JAIST Repository
https://dspace.jaist.ac.jp/

Title	ネットワーク接続された遠隔地間で現実感をともなった情報共有を実現する技術に関する研究
Author(s)	奥田, 基
Citation	
Issue Date	2007-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/3568
Rights	
Description	Supervisor:松澤　照男, 情報科学研究科, 博士

JAIST
JAPAN
ADVANCED INSTITUTE OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY

Japan Advanced Institute of Science and Technology

博士論文

ネットワーク接続された遠隔地間で
現実感をともなった情報共有を実現する技術に関する研究

指導教官 松澤 照男 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科

奥田　基

2007 年 3 月

要旨

研究開発プロジェクトの規模拡大やグローバル化などにともない、遠隔地に展開する研究者間のコラボレーションが活発となっている。これらのコラボレーションでは、研究開発の各フェーズにおいて、離れた場所に展開する研究者間の密な連携が必要であり、これを支援する「現実感を持った遠隔コラボレーション環境」が必要とされている。この支援環境は、現実感を持つ会議システムの機能に加え、研究開発分野におけるコミュニケーションの特徴である、相互に議論の対象となる情報を直接的（同期的）に共有する機能を持つ「現実感を持った遠隔コミュニケーション環境」と、間接的（非同期）なコミュニケーションを支援するグループウェア環境から構成される。

本研究は、現実感を持った遠隔コラボレーション環境を構成する、「現実感を持った遠隔コミュニケーション環境」の実現を目標とし、手法の検討及びその手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性について実証を行った。遠隔地に展開する研究者が、あたかも同じ場所において、画像化された数値シミュレーション結果や実験・測定結果などの共有すべき情報(共有データ)を囲んで、実際に議論を行なっているかの様な環境の提供を狙う。現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現については、一般的な2次元映像による遠隔会議システムの拡張による試みがほとんどであり、立体映像化や、画像化された数値シミュレーション結果や実験・測定結果などの情報共有までを考慮した例は少ない。

本研究では、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法として、コンピュータ上に仮想的な会議室を構築して、3 次元ビデオアバタ(参加者の分身)や共有データを立体像として仮想会議室に配置し立体視表示することで、現実感を持った遠隔会議システムを実現する方式(仮想会議室方式)を取る。この方式は、人物像や共有データを立体像として扱うので、現実感を持った表示が可能であるとともに、表示立体像(オブジェクト)の位置関係を遠隔地間で共有可能で、コミュニケーションの中で重要な、参加者間のアイコンタクト、ゲイズアウェアネス(相互の視線の認識)、共有データの指示などが可能となり、現実感を実現できる。しかし 3 次元データ化によるデータ転送量や計算負荷の増加、人物画像の 3 次元化や立体表示手法などに課題を持ち、一部で大規模なシステム構成により実験的な試みが行われているにすぎない状況である。

本研究では、共有データの情報をできるだけ保存する為に、立体像データを表面幾何データに変換せず、元の、ボクセルと呼ばれる立方体格子を基本単位とするデータの形で取り扱う。さらに、人物立体画像生成システムの様なボクセルデータを生成する外部デバイスとの接続の容易性やシステム内処理の共通化を狙い、表示対象データ（人物画像データと共有データ）はシス

テム内ですべてボクセルの形で取り扱う方式とした(ボクセル処理方式)。表示対象データをすべてボクセル形式で統一的に取り扱い、これの通信・配置・可視化・操作を実現する方式についての試みは、ほとんど行なわれていない。

本研究では、仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて 3 次元データの生成・通信・配置・可視化・操作を行い、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する手法(ボクセルコミュニケーション手法 : VC 手法)を研究対象とした。VC手法では、①接続する各参加地点(サイト)間での分散処理(サイト間分散処理法)、②通信データ量を削減するボクセル通信向けデータ形式、③各サイトでのクラスタ計算機を利用したオブジェクト毎の分散可視化処理(オブジェクト分散可視化法)などを組み合わせた実装方法を検討した。

本研究では、医療分野での応用を想定した、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発した。このシステムを用いた実験により、機能と性能面から VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性の実証を行った。

実験により、機能面では、仮想会議室へのオブジェクトの配置とその自由な視点からの立体可視化、会議参加者間のゲイズアウェアネスと共有データオブジェクトの指示、可視化要件の異なるオブジェクトの可視化、最新入出力デバイスの接続、及びシステム制御機能による一連の会議の実施などの動作を検証した。性能面では、実験システムを構成する各処理要素の性能を測定し、実験システムで実現できる性能の確認と、システムのモデル化とこれを元にした各種の高速化手法による性能推定を行った。その結果、サイト間分散処理法とオブジェクト分散可視化法の適用により、人物立体画像では自然なコミュニケーションが可能な可視化速度が得られ、共有データでは用途を限定すれば実用に耐える可視化速度が達成できる、との見通しを得た。また、一部の形式の共有データでは、3 次元の動画のボクセルデータ転送の高速化に課題がある事が判明した。

以上の様に、本研究では、「仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせた VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性」を実証した。今後は、機能面では、現実感の定量的評価、さらに現実感を増す為の音場生成、背景の表示、視点の動きなどへの対応が、性能面では、さらに自然なコミュニケーションを実現する為の 3 次元立体像生成の高速化、描画速度の向上、ボクセルデータ転送の高速化の検討などが必要と考えている。

本研究は、現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構築を狙う VizGrid プロジェクトの一部として実施し、プロジェクトで開発した 3 次元立体像生成機能などの機能と接続を行った。

Abstract

As the number of interdisciplinary collaborations between remotely located researchers increases, a highly realistic communication environment becomes essential as a collaboration support tool.

In this dissertation, the author describes an approach for this collaboration tool.

The author targeted to develop and evaluate a highly realistic remote communication environment which supports remote collaboration in the research and development application area. To realize this environment, the author proposed a voxel communication method (VC method) which realizes remote communication environment by a combination of a virtual conference room (VCR) method and the voxel processing method.

The VCR method set up a virtual communication space in a computer system, and allocates three-dimensional (3D) video image objects in the VCR. A 3D video avatar of researchers attending from remote locations and shared data objects which are referred to in discussion are treated as video objects. 3D video images of shared data, 3D simulation results data and measured data are treated as shared data objects.

The voxel processing method treats all 3D objects as voxel data.

The VC method was developed by applying three methods, a distributed processing between remotely located communicating sites (site distributed method), voxel data reduction method, and object distributing visualization method.

Instead of site centralized visualization method, the site distributed method distributes all visualization processes to remotely located sites, and aims to reduce computer resources usage and achieve high speed visualization. The voxel data reduction method aims to reduce network load by converting voxel data to surface voxel data which represents only geometric surfaces of objects. The distributed visualization method visualizes each object in parallel on a PC cluster system and aims to achieve high speed visualization.

The author developed an experimental VC system and evaluated functionality and performance of the VC method by using medical application data as shared objects.

The results of the functional experiment show that the VC method can provide multiple object allocation in the VCR and 3D visualization of the VCR from any observation point. Participants are shown seated at a table, so gaze awareness between participants and body motion, such as pointing at objects including precise details, can be shown.

The results of the performance experiment and an investigation of speeding up methods show that the 3D human object visualization speed will be up to twenty

frames per second, and 3D shared data object visualization speed will be up to a few frames per second. This 3D human object visualization speed is sufficient for natural communication between participants. The 3D shared-data-object visualization speed is also sufficient for practical applications for remote collaboration.

These results proved that the VC method can realize a highly realistic virtual communication environment. All participants can discuss with each other in this environment, as if they are in the same conference room and sit at a round table. This remote communication environment will support remote collaboration in the research and development application area.

目次

第 1 章 緒言 …… 1
1.1 研究の背景 …… 1
1.2 論文の構成 …… 2
第 2 章 現実感を持った遠隔コラボレーション環境と本研究の狙い …… 3
2.1 はじめに …… 3
2.2 現実感を持った遠隔コラボレーションの必要性 …… 4
2.3 現実感を持った遠隔コラボレーション環境で必要となる機能 …… 6
2.3.1 機能の概要 …… 6
2.3.2 現実感をもった遠隔会議システム …… 6
2.3.3 同期的な遠隔地間情報共有 …… 9
2.3.4 非同期な遠隔地間情報共有 …… 9
2.4 研究・開発事例 …… 10
2.4.1 研究開発の方向性 …… 10
2.4.2 現実感を持った遠隔会議システムの実現手法 …… 10
2.4.3 遠隔地間での同期的な情報共有実現へのアプローチ …… 14
2.4.4 遠隔地間での非同期な情報共有実現へのアプローチ …… 15
2.5 現状の課題と本研究の狙い …… 16
2.5.1 現状の課題 …… 16
2.5.2 本研究の狙い …… 18
2.6 まとめ …… 22
第 3 章 ボリュームコミュニケーション・システム …… 23
3.1 はじめに …… 23
3.2 ボリュームコミュニケーション・システム …… 24
3.2.1 狙い …… 24
3.2.2 概要 …… 24
3.2.3 入力機能 …… 26
3.2.4 出力機能 …… 28
3.2.5 ボリュームコミュニケーション基盤（VC 基盤） …… 30
3.2.6 ボクセルデータ格納・検索機能 …… 30
3.2.7 遠隔地間での非同期な情報共有システム …… 31

3.3 まとめ ····· 31
第 4 章 ボクセルコミュニケーション手法(VC 手法)····· 32
4.1 はじめに ····· 32
4.2 VC 手法の実現の方法 ····· 32
4.3 システム制御方式(サイト間分散処理)····· 33
4.3.1 サイト間分散処理の考え方 ····· 33
4.3.2 VC 手法の処理構成 ····· 35
4.4 取り扱うボクセルデータの形式と種類 ····· 37
4.4.1 ボクセルデータの形式 ····· 37
4.4.2 ボクセルデータオブジェクトの種類 ····· 40
4.5 多視点カメラ映像と共有データの取り込みと送信 ····· 42
4.6 ボクセルデータの通信 ····· 43
4.7 仮想会議室の構築 ····· 44
4.8 仮想会議室の可視化 ····· 46
4.8.1 オブジェクト分散可視化法 ····· 46
4.8.2 オブジェクト可視化時の座標変換 ····· 48
4.8.3 画像生成処理 ····· 49
4.8.4 画像重畳・表示処理 ····· 51
4.9 音声データ送信及び受信処理 ····· 53
4.10 共有データオブジェクトの操作 ····· 53
4.11 VC 手法の動作 ····· 54
4.11.1 想定する利用形態 ····· 54
4.11.2 処理の流れ ····· 54
4.12 まとめ ····· 56
第 5 章 実験システムによる VC 手法の実験 ····· 57
5.1 はじめに ····· 57
5.2 実験環境 ····· 58
5.2.1 実験システムの設計仕様 ····· 58
5.2.2 実験に用いたデータ ····· 58
5.3 VC 手法の実装 ····· 60
5.3.1 各処理の計算機システムへの配置 ····· 60
5.3.2 実験システムへの実装 ····· 60
5.3.3 ネットワーク構成 ····· 61

5.3.4 計算機環境 61
5.3.5 人物立体画像生成システム 62
5.3.6 表示デバイス 62
5.4 システム機能実験の手順と結果 63
5.4.1 実験手順 63
5.4.2 仮想会議室の配置と可視化 63
5.4.3 配置と可視化機能の効果実証方法 66
5.4.4 オブジェクト配置状況の認識実験 66
5.4.5 会議参加者視線の認識実験 71
5.4.6 共有データオブジェクトのポインティング認識実験 75
5.4.7 ボクセルデータの操作・指示とシステム全体の制御 78
5.5 システム性能実験の手順と結果 79
5.5.1 実験手順 79
5.5.2 ボクセルデータ圧縮性能 79
5.5.3 可視化性能測定方法 80
5.5.4 単一オブジェクト可視化性能測定結果 82
5.5.5 複数オブジェクト可視化性能測定結果 90
5.6 まとめ 93
第 6 章 考察 95
6.1 はじめに 95
6.2 機能面に関する考察 95
6.2.1 仮想会議室への配置 95
6.2.2 自由な視点からの可視化と視点の動きへの対応 95
6.2.3 立体視対応 95
6.2.4 ゲイズアウェアネスと共有データオブジェクトのポインティング 96
6.2.5 可視化要件の異なるオブジェクトの可視化 96
6.2.6 最新入出力デバイスの接続とシステム制御 96
6.3 性能面に関する考察 98
6.3.1 人物立体画像オブジェクトのデータ量 98
6.3.2 可視化性能 99
6.3.3 可視化性能モデル 103
6.3.4 可視化処理の高速化検討 112
6.4 今後の課題 125

6.4.1 システム機能に関する課題 ····· 125
6.4.2 システム性能に関する課題 ····· 126
6.5 まとめ ····· 127
第 7 章 結言 ····· 129
謝辞 ····· 131
付録.A STL データのフォーマット ····· 132
付録.B 通信ライブラリ ····· 133
参考文献 ····· 135
研究業績 ····· 141

図目次

図 1.1 現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構成 ····· 1
図 2.1 会議における各参加者の視点からの見え方の例 ····· 7
図 2.2 参加者・視線・共有データの関係 ····· 8
図 2.3 実写映像ベースの 3 地点会議システムの例 ····· 11
図 2.4 透過型スクリーンを利用するケースにおける視線のずれの影響 ····· 12
図 2.5 カメラと表示スクリーンのセットアップ例 ····· 13
図 2.6 現実感を持った遠隔会議システム実現へのアプローチ ····· 14
図 3.1 想定するボリュームコミュニケーション・システム利用シーン ····· 24
図 3.2 ボリュームコミュニケーション・システムの動作例 ····· 25
図 3.3 ボリュームコミュニケーション・システム構成図 ····· 26
図 3.4 視体積交差法による立体像生成の例 ····· 27
図 3.5 多眼カメラと立体画像の生成状況例 ····· 27
図 3.6 ステレオマッチング法により生成された画像の例 ····· 28
図 3.7 VizGrid プロジェクトで利用できる立体表示デバイスの例 ····· 29
図 3.8 VizGrid プロジェクトで利用する簡易立体視システム ····· 29
図 4.1 システム制御法 ····· 33
図 4.2 システム制御法とデータの流れ ····· 34
図 4.3 VC 手法における各処理の配置とデータの流れ ····· 36
図 4.4 フルボクセルデータの順序付け ····· 38
図 4.5 サーフェスボクセルデータ(1D 形式)の順序付け ····· 39
図 4.6 多視点カメラ映像・共有データ送信処理フロー ····· 42
図 4.7 オブジェクトの仮想会議室への配置 ····· 44
図 4.8 ボクセル空間及びオブジェクトの位置パラメータ ····· 44
図 4.9 仮想会議室内へのボクセル空間配置例 ····· 45
図 4.10 可視化処理手順 ····· 47
図 4.11 画像生成処理フロー ····· 49
図 4.12 球面サンプリング法の原理 ····· 50
図 4.13 サーフェスボクセルデータ(3D 形式)のポリゴン化 ····· 51

図 4.14 画像重畳・表示処理フロー………………………………………………51
図 4.15 共有データオブジェクト操作パレット例……………………………………53
図 4.16 VC 手法が想定する利用形態……………………………………………54
図 4.17 VC 手法による会議制御処理の流れ…………………………………55
図 5.1 実験に利用した共有データの例……………………………………………59
図 5.2 処理の計算機システムへの配置……………………………………………60
図 5.3 多眼式カメラの設置状況……………………………………………………62
図 5.4 人物立体画像表示例…………………………………………………………63
図 5.5 仮想会議室へのオブジェクト配置と表示例(1)……………………………64
図 5.6 仮想会議室へのオブジェクト配置と表示例(2)……………………………64
図 5.7 仮想会議室の可視化例………………………………………………………65
図 5.8 オブジェクト配置状況認識実験データ配置パターン(平面図)……………67
図 5.9 オブジェクト配置状況の認識実験データ配置画面例………………………67
図 5.10 オブジェクト配置状況認識実験の様子……………………………………68
図 5.11 オブジェクト配置状況認識実験の正答率と回答順番の関係……………69
図 5.12 オブジェクト配置状況認識実験における正答率頻度分布………………70
図 5.13 会議参加者視線の認識実験データパターン(平面図)……………………71
図 5.14 会議参加者視線の認識実験データパターン画面例………………………72
図 5.15 会議参加者視線認識実験の正答率と回答順番の関係……………………73
図 5.16 会議参加者視線認識実験における正答率分布……………………………74
図 5.17 立体視表示機能の効果実証方法……………………………………………75
図 5.18 サンプル共有オブジェクトの配置…………………………………………76
図 5.19 実証実験の模型と実験者が模型をポインティングする様子……………76
図 5.20 サイト B での表示画面例……………………………………………………77
図 5.21 サイト B での実験の様子……………………………………………………77
図 5.22 可視化処理の流れと処理時間………………………………………………80
図 5.23 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクト描画時間………………86
図 5.24 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクト描画速度………………86
図 5.25 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの表示画面データ転送処理時間 87
図 5.26 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成処理時間…………88

図 5.27 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成速度・・・・・・・・・・・・・・・・ 88
図 5.28 オブジェクト同時表示時の表示速度変化(人物立体画像オブジェクト)・・・・・・・・・・・・ 90
図 5.29 オブジェクト同時表示時の表示速度変化(共有データオブジェクト) ・・・・・・・・・・・・・・ 91
図 6.1 可視化処理とデータの流れ ・・・ 103
図 6.2 サーフェスボクセル形式オブジェクトの可視化速度モデル ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 111
図 6.3 フルボクセルデータフレーム間データ変化率測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 113
図 6.4 人物立体画像オブジェクトフレーム間データ変化率測定結果・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 114
図 6.5 サンプル図形データフレーム間変化率測定結果 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 115
図 6.6 サーフェスボクセル形式データの可視化速度モデル・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 120
図 6.7 サーフェスボクセル形式データの可視化時間内訳(2 次元表示・高速化適用) ・・・・ 121
図 6.8 サーフェスボクセル形式データの可視化時間内訳(立体視表示・高速化適用) ・・・ 122

表目次

表 2-1 現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法の比較 18
表 2-2 現実感を持った遠隔コミュニケーション環境における共有データ形式の比較.....18
表 4-1 フルボクセルデータのデータフォーマット 37
表 4-2 サーフェスボクセルデータ(1D 形式)のデータフォーマット.....38
表 4-3 サーフェスボクセルデータ(3D 形式)のデータフォーマット.....39
表 5-1 実験システムの設計仕様.....58
表 5-2 実験に用いたデータ.....59
表 5-3 実験システムの計算機構成 61
表 5-4 オブジェクト配置状況認識実験の条件と正答率 68
表 5-5 会議参加者の視線認識実験の条件と測定結果 72
表 5-6 ポインティング実験の条件と正答率 78
表 5-7 データ形式変更によるデータ量削減効果.....80
表 5-8 測定に用いたデータ.....82
表 5-9 人物立体画像オブジェクトの画像生成処理性能測定結果例 83
表 5-10 画像重畳・表示性能測定結果 83
表 5-11 人物立体画像オブジェクトデータの可視化性能例 84
表 5-12 フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能例.....85
表 5-13 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成処理測定結果例 89
表 6-1 分散処理方式と集中処理方式のネットワーク負荷の比較.....99
表 6-2 人物立体画像オブジェクトデータのモデル可視化時間と可視化速度例 106
表 6-3 フルボクセル形式共有データオブジェクトのモデル可視化時間と可視化速度例....108
表 6-4 グラフィックカードの仕様比較例 116
表 6-5 人物立体画像オブジェクトの可視化時間と可視化速度の高速化 118
表 6-6 フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化時間と可視化速度の高速化 ...119

第1章 緒言

1.1 研究の背景

研究開発プロジェクトの規模拡大やグローバル化などにともない、遠隔地に展開する研究者間のコラボレーションが活発となっている。これらのコラボレーションでは、情報収集、計画立案、実験・開発、評価などの研究開発の各フェーズにおいて、離れた場所に展開する研究者間の密な連携が必要であり、これを支援する「現実感を持った遠隔コラボレーション環境」が必要とされている。

この支援環境では、現実感を持つ会議システムの機能に加え、研究開発分野におけるコミュニケーションの特徴である、相互に議論の対象となる情報を遠隔地間で共有する機能が必要である。遠隔地間情報共有機能は、遠隔会議の中で対象となる情報を共有する直接的(同期的)なコミュニケーションを支援する機能(例 : 実験結果データを前に、お互いにこれを参照しながら議論を行う状況を実現する機能など)と、間接的(非同期)に遠隔地間で情報共有を行う機能(例 : プロジェクトの進捗状況を相互に参照できる機能)から構成される。

筆者の参加するVizGridプロジェクトでは[1]、現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構築を狙った研究開発を行なっている。ここでは、現実感を持った遠隔会議システムと同期的な遠隔地間情報共有システムを組み合わせて直接的なコミュニケーションを支援する「現実感を持った遠隔コミュニケーション環境」と、非同期な遠隔地間情報共有を支援する「グループウェア環境」により、現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構築を行なう。図 1.1 にこれらの環境の構成を示す。VizGrid プロジェクトではこの環境を「ボリュームコミュニケーション・システム」と称している。

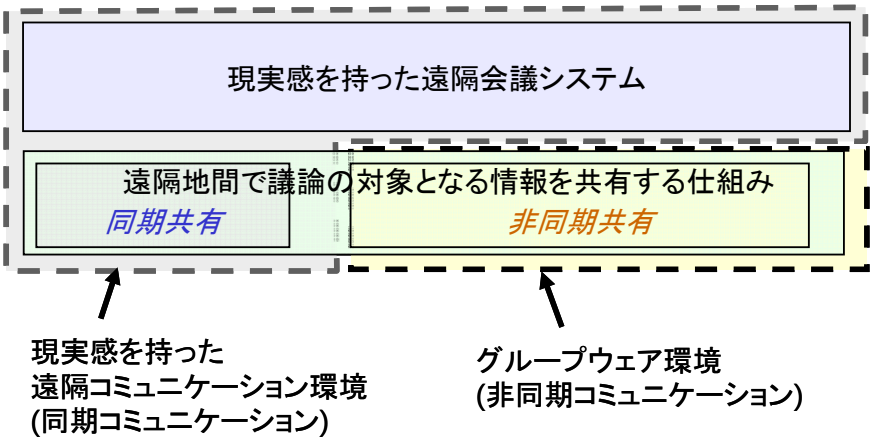


図 1.1 現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構成

現実感を持った遠隔会議システムの実現にあたっては、TV 会議システムからはじまり、これを高度化したシステムによる試みなどが行われている。しかしながら、2次元映像を元に、一般的な会議システムを狙った試みがほとんどであり、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境として、画像化された数値シミュレーション結果や実験・測定結果などの情報共有を考慮した例は少ない。また、一部の、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の試みでは大規模な設備を必要とするものがほとんどであり、システムの普及には課題がある。

以上の課題を踏まえ、本研究では、研究開発分野における直接的な遠隔コラボレーションを支援する「現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現」を目標とし、システムの普及を狙い、PC ベースの簡易な設備のシステムによる実現手法の検討とその有効性について実証を行う。

1.2 論文の構成

本論文は 7 章から構成される。

第 2 章では現実感を持った遠隔コラボレーション環境について、その必要性、これを実現するのに必要な機能を述べ、関連する研究・開発事例を説明し、現状の課題を明確にする。これらの背景を元に、本研究の目的である現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する要件ついて述べる。

本研究では、VizGrid プロジェクトが提唱するボリュームミュニケーション・システムの一部として現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法を検討する。第 3 章では、このボリュームコミュニケーション・システムについて説明し、本研究で検討を行う実現手法と、ボリュームコミュニケーション・システムの他の機能との関係を明確にする。

第 4 章では、本研究で検討する、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法であるボクセルコミュニケーション手法について述べる。

第 5 章では、ボクセルコミュニケーション手法による実験システムの開発と、この実験システムを用いて行った機能及び性能試験の環境と方法、その結果について述べる。

第 6 章では、実験結果についての考察を述べると共に、今後の課題を述べる。

第 7 章では、本研究の総括を述べる。

第2章 現実感を持った遠隔コラボレーション環境と本研究の狙い

2.1 はじめに

本章では、現実感を持った遠隔コラボレーション環境について、その必要性、必要とされる機能、これまでの研究開発動向と事例、及び現状の課題と本研究の狙いについて述べる。

最初に、研究開発をとりまく環境の変化にともない、物理的に離れた場所に展開する研究者間の高度な共同・協調研究を支援するツールの重要性がますます高まっている点を論じる。

次に、遠隔会議システムとして普及している TV 会議システムでは実現が困難な、現実感を持った遠隔コラボレーション環境により、この共同・協調研究の支援が実現できると考え、研究開発分野のコミュニケーションにおいて重要な特性である、「画像化された数値シミュレーション結果や実験・測定結果などの情報共有の必要性」を考慮して、環境が具備すべき機能について論ずる。すなわち、「遠隔隔地間の研究者があたかも同じ場所において議論を行なっているかの様な、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する機能」と、「直接的なコミュニケーションを行ってない状態での非同期な遠隔地間情報共有を行なうグループウェア環境を実現する機能」について論ずる。

最後に、遠隔コラボレーション環境の実現を狙う研究開発について、いくつかの代表的な事例を紹介し、それぞれの狙い、適用範囲、及び課題を論じ、これらの研究開発との違いを明確にしつつ、本研究の狙いと概要を論ずる。

2.2 現実感を持った遠隔コラボレーションの必要性

近年の大規模な研究開発プロジェクトでは、実験機器・測定機器の巨大化に伴い、その設備が偏在化し、研究者間のグローバルな共同と協調研究が普遍的に行なわれている。高エネルギー物理実験設備であるCERNの実験データを世界レベルで共有する共同研究プロジェクト[2]、核融合実験装置(JT-60)を利用した日米間の遠隔実験[3]、天体望遠鏡観測データを世界レベルで共有する共同研究[4] [5]などの事例があげられる。

核融合分野の遠隔実験の例では、米国の研究者が日本の JT-60 制御室内の日本側の研究者と TV 会議を行い、実験パラメータの決定、それに基づく実験と測定、測定結果の評価、評価を基にした次の実験パラメータ決定の実験サイクルを繰り返す。ここでは、単に米国側でパラメータ設定と測定結果の受け取りを行なうのではなく、両国の研究者がリアルタイムに議論しながらこの実験サイクルを繰り返す必要がある。これは実験設備・測定設備を遠隔地から利用するケースの普遍的な協調・共同研究のスタイルと考えられる。

計算科学の分野においても同様である。世界最速レベルの計算機を遠隔地から利用し研究者間の共同研究を行なう事が、日本政府が進める次世代の超高速スーパーコンピュータ開発計画においてもプロジェクト推進にあたっての必須の要件とされている[6]。

産業や医療の分野では、製品開発のスピードアップや効率化、医療サービスの質の向上などに向け、遠隔地間共同・協調研究の試みが行なわれている。産業分野では、遠隔地間で車の設計情報を共有してデザイン検討を行う、実際の製品開発への適用例が報告されている[7]。医療分野の例では、遠隔地から患者の CT(Computed Tomography)や MRI (Magnetic Resonance Imaging)などの医療データを参照して、診断や複数の地点の専門医による診断支援を行なう試みが報告されており、今後の医療分野における大きな研究テーマとなっている[8] [9]。

プロジェクト参加者間のコミュニケーションにおいては、「プロジェクト参加者間の物理的距離が共同・協調プロジェクトの推進(コラボレーション)に大きな影響を与える事」が知られている[10]。物理的距離を仮想的に減らすコミュニケーションツールは、文字情報により非同期コミュニケーションを行なう文書などから、音声や2次元画像で同期的なコミュニケーションを行なう電話やTV会議などへと発展を遂げてきた。しかしながら、プロジェクト間の競争や社会からの要請に基づく「研究開発のスピードアップ」、「効率化」、及び「学際領域における分野の異なる研究者間の連携強化」が求められており、さらに、物理的距離を仮想的に減らす、すなわち現実感を向上させる、コラボレーションツールが必要となっている。

ここで、現実感を持つ遠隔地間コラボレーションツールを、「物理的に離れた場所にいる参加者同士が、あたかも同じ場所で、議論の対象となるデータを前に会議を行なっているかの様な状況を仮想的に実現するツール」と定義し、このツールにより生成される環境を、「現実感を持った遠隔コラボレーション環境」と定義する。遠隔地の研究者同士が実験データ、測定データ、計算結果データ、設計データなどの共有すべきデータを囲んでこれらを参照しつつ、お互いの姿を現実感をもって認識し、従来以上に密度の高いコミュニケーションを行うことを狙う。

マルチメディアの研究開発の現状と将来への指針をまとめた ACM の Multimedia Special Interest Group の 2005 年のレポート[11]においても、隣接の人や環境と同じように、遠隔地の人や環境と相互作用ができるシステムの実現が、今後この分野で集中すべき三つのグランドチャレンジ問題の一つとして挙げられている。特に遠隔コラボレーション環境とインタラクティブで没入感を持つ 3 次元の環境の実現、すなわち本研究で取り上げる現実感を持つ遠隔コラボレーション環境の実現がその構成要素であると述べられている。

2.3 現実感を持った遠隔コラボレーション環境で必要となる機能

2.3.1 機能の概要

研究開発分野におけるコラボレーションツールの開発では、その取り扱うデータや情報の特性、研究開発の各フェーズ(事前調査、実験・観測、分析・評価など)におけるコミュニケーションの特性を考慮する必要がある。

本研究では、2.2 節で述べた様に、遠隔地間の共同・協調作業を支援する現実感を持った遠隔コラボレーション環境は、実際に研究者が直接コミュニケーションを行う状況で利用する現実感を持つ遠隔会議システム、会議の中で議論の対象となる情報を遠隔地間で共有する機能、及びコラボレーションを行なう前提となる非同期な遠隔地間情報共有機能から構成されると考える(図 1.1)。

ここで議論する現実感とは、コミュニケーションの参加者がお互いに同じ場所で議論しているかの様な状況を仮想的に作り出す事であり、仮想現実感と呼ばれる事もある。 会議システムにおけるその実現には、「会議参加者間のアイコンタクト、ゲイズアウェアネス(相互の視線を意識した気づき)を表現できる相互人物画像表示機能」とそこにおける、「現実に近い映像・音声の表現(品質・立体感・低遅延)の実現」、「共有データの位置関係の相互の共有手段」が必要となる。

遠隔会議における共有データの取り扱いでは、「データの持つ情報(3 次元性、時間依存性など)の特性とこれを参加者が利用する手段」と、「操作・指示への現実に近い反応を考慮した実現手段」の検討が必要である。

直接的なコミュニケーション開始以前の「相互の情報レベルの一致」と「参加者の一体感」が円滑なコミュニケーションには重要であり、非同期な遠隔地間情報共有機能としては、この実現手法の検討が必要となる。

以下の項では、これらの具備すべき機能について議論を行う。

2.3.2 現実感をもった遠隔会議システム

一カ所に3人以上のメンバーが集合して、それぞれの参加者が対象となる情報を前に議論するシーンを想定し検討を行う。共有する情報の提示方法としては、机の上に、議論すべき情報(紙に書かれた情報、実物の製品、サンプル模型など)が置かれているケース、計算機の計算結果、または計測機器の測定結果のコンピュータグラフィック画像が表示されたディスプレイが置かれているケースなどが考えられる。

ここで、現実感を実現するとは、「誰と誰が話をしているか、誰が誰の動作を見ているか、誰が何を見ているか、また彼らが何をしているかといった、通常の対面会議では自然に行なっている認識(ジェネラルアウエアネス)、または PFA (Participant Focusing Awareness)を現実の世界に近い映像・音声で表現する事」と定義する。具体的にこれを実現するには、参加者間相互のアイコンタクト、ゲイズアウェアネス、及び共有データに対する各種の動作をできる限り正確かつ相互に共有するできる機能を持つ事、が重要であると報告されている[12] [13] [14] [15] [16]。

例として、ある製品について、3者で議論を行なう状況を考えてみる。図 2.1 (a)に示すように、会議の場で机の上に対象となる製品を置き、写真中の A が製品の説明を行い、B と C がこれを聞きながら必要があれば質問を行なう状況を想定する。ここで、それぞれの参加者の配置状況とその視線方向、及び対象となる共有データの配置状況は、図 2.2 に示される関係となる。

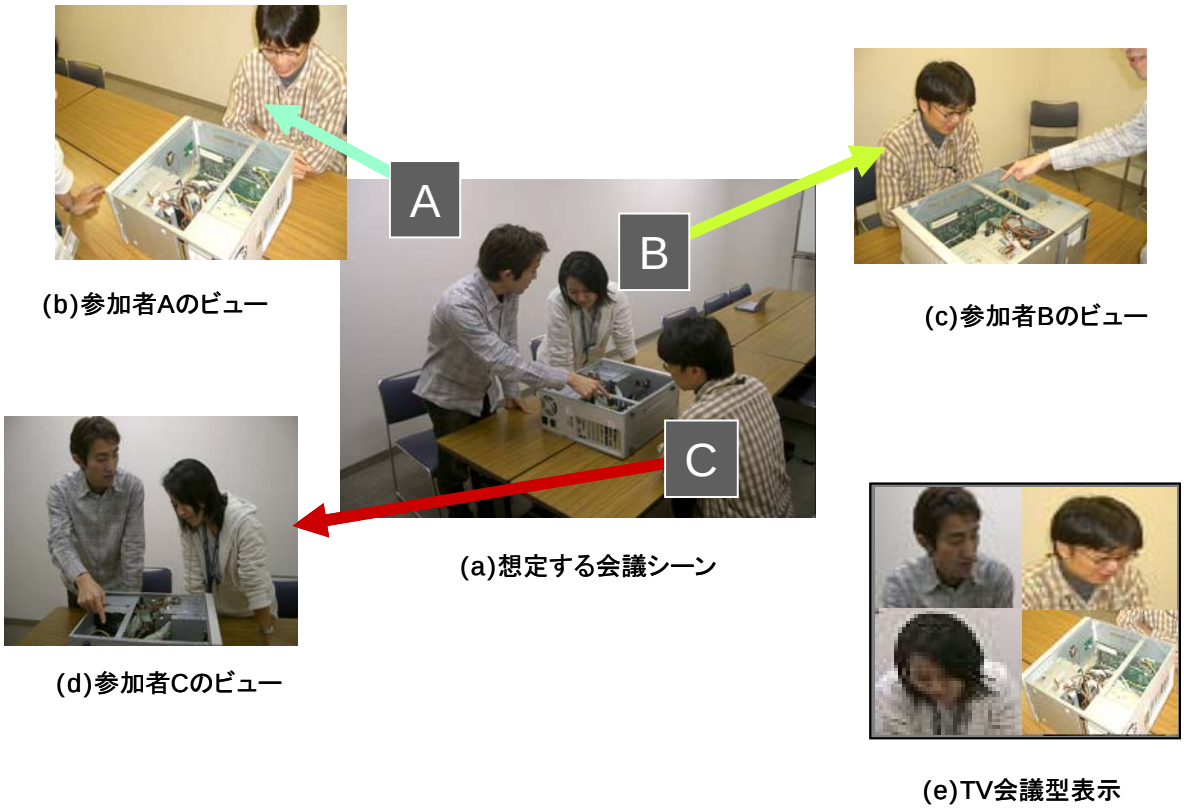


図 2.1 会議における各参加者の視点からの見え方の例

こういった状況では、「Aが製品を指差しつつ、説明を行い、これに対して、Bがうなずきつつ質問を行い、Cはこの状況を見ながら、次の自分の質問を行なうタイミングを見計らう状況」が発生する。ここで C が適切なタイミングで発言するためには、A と B との会話の状況を的確に捉える必要がある。

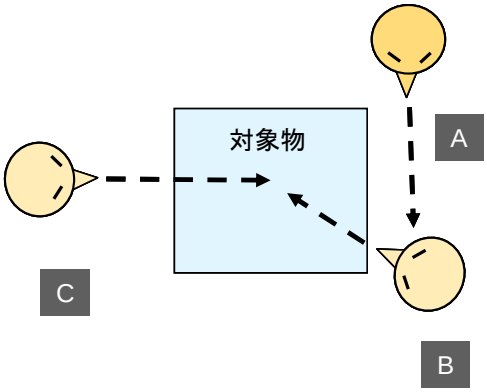


図 2.2 参加者・視線・共有データの関係

例えばこの状況では、Aの視点からはB、Cの二人は図 2.1 (b)の様に見え、B、Cの視点からはそれぞれ図 2.1 (c)、図 2.1 (d)の様に相手が見える。現実の会議では、この様なそれぞれの視点から会議の状況を認識して会話を行なう事で、コミュニケーションを行なっている。また、相手に話しかける時も相手の名前を呼ぶのではなく、相手を見つめて話しかけることにより、お互いに会話の相手を自然に認識している。この様な環境の実現が、自然なコミュニケーションには重要となる。

これには単なる音声情報や平面的な画像情報だけでなく、相互の視線情報や動作表現などの表現、すなわち、参加者間の視線の一致(多視線一致)、視線の動きによるノンバーバルコミュニケーション(アイコンタクト)、体全体、頭、眼の動作により参加者間で誰が誰を見ているかを判断できるゲイズアウェアネス、及び共有データに対する各種の動作の相互認識などの表現が必要となる。

これらの表現の実現には、参加者の顔の表情が理解できる映像解像度、自然な動きを表現できる表示速度、現実感を表現する立体感とはっきり会話が聞き取れるレベルの音質などが必要であるとともに、その遅延が自然な会話に許容される範囲でなければならない。遅延時間は往復400ms が許容範囲であるとの報告がある[17]。

さらに、3次元の位置情報としては、参加者の会議室内の位置関係の相互認識と対象物への指示の相互認識の表現が必要である。このためには、それぞれの視点で会議の場を見る事、すなわち、会議室内での各参加者の位置の決定と、会議室の各参加者の視点位置からの表示が必要となる。例えば、通常のTV会議システムでは、図 2.1 (e)で示されるように、表示画面に顔が平面的に張り付けられている為、画面をどのように動かしても常に顔画像が常に参加者自身を向いている様に見えるいわゆるモナリザ効果が生じ[18]、相互の位置関係の認識などの、自然なコミュニケーションに必要な表現は困難である。

2.3.3 同期的な遠隔地間情報共有

研究開発分野におけるコミュニケーションで共有すべきデータとしては、文書情報、計測結果情報、計算結果情報、設計情報などが考えられる。文書データを除く他のデータは計測器の精密化・高速化、計算機の高速化・解析の複雑化、設計対象の複雑化・設計の高度化などにより急速にデータ量が増大しており、そのほとんどは 3 次元データ化されている。さらに一部は時系列データとなっている。

現実感を持った遠隔コミュニケーション環境における同期的な情報共有においては、データの表示、操作、格納、及び検索においてこれらの特性を考慮した取り扱いが必要となる。すなわち、「3 次元データの立体表示、さらにその時系列データの表示」、「参加者間で注目点を共有できる指示」、「各参加者によるデータの操作(移動、回転、拡大・縮小、色変更など)」、「大容量 3 次元データの類似形状の検索などの高度かつ高速な検索を可能とする格納・検索機能」などである。また、表示においては表面的な情報だけでなく、任意の断面表示などの 3 次元の内部の情報の表示機能も必要となり、これを考慮した、情報量が低下しないデータの取り扱いが必要である。

さらに、表示速度、解像度、及び操作に対する遅延は、議論に影響を与えない性能が必要となる。

2.3.4 非同期な遠隔地間情報共有

コミュニケーションを円滑に進めるには、これまで述べてきた同期的な現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現が必要であるが、同時に、会議前に遠隔地に展開する参加者間の連帯意識を高め、情報レベルを一致させておく事も必要であり、特に、事前調査や分析・検討のフェーズではこれらが重要となる。

会議参加者が同じ場所で作業を行なっていると、会議前に相手の存在や状態を意識し、これから議論する内容やプロジェクトの進捗状況についてお互いがどの程度理解しているかを自然に把握することができる。これらの認識がコミュニケーションの円滑化に大きな影響を及ぼす。すなわち「相手がどこにいるかを認識する位置アウェアネス」、「同じ作業をしている事を他の参加者に気づかせる存在のアウェアネス」、及び「作業の進捗を相互に理解できる情報のアウェアネス」などのグループウェア的機能が遠隔地間での自然なコミュニケーションの実現に必要となる。

具体的には、参加者の状況(今どこにいて、何をやっているか、忙しいのか、暇なのかなど)や、会議に係わるプロジェクトの状況(プロジェクトの担当者毎の進捗状況、データの登録・更新状況など)をリアルタイムに参加者が共有できるグループウェア環境が必要となる。

2.4 研究・開発事例

2.4.1 研究開発の方向性

2.3 節で述べた現実感を持った遠隔コラボレーション環境に必要な機能に関し、「現実感を持った遠隔会議」、「コミュニケーション時における、遠隔地間の研究者による議論の対象となる情報の同期的な共有」、及び「コミュニケーションの開始前にお互いの情報レベルを一致させ一体感を高める非同期な情報共有」の各分野における研究開発の状況について以下に論ずる。

2.4.2 現実感を持った遠隔会議システムの実現手法

(1) TV 会議システム高度化の手法

遠隔コミュニケーションのツールとしては、TV 会議システムが広く利用されている。当初は通信に利用できるバンド幅や映像圧縮技術などに課題があったが、高速バックボーンネットワークの整備や映像技術の進歩を背景に、AccessGrid プロジェクト[19]におけるグリッド上での多地点間TV会議システム、Virtual Rooms Video Conference Service(VRVS)[20]、Global Conference System[21]などの研究開発において、多地点接続、高解像度化、表示速度向上などの発展が見られている。

しかしながら、これらのツールでは、ポンイント to ポイントの二カ所間における対話型コミュニケーションをベースに、複数の地点間の TV 会議においてもこの組み合わせを基本としており、さらにこれらのツールが Window 表示ベースの個々のユーザの映像を表示するシステムを基本としている為に、相互の位置情報の共有が困難となり、結果として、現実感を表現する重要な要素であるアイコンタクトやゲイズアウェアネス表現を実現できない。すなわち、本研究で目的とする現実感をもったコラボレーション環境の実現には至っていない。

(2) 現実感の実現手法

現実感をもった遠隔会議システムの研究には、アバタと呼ばれる CG(コンピュータグラフィックス)により生成された参加者の分身を利用する方式と、実写映像を利用するシステムによる方式があり、さらに両者を組み合わせた方式の研究が行われている。

(アバタを利用する方式)

初期のアバタを利用するシステムの代表的なものとしては、EU プロジェクトとして 1995 年より 1998 年に実施された COVEN プロジェクトがある[22] [23]。これは CG により生成されたアバタとよば

れる参加者の分身を遠隔地感で共有する仮想空間に配置するもので、このアバタに対して利用者の意志に沿った動作を行わせる事で現実感の実現を狙ったものである。これらのシステムでは、アバタの表示解像度が低く、顔の表情の表現が困難であり、会議システムへの応用は少なく、ネットワークビジネスゲームや観光案内などのアプリケーションでその効果を実証したにとどまる。

(実写映像を利用する方式)

実写映像ベースのシステムは、参加者の実写映像を、連結した複数の表示画面に表示または一つの表示画面に合成して表示し、多地点間の現実感のある TV 会議システムを構成するものである。これらの方式の典型的な三カ所の遠隔会議システム構成の例を図 2.3 に示す。三カ所(サイトⅠ～Ⅲ)のサイトにおいて、参加者の前の連結したスクリーンに他の二人の映像がそれぞれ表示される例である。半透過型のスクリーンなどを利用して、利用者からはカメラが見えない構造とし、表示される顔画像の目の位置に設置されたカメラからの映像を、それぞれ他の場所の対応する参加者の位置のスクリーンに表示する。各サイトにおいて、擬似的な会議空間を構成し、アイコンタクトやゲイズアウェアネスなどを実現している。

