

②

学位論文

結球野菜収穫ロボットに関する研究

2000年

村上則幸

目次

第1章 緒言	1
第1節 はじめに	1
第2節 収穫ロボット研究の現状	4
第3節 本研究の目的	5
参考文献	6
第2章 画像によるキャベツの視覚認識	8
第1節 はじめに	8
第2節 画像処理手法の検討	9
2.2.1 キャベツ結球部の抽出	9
(1) キャベツの分光反射特性	9
(2) H S I 変換	10
(3) ニューラルネットモデルによる2値化	12
(4) ニューラルネットの学習方法	14
(5) 2値化処理の高速化	14
2.2.2 結球の位置・球径推定	15
2.2.3 処理の並列化	17
第3節 キャベツ認識実験	18
2.3.1 認識精度	18
2.3.2 処理速度	19
第4節 実験結果及び考察	19
2.4.1 認識精度	19
2.4.2 処理速度	22
第5節 結球野菜画像認識装置の開発	23
2.5.1 画像認識装置	23
2.5.2 野外光のスペクトル	25
2.5.3 キャベツの結球抽出実験	26

2.5.4	実験結果及び考察	27	4.4.3	マニピュレータの動作計算方法	56
第6節	摘要	28	(1)	肩の回転	59
	参考文献	30	(2)	腰の回転	60
			(3)	腕の伸縮	60
第3章	キャベツ収穫ロボット1号機の開発	32	4.4.4	動作実験結果及び考察	61
第1節	はじめに	32	(1)	動作速度	61
第2節	キャベツの形状と栽培様式	32	(2)	位置決め精度	62
第3節	試作1号機の構成	34	(3)	キャベツ収穫速度の推定	62
3.3.1	試作機の概要及び収穫方法	34	第5節	収穫ハンドの設計と試作	64
3.3.2	ロボットの構成要素	36	4.5.1	収穫ハンドの性能目標	64
3.3.3	制御システム	36	4.5.2	キャベツの茎葉切断力調査	64
第4節	圃場実験	38	4.5.3	試作グリッパの概要	68
3.4.1	実験方法	38	4.5.4	結球のセンシング	70
3.4.2	実験結果及び考察	38	(1)	プローブスイッチによるセンシング	70
第5節	摘要	41	(2)	超音波センサによるセンシング	71
	参考文献	41	第6節	試作2号ロボット	72
第4章	キャベツ収穫ロボット2号機の開発	43	4.6.1	ロボットの概要	72
第1節	はじめに	43	4.6.2	ロボットの制御プログラム	73
第2節	マニピュレータの設計と試作	43	(1)	収穫プログラムの流れ	73
第3節	マニピュレータの解析	45	(2)	マニピュレータの軌道制御	74
4.3.1	試作マニピュレータの運動学的解析	45	4.6.3	グリッパの制御	74
(1)	基準姿勢とベクトルの設定	46	(1)	プローブスイッチによる制御	74
(2)	座標変換演算子の定義	46	(2)	超音波センサによる制御	75
(3)	マニピュレータ先端位置の絶対座標表示	47	4.6.4	走行車両	76
4.3.2	マニピュレータの動力学的解析	50	4.6.5	制御システム	77
第4節	マニピュレータの動作実験	54	第7節	摘要	78
4.4.1	動作実験	55		参考文献	79
4.4.2	制御方法	55			

第5章 キャベツ収穫実験	81
第1節 はじめに	81
第2節 収穫実験	81
5.2.1 実験方法	81
5.2.2 プローブスイッチ方式グリッパによる収穫実験結果	82
5.2.3 超音波センサ方式グリッパによる収穫実験結果	84
(1) 収穫精度	84
(2) 作業速度	86
第3節 総合考察	88
第4節 摘要	90
参考文献	90

第6章 総括	91
---------------	----

謝辞	94
-----------	----

第1章 緒言

第1節 はじめに

今日、食料自給率は低下の一途をたどり、多くの農産物を輸入に頼らざる得ない状況にある。このように海外からの輸入農産物が増加する中で、将来の食料安定供給への不安が広がり、多くの人が安全な農産物を生産し国民に安定供給することの重要性に気づき始めている。しかし、現実には農家の担い手不足による農村の過疎化、中山間地の耕作放棄や近郊農地の宅地化が進み、農家戸数、農地面積は減少の一途をたどり、それに歯止めをかける有効な手だてを未だに見出していない。担い手不足の要因としては農作業が重労働で農業従事者の大きな負担であるため、若者が敬遠する傾向にあることや、一戸当たりの耕地面積が小さいこと等から、十分な収入を得ることが困難であることがあげられる。そこで、農業を魅力ある産業にするためには、農作業の省力化を積極的に押し進めること、小さな耕地でできるだけ多くの収入を得るために、規格に適合した高品質の農産物を生産することが重要である。

野菜は品質、出荷時期等によって価格の変動が激しいものの、穀類に比べて単価が高く、小さな耕地面積でも収益をあげられることから、大生産地以外の都市近郊でも多く栽培されている。しかし、作業の省力化は進んでいない。その原因は生産物の規格や品質に対する市場の要求が高いために、収穫作業においては、損傷などによって品質を損なわないように細心の注意が要求されるため、機械化による省力化が困難であること、しかも、農家一戸当たりの栽培面積が小さく、大型、高額な農業機械を購入することが困難であることがあげられる。機械化の進まない野菜栽培が、高齢化した農家の大きな負担となっているばかりでなく、若い担い手が野菜作を敬遠する理由の一つとなっている。

その中でもキャベツ、ハクサイ、ダイコンなどの重量野菜は、収穫、運搬作業が重労働であり、作付け面積減少の要因となっている¹⁾。図 1.1 にキャベツとハクサイの作付け面積と収穫量の推移を示す。

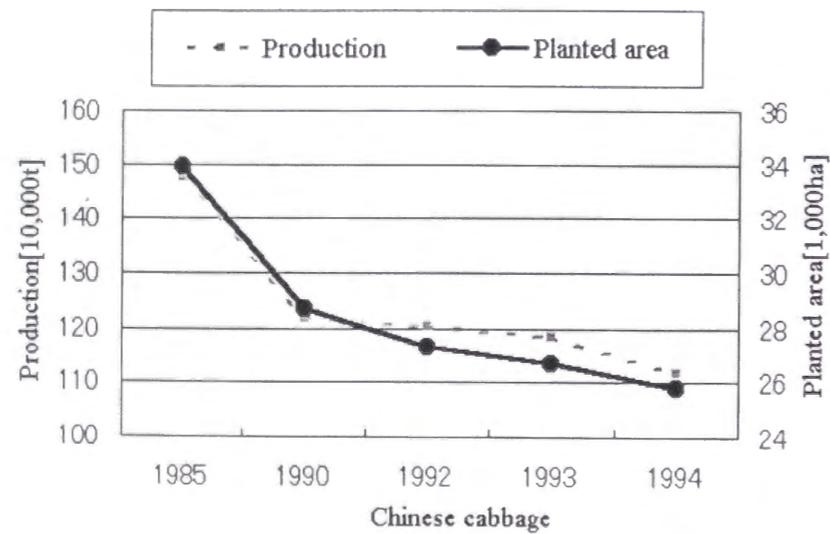
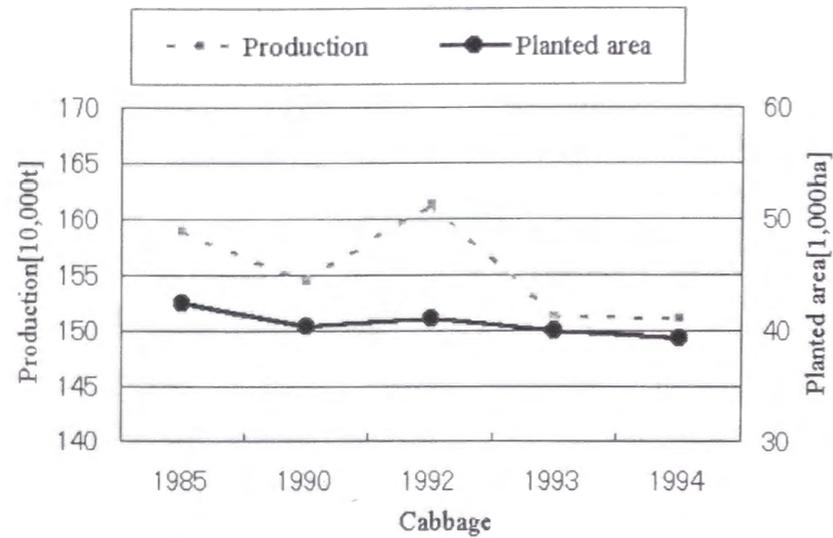


図 1.1 キャベツ・ハクサイの作付け面積と収穫量¹⁾

Fig 1.1 Cabbage and Chinese cabbage productions and their planted areas

表 1.1 のキャベツ、ハクサイ、レタスの作業別労働時間²⁾が示すように、収穫・調製作業は他の作業に比べ格段にその作業時間が長い。これは、市場の出荷物に対する茎葉切断位置、残す外葉枚数、損傷、汚れ等の規格を満たすために、大部分の農家は図 1.2 のように人力によって注意深く収穫作業を行っているためである。

既に結球野菜の収穫機については幾つかの研究報告³⁾がなされており、最近はそれを応用した市販機もみられるが、いずれも一斉収穫方式で規格適合品のみを選択的に収穫する農家の現状に適合しておらず、その上、収穫機は高価で耕地面積の小さい農家では過剰投資となるため普及は進んでいない。

このため、機械化の困難であったこの選択収穫作業の省力化のために、ロボットによる自動収穫技術に大きな期待が寄せられている。

表 1.1 10a 当たりの作業別労働時間 (平成 6 年度)²⁾

Table 1.1 Operation time per 10a (1994)

[h]

	Cabbage (Harvested in spring)	Chinese cabbage (Harvested in autumn and winter)	Lettuce (Harvested in spring)
Tillage and ridging	5.0	3.7	2.1
Basal fertilizing	3.7	3.8	2.8
Transplanting(seeding)	18.8	11.5	20.0
Cultivating and weed control	4.9	2.7	3.6
Additional fertilizing	5.5	4.2	0.2
Cultivating	1.4	14.5	0.5
Pest control	3.0	8.8	1.3
Harvest and processing	<u>25.2</u>	<u>31.4</u>	<u>21.2</u>
Management	1.7	0.8	1.2
Other works	10.8	10.1	14.8

Planted area at the investigated farm household :Cabbage 47.3 a
 Chinese cabbage 76.2 a
 Lettuce 117.0 a



図 1.2 キャベツ収穫の様子（千葉県銚子市）

Fig 1.2 Manual harvesting in Cyoushi City, Chiba Pref.

第2節 収穫ロボット研究の現状

既に、視覚認識装置によって収穫対象を識別し、収穫用ハンドを装着したマニピュレータによって果菜、葉菜及び果実の収穫を行う収穫ロボットに関する研究が数多く報告されている。

野外収穫作業用ロボットの研究は、仕立て栽培のトマト収穫ロボット⁹⁾に始まり、ミカン⁴⁾、オレンジ⁷⁾、リンゴ⁸⁾、ブドウ¹⁰⁾の果実収穫ロボットのように、当初は果実とその他の部分の色差が大きく、比較的カメラによって対象を認識し易いものから徐々に進められ、今日、仕立て栽培のキュウリ¹¹⁾、軟弱野菜¹²⁾やスイカ¹³⁾、メロン¹⁴⁾の露地で栽培される果菜のように、果実が他の部分と同系色のものや蔓や葉の陰になっているもの等、より判定の難しいものにその研究対象は広がっている。

ロボットの収穫対象認識方法としては、カメラ画像を用いる手法が主である。画像処理によって収穫対象を抽出し、その2次元位置と大きさを求める。3次元位置は、カメラを移動したり複数台のカメラを利用して、ステレオ画像によって計測する。その他、収穫対

象に投光してその反射光を受光し、3次元形状を計測することのできる3次元視覚センサも報告されている¹⁵⁾。

収穫用マニピュレータは、直交多関節型、極座標型、多関節型が用いられている。極座標型や多関節型は、仕立て栽培のトマト、キュウリ等の果菜やミカン、ブドウ等の果樹で多く採用されている。直交型は、畝立て栽培される果菜類、葉菜類で採用例^{12,14)}がみられる。それらの駆動は電動方式が主であるが、質量の大きいスイカ、果樹園用ロボットでは、油圧方式もみられる。

収穫用ハンドは電動、空圧駆動が多く、軟弱果菜や果実を扱うものでは、ソフトなハンドリングのために、指の開閉を体積弾性係数の小さい空圧によって行うものが多い³⁾。その他の把持方法としては、果実を吸引する吸着パッドがある¹⁶⁾。また、重量果菜の収穫では、駆動力を必要としないラチェット機構の収穫用グリッパも報告¹⁷⁾されている。把持後の果柄、果梗と果実の分離は、切断刃式やもぎ取りによって行われている。

このように、収穫対象、使用環境に応じて、数多くの収穫ロボットに関する研究がなされてきた。

第3節 本研究の目的

キャベツは、結球性重量野菜の中で生産量が多く、広く選択収穫が行われていることから、その作業の省力化が強く望まれている。加えて、ロボット収穫に関する研究は未だに報告されていないことから、その研究意義は大きい。本研究では、キャベツのロボット収穫技術の確立を目指し、適期、不適期の判断機能、選択収穫のメカニズム、キャベツ圃場を走行するベース車両の要素技術を開発し、それらを統合した収穫ロボットによって圃場実験を行い性能を明らかにした。本論文はこれら一連の研究をまとめたものであり、以下の章から構成されている。

第2章では、画像によるキャベツの収穫適期判定手法とその高速処理方法、及び結球部を抽出するための視覚認識装置について述べる。第3章において、ロボットを構成する要素として開発したマニピュレータ、ハンドと車両の諸元と、視覚認識から収穫までを行える試作ロボット1号機の概要とその収穫性能について述べる。第4章では、試作1号機を基に開発した2号機の要素についてその技術的特徴、並びにそれら要素を統合して試作したキャベツ収穫ロボットについて述べる。第5章において、試作2号機の収穫実験結果と、

それに基づく開発ロボットの総合評価を示す。最後に、第6章では本研究により得られた知見を総括し、キャベツのロボット収穫技術発展方向について述べる。

参考文献

- 1) 園芸統計平成8年版, 農林水産省統計情報部, 農林統計協会, P24-30, 1996
- 2) 平成6年産農産物生産費調査報告 野菜生産費, 農林水産省統計情報部, P78-81, 1996
- 3) 唐橋需, 井上喬二郎, 澤村宣志: 結球野菜収穫機の開発研究, 農事試験場報告, 33, 19-56, 1981
- 4) 金光幹雄, 山本健司, 芝野保徳, 後藤善明, 鈴木光雄: 白菜収穫機の開発研究(第1報), 農機誌, 55(5), 133-140
- 5) 川村 登, 並河 清, 藤浦建史, 浦 元信: 農業用ロボットの研究(第1報), 農機誌, 46(3), 353-358, 1984
- 6) 藤浦建史, 浦元信, 川村 登: 果樹園用収穫ロボットの研究(第1報), 農機誌, 52(2), 35-42, 1990
- 7) Bourelly, A., Sevilla, F., Juste, F., Albajar, F.: Development of a robot for harvesting citrus, Selected paper of IV international symposium on Fruit, nut and vegetable production engineering(Valencia-Zaragoza, Spain), Vol.1, 363-372, 1993
- 8) Pool, T. A. R., Harrell, C.: An end-effector for robotic removal of citrus from the tree, transaction of ASAE, Vol.34(2), 373-378, 1991
- 9) d'Esnon, A. G.: Robotic harvesting of apples, Agri-Mation 1 ASAE, 210-214, 1985
- 10) 近藤 直, 芝野保徳, 毛利建太郎, 門田充司, 岡村誠一: ブドウ管理・収穫用ロボットの基礎的研究(第1報) 農機誌, 55(6), 85-94, 1993
- 11) 有馬誠一, 藤浦建史, 近藤 直, 芝野保徳, 山下 淳, 秋好広明: キュウリ収穫ロボットの研究(第1報), 農機誌, 56(1), 55-64, 1994
- 12) 土肥誠, 藤浦建史, 中尾清治, 岩尾俊男, 竹山 光一: 野菜用多機能ロボットの研究(第2報), 農機誌, 56(2), 101-108, 1994
- 13) 飯田訓久, 古部勝也, 並河清, 梅田幹雄: スイカ収穫グリッパの開発, 農機誌, 58(3), 19-26, 1996

- 14) Yael, E., et.al: Robotic melon harvesting Prototype and field tests, ASAE paper, No.94-3073, 1994
- 15) 藤浦建史: 農業ロボットの視覚部, 農機誌, 58(1), 144-149, 1996
- 16) 藤浦建史他6名: ミニトマト収穫ロボットの研究(3), 第56回農業機械学会年次大会講演要旨, 315-316, 1997
- 17) 岡本嗣男, 白井良明, 藤浦建史, 近藤直: 生物にやさしい知能ロボット工学, 実教出版(株), 130-161, 1992

第2章 画像によるキャベツの視覚認識

第1節 はじめに

今日まで、カメラを利用した野外収穫作業用ロボットの視覚認識技術として、主にトマト、キュウリなどの果菜類²⁴⁾及びミカン、ブドウ等の果樹²⁵⁾についての研究が報告されている。それらの手法の多くは、カメラ画像より得られる色情報と形状情報を利用している。色情報は、主として作物認識の前処理として収穫対象の抽出に用いられており、カラーカメラの、赤(R)、緑(G)、及び青(B)の輝度信号よりしきい値を算出し、2値化処理によって収穫対象を抽出する手法が一般的に用いられている。また、果菜類では、果実と他の部分との近赤外領域光反射特性の差異を利用する方法も報告されている。

形状情報は、画像中に含まれる対象作物の認識に用いられ、2値化画像から対象作物の認識を行うことが多い。これには主として面積やフィレ長、質量中心等の幾何学的特徴量やエッジから得られる輪郭情報が用いられている。なお、これら以外にテクスチャ情報も挙げる事ができるが²⁶⁾、収穫作業への利用を目的とした研究報告は少ない。

野外では照度、色温度等の光条件が変動し、安定した画像データを得ることが困難であるため、画像処理による認識は室内で行うより難しい。その上、CCDカメラで撮影する場合には、カメラへの入射光強度がCCD素子のダイナミックレンジを越えることが少なくない。特に、晴天時の高照度条件下ではストロボ等の補光手段も利用しづらく、また、オートアイリスやフィルター等を使用しても、1枚の画像中に被写体からの鏡面反射によってハレーションを起こして、暗く陰となってしまう部分が混在することが多々ある。さらに、農業現場での利用を考えると、対象果実が葉、枝等の陰になることが多く、収穫対象を欠損のない状態で撮影することが困難であることも問題である。

本研究の対象であるキャベツの場合は、収穫対象の結球部は周囲の外葉との色差が小さく、また、外葉の陰になっていることが多く、その認識は特に難しい。

本章では、このキャベツの画像認識手法について述べる。

第2節 画像処理手法の検討

2.2.1 キャベツ結球部の抽出

(1) キャベツの分光反射特性

キャベツの結球部と外葉部の葉色の差異を調べるために、積分球を取り付けた分光光度計(島津製作所製:UV-3100)によって葉面の190nmから1500nmまでの分光反射率を測定した。その結果、個体差はあるが反射率は図2.1に示すように、550nm付近の反射特性に違いがみられた。それは可視光領域に含まれることから、通常のCCDカラーカメラによる処理を試みた。

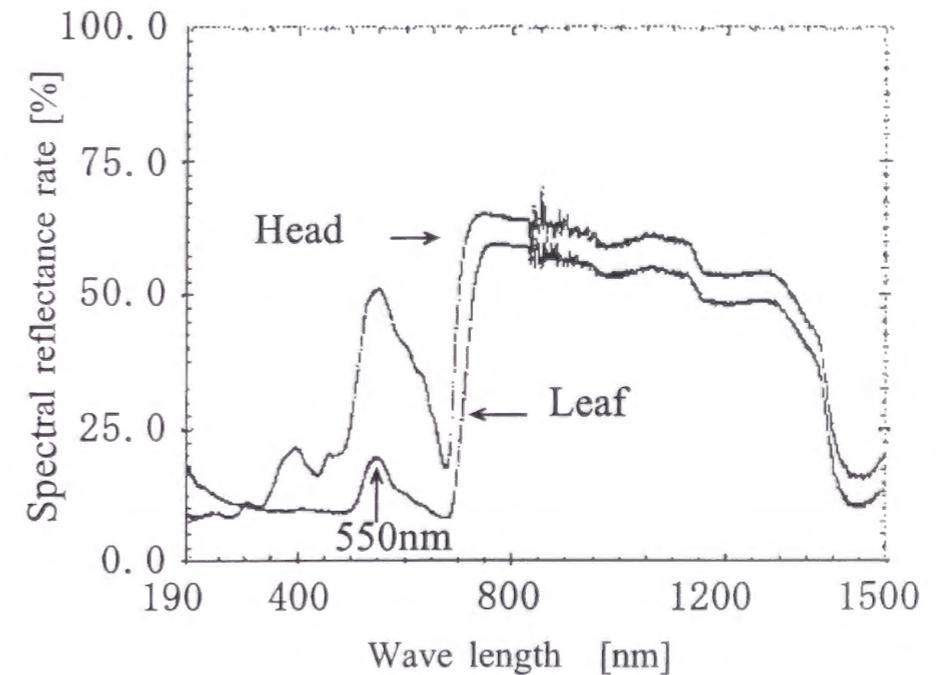


図 2.1 キャベツの分光反射特性

Fig 2.1 Spectral reflectance rate of cabbage

(2) H S I 変換

CCDカメラからのRGB画像データを直接処理せず、色相(H: Hue)、彩度(S: Saturation)及び明度(I: Intensity)の3属性から成る色彩座標系データや色差信号直交座標系データに変換して利用することの有効性が報告⁴¹⁾されている。特に、HSI色空間モデルは、色の等歩度性、等距離性及び3属性の独立性は完全ではないものの、人間の色覚に近く直感的に色データを扱い易いことから広く利用されている。人間の視覚ではキャベツの結球部と外葉の色差を判別することができ、また、色相が光条件の変動に対してロバストであることから、HSIデータの利用を試みた。カラーモデルは図2.2の六角錐カラーモデル¹³⁾を利用し、RGBからの変換は次式によって行った。

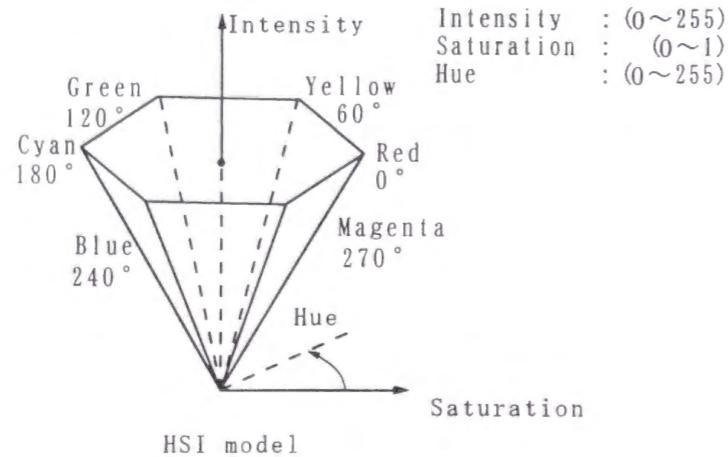


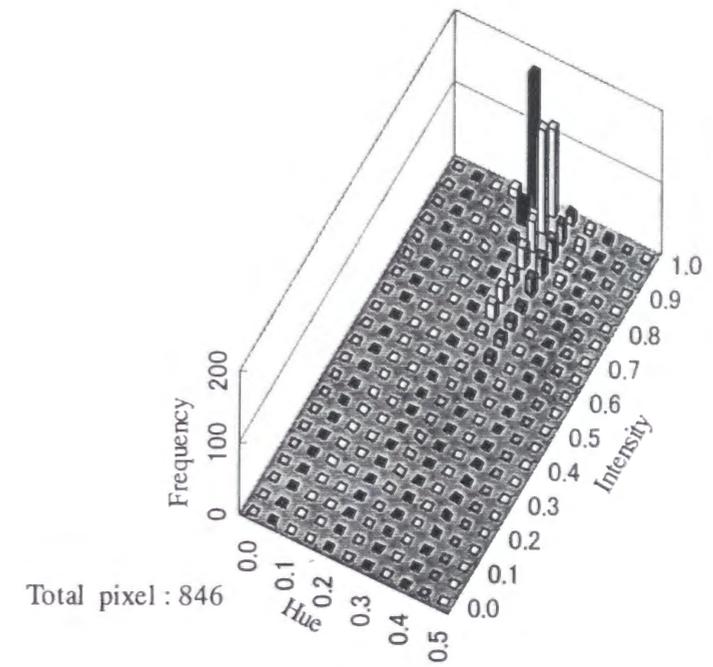
図 2.2 H S I モデル

Fig 2.2 HSI model

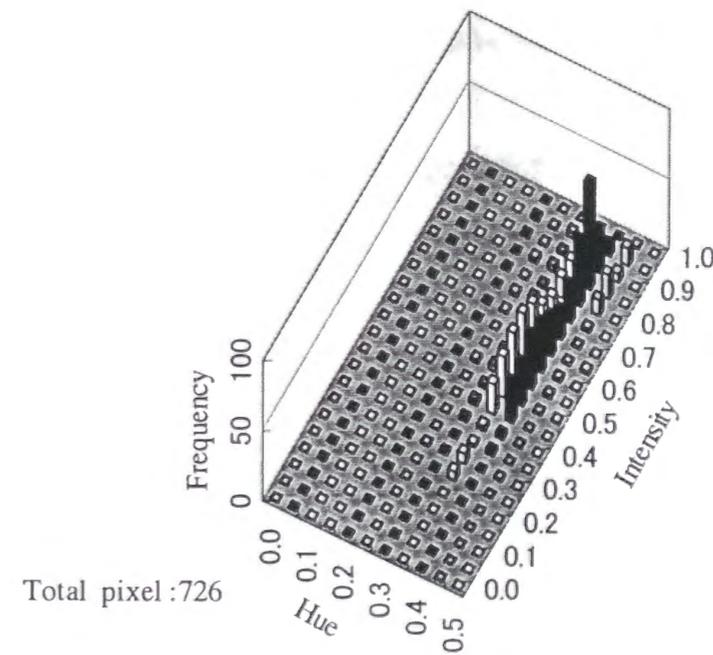
$$H = \left[90 - \text{atan} \left(\frac{2 - G - R - B}{G - B} \right) \right] + \{ 0 \text{ if } G > B, 180 \text{ if } B \geq G \} \quad (21)$$

$$S = \frac{\max(R, G, B) - \min(R, G, B)}{\max(R, G, B)} \quad (22)$$

$$I = \max(R, G, B) \quad (23)$$



(a) Head



(b) Outside leaf

図 2.3 キャベツの色相・明度分布

Fig 2.3 Hue and intensity data of cabbage

CCDカメラによって撮影したキャベツ画像の結球中心部、外葉中央部の一部よりサンプリングした画素の色相、明度分布例を図 2.3 に示す。

ここで色相 ($0^\circ \sim 360^\circ$) と明度 ($0 \sim 255$) は、正規化を行って $0 \sim 1$ の範囲とした。ほとんどの画素の色相値が黄(0.17)~青(0.5) の間に分布しており、外葉部の方が青側に近い傾向にある。また、明度は外葉部に比べ結球部の方が大きい傾向にある。ここで、明度 1 は RGB いずれかの輝度が飽和していることを意味する。彩度では、ハレーションのために RGB 輝度の高い部分では小さな値を示していたが、結球部と外葉との差異を明らかにすることはできなかった。

