

レイグジスタンス視覚系の最近の研究動向

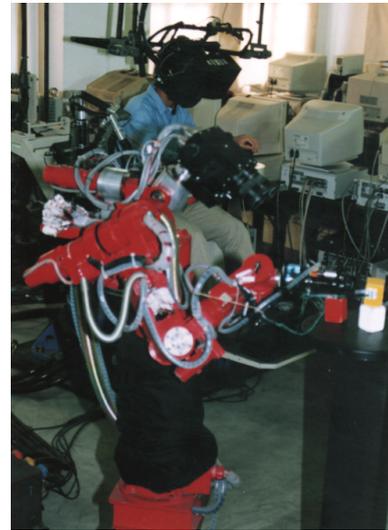
柳田 康幸*

1. はじめに

レイグジスタンス (Telexistence)[1-4] は、ロボットを介して遠隔の現実空間に没入した感覚を得て行動するための技術である。1980年代初頭に館らによって提唱され、通産省のプロジェクト「極限作業ロボット」などを通してその実証が行われてきた。米国ではほぼ同時期にテレプレゼンス (Telepresence) という名称でコンセプトが提案され、ロボットシステムの開発が行われてきた [5,6]。1990年になり、これらテレロボティクス分野のみならず幅広い分野でその技術の共通性が認識され、以後バーチャリアリティ (Virtual Reality: VR) という言葉が一般的に使用されるようになったという経緯がある。

VR というとコンピュータ内のモデルに基づく「仮想」の世界を体験するものというイメージを持つ人もいるようであるが、virtual という言葉の本来の意味 [7]、すなわち形としてそのものでないが本質的に等価という観点から眺めると、遠隔実空間を体験するレイグジスタンスも VR の一形態であると捉えることができる。逆に、狭義の VR をバーチャル空間へのレイグジスタンス [8] と呼ぶこともあり、両者は密接な関係がある。狭義の VR とレイグジスタンスは、利用者から見た場合没入する先の空間の性質が異なるだけであり、感覚提示技術としては共通のものを使用することができる。その一方で、レイグジスタンスの場合、対象とする空間がコンピュータの管理する人工空間ではなく遠隔実空間であるが故の技術的課題も存在する。

レイグジスタンス視覚系においては、初期のシステム以来、ロボット頭部に装備したステレオカメラと頭部搭載型視覚ディスプレイ (Head-Mounted Display: HMD) の組合せ (第1図) が定番の構成として用いられてきた。しかし近年、この構成以外のシステムが研究開発されるようになり、新たな展開を見せている。本稿では、初期のシステムの意義について振り返るとともに、これら最近の研究動向に関して解説を行う。



第1図 レイグジスタンス実験システム (東京大学・館研究室)

2. レイグジスタンス視覚系

2.1 基本構成

レイグジスタンス視覚系の典型的な構成は、ロボット頭部に搭載したステレオカメラと観察者の頭部に装着した HMD という組み合わせである。すなわち、ロボット頭部が観察者の頭部運動に追従し、ロボット頭部に搭載したステレオカメラで得られた画像を観察者側の HMD で提示するという形態である。この構成では、人間が HMD に相当する覗き眼鏡を装着し、ロボットという衣裳を着て遠隔空間に存在しているかのような感覚が得られる。第1図に示す東京大学のレイグジスタンス実験システム (開発当時は工業技術院機械技術研究所) の他にも、米国 NOSC における Greenman, その後継プロジェクトの TOPS[9] など同様の構成をとっていた。これらのようなステレオカメラ+ HMD という構成は、操作者の運動に対応したレイグジスタンス視覚系としては、唯一の実装形態であった。これらのシステムにおける特色について、以下で考察する。

2.2 運動対応

レイグジスタンス視覚系の役割は、視覚刺激を通して人間が遠隔地に存在している場合と等価な状況を作り出す (左右の目に網膜像を与える) ことである。人間の網膜に映る像は、当然ながら人間が歩いたり、上体を動

