

人工現実感と運動/行動の制御

たち
館

すむ
暲*

1. はじめに

人間は、視覚、聴覚、触覚などの感覚器からの情報に基づいて、自らの行動を制御する。目と手の協調作業や、障害物のある空間内の移動動作などの感覚運動制御は、この人間の認知的制御の好例である。このような感覚運動特性の解明は、生体の神秘を解き明かすという科学的興味に加えて、次世代のロボットなど、将来の工学技術分野への幅ひろい応用の可能性を秘めている。

工学や技術に利用可能な解明を考えたとき、従来の生理学的方法や解剖学的方法あるいは、心理学的な方法だけでは不十分である。現在、利用されている工学的手法も認知制御特性の解明には必ずしも十分とはいえず、新しい研究の方法論が求められている。というのは、認知的制御においては、人間の行動が伴うわけで、人間が自然な状態で、しかも拘束されずに行動で

きる状況下で、なおかつ再現可能な条件下で人間の行動を観察し解明研究を行わなければならないからである。

著者の研究室では、人工現実感ないしはテレグジスタンスの方法の人間の感覚認知と運動行動の解明への適用を提案し¹⁾、研究を進めている。

すなわち、人間が作業を行う際に、いかなる感覚情報を取り込み、それに基づいて作業を行うかを定量的に解明し作業に必要な十分な感覚情報を確定するとともに、情報制御モデルを構築し、感覚運動制御のメカニズムを解明する研究課題を探索しその中で人工現実感の方法論の適用を試みている。

そのために、人工的に構成されながらきわめて臨場感の高い3次元空間状態を被験者に特殊な提示装置により提示し、被験者に提示する感覚情報の量と質をコントロールしつつ、その環境下での行動を正確かつ定量的にとらえるというアプローチを用いている。

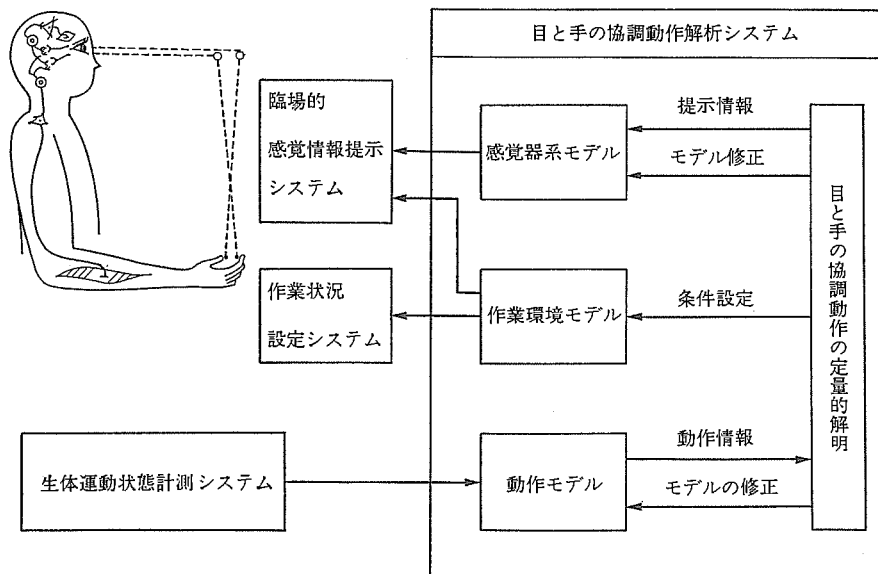


図1 人工現実感を用いる目と手の協調制御機構の解明法¹⁾

* 東京大学先端科学技術研究センター 東京都目黒区駒場 4-6-1

キーワード: 人工現実感 (virtual reality), テレグジスタンス (tele-existence), 知覚 (perception), 行動 (behavior), 仮想環境 (virtual environment).

