

研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2007 年度～2009 年度
 課題番号：19700098
 研究課題名（和文）カメラ・プロジェクタ系によるテクスチャ付全周囲 CG モデル作成システム
 研究課題名（英文）Textured, entire object modeling software using a projector-camera system
 研究代表者 古川 亮（FURUKAWA RYO）
 広島市立大学 情報科学研究科 講師
 研究者番号：50295838

研究成果の概要（和文）：

プロジェクタとカメラを利用して、テクスチャ付きの全周囲 3 次元形状モデルを作成するシステムを構築する研究を行った。この研究により、(1)複数形状の位置合わせを精密に行う手法、(2)複数形状を統合した単一の全周囲モデルを高速に生成する方法、(3)多数の光源条件下で撮影された画像集合から、反射特性パラメータを推定し、統合されたテクスチャを生成する方法、(4)プロジェクタでパターンを投影することで運動する物体を計測することが可能な形状計測方法が開発された。

研究成果の概要（英文）：

We have researched on a system for modeling textured, entire 3D model of target object using projector-camera systems. In those researches, we have developed (1) an accurate method for aligning multiple shapes measured from different directions, (2) an efficient method for merging multiple shapes into a unified entire shape model, (3) methods for obtaining unified texture from image sequence captured in various illumination conditions by estimating reflection parameters, (4) shape measurement methods that can capture moving objects by projecting patterns by video projectors.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,200,000	0	1,200,000
2008 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009 年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	600,000	3,800,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学 知覚情報処理・知能ロボティクス

キーワード：3 次元コンテンツ作成，形状統合，プログラマブルシェーダ，符号付距離場，カメラ・プロジェクタ系，自己校正，表面反射特性，鏡面反射除去

1. 研究開始当初の背景

近年の、パーソナルコンピュータの 3 次元グラフィック描画能力の向上や、ADSL、光ファイバーなどの広帯域ネットワークの普及により、3 次元 CG データをインターネッ

ト上に公開したり、さまざまにカスタマイズされた 3D アプリケーションを web アプリとして公開することができるようになった。こうしたことから、デジタルアーカイブ、電子博物館、3D カタログなどの実現が期待さ

れる。

このような試みを行ううえで、実物体を計測して 3D コンテンツ化する技術の開発は、非常に重要である。従来、実物体の計測には、デジタルカメラによるパッシブな計測や、専用のレンジファインダを用いることが多かった。しかし、パッシブな計測には、精度が低い、模様のない単色の物体の計測が出来ない、特徴点以外の点を直接計測することが出来ないといった欠点があり、また、専用レンジファインダは非常に高価であるため、小規模なプロジェクトや、カタログ作成などには利用しにくいという欠点がある。

我々は、上記の背景から、比較的安価に高精度な 3 次元計測を行うことを目標として、カメラ・プロジェクタ系による 3 次元計測手法の開発を進めてきた。この試みは大きな成果を収め、3 次元計測の知識の乏しいユーザにも利用可能な、自己校正機能を備えた 3 次元計測システムを作成することができた。このシステムは、高い評価を受け、国内でのコンピュータビジョンの最大規模の学術会議である「画像の認識理解シンポジウム(2005年)」においてインタラクティブセッション賞を受賞し、また、独立行政法人情報処理推進機構から 2005 年度上期末踏ソフトウェア創造事業の一つに選ばれている。

2. 研究の目的

本研究では、上記のシステムをさらに発展させ、パーソナルな 3D コンテンツ作成システムを構築する。最終的には、物体の計測から、通常の 3D アプリケーションで取り扱い可能な、高画質なテクスチャを持った CG モデルの構築までを、一貫して行うことの出来るシステムを目標とする。

開発目標は次のとおりである。

●形状修正機能を持つメッシュの位置あわせと、高速な統合アルゴリズムの開発

現実の物体を計測して 3D モデルにするためには、1 度の計測のみでは死角が生じるため不十分であり、複数の計測結果の位置を合わせ、さらに統合して一つのメッシュモデルにする必要がある。本研究では、位置あわせのアルゴリズムについて検討し、位置あわせと同時に、計測誤差の修正を行うアルゴリズムを研究する。