* ATR メディア情報科学研究所

Key Words: telexistence, telepresence, virtual reality, stereoscopic display

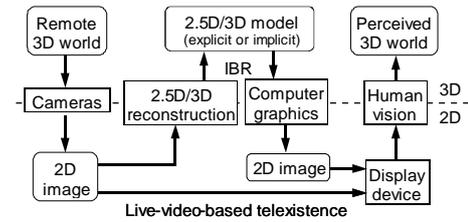
かしたり、首を動かしたり、眼球を動かしたりすることにより変化するので、これらの運動に対して瞬時に（人間が遅れを検出できない間に）網膜像を更新制御できるようなシステム全体を構築することが求められる。前述のロボット頭部搭載ステレオカメラ+HMDの構成では、ロボット頭部を高速かつ安定に（追従の遅延や振動的な挙動が極力生じないように）制御し、ディスプレイ装置のスクリーン面がちょうど遠隔世界への「覗き窓」となるような状況を作り出すことが必要である。このとき、人間の頭部について回る画像表示の「窓」の動きと画像内のオプティカルフローがちょうどキャンセルすれば、そこにある世界が静止して観察される。もしこの条件が満たされない場合、例えばロボットの追従動作に問題があったり画像の伝送遅延などがある場合には、世界がぐらぐら揺れて観察される現象が生じる。

網膜像を制御するといっても、現存する一般的なHMDやスクリーン投影型システムを用いる限り、実は眼球運動へ陽に対応する必要はない。これらの提示系においては左右の視点位置のみが世界の見え方に関与し、眼球がどちらを向いているか（スクリーン上のどの点を注視しているか）は関係しないため、基本的には頭部トラッキングだけで十分である。厳密には眼球運動に伴って眼球の光学中心がわずかにずれるので眼球トラッキングも行う必要があるのだが、このずれは眼間距離（65mm程度）に対してごくわずかであり、大きく問題視されることはない。逆に、もし眼球運動に陽に対応する必要があるようなシステムを構築してしまうと、頭部運動よりさらに速い眼球運動に対して十分な速さで応答できない限り、却って悪影響をもたらす危険性もある。もちろん、十分に高速なシステムを構築できる場合は、視線検出により注目物体への距離を算出して焦点調節制御[10]を行ったり、注視点付近へ選択的に高解像度画像を提示する[11]など、より高度な視覚提示を行うことは有効である。

2.3 実時間・実写ベース

コンピュータの管理する世界を体験する狭義のVRと比較して、トレイグジスタンス視覚系において最も特徴的なのが実時間・実写という点であろう。このため、提示系だけでなく撮像系を対にして考えることが必要である。トレイグジスタンスでは遠隔の実世界の様子を実時間で体験し、かつ自分自身の行動の結果が実時間で遠隔世界に反映されることがキーポイントであるから、一旦遠隔世界をモデル化してコンピュータグラフィックスにより画像を提示するというアプローチは、特別な理由（通信に時間がかかりすぎてリアルタイム操作が不可能など）がない限りあまり歓迎されない。

むしろ、何らかのモデルを紹介することで任意視点からの画像を得ることができるなどのメリットは十分に考えられる。実際、Image-Based Modeling/Rendering[12]の手法を適用して陽には三次元モデルを再構築せず観察



第2図 ビデオ画像を直接提示する方式とイメージベーストレンダリング(IBR)

者の視点移動に対応することを試みたシステム[13]なども報告されている。しかし、これとて内部的には第2図のように最低限世界の奥行き情報が利用できることを前提としており、現状ではその際のエラーなどにより「空中にゴミが浮いている」といった状況が生じやすい。その点、カメラで得られた2次元画像を直接提示系で人間に表示するというアプローチでは、三次元空間を復元するのは人間の仕事であり、カメラ位置を人間の運動に追従させる必要があるというアキレス腱を有するものの、システムの誤りにより間違った空間を提示する危険性がない。この方式はマシンビジョンや複雑な画像処理を介する方法と比べて一見原始的なように見えるかもしれないが、実はマン・マシンシステムの構築において人間の得意とする能力を最大限に利用するというポリシーに基づいているのである。

2.4 立体視対応

トレイグジスタンス視覚系では、遠隔空間を自然な三次元空間として認識させることが大切な要件である。人間は視覚による空間知覚を行う際に両眼視による手がかり（輻輳、視差）を用いており、これを活用するためにはステレオ立体視が有効である。立体画像提示の分野では、さらに多視点画像を用いた立体提示の研究が盛んに行われているが、トレイグジスタンス視覚系の目的のためには、ある時点の遠隔地における左右視点の画像を入力し操作者の左右の目に提示すること、すなわち二眼立体視を行うことが必要十分であり、必ずしも多視点画像は必要ではない。多視点画像は観察者視点位置の変動に対してカメラが迅速に追従できない場合の保険としては有用だが、それぞれの時点において観察者の視点に対応する画像以外は捨てられるものであり、多視点対応のために伝送画像の量を増やすよりは2視点の画像を実時間・低遅延で確実に伝送する方が有益である。

