

令和 6 年 5 月 10 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K19821

研究課題名（和文）身体同期型空中像による「ついでを伸ばしてしまう」空中像の動作表現の実現

研究課題名（英文）Body-synchronized interface to realize the movement of mid-air images that humans want to touch

研究代表者

小泉 直也（Naoya, Koizumi）

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：80742981

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、鑑賞者がついつい手を伸ばしてしまうような空中像の表現の解明に取り組んだ。まず空中像として表示されたアバタを、操作者が自分自身の体のように空中像を操作する身体同期型空中像操作技術の開発に取り組んだ。当初計画では人の動きをアバタの動きに対応させる予定であったが、試作の中でユーザビリティの問題が発見され、操作方法を人型のアバタを利用することで解決した。さらに、人の手の動きユーザーに知られることなく適切に計測するために、ホットミラーとTime-of-Flight式の距離センサを利用する手法を提案し、その実装と実際に「ついつい手が出る」アプリケーションを制作した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で設計したインタフェースは、空中像インタラクションに標準的に使用可能なものであり、今後の様々なインタラクションに使用される可能性がある。特にホットミラーとToFセンサを組み合わせた方式は有用性が高く、標準的な手法として使用されていくことが予想される。

研究成果の概要（英文）：Our goal in this research was to elucidate the expression of a mid-air image that the audience can't help but reach for.

First, our first prototype is a system of body-synchronized interface in which the operator manipulates an avatar displayed as a mid-air image as if it were his or her own body. The initial plan was to have human movements correspond to the movements of the avatar, but usability problems were discovered during prototyping, and the manipulation method was solved by using a human-shaped avatar as a controller. In addition, to properly measure human hand movements, a method using a hot mirror and a time-of-flight distance sensor was designed and implemented, and an attractive application was created that actually evokes the user.

研究分野：バーチャルリアリティ

キーワード：空中像 インタラクション ヒューマンインタフェース

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

実空間上にデジタル情報を重ねることで情報空間と実空間を融合する Augmented Reality (AR) を実現する手法の 1 つとして、空中像表示技術がある。空中像は、光源から出た光が光学素子で反射・屈折して空中に再結像することで形成される実像である。Head Mounted Display (HMD) やタブレット端末を用いた AR とは異なり、ユーザーは特殊な機材を装着することなく実空間上に浮かぶ Computer Graphics (CG) を鑑賞できる。

空中像は三次元に移動し、手で届く位置に表示することができ、さらに物理的実体がないなど、既存の映像表現とは全く異なる特性があるが、その表現効果に関してはまだ研究がなされていない。そこで、人の行動に対して効果的に働きかける空中像の表現を明らかにする必要がある。

### 2. 研究の目的

空中像に「つつい手が出てしまう」ようなインタラクションは、どのようにして実現できるのかを明らかにすることが本研究の目的である。具体的に表示する空中像の内容としては、CG キャラクタとした。

### 3. 研究の方法

上記の研究目的を達成するために、この空中像キャラクタ (CG アバタ) を適切に操作して鑑賞者がつつい手が出てしまうような動きを実現するためのコントローラーと、鑑賞者が手が自然と手を伸ばした様子を適切に計測し、それに応じたフィードバックを行うための計測手法の開発を行った。

### 4. 研究成果

#### 人型コントローラーによる身体同期型空中像アバタ操作手法

空中像の特徴である飛び出す動きを含んだ空中像キャラクターの様々な身体動作を平易に操作することを目的として、人形モーションキャプチャと人の身体動作を組み合わせた操作手法を提案する。具体的には、人形の掌の位置および身体位置の操作と操作者自身の首の動作を組み合わせることで、両腕と首の動作の同時操作と自由な空間移動を可能にし、自由度の高い身体動作の実現を試みた。

人形劇のマニュアルを参考に重要度の高い動作要素として首・腕・足の動作を決定し、それぞれ異なる方法で生成した。腕の動作の多くは掌の位置を動かすことで様々な状況表現するため、人形の掌の位置を計測することで自由度の高い腕の動きを表現できる。首の動作は感情表現において重要な動作であるが、人形の両腕と首の同時操作は困難なため、キャラクターの首の動作を操作者の首の動作に同期させる。空中像の特徴である奥行方向の移動を含む空間移動に伴う足の動作は、下半身の動作は自動的な動作であるという考えをもとに、空間移動に伴い足のモーションを再生することで十分であると判断した。