図1に人工現実感を用いる目と手の協調運動解析システムの構成を示す¹⁾。

作業状態設定システムと臨場の感覚情報提示システムによりコンピュータグラフィックスを用いて構成されたきわめて現実に近い状況でありながら、何度でも再現可能でかつ微妙に空間の状態を制御可能な仮想環境を構成し、人間がその環境内で対象を認知しそれに対して行動する。そのときの人間の行動は、生体運動状態計測システムにより、すべて実時間に記録される。

一方、解析システム内には、感覚器モデル、人間の動作モデルが構成されており、同一の提示条件がモデルにも同時に加えられ、モデルの動作が調べられ、人間の動作と比較される。目と手の協調動作の定量的説明システムにおいて、人間とモデルの比較がなされ、人間の動作に近づくような修正がモデルに対してなされていく。

可能なかぎりさまざまなモデルを考え、考えられるすべてのモデルに対して提示条件をさまざまに変えても、常に人間と同じ動作が可能になるモデルを探し出す。もしそのようなモデルが同定できれば、そのモデルは人間の構成的解析モデルとなっており、工学的応用にも使いやすい。著者らが提案した方法論ではこのように人工現実感を臨場の感覚情報の提示手段として利用している。

2. 仮想空間の構成

人工現実感 (virtual reality) の生起に対しては、高度の臨場感、外界との実時間相互作用、自己投射性が必須の要件である。

この要件を備えてコンピュータの創製する仮想空間に存在する感覚を得るためには、まずそのような環境そのもののモデルが必要である。それに加えて、その環境のなかに入り込んだ自分自身の分身となる仮想人間モデルを構成する必要がある、このことが自己投射性を実現する基礎となる^{2),3)}。

仮想人間モデルは、目や耳など感覚器のモデルと腕や手などの効果器のモデルからなる。また、それが世界モデルに対して働きかけをなすと、それに基づいて世界モデルが変化する。その世界モデルには種々の物理法則が組み込まれている必要が生じる。図2にこのような系の構成例を示す⁴⁾。

物体が仮想世界のどこにどのような状態で存在するかが定まるとその物体を世界座標系で記述することができる。それは、物体の座標系を世界座標系における存在位置と存在姿勢の指定から同次変換 wT を用い

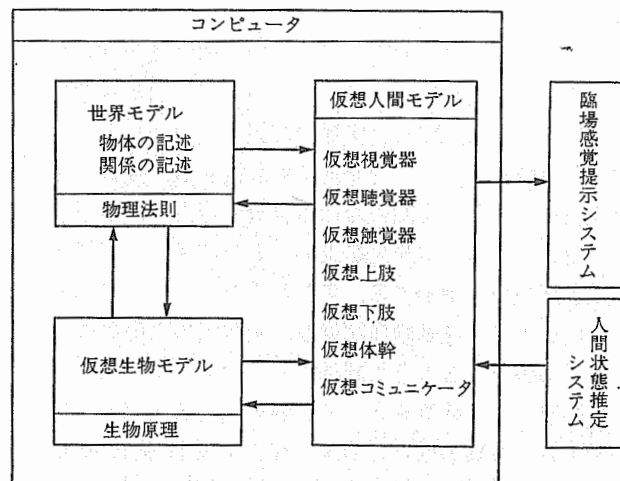


図2 人工現実感システムの構成⁵⁾

て容易に行える。

観測者たる仮想人間のモデルも仮想空間の1つの物体と考える。これも他の物体と同じようにその物体に固定された座標系で原寸大で記述してある。人間の運動状態の実時間計測結果から仮想人間の仮想世界での運動が決定され、仮想空間の世界座標系に占める位置と姿勢が明確になるので、仮想人間、したがって仮想の視覚器の位置と姿勢も世界座標のなかで記述されることになる。世界座標からみた仮想視覚器の位置と姿勢の同次変換行列を wT とする。

