

# デジタル画像計測法を活用したリアルタイム被害査定用システムの構築

京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻  
教授 大西 有三

平成19年9月

# 目 次

第1章	序 論	3
第2章	画像計測法の基本理論	5
2.1	解析原理	5
2.2	自動化のための原理	20
2.2.1	カラーターゲットについて	24
2.2.2	HSV系の色空間におけるターゲット検出	28
2.3	自動認識ソフトの検証	30
第3章	解析作業の自動化	41
4.1	精度に影響を与える諸要因の分析	41
4.2	ノウハウ検証実験	52
第4章	結 論	62

参考文献

## 第1章 序論

本研究開発は、デジタル画像計測がもつ特徴を活用して、リアルタイムの被害査定システムを構築することを目的として行われたものであり、本報告書はそのためのデジタル画像を利用した測量技術の構築法についての成果をまとめたものである。ここで述べるデジタル画像計測はデジタルカメラで撮影した画像を用いて、対象物の形状、体積および変位を高精度に計測する手法であり、その手法としての特徴としては、主に次の項目が挙げられる。

- ・ 計測は写真撮影という簡便な手法であり、計測の普及化を図りやすい。
- ・ 計測点の数が増えても手法自体は変わらないので、面的な挙動を把握する際に対処しやすい。
- ・ デジタルカメラとパソコンの今後の発展を考えると、低コストでの高精度化が期待できる。

本研究開発の目的を詳細に記述すると次のようになる。

豪雨、台風および地震などによる災害が発生した際、どこでどの程度の被害が発生しているのかを早期にかつ正確に把握することは、対策作業の効率化による被害の拡大を防ぎ、また被害査定作業の迅速化による復旧作業の効率化を実現させることができる重要な要素である。そのためには測量作業が必須となるが、当該作業には機器の扱いなどに専門知識を必要とする要素が多く、台風や地震などによる被害が重なった場合などは、測量業に従事する技術職の人数が不足するため、被害査定の遅れによる復旧作業の遅滞によって住民生活に多大な影響を及ぼす事態が昨今生じている。緊急時の現場検証の実施時に、被害や損害査定に関する迅速なデータが提供される測量システムが構築されれば、災害に強い国土の形成が可能になる。本研究はこのような背景を鑑み、現地にて携帯電話によって撮影された画像から、発生した被害の大きさを、誰でも容易に、リアルタイムで把握できる情報システムを実現するものである。これにより、被害の軽減を図る行動や復旧を早期に実現するためのリアルタイムでの被害査定を実現する。具体的には、市販の GPS 機能付きの 100 万以上の画素数をもつ携帯電話で現地の被害状況を撮影し、当該デジタル画像をパソコンに取り込んで、その後画像を見ながら測量したい箇所を画像上で指示すると当該箇所の 3 次元座標を算出するプログラムを実現するものである。この基本理論は、航空写真測量で利用されているステレオ写真による被写体の 3 次元化技術を応用したも

のであるが、この基本理論を基に、撮影する画像の枚数や撮影距離と精度の関係の検証実験、あるいは用いる携帯電話の画素数に応じたレンズ歪みの補正式の開発などによって、誤差が数 cm 以内の測量方法を確立させるものである。現在の携帯電話の機能を活用すれば、GPS のデータと共に画像を転送することが可能で、事務所で現場から送られてきたパソコンの画像がどの位置で撮影されたのかも把握でき、リアルタイムで誰でも簡便に測量することが可能となる。

なお、本研究は財団法人日本建設情報総合センターより平成 18 年 8 月 30 日付助成番号第 2006-5 号の研究助成の成果をとりまとめたものである。

## 第2章 画像計測法の基本理論

本研究で開発するシステムは、デジタルカメラで対象物を撮影した後、自動的に対象物をパソコン画面上で3次元的に復元するものであり、その復元画像上の標点の3次元座標を算出することにより任意の点の測量が実施可能となることを開発目標とするものであり、ここではその基本理論を記述する。

### 2.1 解析原理

計測対象をさまざまな地点から撮影することで、1つの点は複数の画像に写る。それらの画像を組み合わせ、特定の点がどの写真のどの位置に写っているかを調べれば、その点の3次元位置を逆算することができる。これが画像計測の基本的なアイデアである。データとして得られるのは、画像上の  $x, y$  座標のみである。この後で述べる幾何学的条件を適用して方程式群を作り、その最小2乗解を求める。方程式の数は、画像に写った点の数の2倍である。例えば対象点が20個あり、15枚の画像を得たとき、そのすべての点が写っていたとすれば、方程式は  $20 \times 15 \times 2 = 600$  立つ。

ここでの未知数は、次の3つのグループに分類される。

- ① 対象点座標： $(X, Y, Z)$
- ② 外部標定要素：カメラの撮影位置 $(X_0, Y_0, Z_0)$ 、回転角 $(\theta, \phi, \kappa)$ の6つの変数
- ③ カメラの構造に起因するパラメータ：焦点距離やレンズひずみ係数など。カメラのモデルとしてどのような式を採用するかにより、数は異なるが、本研究では8個用いた。

対象点の数を  $n$ 、画像枚数を  $m$  とすると、対象点座標は  $3n$  個、外部標定要素は  $6m$  個、カメラパラメータ（8個）を合わせて  $3n+6m+8$  の未知数が存在する。カメラパラメータはオフラインで、例えば専用のカメラ校正装置などを用いて求めることが可能である。しかし、この方法では本来の計測作業に加えて、装置や解析を必要とするので、計測作業中に他の未知数と同時にパラメータを求める方法を考える。この方法をセルフ・キャリブレーション付きバンドル調整(bundle adjustment with self calibration)、もしくは単にバンドル調整と呼ぶ。最終的に求めるものは、対象点の3次元座標である。この座標軸  $X-Y-Z$  は空間上に任意に設定する。一方で得られる座標は、画像上に設定した2次元座標 $(x, y)$ である。両者の位置関係は、中心投影原理を背景として結び

付けられる。

まず座標系の設定について述べる。対象空間座標  $X$ - $Y$ - $Z$  は、対象物の適当な点を原点にとり、対象物に向かって右側水平方向に  $X$  軸を、垂直上方に  $Y$  軸を、手前方向に  $Z$  軸をとる。また、カメラ座標  $x$ - $y$ - $z$  の初期位置は、カメラの光軸を  $Z$  軸上におき、姿勢を水平に保って原点を見たとき、画面右側を  $x$  軸に、画面上方を  $y$  軸に、 $Z$  軸と一致するように  $z$  軸をとる (図 2-1 参照)。

次にカメラを移動・回転させて写真を撮影する。このとき、対象空間座標系を

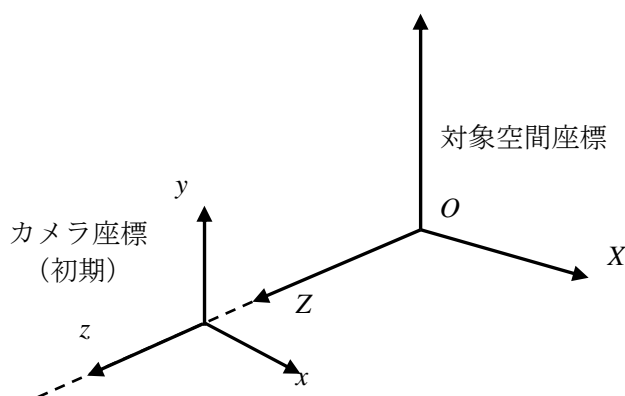


図 2-1 座標系の設定

以下のように回転させて、カメラ座標系が得られるものとする。

- 1) 向かって右側に水平 ( $Z$  軸を  $X$  軸に重ねる方向) に角度  $\theta$  だけ回す。
- 2) 次に上方 ( $Z$  軸を  $Y$  軸に重ねる方向) に  $\phi$  だけ移動する。
- 3) さらにカメラを反時計方向 ( $X$  軸を  $Y$  軸に重ねる方向) に  $\kappa$  だけ回す。

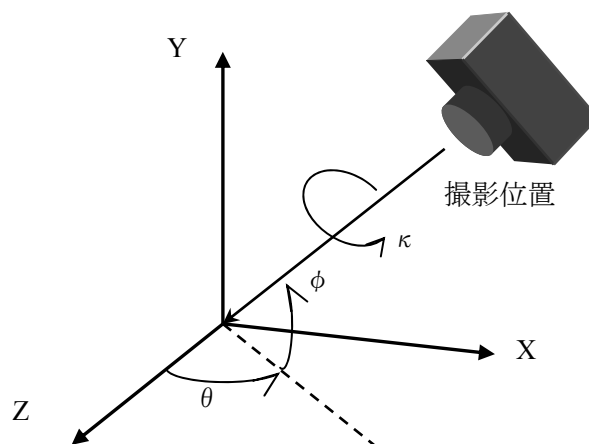


図 2-2 回転角の定義

回転を表現する方法として、上記以外にもいくつか存在する。本研究でこの方法を採用したのは、最も理解しやすいためである。すなわち、カメラの姿勢を見たとき、3つの角度の概略値が簡単に判る。回転角度が容易に求められることは、後述の解法における初期値設定において、非常に大きな利点である。

このように座標の回転を定義したとき、それぞれの対象空間座標系からカメラ座標系に向かう回転行列は

$$\begin{aligned}
 M_{\theta} &= \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{pmatrix} \\
 M_{\phi} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix} \\
 M_{\kappa} &= \begin{pmatrix} \cos \kappa & \sin \kappa & 0 \\ -\sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-1}$$

である。よって、合成した回転行列は

$$\begin{aligned}
 M &= M_{\kappa} M_{\phi} M_{\theta} \\
 &= \begin{pmatrix} \cos \kappa \cos \theta - \sin \kappa \sin \phi \sin \theta & \sin \kappa \cos \phi & -\cos \kappa \sin \theta - \sin \kappa \sin \phi \cos \theta \\ -\sin \kappa \cos \theta - \cos \kappa \sin \phi \sin \theta & \cos \kappa \cos \phi & \sin \kappa \sin \theta - \cos \kappa \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta & \sin \phi & \cos \phi \cos \theta \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

となる。以下では行列  $M$  の  $(i, j)$  要素を  $m_{ij}$  と表すことにする。

最終的に、対象空間座標系の点  $(X, Y, Z)$  と、回転後のカメラ座標系から見たその点の座標  $(x, y, z)$  の関係は、カメラ原点  $(X_0, Y_0, Z_0)$  を用いて次のようになる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix} \tag{2-3}$$

対象空間点とその画像上の点の位置関係は、カメラの原点（レンズ中心）を介して一直線上に存在するという原理に基づいて方程式を立てる。これを共線条件 (collinearity condition) という。

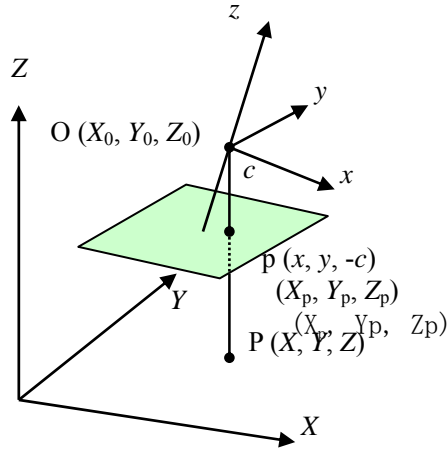


図 2-3 共線条件

座標系を図 2-3 のようにとる．写真面をレンズ中心より対象物側に描いたのは，像の逆転をさせないためである．幾何学的にはまったく等価である．ここで  $c$  はレンズの画面距離（焦点距離とほぼ同義）を表す．

対象空間座標系  $X$ - $Y$ - $Z$  から見た点  $P$  の座標を  $\mathbf{X}=(X,Y,Z)^T$ ，カメラ座標の原点を  $\mathbf{X}_0=(X_0,Y_0,Z_0)^T$  とする．また，カメラ座標系  $x$ - $y$ - $z$  から見た  $P$  の写像  $p$  の座標を  $\mathbf{x}=(x,y,-c)^T$  とし，空間座標系から見た  $p$  を  $\mathbf{X}_p=(X_p,Y_p,Z_p)^T$  とする．写真面の  $z$  座標は常に  $-c$  である．共線条件より，この 3 点は 1 本の直線上に存在するから，任意の実数  $k$  を用いて

$$\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0 = k(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2-4)$$

と書ける．また， $\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0$  はカメラ座標系における  $\mathbf{x}$  に他ならないから，座標の回転行列  $M$  を用いて

$$\mathbf{x} = M(\mathbf{X}_p - \mathbf{X}_0) \quad (2-5)$$

と表せる．式(2-4) (2-5) より

$$\mathbf{x} = kM(\mathbf{X} - \mathbf{X}_0) \quad (2-6)$$

が得られる．これを成分で書き下すと

$$\begin{aligned} x &= k(m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)) \\ y &= k(m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)) \\ -c &= k(m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)) \end{aligned} \quad (2-7)$$

となる．この第 1 式と第 2 式を，それぞれ第 3 式で割って  $k$  を消去することで，次式を得る．



$$\begin{aligned}
x &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\
y &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)}
\end{aligned}
\tag{2-8}$$

これが共線条件式(collinearity equations)である。この式において、既知数は  $x$  および  $y$  の 2 個であり、未知数は対象点座標( $X, Y, Z$ )、カメラ原点位置( $X_0, Y_0, Z_0$ )、 $m_{ij}$  の中に含まれるカメラの回転角( $\theta, \phi, \kappa$ )の計 9 個である。この段階での左辺の  $x, y$  はひずみのない、理想的なカメラで撮影した場合の写真座標である。

ここで述べた共線条件式は、ひずみを考慮しない理想的カメラでの議論であるが、通常どのようなカメラにも光軸のずれやレンズひずみが必要存在する。カメラのモデルを作成したとき、カメラ構造に起因するずれやひずみを考慮し、補正する必要がある。これらは画像座標( $x, y$ )に含まれる系統誤差であるので、真の座標値を( $x', y'$ )、補正項を( $\Delta x, \Delta y$ )とすると、測定で得られた座標( $x, y$ )との関係は以下のように表される。

$$\begin{aligned}
x' &= x + \Delta x(x, y) \\
y' &= y + \Delta y(x, y)
\end{aligned}
\tag{2-9}$$

続いて、この補正項がどのようなパラメータで構成されているのかを考える。一般的に

- (1) カメラの内部構造やレンズひずみに関係したもの
- (2) 写真の変形や映像の系統的なひずみ

の 2 種類が考えられる。このうち、(2)はデジタルカメラでは CCD 画素子の線形ひずみを意味し、通常は無視できるパラメータである。

レンズと画面 (CCD 面) からなるカメラの内部構造を、典型化して考えると図 2-4 のように描ける。画像上の座標系  $x-y$  は画面の中心を原点とし、CCD 画素の配列と平行に両軸を設定する。レンズの中心から画面へ下ろした垂線の長さ  $c$  を画面距離 (principal distance)、その垂線の足を主点 (principal point) という。主点は画像の中心、すなわち原点と一致するとは限らないので、この座標を( $x_p, y_p$ )とおく。

次にレンズひずみ (lens distortion) について説明する。物理的には半径方向ひずみ (radial distortion) と周方向ひずみ (tangential distortion) に分類することができる。両者の意味を図 2-5 に示す。半径方向ひずみは、点が中心から外側もしくは内側

へずれる効果をもたらす。ずれ方は中心からの距離によって異なる。この原因は主としてレンズそのもののひずみである。一方、周方向ひずみの効果は点が円周方向にずれることであるが、方向によって一様ではない。レンズ配列の中心線からのずれが主な原因である。

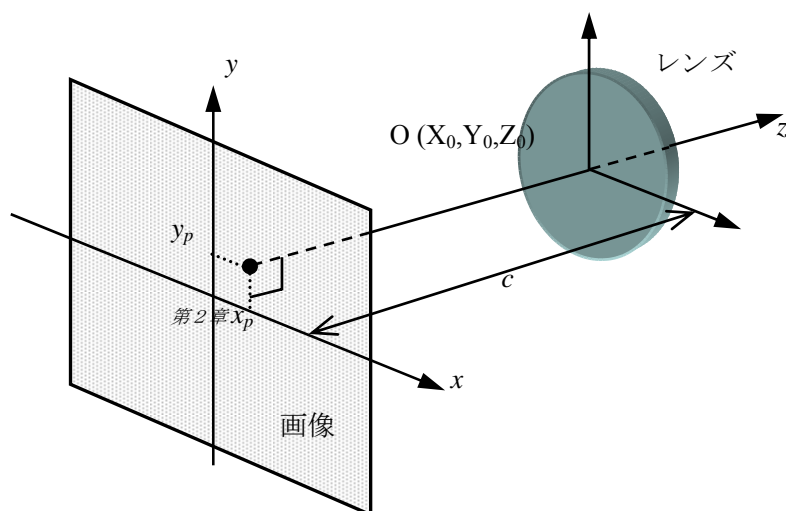


図 2-4 カメラの内部モデル

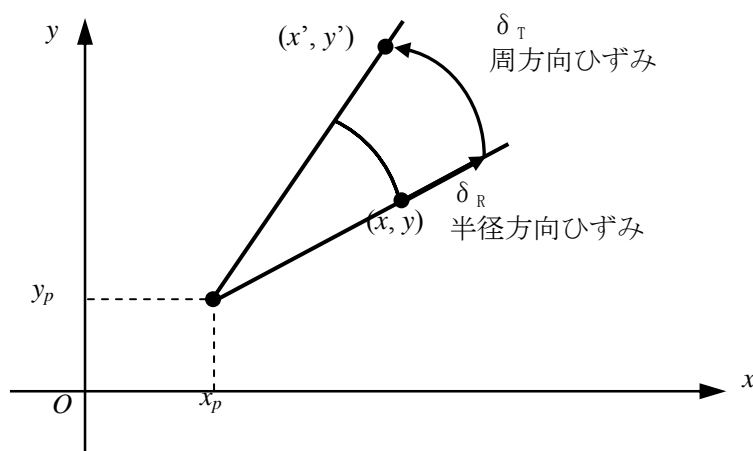


図 2-5 2つのひずみ

本研究でのレンズひずみのモデルは、半径方向ひずみの係数を  $k_1, k_2, k_3$ 、周方向ひずみの係数を  $p_1, p_2$  とし、よく知られている式(2-10)を用いた。

$$\begin{aligned}
 \Delta x &= -x_p + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(x - x_p) \\
 &\quad + p_1 (r^2 + 2(x - x_p)^2) + 2p_2 (x - x_p)(y - y_p) \\
 \Delta y &= -y_p + (k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6)(y - y_p) \\
 &\quad + 2p_1 (x - x_p)(y - y_p) + p_2 (r^2 + 2(y - y_p)^2)
 \end{aligned}
 \tag{2-10}$$

ここで、 $r^2 = (x - x_p)^2 + (y - y_p)^2$  であり、レンズひずみの中心と主点位置は一致すると仮定している。以上より、カメラ内部のパラメータは  $(c, x_p, y_p, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$  の計 8 個である。なお撮影の間、パラメータを変化させないことが必要である。

共線条件式 (2-8) に補正項 (2-10) を加えて次式を得る。

$$\begin{aligned} x + \Delta x &= -c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \\ y + \Delta y &= -c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} \end{aligned} \quad (2-11)$$

右辺を移項して

$$\begin{aligned} F_x &\equiv x + \Delta x + c \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0 \\ F_y &\equiv y + \Delta y + c \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} = 0 \end{aligned} \quad (2-12)$$

とおく。この式は強い非線形性を有するので、線形化を行う。

複数の点を複数の画像に写した場合、多数の像が得られる。1 つの像に対して式 (2-11) の 2 本の式ができる。このようにして得られる多数の共線条件式を連立させて解けば、その解として対象点の座標が得られる。この場合、未知数の数以上の式が立つだけの像が必要である。

式 (2-12) は未知数について非線形なので、一度で解を求めることはできず、繰返し法を用いて解く。すなわち、ある初期値のまわりでテーラー展開して線形化し、その線形連立方程式を最小 2 乗法で解いて補正項を求める。この補正項を用いて解を更新し、次の線形化の初期値とする。この手順を解が収束するまで繰り返す。

一般に非線形方程式  $f(x) = 0$  を解くとき、初期値 (仮の解)  $x^0$  を設定してそのまわりで線形化し、得られた線形方程式を解いて  $\Delta x$  を得る。そして

$$x = x^0 + \Delta x \quad (2-13)$$

として解を更新する。つまり前の値に補正項を足し合わせる。式 (2-12) について未知数は  $(X, Y, Z, X_0, Y_0, Z_0, \theta, \phi, \kappa, x_p, y_p, c, k_1, k_2, k_3, p_1, p_2)$  の計 17 個であり、それぞれに式

