

令和 2 年 5 月 26 日現在

機関番号：34304

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00449

研究課題名(和文)体験型3Dデジタルアーカイブのためのフレームワーク

研究課題名(英文)A flexible frame work for 3D digital archives

研究代表者

林原 尚浩 (HAYASHIBARA, Naohiro)

京都産業大学・情報理工学部・准教授

研究者番号：20397227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、様々な用途で使用可能な3Dデジタルアーカイブの実現を目的としており、1) Publish/Subscribe型3Dコンテンツ閲覧・共有機構、2)3Dコンテンツのアノテーションを実現する機構、3)可換可能なデータタイプを用いた新しい協調編集機構、4)3Dデジタルアーカイブのためのサービス指向フレームワーク、5)実装したフレームワークを用いた実証実験を行った。本研究で実現したフレームワークを用いて3Dモデルを用いた医療安全講習のためのシステムを実装し、有効性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、3Dモデルの協調編集を行うための非衝突型データ構造ChainVoxelを提案した。非衝突型データ構造(CRDT)はテキストに対しての機構として提案されていたが、3Dモデルのための非衝突型データ構造は提案されておらず、本研究課題で提案したChainVoxelはスケーラブルな協調編集システムを実装するための要素技術として学術面、実践面ともに重要である。また、これらを含む本研究課題で提案された要素技術を組み合わせて医療安全講習のためのシステムのプロトタイプを実装し、実際のサービスにおける有効性を示したことは社会的な意義としても大きいと考えている。

研究成果の概要(英文)：In this research project, we aim to realize a 3D digital archive system for various uses. For this purpose, we proposed and implemented the mechanism for view synchronization of 3D models, the conflict-free data structure for 3D models, and a system for learning medical safety as an application.

研究分野：分散システム

キーワード：3Dモデル 協調編集 視点同期 Publish/Subscribeシステム 分散システム 非衝突型データ構造

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

デジタルアーカイブは、テキストや動画などのコンテンツを効率的に収集、保存する手段として図書館や博物館、美術館などで積極的に行われてきている。特に、デジタル化されたコンテンツは加工~(拡大や縮小を含む)が容易である点、保存するスペースの問題を考慮しなくて良い点、遠隔地からの閲覧などに柔軟に対応することができる点などから郷土資料、古文書、絵画などの歴史的価値のあるものを地域資料として全世界に発信する試みが行われている。また、3次元(3D)高精度距離センサなどの開発により、3Dの物体をデジタルアーカイブとして電子的に保存するという試みも始まっている。3Dコンテンツは、従来の静止画や動画のような2次元~(2D)コンテンツと比べて、奥行きや凹凸などのより細かな情報を再現することができることから、美術品や町並み、歴史的建造物などの立体物の保存、閲覧に適している。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、3Dデジタルアーカイブによって保存されたコンテンツに対して、従来の平面的な閲覧だけでなく、3Dモデルのアノテーション方式の提案、複数のユーザ間での共有・協調編集などを可能にする技術基盤を確立し、図書館や博物館、学習教材などでより現実感のある体験を提供するためのフレームワークの実現を目的としている。

3Dモデルを含むコンテンツは、回転やズームなどの操作によって見え方が変わるため、アノテーションを付与する際には、そのアノテーションを付与したユーザの意図を正確に反映する必要がある。そのため、アノテーションとそのアノテーションが意図した見え方を紐付ける。具体的には、アノテーションにカメラの視点位置を紐付けることによってそのアノテーションを付与した際に見える見え方を正確に再現する。3Dコンテンツの閲覧や共有は、OculusRiftなどのHMDを用いてそれらをネットワークに結合し、Publish/Subscribe型のスケーラブルなコンテンツ配信方式を用いて複数ユーザ間で視点などを共有する機構を提供する。さらに、共有した3Dコンテンツを協調編集する機構に関するアルゴリズム、プロトコルを設計し実装を行う。具体的には、3Dコンテンツ向けの非衝突型データ構造を提案し、それに基づいたロックフリーな実装を行う。最終的には、本研究課題で提案した方式をフレームワークとして実装し、特定のアプリケーションに適用することで、実用性についての評価を行う。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、以下に挙げる5つの項目について研究を行う。

