

デジタルカメラを用いた形状計測システムの開発

四国ポリテックカレッジ 秋本 圭一・大野 崇浩
 (四国職業能力開発大学校)

1. はじめに

デジタルカメラが高性能化・低廉化し、高精細のデジタル画像が容易に取得できるようになった。画像にはさまざまな情報が含まれている。われわれは複数の画像から3次元座標に関する情報を取り出し、対象物の寸法形状計測に応用する方法を考えている。

昔からよく使われる方法はステレオ写真である。すなわち2枚の平行撮影された写真の対応点から、対象物までの距離を求める。原理的には明瞭であるが、実用上は問題が多い。

そこでわれわれは、任意の位置から自由に撮影した画像を用いて対象物までの距離を求めることのできる方法を目標にした。技術的なポイントは次の3点である。

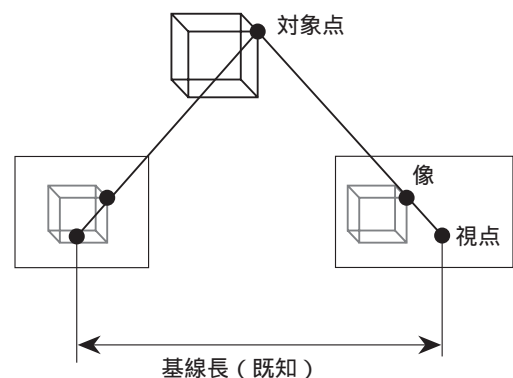
- (1) 写真の撮影位置・姿勢を求める方法
- (2) 複数写真上の対応点の探索方法
- (3) レンズひずみの校正方法

本報告では(1)(2)を中心に述べ、(3)については考え方だけを示す。最後に実験結果を示す。

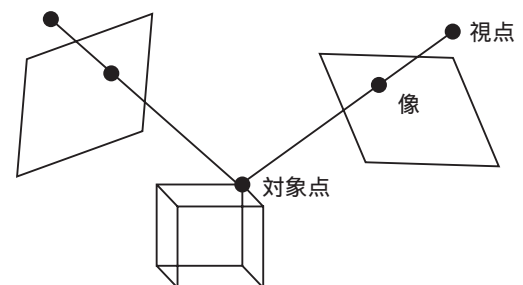
2. 手法

2.1 ステレオ写真

基本は図1aに示すようなステレオ写真である。すなわち2枚の写真上の対応点を見つけ、像とレンズ中心を通る光線を前方に延長する。2本の光線の交点が求める点の位置である。この操作は前方交会



(a) 平行撮影(ステレオ画像)による計測



(b) 任意の姿勢からの写真による計測

図1 手法の概要

と呼ばれている。本課題では平行撮影という制約を取り払い、図1bのように「おおむね平行な」任意の場所・姿勢で写した2枚の写真から前方交会することを目標にした。なぜならステレオ撮影では原理上2台のカメラを棒の両端に、光軸をぴったり平行に調整して固定しなければならない。またはそれと同様の効果を得るよう、1台のカメラを注意を払いながら平行移動して撮影する必要があるからである。

平行撮影でないときの問題は、撮影した写真の位置と姿勢を、写真画像からどのようにして取得する

かである。この問題は外部標定問題と呼ばれている。

2.2 外部標定の方法

例えば自宅の写真を見せられたとき，われわれはその写真が，どちらの方向から何メートルくらい離れて撮られたのかわかる。これをコンピュータにやらせるにはどうすればよいかである。

この問題は古くから写真測量の分野で研究されていて，多くの解法が見つかっている。今回は最も一般的なDLT (Direct Linear Transformation) 法¹⁾を修正して用いることにした。この方法では，座標既知の点の像が6個以上あれば，連立方程式を解いてその写真の撮影位置・姿勢が得られる。以下この方法を説明する(図2参照)。

対象点Pの空間座標を (X, Y, Z) ，カメラ視点Oの座標を (X_0, Y_0, Z_0) ，カメラ光軸の回転行列を $M = (m_{ij})$ ($i, j=1, 2, 3$)，写真上の像pの座標 (x, y) ，レンズ焦点距離を c とすると，これらの関係は次の共線条件式¹で表される。

$$x = -c \cdot \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1a)$$

$$y = -c \cdot \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \quad (1b)$$

