 圭太, 三戸 正道, 畑沢 賢一
岡崎 伸哉, 飯島 俊匡, 大田 佳佑*, 栗林 宏光*

Development of Automatic Potato-Eyes Removing System

Hisashi IGAWA, Yosuke NAKANISHI, Keita KAWASHIMA, Masamichi MITO
Kenichi HATAZAWA, Shin'ya OKAZAKI, Toshimasa IJIMA
Keisuke OTA*, Hiromitsu KURIBAYASHI*

抄 録

じゃがいもの芽や傷み等の不用部除去作業は、人手作業に起因する低生産性や作業人員確保の困難さから複数の食料品製造企業より自動化が強く要望されているが、難易度の高さからこれまで自動化されてこなかった。食品加工工場の省人化や生産性向上を図るためには、不用部除去システムの開発が喫緊の課題であるが、不用部除去システムには、大量に投入される複雑な形状のじゃがいもを高速かつ確実に処理する性能が求められる。

本研究では、複数のじゃがいもを同時に整列・固定し、3次元画像処理で検出した不用部をロボットで高速に除去する不用部除去システムを開発した。

キーワード：画像処理、産業用ロボット、食品、芽取り、点群

Abstract

Removal work of unnecessary parts such as eyes and bruises of potatoes has not been automated so far due to the high level of difficulty. Automation is strongly required from multiple food manufacturers due to low productivity resulting from manual work and difficulty in securing workers. In order to reduce the number of workers and improve productivity in food processing plant, it is necessary to develop an automatic potato-eyes removing system. The automatic potato-eyes removing system is required to have a capability of processing potatoes of complicated shape to be input in large quantities at high speed and reliably.

In this research, we developed the automatic potato-eyes removing system that can align and fix several potatoes at the same time, and eliminate unnecessary parts detected by 3D image processing at high speed with a robot.

KEY-WORDS : Image processing, Industrial robot, Food, Potato-eyes removing, Point cloud

1. はじめに

じゃがいも（以下、芋）は全国収穫量の約8割を北海道産が占めるなど本道を代表する農作物のひとつであり、収穫量の約2割は様々な加工食品として全国に広く流通している。加工食品用途の内訳としては、ポテトチップや、冷凍食品用のダイスポテト、フライドポテト等が挙げられるが、これら

加工食品用の約7割において、皮を剥いた後に商品価値を損なう芽や傷み等の不用部を除去する必要がある。芋を加工する工程としては、原料の投入、洗浄、スチームピーラ等による皮剥き、不用部の除去があり、その後、製品に応じてカットや加熱処理、梱包等を行い製品化している。それら多くの工程では自動化が進んでいるが、不用部除去作業は、大量の芋を高速に処理する技術、複雑な形状の芋を確実に固定する

* シンセメック株式会社, * Synthemec Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：じゃがいもの自動芽取り・傷み除去システムの開発

技術、高精度に不用部の3次元位置を計測する技術等、技術的な難易度が高いため未だ実用化事例がない。特に処理能力には高速性が必要であり、不用部除去作業を自動化する場合、芋1個あたり4秒以下で処理する性能が求められる。これまで工業試験場を始め、数社が芋の不用部除去装置の開発に着手しているが^{1) 2) 3)}、除去方法や処理速度等に課題が残り、実用化に至っておらず、未だ多くの人手で不用部除去作業を行っている。しかし、人手作業に起因する低生産性や作業人員確保の困難さが課題となっており、複数の道内食料品製造企業から不用部除去作業の自動化が強く要望されている。

大量に投入される複雑な形状の芋の不用部除去作業を自動化するには、芋を整列・位置決めし、高速かつ確実に不用部を除去する性能が求められる。本研究では、大量の芋の整列・位置決めを可能とした機構、画像処理により不用部位置を検出する技術、およびロボットにより高速に不用部を除去する技術を開発した。

第2章では、整列・位置決め方法が比較的簡便な半割芋を対象として、芋を半割に切断する自動切断機構や、画像処理による不用部の検出技術、さらにロボットで高速に不用部を除去することが可能な不用部除去システムの開発について報告する。第3章では、全粒芋を対象とした整列・位置決め機構の開発、不用部の安定した検出が可能な画像処理技術の開発、およびそれら一連の技術を統合した不用部除去システムの開発について報告する。

