

米国の新聞「The American Mental Market」で使用されてから急速に広まった。産業用ロボットは1960年代後半の揺籃期から1970年代の実用化時代を経て、1980年には財政投融資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、中小企業近代資金貸付制度および設備貸与制度の対象への指定という4つの政府助成措置が実施されることとなり需要の急成長が見込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」という所以でもある⁶⁾。

しかし、普及時代に入った第1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教え込まれた自分の位置や姿勢を繰返し再生（プレイバック）する繰返し機械であって、本質的には、種々の自動化機器やNC工作機械の制御技術と、多自由度のマニピュレータの設計・制御技術の複合システム技術であり、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2次産業の製造業、その中でも特にマテリアルハンドリング、塗装、スポット溶接などが主となる。

その他の分野、たとえばアーク溶接や組立てなどへの利用では、第1世代のような内界情報のみではなく、センサによって外界の情報を得て、それによって行動を変更したり、あるいは人の命令をよりよく理解する必要が生じてくる。外界の状況を知るためのセンサを付加して、その状態に応じて自分自身の行動を変化させる工夫が1970年代に始まり、いわゆる第2世代の感覚付適応ロボットとなって次第に実用から普及に向いつつある。しかし、まだその有する外界を知るためのセンサは、ごく限られたものであって、応用範囲としても製造現場のきわめて限定された場所しか有効ではない。特に視覚センサが重要であるが、現在は照明条件をコントロールした1次元あるいは2次元の2値化パターンを主として識別している段階である。今後の第1次産業や第3次産業で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3次元物体認識のための視覚情報処理⁷⁾を行うことが重要である。それらは、来るべき第3世代ロボットにお

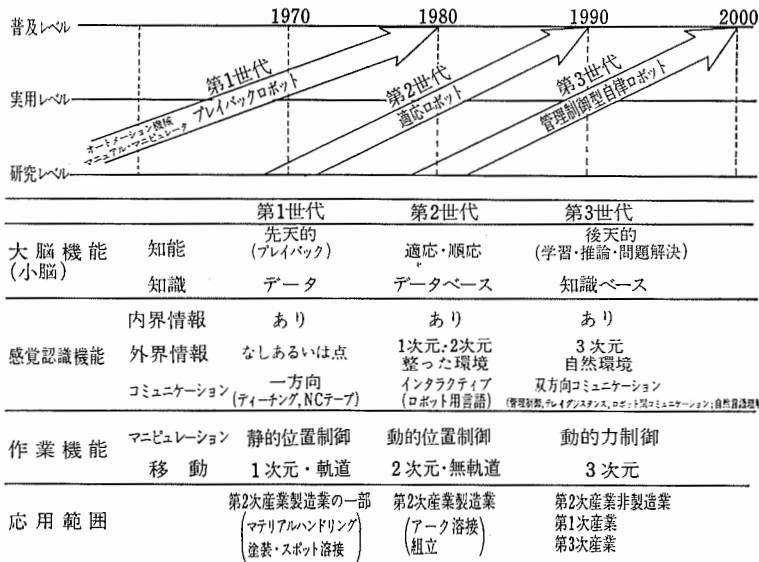


図1 ロボットの世代わけとその特徴

ける1つの重要な課題として残されている。

2.2 第3世代への胎動

さて、ロボットが人間の命令に従って作業を行う場面を想定してみると、つぎの3つの情報がロボットにとって不可欠であることが容易に理解できよう⁸⁾。

- (1) 人の命令を適格に理解すること、また、ロボットの状態を人に伝え、人から新知識を得たり、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)。
- (2) ある仕事を行うために外界の状況、特に対象物の状態を知ること (外界認識)。
- (3) 自分自身の内部状態 (たとえばロボットの腕がどのような角度で曲っているかなど) を知ること (内部状態の把握)。

