

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「サーモグラフィを活用して安全に自律移動するロボット制御ソフトウェアと、
画像・動画解析により選別収穫する自走式収穫作業ロボットの研究と開発」

研究開発成果等報告書

平成26年3月

委託者 北海道経済産業局

委託先 株式会社 CSソリューション

目次

目次.....	1
1. 研究開発の概要.....	2
1.1. 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	2
1.1.1. 研究背景と目的.....	2
1.1.2. 研究目標.....	3
1.1.3. 実施内容.....	4
1.2. 研究体制.....	9
1.3. 成果概要.....	10
1.4. 当該研究開発の連絡窓口.....	12
2. 本論.....	13
2.1. 画像・動画処理装置の開発.....	13
2.1.1. 【サブテーマ 1-1】 熱源ランドマークによる自己位置推定.....	13
2.1.2. 【サブテーマ 1-2】 アスパラガスの位置測定.....	14
2.1.3. 【サブテーマ 1-3】 人熱源感知.....	15
2.2. 自動収穫機の開発.....	16
2.2.1. 【サブテーマ 2-1】 走行駆動装置.....	16
2.2.2. 【サブテーマ 2-2】 収穫装置と搬送装置.....	17
2.3. 【サブテーマ 3】 熱源ランドマークの開発.....	18
2.4. 【サブテーマ 4】 アスパラガス圃場の分析と自動収穫の実証.....	19
3. 全体総括.....	20
3.1. 複数年の研究開発成果.....	20
3.1.1. 成果概要.....	20
3.1.2. 学術、知的財産上の成果.....	20
3.1.2.1. 学会発表.....	20
3.1.2.2. 特許出願.....	21
3.2. 研究開発後の課題・事業化展開.....	21

1. 研究開発の概要

1.1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

1.1.1. 研究背景と目的

人間は食糧なくして生きることはできず、食糧生産における剰余が分業による経済活動を可能とし、文明を成立させた。農業分野における技術改良や機械化の進展は、農業生産性の向上を通して、今日の経済発展の基礎ともなった。

日本においては1960年代から1970年代にかけて農業の機械化が急速に進展し、今日に至ったとされている。ここで注意が必要なのは「機械化」の意味するところが、トラクターの利用に代表されるような「力仕事」の機械化であるという点である。繊細な取り扱いを要する「手仕事」（例えばアスパラガスの収穫）の機械化は進んでおらず、「手仕事」は今日においてもなお農業者の生産活動において大きな比重を占めている。

「手仕事」の機械化は技術的に難易度が高く、現時点ではコスト的に人海戦術の方に軍配が上がることも多い。しかし近年急速に発展したIT技術の活用により、農業用ロボットで代替可能な「手仕事」の範囲が広がりつつある。需要側の事情としては、日本国内の農業従事者平均年齢が65.8歳と高齢化が進み、農業生産の低下が問題となっている状況があり、農業用ロボットに期待が寄せられている。また、視点を引いてみれば、農業用ロボットによる「手仕事」の機械化は、人類史的観点からの必然と言って良い。

農業用ロボットについては、以上で述べたように従来の「手仕事」を置き換える過程にあると考えられるが、一般的に普及させる段階に至るまでには、多くの課題が残されている。

課題のひとつとして挙げられるのが、安全性の確保である。平成19年に発生した農業機械作業による死亡事故件数は259件であり、農作業による死亡事故件数(397件)の65%を占めていることから、農業機械への安全対策ニーズは高い。また課題としてもうひとつ挙げられるのが、ロボットをどのように移動させるかというナビゲーションの方式である。精密な位置制御のためにレールを敷設する場合があるが、敷設コストや作物転換を難しくするといった問題があるため、ロボットはレールなしに自律移動可能であることが望ましい。自律移動が可能な方式としては、GPSを用いる手法の研究開発が既に進められているが、屋外利用に限定されるという制約があり、屋内外を問わず自律移動可能なロボットが求められている。更に、個別の「手仕事」を置き換えるためには、対象物を認識する技術や、作業内容を実現できる機構の開発が必要である。

本研究開発では、アスパラガス自動収穫ロボットの開発を通してこれらの課題解決に取り組み、「手仕事」の機械化を推進することを目的とする。具体的には、画像・動画処理装置を搭載し、安全で農作物を傷つけない機能を備えた自動収穫機、その自律移動を補助する熱源ランドマークの開発と、これらを組み合わせたシステム生産手法を開発する。これにより農業従事者の高齢化や人手不足等による生産低下を解消するのみならず、農業のIT化を通して新規参入を容易にし、農業関連ビジネスの発展に寄与する効果が期待できる。

1.1.2. 研究目標

本研究では、アスパラガスを対象としたノンストップ収穫可能な自動収穫ロボットの開発を目標としている。この目標を実現するために、プロジェクト全体を下記 7 つのサブテーマに分割し、それぞれに目標を設定し、研究開発を実施した。

1.1.2.1. 画像・動画処理装置の開発

1.1.2.1.1. 【サブテーマ 1-1】熱源ランドマークによる自己位置推定

アスパラガスを自動収穫するためには、自動収穫機が圃場の中のどこを移動しているか把握する必要がある。GPS を用いる従来手法は、屋外でしか利用できなかったため、本サブテーマでは屋内外を問わず利用可能な手法として、後述の熱源ランドマークを用いた自己位置推定手法を研究開発する。目標として「自己位置推定平均誤差を 5%以内にする」ことを当初掲げたが、基準を何にするかという点で不明瞭な部分があるため、自動収穫に必要な精度として「自己位置推定誤差を 10cm 以内にする」と、目標を明確化した。

