

時空間3Dスキャニングシステムの開発

Development of Spatio-temporal 3D Scanning System

赤羽 亨

AKABANE Kyo

Abstract 本研究では時間的变化を3Dデータとして記録できる装置を開発し、インタラクション（鑑賞者の空間的な振る舞いと、作品の時間的变化の関係）を含めた作品記録、およびその活用まで含めたアーカイブ手法の開発を目指している。

研究は以下の方向性を持つ。

1. 鑑賞行為記録装置の開発（鑑賞者ボーン撮影システム）
2. 作品の3Dスキャニング装置の開発（TimeBased3D Recording System）
3. 3Dスキャンデータの閲覧手法の開発

本稿では、「鑑賞者ボーン撮影システム」と「TimeBased3D Recording System」について、システム開発と、それらを使用した撮影実験について述べる。

1. 背景

現在3Dスキャニング技術は、測量や、文化財のデータ保存などに用いられている。高価であった3Dスキャナも、ここ数年の低下価格化が進み一般にも流通し始めている。これらの3Dスキャナは深度センサを用いて被写体とカメラとの距離を計算し、被写体を3Dのモデルデータとして記録するものである。被写体となる「静物」を様々な角度から撮影し、深度データを多角的に取得したうえで、最終的にひとつのモデルデータとして統合する。

一般化された3Dスキャナの中には、静物のスキャニングのみならず、家庭用ゲーム機用に開発されたKinectの様に、人の動作など時間的变化の取得も可能なものも出てきている。本研究では、インタラクティブアート作品の記録に、これらの3Dスキャニング技術を取り入れることを試みている。

2. 研究概要

研究は現在、次の3つの方向から進めている。

1. 鑑賞行為記録装置の開発
（鑑賞者ボーン撮影システム）

2. 作品の3Dスキャニング装置の開発
（TimeBased3D Recording System）
3. 3Dスキャンデータの閲覧手法の開発

1つ目は鑑賞行為記録装置の開発（鑑賞者ボーン撮影システム）、これは鑑賞者の空間的变化を捉えるものと位置づけられる。2つ目は作品の3Dスキャニング装置の開発（TimeBased3D Recording System）、これは作品の時間的变化を捉えるものと言える。3つ目は3Dデータ閲覧手法の開発である。これは1の鑑賞者の変化と2の作品の変化を、同一の空間と時間軸上で表すもの、つまり作品と鑑賞者の相互の関係を表すためのものとなる。

本稿では、「鑑賞行為記録装置の開発（鑑賞者ボーン撮影システム）」と「作品の3Dスキャニング装置の開発（TimeBased3D Recording System）」の開発と、それらを使用した撮影実験に焦点をあてて述べる。

一方で、3Dデータの閲覧という視点で考えると、必ずしもコンピュータ画面上のアウトプットに縛られる必要もない。本稿には含めないが、3DプリンタやCNCなどを利用した立体物としてのアウトプットなど、3Dデータのリプレゼンテーションの可能性も同時に模索し

ている。

現在3年プロジェクトの2年目となる。1年目はそれぞれのシステムのプロトタイプを開発し、実際の作品を使っての撮影実験を行った。2年目は、撮影実験を通して顕在化してきた、課題を解決するべく新しいシステムを開発し、それらを用いた撮影実験を行っている。

3. 鑑賞行為記録装置

鑑賞行為記録装置（鑑賞者ボーン撮影システム）は、空間的に展開されるインスタレーション作品や、インタラクティブアート作品における鑑賞者の空間的な振る舞いを、3Dボーンデータとして記録するシステムである。鑑賞者をスケルトントラッキングし、時間的にボーンを生成し記録する。

鑑賞者ボーン撮影システムプロトタイプ1

システム構成

鑑賞者の振舞いを3D空間上に落としこむため、3DモデリングソフトであるRhincerosおよびプラグインソフトのgrasshopper、fireflyを利用し、鑑賞者のスケルトントラッキングにはKinect V2(以下、Kinect)を用いた。まずKinectが鑑賞者の骨格情報を認識し、fireflyおよびgrasshopperを介して任意の間隔でRhinceros上にボーンデータを生成する構成とした。

