解 説

人工現実感とロボット

——知能化作業支援システムの提案——

橋 本 秀 紀*

1. は じ め に

「人工現実感とロボット」という題目で著者の行っている研究を中心に私見を述べさせていただく。というのも、ここ1~2年の間に大変多くの人工現実感の解説が出されており、ロボットに関するものでも相当書かれている^{1~4)}。賢明な読者は殆どのご存じであろう。キーワードを示すと、テレオペレーション、トレイグジスタンス²⁾、HMD、データグローブ、フォースディスプレイ³⁾といったものが出てくる。人工現実感をツールとしてヒューマン・マシン・インタフェースの観点から論じた解説もある⁵⁾。研究も活発になり、元々人工現実感を意識しなかったロボット研究の幾つかが、このキーワードのもとに展開されつつある。このような流れの中で、本稿はヒューマン・マシン・インタフェースとして人工現実感を捉えたときのロボットとの関わりを述べるものである。一般的な話というよりは、著者の研究においてツールとして使っている話をする。

著者の行っている研究は「知能化作業支援システム(Intelligent Assisting System)」と称するものであり、「機械システム(ロボット)は人間とインタラクションすることにより人間の知的能力(思考、推論、判断、認識等)を十分に利用するために存在すべきものである」ということを前提に機械の知能化を考えている。人間と機械とが同一の目的(作業の遂行)を達成するためには協調しなければならず、ヒューマン・マシン・インタフェースが重要な位置を占め、人工現実感の技術が大きな役割を果たす。

本稿では、まず最初に、人工現実感に関わるロボット研究を概観する。続いて、ロボットのあるべき姿を考え、著者の研究している「知能化作業支援システム」の基本的な考えを示す。この中で研究トピックスとして多くの研究者に意識されている「スキル」の獲得と移植に関する

知見を述べる。最後に人工現実感のようなコンピュータサイエンスの成果がロボットにどのように関わってくるかを考える。

2. 人工現実感に関連するロボット研究

これはテレオペレーションに始まるものと思われる。

図1にテレオペレーションに関連するロボット研究の流れを示す。原子力発電所におけるマニピュレータ作業に見られるように、異なった空間における作業の計画や実行を遂行する際のTVカメラによるモニタリングは広い意味での人工現実感であろう。技術が進んで臨場感を飛躍的に高めたのが、1980年代の大型プロジェクト「極限作業ロボット」に見られたトレイグジスタンスである²⁾。これは、計算機の演算能力が飛躍的に向上してグラフィックスパワーが上がり、ビジュアライゼーション(視覚化)が実現できるようになったことを背景としている。しかし、極く最近まで、トレイグジスタンスを人工現実感として意識していた研究者は大変少なかったと思われる。というのは、この技術の目指したものがオペレータが原子炉といった直接入っていけない空間を忠実

1911	SCIENTIFIC MANAGEMENT (Taylor) 人間のセンサ/モータ的なパフォーマンス
1940~ 1960	HUMAN FACTORS - ERGONOMICS がヨーロッパで研究され、 スイッチやダイヤル等に簡単なヒューマン・インタフェース が使われた。
1950~	信号処理及び簡単なディスプレイにコンピュータが用いられ 始める (例: 飛行機のオートパイロット、エレベーター)
1960~	マン・マシン・システムの提案 (Sheridan, Ferrell)
1966	時間遅れがある場合のテレオペレーションは不安定に なり易いとの報告 (Ferrell)
1966~71	ハーディマンの開発 (米国のGE社)
1975~	SUPERVISORY CONTROLが一般的な研究課題として認識される
1983~	大型プロジェクト「極限作業ロボット」が始まる
1984	予測ディスプレイによる時間遅れに対するテレオペレーション の提案 (Noyes, Sheridan, Bejczy)
1986~	人工現実感でのテレオペレーション・トレイグジスタンス
1988	VPL社のデータグローブ及びデータスーツ

図1 テレオペレーションに関連するロボット研究

原稿受付 1992年8月26日

Artificial Reality and Robotics—Proposal of Intelligent
Assisting System

* 東京大学生産技術研究所

図 2 スーパーバイザリーコントロールの3つのループ

に再現するものであったから、仮想的な世界 (Virtual World) までを対象とする人工現実感として考えられなかったのである。現在では、マイクロな世界との間でのトレイグジスタンスが考えられてきており、人間の五官で直接計測 (見る, 触るといったこと) することのできない世界を対象とするので、本当の意味での人工現実感の技術として位置づけることができる。