1.1.2.1.2. 【サブテーマ 1-2】アスパラガスの位置測定

アスパラガスを自動収穫するためには、収穫対象となるアスパラガスの位置を測定する必要がある。本サブテーマでは、そのために L 字 4 眼カメラを利用して多方向からアスパラガスを撮影して位置を測定する。目標として「アスパラガスの位置測定精度 99%を実現する」ことを当初掲げたが、基準を何にするかという点で不明瞭な部分があるため、アスパラガスの認識のために必要な精度として「アスパラガスの位置測定精度 1cm を実現する」と、目標を明確化した。

1.1.2.1.3. 【サブテーマ 1-3】人熱源感知

自動収穫機を運用する際には、事故を防ぎ、安全性を確保することが重要である。そこで本プロジェクトでは開発するアスパラガス自動収穫機が、接近する人間を感知して自動停止する機能を搭載することとした。本サブテーマでは、サーモグラフィを利用して人熱源を感知する機構を研究開発する。目標は、自動収穫機の数値から考えて危険な範囲と考えられる「2m 以内に接近する人熱源を感知する」とした。

1.1.2.2. 自動収穫機の開発

1.1.2.2.1. 【サブテーマ 2-1】走行駆動装置

アスパラガス自動収穫機には走行駆動装置が必要である。そこで本サブテーマでは自動収穫機本体を含む走行駆動装置を開発する。当初は「走行駆動装置が時速 1km で走行する」ことを目標としたが、研究を進める中で移動速度そのものよりも、収穫動作と連動しつつ自律移動することが重要であることが明らかになったので、目標を「走行中の収穫動作を実現する」ことへと変更した。

1.1.2.2.2. 【サブテーマ 2-2】収穫装置と搬送装置

アスパラガスを自動収穫するためには、従来人手で行っていた収穫作業を、機械的に実現する必

要がある。そこで本サブテーマでは、アスパラガスを傷付けずに収穫することのできる収穫装置と搬送装置を開発する。当初は「収穫装置が1秒1本収穫する」ことを目標としたが、研究を進める中で、そこまでの収穫速度は必要ないことが分かったため、目標を「アスパラガスを傷付けずに収穫・搬送する」ことへと変更した。

1.1.2.3. 【サブテーマ 3】熱源ランドマークの開発

アスパラガス自動収穫機が、屋内外を問わず自由に移動可能なナビゲーション方式を確立することを目的とし、本サブテーマでは目印となる「熱源ランドマークを開発する」ことを目標とした。熱源ランドマークは、圃場の要所に設置され、その表面温度が制御可能であるという機能を持つ機器である。自動収穫機にとっては、自己位置を推定する時に、目印としての役割を果たす。

1.1.2.4. 【サブテーマ 4】アスパラガス圃場の分析と自動収穫機の実証

本プロジェクトでは、屋外実証実験圃場でのテストを重ねながらアスパラガス自動収穫機を開発する計画であったが、アスパラガスは繊細な取り扱いを要する作物であり、収穫方法によってはアスパラガス株にダメージが及び、複数年に渡る損失をもたらす恐れがあった。このため実証実験の実施にあたり、栽培農家の協力を得にくいことが予想された。そこで本サブテーマでは、収穫実験用に専用圃場を設けるとともに、自動収穫に適した圃場のあり方についても研究することとし、「ロボット区における生産方法を確立する」ことを目標とした。(ロボット区とは、既存のアスパラガス圃場である慣行区に対して、自動収穫に適した圃場区画を指す)

1.1.3. 実施内容

本プロジェクトでサブテーマごとに実施した研究開発の内容は以下のとおりである。(括弧内は実施研究機関)

1.1.3.1. 画像・動画処理装置の開発

1.1.3.1.1. 【1-1】熱源ランドマークによる自己位置推定(CSソリューション、室蘭工業大学)

■平成 23 年度

- (1) 熱源ランドマークの認識に関する位置測定手法の検討
- (2) 熱源ランドマークの位置測定に関する手法の検討とプログラムの試作
- (3) 必要となる機器の選定と調達

■平成 24 年度

- (1) ステレオサーモグラフィの取り付け位置の検討
- (2) サーモグラフィを搭載するための治具の設計と調達
- (3) サーモグラフィ用のソフトウェアの設計と製造
- (4) サーモグラフィの自動収穫機への取り付け

- (5) サーモグラフィカメラ間距離の最適値調整
- (6) カメラ校正の最適化
- (7) 位置測定の精度向上
- (8) 安価なデバイスへの置き換えを含めた他の自己位置推定方法に関する検討

■平成 25 年度

- (1) 屋外環境の画像・動画処理装置への影響調査
- (2) 自己位置推定手法の改良
- (3) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.1.2. 【1-2】アスパラガスの位置測定(CS ソリューション、室蘭工業大学)

■平成 23 年度

- (1) アスパラガスの認識方法に関する検討
- (2) 位置計測アルゴリズムの開発
- (3) L 字 4 眼カメラの設置方法の検討
- (4) 測定結果を収穫装置に出力する方式の検討
- (5) 計測結果を生育マップに登録・管理する方式の検討
- (6) 必要となる機材の選定と調達