(2-13)が成り立ち，線形化の解とする．

$$\begin{aligned}
 X &= X^0 + \Delta X \\
 Y &= Y^0 + \Delta Y \\
 Z &= Z^0 + \Delta Z \\
 &\vdots \\
 p_2 &= p_2^0 + \Delta p_2
 \end{aligned} \tag{2-14}$$

また回転角についても，前述のように $\theta = \theta^0 + \Delta\theta$ として和の形で更新するのが通常である．しかし本研究では，3つの回転角を個別に扱わず，回転行列として積の形で更新する．すなわち初期回転行列を $M^0$ とし，線形化によって得られた更新分を $\Delta M$ とする

$$M = M^0 \cdot \Delta M \tag{2-15}$$

として次の回転行列を求める．このような形で線形化すると，係数行列に直行するベクトルが解析的に容易に求まる．回転角の微小変化と回転行列との関係を明らかにすると， $\theta, \phi, \kappa$ がそれぞれ $\Delta\theta, \Delta\phi, \Delta\kappa$ だけ微小変化したとき，余弦は1に，正弦は微小角に近似できるので，式(2-2)より

$$\Delta M = \begin{pmatrix} 1 & \Delta\kappa & -\Delta\theta \\ -\Delta\kappa & 1 & \Delta\phi \\ \Delta\theta & -\Delta\phi & 1 \end{pmatrix} \tag{2-16}$$

と書ける．これを用いると，微小回転による回転行列 $M$ の変化分 $dM$ は次のように計算できる．

$$\begin{aligned}
 dM &= M \cdot \Delta M - M \\
 &= M(\Delta M - I) \\
 &= \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \Delta\kappa & -\Delta\theta \\ -\Delta\kappa & 0 & \Delta\phi \\ \Delta\theta & -\Delta\phi & 0 \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} m_{13}\Delta\theta - m_{12}\Delta\kappa & m_{11}\Delta\kappa - m_{13}\Delta\phi & m_{12}\Delta\phi - m_{11}\Delta\theta \\ m_{23}\Delta\theta - m_{22}\Delta\kappa & m_{21}\Delta\kappa - m_{23}\Delta\phi & m_{22}\Delta\phi - m_{21}\Delta\theta \\ m_{33}\Delta\theta - m_{32}\Delta\kappa & m_{31}\Delta\kappa - m_{33}\Delta\phi & m_{32}\Delta\phi - m_{31}\Delta\theta \end{pmatrix}
 \end{aligned} \tag{2-17}$$

よって、それぞれの回転角の変化に対する回転行列の微分は次のように表される。

$$\begin{aligned}\frac{\partial M}{\partial \theta} &= \begin{pmatrix} m_{13} & 0 & -m_{11} \\ m_{23} & 0 & -m_{21} \\ m_{33} & 0 & -m_{31} \end{pmatrix} \\ \frac{\partial M}{\partial \phi} &= \begin{pmatrix} 0 & -m_{13} & m_{12} \\ 0 & -m_{23} & m_{22} \\ 0 & -m_{33} & m_{32} \end{pmatrix} \\ \frac{\partial M}{\partial \kappa} &= \begin{pmatrix} -m_{12} & m_{11} & 0 \\ -m_{22} & m_{21} & 0 \\ -m_{32} & m_{31} & 0 \end{pmatrix}\end{aligned}\quad (2-18)$$

以上で、線形化の準備を終わり、共線条件式の具体的な線形化計算を行う。記述の簡単のために式(2-12)を

$$\begin{aligned}F_x &= x + \Delta x + c \frac{N_x}{D} = 0 \\ F_y &= y + \Delta y + c \frac{N_y}{D} = 0\end{aligned}\quad (2-19)$$

と書き直しておく。ここで

$$\begin{aligned}N_x &= m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0) \\ N_y &= m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0) \\ D &= m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)\end{aligned}\quad (2-20)$$

である。画像上の測定値を $(x', y')$ とすると真値との関係は、測定誤差 $(v_x, v_y)$ を考慮して

$$\begin{aligned}x &= x' + v_x \\ y &= y' + v_y\end{aligned}\quad (2-21)$$

となる。以下、初期値のまわりでテーラー展開し、以下のような線形化された共線条件式を得る。

$$\begin{aligned}v_x + F_x(X^0, Y^0, Z^0, X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \theta^0, \phi^0, \kappa^0, x_p^0, y_p^0, c^0, k_1^0, k_2^0, k_3^0, p_1^0, p_2^0) \\ + \left(\frac{\partial F_x}{\partial X}\right)^0 \Delta X + \left(\frac{\partial F_x}{\partial Y}\right)^0 \Delta Y + \left(\frac{\partial F_x}{\partial Z}\right)^0 \Delta Z + \dots + \left(\frac{\partial F_x}{\partial p_2}\right)^0 \Delta p_2 = 0 \\ v_y + F_y(X^0, Y^0, Z^0, X_0^0, Y_0^0, Z_0^0, \theta^0, \phi^0, \kappa^0, x_p^0, y_p^0, c^0, k_1^0, k_2^0, k_3^0, p_1^0, p_2^0) \\ + \left(\frac{\partial F_y}{\partial X}\right)^0 \Delta X + \left(\frac{\partial F_y}{\partial Y}\right)^0 \Delta Y + \left(\frac{\partial F_y}{\partial Z}\right)^0 \Delta Z + \dots + \left(\frac{\partial F_y}{\partial p_2}\right)^0 \Delta p_2 = 0\end{aligned}\quad (2-22)$$

式(2-22)を行列表示すると

$$\begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X_0 \\ \Delta Y_0 \\ \Delta Z_0 \\ \Delta \theta \\ \Delta \phi \\ \Delta \kappa \end{pmatrix} \\
 + \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} & b_{28} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta x_p \\ \Delta y_p \\ \Delta c \\ \Delta k_1 \\ \Delta k_2 \\ \Delta k_3 \\ \Delta p_1 \\ \Delta p_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} \tag{2-23}$$

ここで  $a, b, c$  は偏微分係数であり,  $\mathbf{e} = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \end{pmatrix} = -\mathbf{F}(X^0, Y^0, \dots, p_2^0)$  で残存量ベクトル (discrepancy vector) である. さらにこれを置き換えて

$$\mathbf{v} + A_1 \mathbf{x}_1 + A_2 \mathbf{x}_2 + A_3 \mathbf{x}_3 = \mathbf{e} \tag{2-24}$$

の形を得る. この式が観測方程式 (observation equations) であり, 画像上のすべての点について立てることができる. 全写真点は  $mn$  ( $m$ : 画像枚数,  $n$ : 対象点の数) なのでこれらの行列の行数, すなわち方程式の数は  $2mn$  である. 構成を図 2-6 に示す.

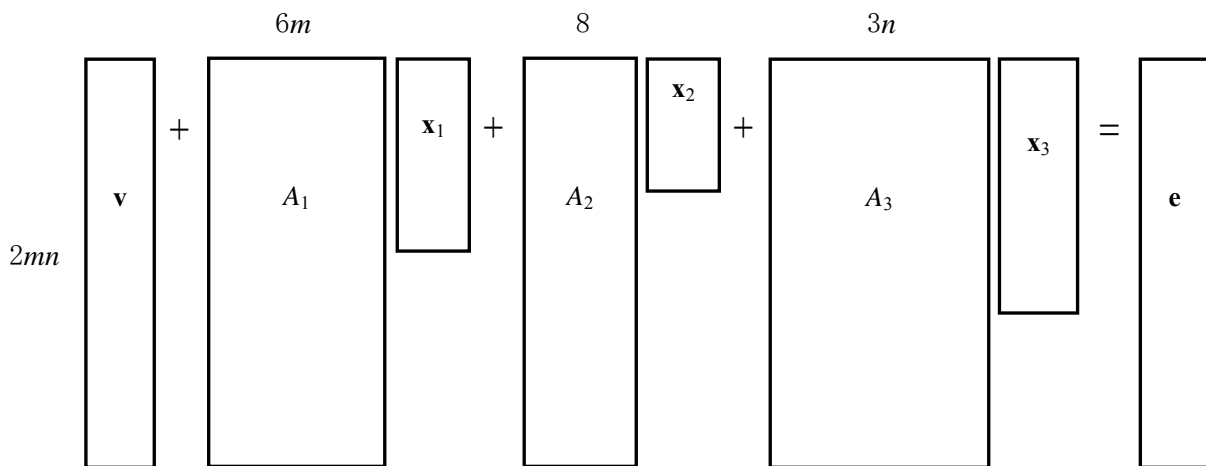


図 2-6 式(2-24)の構成

添字 1 は外部標定要素, 添字 2 はカメラ内部パラメータ, 添字 3 は対象点座標に関する

る量を表している。各係数行列の大きさは次のようになる。

$$A_1 : 2mn \times 6m$$

$$A_2 : 2mn \times 8$$

$$A_3 : 2mn \times 3n$$

また  $\mathbf{x}_1$  は各画像の外部標定要素の、 $\mathbf{x}_2$  はカメラパラメータの、 $\mathbf{x}_3$  は対象点座標の補正量ベクトルである。すなわち

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_1 &= (\dots \Delta X_0^i \ \Delta Y_0^i \ \Delta Z_0^i \ \Delta \theta^i \ \Delta \phi^i \ \Delta \kappa^i \ \dots)^T \\ \mathbf{x}_2 &= (\Delta x_p \ \Delta y_p \ \Delta c \ \Delta k_1 \ \Delta k_2 \ \Delta k_3 \ \Delta p_1 \ \Delta p_2)^T \\ \mathbf{x}_3 &= (\dots \Delta X^j \ \Delta Y^j \ \Delta Z^j \ \dots)^T \end{aligned} \quad (2-25)$$

である。 $i$  は第  $i$  番目の画像を、 $j$  は第  $j$  番目の対象点を表す。

続いて、未知パラメータに対する観測式を考える。未知パラメータは直接観測できないので、実用的には未知数の取りうる範囲を限定する条件を与えるときに用いられる。例えば、対象点に別途測定した座標値がある場合、カメラパラメータの一部もしくは全部を固定したい場合、などである。観測値がまったくない場合は重みを 0 とし、計算に寄与しないようにする。

$$(\text{真値}) = (\text{観測量}) + (\text{誤差}) = (\text{近似値}) + (\text{補正量})$$

の関係から、(誤差) - (補正量) = (近似値) - (観測量) が導けるので、 $\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \mathbf{x}_3$  それぞれについて

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_1 - \mathbf{x}_1 &= \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{v}_2 - \mathbf{x}_2 &= \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{v}_3 - \mathbf{x}_3 &= \mathbf{e}_3 \end{aligned} \quad (2-26)$$

が考えられる。ここで(近似値) - (観測量)を残存量  $\mathbf{e}_i (i:1,2,3)$  とした。これと式(2-24)

とをあわせて行列表示すると

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} A_1 & A_2 & A_3 \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & -I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \\ \mathbf{x}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{e} \\ \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \\ \mathbf{e}_3 \end{pmatrix} \quad (2-27)$$

まとめて以下のように書いておく。

$$\mathbf{v} + \mathbf{Ax} = \mathbf{e} \quad (2-28)$$

式(2-28)においては、通常未知数の数より方程式の数が多いので、最小 2 乗法を用いて解く。すなわち、2 乗誤差の総和を最小にするべく

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n v_i^2 = \mathbf{v}^T \mathbf{v} = (\mathbf{e} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T (\mathbf{e} - \mathbf{A}\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (2-29)$$

とするような未知数  $\mathbf{x}$  を求める。また各測定値の精度が異なる場合、重み (weight) を考慮しなければならない。つまり、精度の良いデータに対しては大きな重みをつけ、悪いデータには重みを小さくして取り扱うべきである。重み行列

$$W = \begin{pmatrix} w_1 & & & & \mathbf{0} \\ & w_2 & & & \\ & & w_3 & & \\ & & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & & w_n \end{pmatrix} \quad (2-30)$$

を導入すると、式 (2-29) は

$$\Phi(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n w_i v_i^2 = \mathbf{v}^T W \mathbf{v} = (\mathbf{e} - \mathbf{A}\mathbf{x})^T W (\mathbf{e} - \mathbf{A}\mathbf{x}) \rightarrow \min \quad (2-31)$$

となる。重みは次の式で表される。

$$w_i = \frac{\sigma_0^2}{\sigma_i^2} \quad (2-32)$$

ここで  $\sigma_0^2$  は数値のスケールを調整するための定数、 $\sigma_i^2$  は事前分散である。式 (2-31) の左辺を  $\mathbf{x}$  で偏微分して 0 とおくと

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \Phi(\mathbf{x}) = 2\mathbf{A}^T W \mathbf{e} - 2(\mathbf{A}^T W \mathbf{A}) \mathbf{x} = 0 \quad (2-33)$$

上式を整理して正規方程式 (normal equations)

$$(\mathbf{A}^T W \mathbf{A}) \mathbf{x} = \mathbf{A}^T W \mathbf{e} \quad (2-34)$$

を得る。以上より、未知数の推定値  $\hat{\mathbf{x}}$  は

$$\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T W \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T W \mathbf{e} \quad (2-35)$$

として得られる。

次に式 (2-35) で求めた推定値がどのような精度で計算されたかを評価する。一般に、観測値のもつ誤差が未知数の誤差に現れることを誤差の伝播といい、その数学的関係を示したものを誤差伝播の法則と呼ぶ。観測が平均値とその分散で表現するのと同様、未知数もその推定値と分散で表す。

未知数  $\mathbf{x}$  が観測値  $\mathbf{e}$  と  $\mathbf{x} = F(\mathbf{e})$  の関係で結ばれているとする。線形の場合、 $\mathbf{x} = \mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B}$  と表せる。観測値の分散は、その平均値を  $\boldsymbol{\mu}_e$  として



$$\Sigma_e = E[(\mathbf{e} - \boldsymbol{\mu}_e)(\mathbf{e} - \boldsymbol{\mu}_e)^T] \quad (2-36)$$

で計算される。同様に未知数  $\mathbf{x}$  の分散は上式より、次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \Sigma_x &= E[(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)^T] \\ &= E[(\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B} - \boldsymbol{\mu}_x)(\mathbf{A}\mathbf{e} + \mathbf{B} - \boldsymbol{\mu}_x)^T] \end{aligned} \quad (2-37)$$

また、 $\boldsymbol{\mu}_x = \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}_e + \mathbf{B}$  であるので、式(2-37)に代入して

$$\begin{aligned} \Sigma_x &= E[(\mathbf{A}\mathbf{e} - \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}_e)(\mathbf{A}\mathbf{e} - \mathbf{A}\boldsymbol{\mu}_e)^T] \\ &= \mathbf{A} \cdot E[(\mathbf{e} - \boldsymbol{\mu}_e)(\mathbf{e} - \boldsymbol{\mu}_e)^T] \cdot \mathbf{A}^T \\ &= \mathbf{A}\Sigma_e\mathbf{A}^T \end{aligned} \quad (2-38)$$

これが誤差伝播の一般式で、未知量の分散共分散行列を推定するのに非常に重要である。また、非線形関数の場合でも、線形化することによって誤差伝播の法則が成立する。観測方程式(2-28)において、観測値の真値  $\boldsymbol{\xi}$  がわかっているものとし、さらに観測値のもつ真の誤差ベクトルを  $\boldsymbol{\varepsilon}$  とすると、観測方程式は

$$\boldsymbol{\varepsilon} + \boldsymbol{\xi} = \boldsymbol{\varepsilon} + \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{e} \quad (2-39)$$

と表される。 $\boldsymbol{\varepsilon}$  の各要素は偶然誤差のみで、かつ相関をもたないとする、 $\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T$  の期待値は、事前分散  $\sigma_i^2$  を用いて

$$\begin{aligned} \Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}} &= E(\boldsymbol{\varepsilon}\boldsymbol{\varepsilon}^T) = E \begin{pmatrix} \varepsilon_1\varepsilon_1 & \varepsilon_1\varepsilon_2 & \cdots & \varepsilon_1\varepsilon_n \\ \varepsilon_2\varepsilon_1 & \varepsilon_2\varepsilon_2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ \varepsilon_n\varepsilon_1 & \cdots & \cdots & \varepsilon_n\varepsilon_n \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \sigma_2^2 & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (2-40)$$

である。 $\sigma_i^2$  ( $i=1, \dots, n$ ) をあらかじめ知ることはできないので、これらの値は計測機器の精度仕様値や経験値によって定める。式(2-30)の重み行列はこの値の逆数を用いて

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} \sigma_0^2 / \sigma_1^2 & & & \mathbf{0} \\ & \sigma_0^2 / \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ \mathbf{0} & & & \sigma_0^2 / \sigma_n^2 \end{pmatrix} = \sigma_0^2 \Sigma_{\boldsymbol{\varepsilon}}^{-1} \quad (2-41)$$

となる。先にも述べたように分散が小さい，すなわち精度がよい観測には，それに比例して大きな重みを与えられる。  $\sigma_i^2 = \sigma_0^2$  のとき重みは 1 となるので，  $\sigma_0^2$  のことを単位重みの分散 (variance of unit weight) とも言う。本研究では，すべての観測値について等精度であると仮定し，かつ重みは 1 とする。すなわち  $\sigma_0^2$  が事前分散となる。

式(2-39)より未知数の推定ベクトルは

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x} + (A^T W A)^{-1} A^T W \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2-42)$$

で求められる。式(2-35) (2-39)を用いると，誤差ベクトルは

$$\begin{aligned} \mathbf{v} &= \mathbf{e} - A(A^T W A)^{-1} A^T W \mathbf{e} \\ &= (\mathbf{e} + A\mathbf{x}) - A(A^T W A)^{-1} A^T W (\mathbf{e} + A\mathbf{x}) \\ &= (I_n - A(A^T W A)^{-1} A^T W) \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2-43)$$

となる。  $I_n$  は  $n$  行  $n$  列の単位行列である。最小 2 乗関数  $\Phi$  は

$$\begin{aligned} \mathbf{v}^T W \mathbf{v} &= \boldsymbol{\varepsilon}^T (I_n - W A (A^T W A)^{-1} A^T) W (I_n - A (A^T W A)^{-1} A^T W) \boldsymbol{\varepsilon} \\ &= \boldsymbol{\varepsilon}^T (W - W A (A^T W A)^{-1} A^T W) \boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^T M \boldsymbol{\varepsilon} \end{aligned} \quad (2-44)$$

$$= \sum_{i=1}^n m_{ii} \varepsilon_i^2 + \sum_{i \neq j} m_{ij} \varepsilon_i \varepsilon_j$$

$$\text{ここに } M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & \cdots & m_{1j} \\ m_{21} & m_{22} & & \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ m_{i1} & & \cdots & m_{ij} \end{pmatrix} = I_n - W A (A^T W A)^{-1} A^T W \text{ である。}$$

式(2-42)の期待値をとると

$$\begin{aligned} E(\mathbf{v}^T W \mathbf{v}) &= \sum_{i=1}^n m_{ii} E(\varepsilon_i^2) + \sum_{i \neq j} m_{ij} E(\varepsilon_i \varepsilon_j) \\ &= \sum_{i=1}^n m_{ii} \sigma_i^2 \\ &= \left( \sum_{i=1}^n \frac{m_{ii}}{w_i} \right) \cdot \sigma_0^2 \end{aligned} \quad (2-45)$$

ここで，式(2-41)より

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n \frac{m_{ii}}{w_i} &= \text{tr}(M W^{-1}) = \text{tr}(I_n - W A (A^T W A)^{-1} A^T) \\ &= \text{tr}(I_n) - \text{tr}((W A (A^T W A)^{-1} A^T)) \\ &= \text{tr}(I_n) - \text{tr}((A^T W A)^{-1} A^T W A) \\ &= \text{tr}(I_n) - \text{tr}(I_m) = n - m \end{aligned} \quad (2-46)$$

この値は(観測方程式の数) - (未知パラメータの数) = (独立な条件の数)で自由度と呼んでいる。式(2-45)の結果は、式(3-46)から次のように表される。

$$E(\mathbf{v}^T W \mathbf{v}) = (n - m) \sigma_0^2 \quad (2-47)$$

以上より、観測値の分散  $\sigma_0^2$  の不偏推定量は

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T W \mathbf{v}}{n - m} \quad (2-48)$$

で表される。画像計測でこの値の平方根の正值は、画像座標(x, y)の計測誤差として扱う。計測が正しく行われた(解析モデルが正確に復元された)場合、 $\sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$ となる。