ここで

$$L = -(m_{31}X_0 + m_{32}Y_0 + m_{33}Z_0) \quad (2)$$

とにおいて1をLで割り，適当に変数を置き換えると次の式を得る。

$$u = \frac{L_1X + L_2Y + L_3Z + L_4}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (3a)$$

$$v = \frac{L_5X + L_6Y + L_7Z + L_8}{L_9X + L_{10}Y + L_{11}Z + 1} \quad (3b)$$

これを行列形式で書いて

$$\begin{bmatrix} X & Y & Z & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -uX & -uY & -uZ \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & 1 & -vX & -vY & -vZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ M \\ L_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} \quad (4)$$

となる。ここで既知数は X, Y, Z, u, v であり未知数は $L_1 \sim L_{11}$ の11個である。1つの像から2つの式が得られ

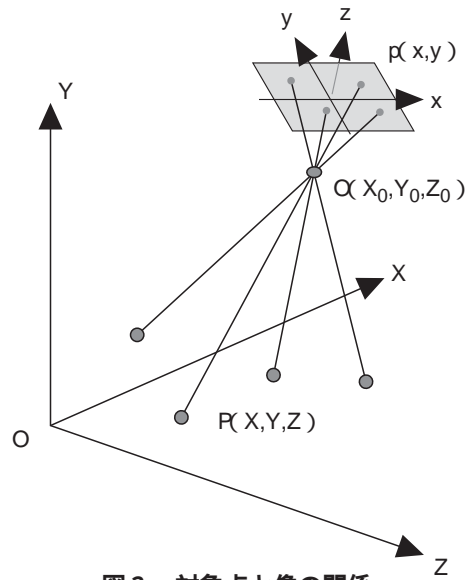


図2 対象点と像の関係

るので6点あれば未知数が求まる。求まったLから，最終的に求めたい撮影位置 (X_0, Y_0, Z_0) および姿勢 (α, β, γ) を算出することができる。

もともとのDLT法はこの6個に加え c を含むカメラパラメータも未知数として扱っている。われわれは校正済みカメラの使用を前提とするので， c などは既知数として計算している。

次に具体的方法を述べる。われわれは板に16個のターゲット(白い円形のシート)を貼り，その位置をあらかじめ計測したもの(以下基準板と呼ぶ)を用いた。後に示す図4の写真中央下部に写っているのがそれである。

16個も貼った理由は，経験上DLTの解はノイズに敏感という意味で不安定であり，冗長性が必要だったからである。また基準板はほぼ平面だから，式1~4をそのまま適用したのでは連立方程式4の係数行列にランク落ちが生じ，解けない。そこで実際には1~4を二次元化して計算している。

2枚の写真の外部標定が求めれば，対応点の像を前方交会して求める点の位置が得られる。つぎの問題は両写真間の対応点をどうやって見つけるかである。

2.3 対応点の探索

2枚の写真における対応点を発見する問題はステレオマッチング問題²⁾と呼ばれ，多くの研究者が古

くから取り組んでいるが、まだ定着した方法はない。その困難さは主として、対応づけの不定性（同じ部分でも、ちょっとした光の具合で見え方が違う）およびオクルージョン（一方からは見えるが他方からは見えない部分）の発生である³⁾。

2枚の写真に対して、全領域にわたって全自動で対応点が検出できるに越したことはないが、現実的には無理だし、その必要もない。なぜならわれわれが普通、実際の問題において知りたいのは、1つの物体の寸法や体積、または2つの物体間の距離など、いくつかの点の座標を用いて計算される二次情報だからである。したがって、必要なのは対象物の形状のうち、二次情報計算のための限られた点の座標でよい場合が多いと考えられる。よって当面は対応点を作業者が目視で発見し、マウスをクリックして画面上の点を指定することにした。ただし、以下に述べるような支援機能を工夫することにした。

1枚目の写真の特徴点（例えば建物の写真であれば窓枠の隅など）をクリックする。つぎに2枚目の写真の対応点をクリックする。このとき、1枚目の選択点と全く同じ点を指定するのは神経を使う作業である。しかもこの際の誤差が直接計測精度に影響する。そこで2枚目の点をクリックしたとき、その近傍を自動的に探索し、1枚目のクリック点と最も良く対応する位置を自動的に発見するようにした。要するに1枚目の写真でクリックした点と最もよく似た部分を発見するということである。

対応点検出には相関法を用いた⁴⁾。まず測定者が写真1上の特徴点をクリックすると、その点Aを中心に $n \times n$ 画素の正方領域Sを取り出し、記憶する。次に写真2の対応点を作業者がクリックする。クリックされた点Bを中心にN画素×M画素の探索範囲Rを設定する。そしてこの探索範囲内で参照画像Sを動かして、R内の対応範囲との相関係数を計算する。最も高い相関係数を与えたR内の点を、Aの対応点として採用する。