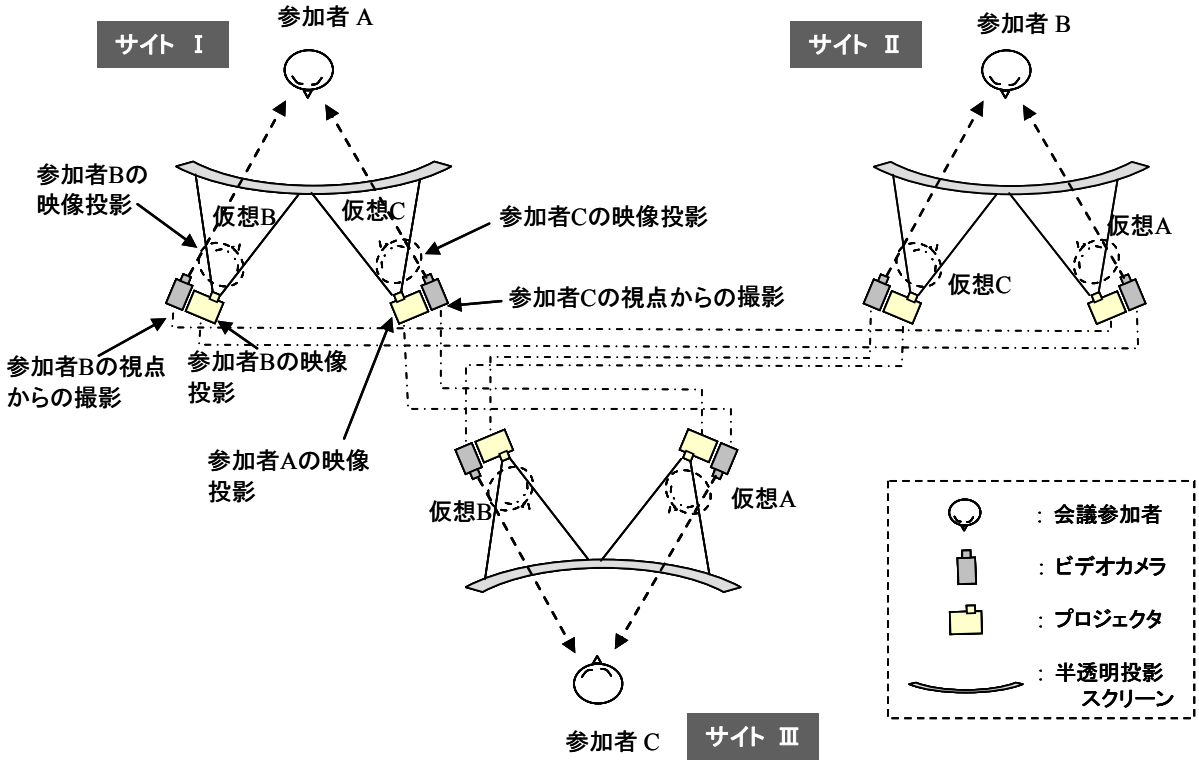


図 2.3 実写映像ベースの 3 地点会議システムの例

この方式の研究開発の例としては、連結した透過型スクリーンとカメラを組み合わせ、3 カ所の

会議システムを開発した MAJIC[24]、Raskar らによる、TV カメラ映像から作成した人物ビデオ画像を遠隔地間で分離したスクリーンに表示して遠隔対話型作業空間を実現する「The Office of the Future」の提案[18] [25] [26]、その関連の研究開発[27] [28] [29]、文殊の知恵システム[30]などが挙げられる。

複数の表示画面を連結する方式では参加人数によりスクリーンやカメラなどの配置の変更が必要であり、スクリーンの物理的な配置の問題で参加サイト数は三カ所が実用的な限界となる。これに対し、複数地点の映像を一つの表示画面に合成する方式では参加サイト数の制限をなくすことができる。

アイコンタクトの正確な表現には、人物映像の表示において、参加者の目の位置の移動への対応が必要となる。透過型スクリーンを用いるケースでは想定する参加者像の目の位置へのカメラの設置により、各参加者が移動しないケースでは視線の良い一致を見る事ができる。しかし、利用者が設定された位置から移動すると、参加者相互の視線がずれ不自然な表示となる。

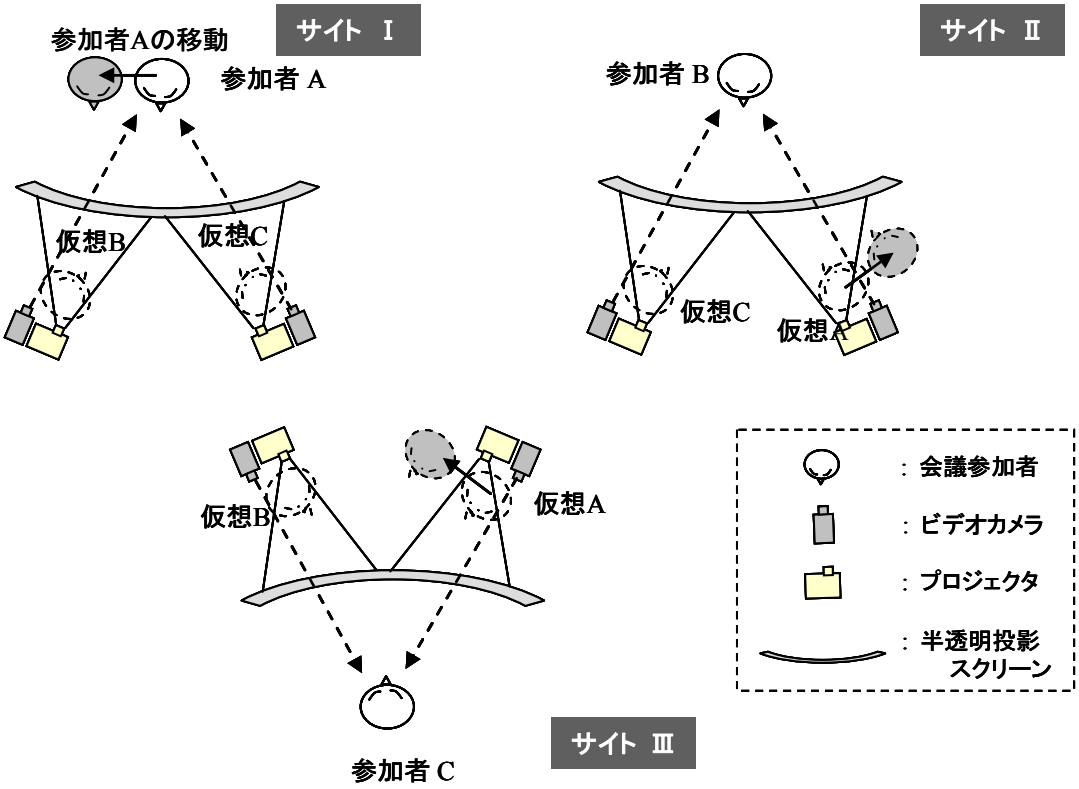


図 2.4 透過型スクリーンを利用するケースにおける視線のずれの影響

例えば、図 2.4 において、サイトⅠの参加者Aが想定する位置から移動すると、これを捕らえているカメラの映像により表示されるサイトⅡにおける参加者Aの位置が移動する。このため、参加者Bのサイト Ⅰ 向けの映像を生成するサイトⅡのカメラの位置と、画面上に表示されている参加

者Aの目の位置がずれ、参加者Bが画面上の参加者Aを見る視線が実際よりずれて参加者Aに見える事になり、アイコンタクトが困難となる。この現象を防ぐ為には、利用者の目の位置を検知し、この情報を元に、それぞれの表示映像とカメラの位置・向きを、想定する視線に沿って物理的に制御または仮想的に制御する必要がある。画面を合成する方式の TELEPORT システム[31]では参加者の目の位置の移動を検知してこれを画面合成時の配置にフィードバックしているが、複数のカメラやプロジェクタを用いる手法では、これらの移動制御が課題となる。

また、プラズマディスプレイなどの、通常の非透過型表示デバイスでは、画面の後方へのカメラの配置はできず、画面近くに設置したカメラ映像から想定する参加者映像の目の位置への補正を行う対処が必要となる。VIRTUE システム[32]及びそれを発展させた I3DVC (Immersive 3D Videoconferencing)[33]では、各地点において参加者を画面の中心上部と左右に設置したカメラの映像で撮影し、MPEG-4 の形式で転送し、表示側でそれぞれの利用者の視点からの映像をカメラ位置、視点位置を考慮し 2 次元の画像合成を行い、大画面曲面スクリーンに表示しこの問題を解決している。図 2.5 にこれらのシステムのセットアップ例を示す。

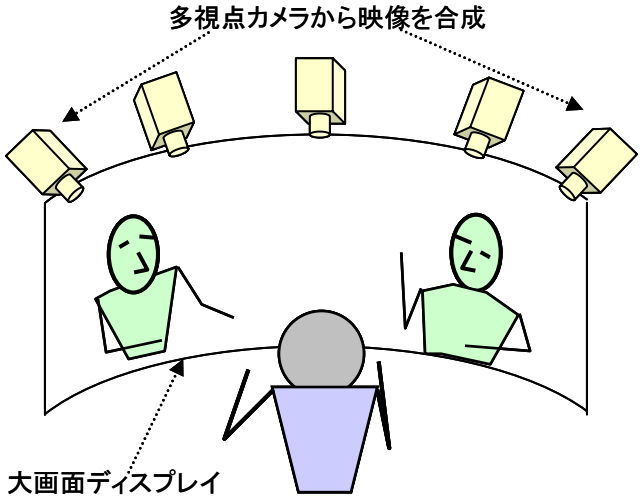


図 2.5 カメラと表示スクリーンのセットアップ例

(両者を組み合わせた方式)

アバタを利用したシステムは、さらに現実感を持たせる為に、実映像をカメラから取り込み仮想空間映像上に重ね合わせて表示するビデオアバタを利用する方式へ発展した[34] [35] [36] [37]。

この方式では、多地点からの映像を仮想会議室内で合成し、多地点間の会議システムを構成可能であるが、現実感の表現には各利用者の視点変化に応じたアバタ映像作成が必要となる。小木らの MVL における取り組みでは[34]、複数のカメラの映像の中から、利用者の視線に最も

近い角度のカメラ映像から得られた映像を選択しビデオアバタを生成し、二カ所の没入型ディスプレイ(CABIN)間で擬似的な視線の一致を実現している。さらに、複数のカメラの映像から参加者の映像をとらえてボクセルと呼ばれる立方体格子を基本単位とするデータを生成し、これを幾何データ(三角メッシュデータ)に加工後、通信・可視化処理を行い、没入型の 3 次元(3D)表示デバイスを用い遠隔仮想共有空間を実現する試みも行っている[37]。

図 2.6 に、以上の現実感を持った遠隔会議システムを実現する研究開発の流れを示す。

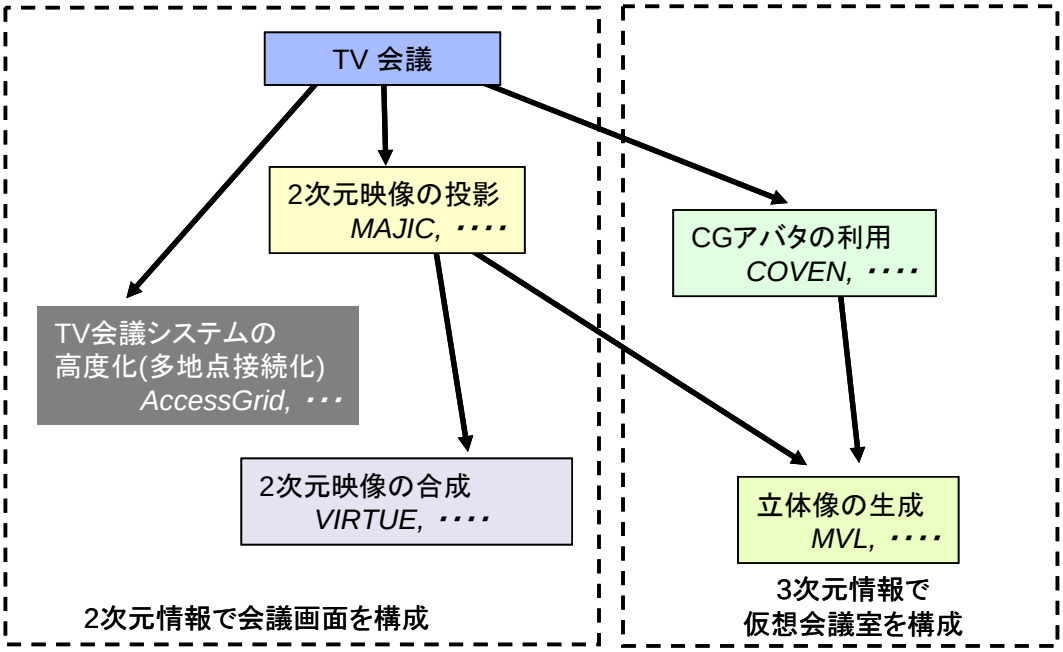


図 2.6 現実感を持った遠隔会議システム実現へのアプローチ

2.4.3 遠隔地間での同期的な情報共有実現へのアプローチ

初期の遠隔地間での同期的な情報共有の研究は 2 次元データの共有に関するものである。

データ共有と 2.4.2 項で述べたゲイズアウェアネスを考慮した試みの例としては、ホワイトボードに書かれたデータを、遠隔地間で対面画像を用いて共有する石井らの研究[38] [39]が挙げられ、TV 会議型の会議システムと比較して相互理解に効果があがったと報告されている。また、ウェブページを利用しテキストデータなどを共有したコラボレーション環境構築の試みも行なわれている[40]。

2 次元データの共有に関する研究は、数値シミュレーション結果・測定結果などの 3 次元のデータを共有するシステムへと研究が展開している。3 次元没入型表示デバイスの 2 地点間接続により、現実感を持ち 3 次元データの共有を行う AccessGrid プロジェクトなどの研究開発が報告されている[41]。これらのシステムでは、二地点間で相互にデータの操作や興味のある点の指示な

どを行なう事が可能であり、遠隔地間での実験結果や医療データの相互評価に効果があったと報告されている。グリッドシステム上で大規模数値シミュレーション結果データの遠隔可視化を行う例としては、NAREGI プロジェクトなどがあげられ、大量の 3 次元計算結果データの表示が可能となったと報告されている[42]。

また、現実感実現へのアプローチの延長として、ポインティング機能の実現例も報告されている[34] [37]。

2.4.4 遠隔地間での非同期な情報共有実現へのアプローチ

遠隔地間での非同期な情報共有については、グループウェアの観点から、同じ作業を行っていることを相手に気づかせる存在のアウェアネスに関する研究[43]、お互いの作業状況の把握が相互コミュニケーションに与える影響の研究[44]、お互いの存在を意識して連帯感・参加感を持たせる位置のアウェアネスの研究[45]、情報の存在や周囲の情報共有活動などを利用者に気づかせる情報取得に関するアウェアネスの研究[46]などが行われており、協調作業においてはこれらのアウェアネスが作業効率に影響を与えるなど、その重要性が指摘されている。さらに最近の研究では、表示方法を工夫し利便性を増したシステムとして、ウェブページへのアウェアネス情報の表示、水槽を泳ぐ魚の様子でメンバーの様子を表現する機能を持つGroupSenseシステムの例が挙げられ[47]、その有効性が報告されている。

2.5 現状の課題と本研究の狙い

2.5.1 現状の課題

2.4 節で述べた様に、現実感を持った遠隔会議システムを実現する試みとして、TV 会議システムを拡張する方法では多地点接続化や高機能化が行われてが、Window ベースで平面的に映像を表示する為に、現実感の実現は難しい。また、参加者の実写映像を参加者の配置位置に設置したスクリーンに表示する方式では、参加地点数を柔軟に変えられない課題を持つ。複数のカメラから撮影した映像を視点位置を考慮し画面に合成表示した方式により、参加地点数への対応を改善した試みがあるが、いずれも 2 次元映像を元にした処理であり、視点の移動への対応や表示に不自然さが残る課題を持つ。

一方、 コンピュータ上に仮想的な会議室を構築して、3 次元データ化されたビデオアバタを立体像として室内に配置し、これを立体表示することで現実感を持った遠隔会議システムを実現する方式が試みられている(以下ではこの方式を仮想会議室方式と呼ぶ)。この方式は、人物像を立体像として扱うので、2 次元映像を加工する方式と比較して、立体像による自然な表示が期待できるとともに、相互位置情報の遠隔地間での共有により、コミュニケーションの中で重要な参加者間の正確なアイコンタクトやゲイズアウェアネス(相互の視線の認識)が可能となり現実感の効果が期待できる。さらに、原理的には多くの地点間接続が可能、と言う利点を持つ。しかし 3 次元データ化によるデータ転送量や計算負荷の増加、人物画像の 3 次元化や立体表示の手法に課題を持つ。一部で大規模なシステム構成により、実験的な試みが行われているにすぎない状況である。

遠隔地間の同期的な情報共有機能については、二地点間のシステムで現実の研究開発に利用されるレベルの機能が実現されている。しかし、遠隔会議システムと組み合わせて現実感をもった情報共有を実現し、さらに、多地点間共有における相互の視点制御の問題を考慮した研究事例は少ない。

遠隔地間での非同期な情報共有機能については、グループウェアの観点から広い分野で研究開発が進められているが、遠隔会議システムとの関係を論じた例は少なく、その連携について、どういった機能・インターフェイスを持つべきかの検討が必要である。

本研究では、共有すべき情報を会議の中での取り扱う事が必要であると言う、研究開発分野におけるコミュニケーションの特性を考慮し、仮想会議室方式の現実感を持つ遠隔会議システムと遠隔地間の同期的な情報共有機能を組み合わせた、現実感を持った遠隔コミュニケーショ

ン環境の実現に目標を絞る。

遠隔地に展開する研究者が、あたかも同じ場所において画像化された数値シミュレーション結果や実験・測定結果などの共有データを囲んで、実際に議論を行なっているかの様な環境を実現する事により、遠隔地間で現実感をもったコミュニケーションが可能になるとともに、現実の世界では難しい立体画像化された共有データを囲んでの議論が可能となる。

この環境の実現には、小木らの試み[37]に見られる様に、仮想会議室方式に立体像化した共有データを組み合わせた方式が提案されている。この方式は 2 次元映像を加工する方式と比較して、共有データと人物立体画像の相互位置関係の遠隔地共有が可能となる。しかしながら、小木らの試みに見られる様な、立体表面だけをメッシュデータなどで表現する方法では、転送量を軽減できる利点を持つが、共有データ内部の情報を持たない為、断面表示などの多様な情報提示が難しいという課題を持つ。共有データの立体像データを表面幾何データに変換せず元のボクセルデータの形で取り扱うことで、この問題を回避することができる。研究開発分野のコミュニケーションにおいてこの点は重要である。ここで、共有データと人物立体画像を別々のデータ形式として取り扱うのでなく、統一したボクセルデータとして取り扱う方式(以下ではボクセル処理方式と呼ぶ)を考える事ができる。ボクセルデータとして統一的に扱う事で、人物立体画像デバイスの様なボクセルデータを出力する外部デバイスとの接続が容易になるとともに、システム内の処理を共通化できる効果が期待できる。ボクセルデータによる処理は一般にはデータ量増大にともなう通信処理時間や可視化処理負荷の増加を招くが、人物立体画像などの表面情報のみが必要なデータで、表面幾何データと同程度のデータ量への削減が可能であれば、ボクセルデータとして統一的に取り扱うメリットを生かす事ができる。システム全体で人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクトを統一的にボクセルデータとして取り扱い、通信・配置・可視化・操作を実現する方式についての試みはほとんど行なわれていない。

表 2-1 に現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法と機能をまとめた。

TV 会議型は、映像生成が容易で、映像品質とシステム規模に利点を持つが、現実感の表現が難点である。2 次元画像合成型は TV 会議型より現実感の表現では優れるが、立体視とオブジェクトデータの立体像としての取り扱いが難点である。仮想会議室型は機能面では他の方式より優れるが、映像品質とシステム規模が課題である。

表 2-1 現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現手法の比較

実現手法	立体視	視点の動き対応	位置関係	オブジェクトデータの取扱	映像生成	映像品質	システム規模
TV 会議型	困難	困難	困難	2 次元表示	容易	○	小
2 次元画像合成型	困難	可能	可能	2 次元表示	複数カメラ映像からの画像合成	△	中
仮想会議室型	可能	可能	可能	立体像として対応可	複数カメラ映像からの立体像合成	△	大

表 2-2 に現実感を持った遠隔コミュニケーション環境で取り扱う共有データ形式の比較を示す。表面幾何データ形式は内部情報をもたない点が課題であり、ボクセルデータ形式ではデータ量増加への対応が課題となる。

表 2-2 現実感を持った遠隔コミュニケーション環境における共有データ形式の比較

共有データ形式	特徴	課題
表面幾何データ形式	・オブジェクトの表面を三角形メッシュ等の幾何データで表現。 ・表面だけのデータで、データ量の削減が可能。 ・多くの研究事例あり。	・ボクセルデータ等からの幾何データへの形式変換が必要。 ・内部情報を持たない為、オブジェクトの持つ情報が失われる。
ボクセルデータ形式	・内部の情報を持つ為、多様な情報提示が可能。 ・ボクセルデータを出力する入力デバイスやプログラムとの接続が容易。	・データ量が増加。計算機資源(ネットワーク、可視化ハードなど)を要する。

2.5.2 本研究の狙い

本研究は、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境(図 1.1 参照)を実現する手法を検討するもので、遠隔会議システムの実現方式としては仮想会議室方式を取り、データの取り扱い方式は、人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクトをシステム内ですべて 3 次元のボクセルデータとして取り扱うボクセル処理方式を取る。この方式の組み合わせで、数サイトが参加し、3 次元の対象物を囲むように参加者が配置される形式の仮想会議室を想定し、3 次元データの生

成・通信・配置・可視化・操作を行い、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する実装手法を検討する。本研究は、現実感を持った遠隔コラボレーション環境の構築を狙う VizGrid プロジェクト[1] [48]の一部として実施した。

この両者を組み合わせた方式は以下の利点を持つ。

(機能面)

- 人物像と共有データオブジェクトを立体像として持つので、仮想会議室における相互の位置関係を遠隔地間で共有できる。
- 仮想会議室内に自由に人物像・共有データオブジェクトを配置でき柔軟な会議構成(会議接続数など)が可能である。
- 任意の視点からの可視化が可能で、参加者の動きに追従する視点移動に対応できる。
- 立体視表示デバイスによる人物立体像と共有データの 3 次元表示が可能であるとともに、2 次元表示においても 3 次元データからの処理による自然な表示が可能である。
- 共有データオブジェクトでは、その内部情報を持つ為、研究者間の多様な情報共有が可能となるとともに、参加者による相互操作結果をリアルタイムに反映可能である。

(システム実装面)

- システムへの入力インターフェイス(I/F)形式を比較的単純なボクセルデータとする事で、3 次元画像生成側の変換処理負担の軽減や、変換I／Fソフトの開発負担の軽減を計る事ができ、結果として、最新かつ多様な 3 次元画像生成デバイスとの迅速な接続や、各種の共有データの取り込みが容易となる。
- 医療分野における CT や MRI のデータ、計算工学分野における、メッシュ生成の負荷を軽減するボクセル表現による解析方式など、ボクセルデータの取り扱いが広がっており[49][50]、これらのデータ取り込みが容易である。

本研究が対象とする、「仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する手法」を以下では、ボクセルコミュニケーション手法(VC 手法)と呼ぶ。VC 手法では現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する為に、以下の要件を満たす必要があるとして、研究を行った。

(機能面)

- 仮想会議室にオブジェクト(人物立体像、共有データの立体像)を自由に配置可能であり、柔軟な会議構成をとる事ができる。
- 遠隔地間で、オブジェクトの配置及び共有データオブジェクトへの指示(ポインティングなど)の相互認識が可能である(これにより参加者間のゲイズアウェアネスや、共有データオブジェクトのポインティングが可能となる)。
- 参加者間のゲイズアウェアネスや、共有データオブジェクトのポインティングが認識可能な解像度での表示が可能である。
- 仮想会議室を自由な視点から立体可視化可能であり、参加者の視点の動きに対応可能である。
- 仮想会議室に配置・可視化される、異なる可視化要件(可視化速度、データ形式、可視化パラメータなど)を持つオブジェクトの可視化が可能で、お互いの干渉が少ない。
- 最新の入出力デバイスの接続が容易である。
- 共有データオブジェクトの操作、会議の制御などの I/F を持つ。

(性能面)

- 人物立体画像オブジェクトの可視化性能が、通常のコミュニケーションに支障のない速度及び遅延時間(通常のビデオレート (30 fps) の 1/2 以上の可視化速度、遅延時間 400ms 以下(2.3.2 項参照)である。
- 共有データオブジェクトの可視化性能は、人物立体像オブジェクトと同程度である必要はないが、共有データを介した議論に支障のない可視化速度(人物立体画像オブジェクトの 1/2 程度の速度)であり、共有データオブジェクトの操作への反応に違和感の無い遅延時間(400ms 以下、2.3.2 項参照))である。
- 同時に表示するオブジェクト数の増加に伴う、可視化速度の低下が少ない。
- 人物立体画像などの表面データのみが必要なオブジェクトにおける、ボクセルデータ形式のデータ量が表面幾何データ形式のデータ量と同等であり、ボクセル処理方式の利点を生かせる。
- 仮想会議室方式では立体像としての処理を行う為、通信負荷と可視化処理負荷が高く高性能なシステムを必要とするケースが多い。会議システムの普及の為、できるだけ簡易なシステムで上記の性能を実現する。

VC 手法では、上記の要件に対応する為に、①接続する各参加地点(サイト)での分散処理、②通信データ量を削減するボクセル通信向けデータ形式、③各サイトでのオブジェクトの分散可視化などを組み合わせた実装方法を検討した。この実装方法により、ボクセル化された人物立体画像オブジェクト、共有データオブジェクト及び音声データを入力として、これらの通信、各オブジェクトの仮想会議室への配置と可視化、及び共有データオブジェクトの操作を実現する。

人物立体画像のボクセル化については、VizGrid プロジェクトでカメラ映像からボクセル化した人物立体画像を生成するシステム(人物立体画像生成システム)の開発を行っており、VC 手法ではこのシステムと接続を行う。

本研究では医療分野での応用を想定して、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発し、このシステムによる実験で、機能・性能面から VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性の実証を行う。

2.6 まとめ

本章では、研究開発のグローバル化、実験・研究施設の巨大化・偏在化にともない、遠隔地間での共同・協調研究開発がますます盛んになり、これを支える遠隔地間コラボレーション支援ツールが必要とされている事を述べた。この支援ツールでは、単なる TV 会議システムとは異なり、現実感の表現、データの共有機能、非同期の情報共有の機能が必要である事と、それぞれの技術要素の研究開発動向について概要を述べた。

2 次元映像を元に開発されたシステムでは、人物映像や共有データの持つデータの 3 次元性・時間依存性などの情報や、仮想会議の場における相互位置関係情報をそのままの形で保存し遠隔地間で共有することは困難であるが、仮想会議室方式ではこれが可能である事を述べた。

オブジェクトデータの取り扱い方式としては、ボクセルデータのままで取り扱う方式と表面幾何データに変換して取り扱う方式があるが、オブジェクトの持つ情報量の低下を防ぐには、ボクセルの形のままで取り扱うボクセル処理方式が必要である事を述べた。

本研究では、現実感を持つ遠隔会議システムと同期的な遠隔地間の情報共有機能を組み合わせた、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現に目標を絞り、仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する手法(ボクセルコミュニケーション手法 ：VC 手法)を研究対象とした。

VC 手法では実装方法として、サイト間分散処理、ボクセル通信向けデータ形式、及びオブジェクト分散可視化を組み合わせた方法を取る。さらに、医療分野での応用を想定した、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発し、このシステムを用いた実験により、機能・性能面から VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性の実証を行う。

第3章 ボリュームコミュニケーション・システム

3.1 はじめに

本章では、本研究で検討する現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の機能要件を明確にする目的と、検討するボクセルコミュニケーション(VC)手法が外部 I/F として利用する各機能を説明する目的で、VizGrid プロジェクトが提唱する、「現実感を持った遠隔コラボレーション環境の実現を狙うボリュームコミュニケーション・システム」について、考え方、実装方法、及び開発状況について述べる。

考え方と実装方法の記述においては、想定する利用シーンを説明し、そこにおけるシステムの動きとシステムの各構成要素の機能(入出力、仮想会議室構成機能、ボリュームデータ格納・検索、非同期の情報共有)について述べる。

VizGrid プロジェクトでは、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現するプログラムコンポーネント群をボリュームコミュニケーション基盤(VC 基盤)と称している。本研究の対象である VC 手法がこの VC 基盤を実現する。VC 手法については、本章では機能の概要を説明するにとどめ、第 4 章以降でその詳細を論ずる。

3.2 ボリュームコミュニケーション・システム

3.2.1 狙い

ボリュームコミュニケーションは、現実感を持つ遠隔会議システムと直接的な情報共有システムを組み合わせた、現実感を持つ遠隔コミュニケーション環境と、非同期の情報共有を行なうグループウェア環境を組み合わせて、現実感を持った遠隔コラボレーション環境を実現する。以下ではこれを実現するシステムをボリュームコミュニケーション・システムと呼ぶ(図 1.1 参照)。

VizGrid プロジェクトでは、できるだけ簡易な設備によるシステム構築が必要と考え、PC ベースのシステムにより、3 次元の対象物を囲むように参加者が配置される対面環境を、仮想空間(コンピュータネットワーク)上に実現することを目標としている。

3.2.2 概要

ボリュームコミュニケーション・システムを、「物理的に離れた三カ所のサイトの、医療と計算科学の研究者が、診断データから得られたデータを元に計算機でシミュレーションを行い、その結果を前に議論を行う状況」、を想定して説明する。図 3.1 に、ここで想定する研究開発の流れを示す。

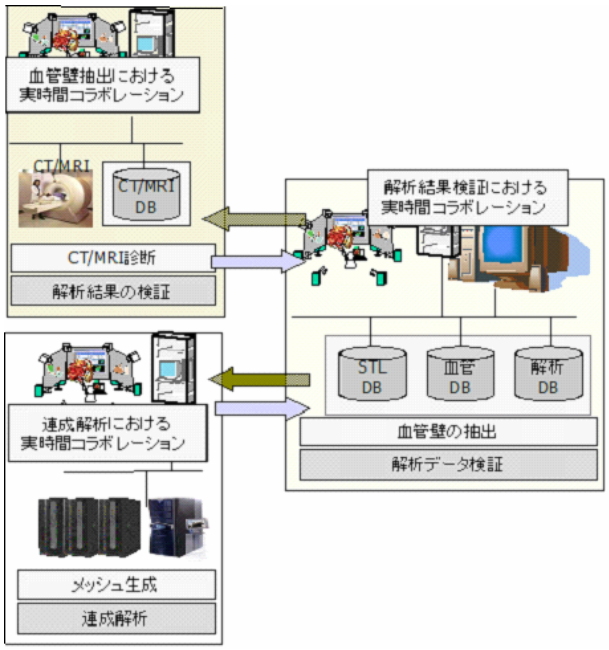


図 3.1 想定するボリュームコミュニケーション・システム利用シーン

ここでは検査・診断を行う医者、CT や MRI から得られた測定データより血管データを抽出する

分析技術者、及び計算機によりシミュレーションを行う流体解析技術者の間でコラボレーションが行われる。分析技術者が他の二人と連携しながらCT/MRIのデータより血管の管壁を抽出しこれをボクセル化し、この結果を流体解析技術者に送る。流体解析技術者は、スーパーコンピュータによる血管内の連成解析(血流シミュレーション)を実施し、得られた血液流速や血管壁圧力などの計算結果を各研究参加者に送り、最後に、このデータを元に全員で議論を行う。

図 3.2 に、この利用シーンの中で、各研究者が議論を行う状況を想定したボリュームコミュニケーション・システムの動きを示す。

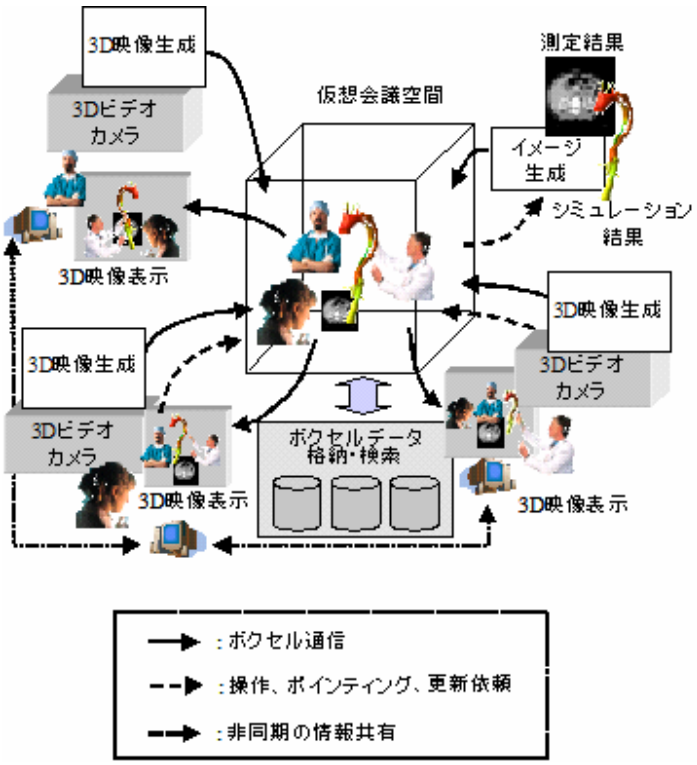


図 3.2 ボリュームコミュニケーション・システムの動作例

ここでは、3 次元映像生成デバイスにより生成された参加人物像をリアルタイムでボクセル化し、ネットワークで接続されたサイト間で音声データと同期して通信する。この人物立体画像を仮想会議室の中に配置する。各サイトではそれぞれの研究者の視点位置を考慮して人物立体画像を 3 次元映像表示デバイス(立体視表示デバイスなど)で表示し、研究者間のアイコンタクト・ゲイズアウェアネスを実現する。

さらに、計算機シミュレーション結果の 3 次元画像をボクセル化し、人物立体画像とともに仮想会議室内に配置、これを参加研究者間で相互に操作・ポインティング可能とする。

また、これらの 3 次元の人物立体画像データ、共有データオブジェクトを格納・検索する機能と

ともに、各サイトの研究者間で、相互の活動状況やプロジェクトの状況などを共用できる遠隔地間での非同期な情報共有支援機能を持つ。

図 3.3 にボリュームコミュニケーション・システムの構成要素を示す。システムは大きく入出力機能、仮想会議室構成機能、ボリュームデータ格納・検索機能、非同期の情報共有システムから構成される。以下に各機能の詳細を記述する。 図中の点線で囲まれた部分が仮想会議室構成機能(以下ではボリュームコミュニケーション基盤 ：VC 基盤と呼ぶ)であり、本研究の対象である VC 手法がこの VC 基盤を実現する。

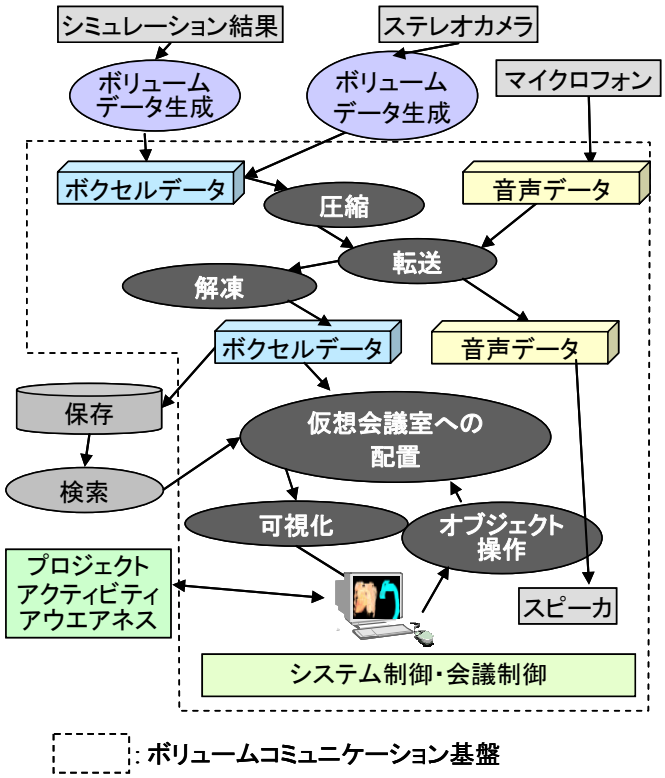


図 3.3 ボリュームコミュニケーション・システム構成図

3.2.3 入力機能

入力機能は、カメラ映像から 3 次元の人物画像を生成する人物立体画像生成機能、共有データ入力機能、及び音声入力機能から構成される。人物立体画像生成については、種々の手法が提案されているが、VizGrid プロジェクトでは複数の独立したカメラ映像から視体積交差法によりボクセルデータを生成する手法[51] [52]及び多眼カメラ[53]からステレオマッチング法によりボクセルデータを生成する手法を用いる。

図 3.4 に、視体積交差法で用いる複数のカメラから映像を撮影する設備(a)と、得られた 3 次元のボクセルデータの例(b)を示す。(a)に示す様に、机を囲む枠にいくつかのカメラを取り付け、上

半身を色々な角度から撮影し立体像を構成するので、完全に立体的な像を得る事ができる。しかし、撮影設備が大規模になる、立体像構成の為の計算負荷が高い、ボクセル空間サイズ(解像度)を上げるのが難しいなどの課題を持つ。

(a) 撮影設備　　(b) ボクセルデータの例

図 3.4 視体積交差法による立体像生成の例

図 3.5 に、ステレオマッチング法で用いる多眼カメラ(a)と、これにより画像生成を行う様子(b)を示す。この手法では、多眼カメラにより顔の映像を取り込み、立体像を作成する。カメラに内蔵された装置でステレオマッチングを行い、画素毎の距離を測定し、これを PC 側で構成して立体像を抽出するので、設備が簡略、高速、及び計算負荷が少ないなどの特徴を持つ。しかし、前に掲げた手の後ろの様なカメラから隠れた部分の表示で抜けが出るなどの表示品質や、完全な立体像を得るのは難しいなどの課題を持つ。VizGrid プロジェクトでは、離れて設置した 2 台の多眼カメラのデータを合成して表示品質を上げている。

(a) 多眼カメラ　　(b) 画像生成時の配置例

図 3.5 多眼カメラと立体画像の生成状況例

図 3.6 に、この方法により作成されたボクセル空間サイズ 256^3 の人物立体画像の例を示す。

図 3.6 ステレオマッチング法により生成された画像の例

これらの立体画像生成システムは、急速にその機能・速度・解像度が向上しており、システムとしては最新のデバイスをできるだけ早く取り込む事が必要である。接続にあたって、入力 I/F を比較的単純なボクセルデータ形式とする事で、最新かつ多様な入力デバイスへの対応が可能となった。

共有データについては、各サイトで作成、又は他サイトで作成されたデータのネットワークを経由した取り込みを行なう。比較的データ形式が単純なボクセルデータ形式とする事で、各種の共有データの利用を容易とした。

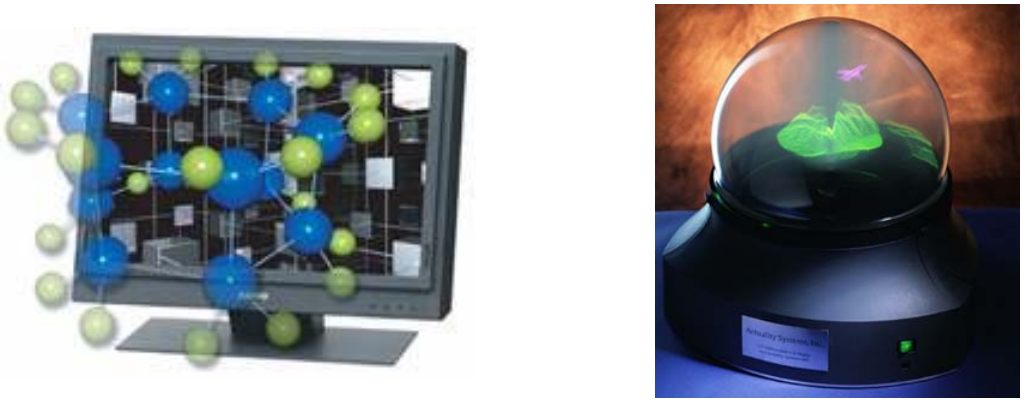
音声は、各サイトにおいて通常のマイクにより入力する。

3.2.4 出力機能

出力機能は、表示デバイスとスピーカーからなる。2 次元表示であっても、オブジェクト立体像の視点位置を考慮した可視化を行うので、自然な映像が得られるが、現実感をもった 3 次元データの表示には立体表示デバイスが必要であり、さらに、会議をできるだけ自然な形で行うには、裸眼立体視ができる事が好ましい。

近年、裸眼立体視が可能なデバイスの研究開発が盛んになり、平面ディスプレイを拡張したタイプとしては、高精ディスプレイに視差の異なる映像を表示して液晶シャッターによる視差バリアでそれぞれの目に入る映像を制御して立体視を実現するデバイス[54]、半透明の液晶ディスプレイを多層化して立体表示をするデバイス[55]などが提案されている。一方、空間に直接映像を表示する空間立体投影タイプとしては、高速回転する円盤に映像を投射して、残像効果を利用して立体像を見せるシステムとして Perspecta[56]や Transpost[57]などが挙げられる。また、最近では、空気中の特定の場所に高出力のレーザを短時間照射し、発生したプラズマの発光で立体像を生成するシステム[58]も提案されている。

どのデバイスにおいても、現時点では大画面で高精度の画像表示はできないが、この分野の技術は急速に研究開発が進んでおり、近い将来、実用的なデバイスが実現するものと考えられる。利用するシステム側としては、これらの最新のデバイスと迅速に接続できるシステムを開発する必要がある。



(a) 立体表示液晶ディスプレイ　　(b) Perspecta

図 3.7 VizGrid プロジェクトで利用できる立体表示デバイスの例

VizGrid プロジェクトでは、立体視出力デバイスとして視差を利用した立体表示液晶ディスプレイ(図 3.7(a))とPerspecta(図 3.7(b))との接続が可能であるが、どちらも表示できるサイズが小さく、本来の会議システムとしての利用は現在では困難である。

(a) 2 台の液晶プロジェクタ　　(b)　セットアップ例

図 3.8 VizGrid プロジェクトで利用する簡易立体視システム

現状では、通常の大画面 2 次元表示ディスプレイと、液晶フィルター付きメガネを利用する簡

易立体視ディスプレイ(図 3.8 参照)を出力デバイスとした。(a)に示す 2 台の液晶プロジェクタで視差を考慮した 2 枚の映像を偏光させて(b)のスクリーンに表示し、偏光フィルター付きメガネでこれを立体視する。

音声については、発声者の位置を考慮した動的な音場生成により現実感が増すと考えられるが、現在の VizGrid プロジェクトでは通常のスピーカーによる静的な対応のみを行う。

3.2.5 ボリュームコミュニケーション基盤（VC 基盤）

ボリュームコミュニケーション基盤は以下の要素から構成される。

- 人物立体画像生成デバイスから人物立体画像の動画データを取り込みボクセルデータ化し、これを各サイトへ送信する機能
- 静止画、動画などの共有ボクセルデータを各サイトへ送信する機能
- 音声データを送信・受信する機能
- ボクセルデータ化された人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクトを、仮想会議室に配置・操作（ポインティング／回転／移動／拡大・縮小／共有データオブジェクトの変更）する機能
- ボクセルデータ化された人物立体画像・共有データを受信し、各参加者の視点から仮想会議室内を立体可視化し表示デバイスへ出力する機能
- 音声データを処理・発生する機能
- 会議に関する情報を管理して、システム全体を制御する機能
- ボクセルデータをシステム内で通信する機能

これらの機能が入出力機能と接続してシステム全体の動作を行う。VC 基盤を実現するVC手法の各要素の詳細は 4 章で論ずる。

3.2.6 ボクセルデータ格納・検索機能

システム内で取り扱うボクセルデータをデータベース化して格納し、これを高速に検索する機能である。特にボクセルデータの検索については、通常のインデックスによる検索とともに、類似データの検索機能を持つ。3 次元データの類似検索については種々の手法が提案されているが、VizGrid プロジェクトでは、3 次元データの特徴点を抽出してその類似性で検索を行う、高速かつ類似検索精度の高い 3 次元データ検索システムを持つ[59]。

この検索システムでは、ボクセルデータから特異点を計算し、特異点グラフを利用してこれを圧縮、この分布データをボクセルデータのインデキシングデータとする。特異点をそのまま特徴点

をする場合と比較して、インデキシングデータサイズの圧縮が可能である。特異点抽出により約1/13、さらに特異点グラフにより 1/1.6 のデータ削減が報告されている。さらにこの手法により CT 画像において通常は困難な立体画像の類似検索に成功したと報告されている[60]。

3.2.7 遠隔地間での非同期な情報共有システム

グループウェア環境である遠隔地間での非同期な情報共有システムとして、VizGrid プロジェクトでは各サイトの研究者間でプロジェクトの状況を共用できる機能を持つ。遠隔実験プロジェクトでの利用を想定して、実験に関わるデータを各研究者が登録する事でプロジェクトの動きを把握できる VizSquare と称するシステムを開発した。

実験のテーマ、目的、内容、結果などを文書または数値データの形で登録しこれを研究者間で情報共有する。この情報の登録状況はリアルタイムで他の研究者に伝わり、他の研究者の研究開発状況の把握、すなわち非同期的なコミュニケーションが行われる。さらにこれらの情報に対して通常の検索機能を持つとともに、この情報に対して作成・参照・更新・承認などの関わりを持った研究者間の情報を保存しておき、その状況をビジュアルに表示する機能を持つ。これにより、研究者間の関係や情報共有の様子の理解が可能である[60]。

3.3 まとめ

本章では、本研究で検討する現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の機能要件を明確にする目的と、検討するボクセルコミュニケーション(VC)手法が外部 I/F として利用する各機能を説明する目的で、VizGrid プロジェクトが提唱する、「現実感を持った遠隔コラボレーション環境の実現を狙うボリュームコミュニケーション・システム」について、考え方と実装方法、さらに、VizGrid プロジェクトにおける開発状況について述べた。

以下の章では、VizGrid プロジェクトで開発された入出力機能を前提に、本研究で開発を行ったVC手法と、医療分野の利用を想定した、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムについて述べる。

第4章 ボクセルコミュニケーション手法(VC 手法)