■平成 24 年度

- (1) 実験用モックの製作
- (2) 実験用モックへの背景ボードの組み込み
- (3) 4 眼カメラのモックへの取り付け
- (4) 3 次元再構成とアスパラガス認識システムの研究開発
- (5) 出力 API の実装
- (6) 自動収穫機への画像・動画処理装置の取り付け
- (7) 屋内模擬圃場における走行試験

■平成 25 年度

- (1) 屋外実証実験圃場における連続画像撮影試験
- (2) 屋外実証実験圃場におけるアスパラガスの 3 次元再構成試験
- (3) 屋外実証実験圃場におけるアスパラガスの認識試験
- (4) 屋外実証実験圃場におけるアスパラガスの位置測定試験
- (5) アスパラガス位置測定手法の改良
- (6) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.1.3. 【1-3】人熱源感知(CS ソリューション、室蘭工業大学)

■平成 23 年度

- (1) 人熱源感知アルゴリズムに関する検討
- (2) 走行駆動装置へ出力する方式の検討と設計

- (3) 必要となる機材の選定と調達

■平成 24 年度

- (1) 熱源分離に関するインターフェイス定義
- (2) 実機用環境に合わせたプログラム改修
- (3) 熱源ランドマークの試験撮影
- (4) 熱源分離処理の開発
- (5) 出力 API の実装
- (6) 自動収穫機への画像・動画処理装置の取り付け
- (7) 屋内模擬圃場における走行試験

■平成 25 年度

- (1) 屋外実証実験圃場における熱源撮影試験
- (2) 屋外実証実験圃場における API 動作試験
- (3) 屋外実証実験圃場における熱源感知試験
- (4) 熱源感知機能の改良
- (5) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.2. 自動収穫機の開発

1.1.3.2.1. 【2-1】走行駆動装置(室蘭工業大学、CS ソリューション)

■平成 23 年度

- (1) 自律移動制御方式の検討
- (2) 必要となる機材の選定と調達
- (3) 走行駆動装置の設計と製作

■平成 24 年度

- (1) PCによる制御の実現
- (2) 走行ナビゲーションの実装
- (3) 収穫装置の制御
- (4) 屋内模擬実験環境の整備と走行収穫実験
- (5) 各種装置の実装

■平成 25 年度

- (1) 実験環境における走行能力の検証
- (2) 各種機器の統合制御
- (3) 屋外実証実験圃場における走行収穫試験
- (4) 自律移動制御手法の改良
- (5) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.2.2. 【2-2】収穫装置と搬送装置(オサダ農機、室蘭工業大学、CSソリューション)

■平成 23 年度

- (1) アスパラガスの傷に関する定量化手法の検討
- (2) アスパラガスを傷付けずに収穫する機構の検討
- (3) 必要となる機材の選定と調達

■平成 24 年度

- (1) 自動収穫機との結合
- (2) 収穫装置から搬送装置へ引き渡される際のアスパラガスの動きの研究
- (3) 収納装置においてアスパラガスを傷付けずに収納する仕組みの研究
- (4) アスパラガスの搬送速度と車体の走行速度との同調の調整
- (5) 収穫装置におけるカッター刃によるアスパラガスの切り口の確認
- (6) カッター刃で切ったアスパラガスをスポンジベルトで挟持するタイミングの研究
- (7) スポンジベルトで挟むことにより生じるアスパラガスへの圧迫ダメージ調査
- (8) 搬送装置における挟持力の調整
- (9) 搬送装置におけるテンションローラーの位置決定
- (10) 屋内模擬圃場での収穫・搬送装置の試験
- (11) 収穫・搬送装置の改良

■平成 25 年度

- (1) 自動収穫機における収納装置の動作検証
- (2) 屋外実証実験圃場における収穫試験
- (3) 収穫物のダメージ検査
- (4) 実験結果を踏まえた収穫装置の改良
- (5) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.3. 【3】熱源ランドマークの開発(室蘭工業大学、CSソリューション)

■平成 23 年度

- (1) 熱源ランドマークの構成検討
- (2) 熱源ランドマークの運用方法検討
- (3) 必要となる機材の選定と調達
- (4) 熱源ランドマークの試作とスイッチャーの開発

■平成 24 年度

- (1) Linux ボード用プログラミング環境の構築
- (2) シリアル通信による温度設定
- (3) パラレルポートによるスイッチャー制御
- (4) 無線 LAN による自動収穫機との通信実現
- (5) 自動収穫機側の熱源ランドマーク制御プログラム開発

(6) 熱源ランドマークの防塵防滴対応

■平成 25 年度

- (1) 屋外実証実験圃場での運用に備えた制御機能の実装
- (2) 屋外実証実験圃場での熱源ランドマーク試験
- (3) 熱源ランドマーク運用方法の改良
- (4) 製品化へ向けた仕様の検討

1.1.3.4. 【4】アスパラガス圃場の分析と自動収穫の実証(弘前大学、オサダ農機、CS ソリューション)

