

東京大学大学院 情報学環 教授

池内 克史

「文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための自動化手法」

研究期間：平成12年7月1日～平成17年3月31日

1. 研究実施の概要

本プロジェクトは、図1.1に示すように鎌倉や奈良大仏、民俗舞踊や匠の技といった失われてはならない貴重な文化遺産を高度メディアコンテンツとし、保存や理解・普及に役立てるための視覚情報工学の新たな手法を開発することを目的として研究を行った。

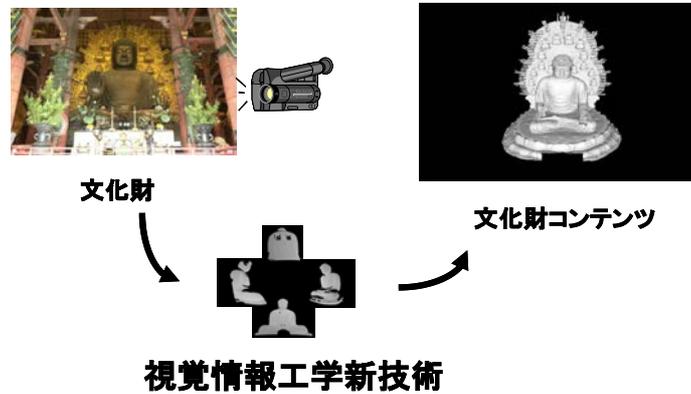


図1.1 本プロジェクトの目的

研究の切り口として、図1.2に示す4つの分野を挙げ、平行して研究開発した。

1. センサからの情報を統合し、全体形状を獲得する幾何情報取得に関する研究
2. 物体本来の色・艶などの見え再現のため光学情報取得に関する研究
3. 物体をとりまく環境情報取得や、それに基づく見えの生成法に関する研究
4. 舞踊等の人の動き情報（無形文化財）の保存や解析、再現等を可能にする動き（時系列）情報取得に関する研究

さらに、これら開発された要素技術を統合する目的から代表的な文化遺産をとりあげ、コンテンツ化を行い、プロジェクト全体の統合性・整合性を取ることにした。

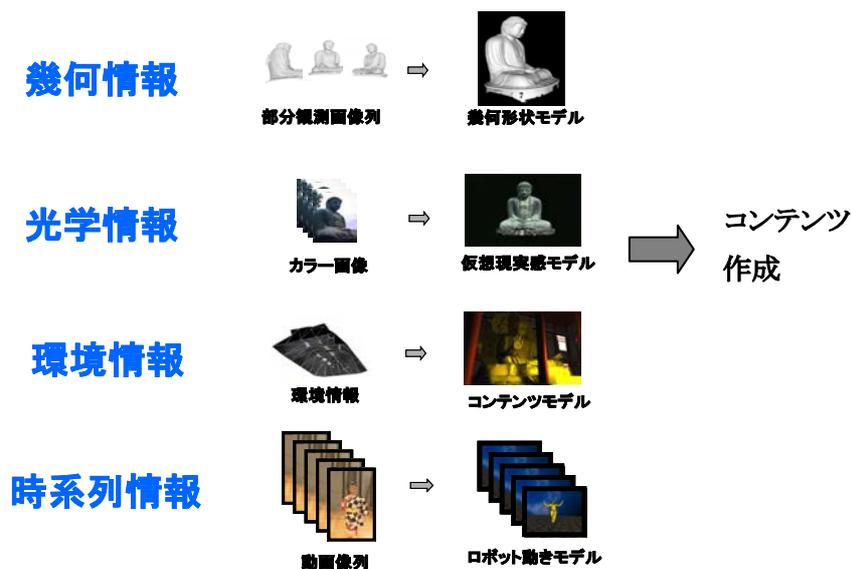


図1.2 プロジェクトの概要

幾何情報取得に関しては、図1.3に示すように、幾何情報収集センサの開発、位置あわせアルゴリズムの開発、統合アルゴリズムの開発といった3つの幾何情報処理ステップに沿って研究を進めた。

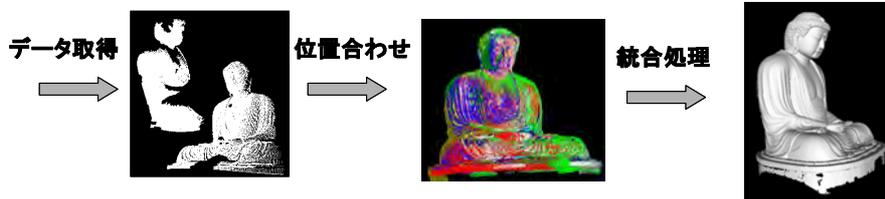


図1.3 幾何情報処理の3ステップ

まず、データ取得に関しては、センサ開発に重点をおいた。現在市場に出回っている既存の距離センサは全て地上据え置き型である。このため、大型の文化遺産に対しては、足場等を組み地上からの視点を補うのが基本である。この方式では、足場建設に時間がかかるだけでなく、たとえば東大寺大仏殿のような大型の構造物では不可能に近い。そこで、気球を利用して空中を浮遊しながら情報が収集できるセンサの開発をめざした。当初は、レーザを発射するごとにセンサの位置姿勢を決定するような方式も考察したが、最終的に画像全体からセンサの動きを補正するアルゴリズムの開発に成功し、これにより、足場等の設置が不可能な高所からのデータも得られるようになった。(図1.4)

これと並行して、通常のセンサではレーザ光の反射を利用して形状取得を行っているが、文化財のなかには、例えばペルシャグラスのような透明表面を持つものも多い。こういった透明物体の形状を得るセンサの開発にも成功した。(図1.5)



図1.4 開発した気球搭載型センサ

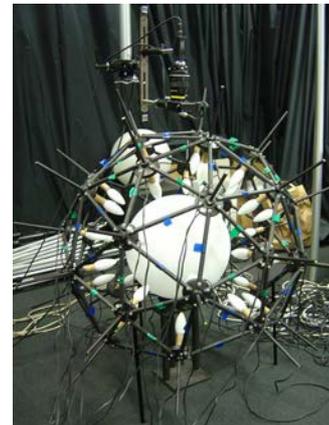


図1.5 透明物体測定センサ

各センサからの情報はそのデータが採られた観測位置からの座標系で表現されている。これら部分データから全体の形状モデルを生成するためには、各センサの位置を決定する位置あわせアルゴリズムとデータを張り合わせる統合アルゴリズムが必要となる。位置あわせアルゴリズムに関しては、現場でその日収集したデータを高速に簡便に処理し、データの取り忘れ等のチェックを行うため、PC上のグラフィクスハードカードを利用した高速位置あわ

せアルゴリズムの開発。ならびに研究室にもどってからノイズが多い場合でも位置合わせ可能なアルゴリズムや、大量のデータを同時に処理できるPCクラスタ上での並列高速位置合わせアルゴリズムを開発した。張り合わせ統合処理に関しても、PCクラスタ上でロバストに且つ並列的に統合処理の行えるアルゴリズムも開発した。

これらの技術を活用して100枚以上の距離データからなる国宝東大寺盧舎那仏（奈良大仏）などの形状データを処理し文化財のデジタル保存を行った。（図1.6）



図1.6 デジタル奈良大仏

光学情報取得とは、幾何形状モデルとカラー画像から対象のうえにカラー画像を重ね合わせることや、重ねあわせられた画像を元にそのもの本来の見え生成することを目的とする。まず、重ね合わせに関しては、比較的小型の文化財に適用可能なキャリブレーション箱を利用するものや、距離センサから得られる反射率画像を利用して大型の文化財に適用可能な手法を開発した。図1.7は、キャリブレーション箱を利用して広目天のテクスチャを貼り付けたもの、図1.8は、反射率画像を利用して鎌倉大仏にてカラー画像を貼り付けた例を示す。



図1.7 テクスチャ付広目天



図1.8 テクスチャ付鎌倉大仏

さらに、貼り付けられた画像を集積することで、画像部分の特性を解析し、本来の反射率を計算し、見えを生成する手法などの開発にも成功した。

光学情報の取得を行っている過程で、環境条件を推定する必要が発生する。例えば、パイヤン寺院の場合、対象が非常に大きいため、例えば北端からカラー画像をとりはじめたとしても一周する間に日照条件が変化し、整合性のとれた色合いとならない。このため、写真から日照条件を推定し、その影響をキャンセルする必要が発生する。これに関して、2枚の未知の撮影条件の画像を見比べるだけで日照条件に普遍的な画像が得られる手法を開発した。(図1.9)

また、出来上がったコンテンツを実シーンに重ねることも多い。こういった場合、仮想コンテンツと実シーンとの間で日照条件が異なるため、違和感のある画像となる。両者の関係を高速に計算し、違和感のない画像を高速に生成する手法を開発した。実際、この手法を用いて、図1.10に示すように明日香村の川原寺の複合現実感再現実験を行った。



図1.9 2枚の光源環境の異なる画像からの光源条件の推定



図1.10 仮想川原寺再現

これまで述べた有形文化財に対して、伝統芸能や匠の技といった動的な無形文化財も多く存在する。無形文化財の保存は人から人への直接的伝承が主なものであった。そのため、無形文化財の中には後継者難から日々失われているものも多いといっても過言ではない。無形文化財は、その中心表現が演者の動きのなかにこめられている。したがって、動きをどのように記録するか、動きをどのように再現するかが研究の中心課題となる。無形文化財のデジタル化は、単純に考えると演者の動きをビデオで採録し、必要に応じて再生を行えばよいことになる。実際、そのような民俗芸能のアーカイブも存在する。しかし、そのようなビデオテープは今後の後継者を育成するための素材を提供しているだけで、本来の意味での後継者を得、その民俗芸能の踊りなり匠の技を継承したことにはならない。

本プロジェクトでは、ヒューマノイドロボットをこの後継者として位置づけ、これに各種の技能を動的にアーカイブするための各種の手法を開発した。まず、人の動きはに入力手法の開発やその解析手法、および提示手法の開発を行った。人間の動きをモーションキャプチャシステムにより計算機に入力する。次に、まず何をするかという動作タスクを連続した動きの中から切り出す手法を開発した。ここから上半身、下半身の動きを解析し、踊りの重要な点を保持しつつ、ロボットにこれを投影する手法も開発した。これに基づき図1.11に示すような人間とロボットの会津磐梯山踊りの共演を行った。



図1.11 人とロボットの会津磐梯山踊り

2. 研究構想

本プロジェクトは、文化遺産のコンテンツ化に関する手法を開発することを目標とした。文化遺産には、大きく分けて奈良大仏や能面といった「静」的な有形文化財と民俗芸能や匠の技といった「動」的な無形文化財に分類できる。従って、進め方として、この2つのサブテーマを平行して行うこととした。

表2.1に提案した開発計画を掲げた。このうち幾何情報から環境情報までが、「静」的な解析に動き情報が「動」的な解析に対応している。静的な解析に関しては、東京大学に機材・経験が集中していたため、東京大学のメンバーが主にこれを執り行った。この際、得られたデータの使用方法という観点から東京文化財研究所の協力を仰いだ。動的な解析に関しては東京大学を中心とし、同様のデータを岡山大学、埼玉大学、電気通信大学、和歌山大学のチームで処理を行うというチーム形研究を行った。

東京大学においては、空中からの視点が得られる幾何情報センサの開発をめざした。プロジェクト当初予定した企業との調整が不調に終わり、2年目から新しい企業をパートナーとしてこれの開発にあたった。当初予定した1パルスごとの方向推定は現実的ではないことがわかり、(1) ジャイロを積む方式、(2) テレビカメラの画像のずれから、各時点のセンサの位置・姿勢を得る、(3) ソフト的に推定する、といった3つの方式を開発した。また、このセンサに関して特許を申請した。

また、大型文化財をデジタル化する過程で狭隘部を測定する必要性を痛感し、新しい木登りセンサを開発した。さらに、透明物体の表面を計測できるセンサも開発した。

表2.1 開発計画

研究分野		センサ系の開発	アルゴリズムの開発	コンテンツ作成	担当
静的解析	幾何	・気球センサ ・木登りセンサ	・センサデータ統合 ・多量データ処理 ・多量データ実時間表示	・奈良大仏 ・飛鳥大仏 ・バイヨン尊顔 ライブラリ	・東京大学 ・東京文化財研究所
	光学	・高度スペクトルセンサ	・反射モデルの高度化 ・幾何・光学統合		
	環境		・物体色・環境色の分離 ・環境光源分布測定		
動的解析	動き	・多視点センサ	・データ解析 ・データ統合 ・データ再現	・じょんがら節 ・会津磐梯山踊り	・東京大学 ・岡山大学 ・電気通信大学 ・和歌山大学 ・東京文化財研究所

距離画像位置あわせアルゴリズムに関しては、当初高速同時位置合わせ手法を開発することを目標とした。その後、グラフィクスハードウェアが使用可能なアルゴリズムが開発でき、特許を申請した。また、当初予期しなかった多量のデータを扱う必要が発生し、1台のPCには全てのデータが乗り切らないという事態が発生した。このため、多量のデータ量をPCクラスタ上に分散して、ロードし、並列処理を行うアルゴリズムの開発が行えた。これに関しても特許を申請した。

高度スペクトルセンサの開発に関しては、インファレンスフィルターを使用するものを試作した。また、これとカメラの画像と比較して簡便にカメラのRGBから本来のスペクトルを復元する手法に関しても開発した。これを用いて九州博物館の展示物を作成した。

反射モデルの高度化・幾何光学情報の統合に関しても、東京大学と岡山大学において当初予定した結果を得られるアルゴリズムが開発できた。物体色・環境色の分離に関しては、2枚の同一場所の異なった光源環境の画像から、物体色を推定する手法や光源環境を高速に推定する手法などが得られた。この手法を応用して、バーチャル川原寺というシステムを明日香村と共同で開発した。

開発された要素技術を用いるコンテンツの例としては、日本の三大大仏のモデル化や現存する奈良大仏から天平大仏を復元することに成功した。これらは、複数のテレビ番組として放映された。

動き情報収集に関しては、特にプロジェクト後半に集中して開発を行った。センシング方式に関しては、岡山大学と中心として執り行われた。これと平行してモーションキャプチャシステムからのデータを処理し、動きの再現の研究にも取り組んだ。特に、東京大学では、再現方法として単なるCGではなく、産業技術総合研究所ヒューマノイド研究グループと共同で、じょんがら節、会津磐梯山踊りなどをヒューマノイドロボットに踊らせることに成功した。特に、会津磐梯山踊りは、人間とロボットの共演を行うことができ、メディアに大きく取り上げられた。

3. 研究成果

3.1 幾何情報

文化財の全体的な形状情報を得ることを幾何情報取得と呼ぶ。幾何情報の取得に関しては、図3.1.1に示すように、まず部分幾何情報を得、各部分情報の位置関係を決定し、最後にそれら全ての部分幾何情報を求められた位置関係を利用して決定するという3つのステップで処理が進められる。従って、研究も幾何情報収集センサの開発、位置あわせアルゴリズムの開発、統合アルゴリズムの開発といった3つのサブテーマに分解できる。

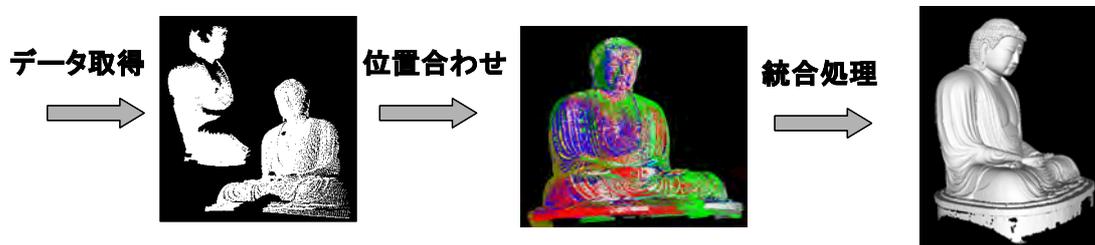


図3.1.1 幾何情報処理の3ステップ

本CRESTプロジェクトにおいて開発したセンサには、気球搭載型レンジセンサ・木登り型レンジセンサ・透明物体計測センサがある。

部分距離画像間の関係を求める位置あわせアルゴリズムとして提案した手法には、ロバスト位置合わせ・高速同時位置合わせ・PCクラスタによる大規模位置合わせ・パラメータ付位置合わせ、気球搭載型レンジセンサの動きと各画像間の関係を同時に推定する手法などを開発した。

各距離画像を張り合わせる統合アルゴリズムとしては、光学情報付き統合・PCクラスタによる並列計算アルゴリズムを提案している。また、複数レンジデータを用いたリファインメント手法を提案した。

これらの幾何情報処理の研究課題は全て東京大学のグループが担当した。以下に、それぞれの成果について述べる。

3.1.1 新規距離センサの設計（東京大学）

3.1.1.1 気球搭載型レンジセンサ FLRS (Flying Laser Range Sensor)

大規模な遺跡を計測する際、対象物が大きくなればなるほど、特に高くなるほど、地上に設置したレンジセンサからは観察が行えないオクルージョン領域が発生する。一般的には計測対象より高く足場を組み、その上にレンジセンサを持ち上げて計測を行っている。しかし、足場を組むことができたとしても、大規模な遺跡の場合では広範囲に移動を行う必要があり、そのためには多大な時間とコストがかかる。また、設置地面の状態や設置許可の問題などにより、足場を組むこと自体が不可能な場合は、それ以降の計測作業の継続ができなくなり、最終的に得られるモデルは不十分な物になる。

このような状況を打開するために、空中からの計測が有効であると考えた。これまでに空中計測システムは幾つか提案されているが、通常デジタル地図作成などの目的で広範囲な町のモデル化や地形調査に用いるため、ヘリコプタや航空機あるいは衛星を計測プラットフォームにしたシステムが中心であった。文化遺産の計測に関する実用上の問題として、作業は文化遺産に接近して行うことが多く、また文化遺産である建造物の中での作業も想定される。そのため、万が一の場合を考慮すると、文化遺産へのダメージが大きくなるヘリコプタを計測プラットフォームとして利用することは難しいと考えている。

我々は気球に搭載し空中からの計測を実現するFLRSセンサ（図3.1.2）を開発した。FLRSのレンジセンサ部は、スキャナユニット、コントロールユニット、制御用PCの3つから構成され気球に吊り下げられている。スキャナユニットの主要機能としては、1点の測距を行うレーザレーダユニット、水平スキャンを行うための4面ポリゴンミラーと垂直スキャンを行う平面スイングミラー、そして観察モニタ用及び歪み補正に用いるビデオカメラである。

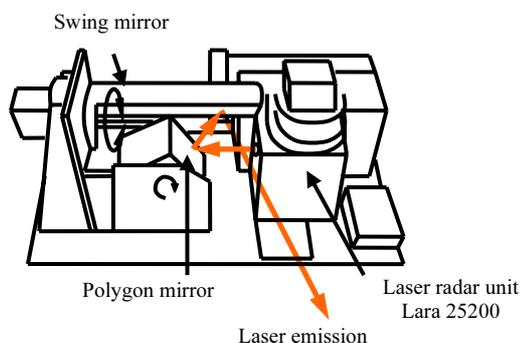
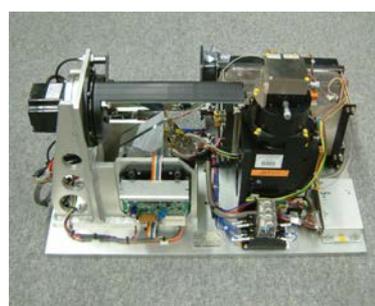


図3.1.2 FLRS (Flying Laser Range Sensor) 試作機

FLRSシステムを、カンボジア、バイヨン寺院のアーカイブ化プロジェクトで使用した例を挙げる（図3.1.3）。塔の上部の計測は地上に設置されたセンサからは不可能である。レーザレンジセンサCyrax2500を用いて計測した塔のモデルは、地上に近い視点からの表示では密に記録されているが（図3.1.4）、図3.1.5に示すような上方からの表示ではオクルージョンによる未計測領域が多いことが分かる。一方、これにFLRSの計測データ4枚をアラインメントした結果を図3.1.6に示す。この図より未計測として残っていた穴が正確に埋められているのが確認でき、これらより上空から計測するFLRSの有効性は明らかである。



図3.1.3 遺跡での運用例

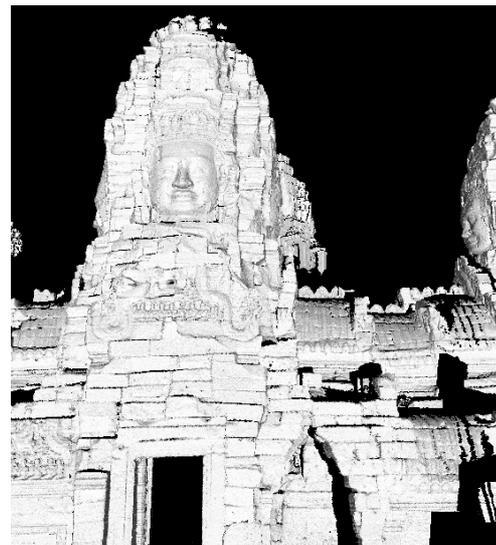


図3.1.4 地上センサによる計測結果
(下方表示)

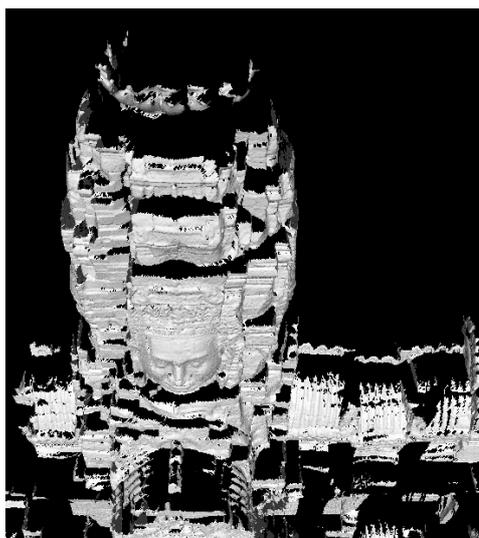


図3.1.5 地上センサによる計測結果
(上空表示)

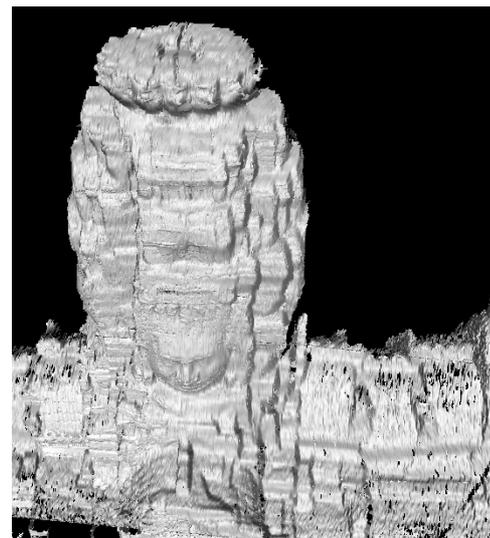


図3.1.6 FLRSの計測結果を追加

3.1.1.2 木登りセンサ型レンジセンサ

地上に固定するタイプのセンサは、どうしてもそのセンサ自体の大きさから測定できる範囲が限定されるといった問題がある。そこで我々は、大規模な物体の狭隘部を測定する際に容易に利用が可能であると考えられる高速測定可能な「木登りセンサ」を考案した。このセンサにより、従来の地上固定型の大きなセンサでは効率的な測定が困難であった狭隘部が測定可能となっている。

木登りセンサでは、時空間距離画像を中心アイデアとしている。時空間画像とは一連の濃淡画像を時間軸上に並べたものである。画像のXY座標と時間軸との三次元平面となる。その空間の同一のyの値をもつ平面をエピポーラ平面と呼び、その平面上の濃淡情報をエピポーラ画像と呼ぶ。

カメラが水平方向に移動すると、時空間画像における画像間の対応点は連続したエッジを描く。エピポーラ画像解析法では、さまざまな傾き成分を持つエッジとカメラの移動速度の積とエッジを描いた奥行き位置が比例関係にあることを利用し、奥行き情報を獲得することができる。

カメラのかわりに、距離情報を取得することが可能なレンジセンサを用いて、同様に時間軸上に距離画像を並べてみるとEPIに類似した時空間距離画像を得ることができる。EPIでは各点の奥行き位置が未知であり、センサの等速を仮定し距離を求めるが、時空間距離画像では奥行きが既知であることから、EPIと同様の解析手法を用いることによって逆にセンサの移動速度を未知数としてその推定を行うことが可能である。

我々は狭隘部の測定を行うため、はしご上を移動する市販のリフトにレンジセンサを取り付け、上下方向に移動しながら計測を行う機構を考案し、木登りセンサと命名した。まず、ラインスキャンを行うSICK社製のセンサを2台、お互いに垂直に配置した。リフトの移動方向に対し垂直方向にラインスキャンするセンサは移動経路に沿って対象全体を計測することができ、移動方向に水平方向にラインスキャンするセンサはスキャン対象の時間的な推移を観測することができる。構成は図3.1.7の通りである。このように構成された木登りセンサは、リフトに付属するウインチを利用し、2台のSICKセンサが同時に上下に運動できるようになっている。前述の時空間距離画像を用いて速度を計算することにより、正確なモデルを作成することが可能となる。

実際の遺跡において木登りセンサを利用して行った測定結果とモデル作成の様子を示す。(図3.1.8) 算出した速度を用いて、横スキャンを時系列上に並べて見ると図3.1.9のようになる。正確な速度が得られていることを示すために、地上固定型のセンサから得られる精度の高いモデルと位置合わせした結果を図3.1.10に示す。精度良く位置合わせが行われている様子が分かる。また図3.1.11に、木登りセンサから得られる距離画像複数枚を位置合わせした結果を示す。すなわち、比較的狭い場所でも計測を行うことができ、さらに、地面からの測定で問題となるモデル上部の測定も可能となった。また、同時に測定される縦スキャンのデータから時空間距離画像を用いることで、正確な速度を逆算し正しい位置合わせを可能とした。



図3.1.7 センサの構成



図3.1.8 狭隘部における運用例

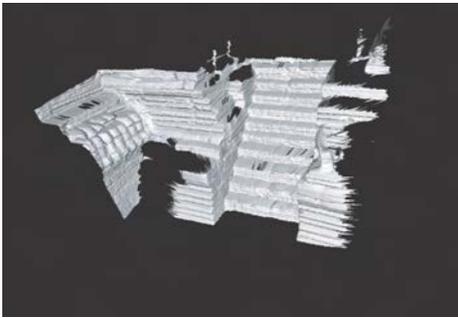


図3.1.9 得られた距離画像

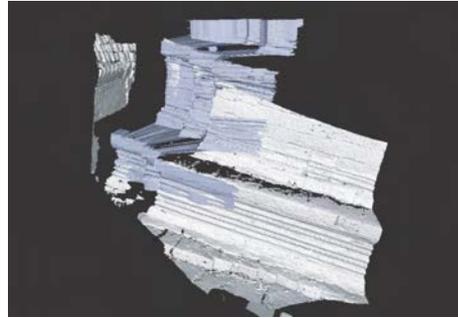


図3.1.10 異なるセンサの距離画像を位置合わせした結果（青:木登りセンサ 白:固定型センサ）

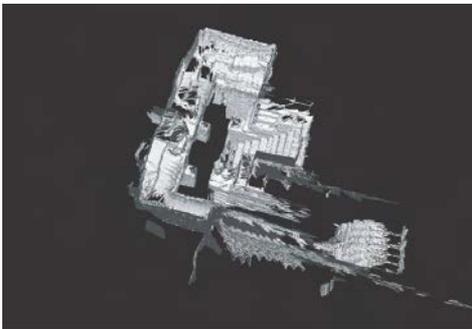


図3.1.11 距離画像を複数枚位置合わせした結果

3.1.1.3 偏光解析に基づく透明物体の三次元形状計測

ガラスなどでできた美しい美術品が数多くある。これら透明な表面をもつ物体の形状も保存したい。不透明な物体の形状を計測する手法は数多く提案されているが、透明な物体の形状を計測する研究は少ない。接触型の計測装置や走査型電子顕微鏡法や光触針法でも透明物体の形状を計測できるが、装置が高価で、計測に時間がかかり、平面に近い物体の形状しか計測できないという問題点がある。透明物体を塗料で塗って不透明物体にしてから既存の装

置で計測する方法は一部の重要な文化財にとっては不適切である。そのため、本研究では透明物体の形状が計測でき、装置が安価であるような計測装置ならびに計算手法を開発した。

光は電磁波であり、振動している。光の振動方向が偏る現象を偏光と呼ぶ。光が物体の表面で反射もしくは透過すると物体表面の形状に応じて光の偏光状態が変化する。これは逆に言えば、光の偏光状態を観測することにより物体形状を求めることができることを示している。そこで、我々は透明物体を反射・透過する光の偏光状態を解析することにより、透明物体の表面形状を推定する手法を開発した。

偏光データ取得のために開発した計測装置を図3.1.12に示す。我々はこの装置を"Cocoon"と名付けた。直径35cmのプラスチック球内部の中心に計測対象物体を配置する。このプラスチック球を36個の40Wの白熱電球で照らす。36個の光源はこのプラスチック球の周囲をジオデジックドームにより空間的にほぼ均等に配置する。この光源で照らされたプラスチック球が光を拡散し、この球が球面光源として働き、計測対象物体を全ての方向から照らすことができる。プラスチック球の上部には小さな穴が開いており、そこから対象物体をモノクロカメラで撮影する。

直線偏光板はカメラと穴の間に配置する。直線偏光板に取り付けられたモータをコンピュータから操作することにより、偏光板を回転させることができる。偏光板を異なる4つの角度に回して4枚の画像を計測し、観測光の偏光状態を計算する。

我々の開発した計測装置"Cocoon"と計算手法を使って透明物体の三次元形状を計測した例を図3.1.13に示す。それぞれの図の(a)は実際の物体の写真であり、(b)が計測した三次元形状をレンダリングした画像である。本研究では安価な装置を使用して透明物体の三次元形状を正しく求めることに成功した。

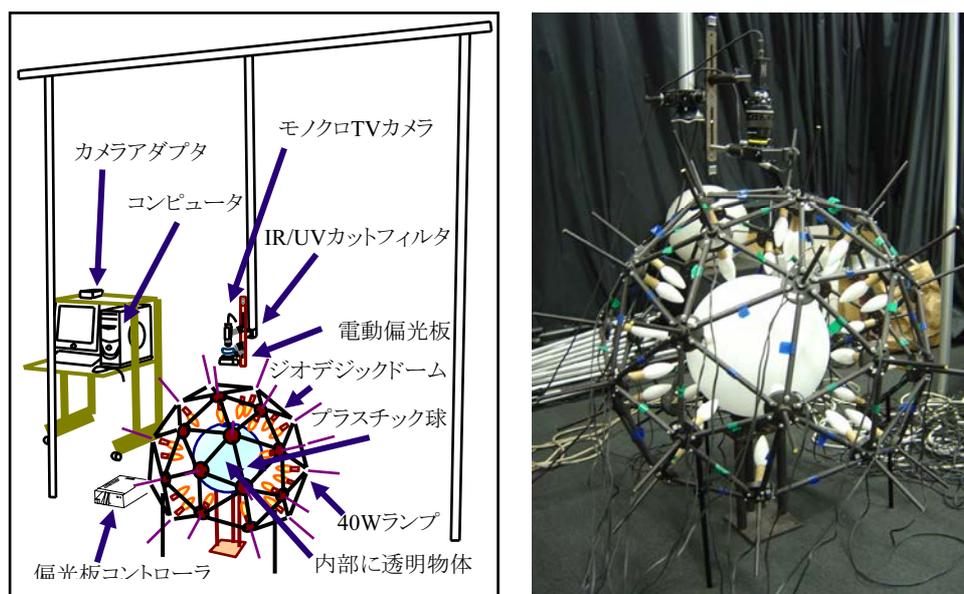


図3.1.12 計測装置"Cocoon"の構成

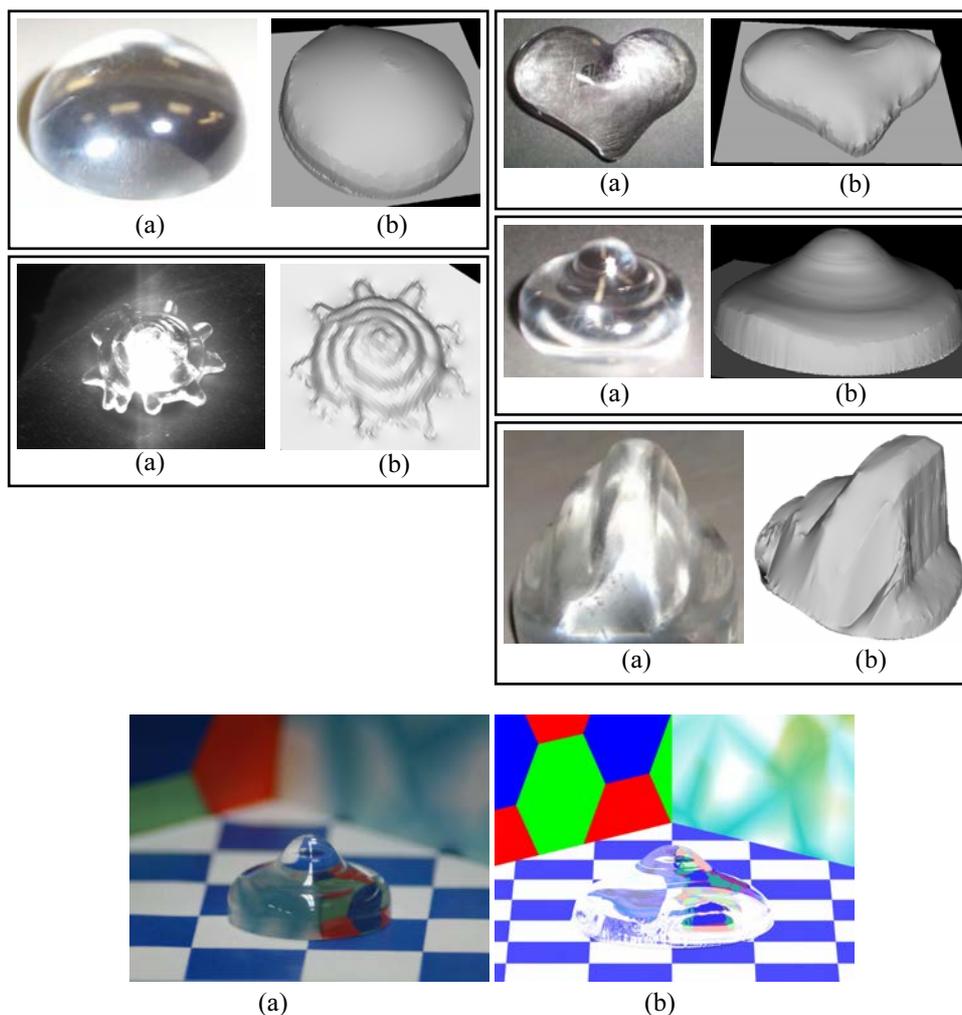


図3.1.13 透明物体の測定結果

3.1.2 位置あわせ手法（東京大学）

前節までで、距離情報を得るセンサの説明を行ってきた。当プロジェクトでは開発したセンサ以外にも、5～100mの範囲を5mmの精度で測定できるCyraxセンサ、360度全方位を高速に測定できるZ+Fセンサ、0.5m～3mの範囲を0.1mの精度で測定できるVIVIDセンサなどを用いて距離情報を収集した。

これらの距離画像は、さまざまな視点から得られている。また、距離画像はその視点にもとづいて表現されている。このため、各視点間関係を決定する必要がある。GPS等をもちいても概略の位置は決定できるが、精度が悪い。そこで、距離画像内の特徴を一致させることで、距離画像間の相対位置関係を求める手法が開発されてきた。それらの手法を総称して、位置あわせ（アラインメント）と呼ぶ。

この複数の距離画像の位置合わせは三次元レーザ計測の分野で近年注目されている研究課題の1つである。これまでに様々な手法が提案されているが、それらは大きく次の3つの要素で整理することができる。

- (1) 複数画像の取り扱い手法：逐次的、または同時的

(2) 対応成分：特徴量ベース、または点ベース

(3) 誤差基準：点と点、または点と面

- (1) 複数の距離画像の位置合わせは逐次的、あるいは同時的な手法によって実現可能である。逐次的手法では、それぞれの位置合わせ時には2つの距離画像を比較するから、メモリ消費量、計算量ともに少なく済む。しかし、それぞれ位置合わせ時に発生する誤差が蓄積され、最終的には大きな位置合わせ誤差が生じる可能性がある。特に、我々のように大型の有形文化財を扱う場合この欠点が顕著となる。一方、同時位置合わせ法は、全ての距離画像を一度に位置合わせすることで誤差の蓄積を回避する方法である。ただ、多量のデータを同時に計算機内にロードする必要があり、メモリの問題が大きい。
- (2) 特徴量ベースの方法はユークリッド変換に不変な特徴量を距離画像から抽出し、それら特徴量間の対応問題を解く方法である。もし十分な量の特徴量の対応関係が得られれば、位置合わせ計算は解析的に行うことができる。一方、点ベースの方法は距離画像を構成する三次元の点座標を直接用いるもので、点の組、例えば最もユークリッド距離の小さい点の組を動的に更新し、距離画像間の位置合わせのための変換を繰り返し求める方法である。
- (3) 点ベースの方法は、ICPアルゴリズムのように、ある基準、例えば点間のユークリッド距離などに従って距離画像間の点の対応を決定する。しかし、この基準は距離画像内の表面の情報を全く考慮していないため、表面に沿った平行移動を補正する能力が低い。この問題を解決する方法の1つは、点と点の対応ではなく、点と対応する面素間のユークリッド距離を用いる方法である。このように面の情報を誤差量へ反映させることで、点と面間の距離を用いる点ベースの方法は局所解に対してロバストになり、収束も早い。しかし点と面素間の距離の計算は、点と点間の距離に比べて計算量が多く、効率よく対応関係を見つけるために視線方向の情報を用いる方法も提案されている。

3.1.2.1 ロバスト位置合わせ

我々は、まずノイズの多い場合でも収束可能なロバストな位置合わせアルゴリズムを開発した。前節の議論から、(1) 同時位置合わせ法を基本とし、(2) 対応成分として点ベースの手法を用い、(3) 点と点の距離を誤差基準として用いた手法を開発した。大規模な対象では、1回に測定される距離画像は全体の表面領域のごく一部分であることから、誤差の蓄積を避けることができる同時位置合わせ法を採用した。また対象物までの距離が大きく、屋外環境など測定条件も良くない。このため測定された距離画像はノイズを含み、それから計算された情報はさらに不正確である。従ってデータ点そのものを対応成分として用いることにした。誤差基準として点と面の距離を用いた場合、法線方向成分の計算は上述したノイズのために不正確である。そのため、本位置合わせ手法では点と点の距離を用いることとした。さらに、点と点の距離の計算は点と面に比べて計算量が少なく、大量のデータを扱う場合には有利である。

ノイズを含んだデータを用いてロバストな推定を行うために、我々はM推定法を用いた。繰り返し計算では、次式を最小化する。

$$E(P) = \frac{1}{N} \sum_i^N \rho(z_i(P))$$

ここで、 $P = (t, q)^T$ は姿勢パラメータ、 N は対応点の数、 $z_i(P)$ は i 番目の対応点のユークリッド距離、 ρ は誤差関数である。 $E(P)$ を最小化するためには、微分を 0 にすればよく、以下の重み付最小二乗法を得る。

$$\frac{\partial E(P)}{\partial P} = \sum_{i \in N} \omega(z_i) z_i \frac{\partial z_i(P)}{\partial P}$$