H S I データの分布からおおよその傾向を把握することができるものの、結球部と外葉で画素データの重複があり、また、この両者を判別する境界線は撮影条件によって変動することから、これらの色情報より結球部を精度良く抽出することは困難であると考えられる。

(3) ニューラルネットモデルによる 2 値化

H S I データよりおおよその傾向を把握できることが明らかになったが、より高い抽出精度を得るために、H S I データを利用した 2 値化手法を検討した。

一般的にはマハラノビス距離による判別分析¹⁴⁾が広く利用されているが、非線形性が強く複雑な事象に対応できることから、農業分野における画像処理への応用が数多く報告^{13,15)}されているニューラルネットモデルによる結球部抽出を試みた。

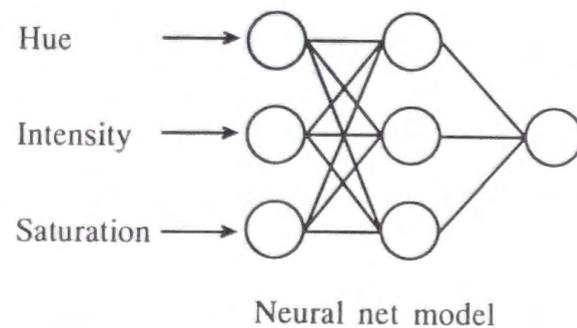


図 2.4 ニューラルネットモデル

Fig 2.4 Neural net model

モデルは図 2.4 に示す、H S I データの 3 入力で中間 1 層、3 ユニット、1 出力とした。結球部の抽出は出力値にしきい値 (0.7) を設定して行った。

ここで、モデルを構成するニューロンは、図 2.5 に示す多入力、1 出力の素子で、各入力 X_i に重み W_i が乗じられた後、その総和が応答関数 $f(x)$ への入力となり、応答関数によって変形の後出力される。この応答関数として一般的には活性化 (シグモイド) 関数と呼ばれる飽和型の応答関数を用いる。つまり入力 x は

$$x = \sum_i W_i X_i \quad (2.4)$$

で表され。次式で表される活性化関数によって

$$f(x) = \frac{1}{(1 + \exp(-x))} \quad (2.5)$$

0 から 1 の値が出力される。さらに、この出力が次のニューロンへの入力となる。このニューラルネットモデルは各ユニットの重みをそれぞれ調整して、入力に対する出力を変化させることによって、様々な処理に対応することができる。

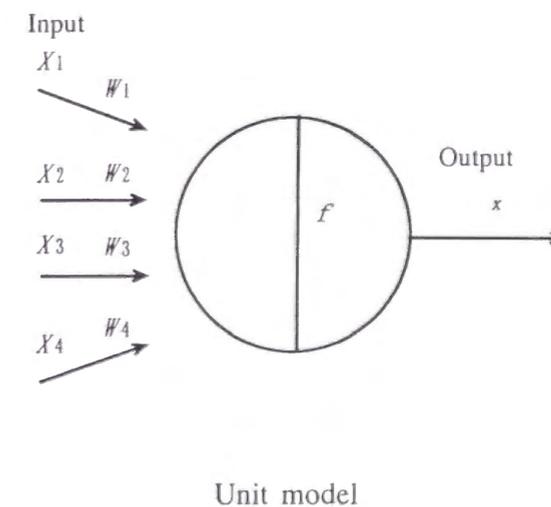


図 2.5 ニューロンユニット

Fig 2.5 Neuron unit

(4) ニューラルネットの学習方法

モデルを最適化するため、ニューラルネットでは教師データによる学習が必要とされる。学習は、広く使用されているバックプロパゲーション法¹⁴⁾によって行うこととした。ただし、学習に使用するデータの数値にばらつきが大きいと、特にこのような小規模のニューラルネットモデルでは、各ユニットの重みの更新量が大きく変動して収束が遅くなったり発散し易くなるので、先に調べたH S Iデータを基に結球部と外葉が含まれる色相角内データのみを用いて学習を行った。

(5) 2値化処理の高速化

ニューラルネットは、各ユニットの重みを自動的に更新してモデルの最適化が行えることから、データの傾向、特徴を直感的に把握するのが困難である場合には有効な手段であるが、判別分析法等の他の手法に比べて小規模なモデルでも計算量が多い。そこで、処理を高速化するために、各ユニットの応答関数 $f(x)$ 内の自然指数をテイラー展開し、次に示す三次式で近似することとした。

$$\left. \begin{aligned} \exp(x) &= 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} & (x \leq 0) \\ \exp(x) &= \left(1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} \right)^{-1} & (x > 0) \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

さらに、モデルへの入力データの範囲を、先に調べたキャベツの画素分布の色相値から結球部は外葉部より黄色側に分布していること、対象キャベツの状態や撮影条件によって色相値が多少変動することを考慮して、上限値はほとんどの結球部が含まれ、下限値は完全に含まれるように、0.14 ~ 0.35に設定した。色相についての既知情報を利用してデータを絞り込むことによって、不要な画素の演算を省き、処理の高速化を図った。また、画像は512x480の原画像を4近傍平滑処理後、平滑化と同時に256x240に縮小して用いた。関数の近似や順次データの絞り込みにより処理を省くことによって、実用的な処理速度の実現を試みた。

2.2.2 結球の位置・球径推定

結球部分は外葉に部分的に覆われていることが多く、結球と外葉の色差が小さいことから、撮影条件によっては2値化処理だけでは結球を抽出できなかつたり、外葉を誤って抽出してしまう恐れがある。そこで、このような画像からでも結球位置・球径を精度良く推定するために、図2.6に示すキャベツのテンプレートとの相関によって推定する手法を開発した。開発した手法では、2値化処理の後、4近傍収縮・膨張処理を各1回行った画像(図2.6(a))と、収穫適期キャベツの平均球径を基にして作成した6x6のテンプレート1とのマッチングによって相関を求め、収穫適期キャベツが含まれている可能性の高い関心領域(ROI: Region of interest)を特定する(図2.6(b))。なお、相関が低い場合にはプレートの36点を全て調べないで処理を打ち切り、次の位置に進むことによって処理の高速化を図った。本実験では、この打ち切り誤差を8に設定した。画像中に複数箇所の関心領域が発見された場合、接近しているものについては相関の高い領域を関心領域として残し、全ての関心領域は一定距離以上離れるようにして特定した。その距離は、農家圃場の条間、株間を参考に実測値に換算して0.3mに設定する。さらに、図2.6(c)に示すように、関心領域内のマッチングは6x6のテンプレート2のピクセル間隔を変化させることによってテンプレートの大きさを変えて行い、最も相関の高かったテンプレートの大きさと位置から結球部の位置と球径を推定することとした。ただし、関心領域内には必ず1個のキャベツが含まれるものとした。マッチングは処理時間短縮のために残差逐次検定法(Sequential Similarity Detection Algorithm, 以下SSDA法と略す)¹⁵⁾によって行い、2値化抽出と同様、形状に関する対象作物の既知情報から関心領域を特定して、次の処理段階で関心領域内を精査した。このことによって領域外での誤判断が避けられ、また、余分な領域の処理を省けることから処理の高速化が図れる。処理の流れを図2.7に示す。

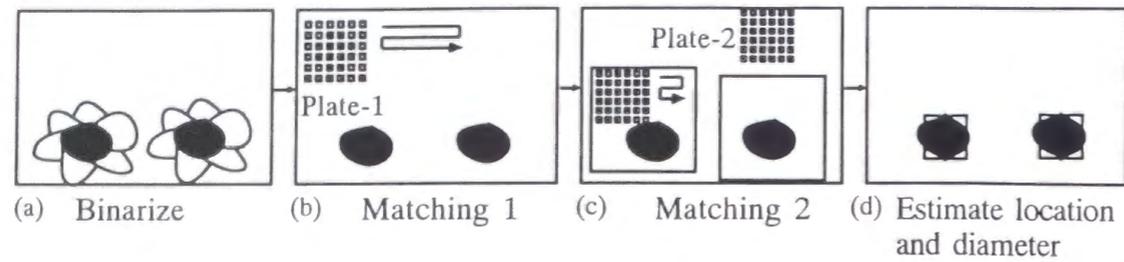


図 2.6 マッチング方法

Fig 2.6 Matching method

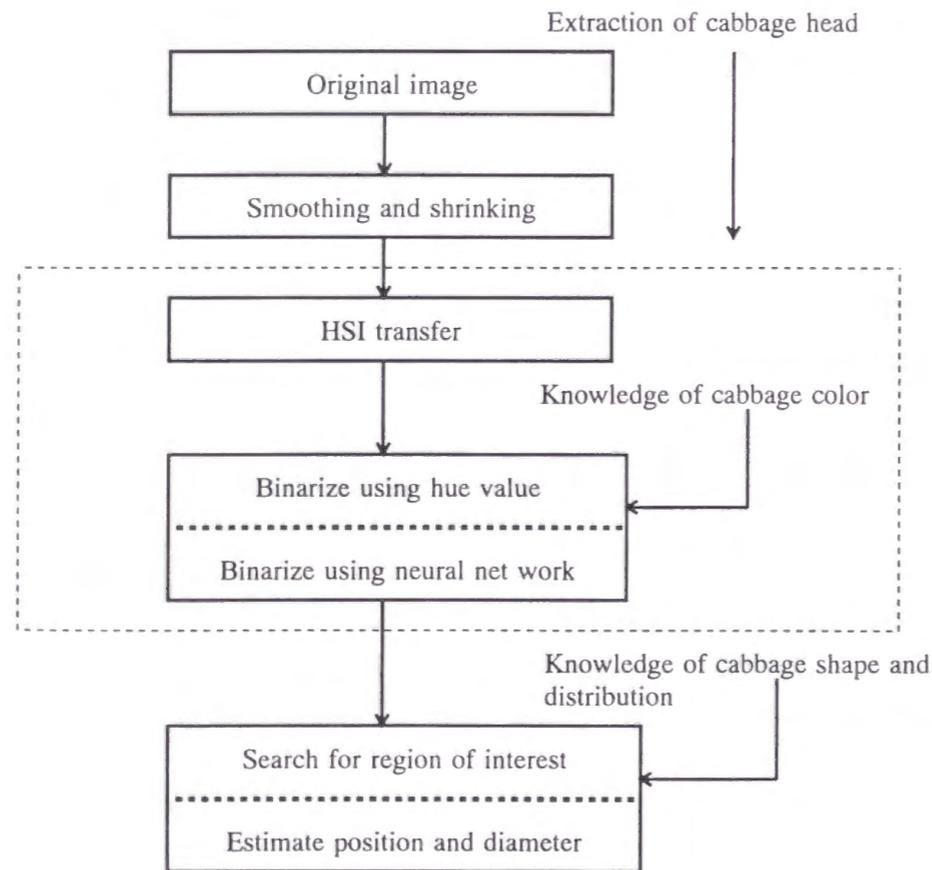


図 2.7 処理の流れ

Fig 2.7 Flow chart

2.2.3 処理の並列化

上述のように2値化処理での色相角を参考にしたデータの絞り込み、ニューラルネット内活性化関数の近似、マッチング処理で特定した関心領域内でのSSDA法等の利用によって処理の高速化を図ったが、さらに、高速化を図るために、処理ハードを並列利用した。処理ハードには、トランスペュータ（T805、

T800：30MIPS Peak）8台を使用し、図2.8に示すようにシリアルリンクによって接続して並列処理を行った。

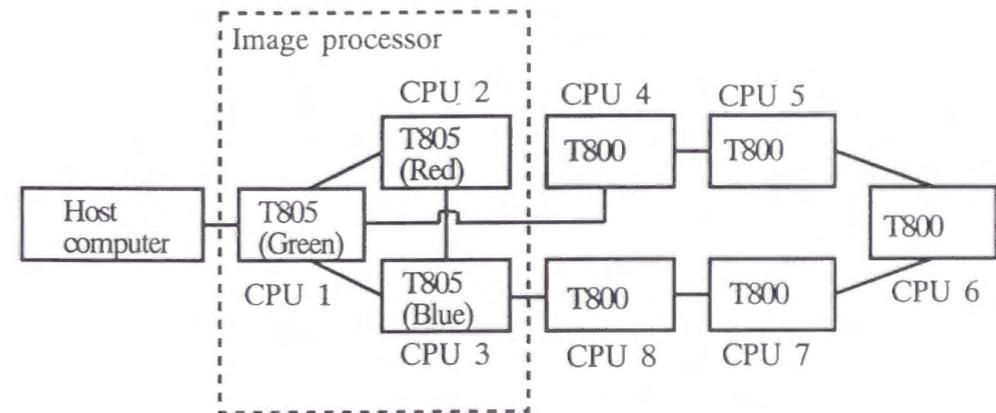


図 2.8 トランスペュータ接続方法

Fig 2.8 Connection method of transputers

画像取り込み部（浜松ホトニクス製）はCPU1からCPU3で、各CPUのメモリーに別々にRGB画像データを取り込み、それぞれのデータを独立して処理する。さらに、5台のCPUを接続して、計8台のトランスペュータにより処理の高速化を図った。処理方法は図2.9に示すように、2値化処理は画面を均等に分割してCPUに分配し、マッチング処理は、y方向のプロファイルからキャベツがないと推測される部分で分割可能であれば、2台のCPUに分割して処理した。なお、プログラミング言語としてParallel Cを使用した。

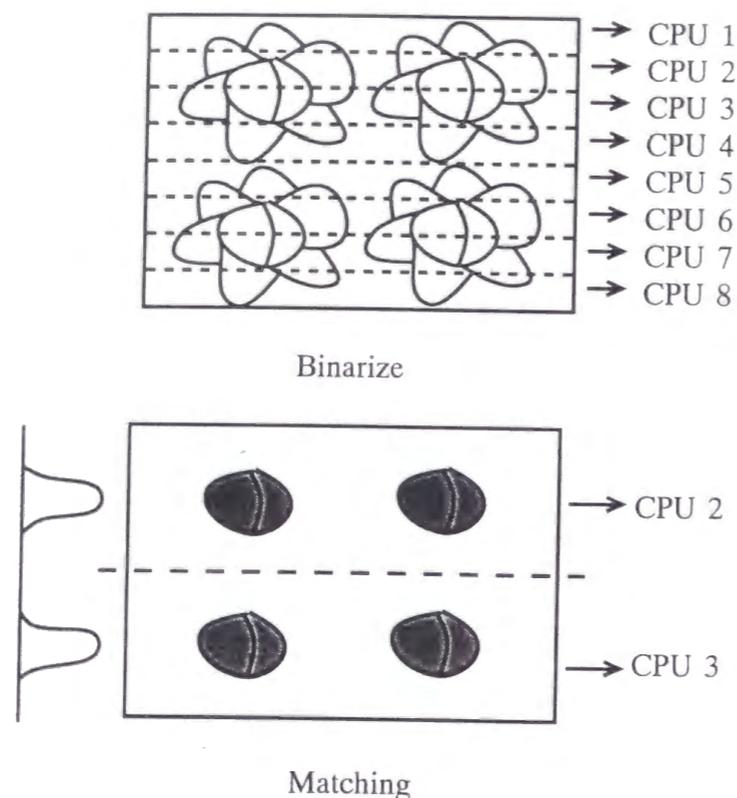


図 2.9 並列処理方法

Fig 2.9 Parallel processing method

第 3 節 キャベツ認識実験

2.3.1 認識精度

圃場で CCD カメラにより自然光下で撮影した画像を用いて、開発したアルゴリズムのキャベツ結球部の 2 次元位置と球径認識精度及び処理時間を調べた。キャベツの品種は「夏晴れ」で、撮影は 1993 年 7 月 15 日の午前中に茨城県内で行った。撮影中の照度は $2 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ lx、色温度は $6.2 \times 10^3 \sim 6.3 \times 10^3$ K である。1 枚の画像に複数個のキャベツが収まるようにするため、カメラを圃場から約 2m の高さに固定し、撮影範囲は約 $1.5 \text{m} \times 1.5 \text{m}$ とした。撮影にはオートアイリスを使用して、撮影画像はコンピュータのイメージボードへ取り込んだ。

なお、供試キャベツは条間 0.60m、株間 0.40m で植え付けられており、撮影した合計 27 個のキャベツの球径（長径と短径の平均）は 165 ~ 220mm の範囲にあり、平均 201mm であった。

結球部の認識処理は、テンプレート 1 の球径を 210mm に設定し、テンプレート 2 とのマッチングは 190 ~ 230mm のキャベツを収穫適期と判断するように設定した。

2.3.2 処理速度

処理速度は同一画像を用いて、下記の 3 条件で比較した。

条件 1 : 1 台の CPU によって、図 2.7 の処理手順で実施した場合。

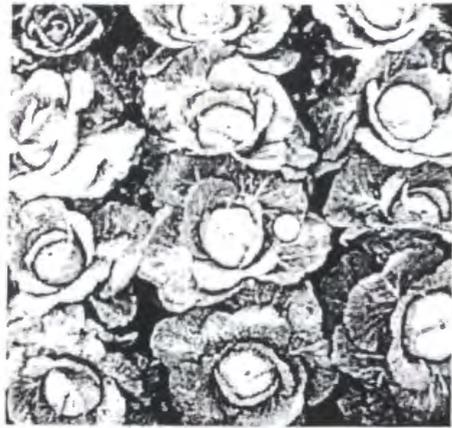
条件 2 : i) 供試画像の縮小、ii) ニューラルネットモデル入力データの絞り込み、iii) 活性化関数の近似、iv) プログラムのアセンブラコードを参考に、処理速度低下の原因となる不要な命令や処理に時間を要する命令を取り除いた改良アルゴリズムで処理した場合。

条件 3 : 条件 2 のアルゴリズムを並列化して 8 台の CPU によって処理した場合。

第 4 節 実験結果及び考察

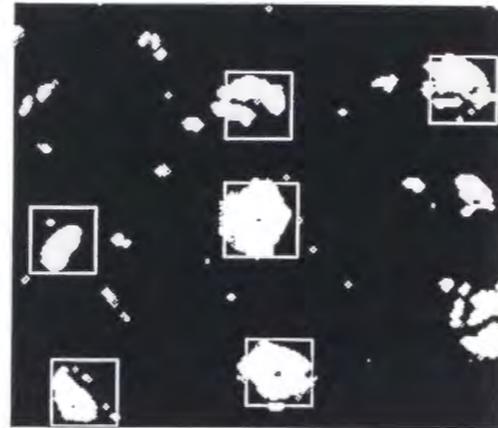
2.4.1 認識精度

処理画像の縮尺を考慮して、圃場で調べた結球部の中心位置・球径の実測値と比較して認識精度を調べた。この結果、図 2.10 並びに図 2.11 に示す 4 枚の原画像に欠損のない状態で含まれる 27 個（収穫適期球：20、不適期球：7）のキャベツのうち、19 個（70%）について収穫適期、不適期の判断を正しく行うことができた。この 19 個の内、収穫適期と判断した 15 個の位置推定値の平均誤差は実測値換算で $\pm 33 \text{mm}$ 、同様に球径推定値の平均誤差は $\pm 25 \text{mm}$ であった。処理画像中の白枠はキャベツの推定位置と推定大きさである。キャベツ画像には結球部が外葉によって部分的に覆われているものも含まれていたが、開発したアルゴリズムでは結球部が約 1/2 以上 2 値化処理により抽出されていれば、テンプレート 1 とのマッチングで見つけ出すことができ、収穫適否の判断が行えた。



原画像 1

Original image (No.1)



処理画像 1

Detected cabbages (No.1)



原画像 2

Original image (No.2)

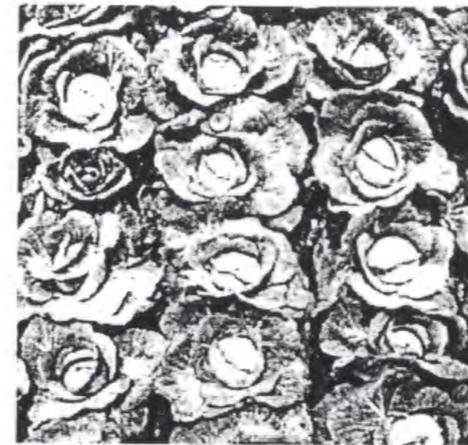


処理画像 2

Detected cabbages (No.2)

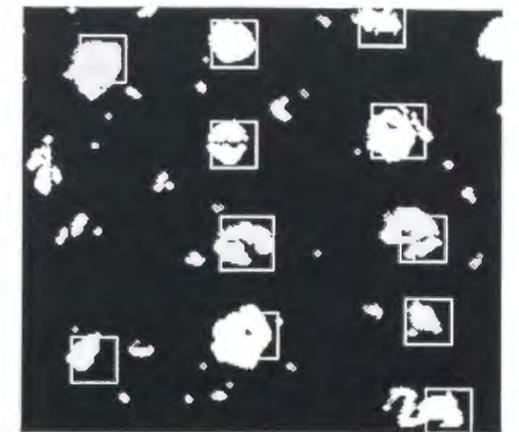
図 2.10 キャベツの原画像と処理画像 (その 1)

Fig 2.10 Original images and detected cabbages (Part 1)



原画像 3

Original image (No.3)



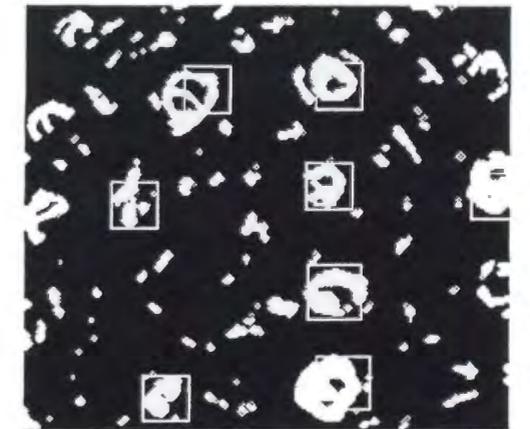
処理画像 3

Detected cabbages (No.3)



原画像 4

Original image (No.4)



処理画像 4

Detected cabbages (No.4)

図 2.11 キャベツの原画像と処理画像 (その 2)

Fig 2.11 Original images and detected cabbages (Part 2)

誤判断は、テンプレート1との相関で棄却されたものが5個(18%)で、最も多かった。原因は、ハレーションや外葉によって大部分が覆われていたことによる未抽出であった。本手法では、結球が十分に抽出されていなくても認識できるよう配慮したが、さらに改善する必要が認められた。その他では、テンプレート2とのマッチングで収穫適期、不適期の判断を誤ったものが3個(11%)あった。その原因は、結球の抽出が十分でない場合や外葉の誤抽出によって生じた球径の計測誤差である。

2.4.2 処理速度

同一画像を供試して、誤認識4個を含む計11個の認識に必要な処理時間を調べた結果、表2.1に示すように、最適化を行わなかった条件1では198.6s要したが、アルゴリズムを改良した条件2では18.1sに短縮することができた。特に、画像の縮小、データの絞り込み、及び活性化関数の近似による効果が大きく、2値化に要する処理時間を大幅に短縮することができた。さらに、条件3の8台のCPUによる並列処理により、8.8sまで処理速度を高めることができた。また、1個目の認識までの所要時間は条件3で2.8sであった。本手法は複数個のキャベツを認識できることから、収穫機に搭載して1枚の画像に含まれる複数個のキャベツを連続収穫可能な実用的な処理速度であると考えられる。

表 2.1 処理時間
Table 2.1 Processing time

	Condition 1 1 CPU	Condition 2 1 CPU Improved	Condition 3 8 CPUs Parallel
Number of pixel	512x480	256x240	256x240
Processing time	[s]	[s]	[s]
Binarization	105.3	6.0	0.9
Neighboring operation	11.7	1.5	0.1
Data communication	0.0	0.0	0.4
Y profile	0.0	0.0	0.2
Matching	81.6	10.6	7.2
Total processing time	198.6	18.1	8.8

第5節 結球野菜画像認識装置の開発

2.5.1 画像認識装置

野外の不安定な光条件下で、安定的に結球部を抽出できる画像認識技術の開発を目的として、ダイナミックレンジ拡大のために電子シャッタ速度の制御回路を取り付けた2板式CCDカメラを試作し、結球部の抽出を試みた。