我々の開発した 3 次元計測システムにおいては、生じる計測誤差について、具体的なモデルを仮定することが出来る。このような場合、従来の位置あわせのアルゴリズムを適用すると同時に、計測誤差を最小化する手法を利用することで、位置あわせと計測誤差の修正を同時に行うことが出来る。これにより、計測誤差が小さくなるとともに、複数形状を統合する時、重なり合った領域の不一致を減らすことができるため、統合アルゴリズムが

安定して働くようになることが期待される。

また、統合アルゴリズムとしては、ボリュームデータ構造を用いた手法が一般に利用されるようになってきているが、速度が遅いことが欠点であった。本研究では、PC のビデオハードウェアを用いて、高速にメッシュ統合を行うアルゴリズムを開発する。

●プロジェクタ・カメラ系の特徴を利用した、統合テクスチャ生成アルゴリズムの開発

CG モデルの作成において、テクスチャの品質は、モデルの最終的なレンダリング結果に大きく影響する。我々の開発した 3 次元計測システムにおいては、形状取得と同時にテクスチャ用画像を撮影することが出来るため、自動的に形状との位置が合ったテクスチャを得ることが出来る。複数の形状データを統合する場合、やはり複数のテクスチャ用画像を統合し、単一のテクスチャ画像にする必要がある。このような処理の問題点の一つは、テクスチャ同士が重なり合う部分において、画像の撮影の際の光源や法線方向などの違いにより、それぞれの色が異なるための「色ずれ」である。このため、テクスチャを統合するためには、重なり部分における色ずれを修正する必要がある。また、テクスチャの品質向上のためには、画像における鏡面反射成分を取り除く必要がある。

本研究では、形状計測時に、プロジェクタを光源として得られた画像集合から、テクスチャを生成する技術の開発を行う。特に、プロジェクタ・カメラ系においては、光源位置や物体の形状が既知である、光源強度の調節が容易であるなどの利点があるので、そうした利点を生かしたアルゴリズムを開発する。

3. 研究の方法

上記目的を達成するために、以下の方法で研究を行った。

●誤差修正と位置あわせ

複数の形状データから、形状測定に利用したパラメータの誤差修正と位置あわせを同時に行う手法の基本アルゴリズムを開発した。文献 1 における形状計測システムは、カメラや、プロジェクタの位置を推定し、同時に形状計測を行うものである。この時、位置推定に誤差があると、計測された形状にゆがみが生じる。また、カメラやプロジェクタの焦点距離などのパラメータの誤差も、測定結果に影響を与える。こうしたゆがみは、位置あわせの誤差となってあらわれるので、誤差の最小化によってこうしたパラメータの誤差を修正することが可能であると考えられる。この手法により、形状のゆがみの補正と、位置あわせとを同時に行う。

●ハードウェアによるメッシュ統合

複数の形状データの統合アルゴリズムを、ビデオハードウェアを用いて行う手法を開

発する。

●ダイナミックレンジテクスチャ

プロジェクトの露出調整による、プロジェクトの応答特性の推定と、ダイナミックレンジ画像形式でのテクスチャ画像の取得を行うアルゴリズムを開発する。我々のシステムはビデオプロジェクトを光源として用いるので、光源の強度を容易に変化させることが出来る。これを利用して、複数の露出度でテクスチャを撮影し、ダイナミックレンジ画像を作成する。プロジェクトの物理的な光強度は、画素値と線形関係にあるとは限らないので、プロジェクトの光強度の応答曲線も同時に推定する。

●鏡面反射成分除去

物体表面の鏡面反射成分を推定するとともに、その除去を行う。我々のシステムでは、物体の形状と、光源（ビデオプロジェクト）の位置が既知であり、さらにダイナミックレンジテクスチャによって飽和や露出不足によるゆがみの無い画像が得られるので、鏡面反射の数理モデルを当てはめることで、高い精度で鏡面反射除去を実行できると期待される。

