いちご収穫ロボット「M型3号機」用RTコンポーネントの開発

山下 智輝*・田中 基雅*・山本 聡史**
林 茂彦**・齋藤 貞文**・菅野 重樹***

Development of RT-components for the M-3 Strawberry Harvesting Robot

Tomoki YAMASHITA*, Motomasa TANAKA*, Satoshi YAMAMOTO**,
Shigehiko HAYASHI**, Sadafumi SAITO** and Shigeki SUGANO***

We are now developing the strawberry harvest robot called “M-3” prototype robot system under the 4th urgent project of MAFF. In order to develop the control software of the M-3 robot more efficiently, we innovated the RT-middleware “OpenRTM-aist” software platform. In this system, we developed 9 kind of RT-Components (RTC): Robot task sequence player RTC, Proxy RTC for image processing software, DC motor controller RTC, Arm kinematics RTC, and so on. In this paper, we discuss advantages of RT-middleware developing system and problems about operating the RTC-configured robotic system by end-users.

Key Words: agrirobot, strawberry, RT-middleware, manipulator, image processing

1. 緒 言

20世紀末頃から農家の高齢化、後継者不足、自給率低下など農業を取り巻く状況がたびたび問題視されてきたが、現在に至ってもなおこれらの問題は歯止めが効かず¹⁾、その一方で最近外食、流通、小売産業など異業種企業が農業へ参入して大規模な経営を行なう事例が増えてきている。このような背景の中、経営の規模拡大・効率化、人手不足の解消、作業者の軽労化などの観点から、農業へのロボット進出がますます強く叫ばれており、NEDO技術ロードマップでも農業ロボットが次世代ロボットの有力な市場の一つとして挙げている²⁾。しかしながら国内における農業ロボットの研究開発はこれまで精力的に進められてきたものの³⁾、工業製品と違って扱う対象が不定形、軟弱で稼働環境も屋外など整備されていないことが多いため、技術的に難しい課題が多い。また、たとえば収穫ロボットでは1年のうち数日～数ヶ月の収穫時期しか稼働できないといった産業用ロボットに比べて稼働率が低いことや、数百～数千万円もかかる高価なロボットに投資できる個人農家、農業法人が上述のように今後増える可能

性はあるものの現状まだ少ないなど、技術面に加えて導入面、採算面でも難しい問題を抱えているため、これまで実用化に結びついた例が少ないのが現状である。

一方、いちごは国内の主要農産物の一つに挙げられ、野菜では毎年トマトと1位、2位の座を争うほど生産高が高く、消費者にも人気の高い作物である⁴⁾。また近年立位での作業が可能で品質向上も図れる高設栽培技術が出現し、またこれを応用した大規模周年栽培システムの検討も始まっている⁵⁾。しかも高設栽培では、Fig. 1のように葉や茎などが生い茂った高さ1m前後の栽培床から果実のみが自重で垂れ下がって着果するという特性がある。これは従来の土耕栽培と違って葉などの障害物をかき分けて果実をセンシングする必要がないため、ロボットに有利な環境といえる。このような背景から、規模拡大化での課題に挙げられている収穫作業やパック詰め省力化などを解決するための取り組みの一つとして、2006年から農林水産省次世代農業機械等緊急開発事業(緊プロ事業)「いちご収穫ロボット」の開発事業が立ち上がり、筆者らは高設栽培施設での運用を前提としたいちご収穫ロボットを共同で開発している。

開発当初は参画機関ごとで制御プログラムの一部の機能を分担開発していたが、これらを統合する作業で時間と手間がかかっていた。また、実験場所ごとでシステムの構成が変わることがあり、その都度現場でプログラムを書き換えるという手間もあった。一方、以前に産業技術総合研究所が開発しているRTミドルウェアOpenRTM-aistを適用した農作物運搬ロボットを試作したが、その際、ロボットの構成要素ごとでプログラムをコンポーネント化させることでソフトウェ

* (株)前川製作所 守谷市立沢 2000

** (独)生研センター さいたま市北区日進町 1-40-2

*** 早稲田大学創造理工学部 東京都新宿区大久保 3-4-1

* Mayekawa MFG. Co., Ltd., 2000 Tatsuzawa, Moriya

** IAM-BRAIN, 1-40-2 Nissin, Kita-ku, Saitama

*** School of Creative Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Ohkubo, Shinjuku-ku, Tokyo
(Received March 1, 2011)

(Revised September 30, 2011)

