

# 農業機械ロボット化の現状と展望

東京大学農学部 農業工学科 岡本嗣男

## 1. はじめに

生物生産技術の目的は、生物の生育過程を適正に管理することで生物の持っている機能を最大限に発揮させ、生物にとって条件の悪い地域であってもあるいは気象条件のよくない年でも安定して生産活動を維持できることである。そのための操作や作業の高効率化のための機械化・自動化が進み、生産性の向上と品質向上に貢献している。生物生産にともなう作業は、扱う対象が自然的要因に左右される生物であることから、人間の持つフレキシブルで総合的な認識・判断機能に依存する傾向が強く、人間に限りなく近い機能を追求しつつあるロボットへの期待は大きい。

工業生産の場においては様々な工業用ロボットが利用され、生産効率の向上や人件費削減に貢献していることは周知の通りである。片や、生物生産の場においては、期待は大きいものの、未だ試作・実験の域を出ず、実用に供されているロボットシステムは見当たらない。その原因は要求される知能化のレベルが格段に高いためと考えられる。さらに、現実的には、コストパフォーマンスを考慮すると、研究開発への投資意欲も低下せざるをえなかったであろうと想像される。しかし、最近では、知能化のための理論や技術が確立されつつあり、それを実践するためのデバイスも発展しており、農業機械への適用に対してもコストパフォーマンスを期待できる時期にきていると思われる。

## 2. 農業機械にとっての知能化とは

生物生産が対象とする生物は、軟弱で傷つき易い物性であり、繊細かつソフトに取り扱わなければならない。さらに、種類も多様であり、形状も複雑で3次元空間に展開しているうえ、生育の不揃いのため個体差が生じる。たとえば、作物を栽培しているほ場での除草作業や間引き作業では、作物と雑草の区別、残すべき株と排除する株の判断、また野菜や果実の収穫作業では、野菜や果実の熟度(収穫適期)の判定と選択収穫といったような、知的推論と判断を必要とする。

さらに、作物が生育する環境は、ほ場の状態、傾斜地などのような地形的条件のほか、季節、天候、時間といった自然条件の影響を直接受けるため、常に変化する。また、機械の移動するほ場面は、自動車用舗装道路とは異なり、不整形で軟弱なうえ、車輪のスリップ、沈下などは、走行性や作業機の位置決め精度に重大な影響を与える。したがって、このような環境の中で作業を行うには、不確定でしかも常に変化する環境に適応して自律的に実行できる知的機能と実行機能が不可欠である。

このようにさまざまな高度な機能が求められる農業機械の知能化を実現する上で、マイクロプロセッサは必要不可欠の要素となってきた。その汎用性と柔軟性は大きな魅力であり、基本的なシングルボードコンピュータにセンサとアクチュエータを接続すれば、ほとん

どの農業機械への利用が可能である。その場合に、内界・外界情報のセンシング技術とAIのソフトウェアがますます重要になると予想されるが、同時に作物や土壌といった制御対象の特性を正確に把握することを忘れてはならない。

### 3. 農業用ロボット

農業の国際競争力を高めるためには、思い切った自動化と装置化により省力化を行い、農産物の生産費を抑えて生産物の価格を安くすることが重要であり、昨今のハード、ソフトにわたるハイテクノロジーを応用した農業用ロボットはこれに大きく貢献するものと期待されている。

作物を扱うのが目的である農業用ロボットの開発では、一般産業用とは異なる多くの難しさがあるが、それらのうちでは、次のような課題が特に重要である。①屋外の圃場に生育する植物体や果実などが操作対象となるから、外界を認識するためのセンサとしては、最も多くの情報量を獲得できる視覚センサの知能化が求められる、②果実収穫のシーンのように果実の他、葉、枝、幹、地面、空などの雑然とした背景を含むシーンにおいても、対象物を認識することのできるアルゴリズムが必要である、③対象物の位置は3次元空間にランダムに配置されており、その位置を正確に知るための技術が不可欠である、④生産物の品質を維持し付加価値をもたせるためには、個々の個体の収穫適期を判定して選択収穫をしなければならない、⑤扱う対象が、作物や家畜などの生物体であるので、ソフトハンドリングのためのロボットハンドの開発が不可欠である、⑥不整地走行のための自律移動技術が必要である、⑦農業用ロボットは、構造が簡単でしかも安価でなければならない。

