

産業用ロボットの将来*

The Future of Industrial Robots

館 暲¹⁾
SUSUMU TACHI

1. はじめに

ロボットという言葉は、よく知られているように、カレル・チャペックの現代文明を痛烈に諷刺した戯曲「ロツサム万能ロボット会社RUR」に起因し、その意味では比較的新しい言葉である。しかし、その言葉が、もともとチェコ語のロボータという強制労働とか退屈で卑しく不快で奴隷的な仕事を意味する言葉から作られた新語であることからわかるように、その概念は人類の歴史と同程度古い。人類の太古からの夢の一つに、自分の命令にしたがって仕事をすべてかわつてやつてくれる忠実な能力のある奴隷を持つことがあつた。しかも、それが自分達にそっくりであれば仲間としての意味もあり都合がよい。このような気持の現れが、人間と同じ、しかし人間ではないもの、つまりロボットという概念を生んだといえよう。それは例えば、紀元前8世紀のホメロスの「イリアス」のなかの鍛冶の神ヘーパイストスの助手の黄金の少女ロボットとして現れ、あるいはギリシャ神話のなかでも、名工ダイダロスの作といわれるクレタ島の海岸を見回る青銅の巨人タロスとして既にみられ、大古から現在まで色を変え形を変えて脈々と続いているのである。

この夢は古代では動物を飼い馴らして使つたり、あるいは不幸にして、本当の人を奴隷として利用することにより実現されていた。ピラミッドの構築の話まで溯らなくとも、アメリカ合衆国においてさえ、つい100年ばかり前までは、奴隷のいる社会であつたのである。彼らは、ある意味では非常に優秀なロボットであつた。そのとき生じた人と人との関係への人道上の反省が、例えばSFの世界にかたちを変え、ロボットと人間との関係のなか

で諷刺されているとも考えられる。

そのような歴史の進展のなかで、人が人をロボットとして使うという非人道的な方法ではなく、機械を使うことで昔からの夢を実現する方向が、科学技術の進展にとともに模索され始めてきた。それが自動化技術の方向である。産業革命の段階では機械が初めて使われ始めたとはいうものの、皮肉なことに前にも増して人の手が必要となつた。そのようなシステムでは、人間も機械の歯車の一部とされてしまうのである。そのような状況は、第二次世界大戦後のサイバネティクスの興隆とエレクトロニクスの進展にとまなう自動化機器の飛躍的な発展がなされるまで続いた。

ウィーナーのいう Human Use of Human Beings⁽¹⁾、つまり高度自動化機械あるいはロボットを作り、それに人にとつて嫌な仕事、危険な仕事、退屈な仕事を行わせ、人はそのような非人間的な仕事から解放されて、もつと人間的な生き方を志向する。そのような道が今、開かれ始めようとしている。

2. 産業用ロボットの進展

2.1. 第一世代ロボットの興隆

第二次世界大戦後の科学技術の飛躍的な進展にとまなつて、かつては全くの夢でしかなかったロボットが、形態は別として人間や動物の持つ機能の一部だけを取り出せば何とか機械で実現できるようになつてきている。1960年頃から汎用性とともな多少の変化する作業にも適応性を持つことを条件とした新しい自動化機械が製品化されるに至つて、産業用ロボットなる新しい言葉が生まれた。この言葉は、アメリカの G.C. Devo が1954年に出願し、1961年に登録された「Programmed Article Transfer」によるといわれているが、1960年アメリカの新聞「The American Mental Market」で使用されてから急速に広まつた。この第一世代ともいべきプレイバックロボ

* 昭和57年11月4日受理。

1). 機械技術研究所システム部。(305 茨城県新治郡桜村並木1-2)。

ットは、1962年にアメリカで初めて製品化され我が国には1967年に導入された。それは、60年代後半の揺籃期から1970年代の実用化時代を経て着実に進展し、1980年に至つて、財政投融资によるリース制度の創設、重要複合機械装置の特別償却制度、産業安全衛生施設特別融資制度、中小企業近代化資金貸付制度及び設備貸与制度の対象への指定という四つの政府助成措置が実施され、需要の急成長がみこめるいわゆる普及時代に入っている。