また、立体画像提示分野ではステレオ視における輻輳と調節の不一致による疲労の喚起、距離知覚誤差などの問題が取り上げられており、これらの問題はトレイグジスタンス視覚系においても将来的には大きな問題となりうる。ただし、筆者の考えでは、まずは前述の運動対応の問題を確実にクリアし、止まっている世界がきちんと止まって見えるようにすることが当面の最重要課題である。

3. 包囲型スクリーンの利用

VRの世界では、人が入る大きさの立方体状に大型スクリーンを配置したCAVE[14] (4面) の登場以来、5面のCABIN[15]、6面のCOSMOS[16]などの没入型投影ディスプレイ (Immersive Projection Technology: IPT) が建設されるなど、包囲型スクリーンを使用するシステムが多用されるようになった。これらのシステムは莫大な設置スペースと面数に応じたプロジェクタなど機器のコストを必要とする。それでも各地で導入が行われたことは、圧倒的な視野角、装着するもの (液晶シャッターメガネ) の簡便さ、複数人で同時に体験できること (ただし正しい立体画像が得られるのは頭部トラッキングを行っている1人のみであるが) などの利点が評価されたことを示唆している。さらにもう一点、これら大型の固定スクリーンを利用したシステムでは、観察者が頭部を動かしたときに世界揺れの生じない安定した空間を提示できるという、見逃してはならない利点 [14,23] を有する。

ところが、実写ベースのテレイドジスタンスでは、最近まで包囲型スクリーンシステムが利用されなかった。その背景として、ビデオ画像を直接ステレオ視覚提示デバイスに表示して自然な3次元空間を知覚させるためには撮像系と提示系を1対1に対応させる必要があり、光軸に関して対称な視野を持つ通常のカメラを用いる限り、ロボット頭部搭載ステレオカメラとHMDの組合せがこれを実現する唯一の手段であったことが考えられる。しかし最近になって、こうした定番の構成の枠を打破し、全天周型ないしは包囲型スクリーンを利用する新しい型の実写画像提示システムが出現してきた。これらのディスプレイシステムを利用するための技術ポイントは、

- (1) 広視野画像を取得するカメラ系の構築
- (2) 提示画像の加工により、パフォーマンスを損なうことなく頭部運動に対応した正確な立体視を実現すること

に集約される。

3.1 広視野画像の取得

広視野画像取得の方法としては、曲面ミラーを利用した全方位撮像システムと、多面構成による複数カメラ利用システムに大別される。全方位撮像システムの例としては、回転双曲面ミラーを用いた撮像系 HyperOmnivision[17] を用い、画像を適切な変換を施しつつ電子的に切り出して表示するテレプレゼンスシステム [18] (表示はHMDを利用) や、楕円面鏡を利用した投影型ディスプレイシステムに対して同構造の撮像系を用いた Ensphered Vision[19] などが挙げられる。これらの全方位撮像システムの最大の特徴は単一のカメラで全周画像が得られることであり、デバイス構成の簡便さに加えて、画像の継ぎ目が生じることがないというメリットがある。その反面、通常のカメラと比較して圧倒的に広い視野を単一のカメラでカバーするため、提示画像の解像度に関しては不利であ



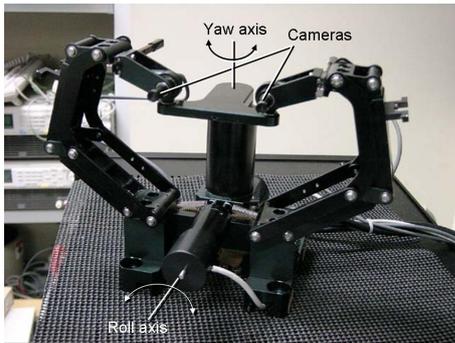
第3図 HRP スーパーコックピット

る。例えば、NTSCレベルの水平解像度 (400本程度) を360度方向に割り当てると換算視力は0.02程度で、強度の近視に相当する画像を見せられることになるため、そのままでは実用に耐えない。高解像度のHDTVを用いたところでは解像度はせいぜい2~3倍であり、実用的な場面で要求される、少なくとも0.3程度の換算視力には及ばない。