2. 半割芋を対象とした不用部除去システムの開発

不用部除去システムには、芋を確実に整列・位置決めする性能が求められる。図1に従来の整列・位置決め機構を示す。芋の両端を左右の保持部により把持し、保持部を回転させることで芋を任意の角度に位置決めして不用部の検出および除去を行っていた。しかし、芋の形状・大きさは一定ではなく、中心軸からずれて把持した場合、不用部を確実に除去することは困難である。また、中心軸上で把持するためには芋の位置・形状をセンサで計測し、保持部を中心軸上に位置決め制御する等の工夫が必要であるため、高速化に課題が残った。そこで、芋を半割にして切断面を下にすることでコンベアと面接触し、姿勢が安定する点に着目し、芋を二分割に切断する機構および整列・位置決めする機構の開発を行った。

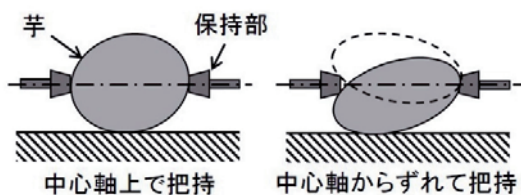


図1 従来の整列・位置決め機構

2.1 整列・位置決め機構の開発

芋を二分割するために、切断する刃は芋の中心軸に配置する必要がある。そこで、芋を2本のスクリューフィーダで搬送し、スクリューフィーダ間の中央に設置した丸刃に押しつけることで二分割する機構を開発した。図2に開発した自動切断機構を示す。切断後は切断面が下向き状態で半割芋がコンベア上へ排出されるように、丸刃-コンベア間をスロープで接続した。多数の芋を投入し切断実験を行ったところ、芋は切断面が鉛直下向きの姿勢で安定して排出されることを確認した。

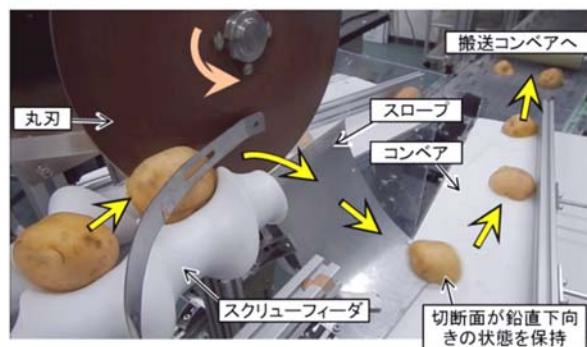


図2 自動切断機構

半割芋を固定するために、搬送されるに従って徐々に先のとがった突起物（以下、トゲ）が突出し、切断面に対してトゲが突き刺さることで半割芋を確実に固定する搬送コンベアを開発した。図3に搬送コンベアの模式図、図4に開発した搬送コンベアを示す。搬送コンベアはトゲ付きプレートと穴空きプレートの2層構造となっており、各プレートのトゲと穴の位置は対応している。半割芋が投入される箇所では、プレートガイドによって各プレート間にトゲの高さよりも広い隙間が生じているため、半割芋にトゲは接触しない。そのため、自動切断機構のスロープから投入された半割芋は滑りながら穴空きプレート上に配置される。搬送コンベアが進むにつれて、プレートガイドで生じていたプレート間の隙間が無くなり、半割芋はトゲに突き刺さる。さらに、ローラで押さえつけることでトゲが半割芋に深く突き刺さり、確実に整列・位置決めすることが可能となる。

