



VR180 を用いた MR システムにおける 深度知覚問題解決のための視線適応型 UI 提示法

A Gaze-Adaptive UI Presentation Method for Solving Depth Perception Issues in MR Systems with VR180

宇佐美 龍斗, 渡辺 圭貴, 志村 魁哉, 林田 望海, 浦野 健太, 米澤 拓郎, 河口 信夫

名古屋大学 (〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)

{usami,yoshiki,kaiya,linda}@ucl.nuee.nagoya-u.ac.jp

{urano,takuro,kawaguti}@nagoya-u.jp

概要: 近年, MR(複合現実, Mixed Reality) の需要は拡大を続け, 医療や製造業など多様な事業で活用されつつある. また, 没入型映像体験を提供するための映像フォーマットとして VR180 が存在する. しかし, VR180 を用いた MR システムには, UI 配置において二重視等のユーザの不快感や疲労を引き起こす深度知覚の問題がある. そこで本研究では, ユーザエクスペリエンスの向上を目的として, 深度知覚問題を解決すべく, 視線先の知覚深度に UI 深度を動的に調節する新しい UI 表示法の提案とリアルタイム VR180 映像への適用を行なう.

キーワード: ユーザインタフェース, 複合現実, 視覚, 深度知覚

1. はじめに

近年, MR(複合現実, Mixed Reality) 技術の発展により, 現実空間と仮想空間を統合した作業支援環境の構築が進んでいる. 医療や製造, 教育分野においては, 仮想情報の重畳表示によって現場の知識を可視化し, 作業精度の向上や学習効率の改善が期待されている. たとえば, 整備作業の手順を MR 表示し, 専門知識を持たない作業員でも効率的に作業を進められるようになるなど, MR は産業応用において有望な技術基盤とされている [1].

このような応用が広がる中で, 現実空間の映像と仮想オブジェクトが混在する MR 環境における情報提示の設計が大きな課題となっている. ユーザに提示される UI (User Interface) の位置や形状, 視覚的な見やすさは, 作業効率や快適性に直結する要素であり, とくに視線や奥行きといった身体感覚に調和した設計が求められる.

本研究では, こうした MR 環境における情報提示の一手法として, VR180 映像の利用に着目する. VR180 は 180 度の視野角を持つステレオカメラによって撮影される映像フォーマットであり, 両眼視差に基づく立体視が可能である. VR360 と比較して前方の映像に限定される一方, 処理負荷を軽減可能で映像内の奥行き情報を高精細に提示できるという特徴がある. この特性を活かし, 遠隔作業など現場の空間状況を立体的に伝える必要がある応用において, VR180 は有力な映像基盤となり, 実際にロボットアームの遠隔操作に活用されている [2][3][4].

しかし, VR180 を用いた MR は仮想空間内の球面スクリーン上でのステレオ立体視空間 [5] に, VR オブジェクトの UI を重畳するという特殊な環境である. そして, VR オブジェクトをステレオ立体視環境に重畳する場合, 視覚的

な違和感が生じる場合がある. 具体的には, ユーザが注視する映像中の知覚深度と提示される UI が異なる深度に配置されていると, 深度の不一致が発生する. このような深度差は, ピントが合わない, UI や映像が二重に見える (複視), UI と背景を交互に見る際の眼球運動が増える, といった視認性や快適性の問題を引き起こす要因となる. 結果として, 作業効率の低下や眼精疲労を誘発する可能性がある.

これまで, 3D コンテンツや一般的な MR 環境において, UI の深度提示に関する研究は数多く行われてきた. たとえば, UI を現実空間の対象に重ねるための視線追従や深度マッチングの手法などが提案されている [6][7][8]. しかし, 筆者らが確認した限り, VR180 を用いた MR 環境における UI 提示手法は十分に検討されていない. VR180 を用いた MR システムでは映像に対して UI が常に手前に表示されるため従来研究とは異なるアプローチが必要となる.

そこで本研究では, VR180 映像を用いた MR システムにおける UI 提示の最適化を目的として, ユーザの視線先の深度情報に対して UI の深度を調整する UI 提示法を提案する. 図 1 に示すように, 視線追跡機能が搭載された HMD (Head Mounted Display) を活用し, ユーザが注視する方向に応じて UI の位置とサイズを変化させ, 常に知覚的に自然な形で UI が提示されるよう制御を行う. 今回は VR180 映像を撮影するステレオカメラの上部に深度カメラを取り付けた機材を用いてプロトタイプの実装を行なった.