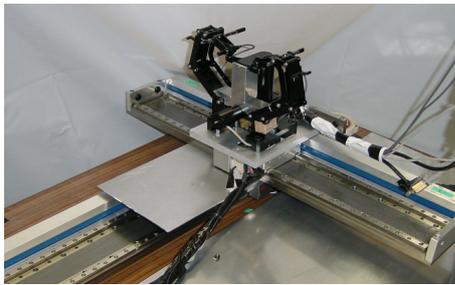
一方、複数のカメラで構成する方式は、画像の光軸・境界合わせなどの煩雑さが伴うが、実用的な解像度を得るには有利である。NTSCカメラを視野角40度で用いた場合の換算視力は0.2弱であり、高解像度カメラが小型化されれば、実用解像度に達することが期待される。この方式の例としては、経済産業省主導のプロジェクト「人間協調・共存型ロボットシステムの研究開発」(ヒューマノイド・ロボティクス・プロジェクト: HRP) [20] で開発された、9面 (3×3) 構成のHRP スーパーコックピット [21] (第3図) や、同様の構成のスクリーンを小型化し2次元歩行インタフェースと組み合わせた巡回式高解像度画像ディスプレイおよび撮像系 [22] などが挙げられる。

3.2 頭部運動対応

前述の広視野画像取得・提示系のうち固定型のスクリーンを利用するものは、カメラ系が頭部運動に対応していないため、人間頭部がある特定の位置に存在する場合以外には正確な立体映像を提供できなかった。固定スクリーンに固定のステレオカメラで得られた映像を表示した場合、観察者頭部が並進運動を行うと世界全体が頭部の動きに従って変形するように感じられる。ちょうどスクリーン上にある (スクリーン上視差ゼロの) 点は動かないが、スクリーンより手前に位置する点は頭部と同じ方向に、スクリーンより後方に位置する点は頭部と反対方向へ移動するように知覚される。頭部回転運動に対しては、HMDのような世界揺れの問題は生じないものの、世界が奥行き方向に歪んで観察される現象が生じる [23]。この問題は人間の頭部運動によってスクリーンと左右視点との位置関係が変化し、スクリーン上に表示する画像の生成時に使用した透視投影と、観察時の透視投影が一致しなくなることに起因する。



(a) 姿勢保持機構付きステレオカメラ



(b) 並進機能を含むカメラ系全景

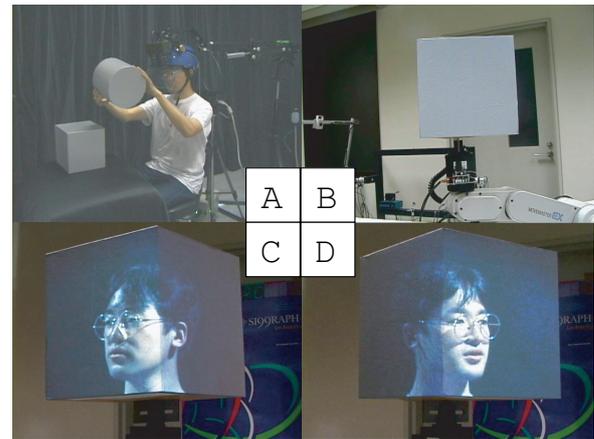
第4図 固定スクリーン型視覚提示システム用カメラ系

この問題を解決するためには、例えば

- スクリーンと視点の位置関係で指定される透視投影に基づき、スクリーン上に提示される画像を生成する際の透視投影を(等価的に)制御する方法。
- 画像提示面そのものを仮想化し、観察時の透視投影が画像生成時の透視投影と一致するよう制御する方法。

という2通りのアプローチが考えられる。前者の方法はスクリーン面をそのまま画像提示面として利用するため、頭部運動による視点移動にカメラ位置を追従させつつ撮像面を一定方向に向ける機構が必要である。その上で、画像提示位置と画像サイズを実時間制御し、撮像系と提示系の間で透視投影を常に一致させる。筆者らはこの手法を提案し、姿勢保持リンク機構を備えたカメラシステム(第4図)の開発を行ってきた[23-25]。このアプローチは固定スクリーン型視覚提示システムにおける頭部運動時の世界の安定性を最大限に活用するものである。特に頭部回転運動を行ってもカメラの方向およびその画像を提示するスクリーンの方向が不変であるため、HMDで問題となった世界揺れの問題が全く生じないという利点を有する。