本アルゴリズムでは、この誤差関数を共役勾配法により最小化する。単純なロバスト推定では、誤差基準に対して固定された閾値を設定しなければならない。しかしこのような閾値は強い非線形性を有するため、本アルゴリズムのような繰り返し計算には適していない。そこで本アルゴリズムでは $\omega(z_i)$ として、次式で与えられる連続なローレンツ関数を用いた。

$$\omega(z_i) = \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{z_i}{\sigma}\right)^2\right)^{-1}$$

z_i を、 $z_i = |R(q)\chi_i + t - y_i|$ と定義すると、 z_i の P についての微分は、次式で計算できる。

$$\frac{\partial z_i(P)}{\partial P} = \begin{pmatrix} 2(\chi_i + t - y_i) \\ 4\chi_i \times (t - y_i) \end{pmatrix}$$

提案したアルゴリズムを実装し、鎌倉大仏の距離画像の位置合わせを行った。初期位置を求めるために、まずそれぞれの距離画像の組に対して逐次比較的な方法でアルゴリズムを実行した。このアルゴリズムでは、視点位置などの付加的な情報を必要としない点と点の誤差を用いるので、ユーザが指示しなくとも比較的良い初期位置合わせを行うことができる。全ての測定データを用い、同時位置合わせ法によって得られた最終結果を図3.1.14に示す。



図3.1.14 同時位置あわせ結果

3.1.2.2 高速同時位置合わせ

前節の手法は、初期位置やセンサのノイズにロバストであった。一方、問題点として実行に時間がかかる。遺跡に出かけ、現場でその日得られたデータを処理するといった目的には向いていなかった。そこで、多数の距離画像を高速に同時位置合わせする手法を開発した。

位置合わせ計算の中で最も計算コストが高いのは対応点探索である。そこで我々は、インデックス画像を用いて頂点数 n に対して計算量 $O(n)$ で対応点探索を行う手法を開発した。この手法はPC上のごく小規模なグラフィックスハードウェアを利用することで、より高速な計算が可能となる。また、少ないメモリ使用量で位置合わせを行う事ができるといった長所がある。

変換行列の計算には線形化した誤差評価式を用い、不完全コレスキー分解共役勾配法 (ICCG) を適用する事で、多数の距離画像に対しても短時間で計算させる事が可能である。位置合わせ手順はICPと同様であるが、全ての距離画像に対して誤差関数が一つ定義され、全ての距離画像の位置が同時に推定される。手順の概略を以下に示す。

1. 全ての距離画像間で以下の計算を行う
 - 1.1 全頂点の対応点を探索する
 - 1.2 全対応点間の誤差を計算する
2. 計算された全ての誤差を最小化するように各距離画像の変換行列を求める
3. 求めた行列を全ての距離画像を適用する
4. 終了条件を満たすまで1~3を繰り返す

対応点は基準画像上の頂点から対象画像取得時のレンジセンサの視線方向に直線を延ばし、対象画像のメッシュとの交点である。このとき基準画像の視線方向に対して、対応するシーン画像のメッシュが裏面方向になる場合や、対応点間距離が与えられた閾値 I_{th} 以上の場合は誤対応として除去する。通常、対応点探索には非常に時間が掛かるため、インデックス画像を用いて高速化する。まず、対象画像の各メッシュに重複しないインデックス値を割当て、この値を重複しない色に変換する。

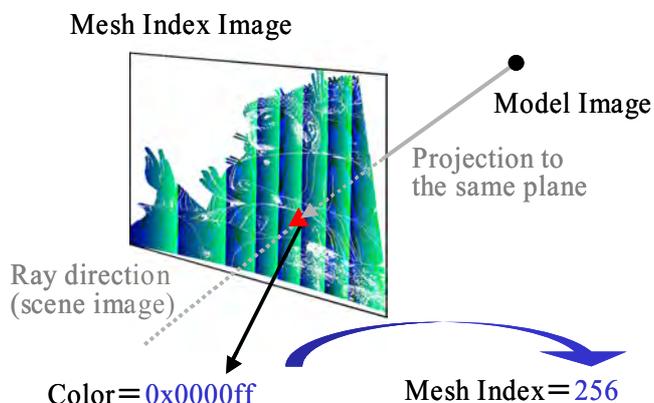


図3.1.15 インデックス画像を用いた対応点探索

そして、対象画像の測定方向から、ある画像面に割当てた色によってメッシュを描画する。このメッシュの描画処理は、グラフィックスハードウェアを利用して高速に行う事ができる。次に基準画像の各頂点を、対象画像の視線方向から透視変換によって画像面に投影する。そして得られた座標値から、対応する画像上の色、つまり対応するメッシュを得る事が出来る。正しい対応メッシュは、対応する対象画像のメッシュが張る平面上に、基準画像上の頂点を投影する事で判定し、同時に正確な対応点も計算する。(図3.1.15)

対応する2点間の距離には頂点法線を考慮した点と面の距離を用いる。基準画像上の頂点 x とそれに対応する対象画像メッシュ上の点 y とする。また、 n を頂点 x の法線 n_x と対応点 y の法線 n_y の平均とする。また R_M, t_M はモデル画像の回転、平行移動行列として R_s, t_s はシーン画像の回転・平行移動行列とする。簡単化のために n に掛かる回転行列は RM とした。これを全ての距離画像の組合せ(i, j)が含む全頂点 k に対して計算し、以下の式で定義される二乗誤差 ε^2 を求める。

$$\varepsilon^2 = \min_{R,t} \sum_{i \neq j,k} (R_M n \cdot \{(R_s y + t_s) - (R_M x + t_M)\})^2$$

この誤差評価式はこのままでは非線形であり最小化計算が難しいため、Neugebauerらの提案する手法によって線形化する。求める変換の回転角を微小角と仮定すると、誤差評価式は以下のように書くことが出来る。

$$\varepsilon^2 = \min_{\delta} \sum_{i \neq j,k} \|A_{ijk} \delta - s_{ijk}\|^2$$

各距離画像の変換行列は、最小二乗法によって δ を求める事によって得られる。実際には0番目の距離画像を移動させない事で一意な解を求めるため、 δ は $((n-1) \times 6)$ 個の変数を持つ連立一次方程式の解として得られる。全ての距離画像が少なくとも一つ以上の他の距離画像と重なりを持つとき、この連立一次方程式の係数行列は $((n-1) \times 6) \times ((n-1) \times 6)$ の正値対称行列となる。この係数行列は距離画像枚数が多くなるにつれて非常に大規模な行列となると共に、重なり枚数は相対的に少なくなるので疎な行列となる。また、この行列は 6×6 の非零パターンを持つ事も分かる。そこで、反復法の前処理付き共役勾配法 (PCG) を用いる事にする。特にこの係数行列は 6×6 の非零パターンを持つ疎行列である事が分かっているため、これに特化した不完全Cholesky分解共役勾配法 (ICCG) を用いる事で高速な計算が可能である。

実験ではArhlonMP2400+プロセッサ、2GByteメモリとGeForceTi4600グラフィックカードを搭載したPCを使用した。また、位置合わせを行ったデータはバイヨン尊顔をVIVID900で測定した45枚の距離画像と、奈良大仏をCyrax2400で測定した114枚の距離画像である。

図3.1.16に各データの最小、最大メッシュ数を持つ距離画像を対象画像とした場合の、インデックス画像解像度と得られる対応点数との関係を示す。図中の対応点数は、実際の対応点数 v_c と本手法を用いて得られた対応点数 v^c の比で表されている。この図からインデックス画像がある一定以上の解像度であれば、ほぼ全ての対応点が得られる事が分かる。

次に、距離画像に含まれる頂点数に対する計算時間を評価する。この評価のためにモデル1及び2の全ての距離画像を用いて、同じ距離画像同士の1対1の位置合わせを行った。計算時間は1回の反復計算に要する時間とし、複数回の反復計算を行ったときの平均時間を評

価した。この実験の結果を図3.1.17に示す。この図から分かるように、頂点数に対する計算時間はほぼ線形に増加する。

最後に、これらの距離画像を同時位置合わせした結果を図3.1.18 (a) と (b) に示す。全ての距離画像は、予め1対1で順次位置合わせを行う事で初期位置を求めてある。同時位置合わせでは20回の反復計算を行い、計算時間はバイヨン尊顔を測定したモデルが1,738秒、奈良大仏を測定したモデルが7,832秒であった。

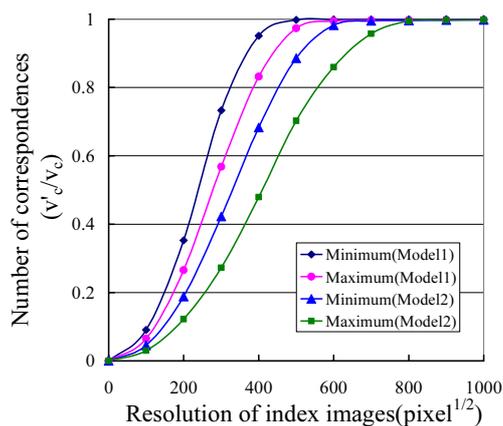


図3.1.16

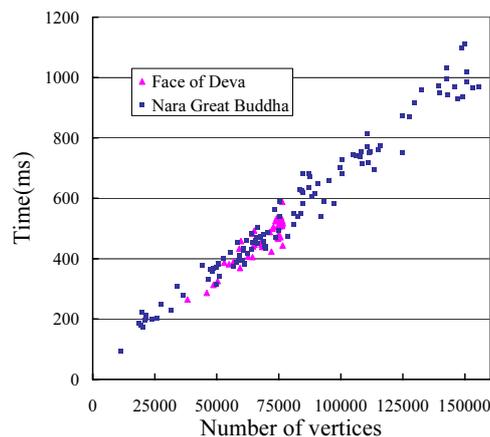


図3.1.17



(a)

(b)

図3.1.18 位置合わせ結果

3.1.2.3 PCクラスタによる大規模位置合わせ

大規模のデータでは、1台のPCにはメモリの制限などのため、同時にロードできなくなってくる。大規模距離画像の同時位置合わせを実現するために、我々は分散メモリシステム上で計算の高速化及びメモリ使用量の削減を可能にする並列化手法を開発した。

位置合わせ計算で最も計算コストが高い対応点探索及び誤差計算は、各距離画像間で独立に行う事ができる。そこで、これらの計算を距離画像の組合せ毎にプロセッサに割当てる事によって並列処理を行った。このとき、位置合わせ計算に不要、冗長な組合せを除去する事により計算時間の短縮及び効率的なデータ分散を図った。また、負荷分散とデータ分散を同時に実現するためにグラフ分割の手法を用いた。

1 台のサーバと複数台のクライアントからなる分散メモリシステムにおいて、同時位置合わせ手法を並列に実現する方法について説明する。位置合わせ処理中の対応点探索及び誤差計算は、各距離画像間で独立に計算することができる。そこで、これらの計算を距離画像の組合せ毎にクライアントに割当てる。各距離画像の変換行列の計算は、対応点探索などに比べて計算時間が短い上にメモリ空間を必要としないため、サーバプログラムで行う。また、各クライアントが計算する組合せも同様にサーバプログラムが求める。

距離画像間の重なりが全く無い場合や重なる領域が小さい場合は、これらの距離画像間で位置合わせ計算を行う必要は無い。また逆に距離画像の重なり枚数が十分多い場合は、これらの距離画像間の計算は冗長とみなす事ができる。そこで、図3.1.19に示すように冗長、不要な組合せを予め除去する事によって、計算の高速化を図るとともにデータ分散の効率を高める。この組合せの除去は、(1) 大域的な接続関係、(2) 局所的重なり領域、(3) 相対画像間距離という3つの情報を用いて順次行っていく。大域的な接続関係とは、最小バウンディングボックスの重なりと視線方向が成す角度によって定められる。また局所的重なり領域とは、各距離画像間の対応点数によって定義される。そして相対画像間距離は、各距離画像間の相対的なユークリッド距離によって定義される。各手順ではそれぞれに定義された情報によって条件の判定を行い、順次組合せを除去していく。

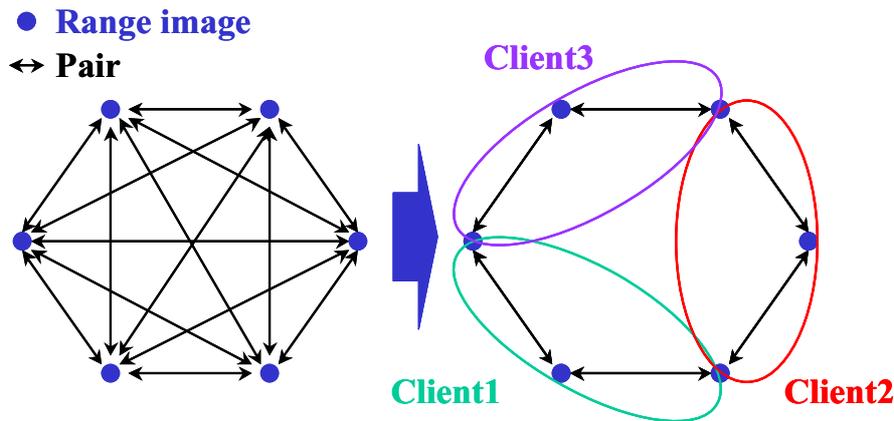


図3.1.19 組合せの除去

以上の手法によって得られた距離画像の組合せを各プロセッサに割当てる。負荷分散とデータ分散を同時に満たす割当てを求める問題はNP-困難である。そこで我々はこの問題をグラフ分割問題に帰着し、経験的解法を適用する事によって各プロセッサに割当てる組合せを決定した。まず、分割すべき組合せグラフを定義する。図3.1.20の左図は距離画像 I_i とそれらの接続関係を示している。この接続グラフの双対を取り、 $P_{i,j}$ をノードとし、各距離画像をネットとしたグラフを作成する。(図3.1.20右) このグラフに含まれるノード重みの和は計算時間を表し、ネット重みの和はメモリ使用量を表している。計算時間は計算すべき総頂点数に比例することから、各ノード重み $W_{i,j}^{node}$ を計算すべき総頂点数、すなわち対応する距離画像 i 及び j の頂点数 v_i と v_j の和とする。またメモリ使用量は各距離画像 i に含まれる頂点

数に比例する事から、ネット重み W_i^{net} として頂点数 v_i で表す。

$$W_{ij}^{node} = v_i + v_j$$

$$W_i^{net} = v_i$$

分割されたグラフに含まれるノード重みの和が均等かつネット重みの和が最小となるようこのハイパーグラフを分割する事によって、最適な組合せの割当て方法を得る事ができる。

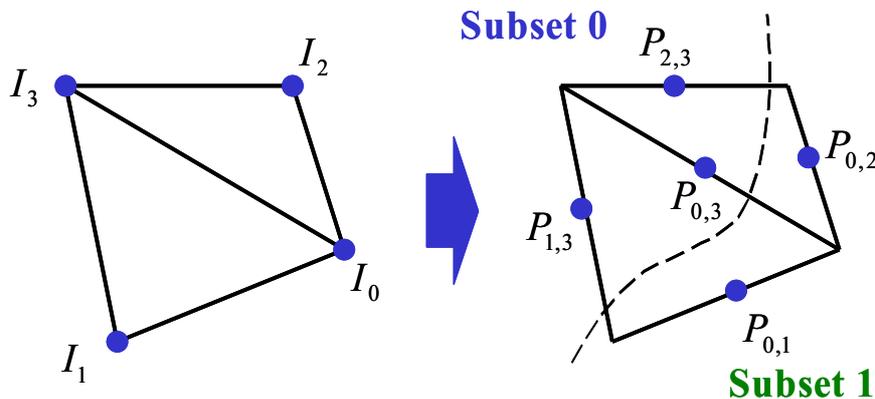


図3.1.20 組合せハイパーグラフ

まず、単一の幾何モデルから人為的に合成された距離画像群を用いて、我々の手法の計算時間とメモリ使用量を評価する。実験には2つのAthlonMP2400+プロセッサと4GBのメモリを搭載した、8台のPCからなるPCクラスタを使用した。また各PC間は100Base-TXで接続されている。使用したデータはCyrax2400によって測定した高さ約13mの鎌倉大仏の完全な三次元モデルから、人工的に作成した50枚の距離画像群である。各距離画像の頂点数は最大12,029点、最小12,197点、平均83,288点、また平均メッシュ数は158,376である。

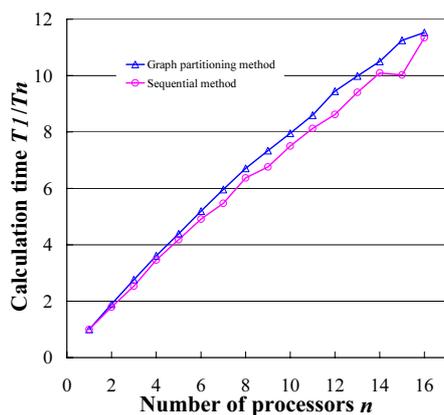


図3.1.21 (a)

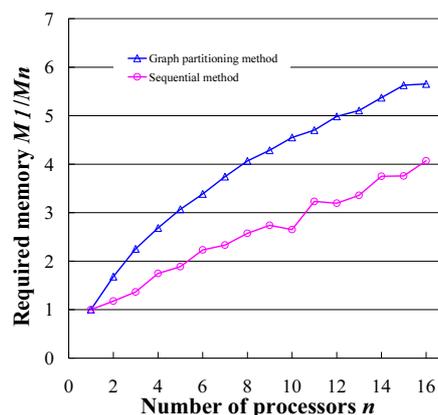


図3.1.21 (b)

図3.1.21 (a) にプロセッサ数に対する計算時間の変化を示す。ただし計算時間は1回の反復計算に要する時間で評価し、複数回の反復計算を行った場合の平均時間を計算時間とした。図中でプロセッサ数 n における計算時間 T_n は、1プロセッサの計算時間 T_1 に対する比で表されている。この図から、並列化数の増加とともに計算時間がほぼ線形に改善されている事

が分かる。また組合せグラフを用いないで順次割当てを行った場合より常に高い効率が得られている。

次にメモリ使用量についての評価を行う。1~16並列で計算を行った場合の、各プロセッサに割当てられる最大メモリ使用量を図3.1.21 (b) に示す。ただし各値 M_n は1プロセッサ時の最大メモリ使用量 M_1 との比で表されている。比較のために距離画像を測定した順に割当てた場合のメモリ使用量も表す。この図から、順次割当てより本手法の方が非常に良い効率が得られる事が分かる。また相対的に並列化数が少ないほど本手法の効果が大きい事も分かる。

3.1.2.4 パラメータ付き位置合わせ

前節まで述べてきた三次元データの位置合わせは、対応するデータを剛体変換（平行・回転移動）に対応づけるものである。この手法を用いて物体の形状データを重ね合わせて比較する場合、データ対は平行・回転移動のみによって重ね合わせられるものばかりではない。例えば、相似の関係にある三次元形状のスケールを調整することなく平行・回転移動のみによってデータを合わせて比較するのは不適切である。我々は既存の位置合わせアルゴリズムを拡張して、形状の変化も考慮に入れた位置合わせの手法を提案した。

既存の位置合わせは平行・回転移動を表すパラメータ空間において、対応するデータにおける対応点間の距離の二乗和を最小化するような勾配を計算し、その勾配に対して線形最小化するものである。提案手法は平行・回転移動のみのパラメータ空間を、形状の変形パラメータを含めた次元へ拡張し、対応するデータにおける対応点間の距離の二乗和を最小化するものである。

平行・回転移動パラメータに変形パラメータを追加した位置合わせのパラダイムは、本プロジェクトにおける様々な実装の基礎となっている。その代表的な例が、浮遊型レーザレンジセンサより取得される、歪みを含んだレンジデータの形状補正である。この歪みは計測時のセンサの運動に起因するので、この運動パラメータを形状補正のパラメータとして実装し、大規模な計測対象物のモデリングを効率的に行うことに成功した。また、邪馬台国の在り処を特定するプロジェクトの一環として、同范・同型の三角縁神獣鏡の形状データの解析手法もこの理論がもとになっている。今後の研究においても、このパラダイムが広く応用されることが予想される。

アルゴリズムとしては、3.1.4節で述べるロバスト位置あわせ手法の未知数を平行・回転運動の6つから、形状パラメータあるいはセンサの運動パラメータと拡張することで、同一のアルゴリズムが組める。図3.1.22にスケールの異なる2つの形状データの位置あわせの様子を示した。左の図が初期位置合わせされた状態で、右の図が左から右へ、上から下へ、順に位置合わせされていく様子を示している。

同様に、図3.1.23では、FLRSで取得した(歪みを含む)形状を、地上に設置したレンジセンサから得られた歪みのない形状に、提案手法を用いて位置合わせしている様子を示している。この場合は、センサを平行運動するものとし、未知数は、FLRSと地上センサの視点の相対関係を示す回転と平行運動の6つに加えて、FLRS自身の撮像中の動きによる画像のひずみ

パラメータ3つを加えた9つのパラメータを3.1.4節で述べるアルゴリズムの未知数として求めるものである。図の黄色のデータがFLRSで取得したデータで、ピンクのデータが地上に設置したレンジセンサで取得したデータを示している。左図は2つのデータを剛体変換のみで位置合わせしているが、黄色のデータに歪みがあるために正確な位置合わせができていない。右図は提案手法で位置合わせしたもので、形状の補正を行っているために非常に正確な位置合わせが行われている。

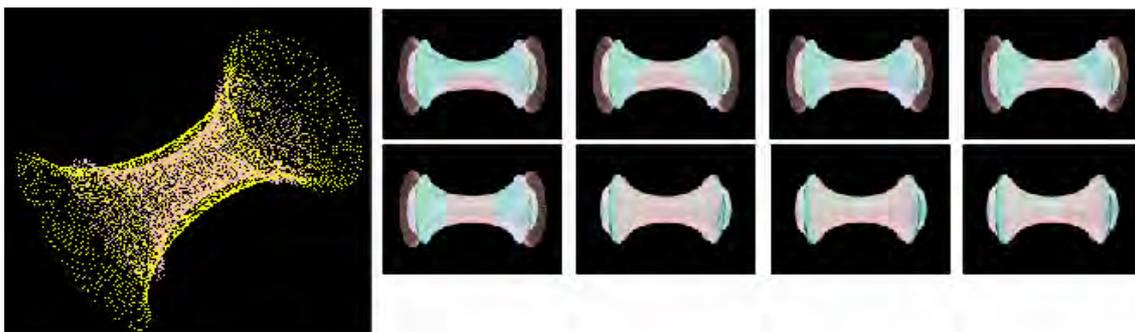


図3.1.22 スケールの異なる二つの形状データの提案手法で位置合わせ

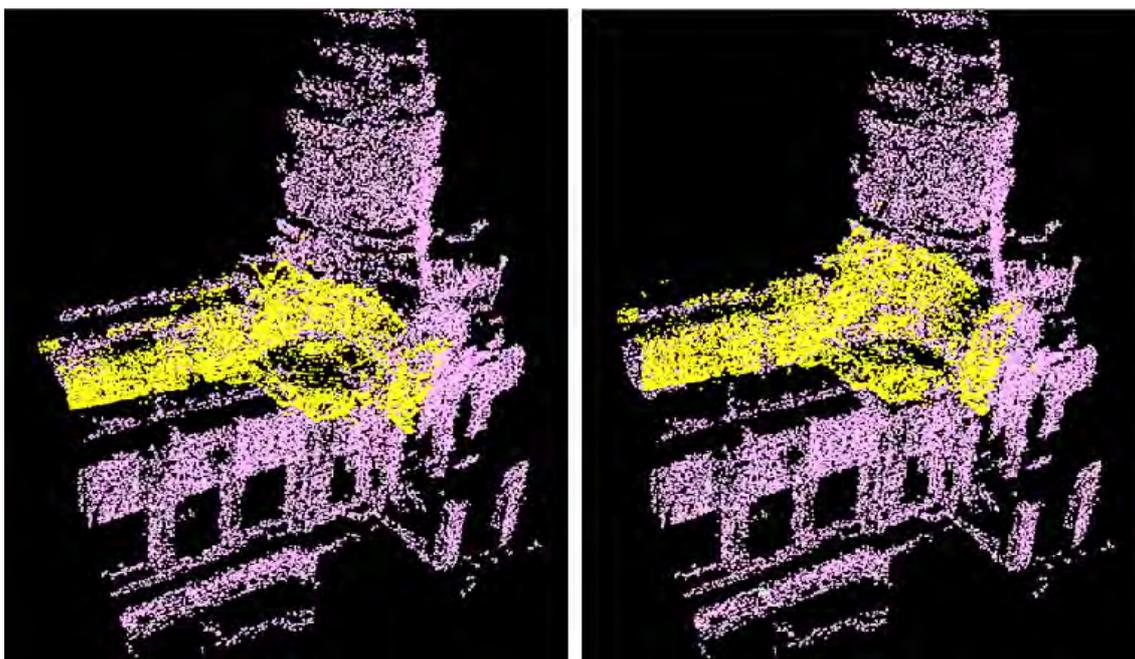


図3.1.23

3.1.3 距離データのリファインメントの諸手法（東京大学）

これまで、距離センサからの値は正しいものとして距離データの相対関係を求める手法を述べてきた。センサデータには通常測定誤差が含まれている。このデータを複数データと比較することでリファインする手法を考える。

3.1.3.1 距離センサの視線方向を考慮した手法

複数方向から測定された距離画像間の対応関係を利用して、各距離データの精度を向上させることを考える。この手法ではレーザレンジセンサなどによって得られる距離データの誤差が光線方向にのみ分布していると仮定し、この方向に誤差補正をすることによってその精度向上を図る。基準となる距離画像と重なり合う他の全ての距離画像において対応点を探索し、それらの対応点間距離が小さくなるように各頂点を光線方向に移動させる。このとき対応点間誤差の頂点移動による非線形性を考慮して、反復計算により徐々に誤差を減少させていく。

本手法ではICPなどの位置あわせ手法と同様に繰り返し計算によって、距離画像の測定誤差を補正していく。いま注目している距離画像を基準画像とし、それと重なり領域を持つ距離画像を対象画像とする。まず基準画像に含まれる全ての頂点に対して、全ての対象画像上の対応点を探索する。そして、これらの対応点間の距離を誤差として、この誤差が小さくなるような位置を推定する。この対応点探索と位置推定は全ての距離画像を基準画像として行う。そして、全ての距離画像に含まれる頂点の位置を推定した後に、各頂点を推定した位置に移動させる。ここで誤差が十分小さくなれば処理を終了し、そうでなければこれらの処理を再度繰り返す。この手法の手順を単純化して示すと以下ようになる。

Algorithm Procedure of Iterative Refinement

```
while (error > threshold){
  for (i = 0; i < nImage; ++i){
    for (j = 0; j < nImage; ++j){/* Search corresponding points for all vertices*/
      if (i != j){
        CorrespondenceSearch (i, j);
      }/* Compute the next position of vertices */
      EstimateNewPosition(i);
    }/* Update the motion of all vertices */
    UpdateVertex(all);
  }
}
```

誤差がレーザの光線方向にのみ分布すると仮定して、対応点は基準画像の光線方向に探索する。このとき、前提条件として各距離画像は正確に位置合わせされているものとする。基準画像に含まれる頂点に対して、この頂点を通り光線方向に平行な直線と対象画像上のメッシュとの交点を求めて対応点とする。このとき明らかな誤対応を除去するために対応点間の距離が閾値以上の点を外れ値として計算に用いない事とする。この閾値には使用したレンジファインダの実際の最大測定誤差を用いる。そして各距離画像の全ての組合せに対して対応点を探索する。このとき、位置合わせ手法と同様にインデックス画像を用いる事によって、高速に対応点探索を行う事が可能である。

誤差補正は、モデル画像上の頂点を対応点から推定される位置に移動することによって行う。対応する対象画像上のメッシュはモデル画像と異なる方向の測定誤差を有しているため、探索された全ての対応点は正しい対応点ではない。また、測定誤差によって局所的なオクルー

ジョンが発生し、明らかな誤対応となる場合も考えられる。つまり、これらの対応点から導き出される推定点は測定誤差が大きいほど不正確となる。更に距離画像間の重なりが少ない場合は、観測数が少ないために正確な推定点を得ることは難しくなる。そこで、これらの理由を考慮して緩やかに収束させるために、各頂点は全ての対応点との重み付き平均の位置に移動させる事にする。いま*i*番目の距離画像上の*k*番目の頂点 x_{ik} は、その対応点 y_{jk} との重み付き平均位置に移動される。

$$x'_{ik} = (1-w) \cdot x_{ik} + \frac{1}{n_{ik}} \sum_{i \neq j} y_{jk}$$

ここで n_{ik} はモデル画像上の頂点に対して得られた対応点数である。 w は重みであり、今回の実験においては $w = 0.5$ としている。この処理は各距離画像の全ての点に対して行われる。そして、対応点探索及び誤差補正による頂点の移動を一つの処理として、誤差が十分小さくなるまで反復して計算を行う。

実験結果をしめす。本手法の有効性を示すために、実際にレーザレンジセンサを用いて測定したデータの補正を行った。測定対象はカンボジア バイヨン遺跡の尊顔の一つであり、使用したレーザレンジセンサはCyrax2500である。取得した距離画像枚数は合計9枚である。表3.1に、このモデルに含まれる頂点数などをまとめる。図3.1.24に補正前と補正結果を比較して示す。また図3.1.25はそれぞれの拡大図である。これらの結果は、本手法が、対象の重要な形状（エッジ）を保存しながら、測定誤差を十分に補正できる事を示している。

表3.1 尊顔データ

Sensor	Cyrax2500
Images	9
Vertices	Max:155434, Min:11231, Ave:81107
Meshes	Max:300920, Min:18927, Ave:148281

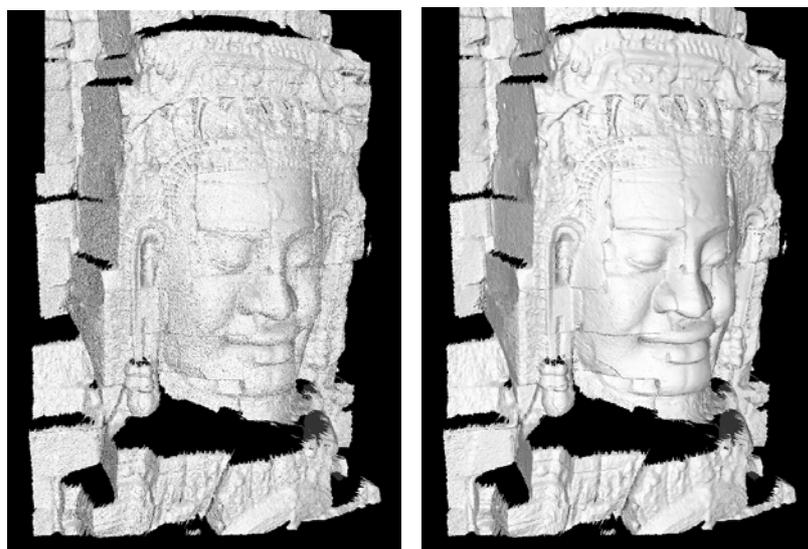


図3.1.24 尊顔データの補正結果（左：補正前、右：補正後）



図3.1.25 尊顔データの拡大図（左：補正前、右：補正後）

3.1.3.2 気球搭載型レンジセンサの動きによる影響の補正

巨大物体の三次元形状計測では、クレーンやヘリコプタ等を利用した空中からのスキャンが効果的な方法の1つとして考えられる。ただし、対象物体が貴重な文化遺産である場合、安全性や効率性の面から、上のような計測にはさまざまな問題が発生する。そのため我々は、レンジセンサを気球に搭載したFlying Laser Range Sensor (FLRS)を開発した。しかし、FLRSでは計測中にレンジセンサが運動するため、獲得する形状データに歪みが生じてしまう。

本節ではこのような移動するセンサから得られるデータを補正する手法を提案する。まず、気球に取り付けたビデオカメラによる画像列のみを利用して、センサの位置・姿勢の推定をおこなう。次に、画像列と歪んだ形状データそのものから抽出できる情報を用いて、さらに精度良くパラメータのリファインメントをおこなった。最後に、求められたセンサの運動パラメータを用いて、歪んだ形状データを補正した。この手法をカンボジア、バイヨン寺院の計測に適用したところ、FLRSから得られた歪んだ形状データを精度良く復元することができた。

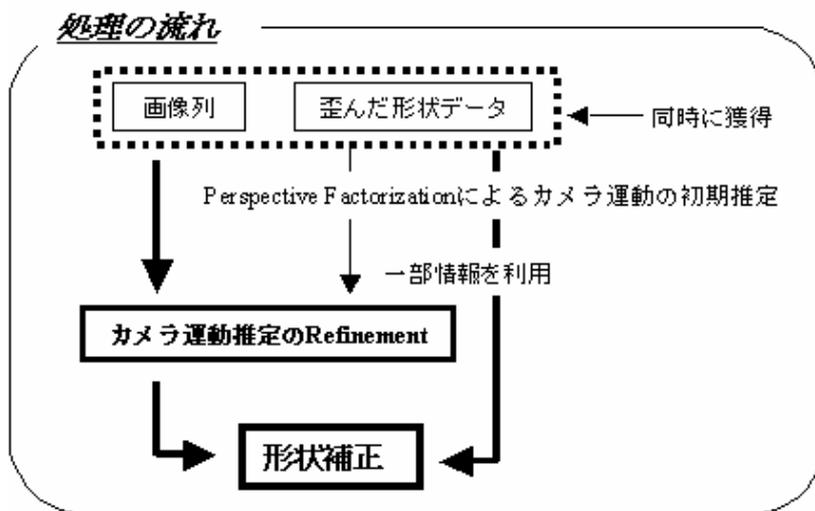


図3.1.26 補正処理の流れ

処理の流れは、図3.1.26に示すように、まず、FLRSによって形状データを獲得すると同時に、レンジセンサに同期させたビデオカメラによって画像列を得る。次に画像列から **Perspective Factorization** を使ってカメラの運動（気球の運動）を推定する。これを初期解として歪んだ形状データから抽出した情報を利用して、さらに精度の高い運動推定をおこなう。最後に、歪んだ形状データから気球の運動の寄与を除去することで、形状を補正する。

復元したデータの様子を、示す。図3.1.27の上図はFLRSから得られたオリジナルデータと、地上に固定したセンサから得られたデータ（正確なデータとする）との比較、下図は復元したデータと正確なデータとの比較である。それぞれのペアでレジストレーションをおこなった結果を示した。特に楕円で囲んだ部分が正しく復元できていることがわかる。

また、FLRSから得られた歪んだオリジナルデータ、それを補正したデータと、地上に固定したセンサ (CyraX2500) から得られたデータの3者をレジストレーションし、その断面を比較した（図3.1.28）。この断面図をみると復元したデータは地上固定のセンサによるデータとほぼ一致しており、正しく復元できていることがわかる。

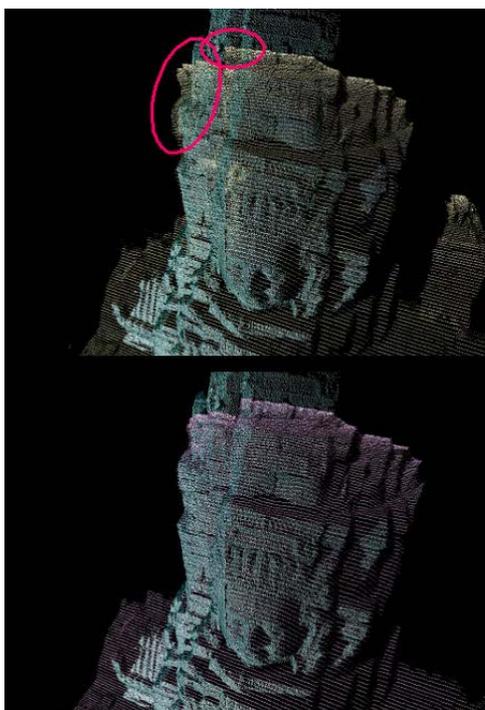


図3.1.27 復元データの比較

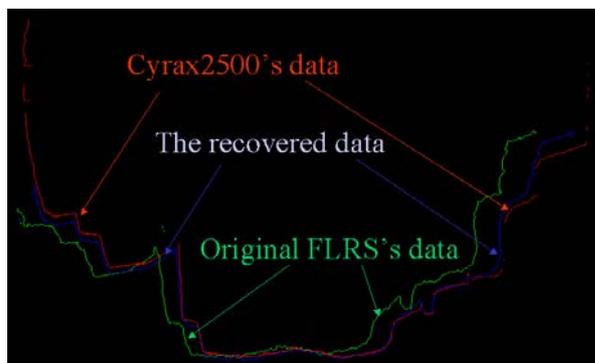


図3.1.28 断面の比較

地上固定センサとのマッチングの結果を示す。図3.1.29はFLRSから得られたオリジナル（左側）・復元データ（右側）と地上固定センサから得られたデータとでレジストレーションをおこない、対応点間距離に応じて色分けしたものである。点間距離が閾値 (6.0cm) 以下の部分を緑色、それ以上の部分を青色で表示した。点間距離が短い緑色の部分は、正確なデータと形状がマッチしていることを意味している。本手法によって復元したデータは緑色の領域が増えており、形状補正がなされたことを示している。

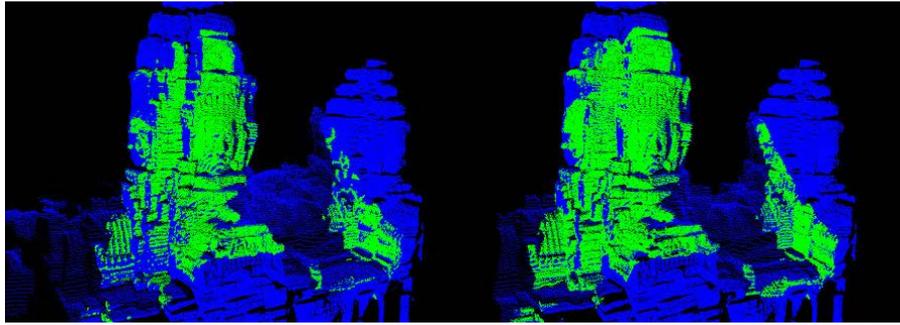


図3.1.29 地上センサとのマッチング

気球の運動が激しい場合の例を示す。図3.1.30、左上はFLRSから得られた歪んだ形状データ、右上はそれを補正したデータである。形状補正の効果を見るため、地上固定のセンサで得られた形状とのレジストレーション結果をその下に示す。このデータでは気球の運動が激しく、オリジナルの形状データの歪みが大きかったが、本手法により形状補正が良好になされたことがわかる。

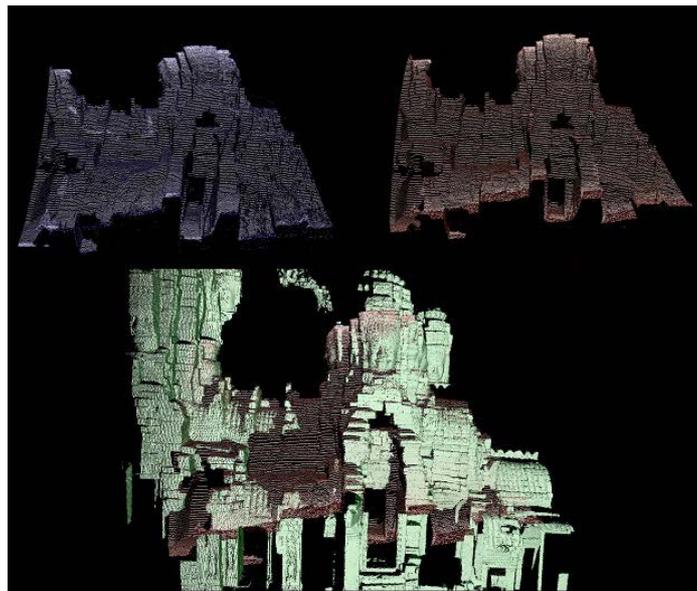


図3.1.30 気球の運動が激しい場合

3.1.4 距離データの統合手法（東京大学）

これまでに計測を行なった文化遺産の中には大規模でかつ形状が複雑なものも多く含まれ、そのモデリングには膨大なデータ量を扱う必要がある。そこで測定された膨大な幾何、光学情報を効率的に統合する枠組みを提案する。まず、幾何情報と光学情報を同時に統合する光学情報付き合致表面法を提案する。次に、大量のデータを扱うために、(1) PCクラスタを用いた並列計算、(2) データに応じた適応的な解像度制御による統合処理、という2つのアプローチによる手法を提案する。