4.1 はじめに

本章では、ボクセル処理方式と仮想会議室方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現するVC手法について、その実装上の主な特徴である、サイト間の分散処理、ボクセルデータの通信法、仮想会議室への配置、及びオブジェクト分散可視化法の順に、その狙いと実装方法を述べる。

VC手法は、VizGrid プロジェクトで開発された、入出力機能(人物立体画像生成、共有データ取り込み、音声取り込み)と接続を行ない、ボクセル化された人物立体画像オブジェクト、共有データオブジェクト、及び音声データを入力として、これらの通信、両オブジェクトの仮想会議室への配置と可視化、共有データオブジェクト操作、及び会議全体に対する制御を行う。

4.2 VC 手法の実現の方法

VC 手法では、以下に示す、サイト間分散処理、ボクセル通信向けデータ形式、オブジェクト分散可視化などを組み合わせた実装方法を取り、2.5.2 項で述べたシステム要件の実現を狙う。

⑴サイト間分散処理 ： システム制御方式としては、一カ所のサイトで全サイトの可視化処理を行う集中処理法ではなく、各サイトで可視化処理を行うサイト間分散処理法をとる。各サイトに可視化処理を分散することで、システム全体の可視化処理の経過時間を削減できる。 またサイト数の増加に対しても柔軟に対応できる。

⑵ボクセル通信向けデータ形式 ： ボクセルデータの通信にあたっては、データ圧縮により通信量の削減を行う。

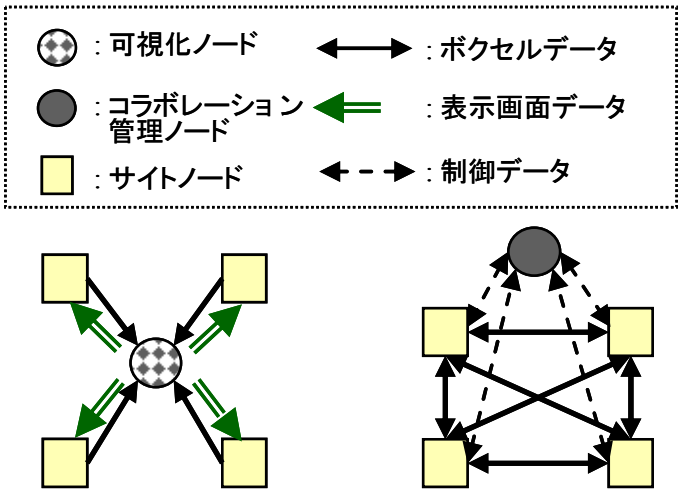
⑶オブジェクト分散可視化 ： サイト間分散可視化処理により、仮想会議室を一括して可視化するのではなく、仮想会議室内に配置するオブジェクト毎の分散可視化が可能となる。オブジェクト毎の分散可視化処理により、①処理経過時間短縮、②可視化要件の異なる複数のオブジェクトに対応する処理の実現(データ形式、描画手法など)、③他オブジェクトの処理に影響されない処理の実現などが可能となる。

以下の節で、これらの方法の狙いと実装方法の詳細を説明する。

4.3 システム制御方式(サイト間分散処理)

4.3.1 サイト間分散処理の考え方

複数サイト間で、仮想会議室方式による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現し、共有する方法としては、大きく、集中処理法と分散処理法の二つの手法が考えられる。図 4.1 にこれらのシステムの構成例を示す。ここでは 4 サイト間での会議を想定する。図中で実線はボクセルデータの流れ、二重線は表示画面データの流れ、点線は制御データの流れを示す。



(a) 集中処理法　　(b) 分散処理法

図 4.1 システム制御法

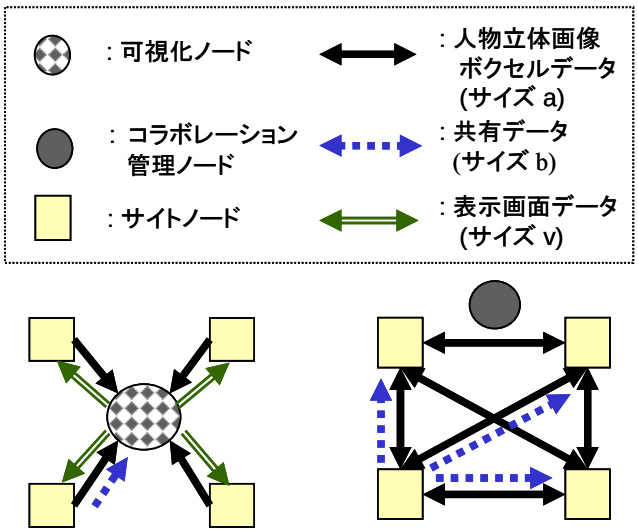
図 4.1 (a) に示す集中処理法では、システムに可視化ノードを置き、ここに各サイトのオブジェクトデータ(人物立体画像、共有データ)を集め、各参加者の視点から仮想会議室の可視化を行い、生成した表示画面データをそれぞれのサイトに配信し、そこで表示を行う。

図 4.1 (b) に示す分散処理法では、システムにコラボレーション管理ノードを置き、ここで、オブジェクトの位置関係、各サイトノードの視点情報、操作・ポインティング情報などの、仮想会議室内の配置に関わる制御情報の管理と各サイトへの通信を行う。オブジェクトデータは各サイト間で相互に直接通信し、各サイトで制御情報を元に参加者の視点から仮想会議室内の共有データオブジェクトと残りのサイトの参加者を表示する。

集中処理法は、仮想会議室に関わる情報とオブジェクトデータを一元的に管理し制御が簡単であるが、可視化ノードにおいて、仮想会議室をサイトの数だけそれぞれの参加者の視点で、可

視化する必要がある。分散処理法では、それぞれのサイトで自サイト分の可視化処理のみを行うので、各サイトでの処理負荷は集中処理法と比較すると 1/サイト数 に軽減され、システム全体の経過時間が短縮されるが、ネットワーク負荷の増加、複雑な制御、各通信間の同期保証などの課題がある。

ここで、ネットワーク負荷(L)をネットワーク中を流れるデータ総量と考えて両方法を比較する。人物立体画像オブジェクトデータのサイズを a、共有データオブジェクトのサイズを b、表示画面データサイズを v、サイト数を n とする。制御データは他のデータと比較すると無視できるデータ量と考え、共有データは一つのサイトで生成されるとする。



(a) 集中処理法　　(b) 分散処理法

図 4.2 システム制御法とデータの流れ

図 4.2 に、システム制御法とデータの流れを示す。ここでは、左下のサイトノードで共有データが生成されると考える。

集中処理法では、全サイトからの人物立体画像オブジェクトデータと、一つのサイトからの共有データオブジェクトデータを可視化ノードに集め、これを各サイトの視点で可視化し、その表示画面データを各サイトに配信する。通信負荷 Lc は(1)式となる。

$$Lc = n \times (a + v) + b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1)$$

分散処理法では、各サイト間での人物立体画像オブジェクトデータの交換、共有データオブジ

ェクトデータの一つのサイトからの残りのサイトへの配信、及び制御データの全サイトとコラボレーション管理ノードとの通信が発生する。制御データは他のオブジェクトデータと比較すると十分小さいと考えられ、通信負荷 Ld は(2)式となる。

$$Ld = n \times (n - 1) \times a + (n - 1) \times b \quad \cdots\cdots\cdots\cdots (2)$$

ここで、共有データはそのリアルタイム性への要求はそれほど強く無いと考え、リアルタイムの表示が必要な人物立体画像オブジェクトデータと表示画面データのみを考慮すると、サイト数が 3 では Lc = 3 (a ＋ v)、Ld = 6 a となり、 a = v で両方法のネットワーク負荷が等しくなる。 また、サイト数が 4 では Lc = 4 (a ＋ v)、Ld = 12 a となり、 2 a = v で両方法のネットワーク負荷が等しくなる。想定する会議システムでは接続するサイト数はせいぜい数サイトであり、人物立体画像オブジェクトデータサイズ a が表示画面データサイズ b より十分に小さければ、ネットワーク負荷についても分散処理法が有利となる。ここで、1,024×768 の解像度を持つディスプレイで 4 バイトのデータがそれぞれのピクセルに必要とすると、v は 3.1MB であり、これと比較して、人物立体画像オブジェクトデータのサイズを十分に小さくする必要がある。

共有データとして、ボクセル数 256^3 でボクセルあたり 3 バイトの情報を持つオブジェクトを考えると、データサイズは 32MB となる。これを、リアルタイムで通信すると集中処理法が有利となるが、共有データオブジェクトは必ずしもリアルタイムの動画表示が必要とは限らず、またデータの変更が無い場合はあらかじめ各ノードに配信する方法も考えられる。

VC 手法では、PC システムでの処理実現に向け、可視化処理の高速化が可能なサイト間分散処理法を取る。この方法では各サイトで独立した可視化処理が可能なので、後述する様に、各サイトでの可視化処理において、オブジェクトデータ毎の分散可視化などの高速化手法が適用できる利点も持つ。

サイト間分散処理法により、基本的な通信は並行して行われるため、仮想会議室の映像再構成時には、各オブジェクト間の同期をとる必要が発生する。VizGrid プロジェクトでは、ネットワークの途中経路上で、複数のストリーミングデータの同期を取るシステム（同期通信システム）を開発しており、これを実装した[60]。

4.3.2 VC 手法の処理構成

VC 手法では、4.3.1 項で述べたサイト間分散処理の考え方で、各処理を各サイトノードに配置

する。図 4.3 に各処理の配置とデータの流れを示す。図中で実線は制御、点線はボクセルデータ、二重線は画像データ、3 重線は音声データの流れを示す。

制御情報の入力処理、操作の指示処理、及び仮想会議室を構築してシステム全体を制御する処理(VizGrid アプリケーション制御及び空間管理処理)をコラボレーション管理ノード(以下では制御ノードと呼ぶ)に配置する。

VizGrid プロジェクトで開発された人物立体画像生成システムと接続し、画像を取り込む多視点カメラ映像送信処理、音声データを送受信する音声データ送信/受信処理、可視化を行う画像生成処理と画像重畳・表示処理、及び共有データオブジェクトの回転・移動の制御を行う空間操作処理の各処理を、各サイトノードに配置する。

各サイトノード間でボクセルデータ及び音声データが通信され、制御データのみが管理ノードと各サイトノード間で通信される。通信には、ボクセルデータを通信するボクセルデータ通信ライブラリを共通に用いる。 ボクセルデータと音声データの通信にあたっては、VizGrid プロジェクトで開発した同期通信システムを用いる。

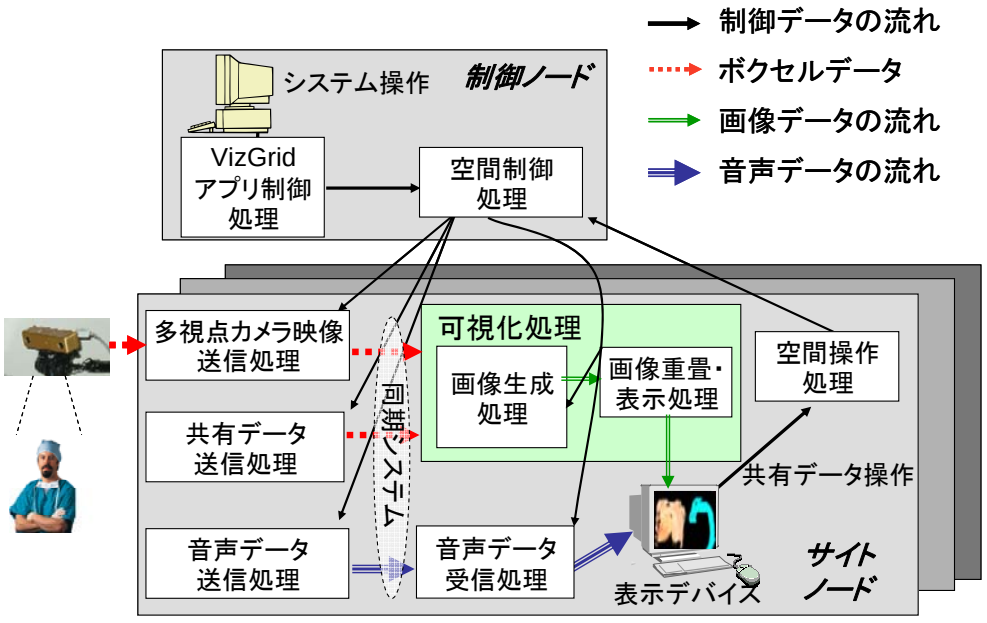


図 4.3 VC 手法における各処理の配置とデータの流れ

4.4 取り扱うボクセルデータの形式と種類

4.4.1 ボクセルデータの形式

VC 手法では、データ量削減の為、オブジェクトデータとして 2 種類のボクセルデータ形式を扱う方式を開発した。通信には VizGrid プロジェクトで開発された通信プロトコルを利用する。

ボクセルデータの第一の形式は、ボクセルを基本単位として、ボクセル空間(設定された数のボクセルで分割された直方体の空間)の中で、色や明るさ、速度ベクトルなどの情報を付与し、空間内の位置順に連続して並べ、3 次元データとして表現するもので、以下では、フルボクセルデータと呼ぶ。

第二の形式は、ボクセル空間中にデータを持つボクセル(有効ボクセル)が少ない場合や、ボクセルデータの内部情報が無い、又は不要な場合の形式である。このデータをフルボクセルデータとして扱うと、不要なボクセルが大部分を占めるため、有効ボクセルや物体表面ボクセルだけをデータ化する。以下ではこの形式をサーフェスボクセルデータと呼ぶ。有効ボクセルや物体表面のボクセルを、ボクセル空間内の座標位置と情報のペアのリストとして表現する形式に変換し、データ量削減を図る。サーフェスボクセルデータとしては2種類のデータ形式を用いた。これは、後述する画像生成処理において用いる2種類の描画手法に対応する。データ変換に要する時間を短縮する為に、描画手法毎のデータ形式とした。位置情報としては、ボクセル空間内で順番に振られたボクセル番号を利用する方法(1D 形式)と、ボクセル空間内の 3 次元座標(ボクセル数単位)を利用する方法(3D 形式)の 2 種類の形式を用いる。

表 4-1 に、フルボクセルデータのデータフォーマットを示す

表 4-1 フルボクセルデータのデータフォーマット

No.	データ本体	サイズ
第 1 ボクセル	カラーマップ番号	2 or 4 バイト
第 2 ボクセル	カラーマップ番号	2 or 4 バイト
：	：	：
：	：	：

フルボクセル形式データは、ボクセル空間の原点から順にボクセルデータの値を並べたもので、1 ボクセルあたりのデータサイズは 2 バイトと 4 バイトである。2 バイトのデータでは、色情報は別のカラーマップテーブル(色情報とインデックス番号のペアリスト)のインデックスとして表現される。4 バイトのデータは、データ自身に色情報を持つため、カラーマップテーブルは持たない。図 4.4 にボクセルの順番を示す。両データサイズの混在はできず、オブジェクト単位に一意に決定される。

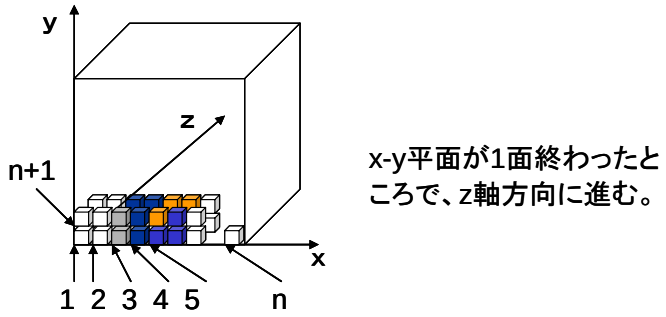


図 4.4 フルボクセルデータの順序付け

表 4-2 に、サーフェスボクセルデータ(1D 形式)のデータフォーマットを示す。後述する画像生成処理において、ボクセルレンダリング法の描画で用いるデータ形式である。存在するボクセルの個数だけ、座標と色データのペアが繰り返される。座標は（ x, y, z ）の三次元座標から求められる通し番号（先頭からのボクセル位置）で表現され、0 から開始される。色データは RGB とα（透過度）である。

表 4-2 サーフェスボクセルデータ(1D 形式)のデータフォーマット

No.	データ本体	サイズ
第 1 ボクセル	通し番号(idx)	4バイト
	色データ(R)	1バイト
	色データ(G)	1バイト
	色データ(B)	1バイト
	色データ(α)	1バイト
第 2 ボクセル	通し番号(idx)	4バイト
	色データ(R)	1バイト
	色データ(G)	1バイト
	色データ(B)	1バイト
	色データ(α)	1バイト
：	：	：

図 4.5 にサーフェスボクセルデータ(1D 形式)のボクセルデータの配置順を示す。

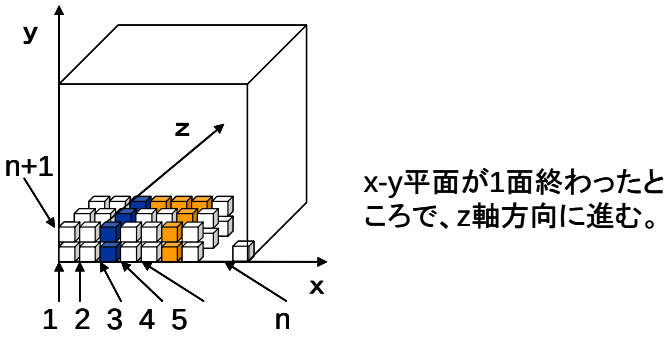


図 4.5 サーフェスボクセルデータ(1D 形式)の順序付け

表 4-3 にサーフェスボクセルデータ(3D 形式)のデータフォーマットを示す。後述する画像生成処理においてポリゴンレンダリング法の描画で用いるデータ形式である。存在するボクセルの個数だけ、X、Y、Z 座標と色データのペアが繰り返される。色データは、RGB とα(透過度)である。

表 4-3 サーフェスボクセルデータ(3D 形式)のデータフォーマット

No.	データ本体	サイズ
第 1 ボクセル	X 座標	2バイト
	Y 座標	2バイト
	Z 座標	2バイト
	色データ(R)	1バイト
	色データ(G)	1バイト
	色データ(B)	1バイト
	色データ(α)	1バイト
第 2 ボクセル	X 座標	2バイト
	Y 座標	2バイト
	Z 座標	2バイト
	色データ(R)	1バイト
	色データ(G)	1バイト
	色データ(B)	1バイト
	色データ(α)	1バイト
:		

4.4.2 ボクセルデータオブジェクトの種類

ＶＣ手法では、オブジェクトデータとして、人物立体画像オブジェクトデータと共有データオブジェクトデータを取り扱う。

研究開発分野で使われる、計算機シミュレーション結果や実験・測定データなどは 3 次元データ化され、さらにほとんどの場合、時間依存のデータとなっている。本実験システムではこれを考慮し、共有データオブジェクトとしては、ボクセルデータ化した 3 次元データの静止画とその動画(時間依存のデータのセット)を取り扱う。

⑴ 人物立体画像オブジェクトデータ

人物立体画像オブジェクトデータは、3.2 節で述べた入力機器により生成される 3 次元のボクセルデータである。動きを表現するための動画データであり、その解像度・表示速度(フレームレイト fps：Frame Per Second)は機器の性能に依存するが、アイコンタクト、ゲイズアウェネスなどの表現の表示が可能な解像度と、動作表現が認識可能な表示速度を持つ必要がある。

このデータはデータ量削減の為にサーフェスボクセル化され、1D または 3D 形式のサーフェスボクセルデータとして取り扱われる。

⑵ 計算機シミュレーション結果データ(共有データ)

計算機シミュレーションにより得られた 3 次元数値データを色情報として表現したデータを、静止画及び動画として取り扱う。

後述する実験システムでは、非構造格子を用いて行われた数値シミュレーション結果と医療画像データをボクセルデータ形式に変換した、動画と静止画データを取り扱う。フルボクセルデータとしては、各ボクセルが 4 バイトの情報を持つ。

⑶ 測定・計測データ(共有データ)

測定・計測データについても、シミュレーション結果データと同様に、3 次元の各ボクセルにおける数値情報を静止画及び動画で表示する。

後述する実験システムでは、医療分野の応用を想定して、以下の二種類の測定・計測データを取り扱う。

数値シミュレーション用の 3 次元形状データとして、CT 及び MRI の医療画像から抽出した、静止画の STL(Stereo Lithography)データ (3D Systems Inc. が提案した、三角形パッチをつなぎ合わせて立体形状を表現する形式。 詳細は付録.A 参照)。フルボクセルデータとしては各ボ

クセル 4 バイトの情報を持つ。

CT 及び MRI 計測結果から諧調値部分のみを抽出した、静止画の医療画像データ（ボクセルデータ形式）。フルボクセルデータとしては各ボクセル 2 バイトの情報を持ち、別にカラーマップテーブルを持つ。

4.5 多視点カメラ映像と共有データの取り込みと送信

多視点カメラ映像・共有データ送信処理では、各サイトにおいて人物立体画像と共有データをシステムに取り込み、各サイトに送信する。

人物立体画像は、VizGrid プロジェクトで開発した人物立体画像生成システムと接続し、これを取り込む。人物立体画像生成システムは以下の二つの手法を用いる。

- 複数のカメラ映像から視体積交差法によりフルボクセルデータを生成する手法[51] [52]
- 多眼カメラ映像からステレオマッチング法によりフルボクセルデータを生成する手法[53]

共有データは、その種類がSTLデータの場合はサーフェスボクセルデータへの変換を、CTデータの場合はシステムで扱う色情報値データへの変換（色情報を表現する数値の範囲が異なるので、これを統一）を行う。図 4.6 に本処理の処理フローを示す。

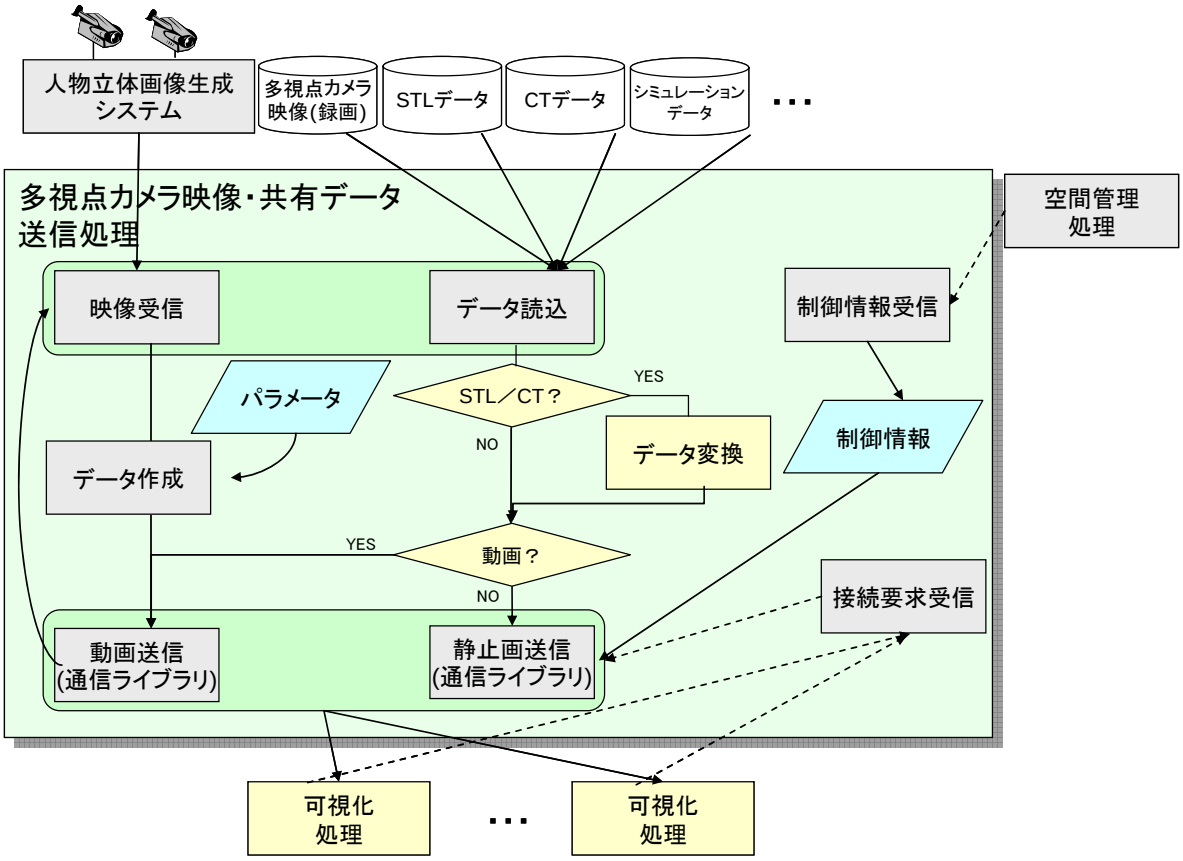


図 4.6 多視点カメラ映像・共有データ送信処理フロー

4.6 ボクセルデータの通信

VizGrid プロジェクトでは、VC 基盤の中で、フルボクセルデータと必要に応じてこれをサーフェスボクセルデータに変換して送受信を行なうプロトコルを開発した。サーフィスボクセルデータとフルボクセルデータを共通して送受信可能なプロトコルとなっており、各ボクセルデータの仕様に合わせる事で、各種の I/O デバイスの容易な接続が可能である(ライブラリの機能詳細は付録 B を参照)。

動画の送信では、人物立体画像生成システムからのボクセル化された人物立体画像と、ボクセル形式の共有データ(ファイル入力による数値シミュレーション結果など)に、同一の送受信用のライブラリを利用する。

仮想会議室を構成するオブジェクトのボクセルデータと音声は、それぞれが別の経路で通信されるため、再生時に同期を実現する必要がある。通常テレビ会議装置などでは、端末で映像と音声の同期を実現することが多い。しかし、3 次元データを扱うと、データ処理だけでも処理負荷が高く、その上同期を実現することは処理が複雑になる。そのため、VizGrid プロジェクトでは複数のデータ通信が通過するネットワーク経路上に同期ノードを設置する方法を開発した[60]。

4.7 仮想会議室の構築

VC 手法では、ボクセル化された各オブジェクトをボクセル空間(各オブジェクトに対応したボクセルで分割された立方体)の中に配置し、各オブジェクトの位置はボクセル空間内の 3 次元座標で表現する。ボクセル空間を仮想会議室に配置し、その位置を仮想会議室内の 3 次元座標で表現する。配置するボクセル空間の数は原理的には任意である。

図 4.7 に各オブジェクトをボクセル空間に配置し、このボクセル空間を仮想会議室空間に配置する状況を模式的に示す。

これらの、人物立体画像や共有データなどのオブジェクト位置情報、各サイトの視点情報、操作やポインティング情報などは制御ノードで一元的に管理される。

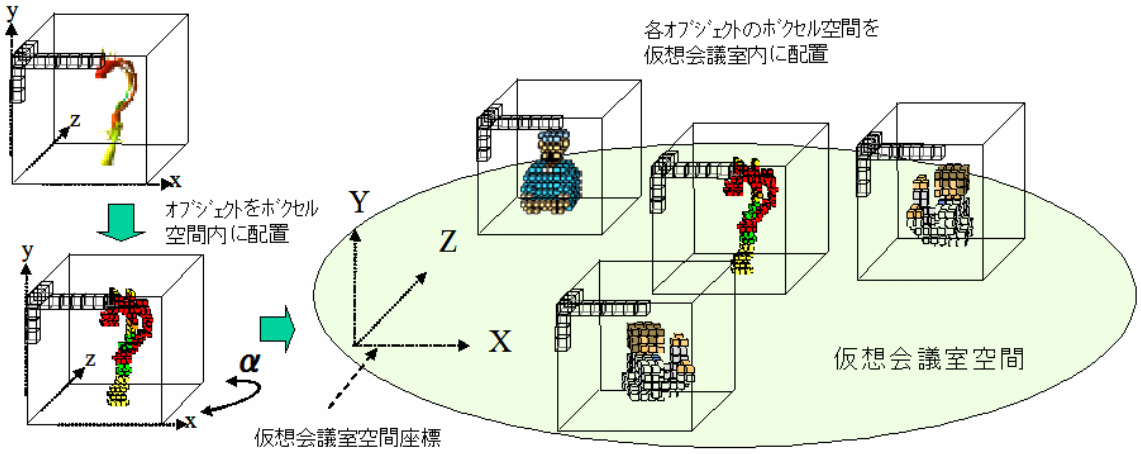
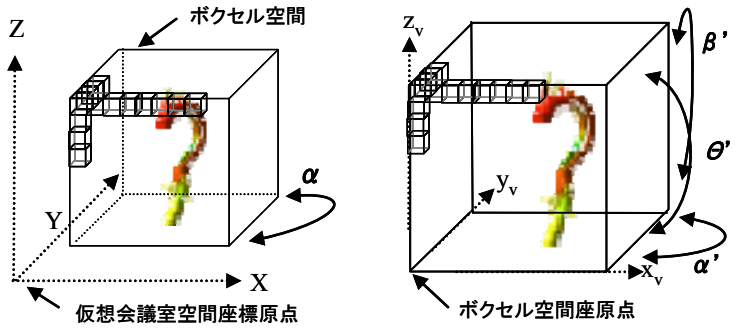


図 4.7 オブジェクトの仮想会議室への配置



(a) ボクセル空間の仮想会議室への配置パラメータ　(b) ボクセル空間中のオブジェクトの配置パラメータ

図 4.8 ボクセル空間及びオブジェクトの位置パラメータ

ボクセル空間は、仮想会議室内に水平に z 軸周りの回転を許す形で任意の位置に配置する

(原点の 3 次元座標と z 軸周りの回転量で配置状況を表現) (図 4.8 (a))。各オブジェクトはボクセル空間内に配置され、3 次元座標と 3 軸回転角で初期位置を表現する(図 4.8 (b))。

本研究では、2.5.2 項述べた様に、「3 次元の対象物を囲むように参加者が配置される仮想会議室のレイアウト」を想定する。

図 4.9 に、3 カ所の人物像ボクセル空間と二つの共有データオブジェクトボクセル空間を配置した、3 地点間会議の例を示す。この例では、各サイトの人物立体画像ボクセルデータを正三角形の頂点にそれぞれ中心に向けて配置し、その中に二つの共有データオブジェクトを配置している。

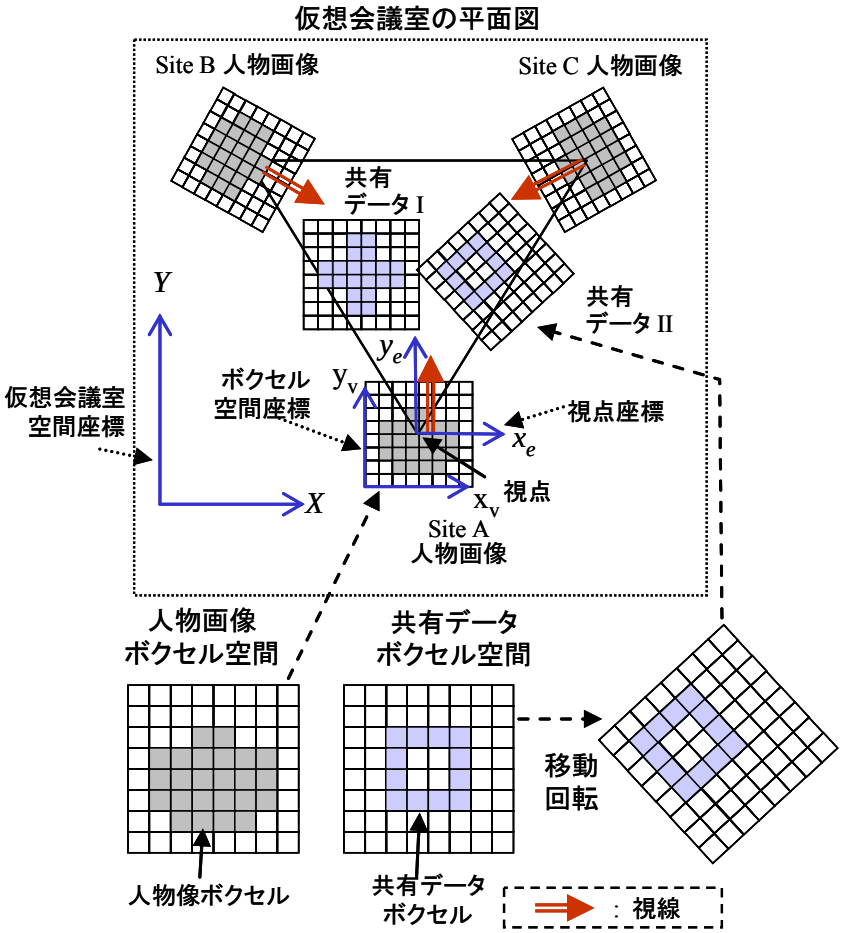


図 4.9 仮想会議室内へのボクセル空間配置例

4.8 仮想会議室の可視化

4.8.1 オブジェクト分散可視化法

VC 手法では、オブジェクト分散可視化法を用いた。これは①処理経過時間短縮、②可視化要件の異なる複数のオブジェクトに対応する処理の実現(データ形式、描画手法など)、③他オブジェクトの処理に影響されない処理の実現などを狙ったものである。

一般に、仮想会議室の可視化においてはオブジェクトごとにその可視化要件が異なる。例えば、人物立体像、共有データ、背景や家具などをひとつの画面に表示する必要があるが、現実感を出す為には、参加者は立体画像として表示され、かつ、表情が理解できる解像度の範囲でできるだけ表示速度が速いことが望ましい。また、参加者と同時に表示する共有データでは、データ形式、静止画・動画、データ解像度などが、それぞれのデータにより異なる。例えば、3 次元の CT や MRI データの様な、静止画であるが高い解像度と内部データの表示などの多様なデータ参照が必要なデータもあれば、計算結果のアニメーションデータの様に 3 次元動画データ表示などが必要とされるデータもある。さらに、遠隔地からデータを転送すると、データの取得に必要な時間もそれぞれのオブジェクトのデータサイズにより異なってくる。また、背景や家具は、静止画として固定で表示すれば良い。注視点、視点などの可視化条件についても利用形態によってはそれぞれのオブジェクトで異なる事も考えられる。また、それぞれのデータの形式には、ボクセル形式、ポリゴン形式、描画ソフトに依存した独自の形式などが考えられる。それぞれのオブジェクトの描画についてもその最適な手法は、オブジェクトの特性やデータ形式などにより異なってくる事も考えられる。

分散可視化法では、仮想会議室空間の可視化において、各オブジェクトを分散処理により個別に可視化し、これを重畳して対象空間全体の表示を行う方式をとる。この方式により、オブジェクト毎に異なる可視化要件に対応し、かつ、表示に必要な負荷を低減する事ができ、PCレベルの計算機資源での可視化を可能とする。

図 4.10 にシステムの全体構成を示す。

システムは大きく画像生成処理と画像重畳・表示処理に分かれる。画像生成処理では、ネットワークを通じて転送された各オブジェクトのデータ、可視化パラメータ(想定空間中の位置、視点、注視点、画面までの距離、画面サイズなど)を基に、オブジェクト毎に描画処理を行い、対象とするオブジェクトだけが描画された表示画面データを得る。得られた表示画面データを、重畳・表示処理のそれぞれのオブジェクトに対応するバッファに転送する。重畳・表示処理では、それぞ

れのバッファの表示画面データをオブジェクトの位置を考慮して重ね合わせて、対象とする空間全体の表示画面を得る。後述する実験システムでは、簡易立体視法による立体視を行っているので、視差を考慮した 2 枚の画像を生成する。

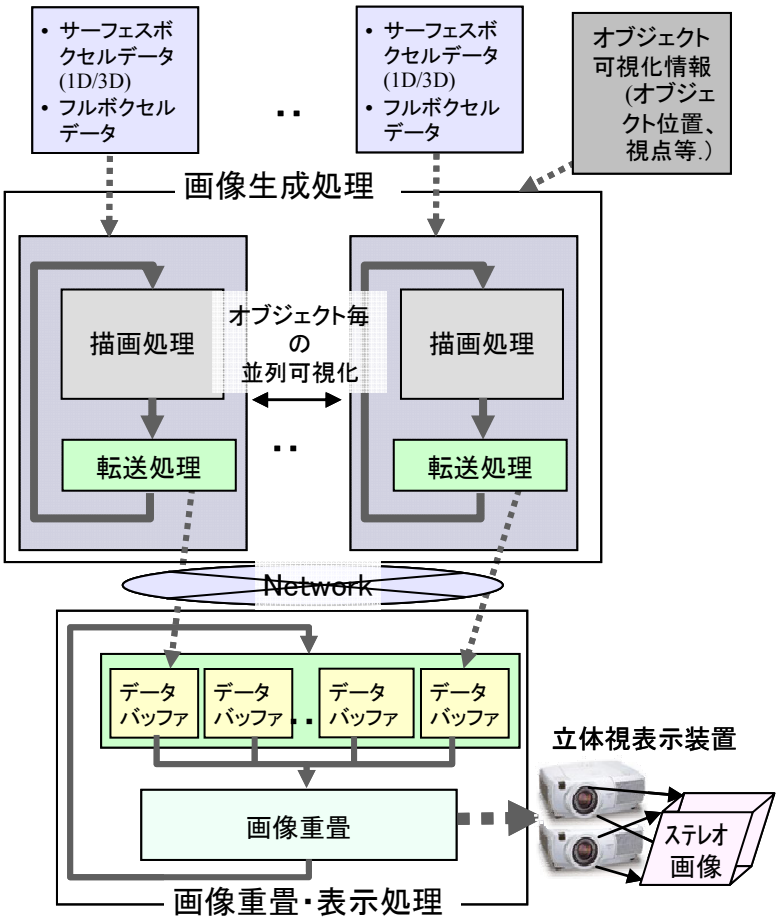


図 4.10 可視化処理手順

各オブジェクトの画像生成処理と画像重畳・表示処理は別の計算機上に実装する。画像生成処理は、オブジェクト毎に独立にクラスタシステム上で分散処理する。

各オブジェクトの描画と表示画面データの転送は、オブジェクト毎に独立に行い、結果は画像重畳・表示処理のバッファに格納される。重畳処理では、オブジェクトの描画とは非同期に自動的に最新のバッファをオブジェクトの位置を考慮した順番で重ね合わせ、表示デバイスに出力する処理を行う。

この方式をとることで、データ量や描画アルゴリズムの違いなどでオブジェクトの描画処理時間が異なっても、最新の表示画面データの表示が可能である。例えば、人物立体画像オブジェクトの動画データは、ネットワークから最新のデータが転送される毎に描画と転送が行われて、重畳・

表示処理のバッファにデータが格納される。静止画で高精細の共有データでは、ネットワークから転送・描画処理に時間が必要となるが、一度、表示画面データを生成し画像重畳・表示処理のバッファに格納すれば、操作などによる変更がない限り、再度の描画と転送は不要である。この為、システムとしては描画処理とネットワーク転送の負荷が軽減でき、できるだけ表示速度を上げたい人物立体画像オブジェクトの動画データの表示などが、静止画の処理に影響される事が無くなる。また、いくつかの動画データを同時に処理する場合でも、並列実行により、描画の部分はそれぞれのオブジェクトを個別に描画するのと同じ経過時間で処理が可能である。

重畳・表示処理への転送については、転送時の競合による性能低下の可能性についての考慮が必要である。

以下では 可視化処理＝画像生成処理(データ変換を含む描画処理＋画像重畳・表示処理への転送処理)＋画像重畳・表示処理 と定義し、その詳細を記述する。

4.8.2 オブジェクト可視化時の座標変換

VC 手法では、可視化時の視点位置は任意にとることができる。各ボクセル空間内のボクセルデータ座標(x_v, y_v, z_v)に対して、(3)式の様に、ボクセル空間内座標変換、ボクセル空間から仮想会議室空間への変換、仮想会議室空間から視点座標への変換、及びスケーリングを行い視点座標(x_e, y_e, z_e)を得る。 各オブジェクトに対する操作は、主にこのマトリックスを変更する操作である。最後に、視点座標に対して画面への距離などのパラメータを用いて透視投影法による座標変換を行い、表示画面座標を得る。各座標の関係は図 4.9 に示す。

$$[x_e \quad y_e \quad z_e \quad 1] = [x_v \quad y_v \quad z_v \quad 1]\, S \cdot V_L \cdot V_V \cdot V_E \quad \cdots\cdots\cdots\cdots \quad (3)$$

S : 対象物サイズ調整のための拡大・縮小を行うスケーリングマトリックス。

V_L : ボクセル空間内での共有データオブジェクト移動時にボクセル再構成でなく等価的な平行移動 T'、回転 $R_{\alpha'}$ 、$R_{\beta'}$ 、$R_{\Theta'}$ の座標変換を行うマトリックス。

V_V : ボクセル空間から仮想会議室空間座標への変換マトリックス(平行移動 T''、初期設定角度 R_α)。

V_E : 仮想会議室空間座標から視点座標への変換マトリックス(平行移動 T)。

ユーザが共有データオブジェクトをマウスなどのデバイスで操作し、位置・角度を変化させると、計算負荷の高いボクセル空間内でのオブジェクト位置の変更に伴うボクセルデータ再構成処理

が必要となる。ここではこの処理を行わず、デバイスの操作量を(1)式の S 及び V_Lの各パラメータ値に換算し、この変化に等価的な視点座標移動変換 V_Lにより高速化を図る。

4.8.3 画像生成処理

画像生成処理では、制御ノードから通知される仮想会議室内のオブジェクト位置、サイズ、視線情報などの可視化パラメータを用いてオブジェクトを画像化する。

図 4.11 に、ひとつのオブジェクトに対応する画像生成処理の処理フローを示す。

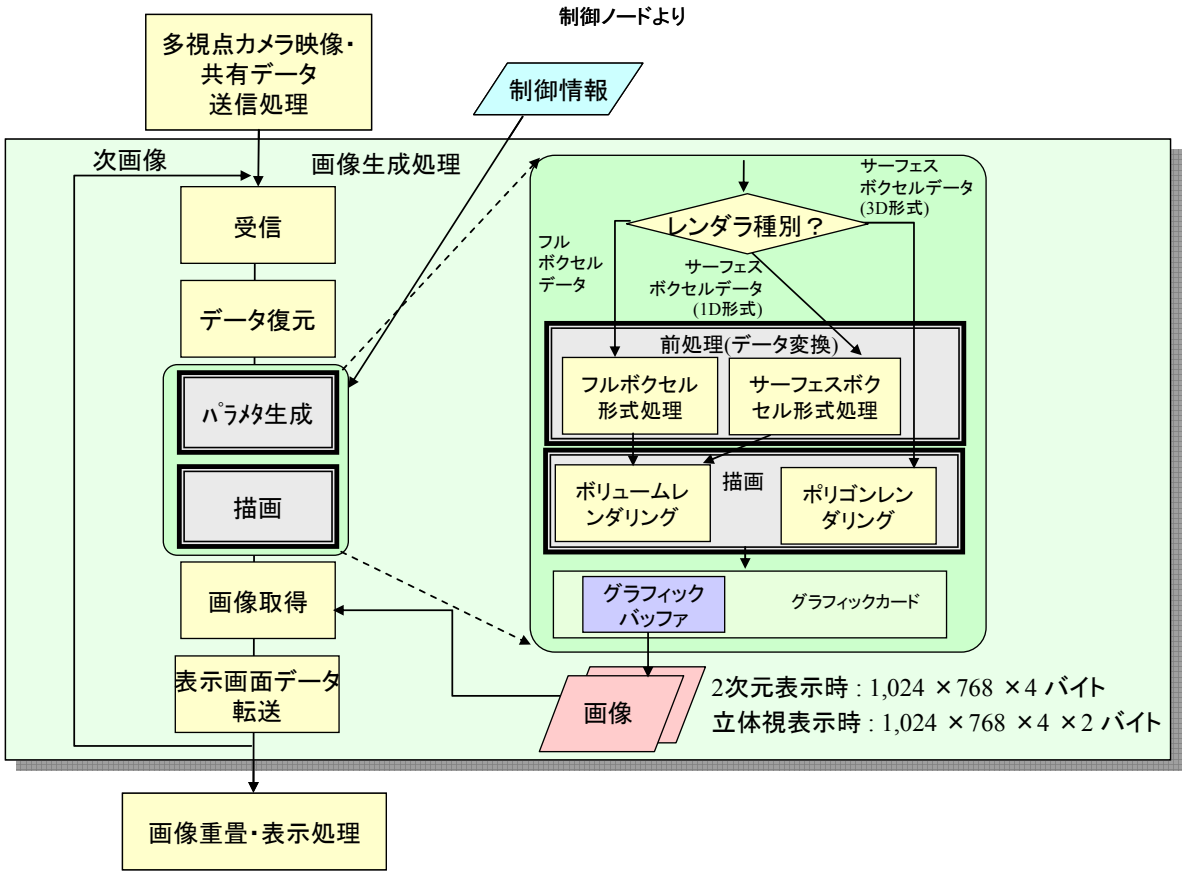


図 4.11 画像生成処理フロー

ネットワークから転送された立体オブジェクトデータに対して、データ種類により描画処理を切り換えて、可視化パラメータを基に各オブジェクトの表示画面イメージ(ビットマップデータ)を生成する。グラフィックカードにより生成された表示画面データをグラフィックカード上のグラフィック・バッファより取り出し、これを重畳・表示処理に転送を行う。動画の処理では、次の立体オブジェクトデータが転送された時点でこの処理を繰り返すループ処理となる。