後者の方法はこの考え方をさらに一歩進めてスクリーン面そのものを仮想化し、さまざまな撮像系と提示系との自由な組合せを実現しようというものである[26]。例えば、撮像側はロボット頭部に搭載した普通のステレオカメラ、提示側は包囲型スクリーンシステムを使用して自然な立体映像を提示することが可能になる。画像提示面の仮想化という考え方の源流は約10年前のVirtual



第5図 投影型トレイグジスタンスのための基盤技術。A: 頭部搭載型プロジェクタ(HMP), B: 再帰性反射材で覆いロボットアームの先に取り付けた箱型スクリーン, C, D: 人物頭部の映像を投影した様子(視点移動・ロボット頭部姿勢変化に対応)

Dome[27]に遡るが、昨今のPCにおけるグラフィックス性能の向上を活用することにより、画像の記録再生ではなく実時間ビデオ映像の立体提示が可能になってきている。本方式(バーチャルスクリーン方式)は撮像系と提示系の組合せを自由化するだけでなく、画像伝送の遅延などにより生じる「世界揺れ」の問題を緩和する効果も併せ持つと期待される。

4. 双方向トレイグジスタンス

従来のトレイグジスタンスは、遠隔地のロボットに乗り移った観察者は遠隔環境を体験することができたが、その遠隔空間においてロボットはロボットでしかなかった。トレイグジストする先が特殊な作業現場に限られるならまだしも、一般のユーザがトレイグジスタンス技術を利用する場面を想定した場合、トレイグジストする先は他の人間が普通に生活する空間であり、そこに存在する人間にとって誰がロボットを操縦しているのかわからないようでは都合が悪い。そこで、ロボットに乗り移った人間と遠隔空間に存在する人間とが自然にコミュニケーションを行えるようにすることを目指して、双方向トレイグジスタンスの研究が進められている。

4.1 投影型トレイグジスタンス

ロボットを誰が操縦しているかわからないという問題を解決するにあたって、最も直接的な方法は操作者の映像をロボット上に提示することである。その際、例えばロボット胴体にディスプレイを設置し操作者の顔の映像を表示するといった方法も考えられるが、視線が不自然になり人間対人間の時と同様の自然なコミュニケーションが行われるとは言い難い。そこで、ロボット全体をスクリーンとして利用し、ちょうど人間型ロボットの頭部に人間の顔が位置するよう画像を表示してやれば、普段の人間同士のコミュニケーションと同様の状況が再現され



第6図 TWISTER: 相互テレグジスタンス用ブース

る [28].

ロボット表面を画像提示面として利用するためには、再帰性反射材スクリーンと頭部搭載型プロジェクタを用いた視覚提示技術 [29,30] が使用される。再帰性反射材をスクリーンとして使用することにより、単一のスクリーン面上で複数の人間がそれぞれの視点に対応した立体画像を観察することができる (第5図)。

4.2 相互テレグジスタンス用ブース

一方、遠隔コミュニケーションを主なターゲットとして、複数のユーザがあたかも一カ所に集まって会話しているかのような状況を創り出すためのテレグジスタンスブースの開発が進められている。相互テレグジスタンスではコミュニケーションに参加する各人が遠隔地画像の観察者であると同時に、被写体でもある。従来のテレビ会議システムでは、カメラの視点位置が固定で自由な位置関係をとることができない、カメラと画像提示面が別々の位置にあるため視線が不自然などの問題があった。また、CAVEなどの没入型視覚提示システムでは、画像を提示することはできてもこれと干渉することなく撮像系を配置することが難しく、さらに液晶シャッターメガネを装着するため人間の視線や表情を観察することが困難であった。本方式においてユーザは電話ボックスほどの大きさのブースの中に入ることになるが、このブースは人間の視野全体を覆う立体画像提示と全方位からの撮像との共存を目指すシステムである [31]。

視覚提示のための構造として、人間が入る大きさの円筒面上へ簾状 (縦方向) に発光ユニットを並べ、円筒全体を回転させる。各発光ユニットはパララックスバリアで仕切られた左右眼用のLEDアレイから成り、これを回転させタイミングを制御しつつ発光させることにより横方向の点列を作り出している。いわば、空間全体を発光素子で埋める代わりに、物理的には疎な発光ユニットを回転させ、空間解像度を時間解像度へ割り振ることで等価的に密な空間解像度を得ようというものである。本方式では視覚提示のための素子が空間的に疎に配置されているため、空いた空間に撮像系を容易に配置できる。試作システムはTWISTER [32] と呼ばれ、発光ユニット数の少ない原理検証用システムから実用段階目前の3号

