

東京大学
情報理工学系研究科 電子情報学専攻
修士論文

タイトル
Title

48-216413

木内 陽大
Akihiro Kiuchi

指導教員 江崎 浩 教授

2023年1月

概要

日本語の要約.

Abstract

English abstract.

目次

第 1 章	緒言	1
1.1	背景	1
1.2	問題点	2
1.3	本研究の目的	3
1.4	本論文の構成	3
第 2 章	提案するシステムの概要	4
2.1	はじめに	4
2.2	Windowing System	4
2.3	類似研究・技術	5
2.4	本論文での結論	7
第 3 章	レンダリングプロトコル	10
3.1	3D コンピュータグラフィックス	10
3.2	関連技術・研究	12
3.3	提案手法	16
3.4	評価：レンダリング性能	19
3.5	評価：レンダリングの自由度	22
3.6	結論	22
第 4 章	2D アプリケーションの利用	23
4.1	関連技術・研究	23
4.2	提案手法	24
4.3	評価	26
4.4	結論	26
第 5 章	Remote Rendering	28
5.1	関連技術・研究	28
5.2	提案手法	28
5.3	評価	28

vi 目次

5.4 結論	28
第6章 結言	29
発表文献と研究活動	30
参考文献	31

第1章

緒言

1.1 背景

Virtual Reality (VR) や Augmented Reality (AR) などの没入環境の社会実装は昨今急速に進んでおり、比較的安価なコンシューマ向けの Head Mounted Display (HMD) の登場により、多くの人が没入環境を体験、利用できるようになった。没入空間の利用シーンは年々多様化しており、コンシューマ向けの VR/AR マーケットではゲームなどエンターテイメント向けの利用が目立つが、VRChat^{*1}や Horizon World^{*2}といったコミュニティに重きを置いた利用も活発になり、コンピュータネットワーク上の新たな世界を指すメタバースという言葉が流行っている。また没入空間の職業支援や、職業訓練への適用として、手術 [1] や航空宇宙 [2]、軍事 [3]、農業 [4] などさまざまな分野での研究が活発であり、産業界での実際の導入も進んでいることが IDC のレポート [5] からもわかる。

ここで述べておきたいことは、昨今の没入環境の利用シーンは多様化しており、様々なコンテキストにおいて没入空間の利用が期待されているという点である。ここでのコンテキストとは、利用者がどのような目的を持ってどのような作業をしようとしているかを指し、それは利用時の状況（休日で趣味に時間を使いたいのか、平日で仕事をしたいのかなど）や利用者の職業などの複雑な組み合わせのもとに生起され、個人ごとの差異があり、個人のなかでもその時々ごとに連続的に変わってゆくものであるとする。ここで連続的と表現しているのは、ユーザがもつコンテキストは料理をする、勉強をする、などと離散的に切り替わってゆくものではなく、料理をしながら動画を見る、料理をしながら一度動画を止めてタイマーを開始する、一度料理をやめてメールを確認する、と連続的に変化するものであることに注意したいからである。

^{*1} <https://hello.vrchat.com/>

^{*2} <https://www.oculus.com/horizon-worlds/>

1.2 問題点

これから現在の没入環境のパラダイムの問題点を考える前に、これと比較するため2次元のデスクトップ環境のパラダイムを考察する。2次元のデスクトップ環境では、1つのスクリーン空間に複数のアプリケーションを立ち上げて使うことができる。アプリケーションは随時開発が可能で、様々な開発元のアプリケーションをダウンロードしたり、アプリケーション自分で作成したりして、他の開発元のアプリケーションと一緒に組み合わせて利用できる。アプリケーションの起動や停止も随時可能であるため、ユーザは自分に必要なアプリケーションをダウンロードしたり、開発したりしておき、時々のコンテキストに合わせて必要なアプリケーションを起動して、不要なアプリケーションを停止するということを行っている。これによつて1つのスクリーン空間を柔軟に変化させ、様々なコンテキストに適応させて用いている（図1.1）。

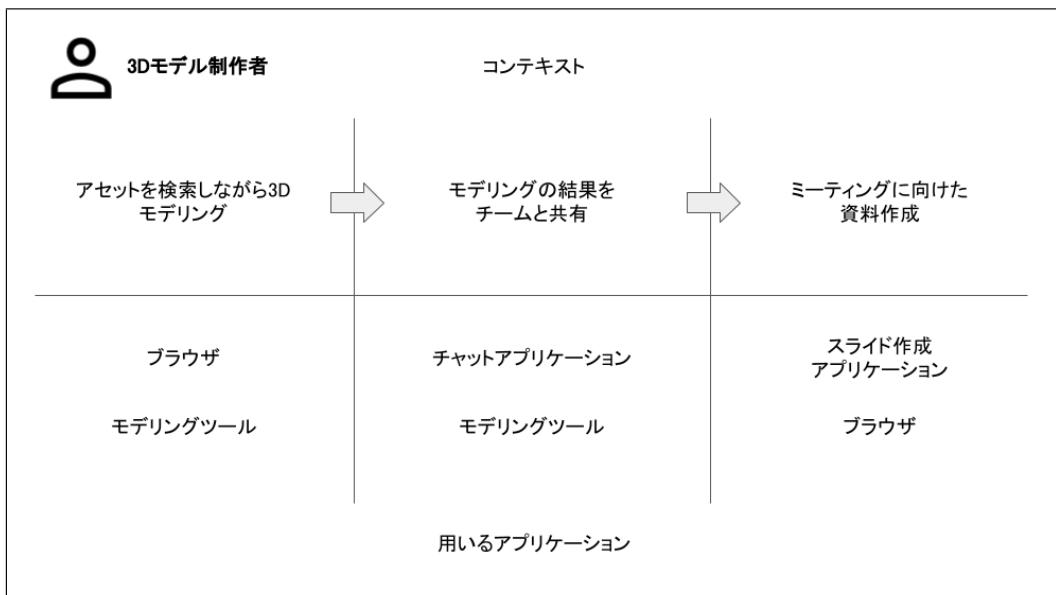


図1.1. 2次元のデスクトップ環境のユーザがコンテキストを変化させてゆく例。3Dモデルの制作者を例に、コンテキストを上段の左から右のように変化していくとき、3Dモデル制作者は下段のようにそのコンテキストの変化に対応して、アプリケーションを開じたり、新しく開いたりすることでスクリーン空間を柔軟に適応させることができる。

以上の点から2次元のデスクトップ環境でのスクリーン空間は不特定のコンテキストに対応可能な、マルチコンテキストな空間であるといえる。

比較して現在の没入空間のパラダイムでは、基本的に1つのアプリケーションがユーザの視野全体を支配している。そのためユーザがコンテキストを切り替えるときは、アプリケーションを別のものに切り替え、全く異なる世界に移動するような形となる（図1.2）。このため、没入環境での3D空間は特定にアプリケーションによって、会議をするといった特定のコンテキ

ストのために設計されているシングルコンテキストな空間となっている。没入環境が今後ユーザの普段の生活に溶け込み、継続的に生活や仕事をサポートするようになるためには、ユーザの連続的に変化し続けるコンテキストに柔軟に対応可能な、新しいパラダイムが必要である。



Google. 「Google Earth VR」 <https://arvr.google.com/earth/> (accessed Dec 19, 2022) . VRChat Inc. 「PRESS KIT - VRChat」 <https://hello.vrchat.com/press> (accessed Dec 19, 2022) .

図 1.2. 没入環境でコンテキストを切り替える例。地図を見るというコンテキストから大人数でゲームをするというコンテキストへの切り替えを考える。この時ユーザは左図のような空間全体を支配した地図アプリケーションの中において、このアプリケーションを停止し、一度ホームの空間に戻る。そこから次は右図のようなソーシャルアプリケーションを起動し、そのアプリケーションの世界に入るという流れになる。

1.3 本研究の目的

本研究の目的はマルチコンテキストな没入環境の実現を目指し、その新しいパラダイムの可能性を詳細に検討することである。その検討が机上の空論とならないために、本研究では実際に動くシステムを実装しており、現状のエンジニアリング的な制約や、コンピューティングリソースの制約からくる限界にも目を向ける。

1.4 本論文の構成

本論文では特に、マルチコンテキストな没入空間を実現するためのシステムデザインや、技術的な課題の解決に関する研究成果をまとめている。

第 2 章

提案するシステムの概要

2.1 はじめに

本章では次章以降の研究課題解決を述べるにあたり、システムの全体像とそれを採用した理由を既存研究と比較しつつまとめる。

1.2 で述べたように、現在の没入環境のパラダイムでは、2 次元のデスクトップ環境とは異なり、基本的に 1 つのアプリケーションがユーザの環境全体を支配するため、マルチコンテキストな没入空間は実現できていない。このため没入環境でも複数のアプリケーションを同時に利用できるようにしようとするのは自然であり、本論文で提案するシステムでも複数アプリケーションが没入環境で同時に利用できることを基礎的なシステム要件の 1 つとする。ここでの没入環境のアプリケーションとは、ユーザの視野全体を支配するようなものではなく、机や時計といった空間の一部を占有するようなアプリケーションである。

次節以降ではまず、2.2 で 2 次元のデスクトップ環境でのマルチコンテキストな空間を作り出している重要な技術要素である Windowing System について、その特徴をマルチコンテキストという視点からまとめる。次に 2.3 で、関連する研究や他の技術要素について触れ、最後に 2.4 で本論文の結論として採用したシステムの概要と、システムが提供する機能のスコープを定義する。

