

全自動収穫ロボットシステムの開発

| | | |
|---------------------|-------|------|
| 機械システム科 | 主任研究員 | 田口喜祥 |
| 機械システム科 | 主任研究員 | 入江直樹 |
| 電子情報科 | 主任研究員 | 堀江貴雄 |
| 農林技術開発センター 野菜研究室 | 主任研究員 | 陣野信博 |
| 農林技術開発センター 干拓営農研究部門 | 専門研究員 | 片岡正登 |
| 京都大学大学院農学研究科 | 教授 | 近藤直 |

アスパラガスは長崎アスパラとしてブランド化を推進中の農作物であり、収益性の高さから栽培面積の拡大が望まれている。しかし、アスパラガスの収穫作業は重労働であり、毎日行う必要があることが、栽培面積の拡大を阻んでいる原因の一つであると考えられている。そこで、工業技術センターでは農林技術開発センターと共同でアスパラガスを自動的に収穫するロボットシステムの開発を連携プロジェクト研究で実施した。このプロジェクト研究では、農林技術開発センターでロボットに適したアスパラガス栽培技術の開発を行い、工業技術センターで収穫ロボットの開発を行った。

本報では、ビニールハウス内で毎日運用することが可能な有索式アスパラガス収穫ロボットと、ロボットが収穫しやすいロボット用圃場から構成される全自動収穫ロボットシステムを試作したので報告する。

1. 緒言

アスパラガスは長崎アスパラとして長崎県がブランド化を推進中の農作物であり、収益性の高さから栽培面積の拡大が望まれている。長崎県で栽培されているアスパラガスは、ハウス雨除けによる半促成長期どり栽培と呼ばれる栽培法で栽培されている。この栽培法は、別名立茎栽培とも呼ばれ、通常の露地栽培と比較して単位面積あたり最大で5倍の収穫量を望める栽培法である^[1]。しかし、収穫作業を中腰姿勢で行う必要があり、過大な労働負担を農業従事者にあたえとの指摘がある。さらに、アスパラガスは毎日収穫する必要がある作物であるため、収穫作業の自動化、機械化、軽労化が強く望まれている。収穫作業を自動化するために、これまでに様々な農作物を対象とした収穫ロボットが提案され、研究開発されているが、アスパラガスを対象とした収穫ロボットは報告されていない^{[2][3]}。

アスパラガスの収穫作業を全自動化するための収穫ロボットシステムを開発する事を目標として平成19年度から平成21年度の3年間研究開発を実施した。平成19年度には、半促成長期どり栽培（以後立茎栽培と呼ぶ）に対応した収穫ロボットを開発するために必要な要素技術であるビニールハウス内で連続運転が可能な移動台車、アスパラガスを把持・切断し収穫作業を行

うロボットマニピュレータ、規定の長さ以上のアスパラガスを認識し位置を計測する認識センサを開発した。平成20年度は、開発した要素技術を組み合わせて、収穫ロボット試作1号機を作成し収穫実験を行った。さらに、より小型で高速な収穫動作が可能な収穫ロボット試作2号機を作成した。平成21年度は収穫ロボット試作2号機での収穫実験および全自動化のための改良を行った。本報告では開発した収穫ロボット試作2号機の構成、ロボット用圃場の概要、収穫実験の結果について報告する。

2. 収穫ロボットシステム

アスパラガスは一般に長さのみにより収穫の可否が決定される。アスパラガスの生長は早いことが知られており、季節によっては1日に10cm以上生長する。規定の長さに満たないものや規定の長さより長すぎるものは商品価値がなくなるため、収穫作業は毎日実施する事が要求される。そのため、開発する収穫ロボットシステムは、毎日動かす必要があるが、電池を動力源として収穫ロボットを動作させると、電池の容量、充電や電池交換の時間などが問題となり毎日長時間駆動させることが難しくなる。そこで本研究では、電源ケーブルドラムをロボットに搭載し、電力ケーブルで電力を供給することにより動作する有索式アスパラガ

ス収穫ロボットシステムを提案する。提案するアスパラガス収穫ロボットのシステムの概要を Fig. 1 に、アスパラガス収穫ロボットの構成を Fig. 2 に、写真を Fig. 3 に示す。有索式アスパラガス収穫ロボットは、電源ケーブルがあるため、ほぼ直線運動のみの動作に制限されてしまう。そこで、ロボットを別の畝に移動させるために、圃場の片側に畝と直角方向に動く移動台車（以下畝間移動台車と呼ぶ）を設置し、広い圃場への対応を行った。有索式収穫ロボットは一つの畝での作業が終了した後、畝間移動台車に乗り移り、