■平成 23 年度

- (1) 自動収穫に適した圃場の設計
- (2) 実証実験用圃場へのアスパラガス株の定植と育成

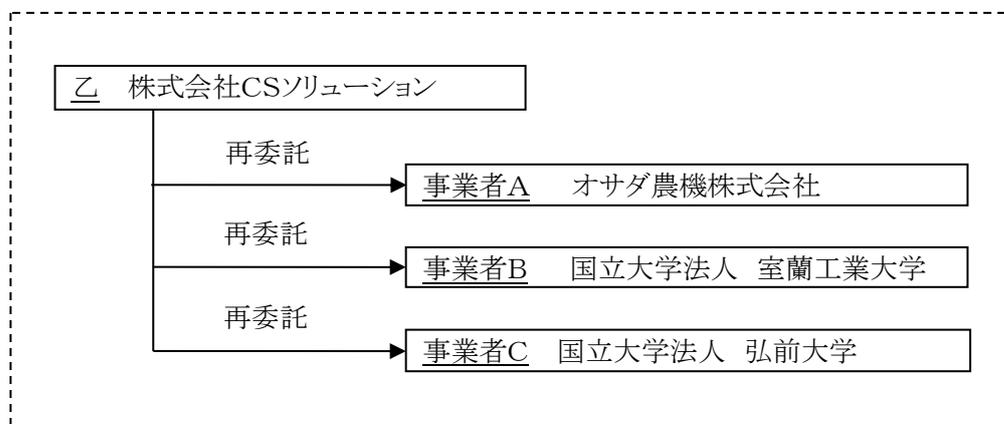
■平成 24 年度

- (1) 支柱およびフラワーネットの設置(5月)
- (2) 病虫害防除
- (3) 細茎、病害茎の除去
- (4) バックアップ圃場の整備と管理
- (5) ロボット制御やアスパラガス管理に必要な圃場内の環境情報を収集・蓄積する安価なシステムの開発

■平成 25 年度

- (1) 支柱およびフラワーネットの設置(5月)
- (2) 病虫害防除
- (3) 細茎、病害茎の除去
- (4) ロボット区と慣行区の比較分析
- (5) 圃場内環境センシングシステムの実証試験および製品化へ向けた仕様の検討

1.2. 研究体制



総括研究代表者(PL)
所属:株式会社CSソリューション
役職:代表取締役
氏名:澁谷 良治

副総括研究代表者(SL)
所属:国立大学法人室蘭工業大学
大学院もの創造系領域
役職:准教授
氏名:花島 直彦

1.3. 成果概要

本研究では、アスパラガスを対象とした自動収穫機を開発し、ノンストップで走行しながら収穫することができることを実証実験で確認した(図 1)。



図 1: ノンストップで走行しながら収穫可能なアスパラガス自動収穫機

サブテーマごとの成果は以下のとおりである。

1.3.1. 画像・動画処理装置の開発

1.3.1.1. 【1-1】熱源ランドマークによる自己位置推定

本サブテーマは、圃場に配置された熱源ランドマークをステレオサーモグラフィで認識し、自動収穫機の自己位置を推定することを目的としている。研究開発の結果、屋外実証実験圃場において自己位置推定誤差を 10cm 以内に抑えるという目標を達成し、GPS に頼らない新しい自己位置推定の手法を確立することができた。

1.3.1.2. 【1-2】アスパラガスの位置測定

本サブテーマは、画像・動画処理装置を用い、収穫ロボット用圃場内でのアスパラガスの位置を自動収穫機の位置と 4 眼カメラの画像から高精度で測定する手法を確立することを目的としている。

研究開発の結果、屋外実証実験圃場においてアスパラガスの位置測定精度 1cm を実現するという目標を達成し、アスパラガスの位置を高精度で測定する手法を確立するという目的を実現することができた。

1.3.1.3. 【1-3】人熱源感知

本サブテーマは、画像・動画処理装置を用い、自動収穫機の安全性を高めることを目的としており、2m 以内に接近する人熱源を感知することを目標としている。研究開発の結果、屋外実証実験圃場において 2m 以内に接近する熱源を感知するという目標を達成し、自動収穫機の安全性を高めるという目的を実現することができた。

1.3.2. 自動収穫機の開発

1.3.2.1. 【2-1】走行駆動装置

本サブテーマは、収穫ロボット用圃場において自動収穫が可能となるような走行駆動装置の開発を目的としている。研究開発の結果、屋外実証実験圃場において走行中の収穫動作を実現するという目標を達成し、所期の目的を実現することができた。

1.3.2.2. 【2-2】収穫装置と搬送装置

本サブテーマは、アスパラガス自動収穫機に取り付ける収穫装置と搬送装置を開発することを目的としており、アスパラガスを傷付けずに収穫することが目標である。研究開発の結果、屋外実証実験圃場において、この目標を達成し、アスパラガスの自動収穫を実現する機構である収穫・搬送装置を開発するという目的を実現することができた。

1.3.3. 【3】熱源ランドマークの開発

本サブテーマは、屋内外を問わず利用可能なナビゲーション方式を確立することが目的であり、自動収穫機が自己位置を推定する際に基準とする熱源ランドマークの開発を目標としている。研究開発の結果、屋外実証実験圃場において熱源ランドマークの動作を確認し、目標を達成するとともに、新しいナビゲーション方式を確立するという目的を実現することができた。

1.3.4. 【4】アスパラガス圃場の分析と自動収穫の実証

本サブテーマでは、収穫実験用に専用圃場を設けるとともに、自動収穫に適した圃場のあり方について研究することが目的であり、ロボット区における生産方法を確立することが目標である。南富良野および弘前に専用圃場を設け管理するとともに、圃場環境センシングシステムの研究開発等を通して、ロボット区における生産方法を確立するという目標を達成し、所期の目的を実現することができた。

