



低遅延体積走査型立体ディスプレイとその拡張現実ミラーへの 応用

A Low-Latency Volumetric Display and its Application to an Augmented Reality Mirror

土屋匠大¹⁾, 鏡慎吾^{2,1)}

Shota Tsuchiya, Shingo Kagami

1) 東北大学 大学院情報科学研究科 (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

2) 東北大学 未踏スケールデータアナリティクスセンター (〒 980-0845 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 468-1)

概要: 本稿では、ハーフミラーを用いた体積走査型ディスプレイとその表示像を素早い運動へ追従させるための低遅延制御手法を提案する。提案する低遅延制御手法では、立体像を構成する断面画像を、追従対象の最新情報に基づいて立体像自体の描画更新レートを超える速度で動的に更新する。提案手法を実装したシステム構成と、投影された立体像に対するユーザ評価実験の結果について報告する。

キーワード: 空中・立体ディスプレイ, 拡張現実, 低遅延ディスプレイ

1. 緒言

体積走査型ディスプレイは、空間内を走査するスクリーンに画像を投影し、残像効果を利用することで、真の3次元像を形成する技術である。この技術は、実空間に発光点を生成するため、特殊な眼鏡を必要とせず、従来のステレオ視ディスプレイにおける輻輳-調節矛盾を解消できる。その結果、ユーザは複数人・複数視点から、違和感や疲労感を伴うことなく、高い没入感のある立体映像を体験できる。その一方、従来の体積走査型ディスプレイには課題がある。典型的なシステムでは、高速で動作する剛体スクリーンを使用しており、触れると危険であるため、立体像との直接インタラクションが困難である。

これに対して、いくつかの直接インタラクションを可能にする試みが行われてきた。Bouzbibら[1]は、柔軟な素材をスクリーンとして用いる体積走査型ディスプレイを提案した。Hunterら[2]はAska3Dプレートを用いた空中体積ディスプレイを提案した。しかしこれらのシステムにおいても、表示コンテンツと動的にインタラクションすることは依然として困難である。なぜなら、直接インタラクションを伴うシステムでは、間接インタラクションに比べて、ユーザ動作に対する高い応答性が求められるためである[3]。その一方で、一般的に、体積走査型ディスプレイでは、描画更新レートが物理的な走査レートによって制限されるため、低遅延化が困難である。

本研究では、ハーフミラーの背後に体積走査型ディスプレイを配置する構成を検討する。この構成では、ハーフミラーを通じて、操作対象物の鏡像と立体像が同じ空間上に重ねて見えるため、ユーザは立体像と擬似的に直接インタラクションすることが可能となる。この構成は、3Dマウスやジェスチャーといった間接インタラクションに比べて高

い操作性を提供するだけでなく、既存の直接インタラクション型システム[1, 2]に内在する「実物体やユーザの身体によって投影が遮られる」というオクルージョン問題を回避することで、新たな3D表現も可能とする。ただし、オクルージョンのない本構成においては、応答性に対する要求がより厳しくなる。

低遅延を実現する率直な方法としては、立体像の描画更新レートを向上させる、すなわち走査レートを上げることが挙げられる。たとえば光学的な走査機構を導入することでこれを実現することができる[4]。しかしこの手法では、プロジェクタのフレームレート制限がある限り、立体像を構成する画像数が減少してしまうという問題がある。

そこで本研究では、物体の姿勢を高速に追跡し、その最新の姿勢情報に基づいて、立体像を構成する各画像を逐次更新する制御手法を提案する。この手法では、物理的な走査レートを変更することなく、描画更新レートを超える速度で画像を更新することで、低遅延を実現する。なお、この制御手法は本研究で提案する拡張現実ミラー構成だけでなく、他の直接操作型の体積走査型ディスプレイにも適用可能である。

本稿では、拡張現実ミラー型体積走査型ディスプレイシステム、及びそのシステムで用いる体積走査型ディスプレイの低遅延制御手法を提案する。また、提案制御手法による立体像の形状の知覚に関する実験と提案手法と従来手法の比較実験の結果の一部を報告する。