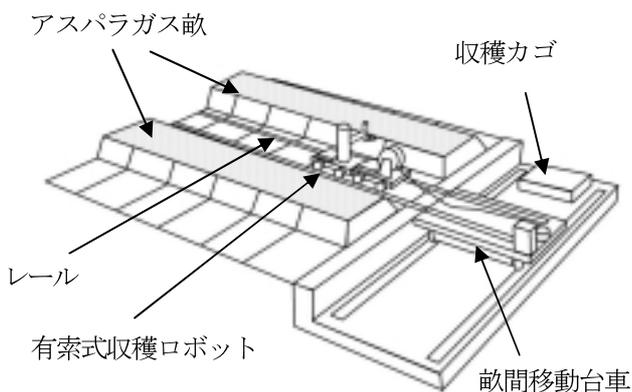


Fig. 1 収穫ロボットシステムの概要

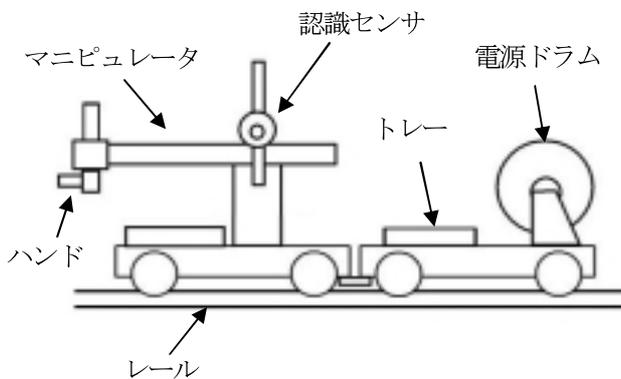


Fig. 2 アスパラガス収穫ロボットの構成

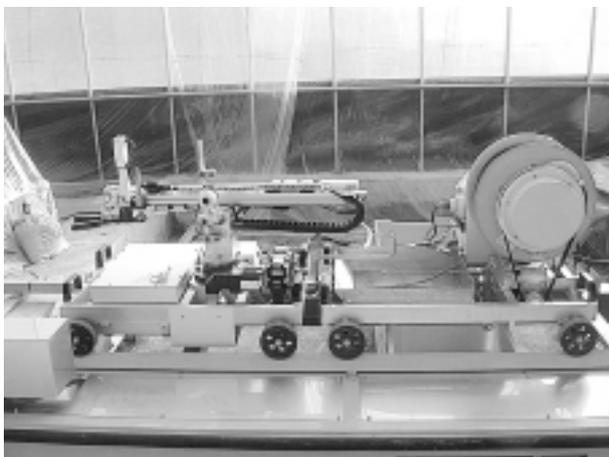


Fig. 3 アスパラガス収穫ロボットシステムの写真

別の畝に移動し収穫作業を続けることができる。

試作した収穫ロボットは、人手による運搬を考慮してマニピュレータと認識センサを搭載する収穫台車と電ドラムと収穫用トレーを搭載する電源台車に分離可能である。また、将来的には、収穫台車を農薬散布用の台車に取り替えて防除作業を行うことも可能である。

試作した収穫ロボットおよび畝間移動台車の制御装置構成を Fig. 4 に示す。収穫ロボット及び畝間移動台車は FA 用コンピュータを中核とした制御装置で動作する。収穫ロボットの FA 用コンピュータではアスパラガス認識センサの信号処理を行い、アスパラガスの長さや位置の計測を行う。また、アスパラガスの位置情報を基に、収穫用マニピュレータの各モータの目標角度の計算を行い、算出されたモータ角度情報を、ワンチップコンピュータ (Cypress PSOC29466 × 2) に送る。ワンチップコンピュータでは送られてきた角度情報に基づき各モータへ指令値を送信することで、収穫ロボットの制御を行う。収穫ロボットを制御する FA 用コンピュータと畝間移動台車を制御する FA 用コンピュータは互いに無線 LAN で通信を行うことで、畝間移動台車への乗り移りや別の畝への移動が可能となる。

