

農産物の自動選別箱詰めシステムの開発

— 視覚による等級選別システムと高速ロボットによるハンドリングシステム —

鈴木 慎一, 高橋 裕之, 波 通隆
 新井 浩成, 本間 稔規, 長尾 信一
 片岡 信義*, 下山 利美*, 小林 恒美*

Development of Sorting and Packing System for Agricultural Products

— Sorting System with Image Processing and Handling System with High-speed Robot —

Shinichi SUZUKI, Hiroyuki TAKAHASHI, Michitaka NAMI
 Hironari ARAI, Toshinori HONMA, Shinichi NAGAO
 Nobuyoshi KATAOKA*, Toshimi SHIMOYAMA*, Tsunemi KOBAYASHI*

抄 録

一次産業産品である農産物や水産物は形状、色合い、重量が不均一な非定型物である。そのため、等級選別や箱詰めといった作業の自動化を工業製品のような画一的な計測によって対応することは難しい。

そこで、農産物等の非定型物に対応する自動化技術の確立を目的に、視覚を用いた形状計測、表面状態識別、内部欠陥識別についての検討および高速ロボットを用いたハンドリングシステムの検討を行い、この結果を基に大根の自動選別箱詰めシステムを開発した。

1. はじめに

農産物や水産物は形、重量等による等級付けや不良品の出荷を防ぐために厳しい選別作業を経て、箱詰め等の梱包を行い出荷されている。これらの作業の大部分を多くの人手をかけて行っているが、就業者不足やローコスト化といった問題に対応するため、作業の自動化が早急に求められている。

本研究では、等級付け等の識別処理を行うために画像処理装置を使用し、大きさ、曲がり等の形状計測、傷、色合い等の表面状態識別、スや空洞等の内部欠陥識別の検討および非定型物を把持するためのハンド機構、視覚装置を搭載した高速ロボットを使用したハンドリング動作、搬送コンベア等の周辺機器およびシステムレイアウトの検討を行うと共に統合システムを試作し実験を行った。

画像識別システムは CCD カメラ、高速画像処理装置による形状計測・表面状態識別部と X 線カメラ、画像処理装置による内部欠陥識別部に分かれる。高速ロボットシステムはロ

ボット本体（ロボット用視覚装置を含む）、大根搬送コンベア、段ボール箱位置決め装置に分かれる。本システムの概念図を図 1 に示す。

非定型物の例として大根をシステムの対象に採用した。

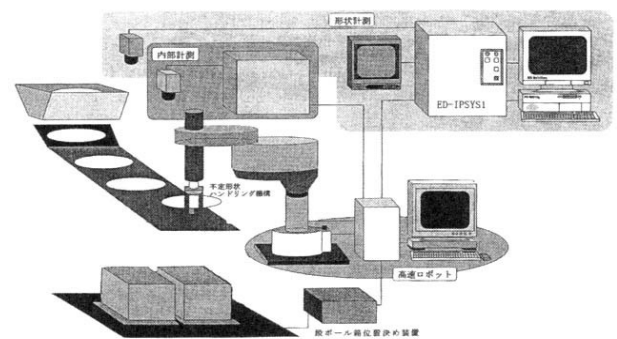


図1 システム構成

2. 画像識別システム

2.1 画像識別システム概要

大根の選別工程では、長さ、太さによるサイズ選別、曲が

*株式会社ニッコー

りや傷、腐れなどによる等級選別、スや空洞などの内部欠陥検査が行われている。このうち、内部欠陥検査は、現在抜き取りによるサンプル破壊検査が行われているが、品質の確実な保証を行うため全数の非破壊検査が求められている。これらの機能を満たす画像識別システムの開発を行った。

画像識別システムは、①長さ、太さ、曲がり計測を行う外観形状計測部（長さ、太さ、曲がり）、②表面の傷、腐れ等の識別を行う表面欠陥識別部、③内部のスや空洞などの識別を行う軟X線による内部欠陥識別部により構成される。

2.2 形状計測部

形状計測部では、外観形状パラメータとして、長さ、太さ、曲がりの計測結果から等級識別を行う。

識別処理手法の確立を図るため、その計測基準および計測手法の検討を行った。選別対象となる大根は、ひげの除去および洗浄された出荷前の状態で、葉は付いており、シーンに対してほぼ水平に搬送されるものとする。図2に外観形状計測基準を示す。長さは、葉を除いた水平方向の全長、太さは、垂直方向の幅の最大値とした。曲がりについては、湾曲部分の最大値が基準値を越えないものを良品として計測を行う。