2. 提案システム

2.1 低遅延投影型体積走査型ディスプレイ

緒言で述べたように、描画更新レートを上げて低遅延を実現することは、技術的に困難である。そこで本研究では、

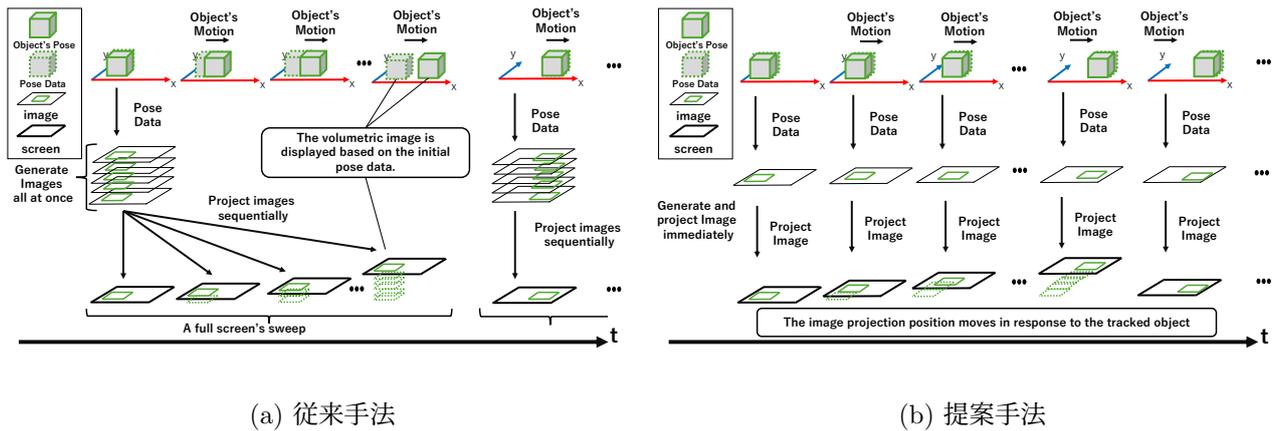


図 1: 従来手法と提案手法の比較図

描画更新レートを上げることなく、立体像の低遅延投影を実現するシステムを提案する。

図 1-(b) に示すように、本提案手法では、追跡された物体の姿勢情報を高速で取得し、それに基づいて直ちに体積スライス画像を生成・投影する。これにより、図 1-(a) に見られるような一走査周期の完了を待つことで生じる遅延を排除し、追従対象に対して最小限の遅延で表示することが可能となる。提案手法により、測定誤差やキャリブレーション誤差が無視でき、ゼロ遅延が仮定される理想的な環境下では、常に追従対象に完全に位置合わせされた断片的な立体像が提示されることになる。

一方で、この手法では、立体像を構成する各画像が異なるタイミングの姿勢に基づいて生成されるため、静止空間上には歪んだ立体像が形成されることになる。特に、走査周期の後半にスクリーンと交差する立体像内の点は、追従対象の移動方向にずれて表示され、歪みとして現れる。

しかしながら、人間の視覚システムは、運動情報を利用して時間的に断片化されたパターンを統合し、全体像を知覚することが示唆されており [5]、この観点から、提案手法により表示される像は許容できる程度に正しく知覚されるものと期待できる。この点については、次節の実験にて検証する。

同様の手法は、低遅延ディスプレイの先行研究にも見られる。Kagami ら [6][7] は、DLP プロジェクタが入力画像を時間的に順次表示される 2 値画像に分解する性質を利用し、それぞれの 2 値画像を最新の運動情報に基づいて更新することで、低遅延な投影を実現した。Nomoto ら [8] は、サンプリング不足によりノイズを含む計算途中のパストレーシング画像を高速に投影することで、ノイズ除去されたパストレーシング画像の低遅延投影を実現した。これらの手法は、画像を加法的に分解し、それぞれの要素を個別に適時制御することで低遅延を達成した事例である。

また Friston ら [9] は、HMD 環境下で、各画素の走査線ごとに、その走査線が表示される時点のシーンに基づいて画像を生成・表示することで、空間的に画像を分解し、それぞれの構成要素を適時制御することで低遅延な描画を実現した。これは、本提案手法と同様の空間分解的手法の一例

である。

2.2 システム実装

提案システムでは、ユーザはハーフミラーの前に座り、その鏡像を通して立体像とインタラクションを行う。

本システムは、高速プロジェクタ、PC (CPU: Core i9-14900KS, GPU: RTX 4090, RAM: 64 GB)、DC モータ (Maxon A-MAX32)、ロータリーエンコーダ (Autonics E40S-6-3600-3-N-24)、螺旋状スクリーン、マイコンボード (Waves ESP-WROOM-32 DevKitC)、2 台の高速カメラ (Basler acA720-520um)、およびハーフミラーで構成されている。カメラの最大フレームレートは 524 fps である。螺旋状スクリーンは 3 枚のブレードを持ち、PID 制御により毎秒 5 回転し、これにより 15 Hz で立体像を走査する。螺旋の半径は 120 mm、高さは 160 mm である。