#### (1) Publish/Subscribe型3Dコンテンツ閲覧・共有機構

ブラウザやHMDを用いて、公開された3Dコンテンツを閲覧・共有する機構を設計、実装する。特に、共有機構はある特定のユーザが閲覧している視点情報を複数のユーザで共有することを想定している。これにより、デジタルアーカイブされた町並みの3Dコンテンツなどのバーチャルツアーなどが可能となる。このような共有機構をスケーラブルに実装するため、Publish/Subscribe型の視点情報配信方式を構築する。

#### (2) 3Dコンテンツのアノテーションを実現する機構

3Dスキャナなどを用いた3Dデジタルアーカイブは、様々な形式で電子的に保存されることが予想される。これらを統合的に扱い、可能な限り高精度な衝突判定を従来の3Dコンテンツの提示システムは、視覚情報の再現が主であったが、本研究課題では、SPIDARを用いた力覚フィードバックを行うことにより、ユーザに視覚情報に加えて触覚情報を与え、より現実感のある体験を可能にするシステムを構築する。

#### (3) 可換可能なデータタイプを用いた新しい協調編集機構

Letiaらによって提案された可換可能なデータタイプCRDT(Commutative Replicated Data Types)を用いて、相互排他ロックを用いない3Dコンテンツの協調編集機構を実現する。CRDTはテキストの編集などに用いられていたが、このデータタイプを拡張し、3Dコンテンツの協調編集のための新たな分散アルゴリズムを提案する。これによりスケーラブルな共同編集作業が可能になり、多人数での3Dアーカイブの検証や修復作業を効率的に行うことができる。

#### (4) 3Dデジタルアーカイブのためのサービス指向フレームワーク

本研究課題で実装するシステムが想定する入力デバイス~(マウス、モーションセンサなど)と出力デバイス~(ディスプレイ、HMDなど)は多岐にわたるが、それらを部分的に用いたシステムの構築を可能にするため、閲覧・共有機構、可触化機構、協調編集機構などをモジュール化して実装し、必要に応じて依存関係を構築することによって動的な機能追加を可能にするサービス指向フレームワークを実現する。この機能は「ディペンダブル・データベースシステムのためのサービス指向フレームワーク」(科研費若手研究(B), 2012-2014, 代表者: 林原尚浩)で得

られた成果を拡張して用いる。

#### (5) 実装したフレームワークを用いた実証実験

医療安全講習のための教材として 3D モデルを用いた体験型コンテンツの設計とプロトタイプを実装する。従来の医療安全講習のテキストは、書籍や動画などであり、与えられたシナリオを一方向的に学ぶだけであったが、本研究で構築する 3D モデルを用いた教材では、学習者による能動的な視点の変更や入力を行って問題解決を図るような双方向の学習が可能になる。また、視点同期機構を用いた 100 人規模の同時配信によって、講義における実習にも用いることができる。

### 4. 研究成果

#### (1) 3D モデルのアノテーション付与および表示方式

3D モデルを含むコンテンツにおけるアノテーション方式の提案をおこなった。3D モデルは、回転やズームなどによってディスプレイ上での見え方が変化するため、従来のようなコメントなどのアノテーションを一覧表示するとそのアノテーションの意図が反映されないという問題点があった。そこで、アノテーションとそのアノテーションを付与した際のカメラ位置を紐付けることによってアノテーションの意図を明確にするのと同時に、カメラ位置によって選択的にアノテーションを表示することによって、3D モデルの操作による見え方の変化に応じたアノテーションの表示を行うことができる。このようなアノテーションの表示方式を提案して、プロトタイプの実装を行った。

