

流通システム研究レポート No.23

青果物人工環境栽培施設用機材

——土耕・砂耕・礫耕・水耕から植物工場へ——

1983

制御講習会テキスト 11-18 計測自動制御学会(1983)

- 5) 高辻正基：野菜工場の進展 計測と制御 22：522-528(1983)
- 6) 古在豊樹：施設栽培におけるマイコン利用 施設栽培，植物工場における計測と制御講習会テキスト 36-45 計測自動制御学会(1983)
- 7) 榎木義一：システム制御工学と知識工学の融合 計測と制御 22：505-507(1983)
- 8) 元田浩・木口高志・小林節雄：知識工学の原子力システムへの応用 システムと制御 27：448-454(1983)
- 9) 高倉直・庄野浩資・本条毅：知識工学的手法による栽培管理システム化
(1)促成トマトの栽培管理システム 39：113-116(1983)

(大政 謙次)

4.7 人工環境栽培施設用機材としての新素材・新技術の応用

4.6節において述べたように人工環境栽培施設における自動化は、現在、複合環境制御にマイコンを導入するという段階にある。これは、施設のプロセスオートメーション化の初期の段階であり、今後、環境要因だけでなく植物の情報をも加え、知識工学的色彩をもったシステム制御の導入により、より高度で総合的プロセスオートメーション化に向うであろう。また、種苗生産から、栽培、収穫、貯蔵、加工、流通に至るまでのメカニカルオートメーション化や双方向CATV、INSなどと結合した管理、教育、経営などに関する情報の広域相互情報交換ネットワークシステムの開発も進むであろう。

これらの施設を対象とした技術の進歩は、マイクロエレクトロニクス(ME)とその応用機器、ロボット、光ファイバーなどといった最先端技術に依存するところが大きい。そこで、ここでは、これらの最先端技術について簡単に解説するとともに、人工環境栽培施設用機材としての可能性について述べる。

4.7.1 ME技術の進歩とその応用

“マイクロエレクトロニクス”という言葉は、ICが誕生する以前に、一時電子装置の小型・軽量化を意味する言葉として使用されていた。しかし、最近、LSI技術の進歩により、この言葉が、単に小型・軽量化という意味だけでなく、LSIの集積度を上げるための微細加工技術や集積度が上がったために画期的に広がった応用分野の特徴を表わすための言葉として盛んに用いられるようになった¹⁾。

今後、施設の自動化および情報化を遂行するためには、現在、施設で使用されている機器のME化と、新しいME機器の導入が必要である。この対象となる機器としては、プロセスコントローラ、各種センサ、計算機、画像計測機器、ロボットなどがある。これらの機器のME化のメリットは、小型・軽量化、低コスト化、高機能・高性能化、標準化、自動化、システム化などにある。しかし、その達成度は、マイクロプロセッサやメモリなどのMEの基本技術の進歩に大きく依存している。

マイクロプロセッサの発達は、応用面からの要請とLSI技術の進歩により、4 bit → 8 bit → 16 bit → 32 bitへと発展し、RAM、ROM、演算器、アナログ系などのオンチップ化、低消費電力化、高速化、汎用化などの目的のために、種々のアーキテクチャを持つものが開発されてきている²⁾。また、メモリも、MOS、バイポーラなどのSiメモリの集積化が進み、低価格、大容量、高速性、高信頼性が追求され、さらに、GaAsや超伝導集積回路の研究開発も始まっている³⁾。施設のME化に関連深いと思われるマイクロプロセッサの他に、16 bit、32 bitの高機能マイクロプロセッサ、1チップマイコン、信号処理マイクロプロセッサなどがある。

8 bit マイクロプロセッサは、各種機器の制御やパーソナルコンピュータなどの広範囲の応用分野に利用され、今日のマイコンブームを作った。その後、汎用を目的としたマイクロプロセッサは、8 bitからミニコンピュータのアーキテクチャを持った16 bitさらに32 bitへ移りつつある。しかし、8 bitのマイクロプロセッサには、数多くのサポートチップが市販されてい