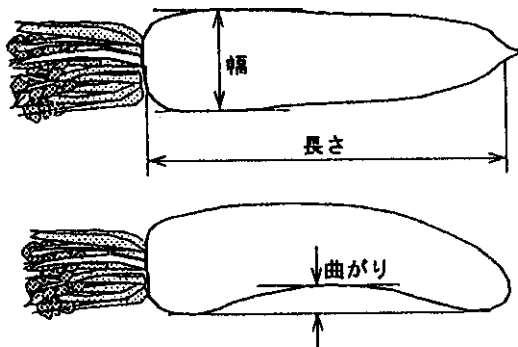


図2 形状計測規準

この基準に対して形状計測手法の検討を行い、計測システムの試作および試験を行った。葉の除去は輪郭線抽出処理結果を垂直方向に射影演算処理し、しきい値処理により行った。長さは葉の除去処理と同様に垂直方向の射影演算処理結果から求め、太さは輪郭線の垂直方向の間隔の最大値とした。曲がりは通常、大根が大きく湾曲しているため、包絡線を抽出して包絡座標の水平座標間隔が最大のところを最大湾曲部と仮定して、その直線を法線に対して大根の中心側へ基準値分平行移動した直線と輪郭との交差点から算出した。本処理フローに基づき画像システムを構築し、型紙により作成したモデルを計測することによりキャリブレーションを行い評価試験を行った。極端に傾いていなければ、葉部の除去処理や等級選別処理として良好な計測結果が得られた。本処理フローにより、長さ、太さ、曲がり計測が可能であることが確認できた。

さらに、高速化を図るため汎用高速画像処理装置（エルムデータ製 ED-IPSYS1 512×512画素、256階調、8フレーム）を用いた画像システムへの搭載を行った。その結果、長さ、太さ、曲がり計測に要する処理時間として約1.3秒/本（撮像時間は含まない）が得られた。しかし、実際のコンベア上で移動しながら撮像試験を行った結果、コンベアからの反射光などノイズの影響を受けることが判明した。このため、ノイズ除去処理や包絡線抽出処理の精度向上のための処理を付加した結果、処理時間は1.6～2.0秒/本を要した。ここでは、要求される処理時間（ロボットの搬送処理時間も関連する）を作業員と同等の処理能力として設定した1秒/本とし、それを実現するために、画像処理領域の最適化および比較的処理時間を要する曲がり識別処理の処理画素数を間引くことで平均約0.7秒/本が得られた。型紙によって作成したモデルや実際の大根を使って実験を行った結果、要求される計測精度について問題ないことが確認できた。処理結果を図3に示す。

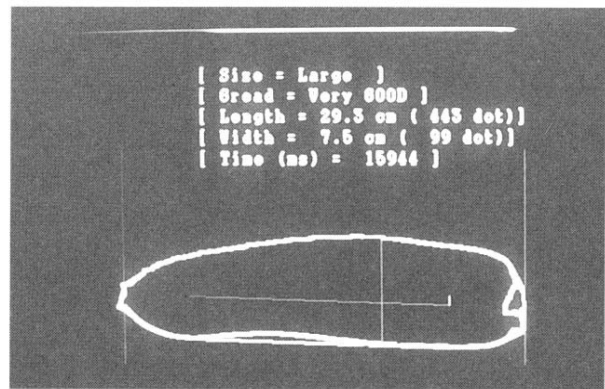


図3 形状計測結果

2.2 表面状態識別部

表面状態の検査項目のうち、本処理では、斑点、虫害、腐れなどの表面欠陥に対する識別処理を行う。まず、欠陥の調査・収集を行い、代表的な欠陥例を以下のように分類した。

- ①腐れによる変色
- ②穴状の窪み（変色が伴う場合もある）
- ③浅く、長い窪み（虫這い）
- ④広範囲な変色
- ⑤斑点状の変色

次に表面欠陥を変色と変色を伴わない窪みとして処理の検討を行った。変色を識別する方法として、カラーカメラにより捉えたR、G、B各イメージ毎のしきい値処理による領域分割処理について検討を行った。本処理は、R、G、Bイメージそれぞれを2値化処理し、重みづけをして加算処理し、加算結果に対して2値化処理により、欠陥部の抽出を行った。処理結果を図4に示す。a)は、窪み部分の腐れによる変色、c)は、腐れによる変色、e)は4個の穴状の窪みのうち、図の下側の2個が変色している例であり、b)、d)、f)がそれぞれ

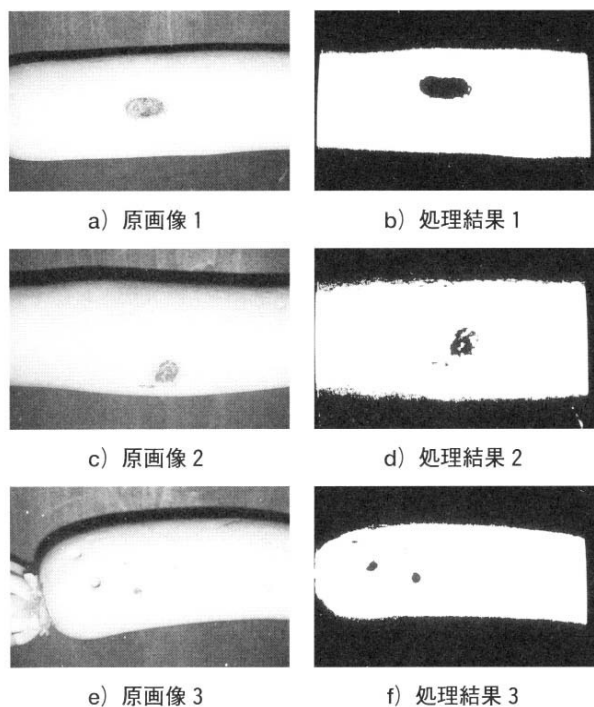


図4 RGB処理による表面状態の計測

の処理結果である。本結果から、変色部の抽出は可能であることが確認できた。しかし、輪郭部分では照明むらによる影響が大きく、微妙な色合いの識別が難しいことが判った。照明法により撮像環境を一定にするなどの考慮が必要である。