3.1.4.1 光学情報付き合致表面法

合致表面法では、まずそれぞれの距離画像に対して最近傍点を別々に求め（図3.1.31 実線矢印）、そしてその最近傍点の周りに他の距離画像が存在しているかどうかを調べる（図3.1.31 破線矢印）。最近傍点とその周囲の他の距離画像の位置と法線方向を比較して、その差があらかじめ設定した閾値内であれば、それらの距離画像は同じ表面を表していると見なす。図3.1.31に対して合致表面を求めた結果を図3.1.32に示す。それぞれの3つの距離画像について2つのボクセルの中心 x , x' から最近傍点までの符号付距離を計算し、最近傍点における合致度を計算する。その結果、円で囲まれたそれぞれ2つの最近傍点が合致表面となり、最終的な符号付距離はこれらの絶対値の小さいものが選択される。また残りの外れ値の部分で得られた最近傍点は合致表面に含まれず、符号付距離計算から取り除かれる。

形状モデルを用いて三次元物体認識や位置姿勢推定などを行う場合、物体の見えの変化が認識精度やロバスト性に大きな影響を及ぼす。特に、鏡面反射の存在は物体の見え方を大きく変化させる。そこで、光源方向と視点位置に依存しない光学的特徴を加えた三次元モデルを構築する手法を提案した。レーザレンジファインダは観測対象に向かってレーザを発射し、その反射光を観測して距離を計測する。この際得られる距離画像がもつ付加的な特徴量をLRS (laser reflectance strength) と呼ぶ。（図3.1.33）レーザ光の反射は自然光の反射と同一であると考えられるため、全方向への拡散反射と完全鏡面方向への鏡面反射に分けられる。完全鏡面方向への反射はごく狭い範囲の視点位置からのみ観測されるので、多くの領域で観測された反射光は拡散反射によるものである。そこで複数の視点からの観測を利用して拡散反射成分のみを抽出する手法を提案する。すなわち、各頂点にLRS値をもった三次元モデルを構築するために、統合において距離画像間で幾何形状の合致をとったのと同様にLRS値についても合致をとる。ただし、LRS値の場合では単純にボクセルから最近傍の合致表面を構成する距離画像のLRS値の中央値を選択することにする。（図3.1.34）

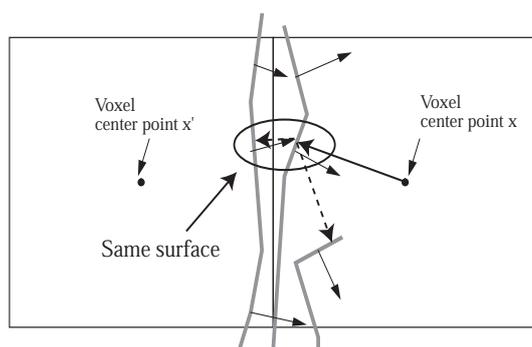


図3.1.31 最近傍点の探索

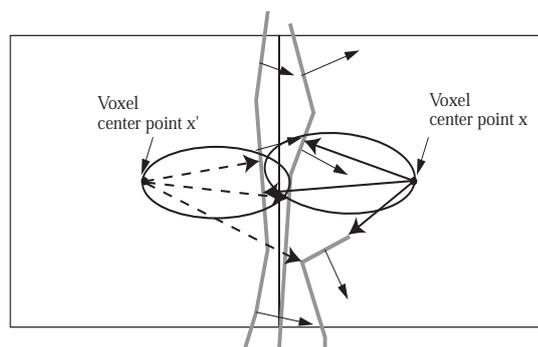


図3.1.32 符号付距離の選択



図3.1.33 LRSを輝度値で表した大仏

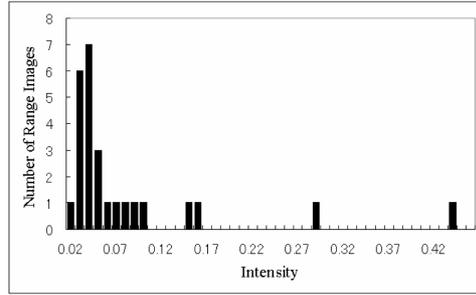


図3.1.34 LRSヒストグラム

3.1.4.2 PCクラスタを用いた並列計算

大量のデータを高速に処理するためにPCクラスタを構築し、統合処理アルゴリズムをクラスタ上で動作させる並列化アルゴリズムを開発した。開発した並列化アルゴリズムは以下の2つの手法からなる。

- ・ 距離データの分散配置と最近傍点の並列探索
- ・ ボクセル分割、探索処理の並列化

単一プロセッサで全ての距離情報を保持するのは困難であるため、本アルゴリズムでは距離データ点の情報を複数台のPCに分散し、並列的に符号付距離を計算することにした（図3.1.35）。ボクセルを分割した後、生成された新たなボクセルにおける符号付距離の計算やボクセルの再分割などの一連の処理は、それぞれ独立に行うことができる。そこで分割された後の各ボクセルに対する処理をそれぞれ別のPCに割り当て、並列処理を行うこととした（図3.1.36）。

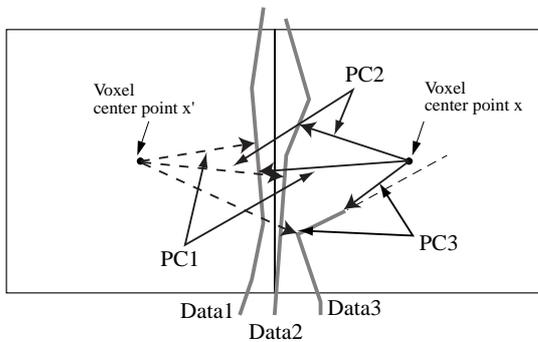


図3.1.35 符号付距離の並列計算の例

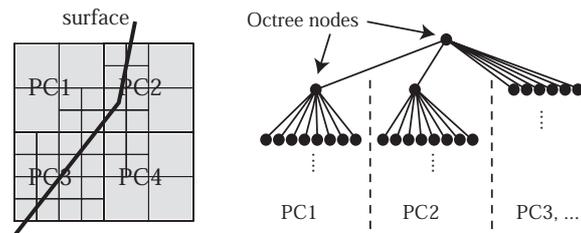


図3.1.36 各部分木の並列探索

データに応じた適応的な解像度制御を利用して、計算機資源を効率的に利用するために、観測対象の幾何的、光学的特徴に応じて適切な解像度でメッシュモデルを生成する手法を提案した。幾何的特長に基づく分割では、観測対象の形状に応じて符号付距離を計算するサンプリング間隔を決定する。形状を表す指標として表面の曲率を用い、平面に近い部分では粗くサンプリングしてデータ量と計算量を減らし、複雑な形状の部分では細かくサンプリングして物体の精細なモデルを構築する。一方、光学的特徴に基づくボクセル分割は曲率に基づいた分割の場合と同様に、ボクセル内部にある距離画像の点の光学的な変化を計算する。ボクセル内部にある点の光学情報の差が十分小さければ、距離画像に対してサンプリング間隔

は十分細かいと判断する。光学情報には、LRS値、輝度値、RGB値などが考えられるが、差の評価にはスカラー値であるLRS値や輝度値の場合には差の最大値を用い、RGBの場合にはRGB空間での距離を用いている。

我々の提案する手法を検証するため、8台のPCから構成されるPCクラスタを構築した。鎌倉大仏のデータはCyraX2400を用いて計測し、LRS値を付加した距離画像を16枚取得した。各距離画像は約30万点、60万ポリゴンから構成されている。並列に探索するプロセス数を変えて統合アルゴリズムを検証した。その計算時間は並列探索数にほぼ反比例しており（図3.1.37）、提案手法は計算資源を効率的に利用していることが確認された。次に、距離画像とともにRGB画像を取得することができるMinolta Vividを用いて龍門石仏を計測し、光学的情報としてRGB値を用いて統合処理を行った（図3.1.38）。距離画像は石仏の顔の部分を中心に40枚取得し、7～10枚の距離画像が各部分で重なっている。その結果提案した統合処理によりRGB画像内の拡散反射成分が中央値として選択され、光学情報に含まれる鏡面反射成分を取り除くことが可能であることが証明された。

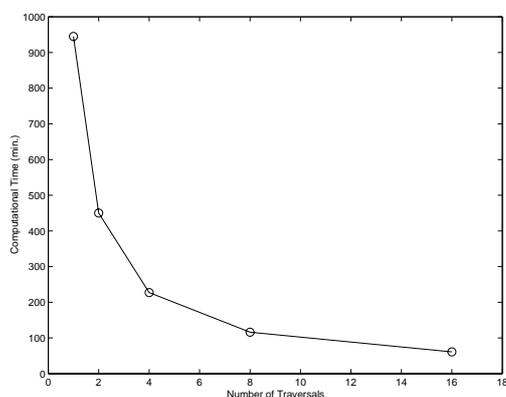


図3.1.37 並列探索数/計算時間



図3.1.38 龍門石仏：光学的情報を用いた統合結果

3. 2 光学情報取得に関する研究

光学情報取得とは、幾何形状モデルとカラー画像から対象のうえにカラー画像を重ね合わせることや重ねあわせられた画像を元にそのもの本来の見え生成することをいう。重ね合わせに関しては、比較的小型の文化財に適用可能なキャリブレーション箱を利用するものや距離センサから得られる反射率画像を利用して大型の文化財に適用可能な手法を開発した。特に後者に関しては、幾何形状取得でも発生したのと同様、多数のカラー画像を重ね合わせると、それぞれの重ね合わせ位置の誤差が蓄積され、カラー画像境界部分で不連続性が観測されるという問題が発生する。この問題を解決するため、多数のカラー画像を同時に重ね合わせることで境界部分のギャップを埋める手法を開発した。

このような重ね合わせを行う目的は、物体の見えを生成することにあるが、物体の見え方は光源や視点位置により変化するため、物体の各点において不変な固有の色（albedo）とは何かを知る必要がある。これは色恒常性問題とも呼ばれ、貼り付けられた画像を集積することで、この問題を解決する手法の開発にも成功した。以下でこれらの詳細を述べる。

3.2.1 カラー画像の幾何モデルへの位置合わせ（東京大学）

幾何情報だけでは実際の文化財の見えは生成できない。カラーセンサ（カメラ等）で撮影したカラー画像（テクスチャと呼ぶ）を、レンジセンサ等により測定した幾何モデル上へ貼り付ける必要がある。通常 OGISやCyberwaresなど距離画像とカラー画像が同じ視点位置から同時に得られるような特別な光学系を有するレンジセンサを除いて、距離画像とカラー画像は、それぞれ独立したレンジセンサとカラーセンサにより異なる視点から得られる。従ってカラーセンサから得られるカラー画像をレンジセンサから構築された幾何モデルに貼り付けるためには、それらの視点間の相対位置関係を正確に知る必要がある。本節ではこのために開発した手法を述べる。

3.2.1.1 キャリブレーション箱を使用する手法

この位置関係を知る方法の1つとして、あらかじめ形状が既知のキャリブレーション箱を用いて両センサの三次元位置関係を把握する方法を開発した。図3.2.1に示すように、カメラと距離センサの両方から見える特徴を持つような物体を用意し、カラー画像と距離画像を取得する。画像中や距離画像中の特徴を予め設定し、自動的にこれを抽出するようなソフトウェアを設計した。これを用いて距離センサとカメラの関係を決定し、カラー画像を貼り付けた国宝東大寺戒壇院広目天立像の結果を図3.2.2に示す。

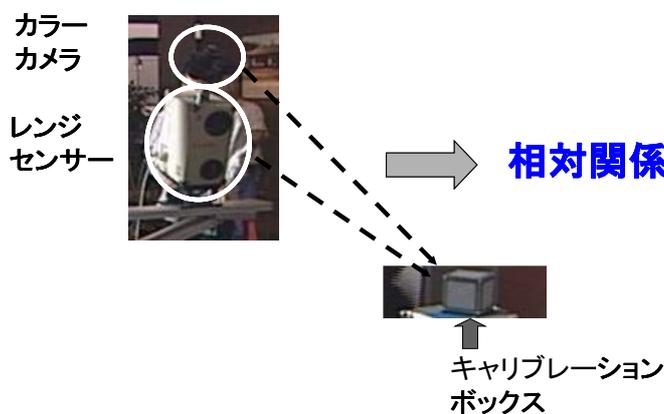


図3.2.1 キャリブレーションボックス法



図3.2.2 デジタル広目天

3.2.1.2 レーザセンサの反射エネルギーを利用する手法

上記の方法では、一旦両者の位置関係を把握したらそれ以後両センサ（の相対位置関係）を動かしてはならない。したがって、この手法は対象物体が比較的小さい場合に、両センサを近接して設置することで適用するのがほとんどである。一方、大きな文化財の場合はこうした手法をとるのは困難であり、カラーセンサの位置が未知の場合でも適用できる手法が必要である。

また複雑なテクスチャを有する対象物でも適用可能な新たな手法を開発した。多くのレンジセンサにおいて距離画像の付加的な情報として得られるリフレクタンス画像に着目したものである。

一般に距離センサはレーザ光を対象に投げ返ってくる時間等を測定することにより対象点までの距離を求めている。この際、返ってくるエネルギーの大小を測定することにより、リフレクタンス画像が得られる。このリフレクタンス画像は、距離画像と完全に同じ視点から計測されている。したがって、まず、カラー画像とリフレクタンス画像の重ね合わせを行う。これができれば自動的に距離画像とカラー画像がの重ね合わせができるという性質をもっている。

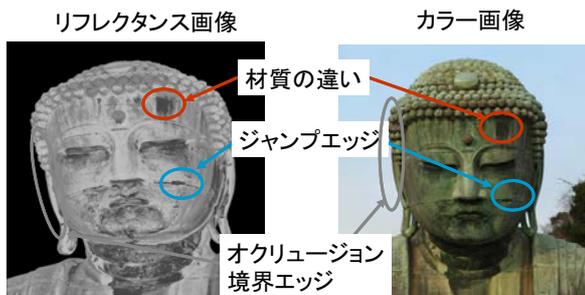


図3.2.3 リフレクタンスとカラーエッジ

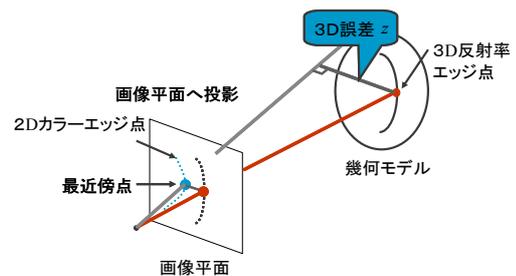


図3.2.4 誤差評価方式

まずリフレクタンスエッジを3次元モデル貼り付ける。その後、図3.2.4に示すように、現在の距離センサとカラーセンサとの相対関係を利用して、リフレクタンスエッジをカメラ画像中に投影する。このエッジ上のサンプル点とカラーエッジ上のサンプル点の間で位置合せの要領で、三次元上の距離を最小化するパラメータを決定する。

図3.2.4において、 z は、三次元誤差である。

$$\varepsilon_i = Z_i \sin \theta$$

ここで全体のエラー、 E , を求める P , をさがす。ここで ρ は誤差関数である。 $E(p)$ は次式より求まる。

$$\frac{\partial E}{\partial P} \sum_i \frac{\partial \rho(\varepsilon_i)}{\partial \varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P} = 0$$

$\omega(\varepsilon)$ を重み関数だと考えることより、

$$\omega(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon}$$

最小化は、次式より求められる。

$$\frac{\partial E}{\partial \rho} = \sum_i \omega(\varepsilon_i) \varepsilon_i \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial P} = 0$$

ローレンチアン関数を重み関数に用することより、

$$\omega(\varepsilon) = \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{\varepsilon}{\sigma}\right)^2\right)^{-1}$$

この方程式を解くことより、相対関係 P が求められる。

本手法を鎌倉大仏に適用し、デジタルカメラから得られたカラーテクスチャを三次元幾何モデルに貼り付けた（図3.2.5参照）。



図3.2.5 カラー画像貼り付け結果

3.2.1.3 複数テクスチャの幾何モデルへの同時位置合わせ

前節では、三次元幾何モデルにテクスチャを重ね合わせるためには、カラーセンサ（カメラ等）が撮影した位置・向きなどを対象物に対して正確に推定する必要があることを示し、その手法について述べた。

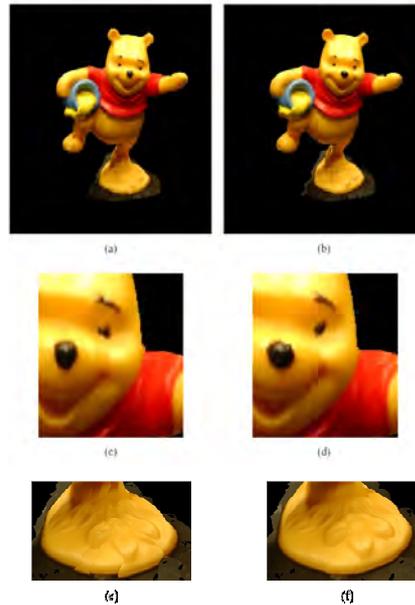


図3.2.6 テクスチャ貼付け結果の比較:
(a)一枚の貼り付け結果. (b) 同時貼り付け結果.
(c), (d), (e), (f) 上の画像の拡大図.

しかしながら、ある視点から得られた一枚の画像と三次元幾何モデルの対応関係を決定するだけでは実は不十分であり、さまざまな視点から得られた複数枚の画像をモデル上に貼り付けると、誤差が非常に小さい場合にでも画像間のつなぎ目が生じてしまうという問題がある。そこで、これら2D-3D間での対応関係に加え、三次元表面上での2D-2D間のエッジ対応

関係も同時に考慮に入れることで、複数方向からの画像全体の間で整合のとれた最適化を行うことを可能にする手法を開発した。誤差最小化計算には共役勾配法を用い、またロバストに動作するようにM-推定法を使用した。テクスチャマッピングへ適用例から、本同時位置合わせ手法の有効性を示す。図3.2.6は同時位置合わせ手法を適用しない場合とした場合の比較である。左側では、眉、目、口元あるいは足の輪郭といった部分で継ぎ目が目立っているが、同時位置合わせした右側ではそれが改善されていることがわかる。

また、文化財のデジタルアーカイブへの応用例として、鎌倉大仏の仮想現実感モデルを生成した。図3.2.7の右側が18枚のテクスチャを同時位置合わせ手法で重ね合わせたものである。



図3.2.7 鎌倉大仏への適用結果. (a) 画像1枚, (b) 画像18枚.

3.2.2 カラー画像間の色彩整合性（東京大学）

前節で述べた手法で複数テクスチャ画像を重ね合わせる場合は、物体の外観が撮影時の光源環境に左右されるため、これら画像間の整合性をとる必要がある。すなわち、画像間における明度と色合いの補正が必要となる。物体の形状と光源の方向に起因する前者の問題（明度）と比べ、光源色の変化に起因する色合いの問題は室内では生じないため、これまで扱われることが稀であった。しかし屋外の大規模なモデルを三次元化するためには後者の問題は不可避である。本節ではこの問題を取り上げる。

3.2.2.1 光源色の変化を利用した物体色推定手法

まず、2枚の光源条件の異なる画像から光源色を推定する手法を取り上げる。光源色の変化を考慮した補正は色恒常性問題として広く研究されている。光源色の変化を利用したFinlaysonらの手法が上述の色補正の問題に適用できるため、これに着目し、手法の問題点の解析を最初に行った。その結果、ノイズに非常に左右される手法であることが判明した。図3.2.8に彼らの手法の概要を示す。この手法では異なる光源下で観測された輝度値から、基準光源下での色として可能な点（直線を成す）をそれぞれ計算し、その共通点（交点）として基準光源下での色が計算される。しかしながら、ノイズによる直線の傾きの微少な変化によって結果が大幅に変化するため、この手法はロバストでない。

この欠点を解消するため、本研究では自然光源の黒体輻射光源による仮定を導入した。ほとんど全ての自然光源は黒体輻射光源のスペクトルに従うことは色恒常性問題に関しては非常によく知られている。この黒体輻射のスペクトルから、自然光源の色温度による変化を計算し、任意のリフレクタンスにおけるこれらの光源下での色を予測することができる。このことを利用し、推定したリフレクタンスから全ての光源下での色を生成し、入力の色と照らし合わせ推定値が妥当であるか判定する。妥当でない場合、入力にノイズがあると判断しノイズを減らすように入力を微少に調節する(図3.2.9)。本研究では、このような推定手法を提案し実装した。

本提案手法の結果を図3.2.10に示す。真値に非常に近い値が推定できており、従来手法と比べ視覚的にもかなり改善されている。この他にもカラーチェッカーを用い様々な光源下で実験を行ったところ、本手法が常に安定であるのに対し、従来手法ではノイズに対する脆弱性のために結果は赤にも緑にもなり得た。すなわち、平均誤差、最大誤差ともに本手法の結果の方が優れていた。また、光学情報のモデル化に適用可能かどうか確かめるため、異なる視点から物体を撮影し、対象物体の三次元モデルを用いてテクスチャアラインメントの手法により同一の座標点を求め同手法を適用した。その結果が図3.2.10（右）である。真値に近い値が推定され、本手法の適応性が示された。

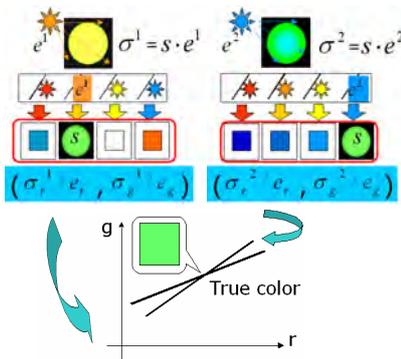


図3.2.8 色推定の原理

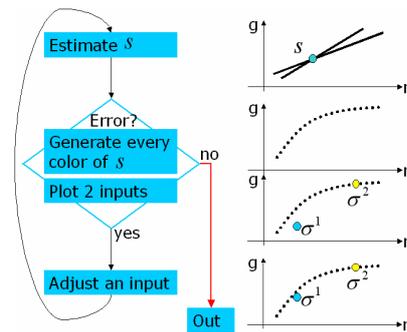


図3.2.9 推定誤算

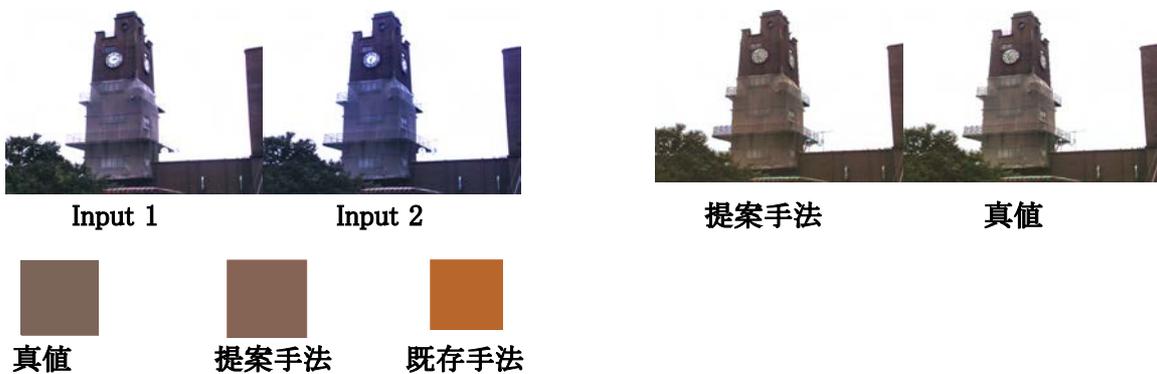


図3.2.10 推定実験結果

3.2.2.2 複数の反射光スペクトルによる光源スペクトル・分光反射率分離

前節の手法は、光源が黒体光源であるとの仮定をおいた。スペクトルを測定することで、反射光スペクトルをその構成成分である光源スペクトルと分光反射率とに分離することができる。一般に光源スペクトルも反射率分布スペクトルも基底関数の線形和で表されることが知られている。従って、ある1点のスペクトルを測定し、基底関数を用いて表される光源スペクトルと反射率分布との積が、測定される反射光スペクトルと等しくなるようにそれらを推定できる。

しかしこの方法では制約が不十分であり正しい解が得られない。そこで複数の反射光スペクトルを用いる事で制約を増やして光源スペクトル及び反射率分布に分離する手法を開発した。ここでいう複数のスペクトルとは、同一光源下異物体・異光源下同一物体・内部反射鏡面反射のスペクトルの3種類である。本手法は、鏡面反射・拡散反射を用いることで非常に高精度に分離を行うことが出来ることが特徴である。以下の図3.2.11にその概要を示す。

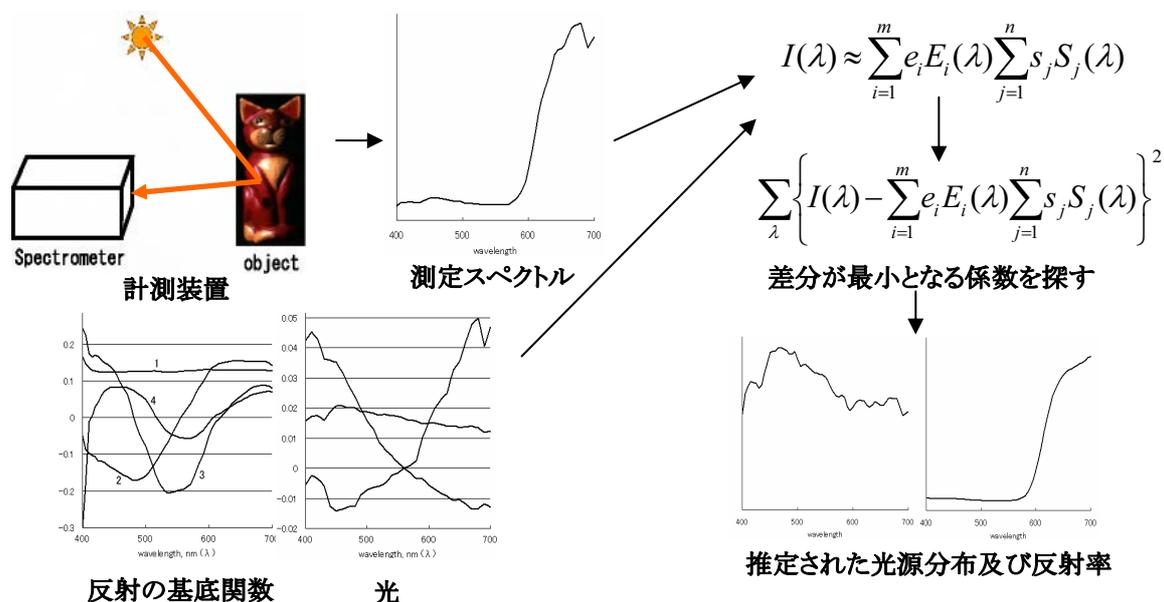
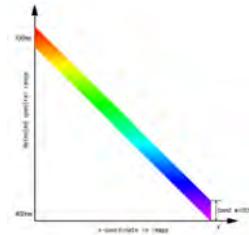


図3.2.11 単一点による分離方法の概要

この手法を適応するためには、できれば画面全域でスペクトル分布が得られることが望ましい。そこで、図3.2.12の上部に示すような多波長干渉フィルタを装着したテレビカメラを移動させることで画面全域のスペクトル分布が得られるような高度スペクトルセンサを開発した。このセンサにより上記のアルゴリズムを用いて、光源スペクトル・反射率画像を取得した例を図3.2.12の下部に示す。



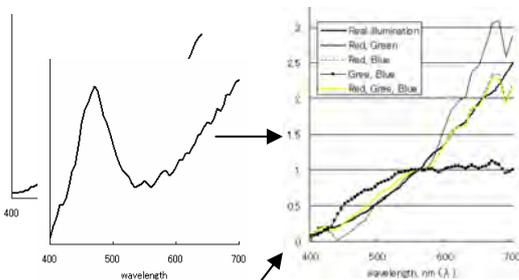
Interference filter



透過光の範囲

高度スペクトルセンサ

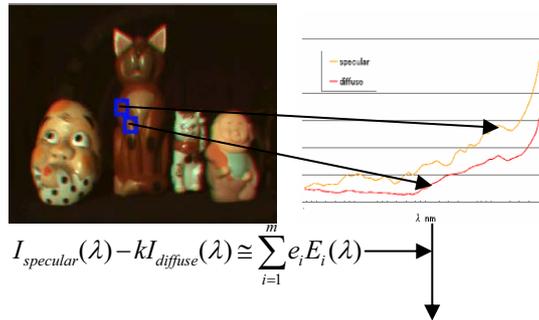
同一光源



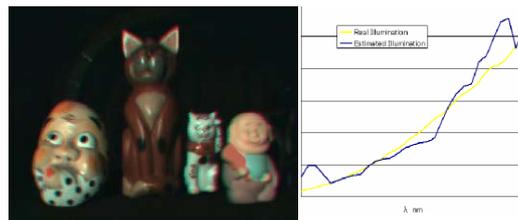
$$\sum_{p=1} \sum_{\lambda} \left\{ I_p(\lambda) - \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda) \sum_{j=1}^n s_{p,j} S_j(\lambda) \right\}^2$$

同一の光源成分を用いることでパラメータを減らし精度を向上させる

鏡面反射・拡散反射



$$I_{\text{specular}}(\lambda) - k I_{\text{diffuse}}(\lambda) \cong \sum_{i=1}^m e_i E_i(\lambda)$$



反射率画像

推定光源

図3.2.12 複数点による分離方法の概要

3.2.2.3 物体の反射成分と内部反射成分の分離

前節に述べた方法で原理的には物体における任意の点の固有色が推定できる。しかし、実物体の表面に強く光が当たればハイライトとして物体固有の色よりは光源の色が強く観測される。また、物体を見る方向によっても見え方が変化する。すなわち実物体の各点は、実際には、反射成分と内部反射成分（固有色）との2成分の合成として観測されることになる。その結果として、光学的整合性の問題は次の2つの問題に帰着される：

- (1) 色恒常性問題、すなわち、観測画像からの反射光（ハイライト）部分の検出と除去
- (2) ハイライトになっている物体部分の固有色の取り出し。

(2)に関しては、ハイライトや見え方は、物体を観測する位置により異なることを手がかりとすることで解決可能である。

ここでは、不均一な不透明物体が発する反射成分を解析することでこれらの問題の解決を図った。本研究のポイントは、クロマティシティと呼ばれる量を利用したことにある。本研究のアイデアは、輝度の逆数とクロマティシティとが張る空間では、画像クロマティシティ

と反射クロマティシティとの間に線型関係があることを見出した点にある。この線型性を利用して、単色物体でも複雑なテクスチャを有する物体いずれであっても同じ手法で、反射クロマティシティ（したがって反射光）を取り出すことに成功した。さらに、本手法の特長として、従来必要とされてきたハイライトになっている部分の色が何であるかを知る必要がない、ということもあげられる。本手法は、多色反射がある場合にも、輝度逆数-クロマティシティ空間の分布を解析し、ハフ変換を行うことで適用できるように拡張された。また、本手法は、画像中の反射光領域数が未知の場合でも適用できるという利点もある。実験を通して、本手法の頑健性と正確さを確認した。

色恒常性問題については、上述したように各点で観測される値は、内部反射成分と表面反射成分の線型和であるので、各成分に分割することで解決できる。このうち表面反射成分のクロマティシティは、内部反射成分のそれと異なり、光源の位置や視線の位置によって変わること注意到する。そのため、ここでは2つの手法を開発した。1つはクロマティシティに基づく分解を行ってノイズの解析を行うこと方法であり、もう1つは繰り返し処理と無反射画像を利用した分解方法である。どちらの手法も、ポイントはハイライトと拡散反射では異なる色および輝度クロマティシティを持つことを利用していることにある。

本手法のフレームワークを図3.2.13に示す。

本研究で開発した色恒常性および反射成分分解の手法は、いずれも実世界の物理的な事象に基づいているので理論的な裏づけがあり、かつ、正確である。さらに、いずれの手法も入力1枚の画像で十分である。すなわち、本開発手法はすべて、実用的であるのみならず、理論的にも十分な裏づけのあるものである。

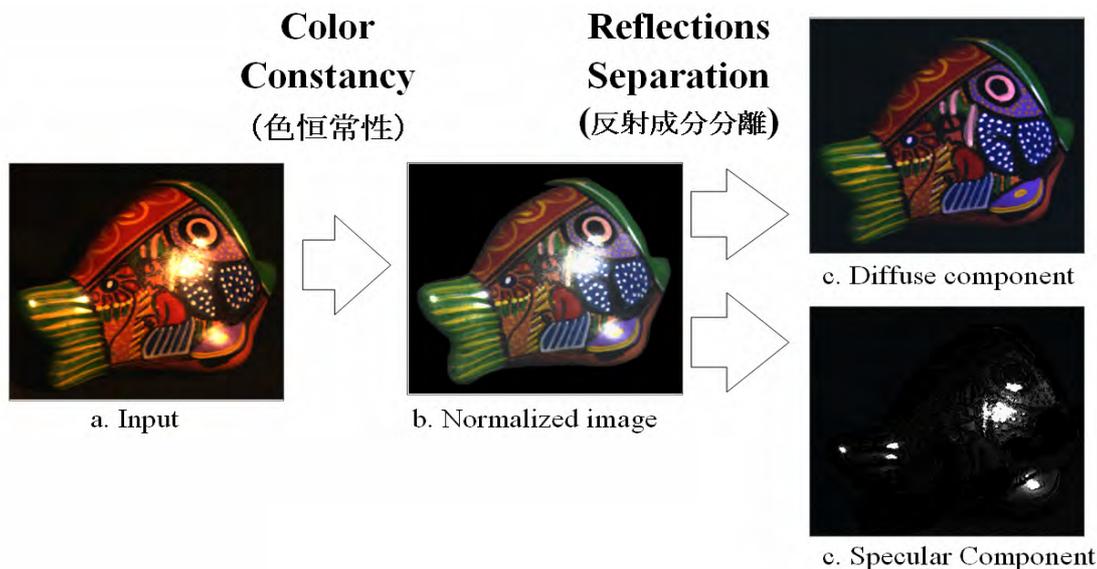


図3.2.13 本手法のフレームワーク

3.3 環境情報取得とその応用

本節では、光源環境情報を利用した研究について述べる。まずはじめは、カラー画像から光源環境を推定し、albedoと呼ばれる光源環境に非依存な、物体の真の色を推定する手法について述べる。また、光源環境と物体の反射特性を同時に推定する手法も開発した。次に、よりリアルな拡張現実感を達成するために、現実の光源環境と整合性の取れたCG画像を、基底画像をあらかじめ用意することにより、高速にレンダリングする手法について述べる。さらに、幾何、光学計測技術と光源シミュレータを効果的に組み合わせ、考古学で現在まで明確な解釈の得られていない問題を解決した例について述べる。最後に、美術品の展示方法について考察したシステムについて述べる。

3.3.1 テクスチャリング手法のための光源環境推定（東京大学）

前節でも述べたように、三次元幾何モデル上にデジタルカメラ等で計測したカラー画像(テクスチャ)を貼り付けることが最終的なモデルのため必要となる。この際、画像間の色調の整合性を保つ必要がある。前節では、黒体光源や連続スペクトルを見る手法をのべた。一般に、観測される画像は、光源、物体の光学的、幾何的性質の影響を受けるが、既知の形状、乱反射物体を仮定した場合、光源の推定問題と等価となる。

本手法は、仮想的に物体を覆うような半球状の面光源（光源球）を考え、その面光源を多数の点光源で近似することにより光源環境を近似する。物体表面上の反射率は、光源環境に依存しない不変量であることを用いて、光源環境の異なる2枚の画像から得られる反射率が等しくなるように光源環境を補正することにより、画像間の色調補正を行う。本手法は、点光源下の基底画像を用いているので、従来の週報とは異なり、複数光源環境下の画像やセルフシャドウ等が存在する画像に対しても適用可能な手法である。

本提案手法をCG画像および実物体に適用し、その有効性を確認した。

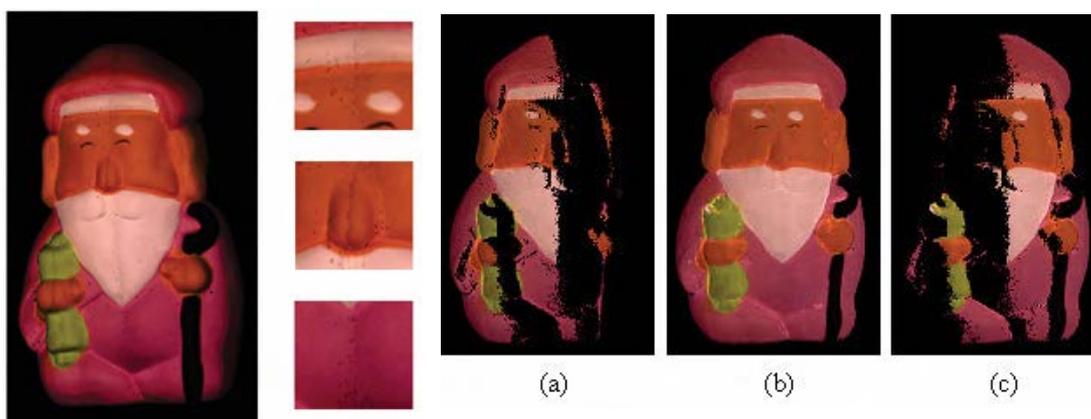


図3.3.1 色調補正前の画像を貼り付けた結果

図3.3.2 色調補正後の画像を貼り付けた結果：
(a)画像1、(b)画像1及び画像2、(c)画像2

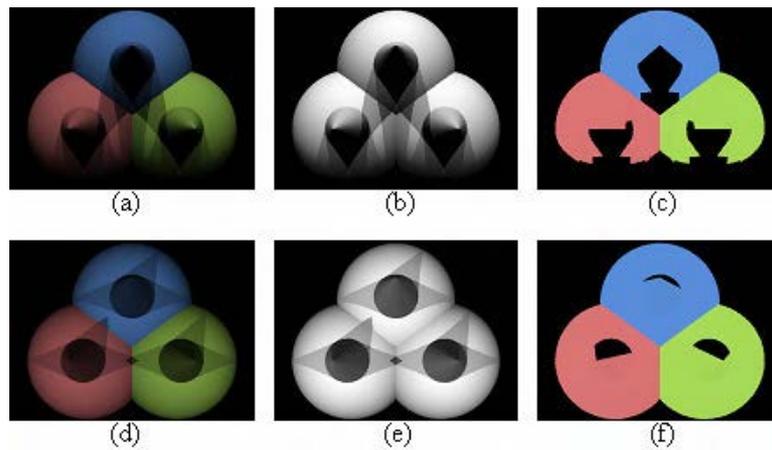


図3.3.3 CG画像への適用結果。入力画像：(a)画像1、(d)画像2、Illumination画像推定結果：(b)及び(e)、albedo推定結果：(c)及び(f)。上の行が画像1、下の行が画像2に対応する。

3.3.2 光源環境と物体の反射係数の同時推定（東京大学）

前節の手法は、物体が乱反射するとして定式化した。本節では、内部反射と表面反射の両者を持つ物体に対して、比較的少ない枚数の画像から、画像中のハイライトの形状を抽出することにより、光源状況と物体表面反射特性を同時に推定する手法を説明する。

まず、既知の形状を用いて複数の画像における同一地点での明るさの変化をプロットする。一般に、光源分布と物体の位置関係を固定していると、内部反射成分は、観測方向によらず一定となる（図3.3.4）。この性質を利用して、複数の画像の明るさ一定成分を決定することで、図3.3.5のように内部反射成分と表面反射成分を分離できる。