るので、施設の制御機器などの開発に使用するには便利である。現在、8bitのものでは、8bitのマイクロプロセッサの普及に最も貢献したインテル社の8080の後継機種である8085、8080の設計に携わっていた技術者が設立したザイログ社のZ80、“究極の8bit”と呼ばれるモトローラ社の6809などが普及している。また、16bitのものでは、インテル8086、モトローラ68000などが人気がある。最近、16bitのものの開発の進歩はめざましく、8bitに比べて、実行速度が数十倍で、仮想記憶やマルチプロセッサの構成が可能な機能をもつものも発表されている。32bit用としては、インテルAPX432やモトローラ68020などが発表されている。

1チップマイコンは、マイクロプロセッサ、RAM、ROM、外部機器と接続するためのI/Oを1つのチップに集積したものである。民生用機器などへ組込むために4bitのものが最も多量に生産されている。特徴としては、必要な機能をすべて1チップに集積することにより、部品数の減少による低価格、高信頼性を追求したものである。今後、LSI技術の進歩により、メモリの大容量化、低消費電力化、高速化、メモリの大容量化、低消費電力化、高速化、汎用化が期待できる²⁾。このため、施設の制御機器の規格化に伴い、低価格を特徴とするこの種のマイコンの末端機器の制御のためのコントローラや簡単な信号処理器としての利用が考えられる。

信号処理マイクロプロセッサは、A/D、D/A変換機能を持ち、実時間で複雑なデジタル信号処理を行う専用マイクロプロセッサである。信号処理に必要なRAM、ROM、並列処理が可能な各種演算器、A/D、D/A変換器などをオンチップ化する傾向にある。現在、実時間で、通信用処理、音声処理、プロセス制御などの目的のために、メモリをEPROMとし、ユーザーが自由にプログラムできるものも市販されている。今後、メモリの大容量化、倍精度演算や浮動小数点演算の導入、並列演算機能の充実、1チップ化などの問題が解決されると、より広範な分野での利用が期待される³⁾。施設での利用を考えてみても、高度な制御アルゴリズムを持つ制御機器、認識機能をも

つ画像計測機器，ロボット，通信用機器など多様である。

4.7.2 画像計測機器

施設の自動化や情報化には，画像計測機器の導入が必要不可欠である。画像計測機器は，リモートコントロールで，施設の状態を監視するためでなく，イメージプロセッサや汎用計算機と接続して，知識工学的なシステム制御のための施設および植物に関する情報をもたらす。また種苗生産から流通に至るまでのメカニカルオートメーション化のためのロボットのセンサとして，さらに，双方向CATVやINSと接続して，いわゆるビデオテックスの端末としての利用など広範におよぶ。

画像センサとしては，可視から近赤外を対象とした一般的なものとして，撮像管あるいは固体撮像素子を用いたTVカメラがある。現状では，解像度や感度などの点で撮像管の方が勝れているので主力である。撮像管を用いたカメラには，0.2～2 μ mまで種々の分光感度特性を有するものがあり，最近，計測用に図形歪，画像安定度，シェーディングなどを補正したものが市販されている。また，各撮像管には，感度，解像度，暗電流，残像などの特性に特徴があり，目的に応じて選択することができる。

他方，固体撮像素子を用いたTVカメラは，固体カメラあるいは撮像板カメラと呼ばれ，撮像管に代わる次世代のカメラとして，研究開発が進められている。最近，MOS，CCD，CPDなどの撮像板を用いたカメラが発表され，市販もされるようになってきている。これらの固体カメラは，撮像管に比べて，小型軽量，低電圧低消費電力，高信頼性，長寿命が期待できる。また，焼付残像がないので高速現象のパターン計測や位置指定が正確にできる特徴を利用した各種の計測に利用できる。

これらのTVカメラと各種光学フィルタを組合せることにより容易にマルチスペクトル画像を得ることができる。この特殊な場合がRGBの合成によるカラー画像である。カラー画像は，人間の目の色調との対応による解析には適しているが，物質の分光特性との対応による解析には，スペクトル画像

をそのまま用いるのが合理的である。また、夜間など暗い場所では、SITカメラの使用やイメージインテンシファイヤの装着が必要である。

この他、施設で用いるのに有効と思われる画像センサとしては、温度計測のための赤外線カメラがある。現在のところ、温度計測のための熱赤外領域の高い精度での計測は、サーモグラフィと呼ばれるInSbやHgCdTeの検出器を用いた光・機械走査型のカメラが使用されている。しかし、この方式は、装置が複雑で高価である。次世代の赤外線カメラとして、現在、ターゲットに焦電材料を用いた赤外ビジコン管や固体撮像素子を用いた電子走査式の赤外線カメラの研究開発が進んでおり、今後の進展が期待される。

