

平成 2 2 年度

博士論文

ハウス園芸におけるピーマン収穫ロボット

Picking Robot for Sweet pepper
in Greenhouse Horticulture

指導教員

岡 宏一 教授

高知工科大学

大学院工学研究科基盤工学専攻

博士後期課程 知能機械システムコース

学籍番号 1096103

北村 晋助

目次

第1章	緒言	1
1-1	研究の背景	1
1-2	ピーマン生産の現状	1
1-3	研究の内容と目的	6
1-4	論文の構成	7
第2章	画像処理	8
2-1	H S I 空間表色系	8
2-2	画像処理システム	9
2-3	ピーマン認識のための画像処理アルゴリズム	11
2-4	照明による果実の識別	18
2-5	ピーマン認識アルゴリズムの検証	20
2-6	ステレオカメラによる奥行方向距離検出	26
2-7	左右カメラ画像の認識対象の一致	30
2-8	第2章のまとめ	31
第3章	ビジュアルフィードバック制御システムの構築	32
3-1	ピーマン追従のためのビジュアルフィードバック制御	32
3-2	ビジュアルフィードバックシステムの構成	34
3-3	カメラ位置決め装置の構成	35
3-4	第3章のまとめ	38

第4章 収穫ロボット	39
4－1 収穫動作の流れ	39
4－2 制御回路	40
4－3 収穫ロボットの試作	41
4－4 摘み取りハンド	47
4－5 第4章のまとめ	49
第5章 認識及び摘み取り実験	50
5－1 実験方法	50
5－2 画像に葉を含まない場合	51
5－3 画像に葉を含む場合	57
5－4 ピーマンの果実が複数ある場合の実験	60
5－5 第5章のまとめ	61
第6章 認識システムの改善	62
6－1 LED光を用いた認識システム	62
6－2 LED光を用いた距離確認誤差の改善	63
6－3 LED光の直進性による改善の実験	64
6－4 果実の反射を用いた果実認識性能の向上	68
6－5 LEDの反射を用いたピーマン認識実験	72
6－6 第6章のまとめ	75

第7章 ハウス内走行装置の開発.....	77
7－1 ハウス内の様子.....	78
7－2 従来の移動機構.....	80
7－3 後輪受動回転型車両の提案.....	82
7－4 旋回半径の比較.....	83
7－5 試作車両.....	89
7－6 走行試験.....	93
7－6 第7章のまとめ.....	96
第8章 結言.....	97
8－1 研究のまとめ.....	97
8－2 今後の課題.....	99
8－3 今後の計画.....	101
謝辞.....	103
参考文献.....	104
関連研究発表一覧.....	106

第1章 緒言

本章では、まず本論文の背景であるハウス園芸の概要についてまとめる．これらをもとに、収穫ロボットに必要とされる技術について論じる．更に本研究の目的を明らかにし、論文の構成を説明する．

1－1 研究の背景

高知県は、温暖・多少の恵まれた気候や、海岸部から山間部に至る変化に富んだ自然条件を有している．しかし、県土の 84 %を森林が占め、耕地の比率が 4.2%と低いため、農家一戸辺りの平均耕地面積は 92.3a は全国平均 168.6 a を大幅に下回っている．こうした条件のもとで、平野部においては、施設栽培を中心とした野菜や花き等の収益率の高い園芸農業が発展している．全国平均と比較すると農業産出額に占める野菜の割合は 2.4 倍、耕地 10 a 当たりの生産農業所得は 1.8 倍となっている．しかしながら、園芸用ハウス面積は、高齢化による規模縮小や、担い手の減少などにより、平成 7 年度をピークに減少傾向にあり、そうしたハウス面積の減少に歯止めをかけていくことが重要とである^[1]．

施設園芸において、なす、ピーマンは高知県の主要な生産物である．農林水産省の統計では、高知県の収穫量は、冬春なすは 3 6 6 0 0 トンで全国 1 位、冬春ピーマンは 1 0 6 0 0 トンで全国 3 位となっている^[2]．

この施設園芸において、労働力不足の解消や農作業の援助などのため機械化・自動化が期待されている．

企業では大規模な農産物の自動化工場への取り組みが進められており、一般のビニールハウス施設においても、温度管理、水やり、窓の開閉などの自動化が進められている．また、収穫についてはナス、イチゴ、トマトなどの収穫ロボットの研究開発が行われている^{[3][4][5]}．本研究では、果実の認識が難しく、また高知県の基幹産業であるハウス園芸野菜の一つであるピーマンを対象に適期を判定し収穫を行うロボットの開発に取り組む．

1－2 ピーマン生産の現状

施設ピーマンは、図1－1に示すようなビニールハウス内で、約400mm程度の間隔で作られた畝に栽培されている(図1－3)。一般に毎年8月から9月ごろに約700mmの間隔で、苗が植えられ、10月ごろから翌年の6月ごろまで収穫されている。ピーマンの果実は二股に伸びるそれぞれの枝の付け根に50mmほど伸びた果柄部の先端に実る(図1－4、図1－5)。収穫する果実の大きさは、高知県園芸連の県共計協会の「高知ピーマン部会」で規格統一されている⁶⁾。市場に出ている主要な大きさは等級A階級Mのもので、一袋4～5入りで150g、ピーマン1つの重さは28g～40gであり30gを中心としている。

農家ではおもにこのMサイズと呼ばれる大きさのものを収穫し、JAなどに出荷している。収穫者はピーマンの大きさを長年の経験で判断し一つ一つ果柄部をハサミで切り(図1－5)、コンテナに入れてJAなどに出荷する(図1－6)。JAなどで、一袋4～5入りで150gに袋詰されて市場に出荷される。各農家の労働力の状況により一日で収穫できる量にはかぎりがあり、生産期になると高齢者経営、少人数経営の農家では適期に収穫できないなどの労働力不足の問題がある。



図1－1 ビニールハウスの概観



図 1 - 2 ハウス内のピーマン栽培風景

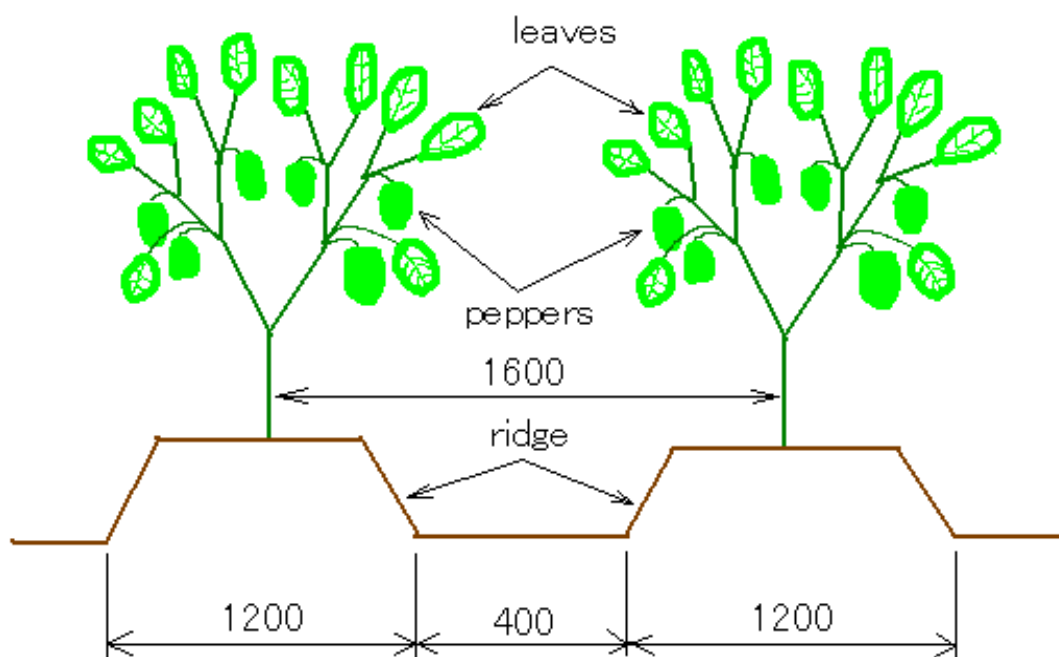


図 1 - 3 ピーマン栽培の概要図



図 1 - 4 ビニールハウス栽培のピーマンの様子

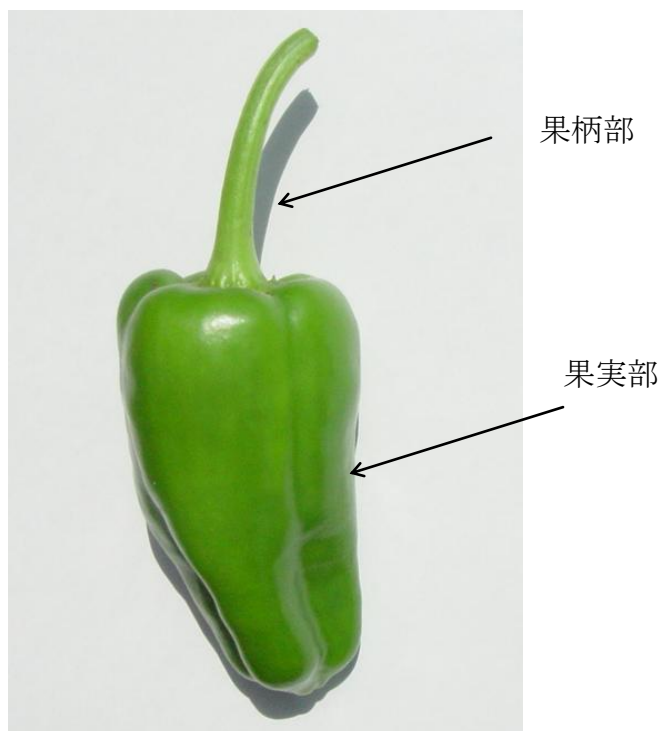


図 1 - 5 果実部と果柄部



図 1 - 6 ピーマン収穫の様子



図 1 - 7 コンテナに収穫されたピーマン

1－3 研究の内容と目的

本研究は，労働力不足の解消・援助をめざし，現状のビニールハウス施設でのピーマンの収穫において，畝間を走行し，自動で収穫可能なピーマンを認識し，摘み取りを行うロボットの開発を目的とする．開発する収穫ロボットのイメージを図1－7に示す．このロボットの機能として，以下のことについて構築・検証を行うものとする．

- (1) 果実を画像などにより識別し，大きさ，形状，位置を把握する自動認識機能．
これは，果実の自動認識を行うもので，人間の目と同様に2つのカメラを用いて画像処理することにより色や形などから果実を認識する．
- (2) 収穫に適する果実の自動摘み取り機能．これは，果実を把持する機構と切断する機構を併せ持ったものである．摘み取り時には，果柄部を把持したことを確認した上で切り取り動作を行う．
- (3) 不安定な畝間を収穫しながら自走するハウス内移動機能．ハウス内は畝間が非常に狭く，悪路となっている．このような厳しい環境下で移動するための機構として，新しい移動機構を用いる．

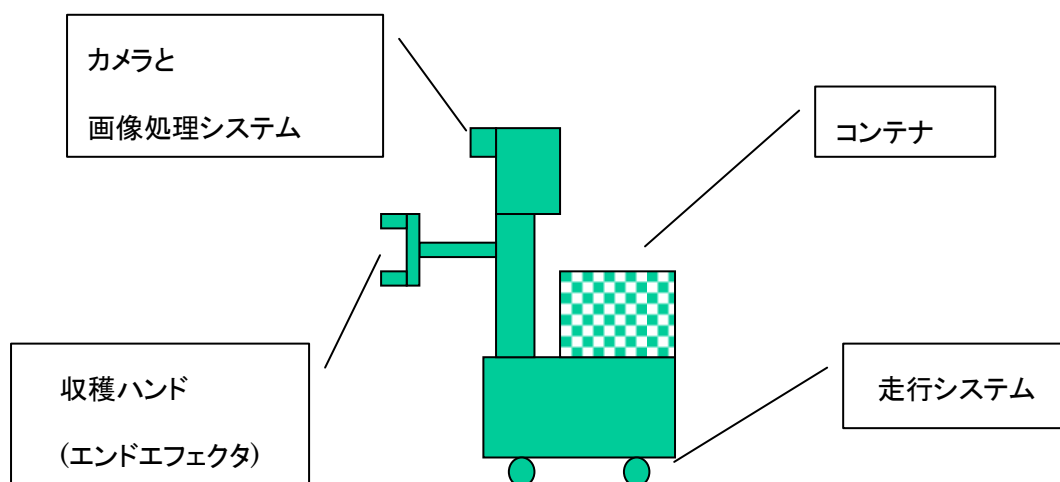


図1－8 収穫ロボットのイメージ

1－4 論文の構成

本論文の第 2 章では、今回構築したピーマン認識などの画像処理について述べる。第 3 章では、対象物の大きさの把握や摘み取りの位置決めに必要なと考えられるビジュアルフィードバック制御を用いて認識したピーマンにカメラを追従させるシステムの構築について述べる。第 4 章では、収穫ロボットの構成や摘み取り作業を行うエンドエフェクタ（摘み取りハンド）について述べる。第 5 章では、製作したロボットでの収穫実験の内容と結果について述べる。第 6 章では、収穫実験で明らかになった問題点をもとに、認識システムの改善について述べる。第 7 章では、走行装置の自動化について述べる。最後に第 8 章で本研究の結論と今後の方向の課題について述べる。

本研究で得られた結果は、ピーマンの自動収穫の可能性を示し、ハウス園芸栽培の自動化の一部として、農業における少子高齢化などによる労働力不足の援助に役立つと考える。

第2章 画像処理

本章では、画像処理による果実の認識、距離の把握についてのアルゴリズムとその有効性について述べる。

2-1 HSI 空間表色系

緑色のピーマンを認識するためにカラー画像を用いて解析する。人の色彩感覚は、色の違いを表す色相 (Hue)、色の鮮やかさを表す彩度 (Saturation)、色のもつ明るさを表す明度 (Intensity) の3つの値による HSI 空間で表される。この表色系は色の表現として直感的であり、カラー画像処理に良く利用されている[2-1] [2-2]。RGB 空間と HIS 空間を図2-1、図2-2に示す。なお、HSI 空間は、輝度に brightness, lightness, および value を用いて HSB 空間, HSL 空間, HSV 空間と呼ばれることがある[2-3]。本書では HSI 空間で統一する。今回ピーマンの果実認識の画像処理には領域分割の行いやすい HSI 空間の表現色を用いた[2-1] [2-2]。

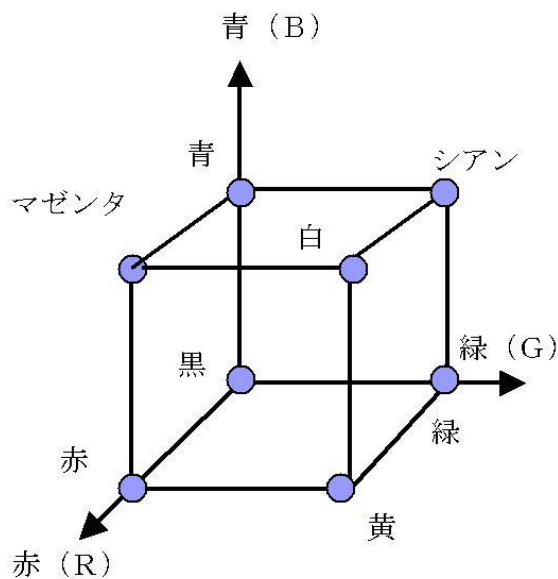


図2-1 RGB空間[2-3]

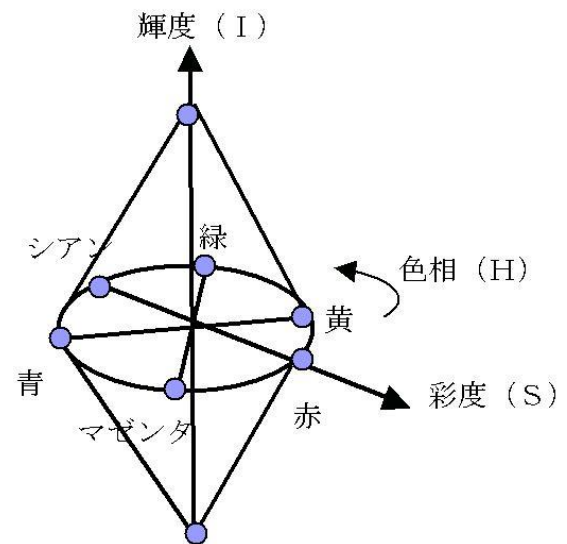


図2-2 HSI空間[2-3]

2-2 画像処理システム

本研究で使用した画像処理システムは、図 2-3 に示すように有効画素数 640×482 のカラー CCD カメラ (RF SYSTEM 製 SG-55), カラー画像入力ボード (Leutron Vision 製 Pic-Port), 画像処理アプリケーションで構成する。カメラは 2 台設置しステレオ映像によって、奥行を把握できるように、左右のカメラで目標物を認識するようにした。画像入力ボードはカメラからのアナログ信号をデジタル信号に変換してパソコンのメインメモリに取り込むもので、カラー対応で入力ポートを複数個持っているものを使用した。画像の取り込みから、目標物の認識までの一連の画像処理は、汎用の画像処理開発アプリケーションを利用してプログラムを開発した。表 2-1 に主な仕様を示す。

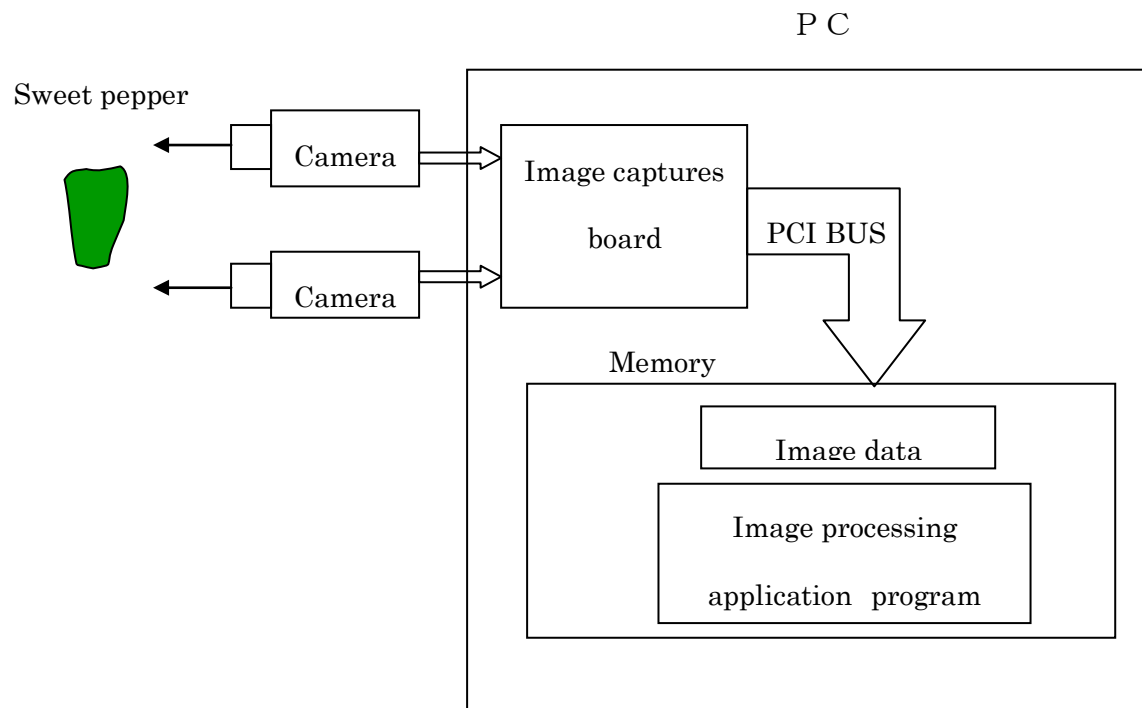


図 2 - 3 ピーマン認識のため画像処理システム

表 2 - 1 画像処理システムの主な仕様

品 目	仕 様 など
カラー C C D カメラ	1/4 インチ デュアル CCD 68 万画素 (RF SYSTEM)
画像入力ボード	アナログカラー画像入力ボード Pic-Port (Leutron Vision)
画像処理開発ソフト	HALCON (MVTec)
コンピュータ	IBM-a50 Pentium 4, 3GHz, 1GB

2-3 ピーマン認識のための画像処理アルゴリズム

ピーマン認識のアルゴリズムは図2-4のような流れとした。カメラから取り込んだカラー画像をH S I 空間で表現した画像に変換し、閾値により果実の色の領域に絞り込む。絞り込んだ色の領域を連続した固まり毎に一つのものとして認識させ（ラベリング）、この個体の特徴量から果実を認識する。以下にアルゴリズムの詳細を示す。

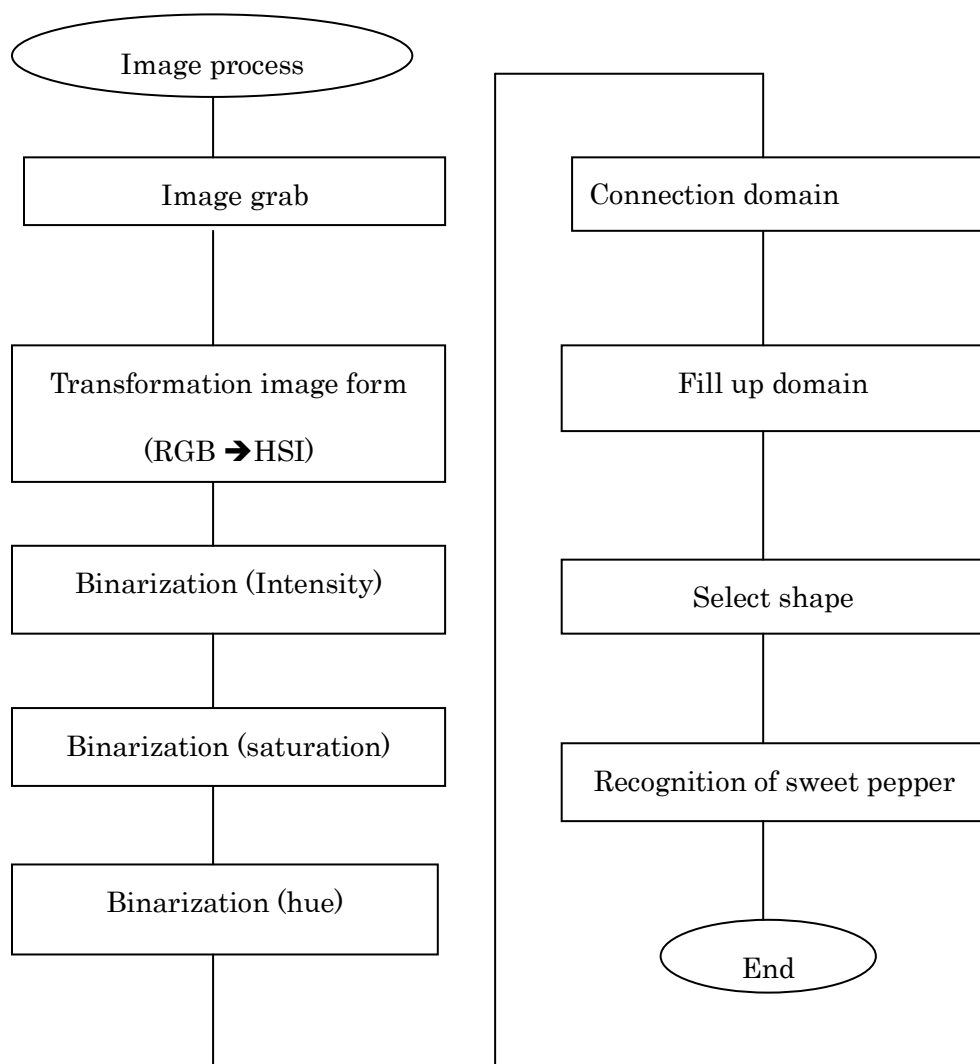


図2-4 ピーマン認識のための画像処理アルゴリズム

（１）画像の取り込みとH S I 空間表現

図 2－5 に示すようなピーマンの栽培状態をカラー画像で取り込み、図 2－6 に示す R G B 空間から図 2－7 に示す H S I 空間表色系に変換する。

（２）２値化処理

輝度（Intensity）、彩度（Saturation）、色相（Hue）の順に画像を２値化処理しできるだけピーマンの果実のみを含む画像にする。輝度画像で非常に明るい部分を除く（図 2－8－（a））。彩度の２値化で葉の大部分が果実と区別され（図 2－8－（b））、最後に色相でできるだけノイズを取り除く（図 2－8－（c））。照明のない画像データでは、葉と果実の差がなくこのような２値化処理でピーマンの抽出は困難である。この段階では絞り込んだ領域には果実以外のノイズが多く含まれている（図 2－9）。

（３）ラベリング

次に図 2－9 に示すように２値化によって絞り込まれた画像中の同じ連結成分内の画素すなわち連結領域には同じラベル（名前）を付け、異なる連結成分には異なるラベルを付ける。この処理をラベリングという[2-1]。この図では領域が４個の個体に分けられそれぞれ、A、B、C、D、と名前が付けられ個別化されている。ラベリング処理した結果を図 2－11 に示す。ラベリングされた各連結成分が色分けされている。

（４）特徴量抽出

ラベリングされた連結領域には、内部に空白の部分が見られる。実際にはこの部分も領域の一部であり、この空白を埋める処理を行う。その結果を図 2－12 に示す。最後にそれぞれ個別化された個体から果実の特徴量で抽出を行う。この場合大きさが一つの特徴量となるので、個体の大きさ（画素数）で果実を抽出した。図 2－13 は 1000 画素以上の大きさの個体を抽出して果実と認識させた結果である。前方のピーマンは果実と認識され、後方のピーマンはノイズと判断された。



図 2-5 カラー画像の取り込み



(a) RED

(b) Green

(c) Blue

図 2-6 画像のRGB空間による表現



(a) Hue

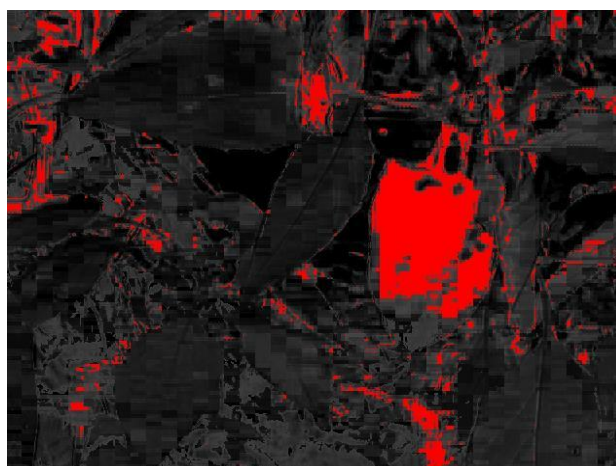
(b) Saturation

(c) Intensity

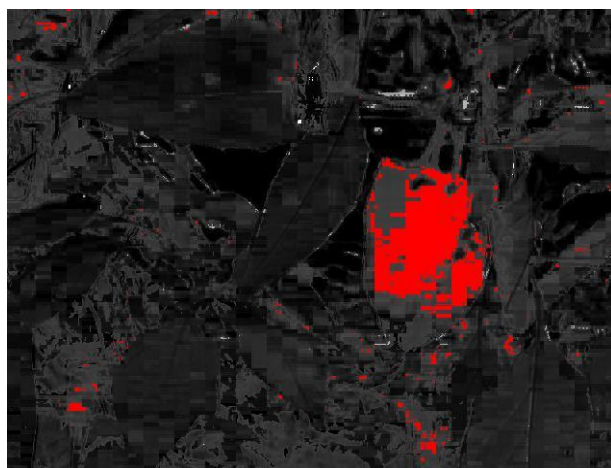
図 2-7 カラー画像のHSI空間による表現



(a) Binarization result by Intensity



(b) Binarization result by Saturation

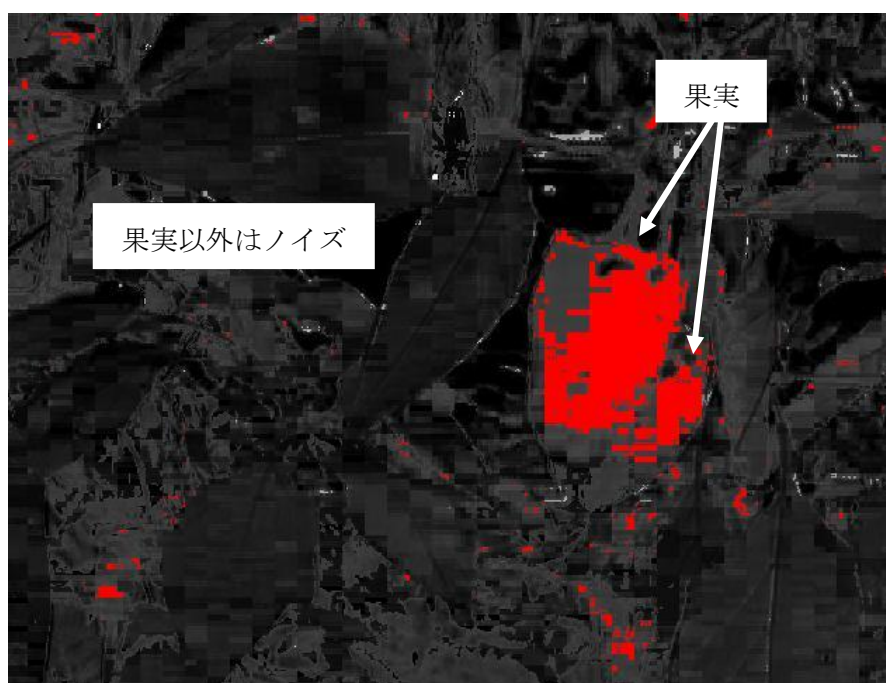


(c) Binarization result by Hue

図 2 - 8 2 値化処理によって絞り込まれた領域 (赤い部分)



(a) 入力画像



(b) 2 値化処理結果

図 2-9 2 値化処理段階で残ったノイズ (入力画面との比較)

