

令和 3 年 6 月 15 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K19817

研究課題名（和文）適応的焦点多重化による立体プロジェクションマッピングの輻輳調節矛盾解決

研究課題名（英文）Multifocal stereoscopic projection mapping for alleviating vergence-accommodation conflict

研究代表者

岩井 大輔（Iwai, Daisuke）

大阪大学・基礎工学研究科・准教授

研究者番号：90504837

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、両目に異なる投影像を提示して立体像を提示する立体プロジェクションマッピングにおける輻輳調節矛盾を解消し、正確な奥行きコンピュータグラフィックスを提示することを目的とした。研究期間において、ユーザが装着するメガネ型光学系の焦点距離変調により、実空間の投影面の虚像を提示立体像の奥行きへと移動させ、同期してプロジェクタより立体像を投影表示する技法を開発した。さらに、被験者実験を実施し、この技術によって輻輳調節矛盾が解消され、正確な奥行きを提示できることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

立体プロジェクションマッピング（PM）では、身の回りの様々な実物の上に、三次元のコンピュータグラフィックス（CG）を奥行きをともなって表現できることが可能である。一方、輻輳調節矛盾と呼ばれる、人の視覚が利用する奥行き手がかりの不一致により、立体PMが提示するCGの奥行きを観察者が正しく知覚できない、という問題があった。本研究課題では、電気式焦点可変レンズと呼ばれる特殊なレンズをメガネとして用いることでこの問題を解決した。この研究成果は、現実空間に立体的なバーチャルアバターを浮かび上がらせるといった、様々な拡張現実アプリケーションの社会展開を後押しすると考えている。

研究成果の概要（英文）：Stereoscopic projection mapping (PM) enables a user to see a 3D computer-generated (CG) object floating over physical surfaces of arbitrary shapes around us by projected imagery. However, current stereoscopic PM only satisfies binocular cues and is not capable of providing correct focus cues, which causes vergence-accommodation conflict. In this research project, we propose a multifocal approach to mitigate VAC in stereoscopic PM. We attach electrically focus tunable lenses (ETL) to active shutter glasses and apply fast and periodical focal sweep to the ETLs, by which the virtual image of a scene observed through the ETLs moves back and forth in each sweep period. A 3DCG object is projected from a synchronized high-speed projector only when the distance of the virtual image locates at a desired distance. This provides an observer with correct focus cues. We conducted a user study and confirmed that the proposed technique can provide a more correct depth cue than conventional systems.

研究分野：拡張現実感

キーワード：プロジェクションマッピング 輻輳調節矛盾 焦点可変レンズ 高速プロジェクタ

1. 研究開始当初の背景

身の周りの実空間に映像投影するプロジェクションマッピング(Projection Mapping; PM)において、視差をつけた投影像を両目に別々に提示して立体像を知覚させる立体 PM 技術は、そこにはないはずの物体を現実空間に浮かび上がらせたり、本物の物体の形状をごく自然な形で操作することすら可能とする。これまでの研究によって、建築、工業デザイン、医療、遠隔コミュニケーションといった広範な応用が期待されていた。

一方、立体 PM で採用されている両眼視差による奥行き提示アプローチでは、輻輳(眼球回転)と調節(ピント合わせ)という2つの奥行き手掛かり不一致が、違和感や疲労、酔いを頻繁に引き起こすことが知られていた。この輻輳調節矛盾は、両眼視差型のあらゆる立体ディスプレイの実用化を妨げる主要問題であったが、根本的な解決がなされていなかった。

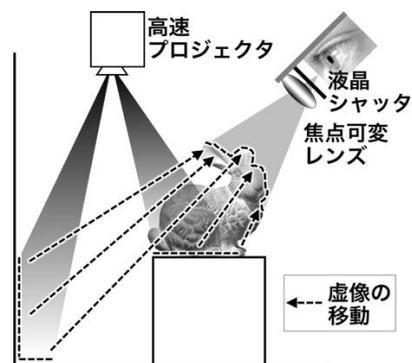


図1：輻輳調節矛盾を解消する立体 PM の概念図

2. 研究の目的

本研究課題では、輻輳調節矛盾のない立体 PM の実現を目指した。具体的には、装着可能で柔軟に焦点を変更できるメガネ型光学系の実現と、それに最新の高速プロジェクタを組み合わせた適応的焦点多重化投影システムの開発を行い、その有効性および性能限界を明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