●表面の反射特性推定

対象物体表面の各点における反射特性の推定を行う。入力に線形なダイナミックレンジ画像を利用し、光源位置と形状が既知であることにより、反射モデルへのあてはめを行う。すでに我々は、文献3で、反射特性としてランバートモデル以外の反射モデルを利用する手法について検討している。本研究でも、いくつかの反射モデルについて実装し、結果を比較する予定である。既知データが多いことの利点を生かし、安定した鏡面反射除去、色ずれ修正を行うことを目標とする。

●テクスチャ統合

前年度までの研究で得られたダイナミックレンジ画像や、反射特性から、一つのテクスチャデータを得るための統合アルゴリズムの開発を行う。ダイナミックレンジ画像は、反射特性の線形な表現を得られるという利点があるが、最終的なテクスチャとしては、取り扱い可能なソフトウェアが少ないという欠点がある。そのため、テクスチャ統合の際には、通常の256階調画像としてテクスチャを出力する方法についても検討する。

4. 研究成果

●誤差修正と位置あわせ

複数の形状データから、形状測定に利用したパラメータの誤差修正と位置あわせを同時に行う手法の基本アルゴリズムを開発した。研究代表者らが作成中の、カメラ・プロジェクト系を用いた形状計測システム（コード化ステレオ法による自己校正機能付3次元計測装置）は、プロジェクトから対照物体に

パターンを照射し、計測を行なうことで、高密度な形状計測を実現できるが、カメラ、プロジェクトの焦点距離や、位置、方向などのパラメータに誤差があると、計測された形状にゆがみが生じる。こうしたゆがみは、複数の形状を位置あわせしたときの誤差となってあらわれるので、誤差の最小化によってこれらのパラメータを修正する手法を開発した。開発した手法は、文献[3][7][16]で発表された。

また、多くの形状位置合わせ手法は、最初に粗く位置合わせを行い（初期位置）、その後誤差最小化によって位置を最適化する。このために初期位置が必要であるが、その初期位置を、形状に含まれる特徴量のマッチングにより、自動的に推定する手法を開発した。この成果は文献[17]で発表された。

●ハードウェアによるメッシュ統合

複数の形状データを統合する手法に、符号付距離場を用いる方法がある。本研究では、符号付距離場による形状統合手法を、形状の穴埋めを同時に行なうことが出来るように改良し、さらにそれをビデオハードウェア（プログラマブルシェーダ）の利用によって高速に実行する手法を提案した。開発した手法は、文献[8][10][11]で発表された。

●鏡面反射成分除去／表面の反射特性推定／テクスチャ統合

対象物体表面の各点における反射特性の推定を行う。このために、光源方向と視点方向を変化させながら対象物体の画像を取得可能な装置を利用し、サンプリングを行った。これらの画像セットから、統合されたテクスチャを作成する手法を提案した。その成果は、文献[2][9][13]で発表された。

上記の画像セットで、入力に線形なダイナミックレンジ画像を利用し、光源位置と形状が既知であることにより、反射モデルへのあてはめを行う。現在、観測される画像上の色のモデルとしてlafortuneモデルを採用した当てはめを実装し、CGレンダリングの結果が向上することを確かめた。この時、共面の影響を除くために、鏡面反射方向付近でのインパルス的な信号を検出し、取り除いた。本研究の成果は、文献[21]で発表された。

また、関連した研究として、実画像からサンプリングしたテクスチャを利用して、視点に依存したテクスチャの変化をレンダリングする手法である視点依存テクスチャにおいて、画像の補間手法を改良し、より現実的なCG画像を得る手法の研究を行った。本研究の成果は、文献[19]で発表された。

●プロジェクト・カメラ系による形状計測システム

物体表面の反射とともに、形状を計測するための手法として、プロジェクト・カメラ系による形状計測システムを開発した。単一の

画像のみから形状を計測することが可能な「ワンショットスキャン」システムの研究を行ない、それによって、運動する物体の形状を計測することが可能なシステムを実装した。また、この手法と高速度カメラを組み合わせることで、風船が割れる瞬間などの、非常に高速度な現象の形状を計測可能であることを示した。その成果は文献[4] [12] [14] [15] [18] [20] [23] [24] [25]で発表された。また、同様な方法を用いて、自由に動かすことが可能なラインレーザによる形状計測や、影による形状計測の研究を行った。その成果を、文献[1] [5] [6]で発表した。