描画速度の評価を行う為に、3 種類のデータと 2 種類の画像生成手法を利用可能とした。後述する実験システムではこれらの描画手法の性能評価を行う。

フルボクセル形式のデータに対しては、VizGrid プロジェクトで開発された球面サンプリング法[59]によるボリュームレンダリング処理を行う。1D 形式のサーフェスボクセルデータはフルボクセル形式に変換して、フルボクセル形式と同様のボリュームレンダリング処理を行う。図 4.12 に球面サンプリング法の原理を示す。視点から見て等間隔の球面とその表面上にポリゴンを設定し、これを描画するボクセル空間に重ね合わせ、それぞれのポリゴンに相当する点の色を求めて、視点から離れた点から順に重ね合わせて描画を行う。処理としては、最初に、サンプリングを行う球面のポリゴンデータをグラフィックカードに入力し、その後、転送されてくるボクセル空間全体の色情報をグラフィックカードに入力する。グラフィックカードでは、ポリゴンデータを元にボクセル空間全体の描画を行う。ボクセル空間のサイズが一定の場合、描画処理時間は内部の有効ボクセル数には関わらず一定となる。

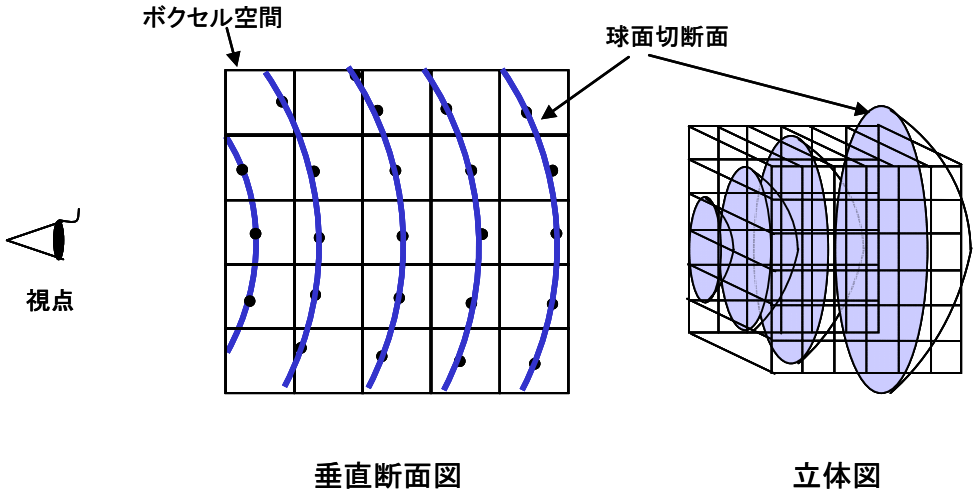


図 4.12 球面サンプリング法の原理

3D 形式サーフェスボクセルデータの描画にはポリゴンレンダリング法を用いる。

ポリゴンレンダリング法では、サーフェスボクセルデータを構成する各ボクセル面を 2 枚の三角形ポリゴンに置き換える形でポリゴン化し、ポリゴンレンダリングを行う。各ポリゴンの頂点の色情報をグラフィックカードに入力し、描画を行う(図 4.13 参照)。 描画時間はポリゴン数に比例するので、有効ボクセル数が増加するとともに描画時間が増加する。

自サイトのディスプレイが立体視対応(簡易立体視)の場合は、視差パラメータにより右目用と左目用の二枚の表示画面データを生成して送信する。

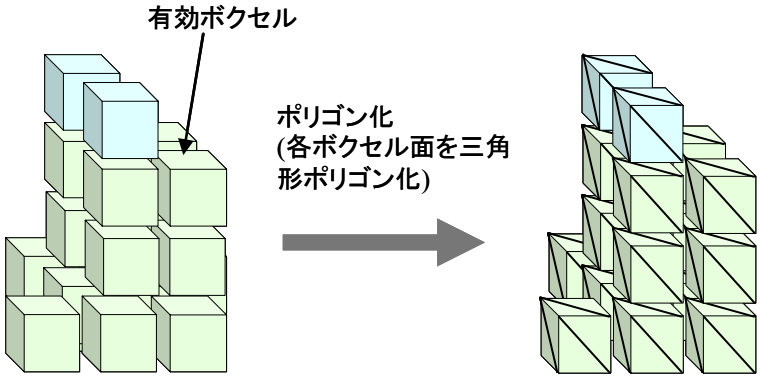


図 4.13 サーフェスボクセルデータ(3D 形式)のポリゴン化

4.8.4画像重畳・表示処理

画像重畳・表示処理では、画像生成処理から受信した画像データを重畳して表示イメージを生成し、ディスプレイに対する出力を行う。自サイトが立体視対応ディスプレイの場合は視差を考慮して生成された右目用と左目用の二枚の画像を重畳して出力する。

図 4.14 に本処理の処理フローを示す。

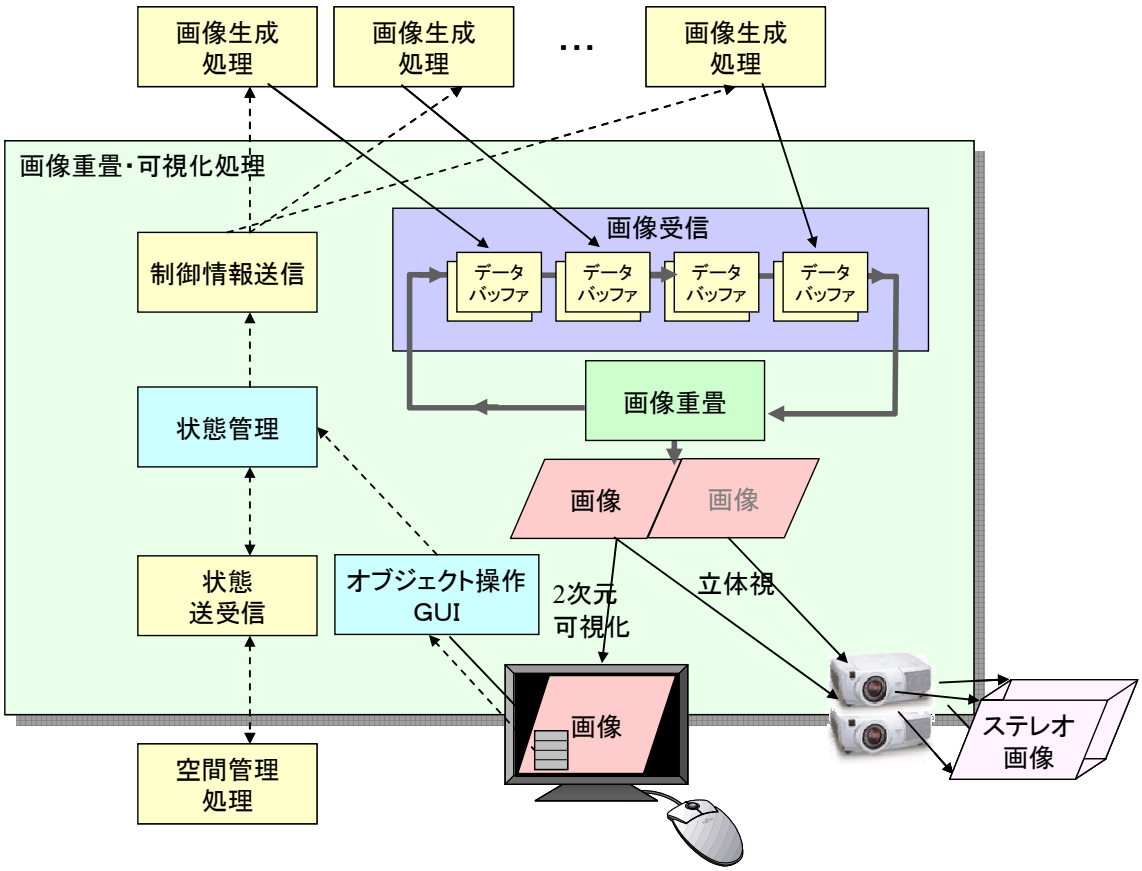


図 4.14 画像重畳・表示処理フロー

画像生成処理から転送されてきた、各オブジェクトに対応する表示画面データは、それぞれのオブジェクトに対応したデータバッファに格納される。データバッファは、オブジェクト毎に 2 個あり、交互に格納を行う。このバッファに格納されたデータに対し、最新のデータを選択して重畳処理を繰り返し、その後、表示画面データをグラフィックカードに転送しこれを表示する。この方式により、他のオブジェクトの画像生成処理とは独立に、常にそれぞれのオブジェクトの最新の表示画面データが重畳される事になる。データバッファに書き込まれた各ピクセルのデータは、RGBの色データと透過度(α)のデータからなる。

重畳は、専用のハードウェアを用いずにソフトウェアで行う。

表示画面データの重畳では、それぞれのオブジェクトの位置を考慮した対応が必要となる。各オブジェクトの表示画面ピクセルに、視点からの距離情報を付加した表示画面データとする事で、グラフィックカード上で位置を考慮した重ね合わせが可能である。実験システムでは、処理の簡略化の為この処理は行わず、ボクセル空間の中心が後ろのデータ $|R_o, G_o. B_o, \alpha_o|$ に対して前のデータ $|R_a, G_a, B_a, \alpha_a|$ を重畳する場合、各ピクセルに対して透過度を考慮した $(1-\alpha_a) \times |R_o, G_o. B_o| + \alpha_a \times |R_a, G_a, B_a|$ の演算を行う。この方法では、視点から見てボクセルが重なり会うと、ボクセル空間の中心が後ろのオブジェクトのボクセルが、前のオブジェクトのボクセルの後ろに隠れて又は透過して見える。

4.9 音声データ送信及び受信処理

各サイトのマイクで収集された音声データを、ボクセルデータと同じシーケンスにより各サイト間で送受信を行い音声出力する。本実験システムでは人物立体画像オブジェクトの配置情報を元に音場を生成する機能は持たず、通常のスピーカーに各サイトからの音声を合成して出力する。

4.10 共有データオブジェクトの操作

共有データオブジェクトの操作は、会議における情報共有の重要な手段の一つであり、会議参加者が自由に操作を行う事ができる必要がある。操作対象となる共有データオブジェクトの、選択と回転・移動・拡大・縮小、ボクセルデータ可視化時のカラーマップ変更、共有データオブジェクトの一時的非表示、リロード(動画の最初からの再生) などの機能が必要となる。図 4.15 に、実験システムで作成した操作パレットの例を示す。ここでは操作パレット上のボタンで操作対象オブジェクトと操作種類を選択し、画面上でマウスをドラッグさせることによりオブジェクト移動・回転・拡大などの操作を行う。空間操作処理でこれらの処理が行われ、オブジェクトへの操作の結果は、空間管理処理に対して送信される。

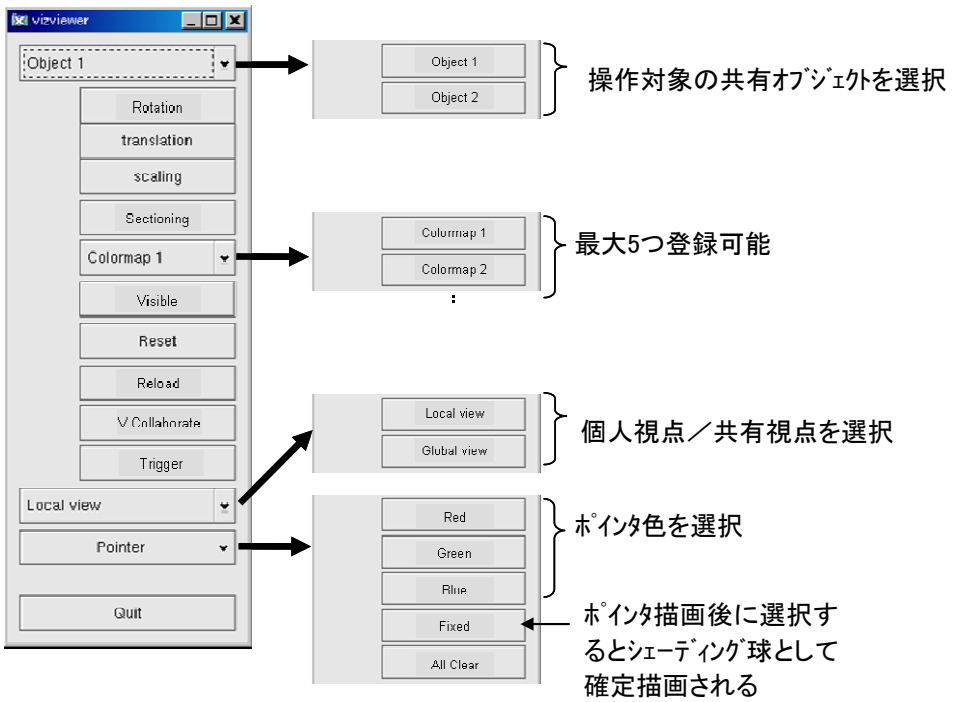


図 4.15 共有データオブジェクト操作パレット例

4.11 VC 手法の動作

4.11.1 想定する利用形態

VC 手法が想定する、仮想会議システムの利用形態を図 4.16 に示す。

ユーザがサイト情報などの登録を行った後、会議を開始する。各会議の中では、人物像の表示、共有データオブジェクトの表示が行われる。

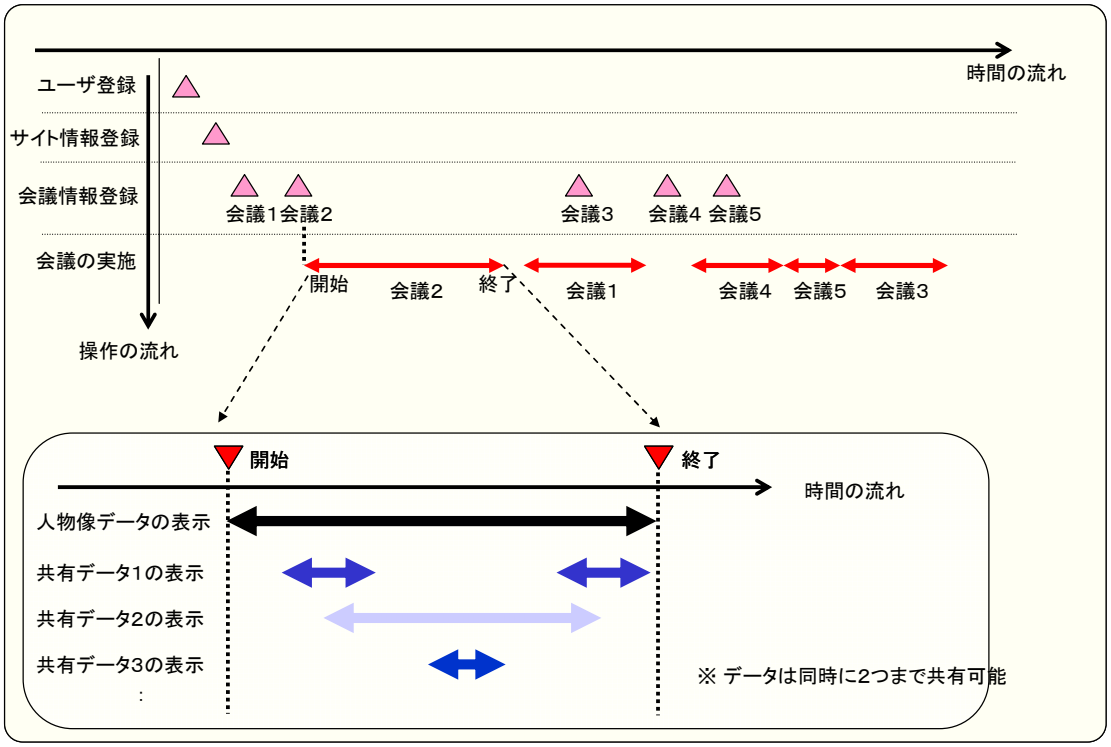


図 4.16 VC 手法が想定する利用形態

4.11.2 処理の流れ

以下に、図 4.16 に示すユーザの操作に対応する、VC 手法による会議制御の流れを示す(図 4.17 参照)。

①ユーザが、接続するサイト名などの仮想会議全体に関する指示を、VizGrid アプリケーション制御処理の UI から入力する。

②空間管理処理は、アプリケーション制御処理よりこの情報を受け取り、各サイトに配置された多視点カメラ映像送信、共有データ及び音声データ送信の各処理に対して各サイト間の人物立体画像オブジェクトデータ、共有データオブジェクトデータ及び音声データ送信の開始を指示する。

③多視点カメラ映像システムからのデータ送信が開始される。

④多視点カメラ映像及び共有データ送信処理は、用意された人物立体画像及び共有データを各サイトの画像生成処理に送信する。音声データ送信処理は、用意された音声データを各サイト音声データ受信処理に送信する。

⑤空間管理処理は、定義ファイル情報及び送受信されるデータ属性・データ数に基づき仮想会議室内にオブジェクトを配置し、配置情報と視線情報などの可視化パラメータを、各サイトの画像生成及び画像重畳・表示処理に送信する。

⑥各サイトの画像生成処理では、表示画面データを作成し画像重畳・表示処理に転送する。

⑦画像重畳・表示処理では、これらの情報を元に各サイトの視点から仮想会議室の可視化を行い、表示デバイスに出力する。音声データ受信処理は音声データを出力する。

⑧各サイトの空間操作処理 UI より、利用者が共有データオブジェクトを操作する。

⑨,⑩利用者の操作による共有データオブジェクトの回転・移動などの情報は、各サイトの空間操作処理より空間管理処理に送信される。ここで新しい仮想会議室内の状態が決められ、再度これらの情報が各サイトの画像生成及び画像重畳・表示処理に送信され、各サイトで更新された画像を表示する。

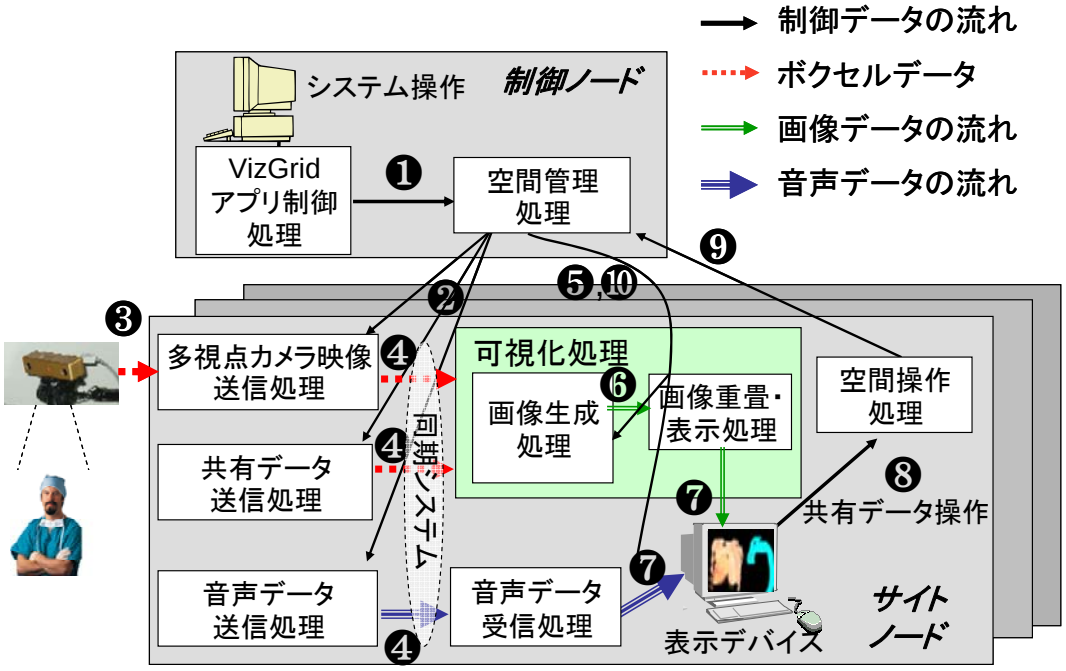


図 4.17 VC 手法による会議制御処理の流れ

4.12 まとめ

本章では、ボクセル処理方式と仮想会議室方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現するVC手法について実現方法を述べた。

VC手法の実装方法である、サイト間分散処理法、ボクセルデータの形式と種類、ボクセルデータのデータ量を削減する通信方式、オブジェクト分散可視化法、及びシステム動作制御と、これらにより、人物立体画像・共有データの送受信、仮想会議室内へのオブジェクトの配置、その可視化、共有データオブジェクトの操作、及びシステム全体の制御を実現する事を述べた。

次章では、医療分野の応用を想定して開発した、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムによる実験と、これによる、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性の実証について述べる。

第5章 実験システムによる VC 手法の実験

5.1 はじめに

本研究で検討した VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性を実証する目的で、VC 手法を用いた現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発した。

開発にあたっては、医療分野での利用を想定した。これは、医療分野は遠隔コラボレーションの一つの大きな応用分野として考えられており、かつ、実験・測定データの入手、計算機によるシミュレーション、及び結果検討からなる一連のコラボレーションプロセスが典型的に現れる例と考えた為である。

実験システムでは、通信(ボクセルデータ変換・圧縮、ボクセルデータ・音声データの通信)、仮想会議室内へのオブジェクトの配置(人物立体画像と共有データ)、可視化、共有データオブジェクトの操作及びシステム制御の各機能を実装した。 参加者の視点位置を検知して視点を制御する機能と人物像の位置に対応して音場を生成する機能は実装していない。

実験は、遅延のほとんど無い実験室内のネットワークで行い、遠隔地間通信で発生するネットワーク遅延は考慮していない。

本章では、実験システムの動作環境、実験内容、及びその結果について記述する。

5.2 実験環境

5.2.1 実験システムの設計仕様

表 5-1 に、実験システムの設計仕様である、登録可能接続サイト数、同時接続可能なサイト数、及び仮想会議室内に表示可能な人物立体画像数と共有データオブジェクト数を示す。VC手法の動作実証の為に、同時に3サイトを接続でき、各サイトの人物立体画像オブジェクトと二つの共有データオブジェクトの表示を可能とした。

表 5-1 実験システムの設計仕様

項目	数
登録可能接続サイト数	20
同時接続可能なサイト数	3
仮想会議室内に表示可能な人物立体画像オブジェクト数	3
登録可能な共有データオブジェクト数	5
仮想会議室内に表示可能な共有データオブジェクト数	2

5.2.2 実験に用いたデータ

各オブジェクトデータのボクセル空間サイズと表示速度(フレームレイト: fps: frame per sec.)は、利用するネットワーク及び機器の性能に制限される。仮想会議室の現実感の評価においては、人物の表情の表示が重要な要素と考え、実験システムでは、人物の表情が確認できると考えられる解像度の人物立体画像オブジェクト空間サイズ(ボクセル空間サイズ 128^3 と 256^3 のデータ)で実験を行った。

顔の実長を25cm程度とすると、人物立体画像オブジェクト空間サイズ 128^3 ではボクセルあたり約 2 mm を、オブジェクト空間サイズ 256^3 ではボクセルあたり約 1 mm を表現する事になる。このオブジェクトを、サイズ 102 cm×77 cm、表示解像度 1,024 ピクセル×768 ピクセルのディスプレイを用いて 1 ピクセルで 1 ボクセルを表示すると、実長 25cm の人物顔像を、ボクセル空間サイズ 128^3 では、ほぼ実物長の 1/2 のサイズの 12.8 cm の画面長で、ボクセル空間サイズ 256^3 では、ほぼ実物長の 25.6 cm の画面長で表現でき、眼の方向などの顔情報の表示が可能と考えられる。

共有データとしては医療分野での利用を想定し、①数値シミュレーション用 3 次元形状データ

として CT 及び MRI の医療画像から抽出した静止画の STL データ。 ②CT 及び MRI 計測結果から諧調値部分のみを抽出した静止画の医療画像データ、③非構造格子を用いて行われた数値シミュレーション結果及び医療画像データをボクセルデータ形式に変換した動画および静止画のデータ、を用いた。

共有データの医療画像データは、人物立体画像と同様に表示画面解像度を考慮し,ボクセル空間サイズ 256^3、動画の数値シミュレーション結果はボクセル空間サイズ 128^3 と 256^3 とした。

表 5-2 に、実験で利用した人物立体画像と共有データの、種類、属性、及びボクセル空間サイズ(ボクセル数)を示す。

表 5-2 実験に用いたデータ

データ種別		型	ボクセル空間サイズ
人物立体画像		動画	128^3, 256^3
共有データ	STL データ	静止画	256^3
	医療画像データ(CT データ)	静止画	256^3
	数値シミュレーション結果データ(CG データ)	静止画、動画	128^3, 256^3
	サンプルデータ(立体文字)	静止画	128^3, 256^3

図 5.1 に、実験に利用した共有データの例を示す。(a)は、カラーマップを変更して内部構造を抽出したボクセル数 256^3 の 3 次元の CT 画像データ、(b)は、ボクセル数 256^3 の大動脈瘤のシミュレーション結果(壁剪断応力)の可視化データである。

(a) CT 画像データ　　(b) シミュレーション結果データ

図 5.1 実験に利用した共有データの例

5.3 VC 手法の実装

5.3.1 各処理の計算機システムへの配置

4.3.2 項で述べた、VC 手法の各処理の計算機システムへの配置方法を図 5.2 に示す。

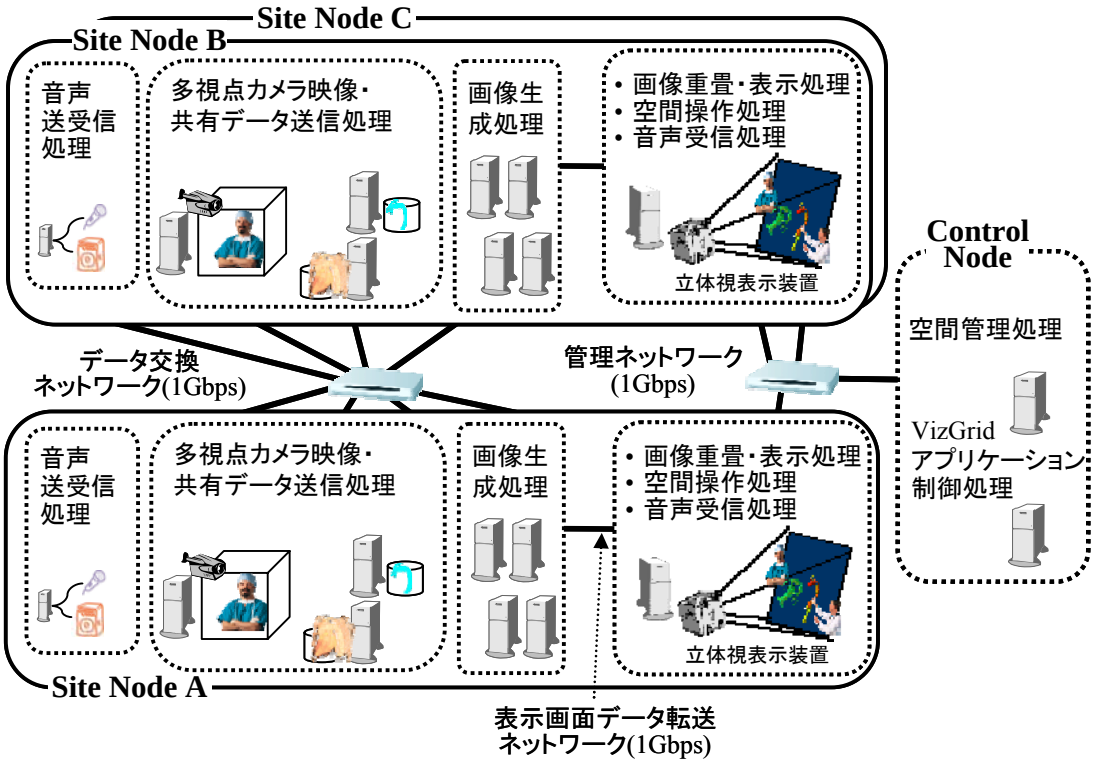


図 5.2 処理の計算機システムへの配置

空間管理及び VizGrid アプリケーション制御処理を制御ノード内の PC に配置し、他の処理を各サイトノード PC に配置した。画像重畳・表示、空間操作及び音声データ受信の各処理を、画像表示ディスプレイに接続した PC に実装した。2 つ人物立体画像と、2 つの共有データを同時に表示する為、画像生成処理は 4 台の PC から構成されるクラスタシステムに配置した。他の処理はそれぞれ独立の PC に配置した。

5.3.2 実験システムへの実装

本実験では、前項で記述した処理の配置構成の中から、実験に必要な一部を切り出して実験システムへ実装した。

(1) サイト A と C ： 全ての機能を実装。ディスプレイは通常の 2 次元ディスプレイ。サイト A、C からの多視点カメラ映像と二つの共有データオブジェクトを表示。

⑵ サイト B：多視点カメラは設置されていない。ディスプレイは立体視が可能な簡易立体視ディスプレイ。サイト A、C からの多視点カメラ映像と二つの共有データオブジェクトを表示。

この構成により、二カ所のサイト(A、C)からの人物立体画像と二種類の共有データオブジェクトを仮想会議室上に配置し、サイト B で簡易立体視ディスプレイにより仮想会議室の状況を表示し、システムの基礎性能の測定実験と、その現実感についての測定実験が可能である。またサイト A とサイト B の間で、対面の相互コミュニケーションに関する実験が可能である。

5.3.3 ネットワーク構成

通信性能を確保する為、図 5.2 に示す様に、サイト間でオブジェクトデータと音声データを通信するネットワーク(データ交換ネットワーク)、画像生成と画像重畳・表示処理間のネットワーク(表示画面データ転送ネットワーク)、及び空間操作と空間管理処理間のネットワーク(管理ネットワーク)をそれぞれ別構成とした。画像生成及び画像重畳・表示処理を配置した PC には、それぞれのネットワークに対応して、各 2 枚のネットワーク・インターフェイス・カード(NIC)を実装した。各ネットワークの性能は 1Gbit/s.である。

5.3.4 計算機環境

表 5-3 に、実験システムで各処理を配置した計算機の仕様を示す。

表 5-3 実験システムの計算機構成

動作する処理	台数	計算機仕様(cpu、メモリ)	ネットワーク
空間管理処理	1	Pentium4 2.8GHz. 1GB	1Gbps ×1
音声データ送信処理	1×n*1	Pentium4 2.8GHz, 1GB	1Gbps ×1
多視点カメラ映像送信処理	1×n*1	Pentium4 3.8GHz, 1GB	1Gbps ×2
共有データ送信処理	1×n*1	Pentium4 2.4GHz, 1GB	1Gbps ×1
画像生成処理	4×n*1,2	Pentium4 2.4GHz, 1GB	1Gbps ×2
重畳・表示処理、空間操作処理、音声データ受信処理	1×n*1	Pentium4 2.4GHz, 1GB	1Gbps ×2

*1：サイト数

*2：クラスタ構成を取る

各 PC には 1GB のメモリを搭載し、CPU は機材の準備の都合で多視点カメラ映像送信処理が Pentium4 3.8GHz、他は Pentium4 2.4GHz の PC を利用した。

画像生成処理と画像重畳・表示処理を行う PC には、NVIDIA 社製 GeForce 6600 GPU (Graphic Processing Unit) と 128MB のグラフィックメモリを持つグラフィックカードを搭載した。

5.3.5 人物立体画像生成システム

実験システムでは、PointGray 社の多眼式カメラ[53]からステレオマッチング法でボクセルデータを生成するシステムを利用した。図 5.3 に、多眼式カメラの設置状況を示す。この人物立体画像生成システムは、20 fps 以上の性能を持つが、映像処理側の処理能力により自動的にフレームレイトが制限される。

図 5.3 多眼式カメラの設置状況

5.3.6 表示デバイス

サイトBにおける表示には、1,024×768 の解像度を持つ簡易立体視ディスプレイを利用した(図 3.8 参照)。視差を考慮した二つの画像を、二つの液晶プロジェクタで偏光させて画面に表示し、偏光メガネを通して見る事で立体視を実現する方式である。

二枚の画面を転送する為、画像生成処理と画像重畳・表示処理間でオブジェクト毎に約 6MB (1,024×768×4 Byte ×2 画面) の画像データが転送される

5.4 システム機能実験の手順と結果

5.4.1 実験手順

3 カ所のサイト間で、「参加者間が仮想会議室内で共有データオブジェクトを参照し、その操作と会話を行う状況」を想定し、システム機能の実証実験を行った。

①会議開始、②参加者間会話を想定した表示、③人物立体画像・共有データオブジェクトの動画表示、④共有データオブジェクト相互ポインティング・操作、⑤会議終了、までの一連の動作実験を空間管理処理の元で行った。

5.4.2 仮想会議室の配置と可視化

二つの人物立体画像と二つの共有データオブジェクトを仮想会議室空間に配置し、これを参加者の視点から可視化を行い、配置及び可視化機能の実験を行った。

図 5.4 に、実験に利用した人物立体画像オブジェクトの例として、ステレオマッチング法により生成されたボクセル空間サイズ 256^3 の人物ボクセル画像を示す。

図 5.4 人物立体画像表示例

ボクセル空間サイズ 256^3 の解像であると、顔の表示が理解できる顔画像が得られている。ステレオマッチング法では、前面からのカメラの映像のみから立体画像を得ているので、人物を囲む複数のカメラから映像を撮影する視体積交差法と比較すると、カメラに写らない後方の部分のデータは無く、人物座像の前面だけの胸像形態の表面のデータとなる。この表示例では、一部にステレオマッチング法の欠点であるデータ抜けが見られる。今回の実験では、2 台のカメラを用いて立体画像を生成しているが、このカメラ台数を増やす事で、データの抜けの軽減が可能である。

データ形式はサーフェスボクセル形式である。

図 5.5 に、人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクトの仮想会議室内への配置と、全体の表示の例を示す。

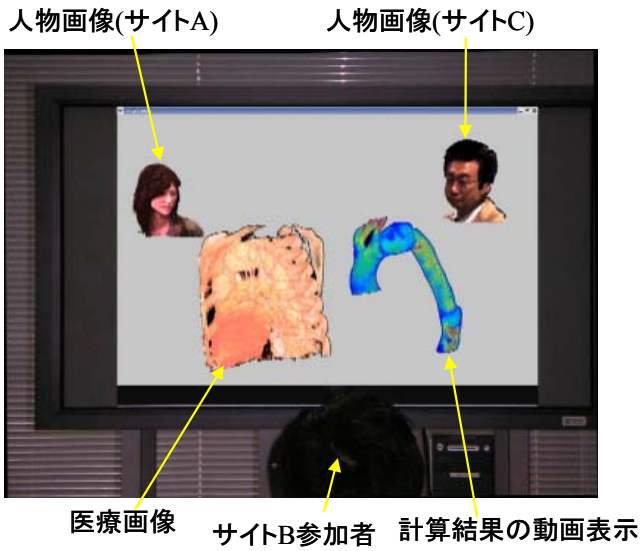


図 5.5 仮想会議室へのオブジェクト配置と表示例(1)

ボクセル空間サイズ 256^3 の CT 医療データ画像と、ボクセル空間サイズ 256^3 の血流シミュレーション動画像の二つの共有データオブジェクトを中央手前に表示する。共有データオブジェクト後方の仮想会議室上に、二カ所の参加者のボクセル空間サイズ 128^3 の人物立体画像オブジェクトを配置する。これらを自サイトの参加者の視点で表示する。ここでは大画面の 2 次元ディスプレイ(プラズマディスプレイ)を利用し 2 次元表示をする。

図 5.6 に、画面中の参加者が共有データをポインティングしているシーンの、表示画面データの例を示す。

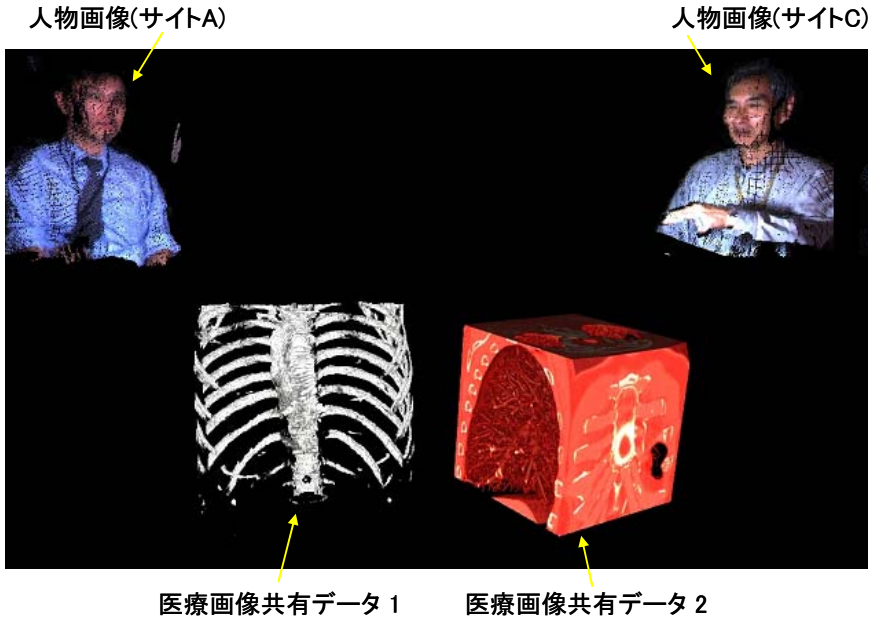
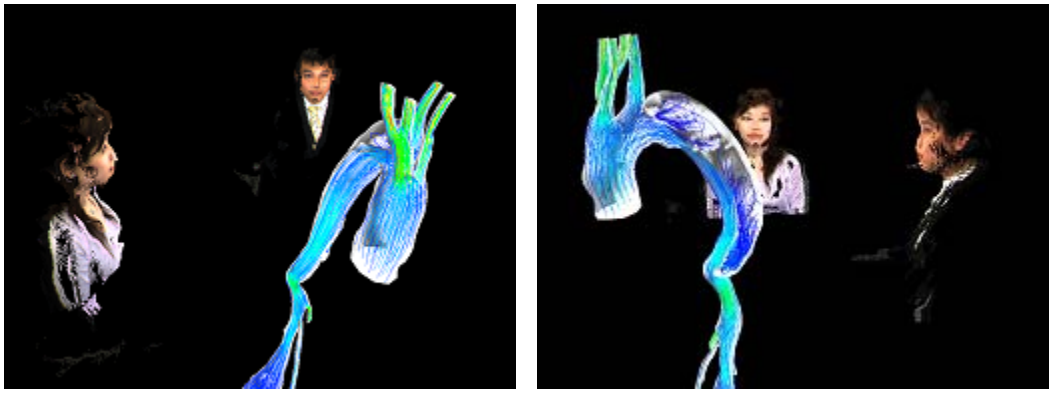


図 5.6 仮想会議室へのオブジェクト配置と表示例(2)

画面右の人物が、共有データオブジェクトを指差し、これを左の人物が見るシーンの画面である。ここでは、ボクセル空間サイズ 256^3 の CT 医療データ画像を、カラーマップを変更して二つ表示している。人物立体画像のボクセル空間サイズは 256^3 であり、一部にデータ抜けは見られるが、画面中の人物が、共有データオブジェクトを指差す状況が明確に認識できる。

図 5.7 に、通常の視点を変更して、立体配置の状況を理解できるように仮想会議室を可視化した例を示す。

(a) 正面からの映像　　(b) 上部からの映像



(c) 斜め左上部からの映像　　(d) 斜め右からの映像

図 5.7 仮想会議室の可視化例

ここでは、二人の人物立体画像オブジェクトとその前方に共有データオブジェクトとして計算結果の CG 画像を配置した。それぞれのオブジェクトは、中心を同じ高さに配置した。(a)が仮想会議室を正面から、(b)が真上から、(c)が斜め左上、(d)が斜め右、から可視化した。

仮想会議室を斜めから見る事で、各オブジェクトが立体として表現されており、さらに、会議室内に立体的に配置されている事が判る。

人物立体画像オブジェクトは胸像形態で前面の表面のみデータを持つので、斜めから見ると、後部のデータは表示されない。今回の実験では、2 台のカメラ映像からステレオマッチング法により立体像を生成しているが、カメラ台数を増やす事で側面後方までの表示が可能となり、さらに現実感を増した立体表示が可能と考えられる。

5.4.3 配置と可視化機能の効果実証方法

仮想会議室への配置の認識とその精度を実証する目的で、被験者が参加する以下の 3 種類の実験を行った。

⑴ オブジェクト配置状況の認識実験

仮想会議室内へのオブジェクトの配置状況(相互のデータの位置関係)を、別サイトの参加者に相当する被験者が認識可能かを測定する実験により、VC 手法により位置関係の相互認識が可能である事を実証する。

⑵ 会議参加者視線の認識実験

仮想会議室内の参加者の視線を、別サイトの参加者に相当する被験者がどれだけ認識可能かを測定する実験により、VC手法によりゲイズアウェアネスの表現が可能である事を実証する。

⑶ 共有データオブジェクトのポインティング認識実験

画面内の人物の指差しによる共有データオブジェクトのポインティングを、別サイトの参加者に相当する被験者がどれだけの精度で認識可能かを測定する実験により、VC手法により共有データオブジェクトへの指示(ポインティング)の相互認識が可能である事を実証する。

5.4.4 オブジェクト配置状況の認識実験

仮想会議室内に配置された二つの共有データオブジェクトの位置関係を、被験者が認識できるかの測定により、VC 方式において仮想会議室へのオブジェクトの配置と、その位置関係の相互認識が可能かを検証する実験を行った。延べ 30 名の被験者による測定を行った。手順は以下の通りである。

①左右で大きさの異なる二つの CT データを共有データとし、9 パターンのオブジェクト配置の画像を予め生成する(図 5.8)。図 5.9 に、図 5.8 に対応する実験に用いた表示画面を示す。左右のオブジェクトのサイズが異なるので、左右を逆にしたパターンも含め全部で 18 パターンを実験に用いた。

②二つの共有データオブジェクトが、被験者から見て同一の距離にある映像(パターン 1、5、9)をまず被験者に見せ、参照データの大きさと配置の関係を理解させる。

③2次元表示と立体視表示でそれぞれ4パターンをランダムに表示する(表示パターンは被験者により異なる)。

④被験者が左右のオブジェクトの位置を回答し、その正答率を測定する。

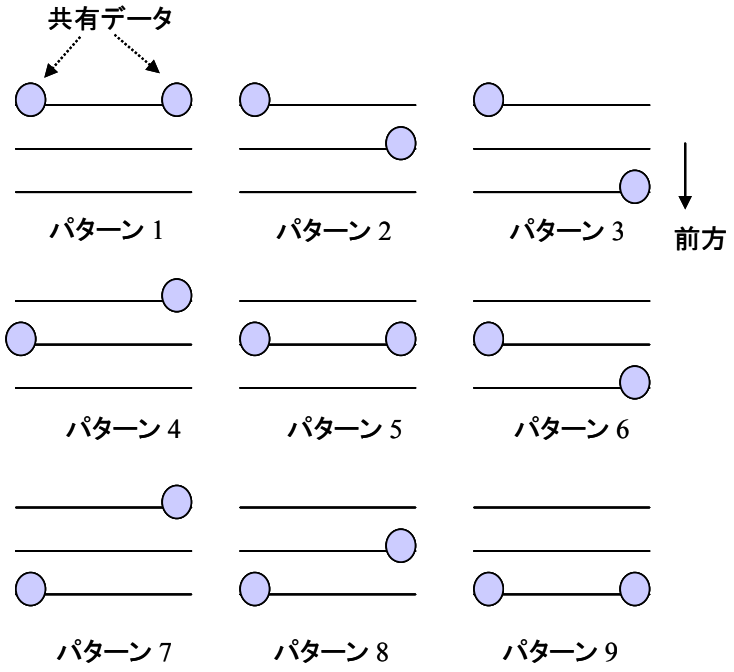


図 5.8 オブジェクト配置状況認識実験データ配置パターン(平面図)