Fig. 1 Ceil hanging system elevated substrate bed in the strawberry greenhouse

アのメンテナンスが容易になり、また以前に開発したコンポーネントが別のプログラム作成時にも再利用可能で融通性が高いなど、ロボット用ソフトウェア開発での有用性を確認した⁶⁾。さらに2010年1月に正式版1.0が発表され、また公式サイトの整備⁷⁾、メーリングリストやRTミドルウェアコンテスト⁸⁾を通してユーザ数や開発に関する情報量が増えたという背景もあり、本研究では、いちご収穫ロボット用制御ソフトウェアの開発でもOpenRTM-aistを導入し、いちご収穫ロボットの制御に必要な複数のRTコンポーネント(RTC)を開発してソフトウェア開発の効率化を試みた。本報では開発したRTCの概要、RTC化による効果および問題点について報告する。

2. いちご収穫ロボット M 型 3 号機の概要

圃場における収穫作業者は、未熟果が混在した果房から瞬時に収穫適期の赤熟果の位置を判別し、しかも傷みやすい果実を1果あたり1~2秒前後で高速かつ巧みにハンドリングしている。しかしながら、現在のロボット技術ではこれらの作業をロボットによって実現させるのは困難である。そこで本プロジェクトでは、人間が行なう収穫作業が1日あたり早朝1~2時間かけて行なっているのに対して、夜間に1果あたり10秒前後で画像処理による赤熟果のセンシングとロボットアームによるハンドリング動作を行なうことで、全体的に8~10時間程度時間をかけて全収穫量の60~70%をロボットが収穫し、その残りを明け方人手で収穫することで軽労化を図ることとした。また、実際に圃場で果実の着果状況を調査すると、果実は通路裏側(栽培ベンチ内側)から通路側に向けて新しい果実が順々に形成され、収穫適期の赤熟果は通路側から見ると未熟果と重なって隠れることが多いことが判明した⁹⁾。したがって、人間のように通路側に限定して作業するだけでなく赤熟果に遭遇する機会が多い栽培ベンチ下に回って収穫動作が行なえれば、果実の収穫成功率が向上する期待がある。さらに実証試験場で使われている栽培ベンチが吊り下げ可動式で¹⁰⁾、ベンチ下の空間を広く利用できるという環境にある。そこで、2度の試作¹¹⁾を経た後、2009年から栽培ベッドの下にロボットシステムをすべて配置できるように小型化を図り、通路裏側に限定して収穫するM型3号機の

Fig. 2 M-3 Strawberry harvesting robot

Fig. 3 System configuration

(a) Approach to the left side (b) Approach to the right side

Fig. 4 Harvesting pose of the robot

開発に着手した。

Fig. 2にいちご収穫ロボットM型3号機の外観を、Fig. 3にロボットのハードウェア構成を示す。本ロボットでは、マニピュレータは3自由度のすべて屈曲軸で構成されたシリアルリンク型で、Fig. 4のように栽培ベンチ右列、左列の両側へ接近する姿勢が取れる。人手では片列収穫したら同じ通路を戻るように反対側の列を収穫するという動線であるが、このような構成によって圃場での動線を減らすことが可能となった。また、アーム自体の小型化・モジュール化を図るため、各関節軸駆動用のモータドライバをマニピュレータに内蔵させ、CAN通信線を介して省配線接続させた。一方、通路に対して平行な移動については、マニピュレータ基部に簡易防塵仕様単軸ロボット(IAI製ISDA-A-M-200-20-1000-

Fig. 5 Travelling platform for harvesting robot

T2)を配置して対応した。

また、果実収穫用ハンドに関しては、人間でも収穫の際果実に直接触れると「手あと」という白く焼けた部分が発生して商品価値を落とすという問題を抱えていることから、本プロジェクトで開発してきたロボットでは果実に直接触れるのではなく、果柄を把持する方式を取っている。M型3号機ではM型2号機と同様、平行リンクを用いた1自由度開閉機構とカミソリ刃を用いた切断機構を採用しているが¹²⁾、M型3号機では右列収穫用、左列収穫用で2個対向して配置し、モータ1個でリンクを介して連動して開閉する機構を取っている。なお、収穫した果実は単軸ロボットを挟むように左右に2個ずつ配置されたトレイに順番に置く。

実証試験場で実験を行なう際、敷地内の移動については、農林水産省「担い手の育成に資するIT等を活用した新しい生産システムの開発」プロジェクトの一環で開発されたガントリ型収穫ロボット専用移動プラットフォーム¹⁰⁾に搭載した。Fig. 5に移動プラットフォームの外観を示す。なお、本装置はM型3号機以外に、「緊プロ」の一環でエスアイ精工社と生研センターが共同開発を進めているS型3号機¹³⁾も搭載可能となっている。

