



Yasutaka Furukawa and Jean Ponce :

Accurate, Dense, and Robust Multi-View Stereopsis

IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol.32, Issue: 8 (Aug. 2010)

身近な三次元計測技術

本会に寄稿する機会をいただいたので、次号の著者と相談の上、三次元計測技術の面白い論文について連載で紹介したいと思う。本稿で紹介するFurukawaらの論文は、多方向の視点から撮影した画像群(多視点画像)を用いて三次元形状の復元を行う際の、マイルストーン的な論文である。詳細に入る前に、身近な三次元計測技術について触れておこう。

三次元計測技術はさまざまに活用されている。たとえば車に搭載されている衝突防止センサは、自転車から人や車までの奥行きを計測することで接触の危険性を検知し、自転車にブレーキをかけることができる。ほかにもNintendo 3DSや最近のスマートフォンには外側に2つや3つのカメラが付いており、これらを用いて奥行き情報を持った3Dムービーの撮影ができる。また、大きな三次元計測システムで人の形状を計測してデータ化し、このデータを3Dプリントすることで人のリアルなフィギュアを造形するサービスが登場している。このように三次元計測技術は、対象シーンの空間的な理解や表現、対象物の形状データ取得をする際に広く役立っている。

上記に示した活用事例は、三次元計測センサを用いることで実現できる。三次元計測センサで用いられる計測アルゴリズムはさまざまであるが、三角測量の原理を用いて計測をする場合が多い。三角測量とは、長さが分かっている基準とする線分の両端から、目的の点までの角度を測定して、幾何学を用いて測量する測量方法である(図-1)。この原理をカ

メラに応用したセンサが、ステレオカメラである。一般にステレオカメラは2台のカメラで構成され、カメラ間の対応点(図-1のカメラA、Bの画像上の青丸)を求めて、この点の奥行きを算出する。前述した衝突防止センサの中には、このステレオカメラを採用した製品があり、現在も広く普及している。また、Nintendo 3DSに内蔵されているカメラもこのタイプのセンサである。

ステレオカメラの拡張版として、カメラの台数を数十台~数百台まで増やした多視点カメラシステムという計測装置がある(図-2)。多視点カメラシステムでは、多くの異なる視点から同期撮影されたカメラ画像群を多視点画像として得ることができる。前述した人の形状を計測してデータ化するというアプリケーションは、このシステムで得た多視点画像を用いて実現しているケースが多い。多視点カメラシステムには静止画像・動画像を入手するシステム

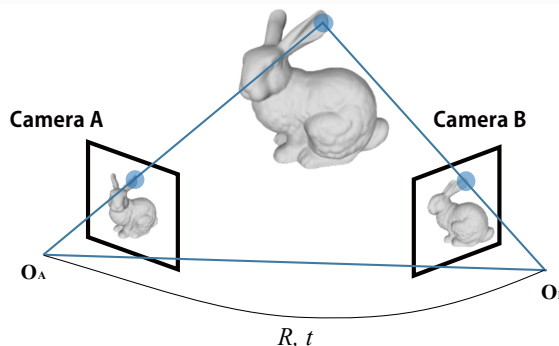


図-1 三角測量のイメージ図。ウサギ(Stanford Bunny)の左耳(青丸部)が計測したい目的の点とする。カメラA、Bどちらも目的の点が撮影されている。目的の点と、それぞれのカメラの光学中心 O_A 、 O_B とを繋ぐと、三角形が構成される。つまり、2つのカメラの光学中心を繋ぐ線分の両端から目的の点までの角度が分かる状態となる。この線分の長さが分かれば、各カメラから目的の点までの奥行きが分かる

があり、中には部屋やスタジアムの天井などに多数のカメラを配置し、広大かつ立体的な多視点画像を入手できるシステムもある。ここでは図-2のように、対象物を中心に据えて撮影された多視点画像を用いた代表的な研究事例について考える。