正規方程式の解である未知数の推定値は、式(2-35)から  $A^T W A = N$  として

$$\hat{\mathbf{x}} = N^{-1} A^T W \mathbf{e} \quad (2-49)$$

で表される。ここで観測値ベクトル  $\mathbf{e}$  の分散  $\Sigma_e$  が分かっているので、誤差伝播の式(2-37)にあてはめて、推定値  $\hat{\mathbf{x}}$  の分散を計算する。

$$\begin{aligned} \Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} &= (N^{-1} A^T W) \Sigma_e (N^{-1} A^T W)^T \\ &= (N^{-1} A^T W) \Sigma_e (W^T A N^{-1}) \end{aligned} \quad (2-50)$$

ここで  $\Sigma_e$  は式(2-32)から、観測値の重み  $W$  と

$$W = \frac{\sigma_0^2}{\Sigma_e} \quad (2-51)$$

の関係にある。したがって式(2-50)に代入して整理すると、 $\hat{\mathbf{x}}$  の分散共分散行列が得られ、次式で表される。

$$\Sigma_{\hat{\mathbf{x}}} = \sigma_0^2 N^{-1} \quad (2-52)$$

未知数の推定値の分散は、この行列の対角要素である。この値は内的精度といわれ、図 2-7 に示すような分布をもち、観測の信頼性を表す。推定値の平均の近傍に集中すれば内的精度は小さいが、この値では真値に対する精度を表すことはできない。

そこで、推定値の平均が真値とどれだけ偏りをもっているかを表す値として、外的精度がある。ある量を  $n$  回観測したとき、その外的精度は以下の式で与えられる。

$$\sqrt{\frac{\sum (\text{推定値} - \text{真値})^2}{n}} \quad (2-53)$$

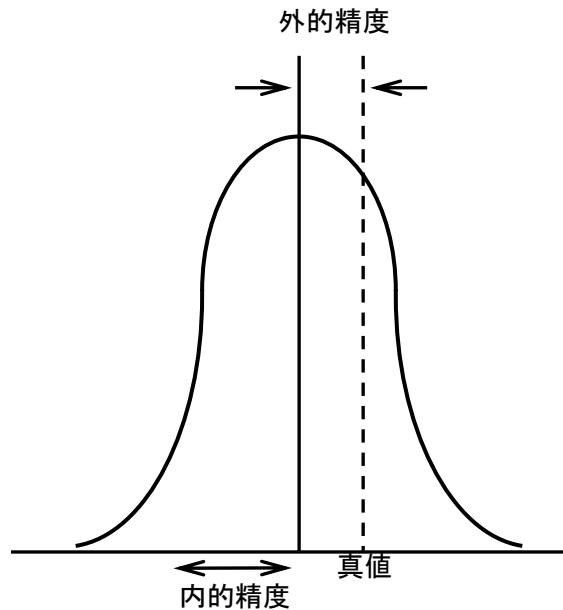


図 2-7 2 種類の精度

しかし、実際の計測において真値を知りうることは皆無に等しく、厳密に外的精度を求めることは不可能である。そのためより精密な、または信頼されている測定器を用いて対象を計り、その測定値との差から計算することがほとんどである。一般に両者の値が一致することはなく、通常の計測では内的精度のほうが外的精度よりも良い。外的精度には、比較対象とする計測器自体の誤差も含まれるからである。内的精度は、何度も同じ計測を繰り返したとき得られる対象点座標推定値のばらつきの範囲を表している。すなわち、母標準偏差の推定量である。

## 2.2 自動化のための原理

デジタル画像を用いた測量システムでは表 2-1 に示すような手順により計測を実施している。

- ①画像取得：デジタルカメラによる撮影（20 枚～60 枚）
- ②画像のソフトウェアへの取り込み[自動]
- ③画像上のターゲット位置特定（各画像）とカメラ外部標定
- ④解析計算：セルフキャリブレーション付バンドル調整法による計算

⑤結果の検証と再計算

⑥前回計測と比較

表 2-1 デジタル画像測量法による作業時間

作業項目	作業詳細	時間(分)	備考	比率(%)
画像取得	現地において計測対象を撮影する	60	28枚	26
画像取込	パソコンに画像データを変換して取込む	20	自動	9
ターゲット取得	画像上のターゲット位置特定・カメラ外部標定	130	手動	57
解析計算	バンドル調整計算	10	半自動	4
結果の検証	異常値の確認	5	手動	2
前回数との比較	前回の計測結果との比較	5	自動	2

現場作業については、撮影位置へのアクセスのしやすさにも依存するが、平均1箇所当たりの所要時間は3分程度、7地点での撮影でも移動時間を含めて1時間程度の作業である。しかし、室内作業において、画像の取り込み～ターゲット位置特定について1枚あたり5分程度を要しており、7地点(28枚)の画像を処理するのに約2.5時間(全体作業の約65%)を要している。このうち、ソフトウェアの取り込みについては、自動化されているため人的な負荷はほとんどなく、昼休み・夜間等を実施させることが可能である。

解析作業・結果の検証については、おおよそ10分～20分程度で実施できるため、上記の②取り込み、③ターゲット特定の作業時間について作業性が改善されれば、全体の処理における人的作業量が減少する。②取り込みについては、前述のとおり自動化されているため、③ターゲットの特定の効率化が全体の作業性の向上(人的負荷の減少)に直接的に影響する。「ターゲット位置特定」の手順の効率化(自動化)を検討するため、現在の作業手順を検証すると次の通りである。

- ①画像を表示する
- ②画像内のターゲット4点～6点程度をクリックし、登録されたターゲットの番号を入力する。
- ③撮影位置の概略値を入力し、すでに入力したターゲットの位置関係から後方交会法により撮影位置(カメラ外部標定)の推定計算を実施する
- ④推定された撮影位置から、入力したターゲット以外の登録されているターゲット

の画像上の位置の推定計算を実施し、画像に推定位置を表示する

⑤推定ターゲット位置が実際のターゲットの近傍にマークされていることを確認し、  
おおきくずれている場合には手動で移動させる

⑥ターゲットの微調整処理を選択し、連続的にターゲットの中心位置を検出する

⑦処理結果を保存する

これらの作業手順の内、②のターゲットの指定および番号の入力は、それほど複雑な作業ではないため、専門的な技能を要するわけではないが、ここでの番号の設定は、ターゲット自体に番号が表記されているわけではなく、画像の周囲の地物からターゲットの番号を推定し入力する必要がある。ここで番号を誤って入力すると、③以降の処理が全て正常に実施されないため、なかなか求める結果に到達できない。

具体的には、一つのターゲットの番号を1番異なる番号とすると、後方交会法によるカメラ位置推定計算の収束が悪く、ターゲットの位置推定についても実際の画像上のターゲット位置から大きく離れた位置にマークされるため、その修正に多くの時間を要してしまう。

また、ターゲットの位置関係に習熟している作業者の場合には、作業自体は遺漏なく完了できるものの、内容については単純作業であり、これを30枚、40枚と実施することは、作業者にとっての精神的な負荷が大きくなる。このように、画像内での4点以上の特定のターゲットについて、その位置と番号をプログラムにより自動的に特定できれば、作業の精度向上と手戻りの防止、単純作業項目数の減少が期待できる。

さらに画像上からターゲットに位置とその番号を特定するためには、

#### ①『コード化ターゲットの導入』

ターゲットの特徴的な配置によるパターン化とそのパターンを認識する手法を導入する

#### ②『撮影位置の高精度検出』

カメラ位置（撮影位置の座標）と方向角、上下角、回転角を正確に取得し、前章②、③の作業自体を省略する

#### ③『カラーターゲットの導入』

特定のターゲットをカラー化し、ターゲットの番号と色情報を一致させることにより、特定色のターゲットを認識する手法を導入する

といった方法が考えられる。

この内、②の方法については、デジタル画像測量法の利便性をまったく無視するもので、新規に位置・角度を計測する機材を開発または導入する必要があり、撮影時の作業についても煩雑になるために、現実的な方法とはいえない。

①に示したパターン化したターゲット配置については、反射ターゲットを用いる旧来の写真測量法における研究で実現されているが、リアルタイム測量システムといった屋外のフィールドにおいては、反射ターゲットを長期間保守することは非常に難しい。また、ターゲットだけが明瞭に撮影できるように、ストロボ撮影を実施する必要があるが、道路のり面の計測のように撮影距離が離れている場合には、強力なストロボを使用する必要がある。さらに、ストロボを使用する方法については、施工中の法面においては作業時間外に実施する等で適用することが可能であるが、供用中の道路のり面の撮影においては、通行車両に対して事故を誘発する要因になりかねないため不適當であり、現場での利用には適さない。

③のターゲットのカラー化について、現行方式で用いているターゲットは「白色の四角で、周囲に黒ふちをつけ、周囲から明瞭に区分できる特徴をもつことでストロボ撮影を行わなくともターゲットの中心検出が可能」という、検証試験をもとに規定した形状である。このため、カラー化したターゲットが、白色のターゲットと同様の中心検出が可能であるかどうかについては、検証実験を実施する必要がある。しかし、カラーターゲットを撮影位置特定の目的に特化したインプットデータとして用いれば、中心検出精度が多少低下しても、解析結果に影響を及ぼさない。このカラーターゲットを検出する手法を確立することで、現行システムの手順自体には大きな変更をすることなくターゲットの位置と番号の特定を実施することが可能である。

そこで本研究においてはカラーターゲットの利用について考察する。

デジタルカメラによる撮影画像は通常では RGB の 3 チャンネルの数値の組み合わせにより表現される。このような画像の数値による表記には多種多様な方法があり、その表記方法は色空間と呼ばれる。色空間とは、色を数値(チャンネルと呼ぶ)の組み合わせによって表現するための方法である。英語の Color Space からカラースペースともいわれている。3種類か4種類の数値を組み合わせることにより表現される。色空間は主に色の再現(特にデジタルの表現)に役立つ。デジタル印刷やディスプレイなどには欠かせないものである。本章では、代表的な色空間の定義を示したあと、RGB と HSV による色空間表記について、その特徴とターゲットの自動検出への適応性について

て示す.

### 2.2.1 カラーターゲットについて

以下に代表的な色空間表記法（表色系）を示す.

#### 1) RGB

RGB は一般に、加法混色を表現するのに使われる。光の三原色をもととして、数値を増すごとに白に近づく。反対に、数値を減らすごとに黒くなる。コンピュータのモニターで用いられるのも、この RGB である。RGB は、それぞれ赤 (red) 緑 (green) 青 (blue) の頭文字である。

#### 2) RGBA

RGBA は RGB の色空間に加えて、透過 (透明度) を表現するアルファチャンネルも色決定に考慮させる。

#### 3) CMK

CMY は印刷の過程で利用する、減法混色の表現法である。色の三原色からイエロー (yellow) を除いた表現である。CMK には、シアン (cyan), マゼンタ (magenta), そして黒 (black) のインクの数値が含まれている。一般的にイエローの使用頻度が少なく、CMK だけで十分表現可能であり、印刷コストも下がることから低価格印刷物に利用されている。

#### 4) CMYK

CMYK は印刷の過程で利用する、減法混色の表現法である。色の三原色を元としている。基本色は白で、それに色の度合いを加えて (減法)、黒色にしていく。すなわち、始めは白いキャンバスから始め、インクを加えて暗くしていくということである。CMYK には、シアン (cyan), マゼンタ (magenta), イエロー (yellow), そして黒 (black) のインクの数値が含まれている。

#### 5) HSV

HSV はコンピュータで絵を書く場合や、色見本として使われる。これは、色を色相と彩度という観点から考える場合、加法混色や減法混色よりも自然だからである。HSV では色相 (hue), 彩度 (saturation value), 輝度 (value) の 3 値で色を表現する。



## 6) YIQ, YUV, YCC, YCbC (いずれも映像信号向)

YIQ は、NTSC カラー映像信号で使用されている。YIQ にはルミナンス(輝度)と2つのクロミナンス(色差、YIQ の場合大体色の中の青と赤の量に相当)の値が含まれる。これは、PAL テレビや JFIF 形式の JPEG 画像で用いられる YUV(YCC(正確には YCbCr)とも)に非常に似ている。ただし、YIQ は 1950 年代当時のカラーのブラウン管の性能に基づき定められており、当時は青の発色が悪かったため、YIQ は青の表現力に欠ける面がある。

## 7)その他

他に、以下のような表色系がある。

- ・マンセル表色系：印刷向の表色系（塗装色指定等）
- ・CIE 表色系：CIE（国際照明委員会）が定める各種の表色系。

これらの表色系（色空間）を用いて、目的に応じて被写体の色を定義することができるが、表現結果についてはそれぞれに共通する注意が必要な点がある。

RGB 表色系を例にとれば、例えば赤といってもいろいろな赤があるのであって、赤・緑・青の基準を定めないことには正確な色表現ができない。さまざまな表色系が存在するが、それぞれの表色系ごとに、赤・緑・青の基準が定められている。さらに、われわれが計測しようとする対象は、放射光ではなく、反射光である。センサー・フィルム等で画像を取得する場合、暗闇では何も撮影することはできない。

このように、被写体の色を波長（スペクトル）帯域で定義しても、その値は、それが撮影または計測された環境における照明（環境）光の波長成分に大きく左右される。例えば、蛍光灯下での撮影では、光源に赤色の成分（長波長成分）が不足するため、全体に青から緑がかかった色合いで撮影されてしまうし、白熱灯下での撮影では発熱発光のため、青色の成分（短波長成分）がほとんどないため、全体に黄色からオレンジがかかった色合いで撮影されてしまう。また、屋外での撮影においても、早朝や夕方といった時間帯では、光の屈折率の違いにより長波長成分が高めになり撮影画像は赤っぽくなってしまう（朝焼け・夕焼け）。このため、デジタルカメラ・デジタルビデオ等では、ホワイトバランス調整という出力調整機能が備わっているが、この調整も完全なものではなく、照明の光源にない波長帯域の色成分については、表現力が低下してしまう。このように、カラーカラーインデックスを作成し、同系色を抽出しようと

する場合、インデックスの光源と計測対象を撮影する場合の光源が一致していることが重要である。一方、デジタルカメラの画像は、RGBの色成分の数値データとして記録されている。光の3原色によるこの色表記はセンサーの出力値の直接的な数値であり、モニター等に画像として出力する際のデータとして変換することなく使用できる。しかし、RGB系による表現は、色合い・同系色のグルーピング等、人間の目(脳)の色判別とは異なる表現系であり、RGB系による表記では、撮影条件により微妙に異なるターゲット色を自動検出する処理を手順化することは難しい。以下に、RGB系の色空間の特徴について示す。

RGB系による表記は、図2-8のように光の信号を赤(R)、緑(G)、青(B)の3成分(光の三原色)に分解し、それぞれの強度を数値化することにより得られる値で画像を表現する方法である。

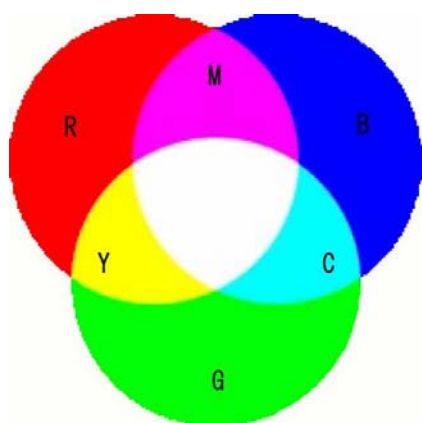


図2-8 RGB系の色空間

CCDのフィルター配置  
(原色フィルター)

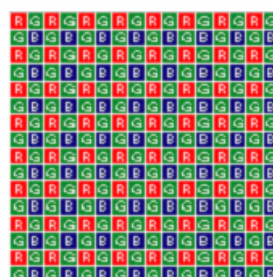
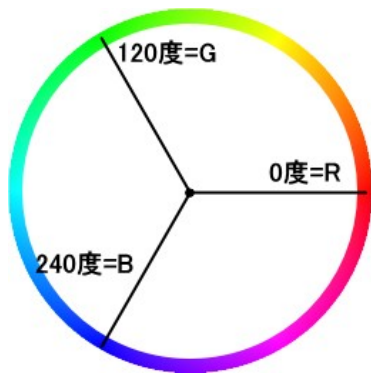
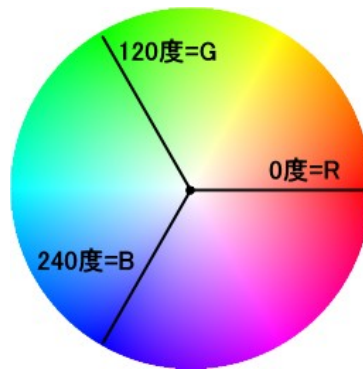


図2-9 CCDのフィルタ

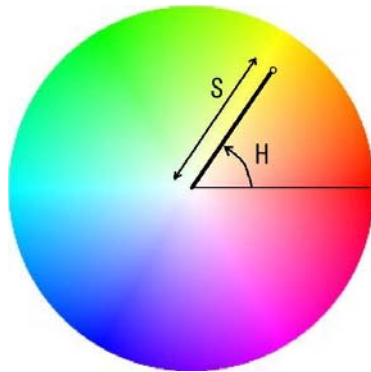
RGB系の色空間では、たとえば、フォトセンサーにRGBの各フィルターを貼付することにより、特定の点の色(反射光)を簡単に数値情報として取得することができる。現在のデジタルカメラ、ビデオカメラに用いられているCCD撮像素子は、図2-9に示すように、すべてこの原理を用いて画像を記録している。また、RGB系の表記はカラー印刷を行う際にCMYK(RGBの補色+黒)の色インクにより表現できる。しかしながら、人間の目では、ある特定の色を見て赤がいくつ、緑がいくつ、青がいくつと数値的に体感することはできないし、その色に緑を30、青を20加えたときの色を想像することは不可能である。このように、RGB系の色空間は入出力デバイスに対して、非常に相性の良い表記形であるが、人間の感覚的な表現とはまったく異なった表現形である。



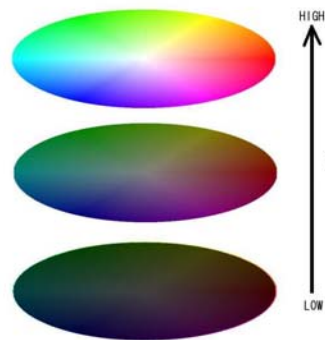
色相 (H) の定義



彩度 (S) を加えた色空間



色相 (H) と彩度 (S) の関係



輝度 (V) の定義

図 2-10 HSV 空間による色の表現

そのため、RGB 系の色空間で表現されるデータにより特徴量を抽出しようとする、アルゴリズムで表記すること（またはプログラミングすること）は非常にむずかしく、また、その検証を実施することも難しい。先に示したように、図 2-10 のように HSV では色相 (hue)、彩度 (saturation value)、輝度 (value) の 3 値で色を表現する。

図 2-10 は、HSV 系の色空間の定義を色相 (H)、彩度 (S)、輝度 (V) についての定義を図示したものである。色相は、対象色の絶対的な色（感覚的な色）を表しており、その純度（彩度：鮮やかさ）とは無関係に表記される。このため、薄暗く撮影された画像でも、はっきりと明瞭な照明の下で撮影された画像でも、同じ色の物体は、同じ色相値をもつことになる。彩度は、その色の純度または鮮やかさを示している。彩度が高くなるとその色の濃さ（鮮やかさ）が明瞭になり、逆に低くなると白っぽい淡い色合いとなる。輝度は、その名のとおり、そのデータの示す明度であり、輝度が低いほど暗く、また高いほど明るくなる。図 2-11 は、図 3 の色相の円環について 180 度 (CYAN) を中心に直線で表したものである。この図から、水色 (CYAN) を抽出する

ためには、180 度を中心に各画素（ピクセル）の色相値について 180 度からの角度差（オフセット）を計算し、角度差の少ない画素のみを選択すればよいことがわかる。この手順により水色に近い色あいをもつ画素の検出が RGB 値により算出するよりも単純なアルゴリズムで実現可能である。



図 2-11 直線で表現した色相 (H)

このように、HSV 系の色空間の表現では、〇〇に近い色、同系色といったあいまいな色表現の対象を比較的容易に定義し、分離することが可能になる。そこで、本研究では HSV 空間を利用したターゲットの認識技術を開発する。