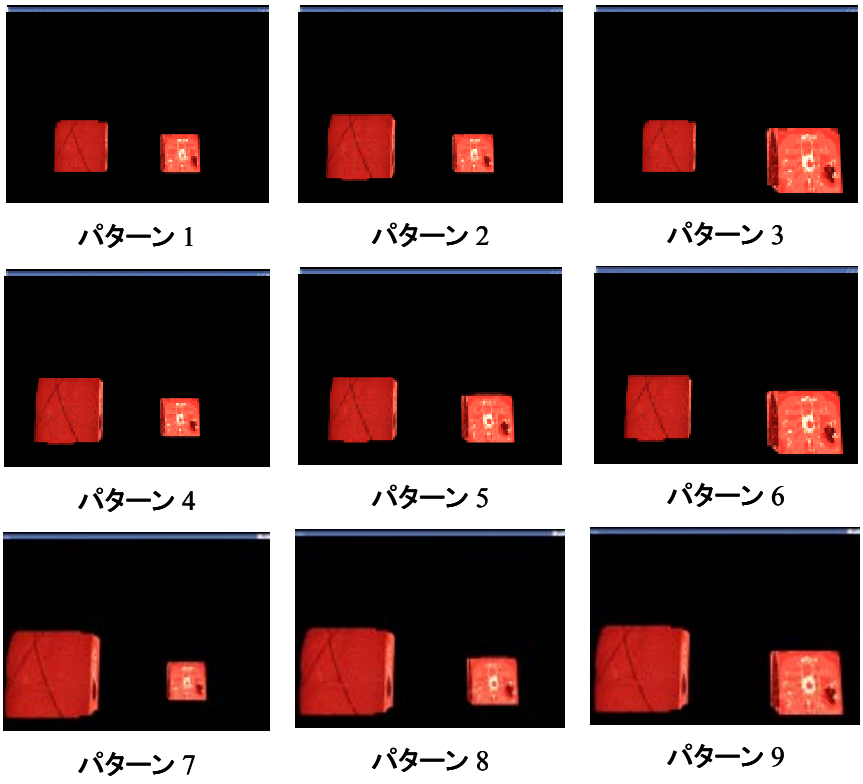
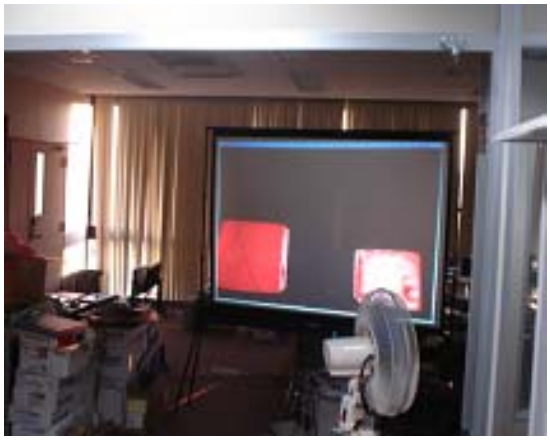


図 5.9 オブジェクト配置状況の認識実験データ配置画面例

図 5.10 (a) に実験パターンの簡易立体視ディスプレイへの表示例を、(b) に被験者が実験を行っている様子を示す。



(a) 簡易立体視ディスプレイへの表示例

(b) 被験者による回答の様子

図 5.10 オブジェクト配置状況認識実験の様子

表 5-4 に、本実験の表示パターン(2 次元表示と立体視表示)、被験者数、実験回数、及び正答率を示す。延べ 30 人の被験者が、2 次元表示と立体視表示の各表示パターンについてそれぞれ 4 回、総計 120 回の回答を行った。正答率は、表示位置ではなく、オブジェクトのサイズ(大きいオブジェクト : 図 5.9 の左側のオブジェクト、小さいオブジェクト: 図 5.9 の右側のオブジェクト)で集計した。

表 5-4 オブジェクト配置状況認識実験の条件と正答率

表示パターン	延べ被験者数(人)	被験者あたりの回数数	総回答数	正答率		
				大*1	小*2	平均
2 次元表示	30	4	120	75 %	87 %	81 %
立体視表示	30	4	120	83 %	91 %	87 %
		正答増加率		11 %	5 %	8 %

*1 : サイズの大きいオブジェクト (図 5.9 の左側のオブジェクト)の正答率

*2 : サイズの小さいオブジェクト (図 5.9 の右側のオブジェクト)の正答率

正答率は、2 次元表示で平均 81%、立体視表示で平均 87%、となった。表示パターンにかかわらず、小さいオブジェクトの正答率が高い傾向が見られる。立体視表示により、大きいオブジェクトの正答率が平均 8% 増加した。

図 5.11 に、各被験者の 4 回の回答における、回答を行った順番と正答率の関係を示す。延べ 30 名の被験者の結果の平均値である。2 次元表示では、回答の後半で正答率が増加し、立体視表示では、後半で低下する傾向が見られるが、大きな差ではなく、回答順番と正答率に有意な関係があるかは判断できない。

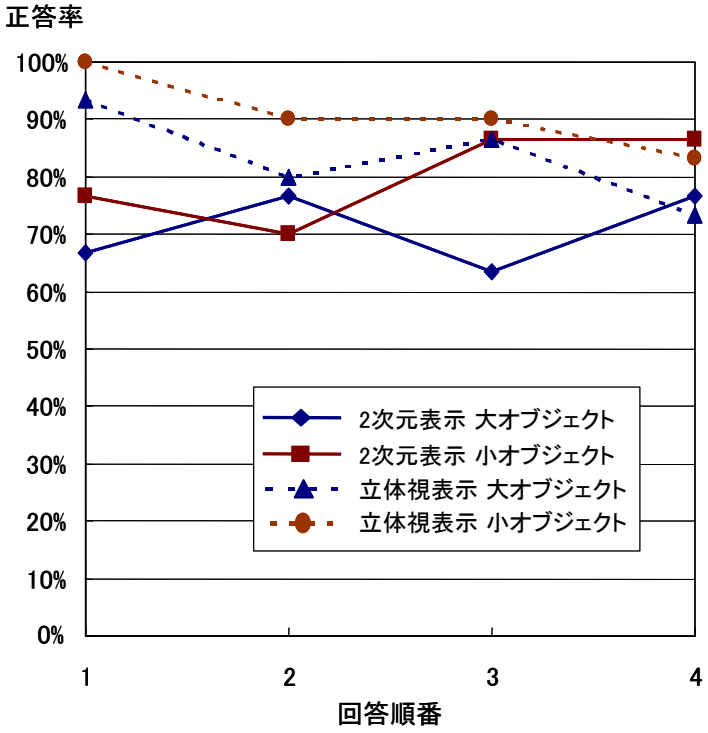
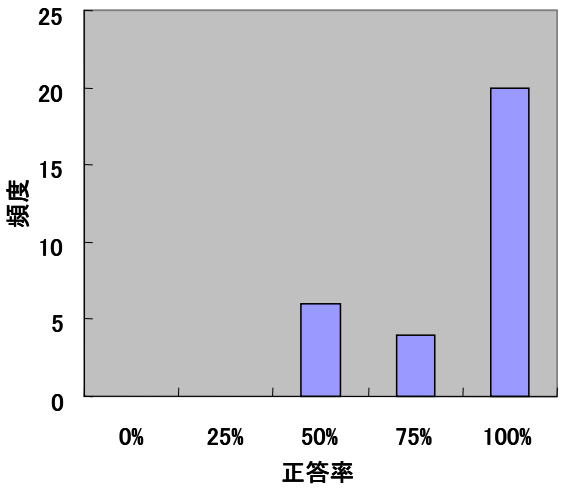


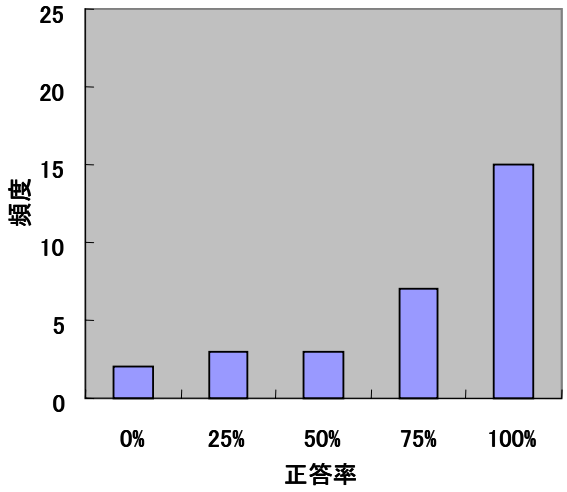
図 5.11 オブジェクト配置状況認識実験の正答率と回答順番の関係

図 5.12 に、延べ 30 名の測定における正答率の分布頻度図を示す。各被験者が、4 回の回答で何%正答したかをオブジェクトのサイズ(大・小)で集計した。縦軸の頻度の合計が 30(人)となる。4 回正答すると 100 %、一問も正答できないと 0 % となり、回答者による正答のバラツキを見る事ができる。

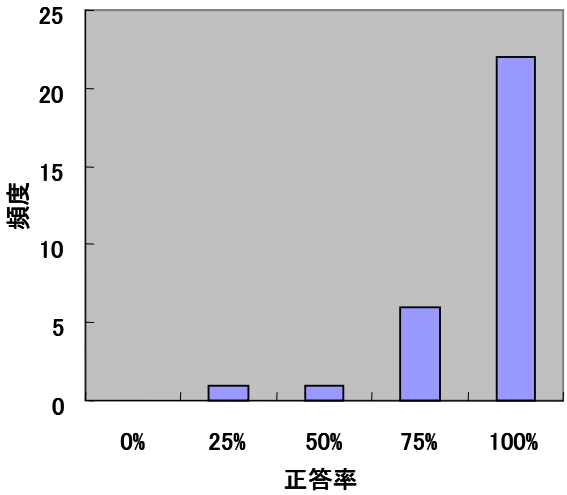
2 次元表示では、大きいオブジェクトの回答の正答率にバラツキがみられるが、立体視表示では、大小どちらのオブジェクトにおいても、バラツキが減り、正答が増える傾向を見る事ができる。



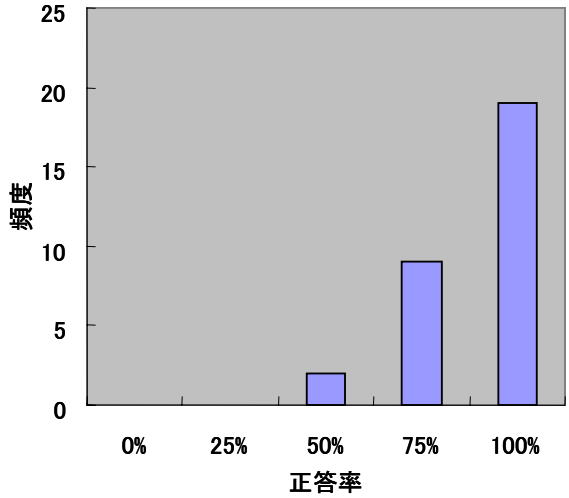
(a)　2 次元表示　小オブジェクト正答率頻度



(b) 2 次元表示　大オブジェクト正答率頻度



(c)　立体視表示　小オブジェクト正答率頻度



(d) 立体視表示　大オブジェクト正答率頻度

図 5.12 オブジェクト配置状況認識実験における正答率頻度分布

5.4.5 会議参加者視線の認識実験

会議参加者に相当する二つの人物立体画像と一つの共有データオブジェクトを仮想会議室に配置し、この仮想会議室の表示画面内で人物立体画像が見ている方向(視線)を、他のサイトの参加者に相当する被験者が認識できるか(ゲイズアウェアネスが可能か)の実験を行った。VC方式においてゲイズアウェアネスが可能かを検証する。

延べ 10 名の被験者による測定を行った。手順は以下の通りである。

①図 5.13 に示す画面中の左右の参加者が、画面中の他の参加者、共有データオブジェクト、及び被験者を見ている 6 パターンのシーンの画像を予め生成する。図 5.14 に、図 5.13 に対応する実際の表示画面を示す。

②2 次元表示と立体視表示でこのパターンをランダムに表示する。

③被験者が左右の会議参加者の視線方向を回答し、その正答率を測定する。

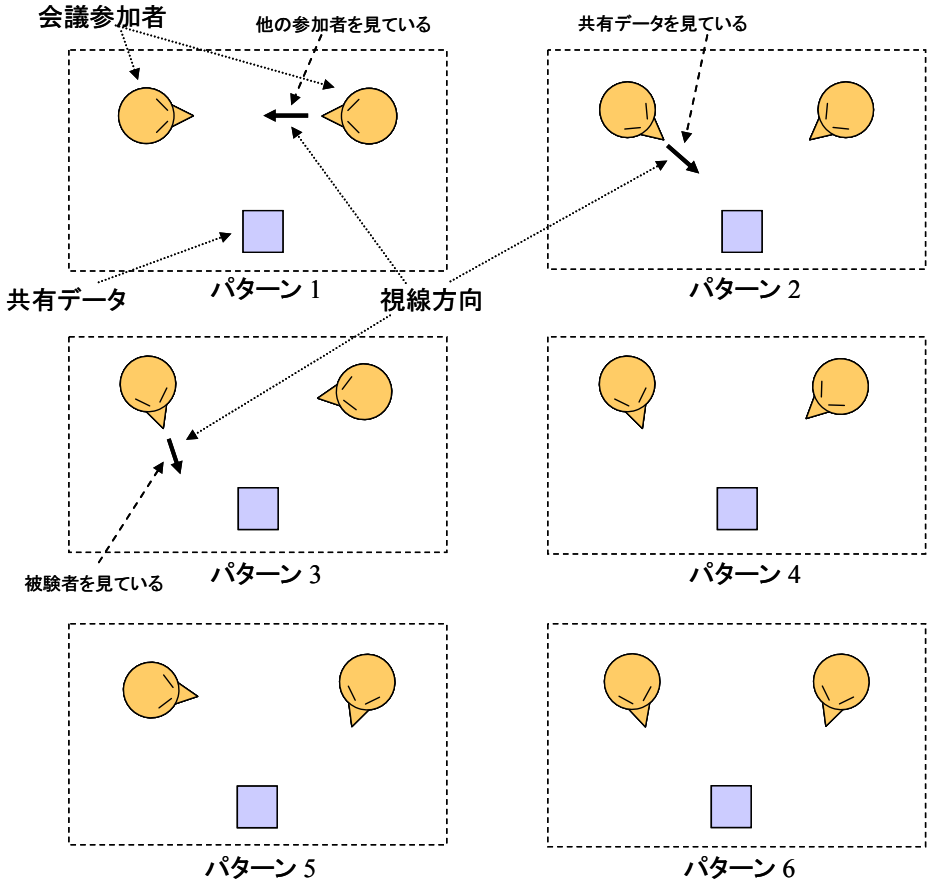


図 5.13 会議参加者視線の認識実験データパターン(平面図)

パターン 1

パターン 2

パターン 3

パターン 4

図 5.14 会議参加者視線の認識実験データパターン画面例

表 5-5 に、本実験の表示パターン(2 次元表示と立体視表示)、被験者数、実験ケース数、及び左右のオブジェクトの視線方向に対する回答の正答率を示す。10 人の被験者あたり4 ケース、総計 40 ケースの実験を各表示パターンについて行った。

表 5-5 会議参加者の視線認識実験の条件と測定結果

表示パターン	被験者数(人)	被験者あたりの実験回数	総回答数	正答率		
				左位置	右位置	平均
2 次元表示	10	4	40	93 %	80 %	86 %
立体視表示	10	4	40	98 %	90 %	94 %
		正答増加率		5 %	13 %	9 %

正答率は、2 次元表示で平均 86% 立体視表示で 94%となり、左位置の正答率が高い。立体視

表示により、平均 9% の正答率の増加が見られた。

図 5.15 に、4 回の回答における回答を行った順番と正答率との関係を示す。10 人の被験者の結果の平均値である。結果のバラツキは大きく、回答順番と正答率との間に有意な関係があるとは考えられない。

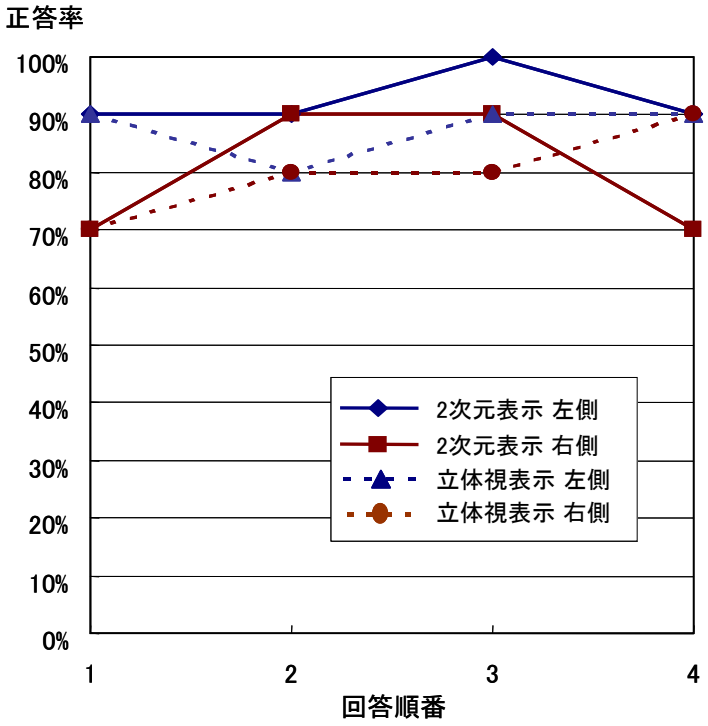
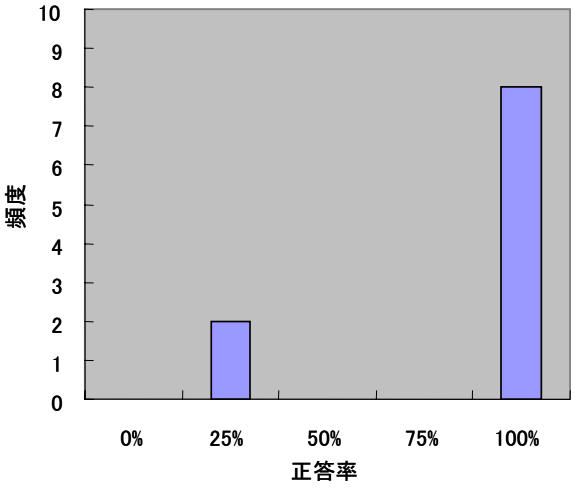


図 5.15 会議参加者視線認識実験の正答率と回答順番の関係

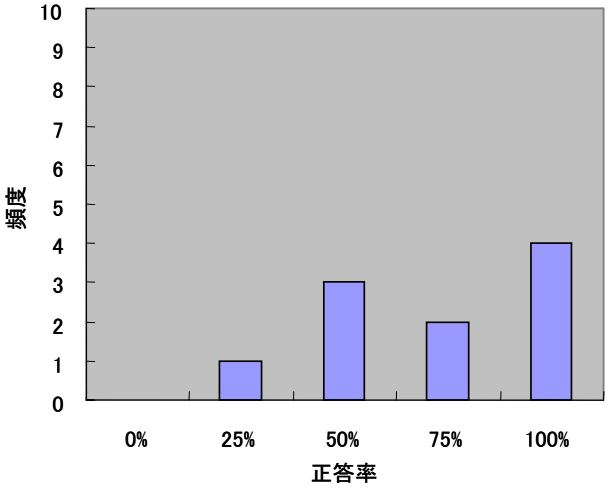
図 5.16 に、10 名の被験者の正答率の分布図を示す。各被験者が 4 回の回答で何%正答したかを、左右のオブジェクトで集計した。縦軸の頻度の合計が 10(人)となる。4 回正答すると 100 %、一問も正答できないと 0 % となり、回答者による正答のバラツキを見る事ができる。

2 次元表示、立体視表示とも右側の人物像の向きへの正答率のバラツキが見られており、結果として回答率が低い。これは図 5.14 に見られる様に、右側の人物像の動きが、左側の人物像より小さく、判断が困難だった事に起因すると考えられる。

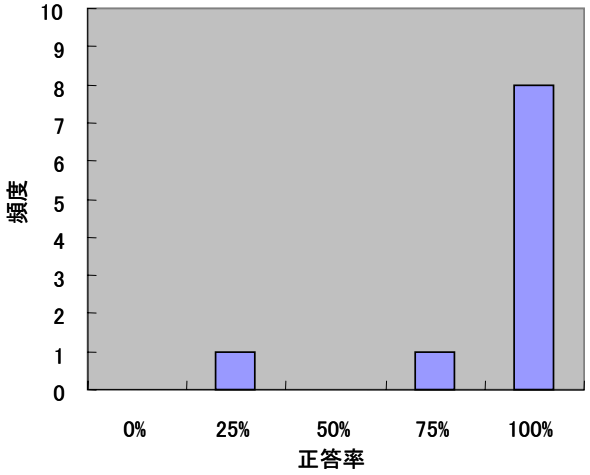
左右のオブジェクトとも立体視表示により、頻度分布のバラツキが減る傾向が見られる。



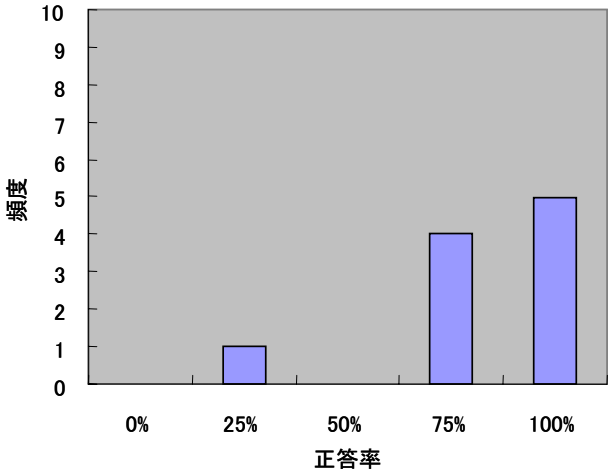
(a)　2 次元表示　左側正答率頻度



(b) 2 次元表示　右側正答率頻度



(c)　立体視表示　左側正答率頻度



(d) 立体視表示　右側正答率頻度

図 5.16 会議参加者視線認識実験における正答率分布

5.4.6 共有データオブジェクトのポインティング認識実験

画面内の人物の指差しによる共有データオブジェクトのポインティングを、別サイトの参加者に相当する被験者がどれだけの精度で認識可能かを測定する実験により、VC手法において参加者の共有データオブジェクトへの指示の相互認識が可能かを検証する実験を行なった。

図 5.17 に実験方法の概要を示す。延べ 5 名の被験者による測定を行なった。

実験システムでは、大画面で表示ができるサイトは一カ所であるので、双方向の表示機能の効果実験ができない。この為、以下の手順を取る。

①サイト C 側で仮想会議室を模して実世界に共有データの模型を置く。

②これを会議参加者に相当するサイト C の実験者が指差しでポインティングし、この上半身を多眼カメラで撮影する。

③この実験者の立体画像を仮想会議室に配置する。

④同時に、実世界と同じ位置にボクセル化した共有データオブジェクトを配置する。これにより、サイト C 側でポインティングした実物の模型を、仮想会議室の中で等価的にポインティングする表現が可能となる。

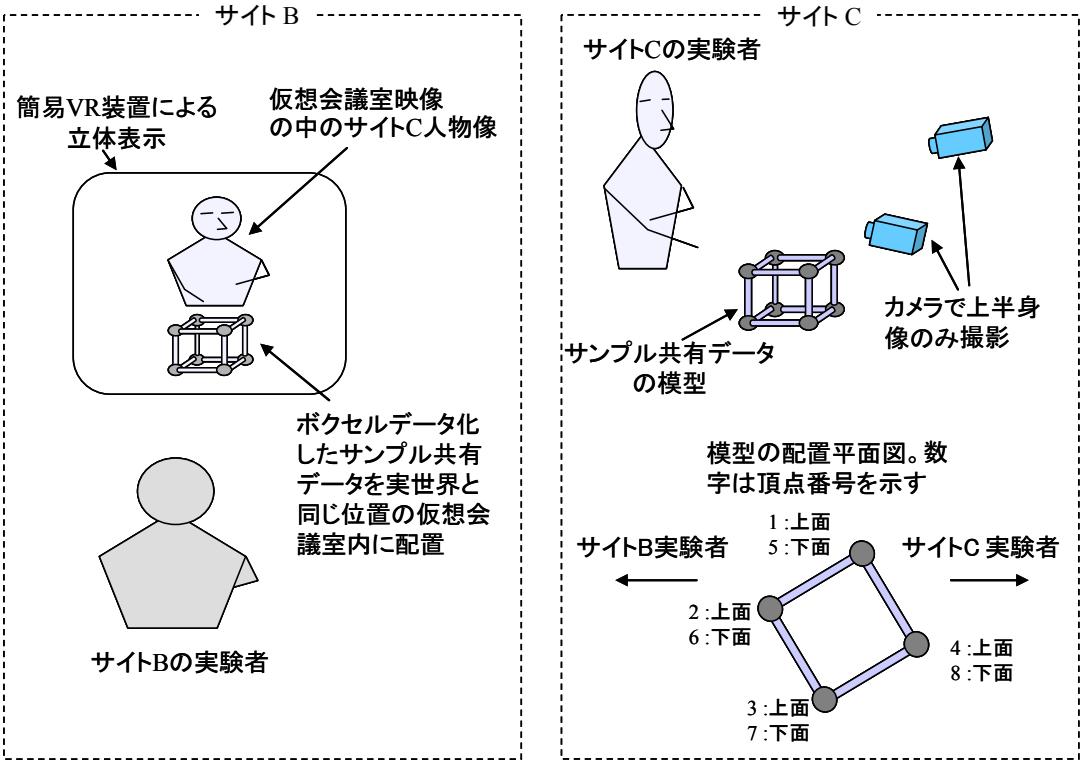


図 5.17 立体視表示機能の効果実証方法

⑤サイト C 側の実験者が模型の各頂点をポインティングする。

⑥サイト B 側の実験者は立体視ディスプレイの前でサイト C の実験者が仮想会議室内の中で仮想的な模型をポインティングする様子を見て、どこを指差すかを判断する。このプロセスを繰り返し、指示の認識率を測定する。2 次元表示と立体視表示で測定を行う。

図 5.18 に、サンプル共有データオブジェクトの配置の平面図を示す。サイト C 実験者から中心までの距離が 100 cm の位置に 30° 回転させた位置に配置した。

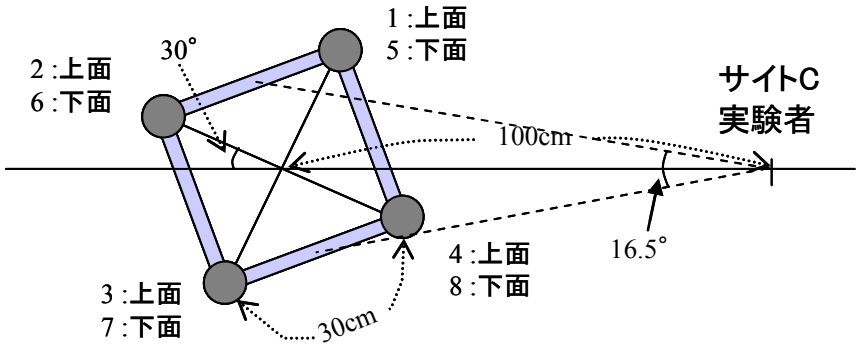
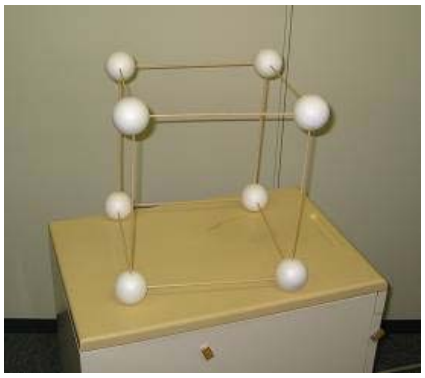


図 5.18 サンプル共有オブジェクトの配置

図 5.19 (a) に、実験に利用したサンプル共有データの模型を示す。一辺 30cm の立方体の各頂点に球を配置した。



(a) 実証実験に利用した模型

(b)サイト C の実験者が模型をポインティングする様子

図 5.19 実証実験の模型と実験者が模型をポインティングする様子

図 5.19 (b) に、サイト C の実験者が模型をポインティングして実験を行っている状況を示す。

立体映像を生成する二つのカメラの前で、1 m の距離でサンプル共有データの模型を指でポインティングする。共有データは、仮想会議室内の配置位置を考慮して、人物の前の下方に設置した。

図 5.20 に、サイト B の表示画面例を示す。サイト C の実験者が、仮想会議室内の共有データオブジェクトの頂点を指でポインティングしている。図 5.21 は、サイト B に対応する実験設備において、サイト B の実験者が、簡易立体視ディスプレイの画面を見ている様子を示す。

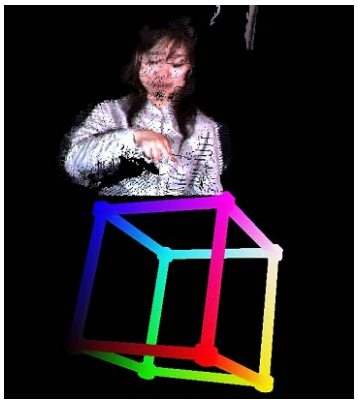


図 5.20 サイト B での表示画面例

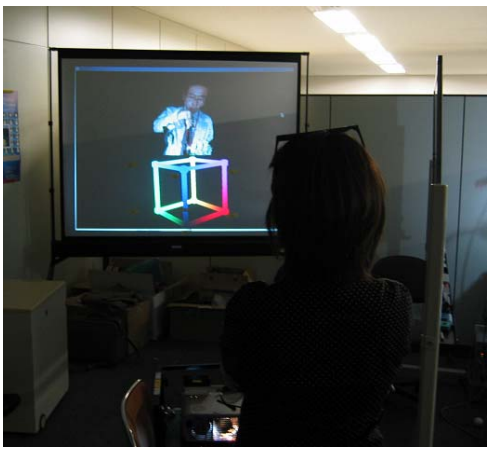


図 5.21 サイト B での実験の様子

5 名の被験者による、各 30 回の指差し実験の結果を表 5-6 に示す。完全正答率は、ポインティングした頂点を正答できたかどうかを示す。上下正答率は、上下を間違えたケース(例えば 1 と 5 を間違えたケース)も正答とした正答率で、平面的に見た位置の認識率を示す。上下面正答率は、ポインティングした頂点が上の面にある場合、上のどの頂点を回答しても正答とする正答率で、上下面の認識率を示す。左右面正答率は、図 5.17 において、ポインティングした頂点が

含まれる面(左の面(3,4,7,8)、右の面(1,2,,5,6))を回答した場合は正答とする正答率で、左右の認識率を示す。それぞれ、2 次元表示と立体視表示の場合を示す。

表 5-6 ポインティング実験の条件と正答率

表示パターン	被験者数(人)	被験者あたりの実験ケース数	総ケース数	正答率			
				完全正答	上下正答*1	上下面正答*2	左右面正答*3
2 次元表示	5	15	75	45.3 %	72.0 %	61.3 %	88.0 %
立体視表示	5	15	75	46.7 %	74.7 %	58.7 %	86.7 %
合計	10	30	150	46.0 %	73.3 %	60.0 %	87.3 %

(注) 1： 上下を間違えたケースも正答とした正答率

2： 上下面(1,2,3,4 対 5,6,7,8)を正答とした正答率

3： 左右面(1,2,5,6 対 3、4、7、8)を正答とした正答率

2 次元表示と立体視表示両者の完全正答率は、46.0 %であった。

平面的に見た位置の正答率は、73.3 %に上がった。上下面の正答率は 60.0 %であり、上下の正答率は左右面の正当率と比較すると低い。これは、対象オブジェクトがポインティングする実験者より低い位置にあり、上下の差が判断しにくかった点に起因する可能性がある。

左右は 87.3 %の正答率でほぼポインティングされた面を正答できている。今回の実験の配置では、図 5.18 に示す様に、左右の面の中心点での平均で考えると 16.5° の指差しの角度の差を 87%の認識率で認識できた事となる。

どのケースでも、2 次元表示と立体視表示の違いによる正答率の有意な差は見られなかった。

5.4.7 ボクセルデータの操作・指示とシステム全体の制御

共有データオブジェクトについて、図 4.15 に示した操作パレットにより、参加者による会議の状況を想定した操作(回転・移動・拡大・縮小)の実験を行い、動作を確認した。操作の画面へのフィードバックでは、共有データオブジェクトの表示時間に相当する遅延時間が発生した。

システム全体制御の実験では、図 4.16 で示した想定したシナリオに沿った動作を行い、図 4.17 で示す一連のシステム動作を確認した。

5.5 システム性能実験の手順と結果

5.5.1 実験手順

3 カ所のサイト間で、「参加者が仮想会議室内で共有データオブジェクトを参照・操作し、これを元に会話を行う状況」を想定し、以下の、基礎性能の測定とシステム性能の測定を行った。

⑴ ボクセルデータ圧縮性能 ： サーフェスボクセル化によるデータ削減効果を測定し、サイト間分散処理法の効果を実証する。

⑵ 可視化性能測定 ：システムの可視化性能を測定し、VC手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性を実証する。2 次元ディスプレイへの表示(2 次元表示)と簡易立体視ディスプレイ表示(立体視表示)のケースについて以下の測定を行った。

⑷単一オブジェクト可視化性能 ： 人物立体画像オブジェクト、フルボクセル形式共有データオブジェクト、及びサーフェスボクセル形式共有データオブジェクトをそれぞれ単独に可視化したケースの可視化性能を測定した。それぞれのオブジェクトの可視化特性・要件に合った分析を行う。

⑸複数オブジェクト同時表示可視化性能 ： 複数のオブジェクト(人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクト)を同時に表示し、システムとしての可視化性能を測定した。

5.5.2 ボクセルデータ圧縮性能

VC 手法で開発した、フルボクセルデータからサーフェスボクセルデータへの変換による、ボクセルデータ削減法の効果例を表 5-7 に示す。サーフェスボクセルデータは 4.4.1 項で述べた1D形式のデータ形式とした。

CG画像データ(ボクセル空間サイズ128^3と256^3)、サンプル図形(断面が文字形状の立体図形、ボクセル空間サイズ256^3)、CTデータ(ボクセル空間サイズ256^3)、及び人物立体画像オブジェクトデータ(ボクセル空間サイズ256^3)、におけるボクセル数及びデータサイズの削減効果を示す。CG 画像データ以外は二種類のデータ平均値を示す。

フルボクセルデータは、2 byte/voxel、1D形式サーフェスボクセルデータは 8 byte/voxel のデータサイズであるので、ボクセル空間ボクセル数では 96.4%～99.8%の、データサイズでは 86.0%～99.3%の削減効果を得た。

サイト間分散処理法の効果の判断に用いる、人物立体画像オブジェクトデータのデータサイズは平均 240KB であった。

表 5-7 データ形式変更によるデータ量削減効果

データ種別	ボクセル空間サイズ (v)	サーフェスボクセル数 (s)	ボクセル数削減効果 (1- s/v)	データサイズ削減効果	データサイズ (MB)
共有データ(CG画像) I	2,097,152 (1283)	6,205	99.7 %	98.8%	0.049
共有データ(CG画像) II	16,777,216 (256^3)	51,087	99.7 %	98.8 %	0.41
サンプル図形*1		558,504	96.7 %	87.0 %	4.5
共有データ(CTデータ)*2		598,884	96.4 %	86.0 %	4.8
人物立体画像データ*3		30,516	99.8 %	99.3 %	0.24

*1：断面が文字形状の立体図形。2 サンプル平均値

*2：2 サンプル平均値　　*3：2 サンプル平均値

5.5.3 可視化性能測定方法

システム可視化性能の測定を行った。図 5.22 に、本システムの可視化処理の流れと対応する処理時間の関係を示す。

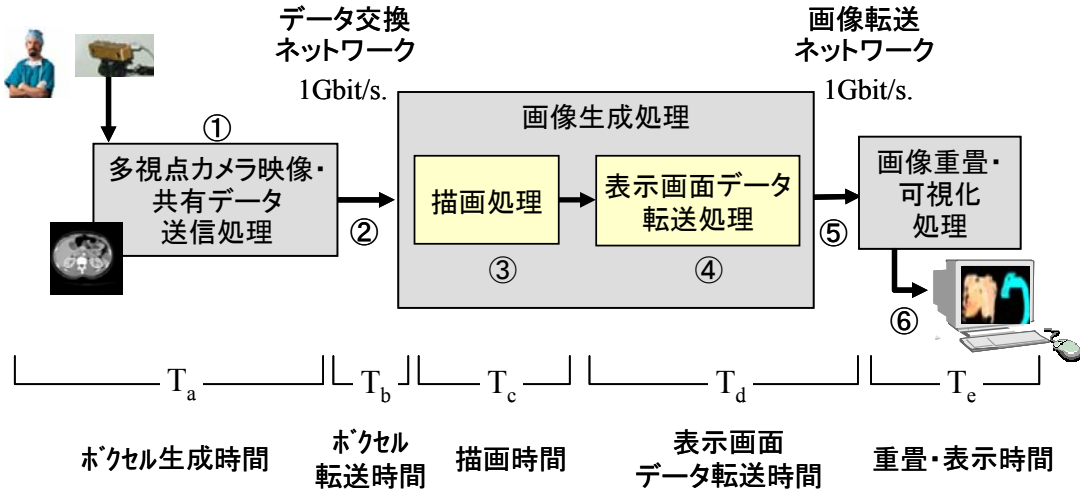


図 5.22 可視化処理の流れと処理時間

ここで、①-⑥は以下の処理を示す。

①多視点カメラからのデータの取り込み (T_a：ボクセル生成時間)。ここでは共有データの生成は予め行なわれているものと考える。

②人物立体画像オブジェクト及び共有データオブジェクトのネットワーク転送（T_b：ボクセル転送時間)。

画像生成処理は描画処理（ボクセルデータの入力・変換から描画と転送バッファへのデータ格納までの処理時間)と表示画面データ転送処理時間(転送バッファから重畳・表示処理バッファへのデータ転送完了までの処理時間)から構成される。

③画像生成処理内の描画処理（T_c：描画時間)。

④、⑤画像生成処理内の転送処理と表示画面データのネットワーク転送（T_d：表示画面データ転送時間)。

⑥表示画面データの重畳・表示(T_e：重畳・表示時間)。

処理は①、②、(③+④+⑤)、⑥の単位でパイプライン化されており、②と③の処理は前の処理よりデータを受け取ると処理を開始する。⑥の処理(重畳・表示処理)では画像生成処理からの表示画面データの転送処理とは独立に最新のデータバッファの内容を重畳し表示する処理を繰り返す。これにより、オブジェクトの一回の可視化時間(オブジェクトの変化が表示に反映されるまでの時間)は個々の処理時間の合計となるが、連続して処理を行うとパイプライン処理となるため、システムとしての可視化速度はそれぞれの単位の処理時間の逆数の最小値 $\min[\ 1/T_a,\ 1/T_b,\ 1/T_{(c+d)},\ 1/T_e\ ]$ となる。

①-②の性能は、人物立体画像生成に利用するデバイスやネットワーク環境に大きく影響される為、実験においては、③-⑥の処理時間(T_{c+d}, T_e)の測定と評価を行った。①-②の処理時間を含めた、システム全体の性能については 6.3 節で議論を行う。

人物立体画像オブジェクトでは、カメラからのデータの取り込みとデータの転送、画像生成、及び重畳・表示の一連の流れでの中で、処理時間(T_{c+d}, T_e)の測定を行った。共有データオブジェクトでは、必要な全てのデータを画像生成ノードに転送した後、画像生成と重畳・表示の一連の流れで、処理時間(T_{c+d}, T_e)の測定を行った。

測定では、一定時間に連続して画面を表示して、その時間内で表示された画面枚数と③-⑥の処理区間の積算時間を測定した。積算時間を表示画面枚数で割り、③-⑥の処理区間の表示画面 1 枚あたりの処理時間を求めた。

測定に用いたデータを表 5-8 にまとめる。

人物立体画像オブジェクトデータは、128^3 と 256^3 のボクセル空間サイズで 2 種類のサーフェスボクセル形式の測定を行った。共有データオブジェクトである計算結果の CG 画像は、128^3 と 256^3 のボクセル空間サイズで 2 種類のサーフェスボクセル形式とフルボクセル形式の測定を行った。

立体文字のサンプルデータは、4 種類の文字でそれぞれ 256^3 のボクセル空間サイズで 2 種類のサーフェスボクセル形式の測定を行った。

測定に用いた描画手法は、1D 形式サーフェスボクセルデータとフルボクセルデータではボリュームレンダリング法、3D 形式サーフェスボクセルデータではポリゴンレンダリング法である。

表 5-8 測定に用いたデータ

ボクセル空間サイズ	種類	形式	描画手法
128^3	人物立体画像	サーフェス(1D 形式)	ボリュームレンダリング
		サーフェス(3D 形式)	ポリゴンレンダリング
	CG 画像	サーフェス(1D 形式)	ボリュームレンダリング
		サーフェス(3D 形式)	ポリゴンレンダリング
		フルボクセル	ボリュームレンダリング
256^3	人物立体画像	サーフェス(1D 形式)	ボリュームレンダリング
		サーフェス(3D 形式)	ポリゴンレンダリング
	CG 画像	サーフェス(1D 形式)	ボリュームレンダリング
		サーフェス(3D 形式)	ポリゴンレンダリング
		フルボクセル	ボリュームレンダリング
	サンプル図形 (4 種類)	サーフェス(1D 形式)	ボリュームレンダリング
		サーフェス(3D 形式)	ポリゴンレンダリング

5.5.4 単一オブジェクト可視化性能測定結果

(1) 人物立体画像オブジェクトの可視化性能

2 種類の人物立体画像オブジェクト(ボクセル空間サイズ 128^3、ボクセル空間サイズ 256^3)の、2 次元及び立体視表示における可視化性能測定結果(処理時間と処理速度(フレームレイ fps : frame per second、1 画面の表示時間の逆数))を表 5-9 に示す。ここでは、③-⑤(画像生成処理)の処理時間より可視化性能を求める。

それぞれ 20 ケースのデータによる 5 回の測定結果の平均値である。

1D 形式サーフェスボクセルデータの描画にはポリゴンレンダリング法を、3D 形式サーフェスボ

クセルデータの描画にはボリュームレンダリング法を用いた。

ボクセル空間サイズ 128^3 と 256^3 のデータに対する有効ボクセル数の平均値は 17.8K と 17.7K であった。

ここで示される様に、人物立体画像オブジェクトではポリゴンレンダリング法がボリュームレンダリング法より高速で、ボクセル空間サイズが増加するにつれ、その差は拡大する。1D、3D 形式ともサーフェスボクセル形式として表現する情報には差が無い為、以下では人物立体画像オブジェクトは 3D 形式サーフェスボクセルデータとボリュームレンダリング法の組み合わせで検討を行う。

表 5-9 人物立体画像オブジェクトの画像生成処理性能測定結果例

ボクセル空間サイズ	平均有効ボクセル数.	形式	描画手法	処理時間 T_{c+d} (sec.)/速度 (fps)	
				2 次元表示(2D)	立体視表示(3D)
128^3	17.8 K	サーフェス(1D)	ボリュームレンダリング	0.245 sec. 4.1 fps	0.518 sec. 1.9 fps
		サーフェス(3D)	ポリゴンレンダリング	0.164 sec. 6.1 fps	0.494 sec. 2.0 fps
256^3	17.7 K	サーフェス(1D)	ボリュームレンダリング	0.9 sec. 1.1 fps	1.18 sec. 0.85 fps
		サーフェス(3D)	ポリゴンレンダリング	0.162 sec. 6.2 fps	0.498 sec. 2.0 fps

画像重畳・表示処理時間の測定値を表 5-10 に示す。

2 次元表示、立体視表示とも 10 ケースについて、それぞれ 5 回の測定を行った結果の平均値である。この処理時間は、オブジェクトのボクセルデータ形式・ボクセル空間サイズには依存せず、表示画面データサイズにのみ依存する。立体視表示は画面サイズが倍であるので、ほぼ倍の処理時間を要する。

表 5-10 画像重畳・表示性能測定結果

	2 次元表示(2D)	立体視表示(3D)
処理時間 T_e	0.0881 sec.	0.171 sec.