そのうち(3)については比較的容易であって各種の自動化機器や第1世代ロボットにおいて実現され、サーボの基礎情報となっている。現在、実用化の段階を向えつつある第2世代の感覚付適応ロボットにおいては、(2)の外部環境の知覚と、それによる適切な行動の変更がその技術の中心となっている。それは、近年のセンサとマイクロコンピュータの進展と呼応している。特に中心となるのは視覚と触覚で、半導体のワイヤボンディング⁹⁾ や、各種の組立て¹⁰⁾、あるいは目視検査機械として実用化されている¹¹⁾。

第1世代が内界センサとサーボ技術、第2世代が外界センサとマイクロプロセッサシステム技術とすれば、第3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

表1 ロボットの機能と科学技術上の解決課題

科学技術		構 成			
機能	細 分	人間・生物・自然から学ぶ	ハードウェア	信号処理・制御	システム
感 覚	視覚 (含、電波、赤外、紫外、X線)	立体視・パターン認識、状況認識	高密度高分解能センサ、画像メモリー、並列演算	マルチプロセッサ、並列処理技術	屋外における実時間シーナリシス
	聴覚 (含、超音波・低周波振動)	言語理解	超小型高性能マイクロフォン、音声認識IC		言語理解システム
	触覚 (含、温度)	皮膚構造と感覚器のメカニズム	高密度分布型触覚素子	分布形触覚における接触状態の検出	触診システム
	嗅覚	感覚器のメカニズム			
手 (マニピュレーション)	人間型	神経パルスによる腕の制御メカニズム	人間腕に類似した機構、新材料、新しい駆動	神経系に類似した制御、多自由度系の制御、実時間動的制御	人間の意のままに動く義手、テレオペレータ
	動物型 非動物型		ソフトグリップ機構 多自由度汎用グリップ		多様なタスクへ適用可能な柔軟な腕(障害物回避)
足(移動)	人間型 (2足)	神経パルスによる2足歩行制御メカニズム	人間足に類似した機構	神経系に類似した制御、動的制御	人間の意のままに動く義足
	動物型 (多足、無足) 非動物型 (車輪 キャタピラ etc.)	多足歩行の協調制御			階段、不整地、壁面などの移動 障害物回避、自然道標を利用するナビゲーション
頭	知 情 意	認識、記憶、学習、連想 感情 判断、意欲、創造	第5世代コンピュータ	非ノイマン型アーキテクチャ 感情の定量化 意思決定理論	高度な知的情報処理システム
	人間-機械-人間 人間-機械 機械-機械	言語理解 人間の空間認知機構	人間・機械・環境シミュレータ	人の動きの実時間計測	自動サイマルインテグリティ テレレジスタンス
個 体 の 持 続	エネルギーの摂取 自己修復・保存	再生		自己修復の理論	自己修復機械
種 族 の 存 続	生殖	DNA		増殖の理論	増殖機械

ろいろな意味で、(2)の機能の3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になってくると思われる。図1に著者らの考え方をまとめてある。

第1世代、第2世代でのコミュニケーションは人間から機械への一方向的なものであり、しかも、その方法はきわめてぎごちないものである。たとえば、ロボットが音声入力によって命令を聞いて、棒を所定の穴に挿入する作業を行うとしよう。その場合、まず作業の内容をロボットが理解する必要がある。現在では、単に人が「棒を穴に入れろ」といってもロボットがそれを行えるわけではなく、ロボットが実現できるような細かいステップに分けて伝える必要がある。特に第1世代の産業用ロボットでは音声も使わず、その作業の各ステップのロボットの手の位置や姿勢を、まさに手取り足取り教えこんでいる。この過程に要する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2世代では、ロボット用語¹²⁾の使用やインタラクティブなシステムの利用など教示の簡略化が図られているが、コミュニケーションという意味からは、いまだ暗中模索の段階にある。第3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っと人と人とのそれに近いものにしていく必要があり、音声