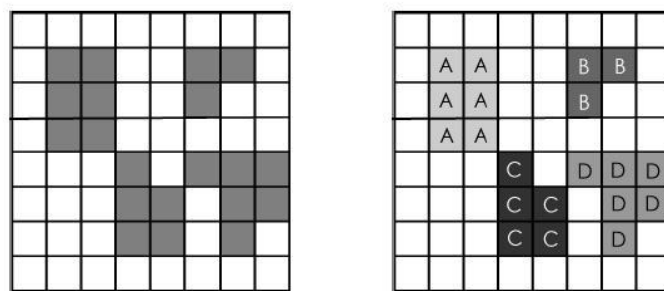
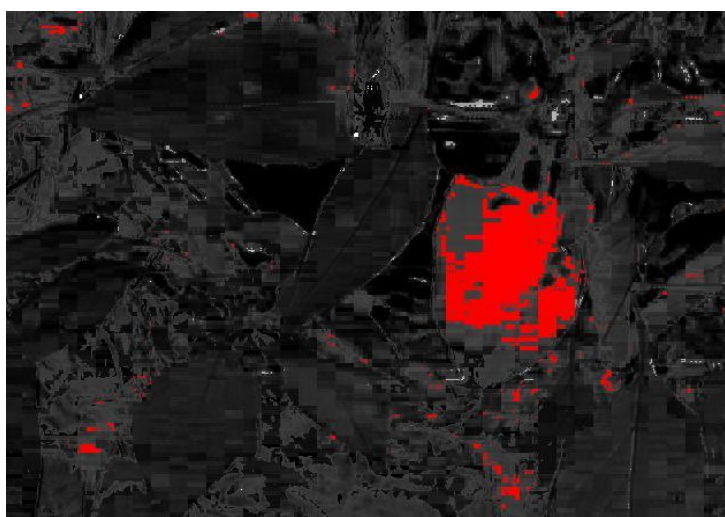
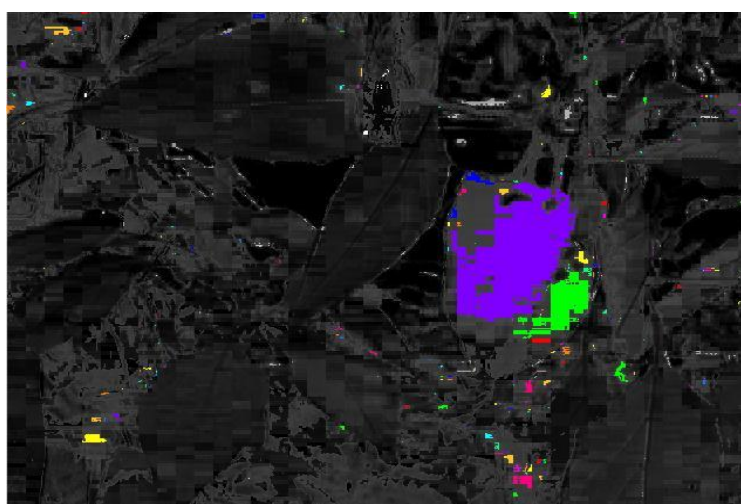


図 2-10 連結成分とラベリング結果[2-1]

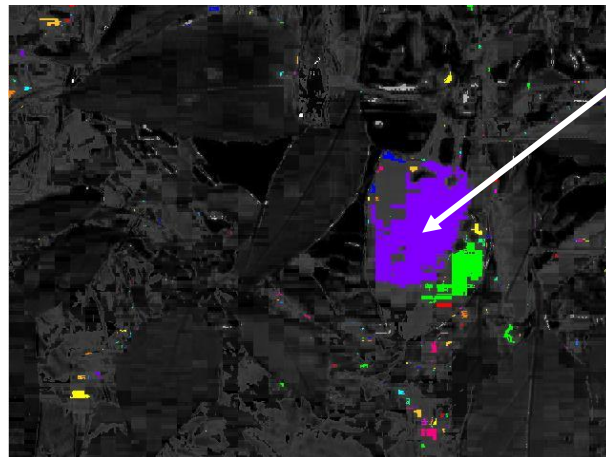


(a) ラベリング処理前の領域（赤い部分）



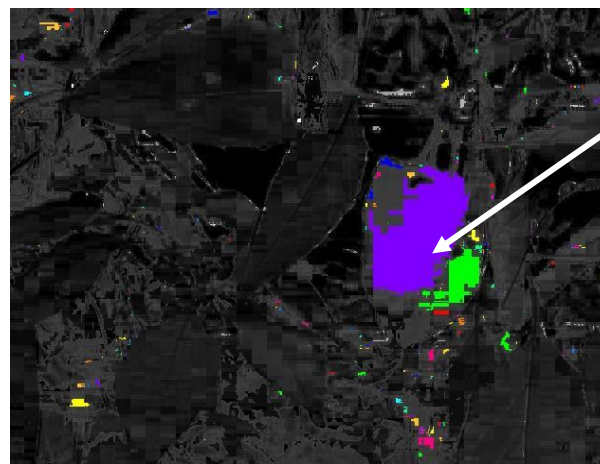
(b) ラベリング処理後（個体を色分け）

図 2-11 領域のラベリング処理結果



空白が見られる

(a) 塗りつぶし前



空白が埋められている

(b) 塗りつぶし後

図 2-1-2 連結領域の塗りつぶし



果実と判断

ノイズと判断

図 2-1-3 特徴量抽出結果

2-4 照明による果実の識別

ピーマン識別の画像処理において、照明を用いることによって、HSI 空間で表現された彩度 (Saturation) 画像の濃淡値が変化することがわかった。照明を用いない画像は果実の濃淡値に、殆んど差異が見られず、2 値化により葉と果実を区別することは困難である。一方、照明と用いた画像では、葉と果実の濃淡値に差異が見られ果実の区別が可能となる。図 2-14 の赤い部分は 2 値化処理した領域を示す。照明を用いない画像では葉と果実に殆んど変化がない。しかし、照明を用いた画像では、葉と果実に濃淡値の差異が見られピーマンの識別が可能となる。

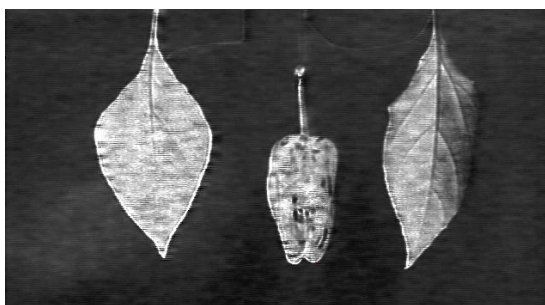
照明無し



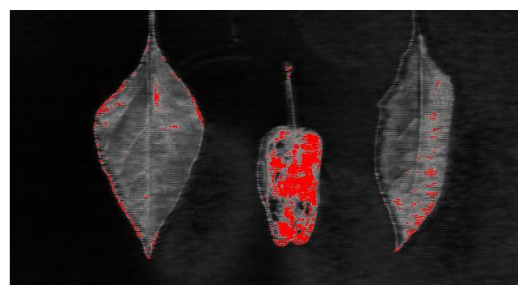
照明有り



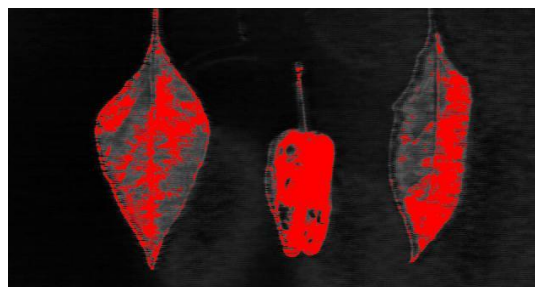
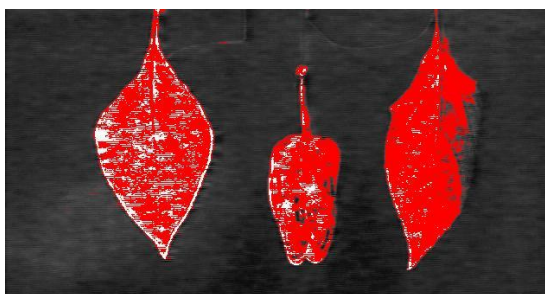
(a) 取り込んだカラー画像



(b) H S I 空間に変換された Saturation 画面



(c) 2 値化処理による領域の変化 (その 1)



(d) 2 値化処理による領域の変化 (その 2)

図 2-14 閾値による領域の変化 (Saturation)

2-5 ピーマン認識アルゴリズムの検証

2-5-1 実験装置

ほ場で実際に栽培されているハウス内のピーマンの画像データを収集し，今回作成した画像処理アルゴリズムの検証を行った．

実験装置は図2-15に示すような，110mmの間隔で取り付けた有効画素数640×480のカラーCCDカメラ（Logcool 製 QcamPro4000）2台をノートパソコンに接続して画像データの収集を行った．また，照明として市販の蛍光灯27Wを用いた．更に，周囲の明るさの影響を確認するために夜間のデータも収集した．



図2-15 画像収集に用いた装置

2-5-2 実験結果

収集した画像データと画像処理結果の一部を図2-15及び図2-16に示す．図2-15は昼間に得られた画像を処理したもの，図2-16は夜間に得られた画像を処理したものである．処理された画像の中で，線で囲まれている部分が画像処理によって認識されたピーマンである．

図 2-15 (a) では、人の目では左右 2 個ずつのピーマンが確認できる。一方画像処理では、左右 1 個のピーマンを認識している。左カメラでは前方と後方のピーマンの区別ができていない。右カメラでは前方と後方のカメラでピーマンの区別はしているが後方の認識された領域が小さいため本アルゴリズムではノイズと判断されている。

図 2-15 (b) では、1 個ずつピーマンと認識され右カメラの後方に見えるピーマンはノイズと判断された。

図 2-16 (c) は、一部に隠れている状態であるが、左右とも 1 個ずつピーマンを認識している。

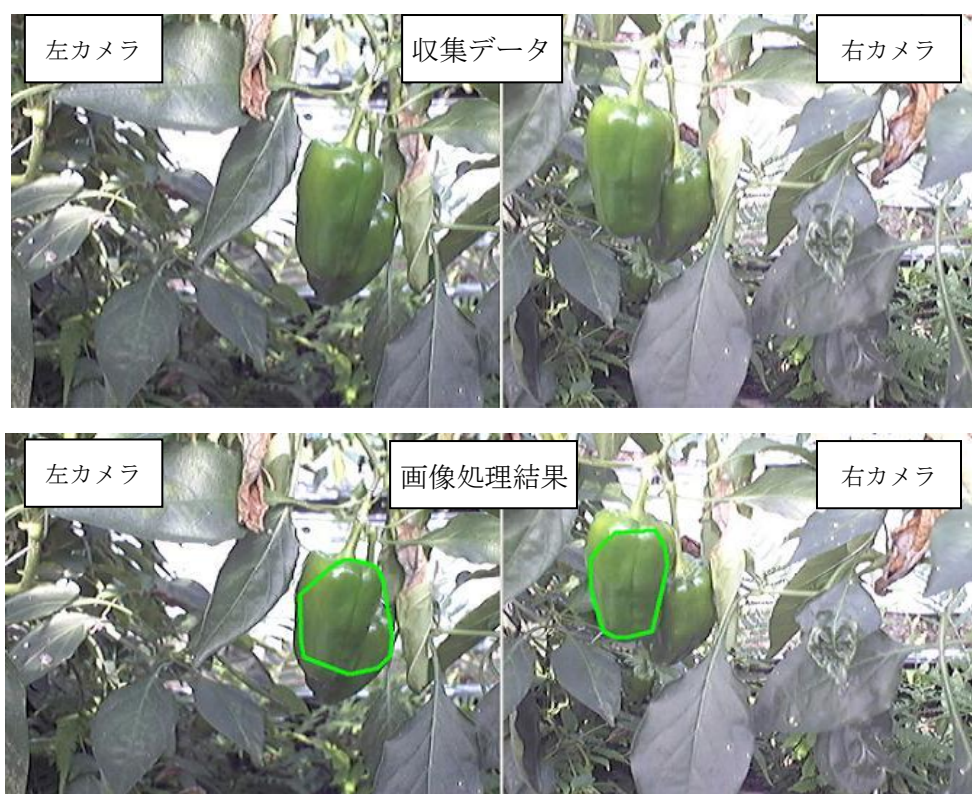
図 2-16 (d) では、葉をピーマンと誤認しており、ノイズが集まって大きくなった部分ではピーマンと認識される。

図 2-16 (e) では、ピーマンが葉の奥にあり照明が十分にあたらず、1 個も認識されていない。

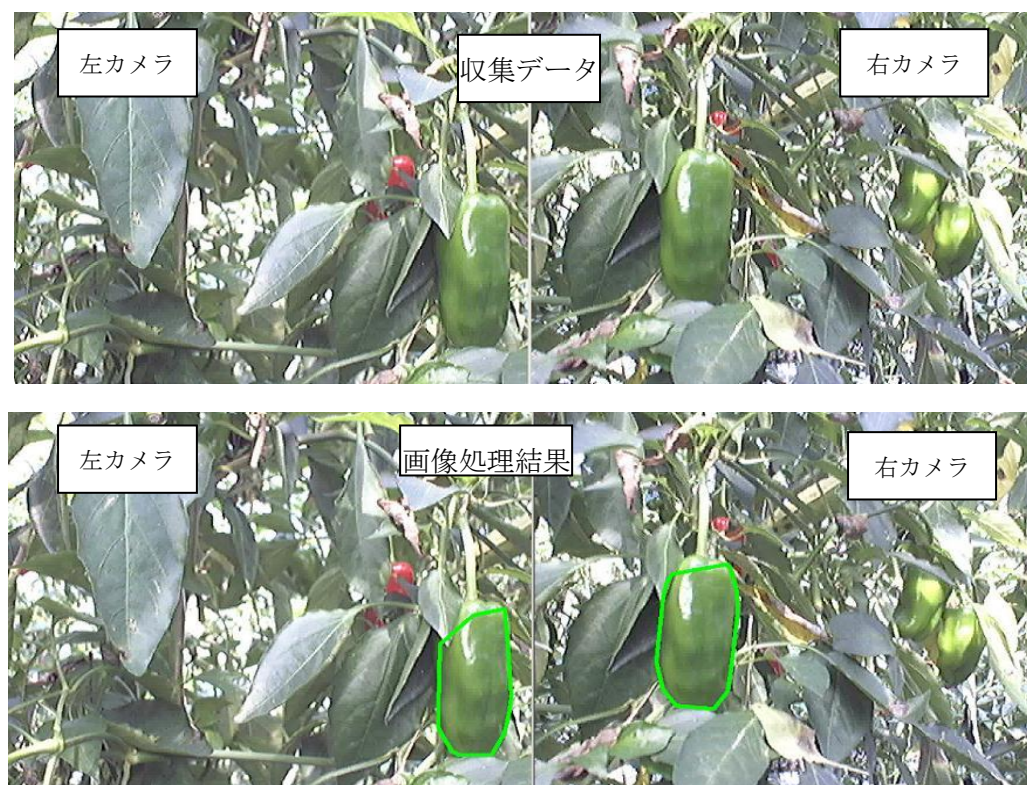
図 2-17 は、夜間に収集した画像データと解析結果である。昼間の画像と比較すると夜間の方が安定して認識できることがわかる。このことは、ロボットが夜間の作業をすることの妥当性を示している。

これらの画像処理結果をもとに、人の目で確認した場合のピーマンの個数と画像処理による認識数を比較した。その結果を表 2-2 に示す。表からわかるように、認識率は昼間では 47.5%、夜間では 75.5% であり、葉と果実の区別は可能であると判断できる。また、夜間に認識率が高いのは、周囲の明るさの影響を受けにくく安定して認識できたためと考えられる。

この結果により、本アルゴリズムはピーマン認識が可能であると考えられるが、十分な認識率であるとは言えず、更に認識率を向上させる必要がある。また、今回は二値化のための閾値を人間が決めており、自動化を行うことに障害になると予想される。しかし、葉に一部隠れている状態でも認識は可能であることは、葉と果実の識別がきちんとできることであり、今後の認識率向上により収穫ロボットの実用化が期待できる。



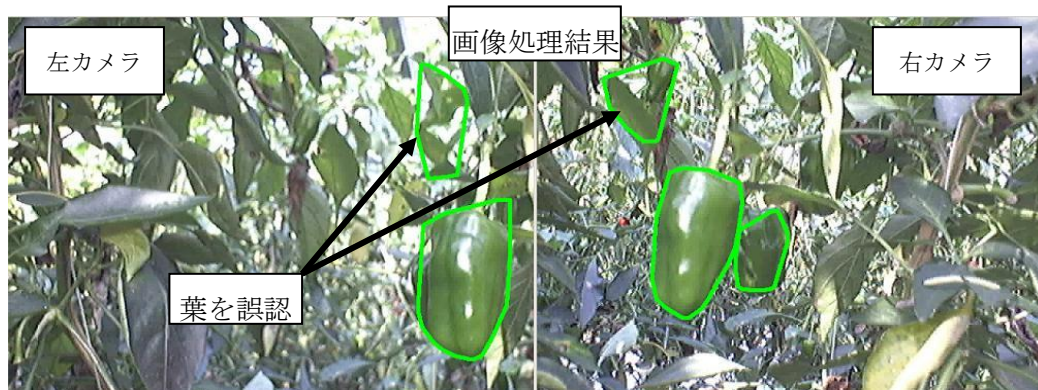
(a)



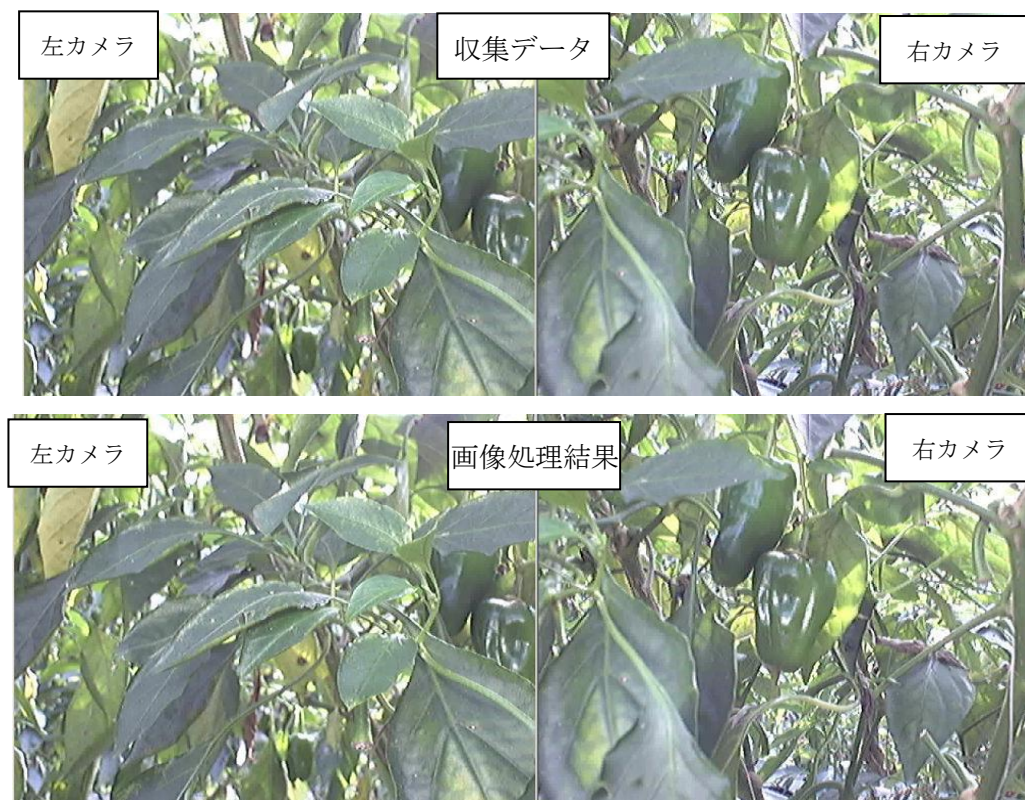
(b)



(c)



(d)



(e)

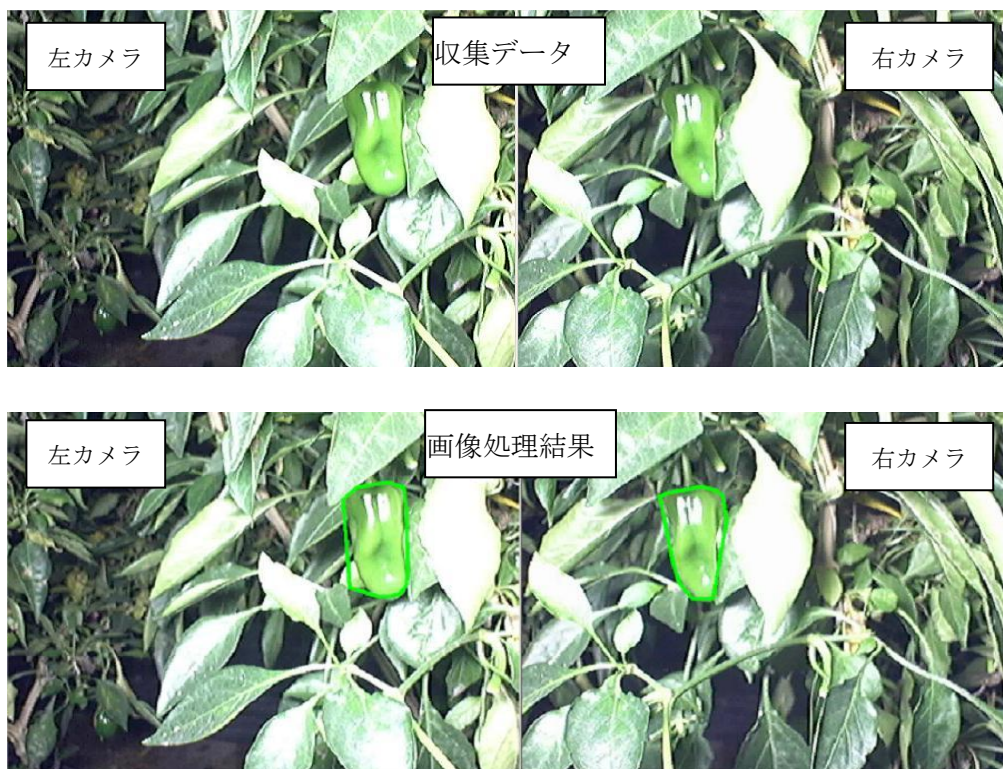
図 2－1 6 収集した画像と画像処理結果（昼間）

表 2－2 画像処理アルゴリズム検証結果

	昼間	夜間
画像収集数	左右 5 1 画像	左右 2 2 画像
①人によるピーマンの確認数	1 6 4 個	9 8 個
②画像処理によるピーマンの認識数	7 4 個	7 8 個
③認識率 ②／①×100	4 7 . 6 %	7 5 . 5 %



(a)



(b)

図 2 - 1 7 画像処理結果 (夜間)

2-6 ステレオカメラによる奥行方向距離検出

図2-18に示すように、2つのCCDカメラを平行に設置し、それぞれのカメラから取り込んだ画像からのピーマンの図心座標よりカメラと目標物の距離を求める。2台のカメラを平行に設置した場合、撮像された画像内から計測できる視差($x_l - x_r$)を用いて次式から距離 d が求まる[2-4]。

$$d = \frac{bf}{(x_l - x_r)} \quad (2-1)$$

ただし、

d : カメラとピーマンの距離(mm)

x_l : 左側カメラ入力画像による目標物の水平方向の図心位置 (ピクセル)

x_r : 右側カメラ入力画像による目標物の水平方向の図心位置 (ピクセル)

b : ステレオカメラの基線長(mm)

f : カメラの焦点距離(mm)

ここでは、 $k = bf$ とおき、次式を距離検出の式とした。

$$d = \frac{k}{(x_l - x_r)} \quad (2-2)$$

利用したカメラによるピーマンの距離の精度を確認するために、図2-20のような実験を行った。実験は、カメラとピーマンとの距離を変化させそのときのカメラの画像処理から得られる距離と比較した。また bf の値は、距離 200mm で実測値と画像処理による検出値が等しくなるよう定数 $k = bf = 65100$ とし、その他の距離で両者を比較した。結果を表2-3に示す。認識したピーマンのピクセル数変動しているため、定数の決定の基準とした 200mm をはなれるほど誤差が大きくなっている。しかしカメラと目標物の距離を認識するために十分利用可能であると考ええる。

また、このときの画像処理の流れを図 2-21 に示す。今回構築したピーマン認識のための画像処理アルゴリズムとステレオ視による距離検出を組み合わせ、ピーマンの認識と位置の把握を行う。左右のカメラから取り込んだ画像をそれぞれ処理し、左右両方の画像からピーマンを認識すれば、ステレオ視による距離計算を行う。

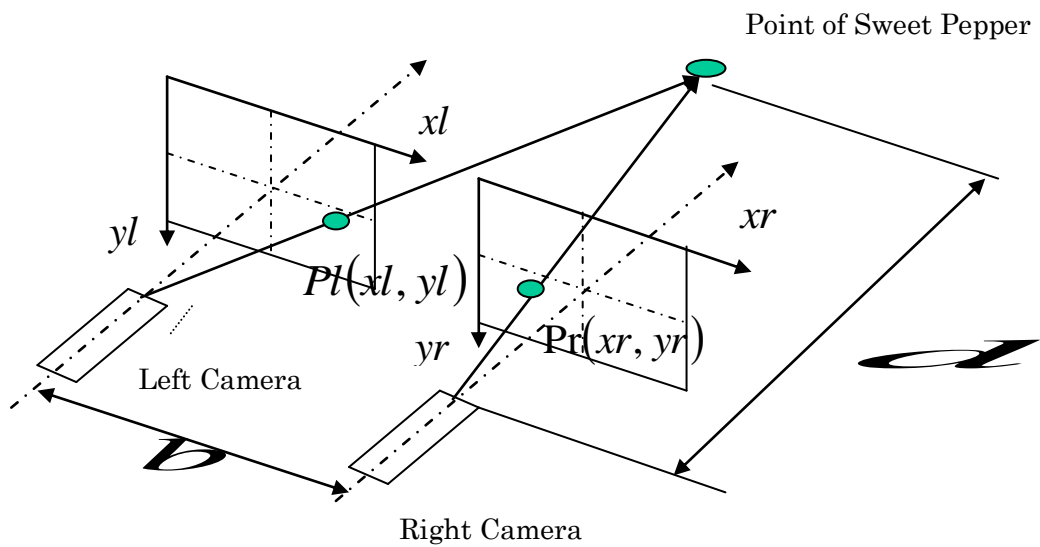


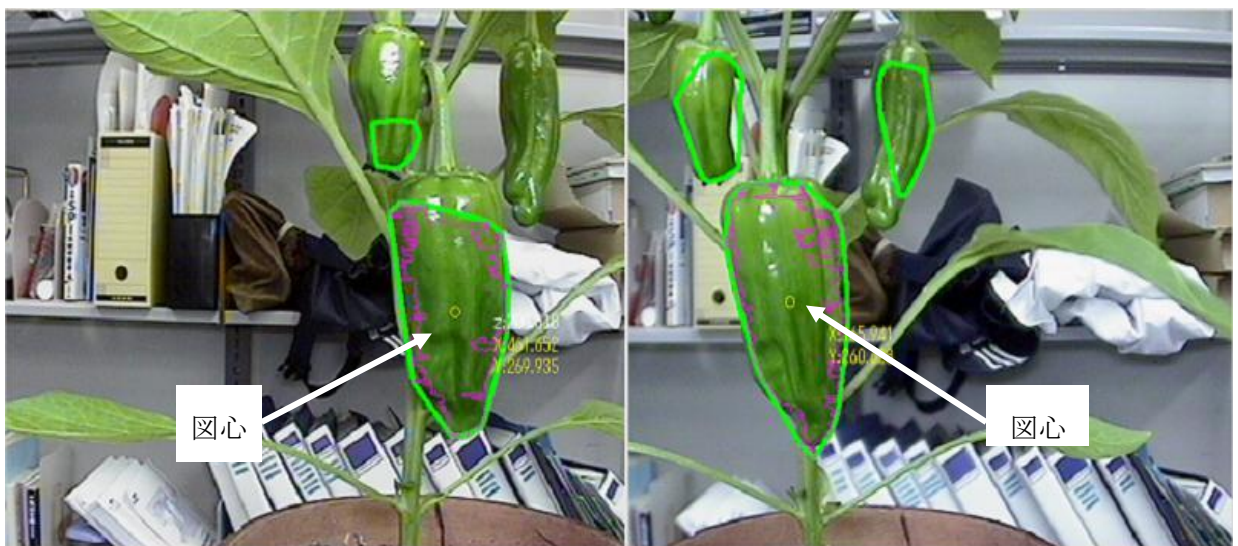
図 2-18 ステレオカメラの幾何学図[2-4]

表 2-3 ステレオカメラによる距離検出結果

実測値	ステレオカメラによる検出値	誤差
150mm	152～156	2～6
200mm	197～200	-3～0
250mm	246～250	-4～0
300mm	294～304	-6～4