2. 関連研究

2.1 コンテンツの深度不一致

VR などの立体視環境において, 視差や遮蔽などの奥行き手がかりの整合が取れない状態が存在する [9][10]. UI が

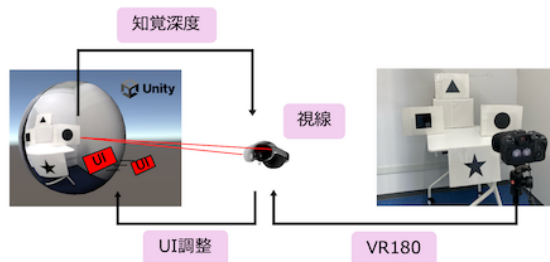


図 1: 提案手法概要図

手前に表示されているが、背景のステレオ映像がより手前に知覚され「後ろにある UI が手前の映像を隠す」といった不自然な状況が生じる。これは深度矛盾 (Depth Conflict) と呼ばれ、ユーザに複視や不快感を引き起こす [6][7]。また、前後関係が正しくても UI と背景映像の深度の差が大きい場合には、ユーザは頻繁にピントを切り替える必要があり視覚的不快感や疲労の原因となる [11]。図 2 に深度差による複視の再現を示す。深度に差があると手前の UI にピントを合わせた場合は奥のステレオ映像が、ステレオ映像にピントを合わせた場合は UI がぼやけて二重に見える。複視は前後関係を把握する上では必要な現象である。しかし、映画の字幕やゲームのミニマップなど、背景映像と同時に情報を取得したり、頻繁にピントを切り替える UI において、複視は取り除きたい要素である。

他にも VR などの立体視環境には調節と輻輳・開散の不一致と言った問題も存在する [12][13] が、VR180 を用いた MR 環境では仮想オブジェクトをスクリーンよりも手前に配置するという制約があり解消は困難である。そのため、本研究では VR180 での MR 環境における深度不一致解消にフォーカスした実装を行なった。

2.2 3D コンテンツにおける UI 提示手法

Nguyen らは、UI の深度を立体映像の深度に合わせて調整し、ユーザの知覚している深度との不一致を減らす手法を提案した。事前にステレオ映像の深度情報を解析し、UI 周辺部の映像深度に対して動的に UI 深度を調整して視聴者の不快感や UI の見にくさを低減している [6]。しかし、この手法では UI 以外の部分に視線を向けた際に複視が起こってしまう。

また、VR 環境において視線情報を用いたアプローチをしている研究が存在する。Ludwig らは現行 VR アプリにおける字幕設計を体系的に調査し、視線が字幕方向を向いた時に背景をぼかし読みやすさを向上する手法と視線が向いている物体の深度に字幕の深度を合わせる仕組みを実装した [7]。Shimizu らは 3D 映画への字幕付与における問題の調査を行った他、移動するオブジェクトに対して複数の字幕配置手法を提案し、可視性、可読性、疲労の観点で評価実験を行った。実験の結果、視線追従を模した、オブジェクトに追従する字幕配置は可視性、可読性、疲労において有効な提示法であると示した [8]。このように 3D コンテン



図 2: 深度差により複視が起こる様子

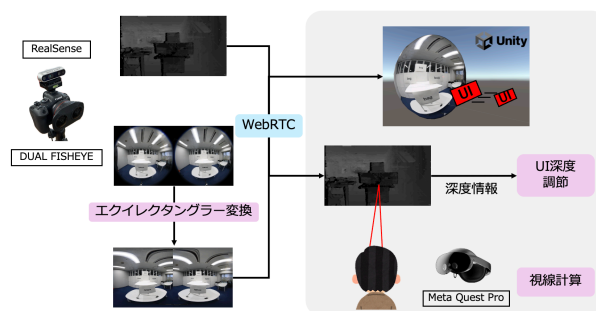


図 3: システム構成図

ツにおける深度問題に対応するための UI 提示手法はいくつか提案されているが、視線情報を活用したシステムを実装した上での評価は行われていない。また VR180 に対応した手法も筆者の知る限り存在しない。