認識¹³⁾、自然言語理解¹⁴⁾、質疑応答システム、種々の知識のベースおよびその追加、変更システム技術などの確立が重要となる¹⁵⁾。

第3世代における人間とロボットとの関係は、人間社会における上司と部下との関係にたとえれば理解しやすい¹⁶⁾。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、その仕事に関するすで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、それ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、ロボットはそれに従う。もしも、部下あるいは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、上司が自らその問題の解決にあたる。ロボットが遠隔地あるいは人間が行くには危険かつ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遠隔臨場感を有してロボットを操作し、その難所を切りぬける(テレレジスタンス)。また、

表2 ロボットの応用分野と基礎技術

応用分野	第1次産業			第2次産業			第3次産業					
	農業	林業	漁業・畜産業	鉱業	建設業	製造業	卸売業 小売業	金融・保険業 不動産業	運輸業	電気・ガス 水道業	サービス業 医療・教育	公務事務
1. 感覚機能	収穫量、収穫時期の子割病害虫の発見 フェロモンによる害虫の駆除米の等級の定量化	森林の状態の推定	漁群探知 集魚	鉱脈発見 爆発検知器 酸欠子知器	構造物の検査	製品検査、保全、故障診断 プリント基板、ICマスク、AE探傷 サーモグラフィ検査 ガスもれ探知 自動アレンジ、等級の自動仕分け 各種製品の製造工程	商品受け入れ検査 商品管理			原子炉保守用ロボット 埋設物の検出 ガスもれ検知器	自動診断人工眼 人工耳	地震予知
2. マニピュレーションの機能	除草、選別 動物型 羊毛かり 非動物型 耕作、播種、収穫		自動釣器	自動採掘機	大工ロボット コンクリートの枠組	産業用ロボットのメンテナンスのボグ 物品の搬送、機械の移動 工場内の搬送車、天井走行ロボット	自動正札器 自動販売器			原子炉用マニピュレータ	介護システム 義手 外科手術用マニピュレータ あんまロボット	長期観測ロボット 清浄ロボット
3. 移動の機能	人間型(2足) 動物型(多足、無足) 非動物型(車輪、キャタピラ)	耕作、播種、除草 収穫、農薬散布	木材の選搬	擬似脚 抗遠移動機械	構造物の清掃、塗装	制御用計算機、群管理、集中制御 かしこい自販器 購買意欲制御システム 在庫管理発注システム			無人自動車 無人タンカ		義足 病院内搬送車 清浄ロボット	
4. 頭脳の機能	農業用データベース	林業用データベース	漁業用データベース								自動教育機械 接待ロボット	戸籍ロボット
5. コミュニケーションの機能	人間-機械 人間(動物)-機械 機械-機械		水中牧場	テレオペレータ	テレオペレータ	工場内の連絡装置 教示装置、警備装置、モニタ装置 各種情報伝達	自販器の音声入出力	自動預金支払いシステム	音声ファクシミリ 自動着陸装置	案内ロボット ICU	災害警報システム	
6. 個体維持	エネルギーの摂取 自己修復、保存	植物プランクトン 自動森林環境保存装置	自動養殖器			自動エネルギー投入 切断装置 自己診断・修復装置					自動調理装置 警備ロボット	警察ロボット
7. 種族保存	生殖	自動交配器	自動受精、孵化			自動工場、機械自動製造装置					人工子宮、保育器	

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、それらの間のコミュニケーションも重要になってくる。

そのほか、作業機能の面からみてもマニピュレーション、移動ともに第3世代で解決すべき多くの重要な問題を抱えている。特に第1次産業や第3次産業での利用を考えた場合、ロボット自身が自らのエネルギー源を内蔵して、ある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 の3条件¹⁷⁾が第3世代に至って初めて実用のロボットに付加されることになる。

3. ロボットの技術課題と応用分野

ロボットにおける科学技術上の解決問題は多い。表1に、著者らが試みにまとめた課題の例を示す。これはあくまでも試みであって、これにすべてが集約されているわけでは決してない。むしろ、このマトリクスを埋める作業の中で新しい課題が発見されることを期待している。縦には人間の機能をいわば計測にあたる感覚機能、制御にあたる手足の機能、情報処理にあたる