#### (2) スケーラブルな 3D モデルの強調編集機構の提案と実装

複数ユーザで 3D モデルをスケーラブルに同時編集する機構 ChainVoxel を提案した。この機構は、非衝突型データ構造 CRDT を 3D モデル編集用に拡張させたものであり、ボクセルベースの 3D モデルにおけるボクセルの挿入および削除を複数のユーザが非同期に行ったとしても排他制御を行うことなく、ボクセル同士の衝突を回避することができる。本研究で提案した ChainVoxel は各座標におけるボクセルの操作をチェーンハッシュ構造で管理し、競合が起こった際には優先すべき操作を定められた規則に応じてソートすることによって競合を回避する。この規則は、アプリケーションに応じて柔軟に変更することが可能であり、例えば、単純に同時刻にボクセルの操作が行われた場合にはユーザの ID によるソートや、ボクセルの操作に意味をもたせる場合には、近接ボクセルを連続的に操作しているユーザに優先権をもたせるなどが考えられる。

このチェーンハッシュ構造はすべてのノードで管理されており、あるノードが行った操作はメッセージ通信によってすべてのノードへ送信される。重要な点としては、この ChainVoxel の機構は、サーバを前提としない完全 P2P 型であるため、システムの構築が非常に安価で、ユーザが多くなったとしても負荷分散を考える必要が無いことである。

本研究では、ChainVoxel のシミュレータを実装し、他の方式と比較してスケーラビリティに関する優位性について評価を行った。比較対象としては、二層コミット (Two-Phase Commit) と類似研究である Let's3D-C を用いた。

Figure 1 は、ChainVoxel と他の方式のシミュレーションステップ数に関する比較を行った。ユーザ (Site) の増加に対して、単位時間あたり一定の操作が与えられた時に処理を行うステップ数がどれだけ増加するかを示している。ChainVoxel は排他制御を行わず、処理に関するメッセージ通信と操作を受信した際に行うボクセルのチェーンハッシュ構造への登録およびソートのみなので、ユーザ数が増加してもほぼ一定のステップ数で実行できることがわかる。一方で、Two-Phase Commit はユーザ数の増加に応じたステップ数が増加している。また、Let's3D-C も排他制御に Raft 合意アルゴリズムを用いているので、二層コミット

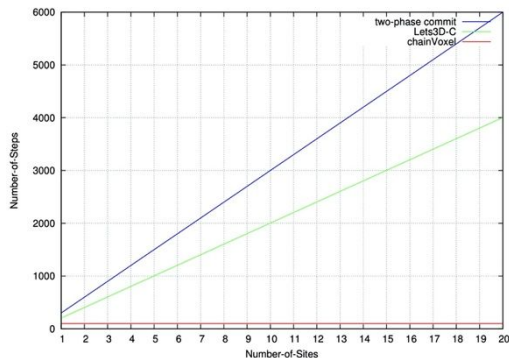


Figure 1 ChainVoxel と他の方式のステップ数に関する比較

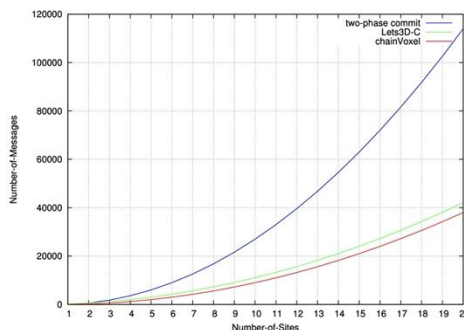


Figure 2 ChainVoxel と他の方式のメッセージ数に関する比較

トほどではないが、ユーザ数に対してステップ数が線形に増加している。

Figure 2 は、ユーザ数(Site 数)の増加に対するメッセージ数の増加を示している。ChainVoxel はボクセルに対する操作を行うたびにメッセージ通信を行うため、ユーザの増加に応じたメッセージ数の増加が見られる。この増加は、ほぼ Let's3D-C と同様であるが、差分は Raft 合意アルゴリズムで必要となるメッセージ通信分である。二層コミットは他の 2 つに比べて急激に増加していることがわかる。

これらの結果から、ChainVoxel はユーザ数の増加に対して、メッセージ数では Let's3D-C と同等で、ステップ数では大幅に優位性を示すことができた。実行時間に関してはコンピュータの性能に依存するため評価は行っていないが、ステップ数で大幅な優位性が見られたことから、ChainVoxel は他の方式よりも実行時間に関してもより高速に処理が行えることを示唆している。