ポリゴンレンダリング法による人物立体画像オブジェクトデータの可視化処理時間の測定例をまとめたものを表 5-11 に示す。ポリゴンレンダリング法では、描画速度は有効ボクセル数に比例するので、描画時間はボクセル空間サイズには依存しない。この例ではほぼ同じ有効ボクセル数であるので、ほぼ同一の測定結果となっている。

この例では、画像生成時間が重畳・表示処理時間より長い為、システムの可視化速度は画像生成時間の逆数($1/T_{c+d}$)により求められ、さらに表示画面データ転送時間(転送時間)が画像生成時間において支配的である。表中の網駆け部分が律速となる画像生成時間を示す。

表 5-11 人物立体画像オブジェクトデータの可視化性能例

表示タイプ			2 次元表示	立体視表示	2 次元表示)	立体視表示
ボクセル空間サイズ			128^3		256^3	
有効ボクセル数			17.8 K		17.7 K	
		描画時間 T_c (sec.)	0.05	0.103	0.05	0.099
		転送時間 T_d (sec.)	0.114	0.391	0.112	0.399
	画像生成時間 T_{c+d} (sec.)		0.164	0.494	0.162	0.439
	重畳・表示時間 T_e (sec.)		0.088	0.171	0.088	0.171
可視化時間(sec.)			0.252	0.665	0.250	0.610
可視化性能(fps)			6.10	2.02	6.17	2.01

⑵ フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能

フルボクセル形式の共有データオブジェクト(ボクセル空間サイズ 128^3 で有効ボクセル数が 6.2K、ボクセル空間サイズ 256^3 で有効ボクセル数が 51.1K)の、ボリュームレンダリング法による 2 次元及び立体視表示の可視化処理時間の測定例を表 5-12 に示す。

データは計算機シミュレーション結果の CG 画像オブジェクトであり、それぞれ 5 回の測定の平均値である。

画像重畳・表示処理時間の測定値は、オブジェクトのボクセルデータ形式とボクセル空間サイズには依存せず、表示画面データサイズにのみ依存するので、表 5-10 と同一である。

ボリュームレンダリング法では、全てのボクセル空間のデータを処理して描画を行うので、描画時間は有効ボクセル数ではなく、ボクセル空間サイズに比例する。この測定結果においても、128^3

から 256^3 にボクセル空間サイズが増加するに伴い、描画時間はほぼ 8 倍となり、その傾向を見る事ができる。

表 5-12 フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能例

表示タイプ		2 次元表示	立体視表示	2 次元表示)	立体視表示
ボクセル空間サイズ		128^3		256^3	
有効ボクセル数		6.2 K		51.1 K	
	描画時間 T_c (sec.)	0.214	0.229	1.60	1.85
	転送時間 T_d (sec.)	0.144	0.403	0.198	0.436
	画像生成時間 T_{c+d} (sec.)	0.358	0.632	1.80	2.28
	重畳・表示時間 T_e (sec.)	0.088	0.171	0.088	0.171
可視化時間(sec.)		0.442	0.803	1.888	2.451
可視化性能(fps)		2.79	1.58	0.56	0.44

画像生成処理時間が画像重畳・表示処理時間より長い為、人物立体画像オブジェクトデータと同様に、可視化速度は画像生成時間の逆数($1/T_{c+d}$)により求められる。

(3) サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能

ボクセル空間サイズ 256^3 の、サーフェスボクセル(1D 及び 3D)形式共有データオブジェクトの可視化性能について 1D 形式データにはボリュームレンダリング法を、3D 形式のデータにはポリゴンレンダリング法の描画手法を用いて、2 次元及び立体視表示の測定を行った。測定には、サンプル図形を含めた 3 種類のデータを用いた。

可視化するオブジェクトの有効ボクセル数と描画処理時間 T_c の関係を図 5.23 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は描画処理時間を示す。図中の実線は線型近似線を示す。

有効ボクセル数と描画速度 $1/T_c$ の関係を図 5.24 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は描画速度を示す。図中の曲線は累乗近似線を示す。

それぞれ、図中の 3D は立体視表示を、2D は 2 次元表示を表す。ポリゴンレンダリングは 3D サーフェスデータのポリゴンレンダリング法による描画、ボリュームレンダリングは 1D サーフェスデータのボリュームレンダリング法による描画処理を表す。

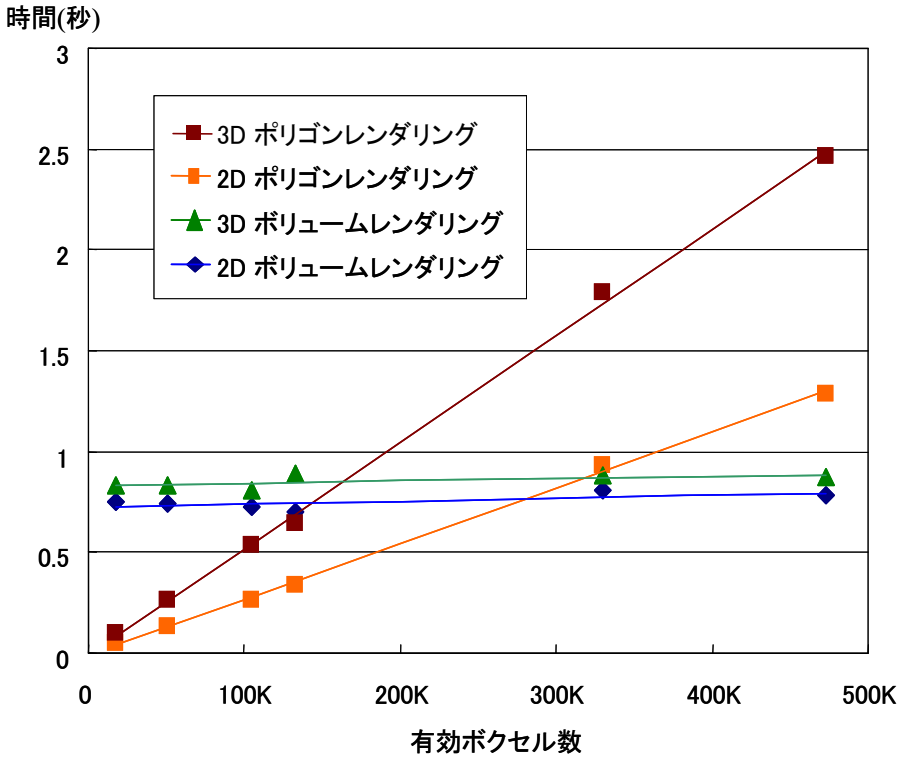


図 5.23 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクト描画時間

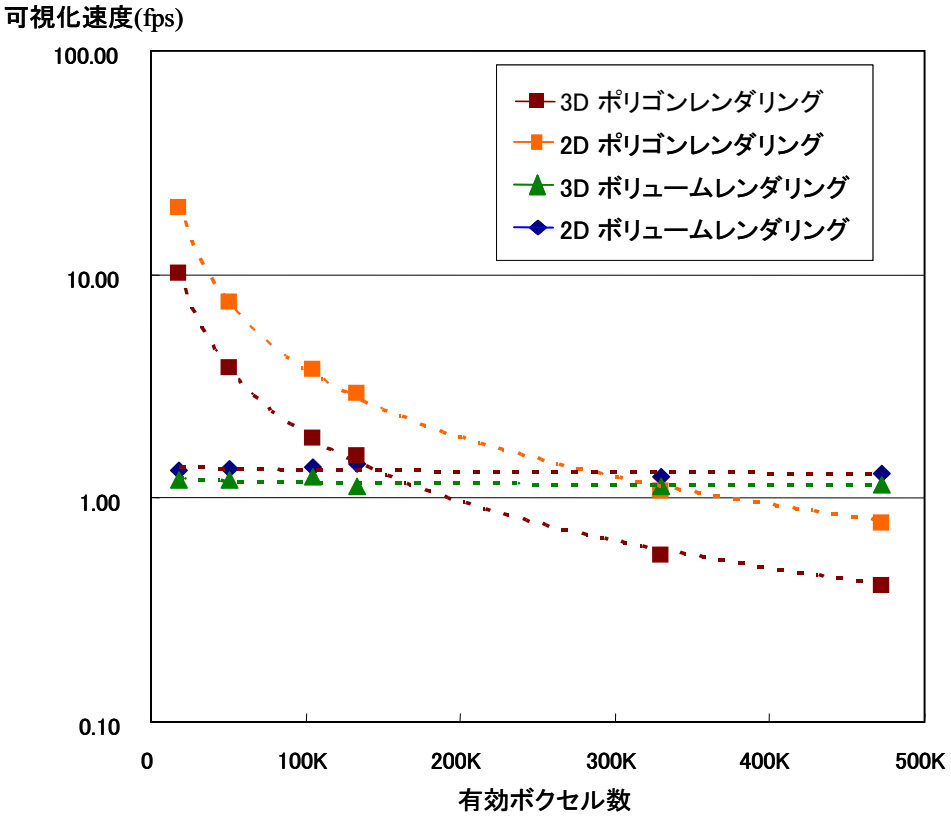


図 5.24 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクト描画速度

ボリュームレンダリング法では、描画処理時間は有効ボクセル数には依存せず一定となり、ポリゴンレンダリング法では、有効ボクセル数に比例して描画時間が増加する。図 5.23 及び図 5.24 に、このレンダリング手法の特性を見る事ができる。ボリュームレンダリング法の描画時間は 2 次元表示では平均 0.751 sec.、立体視表示では平均 0.852 sec. であった。

立体視表示により、ポリゴンレンダリング法では平均 1.95 倍、ボリュームレンダリング法では平均 1.14 倍に描画時間が増加している。

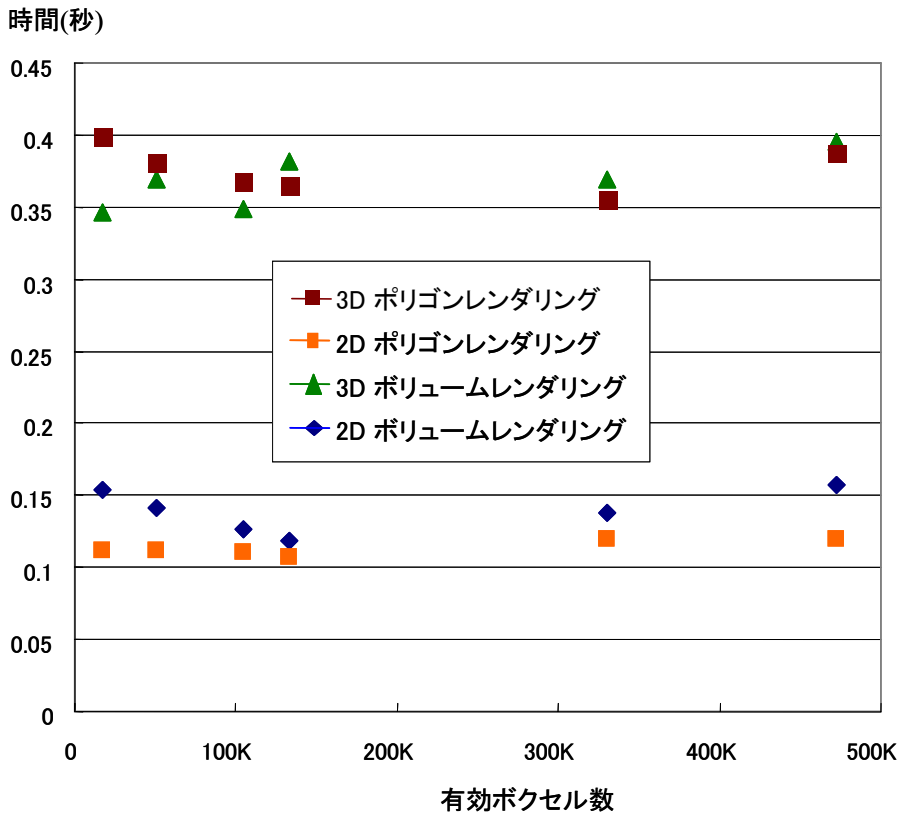


図 5.25 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの表示画面データ転送処理時間

有効ボクセル数と画像重畳・表示処理への表示画面データ転送時間 T_d の関係を図 5.25 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は表示画面データ転送時間を示す。

表示画面データ転送時間は有効ボクセル数や描画手法には依存せずほぼ一定であり、立体視表示では 2 次元表示の平均 2.9 倍の時間を要する。転送する画像データ量は、2 次元表示では画面 1 枚(3MB)、立体視表示(簡易立体視ディスプレイへの出力)では画面 2 枚分(6MB)である。転送速度に換算すると 2 次元表示(3MB データ)のケースで平均 25.0MB/sec.、立体視表示のケースで 16.9 MB/s.が必要となる。1Gbps のネットワークを利用するので、ピーク性能に対する効率はそれぞれ 20.1%と 13.5%に相当する。

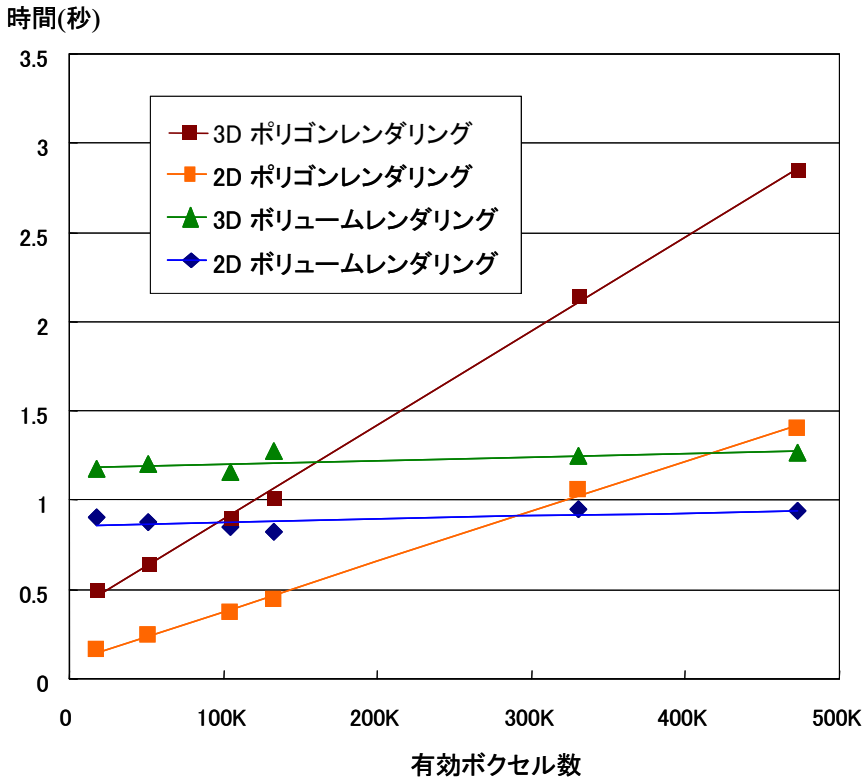


図 5.26 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成処理時間

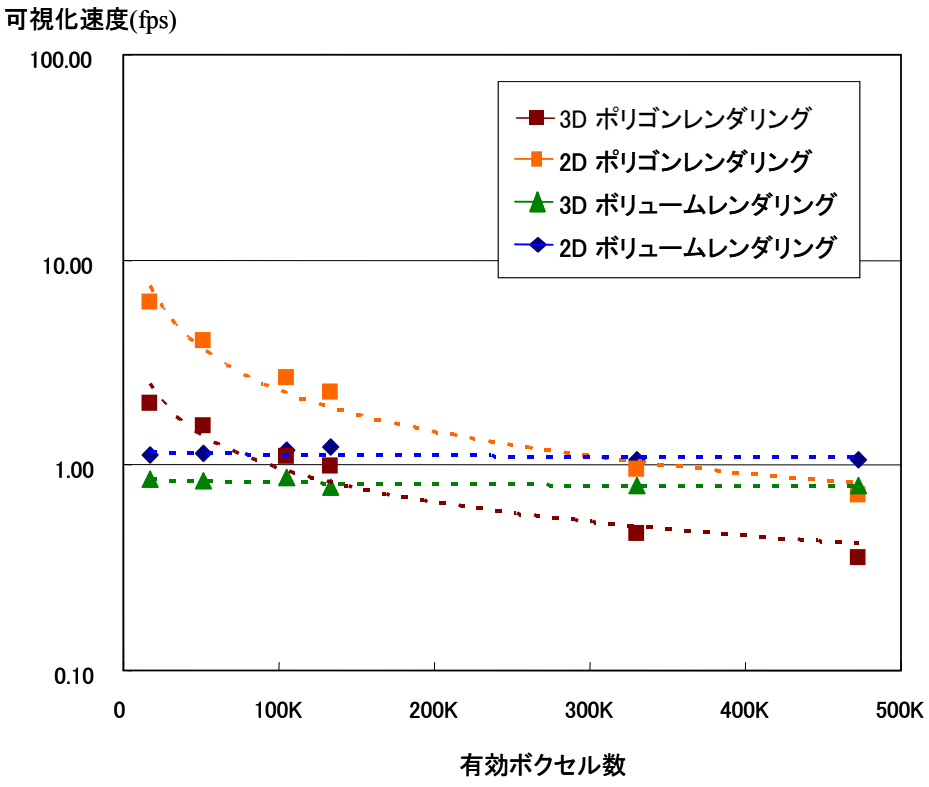


図 5.27 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成速度

有効ボクセル数と画像生成処理時間 T_{c+d} の関係を図 5.26 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は画像生成処理時間を示す。図中の実線は線型近似線を示す。

この画像生成処理時間は図 5.23 の描画時間 T_c に図 5.25 に示される転送時間 T_d を加えたものである。

有効ボクセル数と画像生成速度(fps、画像生成時間の逆数)の関係を図 5.27 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は画像生成速度を示す。図中の曲線は累乗近似線を示す。

ボクセル数が少ないとポリゴンレンダリングが高速であるが、2 次元表示では約 260K 有効ボクセル、立体視表示では約 170K 有効ボクセルでボリュームレンダリング法が高速となる。一般に、サーフェスボクセル形式の人物立体画像オブジェクトデータはボクセル数が少ないので(表 5-7 参照)、ポリゴンレンダリング法が適するが、その他のデータではボクセル数により用いるべき描画法を選択する必要がある事が判る。

表 5-13 に有効ボクセル数がそれぞれ 6.2K と 51.1K のケースの画像生成処理時間と速度を例として示す。

表 5-13 サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの画像生成処理測定結果例

ボクセル空間サイズ	有効ボクセル数.	形式	描画手法	画像生成時間(sec.)/速度 (fps)	
				2 次元表示(2D)	立体視表示(3D)
128^3	6.2 K	サーフェス(1D)	ボリュームレンダリング	0.243 sec. 4.1 fps	0.518 sec. 1.8 fps
		サーフェス(3D)	ポリゴンレンダリング	0.135 sec. 7.4 fps	0.457 sec. 2.2 fps
256^3	51.1 K	サーフェス(1D)	ボリュームレンダリング	0.881 sec. 1.1 fps	1.20 sec. 0.83 fps
		サーフェス(3D)	ポリゴンレンダリング	0.246 sec. 4.1 fps	0.641 sec. 1.6 fps

画像重畳・表示処理時間の測定値は、データタイプ・ボクセル空間サイズなどには依存せず、表示画面データサイズにのみ依存するので、表 5-10 と同一である。

画像生成処理時間が画像重畳・表示処理時間より長い為、人物立体画像オブジェクトデータと同様に可視化速度は、画像生成時間の逆数($1/T_{c+d}$)により求められる。

5.5.5 複数オブジェクト可視化性能測定結果

複数オブジェクト同時表示時の、可視化処理速度の変化を測定した。

人物立体画像オブジェクトと共有データのオブジェクトを同時に表示したケースの測定結果を図 5.28 に示す。5 回の測定の平均値である。

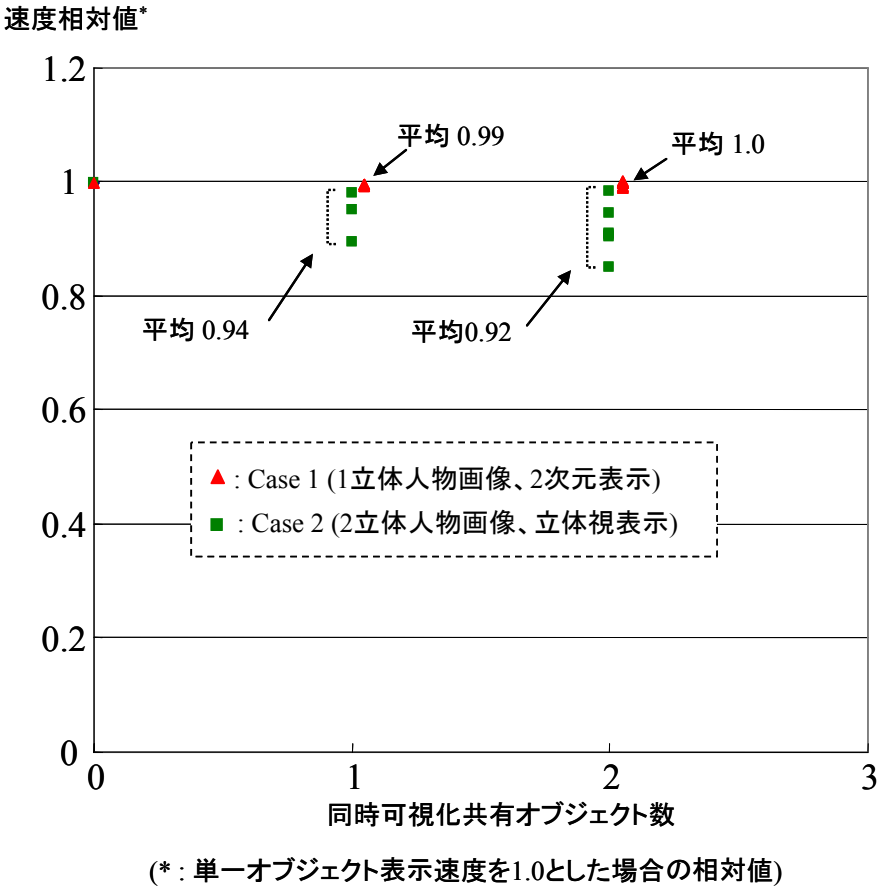


図 5.28 オブジェクト同時表示時の表示速度変化(人物立体画像オブジェクト)

横軸が人物立体画像オブジェクトと同時に表示した共有データのオブジェクトの数、縦軸が人物立体画像オブジェクトの単体表示速度を 1 とした場合の測定結果の相対速度を示す。人物立体画像オブジェクトとしては、3 種類のボクセル空間サイズ 256^3 のデータを、共有データオブジェクトとしては 3 種類のボクセル空間サイズ 256^3 のフルボクセル形式の CG データを用いた。横軸が 0 における図中の点は単独の表示速度(1.0)を示す。

ケース 1 は、同時に表示する共有データオブジェクト数を 1 及び 2 に増やし、人物立体画像オブジェクトデータを 2 次元表示で可視化したケースである。ケース 2 は、二つの人物立体画像オブジェクトデータを同時に可視化する速度を 1 として、表示する共有データオブジェクト数を、1 及び 2 に増やし立体視表示で可視化したケースで、実験システムでは最も負荷が高いと考えられる

ケースである。3 種類の共有データオブジェクト(A、B、C)は、全ての組み合わせで測定を行った(一つの共有データオブジェクトの場合は、A、B、C、二つの共有データオブジェクトの場合は、AA、AB、AC、BB、BC、CC)。

ケース 1 では、同時可視化の影響はほとんど受けず、単独とほぼ同じ可視化速度となった。ケース 2 では、同時に一つの共有データを表示すると、最大で 11%、最小で 2%、平均 6%の性能劣化、同時に二つの共有データを表示すると最大で 15%、最小で 2%、平均 8%の性能劣化が測定された。

複数の共有データオブジェクトのみを 2 次元で同時表示した場合の速度変化の測定結果を図 5.29 に示す。5 回の測定の平均値である。

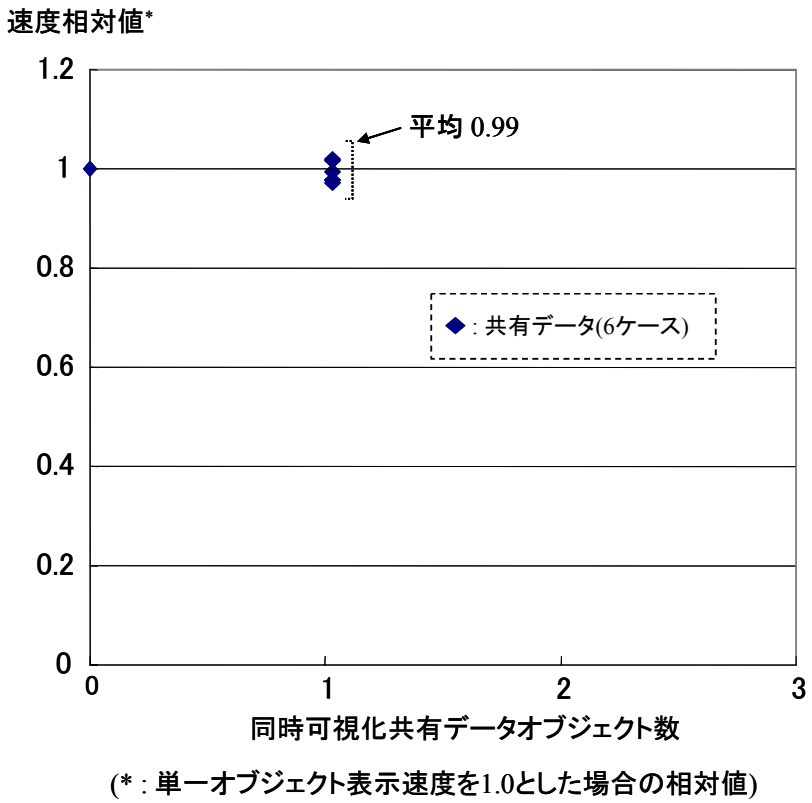


図 5.29 オブジェクト同時表示時の表示速度変化(共有データオブジェクト)

横軸が同時に表示した共有データオブジェクトの数、縦軸が共有データオブジェクトの単体表示速度を 1 とした場合の測定結果の相対速度を示す。

図 5.28 のケースと同じ共有データオブジェクトを用い、図 5.28 のケースと同様に、全ての組み合わせ(6 ケース)の測定を行った。

表示速度変化は最大 1.02、最小 0.98、平均 0.99 であり、ここでは遅れはほとんど見られない。

以上の結果は、ここで、用いたデータサイズ、表示速度の範囲では、VC 手法で実装したオブジェクト毎の分散可視化法により、他のオブジェクトの影響をほとんど受けることなく、それぞれのオブジェクトの表示が可能である事を示している。

5.6 まとめ

本章では、VC 手法を適用した、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発し、医療分野での利用を想定した実験を行った結果を述べた。

開発した実験システムは、通信(ボクセルデータ変換・圧縮、ボクセルデータ・音声データの通信)、仮想会議室内へのオブジェクトの配置(人物立体画像と共有データオブジェクト)、可視化、共有データオブジェクトの操作及びシステム制御の各機能を持ち、3 地点の参加者と二つの共有データオブジェクトを扱う事ができる。

実験では、VizGrid プロジェクトで開発された人物立体画像生成システムと接続し、仮想会議室への人物立体画像オブジェクトと共有データオブジェクト(医療分野での応用を想定した測定データと計算結果 CG データ)の配置を行った。

2 次元ディスプレイによる 2 次元表示と、簡易立体視ディスプレイによる立体視表示を行った。

仮想会議室へのオブジェクトの配置と簡易立体視ディスプレイへの表示により、オブジェクトの相互位置関係の認識実験、画面中の参加者の視線方向の認識(ゲイズアウェアネス)実験、及びポインティングによる共有データオブジェクトへの指示の相互認識の実験を行った。

配置及び視線方向の認識実験では、システムによる仮想会議室へのオブジェクトの配置及び、システムが実現する仮想空間内のオブジェクトの位置関係と視線の認識が参加者に可能であるとの結果を得た。さらに、立体視ではその認識精度が上がる結果を得た。ポインティングによる共有データオブジェクトへの指示については、指示点の左右方向の認識はほぼ可能との結果を得た。

共有データオブジェクトの操作とシステム全体の制御については、一連の実験により、これらの機能の動作を確認した。

各種のオブジェクトデータで性能測定を行い、ボクセルデータ形式変換によるデータ削減効果、可視化性能(単独オブジェクト可視化、複数オブジェクト同時可視化)に関する結果を得た。

データ削減効果の測定実験では、サーフェスボリュームデータ化による大きな削減効果を測定した。人物立体画像オブジェクトデータの平均データ量は、240KB であった。

実験では、画像生成処理(描画処理、表示画面データ転送処理)と画像重畳・表示処理の処理速度を測定した。今回の測定ケースでは、画像重畳・表示処理時間が画像生成処理より短いので、システムの可視化性能は画像生成処理性能となる事が判明した。

人物立体画像オブジェクトデータの可視化性能は、ポリゴンレンダリング法を用いたケースが

高速で、2 次元表示のケースが最大で 6.17 fps の性能、立体視表示のケースで 2.02 fps の性能を得た。画像生成処理の中では、表示画面データ転送処理が支配的であった。

フルボクセル形式の共有データオブジェクトの可視化性能は、ボクセル空間サイズに依存し、空間サイズ 128^3(有効ボクセル数、6.2 K)の 2 次元表示のケースでは 2.79 fps 、空間サイズ 235^3(有効ボクセル数、51.1 K)のケースでは 0.56 fps となった。描画時間が有効ボクセル数にほぼ比例し、有効ボクセル数が多くなると画像生成処理の中では描画処理が支配的であった。

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトの可視化については、ボクセル数により最適な描画方法があるとの結果を得た。2 次元表示では約 260K 有効ボクセル、立体視表示では約 170K 有効ボクセルで、ポリゴンレンダリング法からボリュームレンダリング法へ描画法を切り換える事で、高速な可視化が可能であるとの結果を得た。画像生成処理の中で支配的となる処理も有効ボクセル数により変化する結果を得た。

複数オブジェクト同時表示時の相互干渉による性能低下については、システムとして最も負荷が高いケースの立体視表示時に、最大 15 % の性能低下が見られたにとどまり、今回のオブジェクトデータの範囲では、同時表示の影響が少ないとの結果を得た。

次章では、これらの実験結果を元に、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現性に対する考察を行う。

第6章考察

6.1 はじめに

本研究では、PC ベースのシステム上で、仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現を狙う VC 手法の検討と、実験システムの開発を行った。本章では、実験システムによる実験結果を元に、VC 手法を構成する通信、仮想会議室への配置・可視化、及び共有データオブジェクト操作の各処理について、機能と性能の両面から考察を行う。

6.2 機能面に関する考察

6.2.1 仮想会議室への配置

仮想会議室方式の特徴である、仮想会議室内に自由に人物立体像・共有データオブジェクトを配置でき柔軟な会議構成が可能である点については、図 5.5、図 5.6、及び図 5.7 の画面例の様に、3 カ所間の遠隔会議を想定した仮想会議室内への各オブジェクトの配置を実現した。今回は、3 カ所の会議を想定して評価を行ったが、これは会議構成により変更が可能である。

配置機能の実証の為に、5.4.4 項に記述した、「大きさの異なる二つのオブジェクトの位置を前後に変化させたデータで、被験者によるオブジェクト配置の認識率を測定する実験」を行い、立体視表示では 87 %の配置の認識正答率を得た。これにより、本手法で仮想会議室への配置を行い、これを表示画面で認識可能である点を実証した。すなわち、参加者の位置関係及び参加者と共有データオブジェクトの位置関係の遠隔地間での共有が可能である。

6.2.2 自由な視点からの可視化と視点の動きへの対応

仮想会議室内に配置されたオブジェクトの可視化実験を行い、図 5.7 に見られる様に、VC手法でオブジェクトの任意の視点から立体視可視化が可能である点を実証した。

今回の実験システムでは、視点の動きに対応する機能は実装されていないが、視点情報のリアルタイムな入手が可能であれば、この情報を(3)式に反映する事で対応は可能である。

また、オブジェクト分散化可視化法により、オブジェクト毎に注視点、視線を変化させるなどの高度な可視化の実現も可能である。

6.2.3 立体視対応

立体視可能なデバイスへの対応については、簡易型の立体視装置による立体視を実現した。

これにより、5.4.4－5.4.5 項の実験結果で述べた様に、配置の認識、視線方向の認識にその効果を示し、相互の位置関係の遠隔地間での共有を実証した。共有データのポインティング実験では、その効果は明確には現れなかった。この点は実験方法を含め、今後の検討課題である。

6.2.4 ゲイズアウェアネスと共有データオブジェクトのポインティング

人物立体画像オブジェクトの表示解像度については、実験で用いた 256^3 のボクセル空間サイズであれば、図 5.4 の様に相手がどこを見ているかをほぼ正確に判別できると考えられる。

画面中の参加者の、視線方向の認識(ゲイズアウェアネス及び共有データオブジェクトのポインティングによる相互認識)については、5.4.5 項に記述した、二人の人物像が共有データオブジェクト、相手、及び被験者に視線を向けるデータを用いた認識実験を行った。立体視表示では 94 %の正答率を得、本手法により視線方向の認識が画面上で可能である点を実証した。

共有データオブジェクトのポインティングについては、5.4.6 項で記述した指差し点の定量的評価実験を行った。完全正答率は 46 %であったが、左右の面の位置では 87.3 %の正答率を得ており、共有データオブジェクトの関心のある点のポインティング、すなわち共有データオブジェクトへの指示の相互認識が画面上でほぼ可能である事を実証した。今後は、対象とするオブジェクトの視点との上下配置を変更して、各種の視線における実証を行う必要があると考えられる。

6.2.5 可視化要件の異なるオブジェクトの可視化

仮想空間に配置された、可視化特性の異なる複数の立体オブジェクトを可視化する機能については、データ形式(ボクセル形式)、描画手法(ボリュームレンダリング法、ポリンゴンレンダリング法)、表示要件(動画、静止画、動画の表示速度、解像度、表示方法、可視化パラメータなど)、及びデータサイズの異なる複数のオブジェクトの可視化を実現し、本手法で実現したオブジェクト分散可視化法の有効性を実証した。

6.2.6 最新入出力デバイスの接続とシステム制御

各種のデータの取り込みと最新のデバイスの接続については、形式が単純なフルボクセルデータを通信するプロトコルを開発し、デバイスの進歩が著しい 3 次元データ生成デバイスを、比較的容易に接続できるとともに、実験システムで行った様に、各種の共有データの取り込みも容易となった。

出力デバイスについては、簡易立体視表示デバイスへの対応を行った。可視化処理は表示デバイスに依存する部分が多いが、VC手法で提案したオブジェクト分散可視化法は、高速化や

処理のオブジェクト毎の独立性などの特長を持ち、他の表示デバイスへの適用においても有効な手法と考えられる。

システム制御については、仮想会議の開始から終了までの一連の動作(人物立体画像データ生成・配置・可視化・共有データオブジェクト操作)を確認し、各処理のサイトノードへの分散とその有効性を実証した。

6.3 性能面に関する考察

6.3.1 人物立体画像オブジェクトのデータ量

(1) 表面幾何データ形式とサーフェスボクセル形式のデータ量比較

2.5.1 項で検討した様に、サーフェスボクセル形式を取る人物立体画像オブジェクトデータのデータ量については、一般に用いられる表面幾何データ形式と比較して大きな差が無く、ボクセルデータとして取り扱う事のデメリットが無い点を確認する必要がある。

フルボクセルデータからの変換において、サーフェスボクセル形式ではその表面ボクセルの位置情報と色情報を持つ。表面幾何データでは、その変換においてボクセルデータと同じ解像度で等間隔にメッシュ分割すると考えると、サーフェスボクセル数と同程度の各頂点の位置座標データと色情報を持つことになる。その結果、両者のデータ量はサーフェスボクセル形式と同程度になると考えられる。すなわち、このボクセルデータから表面幾何データへの変換方式のケースではデータ量に大きな差は無く、ボクセル形式として統一的に取り扱う事(ボクセル処理方式)による利点を生かす事ができると考えられる。

表面幾何データへの変換方法には、対象物の変化率を考慮してメッシュサイズを可変としデータサイズを削減するなどの手法もあるが、人物像をできるだけ現実感を保って表現するに、オリジナルのボクセルデータに近いメッシュサイズを取る必要があり、効果は少ないと考えられる。

(2) 分散処理方式と集中処理方式の比較

4.3.1 項で検討した様に、サイト間分散処理法の利点を生かすには、人物立体画像オブジェクトのデータサイズが表示画面データサイズより十分に小さい事が必要となる。

表 5-7 に見られる様に、今回適用したサーフェスボクセルデータへの変換により、フルボクセルデータからの大幅なデータ量削減が可能となり、人物立体画像オブジェクトデータのデータ量は、代表的な例として 240KB であった。解像度 1,024×768 の表示画面データ量は、2 次元表示では 3.1MB、立体視表示では 6.3MB であるので、式(1)、式(2)で算出したサイト数 3、4、5 のケースにおける集中処理方式と分散処理方式におけるネットワーク負荷は、表 6-1 に示す値となる。

ここに見られるように、接続サイト数が数サイトの範囲では、人物立体画像オブジェクトのボクセルデータのサーフェスボクセル化による削減で、ネットワーク負荷は分散処理方式が低く、ネットワーク負荷の点からはサイト間分散処理方式が集中処理方式より優れている点を実証した。

表 6-1 分散処理方式と集中処理方式のネットワーク負荷の比較

ネットワーク負荷*	同時接続サイト数(n)		
	3	4	5
集中処理方式 式(1) Lc = n × (a + v) + b	19.6	26.2	32.7
分散処理方式 式(2) Ld = n × (n − 1) × a + (n − 1) × b	1.44	2.88	13.0

*: 単位は MB、a(人物立体画像オブジェクトデータサイズ) = 240KB、
v(立体視画面データサイズ) = 6.3MB 、b(共有データオブジェクトサイズ) = 0 のケース

6.3.2可視化性能

データ形式(フルボクセル、サーフェスボクセル)、描画手法(ボリュームレンダリング、ポリゴンレンダリング)、及び表示方法(2 次元表示、立体視表示)の異なるオブジェクトの可視化性能を得た(表 5-9-表 5-12、図 5.23-図 5.29)。今回のケースでは画像生成処理が律速となり、可視化性能は画像生成性能と同一であった。

(1) 人物立体画像オブジェクトの可視化性能

人物の表情がほぼ表現できる、有効ボクセル数 17K ポリゴンのオブジェクトにおいて、サーフェスボクセルデータとポリゴンレンダリング法を組み合わせる事で、人物立体画像オブジェクトの 2 次元表示の可視化速度は、6.1 fps(ボクセル空間サイズ 128^3)と 6.2 fps(ボクセル空間サイズ 256^3)を得た。5.4.6 項で記述した、指差しによる指示の定量的評価実験に見られる様に、人物のゆっくりした動作は認識できる性能であり、オブジェクトの操作へのフィードバックが可能であった。しかし、自然なコミュニケーションを行うにはさらなる高速化が必要と考えられる。

可視化時間は画像生成時間(描画処理と表示画面データ転送処理)と画像重畳・表示処理時間の合計値であり、表 5-11 に見られるように表示画面データ転送処理時間が支配的である。

ここでの可視化速度の算出には、多視点カメラによる人物立体像データ生成からボクセルデータ転送の処理時間(図 5.22 ①-②)を考慮していない。データ生成は、単独では 20 fps での生成を実測しており、ボクセルデータ転送は、人物立体画像オブジェクトのデータ量は高々240KB であり、1 Gbps での転送では、25%の転送効率としても、約 8 ms で転送可能と推定され、可視化速度への影響は無いと考えられる。

ボクセル空間サイズ 256^3 で 17K の有効ポリゴンから構成される 2 次元表示では、ポリゴンレンダリング法による描画処理で 20.0 fps の性能 (描画時間 0.05 sec.) であった。残りの処理の高速化によりさらなる高速な人物立体画像オブジェクトの表示の可能性がある事が判明した。

人物の動作の結果が表示に反映されるまでの時間が、遅延時間としてコミュニケーションに影響を及ぼす。ここでは、可視化時間(各処理の合計時間)が遅延時間となる。今回のケースでは、遅延時間は 2 次元表示で 250 ms、立体視表示で 650 ms 程度となった。人物立体像データ生成による遅延(50 ms/一枚)を考慮すると、それぞれ、300 ms、700 ms 程度の遅延時間と考えられる。2.3.2 項で述べた様に 400 ms が許容範囲と考えると、2 次元表示では、ほぼこの範囲内であるが、立体視表示における、全体の処理時間削減の検討が必要である。

(2) フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能

ボリュームレンダリング法の描画による、フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化速度は、2 次元表示において、ボクセル空間サイズ 128^3(有効ボクセル数 6.2 K)で 2.8 fps、ボクセル空間サイズ 256^3(有効ボクセル数 51.1K)で 0.56 fps、立体視表示において、それぞれ 1.6 fps、0.44 fps を実現した。

立体視表示においては、平均 1.14 倍に描画時間が増加する結果を得た(表 5-12)。ボリュームレンダリング法では、最初に、描画する 3 次元のテクスチャデータをグラフィックカードで処理し、その後、同じテクスチャデータを利用して二つの視点からの映像を描画する為、描画時間は倍よりも短くなる事に起因すると考えられる。表示画面データ転送時間は、平均 2.5 倍の増加を測定した。転送すべきデータ量は 2 倍であり、この差の原因としては、データ転送プロトコルのオーバヘッドなどが考えられるが、今後の検討が必要である。

現在の可視化速度では滑らかな動画表現は難しい。必ずしも人物立体画像オブジェクトと同程度の可視化速度は、必要でないと考えられるが、各処理のさらなる高速化検討が必要である。

今回の実験では、共有データは既に画像生成を行う計算機にあるとして測定を行ったが、可視化性能としては、データ作成ノードからのボクセルデータ転送時間(図 5.22 ①-②)も考慮する必要がある。

共有データオブジェクトの操作が表示に反映されるまでの時間(反応速度)は、可視化時間(各処理の合計時間)となる。今回のケースでは、有効ボクセル数 6.2 K のオブジェクトの立体視のケースで 800 ms、有効ボクセル数 51.1 K の立体視のケースで、2.45 sec.である。滑らかな操作の為には、可視化処理のさらなる各処理の高速化が必要と考えられる。

(3) サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトの可視化性能

サーフェスボクセルデータでは、ボクセル空間サイズを固定すると、ボリュームレンダリング法でほぼ一定の描画速度、ポリゴンレンダリング法で有効ボクセル数に反比例する描画速度を得た

(図 5.27)。これは、ボリュームレンダリング法では、可視化を行う空間を表示対象データの有無に関わらず描画を行うので、有効ボクセル数には依存せずほぼ一定の処理時間となり、ポリゴンレンダリング法では、対象ボクセル空間内の有効ボクセルのみをポリゴン化し描画するので、描画速度は有効ボクセル数に反比例して低下することに起因すると考えられる。この結果、オブジェクトの有効ボクセル数により適用すべき描画手法の選択が必要となる。2 次元表示では、有効ボクセル数 約 260K ボクセル、立体視表示では、有効ボクセル数 約 170K ボクセルで描画手法を切り換える事で最適な描画法の選択が可能となる事が判明した。

立体視表示においては、ポリゴンレンダリング法では平均 1.95 倍に描画時間が増加する結果を得た (図 5.24)。これはポリゴンレンダリング法では視点の異なる 2 枚の画像をそれぞれ作成する事に起因すると考えられる。ボリュームレンダリング法では平均 1.14 倍に描画時間が増加している。これはフルボクセル形式共有データオブジェクトの考察で述べた様にグラフィックカード内の処理の違いによると考えられる。表示画面データ転送時間は平均 2.9 倍の増加を測定した(図 5.25)。フルボクセル形式共有データオブジェクトの考察で述べたと同様に、転送すべきデータ量は 2 倍であり、この差の原因としては、データ転送プロトコルのオーバヘッドなどが考えられるが、今後さらに検討が必要である。

現在の可視化速度では、滑らかな動画表現は難しい。フルボクセル形式共有データオブジェクトと同様に、必ずしも人物立体画像オブジェクトと同程度の可視化速度は必要ではないと考えられるが、各処理のさらなる高速化の検討が必要である。また、フルボクセル形式共有データオブジェクトと同様に可視化性能としては、データの作成ノードからの転送時間(図 5.22 ①-②)も考慮する必要がある

遅延時間についても、フルボクセル形式の共有データオブジェクトと同様に、全体の処理時間削減の検討が必要である。

(4) 複数オブジェクト可視化性能

複数オブジェクト表示時の可視化速度の変化については、図 5.28 に示す様に、一つの人物立体画像オブジェクトと二つの共有データを 2 次元表示で可視化するケース 1 では、2 次元表示ではその影響はほとんどみられなかった。実験システムで最も負荷の高いと考えられる、二つの人物立体画像オブジェクトと二つの共有データオブジェクトを立体視表示するケース 2 では、表示オブジェクト数が増加すると可視化速度の低下が見られるが、その範囲は 1 共有データオブジェクト表示時に平均 6%、2 共有データオブジェクト同時表示時に平均 8% であった。また、図 5.29

に示す共有データオブジェクトのみの同時表示においても、二つのデータを表示する範囲では、ほとんど性能劣化が見られない事を実証した。今回の手法により、他のオブジェクトの表示の影響を軽減し、可視化速度を上げたい人物立体画像オブジェクトの高速な表示が可能である事を実証した。

描画処理は各オブジェクトで完全に独立に行っており、さらに画像重畳・表示処理はオブジェクトの数に依存せず行っているので、ここで見られた性能低下は表示画面データ転送処理で発生したものと考えられる。表示画面データサイズは、2 次元表示で 3.1MB であり、10fps で 3 個のオブジェクトを同時に表示するには 93MB/s.の性能が必要となる。立体視表示では、転送量が倍となる。実験システムでは、画像生成処理と画像重畳・表示処理間のネットワーク速度は 1Gbps であり、このネットワーク転送の輻輳による性能低下が考えられ、現状のままでは、大幅な表示オブジェクト数の増加は難しいと考えられる。また、重畳・表示 PC 側のデータ格納処理における処理のぶつかりによる処理時間増加も考えられる。すなわち、前述の単体オブジェクトの表示と同様に表示画面データ転送処理(図 5.22 ④-⑤)の高速化が課題である。

(5) サイト間分散処理とオブジェクト分散可視化の効果

サイト間分散処理とオブジェクト分散可視化処理の効果による本手法の有効性を考察する。

サイト間分散処理では、一カ所で全サイト分の可視化を行う場合と比較して、可視化スループット時間は 1/(サイト数)となる。また、ボクセルデータの転送時間と表示画面データ転送時間は 6.3.1 項で示す様に、サイト間分散処理法が高速であり、本方式により、システム全体として、1/(サイト数)以上のスループット性能を実現した。