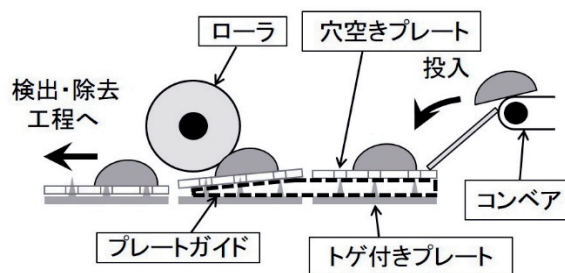


図3 搬送コンベアの模式図

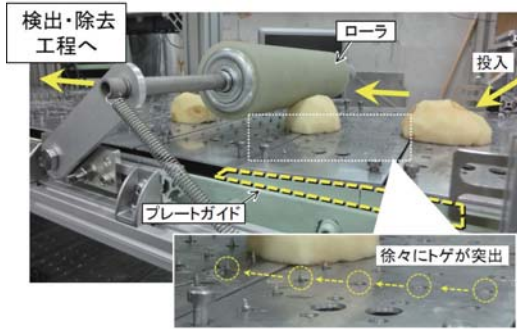


図4 開発した搬送コンベア

2.2 不用部位置検出技術の開発

不用部の位置を検出する工程(検出工程)では、カラー画像と深度画像を同時に得ることができるイメージセンサとしてMicrosoft製のKinectを使用した。本研究では、あらかじめ皮が剥かれて身が露出しているが、芽のくぼみには剥ききることができなかつた茶色い皮が残存している芋を対象としている。芽に残った茶色い皮、すなわち不用部を画像処理により検出する。画像処理の内容としては、身と皮の彩度の違いに着目し、取得したカラー画像をRGB表色系からHSV(色相, 彩度, 明度)表色系に変換する。色相に対して閾値による抽出範囲を設定することで芋に対する背景を除去し、彩度に対する抽出範囲で皮を検出することが可能であることを確認した。図5に、設定した色相の閾値, 彩度の閾値, 取得した元画像, および画像処理結果を示す。

検出した不用部領域を除去機構によりすべて除去するために、除去機構の直径を考慮し、不用部領域の分割を行うことで、平面上における除去機構の目標位置(XY方向)を検出する。不用部の高さは深度画像から取得する。得られた除去機構の目標位置をロボットへ送信することでロボットは除去動作を行うが、除去動作のタクトタイムを短縮させるためには、目標位置の順序を並び変えてロボットの移動距離が小さくなるように経路を生成する必要がある。

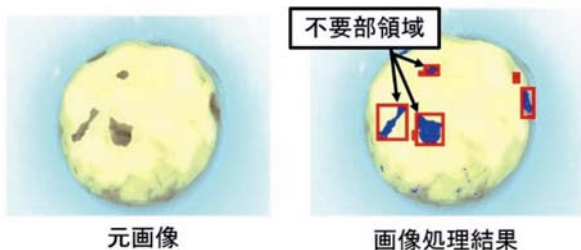
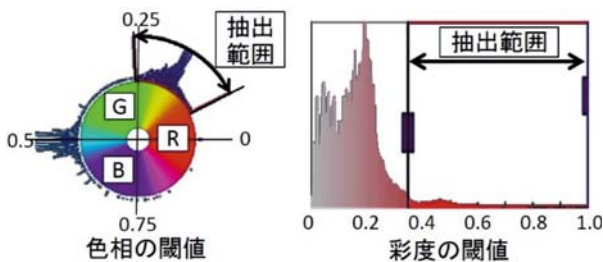


図5 画像処理

本研究では、ロボットの移動距離を低減する経路生成の手法を考案した。除去機構の目標位置をXY方向にプロットした模式図を図6に示す。X軸やY軸方向のソートにより経路を生成することも可能だが、目標位置の配置の仕方に関わらず移動距離を低減することは難しい(図7)。本手法では、まずX軸(もしくはY軸)方向の最小値(もしくは最大値)となる目標位置P0を経路の開始位置として選択し、P0から他の目標位置(P1からP4)までの距離を計算する(図8(1))。次に、P0からの距離が最小となるP1を経路の2点目として選択し、P1から他の目標位置(P2からP4)までの距離を計算する(図8(2))。これらの手順を繰り返すことにより経路の生成が可能となる(図8(3), 図8(4))。生成した経路の一例を図9に示す。このようにして、複数の芋における不用部領域の3次元位置を一括して検出する画像処理および経路生成アルゴリズムを開発した。

