

立体視と人工現実感

舎官 日章

東京大学先端科学技術研究センター

Three Dimensional Vision in Virtual Reality
Susumu Tachi, Ph.D., Prof. Univ. of Tokyo

1. 人工現実感の3要素

人工現実感ないしはトレイグジスタンスの最も特徴的な点は、人間が仮想存在する仮想環境が(1)人間にとって自然な3次元空間を構成しており(臨場感)、(2)人間がそのなかで自由に行動でき、その仮想環境との相互作用が自然な形で実時間に生じ(実時間相互作用性)、かつ(3)自分の分身がその環境にいること(自己投射性)である。

(1)については、理想的には、視覚、聴覚、触覚、嗅覚、味覚のいわゆる五感と呼ばれる外界情報と、体性感覚などの内界情報がコヒーレンシーを保った形で人間に提供されなければならない。これは、ロボットを用いる人工現実感では、ロボットが人間の動きに従って外界から得た情報を人間の内部状態と矛盾しない形で忠実に再現することであり、コンピュータによる人工現実感でも同様に、人間の動きに基づいて、人間の内部状態に矛盾しないかたちで外界情報を創製することにあたる。(2)は、ロボットにおいては、ロボットが自由に環境内を行動できることであり、仮想環境では、その環境が人間の動きにより、自然な形で変化するように構成されていることを意味する。応用によっては、仮想環境はパッシブな相互作用性のみではなく、そこに知能性を有する仮想生物が棲息し、それとのインタラクションも可能でなくてはならない。

(3)は、自己の分身の存在であり、自分がその分身に投射された感覚を意味する。ロボットを用いる人工現実感では、人間型のロボットにより自分自身を遠隔環境に投影する。例えば、自分の手のあるところに、ロボットの手がみえ、自分がロボットになりきった、ないしは、ロボットのなかに入り込んだ感覚を生じさせる。一方、コンピュータによる人工現実感では、仮想環境内に仮想人間を構成し、それと人間との一体化を図って投射を行う。

臨場感と自己投射性の違いは、つぎのように説明できよう。自己投射性のあるシステムでは、自分の周りのすべてを実環境でなく仮想環境にかえられる。すなわち、まわりの環境のみでなく、自分自身までもが、仮想環境内の自分となる。従って、そこで見える自分の手は実際の自分の手があるべき位置に見えるロボッ

トの手で在り、仮想の手である。それらが、ロボットの眼をかりて観察される。

従来の3次元システムは、あるものは実時間相互作用性を有し、また臨場感もある程度在るシステムもあるが、自己投射性に欠けていた。これに、自己投射性を加えたシステムがトレイグジスタンスによる制御システムである。

本講演では、立体視を概観し自己投射性のある立体視システムとしてのトレイグジスタンスを紹介する。

2. 立体視

2.1 空間の視覚認識に關与する立体視の要因

人間が視覚3次元空間を認識する際には、空間からの様々な手がかりを利用している。その内の主要なもの、単眼の情報に基づくものと、両眼の情報に基づくものとに大別できる。また、観察者や対象物体の動きによる認識への手がかりも重要なファクタとなる。

観察者や対象が静止している場合、単眼視における立体視の要因としては、①水晶体の調節(accommodation)、②網膜像の大きさ(retinal size)、③線透視(linear perspective)、④模様勾配(texture gradient)、⑤空気透視(aerial perspective)、⑥重なり合い(overlapping)、⑦陰影(light and shade)などが挙げられる。

一方両眼による立体視の要因には⑧輻輳(convergence)と⑨両眼視差(binocular parallax, binocular disparity)がある。

さらに、運動によるものとして、⑩運動視差(movement parallax)が重要な役割をはたす。

その他にも、対象物体の形態や色彩、観察する視野の大きさが影響を及ぼすほか、特定距離傾向が奥行き知覚への手がかりが少ない状況では生じる。

①の調節は、眼のレンズである水晶体の厚さを毛様筋の収縮により変え、水晶体を含む眼球全体の焦点距離を調節する。しかし、この手がかりは単独では効果が少ないと考えられる。②の網膜像は、物体までの距離と物体の大きさにより定まる視角が一定のものがある。実際、大きさが既知の日常的な対象の場合には距離を知る手がかりとなる。一般には、後述の輻輳情報や視差情報による距離情報とあわせて利用される。③の線透視は、3次元空間を2次元平面に写像する透視変換によるもので、特に人工的な造