2.2 Windowing System

Windowing System とは、2 次元のデスクトップ環境で複数のアプリケーションを 1 つのスクリーン空間で同時に用いるための仕組みである。さまざまなオペレーティングシステムでの実装があり、オープンソースな実装としては X.Org^{*1}による X Window System[6] や Wayland^{*2}などがある。Windowing System は 2 次元のデスクトップ環境において、ブラウザやメールクライアントなど複数のアプリケーションを同時に利用することを可能にしているが、アプリケーション間の衝突なくこれを実現するための様々な工夫がある。

^{*1} <https://www.x.org/wiki/>

^{*2} <https://wayland.freedesktop.org/>

まず、Windowing System では、サーバ・クライアントモデルを採用しており、複数のアプリケーション（クライアント）と、それらとコミュニケーションを行ってウィンドウをスクリーンに実際に表示するコンポジッタ（サーバ）から構成される。アプリケーションはそれぞれプロセスとして起動でき、Inter-Process Communication (IPC) によってコンポジッタとコミュニケーションをとる。このためアプリケーションどうしはオペレーティングシステムによってメモリ空間の分割や、CPU のスケジューリング、セキュリティ上の分離などを行ってもらえ、基本的なアプリケーションどうしの衝突を防いでいる。また、2 次元のデスクトップ環境では 1 つのスクリーン空間上に複数のアプリケーションがウィンドウと呼ばれる長方形領域が重なる形で表示される。ウィンドウの位置や大きさは基本的にアプリケーション側で決めるのではなく、ユーザが調整できるため、アプリケーションの空間的な衝突をユーザ自身が最小限にできる。さらに、ユーザはマウスなどのポインティングデバイスでスクリーン上のカーソルを操作し、カーソルを介してアプリケーションとのインタラクションを行う。入力に関するこのプロトコルはカーソルが重なっているウィンドウのみにカーソルのイベントが伝達されるという制約ゆえに、1 つのポインティングデバイスの入力イベントを適切にアプリケーションに割り振っており、ユーザの意図しないアプリケーションが入力を受け取ったり、複数のアプリケーションが入力を同時に受け取ってしまうといった、入力の衝突を最小限にしている。Windowing System ではこういった衝突を防ぐ工夫によって、それぞれ全く無関係のアプリケーションをどのように組み合わせて用いても、ある程度使いやすくデスクトップ環境を利用できるようにしている。マルチコンテキストな空間を実現するためには、市場にある様々なアプリケーションの中から、ユーザが自由に選んで、その時々のコンテキストに合わせて恣意的にアプリケーションを組み合わせられる必要があるため、このアプリケーション間の衝突を防ぐ仕組みは、マルチコンテキストな没入環境を考えるうえでも重要である。

2.3 類似研究・技術

初めてマルチコンテキストな没入環境を実現するシステムの提案がされたのは 1997 年の Tsao らによる CRYSTAL[7] である。CRYSTAL は X Windowing System に強い影響を受けており、サーバ・クライアントモデルに近い、MasterSynchronizer とそれぞれ機能を持ったモジュールからなるシステム（図 2.1）を提案している。ここではモジュールがアプリケーションと近い意味を持つが、アプリケーションだけではなく、ヘッドトラッキングなど、ハードウェアから提供されるデータもモジュールとして抽象化されている。单一マシン向けであり、モジュールと MasterSynchronizer とのコミュニケーションは共有メモリとセマフォを用いた独自のプロトコルで効率的に行っている。アプリケーションには 2 次元デスクトップ環境におけるウィンドウのメタファーとして 3D Crystal（図 2.2）と呼ばれる直方体領域が割り当てられており、このようなメタファーは後述する motorcar[8] や studierstube[9] などでも用いられている。

Schmalstieg らは AR の分野で、複数アプリケーションを表示することに加え、複数ユーザ・ホストマシンでの利用を想定したシステムである、Studierstube[9] を提案した。Studierstube

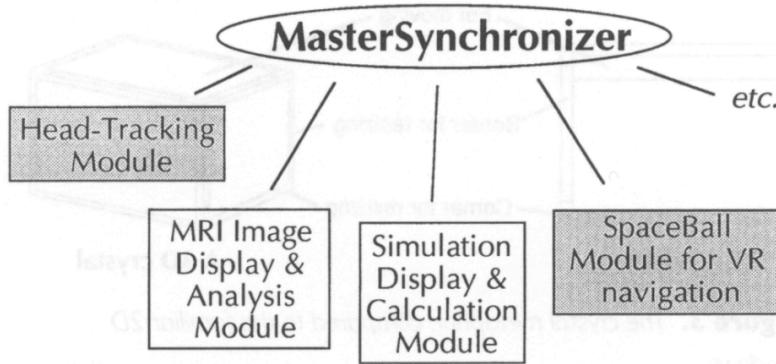


図 2.1. CRYSTAL のシステム概要図. MasterSynchronizer とそれぞれ機能を持ったモジュールからなる. 影のついた箇所はハードウェアコンポーネントである. (Adapted from Tsao and Lumsden 1997[7])

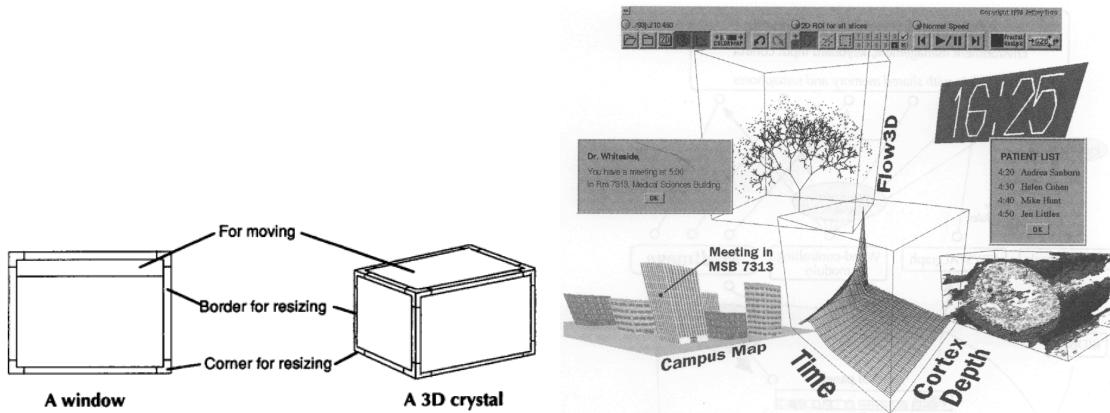


図 2.2. CRYSTAL で提案された 3D crystal の図. 左図はウィンドウとのメタファーを説明したもの. 右図は実際に用いられる状況を想定した図. (Both adapted from Tsao and Lumsden 1997[7])

では、システムに接続した複数のユーザがアプリケーションの状態や、現実空間での位置を共有しながら操作する仕組みを提案している。加えて、同時にアプリケーションの状態は共有しながら、その現実空間の位置はユーザごとに変えることも可能にすることで、遠隔地からのコラボレーションや、一箇所に集まりきれないほどの大人数でのコラボレーションにも対応できるようなマルチローケルなシステムであることも特徴である。また、Studierstube のアプリケーションはプロセスとして起動するのではなく、動的ライブラリとしてシステムにロードされ、システムのプロセスの中で呼び出されることも特徴である。

Reiling の提案した motorcar[8] では Linux 上で動く Windowing System である Wayland のプロトコルを拡張する形で 3D の Windowing System を提案した。Wayland は Linux で

広く使われていた X Window System の、Linux カーネルやハードウェアの進化と共に浮き出てきたパフォーマンス上の欠点などを解消する形で生まれた Windowing System である。基本的な 2 次元の Windowing System を構成するのに必要なプロトコルが定義されているのに加え、自由にプロトコルを拡張できる仕様になっており、motorcar では、拡張したプロトコルに沿ってコンポジッタがアプリケーションから 3D オブジェクトを表示するための情報を受け取り、複数のアプリケーションから受け取った情報を合成して、ヘッドマウントディスプレイ (HMD) に出力している。既存の 2 次元デスクトップの Windowing System の拡張であるため、Studierstube とは違い、シングルホストマシンにおいて複数の 3D アプリケーションを利用できるシステムであるが、既存の 2DWayland アプリケーションからのデータも同様に受け取ることができ、それを没入環境に 3D アプリケーションと同時に表示できる。

近年の産業的な成果に目を向けても、マルチコンテキストに対応しようとする動きがみえる。特に既存の 2D のアプリケーションを没入環境に表示することで、没入環境のマルチコンテキスト化を図る例は多い。2 次元の PC の画面を没入空間で使えるようにするものとしては、Virtual Desktop^{*3} のような専用の VR アプリケーションや、Meta Horizon Workrooms^{*4} や Spatial^{*5} といった会議やイベント用の VR アプリケーションの中で PC 画面を投影するものなどがある。また、Microsoft の提供する Mixed Reality HMD である HoloLens^{*6} や Meta 社の提供する Meta Quest^{*7} では特定の形式の 2D アプリケーションを没入環境で複数起動できる仕組みがある。ただし、これらは没入環境自体をマルチコンテキスト化しているわけではなく、没入環境にマルチコンテキストな 2D デスクトップ環境を持ち込んでいると捉えられる。

さらに、VR や AR のシステムの標準化におけるデファクトスタンダードである OpenXR^{*8} では、Overlay と呼ばれる機能が定義されており、メインのユーザの視野全体を支配するアプリケーションに重ねて、他のコンテンツを表示できる仕組みを提供しており、VR ゲームをプレイしながら、ソーシャルメディアを時々チェックするといった、マルチコンテキストな没入環境の使い方を支援している。