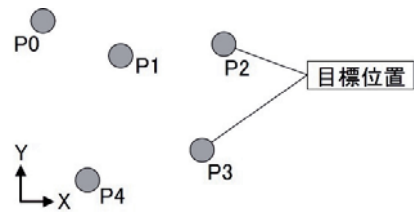


図6 目標位置の模式図

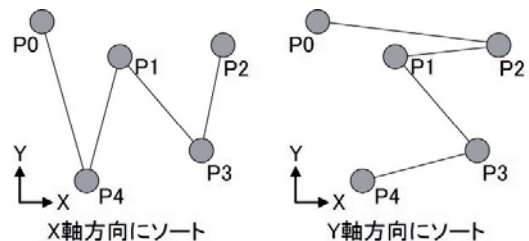


図7 各軸方向のソートによる経路生成

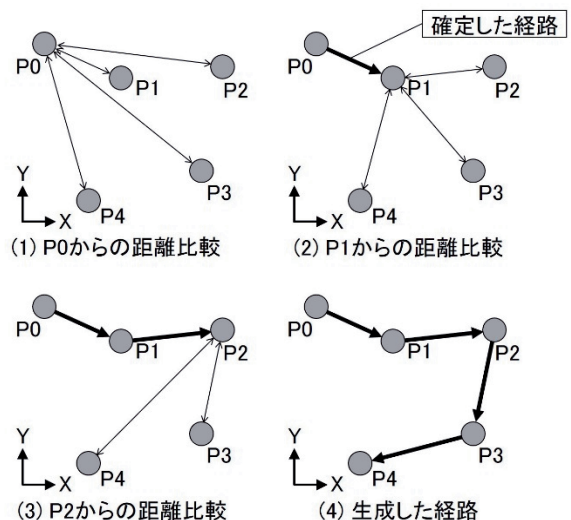


図8 移動距離を低減した経路生成

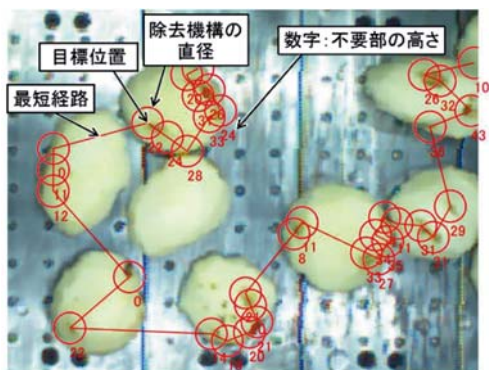


図9 生成した経路の一例

2.3 不用部除去システムの開発

不用部を除去する除去工程は、高速動作が可能なロボットと、ロボット手先に装着する不用部除去機構から構成される。図10に不用部除去機構を示す。除去機構は先端にドリルを有しており、動力はフレキシブルシャフトを通じて、ロボット架台に設置したモータから伝達する。重たいモータをロボット架台に設置することでロボット手先が軽量化され、ロボットの高速動作が可能となる。また、不用部を除去する際、ドリルに接触した芋が動かないように芋抑えプレートおよび圧縮バネにより芋を固定している。

搬送コンベアにより工程間を接続し、開発した不用部除去システムを図11に示す。整列・位置決め工程の制御はプログラマブルロジックコントローラ（以下、PLC）、検出工程および除去工程の制御はパーソナルコンピュータ（以下、PC）で行い、PLCとPC間はシリアル通信で接続することで、一連の流れをコンピュータで通信・制御可能とした。芋12個の除去試験を行った結果、処理速度は5.6秒/個であった。

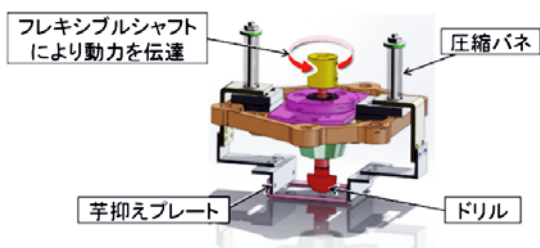


図10 不用部除去機構

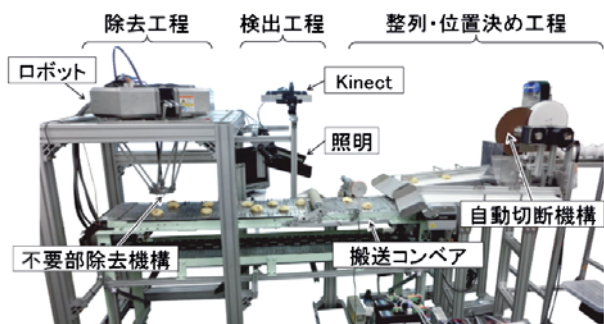


図11 不用部除去システム

3. 全粒芋を対象とした不用部除去システムの開発

第2章では、不定形状の芋を高速かつ確実に整列・位置決めするために、芋を二分割して固定する機構および不用部除去システムについて述べた。しかし、半割芋の対象製品がダイスポテトやコロッケなどに限定されるのに対して、芋を二分割しない全粒芋は全ての芋加工製品が対象となるため、全粒芋の状態 dengan 不用部を除去する自動化機械の早期開発ニーズは高い。本章では、全粒芋を対象とした整列・位置決め機構を考案し、第一試作機および第二試作機の開発を行ったので報告する。検出工程においては、イメージセンサおよび画像処理の改良を行うことで不用部の検出精度を向上させ、除去工程においては、除去対象領域を広げて同時処理が可能な個数を増やすことで処理速度を向上させた。

