

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                | 8  |
| 3.1   | 関連技術・研究 . . . . .          | 8  |
| 3.2   | 提案手法 . . . . .             | 8  |
| 3.3   | 評価 . . . . .               | 8  |
| 3.4   | 結論 . . . . .               | 8  |
| 第 4 章 | 2D アプリケーションの利用             | 9  |
| 4.1   | 関連技術・研究 . . . . .          | 9  |
| 4.2   | 提案手法 . . . . .             | 9  |
| 4.3   | 評価 . . . . .               | 9  |
| 4.4   | 結論 . . . . .               | 9  |
| 第 5 章 | Remote Rendering           | 10 |
| 5.1   | 関連技術・研究 . . . . .          | 10 |
| 5.2   | 提案手法 . . . . .             | 10 |
| 5.3   | 評価 . . . . .               | 10 |
| 5.4   | 結論 . . . . .               | 10 |
| 第 6 章 | 結言                         | 11 |

vi 目次

|           |    |
|-----------|----|
| 発表文献と研究活動 | 12 |
|-----------|----|

|      |    |
|------|----|
| 参考文献 | 13 |
|------|----|



# 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ンメント向けの利用が目立つが、VRChat<sup>\*1</sup>や Horizon World<sup>\*2</sup>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。

---

<sup>\*1</sup> <https://hello.vrchat.com/>

<sup>\*2</sup> <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、アプリケーションを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同時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を行っている。これによって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）。

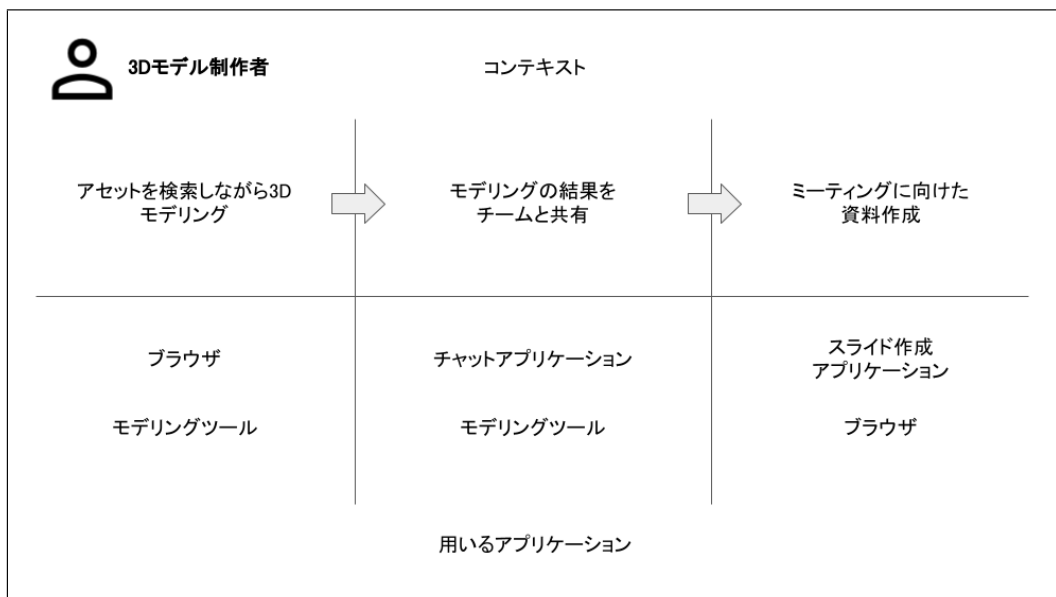
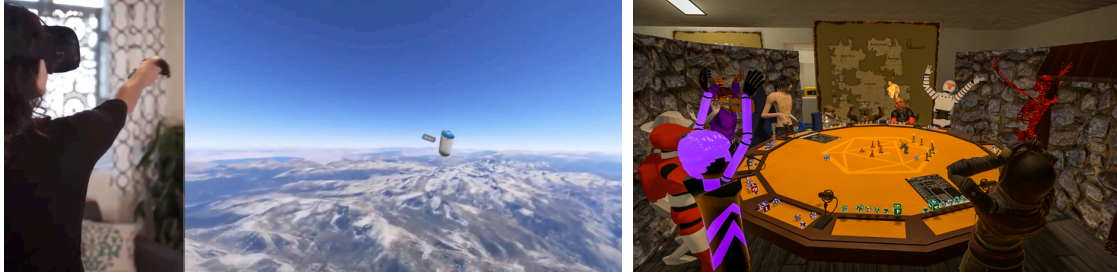


図 1.1. 2次元のデスクトップ環境のユーザがコンテキストを変化させてゆく例。3D モデルの制作者を例に、コンテキストを上段の左から右のように変化していくとき、3D モデル制作者は下段のようにそのコンテキストの変化に対応して、アプリケーションを閉じたり、新しく開いたりすることでスクリーン空間を柔軟に適応させることができる。

