

モーショントキャプチャプロジェクト 国宝能舞台のCG再現とその応用

八村広三郎
理工学研究科

概要 本プロジェクトでは、モーショントキャプチャ技術を利用して、舞踊のデジタルアーカイブ、すなわち、身体動作の計測と記録・保存、CG再現、動作の解析・比較などの研究を行ってきた。今回、このような無形文化財、特に能の仕舞をキャプチャしたデータに基づく演技の再現のためにふさわしい能舞台のCG再現を試みた。歴史的・文化的価値のきわめて高い、西本願寺の国宝「北能舞台」を対象とした。form・Zを用いて図面からモデリングを行い、能役者の視点でのウォークスルーアニメーションを可能にし、また、OpenGL化して、大画面立体表示システムでのキャラクタアニメーションの立体表示を可能にした。モデリングにはいまだ不十分などころがあるが、さらに改良して、研究成果の公表に活用することを考えている。また、このCG舞台は、本来の能の表現だけでなく、バレエやダンスなどの新しい芸術表現のためにも利用することを企図している。

Motion Capture Project: CG Modeling of the Historical Noh Theater and Its Application

Kozaburo Hachimura
Graduate School of Science and Engineering

Abstract In this project a research on digitally archiving intangible cultural properties, e.g. dance, has been carried out, including measurement/recording, quantitative analysis and comparison of body motion. In this report a reproduction of historical Noh theater by CG modeling is described which can be used for the research project. The walk-through animation of a rendered scene from the view point of the Noh player has been produced by analyzing his motion data during the performance. Also, the model and the motion data have been used for stereoscopically displaying the animated scene on a large-scale screen display system.

1 はじめに

人体の動きを計測対象とするモーショントキャプチャの技術が開発され、コンピュータゲームや映画の制作に利用されるようになってきている。筆者は、数年前からこのモーショントキャプチャ技術を利用して、無形文化財のデジタルアーカイブ、すなわち、さまざまな舞踊の計測と記録・保存、CG再現、動作の解析・比較などの研究を行ってきた [1]。本COEのプロジェクトでもこの研究を継続し、おもに能や日本舞踊などについて、いくつかのテーマで研究を行っている。これらの研究テーマの概要については、2003年度の報告書 [2] で述べているとおりである。これらのテーマについての2004年度の研究成果としては、文献 [3] から文献 [11] を発表している。ここでは、これらの研究についてはふれず、今年度新たに始めたテーマである能舞台のCG復元とVR利用の研究について述べる。

モーショントキャプチャによって得られた能や日本舞

踊の動作に関するデータは、数値的・定量的な動作分析や比較研究に利用されるが、これらのデータから3次元CGによるキャラクタアニメーションとして再現することもできる。このとき、プロ級の表現芸術の再現のためには、CGキャラクタそのものの詳細な表現だけでなく、それらの演技にふさわしい環境、すなわち、舞台やその周辺の様子を用意する必要がある。このような観点から、今回、無形文化財、特に能の仕舞をキャプチャしたデータに基づく演技の再現のためにふさわしい能舞台のCG再現を試みた。ここでは、本COEプログラムの趣旨にもふさわしく、また歴史的・文化的価値のきわめて高い国宝建築物である、西本願寺の「北能舞台」を対象とした。このCG再現された能舞台は、モーショントキャプチャでデジタルアーカイブされたさまざまな能の表現だけでなく、将来的には、他の舞踊表現のためにも利用することも企図している。

2 大画面立体表示装置

本学情報理工学部には大型スクリーンに立体画像を表示する装置が設置されており、我々はこれをIVE(Immersive Virtual Environment:没入型仮想環境)と呼んでいる。このIVE上に表示された能舞台の上で、能役者のCGキャラクタに能を演じさせることが最終的な目標である。そのために、能舞台のCG、役者のCGキャラクタ、舞踊のモーションデータの3つコンテンツが必要となる。本研究のテーマはおもにこの能舞台のCGを作成することである。

IVEは大型湾曲スクリーン、高輝度DLPプロジェクタ、表示処理用PC、トラッキング用PC、トラッキングデバイス、トラッキング処理用PC、湾曲補正・レンディング装置、および立体視用の液晶シャッターメガネから構成されている。