テレオペレーションにも技術の変遷があり、初期の考え方は単なるリモートコントロールであり、次第に通信による遅れをどう補償するかということからスーパーバイザリーコントロール (Supervisory control) の概念が導入されてきた⁶⁾。これは図2に示すように3つのループからなり、Remote loop はマニピュレータに自律性を持たせ簡単な作業を実行させる。Supervisory loop ではオペレータが間欠的に目標を与え、必要があればロボットに補正を加える。Local loop ではロボットのモデルが表現されており、動作を予測することにより通信による遅れを補償することができる。これは予測ディスプレイ⁷⁾として研究が進められた⁷⁾。トレイグジスタンスあるいは人工現実感として意識されるのは Supervisory and local loop の部分である。また、現在では各ループの技術が進み、環境を幾何モデルとして与えるなど相当な高度化が進んでいる⁸⁾。

図 3 人間増幅器

もう1つの流れが、パワード・スーツと呼ばれるものである。米国国防省が1960年代に軍用として開発を進めたものであり、SFによく見られるように人間がロボットの中に服を着るように入り操作するものである (図3)。映画「エイリアン2」では主人公(シガニー・ウィーバー)がフォークリフトに似た2足歩行ができて重いものを運ぶことが可能なロボットの中に入り作業をしていた。これが典型的なパワード・スーツである。このロボット研究は「人間増幅器 (man-amplifier)」として知られている研究が源泉である。要するにマスター・スレーブのコンセプトに基づいてオペレータの力を増幅するマニピュレータの開発であった⁹⁾。当時は、信号 (位置・力等) のみによる制御であり、制御ループの中に人間が入らず、期待したほどの成果を得ることができなかった。現在では、人間が制御ループに入り、特に外界とのインタラクションに重要な力感覚が意識された人工現実感を用いたヒューマン・マシン・インタフェースが研究されている。また、人間の動作を3[m]×5[m]の範囲で68個のジョイントで表現できるデータ・スーツが開発されている¹⁰⁾。

3. 知能化作業支援システム^{11~14)}

ロボット研究の主流は人間の知的な能力を積極的に活用した知能ロボットの研究開発へと進んできた。AI等に代表される知識情報処理がロボットの複雑なタスク実現のために研究され応用されたが、やがてその限界が見えてきた。大規模なシステムの計画や運行といった多大なデータ処理及び静的な組み合わせを対象とするには有効であるが、ロボットのように外界と情報のみならず動的な力のやりとりをも有する系では、対象として複雑すぎて現段階でのAI技術では難しく近い将来にブレークスルーを引き起こすかどうか疑問といえよう。

知能化作業支援システムにおいては、機械システムは人間の一部の機能の増幅、延長でしかない位置づけることにより、いわゆる「知能化」の呪縛から解放される。自動車は人間の「歩く」(移動)という機能の延長線上(歩行ではなく車輪による移動)にある。コンピュータ

図4 知能化作業支援システム概念

も「記憶する」、「計算する」といった人間の一部の能力を量的に大きく増幅したものと見える。知能化作業支援システムは、人間の行う作業の支援に当たるものであり、外界との情報及び力のやりとりを主に担当する。したがって、いわゆる知能ロボットのように人間に取って代わろうとするものではなく、人間の機能の一部を代価するものであり、前章でのべた「人間増幅器」の延長線上にあるといえる。

人間の労働の本質を考えたとき、その労働にどれだけの知的なものが感じられるかがインセンシビティの大小につながると考えられる。知的なものは人間にとって楽しいのである。即ち、労働といった作業の知的な部分はなるべく人間が行い、それ以外の物理的な部分が多くを占めるところは機械システムが支援する。このように、人間がイニシアチブを取りながら知的な部分を受け持ち、機械システムが支援することになる。これは人間から離れていく高度技術の塊である機械システムを道具として位置づけ、しかも使いこなす方向である。

以上のことがらを「知能化作業支援システム」として抽象的に表現したのが図4である。作業を知的な部分が主であるAと物理的な作業を含むBに分けIASを用いることにより全体の能率を上げる。Aに於ては人間の比率が高くなりBでは低くなる。いっていることはシンプルであるが、意識して議論するかどうかは今後のロボット研究に大きく影響すると思われる。

図5 支援の階層化

4. 知能化作業支援システムにおける高度運動機能の実現

人間を支援することが「知能化作業支援システム」の目的であり、利用しやすいヒューマン・マシン・インタフェースで情報伝達及び作業に関して人間をサポートする。図5に示すように支援は階層化されており、知識(シンボル)、ルール、スキルに分けて考える¹⁵⁾。上位レベルで、人間が作業及び処理の目的をシンボルで与え、システムからアドバイスを受ける。中間レベルでパターンとルールで処理を行う。最下位レベルは作業スキルレベルであり、具体的な高度運動機能を実現する。