多視点画像を用いた三次元計測の研究

多視点画像を用いた代表的な手法に視体積交差法がある。この手法は、多視点画像それぞれに写った対象物の領域をシルエットと考え、それらシルエットを満たす三次元領域を対象物の近似形状とする手法である。ある視点から見たシルエットを元に、対象物体が存在し得る部分空間を求めると、カメラの位置を頂点、その視点から見た対象物体のシルエットを断面とする錐体となる。これを視体積と呼ぶ。この視体積を各視点ごとに求め、それらの交差する部分を抜き出す（視体積交差）ことにより、三次元形状（Visual Hull）を求めることができる。この手法の特徴は、視点の数が多ければ多いほど、対象物体と近似形状の差が小さくなることである。たとえば、上下左右、さまざまな視点から得られるシルエットを使用した場合は、近似形状がおおむね正確に得られる。ただし、同じような視点からのシルエットばかり利用すると、それらの視点に偏った近似形状になってしまう。また、凹んだ部分の形状はシルエットに現れない情報なので復元できない。このよ



図-2 多視点カメラシステムのイメージ図。対象物（花）を囲むように配置された例

う

なデメリットがある一方で、この手法のメリットは他の既存手法に比べロバストな復元ができることである。このため、これまでこの手法をベースとした数多くの研究が発表されているが、精度良く形状復元を行うことは困難であった。

この研究課題において劇的な精度向上を見せた、1つのセンセーショナルな研究を Furukawa らが発表した（図-3、図-4）。彼らの手法は、対象物の特徴点（対象物上の一意に特定できる特徴的な箇所、人の顔で言えば口やホクロのような部位）を用いて対応点を取得する。この点の奥行きを三角測量の原理で求め、初期形状として粗く分布したパッチ（四角形ポリゴン）を取得する。そして、各パッチにおいて、周囲のパッチ同士の対応を検出してパッチを増やしていき（Expansion）、誤対応により誤った奥行きを持つと推定されたパッチの除去を行う（Filtering）。このように Expansion と Filtering を繰り返すことで、たくさんのパッチからなるパッチ形状を取得する。最後に隙間なく形状を表現するために、視体積交差法で得たポリゴン形状をパッチ形状に重ね合わせることで、最終的なポリゴンメッ



図-3 多視点画像を用いたフィギュア（roman）の形状復元結果例。左：視体積交差法の復元結果、中：Furukawa らの復元結果、右：Furukawa らの結果に色付けした結果。視体積交差法に比べ、精度の高い凹凸形状の復元がなされている（[Furukawa, et al., TPAMI'10] より引用）



図-4 多視点画像を用いた人の形状復元結果例。高精度に顔、全身のデータを取得できている（[Furukawa, et al., TPAMI'10] より引用）

シュ形状を得る。この手法は、当時、特に高い精度を示していた手法であり、現在も多視点画像からの形状復元の研究のマイルストーンとされている。

より精緻な三次元計測を目指して

三次元計測技術はさまざまなアプリケーションの実現に応用されており、特に多視点画像を用いた研究を活用すると精度良く対象物形状をデータ化できるため、人の計測データからリアルな人のフィギュアを造形できる事例を紹介した。

しかし、多視点画像を用いた研究にもまだ計測精度の課題がある。まず、対象物の表面に見た目にかかる模様や傷などの特徴がない場合は計測が難しい。たとえば、特徴的な個所がない真っ白なボールは精度良く形状復元することが難しい。これは、多視点画像を用いた多くの手法が特徴点を用いた計測法であるためである。

またほかに、復元された対象物の3Dデータ表面を拡大してみると、実物にはない凹凸形状が形成されてしまう。これはデジタルカメラの画素に基づく

点計測の分解能の問題による。無限の解像度を持つデジタルカメラであれば、精度の高い計測が可能だが、実際にはそのようなカメラを作ることは現実的ではない。

これらの課題に対し、より精緻な計測を実現するために、カメラ以外に光を用いる手法が登場している。カメラとは別の位置・姿勢から模様や色などをのせた光を対象物に当てることで、対象物の形状に関する物理情報を浮かび上がらせる。この物理情報をカメラで観測することで精緻な計測を可能とする。光を用いる代表的な手法である、対象物の陰影情報から形状を推定する照度差ステレオ法について、次号で紹介する。

(2020年6月9日受付)

.....
住吉信一 ssumiyoshi@d-itlab.co.jp

2010年北海道大学大学院修士課程修了。同年(株)リコー中央研究所入社。2016年(株)デンソーアイティラボラトリ入社。コンピュータビジョンの研究、特にステレオカメラ、プロジェクタ・カメラを用いた三次元計測の研究に従事。PRMU研究会専門委員(2018～)。精密工学会大規模環境の三次元計測と認識・モデル化技術専門委員(2015～)。