画像どうしの相関を取るときには、その枠の大きさの決定が問題である。それが大きすぎると明確なピークが現れず、精度が悪くなる。小さすぎると対応点候補が多数現れ、誤対応の機会が増える。最適

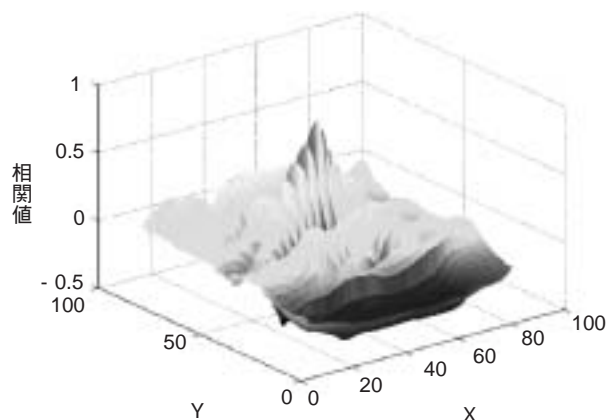


図3 相関グラフ

な枠寸法の決定は、画像そのもの（テクスチャ）に依存するので難しい問題である。ここではこの問題を避け、常に一定の枠（ 20×20 画素）に固定した。これは使用するカメラの解像度にも関係するので、ある程度の自動化（例えば画素数が2倍になれば枠の大きさを半分にするなど）は不可欠である。今後の課題である。相関計算結果の例を図3に示す。

画像データからはR、G、Bの3つの色の明度が個別に得られる。計算ではそれぞれの色について相関を取り、そこから得られた3つの相関係数の平均値を全体の相関係数とした。

2.4 カメラの校正

以上のような操作を行うときの前提として、カメラの校正がある。すなわち、今のようにカメラを計測器として使う場合には、カメラ自体の特性（レンズ焦点距離、レンズひずみ、光軸中心のずれなど）を正確に把握しておき、これらを補正しなければならない。

最も大きい要因はレンズひずみである。これはファインダーをのぞいたとき、画面の端に写る線が湾曲していることでわかる。特に一般向けのデジタルカメラは焦点距離6～7mmの広角レンズが使われているので、画面周辺部のひずみ量は100画素を超える。

カメラの校正方法にはさまざまな方法があるが、今回の実験ではターゲット場を多重撮影する方法⁵⁾を用いた。



図4 計測対象

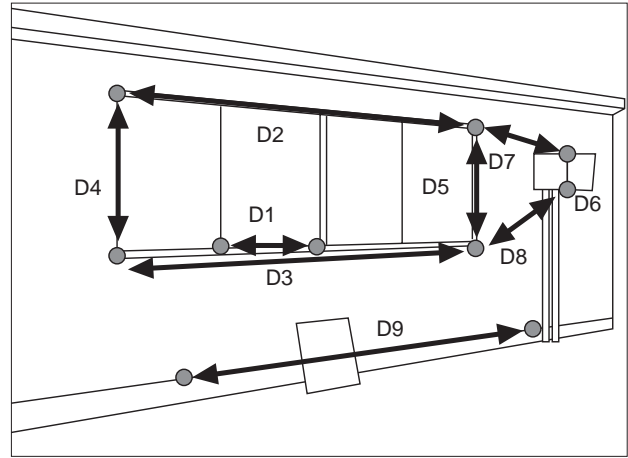


図5 測定した場所

3. 実験結果

まとめると、計測の手順は次のようになる。

- (1) 対象物の近傍に基準板を置き、写真を写す。
- (2) 場所を移動して2枚目の写真を写す。
- (3) 基準板の像を用いて、各写真を外部標定する。
- (4) 1枚目の写真の特徴点をクリックする。
- (5) 2枚目の写真の対応点近傍をクリックする。
上述の相關法により自動的に最適な対応点が探索される。
- (6) 前方交会により、その点の座標が求まる。
- (7) 以上4～6の操作を繰り返して特徴点の座標を求める。
- (8) 座標をもとに長さや面積、体積等を計算する。