以上に述べた画像センサを用いれば、人間が見ることのできない紫外あるいは赤外領域の画像や任意のスペクトル画像を得ることができる。イメージプロセッサや汎用計算機による植物を対象とした画像処理は、可視あるいは不可視の画像に含まれる植物の生理情報や生育の特徴量をテクスチャー解析、マルチスペクトル解析、その他の手法を用いて計測評価しようとするものである。そして、得られた画像情報は、施設栽培あるいは植物工場におけるエキスパートシステムのデータベースや推論に利用される。また、ロボットのパターン認識のためにも用いられる。画像処理により得られる植物の情報としては、形状、繁茂状態、病虫害・環境汚染害徴、生長量、水分状態、色素の含有量、植物温度、蒸散量、光合成量、大気汚染ガス吸収量、気孔開閉運動、微細構造変化など様々である^{5~8)}。

施設で利用される画像処理装置としては、新しいアルゴリズムの開発のための汎用型のものでなく、可搬性、リアルタイム性、経済性を追求したものが要求される。それゆえ、先に述べた信号処理マイクロプロセッサの技術の進歩に期待するところが大きい。現在でも、リアルタイムで植物の葉面積や生長量を二値化処理により求める程度のものであれば安価に手に入るが、先に述べた植物の生理情報や生育の特徴量を精度よく求めるためには、やはり、イメージプロセッサや汎用計算機によらざるをえない。対象とする現象

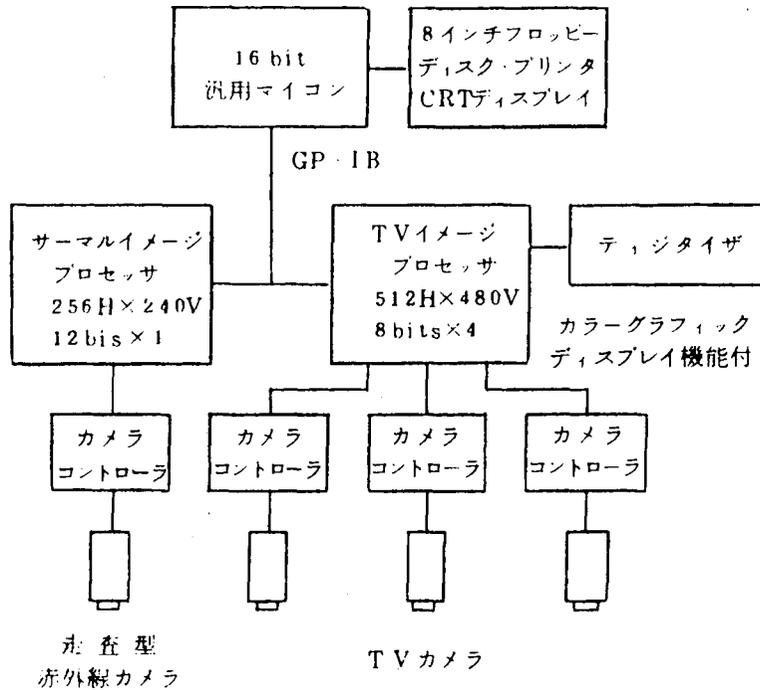


図 4・28 植物の生育・生理反応の評価のための可搬型画像計測システムの例

が遅く、処理に時間がかかってもいいということであれば、汎用マイコンにビデオ信号のホールド機能と低速の A/D 変換器をつければ、百万円以下の予算で実現できる。しかし、高速処理を可能にするためには、必要基本機能のハードウェア化や並列画像演算機能を最大限に取り込んだイメージプロセッサの導入が必要である。

図 4・28 に、国立公害研究所の植物の生育・生理反応の評価のための可搬型画像処理システムの例を示す。このシステムは、高速処理が可能なイメージプロセッサと汎用マイコンを GP-IB で接続した種々の目的に応じることのできる汎用システムであるが、可搬性とリアルタイム性には特に配慮がなされている。画像センサとしては、3 台の TV カメラ（あるいは 1 台のカラー TV カメラ）および走査型赤外線カメラが接続されている。これらのカメラにより、 $0.2 \sim 2 \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 13 \mu\text{m}$ の任意のマルチスペクトル画像やステレオ画像を得ることができる。サーマルおよび TV の各イメージプロセッサは、

