

博士学位論文

(内容の要旨及び論文審査の結果の要旨)

	TAKAZAKI Mayumi
氏名	高崎 真由美
学位の種類	博士（経営情報科学）
学位記番号	博 甲 第 45 号
学位授与	令和 7 年 3 月 23 日
学位授与条件	学位規程第 3 条第 3 項該当
論文題目	実物体との空間的整合性を考慮した空中立体映像に対するインタラクション Interaction between Physical Objects and Stereoscopic Mid-air Images Considering Spatial Consistent
論文審査委員	（主査）教授 水野 慎士 ¹ （審査委員）教授 森本 正志 ¹ 教授 北坂 孝幸 ¹

論文内容の要旨

実物体との空間的整合性を考慮した空中立体映像に対する インタラクション (Interaction between Physical Objects and Stereoscopic Mid-air Images Considering Spatial Consistent)

近年のディスプレイ技術の進歩に伴って、VR や AR など HMD 等を用いたコンテンツが開発されている。これらのコンテンツでは、実空間とは違う空間で自由に行動したり、CG 物体が実空間上に存在するように HMD 等で重量表示しながらインタラクションしたりするなど、直感的な操作で没入感の高い新しい体験を提供している。その中でも、本研究では空中映像ディスプレイによる空中像に着目した。空中像とは何もない空間中に浮いているように映し出された映像のことであり、裸眼で観察できたり直接手で触れられたりするなどの特徴を持ち、今まで以上に直感的なインタラクションの実現が期待できる。

本研究の目的は、立体物が現実空間に存在するように空中像として表示することができる手法を開発することである。これを実現するには、空中像を立体的に表示することが必要になる。また、空中像が実物体との間に空間整合性を持つことも求められる。具体的には、空中像

に対して手などで操作を行ったときには、実物体に対して空中像がリアルタイムで適切に変化するインタラクションが必要になる。また、実物体との正しいオクルージョン、実環境や実物体のインタラクティブな反映、空中像の素材感の表現なども必要となる。本研究では、空中像で表示した立体物が現実空間に存在するように観察するために必要な要素として実物体との空間整合性に着目して、これらを実現するための手法を開発した。

本研究では空中像を実現するためにマイクロミラーアレイプレート(MMAP)を用いた。MMAP は直交する 2 つのミラーアレイで構成され、面对称の位置に像を結像するという性質を持つ。MMAP を用いた空中像は裸眼で観察できることに加えて、手で直接触れられる位置に表示される。また、高解像度での表示や大型化も可能である。このようなことから、MMAP では実在感のある空中映像表現の実現が期待できる。しかし、MMAP を用いて立体的な空中像を表示するにはいくつかの課題がある。まず、MMAP による一般的な空中像は通常の平面ディスプレイ映像を空中に結像しているため、空中像も平面的となる。また、映像と実物体の実際の位置関係にかかわらず、映像は常に実物体によって遮蔽されるため、インタラクション中にオクルージョン矛盾が発生して、違和感を生じさせる原因となる。また、そのままでは周囲環境は反映されてお

¹ 愛知工業大学 情報科学部 情報科学科（豊田市）

らず、空間適合性が十分とは言えない。

そこで本研究の先行研究である修士研究では、空中像の課題として平面的であることとオクルージョン矛盾が生じることに焦点を当て、これらを解決する手法の開発を行った。平面的である空中像を立体的に表示させるために、空中像に運動視差立体視を適用する手法を開発した。オクルージョン矛盾を解決するために、プロジェクタで実物体に映像を投影することで空中像での実物体の遮蔽を擬似的に実現した。加えて、手の操作による変形や生成などのインタラクションを実現する手法の開発も行った。これらにより、現実空間に存在するような立体的な空中像を実現する基盤はある程度実現できた。

そして、本研究では先行研究で開発した手法を基盤として用いて、実物体との空間整合性の再現度をさらに高めながら立体的な空中像を表示したりインタラクションを行うことができる手法の開発を行った。この中では、空中像が現実空間に存在する場合と同様に実物体や実環境と相互に干渉することを目指した。そのため、空中像と実物体との関係を3DCG空間内で再現して相互間で影を発生させる手法や、実空間の状態を全周囲カメラで撮影して実空間の照明条件等を空中像に反映させる手法の提案と開発を行った。また、空中像での表示物体を流体に対応させて実物体の形状に応じて液体のように変形する空中像を実現する手法や、空中像を実空間の色で着色する手法の提案と開発を行った。さらに、物体の表示をボリュームレンダリングに対応させることでオクルージョンの再現を拡張して空中像として表示している物体の素材感を再現したり、表示物体をソリッドモデルに拡張することで空中像を実物体で切断して断面を表示させることなどを実現する手法の提案と開発を行った。

本研究で提案した手法については実際にシステムの実装を行って、映像表示やインタラクションなどの実験を実施した。実験によって、提案手法は実物体や実空間との空間整合性を保ちながら、空中像に対する実環境のインタラクティブな反映、空中像の素材感の表現、空中像との複雑な変形・生成インタラクションなどが実現できることを確認した。その結果、提案手法による空中立体映像が現実空間に存在するように観察・インタラクションできることが確認された。これにより、先行研究に比べて空中立体映像の空間整合性を向上させることが実現で

きたと考えている。その一方で、MMAP 自体が持つ課題である視野の狭さや迷光の発生、そして触覚フィードバックへの未対応など実在感を損ねる要因は残っている。これらの課題を解決する手掛かりとなる関連研究はいくつか発表されており、本研究の提案手法に関連研究の手法を適用することは今後の課題の一つである。

