# 動物体三次元形状計測システム

=V4: Vision-based Versatile Volume Visualizer=

京都大学 舩冨 卓哉・飯山 将晃・美濃 導彦 山梨大学 豊浦 正広 関西学院大学 角所 考

# 1. 物体の三次元形状計測

昨今、MicrosoftのKinectやAsusのXtion、SoftKineticのDepthSenseなど、色だけでなく奥行きも同時に取得できるカメラが安価に入手でき、手軽に利用できるようになってきた。これらのカメラを用いた研究が急激に増え、物体認識や姿勢推定、ジェスチャ認識、三次元モデリングなど、さまざまな活用方法が提案されている。

我々の研究室では10年以上前から三次元形状復元やモデル処理に関する研究を行っており、自前で計測システムのプロトタイプを構築してきた。徐々に拡張を重ね、現在このシステムでは、同期撮影が可能なカメラ39台を中心として、約30 cm立方の空間内の三次元形状を0.5 mm程度の精度で計測することが可能となっている。本稿では、これまで行ってきた研究と関連付けて、このシステムについて紹介する。

# 2. 三次元形状計測原理

カメラを用いた三次元形状復元に関する研究は幅広く行われており、照度差ステレオ法のような輝度情報に基づく手法や、多視点ステレオのような幾何情報に基づく手法など、さまざまな原理を用いた手法が提案されている。原理に応じて各手法の得失もさまざまである。三次元形状復元技術に関して幅広い研究を行うため、我々のシステムでは幾何情報に基づく手法を中心に複数の三次元形状復元手法が可能となっている。以下にその例を示す。

0917-026X/13/¥500/論文/JCOPY

# 2-1 視差に基づいたさまざまな 三次元形状復元法

複数のカメラで物体を撮影し、カメラ間での視差に 基づいて測距を行うステレオ法がある。この手法では、 物体上で同一の点が異なる視点からどこに見えている か、カメラ間での対応付けを構築する必要がある。近 年、多カメラ間で対応付けを求めるPatch-based Multi-View Stereo法(いなどがよく用いられているが、特に 均一色の物体などでは、カメラ間での対応付けが曖昧 となり、結果として三次元形状復元ができなかったり、 結果が不安定になったりする場合がある。こういった 場合には、レーザモジュールやプロジェクタなどを用 いて物体表面にパターンを投影し、これを手掛かりに 対応付け問題を解くパターン光投影法がよく用いられ る(図1)。この際、パターン光の投影位置・方向な どが既知であれば、カメラは1台でも三次元形状を復 元することができる。パターン光投影法には、スリッ トレーザで物体を走査する光切断法、グレイコードパ

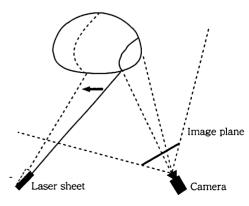


図1 パターン光投影法

ターンを順に照射する空間コード化法(2)、デブルーイ ン系列を利用したパターンを照射することで1枚の画 像から広範囲の形状復元を可能にしたワンショットス キャン法(3)(4)など、さまざまな手法が提案されている。 我々のシステムではこれらの手法による三次元形状復 元を実現している。

# 2-2 カメラ間対応付けの不要な視体積交差法

全く異なるアプローチとして、視差ではなく、物体 のシルエットを用いる手法も提案されている。カメラ で物体を撮影したとき、その投影像はカメラの画像平 面上の領域として得られる。このとき、カメラのレン ズ中心を端点とし、投影像の輪郭上の任意の点を通る 半直線で形成される錐体状の開空間を考えたとき、物 体はこの空間に内接して存在する (図2)。物体を複数 のカメラで観測したとき、各カメラでこの開空間を構 成することができ、これらの積をとることによって物 体の近似形状を得ることができる。この手法を視体積 交差法(5)(6)と呼び、我々のシステムでもこの手法を実 現している。