それぞれ2秒および $\frac{1}{30}$ 秒でカメラから送られてきた画像をデジタル化する。各イメージプロセッサは、基本処理がハードウェア化されており、ノイズ除去、シェーディング補正、温度変換、濃度レベルの変換等の前処理をきわめて高速で行うことができる。特に、TVイメージプロセッサ（柏木研究所NEXUS-6400）は、画像処理専用的高速演算機能を有している。例えば、画像処理の基本機能である画像の平滑化、空間フィルタ、フレーム間の加減乗除算を $\frac{1}{30}$ 秒から数秒で行うことができ、汎用マイコンの数倍から数百倍の処理能力を有する。また、このTVイメージプロセッサは、RGB各8bitでの表示、フレーム間のプライオリティ指定、ズーム、スクロールといった機能をもちディジタイザによる作図も容易に行えるので、対話型のグラフィックディスプレイとしても使用できる。これらの処理や表示の機能は、各々のイメージプロセッサに内蔵するマイクロプロセッサで管理されるが、制御コマンドは、GP-IBを介してホストの汎用マイコンから送られる。また、イメージプロセッサの機能で不足する一部の複雑な処理については、実行速度は遅くなるが、汎用マイコンのプログラムにより行う。それゆえ、このシステムは、高度なアルゴリズムを実行する複雑な画像処理には適さないが、可搬性とリアルタイム性により、実用システムとして、施設など現場での使用には威力を発揮するであろう。

リアルタイムでの画像処理は、信号処理マイクロプロセッサの開発の1つの目標であり、今後のMEの進歩による価格や処理速度へのみかえりが十分期待できる分野である。

4.7.3 ロボット

1960年代の後半において、産業用ロボットが実用化の段階に入り、ロボットの設計、製作、使用法などの研究の総称であるロボティクスが脚光を浴びはじめた。そして、最近、自動車工業をはじめとした製造部門における産業用ロボットの活躍には目を見張るものがあり、今日、産業界におけるロボットの普及では、わが国が世界をリードしている。

JISによる産業用ロボットの分類によれば、ロボットには、あらかじめ設定された順序と条件および位置に従って各段階の動作をするシーケンスロボット、オペレータがあらかじめ教示した動作を記憶しておき実行するプレイバックロボット、数値情報に基づいて動く数値制御ロボット、オペレータが簡単な作業仕様を与えれば、環境や作業対象に適応した動作をする知能ロボットなどがある。現在、産業用としては、設定情報の変更が容易にできない固定シーケンスロボットが主流であるが、MEの進歩とともに設定情報の変更が容易な可変シーケンスロボット、プレイバックロボット、数値制御ロボットなどより高級なロボットが導入されるようになってきた。さらに、知能ロボットに関する研究開発も進んでおり、簡単な機能のものは、すでに実用化されている⁹⁾。

図4・29に次世代のロボットである知能ロボットの概念を示す。この図は、花房¹⁰⁾および鳥野¹¹⁾のロボットの構造図を参考に人工知能部を加え再構成したものである。人間あるいは上位の計算機が簡単な作業仕様を指令すると、ロボット用計算機内の知識ベースと推論機構により指令を解釈するとともに、

