

解析写真測量によるデジタルカメラを用いた 三次元測量システムの開発に関する研究

建設設計工学研究室 竹田 喜彦
指導教官 鳥居 邦夫

1 はじめに

現在写真測量の技術が進歩する中、わが研究室の CCD (Charge-Coupled Device) ビデオカメラによる三次元測量は共線条件方程式を主とした単写真標定による測量となっている。このシステム¹⁾は、橋梁の工場における仮組立を省略する橋梁検査システム (CATS) の計測分野において実用され、多くの実績を残している。また、斜面監視システムとして過去から多くの実験、実用を繰り返してきた。

しかし、この方法は、カメラの内部標定要素および外部標定要素算出に多大な労力が必要とされる。また、その測量理論により各カメラにおける外部標定要素の関係を維持しなければならず、高精度測量においてその管理に細心の注意を払わなければ精度の良い三次元測量を行うことが出来ない。したがって、この計測方法による三次元測量は、屋内など比較的計測環境が整っている場合には適しているが、屋外などの悪条件下での計測には使用が難しい。また、システムの移動を行う場合、非常に大掛かりな作業を要するため、簡易的な屋外の三次元計測には不向きである。

このような背景から、本研究では持ち運びが容易な三次元測量システムの開発を試みた。この方法は、工事現場のような野外において簡単な実測とその測定物の写真をいくつかの方向から数枚撮影することにより三次元測量が可能なものとした。また、使用するカメラについては、一般に市販されているデジタルカメラを用い高精度の測量が可能なシステムとなるように、開発を行った。

2 本研究の目的

前章で挙げたように、簡易化された三次元測量システムとするためにはいくつかの問題点がある。それを「測量理論による制約の問題」と「CCD カメラ変更による問題」に分け以下に記す。

1) 測量理論による制約の問題

測量を行う前段階である標定に労力を要し、座標系の考慮など素人には困難である。

固定カメラによる計測となるため、移動が困難である。

高精度の測量を維持するための管理に労力を要する。

巨大な立体定規を必要とし、そのメンテナンスが定期的必要である。

2) CCD カメラ変更による問題

オートフォーカスによる絞りの変化。

ズーム機能による焦点距離の変化。

これらの問題点を解決するべく、研究を行うことにより本研究の目的である簡素化された三次元測量システムが完成すると考えられる。

3 計測機器

使用機器として、システムを安価なものとするため市販のデジタルカメラ CANON PowerShot G1 (有効画素約 330 万) 図-1(1)および G2 (有効画素約 400 万) 図-1(2)を使用した。



図-1(1)(2) 計測に使用したデジタルカメラ

また、ここでは測量精度を現行のシステム¹⁾と同程度とするため、撮影カメラには前に述べたデジタルカメラを用い、カメラの固定装置として図-2に示す旋回装置を用いた。



図-2 カメラ固定装置

また、旧システム¹⁾において内部標定要素および外部標定要素算出時に使用されていた既知の座標を有した立体定規を図-3に示す。この定規は各測点間距離を大型のノギスにより正確に測定し、さらに幾何補正を行い精密な三次元値を有している。



図-3 立体定規

4 システム概要

4.1 旧三次元測量システム¹⁾の概要

旧システム¹⁾は、前章(図-2)のカメラ旋回装置のように2台以上のカメラを固定した状態で、計測対象物の計測を行う。これは、単写真標定によりカメラの外部標定要素を求めているためである。すなわち、図-4のイメージにあるように、各カメラの位置、傾きの関係を維持することにより

検定座標系における各カメラの位置三次元座標値(X_c, Y_c, Z_c)と回転角(α, β, γ)がそれぞれ固定される。したがって、固定カメラにおいては光軸が変化しないため計測物の三次元座標値を求めることができる。このことは、事前に三次元座標を持った既知となる測点が4点以上必要であることを意味する。

また、同様にカメラの内部標定要素についても同じ方法から求めるため、外部標定要素算出および内部標定要素算出を同時に行えるような立体的な定規(図-3)が必要となってくる。