図3.3.6に示すように分離された表面反射成分を天空上の球に打ち返すことで、ラフな光源分布が得られる。複数方向の観測値と表面粗さがガウス分布で近似できるという仮定から、表面粗さのパラメータと真の光源分布を決定する。図3.3.7、図3.3.8に推定結果を示す。本手法は、従来のinverse renderingの手法とは異なり、光源状況、反射特性、テクスチャの全てを未知としそれらを推定するのが特徴である。

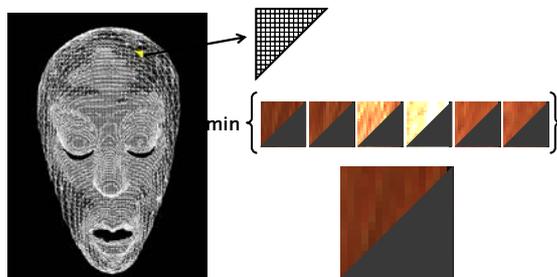


図3.3.4 各点での一定値（最小値）



入力画像 内部反射 表面反射

図 3.3.5 成分の分離

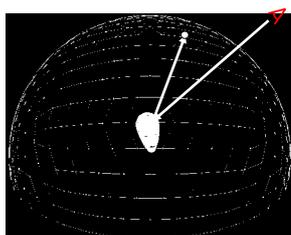


図3.3.6 光源方向への
打ち返し



合成



真値



推定値

真値

図3.3.7 画像合成

図3.3.8 光源推定

3.3.3 拡張現実感における建築物の陰影表現手法（東京大学・明日香村）

近年、科学技術の進歩によりCGによる文化財の復元が可能となった。発掘調査や文献資料などの情報をもとに、世界各地のさまざまな遺跡で文化遺産のデジタル化やバーチャル復元が盛んに行われている。一方でバーチャルリアリティの分野における新たなトピックとして、拡張現実感技術が注目を浴びている。拡張現実感とは、CGで描かれた仮想環境を現実環境に合成表示することによって、現実世界に情報を付加する技術である。つまり従来研究されてきた仮想現実感が完全にバーチャルな世界での没入体験を提供することに対し、拡張現実感では現実世界をベースに仮想物体を重ね込むことによって、作業訓練や景観シミュレーションを行うことを目的としている。

CGによる文化財の復元は、ハードウェアの進化や計算手法の改良によって今後ますます盛んになっていくと考えられが、その一方で作成したコンテンツをどのように一般に公開していくかという問題が新たに生じている。CGアニメーションをテレビやモニタの画面上で観賞するのは迫力に欠けるが、コンテンツの上映のために巨大なVRシアターを準備するにも多大な手間とコストが必要とされる。そのため、各地の文化遺産データを集積した有益なデジタルアーカイブなどが、一般の人々の目に触れることのないまま埋もれてしまっているという現状がある。

そこで本研究では、奈良県明日香村川原寺跡を対象に、拡張現実感による遺跡現地での文化財建築の復元展示を試みる。川原寺遺跡は飛鳥四大寺の一つに数えられた歴史上重要な建築文化財であるが、現在では主要な建物は失われ、わずかに基壇と礎石の一部を残すのみである。そこでCGによる伽藍の復元を行い、現地での拡張現実感システムによる展示を目的としてバーチャル川原寺プロジェクトに取り組んでいる。

さらに、拡張現実感における重要な技術課題である仮想物体と実画像の光学的整合性の実現に向けて、実時間での高速な陰影付け手法を提案する。従来、拡張現実感における合成画像のリアリティー向上のためには、実世界画像と仮想物体との光学的整合性の実現が重要と考えられてきた。そのためには仮想物体のシェーディングおよびシャドウイングが実世界の物体と一致することが必要とされる。しかも拡張現実システムにおいては、刻々と変化するユーザの視点に応じてリアルタイムにCG画像を生成することが条件とされている。一般に

CGの分野において物体の影付けを行うには、シャドウマップ、レイトレーシングなどの手法が用いられ、さらに物体間の相互反射を考慮して自然なソフトシャドウの表現を行うにはラジオシティ法などが利用されるが、総じてこれらの影付け手法は多大な計算時間を要する。拡張現実システムにおいては上記のようにリアルタイムでのCG描画が必須条件なため、これまで仮想物体の影付け処理は難しいと考えられてきた。その代わりにキャストシャドウに相当するオブジェクトを別途用意するなどして、簡易的に仮想物体が地表面に落とす影などを表現することは行われてきたが、外部の実光源環境に対応してダイナミックに影を生成することは困難であった。

本研究の提案手法では、あらかじめオフラインで生成した基礎画像の集合から仮想物体の影を合成することにより、刻々と変化するユーザの視点に応じて、リアルタイムにCGの影付け処理を行うことが可能である。また実世界の光源情報はビデオカメラにより逐一取得するため、屋外のような光源が変化する状況下においても、実世界にある物体と違和感のない陰影付けを行うことができる。川原寺跡を対象に拡張現実感システムを構築し、明日香村現地において復元展示を行った結果、合成画像における実物体と仮想物体の光学的整合性を飛躍的に向上させることに成功し、提案手法の有効性を確認することができた。

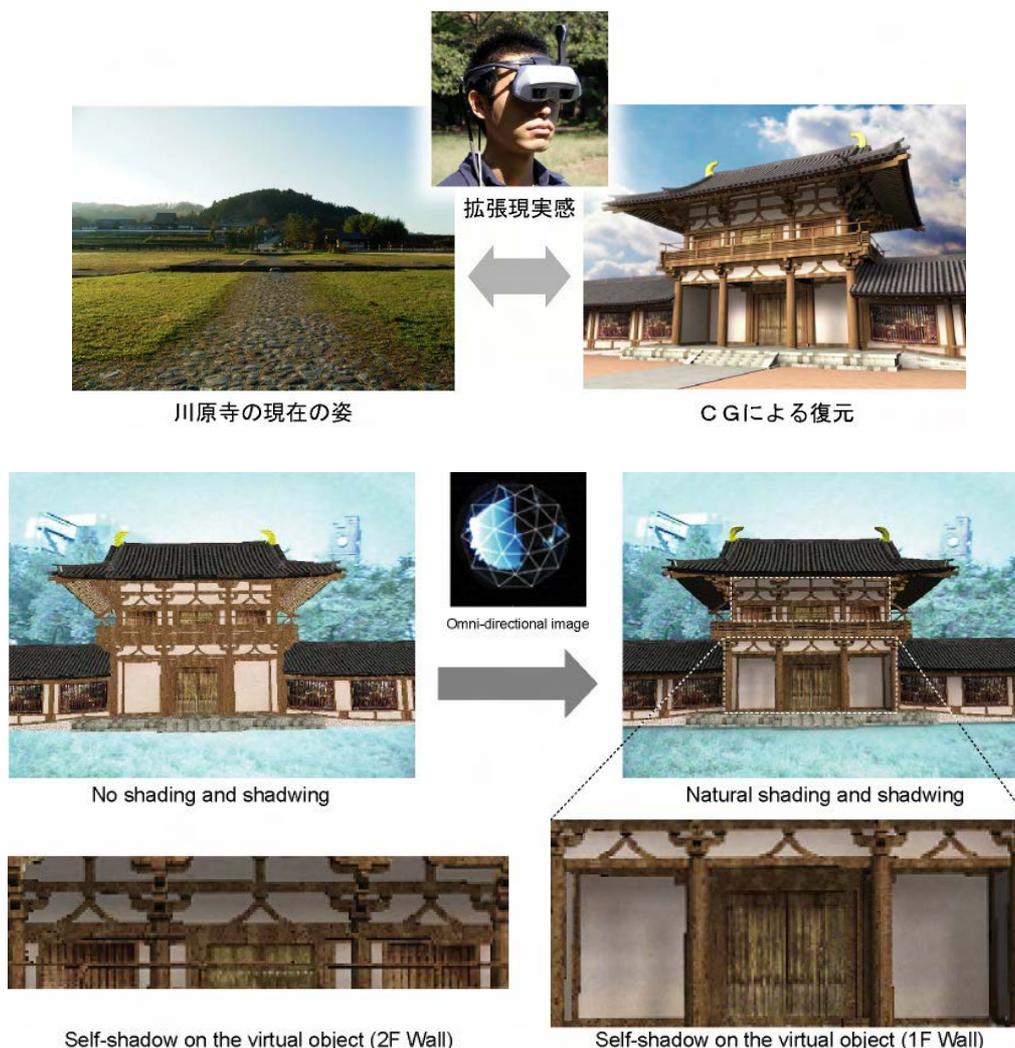


図3.3.10 レンダリング結果

3.3.4 三次元計測データに基づいた光源シミュレーション

(東京大学・東京文化財研究所)

貴重な文化財の情報を記録し、活用していく取り組みの中で注目を集めているのが、文化財の情報を紙などの物理的な媒体に書き込むのではなく、デジタル情報として記録する所謂デジタル保存とよばれる手法である。近年のコンピュータやデジタルカメラなどのデジタル機器の急速な発展の中で、この手法の重要性、効率性が認識され、世界各地で活動が活発化している。デジタル保存されたデータは単に保存の目的に利用するだけではなく、図面などのアナログな記録以上に幅広い応用範囲が考えられる。まず考えられる用途としては学術研究や保存修復作業への応用である。

一方、考古学分野においてもデジタルデータの有用性に対する理解が進み、デジタルデータ固有の利点を生かしての新たな考古学的示唆が期待されている。これらの研究は情報考古学等の名称で呼ばれ研究活動が活発化している。考古学分野で議論となる問題の一つに、洞窟内の壁画に関するものが挙げられる。北海道余市町に位置するフゴッペ洞窟である。この洞窟には内部に線刻画と呼ばれる壁画が施されているが、先史芸術に関する情報の少なさ等から多くの謎が残されている。そのうちの 하나가描画作業の光源環境に関する疑問である。通常古墳や洞窟といった壁画が施されている遺跡は開口部が少なく、非常に暗い内部空間であるため壁画の描画作業は松明などの光源の下で行われていたと考えられてきた。しかしフゴッペ洞窟内部の壁面には松明等を使用した痕跡とされる煤の沈着がほとんど見られないという報告がなされ、松明などの人工的な光源の使用に否定的な意見も上がっている。松明などの炎による光源以外の、当時利用できる光は自然光意外には考え難い。そこで洞窟内にどの程度自然光が入射し、描画作業に必要な光量が確保されるかどうかを検討する必要がある。しかし現在のフゴッペ洞窟は、その保存のために洞窟外部を全て覆う形で保存施設が建設され、内部への光の入射はもとより外気も遮断してカプセル化を行い、温度湿度を管理している。



フゴッペ洞窟



内部壁画

図3.3.11 フゴッペ洞窟と壁画

そこで我々はフゴッペ洞窟のデジタルモデル化を行い、現状の形状に基づいた照明シミュレーションを行った。

洞窟のモデリングは3つの情報について行った。幾何情報に関してはレーザレンジセンサによるスキャニングを行い、得られた距離画像に対しメッシュ化、位置あわせ、統合、穴埋めといった処理を施すことによって幾何モデルを生成した。次に光学情報を幾何モデルに追加した。モデル表面の色情報に関してはテクスチャマッピングを行なった。表面の反射モデルに関しては、本来は各種の反射モデルや分光計測によってより厳密なモデルを設定する必要があるが、本研究では近似的に各表面を均等拡散面と仮定した。最後の環境情報について、太陽による自然光源をモデル化した。簡略化した光源によって洞窟内部の影の遷移状況を観察した。さらにCIE Sky Model, Perez Modelによって標準的照度を持つ天空光を設定した。天空光の設定に伴って、構築した三次元モデルを地球座標上に適切に配置した。

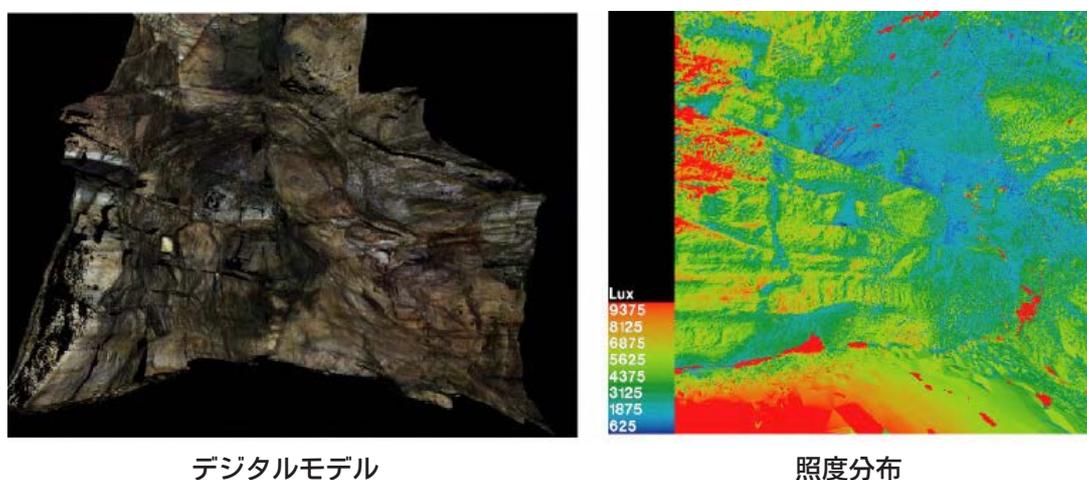


図3.3.12 光源環境シミュレーション

光源環境のシミュレーションに際して、大域照明の一手法であるMonte Carlo Ray Tracing法をさらに拡張した手法を用いて、内部表面の相互反射を考慮したシミュレーションを行なった。相互反射と天空光の考慮による輝度値の上昇を視覚的に確認し、線刻画の描かれている壁面の照度をJISの照度基準に照らし合せて評価した。内部に直射光の入る時間帯は、いずれも内部反射光によって壁面に十分な照度が確保される。また、薄曇りの天候では直射光の当たらない時間帯においても十分な照度が得られる。しかし、快晴時の午後と曇天時は十分な照度を得られない時間帯がある可能性が残った。

以上のシミュレーション結果から、現状の洞窟形状に基づけば自然光の下での線刻画の描画作業は十分可能であったと結論付けられる。

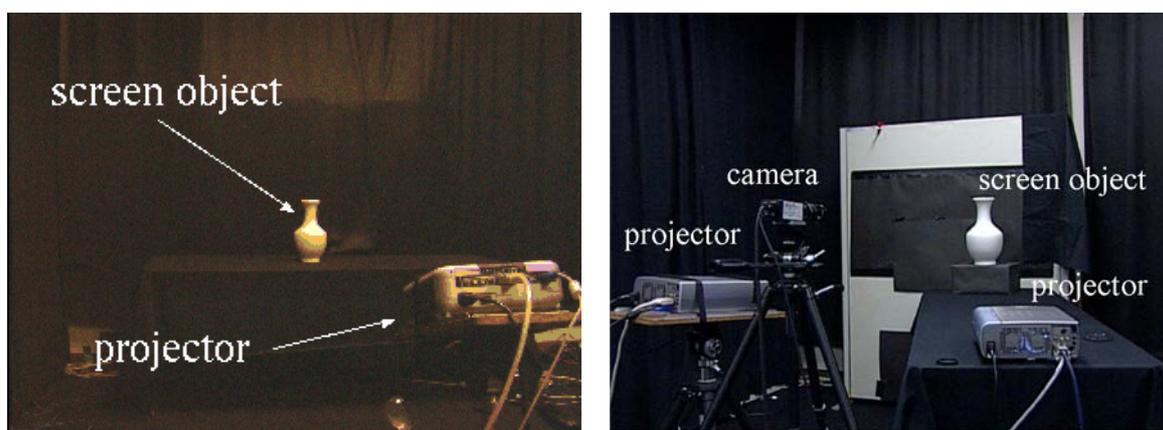
これらの結果に対して、現状と壁画の製作当時との環境の差異を考察した。現状よりも内部の照度が劇的に減少するという要因は認められず、ある程度の環境的な要因を認めるとしても、当時から洞窟内部で自然光源のみを利用した壁画製作が十分可能であったと結論付けることができる。

3.3.5 仮想光学環境による有形文化財の展示（岡山大学）

有形文化財の展示も重要な研究課題である。我々は、各種の有形文化財を単なるスクリーンではなく、実物体の上にパターンを表示することでよりリアルに表現できるシステムを実現した。

3.3.5.1 投影システム

有形文化財展示システムは仮想光学環境（図3.3.13左）により実現した。ここで、仮想光学環境とは実世界のスクリーン物体に対して光学パターンを投影することで、照明条件や反射特性を任意に変化させることができる系である。このため、スクリーン物体の形状と仮想展示する有形文化財表面の反射特性を精度良く求め、仮想照明条件を計算機で制御した場合の有形文化財の見え方を自動生成する必要がある。また、展示システムの性能を向上させるため、複数プロジェクタの使用についても検討し、幾何的／光学的校正によって4台のプロジェクタによる展示システム（図3.3.13右）を試作した。



仮想光学環境の概観（1プロジェクタ系）

マルチプロジェクタ系

図3.3.13 仮想光学環境と展示システム

3.3.5.2 反射特性と三次元形状の学習

主な題材として備前焼などの陶器を扱い実際の陶器の反射特性を学習し、仮想光学環境において再現する方法を検討した。物体表面上の各点における反射特性は二次元反射特性関数（BRTF）で近似し、実際の陶器とスクリーン物体の形状の違いを考慮したテクスチャマッピングにより投影パターンを生成する際に利用する。ここで、二次元反射特性関数（BRTは照明条件を変化させながら実サンプルを撮影（図3.3.14左に例を示す）し、データを解析することで推定した。また、投影パターン生成を容易にするため、Torrance-Sparrowモデルを利用して反射特性と形状の推定精度を改善する方法を検討し備前焼に有効であることを確認した。また、表面テクスチャの記述法としては、マルコフモデルを用いる方法とフーリエ級数モデルによる双方向テクスチャ関数（BTF）表現を用いる方法を検討し、それぞれの手法について有効性を確認した。下図右にフーリエ級数モデルによるBTF表現から作成した備前

焼の投影パターンを示す。ここで、BTFの学習サンプル（図3.3.14左）とスクリーン物体の形状は異なっているが、投影パターンの生成時にはスクリーン物体形状を予め測定しこれに合わせて投影パターンを生成しているため、形状の変化に影響されずに自然な備前焼テクスチャを生成できることが判る。

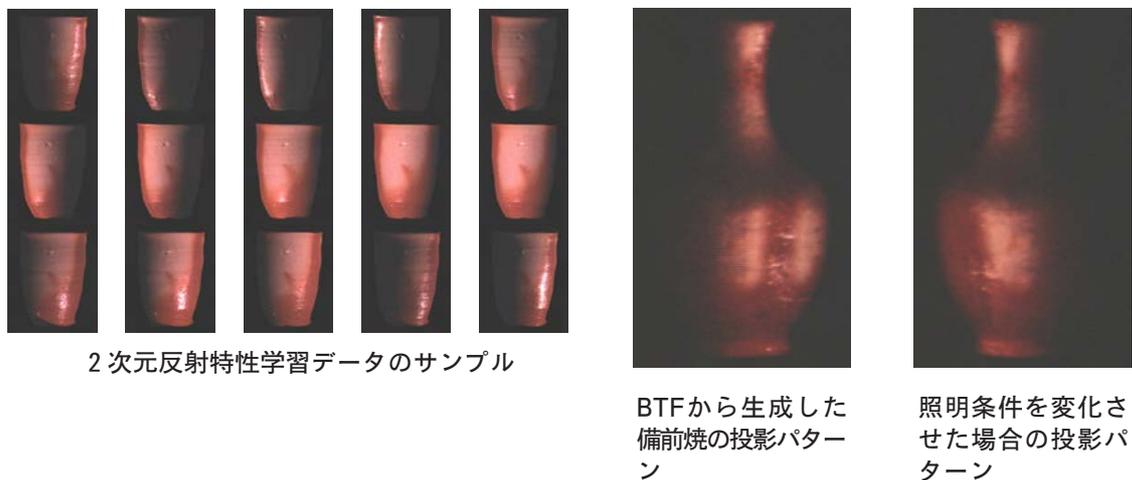


図3.3.14 学習データサンプルと投影パターン例

3.4 時系列情報取得に関する研究

大仏や遺跡など「静」的な有形文化財に対して、能や刀鍛冶の技といった身体の動きをその中心表現とする「動」的な無形文化財は、主に人から人へ直接的に伝承されてきたため、後継者難などの社会的背景の変化から日々失われつつあるといっても過言ではない。すなわち、無形文化財に関しても何らかの電子的な保存技術の開発に対する要求があり、時系列に沿った演者の動きをどのように記録し、動きをどのように再現するかが研究の中心課題となる。本研究では、伝統舞踊に代表される全身運動と、匠の技など視覚と器用な操りが密接な関係を持つ手作業とに対象を分け、それぞれについてデジタル化手法の開発を行った。

舞踊など全身運動のデジタル化は、単純に考えると演者の動きをビデオで採録し、必要に応じて再生すればよい。実際、そのような民俗芸能のアーカイブも存在する。しかし、このようなアーカイブでは学習者の視点が撮影時のカメラの視点に制限されるため、身体動作の見たい箇所が自由に見られないという問題がある。そこで我々は、多視点から同時に撮影を行い、任意視点からのビデオ映像を写実的に生成する手法を開発した。

しかしながら、例えば舞踊を学習する場合、ディスプレイ上でビデオ映像を眺めるのと、実際に目の前で師匠が要所・要所を解説しながら踊って見せてくれるのでは進歩に大きな差が出る。師匠なしでは本当の意味での習得は不可能であるといっても過言ではない。そこで我々は、全身型のヒューマノイドロボットを用いて舞踏を再生することによる、臨場感溢れる舞踏の新たな提示手法を開発した。

また、学習者が効率よく舞踏を習得していくためには、学習者の習熟具合を評価しその場で悪い部分を指摘する枠組みが必要となる。そこで我々は、舞踏映像の提示装置とモーショ

ンキャプチャ装置を組み合わせることによって、これを実時間で行う舞踊の簡易稽古システムを開発した。

一方、茶道に代表される手作業のデジタル化においては、器用な操りをいかに電子的に記述し、またこれからいかにロボットハンドによる操りを再生するかが問題となる。たとえば、師匠の指関節角の時系列変化を計測し、これをそのままロボット指に伝達するといった単純な方法では、ハンドの機構やサーボモータの特性の違い、物体配置の変化などの環境要因からうまくいかない。そのため我々は、作業を遂行する上で肝となる動作を有限個のプリミティブとして定義し、各プリミティブに対応する操作戦略をあらかじめロボット側に用意しておくことによって、師匠の動きをプリミティブ列の形で認識し、これからロボットの操りを再生する取り組みを行ってきた。

対象とする作業が既知であるならば、必要十分なプリミティブ集合をあらかじめ解析的に求めることも可能である。プリミティブはさらに、作業自体の進行を記述するタスクレベルのプリミティブと、作業を実現するために具体的な操作に関連するスキルレベルのプリミティブの2種類に分けられる。前者の例としては、柔軟物操作を実現する端緒として任意のひも結びを記述可能なプリミティブ集合の導出と作業の記述方法を提案した。また、後者の例として、操りに伴う任意の物体持ち替え動作を記述可能なプリミティブ集合を定義し、持ち替え動作の認識方手法とロボットハンドによる再生手法を開発した。

一方、対象の作業が未知である場合には、タスクレベルのプリミティブは観察から自動的に獲得する必要がある。そこで我々は、同じ作業を繰り返し観察し、共通して現れる動作パターンを作業の達成に必要なプリミティブであるとして自動獲得する手法を提案した。また、プリミティブが大量に増えた場合には、観察した動きがどのプリミティブに該当するのかを高速に判定する必要がある。そのため我々は、これを最近傍探索問題に帰着させ、単一の計算の枠組みで画像中の対象を高速に認識・追跡する手法を提案した。以下でこれらの詳細を述べる。

3.4.1 任意視点からの舞踏提示手法（岡山大学）

3.4.1.1 舞踏提示システムの概要

舞踊展示システムでは、自由に視点位置を移動させた場合に得られる仮想視点映像の生成をシステムの目的とした。踊り手の動作範囲を取り囲むように配置した同期型固定多視点カメラシステム（8台を実装）を構成し、画像系列（図3.4.1）を入力した。

ここで、画像系列から仮想視点映像を得るためには、各カメラに幾何学的／光学的校正を施した上で、被写体である踊り手の三次元形状（図3.4.1中央）を各時刻毎に復元する技術が必要である。また、これを元に仮想映像を作成する技術が必要となる。我々は、この2つの課題について研究を進め、以下の2節に示す方法をそれぞれ提案した。

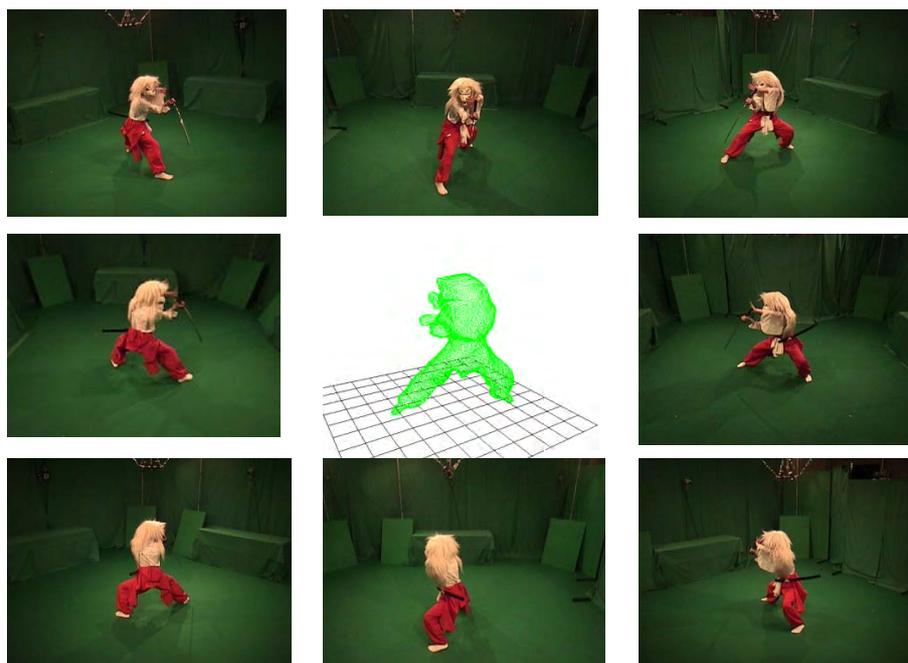


図3.4.1 8台のカメラで撮影された画像と復元された三次元形状（中央）

3.4.1.2 シルエット保存型スペースカービング法による3次元形状復元

入力画像（図3.4.1）から判るように、このシステムではスタジオを緑色に統一し、一方、踊り手の衣装には緑色が含まれていない。これにより、背景差分によって各画像から踊り手だけを安定的に抽出することが可能になり、各時刻の多視点画像から三次元形状を抽出することができる。ここで、静止物体を対象とする場合、視点位置を変えて撮影した連続画像から三次元形状をある程度の精度で復元できることが知られているが、舞踊動作のように動作範囲が広く、大きな動作を伴う題材を対象とするのは現実的でない。実用的な観点からは、数台～数十台のカメラを用いて三次元復元を行うのが妥当である。このような条件に適用可能な三次元形状復元法としては、視体積交差法やスペースカービング法が知られているが、舞踊動作を対象とした場合、両者には問題があることが判った。即ち、視体積交差法は2値化されたシルエットの視体積 (visual hull) を求めることにより、対象物体の三次元形状を復元する方法であるが、視体積は実際の形状に外接する近似形状となり、カメラの台数が少ない場合、形状差が無視できなくなる。一方、スペースカービング法では、この問題を軽減するため、複数カメラの各画素値が形状表面において光学的両立性 (photometric consistency) を持つかどうかを判定し、両立しない部分を削り取っていく。しかし、従来のスペースカービング法では、光学的両立性をボクセル毎に独立に行うため、過剰削除を生じて局所形状や模様によってシルエットが保存されないという問題があった。我々は、これらの問題をスペースカービング法の枠組内で解決するため、光学的両立性とシルエット保存ポテンシャルに基づくカービング法を開発した。この方法を舞踊データに適用した例を図3.4.2に示す。この例では、視体積交差法では形状が多面体で近似されているため仮想画像が粗い。一方、従来の

スペースカービング法では手足の先で過剰削除の問題が生じているが、提案手法ではこれらの問題が解決されている。



図3.4.2 三次元形状復元手法の比較

3.4.1.3 仮想映像生成技術

仮想映像生成法は、対象物体の記述単位がボクセルであるかサーフィスであるか、また、形状の記述精度に依存していると考えられる。特に、詳細な三次元形状が復元できない状況では、本質的にボクセルレベルの記述しか得られないため、光線追跡法などモデルベーストレンダリングを利用できない。我々の方法で得られる三次元形状は5cm立方を単位とするボクセル表現であるため、モデルベーストレンダリングでは対応できない。

このような条件での映像生成法として、複数画像上の見え方（対応する画素値）を可視ボクセル毎に混合して画像を生成する混色(color blending)法があり、従来の混色法は、視点依存型混色法と法線依存型混色法に分類される。ここで、前者では混色比の決定を仮想視点と実カメラの視点の位置関係から行うのに対し、後者では仮想視点と各表面ボクセルで求められる法線方向の関係から混色比を求めていた。しかし、これらの従来法には計算の高速化を優先したため、自然な映像を目指す立場からは解決すべき問題が存在した。即ち、視点依存型では表面法線を見逃しているため、対象物体の輪郭付近で無理な引伸ばしが発生し、生成映像の画質が低下する原因となっていた。



図3.4.3 仮想映像生成技術の比較

一方、法線依存型ではカメラ間の位置関係を見逃しているため、撮影時の照明環境を反映した写実性の高い映像が得られないという問題があった。これらの問題を解決するため、我々

は混色法の改良を試み、視点・法線依存型混色法による仮想映像生成法を提案した。この方法は、仮想視点と実カメラの視点、および、表面法線の関係から混色比を求めることを特徴とし、従来の視点依存型および法線依存型において問題となった現象を格段に軽減することに成功している。図3.4.3に同じ形状データを用いた場合の3手法による仮想画像の生成例を示す。

3.4.1.4 舞踊動作解析と仮想視点映像生成への利用

我々はまた、仮想映像生成とは別に、舞踊動作のデジタル保存およびこれに基づく舞踊解析の研究を行ってきた。この研究では、モーションキャプチャによって得られた舞踊動作データは時系列相関行列を用いて解析される。これにより、動作の類似性解析が可能となり、同一演者における踊りの安定性や、演者間での踊りの類似性の比較が可能となり、無形文化財の伝承への利用も考えられる。また、類似性解析に基づいて「振り」を自動的に抽出することも可能である。一方、仮想映像生成と動作解析を融合させることにより、新しい画像制御法を開発することも可能である。即ち、動作解析に基づいて仮想カメラの視点制御を行うことで、実カメラでは得られない映像を作成することができる。ここで、復元された三次元形状と動作データは同時に撮影されていないため、位置合わせ（並進+回転）が必要となるが、我々は、三次元空間での重なりを評価関数とした位置合わせ法を開発し、踊り手中心座標系によるカメラ制御を実現している。（図3.4.4左端に位置合わせの例を、その右側に踊り手の正面に仮想カメラがくるようにして生成した映像の例を示す。）

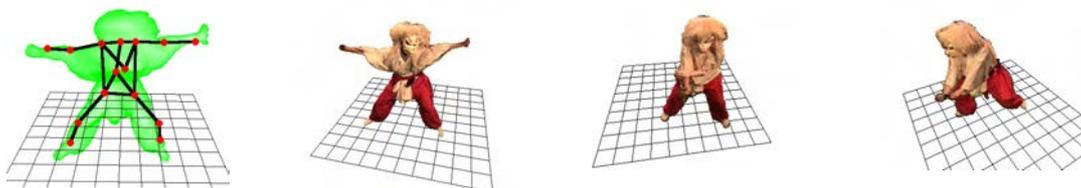


図3.4.4 位置合わせの例 踊り手がカメラ正面にくるようにした仮想視点映像生成の例

3.4.2 ヒューマノイドロボットによる舞踏提示手法（東京大学）

我々は無形文化財のデジタル化のためには、この踊りの師匠を物理的に作成することが必須だと考える。要件としては、（1）無形文化財の動きの流れとともにその要所要所（あるいは肝）を抽出し、理解し、解説できること、（2）動きを物理的に、とくに肝となる部分を忠実に表現できること、の2点であると考えます。

人の動き情報の取得に関しては、我々のグループでは、多視点カメラシステムとモーションキャプチャシステムを併用し、人の動き情報を得ている。動きの解析に関しては、人の様々な動作から動きの共通項の役割を果たすシンボリックな表現を抽出する。手先動作の速度変化や音楽情報から動作を切り分け分類する。切り分けられた舞踊動作セグメントのクラス化を行い階層構造をつくることで全体構造を把握する。さらに、セグメント間や個人間による

セグメント内での軌道などのばらつきから踊り手のくせや中心表現を抽出することなどが課題である。これらは、図3.4.5のフローで有機的に関連している。

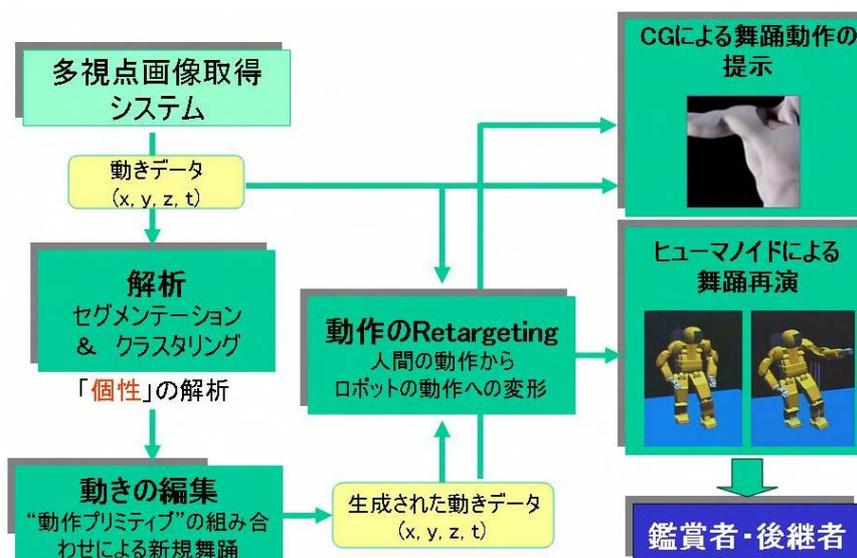


図3.4.5 動きのデジタル化概要

無形文化財という人から人へと伝承することが重要となる対象を扱うためには、獲得・解析された動作を単なるデジタルデータとして残すだけではなく、これを提示するための技術開発も重要である。動作データの提示に関しては従来よりCGを用いた手法が主流であるが、我々のプロジェクトでは産業技術総合研究所ヒューマノイドロボットグループとの協力の下、ロボットを用いた手法を開発している。CGによる手法に比べ、臨場感が大きく、動きデータを表示するディスプレイとしては画期的なデバイスであると考えている。しかし、モーションキャプチャによって得られた人の動きデータをそのままロボットに入力しても、人とロボットの間での様々な違いによって同様の動きをつくることは不可能であるため、これを実現するための新たな手法を開発する必要がある。このために我々は、ロボットと人体モデルの動力学的制約を満たす動作生成手法や、動き情報の構造解析結果を用いた適応的フィルタを導入、動作の中心表現を変化させずに全体的な動きの流れを変換する手法などを開発している。以下では、中心課題である動きの解析、動作生成、ロボットによる再現について詳細にのべる。

3.4.2.1 舞踊の動作解析

モーションキャプチャシステムから得られた舞踊の関節位置データを用いて、舞踊動作全体の解析を行う。ここでの目的は舞踊全体の動作から有限個の「基本動作プリミティブ」を獲得し、舞踊を表現することである。これにより、舞踊内での繰り返しの動作や一度しか出現しない動作などを把握することができ、舞踊全体の構成を把握することができる。また、異なる舞踊のプリミティブを比較することによって相互の関係を把握することも可能となる。さらに、今まで文字や絵等で記されてきた舞踊の記述方式としてこの表現を用いることも可

能である。

我々のグループでは、入力されたモーションキャプチャデータを分割し、低レベルの表現としてその分割された動きセグメントをそのまま保存するアプローチをとる。分割された動きセグメント間ではその目標点(手先、足先)の軌跡によって動きの相関が評価され、舞踊の中で頻出する動きセグメントが「基本動作」として抽出される。最終的には、同一の動作とされた分割セグメントの中の動き情報を平均化しアーカイブ化する。この方法では、実際のモーションキャプチャデータから得られたデータをそのまま保存データとして用いるため動作の再現が容易になる。

民俗舞踊を見ると、その動きの中には繰り返しやバリエーションを持たせた動作など、音楽のような動作構造が存在することに気づく。そこで、以下に述べる5つのステップで、低レベル表現である分割された動作データをクラス化することで動作の構造を把握する。

1. フレーム毎に人の腰位置に体中心座標系を設定。
2. この座標系における手先足先の速度と軌跡を得る。
3. 速度の極小値を動きセグメントの境界フレームと考え動作を切り分ける。これにはEM-Algorithmを使用する。
4. 切り分けられた動作セグメント内の軌跡の相関を評価することで動作をクラス化する。
5. 同クラスの動作セグメントが連続する場合、セグメントの併合を行うことで舞踊全体の動作構造を把握する。

以上の5ステップにより手足の動きの加速度で切り分け体中心に対して同じ軌跡を描くセグメント（最小セグメント）が分類できる。この最小セグメントでは手や足の振り等の動きが検出できるが、舞踏のようなシナリオをもった動きではより大きな単位である共通した動きが存在する。これを検出するためにレベル付けされた最小セグメント列から頻出する一連のパターンを検出して、より大きな動き列を抽出する。これにはApriori Algorithmを用いる。これらの大きな動き列を分類することで同一部位における動作ラベル列の階層化を行う。次に、他の部位の動きとの関連付けも行い最終的な動きの記述とする。本アルゴリズムを用いた「そうらん節」の解析結果を図3.4.6に示す。

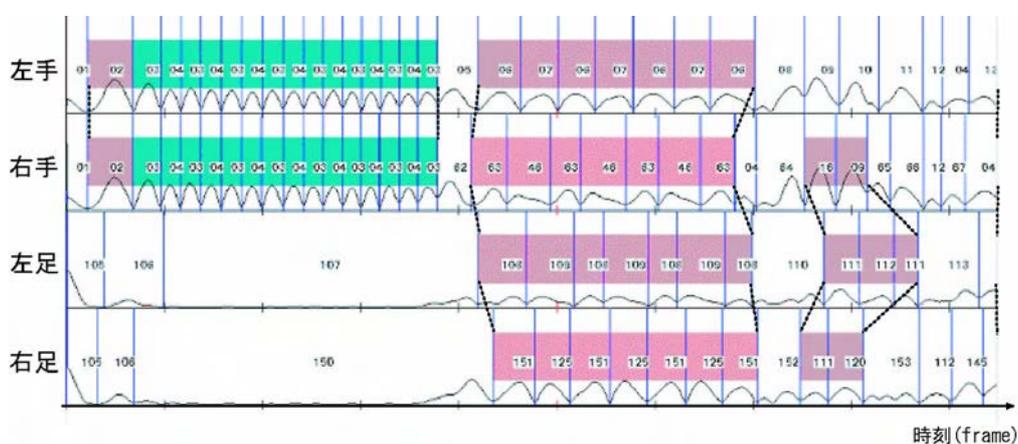


図3.4.6 そうらん節の自動解析結果

舞踊がいくつかの繰り返しのある動作プリミティブとそれらを連結する動作セグメント、一度しか出現しない動作プリミティブ等の部分から成り立っていることが確認できる。繰り返し演じられる動きが同様のラベルに振られるため、必要最小限の動作プリミティブを登録するのみで十分となるだけでなく、舞踊全体の構造を把握することも可能である。

