

# 写真測量とコンピュータビジョンの最近の動向 -アンモナイトの三次元化に関して-

藤井幸泰

深田地質研究所

## Recent trend about Photogrammetry and Computer Vision: 3D visualization from multiple 2D images of Ammonite Fossil

FUJII Yukiyasu

Fukada Geological Institute

要旨：アンモナイト化石の三次元モデル化に関して、写真測量と Structure from Motion (SfM) の両技術の適用を試みた。どちらでも三次元モデル化は可能であるが、従来の写真測量は標定点の設置と測量など煩わしい作業も多い。近年のコンピュータビジョンの発展から生まれた SfM はとりあえず写真撮影すれば三次元モデルができてしまう。今後も技術の進展を見守りつつ、地質対象物への適用を試みていきたい。

キーワード：デジタルカメラ、画像処理、Structure from Motion、バンドル調整

Abstract: Photogrammetry and Structure from Motion (SfM), which is one of computer vision techniques, were applied to make three-dimensional (3-D) model of an ammonite fossil. Both techniques are useful to make 3-D models. On the one hand, it is needed to put control points and measure them for photogrammetry. On the other hand, it is very easy for SfM to make a 3-D model from multiple photo images. The technique related to photogrammetry and computer vision will be progressed in the future. It would be applied to geo-objects.

Keywords: Digital Camera, Image Analysis, Structure from Motion, Bundle Adjustment

### 1. はじめに

我々が普段生活している空間は三次元である。一方、現在読者が目にしている紙面は二次元である。同様に一枚の写真が持つ情報も二次元である。我々はどうやって対象物の三次元情報を取得しているのか？ まずは対象物の遠近感を感じることができる。手前にあるものは大きく、遠くにあるものは小さく見られるし、遠くにある物は手前に存在する物に覆い隠される場合もある。しかしこれらは相対的な遠近感を感じられるだけある。

我々がある程度正確な奥行きを感じられるのは、目が二つあるためである。左右両眼の間隔は平均 65 mm 程度と言われている (EIZO 株式会社ホームページ)。それぞれの眼球に写りこむ映像は、それぞれ若干の違いを持っており、これを視差と呼ぶ。視差から対象物の奥行きを感じられる (立体視できる) わけである。ライオンなどの捕食者の両眼が、顔の前方に付いているのにお気づきであろう。獲物を追うためには、獲物までの正確な距離を把握する必要がある。一方の草食動物は顔の側方にそれぞれの眼球を配置している。立体視で

きる範囲を犠牲にしても二次元の視覚の範囲を広げ、いち早く捕食者の接近に気付くためである。化石時代に注目しても面白いことが分かる。古生代に反映した三葉虫は複眼であるが左右一対の眼を持っており、物を立体に見ていた可能性が高い。

さて同様な原理を用いて、二枚一組の立体写真から、対象物の正確な三次元情報を取得する技術がある。立体写真測量である。写真測量は航空写真から地形図を作製する技術として発展してきた。対象物の三次元情報を取得する際、撮影時のカメラ位置と方向の情報が必要である。これは対象物上に設置した標定点などを目印として、光線がレンズ中心で収束する原理を用いて計算することができる（水尾, 1996）。このような原理を逆に応用すれば、立体写真から現在の位置を計算することも可能である。

立体写真から対象物の三次元情報を取得する技術は、コンピュータビジョンにおける形状復元問題の1解法である。一方の立体写真撮影時のカメラ位置の計算は、ロボットビジョンにおける自己位置推定手法と捉えることもできる（満上, 2011）。

地形図作成の航空写真測量技術は、レーザ測量技術と衛星測位システム及び慣性測位システムの発展により、その役割を航空レーザ測量に譲った。しかし上述のとおり、コンピュータビジョン関連で同様な技術が格段に進んでおり、写真測量を含めた画像計測の進展は目が離せないものである。

この研究はアンモナイト化石（*Craspedites nodiger*）の三次元映像化について、写真測量および、コンピュータビジョンから発展してきた Structure from Motion (SfM; 後に詳述) の両技術を適用した事例について報告する。

## 2. 写真測量によるアンモナイトの三次元化

### 2.1 写真測量とは？

写真測量とは対象物を写真像として記録し、これを用いて対象物の測定、判読、調査を行う技術である（水尾, 1996）。もともと平板測量では困難な地域や広範囲にわたる地図作成に伴い発達した技術である。地図作成に利用するのは空中写真が中心であり、またこの場合は複数の空中写真（各写真は二次元）から地形図（三次元モデル）を構築する技術が主体となる。