これまでの農用ロボット分野では、キュウリ認識のために、葉と果実の近赤外光域における分光反射率の差異に着目して、可視光と近赤外光を受光する方式の2板式カメラに関する研究が報告されている⁹⁾。図2.1に示すように、キャベツの場合、結球部と外葉の分光反射特性の特徴は、キュウリとは反対に近赤外線領域では結球部、外葉共に反射率が高く、550nm付近の可視領域に反射率の差異が見られることである。そこで、この特徴的な二つの領域の反射光を受光する2板式カメラを試作した。

画像認識装置を図2.11に示す。レンズ(ニコン製カメラ用マウント)からの入射光を、ビームスプリッタによって2台のCCDモノクロカメラ(日立製:KP-M1、2/3 inch CCD)で受光する。1台のモノクロカメラは、結球部と外葉の分光反射特性の差異が最も大きい550nm付近の光を透過するバンドパスゼラチンフィルタを装着し、他の1台は両者の分光反射特性の差異が最も小さい近赤外域(690nm以上)の光を透過するIRゼラチンフィルタを装着した。

野外では、ハレーションによって、CCDカメラで撮影した画像から十分な視覚情報が得られないことが少なくない。そこで、カメラの電子シャッタを利用してダイナミックレンジを拡大した²⁰⁾。本機は、試作した電子シャッタ速度制御回路によって、外部電圧信号でシャッタ速度を1/60~1/10000sまで7段階に設定できる。これを利用して1/60sで撮影した画像にハレーション部分がある場合には、シャッタ速度を高めて再度撮影を行い、飽和しなくなるまで順次撮影を繰り返した。撮影した複数枚の画像は、輝度値とシャッタ速度の関係よりリニアな輝度値に換算して処理を行う。本試作機では1/60sでの256階調を基準として、1/10000sまでのシャッタ速度利用により、最大42667階調の輝度値を得ることが可能である。

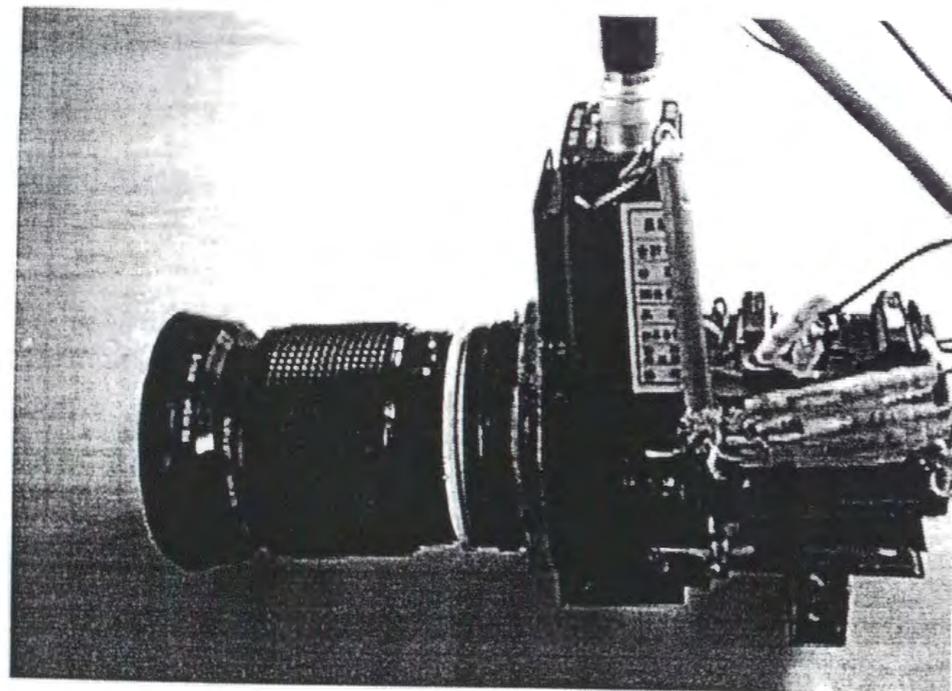
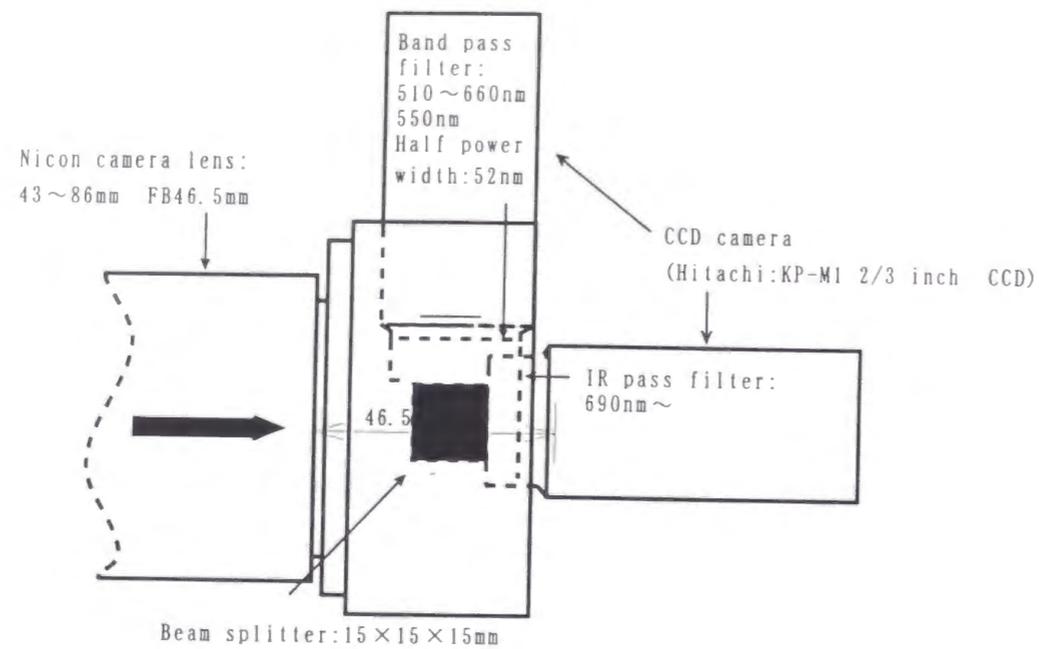


図 2.11 画像認識装置

Fig 2.11 Image recognition device

2.5.2 野外光のスペクトル

野外光の照度と分光スペクトルを測定して、その変動を調べた。測定は、晴天日に分光分析器（オプトリサーチ製：マルチスペクトルメータ HSR-8000、ゲイン5倍、積分時間0.3s）によって、農林水産省農業研究センター（NARC: National Agriculture Research Center）にて午前1回、午後2回の合計3回測定した。

図 2.12 に示のように、野外光は日中の照度変動に応じて含まれるスペクトル成分の割合も変化する。また、野外光は時間帯ばかりでなく、季節、天候や場所によってもスペクトルが異なることから³⁾、開発する画像認識技術にはこれらの影響を除去して、安定した処理を行えることが求められる。

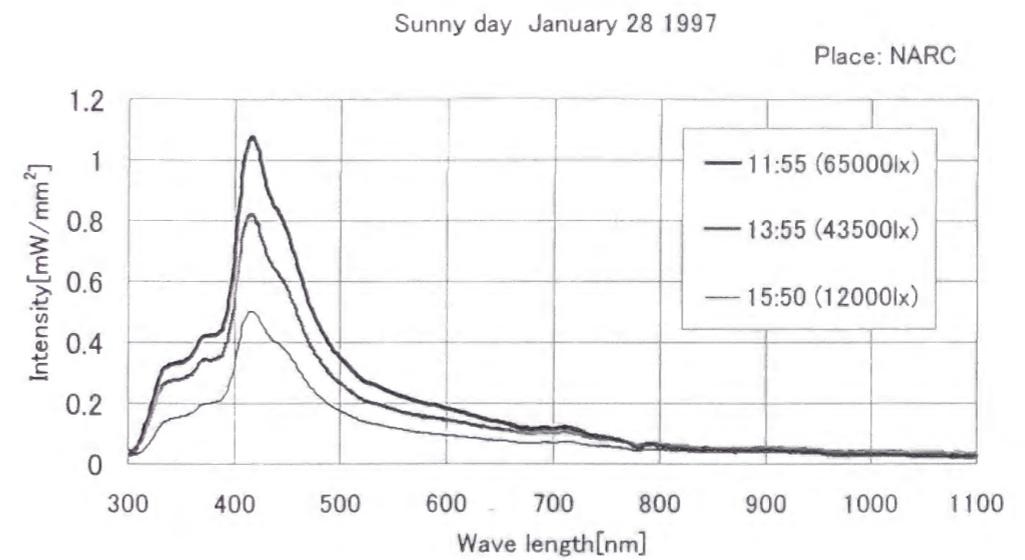


図 2.12 晴天日の野外光スペクトル

Fig 2.12 Spectrum of sunny day

2.5.3 キャベツの結球抽出実験

結球部の抽出は、結球部と照度変動の影響を相殺するために2つの波長域画像の輝度比を用いた。なお、葉面での反射は完全拡散反射とし、鏡面反射の影響は無視することとした。

2値化しきい値は、式(2.8)、(2.9)によって求めた結球葉と外葉の画素輝度比を、式(2.10)に代入して求めた。

$$\frac{\int_{510}^{660} f_{sun}(\lambda) f_{in}(\lambda) f_{550}(\lambda) f_{CCD}(\lambda) d\lambda}{\int_{690}^{1050} f_{sun}(\lambda) f_{in}(\lambda) f_{IR}(\lambda) f_{CCD}(\lambda) d\lambda} = P_{out} \quad (2.8)$$

$$\frac{\int_{510}^{660} f_{sun}(\lambda) f_{out}(\lambda) f_{550}(\lambda) f_{CCD}(\lambda) d\lambda}{\int_{690}^{1050} f_{sun}(\lambda) f_{out}(\lambda) f_{IR}(\lambda) f_{CCD}(\lambda) d\lambda} = P_{in} \quad (2.9)$$

$$\frac{P_{out} + P_{in}}{2} = T_{hold} \quad (2.10)$$

ここで用いたパラメータは

$f_{sun}(\lambda)$: 撮影光スペクトル

$f_{in}(\lambda)$: 結球葉分光反射率

$f_{out}(\lambda)$: 外葉分光反射率

$f_{550}(\lambda)$: バンドパスフィルタ透光率(550nmPeak)

$f_{IR}(\lambda)$: 近赤外光透過フィルタ透光率

$f_{CCD}(\lambda)$: CCD素子受光感度

P_{in} : 結球葉の近赤外と可視光域の反射光推定輝度比

P_{out} : 外葉の近赤外と可視光域の反射光推定輝度比

T_{hold} : 2値化しきい値

である。上記の式で用いた撮影光スペクトルの積分値は、図2.12と同様に撮影時にマルチスペクトルメータによって測定した。また、結球葉並びに外葉の2波長帯域の分光反射率は図2.1の分光光度計によって測定した値を用い、CCDカメラの受光素子感度、フィルタの透光率はカタログ値を使用した。計算によって求めた輝度比は $P_{in} = 2.57$ 、 $P_{out} = 1.01$ 、しきい値は $T_{hold} = 1.79$ である。

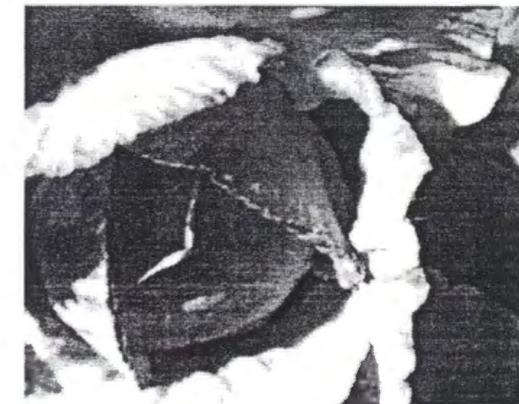
キャベツ(冬玉: 球径120mm)の撮影は、曇天時にカメラのアンプゲイン係数(ガンマ係数)を1、固定ゲインを0dBに設定して、シャッタ速度は1/60sから始め、すべての画素が飽和しなくなるまで順次速度を高めて行った。なお、1/60sで得られた画像の輝度80以下の低輝度画素はS/N比が十分でないため使用しないこ

ととした。

2.5.4 実験結果及び考察

処理に用いた画像は、図2.13に示すシャッタ速度1/60sで撮影した1枚の近赤外光画像と、図2.14(a)、(b)に示す1/60、1/125sで撮影した2枚の可視領域画像の計3枚である。図2.15に示すように、2値化により結球部を認識できることが確認できた。

この結果、試作2板式カメラによってシャッタ速度を変更して、ハレーションがなくなるまで撮影を繰り返して得られた複数枚の画像と、撮影光のスペクトル測定値等から、しきい値を求める2値化アルゴリズムを用いて結球部を抽出できる可能性を見いだせた。なお、部分的にみられる誤抽出の原因としては、葉面の撮影光の鏡面反射や葉を透過する光、及び葉面間での乱反射の影響が考えられる。



Shutter speed 1/60s

図 2.13 近赤外光透過フィルタ撮影画像

Fig 2.13 Image through IR pass filter



Shutter speed 1/60s



Shutter speed 1/125s

図 2.14 550nm バンドパスフィルタ撮影画像

Fig 2.14 Images through 550nm band pass filter



図 2.15 2 値化結果

Fig 2.15 Binarized image

第 6 節 摘要

キャベツ認識手法の開発を目的としてキャベツの結球部を抽出し、その位置と球径を計測する画像処理手法、並びに撮影条件の変動著しい野外圃場で安定した画像を得ることのできる画像認識装置を開発し、実験によってそれらの性能を明らかにした。本章の要約は以下のとおりである。

- 1) 外葉との色差が少ないキャベツ結球部の抽出は、カラー画像の輝度データを色彩座標系データに変換した後、ニューラルネットモデルによる 2 値化によ

って行った。

- 2) 外葉によって覆われたり、ハレーション、病害や生理傷害によって欠損して抽出されることの多い結球部の認識は 2 枚のテンプレートを、1 枚目のテンプレートとの相関より関心領域を特定し、その領域内を 2 枚目のテンプレート 2 によって精査する 2 段階のマッチング法によって行った。
- 3) アルゴリズムは、画素の色相角からニューラルネットモデルへの入力データをおある程度絞り込み、判別の難しい画像データのみをニューラルネットモデルで 2 値化することと、プログラムコードの最適化や並列化によって処理の高速化を図った。
- 4) 実験の結果、収穫適期・不適期の判定精度は約 70%、1 枚の画像に含まれる 11 個のキャベツの平均処理時間が 8.8s で、ロボットに搭載可能な処理速度を得ることができた。
- 5) 対象作物の認識が困難かつ高速処理が要求される場合、作物の色、形状及び作物の植え付け間隔の既知情報を活用して、データを順次絞り込み処理する本手法の有効性を明らかにした。
- 6) キャベツの分光反射特性に着目し、特徴的な分光反射特性を示す 2 つの波長領域を、2 台の CCD 受光素子によってとらえることのできる結球野菜画像認識装置を試作した。
- 7) 試作機による結球部の抽出は、キャベツの分光反射特性、撮影時に測定した撮影光の分光強度を利用して、2 波長域の撮影画像の輝度比よりしきい値を求める 2 値化アルゴリズムによって行った。
- 8) 試作装置では、部分的にハレーションがみられる画像でも、電子シャッタのシャッタ速度を変更してダイナミックレンジを拡大し、輝度値に飽和がみられなくなるまで撮影した複数枚の撮影画像を組み合わせることで処理することにより、野外での認識が可能となった。結球部抽出実験の結果、部分的に誤抽出はみられるものの、本装置の手法によって野外で安定的に結球を抽出できる可能性が示唆された。

参考文献

- 1) Murakami, N., Inoue, K., Otsuka, K. : Selective harvesting robot of cabbage, Proceedings of international symposium on automation and robotics in bioproduction and processing, JSAM, Vol.2 25-31, 1995 (Kobe Japan)
- 2) 川村 登, 並河 清, 藤浦建史, 浦 元信 : 農業用ロボットの研究(第2報), 農機誌, 47(2), 177-182, 1985
- 3) 有馬誠一, 藤浦建史, 近藤 直, 芝野保徳, 山下 淳 : キュウリ収穫ロボットの研究(第3報), 農機誌, 57(1), 51-58, 1995
- 4) 近藤 直, 遠藤俊三 : 果実認識用視覚センサの開発(第3報), 農機誌, 50(6), 83-89, 1988
- 5) 近藤 直, 芝野保徳, 毛利建太郎, 門田充司 : ブドウ管理・収穫用ロボットの基礎的研究(第2報), 農機誌, 56(1), 45-53, 1994
- 6) 田中芳夫, 小川洋司 : パソコンベース色彩画像処理による果実抽出, 農機誌, 52(1), 61-67, 1990
- 7) 藤浦建史, 浦 元信 : 果樹園用収穫ロボットの研究, 科学研究補助金(一般研究(c))研究成果報告書, 25-32, 1988
- 8) Wilhot, J. H., Byler, R. K., Koslav, M. B., Vaug-ham, D. H. : Broccoli head sizing using image textural analysis, Transactions of ASAE, 33(3), 1736-1740, 1990
- 9) 行枝 亮 : レタス選択収穫のためのビジョンシステム(第1報), 第53回農機学会年次大会講演要旨, 125-126, 1994
- 10) Dohi, M., Fujiura, T., Nakano, S. : Studies on potato harvesting robot(1), Proceedings of international symposium on automation and robotics in bioproduction and processing, JSAM, Vol.1 21-26, 1995 (Kobe Japan)
- 11) 徳田 勝, 並河 清 : 画像によるスイカ果実の識別, 農機誌, (57)2, 13-20, 1995
- 12) 大角雅春, 中村喜彰, 山崎 稔 : 画像処理による水稻葉色測定に関する研究(第2報), 農機誌, 57(4), 45-52, 1995
- 13) 高木幹雄, 鳥脇純一郎, 田村秀行編 : 画像処理アルゴリズムの最新動向, 新技術コミュニケーションズ, 画像処理, 188-196, 1993
- 14) 杉本光穂, 村上則幸, 大塚寛治, 井上慶一, 深山大介, 鎌田直人 : セル成形苗の画像認識手法の検討, 農機学会第31回関東支部年次大会講演要旨, 20-21, 1995
- 15) 池田善郎, 斉藤義行 : ニューラルネットによる農産物の形状判定, 農機誌, 55(3), 59-64, 1993
- 16) 中野 馨 : ニューロコンピュータ, 技術評論社, 1989
- 17) 尾上守夫編 : 画像処理ハンドブック, 昭晃社, 303-305, 1990
- 18) 藤吉弘亘, 梅崎太造 : ナンバープレート位置検出法の評価, 信学技報(93)40, 45-52, 1993
- 19) 藤浦建史 : 農業ロボットの視覚部, 農機誌, 58(1), 144-149, 1996
- 20) 山田 啓一, 中野 倫明, 山本 新 : 証明変動にロバストな部品位置決め用ロボットシステム, ロボット学会誌 14(6), 153-156, 1996
- 21) 山内次郎, 金沢寿吉 : 新編色彩科学ハンドブック, 東京大学出版会, 11, 1980

第3章 キャベツ収穫ロボット1号機の開発

第1節 はじめに

露地野菜収穫のロボット化を目的として、前章でキャベツの収穫適期を判定するための画像処理手法を開発した。ハンドリング機構はキャベツの形状に適合し、確実に結球部を把持できることが要求され、その収穫範囲、動作機構、部材寸法やロボットの移動方法は、キャベツ形状の他に、栽培様式や画像認識装置の視野角等から検討しなければならない。本章では、キャベツの形状、栽培様式を調査し、その結果を基に開発した試作1号機の概要、収穫方法及び要素の技術特徴について述べる。

第2節 キャベツの形状と栽培様式

農家及び農業研究センター試験圃場において、キャベツの球径、球高、質量及び栽培様式を調査した。その結果、M、L及び2Lに等級分けされた後、箱詰め出荷されているキャベツの球径は表3.1に示すように160～220mmの範囲にあり、球高は118～135mmであった。この中で生食用は主にLが出荷されている。また、収穫適期球の質量は、農業研究センター試験圃場で栽培した球径160mm以上のキャベツ72個の平均が1.07kgであった。

キャベツの栽培様式は1条畝立て栽培の場合、群馬県嬬恋村、愛知県赤羽町、岩手県西根町ではそれぞれ畝幅0.45m、株間0.35m、畝幅0.60m、株間0.35m、畝幅0.60m、株間0.30mで植え付けられている。これらの様式を参考にして、ロボットは、畝幅0.60m、株間0.40m前後で1条畝立て栽培されているキャベツを2畝またいで走行し、収穫できるよう設計した。

表 3.1 キャベツの圃場調査

Table 3.1 Field investigation of cabbage

Investigation 1				
Class	Diameter [mm]	Average diameter [mm]	Average height [mm]	Sample number
M	160 ~ 180	171	118	20 (10 cabbages/box)
L	190 ~ 205	198	135	16 (8 cabbages/box)
2L	205 ~ 220	216	135	12 (6 cabbages/box)

Place :Tsumagoi Vil. in Gunma Pref. Variety : Aoba
Ridge width : 0.45m Distance between plants: 0.30m

Investigation 2				
Diameter [mm]	Average diameter [mm]	Mass [kg]	Average mass [kg]	Sample number
140 ~ 158	151	0.66 ~ 1.03	0.79	13
160 ~ 202	175	0.68 ~ 1.62	1.07	72

Place : NARC(National Agriculture Research Center) in Ibaraki Pref.
Variety : Fuyuou
Ridge width : 0.60m Distance between plants : 0.40m

第3節 試作1号機の構成

3.3.1 試作機の概要及び収穫方法

試作1号機の外観並びに諸元を図3.1、表3.2に示す。試作機はクローラタイプの台車上にマニピュレータ及びハンドとそのコントローラ及び画像処理用コンピュータを搭載し、画像処理用CCDカメラはマニピュレータのアームに取り付けている。このシステムによって、1回の撮影で収穫できる範囲は上述の栽培様式で3条×3株である。

マニピュレータは広い作動領域を有し、質量1kg程度のキャベツ結球部を能率的に扱う必要があることから油圧駆動方式とした。油圧駆動はアクチュエータのパワーレシオが電動方式や空圧駆動方式に比べて優れており、また、エンジンによって油圧ポンプを直接駆動できるため、大容量の電源が不要となりシステムのまとまりも良い。このような理由から油圧駆動は建設機械などに広く採用されており、野外作業を行う油圧駆動方式の農業用ロボットも幾つか研究事例が報告されている²³⁾。

グリッパの駆動についても、システム全体のまとまりと把持力をリリース圧によって自由に設定できることから、マニピュレータ同様油圧駆動方式とした。

試作1号機による収穫は、以下の手順で行う。

- 1) ロボット前方中央までアームを運び、地上より高さ約2.0mの位置から圃場を撮影する。
- 2) 撮影画像より結球部球径を推定し²⁴⁾、収穫適期と判定したキャベツ頭上にロボットアーム先端の収穫用グリッパを運ぶ。
- 3) グリッパの基部に取り付けた超音波センサ(キーエンス製:UD-300)によってキャベツとの距離を計測しながらグリッパを降下させる。
- 4) 十分近づいた時点で、球を把持し、引き抜いて収穫する。
- 5) 収穫したキャベツを圃場の所定の位置に置いたコンテナ上で放出する。

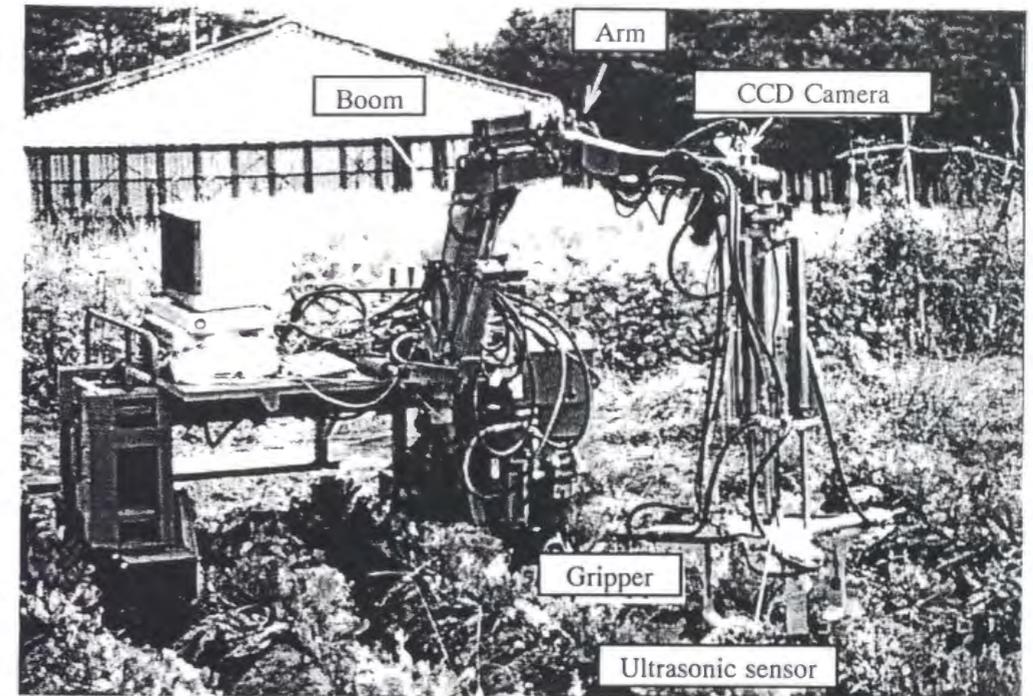


図3.1 キャベツ収穫ロボットの外観

Fig 3.1 Prototype of robotic cabbage harvester

表3.2 ロボットの諸元

Table 3.2 Dimensions of the robot

Dimensions	Length	2200 mm
	Width	1670 to 2159 mm
	Height	1135 mm
Mass	520 kg	
Payload	450 kg	
Engine	4.4 kW/1800rpm	
Hydraulic pump	Type	Gear pump
	Displacement	5 cc/rev
Transmission	Hydrostatic transmission(HST)	
Manipulator and gripper	Type	5-D.O.F manipulator
	Mass	74 kg (included gripper)

