多本指ハンドの作業への応用*

大 道 武 生** 沖 野 晃 久**

1. は じ め に

近年のロボット技術の発展は多くの自動化を達成し、益々その領域を広げつつある。特に、定形的作業からより不定形、人間の作業への展開が図られつつあるが、この分野でマニピュレータの果たす役割は非常に大きなものがあるといえる。従来マニピュレータと言えば人間で言う腕をイメージするものであり、研究もほとんどこのマニピュレータに関するものであったと言える。しかしながら、作業を構成する要素を考えると、腕の果たす役割は物の搬送・案内が主であり、必要に応じて多数のエンドエフェクタ（ハンド）を使い分けて作業を達成していると言える。このことは作業が専用的であるときは極めて効率の良いシステムを作れることを意味するが、少しでも汎用的要素、例外的要素が加わると多くのエンドエフェクタを必要とし、システムそのものが否定されてしまうことにもなる。

従って、作業を実行する優秀なマニピュレータは必然的に優秀なハンドを必要とすることになる。従来からハンドの研究は着手はされているが、その興味が多リンク形のマニピュレーションの域を出ていない。これは研

究の内容の興味の領域にもよるが、作業が出来る程高度のハンドが存在しなかったことにもよると考えられる。幸いなことに通産省工業技術院大型プロジェクト「極限作業ロボットの開発」でそのブレイクスルーを行う機会を与えられたのでその知見をもとに汎用作業を可能とするための要因と、その解決法について紹介する。

2. ハンドの機能

作業を行うハンドの機能は大別して対象物を確実に把持すること、および、対象物をハンドの内・外で操ることに分けて考えると判り易い。この観点で言えば従来のハンドは既知・定型の対象物を把持することであるが、どんなものでも安定に把持することの出来るハンドは実用上は非常に有用であり、自由度（アクチュエータ）の低減、その制御法が付加されればマニピュレータ高機能化の一助として導入されていくと考えることが出来る¹⁾。

アクチュエータの低減の例として対象物の形状に沿った変形を可能とするなじみハンド（図1、図2）が発案されたが、あまり進展をみるに至っていない。これは、なじみハンド²⁾の本質的問題というよりハンドを使いこなす腕の進歩に待つところが大きく、今後安定把持ハンドの一形態として進展していくものと想像する。

次に、対象物の操りについて述べる。操りはハンド内での持ちかえ、回転、姿勢変更、相手物の動きに応じた適応性（ドライバの回転等）を可能とし、汎用作業の遂行に大きな力を発揮する。対象物を操る試みは、電総研

図1 なじみハンドの例（東工大）

原稿受付 1989年8月29日

* Study on multi-fingered manipulation for tasks

** 三菱重工株式会社

図2 3本指の簡易なじみ型グリップ（三菱重工）

図 3 多本指の自由度決定要因

ハンド³⁾, Stanford-JPL Hand⁴⁾ 等で試みられ、いくつかの理論的考察が行われ、3本指によってほとんどの動作が実現できると推定した。しかしながら、実際の作業を実行するには、繊細性、器用性、負荷能力、腕との協調・整合性が不可欠であり、未だ未知分野が多く今後とも多くの研究を必要とする。

作業用ハンドはこの把持と操りの双方の機能をうまく整合することが重要であり、汎用作業を可能とする要とも言える。

3. 作業性とハンド

3.1 指数と自由度

把持と操りの整合が重要なことは前述の通りであり、この2大機能を併せ持たせるためには、自由度、指数は多いほど良いことになる⁵⁾。しかしながら、自由度の増加は、アクチュエータを含む駆動部重量の増加、制御則の複雑化を招き、自ずと限界があるため、明確な思想が必要となる。図3には極限作業ロボットに於けるハンド(以下本ハンドと略す)に於ける思想を示す。より安定した把持のための指数として4本指を、操りの最少自由度(指先点の位置決め)として3自由度/指を設定した。更に、大きな負荷に耐えるための握り込み動作が必要であるので、この握り込みを少ない軸数で実現させるために手の平軸を加えることとした。図4に構成概念を示す。

3.2 安定把持と指形状

ハンド開発の困難性の一つに、対象物の大きさとハンドの大きさに大きな相関が存在することがある。即ち、

図 4 多本指の自由度構成

小さなものを取扱うには、小さなハンドが、大きなものを取扱うには大きなハンドが必要である⁶⁾。従って人が取扱う作業をロボット化するためには人並みの形状が必要となり、また、指先形状も人間指に学ぶものが多い。図5は指先形状と機能の分析例を示すが、一見して考えられる球状先端の円筒型の指は小物のつまみ上げに不利であることが判る。しかしながら、側面が矩形をしていると操り時に対象物がコーナ部でスムーズな動きをしないことが言え、この点からは滑らかな曲面で結ぶ必要がある。結論的に言えば極めて人間指に近い形状の選択が、より小物から、大きな対象への適合の観点で好ましいことが判った。