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り、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しての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範囲を定義する．

### 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<sup>\*1</sup>による X Window System[6] や Wayland<sup>\*2</sup>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．

---

<sup>\*1</sup> <https://www.x.org/wiki/>

<sup>\*2</sup> <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に近い意味を持つが、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。単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]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

## 6 第2章 提案するシステムの概要

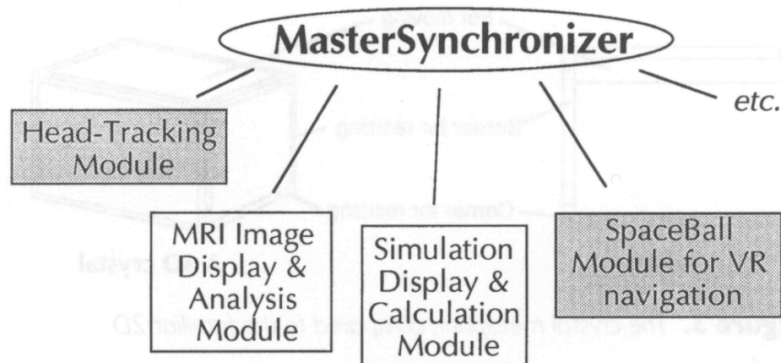


図 2.1. CRYSTAL のシステム概要図. MasterSynchronizer とそれぞれ機能を持ったモジュールからなる. 影のついた箇所はハードウェアコンポーネントである. (Adapted from Tsao and Lumsden 1997[7])

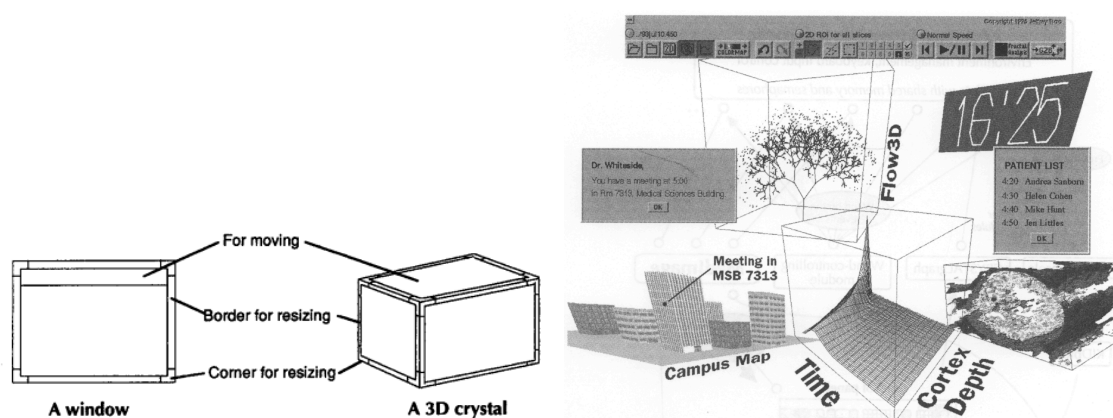


図 2.2. CRYSTAL で提案された 3D crystal の図. 左図はウィンドウとのメタファーを説明したもの. 右図は実際に用いられる状況を想定した図. (Both adapted from Tsao and Lumsden 1997[7])

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 2D Wayland 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 <sup>\*3</sup> のような専用の VR アプリケーションや、Meta Horizon Workrooms <sup>\*4</sup> や Spatial <sup>\*5</sup> 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 <sup>\*6</sup> や Meta 社の提供する Meta Quest <sup>\*7</sup> 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 <sup>\*8</sup> 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とする。

<sup>\*3</sup> Virtual Desktop, Inc. "Virtual Desktop" <https://www.vrdesktop.net/> (accessed 25 Dec, 2022)

<sup>\*4</sup> Meta. "Meta Horizon Workrooms" <https://www.meta.com/jp/work/workrooms/> (accessed 25 Dec, 2022)

<sup>\*5</sup> Spatial Systems, Inc. "Spatial" <https://www.spatial.io/> (accessed 25 Dec, 2022)

<sup>\*6</sup> Microsoft "HoloLens" <https://www.microsoft.com/ja-jp/hololens> (accessed 25 Dec, 2022)

<sup>\*7</sup> Meta "Meta Quest" <https://www.meta.com/jp/quest/> (accessed 25 Dec, 2022)

<sup>\*8</sup> Khronos group "OpenXR" <https://www.khronos.org/openxr/> (accessed 25 Dec, 2022)

## 第 3 章

# レンダリングプロトコル

3.1 関連技術・研究

3.2 提案手法

3.3 評価

3.4 結論



## 第 4 章

# 2D アプリケーションの利用

4.1 関連技術・研究

4.2 提案手法

4.3 評価

4.4 結論

## 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.



# 謝辞

謝辞です.





If needed.