写真測量の歴史は、19世紀中期の写真発明と測量用カメラの開発、および19世紀後期の飛行機の発達と共に歩んできた（詳しくはブラハト・ブルクハルトを参照）。20世紀に入ってから空中写真測量技術は、二度の世界大戦を通して飛躍的な発展を得た。ところで当時の精密図化機は完全に機械的な構造であった。戦後はコンピュータの登場により、図化機の一部であるステレオコンパレータや製図機をコンピュータとドッキングさせて、計算部分はコンピュータに任せる解析図化機が1970年代に登場した。1990年代以降のコンピュータとデジタルカメラの飛躍的な技術発展に伴い、写真像の取得から図化作業まで全ての作業をデジタル形式で行う、デジタル写真測量技術が登場した。さらに2000年以降のデジタルカメラとコンピュータの低価格化に伴い、これまで地図作成などの特殊な専門業種のみ利用されてきた写真測量機器が、他分野でも入手しやすいものとなった。これは写真測量機器が入手しやすくなっただけでなく、写真測量技術が手軽になったわけではない。ちょうど同時期には、レーザ測距装置とGNSS（衛星測位システム）とIMU（慣性計測装置）を利用した航空レーザ測量技術が大幅に発展し、地図作製の役割が空中写真測量から航空レーザ計測に代

わってしまった。

## 2.2 アンモナイトの三次元化

写真測量作業の流れを図1に示す。

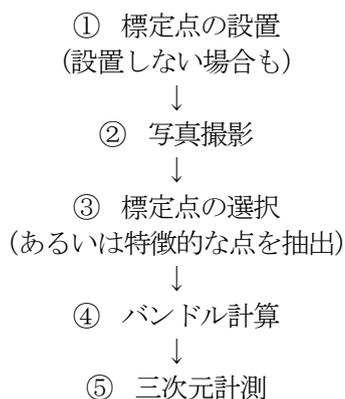


図1 写真測量作業チャート

一対の立体写真で撮影できる部分は、化石の前面のみである(図2)。したがって化石の三次元映像化も前面のみしか行うことができない。そこで側面や背面からも同様に立体写真を撮影し、複数の三次元モデルを作成した上で、それらの統合を試みた(藤井・堀, 2009)。

複数モデルの統合には、それぞれのモデルの座標情報が統一されている必要がある。写真測量は撮影時の左右カメラの位置と方向の情報が基本となる。さらにこの情報は標定点から計算しているため、これらに統一した座標情報を与えれば、複数モデルの統合が可能となる。そこで方眼紙の上に化石を設置し、線交差部の適切な場所に、長さが既知の釘を6本立て(図2)、その先端を①の標定点とした。前面・背面・側面・上面と、それぞれの方向からの撮影において、異なる場所に適切に釘を配置して②立体写真撮影を行った。図2に示す様に、立体写真を合計6組撮影し、以下の解析を行った。