提案システムの全体構成を図 1 に示す。身体動作入力装置で計測した動きを CG キャラクターの動きに対応させ、光学装置で空中像 CG キャラクターを表示する。また、モニタリングシステムによって操作者が鑑賞者の様子を観察することを可能にし、空中像 CG キャラクターと鑑賞者のコミュニケーションを実現する。

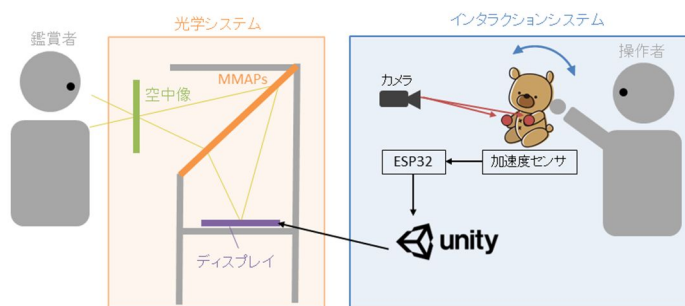


図 1 人型コントローラーによる身体同期型空中像アバタ操作手法 システム構成

空中像キャラクターの腕の動作および空間移動の操作のために、操作する人形の掌の位置および全身の位置を光学式モーションキャプチャで取得する。両腕の動作は、図 2 のように人形の掌に固定された再帰性反射マーカを棒によって操作し、掌の位置・姿勢データをもとに IK 制御する。足の動作の生成は、前後左右の移動に伴い歩行モーションを再生し、人形を持ち上げる操作に伴いジャンプモーションを再生させることで実現する。モニタリングシステムでは、鑑賞者の様子を後述するの手法で撮影し、その映像に CG キャラクターの映像を重ね表示した。ま

た、キャラクターの奥行位置を理解して操作するために、両眼視差による立体映像を投影した。

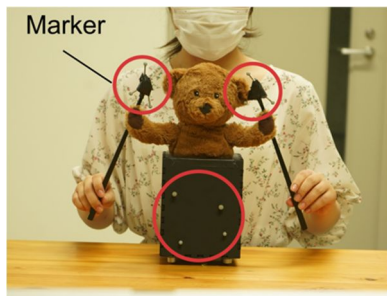


図2 人型コントローラーによる身体同期型空中像アバタ操作の様子

(評価実験1：身体動作表現の調査)

空中像キャラクターと鑑賞者のコミュニケーションにおいて必要となる身体動作表現を調査した。参加者は鑑賞者の様子映した映像を見ながら空中像キャラクターを操作し、どのような身体動作を表現したいか実現可能性の有無によらず考えた。実験より、本システムで実現可能な32種類の動作、実現可能であるが操作が難しい3種類の動作、実現不可能な14種類の動作の計49種類の身体動作表現が観察された。各操作者の個性や場面に応じた即興性のある動作や空中移動といった人間の身体能力を超える動作が観察され、人形モーションキャプチャを用いた操作の有用性が示された。また、腕・首・空間移動を複合的に組み合わせた身体動作が観察され、複数部位の同時操作により様々な動作を表現できると確認できた。

(評価実験2：奥行き操作精度の調査)

空中像キャラクターを操作者が意図した位置に正しく配置できるか確認した。参加者はモニタリングシステムを介して、実空間に配置された目印と同じ奥行位置になるように空中像キャラクターを移動させた。配置条件は、CGキャラクターの原点から奥行位置5 cmから30 cmの範囲で5 cm間隔の6条件、操作者から見て右に10 cmの位置で奥行位置0 cmと20 cmの2条件を設定した。各条件につき3試行を行い、計24試行をランダムで実施した。実験の結果を図3に示す。図3より、配置する奥行方向の距離が大きくなるにつれ、空中像キャラクターを目標位置より手前に配置する傾向が見られた。両眼視差による奥行知覚では自身から離れた位置であるほど奥行感度は下がるため、誤差が大きくなったと考えられる。また、左右方向と奥行方向を組み合わせた3次元移動が約12%の誤差率で可能であることを確認できた。

