

人間における視触覚複合機能の考察と

知能ロボットへの応用

武安清雄 後藤達生 鳥野武 柏岡誠治 霜村来爾

1. 緒言

ロボットの適応性や作業能力の向上を目的とした視覚認識や触覚制御技術の開発は、内外で広く進められており、すでにいくつかの実用化例も見られる。これらの技術開発が、今後のロボット制御技術の発展に対して重要な意味を持つ事は言うまでもない。

しかしながら、人間の優れた作業能力が各種の感覚機能、特に視覚と触覚の複合的な利用に基づいている事に注目する時、前記の技術開発が一定の連けいを保ち、相互の特長を生かした形で今後の課題に挑戦して行く事が重要であると考えている。

我々のアプローチはこのような立場に立ち、従来からの視覚認識や触覚制御の個別的な追求だけでなく、相互の機能的な複合化、一体化に基いた新しい考え方の制御技術の開発を目標としている。このようなアプローチにおいては、まず人間の作業動作における視触覚複合機能の意義と形態を考察し、その中から工業的に利用可能なものを抽出するための模索と、さらに、これらを実用的な技術に結びつけて行くための視触覚複合制御のモデル実験とが必要である。

本報告は、このような検討の経緯と得られた結果についての概要を述べたものである。

2. 人間における視触覚機能の役割2.1 視覚と触覚の対比

視覚と触覚は機能的に異質の感覚であり、各々独立した制御系を構成する事ができる。しかし触覚が皮膚から分化し、また視覚が触覚の進化によって得られた事からも想像できるように、両者には機能的な相補関係があり、この事が人間の高度な作業にうまく生かされている。このような視覚および触覚の特徴を分析し、対比的に示したのが図1である。

まず、情報入力形態について考えて見ると、視覚が広範囲にわたる情報を遠隔的に入力できるのに対し、触覚は対象との接触により始めて外部情報を入力する事が可能であり、その範囲も領域に限定される。また、視覚が平面的であるとは言え、高密度な情報を高速かつ非干渉的に得るのに対し、触覚は情報の入力に際し対象に何らかの形で力学的な干渉を与える。むしろ、このような干渉の形態そのものが、触覚の多角的な情報入力源であると言っても過言ではない。

この結果、視覚は全体的な状況を瞬時に把握し、あるいは逆に必要な範囲に限定して注目し、対象の状態を観察的に認識する。このような視覚の能力は、物体ハンドリングの立場から見れば、本質的に推定認識であると言えるが、その反面、予測や推測など実際に与えられた入力以上の認識も、場合によっては可能である。このような視覚の機能は、頭脳の高次判断処理部と密接な関係を持つ。

一方触覚は、手と対象物体との力学的な関係を、局部的にはあるが確定的に認識する事ができる。このような触覚の機能は、手の動作そのものとの関連が極めて強く、その認識結果が手の動作制御に寄与すると同時に、手の動作によって

さらに新しい触覚情報を得る事ができる。

このように視覚は高速な認識処理を得意とする反面，入力情報の過多が場合によってはノイズとしての意味を持ち，必要な情報の抽出処理手順が複雑となる。これに対し触覚は物体ハンドリング動作そのものと同時的な認識を得意とするものの，局面的で限定的な作業を除けば，触覚のみに依存した作業は円滑さや速度に関して不満足なものになる事が多い。