図 2-19 ステレオカメラによるカメラとピーマンの距離計測の実験の様子



(a) 左カメラの画像処理結果

(b) 右カメラの画像処理結果

図 2-20 ステレオカメラによる距離検出のための画像処理結果例

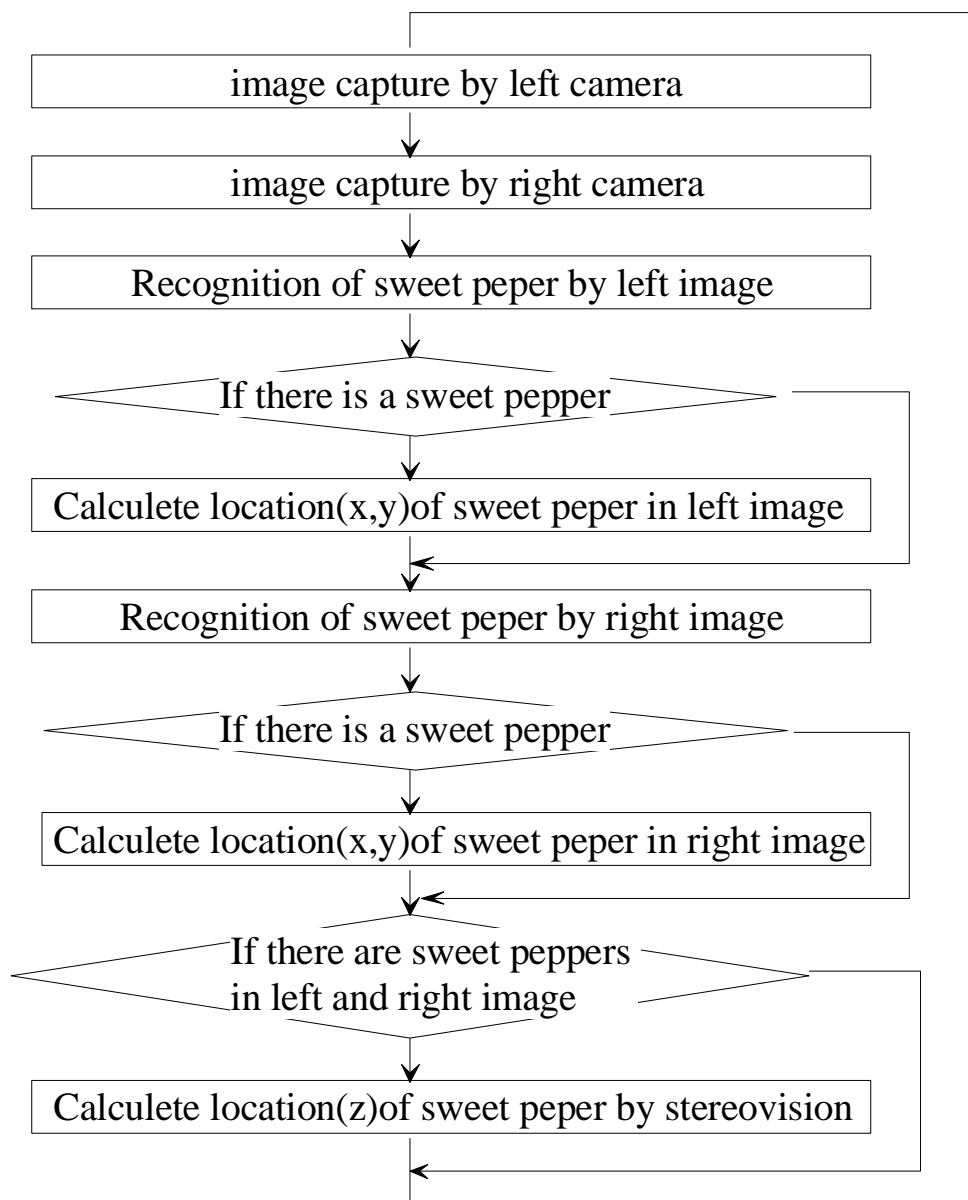


図 2 - 2 1 ステレオカメラによる奥行き方向の距離検出の画像処理の流れ

2-7 左右カメラ画像の認識対象の一致

画像内に複数のピーマンの果実がある場合、収穫するピーマンを1個だけ選択する必要がある。もし、左右のカメラからの画像処理で異なるピーマンを選択すれば、奥行方向の距離の認識ができなくなり、摘み取り不可となる。このため、認識したピーマンの中で大きさ（画素数）最大の果実から摘み取り対象にするようにした。しかし、左右でピーマンの見え方が異なり、大きさの順序も異なる場合が生じる。そこで、図2-22に示すように、全画面から領域を絞り込み認識するピーマンが一致するようにした。左カメラからの画像処理対象領域を基準にし、右カメラからの画像で、目標のピーマンが存在する可能性が高い領域に絞り、果実を認識する。これにより2つのカメラで同一の果実を認識できる。

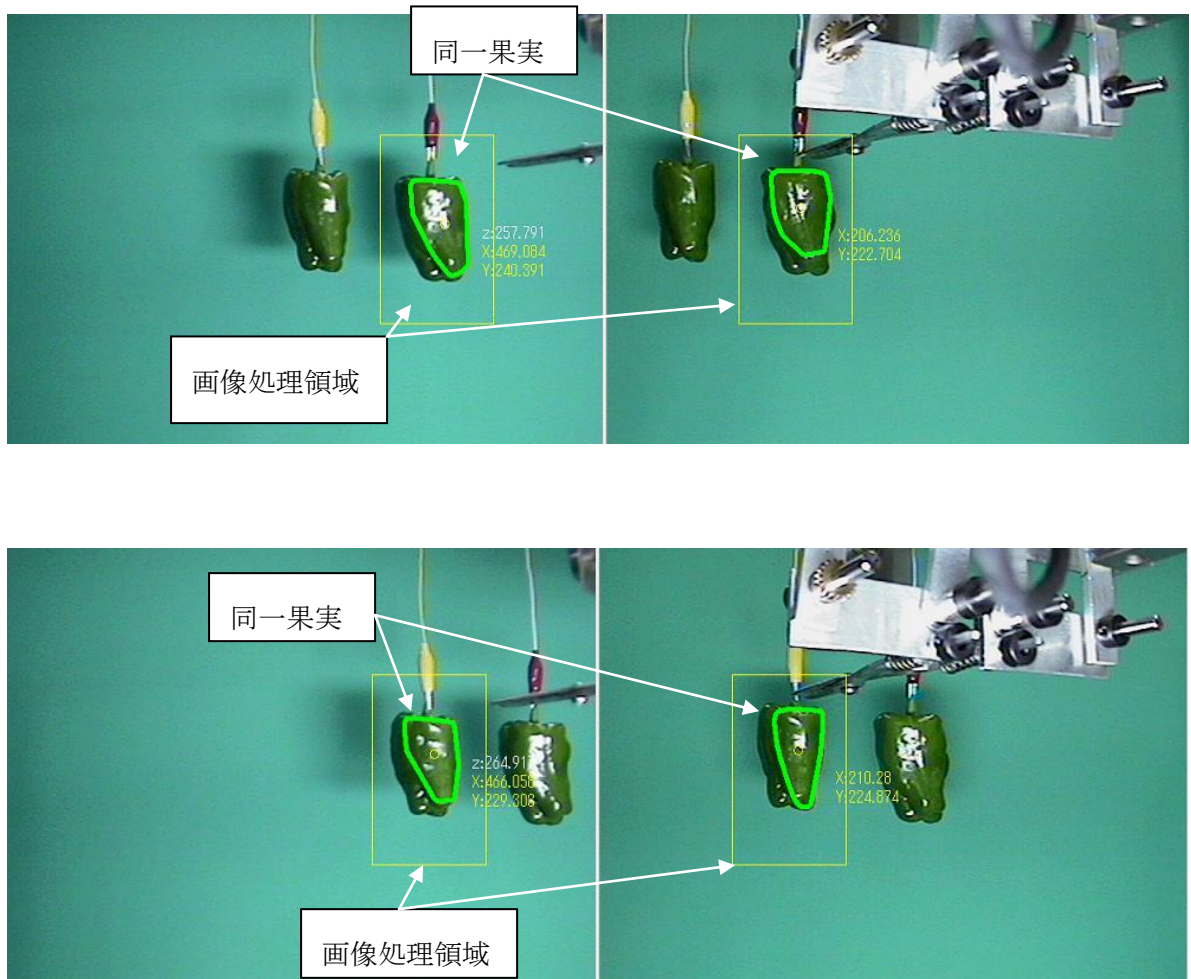


図2-22 同一ピーマン認識のための画像処理領域の絞り込み

2-8 第2章のまとめ

ピーマンを認識するための画像処理システムおよび画像処理アルゴリズムを構築し、ハウス内の実験で有効性も確認できた。照明を用いることで、同色の葉と果実を識別することが可能であることが確認できた。また、画像処理によるカメラと認識果実の距離検出、さらに、左右カメラが同じ果実を認識するアルゴリズムを構築し、収穫ロボットの重要な機能の一つである画像処理部の基礎づくりができた。

第3章 ビジュアルフィードバック制御システムの構築

認識したピーマンの摘み取るためには、摘み取りハンドの位置を認識したピーマンに対し制御する必要がある。摘み取りハンドとカメラは一体となって動く構造とし、ここでは、直行座標形ロボットにカメラを取り付け、得られた画像データをリアルタイムでフィードバックするシステムを構築した。

3-1 ビジュアルフィードバック制御

ビジュアルフィードバック制御は、カメラをセンサとして制御量を検出するもので図3-1に示すようなブロック図となる。具体的には、図3-2に示すように、リアルタイムで画像を取り込み、画像処理によってピーマンを認識し、同時に果実図心を計算し、目的のピーマンの果実図心位置をカメラの移動により目標値に追従させるものである。目標位置はハンドの先の切断機構が働く場所であり、カメラ画像内の定点となる。図3-2は水平垂直方向の追従を示したものであるが、今回のシステムは奥行方向にも追従できるようにした。左右のカメラの利用方法としては、ピーマンを探すときには左のカメラを用いて行い、左のカメラでピーマンの果実図心が目標位置まで到達の後には、右のカメラとともに両方のカメラ画像の果実図心が目標位置に来るよう、ステレオカメラによる奥行方向距離の検出によって奥行方向も位置決めする。

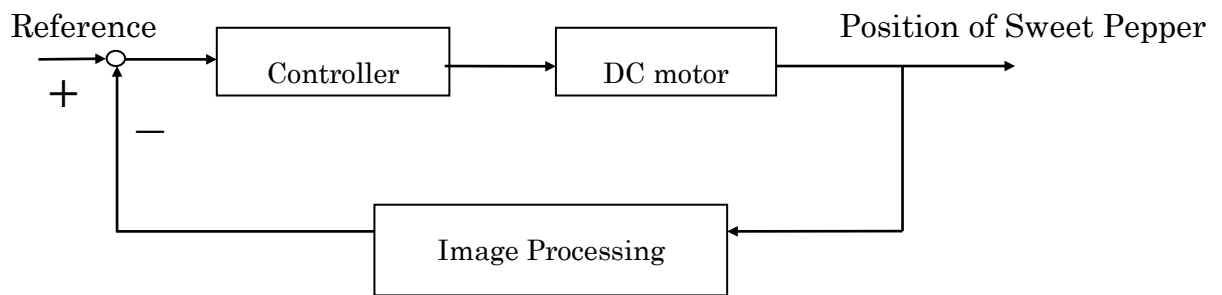


図 3 - 1 ビジュアルフィードバックのブロック線図

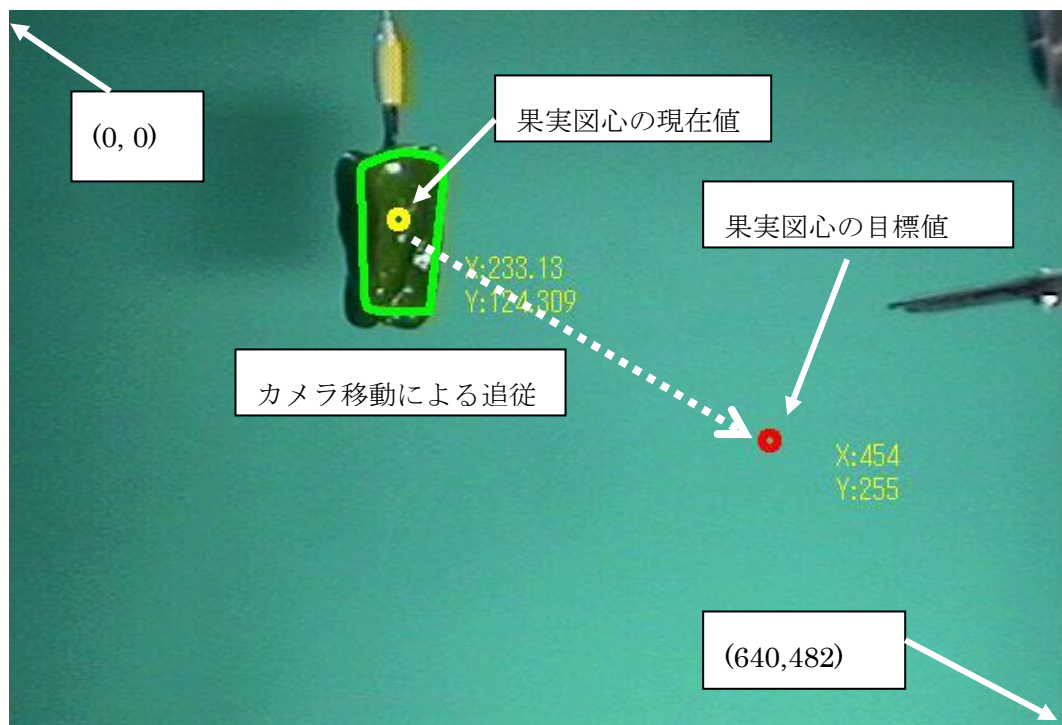


図 3 - 2 画像中の目標値追従 (左カメラ)

3-2 ビジュアルフィードバックシステムの構成

ピーマン追従のためビジュアルフィードバック制御システムを図3-3に示すように構成した。第2章で構築した画像処理システムに制御回路を組み込んだものである。画像処理により、リアルタイムでピーマンの位置を認識し、制御回路にフィードバックする。コントローラには、制御回路と入出力インターフェイスを有するコントローラボード（DS1104 (dSPACE)）を使用し、制御系設計アプリケーション（MATLAB/Simulink (The MathWorks)）によりプログラムを作成し、コントローラに実装（書き込み）して、制御を行う。

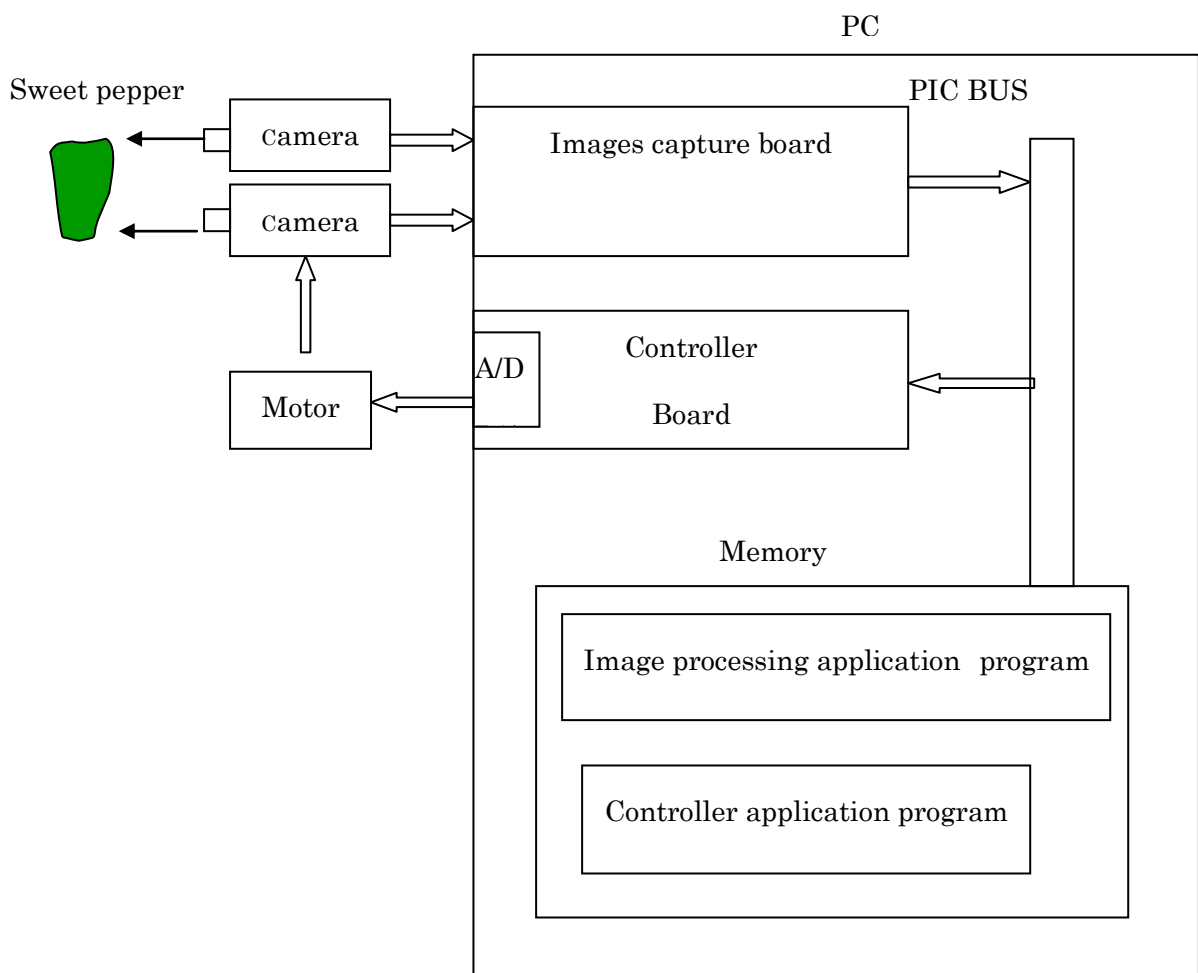


図3-3 ピーマン追従のためのビジュアルフィードバック制御システムの構成

3-3 カメラ位置決め装置の構成

ビジュアルフィードバック制御を利用したカメラ位置決め装置の概要を図3-4に示す。目標物にカメラが追従するように装置は3軸の直動形移動機構を備えている。3軸の移動機構はDCモータ、Vベルト、スライドルールで構成している。位置決めのためのセンサはポテンシオメータまたはリニアエンコーダを用いた。図3-5に位置決めシステムの構成、図3-6に位置決めシステムの外観、図3-7、図3-8に各部の写真を示す。

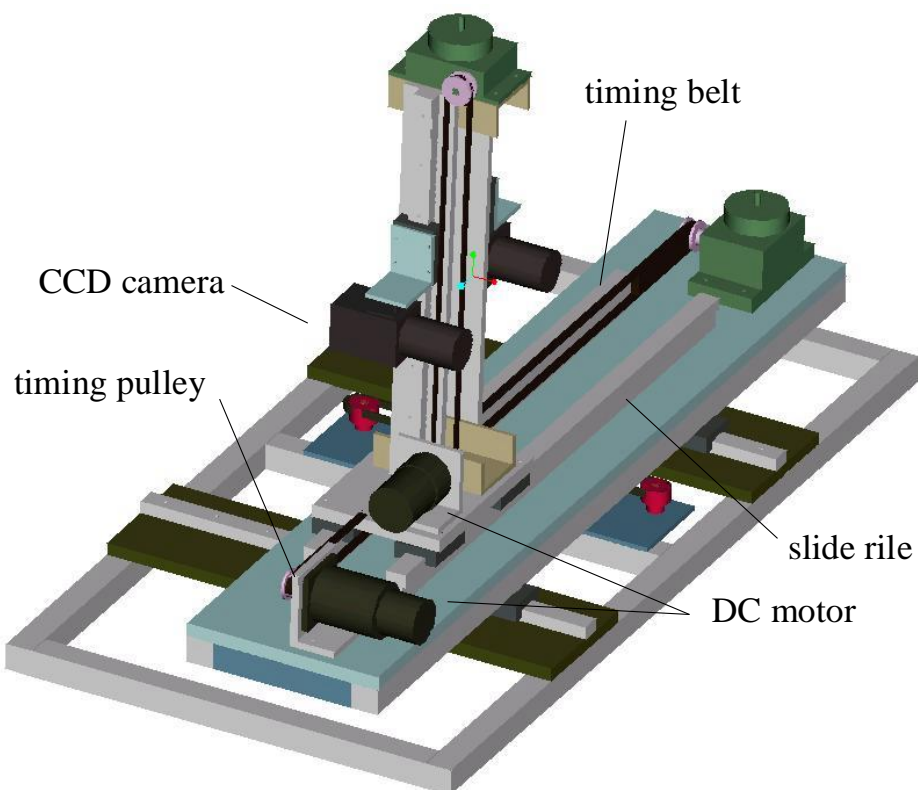


図3-4 カメラ位置決め装置の概要

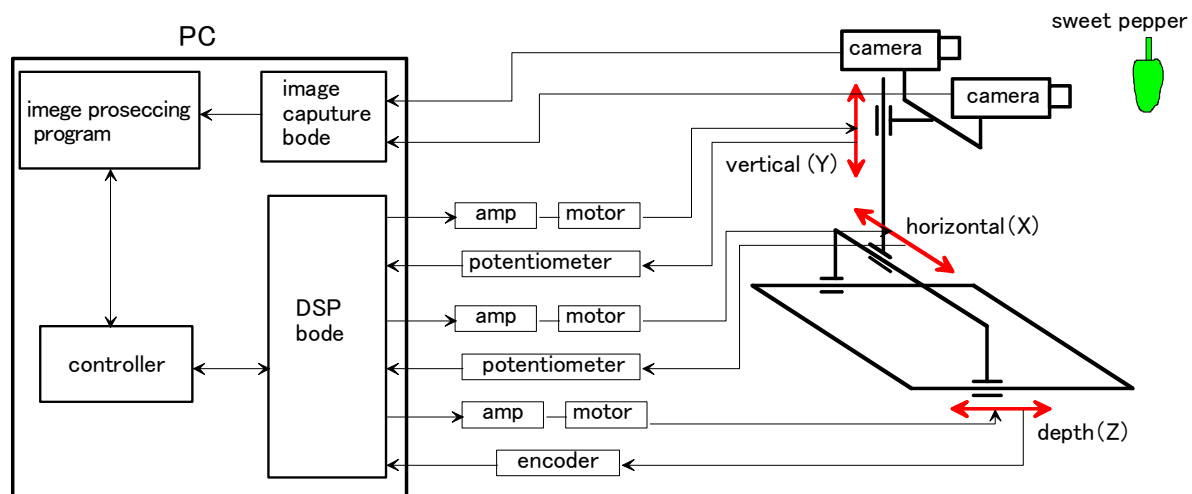


図 3-5 カメラ位置決めシステムの構成

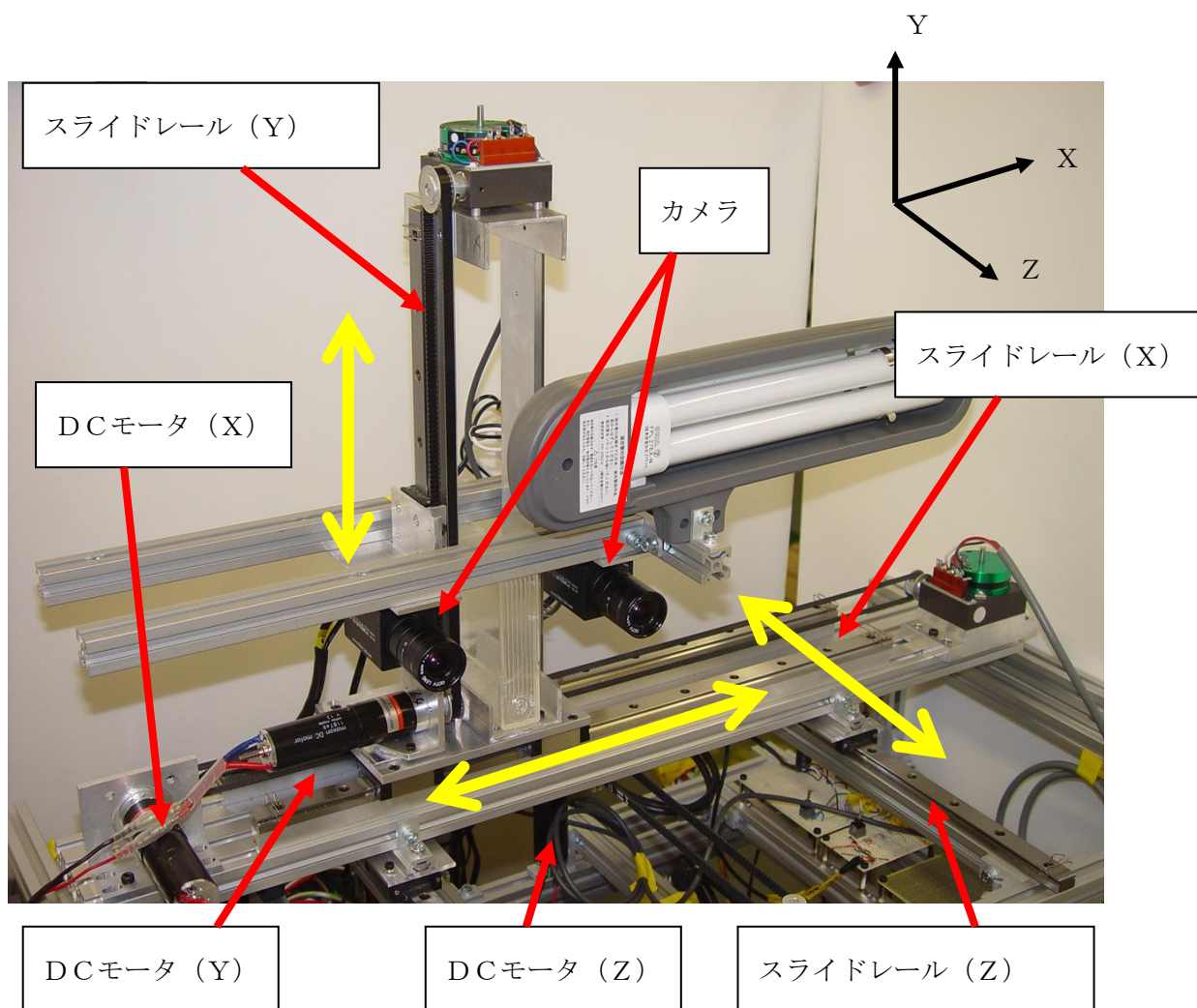


図 3-6 カメラ位置決め装置の外観

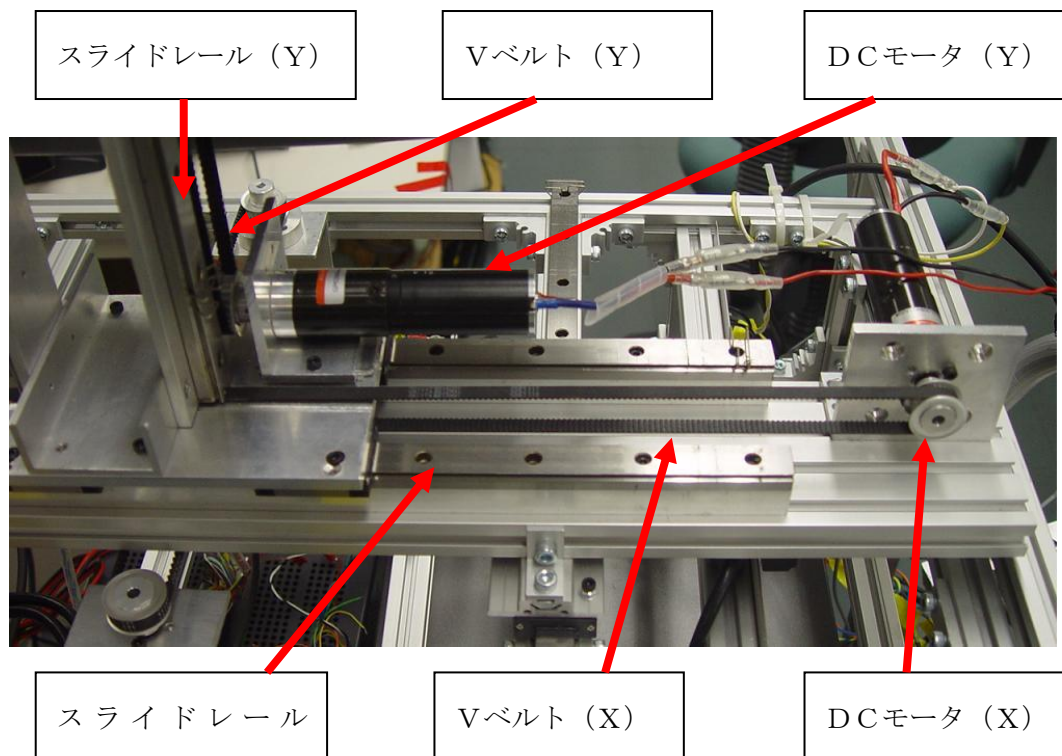


図 3 - 5 X Y方向カメラ位置決め機構

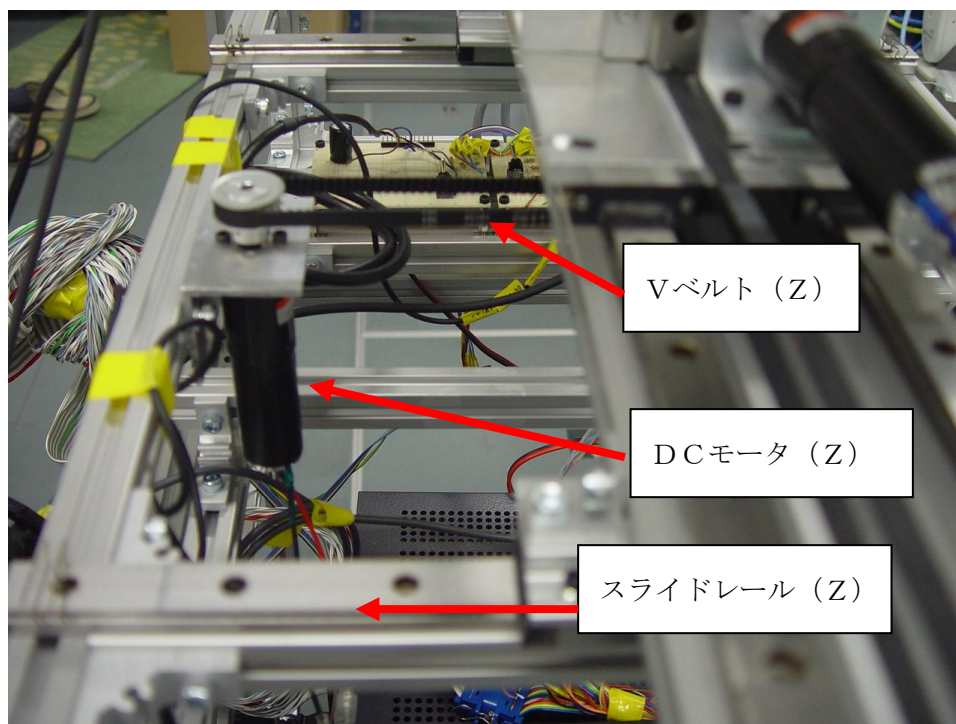


図 3 - 6 Z方向カメラ位置決め機構

3-4 本章のまとめ

ピーマン追従のためのビジュアルフィードバック制御システムを検討し，カメラ位置決め装置を製作し，画像処理結果をリアルタイムでフィードバック制御回路に取り込み，カメラをピーマンに追従させるシステムを構築した．これにより，認識したピーマンの摘み取り動作が可能になり，さらに，ピーマンの大きさ判定にも利用できると考えられる．

第4章 収穫ロボットの構築

4-1 収穫動作の流れ

収穫ロボットの構築にあたり，収穫の流れを，図4-1のように設定した．まず，装置の原点復帰状態から，ピーマンを探してカメラが水平（x）垂直（y）方向にスライドする．左右2つのカメラでピーマンを認識すれば，ピーマンに対し目標位置にカメラをx y方向に位置決めする．位置決めが安定すれば，カメラをピーマン方向（z）にスライドさせ，カットポイントとなる目標の間隔にカメラを位置決めする．このポイントでx y z方向ともに安定すればカット動作を行う．カットが終われば原点復帰をし，以上の動作を繰り返し，収穫作業を行う．