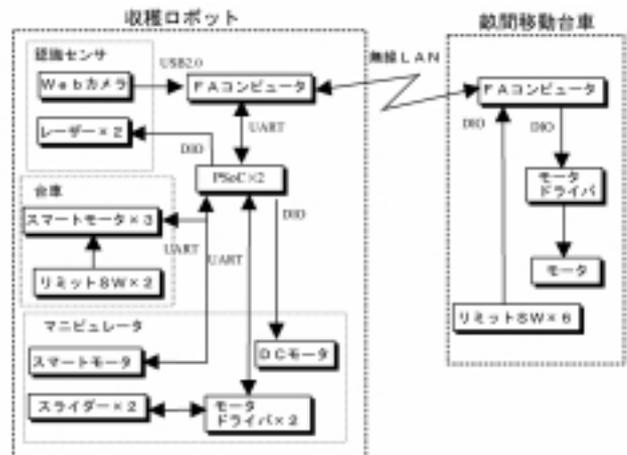


Fig. 4 収穫ロボット制御装置

なお、FA 用コンピュータの制御プログラムは Microsoft 製 VisualStudio2005 で開発を行った。以下ではアスパラガスを認識する認識センサとアスパラガスを収穫するマニピュレータについて述べる。

2.1 認識センサ

アスパラガスが長さのみにより収穫可能であるかの判断が行われることに着目した認識センサを開発した。開発した認識センサの概要を Fig. 5 に写真を Fig. 6

に示す。認識センサは2台のレーザ投光器とカメラで構成されている。2台のレーザ投光器は、アスパラガスを収穫対象であると判断する長さと同しい間隔を空けて設置されている。

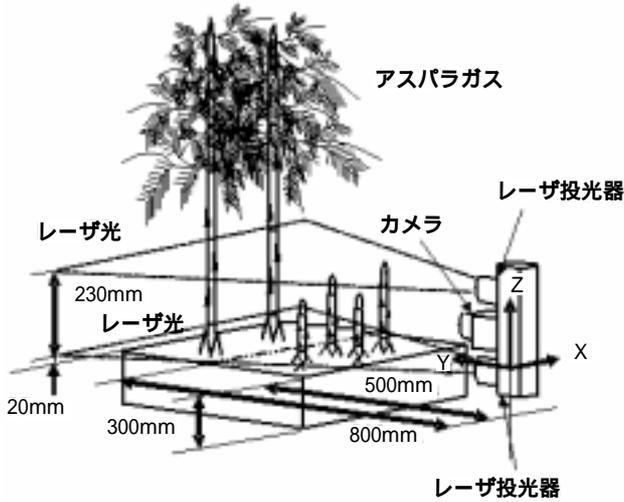


Fig. 5 認識センサの概要

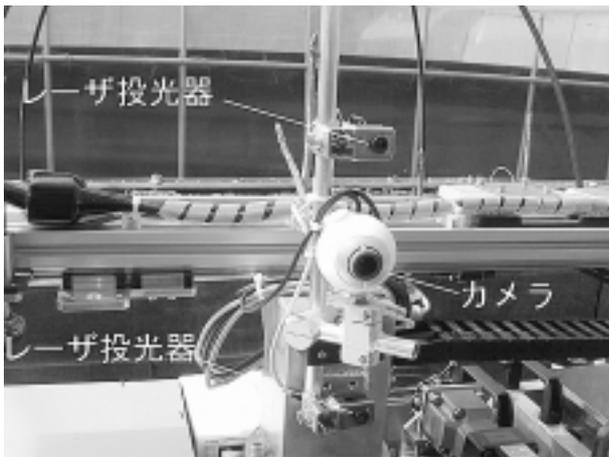


Fig. 6 認識センサの写真

それぞれのレーザ投光器からレーザスリット光を地面に対し平行に投射すると、収穫可能な長さ以上に生長したアスパラガスからは上下2本の反射光が観測できる。そこで、事前にそれぞれのレーザスリット光が投影される3次元座標とテレビカメラの座標（以下ラスタ座標と呼ぶ）を光切断法の原理に基づいて校正（キャリブレーション）しておけば、スリットレーザ光が当たっている場所の3次元座標を計測できる。その後、上下のレーザスリット光から得られた3次元座標の対応付けを行うことで規定の長さ以上に生長したアスパラガスの認識と位置計測を行う。校正は一定間隔で縦線が記してあるプレート（図5参照）を計測することで実施した。最初に、プレートをカメラから500mm隔てた箇所に設置する。ラスタ座標 (u_i, v_i) は、スリット