更に、硬い指表面の場合、対象物との接触が点となり、摩擦係数の低い材質は滑りを生じ易く、せつかくの多本指の冗長性を生かしきれない。逆に、柔らかい材料は変

	Fingered Manipulating	Holding	Sensor Arrangement	Picking
Round Shape Tip	No difference	Unstable except center of fingers	Difficult to attach many sensor on the round shape tip of the finger	More than 10mm dia.
Thin Tip Shape		Stable except special position	Easier arrangement than the round shape tip	Picking up 5mm dia.

図5 指先形状と機能

形が大きく対象物の接触点を割り出すうえからは好ましくないなのでその整合には注意を要する。

3.3 感覚センサと皮膚構造

感覚センサには一般に力覚と触覚がある。この2つのセンサは大まかに数 gf~100 gf を触覚、それ以上を力覚として考えれば良いように思われる。但し、境界部は明確なものではなく適度な重なりを設けるのが良い。注意すべきことは、その使用法を明確化することと、ハンドにかかる最大力に耐える必要があるので、センシング帯域に対し、はるかに大きな耐破壊帯域を持つことが必要である。

触覚センサは、硬い平面上のセンサでの議論が多いが、対象物を操るハンドでは接触部の分解能もさることながら安定把持のための柔軟性、また、指先端・側面・腹面を駆使するための、立体配置可能な形状が不可欠となる。現状ではこのような目的に合致した触覚センサが実現しないため、皮膚の工夫で解決を図る必要がある。図6に本ハンドのセンサ実装例を示すが、どの点を押さえても合理的の出力がとれ、適度な変形を可能にするような形状、材質、固定方法がとられている⁷⁾。

なお、立体的配置の可能なセンサについては、本プロ

図6 触覚センサ実装の指先

ジェクトで別途開発中である。

4. 拘束感のないマスタ

4.1 低拘束化と操作性

多本指の自律的制御はそれ自体緒についた段階であり、すぐに作業が実現できる状況にないため、遠隔制御を中心にした検討が必要となる。一般に腕のマスタスレーブ制御は手首着目式であり、腕形状は重要な意味をもたないと言われている。簡単には全く同じ構造のマスタ・スレーブの組合せで十分な機能を得ることが出来る。

しかしながら、指はお互いが重なり合ったり、握り込んだりすることが不可欠となるため、同じ構造の形態は人間の指そのものと干渉が厳しく実現不可能である。また、操り、把握の双方とも指の姿勢が重要であり、その姿勢を指令する工夫が必要となる。

本ハンドでは、図7に示すように、同形状に近いものからスタートし、最終的には指の非干渉空間をうまく利用した、相似、指対向の組合せ方式となった。このことによって、指の動作範囲を広くとり、拘束感を低減することが出来た。親指は特に動作範囲が広いために4自由度とすることが良いことが結論付けられた。

4.2 圧覚発生機構

本ハンドの中で最も実装が困難であったのが圧覚発生機構である。即ち、圧覚(触覚)の発生は駆動パワー(10 gf~200 gf)を必要とすること、人間指表面の変形に追従するためのストローク(~5 mm)を必要とすることから機構的工夫を要することとなる。

もちろん、直接人間が指を押す方法以外に、電気刺激、温度、空気圧力、振動等についても実験検討を行ったが、感覚の慣れ、圧覚の認識度、応答性、安定性からいずれも適切でなかった。また、形状的にも満足のゆくものとは言えなかった⁸⁾。

図 7 マスタ指の形状の変遷

また、圧覚発生密度については、接触点の変化（物の移動、滑り等）について調査を行い⁹⁾、最終的には空気圧を利用した方式（指先4点）で何とか目的を達することが出来た。

5. 腕 と の 整 合

5.1 スレーブマニピュレータ

図 8, 図 9, 図 10 に指と腕の実装状態を示す。スレーブハンドの実装を行う場合の問題は指の駆動アクチュエータの実装法である。ある程度の負荷を扱う人間指並形状の指を直接駆動することは困難であるので、ロープと蛇管を使って間接的に動かす方法をとる。しかし蛇管の長さは摩擦力を増加させ¹⁰⁾¹¹⁾、繊細な動作を阻害することになるので極力短くする必要がある。従って往復動アクチュエータと下腕部に密封された液圧シリンダを配する方式とした。このことによって、駆動アクチュエータは完全にアームの外置となった。