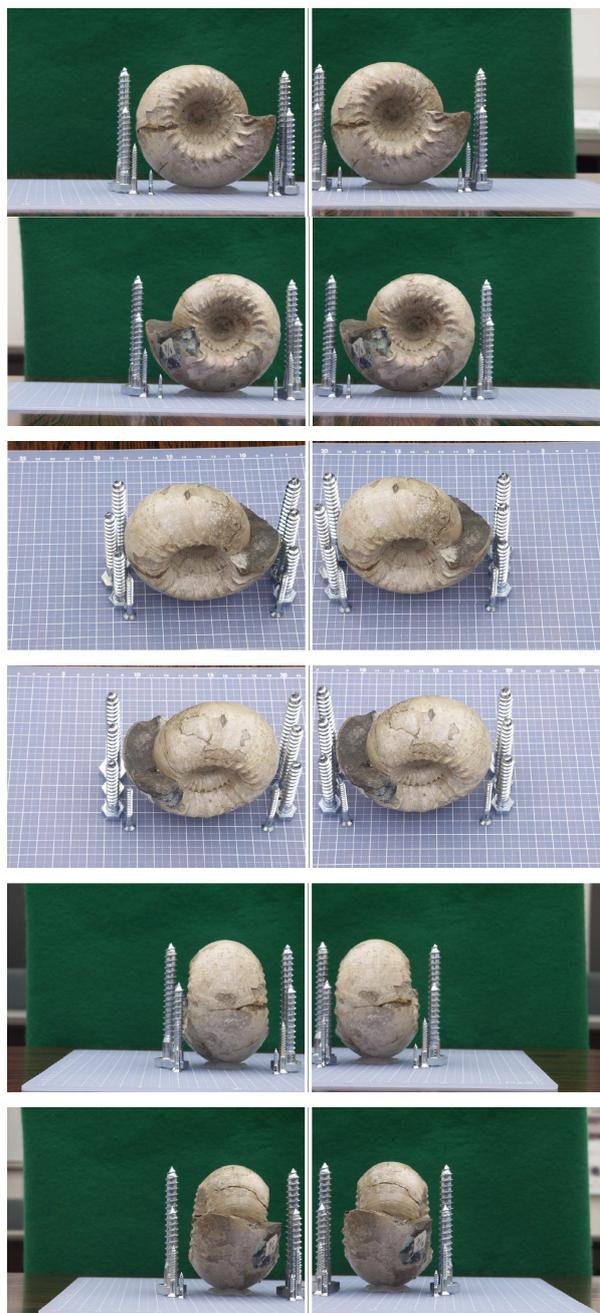


図2 アンモナイト化石の立体写真群(正面)

アンモナイトの立体写真を写真測量ソフトに取り込み、方眼紙上に設置した釘の先を③標定点として選択する。左右カメラの位置と方向は、標定点から最小二乗法を用いて④バンドル計算される。計算時の誤差はおよそ1mmとなった。左右カメラの位置と方向が判明すれば、両写真の視差

差より⑤三次元計測が可能となる。計測した三次元点群を繋ぎ合わせて三角形群 (Triangle Irregular Network) 表現した例を図3に、さらにテクスチャーとして写真を貼り付けた例を図4に示す。

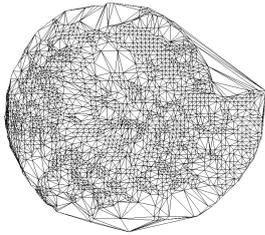


図3 三次元モデル



図4 テクスチャーマッピング

さらに複数モデルを統合したテクスチャーマッピングの鳥瞰図を図5に示す。このモデルは、化石の裏側を除く任意の視点からの閲覧が可能である。



図5 複数の三次元モデルを統合した結果

### 3. SfMによるアンモナイトの三次元化

#### 3.1 Structure from Motion とは

コンピュータビジョンに関する技術は、近年ま

れにみる発展を遂げている。その中で登場してきた写真測量に関連した技術に、Structure from Motion (SfM) がある。SfM とは、あるシーンをカメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、そのシーンの3次元形状とカメラの位置を同時に復元する手法である (満上, 2011)。前節の説明では、標定点を撮影前に設置して、これを写真に写しこみ、写真測量時に解析者が手動で選択する必要があった。しかし SIFT (Scale-Invariant Feature Transform) や SURF (Speeded-Up Robust Features) などのオペレータが提案され、このような標定点の認識と選択を、コンピュータ上にて自動で行えるようになった (満上, 2011)。しかも写真の順番関係なし、ズームを使って焦点距離変化させても問題なしである。これはデジタル画像に埋め込まれた Exif (Exchangeable image file format) の情報を利用している。

#### 3.2 アンモナイトの三次元化

図1に写真測量作業の流れを示した。現場では①標定点の設置と②写真撮影が必要であるが、絶対標定が不要であれば①の作業は不要である。また室内では③標定点の手動選択、④バンドル計算 (カメラ位置の復元)、⑤三次元計測といった流れで三次元モデルを作成できる。このうち③と④の作業をコンピュータが自動で行ってくれるのが (Snavely et al., 2007), SfM と写真測量の違いである。すなわち対象物の全域を、重複するように複数の写真で撮影し、これをコンピュータに読み込んで解析を行うだけで、三次元点群がほぼ自動で作成できる技術である。なおここでは絶対標定を考慮していないので、標定点は設置していない。また③標定点の選択はコンピューターが自動的に特徴点を抽出してそれぞれ写真の特徴点のマッチングを行える。



図6 アンモナイト化石の写真群

図6にSfM解析を行うため、改めて撮影を行ったアンモナイト化石の写真群を示す。図2に示した化石と同じものを撮影した。これをVisual SFMに読み込み、一連の解析である図1中の③と④と⑤の作業を、ボタンを押すだけで実行できる。具体的には画像同士の同じ位置を合わせるマッチングを行い、マッチングされた点(標定点に当たる)からバンドル調整による撮影時のカメラ位置と方向の計算が行われ、カメラと標定点の三次元形状を復元することができる。この結果を図7に示す。APSサイズのセンサーを持つデジタル一眼レフカメラに、焦点距離90mmのレンズを装着して撮影したため、アンモナイトからかなり離れた位置にカメラ位置が表示されているが、図6に対応する撮影時のカメラ位置に対応している。