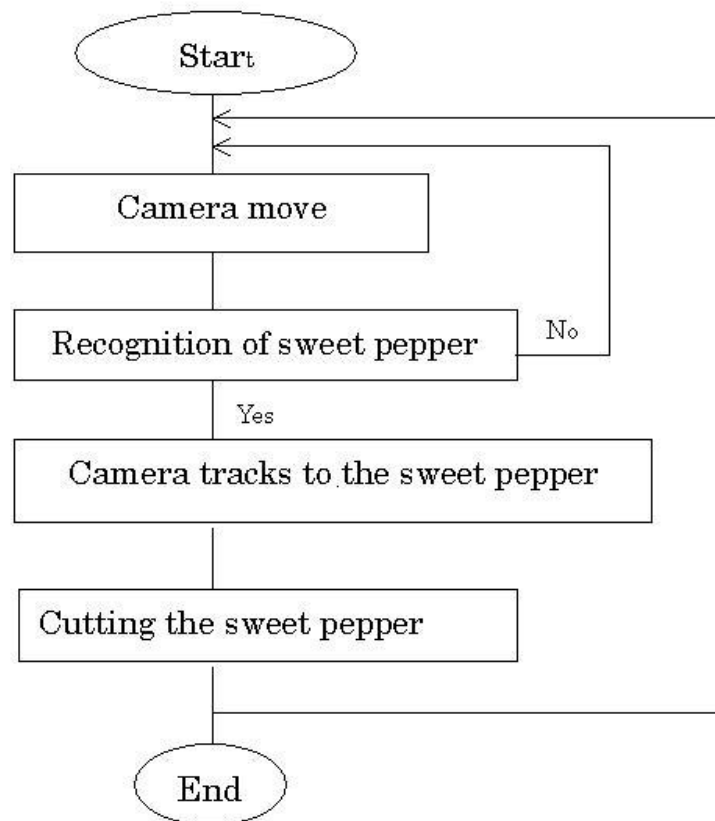


図4-1 収穫の流れ

4-2 制御回路

設定した収穫動作を行うためには、ポテンシオメータ／エンコーダを用いた通常のフィードバック制御とピーマンを捕らえるためのビジュアルフィードバック制御を組み合わせる必要がある。

ピーマン探索時、カッティング時、カッティング終了時はエンコーダまたはポテンシオメータのセンサ値をフィードバックし、通常の方法で装置の動作を制御する。ピーマン追従時は画像フィードバック制御に切り替えてピーマンに追従し、カッティングポジションに位置決めする。この切り替えを含む一連の収穫動作は画像処理のプログラムの中で行う。図4-2にそのブロック線図を示す。

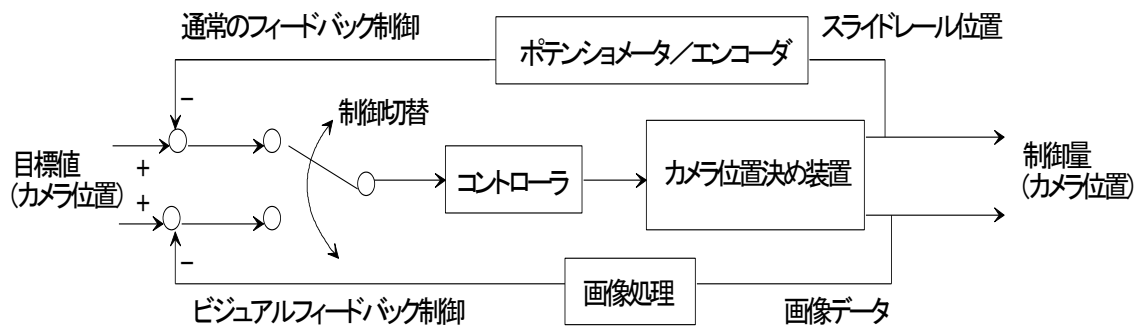


図4-2 カメラ位置決めシステムのブロック線図

4－3 収穫ロボットの試作

収穫ロボットは、ピーマンを認識しカメラが追従するビジュアルフィードバック制御システムと本章で示す摘み取りのためのカッティングマニピュレータで構成した。走行部は、収穫時にコンテナを乗せ、畝間を移動する、手で押すタイプの市販のハウスカーを利用した。図4－3に収穫ロボットのシステム構成図を示す。カメラからのピーマンの画像は画像入力ボードを通して一連の収穫動作を含む画像処理プログラムで画像処理される。画像処理データはコントローラボード内の制御回路に書き込みフィードバック制御値として利用する。また、このプログラムは画像処理以外に制御状態を切り替える指令値も制御回路に書き込む工夫をし、シーケンス動作も行うことができる。

今回製作した収穫ロボットの動作モデルを図4－4に示す。カメラの位置決め範囲は、水平方向（X方向）230mm、垂直（Y方向）に180mm、奥行方向（Z方向）に180mmで、カメラ取り付け部に設置された摘み取りハンド（カッティングマニピュレータ）は、カメラ80mmスライドし、ハンド先端に取りつけてある摘み取りハサミを開閉してカッティングする。図4－5に試作ロボット全体のシステム構成、図4－6に外観図を、図4－7に認識及び摘み取り部を示す。また、表4－1に試作ロボットの主な仕様を示す。

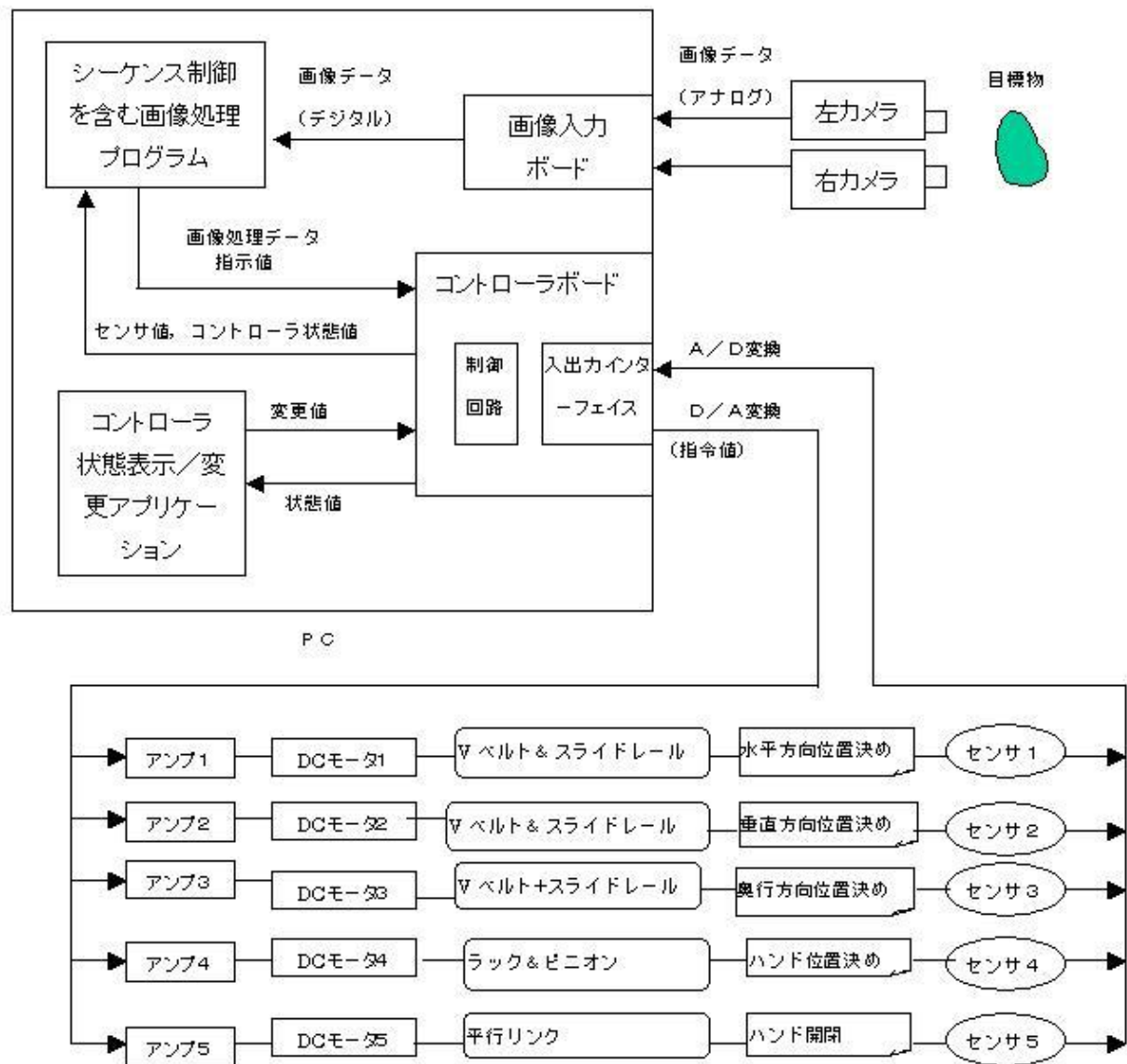


図 4 - 3 収穫ロボットのシステム構成

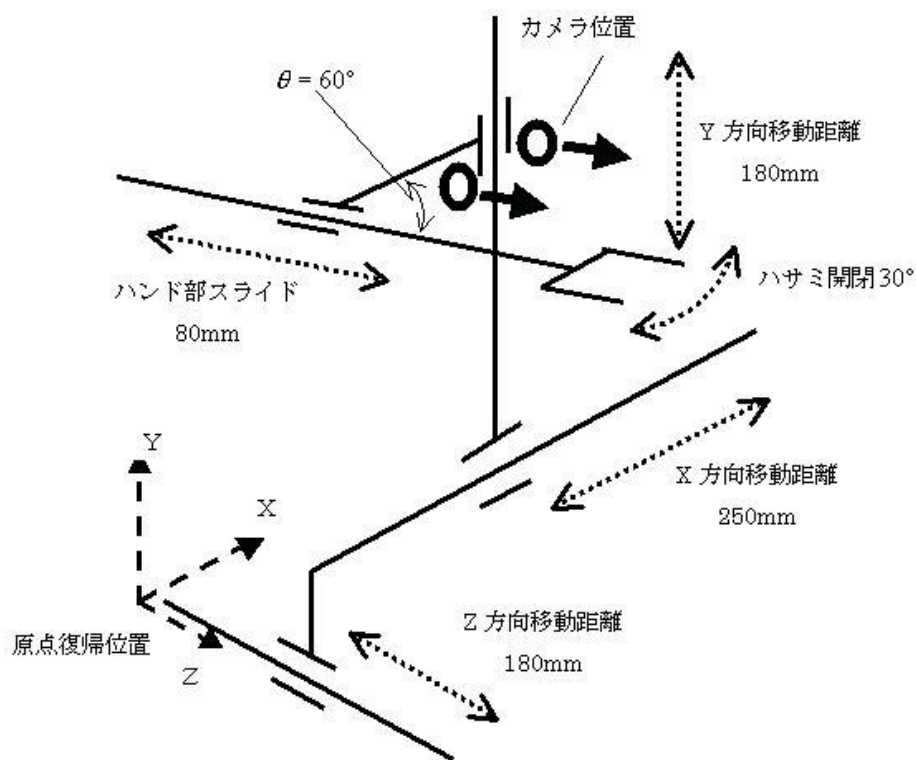


図 4-4 ロボットの動作モデル

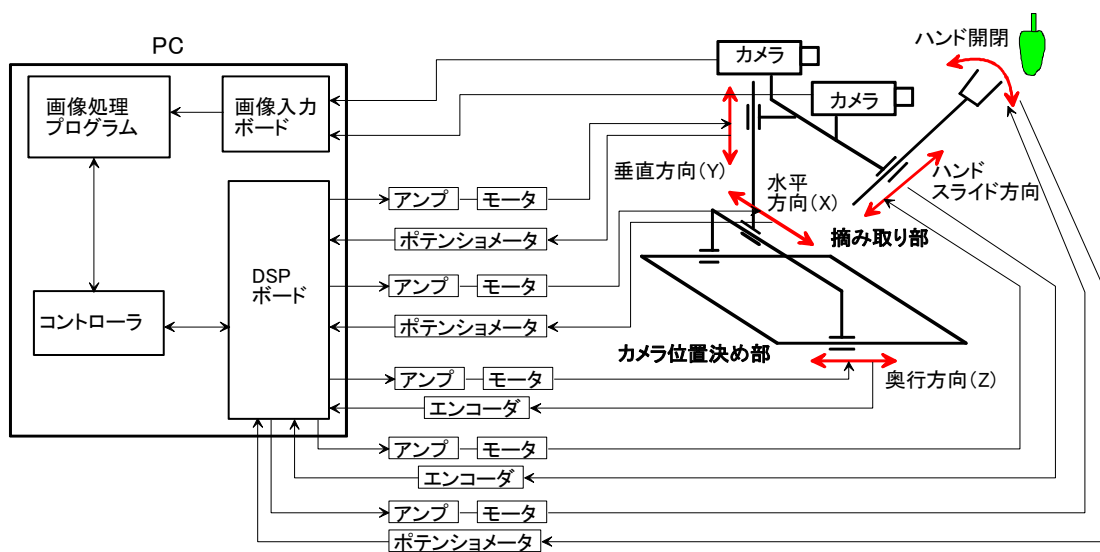


図 4-5 試作ロボット全体のシステム構成

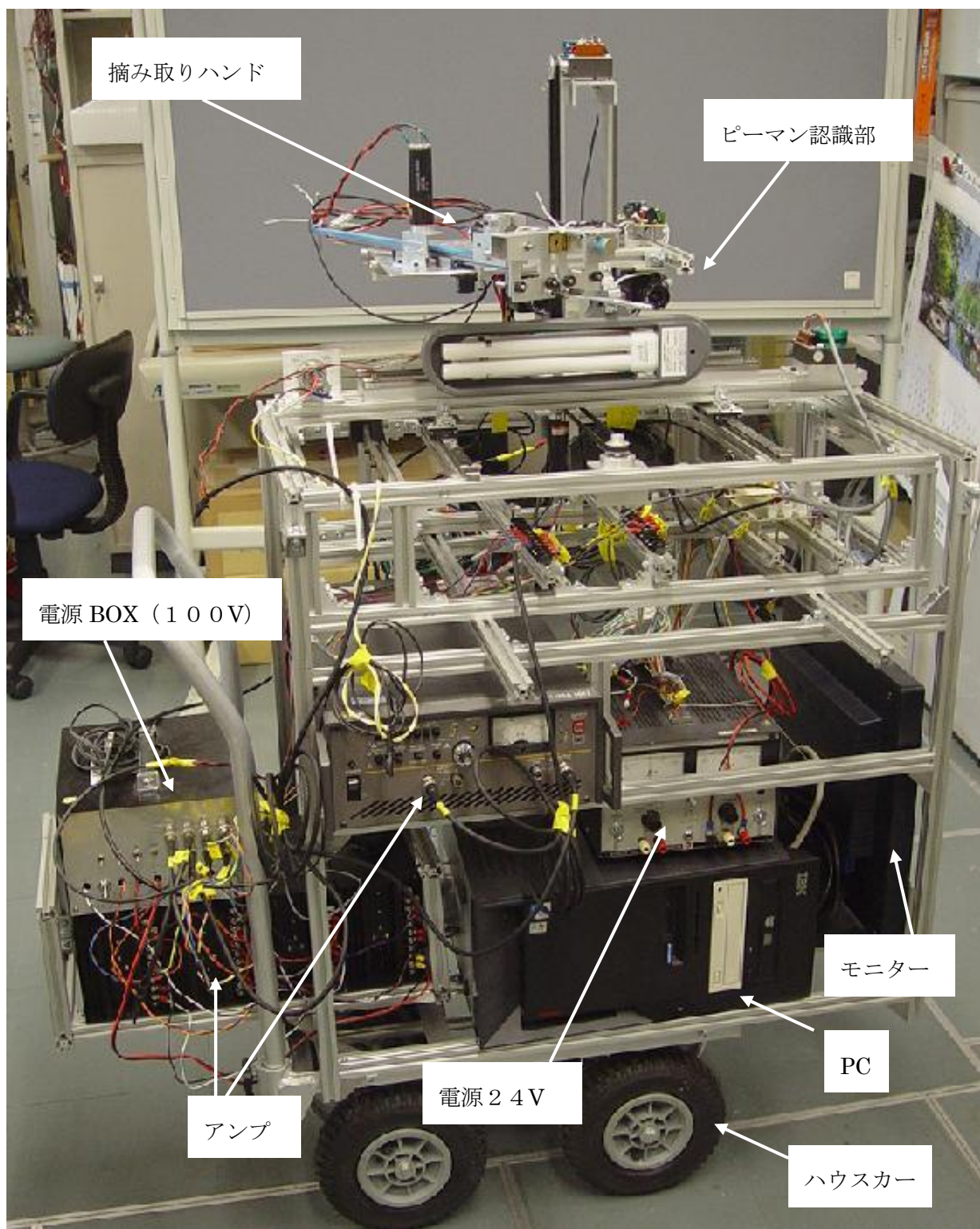


図 4 - 6 試作ロボット全体の外観図

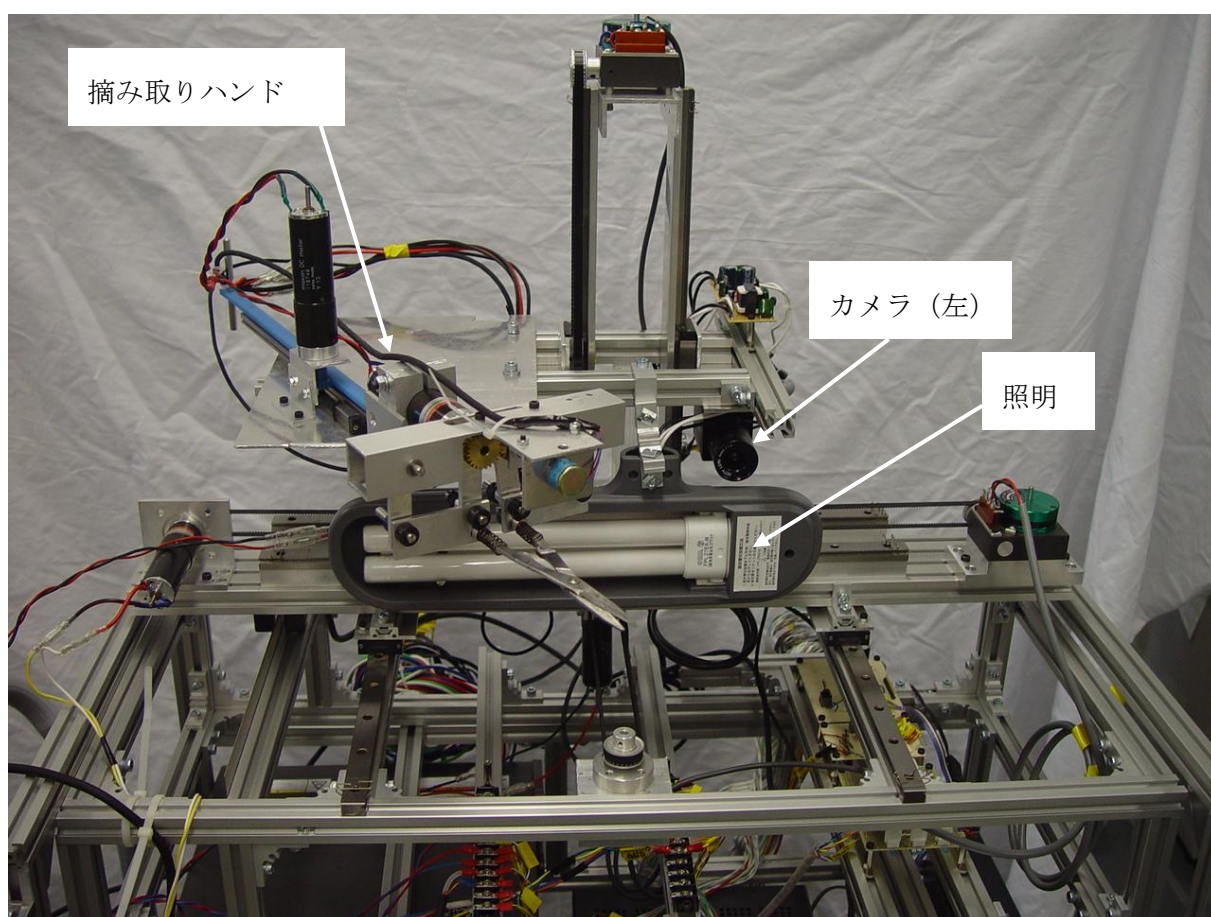


図 4 - 7 認識および摘み取り部

表 4－1．システムの主な仕様

	仕 様 など
カラー CCD カメラ	1/4 インチデュアル CCD 68 万画素 (RF SYSTEM)
画像入力ボード	アナログカラー画像入力ボード Pic-Port (Leutron Vision)
画像処理開発ソフト	HALCON (MVTec)
制御系設計ソフト	MATLAB/Simulink (The MathWorks)
コントローラボード	DS1104 (dSPACE)
DC モータ 1,2,3,5	12V キヤハット付き (1/64) (maxon)
DC モータ 4	12V キヤハット付き (1/32) (maxon)
アンプ 1,2,3,4	バイポーラ電源 BWA25-1 形±25V, ±1A (高砂製作所)
アンプ 5	バイポーラ電源 HSA4012±125V, ±2A (NF)
センサ 1, 2	ウォーム付きポテンシオメータ 有効角 350° 減速比 10:1 (緑測器)
センサ 3	光形リニアエンコーダ DC24V, 分解能 1mm (オムロン)
センサ 4	ワイヤ形リニアエンコーダ DC4.5～13V, 精度±0.05/100mm (イトウエンジニアリング)
センサ 5	無接触形ポテンシオメータ 有効角 90° (緑測器)
コンピュータ	IBM-a50 Pentium 4, 3GHz, 1GB

4-4 摘み取りハンド

ピーマン収穫のための第一段階の装置ではあるが、実際にピーマンの果柄部の切り取りが可能であるかの試験を行うために、果柄部切断装置を試作した。これは、図4-7に示すように、平行リンク機構を用いて、市販の剪定ハサミを開閉して摘み取りができる構造である。平行リンクを用いることにより、図中のリンクAの部分が水平に動く構造となる。この平行リンクにDCモータを取り付け、リンクAが開閉動作できるようにした。このリンクAに剪定ハサミの握りの部分を取り除いて装着し、ハサミを開閉させた。実際のものを図2.25に示す。ハサミとリンクの取り付け部には、隙間が必要なため、そのまま装着するとガタが多く摘み取りができないため、スプリングをつけ、隙間を持ちながらガタをなくすようにした。これによって市販のハサミを用いて摘み取りができるようになり、また、必要な場合には、ハサミを取り外して研磨することができる。更に、摘み取りハンド自体をスライドさせて、目標のカッティングポイントに位置決めできるようにした。

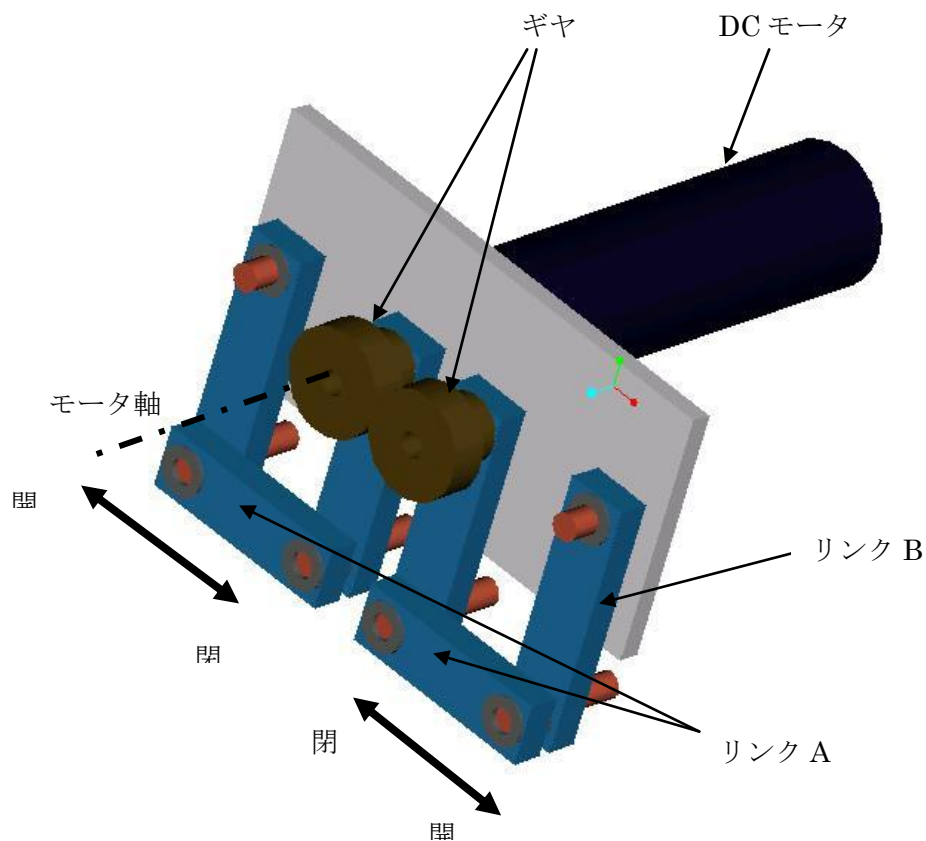
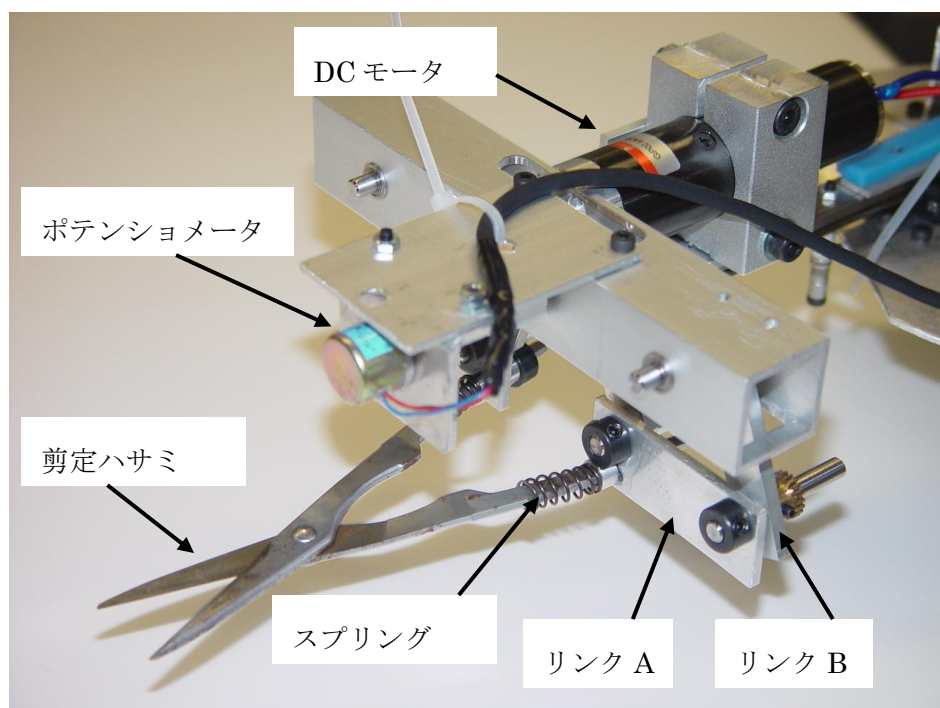
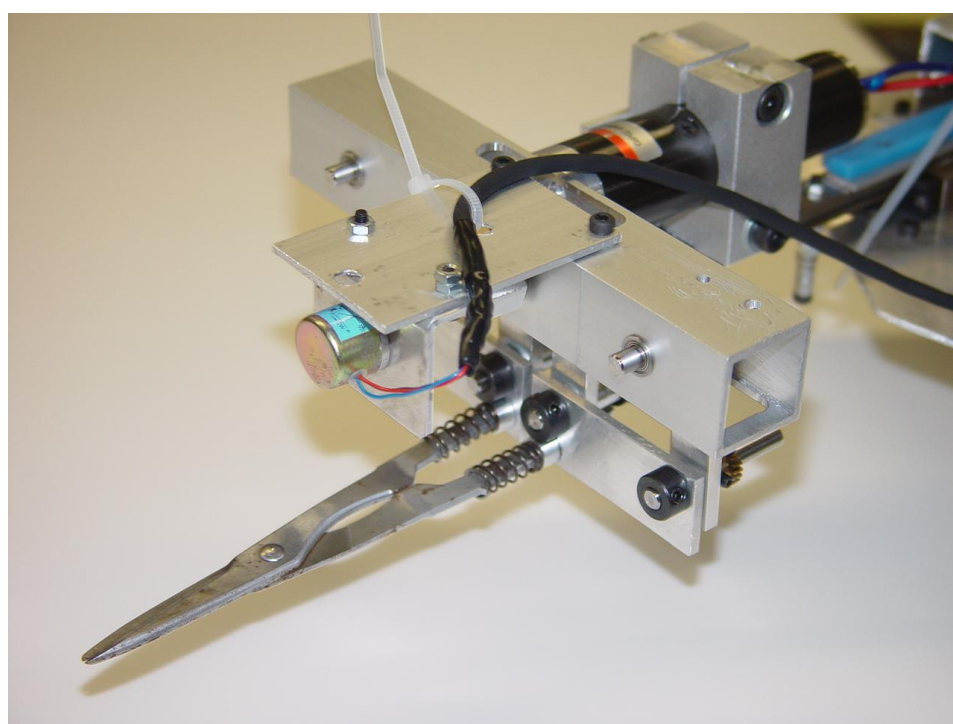


図4-7 切断部の機構の概略



(a) 摘み取りハサミ開



(b) 摘み取りハサミ閉

図 4 - 8 製作した摘み取り部の写真

4－5 第4章のまとめ

収穫ロボットの構築にあたり，収穫動作の流れを設定した．この動作をするには，ビジュアルフィードバック制御と通常のフィードバック制御，また，シーケンス制御を組み合わせる必要があり，これら一連の動作を画像処理プログラム内で行えるよう，システムの構築をした．また，市販の剪定ハサミを利用しピーマンの果柄部を切断する摘み取りハンドを製作し，ピーマンの認識から摘み取りまで一連の動作ができる試作ロボットを構築した．