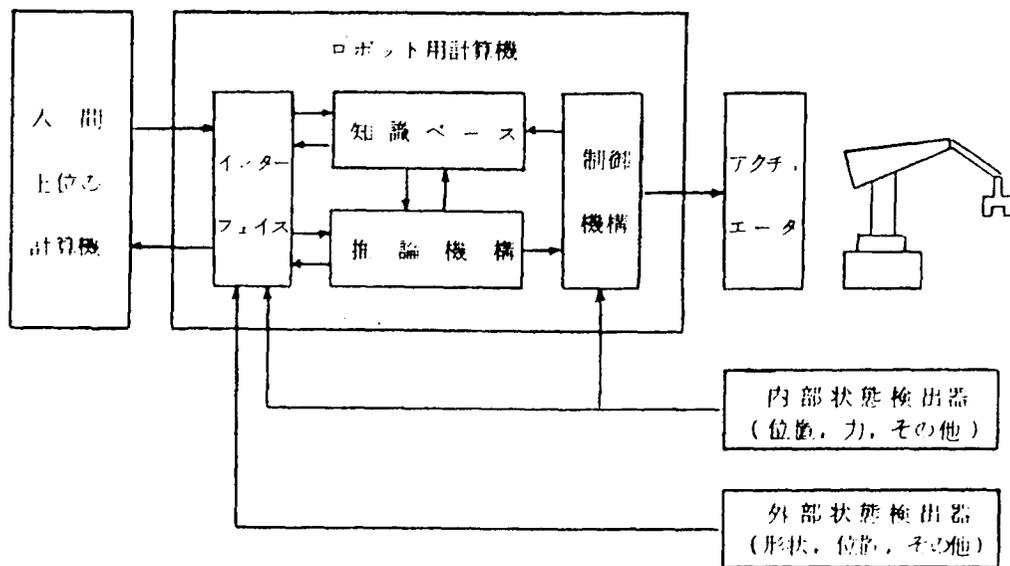


図4・29 知能ロボットの概念

視覚、触覚などの機能を持つ内部および外部検出器からの信号とを総合して制御機構に指令を送る。制御機構では、内部状態検出器からの信号をフィードバックさせながらアクチュエータを駆動する。外部検出器の視覚センサとして、先に述べた高速処理機能を持つ画像計測機器が用いられ、環境や作業対象を認識する。理想的な知能ロボットは、汎用を目的とし、人間とロボット用計算機との対話に日本語や英語のような自然言語を用いることを目標としている。しかし、人間のように大量の知識を有し、柔軟に対応できる制御系を開発することはなかなか困難であるので、知識工学のようにある特定の専門知識を利用し、工場など限定された環境で働くエキスパートロボットが研究開発の基本となる^{10,12)}。

施設栽培、さらに一步考え方を進めた植物工場において、栽培のメカニカルオートメーション化を図る場合、2つの考え方がある。1つは、野菜の生産などにあてはまる少品種大量栽培である。この場合は移動栽培方式や簡単な自動収穫機の導入により自動化が可能であり、省力化と生産性の向上が図れる¹³⁾。しかし、農作物の需要は多様で、市場価格が不安定であるので、少量多量生産の考え方と並行して多種混合生産に対処できるフレキシブルオートメーションの考え方も必要である。このためには、環境順応性を持ち、融通性のきくロボットの導入が必要不可欠である。そして、ロボットの導入は、野菜だけでなく、果菜類、果物、花卉などを対象とした種苗生産から、栽培、収穫、貯蔵、加工、流通に至るまでのメカニカルオートメーション化に道を開ける。

今後、ロボットと環境制御機器の開発は互いに関連することがらが多いので、施設としての総合性能を高めるためにも、統一的な思想に基づく研究開発が必要となる。

4.7.4 光ファイバー

実用的な低損失の光ファイバーが開発されて十数年になる。この間、光ファイバーの応用は、通信分野をはじめ、計算機関連や種々の応用計測分野な

どへ急速に拡大している^{14,15)}。そして、INSをはじめとした広域通信網など次世代の高度な情報化社会を担う最先端技術として脚光を浴びている¹⁶⁾。

光ファイバーの特徴は、従来のメタリックケーブルに比べて細心軽量で、広帯域信号を低損失で伝送できること、さらに、光の伝送であるので環境からの電氣的影響を受けないことなどにある。このため、電磁誘導、高温多湿、漏水などの悪条件下でも長い距離中継機なしに高い信頼性で情報伝送ができる。また、大容量の情報を高速で伝送することができ、経済的にも有利である。