頭の機能、生命体としての基礎となる生命維持、さらには人間・ロボット、ロボット間のコミュニケーションとに分類し、横軸には解析と構成とを記してある。

表2は、応用分野と基礎技術の関係をあらわす表であって、縦軸は表1のそれと同一にとってある。横軸は一般的な産業の分類である。これも表1と同様、1つの試案であって、ぬけている重要な課題も数多くあり、むしろそれを発見することにより真に新しい課題が得られるのかもしれない。

4. 人間・ロボットシステム

知能ロボットの知能とは何かについては多くの論議があるが¹⁸⁾⁻²¹⁾、いまだにコンセンサスはない。また将来においても、これが知能であると決定できる種類のものではないようにも思われる。

知能と似て性格を異にするものに知識がある。たとえばユークリッド幾何において定義と公理のみを知識として与えて、種々の定理を発見できれば、その能力は新しい知識を生み出すという意味で知能の働きであると思われる。その意味で知能とは、既知の知識から

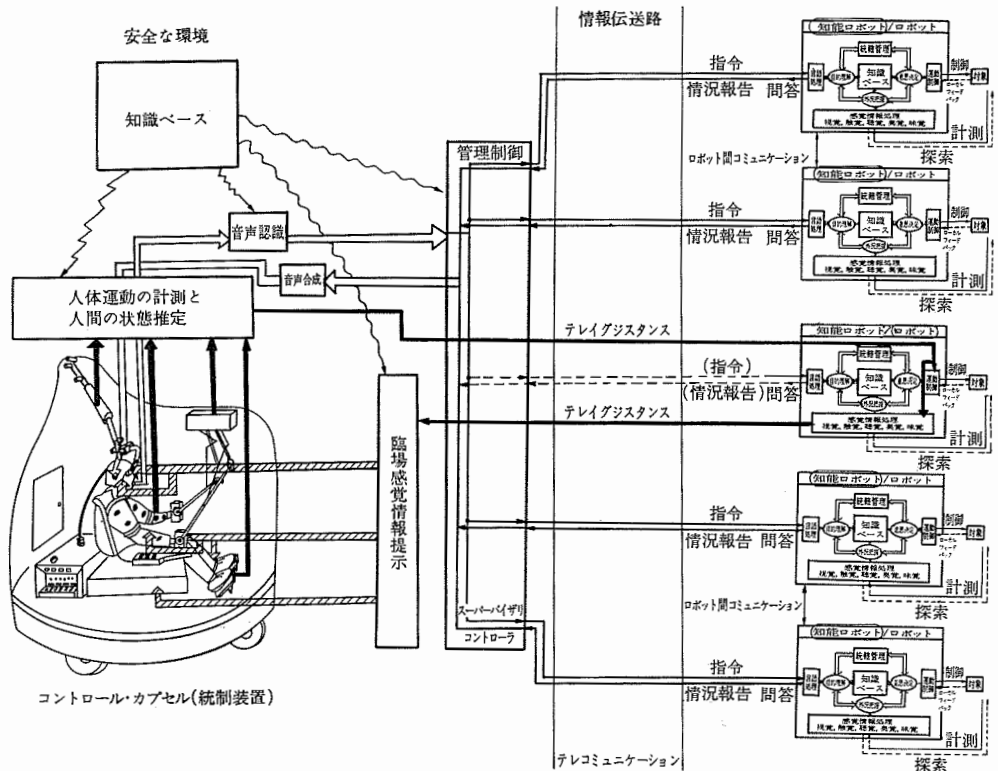


図 2 人間・ロボットシステムの一構成例

新しい未知の知識を生み出す力、あるいは新しい判断を行う力と捉えることもできよう。その力は、機械の場合には計算機のハードウェアとそれを補うソフトウェアのアーキテクチャによるところが非常に多いと思われる。たとえば知識を吸収しやすい学習機械型のアーキテクチャをもつ計算機が構成されれば、その学習能力は高まり、従来の計算機に比べてその意味での知能は向上しよう。