つぎに、対象物体の位置と姿勢とを観測者の座標系で指定する。対象物体を観測者から見た座標を oT と表わすと、これはさきほどの wT と oT を用いてつぎのようにして求められる。

$${}^oT = {}^wT^{-1} {}^wT$$

さてつぎはこのような状況下で仮想視覚器から観察するとどのような視覚情報が得られるかという問題となる。人間の目やロボットのテレビカメラの行っていることは物体の線形透視変換である。そこで、仮想視覚器がロボットのカメラの目が行ったのと同変換すなわち線形透視変換を行えば、ロボットによるレイグジスタンスの原理と同様に人間に自然で臨場感のある視覚情報が提示できることになる。

レイグジスタンスの両眼立体視の提示を行うことの最も重要な特徴は、この方法によれば対象物を、実際と同一の大きさで任意の距離の場所に任意の姿勢角をもって提示しうることである。

そのためには、左右両眼に提示する提示像の左右の対応点に距離に対応する両眼視差を与えると同時に、[みえの大きさ \propto 網膜上の像の大きさ \times 像までの距離]の関係が保たれるように視覚を調整する必要がある⁶⁾。そのような関係を保つよう仮想視覚器モデルを

構成する。

この間実時間かつ非拘束に人間の運動計測が行われている。位置姿勢計測システムを用いて、固定座標系から見た手先に付随した座標の位置 (x, y, z) と、その方向余弦 α, β, γ を非拘束に計測する。被験者の運動情報から仮想空間における自分の分身である仮想人間のとるべき各関節角を求め、それにより、仮想人間の各関節角を制御する。すなわちコンピュータ内にある仮想人間の運動動作状態を、被験者の実際の体と同一の関係となるように制御する。その様子は頭部搭載型両眼立体視装置を介して被験者である人間本人に提示され、被験者は自分の腕の存在する位置に仮想人間の腕を観察し、対象物をあたかも仮想人間の存在する位置で見ているかのような感覚を有して観察し、必要に応じてその情報に基づき臨場的に作業を遂行できる。

この間これら過程のすべてが、仮想人間の仮想感覚器（視覚、聴覚、触覚）を介して、被験者である人間にリアルタイムに臨場的に伝わっている。かくして被験者は仮想人間の中に入りこんだ感覚を有し、あるいは仮想空間内の仮想人間としての感覚を認知し、運動行動することができる。

3. 仮想空間の構成システムの概要

運動感覚と視覚が融合される条件を考慮しつつ、人工現実感実験システムを構成した。本システムは、人間運動計測装置、計測用計算機、仮想環境構成/提示画像生成用計算機、頭部搭載型ディスプレイで構成される（図3）。