2.4 本論文での結論

本論文での結論としては、Wayland のプロトコル拡張の機能を用いる Reiling の手法を基本的なシステム構成のベースとした（図 2.3）。システムの構成要素は、3D アプリケーションと Wayland 上で動作する既存の 2D アプリケーション、入力装置であるキーボードとマウス、没入環境を提示する HMD、そしてそれらとコミュニケーションをとって制御する 3D コンポ

^{*3} Virtual Desktop. Inc. “Virtual Desktop” <https://www.vrdesktop.net/> (accessed 25 Dec, 2022)

^{*4} Meta. “Meta Horizon Workrooms” <https://www.meta.com/jp/work/workrooms/> (accessed 25 Dec, 2022)

^{*5} Spatial Systems, Inc. “Spatial” <https://www.spatial.io/> (accessed 25 Dec, 2022)

^{*6} Microsoft “HoloLens” <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens> (accessed 25 Dec, 2022)

^{*7} Meta “Meta Quest” <https://www.meta.com/jp/quest/> (accessed 25 Dec, 2022)

^{*8} Khronos group “OpenXR” <https://www.khronos.org/openxr/> (accessed 25 Dec, 2022)

8 第2章 提案するシステムの概要

ジッタである。3D コンポジッタはマウスやキーボードの入力を適切にアプリケーションに分配し、2D/3D アプリケーションは没入環境に描画したい内容を 3D コンポジッタに伝える。3D コンポジッタは複数のアプリケーションから受け取った情報を合成して HMD に表示することで、ユーザに複数アプリケーションが利用可能な没入環境を提示できる。

本論文が扱うのは 3D アプリケーションとコンポジッタとの間のやり取りのプロトコル、また 3D コンポジッタの設計・実装の部分である。2D アプリケーションとコンポジッタとの間のプロトコルは既存のものが存在しており、本論文のスコープの範囲ではないが、他の部分の設計において重要な要素であり、詳しくは 4 章で扱う。

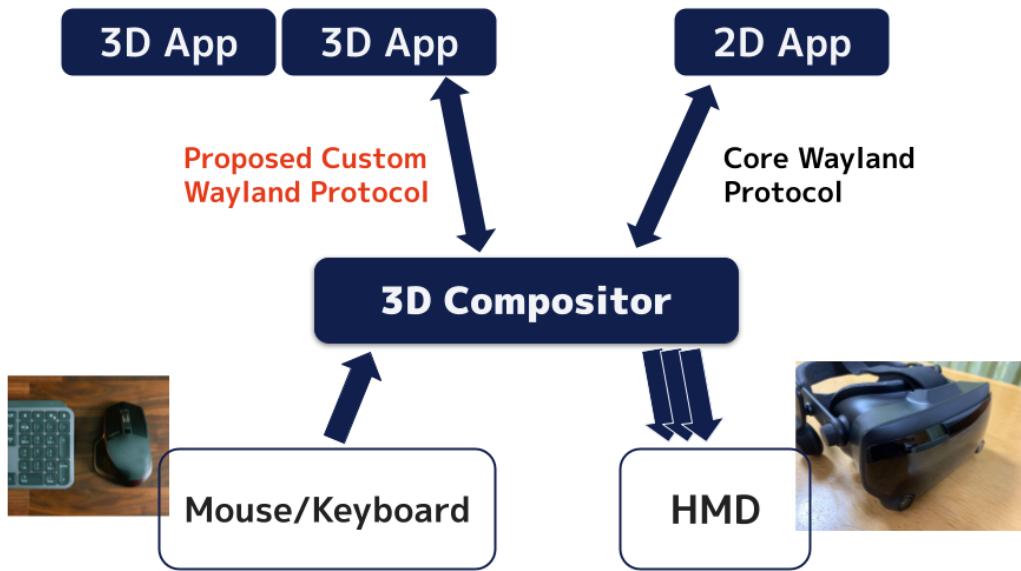


図 2.3. 提案するシステムの概要図。

類似研究・技術と比較してこの設計を選択した理由は以下の通りである。

- マルチコンテキストな没入環境を社会実装していくうえで大きな課題となるのは、初期の 3D アプリケーションの少なさである。ユーザの視野全体を覆うというパラダイムのアプリケーションから、空間の一部を占有するアプリケーションへと変えようとしているため、既存の 3D アプリケーションを少し改変して対応できるわけではない。しかし豊富に存在する既存の 2D アプリケーションが、没入環境で使うことができれば、3D アプリケーションは、例えば 3D モデルをみるだけといった、補助的な役割から始めることができる。このため既存の 2D アプリケーションを利用できるようにすることは大変重要であると考える。CRYSTAL や Studierstube, OpenXR の Overlay などは 2D アプリケーションを表示する仕組みとは全く異なる仕組みを用いているため、既存の 2D アプリケーションを利用することは不可能、または制限がかかることになる。一方、本論文が採用したシステムでは、2D アプリケーションと直接やり取りするコンポジッ

タを自由に設計し直せるため、没入環境で 2D アプリケーションを最大限利用できる。その詳細は 4 章で述べる。

- 本システムは単一ホストマシンでの利用のみをスコープとしており、Studierstube のような複数のホストマシンでの多人数の利用に関してはスコープに入れていない。どのように多人数でのコラボレーションを実現するかは、自明でないためである。例えば、ユーザの間で同期されるべきデータについても、3D モデルを共同編集するようなアプリケーションであれば、メッシュやテクスチャのデータを同期しなければいけないが、同時にある動画を見るアプリケーションであれば、同期するべきデータは動画の ID と再生時間のみで良い可能性がある。その他にも同期の頻度やタイミング、操作や閲覧の権限管理をするなどは個別のアプリケーションによって替わりうる。また、サーバなどインフラやその他の機器を必要とする場合もありえる。このため個別の 3D アプリケーションがサーバなどを介して、サービスとして多人数コラボレーションを実現するのが現実的だと考えられる。
- 1.1 で述べたように、没入環境を用いた 3D アプリケーションは様々な分野で応用されており、単に没入環境に PC の画面を投影するだけでは没入環境を最大限利用できていない。

第3章

レンダリングプロトコル

3D アプリケーションとコンポジッタとの間のプロトコルの中でも特に重要であるのが、アプリケーションの表示に関するレンダリングプロトコルである。レンダリングプロトコルに求められるものには以下のものがある。

- 複数のアプリケーションが別々に提示してきたレンダリングの情報を合成して、1つの没入環境に矛盾なくレンダリングできる。
- 質の悪いアプリケーションが他のアプリケーションや環境全体に影響を及ぼさない。複数のアプリケーションを利用できる環境下では、質の悪いアプリケーションがあり、フレームレートにレンダリングが追いつかなかったり、ハングしてしまう可能性がある。このようなときにシステム全体への影響を最小限にする必要がある。
- レンダリングの効率がよい。
- レンダリングの自由度が高く、様々な表現が可能である。

3.1 3D コンピュータグラフィックス

この節では以降の説明のために最小限必要な、3D レンダリングにおけるレンダリングパイプラインの概要を述べる。ただしレンダリングの手法は様々であり、ここでは代表的な手法についてのみ述べている。

3D オブジェクトのレンダリングは基本的に、3D 空間で定義されたオブジェクトを、ある視点から見た時の2次元平面でのピクセルマップに落とし込む行為である。このプロセスは大きく、Geometry Processing と Rasterization の2つのフェーズに分けることができる。

Geometry Processing

3D オブジェクトの形は多くの場合、メッシュによって表現され。メッシュは三角形などの Primitive の集まりとして表現される。レンダリングパイプラインではこの Primitive ごとに、それが Screen のどのピクセルを何色で塗りつぶすかを計算する。Geometry Processing

のフェーズ（図 3.1）ではこの Primitive を構成する頂点の座標（Object Space）を行列計算によって、ある視点から投影したときの座標（Clip Space）へ変換するフェーズである。Primitive の頂点はまず、Model Matrix をかけることで、World Space のどこに配置するかが決定される。さらにこれに、視点の位置や向き、視野角などから取得される View Projection Matrix を乗算することで、頂点は Clip Space に配置される。

これらの操作は Vertex Shader によって制御される。OpenGL^{*1} のシェーダ言語である GLSL における簡単な Vertex Shader の例をソースコード 3.1 に示した。ここでの model, view_projection は Uniform 変数などと呼ばれ、その値はレンダリングパイプラインを実行するときに指定できる。

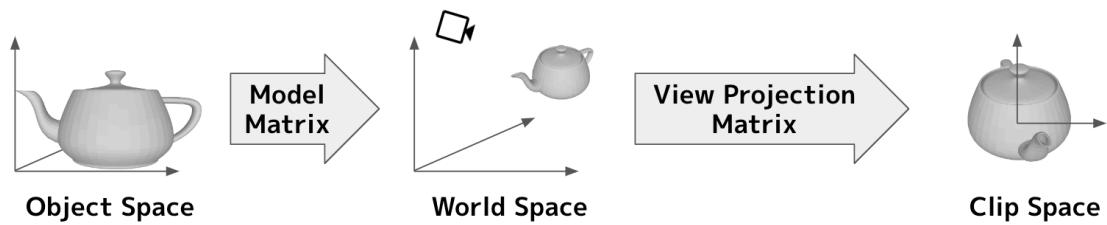


図 3.1. Geometry Processing.