RGB からの変換は以下のようなアルゴリズムで行う。

○RGB → HSV

$$V = \max( R, G, B )$$

$$S = ( V - X ) / V \text{ ただし } X = \min( R, G, B )$$

H は次の式で表される。

$$R = V \text{ の場合 } H = ( \pi / 3 ) * ( b - g )$$

$$G = V \text{ の場合 } H = ( \pi / 3 ) * ( 2 + r - b )$$

$$B = V \text{ の場合 } H = ( \pi / 3 ) * ( 4 + g - r )$$

$$\text{ただし } r = ( V - R ) / ( V - X ), \quad g = ( V - G ) / ( V - X )$$

$$b = ( V - B ) / ( V - X )$$

H : 0 ~ 360    S : 0 ~ 1    V : 0 ~ 1, R,G,B : 0 ~ 1 とする。

HSV 系はあくまでも RGB 系のデータを 1 対 1 に変換したものであり、別のセンサーによる計測値によって補正するものではない。また 1 対 1 の写像であるため、HSV に変換したデータを補正したのち、再度 RGB に変換することも可能である。

## 2.2.2 HSV 系の色空間におけるターゲット検出

図 2-12 は、赤 (0deg)、黄 (60deg)、緑 (120deg)、青 (240deg) の各色に着色したバーおよびボールを撮影した画像について、色相 (HUE) に着目してそれぞれの角度で

の類似度を画像化したものである。各画像で白っぽく表現されている部分はその角度での最大値を表しており、バーおよびボールについて、それぞれの角度値での類似度が高くなっていることがわかる。

対比の意味で、図 2-13 に同様のオリジナル画像に対して、RGB のそれぞれの色成分で分離した画像データを示す。RED のチャンネルでは、赤および黄色のバー・ボールについて、赤色成分が強いため白っぽく撮影されている。しかし、GREEN および BLUE のチャンネルでは、緑および青のボール・バーは、RED における赤・黄色と比較すると鮮明な白にはなっていない。これは、緑および青のボール・バーが、CCD センサーの規定する GREEN・BLUE の色とは微妙に異なるため、各色チャンネルにおけるデータの強度があまり高くないことを示している。このように、RGB での色判別は、青・緑と肉眼では見えるものが、デジタルデータ上では、BLUE または GREEN が 100% のデータではない場合、数値処理としてそれぞれの色の物体を抽出することが難しいことがわかる。

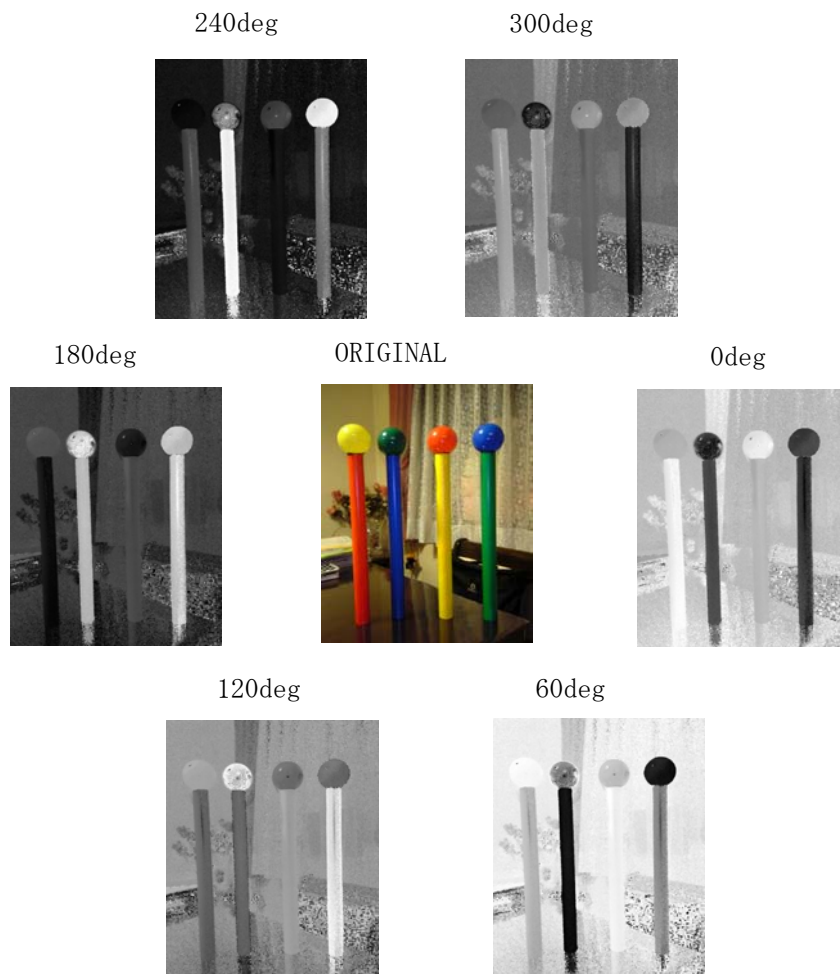


図 2-12 色相 (HUE) による同系色の検出

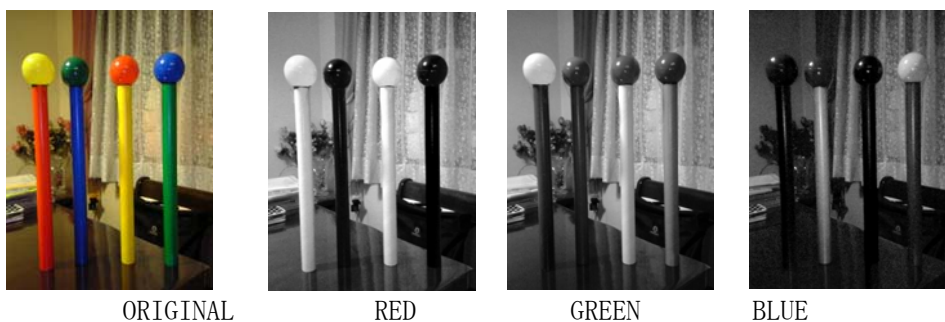


図 2-13 RGB に分解した画像イメージ

これに対して HSV の表記方法を用いる場合には色相に着目することで、緑に近い色については GREEN の近似度が高く、青に近い色では BLUE の近似度が高くなり、プログラムとしてアルゴリズムを表記した場合、各色の物体を抽出することが比較的容易になる。

このように、HSV 系による表記（色空間）を用いることで、色相（Hue）により同系色をグルーピングし、対象とするターゲット色を検出する手順をアルゴリズムとして表記することが可能である。本処理に必要なターゲット色は 4 色であり、光の 3 原色およびその補色（RGB, YMC）を基本的な指定色として、現地背景色と明瞭に区別する色合いの 4 種を選択することで、個々のターゲットを検出および識別することができる。実際の検出の手順としては、ターゲットを撮影した数十枚の画像から 1 枚を選択し、そこで撮影されているカラーターゲットについて、各色のターゲットを人間がマウス等で指定する。これにより、それぞれのターゲットの色相基準値が設定され、他の画像（明度の異なるものがあったとしてもかまわない）について、同様の色相値のターゲットの検出を実施する。この場合、周期的に計測を実施するような現場においても、ターゲットの色相値の設定は初回の一度で可能であると想定できるため、2 回目以降の計測については、解析計算にいたる前の処理についてかなりの部分を自動化できると推定される。

### 2.3 自動認識ソフトの検証

実験は、現在写真測量システムにより、施工時の法面モニタリングを試験的に実施している現場で実施した。ターゲットはすでに接地済であり、今回のカラーターゲッ

トによる自動検出手法の開発にむけて、テスト用のカラーターゲットのみを追加設置することで、実験が可能となる。カラーターゲットによる検出実験は、法面向かって右端において実施する。これは、図 2-14 における撮影中心⑤～⑥の範囲である。接地位置は、図中の赤丸で囲った部分を想定している。

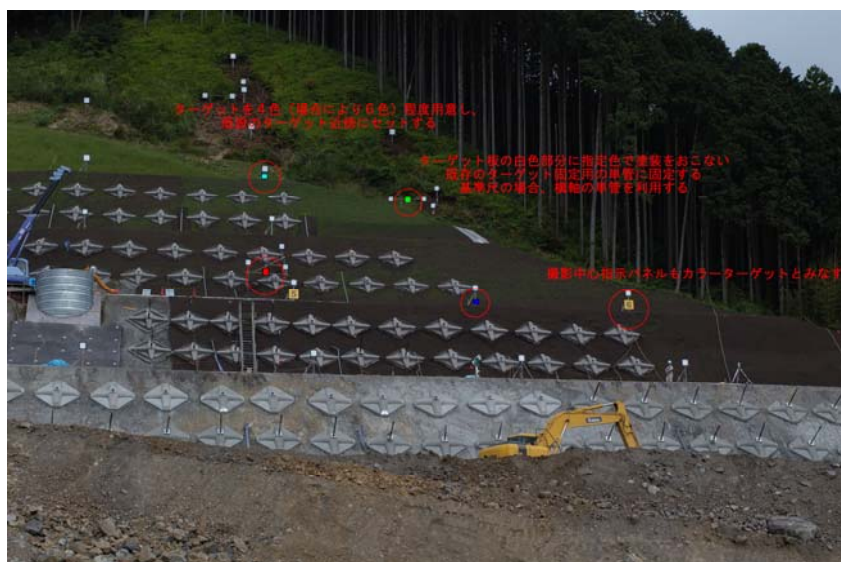


図 2-14 法面に設置したカラーターゲット像の例



図 2-15 原画像



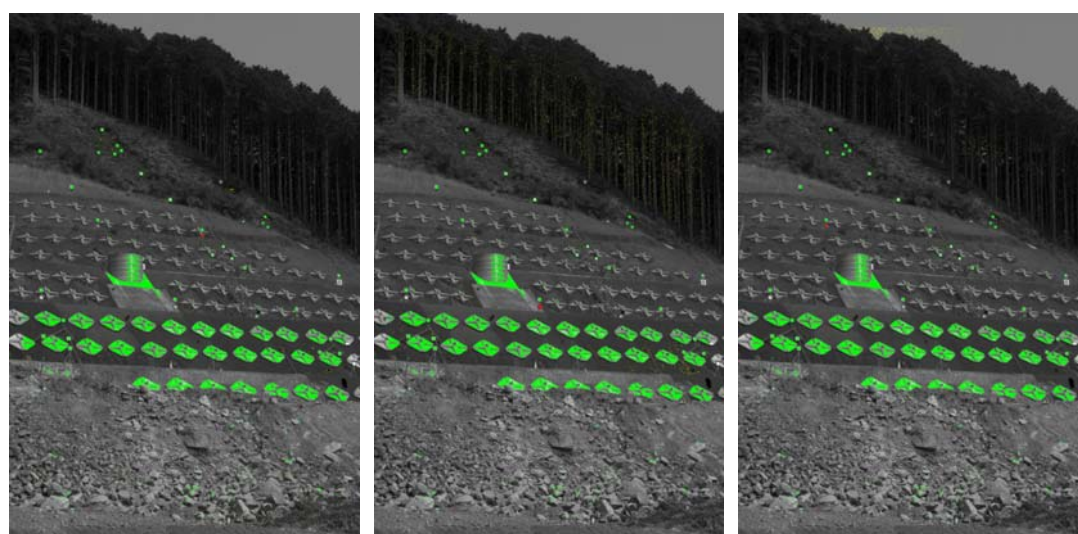
図 2-16 ターゲット画像拡大図

図に示すとおり、ターゲットは既存形状と同様のものを用いて、白色部分に指定色で塗装したものを新たに製作する。ターゲットの設置は、単クランプを用いて、既設ターゲットと同様の固定方法とする。図 2-15 は実験対象のオリジナルの画像である。計測対象現場の法面に設置された集水孔を中心に 5 色のカラーターゲットを配置して

いる。図 2-16 はそれぞれのターゲットの部分を拡大したものである。標準的な露光の画像では明瞭にそれぞれのターゲットを目視で識別できる。計測の対象とした色は、赤紫、赤、青、水色、緑の 5 色である。プログラムでは、自動検出を実施する前にカラーターゲット上をクリックして探索色の代表値をセットし、同時に直近の白色ターゲットの番号をセットしている。システム的には、カラーターゲットの座標自体を保持せず、直近の計測用ターゲットを検出するようになっているため、現場で交換する際に、カラーターゲットを正確な位置にセットする必要が無いため取付け作業者のスキルを要求しない。図 2-17 に各カラーターゲット検出結果の画像を示す。画像の中で赤く表示されている部分がカラーターゲットとして認識された部分を示し、黄緑色で表示されている部分が白色ターゲットまたは無彩色で明度の高いもの（灰色～明灰色：主にコンクリート）を示している。自動検出処理では、カラーターゲットを検出したあと、検出したカラーターゲットの近傍にある画像中の黄緑色の部分のうちターゲット形状に合致するものを探索し、その中心位置（濃度重心）の画面座標を算出している。画像上に同一の形状であり、かつ同一の色相の物体があった場合、画面中心に近い方の検出結果を対象ターゲットとして認定するようになっている。このため、広大な法面において複数ブロックに分けて計測を実施するような場合でも、画面に複数の同一色ターゲットが撮影されていてもほとんどの場合、誤認識を回避できる。図 2-18 および図 2-19 はカラーターゲットの自動検出に失敗した画像の代表例である。それぞれ標準的な露光量の 40% および 30% 程度しかない画像で、撮影時刻も太陽高度の低くなった夕方での撮影である。図 2-19 のターゲットについては明るい色調の水色、赤紫のターゲットについてはそれぞれの画像で自動検出できていたが、暗い色調の赤、緑のターゲットについてはほとんどの画像で検出することができなかった。また、夕方遅くの撮影では、1 枚毎に画像の明度変化が異なり、撮影開始時点と終了時点の画像では 30 分程度の時間差もあり明度が倍以上ことなるものもあった。これとは別に、法面がおおむね西向きであるため法面に向かって左側から撮影した画像でターゲット表面で太陽光が直接反射してカラーターゲット本来の色とはやや異なる色相のデータとなってしまったものも存在した。この場合でも法面に向かって右側から撮影した画像ではほぼ背中に太陽を受けており、斜め位置からの撮影であるためにカラーターゲット本来の色相で撮影されていた。このように、太陽高度が低く、照度が刻々と変化するような夕方の撮影においては、カラーターゲットの検出が難しくなることが確認



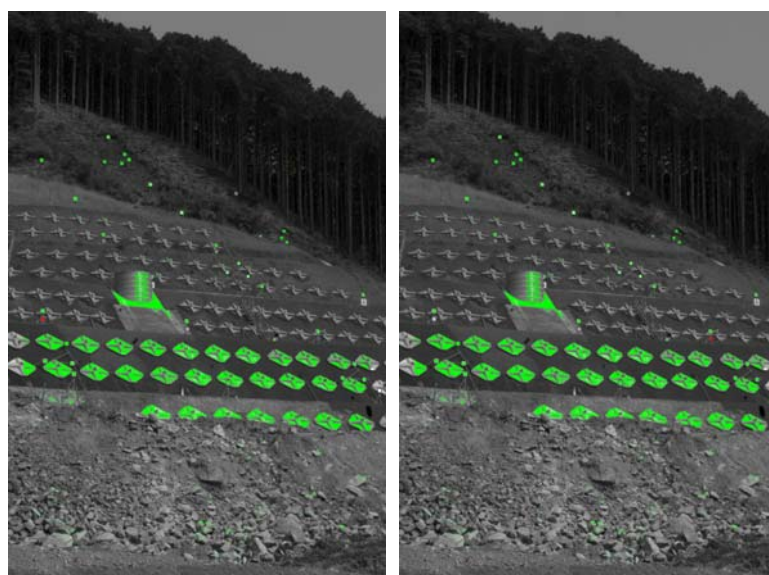
された。1枚の撮影ごとに露出を確認し、適正な露出で撮影することができれば、この問題はある程度回避できる可能性はあるが、作業効率を考慮するのであれば夕方の撮影はできるだけ回避するべきである。表 2-2～2-4 はそれぞれ適正露光画像 32 枚、露光不足画像：通常の 50% 28 枚、露光不足画像：通常の 33% 28 枚の画像について自動標定を実施した結果を示す。それぞれ 100%、97%、67%であった。この結果から、カラーターゲットによる自動標定は、通常またはやや暗めの画像（露光量が通常の 50% 程度まで）について有効であると判断できる。なお、カラーターゲットの自動検出処理については標準、弱画像処理、強画像処理の 3 通りの設定が選択可能になっている。



赤ターゲット検出状況

赤紫ターゲット検出状況

青ターゲット検出状況



水色ターゲット検出状況

緑ターゲット検出状況

図 2-17 ターゲット検出結果

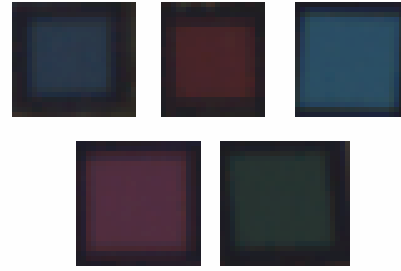


図 2-18 不適格な画像およびターゲット部拡大図（露光量 40%程度）



図 2-19 不適格な画像およびターゲット部拡大図（露光量 30%程度）

標準の処理では、画像データを取り込んで、色相の類似度を4%として標準値と類似のカラーターゲットの検出処理を行う。また、弱画像処理は、画像データ取り込み後に、全体の画素についてフィルタリング処理（平滑化処理、10%のガンマ補正、10%の明度・彩度強調処理）を実施してから色相の類似度を5%として処理を行う。強画像処理については弱画像処理のフィルタリング処理を、平滑化処理を25%のガンマ補正、20%の明度・彩度強調処理に変更してカラーターゲットの検出処理を実施する。

ただし、今回選択したターゲット色では、強画像処理を用いて5%の類似度で判定した場合、水色と青、および赤紫と赤のターゲットについて区分が難しく、誤認識が発生している場合があった。

表 2-5 は従来の作業工数を、表 2-6 は今回の改良を実施した結果を示したものである。本開発により、従来の解析作業では手動作業が全作業の60%以上を要していたものが、新システムにおいては15%程度にまで減少した。解析作業の総所要時間も

自動処理による効率の工場により従来の半分以下になっている。画像の取り込みや標定・解析処理等の実処理時間は従来と変わらないものの、人間が常時コンピュータの側について進行状況を確認しつつ作業を行う必要がなく、その分の作業時間を別作業に割り当てることが可能になった。実際に28枚の画像について解析処理を行う場合、人的作業が約20分程度で可能となり非常に効率化が進んだ。ここで、ターゲット標定から解析計算に至る全過程を自動化すればさらに効率は向上すると思われる。しかし、実際には撮影位置とターゲットの設置状況から、ターゲットが重なって写ってしまうケースや、現地の植生等の影響によりターゲットが隠蔽されてしまい、画面にあらわれてこないことも多く発生する。

表 2-2 自動認識実施結果

Name	自動標定				弱画像処理				強画像処理			
	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考
Image_001.bmp	5	0.017	○		5	0.013	○		4	0.046	△	白ターゲット誤認
Image_002.bmp	4	0.029	○		4	0.030	○		4	0.029	△	白ターゲット誤認
Image_003.bmp	5	0.016	○		5	0.013	○		5	0.047	○	
Image_004.bmp	4	0.037	○		4	0.036	○		4	0.037	○	
Image_005.bmp	5	0.011	○		5	0.011	○		5	0.011	○	
Image_006.bmp	4	0.037	○		4	0.040	○		4	0.039	○	
Image_007.bmp	5	0.008	○		5	0.008	○		5	0.009	○	
Image_008.bmp	4	0.044	○		4	0.048	○		4	0.047	○	
Image_009.bmp	5	0.010	○		5	0.010	○		5	0.009	○	
Image_010.bmp	4	0.047	○		4	0.171	△	白ターゲット誤認	4	0.046	○	
Image_011.bmp	5	0.012	○		5	0.087	△	白ターゲット誤認	5	0.012	○	
Image_012.bmp	4	0.053	○		4	0.170	△	白ターゲット誤認	4	0.052	○	
Image_013.bmp	5	0.024	○		5	0.022	○		5	0.044	○	
Image_014.bmp	4	0.050	○		4	0.050	○		4	0.168	△	白ターゲット誤認
Image_015.bmp	5	0.030	○		5	0.028	○		5	0.030	○	
Image_016.bmp	4	0.056	○		5	0.057	○		4	0.055	○	
Image_017.bmp	5	0.012	○		5	0.019	○		5	0.052	○	
Image_018.bmp	4	0.062	○		4	0.062	○		5	0.064	○	
Image_019.bmp	5	0.006	○		5	0.054	○		5	0.056	○	
Image_020.bmp	4	0.054	○		4	0.053	○		4	0.056	○	
Image_021.bmp	5	0.006	○		5	0.007	○		5	0.006	○	
Image_022.bmp	5	0.004	○		5	0.002	○		5	0.003	○	
Image_023.bmp	5	0.011	○		5	0.057	○		5	0.043	○	
Image_024.bmp	5	0.014	○		5	0.059	○		5	0.012	○	
Image_025.bmp	5	0.021	○		5	0.022	○		5	0.018	○	
Image_026.bmp	5	0.016	○		5	0.016	○		5	0.014	○	
Image_027.bmp	5	0.023	○		5	0.025	○		5	0.025	○	
Image_028.bmp	5	0.027	○		5	0.027	○		5	0.027	○	
Image_029.bmp	5	0.019	○		5	0.184	△	白ターゲット誤認	5	0.017	○	
Image_030.bmp	5	0.016	○		5	0.018	○		5	0.017	○	
Image_031.bmp	5	0.027	○		5	0.027	○		5	0.027	○	
Image_032.bmp	5	0.029	○		5	0.027	○		5	0.029	○	
	成功数	32/32	(100%)		成功数	32/32	(100%)		成功数	32/32	(100%)	