続いて、変色がない欠陥(②および③)についての抽出方法に関して検討を行った。変色を伴わない欠陥では、色の相違がないためRGBイメージによるしきい値処理では抽出できない。そこで、照明角度を制御することで凹部を明確化するための検討を行った。照明を大根に対して斜め方向から照らすことにより凹部分に影が生じ、その影部分を画像により捉えることで変色を伴わない窪み欠陥部抽出が可能となることを確認できた。しかし、狭い領域に対して照明を照射することになるため、欠陥部の検出範囲が限られる。そこで、図5に示すように照明を4個用いて別々に制御することにより検出範囲の拡大の検討を行った。大根に約10mmの窪み4個と細長い窪みを付け評価試験を行った。処理結果を図6に示す。処理手法は、RGBで捉えた画像に対して、それぞれしきい値処理を行い、最終的に検出された欠陥部を加算処理することで全体の欠陥の抽出を行った。

本処理手法により、照明を増やすことで検出範囲が広がることを確認できたが、輪郭付近にある2個の窪みを検出することは困難であった。照明の照射角度の最適化や照明数を増やすことで検出範囲拡大の可能性を検討する必要がある。本処理手法は、変色識別処理と同様な処理が可能であるため、変色の抽出と同時に窪み状の欠陥が抽出可能である。今後は、これらの表面識別処理の高精度化と高速化を図り、実用化の検討を行う予定である。

2.3 内部欠陥識別部

ス、割れ、空洞等の内部欠陥を抽出することを目的に、非破壊検査装置(SOFTEX PT-150II型:図7)を用い、軟X線画像による処理手法の検討を行った。

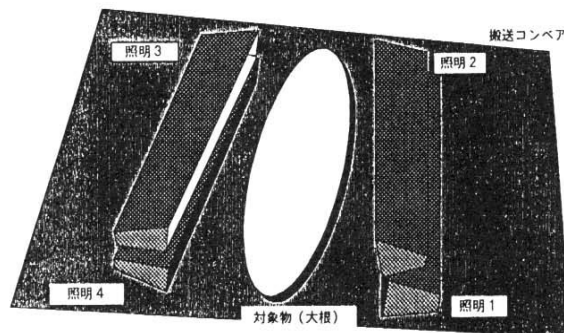


図5 照明制御の模式図

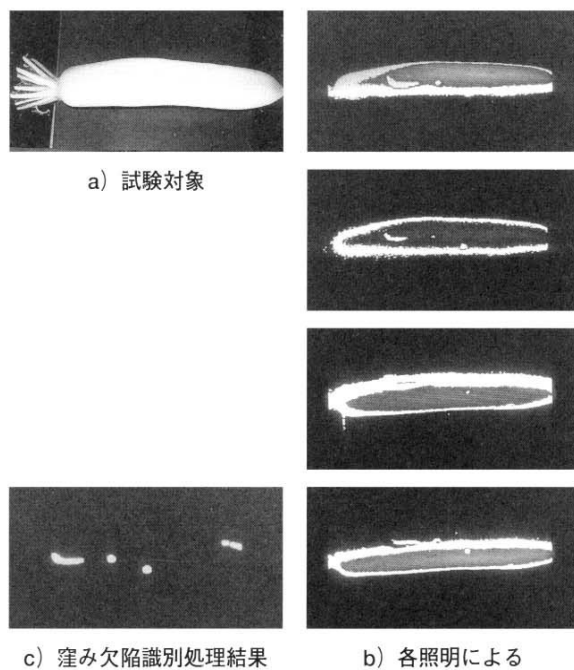


図6 照明制御による窪みの識別



図7 非破壊検査装置

今回、非破壊検査装置と画像処理装置が直接接続できないため、ビデオテープレコーダー（VTR）に一旦記録して行った。非破壊検査装置の出力画像は、120回取り込み平均した画像を使った。軟X線画像を目視で観察すると内部の欠陥の状態を確認することができるが、取り込んだ画像ではムラやノイズの影響に対して濃淡の差が微少であるため、単純な2値化処理等による抽出は困難であった。そこで、ウィンドウ（2×3）を設定して、隣接するウィンドウ間における濃度値の合計の差がしきい値を越えた場合を欠陥部との境界と

した。画像が比較的安定している中心部に限定して識別処理を行った。図8は、内部欠陥がある大根の軟X線画像および処理結果である。多少ノイズが残るが欠陥部の抽出が確認できた。今回はVTRを介したが、直接X線画像を取り込みさらに良質な画を使用することで欠陥部抽出精度の向上が期待できる。

また、軟X線画像の画質改善を図る上で、大根のような形状の場合、画質に悪影響を与える要因として次の項目が考えられる。

- ①厚さの変化に伴う透過量の変化の影響
- ②エッジ部のX線の回折による影響
- ③点X線源による中心部と周辺部のX線量の強度の違いによる影響

そこで、これらの要因に対する画質改善案を検討した。

- 1) 厚さやエッジの回折の影響を回避するためには、大根と同じ透過率の物質によって挟みながら計測する。
- 2) X線量の強度の影響では、対象物が存在しない状態の画像と計測画像との比較により補正を行う。
- 3) X線画像の安定化を図るためにCuフィルタなどにより画像の安定化を図る。