また、プロジェクタ・カメラ系による形状計測を高精度に行うための手法の一つに、位相シフト法がある。この方法の精度向上のために、プロジェクタとカメラの間の、光学的なレスポンス関数の校正を行う方法を提案し、形状計測に与える影響を評価した。その成果は、文献[22]で発表された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- [1] 古川 亮, 川崎 洋, 共面性情報および幾何学的条件を用いた影からの 3 次元形状復元, 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.1, no.2, 2008, pp.111-123, 査読有
- [2] 猪瀬健二, 榎本和史, 川崎洋, 古川亮, 全周 3 次元モデル生成のための複数テクスチャのシームレスな合成手法, 情報処理学会 CVIM 論文誌 MIRU2007 特集号, vol.49, no.4, 2008, pp. 1234-1249, 査読有
- [3] 榎本和史, 猪瀬健二, 川崎洋, 古川亮, 複数形状間の誤差最小化によるアクティブステレオのパラメータおよび形状補正, 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.1, no.3, 2008, pp. 12-27, 査読有
- [4] Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Ryusuke Sagawa, Yasushi Yagi, "Shape from grid pattern based on coplanarity constraints for one-shot scanning", IPSJ Transaction on Computer Vision and Applications, vol. 1, pp. 139-157, 2009, 査読有
- [5] Hiroshi Kawasaki and Ryo Furukawa, Shape Reconstruction and Camera Self-Calibration Using Cast Shadows and Scene Geometries, International Journal of Computer Vision, vol.83, no.2, 2009, pp.135-148, 査読有
- [6] Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Laser range scanner based on self-calibration techniques using coplanarities and metric constraints, Computer Vision and Image

Understanding, vol. 113, no. 11, 2009, pp.1118-1129, 査読有

[学会発表] (計 18 件)

- [7] 榎本和史, 川崎洋, 古川 亮, プロジェクタ・カメラを用いた 3 次元計測システムにおける複数形状計測時の誤差最小化による精度向上手法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), 2007 年 7 月 31 日, 広島市立大学
- [8] 板野友哉, 森栄晃彦, 古川亮, 川崎洋, 未観測ボクセルのクラス推定を用いた形状の統合及び補間手法と GPU を用いた高速な実装, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), 2007 年 8 月 1 日, 広島市立大学
- [9] 猪瀬健二, 榎本和史, 川崎洋, 古川亮, 全周 3 次元モデル生成のための複数テクスチャのシームレスな合成手法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007), 2007 年 8 月 1 日, 広島市立大学
- [10] R. Furukawa, T. Itano, A. Morisaka, and H. Kawasaki, Shape-merging and interpolation using class estimation for unseen voxels with a GPU-based efficient implementation, 6th International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling (3DIM 2007), 2007 年 8 月 22 日, Omni Mont-Royal Hotel Montréal, Québec, Canada
- [11] R. Furukawa, T. Itano, A. Morisaka, and H. Kawasaki, Improved Space Carving Method for Merging and Interpolating Multiple Range Images Using Information of Light Sources of Active Stereo, 8th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2007), 2007 年 11 月 21 日, The Institute of Industrial Science, the Univ. of Tokyo, Japan
- [12] H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, Y. Yasushi Yagi, Dynamic scene shape reconstruction using a single structured light pattern, IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2008), 2008 年 6 月 24 日, Egan convention center, Anchorage, Alaska, USA
- [13] 猪瀬健二, 榎本和史, 川崎洋, 古川亮, 実物体のシームレステクスチャ付き 3 次元モデルの自動生成システム, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), 2008 年 7 月 29 日, 軽井沢市
- [14] 古川亮, 川崎洋, 佐川立昌, 八木康史, ワンショットスキャンによる動物体の密な 3 次元形状復元手法, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008), 2008 年 7 月 29 日, 軽井沢市
- [15] Ryo Furukawa, Huynh Quang Huy Viet, Hiroshi Kawasaki, Ryusuke Sagawa and

Yasushi Yagi, One-shot Range Scanner using Coplanarity Constraints, International conference on image processing (ICIP 2008), 2008年10月12日, San Diego, California, U.S.A.