表 2-3 自動認識実施結果

Name	自動標定				弱画像処理				強画像処理			
	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考
Image_023.bmp	4	0.001	○		5	0.017	○		4	0.160	△	白ターゲット誤認
Image_024.bmp	4	0.003	○		4	0.251	△	白ターゲット誤認	4	0.179	△	白ターゲット誤認
Image_029.bmp	5	0.004	○		5	0.144	△	白ターゲット誤認	4	0.155	△	白ターゲット誤認
Image_030.bmp	4	0.003	○		4	0.139	△	白ターゲット誤認	4	8.705	×	白ターゲット誤認
Image_037.bmp	4	0.002	○		4	0.002	○		4	10.695	×	白ターゲット誤認
Image_038.bmp	4	0.001	○		5	0.001	○		3		×	
Image_039.bmp	4	0.005	○		4	0.005	○		4	0.099	△	白ターゲット誤認
Image_040.bmp	4	0.006	○		3		×	緑ターゲット未検出	3		×	
Image_053.bmp	5	0.003	○		4	0.128	○		5	0.007	△	白ターゲット誤認
Image_054.bmp	5	0.002	○		5	0.003	○		5	0.224	△	白ターゲット誤認
Image_069.bmp	5	0.002	○		4	0.002	○		4	0.323	△	白ターゲット誤認
Image_070.bmp	5	0.003	○		5	0.003	○		5	0.218	△	白ターゲット誤認
Image_077.bmp	4	0.006	○		4	0.110	△		4	0.197	△	白ターゲット誤認
Image_078.bmp	4	0.002	○		5	0.165	△	白ターゲット誤認	4	0.309	△	白ターゲット誤認
Image_083.bmp	4	0.003	○		4	0.092	○		4	0.433	△	白ターゲット誤認
Image_084.bmp	5	0.001	○		5	0.009	○		5	0.135	△	白ターゲット誤認
Image_087.bmp	5	0.001	○		5	0.004	○		5	0.004	△	白ターゲット誤認
Image_088.bmp	5	0.002	○		5	0.003	○		4	0.167	△	白ターゲット誤認
Image_101.bmp	5	0.004	○		5	0.005	○		5	0.020	○	
Image_102.bmp	5	0.004	○		5	0.004	○		5	0.044	○	
Image_111.bmp	4	0.001	○		5	0.002	△		4	0.212	△	白ターゲット誤認
Image_112.bmp	4	0.002	○		4	0.095	△		4	0.103	△	白ターゲット誤認
Image_113.bmp	4	0.013	○		3		×	緑ターゲット未検出	3		×	
Image_114.bmp	3		×	緑ターゲット未検出	3		×	緑ターゲット未検出	3		×	
Image_121.bmp	4	0.001	○		4	0.001	○		4	0.165	△	白ターゲット誤認
Image_122.bmp	5	0.002	○		5	0.004	○		5	0.035	○	
Image_123.bmp	4	0.007	○		4	2.617	×		4	4.753	×	白ターゲット誤認
Image_124.bmp	4	0.005	○		4	0.154	△		4	0.011	○	
	成功数	27/28	(96.4%)		成功数	24/28	(85.7%)		成功数	21/28	(75%)	

表 2-4 自動認識実施結果

Name	自動標定				弱画像処理				強画像処理			
	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考	Targets	RMSE	判定	備考
Image_005.bmp	5	0.003	○		5	0.001	○		5	0.003	○	
Image_006.bmp	5	0.002	○		5	0.002	○		5	0.026	△	白ターゲット誤認
Image_011.bmp	5	0.002	○		5	0.003	○		5	0.167	△	白ターゲット誤認
Image_012.bmp	5	0.003	○		5	0.002	○		5	0.103	△	白ターゲット誤認
Image_017.bmp	5	0.010	○		5	0.093	○		5	0.084	○	
Image_018.bmp	5	0.005	○		5	0.004	○		5	0.112	△	白ターゲット誤認
Image_023.bmp	5	0.026	○		5	0.004	○		5	0.007	○	
Image_024.bmp	5	0.102	△		5	0.007	○		5	0.119	△	白ターゲット誤認
Image_033.bmp	3		×		5	0.002	○		5	0.005	○	
Image_034.bmp	2		×		3		×		5	0.005	○	
Image_043.bmp	4	0.020	○		4	0.026	○		4	0.222	△	白ターゲット誤認
Image_044.bmp	4	0.023	○		4	0.023	○		4	0.202	△	白ターゲット誤認
Image_045.bmp	3		×		4	0.026	○		3		×	
Image_046.bmp	4	0.023	○		4	0.020	○		4	0.228	△	白ターゲット誤認
Image_049.bmp	4	4.836	×		5	0.504	×		5	0.025	○	
Image_050.bmp	3		×		4	0.373	△	白ターゲット誤認	4	0.073	○	
Image_053.bmp	1		×		3		×		4	4.203	×	
Image_054.bmp	0		×		3		×		3		×	
Image_059.bmp	3		×		3		×		2		×	
Image_060.bmp	3		×		3		×		3		×	
Image_061.bmp	2		×		3		×		2		×	
Image_062.bmp	2		×		2		×		3		×	
Image_065.bmp	3		×		5	0.023	○		3		×	
Image_066.bmp	2		×		4	0.167	△		4	0.311	△	
Image_067.bmp	4	0.012	○		4	0.010	○		2		×	
Image_068.bmp	3		×		4	0.009	○		3		×	
Image_071.bmp	5	0.030	○		4	0.927	×		5	0.008	○	
Image_072.bmp	5	0.033	○		4	0.326	△	白ターゲット誤認	5	0.042	○	
	成功数	14/28	(50.0%)		成功数	19/28	(67.9%)		成功数	18/28	(64.3%)	

このため、自動標定後に結果の確認を実施しないで解析計算処理をおこなっても、結局のところ収束が悪くて再解析となり手戻りになってしまうことになる。写真測量における標定作業は、その結果が計測値のすべてであり、解析計算処理の結果および精度に大きく影響するため、人間によるチェック作業は欠くことができない。カラーターゲットの認識結果については、極端に悪条件でなければ十分に満足できる内容であり、認識が不調であった画像についてもターゲットを2個から3個は検出できているため、画像を開き認識できたカラーターゲットを呼び出し、不足のターゲット（1点から2点）を指定することで、自動標定を実施させることができる。このため、自動認識が不調であった画像についても従来のように時間を要することなく、ごく短時間で処理をすることができる。カラーターゲットの検出は、通常の日中における撮影では、非常に高い信頼度で実施できることが確認されたが、夕方や早朝の撮影においては画像毎の明度の変化が大きくカラーターゲット検出にはやや不向きである。また、太陽高度の低い晩秋の夕方に撮影された画像では、法面に向かって左側の位置から撮影した画像で、ターゲット面の位置と太陽の位置関係から撮影画像が太陽光の直接反射を受ける位置にあったため色情報が他の撮影位置からの画像とかけはなれた値を示すものがあった。これは、ターゲット表面が光沢面であり、太陽光の直接反射によって本来のターゲットの色を取得できなかったためである。この結果からカラーターゲットの材質および表面の性状については配慮する必要があることがわかった。また、全体にグリーンターゲットが取得しにくい状況が多かったが、反射塗料としての緑は反射光量が十分ではないため露光量が不足した画像においては検出対象として不向きであることがわかった。

これらの点をまとめると以下のような制約項目および要検討項目になる。

- ・撮影時刻（太陽高度が低い時間帯にはなるべく撮影を行わない。また撮影を実施する場合には露光量の変動に注意する）
- ・カラーターゲットの表面の材質および性状について検討を行う。
- ・カラーターゲットの色は彩度が高く、照度低下に強い色になるように検討を行う。

なお、本システムではカラーターゲットについては計測用ターゲットとは区別し、カラーターゲット自体に3次元座標を与える代わりに、カラーターゲットを計測用ターゲットの直近に配置し、カラーターゲットの情報として計測用ターゲットのIDを付与している。今回追加した処理は、カラーターゲットの探索を行った後、周辺の計測

用ターゲット（白色ターゲット）を探索し、発見されたターゲットの ID および座標を結果として出力するため、カラーターゲット自体に座標値は必要がない。これは、カラーターゲットを屋外に設置した場合の、紫外線による退色およびターゲット自体の劣化の特性が現状では不明であり、長期の設置で退色等が発生した場合に交換を容易に実施することを可能にするためである。このため、既設の計測現場においても後からカラーターゲットを簡単に追加したり交換したりすることができる。

表 2-5 デジタル画像測量法による作業時間（写真枚数 28 枚の場合）

作業項目	作業詳細	時間(分)	備考	比率(%)
画像取得	現地において計測対象を撮影する	60	28枚	26
画像取込	パソコンに画像データを変換して取込む	20	自動	9
ターゲット標定	画像上のターゲット位置特定・カメラ外部標定	130	手動	57
解析計算	バンドル調整計算(結果の検証の繰返し)	10	半自動	4
結果の検証	異常値の確認(解析計算の再実行)	5	手動	2
前回値との比較	前回の計測結果との比較	5	自動	2

表 2-9 デジタル画像測量法による作業時間（写真枚数 28 枚の場合）

作業項目	作業詳細	時間(分)	備考	比率(%)
画像取得	現地において計測対象を撮影する	60	28枚	45
画像取込	パソコンに画像データを変換して取込む	20	自動	15
ターゲット標定	画像上のターゲット位置特定・カメラ外部標定	14	自動	11
標定確認	自動標定結果の確認	14	手動	11
解析計算	バンドル調整計算(結果の検証の繰返し)	10	自動	8
異常値の除去	異常値の確認(解析計算の再実行)	5	自動	4
結果の検証	計測結果の確認と評価	5	手動	4
前回値との比較	前回の計測結果との比較	5	自動	4
人的作業の時間累計 * カッコ内は総計		79 (133)		59
人的作業の時間累計(同上、写真撮影を除く)		19 (73)		26

\* 網掛け部は人手による作業

また、本自動化の手法が従来の手法（手動操作）と同様の精度を有するかどうか、  
 図 2-20 に示すターゲット場を用いて計測を試みた。

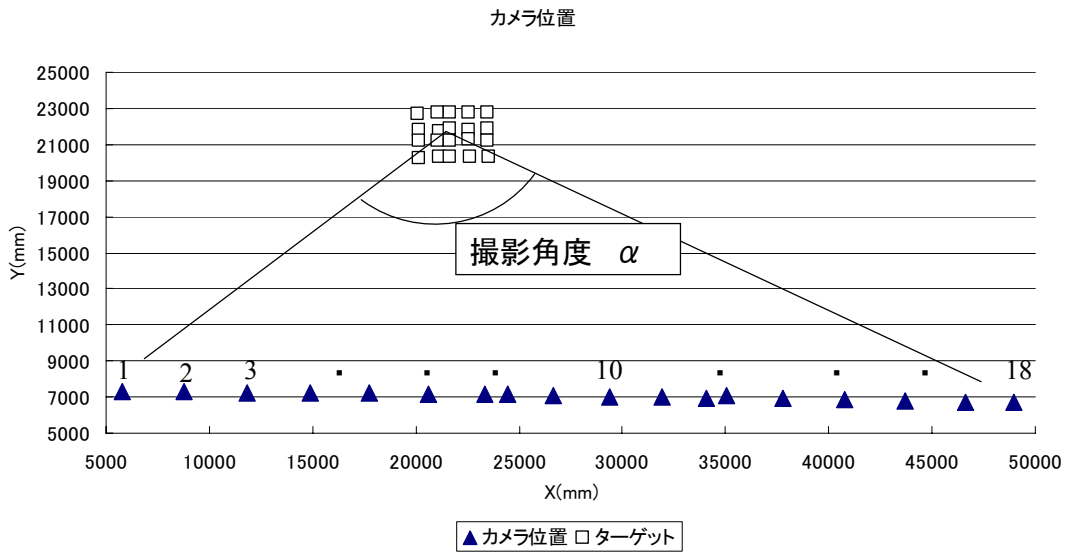


図 2-20 精度検証用ターゲット場

図における青三角印が撮影位置であり，図中における白四角の印がターゲットを示す．なお撮影は 600 万画素のカメラを用い，焦点距離 50mm のレンズで撮影した．図 2-21 には，撮影した画像枚数と内的精度の関係を，図 2-22 には図 2-20 における撮影角度  $\alpha$  と内的精度の関係を示す．図に示すように，従来の手法と，本開発の自動化の手法の精度はほぼ同等であることが検証された．

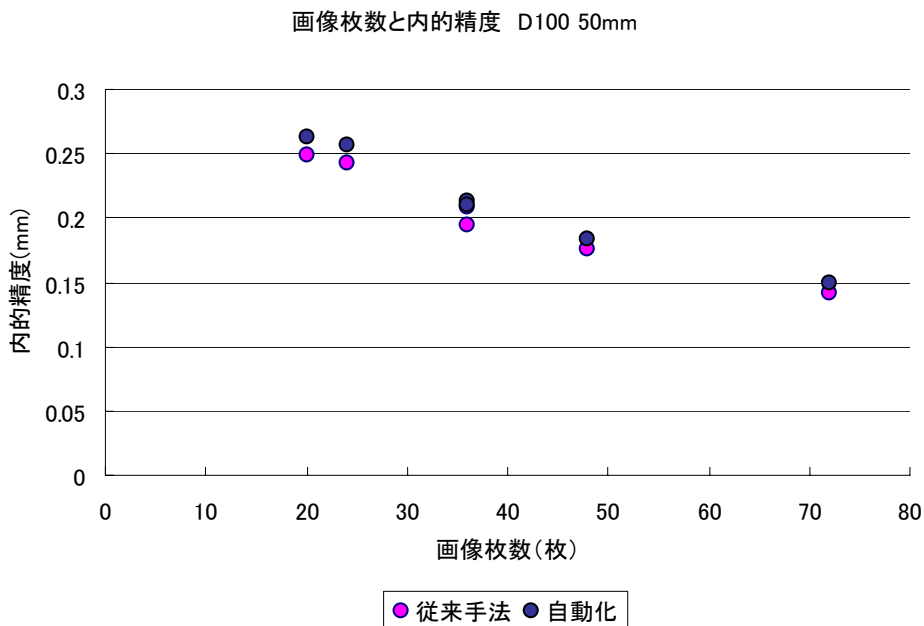


図 2-21 撮影画像枚数と内的精度の関係

撮影角度と内的精度(D100 50mm)

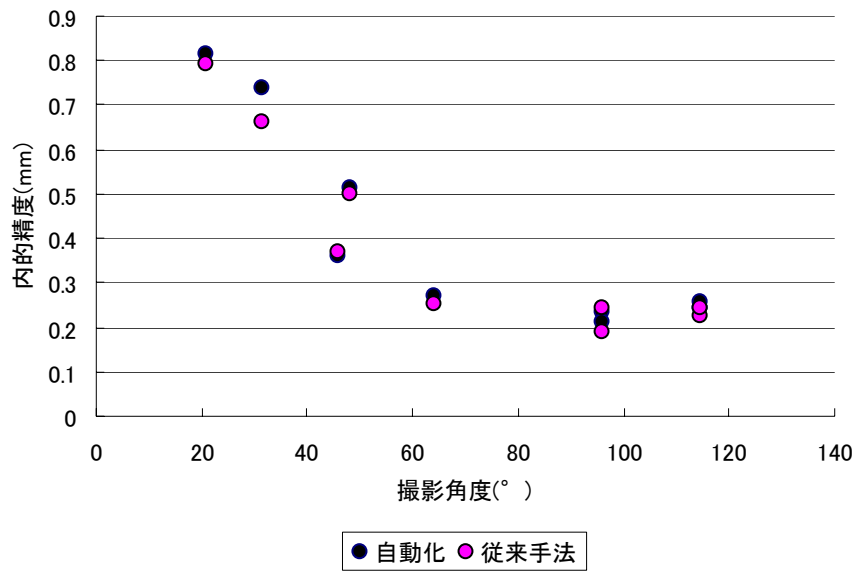


図 2-22 撮影角度と内的精度の関係



## 第3章 解析作業の自動化

解析作業の自動化とは、現在は解析結果を見ながら技術者が計測精度を向上させるための再解析の判断を行うが、これまで蓄積されたノウハウを整理し、精度向上につながる要因を抽出してマニュアル化しておくことにより、今後どんな技術者が対応しても、一定の成果を得ることができるようになることを目的とするものである。

### 3.1 精度に影響を与える諸要因の分析

現地作業の主なものは、ターゲットの設置と写真撮影である。このうち、ターゲット設置作業に関わるターゲットの個数の選定は、計測したい対象点を幾つに設定するのかによって異なり、計測対象現場ごとに異なる。これまでの経験より、1画面6個以上ターゲットが撮影される状態であれば、解析は可能であり、その個数は精度に影響しないことが判明している。これらを考慮して、本業務では残る現地作業である写真撮影に関して、その合理化を検討することとする。

現地での写真撮影は、理想的には対象物全体を覆うように、各方向から撮影するのがよい。しかし撮影対象区間が広い場合には、全体を1枚の画像におさめることができないので、対象物をオーバーラップするように写し、写真を接続する必要がある。このとき接続の輪を閉じるような撮影、つまり1枚の画像について両側から拘束することができれば、全体の計測精度を上げることができる。この様子を図3-1に示す。開いた接続だと、どうしても端の点が弱くなる。工業製品の形状計測の場合、その多くで接続を閉じることができるが、斜面での計測ではそのような撮影をすることは不可能であるため、枚数でカバーすることにより精度の落ち込みをくい止める。

まず、写真撮影枚数というパラメーターが、対象点の計測精度にどのような影響を与えるのかについて、理論的考察を行っていく。

写真測量の計測によって得られる対象点の座標は確率変数として求められる。これを一般化して、正規分布をしている確率変数  $x$  について、 $N$  個の測定値  $x_1, \dots, x_n$  を得た場合を考える。

各測定値の重みが同じならば、各測定値から得られる真の値  $X$  の最良推定値は値  $x_1, \dots, x_n$  の平均値  $u_x$  である。

$$u_x = \sum x_i / N \quad (3-1)$$

測定値  $x_1, \dots, x_n$  のそれぞれが正規分布をしていると考えられ、従ってその平均値も正規分布をする。

これをさらに一般化し、確率変数  $y$  と確率変数  $x$  の間に、

$$y = Ax + B \quad (3-2)$$

という関係が成り立っているとす。

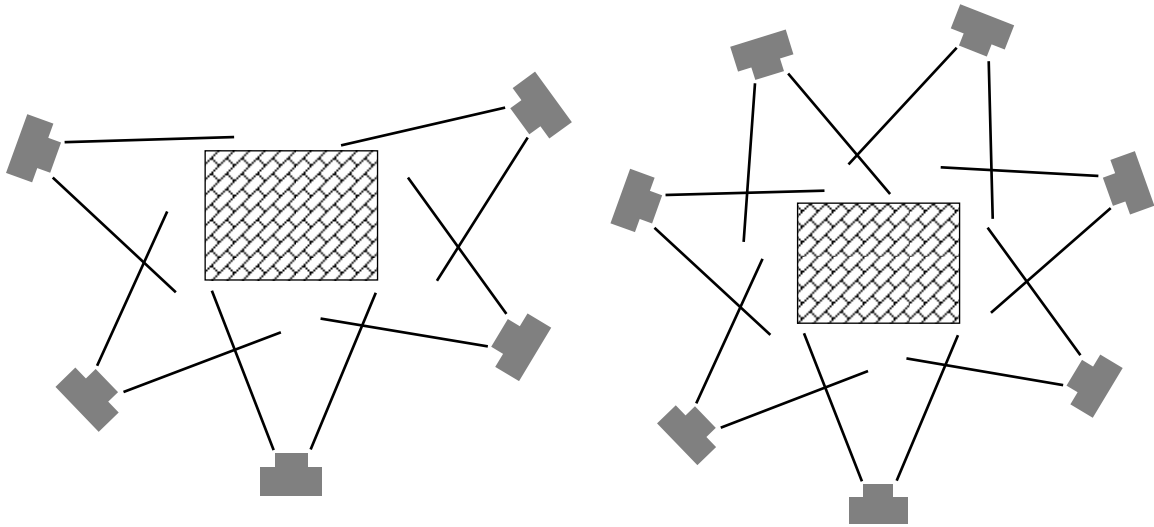


図 3-1 開いた接続 (左) と閉じた接続

確率変数  $y$  の分散  $\sigma_y$  は、

$$\sigma_y^2 = E[(y - u_y)(y - u_y)^T] \quad (3-3)$$

で与えられる。ここで、 $u_y$  は  $y$  の平均値、 $E[\ ]$  は期待値を取ることを意味し、 $( )^T$  は転置を取ることを意味する。

$u_y$  は、 $u_y = Au_x + B$  となることから、(3-3)式に(3-2)式を代入すると、

$$\begin{aligned} \sigma_y^2 &= E[A(x - u_x)(x - u_x)^T A^T] \\ &= AE[(x - u_x)(x - u_x)^T] A^T \\ &= A \sigma_x^2 A^T \end{aligned} \quad (3-4)$$

となる。

(3-1)式の場合を(3-4)式に適用して考えると、平均値の分散  $\sigma_u^2$  は、

$$\begin{aligned}\sigma_u^2 &= (1/N, \dots, 1/N) \sigma_x^2 (1/N, \dots, 1/N)^T \\ &= \sigma_x^2 / N\end{aligned}\tag{3-5}$$

となる.