収穫適期のいちごの着色度判別および3次元位置検出は画像処理で行ない、マンピュレータベース上面にあるステレオビジョンカメラ(Point Grey Research製FMVU-03MTC-CSを2台使用)でおおよその3次元的位置を把握し、収穫直前にハンドに内蔵したハンドアイビジョンカメラ(Point Grey Research製FMVU-03MTC-CS)で果柄周辺の拡大画像を取得して最終的な把持位置を決定する。

3. いちご収穫ロボット用 RTC について

Fig. 6に開発したコンポーネント群を、Fig. 7に実行時のスクリーンショットを示す。各コンポーネントは基本的にFig. 3に示したハードウェア構成に準じて分けた。また、システム制御アルゴリズムのうち、画像処理やアーム運動学計算など、参画機関ごとで分担開発しかつ改良する頻度が高い部分については別途コンポーネント化した。なお、使用しているハードウェアのデバイスドライバ(CANインタフェース、単軸ロボット用インタフェース)や各インタフェースの

1: Motion sequence player RTC
2: Arm manual controller RTC
3: Arm kinematics RTC
4: Angle/encoder-pulse converter RTC
5: DC motor controller RTC
6: Linear actuator controller RTC
7: Image processor RTC
8: Fruit arrangement controller RTC
9: Travelling platform controller RTC

Fig. 6 Connecting diagram of RT-components

Fig. 7 Screenshot of robot controller PC

制御用APIの制約から、これらはWindowsで動作している。また、OpenRTM-aistの開発プラットフォームはC++、バージョンは1.0 Releaseである。以下に開発したRTCについて述べる。

3.1 収穫動作シーケンス制御コンポーネント

本コンポーネントは、ロボットの収穫作業シーケンスを記述したXML形式のファイルを読み込み、その順番に従ってほかのコンポーネントへ指令値を送出するとともに、各コンポーネントから送られる現在状況からつぎの動作を制御するコンポーネントである。動作記述ファイルの一例をFig. 8に示す。ファイル内に記述したキーワードとして、アームの手先位置の指定、画像処理による赤熟果の走査、移動プラットフォームの移動、ハンドの開閉、収穫した果実をトレイへ置く動作など、収穫動作に必要なキーワードと、繰り返し動作のために任意の行ヘジャンプ、動作の終了など、動作シーケンスを制御するキーワードで構成される。本コンポーネントを起動すると、Fig. 7左側に示すロボットを操作するためのGUIも同時に表示され、GUIを介してロボットの運転、

```

<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
<Task>
  <!--0:EE を開く-->
  <Node>
    <Action>EE</Action>
    <Velocity>80</Velocity>
    <Time>10</Time>
  </Node>
  <!--1:Sleep-->
  <Node>
    <Action>Sleep</Action>
    <Time>2</Time>
  </Node>
  <!--2:EE 停止-->
  <Node>
    <Action>EE</Action>
    <Velocity>0</Velocity>
    <Time>5</Time>
  </Node>
  <!--3:初期姿勢 (左側) -->
  <Node>
    <Action>Pos</Action>
    <X>30</X>
    <Y>Current</Y>
    <Z>300</Z>
    <Angle3>0</Angle3>
    <Time>3</Time>
    <ErrorReturnNode>39</ErrorReturnNode>
  </Node>
  <!--4:Sleep-->
  <Node>
    <Action>Sleep</Action>
    <Time>6</Time>
  </Node>
  <!--5:果実位置情報取得-->
  <Node>
    <Action>GetBerryPos</Action>
    <ErrorReturnNode>36</ErrorReturnNode>
  </Node>
  .....
  <!--38:単軸ロボット戻る-->
  <Node>
    <Action>Pos</Action>
    <X>Current</X>
    <Y>-194</Y>
    <Z>Current</Z>
    <Angle3>0</Angle3>
    <Time>3</Time>
    <ErrorReturnNode>39</ErrorReturnNode>
  </Node>
  <!--39:終了-->
  <Node>
    <Action>Finish</Action>
  </Node>
</Task>

```

Fig. 8 Example of the task sequence file

停止，動作ファイルの読み込みなどを行なう。なお，GUI に関しては .NET Framework で開発した。

3.2 マニュアルコントローラコンポーネント

ロボット動作シーケンス制御コンポーネントとは別に，アームの動作確認用途で目標手先位置を入力して動作させるとともに，現在の手先位置を表示するためのマニュアル操作コンポーネントを開発した。これも GUI については .NET Framework で開発した。