しかし、一方知能を知識で補うことも可能である。たとえば将棋のある局面で盤上この一手ともいべきつぎの一手をみだしたとしよう。これを将棋の駒の動きのみから生み出したとすれば、きわめて高い知能の作用である。しかし、もしその局面がすでに前にもあらわれて、それが定跡となっていれば、その定跡をあらかじめ知識として記憶しておくことでもまったく同一の手が指せることになる。その場合にはさして高い知能は必要としない。しかも、その局面に対するつぎの一手だけを見ている範囲では両者の差はまったくわからない。

機械の場合、特に、正確な知識の記憶という点ではむしろ人より勝れており、このような知識を利用して知能の足りない点を補う方式が有効である。そして、

その機械を使う環境が工場内のように、もともと人が設計したものであって、それに関する人の知識が豊富な場合などにより有効である。

そのようなアプローチはしかし、人の知識がまだ及ばない自然環境下で利用する場合には大きく制限されることも事実である。その場合には、機械にあらかじめ貯えておいた高度の知識と人間のもつ知能の力を互いに利用しあって、人間とロボットが全体として、人だけでもできないし、機械だけでもできない仕事をなしとげていく人間・ロボットシステムのアプローチが有力であり、それらが有効に協力するための人間機械系の技術は、今後ますますその重要度を高めていくと思われる。

4.1 人間・ロボットシステムの一例

著者が機械技術研究所を中心としたグループで提案されている人間と複数のロボットからなる作業システムの一構成例を図 2 に示す。数台の自立移動型知能ロボットがコントロールカプセル(統制装置)内の操作者(管理者)の命令に従って、危険かつ苛酷な作業環境内で作業を分担し、かつ必要に応じて共同しながら働いている。その作業分担やプランニングスケジュールリングは管理制御装置(一種のスーパーバイザリコン

危険・苛酷な環境

作業の分担あるいは共同作業

トローラ)が受持ち、各知能ロボットからは、仕事の進行ぶりに関する報告が逐次送られてくる。それらはスーパーバイザリコントローラで整理され、たとえば音声(視覚・触覚でも可)で操作者に伝わる。操作者は自然言語に近い言語で命令を下し、判断結果を伝えれば、音声認識装置、スーパーバイザリコントローラを経て各知能ロボットへの命令として伝達され、知能ロボットは目的を理解して自らの知能や知識を活用して目的の遂行をはかる。ロボットの感覚器の情報はロボットの知的動作のための重要な情報源であるが、それらは操作者によっても随時モニタされている。

安全性からのチェックも、知能ロボット自体、スーパーバイザリコントローラレベル、操作者といった三段階で行っており、その意味で安全性が高められている。

知能ロボットが、独自の能力では対処しえない困難な作業に直面したとき、ロボットからの要請あるいは操作者の判断で、そのロボットを遠隔操縦モードに切りかえる。その際にも従来のいわゆる遠隔操縦の方式ではなく操作者がそのロボットの中に入って操縦しているような高度の遠隔臨場感(tele-presence)²²⁾と自分の腕を操るに似た高い操作性(tele-operator)をもって作業のできるテレグジスタンス(tele-existence)の方式^{23),24)}を採用する。その際、知能ロボットの各サブシステムは人の指令によって自由に制御される操縦型ロボットとして働く。

テレグジスタンスでは、操作者の人体運動や力の状態などが実時間で計測され、操作者の内部状態が推定される。その内部状態がロボットに伝送され、直接ロボットの運動制御回路をコントロールする(図中では第3番目のロボットがテレグジスタンスモードで制御されており、太線が人とロボットの間の情報の流れを示している)。人の動きを忠実に再現してロボットの人工の目、首、手、足などが制御される。そのときのロボットの人工の感覚器からの情報はすべて対応する人間の感覚器に直接提示の方式で送られる。たとえば、操作者が見たい方向を向けば、ロボットも同一方向を向いて、そこに人がいたときに見える状景に対応する像を人の網膜上に実像として結像する。操作者が腕を目の前にもってくると、視野内にはロボットの手が同じ位置関係であらわれてくる。したがって人は自分の手と対象物、さらには囲りの空間との関係を、自分の過去の経験と同一の関係でとらえて作業ができる。ロボットが物体にふれた感覚は、人の手に皮膚刺激として提示され、操作者は自分でふれたのに似た感覚を有して作業が行え、理想的には人が直接作業する