光ファイバーは、石英、多成分ガラス、プラスチックなどを材料としたものが広く利用されている。石英系光ファイバーは、他の材質のものに比べて低損失、広帯域化が図られている。短距離・小容量伝送に利用されるステップインデックスファイバー、長距離・大容量伝送に用いるグレーデッドインデックスファイバー、さらに高性能のシングルモードファイバーなどがある。レーザ・ダイオード(LD)や発光ダイオード(LED)などの発光素子およびSiやGe素子によるpinフォトダイオード(pin-PD)、アバランシェ・フォトダイオード(APD)などの受光素子の進歩に伴い、0.85 μm 帯、さらに、材質やOH基による吸収およびレーリー散乱が少ない1.3 μm や1.55 μm の波長帯が利用できるようになってきた。現在、1.55 μm 帯で、シングルモードファイバーにより石英系ファイバーの理論限界に近い0.2 dB/kmが達成されており、約100 km無中継での伝送も可能になってきている。また、OH基を除去する技術の開発も進んでおり、広い波長帯にわたって比較的ブロードな損失特性を有するものが出ている。プラスチックグラッドのものも含めて、種々の損失および帯域幅特性のものが市販されている。多成分系光ファイバーは、石英系に比べて、損失が大きく、また帯域が狭い欠点があるが、製作工程が簡略で量産化に適しているので価格が安いという特徴があり、損失が10 dB/km、帯域幅が20 MHz \cdot km程度までのものが市販されている。プラスチック系光ファイバーには、プラスチックグラッドのものと同全プラスチックファ

イバーがある。損失が大きく、帯域が狭いが、価格が安く、加工性、強度において勝れている。この他、2~20 μm の波長帯を利用する赤外線光ファイバーの研究開発も進んでおり、損失が0.01 dB/kmといった光ファイバーも発表されている。また、TVカメラが使用できない特殊環境下において画像を得るためのファイバースコープなどの開発もなされている。

最近、離れた場所に設置されている計測制御機器や計算機間の情報交換のためのGP-IBなどの汎用バスの延長に光ファイバが利用されるようになってきており、このための機器も市販されている。また、アナログ信号の伝送のための光-電気変換器も市販されているので容易に利用することができる。1~数km程度のデータ伝送であれば、比較的価格の安い多成分系あるいはプラスチック系光ファイバーで十分である。今後、光ファイバーケーブルの低廉化に伴って、施設栽培のための各計測制御機器間の情報交換に、電磁誘導、高温多湿、漏水といった施設内で予想される悪環境条件に影響を受けず、無中継で長い距離の情報伝送が可能な光ファイバーの利用が進むであろう。

<引用文献>

- 1) 垂井康夫：マイクロエレクトロニクスの進歩 電子通信学会誌 65: 1140-1145(1982)
- 2) 国分明男：マイクロプロセッサ 電子通信学会誌 65:1146-1154 (1982)
- 3) 鈴木敏正：将来動向、新しい技術 電子通信学会誌 65:1230-1237 (1982)
- 4) 有吉昶：信号処理技術 電子通信学会誌 65:1164-1177(1982)
- 5) T. Matsui and H. Eguchi: Image processing of plants for evaluation of growth in relation to environment control. Acta Horticulturae 87:283-290(1978)
- 6) 大政謙次・相賀一郎：画像処理による植物の生育・生理反応の評価 遺伝 35(1)25-31(1981)

- 7) 橋本康：画像計測，サーモグラフィを利用した植物体温分布の計測，
“ライフサイエンスを測る” 丹羽登編 p. 28-56, p. 139-149,
オーム社(1983)
- 8) K. Omasa and I. Aiga : Image instrumentation for evaluating
the effects of environmental pollution on plants. In "Ency -
clopedia of Systems and Control " Editor-in-Chief M Singh.
Pergamon Press, in press.
- 9) 日本産業用ロボット工業会：産業用ロボットの統計 計測と制御 21
:1101(1982)
- 10) 花房秀郎：ロボット技術の展望 計測と制御 21:1089-1094(1982)
- 11) 鳥野武：視覚と触覚 電子通信学会誌 65:419-425(1982)
- 12) 辻三郎：ロボティックスの最近の進歩 電子通信学会誌 65:413-419
(1982)
- 13) 高辻正基：野菜工場の進展 計測と制御 22:522-528(1983)
- 14) 森川滝太郎：専用通信 電子通信学会誌 63:1129-1134(1980)
- 15) 保立和夫：光計測 “ライフサイエンスを測る” 丹羽登編, p. 56 -
-101 オーム社(1983)
- 16) 橋本国生, 片桐清志, 石原広司, 三木哲也：光ファイバーケーブル伝
送方式 電子通信学会誌 66:884-899(1983)

(大政 謙次)