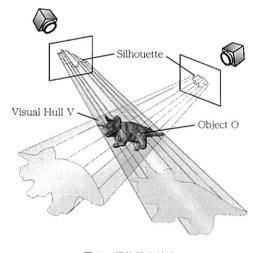


図2 視体積交差法

# 3. 時系列計測データの統合

## 3-1 形状と運動の同時計測による形状統合

パターン光投影法では、物体表面が均一であっても、 凹面も含めて詳細な形状を復元することが可能である という利点がある一方、形状が復元される領域が、パ ターンが投影されている部分に限られるという欠点も ある。そのため、パターン光を照射する場所を変えな がら、色々な部分の形状を計測し、これらを後から統 合するアプローチがとられる。従来は、角度指定が可 能なターンテーブルに計測対象を乗せ、対象を一方向 から計測した後回転させることを繰り返し、360度を 数回に分けて計測したものを回転角度に基づいて再度 統合するという方法が採られることが多かった。しか しこの手法では、ターンテーブルに置きながら計測す るため、接地面など隠ぺいされて計測できない部分が ある。そのため我々のシステムでは、例えば物体を糸 などで宙吊りにし、自由回転している状態で計測する ことで、全周形状を獲得することができる。この際、 ターンテーブルで回転角度を指定する代わりに、物体 の運動状態を獲得する必要がある。そのため本システ ムでは、物体に少数(3~4点)のマーカを貼付し、 その三次元位置を基に運動を計測するモーションキャ プチャの機能も備えており、獲得した運動に基づいて 形状を統合することで全周形状を復元することができ る。また、これらの機能を組み合わせることで、手の ような複雑に形状を変化させる対象を、さまざまな方 向からさまざまな姿勢で計測を行い、これらを統合す ることで形状モデルを獲得する手法も提案している(8)。

# 3-2 視体積の時系列統合

視体積交差法は対象物体のシルエットしか用いない ため、物体表面の反射特性に依らず、安定して三次元 形状を復元することができる。また、同期撮影が可能 な多数のカメラが必要となるが、一瞬で全周形状を獲 得することができるという利点もある。一方、パター ン光投影法と異なり、視体積交差法で得られる形状は 物体領域を含む凸包となるため、粗い形状しか復元で きないという欠点もある。視体積に含まれる物体領域 以外の余分な領域の大小はカメラの台数と配置によっ て決まる。多くの台数のカメラが物体の全方位を囲む ように配置されるとき、余分な領域は少なくなること が期待できる。我々のシステムでは、観測空間を取り 囲むように配置された39台のカメラを備え、十分な 精度で形状を復元することが可能である。また、物体 が剛体である場合、自由回転している状態で計測し、 時系列で得られるシルエットをすべて用いて視体積交 差法を行うことで、仮想的にカメラ台数を増加し、最 小凸包に近い復元形状を得ることができることを示し た(9)。また、対象が多関節剛体とみなせる場合にも、 対象が運動している様子を観測することで、各体節の 形状を獲得する手法を提案している(10)。

# 4. 計測システム - V4: Vision-based Versatile Volume Visualizer

上述したパターン光投影法、視体積交差法、モーシ

ョンキャプチャを備える、我々が構築した全方位動物 体計測装置について紹介する。

4-1 多カメラを用いた全方位同期撮影システム 本システムでは、同期撮影が可能なカメラとして Point Gray Research社製のIEEE1394カメラを利用 している。長期間にわたり、徐々に拡張してきたシス テムであるため、システムを構成しているカメラは Dragonfly, Dragonfly2, Flea, Flea2, Grasshopper といったさまざまな解像度のカメラで構成されている。 これらのうち、Dragonfly、Dragonfly2、Fleaは IEEE1394aのカメラ、Flea2、GrasshopperはIEEE 1394bのカメラである。これらのカメラは、それぞれ が消費する帯域に応じて8台のPCに割り当てられて いる。我々のシステムでは、39台すべてのカメラを接 続した際には7.5 fpsのフレームレートで撮像できる構 成となっているが、目的に応じて、高解像度なIEEE 1394bカメラ8台を1台ずつPCに接続し、30 fpsで撮 像することもできる構成になっている(表1)。PC間 はカメラとは独立したIEEE1394aインターフェース によって接続されており、Point Gray Research社 が提供しているMultiSyncによって同期撮影が可能と なっている。図3にカメラとPCの接続関係を示す。

表1 各カメラのPCへの割り当て

全方位撮影モード		高解像度・ 高フレームレート撮影	
IEEE1394aカメラ5~6台	5セット	IEEE1394b カメラ 1 台	8セット
IEEE1394bカメラ3~4台	3セット		

各PCでは、ある1台のクライアントPCが送出した 撮影開始/終了のパケットを受けて撮影を開始/終了 するサーバプログラムが実行される。サーバプログラ ムは、それぞれのPCに接続されたカメラの撮影を制 御する。撮影終了後に、各カメラから取得された画像 データに埋め込まれたタイムスタンプを参照して同期 関係をチェックする。