この研究成果は、国際会議 IEEE DASC2016 および論文誌 IJSSC 9(1)において発表されている。

### (3) ChainVoxel の層構造による 3D モデルグループ化

層構造による複雑な 3D モデルの編集やポリゴンなどの多種の 3D モデルの形式に対応できるように ChainVoxel を発展させた。従来の ChainVoxel はボクセル単位の操作のみ定義されていたが、一般的に 3D モデルは意味のある(人体モデルの場合、顔、腕、胸部、足など)ボクセルの集合をグループ化している。本研究では、ChainVoxel に層構造を導入することで、ボクセルのグループ化などの操作を可能にした。これによって、より実践的な 3D モデルの強調編集が可能となった。Figure 3 は ChainVoxel の層構造を示したものである。この場合、Primary Layer は従来のボクセルのみの操作を行う層であり、Grouping Layer は Primary Layer のボクセルのグループを管理する層である。互いの層を行き来する際には他の層がロックされて操作不能となる。例えば、Grouping Layer の操作を行っている際には、Primary Layer のボクセル単位での追加削除は行うことができない。これによって、スケーラブルなボクセルのグループ操作を可能にし、同時に、ボクセルの集合の一貫性も保証している。

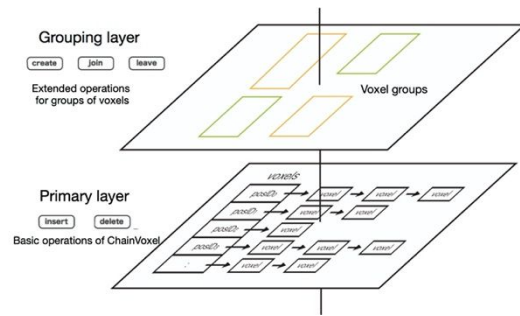


Figure 3 ChainVoxel の層構造

### (4) 複数ユーザ間の Publish/Subscribe 型 3D モデル視点共有機構

Publish/Subscribe 方式による 3D モデルのスケーラブルな視点共有機構を実装した。この機構は Client/Server モデルで動作し、各ユーザ(client)は予め共有している 3D モデルに対して回転やズームなどの操作を行い、他のユーザはリアルタイムにその更新がローカルな 3D モデルに対して反映されるというものである。テレビ会議システムと組み合わせることによって、3D モデルを用いた遠隔授業や臓器の 3D モデルを用いた遠隔医療分野での応用も考えられる。

各ユーザの Client には予め 3D モデルがダウンロードされていると仮定する。また、この 3D モデルにはタグが設定されており、タグに該当する 3D モデルを操作することによって、そのタグを持つ client にその操作が送信されるという仕組みになっている。つまり、操作を行う client が出版者、それ以外の操作を受け取る client が購読者となるような Publish/Subscribe システムとなる。一般的に Publish/Subscribe システムは client 数の増加に対してスケーラブルなメッセージ配送を行うことが知られており、3D モデルを用いた会議などの応用に適した機構と言える。

本研究では、視点同期機構の評価を行うために、LAN 内に実機によるシステムを組んで実験を行い、3D モデルに対する操作の反映にかかる時間を計測した。実験の結果、Client 数 20 までは操作を行ってから 10msec 未満で操作を他の client へ反映することができることが分かった(Figure 4 参照)。WAN 上では遅延が増大することが予想されるが、テレビ会議システムと組み合わせる場合は、テレビ会議システムの遅延とほぼ変わらないため、実用に耐えうる性能であると考えられる。

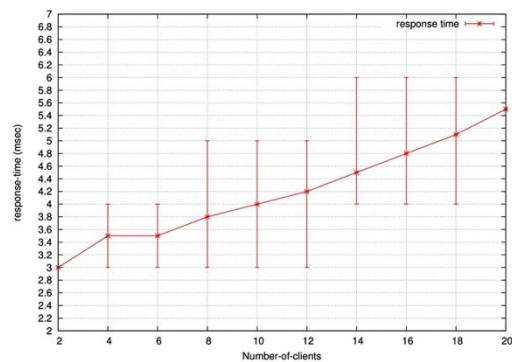


Figure 4 視点同期機構の操作反映時間と Client 数

### (5) 3D モデルを用いた医療安全講習のためのプロトタイプ実装

本研究で提案・開発してきた 3D モデルの要素技術をサービス・コンポーネントとして組み合わせたサービス指向フレームワークとして実装し、3D モデルを用いた医療安全講習のためのプロトタイプを実装した。岩手県立大学看護学部高橋教授らの助言をもとに、大学における医療安全講習の講義を想定している。