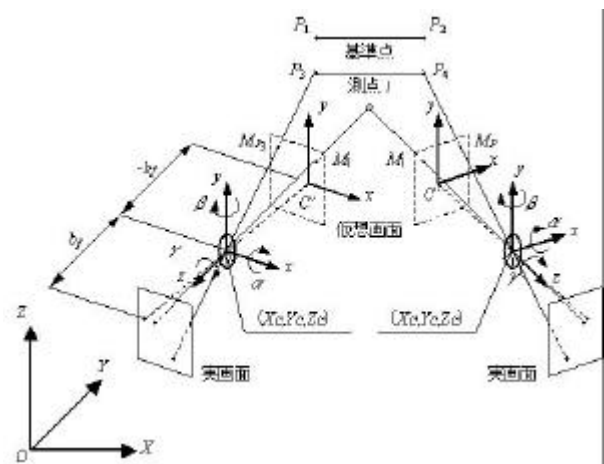


図-4 単写真標定による三次元計測イメージ

4.2 新三次元測量システムの概要

本研究で開発したシステムでは、従来のように単写真標定による外部標定要素の決定を行わず、相互標定により外部標定要素を決定する。

相互標定では、2箇所以上から撮影された画像に共通する任意の点(写真測量においては、パスポイントと呼ばれる。)を5点以上共有することによりその撮影された写真におけるカメラの位置、傾き、を表す外部標定要素を決定することが可能である。この方法で外部標定要素が決定することにより、写真内の任意点の三次元座標が算出される。つまり、単写真標定において必要であった立体定規などの既知点が不要となる。

したがって、新システムでは違う方向から撮影された写真が2枚以上あれば三次元座標が算出されることになる。

5 解析写真測量の概要

5.1 共線条件による単写真標定

旧システム¹⁾では、共線条件方程式を用いた単写真標定を行っている。この単写真標定では、カメラの画像面に写る点、カメラのレンズ中心、測点が空間内の同一直線上に位置するという条件式(1)を用いる。各点が一つの直線を共有することから、この方程式を共線条件方程式と呼び、そのイメージを図-5に示す。

$$\left. \begin{aligned} x_i &= -b_f \frac{y_{pi}}{z_{pi}} = -b_f \frac{L_1(X_i - X_c) + L_2(Y_i - Y_c) + L_3(Z_i - Z_c)}{N_1(X_i - X_c) + N_2(Y_i - Y_c) + N_3(Z_i - Z_c)} \\ y_i &= -b_f \frac{x_{pi}}{z_{pi}} = -b_f \frac{M_1(X_i - X_c) + M_2(Y_i - Y_c) + M_3(Z_i - Z_c)}{N_1(X_i - X_c) + N_2(Y_i - Y_c) + N_3(Z_i - Z_c)} \end{aligned} \right\} \dots (1)$$

x_{pi}, y_{pi}, z_{pi} : 基準点 P_i のカメラ座標系での値
 X_c, Y_c, Z_c : カメラの原点の計測座標系での値
 X_i, Y_i, Z_i : 基準点 P_i の計測座標系での値
 b_f : 焦点距離

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= \cos b \cdot \cos g \\ L_2 &= -\cos b \cdot \sin g \\ L_3 &= \sin b \\ M_1 &= \cos a \cdot \sin g + \sin a \cdot \sin b \cdot \cos g \\ M_2 &= \cos a \cdot \cos g - \sin a \cdot \sin b \cdot \sin g \\ M_3 &= -\sin a \cdot \cos b \\ N_1 &= \sin a \cdot \sin g - \cos a \cdot \sin b \cdot \cos g \\ N_2 &= \sin a \cdot \cos g + \cos a \cdot \sin b \cdot \sin g \\ N_3 &= \cos a \cdot \cos b \end{aligned} \right\} : \text{回転マトリックス}$$