これより,

$$\sigma_u = \sigma_x / \sqrt{N}\tag{3-6}$$

となり, 標準偏差は測定回数  $N$  の平方根に比例して改善されることになる.

写真測量においては, 測定 (計測) は写真撮影であり, 1つの対象点は何本の光線によって解析されたによって計測精度は決定されると考えられる. この場合, 計測精度は(3-6)式の左辺であり, 撮影枚数は(3-6)式の右辺の測定回数  $N$  に相当する.

これより, (3-6)式から

$$\text{計測精度} \propto \sqrt{\text{(写真枚数)}}\tag{3-7}$$

が成立すると考えられる.

前章で考察した際のデータを用いて, 写真枚数と対象点の 3次元計測精度の関係を求めたものが, 図 3-2 である. なお, 縦軸は全計測点の 3次元座標の計測精度の平均値

$$\sigma_{XYZ} = \sqrt{\frac{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2 + \sigma_Z^2}{3}}$$

を用いている.

図より実験結果は, 写真枚数と対象点の計測精度は, 理論的考察結果と同じく,

$$\text{計測精度} \propto \sqrt{\text{(写真枚数)}}$$

の関係が成立することを示している. このように理論を実験結果が証明していることは, 反射ターゲットの性能が同一の条件下では常に成立するものと考えられ, 写真測量を適用するどの現場にも成立する関係であると考えられる.

ただ, 絶対的な精度の値は各現場によって変わるため, 1, 2回の試行により, ある写真枚数の時の計測精度の値を求めておき, 本業務の結果に基づく(3-7)式に当てはめて, 要求精度に対する最低写真枚数の想定を行う必要はある. また, 写真枚数が計測精度に及ぼす影響は, 撮影の位置と角度も同時に考慮する必要がある.

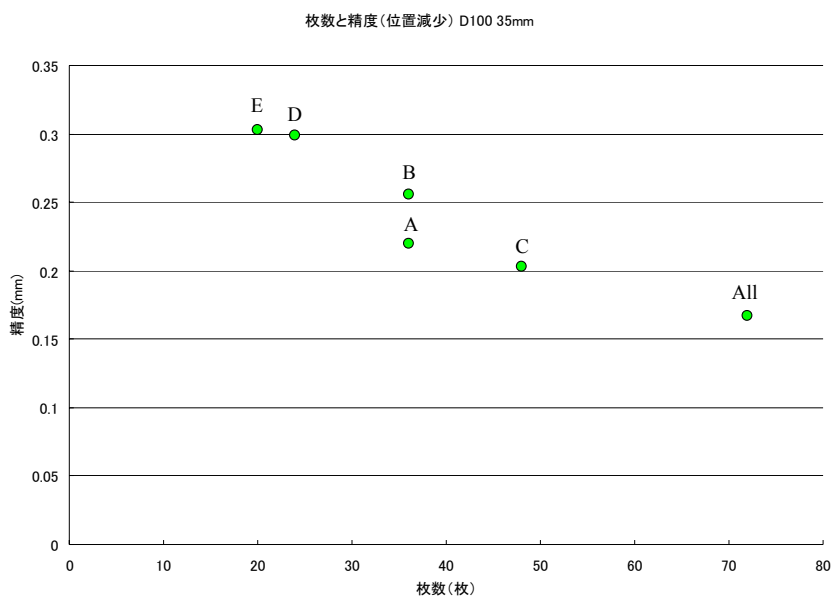


図 3-2 写真枚数と計測精度の関係

ここで、計測精度に影響する因子について再度考察する。図 1-3 の幾何学的な関係を考慮すると、2次元座標の読み取り誤差は、計測点の3次元座標に画像の縮尺倍拡大されることが分かる。

即ち、図 3-3 において、カメラの焦点距離を  $c$ 、カメラから計測点までの距離を  $(c + d)$  とすると、縮尺は  $(c + d) / c$  となる。

以上より、撮影距離と計測精度（分解能）は縮尺に比例した関係を持つと言え、共線条件より、

$$\text{計測精度} \propto$$

$$[(\text{撮影距離}) / (\text{焦点距離})] * (\text{画像上の2次元座標の読み取り誤差})$$

の関係が存在することが分かる。

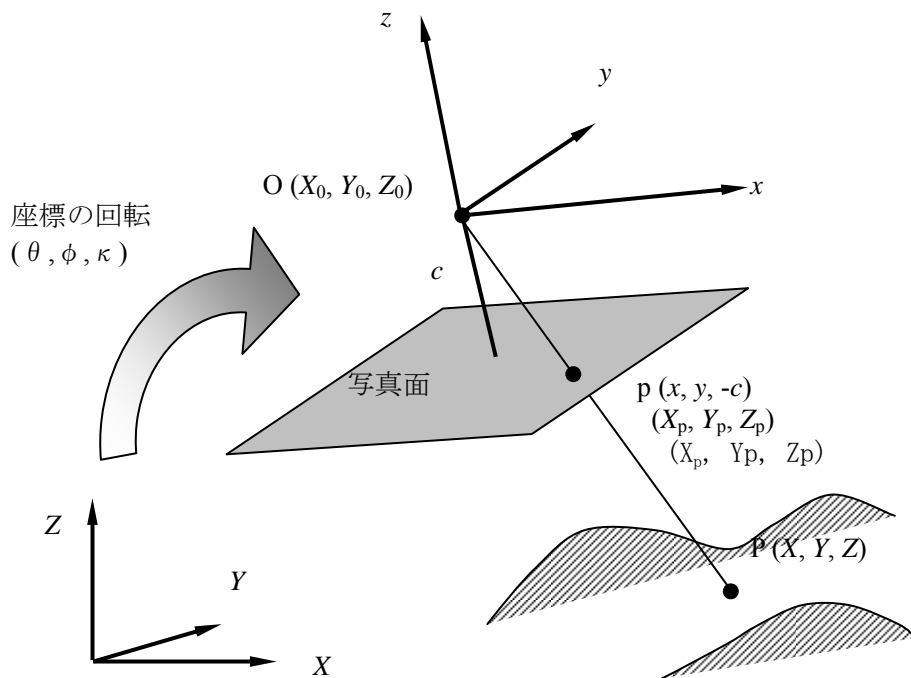


図 3-3 共線条件

縮尺は〔(撮影距離) / (焦点距離)〕で与えられ、撮影距離が長くなる場合は、焦点距離も長くした方が有利である。また、前述の考察より、写真枚数と計測精度は、

$$\text{計測精度} \propto 1/\sqrt{\text{撮影枚数}}$$

の関係があり、これらの因子を組み合わせると、

$$\text{計測精度} \propto$$

$$\begin{aligned} & [ (\text{撮影距離}) / (\text{焦点距離}) ] * (\text{画像上の2次元座標の読み取り誤差}) \\ & * [ 1/\sqrt{\text{撮影枚数}} ] \end{aligned} \quad (3-8)$$

となることが分かる。しかし、写真測量においては、計測精度に対しては、撮影位置および角度も影響を与える。これを詳述すると次のようになる。

写真測量では、図 3-4 に示すように対象物に向かって複数の方向からカメラの角度を変えながら撮影する。この撮影方法は収束撮影と呼ばれる。これまでの航空写真測量などで行われていた2枚のステレオ撮影によって、その重複部分から対象点の座標を求める手法に対し、収束撮影による方法では、対象物の複数の画像を同時に解析するので、3次元座標の取得に要する時間の短縮と精度の向上を図ることができる。

撮影角度は、対象とする計測点を2つ以上の方向から見るときの角度が大きくなるように設定する。角度が小さい、画像面上での誤差の影響が大きくなる。十分な角度

をもって撮影された画像ネットワークは「強いネットワーク」と称し、逆の場合は「弱いネットワーク」と呼ばれる。これは、写真枚数と共に 1 つの計測点を、どの角度から入射した何本の光線で決定するのかという問題となる。

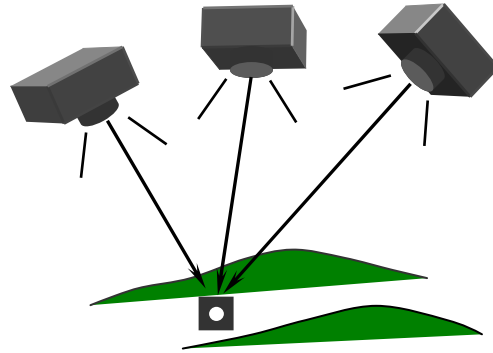


図 3-4 収束撮影の概念図

これまで使用してきたターゲットは平面形状のものなので、走行中の車両から一定の角度になると、円形で近似して重心を求める手法でその 2 次元座標を求めることが困難になる。即ち、ある一定の角度をもって写された画像では、画像上での楕円形状の扁平率が大きくなり、解析に使用できる写真を得るための撮影方法に限られる、あるいは撮影された画像の中で、解析に使用できない写り方をしているものが多くなるなどの非効率性が生じてしまい、結果として計測精度の劣化を引き起こすことになる。そこで、実際には強いネットワークを得ることには限界が生じる。ここまで考察してきた計測精度とそれに影響を与える因子との関係を表現すると次式を得ることができる。

$$\sigma_{xyz} = \frac{q}{\sqrt{k}} \cdot \frac{L}{f} \cdot \hat{\sigma}_0 \quad (3-9)$$

ここで  $\sigma_{xyz}$  : 対象点座標の平均精度 (標準偏差)

$q$  : ネットワークの強度を表す係数

$k$  : ひとつ (またはその近傍) の撮影場所から写した枚数の平均値

$L$  : カメラから対象物までの概略距離

$f$  : レンズの焦点距離

$\hat{\sigma}_0$  : デジタル面上での計測誤差 (標準偏差)

ここで大学のグラウンドにおいて実験したデータにて式(3-9)を検証する。

実験条件は次の通りである。

- 使用カメラ Nikon D100(610 万画素)
- 使用レンズ Nikkor レンズ 焦点距離 35mm・50mm
- ターゲット数 20
- 平均撮影距離 30m
- スケール数 4本 (手動で計測)
- 撮影地点数 18箇所
- 撮影枚数 72枚 (一撮影地点から  $0^{\circ}90^{\circ}180^{\circ}270^{\circ}$  に回転させて撮影)

なお、ターゲットと撮影地点の関係は図 3-5 の通りである。

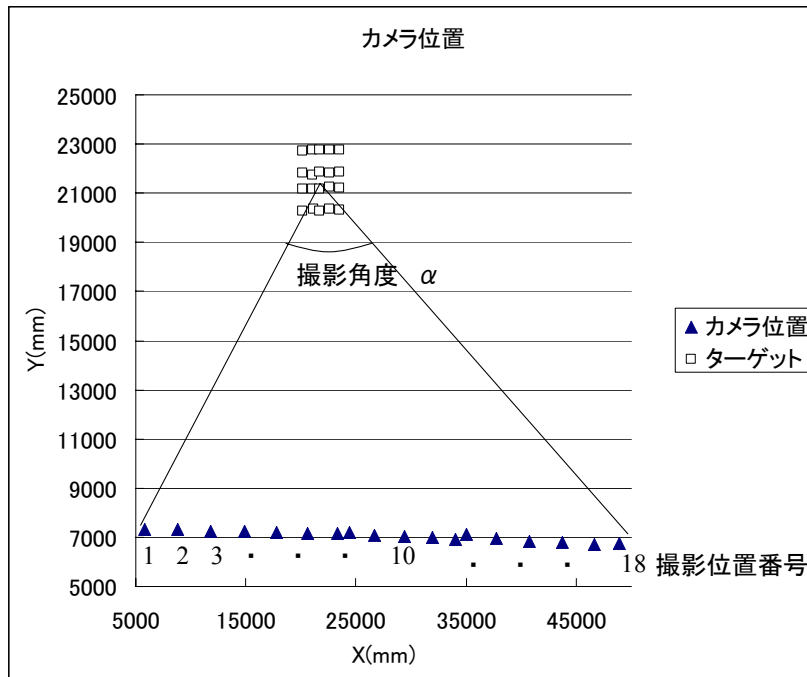


図 3-5 カメラ位置 (現場を真上から見た図)

- X 軸は左右方向, Y 軸は奥行き方向, Z 軸は鉛直方向である。
- ターゲット場の中心と撮影位置の両端との角度を撮影角度  $\alpha$  とする。

また、以下撮影地点を変えて解析を行っているので、その関係を表 3-1 に示す。

表 3-1 画像を使用した地点（丸印の箇所画像を使用）

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A				○		○		○		○		○		○		○		○
B	○			○		○		○		○		○		○		○		○
C	○		○	○		○	○		○	○		○	○		○		○	○
D		○				○			○		○							○
E	○					○			○				○	○				○

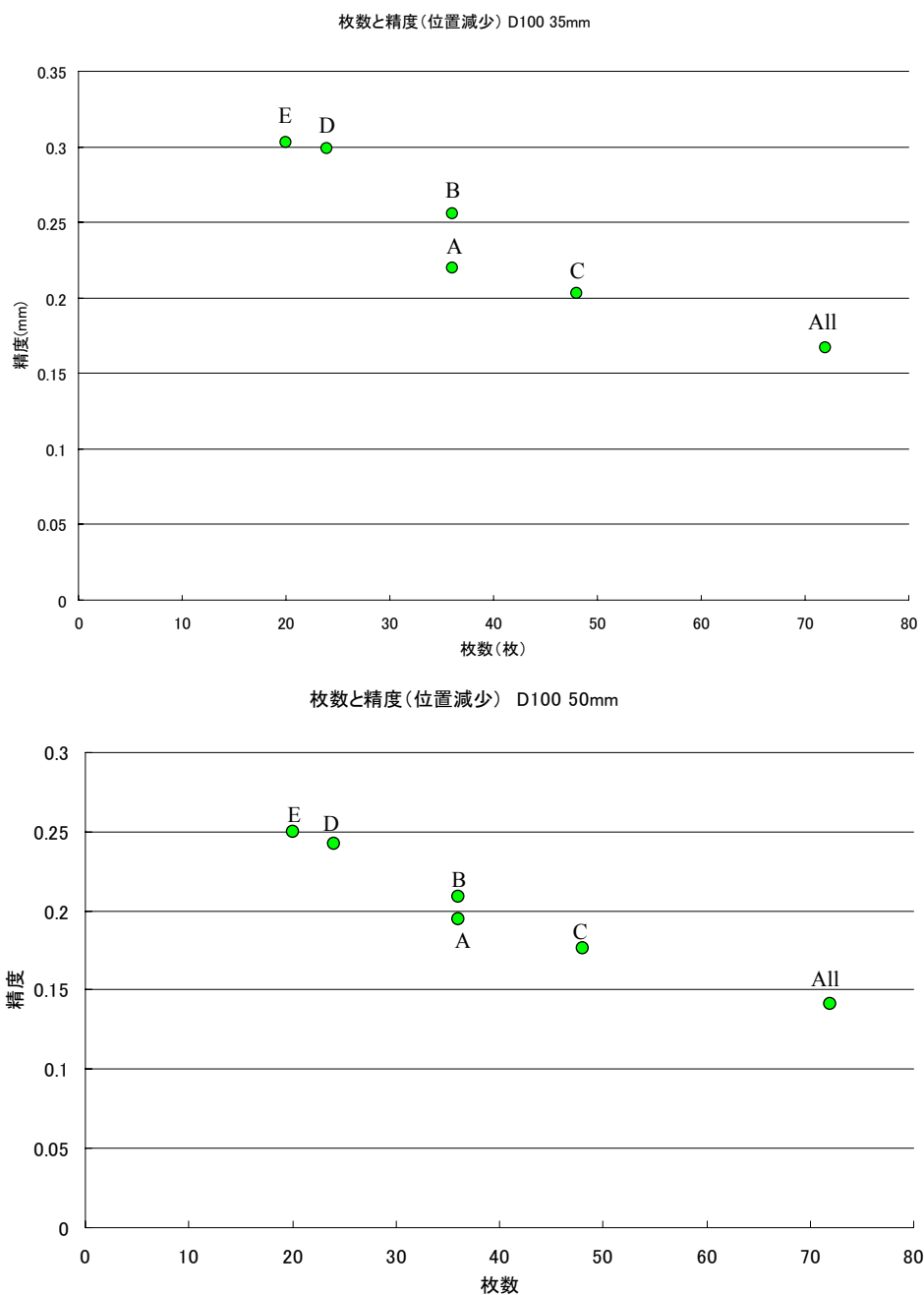


図 3-6 枚数と精度（撮影地点減少による）

カメラ回転は 4 方向（0°90°180°270°）で固定

前述した撮影枚数と精度の関係は、図 3-6 になる。

ただし、焦点距離を 35mm と 50mm の結果を並列して示している。表-1 に示すように撮影地点は 1 部分に固まらないように満遍なく使用した。これは撮影角度を固定する



ためである。この結果から計測精度は撮影枚数に反比例することが分かる。ただし、式(3-9)における  $k$ : ひとつ (またはその近傍) の撮影場所から写した枚数の平均値に関しては、レンズ歪みの解消による枚数の増加も含まれる。そこで、画像数 18 枚での解析結果からカメラ回転の有用性を検証する。表 3-2 に各撮影地点でのカメラの回転角を示す。図 3-7 は画像枚数が 18 枚の場合の解析結果である。カメラを回転させなかった場合 (青色の点), 内的精度はいずれのパターンでも 0.4mm 以上の値となっている。それに対してカメラを 2 方向あるいは 4 方向に回転させた場合 (ピンク, 緑の点) では若干精度が向上する。次に, 36 枚での値を用い, 適切なカメラ回転角の組み合わせについて検討したものが図 3-8 である。これはカメラ回転を 2 方向あるいは 4 方向とした場合のものである。どのパターンにおいても内的精度は 0.23mm から 0.24mm の値となっている。この結果から, 35mm および 50mm のレンズでは, カメラの回転数は 2 回転させた場合でも精度は確保でき, 1 箇所での撮影枚数の増加より, 多数の地点からの撮影による枚数増加が効果的となることが分る。

表 3-2 各撮影地点での使用した回転角

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
a	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270
b	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180	90 270	0 180
c	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90
d	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180	0	180
e	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270	90	270

これを実証するために, 図 3-9 は使用写真枚数が同等になるように回転数とポイント数を変化させたものである。表 3-3 は撮影地点を示す。この結果から, 回転数を減らして撮影ポイントを増加させても, 精度は向上することが分かる。すなわち, 式(3-9)におけるネットワーク係数の増加が有用であるといえる。

式(3-9)のネットワーク係数は, 最終的には撮影角度によって決定される。ネットワークという概念を撮影角度で定量化したものが, 図 3-10 である。これより, 撮影角度が増加するにつれて, 内的精度は高くなるという結果が得られた。この結果から, 最適な計測を行うためには, ある撮影角度を満たす条件で撮影をする必要があると考えられる。また, 写真撮影位置が右あるいは左に偏っているパターン (左 6, 右 6, 右 6) では著しく精度が低下している。