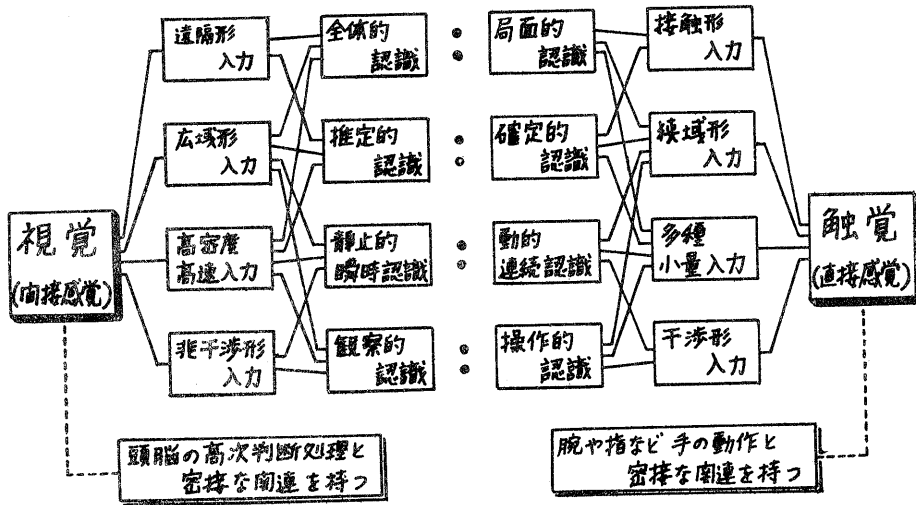


図1 視覚と触覚の機能の対比

2.2 視触覚複合制御の形態

ところで，人間における視覚，触覚の分担や協調は，両者の処理系の下位レベルで直接行なわれるのではなく，いったん頭脳の処理系を介して行なわれるものと考えられる。すなわち，人間をモデルとした視触覚複合制御の基本形態は，図2に示したような2重系システムであると考えられる。

この制御系において，視覚は情報を入力する手段としての眼球や首などの運動器官を持ち，情報処理結果をインタフェースを介して頭脳に送り出す。また触覚は，頭脳からの動作指令を解読する運動処理部に，手や対象物体に関する情報を伝達する。このような意味でも，視覚系と触覚系は対称的である。

しかしながら，人間の各種の作業動作において，この二つの系が機能的にバランスした状態で並立する事は極めてまれであると考えられる。すなわち，通常は図2(B)に示した視覚系中心の，いわば“見ながら動く”制御状態と，(C)に示した触覚中心の，いわば“動きながら見る”制御状態のいずれか一方に偏りを持った状態にあると想定される。

前者は手に持った物体の表裏の傷を調べたり，細い針の穴に糸を通すといった視覚認識に依存する作業に見られる。この場合，手の運動は視覚情報に完全に支配されており，触覚は手の運動を安定化させるための下位レベルのマイナな処理に利用されるのみである。後者の制御状態は，カンナで板をけずる，あるいはナイフで鉛筆を削る動作など，触覚フィードバックを伴う，手の自主性，自律性を主体とした作業に見られ，視覚はサンプリング的な条件での状況把握の手段として利用される。

このような自律的な動作が発生する理由としては、以下の三つの場合を挙げる事ができる。

(1) 本来は視覚にかなり依存する作業であっても、熟練によって触覚フィードバック情報を含む基本動作パターンを習得し、視覚による連続的な情報の提供を必要としなくなった場合。

(2) 極めて高速な対象への追従や高速でダイナミックな作業動作が要求される結果、視覚の連続的で密な情報の提供が不可能である場合。

(3) 手と対象物体、あるいは対象物体相互間の力学的関係が顕著であり、触覚系による状況把握がかなり保証される場合。

一つの目的を持った、まとまりのある作業が視触覚複合制御で実行される場合は、その作業を構成する各単位作業が、前記の視覚中心あるいは触覚中心のいずれか一方、またはその適応的な切換で行なわれると考える。すなわち、作業動作をミクロに分割した場合、いずれか一方の制御状態が存在し、その形態や組合せを作業状況に応じて適応選択する所に視触覚複合制御の本来的意味があると言える。