ハードウェアは、センサにKinectとWindows PC1台で構成される。Kinectを用いて骨格情報を取得し、PC側がfireflyを介してデータを受け取り、grasshopperが任意の間隔でRhinceros上にボーンデータを生成し3dm

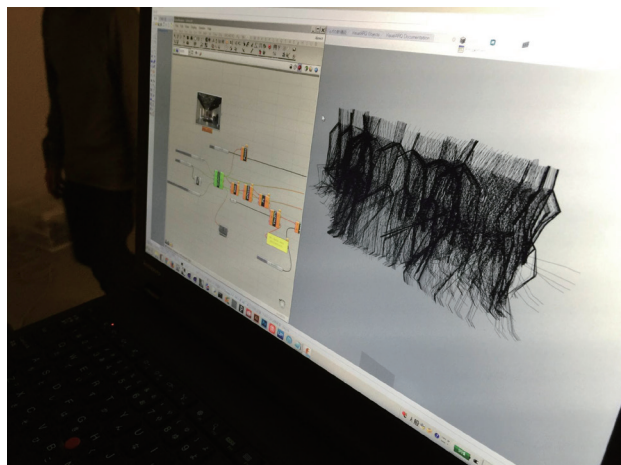


図1 プロトタイプ1 スキャニング中の画面

形式で保存される。この時、Kinectの骨格定義数分のレイヤーを分け、頭、胴体、右腕、左腕、右足、左足、というように、部位ごとのボーンを25レイヤーに分割して保存されている。これにより、右腕のみの軌跡を表示するという様なことが可能となる。

撮影実験1（「The Dive-Methods to trace a city」）

岐阜おおがきビエンナーレ2015（岐阜県大垣市、平成27年12月19日～23日）において、八嶋有司の出品作品である「The Dive-Methods to trace a city」で鑑賞者を3Dアーカイブする撮影実験を行った。

この作品は、11m×4mの空間の床と壁面へ6面プロジェクションする映像インスタレーション作品である。各映像ソースは約16分間のもので、6画面が同期してループ再生されている。

撮影は2015年12月19日と23日に計4回行った。各回のトラッキングは30分間で、20ms間隔でボーンデータを生成し、約2万から29万本のボーンデータを取得した。

実験結果

実験で得られた課題点を以下に挙げる。

- 撮影範囲の制限
- 鑑賞者不在時を含めた正確な時間表現に問題

撮影範囲の制限

1台のKinectではトラッキングできる範囲に限られることから、想定される鑑賞エリア全体をカバーすることが難しかった。実際の展示では、中央にトラスがあり図2の点線で囲まれた範囲に映像がプロジェクションされている。そして、グレーの部分が想定されていた鑑賞エリアで、11m×4mの大きさがある。鑑賞エリアに対して、Kinect1台で実際に撮ることができたのが、半径4m程度の扇状の範囲で、全体の1/3ほどのエリアに該当する。これはKinectのハードウェアの仕様に起因する制限のため、次のステップとして、複数台のKinectを使用することで撮影範囲の拡大を行うこととした。ただし、データ量と処理の関係で、ハードウェアとしてはKinectが1台に対して1台のPCが必要になるため、そのセットを複数用意する必要が生じる。また、各Kinectで取得したデータを、事後に合成・同期して扱える様にするため、取得データにタイムスタンプをメタデータとして持たせることも同時に実装することとした。