ソースコード 3.1. Vertex Shader の例

```

1 uniform mat4 model;
2 uniform mat4 view_projection;
3 layout(location = 0) in vec4 position;
4
5 void main() {
6     gl_Position = view_projection * model * position;
7 }
```

Rasterization

Clip Space に変換された Primitive は Rasterization のプロセスによって、スクリーン上のどのピクセルをどの色で塗るかといった情報にまで落とし込む。このピクセルごとの情報はフラグメントと呼ばれ、一般的にフラグメントには色の情報と、そのフラグメントに投影された Primitive が視点からどれくらい離れているかを指す深度情報が含まれる。この Rasterization のフェーズでは Fragment Shader やテクスチャなどをプログラマが指定する。

^{*1} Khronos Group "OpenGL" <https://www.opengl.org/> (accessed 27 Dec, 2022)

Framebuffer と Depth Testing

Framebuffer とはレンダリング結果を格納するバッファである。Framebuffer はピクセルごとの色の情報を保持する Color buffer と深度の情報を保持する Depth buffer を含むことが多い、Rasterization によって得られたフラグメントは Framebuffer の Color buffer と Depth buffer に格納される。Rasterization によって Primitive がフラグメントに変換され、そのフラグメントが次々と Framebuffer に書きこまれていくが、このとき Depth Testing を用いると、フラグメントの深度情報と Framebuffer が持つ深度情報を比較して、フラグメントが手前にあるときだけ、Framebuffer に書き込むことができる。これによって、重なっている Primitive の処理順に関係なく、Primitive の前後関係をレンダリングに反映させている。

レンダリングパイプライン

今まで述べたプロセスはレンダリングパイプラインとして、GPU 内で行われることが多い。ただしレンダリングパイプラインを実行するために必要なデータはプログラマによって CPU で作成され、OpenGL などの API を通して GPU に送られるのが一般的である。レンダリングパイプラインへの入力としては主に以下のものがある。

- メッシュに関するデータ：頂点の位置情報やそれに付随するデータなど。
- テクスチャ
- Model Matrix の値
- View Projection Matrix の値
- Vertex / Fragment Shader

3.2 関連技術・研究

本システムはそれぞれ別プロセスのアプリケーションがレンダリングしたい情報を持っており、結果的に1つのレンダリング結果を導くという点で Parallel Rendering の分野と類似性がある。Molnar らは Parallel Rendering の手法を “sort-first”, “sort-middle”, “sort-last” の大きく3つに大別した [10] (図 3.2)。3.1 で述べたとおり、3D レンダリングは Primitive がどのピクセルに影響を与えるかを計算するタスクであり、Primitive をスクリーンへと sort (選別・分配) するタスクであると捉えられる。Parallel Renderingにおいてこの sort のタスクでは、プロセッサ間で Primitive やフラグメントに関するデータを再配置する必要がある。Molnar らはこの再配置のタイミングに注目しており、“sort-first” は、Primitive を Geometry Processing の際に再配置する手法、“sort-middle” は Geometry Processing 後の Primitive を再配置する手法、そして “sort-last” は Rasterization の際にフラグメントなどを再配置する手法である。

本研究では、複数のアプリケーションがコンポジッタに対してレンダリングに必要な情報を

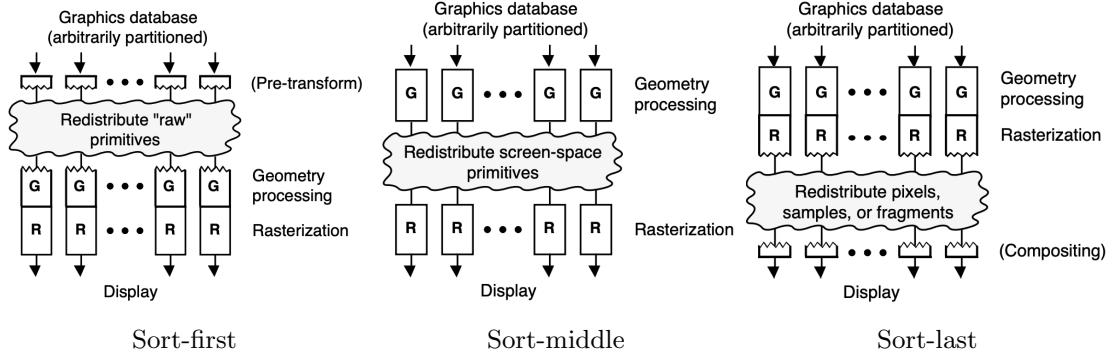


図 3.2. Molnar らによって分類された Parallel Rendering の 3 つの手法. (Each figure is adapted from Molnar, et al. 1994[10])

伝達して、それを用いてコンポジッタ側が最終的なレンダリングを行うため、Molnar らの分類において、データの分配のタイミングまでをアプリケーションが担い、分配後をコンポジッタが担うと捉えられる。ただし Molnar らの設定とは大きな違いがあり、Molnar らの論文ではスクリーンはいくつかの領域に分割され、その領域ごとにプロセッサが割り当てられてレンダリングを行う設定であったため、どのプロセッサにデータを再配置するかを知るために、データがスクリーンのどの領域に影響を与えるものであるか計算できている必要があった。一方本研究の設定では、アプリケーションがデータを作成しコンポジッタで合成するためにデータの再配置（アプリケーションからコンポジッタへの描画情報の伝達）をおこなう。全く異なる設定ではあるが、Molnar らの論文での洞察や検証は本研究にも応用できる部分が多い。

Reiling の提案した motorcar[8] は “sort-last” に近い手法（図 3.3）をとっている。motorcar ではそれぞれのアプリケーション（図 3.3 では client）がレンダリングを行い、生成したフレームバッファができるだけ効率のよい方法でコンポジッタに送り、Depth Testing によってそれぞれのアプリケーションのフレームバッファどうしを合成している。motorcar の手法の特徴は以下のとおりである。

矛盾のないレンダリングについて

Depth Testing によって、複数のアプリケーションを矛盾なく合成できる。

質の悪いアプリケーションについて

質の悪いアプリケーションがフリーズしてしまった場合などは、オブジェクトが消えてしまうか、視点の情報を更新できず、描画の整合性が失われてしまう。

レンダリングの効率について

複数のアプリケーションが GPU を共有するため、プロセス間で GPU を奪い合い、コンテキストスイッチにオーバヘッドがある。また、Molnar らが指摘しているとおり、“sort-last” の手法ではコンポジッタに対して毎フレーム全てのフラグメントの情報を送る必要があり、

14 第3章 レンダリングプロトコル

データの転送量が多くなってしまう。Reiling の手法では単一ホストマシン内でのデータ転送であるため、アプリケーションとコンポジッタで共有したバッファを用いることで時間がかかる GPU メモリへの読み書きを最小限に抑え、伝達効率を上げているが、Reiling 自身が言及されているとおり、バッファへの書き込みや読み出しの部分でオーバヘッドが存在する。

レンダリングの自由度について

アプリケーションがレンダリングパイプラインを全て実行できるため、描画の自由度が高い。ただし、他のアプリケーションのオブジェクトの形などの情報は取得できないため、他のアプリケーションの影を落とすといったことはできない。

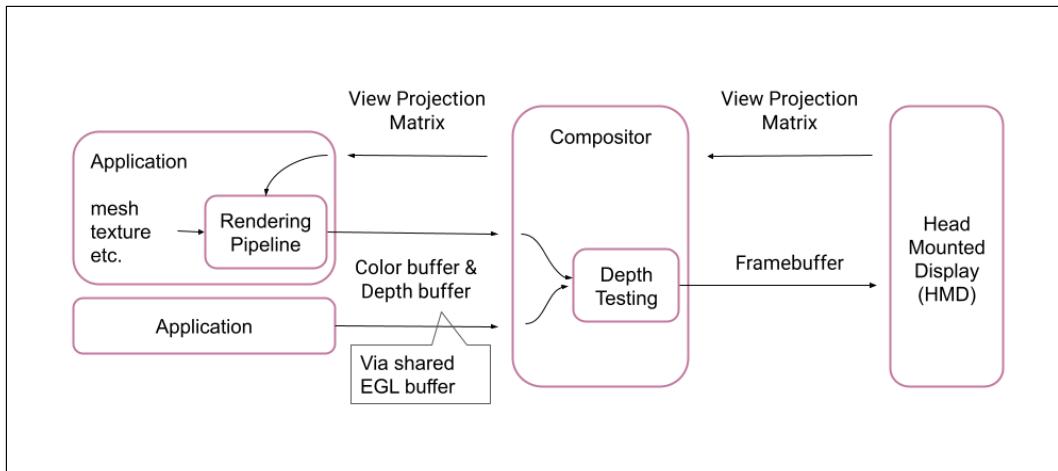


図 3.3. motorcar[8] でのレンダリング手法の概略図。

Peuhkurinen らは motorcar の手法におけるコンテキストスイッチのオーバヘッドを指摘し、アプリケーションとコンポジッタとの間で共有したシンググラフを用いる手法を提案した [11]。Peuhkurinen らはモバイル端末を用いた AR 環境で実験をしているため、没入環境ではないが、端末の位置や傾きをもとに、複数のアプリケーションを AR 環境にレンダリングしている点で、レンダリングに関しては本研究と同じ問題に取り組んでいる。Peuhkurinen らの手法（図 3.4）ではコンポジッタ側で 1 つのシンググラフを持ち、アプリケーションが IPC によってそのシンググラフに変更を加える。コンポジッタでは毎フレームそのシンググラフを走査し、そのタイミングで取得したデバイスの位置や傾きを使ってシーンをレンダリングする。Peuhkurinen らの手法の特徴は以下のとおりである。

矛盾のないレンダリングについて

システムで共有するシンググラフからレンダリングすることで複数のアプリケーションを矛盾なくレンダリングできる。

質の悪いアプリケーションについて

質の悪いアプリケーションがフリーズした場合でも、シーングラフの更新が途絶えるだけで、フレームごとにデバイスの位置や傾きを更新して、矛盾なくシーンをレンダリングできる。