本研究では、次の 2 つの構成を開発した。一つは鏡らが開発したプロジェクタ [6](以下プロジェクタ A) 構成、もう一方は ViaLUX 社製 V-7001 プロジェクタ (以下プロジェクタ B) 構成である。

プロジェクタ A は、任意の画像を高速に投影することはできないが、予めロードした 2 値画像に対して、PC から送信される座標変換パラメータに基づいて射影変換を施すことで、2469 Hz の速度で描画を更新できる。本構成では、3 つの明るい円 (スクリーンと立体像の交点) を配置した画像を事前にロードし、アフィン変換を適用することで目的の画像を生成する。この構成では、送信するのがアフィン変換パラメータのみで済むため、高い奥行き解像度と低遅延性を実現できる。ただし、描画可能な光点の数に限りがあるため、立体像として表示できるのはワイヤフレーム構造などのスパースな形状に限られる。

より複雑な形状を表示するために、プロジェクタ B を用いた構成も開発した。我々の実装では、任意の 1 ビット画像を 625 Hz で投影できる。これにより、任意形状の立体像を描画できる一方で、画像生成および転送に要する時間が増加するため、奥行き解像度が低下し、遅延も大きくなるというトレードオフがある。

いずれの構成においても、PC 上では物体追跡スレッドと画像生成スレッドの 2 つが並列に実行される。物体追跡ス

レッドは、カメラ画像から追跡対象物の姿勢を推定し、それをカメラ座標系からスクリーン座標系に変換して画像生成スレッドに渡す。画像生成スレッドでは、前回の姿勢情報を保持し、線形外挿によってカメラ～PC間の遅延を補償する。さらに、推定された姿勢とマイコンからの同期信号に基づいてスクリーンとの交点を計算し、画像または座標変換パラメータを算出してUSB経由でプロジェクタに送信する。

2.3 拡張現実ミラー型体積走査型ディスプレイシステム

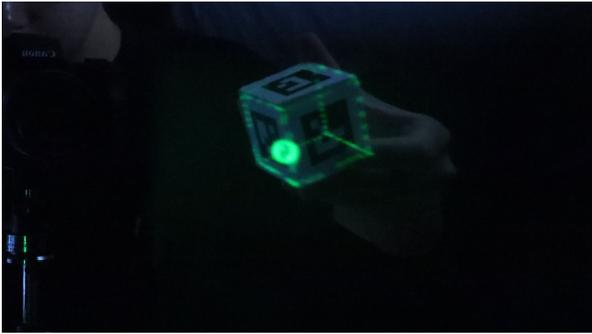


図 2: キューブの鏡像内に表示される仮想的な球

図 2 に提案システムによる立体像の例を示す。図 2 では、アクリルキューブの鏡像内に仮想的な球を表示している。ユーザは箱の中を動く球の物理シミュレーションを疑似的な直接操作で楽しむことができる。また、提案システムでは、物体の内部や背後といった、プロジェクタの投影が遮られてしまう位置にも立体像を投影できる。この特性により、従来不可能だった 3D 表現が可能となり、アプリケーションの可能性を広げる。図 2 の立体像は、プロジェクタ B 構成を用いて表示した。

3. 評価実験

提案手法の有効性を評価するために、2つのユーザ実験を実施した。各実験の参加者は共通であり、対象は 20~23 歳の成人 14 名（男性 12 名、女性 2 名）で、全員が正常または矯正視力を有していた。また、PC の処理やデバイス間通信による遅延を極力排除するため、プロジェクタ A 構成を採用した。

3.1 立体像の運動速度の変化に伴う歪みの度合いの知覚

3.1.1 実験手順

この実験では、立体像における歪みの知覚が運動速度によってどのように変化するかを評価した。一辺 30 mm の立方体の立体像を、スクリーン上の一方向に沿って 160 mm の距離を一定速度で往復運動させた。端に到達すると即座に反転し、連続的に振動するように設定した。参加者は、さまざまな運動速度における立体像の歪みを観察した。評価に用いた運動速度条件は 10 通りで、0.27, 0.29, 0.32, 0.36, 0.40, 0.46, 0.53, 0.64, 0.80, 1.07 m/s である。立体像に適用される姿勢更新レートは 500 Hz に固定されており、これは投影画像の計算に使用される姿勢が 1 秒間に 500 回更新されることを意味する。なお、立体像自体の描画更新レートは 15 Hz である点に注意されたい。参加者は、0 度から 18 度まで 2 度刻み（全 10 種類）でせん断歪みが与えられ