オブジェクト分散可視化処理では、例として描画処理のコストが高いケース(ボクセル空間サイズ 256^3 のフルボクセル形式 CG データの立体視可視化で描画処理 ： 1.85 sec.、転送時間 ： 0.436 sec.、画像生成時間 ：2.28 sec.、画像生成速度 ：0.44 fps) を考える。4 オブジェクトの描画を一台の PC で行うとすると、転送処理は不要となるが、4 オブジェクトを順に描画して表示するので、可視化時間は 7.41 sec. (1.85 sec. × 4) となる。転送のオーバヘッドを考慮してもスループット時間を 1/3.23 に短縮している。

すなわち、サイト間分散処理とオブジェクト分散可視化処理の効果により、3 サイト間の会議のケースでは可視化スループット時間を 1/9.7 に短縮している。

6.3.3 可視化性能モデル

6.3.2 項で考察した様に、人物立体画像オブジェクト及び共有データオブジェクトの表示では、さらなる高速化への検討が必要である。本項では、これまでの実験により得られたデータにより、人物立体画像オブジェクト、フルボクセル形式共有データオブジェクト、及びサーフェスボクセル形式共有データオブジェクトそれぞれに対する可視化性能モデルを構築し、これを元にさらなる高速化手法について検討を行う。

(1) 可視化処理のデータの流れと全体の考え方

図 6.1 に、本手法の処理とデータの流れを再掲する。

ここで、①は多視点カメラからのデータの取り込み、②は人物立体画像データ及び共有データのネットワーク転送、③は画像生成処理の描画処理、④は同じく表示画面データ転送処理、⑤は表示画面データのネットワーク転送、⑥は表示画面データの重畳・表示を表し、それぞれの時間を、T_a：ボクセル生成、T_b：ボクセル転送、T_c：描画、T_d：表示画面データ転送、T_e：重畳・表示 の単位で議論する。

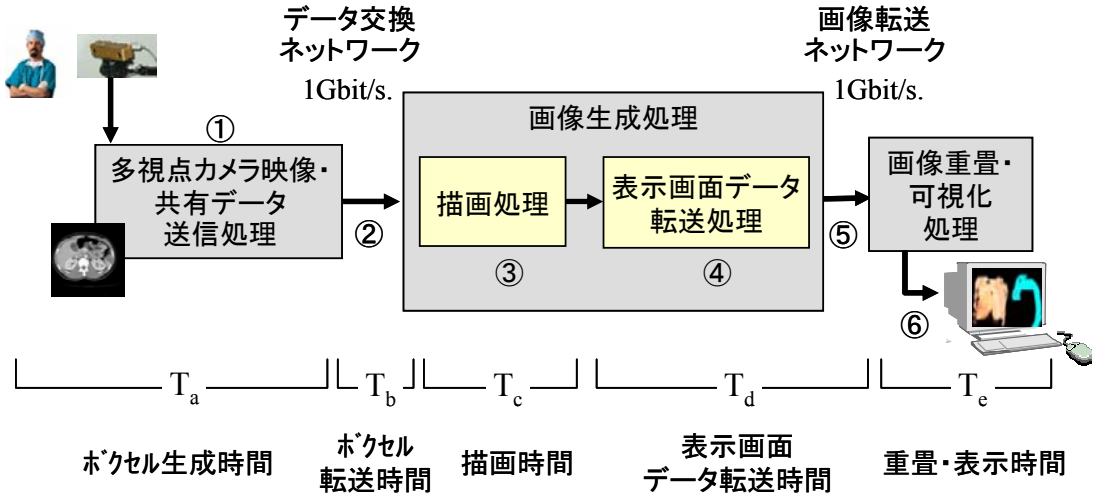


図 6.1 可視化処理とデータの流れ

以下では、次の考え方で検討を進める。

- 5.5.3 項で述べた様に、①、②、(③+④+⑤)、⑥の単位で処理はパイプライン化されているため、システムとしての可視化速度は、それぞれの単位の処理時間の逆数の最小値 $\min[\ 1/T_a,\ 1/T_b,\ 1/T_{(c+d)},\ 1/T_e\ ]$ となる。現在、描画と転送処理はパイプライン処理化されていないが、これをパイプライン処理化する事に実装上の障害はないので、以下のモデ

ル化ではこれを前提とする。この場合、システム可視化速度は $\min[1/T_a, 1/T_b, 1/T_c, 1/T_d, 1/T_e]$ となる。

- 人物立体画像オブジェクトは、サーフェスボクセル形式、共有データオブジェクトはフルボクセル形式又はサーフェスボクセル形式として取り扱う。
- 5.5.5 項で議論した複数オブジェクト表示時の性能劣化は、現状のオブジェクト数の範囲では影響が小さいと考え、これを考慮しない。

⑵ システム全体の可視化時間と可視化速度

図 6.1、及び上記の考え方により性能モデルを検討する。

一つのオブジェクトの可視化時間(T)、すなわち新しいオブジェクトが表示されるまでの遅延時間は次式で表される。

$$T = T_a + T_b + T_{(c+d)} + T_e \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (4)$$

ここで　T_a：ボクセルデータ生成時間

T_b：ボクセルデータネットワーク転送時間

$T_{(c+d)}$：画像生成時間(画像描画時間 + 表示画面データ転送時間)

T_e：画像重畳・表示処理時間

システムとしての可視化速度(V)は以下の式で表される。

$$V = \min[\ 1/T_a,\ \ 1/T_b,\ \ 1/T_c,\ \ 1/T_d\ ,\ \ 1/T_e] \cdots\cdots\cdots\cdots (5)$$

検討にあたって、ネットワーク性能に次の仮定を置く。

- 実験システムで用いた 1Gbps のネットワークを利用する。
- 転送時間を算出する実効ネットワーク性能(S)は、転送効率 50%(62.5MB/sec.)とし、同時転送時の性能低下は考えない。

⑶ 人物立体画像オブジェクトの性能モデル

サーフェスボクセル形式の人物立体画像オブジェクトデータ可視化における、(4)及び(5)式のパラメータの検討を行う。

[T_a：ボクセルデータ生成時間]

本実験で用いた、ステレオマッチング法によるボクセル生成法で検討する。表 5-11 に示す様

に描画性能では 20 fps を実測した事から、生成速度は 20 fps 以上の性能を持つと推定されるが、ここでは、1 枚の画像生成に 0.05 sec.を要するものとする。

$$T_a = 0.05 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (6)$$

[T_b： ボクセルデータネットワーク転送時間]

サーフェスボクセル形式の人物立体画像オブジェクトデータは、今回の実験では平均 240KB のデータサイズであり、このデータサイズとネットワーク性能(S)より、ボクセルデータネットワーク転送時間は以下とする。

$$T_b = 240 \text{ KB} / \text{S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (7)$$

[$T_{(c+d)}$： 画像生成時間(T_c画像描画時間 + T_d表示画面データ転送時間)]

サーフェスボクセル形式のボクセルデータの描画時間は、有効ボクセル数に依存する。人物立体画像オブジェクトデータでは、有効ボクセル数がたかだか 20K ボクセル程度であるので、描画手法としてはポリゴンレンダリング法を用いる。図 5.23 に示すポリゴンレンダリング法の描画時間グラフの比例近似曲線より、描画時間を求める。

2 次元表示

$$T_c = 3\times10^{-6} N_{ev} - 0.0115 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (8)$$

立体視表示

$$T_c = 5\times10^{-6} N_{ev} - 0.0121 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (9)$$

ここで　　N_{ev}： 有効ボクセル数

表示画面データ転送時間は図 5.25 より、平均値を取り以下の値とする。

2 次元表示

$$T_d = 0.114 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (10)$$

立体視表示

$$T_d = 0.369 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (11)$$

よって、それぞれの画像生成時間は、以下の通りとなる。

2 次元表示

$$T_{c+d} = 3\times10^{-6} N_{ev} + 0.1025 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (12)$$

立体視表示

$$T_{c+d} = 5\times10^{-6} N_{ev} + 0.357 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (13)$$

[T_e： 重畳・表示処理時間]

重畳・処理時間は画面データサイズにのみ依存し、その処理時間は表 5-10 に示す測定値が得られている。

2 次元表示

$$T_e = 0.0881 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (14)$$

立体視表示

$$T_e = 0.171 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (15)$$

表 6-2 に、ボクセル空間サイズ 256^3、有効ボクセル数 17K ボクセルの人物立体画像オブジェクトに対して、本モデルを適用した可視化時間・可視化速度を例として示す。表中の網駆け部分は処理速度として律速となる処理部分を示し、この処理速度が、システムとしての可視化速度となる(以下の表も同様)。

表 6-2 人物立体画像オブジェクトデータのモデル可視化時間と可視化速度例

表示方法	2 次元表示		立体視表示	
	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)
ボクセル生成(T_a)	0.05	20.0	0.05	20.0
ボクセル転送(T_b)	0.0077	130.0	0.0077	130.0
描画(T_c)	0.0395	25.3	0.0729	13.7
画面転送(T_d)	0.114	8.75	0.369	2.71
重畳・表示(T_e)	0.088	11.4	0.171	5.85
全体*	0.299	8.75	0.670	2.71

＊： T = 一つのオブジェクト可視化時間 V = システムとしての可視化速度(fps)

(4) フルボクセル形式の共有データオブジェクト性能モデル

フルボクセル形式の共有データオブジェクトの可視化における、(4)及び(5)式のパラメータの検討を行う。

[T_a： ボクセルデータ生成時間]

共有データオブジェクトは予め生成されている事を想定するので、ここではボクセルデータ生成時間は考慮しない。

$$T_a = 0.0 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (16)$$

[T_b： ボクセルデータネットワーク転送時間]

フルボクセル形式のデータ量は、ボクセル空間サイズに依存する。本検討では、負荷の高いケースとして256^3のボクセル空間サイズと、表 4-1で示す各ボクセルあたりの色情報が4バイト形式のデータを仮定する。データサイズは67.1 MB ($256^3 \times 4$ Byte)となり、ボクセルデータネットワーク転送時間は以下の式で表されるものとする。

$$T_b = 67.1 \text{ MB / S} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (17)$$

[$T_{(c+d)}$： 画像生成時間(T_c画像描画時間 + T_d表示画面データ転送時間)]

フルボクセル形式の描画時間は、ボクセル空間サイズに比例する。ここでは 256^3 のボクセル空間を仮定するので、描画時間は表 5-12より、以下の値とする。

2次元表示

$$T_c = 1.60 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (18)$$

立体視表示

$$T_c = 1.85 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (19)$$

表示画面データ転送時間も同様に表 5-12より、以下の値とする。

2次元表示

$$T_d = 0.198 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (20)$$

立体視表示

$$T_d = 0.436 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (21)$$

よってそれぞれの画像生成時間は、以下の通りとなる。

2次元表示

$$T_{c+d} = 1{,}80 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (22)$$

立体視表示

$$T_{c+d} = 2.29 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (23)$$

[T_e： 重畳・表示処理時間]

重畳・処理時間は、人物立体画像オブジェクトデータと同様に、以下の値となる。

2 次元表示

$$T_e = 0.0881 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (24)$$

立体視表示

$$T_e = 0.171 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (25)$$

表 6-3 に、本モデルを適用したボクセル空間サイズ 256^3 のフルボクセル形式のオブジェクトの可視化時間・可視化速度を例として示す。

表 6-3 フルボクセル形式共有データオブジェクトのモデル可視化時間と可視化速度例

表示方法	2 次元表示		立体視表示	
	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)
ボクセル生成(T_a)	0.0	0.0	0.0	0.0
ボクセル転送(T_b)	1.07	0.931	1.07	0.931
描画(T_c)	1.60	0.625	1.85	0.540
画面転送(T_d)	0.198	5.05	0.439	2.28
重畳・表示(T_e)	0.088	11.4	0.171	5.85
全体*	2.96	0.625	3.54	0.540

＊： T = 一つのオブジェクト可視化時間 V = システムとしての可視化速度(fps)

(5) サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクト性能モデル

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトにおける、(4)及び(5)式のパラメータの検討を行う。

[T_a： ボクセルデータ生成時間]

共有データオブジェクトは、予め生成されている事を想定するので、ここではボクセルデータ生成時間は考慮しない。

$$T_a = 0.0 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (26)$$

[T_b： ボクセルデータネットワーク転送時間]

サーフェスボクセル形式のボクセルデータの転送時間は、有効ボクセル数に依存する。ここでは負荷の高いケースとして、表 4-3 に示す有効ボクセルあたり 10 Byte のデータサイズとし、ボクセルデータネットワーク転送時間は以下の式で表されるものとする。

$$T_b = N_{ev} \times 10 / S \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (27)$$

[$T_{(c+d)}$： 画像生成時間(T_c画像描画時間 + T_d表示画面データ転送時間)]

人物立体画像オブジェクトのケースでは、有効ボクセル数が高々20K であるので、描画手法はポリゴンレンダリング法が高速であるが、共有データオブジェクトなどの有効ボクセル数が多いオブジェクトでは、図 5.23 に示す様に有効ボクセル数による描画手法の切り替えが必要である。

図 5.23 の両描画手法の近似直線の交点情報より、描画時間は以下の式で表わされる。

2 次元表示

$N_{ev} \leqq 262K$

$$T_c = 3\times10^{-6} N_{ev} - 0.0115 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (28)$$

$N_{ev} > 262K$

$$T_c = 2\times10^{-7} N_{ev} + 0.723 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (29)$$

立体視表示

$N_{ev} \leqq 169K$

$$T_c = 5\times10^{-6} N_{ev} - 0.0121 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (30)$$

$N_{ev} > 169K$

$$T_c = 1\times10^{-7} N_{ev} + 0.831 \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (31)$$

表示画面データ転送時間は図 5.25 より、平均値を求め以下の値とする。

2 次元表示

$$T_d = 0.114 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (32)$$

立体視表示

$$T_d = 0.369 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (33)$$

よってそれぞれの画像生成時間は、以下の式で表わされる。

2 次元表示

$N_{ev} \leqq 262K$

$$T_{c+d} = 3\times10^{-6} N_{ev} + 0.103 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (34)$$

$N_{ev} > 262K$

$$T_{+d} = 2\times10^{-7} N_{ev} + 0.837 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (35)$$

立体視表示

$N_{ev} \leqq 169K$

$$T_{c+d} = 5\times10^{-6} N_{ev} + 0.357 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (36)$$

$N_{ev} > 169K$

$$T_{c+d} = 1\times10^{-7} N_{ev} + 1.20 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (37)$$

[T_e： 重畳・表示処理時間]

重畳・処理時間は、人物立体画像オブジェクトデータと同様に、以下の値となる。

2 次元表示

$$T_e = 0.0881 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (38)$$

立体視表示

$$T_e = 0.171 \text{ sec.} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (39)$$

本モデルを適用したオブジェクトの可視化速度(V)を図 6.2 に示す。

ここでは、2 次元表示と立体視表示のケースについて、可視化速度を有効ボクセル数の関数として示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は可視化速度を示す。図中の実線は計算を行なった有効ボクセル数に対応する可視化速度の点を結んだものである。

有効ボクセル数が少ない範囲では、有効ボクセル数に依存しない表示画面データ転送処理が最も時間を要するので、可視化速度はこれに律速される。有効ボクセル数が増加すると描画速度が律速となり、さらに、2 次元表示では有効ボクセル数 262K で描画方式がボリュームレンダ

リング法に切り替わり、可視化速度はほぼ一定値となる。立体視表示では有効ボクセル数 169K で描画手法が切り替わる。

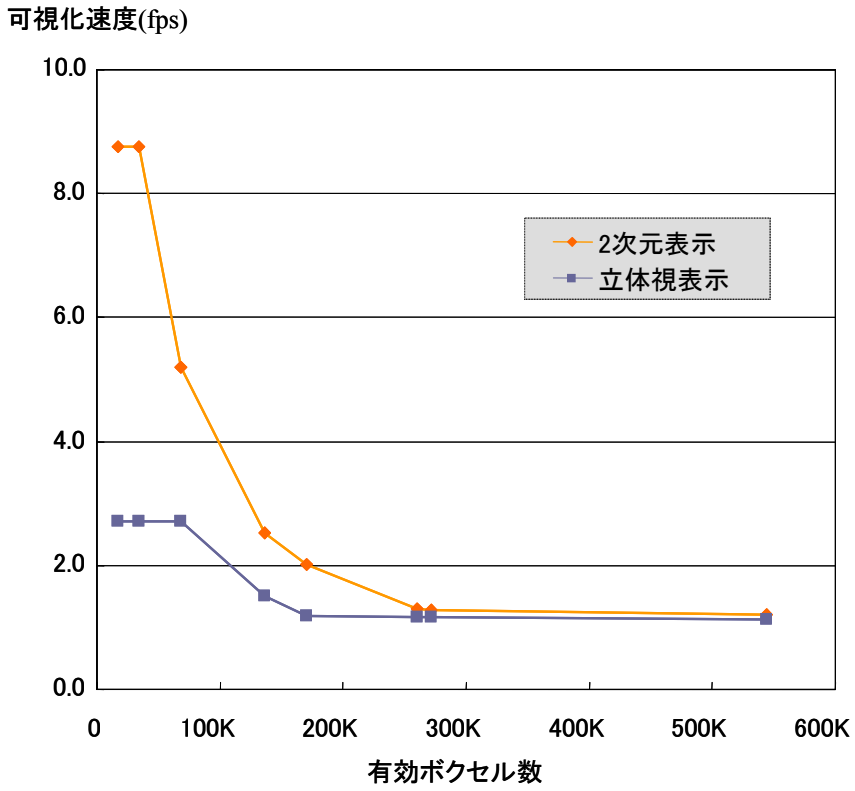


図 6.2 サーフェスボクセル形式オブジェクトの可視化速度モデル

6.3.4 可視化処理の高速化検討

6.3.2 項で述べた様に、実験システムでは人物立体画像オブジェクトにおいて、6.1 fps(ボクセル空間サイズ 128^3)、6.2 fps(ボクセル空間サイズ 256^3)、フルボクセル形式の共有データオブジェクトにおいて、ボクセル空間サイズ 128^3 で 2.8 fps、ボクセル空間サイズ 256^3 では 1.8 fps の可視化速度を得たが、自然なコミュニケーションや自然な応答速度の実現の為には、さらなる高速化が必要である。

以下では、6.3.3 項で検討した性能モデルの(4)式の各処理時間の短縮方法を検討する。

(1) 各処理の高速化検討

(T_a：ボクセルデータ生成)

ステレオマッチング法による現行の人物立体画像生成システム(図 6.1①)は、表 5-11 に示す様に描画性能では 20 fps を実測した事から、生成速度は 20 fps 以上の性能を持つと推定される。多視点カメラからの 3 次元映像生成については、研究開発が盛んに行われており、今後さらに高速化が期待できると考えられる。

(T_b：ボクセルデータのネットワーク転送)

ボクセルデータのネットワーク転送時間の短縮には、ネットワーク通信速度の高速化と転送時のデータ削減を検討する必要がある。

ネットワーク通信速度の高速化については、使用した 1Gbps のネットワークより高速な 10Gbps ネットワークの利用や、ボクセルデータを分割し複数のネットワークを用いて並列に送信するプロトコル[59]の実装などの対応が考えられる。

ボクセルデータ転送時のデータ削減については、表 5-7 に示す様にサーフェスボクセル化により大幅なデータ削減を行っているが、表 6-3 や(23)式に見られる様に、フルボクセルデータや有効ボクセル数の多いサーフェスボクセルデータでは、さらなる削減の検討が必要である。削減には通信プロトコルの下位層でのデータレベルでの削減も考えられるが、これはネットワークの実装に依存するところが大きいので、以下ではアプリ層で対応できる手法を検討する。

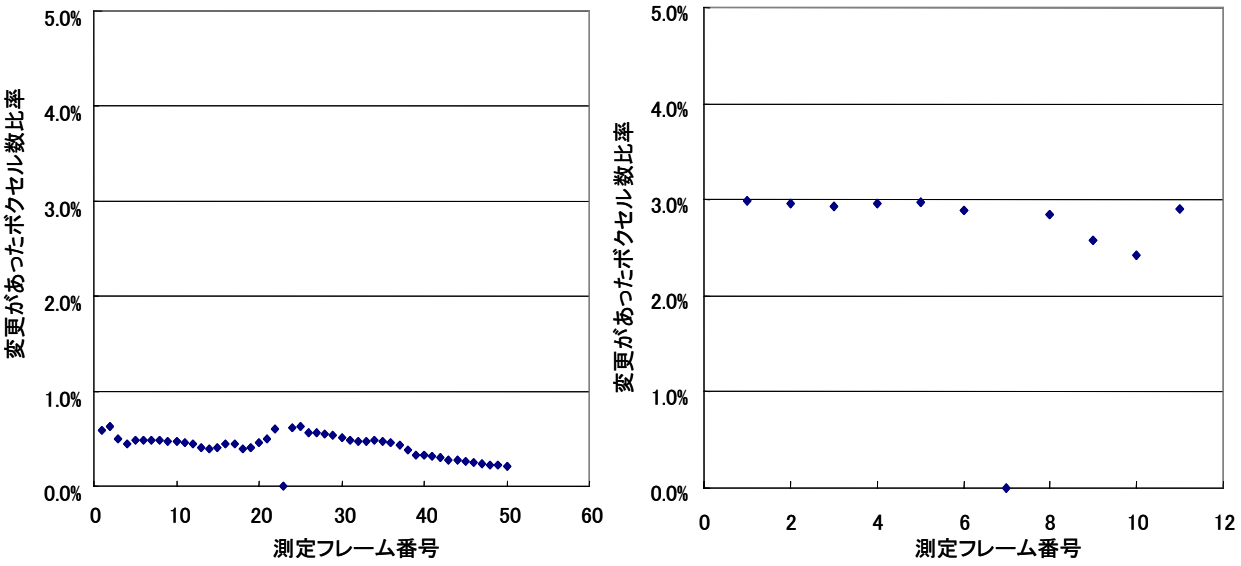
ビデオデータなどの 2 次元画像データ量の削減については、各種の手法が提案されているが、ここで取り扱うデータは 3 次元データであり、これらの適用は難しい。本論文ではボクセルデータの変化分を転送する手法の検討を行う。

ボクセルデータの変化分のみを転送する手法による、ボクセルデータネットワーク転送時間の短縮の可能性を検討する為に、フルボクセル形式共有データと人物立体画像オブジェクト及び

サンプル立体図形によるサーフェスボクセルデータにおける、各フレーム間でのデータ変化度を測定した。

ボクセル空間サイズ 128^3 と 256^3 の CG 画像のフルボクセルデータにおけるデータの変化率測定結果を図 6.3 に示す。横軸は各フレーム番号、縦軸は一つ前のフレームから変化があったボクセルの数の全ボクセル数に対する比率である。

フルボクセルデータは表 4-1 に示す様にボクセル空間全体を連続して格納しており、同じ順番のデータの比較で変化度を測定する。ボクセル空間サイズ 128^3 のデータでは 50 フレームの間で、ボクセル空間サイズ 256^3 のデータでは 11 フレームの間、直前のフレームとの変化度を測定した。図から明らかな様に、データ間の変化度は少なく、ボクセル空間サイズ 128^3 のデータでは平均 0.42 %、ボクセル空間サイズ 256^3 のデータでは平均 2.59 %の変化率であった。



(a) 128^3 フルボクセルのデータ　　(b) 256^3 フルボクセルのデータ

図 6.3 フルボクセルデータフレーム間データ変化率測定結果

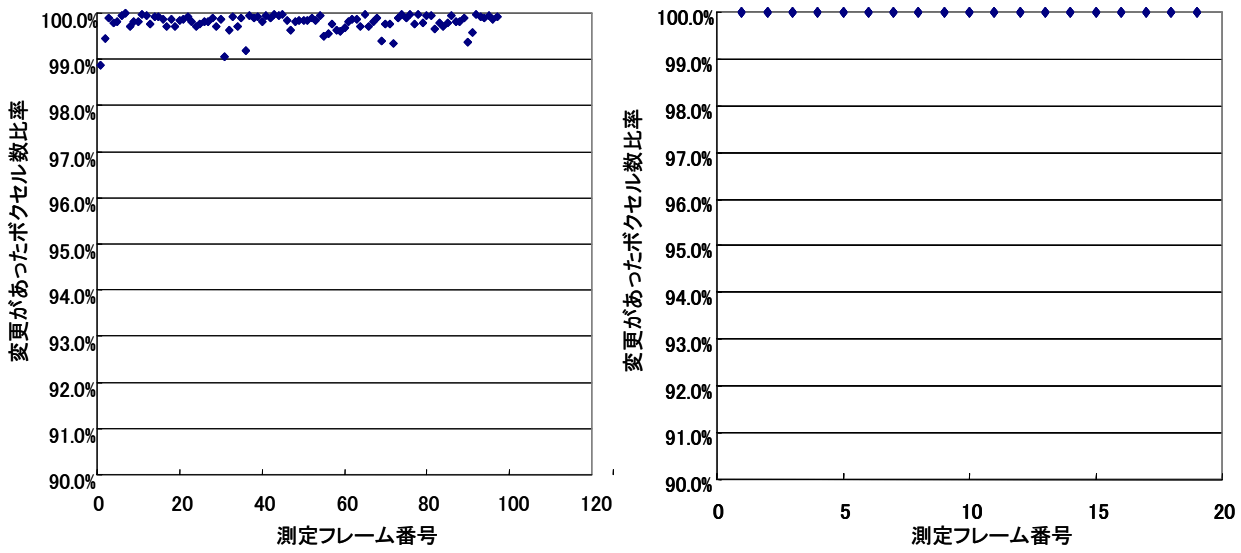
サーフェスボクセルデータでは、表 4-3 に示す様に、ボクセルの位置情報とそのボクセルの色情報がペアで格納されており、その変化率測定はフルボクセル形式の様な単純なデータ一致では行えない。フルボクセル形式に変換後、比較を行う必要がある。以下のサーフェスボクセル形式データの変化率比較ではこの方法をとった。

表 5-11 に示すボクセル空間サイズ 128^3 と 256^3 のサーフェスボクセル形式(3D)の、人物立体画像オブジェクトデータにおける変化率測定結果を図 6.4 に示す。横軸は各フレーム番号、縦軸は一つ前のフレームから変化があったボクセルの数の全ボクセル数に対する比率である。それぞれ

の有効ボクセル数は 17.8K、17.7K である。

ボクセル空間サイズ 128^3 のデータでは 97 フレームの間で、ボクセル空間サイズ 256^3 のデータでは 19 フレームの間で、直前のフレームとの変化度を測定した。図から明らかな様に、データ間の変化度は大きく、ボクセル空間サイズ 128^3 のデータでは平均 99.8 %の、ボクセル空間サイズ 256^3 のデータでは 100 %の変化度であった。

人物立体画像オブジェクトは 40 cm の上半身を撮影した場合、ボクセル空間サイズ 256^3 では 1 ボクセルは実長 1.6 mm 程度を表現する。動きのある人物が対象であり、1.6 mm 程度の解像度であると、ほんの少しの動きであってもボクセルの動きの発生、またその中での色情報の変化がおこると考えられる。これは解像度の低い 128^3 のケースでは、変化率が少し低下した事からも推定される。これらの理由により、人物立体画像オブジェクトデータの変化率が高いと考えられる。



(a) 128^3 サーフェス人物画像のデータ　　(b) 256^3 サーフェス人物画像のデータ

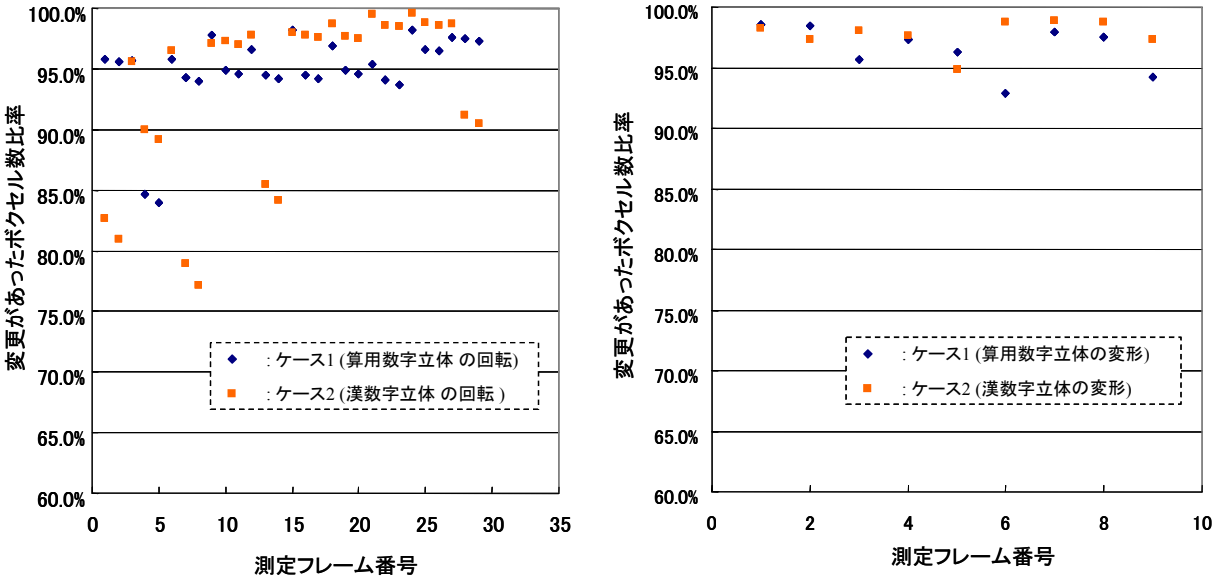
図 6.4 人物立体画像オブジェクトフレーム間データ変化率測定結果

立体文字図形サンプルデータを用いた、サーフェスボクセルデータの変化率測定結果を図 6.5 に示す。横軸は各フレーム番号、縦軸は一つ前のフレームから変化があったボクセルの数の全ボクセル数に対する比率である。

同一の色情報を持つボクセル空間サイズ 256^3 の立体文字図形(数字及び漢字の形をした立体図形)を、回転させたケース(10 種類の数字・漢数字を 30° ステップで回転)と文字変化させたケース(零から壱 などの変化を算用数字及び漢数字で 0 から 9 まで変化)の変化率を測定した。文字回転では 2 ケース合計 58 フレームの平均変化率 は 94.2 %、文字変化では 2 ケース合計

18 フレームで平均変化率 は 97.1 %であった。

この例においても、人物立体画像オブジェクトと同様にオブジェクトの少しの動き・変化がサーフェスボクセルの変化につながり、直前のフレームとのデータ一致度が低いと考えられる。



(a) 256^3 サンプルデータローテーション　　(b) 256^3 サンプルデータ文字変化

図 6.5 サンプル図形データフレーム間変化率測定結果

上記の様に、フルボクセルデータでは、データの一致度が高く、変化部分のみを転送し受信側でデータを復元する手法で、大幅なデータ転送量の削減を図る事ができると考えられる。ボクセル空間サイズ 256^3 のデータでは、平均 2.59 %の変化率であり、67.1 MB から、1.73 MB へのデータ削減を見込む事ができる。データの比較・復元についても、フルボクセルデータでは比較的簡単な比較演算で実現できる。本測定で用いた PC(CPU Pentium4 3.6 GHz、メモリ 1 GB)では、1 フレームの比較を、ボクセル空間サイズ 128^3 では 4.5 msec.、256^3 では 37.4 msec.で行っている。

一方、サーフェスボクセルデータはフレーム間データ変化率が大きく、ここで検討する変化部分のみの転送によるデータ削減方式の効果はあまり見込めない。さらに、データ比較では、フルボクセルデータへの変換と変換後のデータ比較の処理が必要となり、この方式の適用は効果が少ないと考えられる。人物立体画像オブジェクトデータは、データ転送量も 250 KB 程度であり、本方式の適用は必要無いと考えられる。

(T_c: 画像描画)

描画時間は、描画アルゴリズムとグラフィックカードの性能に大きく依存する。

ハードウェアの性能向上による高速化は、継続して見込めると考えている。今回利用した GPU（GeForce 6600）を搭載するグラフィックカードは 2004 年 9 月に市販された製品である。現行の最新の GPU (GeForce 8800) を搭載するグラフィックカードとの比較例を表 6-4 に示す[61]。GPU の性能向上やグラフィックカードに搭載されるメモリ量の増加は著しく、ここで見られる様に10倍近くの高速化が望める事が判る。さらに、今後はマルチコア GPU の開発も行われると考えられ、さらなる高速化が期待できる。

表 6-4 グラフィックカードの仕様比較例

仕様	実験で利用した機種	最新機種の例
GPU	GeForce 6600	GeForce 8800
発売開始時期	2004 年 9 月	2006 年 11 月
ビデオメモリ容量	128MB	768MB
頂点シェーダ本数	3本	可変
ピクセルシェーダ本数	8本	可変
ストリーミングプロセッサ本数	—	128 本
頂点性能	3 億 7500 万頂点/秒	27 億頂点/秒* (7.2 倍)
フィルレイト	40 億テクセル/秒	138 億テクセル/秒*(3.45 倍)

＊：GeForce 8800 ではシェーダを頂点用とピクセル用に固定せず、どちらにも使えるストリーミングプロセサを使っているので、直接的な性能比較は難しい。各シェーダの本数を一世代前の機種である GeForce 7900 と同じ8本、24 本と仮定した推定値。雑誌などの比較では 10 倍以上との報告も見られる。

描画アルゴリズムについては、ボクセル空間をさらに分割して並列処理を行うなどの、高速化が考えられるが、本論文ではこの点についての検討は行っていない。

(T_d：表示画面データ転送, T_e：画像重畳・表示)

画像データの転送時間の短縮には、ネットワーク転送の高速化と転送データの削減を検討する必要がある。

ネットワーク転送の高速化については、利用した 1 Gbps のネットワークを、さらに高速な 10 Gbps ネットワークにする事が考えられる。

利用したデータ転送ライブラリは、各フレームの通信毎に計算機間コネクションを確立し、フレ

ーム終了後に切断する処理を繰り返す方式であり、メッセージパシングライブラリなどの適用により、このオーバヘッドの軽減が可能と考えている。

転送する表示画面データの削減については、現在のそれぞれのオブジェクトが描画された表示画面データを全て転送している方法を改善し、オブジェクト空間に相当する部分のみを転送する方式や、フレーム間で画面ピクセルデータの一致部分のみを転送し受信側で復元する方式などが考えられる。

前者の方法は、表示画面上のオブジェクト空間相当部分以外を転送しないで、画面重畳・表示処理側でオブジェクトの画面上の位置を考慮した重畳を行う事で、転送データ量の削減を実現できる。特別なデータ一致の比較演算、復元などの処理を要しないので演算負荷も低い方式である。1,024×768 の解像度のディスプレイに 256 × 256 のボクセル空間のデータを画面に平行に配置して 1 ピクセルあたり 1 ボクセルで表示するケースを考えると、データサイズを 8.3 % (256^2/1024×768) に削減する事ができる。ボクセル空間を縮小して表示する場合には、さらにこの効果が期待できる。

このデータ削減は、重畳処理においても処理時間の削減に繋がる。以下の検討では、画像重畳・表示処理についても同様の比率で処理時間が削減されるものと考える。

⑵ 人物立体画像オブジェクト可視化の高速化

人物立体画像オブジェクトでは、①画像生成処理の表示画面データ転送部分においてボクセル空間部分のみを転送する高速化手法、及び ②画像重畳処理においてボクセル空間のみを重畳する高速化手法、を適用したケースを検討する。人物立体画像オブジェクトはサーフェスボクセル形式であり、かつ、転送ボクセルデータサイズが小さいので、ボクセルデータの変化部分のみを転送し時間の短縮を計る高速化手法の適用は行なわない。

表 6-5 に、表 6-2 のケースにこれらの高速化を適用して算出した、可視化時間・可視化速度を示す。表示画面データ転送部分についてボクセル空間相当部分（ 8.3 % ）のみを転送するデータ削減を、画像重畳処理においても同様の削減効果を適用した。

表示画面データ転送（T_d）時間及び重畳・表示（T_e）が短縮され、2 次元表示で、可視化時間は 0.114 sec. と 1/2.62 に、可視化速度は最も低速のボクセル生成部分が律速となり、20fps と 2.29 倍高速化されると考えられる。立体視表示では、可視化時間が 1/3.82 に短縮、可視化速度は描画部分が律速となり 13.7 fps と 5.06 倍の高速化が期待できる。

描画速度は、最新のグラフィックカードなどの利用により、10 倍程度の高速化が望め、最終的にはボクセル生成部分の性能(20fps)に律速されると考えられる。

遅延時間についても、2 次元表示で 114 ms、立体視表示で 176 ms と想定され、許容範囲である 400 ms を達成できると考えられる。

表 6-5 人物立体画像オブジェクトの可視化時間と可視化速度の高速化

表示方法	2 次元表示		立体視表示	
	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)
ボクセル生成(T_a)	0.05	20.0	0.05	20.0
ボクセル転送(T_b)	0.0077	130.0	0.0077	130.0
描画(T_c)	0.0395	25.3	0.0729	13.7
画像転送(T_d)	0.0095	105.0	0.03	32.5
重畳・表示(T_e)	0.00734	136.0	0.0143	70.2
全体*	0.114	20.0	0.176	13.7
高速化倍率	2.62	2.29	3.82	5.06

＊： T = 一つのオブジェクト可視化時間 V = システムとしての可視化速度(fps)

⑶ フルボクセル形式の共有データオブジェクト可視化の高速化

フルボクセル形式の共有データオブジェクトでは、①画像重畳・表示処理への表示画面データ転送においてボクセル空間部分のみを転送する高速化手法、②画像重畳・表示処理においてボクセル空間のみを重畳する高速化手法、及び③他サイトからのボクセルデータ転送時に変化部分のみを転送し処理時間の短縮を計る高速化手法を適用する。

表 6-6 に、表 6-3 のケース(ボクセル空間サイズ 256^3 のフルボクセル形式)にこれらの高速化を適用して算出した、可視化時間・可視化速度を示す。ボクセルデータ転送では、変化部分(平均 2.59 %)のみを転送するデータ削減を適用し、表示画面データ転送部分及び画像重畳処理では、ボクセル空間相当部分(8.3 %)のみを転送するデータ削減効果を適用した。

このケースでは、2 次元表示の可視化時間で 1.76 倍、可視化速度で 1.12 倍の高速化、立体視表示ではそれぞれ、1.80 倍、1.24 倍の高速化が想定される。ボクセル転送、表示画面データ転送部分は、大幅に高速化されているが、ここでは描画処理部分が律速となる。

描画速度は、最新のグラフィックカードなどの利用により、10 倍程度の高速化が望めるので、最終的には、数 fps 程度の表示速度は実現可能と考えられる。

描画速度の高速化により、遅延時間についても 2 次元表示で 250 ms 程度、立体視表示で 300 ms 程度に高速化され、許容範囲である 400 ms をほぼ達成できると考えられる。

表 6-6 フルボクセル形式共有データオブジェクトの可視化時間と可視化速度の高速化

表示方法	通常視		立体視	
	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)	処理時間 T (sec.)	処理速度 V (fps)
ボクセル生成(T_a)	0.0	0.0	0.0	0.0
ボクセル転送(T_b)	0.058	17.3	0.058	17.3
描画(T_c)	1.60	0.625	1.85	0.540
画像転送(T_d)	0.017	60.6	0.037	27.3
重畳・表示(T_e)	0.00734	136.0	0.0143	70.2
全体*	1.68	0.625	1.96	0.540
高速化倍率	1.76	1.12	1.80	1.24

＊： T = 一つのオブジェクト可視化時間 V = システムとしての可視化速度(fps)

(4) サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクト可視化の高速化

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトでは、人物立体画像オブジェクトデータと同様に、①画像重畳・表示処理への表示画面データ転送においてボクセル空間部分のみを転送する高速化手法、及び ②画像重畳・表示処理において、ボクセル空間のみを重畳する高速化手法を適用する。ボクセルデータの変化部分のみを転送し時間の短縮を計る高速化手法の適用は行なわない。

図 6.2 の可視化速度モデルに、表示画面データ転送部分と画像重畳・表示処理にボクセル空間相当部分(8.3 %)のみを転送するデータ削減効果を適用した結果を図 6.6 に示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は可視化速度を示す。図中の線は計算を行なった有効ボクセル数に対応する可視化速度の点を結んだもので、点線が適用前、実線が適用後の可視化速度である。

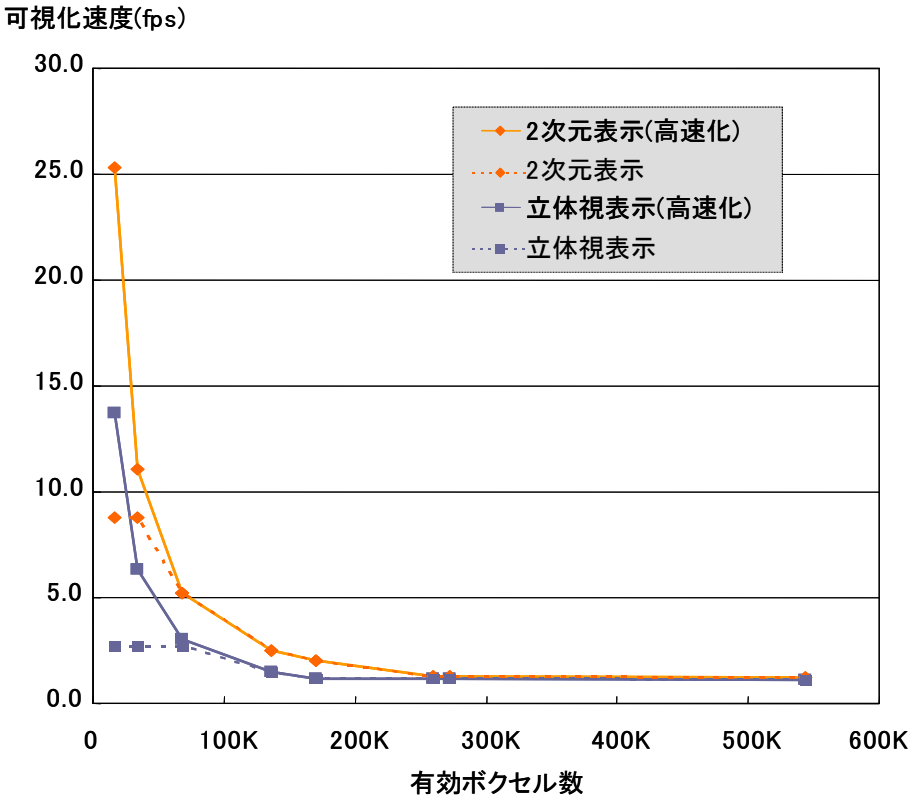
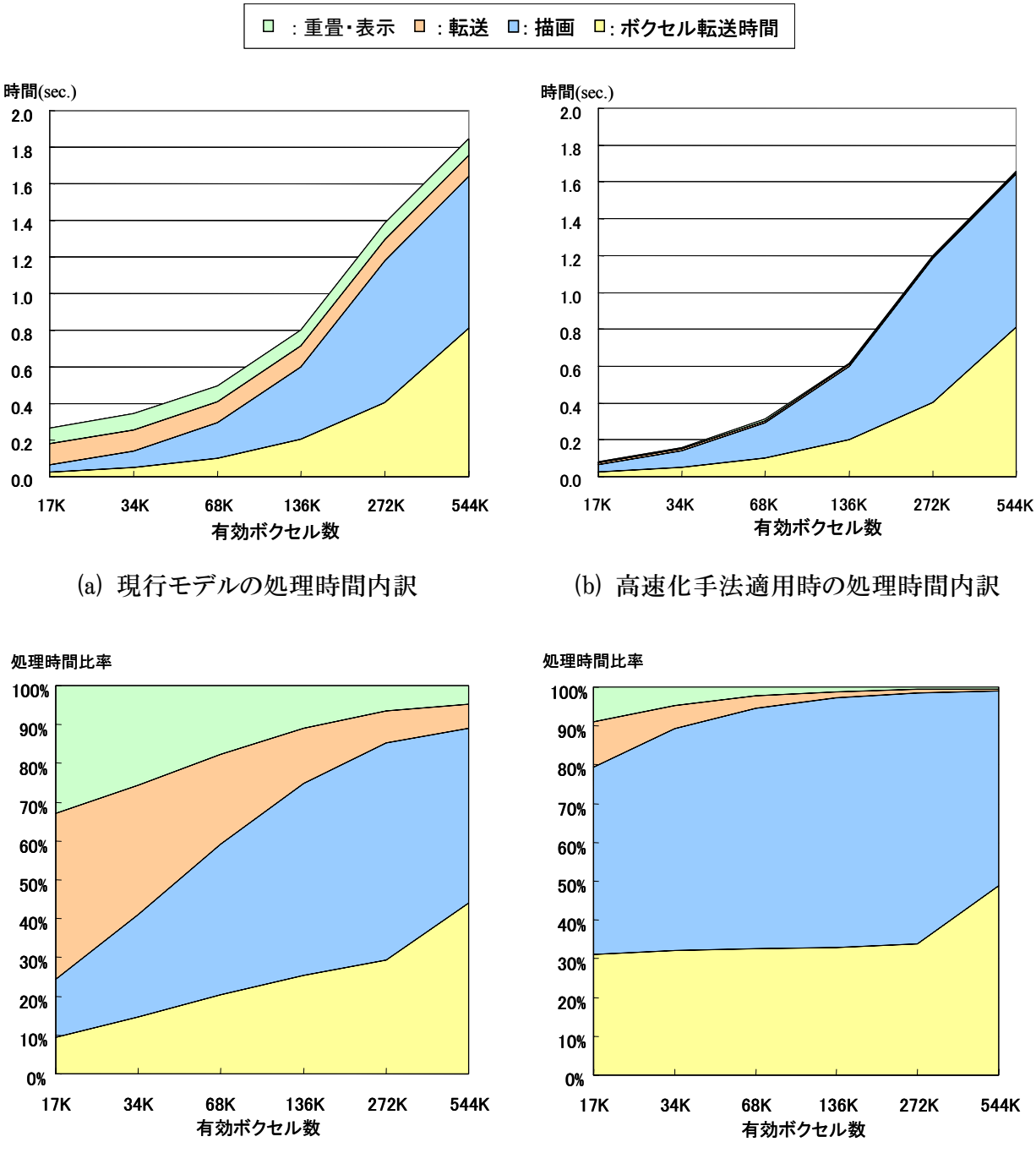