IVEのスクリーン(図1)は、高さ約1.8m、差渡し約6mの大きさで、円弧を描くように湾曲した形状をしており、この画面の表示を3台の表示処理用PCがスクリーンの正面、左面、右面の各面に対して描画を行っている。描画用のプログラムはCAVELibというライブラリを用いて記述される。表示処理用の各PCはネットワークで接続されており、それぞれで同じプログラム起動すると、CAVELibが各PCの時間的な同期をとって実行する。そのため、各面において映像がずれることはない。また、湾曲したスクリーンに画像を正しく映すための湾曲補正と、各面を自然につなが合わせるためのレンディング処理をCompactUTMと呼ばれるコンピュータが行って、最終的にスクリーン上に高解像度で大画面のCG映像が投影される。

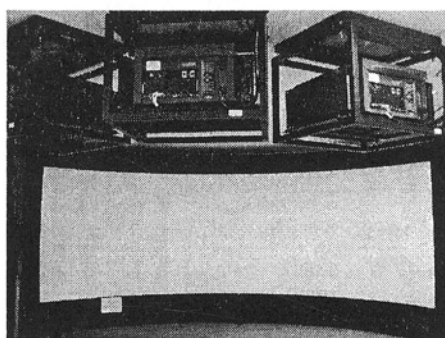


図1: IVEの大型スクリーンと3台のプロジェクタ

IVEでは液晶シャッターメガネ(図2)を使って立体視を行う。IVEのスクリーンには左目用の画像と右目用の画像が1/120秒周期で交互に表示されており、液晶シャッターメガネは画像の切り替えと同じタイミングで左目と右目のシャッターを交互に開閉する。これによって

左目には左目用の画像、右目には右目用の画像しか見えないので、人間にはスクリーン上の画像が立体であるかのように見える。画面とメガネの同期はスクリーンの周囲に設置された赤外線エミッタから放射される赤外線による同期信号を、メガネの中央部にある赤外線センサが受信することで実現されている。

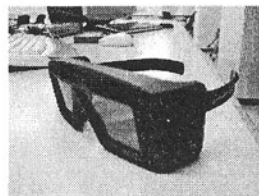


図2: 液晶シャッターメガネ

IVEでのインタラクションは磁気トランスミッタとWANDA(図3)と呼ばれるデバイスを使って行う。WANDAは、内部に組み込まれた磁気センサで位置情報と方位情報を得ることができる。WANDAを操作することで視点位置の移動や回転を行い、スクリーンに表示された仮想空間内をウォークスルーすることができる。WANDAが取得したデータはトラッキング用のPC(Trackd-PCと呼ぶ)を経由して表示処理用のPCへと渡される。

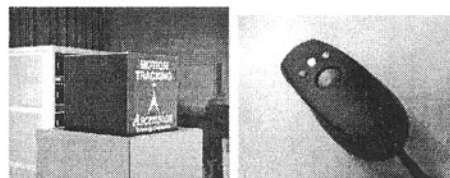


図3: 磁気トランスミッタとWANDA

3 能舞台

3.1 能舞台の構造

能舞台は図4に示すように、本舞台、地謡座、後座、橋掛りの部分により構成されている。

本舞台は、約6m四方の正方形の床面部分である。床板は正面から見て縦方向に敷いてある。また本舞台の四隅には4本の柱がある。正面見所から見て、本舞台奥の右側にあるのが笛柱、本舞台手前の右側にあるのがワキ柱である。本舞台奥の左側にあるのがシテ柱で、シテの常座に近いのでこの名前がある。本舞台手前の左側の柱が目付柱である。この柱は、演者、特に面をつけている演者が、所作をするための目標とするので