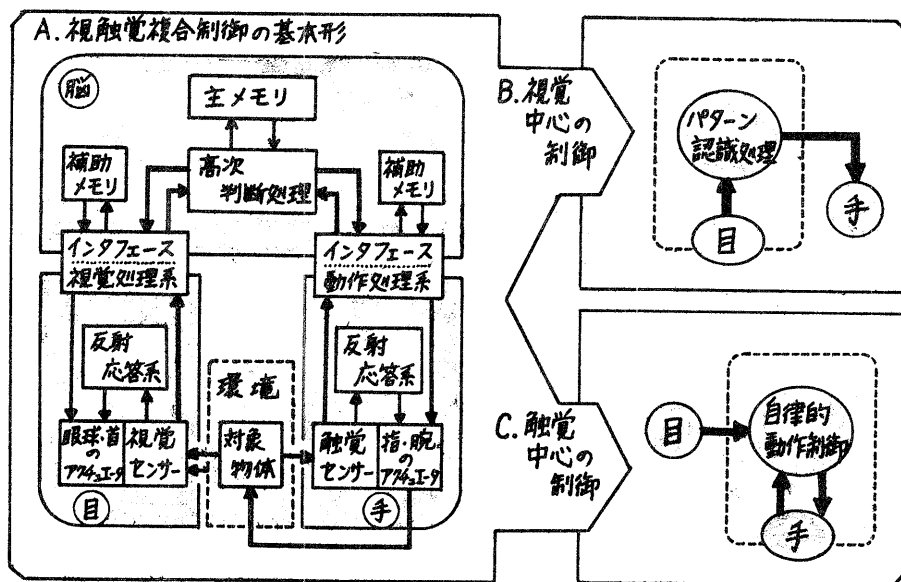


図2 視触覚複合制御の基本形と変形

3. 人間における視触覚複合機能の考察

人間の作業動作の中で視触覚複合機能が特に必要な場合として以下を挙げる事ができる。

(a) 対象物体が高速又は不規則的に動く場合。

(b) 対象物体間に力学的な不連続性やあいまいさがある場合。

(c) 作業対象や作業動作内容が複雑な場合。

これ等のうち、(a)に相当する作業例として“棒立ての曲芸”，(b)の例として“コーヒのサービス”，(c)として“リンゴの皮むき”についての考察結果を述べる。

3.1 棒を立てる曲芸

倒れやすい棒を手の平の上で安定に立てるためには、手先を素早く位置修正する必要がある。しかし人間の手は、先端部は速応性がある反面、動作範囲が狭く、全体的には動作範囲が拡大するものの慣性が大きいという特性がある。この為図3に示したように、マクロな位置修正を比較的低速で行なう制御ループと、ミクロな位置修正を速応的に行なう制御ループが並列に存在し、上記の欠点を補っている。

このうちミクロループは、棒の重量を含んだ形で定まる手先の固有振動周波数を利用し、その振動振幅を必要に応じて抑制する形の制御を行なう。また速応性に重点があるため、精密な位置制御ではなく、手の行き過ぎを伴なうフィードフォワード的な制御形態を取る。また、これ等二つの平面位置制御ループをバックアップするものとして、触覚フィードバックを利用した手の上下動制御ループがあり、特に棒の重量が大きい場合の手の平面移動を容易にしている。

一方、視覚は棒の先端のランダムな位置変動に注目して、ミクロ制御ループに常に情報を与えると同時に、棒全体の傾斜の変化を監視し、マクロ制御ループに情報を提供する。この場合、目の前後方向に対する鈍感さと、手の前後方向における制御性の良さが相補的な関係にあり、また手の動き自体が棒の移動に関する予測情報となって、視覚認識処理をバックアップしていると考えられる。

以上のような制御動作の中の重要なポイントとして、以下の点があると思われる。

- (a) 雑然とした動きの中から全体的な動きを抽出できる視覚機能。
- (b) 対象の移動方向の予測を利用した対象認識の高速化。
- (c) 視覚など感覚器の方向性と手の制御性との相補性。
- (d) 機構の共振特性を利用したフィードフォワード形速応制御。
- (e) エネルギーミニマムの為の冗長的動作を加えた位置制御。
- (f) マクロ、ミクロ位置制御を並立させた視触覚複合制御。