現在、様々な農業用ロボットの開発研究が行われており、実用化への希望も見えてきたように思われる。ロボット開発の方向としては、無人化システムを目指した方向と、マンマシンシステムの一部としてのロボットシステムを目指す方向がある。当然のことであるが、無人化システムといえども、個々の作業を自動的に行うという程度と考えておくべきで、安全管理・作業管理は人間にゆだねられなければならない。当面、人間にとって不得手な特定の作業などをロボットにやらせ、人が主体となって、言い換えればロボットを作業システムに取り込み、人が指揮して作業を行うという概念が必要ではなかろうか。たとえば、果実収穫ロボットにおいて、個々の果実はオペレータがカメラを操作してモニター上で収穫すべきものを指示して、マニピュレータがこれを自動的にもぎ取りに行くという方式もありうる。

## 4. ほ場作業用ロボット

### 4.1 栽培管理ロボット

栽培管理作業をロボット化する試みがなされている。薬剤散布では、園芸ハウス内で畝間を無人で自動走行しながら作業をする、防除ロボットと称する防除機が市販されている。施肥作業では、狭くて軟弱な水田内を無人で走行し、深層追肥作業を行う水稻施肥管理ロボットが試作されている。畑地における雑草と作物を区別して機械除草をする除草ロボットも研究されている。

## 4.2 果実収穫ロボット

果実収穫ロボットでは、収穫対象となる果実をどのように認識するかが重要である。トマト収穫ロボットでは、カラーテレビカメラを用いて、色の違いにより果実と茎葉を識別している。トマトと同様に色情報により果実をそれ以外の周囲のシーンと区別する手法が使えるものとして、ミカン・オレンジなどの柑橘類収穫ロボット、リンゴ収穫ロボットなどがある。ブドウ収穫ロボットでは、果実と枝葉の色の異なるキャンベルやデラウェアはRGB信号で識別可能であるが、マスカットのように両者が同系色の場合は干渉フィルタにより識別している。キュウリ収穫ロボットにおいても近赤外域の干渉フィルタを用いてキュウリ果実を認識している。

## 5. 自律走行ロボットと遠隔制御

### 5.1 自律走行車両

水田、畑、果樹園などで移動しながら作業する機械では、硬い平坦な路上での走行と異なり、車両は凹凸のある柔らかい土の上や雑草の上あるいは傾斜地を走行しなければならないので、車体姿勢の変動、スリップ、沈下などが生じ、その位置を正確に決めるには多くの困難がある。さらに、自律走行するためには、対象物に対する相対位置のみならず、圃場内における機械自身の位置座標を知っておく必要がある。圃場を走行する機械の操向を制御する方式としては、種々の誘導法が考えられている。なかでも、軌道方式のガントリは土壌圧密軽減の長所とともに高位置決め精度が特徴である。これについては別項で触れる。そのほか、レーザー光と複数の定点反射鏡を組み合わせたもの、レーザー光の代わりに音波を用いたものなどの自己位置検出系が提案されている。畦や作物列のように基準となるガイドがある場合には、それを検出して自動操向することができる。

図1は、現在開発をすすめている中耕、除草、防除などの管理作業用ロボットのための小型自律走行車両の概略を示したものである。当面の目標は、トウモロコシ畑内を作物列を検出しながら作物列間を自律走行できる車両のハードウェアとソフトウェアの開発である。車両の諸元は、トウモロコシ条間を通過走行できることを前提に決めている。方位検出のため地磁気センサを搭載し、障害物検出、距離測定、走行路探索のために超音波センサを利用している。また、マシンビジョンによる作物列検出のアルゴリズムを研究中である。