この手法では、人の手足の動き情報のみをセグメント化とクラス化に用いている。だが、これが舞踊において意味レベルでも正しいものであるかは分からない。これを解決するため音楽情報を導入して意味レベルでも正しいセグメント化を行う手法を開発した。ここでは、舞踏の動きは音楽と不可分のものであり、音楽の節々に重要な動きが出るとの仮定による。

まず、舞踊で流される音楽をスペクトル解析することでリズム（ビート）を抽出する。このビートと先に求めた動作セグメントがほぼ同時刻にくるものを見つけ、加えて両手両足、重心のそれぞれの動作セグメント点が同時刻に存在する場合、意味レベルでも正しいセグメント点として動作の切り分けを行う。図3.4.7に、この手法を用いて会津磐梯山踊りに対して適用した結果を示す。

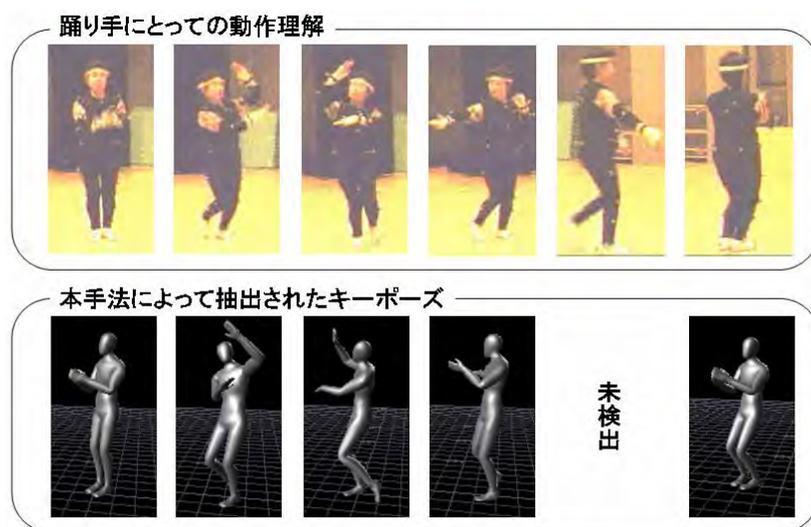


図3.4.7 会津磐梯山踊りの留め動作抽出結果

止め動作が正しく抽出されている様子が見て取れる。実際、踊り手が踊っているときに意識している姿勢についてヒアリングを行い、求められた動作セグメントとの比較をおこなったところほぼ一致した結果が得られ、本手法の有効性が示された。ここであげた2種の動作解析手法から、民俗舞踊においては以下のような特性が成り立つものと考えられる。

1. 舞踊はセグメント化された動作から成り立ち、それらは有限種のクラスに分類できる。
2. セグメントフレームは音楽のリズムに応じたリズムパターンに応じて現れる。

3.4.2.2 動作プリミティブの編集による新規動作列の生成

前章の手法で舞踊中の動作プリミティブを導出できる。ここで例として挙げた3つのおどりの解析結果を見ると、舞踊はいくつかの繰り返し動作と、それを連結する動作から成り立つ

ていることがわかる。すなわち、舞踊動作は有限の動作群の組み合わせによって構成されるという仮説を支持するものであると言える。この知見から、抽出された動作プリミティブをデータベースとして蓄積することの重要性がわかる。さらに、任意の動作プリミティブを自動的に連結する手法があれば、既存のプリミティブをつなぎ合わせて新しい舞踏生成するという舞踊動作の編集が可能になる。

この舞踏編集のための繋ぎ動作は、人の動作軌道生成に基づく軌道を生成する必要がある。軌道生成のうち、腕の動きに関しては神経科学やロボティクスの分野で多くの研究がなされている。Flashらは、腕の動作軌道に対してJerk (躍度) 最小モデルという概念を提唱している。人の腕の動作においてはその最中の躍度の積分がもっとも小さくなる軌跡を通るという理論であり、実験的にもその正しさが証明されている。この概念を発展させ、宇野らはトルク変化最小モデルを提唱し、川人らは粘性トルク変化最小モデルを提唱している。いずれも、より人間の随意運動に近い動きを生成することが示されている。

一方、脚の動きに関しては現在さまざまな手法が考えられているが、脚は手と異なり体を支えるためのバランスをとる必要があるため、腕のように動き自体を他の部位の動きと独立して考えることが難しい。我々は、動きの間ではいずれかの脚が支持脚となるという拘束のみを与え、他の脚や体全体は滑らかに連続した動作をするという仮定を設けることとで脚の軌道生成を行う手法を開発した。図3.4.8に示すように、連結対象とする動作プリミティブ間での支持脚を設定し、他方のプリミティブはこの脚が一致するように平行移動させる。次に、遊脚先位置、腰位置、体中心位置、首位置を2つのプリミティブの間で一致するよう他方のプリミティブを移動させる。さらに、腰ならびに首の座標系を回転させる。最後に、腕および脚の関節角度跳躍度最小な軌道で補間を行う。動作変形のアニメーションから、異なる舞踊などの間でもスムーズに連結動作が確認でき、本動作編集手法が有効に働いていると思われる。



図3.4.8 動作連結による新規動作の作成

3.4.2.3 最適化計算による動作生成

前節の軌道計算では、跳躍度最小となる軌道を利用した。人型モデルの動作生成においては、モデルに予期せぬ外乱が加えられた場合でも、それを適切に対処できるようにすることが重要である。とくに、2本脚モデルでは体を支えるための「支持面」が小さいため、バランスをとることが難しくなる。これまでCGやロボティクスの分野で人型モデルのバランス制御についての研究がなされてきた。

一方、人間は非常に高度なバランス保持動作を行っており、そのメカニズムを見習うことで、より効果的で頑強なシステムを構築できる可能性がある。このため、人間のバランス保

持動作について観察することは重要であると考え。人間の場合大きな外乱が加えられると、バランスを保つためにしばしば腕を大きく振り回したり、腰を大きく折り曲げたりする。すなわち、外乱で生じた角運動量をこれらの動作によって適切にコントロールし、転倒を回避していると考えられる。大きな外乱に対処するには、このようなダイナミックな全身動作によるバランス保持が必要である。ところがこれらのダイナミックな動作は、従来のフィルタリングやPD制御によるバランス制御の手法では実現が困難であった。これは、従来の手法では現在の姿勢と目標とする姿勢の差を縮めるように動作を生成するため、「一時的に目標とする姿勢からは遠ざかるが、実はバランスを回復するのに効果的な動作」を生成することができなかったからである。

我々のグループでは、この点に注目し、最適化を用いた姿勢制御の手法を開発している。この手法においては、ZMP (Zero Moment Point) と呼ばれる「地面から受ける力によるモーメントが0になる点」を足の支持多角形内に納まるよう制御することで、動的バランスを直接的に取り扱う。ここでは各関節の角加速度を変数とし、「できるだけ力を使わずに姿勢を保持する」ということに相当する「関節角加速度の二乗和」の最小化する定式化を行う。最適化には、二次計画法を用いる。その際、拘束条件として次の3つの条件を設定した。

1. 重心の加速度が、重心の目標位置の方向を向いている。
2. モデルのZMPが足の支持多角形内に存在する。
3. できるだけ左右対象な動きとなるようにする。

すなわち、重心の位置・加速度やZMPのみを問題にし具体的な姿勢については問題にしないことによって、フィルタリングやPD制御では実現できなかったような、ダイナミックに全身を使ったバランス回復動作が生成できるようになった。具体的には、人間によく見られるような腕を振り回すことによって角運動量を適切に制御してバランスをとる動作が生成された (図3.4.9)。

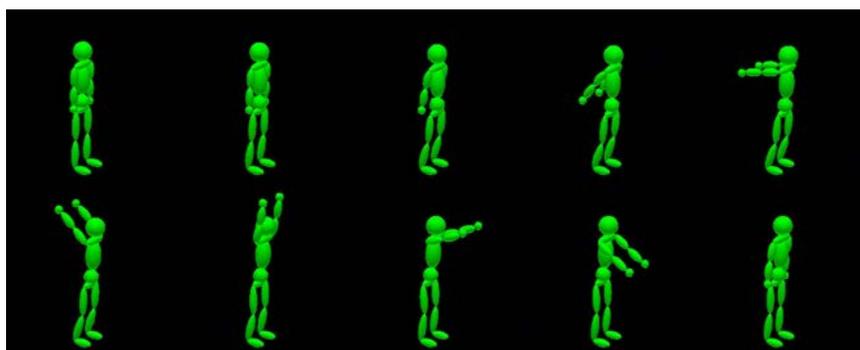


図3.4.9 シミュレーションによって得られたバランス運動

3.4.2.4 ロボットによる動作提示

コンピュータ上に取得された動作データのより効果的な提示手法として、ヒューマノイドロボットによる舞踊の実演を試みている。しかし、ヒューマノイドロボットは人間に似せて設計されてはいるものの、現状ではまだ関節の構造や自由度・可動範囲・動作速度などにおいて制限されたものとなっており、身体における重量配分も異なる。よって人間から得られ

た動作データをそのままロボットに適用することは不可能であり、ロボットは目標とする動作を自らの身体に適応させていく必要がある。これは人間同士であっても体格や身体能力の違いがある中で同じ動作をしようとしていることと同じであり、動作模倣における一般的な問題であると考えられる。

ロボットを動作させるにあたって、元の動作からの逆運動学によって直接的に得られた関節角軌道をベースとすることが考えられる。Pollardらは得られた個々の関節角軌道を可動範囲や最大角速度内に収まるよう修正することで、ロボットによる舞踊模倣を実現している。しかしこうして得られた動作は身体全体とその力学を考慮していないので、自己干渉を起こしてしまったり、元の動作の特徴を失ってしまったりする上に、自らの脚でバランスをとって動作を続けることは難しい。これに対し、我々は今まで述べてきたような動作の解析結果を有効に活用することでこの問題を解決することをめざしている。元の動作をそのままロボットの制約内に修正していくのではなく、元の動作を解析して基本となる動作の列を抽出し、ロボットの動作はその基本動作列をもとに新たに生成する。ロボットは各種の制約や力学を満たしながら、個々の基本動作のもつ動作の特徴を反映していけばよい。この手法を用いて、図3.4.10に示すように、ロボットが自らの脚でバランスをとりながら舞踊の模倣を行うことに成功した。



図3.4.10 ロボットによる舞踊の模倣

3.4.3 舞踏の簡易稽古システムの開発（埼玉大学）

舞踏に慣れ親しんでもらうために、舞踏後継の担い手である初心者・子供を対象として、学習者が模範演技者の演技を模倣し、表面的にはそっくりに踊れるように指導する手法・システムを開発した。舞踊学習の初期段階としては学習者が模範演技者の模倣をすることから始まる。ただ真似をするとしても、身体の一部の動きを合わせることはできても身体全体として同じ外見を再現することは難しい。また、初心者は小手先の真似をし、大局的な動きを捉えにくい。そのため、学習者の動きをリアルタイムにとらえ、解析、その場で直接的に指導することを目的とした。

3.4.3.1 システムの概要

提案するシステムを図3.4.11に示す。モーションキャプチャシステム及びプロジェクタ、

計算機、装着デバイス(振動器及びマーカ)、スクリーン (大型画面)、ロボットから成る。情報提示に関しては模範演技者及び学習者の舞踊動作のスクリーンへの表示、床面への時系列的足跡情報投影、学習者の動作・姿勢に応じて位置を変化させる表示ロボット、身体装着デバイスによる音声や振動刺激等を考える。学習者の動きはモーションキャプチャシステムで取得後、模範演技者の舞踊データと解析・比較されて、大幅な相違や悪い部分などの情報が新たな教授信号として学習者にフィードバックされる。

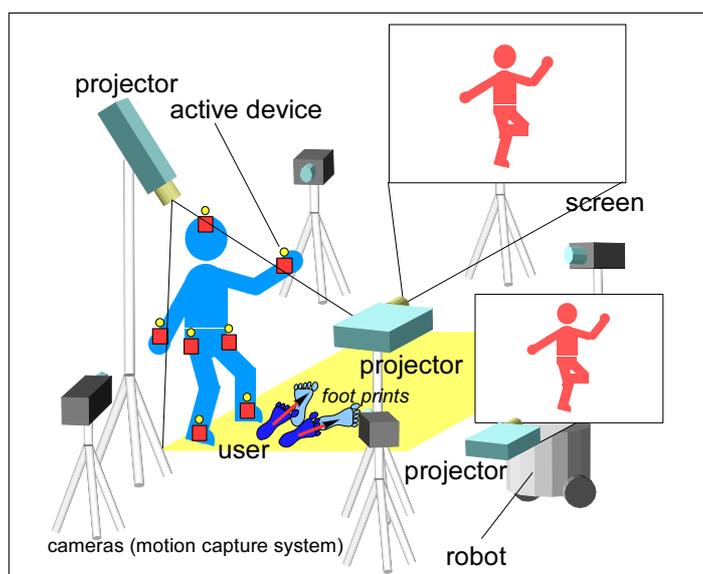


図3.4.11 舞踊簡易稽古システムの概要

3.4.3.2 映像表示

模範演技者の舞踊を学習者に表示する際ビデオ映像を表示するのが一般的であるが、カメラ位置に視点が固定されてしまう。特に模範演技者の正面から撮影された映像を見て学習するためには、頭の中で座標を変換する必要があり効率的ではない。そのため、実際のビデオ映像の代わりにモーションキャプチャデータより作成したCG映像を表示する（図3.4.13内スクリーン内画像 参照）。三次元データであるため、動作が把握しやすい模範演技者斜め後方の映像（頭の中で回転等を加える必要がなく、学習者が見たまま身体を動かせばよいので分かりやすい）を含め、視点を自由に変更できる利点がある。

また、学習者にステップを覚えさせるために投影歪みの補正、投影タイミングを考慮しつつ床面への足跡投影を行った（図3.4.12 参照）。



図3.4.12 足跡表示

3.4.3.3 移動ロボット

前述の映像表示を行う際、学習者は常に正面を向いているとは限らず、上記の映像提示をスクリーンに映すだけでは不十分である。そこで超短焦点プロジェクタ及びスクリーンを移動ロボットに搭載し、そのロボットが常に学習者の正面に位置するよう移動し、映像を提示することとする（図3.4.13参照）。これにより、スクリーンを増設することなく常に映像情報を視界におさめることが可能となる。また、簡単な並進運動を含む舞踊の場合は上記の足跡投影の代わりにロボットの動きに追従することで大まかな足運び・移動について学習できる。

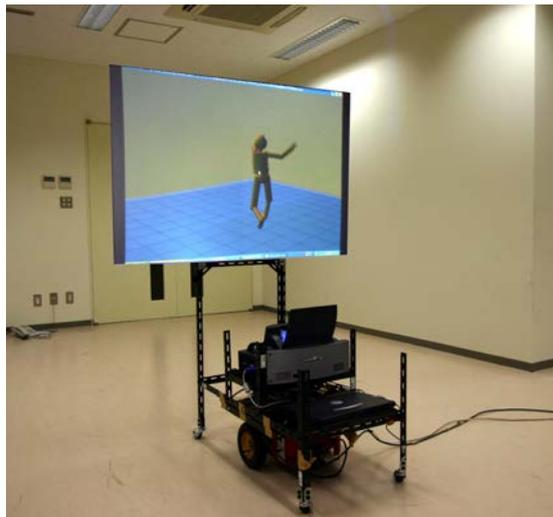
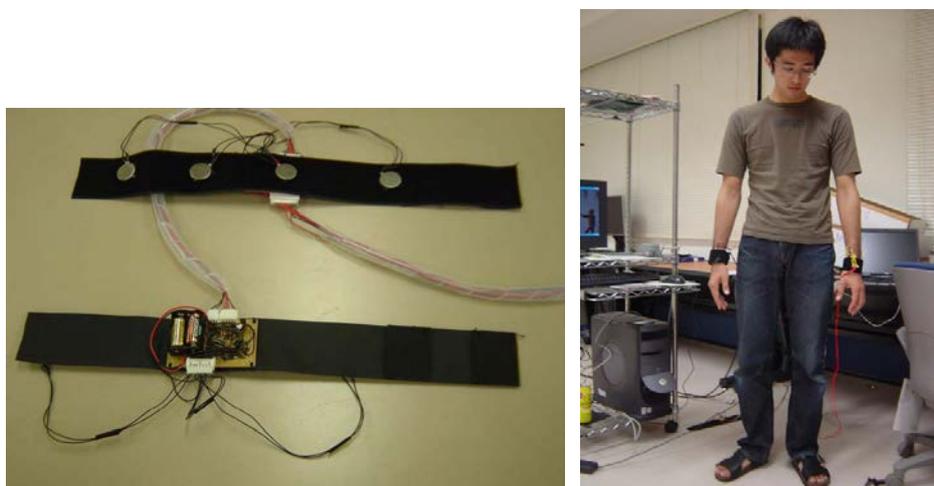


図3.4.13 移動ロボット

3.4.3.4 アクティブデバイス

学習者により直感的に指示を行うため、振動モータを用いたアクティブデバイスを開発した。マジックテープの上に複数の振動モータを配置して、それを手首などの関節周囲に巻き、振動により動作の方向、タイミング等の舞踊情報を伝達する（図3.4.14参照）。



(a) アクティブデバイス

(b) 装着した様子

図3.4.14 アクティブデバイス

実験の結果、動作方向指示には適していないことが分かったが、動作開始タイミング指示に関しては有用であることが分かった。結果を図3.4.15に示す。津軽じょんがら節の中の一部の動作を取り出し、その中に含まれる37の振りを6人の被験者に踊ってもらったものである。振りを開始すべきタイミングの500ms前に振動を与え、それから1s以内に振りを開始したものを「成功」、1s以上経過してから振りを始めたものを「遅れ」、間違っただ振りの場合は「間違い」、「それ以外」とした。その結果、一人の被験者を除き、振動指示があった場合の方が成功する回数が多い。

舞踊の保存に関して、これまではビデオで撮影したり動作データを取得したりするのみで再利用を考えていなかった。運動解析についても、速度・加速度で踊りの動作を分割する研究はあるが、それに基づいてリアルタイムで指導を行う研究はない。本研究では踊りの解析及び後世への伝達を目的としており、舞踊技術の伝達、後継者育成の一助になれば、と考える。

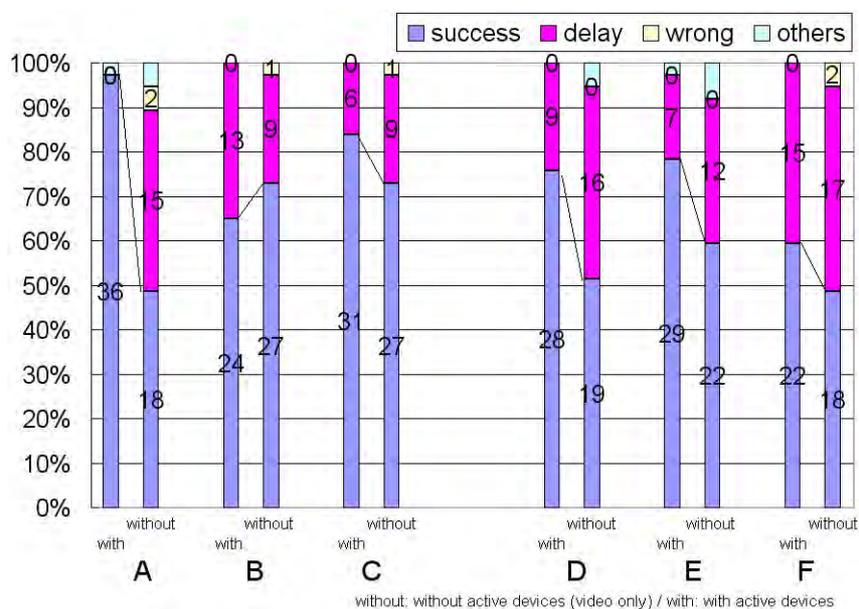


図3.4.15 タイミング指示の結果

3.4.4 持ち替え動作の解析と記述（東京大学）

本節では、匠の技の解析に必要な、手先の記述を考える。鎌倉によれば、日常に存在する様々な物体に対しどのような把持の仕方が存在するのかを数え上げることができる。把持は(1)安定的な保持を目的とした「圧力把握系」、(2)物体操作を目的とした「精密把握系」、(3)両者の中間である「中間把握系」の3つに大分類され、さらに細かく分類し計14種類の把持によって日常に現れる把持をほぼ分類できることを示した。

この知見は、物体の操りをロボットに伝達する際にただ掴めばよいのではなく、同種類の把持方法が再生されなければいけないことを示している。

そこで我々は、前記14種類の把持をスキルレベルのプリミティブと定義することによって、

任意の手作業における指の操りは、この14種類のいずれかの把持プリミティブから別の把持プリミティブへの連続する状態遷移として記述できることを提案した。すなわち、人間の行う一連の手作業は、把持プリミティブの時系列データとして認識・記号化される。またプリミティブからプリミティブへの遷移動作戦略をあらかじめロボットに学習させておくことによって、任意のプリミティブ列からロボットによる持ち替えを再生することが可能になる。実際には、対象とする作業を限定することによって、学習するべき遷移戦略の数は限定され、たとえば茶道における点前の一例ではたかだか7種類の遷移によって記述できることを確認している。

各把持プリミティブは、手の形状と掌の圧力分布によって表現することができる。そこで我々は、図3.4.16に示すように、手の形状を測定するデータグローブの表面に面上圧力センサを分布させた把持計測装置を開発した。

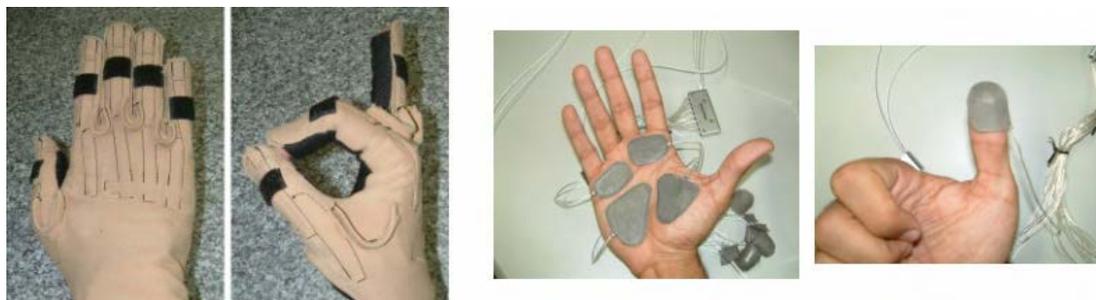


図3.4.16 把持計測デバイス

そして、指の関節角（18自由度）と圧力分布（12自由度）の時系列情報を入力とし、図3.4.17に示すように隠れマルコフモデルを用いることによって、連続する持ち替え動作を実時間で認識しプリミティブ列を出力するシステムを開発した。

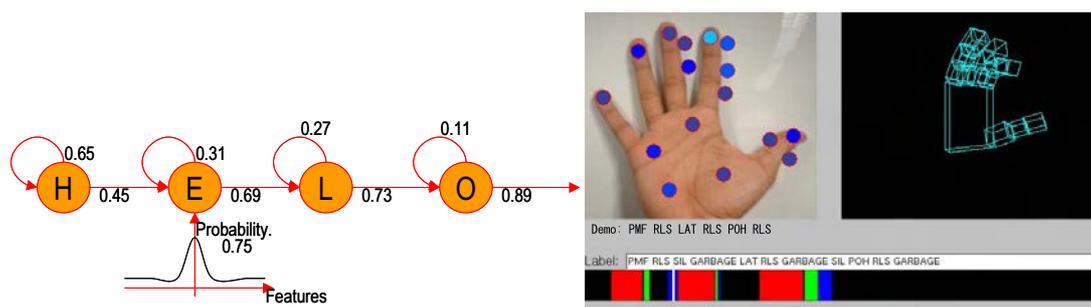


図3.4.17 隠れマルコフモデルによる持ち替えの連続認識

3.4.5 持ち替え動作の再生（電気通信大学）

持ち替え動作の再生を実現するために、人間の手の形状を模したロボット多指ハンドを開発した。また、3.4.4節で述べた遷移動作は、遷移中に接触状態の変化を指標にセグメンテーションを行うことで、連続的な単純な指の運動として実現することが可能である。図3.4.18

上部に、茶杓をつまみ持ち替える遷移動作例を示す。この遷移動作は、6種の間中把持形に再分割され、単純な逆運動学と触覚フィードバックに基づく中間把持間の遷移動作をロボットに実装することによって、図3.4.18下部に示すようにロボットハンドによる把持の再生を可能にした。

本枠組みを適用することによって、物体の操りに必ず伴う任意の持ち替え動作を記述することが可能になり、また有限個の把持遷移戦略をロボットに学習させておくことによって、任意の持ち替え動作を機構の異なるロボットハンドで再生することが可能なる。

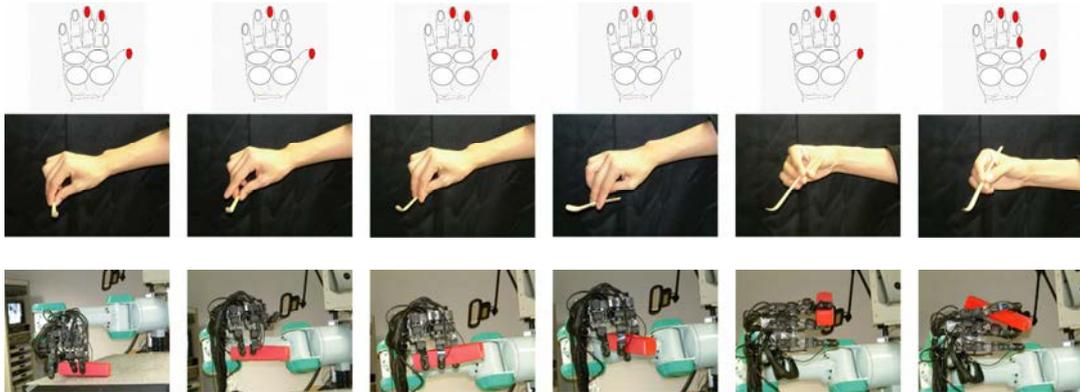


図3.4.18 持ち替えの伝達

3.4.6 複数回観察に基づくプリミティブの自動抽出 (東京大学)

学習対象となる作業が未知の場合には、3.4.5節の場合と異なり事前に必要十分性を満たすプリミティブ集合を定義しておくことは難しい。このような場合には、人間が行う教示動作からプリミティブを自動抽出する必要がある。プリミティブとは、作業を構成する肝となる動作であるが、単一の観察結果からのみでは一連の動作のどの部分が肝であるのかを推測することは困難である。

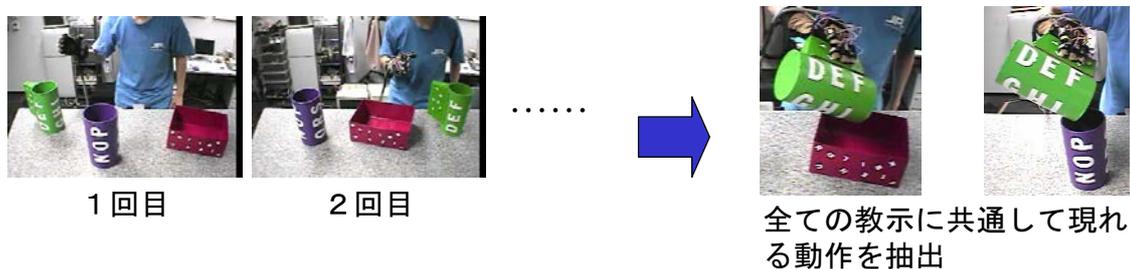


図3.4.19 複数回観察に基づくプリミティブの抽出

そこで、図3.4.19に示すように、物体の配置など表現形を変えて何度も同じ作業を繰り返して実演し、全ての教示動作に共通して現れる動作パターンを見つけることでプリミティブを自動抽出する方法を提案した。

動作パターンとして、環境に存在する物体間の相対運動に着目し、全ての教示動作の中で同じ物体の組み合わせによる相対運動の分散が小さい場合には、その動作が肝、つまりプリ

ミティブであるとする。このために、図3.4.20に示すように三次元計測装置を利用して教示動作を観察し、開発したモデルベースの三次元物体追跡手法によって各環境物体の軌跡を計算する。次に、教示データごとに独立に、全ての物体の組み合わせについて相対運動を計算し、これがある閾値より小さい区間を「肝」動作の候補とする。最後に、全ての教示データに現れる同一の「肝」動作を検出する。これを効率よく行うために多次元DPマッチングを用いる手法を提案した。

これによって、作業の肝となる部分を作業に対する事前の知識無しに推測することが可能になる。また、この肝の部分のみ相対運動が保たれるように再生を行い、その他の区間については、教示時と再生時の環境の違いを吸収するようにロボットアームを制御することによって、必ずしも同一では無い環境において作業を達成することが可能になるとともに、複数の相対運動が一つのプリミティブに対応していることを利用して、隠れマルコフモデルによって運動のばらつきをモデル化することで、新たに獲得したプリミティブ郡を用いた連続動作認識を可能にした。

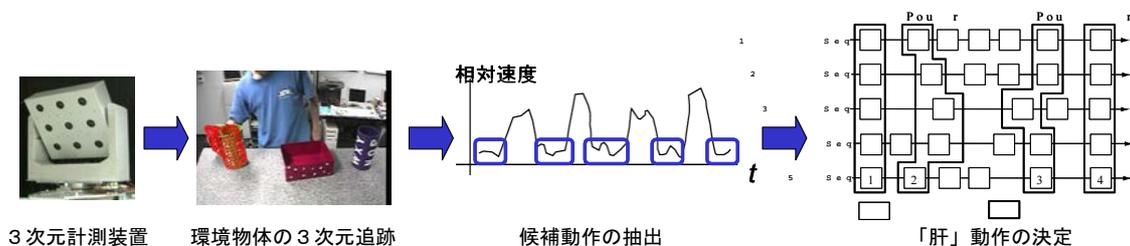


図3.4.20 相対運動の類似度に基づくプリミティブの自動抽出

3.4.7 獲得した多量のプリミティブからの高速認識（和歌山大学）

本研究では、画像を用いた動作解析の根幹となる（1）画像上での対象追跡と、（2）追跡対象の認識、の2つを単一の計算の枠組みで実現し、実時間で動作するシステムを構築することにある。

対象追跡は、動画像上での対象の位置・姿勢を求める問題であり、対象の認識とは三次元物体の姿勢変化や顔の表情の変化、人体の関節の変化などに伴う見えの変化を識別する問題である。この問題は、位置・姿勢パラメータと、見えの両方を同時に探索する問題であり、探索空間は位置・姿勢パラメータ空間と見えの空間の直積空間となる。一般にこの探索空間は非常に大きな空間となるため、実時間でこれを実行することはできないと考えられてきた。

これを解くためには、画像中の対象を切り出すための枠（以下 Object Frame）に含まれる画像をクエリとし、見えの集合に対する高速な最近傍探索を行うことが必要となる。

14年度は、二値画像に対する最近傍探索問題および、さらにこの問題を特殊化した最近傍認識の高速化に関する研究を行った。

まず、我々の開発した色ターゲット検出器を用いて得られた対象のシルエット（二値）画像に対して高速な最近傍探索を行う方法として、画像の4分木表現を利用して最近傍候補と

なり得ないものを順次削除しながら最近傍探索を行う方法を開発した。この方法は、分枝限定法あるいはA*アルゴリズムと同様に上限値下限値を4分木のあるレベルで見積もることによって計算を行う手法である。この手法では、図3.4.21に示すように処理の初めの候補数が多いが木構造は単純でデータ量は少なく、木のレベルを上げるにつれて個々のデータ量は増えるものの、最近傍候補数が減っているため高速な計算が実現できるというものである。この手法により、記憶する見えのデータ（プロトタイプ）が図3.4.22に示したものを含む8枚の画像を2度ずつ回転させた二値画像1,440枚に対して、単純に画像間の距離を比較する方法よりも43倍以上高速化できることを確認した。

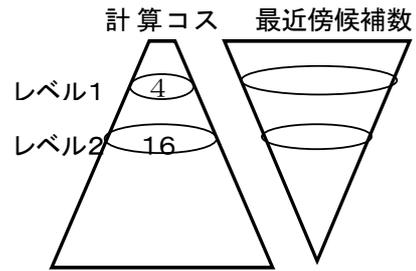


図3.4.21 解像度と候補数の関係

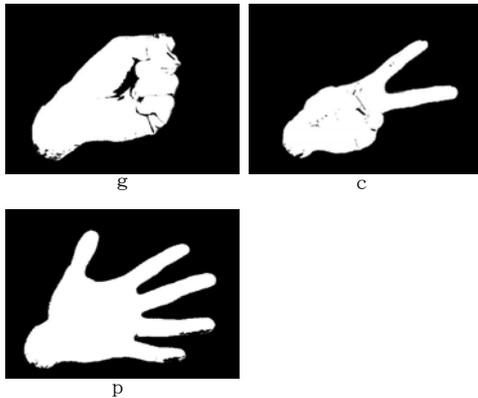


図3.4.22 回転前のプロトタイプ画像（一部）

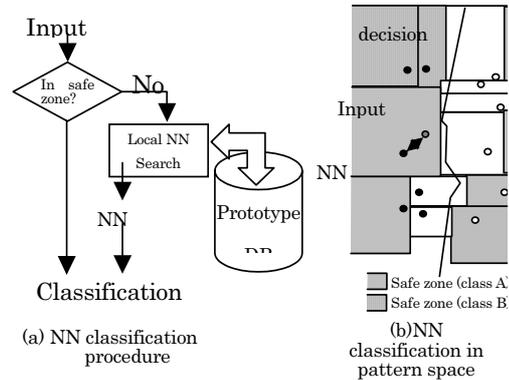


図3.4.23 KDDTによる最近傍識別器

次に、最近傍識別の高速化方法として、K-D Decision tree (KDDT) と命名した手法の開発を行った。これは、S. Aryaらによる高速な空間分割型最近傍探索器ANNを分析し、この中で木探索部分は高速に動作するが葉に到達した後に実行されるPriority Search と呼ばれる後戻り探索に時間がかかっていることに着目した手法である。ANNでは空間を1つのプロトタイプを含むBOXに分割し、クエリがどのBOXに含まれるのかをまず木探索によって調べる。そして、最近傍候補となり得るプロトタイプが含まれる可能性のある近隣のBOXをPriority Search によって調べていく。最近傍識別の問題では、識別境界と交差しないBOXに含まれるクエリは即座に識別することができる。そして、識別境界と交差するBOXにクエリが含まれる場合でも、その部分の識別面を形成している数個のプロトタイプとの距離比較を行うだけで識別することができる。このようなアプローチを採用した手法がKDDTである。25次元程度の空間で1,000~3,000個のプロトタイプを用いた実験では、ANNを最近傍探索エンジンとして用いた最近傍識別器と比べ、6~400倍程度高速化できることを確認し、プロトタイプ数の増加に対してほぼ一定の識別時間が保てることを確認した。

平成15年度は、二値画像ではなく多値のカラー画像に対する最近傍探索技術を開発し、それを対象追跡と認識に用いるシステムの構築を行った。先に述べたKDDTは、固有画像解析などを行って低次元データに変換しない限りこの問題には適用できないため、新たにNearest First Traversing Graph (NFTG) と命名した手法を開発した。これは、見え（画像）を頂点とするグラフ構造であり、現在の頂点と隣接する頂点のうちクエリに対して最も近くなる頂点に移動しながら、最近傍点を探索する手法である。

一般にこの方法は、Delaunayグラフを用いない限り完全な最近傍探索とはならないが、Delaunayグラフの構築はd次元空間でN個のプロトタイプに対して、となるため、実用的ではない。その代わりに、NFTGは、入力されるクエリと記憶したプロトタイプのいずれかは一致しているか非常に近い場合は最近傍探索が行えるという性質を持っている。これによって、大量の高次元プロトタイプを記憶しておき、最近傍探索を行うことができるようになったが、動画像中の対象の追跡を行いながら、最近傍プロトタイプを求めるということはこれだけでは実現できない。対象の位置・姿勢パラメータが求められないからである。この問題を解決するために開発した手法がPose Parameter Embedding (PPE) である。PPEでは Object Frame をわざとずらした画像や大きすぎたり小さすぎたりさせた画像をプロトタイプ画像の中に含めておき、その画像にマッチした場合、Object Frame をどのように平行移動、拡大・縮小、回転させるかという修正量を書き込んでおくのである。最近傍探索によって見つかった画像に埋め込まれたパラメータを参照してObject Frame を変化させれば、位置・姿勢のパラメータ空間を探索することなく対象の追跡を行うことができる。このPPEとNFTGを併用したシステムに10人分の顔画像10,290枚をプロトタイプとして記憶させ、追跡を行ったところ、対象の追跡と個人の識別や顔向き表情の判定のいずれも正確に行うことができ、各画像に対する平均処理時間は5msとなった。このことは、十分に実用的なシステムの基本アルゴリズムとして本手法を用いることができることを示しており、舞踊データの実時間解析等に適用可能なものとなっている。

3.5 コンテンツ化

本CRESTプロジェクトの特色として、単に要素技術を開発するのみでなく、開発された手法を用いて、特に大型有形文化財をとりあげ、そのデジタル化、コンテンツ化、あるいは文化財保存科学への応用の可能性を検討した点がある。本節では、このような応用面について述べる。

3.5.1 デジタル化（東京大学）

本CRESTプロジェクトを通して開発した技術を用いて、数多くの文化遺産のデジタル化を行った。これまでに行った主要なリストは表3.2に、代表的なデジタルライブラリの例を図3.5.1から図3.5.10に示す。

表3.2 デジタルライブラリ

対象文化遺産	時期
奈良 東大寺 奈良大仏	2000年10月
生産技術研究所六本木校舎	2001年4月
奈良 東大寺 大仏殿	2001年5月
奈良明日香村 石舞台古墳	2001年5月
奈良明日香村 酒船石遺跡	2001年5月
奈良 唐招提寺 金堂	2001年7月
東京大学駒場寮	2001年9月
中国 龍門 宝冠如来坐像	2001年11月
大分県臼杵市 古園磨崖仏	2001年12月
奈良明日香村 飛鳥大仏	2002年2月
タイ スコタイ アチャ仏	2002年3月
奈良東大寺 項目天	2002年7月
カンボジア バイヨン寺院	2003年2月
カンボジア バイヨン寺院	2003年12月
福岡県 王塚古墳	2003年9月
カンボジア バイヨン寺院	2004年12月
カンボジア バイヨン寺院	2005年2月