カメラ回転と内の精度 D100 35mm

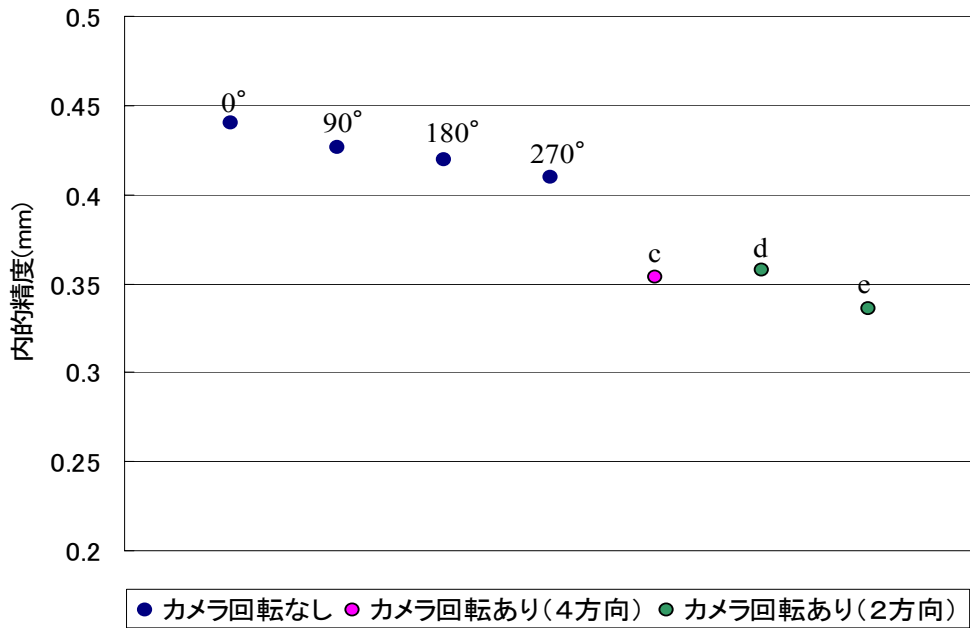


図 3-7 カメラ回転と内の精度 画像枚数 18 枚

カメラ回転と内の精度 D100 35mm

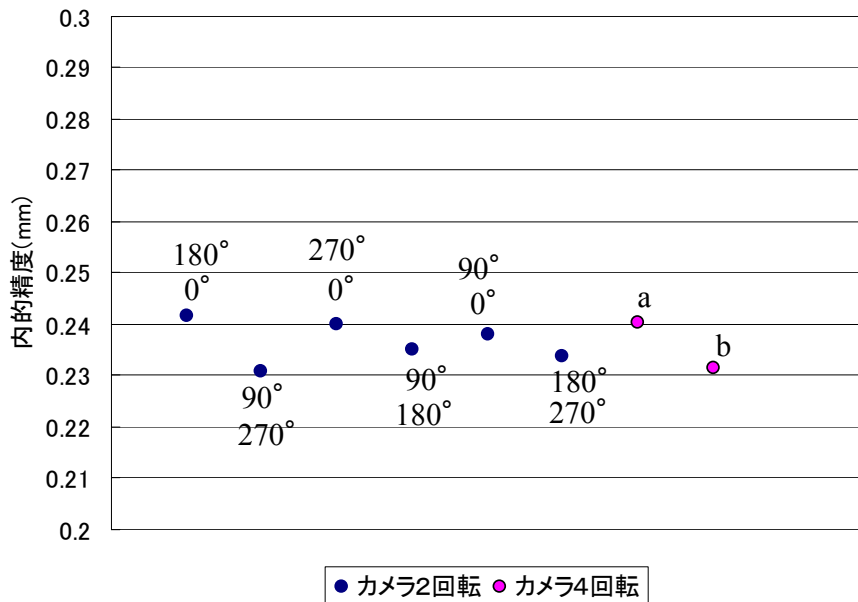


図 3-8 カメラ回転と内の精度 画像枚数 36 枚

表 3-3 使用した撮影位置

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A																		
B	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
C	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

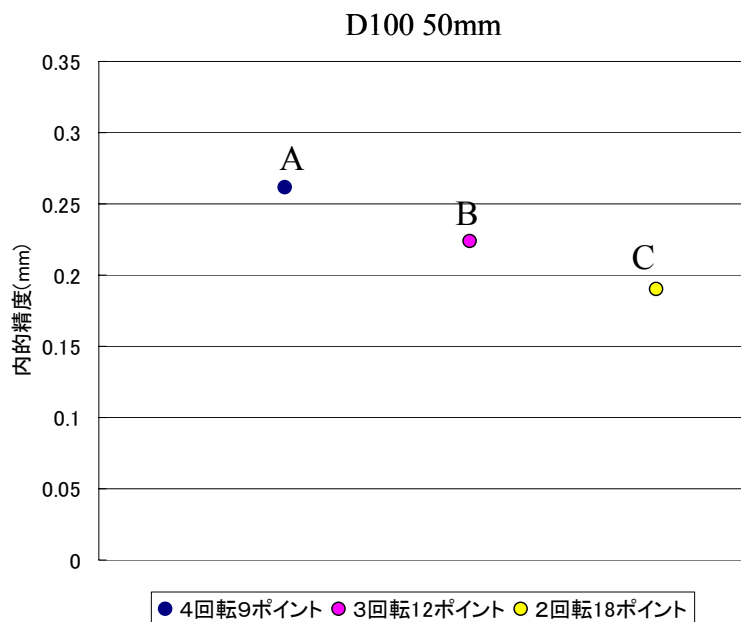
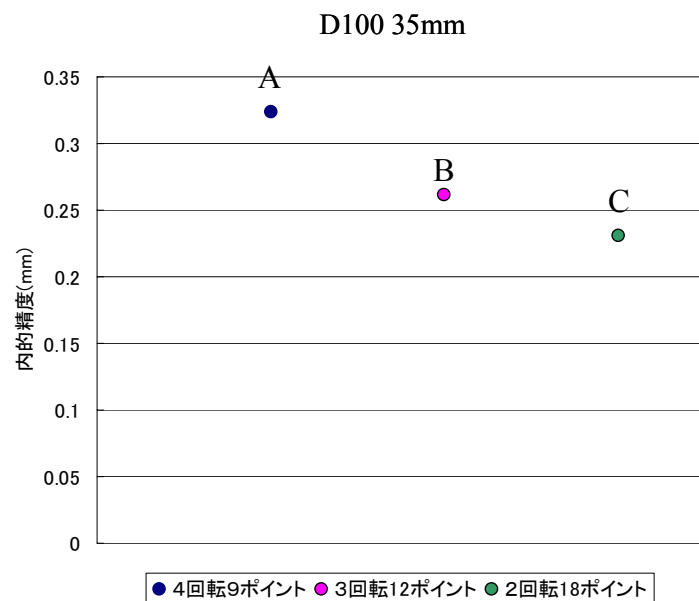
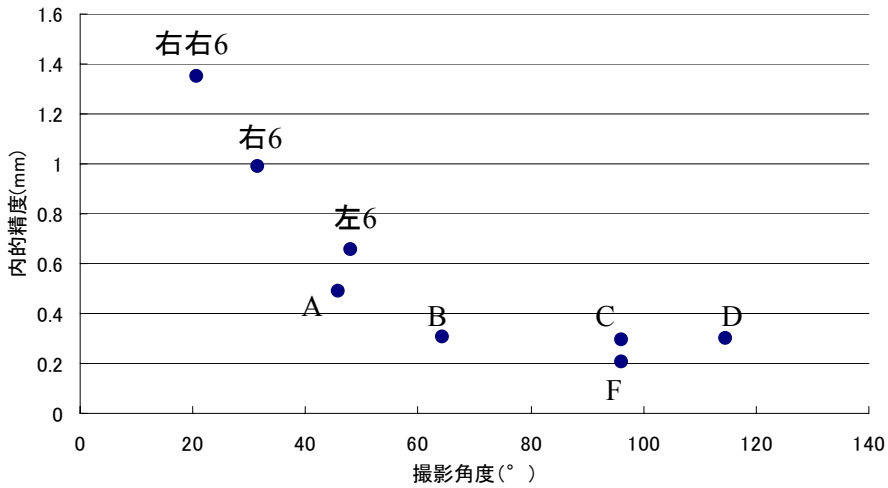


図 3-9 枚数固定での撮影ポイント・回転数変化

撮影角度と写真枚数がほぼ同じ左 6.と A パターンを比べると、対象物を左右から撮影できている A パターンのほうが精度がよい。このことから、対象物を左右から満遍なく撮影すれことが、精度の低下を防ぐために必要であると考えられる。

撮影角度と内的精度 D100 35mm



撮影角度と内的精度 D100 50mm

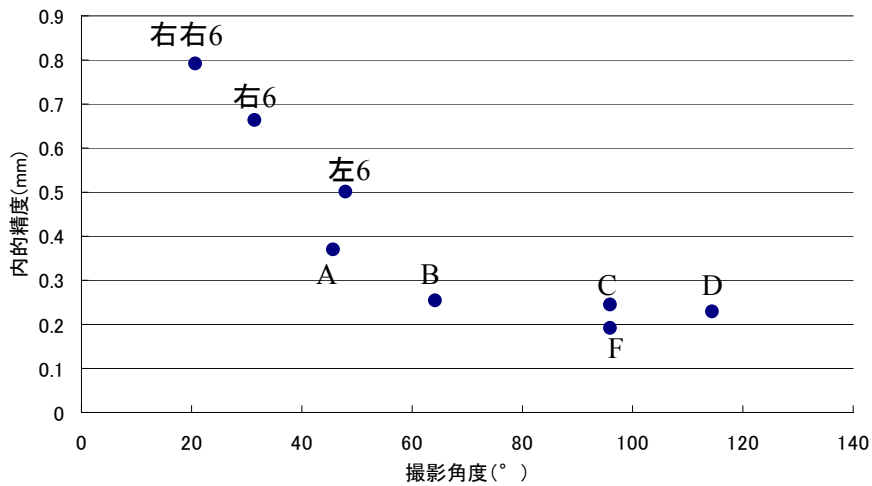


図 3-10 撮影角度と内的精度

条件	解析に使用した写真撮影位置																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A				○	○	○		○	○	○								
B			○	○	○						○							
C	○		○	○	○						○		○					
D	○		○	○	○									○		○		○
F	○	○	○	○	○	○					○	○	○					
左半分 6	○	○	○	○	○	○					○	○	○					
右半分 6							○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
右右半分 6																		

### 3.2 ノウハウ検証実験

前節で考察した精度検証が再現するかどうか、室内にターゲット場を作製し実証した。高さ 3m, 幅 3m, 奥行き 3m の空間の天井および左右の壁面にターゲットを設置した。スケールデータは、あらかじめトランシット (20 秒読み) で測定した 2 点の座標値から長さを計算して用いた。なお、トランシットは 2 台利用し、コリメーションにより基準方向を決めた。観測は、正位・反位を 2 対回、計 4 回トランシットの目盛を

読み取った。トランシットからスケール点間の視準長は 4m とした。  $20''=9.7 \times 10^{-5}$  より、計測点の精度は  $4000 \times 9.7 \times 10^{-5} = 0.388(\text{mm})$  となるので、距離データの精度は次のように計算される。

$$\sqrt{0.388^2 + 0.388^2} = 0.549(\text{mm})$$

これをスケールの事前誤差  $\sigma_s$  として、重み行列の中に組み入れる。

また、これとは別にターゲットに仮想的な変位が与えられるよう、一部にマイクロメーターを取り付けた。これにより、0.001mm 単位でターゲットを動かすことができる。

以上の被計測装置を室内に取り付けた。その全数は次のようになる。

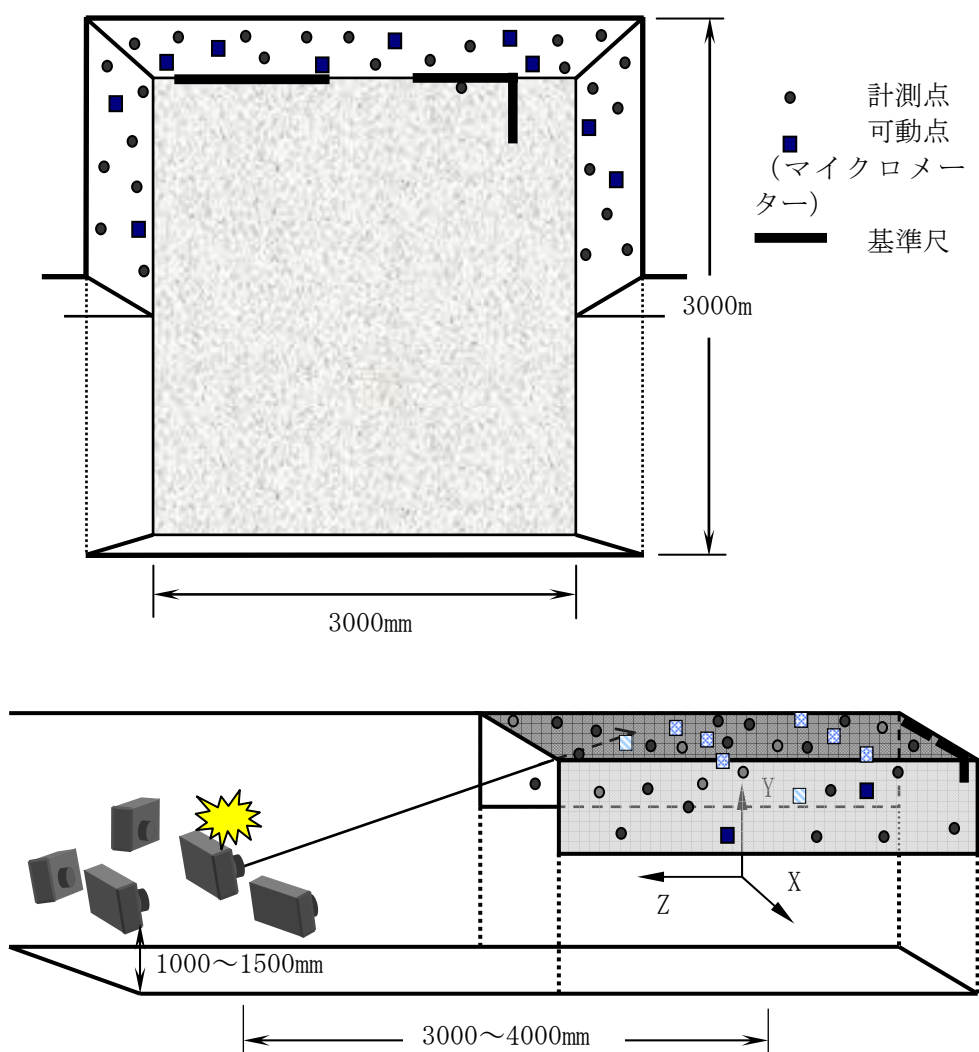


図 3-11 ターゲット配置概略

- 計測ターゲット：80 点
- 可動ターゲット：10 点

- 基準尺 : 2本 (両端の点は計測ターゲットに含まれる)

ターゲットおよび基準尺の配置の様子を図3-11に示す。

撮影は300万画素のカメラを用い、28mmの焦点距離のレンズを使用した。

まず、2点間の距離を各回ごとに比較する。無作為に選んだ2点間の距離を計測回ごとに算出した。選んだ点とその概略位置を図3-12に示す。

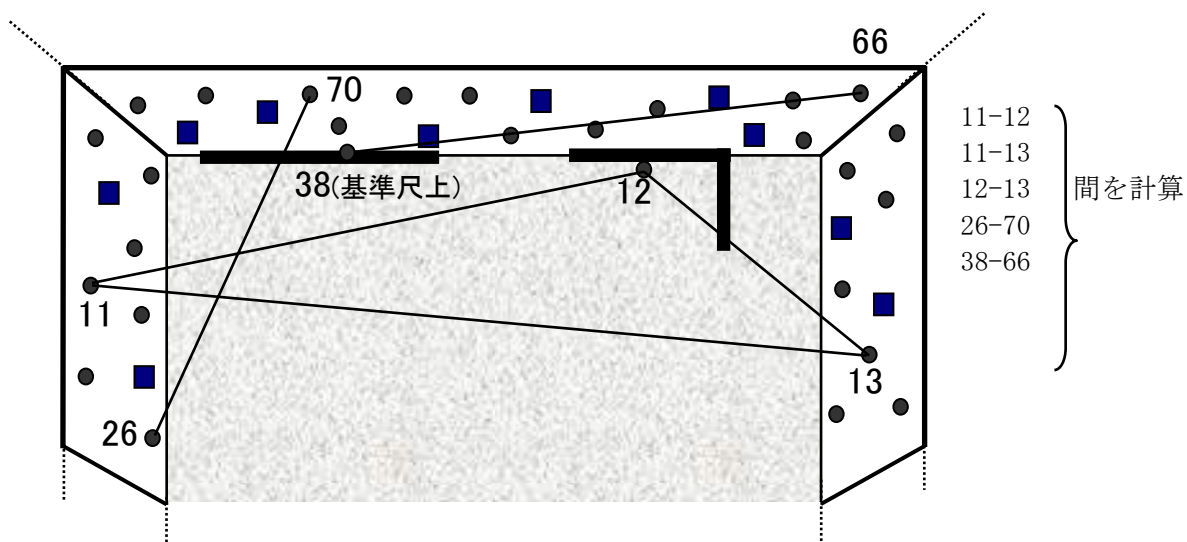


図3-12 相対距離計算に用いた点

表3-4 相対変位の検証

両端の点番号	1st	(上)2nd/(下)3rd	1stとの差
11~12	3469.977	3470.304	0.327
		3470.440	0.463
11~13	3315.386	3315.119	-0.267
		3314.876	-0.509
12~13	2955.852	2956.368	0.516
		2956.426	0.574
26~70	1111.365	1111.469	0.103
		1111.435	0.069
38~66	2396.561	2396.259	-0.302
		2396.167	-0.394

(単位: mm)

1回目と2回目/3回目との差は±0.5mm以内にあり、それぞれにあまり差がみられないことから、再現できたと言える。またスケールデータの事前精度を0.549mmとしたが、上の結果はその範囲内にほぼおさまっている。これはスケールの精度が影響し

ているものと考えられる。より精密に計測した長さ情報を入れることで、さらに再現性を高められると期待できる。以上の結果をまとめると、再現性に関する精密に計測したスケールを設置することが重要であるといえる。

この実験では、可動ターゲットを用いて仮想的に変位を与え、計算から導出された変位量と、実際の変位とを比べる。外的誤差を算出できるので、3回の計測の内的精度とともに結果を表3-5に示す。

表3-5 外的精度および内的精度

#	2nd-1st		3rd-1st		外的精度	内的精度
	解析変位	実変位	解析変位	実変位		
1	1.1460	1.0000	2.6096	2.5000	0.1291	<b>0.0795</b>
2	1.1804	1.1500	3.1567	3.1500	<b>0.0220</b>	0.0575
3	1.5364	1.5000	2.1206	2.0000	0.0891	<b>0.0522</b>
4	0.9346	1.0000	2.8581	3.0000	0.1105	<b>0.0630</b>
5	1.1933	1.0000	1.7909	1.5000	0.2470	<b>0.0777</b>
6	1.0368	1.0000	3.5891	3.5000	<b>0.0682</b>	0.0899
7	0.7430	1.0000	0.8085	1.0000	0.2266	<b>0.0787</b>
8	1.3492	1.2000	1.9882	1.7000	0.2295	<b>0.0713</b>
9	1.2596	1.3000	1.2797	1.5000	0.1584	<b>0.0775</b>
10	1.0441	0.8500	1.6023	1.3500	0.2251	<b>0.0944</b>

(単位：mm)

外的精度は平均で0.2mm弱である。2つの精度を比べると、2点を除いて内的精度の方がよい。計測に一定の信頼をおいたうえで、変位（ここでは外的精度）には内的精度より大きい誤差が含まれていることを知っておく必要がある。外的精度と内的精度が同じである必要は必ずしもないが、「変位計測」の信頼性を保証するためには、両者の値を近づけることが課題である。