第5章 認識及び摘み取り実験

5-1 実験方法

今回の実験のフローチャートは、図5-1のように設定した。まず、装置の原点復帰状態から、ピーマンを探してカメラが水平（x）垂直（y）方向にスライドする。左右2つのカメラでピーマンを認識すれば、ピーマンに対し目標位置にカメラをx y方向に位置決める。位置決めが安定すれば、カメラをピーマン方向（z）にスライドさせ、カットインポイントとなる目標の間隔にカメラを位置決めする。このポイントでx y z方向ともに安定すればカットイン動作を行う。カットインが終われば原点復帰をし、スタート信号により動作を繰り返すこととした。実験は、以下の3つについて行った。まず、カメラ画像にピーマン果実だけがあり葉を含まない場合の認識・切断実験、次に果実と葉がカメラ画像にある場合の実験、最後にピーマン果実が複数ある場合の実験である。

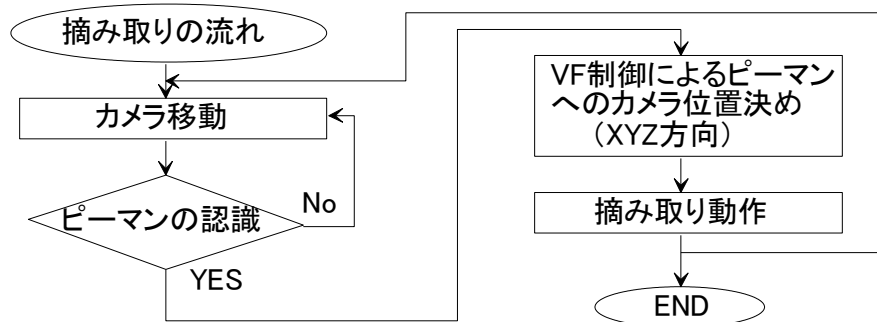


図5-1 認識・切断実のフローチャート

5-2 画像に葉を含まない場合

ロボット前方に果柄部と果実のみの状態のピーマンを設置し、ピーマン認識から摘み取りまでを実験した。葉の影響がない場合問題なく摘み取り作業ができることが確認できた。図5-2に果実1個の場合の様子を示す。本実験では、ピーマンは装置前方にクリップで固定されている。

まず、図5-3(a)のスタート位置から、図5-3(b)に示すようにピーマンを探するために水平垂直方向にカメラが移動する。左右両方のカメラでピーマンを認識すれば、カメラがピーマンに追従する。目標との誤差が安定すると(10画素以内とした)、図5-3(c)のように奥行方向の距離を制御する。水平垂直奥行方向に認識したピーマンに対して位置決め制御を行い、目標の切断地点にピーマンがくるようにする(図5-3(d))。位置決めが安定すれば切断動作に入る(図5-3(e))。切断動作が終わると原点に復帰し1サイクルが終了する(5-3(f))。

一連の動きを行っているときの左右のカメラの映像を図5-4に示す。図5-4(a)のスタート位置では、左カメラではピーマンが写っているが、認識はされていない。また、右カメラではピーマンは見えていない。このようにピーマンが認識されていない場合は、左右両方のカメラでピーマンを認識するまで、水平垂直方向に移動する。両方のカメラでピーマンが認識できると、ビジュアルフィードバック制御回路に切り替え、ピーマンにカメラが追従し、目標位置に位置決めする。図5-4(b)に追従完了の状態を示す。ピーマン中央の赤い丸認識した領域の図心を示す。この段階から奥行方向にも追従を始める。図5-4(c)に奥行方向の追従が完了の様子を示す。図5-4(b)と比較すると画像に写ったピーマンが大きくなっており、奥行方向に追従したことが分かる。また、この地点でビジュアルフィードバック制御からシーケンス制御に切り替え、摘み取り動作に入る。

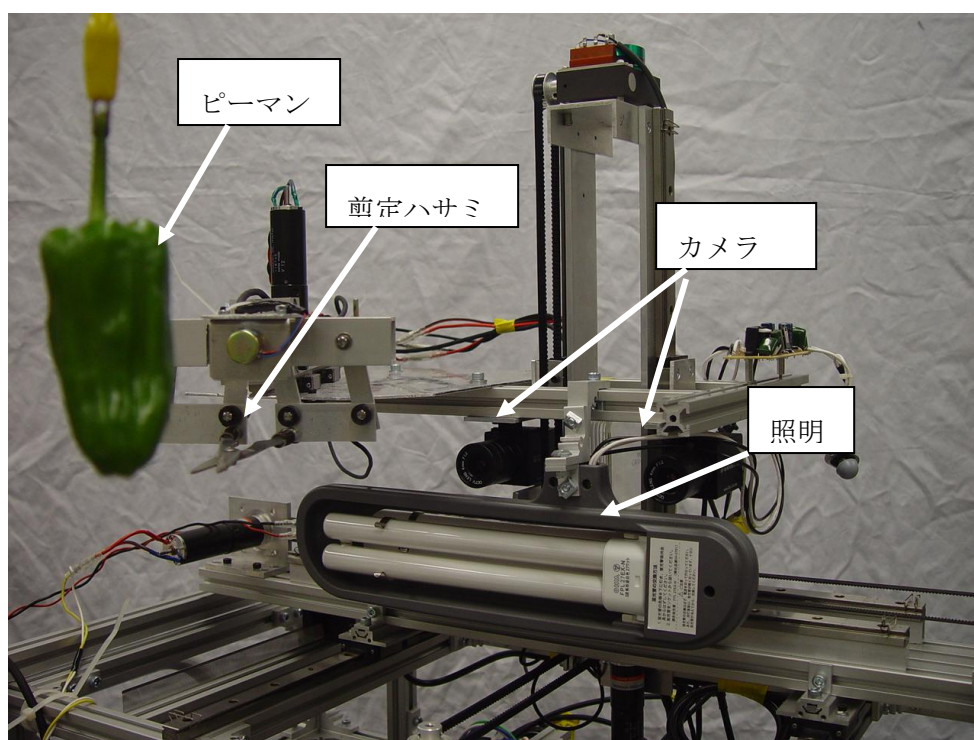
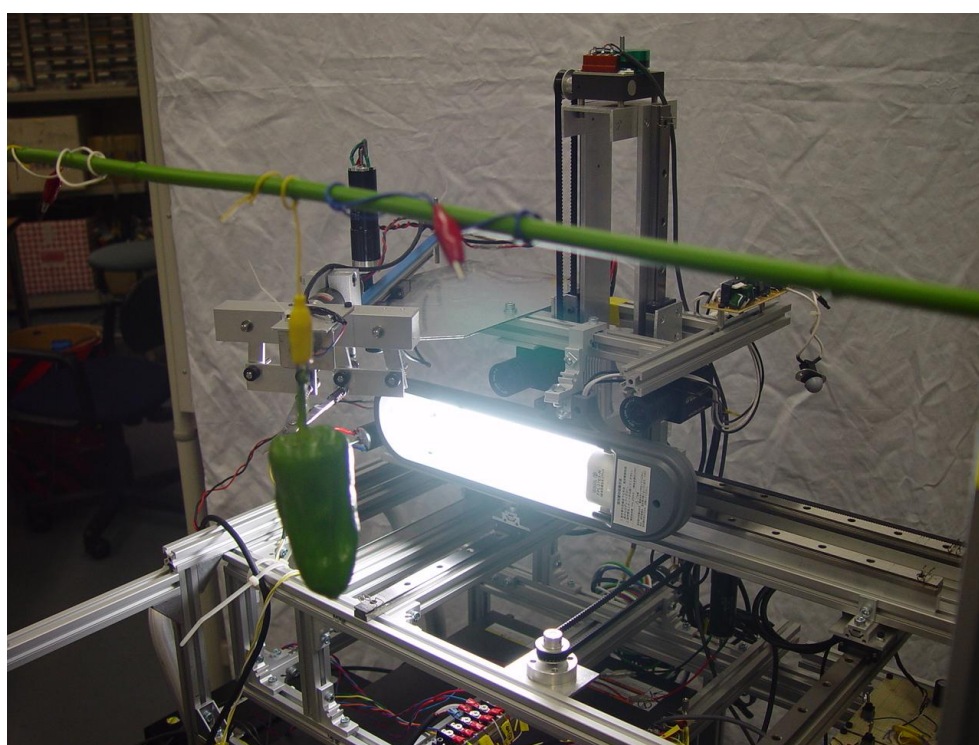
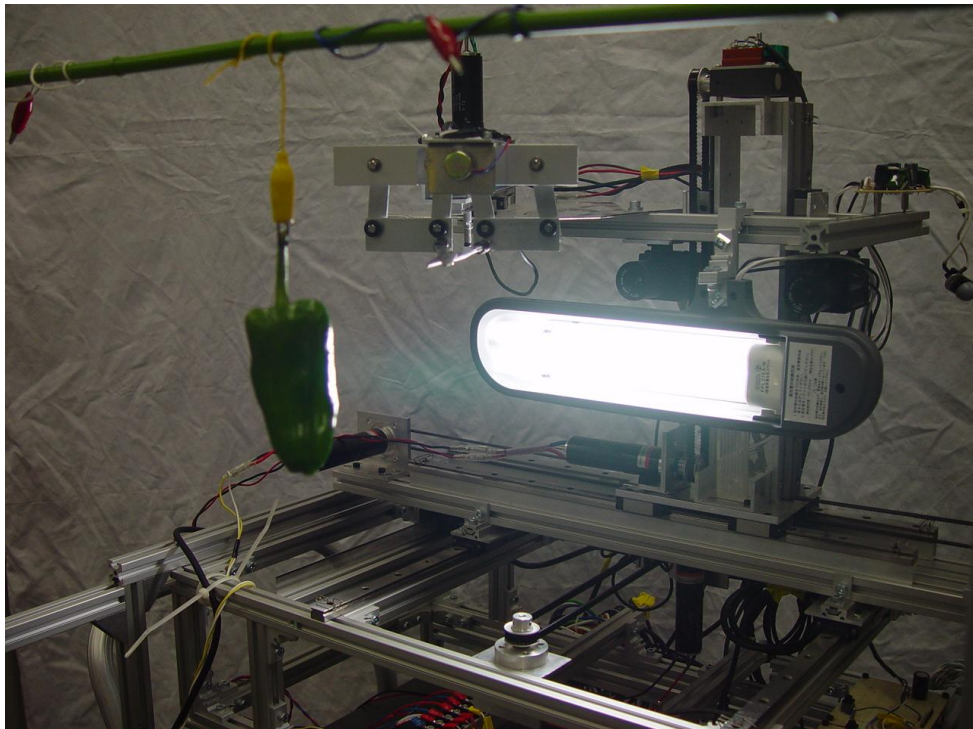


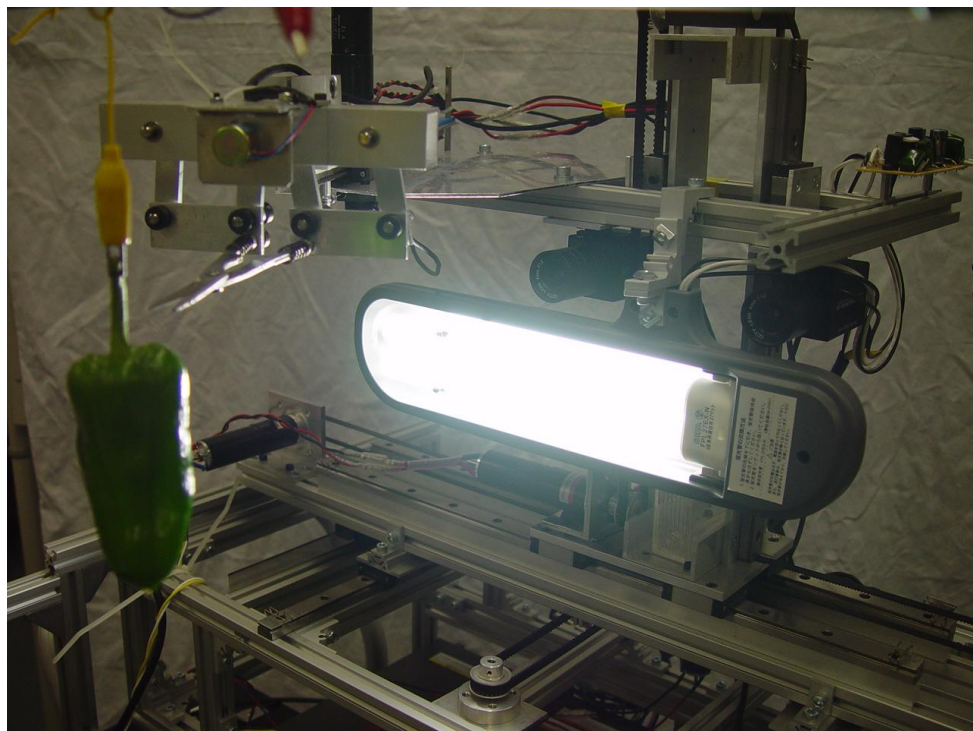
図 5 - 2 ピーマン摘み取り実験（果実 1 つの場合）



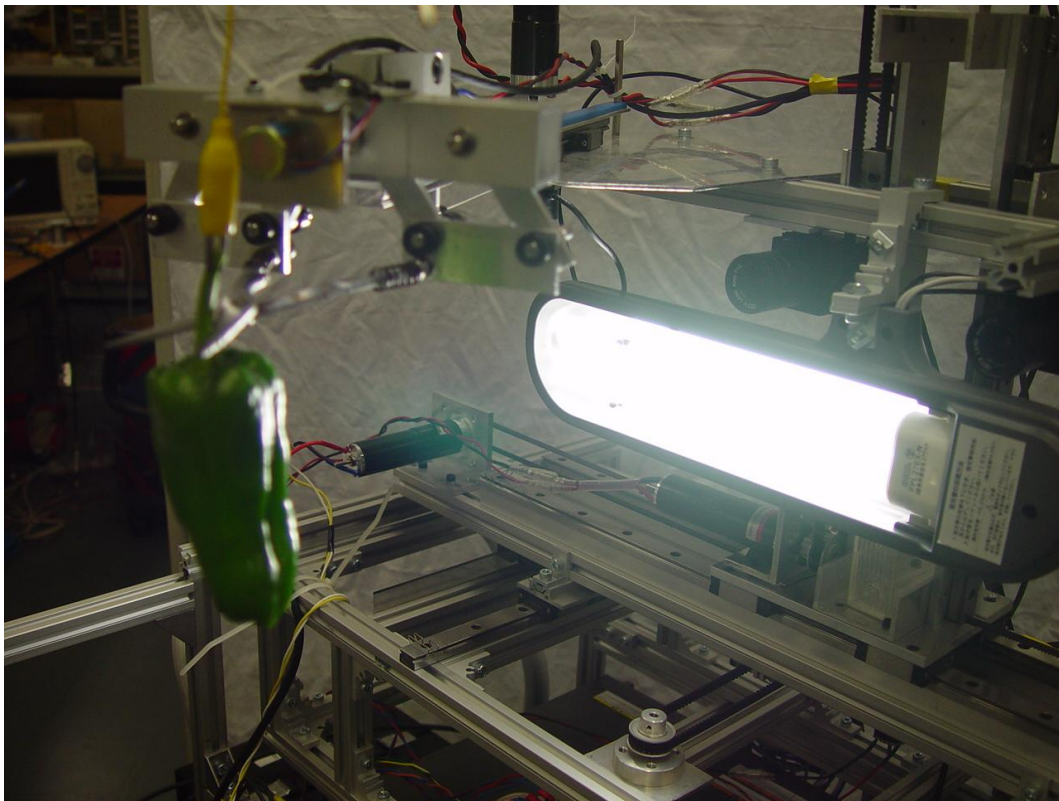
（a）スタート位置



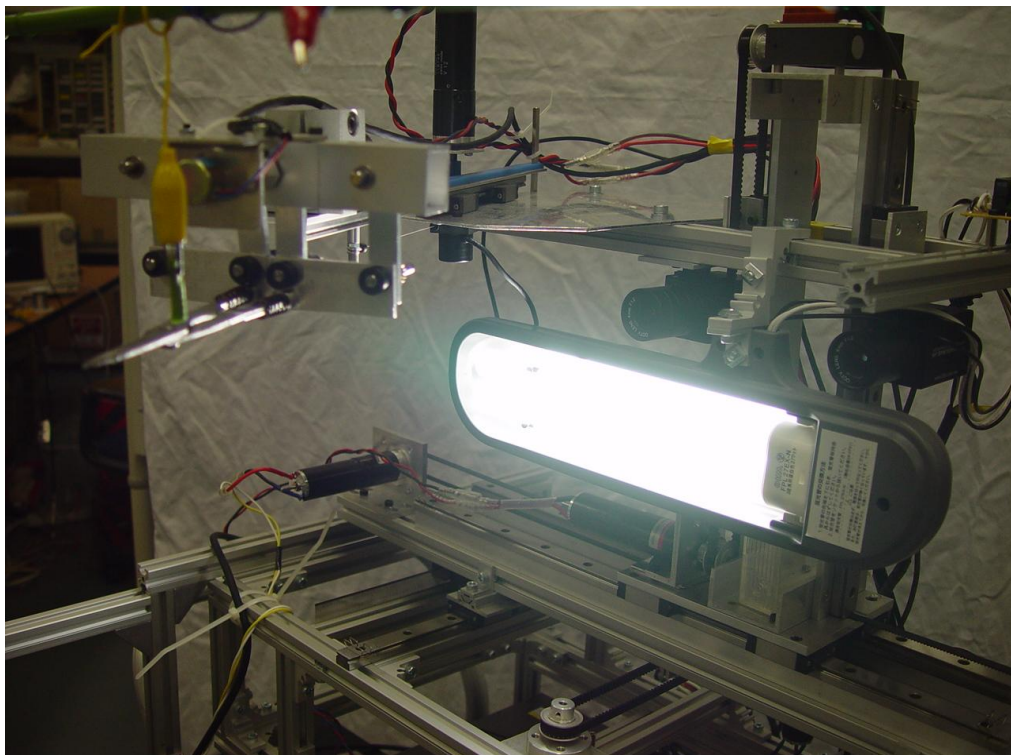
(b) 水平・垂直方向追従完了



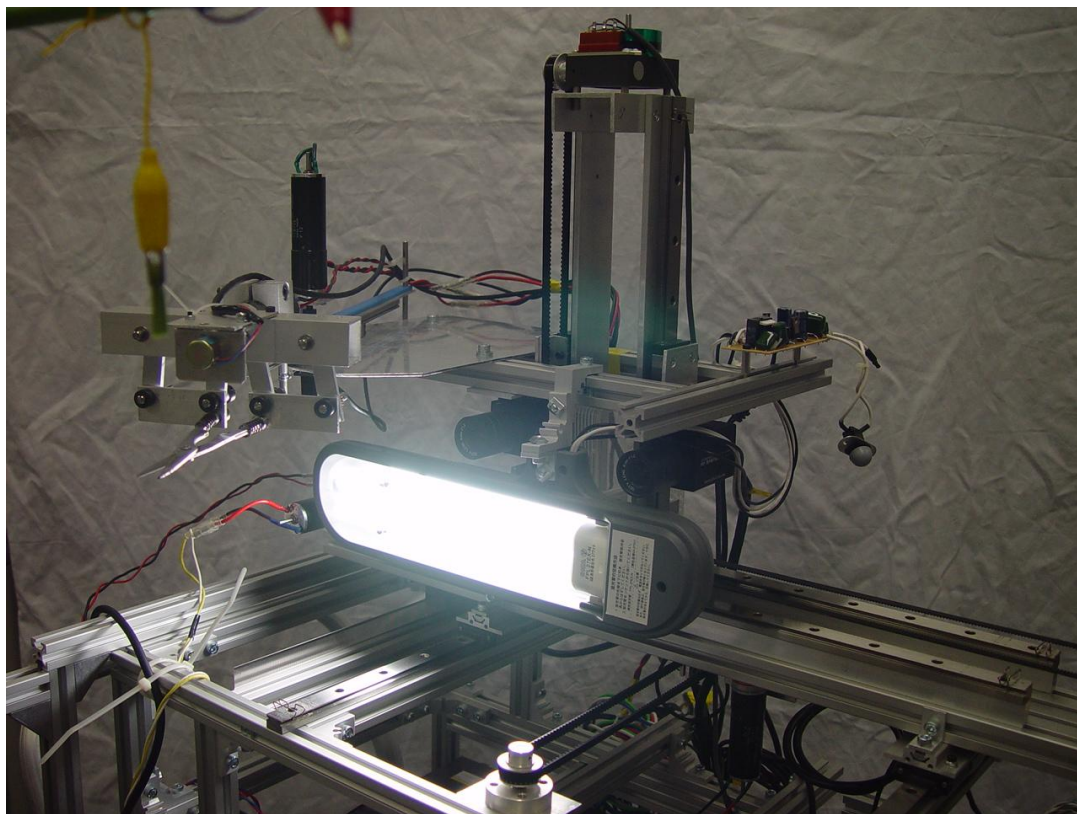
(c) 水平垂直奥行方向追従完了



(d) カッティング動作



(e) カッティング終了



(f) 原点復帰

図 5 - 3 収穫実験の様子

左カメラ



右カメラ



(a) スタート位置 (原点位置)

左カメラ



右カメラ

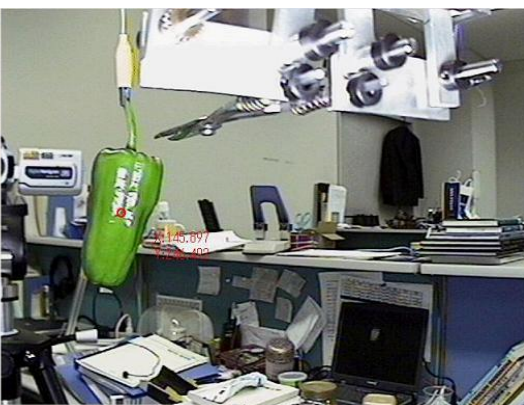


(b) 水平垂直方向カメラ追従完了

左カメラ



右カメラ



(c) 奥行方向カメラ追従完了

図5-4 収穫作業の画像処理の様子

5－3 画像に葉を含む場合

図5－5に示すように，画像に葉を含む場合を実験した．3つの果実はそれぞれ葉の影響が異なるように設定した．その結果，果実A，Bはきちんとピーマンと認識され果柄部を切断できた．果実Cは認識できたものの，果柄部が葉に遮られていたため，果柄部にハサミが入ることができず，切断できなかった．図5－6に果実Bのカッティングの様子を示す．



図 5 - 5 画像に葉を含む収穫実験

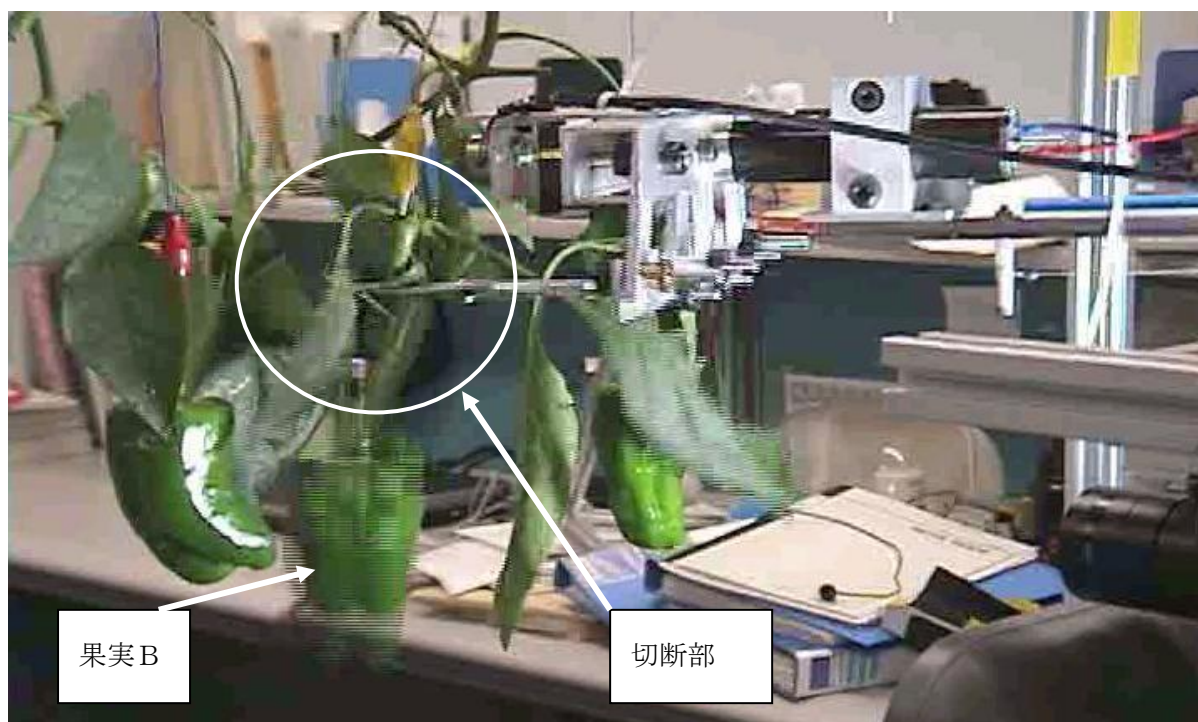


図 5 - 6 果実Bのカッティングの瞬間

次に、ピーマンを付け替えながら図5－7に示すような場合の認識・切断実験を繰り返して、成功率を求めた。結果は同図の下に示してある。これらの結果より、葉が果実の一部を隠すような場合でも認識には大きな問題はないが、切断する果柄部が隠れている場合には切断が不可能であり成功率が下がるという知見が得られた。

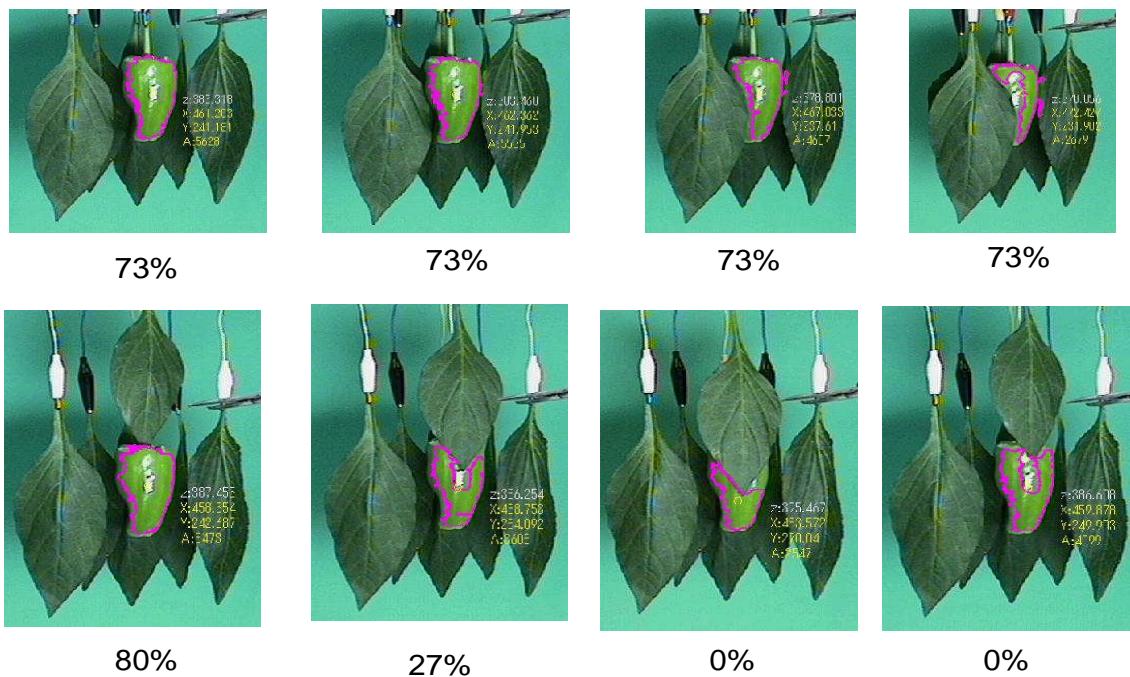


図5－7 ピーマン果実が葉に隠されている場合の認識・切断成功率

5－4 ピーマンの果実が複数ある場合の実験

ピーマンの果実が複数ある場合の実験を行った。実験は、図5－8に示すように、カメラから見てピーマン同士の重なりがない場合、ピーマン同士はひっついてはいるが2つのピーマンと十分認識できる場合、形からは2つのピーマンとの認識が不可能な場合、の3つについて行った。結果を図5－8の下に示す。図に示すようにピーマン同士の重なりがあるとカメラからの距離に誤差が生じてしまい、認識・切断の成功率が下がることがわかった。



図5－8 果実が複数ある場合の認識・切断実験の結果

5-5 第5章のまとめ

本章では、今回製作した収穫ロボットの動作試験をし、その検証を行った。葉を含まない画像の場合は、ピーマンの認識からカッティングまで問題なく動作する。左右2つのカメラで同じ果実を認識し、ステレオカメラによる距離認識もできていることがわかった。

葉を含む画像の場合も、葉と果実の区別をし、ピーマンを認識することができる。しかし果柄部が葉に隠れている場合、ハサミが果柄部に進入することができず切断できないことがわかった。このためハンドの手首機構には葉を迂回してピーマンを切断するための自由度が必要であると考えられる。

また果実が複数あると、左右のカメラで認識するピーマンが同一ではなくなることがあり、カメラからの距離に誤差が生じることがわかった。常に左右のカメラで同じピーマンを認識するための工夫が必要である。

実験では、HSIの空間の値に従って2値化することにより、ピーマンの果実を認識した。このための設定は、実験を行うたびに必要であり、かなり時間と労力が必要である。また、ピーマンは収穫時期によって、果実と葉の色が変化するため一定の設定で収穫を行うことは困難である。自動でピーマンの果実を判別するためのアルゴリズムが必要である。

第6章 認識システムの改善

前節において行った実験により認識システムに改良すべき2つの点が確認された。それは、左右のカメラが同一のピーマンを対象として認識することと、ピーマン果実認識のための色などの自動設定を行うことである。今回は、この対策としてLED光を用いた認識システムを用いることにより対策を行う。

6-1 LED光を用いた認識システム

LEDは、図6-1に示されるように16個のLEDが一つのカメラのレンズの周囲に配置される。このようにすることにより、図6-2に示されるように、このカメラの前が主にLED照明で照らされることになる。また、このLEDはマイコン制御でその光量を調節できるようになっている。