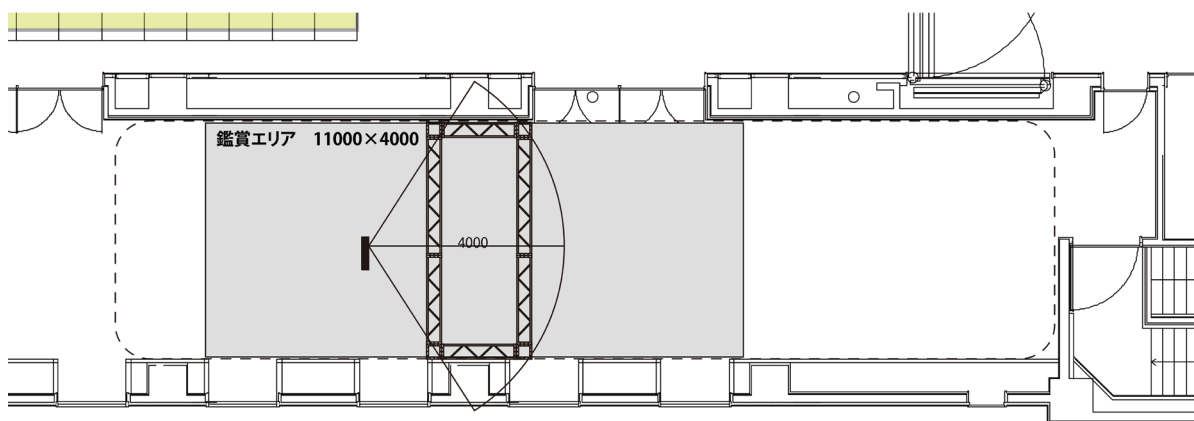


図2 撮影実験1の撮影範囲

鑑賞者不在時を含めた正確な時間表現の問題

実験時の時点では、Kinectが鑑賞者を認識しない場合、データが生成されない仕組みだったため、鑑賞者不在時の時間表現ができなかったという問題が生じた。この問題については、認識していない状態であっても、ダミーのデータを生成し、かつ、同様にメタデータとしてタイムスタンプを持たせることで、正確な時間表現を行うこととした。

また、撮影範囲の制限の問題の解決と併せ、ソフトウェアの構成の部分で、現在のgrasshopper + Rhinoceros から、Unityによるフルスクラッチのアプリケーション開発へと変更した。

鑑賞者ボーン撮影システムプロトタイプ2

システム構成

鑑賞者ボーン撮影システムプロトタイプ1の開発と、それを生じた撮影実験1の結果を受けて、鑑賞者ボーン撮影システムプロトタイプ2として、Kinectを用いた複数台連携による、スケルトントラッキングシステム開発を行った。

撮影システムは、Kinectを被写体を囲うように配置し、それぞれのKinectにPCを接続する方式で、Microsoftが配布するKinectからのデータをUnity座標系に変換できるライブラリを用いてUnity5で実装した。撮影後に各PCに保存されたデータを統合して、プレビューするソフトウェアについてもUnity5で開発した。撮影で取得したボーンデータは、MongoDBによるデータベースに保存され管理される。プレビュー時には保存されたデータを逐次呼び出すことによって再生を実現す

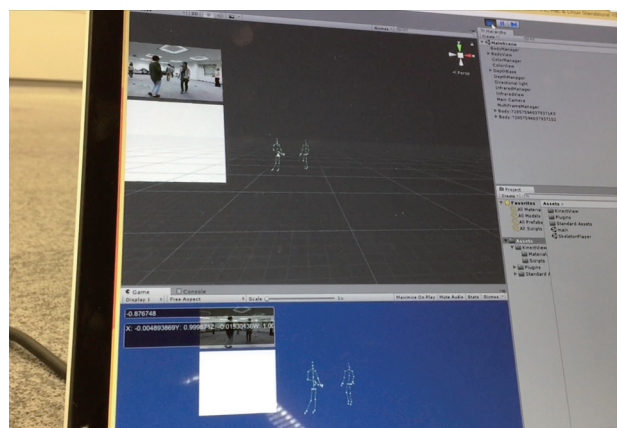


図3 プロトタイプ2 スキャンニング中の画面

る。複数台のKinectで撮影したデータを統合してプレビューするためには、時間的整合性、空間的整合性の両方を取る必要がある。そのため、それぞれのデータには、メタデータとしてタイムスタンプを持たせること（時間的整合性）と同時に、撮影時のKinectの空間的位置を正確に計測しておく必要が生じた（空間的整合性）。また、複数台のPCの記録開始や停止を協調して行うために、1台の撮影PCから他のPCに向かってUDP通信でトリガーを送る方式を取った。