光と縦線の第 i 番目の交点である。ラスタ座標 (u_i, v_i) とその座標に対応する3次元座標 $(x_i, 500, z_0)$ を求める。その後、プレートとカメラの距離を変え（本研究では、500mm~1000mm）、ラスタ座標 (u, v) と対応する3次元座標 (x, y, z_0) を求める。次に、このとき計測した座標データとスリットレーザ光の反射光を計測したラスタ座標から3次元位置を算出する計算式を求める。スリット光を $z = z_0$ の平面に投射した場合、3次元座標 (x, y, z_0) とこの座標に対応するカメラ上のラスタ座標 (u, v) の関係は、透視変換の式を用いて式(1)で表される^[4]。

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

スリット光平面上では上記関係は成り立つので、 n 点選択した際の3次元座標 (x_i, y_i, z_0) と (u_i, v_i) ($i = 1, 2, \dots, n$) の関係は式(2)で表される。

$$Th = w \quad \dots (2)$$

ここで、各パラメータは以下で表される。

$$T = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_1 \cdot u_1 & -y_1 \cdot u_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & -x_1 \cdot v_1 & -y_1 \cdot v_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_2 \cdot u_2 & -y_2 \cdot u_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & -x_2 \cdot v_2 & -y_2 \cdot v_2 \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & x_n & y_n & 1 & -x_n \cdot v_n & -y_n \cdot v_n \end{bmatrix}$$

$$h = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{12} \\ b_{13} \\ \vdots \\ b_{32} \end{bmatrix}, \quad w = \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

行列 T とベクトル w は、キャリブレーションで測定した値で作成できる。4点以上の測定点のデータを用いると、疑似逆行列を持ちいて、ベクトル h は式(3)で求められる。

$$h = (TT)^{-1}Tw \quad \dots (3)$$

ベクトル h が求められれば、式(1)を変形した式(4)を用いて、それぞれのラスタ座標に対応する3次元座標を計算することができる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{31} \cdot u - b_{11} & b_{32} \cdot u - b_{12} \\ b_{31} \cdot v - b_{21} & b_{32} \cdot v - b_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} b_{13} - u \\ b_{23} - v \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

アスパラガス認識装置の有効性を確認するために圃場において認識実験を行った。認識センサは外乱光の影響を避けるために日没のみで使用する。対象としたアスパラガスの写真を Fig .7 に、認識結果を Fig .8 に示す。本実験では、収穫可能なアスパラガスは 5 のみと認識された。2 は規定の長さに達しておらず、1、3 と 4 は、ロボットの収穫可能範囲を超えているため収穫可能であると認識されなかった。なお、認識センサの計測精度は± 2 mm 以内であった。

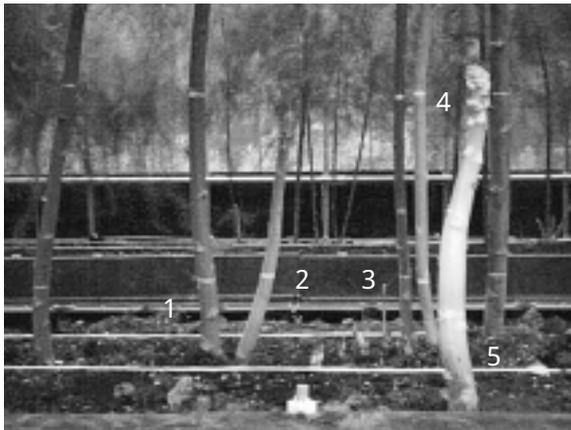


Fig .7 アスパラガス認識実験

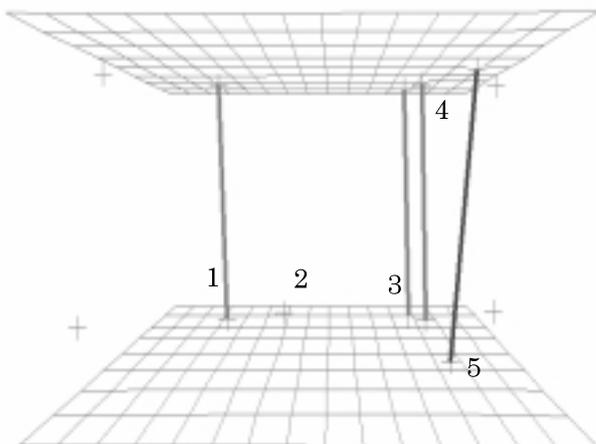


Fig .8 アスパラガス認識結果

2.2 収穫用マニピュレータ

収穫対象でないアスパラガスの間を通り抜けて収穫対象のアスパラガスに接近するため、並進可動距離が大きく取れる円筒座標型マニピュレータを試作した。試作した収穫用マニピュレータの写真を Fig .9 に示す。このマニピュレータは回転 1 自由度、並進 2 自由度の合計 3 自由度を有している。また、先端にはアスパラガスを把持・切断するために回転 1 自由度を持ったロボットハンドが搭載されている。マニピュレータの回転軸は 360 度回転することが可能となっており、