X線の回折の除去や太さの補正処理などを加えることにより画像の改善が図れると思われる。また、Cuフィルタなどを用いることで低エネルギー成分をカットし、高エネルギー成分のみを通すことでコントラストが低下するが、全体の形状が見やすくなるなどの利点がある。このことから、これらの画像改善処理を施すことにより、ある程度の大きさの内部欠陥についての識別が可能と思われる。

3. 高速ロボットシステム

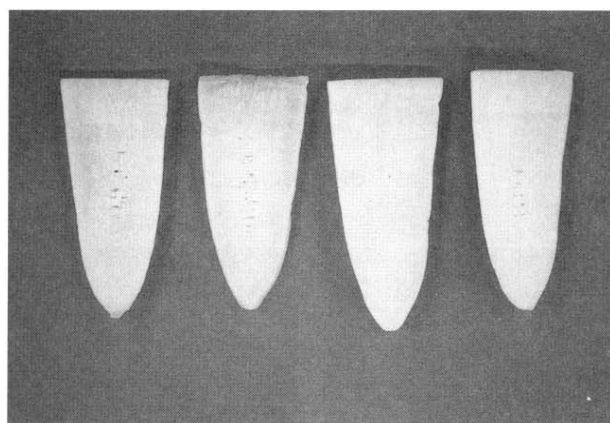
3.1 システムの概要

ロボットシステムは大根を確実に把持し、等級識別の結果に基づいた箱詰めを行う。

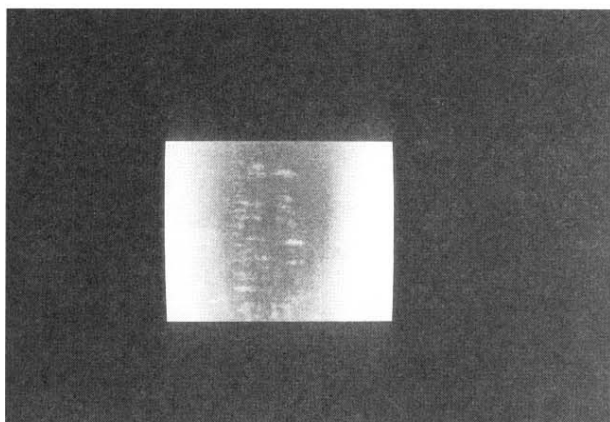
ロボットは不整列にコンベア上を流れてくる大根の取り上げ位置をロボット用視覚装置の計測によって求め、コンベアを停止させずに大根を掴み上げる。そして画像識別システムで等級付けされた大根に対応する段ボール箱をロボットの大根離し位置へ位置決めし、大根の葉側を外向きにして整列箱詰めを行う。

システムレイアウトを図9に示す。このレイアウトの決定にはロボットの動作領域を最大に活用すると共に搬送経路が最短になるよう考慮した。

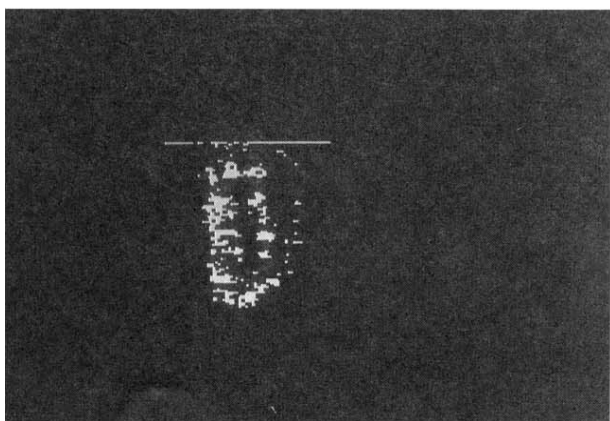
ロボットはAdept社製のダイレクトドライブ駆動4軸スクラ型である。最大可搬重量は9.1kg(ハンド重量含む)あり、サイクルタイム(負荷5.9kg)は1.3秒と高速動作が可能である(図10)。また、視覚装置を搭載しており複数のスイッチやセンサを併用すること無く不整列なワークをハンドリン