人間（オペレータ）の運動は、トレイグジスタンス

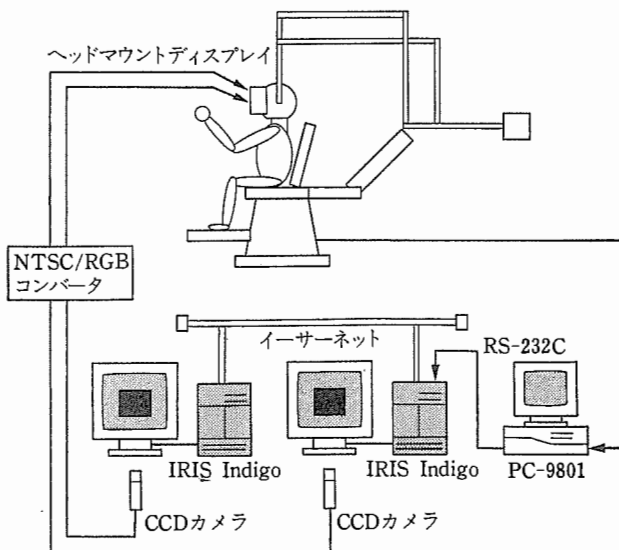


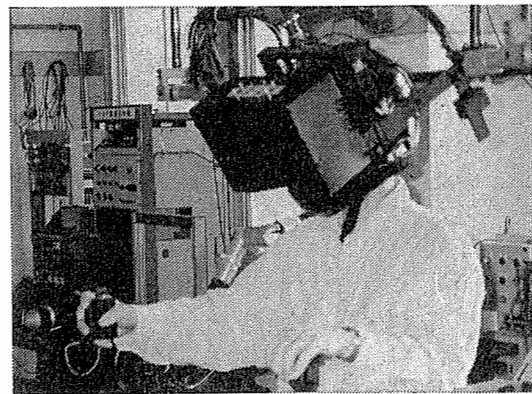
図3 実験用システムのブロック図⁹⁾

マスタシステムによって実時間で計測される。計測される自由度は、頭部並進3、頭部回転3、上腕7、ハンド開閉1、ジョイスティック3の計17自由度であり、頭部運動および上腕運動はリンク機構に取り付けられたロータリーエンコーダにより行う。また、ハンドおよびジョイスティックはポテンショメータにより計測している（図4(a)）。

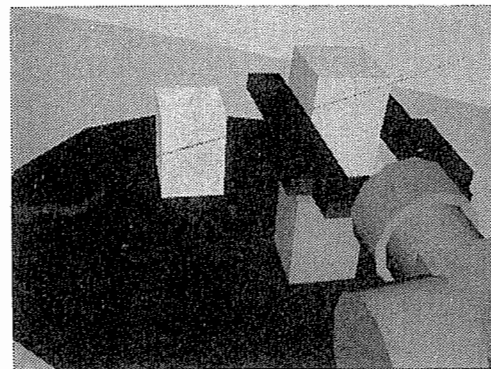
本システムではオペレータ頭部の体幹に対する相対位置を計測しており、オペレータの上体運動の感覚を仮想環境において再現することが可能である。また、エンコーダにより300 Hz以上の頻度で全自由度を計測しているため運動計測における時間遅れがほとんど存在せず、システムの応答特性を良好に保つことに寄与している。

計測用計算機(NEC PC-9801)は信号を計測して数値に変換し、データを仮想環境構成/提示画像生成用計算機に送る。仮想環境構成/提示画像生成用計算機(Silicon Graphics IRIS Indigo×2)は送られたデータを基に仮想環境を構成し、適切な視点からの提示画像をCRTのウィンドウ上に生成する。

生成された画像は、CCDカメラで撮影され、頭部運動計測機構に取り付けられた頭部搭載型ディスプレイ(HMD:画素数720×240、視野角は40°)により



(a) マスタシステム



(b) 仮想環境内作業

図4 仮想空間における目と手の共同作業

オペレータに提示される(図4(b)).

仮想環境は C++ 言語のクラスを用いて階層的に記述している⁹⁾. 仮想環境中の物体それぞれに物体フレームを定義し、「親(基準)」物体フレームからその物体フレームへの変換行列を付随させることにより、位置関係の記述および変更が容易に行える. 特定の CAD データなどに依存しないため、機能拡張や各種パラメータの変更などが容易である.

仮想環境の中に仮想的なオペレータ自身を描くことにより、オペレータは HMD を装着しているにもかかわらず自分自身を見ることができ、自分がロボットや仮想人間としてそこに存在するかのような感覚を有して仮想空間内を動き回ることが可能である.

本システムを使用して、トレイグジスタンス型マスタースレーブシステムを仮想環境中に構築した. 環境はトレイグジスタンス実験用マスタマニピュレータとスレーブロボットが設置されている実験室およびその建物の廊下で構成されている.

本プログラムでは、自分が仮想オペレータとして仮想環境内に存在するモードと、仮想ロボットの中に入りこんでトレイグジスタンスによる作業を行うモードが存在する.