両側の畝の収穫及び収穫したアスパラガスを収穫ロボットに設置されたトレーに入れることが可能である。



Fig 9 収穫用マニピュレータ写真

マニピュレータ先端に取り付けられるアスパラガスを把持・切断するハンド部の写真を Fig .10 に示す。ハンド部にはベルトとカッターが取り付けられており、把持動作と切断動作を同時に行うことができる。この機構の採用により、把持切断作業を 0.4 秒と高速に実施可能となった。



Fig .10 収穫ハンド写真

3. 収穫ロボット用栽培技術

立茎栽培では春芽を収穫した後立茎作業を行う。立茎栽培での立茎場所を示すため、畝を上から見たイメージ図を Fig .11 に、立茎した圃場の写真を Fig .12

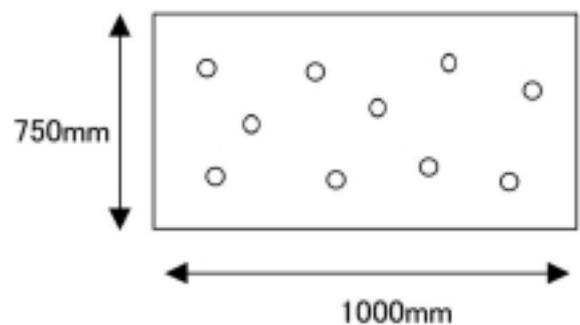


Fig .11 立茎場所イメージ図（従来型栽培）

に示す。通常の立茎栽培では単位面積あたりの収量増加を目的とし、隣り合う茎の距離が均一になるよう立茎を行う。この栽培方法は土地の面積を有効に利用するという点では優れているが、収穫を行う場合立茎した茎を除けて若芽を探し出し収穫を行う必要があるため、ロボットでの収穫作業を難しくする要因の一つとなっている。

そこで、収穫ロボットを利用することを前提として、立茎を畝の中心部の250mmの範囲のみで行うロボット用栽培を提案する。ロボット用栽培では、畝の中心



Fig .12 アスパラガス圃場（従来型栽培）

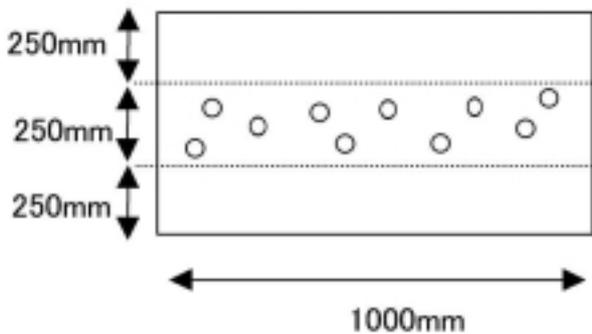


Fig .13 立茎イメージ図（ロボット用栽培）



Fig .14 アスパラガス圃場（ロボット用栽培）

部のみで立茎を行い、畝の端部からの萌芽を促す。畝の端部から萌芽したアスパラガスは全て収穫対象となる。提案した栽培をする場合の立茎場所イメージ図を Fig .13に、圃場の写真を Fig .14に示す。また、ロボットが取りやすい高さでアスパラガスを栽培するため、プラスチック板で畝を覆い、高さ300mmの高畝栽培とした。

4 . 収穫実験

開発したアスパラガス収穫ロボットシステムを用いて収穫実験を行った。ロボット用圃場のアスパラガスは2年目であり、収穫対象範囲に萌芽するアスパラガスは非常に少ないため、収穫対象範囲にアスパラガスを植えて実験を行った。実験中の写真を Fig .15及び Fig .16に示す。