### 5.2 圃場移動車両の遠隔制御

もし自律走行車両が実現できたとしても、圃場を走行・作業する車両では、遠隔制御をする必要が生じることになると予想される。すなわち、複数の作業車を群管理したり、個々の車両の作業状態を把握するなどのための情報通信・制御技術が求められる。また、図2に示すような、デジタル無線パケット通信を利用して作業状態データを収集すると同時にそれに基づいてトラクタ・作業機システムを遠隔制御しようとする試みもなされている。パケット通信は、ひとかたまりのデータ（パケットという）の符号を直列伝送する方式のため、使用チャンネルはひとつであり、無線通信による場合も電波は1周波数で足り、高速デジタル通信技術の発達により有限な資源の有効利用ができる。また、パケットの伝送には有手順

のプロトコルを採用しているためエラーフリーの通信が可能である。さらに、トラクタ移動局に識別標識を付与すれば、同一基地局が複数のトラクタ作業をモニタ・制御することができる。

## 6. ガントリーシステム

圃場作業ロボットでは、移動機構を持った台車上にマニピュレータを搭載したロボットが一般的な形態となる。移動機構としては、外界センサまたは内界センサを利用した自律走行車両によるものやガントリーシステムのように圃場面にレールなどの固定軌道を直交座標状に設置して台車とキャリアを移動させるものが考えられるが、圃場自律走行技術はまだ未開発であり、果実収穫ロボットなどの試作機では汎用自走台車を利用したものが多い。レールの代わりに無限軌道式移動機構を用いた軽量ガントリーも提案されている。

ガントリーシステムには、次のような長所があり、そのため農作業方式に、大きな変革を与える可能性があると考えられる。すなわち、1) レールを基準にしているため位置決めが正確で、高い精度で作業することができる。2) トラクタのように踏圧によって土壌を締め固めることがない。3) トラクタならば車輪の沈下やスリップで作業不可能の土壌や雨天の場合にも作業することができる。4) レールやフレームに沿って動くため自立走行が容易で、完全な自動化、いわゆる無人運転も可能で、原理的には昼夜を問わず作業ができる。5) レールに沿って走行することから、石油などの液体燃料以外のエネルギー源、例えば商用電力や太陽エネルギーを用いることも可能である。

このような理由から、ガントリーシステムのキャリアにロボット・マニピュレータを装着したシステムの実現性は高い。ガントリーシステムのキャリアに作業機やマニピュレータを取り付け、種々の圃場作業を自動的に行うものも試作されている。従来のガントリーシステムでは、ガーダーフレームをレールに沿って動かしながら作業を行い、長いスパンと大きな重量の構造物を常時動かすため、大きなエネルギーを必要とする。これを軽量化、低コスト化するため、作業中はガーダーフレームを静止させ、キャリアのみをガーダーフレームに沿って駆動して作業機を動かし、レールと直角方向に作業を行い、一畝の作業が終わると、作業機を持ち上げて、畝幅だけガーダーフレームを移動させ、次の畝の作業にはいる新しい方式のガントリーシステムが提案されている。このシステムは軽量、省エネルギーの特徴も備えているので、抵抗の大きい耕うん作業を簡易耕うんにすれば、太陽電池でシステムを駆動することも夢ではないとしている。このキャリアにミニマムティレッジ用ツールや移植マニピュレータを取り付けている。

将来ガントリーシステムは、これまでトラクタでは行えなかったような作業方式をとることが可能である。コンピュータによる無人作業、24時間作業、精密な播種作業を前提とした高精度の間引き、中耕、除草、防除、あるいは圃場内移植などをマニピュレータが行うといった新しい作業方式も実現できるであろう。