3.3 アーム運動学コンポーネント

動作シーケンス制御コンポーネントからアーム手先の3次元目標位置を取得すると，アームの逆運動学計算を行なって，各関節の目標姿勢角および現在姿勢角との差分を出力する。一方，各関節の現在角度をモータから取得すると，順運動学計算を行なって収穫動作シーケンス制御コンポーネントへ各関節の現在角を出力する。アームのリンク長は実証試験

Fig. 9 Joint and link configuration of the robot

農園での栽培ベンチの設置環境(ベンチの設置高さ，ベンチの幅，赤熟果が出現する確率の高い領域)を調査して Fig. 9 のように定めており¹⁴⁾，また図のとおりアームの軸構成が平面内3自由度で構成されていることから，ツールエンドポイントを手首軸(J3)回転中心に置いて，三角関数のみで解けるよう逆運動学計算を簡略化した¹⁵⁾。この場合，ハンドは収穫動作中常に水平に保たれるように動作しているため，最終的な目標位置はアームが向いている列に応じてグリッパ把持中心までオフセット量(L31 または L32)を足せばよい。

逆運動学計算時に目標位置が特異点や到達不可能点によってエラーが発生したときは，動作シーケンス制御コンポーネントへエラーを通知するとともにつぎの目標候補点(動作シーケンスファイルで指定可能)を要求し，再度目標位置を受信すると姿勢角を再計算する機能も有している。

開発当初ハンドは常に水平に保つという前提で目標姿勢角を決定していたが，トレイに果実を置く動作の際，ハンド底面がトレイの縁(高さ 70 mm)をかかわる必要があり，その姿勢を保ったままグリッパを開くと，結果的に果実をトレイの底に落下させることになり，収穫動作を見ていただいた農家の方々から「落下させると果実が傷む確率が高くなるので落下距離をできるだけ抑えて置いてほしい」という要望が多く挙がった。そのため，果実をトレイに置く際には，手首を 30° 傾けて落下距離をできるだけ抑えるようにし，それに伴ってハンドの水平からの傾き角を動作シーケンスファイル内で記述し，収穫動作シーケンス制御コンポーネントから受信した指令値から手首の傾きを変更できるようにした。

3.4 関節角-モータ指令値変換コンポーネント

アーム運動学コンポーネントから得られた各関節の目標姿勢角および現在角との差分から，モータドライバへ指令値，モータの回転速度および回転加速度を計算し，出力する。この場合，指令値はエンコーダカウント値である。また，本ロボットでは計算コストを低減するためアームの軌道制御は PTP 制御で行なっている。さらに，本コンポーネントでは

“高速”，“中速”，“低速”の3段階で運転速度パターンを動作シーケンスファイルから指定できる。実際の収穫動作では，果実を掴んでないときはタクトタイム短縮のために“高速”，果実を収穫する直前の接近動作は果実に配慮して“低速”にするなど，作業状況に応じて速度パターンを使い分けることで収穫作業に適した運転を行なっている。

3.5 DC モータ制御用コンポーネント

本ロボットではアームの関節駆動用モータに Maxon 製フラットモータ EC-i40 を，グリッパ開閉用モータには同 EC 32Flat を用いることで，本体の小型化を図っている。関節駆動用モータドライバには Elmo Motion 製 SoloWhistle を，グリッパ開閉用モータドライバには Maxon 製 EPOS 24/1 を採用している。いずれのドライバも，CiA(CAN in Automation)によって策定の進められているネットワークプロトコル CANopen¹⁶⁾を採用している。CANopen ではデバイスの種類ごとにプロファイルを策定しているため，プロファイルに定められたコマンドを利用することでデバイスの制御が可能である。これによって，異なるメーカーのモータドライバであるにもかかわらず，ソフトウェアの仕様を共通化することができた。しかしながら，モータドライバのプロファイルでは，メーカーごとに一部独自に仕様を定めることが許されている。そのため，ドライバによって一部処理を変更している。

3.6 単軸ロボット制御用コンポーネント

本システムでは単軸ロボットと PC とのインタフェースに CONTEC 製モーションコントロールボード(SMC-4DL-PE)を用いている。本ボードはメーカーから独自の制御用 API が用意されており，上述の DC モータ制御用 RTC と共通化が図れなかったため，専用の RTC を別途開発した。