仮想オペレータの運動と仮想スレーブロボットの動きはトレイグジスタンスによる作業を想定して連動しており、スレーブロボットがマスタマニピュレータと同じ動作を行う. 仮想オペレータモードのときは、手を伸ばすと仮想人間の腕や手が見え、下を向くと足や体が観察できるが、これは、自己投射性の実現にきわめて有効である.

この仮想人間は仮想マスタマニピュレータのアームやジョイスティックが実オペレータの操作に応じて動き、実際に操作を行っている感覚を与える.

仮想マスタシステムに座った仮想オペレータと仮想スレーブロボットはそれぞれ仮想環境内を実マスタシステムに配したジョイスティックの指示に従って動き回ることができる. また、トレイグジスタンスによる作業を想定して、スレーブロボットによる簡単な積み木作業を仮想環境内に再現し、積み木作業を行うことに成功した. また、実際の作業と仮想環境内での作業をそれぞれの作業時のハンド位置の軌跡を調べることで比較し、類似性を確認した^{7),9)}.

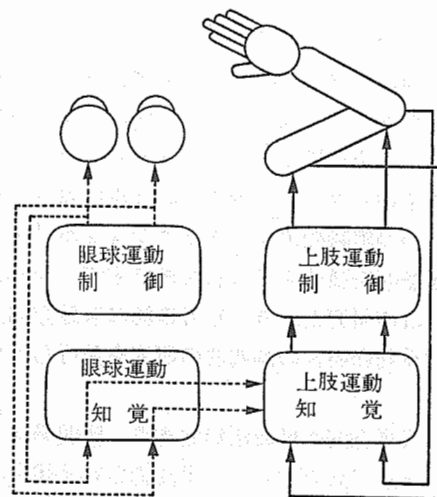
4. 視空間と固有受容空間の知覚

大規模な仮想環境内での人間知覚にもとづく運動行動制御特性を調べる第1段階のステップとして、きわめて単純化された空間における人間の視空間と固有受

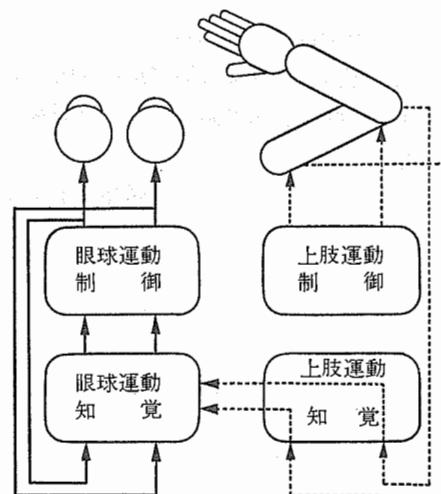
容空間の知覚特性を情報制御論的に解明している.

現在までに、人間の空間知覚におけるホロプタの発生を、輻輳による両眼立体視の情報を主観的直交座標系への変換を学習する信号処理系の特性としてとらえ、神経回路網モデルによる学習を適用することで処理系の情報構造について考察し人間と同様のホロプタとアレイを生じる空間知覚モデルを得ている. また腕の手先位置の感覚を固有受容感覚として得る人間の特性における等価ホロプタを測定し、視覚空間と固有受容空間の統合過程の解明を情報制御論的に進めている.

さて、人間は暗中の小光点の位置を視空間で知覚するとともに、その位置に上肢の先端を位置決めすることができる. 視覚ターゲットである小光点と自分の手先をみることが出来る条件ではその位置は一致するが、自分の手先が見えない条件下では、数 cm 程度の位置決め誤差が生じる. しかも小光点をターゲットと



(a) 視覚性手先位置決め実験



(b) 固有受容性注視点定位実験

図5 位置情報の統合過程¹¹⁾

する視覚性上肢先端位置決めでは手先の位置が小光点に対してアンダーシュートとし、一方、手先の位置をターゲットとし、小光点をその位置に位置決めする固有受容性注視点位置決め実験では逆に、手先に対して小光点がアンダーシュートする。