図7 Visual SFMでの解析結果。  
中心がアンモナイトで、周りを囲んでいるのがカメラ。

Visual SFMでは、カメラ位置の復元と、標定点としても利用したマッチングされた疎な三次元点群のみを計算出来る。さらに密な三次元点群の発生には、他のソフトを利用する必要がある。密な点群を発生できるフリーのソフトウェアもいくつか存在するが、ここではSUREと呼ばれるソフト

ウェアを利用した。SURE を用いて発生させた密な三次元点群の結果を図 8 に示す。図 8 は三次元点群のそれぞれに色情報が入っており、密な点群を色と共に表示している。従って図 5 とは三次元データが全く異なる。このような密なデータと撮影位置を復元した写真群(図 6)を用いて、MeshLab 等の解析ソフトで三次元モデル(面)を作成して写真をテクスチャーとして貼り付けることも可能である。

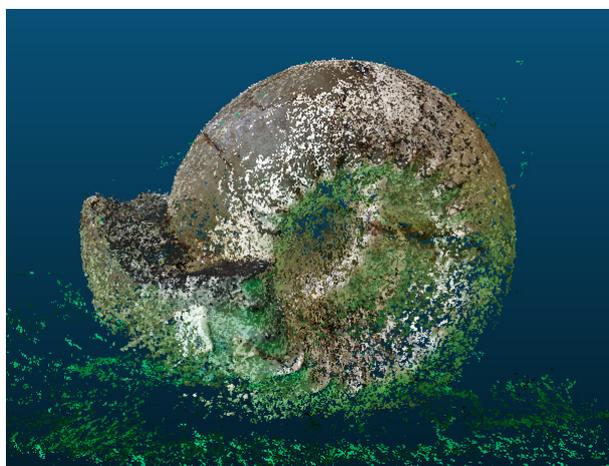


図 8 Visual SFM と SURE での解析結果

#### 4. おわりに

地上測量用レーザスキャナの値段がどんどん低下した数年前までは、写真測量を含む三次元画像計測は、衰退していく技術であろうと思われた。しかしながらコンピュータビジョン技術から発展した SfM の登場により、更に利用しやすい画像計測技術となった。パーソナルコンピュータとデジタルカメラの普及・低価格化により、コストパフォーマンスの高い画像計測技術が、レーザスキャナ以上に利用しやすい技術となった感がある。レーザ計測および画像計測が今後もどんな発展を遂げていくのか、ますます楽しみである。著者は画

像計測自体の研究者ではない。これを地盤や地質の問題に適用する研究者である。今後も最新の技術に注視しながら、実際の問題への適用を試みていきたい。

#### 謝辞

写真測量を用いたアンモナイトの三次元化は、約 10 年前に防災技術株式会社で、ステレオアイと呼ばれるソフトを利用して行った。社長の堀伸三郎氏に御礼申し上げたい。また SfM に関しては、Changchang Wu 博士作成の Visual SFM を、また密な点群発生には、Stuttgart 大学 Institute for Photogrammetry の Mathias Rothermel と Konrad Wenzel 氏による SURE を利用した。紙面を利用して感謝申し上げます。

#### 参考文献

- テオドール J. ブラハト・ルドルフ ブルクハルト (1998) : 写真測量の歴史, 日本写真測量学会誌, 社団法人日本写真測量学会, 201p.
- EIZO 株式会社ホームページ [http://www.eizo.co.jp/products/id/fdf2301\\_3d/](http://www.eizo.co.jp/products/id/fdf2301_3d/), 2014/8/7 確認.
- 藤井幸泰・堀伸三郎 (2009) : デジタル写真測量を用いたアンモナイト化石の三次元映像化の試み, 情報地質, 20, 116-117.
- 満上育久 (2011) : 私の研究開発ツール Bundler: Structure from Motion for Unordered Image Collections, 映像情報メディア学会誌, 65, 4, 479~482.
- 水尾藤久 (1996) : 教程写真測量, 山海堂, 272 p.
- Snavely N., Seltz, S. and Szeliski, R (2007): Modeling the World from Internet Photo Collections, International Journal of Computer Vision, DOI 10.1007/s11263-007-0107-3.