管物の多く存在する場面で有効な手がかりである。④は、草原や砂利の川原などのテクチャー模様の密度が距離とともに変化する勾配が形成されており、模様の密度の遠近の手がかりが得られる。⑤の空気透視は、遠くにある対象は、光が眼に届くまでに、空気中の微粒子によって散乱・吸収をうけて、色が青っぽく鮮鋭度が低く見えるという現象である。⑥では、近くのものから遠くのものまでを覆い隠すことにより、遠近が判断される。⑦は、照明方向により、物体の凹凸状態の見え方が変化することがある。特に人間は上方からの光を仮定している場合が多く、下からの光をうけている場合に判断を誤りやすい。

⑧の輻輳と⑨の両眼視差は、両眼立体視の基本ともいえる要因である。左右両眼が物体をその視線にとらえるように反対方向に動く運動を輻輳・解放運動と呼んでいる。輻輳が必要な理由は、網膜がカメラ受光部のように均一な性能の受光面ではなく、視覚にして約2度の中心窩と呼ばれる狭い領域だけが優れた視力や色別能力を持つ構造になっていることによる。両眼で注視した対象物体の像は、輻輳によって左右眼の中心窩上に結像されているが、その状態を基準として注視物体の前後にある物体の像ができる位置が、左右の網膜上で異なる。この左右対応の位置の差（ズレ量）を両眼視差といい、注視物体に対する前後方向の相対距離を示している。この検出能力は人では高く、通常、視角約10秒の微小なズレが検出できる。

⑩の運動視差は、観察者かあるいは対象物体の運動により時間とともに視点が移動することにより生じる視差を手がかりとするものである。

2. 2 3次元提示方式

理想的な臨場感提示方式では、2. 1で述べたすべての手がかりが、提示装置を介しても直接視の場合と同等に得られなければならない。現在、行われている3次元空間再生技術としては、単眼視の手がかりを主とした、2次元映像からなる奥行ディスプレイ、2次元映像2枚を提示するディスプレイ、それに運動視覚による多方向からの観察の効果も含めた3次元ディスプレイに大別できる。

大スクリーンを代表例とする奥行ディスプレイでは、透視、照明、対象物体の動きなどの手がかりを主として用いており、大画面による取囲み効果で臨場感を生じさせている。遠距離には効果的であるが、近距離では効果がない。

立体ディスプレイは、両眼視覚効果を用いたもので、メガネ方式と表示面方式とに分けられる。メガネ方式では、二つの画像を同時に提示し、左右像を色や偏光の違いから分離する同時式と、液晶シャッタなどを用いて、左右像を時間的に分離して提示する継時式とに分れる。偏光式を用いる同時式では、二つのディス

プレイないしはプロジェクターを必要とするが、目の負担は少ない。継時式は、ディスプレイないしはプロジェクターは一台ですむメリットがあるが、目の負担は残る。表示面方式は、両眼への映像を分離提示するのに、観察側ではなく表示面側に工夫をし分離観察する方式で、レンチキュラ板、ハエの眼レンズ板、パララックスバリヤ、コーナ・キューブ板などを利用して、両眼用の画像を作り出す。メガネを必要としない点にメリットがあるが、観察位置の制限がある点に問題点がある。

3次元ディスプレイは、運動視差、両眼視差、輻輳、ピント調節、網膜像の大きさなどの主要因をすべて考慮し、最も臨場感を伝えるものである。それらは、ホログラフィーやオムニマックス全天周スクリーンなどの、波面再生方式と、観察者の運動を実時間計測し、それにより提示像を変化させ運動視差を生じさせる能動立体ディスプレイ方式とに分けられる。

2. 3 能動立体ディスプレイ

輻輳、両眼視差、像の大きさ、水晶体調節などの主要な手がかりを直接視の場合と同等に保存した立体ディスプレイ提示装置において、さらに、観察者の動きによって対象画面が適切に変化して、正しい運動視差を伝えるように設計された立体ディスプレイを能動立体ディスプレイと呼ぶ。因みに、トレイグジスタレスで用いられるディスプレイは、これにあたる。

人が単色で空間を知覚する際のパラメータとして、(a)水晶体調節筋緊張弛緩、(b)網膜像の大きさ、(c)両眼の輻輳角の三つがある。図1の理想システムを介した場合、それを利用する人間の視覚における上記(a)～(c)のパラメータの値は、直接視の場合の(a)～(c)のパラメータの値とそれぞれ等しくなる。従って、トレイグジスタレスの理想システムでは、直接視と同一の視覚情報が得られていることになる。