## 7. バイテク用ロボット

植物組織培養による種苗大量生産は有望視されているが、生産プロセスにおける多様な作

業を行うためには、熟練した人手を要すること、雑菌による汚染のため歩留まりが低いことなどのため生産コストが極めて高くなり、その実用化が遅れている。ことに、生産費に占める人件費の割合は非常に大きく、最も実用化が進んでいるランの組織培養では生産コストの7～8割近くが手間賃といわれている。バイオテクノロジーを産業に応用するためには、その作業から人手を省くことによってクリーンな環境を維持し、ロボットによりバイオテクノロジー作業を自動化しようとする方法は実用性の高い有効な方法の一つである。図3は、組織培養を使って培養苗の大量生産をする場合の手順と、これらの作業をロボットによって自動化する方法を示したものである。以下にいくつかの事例を紹介する。

### 7.1 カルス植え継ぎロボット

大量の培養苗を生産する場合、増殖のステージとしては、未分化組織の培養ステージとえき芽の生育ステージとがある。カルス、PLB、苗条原基など未分化組織は、分化した幼植物よりも格段に増殖率が大きく、効率的な培養苗生産を可能とする。植物組織植え継ぎロボットは、カルスやPLBの継代培養ステージにおける植え継ぎ作業を自動的に行うシステムである。

カルスは培養を続けて行くと大きくなって行くが、培地の養分が少なくなると増殖が止まるので、その前に新しい培地に植え継ぎを行い継代培養する。植え継ぎ作業では、シャーレ中で培養されてきたカルスを適当な大きさに切断した後分離し、それぞれのカルス塊を捕捉して新鮮な培地の入ったシャーレに植え付ける一連の操作が行われる。またこれに付随した、メス刃などの消毒作業も必要である。マニピュレータ本体はクリーンベンチ内に設置するかもしくはハンドとアームの一部をクリーンベンチ内に挿入して無菌作業を行うことになる。

### 7.2 植物培養組織ソフトハンドリングハンド

培養組織のように軟らかく傷つきやすい植物細胞塊をロボットで扱うには、対象物に損傷を与えることなくソフトにハンドリングできるハンドの開発が重要である。また、把持対象の姿勢制御を要する場合には、ピンセット形状2本指ハンドが適している。この目的のため試作したソフトハンドリングハンドをは形状記憶合金(SMA)をアクチュエータとしたロボット指であり、小型軽量のロボット指駆動系を実現している。ハンド指先の変位ならびに把持力制御にファジィ理論を適用し、カルスなどの培養組織のみならず植物器官片などのソフトハンドリングハンドへの適用を試みている。

### 7.3 ラン科植物プロトコーム移植ロボット

プロトコームの移植作業は、寒天培地中のプロトコーム(直径0.5mm程度)を1個ずつ取り出して新鮮な培地の入った培養器に、7～10mm間隔に格子状に置床していく作業である。ロボットシステムの概略を示すと図4のようになる。グリッパは、形状記憶合金アクチュエータにより駆動される構造のものが作製された。グリッパは、通常は指先を閉じ、把持動作を開始するときのみSMAを形状記憶の状態にして指先を開く。対象物を両指先の間に捉えたら、通電を停止して隣銅板のたわみ力を利用して指先を閉じ把持する。そのときの把持力はプロトコームに損傷を与えないよう、十分小さい力に設定している。

作業は、初期設定後、まずマニピュレータの基準位置においてプロトコーム画像の入力を行い、上述のように画像データを処理してプロトコームの中心座標を求める。次に、移植の

対象として選択された対象は連続的に移植される。画像中の選択された対象を移植先の培地上に一定間隔に置床し、全ての個体の移植が終了した後は、隣接した領域へカメラを移動して画像を取り込み、同様の手順で連続的に作業を行う。一つの個体を数秒程度で移植できる。このロボットシステムは、熟練者とくらべても十分に高い能率をもっているといえる。