レンダリングの効率について

レンダリングは全てコンポジッタ側で行われるため、コンテキストスイッチのオーバヘッドがなく効率的である。

レンダリングの自由度について

シーングラフの設計によってレンダリングできるものが限られてしまい、レンダリングの自由度は著しく落ちる。特に Peuhkurinen らが提案したシーングラフを構成する要素は以下の 5 つであり、より高度なレンダリングを実現する提案までは至らなかった。

1. **Mesh** 位置を表す (X,Y,Z) と頂点の法線ベクトルの (X,Y,Z), UV マッピングのための (U,V) の情報を持つ。
2. **Texture** 8bit ずつの RGBA コンポーネントを持つ。
3. **Transformation Matrix** アプリケーションのローカル座標系における Mesh の平行移動、回転、スケールを表す 4x4 の変換行列。
4. **Node** Mesh, Texture, Transformation Matrix から構成され、コンポジッタによって描画される単位。
5. **Application Volume** アプリケーションが Node を描画できる直方体領域。

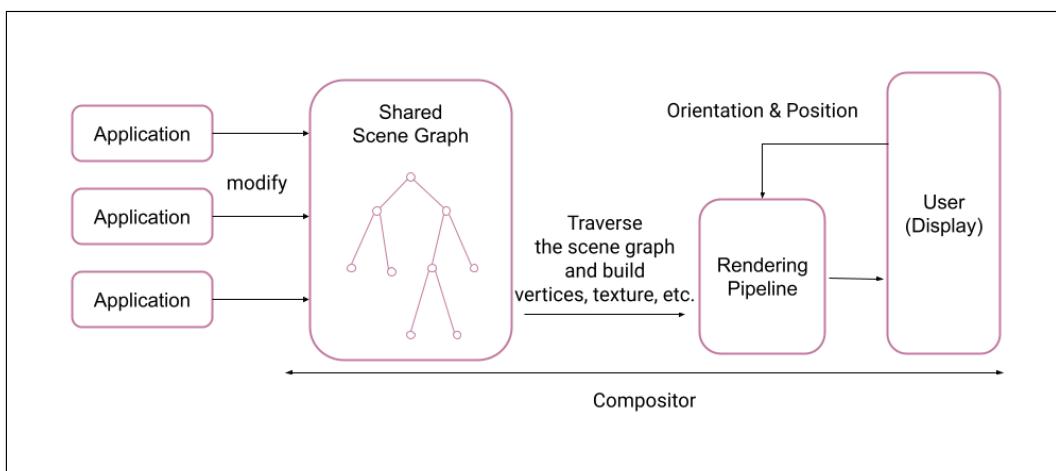


図 3.4. Peuhkurinen ら [11] の提案するシステムのレンダリング手法の概略図。

3.3 提案手法

motorcar の手法では、レンダリングの自由度は高いが、レンダリングの効率や質の悪いアプリケーションがいた場合において問題があった。一方共有シングラフを用いた Peuhkurinen らの手法では、レンダリング効率や、質の悪いアプリケーションに関しては有効だが、レンダリングの自由度が制限されていた。本システムでは “sort-first” に近い手法を提案し、レンダリングの効率や質の悪いアプリケーションの問題を解決しつつ、Peuhkurinen らの手法よりレンダリングの自由度を高くする。

本システムでのレンダリング手法の基本的な方針は、シングラフといった抽象化を行うとその分レンダリングの自由度が落ちてしまうため、できるだけアプリケーションがレンダリングパイプラインをそのまま使うことができるようになることである。そこで本システムでは広く使われているグラフィックスライブラリである OpenGL をベースとしたレンダリングプロトコルを作成した。今回は特に OpenGL ES 3.2^{*2} をもとにしている。

OpenGL では以下のようなオブジェクトが定義されており（一部）。これらのオブジェクトといくつかのパラメータを指定してレンダリングパイプラインを実行することで、指定した Framebuffer にレンダリング結果が格納される。

- **Buffer Object** 頂点データや頂点の配列順のデータなどを格納する汎用的なバッファ
- **Shader Objects** Vertex Shader や Fragment Shader などを格納するオブジェクト
- **Program Objects** レンダリングパイプラインの各ステージで用いられる Shader Object をひとまとめにするオブジェクト
- **Texture Objects** テクスチャを格納するオブジェクト
- **Sampler Objects** テクスチャのサンプリングに関するパラメータの集合を保持するオブジェクト
- **Vertex Array Objects** Vertex Shader で用いる頂点情報がどのバッファのどこに、どのような形式で存在するかを指定するオブジェクト

本システム（図 3.5）ではまず、アプリケーションが IPC を用いて上記の 6 つのオブジェクト（Rendering Resource）をコンポジッタ側で作成するプロトコルを用意した。また、レンダリングパイプライン実行時に指定するオブジェクトとパラメータをまとめた Rendering Unit というオブジェクトを新たに定義した。Rendering Unit は 1 回のレンダリングパイプラインの実行に相当する。そして、アプリケーションが Rendering Unit をコンポジッタ側に作成し、Rendering Unit に対して Rendering Resource の紐付けと、パラメータの指定ができるようにした。Rendering Resource は複数の Rendering Unit に対して紐づけることが可能である。また、Rendering Unit に対して指定可能なパラメータには、シェーダから利用可能

^{*2} Khronos Group ”OpenGL ES Version 3.2” https://registry.khronos.org/OpenGL/specs/es/3.2/es_spec_3.2.pdf (accessed 29, Dec)

な Uniform 変数の値などを含む。

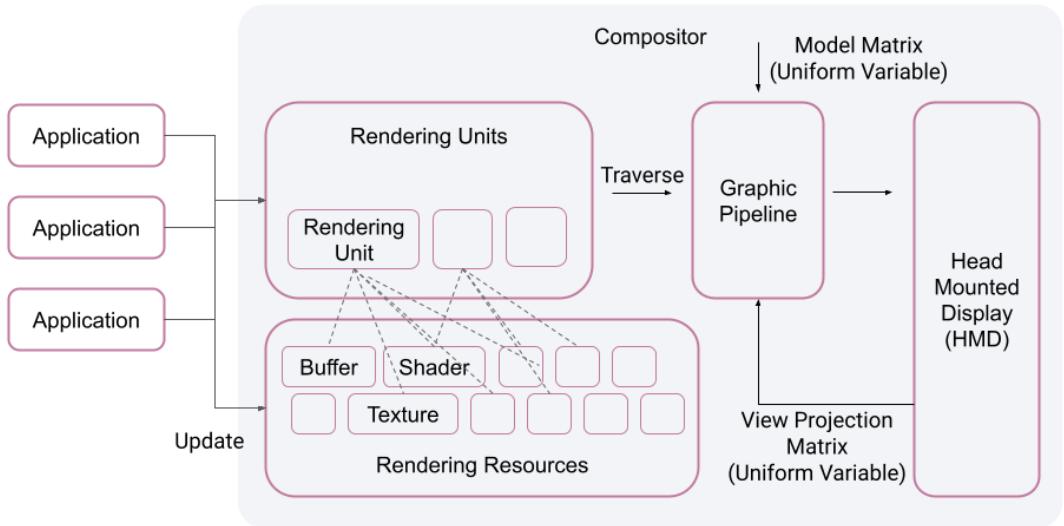


図 3.5. 本システムのレンダリング手法の概要図。

上記のようなシステムにすることで、アプリケーションは頂点データの形式、バッファへの格納方法、テクスチャの形式、そしてシェーダを自由に設定、記述でき、レンダリングの自由度を高く保つことができた。また、レンダリングパイプラインの実行自体は全てコンポジッタ側で行われるため、GPU のコンテキストスイッチが少なく、効率的である。Texture や Buffer、Shader などのサイズの大きいオブジェクトはその生成やフォーマットの修正、転送のコストも無視できないが、本システムではアプリケーションは共有メモリを介してこれらのオブジェクトをコンポジッタと共有し、コンポジッタはそのデータを再形成することなくそのまま GPU 上のメモリに転送できるため、転送や再形成のためにオーバヘッドがかかることはない。最後に、質の悪いアプリケーションに対応するための工夫を述べる。

2.2 で述べたとおり、マルチコンテキストな没入環境を実現するためには、アプリケーション間の衝突を防ぎ、適切に分離することが大切である。そのため質の悪いアプリケーションがフリーズしたり、動作が遅くなった場合でも、そのアプリケーションをレンダリングする際の視点情報が更新される必要がある。そうでなければ、アプリケーションのレンダリング情報が途絶えた場合に、そのアプリケーションのレンダリングをやめるか、最後のレンダリング結果を表示し続けることになる。前者の場合はチラつきが発生し、後者の場合は現在の視点と異なる視点でレンダリングした結果を表示するため、整合性が失われ、酔いの原因になりうる。いずれにせよ、1 つのアプリケーションが環境全体にあたえる影響が大きい。視点情報が更新され続ければ、フリーズしたアプリケーションがレンダリングするオブジェクトは没入環境の中では静止するが、描画の整合性が失われることはなく、他のアプリケーションは通常通り利用できる。

18 第3章 レンダリングプロトコル

また、本システムではアプリケーションの位置をコンポジッタ側が決定する。これはユーザがアプリケーションを好きな位置に配置し、アプリケーションどうしの空間的な衝突をユーザが最小限にできることを保証するためであるが、フリーズしたり、動作が遅いアプリケーションでもその配置を変更できるようにする必要がある。そのため質の悪いアプリケーションがフリーズしたり、動作が遅くなった場合でも、アプリケーションの配置を決める Model Matrix が更新可能である必要がある。

