

## 論文の内容の要旨

論文題目    テレイグジスタンスにおける視覚と運動感覚の  
整合性に関する研究

氏    名    柳 田 康 幸

テレイグジスタンス (Telexistence) は人間が実在する場所以外の遠隔環境、もしくはコンピュータの創成したバーチャル環境へ臨場感を持ちつつ存在し行動する概念であり、前者を実環境へのテレイグジスタンス、後者をバーチャル環境へのテレイグジスタンスという。後者はまた、狭義のバーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) と呼ばれる。テレイグジスタンスおよび VR における感覚提示において、視覚提示は最も盛んに研究開発が行われてきた領域であり、人間の運動に対してリアルタイムに提示される視覚情報を更新することが必要である。

従来、空間的品質、すなわち提示される画像の解像度や VR 空間のリアルな画像を生成することには多くの注意が払われてきたが、時間的な品質に関しては個々のデバイス単位ではなくシステム全体にわたる性質を論じなければならないこともあって、置き去りにされてきた。時間的品質が不十分、すなわち提示される情報の更新頻度が低い場合やシステム全体としての遅延が大きい場合には、システムを体験する人間にとって提示される空間がそこに存在するような感覚が得られず、作業性の低下や不快感を生じる。本論文では、そのような場合に生じる現象の解析を行うと共に、安定な空間提示を実現するための手法を提示することにより、この問題の解決を図る。

本論文では、まず第 1 章において VR およびトレイグジスタンスシステムがどのような要素から構成されるかについて整理し、実際にシステムを体験した場合の「違和感」という漠然とした感覚を、リアルタイムインタラクションの実現、より具体的には操作者の運動と提示される視覚情報との整合性という切り口から見ることにより、工学的な解析の俎上に乗せる。

第 2 章では、最も典型的な VR システムの構成、すなわち人間の運動計測と頭部搭載型視覚提示装置 (Head-Mounted Display: HMD) による VR 空間の視覚によるという構成をとりつつ、極力実時間性を重視したシステムの構築を行った。ハードウェア的には、運動計測装置として物理世界のロボットを制御するためのトレイグジスタンスマスタ装置を利用し、大きな自由度数の運動情報を高速・安定に VR 空間の中へ取り込むことに成功した。ソフトウェア的には、システム全体の仕事をいくつかのサブタスクに分割し仕事の分散を図ると共に、最も負荷が大きく時間がかかる画像生成についてはいくつかの高速化テクニックを開発・実装し、効率の良い VR 空間画像の生成を実現した。これにより、システム全体としての遅延時間を小さくすることができ、運動感覚と提示される視覚との整合性の確保を実現した。同時に、使用する HMD の仕様に適合するパラメータを用いることにより自然な三次元空間の提示を、また大きな自由度を反映して操作者の上肢や体幹の運動を VR 空間中に反映させることにより自己投射性を実現した。

第 3 章では第 2 章で構成したシステムを利用して、空間的な側面と時間的な側面が互いに干渉することを示した。すなわち、両眼立体視を利用する視覚提示デバイスを用いて空間提示を行っている場合に、何らかの理由により正確な三次元空間提示が行えない状況において頭部運動を行うと、空間の動的な変形と不自然な画像のフローが生じるという現象を幾何学的解析により定量的に説明した。また、これによって作業性に影響が生じることを実験により確認した。従来 VR システムの時間的な要素といえば純粋な時間遅ればかりが議論されてきたが、ここで指摘した問題は、たとえシステム全体の時間遅れが皆無という理想的な状態でも不正確な立体視を行っている和不具合が生じるということを解明したものである。

第 4 章では、近年各地に建設されているプロジェクション型没入ディスプレイ (Immersive Projection Technology: IPT) に着目し、HMD を用いたシステムとの比較を行うことにより、それぞれのディスプレイにおける利点と欠点を解析した。その結果、IPT の視覚提示品質が良好であることの本質は頭部搭載でなく空間に固定した画像提示面を使用していることにあることを明らかにした。頭部運動、特に回転運動を行った場合における提示画像の安定性は固定スクリーン型の方が優れており、*simulator sickness* を喚起しにくい性質を持っていることを示した。逆に、固定スクリーンを用いて自然な立体視を行うには、操作者の運動に従って時間的に変動する非対称透視投影によって生成される画像をスクリーン上に表示することが必要であり、HMD を利用した実環境へのトレイグジスタンスシステムとは異なり光軸に対称な視野を持つ通常のカメラをそのまま使用できないという問題を指摘し、続く 2 章へ向けた問題提起を行った。

第 5 章では、システム全体にわたる時間遅れが大きい場合や CG 画像生成時のフレームレートが十分に確保できない場合に、HMD を用いたシステムでは世界が揺れるという弱点の解決を図った。操作者に近い場所にローカルな高速ループを構成することにより、等価的に高フレームレートと遅延の補償を行う手法を提案した。これは視野角が限定されることを除いて、頭部運動に対する画像の振る舞いにおいて等価的に固定スクリーン型システムの良好な性質を HMD において実現するものであり、提示される世界を安定化させる効果を持つ。

第 6 章では、元来頭部運動感覚と視覚との整合性確保が容易な固定スクリーン型システムを実環境へのトレイグジスタンスに適用するにあたり、第 4 章で指摘した、時変非対称透視投影の問題に対する解決法を示した。その際、複雑な三次元空間の再構築や画像の三次元的な変形操作を行わず、あくまでカメラで取得した二次元画像を二次元画像のまま扱うために、カメラの姿勢を常に一定に保つリンク機構を発案・設計・試作した。これと二次元的な画像のシフト・拡大縮小操作を組み合わせることにより、固定スクリーンを利用し頭部運動に対応した正確な三次元空間提示が可能になり、実環境へのトレイグジスタンスが実現できることを示した。

以上のように、本研究では VR およびトレイグジスタンスにおいて人間が運動を行った場合に提示される世界がどのように見えるかに関して探求を行った。従来、ともすれば個々のデバイスレベルでの議論に終始し、システムを構築して人間が運動を行った時に生じる現象については放置されがちであったが、本研究ではそこに運動感覚と視覚との整合性という観点を導入することにより、インタラクティブなシステムにおいて安定な世界提示を実現するための設計指針を提示した。これは、いわば「止まっている世界が止まって見える」という、現実世界では至極当たり前のことを VR システムで実現するための非常に基本的かつ重要なポイントであり、VR やトレイグジスタンスが一般社会に浸透していくために必要なマイルストーンを示すことができたと考える。