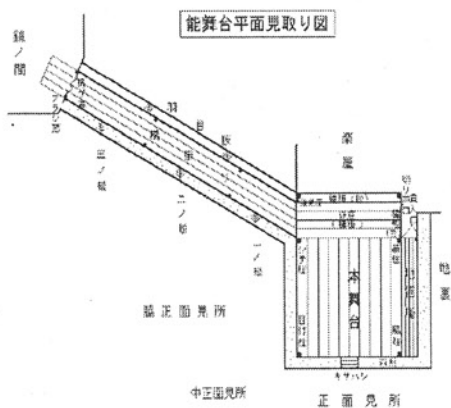


図 4: 能舞台の基本構造

この名称がある。

本舞台の向かって右側にある、幅約1メートルの張り出し部分が地謡座で、ここに能の地謡方が列座する。

本舞台の奥にある、奥行き約3メートルの張り出し部分が後座である。後座の後ろと横の壁は鏡板といい、正面の鏡板には松の絵が描かれている。また、右側の鏡板には若竹が描いてあることがおおいが、本願寺の北能舞台では松が描かれている。

後座の左側には鏡の間から斜めに橋掛りが接続する。橋掛りは単なる通路ではなく、ここでも演技が行われる。

その他、能舞台の特徴的な部分としては、白州、床下、はしご段、橋掛りの両側の松などがある。白州は、舞台を取り囲む地面で、多数の10センチ程度の丸みを帯びた小石（ぐり石）で覆われている。能舞台の床下には、地面に数か所穴を掘り、そこに焼き物の大甕を置く。この甕は、舞台上の音響を共鳴させるためのものといわれている。本舞台の正面には、白州との間にキザハシ（はしご段）が掛けられている。現在は使われることは少ない。橋掛りの両側の白州には、小さい松の木が植えてある。観客席に面した側は、松の数が三本と決まっており、本舞台に近い方から、一ノ松、二ノ松、三ノ松と呼ばれる。後ろ側の数は不定である。これらの松は、演技上の位置の目印にもなっている。

3.2 本願寺北能舞台

西本願寺は、親鸞聖人によって開かれた浄土真宗本願寺派の本山で、桃山文化を代表する建造物や庭園が今日まで多く残されており、平成6年(1994年)12月に、ユネスコの世界文化遺産に登録された。

本願寺には常設の能舞台が書院の南北に二つあり、北能舞台は、現存する日本最古の能舞台であって国宝に指定されている。室町後期の能の名手である下間仲孝

が家康から与えられ、本願寺に移築したものといわれている。国宝であるため、特別な場合以外、この北能舞台は実際の演能には使われない。

見所である白書院のやや左側から、舞台を撮った写真が図5である。2004年12月現在、右手の御影堂の改修工事中で、地謡座側はビニールシートで覆われている。



図 5: 本願寺北能舞台

4 能舞台の幾何形状モデリング

4.1 モデリングのための資料

能舞台のモデリングにはform・Zを使用し、今回、北能舞台全体とその周辺の、白州、および周りを取り囲む建物の外観を作成した。能舞台は特徴的な部分の再現に特に力を注いだ。周囲の建物は、今回は、時間の関係で、舞台上の演者から見える範囲のものにとどめた。

モデリングには、京都府文化財保護課から提供して頂いた、昭和3年の解体修理の際に作成された実測図を使用した。平面図、正面図、横断面図など、全部で9葉の図面がある。図6は、この実測図中の、本舞台と橋掛りの部分の正面図である。

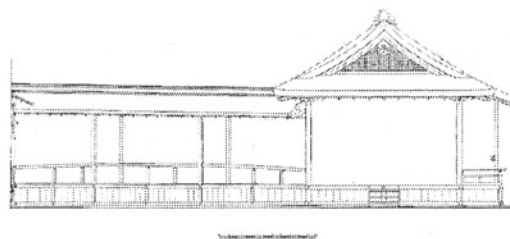


図 6: 正面図

質感設定、テクスチャマッピングなどのレンダリン

グの設定のために、われわれが実際に現場で撮影した写真を利用した。また実測図だけでは判断できない部分のモデリングの際も参照した。

さらに、出版されているいくつかの書籍、たとえば[12][13]も参照した。

この北能舞台は屋外にあって、特別な保護は施されていないので、風雨による劣化が著しい。鏡板の部分も図7に示すように、松の絵の大部分の顔料が薄落しており、絵はほとんど確認できないような状況になっている。松の絵は能舞台の特徴的な部分のひとつであるため、より完成度の高いコンテンツを作成するためにはこの部分の表現は極めて重要である。ここでは、川面美術研究所の荒木かおり氏に依頼して、実際の松の絵を写し、高さ30cm程度の小さい板の上に再現模写してもらった。これを図8に示す。これらをデジタルカメラで撮影し、テクスチャマッピングに使用した。