## 8. おわりに

生物生産における作業は、多種多様でありしかも季節性があるため、各作業用の機械の利用は短期間に集中し、他の産業用の機械に比べその年間稼働率はきわめて低いのが現状である。機械設備への投資効果を上げるためにも、機械の汎用性を高めて利用効率を上げる方向が必要である。ロボットはもともと人間に似た機能を目指してきたものであるから、多くの面で柔軟な適応性を発揮できる可能性を持っており、農業分野においては大いに期待できるものと考えられる。上述のごとく、農業用ロボットは開発途上にあり、今後の発展が望まれるわけであるが、その過程においては、ロボットに対していかにして農作業のノウハウをAIとして賦与するかがそのキーとなる。

農作業の高度な機械化・自動化は、いわゆる、「3K」からの脱出をめざして、労力の軽減、精度・能率の向上、生産性の向上、生産物の品質向上、労働費の節減と収益の向上などにより、農業を活性化するためには益々重要な課題となってきた。これを達成するには、今までより格段に高度な機械化と装置化の実現が求められ、そこでは知能化の手法が大きな役割を果たすことになる。さらに、これからもまだ当分の間、人の頭脳に大きく依存しなければならない生物生産活動において、個々の機械や装置がハイテク化・知能化されるだけでなく、システム全体として human-friendly に最適化されることが重視されるべきである。