のと同程度の、現実的には人がロボットの中に入り込んで作業するのと同程度の操作性をもって、人の器用さを生かした作業が逐行できる。

ロボットがもつ放射線、紫外線、赤外線、マイクロ波、超音波、超低周波などのセンサ情報(超感覚情報と呼ぶ)も、操作者がたとえば、夜間は赤外センサ情報を可視光に変換して提示して闇の中で物を見たり、超音波情報を可聴周波数に変換して通常は聞えない音の情報を操作者が利用したりできる。また、通常の視覚ディスプレイ上に超感覚情報をスーパーインポーズしたり、通常利用しない皮膚感覚チャネルを利用して提示できる。それらの情報を有効利用して操作者は人間能力の拡張をはかれる^{25)~27)}。また、ロボットの腕の操作性を高めて自分の腕のように制御すれば、通常もてない物がもてるという意味での人力増幅機が実現されることになる。

さらに、カプセル内の知識ベースをたとえば、MITのMedia Room²⁸⁾のように、アクセサビリティの高い方式で利用することにより操作者の判断がより確実なものとなる。知識ベースを人の記憶の補助や計算の補助として使う以外に、人の動きをそのままロボットに送るのではなく、熟練作業者の動きに修正して送ることなども興味がある課題である。

これらのシステム技術は、工場やプラント、コンピュータ内の危険、劣悪環境内作業、原子力プラントの点検、修理、危険作業、放射線廃棄物処理、宇宙海洋での探索、修理、組立作業、災害時における捜索、人命救助、復旧作業、通常時においては、清掃作業、土木建築作業、農林水産業、警察、探検、レジャー、テストパイロットやテストドライバーの代替など広範囲の応用の可能性をもつ根幹技術である。

4.2 研究課題

4.1のシステムを可能にするための研究開発課題としてたとえば以下の課題があげられる。

- ①生体運動、生体状態の計測・推定技術
- ②人間型ロボット機構とその制御
- ③人工の感覚器による外界情報検出技術
- ④臨場感覚情報提示技術
- ⑤マスタ・アシスト用知識ベース
- ⑥人間能力の拡張
- ⑦知能ロボットのための認識技術
- ⑧知能ロボットのための判断技術
- ⑨知能ロボットのための移動技術
- ⑩知能ロボットのための作業技術
- ⑪スーパーバイザリ制御技術
- ⑫テレコミュニケーション

- ⑬ロボット用アクチュエータ
- ⑭ロボット用センサ
- ⑮ロボット用材料
- ⑯ロボットの安全対策

5. おわりに

1980年代の断面を切ったとき、普及時代を迎えた内
界センサを主とした第1世代プレイバックロボット、
実用化時代にさしかかった外界センサを有する第2世
代適応ロボット、実用化にむけて研究開発を開始した
コミュニケーション機能を重要視する第3世代ロボッ
トの3世代が渾然一体となり、互いに大きな影響を及
ぼしあっている。

応用分野も従来の第2次産業のうちの製造業中心か
ら、建設、土木、鉱業といった他の分野への応用が模
索されており、さらには農林水産といった第1次産業
や、輸送、流通、サービス、医療福祉関連、原子力と
いった第3次産業への応用も真剣に考えられはじめて
いる。

その中でも、原子力、海洋、災害といったきわめて
厳しい環境の中で、現状では人間に頼らざるをえない
危険かつ苛酷な作業を代替するシステムに対するニーズ
が増大しつつある。通産省では、昭和58年から
7~8年計画で、「極限作業ロボット」の大型プロジェ
クトを計画している。これは、いわば第3世代に向っ
ての研究開発とも位置づけられ、その実現が大いに期
待される。