特定のシナリオにもとづいた 3D モデルを用意し、そのモデルを学生が操作して演習を行う。また、3D モデルは学生の端末で共有されているため、ある学生が 3D モデルを操作して演習問題に取り組んでいても、他の学生がリアルタイム共有することができるため学習効果は高い。

さらに、ヘッドマウントディスプレイへの出力や入力装置としてジョイスティックなどの外部デバイスを用いることもできることから、より現実感の高い体験が可能になると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kengo Imae and Naohiro Hayashibara	4. 巻 9(1)
2. 論文標題 Scalable distributed collaborative editing for 3D models using conflict-free data structure	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Space-based Situated Computing	6. 最初と最後の頁 11-21
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/IJSSC.2019.100008	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuro Nakagawa and Naohiro Hayashibara	4. 巻 8(2)
2. 論文標題 Resource management for Raft consensus protocol	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Space-based Situated Computing	6. 最初と最後の頁 80-87
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1504/IJSSC.2018.094467	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Tomoyuki Sueda and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Opportunistic Communication by Pedestrians with Roadside Units as Message Caches
3. 学会等名 The 22nd International Conference on Network-Based Information Systems (NBIS-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichiro Sugihara and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Message Dissemination Using Nomadic Levy Walk on Unit Disk Graphs
3. 学会等名 the 13th International Conference on Complex, Intelligent, and Software Intensive Systems (CISIS-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 Takeru Kurokawa and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Data Replication Based on Cuckoo Search in Mobile Ad-Hoc Networks
3. 学会等名 the 14th International Conference on Broad-Band Wireless Computing, Communication and Applications (BWCCA-2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tomoyuki Sueda and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Opportunistic Message Broadcasting with Pheromone-based Caching
3. 学会等名 CyberSciTech Workshop 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Tasuku Takahashi, Kengo Imae and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Conflict-free Multi-user Collaborative Editing System for 3D Models
3. 学会等名 CISIS 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kenya Shinki and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Resource Exploration Using Levy Walk on Unit Disk Graphs
3. 学会等名 AINA 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takumu Hirooka and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Gossip Message Dissemination Protocols in the Presence of Link Instability
3. 学会等名 AINA 2019 ( 国際学会 )
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuro Nakagawa and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Energy Efficient Raft Consensus Algorithm
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2017) ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Takumu Hirooka, Daisuke Yamamasu and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Gossip-Style Message Dissemination Based on Biconnected Components
3. 学会等名 The 11th International Workshop on Advanced Distributed and Parallel Network Applications (ADPNA-2017) ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Shigeki Yoneda and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Adaptive Zone Replication for Structured Peer-To-Peer Systems
3. 学会等名 The 15-th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC 2017) ( 国際学会 )
4. 発表年 2017年



1. 発表者名 Tasuku Takahashi, Kengo Imae and Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Towards a Collaborative Editing System on 3d Space
3. 学会等名 The 19-th International Symposium on Multimedia Network Systems and Applications (MNSA-2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Hiroshi Shimada, Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Annotation and View Synchronization of Shared 3D Models
3. 学会等名 The 10th International Conference on Advances in Computer-Human Interactions (ACHI 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuta Yamamoto, Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Merging Topic Groups of a Publish/Subscribe System in Causal Order
3. 学会等名 The 13th International Symposium on Frontiers of Information Systems and Network Applications (FINA-2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Kenya Shinki, Naohiro Hayashibara
2. 発表標題 Message Dissemination Using Levy Flight on Unit Disk Graphs
3. 学会等名 The 31st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA-2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	青木 淳  (AOKI Atsushi)  (60513380)	京都産業大学・情報理工学部・教授    (34304)	