図7に示すように、現状の松の絵はほとんど確認できないが、同時代の狩野派の現存する松の絵を参考にし、現状の鏡板の松の葉叢の痕跡、松の幹に生える苔の痕跡により得られる幹のパターン、また、松葉や小枝の痕跡より得られる表現方法などの情報を利用して再現模写が行われている。

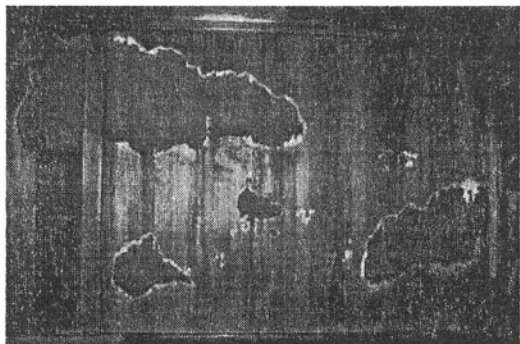


図7: 現状の鏡板の松の絵

4.2 モデリング手順

以下に、能舞台のモデリング手順の概略を述べる。

実測図を用いて、舞台、橋掛りの平面図を入力する。床の板の大きさやふき方も、一枚一枚、実際のものと同じ寸法で、同じふき方でモデリングしている。

平面図を元に、実測図から求めた各部分の高さを入力し、舞台下から舞台の板1枚1枚、柱、屋根、橋掛りを順に立体的にした。図9に、作成した立体モデルのワイヤーフレーム図を示す。

大まかな形が完成した後、屋根の飾りや瓦、柱の組み木(斗組)の詳細な形状、臺股(かえるまた)な

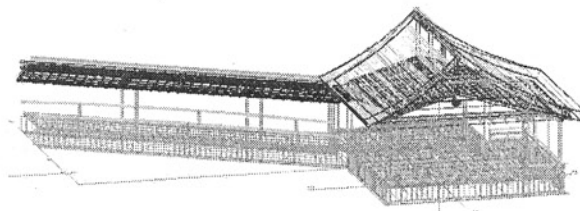


図9: 能舞台のワイヤーフレーム図

ど細かな部分を作成する。

図10に柱の組み木部分の例を示す。図11に示す臺股は、まず外枠の形状をモデリングし、中の彫り物の部分はテクスチャマッピングを行った。

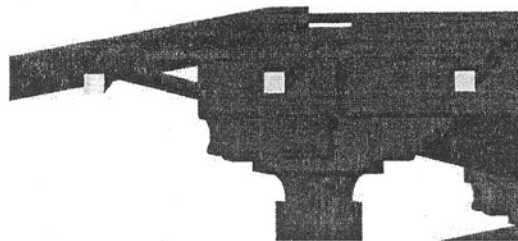


図10: 柱の組み木部分のモデリング例

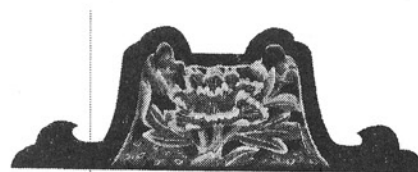


図11: 臺股のモデリング

質感を設定する。

必要なオブジェクトに対して、form・Zで用意されている質感(色、模様)などを設定する。

テクスチャマッピングを設定する。

使われている板材などに関しては、画像データを用いてテクスチャマッピングする。また、復元模写による鏡板の松の絵もテクスチャマッピングする。

照明を設定する。

以上が、モデリング手順の概略である。さて、能舞台を取り囲む白書院等については、実測図面を入手す



(a) 正面の鏡板

(b) 側面の鏡板

図 8: 復元された鏡板の松の絵

ることができなかった。したがって、周囲の建物については、能舞台上の演者から見える範囲の建物の外側部分のみの概略モデリングにとどめた。現場での巻尺による簡単な実測と写真からの推定した寸法に基づいたものであり、今回のモデリングは正確なものではない。図 12 に、能舞台部分を除いた周囲の部分のレンダリング結果を示す。