1.4. 当該研究開発の連絡窓口

本研究開発の連絡窓口は以下のとおりである。

株式会社CSソリューション 本社(最寄り駅:市営地下鉄大通駅)

〒060-0042 北海道札幌市中央区大通西5丁目11番地 大五ビル 2F

代表取締役社長 澁谷 良治

電話(011)232-1222 FAX(011)232-1228

E-mail:shibuya-ryoji@cs-sol.co.jp

2. 本論

2.1. 画像・動画処理装置の開発

2.1.1. 【サブテーマ 1-1】 熱源ランドマークによる自己位置推定

アスパラガスを自動収穫するためには、自動収穫機が圃場の中のどこを移動しているか把握する必要がある。GPS を利用して位置を把握するという手法は従来から存在したが、屋外での利用に限定されるといった点が問題であった。そこで本サブテーマでは、アスパラガス自動収穫機が自らの現在位置を把握するための、新しい手法を研究開発した。この手法は GPS を用いた従来手法と異なり、農業用ビニルハウスや植物工場内などの屋内でも適用可能であるところが利点であり、熱源とステレオサーモグラフィの組み合わせで位置推定を行う点が新しい。

初年度の平成 23 年度は、位置推定の実現手法を具体的に検討するところから始め、システム構成要素であるサーモグラフィを選定し調達するとともに、そのステレオ化のために必要な器具を設計した。また、適切なカメラ間距離を調査した。平成 24 年度には、ステレオサーモグラフィをアスパラガス自動収穫機へ取り付け、カメラ較正のためのプログラムを開発し、屋内模擬圃場での自己位置推定実験を実施した。平成 25 年度には、屋外実証実験圃場での自己位置推定実験(図 1)を実施し、その結果も踏まえて自己位置推定プログラムを更に改良した。

その結果、3 年間の研究開発の成果として、屋外実証実験圃場における自己位置推定誤差を 10cm 以内に抑えるという目標を達成することができ、新しい自己位置推定の手法を確立することができた。また、屋外圃場での精度低下や、構成部品のコスト等、製品化へ向けた課題を明らかにすることができた。



図 1: 屋外実証実験圃場での自己位置推定実験

2.1.2. 【サブテーマ 1-2】 アスパラガスの位置測定

アスパラガスを自動収穫するためには、収穫対象となるアスパラガスの位置を正確に測定する必要がある。そのために本サブテーマでは、4 眼カメラを利用して 4 方向からアスパラガスを撮影することで位置測定する手法を開発した。

具体的な実現方法としては何通りか考えられたが、検討の結果、ロボットに取り付けた4眼カメラでアスパラガスを撮影し、そこからアスパラガスの形状を3次元的に復元し、アスパラガスとして認識するとともに、復元された3次元形状から位置を算出する、という難易度の高いアプローチを採用することとした。これにより、単純に位置や傾きを測定するだけにとどまらず、アスパラガスがまっすぐに生えているか(商品価値が高い)、曲がって生えているか(商品価値が低い、あるいは無い)、といった分析を加えたり、更にはアスパラガス以外の作物の場合にも同様の手法を適用したり、といった展開につなげることができるためである。研究的な要素が強いため、平成23年度は検証用フレーム(図1)を製作して実現性を確認するところから始め、平成24年度には自動収穫機のモック(図2)を利用した開発へと進み、最終的に平成25年度には4眼カメラで撮影した画像セット(図3)から、アスパラガスを3次元的に復元(図4)するシステムを構築した。その結果、3年間の研究開発の成果として当初目標としていた精度1cmを大幅に上回る、精度1.7mmの位置測定を実現することができた。



図 1: 検証用フレーム



図 2: 自動収穫機のモック



図 3: 4眼カメラによる撮影

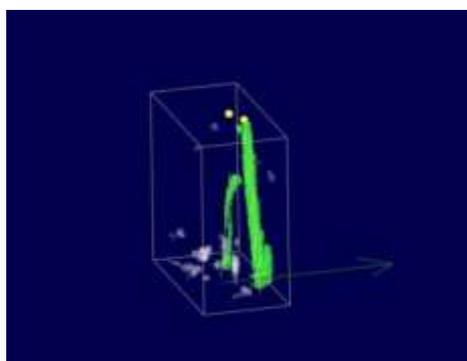


図 4: 3次元的に復元されたアスパラガス

2.1.3. 【サブテーマ 1-3】 人熱源感知

本サブテーマは、画像・動画処理装置を用い、自動収穫機の安全性を高めることを目的としており、2m 以内に接近する熱源を感知することが目標である。熱源を感知するために、サーモグラフィを用いて熱画像を取得する。サーモグラフィは特殊なカメラであり、通常のカメラが可視光線を撮影するのに対して、遠赤外線を撮影することができる。熱を帯びたあらゆる物体は温度に応じて遠赤外線を放射しているため、サーモグラフィを用いれば物体の放射する遠赤外線を捕らえた熱画像を撮影することができる。実際の熱画像は図 1 のような、グレースケール画像であり、物体の種類に応じた係数から物体の表面温度へと変換することができる。

このような熱画像を図 2 のように解析することで人熱源を感知するわけであるが、平成 23 年度は人熱源感知機能の提供方法や人熱源感知アルゴリズムを考案し、平成 24 年度にはそのアルゴリズムを実装し屋内模擬圃場における試験を実施した。最終年度の平成 25 年度には、図 3 のように屋外実証実験圃場における試験を実施し、2m 以内に接近する人間に対して、収穫機を自動停止させる機能の実現を確認した。