以下実験を説明する。用意したカメラは三百万画素Fuji FinePix2000 (1600×2000)、四百万画素Canon IXY DIGITAL (2272×1704) および六百万画素Nikon D100 (3008×2000) の3台である。D100は一眼レフでありこの実験では20mmレンズを付けた。いずれも撮影に先立ち2.4節で示した方法で校正した。対象は図4に示す校内の建物である。FinePixおよびIXYでは撮影はすべて自動である。ただし前者のズームは校正時も含め最も広角側にし、動かさないようにした。IXYは単焦点である。D100ではピントを無限大にし、被写界深度を深くするため絞りを絞って写した。このあたりのカメラの取り扱いについては、校正時の条件を変えないように注意しなければならない。

それぞれのカメラで建物を左右から1枚ずつ、計2枚撮影した。このとき基準板は画面の中央下部に写るように置いた。基準板の左右両端のターゲット間隔は56cmである。

計測対象の寸法として図5に示す9つの長さをとった。いずれも写真上で明瞭な特徴点として抽出でき、かつ実測しやすい点を選んだものである。選んだ長さを巻尺で実測し、これを参照値とした。この参照値自体の精度は±1mm程度だと思われる。

計測結果を表1に示す。9つの長さの平均誤差(RMS値)は3つのカメラでそれぞれ14.3mm、8.2mm、5.3mmであり、画素数に比例して精度がよくなるという結果になった。特徴点をクリックするとき、画像を拡大して、例えば窓枠の隅の点を探すのであるが、このとき画素数の違いは大きい。画素数の大きなカメラでは拡大に耐え、点を探しやすい。かつ一眼レフのレンズ性能やボディ剛性、CCDサイズの違いなどD100の総合力が他を上回ったと考えられる。

今回の実験では大まかに、3m程度の大きさの対象を10mm以下の誤差で測れることが確認できたといつてよいと考える。

4. おわりに

デジタルカメラで撮影した2枚の写真から建物の寸法を計測する方法を示した。本方法は、いまのところ高精度とはいえないが、土地や建物の大まかな

表1 計測結果

(単位: mm)

対象	巻尺値	FinePix	差	IXY	差	D100	差
D 1	743	745.5	2.5	739.8	- 3.2	739.9	- 3.1
D 2	3,130	3,138.8	8.8	3,116.3	- 13.7	3,126.7	- 3.3
D 3	3,121	3,127.0	6.0	3,111.3	- 9.7	3,113.5	- 7.5
D 4	1,200	1,203.4	3.4	1,199.0	- 1.0	1,203.4	3.4
D 5	1,200	1,207.7	7.7	1,199.9	- 0.1	1,210.1	10.1
D 6	397	395.5	- 1.5	395.2	- 1.8	392.7	- 4.3
D 7	890	885.5	- 4.5	885.5	- 4.5	892.3	2.3
D 8	1,005	1,001.3	- 3.7	1,000.5	- 4.5	1,008.0	3.0
D 9	4,200	4,159.9	- 40.1	4,183.7	- 16.3	4,205.3	5.3
			14.3		8.2		5.3

(注) 「差」はそれぞれの測定値から巻尺値を引いたものである。最下段の数値は、9つの誤差の二乗平均値(RMS)である。

寸法や体積など、他の方法では容易に計れない要求に対して容易かつ安価に応える方法であると思う。このような場面には有効に使えらるかと考えている。今後さらに実験して結果を報告したい。今後の課題は次のような事柄である。

- ・特徴点オペレータなどを用いて、特徴点をより高精度で検出する。
- ・第二の写真をクリックせず、エピポーラ線上の探索により対応点探索を自動化する。
- ・2枚以上の写真を利用することにより精度を向上させる。

なお、本開発は事業主団体共同研究開発事業として行われたものである。本共同開発に当たり討議し、協力くださった企業団体TIC会の関係者の皆さまに感謝します。

参考文献

- 1) Mikhail, et.al: " Modern Photogrammetry ", pp.251-256, John Wiley & Sons, 2001 .
- 2) 秋本圭一: 「ステレオマッチング問題について(サーベイ)」, 『四国職業能力開発大学校紀要』, vol.14, pp.17-31, 2002 .
- 3) 望月隆生・秋本圭一・大野崇弘・嶋田純二: 「デジタルカメラによる形状計測システムの開発」, 『四国職業能力開発大学校紀要』, vol.15, pp.49-54, 2003 .
- 4) 村井俊治: 『空間情報工学(改訂版)』, p.190, 日本測量協会, 2002 .
- 5) 服部進・秋本圭一・岡本厚・長谷川博幸・井本治孝: 「ターゲット場の多重撮影による基準点のないICCDカメラキャリブレーション」, 『電子情報通信学会論文誌』, vol.J82-D-II(9), pp.1391-1400, 1999 .