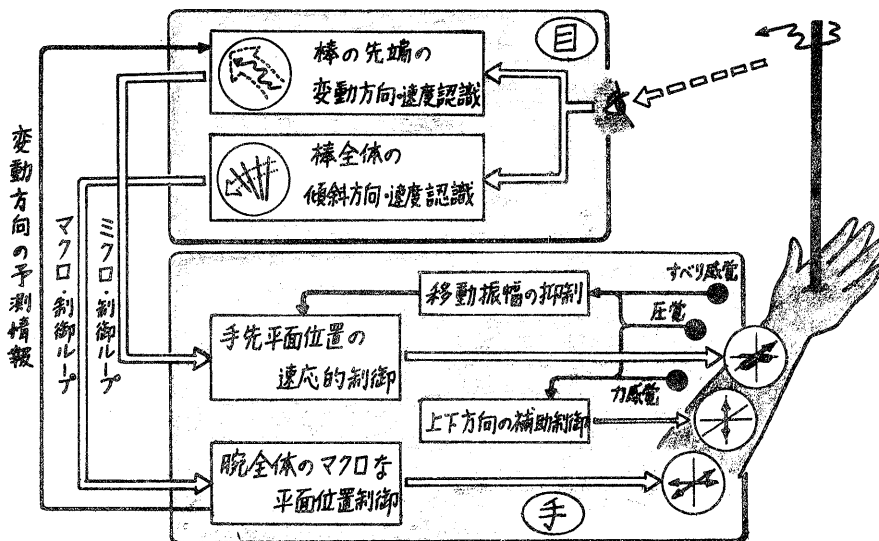


図3 棒を立てる動作における認識と制御

3.2 コーヒのサービス

右手に持ったポットから左手で支えたカップにコーヒーを注入する動作は、力学的な不連続性がある複腕作業の典形であり、視覚情報がこの不連続性を補う役割をする。図4に示したように、この作業では左右の手の各々独立した制御系と、左右の手の相対位置関係を一定に保つための制御系とが必要であり、前二者では触覚フィードバック、また後者では視覚フィードバックの比重が高い。

まず左手の制御系は、カップの水平度を安定に保つ事を目的とするが、初期状態が設定された後は、コーヒーの注入に伴うモメントの変化を手先の触覚で検出し、手首角度の補正や握力の調整に利用する。これらの触覚検出レベルが飽和すると視覚系が割込んで手先の姿勢を修正し、再び触覚系に制御を戻す。また右手はポットを支えながらその傾斜角を除々に変化させ、コーヒーを注入するが、この変化速度は初期の視覚による監視状態のあとには、手の自律的な運動に引継がれる。また、手先の運動の非線形性に起因する注入速度の変化が大きくなると、コーヒー流入量の変動となって視覚が情報を発生し、手の動作速度を補正する。

一方、左右の手の相対位置関係は、コーヒーの流入位置として視覚で常時監視される。この視覚情報によって、左右の手の一方または両方が状況に応じて選択され位置修正が行なわれる。この選択条件として考えられるのは、腕の姿勢状態、対象物体の重量関係、制御的にビジイであるか否か等である。

以上の説明から分るように本作業における重要なポイントとして以下の様な点を挙げる事ができる。

- (a) 視野の中の複数個の目標のうち、変動の大きいものを素早く注視できる目。
- (b) 初期条件を視覚主体で設定後、触覚の自律性に引継ぐ制御。
- (c) 目標を達成できる複数の手段の中からの適応的な選択。
- (d) 感覚器のダイナミックレンジに適合した動作姿勢の決定。