その結果 3 年間の研究開発の成果として、アスパラガスの自律移動収穫機が自動収穫を安全に行えるよう、必要な情報を提供することができるようになった。



図 1: サーモグラフィの熱画像



図 2: 熱画像の解析例



図 3: 屋外実証実験圃場における試験の様子

2.2. 自動収穫機の開発

2.2.1. 【サブテーマ 2-1】 走行駆動装置

アスパラガスの自動収穫を実現するためには、アスパラガス圃場内を移動する自動収穫機が必要であり、自動収穫機は走行駆動装置を備えている必要がある。本サブテーマでは、屋外実証実験圃場において自動収穫が可能となるような走行駆動装置を開発した。

初年度である平成 23 年度は走行駆動装置の設計と製作を行った(図 1、図 2)。続く平成 24 年度には屋内模擬圃場において走行中の収穫動作を実現した(図 3)。その過程で自律移動手法に関する知見を蓄積するとともに、通路環境を前提とした新しい移動経路生成手法を考案し、学会で発表した。平成 25 年度には、収穫・搬送装置と連動させ、屋外実証実験圃場において走行中の収穫動作を実現した。

その結果 3 年間の研究開発の成果として、アスパラガス自動収穫機の自律移動および走行中の収穫動作が可能となった。また、機体軽量化や車輪接地面の増加、モーター性能の増強等の必要性が判明するなど、今後の事業化に向けた課題を明らかにすることができた。



図 1: 走行駆動部の製作

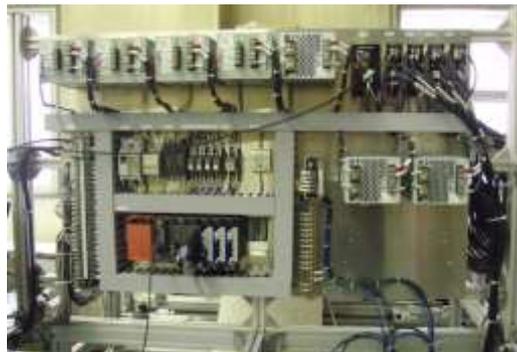


図 2: 走行駆動装置の制御盤



図 3: 屋内模擬圃場における収穫実験



図 4: 屋外実証実験圃場における収穫実験

2.2.2. 【サブテーマ 2-2】 収穫装置と搬送装置

アスパラガスを自動収穫するためには、従来人手で行っていた収穫作業を、機械的に実現する必要がある。収穫対象であるアスパラガスは非常に柔らかく繊細な作物であり、手荒に扱うとたちまち穂先がもげたり、折れたりする。また、収穫時には問題がないように見えても、しばらくして傷みが現れる場合もあるので、丁寧な収穫搬送が必要である。

そこで本サブテーマでは、アスパラガスに傷付けずに収穫することのできる収穫装置と搬送装置を開発することを目標とし、初年度の平成 23 年度に収穫搬送装置を設計し(図 1)、組み立てた(図 2)。続く平成 24 年度にはアスパラガスに傷付けずに収穫・搬送する技術を開発するため、実験や改良を繰り返した(図 3)。最終年度となる平成 25 年度には、実際にアスパラガスに傷付けずに収穫・搬送できることを確認した(図 4)。

その結果 3 年間の研究開発の成果として、自動収穫機の走行と連動しつつアスパラガスに傷付けずに自動収穫できるようになった。

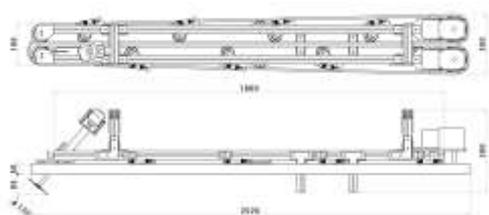


図 1: 収穫・搬送装置設計図



図 2: 収穫・搬送装置の組み立て



図 3: 収穫実験



図 4: 屋外実証実験圃場における収穫実験

2.3. 【サブテーマ 3】 熱源ランドマークの開発

アスパラガスを自動収穫するためには、自動収穫機が圃場の中のどこを移動しているか把握する必要がある。本サブテーマではそのために、熱源ランドマークを用いたナビゲーション方式を新たに開発することを目的とした。熱源ランドマークは、圃場の要所に設置され、その表面温度が制御可能であるという機能を持つ機器である。自動収穫機にとっては、自己位置を推定する時に、目印としての役割を果たす。

初年度である平成 23 年度は、熱源ランドマークの形状や大きさ、温度制御性について検討し、試作を行った(図 1)。続く平成 24 年度には、試作したランドマークの温度を、ネットワークを介して制御できるようなシステム(図 2)の開発を行った。さらに、屋内での温度制御実験を行った。最終年度の平成 25 年度には防塵・防滴装備を追加するとともに、屋外において実証実験を行い、実用化のための課題などについて検討した。

その結果 3 年間の研究開発の成果として、屋外においても所定の温度制御性能を有し、マイコンからのプログラムによる加熱シーケンスの指示が可能であり、今後の実用化における基本性能を有していると考えられる熱源ランドマークを開発することができた。