理想システムの簡略化も試みられている。人の視覚の特性を調べると、(a)については、水晶体の調節を20 cmに固定しても、10～50cmの輻輳範囲に対して自然な両眼像の融合が生じ、1 mにすれば20 cmから無限遠までの輻輳範囲に対応できる。したがって、提示像の距離を常に1[m]に固定しても臨場感は失われない。提示距離を一定距離に固定すれば制御すべき変量は網膜像の大きさと両眼の輻輳角の二つになり装置の簡略化が可能となる。

次に、運動視差の効果を生じさせるために、オペレータの運動に伴いロボット側のセンサ部も人間の運動にあわせて制御しつつ、その時得られた映像情報をオペレータに上記の状態を保ちつつ提示する必要がある。

そのための提示機構としては、

- (1)パッシブリンク型
- (2)マスタースレーブ型

(3)インピーダンス制御型

(4)頭部搭載型

の4とおりが研究されている。いずれも理想的には空間移動3自由度と回転3自由度の合計6自由度を必要とする。

(1)のパッシブリンク型は、重力バランスをとったリンクに提示装置を取り付け、それを人の頭と固定する。これにより人の自由な運動に対して、いつも上記条件下で空間知覚が行える様にしている。装着感は最も良好であるが、粘性力や慣性力の動的バランスが補償されず残るのが問題である。

(2)のマスタースレーブ型では、人間の運動をゴニオメータ、磁気センサあるいはジャイロなどの装置で測定し、人の前に配した提示装置を人の運動にあわせて制御し上記条件を満足させる。人との接触条件を厳密に考慮しないとわずかの遅れや軌道のずれにより使いにくさが生じる。

(3)のインピーダンス制御型は、(1)のパッシブリンク型にアクチュエータを加え慣性力や粘性に対する補償を行ったもので使いやすい。システムが複雑になりコストがかさむのが欠点である。このシステムでは、オペレータはディスプレイの重力を負担せずすみ、また、慣性力も実際の1/3以下に抑えることができるため、装着感の優れた頭部操作が可能となる。

(4)の頭部搭載型では、ディスプレイの軽量化を計り提示装置全体をヘルメット等に取り付けオペレータが頭にかぶる。運動の計測は磁気センサ等で非拘束に行う。構成は簡単で、自由度は極めて高いが、よほど軽量化しないと重力、慣性力がすべて人間の首への負担となる。

3. テレイグジスタンス・ロボット・システム

図2に示すロボットが、大きさや自由度配置を人間に合わせて設計したテレイグジスタンス用スレーブロボットTERA (Tele-Existence Robot Anthropomorphic) である。頭部には立体視カメラとマイクロフォンを搭載し、人間の見たい方向、聞きたい方向へ実効上時間遅れなく向くことができる。このロボットは、平面内の2自由度の並進と1自由度の回転が可能である。

ロボットの得た視覚情報は、オペレータに送られ、オペレータは頭部に結合された提示装置を使って、ロボットが見たり聞いたりしたのと原理的に同一の歪のない空間を、天然色かつ3次元で体験できる。

オペレータが作業を行うと、人間と同一の自由度配置に設計された7自由度のスレーブ腕機構が、その動作を忠実に再現する。オペレータは、自分の腕の存在する場所にロボットの腕を見て、視聴覚情報と姿勢・運動感覚情報が整合した状態で作業を行える。

このシステムでは、実世界へのテレイグジスタンスに加えて、コンピュータが創出した虚世界へのテレイ

グジスタンス、さらには、現実世界と仮想世界の重ね合わせを可能とするため、コンピュータグラフィックスの立体的スーパーインポーズ機能を有している。

4. 仮想世界へのテレイグジスタンス

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。

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込まれている必要が生じる。

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一つの物体と考える。これも他の物体と同じ様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、従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。

次に、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 vT と表すと、これはさきほどの wT と vT を用いて次のようにして求められる。

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

さて次はこのような状況下で仮想視覚器から観察するとどの様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じ変換すなわち線形透視変換を行えば、ロボットによるテ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。

テ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得ることである。

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。

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於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各自由度(現在6+8+3自由度)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(図3)。