た参照画像セットから、自身が知覚した歪みに最も近いものを選択した。参照画像には各角度に対応して 0-9 の番号を振った。運動速度の提示順序はランダムで、各条件について 3 回繰り返し提示した。分析には、3 回の回答の平均値を用いた。参加者は、スクリーンから約 40 cm の距離から立体像をさまざまな角度から観察した。

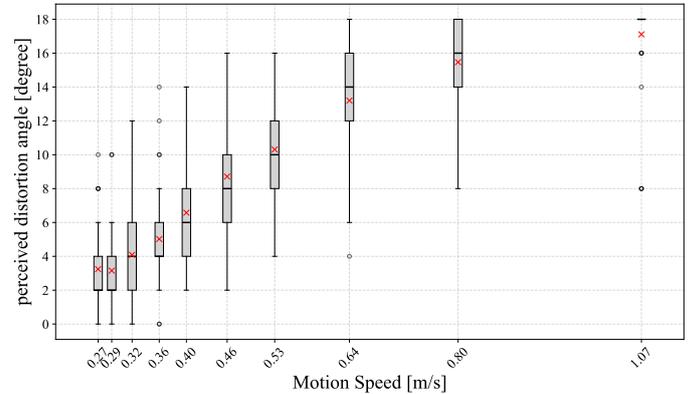


図 3: 運動速度ごとの立体像の歪みの知覚の度合い

3.1.2 結果

図 3 に実験結果を示す。縦軸は知覚された歪み角度、横軸は運動速度を示している。横軸は実数スケールで表記されている。

実験結果から、移動する立体像における知覚歪みは運動速度に応じて変化することが確認された。具体的には、速度が 0.29 m/s 以下では、知覚歪みは概ね一定で約 3 度にとどまった。一方、0.32 から 0.64 m/s の範囲では、歪み角は速度の増加にほぼ比例して増加した。さらに、0.80~1.07 m/s の範囲では、歪みの増加率が次第に緩やかになる傾向が見られた。全体として、移動中の立体像の歪みは、概ね運動速度に比例して増加する傾向があることが示唆された。特に 0.29 m/s 程度以下の中程度の速度では、歪み角は数度程度と小さく、画像が移動中であることを踏まえると、注意深く観察しなければ気づかないレベルと考えられる。

なお、0.80 m/s 以上で歪みの増加が鈍化しているように見える理由としては、提示された選択肢の最大角度が上限となっていた可能性がある。つまり、実際にはより大きな歪みを知覚していたにもかかわらず、参加者は与えられた中で最も大きな角度を選ばざるを得なかったと考えられる。

3.2 運動する投影対象に追従する立体像の遅延の知覚

3.2.1 実験手順

この実験では、移動する対象に追従する立体像に対する遅延の知覚について評価を行った。立方体の立体像を、移動するロボットアームの先端に取り付けられたアクリル立方体の鏡像上に投影し、参加者はロボットの運動速度と姿勢更新間隔の各組み合わせに対して、立体像に遅れを感じたかどうかを回答した。ロボットの運動速度は、振動運動中の平均速度として 0.35, 0.26, 0.21, 0.18, 0.15, 0.13 m/s の 6 条件を設定した。また、姿勢更新間隔は 66.6, 33.3, 16.7, 8.3, 4.2, 2.8, 2.0 ms の 7 条件である。分析を簡略化するため、姿勢更新レートではなく間隔で表記している。なお、

66.6 ms 条件は従来手法による表示と一致する。各運動速度に対して、7つの姿勢更新間隔をランダムな順序で3回ずつ提示し、参加者の2値回答（1: 遅れを感じた, 0: 感じなかった）の平均値を評価指標とした。ロボットアームは、実体の立方体を振幅 79 mm の範囲で往復移動させた。アクリル立方体および立体像はともに、一辺 30 mm の立方体とした。参加者はハーフミラーの約 50 cm 前に着席し、さまざまな角度から立体像を観察した。また、ハーフミラーとスクリーンは約 20 cm 離して配置されている。