3.1 整列・位置決め機構の開発

図12に開発した整列・位置決め機構を示す⁴⁾。中心がくびれた一對のローラで芋を挟み込むというシンプルな構造ではあるが、以下の3つの機能を有している。

- i) 姿勢安定化
- ii) 反転（任意の角度に回転）
- iii) 複数同時処理

まず、姿勢安定化について説明する。本研究で開発した不用部除去システムでは、人手で芋を1個ずつ一對のローラ間に投入することを前提としている。芋を投入した直後は、ローラ軸に対して芋の中心軸の方向が必ずしも平行にはならず、芋とローラ間に多くの隙間が散在する（図12左図）。この状態の芋に除去機構を押し付けた場合、押し付ける度に芋が動いてしまうため不用部の除去は不可能となる。芋投入直後にローラで揺動回転させることでローラ軸と芋の中心軸が平行になるため、芋とローラ間の隙間が無くなり芋は安定した姿勢で落ち着く（図12右図）。そのため、芋に除去機構を押し付けても芋が動くことはない。反転に関しては、ローラを回転させることで、芋の大きさや形状の影響を受けることなく、中心軸周りに任意の角度で芋を回転させることが可能である。複数同時処理に関しては、構造がシンプルのためローラの本数を増やすことが容易であり、複数の芋を同時に反転させることができる。このようにして、不定形状である芋を大量に整列・位置決めすることが可能となる。

第一試作機では、ローラ表面に筋状の加工を施すことで、除去機構を押しつけた際の芋の滑りを防いでいたが、第二試作機では、突起状の加工を施すことで芋を確実に保持できるようにした（図13）。

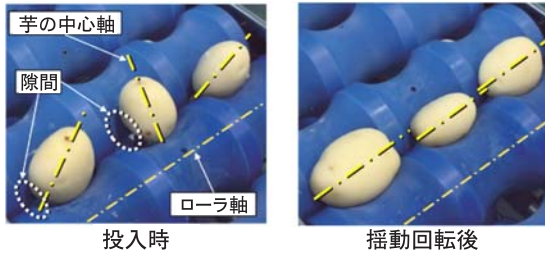


図 12 整列・位置決め機構

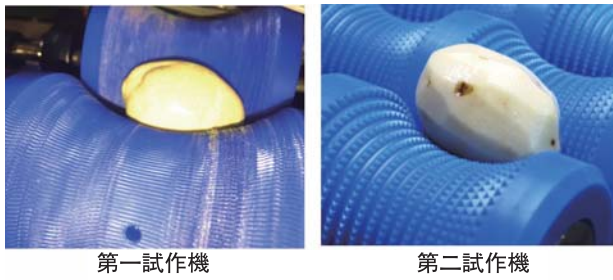


図 13 ローラ表面の加工

に対して3次元点群のZ軸方向(チェッカーボードに対して奥行き方向)の偏差をヒストグラムで描画した(図15)。標準偏差で比較したところ、Kinectが1.67mmであったのに対し、ステレオカメラは0.59mmという結果となり、Kinectに対してステレオカメラは、取得した3次元点群のZ軸方向のパラッキが小さいことを確認した。

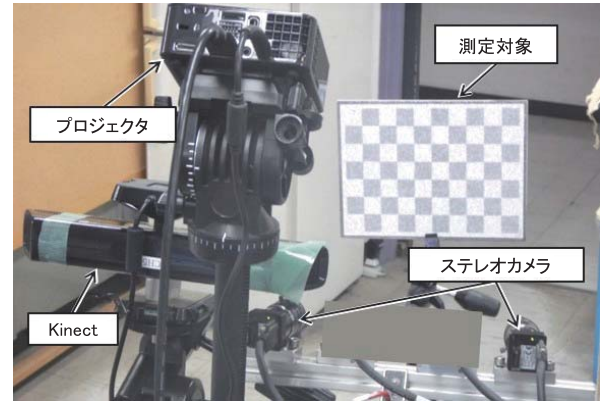


図 14 実験環境

3.2 不用部位置検出技術の開発

半割芋を対象とした不用部除去システムにおいて、イメージセンサから測定対象までの距離(以下、WD: Working distance)は60cmであったが、全粒芋を対象とした不用部除去システムでは、ロボットとの位置関係からWDは100cm以上必要となる。ステレオ計測の距離分解能はWDが大きくなるほど低下するため⁵⁾、イメージセンサの計測精度を向上させる必要がある。また、不用部の検出に関して、第2章では、HSV表色系における閾値により不用部の抽出をしていたが、身色の異なる芋の場合、その都度閾値を設定する必要があった。本章では、イメージセンサの精度向上と、品種の異なる芋にも対応した画像処理手法について述べる。