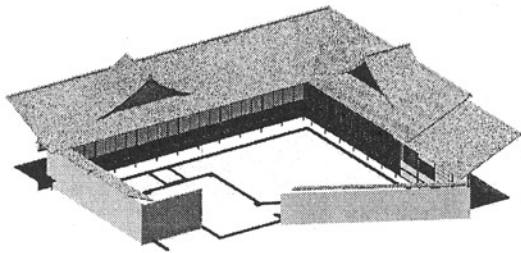


図 12: 能舞台周囲のレンダリング結果

5 form・Zによるレンダリング結果とアニメーション

form・Zによるレンダリング結果の例を図 13 と図 14 に示す。

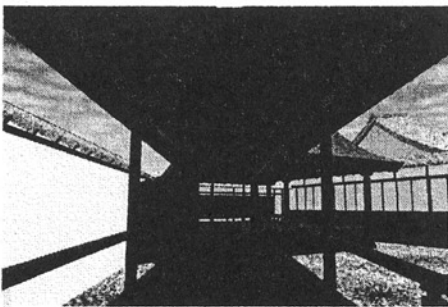


図 13: レンダリング結果：橋掛りから見た能舞台

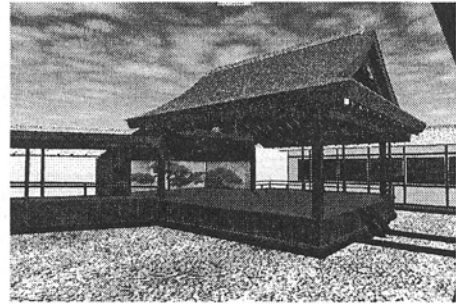


図 14: レンダリング結果：白書院から見た能舞台

form・Zでは、作成したモデルに対して、視点と視線方向の系列を指定して、この視点をたどるウォークスルー・アニメーションを作成することができる。すなわち、いくつかのキーフレームでの視点と注視点を設定すれば、これらのキーフレーム間のフレームが自動的に作成される。この機能を使って作成したウォークスルー・アニメーションの様子をスナップショットにして図 15 に示す。ここでは、橋掛りから移動を開始し、能舞台中央まで移動してそこで右に回転を行うよう視点の移動を指定している。

さらに、ここでは新しい試みとして、モーションキャプチャによって得られた能の演者の視点位置からのウォークスルー・アニメーションの作成を行った。図 16 に示すように、モーションキャプチャの際に頭部に 4 個つけているマーカー位置の情報から、左右の目の中央の座標および視線の方向ベクトルを抽出し、これをアニメーションの作成に利用する。ここで、この結果を示すことはできないが、片山清司氏による実際の能の演目「海士」のキャプチャーデータを使用して試みたところ、普段、観客は見ることでできない、能役者の視点での迫力あるアニメーションを得ることができた。

6 IVEでの能舞台とキャラクターアニメーションによる能の表示

form・Zでのモデリングにより再現した能舞台の応用として、IVEのスクリーン上で能役者のCGキャラクターがこの能舞台上で能を演じ、これを立体視するためのアプリケーションプログラムを作成した。