そこで自身の研究にて、VR180 の静止画像を用いた環境下において、視線情報の活用により複視を抑えた UI 提示手法を実装・評価した。被験者実験の結果、複視の抑制による身体的負荷の軽減を確認した [14]。本研究は自身の研究を基盤とし、遠隔から送信される VR180 映像を対象として発展的に応用するものである。

3. 提案システム

図 3 にシステム構成図を示す。本研究では VR180 映像を用いた MR システムにおいて、UI の提示深度をユーザの視線に応じて動的に制御する UI 提示法を提案する。本手法は、視線情報を取得可能な HMD と、VR180 形式のステレオ映像を再生する MR 環境によって構成される。ステレオカメラで撮影した VR180 映像と深度カメラから得られた深度情報を元に、ユーザが視線を向けている映像部分の現実空間での深度をリアルタイムで取得する。取得した深度に対する UI 深度の調整によりユーザが映像から UI に視線を移す際に必要な眼球運動量が減少する。

3.1 VR180 を用いた立体視空間

VR180 映像を撮影するステレオカメラには Canon 社の EOS R6 MarkII に RF5.2mm F2.8 L DUAL FISHEYE のレンズを取り付けたものを使用する。ステレオカメラで撮影した VR180 映像は PC に送信され、PC 内でエクイ

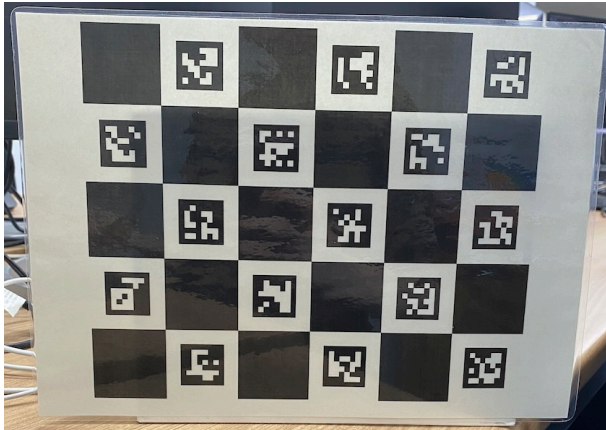


図 4: ArUco マーカー

レクタングラー変換を施す。エクイレクタングラー変換とは、ステレオカメラで撮影された魚眼映像を、仮想空間で球面スクリーン上に描画するための規格に変換する処理である。変換後の映像は WebRTC を用いて、HMD に送信する。WebRTC の使用には低遅延の VR180 配信を実現する狙いがある。その後、HMD 内で仮想空間上の球面スクリーンに受信した VR180 映像を表示しステレオ立体視空間を形成する。

3.2 実空間深度情報の取得

本システムでは遠隔地の VR180 映像を用いて MR 空間を作成するため、MR における現実空間の深度の計測に HMD に搭載された深度カメラの使用はできない。そのため、ステレオカメラの上部に Intel 社の RealSense D435i を取り付けて、深度の計測を可能にした。取得した深度画像も VR180 映像と同様に WebRTC で HMD に送信する。ステレオカメラと深度カメラは図 4 に示すような ArUco マーカーを用いて事前にキャリブレーションを行い、視線ベクトルと深度画像上のピクセル座標が一貫した空間上の点を指すよう調整した。

3.3 UI 深度調節機構

アイトラッカが搭載された HMD は Meta 社の Meta Quest Pro を用いる。ユーザの視線は HMD 内蔵の視線追跡センサーによって取得される。取得される情報は HMD 基準座標系におけるベクトルであり、これを元にスクリーン正面に対する視線の向きと角度が計算される。取得された視線ベクトルから、ユーザが見ている映像箇所に対応する深度画像のピクセルを計算し、そこに付加された深度情報に基づいて UI を仮想空間上に表示する際の深度を動的に調整する。また、UI のサイズは深度に応じてスケールされる。たとえば注視点が遠方にある場合、UI の表示位置も遠くなるためそのままの大きさだと UI に表示された文字が読めなくなる可能性がある。そのため、見かけ上の大きさが変化しないように UI オブジェクトを拡大する。これにより UI が常に一定の視認性を保つように調整される。サイズのスケール係数は、ユーザと UI との距離に対して比例するよう設計されている。