1980年を「産業用ロボット普及元年」というゆえんでもある⁽²⁾。

しかし、普及時代に入った第一世代ロボットを技術的にみると、仕事の前のティーチングというプロセスで、人が文字どおり手取り足取りロボットの位置や姿勢のシーケンスを教え込み、それをロボット内のメモリに記憶させ、実際の作業時にその記憶された位置や姿勢のシーケンスを再生（プレイバック）するという繰り返し機械であつて、本質的には、種々の自動化機器やNC工作機械等の制御技術と、原子炉のホットセル用等として研究開発が進められていた操縦型の多自由度のマニピュレータ（あるいはメカニカルハンド）等のハードウェア設計・構成・制御技術との複合システム技術である。その有するセンサはロボット自体の位置や姿勢を知るためのいわゆる内界センサのみであつて、外部環境や対象物の状態によつて自分の行動を変えることはない。したがつて、その利用範囲はおのずから制限される。それらが最も効果的に利用できるのは第二次産業の製造業、そのなかでも特にマテリアルハンドリング、塗装、スポット溶接等である。

内界センサとサーボ技術に関する研究で特筆すべきはPaulによる腕の動的制御であろう⁽³⁾。多自由度のマニピュレータは、そのとる姿勢によつて慣性率が大きくかわり、また重力トルクも変化する。更に、その腕を高速でサーボしようとする加速度による影響も考えなければならない。ある軌道上を定められた姿勢で運動し、例えば終点において、速度0で止まるような動的な制御法が始めて試みられ成功した。その成果は現在PUMAロボットに産業用ロボットに向く形に改良されて利用されている。Paulの制御において考慮されなかつた頃は遠心力によるトルクとコリオリの力である。後者は比較的小さいが、前者は割合大きく、腕の最大速度付近では、重力と同程度の影響を持つ。すべての頃の影響を考慮した制御はVukobratovic⁽⁴⁾、やLuhら⁽⁵⁾によつて行われている。それらはニュートン・オイ

ラー法等を用いた運動方程式から必要なトルクを求め制御を行うもので、運動方程式を実時間で計算するためのアルゴリズムの開発やマイクロプロセッサの並列な利用法等のより優れた解決を行い実際問題への適用を行うことが今後の課題として残されている。

2.2. 第二世代への展開

図1にロボットが有すべき機能と、それらの相互関連を著者なりにまとめたものを示す。上肢機能、体幹機能、下肢機能はまとめて作業機能と表すことができよう。感覚機能とコミュニケーション機能とは、まとめて感覚認識機能と表してもよい。ロボットが人間の命令にしたがつて何らかの作業を行う場面を想定してみると、次の三つの情報がロボットにとつて不可欠であることが容易に理解できよう⁽⁶⁾。

- ① 人の命令を適格に理解すること。また、ロボットの状態を伝えたり、人から新しい知識を得たり、新しい指示、教示を得ること（人間とロボットのコミュニケーション、あるいは人の意図の把握）。
- ② 特定の仕事を遂行するための外界の状況、特に対象物の状態を知ること（外界認識、あるいは外部状況の把握）。
- ③ 自分自身の内部状態（例えばロボットの腕がどのような角度で曲がっているか等）を知ること（内界認識、内部状態の把握）。

そのうち③については技術的に比較的容易であつて、したがつて各種の自動化機器や第一世代ロボットにおいて実現されている。この内部状態を知るとはサーボ技術の基礎であり、第一世代は内界センサとサーボ技術を主体としているともいえよう。