スキルレベルが知能化作業支援システムを支える技術として大変重要であり、また人間の持つ高度運動機能の実現が「スキル」の獲得及び移植としてロボット研究者に意識されているものである。人間の作業の多くの部分は手によるものである。人間の腕と手は27自由度有ると言われており、機械システムに人間と同様な器用な作業を行なわせるのはハードウェア、及びソフトウェアとも現段階では困難である。しかし、人間の作業を支援することを目的とすると、ハードウェアとしては人間と同じである必要はなく作業目的に応じて必要最小限な構成で十分である。例えば、建設現場における重量物の運搬を考えるならば、ロボットハンドの自由度としては12自由度(各指4自由度の3指構成)を考えればよい。問題は「物を持つ」という動作をどのように表現して、どのように実現させるかである。人間はまず目で見て、どこを持つかを計画して、手を近付け接触させて安定に且つ滑らないように力を加減して持つ。また、このとき物体の形、大きさ、硬さ、表面摩擦定数等がかなり変化しても、目的とする動作をロボットに行うことが簡単に行える。しかし、これを視覚系まで含めてアルゴリズムとして記述するのは困難であり柔軟性も期待できないであ

図 6 知能化された機械システム

ろう。

「知能化作業支援システム」では、認識、判断、計画といった部分は人間が主に行い、スキルレベルにおいて、ロボットハンドは対象物に近づくと安定に把持するように動作する。機械システムの方が知的能力を引き出すために部分的に知能化される(図6)。例えば、人間の動作を予感(予測)することにより動作の目的を認識し、ある程度自動的に行わせることが考えられる。機械システムとオペレータの能力を融合させ、物理的作業を機械に行わせ、知的な部分を人間の判断に委ねる形となるであろう。即ち、人間が制御ループに入り込み、全体の制御システムや作業プロセスの一部となる。

4.1 スキル解析システム

人間の手の動作を解析するために3指 10 自由度を有するグローブを開発した。これはセンサグローブと呼ぶもので、10 自由度のうち手首の回転を除く9 自由度に対してワイヤー伝達モータ駆動により力をフィードバックすることができる(図7)。このサーボ系の周波数帯域は6[Hz]である。各自由度には指の関節角度を計測するためのポテンショメータ及び力を測るための歪みゲージを用いた線形性の高いトルクセンサが取り付けられて

図 7 センサグローブの外形

いる。このシステムは図8に示す人工現実感シミュレータに組み込まれており、計算機の中にあるロボットハンド(23 自由度を有する)と結ばれて関節角度、トルクのデータをやり取りする。通信速度はセンサグローブとワークステーション間で38400[baud]であり毎秒30枚の画面の更新ができる。また、関節角度情報及びトルク情報はそれぞれ8[bit], 12[bit] データで120[sample/sec]でコンピュータに取り込まれる。

オペレータはこのセンサグローブを介して人工現実感シミュレータ内の物体を掴むことによって、反力を感じることができる。これはシミュレータによって物体に働く外力と内力を計算して、反力としてセンサグローブへ返す。オペレータはセンサグローブからの感覚を頼りに作業を行う。このセンサグローブと人工現実感シミュレ

図 8 高度運動機能獲得のための実験システム

図 9 キャリブレーション結果

(a) 4本指で握んだ鉛筆

(b) 接触力の軌跡

図 10 スキルの表現例

ータは視覚と力覚の融合に適しており、スキルの解析には強力なツールとなる。現在は、物体把持時の触覚を実現し自由度を更に増やし両手へ拡張すること、及び3次元マウスを併用し高さ方向の自由度を与えることを進めている。

4.2 キャリブレーション問題

スキルの解析を行うためにセンサグループを用いて人工現実感環境下で各種データを収集するが、オペレータの手の大きさの違い等によりキャリブレーションが必要となる。また、センサグループの自由度の合計が10であるのに対して、人工現実感シミュレータ内のロボットハンドのモデルは23自由度ある。従って、シミュレータ内で自然な動きを実現するためにセンサグループからのデータを補完してロボットハンドへの入力情報を作る必要がある。また、力のフィードバックでは逆向きの補完が必要となる。著者はこのキャリブレーション及び補完にニューラルネットワークを用いて、シミュレータ内のロボットハンドの動作を自然なものとしている(図9)。

4.3 スキルの表現

本節では著者が提案しているスキルの表現を示す。物体に対する一般化外力と、その力を実現する一般化接触力とはグリップ変換行列で結ばれる。通常は静的な力の

釣り合いとして取り扱われているが、ここでは作業に応じて動的に変化するものとしてグリップ変換行列の動的な振る舞いをスキルの抽出モデルとして考える。この動的グリップ変換行列を予想される作業毎に求めスキルデータベースとして蓄える。数学的な導出はここでは省略するが、鉛筆を4本の指で安定に握り、指を滑らしながら鉛筆の位置を変える場合の各指の接触力の軌跡を示す(図10)。