カメラの設置は、パイプで図4に示すようなフレームを組み、これに取り付けることで行う。手の大きさ程度の対象物体を想定し、観測範囲をフレーム中央に30 cm立方に設定した。カメラの設置の際に、この観測範囲全体を画角に含めるようにした。また、観測範囲の中心付近に焦点位置がくるようにカメラの焦点距離を調整してある。

また、パターン光投影法を行うためにプロジェクタも設置し、モーションキャプチャを行うために、蛍光マーカを発光させるブラックライトも設置している。

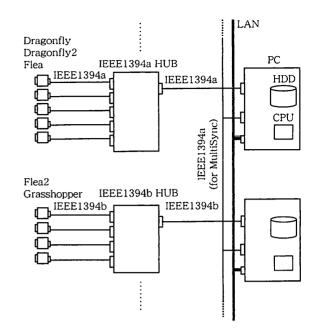


図3 同期撮影システム

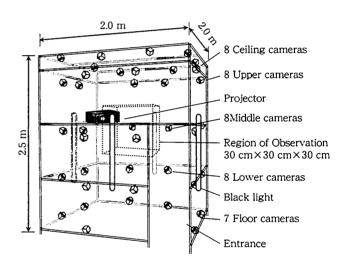


図4 カメラ配置

これは、紫外線光はカメラが感知しないが、蛍光はカメラが感知できることを利用し、パターン光投影法を行うのに適した暗所でもモーションキャプチャを実現するためのものである。

## 4-2 カメラキャリブレーション

三次元復元を行う際には、物体を観測するカメラの 焦点距離や取り付け位置、向きに関する情報が必要と なる。これらの値を収集する過程をカメラキャリブレ ーションと呼ぶが、物体に対して全方位にカメラを設 置する場合、この方法にも工夫が必要となる。

焦点距離や画像上での光軸中心、レンズ歪みなどの 内部パラメータの推定には、Zhangが提案したチェス ボードによるキャリブレーション手法(11)を利用してい る。図4に示したフレームにカメラを設置した後に、 各カメラに対して観測範囲付近で20パターン程度チ ェスボードを撮影し、この画像に基づいてカメラごと に内部パラメータの推定を行う。

カメラの取り付け位置、向きといった外部パラメー タの推定には、Tsaiが提案した弱校正手法(ロ)を用いる。 この手法は全カメラで同一の三次元位置を観測したと きの対応点を多数必要とする。全方位にカメラを設置 した環境で、すべてのカメラから一度に観測可能な対 応点を与えるため、図5に示す点光源発生装置を用い て対応点を与える手法を採用している。装置を暗所で 稼働し、点光源装置を観測範囲内で動かす様子を全力 メラで同期撮影すると、各時刻で1点の対応点を与え ることができる。このような対応点を700~800セッ ト程度収集し、RANSACを用いて全カメラの外部パ ラメータを同時に推定する。

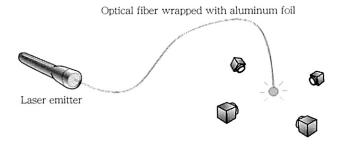


図5 光ファイバを用いた点光源発生装置

# 4-3 撮影データ、形状復元結果例

我々のシステムを用いて、39台のカメラで同期撮影 した画像の例を図6に示す。1つの画像で指定した点 に対応するエピポーラ線を計算し、他カメラの画像上 に表示することができるようになっており、複数の画 像で位置を指定すれば、三次元位置を計測できるよう になっている。

図6で示した、プロジェクタによってデブルーイン 系列のパターンを投影した画像を基にカメラ間での対 応関係を自動的に計算して三次元形状計測した結果と、 モーションキャプチャのために貼付したマーカの三次 元位置を計測した例を図7に示す。

これらの機能により動物体の形状と運動を同時に計 測することができ、さまざまな方向からさまざまな姿 勢で計測した形状と運動を、我々が提案した手法(8)を 用いて統合することで、さまざまな姿勢での全周形状 を表現可能なモデルを獲得することができることを示 すことができた (図8)。

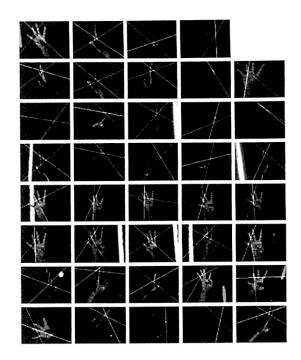


図6 全方位撮影画像中のエピポーラ線



図7 形状と運動の同時計測

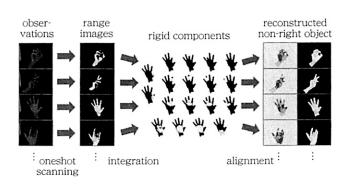
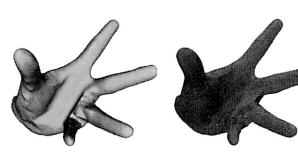