ユーザが装着するメガネ型光学系の焦点距離変調により、実空間の投影面の虚像を提示立体像の奥行きへと移動させ、同期してプロジェクタより立体像を投影表示する。対象面と立体像の形状およびユーザとの位置関係によって虚像の移動距離は様々に変化するため、液体の界面形状を電気的に操作することで焦点距離を柔軟に変更できる焦点可変レンズを用いる。このレンズは小型軽量でありメガネのように装着しても違和感がない。これに液晶シャッターを組み合わせ、左右それぞれの目に視差のついた別々の映像を、ちらつきを知覚させないよう 1/60 秒毎に切り替えて表示することで立体 PM を実現する(図1)。この焦点多重化立体 PM システムで輻輳調節矛盾を解決するため、種々の技術課題について研究を進める。最後に被験者実験を通して提案法の有効性を評価する。

4. 研究成果

研究期間を通して、大きく分けて2つの成果が得られた。

4. 1 電気式焦点可変レンズの高速制御

本研究で用いた電気式焦点可変レンズは、透明な液体を薄膜で封入した液体レンズを、リング状のアクチュエーターを用いてその厚みを変えることで屈折率を制御する方式のものである。ちらつきを知覚させないためには、高速にレンズ屈折率を切り替えなければならないが、液体のため駆動時に波が生じ、所望の屈折率で安定するまでに一定の時間が必要であった。そこで本研究では、スパース最適制御に基づく制御手法を導入して、高速に屈折率を制御することに成功した。

まず、様々な入力系列に対するレンズ屈折率の応答を観測し解析した結果、このレンズを線形時不変システムとみなせることを発見した。これにより、ある信号系列が入力されたときの屈折率を、入力系列とインパルス応答との畳み込み計算で求めることができる。そこで、ある入力による屈折率と目標の屈折率との間の L1 ノルムが最小になるように、入力系列を求めることで、従来法よりも高速に目標屈折率を再現できることを示した。

4. 2 立体 PM における輻輳調節矛盾の解消

メガネとして採用した電気式焦点可変レンズの焦点距離を 60 Hz で変調し、観察している実

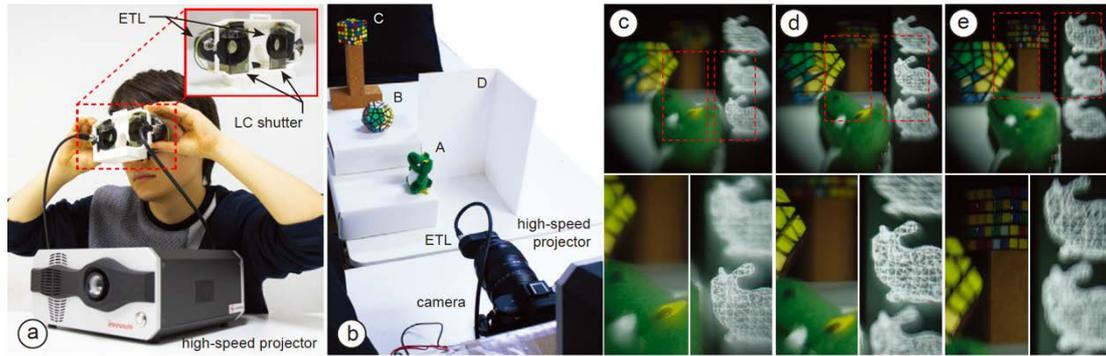


図2：輻輳調節矛盾を解消する立体PMの実験結果：(a) プロトタイプシステム、(b) 実験環境、(c-e)カメラのピント位置を物体A、物体B、物体Cの位置に合わせて撮影した写真。右側のバニーの投影映像はいずれも同じ距離のスクリーンDに投影しているが、ピントがあう位置が異なることから、提案手法が適切に動作していることが確認できた。

物の虚像を前後に振動させる。映像を表示したい位置に虚像が移動してきたタイミングで、プロジェクタからその映像を実物に投影する。これにより、正しい「調節」手がかりを観察者の視界に与える。さらに、奥行きに応じた両眼視差を表現して正しい「輻輳」手がかりを与えるため、液晶シャッターグラスを用いて、それぞれの目に異なる位置に配置した映像を見せる。