3.2.1 イメージセンサの性能検証

半割芋用装置ではKinectを使用していたが、全粒芋用装置では精度向上を図るためにイメージセンサとしてステレオカメラを使用することとした。ステレオカメラの構成は、30万画素のUSB3.0カラーカメラ2台、レンズ焦点距離8mm、ベースライン150mmとし、キャリブレーションにより両カメラのひずみ補正や左右画像の平行化を行った⁶⁾⁷⁾。また、ステレオマッチングの精度を向上させるために、プロジェクタでランダムパターンを照射し、測定対象に対してテクスチャを投影した。

イメージセンサの性能を検証するために、図14に示す環境でKinectとの精度比較検証実験を行った。まず、Kinectとステレオカメラから1m離れた箇所に、測定対象となるチェッカーボードを各イメージセンサに対して垂直になるように設置する。次に、各イメージセンサでチェッカーボードを計測し、得られた3次元点群から近似平面を抽出する。近似平面

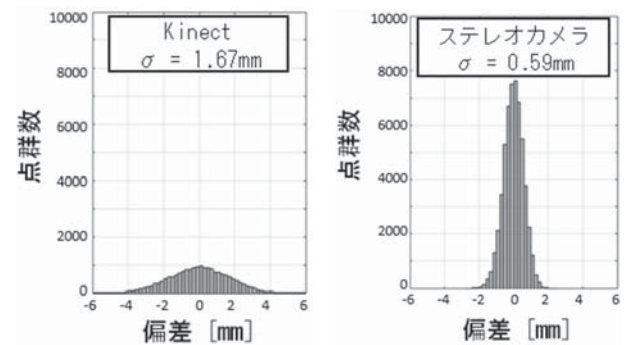


図 15 精度検証 (Z方向の偏差)

3.2.2 不用部領域の検出

芋は品種が異なると身色も異なるため、色相や彩度による閾値の設定で安定して不用部を検出することは難しい。本章では、背景となる青色のローラ部から色相による固定閾値処理により芋領域を抽出し、芋領域ごとに動的な閾値処理を施すことで、安定した不用部領域の抽出が可能であることを確認した。図16に元画像、図17に芋領域および不用部領域を抽出した画像処理結果を示す。

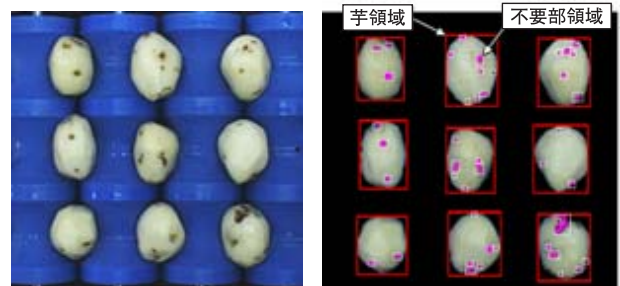


図 16 元画像

図 17 画像処理結果

3.2.3 除去機構の経路生成

前項で抽出した不用部領域に対して、除去機構の形状を考慮した目標位置を抽出する。除去機構のドリル部は、厚さ1mmの板を三角形に切り出した形状をしているが、モータにより高速回転しているため、不用部を除去する際は三角錐の形状で削り取ることとなる。そこで、画像処理により得られた不用部領域の全ての3次元点群が除去機構の三角錐に含まれるように除去機構の目標位置を算出した。図18に、除去機構の目標位置を描画した結果を示す。

2.2節の手法を用いてすべての目標位置を最短経路で接続し、かつ、経路上の芋領域の3次元点群（芋の高さ）を考慮することで、除去機構が芋に衝突することなく、除去機構の上下移動量が最小となるような経路を生成した。図19に生成した経路を示す。