図8 手を対象とした形状と運動の同時計測による形状統合

また、39台のカメラ画像を用いて、視体積交差法に よって復元した形状モデルの例を図9に示す。十分な 台数があるため一瞬の観測から高品質な形状が復元で きているが、掌の凹面部分に余分な領域が残っている ことも確認できる。また、再構成に用いた画像をその ままテクスチャとして貼り付けることもでき、より写 実性の高いモデルを復元することが可能である。



Reconstructed shape

Model with Texture mapping

図9 視体積交差法による復元結果

# 5. おわりに:まとめ

本稿では、動物体の三次元形状を計測するために我 々が構築したシステムについて紹介した。本システム では同期撮影が可能な39台のカメラを用いることで、 パターン光投影法、視体積交差法による形状計測法、 およびマーカベースのモーションキャプチャを行うこ とができるシステムとなっており、形状計測と運動計 測の連携による動物体の形状モデリングの手法につい て研究してきた。このほかにも、照明を変化させなが ら物体表面の法線方向を計測する照度差ステレオ法、 カメラ画像を形状モデルに貼り付け、よりリアルな表 現が可能となるテクスチャマッピングについての研究 もこの装置を用いて行った。

#### 〈参考文献〉

- (1) Y. Furukawa, J. Ponce: "Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.32, No.8, pp.1362-1376 (2010)
- (2) 佐藤・井口: "空間コード化による距離画像入力"、電子情報通信学 会論文誌、Vol.J68-D、No.3、pp.369-375 (1985)
- (3) A. Ulusoy, F. Calakli, G. Taubin: "One-shot scanningusing de bruijn spaced grids", IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, pp.1786-1792 (2009)
- (4) H. Kawasaki, R. Furukawa, R. Sagawa, Y. Yagi: "Dynamicscene shape reconstruction using a single structuredlight pattern", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.1-7 (2008)
- (5) W. N. Martin, and J. K. Aggarwal: "Volumetric description of ob-

- jects from multiple views", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.5, No.2, pp.150-158 (1983)
- (6) A. Laurentini: "How far 3d shapes can be understood from 2d silhouettes", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.17, No.2, pp.188-195 (1995)
- (7) Y. Furukawa, J. Ponce: "Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis", IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.32, Issue 8, pp.1362-1376 (2010)
- (8) T. Funatomi, H. Akuzawa, M. Iiyama, M. Minoh: "Pinhole-to-projection pyramid subtraction for reconstructing non-rigid objects from range images", 2012 Second Joint 3DIM/3DPVT Conference; 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization & Transmission, pp.254-261 (2012)
- (9) 豊浦・飯山・角所・美濃: "視体積交差法における時系列画像の統合 による三次元復元形状の再現性の向上"、電子情報通信学会論文誌、 Vol.88-D-II, No.8, pp.1549-1563 (2005)
- (10) 飯山・角所・美濃: "時系列視体積からの多関節物体の体節形状と 姿勢の同時推定法"、電子情報通信学会論文誌、Vol.J89-D、No.6、 pp.1379-1390 (2006)
- (11) Z. Zhang: "A flexible new technique for camera calibration", IEEETrans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.22, No.11, pp.1330-1334 (2000)
- (12) R. Y. Tsai: "An efficient and accurate camera calibration technique for 3dmachine vision", IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.364-374 (1986)

## 【筆者紹介】-

## 舩冨卓哉

京都大学 学術情報メディアセンター 助教 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

TEL: 075-753-9066 FAX: 075-753-9056 E-mail: funatomi@media.kyoto-u.ac.jp

### 飯山将晃

京都大学 大学院 経済学研究科 准教授 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL/FAX: 075-753-3424

E-mail: iiyama@econ.kyoto-u.ac.jp

## 美濃導彦

京都大学 学術情報メディアセンター 教授 〒606-8501 京都市左京区吉田本町 TEL: 075-753-9060 FAX: 075-753-9056

E-mail: minoh@media.kyoto-u.ac.jp

#### 豊浦正広

山梨大学 大学院 医学工学総合研究部 助教 〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11

TEL/FAX: 055-220-8494

E-mail: mtoyoura@yamanashi.ac.jp

## 角所 考

関西学院大学 理工学部 人間システム工学科 教授

〒669-1337 兵庫県三田市学園2-1 E-mail: kakusho@kwansei.ac.jp