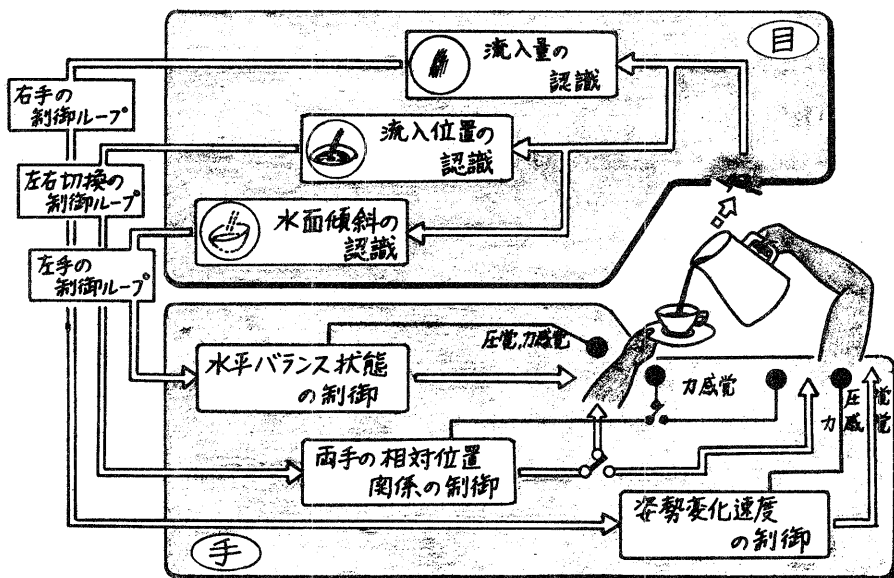


図4 コーヒのサービスにおける認識と制御

3.3 リンゴの皮むき

ほぼ左手で支えたリンゴの皮を右手に持つナイフでむく作業は、複雑作業の代表例であり、図5に示したように三種類の制御ループを主要素として実行される。

まず、両手でリンゴを保持するための制御ループがあり、最も優先レベルが高い。この制御系の目的は、他の制御動作の実行に支障がないよう出来るだけ弱い握力で対象を支える事であり、視覚による手とリンゴの2次元的な位置関係の認識と、各指の圧覚に依存した3次元的な認識との協調によって安定化される。しかし、視覚は必ずしも不可欠ではない。

このような基本条件が満たされる範囲内で、リンゴの手に対する相対位置を変化させる制御と、ナイフで皮を切り込む制御が交互に繰返し実行される。視覚は前者に対しては全体的な皮のむけ具合を、また後者に対してはナイフに近接した部分での皮の境界ならびに皮の幅を認識し与える。

この二つの制御動作においては、視覚が常時監視しながらフィードバック信号を与えるのではなく、あらかじめ与えられた視覚情報に基づいて、手が一定範囲の動作に見込みをつけ自主的に実行する形を取り、この動作結果が再び視覚で検出され、次回の見込量を修正する。

ところで、リンゴの相対移動制御では左手が主で右手が従の関係、またナイフによる切込制御では右手が主、左手が従の状態になる。これ等二つの制御動作は基本的にシーケンシャルに実行されるが、作業の熟練にしたがって次第に重複し、円滑でむだな動きの少ない動作となる。

本作業の重要なポイントとして以下の点を挙げる事ができる。

- (a) 指定された部分の、指定された時点での高速認識ができる視覚。
- (b) 多点ならびに多段柔軟性を活用した複腕協調動作。
- (c) シーケンシャルな動作をできるだけ重複させる熟練性。

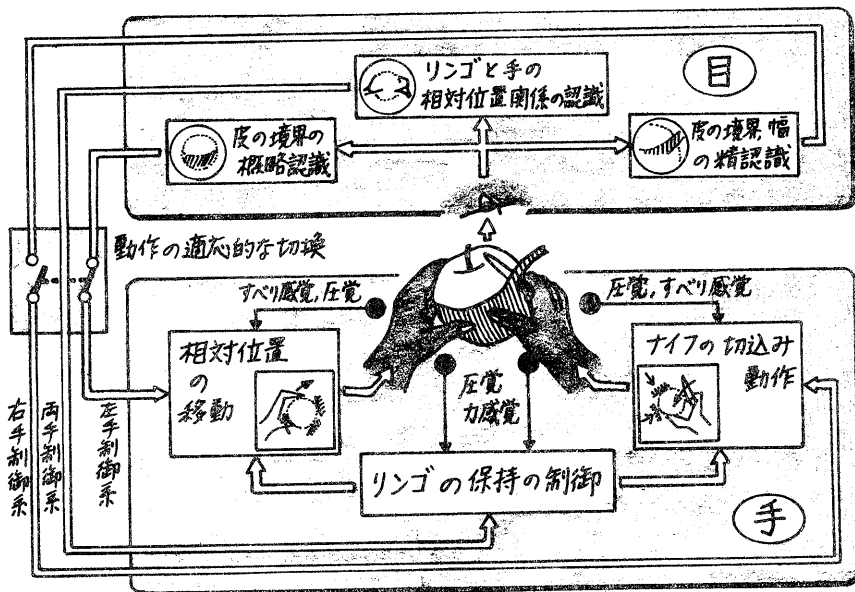


図5 リンゴの皮むきにおける認識と制御

4. 視触覚複合制御の技術課題

以上に直感的な推定や仮定を含めた人間の作業動作の考察例を説明した。これ以外の例として、たとえば柔軟物体のハンドリング作業では、視覚中心、触覚中心の各制御系と、視覚あるいは触覚のいずれかに適応切換できる制御系のバランスに重点がある。また、卓球などの運動々作では、視覚情報がタイミング信号と偏差信号に分離され、これに基づきからだ全体のハイアラキ・メカニズムが対戦相手と一定の連けいを持つ反復動作を実行すると考える事ができる。