3.3.2 ロボットの構成要素

試作したマニピュレータを Denavit-Hartenberg⁴⁾の記法によって図 3.2 並びに表 3.3 に示す。表中の a 及び d は関節間の長さに関するパラメータ、 θ_1 から θ_4 及び a_5 は関節の変数、 α は関節軸の回転角度である。図中、関節 4 はアクチュエータを持たない自由関節である。その関節に直動関節をもつ 3 指の収穫用グリッパを取り付けた。

キャベツ収穫用マニピュレータは、地上部近くに広い作動領域があること、グリッパを取り付けてもキャベツを収穫するのに十分な強度を持つことが必要であるため、市販のミニパワーショベル（神戸製鋼製：SS1）のバックホーをベースとして、回転関節 4 自由度、直動関節 1 自由度の合計 5 自由度をもつマニピュレータを試作した。このマニピュレータの各関節の回転とグリッパの指の開閉は、全て油圧シリンダによって行う。また、圧油は、走行用エンジンで駆動される油圧ポンプから供給される。

グリッパは、指の最大開度が 300mm であり、多少の位置決め誤差が生じても球を把持できる。キャベツとの距離は、グリッパの基部に取り付けた超音波センサによって計測する。また、把持指には触圧センサを取り付け、把持状態の確認に用いる。指はそれぞれ独立して駆動することができ、3 指が等速度で動作するように分流弁を通して圧油を供給した。

上述のマニピュレータを搭載するクローラタイプの農業用運搬台車は、生物系特定産業技術研究推進機構（以下生研機構）で試作され、その最大積載量は 4400N で静油圧駆動変速機（以下 HST）により微速走行が可能である。トレッドは、作業に応じて調整が可能であり、実験ではキャベツ 2 畝をまたいで走行できるように 1.20m に設定した。また、ロボットの駆動用に吐出量 5cc/rev の油圧ポンプを持っている。

3.3.3 制御システム

図 3.3 に制御システムを示す。キャベツの画像認識は並列処理コンピュータ（トランスピュータ；T805、T800）を 8 台接続して使用し、その内の 1 台は EIA-232C によって接続したマニピュレータ用コントローラ（ガリル製：DMA-740）とハンドの制御にも用いた。

マニピュレータの位置決め制御は、ブームとアームはシリンダに取り付けたリニアエンコーダ、腰はロータリエンコーダによって得る位置情報より、マニピュレータ用コントローラによって油圧流量制御弁（東京精密測器製：NF-304F）をデジタル P I D 制御⁵⁾した。また、グリッパを上下に動作させる直動関節と指の開閉も、他の関節と同様の油圧流量制御弁で制御した。なお、視覚認識したキャベツの 2 次元推定位置までハンドを運ぶた

めに、マニピュレータ関節角の計算は、マニピュレータ原点から結球中心までの距離とブーム長及びアーム長から余弦定理によって行った⁶⁾。

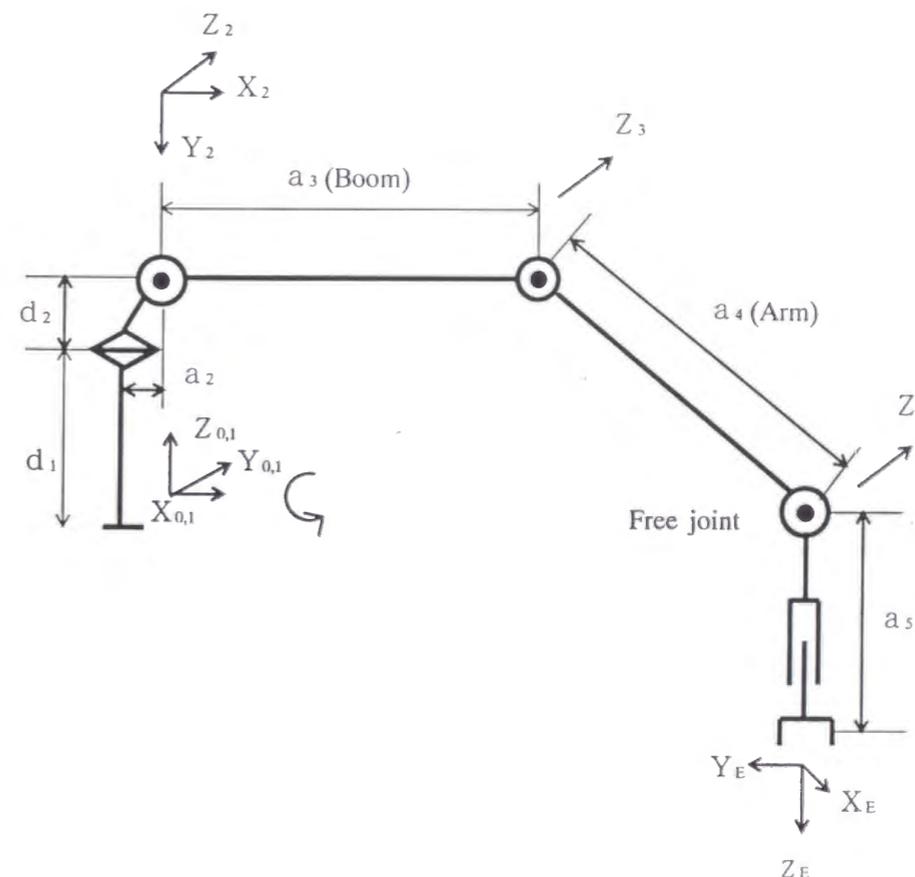


図 3.2 試作マニピュレータ

Fig 3.2 Designed manipulator

表 3.3 マニピュレータのリンクパラメータ

Table 3.3 Link parameters of manipulator

link	variable	α [deg]	a [mm]	d [mm]
1	θ_1	-90	0	980
2	θ_2	0	35	80
3	θ_3	0	950	0
4	θ_4	0	940	0
5	a_5	0	a_5	0

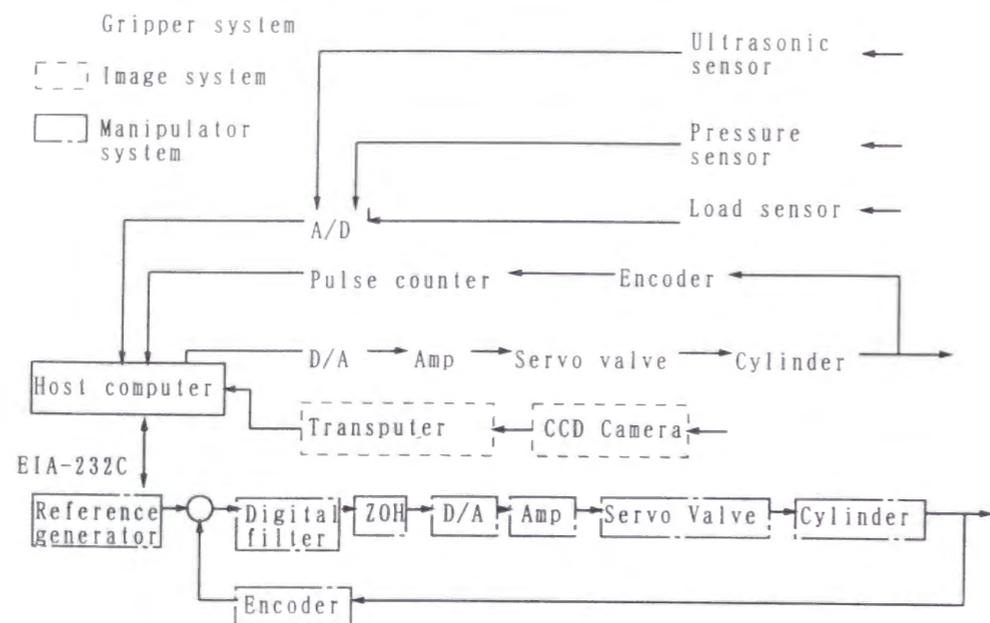


図 3.3 制御システム

Fig 3.3 Control system

第4節 圃場実験

3.4.1 実験方法

平成6年10月に農業研究センター試験圃場にて、茎を切断したキャベツ（金春）を配置し、ロボットに視覚認識による収穫適期キャベツの判断から、キャベツを持ち上げて所定の位置で放出するまでの一連の動作を行わせ、作業精度と作業速度を調査した。画像処理で用いるキャベツのテンプレートの大きさは、球径 170 ~ 230mm を収穫適期と判定するよう設定した。カメラは 1/16 の ND フィルターを装着し、オートアイリスを使用して撮影した。

3.4.2 実験結果及び考察

表 3.4 に実験結果を示す。配置した 10 個のキャベツに含まれる収穫適期球 5 個のうち、

球径が小さく誤認識したものが 1 個、また、収穫しなかった 5 個の中に、収穫適期球が 1 個あった。誤認識の要因としては外葉によって球が覆われていたこと、ハレーションや外葉の変色が考えられる。

収穫時間を表 3.5 に示す。キャベツ認識から圃場の所定の位置に置いたコンテナに入れるまでの一連の動作に要する時間の平均は 107s であり、このうち、持ち上げてからコンテナまで 51s を要した。

以上の結果、試作 1 号機は収穫動作を行うことができたものの、認識精度や作業速度に課題が残った。特に、作業速度は 1 個の収穫に 100s 以上を要し、大幅な向上が必要であった。その原因は、ハンドリング対象キャベツが数 kg にもかかわらずマニピュレータ可動部分の総質量がハンドを含めて 74kg もあり、エンジンの出力、各アクチュエータ出力と負荷とのマッチングが適切でなかったためと考えられる。また、収穫方式がキャベツの引き抜き方式であるため、持ち上げた後、主茎に付着した土壌が他のキャベツを汚してしまう問題が発生した。したがって、汚れによって他のキャベツの商品価値を損ねないために、農家の作業と同様に茎葉を切断して収穫することのできる、茎葉処理機能をロボットに付加する必要があると考えられる。

表 3.4 実験結果

Table 3.4 Experiment result

[mm]			
No	Diameter of picked cabbages	No	Diameter of remained cabbages
①	180	⑥	144
②	176	⑦	158
③	170	⑧	× 192
④	168	⑨	154
⑤	× 156	⑩	148

×: Misjudgement

表 3.5 作業時間

Table 3.5 Operation time

Operation time	[s]
① Time to initialize the robot and set the manipulator to take image	5
② Time to process image	15
③ Time to move the hand on the top of the head	13
④ Time to pick up a cabbage	23
⑤ Time to put the cabbage on the container	51
Total operation time to harvest one cabbage	107
Total operation time to harvest two cabbages	240

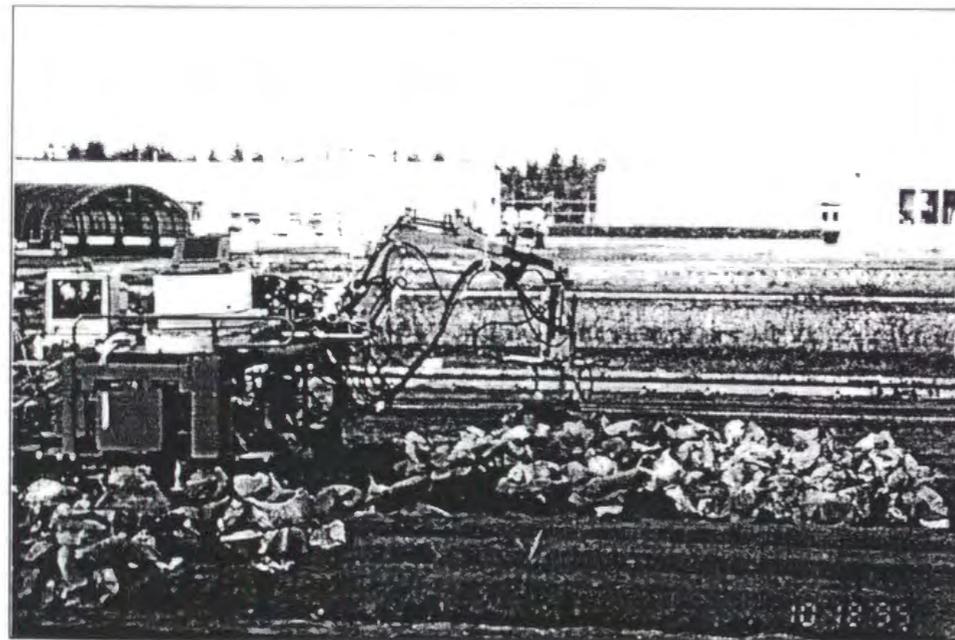


図 3.4 試作 1 号機によるキャベツの収穫

Fig 3.4 Cabbage harvesting by Prototype 1

第 5 節 摘要

キャベツの圃場調査結果を基に、キャベツ収穫ロボットの設計仕様を検討した。これに基づいて収穫ロボット 1 号機を試作し、圃場実験によってその性能を確認した。本章の要約は以下のとおりである。

- 1) 前章にて述べた画像処理アルゴリズムにより、収穫適期を判断して選択的にキャベツを収穫するロボットを開発した。試作 1 号機は H S T 駆動の台車上にパワーショベルのバックホーをベースに開発した油圧駆動の 5 自由度多関節マニピュレータを搭載し、収穫用ハンドは 3 指の油圧駆動グリッパを用いた。
- 2) キャベツ収穫方法は、動作範囲内の収穫適期球の頭上までグリッパを運び、その基部にある超音波センサによって、キャベツとの距離を計測しながらグリッパを降下させ、グリッパが十分接近したところでキャベツを把持し、引き抜いて収穫した。
- 3) ロボットによるキャベツ収穫の可能性は、実験により確認した。しかし、作業時間は 1 個あたり 107s であり、実用化には作業速度の改善が必要であった。また、付着した土壌でキャベツを汚してしまうことがないように、茎葉の切断機構を取り付ける等のグリッパの改良が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本施設園芸協会：野菜生産機械化緊急対策事業 機械化適性規格・流通形態調査検討会報告書，1997
- 2) 並河清，梅田幹雄，飯田訓久：農業用油圧マニピュレータの研究(第 1 報)，農機誌，56(4)，67-74，1994
- 3) 藤浦建史，浦元信，川村登，並河清：果樹園用収穫ロボットの研究，農機誌，52(2)，35-42，1990
- 4) 村上則幸，大塚寛治，井上慶一，杉本光穂：画像によるキャベツ認識技術の開発，農機誌，59(2)，65-77，1997
- 5) 村上則幸，井上慶一，大塚寛治，杉本光穂：キャベツのロボット収穫，robomec '96 講演論文集 vol.A，600-603，1996

- 6) Paul, R. P. : ロボットマニピュレータ, コロナ社, 1984
7) 金原昭臣, 黒須茂 : デジタル制御入門, 日刊工業新聞社, 90-109, 1990
8) Brady, M., et. al. : Robot motion 1 (Planning and control), HBJ shuppan, 16-20, 1985

第4章 キャベツ収穫ロボット2号機の開発

第1節 はじめに

試作1号機では、1個のキャベツ収穫開始からコンテナに運ぶまでに平均107sを要し、動作速度の向上が必要であった。この原因は、マニピュレータ可動部分の総質量が74kgあり、エンジンの出力、各アクチュエータ出力と負荷とのマッチングが適切でなかったためである。そこで、試作2号機の開発に際しては、マニピュレータについては解析によってその設計仕様を検討し、ハンドについてはキャベツの茎切断力を調査して、ハンドが茎葉処理するために必要な力を明らかにした。また、1号機の反省に基づいてキャベツ収穫方法についても再検討を行った。

本章では、設計したマニピュレータの動作を解析と実験によって調べてロボットの作業速度を推定し、マニピュレータの設計仕様を明らかにした。次に、キャベツの茎切断力の調査結果、茎葉切断処理が可能なハンドの機構、結球のセンシング及び制御手法について述べ、最後に、これらの要素を統合して開発した試作2号機について述べる。

第2節 マニピュレータの設計と試作

適切な作業速度を得られるよう、マニピュレータは軽量化に重点を置いて設計した。図4.1に試作した極座標型マニピュレータを示す。マニピュレータの自由度は腰、肩の回転及び腕の伸縮の3自由度であり、ロボットは収穫ハンドを接続する先端の自由関節を含めて4自由度を有する。部材には安価で許容応力の大きい一般構造用角形鋼管を用いた。極座標型は、可動部の制御誤差がアーム先端まで蓄積しないため、多関節型に比べ各可動部の位置決め精度は低くて済む。また、軽量化のために腕は先端の負荷に対して多少のたわみを許容して設計し、腕の部材には $h=75\text{mm}$ 、 $w=45\text{mm}$ 、 $t=2.3\text{mm}$ と $h=60\text{mm}$ 、 $w=30\text{mm}$ 、 $t=2.3\text{mm}$ の角形鋼管を使用した。腕のたわみは、回転軸より2.1mの腕の先端位置にハンド及びキャベツの静負荷196Nが作用するものとし、直動関節のガタを無視して計算すると、4.1mmであった。軽量化の結果、マニピュレータ駆動部分の総質量は16.4kgに軽減でき、先端に12.4kgのハンドを装着してもその質量は1号機の39%であった。

アクチュエータは、腰の回転と腕の伸縮に油圧モータ(ダンフォス製: OML12.5, OML8)、肩の回転には油圧シリンダ(内径: 40mm、ストローク: 250mm)を用い、腰は1/30の減

速機、腕はリード幅 8mm/rev のボールネジで駆動した。

制御のための位置情報は、肩の回転、腕の伸縮はプルワイヤタイプのポテンシオメータから、腰の回転はロータリエンコーダにより得ることとし、位置検出の分解能は腰のエンコーダが 4777puls/rad、肩駆動用シリンダのポテンシオメータが 6.5bit/mm、腕の伸縮が 2.5bit/mm であった。

制御にはトランスペュータ (T805) を使い、ポテンシオメータ及びエンコーダからの信号は EISA バス拡張ボックスに取り付けた AD 変換器 (分解能 12bit) とパルスカウンタにより計測し、サーボ弁 (東京精密測器製: NF-401F) の制御信号は、DA 変換器 (分解能 12bit) から出力される電圧信号を、アンプを介して電流信号に変換して生成した。

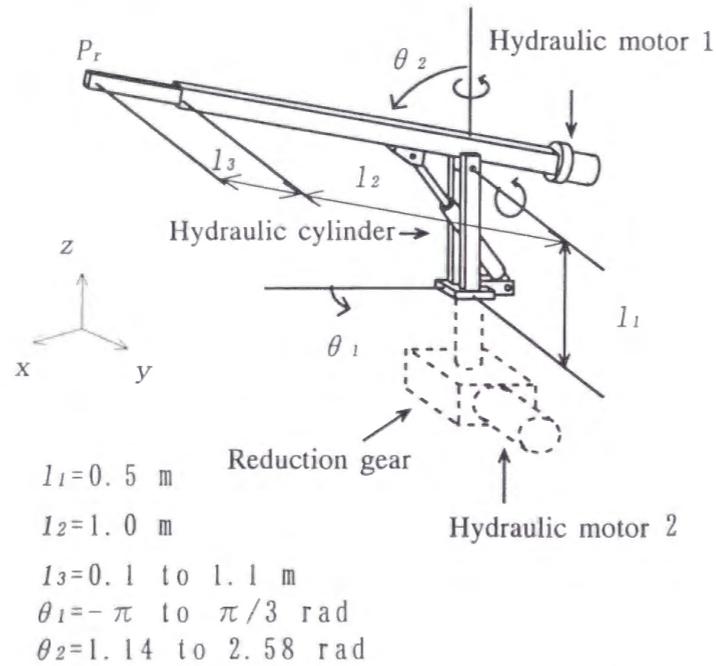


図 4.1 試作マニピュレータ

Fig 4.1 Prototype manipulator

第3節 マニピュレータの解析

マニピュレータは、画像より得られるキャベツの位置情報を基に、ハンドをキャベツが収穫できる位置まで運ばなくてはならず、キャベツの2次元位置からマニピュレータ各関節の位置を計算しなければならない。このため、運動学的な解析によって関節の角度とマニピュレータ先端の絶対位置との関係を明らかにする必要がある。また、同形式の収穫用マニピュレータを設計するために、所要動力とマニピュレータの動作速度の関係を明らかにすることも重要である。そこで、本章では、試作マニピュレータの運動学的、動力学的解析を広瀬¹⁾の方法により行った。

4.3.1 試作マニピュレータの運動学的解析

図 4.1 に示すように試作マニピュレータは極座標型で、腰、肩の回転と腕の伸縮の3自由度を有する。ここで、関節の回転角として θ_1 、 θ_2 、関節長さとして l_1 、 l_2 及び伸縮する直動関節の長さ l_3 が与えられたときの腕先端 P_r の位置と姿勢を、有顔ベクトルによる表記法¹⁾によって求める。

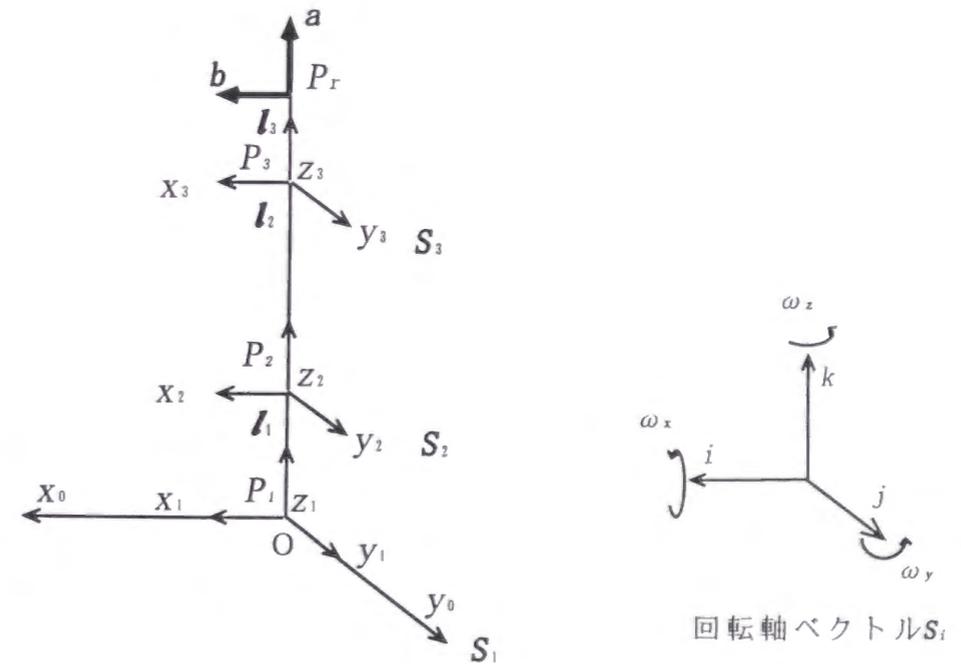


図 4.2 基準姿勢でのベクトル

Fig 4.2 Vectors of posture

(1) 基準姿勢とベクトルの設定

3次元空間において、方向は一般に3つのパラメータによって与えられるが、マニピュレータ自身回りの回転は表現できない。このために、腕の先端をz方向に向けた基準姿勢を考え、腕の先端を主軸単位ベクトル $a(a_x, a_y, a_z)$ とx軸方向に向けた副軸単位ベクトル $b(b_x, b_y, b_z)$ で姿勢を示すこととする。これらの姿勢ベクトルは、有顔ベクトルと呼ばれている。この有顔ベクトルによる表記では、最大6つのパラメータを用いることができるため、4つのパラメータを使用する Denavit-Hartenberg の記法³⁾に比べ、マニピュレータの向きを無理なく表現できる。図4.1の極座標型マニピュレータの基準姿勢でのベクトル図を図4.2に示す。ここで、各関節 P_i に設定した座標系を相対座標系 Σ_i ($i = 1 \sim 3$) と呼ぶ。また、ベース部 P_0 のOを原点とする座標系を絶対座標系 Σ_0 とする。相対座標系の x_i, y_i 及び z_i 軸は、絶対座標系 x_0, y_0 及び z_0 の軸方向と一致させる。そして、基準姿勢での関節を示すベクトル l_j ($j = 1 \sim 3$) は、関節 P_i から P_{i+1} にいたるベクトルとし、関節 P_i から l_i の質点 G_i までのベクトルを関節の質点ベクトル l_{Gi} と定義する。また、位置 P_i には単位ベクトル i, j, k で表される回転軸ベクトル S_1, S_2, S_3 を設定する。試作マニピュレータでは、このうちの S_3 は直動関節である。また、位置 P_i の絶対座標 Σ_0 における位置ベクトルを P_i と示す。なお、ベクトルは、文中他の記号と区別するために太字のイタリック文字で示している。

(2) 座標変換演算子の定義

先端位置 P_i を絶対座標系 Σ_0 で表すために、座標変換演算子と座標回転行列を導入する。座標変換演算子は、関節 P_i の上に設定した相対座標系 Σ_i で表す位置を、関節 P_{i+1} の上に設定した相対座標系 Σ_{i+1} での位置に変換するために用い、この座標変換演算子 ${}^iA_{i+1}$ と表す。ここで、演算子左肩の添え字は変換で参照する座標系を示している。他のベクトル表記記号にも同様に用いる。この演算子を用いて先端位置 P_i を相対座標系での位置に変換する。例えば、先端座標を P_i を相対座標 Σ_i で表すと iP_i となり、座標変換演算子 ${}^iA_{i+1}$ によって、下記のように変換できる。

$${}^2P_i = {}^2A_3 {}^3P_i \quad (4.1)$$

この変換を順次行うことによって、先端位置を絶対座標系で表す 0P_i を求める。この座標変換演算子による変換操作のうち、回転変換操作を行うのが座標回転行列であり iR_i と表す。具体的に図4.1を例として、相対座標系 Σ_i で表した位置を関節2の相対座標