3.7 画像処理ソフトウェア制御コンポーネント

画像処理のソフトウェア本体は，プロジェクト発足当時から Microsoft Foundation Class(MFC)と MVTec 製画像処理ライブラリ HALCON との組み合わせで開発を行なっている。また，画像処理の演算速度をできるだけ向上させるため，Intel C++ Compiler(version 11.1)で実行ファイルの最適化を図っている。当初はこれらの開発環境と OpenRTM-aist との統合を検討したが，MFC が main 関数を有さないイベント駆動型のプログラム書式であるため，従来の画像処理プログラムと OpenRTM-aist とソースコードレベルで共存させることが非常に困難であった。そのため，Window メッセージと共有メモリを介して画像処理ソフトウェアとほかの RTC 群との仲介を行なうプロキシ RTC を新たに開発した。Fig. 10 のようにロボット動作指令コンポーネントから画像処理開始指令を受信すると，プロキシ RTC から画像処理ソフトウェアへ Window メッセージを投じて画像処理を開始し，画像処理が完了したら共有メモリを介して目標とする果実の位置をプロキシ RTC へ受け渡し，プロキシ RTC から収穫動作シーケンス制御コンポーネントへ送出する。

Fig. 10 Data and command interaction between the image processing software and the RTC

3.8 トレイ内収穫物配置順番算出コンポーネント

収穫した果実をロボット下部に設置したトレイに置く際，その順番を計算する。開発当初はトレイ内で果実が置かれていない空間の中から収穫した位置から最も近い位置へ置く方針で算出していた。しかしながら現場試験を重ねていった結果，収穫した位置が不規則なためトレイ内の果実の配列順序がランダムになり，場合によっては果実が増えて空いている場所が少なくなると果実収穫位置からトレイ内の目標位置までの距離が離れて，結果的にはタクトタイムが長くなることが判明した。そのため現在ではトレイの端から順番に置くように変更している。

3.9 移動プラットフォーム制御コンポーネント

移動プラットフォームの制御はシーケンサ(Keyence KV-3000)で行なっており，ロボットとの通信は単軸ロボットとのインタフェースボードで空いているデジタル I/O ポート(入力 10 ポート，出力 9 ポート)を利用して行なっている。移動プラットフォーム制御盤の仕様上，1 秒周期の矩形パルス信号で相互に定期通信を行なう必要があり，また移動プラットフォームの終点や作業開始地点，作業列前などに設置された複数の近接スイッチでインターロックがかけられており，たとえば栽培ベンチ下では横移動ができない，一度プラットフォーム原点に戻さないと別の列への移動ができないなど，ある条件を満たして一定の手順を踏まないと目的とする方向への移動ができない仕組みになっている。そのため，相互定期通信および I/O を介して移動プラットフォームの状態を取得してプラットフォームへ移動指令を出力する下位コンポーネントと，動作シーケンス制御コンポーネントから少数の動作命令(前進，後進，原点復帰の 3 種類)を受信して現在のプラットフォームの状況から下位へプリミティブな指令

へ変換するための上位コンポーネントに分けた。

4. 現場での稼働状況および今後の課題

まず、開発した RTC によるいちご収穫ロボットの動作のようすを Fig. 11 に示す。写真は 2010 年 12 月にて行なった実験農場(愛媛県松山市)での収穫動作試験を動画撮影したものである。本来は夜間に稼働するのであるが、動作のようすを撮影しやすくするため、暗幕によって背景だけ夜間のようすを作り出し、昼間に撮影を行なっている。上述のように本ロボットシステムでは PTP 制御を行なっているため、ハンドやアーム周辺の物体(目標以外の果実、栽培ベンチ底面、収穫物収納トレイの縁など)に衝突しないよう動作順序を考慮する必要がある。現場試験を重ねて検討した結果、おおよそ以下の順序で収穫作業を行なうこととした。まず、Fig. 11(a)の待機姿勢から右列、左列両側のメインカメラでステレオ画像処理を行なう。赤熟果が検出されると待機位置から近い順に収穫順序を決定し、その後単軸ロボットを動作させてハンドが最初の目標果実と相対する位置まで移動し、つぎに Fig. 11(b)のように目標果実の把持位置の高さとハンド

把持中心の高さが同一で、かつ X 方向に 80 mm 手前の位置までアームを動作させてハンドアイカメラ撮像姿勢を取る。ハンドアイからの画像処理で最終的な把持位置を決定した後、ハンドが収穫物へ接近して果柄を切断、把持する。収穫後は Fig. 11(d)のように一度ハンドアイ撮像姿勢と同じ姿勢を取って周辺の果実との衝突を回避してからトレイへ置く動作を行なう。なお、前回収穫した列と反対側につぎの目標果実が存在すると、Fig. 11(f)のように接近前に反転動作を行なってから一連の動作を行なう。また、事前の現地調査では、栽培ベンチ底面の地上高が 900 mm に対して、高さ約 650~850 mm の範囲で赤熟果が分布していたが¹⁴⁾、苗への水分不足などが原因で果梗が伸長しないまま地上高 850 mm より上で熟す果実が各収穫試験場で時々見受けられた。したがってこのような果実も収穫しようとする、ハンドアイ撮像姿勢やその後の目標果実への接近動作の際に、ハンド上面が栽培ベンチに接触する可能性がある。そこで、現地でハンドが栽培ベンチ底面に接触しない上限値を検証し、その結果、上記の赤熟果分布上限値から 10 mm 分のマージンを考慮し、840 mm より高い果実は着色状態にかかわらずステレ