a) 試験対象



b) 内部画像



c) 処理結果

図8 内部欠陥識別結果

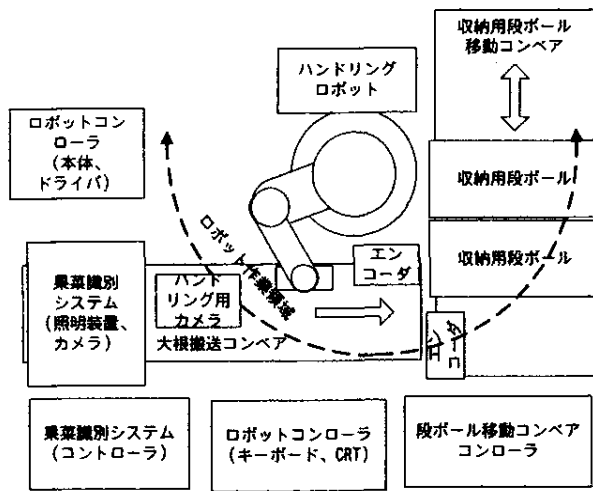


図9 システムレイアウト

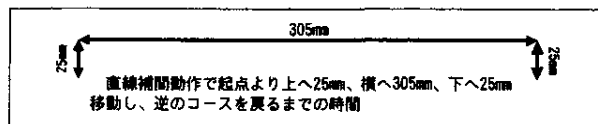


図10 サイクルタイム

グする事が可能である。

ハンドは平行開閉方式の2指型で空気圧で駆動される。指の内側に緩衝材を取り付けて把握時の接触面積を大きく取り、大根の非定形状に対する把持の確実性を確保した。

3.2 ロボットコントローラ

本システムで使用したロボットコントローラはマルチバスのバックプレーンにCPUボード、視覚処理およびモーションの各機能ボードを組み込むことで構成されている。オープン・アーキテクチャの思想により、カセンサボード等の各種機能ボードを追加することが可能であり容易にシステムの機能向上を図ることが出来る(図11)。

また、OSはV+という独自の言語で記述されたマルチタスク環境で動作している。そしてユーザープログラムをGUI環境で構築するソフトウェアであるAIM(Assembly Information Manager)を使用することでユーザープログラムの作成やカスタマイズを容易に行える。このAIMにはロボット動作と画像処理の手順等を記述するためのモーションウェア、ビジョンウェアというアプリケーションモジュールがある。これらを使用することで、作業データベースの作成、処理動作の確認、修正等が一括に行える。

画像の取り込みにはCCDカメラ(松下電工GPCD40)と焦点距離16mmのレンズを使用した。カメラの有効画素は484×512画素あり、カメラをコンベアの上、約1000mmの位置に設置することにより実画像で約280×290mmを得ている。照明にはインバータ電灯を使用した。

また、実験環境は外乱光による影響を受け無いため特に遮光は行っていない。

視覚処理の動作手順はビジョンウェアにより作成した。ビジョンウェアではCCDカメラのスケーリング・データや2値化のしきい値等を記録としてデータベース化しそれらを用いて処理手順を作成する。その他の記録としては取り込んだ画像から重心や線、円を求めるものや各記録を組み合わせてカメラ視野での座標系を作成するものがある。

ロボットの動作手順はモーションウェアにより作成した。モーションウェアでは、作業位置のデータベース等を作成し、外部からの信号処理を含めたシーケンスを記述する。記述するステートメントは移動を指示するもの、条件分岐等のシーケンスを制御するもの等が20数種類と少なく、編集は容易であり、複雑なシーケンスも数行で記述できる。

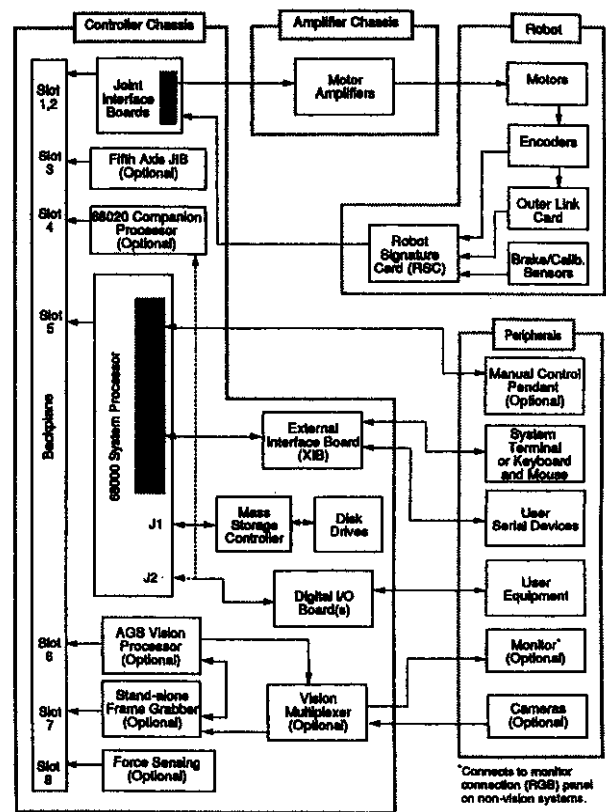


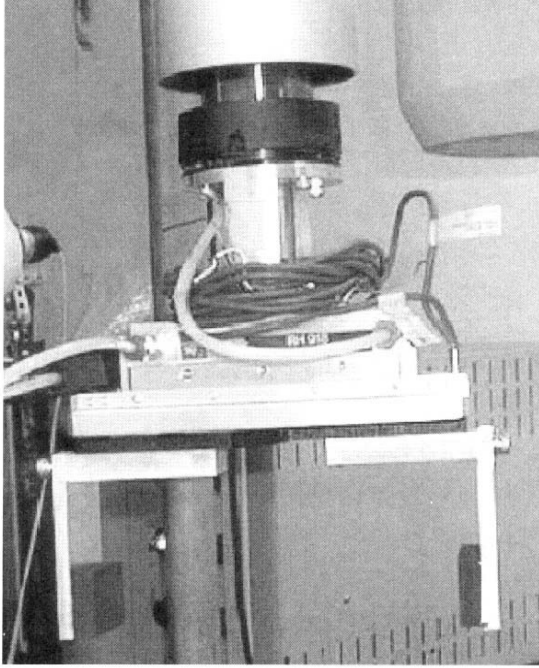
図11 ロボットコントローラの構成

3.3 ハンド機構

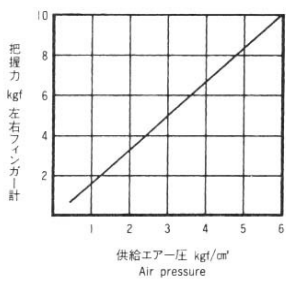
農産物選別システムのハンドには不均一で複雑な形状物を確実に把持しながら高速搬送を行い、かつワークに傷を付けないことが要求される。