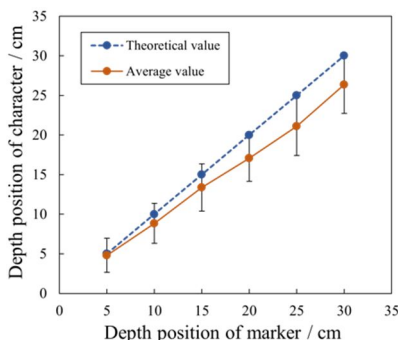


図3 空中像の奥行き操作精度

このように、実空間上で飛び出す映像を提示できる空中像の特徴を活かしたキャラクターの身体動作の操作手法として、人形モーションキャプチャと人の身体動作を組み合わせた操作手法を提案した。空中像キャラクターの腕の動作および空間移動を物理的な人形の操作で行い、首の動作を操作者自身の首の動きと同期させることで実装した。提案手法によって空中像キャラクターの様々な身体動作を表現できることを確認でき、身体同期型空中像操作手法の有用性を確認した。

空中像に対して伸ばされた手を計測する手法の開発

空中像とユーザーの手等の実物体の幾何学的関係を計測することで、ユーザーの動きに対して空中像が時間的・幾何的な整合性のあるインタラクションが実現できる。これによってユーザーは自然と手を伸ばし、実物体を扱うように操作することができる。そこで、空中像の背部から実物体の形状を計測可能な光学系を提案する。提案手法では、赤外線 (Infrared, IR) を透過、可視光を反射する光学素子であるホットミラーを MMAP に重ねて配置し、反射した IR を計測することで実質的に空中像背部からのセンシングを実現した。これにより、ユーザー視点で観察される実物体と空中像の接点が明確となり、実物体と重ならない位置に空中像を描画可能となった。

図4は提案する光学系の概略図であり、IRセンサー、ディスプレイ、重ねて配置されたMMAPとホットミラーにより構成される。ディスプレイから出た光は45度傾けて設置されたMMAP内部で複数回反射し、MMAPに対して面对称な位置に空中像として結像する。一方で、システム上部に設置されたIRセンサーはホットミラーで反射した赤外線を受け取る。なお、本研究ではIRセンサーとしてTime of Flight (ToF)方式の深度センサーを利用する。ToFセンサーから照射される赤外線が、ホットミラー、計測対象、ホットミラーの順で反射しセンサーに返ってくることで、実物体の計測が可能となる。

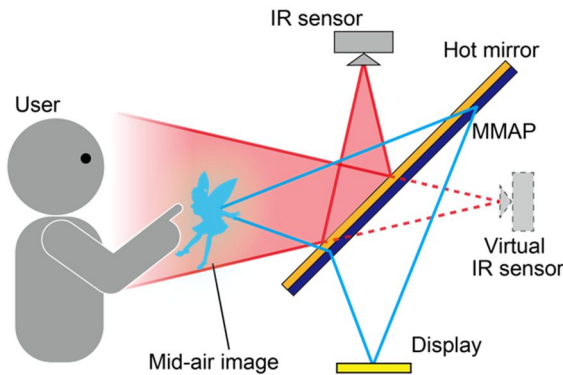


図4 提案する光学系

光学系を実装したのち、提案手法が空中像の画質に与える影響の調査を始めとした複数の実験を実施した。空中像の画質評価では、本手法によりホットミラーを介して表示される空中像の解像度・輝度・色度を従来の空中像光学系と比較した。その結果として表1に輝度の減衰率、表2に色度差を示す。いずれもユーザーの知覚には影響を及ぼさない程度の差であるとわかった。さらに、提案手法により実現可能なアプリケーション例を提示し、実際に実装して動作を確認した。提案手法を用いた空中像インタラクションでは、映像の時間的変化が容易である空中像と、実体を持つため直接操作できる実物体の両者の特性を活かすことにより、CG空間や実空間単体では実現し得ない体験が実現可能となる。国際会議や学内イベントでの展示では、累計120人以上の体験者が、提案手法により実装されたインタラクションを楽しむ様子を観察され、学会等で表彰を受けた(受賞に関しては後述する)。

表1 輝度計測結果(減衰率)

Luminance ratio [%]		Azimuth angle ( $\theta_A$ )				
		0°	5°	10°	15°	20°
Elevation angle ( $\theta_E$ )	-15°	83.6	84.2	82.7	82.4	78.0
	-10°	91.4	91.8	89.5	90.3	88.2
	-5°	93.2	93.2	93.0	92.4	91.4
	0°	94.8	94.5	94.2	94.2	93.4
	5°	94.9	95.1	95.4	94.4	94.4
	10°	94.9	94.8	94.8	94.8	94.7
	15°	94.5	94.0	94.3	95.3	97.4(※)