この現象はヘルムホルツのホロプタや平行アレイ、距離アレイなどと同様、人間の神経回路網の制約によりもたらされた物理空間と知覚空間の対応機構の特徴に起因するものであると考えられる。この現象をホロプタなどで用いた神経回路網の生理学的構造的制約を導入したモデルを知覚運動制御系に対して適用することにより再現し構造的に解明した。

またこのモデルの構造から、人間の知覚運動制御は、異種感覚からの情報を運動指令に直結した信号空間内で評価することにより情報処理を最小手順構成するように合理化かつ高速化された運動制御構造を有することがわかる (図5)^{10), 11)}。

5. おわりに

仮想環境における人間の知覚認知に基づく制御行動特性を調べることにより、人間の感性情報処理機構を解明することを目標として研究を進めている。そのために、対象物の大きさと距離が直接視の場合と同等に保たれ、かつ実時間のインタラクションが可能な3次元の仮想空間を構成する手法を確立するための仮想空間構成法の研究と、きわめて単純な仮想空間内での人間の知覚動作特性の解明法の研究を並行して行ってきた。

現在、仮想空間の構成法が定まり、解明研究もホロプタや小光点実験を行って、単純化された状況での現象を説明する人間の知覚運動制御モデルの提案が可能となってきた。

今後、両者を総合し、実空間のもつ特徴を十分に反映した仮想空間内での人間の知覚動作実験とその中で知覚行動する人間の認知制御モデルへと進展させてゆく所存である。

(1994年1月21日受付)

参考文献

- 1) 館：トレイグジスタンスの認知的制御，バイオメカニズム学会誌，14-1，3/9 (1990)
- 2) 館，廣瀬：バーチャル・テック・ラボ，工業調査会(1992)
- 3) 館：人工現実感，日刊工業新聞社 (1992)
- 4) 館，前田：人工現実感を有するトレイグジスタンスロボットシミュレータ，電子通信学会論文誌，J75-D-II-2，179/189 (1992)
- 5) 館，荒井：トレイグジスタンスにおける視覚情報提示系の設計と評価，日本ロボット学会誌，7-4，314/326 (1989)
- 6) 柳田，館：仮想人間へのトレイグジスタンスを指向する仮想環境の構築，日本ロボット学会誌 (投稿中)
- 7) 大山，常本，前田，館：仮想環境へのトレイグジスタンスのための一手法，日本ロボット学会誌 (投稿中)
- 8) 大山，常本，井上，館：仮想環境と実環境の重ね合わせの一手法，日本ロボット学会誌，12-2 (1994)
- 9) 前田，館：ホロプタを生じる空間知覚モデル，計測自動制御学会論文集，25-10，1111/1118 (1989)
- 10) 前田，館：視覚性到達運動における両眼視と上肢位置感覚の統合，計測自動制御学会論文集，29-2，201/210 (1993)
- 11) 前田，館：体性感覚性注視運動における両眼視と上肢位置感覚の統合，電子情報通信学会論文誌，D-II，J76-D-II-3，717/728 (1993)

[著者紹介]

たち
館



すずむ
障君 (正会員)

昭和21年1月1日生。昭和43年東京大学工学部計数工学科卒業。48年同大学院工学系研究科博士課程修了，工学博士。同年同大助手。50年通産省機械技術研究所研究員，主任研究官，遠隔制御課長，バイオロボティクス課長を歴任。平成元年東京大学助教授，4年同大先端科学技術研究センター教授に就任し，現在に至る。1979年から1980年米国マサチューセッツ工科大学(MIT)客員研究員。バースペクトルを用いる信号処理，盲導犬ロボット，トレイグジスタンスなどの研究を行う。IEEE/EMBS学会賞，通産産業大臣賞研究業務優秀者表彰などを受賞。現在，IMEKO TC17 (Robotics) 議長。SICEフェロー。