以上の議論から、レンダリングする際に Model Matrix と視点の情報である View Projection Matrix をいかに適用するかが重要である。3.1 で述べたように、通常 Model Matrix や View Projection Matrix は Uniform 変数として用い、シェーダで頂点に対して適用することが多い。一般的な既存の VR アプリケーション（図 3.6）ではソースコード 3.1 のような Vertex Shader と、その Vertex Shader で用いられている Model Matrix や View Projection Matrix を示す Uniform 変数に入れる値を Graphics Pipeline に伝えることで、頂点に Model Matrix と View Projection matrix を適用させている。

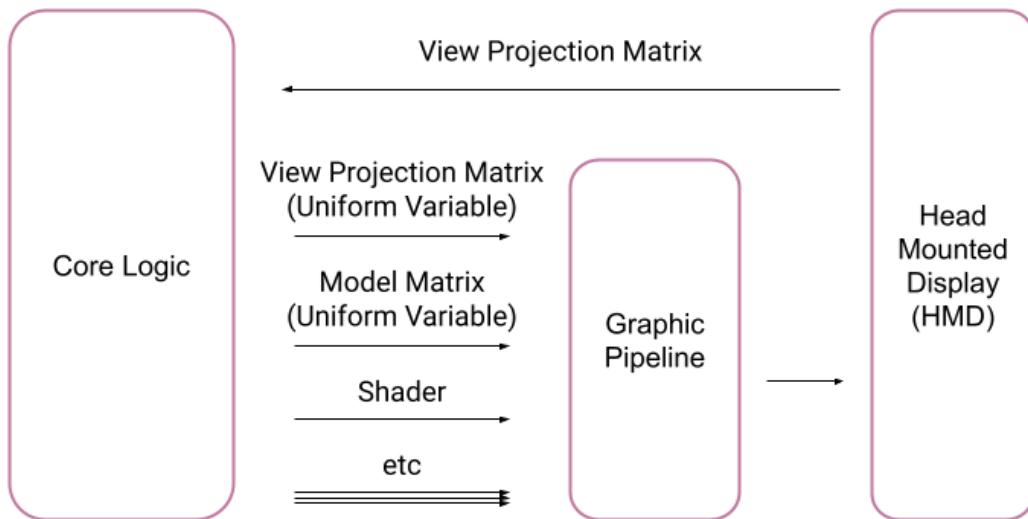


図 3.6. 没入環境での一般的なアプリケーションでの Mode View Projection Matrix の適応のさせ方の例。

本システムのレンダリングシステムでは（図 3.5）、Model Matrix はコンポジッタがアプリケーションごとに管理しているものを、View Projection Matrix は HMD から取得したものをアプリケーションへ渡すことなく Graphics Pipeline 実行時に適用する。そのため本システムではシェーダで用いる Uniform 変数のいくつかを予約しており、例えば “zModel” という名前の Uniform 変数には Model Matrix の値を、“zViewProjection” という Uniform 変数には View Projection Matrix の値をコンポジッタ側で設定することとしている。アプリケーションはソースコード 3.2 のような Vertex Shader を記述することで、Model Matrix や

View Projection Matrix の実際の値を知らないまま、用いることができる。

ソースコード 3.2. 本システムでの Vertex Shader の例

```

1 uniform mat4 zModel;
2 uniform mat4 zViewProjection;
3 layout(location = 0) in vec4 position;
4
5 void main() {
6     gl_Position = zViewProjection * zModel * position;
7 }
```

このように本システムでは、Model Matrix と View Projection Matrix を表す Uniform 変数の値をコンポジッタ側が、それ以外のレンダリングパイプラインの実行に必要なオブジェクトやパラメータをアプリケーション側が提供し、コンポジッタ側でレンダリングパイプラインを実行する。これにより、レンダリングに関するオーバヘッドが小さく、レンダリングの自由度を高く保ち、かつ質の悪いアプリケーションに対して堅牢なレンダリングシステムを実現した。

3.4 評価：レンダリング性能

本節では、レンダリング性能に関して絶対的な評価をした。

3.4.1 実装・環境

プログラミング言語は C と C++ を用いた。アプリケーションとコンポジッタ間の IPC には Wayland を用いた。HMD への出力、HMD からの View Projection Matrix の取得には SteamVR ランタイムの OpenVR を用いた。その他の環境に関しては表 3.1 に示す。

OS	Ubuntu 20.04.4 LTS
Kernel	5.13.0-41-generic
CPU	Intel(R) Core(TM) i7-10700K CPU @ 3.80GHz
GPU	GeForce RTX 2070 SUPER
Memory	32GB
HMD	Valve Index

表 3.1. レンダリングに関する実験環境

また、今回の実装では FPS の上限は 90fps となっている。

3.4.2 実験の設定

本実験ではレンダリングの性能を確かめるため、いくつかのタイプの3Dアプリケーションを複数実行し、システム全体のFPSの変化を測定した。実験に用いたアプリケーションは以下の3つである。

Box App

Box App（図3.7）は立方体を表示する、頂点の少ない簡単なアプリケーションである。ただし一面にテクスチャが貼られており、アプリケーションは毎フレームテクチャを更新する。テクスチャのサイズは256x256で1ピクセルあたりビット数は32bitである。

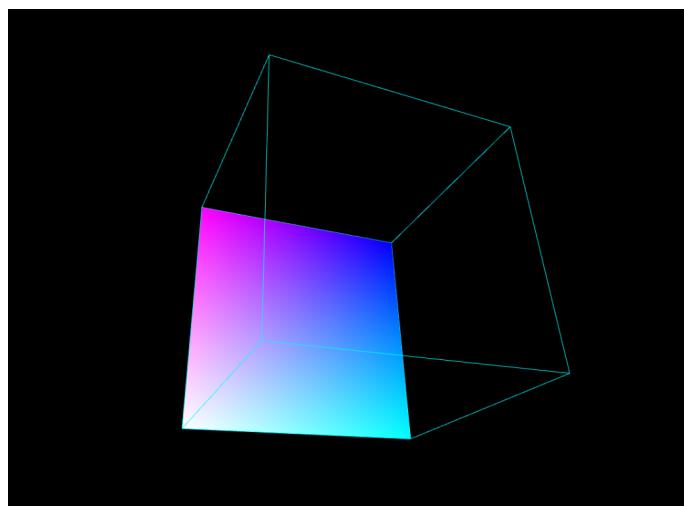


図3.7. Box App. 頂点が少なく、テクスチャの更新がある。

STL App

STL App（図3.8）はSTL^{*3}形式のファイルを表示するアプリケーションである。比較的頂点数が多いが、データの更新がない。本実験で用いたSTLファイルは頂点数が324,000個のものである。

STL App with rotation

STL App with rotationはSTL Appに加え、STLオブジェクトをヨー方向に回転させる。アプリケーションは回転量を表すUniform変数(float, 32bit)を毎フレーム更新し、頂点シェーダで頂点の回転処理を記述している。

^{*3} Wikipedia. “STL(file format)” [https://en.wikipedia.org/wiki/STL_\(file_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)) (accessed 17 Jan, 2023)



図 3.8. STL App. 頂点が多いが、データの更新がない。

3.4.3 結果

上記の三種類のアプリケーションそれぞれについて、同時に起動するアプリケーションの数を増やしたときの FPS の変化を図 3.9 に示す。

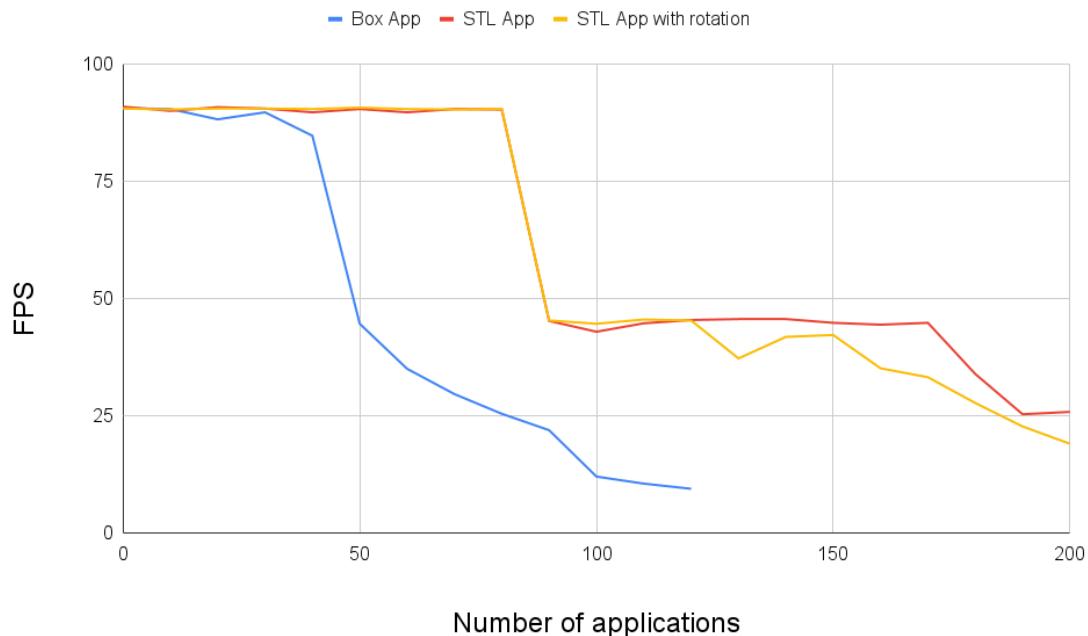


図 3.9. レンダリング性能測定実験の結果。

いずれのタイプのアプリケーションでも 40 個ほどまでは 90fps 近くを保っており、本レンダリング手法が十分実用に耐えうることが示された。また、STL App や STL App with