撮影実験2（『みんなが好きな給食のおまんじゅう』—ひとりの傍観者と6人の当番のための—）

平成29年3月1日に名古屋学芸大学（愛知県日進市）において、三輪眞弘氏作のパフォーマンス作品「みんなが好きな給食のおまんじゅう—ひとりの傍観者と6人の当番のための—」を3Dアーカイブする撮影実験を行った。この作品は、およそ8分の長さの作品で、7人の演



図4 『みんなが好きな給食のおまんじゅう』 パフォーマンス風景

者を要する。5m×5mのフィールド内で演算結果としての移動を伴いながら演奏する5人の「当番」と、中央のエリアで演奏を行う「交換番」、その外側に1人の「傍観者」が、それぞれの決められたルールに従って協調的な演奏を行うものである。

本研究では「鑑賞者ボーン撮影システム」としての開発を行っているため、本来の意味ではパフォーマンス作品の演者の動きを捉えることを目的としていない。しかしながら、複数台Kinectによる撮影エリアの拡大や、複数人の鑑賞者（本実験の場合は演者）の同時撮影という共通の観点が見いだせたため、鑑賞者ボーン撮影システムプロトタイプ2の撮影実験として、この作品を題材として選んだ。

実験結果

実験から間もないため、総合的な検証や考察はまだ行っていない。そのため、ここでは撮影実験中に顕在化した問題点について記す。

● Kinectの設置の難しさ

事前の空間のサイズの把握と、その中で人の動きを想定しておく必要性があり、その条件に適したKinectの空間的配置が必要になる。これを実現するために、事前に同じ広さの空間を設定したテクニカルテストを2回行い最適な配置を割り出す必要があった。

● 誤認識の問題

たとえ、Kinectの検知範囲内であっても、複数の人が「重なる」場合に、認識ができない場合があった。また、Kinectに対して正対していない場

合に認識されない場合も散見された。

これらについては、Kinectの台数を増やすことにより、どれか1台でも人の重なりが少ない画角で捉えている状態や、正対している状態を捉えている状態を作り出すことによって解決できると考えられる。

● リアルタイムのプレビューの問題

リアルタイムプレビューシステムがまだ不完全のため、データベースからのデータ読み込みがボトルネックとなり、スムーズなプレビュー再生ができていない。また、各PCからのデータの吸上げや、プレビュー中の視点変更機能など、プレビューシステムを使う上でのユーザーインターフェースの改善や機能実装の余地が大きく残っている。

● データ統合の問題（データクリーニング）

鑑賞者（演者）の位置によっては、複数台のKinectが同一人物を捉えることがある。しかしながら、現在のプレビューシステムでは、それらのデータすべてを同一空間上に表示してしまうため、処理に無駄が生じている。また、それらのデータが微妙にずれている場合は、どのデータを正確なものを見極めるのが難しい。この点について、今後どのように解決していくかの方針を定めていく必要がある。ソフトウェアによるデータ統合を自動化していく方法や、人の判断によってデータを選択して統合していく方法など、様々なアプローチが考えられるが、現時点でまだ方向性は定まっていない。

4. 作品の3D スキャニング装置

作品の3Dスキャニングシステム（TimeBased3D Recording System）は、空間的に展開される作品の時間的变化を、時間軸を持った3Dデータとして記録する装置である。作品自身を時系列に連続的に3Dスキャンし3Dデータ化する。