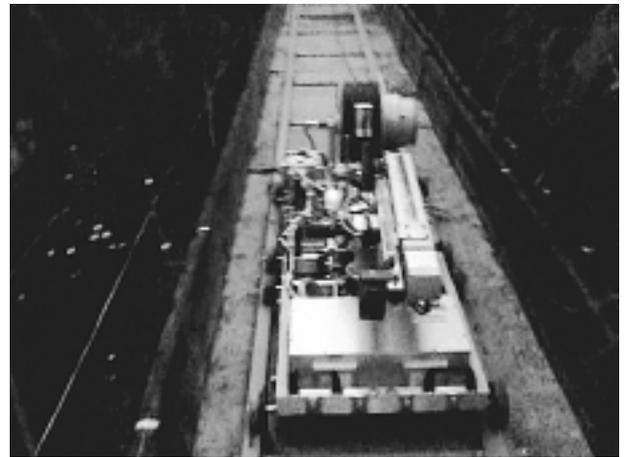


Fig .15 アスパラガス収穫実験（計測中）



Fig .16 アスパラガス収穫実験（収穫中）

Fig .15はアスパラガス認識センサによりアスパラガスを認識中の写真であり、Fig .16は認識した収穫対象のアスパラガスを把持・切断している写真である。なお、外乱光の影響をさけるために日没後に収穫実験を行った。収穫作業は認識センサの視野角の関係から、

収穫ロボットが180mm 移動するごとにアスパラガスを計測し収穫を行った。1回の計測で収穫可能なアスパラガスが1本あったときに動作に要した時間をTable .1 に示す。

Table .1 収穫動作時間分析

| 収穫動作 | 時間 [秒] |
|------------------|----------|
| ロボット移動 (180mm) | 3.0 |
| アスパラガス認識 | 1.0 |
| マニピュレータ回転 | 1.2 |
| マニピュレータ伸張 | 0.7 |
| 把持切断 | 0.4 |
| マニピュレータ伸縮 | 0.7 |
| マニピュレータ回転 | 0.9 |
| ハンド開放 | 0.6 |
| 全時間 | 8.5 |

1本当たりで要した収穫時間は、開発の目標としていた人間が1日に収穫する本数2,000本の3倍である6,000本を18時間で収穫するために必要な時間10.8秒より短い事を確認した。1本当たり8.5秒という収穫速度で6,000本を収穫すると仮定すると計算上は14時間10分必要となる。なお、同様な収穫実験を5回実施したところアスパラガスを収穫できた確率は84.6%であった。

5. 考察

今回の実験では収穫したアスパラガスをトレイに入れるときに穂先の方向が揃わないという問題点が明らかとなった。そこで、穂先方向をそろえる動作を追加したところアスパラガス1本当たり12.4秒の時間を要した。これは、ハンド部を75mm動かすだけで3.0秒かかっているためであったので、アクチュエータを変更してアーム回転中に上下動作が終了できれば、穂先方向をそろえてもアスパラガス1本当たり9.4秒で収穫可能になると考えられる。また、今回開発した収穫ロボットは認識センサの関係で日没後のみの使用に限定される。しかし、6,000本のアスパラガスを日没後の夜間のみで収穫する事は時間的に難しいため、レーザーセンサを用いた認識センサを開発しており^[5]、昼夜駆動可能な収穫ロボットとすることで1日に6,000本を収穫することが可能になると考えられる。

6. 結言

アスパラガスを対象とした有索式収穫ロボットと、ロボットで収穫する事を考慮したロボット用圃場から

構成される全自動収穫ロボットシステムの試作を行った。試作した収穫ロボットシステムで収穫実験を行ったところ、アスパラガスを1本当たり8.5秒で収穫可能であった。このとき、収穫できた確率は84.6%であった。今後は、昼夜兼用センサーによる収穫実験やロボット用圃場におけるアスパラガスの生産性が高くなる3年生以降の収量・品質調査など残された課題解決を図りながら実用化を目指して開発したシステムの実証実験を行っていききたい。

文献

- [1] 井上：半促成長期どりアスパラガスの養分動態，長崎県総合農林試験場研究報告，農林部門23号 p 31 - , 45 (1998 - 3)
- [2] 近藤，門田，野口：農業ロボット (I) - 基礎と理論 - ，コロナ社，(2004 - 9)
- [3] 近藤，門田，野口：農業ロボット (II) - 機構と実例 - ，コロナ社，(2006 - 6)
- [4] 石松，田口，落合，大幡：三次元形状計測の高速化の一手法，JSME(C)，pp .1969 - 1973 (1991 - 6)
- [5] 椎木，近藤，田口，清水：アスパラガス検出のためのステレオビジョンとレーザーレンジファインダの比較，JSME, ROBOMECH 2009, 1 A 2-C 06, (2009 - 5)