機 [33] (第6図) までが試作されている。

5. まとめ

テレグジスタンス視覚系について、従来のステレオカメラ+HMDというスタイルの枠を超えて、包囲型スクリーンを利用したシステムへの展開と、双方向テレグジスタンスへ向けた研究活動について紹介した。従来テレグジスタンス視覚系は実時間・実写映像を利用するが故に撮像系と提示系との対応が1対1に縛り付けられていたが、この制約から解放されれば、ユーザの手元にある視覚提示システムを用いてさまざまなロボットへテレグジストすることが可能になる。記録映像を眺めるだけでなく、今遠隔地で起きていることを生で体験することができるようになれば、多くの人にとってまた格別の楽しみになるであろう。

謝 辞

資料をご提供いただきました、東京大学 舘 暲 教授ならびに同研究室の方々に感謝いたします。

参考文献

- [1] 舘 暲, 阿部 稔: テレ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)
- [2] 舘 暲, 荒井裕彦: テレ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, Vol. 7, No. 4, pp. 314–326 (1989)
- [3] 前田太郎, 荒井裕彦, 舘 暲: 頭部運動追従型両眼視覚提示装置の設計と評価; 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 5, pp. 655–665 (1992)
- [4] 舘 暲, 安田賢一: テレグジスタンス・マニピュレーション・システムの設計と評価; 日本電気学会論文誌, Vol. 115-C, No. 2, pp. 172–181 (1995)
- [5] D. L. Akin, M. L. Minsky et al.: Space Application of Automation: Robotics and Machine Intelligence Systems (ARAMIS) —Phase II; NASA Contract Report, No. 3734 (1983)
- [6] J. D. Hightower, E. H. Spain and R. W. Bowles: Telepresence: A Hybrid Approach to High Performance Robots; *Proceedings of the 3rd International Conference on Advanced Robotics (ICAR '87)*, pp. 563–573 (1987)
- [7] 舘 暲: バーチャルリアリティとロボティクス; 日本バーチャルリアリティ学会誌, Vol. 1, No. 1, pp. 8–10 (1996)
- [8] 大山英明, 常本直貴, 前田太郎, 舘 暲: 仮想環境へのテレグジスタンスのための一手法; 日本ロボット学会誌, Vol. 12, No. 8, pp. 1175–1182 (1994)
- [9] M. S. Shimamoto: TeleOperator/TelePresence System (TOPS) Concept Verification Model (CVM) Development; *Recent Advances in Marine Science and Technology '92*, pp. 97–104 (1992)
- [10] 杉原敏明, 宮里 勉, 中津良平: 焦点調節補償機能を有するHMD: 3DDAC Mk.4; 日本バーチャルリアリティ学