図3.5.1 東大寺国宝盧舎那仏坐像（奈良大仏）

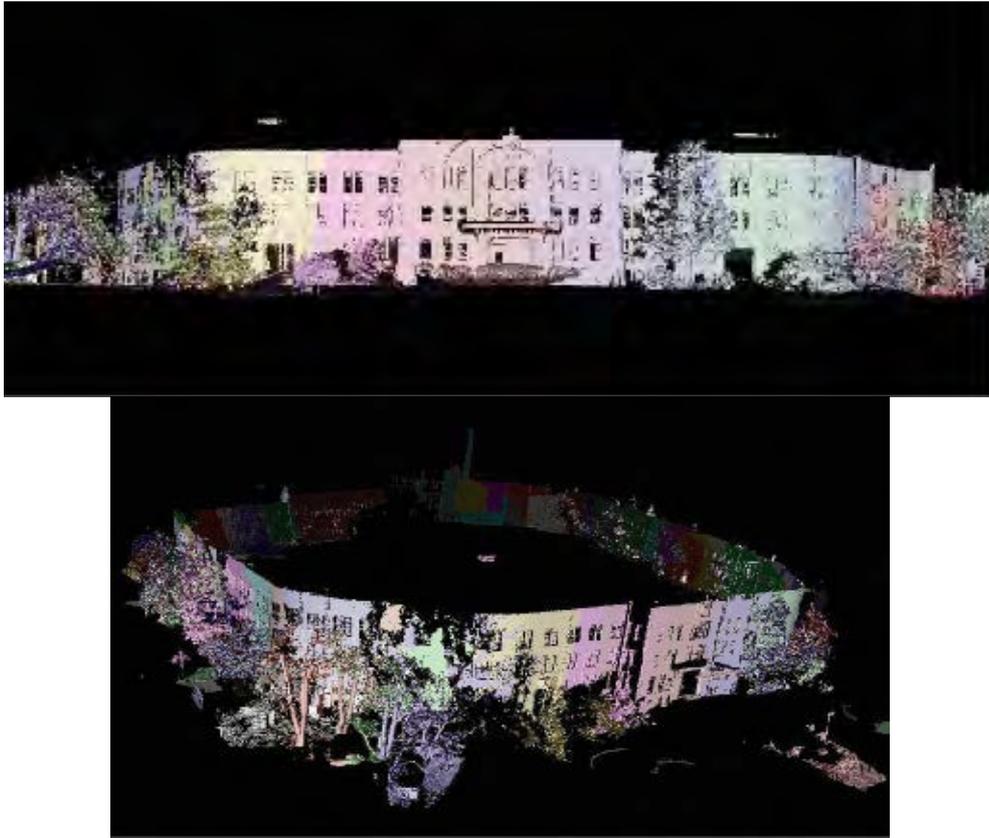


図3.5.2 生産技術研究所六本木校舎

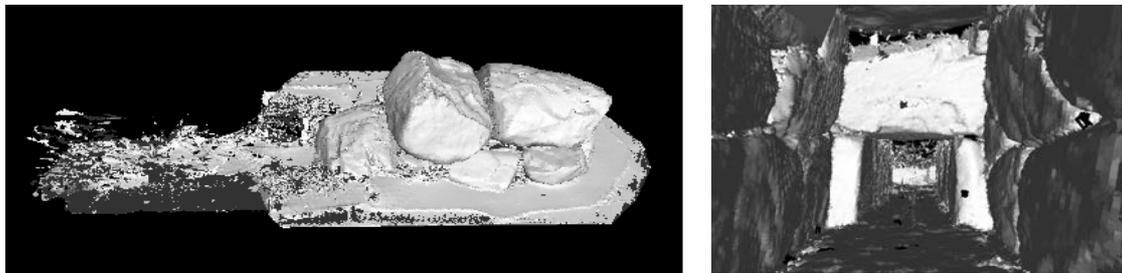


図3.5.3 奈良明日香村 石舞台古墳

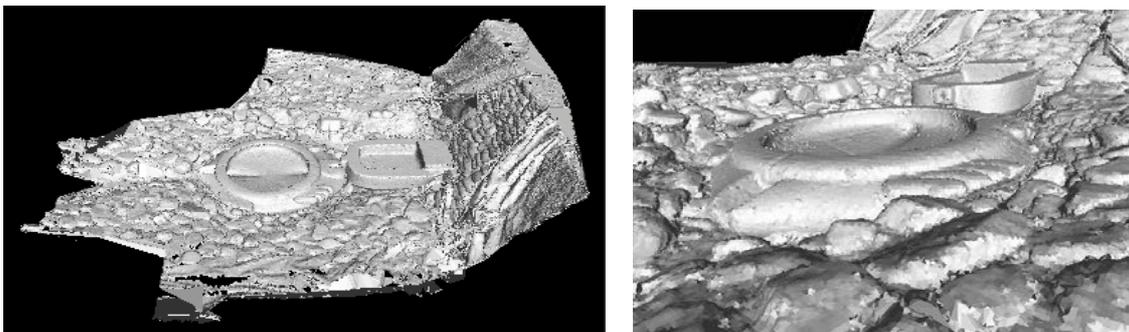


図3.5.4 奈良明日香村 酒船石遺跡

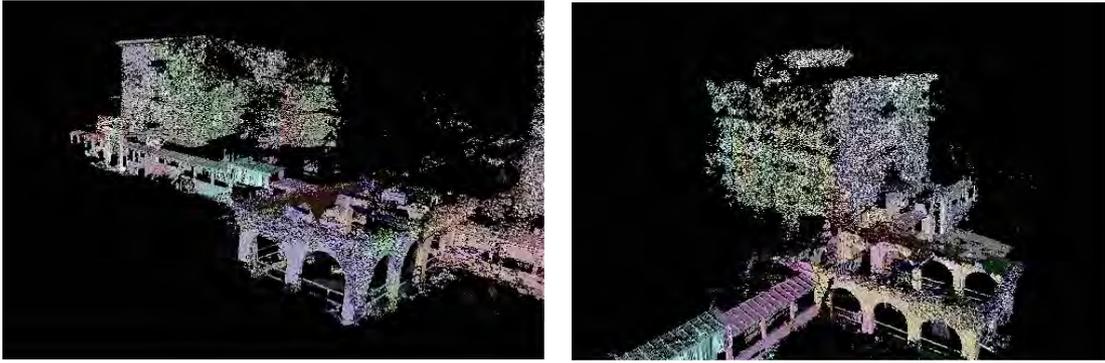


図3.5.5 東京大学駒場寮

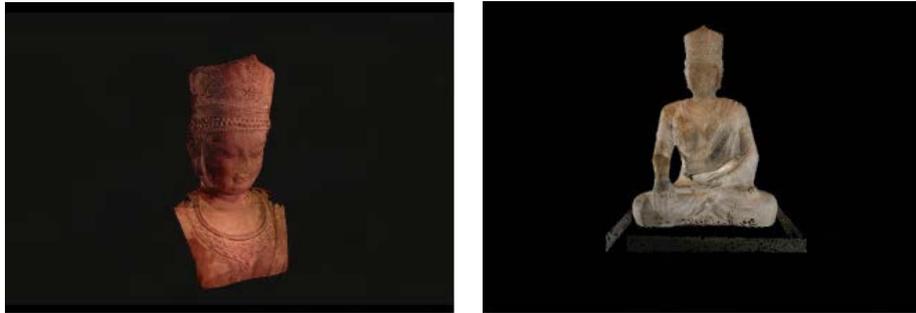


図3.5.6 中国龍門石造宝冠如来坐像

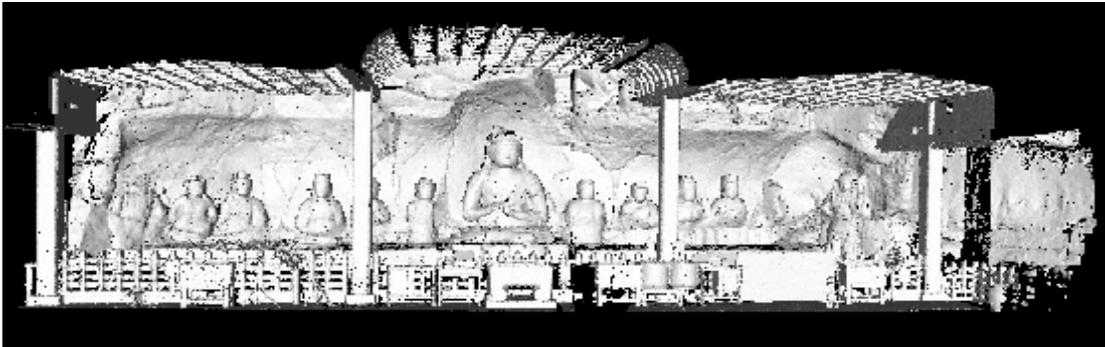


図3.5.7 大分県臼杵市古園磨崖仏

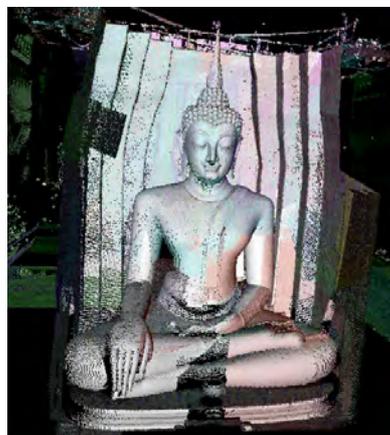


図3.5.8 タイ スコタイ アチャ仏

3.5.2 デジタル復元：創建期・奈良大仏（東京大学）

デジタルデータのメリットとして、容易に変形し、CGなどの技術を用いて、文化財の過去の姿を生成できる点が上げられる。そのような例として、東大寺の大仏の天平期の姿を再現することを行った。

東大寺は8世紀に建立されて以来、2度の戦火によって焼失している。また、地震によって大仏の頭部が落下するという事件などもあり、幾度かの再建等が行われている。そのため、現在の大仏及び大仏殿の姿は創建当時と少なからず異なっているとされている。そこで、我々はコンピュータグラフィックスによって創建当時の東大寺大仏及び大仏殿の復元を行った。まず、現存する大仏から取得した形状モデルを、文献値に従って変形する事により創建期大仏の三次元モデルを生成した。また、大仏殿の復元推定模型をモデル化し、唐招提寺金堂の部分モデルと組み合わせる事によって創建期大仏殿の復元を行った。

3.5.2.1 創建期奈良大仏の復元

文献に記された創建当時の寸法を基にして創建期大仏の形状復元を行った。大仏のような複雑な形状を一般的に用いられるCADによって作成する事は難しい。そこで、現在の大仏から前章までの開発した手法を用いて三次元データを得た。

この取得したモデルを文献値に従って変形し創建期大仏の三次元モデルを生成した。復元に用いた寸法は延暦寺僧録文や大仏殿碑文に記されていたとされる値である。これらは創建期大仏の二次元復元図を作成した長谷川の研究を参考にした。

実際の変形処理は2段階で行った。まず結跏趺坐高や御面長などの全体的な寸法を変化させ、次に目長や鼻の高さなど細かな部分を変形させていった。文献値が示す各部位の寸法がそれぞれどの部分を示すかは長谷川が作成した復元図を参考にした。ただし、眉長など一部矛盾がある部分には訂正を加えつつ造作を変えていった。図3.5.11に現在と創建期の東大寺大仏の三次元モデルを示す。この図からも創建期の大仏は現在の大仏と形状が少なからず異なっている事が分かる。



図3.5.11 奈良大仏の現在と創建当時の形状比較（左：現在，右：創建時）

3.5.2.2 創建期大仏殿の復元

次に創建期東大寺大仏殿の三次元モデルの復元を行った。東大寺大仏殿は二度の戦火で焼失しており、12世紀と18世紀に再建されている。この再建時には創建当時とは異なった建築

様式が用いられた。東大寺の創建は8世紀であるため天平の建築様式であるが、再建された12世紀頃には宋から天竺様と呼ばれる様式が伝えられ、この様式によって再建がなされた。現在の大仏殿は18世紀に再建されたものであり、この時にも12世紀と同様に天竺様が用いられている。つまり、現在の大仏殿は創建当時と全く異なった様式で建てられたものである。そのため、創建期の大仏殿を復元するために、現在の大仏殿のモデルを用いる事はできない

そこで、東京大学大学院工学系研究科・藤井恵介助教授に助言を頂いて、大仏殿に安置されている復元模型と唐招提寺金堂の部分モデルを用いることにした。復元模型は博覧会のために天沼俊一博士の指導のもとで造られたものである。唐招提寺金堂は東大寺と創建時期を同じにし、当時の建築様式をほぼそのまま現在に伝えている。つまり、全体図として復元模型の形状モデルを用い、細部は唐招提寺金堂の部分モデルを組み合わせる事によって創建期東大寺大仏殿の再現を行った（図3.5.12）。

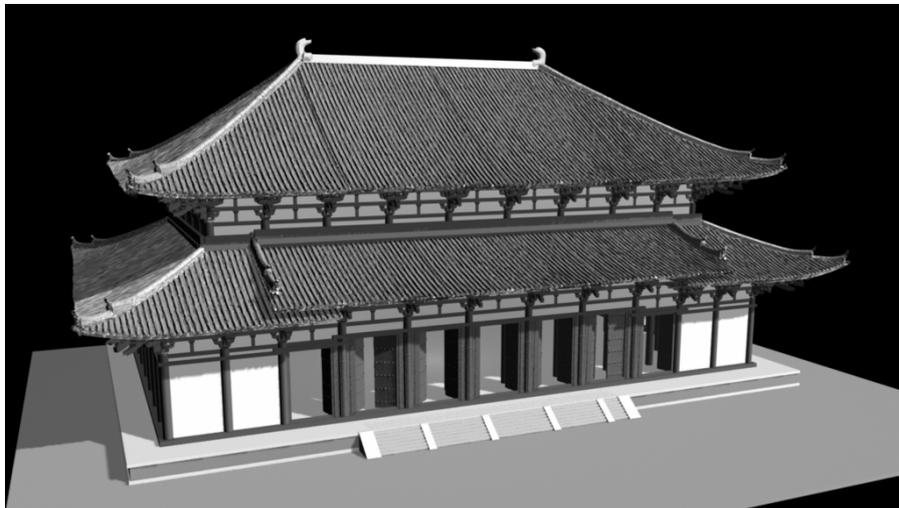


図3.5.12 大仏殿復元モデル

3.5.2.3 創建当時の様子の再現

最後に、復元した東大寺大仏及び大仏殿を用いて創建当時の様子を再現した。柱や扉などの色は丹土色とした。また鷗尾と大仏本尊は金箔が貼られていたものとして、金色を用いた。壁は白、屋根は灰色であるが、これは明確な定義が無いため違和感の無い程度に落ち着かせた。これらの色を生成した三次元モデルに反映させて創建期東大寺の様子を再現した。この再現結果を図3.5.13及び図3.5.14に示す。



図3.5.13 創建期東大寺大仏殿の復元CG

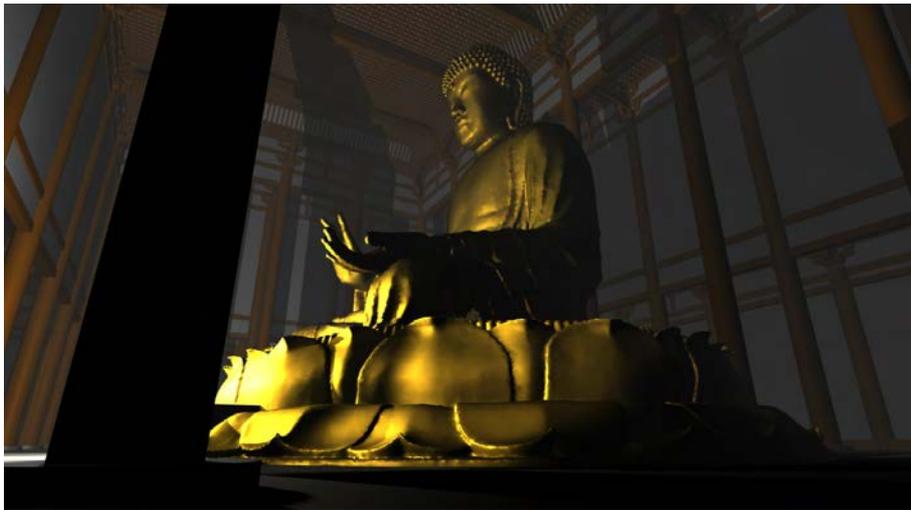


図3.5.14 創建期奈良大仏の復元CG

3.5.3 邪馬台国に関わる三角縁神獣鏡の形状差異の視覚化 (東京大学・樫原考古学研究所)

日本の考古学史上の主要な議論の一つに、邪馬台国の所在の問題がある。この問題を明らかにするため、考古学者は魏朝(中国)から卑弥呼への献上物として持ち帰ったとされる三角縁神獣鏡の形状解析を行っている。

これらの銅鏡は同じ鋳型から作られたり銅鏡から鋳型を作って複製されたりしたと考えられており、前者は同范鏡、後者は同型鏡と呼ばれている。同范同型鏡は全体的に同じ模様が施されているが、製作された順序によって形状に局所的な差異が見られる。鋳型が使いつづけられることによって磨り減り、銅鏡に反映される模様が次第に不鮮明になったり、鋳型に傷がついている場合は後に作られた銅鏡ほどそれが大きく反映されたりする。このような局

所的な差異を調査することで同范同型鏡の製作順序を推定することができ、それらの分布と照らし合わせることによって銅鏡の頒布の流れが推定できる。

考古学者はこれまでこの作業を肉眼観察で行っており、一对の鏡を観察するのに丸一日を費やしていた上、形状の差異の判断も主観的であった。そこで我々は橿原考古学研究所との共同研究において、同范同型鏡の製作順序を決定する形状の差異の候補を自動的に検出するシステムを開発した。形状差異の候補は幾何学的に決定されるので客観的な結果が得られる。このシステムの前準備としては、一对の(部分/全体)鏡データを位置合わせするだけであり、三角縁神獣鏡の形状解析はこのシステムの利用により格段に効率的に行うことができるようになった。また、このシステムは三角縁神獣鏡のみならず、様々な文化財の風化による経年変化などを観察するために幅広く活用されている。

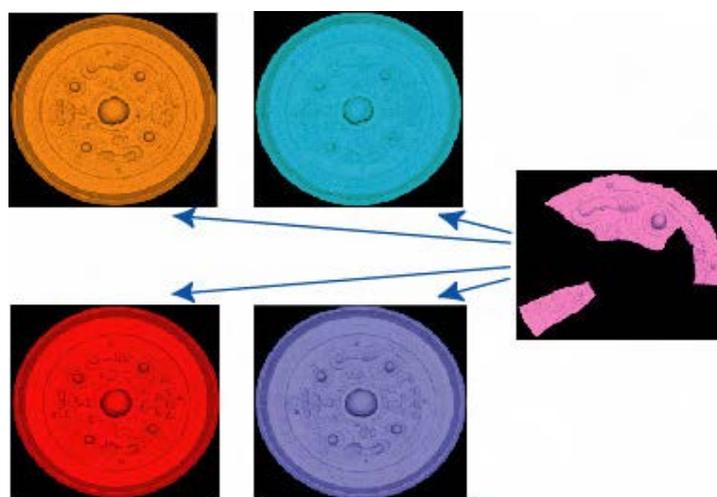


図3.5.15 同型同范鏡の形状比較

図3.5.15(ピンク)のデータを基準にし、同図左4つのデータの形状差異の凹凸を調べる。

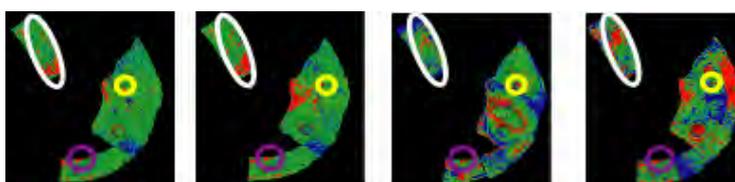


図3.5.16 形状差異を可視化した結果

図3.5.16は、左から順に図3.5.15の赤、オレンジ、群青、水色のデータに対応している。基準のデータに対する凸状の差異を赤で表し、凹状の差異を青で表している。緑は差異がないことを示している。こうして得られた形状の差異の候補は製作順序に依存する先天的なものだけではなく、製作後の後天的な要因(錆など)によるものもあるため、製作順序を決定する形状の差異であるかどうかは実物の鏡を観察しながら判断する。図3.5.16中の丸印は范傷(同范同型鏡の製作順序に依存する傷)と判断されていることを示し各々の丸印の色は対応する范傷である。

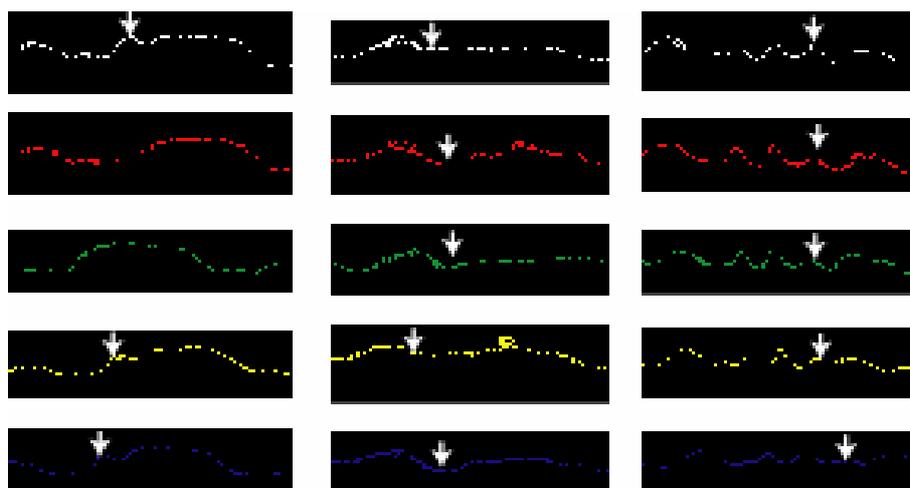


図3.5.17 図3.5.16の丸印の部分の5つの鏡の断面図

図3.5.17にある5つの行は上から順に図3.5.15の赤、オレンジ、群青、水色、ピンクのデータに対応し、3つの列は左から順に黄、紫、白の丸印の箇所の断面を記している。矢印の部分が范傷であり、范傷ができた順を特定することにより同范同型鏡の製作順序を特定することが可能となる。

3.5.4 デジタルデータの文化財保存科学への応用

(東京大学・東京文化財研究所・九州国立博物館・前橋市・タイ文化局)

3.5.4.1 フゴッペ洞窟・九州彩色古墳群調査

史跡フゴッペ洞窟（北海道余市町）は、洞窟内壁面に舟、魚、人物などが線刻で描かれている洞窟で、縄文時代（およそ2,000～1,500年前）の遺跡とされる。見学者用のカプセルの改修工事の機会に、窟内全体を計測することが可能となったので三次元デジタルセンサで計測した。得られた洞窟の形状をもとに太陽の動きをシミュレーションすることから、洞窟内部にどのように光が射し込むかを見積もった。その結果、特別に灯明のような灯りを用いなくとも季節と時刻さえ選べば、自然光を利用して洞窟内でも十分に壁画を描くことが可能であることが判明した。この成果はリニューアルオープンされるフゴッペ洞窟で公開することを計画している。

九州装飾古墳の内、王塚古墳（福岡県桂川町）、寺徳古墳（福岡県田主丸町）、山口8号横穴墓（熊本県植木町）、オブサン古墳、弁慶が穴古墳（熊本県山鹿市）の各古墳において石室の構造と壁画を三次元計測した。装飾古墳は公開が限られている場合が多いことから、今回のようにして得られた情報を用いてバーチャルリアリティを作成することで、多くの人々に壁画を鑑賞してもらえるシステムを構築していく予定である。

フゴッペ洞窟の調査や九州の古墳群の調査は、内部空間を持つ洞窟内の壁画をデジタルコンテンツ化するものである。この種の遺跡では環境変化に弱い壁画の保存のために、一般的には人の入室を厳しく制限するものであり、デジタルコンテンツ化し博物館等において擬似的に窟内を体験できるようにすることは、文化財の活用として極めて有効である。また、デ

デジタルコンテンツ化された情報を用いて、壁画がどのような光環境のもとで制作されたかを研究する上で有用な手段となりうることが判明した。今後、この研究は事例を積み重ねてより科学的な研究成果をあげうるものと思われる。

3.5.4.2 前二子古墳調査

史跡前二子古墳（群馬県前橋市）は6世紀前半築造とされる前方後円墳で、2002年から04年にかけて石室の一部解体が行われている。石室の壁、床、天井を構成する石の状態を解体前、解体中、修復後に三次元デジタルセンサ及び三次元測量カメラで計測・記録し、実測図を作成した。

本調査は、遺跡の修復の過程で記録されなければならない情報の取得を目的としている。個々に形状の異なる石を数百個の単位で積み上げている遺跡では、スチルカメラによる記録や従来の測量による図化では不十分であり、何らかの事情が生じてオリジナルな状態の戻す場合に不安があった。これに対して、三次元デジタルセンサ及び三次元測量カメラで計測・記録した情報は、いつでも解体前の状況を正確に把握することが可能であることから極めて有効な手段である。しかしながら、狭い窟内での情報取得には多くの時間が必要であり、また、これらの情報から図化を行うことも種々困難を伴い、三次元デジタルセンサと三次元測量カメラではそれぞれの有利・不利があることが明らかになった。今後は、これらの研究を継続し、より有効な手段の開発を目指す。また、取得したデジタル情報を利用して、修復や復元のシミュレーション、竣工後のイメージの作成などへの応用を目指している。

3.5.4.3 タイ・アユタヤ遺跡調査

タイ・アユタヤ遺跡において、レンガの劣化が顕著に認められる壁面を三次元計測した。前回（2001年度）計測時と比べ、どの程度壁面崩落が起きたかを定量的に解析した。また、同地点について2000年に写真測量用アナログカメラで撮影したものと、2004年に民生用デジタルカメラで撮影した写真を用いて、写真計測技術を適用した構造・形状情報の取得とその三次元的なデータを用いた劣化評価を実践した。

本調査は、写真や図化では不可能な微細で複雑な劣化の変化をデジタル情報として取得し、劣化の進行や原因の解明、防止措置の開発を目指すものである。しかしながら、現在の三次元デジタルセンサの精度では、この研究には一定の限度があることが明らかになりつつある。したがって、この種の文化財保存プロジェクトへの応用には、機器の性能はどのようなものが適しているかの研究とその開発を進める必要がある。ところで、写真計測の手法による劣化評価は従来定性的に記載されていた、文化財の劣化の進行状況を定量化できる可能性を示すものであった。計測にはデータ処理のための作業量が多いなど問題もあるが、条件を整えば現存しない文化財の写真から実測図を作成できるといった利点がある。今後の研究継続により、文化財保存の分野へ広く貢献することが期待できる。

3.5.5 人とロボットの共演（東京大学・産業技術総合研究所）

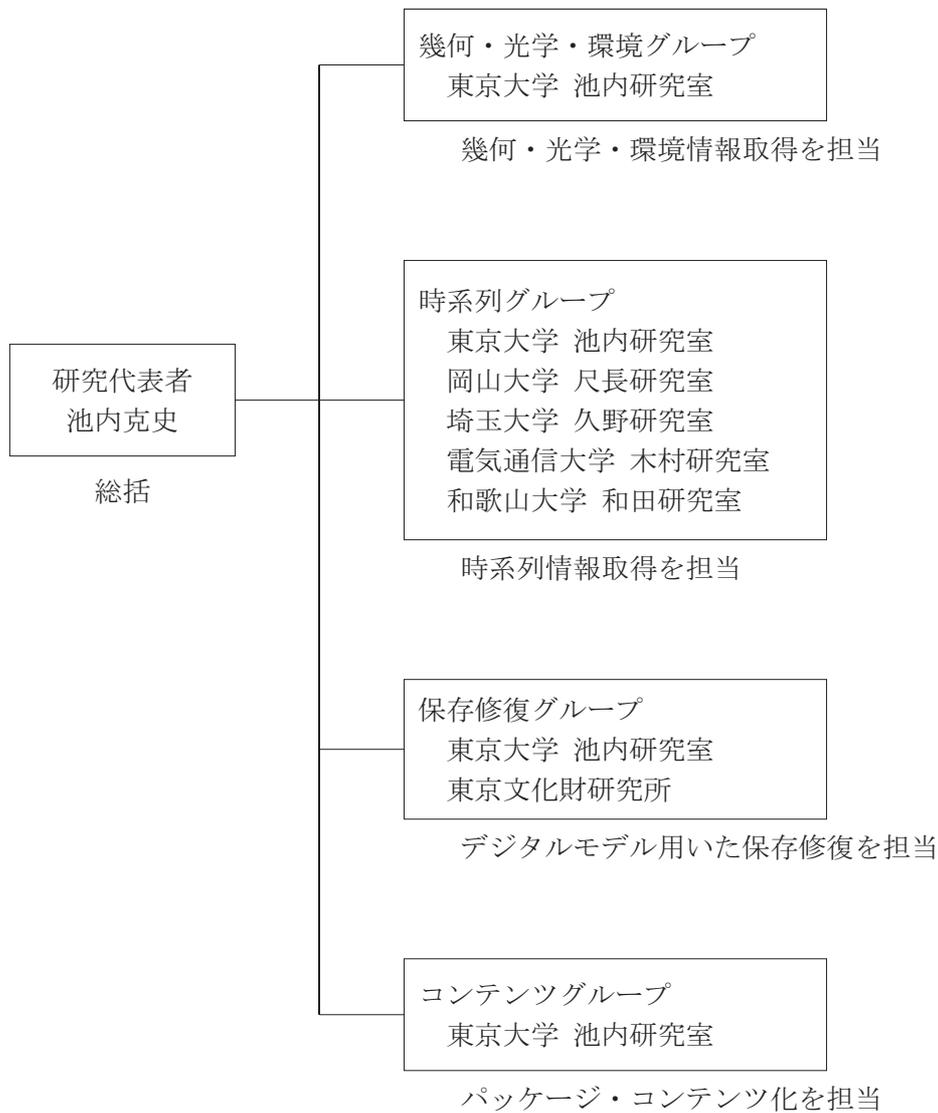
本プロジェクトでは、無形文化財の動的アーカイブの1つの形態としてロボットによる民俗芸能・匠の技の再現のための要素技術を開発してきた。これの1つの応用として、蓄えられた動きを用いて、人間とロボットの共演による新しい芸能のジャンルが考えられる。この1つの方向性として、会津磐梯山踊りの踊りを要素技術を用いて解析し、ロボットで再現の後、人間の踊り手と共演するという試みを行った。図3.5.18にその様子を示す。このデモは多くのメディアに取り上げられ、珍しさも手伝って、観光業者やイベントの引き合いもあった。



図3.5.18 人とロボットの共演による会津磐梯山踊り

4. 研究実施体制

(1) 体制



(2) メンバー表

①幾何・光学・環境グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
池内 克史	東京大学	教授	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
影沢 政隆	東京大学	助手	光学情報入力	平成12年 8月～ 平成17年 3月
長谷川 仁則	東京大学	技官	幾何情報入力	平成12年 8月～ 平成17年 3月
佐藤 秀	東京大学	技官	幾何情報入力	平成12年 8月～ 平成17年 3月
倉爪 亮	九州大学	助教授	幾何情報	平成12年10月～ 平成17年 3月
西野 恒	JST	CREST 研究員	光学情報	平成12年 8月～ 平成14年 9月
Supatana Auethavekiat	JST	CREST 研究員	幾何情報	平成14年 3月～ 平成16年 3月
長谷川 一英	JST	CREST 研究員	幾何情報	平成14年12月～ 平成17年 3月
Robby T. Tan	JST	CREST 研究員	光学情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
原 健二	九州大学	協力研究員	光学情報	平成14年 4月～ 平成17年 3月
王 武宏	日本学術振興会	外国人 特別研究員	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
Mustapha Boukraa	日本学術振興会	外国人 特別研究員	幾何情報	平成16年 4月～ 平成17年 3月
佐川 立昌	大阪大学	助手	幾何情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
川崎 洋	埼玉大学	助手	幾何情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
元木 恵子	派遣先	研究補助員	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
松浦 芳子	派遣先	研究補助員	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
斉木 優子	派遣先	研究補助員	幾何情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
平山 幸恵	派遣先	研究補助員	環境情報	平成14年 4月～ 平成17年 3月
菊地 薫	派遣先	研究補助員	幾何情報	平成16年 5月～ 平成17年 3月
松下 康之	東京大学	大学院生	光学情報	平成14年 5月～ 平成15年 3月
山崎 俊太郎	産業技術 総合研究所	研究員	幾何情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
吉田 達哉	東京大学	大学院生	光学情報	平成12年 8月～ 平成14年 3月
高橋 徹	東京大学	大学院生	光学情報	平成12年 8月～ 平成14年 3月

宮崎 大輔	東京大学	博士学生	幾何情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
佐藤 いまり	東京大学	博士学生	環境情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
林田 守宏	東京大学	大学院生	環境情報	平成12年 8月～ 平成14年 3月
大石 岳史	東京大学	博士学生	環境情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
増田 智仁	東京大学	博士学生	幾何情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
吉藤 伸幸	慶応義塾大学	大学院生	光学情報	平成13年 4月～ 平成15年 3月
小川 希	東京大学	博士学生	幾何情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
森田 拓磨	東京大学	大学院生	光学情報	平成13年 4月～ 平成15年 3月
小野 晋太郎	東京大学	博士学生	光学情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
平原 清隆	東京大学	博士学生	幾何情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
松本 裕介	東京大学	大学院生	幾何情報	平成13年 4月～ 平成15年 3月
吉仲 亮	東京大学	博士学生	光学情報	平成13年 4月～ 平成17年 3月
運天 弘樹	東京大学	博士学生	環境情報	平成13年10月～ 平成17年 3月
朱 成華	東京大学	修士学生	環境情報	平成13年10月～ 平成15年 9月
大久保 亮	東京大学	大学院生	環境情報	平成13年10月～ 平成15年 3月
猪狩 壮文	東京大学	博士学生	光学情報	平成13年10月～ 平成17年 3月
上原 康彦	東京大学	修士学生	光学情報	平成13年10月～ 平成16年 3月
崎田 健二	東京大学	修士学生	幾何情報	平成14年 4月～ 平成16年 3月
白鳥 貴亮	東京大学	博士学生	光学情報	平成14年 4月～ 平成17年 3月
廣田 祐一郎	東京大学	修士学生	環境情報	平成14年 4月～ 平成16年 3月
角田 哲也	東京大学	修士学生	幾何情報	平成14年12月～ 平成17年 3月
阪野 貴彦	東京大学	博士学生	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
トウ 利洪	東京大学	博士学生	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
太田 亮	東京大学	修士学生	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
Khairil Azmi	東京大学	修士学生	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月

川上 玲	東京大学	修士学生	環境情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
山田 陽介	東京大学	修士学生	幾何情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
岡本 泰英	東京大学	修士学生	光学情報	平成15年10月～ 平成17年 3月
富樫 政徳	東京大学	博士学生	幾何情報	平成16年 4月～ 平成17年 3月
J.H.Manoj Vincent Perera	東京大学	博士学生	光学情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
松井 健	東京大学	修士学生	光学情報	平成16年 4月～ 平成17年 3月
柴田 卓司	東京大学	修士学生	環境情報	平成16年 4月～ 平成17年 3月
李 暁路	東京大学	修士学生	光学情報	平成16年 4月～ 平成17年 3月
楊 進華	東京大学	研究生	光学情報	平成14年 4月～ 平成15年 9月
松田 真理	東京大学	研究生	光学情報	平成13年 4月～ 平成16年 3月

②時系列グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
池内克史	東京大学	教授	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
尺長健	岡山大学	教授	時系列情報取得と	平成12年 8月～ 平成17年 3月
向川康博	岡山大学	助手	その利用	平成12年 8月～ 平成15年 3月
右田剛史	岡山大学	助手	時系列距離画像の生成	平成15年 6月～ 平成17年 3月
山根亮	岡山大学	教務員	光学情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
佐竹純二	岡山大学	博士学生	時系列情報取得と	平成13年 4月～ 平成15年 9月
井原利昇	岡山大学	大学院生	その利用	平成13年 4月～ 平成14年 3月
國次孝昌	岡山大学	大学院生	時系列情報解析	平成13年 4月～ 平成14年 3月
重成一真	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成14年 3月
西山正志	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成14年 3月
藤田武史	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成14年 3月
石井育規	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成15年 3月
川嶋幸治	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成15年 3月

源田 大輔	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成15年 3月
西山 昭	岡山大学	大学院生	時系列距離画像の生成	平成13年 4月～ 平成15年 3月
坂上 文彦	岡山大学	博士学生	時系列情報解析	平成13年 4月～ 平成17年 3月
有光 博志	岡山大学	修士学生	光学情報解析	平成14年 4月～ 平成16年 3月
福井 孝太郎	岡山大学	修士学生	時系列情報獲得	平成14年 4月～ 平成16年 3月
松原 康晴	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成14年 4月～ 平成16年 3月
阿部 圭佑	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
江角 直起	岡山大学	修士学生	光学情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
関口 真	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
笠崎 隆史	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
加門 優治	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
浅利 圭介	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成16年 4月～ 平成17年 3月
中原 英雄	岡山大学	修士学生	時系列情報解析	平成16年 4月～ 平成17年 3月
久野 義徳	埼玉大学	教授	時系列画像の解析	平成12年 8月～ 平成17年 3月
中村 明生	埼玉大学	助手	時系列画像の解析	平成13年 4月～ 平成17年 3月
村上 智一	埼玉大学	大学院生	時系列画像の解析	平成13年12月～ 平成15年 3月
庭山 知之	埼玉大学	修士学生	時系列画像の解析	平成14年 4月～ 平成16年 3月
田端 聡	埼玉大学	修士学生	時系列画像の解析	平成15年 4月～ 平成17年 3月
植田 智哉	埼玉大学	修士学生	時系列画像の解析	平成16年 4月～ 平成17年 3月
木村 浩	電気通信大学	助教授	時系列情報の再現	平成12年 8月～ 平成17年 3月
園田 展人	電気通信大学	大学院生	時系列情報の再現	平成13年 4月～ 平成15年 3月
佐藤 啓宏	電気通信大学	博士学生	時系列情報の再現	平成12年 8月～ 平成16年 3月
有村 圭介	電気通信大学	修士学生	時系列情報の再現	平成16年 4月～ 平成17年 3月
音田 裕史	電気通信大学	修士学生	時系列情報の再現	平成16年 4月～ 平成17年 3月
和田 俊和	和歌山大学	教授	時系列情報表現	平成14年10月～ 平成17年 3月

呉 海元	和歌山大学	助教授	カメラ キャリブレーション	平成15年 5月～ 平成17年 3月
中村 恭之	和歌山大学	助教授	非線形写像の学習	平成15年 5月～ 平成17年 3月
陳 謙	和歌山大学	助教授	カメラ キャリブレーション	平成15年 5月～ 平成17年 3月
加藤 丈和	和歌山大学	助手	最近傍識別器の学習	平成15年 5月～ 平成17年 3月
松浦 広明	和歌山大学	助手	シーケンスの識別	平成16年 1月～ 平成17年 3月
小川原 光一	事業団	研究員	時系列情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
高松 淳	事業団	研究員	時系列情報	平成12年 8月～ 平成17年 3月
大野 一	東京大学	大学院生	時系列情報	平成12年 8月～ 平成14年 3月
橋本 謙太郎	東京大学	大学院生	時系列情報	平成12年 8月～ 平成15年 3月
中岡 慎一郎	東京大学	博士学生	時系列情報再現	平成13年 4月～ 平成17年 3月
Shirmila Mohottala	東京大学	博士学生	時系列情報再現	平成13年 4月～ 平成17年 3月
Keni Bernardin	東京大学	外国人	時系列情報表現	平成13年 4月～ 平成16年 3月
工藤 俊亮	東京大学	協力研究員	時系列情報表現	平成13年10月～ 平成17年 3月
原田 貴昭	慶応義塾大学	博士学生	時系列情報表現	平成14年 4月～ 平成16年 3月
Miti Ruchanurucks	東京大学	修士学生	時系列情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
佐賀 直也	東京大学	修士学生	時系列情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月
池田 直人	東京大学	修士学生	時系列情報	平成15年 4月～ 平成17年 3月

③保存修復グループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
池内 克史	東京大学	教授	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
青木 繁夫	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	センター長	総括／考古遺跡・遺物 保存修復への3次元デ ジタル情報の応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
西浦 忠輝	東京文化財研究所 保存科学部	部長	レンガ・石材遺跡保存 修復への3次元デジタ ル情報の応用研究	平成13年 8月～ 平成16年 3月
松本 修自	奈良文化財研究所 埋蔵文化財センター	保存修復工学 研究室長	歴史的建造物保存修復 への3次元デジタル情 報の応用研究	平成13年8月～ 平成16年3月