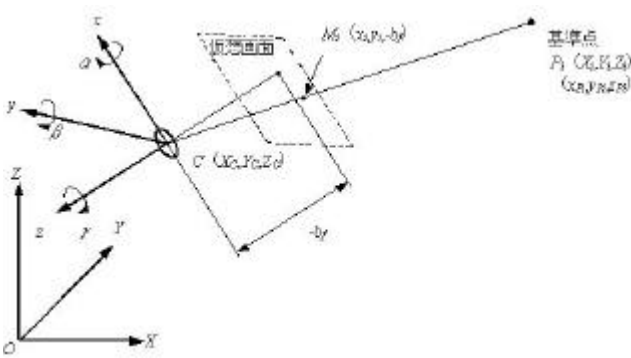


図-5 共線条件による単写真標定

5.2 共面条件による相互標定²⁾

新システムにおいては、共面条件から導出される相互標定を用いる。

この相互標定では、射影幾何学の原理から、2枚の写真の対応する光束がすべて交わるために、少なくとも5本の光束が交会すればよいことが知られている。したがって、カメラの位置に関する12の変量の中から、5つの変量を決定すれば

よいこととなる。

また、相互標定では、相対的に相似なモデルを決定すればよいことから、基線長を単位長さ1とおくことができる。

このように、2本の光束が交会するためには、図-6に示すように、2本の空間直線が同一平面内に含まれるという条件が成立することを利用した方法を、共面条件による相互標定と呼ぶ。

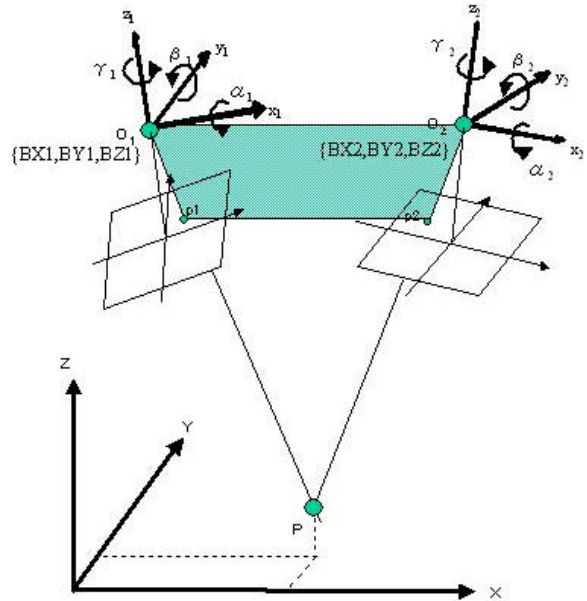


図-6 共面条件による相互標定

この相互標定には2つのモデルが存在する。1つは、左カメラを固定するモデル(図-7)、もう1つは投影中心を結ぶモデル(図-8)である。

左カメラを固定するモデルでは、左カメラを固定し右カメラの座標を表すことにより、2つのカメラ関係を示すモデルである。この場合、カメラの外部標定要素は右カメラ ($B_y, B_z, \gamma_2, \alpha_2$) で表すことができる。これを、数式化すると式(2)のようになる。

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ B_x & B_y & B_z & 1 \\ X_{1i} & Y_{1i} & Z_{1i} & 1 \\ X_{2i} & Y_{2i} & Z_{2i} & 1 \end{vmatrix} = 0 \dots \dots \dots (2)$$

この(2)式を最小二乗法を用いて解く問題となる。

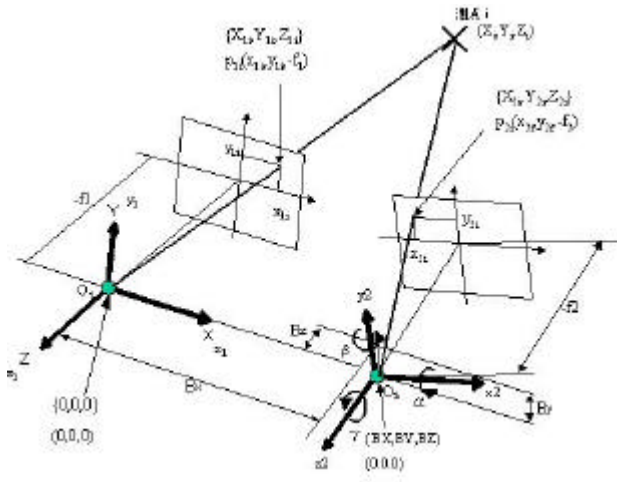


図-7 左カメラを固定するモデル

一方、投影中心を結ぶモデルは、左右カメラの投影中心を結ぶ軸をX軸とし、2つのカメラ関係を示すモデルである。この場合、カメラの外部標定要素は左カメラの(1、1)右カメラの(2、2)で表すことが出来る。この場合も同じように式2))において各回転角5つを未知数とする問題となる。