5.2 マスタマニピュレータ

マスタマニピュレータの実装要点は操作性である。即ち、負荷時の低摩擦、低慣性、アーム・ハンドと操作者の干渉等である。本目的のために近年は DC モ

ータによるダイレクトドライブを採用する例が増えているが、この方式は低摩擦には有効であるが低慣性とはいえない面がある。マスタマニピュレータは操作器としてみれば力発生器であり、かつ、応答性も人間の感性の範囲であることを考え、空気圧式を検討した。十分な解析・実験の結果、低摩擦のシリンダと比例弁を組み合わせることによって gf 単位の制御が可能なることを見出し、極めて軽量なアーム・ハンドに仕上げる事が出来た。

図 8 スレーブハンド・アームの概念

図 9 マスタハンド・アームの概念

図 10 ハンド・アームの概観

6. 感覚を利用した多本指の制御

6.1 多自由度関節と制御

本ハンドは指 14 自由度, 腕 7 自由度, またアクチュエータは 35 個と極めて多自由度の制御システムである。従って, その制御にあたっては階層化と構造化が重要であり, 超多自由度のロボット制御系の設計をするうえで参考になる点も多い。

即ち, 最も下位レベルとしてサーボ系, 次に運動制御系(腕・指・左・右系), 作業計画系, 作業地図生成系等(図 11), として計画するが, 本誌ではハンドに係るサーボ系, 運動制御系に含まれる内容について表 1 に示す。

6.2 感覚の利用と多感覚バイラテラル制御

上述したハードウェアを利用して, 本ハンドで実現された多感覚バイラテラル制御(図 12)について述べる。多感覚バイラテラル制御は力と位置のみに着目するバイラテラル制御に触覚を付加することから始まる。即ち, より繊細な作業を行うとき必要とされる手先の微妙な触覚を利用することによって, 作業性を飛躍的に高めようとする試みで計画された。前述の如く, 本ハンドは, 指

表 1 サーボ・運動制御の構成

		ハ ン ド		ア ー ム	
		有無		有無	
サ ー ボ	1. 通常サーボ	○	ハード	○	同左
	2. 摩擦補償	○	蛇管の摩擦	—	直動式
	3. アクチュエータ協調	○	蛇管たるみ補償	—	同上
	4. 帰還型バイラテラル	○	電気/空気(力・圧覚)	○	同左(力覚)
運 動 制 御	5. 異構造バイラテラル	○	本質的に必要	○	必要に応じ使用する
	6. コンプライアンス	○	通常は自律のみ	○	同左
	7. 自重補償	○	マスタは不可欠	○	同左
	8. 自律遠隔性融合	△	アームの支援	○	電総研方式を充実

部に触・力覚センサ, 腕部にトルクセンサを有し, 階層的力の検知が可能である。検知された信号はマスタ側の圧覚・力覚発生器に伝えられるが, 人間の感覚は必ずしも直線的でなく強調, 平均化, 接触点の対応付け等の処理を行う必要がある。例えば, 人間の皮膚は同じ圧力で押え続けると感覚が薄れたり, 強い力のもとではより弱い力が感じられないことが多い。従って, 本ハンドでは接触力の変化に着目し, その変化量に応じた圧覚を発生させることにより, 操作者の感受性を高める方法をとっている。

また, 指の制御においては形を自在に作ることが重要となるが, 本質的に異構造である指制御では指位置のみに着目するだけでは目的を達することが出来ないで, オペレータ指先の方角に着目したベクトル表現を導入することによって操作性を大きく改善した。

このように, 多感覚バイラテラル制御では人間の有する能力をより多く発揮させるための思想が重要であり,

今後とも研究の余地は多い。

6.3 作業実験

図 13, 図 14 には作業実験の例を示すが, 基本的作業モジュールとして, 安定把持と腕作業(スパナ把握, ハンドル回し, インパクトレンチ等の工具利用, ワイヤロープ等変形物保持, 電線の保持, 小ビス等の小物品の保持, パッキン等の柔軟物の利用等々)と操り(テニスボールの回転, ドライバによるネジ締め, ナットの挿入回転, 揚重機吊フックの扱い等々)が可能となった。これらを組み合わせる

図 11 高機能ハンド・アームの制御階層

図 12 多感覚バイラテラル制御

(a) ナット掛け

(b) ドライバによるネジ締め

(c) ピン挿入

(d) スパナによるナットの締緩

図 13 作業実験 (基本作業の例)

表 2 作業に対する感覚の寄与度 (抜すい)