このように、人間における視覚、触覚の分担、協調の内容は実に多彩であるが、制御的に見て次のように分類する事ができる。

(1) 対等レベルの分担、協調。

視覚と触覚が、質的に同レベルの分担、協調を行なう制御系であって、いずれか一方が欠如しても目的を達成できないか、あるいは目的達成が困難となる場合である。

(2) 階層的な分担、協調。

視触覚複合制御における最も一般的な形であり、さらに以下の4種類に分類する事ができる。

(a) 視覚主フィードバック形。

主として視覚情報に基づいて作業が実行され、触覚系は動作の安定化を受け持つマイナ・フィードバックに利用される。

(b) 触覚主フィードバック形。

主として触覚フィードバックによる自律的な動作が実行され、必要に応じて視覚情報がサンプリングされる。

(c) 視覚マクロ、触覚ミクロ形。

視覚の概略情報によって手が起動し、最終的には触覚系による精密な直接情報によって作業を完了させる場合である。

(d) 視覚スーパーバイザ形。

触覚フィードバックを伴なう複数個の制御系を視覚が監視する制御系であり、上記(a)の発展形とも言える。

(3) 独立的な分担、協調。

視覚系、触覚系のいずれもが制御系をクローズドさせる事が可能な場合であり、状況に応じて一方が選択される。

ところで、この様な特長を持つ視触覚複合制御をロボット制御技術として展開して行くためには、視覚認識や触覚制御個々の技術開発を進めて行く必要がある。まず視覚認識技術については、

- (i) 雑然とした背景の中からの特定対象の抽出。
 - (ii) 高速対象の認識や距離感の導入。
 - (iii) 注視点の適応移動や複数画像の処理。
 - (iv) 特定の照明条件を要しない認識や、自然物など不定対象の認識。
- などがあり、触覚制御に関しては、

- (i) 多自由度腕のダイナミックな制御や複腕協調制御。
 - (ii) 柔軟性の活用方式や冗長性のあるハンドリング動作機能。
 - (iii) 多様な触覚センサ方式の開発とこれを活用した自律的動作制御。
- 等が挙げられる。

以上、人間の動作の考察結果に基づいて検討した視触覚複合制御のゆらいについて述べた。この中から当面アプローチすべき重要な技術目標を抽出する必要があったため、現実の生産ライン、特に組立ラインの幾つかについて実情調査を行った。このような調査から得られた現場レベルの技術的要求と、前記の検討結果との間にかなり強い相関がある事が分った。そこで、これ等を基に視触覚複合制御ロボット開発における技術課題を図6のようにまとめた。