製造業における他の分野、例えばアーク溶接や組立等へロボットを利用する場合には、第一世代のような内界

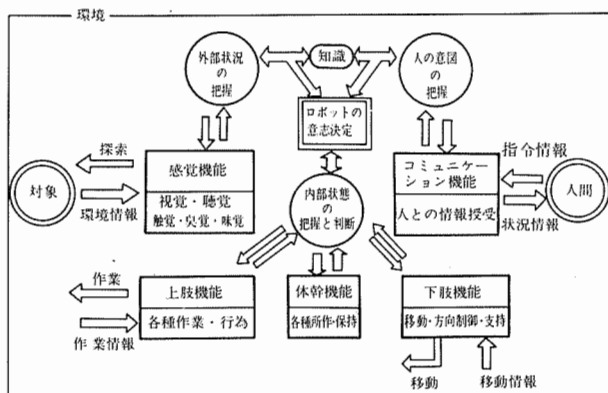


図1 人間・ロボット・環境のかかり合い

情報のみでは不十分であつて、外界センサによつて外部環境、特に対象の状態に関する情報を得て、それによつて自分の行動を変更して行く必要が生じてくる。つまり上記の②の機能が極めて重要となつてくる。感覚付ロボットの研究室レベルでの研究として最も古いものの一つで、それでいて現在においてもその概念としては十分通用する研究として、Ernstの行つたMITのMH-1ハンドが挙げられる⁽⁷⁾。それは、接触覚、圧覚、近接覚等を備え人の手に似た柔軟な動作を行う。機械技術研究所においても、ユニマンの手先に分布接触センサと力覚センサを取り付け同様の研究を行つている⁽⁸⁾。そのような概念を実用化レベルに進めたものとして、後藤らのHI-T-HANDの研究がある。力センサからの出力と論理演算とを組み合わせることにより、はめ合い作業の自動化に成功している⁽⁹⁾。

感覚センサからの情報を電気信号に変換しマイクロプロセッサで処理して、その結果にもとづいてハンドの制御を行うというループは極めてオーソドックスな方法ではあり、処理の融通性、汎用性という点では大いに利点があるが、その処理に時間がかかりすぎるのが難点である。また、センサ自身もその耐久性や信頼性を高めなければならないところに開発のネックがある。ローカルなフィードバックを電気系への変換なしに、巧妙なメカニズムによつて行う方式としてMITで開発されたRCC (Remote Center Compliance) がある⁽¹⁰⁾。これは、現在の段階では実用化という見地からは高く評価のできる方式である。

視覚の利用は触覚以上に重要であると考えられるが、実用化の立場からは難しい問題が残されている。しかし、人の視覚のように複雑な環境下における三次元立体認識を行おうとしなければ実用化を考慮しても解決できる問題も比較的多いのも事実である。

多くの視覚の製造業分野における実用化研究は特に製品検査の分野で1970年代に進展をみせた。プリント配線基板の導線部の欠陥を拡大縮小法によつて検出した例⁽¹¹⁾、鍍剤表面にコーティングされている糖衣層の欠陥やごみ付着を検出するシステムの開発⁽¹²⁾、きゅうり等の野菜の形状を測定し等級を選別するシステム⁽¹³⁾、熱鋼片の表面の傷の検出方法⁽¹⁴⁾、ヒートシンクにダーリントン回路ICを接着した製品を検査するシステム⁽¹⁵⁾、等枚挙にいとまない。

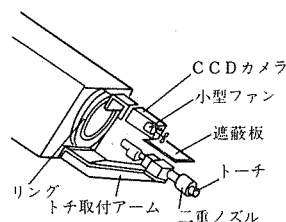
更に、視覚とロボットの制御動作を結び付けた実用化に向けての研究としては、トランジスタ全自動組立て

システムがある⁽¹⁶⁾。これはテレビカメラが顕微鏡を介して上方からチップの映像をとらえ、あらかじめ記憶しておいた対象の特徴的部分パターンとの比較を行う「複合型部分パターンマッチング法」を基礎にして、エミッタとベースの位置を求め、そこにワイヤボンディングを行うシステムである。同様の作業はICに対しても行えるようになってきている⁽¹⁷⁾。