系を Σ_2 による表示に改めるための座標回転行列を示す。

$${}^2R_3 = E^{j\theta_2} \quad (4.2)$$

ここで、右辺 $E^{j\theta_2}$ は回転変換行列と呼ばれ、右肩の添え字 $j\theta_2$ は回転軸ベクトル S_2 の回転軸方向 j と回転角度 θ_2 を表している。この行列と並進移動を示す位置ベクトル l による位置の変換によって座標変換演算子は座標系を変換する。

(3) マニピュレータ先端位置の絶対座標表示

試作したマニピュレータ先端位置を絶対座標で表し、その有顔ベクトルを求める。関節ベクトル、回転軸ベクトルと相対座標系 Σ_i での有顔ベクトル ${}^i a, {}^i b$ は次式によって表すことができる。

座標回転行列は

$${}^1l_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 \quad (4.3)$$

$${}^2l_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_2 \quad (4.4)$$

$${}^3l_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_3 \quad (4.5)$$

$${}^1S_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

$${}^2S_2 = {}^3S_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$${}^3a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

$${}^3b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$${}^0R_1 = E^{k\theta_1} \quad (4.10)$$

$${}^1R_2 = E^{j\theta_2} \quad (4.11)$$

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

ここで、 $C_1 = \cos\theta_1$ 、 $S_1 = \sin\theta_1$ 、 $C_2 = \cos\theta_2$ 、 $S_2 = \sin\theta_2$ である。

相対座標 Σ_3 における先端位置は

$${}^3P_r = {}^3l_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_3 \quad (4.14)$$

である。また、相対座標 Σ_2 における先端位置は S_3 が直動関節であることから

$${}^2P_r = {}^2A_3 {}^3P_r = {}^2l_2 + {}^3P_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_2 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_3 \quad (4.15)$$

によって表すことができる。先端 3P_r における主軸単位ベクトル軸 2a と副軸単位ベクトル 2b は

$${}^3a = {}^2a = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$${}^3b = {}^2b = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

であり、単位主軸ベクトルの向きは先端軸の方向と一致する。次に、相対座標 Σ_1 を参照した場合の先端位置と 1a と 1b は

$${}^1P_r = {}^1A_2 {}^2P_r = {}^1l_1 + {}^1R_2 {}^2P_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} C_2 & 0 & S_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -S_2 & 0 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} (l_2 + l_3)$$

$$\therefore {}^1P_r = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} S_2 \\ 0 \\ C_2 \end{bmatrix} (l_2 + l_3) \quad (4.18)$$

$${}^1a = \begin{bmatrix} S_2 \\ 0 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

$${}^1b = \begin{bmatrix} C_2 \\ 0 \\ -S_2 \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

である。最後に、絶対座標系 Σ_0 での先端の位置と 0a と 0b を求める。

$${}^0P_r = {}^0A_1 {}^1P_r = {}^0R_1 {}^1P_r = + \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_2(l_2 + l_3) \\ 0 \\ l_1 + C_2(l_2 + l_3) \end{bmatrix}$$

$$\therefore {}^0P_r = \begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 S_2 (l_2 + l_3) \\ S_1 S_2 (l_2 + l_3) \\ l_1 + C_2 (l_2 + l_3) \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

$${}^0a = \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} = {}^0R_1 {}^1a = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_2 \\ 0 \\ C_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 S_2 \\ S_1 S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (4.22)$$

$${}^0b = \begin{bmatrix} b_x \\ b_y \\ b_z \end{bmatrix} = {}^0R_1 {}^1b = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_2 \\ 0 \\ -S_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 C_2 \\ S_1 C_2 \\ -S_2 \end{bmatrix} \quad (4.23)$$

よって、原点 O を中心とする絶対座標系における位置 0P_r は、それぞれの関節間長と関節角度より式 (4.21) で表される。また、軸方向を表す主軸ベクトルは 0a 、副軸ベクトルは 0b で表すことができる。

なお、この姿勢は原点 O に関するオイラー角 α 、 β 、 γ によって下式によって表すことができる。

$$\alpha = \text{atan2}(a_y, a_x) = \text{atan2}(S_1, C_1) = \theta_1, \text{ あるいは } \alpha = \alpha + \pi \quad (4.24)$$

$$\beta = \text{atan2}(C_\alpha a_x + S_\alpha a_y, a_z) = \text{atan2}((C_1^2 + S_1^2) S_2, C_2) = \theta_2 \quad (4.25)$$

$$\gamma = \text{atan2}(-S_\beta (C_\alpha b_y - S_\alpha b_x), b_z) = \text{atan2}(-S_2 (C_1 S_1 C_2 - S_1 C_1 C_2), -S_2) = 0 \quad (4.26)$$

ここで、 $C_i^2 = \cos^2 \theta_i$ 、 $S_i^2 = \sin^2 \theta_i$ である。

これらの式により、画像中のキャベツ位置座標を、腰の回転中心を原点とする座標位置に換算して求めたキャベツ位置 P_1 、 P_2 と、任意の高さ P_3 を与えることによって、代数的に、関節角 θ_1 、 θ_2 及び l_3 を求めることができる。また、マニピュレータの軸方向と向きは、ベクトル a 、 b によって表すことができる。

4.3.2 マニピュレータの動学的解析

マニピュレータの駆動力と動作速度、及び加速度の関係を調べるために、マニピュレータの動学的な解析を行う。解析は回転関節と直動関節についてそれぞれ行う。まず、絶対座標系における関節 P_1 の角速度ベクトルと角加速度ベクトルを求める。関節 P_1 と P_2 の角速度ベクトル ${}^0\omega_i$ と角加速度ベクトル ${}^0\dot{\omega}_i$ は、回転軸ベクトルと回転角により次式で表される。

$${}^0\omega_1 = {}^0S_1\dot{\theta}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \quad (4.27)$$

$${}^0\omega_2 = {}^0\omega_1 + {}^0S_2\dot{\theta}_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 + \begin{bmatrix} -S_1 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \quad (4.28)$$

$${}^0\dot{\omega}_1 = {}^0S_1\ddot{\theta}_1 + {}^0\omega_1 \times ({}^0S_1\dot{\theta}_1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \quad (4.29)$$

$${}^0\dot{\omega}_2 = {}^0\dot{\omega}_1 + {}^0S_2\ddot{\theta}_2 + {}^0\omega_2 \times ({}^0S_2\dot{\theta}_2) = \begin{bmatrix} -S_1\ddot{\theta}_2 + C_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\ddot{\theta}_2 + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

また、関節 P_i の速度 0v_i と加速度 ${}^0\alpha_i$ は

$${}^0v_2 = {}^0S_1\dot{\theta}_1 \times {}^0l_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 = 0 \quad (4.31)$$

$${}^0v_3 = {}^0v_2 + {}^0S_2\dot{\theta}_2 \times {}^0l_2 = \begin{bmatrix} -S_1 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \times \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} l_2 = \begin{bmatrix} C_1C_2 \\ S_1C_2 \\ -S_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 l_2 \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} {}^0v_r &= {}^0v_2 + {}^0\dot{l}_3 + {}^0S_3\dot{\theta}_3 \times {}^0l_3 = \begin{bmatrix} C_1C_2 \\ S_1C_2 \\ -S_2 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 l_2 + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \dot{l}_3 + \begin{bmatrix} -S_1 \\ C_1 \\ 0 \end{bmatrix} \dot{\theta}_2 \times \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} l_3 \\ &= \begin{bmatrix} C_1C_2\dot{\theta}_2(l_2+l_3) + C_1S_2\dot{l}_3 \\ S_1C_2\dot{\theta}_2(l_2+l_3) + S_1S_2\dot{l}_3 \\ -S_2\dot{\theta}_2(l_2+l_3) + C_2\dot{l}_3 \end{bmatrix} \quad (4.33) \end{aligned}$$

$${}^0\alpha_2 = {}^0\dot{\omega}_1 \times {}^0l_1 + {}^0\omega_1 \times ({}^0\omega_1 \times {}^0l_1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \times \left\{ \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \dot{\theta}_1 \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} l_1 \right\} = 0 \quad (4.34)$$

$$\begin{aligned} {}^0\alpha_3 &= {}^0\alpha_2 + {}^0\dot{\omega}_2 \times {}^0l_2 + {}^0\omega_2 \times ({}^0\omega_2 \times {}^0l_2) \\ &= \begin{bmatrix} -S_1\ddot{\theta}_2 + C_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\ddot{\theta}_2 + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} l_2 + \begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} l_2 \right) \\ &= \begin{bmatrix} -S_1S_2\ddot{\theta}_1 + C_1C_2\ddot{\theta}_2 - C_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ C_1S_2\ddot{\theta}_1 + S_1C_2\ddot{\theta}_2 - S_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -S_2\ddot{\theta}_2 - C_2\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} l_2 \quad (4.35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} {}^0\alpha_r &= {}^0\alpha_3 + {}^0\dot{l}_3 + {}^0\dot{\omega}_3 \times {}^0l_3 + 2{}^0\omega_3 \times {}^0\dot{l}_3 + {}^0\omega_3 \times ({}^0\omega_3 \times {}^0l_3) \\ &= \begin{bmatrix} -S_1S_2\ddot{\theta}_1 + C_1C_2\ddot{\theta}_2 - C_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ C_1S_2\ddot{\theta}_1 + S_1C_2\ddot{\theta}_2 - S_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -S_2\ddot{\theta}_2 - C_2\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} (l_2 + l_3) \\ &\quad + 2 \begin{bmatrix} C_1C_2\dot{\theta}_2 - S_1S_2\dot{\theta}_1 \\ S_1C_2\dot{\theta}_2 + C_1S_2\dot{\theta}_1 \\ -S_2\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \dot{l}_3 + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \ddot{l}_3 \quad (4.36) \end{aligned}$$

で表される。

関節の質点ベクトル l_{Gi} の速度 ${}^0v_{Gi}$ 及び加速度 ${}^0\alpha_{Gi}$ は、上式の関節の長さ l_i を質点までの長さ l_{Gi} に置き換えて同様に誘導できる。これらと重力加速度のベクトル 0g から、質点に

加えるべき力 ${}^0f_{Gi}$ とトルク ${}^0n_{Gi}$ を求め、最後に関節の駆動トルクや力に関する運動方程式を誘導する。

$${}^0g = [0, 0, -g]^T \quad (4.37)$$

$${}^0f_{G1} = m_1({}^0\alpha_{G1} - {}^0g) = m_1 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

$${}^0f_{G2} = m_2({}^0\alpha_{G2} - {}^0g) = m_2 \left\{ \begin{bmatrix} -S_1S_2\ddot{\theta}_1 + C_1C_2\ddot{\theta}_2 - C_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ C_1S_2\ddot{\theta}_1 + S_1C_2\ddot{\theta}_2 - S_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -S_2\ddot{\theta}_2 - C_2\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} l_{G2} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \right\} \quad (4.39)$$

$$\begin{aligned} {}^0f_{G3} &= m_3({}^0\alpha_{G3} - {}^0g) \\ &= m_3 \left\{ \begin{bmatrix} -S_1S_2\ddot{\theta}_1 + C_1C_2\ddot{\theta}_2 - C_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ C_1S_2\ddot{\theta}_1 + S_1C_2\ddot{\theta}_2 - S_1S_2(\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2) \\ -S_2\ddot{\theta}_2 - C_2\dot{\theta}_2^2 \end{bmatrix} (l_2 + l_{G3}) \right\} \\ &+ m_3 \left\{ 2 \begin{bmatrix} C_1C_2\dot{\theta}_2 - S_1S_2\dot{\theta}_1 \\ S_1C_2\dot{\theta}_2 + C_1S_2\dot{\theta}_1 \\ -S_2\dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \dot{l}_{G3} + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} \ddot{l}_{G3} - \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix} \right\} \end{aligned} \quad (4.40)$$

式(4.40)より直動関節の推力 f_3 は質量 m_3 と $\ddot{l}_3 (= \ddot{l}_{G3})$ より求めることができる。

次に ${}^0n_{Gi}$ は

$${}^0n_{G1} = {}^0(I_1) {}^0\dot{\omega}_1 + {}^0\omega_1 \times ({}^0(I_1) {}^0\omega_1) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} I_1 \ddot{\theta}_1 \quad (4.41)$$

$$\begin{aligned} {}^0n_{G(2+3)} &= {}^0(I_2 + I_3) {}^0\dot{\omega}_2 + {}^0\omega_2 \times ({}^0(I_2 + I_3) {}^0\omega_2) \\ &= (I_2 + I_3) \begin{bmatrix} -S_1\ddot{\theta}_1 + C_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\ddot{\theta}_2 + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times (I_2 + I_3) \begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.42)$$

ここで ${}^0(I_i)_0$ は、式(4.43)に示す関節 P_i から P_{i+1} までの部材の慣性テンソルを、絶対座標系を参照に変換したものである。座標系の変換は広瀬の方法¹⁾で行った。

$$I_i = \begin{bmatrix} I_{ix} & 0 & 0 \\ 0 & I_{iy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{iz} \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

さらに、マニピュレータの先端 P_i に、外力 ${}^0F_r [F_{rx}, F_{ry}, F_{rz}]^T$ と、モーメント ${}^0N_r [N_{rx}, N_{ry}, N_{rz}]^T$ が加わるとすると、マニピュレータの腰(関節1)、肩(関節2)の回転でアクチュエータが発生すべきトルク 0n_1 と 0n_2 は次式で表される。

$${}^0n_1 = {}^0n_2 + {}^0l_1 \times {}^0f_2 + {}^0l_{G1} \times {}^0f_{G1} + {}^0n_{G1} \quad (4.44)$$

$${}^0n_2 = {}^0N + {}^0l_3 \times {}^0F_r + {}^0l_{G2} \times {}^0f_{G2} + {}^0l_{G3} \times {}^0f_{G3} + {}^0n_{G(2+3)} \quad (4.45)$$

式中 0f_i は式(4.46)によって求めることができる。

$$\begin{aligned} {}^0f_2 &= {}^0F_r + {}^0f_{G3} + {}^0f_{G2} \\ {}^0n_2 &= \begin{bmatrix} n_{2x} \\ n_{2y} \\ n_{2z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} (l_2 + l_3) \times \begin{bmatrix} F_{rx} \\ F_{ry} \\ F_{rz} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} l_{G2} \times \begin{bmatrix} F_{G2x} \\ F_{G2y} \\ F_{G2z} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1S_2 \\ S_1S_2 \\ C_2 \end{bmatrix} (l_2 + l_{G3}) \times \begin{bmatrix} F_{G3x} \\ F_{G3y} \\ F_{G3z} \end{bmatrix} \\ &+ (I_2 + I_3) \begin{bmatrix} -S_1\ddot{\theta}_2 + C_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\ddot{\theta}_2 + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 \\ \ddot{\theta}_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \times (I_2 + I_3) \begin{bmatrix} -S_1\dot{\theta}_2 \\ C_1\dot{\theta}_2 \\ \dot{\theta}_1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (4.46)$$

具体的に 0n_2 の中で、関節2のアクチュエータが与えることのできるトルク n_{2y} を求めると

$$\begin{aligned} n_{2y} &= -S_1C_2S_2(m_2l_{G2}^2 + m_3(l_2 + l_{G3})^2)\ddot{\theta}_1 \\ &+ C_1(m_2l_{G2}^2 + m_3(l_2 + l_{G3})^2)\ddot{\theta}_2 \\ &- C_1C_2S_2l_{G2}^2(m_2l_{G2}^2 + m_3(l_2 + l_{G3})^2)\dot{\theta}_1^2 \\ &+ 2m_3(C_1(l_2 + l_{G3})\dot{l}_{G3}\dot{\theta}_2 - S_1S_2C_2(l_2 + l_{G3})\dot{l}_{G3}\dot{\theta}_1) \\ &+ C_1S_2(m_2l_{G2} + m_3(l_2 + l_{G3}))g \\ &+ {}^0(I_{2y} + I_{3y})_0(C_1\ddot{\theta}_2 + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2) + S_1\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2(I_{2z} + I_{3z} - (I_{2x} + I_{3x})) \\ &+ N_{ry} - (C_2F_{rx} - C_1S_2F_{rz})(l_2 + l_3) \end{aligned} \quad (4.48)$$

となる。

同様に、関節1の駆動トルクは

$$\begin{aligned}
{}^0n_{1z} = & (m_2 S_2^2 l_{G2}^2 + {}^0(I_{1z} + I_{2z} + I_{3z})) \ddot{\theta}_1 + m_3 S_2^2 (l_2 + l_{G3})^2 \ddot{\theta}_1 \\
& - S_1 C_1 (I_{2y} + I_{3y} - (I_{2x} + I_{3x})) \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \\
& + 2m_3 S_2^2 (l_2 + l_{G3}) \dot{l}_{G3} \dot{\theta}_1 \\
& + N_{rz} + (C_1 S_2 F_{ry} - S_1 S_2 F_{rx}) (l_2 + l_3)
\end{aligned} \tag{4.49}$$

となる。これらの式をまとめると関節の駆動トルク T は

$$T = \begin{bmatrix} n_{1z} \\ n_{2y} \end{bmatrix} = H(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) + J^T K \tag{4.50}$$

$H(\theta)$: ジョイント回りの角加速度とトルクの関係を示す、慣性モーメントについてまとめた行列

$C(\theta, \dot{\theta})$: コリオリ力と求心力についてまとめた行列

$G(\theta)$: 重力の影響をまとめた行列

J^T : 転置したヤコビ行列

K : マニピュレータ先端に働く外力と外力モーメントをまとめた、静力学的なモーメント

となる¹⁾。ここで、 J はヤコビ行列と呼ばれ、外力によって生じる静的なモーメントを表す。具体的には下式によって表される。

$$J^T K = \begin{bmatrix} -S_1 S_2 (l_2 + l_3) & C_1 S_2 (l_2 + l_3) & 0 & 0 & 0 & 1 \\ C_2 (l_2 + l_3) & 0 & -C_1 S_2 (l_2 + l_3) & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^0F_{rx} \\ {}^0F_{ry} \\ {}^0F_{rz} \\ {}^0N_{rx} \\ {}^0N_{ry} \\ {}^0N_{rz} \end{bmatrix} \tag{4.51}$$

第4節 マニピュレータの動作実験

マニピュレータの性能がロボットの作業速度を左右するため、設計ではマニピュレータの仕様が最適となるよう留意しなければならない。本節では、試作マニピュレータの動作速度を計算によって調べ、実験によってその計算精度を確認するとともに、収穫用マニピュレータの設計仕様を明らかにし、ロボットの収穫速度を推定する。

4.4.1 動作実験

実験によって

a) 腕を 0.5m 伸長した状態で、肩を 0.605rad 回転させて腕を 1m 持ち上げる。

b) 腕を 0.5m 伸長し、水平状態で π rad 腰を回転させる。

c) 腕を水平状態で 0.5m 短縮する。

の3動作を調べた。これら一連の動作は図 4.3 に示すようにロボットがキャベツを持ち上げて、ロボットの台車上で放出するまでの動作を想定した。

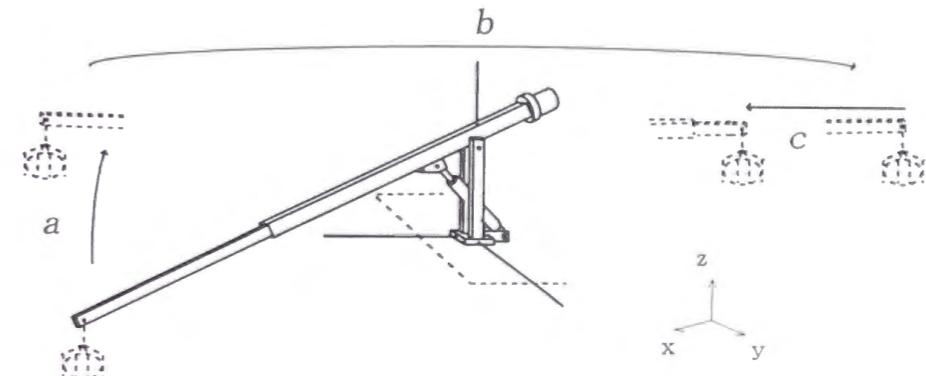


図 4.3 モデル動作

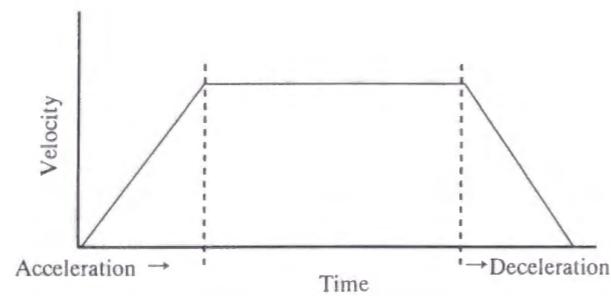
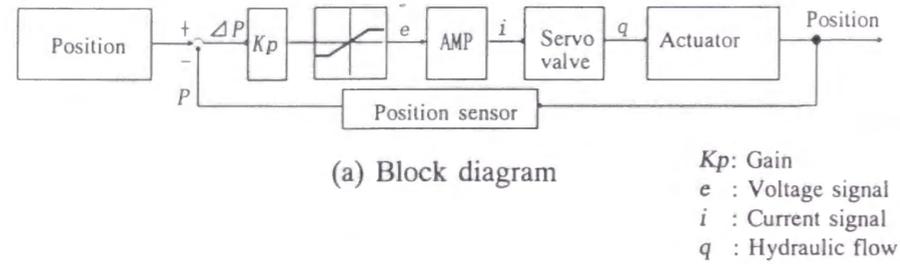
Fig 4.3 Test motion

4.4.2 制御方法

図 4.4(a)にマニピュレータの制御ブロックダイアグラムを示す。制御は、位置フィードバックによる PTP(Point to point)制御により行い、フィードバックループは 16ms で 1 巡するように設定した。図 4.4(a)に示すように、現在位置と目標位置の差に比例ゲイン K_p を乗じ、電圧信号 e を電流信号 i に変換して、サーボ弁によって、流量 q を制御する。

計算は、図 4.4(b)に示す動作モデルにより、実験と同様の条件で行い、加速時間、定速動作時間、減速時間を調べ、マニピュレータの動作時間を推定した。動作開始からの加速時は、マニピュレータの運動方程式より得られる最大加速度によって駆動するとして計算した。最高速度はアクチュエータの最大速度を与えることとし、サーボ弁の開度と油圧ポン

プの吐出油量、リリーフ圧より計算した。減速については、上述の位置フィードバックにより目的位置に近づくに従い、サーボ弁吐出油量を徐々に減少するよう制御して停止させた。なお、フィードバックゲインはあらかじめ振動を起こさないよう調整し、腰、肩、腕それぞれ 0.08、0.06、0.9 の値を用いた。



(b) Motion model

図 4.4 制御ブロックダイアグラムと制御モデル

Fig 4.4 Block diagram and motion model

4.4.3 マニピュレータの動作計算方法

マニピュレータの運動方程式は前述の式 (4.40)、式 (4.48) 及び式 (4.49) に示すように、腰、腕の駆動トルク及び腕の伸縮力と、関節の角加速度、加速度、回転加速度、速度、マニピュレータの姿勢、慣性力、コリオリ力、遠心力、質量及び摺動面摩擦力の関係で表すことができる。また、定速時のアクチュエータ動作速度は、エンジン出力、油圧ポンプ吐出量、アクチュエータの特性と負荷によって変動する油圧弁吐出油量³⁾より算出できる

が、これらの計算は、複数のアクチュエータを同時に動作させる場合には煩雑である。そこで、本実験では、各アクチュエータを単体で駆動させる場合について、その解析を行った。アクチュエータ単体動作での運動方程式、並びにアクチュエータの最大動作速度の計算式は、下記に示すように簡略化でき、マニピュレータの動作特性を簡便かつ的確に把握することができる。

設定したマニピュレータのパラメータ及び計算条件を図 4.5 及び表 4.1 に示す。表中、マニピュレータの慣性モーメントは部材の寸法より求めた。装着するハンドは 12.4kg で、腕先端への集中荷重として扱った。また、直動関節の摺動面摩擦力は実測値を測定して用いた。

油圧機器については、サーボ弁の吐出流量、油圧ポンプの効率及びモータの出力はカタログ値を用いた。シリンダの推力は、シリンダ内の受圧面積、ポンプ側とタンク側の差圧と油圧シールの摩擦⁴⁾より算出して用いた。ただし、ホース、油圧弁での圧力損失は無視した。