一般的に食品類のハンドリングには吸着式ハンドが多用されている。しかし、大根は食品類としては重たく、その形状からハンド接触面の密着性確保が困難であり、吸着式ハンドは不適と考えられる。

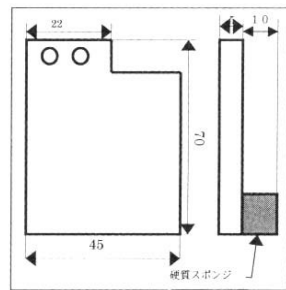
また、ユニバーサルハンドは3~5本の2~4関節指を持



a) ハンド全景



b) 供給エア圧と把握力の関係



c) 指部

図12 ロボットハンド

つため多様な把持対象に対応できるが、機構、制御が複雑になりハンドシステムが大きくなり易く、ローコスト性、メンテナンス性等に問題がある。

そこで、本システムでは、最も使用例の多い二指形の挟み機構ハンドを使用した。二指の開閉方式はスイング形、並進形がある。スイング形は機構が簡単であるが把持対象への安定性において並進形に劣っているため、本システムでは並進形のタイプを採用した。ハンド本体（高野ベアリング RH918ST140）は空気で駆動する。そこにアルミ製の指（45mm×70mm×5mm）を取り付け接触面には硬質スポンジを取り付けた（図12）。把持の際にはスポンジが変形し接触面積を広くとり把持力を確保すると共に大根の表面を保護する。また、把持力が一定になるように圧力制御弁を取り付け、供給圧を5kgf/cm²とし、把持力は8.5kgfとした。この値は経験値であり、確実に把持できかつ大根に傷を付けない最適値を実験により設定した。

ハンドのストロークは120mmとし、大根の径（40～80mm）に対して十分なクリアランスがあり、コンベア上で

の大根のズレや計測誤差に対して確実に把持が可能である。

3.4 周辺装置

ロボットシステムの周辺機器として大根搬送用コンベア、段ボール箱位置決め装置を配置した。

3.4.1 大根搬送コンベア

搬送コンベアの起動・停止はロボットからの指令で制御される。搬送コンベア（340mm(W)×2000mm(L)）にはエンコーダが取り付けられており、ロボットはコンベア移動量を常時、認識することが可能である。

今回の試験中に搬送中の大根が転がり安定しないことがあった。実用時にはコンベアベルトに人工芝を張るなどの対策が必要である。

3.4.2 段ボール箱位置決め装置

本装置は画像識別システムによる等級判定に対応する段ボール箱をロボットの箱詰め位置に位置決めする。食品用コンベア（400mm(W)×1500mm(L)）を改造し、リバースモータ、位置決め用カウンタ、パソコン等を付加して位置制御を可能とした。図13にブロック図を示す。段ボール箱の大きさとの関係より箱は2個置きとした。

本システムでは設置場所の制約等によりコンベアサイズが小さくなったが、実用化の際にはコンベアサイズの最適化および段ボール箱の交換装置なども含めた設計が必要である。

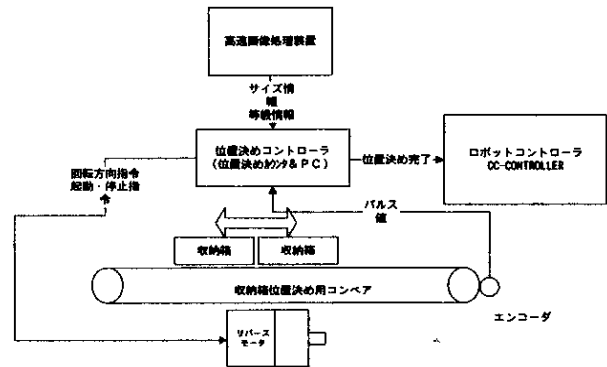


図13 段ボール箱位置決め装置ブロック図

4. 選別箱詰め実験

画像識別システムの形状計測部とロボットシステム部を統合化し、大根の形状による等級選別を行い、その結果を基に箱詰めする実験を行った。システム全景を図14に示す。

現在、農協で行われている大根の等級選別作業では優、秀の2等級に、LL、L、Mの3サイズを組み合わせた6つに分けられている。今回もこの選別基準に従い処理するが、段ボール箱位置決め装置の大きさによる制約から実験では2つのサイズの選別箱詰めを行った。実験には葉を除去した後のM、L、2サイズの大根を使用した（図15）。