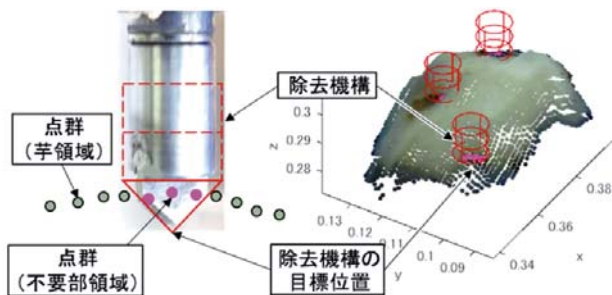


図18 除去機構の目標位置

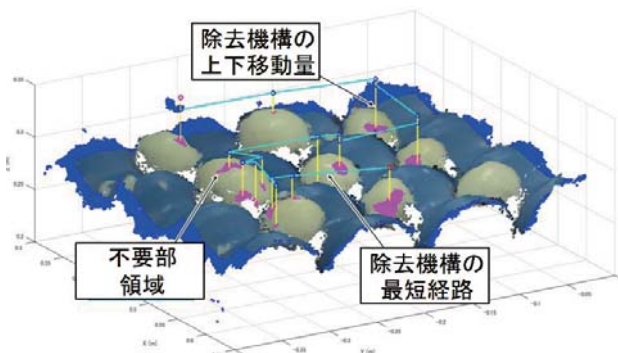


図19 生成した経路

3.3 座標変換

ステレオカメラで得られる3次元点群は、カメラを原点とした座標系で表されるため、実際に除去動作を行うロボットの座標系へ変換する必要がある。図20に、座標変換を行う際の環境を示す。まず、ロボットの手先でチェッカーボードの交点（チェッカーボード上の白と黒が交差する点）の座標を取得する。次にステレオカメラでチェッカーボードを撮像し、交点を抽出する。各座標系で得られた交点の座標の対応付けを行い、回転行列と並進移動ベクトルを特異値分解により推定することで座標変換が可能となる。

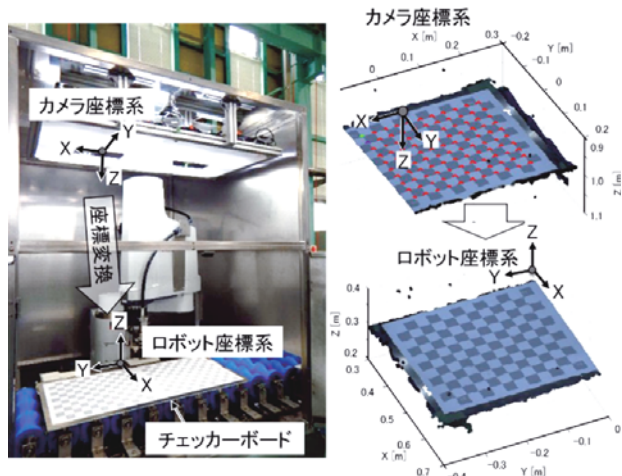


図20 座標変換

3.4 不用部除去システムの開発

芋の整列・位置決めから不用部の検出・除去、そして搬出までの工程を一連のラインに統合した全粒用の不用部除去システムを図21と図22に示す。整列・位置決め工程では、搬送コンベアのローラ上に人手で芋を並べ、ローラの揺動回転により芋の姿勢を安定させる。検出・除去工程では、ローラの上部に設置したステレオカメラにより不用部の検出を行い、除去機構の目標位置となる不用部の座標をロボットへ送る。座標を受けたロボットは、高速に回転するドリルから構成される除去機構により不用部の除去を行い、除去作業終了後、ローラを一定角度回転させて不用部の未処理部分を上部に露出させる。芋全周の処理が終了した後、搬送コンベアを駆動させて芋を搬出する。

第一試作機では、1列の搬送コンベアで芋を搬送する。検出・除去工程は2つの領域A・Bに分かれており、各々の領域に9個の芋、合計18個の芋を投入する。一方の領域で不用部の検出を行っている間に、もう一方の領域でロボットによる除去作業を行うことで、18個の芋の不用部除去作業がすべて終了するまで常時ロボットを稼働させている。しかし、整列・位置決め工程から検出・除去工程へ18個の芋を搬送する間、ロボットは停止しているため、処理速度に課題が残った。第一試作機の芋1個当たりの処理速度は3.6秒/個であった。