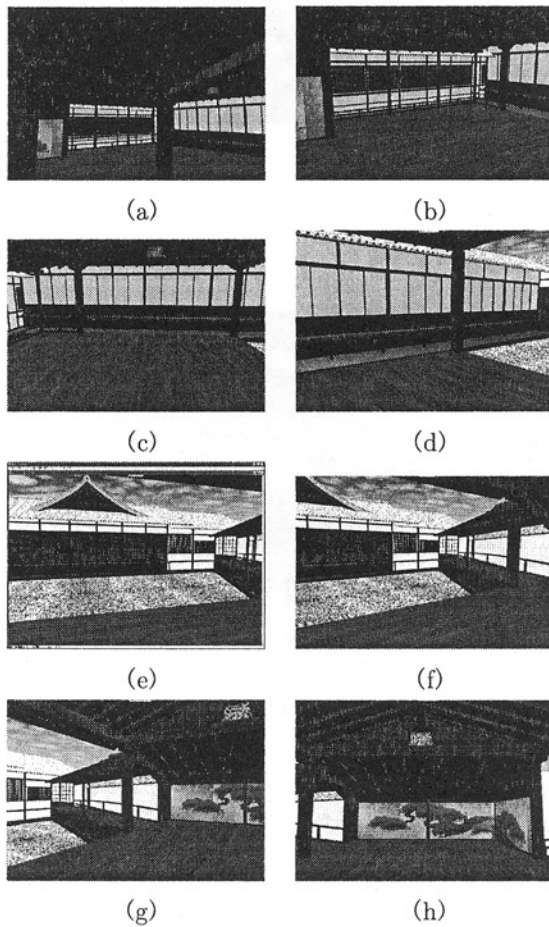


図 15: ウォークスルー・アニメーションの様子

6.1 モデルの OpenGL 化

IVEでインタラクティブなCGコンテンツを表示するためにはCAVELibとOpenGLを用いてプログラムを作成する必要がある。そのため、まず、form・Zのモデルデータのファイルから、まず、OpenGLのソースコードへの変換を行う。本研究では、市販のソフトウェアPolyTransを用いてこの変換を行った。ファイル形式の変換の流れは以下のとおりである。

1. form・Zで作成した能舞台のデータをVRML形式でエクスポートする。
2. PolyTransを使ってVRML形式のファイルを読み込み、DirectX形式で出力する。
3. DirectX形式のファイルを再びPolyTransで読み込み、OpenGLのソースコードに変換し出力する。

VRMLから一旦DirectXを中継してからOpenGLに変換するのは、PolyTransによってVRMLから直接OpenGLに変換すると、ポリゴン頂点の座標とテクスチャ座標の対応づけが乱れるという問題が生じたためである。

6.2 OpenGLによるテクスチャマッピング

PolyTransによって出力されるOpenGLのソースコードでは、テクスチャマッピングを行う関数の本体部分が空白になっているので、この部分のプログラムは独自に作成する必要がある。

テクスチャマッピングは、以下のステップでプログラミングを行う[14]。

1. テクスチャ用の画像データを用意する。
2. テクスチャ・オブジェクトを作成し、これにテクスチャを指定する。
3. テクスチャの適用方法を設定する。
4. テクスチャマッピングを有効にする。
5. テクスチャの座標を指定してポリゴン面に貼り付ける。



(a) 頭部のマーカー (b) 視点と視線方向

図 16: 視点・視線方向の決定

6.3 ぐり石を敷いた白州の立体表現

能舞台周囲の白州には、図5で分かるように、丸い小石（ぐり石）が敷き詰められている。この小石のひとつひとつを正確にモデリングして表示に利用するとポリゴン数が極端に増大し計算負荷が莫大になる。地面部分をポリゴンとしてモデルし、ここに実際に敷き詰められた砂利石の写真のテクスチャを貼り付ければ、それらしく表現することができるが、これでは立体感がなくリアリティに欠ける。

このような問題のために一般的に用いられる手法にバンプマッピングがある。しかし、OpenGLでは標準でバンプマッピングがサポートされていない。そこで、ここでは、簡単にモデリングし、また計算負荷を極端に増やさない表現方法について検討した。

すなわち、いくつかの小石のモデルを作成し、それらをランダムに平面上に撒き散らす方法を試みた。

まずはじめに、24個の頂点を持つ、碗を伏せたような石の立体形状をモデル化し、これを基本形とする。この各頂点位置をある範囲でランダムにずらし、10種類の石を用意する(図17)。

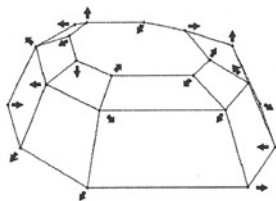


図17: 石の基本形のランダムな変形

この10種類の石の中からランダムに1つを選び、ランダムな数値でスケール変換を行って平面上の格子点に配置する。さらにこの石に対してランダムに回転変換を行い、また格子点から位置を平行移動させる。