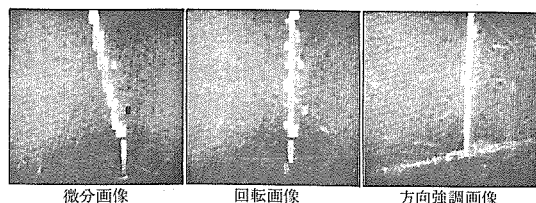
ワイヤボンディングは一種の組立作業であるが、視覚のアーク溶接への利用も重要な応用分野である。造船、重機械工業では生産対象物が大型で多品種生産であるうえ、素材精度、仮組誤差のばらつきが大きく、溶接変形も大きいと、あらかじめティーチングされたパスにそうだけではなく、ロボットの有する感覚を利用して実際のワークと自己の関係を測定し、誤差や溶接変形に対処する機能が必須である。

三井造船では1976年に50×50のCCDカメラをトーチを中心として自由に回転させる開先検出機構と、その高速画像処理との組み合わせによりその実現を図つた⁽¹⁸⁾。CCDカメラをトーチを中心として回転させどのような姿勢のときにも開先の稜線がカメラのセンタに位置できるようにしている。小型ファンは溶接ヒュームを吹飛ばすためであり、この悪影響を減じるために二重ノズルがトーチに付加されている。遮蔽板は溶接スパッタとアーク光を減ずるためであり、別にカメラにも赤外線フィルタをかけアーク光の影響を減らしている。図2(a)にその概観を、また図2(b)にその画像処理結果を示す。

日立造船では、アーク溶接時の雑音を減じるために、レーザを用いるアクティブな方法を1979年に発表した⁽¹⁹⁾。



(a) トーチの構成



(b) 処理例

図2 可動型カメラを有するアーク溶接ロボット

これは水力発電所の水圧鉄管の連続掘付作業システムの一部として開発されたもので、出力6mWのHe-Neガスレーザを扇状ビームとして開先部に照射し、干渉フィルタとレチコン32×32のイメージセンサによりその反射光を検出している。ロボットの側から光を発するアクティブな探索法を採用したため信号処理が極めて単純です。それでもアーク溶接時にはアーク光による非定常な雑音成分が重なってくるので、それらを何回か重ね合わせて雑音の軽減を図っている(図3(a),(b))。

アーク溶接時のアーク光雑音の大幅な低減がPSD(Position Sensitive Detector)という新素子の利用により行われた⁽²⁰⁾。図4(a)は三菱電機により1981年に発表されたシステムで、高出力赤外LEDに10kHzの変調をかけ、スペクトル差の他にDC成分とAC成分の差も利用して信号光と雑音光とを分離している。また、PSDという新センサを利用したため精度の向上が図れるとともに、開先の位置のみではなく、そこまでの距離も測定できる点も注目できる(図4(b))。

このように、感覚付適応ロボットとしての第二世代ロボットは現在のセンサ技術の興隆と革新的なマイクロプロセッサシステム技術とに支えられて基礎的研究の時代から実用化時代へと進みつつある。

しかし特に視覚については、現在の照明条件をコントロールした二次元あるいは三次元の2値化パターンや背景のはつきりした単純なパターンを主として識別している段階であることも事実である。今後、特に第二次産業

の製造業のみではなく、第二次産業の非製造分野や第一次、第三次産業への応用を考えた場合には、照明条件が刻々変化する自然環境内での三次元物体認識のための視覚情報処理を行うことが重要である。それらは、来たるべき第三世代ロボットにおける一つの重要な課題として残されている。

3. 第三世代の胎動

第一世代が内界センサとサーボ技術、第二世代が外界センサとマイクロプロセッサシステム技術であるとするれば第三世代の中心は何であろうか。これについては各人各様の意見がありコンセンサスはまだないが、いろいろな意味で、2.2.で述べた②の機能の三次元自然環境への拡張と、①のコミュニケーション機能の確立が重要なテーマとなってくると考えられる。図5に著者らの考え方をまとめてある⁽²¹⁾。

図中、各世代を研究、実用、普及の三レベルに分けておおよその年代との対応を付けてある。また、各機能ごとに、その課題をおおまかに特徴付けてある。

コミュニケーションについていうならば、第一世代、第二世代でのコミュニケーションは人間から機械への一方的なものであり、しかも、その方法は極めてぎこちないものである。特に第一世代では、その作業の各ステップをロボットの手の位置や姿勢のシーケンスとして、まさに手取り足取り教えこんでいる。この過程に要する