第二試作機では、ロボットを挟んで搬送コンベアを2列配置し、一方の搬送コンベアで検出・除去を行っている間に、もう一方の搬送コンベアで芋を搬送する。このような構成にすることで、ロボットは搬送コンベア間の移動以外は常時除去動作が可能となり、第一試作機と比較して大幅な処理速度の向上を実現することができた。なお、各搬送コンベアでは21個の芋を投入可能としており、合計42個の芋の同時処理が可能である。第二試作機の芋1個当たりの処理速度は2.3秒/個であった。

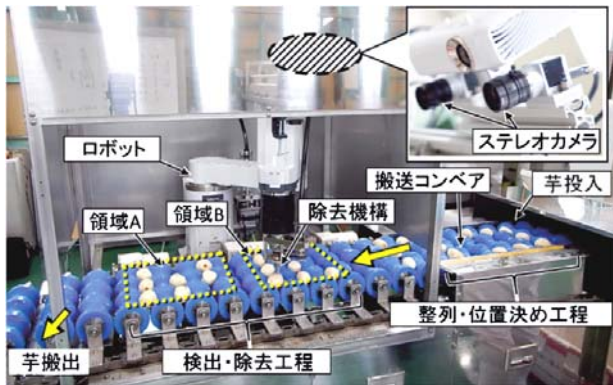


図 21 不用部除去システム（第一試作機）

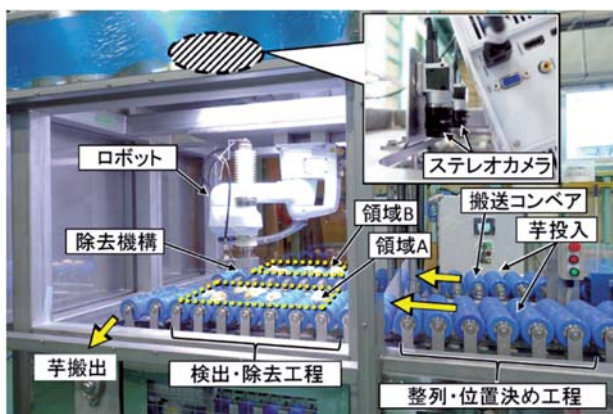


図 22 不用部除去システム（第二試作機）

4 まとめ

本研究では、複数の芋を同時に処理可能な不用部除去システムの開発を行い、以下のことを確認した。

- (1) 複数の芋の整列・位置決めを簡易に行うために、自動切断機構により半割芋を生成・固定し、画像処理により検出した不用部をロボットにより除去する半割芋を対象とした不用部除去システムを開発した。芋 1 個当たりの処理速度は 5.6 秒/個であった。
- (2) 新たに全粒芋を対象とした整列・位置決め機構を考案し、画像処理の改良により身色の異なる芋に対しても安定して不用部を検出し、除去することが可能な不用部除去システム（第一試作機）を開発した。芋 1 個当たりの処理速度は 3.6 秒であった。
- (3) 第一試作機を改良して搬送コンベアを 2 列配置させることで高速化を実現し、除去機構の接触による芋の滑りを防ぐためにローラに突起状の加工を施した不用部除去システム（第二試作機）を開発した。芋 1 個当たりの処理速度は 2.3 秒/個であった。

開発した全粒芋用の本システムは、整列・位置決め機構の機構上の制約から、芋の長軸端の不用部は検出および除去不可能である。今後、長軸端の不用部を除去する機構の開発を進める予定である。

参考文献

- 1) 牧野功・多田達実・戸羽篤也他：不定形状ハンドリングシステムの研究開発，北海道地域人材不足対策技術開発事業実績報告書，pp.71-128，(1993)
- 2) 今村藤男・上遠野覚：芋の不用部自動除去方法および装置，特許第2572204号，(1996)
- 3) 長岡伸司：じゃがいもの芽取り装置，特許第2963874号，(1999)
- 4) 栗林宏光・松本英二・中西洋介他：農産物の不用部除去装置，特願2017-58731，(2017)
- 5) 下村倫子・農宗千典・高橋宏：ステレオ視差と画像上の先行車高さ変化による車間距離計測のばらつき低減手法の考察，電気学会論文誌C，Vol.120 No.11，pp.1694-1701，(2000)
- 6) Z. Zhang, A Flexible New Technique for Camera Calibration, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22 No.11, pp. 1330-1334, (2000)
- 7) J. Heikkila, O. Silven, A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction, IEEE International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, (1997)