Fig. 11 Harvesting motion of the robot

オ画像処理の段階で収穫対象から除外することとした。

これら一連の収穫動作を実現するに至るまでの間、たとえば開発当初は運動学エラー時の例外動作が実装されてなかったために、試験農場での連続収穫試験中にエラーが出た時点で停止した、各 RTC の実行周期の調整が不適切で一部のコンポーネント間でのデータ送受信で同期が取れずロボットが途中で停止した、当時 OpenRTM-aist の 1.0 Release が発表直後で原因不明のバグでロボットの動作が途中で停止し、svn リポジトリのパッチでアップデートしたところ症状が改善された、などなど現場でさまざまなトラブルに見舞われた。その後 svn リポジトリから常に最新版へ更新するとともに、各コンポーネントの改善改良を続けた結果、開発当初は果実 1 個収穫するタクトタイムが 28 秒であったが、Fig. 11 当時で目標タイムを切る 9 秒まで短縮することができた。なお、OpenRTM-aist で開発した RTC で動作するロボットの OS として、Kernel Preemption 機能が標準実装されて以降 Linux を用いて実時間制御する例が増えてきているが¹⁷⁾、今回実時間制御に向かない Windows でも実用上問題は起こっていない。この理由として、画像処理ではビジュアルサーボを行わない、モータの制御を下位のモータドライバに任せているなど、PC 側でリアルタイム性を要求されるタスクを行わないようシステムを構成したことが挙げられる。現に、今回開発した RTC の中で実行周期が最大なのは収穫動作シーケンス制御 RTC と DC モータ制御用 RTC の 200 Hz で、そのほかも 10~100 Hz で動作している。

つぎに、開発プラットフォームに OpenRTM-aist を導入した効果について述べる。本ロボットシステムは 2010 年 2 月上旬に完成して、生研センター農業機械化研究所敷地内の試験農場へ搬入して収穫試験を行ないながら改善改良を行ない、4 月下旬から 5 月中旬にかけて愛媛県松山市の一般農家が所有するいちご農園内に設営された「緊プロ」専用試験農場で現場試験を行なって、シーズンオフの 6 月から 12 月までは生研センター機械調整工場および前川製作所守谷工場の屋内で調整を行なった。また、2010 年 12 月に「緊プロ」一般公開会が愛媛の試験農場で開催され、現場で収穫デモを実施した。そのほか、2010 年 6 月に東京ビッグサイトにて開催された 2010 年国際食品工業展 (FOOMA2010) にて展示され、その際にはシーズンオフでいちごが入手できなかったため、画像処理を行わず収穫動作だけを行なうデモを行なった。移動プラットフォームや画像処理機能の有無をはじめ上記に挙げた実験・調整場所によってシステム構成が変わることがたびたびあったが、RTC の構成を変更するだけで現場でも即座に対応できた。また、松山での夜間収穫試験中ハンドが故障するというトラブルが 1 度発生したが、ハンド駆動モータ用 RTC を切り離して収穫物への把持動作を省略し、画像処理で検出した目標位置に対してアームが実際に果実へアプローチできるか否かに絞って検証試験を続行するというかたちで、貴重な現場での検証時間を無駄にせず緊急事態にも対処できた。このように、システムソフトウェアを機能ご

とでコンポーネント化して各要素の再構成が容易になったことで、現場で起こるさまざまな状況に対処することができた。

一方、ソフト開発に OpenRTM-aist を導入した際の問題点について挙げると、まずコンポーネントを分担開発する際に、各ポートの型やコンポーネントの実行周期など、コンポーネントの仕様に関して開発者相互で情報を共有することが重要である。実際に、申し合わせた仕様に一部抜けがあったため、異なる機関ごとで開発したコンポーネントを接続しようとしても入出力の型が異なって接続できない、複数のデータを扱える Sequence 型のデータポートを介してデータを送受信する際、送られる側のデータの数と受信側の受けられるデータの数が違って下位側での処理が正常に行なわれない、どちらか一方の実行周期が早すぎてデータが正常に送受信できない、などの不具合に見舞われることもあった。なお、二宮らも NEDO 次世代ロボット知能化技術開発プロジェクトにおいて、プロジェクトに参画しているコンソーシアムがそれぞれ開発した RTC を統合検証する際に上記と同様の問題を指摘しており、ドキュメント整備の必要性を論じている¹⁸⁾。