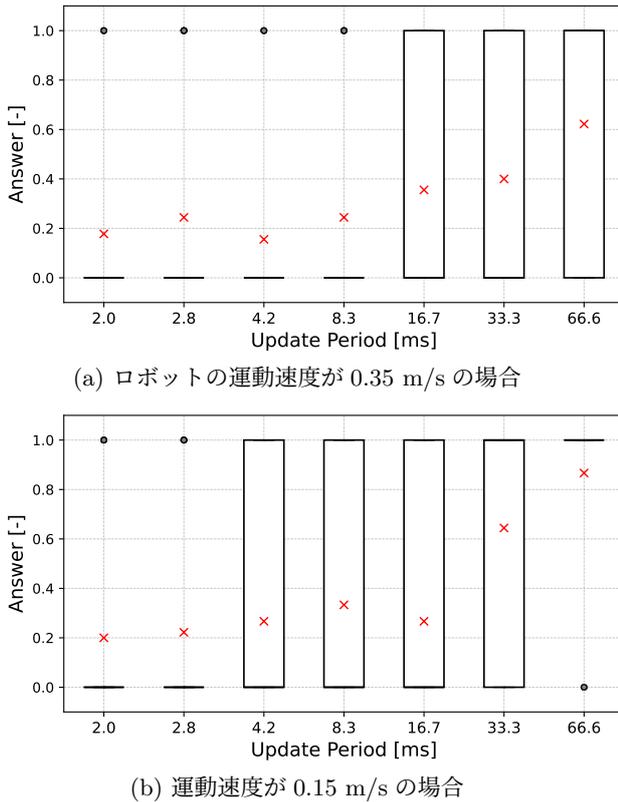


図 4: 運動速度ごとの更新周期と遅延の知覚の関係

3.2.2 結果

図 4 に結果を示す。縦軸は回答値（遅延を知覚した確率）、横軸は姿勢更新間隔を表している。赤い「×」は平均値、黒い「○」は外れ値を示す。

実験結果から、従来手法（姿勢更新間隔 66.6 ms）と比較して、提案手法では全ての更新周期において遅延を知覚する確率が「知覚しない」側へとシフトした。これは、提案手法に一定の遅延低減効果があることを示唆している。特に、姿勢更新間隔が 8.3 ms から 66.6 ms へと変化した場合には、遅延を知覚する確率の増加が大きく、2.0 ms から 8.3 ms へと変化した場合と比べてその影響が顕著だった。この結果から、8.3 ms 程度の更新周期でも、十分な遅延低減効果が得られる可能性があることが示される。一方で、更新周期が非常に短くなると、立体像のエッジが細かく分割されて投影されるため、表面が波打ったように見えることがある。そのため、もしある程度長い更新周期でも同等の遅延低減効果が得られるのであれば、視覚的な品質を保つためにも、より長い周期で運用する方が望ましいと考えられる。

4. 結言

本稿では、拡張現実ミラー型体積走査型ディスプレイシステムと、そのシステムで用いる体積走査型ディスプレイの低遅延制御手法を紹介した。実験の結果、提案制御手法には、従来手法と比較して遅延知覚を低減する効果があることが示された。その一方、立体像の運動速度に比例して、立体像の知覚歪みが増加する傾向も確認された。

今後の課題としては、歪み補正手法の検討に加え、本システムの特徴を活かしたアプリケーション提案も行っていく予定である。

謝辞 本研究の一部は科研費 22H03622, 21H05298 の支援を受けた。

参考文献

- [1] E. Bouzbib, I. Sarasate, U. J. Fernández, I. Fernández, M. Lopez-Amo, I. Ezcurdia, A. Marzo: “FlexiVol: a Volumetric Display with an Elastic Diffuser to Enable Reach-Through Interaction,” *the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Article 977, 1–16, 2025
- [2] S. Hunter, R. Azuma, J. M. Thompson, D. Macleod, D. Disanjh: “Mid-air interaction with a 3D aerial display,” *SIGGRAPH 2017 Emerging Technologies*, Article 17, 1–2, 2017
- [3] R. Jota, A. Ng, P. Dietz, D. Wigdor: “How fast is fast enough? a study of the effects of latency in direct-touch pointing tasks,” *the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2291–2300, 2013
- [4] K. Suzuki, Y. Fukano, H. Oku: “1000-volume/s high-speed volumetric display for high-speed HMD,” *Opt. Express*, 28, 29455–29468, 2020
- [5] S. Nishida: “Motion-based analysis of spatial patterns by the human visual system,” *Current biology*, 14, 830–839, 2004
- [6] S. Kagami, K. Hashimoto: “A full-color single-chip-DLP projector with an embedded 2400-fps homography warping engine,” *SIGGRAPH 2018 Emerging Technologies*, Article 1, 2018
- [7] S. Kagami, K. Hashimoto: “Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment,” *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, No. 11, 3094–3104, 2019
- [8] T. Nomoto, R. Koishihara, Y. Watanabe: “Realistic Dynamic Projection Mapping Using Real-Time Ray Tracing,” *SIGGRAPH 2020 Emerging Technologies*, Article 13, 1–2, 2020
- [9] S. Friston, T. Ritschel, A. Steed: “Perceptual rasterization for head-mounted display image synthesis,” *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 38, 1–14, 2019