22 第3章 レンダリングプロトコル

rotation のように、頂点データ数が多くても時間あたりに更新するデータが少ないアプリケーションであれば、さらに多くのアプリケーションをレンダリングできることがわかった。

STL App と STL App with rotationにおいて、アプリケーション数が 90 個近くなったときに急激に FPS が落ち込むのは、頂点数が多く、レンダリングパイプラインの処理が 1 フレーム内に収まりきらなくなり、バッファのスワップが次のフレームタイミングで行われるようになつたためである。一方 Box App では比較的連続的に FPS が落ちるが、これはコンポジッタ側でアプリケーションから共有されたテクスチャを GPU へ送る部分に時間がかかるており、コンポジッタのメインループがビジー状態になっていることが原因である。

3.5 評価：レンダリングの自由度

3.6 結論

第 4 章

2D アプリケーションの利用

既存の 2D アプリケーションがうまく利用できることは、本システムの重要な設計方針の 1 つである。

世の中にはすでに有用で、洗練された 2D アプリケーションが数多く存在しており、アプリケーションそのものだけではなく、ライブラリやデザインシステム、設計パターンなど多くの知見と資産がある。また、1.2 や 2.2 で言及したとおり、既存の 2D Windowing System 上で動くアプリケーションは、他のアプリケーションと連携してマルチコンテキストな 2D デスクトップ環境を実現しており、マルチコンテキストな没入環境においても、他の 2D アプリケーションや 3D アプリケーションと連携して利用されることが期待できる。

4.1 関連技術・研究

2D のウィンドウやディスプレイを没入環境に投影する取り組みはすでに多い。

2.3 で言及した Meta Horizon Workrooms や Virtual Desktop, Spatial といった商用アプリケーションは、Microsoft Windows^{*1} や macOS^{*2} といったプロプライエタリなオペレーティングシステムのウィンドウやディスプレイを没入環境に投影できる（図 4.1）。これらのアプリケーションはオペレーティングシステムが提供するディスプレイやウィンドウ単位での画面共有の仕組みを用いて、それを VR 空間に投影している。しかしこの画面共有を用いた手法では、実際の物理ディスプレイの数やサイズ、ウィンドウの配置に制約をうけたり、本来 Windowing System が提供するより高度な仕組みを使うことができない。本来 Windowing System が提供するより高度な仕組みの例としては、以下のようなものがある。

- ウィンドウのコンテンツ（ピクセルマップ）の中で変更があった領域だけを取得し、効率的に画面の変更を反映する仕組み
- アプリケーション側のウィンドウのコンテンツ更新のフレームレートを制御する仕組み

^{*1} Microsoft. “Meet Windows 11” <https://www.microsoft.com/en-us/windows/windows-11> (accessed 18 Jan, 2023)

^{*2} Apple. “macOS Ventura” <https://www.apple.com/macos/ventura/> (accessed 18 Jan, 2023)

- ポップアップを表示する位置を制御する仕組み

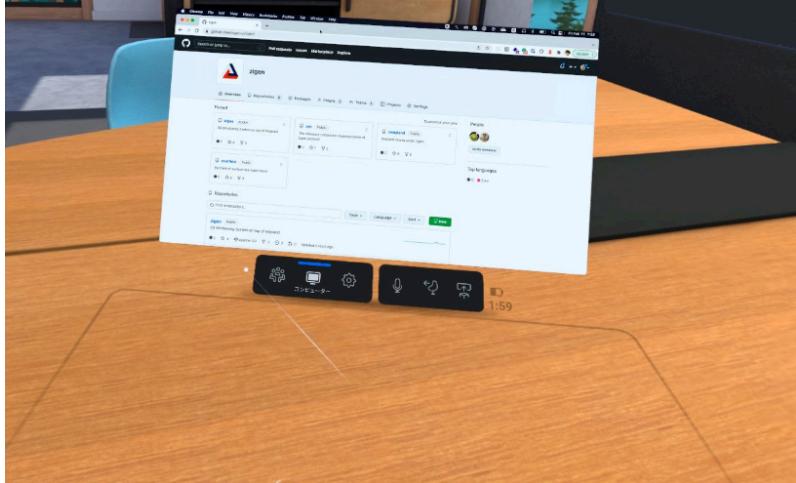


図 4.1. Meta Horizon Workrooms での PC 画面の共有機能.

これに対して, Reiling[8] が提案した没入環境向けのコンポジッタでは, 既存の 2D Window System のプロトコルも実装することで, 没入環境で既存の 2D アプリケーションが利用できるようにした (図 4.2).

この手法では, コンポジッタが 2D アプリケーションと直接やり取りするため, 既存の 2D アプリケーションを改変しないという制約のもとで, 2D アプリケーションの表示や操作に関して最大限の自由度がある.

しかし, Reiling の提案では, 3D アプリケーションを 2D アプリケーションと連携して使うための工夫については言及がなかった. 3D アプリケーションと 2D アプリケーションとを連携して使うためには 3D アプリケーションのプロトコルの設計も工夫する必要がある.

4.2 提案手法

本システムでは, 3D アプリケーションに対する操作に関するプロトコルを, 既存の 2D の Windowing System と変換可能な形に設計することで, 2D アプリケーションを 3D アプリケーションとより連携して使えるようにした.

2D の Windowing System ではカーソルを介してそれぞれのアプリケーションに操作を加えるが, 本システムでは始点と方向ベクトルを持つ Ray を介してアプリケーションに操作を与えることにした. Ray による操作は没入環境では一般的だが, 特に本システムでは Ray を定義することで, Ray と Window が交差した位置にカーソルを定義でき, これを用いて Ray とカーソルを変換できるので重要である.

本システムでは 2D の Windowing System の操作に関するプロトコルのうち, カーソルに関する部分だけを Ray に置き換えたプロトコルを 3D アプリケーションの操作のために定義した. そして, 3D コンポジッタと既存の 2D アプリケーションとの間に Ray の動きをウィン

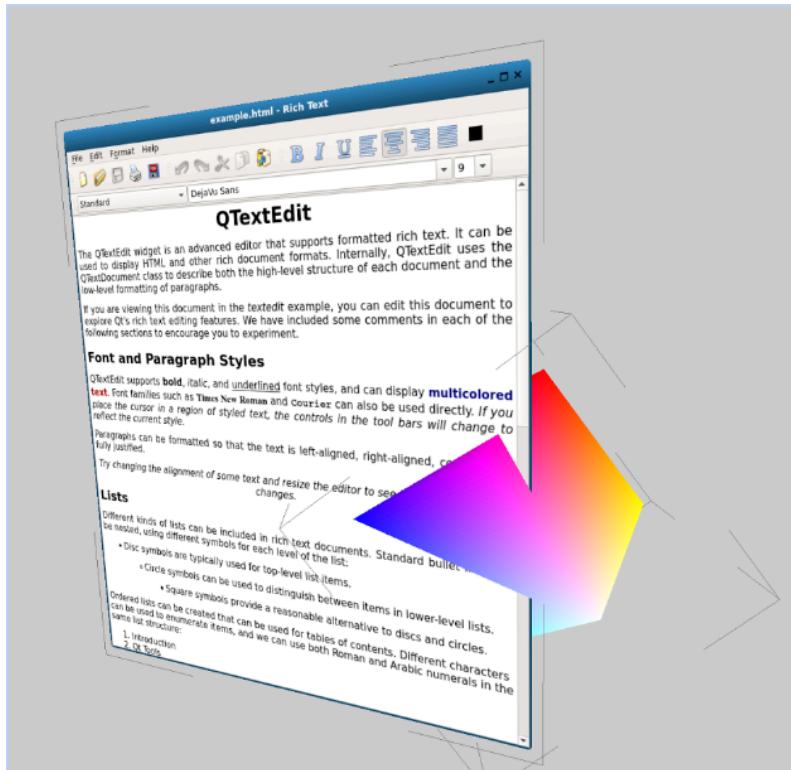


図 4.2. motorcar[8] での既存の 2D アプリケーションの表示. (Adapted from Reiling. “Defense Slides” (Google Slide) https://docs.google.com/presentation/d/1svgGMxxbfmcHy_KuS5Q9hah8PQOsXqvjBK0oMIzW24Y/edit?usp=sharing (accessed 18 Jan, 2023))

ドウ上のカーソルの動きに変換するコンポーネントを入れた（図 4.3）。

これによって、2D アプリケーションと 3D アプリケーションを同じデバイスで、同じ Ray を介して操作できるようになる。また、本システムではドラッグ & ドロップに関するプロトコルも Ray を用いて再定義している。2D Windowing System におけるドラッグ & ドロップのプロトコルはイベント（コンポジッタからアプリケーションへの通信）とリクエスト（アプリケーションからコンポジッタへの通信）の複雑な組み合わせで実現されており、ドラッグ & ドロップの開始のリクエスト、データを送る側がどのような形式のデータで送ることができるかの候補（mime-type）を提示するリクエスト、送る側のアクションの意図（データのコピーなのか、移動なのか）を提示するリクエスト、ドラッグ中のカーソルの位置を知らせるイベント、など 20 種類以上存在する。これらを全て 3D アプリケーション用に定義し直すことで、本システムでは既存の 2D アプリケーションと 3D アプリケーション間でのドラッグ & ドロップを実現しており、これはまさに本システムでしか実現できない特徴である。