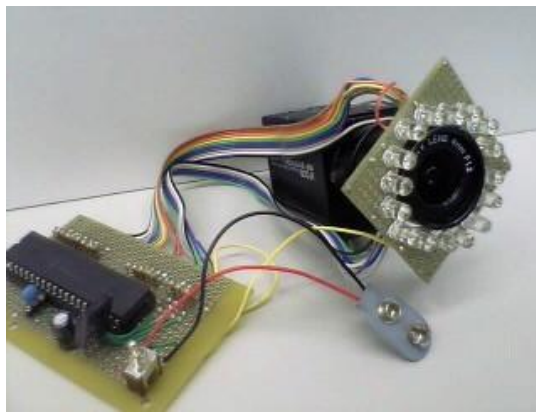


図6-1 LEDを取り付けた左側カメラ

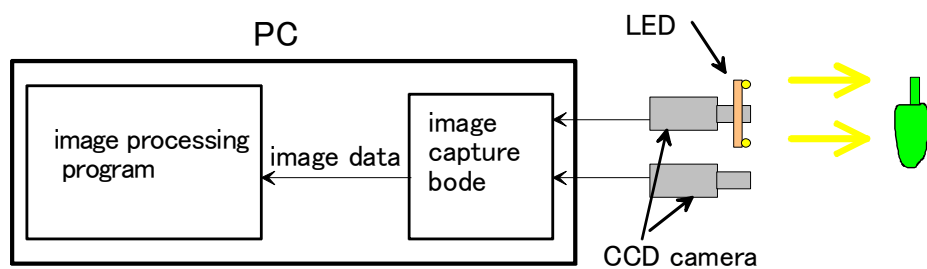


図6-2 画像認識システム

6-2 LED 光を用いた距離認識誤差の改善

ここで改善する距離認識誤差は、左右カメラで違うピーマン果実を認識すること起因する誤差である。この対策として LED を用いた理由は、LED 光の照射角が狭いという点を利用している。ピーマンを認識するための照明に蛍光灯などを使った場合には、カメラの視野全体を照らしてしまい、図 6-3 の左側に示されるように、左右のカメラで認識するピーマンに違いの出る可能性が高い。これに対し、一つのカメラの周囲に取り付けられた LED 光は直進性があるため、図 6-4 の右図で示されるようにそのカメラの前にあるピーマン果実だけををてらすことができる。照明があたっているのはこの果実であるので、他のカメラからピーマン果実を認識した場合も同一の果実を認識すると考えられる。

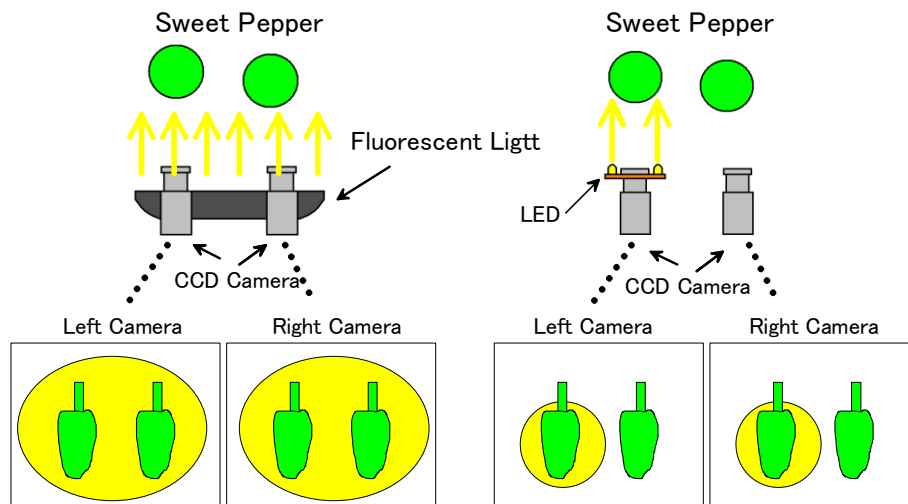


図 6-4 蛍光灯と LED 光の照明によるピーマン認識の違い

この性能を確認するために、カメラを 1 台用いた実験と、2 台用いた実験を行った。1 台用いたものでは複数のピーマンが重なって見える場合の判別性能を蛍光灯照明と比較した。2 台用いたものは左右のカメラが同じピーマンを認識するかどうかを同じく蛍光灯照明と比較して実験した。

6－3 LED 光の直進性による改善の実験

まず、LED 照明装置を取り付けたカメラで、前方に設置したピーマンの認識状況を確認した。実験はピーマンを 2 個用い、隣接させて設置した場合と、1 個を後方に置き前方から重なって見える場合の 2 つのケースで実施した。また、大きさによる認識した果実の絞込みと画像領域の制限は行わず、認識したピーマンをすべてマーキングさせた。実験の様子を図 6－5 に示す。

実験結果を図 6－6 に示す。図 (a)、(b) は認識させた果実の様子の写真、(c)、(d) は蛍光灯によるピーマンの認識の結果、(e)、(f) は LED 照明による認識の結果である。図 (a) のように隣接して果実を設置した場合、既存の蛍光灯の照明では、(c) に示されるように 2 つの果実を認識したが、(e) に示される LED の照明では、正面にある果実のみが認識されることが確認された。また、図 (b) のように重なりが有るように設置した場合、蛍光灯照明では、(d) に示されるように 2 個の果実を 1 つと認識したが、LED では、(f) に示されるように前方の果実のみを認識した。この結果、蛍光灯を用いた既存の照明では広範囲の果実を認識するため、誤認や左右のカメラでの認識する果実の不一致が生じる可能性が高い。一方、LED の場合照明範囲が限定されるため、誤認が少なく、また、左右のカメラで認識する果実が一致する可能性が高いと考える

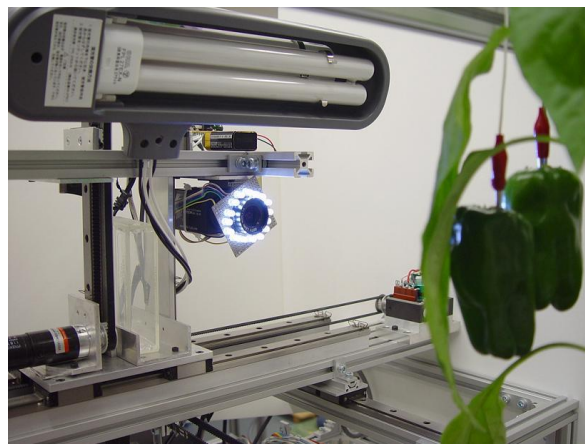


図 6－5 蛍光灯と LED 光の照明によるピーマン認識の違いの実験の様子

隣接

重なり



(a)

(b)

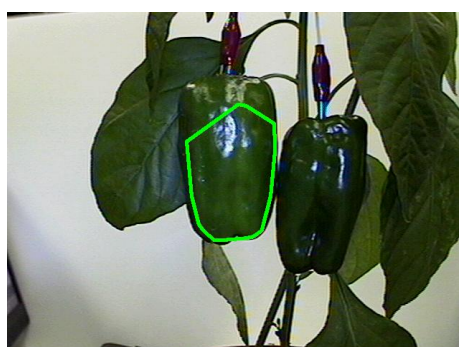
蛍光灯



(c)

(d)

LED



(d)

(e)

図 6 - 6 蛍光灯と LED 光の照明によるピーマン認識の違いの実験

次に、左右2台のカメラによるステレオビジョンでの認識状況を確認した。LED照明装置は左カメラのみ取り付け、カメラ位置を移動させながら、認識状況を確認した。また、画像処理領域は制限せず、ピーマンと認識されたものの中で最も大きいものを選択しマーキングさせた。実験の様子を図6-7に示す。

結果を図6-8,6-9に示す。図6-8は照明に蛍光灯を用いた場合、図6-9はLEDを用いた場合である。位置1と位置2はカメラが移動したときのある2つの点であり、二つの図のカメラ位置はそれぞれ等しい。すべての図で紫色の線が認識したピーマンを示している。図からわかるように蛍光灯を用いた場合、位置1、位置2で左右のカメラで認識しているピーマンが異なっており、ピーマンの距離が測定できない状況になっている。ただし、この状況はカメラ画像を取得するたびに異なっており、同一のピーマンを認識することもある。これに対し、LEDを用いた場合では、位置1、位置2で光源（カメラ）の動きに従って認識するピーマンが異なっているが、左右のカメラでは同じピーマンを認識していることがわかる。この結果、LED照明を用いることにより、ピーマンの距離の精度を上げられることが確認された。

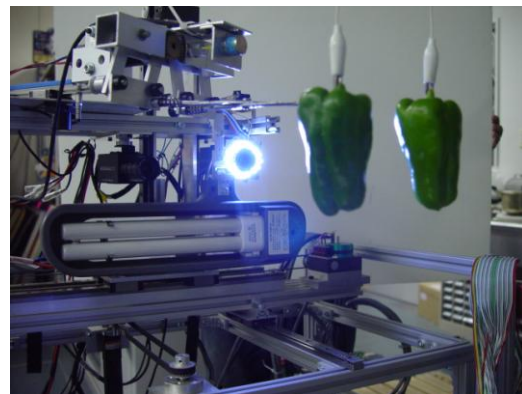


図6-7 カメラを移動させた場合のピーマン認識実験

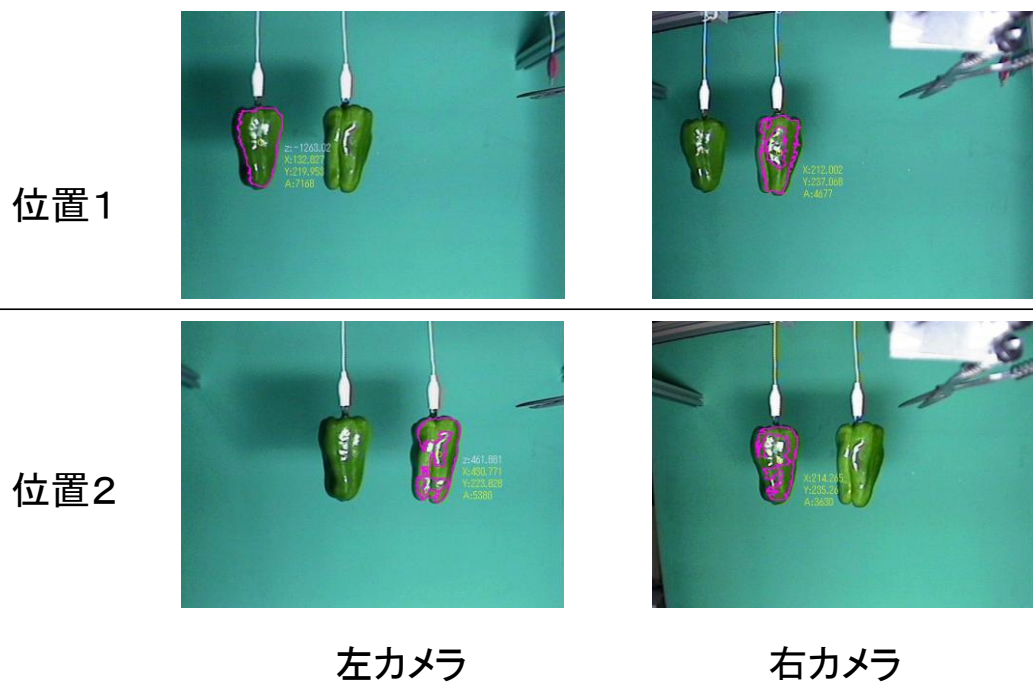


図 6 - 8 蛍光灯照明を用いた左右カメラのピーマンの認識結果

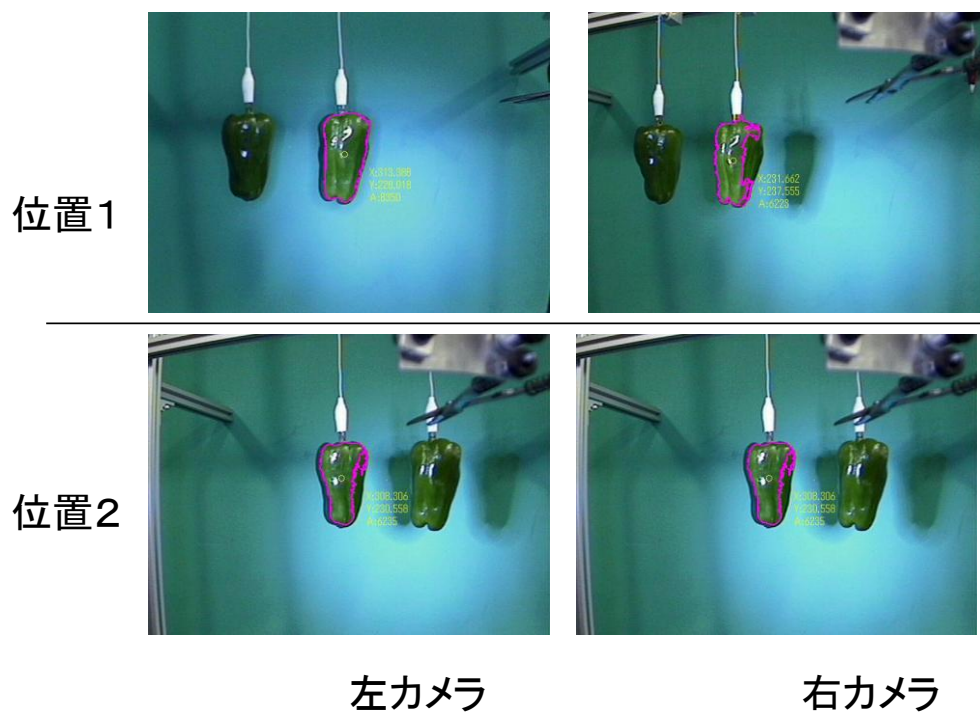


図 6 - 9 LED 照明を用いた左右カメラのピーマンの認識結果

6－4 果実の反射を用いた果実認識性能の向上

人がピーマンの果実と葉を見分けるとき，一番わかりやすいものが，果実には光沢があり，葉には光沢がないことではないかと思われる．この考えに基づいて，光沢があるものがあればそれはピーマンの果実の候補として考える手法を提案し，実験を行った．

LED を用いたピーマン果実と葉の代表的な画像を図 6－10 に示す．図に示すように果実の中には特徴的な光の反射部が確認できる．葉の部分と果実の反射のない部分，および反射部に関して HSI 空間上でのヒストグラムで表した結果を図 6－11 に示す．図からわかるように反射部は彩度(Saturation)が低く，輝度(Intensity)が高い部分でヒストグラムにおいても非常に認識が容易である．

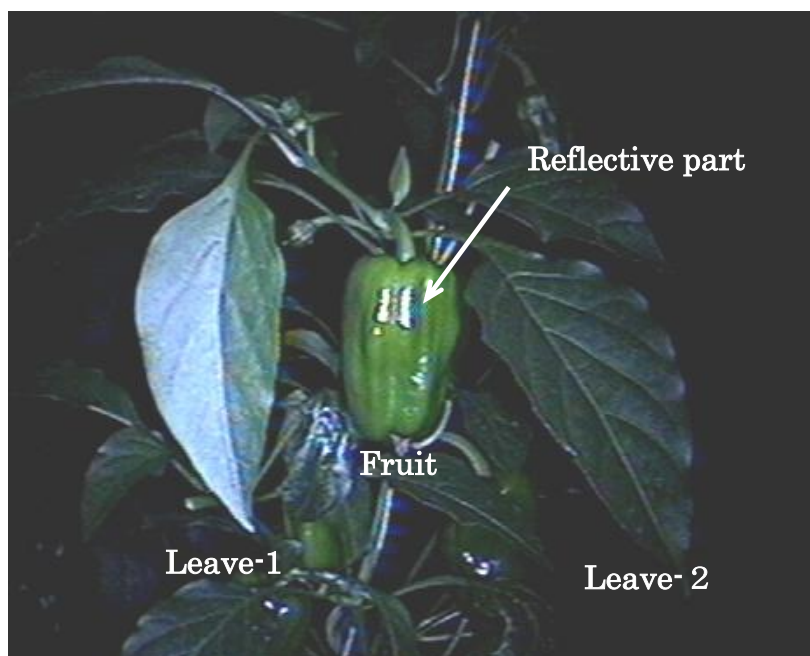


図 6－10 LED 照明を用いたカメラ画像の一例

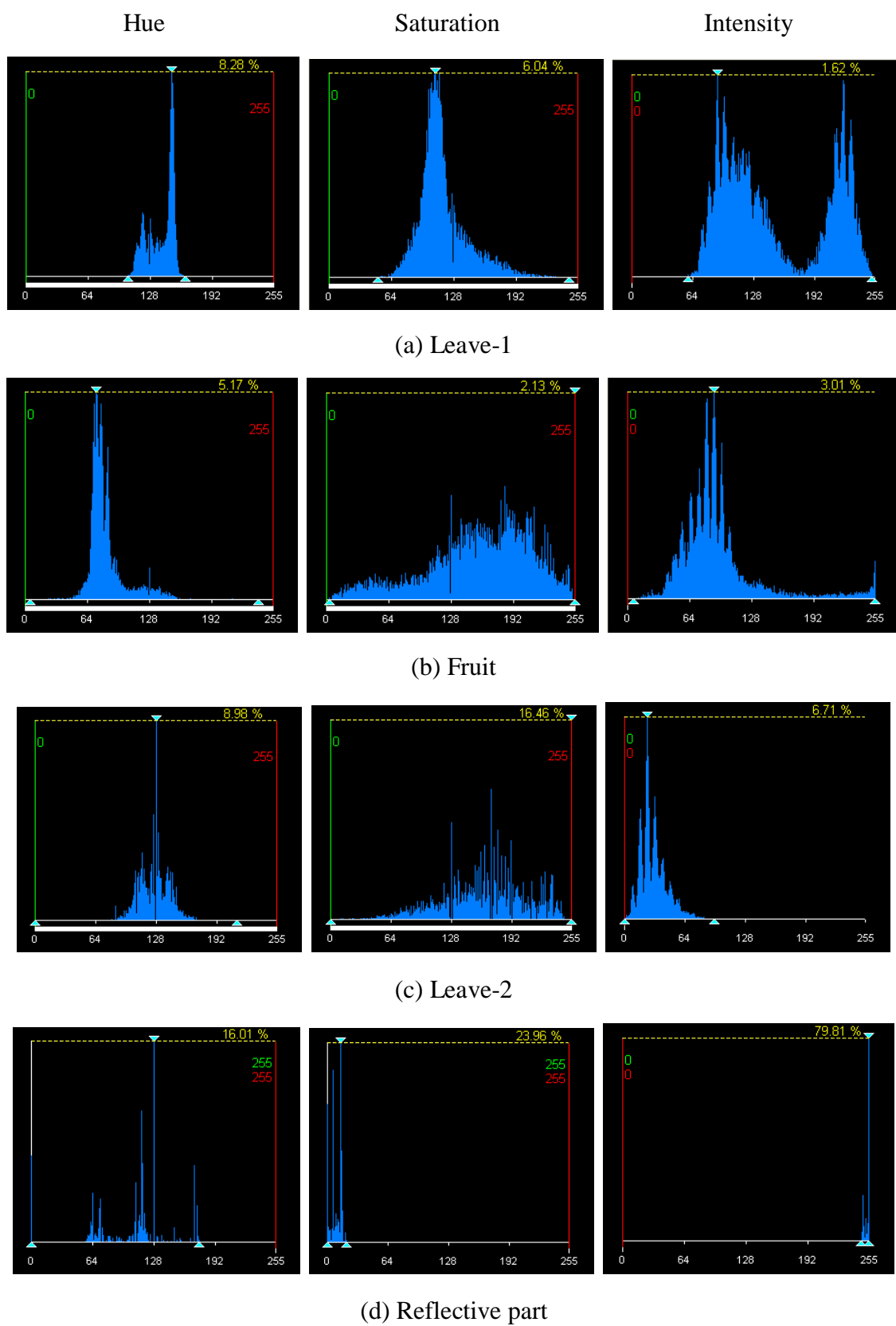


図 6 - 1 1 葉, 果実, 果実の反射部の HSI 空間ヒストグラム

また、この方法を用いることにより自動でピーマンの果実を認識できると考えられる。具体的には、光沢がある場所をピーマンの果実と考えその周辺の色を反射のないピーマンの果実の部分であると仮定する。予め反射部を中心として検査領域を狭めた上で、この部分の色を参照してピーマンの果実部を検出するものである。この方法により反射部周辺の色がピーマン果実の色となるため、実験のたびの二値化の閾値の設定を行わなくてよいことになる。

この手法のアルゴリズムを図 6-12, アルゴリズム内での処理された画像の様子を図 6-13 に示す。アルゴリズムは通常の HSI 空間による二値化処理の前に反射部を見つけ、その周囲の色を参照するようになっている。それに応じて処理された画像によりピーマンがどのように認識されているかが示されている。

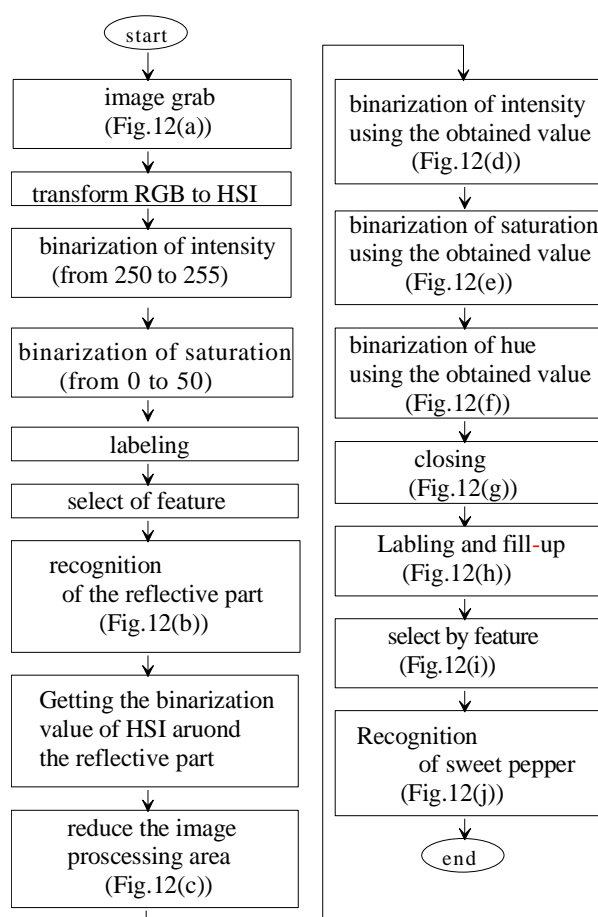
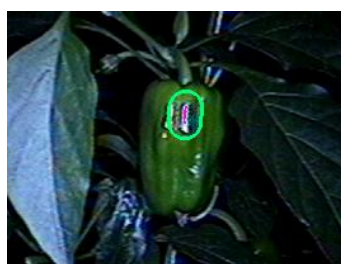


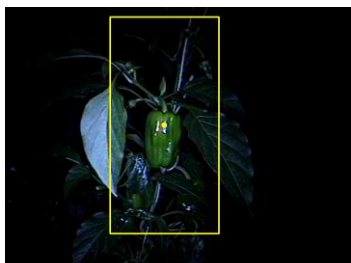
図 6-12 反射を用いたピーマン認識のアルゴリズム



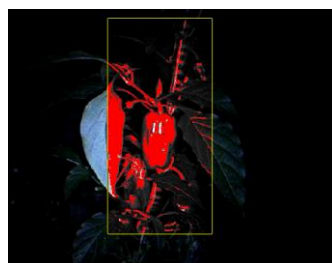
(a) Image grab



(b) Reflective part



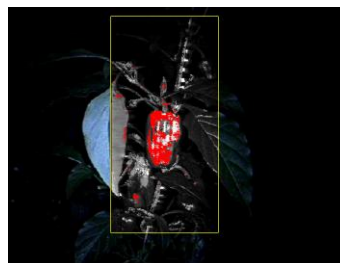
(c) Processing area



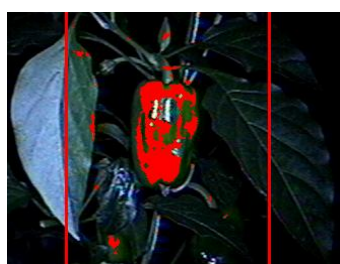
(d) Binarization of intensity



(e) Binarization of saturation



(f) Binarization of hue



(g) Closing



(h) Labeling and Fill-up



(i) Selection by feature



(j) Recognition of sweet pepper

図 6 - 1 3 反射を用いたピーマン認識の画像処理ごとの画像の様子

6－5 LEDの反射を用いたピーマン認識実験

反射を用いたピーマンの果実認識の有効性を確認するために、ほ場での実験を行った。実験は、図6－14に示すように夜行った。今回の実験は、ほ場で任意に選んだピーマンをカメラ中央で捉えられるように設定しておき、その上で認識実験を行った。実験では24枚の画像における認識実験を行った。ピーマン果実と認識された部分にピーマンの果実だけが含まれている場合を、実験成功とし、それ以外を失敗とした。



図6－14 ほ場内での認識実験の様子

結果を図6－15に示す。24枚の画像のうち19枚の画像においてピーマンの認識に成功した。このうちの7枚の画像を図6－15(a)～(g)に示す。認識に失敗した5枚の画像は、そのすべてを図6－15(h)～(l)に示す。

認識に失敗した5枚の画像に関して、まず(h)では実際は一つのピーマンの認識であるが、2つのピーマンと認識されている。このピーマンにはおおきなへこみがありその部分が暗くなっている。暗い部分をピーマンと認識しておらず結果として左右2つのピーマンとして認識されている。画像(i)の場合は、まずピーマンがいびつな形をしており、その上に枝がピーマンの前にある。このために反射部の周囲の色の認識に多くの誤差が含まれたためピーマンの果実の形の認識に失敗している。画像(j)では反射部の横に葉があるためこの葉

の色をピーマン果実の色として参照したものと考えられる．画像(k)では反射部の領域がはっきりしていないため，周囲の色の認識に失敗しており，これがピーマンの果実を認識できない原因となっている．最後の画像(l)では，ピーマンより葉の方がずっとカメラ側に近いため，反射部が葉の上になっている．このためピーマンの果実が認識出てない状況となっている．

このように，いまだピーマンの認識に失敗することはあるが，成功率は79.2%であり，しかも設定は自動であることを考えると満足できる結果であると考えることができる．今後より認識率をあげるために，ハンドに取り付けたカメラを用いて，カメラを移動させながら認識を行うことにより精度を高めていくことを考えている．

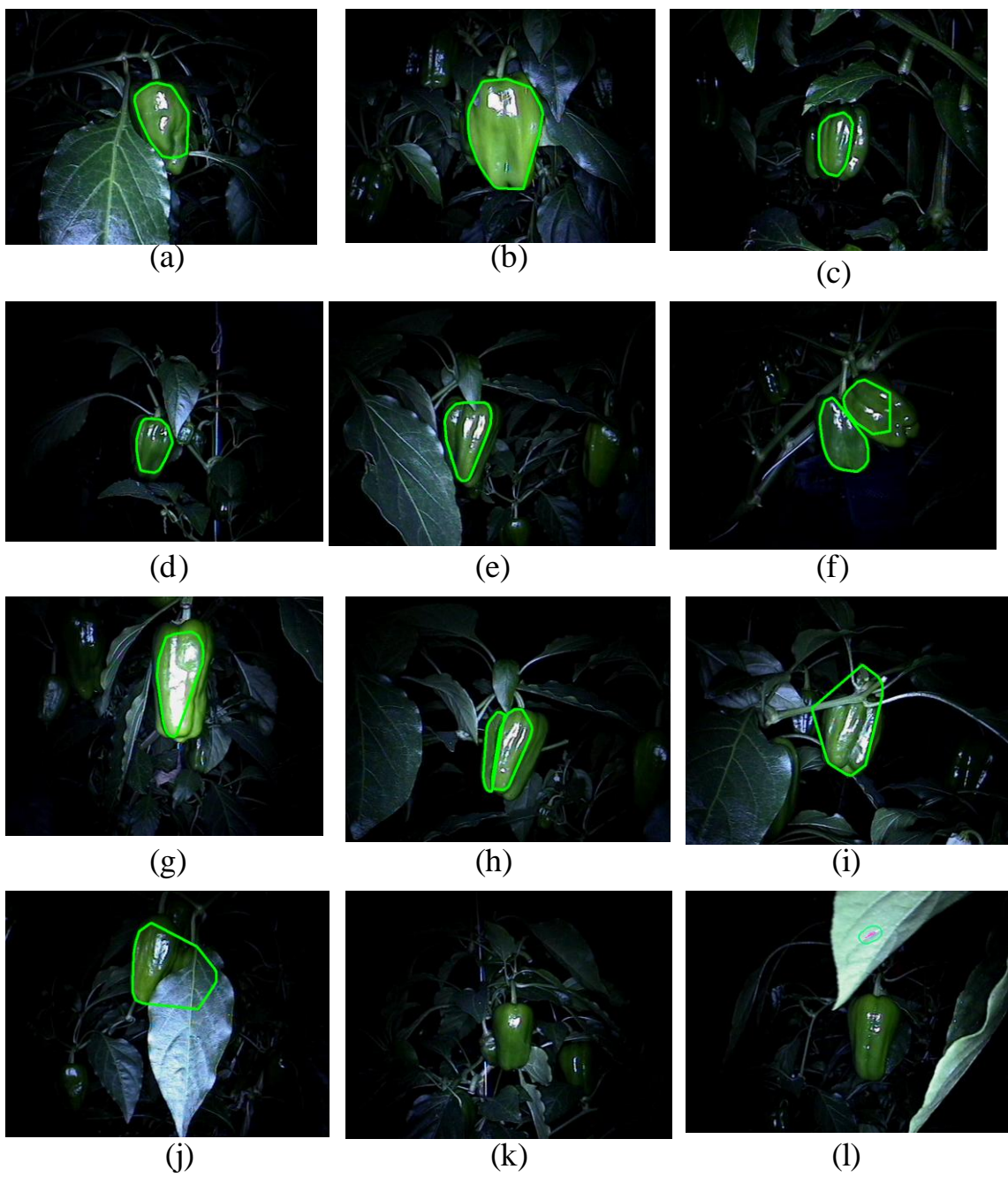


図 6 - 1 5 反射を用いたピーマンの認識結果

6-6 第6章のまとめ

画像処理を用いたピーマン果実の認識について、LEDを用いた新しい方法などを提案しながらその有効性および実用性について実験を行った。特にLEDの反射を用いて果実を認識する方法は実用を考えると非常に有用な方法であると考えられる。しかし、種々の条件で認識が困難な場合があり、この後も検討が必要と考えられる。以下本章のまとめである。