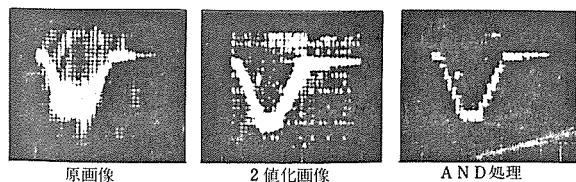
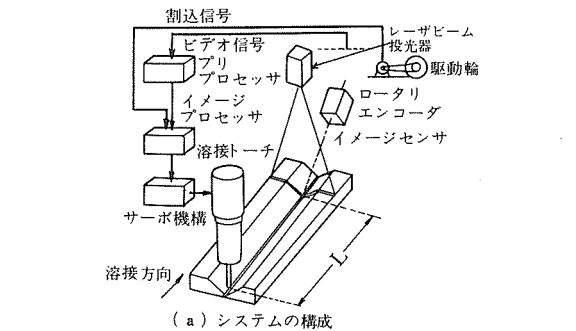


図3 レーザと視覚センサによる開先の抽出

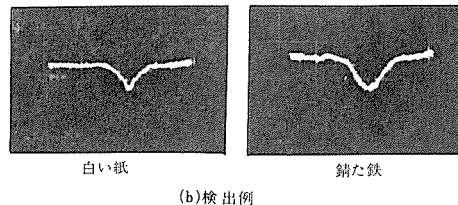
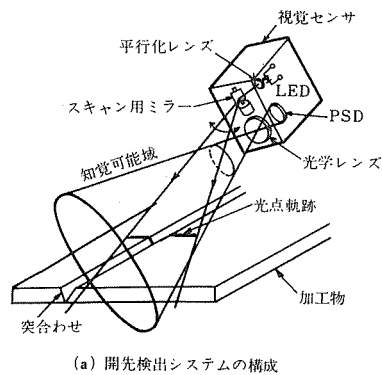


図4 PSDセンサを利用した開先検出
(a) 開先検出システムの構成
(b) 検出例

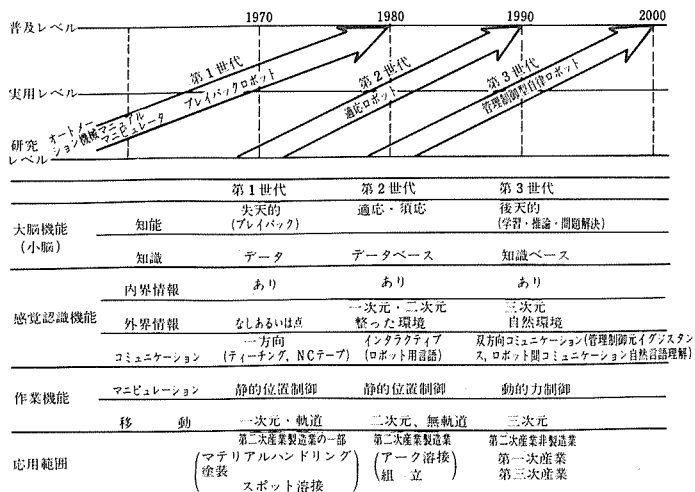


図5 ロボットの世代わけと特徴

労力と時間はロボットの台数が増すと莫大なものになってくる。第二世代ではロボット用言語の使用やCAD/CAM的な手法の導入、インタラクティブなシステムの検討等教示の簡略化が試みられているが、コミュニケーションという観点からはまだ暗中模索の段階にある。第三世代では、この人間とロボットとのコミュニケーションをもつと人と人とのそれに近いものとして行く必要があり、音声認識、自然言語理解質疑応答システム、種々の知識ベース及びその追加、変更システム技術の確立が重要となる。