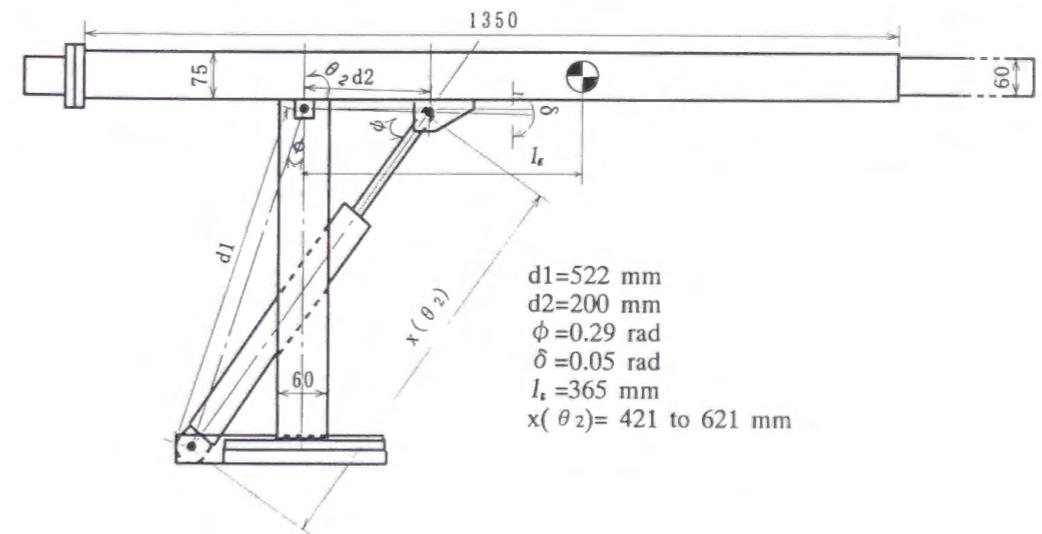


図 4.5 マニピュレータのパラメータ

Fig 4.5 Parameters of manipulator

表 4.1 解析条件

Table 4.1 Conditions of calculation

Engine rated speed	: 1200 rpm	
Hydraulic pump	: 7 cc/rev	
Pump efficiency of displacement	: 94 %	
Oil flow rate of servo valve	: max.12.5×10 ⁶ m ³ /s at 6.9MPa	
Mass of manipulator	: 16.4 kg	
Moment of manipulator (z axis)	: 12.1 kgm ²	
Moment of manipulator (y axis)	: 11.7 kgm ²	
Mass of hand	: 12.4 kg	
Moment of hand (z axis)	: 31.7 kgm ²	
Link 1	Actuator	: Hydraulic motor
	Displacement	: 12.5 cc/rev
	Efficiency of hydraulic motor	: 91 %
	Reduction ratio	: 1/30
	Moment of reduction gear	: 0.25×10 ⁻⁴ kgm ²
Link 2	Actuator	: Hydraulic cylinder
	Stroke	: 250 mm
	Diameter of piston	: 40 mm
	Diameter of cylinder rod	: 25 mm
	Friction of seal	: 370 N
Link 3	Actuator	: Hydraulic motor
	Displacement	: 8.0 cc/rev
	Efficiency of hydraulic motor	: 91 %
	Ball screw pitch	: 8 mm/rev
	Friction force of slide part	: 3.9 N

(1) 肩の回転

肩の関節回転速度、トルクと油圧シリンダのロッド位置、伸縮速度及びシリンダ伸縮力の関係を式(4.52)に示す⁵⁶⁾。回転加速度とトルク及び慣性モーメントの関係は式(4.53)に示す。これらの式により、シリンダ伸縮力及び位置から肩の回転加速度及び速度を求めることができる。

$$\frac{\dot{x}(\theta_2)}{\dot{\theta}_2} = \frac{\tau}{F} = \frac{-l_1 l_2 \sin(\pi - \theta_2 - \delta + \phi)}{x(\theta_2)} \quad (4.52)$$

$$\ddot{\theta}_2 = \frac{(\tau - \cos(\theta_2)mg)}{I_y} \quad (4.53)$$

ここで

$\dot{x}(\theta_2)$: シリンダ伸縮速度 [m/s]

$\dot{\theta}_2$: 肩の関節回転速度 [rad/s]

$\ddot{\theta}_2$: 肩の関節回転速度 [rad/s²]

F : シリンダ推力 [N]

τ : 回転トルク [N·m]

I_y : マニピュレータとハンドの慣性モーメント [kg·m²]

l_g : Z軸より腕重心までの長さ [m]

m : 腕及びハンドの質量 [kg]

g : 重力加速度 [m/s²]

また、油圧シリンダの推力と最大伸縮速度は

$$F = A_1 P_1 - A_2 P_2 - A_1 D \quad (4.54)$$

$$\dot{x}_{max} = \mu_p \frac{\dot{\theta} V_p}{60 A_1 P_1} \quad (4.55)$$

ここで

A_1 : ポンプ側面積 [m²]

P_1 : ポンプ側圧力 [Pa]

A_2 : 排圧側面積 [m²]

P_2 : 排圧 [Pa]

D : シール摩擦抵抗 [N/m²]

\dot{x}_{max} : シリンダ最大伸縮速度 [m/s]

μ_p : ポンプ効率

$\dot{\theta}$: エンジン回転速度 [rpm]

P_2 : 排圧 [Pa]

V_p : ポンプ押しのけ容積 [m³/rev]

と表される。

(2) 腰の回転

減速ギアを介して駆動する場合の入力軸側の等価慣性モーメント、入力トルクと関節の回転加速度の関係は

$$I_e = I_{0z} + \frac{I_z}{\xi_1^2} \quad (4.56)$$

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{T_{inp}}{I_e} \quad (4.57)$$

- I_e : 等価慣性モーメント [kg·m²]
- I_{0z} : 入力軸側慣性モーメント [kg·m²]
- I_z : マニピュレータとハンドの慣性モーメント [kg·m²]
- ξ_1 : 減速比
- $\ddot{\theta}_1$: 腰の関節回転加速度 [rad/s²]
- T_{inp} : 入力トルク [N·m]

と表される。また、アクチュエータの発生するトルクと最大回転速度は

$$T_{inp} = \frac{\Delta P V_m}{2\pi} \quad (4.58)$$

$$\dot{\theta}_{1max} = \frac{1}{\xi_1} 2\pi \mu_m \mu_p \frac{\dot{\theta}_e V_p}{60 V_m} \quad (4.59)$$

- ΔP : ポンプ圧とモータ排圧の差圧 [Pa]
- $\dot{\theta}_e$: エンジン回転速度 [rpm]
- $\dot{\theta}_{1max}$: 腰の関節最大回転速度 [rad/s]
- V_m : モータ押しのけ容積 [m³ / rev]
- μ_m : モータ効率

で求める。

(3) 腕の伸縮

ボールネジを介して、回転運動を直線運動に変換して駆動する場合の運動方程式¹⁾から、油圧モータトルクと腕の伸縮力の関係を式 (4.60)、伸縮力と腕の動作加速度の関係は式 (4.61) より表すことができる。

なお、最大動作速度については式 (5.59) の油圧モータの最大回転速度とボールネジリードの関係から求める。

$$F = \frac{2\pi}{p} T \quad (4.60)$$

$$\ddot{l}_3 = \frac{(F - m_{arm} g \cos \theta_2 - D_{arm})}{m_{arm}} \quad (4.61)$$

- F : 伸縮力 [N]
- p : ボールネジリード [m/rev]
- T : 油圧モータトルク [N·m]
- m_{arm} : 腕可動部とハンド質量 [kg]
- \ddot{l}_3 : 伸縮加速度 [m/s²]
- D_{arm} : スライド部摩擦力 [N]

4.4.4 動作実験結果及び考察

(1) 動作速度

実験と計算の結果を動作別に図 4.6 に示す。

a) 肩の回転

(a) に示すように回転速度は 0.3 ~ 0.68 rad/s で、0.605 rad (約 35 度) 回転する所要時間は 1.3s であった。動作速度の計算誤差が大きく、所要時間は計算値が実測値を 0.2s 上回った。これはシール摩擦の推定誤差や負荷により変動するサーボ弁吐出油量の推定値誤差の影響と考えられる。

b) 腰の回転

(b) に示すように定速時の回転速度は 0.65 rad/s、動作の所要時間は 4.9s で、計算値との差は 0.4s であった。加速開始時の応答遅れは、減速ギアのカップリングのバックラッシュやあるいはアンプやサーボ弁の応答遅れが原因である。回転速度の計算誤差は、負荷によるサーボ弁吐出流量の減少に加え、考慮しなかったベアリング摩擦力の影響と考えられる。

なお、最大流量で動作させると腕が振動したので、油圧流量を最大値の 30 % で使用した。

軽量化を図るために、多少のたわみが生じることは許容して設計したため、動作開始、停止時に腕のたわみや支柱のねじれによる振動が発生した。前述の重力方向への静荷重と同様に、腰の回転方向への負荷による腕のたわみを計算した結果、腕を 2.1m に伸長して、0.65 rad/s の速度で回転している腕を 0.2s で停止させた場合、腕先端のたわみは 4.8mm であった。

c) 腕の伸縮

(c)に示すように定速時の動作速度は 120mm/s で、動作所要時間は 4.5s であった。動作速度は計算値とほぼ一致したが、加速時の応答遅れが 0.2s あり、他の部分よりも大きかった。これはボールネジのバックラッシュが原因と考えられる。

実験の結果から、肩の回転では速度の計算に誤差がみられたものの、他の関節については計算によって精度良くその動作を推定することができた。

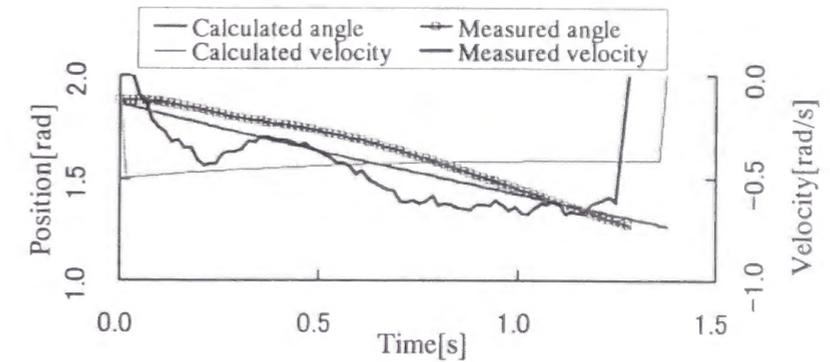
(2) 位置決め精度

位置センサの出力値より調べた位置決め誤差は、腰の回転が $\pm 4.2 \times 10^{-3}$ rad、肩の回転が $\pm 0.3 \times 10^{-2}$ rad そして、腕の伸縮が ± 3 mm であった。腰の回転角度は、減速機の駆動軸側で計測したため、腕先端ではこの誤差にギアとカップリングのバックラッシュが加わるが、駆動軸側に位置決め誤差がほとんど無いことから、キャベツの選択収穫には十分な位置決め精度が得られたと考えられる。

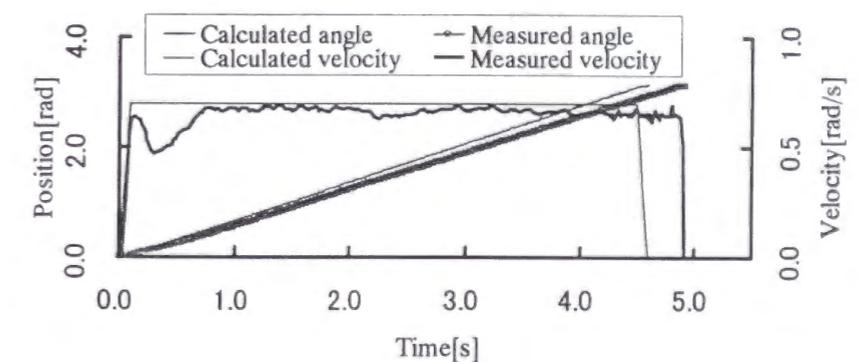
(3) キャベツ収穫速度の推定

ロボットの収穫速度は、図 4.3 に示す動作手順でキャベツを収穫する場合、キャベツを掴み上げてコンテナ上で放出するまでの所要時間が、先に調べた 3 動作の合計から 10.8s であり、また、キャベツの放出からキャベツの把持にも、同様の時間を要するとして、1 個のキャベツ収穫所要時間は 2 倍の約 22s と推定できる。このロボット正面、腕の作動領域中心である、0.5m 伸長した状態でキャベツを収穫する所要時間を平均的な収穫所要時間とすると、2 号機は 1 号機の約 5 倍の作業速度である。しかし、実際の収穫作業ではキャベツを確認しながらハンドを降下させるためのセンシングやハンドのキャベツ把持時間が必要であるため、実作業時間は推定値以上を要すると考えられる。なお、キャベツの質量を 1.5kg として負荷に加え同様に計算した結果、腰の回転加速時間が 0.03s 増大する程度で、動作所要時間は先の実験とほぼ同じであった。

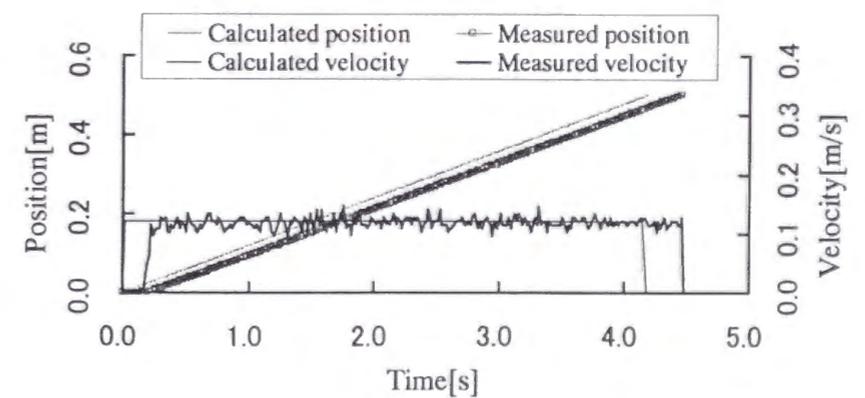
動作速度改善のためには、腰の回転と腕の伸縮ではほとんど加速、減速時間の必要なく、定速状態に移したことから、より低トルク、高速回転のアクチュエータを選定することにより高速化を図ることができる。ただし、腰の回転では振動を防止するために、部材の寸法・形状を検討し、剛性を高める必要があり、その際、質量が大きく増大しないよう留意する必要がある。剛性が低く、バックラッシュによる時間遅れがあることから、振動を抑えて、安定した動作を行えるよう制御方法についての検討も必要である。



(a) Rotation of link 2



(b) Rotation of link 1



(c) Contraction of link 3

図 4.6 動作実験の結果
Fig 4.6 Results of experiment

第5節 収穫ハンドの設計と試作

5.5.1 収穫ハンドの性能目標

試作1号機の収穫グリッパは茎葉切断機構を備えていないため、引き抜きによって収穫を行った。しかし、引き抜き方式では、根部に付着した土壌によってキャベツを汚してしまい、商品価値の低下を招く。一般的に行われている人力収穫では、土壌がキャベツに付着しないよう、収穫時に注意深く包丁で結球部下部の茎葉を切断して、外葉を分離した後箱詰めして出荷している。ロボット収穫でも同様に、収穫時に茎葉を処理できることが望まれる。これまでに、茎や蔓を切断処理できるメロン収穫用ハンド、ラチェット機構をもつ軽量なスイカ収穫用4指ハンドに関する研究¹⁹⁾が報告されている。本研究ではキャベツの茎葉を切断でき、かつ軽量な4指ハンドを開発した。本節では、ハンド設計のために実施したキャベツの茎切断力の調査結果と、その結果を基に開発した試作収穫ハンドの仕様並びにハンドの結球センシング方法とその制御方法について述べる。

4.5.2 キャベツの茎葉切断力調査

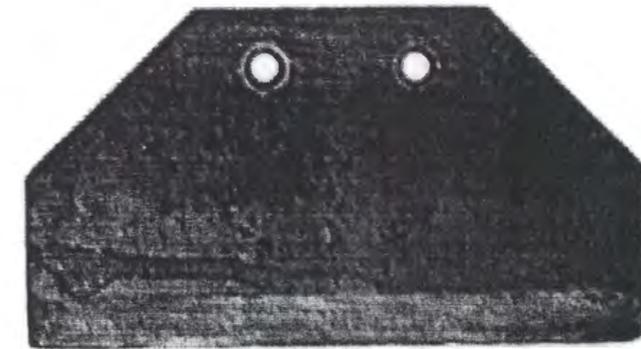
茎葉切断用の刃を用いて収穫適期のキャベツの茎を切断するのに必要な切断力を調べた。切断位置は人力作業での切断位置を参考にして、外葉を分離できる茎位置で調べた。測定にはエーアンドディ製 AD-4937 を用い、人力による押し切り時の最大力を切断力とした。なお、供試したキャベツの品種は、農業研究センター試験圃場にて栽培された「冬王」である。

切断刃としては図 4.6(a)に示すハンド用として試作した厚さ 3.0mm、刃先幅 0.7mm のものと、図 4.6(b)に示す結球野菜収穫用包丁として市販されている刃厚さ 1.5mm のものを用いた。また、切断後茎の硬化程度を確認するために切断面を電子顕微鏡にて観察した。

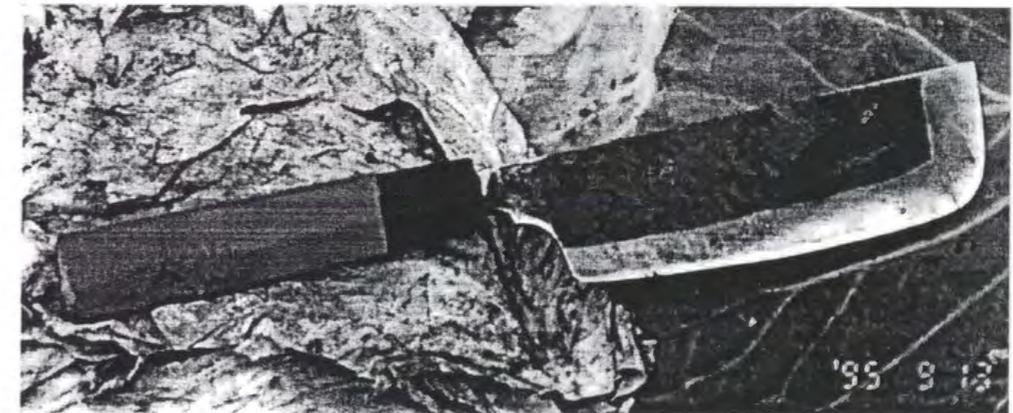
切断刃の厚さと切断力の関係を表 4.2 に示す。切断に要する最大力は、刃厚さ 3.0mm のもので平均 288N であった。また、厚さ 1.5mm のものでは平均 126N であった。刃の形状によって所要切断力に差異がみられたが、いずれもその所要切断力はレタスの茎の切断力が 100N 以下であるのに比べて大きい¹⁹⁾。このため、ハンドは茎葉を切断するのに必要な力を発生させることのできる、高出力のアクチュエータを用いなければならない。

図 4.7 に茎切断面の顕微鏡写真を示す。(a),(b)では維管束や導管、師管の様子や切断面の微小な付着物を確認した。一般に植物体は成長とともに細胞内物質の移動が不活発となり、細胞内物質の固定が進むにつれて硬化することが知られている¹¹⁾。成熟したキャベツ

の茎は、成長から老化の途上にある。(c)の写真によってコルク化の進んだ細胞を確認できたことから、収穫適期では、茎の硬化がかなり進んでいると考えられる。



(a)



(b)

図 4.6 供試切断刃

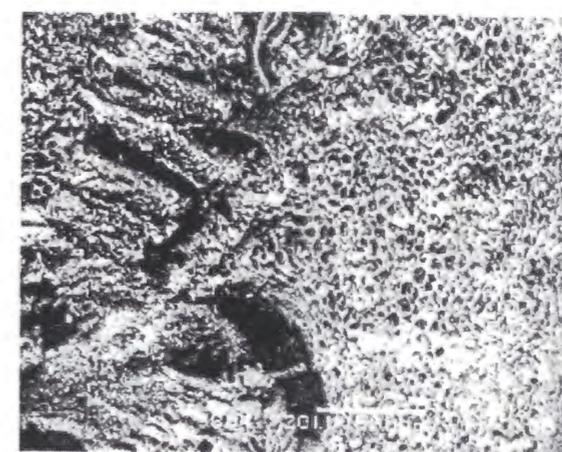
Fig 4.6 Tested blades

表 4.2 茎の切断力調査結果

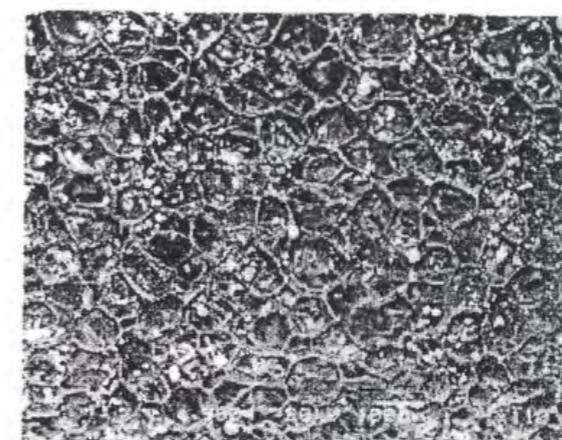
Table 4.2 Stem cutting force

variety : Fuyuou

	Force for cutting [N]	Diameter of stem [mm]	Diameter of head [mm]
Blade 1 thickness = 3.0mm Number of test : 16	377	37.0	160
	181	37.0	154
	201	34.5	152
	419	34.5	174
	283	39.5	152
	317	39.5	172
	250	34.5	160
	292	33.0	152
	318	36.0	172
	220	36.5	152
	289	34.5	152
	287	35.0	155
	296	35.5	150
	264	38.5	164
	316	35.5	152
	300	36.5	150
Average	288	36.1	158
Blade 2 thickness = 1.5mm Number of test : 4	120	38.0	160
	112	36.5	154
	110	37.5	154
	146	36.5	166
Average	126	37.1	159



(a) mag. ×50



(b) mag. ×100



(c) mag. ×180

図 4.7 電子顕微鏡による茎の切断面の観察

Fig 4.7 Scanning electron micrographs of cut cabbage stem

5.5.3 試作グリッパの概要

収穫ハンドとして図 4.8 に示す、把持用 2 指と茎葉切断用 2 指を独立して動作させることのできる、4 指油圧駆動グリッパを開発した。収穫は把持指によってキャベツを把持し、切断指によって茎葉を切断して行う。このグリッパの質量は 12.7kg であり、キャベツの質量との合計は 14kg 程度である。これは、マニピュレータの強度やアクチュエータの出力範囲内の質量である。また、把持指の開度は約 300mm あり、球径 200mm 前後の収穫適期キャベツの収穫に十分である。アクチュエータには、把持指側が内径 15mm、切断指が内径 30mm のスプリングバック式単動シリンダ(ジャパニューマチックス製: CM model) を用い、シリンダの推力を回転運動に変換して指を開閉する。スプリングバック式シリンダのロッドは、図 4.9 に示すその内部構造から理解できるように、シリンダ内スプリングによって戻る。そのため、シリンダに接続する油圧供給ホースは 1 本で済む。その上、ポンプ側とタンク側の排圧側への油圧の切り替えによって伸縮を制御できるので、油圧回路を簡素化できる。

キャベツの把持力、茎葉の切断力はシリンダのリリーフ圧によって調節する。これらの力を、油圧シリンダ推力と関節の位置関係から計算すると、把持側リリーフ圧を 5.9MPa、切断側リリーフ圧を 11.8MPa に設定して球径 200mm のキャベツを収穫する場合、シリンダの推力は把持指側 940N、切断指側 7950N で、把持指の把持力が 92N、茎の切断力は 532N である。

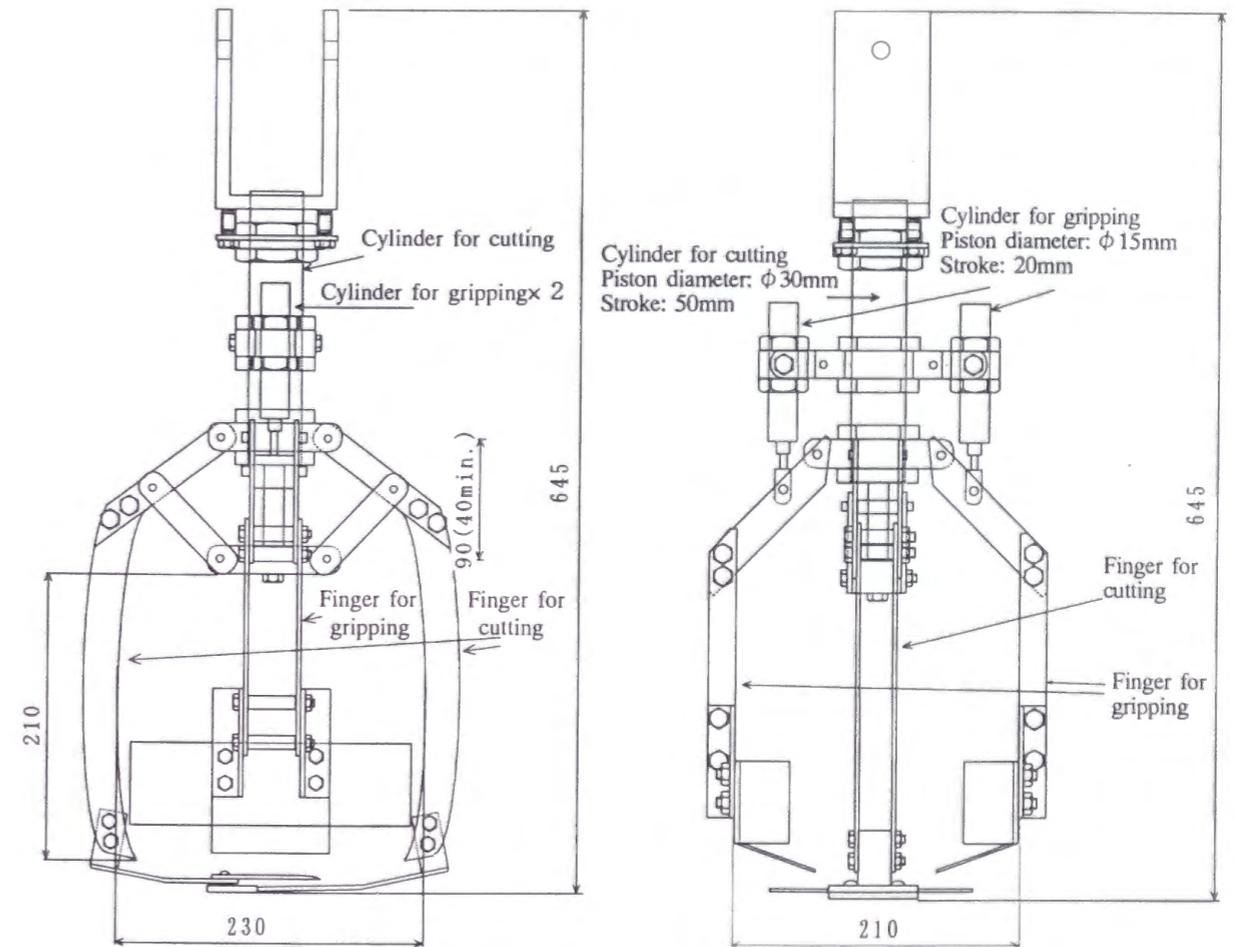
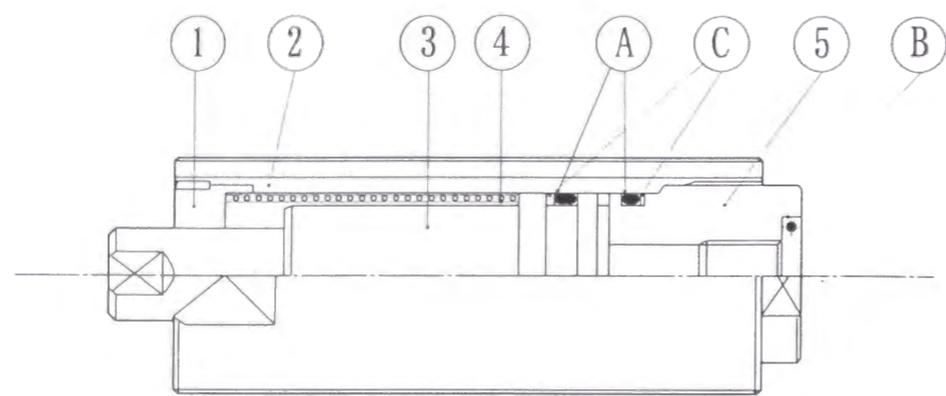