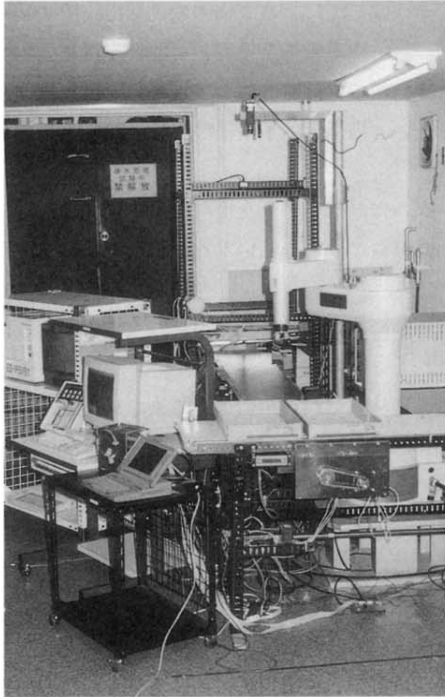


図14 実験システム全景

	重量(kg)	長さ(cm)	太さ(cm)	サイズ
A	0.74	26	67	M
B	0.98	26.5	72	M
C	0.9	27	68	M
D	0.86	27.5	67	M
E	0.62	29	85	M
F	0.74	29	61	M
G	0.8	30.5	61	M
H	0.86	30	67	L
I	0.92	30.5	65	L
J	1	31	67	L
K	0.9	31.5	69	L
L	0.9	32	68	L
M	1.2	34	74	LL

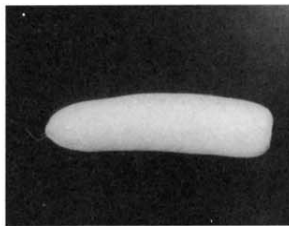


図15 試験に使用した大根

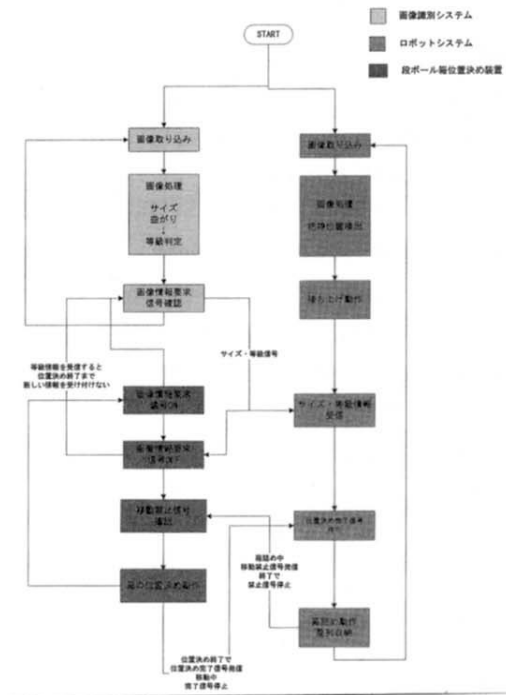


図16 システム間の情報伝達と動作

各システムはパラレル信号により情報を送受信している(図16)。各システム間の信号はレベル変換ボードを介して接続されている。

選別箱詰め動作を以下に示す。

- 1) コンベア上の大根形状を画像識別システムで取り込み、長さ、曲がり、太さの計測から等級判定を行い、その結果をロボットシステムへ発信する(図17)。
- 2) 段ボール箱位置決め装置は受信した結果によって対応する箱をロボットの箱詰め位置へ移動する。ロボットは画像識別システムを通過した大根の映像をロボット用視覚装置で取り込み、カメラ座表系での大根の重心位置および主軸の傾き(ロボットのX座標軸と大根主軸のなす角度)を計測する(図18)。
- 3) ロボットは搬送コンベアの移動量と視覚装置の計測量から大根の把持位置とタイミングを計算する。ロボット正面まで大根が来たときにコンベアの動きと同期しコンベアを停止させずに掴み上げ、箱詰め待機位置まで移動する(図19)。
- 4) 段ボール箱の位置決めが終了していることを確認後、大根を箱に入れる。この時、常に大根の葉側を箱の外に向け整列(4x4)して収納する(図20)。