(1) 多種物体のハンドリング。

複数種類の物体の取扱い、あるいは1個の物体であっても多種類の操作を必要とする場合である。

(2) 非整列状態からのピッキング。

位置や姿勢が不正確な状態、極端な場合は複数種類の物体が混在している条件が想定される。

(3) 持ち換え、姿勢修正。

いったん保持した物体を作業に適した条件に持ち換える機能、あるいは所定の姿勢に整列、装着する能力である。

(4) スムーズな移動能力。

対象物体に振動や衝撃を与えず速やかに移動できる能力である。多自由度軽量腕の場合は、それ自身の運動についても同じ事が言える。

(5) 位置精度が悪い条件下での組立。

対象物体の供給精度が悪い条件下での組立、あるいは逆にロボット自体の精度が悪い場合の組立である。

(6) あいまいな物体の組立。

変形しやすい物体、柔軟な物体、加工精度が悪い物体同志の結合、あるいは基準位置の取りにくい物体などである。

(7) 手加減が必要な諸作業。

多元的な感覚処理、とりわけ多元的な力制御を必要とする作業であって、全体的な状況の把握に視覚系のバックアップを要する場合である。

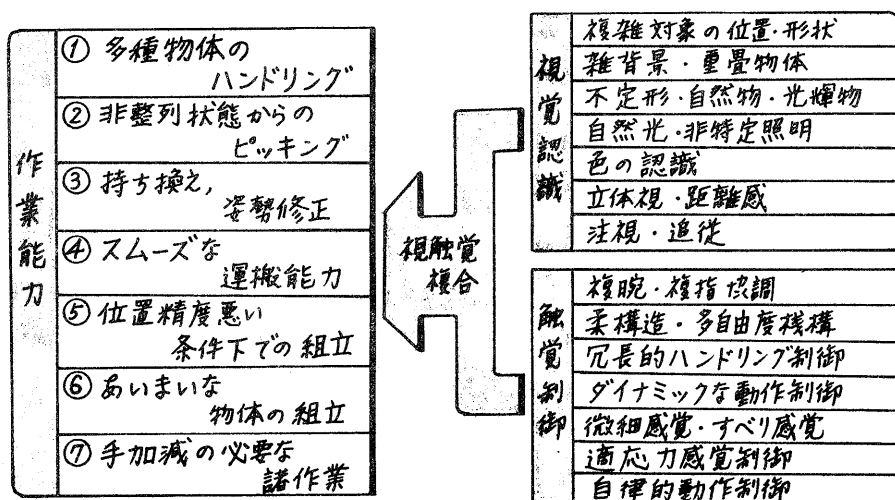


図6 視触覚複合ロボットの技術課題

5. 知能ロボットによるモデル実験

5.1 モデル作業の内容

前章に述べた技術目標にアプローチするため、視触覚複合形の知能ロボットによるモデル実験を試みた。作業対象として何種類かのものを検討したが、技術開発の内容や意義などの点から家庭用クリーナの組立作業を選定した。

家庭用クリーナは、フィルタ、ダストケース、あるいはモータユニット等から構成されている。これらの部品は、プラスチック、布、ゴムなど変形しやすく、加工精度が悪い材料が使用されており、従来の工業ロボットが取扱いを困難として来た。

組立作業の内容は図7に示した通りであり、以下の作業を含んでいる。

- (1) 重畳して供給されたフィルタのピッキング作業。
- (2) ピッキングしたフィルタの持換え作業。
- (3) 任意位置に供給されたダストケースのつかみと運搬。
- (4) ダストケースへのフィルタの挿入作業。
- (5) 任意位置、方向に供給されたモータユニットのつかみ上げ。
- (6) ダストケースとモータユニットの組み立て。
- (7) クランパによる締結作業。

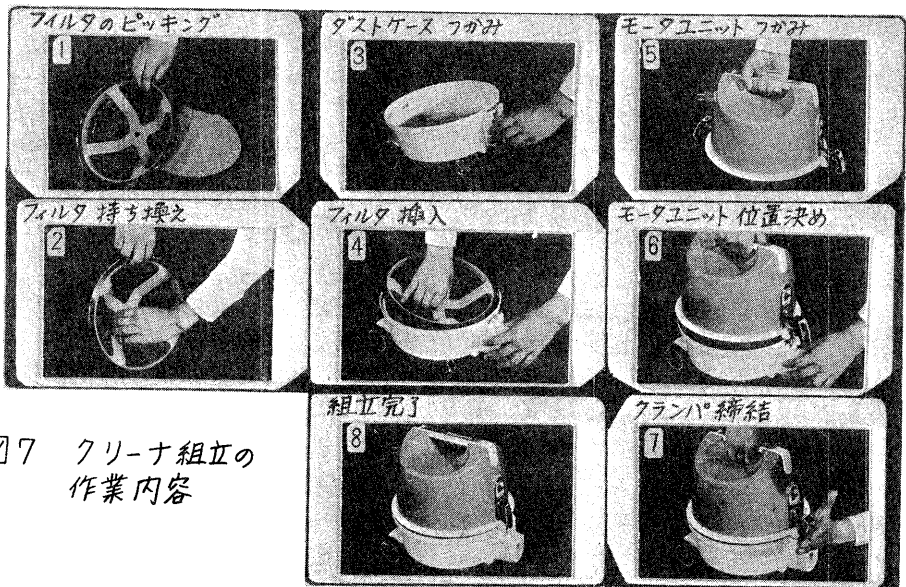


図7 クリーナ組立の作業内容

5.2 知能ロボットの構成と作業実験

図8に試作したロボットの構成ならびに外観を示す。このロボットには以下の内容が含まれている。

- (a) 水平、垂直方向の固定の目、腕の一方に装着された可動の目から構成された複眼システム。
- (b) 上記(a)からの入力情報を高速処理するための汎用映像認識処理装置。
- (c) アクチュエータを肩部に集中し、リンク機構とチェーン機構で駆動される軽量形の腕。