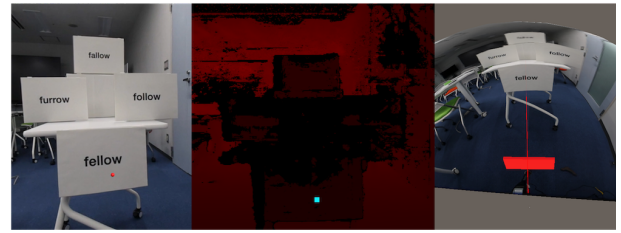


図 5: 手前のパネルに視線を向けた様子

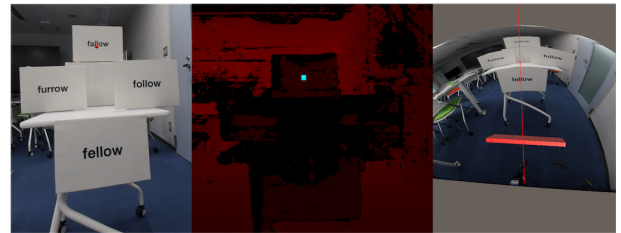


図 6: 奥のパネルに視線を向けた様子

3.4 システム動作の様子

図 5, 図 6 にシステム動作を可視化したものを示す。現実空間にはカメラからの深度が異なる 4 つのパネルが設置されている。手前のパネルと奥のパネルそれぞれに視線を向けた際に計算された深度画像内の対応ピクセルを可視化している。計算されたピクセルが表す深度に UI の深度を合わせ、見かけ上の大きさ変化しないようスケールしている様子が見て取れる。

4. 今後の展望

今回の研究では実装の簡便さを重視して深度カメラを用いたが、精度やコストの観点からも VR180 の魚眼ステレオ映像から深度情報を推定するのが望ましい。近年ではステレオマッチングに加え、単眼深度推定をはじめとする機械学習ベースの手法も進展しており、今後はそれらの導入を検討する。また、本システムは現在前方 180 度の固定視点による映像に限定されているが、マニピュレータやモータ機構との連携により、視点の回転や覗き込み操作が可能になり、遠隔作業時の操作性や没入感のさらなる向上が期待される。

また、UI の深度調節機構に関して、現在は取得された実空間の深度に直接対応させて UI の表示位置を制御している。しかし、対象物に凹凸が多い場合や奥行きの変化が激しい場面では UI の位置が頻繁に変化し、ちらつきが生じ視認性や快適性を損なう可能性がある。そのため、今後は深度変化を段階的に制御する機構や、一定閾値未満の深度変化に対しては UI 位置を変更しないといった安定化手法を検討している。また、本研究では VR180 映像から得られる知覚深度が実空間の深度と一致すると仮定しているが、実際には人間の視覚情報処理により知覚される奥行きと物理的な距離には乖離が生じると知られており、今後はその点も考慮した深度制御手法の検討が必要であると考えられる。

5. まとめ

本研究では、VR ヘッドセット、ステレオカメラ、深度カメラを用いて、VR180 を活用した MR システムにおける UI 深度の課題に対応するため、視線情報に基づく UI 提示手法を提案した。本システムでは、UI の提示位置を視線先における VR180 映像上の知覚深度に適応させ、視線移動における眼球運動を抑制し、視覚的疲労の軽減につながる可能性がある。今後は、本稿の展望で述べたように、深度推定の手法改善や視点操作機構の導入、知覚深度へのさらなる配慮といった課題に取り組んでいく予定である。