図 6.6 サーフェスボクセル形式データの可視化速度モデル

有効ボクセル数が少ない部分では、描画時間が短いので、表示画面データ転送時間の短縮が効果を示し、3 倍近い高速化が得られるが、有効ボクセル数の増加に伴い、描画速度が律速となり、高速化の効果が見られなくなる。例えば、有効ボクセル数 544K の 2 次元表示のケースではボクセルデータ転送時間が 0.811 sec.、描画時間が 0.885 sec.、表示画面データ転送時間が

0.031 sec. となっている。

図 6.7 に、2 次元表示時における、処理時間の内訳と有効ボクセル数の関係を、現行と高速化手法を適用した場合それぞれについて、絶対時間と比率で示す。横軸は有効ボクセル数、縦軸は(a)、(b)では可視化時間、(c)、(d)では可視化時間に占める各処理の比率を示す。



(a) 現行モデルの処理時間内訳

(b) 高速化手法適用時の処理時間内訳

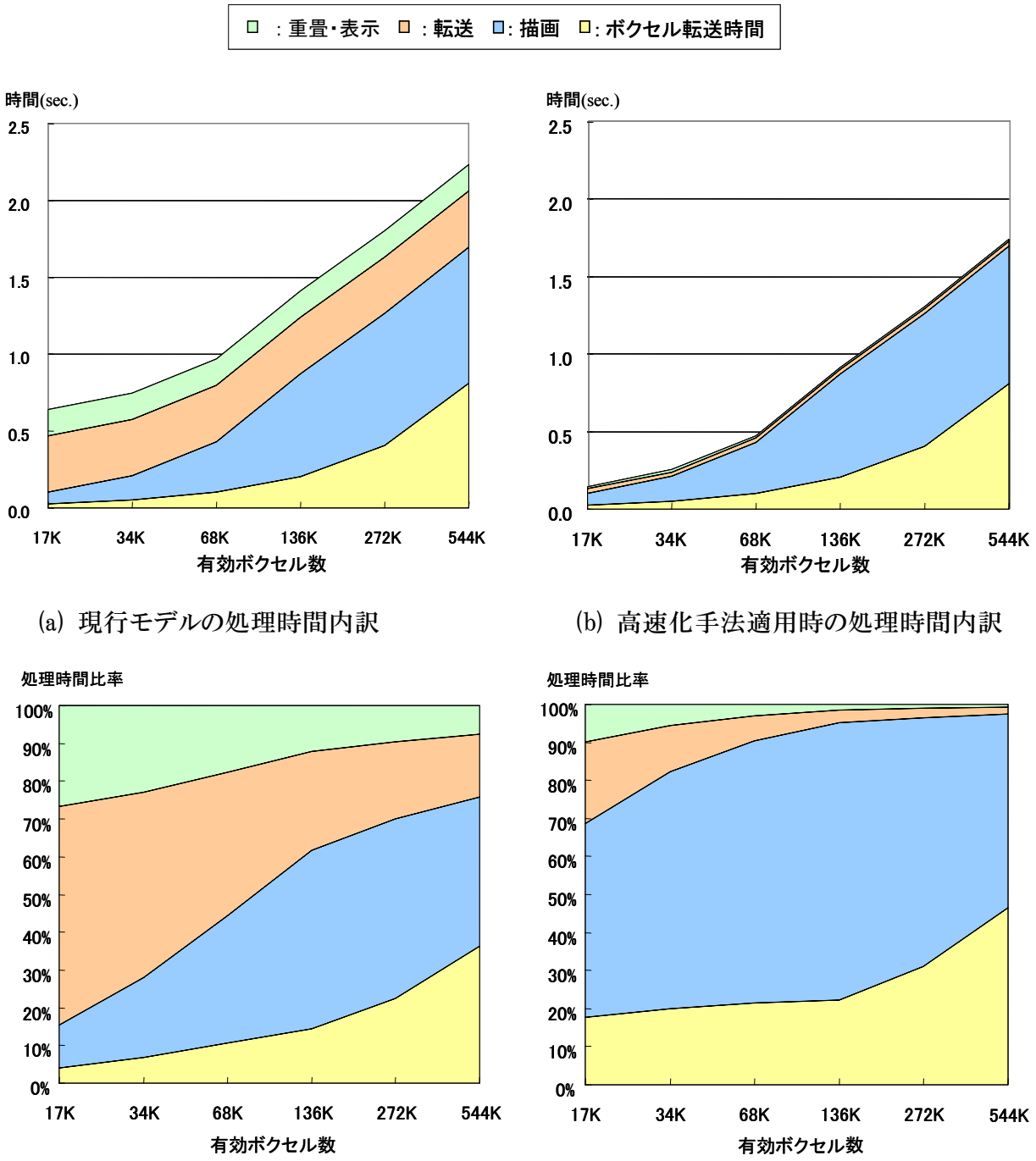
(c) 現行モデルの処理時間比率

(d) 高速化手法適用時の処理時間比率

図 6.7 サーフェスボクセル形式データの可視化時間内訳(2 次元表示・高速化適用)

有効ボクセル数が少ない場合は、重畳・表示処理と表示画面データ転送時間が削減されるため、全体として高速化手法の適用が効果を持つが、有効ボクセル数が増加すると、描画時間とボクセルデータ転送が律速となる様子を見る事ができる。

図 6.8 に同様に立体視表示時の変化の様子を示す。通常視と同様な傾向が見られる。



(a) 現行モデルの処理時間内訳

(b) 高速化手法適用時の処理時間内訳

(c) 現行モデルの処理時間比率

(d) 高速化手法適用時の処理時間比率

図 6.8 サーフェスボクセル形式データの可視化時間内訳(立体視表示・高速化適用)

描画速度は、最新のグラフィックカードなどの利用により、10 倍程度の高速化が望めると考えられる。描画速度が 10 倍と想定すると、有効ボクセル数 544K のオブジェクトの可視化速度は、ボクセルデータ転送時間の高速化が律速となり、2 次元表示と立体視とも 1.23 fps となる(ボクセルデータ転送時間が 0.811 sec.、描画時間が 0.09 sec.程度)。

描画速度の高速化を適用しても、遅延時間は 2 次元表示、立体視表示とも 900 ms 程度となり、自然な操作にはさらなる高速化が必要である。

サーフェスボクセルデータは図 6.5 に見られる様に、データの一致度を利用したデータ削減が困難であるので、さらなるデータ削減手法の検討が必要である。

(5) まとめ

人物立体画像オブジェクトデータ、フルボクセル形式の共有データオブジェクト、及びサーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトについて、可視化性能モデルを作成し、ボクセルデータ生成時間、ボクセルデータ転送時間、描画時間、表示画面データ転送時間、及び画像重畳・表示時間について、高速化の方式について検討を行った。

人物立体画像オブジェクトデータは、表示画面データ転送処理、画像重畳・表示処理への高速化手法の適用により、2 次元表示で 20 fps、立体視表示で 13.7 fps の表示速度が得られると考えられる。最新のグラフィックカードの利用により、ボクセルデータ生成部分(現行 20fps)が律速となると考えられる。操作に対する遅延時間は、許容範囲に十分に入る 200 ms 以下が実現可能と考えられる。上記により、人物立体画像オブジェクトデータの可視化性能については通常のコミュニケーションに十分な性能が達成可能と考えられる。

フルボクセル形式の共有データオブジェクトは、ボクセル転送、表示画面データ転送処理、及び画像重畳・表示処理への高速化手法の適用により、描画処理部分が律速となり、ボクセル空間サイズ 256^3 のオブジェクトの可視化速度は、2 次元表示 0.625 fps、立体視表示 0.54 fps となると考えられる。最新のグラフィックカードの利用により、描画速度の高速化が期待でき、数 fps 程度の可視化速度は実現できると考えられる。操作に対する遅延時間についても、許容範囲にほぼ入る 300 ms 以下が実現可能と考えられる。上記により、フルボクセルの共有データオブジェクトの可視化性能は、用途を限定すれば実用に耐える性能を達成可能と考えられる。

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトは、表示画面データ転送処理、画像重畳・表示処理へ高速化手法の適用により、有効ボクセル数が少ない範囲では、可視化速度の 3 倍近い高速化が考えられるが、有効ボクセル数が多いケースでは、この効果が低減する。最新のグラ

フィックカードによる描画速度の高速化を想定すると、544K 有効ボクセル数のオブジェクトではボクセルデータ転送時間の高速化が律速となり、2 次元表示、立体視とも 1.23 fps の可視化速度となる。操作に対する遅延時間についても、900 ms 程度になると考えられる。有効ボクセル数の多いケースに対応した、新たなボクセルデータ転送高速化手法の検討が必要と考えられる。

6.4 今後の課題

6.4.1 システム機能に関する課題

実験システムで、VC 手法による、通信、配置、可視化、共有データオブジェクトの操作、及び全体の制御についてその機能を評価し、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現を機能面から実証したが、今後は以下の課題への対応が必要である。

(現実感の定量的評価)

今回の実験では、現実感表現の評価は、表現の確認が可能であるかの定性的な実証にとどまっている。今後は、視線の方向の確認精度の定量的な評価や、立体相互表示によるコミュニケーション促進の度合いについて、定量的な評価を行う必要があると考える

(音場生成)

現実感を増す為には、仮想会議室内への配置位置を考慮した音場生成を行う事が望ましい。これには、オブジェクトの位置情報により、それぞれの音場を合成する手法が考えられる。

(背景・家具の表示)

仮想的な背景・家具により、さらに現実感が増すと考えられる。固定的な表示であれば処理への負荷も少なく、比較的容易に実現できると考えられる。

(視点の動きへの対応)

参加者の動きに追従する視点移動の機能は，人物立体画像データから目の位置を抽出するいくつかの技法・製品が提案されており[62]、得られるリアルタイムな目の座標情報を描画時の座標変換計算に取り込む事により、実現可能と考えられる。

6.4.2 システム性能に関する課題

実験システムで、VC 手法による、通信、配置、可視化、共有データオブジェクトの操作、及び全体の制御について、その性能を評価したが、今後は以下の課題への対応が必要である。

(人物立体画像オブジェクトの可視化)

人物立体画像オブジェクトデータでは、目的とする 20 fps 程度の性能はほぼ実現できると考えられるが、さらなる性能向上には、ボクセルデータ生成部分(現行 20fps)の高速化が必要となる。ボクセルデータ生成については、研究開発の進歩が著しい分野であり、継続して最新の生成デバイスや生成手法の検討が必要である。

(フルボクセル形式の共有データオブジェクト)

フルボクセル形式の共有データオブジェクトでは、数 fps の可視化速度が実現できると考えられるが、人物立体画像オブジェクトデータと同程度の可視化速度の実現には、オブジェクト可視化処理の並列化等のさらなる高速な描画手法の検討が必要である。

(サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクト)

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトでは、有効ボクセル数の多いケースではボクセルデータ転送部分が律速となる。3 次元動画のサーフェスボクセルデータの転送高速化への、新たな手法の検討が必要と考えられる。データ自身の転送方法は、VizGrid プロジェクトにおいて開発した、「ボクセルデータを分割し複数のネットワークを用いて並列に送信するプロトコル[59]の実装による高速化手法」の適用が考えられる。さらに、高速な 10Gbps ネットワークの利用が考えられる。

(ネットワーク遅延試験)

今回の実験では、遠隔地間通信で課題となるネットワーク遅延を考慮した実験を行っていない。今後は、遠隔地間を模擬した実験や実際の遠隔地間での実験などにより機能・性能面の実証を行う必要がある。

6.5 まとめ

本章では、VC 手法を構成する通信、仮想会議室への配置・可視化及び共有データオブジェクト操作の各処理について、機能面・性能面からの考察を行い、以下の様に現実感を持った遠隔コミュニケーション環境が必要とする機能を、PC ベースのシステムにより VC 手法により実現が可能である事を実証した。

(機能面)

仮想会議室への立体オブジェクトの配置と、その自由な視点からの立体可視化を、実験システムで実現した。さらに視点の動きへの対応も可能である。

この立体可視化により、会議参加者間のゲイズアウェアネスと共有データオブジェクトのポインティング(共有データオブジェクトへの指示の相互認識)が可能と実証した。

オブジェクト分散可視化法の適用により、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境として必要とされる可視化要件の異なるオブジェクトの可視化が可能と実証した。

システムではボクセル処理方式の実装により最新入出力デバイスの接続が容易であり、システム制御機能により一連の会議の実施が可能である事を実証した。

(性能面)

人物立体画像オブジェクトのサーフェスボクセルデータ形式化より、ボクセル処理方式による利点、サイト間分散処理法の利点を生かす事が可能となった。

人物立体画像オブジェクトでは、ボクセル空間サイズ 256^3 で、視線の動きと表情が捕らえられる事を実証し、その可視化速度は実験システムで、立体表示視時 2 fps を実測した。さらに表示画面データ転送処理部分、画像重畳・表示処理部分の高速化、及び高速なグラフィックカードの利用を想定すると、2 次元表示、立体視表示とも、自然なコミュニケーションが可能な 20 fps 程度の可視化速度と 400ms 以下の遅延時間は達成可能であると考えられる。

フルボクセル形式の共有データオブジェクトの可視化性能では、ボクセル空間サイズ 256^3 のオブジェクトの立体視表示で、0.44 fps の性能を実測した。ボクセル転送、表示画面データ転送処理、画像重畳・表示処理への高速化手法の適用、及びグラフィックカードの高速化により、数 fps 程度の可視化速度と 400ms 以下の遅延時間達成は可能と考えられる。人物立体画像オブジェクトと同程度の表示速度が必ずしも必要とは限らないので、フルボクセルの共有データオブジェクトの可視化速度としては、用途を限定すれば、実用に耐える速度と考えられる。

サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトでは、フルボクセルデータと同様に表示画面データ転送処理、画像重畳・表示処理への高速化手法の適用、最新のグラフィックカードの利用により高速化が可能と考えられる。しかし、有効ボクセル数の多いケースではボクセルデータ転送処理が律速となり、有効ボクセル数 544K のオブジェクトで、可視化速度は 2 次元表示、立体視表示とも、1.23 fps 程度、遅延時間は 900 ms 程度と考えられる。今後は、ボクセルデータ転送の高速化について、並列転送などの新たな手法や、さらに高速なネットワークの利用などの検討が必要と考えられる。

複数オブジェクトの可視化性能では、実験システムにおいて最も負荷が高い 4 オブジェクトを同時に表示する立体視表示のケースで、平均 8% の性能低下がみられたが、画像重畳・表示処理への高速化手法の適用、さらに高速なネットワークの利用によりオブジェクト数を増加させても性能低下は起こらないと考えられる。

システム全体の構成としては、サイト間分散処理法とオブジェクト分散可視化法の組み合わせにより、今回の実験データのケースでは 10 倍近い高速化を実現したと考えられる。

第7章 結言

研究開発プロジェクトにおける規模拡大やグローバル化により、遠隔地に展開する研究者間のコラボレーションが活発となっている。本研究では、「研究開発分野における、直接的な遠隔コラボレーションを支援する、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現」を目標とし、PC ベースのシステムによる実現手法の検討とその有効性について実証を行った。

現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実現には、各種の手法が提案されているが、本研究では、コンピュータ上に仮想的な会議室を構築して、3 次元ビデオアバタを立体像として室内に配置し、立体表示することで、現実感を持った遠隔会議システムを実現する方式(仮想会議室方式)と、システム内で共有データの情報をできるだけ保存する為に、立体像データを含め全てのデータを表面幾何データに変換せず、元のボクセルデータの形で取り扱う方式(ボクセル処理方式)を組み合わせる方式とした。これにより、遠隔地間の研究者があたかも同じ場所において、画像化された数値シミュレーション結果や、実験・測定結果などの共有すべき情報を囲んで、実際に議論を行なっているかの様な環境の提供を狙った。

本研究では、仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて、3 次元データの生成・通信・配置・可視化・操作を行い、現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する手法(ボクセルコミュニケーション手法 ： VC 手法)を研究対象とした。VC手法ではその実装において、①サイト間分散処理、②通信データ量を削減するボクセル通信向けデータ形式、③オブジェクト間分散可視化などを組み合わせた方法を検討した。さらに、医療分野での応用を想定した、VC 手法による現実感を持った遠隔コミュニケーション環境の実験システムを開発し、このシステムによる実験で、機能・性能面から VC 手法の実証を行った。

被験者による評価実験も含めた実験により、機能面では、仮想会議室への立体オブジェクトの配置とその自由な視点からの立体可視化、会議参加者間のゲイズアウェアネスと共有データオブジェクトのポインティング、可視化要件の異なるオブジェクトの相互干渉の少ない可視化、最新入出力デバイスの接続、及びシステム制御機能による一連の会議の実施を実証した。

性能面では、人物立体画像オブジェクトは、ボクセル空間サイズ 256^3 で視線の動きや表情を捕らえられる事を実証し、その可視化速度は実験システムで立体表示視時 2 fps を実測した。フルボクセル形式の共有データオブジェクトの可視化性能は、256^3 のボクセル空間サイズのオブジェクトの立体視表示で 0.44 fps の性能を実測した。サーフェスボクセル形式の共有データオブジェクトについては、有効ボクセル数の異なる幾つかのオブジェクトの可視化性能を実測し、有効ボクセル数により最適な描画手法が異なり、その切り換えが必要である事が判明した。さらに、実測

データからシステムの可視化性能モデルを構築し、変化分のボクセルだけを転送する手法、ボクセル空間のみの表示画面を転送・重畳する手法、及び高速なグラフィックカードの利用などの各種の高速化手法の適用による性能推定を行った。その結果、VC 手法により、人物立体画像オブジェクトでは自然なコミュニケーションが可能な可視化速度(20fps 程度)と遅延速度(200ms 以下)が、フルボクセル形式共有データオブジェクトでは、実用に耐えうる可視化速度(数 fps)と遅延速度(400ms 以下)、が達成できるとの見通しを得た。サーフェスボクセル形式共有データオブジェクトでは、サーフェスボクセル転送の高速化に関するさらなる検討が必要である事が判明した。

本研究では、仮想会議室方式とボクセル処理方式を組み合わせて現実感を持った遠隔コミュニケーション環境を実現する VC 手法について、実験システムによる評価を通じて実現性を実証した。今後、機能面では、現実感の定量的評価、さらに現実感を増す為の、音場生成、背景の表示、視点の動きなどへの対応が、性能面では、さらに自然なコミュニケーションを実現する為の、3 次元オブジェクト生成の高速化、描画速度の向上、サーフェスボクセル転送の高速化、高速なネットワークの利用などについての検討が必要と考えている。

謝辞

本研究にあたり、直接のご指導を頂いた、指導教官である松澤照男教授には深く感謝いたします。在学中の研究にあたっては、情報科学研究科の先生方、特に副テーマのご指導をいただいた日比野靖教授、副指導教員の井口寧助教授には大変貴重なアドバイスをいただきました。感謝の意を表します。また、本論文をまとめるにあたってご指導をいただきました、広島大学の石井光雄教授、国立情報学研究所の三浦謙一教授に感謝の意を表します。

研究遂行、実験の実施にあたっては、松澤研究室の特別研究員の渡邉正宏さん、秘書の向千晶さんを初め、学生の方々にご協力いただきました。この場を借りて、感謝の意を述べさていただきます。

さらに、本研究と深い関わりを持つ VizGrid プロジェクトのメンバーの各先生方、本研究の推進にご協力いただいた、富士通株式会社の軽部行洋さん、水澤有里さん、株式会社富士通研究所の松倉隆一さん、株式会社富士通長野システムエンジニアリングの広田克彦さんに深く感謝の意を表するものです。

最後に、社会人大学院生としての会社業務と研究の両立を支えてくれた家族、特に妻 圭子には深く感謝したい。

2007 年 3 月

奥田　基

付録.A STL データのフォーマット

STL データ (Stereo Lithography)は、3D Systems Inc[63]が提案した 3 角形パッチをつなぎ合わせて立体形状を表現するデータ形式である。表 A-1 にデータフォーマットを示す。

表 A-1 STL データのバイナリフォーマット

			サイズ
ヘッダー（任意のテキスト）			80 バイト
全ファセット数			4 バイト
第 1 ファセット	法線ベクトル	x 成分	4 バイト
		y 成分	4 バイト
		z 成分	4 バイト
	頂点 1	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	頂点 2	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	頂点 3	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	未使用		2 バイト
第 2 ファセット	法線ベクトル	x 成分	4 バイト
		y 成分	4 バイト
		z 成分	4 バイト
	頂点 1	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	頂点 2	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	頂点 3	x 座標	4 バイト
		y 座標	4 バイト
		z 座標	4 バイト
	未使用		2 バイト
:			

付録.B 通信ライブラリ

VizGrid プロジェクトでは、サーフィスボリュームデータとフルボリュームデータを共通して送受信可能な通信ライブラリを開発した。

データの送受信時の接続制御には、VoIP を応用したインターネット電話などで通話制御プロトコルとして利用されている SIP(Session Initiation Protocol)[64]を用いる。このライブラリは静止画および動画が送受信可能であり、静止画は TCP 上での通信によりデータ保証を行い、動画は、音声や映像をストリーミング再生するために広く使われている伝送プロトコル RTP(Real-time Transport Protocol)[65] のペイロードに、ボリュームデータを実装することで、従来の一次元データや二次元データ同様、RTP ストリームとしての伝送を可能としている。

RTP への実装では、フルボリュームデータを 16×16×1 のスライスデータを基本としたボクセルブロック（VB）で分割した(図 B-1)。フルボリュームデータでは 1 ボクセルが色情報のみの 1 バイトのデータであり、基本 VB の一つは 256 バイトである。このサイズのデータを基本としてパケットを組み立てた。実験システムでは 4VB データを図のようにまとめて 1 パケットとし、この 4 パケットからひとつのエラー訂正符号パケットを生成した。この 5 パケットをグループとして、4 グループをまとめてインターリービングすることで送信パケットを構成させた。FEC(Forward Error Correction)とインターリービングにより、1 パケットが失われた場合だけでなく連続してバーストエラーになった場合でも元のパケットを回復することが可能となった。

サーフィスボリュームデータでは、リストボクセル形式の RTP ストリーム(リストボクセル形式のデータを RTP のペイロードに載せて通信)として伝送している。

動画の送信では、多視点カメラ映像などからのボリュームデータ化された人物立体画像、ファイル入力による数値シミュレーション結果などのボリュームデータに同一の送受信用のライブラリを利用する。

仮想会議室における映像再構成時の各オブジェクト間同期は、ビデオ会議などでは、端末内部で音声と映像を同期させる機能を持つが、VC 手法では、アプリケーションが PC クラスタを利用した分散処理によって実現されるため、受信側で同期を取るためにはアーキテクチャが複雑になる可能性がある。そのため、ネットワークの途中経路上で複数のストリーミングデータの同期を取るシステムを開発した。VC 基盤では、扱う RTP 形式にデータを統一することにより、RTP ヘッダに基づく統一的な処理が可能となってくる。そこで、ネットワーク内に設置するノードとして複数ストリーム間の同期処理の一部を肩代わりする機構を設け、端末の処理を軽減する。基本的には

SSRC、タイムスタンプなどの RTP ヘッダの情報を用いることになる。VizGrid プロジェクトでは、トランスペアレント型中間ノード(パケット単位での並べ替えを行なうもので、サーバや端末からは完全に透過的なノードとしてネットワーク内に設置される)、とプロキシ型中間ノード(送信側と受信側それぞれにアプリケーションプロキシに相当するノードを配置し、送信および受信アプリケーションは、それぞれのプロキシノードを明示的に指定してプロキシノード間は、同期すべき複数のストリームを一本のストリームにまとめて伝送)、の 2 種類の同期を行うノードを開発した。

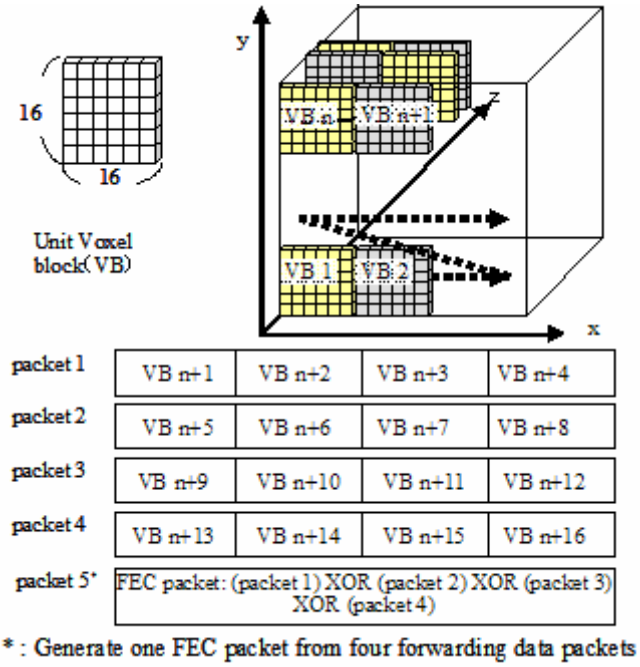


図 B-1 ボクセルのパケット構成

参考文献

[1] M. Okuda, H. Morishige, Y. Karube, M. Yamada, H. Shitara, and T. Matsuzawa, VizGrid: Development of teleimmersive collaboration environment, Proceedings of the Third International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies, pp.94-99, 2002.

[2] http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.htm

[3] 原研ニュース No. 41 1998/12 Tech Now, 海外に居ながらにして JT-60 の実験研究に参加する, 1998

[4] http://www.ivoa.net/

[5] http://jvo.nao.ac.jp/

[6] 内閣府総合科学技術会議 評価専門調査会, 最先端・高性能汎用スーパーコンピュータの開発利用評価検討会報告書, 2006

[7] 吉田俊介, 星野俊仁, 宮崎慎也, 大関徹, 長谷川純一, 安田孝美, 横井茂樹 : 空間スケッチシステム－仮想空間における自動車のスタイルデザイン－SPATIAL SKETCH SYSTEM - Car Styling Design using VR Spaces Visual Computing, グラフィクスと CAD 合同シンポジウム 2000, 画像電子学会/情報処理学会, pp.89-94, 2000

[8] 日本遠隔医療学会 http://square.umin.ac.jp/jtta/

[9] 遠隔医療システム研究会 http://square.umin.ac.jp/jami-telemed/

[10] R. Kraut, Patterns of contact and communication in scientific research collaboration, CSCW'88, pp.1-12, 1988

[11] L. Rowe and R. Jain, ACM SIGMM retreat report, ACM TOMCCAP, Vol. 1, No. 1, pp.3-13, 2005.

[12] A. Kendon, Some Functions of gaze direction in social interaction. Acta Psychological, 26, p.22-63, 1967

[13] P. Dourish and S. Bly, Portholes: Supporting Awareness in a Distributed Work Group, Proceedings of the CHI 92, pp.541-547, 1992

[14] 伴野, 岸野, 高臨場感通信会議におけるヒューマンインタフェース技術, 人工知能学会誌, Vol.6, No.3, pp.359-369, 1991

[15] 松尾太加志, コミュニケーションの心理学, ナカニシヤ出版, 1999

[16] 福井健太郎, 喜多見美鈴, 岡田謙一 : 仮想空間を使った多地点遠隔会議システム: e-MulCS, 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, pp.3375-3384, 2002

[17] 栗田孝昭, 井合知, 北脇信彦: オーディオビジュアル通信における伝搬遅延の影響, 電子情報通信学会論文誌, B-Ⅰ Vol.J82-D-Ⅰ, No.4, pp.581-588, 1999

[18] Ramesh Raskar, Greg Welch, Matt Cutts, Adam Lake, Lev Stesin and Henry Fuchs, The office of the future: a unified approach to image-based modeling and spatially immersive displays, Proceedings of the 25th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, pp.179-188, 1998

[19] http://www.accessgrid.org/

[20] http://www.vrvs.org/About/index.html

[21] http://www.fuqua.duke.edu/admin/extaff/news/global_conf_2002.htm

[22] http://www.crg.cs.nott.ac.uk/research/projects/Coven/

[23] Normand, V. et al., The COVEN project: Exploring applicative, technical, and usage dimensions of collaborative virtual environments, Presence: Teleoperators & Virtual Environments April 1999, Vol. 8, No. 2, MIT Press, pp.218-236, 1999

[24] 岡田謙一, 松下温, 臨場感のある多地点テレビ会議システム:MAJIC, 情報処理学会論文誌, Vol.36, No.3, pp.775-783, 1995

[25] http://www.cs.unc.edu/Research/stc/

[26] Greg Welch, Henry Fuchs, Ramesh Raskar, Michael Brown, and Herman Towles, Projected Imagery In Your Office in the Future, IEEE Computer Graphics and Applications, July/August 2000, pp.62-67, 2000

[27] Herman Towles, Wei-Chao Chen, Ruigang Yang, Sang-Uok Kum, Henry Fuchs, Nikhil Kelshikar, Jane Mulligan, Kostas Daniilidis, Loring Holden, Bob Zeleznik, Amela Sadagic and Jaron Lanier, 3D Tele-Collaboration Over Internet2, Proceedings of the International Workshop on Immersive Telepresence (ITP 2002), 2002.

[28] Kelshikar, N., X. Zabulis, J. Mulligan, K. Daniilidis, V. Sawant, S. Sinha, T. Sparks, S. Larsen, H. Towles, K. Mayer-Patel, H. Fuchs, J. Urbanic, K. Benninger, R. Reddy, and G. Huntoon, Real-time Terascale Impementation of Tele-immersion, Proceedings of the ICCS2003 Part IV, pp.33-42, 2003.

[29] Ott, David and Ketan Mayer-Patel, Coordinated Multi-streaming for 3D Tele-immersion, Proceedings of the 12th annual ACM international conference on Multimedia, pp.596-603, 2004

[30] 坂本信樹, ウィドヨクスタルト, 青木輝勝, 安田浩, 情報処理学会研究報告, : 文殊の知恵システムにおける視線情報伝達に関する一検討, 研究報告[オーディオビジュアル複合情報処理] 社団法人情報処理学会 第 99 巻, 第 107 号, pp.49-54, 1999

[31] S.J. Gibbs et al., TELEPORT-Towrds Immersive Copresence, Multimedia Systems, No.7, Springer-Verlag, pp.214-221, 1999

[32] O. Schreer and P.Sheppard, VIRTUE – The step towards immersive telepresence in virtual video-conference systems, Proceedings of the eWorks 2000, pp.989-995, 2000.

[33] O. Schreer and P. Kauff, An Immersive 3D Video-Conferencing System Using Shared Virtual Team User Environments, Proceedings of the 4th international conference on Collaborative virtual environments, pp.105-112, 2002.

[34] 小木哲朗, 山田俊郎, 玉川憲, 廣瀬通孝, 共有没空間におけるビデオアバタを用いた位置関係表現, 電子情報通信学会論文誌, D-II Vol.J82-D-II, No.10, pp.1826-1834, 1999

[35] Ståhl, Olov, Meetings for real - Experiences from a series of VR-based project meetings, In Symposium on Virtual Reality Software and Technology 1999, 1999

[36] Rajan, V., Subramanian, S., Keenan, D., Johnson, A., Sandin, D., DeFanti, and T., A Realistic Video Avatar System for Networked Virtual Environments, Immersive Projection

Technology Symposium, 2002

[37] Tetsuro Ogi, Toshio Yamada, Yuji Kurita, Yoichi Hattori, and Michitaka Hirose, Usage of Video Avatar Technology for Immersive Communication, Proceeding of the First International Workshop on Language Understanding and Agents for Real World Interaction, pp.24-31, 2003

[38] 石井 裕, グループウェアのデザイン, 共立出版, 1994.

[39] Hiroshi Ishii, Minoru Kobayashi and Jonathan Grudin, Integration of Inter-Personal Space and Shared Workspace ; Clear Borad Design and Experiments, Proceedings of the CSCW'92, ACM, Nov. 1992, pp.33-42, 1992

[40] 門脇千恵, 爰川知宏, 山上俊彦, 杉田恵三, 國藤 進:情報取得アウェアネスによる組織情報の共有促進、人工知能学会誌、Vol.14, No.1, pp.111-121, 1999

[41] L. Childers, T. Disz, R. Olson, M. E. Papka, R. Stevens, and T. Udeshi, Access Grid: Immersive Group-to-Group Collaborative Visualization, Proceedings of the SGI 4th International Immersive Projection Technology Workshop, 2000

[42] Satoshi Matsuoka, Sinji Shimojo, Mutsumi Aoyagi, Satoshi Sekiguchi, Hitohide, Usami, and Kenichi Miura, Japanese Computational Grid Research Project: NAREGI, In Proceedings of the IEEE Vol.93, No.3, pp.522-533, 2005

[43] 松下温, 岡田謙一, コラボレーションとコミュニケーション, 共立出版, 1995

[44] James Bo Begole , John C. Tang , Randall B. Smith, and Nicole Yankelovich, Work rhythms: analyzing visualizations of awareness histories of distributed groups, Proceedings of the 2002 ACM conference on Computer supported cooperative work, pp.334-343, 2002

[45] 本田新九郎, 富岡展也, 木村尚亮, 岡田謙一, 松下 温, 在宅勤務者の疎外感の解消を実現した位置アウェアネス・アウェアネススペースに基づく仮想オフィス環境, 情報処理学会論文誌, Vol.38, No.7, pp.1454-1464, 1997

[46] 中川健一, 國藤 進, アウェアネス支援に基づくリアルタイムな WWW コラボレーション環境の構築, 情報処理学会論文誌, Vol.39, No.10, pp.2820-2827, 1998

[47] Andreas Dieberger, Bogdan Dorohonceanu, Stephen Farrell, Beverly Harrison, Eser Kandogan, Thomas P. Moran, Barton and A. Smith, Encountering Awareness Information with GroupSense Displays and Tools, Demo at CSCW 2002, New Orleans, 11/2002 Smith: Encountering Awareness Information with GroupSense Displays and Tools, 2002

[48] 松澤照男, VizGrid: スーパーコンピューティングネットワーク上でのリアル実験環境の実現, システム制御情報学会誌, 47, 2, pp.65-70, 2002

[49] 雷康斌, 岩田正子, 姫野龍太郎, ボクセル法による流体構造連成解析, 日本機械学会論文集, 2004 年 3 月号(第 70 巻第 691 号)A 編, pp.449-455, 2004

[50] 鈴木克幸, 寺田賢二郎, 大坪英臣, 米里直樹, ボクセル情報を用いたソリッド構造の解析法, 日本造船学会論文集, 第 182 号, pp.595-600, 1997

[51] T. Wada, X. Wu, S. Tokai, and T. Matsuyama, Homography Based Parallel Volume Intersection : Toward Real-Time Volume reconstruction Using Active Cameras, Proceeding of Computer Architectures for Machine Perception, pp.331-339, 2000.

[52] T.Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and T. Wada, Real-Time Dynamic 3D Object Shape Reconstruction and High-FidelityTexture Mapping for 3D Video, IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, Vol.CSVT-14, No.3, pp.357-369, 2004

[53] http://www.ptgrey.com/products/bumblebee/index.html

[54] 高橋俊哉, 牧野剣道, 奥田充一, 今井明, 3D 液晶ディスプレイシステムのコンテンツ制作方法, シャープ Technical Journal No.19, 通巻 87 号, 2003

[55] http://www.hitachi-displays.com/news/2032406_16927.html

[56] http://www.actuality-systems.com/

[57] ひたち、2004 年秋号, http://hhil.hitachi.co.jp/products/transpost.html

[58] http://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2006/pr20060207/pr20060207.html

[59] VizGrid プロジェクト 2003 年度研究成果報告書

[60] VizGrid プロジェクト 2004 年度研究成果報告書

{61} http://www.nvidia.co.jp/page/desktop.html

[62] http://www.ndigital.com/certus.php

[63] http://www.3dsystems.com/japan/index.asp

[64] RFC3261, http://www.ietf.org/rfc/rfc3261.txt

[65] RFC3550, http://www.ietf.org/rfc/rfc3550

研究業績

[在学中及び研究テーマに関連する業績]

(査読付き論文)

奥田 基, 軽部 行洋, 松倉 隆一, 渡邉 正宏, 丹 康雄, 松澤 照男, ボリュームデータを共有する遠隔コラボレーション環境の開発, 日本計算工学会論文集, Vol. 2006, 20060034, 2006

奥田 基, 軽部 行洋, 松倉 隆一, 広田 克彦, 渡邉 正宏, 松澤 照男,分散処理による立体画像可視化システムの開発, 可視化情報学会論文集, (投稿中)

(査読付き国際学会)

Motoi OKUDA, Yukihiro KARUBE, Ryuichi MATSUKURA, Masahiro WATANABE Teruo MATSUZAWA, Development of A VizGrid Volume Communications Environment, Proceeding of the ASIAN SIMULATION CONFERENCE 2006, 印刷中, 2006

Motoi Okuda, Masahiro Watanabe, Teruo Matsuzawa, Construction of a diagnostic support system for circulatory disease, Proceeding of the 5th IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid 2005(CCGrid), ISBN 0-7803-9075 (CDROM), 2005

Masahiro Watanabe, Motoi Okuda, Teruo Matsuzawa, Developing a Prototype of Teleimmersive Collaboration Environment and its Application for a Diagnostic Support System for Circulatory Disease, Proceeding of 1st International Conference on Semantics, Knowledge and Grid(SKG2005), pp.707-713, 2005

Masahiro Watanabe, Motoi Okuda, Teruo Matsuzawa, Construction of a prototype of a volume communications environment, Proceeding of The Sixth International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT'05), pp.158-162, 2005

(国際学会における招待講演など)

Motoi Okuda, High Performance Cluster Systems and Grid Activities in Japan, Paderborn Univ. HPC Seminar invited talk, Paderborn, Germany, 6/21, 2005

Motoi Okuda, Grid and Cluster Technology for HPC, Korean Supercomputing Workshop keynote talk, KISTI, Taejon, South Korea, 10/6, 2004

(国際学会における発表・講演など)

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, SC2006, Vender session, Tampa, USA, 11/15, 2006

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, Twelfth workshop of the Use of High Performance Computing in Meteorology, Vender session, Reading, U.K., 10/31, 2006

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, ISC2006 Vender session, Dresden, Germany, 29/06, 2006

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, SC2005 Vender session, Seattle, USA, 11/15, 2005

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, ISC2005 Vender session, Heidelberg, Germany, 23/06, 2005

Motoi Okuda, Fujitsu's Vision for High Performance Computing, SC2004 Vender session, Pittsburg, USA, 11/9, 2004

M. Okuda, H. Morishige, Y. Karube, M. Yamada, H. Shitara, and T. Matsuzawa, VizGrid: Development of tele-immersive collaboration environment, Proceedings of the Third International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT'02), pp.94-99, 2002

M. Okuda, Fujitsu's Activities In Grid Computing, Proc. Of Asia-Pacific Grid Workshop2001, Tokyo, Japan, pp.554-564, 001, 2001

(国内学会などにおける発表・講演など)

奥田　基, FIT2005 第 4 回情報科学技術フォーラム, パネル「スパコン日本の時代は取り戻せるか」パネリスト講演, 2005 年 9 月 9 日

奥田 基,「富士通のペタスケールコンピューティングへの取り組み」, サイエンティフィック・システム研究会 HPC フォーラム 2005, 2005 年 8 月 31 日

[入学以前の業績]

(査読付き論文)

David Brown, J.H.R. Clark, Motoi Okuda, Takao Yamazaki, The preparation of polymer melt samples for computer simulation studies, Journal of Chemical Physics, 100, pp.6011-6018, 1994

David Brown, J.H.R. Clark, Motoi Okuda, Takao Yamazaki, A Molecular dynamics study of chain configuration in N-alkane-like liquids, Journal of Chemical Physics, 100, pp.1684-1692, 1994

(海外発表論文)

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto,H.C.Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamatm, Search for Effective Lattice Action of Pure QCD, Nuclear Physics B 53, pp.938-941, 1997

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Finite Temperature Gauge Theory on Anisotropic Lattices, Nuclear Physics B 53, pp.426-428, 1997

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Search for effective Lattice Action OF pure QCD, Nuclear Physics B 53, pp.938-941, 1997

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Analyzing Finite Temperature Mesonic Correlators, Nuclear Physics B 42, pp.445-447, 1995

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, MCRG Study and Renormalized Coupling Constants, Nuclear Physics B 42, pp.805-807, 1995

David Brown, J.H.R. Clark, Motoi Okuda, Takao Yamazaki, A domain decomposition parallel

processing algorithm for molecular dynamics simulation of polymers, Computer Physics Communications 83, pp.1-13, 1994

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Quenched Wilson hadron spectroscopy on a 323× 48 lattice at β=6.3, Nuclear Physics B 34, pp.338-340, 1994

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Systematic study of autocorrelation time in pure SU83) lattice gauge theory, Nuclear Physics B 34, pp.789-791, 1994

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Dose over relaxed updating in lattice QCD improve critical slowing down, Physics Letters B 328, pp.407-410, 1994

David Brown, J.H.R. Clark, Motoi Okuda, Takao Yamazaki, A domain decomposition parallelization strategy for molecular dynamics simulation on distributed memory machine, Computer Physics Communications 74, pp.67-80, 1993

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Monte Carlo Renormalization Group Study at Large β in Confinement, Region Nuclear Physics B 30, pp.517-520, 1993

K. Akemi, Ph deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Study of Spatial Size Effect in Quenched Wilson Hadron Spectroscopy at β=6.3, Nuclear Physics B 30, pp.373-376. 1993

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Scaling Study of Pure Gauge Lattice QCD by Monte Carlo Renormalization Group Method, Physical Review Letters Vol. 71, NO. 19, pp.3063-3066, 1993

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, Hadron Spectroscopy on a 323× 48 Lattice,

Nuclear Physics B 26, pp.293-295, 1992

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, SU(3) Renormalization Group Study On Parallel Computer AP1000, Nuclear Physics B 26, pp.420-422, 1992

K. Akemi, Ph. deForcrand, M. Fujisaki, T. Hashimoto, H. C. Hege, S. Hioki, J. Makino, O. Miyamura, A. Nakamura, M. Okuda, I. O. Stamat, QCD ON The Highly Parallel Computer AP1000, Nuclear Physics, B 26, pp.644-646, 1992

(査読付き国際学会)

Takao Yamazaki, Masashi Fujisaki, Motoi Okuda, Makoto Takano, Fumihiro Masukawa and Yoshitaka Naito, A parallelization study of the general purpose Monte Carlo code MCNP4 on a distributed memory highly parallel computer, Mathematical Method and Supercomputing in Nuclear Applications, 1993

(国際学会における発表・講演など)

Motoi Okuda, The Japanese Challenge in Parallel Supercomputing, Third Australian Super Computing Conference, 1990

(国内発表論文)

Motoi Okuda, Akemi Kawazoe, Masahide Fujisaki, A Parallelization Study of Quantum Chronodynamics Simulation on AP1000, Fujitsu Science & technical Journal, Vol.29 No.1, pp.84-96, 1993

増川史洋, 高野誠, 内藤俶孝, 山崎孝男, 藤崎正英, 鈴本孝一郎, 奥田基, 高並列分散メモリ型計算機におけるモンテカルロ中性子・光子輸送計算コード MCNP4 の並列化, JAERI-M 93-210, 1993

石黒美佐子, 幾島毅, 篠沢尚久, 奥田基, 赤井礼治郎, 非線型熱伝導計算コード HEATING6 のベクトル化, JAERI-M 85-153, 1985

石黒美佐子, 松浦俊彦, 奥田基, 原田裕夫, 太田文雄, 梅谷真, ベクトル計算機の大型原子力コードへの適用性, JAERI-M 82-78, 1982

(国内発表・講演など)

奥田 基, 超並列計算機と計算力学, 日本機械学会講習会「製品開発に役立つハイパフォーマンスコンピューティング」, 1995

奥田基, 西敬二朗, 保坂良, 立石源治, パラレルサーバ AP3000 の特徴と構造解析への適用, 計算工学論文集講演会論文集, Vol.2 No.1, 1994

(雑誌など)

奥田 基, 松本 俊二, 市川 真, ポストゲノムプラットフォーム, FUJITSU Vol.53, No.5(09.2002), 2002

奥田基, 並列計算機と流体解析, 機械の研究, 第 45 巻, 第 1 号(1993), pp.116-121, 1993