提示したい映像が立体像である場合、映像の虚像の奥行きを部位ごとに切り替える必要がある。このとき、観察者の目と電気式焦点可変レンズは同じ位置に配置できないことに起因して、虚像の奥行きに応じて投影映像の大きさが変化してしまう。このため、投影された立体像の各部位のサイズがそれぞれ異なってしまい、継ぎ目が生じる。従来、この継ぎ目を目立たなくするため、接続部で輝度を連続的に減少させてブレンディングする深度フィルタリングと呼ばれる技術が提案されており、本研究でも採用した。しかしながら、継ぎ目が十分に解消されなかったため、新たな手法を提案した。具体的には、観察像の大きさがどの程度変化するかを計算するモデルを構築し、大きさ変化を補償するために投影映像をリサイズする技術を開発した。

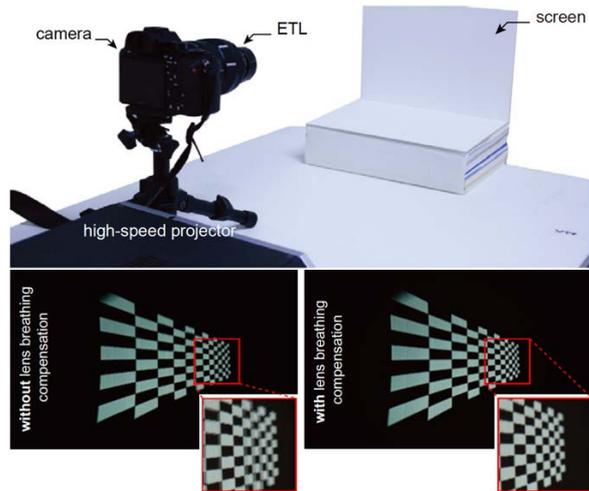


図3：異なる虚像位置の映像間の継ぎ目を解消する手法の検証実験。左下が同手法適用前、右下が同手法適用後。

1,000 fps で映像投影できる高速プロジェクタを用いてプロトタイプシステムを構築した。同システムを用いて、投影した映像を任意の奥行きに配置できることを確認した(図2)。また、提案手法によって、異なる虚像位置の映像間の継ぎ目が目立たなくなったことも、同システムを用いて確認した(図3)。最後に、提案する輻輳調節矛盾のない立体PMと、虚像位置が固定されており輻輳調節矛盾の生じる従来の立体PMとで、提示された投影像までの距離を回答する被験者実験を実施し、被験者が提案環境においてより正確な距離を知覚できていたことが確認できた。

4.3 まとめ

上述の通り、当初目標であった輻輳および調節の手がかりの双方を正しく提示できる立体PMを実現できた。このため、本研究課題は当初予定通りに進展したものと考える。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2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 Iwai Daisuke, Izawa Hidetoshi, Kashima Kenji, Ueda Tatsuyuki, Sato Kosuke	4. 巻 9
2. 論文標題 Speeded-Up Focus Control of Electrically Tunable Lens by Sparse Optimization	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12365
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-019-48900-z	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 -

1. 著者名 木村宙志, 岩井大輔, 佐藤宏介	4. 巻 31
2. 論文標題 焦点走査眼鏡と同期した時間多重化投影による立体投影の輻輳調節矛盾の軽減	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 光アライアンス	6. 最初と最後の頁 32-36
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Sorashi Kimura, Tatsuyuki Ueda, Daisuke Iwai, Kosuke Sato
2. 発表標題 Alleviating Vergence-Accommodation Conflict in Stereoscopic Projection by Time-Multiplexed Projection with Focal Sweep
3. 学会等名 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村宙志, 上田龍幸, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 焦点走査眼鏡と時間多重化投影による立体プロジェクションにおける輻輳調節矛盾の軽減
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 木村宙志, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 焦点走査眼鏡と同期した時間多重化投影による立体投影の輻輳調節矛盾の軽減
3. 学会等名 映情学技報
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 加嶋健司, 岩井大輔
2. 発表標題 液体可変焦点レンズのスパース最適制御
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 木村宙志, 岩井大輔, 佐藤宏介
2. 発表標題 非平面スクリーンへの立体投影における焦点走査眼鏡による輻輳調節矛盾の軽減
3. 学会等名 第25回日本バーチャルリアリティ学会大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究分担者	加嶋 健司 (Kashima Kenji) (60401551)	京都大学・情報学研究科・准教授 (14301)	

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
---------	---------