謝辞

貴重なご討論をいただいた機械技術研究所谷江和雄
主任研究官、新井健生研究員に謝意を表す。

(昭和57年9月16日受付)

参考文献

- 1) ロボット特集, 計測と制御, 7-12 (1968)
- 2) 知能情報処理とロボット特集, 電子通信学会誌, 65-4 (1982)
- 3) 日本人と産業用ロボット小特集, 日本機械学会誌, 85-766 (1982)
- 4) N. Wiener: The Human Use of Human Beings: Cybernetics and Society, Houghton Mifflin Company (1950)
- 5) R. C. Goertz, et al.: Electronically Controlled Manipulator, Nucleonics, 12, 46/47 (1954)
- 6) 米本: 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, 85-766, 1069/1077 (1982)
- 7) 白井: 図形・画像理解, 電子通信学会誌, 65-4, 352/358 (1982)
- 8) 館: 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, 35/46 (1982)
- 9) S. Kashioka, et al.: A Transistor Wire Bonding System Utilizing Multiple Local Pattern Machine, IEEE Trans., SMC-6 (1976)
- 10) T. Goto, et al.: Control Algorithm for Precision Insert Operation Robot, IEEE Trans., SMC-10, 19/25 (1980)
- 11) R. P. Kruger, et al.: A Technical and Economic Assessment of Computer Vision for Industrial Inspection and Robot Assembly, Proc. IEEE 69-12, 1524/1538 (1981)
- 12) 高瀬: ロボットの動作記述と言語, 電子通信学会誌, 65-4, 426/432 (1982)
- 13) J. L. Flanagan: Talking with Computers: Synthesis and Recognition of Speech by Machines, IEEE Trans., BME-29-4, 223/232 (1982)
- 14) T. Winograd: Understanding Natural Language, Academic Press (1972)
- 15) 田中: 知能情報処理とロボットの研究開発動向, 電子通信学会誌, 65-4, 334/345 (1982)
- 16) T. L. Brooks: SUPERMAN: A System for Supervisory Manipulation and the Study of Human/Computer Interactions, MS Thesis, M. I. T. (1976)
- 17) 森: ロボットの基本思想と構想, 計測と制御, 7-12, 871/880 (1968)
- 18) 館, 小森谷: 知能ロボットの開発, 自動化技術, 13-1, 25/31 (1981)
- 19) 井上: 知能ロボット, 別冊サイエンス, メカトロニクス, 45, 98/109 (1981)
- 20) 辻: ロボティックスの最近の進歩—単能ロボットから知能ロボットへ, 電子通信学会誌, 65-4, 413/419 (1982)
- 21) 梅谷: オートメから知能ロボットへの発展系譜, 日本の科学と技術, 23-215, 26/30 (1982)
- 22) K. Corker, et al.: Research Issues in Implementing Remote Presence in Teleoperator Control, Proc. 7th Annual Conference on Manual Control, 109/126, Los Angeles, CA (1981)
- 23) 館, 阿部: テレイグジスタンスの研究 第1報, 第21回 SICE 学術講演会予稿集, 167/168 (1982)
- 24) 館, 谷江, 小森谷, 金子, 阿部: テレイグジスタンスの研究第2報, 第3回バイオメカニクス学会学術講演会前刷 (1982)
- 25) 館: 感覚補綴・代行システムの現状と将来, 計測と制御 20-12, 1113/1121 (1981)
- 26) 館: 人間能力の補綴と医用精密工学, 精密機械, 48-5, 572/577 (1982)
- 27) 谷江: 感覚代行の最近の進歩, 計測と制御, 18-1, 92/99 (1979)
- 28) N. Negroponce: New Qualities of Computer Interactions, Proc. Int. Conf. on Cybernetics and Society, 1402/1411 Tokyo, Japan (1978)