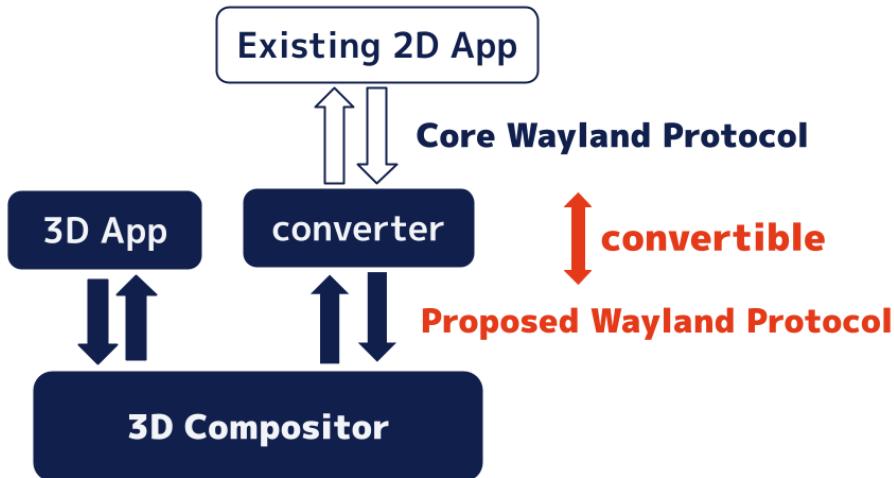


図 4.3. 3D アプリケーションと既存の 2D アプリケーションとの間のドラッグ & ドロップ

4.3 評価

本システムにおいて 2D アプリケーションに関する設計が有効であることを確かめるために、サンプルのアプリケーションを用意した（図 4.4）。1 つは改変のない既存の 2D ブラウザ（Google Chrome^{*3} 図 4.4 右側），もう 1 つは地球などの天体を表示する 3D アプリケーション（図 4.4 左側）である。また今回は Ray の操作にはマウスを用い、マウスの 2 次元の移動量を Ray の方向ベクトルの変化にマッピングした。

まず、この Ray を用いてブラウザ対してカーソルの移動、クリック、スクロールの基本的な操作が可能であることを確かめた。また天体のアプリケーションに本システムで定義したドラッグ & ドロップのプロトコルを実装し、ブラウザからのドラッグ & ドロップによって天体のテクスチャデータを更新できることを確かめた（図 4.5）。

4.4 結論

^{*3} Google. “Google Chrome” <https://www.google.com/chrome/> (accessed 18 Jan, 2023)

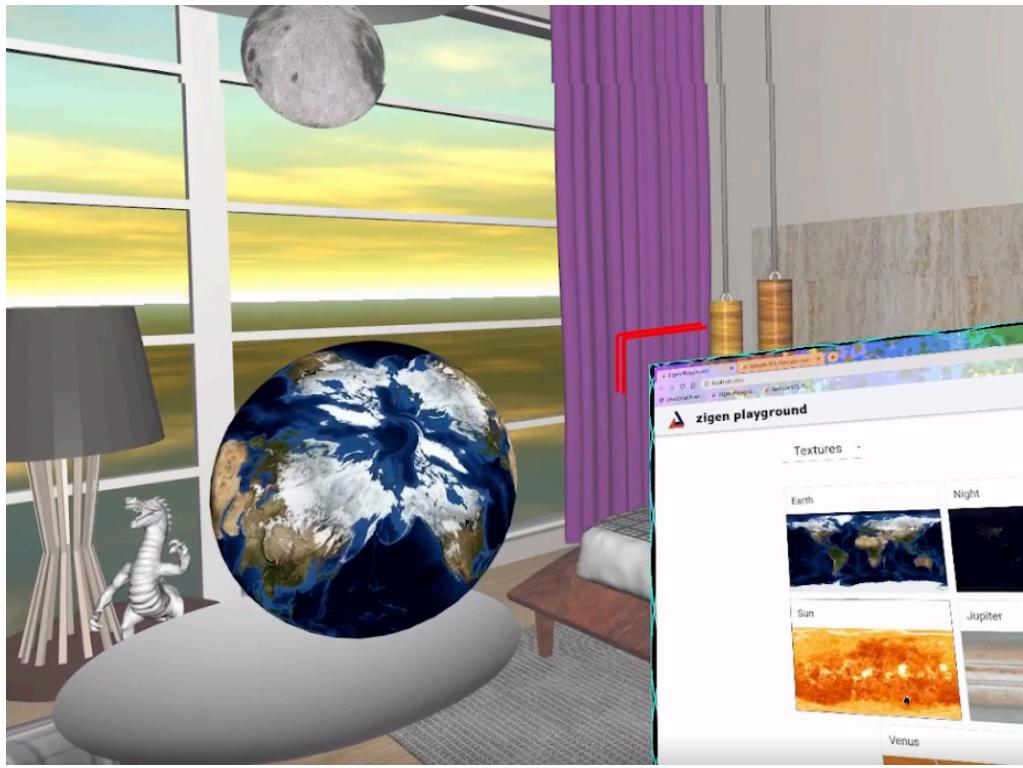


図 4.4. サンプルの 3D アプリケーションと Google Chrome

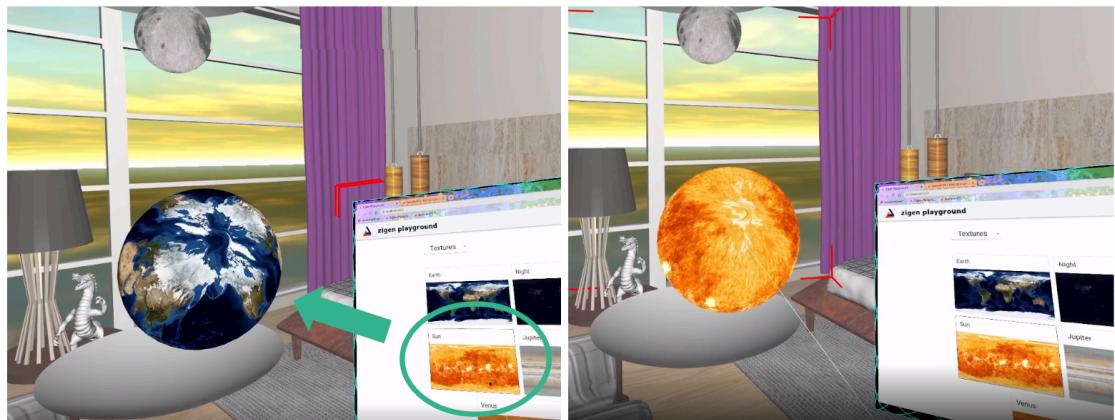


図 4.5. 3D アプリケーションと 2D アプリケーションとの間でドラッグ & ドロップする様子。左図がドラッグ & ドロップの前で、ブラウザから太陽のテクスチャをドラッグ & ドロップすることで、右図のように地球のテクスチャを太陽に変化させることができた。

第 5 章

Remote Rendering

5.1 関連技術・研究

5.2 提案手法

5.3 評価

5.4 結論

第6章

結言

発表文献と研究活動

(1) Publications.

参考文献

- [1] Anthony G Gallagher, E Matt Ritter, Howard Champion, Gerald Higgins, Marvin P Fried, Gerald Moses, C Daniel Smith, and Richard M Satava. Virtual reality simulation for the operating room: proficiency-based training as a paradigm shift in surgical skills trainings. *Ann Surg*, Vol. 241, No. 2, pp. 364–372, February 2005.
- [2] Kristoffer B. Borgen, Timothy D. Ropp, and William T. Weldon. Assessment of augmented reality technology's impact on speed of learning and task performance in aeronautical engineering technology education. *The International Journal of Aerospace Psychology*, Vol. 31, No. 3, pp. 219–229, 2021.
- [3] Yun-Chieh Fan and Chih-Yu Wen. A virtual reality soldier simulator with body area networks for team training. *Sensors*, Vol. 19, No. 3, 2019.
- [4] Hailin Li. Analysis of virtual reality technology applications in agriculture. In Daoliang Li, editor, *Computer And Computing Technologies In Agriculture, Volume I*, pp. 133–139, Boston, MA, 2008. Springer US.
- [5] IDC. Ar/vr spending in asia/pacific* to reach 14.8 billion, driven by remote meetings, training, and collaboration, says idc. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prAP49932422>, (accessed Dec 17, 2022).
- [6] Robert W. Scheifler and Jim Gettys. The x window system. *ACM Trans. Graph.*, Vol. 5, No. 2, p. 79–109, apr 1986.
- [7] Jeffrey Tsao and Charles J. Lumsden. CRYSTAL: Building Multicontext Virtual Environments. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 6, No. 1, pp. 57–72, 02 1997.
- [8] Forrest F. Reiling. Toward general purpose 3d user interfaces: Extending windowing systems to three dimensions, 2014.
- [9] Dieter Schmalstieg, Anton Fuhrmann, Gerd Hesina, Zsolt Szalavári, L. Miguel Encarnação, Michael Gervautz, and Werner Purgathofer. The Studierstube Augmented Reality Project. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 11, No. 1, pp. 33–54, 02 2002.
- [10] S. Molnar, M. Cox, D. Ellsworth, and H. Fuchs. A sorting classification of parallel rendering. *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 14, No. 4, pp. 23–32,

32 参考文献

1994.

- [11] Antti Peuhkurinen and Tommi Mikkonen. Mixed reality application paradigm for multiple simultaneous 3d applications. In *Proceedings of the 16th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*, MUM '17, p. 133–141, New York, NY, USA, 2017. Association for Computing Machinery.

謝辞

謝辞です。

If needed.