- (1) 同色の緑色である葉と果実から、照明を用いた画像処理によって果実のみを識別できる画像処理プログラムを作成した。また、葉に隠れているピーマンの認識についても検討が必要である。
- (2) カメラの画像処理によって得たピーマンのそれぞれの図心からカメラを認識ピーマンとの距離を把握し、その図心と距離をリアルタイムでフィードバックしてカメラを目標のピーマンに3次元的に追従させるビジュアルフィードバックシステムを構築した。この位置決めによって、果柄部の切断が可能であった。しかし、図心为目标に位置決めし、果柄部はそのおよその位置関係で切断しており、ピーマンの形状によって、切断位置が異なる。果柄部の切断長さには出荷規定があり、今後の検討が必要である。
- (3) 市販の収穫ハサミが利用でき取り外し可能なエンドエフェクタを作成し、果柄部切断は可能となった。しかし、保持する機能はなく、コンテナ取り入れるための機能を検討する必要がある。また、今回利用したハサミは取り付けのために柄を除く必要があり、ハサミの種類も限定される。周期的に研磨も必要であり、簡単に取り付け取り外しができ、ハサミの適用範囲も広くできるよう検討が必要である。
- (4) LED照明を用いた画像認識の改善を提案し、ピーマン果実の重なりやピーマンの距離計測誤差をなくすために効果があることが確認された。
- (5) LED照明の反射を用いてピーマン果実を認識する新しい方法を提案しその有効性を確認した。この方法は色の設定が自動でできることが大きな特長となっており実用に役立つものと考えられる。

- (6) 今回大きさ判定や果柄部の認識については十分検討ができなかった．しかしピーマン認識と同様に収穫作業のためには重要な画像処理技術となり今後早急に検討していく必要がある．

第7章 ハウス内走行装置の開発

本章では狭路かつ悪路であるハウスの畝間を走行する新しい機構の開発について研究を行った結果を述べる。ロボットの開発のためには実際の認識や摘み取りの技術も必要であるが、ビニールハウス内で移動するための機構も同様に重要である。通常ビニールハウス内の通路は、その生産効率をあげるため、狭く、畝の間にあるため悪路である。現在、収穫ロボットの開発のために、ハウス自体をロボットが働きやすいような環境に変更したものが多く提案されている。しかし、高知などのように農業従事者に高齢者が多く、後継ぎの問題などがかかえている場合には、ハウス全体を改造してロボットに適した環境に変更することは、困難なことが多い。本研究は、既存のハウスを変更せずに、狭路、悪路を効率よく移動するための機構の開発を目的とする。

以下では、ピーマンの収穫のためのロボット概略とビニールハウス内の様子を説明し、提案する機構について紹介する。今回は、機構の有効性を確認するために試作した車両を紹介し、その動作を数値シミュレーションによって、他の駆動機構と比較し、提案した車両の有効性を確認したのでその結果について報告する。

7-1 ハウス内の様子

実際のビニールハウス内のピーマンの様子を図7-1に示す。図からわかるように畝と畝との間の通路は狭く、かつ悪路である。このようなピーマンの収穫作業を自動化するためには、画像認識により収穫に適したピーマンを認識する認識装置、切断機構によってピーマンを摘み取りコンテナに入れる摘み取り装置、および走行装置を持つロボットを開発することが必要である。走行装置は、摘み取りおよび荷送りのために、ハウス内を自由に移動可能である必要がある。



図7-1 ほ場ハウス内の畝間の様子

ハウス内は、収穫効率を上げるために、畝と畝の間の通路は非常に狭い。また、畝の端部とハウスの内壁との間も図7-3に示すように狭い。通路の見取り図を図7-3に示す。図に示すように畝の間の通路の幅は約50cm、ハウス内と内壁部の通路幅は80cm程度しかないことがわかる。また先の図でみたように、路面の状況は非常に悪い。

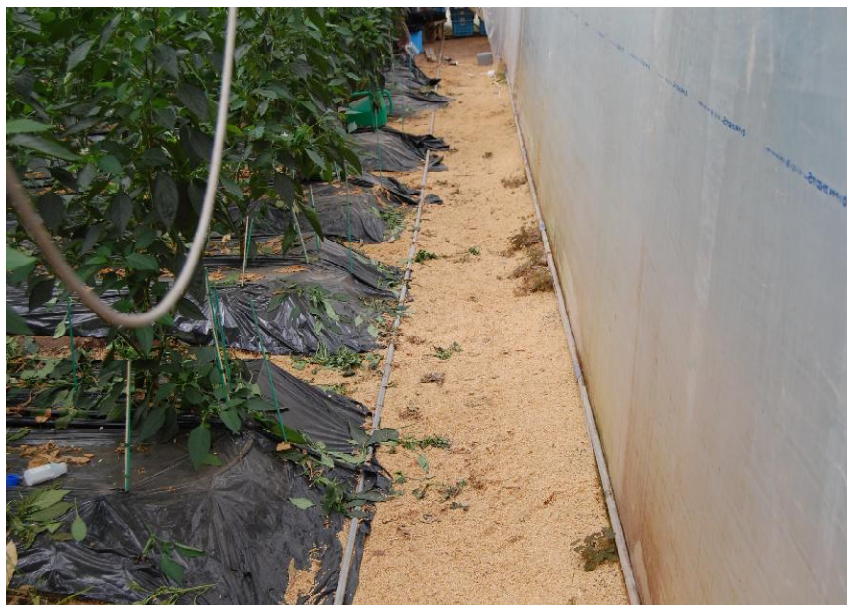


図 7 - 2 ハウスの畝の端部の様子

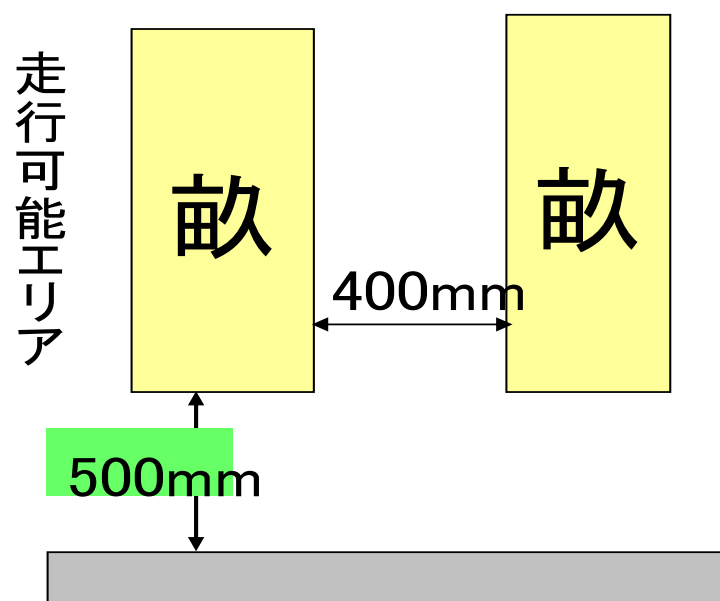


図 7 - 3 ハウス内通路の見取り図

7-2 従来の移動機構

このような狭路・悪路を走行するために種々の機構が開発されているが、まずは従来の移動機構について考察を行う。

7-2-1 四輪機構型移動機構

一般的な移動機構の一つとして、四輪型移動機構が挙げられる。四輪型移動機構の場合は、タイヤが4つ、駆動力を得るためのアクチュエータが最低1つ、そして曲がるためのステアリング機構から構成される。機構が単純ですむことや、方向転換の制御には前輪を切るという動作だけですむといったメリットがある。しかし図7-4のように、外輪と内輪の回転半径が異なるため、曲がるためには十分な空間を確保する必要がある。また、タイヤと地面の接地面積が少ないため、車両の重心が高くなった場合、落ち葉や枝といった少しの障害物でも走行の安定性が損なわれる可能性がある。そのため、不整地狭路には向かないと考えられる。

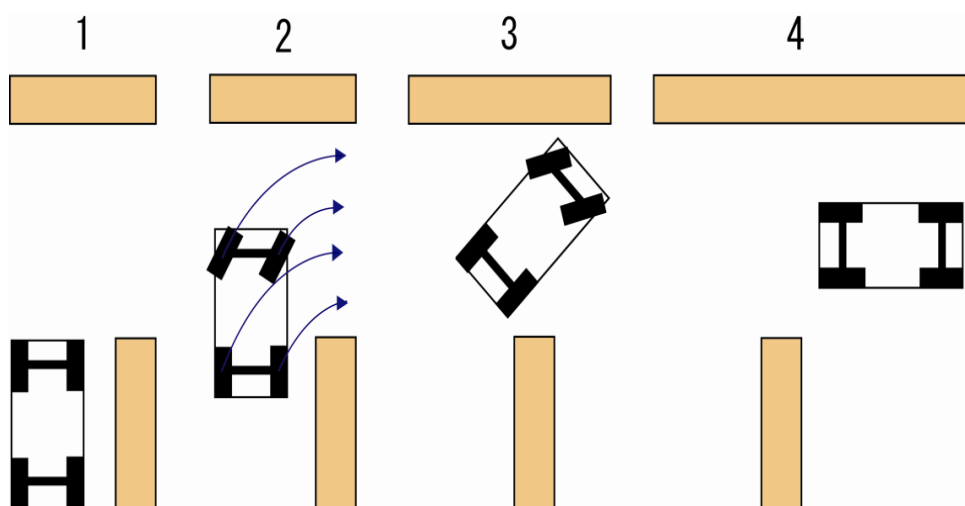


図7-4 前輪操舵・後輪固定型車両の旋回の様子

7-2-2 無限軌道型移動機構

不整地に有効な移動機構として無限軌道型機構がある。機構としては、起動輪、転輪、誘導輪、そしてそれらを囲むように一帯に接続された履板の輪と、駆動力を得るための最低1つのアクチュエータ、また起動輪の回転方向を任意に変更するためのギヤなどから構成される。図7-5に示すように、方向転換は、直進と旋回という動作二つの動作を組み合わせたものとなる。しかし、今回のロボットは作業のために畝と平行方向に細長くなることが考えられる。細長いものを旋回するためには車体長以上の空間を確保するため、狭路には向かないと考えられる。

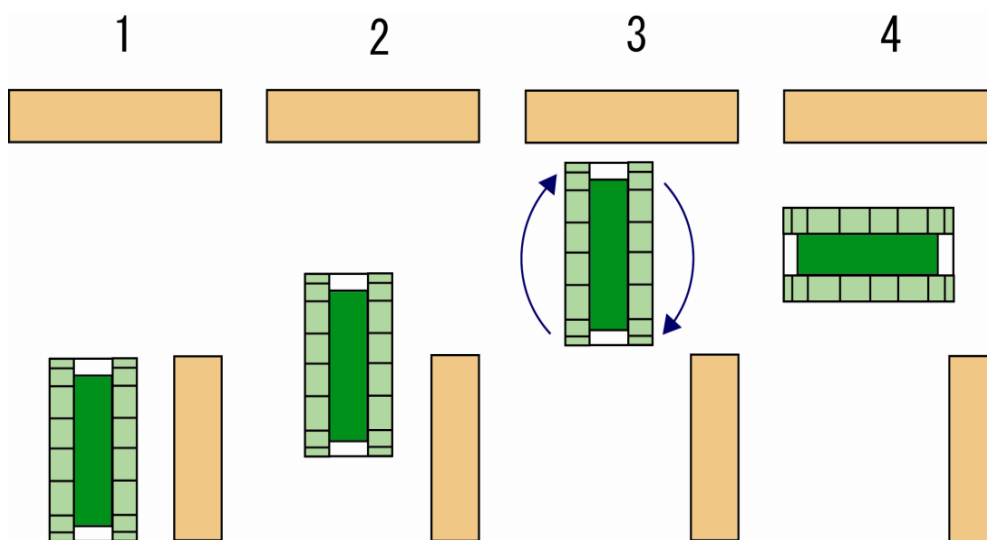


図7-5 無限軌道型移動機構の旋回の様子

7-3 後輪受動回転型車両の提案

今回、ハウス内で走行するために、新しい機構を提案し、この考えに基づいた試作機を制作した。この機構は、図7-6に示すように、二輪機構を前部、無限軌道機構を後部とし、それらを接続した移動機構を提案する。前輪部は通常の車両を同じく操舵が可能な機構となっており、車両本体は前輪部に取り付けられる。後輪は無限軌道を用いて走行駆動が可能なものとなっている。前部と後部はベアリングにより接続され、受動的に回転することができる機構となっている。

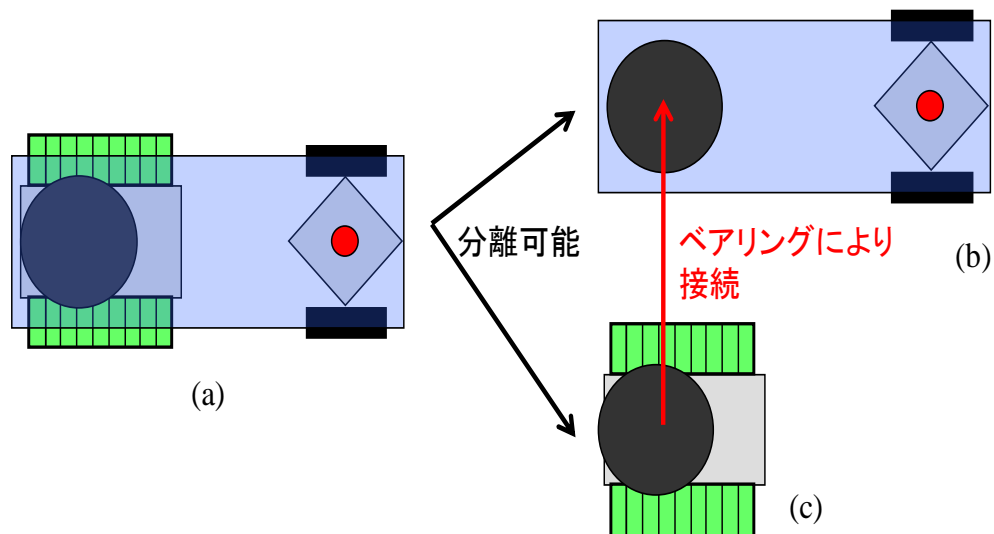


図7-6 提案するハウス内車両の構造

この機構による旋回の方法を、図7-7に示す。旋回を行うべき地点に来ると、図の2に示すようにまず前輪を操舵する。このとき後輪部は図の3のようにそのまま直進する。図の4に示すように車体と後部が直角になったときに、後輪部は駆動を前進から旋回に変更し、その場で後輪部を旋回させ方向転換を完了する。このような走行装置および旋回方法を用いることにより、ハウス内でも、安定した走行能力と小さな空間でも方向転換が可能となることが予想される。

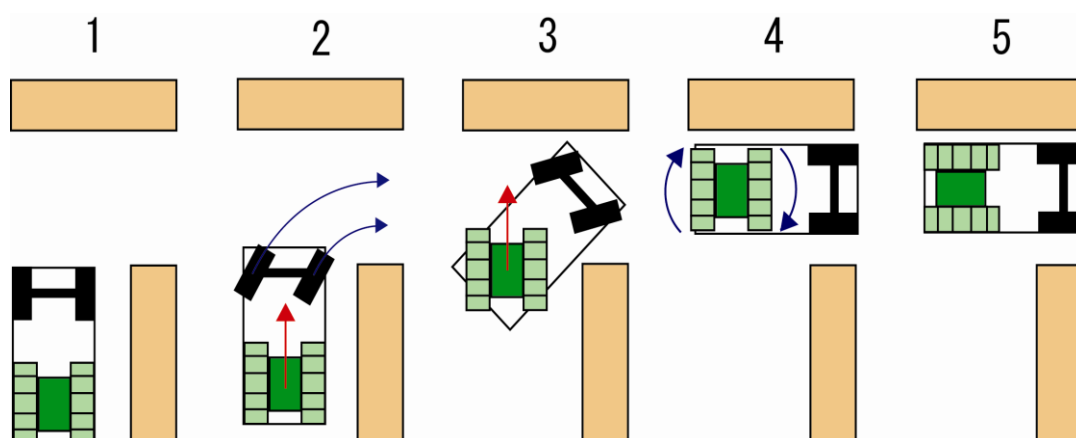


図 7－7 提案した走行機構の旋回の方針

7－4 旋回半径の比較

4 輪型移動機構，無限軌道型移動機構，前後独立操舵型移動機構の軌道をそれぞれモデルによって求め，方向転換に必要な畝間幅を算出した．それらを比較することで，不整地狭路における前後独立操舵型移動機構の有効性を数値的に確認した．

7－4－1 前輪操舵型車両の軌道のモデル化

実際の車両は低速移動で農作業を行うことを想定しているため，四輪型移動機構のモデル化には二輪モデルを用いて横滑りがないような旋回を行うと仮定した．軸幅を W ，車軸距離を L ，操舵角を θ として図 7－8 のようなモデルを立てた．このとき外輪の回転半径と内輪の回転半径を求めると，四輪型移動機構において図 7－9 のように旋回時において全ての畝間幅が共通かつ最小距離 S になる場合，以下の式で S を求められる．

$$S = W \cos \theta + \frac{L}{\sin \theta} - \frac{\sqrt{2}L}{2 \tan \theta} \quad (7-1)$$

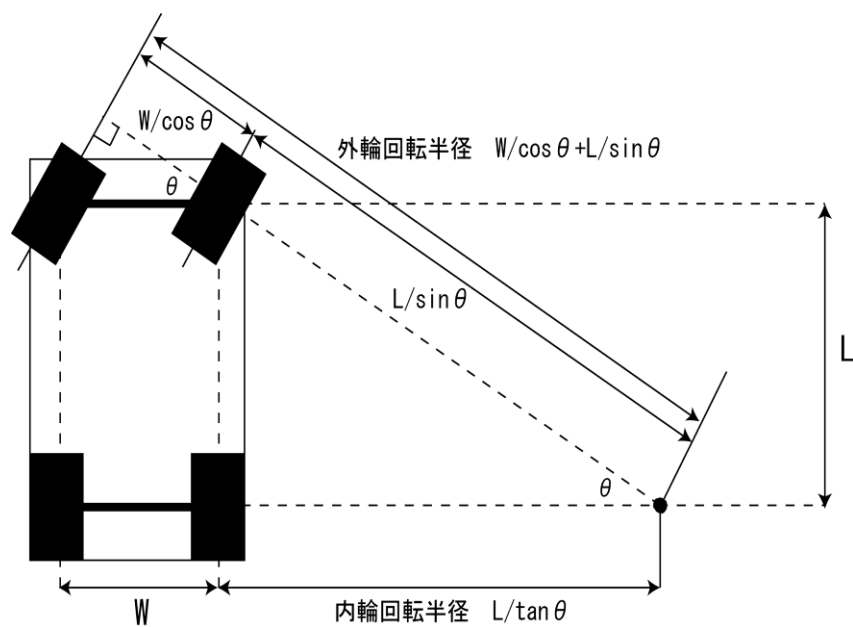


図 7 - 8 前輪操舵型車両の旋回のモデル

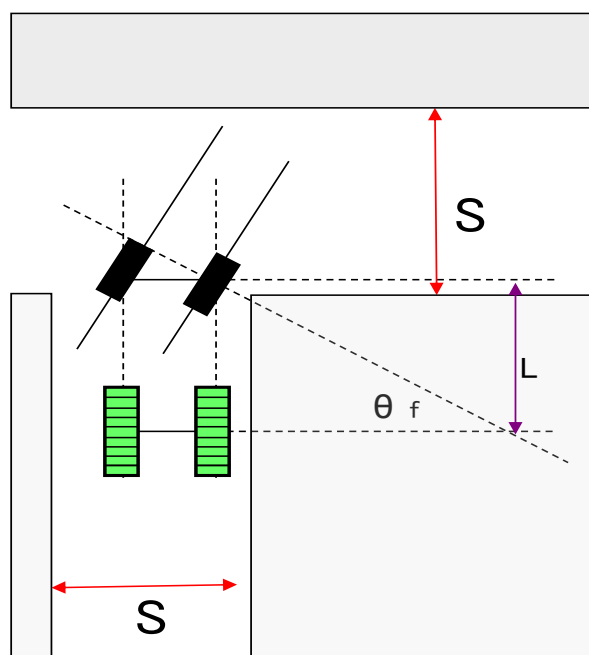


図 7 - 9 最小旋回半径と畝間の幅の関係

7-4-2 無限軌道型移動機構車両の軌道のモデル化

無限軌道型移動機構の方向転換に必要な畝間幅は，図 7-10 のように一対の無限軌道の対角線の長さ D である．よって，車幅を W ，キャタピラの長さを L とした場合，必要な畝間の距離 S は，

$$S = D = \sqrt{W^2 + L^2} \quad (7-2)$$

となる．

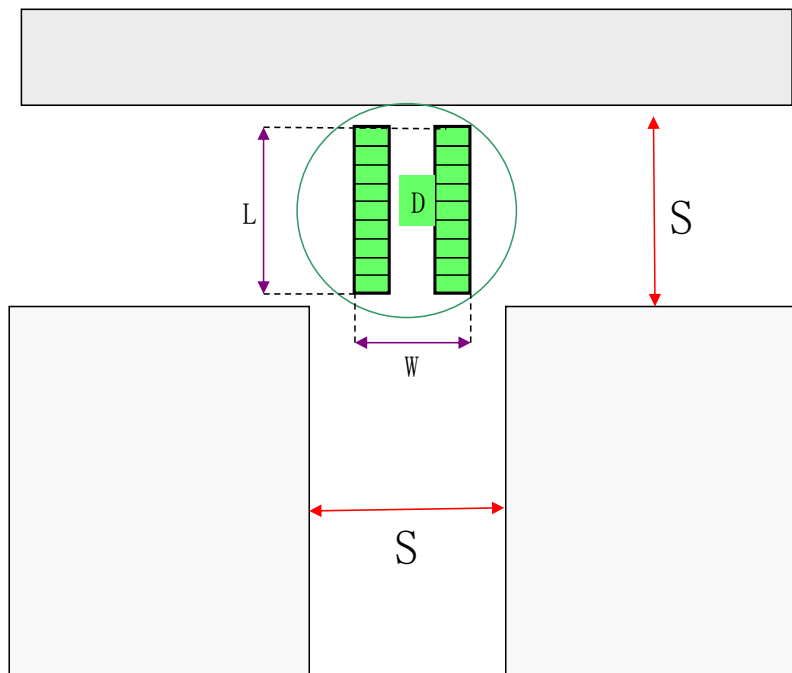


図 7-10 無限軌道型車両の旋回のモデル

7-4-3 提案車両の旋回のモデル化

後輪受動回転型車両機構の二輪モデルで表現する．初期位置を図 7-11 のように xy 平面上に表現した．前輪部の車軸中心を $(0, L)$ の点に，車体と無限軌道機構の接続箇所を平面上の原点とした．この時の車体の回転中心から前部の 2 輪機構の車軸までの距離を L ，操舵角 θ_f とした．初期状態では，前部の回転中心座標は， $(L/\tan \theta_f, 0)$ である．

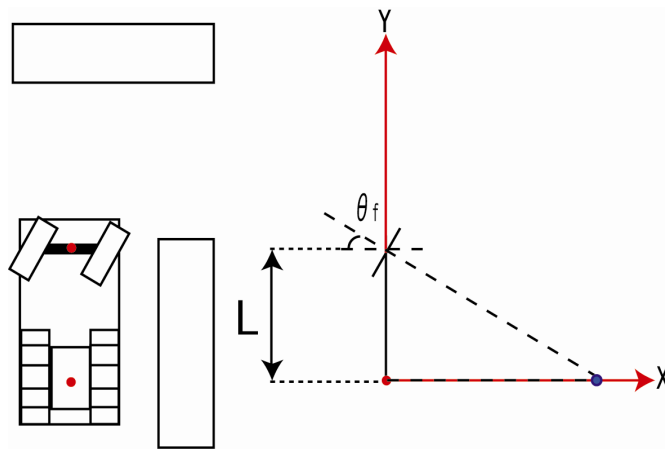


図 7-11 提案する走行車両の旋回の初期位置

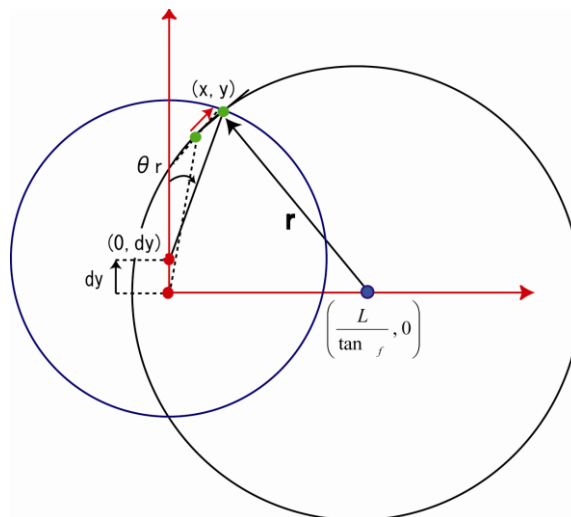


図 7-12 後輪が dy だけ進んだときのモデル

次に、後部が(0, dy)だけ進んだとき、図 7-12 のように前部は回転中心が描く円に沿って移動する。このとき前輪の位置は、以下の連立方程式を解くことによって求まる。

$$\begin{cases} x^2 + (y - dy)^2 = L^2 \\ (x - \frac{L}{\tan \theta_f})^2 + y^2 = r^2 \end{cases} \quad (7-3)$$

ただし、r は回転中心半径であり、 $r = \sqrt{\left(\frac{L}{\tan \theta_f}\right)^2 + (-dy)^2}$ である。

移動後、前部回転中心座標は変化し、移動後の車体の傾きと前部回転中心は以下の式によって求められる。

$$\theta_r = \sin^{-1} \frac{x}{L} \quad (7-4)$$

$$\left(\frac{L \sin(90 - \theta_f)}{\sin(\theta_f + \theta_r)}, dy \right) \quad (7-5)$$

次の移動では前部はこの円に沿って移動することとする。dy だけ動くたびにこの一連の計算を繰り返すことで軌道を求める。

L を試作車両に基づいて 560mm、変位量 dy を 1mm として、操舵角 θ_f をそれぞれ 30° , 45° , 60° の場合において前部が後部に対して直角になるまで求めた。その結果に基づいて必要な畝間の距離 S を、この軌道に軸幅 W を加えることで算出した。

7-4-4 旋回時における必要最小畝間幅の比較

四輪型移動機構，無限軌道型移動機構，提案した車両の各モデルより，方向転換における必要最小畝間幅を算出し比較した．使用したパラメータを表 3.1 に示す．これらのパラメータは前後独立操舵型移動機構の試作車両に基づいており，それを四輪型移動機構，無限軌道移動機構の場合に当てはめて必要最小畝間幅を算出した．

無限軌道型移動機構を除き，前輪の操舵角が 30° ， 45° ， 60° の場合における必要最小畝間幅を算出したものが表 3.2 である．前後独立操舵型移動機構に関しては，シミュレーション結果に前輪軸幅を考慮し算出した． 60° においては，必要最小畝間幅は無限軌道型移動機構が小さくてすむ．しかし， 45° を越えると前後独立操舵型移動機構が他の移動機構に比べて必要最小畝間幅は小さくてすむ．よって操舵角を 45° 以上という条件下において，狭路における前後独立操舵型移動機構の有効性を数値的に確認できたと言える．

表 7-1 試作装置の走行部に関するパラメータ

パラメータ	
四輪型	軸距 : $L=560\text{mm}$ 軸幅 : $W=440\text{mm}$
無限軌道型	キャタピラの長さ : $L=560\text{mm}$ 車幅 : $W=440\text{mm}$
前後独立操舵型	前輪軸幅 : $W=440\text{mm}$ 後部中心から前輪軸中心までの距離 : $L=560\text{mm}$

表 7-2 各機構で旋回するときに必要な最小畝間幅

必要最小畝間幅			
前輪操舵角	30°	45°	60°
前後独立操舵型	798mm	624mm	518mm
四輪型	815mm	707mm	638mm
無限軌道型	712mm		

7-5 試作車両

7-5-1 試作車両の概要

実際の装置で有効性を確認するために図7-13のような試作車両を製作した。車体は軽量化と組み立て易さを考慮し、MISUMI製のアルミフレームを使用した。その車体上には電源用にバッテリー、各モータ用のアンプ、制御用にS-BOX、電気回路を収納したアルミケースを搭載させた。また、そして、前部と後部の傾きを計測するために、接続部であるターンテーブルにエンコーダを取り付けている。車体の先端にホール素子センサを取り付け、磁気テープをトレースしながら走行する。今回は磁気テープ上に土が積もっても磁束は土を透過するため、センサで検出できるという理由から磁気テープを使用したライントレースを試作した。

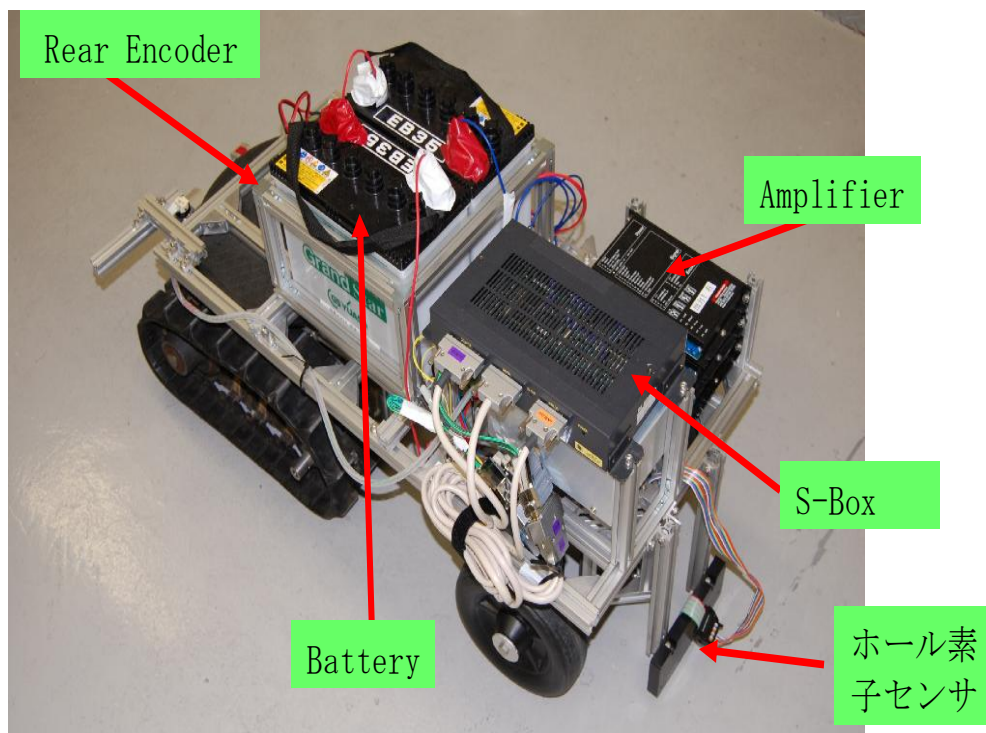


図7-13 試作車両の外観

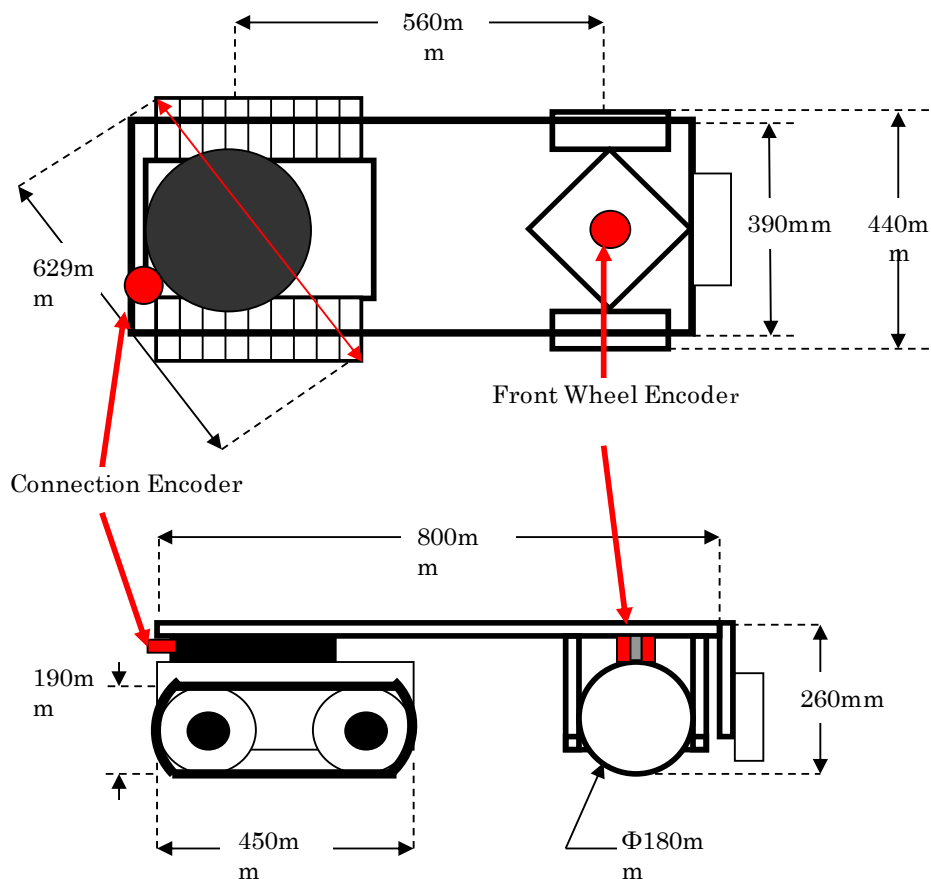


図 7 - 1 4 試作車両の寸法

今回試作した車両の寸法を図 3.14 に示す. 今回ほ場では車両の誘導のために磁気テープとホール素子センサを利用した. ホール素子センサは, 図 3.13 に示すように車両の前部に取り付けられている. また, 利用した磁気テープは, エムティエスセンサーテクノロジー株式会社の無人搬送車用ガイドテープを使用した. コントローラには **MTT** 社の S-BOX を利用した. S-BOX は浮動少数点 DSP ボードを搭載した PC ベースの DSP 開発プラットフォームである. アナログ入出力, デジタル入出力, カウンタを有しており, **Simulink** によってプログラムを作ることが可能である. クローラや前輪を駆動するためのアンプは, **MAXSON** 社製の ADS 50/5 を使用した. これは, DC モータ用のサーボアンプで最大出力は 250W である. 今回は電流制御モードで利用した. またバッテリーはディープサイクル 12V のものを 2 つ使い, 24 の電源電圧でアンプを駆動した.