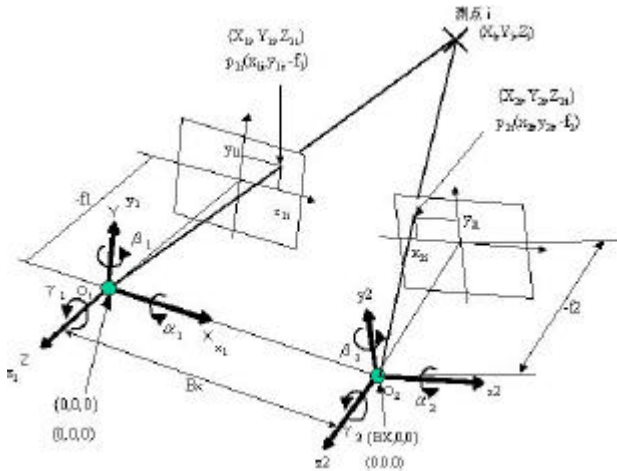


図-8 投影中心を結ぶモデル

6 新システムによる実験

6.1 左カメラを固定する場合の実験及び結果

実験は、立体定規を用い単写真標定より内部標定要素を求めた後、相互標定を行った。旧システムとの精度比較のため、旋回架台を用いた実験も行った。

図-9を見ると、現行の単写真標定を用いて検定

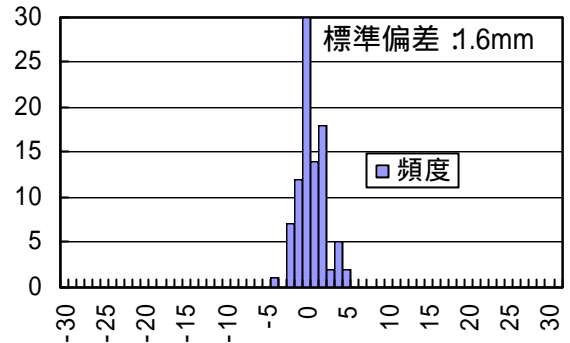


図-9 単写真標定と実測値の差

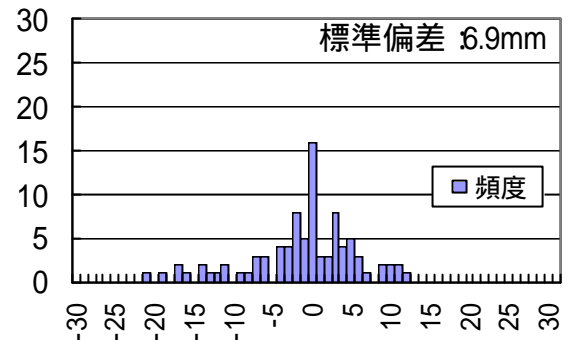


図-10 相互標定と実測値の差

(左カメラを固定するモデル)

を行った場合、標準偏差が1.6mmと非常に小さい。しかし、図-10に示すように相互標定では、標準偏差が6.9mmと大きい値が得られた。

これらのことから、左カメラを固定した相互標定の場合、単写真標定の計測結果より精度は数倍悪くなるのが分かった。その原因としては、収束性が悪いBy、Bzは 10^3 程度の値だがその他は 10^0 以下の値であり、数値的なオーダーの差が収束の変数に影響をもたらしていることが考えられる。

6.2 投影中心を結ぶ場合の実験及び結果

実験方法は前節と同様である。

投影中心を結ぶモデルにより相互標定を行った場合では図-11に示すように、標準偏差が2.6mmと大変よい結果が得られた。相互標定として得られた今回の結果は十分信頼性のある結果と言える。