- (d) 上記軽量腕を基本とし多数の触覚を配置した機能分担形複腕装置。
 (e) 視覚処理系と触覚処理系をリンケージした視触覚複合システム。
 このような構成のロボットの詳細ならびに視触覚複合実験の内容については、すでに多くの報告を行なっている^{1)~4)}ので参照されたい。

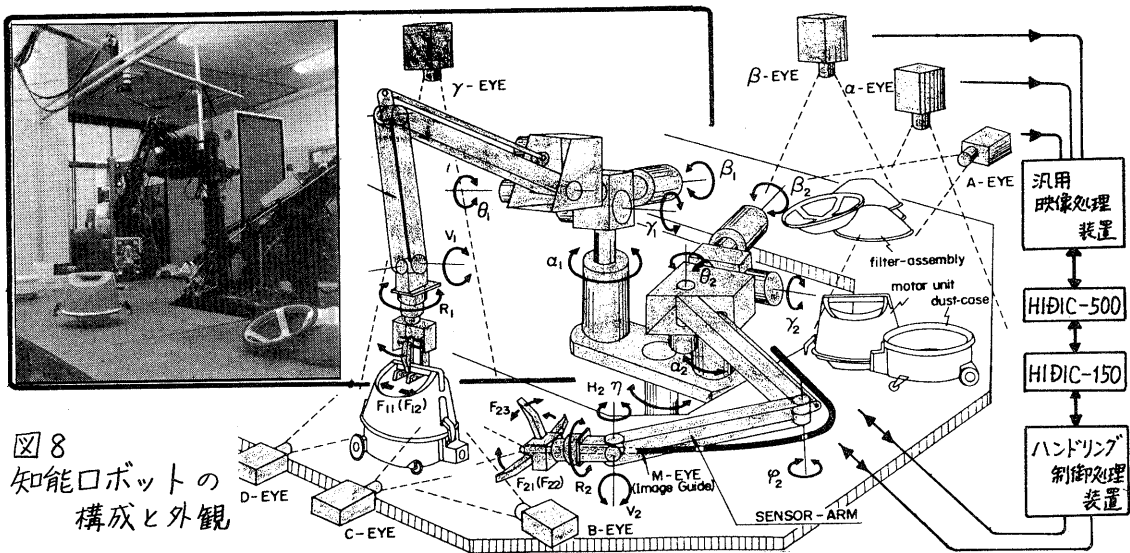


図8
知能ロボットの
構成と外観

6. 結 言

視触覚複合機能の意義を把握し、ロボット制御への適用方式を模索する事を目的として、人間の作業動作内容の思考的な考察を中心とした検討を行なった。主な結論は次の通りである。

- (1) 視触覚複合制御の基本形は視覚および触覚系が並立した2重系となるが、作業内容に応じていずれかの系に偏るのが普通である。
- (2) 視触覚の分担、協調の仕方は多様であるが、基本的には対等レベル、階層的および独立的分担、協調の3種類に分類できる。

このような考察結果と共に、実際の組立ライン自動化に対する技術的な要求を調査し、今後の視触覚複合形知能ロボットの技術課題を設定し、クリーナ組立作業を対象としたモデル実験を行なった。これ等の検討は、まだ問題提起の段階であるが、これを土台とした技術展開を今後の課題としたい。

最後に本研究に関し種々御協をいただいた、日立中央研究所、笠井増雄、武田昌一、加藤寛次、宇野元雄の各氏に感謝します。

〔参考文献〕

- (1) 後藤ほか：昭和52年電気学会全国大会，1568。
- (2) 武安ほか：昭和52年電気東京支部大会，285～288。
- (3) K. Takeyasu et al: 7th International Symposium On Industrial Robots, P523～530
- (4) S. Kashioka et al: 7th International Symposium On Industrial Robots, P531～538