7-5-2 制御方法

制御システムの構成を図7-15に示す。図に示すように、ホール素子センサ、前二輪の操舵角を検出するエンコーダ、車体と後輪の角度を検出するためのエンコーダの各センサの値が、S-Boxに取り込まれる。取り込まれた値に基づいて計算処理し、その結果は電圧としてアンプに出力される。各モータは、電流アンプからの出力により駆動される。

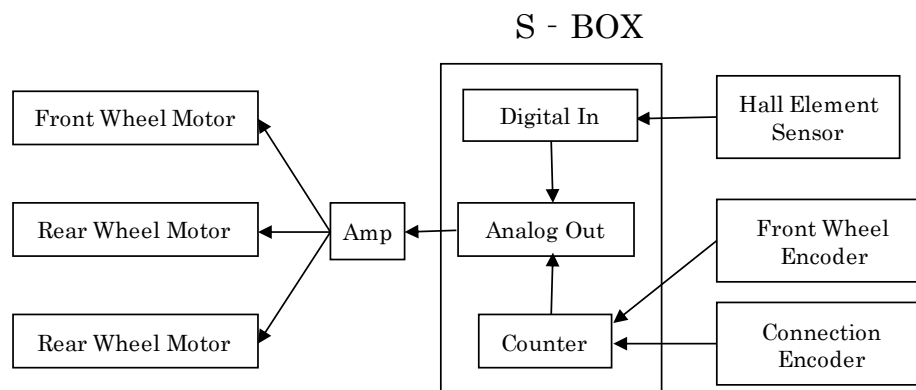


図7-15 走行系の制御ブロック図

今回使用したホール素子センサと磁気テープを、図7-16に示す。ホール素子センサは磁気を計測するホール素子が10mm間隔で計15個配置されている。S-Boxではデジタル入力が8ビットしかないため、このホールセンサのうち、2, 4, 6, …14の7個を利用して直進制御と旋回制御に用いた。

直進制御では、7個のホール素子のフィードバック信号で前輪の角度を比例制御した。ホール素子センサの間隔が20mmであるため非常に荒い制御ではあるが、走行速度が比較的定速であるため問題とならなかった。また後輪のクローラは、車体と後輪の角度を検出するエンコーダの値に基づいて制御を行った。後輪の進行方向が車体と同じ方向を向くように左右のクローラの駆動電流を比例補償によって制御を行った。

旋回制御は図7-17に示す方策で行うこととした。図に示すように畝の終わりでは、直進案内用テープがないテープがないことを検知すると走行機構は図中の番号2で示され

るような旋回動作に移る。図中の番号3のように車体と後輪の角度が90度になった点で前輪は車体と平行になるように制御され、後輪もその場で旋回し車体と平行になるようにする。その後車両は直線走行と同様に前進する。なお、実験では磁気テープがないことを確実に検知することが困難であったため、旋回開始の信号として、ホール素子センサがすべて反応するような幅の磁気テープを設置することとした。

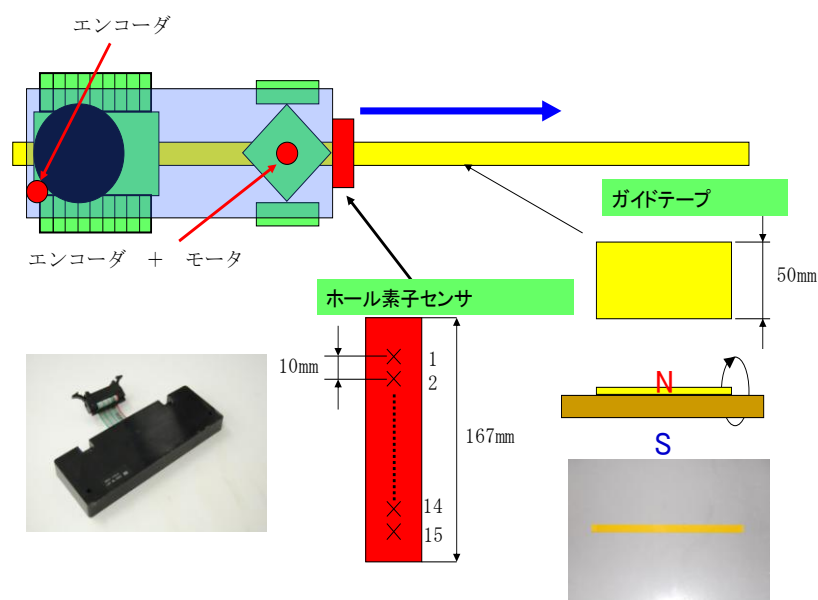


図7-16 ホール素子センサと磁気テープの幅の関係

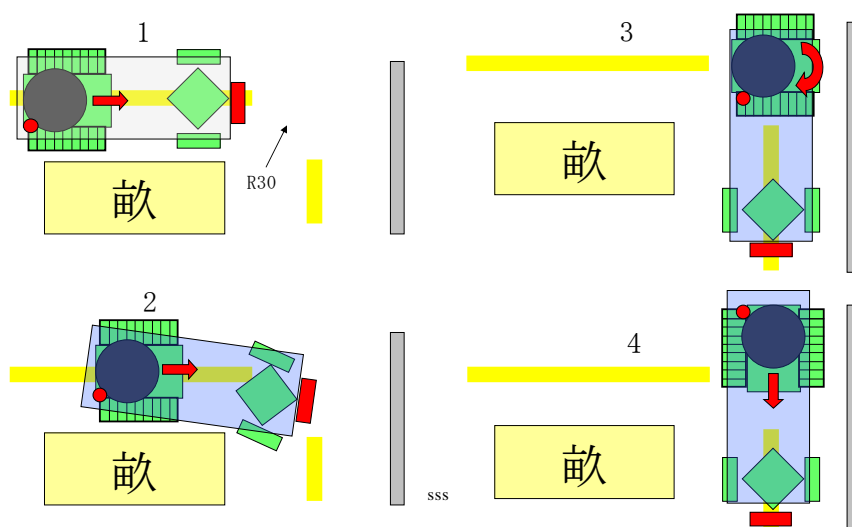


図7-17 旋回のための方策

7－6 走行試験

試作した前後独立操舵型移動機構車両を用い、ほ場において走行試験を行った。走行試験では、直進時における不整地の走行安定性の確認、方向転換時における狭路の軌道の確認を行った。

7－6－1 走行試験結果

試作装置を用いて走行試験を行った。走行試験は実験室とほ場の 2 カ所で行った。実験室では床が平らであり、磁気テープの敷設も問題なく可能であった。走行結果も直進制御、旋回制御共に安定して走行が行えた。

ほ場での実験結果の連続写真を図 7－18 に示す。これは畝から出て旋回するところの様子である。今回お借りしたほ場の農家の方は畝間にもみ殻をまいている。実験を行ったハウスの南側は温度が高いため水やりの量も多く走行部ももみのすぐ下はぬかるんでいる。このような条件の下で走行実験を行った結果、試作装置ではパワーが不足していることがわかった。特に旋回の最後で後輪のクローラが信地旋回をするときには後輪が停止してしまう結果となった。しかし、その他は図に示すように狭路かつ悪路であるハウス内の直線走行、旋回走行が可能であり、ハウス内の機構として有効であることが確認された。



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

図 7 - 1 8 試作装置のほ場での走行実験

7-6-2 今後の課題

しかし、今回の走行試験で問題点も多数明らかとなった。まず、方向転換時において後部の無限軌道型移動機構が旋回する際、敷設している磁気テープに大きな力がかかり変形や適切な敷設場所から動いてしまうという問題があった。

また、クローラを用いることは安定走行には有利であるが、消費電力の点では不利である。今回提案のロボットは一晩中働くことを目標としているため、できるだけ省電力化を目指す必要があり、このような観点から走行装置に対するさらなる検討が必要である。

今回のほ場では走行路がぬかるんでおり、またもみ殻も撒いてある。このような場合磁気テープを安定して敷設することができず、またホール素子センサとの距離も不安定である。走行装置の案内に磁気テープを用いることは困難であり、他の案内機構を検討する必要がある。

7-7 第7章のまとめ

ハウス内の果実を自動的に収穫するロボットを開発するための、一つの要素として、ハウス内をロボットが移動するための機構を提案し、その試作車両の紹介およびほ場での試験を行った。提案した機構は、前輪が通常のタイヤ形ホイールであり、後輪がクローラになっているセミクローラビークルタイプのものである。しかしこのタイプの車両は、後輪が車体とベアリングで連結された構造になっており車体に対して操舵できることが特長となっている。

提案した移動機構の有効性を確認するために、数値的に性能を検証した。その結果、通常の4輪型車両や、クローラ型車両に比べて、優位性が確認できた。またほ場ハウス内での走行実験の結果、狭路での旋回性能に問題はないことが確認された。しかし、種々の課題も確認されており、今後ほ場での実験を行いながら、装置の改良を検討していく予定である。

第8章 結言

8-1 研究のまとめ

本研究では労働力不足の解消・援助をめざし、現状のビニールハウス施設でのピーマンの収穫において、畝間を走行し、自動で収穫可能なピーマンを認識し、摘み取りを行う自動収穫ロボットの開発を目的とし、葉と果実を区別したピーマンの識別、大きさ把握および摘み取りのために認識した果実にカメラを追従さすビジュアルフィードバックシステムの構築、果柄部を摘み取るエンドエフェクタ（摘み取りハンド）の検討、そして、認識から摘み取りまで行うシステムを構築し、ピーマン収穫ロボットを試作し検証した。検証結果をもとに、更に、認識システムの改善、また、新たな走行装置を検討した。これらの実験は、ほ場であるビニールハウスを適宜用いながら行われたものであり、実用化を念頭に行われた研究である。以下に得られた研究成果と今後実用化のための展開について述べる。

本研究で得た結論や今後の課題について述べる。

- (1) ピーマンの果実と葉は共に緑であり、その判別は困難であると考えられる。しかし、十分な照明があれば HSI 空間での二値化によって、区別が可能であることを示した。また果実として認識された面積の図心を用いることによりステレオカメラによる距離計測も可能である。これらの技術を用いてビジュアルフィードバックによるピーマンの自動切断実験を行ったところ、切断実験に成功したが、果柄部が葉に隠れる問題、複数のピーマンが画像内に存在した場合の距離情報の精度低下、実験ごとに行うしきい値設定の煩雑さなどの問題があることがわかった。
- (2) LED 照明を用いることによっていくつかの問題に対処できることがわかった。LED 照明を1つのカメラの周囲に配置することにより、LED 光の直進性を利用して画像内に複数のピーマンがあつた場合でも距離情報が正確に認識できることが示された。

また、ピーマン果実と葉の光沢の違いにより果実を認識する方法を考案した。果実表面は葉の表面より光沢があり、光を反射しやすい。このことを利用し、果実の認識性能を向上させ、HSI 空間内の二値化のしきい値を自動で設定できることを確認した。

- (3) ハウス内の畝間は狭路かつ悪路である。このような環境での走行装置として、新しい機構の車両を提案し、試作を行った。この機構の特長は、前輪は通常の操舵機構を有し後輪には車両に対する旋回機能を持つ無限軌道型車輪を採用した点である。提案した機構がどの程度小回りが可能であることを数値的に確認し、前輪の操舵角を大きくとれる場合には、提案した機構が有効であることを確認した。また、この装置を用いた実験を行った結果、研究室内のような床面に関しては問題なく走行が可能であったが、ほ場などの悪路になると、パワー不足、案内信号の不安定性、電力消費などの問題が確認された。
- (4) 今回市販の収穫ハサミが利用でき、取り外し可能なエンドエフェクタ（摘み取りハンド）を考案し、果柄部切断は可能であることがわかった。しかし、保持する機能はなく、また、可動範囲も狭く、切断能力も十分でなかった。更にコンテナに取り入れるための機能を検討する必要がある。構築したピーマン摘み取りのためのハンド部および位置決め機構は、可動範囲が狭く、切断能力も低くかった。

8-2 今後の課題

ほ場における試験によって種々の有用な知見が得られたが、同時に多くの課題があることもわかった。主な課題を以下に述べる。

8-2-1 認識機構の課題

認識機構では、認識精度の向上が一番の課題である。精度が低下する原因としては、ピーマンの遠近における照明量の過不足、実が葉によって隠されるなどが多い。この対策として、以下に述べるような事項を検討する予定である。

(1) ハンドに取り付けたカメラの利用：今回試作したロボットのステレオカメラは、ロボットの位置決め部に固定される。これとは別にもう一つのカメラをロボットのハンドに取り付ける。このカメラで最終的なピーマン果実の位置を認識することにより認識性能が向上すると考えている。

(2) 異なる場所からの複数の画像に基づいた判断：ハンドに取り付けたカメラはピーマンが栽培されている中を動き回ることが可能である。ピーマン検出のためにハンドの動きを利用し、複数の地点からの画像処理による総合的な判断を行うことにより認識性能が向上すると考えている。

8-2-2 走行機構の課題

走行装置の課題としては、パワー不足、床下に余裕がない、案内装置の検討などである。この対策として、

(1) 提案した走行方法による新しい車両の設計：今回提案した車両の形式は踏襲し、問題がある点を改良した車両を設計する。具体的な改良点は、クローラの駆動のパワー不足の解消、悪路を走行できるように車高を高くする、前輪の機構を堅牢な機構とするなどである。

(2) 畝の斜面などを利用した新しい案内装置の提案：今回用いた磁気テープは施設、価

格，性能などに問題があった．全く新しい案内装置を提案し，試作することが必要である．
現在，考慮中の方式は，畝の横の傾きを利用するものと画像処理を行うものの２つについて検討中である．

８－２－３ 摘み取り機構の課題

（１）今回は果柄部を切断する摘み取り機構のみの構築であり，果実の把持機能はなく，切断力も低く十分な性能が十分ではなく，把持機能を持った新しい切断部の機構を検討していく必要がある

（２）また，ピーマン果実および果柄部の状況によってどのようにピーマンを収穫するか，どの方向から果実を掴み，どのように果柄部を切断のかなどをパターン化しておき，画像認識による結果に基づいてどのように掴み，切断するかをパターンによって決定する果実摘み取りのための戦略の検討も必要である．

8－3 今後の計画

現在の収穫ロボットは、第二段階と位置づけており、今回試作したロボットにより実用化の目途をつけることを考えている。現在の進捗状況は、機能ごとの要素的な検討を終えた段階であり、今後収穫ロボットシステムを構築して、総合的な収穫実験を行い、その結果の検討を行う必要がある。走行機構やハンドなどは再設計を行い、試作することを予定しており、第二段階のロボットのシェイプアップをはかっていく予定である。その収穫装置における実験結果に基づいて実用化のための方向性を判断していく。

実用化が可能であるとの判断ができた時点で第三段階のロボットの試作を行う予定である。第三段階のロボットは、商品化を念頭に置いたものとして、企業などとの共同研究により製作の予定である。表8－1に開発計画を、実用化、商品化を進めるための計画を表8－1に示す。

	第1段階	第2段階	第3段階
認 識 部	果実の識別可能 ・画像処理 ・ステレオカメラ ・照明	認識率の向上 ・照明改良(LED) ・アルゴリズム改良 (反射の利用による自動化)	実用化 軽量化 スピードアップ 耐久性 安全性 操作性 メンテナンス性
摘取り部	摘取り機能 ・ハサミ型 ・可動範囲狭い ・ハンド先端部が重い ・把持機能なし	動作範囲拡大・軽量化・把持機能・高速化 ・かま型(ハンド先端軽量化) ・手先の自由度追加 摘み取り率の向上	
走 行 部	手動 新機構開発 (タイヤ＋クローラ)	自動化 (安定走行、旋回機能)	
全 体		電源確保(バッテリー運転) 各部の連動、自動化	

表 8－1 開発計画

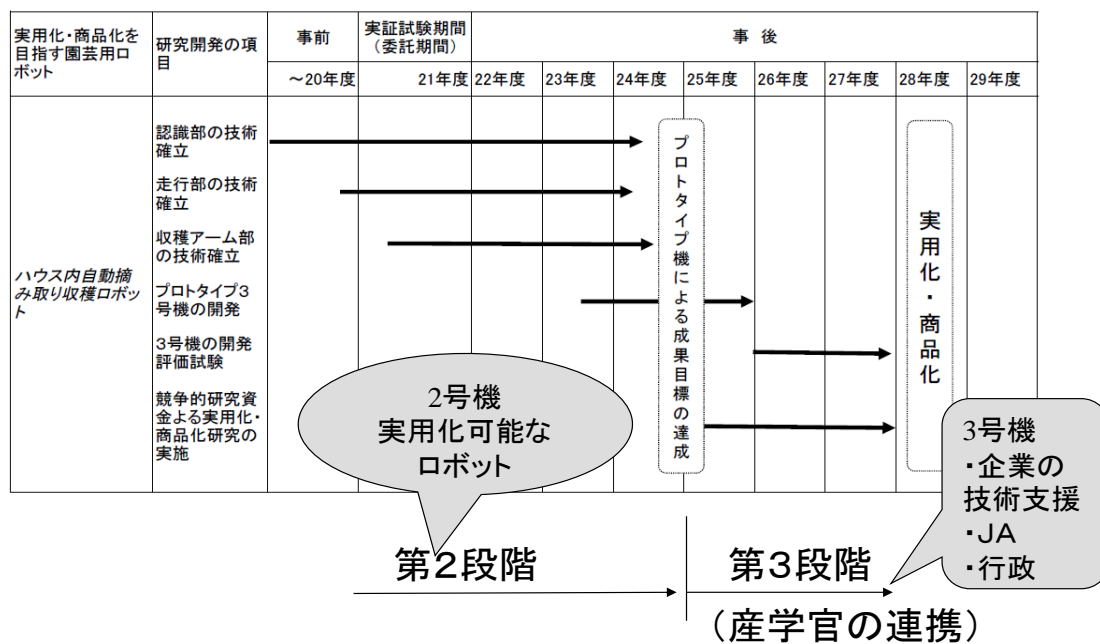


図 8 - 1 実用化，商品化を進めるための計画

少子高齢化を抱える我が国の農業にとって機械化自動化は必要不可欠なものである。ハウス園芸栽培においても収穫ロボット以外にも多くの機械化・自動化が今後ますます期待されている。

以上のように，実用化にあたりまだまだ多くの問題点・課題を抱えているが，本研究で得られた画像処理技術，制御技術はピーマン収穫ロボットの基礎作りとして，農業における少子高齢化などによる労働力不足の援助に役立つと考える。

謝辞

本研究の推進および論文の執筆にあたり，長期間にわたって，終始丁寧かつ適切な御指導を賜りました指導教官の高知工科大学岡宏一教授に深く感謝の意を表します．また，本論文の副査を快諾してくださった竹田史章教授，井上喜雄教授，王碩玉教授，楠川量啓教授に感謝します．

修士在学中も含め，多くの高知工科大学の先生方から，たくさんの知識・情報のみならず，物事の考え方，本質を考えることの大切さなど，学問の深さ，学ぶことの本当の喜びを教えていただきました．心より感謝いたします．

本研究のために，ピーマン栽培や収穫の現状や自動化へのアドバイスをいただくとともに，実験のために長期間にわたりたくさんの情報や多くのピーマンの提供していただいた高知県安芸郡芸西村のハウス園芸農家の下司武志氏，また，ほ場をお借りし，実験を援助いただいた同村ハウス園芸農家の黒岩正充氏に厚くお礼申し上げます．

共に研究に励み，様々な研究のサポートをしていただいた，知能機械システム工学科岡研究室の皆様に感謝します．

このように，本研究は多くの方々のご指導とご援助により達成されたものです．ここに心から敬意を表し，この論文の結びにします．ありがとうございました．

参考文献

- [1] 高知県農林水産部, “こうち農業・農村振興指針”, 平成 19 年 1 月
- [2] 農林水産統計「平成 21 年産春野菜、夏秋野菜等の作付面積、収穫量及び出荷量」、
平成 22 年 4 月 22 日公表
- [3] 林ら, “果菜類の選択収穫方法及び装置”, 2002.
- [4] 有馬誠一, 湯木正一, 山下淳, 加藤岳史, 丸身和也, “イチゴ収穫ロボットの開発研究”,
日本機会学会[No.03-4]ロボテスクメカトロニクス講演会'03 講演論文集 1P1-2F-A5,
2003.5
- [5] 門田充司, 難波和彦, 西卓郎, “テレロボテスク農業”, 日本機会学会[No.03-4]ロボテ
スクメカトロニクス講演会'03 講演論文集 1P1-2F-A1, 2003.5
- [6] 高知県園芸連・県共計委員会「高知ピーマン部会」, “県共計「高知ピーマン」等階級
規格表, 平成 16 年 9 月
- [7] 株式会社リンクス画像システム事業部, HALCON 活用法, 2004.10.1
- [8] FEST Project 編集委員会, 新実践画像処理, 2001.6.6
- [9] 藤岡弘, 中前幸治, “画像処理の基礎”, 2002. 9
- [10] 菅沼直樹, 藤原直史, 泉田啓, ステレオビジョンシステムと動的輪郭モデルを用いた
高速道路におけるレーンマーカ検出, “日本機械学会論文集 (C 編) 70 巻 700 号”,
2004.12
- [11] 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 池田英男, LIN Tingxi, 馬場康裕 (大阪府大 大学院
生命環境科学研究科), 土肥誠 (島根大 生物資源科学), 移動型栽培施設のミニトマト
収穫ロボット(第 2 報)-収穫実験-, 農業機械学会誌, Vol.72, No.2, pp.152-159, 2010.
- [12] 藤浦建史, 和田光生, 西浦芳史, 池田英男, LIN Tingxi, 馬場康裕 (大阪府大 大学院生
命環境科学研究科), 土肥誠 (島根大 生物資源科学), 移動型栽培施設のミニトマト収
穫ロボット(第 1 報)-ロボットの概要と三次元画像認識-, 農業機械学会誌, Vol.72,
No.2, pp.143-151, 2010.

- [13] 山本聡史, 林茂彦, 吉田啓孝, 小林研 (生物系特定産業技術研究支援セ), 下側接近を特徴とする定置型イチゴ収穫ロボットの開発(第2報)-マシンビジョンの構築-, 農業機械学会誌, Vol.72, No.2, pp.133-142, 2010.
- [14] 重松健太, 林茂彦, 山本聡史, 小林研 (生物系特定産業技術研究支援セ), 河野靖 (愛媛県農林水研), 鎌田順三, 栗田充隆 (エスアイ精工), イチゴ促成栽培における収穫ロボットの周年利用に関する研究, 農業機械学会誌, Vol.71, No.6, pp.106-114, 2009.
- [15] CUI Yongjie, 永田雅輝, 日吉健二, 木下統, 御手洗正文 (宮崎大 農), GUO Feng (上海交通大 ロボット研), マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究(第2報)-採果用カメラによる熟度判定, 果柄認識及び採果ハンドの試作-, 農業機械学会誌, Vol.69, No.2, pp.60-68, 2007.
- [16] 有馬誠一 (愛媛大 農), 門田充司, 難波和彦, 吉田裕一 (岡山大 農), 近藤直 (石井工業 技術開発部), 高設栽培用イチゴ収穫ロボット (第2報) -つり下げ型マニピュレータを有する収穫ロボット-, 植物工場学会誌, Vol.15, No.3, pp.162-168, 2003.
- [17] 有馬誠一 (愛媛大 農), 近藤直 (石井工業 技術開発部), 八木洋介, 門田充司, 吉田裕一 (岡山大 農), 高設栽培用イチゴ収穫ロボット (第1報) 5自由度マニピュレータを用いた収穫ロボット, 植物工場学会誌, Vol.13, No.3, pp.159-166, 2001.
- [18] 有馬誠一 (井関農機), 藤浦建史 (島根大 農), 近藤直, 芝野保徳 (岡山大 農), 山下淳 (愛媛大 農)キュウリ収穫ロボットの研究(第3報) モノクロTVカメラと走査型距離センサを組み合わせた果実検出, 農業機械学会誌, Vol.57, No.1, pp.51-58, 1995.
- [19] 有馬誠一 (井関農機), 近藤直, 芝野保徳, 中村博 (岡山大 農), 藤浦建史 (愛媛大 農), 山下淳 (島根大 農)キュウリ収穫ロボットの研究(第2報) キュウリの物理的特性に基づくハンド部の試作と収穫基礎実験, 農業機械学会誌, Vol.56, No.6, pp.69-76, 1994.
- [20] 有馬誠一 (井関農機), 近藤直, 芝野保徳 (岡山大 農), 山下淳, 秋好広明 (愛媛大 農), 藤浦建史 (島根大 農)キュウリ収穫ロボットの研究(第1報) キュウリの栽培様式およびマニピュレータの機構の検討, 農業機械学会誌, Vol.56, No.1, pp.55-64, 1994.

関連研究発表一覧

1. 投稿論文

- [1] Shinsuke Kitamura, Koichi Oka, “A Recognition Method for Sweet Pepper Fruits Using LED Light Reflections”, SICE Journal of control, Measurement, and System Integration (SICE JCMSI), Vol.2, No4, pp. 255-260, July 2009.

- [2] Shinsuke Kitamura, Koichi Oka, “Development of Picking Robot for Sweet Pepper in Greenhouse Horticulture by Using Image Processing”, Special issue on Machine intelligence for Robotics and Mechatronics, (投稿中)

2. 講演発表

- [1] Sinsuke Kitamura, Koichi Oka, “Recognition and Cutting System of Sweet Pepper for Picking Robot in Greenhouse Horticulture”, The 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Niagara Falls(Ontario,Canada), 2005.

- [2] Sinsuke Kitamura, Koichi Oka, Fumiaki Takeda, “Development of Picking Robot in Greenhouse Horticulture”, SICE Annual Conference 2005, Okayama University(Okayama,Japan), 2005.

- [3] 北村 晋助, 岡 宏一, “ピーマン収穫ロボットにおける認識システムの改善”, 第 48 回 自動制御連合講演会, JA 長野県ビル(長野市, 長野県), 2005.

- [4] 北村 晋助, 岡 宏一, “ハウス園芸におけるピーマン収穫ロボットの開発”, 第 11 回 ロボティクスシンポジウム, 嬉野温泉 ホテル桜(嬉野市, 佐賀県), 2006.

- [5] 北村 晋助, 生友 健太, 岡 宏一, “LED を用いたステレオカメラによる収穫ロボットの摘み取り率の向上”, Dynamics & Design Conference 2006, 名古屋大学 工学部(名古屋市, 愛知県), 2006.

- [6] Sinsuke Kitamura, Koichi Oka, “Improvement of the Ability to Recognize Sweet Peppers for Picking Robot in Greenhouse Horticulture”, SICE-ICASE International Joint Conference 2006, BEXCO-Busan Exhibition & Convention Center(Busan, Korea), 2006.