したがって、以降の相互標定には投影中心を結ぶモデルを用いることとする。

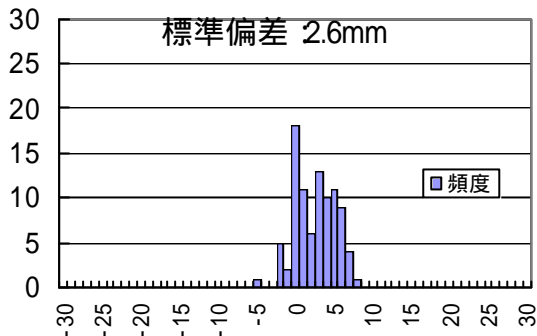


図-11 相互標定と実測値の差
(投影中心を結ぶモデル)

6.3 内部標定要素の算出

内部標定要素は、単写真標定によって算出しているが、この要素決定により相互標定の精度は大きな影響を受けることから、算出方法について検討した。

実験は、撮影画面を横にした場合(画面中央で立体定規を撮影：図-12(1))と撮影画面を縦に配置した場合(画面全体で立体定規を撮影：図-12(2))を比較して、どの程度の差が現れるかを確認する。また、撮影は焦点距離=21mmとして行った。



図-12 左図(1)：立体定規を画面中央に配置した場合 右図(2)：全体に配置した場合

結果の図は省略するが、内部標定算出時に写真の全体で立体定規を撮影した場合において、標準偏差=1.1mmと良い結果が得られた。したがって、内部標定要素算出時には、図-12(2)のように測点を撮影画面全体に配置することとする。

6.4 パスポイントの数と収束回数

共面条件による相互標定では、5つの面が形成されれば、幾何学的に外部標定要素が決定されることが明らかである。しかし、実際の計測においては、残差の影響により5点以上測点を設けるこ

ととなっている。そこで、最適なパスポイントの個数を検討する。

実験は、立体定規を用い測点数(パスポイント数)を4点から14点まで変化させ、相互標定を行った。その結果を表-1に示す。

表-1 パスポイントの数と収束値

測点数 〔パスポイント数〕	収束回数	標準偏差 〔mm〕
4点	収束しない	×
5点	288回	×
6点	455回	×
7点	673回	×
8点	269回	×
9点	28回	3.1
10点	25回	2.4
11点	19回	1.3
12点	15回	1.1
13点	15回	0.9
14点	14回	0.8

表-1の結果を見ると、輪郭抽出により測点を取得した場合、10点程度の測点数(パスポイント)があれば収束し、よい値が得られた。しかし、精度を考えるならば収束回数が20回以下で収束する測点数または、収束する測点の組み合わせを考えた方がよい。

6.5 内部標定要素を考慮した相互標定

相互標定では、立体定規を用い単写真標定の原理を利用することにより内部標定要素を算出し、その後、相互標定を行っている。しかしその方法では、作業が複雑になることや大型の立体定規が必要であることなど、使用に際し不便である。したがって、内部標定要素を相互標定と同時に求めることを試みた。

実験は、相互標定プログラムに式(3)の内部標定要素を加えた11個の未知数(1, 1, 2, 2, 2, x₀, y₀, bf, c₁, c₂, keisu)を求める計算を行った。

$$F(b1, g1, a2, b2, g2, bf, \underset{\substack{\uparrow \\ \text{焦点距離}}}{x_0}, \underset{\substack{\uparrow \\ \text{光軸のスレ}}}{y_0}, \underset{\substack{\uparrow \\ \text{収差}}}{c1}, \underset{\substack{\uparrow \\ \text{アスペクト比}}}{c2}, keisu) = \begin{matrix} \begin{matrix} 1 & 0 & 0 \\ X_{1i} & Y_{1i} & Z_{1i} \\ X_{2i} & Y_{2i} & Z_{2i} \end{matrix} \end{matrix} = 0 \dots (3)$$