岡田 健	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	保存計画 研究室長	美術作品保存修復への 3次元デジタル情報の 応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
朽津 信明	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	主任研究官	レンガ・石材の劣化現 象の記録法と解析への 3次元デジタル情報の 応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
二神 葉子	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	文部科学技官	文化財情報としての3 次元デジタル情報 の 有用性の研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
野口 英雄	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	客員研究員	レンガ・石材遺跡保存 修復への3次元デジタ ル情報の応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
井上 敏	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	日本学術振興会 特別研究員	文化財情報としての3 次元デジタル情報の有 用性の研究	平成13年 8月～ 平成14年 3月
川野邊 渉	東京文化財研究所 修復技術部	修復材料 研究室長	レンガ・石材の劣化現 象の記録法と解析への 3次元デジタル情報の 応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
中野 照男	東京文化財研究所 美術部	部長	美術作品保存修復への 3次元デジタル情報の 応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
津田 徹英	東京文化財研究所 美術部	主任研究官	美術作品保存修復への 3次元デジタル情報の 応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月
荻谷 勇雅	文化庁 文化財部 建造物課	課長	文化財保護行政への3 次元デジタル情報の応 用研究	平成14年 2月～ 平成15年 3月
堀 勇良	文化庁 文化財部 建造物課	主任文化財 調査官	文化財保護行政への3 次元デジタル情報の応 用研究	平成14年 2月～ 平成17年 3月
北河 大次郎	文化庁 文化財部 建造物課	文部科学技官	文化財保護行政への3 次元デジタル情報の応 用研究	平成14年 2月～ 平成17年 3月
児玉 竜一	東京文化財研究所 芸能部	研究員	民族芸能の記録保存へ の3次元デジタル情報 の応用研究	平成14年 2月～ 平成16年 3月
宮田 繁幸	東京文化財研究所 芸能部	民族芸能 研究室長	民族芸能の記録保存へ の3次元デジタル情報 の応用研究	平成14年 4月～ 平成17年 3月
稲葉 信子	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	企画情報 研究室長	歴史的建造物保存修復 への3次元デジタル情 報の応用研究	平成14年 4月～ 平成17年 3月
俵木 悟	東京文化財研究所 芸能部 民俗芸能研究室	文部科学技官	民俗芸能の記録保存へ の3次元デジタル情報 の応用研究	平成14年 6月～ 平成17年 3月
山内 和也	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	地域環境 研究室長	レンガ・石材遺跡保存 修復への3次元デジタ ル情報の応用研究	平成15年 4月～ 平成17年 3月

城野 誠治	東京文化財研究所	専門職員	美術作品保存修復への3次元デジタル情報の応用研究	平成15年 4月～ 平成17年 3月
平賀 あまな	写真室	日本学術振興会 特別研究員	文化財情報としての3次元デジタル情報の有用性の研究	平成15年 4月～ 平成16年 3月
斎藤 英俊	東京文化財研究所 国際文化財保存修復 協力センター	教授	歴史的建造物保存修復への3次元 デジタル情報の応用研究	平成13年 8月～ 平成17年 3月

④パッケージ・コンテンツグループ

氏名	所属	役職	研究項目	参加時期
池内 克史	東京大学	教授	総括	平成12年 8月～ 平成17年 3月
中村 英俊	東京大学	技術専門職員	パッケージ化	平成14年 5月～ 平成17年 3月
福田 武士	東京大学	技術専門官	パッケージ化	平成14年 5月～ 平成17年 3月
倉科 満寿夫	東京大学	技術専門職員	パッケージ化	平成14年 5月～ 平成17年 3月
中澤 篤志	大阪大学	講師	パッケージ化	平成13年 4月～ 平成17年 3月

5. 研究期間中の主な活動

(1) ワークショップ・シンポジウム等

年月日	名称	場所	参加人数	概要
平成14年 3月9日	平成13年度 成果報告会	東京大学 生産技術研究所	100名 (うち関係者 43名)	プロジェクト開始から約2年間の研究成果をまとめ、広く一般に紹介するとともに以後の課題の確認を行った。
平成15年 5月23日 ～24日	国際シンポジウム (第一回) International Symposium on the CREST Digital Archiving Project	東京大学 生産技術研究所	約80名	プロジェクト開始から約3年間の研究成果をまとめるとともに以後の課題の確認を行った。2日間のスケジュールの中で計17件の関連発表が行われた。 (発表時間30分～50分)
平成17年 3月8日～9日	国際シンポジウム (第二回) International Symposium on the CREST Digital Archiving Project	東京大学 生産技術研究所		プロジェクト約5年間の研究成果をまとめた、最終報告。

(2) 招聘した研究者等

氏名(所属、役職)	招聘の目的	滞在先	滞在期間
Keni Bernardin (CREST研究員)	文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための自動化手法に関する研究開発	東京大学 池内研究室	平成14年4月23日～ 平成15年9月28日
Olivier Faugeras (INRIA, France)	CREST国際シンポジウムにおける招待講演	東京大学 池内研究室	平成15年5月23日～ 平成15年5月24日
Sing Bing Kang (Microsoft Reserach, USA)	CREST国際シンポジウムにおける招待講演	東京大学 池内研究室	平成15年5月23日～ 平成15年5月24日
Zhengyou Zhang (Microsoft Research, USA)	CREST国際シンポジウムにおける招待講演	東京大学 池内研究室	平成15年5月23日～ 平成15年5月24日
Martial Hebert (The Robotics Institute, CMU, USA)	CREST国際シンポジウムにおける招待講演	東京大学 池内研究室	平成15年5月23日～ 平成15年5月24日
Jean Ponce (Beckman Institute and Department of Computer Science, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA)	CREST国際シンポジウムにおける招待講演	東京大学 池内研究室	平成15年5月23日～ 平成15年5月24日

6. 主な研究成果物、発表等

(1) 論文発表 (国内34件、海外18件)

1. I.R. Kurazume, S. Hirose, Development of a Cleaning Robot System with Cooperative Positioning System, Autonomous Robots, Vol.9, No.3, pp.237-246, 2000.12
2. 2.K. Nishino, Y. Sato and K. Ikeuchi, Eigen-Texture Method: Appearance Compression and Synthesis based on a 3D Model, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol.23, no. 11, pp.1257-1265, 2001.11
3. Daisuke Miyazaki, Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, Determining surface orientations of transparent objects based on polarization degree in visible and infrared wavelengths, Optical Society of America, Vol.19.4, pp.687-694, 2002.4
4. Tatsuya Yoshida, Shirmila Mohottala, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Vehicle Classification System with Local-Feature Based Algorithm Using CG Model Images, IEICE Trans. on Information and Systems, Vol.E85-D-II, pp.1745-1752, 2002.11
5. I. Sato, Y. Sato, K. Ikeuchi, Illumination from shadows, IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.25.3, pp.290-300, 2003.3
6. Koichi OGAWARA, Jun Takamatsu, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI, Extraction of Essential Interactions Through Multiple Observations of Human Demonstrations, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 50, No. 4, pp.667-675, 2003.8
7. Tomohito Masuda, Setsuo Imazu, Supatana Auethavekiat, Tsuyoshi Furuya, Kunihiro Kawakami, Katsushi Ikeuchi, Shape difference visualization for ancient bronze mirrors through 3D range images, The Journal of Visualization and Computer Animation, pp.183-196, 2003.10

8. Koichi OGAWARA, Jun Takamatsu, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI, Acquisition of A Symbolic Manipulation Task Model by Attention Point Analysis, *Advanced Robotics*, vol. 17, No. 10, pp.1073 - 1091, 2003.12
9. Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Transparent Surface Modeling from a Pair of Polarization Images, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.26, No.1, pp.73-82, 2004.1
10. F. Sakaue, T. Shakunaga, Robust Projection onto Normalized Eigenspace Using Relative Residual analysis and Optimal Partial Projection, *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol.E87-D, no.1, pp.34-41, 2004.1
11. Robby T. Tan, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Color constancy through inverse-intensity chromaticity space, *Optical Society of America*, Vol.21, No.302, 2004.3
12. Atsuhiko Banno, Tomohito Masuda, Katsushi Ikeuchi, Three dimensional visualization and comparison of impressions on fired bullets, *Forensic Science International*, Vol.140, No.2-3, pp.233-240, 2004.3
13. Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Hiroshi Kawasaki, Shintaro Ono, Constructing Virtual cities by Using Panoramic Images, *International Journal of Computer Vision*, Vol. 58, No.3, pp. 237-247, 2004.7
14. Robby T. Tan, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Separating Reflection Components Based on Chromaticity and Noise Analysis, *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*, Vol. 26, No. 10, pp.1373-1379, 2004.10
15. Yasuyuki Matsushita, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Illumination Normalization with Time-Dependent Intrinsic Images for Video Surveillance, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 26, No. 10, pp.1336-1347, 2004.10
16. Shintaro Ono, Katsushi Ikeuchi, Self-Position Estimation for Virtual 3D City Model Construction with the Use of Horizontal Line Laser Scanning, *International Journal of ITS Research*, 2004.10
17. Keni Bernardin, Koichi Ogawara, katsushi Ikeuchi, Ruediger Dillmann, A Sensor Fusion Approach for Recognizing Continuous Human Grasping Sequences Using Hidden Markov Models, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2004
18. Ryusuke Sagawa, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Adaptively Merging Large-Scale Range Data with Reflectance Properties, to appear in *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27 No. 3 pp. 392-405,
19. 倉爪, 広瀬, 高速画像安定化機構を用いた歩行機械の遠隔操縦性能向上に関する研究, *日本ロボット学会誌*, Vol.18, No.7, pp-109-116, 2000.10
20. 斉藤 めぐみ, 佐藤 洋一, 池内 克史, 赤外線偏光解析とその透明物体形状モデリングへの応用, *情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア「Physics-based VisionとCGの接点」特集号*, Vol.41・SIG10, pp.12-18, 2000.12
21. 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, 物体の陰影に基づく光源環境の推定, *情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア「Physics-based VisionとCGの接点」特集号*, Vol.41・SIG 10, pp.31-40, 2000.12
22. 浅田 稔, 池内 克史, ロボット群, ロボット-人間の協調動作の実現, *日本ロボット学会誌*, Vol.19, No.4, pp.38-43, 2001.6

23. 池内 克史, Geometry-based Vision とVRの接点, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.42・SIG6(CVIM2), 2001.6
24. 向川康博, 西山正志, 尺長健, スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現, 電子情報通信学会論文誌(D-II), vol.J84-D-II, no.7, pp.1448-1455, 2001.7
25. 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫, 時空間画像解析を用いた全方位カメラ映像の超解像度化, 電子通信情報学会論文誌, D-II, Vol.J84-D-II, No.8, pp.1891-1902, 2001.8
26. 佐藤 いまり, 林田 守宏, 甲斐 郁代, 佐藤 洋一, 池内 克史, 実光源環境下での画像生成:基礎画像の線形和による高速レンダリング手法, 電子情報通信学会論文誌 D-II, Vol. J84-D-II, No. 8, pp.1864-1872, 2001.08
27. 中澤篤志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士, 分散視覚による複数人物追跡システム, 情報処理学会論文誌 Vol.42, No.11, pp. (Nov. 2001), 2001.11
28. 中澤篤志, 日浦慎作, 加藤博一, 井口征士, 分散視覚による複数人物追跡システム, 情報処理学会論文誌 Vol.42, No.11, pp. (Nov. 2001), 2001.11
29. 池内 克史, 坂内 正夫, 川崎 洋, 高橋 拓二, 村尾 真洋, 佐藤 いまり, 甲斐 郁代, 全方位画像による仮想都市空間の生成, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol. 42, No. SIG 14 (CVIM 3), pp.49-58, 2001.12
30. 池内 克史, 倉爪 亮, 西野 恒, 佐川 立昌, 大石 岳史, 高瀬 裕, The Great Buddha Project -大規模文化遺産のデジタルコンテンツ化-, 日本バーチャルリアリティー学会 論文誌, Vol.7, No.1, pp.103-113, 2002.1
31. 影澤 政隆, 上野 信一, 池内 克史, 栢木 寛, 並列画像処理ボードIMAP-visionを利用した赤外線による車両認識システム, 電子通信情報学会論文誌 基礎・境界, Vol.J85-A・5, pp.597-605, 2002.5
32. 倉爪 亮, 西野 恒, Mark D. Wheeler, 池内 克史, リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテキストのアラインメント, 電子情報通信学会論文誌 情報・システムII-パターン処理, Vol. J85-D-II・6, pp.1038-1046, 2002.6
33. 小川原 光一, 高松 淳, 木村 浩, 池内 克史, 複数教示動作の時系列上での統合に基づく人間作業のモデル化手法, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.43・SIG4(CVIM4), pp.117-126, 2002.6
34. 西野 恒, 池内 克史, 大規模距離画像群の頑健な同時位置合せ, 電子情報通信学会論文誌 情報・システムII-パターン処理, 2002.9
35. 池内 克史, 文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための自動化手法, 画像電子学会誌 (Imaging & Visual Computing), Vol.31・5, pp.716-721, 2002.9
36. 佐川 立昌, 西野 恒, 池内 克史, 光学的情報付き距離画像のロバストな適応的統合, 電子情報通信学会論文誌 情報・システムII-パターン処理, Vol.J85-D-II・12, pp.1781-1790, 2002.12
37. 中澤 篤志, 日浦 慎作, 加藤 博一, 分散協調型対象追跡システムの設計に関する考察, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.43・SIG11(CVIM5), pp.11-20, 2002.12
38. 原 健二, 西野 恒, 池内 克史, 透視投影と点光源下の鏡面反射からの光源位置と反射特性の推定, 情報処理学会論文誌: コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.43・SIG11(CVIM5), pp.121-129, 2002.12

39. 向川康博, 岡直人, 尺長健, 形状情報と画像情報の併用による Cast Shadow のモーフィング, 情報処理学会論文誌, vol.43, no. SIG11(CVIM5), pp.130-138, 2002.12
40. 佐川 立昌, 西野 恒, 倉爪 亮, 池内 克史, 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, SIG5(CVIM6), pp.41-53, 2003.4
41. 西野 恒, 池内 克史, 張 正友, 疎な画像列からの光源状況と反射特性の推定, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, SIG5(CVIM6), pp.1-10, 2003.4
42. 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健, 光学現象の分類に基づく画像の線形化, 情報処理学会論文誌, vol.44, no. SIG5(CVIM6), pp.11-21, 2003.4
43. 宮崎 大輔, 池内 克史, 偏光と放物的曲線の解析による透明物体の表面形状計測, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, SIG9(CVIM7), pp.86-93, 2003.7
44. 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, 絵画の陰影特徴解析に基づく仮想物体の絵画への重ね込み, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, SIG9(CVIM7), pp.132-141, 2003.7
45. 原 健二, Robby T. Tan, 西野 恒, 中澤 篤志, 池内 克史, 単一画像からの光源位置・色と表面反射特性の推定, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, SIG9(CVIM7), pp.94-103, 2003.7
46. 山崎 俊太郎, 佐川 立昌, 川崎 洋, 池内 克史, 視点依存の微小面を用いた複雑な表面形状をもつ物体の表示手法, 電子情報通信学会 論文誌D-II, J86-D-II, 10, pp.1441-1449, 2003.10
47. 小川原 光一, 高松 淳, 木村 浩, 池内 克史, 観察に基づく手作業の獲得における視覚の利用, 情報処理学会論文誌：コンピュータビジョンとイメージメディア, Vol.44, No.SIG17(CVIM8), pp.13-23, 2003.12
48. 坂上文彦, 尺長健, 正規化固有空間への最適部分射影とその応用, 情報処理学会論文誌, vol.44, no. SIG17(CVIM8), pp.100-108, 2003.12
49. 久野 義徳, 文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための時系列情報解析, 埼玉大学21世紀総合研究機構 プロジェクト成果報告書, pp.52-53, 埼玉, 2003.3
50. 池内克史、中澤篤志、小川原光一、高松淳、工藤俊亮、中岡慎一郎、白鳥貴亮, 民族芸能のデジタルアーカイブとロボットによる動作提示, 民族芸能のデジタルアーカイブとロボットによる動作提示, Vol. 9, No. 2, pp.14-20, 2004.6
51. 向川康博, 石井育規, 尺長健, 画像の線形化による光学現象の解析, 情報処理学会論文誌, vol.45, no. SIG8(CVIM9), pp.40-52, 2004.6
52. 運天弘樹, 池内克史, テクスチャマッピングにおける擬似albedoに基づく色調補正手法 - 点光源下の画像及び一般光源環境での画像への拡張-, 電子情報通信学会論文誌 情報・システムII-パターン処理, J87-D-II, No.12, p.2156-2164, 2004.12
53. 佐川立昌, 池内克史, 符号付距離場の整合化による形状モデル補間手法, to appear in 電子情報通信学会論文誌, 2004

(2) 口頭発表

①招待、口頭講演 (国内152件、海外114件)

- 1 Koichi OGAWARA, Jun TAKAMATSU, Soshi IBA, Tomikazu TANUKI, Yoshihiro SATO, Akira SAEGUSA, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI, Acquiring hand-action models in task and behavior levels by a learning robot through observing human demonstrations, Humanoids2000(The First IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots, 2000.9
- 2 Daisuke Miyazaki, Takeshi Oishi, Taku Nishikawa, Ryusuke Sagawa, Ko Nishino, Takashi Tomomatsu, Yutaka Takase, Katsushi Ikeuchi, The Great Buddha Project: Modelling Cultural Heritage through Observation, VSMM2000 (6th international conference on virtual systems and multimedia), pp.138-145, 2000.10
- 3 Koichi Ogawara, Soshi Iba, Tomikazu Tanuki, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Recognition of human task by attention point analysis, Inter. Conf. on Intelligent Robot and Systems (IROS2000), Vol.3, pp.2121-2126, 2000.11
- 4 Jun Takamatsu, Hirohisa Tominaga, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Extracting Manipulation Skills from Observation, Inter. Conf. on Intelligent Robot and Systems (IROS2000), Vol.1, pp.584-589, 2000.11
- 5 Katsushi Ikeuchi, Yutaka Takase, Ko Nishino, Ryusuke Sagawa, Daisuke Miyazaki, Takashi Oishi, Modelling Cultural Heritage through Observation, 7th International Display Workshop , pp.1099-1102, 2000.11
- 6 K. Ikeuchi, Y. Sato, K. Nishino, R. Sagawa, T. Nishikawa, T. Oishi, I. Sato, J. Takamatsu, D. Miyazaki, Modeling Cultural Heritage through Observation, 1st IEEE Pacific-Rim Conference on Multimedia, pp.86-89, 2000.12
- 7 Katsushi Ikeuchi, Modeling from Reality, 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM) 2001, pp.117-124
- 8 Katsushi Ikeuchi, Modeling Cultural Heritage through Observation, The 1st IEEE International Symposium on Signal Processing and Information Technology 2001, p.v
- 9 R. Kurazume, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi, Mapping textures on 3D geometric model using reflectance image, Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.05
- 10 Koichi OGAWARA, Soshi IBA, Tomikazu TANUKI, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI, Acquiring hand-action models by attention point analysis, Proc. of Inter. Conf. Robotics and Automations (ICRA) 2001, 4, pp.465-470, 2001.05
- 11 R. Kurazume, M. D. Wheeler, K. Ikeuchi, Simultaneous 2D images and 3D geometric model registration for texture mapping utilizing reflectance attribute, Data Fusion Workshop in IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 2001.5
- 12 Tatsuya YOSHIDA, Masataka KAGESAWA, Katsushi IKEUCHI , Local-feature Based Vehicle Recognition System Using Parallel Vision Board, Proc. of the 5th World Multiconference on Systemics, Cybernetics and Informatics, 2001.07
- 13 Y. Mukaigawa, H. Miyaki, S. Mihashi, T. Shakunaga, Photometric Image-Based Rendering for Image Generation in Arbitrary Illumination, Proc. ICCV2001, vol.2, pp.652-659, 2001.7
- 14 K. Nishino, Z. Zhang and K. Ikeuchi, Determining Reflectance Parameters and Illumination Distribution from a Sparse Set of Images for View-dependent Image Synthesis, Proc. of Eighth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV '01), vol.1, pp.599-606, 2001.07

- 15 Hiroshi Kawasaki, Hiroyuki Aritaki, Takeshi Ooishi, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Image-based rendering for Photo-realistic animation, SIGGRAPH2001 Technical Sketch, pp.205, 2001.8
- 16 Shunsuke Kamijo, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Event Recognition from Traffic Images based on Spatio-Temporal Markov Random Field Model, ITS2001, 2001.9
- 17 Koichi OGAWARA, Jun TAKAMATSU, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI , Extraction of fine motion through multiple observations of human demonstration by DP matching and combined template matching, 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication (ROMAN) 2001, pp.8-13, 2001.9
- 18 Shunsuke Kamijo, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Vehicle Tracking in Low-angle and Front-View Images based on Spatio-Temporal Markov Random Field Model, ITS2001, 2001.9
- 19 Tsunetoshi Nishida, Syunsuke Kamijo, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Automated Statistics Acquisition from Traffic Images based on Occlusion Robust Vehicle Tracking Method, ITS2001, 2001.9
- 20 Yasuyuki MATSUSHITA, Michihiro MURAO, Shunsuke KAMIJO, Katsushi IKEUCHI, Masao SAKAUCHI, Visualization of Traffic Activities at Intersections, 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC 2001), 2001.10
- 21 Hiroshi Kawasaki, Michihiro Murao, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Enhanced navigation system with real images and real-time information, Prof. of 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC2001), 2001.10
- 22 Koichi OGAWARA, Hiroshi KIMURA, Katsushi IKEUCHI, Refining hand-action models through repeated observations of human and robot behavior by combined template matching, International Conference on Intelligent Robot and Systems (IROS)'01, pp.545-550, 2001.10
- 23 Tatsuya YOSHIDA, Masataka KAGESAWA, Tetsuya TOMONAKA, Katsushi IKEUCHI, Vehicle Recognition with Local-Feature Based Algorithm Using Parallel Vision Board, Prof. of 8th World Congress on Intelligent Transport Systems (ITSWC2001), 2001.10
- 24 R. Sagawa, K. Nishino, M.D. Wheeler, K. Ikeuchi, Processing of Range Data Merging, Proc. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, vol.1, pp.577-583, 2001.10
- 25 R. Sagawa, K. Nishino, K. Ikeuchi, Robust and Adaptive Integration of Multiple Range Images with Photometric Attributes, Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.2, pp.172-179, 2001.12
- 26 I.Sato, Y. Sato, and K. Ikeuchi, Stability issues in recovering illumination distribution from brightness in shadows Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'01), vol.2, pp.400-407, 2001.12
- 27 Hiroshi Kawasaki, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Light Field Rendering for Large-Scale Scenes, CVPR-01, 2001.12
- 28 T. Shakunaga, K. Shigenari, Decomposed Eigenface for Face Recognition under Various Lighting Conditions, Proc. CVPR2001, vol. 1, pp.864-871, 2001.12
- 29 Koichi Ogawara, Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Generation of a task model by integrating multiple observation of human demonstrations, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA), Washington D.C., U.S.A. , 2002.5

- 30 Atsushi Nakazawa, Hirokazu Kato, Shinsaku Hiura, Seiji Inokuchi, Tracking Multiple People using Distributed Vision Systems, IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation(ICRA), pp.2974-2981, Washington D.C., U.S.A., 2002.5
- 31 Shintaro Ono, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, A Probe Car for Parking-Vehicle Detection by Using Laser Range Sensor, IEEE Intelligent Vehicle Symposium(IV2002), 2002.6
- 32 Shuntaro Yamazaki, Ryusuke Sagawa, Hiroshi Kawasaki, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Micro facet Billboarding, Proc. Eurographics Workshop on Rendering 2002, pp.175-186, 2002.6
- 33 T. Shakunaga, F. Sakaue, Natural Image Correction by Iterative Projections to Eigenspace Constructed in Normalized Image Space, Proc. ICPR2002, vol.1, pp.648-651, 2002.8
- 34 Ko Nishino, Kenji Hara, Robby T. Tan, Daisuke Miyazaki, Katsushi Ikeuchi, Photometric Aspects on the Preservation of Cultural Assets, The Eighth Inter. Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM2002), pp.926-933, 2002.9
- 35 Takeshi Oishi, Tomohito Masuda, Katsushi Ikeuchi, Digital Restoration of the Cultural Heritage, The Eighth Inter. Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM2002), 2002.9
- 36 Tomohito Masuda, Setsuo Imazu, Tsuyoshi Furuya, Kunihiro Kawakami, Katsushi Ikeuchi, Shape Difference Visualization for Old Copper Mirrors through 3D Range Images, The Eighth Inter. Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM2002), 2002.9
- 37 Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Shunsuke Kudoh, Katsushi Ikeuchi, Digital Archive of Human Dance Motions, The Eighth Inter. Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM2002), 2002.9
- 38 Katsushi Ikeuchi, Ko Nishino, Atsushi Nakazawa, Towards The Digital Archive of Cultural Heritages-Preservation and Restoration of Ancestral Assets through Observation-, The Eighth Inter. Conf. on Virtual Systems and Multimedia(VSMM2002), Seoul, Korea, 2002.9
- 39 Tomokazu Murakami, Akio Nakamura, and Yoshinori Kuno, Generation of Digital Contents for Traditional Dances by Integrating Appearance and Motion Data, Proceedings of the 2nd IASTED International Conference Visualization, Imaging and Image Processing (VIIP 2002), pp.672-676, Malaga, Spain, 2002.9
- 40 Ryusuke Sagawa, Takeshi Oishi, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi, Iterative Refinement of Range Images with Anisotropic Error Distribution, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.79-85, 2002.10
- 41 Jun Takamatsu, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Correcting Observation Errors for Assembly Task Recognition, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.232-237, 2002.10
- 42 Koichi Ogawara, Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Modeling Manipulation Interactions by Hidden Markov Models, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.1096-1101, 2002.10
- 43 Yoshihiro Sato, Keni Bernardin, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Task Analysis based on observing hands and objects by vision, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.1208-1213, 2002.10
- 44 Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Calculating Optimal Trajectories from Contact Transitions, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.1547-1552, 2002.10

- 45 Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Improved Screw Theory using Second Order Terms, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.1614-1618, 2002.10
- 46 Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Katsushi Ikeuch, Kazuhiro Yokoi, Imitating Human Dance Motions through Motion Structure Analysis, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.2539-2544, 2002.10
- 47 Shunsuke Kudoh, Taku Komura, Katsushi Ikeuchi, The Dynamic Postural Adjustment with the Quadratic Programming Method, 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2002), pp.2563-2568, 2002.10
- 48 Kiyotaka Hirahara, Mari Matsuda, Shunsuke Kamijo, Katsushi Ikeuchi, Detection of Street-Parking Vehicles using Line Scan Camera, ITSW2002, Chicago, 2002.10
- 49 Tatsuya Yoshida, Shirmila Mohottala, Masataka Kagesawa, Tetsuya Tomonaka, Katsushi Ikeuchi, Vehicle Recognition with Local-Feature Based Algorithm using CG Models, ITSW2002, 2002.10
- 50 Shintaro Ono, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Parking-Vehicle Detection System by using Laser Range Sensor Mounted on a Probe Car, ITSW2002, 2002.10
- 51 Yasuyuki Matsushita, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Shadow Estimation for Robust Video Surveillance, IEEE Workshop on Motion and Video Computing, Orlando, FL USA, 2002.12
- 52 Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Determining Shapes of Transparent Objects from Two Polarization Images, IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002), pp.26-31, 2002.12
- 53 Kenji Hara, Ko Nishino, Atsushi Nakazawa, Katsushi Ikeuchi, Estimating Light Position and Surface Reflectance from Specular Reflection under Perspective Projection, IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002), pp.566 -571, 2002.12
- 54 Yasuyuki Matsushita, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Masao Sakauchi, Realtime estimation of illumination images using Illumination Eigenspace, IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002), 2002.12
- 55 Robby T. Tan, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Separating Diffuse and Specular Reflection Components based on Surface Color Ratio and Chromaticity, IAPR Workshop on Machine Vision Applications (MVA2002), 2002.12
- 56 F. Sakaue, T. Shakunaga, Natural Image Correction by Iterative Linear Projection onto Eigenspaces, Proc. MVA2002, pp.36-39, 2002.12
- 57 J. Satake, T. Shakunaga, Simultaneous Estimation of Head Pose and Shape by Hierarchical Control System, Proc. MVA2002, pp.72-75, 2002.12
- 58 K. Shigenari, F. Sakaue, T. Shakunaga, Decomposed Eigenface Method along with Image Correction for Robust Face Recognition, Proc. MVA2002, pp.322-325, 2002.12
- 59 F. Sakaue, T. Shakunaga, Natural Image Correction by Iterative Linear Projection onto Eigenspaces, Proc. MVA2002, pp.36-39, 2002.12
- 60 Katsushi Ikeuchi, Atsushi Nakazawa, Ko Nishino, Ryusuke Sagawa, Takeshi Oishi, Hiroki Unten, Modeling from Reality -Creating virtual reality models through observation-, IS&T/SPIE's 15th Annual Symposium Electronic Imaging Science and Technology, 2003.1

- 61 Robby T. Tan, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Illumination Chromaticity Estimation using Inverse-Intensity Chromaticity Space, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2003), 2003.6
- 62 Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Takaaki Shiratori, Katsushi Ikeuchi, Analysis and Synthesis of Human Dance Motions, IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), 2003.7
- 63 Takaaki Shiratori, Atsushi Nakazawa, Katsushi Ikeuchi, Rhythmic Motion Analysis using Motion Capture and Musical Information, IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), 2003.7
- 64 Jun Takamatsu, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Second Order Approximation of Possible Local Displacement for Curve Objects, IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), 2003.7
- 65 Yoshihiro Sato, Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Recognition of a Mechanical Linkage Based on Occlusion-Robust Object Tracking, IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), 2003.7
- 66 Y. Mukaigawa, D. Genda, R. Yamane, T. Shakunaga, Color Blending based on Viewpoint and Surface Normal for Generating Images from Any Viewpoints Using Multiple Cameras, Proc. IEEE Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI2003), pp.95-100, 2003.7
- 67 Koichi Ogawara, Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Estimation of essential interactions to achieve a task by integrating demonstrations, IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA03), 2003.7
- 68 Y. Mukaigawa, M. Nishiyama, T. Shakunaga, Realization of Virtual Photometric Environment by Photometric Pattern Projection, Proc. IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA2003), pp.435-440, 2003.7
- 69 Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Takaaki Shiratori, Katsushi Ikeuchi, Analysis and Synthesis of Human Motions using Motion Capture, Sixth International Conference on Humans and Computers(HS2003), 2003.8
- 70 Shunsuke Kudoh, Taku Komura, Katsushi Ikeuchi, Dynamic Postural Adjustment for Human Body Model against Large Perturbation, Sixth International Conference on Humans and Computers(HS2003), 2003.8
- 71 Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Kazuhito Yokoi, Katsushi Ikeuchi, Leg Motion Primitives for a Humanoid Robot to Imitate Human Dances, Sixth International Conference on Humans and Computers(HS2003), 2003.8
- 72 Atsushi Nakazawa, Shinichiro Nakaoka, Katsushi Ikeuchi, Synthesize Stylistic Human Motion from Examples, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2003), 2003.9
- 73 Jun Takamatsu, Koichi Ogawara, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Calculating Possible Local Displacement of Curve Objects using Improved Screw Theory, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2003), 2003.9
- 74 Koichi Ogawara, Jun Takamatsu, Hiroshi Kimura, Katsushi Ikeuchi, Estimation of essential interactions from multiple demonstrations, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2003), 2003.9

- 75 Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Kazuhito Yokoi, Hirohisa Hirukawa, Katsushi Ikeuchi, Generating Whole Body Motions for a Biped Humanoid Robot from Captured Human Dances, 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA2003), 2003.9
- 76 Takeshi Oishi, Ryusuke Sagawa, Atsushi Nakazawa, Ryo Kurazume, Katsushi Ikeuchi, Parallel Alignment of Large Number of Range Images, The 4th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM), 2003.10
- 77 Shunsuke Kudoh, Taku Komura, C2 Continuous Gait-Pattern Generation for Biped Robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), 2003.10
- 78 Koichi Ogawara, Kentaro Hashimoto, Jun Takamatsu, Katsushi Ikeuchi, Grasp Recognition using a 3D Articulated Model and Infrared Images, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2003), 2003.10
- 79 Daisuke Miyazaki, Robby T. Tan, Kenji Hara, Katsushi Ikeuchi, Polarization-based Inverse Rendering from a Single View, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 80 Daisuke Miyazaki, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Polarization-based Transparent Surface Modeling from Two Views, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 81 Kenji Hara, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Determining Reflectance and Light Position from a single Image Without Distant Illumination Assumption, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 82 Robby T. Tan, Ko Nishino, Katsushi Ikeuchi, Reflection Components Separation based on Chromaticity and Noise Analysis, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 83 Robby T. Tan, Katsushi Ikeuchi, Estimating Chromaticity of Multicolored Illuminations, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 84 Robby T. Tan, Katsushi Ikeuchi, Separating Reflection Components of Textured Surfaces using a Single Image, The 9th International Conference on Computer Vision (ICCV2003), 2003.10
- 85 Keni Bernardin, Koichi Ogawara, Katsushi Ikeuchi, Ruediger Dillmann, A Hidden Markov Model Based Sensor Fusion Approach for Recognizing Continuous Human Grasping Sequences, 3rd IEEE International Conference on Humanoid Robots, 2003.10
- 86 T. Shibata, T. Kato, T. Wada, K-D Decision Tree: An Accelerated and Memory Efficient Nearest Neighbor Classifier, International Conference on Data Mining (ICDM2003), Melbourne, Florida 2003.11
- 87 Shuntaro Yamazaki, Katsushi Ikeuchi, Yoshihisa Shinagawa, Determining Plausible Mapping Between Images without a Prior Knowledge, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2004), Vol.1, pp.408-413, 2004.1
- 88 Yuichiro Hirota, Tomohito Masuda, Ryo Kurazume, Koichi Ogawara, Kazuhide Hasegawa, Katsushi Ikeuchi, Designing a Laser Range Finder which is Suspended Beneath a Balloon, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2004), Vol.2, pp.658-663, 2004.1
- 89 Rei Kawakami, Robby T. Tan, Katsushi Ikeuchi, A Robust Framework to Estimate Surface Color from Changing Illumination, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2004), Vol.2, pp.1026-1031, 2004.1

- 90 Akifumi Ikari, Robby T. Tan, Katsushi Ikeuchi, Separating Illumination and Surface Spectral from Multiple color Signals, Asian Conference on Computer Vision (ACCV2004), Vol.1, pp.264-269, 2004.1
- 91 Katsushi Ikeuchi, Digital Bayon Archival Project, International Symposium on the Temple of Bayon, 2004.2
- 92 Yuichiro Hirota, Tomohito Masuda, Ryo Kurazume, Koichi Ogawara, Kazuhide Hasegawa, Katsushi Ikeuchi, Flying Laser Range Finder and its data registration algorithm, IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation, 2004.4
- 93 Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Kazuhito Yokoi, Katsushi Ikeuchi, Leg Motion Primitives for a Dancing Humanoid Robot, IEEE 2004 International Conference on Robotics and Automation, 2004.4
- 94 Takaaki Shiratori, Atsushi Nakazawa, Katsushi Ikeuchi, Detecting Dance Motion Structure through Music Analysis, The 6th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition (FGR2004), 2004.5
- 95 Wuhong Wang, Wei Shang, Dehui Li, Kiyotaka Hirahara, Katsushi Ikeuchi, Improved Action Point Model in Traffic Flow Based on Driver's Cognitive Mechanism, IEEE The Intelligent Vehicles Symposium (IV'04), 2004.6
- 96 Hiroki Unten, Katsushi Ikeuchi, Color Alignment in Texture Mapping of Images under Point Light Source and General Lighting Condition, CVPR 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004.6
- 97 Kenji Sakita, Koichi Ogawara, Shnji Murakami, Kentaro Kawamura, Katsushi Ikeuchi, Flexible Cooperation between Human and Robot by interpreting Human Intention from Gaze Information, 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2004.9
- 98 Akio Nakamura, Tomoyuki Niwayama, Sou Tabata, and Yoshinori Kuno, Development of a Basic Dance Training System with Mobile Robots, Proceedings of the 13th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN 2004), /CD-ROM 036.pdf, Kurashiki, Japan, 2004.9
- 99 Tomoyuki Niwayama, Akio Nakamura, Sou Tabata, and Yoshinori Kuno, Mobile Robot System for Easy Dance Training, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2004), pp.2223-2228/CD-ROM IROS04-1160.pdf, Sendai, Japan, 2004.10
- 100 Shintaro Ono, Koichi Ogawara, Masataka Kagesawa, Hiroshi Kawasaki, Masaki Onuki, Ken Honda, Keiichi Kenmotsu, Mayumi Sakai, Motomu Tsuji, Katsushi Ikeuchi, Image Generation on System for Mixed-Reality Traffic Experiment Space, 11th World Congress on Intelligent Transport Systems(ITSW2004), 2004.10
- 101 カイリル アズミ, 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史, Automatic Reconstruction of Large-Scale Virtual Environment for Intelligent Transportation Systems Simulation, The 11th World Congress on ITS, Nagoya, Aichi 2004, 2004.10
- 102 Hiroki Unten, Katsushi Ikeuchi, Virtual Reality Model of Koumokuten Generated from Measurement, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2004), 2004.11
- 103 Katsushi Ikeuchi, Kazuhide hasegawa, Atsushi Nakazawa, Jun Takamatsu, Takeshi Oishi, Tomohito Masuda, Bayon Digital Archival Project, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia(VSMM 2004), 2004.11

- 104 Tetsuya Kakuta, Takeshi Oishi, Katsushi Ikeuchi, Virtual Kawaradera: Fast Shadow Texture for Augmented Reality, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), 2004.11
- 105 Shinichiro Nakaoka, Atsushi Nakazawa, Katsushi Ikeuchi, An Efficient Method for Composing Whole Body Motions of a Humanoid Robot, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), 2004.11
- 106 Tomohito Masuda, Yosuke Yamada, Nobuaki Kuchitsu, Katsushi Ikeuchi, Sunlight Illumination Simulation for Archaeological Investigation -Case Study of the Fugoppe Cave, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), 2004.11
- 107 Takaaki Shiratori, Atsushi Nakazawa, Katsushi Ikeuchi, Detecting Dance Motion Structure using Motion Capture and Musical Information, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), 2004.11
- 108 Shunsuke Kudoh, Taku Komura, Katsushi Ikeuchi, Balance Maintenance by Stepping for Human-like Characters against Large Perturbation, 10th International Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM2004), 2004.11
- 109 Y. Mukaigawa, M. Nishiyama, T. Shakunaga, Virtual Photometric Environment using Projector, Proc. Tenth International Conference on Virtual System and Multimedia(VSMM2004), pp.64-72, 2004.11
- 110 Sou Tabata, Akio Nakamura, and Yoshinori Kuno, Development of an Easy Dance Teaching System Using Active Devices, Proceedings of the IASTED International Conference on Advances in Computer Science and Technology (ACST 2004), pp.38-43/CD-ROM 431-056.pdf, St. Thomas, US Virgin Islands, 2004.11
- 111 Katsushi Ikeuchi, Digitally Archiving Cultural Heritage, Third Seminar on Thai-Japanese Cooperation in Conservation of Monuments in Thailand 2004, 2004.12
- 112 Tomohito Masuda, Nobuaki Kuchitsu, Yosuke Yamada, Katsushi Ikeuchi, Aged Shape Deterioration Visualization Based upon 3D Shape Measurement -Observing Brick Wall in Ayutthaya Relic-, Third Seminar on Thai-Japanese Cooperation in Conservation of Monuments in Thailand 2004, 2004.12
- 113 T. Migita, S. Sekiguchi, T. Shakunaga, Estimation of Bidirectional Texture Functions from Bizenware Images, to appear in Proc. 11th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV2005), 2005.1
- 114 Y. Kamon, R. Yamane, T. Shakunaga, Dancer-centered view generation of archived traditional dance, to appear in Proc. 11th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision(FCV2005), 2005.1
- 115 小川原 光一, 射場 総司, 田貫 富和, 木村 浩, 池内 克史, データグローブとステレオビジョンを用いた注視点解析に基づく人間作業のモデル化手法, 第18回日本ロボット学会学術講演会, Vol.2, pp.855-856, 2000.9
- 116 佐藤 啓宏, 木村 浩, 池内 克史, 教示動作の視覚処理に基づく物体の機能情報の抽出, 第18回日本ロボット学会学術講演会, Vol.3, pp.1305-1306, 2000.9
- 117 Daisuke Miyazaki, Megumi Saito, Yoichi Sato, Katsushi Ikeuchi, Shape Measurement of Transparent Objects using Polarization and Geometrical Characteristics, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会, pp.33-42, 2000.9
- 118 西山 正志, 向川 康博, 尺長 健, プロジェクタを用いた仮想照明環境のための相互反射の解析と生成, 信学技報, PRMU2000-61, pp.1-6, 2000.9