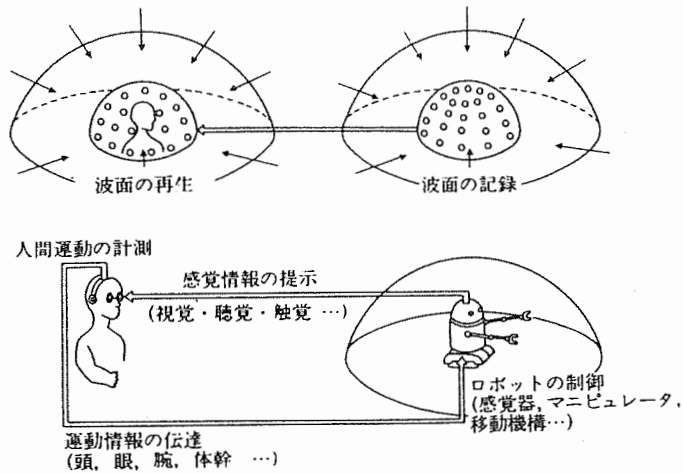


図1 テレイグジスタンスの原理

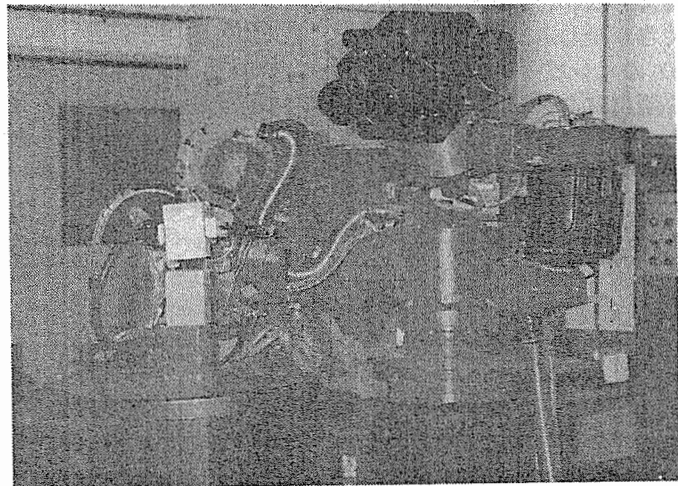


図2 テレイグジスタンス・ロボット・システム
(ロボットが仮想世界と現実世界を結ぶ)

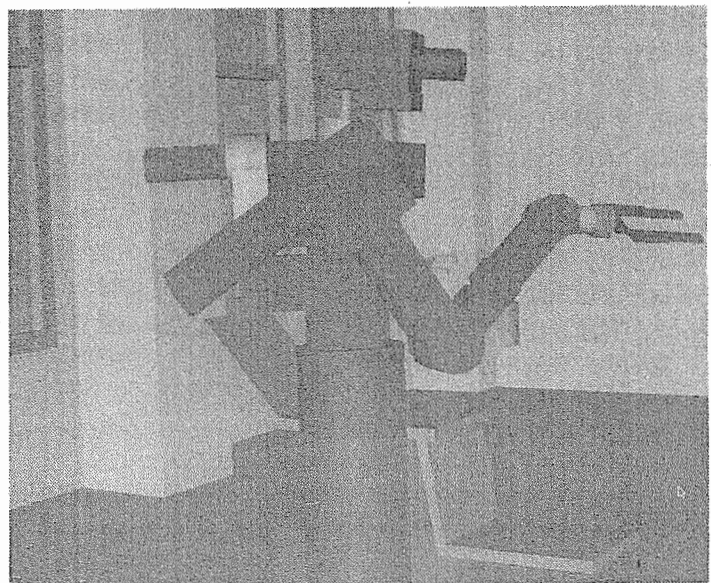


図3 仮想空間へのテレイグジスタンス

5. おわりに

本講演では、人工現実感ないしはテレイグジスタンスを制御、通信、創造、経験、解明、芸術といった人間活動の広範囲の領域におけるジェネリックテクノロジーとして位置づけ現状を概観し将来を展望した。米国ではデータスーパーハイウェーがらみで、国立科学アカデミーが昨年から人工現実感の特別調査研究委員会を発足させ国家規模のプロジェクトを模索するなど新しい発展への展開をみせつつある。そのなかでマイクロマシーンも重要テーマの一つとして討議されており、マイクロ・バーチャル・リアリティの今後が期待される。

[参考文献]

- 1) 舘 暁, 阿部 稔: テレイグジスタンスの研究 第1報-視覚ディスプレイの設計-, 第21回計測自動制御学会学術講演会予稿集, pp. 167-168 (1982-07).
- 2) 舘 暁, 廣瀬通孝: バーチャル・テック・ラボ, 工業調査会, 1992.
- 3) 舘 暁: 人工現実感, 日刊工業新聞社, 1992.