- 会誌, Vol. 4, No. 1, pp. 261–268 (1999)
- [11] 岩本和世, 谷江和雄, 前田太郎: 視線追従型ヘッドマウントディスプレイの開発—注視位置に高解像度像を提示する映像提示方式の検討—; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-II, No. 5, pp. 879–888 (1996)
- [12] L. McMillan and G. Bishop: Plenoptic Modeling: An Image-Based Rendering System; *Proceedings of SIGGRAPH 95*, pp. 39–46 (1995)
- [13] R. Raskar, G. Welch, M. Cutts, A. Lake, L. Stesin, and H. Fuchs: The Office of the Future: A Unified Approach to Image-Based Modeling and Spatially Immersive Displays; *Proceedings of SIGGRAPH '98*, pp. 179–188 (1998)
- [14] C. Cruz-Neira, D. J. Sandin, and T. A. DeFanti: Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE; *Proceedings of SIGGRAPH '93*, pp. 135–142 (1993)
- [15] 廣瀬通孝, 小木哲朗, 石綿昌平, 山田俊郎: 多面型全天周ディスプレイ (CABIN) の開発とその特性評価; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J81-D-II, No. 5, pp. 888–896 (1998)
- [16] 山田俊郎, 棚橋英樹, 小木哲朗, 廣瀬通孝: 完全没入型6面ディスプレイ COSMOS の開発と空間ナビゲーションにおける効果; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 531–538 (1999)
- [17] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦: 移動ロボットのナビゲーションのための全方位視覚センサ HyperOmni Vision の提案; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J79-D-II, No. 5, pp. 697–707 (1996)
- [18] 山口晃一郎, 山澤一誠, 竹村治雄, 横矢直和: 全方位動画像を用いた両眼ステレオ画像の実時間生成によるテレプレゼンス; 電子情報通信学会論文誌, Vol. J84-D-II, No. 9, pp. 2048–2057 (2001)
- [19] 橋本 渉, 岩田洋夫: 凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 479–486 (1999)
- [20] 特集『HRP: 「人間協調・共存型ロボットシステム」プロジェクト』; 日本ロボット学会誌, Vol. 19, No. 1 (2001)
- [21] 星野 洋, 鈴木健之, 西山高史, 澤田一哉: ロボット遠隔操作のための高臨場感視覚提示システムの開発; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 39–47 (2002)
- [22] 續 元宏, 岩田洋夫: 旋回式高解像度実画像ディスプレイ; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 7, No. 1, pp. 49–58 (2002)
- [23] 柳田康幸, 前田太郎, 館 暉: 固定スクリーン型視覚提示装置を用いたレイグジスタンス視覚系の構築手法; 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 4, No. 3, pp. 539–547 (1999)
- [24] Y. Yanagida, T. Maeda and S. Tachi: A Method of Constructing a Telexistence Visual System Using Fixed Screens; *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000*, pp. 117–125 (2000)
- [25] Y. Yanagida, S. Saito, S. Yano, T. Maeda, and S. Tachi: A Head-Tracked, Live-Video-Based Telexistence System Using a Fixed Screen; *Proceedings of the 11th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT 2001)*, pp. 42–47 (2001)
- [26] 中川高志, 財津義貴, 稲見昌彦, 川上直樹, 柳田康幸, 前田太郎, 館 暉: バーチャルスクリーンを用いた実時間実環境レイグジスタンスシステム (第2報) —試験的実装—; 日本バーチャルリアリティ学会第6回大会論文集, pp. 423–426 (2001)
- [27] M. Hirose, K. Hirota, R. Kijima, M. Kanno, K. Hayakawa, and K. Yokoyama: A Study on Synthetic Visual Sensation through Artificial Reality; 計測自動制御学会ヒューマン・インタフェース研究論文集, Vol. 1, No. 1, pp. 19–26 (1992)
- [28] S. Tachi: Augmented Telexistence; *Mixed Reality* (Y. Ohta, H. Tamura ed.), Chapter 14, pp. 251–260, Ohmsha (1999)
- [29] 川上直樹, 稲見昌彦, 柳田康幸, 前田太郎, 館 暉: オブジェクト指向型ディスプレイの研究; 情報処理学会論文誌, Vol. 40, No. 6, pp. 2725–2733 (1999)
- [30] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi: Visuo-Haptic Display Using Head-Mounted Projector; *Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000*, pp. 233–240 (2000)
- [31] S. Tachi, T. Maeda, Y. Yanagida, M. Koyanagi and H. Yokoyama: A Method of Mutual Tele-Existence in a Virtual Environment; *Proceedings of the 6th International Conference on Artificial Reality and Telexistence (ICAT '96)*, pp. 9–18 (1996)
- [32] 國田 豊, 尾川順子, 佐久間敦士, 稲見昌彦, 前田太郎, 館 暉: 没入型裸眼立体ディスプレイ TWISTER I の設計と試作; 映像情報メディア学会誌, Vol. 55, No. 5, pp. 671–677 (2001)
- [33] K. Tanaka, J. Hayashi, Y. Kunita, M. Inami, T. Maeda and S. Tachi: TWISTER: Technical Challenges; *ACM SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, p. 271 (2002)

著者略歴

やなぎだ やすゆき
柳田 康幸 (非会員)

1964年10月17日生。1990年3月東京大学大学院工学系研究科計数工学専攻修士課程修了。同年4月同大学先端科学技術研究センター助手。1997年4月同大学大学院工学系研究科助手。2001年4月同大学大学院情報理工学系研究科助手。同年9月(株)エイ・ティ・アール知能映像通信研究所客員研究員, 10月(株)国際電気通信基礎技術研究所(ATR)客員研究員, 現在に至る。博士(工学)。レイグジスタンス, バーチャルリアリティの研究に従事。日本音響学会, 計測自動制御学会, 日本ロボット学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ヒューマンインタフェース学会, 日本視覚学会などの会員。