- 119 西山正志, 向川康博, 尺長健, プロジェクタを用いた仮想照明環境のための相互反射の解析と生成, 電子情報通信学会技術報告, PRMU2000-61, 2000.9
- 120 倉爪 亮, M. D. Wheeler, 池内 克史, リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアラインメント, コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告 (CVIM), 2001-CVIM-126, pp.41-48, 2001
- 121 佐藤啓宏, 小川原光一, 田貫富和, 木村浩, 池内克史:人間の教示動作の視覚処理に基づく物体機能の抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会'01, 2A1-C12, 2001.
- 122 佐藤啓宏, 木村浩, 池内克史:物体機能に基づくロボットの動作記述と実装, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演概要集, 1K26, pp.108, 2001.
- 123 K. Nishino, K. Ikeuchi, Robust Simultaneous Registration of Multiple Range Images Comprising A Large Number of Points, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告 (CVIM), 2001-CVIM-36, pp.1-8, 2001.05
- 124 高松淳, 小川原光一, 木村浩, 池内克史, 視覚誤差修正能力を有する観察からの組み立て動作理解, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2001-CVIM-127, pp.17-24, 2001.05
- 125 倉爪 亮, 大石 岳史, 佐川 立昌, 西野 恒, 池内 克史, Great Buddha Project -文化遺産のデジタル保存-, 第19回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.23-24, 2001.09
- 126 吉田 達哉, 影沢政隆, 池内克史, 局所特徴認識アルゴリズムによる車両の認識, 第19回日本ロボット学会学術講演会講演論文集, pp.1119-1120, 2001.09
- 127 吉田 達哉, 影沢政隆, 塘中 哲也, 池内克史, 局所特徴認識アルゴリズムによる車両の認識, 電子情報通信学会技術研究報告, vol.101, no.302, pp.9-14, 2001.09
- 128 中澤 篤志, 中岡 慎一郎, 池内 克史, モーションキャプチャデータからの舞踊動作プリミティブの抽出, 第19回日本ロボット学会学術講演会, 2001.9
- 129 佐藤 啓宏, 木村 浩, 池内 克史, 物体機能に基づくロボットの動作記述と実装, 第19回日本ロボット学会学術講演会, pp.289-290, 2001.9
- 130 Bernardin Keni, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, Classification of human actions using sensor gloves and hidden Markov models, 第19回日本ロボット学会学術講演会, pp.797-798, 2001.9
- 131 橋本 謙太郎, 高松 淳, 小川原 光一, 池内 克史, 赤外線画像のステレオ処理に基づく手の形状推定, 第19回日本ロボット学会学術講演会, pp.1283-1284, 2001.9
- 132 小川原 光一, 高松 淳, 木村 浩, 池内 克史, 人間行動の複数回観察に基づく注視点の発見と行動理解, 第19回日本ロボット学会学術講演会, pp.341-342, 2001.09
- 133 原 健二, 稲熊伸昭, 西野 恒, 池内克史, 透視投影における単一画像からの反射パラメータ推定, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2001-CVIM-130, pp.15-22, 2001.11
- 134 山崎 俊太郎, 加瀬 究, 池内 克史, PCグラフィクスハードウェアを利用した高精度・高速ボリュームレンダリング手法, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告 CVIM-130-10, 2001.11
- 135 石井育規, 向川康博, 尺長健, 鏡平面への映り込みを考慮したPhotometric Image-Based Rendering, 画像電子学会第190回研究会予稿集, 2001.11

- 136 村上 智一, 中村 明生, 久野 義徳, ビデオ及びモーションデータを用いた踊りの解析, 計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 (SI 2001) 講演論文集, 名古屋, pp.229-230, 2001.12
- 137 西野 恒, 原 健二, 高橋 徹, 宮崎 大輔, Robby T. Tan, 池内 克史, 画像にもとづく見えの解析 -文化財のデジタル化に向けて-, 計測自動学会第2回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2001), pp.221-222, 2001.12
- 138 池内 克史, CREST 池内プロジェクト -観察に基づく文化遺産のデジタル保存-, 計測自動制御学会 第2回 システムインテグレーション部門学術講演会 (SI2001) , 2001.12
- 139 中澤 篤志, 中岡 慎一郎, 池内 克史, 動きのデジタル保存-舞踊動作のプリミティブ化とヒューマノイドによる再演-, 情報処理学会 人文科学とコンピュータシンポジウム (じんもんこん2001) , 2001.12
- 140 倉爪 亮, 大石 岳史, 佐川 立昌, 西野 恒, 池内 克史, Great Buddha Project -観察に基づく文化遺産のデジタル保存-, 情報処理学会 人文科学とコンピュータシンポジウム(じんもんこん2001), 2001.12
- 141 倉爪 亮, 文化財のデジタル化, 計測自動学会第2回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2001), 2001.12
- 142 吉田 達哉, シャミラ モホッタラ, 影澤 政隆, 塘中 哲也, 池内 克史, CG モデル画像を利用した局所特徴認識アルゴリズムによる車両の認識, 信学技報 , IE 2001-237, 2002.3
- 143 佐藤啓宏,木村浩,池内克史:視覚による手と物体の観察に基づく作業解析,第7回ロボティクスシンポジア予稿集,pp.125-130, 2002.
- 144 西山正志, 向川康博, 尺長健, 仮想光学環境のための局所反射特性分布の学習と再現, 情報処理学会研究報告, CVIM-132-9, 2002.3
- 145 藤田武史, 向川康博, 尺長健, 多視点カメラシステムによる舞踊動作の獲得と解析,情報処理学会研究報告, CVIM-132-14, 2002.3
- 146 Katsushi Ikeuchi, Modeling from Reality -Creating virtual reality models through observation-, 第6回 歴博国際シンポジウム 情報技術による歴史・文化研究の新展開, pp.65-72, 国立歴史民俗博物館, 2003.2
- 147 池内 克史, 中澤 篤志, 観察に基づく文化遺産のデジタル保存, 画像電子ミュージアム 招待講演, 2002.6
- 148 池内 克史, 文化遺産のデジタルアーカイブ, 第12回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2002) , pp.1-8, 大阪大学コンベンションセンター, 2002.10
- 149 上原 康彦, 倉爪 亮, 池内 克史, エピポーラ拘束を利用した複数レンジデータのロバストな同時位置合わせ, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 京都大学, 2002.5
- 150 猪狩 壮文, Robby T. Tan, 池内 克史, Variable interface filter とスペクトル画像エッジを利用した多波長パノラマ画像の生成, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 京都大学, 2002.5
- 151 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, 絵画における陰影特徴の解析とその画像合成への応用, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2002.5

- 152 岡部 孝弘, 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, キャストシャドウを用いた光源推定法: 球面調和関数展開に基づく解析, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2002.5
- 153 小川原 光一, 高松 淳, 木村 浩, 池内 克史, プリミティブ動作の模倣に基づく手作業の獲得とプリミティブに基づく作業の認識と再現, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, くにびきメッセ, 松江, 2002.6
- 154 佐藤 啓宏, 木村 浩, 池内 克史, 色モデルの動的生成による三次元物体追跡, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会'02, くにびきメッセ, 松江, 2002.6
- 155 小野 晋太郎, 影澤 政隆, 池内 克史, 車載レンジセンサによる距離画像からの駐車車両認識システム, 第8回 画像センシングシンポジウム (SSII2002) , 2002.6
- 156 吉田 達哉, Shirmila Mohottala, 影澤 政隆, 塘中 哲也, 池内 克史, CGモデル画像を用いた局所特徴認識アルゴリズムによる車両の認識, 第8回 画像センシングシンポジウム (SSII2002) , 2002.6
- 157 倉爪 亮, 西野 恒, Zhengyou Zhang, 池内 克史, レーザリフレクタンスとエピポーラ拘束を利用した複数テクスチャの同時アラインメント, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 158 宮崎 大輔, 池内 克史, 偏光解析と幾何学的解析に基づく透明物体の表面形状計測, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 159 増田 智仁, 倉爪 亮, 池永 美都, 西野 嘉章, 池内 克史, パラメタ同時推定位置合わせ手法の開発, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), Vol.1・, pp.171-176, 2002.7
- 160 佐川 立昌, 西野 恒, 倉爪 亮, 池内 克史, 大規模観測対象のための幾何形状および光学情報統合システム, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 161 原 健二, Robby T. Tan, 西野 恒, 中澤 篤志, 池内 克史, 単一カラー画像からの光源位置と光源色の推定, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), Vol.1, pp.477-482, 2002.7
- 162 山崎 俊太郎, 佐川 立昌, 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫, 微小面ビルボーディングを用いた複雑なシーンの表示手法, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 163 大石 岳史, 佐川 立昌, 中澤 篤志, 倉爪 亮, 池内 克史, 距離画像の誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 164 佐藤 啓宏, 木村 浩, 池内 克史, マルチベースラインステレオによる三次元物体追跡, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 165 西野 恒, 池内 克史, 張 正友, 疎な画像列からの光源状況と反射特性の確定, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 166 池内 克史, 中澤 篤志, 西野 恒, 小川原 光一, 文化遺産のデジタル保存, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), pp.I-331-I-340, 2002.7
- 167 Shintaro Ono, Masataka Kagesawa, Katsushi Ikeuchi, Recognizing Vehicles in a Panoramic Range Image, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7

- 168 松下 康之, 西野 恒, 池内 克史, 坂内 正夫, 照明固有空間と頑健なビデオサーベイランスへのその応用, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 169 吉田 達哉, シャミラ モホッタラ, 影澤 政隆, 池内 克史, CGモデル画像を利用したベクトル量子化による車両認識, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 170 中澤 篤志, 中岡 慎一郎, 原田 貴昭, 工藤 俊介, 池内 克史, 視覚による舞踊動作の保存・解析および生成 -舞踊動作のプリミティブ化とロボットを用いた再演-, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 171 小川原 光一, 高松 淳, 木村 浩, 池内 克史, 複数教示動作の統合に基づく手作業のモデル化手法, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 172 佐藤 いまり, 佐藤 洋一, 池内 克史, 絵画における陰影特徴の解析とその画像合成への応用, 電子情報通信学会 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002), 2002.7
- 173 石井育規, 福井孝太郎, 向川康博, 尺長健, 光学現象の分類基準を利用した画像の線形化, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2002)論文集, vol.2, pp.167-176, 2002.7
- 174 池内 克史, 中澤 篤志, 観察に基づく文化遺産のデジタル保存, 第30回 可視化シンポジウム, 2002.7
- 175 吉田 達哉, シャミラ・モホッタラ, 影澤 政隆, 池内 克史, CGモデル画像を教師画像とする車両認識システムについて, 信学技報, 2002.9
- 176 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 物体の可能な変位の2次近似式の導出とその応用, 第20回ロボット学会学術講演会, 2002.10
- 177 森田 拓磨, 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 観察によるひも結び動作の学習, 第20回ロボット学会学術講演会, 2002.10
- 178 園田 展人, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 人間からロボットへの日常の把持スキルの伝達, 第20回ロボット学会学術講演会, 2002.10
- 179 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 「実演に基づく教示」におけるロボットビジョンの役割とその応用, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2002.11
- 180 森田 拓磨, 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 観察によるひも結び動作の学習, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2002.11
- 181 橋本 謙太郎, 小川原 光一, 高松 淳, 池内 克史, 赤外線画像を用いた視体積交差法による把持形体の認識, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2002.11
- 182 吉田 達哉, シャミラ モホッタラ, 影澤 政隆, 池内 克史, CGモデル画像による教師画像を利用した車両認識の試み, ITSシンポジウム, 2002.12
- 183 小野 晋太郎, 平原 清隆, 影澤 政隆, 池内 克史, 車載レンジセンサによる路上駐車車両計数システム, ITSシンポジウム, 2002.12
- 184 朱 成華, 平原 清隆, 松田 真理, 上條 俊介, 池内 克史, ラインスキャンカメラを用いた路上駐車車両の検出, ITSシンポジウム, 2002.12
- 185 園田 展人, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, ロボットによる日常の把持スキルの獲得, SI2002, 2002

- 186 森田 拓磨, 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 観察によるひも結び動作の学習, SI2002, 2002
- 187 有光博志, 向川康博, 尺長健, 陶器の反射特性学習と仮想光学環境への応用, 計測自動制御学会 第2回システムインテグレーション部門学術講演会(SI2002), 2002.12
- 188 中岡 慎一郎, 中澤 篤志, 横井 一仁, 池内 克史, 舞踊動作を模倣するロボットの全身動作の生成, SI2002, 2002
- 189 庭山 知之, 村上 智一, 中村 明生, 久野 義徳, コンピュータビジョンを用いた踊りの解析とその利用, 計測自動制御学会 システムインテグレーション部門学術講演会 (SI 2002) 講演論文集, vol.1, pp.291-292, 神戸, 2002.12
- 190 池内 克史, CREST池内プロジェクトの概要 -観察に基づく文化財のデジタル保存-, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 東大生研, 2003.3
- 191 佐川 立昌, 増田 智仁, 大石 岳史, 西野 恒, 中澤 篤志, 倉爪 亮, 池内 克史, 大規模観測対象のための幾何および光学情報の統合, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 東大生研, 2003.3
- 192 宮崎大輔, Robby T. Tan, 原 健二, 池内克史, 光学的アプローチに基づく現実世界のモデル化手法, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), PP.19-26, 2003.3
- 193 大石 岳史, 佐川 立昌, 中澤 篤志, 倉爪 亮, 池内 克史, PCクラスタによる大規模距離画像の並列アラインメント, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 194 増田 智仁, 池内 克史, レンジデータを用いた三次元形状の復元と評価, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 195 小野 晋太郎, 川崎 洋, 池内 克史, 坂内 正夫, EPI解析による複数ビデオカメラの画像統合, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 196 園田 展人, Keni Bernardin, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 日常動作における把持の認識とロボットによる再現, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 197 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 接触状態を用いたビジョンの誤差修正のための線形解法, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 198 中岡 慎一郎, 中澤 篤志, 横井 一仁, 池内 克史, 舞踊模倣ヒューマノイドロボットにおける脚動作の認識と生成, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 199 中澤 篤志, 中岡 慎一郎, 池内 克史, 複数舞踊動作からの個性の抽出および適用, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 200 源田大輔, 向川康博, 尺長健, 視点と法線を組み合わせた任意視点映像の生成法, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 201 川嶋幸治, 尺長健, 相関による類似動作抽出に基づく舞踊動作の解析, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3
- 202 石井育規, 向川康博, 尺長健, 相互反射を含むシーンにおける画像の線形化と光学現象の解析, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3

- 203 中村 明生, 庭山 知之, 村上 智一, 田端 聡, 久野 義徳, 舞踊動作の解析と応用システムの開発, 情報処理学会 コンピュータとイメージメディア研究会, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究会(CVIM), 2003.3, pp.85-92, 東京, 2003.3
- 204 増田 智仁, 今津 節生, Spatana Auethavekiat, 古谷 毅, 池内 克史, 同範・同型鏡における差異の視覚化, 日本文化財科学会第20回大会, 2003.5
- 205 加藤丈和, 和田俊和, 近接性グラフに基づく効率的Condensingのアルゴリズムと評価, 信学技報 PRMU, Vol. 103, No. 96, pp.19-24, 2003.5
- 206 和田俊和, 加藤丈和, 近接性グラフに基づく効率的Condensingの理論, 信学技報PRMU, Vol. 103, No. 96, pp. 13-18, 2003.5
- 207 楊 進華, 池内 克史, 織布反射のレンダリング方法, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2003.9
- 208 運天 弘樹, 池内 克史, テクスチャマッピングと色調補正, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2003.9
- 209 崎田 健二, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 視線を利用した人間とロボットの協調作業, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 2003.9
- 210 廣田 祐一郎, 増田 智仁, 長谷川 一英, 小川原 光一, 池内 克史, 気球上から取得した三次元形状の歪み補正, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 2003.9
- 211 佐賀 直也, 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 観察による紐結びの動作学習のための紐の状態認識, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 2003.9
- 212 白鳥 貴亮, 中澤 篤志, 池内 克史, 楽音のリズムを考慮した舞踊動作の解析, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 2003.9
- 213 原田 貴昭, 原 健二, 中澤 篤志, 池内 克史, ロボットシミュレータのための材質モデルの自動生成, 日本ロボット学会 第21回学術講演会, 2003.9
- 214 庭山 知之, 久野 義徳, 中村 明生, 田端 聡, 舞踊データを利用した舞踊教示支援システム, 第2回情報科学技術フォーラム (FIT 2003) 講演論文集, pp.129-130/CD-ROM I-059, 江別, 2003.9
- 215 中岡 慎一郎, 中澤 篤志, 横井 一仁, 池内 克史, シンボリックな動作記述を用いた舞踊動作模倣ロボットの実現, 電子情報通信学会 ニューロコンピューティング研究会, 2003.10
- 216 武本浩二, 加藤丈和, 和田俊和, 画像の4分木表現に対する最近傍識別, 信学技報PRMU. Vol.103, No.390, pp.1-6, 2003.10
- 217 原田貴昭, 原健二, 中澤篤志, 斎藤博昭, 池内克史, 材質感モデルの自動生成, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM)2004 2003-CVIM-142, 2004.1
- 218 小野 晋太郎, 川崎 洋, 池内 克史, 時空間距離画像の提案・考察と街のモデル化への応用, CVIM研究会 2004 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告, 2004.1
- 219 久野 義徳, 中村 明生, 文化遺産の高度メディアコンテンツ化のための時系列情報解析, 埼玉大学21世紀総合研究機構 プロジェクト成果報告書, pp.45-46, 2004.3
- 220 山崎俊太郎, 池内克史, 不十分な計測情報に基づく実物体の写実的な画像合成, CVIM研究会 2004 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告, 2004.5

- 221 朽津信明, 増田智仁, 山田陽介, 池内克史, 三次元計測に基づくフゴッペ洞窟への光の射し込みのシミュレーション, 日本文化財科学会第21回大会, 2004.5
- 222 高松淳, 池内克史, ロボット動作の自動生成のための観察による手作業の抽象化, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.5
- 223 Robby T. Tan, Katsushi Ikeuchi, Illumination Color and Intrinsic Surface Properties -Physics-based Color Analyses from a Single Image-,情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.5
- 224 岡本泰英, 池内克史, Sequential Point Clusters: 大規模モデルに対する効率的なポイントベースレンダリングシステム, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.5
- 225 朽津信明, 増田智仁, 山田陽介, 池内克史, 三次元計測に基づくフゴッペ洞窟への光の差し込みのシミュレーション, 日本文化財科学会第21回大会, 2004.5
- 226 二神葉子, 津村宏臣, 三次元写真測量技術を用いた文化財建造物の劣化状況の評価, 文化財保存修復学会第26回大会, 2004.6
- 227 岡本泰英, 山崎俊太郎, 池内克史, Sequential Point Clusters:を用いた大規模モデルに対する効率的なポイントベースレンダリングシステム, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 228 猪狩壮文, Robby T. Tan, 池内克史, Interference filterを用いて取得した反射光スペクトルの光源スペクトル・分光反射率分離, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 229 猪狩 壮文, タン・ロビタントウイ, 池内 克史, Interference filterを用いた多波長データ取得のためのスペクトル変換関数の推定, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 230 運天弘樹, 三橋徹, 池内克史, 画像間の色調連続性を保持した3次元幾何モデルのテクスチャリング手法, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 231 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪亮, 池内克史, PCクラスタによる複数距離画像の並列同時位置合わせ, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 232 大石岳史, 中澤篤志, 池内克史, インデックス画像を用いた複数距離画像の高速同時位置合わせ, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 233 白鳥貴亮, 中澤篤志, 池内克史, モーションキャプチャーと音楽情報を利用した舞踊動作の構造解析, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 234 増田智仁, 廣田祐一郎, 長谷川一英, 池内克史, 浮遊型レーザーレンジセンサから得られた距離画像の変形位置合わせ, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」, 2004.7
- 235 小野晋太郎, 川崎洋, 影沢政隆, 池内克史, 時空間距離画像を利用した事故位置推定による効率的な広域空間モデルの構築, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」 2004.7
- 236 中岡慎一郎, 中澤篤志, 横井一仁, 池内克史, 人の全身動作をロボットで模倣するための動作プリミティブ, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」 2004.7
- 237 中澤篤志, 中岡慎一郎, 竹村治雄, 池内克史, スケーラブルDPを用いた人間動作のマッチングと生成, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」 2004.7
- 238 佐藤いまり, 岡部孝弘, 佐藤洋一, 池内克史, 任意光源下における画像生成のための基底画像の獲得, 「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」 2004.7

- 239 山崎俊太郎、池内克史、品川嘉久、非拘束自動画像モーフィングを用いた自由視点画像の生成、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 240 原健二、西野恒、池内克史、混合球面上分布に基づく光源状況の推定、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 241 宮崎大輔、池内克史、偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状の推定、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 242 宮崎大輔、池内克史、偏光レイトレーシング法による透明物体の表面形状と裏面形状の同時推定の可能性と限界、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 243 宮崎大輔、池内克史、偏光レイトレーシング法による透明物体の相互反射の解析、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 244 川上玲、タン・ロピタントウィ、池内克史、光源環境の変化を利用した物体の色推定、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 245 阪野貴彦、池内克史、EPI解析に基づく動画像からの鏡面反射成分の分離、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 246 工藤俊亮、幸村琢、池内克史、モーションキャプチャ・データからのパラメタ抽出に基づく強い外乱に対する人体モデルの姿勢制御、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 247 崎田健二、小川原光一、木村浩、池内克史、視線を利用した人間の意図推定に基づく人間とロボットの柔軟な協調作業、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 248 長谷川一英、廣田祐一郎、小川原光一、倉爪亮、池内克史、気球搭載型レーザーレンジセンサ-FLRS(Flying Laser Range Sensor)-、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 249 高松淳、佐藤啓宏、木村浩、池内克史、誤差を考慮した観察による回転ジョイントのパラメタ推定、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 250 タン・ロピタントウィ、池内克史、Intrinsic Properties of an Image with Highlights、「画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004)」2004.7
- 251 武本浩二、加藤丈和、和田俊和、画像の4分木表現を用いた高速最近傍識別、画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004), Vol.II, 347-352
- 252 柴田智行、加藤丈和、和田俊和、K-D Decision Tree -最近傍識別器の高速化と省メモリ化-, 画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2004), Vol.II, pp. 55-60
- 253 高松淳、佐藤啓宏、木村浩、池内克史、視覚誤差にロバストな回転ジョイントのパラメタ推定、第22回日本ロボット学会学術講演会, 2004.9
- 254 中村 明生、庭山 知之、田端 聡、久野 義徳、舞踊教示支援システムの開発 --移動ロボットによる表示システム--, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, /CD-ROM 1A35.pdf, 岐阜, 2004.9
- 255 田端 聡、中村 明生、庭山 知之、久野 義徳、舞踊教示支援システムの開発 --音声, デバイスによる教示--, 第22回日本ロボット学会学術講演会予稿集, /CD-ROM 1A36.pdf, 岐阜, 2004.9
- 256 坂垣内洵也、和田俊和、加藤 丈和、修正相対近傍グラフを用いたターゲット追跡と認識、情処研資CVIM, No.145, CVIM 1 4 5 -16, 2004.9

- 257 山田陽介, 増田智仁, 朽津信明, 池内克史, 三次元計測データに基づく学術調査・シミュレーション-フゴッペ洞窟の光源環境に関して-, 日本バーチャルリアリティ学会 (VRSJ) 第9回, 2004.9
- 258 カイリル アズミ, 小野晋太郎, 影沢政隆, 池内克史, 広域仮想都市構築のための航空写真影解析による3次元情報復元, 第3回ITSシンポジウム2004, 2004.10
- 259 松井健, 長谷川一英, 池内克史, 文化遺産における壁面画の測定に伴う歪み補正, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.11
- 260 高松 淳, 小川原 光一, 木村 浩, 池内 克史, 観察による組み立て作業の模倣, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.11
- 261 中澤篤志, 中岡慎一郎, 白鳥貴亮, 工藤俊亮, 池内克史, モーションキャプチャによる全身運動解析と模倣ロボット-「じょんがら」節をHRP-1S に踊らせる-, 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2004.11
- 262 大石岳史, 佐川立昌, 中澤篤志, 倉爪亮, 池内克史, 大規模距離画像の同時位置合わせ手法, 第70回3次元映像フォーラム, Vol.18, No.4, p.2-5, 2004.12
- 263 阪野貴彦, 長谷川一英, 池内克史, 画像列を利用した気球センサーからの3次元形状補正, 第70回3次元フォーラム(2004), Vol.18, No.4, p.6-11, 2004.12
- 264 宮崎大輔, 池内克史, 文化財のデジタル保存のための偏光を用いた透明物体形状計測手法, 第70回3次元フォーラム(2004), Vol.18, No.4, p.12-22, 2004.12
- 265 川上玲, タン, ロッピタントウイ, 池内克史, 文化遺産のデジタル保存のための光源色の変化を用いた物体色推定手法, 第70回3次元フォーラム(2004), Vol.18, No.4, p.23-26, 2004.12
- 266 加門優治, 山根亮, 尺長健, スペースカービング法へのシルエット制約の導入, to appear in 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2005.3
- 267 関口真, 右田剛史, 尺長健, 基底反射特性モデルの線形結合による双方向テクスチャ関数と物体形状の同時復元の検討, to appear in 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2005.3
- 268 江角直起, 右田剛史, 尺長健, フーリエ級数モデルによる双方向テクスチャ関数学習と仮想光学環境への応用, to appear in 情報処理学会 コンピュータビジョンとイメージメディア研究報告(CVIM), 2005.3

②プレス発表

2002年10月9日

奈良国立博物館において実施した、東大寺戒壇堂四天王像の三次元データ計測の結果等の発表を、奈良国立博物館が実施した同塑像のX線計測の結果とあわせて発表する。

2005年1月12日

東京大学生産技術研究所 第53回定例記者会見

「ヒューマノイドロボットと踊り師範による会津磐梯山踊の共演—ヒューマノイドロボットをメディアとした民俗芸能・技法の動的アーカイブに向けて—」

(3) 特許出願 (国内 5件、海外 2件)

①国内

発明者：池内 克史, 佐川 立昌, 大石 岳史
 発明の名称：距離画像の誤差分布方向を考慮した反復計算による精度向上手法
 出願番号：2003-22316
 出願日：2003年1月31日

発明者：池内 克史, 川崎 洋, 佐川 立昌, 山崎 俊太郎
 発明の名称：微小面ビルボードイングを用いた複雑なシーンの表示手法
 出願番号：2003-22317
 出願日：2003年1月31日

発明者：池内 克史, 坂内 正夫, 川崎 洋
 発明の名称：複数カメラからパノラマ画像を生成する装置と手法
 出願番号：2003-038507
 出願日：2003年2月17日

発明者：池内 克史, 長谷川 一英, 増田 智仁
 発明の名称：フライングレーザレンジセンサと空中計測による歪み補正パラメータの推定手法
 出願番号：2004-50029
 出願日：2004年2月25日 (日本)

発明者：池内 克史, 大石 岳史
 発明の名称：画像処理装置および画像処理方法並びにこれらに用いるプログラム
 出願番号：特願2005-14837
 出願日：2005年1月21日

②海外

発明者：池内 克史, 川崎 洋, 佐川 立昌, 山崎 俊太郎
 発明の名称：Image Processing Apparatus, Image Processing Method, and Image Processing Program
 出願番号：10/602,600 (米国)、3014276.4 (EU)
 出願日：2003年6月25日 (米国およびEU)

発明者：池内 克史, 坂内 正夫, 川崎 洋
 発明の名称：Apparatus and Method for Generating Image
 出願番号：10/778,308 (米国)、04003560.2 (EU)
 出願日：2004年2月17日 (米国およびEU)

(4) 新聞報道等

①新聞報道、雑誌、テレビ、HPなど

日付	媒体	タイトル
平成12年7月17日	鹿児島新報	よみがえる金色の鎌倉大仏 コンピュータ技術で成功
平成12年7月号	画像ラボ	14年前の写真とその修復 安田善一郎肖像銀板写真の発見と画像の復元
平成12年7月24日	陸奥新報	金色の鎌倉大仏CGでよみがえる「仮想現実」で遺跡保存
平成12年8月号	Inter Lab	デジタルコンテンツ化自動化技術と文化遺産の出会い
平成12年年9月号	VinTa	鎌倉大仏を3次元CD化に成功

平成13年5月15日発行 (128号)	日本ロボット学会誌 Vol.19 No.4	表紙 (ドットちゃん)
平成13年7月29日	福島民友	人のまねするA・Iロボット (うつくしま未来博)
平成13年8月	読売新聞	来年で開眼1250年 奈良の大仏
平成13年9月	日本建築学会大会 学術講演梗概集	歴史的建造物における3次元形状取得技術の活用 研究
平成13年10月5日	科学新聞	文化遺産を永久保存 学ぶ価値ある日本の伝統 3次元CGに形を変えて
平成14年2月22日 (No.1230)	東京大学学内広報	駒場寮廃寮の完結と将来の駒場キャンパス (レー ザ測定データによって再現された旧駒場寮建物写 真提供)
平成14年4月20日	朝日新聞 (夕刊) 関西版	大仏さん昔やせ顔 修理重ね今ふっくら
平成14年4月	社会科資料集 小6	歴史ニュース-デジタル化でよみがえる鎌倉大仏-
平成14年4月1日	生研ニュース	没入空間型ディスプレイを利用したデモンストレー ション
平成14年4月10日	朝日新聞 関西版夕刊	大仏さん昔やせ顔
平成14年4月10日	朝日新聞 関東版 夕刊	大仏さん昔やせ顔
平成14年4月20日	asahi.com (My Town 奈良)	大仏さん 昔やせ顔 開眼時CGに
平成14年6月26日	読売新聞 (夕刊) 関西版	関西おもしろ文化考 (池内コメント)
平成14年7月2日	朝日新聞関西版	広目天さま「身体測定」
平成14年7月23日	東京大学新聞	コンピュータと人間・芸術を伝承するコンピュータ
平成14年7月	Cyber Lab	『S-Report』7/4 大仏はどんな顔をしていたのか
平成14年7月号	歴史街道	奈良の大仏は面長だった?
平成14年8月15日	日本経済新聞 (夕刊)	昔を体感 3D画像
平成14年9月	やりたいこと チャレンジBOOK	気になる学問について調べてみよう
平成14年9月26日	KTM-HWI	8th International Conference on Virtual Systems and MultiMedia, Koria (2002/9/25月~9/27)にて
平成14年10月9日	記者発表	奈良国立博物館において実施した、東大寺戒壇堂 四天王像の三次元データ計測の結果等の発表を、 奈良国立博物館が実施した同塑像のX線計測の 結果とあわせて発表する。
平成14年10月10日	産経新聞	東大研究室 広目天像のCG化成功
平成14年10月10日	読売新聞	いずみ (コラム)
平成14年10月10日	朝日新聞	広目天、全方位ウォッチ

平成14年10月10日	asahi.com (My Town 奈良)	広目天、全方位ウォッチ
平成14年10月17日	朝日放送	嚮田隆史のぶらり旅
平成14年11月4日	朝日放送	愛と悲しみの光明皇后月～正倉院2002
平成14年12月	学環学府 (情報誌)	広目天像のデジタルデータ化成功
平成14年3月15日	美術館IT情報	三次元形状計測された世界最大規模の「東大寺 盧舎那大仏」
平成15年3月	学環学府 (情報誌)	バイヨン・三次元デジタルモデル化プロジェクト始 動
平成15年6月	マッキンゼーエリクソン (広告)	マクセルDVDの広告
平成15年6月	アートトップ (芸術新聞社)	J-ASEAN VISUAL ART FESTIVAL in YOKOHAMA
平成15年4月3日	産経新聞 地方面	「名所・景勝」鎌倉大仏特集
平成15年8月25日	朝日新聞 (夕刊)	崩れず、色あせず 文化財デジタル保存
平成15年10月	学環学府 (情報誌)	横浜赤レンガ倉庫外壁に、バイヨン寺院 3D映像 が・・・
平成15年10月31日	科学新聞	科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業部 CREST研究成果から「文化遺産の高度メディアコ ンテンツ化のための自動手法化」
平成16年3.26日	地上デジタル HD制作・HD放送	昔が見えた!
平成16年4月21日	西日本新聞	「王塚古墳」CGで再現へ
平成16年4月21日	朝日新聞 筑豊南	装飾壁画再現へ レーザーで測量 桂川の王塚古 墳
平成16年4月21日	毎日新聞 筑豊	王塚古墳の壁画測量
平成16年4月21日	読売新聞 地域ニュース筑豊	石室内部を立体計測 古代人の見た世界 画面 で再現へ
平成16年4月21日	西日本新聞	「王塚古墳」CGで再現へ
平成16年7月18日	日本テレビ 「中居正広のブラック バラエティー」	タイトルなし。 鎌倉大仏と奈良大仏の体積を提供。比較対象物 として、どのくらい大きくなるか、といったこ とを調べていくという番組内容。
平成16年12月25日	テレビ大阪 「シリーズ歴史スペシ ャルもうひとつの歴史」	遥かなる大仏の道 月～世紀の大事業に挑む日本 人の叡智月～
平成16年12月31日	テレビ東京系全国ネッ ト「シリーズ歴史スペ シャル」	遥かなる大仏への道
平成17年1月12日	東京大学	東京大学生産技術研究所 第53回定例記者会見
平成17年1月12日	朝日新聞 (夕刊)	月～世紀の大事業に挑む日本人の叡智月～
平成17年1月12日	読売新聞 (夕刊)	私が「後継者」!?

平成17年1月12日	高知新聞 FLASH24：写真	人型ロボット、師範と共演
平成17年1月12日	Sankei Web	人型ロボット、師範と共演「会津磐梯山踊り」を舞う
平成17年1月12日	TBS News-i	「会津磐梯山」踊る二足歩行ロボット
平成17年1月12日	Impress PC Watch	HRP-2、人間と一緒に会津磐梯山を踊る
平成17年1月12日	asahi.com	ヒト型ロボ、「会津磐梯山」を踊る 東大・産総研チーム
平成17年1月12日	NIKKEI NET	人型ロボット、踊りの師範と共演
平成17年1月12日	YOMIURI ON-LINE	踊るロボット、会津民謡の師範と共演
平成17年1月12日	四国新聞社 香川県ニュース	人型ロボット師範と共演／踊りの動きデジタル化
平成17年1月12日	TBSテレビ 「ニュース23」	ロボットが師範と共演
平成17年1月12日	TBSテレビ 「ニュースの森」	伝統芸能保存します 踊るロボットに師範も絶賛
平成17年1月12日	TBSテレビ 「ニュースフロント」	ロボットが伝統舞踊
平成17年1月13日	TBSテレビ 「JNNニュースバード」	ロボットが伝統舞踊
平成17年1月13日	日本経済新聞	舞うロボット、伝統継承 CG使い 動き記憶
平成17年1月13日	福島民友	ロボットが会津磐梯山踊り 二足歩行で師範と共演
平成17年1月13日	福島民報	師範のくせまで再現 磐梯山踊りデジタル化 人型ロボットが熱演
平成17年1月13日	産経新聞	「チャイム」の欄にて紹介 跡取りはロボット？
平成17年1月13日	FujiSankei Business i	踊りをロボットに伝承！？東大と産総研、なめらかな動きを実現
平成17年1月13日	SANSPO. COM	“免許皆伝”モノのデジ舞い…伝統芸能をデータで後世に
平成17年1月13日	日経BP社 「日経ものづくり」	コーナー名：「ものづくり万華鏡」 「ヒューマノイドロボットによる会津磐梯山踊り」をコラムでとりあげたい
平成17年1月14日	AP通信 TV部門	伝統舞踊を踊るロボット
平成17年1月14日	テレビ朝日 「報道ステーション」	踊る！ロボットプロメテ君 生出演
平成17年1月15日	テレビ朝日「ドスペ！」	「草野仁の緊急検証 巨大地震は必ず来る」
平成17年1月18日	愛・地球博シンボル・パビリオン グローバル・ハウス」 内 ソンマ遺跡展示コーナー	「ソンマ・ベスピア遺跡復元CG」(仮)
		「ソンマ・ベスピア遺跡壁面復元コーナー」(仮)

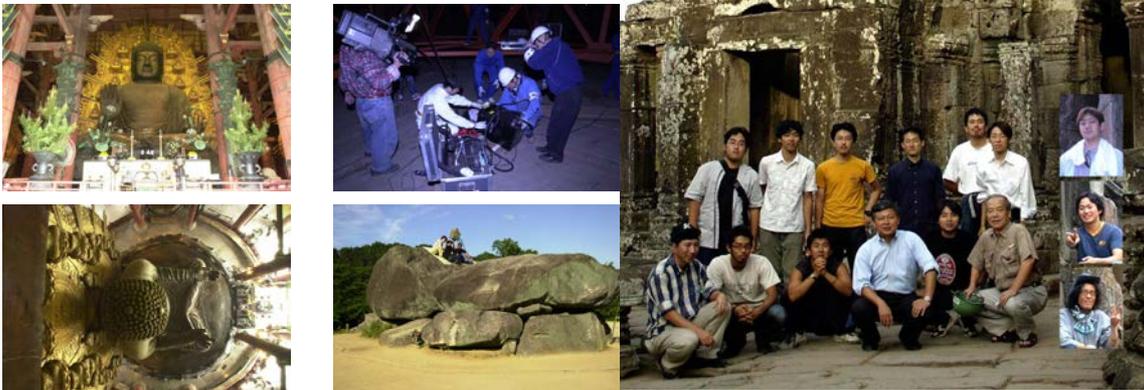
②受賞

- 平成12年 7月10日 MIRU2000 最優秀論文賞 佐藤いまり他
- 平成12年 9月19日 日本バーチャルリアリティ学会 最優秀論文賞 佐藤いまり他
- 平成12年11月27日 6th VSMM 最優秀論文賞 宮崎大輔他
- 平成16年 5月 6日 情報処理学会C V I M研究会 優秀卒論賞 岡本泰英
- 平成16年11月19日 10th VSMM 最優秀論文賞 長谷川一英他

7. 結び

本プロジェクトは、有形文化財と無形文化財という2つサブ分野に分かれている。2つのサブ分野で要素技術の開発を積み重ねることができた。通常の科研費などでは、単なるペーパーの製造の段階で終わることが多いが、CRESTという大型プロジェクトのおかげで、有形文化財では天平大仏の復元に成功し、無形文化財の分野では、ヒューマノイドロボットに会津磐梯山踊りを躍らせるという比較的目立つ成果をつくることにも成功し非常な達成感がある。強いて心残りの点をあげるとすれば、延長募集に応募したものの成功しなかった点であろうか。

また、本プロジェクトでは従来のようなばら撒き型プロジェクトとせず、若干批判もあったが、大半の資金を東京大学に集中した。そのおかげで多くのサブ分野に分かれているものの、互いに整合性をとりつつプロジェクトを進めることができた。



奈良における実験風景

カンボジア バイヨン遺跡にて