さらに、現場での試験を通して、複数の RTC で構成されたシステムをエンドユーザである農家にどう使っていただくかという問題が今後の課題として浮上した。Fig. 12 に 2010 年 5 月松山の実験農場で行なったロボットの操作手順を示す。RTC の操作には GUI ツールである RTSystemEditor を介して行なうか、CUI ツールである rtcshell どちらかを使用する。今回は、まず OS 起動後に RTC 同士の通信に必要なソフトウェア (CORBA ネーミングサービス) を立ち上げ、つぎに各コンポーネントをコンソール画面から起動し、

- Turn on the main power of the control panel
- Boot the OS
- Start the naming service of CORBA
- Start all RTCs from the console terminal
- Start the RTSystemEditor
- Add all RTCs to the RTSystemeditor
- Connect data ports with the mouse
- Change the configuration of RTCs, as needed
- Change all RTCs state to "Activate"
- Run the robot
- Change all RTCs state to "Deactivate" in exiting the robot operation
- Close all RTCs
- Exit the naming service of CORBA
- Shut down the OS
- Turn off the main power

Fig. 12 Operation procedure of the robotic system in RTC oriented

RTSystemEditor を起動して各 RTC の接続を行ない、最後に全 RTC をアクティベートしてロボットが動くという手順を踏んでいた。これらの作業はマウスやキーボードを駆使するという点で非常に手間や時間がかかるばかりでなく、IT 技術者レベルの知識が要求される。一方、エンドユーザとしては家電のように指一つで起動、操作できるほどのシンプルかつ簡単な操作ができることを求めている。これは農業ロボットばかりでなく、ホームロボットをはじめ幅広いユーザ層を対象としている次世代ロボット全体にいえることである。しかしながら、たとえばメインスイッチ投入と同時にすべての RTC も連動して自動起動し、シャットダウンする際に各 RTC が安全に終了処理を行なってから電源が切れるなど、煩雑な操作をエンドユーザ側に隠蔽させることで使い勝手を向上させるような機能または開発支援ツールが OpenRTM-aist では今のところ正式に用意されていない。将来開発側でソフト開発に RT ミドルウェアが広く利用されてもユーザ側で使いづらいロボットであり続けると、そのロボット自体が一般に受け入れにくくなるため、開発側とエンドユーザ側とのギャップを埋めるべく、ロボットを使う側の立場に立った仕組みを早急に検討し、実現させる必要がある。

5. 結 言

以上、いちご収穫ロボット M 型 3 号機用に開発した RT コンポーネントの概要について述べた。開発環境に OpenRTM-aist を導入したことによる開発側の利点がある一方で、ユーザへの使い勝手など現場ならではの課題が挙がってきた。2010 年 12 月から再びいちごの収穫シーズンが始まり、引き続き各試験農場などでハードウェアや画像処理機能の性能向上とともに、今回述べた問題の解決を試みながら改善改良を行なっているところであり、いち早く実用化を目指したい。

謝辞 最後に、本研究を遂行するにあたり多大なる協力をいただいた、早稲田大学大学院生堀内大介氏、中尾真梨子氏、菅原英剛氏に深甚なる謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 農林水産省：2010 年世界農林業センサス結果の概要（暫定）ホームページ，http://www.maff.go.jp/j/tokei/sokuhou/census10_zantei/index.html
- 2) NEDO：ロボット分野技術ロードマップ，<http://www.nedo.go.jp/roadmap/2009/sys1.pdf>
- 3) 近藤，門田，野口：農業ロボット II，コロナ社（2006）
- 4) 農林水産省：平成 21 年 主要農産物の産出額と構成比（1～50 位），http://www.maff.go.jp/j/tokei/kouhyou/nougyou_sansyutu/other/21_sansyutu_ranking.xls
- 5) 望月龍也：イチゴ産業の革新に向けて技術開発の動向，施設と園芸，129，4/8（2005）
- 6) 山下，伊東：RT ミドルウェアによる農作業支援ロボットシステムの開発—OpenRTM-aist を適用した収穫物運搬ロボットの試作—，第 6 回計測自動制御学会 SI 部門学術講演会予稿集 CD-ROM，981/982（2005）
- 7) OpenRTM-aist ホームページ，<http://www.openrtm.org>
- 8) RT ミドルウェアコンテストホームページ，<http://www.openrtm.org/rt/RTMcontest>