さらに、これらの石のモデルを置く地面そのものにも実際の写真をテクスチャ画像として貼っておく。この方法で表示した結果を図18に示す。

6.4 キャラクタアニメーションの表示

前述した方法により form・Z からの変換で得られた OpenGL による能舞台のプログラムを、さらに、IVE での立体表示のために CAVELib を用いて書き直し、この上にモーション付きの CG キャラクタを表示する。能舞台の CG とキャラクタの CG は座標系が異なるので、適切に座標変換とスケールをする必要がある。キャラクタのスケール変換は能舞台の図面の縮尺を参

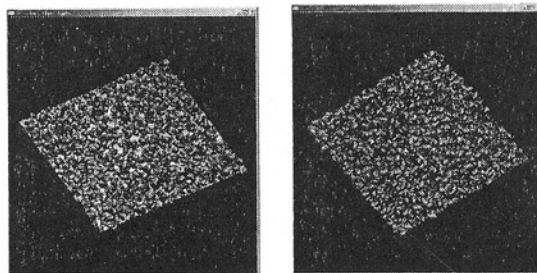


図18: 平面上に石をランダムに配置した例(左:石の数576個,右:同900個)

考にし、平行移動と回転変換は実際に演じられている演目を収録したビデオを参照して行う。

はじめに白州に石のモデルを配置せずに、またテクスチャ画像を利用しないで、プログラムを実行した。図19に実行時のスナップショットを示す。これらの画像では舞台とキャラクタが二重に重なって見えるが、これは立体表示を行っている画面を撮影したためである。この画面で、液晶シャッターメガネを用いて立体視を行うと、迫力ある立体映像を観察することができる。特に演者に近い視点での映像は能が間近で演じられているような臨場感を感じることができた。

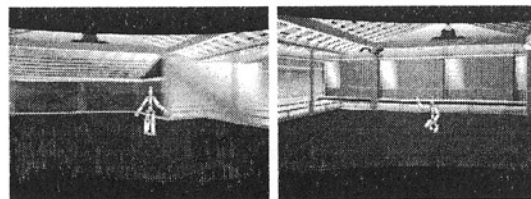


図19: プログラム実行時のスナップショット

今回使用したモーションデータのフレームレートは30フレーム/秒であるが、このフレームレートでは表示の処理が重くなり、キャラクタの動作が実際より遅くなった。そこで、プログラムで数フレームずつ読み飛ばして処理を軽くした。読み飛ばしのフレーム数を変化させてプログラムを実行し、最適なフレーム数を求めた。その結果、読み飛ばすフレーム数は3フレームが最適との評価が得られた。

次に、ぐり石の画像を白州の地面のポリゴンにマッピングし、照明効果を入れた場合、3フレームの読み飛ばしでは不十分であり、4フレームの読み飛ばしが必要であった。この場合、モーションデータのフレームレートは6フレーム/秒となる。

次に、石のモデルを白州の地面にランダムに配置してプログラムを実行した。この手法を用いると、ポリゴン数が710,000にもなり、表示が非常に遅くなる。こ

のため、WANDA の操作が画面上に反映されるまでに数分以上かかるなど、ウォークスルーが満足に行えなくなる。能舞台および周辺の建物などのモデリングのためのポリゴン数は 44,000 程度であるので、ぐり石のモデルのためのポリゴン数の多さが分かる。また、キャラクタの動作も非常に遅くなる。以上の結果から、IVE で、能舞台とキャラクタの動作を表示するには平らな地面に石のテクスチャ画像を貼り付ける方法が現実的であることが分かった。

7 あとがき

西本願寺の国宝北能舞台とその周辺をモデルとして 3 次元 CG モデルを作成した。解体修理時の実測図を元に、細部についても詳細にモデリングを行った。また、柱や舞台の床板、蛙股、鏡板については画像のテクスチャマッピングを行った。

作成したモデルに対して、演者の視点で動くアニメーションを作成した。これにより、観客からは知ることができない演者の目線での迫力のある情景変化を観察することができた。

また、能舞台とモーションキャプチャによる CG キャラクタによる能のアニメーションを IVE で表示することによって、立体的で臨場感のある映像を表示することができた。