TimeBased3D Recording Systemプロトタイプシステム構成

作品の撮影で使用するスキャナは、iPadと、iPadに取り付けるタイプの深度センサであるStructure Sensorを

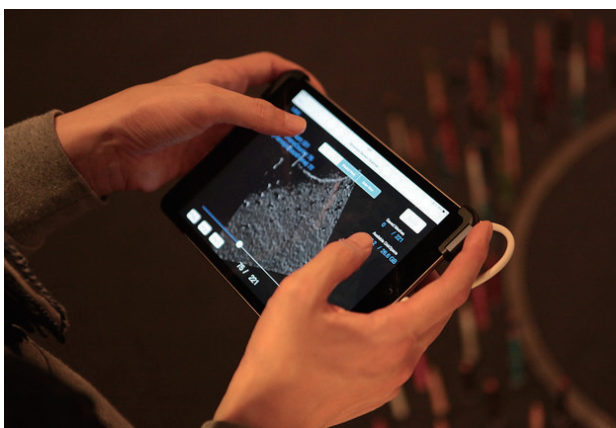


図5 TimeBased3D Recording System

利用し、その上で時系列に3Dスキャンが可能なiOSアプリケーションを開発したものである。Structure SensorのSDKは現在Objective-Cで提供されているため、本アプリケーションもObjective-Cにて実装された。スキャナで撮影したデータは、各フレームが汎用の3Dデータ形式であるWavefront OBJ形式で連番ファイルとして記録され、同時にフレームごとにタイムスタンプが記録される。この連番ファイルとタイムスタンプを専用ビューア（TimeBased3D Viewer）で読み込むことで、時系列3Dデータの再生を実現する。また、アプリケーションの操作を遠隔で行うためにUDP通信機能も実装されている。

TimeBased3D Viewerプロトタイプ システム構成

時系列3Dスキャンデータを再生するためのビューア（TimeBased3D Viewer）を開発した。これによって、複数のスキャンデータを同一の空間上に配置して再生することや、再生の際に視点の変更を行うことを可能にする。また、データに記録されたタイムスタンプに則った再生を実現することによって、時間的整合の取れた再生も可能にしている。実装方法としては、連番のWavefront OBJ形式ファイルとして保存されたコマ撮りの3Dスキャンデータを、あらかじめ全て読み込み、それを順次表示することで、動画のように時間軸のある3Dデータの再生を実現した。3Dスキャンデータの描画方法は、一般的なポリゴンメッシュ表示、ワイヤーフレーム表示、頂点表示の3種類から選べるようにし、ワイヤーフレームと頂点表示ではX線写真のように内部や背景を透過さ

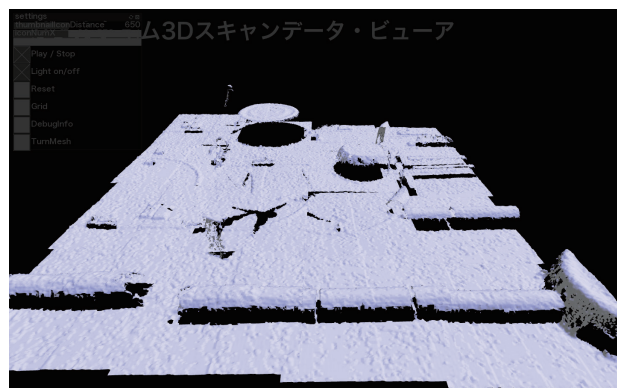


図6 TimeBased3D Viewer画面

せた状態で表示できるようにopenFrameworksで実装した。

撮影実験1（「10番目の感傷（点・線・面）」）

平成28年の1月23日から24日に、クワクボリョウタ氏の作品『10番目の感傷（点・線・面）』を対象に、作品の撮影実験を行った。この作品は5m x 7mの広さの空間に置かれており、鉄道模型に取り付けられた光源がレールの上を走り、さまざまなオブジェクトを照らしながら立体的な影絵を生み出していく作品である。このシステムの撮影可能距離は最大で3.5mだが、一度に広い範囲を撮影しようとする、解像度や精度が落ちて対象が撮影できないという問題が発生した。そこで作品を細かく分けてスキャンし、それをあとで統合して表示する方法を取った。作品のスキャンは作品の真上から、50cm程度の距離で行った。