- 9) 吉田，林：イチゴ自動収穫のための基礎試験—品種適応，接近方法の検討—，農業環境工学関連学会 2006 年合同大会講演要旨集 CD-ROM，O101312（2006）
- 10) 長崎裕司：果菜類収穫ロボットを世に出すために～「超省力施設園芸プロ」における取り組み，日本生物環境工学会 2010 年京都大会講演要旨，353（2010）
- 11) 高嶺，長谷川，岩田，菅野，山下，熊沢，柏原，重松，小林：高設栽培いちごの夜間自動収穫システムの提案，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008 DVD，2A1-B4（2008）
- 12) 中尾，高嶺，山下，熊沢，柏原，小林，石綿，菅野：内外両側アプローチ可能ないちご収穫ロボットにおける果柄接触取込型エンドエフェクタの開発，日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009 DVD，1A2-C08（2009）
- 13) 生研センター農業機械化研究所ホームページ，http://brain.naro.affrc.go.jp/iam/Team/iam_team_robo00.html
- 14) 菅原，中尾，菅野，山下，柏原，山本，林：高設架台内側両条アプローチの提案とそれを実現するいちご収穫ロボットアームの開発，第 28 回日本ロボット学会学術講演会 DVD-ROM，2G2-1（2010）
- 15) 米田，坪内，大隅：はじめてのロボット創造設計，講談社，49/51（2001）
- 16) 高橋博由：CAN Controller Area Network の利用，日本ロボット学会誌，26-3，15/18（2008）
- 17) 清水，林原，大和，戸田，古田：Linux 標準機能を利用した RT ミドルウェア実行周期機能のリアルタイム化，第 9 回計測自動制御学会 SI 部門講演会予稿集 DVD-ROM，881/882（2009）
- 18) 二宮，小笠原，福永，松坂，原，松本，平井：RT コンポーネント再利用性向上の研究（アプリケーション事例に基づく知能モジュール検証の取り組み），第 9 回計測自動制御学会 SI 部門学術講演会予稿集 DVD-ROM，1477（2009）

[著 者 紹 介]

山 下 智 輝（正会員）

1991 年早稲田大学理工学部機械工学科卒業。96 年同大学院理工学研究科博士後期課程単位取得退学，同年早稲田大学理工学部助手。99 年早稲田大学理工学総合研究センター客員研究助手。2000 年（株）前川製作所入社。2009 年より早稲田大学創造理工学部非常勤講師（兼任）。農作業支援ロボットに関する研究開発に従事。工学博士，日本機械学会，日本ロボット学会会員。

田 中 基 雅

2010 年芝浦工業大学大学院修士課程修了，同年前川製作所入社。RT ミドルウェアを用いたロボットの制御などの研究に従事。日本ロボット学会，日本電気学会会員。

山 本 聡 史

1999 年京都大学大学院農学研究科地域環境科学専攻博士前期課程修了。同年生物系特定産業技術研究推進機構研究員。現在，生物系特定産業技術研究支援センター園芸工学研究部主任研究員。収穫ロボットなどの研究に従事。農学博士。

林 茂 彦

1988年岐阜大学農学部農業工学科卒業。92年農林水産省入省。野菜・茶業試験場、野菜茶業研究所などを経て、現在、生物系特定産業技術研究支援センター園芸工学研究部主任研究員。収穫ロボット、施設園芸システムなどの研究に従事。農学博士。

齋 藤 貞 文

2007年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年、生物系特定産業技術研究支援センター園芸工学研究部特別研究員。施設園芸システム、収穫ロボットなどの研究に従事。博士(農学)。

菅 野 重 樹 (正会員・フェロー)

1986年早稲田大学大学院博士後期課程単位修得退学、同年早稲田大学助手。その後、専任講師、助教授を経て、98年より同大学教授。工学博士。IEEE Fellow, JSME フェロー, RSJ フェロー。2001年より同大学 WABOT-HOUSE 研究所所長。人間共存ロボット、機械における心の発生などの研究に従事。90年日本ロボット学会技術賞、2001年日本機械学会論文賞。2006～2007年計測自動制御学会 SI 部門部門長。2008～2009年計測自動制御学会常務理事、SICE 2011 実行委員長、2007年より日本ロボット学会欧文誌 Advanced Robotics 編集長。著書に、ワボットのはなし 5(中央公論新社)、メカノクリーチャ(コロナ社)、人が見た夢 ロボットの来た道(JIPM ソリューション)など。

.....

.....