課題としては、能舞台の周囲の建物のモデリングについて、舞台上の演者から見える範囲の外側のみの簡略モデリングにとどめたが、これらも、より詳細に作成して、より完成度の高いものにする必要がある。また、この周辺部分のオブジェクトには、簡単な質感と色彩を form・Z で設定したので、その部分の表現は不十分である。特に、form・Z で設定した質感の情報が、変換によって得られた OpenGL のソースコードでは正しく反映されておらず、色彩や質感が大きく異なった結果となるという問題が残っている。

ぐり石を敷き詰めた白州のモデリングにはひとつの方法を試みたが、ポリゴン数の増大のため、期待どおりの成果が得られなかった。また、橋掛かり脇の 3 本の若松のモデリングも現状では未着手である。

今後、IVE 表示における CG キャラクタについては、現状のような単純なスティックモデルではなく、より忠実な表現の人体モデルを利用できるようにすることが必要である。さらに教育的なコンテンツへの応用も考慮し、能舞台の各部についての説明を加えたり、能舞台の特徴的な部分をクローズアップあるいは分解のアニメーションにより構造の説明ができるような機能を加えていきたいと考えている。

謝辞 本研究に対してアドバイスを下さった益田兼房教授、重田みち先生に厚くお礼申し上げます。また、本研究にご理解をいただき、能舞台の見学、写真撮影等で度々お世話になりました西本願寺の佐々木善昭氏、実測図についてお世話になりました京都府文化財保護課の平井氏、さらに、鏡板の松の絵の復元模写をお願いした川面美術研究所の荒木かおり先生に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] 八村広三郎：無形文化財のデジタルアーカイブ，画像電子学会第 30 回年次大会予稿集，pp.29-36，2002.
- [2] 八村広三郎：モーションキャプチャプロジェクトー舞踊のデジタルアーカイブ，京都アート・エンタテインメント創成研究，pp.113-118，2004.
- [3] Kozaburo Hachimura, Hiromu Kato and Hideyuki Tamura: A Prototype Dance Training Support System with Motion Capture and Mixed Reality Technologies, Proceeding of the 2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.217-222, 2004.
- [4] Mitsu Yoshimura, Kazuya Kojima, Kozaburo Hachimura, Yuuka Marumo and Akira Kuromiya: Quantification and Recognition of Basic Motion "Okuri" in Japanese Traditional Dance Proceeding of the 2004 IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, pp.205-210, 2004.
- [5] 瀬藤義則，八村広三郎，中村美奈子：モーションキャプチャデータからの舞踊譜 Labanotation の生成，情報処理学会人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，pp.245-252，2004.
- [6] 小林弘幸，八村広三郎，中村美奈子，芝野耕司：XML 記述に基づいた舞踊譜 Labanotation の入力・編集と舞踊動作表示のためのシステム，情報処理学会人文科学とコンピュータシンポジウム論文集，pp.237-244，2004.
- [7] 阪田真己子，八村広三郎，吉村ミツ，小島一成：モーションキャプチャを用いた舞踊運動の感性情報処理の試み，ヒューマンインタフェース学会ヒューマンインタフェースシンポジウム 2004 論文集，pp. 267-272，2004
- [8] 吉村ミツ，小島一成，八村広三郎，丸茂祐佳，黒宮明：日本舞踊における基礎動作「オクリ」の識別，計測自動制御学会第 21 回センシングフォーラム論文集，pp.208-212，2004.
- [9] 高階克己，八村広三郎，吉村ミツ：LMA に基づく舞踊動作の解析・評価，情報処理学会研究報告，2005-CH-65，pp.9-16，2005.
- [10] 吉村ミツ，八村広三郎，丸茂祐佳：舞踊動作を表す特徴についての検討，情報処理学会研究報告，2005-CH-65，pp.17-24，2005.
- [11] 丸茂祐佳，吉村ミツ，小島一成，八村広三郎：日本舞踊の基礎動作「オクリ」に現れる女らしさの特徴解析，舞踊学，第 27 号，2005。（印刷中）
- [12] 北尾春道：国宝能舞台，洪洋社，1942.
- [13] 文化庁監修：国宝 15 建造物，毎日新聞社，1987.
- [14] Mason Woo, Jackie Neider, Tom Davis 著，(株)アクロス訳：OpenGL プログラミングガイド第 2 版，ピアソン，2002.