第三世代における人間とロボットとの関係は、人間社会における管理者あるいは上司と部下との関係に例えると理解しやすい⁽²²⁾。つまり部下であるロボットは上司の命令を受ける。そのときにその意味がわからなければ、それを自分が納得するまで上司に質問する(質疑応答システム)。ロボットが命令を理解したならばその仕事を開始する。その際、その仕事に関する既に過去の経験者が得た知識やノウハウを綴ったマニュアルを利用しながら行う(知識ベース)。その知識とロボットの判断で仕事を進行中にロボットがうまく解決できない事態が発生した場合には上司に相談する(インタラクション)。上司はロボットの状態を知って、その状態で最も適切な判断を下し、ロボットはそれにしたがってことに当たる。もしも、ロボットでは解決できそうもないと上司が判断した場合には上司が自からその問題の解決に当たる。遠隔地あるいは人間が行くには危険、あるいは苛酷な環境でロボットが仕事をしている場合には、そのロボットの存在する場所に人が存在しているような極めて高い遠隔臨場感、ないしは存在感を有してロボットを操作しその難所を切り分け

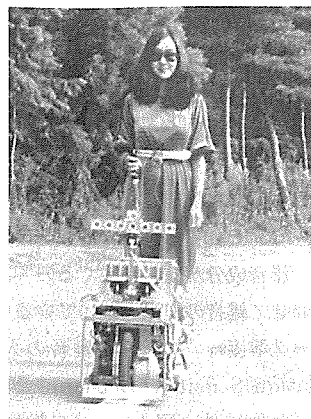


図6 盲導犬ロボットMELDOG Mark IIIによる屋外実験風景

る(トレイグスタンス)⁽²³⁾。また、複数のロボットが共同作業する場合にはおのおのの仕事の分担、共同等のスケジューリングや、ロボット間のコミュニケーションや共同作業等も重要となってくる。

その他、作業機能の面からみても、マニピュレーション、移動とともに第三世代で解決すべき多くの重要な課題をかかえている。特に第一次産業や第三次産業での利用を考えた場合、ロボット自体が自からのエネルギーを内蔵して、かなりの程度の知能を有して移動する必要があり、10年以上前にロボットの条件として提案されたAutonomous, Independent, Mobile(AIM)の3条件⁽²⁴⁾が第三世代に至つて初めて実用のロボットに付加されることになる。

AIMの条件を満たし、また人間とロボットとのコミュニケーションの問題や、両者が互いに触れあう環境下での利用の問題点を研究し始めている例として、機械技術研究所で研究している盲導犬ロボット「MELDOG」⁽²⁵⁾(図6)や医療介助用ロボット「メルコング」⁽²⁶⁾を挙げることができる。両者とも自立的に移動できる移動機構、パワー源、センサ、知能的判断のための情報処理部、制御部を有し自律的な行動を行うと同時に、前者では、障害物や道標等に関する情報を盲人とやりとりするコミュニケーション機能を有しており、システムは一つのスーパーバイザリコントロールシステム概念を有する点に人間・ロボットシステムの特徴を持つ。

いろいろな意味での人間とロボットとのインタフェース、コミュニケーションあるいは触れあいが第三世代以降ますます重要になってくると思われる。

4. おわりに

1980年代は、普及時代を迎えますますます洗練され使いやすくなって行く第一世代プレイバックロボット、近年のセンサ技術、マイクロプロセッサシステム技術を背景に、いよいよ実用化への道を歩き始めた第二世代適応ロボット、そして実用化へ向けての研究開発が今開始されようとしている第三世代ロボットとが渾然一体となつて互いにインパクトを与えつつある複雑な時代である。

応用分野においても、従来の第二次産業における製造業にとどまらず、同じ第二次産業分野の鉱業、土木・建設業から、農林水産といった第一次産業、更には卸売、小売、金融、保険、不動産、倉庫、運輸・通信、原子力、宇宙、海洋、医療福祉、清掃等の社会事業、災害救助、レジャー、家庭用といった第三次産業関連への利用へと拡大しつつある。

情報科学とエレクトロニクスの進展のなかで、このような新分野におけるロボットの応用が進むにつれ、いよいよ人間と機械とのかかわりが増すこととなり、より有効かつ有意義な人間と機械あるいはロボットとの関係が、社会システム全体のなかで前にもまして問われなければならない。