[16] Ryo Furukawa, Kenji Inose, Hiroshi Kawasaki, "Multi-view reconstruction for projector camera systems based on bundle adjustment", IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems, pp.69-76, 2009年6月, Miami, Florida, USA

[17] 石川 雅浩, 川崎 洋, 古川 亮, "プロジェクタ・カメラシステムの移動計測による高精度な全周形状復元手法", 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, パターン認識・メディア理解, Vol.2009, No.40-59, pp.25-30, 2009年6月, 札幌市

[18] 川崎 俊央, 川崎 洋, 古川 亮, 大田 雄也, 佐川 立昌, 八木 康史, "グリッドパターンを用いたワンショットスキャンによるリアルタイムな人体計測システム", 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, パターン認識・メディア理解, vol.2009, no.40-59, pp.43-48, 2009年6月, 札幌市

[19] 古川 亮, 平松 淳也, 浅田尚視点依存テクスチャマッピングのための非類似度最小化に基づく画像補間, 電子情報通信学会技術研究報告 PRMU, パターン認識・メディア理解, vol.2009, no.40-59, pp.95-100, 2009年6月, 札幌市

[20] 大田 雄也, 川崎 俊央, 佐川 立昌, 古川 亮, 川崎 洋, 八木 康史, "デブルーイン系列と Belief-Propagation を用いた高密度ラインパターン検出による高速動体の3次元計測手法", 第12回 画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2009 論文集), pp.222-229, 2009年7月, 松江市

[21] 猪瀬 健二, 福田 悠人, 川崎 洋, 古川 亮, "3次元物体の全周形状の高精度な計測および双方向反射特性の効率的獲得手法", 第12回 画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2009 論文集), 2009年7月, 松江市

[22] 戸塚 聡, 古川 亮, 川崎 洋, "プロジェクタ・カメラシステムのレスポンス関数を用いた位相シフト法によるアクティブ・ステレオの精度向上", 第12回 画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2009 論文集), pp.1594-1599, 2009年7月, 松江市

[23] 大田 雄也, 川崎俊央, 佐川 立昌, 古川 亮, 川崎 洋, 八木 康史, "デブルーイン系列と Belief-Propagation を用いた高密度ラインパターン検出による高速動体の3次元計測手法", 第12回 画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2009 論文集), pp.222-229, 2009年7月, 松江市

[24] Ryusuke Sagawa, Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Yuya Ohta, Yasushi Yagi,

Naoki Asada, "Dense 3D Reconstruction Method Using a Single Pattern for Fast Moving Object", The Twelfth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2009), 2009年10月, Kyoto, Japan

[25] Ryo Furukawa, Hiroshi Kawasaki, Masahiro Ishikawa, Ryusuke Sagawa, Yuya Ohta, Yasushi Yagi, "Dense 3D reconstruction system for fast moving object using single pattern", The Twelfth IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2009) Demo Session, 2009年10月, Kyoto, Japan

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計2 件)

名称: 画像処理装置、画像処理方法およびプログラム

発明者: 古川亮 他3名

権利者: 広島 TLO 他

種類: 特願

番号: 2007-196740

出願年月日: 2007年7月27日

国内外の別: 国内

名称: 画像処理装置、画像処理方法およびプログラム

発明者: 古川亮 他1名

権利者: 広島 TLO 他

種類: 特願

番号: 2007-196741

出願年月日: 2007年7月27日

国内外の別: 国内

○取得状況(計◇件)

名称:

発明者:

権利者:

種類:

番号:

取得年月日:

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 亮 (FURUKAWA RYO)

広島市立大学 情報科学研究科 講師

研究者番号: 50295838

(2) 研究分担者
なし

(3) 連携研究者
なし