図 4.8 試作グリッパ

Fig 4.8 Developed gripper



Symbol	Part	Material (JIS)
①	Sleeve	BC
②	Cylinder tube	STKM13C
③	Piston rod	S45C
④	Spring	SWPB
⑤	Head cover	S45C

Rubber packing list

Symbol	Part
A	O-Ring
B	O-Ring
C	Backup ring

図 4.9 スプリングバック式シリンダの構造¹²⁾

Fig 4.9 Cross section of spring back type cylinder

4.5.4 結球のセンシング

画像より得られるキャベツの2次元位置情報に加え、キャベツの球高さ、把持状態、圃場面からの距離等の高精度なセンシングが、球を把持、茎葉切断するために必要である。開発ハンドでは、プローブスイッチと超音波センサの接触、非接触、2種類のセンシング方法による結球検出を試みた。

(1) プローブスイッチによるセンシング

プローブスイッチを取り付けたグリッパを図 4.10 に示す。プローブの長さは 50mm でプローブ先端の接触によって結球を検出する。また、接地スイッチを切断指受刃圃場面に取り付け、グリッパの接地確認用にも用いる。

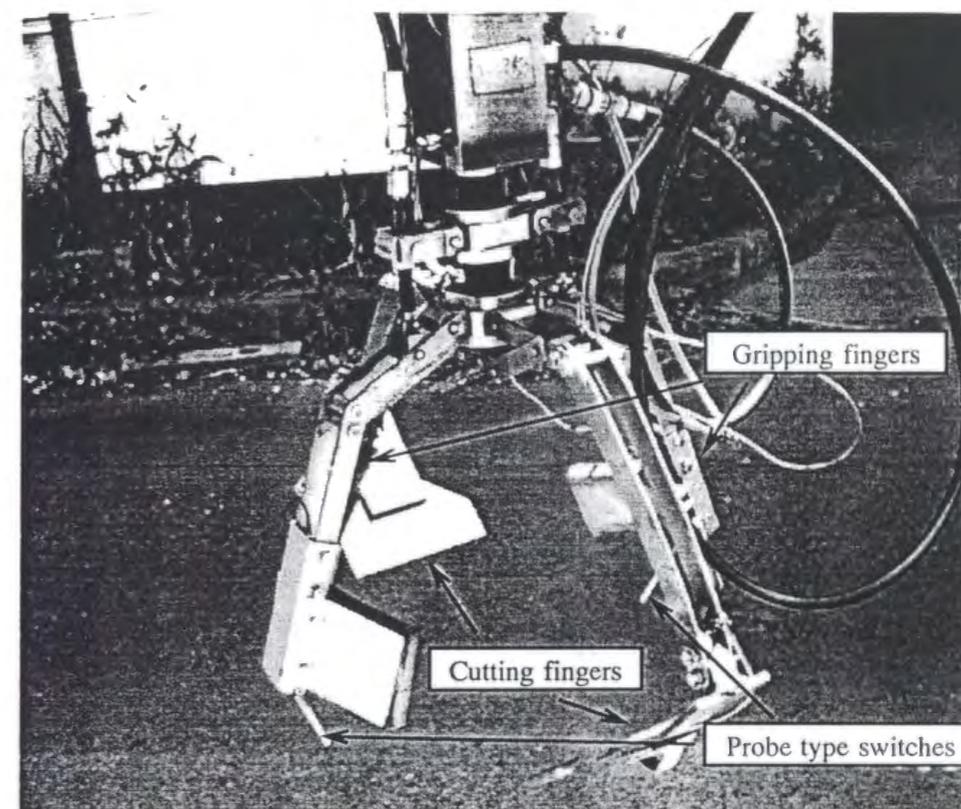


図 4.10 プローブスイッチを取り付けた収穫グリッパ

Fig 4.10 Gripper with probe type switch

(2) 超音波センサによるセンシング

プローブスイッチでは、結球の状態によってはプローブが結球に接触せず、検出できない可能性がある。そこで、この欠陥を解消するために、図 4.11 に示すように切断用シリンダロッドに取り付けた超音波センサ（日本セラミック製：T/R40-16、40kHz、指向角 0.96rad）による検出を行った。超音波センサには、結球の大まかな位置が把握できるよう、比較的指向角の広いものを採用した。このセンサによって葉や結球の状態によっては検出できない接触式よりも、高い検出精度を得られることが期待できる。また、圃場面接触確認用スイッチ（オムロン製：D5B-5011）をグリッパの基部にある切断指駆動用シリンダとマニピュレータの関節との接続部に取り付けた。このスイッチによって指先が接地してグリッパ本体が押し上げられるのを検出することができる。その他、球の把持状態を確認する触圧センサ（電機計測販売製：S100）を把持指面に取り付けた。

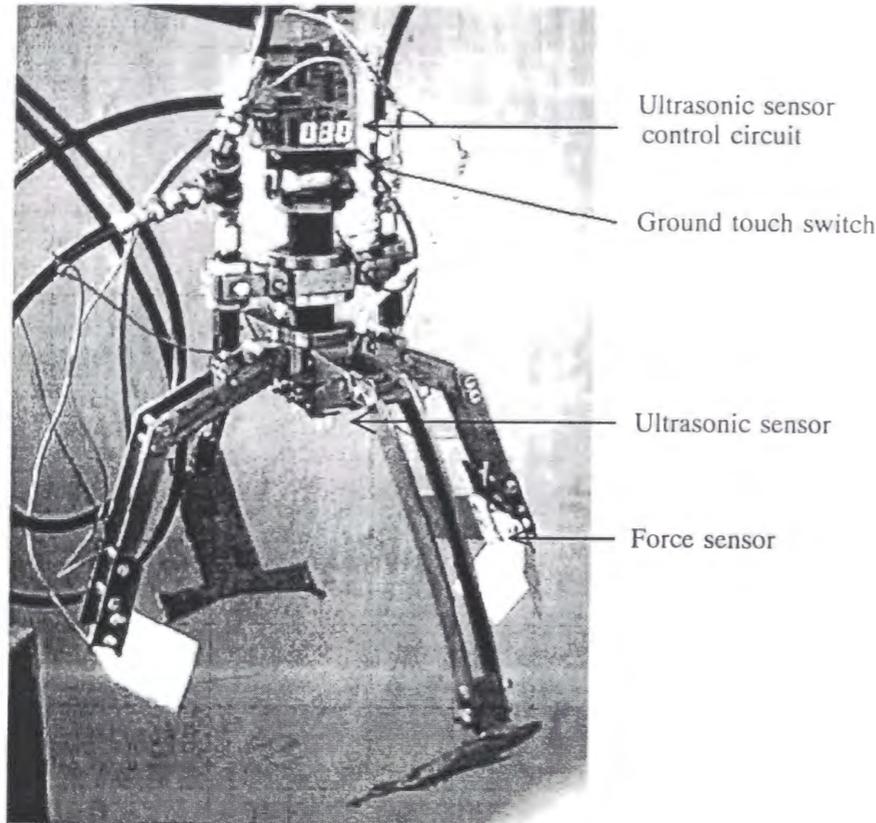


図 4.11 超音波センサを取り付けた試作グリッパ

Fig 4.11 Gripper with ultrasonic sensor

第6節 試作2号ロボット

4.6.1 ロボットの概要

試作2号機を図4.11に示す。2号機は、クローラタイプの運搬車両をベースにした台車上に、キャベツ収穫用ハンドを取り付けた油圧マニピュレータを搭載した。図中ロボットの手前に制御用コンピュータ及び画像処理装置、反対側には油圧制御用バルブ類を搭載した。

CCDカメラ(SONY製:XC-711RR、2/3 inch CCD)は、マニピュレータ作動領域をカバーするようにマニピュレータ上部の支柱先端、地上より高さ1.85m、車体前方0.50mに取り付けた。この位置から $f=6.5$ のレンズによって、 $2.50\text{m} \times 1.80\text{m}$ の範囲を撮影できる。

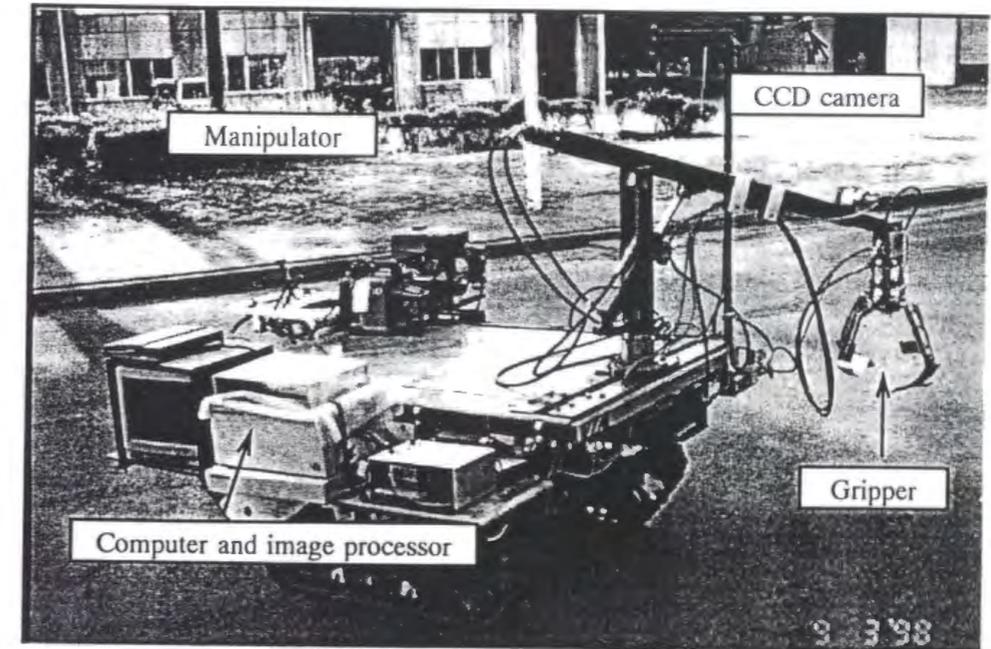


図 4.12 試作2号機

Fig 4.12 Prototype 2

4.6.2 ロボットの制御プログラム

(1) 収穫プログラムの流れ

ロボットの作業プログラムの流れは下記のとおりである。

- 1) マニピュレータをイニシャライズ位置まで駆動して圃場画像を取り込み、画像処理により収穫適期のキャベツを特定する。
- 2) あらかじめ調べておいた画像内 x 、 y 位置と圃場の位置関係より、特定したキャベツがマニピュレータ作動領域内であれば、アームの先端をキャベツの頭上まで運ぶ。
- 3) キャベツの頭上よりグリッパを降下させ、球を把持して茎葉を切断する。
- 4) 収穫したキャベツを台車のコンテナ上まで運び、放出する。
- 5) 作動領域内の収穫対象キャベツをすべて収穫し終わると、一定距離前進の後、停止して1)から動作を繰り返して収穫作業を行う。対象キャベツがマニピュレータの作動領域外であったり、グリッパが結球部を検出できなかった場合には動作を停止し、次の収穫に移る。

(2) マニピュレータの軌道制御

マニピュレータの制御は、PTP (Point to point)制御により、キャベツの頭上やコンテナ上の目標位置座標を与えて行うが、キャベツ頭上よりグリッパを降下させる際に、グリッパが垂直に降下するよう、マニピュレータ先端の軌道を制御する必要がある。制御をマニピュレータ肩の回転、伸縮速度の制御によって行うのは、位置センサの分解能、コンピュータの処理速度や動作の応答遅れにより困難であるため、図 4.13 に示すように、中間目標位置を順次与える CP(Continuous path control)制御によって、目的軌道を生成することとした。なお、実験では中間目標の間隔 ΔP を 50mm に設定した。

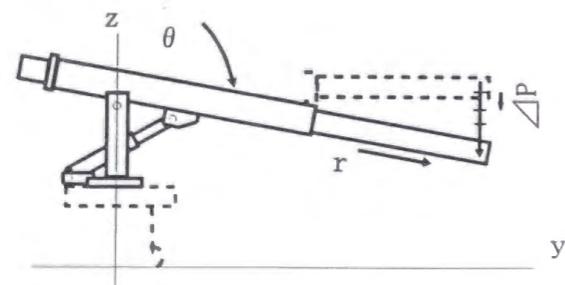


図 4.13 マニピュレータの軌道制御

Fig 4.13 Trajectory control of manipulator

4.6.3 グリッパの制御

グリッパが結球を検出する方式として、平成 8、9 年度はプローブスイッチ、平成 9、10 年度は超音波センサの 2 方式で収穫を試みた。

(1) プローブスイッチによる制御

プローブスイッチの接触情報を基に、次のようにグリッパを制御する。

- 1) 把持指先端のプローブスイッチがキャベツに接触するまで、グリッパを降下させる。
- 2) プローブスイッチがキャベツを検出した場合、把持指、茎葉切断指の順に閉じて球を把持、茎葉を切断して持ち上げる。
- 3) プローブスイッチが接触しなかった場合でも、切断指に取り付けた接地センサが地面の接地を確認した場合には、同様の動作を行う。これらで検出できなかった場合には、画像の誤認識と判断して次のキャベツ収穫に移る。

(2) 超音波センサによる制御

超音波センサによるセンシングを基に、図 4.14 に示すようにグリッパを制御する。制御の流れは下記の通りである。

- 1) 超音波センサの出力を確認しながらグリッパを、画像より推定したキャベツの頭上より降下させる。
- 2) 超音波センサが 0.2m の距離に対象物体を捉えた時点から、その距離内に対象物が検出されている時間の計測を開始し、更にグリッパを降下させる。
- 3) その状態で、指が接地するか、または一定時間 (0.9s) 以上、対象物を検出し続けている場合には指内にキャベツが存在し、収穫可能であると判断して球を把持する。
- 4) 把持した球を 100mm 持ち上げた時点で茎葉を切断して収穫する。なお、グリッパが接地した時点で、超音波センサが 0.2m 以内に対象物を検出していない場合には、誤認識と判断して次の収穫に移る。

把持と茎葉切断を同時に行うと、キャベツが転倒した状態で把持されたり、結球部との距離計測に誤差が生じた場合には適切な位置で把持されず、茎葉の切断位置決めに誤差を生じる。把持した後、一旦引き上げることによってキャベツの姿勢や把持位置を矯正でき、茎葉切断精度の向上が期待できる。なお、今回の収穫実験では、グリッパ把持指の触圧センサは把持状態の確認に使用し、制御には使用しない。

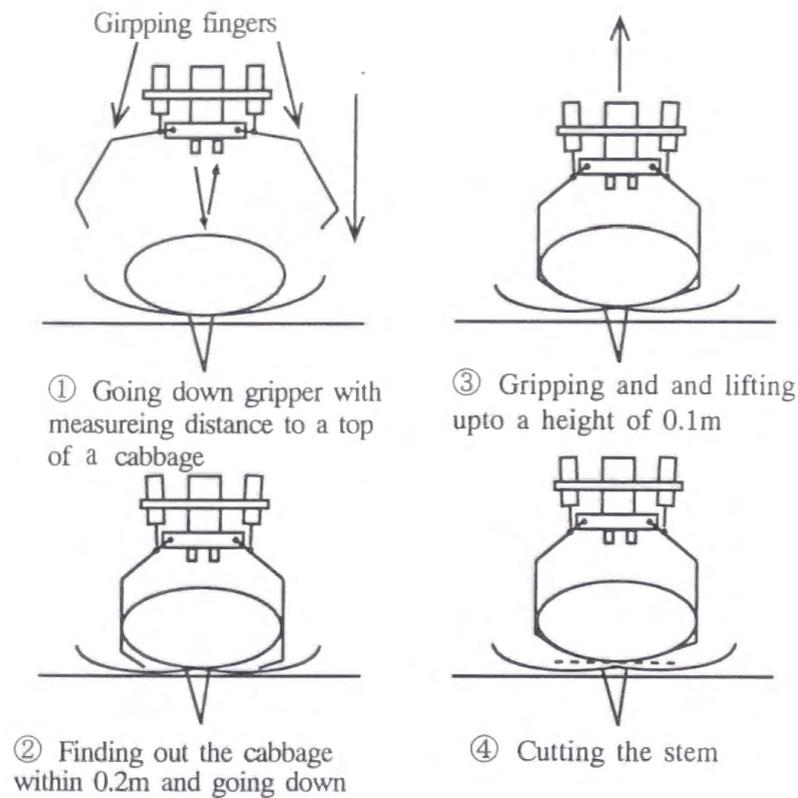


図 4.14 グリッパの制御

Fig 4.14 Control method of gripper

4.6.4 走行車両

表 4.7 に車両の諸元を示す。車両のトレッドは 1.10m で、畝幅 0.60m のキャベツ 2 畝を跨いで走行することができる。台車はマニピュレータを搭載し、収穫したキャベツ用のコンテナを積むために、台上が平面なクローラタイプの農業用運搬台車の走行部分を改造して使用した。走行部はエンジンの出力を V ベルトで伝達する直接駆動と、油圧ポンプで油圧モータを駆動する 2 つの駆動系を有し、自動収穫時は ON-OFF 弁によって油圧モータを制御して走行、停止を行う。走行距離はクローラの駆動用チェーンに取り付けたエンコーダによって計測した。

表 4.3 台車の諸元

Table 4.3 Dimensions of carrier

Dimensions	Overall length	2430 mm
	Overall width	2100 mm
	Overall height	1170 mm
	Max. clearance	560 mm
	Crawler width	110 mm
	Tread	1100 mm
Mass	454 kg	
Engine	Type	Four-stroke air cooled gasoline
	Rated output	4.4kW / 2000rpm
Displacement of gear pump	Gripper	3.5 cc/rev
	Manipulator and traveling	7.0 cc/rev

4.6.5 制御システム

収穫ロボットの制御システムを図 4.15 に示す。図中破線部はグリッパの制御部、2 点鎖線は走行の制御部で、その他はマニピュレータの制御部である。グリッパ及び車両駆動用油圧モータの制御は I/O ポートからの TTL 出力によって ON-OFF 弁を制御して行う。マニピュレータ、グリッパのセンサからの信号は、A/D ボード、カウンタボードにより取り込み、処理する。画像処理は CCD カメラからの画像信号を画像処理装置メモリに取り込んだ後、8 台のパーソナルコンピュータ (T800、T805) によって並列処理し、その中の 1 台はロボットの制御にも用いる。

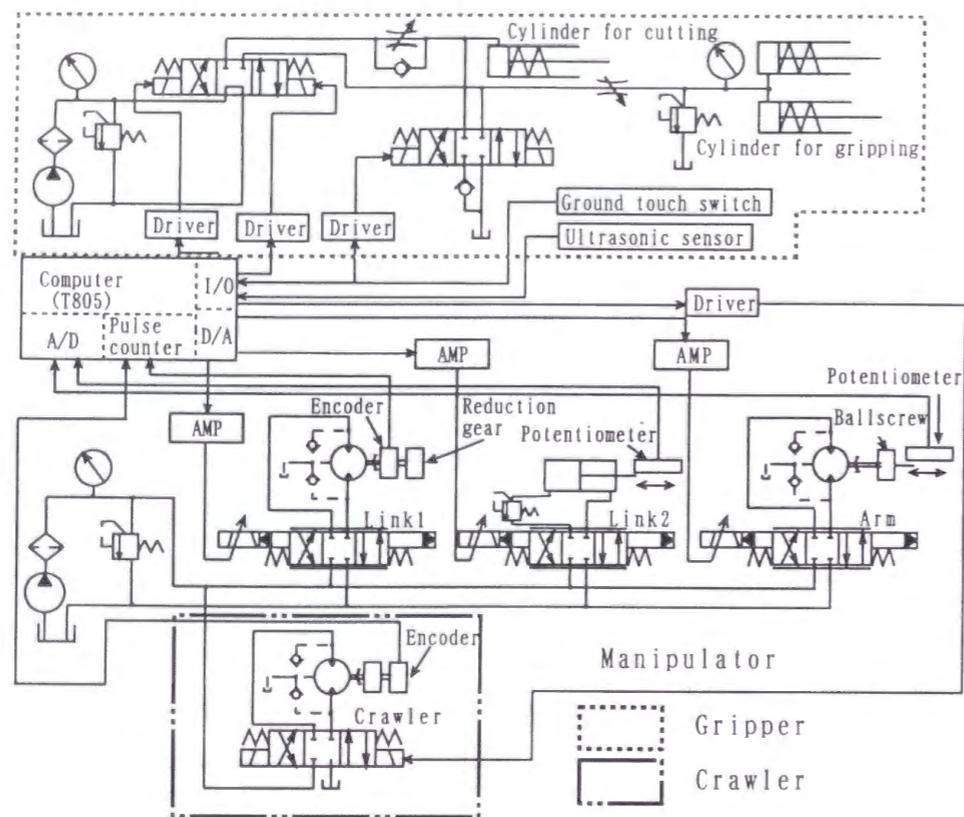


図 4.15 ロボットの制御システム

Fig 4.15 Control system of the robot

第7節 摘要

試作ロボット1号機の実験結果を基に、試作ロボット2号機のマニピュレータ、ハンド及び車両の機構について検討し、キャベツ収穫ロボットを試作した。本章の要約は次のとおりである。

- 1) 高速作業可能な油圧マニピュレータを設計し、その性能を実験によって確認した。開発した油圧駆動3自由度極座標型マニピュレータの質量は16.7kgとなり、軽量化を実現できた。
- 2) 試作2号機は、質量454kgのクローラタイプの台車上に、総質量約30kgのグリッパを装着したマニピュレータ、制御用コンピュータ及び画像処理装置、油圧制御機器を搭載した。また、CCDカメラはマニピュレータ作動領域をカバーするように、マニピュレータの上部、地上より高さ約1.85m、車体前方0.5mに取り付けた。
 ロボットは、1条畝立て栽培されているキャベツを2畝またいで走行し、停止状態でキャベツを収穫し、走行と停止を繰り返しながら作業を進める。
- 3) 動作速度は、先端に12.4kgのグリッパを搭載して、エンジン回転数1200rpmのとき、腕の旋回、伸縮及び上下回転の速度はそれぞれ、0.65rad/s、0.49rad/s、0.12m/sであった。推定した平均作業速度は1個あたり22sで、1号機に比べて大幅な作業能率の向上が期待できる。また、位置決め精度は位置センサ出力値より、旋回が誤差 $\pm 4.2 \times 10^{-3}$ rad、上下の回転 $\pm 0.3 \times 10^{-2}$ rad、伸縮が ± 3.0 mm以内で、キャベツ収穫に十分な位置決め精度を得ることができた。
- 4) 茎の切断所要力調査の結果、茎切断には最大420N以上の切断力を要することが明らかとなった。この切断力を発生して、茎葉を切断処理可能な把持用2指と切断用2指の合計4指を持つ油圧駆動グリッパを試作した。試作グリッパは把持、茎葉の切断を独立して制御することができ、指駆動用アクチュエータには、軽量化と油圧ホースの取り回しを簡素化するために、スプリングバック式シリンダを用いた。グリッパを制御するための結球位置のセンシングには、プローブスイッチ、超音波センサによる2種類の方法を試みた。これらの方法による結球部の位置と、接地センサによる圃場面のセンシングによって、グリッパの降下、把持指、切断指の開閉を制御した。

参考文献

- 1) 広瀬茂雄：ロボット工学，裳華房，1987
- 2) Paul, R. P.：ロボットマニピュレータ，コロナ社，1984
- 3) 鈴森公一，中村公昭：油圧の基礎と油圧回路，日本工業新聞社，190-198，1993

- 4) 日本規格協会：J I Sハンドブック油圧・空気圧 1998, 848, 1998
- 5) 並河清, 梅田幹雄, 飯田訓久：農業用油圧マニピュレータの研究（第1報）, 農機誌, 56(4), 67-74, 1994
- 6) 森田孝司, 坂和愛幸：パワーショベルのモデリングと制御, 計測自動制御学会論文集, 22(1), 69-75, 1986
- 7) 降旗清司, 染谷克明, 久慈俊夫：簡易ロボット, 海文堂, 78-80, 1986
- 8) Wolf, J., Bar-Or, Y., Edan, U. Peiper：Developing grippers for a melon harvesting robot, ASAE paper, 90-7504, 1990
- 9) 飯田訓久, 古部勝也, 並河清, 梅田幹雄：スイカ収穫グリッパの開発, 農機誌, 58(3), 19-26, 1996
- 10) 丁碩炫, 藤浦建史, 土肥誠, 月谷香織：レタス選択収穫ロボットの研究, 農業機械学会第57回年次大会講演要旨, 359-396, 1998
- 11) Niklas, K. J：Plant biomechanics, the University of Chicago press, 48-51, 1992
- 12) ジャパンニューマチックス, CM model カタログ, 93-9改, 3, 1993
- 13) Murakami, N., Otsuka, K., Inoue, K., Sugimoto, M.：Robotic cabbage harvester, International workshop on robotics and automated machinery for bio-productions (Bio-robotics'97), 131-136, 1997(Spain)