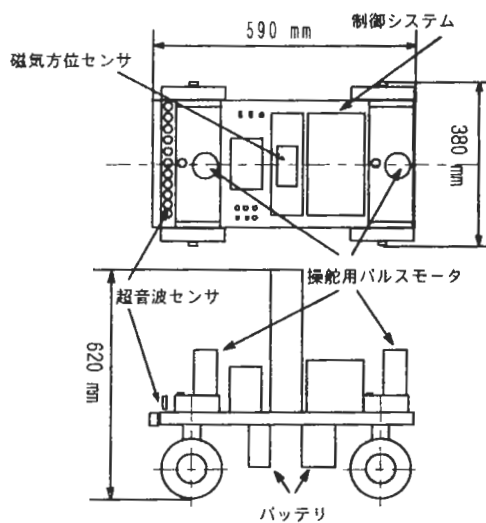


図1 試作車両の概略

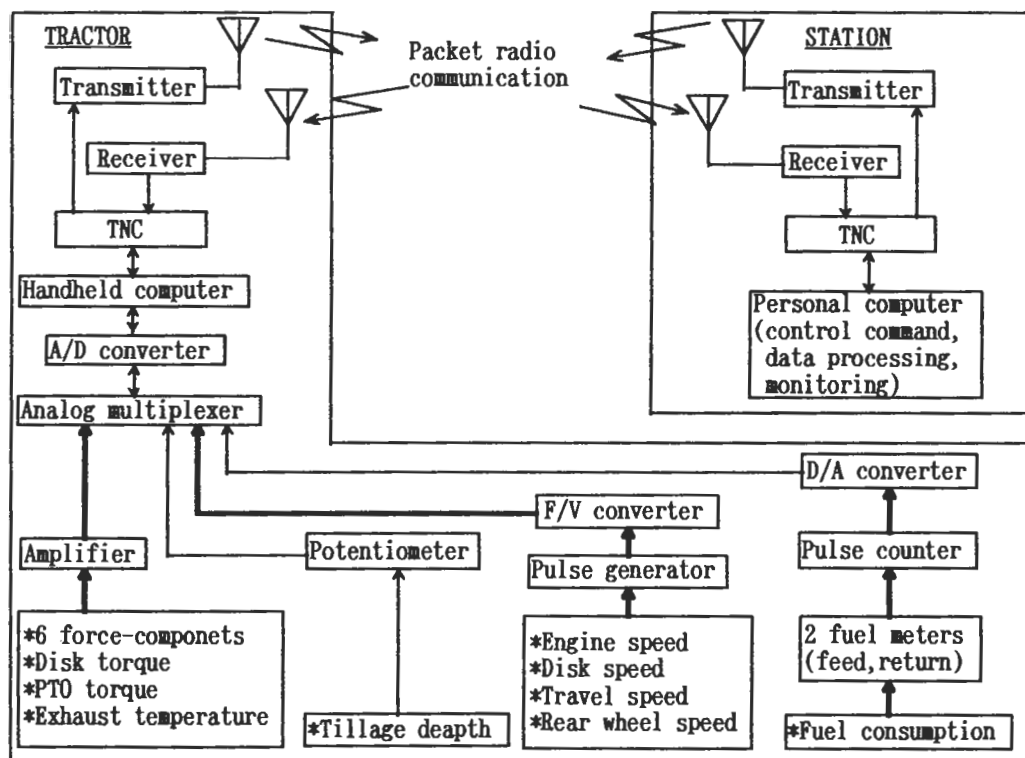


図2 圃場移動車両遠隔制御システム

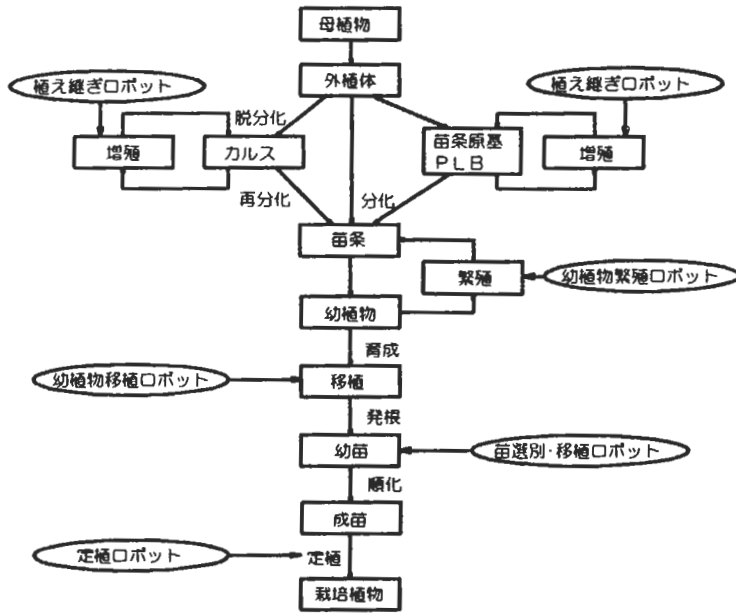


図3 培養苗生産とロボット

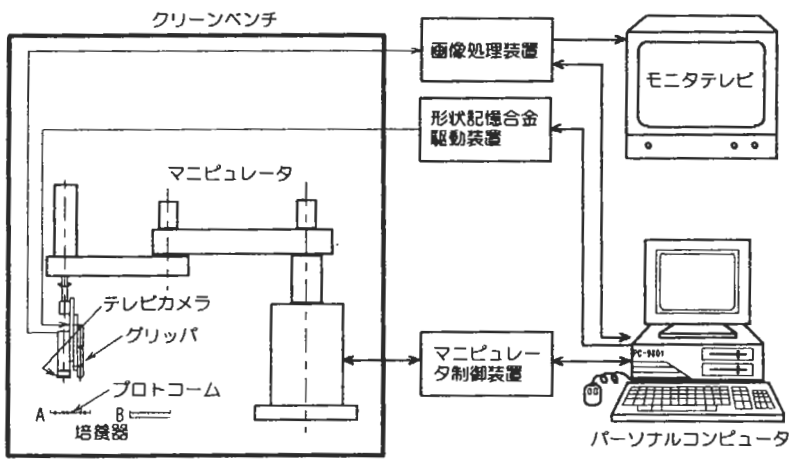


図4 ラン科植物プロトコーム移植ロボット