参 考 文 献

- (1) N. Wiener: The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society, Houghton Mifflin Company (1950).
- (2) 米本完二: 産業用ロボットはどこまで普及しているか, するか, 日本機械学会誌, vol. 85, No.766(1982), p.1069-1077.
- (3) R. Paul: Modeling, Trajectory Calculation and Servoing of a Computer Controlled Arm, Stanford Artificial Intelligence Project, Memo No.177, November (1972).
- (4) M. Vukobratović: Dynamics of Robots and Manipulators (加藤一郎監訳: ロボットの手—力学と運動—1979 (日刊工業新聞社)).
- (5) J.Y.S.Luh et al: On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, Tran. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control, vol.12(1980), p.69-76.
- (6) 館 暁: 半導体視覚センサのロボットへの応用, 日本機械学会第539回講習会教材 (1982) p.35-46.
- (7) H.A.Ernst: MH-1, A Computer-Operated Mechanical Hand, Theoretical Problems in Artificial Intelligence (1971), p.39-51.
- (8) 谷江和雄: 硬さ認識アルゴリズム, 計測と制御, vol.14, No.3(1975), p.22-28.
- (9) 後藤達生 他: 精密はめあいロボット, 日立評論, vol.57, No.10(1975), pp.813-818.
- (10) D.E.Whitney et al: What Is the Remote Center Compliance (RCC) and What Can It Do?, Proc. of 9th Int. Symp. Industrial Robots (1979), p.135-152.
- (11) 成瀬 他: 印刷回路パターン検査への応用, システムと制御, vol.23, No.7(1979), p.362-369.
- (12) Nakamura et al: Automated Pattern Inspection based on Boundary Length Comparison Method, Proc. 4th Int. Joint Conf. Pattern Recognition (1978), p.955-957.
- (13) 野村 他: 三菱パターン計測・選別システム<MELSORT>の開発製品化とその応用, 三菱電機技報, vol. 53, No. 12 (1979), p.899-903.
- (14) 岩崎他: 熱鋼片表面疵の光学的自動検出装置, 日本非破壊検査協会第3分科会, 熱間スラブ表面キズ検出に関するシンポジウム予稿 (1979), p.95-113.
- (15) M.I.Baird: SIGHT-I, A Computer Vision System for Automated IC Chip Manufacture, IEEE Trans. vol. SMC-8, No.2(1978), p.133-139.
- (16) S. Kashioka et al: A Transistor Wire Bonding System Utilizing Multiple Local Pattern Matching Techniques, IEEE Trans. vol. SMC-6, No.8, (1976), p.562-570.
- (17) 五十嵐賢一 他: 高速全自動 IC ワイヤボンディングシステム, ロボット, No.27(1980), p.44.
- (18) 高橋孝典: 大型アーク溶接ロボット, ロボット, No.11 (1976), p.60-64.
- (19) 河原 守: レーザ光線, イメージセンサを利用した開先形状検出器を有するアーク溶接ロボットによる大型構造物のアーク溶接工程の自動化, 第11回産業用ロボット利用技術講習会, 日本産業用ロボット工業会 (1979), p.61-68.
- (20) T. Bamba et al: A Visual Sensor for Arc-Welding Robots, Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots(1981), p.151-158.
- (21) 館 暁 他: 第3世代ロボット, 計測と制御, vol.21, No. 12(1982), p.1140-1146.
- (22) T.B.Sheridan: Supervisory Control: Problems, Theory and Experiment for Application to Human-Computer Interaction in Undersea Remote Systems, MIT Man-Machine Systems Laboratory Report, March (1982).
- (23) 館 暁 他: テレイグジスタンスの研究 第1報, 第21回 SICE学術講演会前刷 (1982), p.167-168.
- (24) 森 政弘: ロボットの基本思想と構想, 計測と制御, vol. 7, No.12(1968), p.871-880.
- (25) S. Tachi et al: Guide Dog Robot-Feasibility Experiments with MELDOG Mark III, Proc. 11th Int. Symp. Industrial Robots (1981), p.95-102.
- (26) E. Nakano et al: First Approach to the Development of the Patient Care Robot, ibid (1981), p.87-94.