第5章 キャベツ収穫実験

第1節 はじめに

前章にて概要を述べた収穫ロボット2号機によって、平成8～10年に収穫実験を行った。平成8～9年はプローブスイッチによる結球検出方式¹⁾、平成10年は超音波センサによる結球検出方式によって行い、両手法の性能を比較検討した。

本章では、2種類の結球センシング方法による収穫実験により、明らかとなった試作2号機の作業性能、及び開発したロボット収穫技術の特徴とその問題点について述べる。

第2節 収穫実験

5.2.1 実験方法

収穫実験は、農業研究センター試験圃場にて、表5.1、表5.2に示す実験条件で合計4回行った。収穫適期球の球径を、プローブスイッチ方式では150～200mmに、超音波センサ方式では170～230mmに設定し、設定範囲内のキャベツ収穫個数、作業速度、キャベツ茎葉の切断状況を調べ、実験中の観察により収穫失敗を確認した。

なお、キャベツは、平成8年4月1日播種、5月12日定植と、平成10年5月22日播種、6月26日定植の金春を供試した。

表5.1 プローブスイッチ方式グリッパによる収穫実験条件
Table 5.1 Experiment conditions of gripper with probe type switch

Date	Luminous intensity [lx]	Engine speed [rpm]	Travel distance [m]
August 1 1997	60000	960	15.8

表 5.2 超音波センサ方式グリッパによる収穫実験条件
Table 5.2 Experiment conditions of gripper with ultrasonic sensor

	Date and time	Luminous intensity [lx]	Engine speed [rpm]	Travel distance [m]
No.1	September 4 1998 10:30-11:20	31160	1250	12.0
No.2	September 8 1998 14:00-14:30	23800	1205	8.1
No.3	September 8 1998 14:45-15:10	44400	1205	10.4

Hydraulic pressure : 6.9MPa(for manipulator)、9.8MPa(for cutting fingers)
5.9MPa(for gripping fingers)

5.2.2 プローブスイッチ方式グリッパによる収穫実験結果

収穫適期球収穫率は、表 5.3 に示すように 58%であった。表中収穫キャベツには、切断位置が深く球を傷つけた深切りキャベツ 6 個と、切断位置が浅いもの、茎を切断できなかったもの 7 個を含んでいる。図 5.1 に茎葉切断状況を示す。図中、左側が茎の切断に失敗したキャベツ、右側が切断状態良好のキャベツである。

ロボットの収穫成功と失敗の回数を表 5.4 に示す。実験中、ロボットは合計 60 回の収穫動作を行い、その内、15 回収穫に成功した。失敗はプローブスイッチのキャベツ検出失敗が 16 回、圃場土面、芝草や収穫後のキャベツ切り株の誤認識が合計 20 回、収穫対象キャベツの位置推定誤差によるものが 9 回であった。

検出失敗は、キャベツの形状や姿勢が不斉一であるために、スイッチが対象球に安定的に接触して検出できなかったことによる。茎葉切断で発生した浅切りと深切りについても、スイッチが結球の位置を正確に検出できなかったために、把持位置が定まらず、茎を適切な位置で切断できなかったことが原因であった。また、誤認識は、実験を晴天時の高照度下に行ったため、ハレーションが発生したことが原因として考えられる。

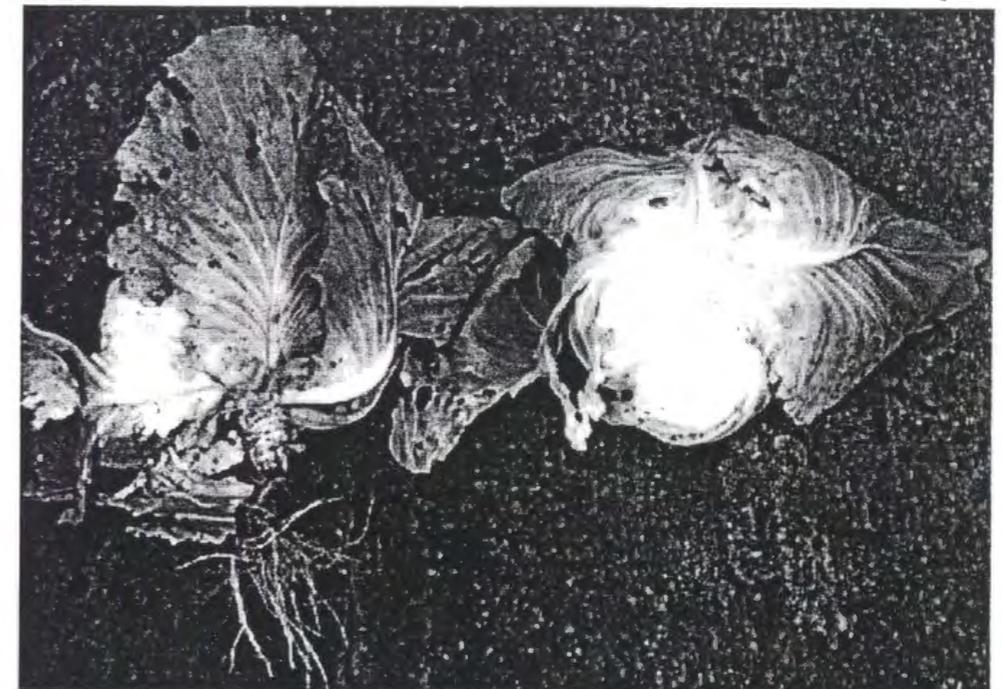
平均作業速度は表 5.5 に示すように、初期化及び画像処理が平均 6.0s、収穫開始から収穫キャベツを放出する動作 10 回の平均が 38.0s であった。エンジン回転数を前章にて、作業速度を推定した際の約 80%である 960rpm に設定して行ったため、動作速度は推定値に達していない。

表 5.3 収穫実験結果

Table 5.3 Experiment result

() : out of 150 - 200mm

Total cabbages [Number]	Picked cabbages [Number]	Harvest rate [%]
26 (3)	15	58



Left: No good
Right: Good

図 5.1 収穫キャベツの茎葉切断状況

Fig. 5.1 Cut stems of harvested cabbages

表 5.4 収穫の成功と失敗の回数

Table 5.4 Success and failure times of the picking trial

[Time]	
Success times	15
Failure times	
False detection of sensor	16
Miss- recognition of image	20
Positioning error of gripper	9
Total trial times	60

表 5.5 平均作業速度

Table 5.5 Operation time on the average

[s]	
Initialize and image processing	6.0
Operation time	38.0 (The average of 10 times operation)

5.2.3 超音波センサ方式グリッパによる収穫実験結果

(1) 収穫精度

9月4日及び9月8日に実施した3回の実験で供試したキャベツの総数と、その内の収穫適期球数のうち、収穫したキャベツ数及び収穫できなかった適期球数を表5.6に示す。収穫球については、収穫適期球総数に対する収穫球の割合(収穫率)と誤収穫球数を示す。No.1の実験では、33個の適期球を含む36個のうち収穫した適期球は21個あり、収穫率は64%であった。同様にNo.2、No.3の収穫率はそれぞれ71%、40%であった。

適期球の収穫失敗や不適球の誤収穫が発生した主たる原因は、撮影条件やキャベツの姿勢によって生じた画像認識での球径の推定誤差である。また、正しく収穫適期と判定されたキャベツについても、転倒していたり、外葉が十分に展開していないものでは、画像認識でのキャベツの位置推定誤差や超音波センサによる距離計測誤差によって、結球の検出

や把持の失敗が発生した。なお、ロボットは圃場を走行するため、圃場面の凹凸によって発生する車両のローリングやピッチングもマニピュレータの位置決め誤差の原因と考えられる。

図5.7に収穫動作63回中の収穫成功回数と失敗回数を示す。ロボットは27回収穫に成功し、失敗の原因はグリッパに取り付けた超音波センサの検出ミスが14回、画像の誤認識による誤動作が12回、位置認識誤差が大きくグリッパが球を把持できなかったことによる失敗が9回、その他球を持ち上げる際に指から外れる失敗が1回であった。

表 5.6 収穫精度

Table 5.6 Harvesting accuracy

	Picked cabbages		Not picked targets	Total cabbages (Targets)
	Targets (Harvest rate)	Misjudged cabbages		
No.1	21 (64%)	3	12	36 (33)
No.2	12 (71%)	1	5	19 (17)
No.3	10 (40%)	0	15	29 (25)

表 5.7 収穫の成功と失敗の回数

Table 5.7 Success and failure times of the picking trial

[Time]	
Success times	27
Failure times	
False detection of the sensor	14
Miss- recognition of image	12
Positioning error of image	9
Handling miss of the hand	1
Total trial times	63

表 5.8 に収穫球の茎葉切断状況を示す。No.1 では収穫適期球総数 24 個のうち、茎葉を最適な位置で切断した収穫球は 17 個あり、その割合は 71 %であった。同様に No.2、No.3 は 67 %、60 %である。切断の失敗はキャベツを傷つけてしまう深切りが、No.1 で 5 個、No.2、No.3 でも 3 個、2 個あり最も多かった。その他は、茎葉の切り残しや切断刃が茎に当たらなかったことによる失敗であった。

No.1 の収穫球のうち、任意の 20 個の姿勢と茎葉切断の失敗の関係を表 5.9 に示す。この結果より直立球と転倒球のいずれにも茎葉切断の失敗が見られ、それらに明確な傾向はみられなかった。ただし、20 個のうち、転倒球は 5 個であったこと、同一圃場の別区画で転倒球数を調査した結果、53 %が畝間に転倒している転倒球であったことから、画像認識の段階で、転倒球は適期と判定されないものが多いことは明らかである。

観察によって茎葉切断の失敗を調査した結果、グリッパが把持した球を持ち上げる際に、把持指より球が外れたり転倒球の姿勢が十分に矯正されない場合には深切りが発生した。また、茎の曲がりのために茎が切断刃を外れたり、切断刃と受け刃のクリアランスに茎が入り込んでしまう場合には切り残しが発生した。

(2) 作業速度

表 5.10 に実験 No.1 におけるロボットの作業速度を示す。連続的に作業している場合、コンテナ上で収穫球を放出してから、次の球を収穫して放出するまでの平均所要時間は 32.1s であった。この他に機器の初期化と画像処理には 6.5s 要した。また、ロボットの走行速度は 0.78m の走行時間 19.5s から、39mm/s であった。所要時間を動作別にみると、キャベツ頭上までグリッパを運ぶのに 10.4s、グリッパを降下させて球を把持して持ち上げるのに 9.8s、球をコンテナ頭上まで運んで放出する動作に 11.9s を要し、グリッパを降下させて球を把持する動作を除き、前章で推定した収穫作業速度とほぼ一致した。1号機に比べて大幅に作業速度を改善することができたが、一般に人力作業では 1 個あたり 3 ~ 4s で収穫していることから、一層の作業速度の向上が必要である。

表 5.8 収穫したキャベツの状況

Table 5.8 Condition of picked cabbages

	Good	①	②	③	Total picked cabbages
No.1	17 (71 %)	0	2	5	24
No.2	8 (67 %)	0	1	3	12
No.3	6 (60 %)	1	1	2	10

() : Success rate

① : No-contact with a cabbage stem

② : Stem residue

③ : Injured heads

表 5.9 キャベツの姿勢と茎葉切断の関係

Table 5.9 Posture of head and cut stems condition
[Number]

	Upright heads	Inclined heads
Good	10	3
Incomplete cut	3	2
Injured head	2	0
Total	15	5

表 5.10 平均作業速度

Table 5.10 Operation time on the average

	[s]
Time to move the gripper over a cabbage	10.4
Time to down the gripper and pick a head	9.8
Time to move the gripper over the carrie and release	11.9
Total operation time	32.1
Time to Initialize and process image	1.2
Time to travel	19.5

第3節 総合考察

ロボット収穫の失敗原因を下記に整理すると、

- 1) 画像認識段階での誤判定
 - 2) キャベツの位置推定誤差、グリッパのキャベツとの距離計測誤差ならびに誤検出による把持失敗
 - 3) キャベツの転倒や、茎の曲がりによる、茎葉切断の失敗
- に分類される。

誤認識は、撮影条件の変動や、キャベツの姿勢、外葉による結球部分の隠蔽によって、結球抽出精度が上がらないために発生する。グリッパの把持失敗は画像認識での位置計測誤差の他に、グリッパ側センサの結球検出失敗や、キャベツの転倒が原因として考えられる。この他、ロボットのローリングやピッチングにより発生する位置計測誤差も考えられるが、その影響については明らかにできなかった。茎葉切断の失敗は、グリッパ側センサの検出誤差や転倒球のために球が確実に把持されていないことの他に、茎の曲がりにより、切断刃から茎が外れるために発生した。

以上の結果より、キャベツ認識のためにカメラ画像による検出は簡便かつ有効な手段であるが、一層の認識精度向上のために、改良が必要であると考えられる。また、グリッパの結

球検出手法については、超音波センサ方式がプローブスイッチ方式より検出力で優れていたが、超音波センサ方式は外葉の状態やキャベツの姿勢によっては超音波が受音側センサに反射しない場合や、外葉で反射した音波によって外葉を球と誤り適切な把持位置に降下する前に把持動作を行って失敗するケースがみられた。これに対して、プローブスイッチは、結球部との接触に成功した場合には、確実に認識できた。今後、確実な接触情報を得られるプローブ式、広角で対象球との距離を認識できる非接触方式の両者の長所を兼ね備えたセンシング法の研究が必要である。

試作グリッパは、把持、切断の2段動作機構によってキャベツを収穫できることが確認できたが、キャベツが転倒している場合には、把持指によって球を十分に把持、引き上げて姿勢の矯正ができないことがあり、球把持、茎葉切断精度の改良が必要である。

作業時間は、1号機の約1/3に短縮することができた。前章にて述べたマニピュレータの設計仕様に基づき、さらなる最適化を図ることによって、一層の作業速度向上が期待できる。

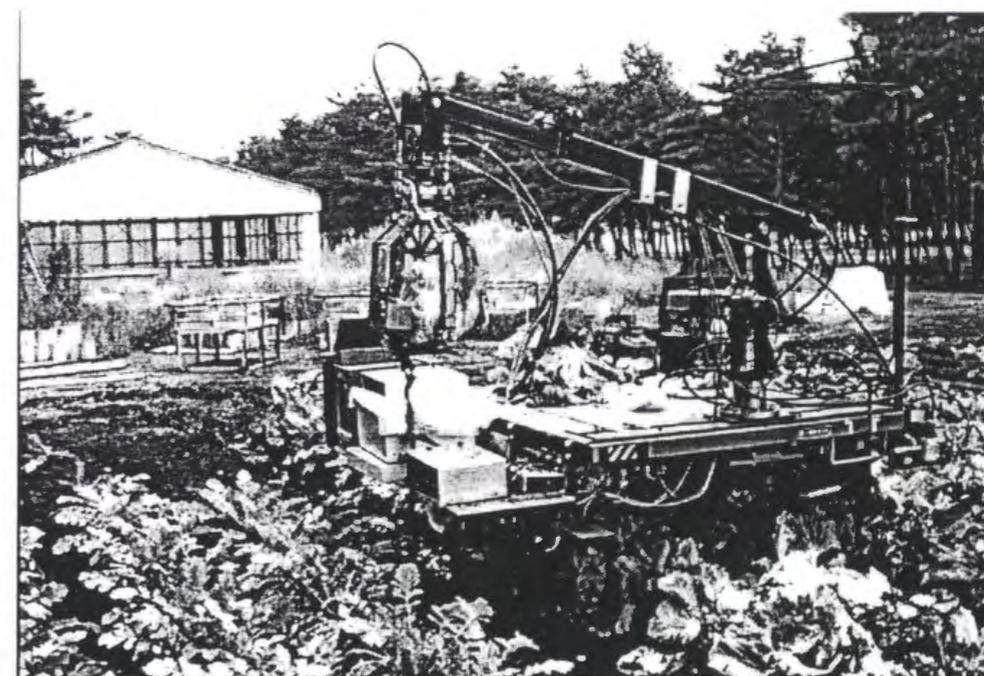


図 5.2 収穫実験の様子

Fig 5.2 Picking test

第5節 摘要

本章では、収穫実験によって、ロボットの作業性能を明らかにした。本章の要約は以下のとおりである。

- 1) ロボットによる収穫実験は、グリッパの結球検出法として、プローブスイッチと超音波センサの2つの方法により行った。実験の結果、収穫適期球の収穫率はプローブスイッチ方式が58%、超音波センサ方式が40～71%であった。また収穫球のうち適切な位置で茎葉を切断できたものは、プローブスイッチ方式が13%、超音波センサ方式が64～71%であった。
- 2) 超音波センサを取り付けたグリッパでは、プローブスイッチに比べ、結球検出失敗が約50%に減少し、安定して結球を検出することが確認できた。また、グリッパの制御については球を把持した後、持ち上げてから切断するようロボットを制御することによって切断精度が向上し、収穫したキャベツの64～71%は適切な位置で茎葉を切断することができた。
- 3) キャベツの姿勢、外葉の状態や画像認識での位置検出誤差によっては、グリッパの結球検出失敗や適切な位置で把持できないことによる茎葉切断の失敗がみられたことから、結球状態のセンシング手法についてはなお一層の改善が必要である。
- 4) 茎葉切断の成功率は超音波センサ方式の場合、60～71%であった。切断の失敗原因は、キャベツの転倒のために把持姿勢が安定しないこと、超音波センサの距離計測誤差、茎の曲がりのため、茎が刃に当たらないためであった。
- 5) 作業速度は、超音波センサ方式による収穫作業で、ロボットの初期化と画像認識に平均6.2s、収穫動作は平均32.1s/個であった。動作を分析して調べた結果、前章にて推定した動作速度で、作業を行えることが確認できた。

参考文献

- 1) Murakami, N., Otsuka, K., Inoue, K., Sugimoto, M.: Robotic cabbage harvester, International workshop on robotics and automated machinery for bio-productions (Bio-robotics'97), 131-136, 1997(Spain)

第6章 総括

本研究は、収穫適期のキャベツを判別して選択的に収穫できる、キャベツのロボット収穫技術の確立を目的として、収穫適期のキャベツの画像認識方法、キャベツを個別に収穫するための収穫機構とその制御方法について研究を行い、試作した2台のキャベツ収穫ロボットによる収穫実験によって、それら技術の有用性と問題点を明らかにした。以下に、本研究の要約を述べる。

1. キャベツの画像認識

(1) 画像認識アルゴリズム

キャベツは部位により分光反射特性に差異がみられる。外葉部分より結球葉の方が550nm付近の反射率が高い傾向にあり、カラー画像によってそれらの差異から結球部分を抽出するためのHSI変換、ニューラルネットによる結球抽出手法と、その結球部を抽出した画像からキャベツのテンプレートによって球径を推定する手法を開発した。さらに、処理高速化のために処理プログラムの最適化と処理の並列化を図った。実験の結果、収穫適期球の判定精度は約70%で、処理に要する時間は最初の1個目の認識までが2.8sであり、開発手法がロボット収穫に適応できることを明らかにした。

(2) 結球抽出のための画像認識装置

結球葉と外葉の分光反射特性の差異を利用した結球野菜認識用カメラによる結球部抽出手法を開発した。試作した2板式カメラは、葉面の反射特性が特徴的な550nm付近の光を透過するバンドパスフィルタと近赤外領域の光を透過するIRフィルタを装着し、得られる画像の輝度比より結球部を抽出する。また、照度変動の激しい野外ではハレーションを起こしてしまうこともしばしば見られることから、電子シャッタ速度を外部信号でコントロールできるようにして、ハレーションを起こした部分についてはシャッタ速度を速めて、ハレーションが無くなるまで撮影する。撮影したこれらの画像の処理は、シャッタ速度よりリニアな輝度値に換算して行う。開発手法によってキャベツ結球を抽出を試みた結果、一部誤抽出がみられるが、結球部の抽出は可能であった。

2. 収穫ロボット

1号機と2号機の2台の収穫ロボットを試作して実験を行った。いずれも、上述の画像認識手法によって適期球を判定し、油圧マニピュレータに装着したグリッパによってキャ

ベツを選択的に収穫できた。

(1) 油圧マニピュレータ

回転関節4自由度、直動関節1自由度の合計5自由度をもつ1号機では、1個のキャベツ収穫に107.0sを要し、大幅な収穫速度の改善が必要であった。試作2号機では、1kg程度のキャベツを能率よく収穫するために、軽量の3自由度極座標型油圧マニピュレータを試作した。試作マニピュレータの解析と実験によってその動作速度を調査した結果、腰、肩の回転速度及び腕の伸縮速度はそれぞれ0.65rad/s、0.3～0.68rad/s及び0.12m/sで、動作速度から推定した収穫作業速度は1個あたり22s以上であった。また、その位置決め誤差は、腰、肩 $\pm 4.2 \times 10^{-3}$ rad、 $\pm 0.3 \times 10^{-3}$ rad、腕は ± 3.0 mm以内で、収穫に十分な位置決め精度を得られることが確認できた。

(2) 収穫ハンド

試作1号機は、3指の収穫用グリッパによってキャベツを引き抜き収穫するため、根部に付着した土によって他のキャベツを汚してしまう欠陥が確認された。

試作2号機では茎葉の切断処理できる油圧駆動グリッパを開発した。このグリッパは、対向する把持用2指と切断用2指を持ち、それぞれ独立に動作させることができる。結球の検出方法としては、プローブスイッチと超音波センサの2方法を検討し、収穫性能を比較した結果、検出力は超音波センサが優れていた。

3. ロボットの収穫性能

収穫試験の結果、収穫適期球の収穫精度は超音波センサハンドで40～71%で、そのうち最適な位置で茎葉を切断できたものは、64～71%であった。また、作業速度は連続作業において、1個あたりの平均収穫時間が32.1sであった。

収穫の失敗は外葉による結球の隠蔽や、キャベツの転倒、茎の曲がり等の生育状態やハレーション等の撮影画像が原因による画像の誤認識、グリッパの把持失敗による。

以上、試作した2台の収穫ロボットによって、キャベツの選択収穫作業を無人で行うことが可能であったことから、開発した要素の有効性を実証することができた。また、画像認識、マニピュレータ、ハンドの技術的な問題点についても確認でき、研究発展のための知見を得ることができた。これらのことから、本研究がキャベツのロボット収穫技術の基礎となり、実用化への一助となるものと考えられる。

今後、実用化に向けて、キャベツの収穫精度や作業速度向上を目指した技術面の研究推進とともに、ロボット収穫への適応性が高い、収穫時期に外葉が展開して結球部が十分に

露出し、かつ直立した状態のキャベツを生産するための栽培管理技術の開発、ロボット収穫による省力化効果を最大限にするためのキャベツ生産における作業技術体系の見直しや、コスト面からの生産農家への導入可能性の検討を進めていきたいと考えている。

謝辞

本論文は、平成4～7年度までは農林水産省特別研究「野菜生産におけるインテリジェント機械作業システムの基盤技術の開発」、平成8年度より総合的開発研究「未来型軽労化農業技術確立のための基盤技術開発に関する総合研究」のもとで、農業研究センター機械作業部畑作機械化研究室在職中に進めた一連の研究をまとめたものであり、研究の推進と論文の作成にあたり多くの方々のご指導、ご鞭撻とご協力を頂きました。

特に、京都大学大学院農学研究科梅田幹雄教授には、研究の推進と論文の作成にあたり多くの適切なお指導を頂きました。ご厚恩に対して衷心より感謝の意を表します。

京都大学大学院農学研究科池田善郎教授、笈田昭教授並びに矢澤進教授には、論文の作成にあたり、多くの有益なお指導を頂きました。ここに慎んで感謝の意を表します。

本研究の実施にあたり、桑名隆元部長、鳥取大学農学部唐橋需教授（前部長）、佐々木泰弘部長の歴代農業研究センター機械作業部長をはじめ、関係者各位より多くのご指導とご支援を頂きました。特に、唐橋需教授には本研究の開始当初、畑作機械化研究室長時代より多くの適切なお指導を頂きました。ここに慎んで感謝の意を表します。

畑作機械化研究室では、数多くの有益なお指導と激励の言葉を頂いた大塚寛治畑作機械化研究長をはじめ、ハンドの研究を進められた北海道農業試験場井上慶一農業機械研究室長（前畑作機械化研究室主任研究官）、実験やキャベツの栽培で多大なるご協力を頂いた杉本光穂主任研究官、黎文氏をはじめ多くの研究員、研修生の方々のご指導とご協力を頂きました。ここに、皆さんへ心より感謝の意を表します。

生物系特定産業技術研究推進機構山本健司氏、貝沼秀夫氏の両氏にはご多忙の中、ロボットの台車、並びにグリッパの試作にご尽力頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

油圧に関しては株式会社工苑の野見山紘一氏に、画像処理については浜松ホトニクス中央研究所黒野剛弘氏、並びに花嶋正昭氏より多くの有用なお助言をいただきました。また、茨城県農業改良普及センター滑川裕之氏には、キャベツ栽培農家を紹介していただきました。ここに深く感謝の意を表します。

最後に、研究の推進、並びに論文の作成にあたり、九州農業試験場古川嗣彦次長（前北海道農業試験場総合研究部長）、帯広畜産大学西崎邦夫教授（前北海道農業試験場農業機械研究室長）、京都大学大学院農学研究科飯田訓久助教授より多くの有益なお助言を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。