本研究で提案した手法はさまざまな場面での活用が期待される。例えば、立体的な科学現象が目の前で生じているように見せることができる博物館向け展示物への使用や、会話相手が目の前に立体的に存在するように表示することができる遠隔会議システムへの応用などが考えられる。

論文審査の結果の要旨

高崎真由美君の論文「実物体との空間的整合性を考慮した空中立体映像に対するインタラクション」は、空中立体映像で表示した物体について、実在感を向上させるために表示物体の空間整合性を高める様々な手法を開発するとともに、それらの有用性について検証したものである。

空中立体映像はマイクロミラーアレイプレートを使った空中映像に運動視差立体視手法を組み合わせたもので、高崎君が修士研究で開発したものである。また、空中立体映像に手で触れて変形や移動を行う基礎的なインタラクション技術、およびインタラクション時のオクルージョン矛盾を解消するためのプロジェクションマッピング技術も修士研究で開発したものである。これらは本論文の基盤技術として非常に重要な要素となっている。

本論文は全 7 章で構成されている。以下に各章の内容について説明する。

第 1 章では本研究の発想に至った研究背景や研究目的を述べている。映像技術の発達に伴って様々な映像表示手法が開発される中、空中映像に注目が集まっていることや、ハーフミラー、ミスト、再帰性反射材などを用いた手法が提案されていることを紹介している。また、その中でも本研究では直接触れられる高解像度の空中映像が実現できるマイクロミラーアレイプレートに着目したことと、それを用いて空中立体映像の表示やインタラクションが可能であることを述べている。そして、現状の

空中立体映像には実在感が不足している部分があり、本研究では空間的整合性を高めることで空中立体映像の実在感を向上させることを目指すことを述べている。

第2章では関連研究を紹介しながら本研究の位置付けを示している。初めに全般的な空中映像実現手法の研究を紹介してから、本研究と同様に空中立体映像を実現した研究、空中映像とのインタラクションを行っている研究、空中像の影の表示やオクルージョン矛盾の解消を目指した研究などを紹介している。そして、空間的整合性を考慮しながら空中立体映像とのインタラクションを実現するという本研究で実施する内容はこれまでに報告されていないとを示すことで、既存研究に対する本研究の新規性や位置付けを明確化している。

第3章では本研究の基盤となるマイクロミラーレイプレートをを用いた空中立体映像の実現手法、空中立体映像とのインタラクション手法、そして空中立体映像と実物体との正しいオクルージョンの実現手法について述べている。これらの内容は高崎君が修士研究で実施したものであるが、本研究の基盤技術として非常に重要であるため、空中立体映像システムの機材構成、空中映像に対する運動視差立体視の適用方法、指位置データに基づく空中立体映像の変形手法、プロジェクションマッピングを用いたオクルージョン矛盾解消手法などについて述べている。

第4章では本研究で新たに行った空中立体映像の空間整合性を向上させる様々な手法について、具体的な実装方法と共に述べている。空間整合性を向上させる手法は大きく分けて、素材感の表現、実環境のインタラクティブな反映、複雑な変形生成インタラクションで構成されている。素材感の表現では、先行研究で実施したプロジェクションマッピングを用いたオクルージョン矛盾解消手法を拡張することで、ゼリーやミストなどの半透明素材を空中立体映像で表示することを実現している。実環境のインタラクティブな反映では、インタラクション中の手を三次元的にリアルタイムスキャンしながら3Dモデル化することで、空中立体映像に手の影を落としたり、逆に手に空中立体映像の影を落とすことを実現している。また、全天周カメラ映像を用いることで実空間の照明環境を空中立体映像に反映することを実現している。複雑な変形生成インタラクションでは、実空間の透明コップ

の位置を追跡しながら流体シミュレーションで生成したCG液体を空中立体映像として表示することで、空中立体映像でコップ中の液体を表現することを実現している。また、実物体として板を用いることで空中立体映像を任意の位置で切断して断面を表示する手法や、空中立体映像を指など実物体の色で着色する手法を開発している。

第5章では第4章で述べた空中立体映像の空間整合性を向上させる様々な手法について、実際にシステムを実装して実験した結果を述べている。空中立体映像による半透明素材の表現、空中立体映像と実物体との相互の影の発生、空中立体映像に対する実空間の照明環境の反映、空中立体映像によるコップ中の液体の表現、板による空中立体映像の切断、着色した指による空中立体映像への着色についてシステムの実装と実験を行うことで、それぞれの提案手法が実現可能であることを示している。

第6章では第5章での実験を踏まえて、提案した各手法が空中立体映像の空間整合性を向上させるのに有用であるかの検証や考察を行っている。その中では、各手法が空間整合性を向上させる効果があり、その結果として空中立体映像の実在感を高めることに寄与していることを示している。その一方で、視野角の狭さや触覚のなさなど実在感を低下させる問題が残っていることを挙げながら、それらを解決する可能性がある手法の提案についても行っている。

第7章では本論文の総括を行っている。修士研究で行ってきた空中立体映像に対して様々な表示手法やインタラクション手法で拡張することで空間整合性を向上させて、空中立体映像の実在感を向上させたことをまとめている。また、第6章で明らかになった問題点についても今後解決すべき課題としてまとめている。

本論文は空中立体映像の表示とインタラクションという高崎君自身の修士研究を基盤として、空中立体映像の空間整合性に注目して表示映像の実在感を高めるための様々な手法の提案と実装を行っている。この研究は非常に独創的であるとともに、学術分野や産業分野にも大きく寄与することが期待される。以上のことから、高崎真由美君の論文は博士論文として非常に高い価値があり、博士の称号を授与するのに適格と判断する。