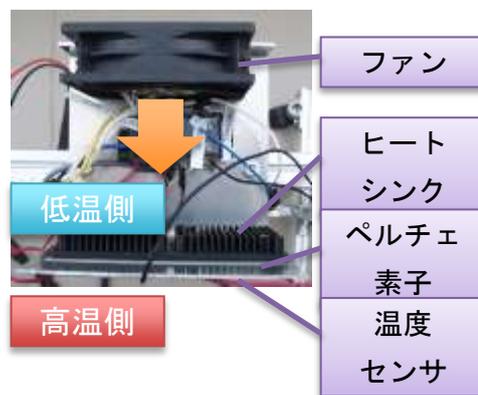


図 1: 熱源ランドマークの内部構造

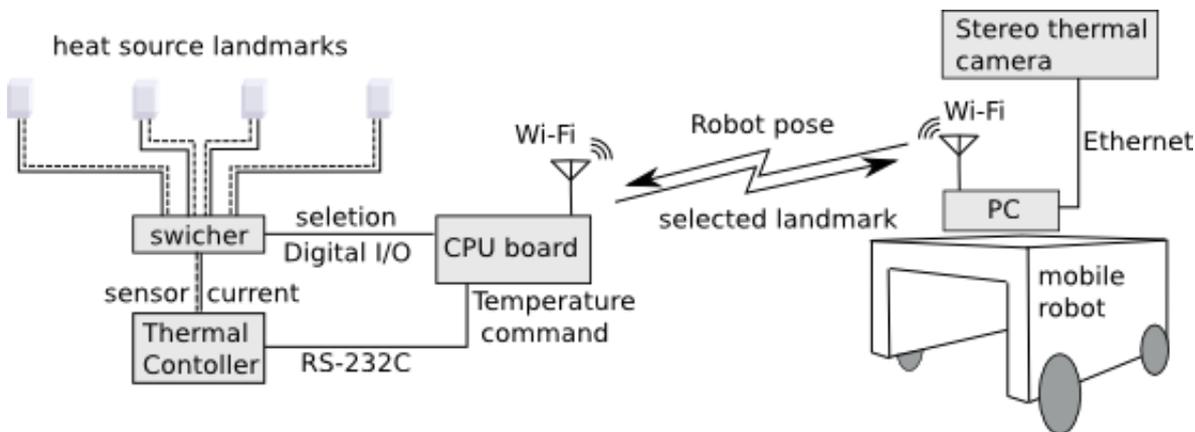


図 2: 走行台車の位置情報により熱源ランドマークを切り替える仕組み

2.4. 【サブテーマ 4】 アスパラガス圃場の分析と自動収穫の実証

本サブテーマでは、アスパラガス自動収穫の実証実験を円滑に実施することを目的として実験圃場を設置・管理するとともに、圃場内環境センシングシステムを開発した。

平成 23 年度には、自動収穫に適した圃場(ロボット区)を考案・設計し、南富良野の実験圃場(図 1)にアスパラガスを定植した。また、病害虫や病気の発生により実験に支障がでないよう弘前大学にてバックアップ圃場を構築し、万が一に備えた。続く平成 24 年度には、病気・病害虫が発生することのないように圃場を管理し、アスパラガスを育成した。また、圃場における環境情報をセンシングして監視するシステムを構築した。平成 25 年度には、引き続き圃場管理を実施するとともに、実験圃場にて収穫実験を実施した。また、環境センシングシステムの改良により、圃場の環境情報をクラウドに蓄積し、PC・スマートフォンで閲覧できるようにし(図 2)、合わせて実証実験を実施した(図 3)。

その結果 3 年間の成果として、アスパラガス圃場の分析とアスパラガス自動収穫の実証を通して、ロボット区におけるアスパラガスの生産方法を確立するという目標を達成することができた。



図 1:南富良野の実証実験圃場

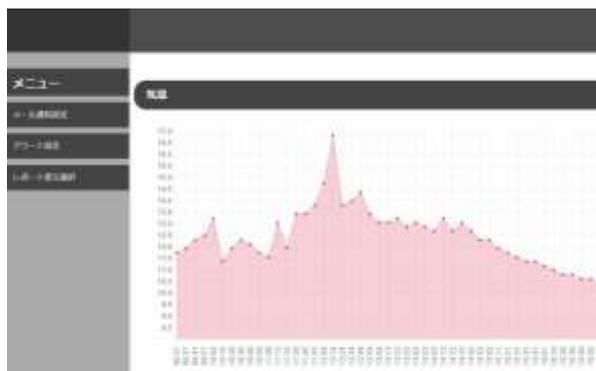


図 2:環境センシングシステム画面



図 3: 環境センシングシステムの実証実験

3. 全体総括

3.1. 複数年の研究開発成果

3.1.1. 成果概要

平成 23 年度から開始した本プロジェクトは、実証実験用圃場の整備やアスパラガス自動収穫ロボットの設計から始め、ロボットの製作、制御ソフトウェアの構築、画像・動画解析システムの開発等を経て、屋内模擬圃場での実験へと進み、最終的に屋外実証実験圃場での自動収穫実験およびその評価の実施をもって完結した。

本プロジェクトの成果として、ノンストップ収穫を実現するアスパラガス自動収穫ロボットが完成した。このロボットは、主に以下の点で新規性を有している。

ひとつめは、人身事故を防止するために、サーモグラフィを利用した人熱源感知システムを搭載している点である。このシステムは本プロジェクトで開発したものであり、他のロボットにも転用可能であることから、農業機械による事故を減らす効果が期待できる。