表-2 内部標定要素を考慮した相互標定結果

未知数	収束の可否
1, 1, 2, 2, 2 (5)	
1, 1, 2, 2, 2, x ₀ , y ₀ , bf, c ₁ , c ₂ (1) 0)	×
1, 1, 2, 2, 2, bf (6)	×
1, 1, 2, 2, 2, bf, x ₀ , y ₀ , (7)	×
1, 1, 2, 2, 2, bf, x ₀ , y ₀ , bf (8)	×
1, 1, 2, 2, 2, x ₀ , y ₀ , bf, c ₁ , c ₂ , keisu (1) 1)	×
x ₀ , y ₀ , bf, c ₁ , c ₂ , (5)	

表-2の結果より、相互標定の場合、内部標定要素を同時に求める事は出来ない。これは、共面条件に内部標定要素が系統的に現れないことが原因であると考えられる。

6.6 オート(AE,AF)撮影による精度

一般に市販されているデジタルカメラはユーザーが撮影時にピンボケや光量の調整を気にすることなく撮影できる機能、つまり撮影技術を必要としない AF,AE 機能が多く用いられている。しかし、この機能は内部標定要素を変化させてしまうと考えられることから、その機能の使用による影響を検討した。

実験は、カメラをマニュアルモードとし、絞りを Auto,F8.0,F5.0,F8.0 と変化させ測量精度のばらつきを調べた。

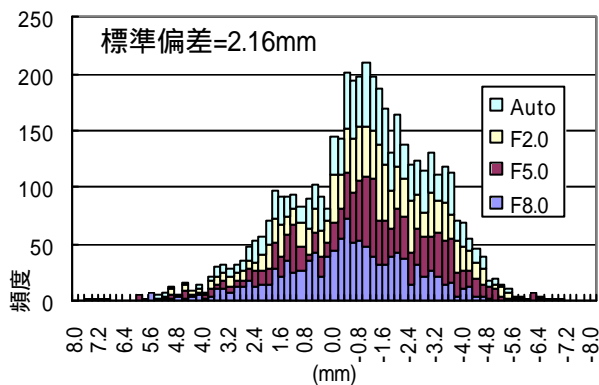


図-13 AUTO撮影による精度への影響

図-13に示すように、測量誤差がどの絞りに対しても均等にばらついていることから、Auto撮影による測量精度への影響が無い事が分かる。

またズーム機能による内部標定要素の変化を同様に実験したところ、2ピクセル程度の誤差にとどまった。

したがって、市販のデジタルカメラでAuto機能を用いて撮影した場合の影響は、2ピクセル程度であることが分かった。

7 結論

相互標定では、左カメラを固定する方法と投影中心を求める方法のモデル化が可能であるが、その収束結果は、投影中心を求める場合においてよ

い結果が得られた。また、パスポイントの数については、実際の計測においてターゲットを用いた場合、10点程度のパスポイントを設けることが必要でその位置も、カメラの画像に対し全体に配置することが望ましい事が確認された。

次に相互標定の未知数とする値に内部標定の要素を未知数として付加させ計算した。しかし、この方法では収束解を得ることが出来なかった。これは、相互標定において内部標定の各要素が系統的に算出されない事が原因と考えられる。

市販デジタルカメラは、ズーム機能、オートフォーカス機能などのユーザーが簡単に撮影を行うための機能が付属されている。そのため、計測において非常に不利な要素が多い。そこで、一般のデジタルカメラにおいてどの程度の撮影精度(測定精度)が得られるかについて実験を行った。その結果、ズーム、オートフォーカス等の影響が約1ピクセル程度と確認された。

したがって、その程度の影響を許容すれば、一般の市販デジタルカメラにおいても2ピクセル程度の誤差で十分に三次元計測が可能であることが分かった。

8 参考文献

- 1) 小櫻義隆：鋼橋の完成検査システムに関する開発研究、長岡技術科学大学大学院工学研究科博士論文、昭和62年
- 2) 社団法人 日本写真測量学会：解析写真測量改訂版(社)日本写真測量学会・解析写真測量委員会、平成9年
- 3) カール・クラウス教授 大島太市・堀江延韶訳：写真測量、株式会社 技術書院、平成5年
- 4) 日本測量学会：写真による三次元測定応用写真測量、共立出版、昭和58年