Control Task Name		Result						
		Position	Position+Force		Position+Tactile		Position+Force+Tactile	
		Ability of Work	Ability of Work	Feeling	Ability of Work	Feeling	Ability of Work	Feeling
Insertion of a Pin (Clearance 0.1mm)	φ5	×	△	△	△	△	△	△
	φ10	×	△	○	△	△	△	○
	φ16	×	△	○	△	△	△	○
	φ30	×	△	△	△	△	△	○
Insertion of a Pin (Tolerance f7H7)	φ5	×	△	△	×	×	△	△
	φ10	×	△	○	×	×	△	○
	φ16	×	△	○	×	×	△	○
	φ30	×	△	○	△	○	◎	◎
Holding of a Hexagon Wrench	M3	△	△	○	△	×	△	○
	M5	△	△	○	△	△	△	○
	M8	△	△	○	△	△	△	○
	M12	△	△	○	△	△	△	○

ことによって弁分解組立のほとんどの作業が遠隔で実行できることが確認され、多本指ハンドの有用性を立証することができた^{12),13)}。

表2には代表的作業に於ける感覚の寄与度を整理して示すが、嵌め合い挿入時に多感覚が有効なことが言える。また、実験は人間が直接目視する方式で実施されているが、多くの場合に、作業対象の不完全目視状態（対象物の一部がマニピュレータおよび対象物等によって隠される状態）が生ずるが、この場合も感覚の利用によって十分作業が実行出来ることが判り、多感覚バイラテラル制御が作業実行のうえで不可欠なことも調べる事が出来た。

7. おわりに

ハンドのあり方を作業性の観点から概説したが、極限作業ロボットのハンドはハンドの研究を基本的動作の研究レベルから実作業を遠望する領域に押し進めることへの大きな動機付となった。即ち、ハンドの研究は、真の実用化へ向けて離陸したとも考えられ、それをもとに取組むべき多くの課題も明確になってきたと言える。その意味で本ハンドの果たした役割は非常に大なるものがある。即ち多本指ハンドで汎用的作業が実現することの事実は、今後の研究の参考となるものであるし、また、現能力の向上へ向けての研究が実行されることを期待したい。もちろん、手の自律制御の実現等は早々に行えるものではないが、多くの人が研究に従事することは、それだけ目標点への接近が早くなることでもあるので、当事者の一人として、今後とも精力的に研究を行うとともに、本稿が少しでも役に立つことを念ずるものである。

図 14 作業実験 (一連作業)

参考文献

- 1) 大道他：“高機能移動式軽作業ロボットの開発”，火力原子力発電，第 37 巻，360 号，1986.
- 2) 広瀬他：“任意形状物体を柔軟に把握する機構の開発”，ロボット，15 号，p.76-80.，日本産業用ロボット工業会，1977.
- 3) 岡田：“多関節を備えた柔軟なハンドリングシステムに関する研究”，電総研 研究報告，第 828 号，1982.
- 4) J. K. Salisbury, et al.: “Robot Hand and the Mechanics of Manipulation”, the MIT Press.
- 5) S. C. Jacobson, et al.: “Design of the Utah/MIT dextrous hand”, IEEE, 1986.
- 6) T. Oomichi, et al.: “Analysis and evaluation for fingered manipulators Supported by master slave control”, 15th, ISIR, 1985.
- 7) 大道他：“多本指機構の機能向上に関する研究”，ロボテクス・メカトロニクス講演会，'89 講演概要集，p. 178-179, 1989.
- 8) 大道他：“圧覚発生機構の基礎的検討”，第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1986.
- 9) T. Oomichi, et al.: Mechanics and Multiple Sensory Bilateral Control of a Fingered Manipulator, #4 ISRR, the MIT Press, 1987.
- 10) 前川他：“ハンド制御のための摩擦に関する基礎検討”，第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1985.
- 11) 前川他：“ハンドのロープを用いた力制御”，第 4 回日本ロボット学会学術講演会予稿集，1986.
- 12) A. Maekawa, et al.: “Multiple Sensory Bilateral Control of a Manipulator with Dextrous Hand”, IARP, 1988.
- 13) 前川他：“極限作業ロボット研究開発成果発表会予稿集”，極限作業ロボット技術研究組合編，1989.

大道武生 (Takeo OOMICHI)

昭和 43 年 3 月九州大学動力機械工学科修士課程を卒業，同年三菱重工業株式会社へ入社。原子力ロボットの黎明期から同ロボットの開発に着手し，格納容器内点検作業ロボット・極限作業ロボットのマニピュレーション開発等，高度汎用ロボットの研究開発に従事する。日本機械学会，日本原子力学会会員
(日本ロボット学会会員)

沖野晃久 (Akihisa OKINO)

昭和 57 年 3 月早稲田大学機械工学科修士課程を卒業，同年三菱重工業株式会社へ入社。格納容器内点検作業ロボット・極限作業ロボットのマニピュレーション開発等，高度汎用ロボットの研究開発に従事する。
(日本ロボット学会会員)