4.4 スキルの利用

スキルデータベースに格納されているスキルを引き出し、ロボットハンドの制御を行う。この時、人間の作業動作と同じ意味を持つ動作を異構造ロボットハンドに実行させるために構造変換行列を用いる。また、引き出したスキルと実行すべき作業とのずれはローカルに取り除くことが必要となる。コンプライアンスコントロールやバイラテラル型の制御系の部分的利用を考えている。

5. おわりに (人工現実感技術の利用)

表題にある「人工現実感とロボット」に立ち戻り、人工現実感の積極的な利用を考える。人工現実感を実際の世界を模擬しているかを問わず、コンピュータによって作り出された世界(現実感)である。ゲームのように外界に働き掛けるというよりは人間をコンピュータの世界に引き込む為に人間の感覚器に働き掛けるための技術として捉えられていると思われる。もちろん、力覚、触覚を中心としたフォース・ディスプレイの研究が行われており外界とのインタラクションも重視されてきているが、積極的に外界に働き掛けるという視点は少ないようである。一方、ロボットで必要なのはこの外界への働き掛けである。この観点での研究はまだ少なく、離れた場所の知覚をオペレータに与えるテレグジスタンスとして研究が進められているのが現状である。

人工現実感技術はロボット研究に何らかのインパクトを与えているのだろうか? 著者の行っている「知能化作業支援システム」はその主眼が人工現実感にあるのではなく、人間の知的能力を活用するための機械システムの在り方を問題にしており、人工現実感はそのを支えるひとつの技術であると位置付けている。人工現実感というよりビジュアライゼーション(視覚化)としての有用性が大であり、力感覚がそれに相乗されてシミュレータとして優れたものを得ている。メインの技術というよりはヒューマン・マシン・インターフェースの優れたツールとして位置付けている。しかし、フライトシミュレータ等に応用されている人工現実感技術を見るとき、その技術の底知れない可能性から近いうちにロボット技術に大きなインパクトを与えるに違いないと確信できる。

参 考 文 献

- 1) 服部, “人工現実感の世界”, 工業調査会 1991 年.
- 2) 館, “テレグジスタンス”, 計測と制御, Vol.30, No.6, pp. 465-471, 1991.
- 3) 岩田, “フォースディスプレイ”, 計測と制御, Vol.30, No.6, pp. 472-477, 1991.
- 4) 広瀬, “知的マン・ロボットインタフェース”, Computrol, No.34, pp. 104-110, 1991.
- 5) 岩田, “インタフェース指向の認知工学”, 1992年, 計測と制御 Vol.31, No.1, pp. 250-253.
- 6) W. R. Ferrel, T. B. Sheridan, “Supervisory control of remote manipulation”, IEEE Spectrum, pp. 81-88, October, 1967.
- 7) A. K. Bejczy, W. S. Kim, S. C. Venema, “The Phantom Robot: Predictive Displays for Teleoperation with Time Delay”, Proceedings ACC, pp. 546-551, 1990.
- 8) T. Sato, “Teleoperation Technology in MITI Advanced Robot Technology Project” Proceedings of the 1992 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Nice, France, pp. A10-14.
- 9) H. Kazerooni, “Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals” IEEE Transactions on SMC, Vol.20, No.2, March/April, pp. 450-463, 1990.
- 10) E. R. Tello, “Between Man and Machine”, Byte, pp. 288-293, September, 1988.
- 11) 橋本秀紀「ヒューマン・インターフェース制御システムにおける人間の関わり」 pp. 44-51, 別冊生産研究 (東京大学生産技術研究所) 1992年 6 月.
- 12) 橋本, ブス, “知能化作業支援システムに関する研究”, 日本ロボット学会, 第2回ロボットシンポジウム予稿集, 1992, pp. 187-192.
- 13) 橋本, ブス, 向井, 原島, “知能化作業支援システムのためのセンサハンドの開発”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演集, 1992, pp. 445-450.
- 14) 橋本, ブス, “知能化作業支援システム”, 生産研究 (東京大学生産技術研究所), Vol.44, No.12, 1992.
- 15) Rasmussen, J., “Skills, Rules, and Knowledge; Signals, Signs, and Symbols, and Other Distinctions in Human Performance Models”, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Vol. SMC-13, No.3, pp. 257-266, 1983.

橋本秀紀

(Hideki HASHIMOTO)

1981年3月東京大学工学部電気工学科卒業, 1987年3月同大学院工学系研究科電気工学専門課程博士終了, 工学博士, 同年4月東京大学講師, 生産技術研究所勤務, 1990年7月助教授現在に至る. 1989年~90年 MIT 客員研究員 (LIDS, LEES). 知的制御システム及び制御工学, ロボティクスの研究に従事.

(日本ロボット学会正会員)