本実験で等級識別および大根の把持は安定して行われることが確認できたが、実用化の際には把持の失敗時における対応を行う必要がある。

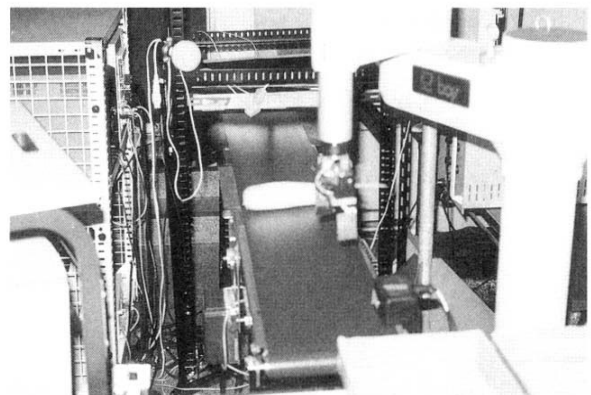


図17 識別装置を通過し流れてくる大根



図18 ロボットの視覚処理と把持

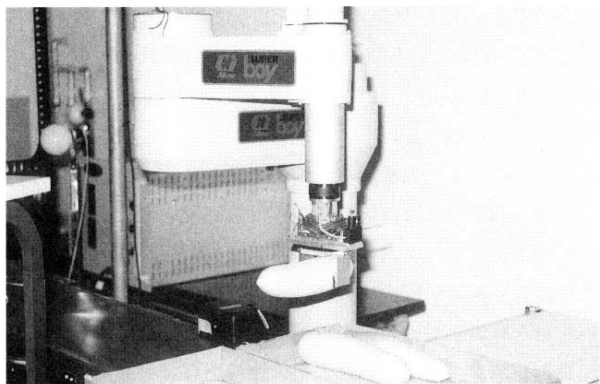


図19 待機位置で待つロボット

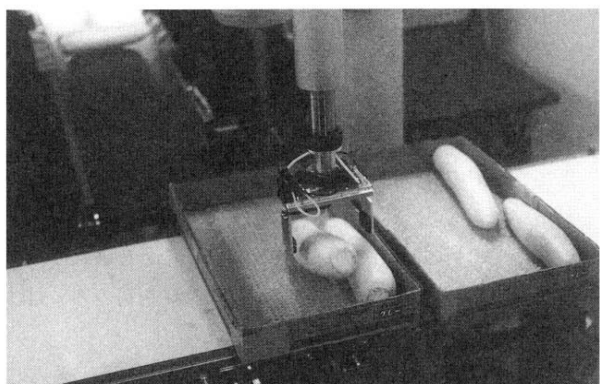


図20 箱詰め

ロボットは大根を約 1200mm 搬送するが、この移動に約 3.5 秒要する事を確認した。さらに大根を箱に入れ、次の大根を掴み上げるまでに約 2 秒要した。このため、大根の供給を約 6 秒間隔とすることで安定な箱詰めが実現できた。

また、段ボール箱を移動する際に入っている大根が転がり、安定しない事があったが、箱の移動時の加減速をスムーズにすることや装置を傾けることで対策が可能である。

5. まとめ

農産物を対象とした自動化技術の確立を目的に大根の自動選別箱詰めを行うシステムを試作した。本システムは画像識別システムと高速ロボットシステムから構成される。

画像識別システムでは画像処理装置による形状計測、表面状態識別および軟 X 線を使用した内部欠陥識別について、高速ロボットシステムでは大根を確実に把持するハンド機構、搬送コンベア等の周辺機器および全体レイアウトについて検討を行った。

また、形状計測部と高速ロボットシステムを統合化し動作確認を行った。これらの検討、試験により以下の成果が得られた。

- 1) 長さ、太さ、曲がり等の外観形状の計測が平均 0.7 秒 / 本の高速処理が実現できた。

- 2) カラー画像処理による表面の変色抽出、照明制御を用いた表面の傷、窪みの抽出処理の可能性を得た。
- 3) 軟 X 線画像の画像改善および内部欠陥検出処理に関する検討を行い、内部欠陥検出処理手法に関する指針が得られた。
- 4) ランダムにコンベア上を流れてくる大根を的確に把持するため高速ロボットを用いたハンドリングシステムを構築した。
- 5) 空圧駆動の二指ハンドを使用し、大根の確実な把持を実現した。
- 6) 大根を把持してから箱に入れるまで平均 3.5 秒 / 本を要した。

農産物の選別箱詰めの自動化システムは全国的にも実用例が少なく、特に北海道においては農業およびその関連産業は大きな産業であり、各種の自動選別箱詰めシステムがますます求められている。今後は、本研究の成果をそれらのシステムに積極的に応用し、実用化に向けて以下の技術開発を進めていく必要がある。

- 1) 表面状態計測の高速化およびロボットシステムとの統合化。
- 2) 内部欠陥計測の処理手法の改良、処理の高速化の確立。
- 3) ロボットコントローラによる周辺機器の集中制御を行い、全システムの小規模化を図る。
- 4) コンベア等周辺機器の実用化に向けた検討。
- 5) 搬送箱詰め時間の短縮。

6. 参考文献

- 1) 高橋他：「高速画像処理による農産物加工品等級識別システムの開発（第 1 報）—平面形状計測による農産加工品等級識別システムの開発—」、北海道立工業試験場報告、No.292、pp115-130（1993）
- 2) 高橋他：「視覚搭載型高速ロボットを用いた果菜選別システムの開発研究」北海道立工業試験場平成 7 年度共同研究報告書（1996）
- 3) 高橋他：「視覚搭載型高速ロボットを用いた果菜選別システムの開発研究」北海道立工業試験場平成 8 年度共同研究報告書（1997）
- 4) 高取他：「生体の機能をまねた画像処理アーキテクチャを開発、1 画素を 40ns で処理」日経エレクトロニクス、no.450 pp189-198（1988）
- 5) 「CC Controller User's Guide」アデプト・テクノロジー・ジャパン
- 6) 「VisionWare User's Guide」アデプト・テクノロジー・ジャパン
- 7) 「MotionWare User's Guide」アデプト・テクノロジー・ジャパン
- 8) 大永英明：「包装・食品ロボット」日本ロボット学会誌、

- vol.13, No.6 pp30-33 (1995)
- 9) 日本機械学会編：「機械工学便覧 エンジニアリング編
C4 メカトロニクス」日本機械学会、ppC4-70-C4-71
(1989)
- 10) 「ROBOT HAND '94」高野ベアリング Co., Ltd