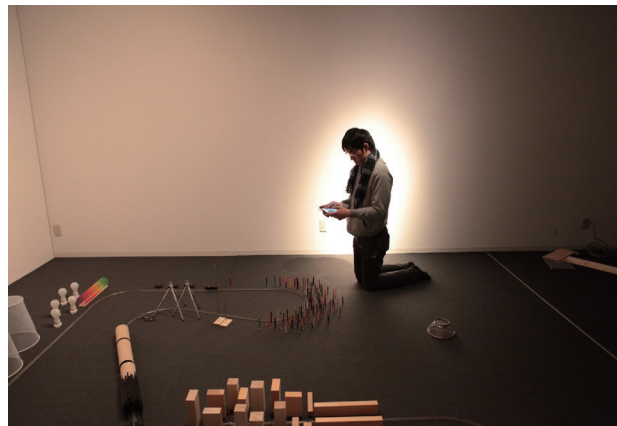


図7 「10番目の感傷（点・線・面）」撮影風景

実験結果

実験で得られた課題点を以下に挙げる。

- 撮影範囲の狭さ
(撮影範囲と解像度がトレードオフの関係。解像度が低い)
- タイムスタンプに基づく実時間再生が未実装
(TimeBased3D Recording System)
- ユーザーインターフェースの改善の余地
- スキャナから死角となる部分が記録されない

スキャナの解像度を上げるためには撮影範囲を狭める必要があり、選択範囲を広げるためには、解像度の設定を低くする必要がある。スキャナの解像度を保つためには、撮影可能範囲が狭くする必要があり、その結果として撮影カット数を増やさなければならないという問題があった。また、一方向からのスキャンでは、どうしても死角となる部分が発生して記録されない点も問題と言える。

これについては、複数視点からの撮影を行った上でTimeBased3D Viewer上で合成を行う方法を取る方針を立てた。

また、iPadのアプリケーションに関しては、撮影時に操作するユーザーインターフェースについての改善の余地が認められた。また、タイムスタンプの記録機能はあったが、iPad上でのデータの再生時にそれを利用し、実物と同じ速度で再生する機能がなかったため、この機能の必要性が顕在化した。

撮影実験2（「Interactive Sketch」）

まず撮影実験1の時点では実装されていなかった、タイムスタンプ情報をiPadアプリケーションでのデータ再生時に利用するようにし、記録時と同じ時間間隔でデータの再生が行われるように改良した。また、これと合わせて新たにカラーでの記録と再生を可能にした。

これらの改良を踏まえて、大澤悟氏のデバイス作品「Interactive Sketch」を題材にして撮影実験を行った。スキャナから死角となる部分が記録されない問題に対応するため、iPad 2台による複数視点からの撮影を行い、撮影後にTimeBased3D Viewer上でデータ合成を行う方法を取った。

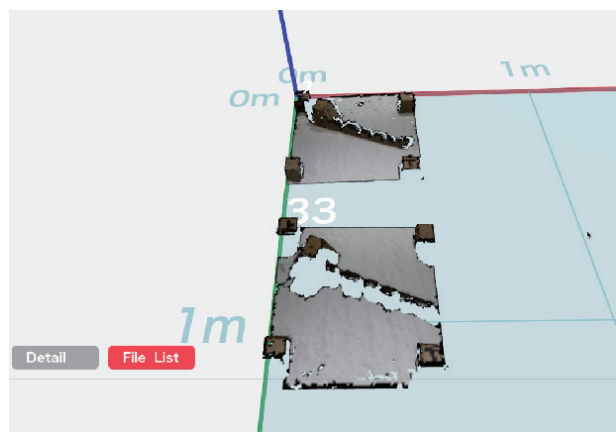


図8 2台のスキャナで撮影したデータの読み込み
(TimeBased3D Viewer)

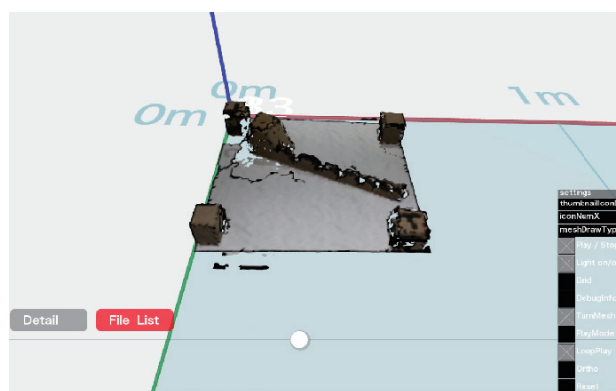


図9 2つのデータの合成 (TimeBased3D Viewer)