表2 色度計測結果(色度差)

Color difference ( $\Delta E$ )		Azimuth angle ( $\theta_A$ )				
		0°	5°	10°	15°	20°
Elevation angle ( $\theta_E$ )	-15°	21.9	18.4	21.8	20.1	18.9
	-10°	8.8	8.3	14.6	10.6	11.2
	-5°	6.6	6.9	7.2	6.6	7.8
	0°	5.3	5.4	5.1	4.5	4.5
	5°	4.5	4.4	4.6	3.9	3.5
	10°	3.9	4.5	4.4	3.5	3.4
	15°	4.3	3.5	3.9	5.5	4.0(※)

本光学系は、エンターテインメント施設などでの使用が期待される。空中像が裸眼で観察可能であることに加え、本手法では任意の実物体を使用してインタラクション可能なため、誰でも気軽に立ち寄って使用できる。今後の展望として、奥行方向に移動する空中像光学系などのその他光学系との組み合わせや、遮蔽矛盾問題の解決、テレプレゼンスでの応用が期待される。

【受賞】

に対して：Best Demo Award (ICAT-EGVE2022, 2022年12月3日)

に対して：第7回羽倉賞 奨励賞(一般財団法人 最先端表現技術利用推進協会, 2023年11月10日) ティザー最優秀賞・企業賞: バンダイナムコスタジオ賞・デモ優秀賞(一般投票)・優秀研究賞(ECシンポジウム2023, 2023年9月1日)、山下記念研究賞(情報処理学会, 8月3日) 2022年度 学生優秀賞(情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング研究会, 6月20日)

その他：Best Paper Honorable Mention Award (ICAT-EGVE2023, 2023年12月6日)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ando Shohei, Koizumi Naoya	4. 巻 12
2. 論文標題 An Optical Design for Interaction With Mid-Air Images Using the Shape of Real Objects	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 39129 ~ 39138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2024.3374782	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Miyu Fukuoka, Shohei Ando, Naoya Koizumi
2. 発表標題 Prototype to Control a Mid-air CG Character Using Motion Capture Data of a Plush Toy
3. 学会等名 ICAT-EGVE 2022 - International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments - Posters and Demos（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shohei Ando, Naoya Koizumi
2. 発表標題 Floagent: Interaction with Mid-Air Image via Hidden Sensors
3. 学会等名 SIGGRAPH Asia 2022 Emerging Technologies（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福岡美結, 安藤将平, 小泉直也
2. 発表標題 人形モーションキャプチャを用いた空中像キャラクターの操作
3. 学会等名 第27回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤 将平, 小泉 直也.
2. 発表標題 ホットミラーによる赤外光反射を用いた空中像インタラクション手法の提案
3. 学会等名 第64回 情報処理学会エンタテインメントコンピューティング研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 安藤 将平, 小泉 直也
2. 発表標題 各種再帰透過光学系を用いた空中カメラで撮影可能な範囲
3. 学会等名 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Naoya Koizumi
2. 発表標題 Application of mid-air image: Interaction Technology.
3. 学会等名 映像情報メディア学会2021年冬季大会 KIBME/ITE Joint Session ~ AR/MR/XR Technology ~ (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yutaro Yano and Naoya Koizumi
2. 発表標題 Mid-air image's background changes the impression of a mid-air image
3. 学会等名 ICAT-EGVE2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安藤 将平, 小泉 直也
2. 発表標題 空中像結像平面にある実物体の形状情報を活かしたインタラクシヨンの提案
3. 学会等名 エンタテインメントコンピューティングシンポジウム2023
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 空中像インタラクティブ装置	発明者 安藤 将平, 小泉 直也	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-093116	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

Best Demo Award (ICAT-EGVE2022, 2022年12月3日) 第7回羽倉賞 奨励賞 (一般財団法人 最先端表現技術利用推進協会, 2023年11月10日) ティザー最優秀賞・企業賞: バンダイナムコスタジオ賞・デモ優秀賞(一般投票)・優秀研究賞(EGシンポジウム2023, 2023年9月1日) 山下記念研究賞 (情報処理学会, 8月3日) 2022年度 学生優秀賞 (情報処理学会 エンタテインメントコンピューティング研究会, 6月20日) Best Paper Honorable Mention Award (ICAT-EGVE2023, 2023年12月6日)
--

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------