謝辞

本研究の一部は、内閣府 SIP3 (JPJ012495) 及び JST CREST (JPMJCR22M4) に支援いただきました。

参考文献

- [1] トヨタ自動車が全国の GR Garage に HoloLens2 を導入開始。自動車整備の働き方改革に Mixed Reality テクノロジーを活用, Microsoft, <https://news.microsoft.com/ja-jp/2020/10/06/201006-toyota-motor-started-introducing-hololens-2-in-gr-garage-nationwide/> 2025-04-28.
- [2] 宇佐美龍斗, 渡邊企章, 具志祐希, 筒井秀斗, 渡辺圭貴, 加納一馬, 相川雄也, 志村魁哉, 林田望海, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫: 遠隔 MR ロボットアーム制御によるスマートな 3D スキャンシステム, 日本バーチャルリアリティ学会大会 (2024),
- [3] Usami, R., Watanabe, K., Gushi, Y., Tsutsui, S., Watanabe, Y., Kano, K., Aikawa, Y., Shimura, K., Hayashida, N., Urano, K., Yonezawa, T. and Kawaguchi, N.: Demonstration: Remote 3D Scanning with VR and Robotic Arm, Proc. ACM Int. Joint Conf. Pervasive Ubiquitous Comput. (UbiComp '24), pp.201-204, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/3675094.3677548 (2024).
- [4] 筒井秀斗, 渡邊企章, 宇佐美龍斗, 具志祐希, 渡辺圭貴, 林田望海, 志村魁哉, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫: VR180 遠隔ロボットアームシステムにおける操作支援のための情報提示手法の検討, 情報処理学会, 研究報告モバイルコンピューティングと新社会システム (UBI), 第 2025-UBI-85 巻 (2025)
- [5] 鎌田光宣: 仮想空間における 180 度ステレオ動画の再生手法および VR コンテンツの提案, 国際 ICT 利用研究学会研究会研究論文誌, Vol.3, No.1, pp.11-15, DOI: 10.32188/tiars.3.1.11 (2024) .
- [6] Nguyen, C., DiVerdi, S., Hertzmann, A. and Liu, F.: Depth Conflict Reduction for Stereo VR Video Interfaces, Proc. CHI '18, Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, Paper 64, pp.1-9, DOI: 10.1145/3173574.3173638 (2018).
- [7] Sidenmark, L., Kiefer, N. and Gellersen, H.-W.: Subtitles in Interactive Virtual Reality: Using Gaze to Address Depth Conflicts, Proc. CHI 2019, pp.1-9, DOI: 10.1145/3290605.3300835 (2019).
- [8] 清水裕介, 大西鮎美, 寺田努, 塚本昌彦: 立体映像における奥行き要素に着目した視線適応型字幕配置手法, 情報処理学会論文誌, Vol.63, No.11, pp.1665-1678, DOI: 10.20729/00222142 (2022) .
- [9] Nakayama, K. and Shimojo, S.: da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours from unpaired image points, Vision Res., Vol.30, No.11, pp.1811-1825, DOI: 10.1016/0042-6989(90)90161-d, PMID: 2288092 (1990).
- [10] Nakayama, K., Shimojo, S. and Silverman, G.H.: Stereoscopic depth: its relation to image segmentation, grouping, and the recognition of occluded objects, Perception, Vol.18, No.1, pp.55-68, DOI: 10.1068/p180055, PMID: 2771595 (1989).
- [11] Li, S., Gao, C., Zhang, J., Zhang, Y., Liu, Y., Gu, J., Peng, Y. and Lyu, M.R.: Less Cybersickness, Please: Demystifying and Detecting Stereoscopic Visual Inconsistencies in Virtual Reality Apps, Proc. ACM Softw. Eng., Vol.1, FSE, Article 96, 23 pages, DOI: 10.1145/3660803 (2024).
- [12] Hoffman, D.M., Girshick, A.R., Akeley, K. and Banks, M.S.: Vergence-accommodation conflicts hinder visual performance and cause visual fatigue, J. Vis., Vol.8, No.3, p.33, DOI: 10.1167/8.3.33 (2008).
- [13] Kramida, G.: Resolving the Vergence-Accommodation Conflict in Head-Mounted Displays, IEEE Trans.Vis. Comput. Graph., Vol.22, No.7, pp.1912-1931, DOI: 10.1109/TVCG.2015.2473855 (2016).
- [14] 宇佐美龍斗, 渡辺圭貴, 志村魁哉, 林田望海, ジメネスフェリクス, 片山晋, 浦野健太, 米澤拓郎, 河口信夫: GADA-UI: VR180 を用いた MR システムに向けた視線適応型 UI 提示法, 情報処理学会, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2025) シンポジウム論文集, pp.541-547(2025)