実験結果

撮影実験1で得られた問題点については、撮影範囲の狭さを除き概ね解消できたと言える。タイムスタンプに基づく実時間再生は実装され、撮影時のユーザーインターフェースも改良されている。また、死角を減らすための複数台での撮影とデータ合成についても、最低限実現している。最新のバージョンでは3台のiPadでスキャンしたデータをTimeBased3D Viewer上で合成することにも成功している。一方で、撮影範囲や解像度の問題については、ハードウェアへの依存度が高く、現在採用しているハードウェアでは劇的な改善は望めないという問題もある。

今後は、TimeBased3D Viewer上で作品の3Dスキャン結果のみならず、鑑賞者ボーンデータも同時に表示できるように機能を統合していく予定である。これによって、ボーンデータとポイントクラウドデータとのシームレス

な表示を可能とするとともに、鑑賞行為と作品自体の動きを統合的に時空間3Dデータとして記録することが可能になる。また、スキャナの解像度とフレームレートの改善については、新しいバージョンのStructure SDKへの対応や、iPad側のハードウェア性能を上げる方法で出来る限り対処していく。

5. 今後の展望

本稿では、「鑑賞者ボーン撮影システム」と「Time-Based3D Recording System」についてシステム開発と、それらを使用した撮影実験について述べてきた。今後はTimeBased3D Viewerを更に発展させながら、「3Dデータ閲覧手法の開発」に注力していきたいと考えている。

これによって「鑑賞者の空間的な振る舞い」「作品の時間的变化」を1つのビューワー上で閲覧可能にし、その相互作用＝インタラクションを含めた作品記録のためのシステムの実現を目指す。また、今後も実際の作品を題材とした撮影実験を続けながら、それを通して得られた知見をもとに開発を進め、取得したデータの活用まで含めたアーカイブ手法の開発も行っていく。

謝辞：

本研究は、以下の助成を受けて行われた。

科研費 挑戦的萌芽研究「3D スキャニング技術を用いたインタラクティブアートの時空間アーカイブ」（研究分担者：齋藤正和（名古屋学芸大学 講師）、池田泰教（名古屋造形大学 非常勤講師）、八嶋有司（IAMAS産業文化研究センター 研究員）、小川圭祐（東京工芸大学 助教）

文化庁 文化芸術振興文化芸術振興費補助金

メディア芸術アーカイブ推進支援事業「IAMAS メディア表現アーカイブ・プロジェクト」

メディア芸術アーカイブ推進支援事業「三輪眞弘メディア・パフォーマンス作品の保存・修復・資料化プロジェクト」

研究協力：

田中省吾（情報科学芸術大学院大学 M2）、高尾俊介（IAMAS産業文化研究センター 研究員）、イトウユウヤ（NTT インターコミュニケーション・センター [ICC] テクニカルスタッフ）、山下 健（椋山女学園大学、TAB）、富田太基（TAB）、鈴木悦久（名古屋学芸大学 講師）

また、以下の方々（敬称略）の協力を得て撮影実験を行った。

クワクポリョウタ「10番目の感傷（点・線・面）」、大澤 悟「Interaction Sketch」、三輪眞弘「『みんなが好きな給食のおまんじゅう』—ひとりの傍観者と6人の当番のための—」

撮影協力：高尾俊介（IAMAS産業文化研究センター 研究員）、イトウユウヤ（NTT インターコミュニケーション・センター [ICC] テクニカルスタッフ）、山下 健（椋山女学園大学、TAB）、富田太基（TAB）、鈴木悦久（名古屋学芸大学 講師）、田中省吾（情報科学芸術大学院大学 M2）