次に、ロボット移動時の位置測定のために、熱源ランドマークを利用する点についても、新規性が高い。GPS を利用する方法と異なり、屋内外を問わず位置測定が可能であることから、ハウス栽培を対象としたロボットへの搭載も考えられる。なお、本プロジェクトで開発したロボットの自律移動制御手法や熱源ランドマークシステムに関しては、査読付きのものを含め既に 9 件の学会発表(3.1.2.1 参照)を実施しており、学術的貢献も大きい。

更に、我々の開発したロボットは、アスパラガスを認識して選別収穫するシステムを搭載している点でも新規性が高い。従来のアスパラガス収穫ロボットでも選別収穫を行うものはあったが、本システムは 4 眼カメラの画像解析による立体形状認識が可能で、アスパラガス以外の作物にも転用可能であることから、より汎用的である。また、独自に開発したアスパラガス専用の収穫機構と連動することにより、ノンストップ収穫が可能であるという点で、従来のものよりも優れている。

本プロジェクトでは、このような研究開発成果を元に、特許を 2 件出願したこと(3.1.2.2 参照)、農業分野における「手仕事」の機械化を一步前進させることができた点も成果として挙げられる。

3.1.2. 学術、知的財産上の成果

3.1.2.1. 学会発表

国際会議での Proceedings (査読付)

- Bo Yang, Naohiko Hanajima, Atsushi Yamamoto, Mototada Ayamura and Jun Dai : Path-generating Regulator along a Straight Passage for Two-wheeled Mobile Robots, Proceedings of 2013 IEEE IRS/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, (2013, 11/3-7, Tokyo) , pp.4837-4844

国内口頭発表

- Peng Hao, 花島直彦, 山下光久:ペルチェ素子による複数ランドマークシステムの設計, 第4回日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会(RSJ-HRT)学術講演会講演論文集, (2012,3/5-6,札幌), pp.124-126
- Bo YANG, Naohiko HANAJIMA, Jun DAI:Path-generating Regulator along a Straight Passage for Two-wheeled Mobile Robots and its Simulations, 第45回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 計測自動制御学会北海道支部, (2013,3/6-7,札幌), pp.84-85, B04
- 横山稜, 花島直彦, 綾村本忠:熱源ランドマークを用いた自己位置推定に関する研究, 日本機械学会北海道学生会第42回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2013,3/9,旭川), pp.303-304
- 山本惇史, 花島直彦, 楊波:収穫ロボットの走行および収穫動作の統合制御, 日本機械学会北海道学生会第42回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2013,3/9,旭川), pp.315-316
- 綾村本忠, 楊波, 花島直彦:アスパラガス収穫ロボットの圃場における走行制御および収穫動作の実験, 第14回(公)計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2013, (2013,12/18-20,神戸), pp.2671-2674
- 林佑司, 綾村本忠, 楊波, 花島直彦:熱源ランドマークを用いた自己位置推定の精度向上に関する研究, 日本機械学会北海道学生会第43回学生員卒業研究発表講演会講演論文集, (2014,3/8,釧路), pp.223-224
- 綾村本忠, 花島直彦, 楊波:アスパラガス収穫ロボットの自己位置推定とその精度検証実験, 第6回日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会(RSJ-HRT)学術講演会講演論文集, (2014/3/10,札幌), pp.117-119, P12
- Bo YANG, Naohiko HANAJIMA, Mototada AYAMURA:Performance comparison and analysis of path-generating regulator along a passage by adjusting parameters, 第6回日本ロボット学会北海道ロボット技術研究専門委員会(RSJ-HRT)学術講演会講演論文集, (2014/3/10,札幌), pp.129-130, P15

3.1.2.2. 特許出願

- 特願 2014-029689 植物自動収穫機、植物自動収穫プログラムおよび植物自動収穫方法
- 特願 2014-029714 植物自動収穫機、植物自動収穫プログラムおよび植物自動収穫方法

3.2. 研究開発後の課題・事業化展開

本プロジェクトでは上述のとおり大きな成果を上げることができた一方で、今後の事業化へ向けた課題も明らかになった。そのうち特に重要な課題が、ロボットの小型化・軽量化である。これは販売価格を抑えるためにも必要であるため、委託事業終了後も引き続き改良へ向けた取り組みを進める予定である。

一方、本プロジェクトで研究開発した要素技術は、アスパラガス以外に展開可能なものも多く、ブ

ロココリーの収穫機や、苗の移植機としての展開も今後の検討課題である。要素技術の中には、当初想定していなかった需要があることも分かった。例えば、アスパラガス認識の一環として開発した圃場環境センシングシステムは、単独で引き合いが来ており現在事業化へ向けて調整中である。

本プロジェクトで開発したアスパラガス自動収穫ロボットの事業化にあたっては、高機能過ぎるといふ指摘もあったため、まずはハーベスター(収穫機)としての機能に限定することで、低価格化を実現することも検討している。

いずれにしても、市場のニーズを見極めながら、本プロジェクトで蓄積した技術を最大限活用して、積極的に事業化を進めて行く予定である。

最後に本研究開発の推進にあたり3年間に渡ってご支援をいただいた各関係機関、並びに本稿の執筆にご尽力いただいた関係者各位に感謝する。北海道経済産業局には、事業の遂行にあたり細やかな助言を頂戴し、委託事業を適切に運営管理することができた。謝意を表したい。納税者の皆様には、3年間に渡る我々の研究開発を支えて下さったことに感謝したい。支えられた分よりも多く、社会へ還元することを目指して最善を尽くしたい。