ここまでの実験は、画像40枚・ターゲット90個すべてを使用した場合の計測結果を示した。しかし実際の現場計測では、先にも述べたように、撮影位置やターゲットの設置に制約のあることが多く、必ずしも要求される精度が満足できるわけではない。そこで、枚数・ターゲット数の増減によって、計測精度（内的精度）がどのように影響を受けるか、の検討を行った。枚数は40から5枚おきに15枚まで6パターン、ターゲットは90から10個ずつ減らして30個まで7パターンを考え、それぞれの組み合わせについて内的精度 $\sigma_{xyz}$ の計算を行った。6パターンの撮影位置について、その並

びを図 3-13 に示す。

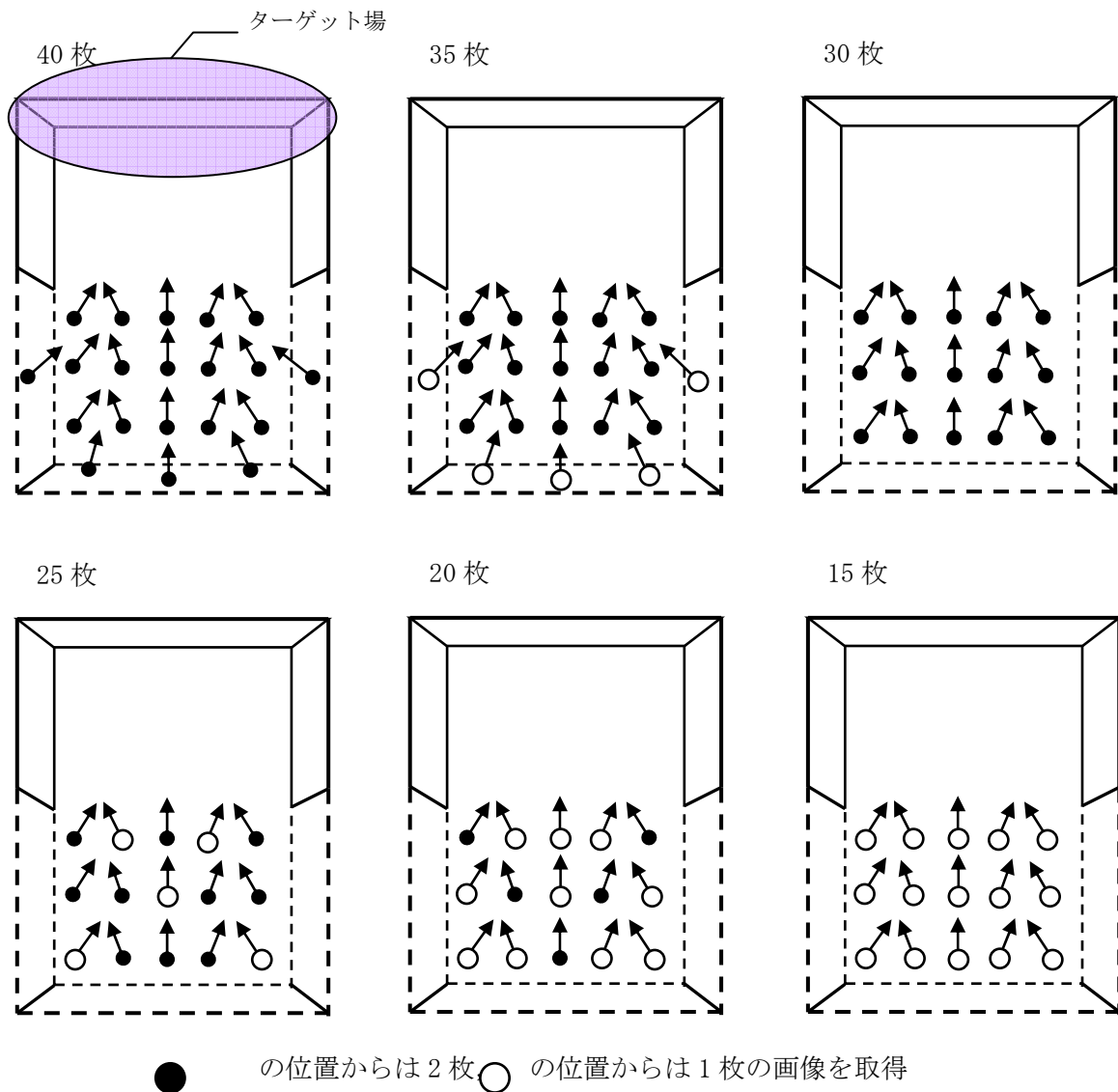


図 3-13 画像枚数と撮影位置

表 3-5 にその結果を、また内的精度を鉛直軸としたときのプロット図を図 5-11 に示す。ここから判るのは、ターゲット数よりも画像枚数の方が精度への影響が大きいことである。例えば(枚数, ターゲット数)が(30, 40)と(90, 15)の2組は、観測方程式・未知パラメータの数ではほぼ同数であるが、両者の精度は2倍弱の違いがある。ゆえにターゲットを多数設置することが困難な場所では、枚数をできるだけ確保することで、精度を落とさないようにできると言える。



表 3-5 枚数～ターゲット数～精度の関係

		ターゲット数						
		90	80	70	60	50	40	30
画像枚数	40	0.0949	0.0966	0.0982	0.9710	0.1013	0.1048	0.1158
	35	0.1014	0.1032	0.1050	0.1039	0.1089	0.1122	0.1250
	30	0.1211	0.1236	0.1260	0.1267	0.1337	0.1408	0.1650
	25	0.1306	0.1324	0.1348	0.1382	0.1451	0.1505	0.1749
	20	0.1466	0.1509	0.1532	0.1558	0.1640	0.1717	0.2029
	15	0.1909	0.1954	0.2069	0.2078	0.2225	0.2498	0.3114

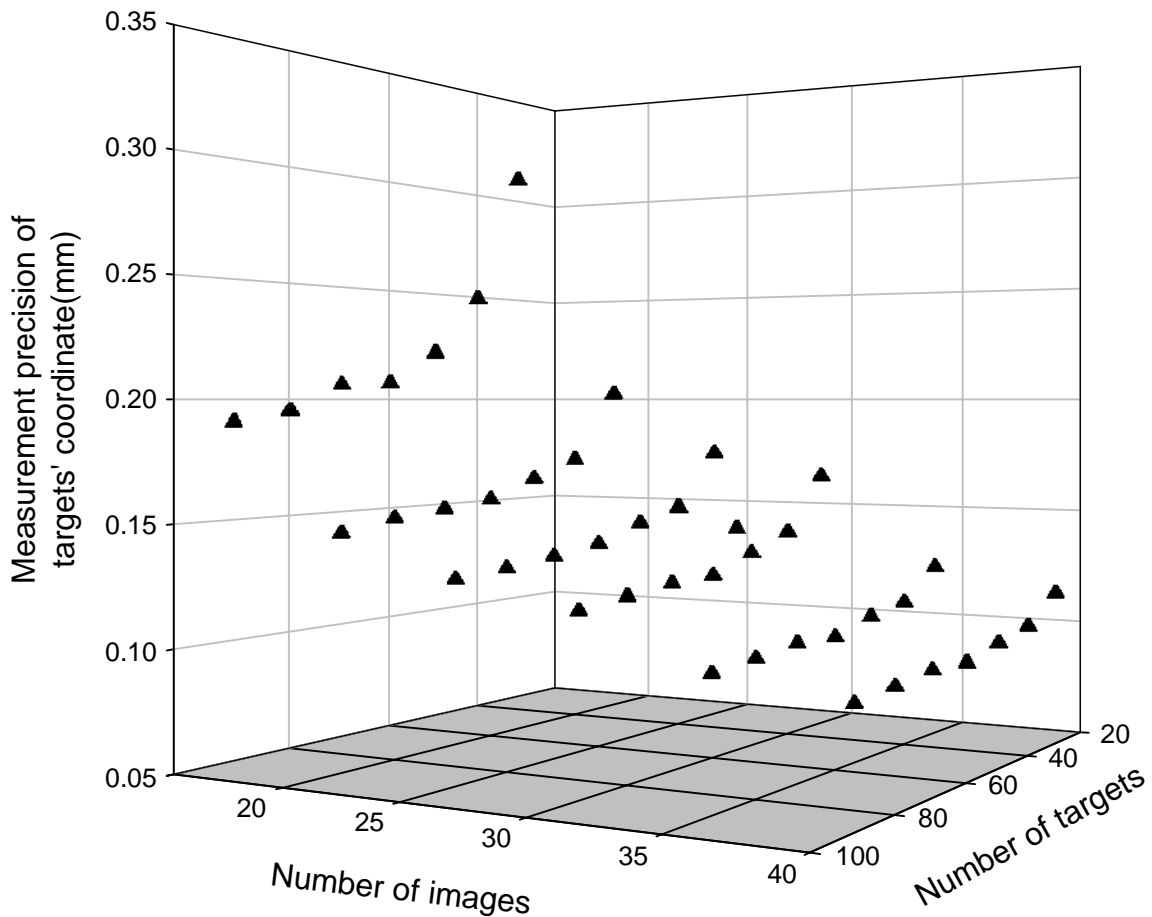


図 3-14 枚数～ターゲット数～精度の関係

これまで記述してきたように、内的精度  $\sigma_{xyz}$  は画像枚数とは式(3-9)の関係がある。これは観測が独立であれば、対象点の存在の範囲は撮影枚数の平方根に反比例して

小さくなることを意味している。また、対象物上の誤差と画像面上の誤差は比例することも示している。比例定数  $q$  は撮影形態の効果を表す値で、小さいほど観測のネットワークは強く、この場合  $q = 0.5 \sim 0.9$  程度となる。

式(3-9)を用いて、このターゲット場において強いネットワークが形成された場合の内的精度を計算する。

表 3-6 ネットワークの強さが精度に与える影響

枚数	$q = 0.5$	$q = 0.7$	$q = 0.9$
40	0.0553	0.0775	0.0996
35	0.0592	0.0828	0.1065
30	0.0639	0.0895	0.1150
25	0.0700	0.0980	0.1260
20	0.0783	0.1096	0.1409
15	0.0904	0.1265	0.1626

この結果と表 3-5 とを比べると、枚数が多い時はターゲット数がある程度減じてでもネットワークの強さは落ちないが、逆に少ない時は 90 個のターゲットをすべて用いた場合でも、ネットワークは強くない。このことから画像枚数を確保する重要性が確認された。

さらに、ターゲット密度について考察する。この実験場では  $15\text{m}^2$  の面に対し 90 個のターゲットを設置した。  $1\text{m}^2$  あたり 6 個である。この密度をそのまま斜面へ持ち出すことは事実上不可能である。  $1\text{個}/\text{m}^2$ 、すなわち 1m おきにターゲット 1 個設置できれば、良好な計測環境にあると言って差し支えない。本実験場に、この条件を適用すると、使用できるターゲットは 15 個となる。ターゲット数 15 個固定で、画像枚数 15~40 について内的精度を計算すると図 3-15 のようになる。枚数を減らすと徐々にネットワークが弱くなる。よって、ターゲット密度が低下する場合は、画像枚数をできるだけ増やすようにすれば観測ネットワークが強化され、精度を落とさず計測を行えると考えられる。

また式(3-9)における  $(L/f)$  の値が現場では大きく影響してくる。これに関して、開発した自動化ソフトにおいて、前章での現場における解析結果に基づいて考察を行った。

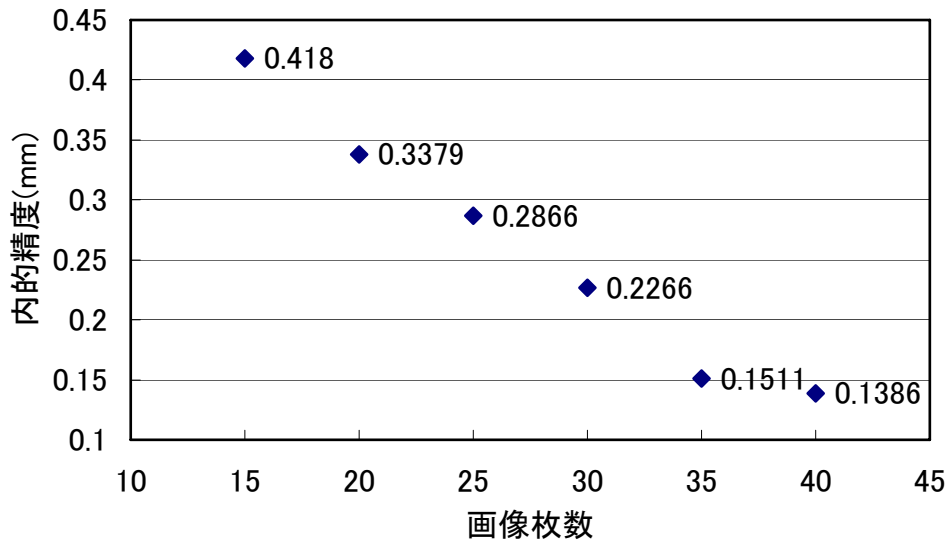


図 3-15 枚数～精度の関係 (ターゲット 15 個)

図 3-16 は、これまでのフィールド実験および現地実験 (14 方向) の結果を計算精度 (内的精度) と L/f 値であらわしたものである。現地実験のデータ数が少ないため直線または多項式で近似することは難しいが、ほぼ正の相関があるように見られる。前章での現場とそれ以外の実験フィールドを利用して実施した L/f 値-計算精度相関を比較すると次のようになる。

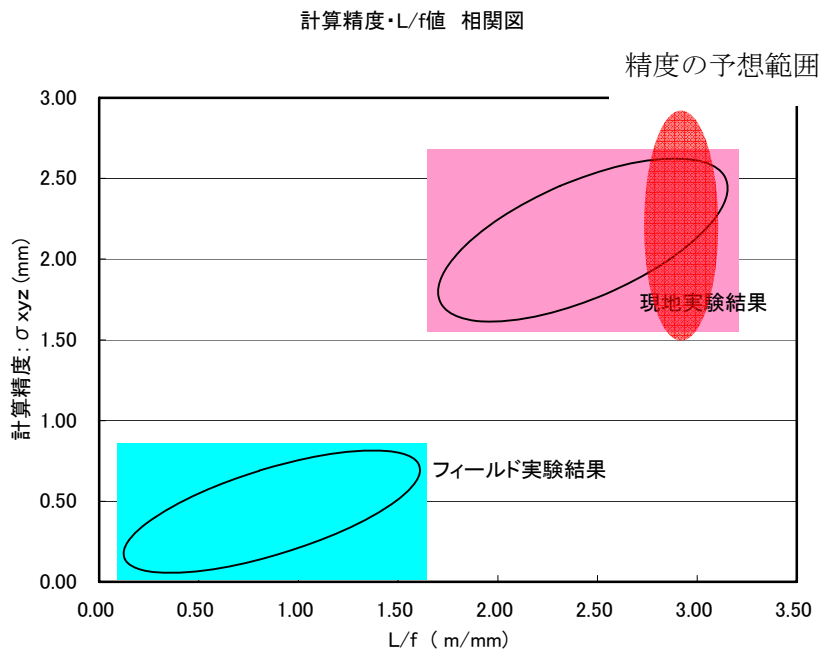


図 3-16 計測距離とレンズ焦点距離の比と精度の関係

○別の実験フィールド 撮影距離 100 m / 50 mm = 2.0

○前章の実験フィールド 撮影距離 125 m / 50 mm = 2.5

この結果と図3-16より前章での現場における想定計算精度は、1.5 mm～3.0 mmであると予想できる。

表3-7は、それぞれの枚数毎の読取精度および計算精度（内的精度）を示したものである。これより、それぞれの解析ケースを比較すると読取精度はほぼ一様な値を示しているが、計算精度（内的精度）は写真枚数の増加とともに向上していることがわかる。

表3-7 計測精度例

解析結果比較(写真枚数を変化)

写真枚数	28	56	68	枚
読取精度	0.099	0.101	0.101	ピクセル
内的精度				
X	4.905	3.159	3.031	mm
Y	2.462	1.714	1.613	mm
Z	4.746	3.115	2.944	mm
XYZ	4.189	2.746	2.611	mm

計算精度・L/f値 相関図

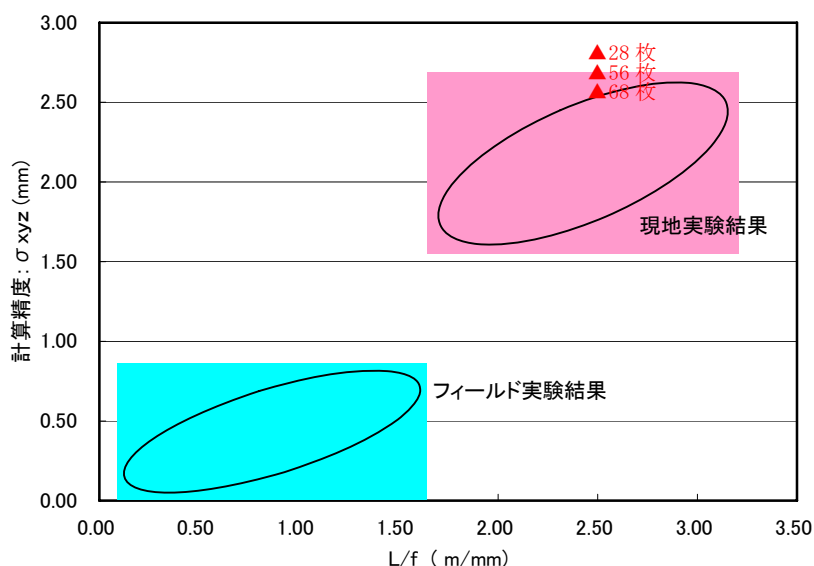


図3-17 現場での計測結果とその他のフィールド実験結果の比較

図3-17は別の現場でのフィールド実験の結果から考察したL/f値と計算精度の関係に、前章の現場実験におけるテストの結果を追記したものである。写真枚数が28枚および56枚

では、計算精度は予想領域よりも精度の低い位置に分布しているが写真枚数が 68 枚のケースでは、ほぼ予想範囲に入っている。これは、もともと  $L/f$  値-計算精度の関係がリニアな相関を示していないことが推定される。しかし、 $L/f$  値が大きくなった場合には、それに相当する写真枚数の増加により計算精度を向上させることが可能であることを示している。また、このように、撮影距離・撮影位置・写真枚数・レンズ焦点距離の関係をある程度推定するために、次章で記述するシミュレーション機能は重要になると考える。この機能により、期待する精度を維持できるだけの撮影方法・撮影枚数を推定することで現場での失敗や期待した精度が出ない場合の対策を講じることが容易になると考える。

## 第4章 結 論

ここまでデジタル画像計測法の基本理論と測量システムへ応用するための具体的手法およびその具体的事例を述べた。ここでは、あらためてその研究成果を述べる。

1) 本計測システムにより広範囲に多点の測定を簡便に行え、面的に位置情報をとらえることが可能である。

これまでに行われてきた画像計測は、工業製品の精密計測に適用されることが大半であり、そのサイズは大きくても 10m 程度である。それに対し、例えば斜面などは場合によっては数 100m もの規模があり、これまでそのようなサイズで実施された例は皆無である。本研究では規模の大きい計測対象について、いろいろな撮影条件を考慮し、得られた結果について検討を行った。その結果、現場ごとに異なりはするものの、適切な撮影形態を設定すれば、広範囲にわたりほぼ同等の精度で 3 次元座標を復元することができた。

2) 市販のデジタルカメラを用いて高精度計測が行える

本研究開発では、600 万画素クラスのデジタルカメラを用いて計測実験を試行したが、これは携帯電話に搭載される画素クラスのカメラであり、本研究におけるセルフキャリブレーション法を用いれば、どのようなカメラを用いても本報告書に述べる成果を得ることが可能である。また撮影時のカメラの位置を被写体中の情報を利用して算出したが、これも GPS 機能付のカメラを用いれば容易に求めることが可能であり、その精度は高くなくても、最終的に得られる対象物の 3 次元座標は高精度で得ることができるということを実証した。これにより、本研究成果を低コストの機器構成で実現でき、またその取り扱いも非常に簡便な測量システムとすることができる。

3) 精度への影響は画像枚数の効果が大きい

室内および原位置で行った計測から、画像枚数／ターゲット数によってどのように精度に関係するかを調べたところ、画像枚数のほうが精度に与える影響が大きいなど、その測量実施時のノウハウなどを構築することができた。このことから、ターゲットを十分設置できない場合でも、枚数を確保して精度を落とさないようにできることを

明らかにし、その要求精度によって撮影方法を考慮することが可能になった。

以上のようにデジタルカメラを用いた画像計測法は、測量手法という点からは有効性の非常に高い手法であることが判った。さらに現場へ普及・浸透していくために、解析処理を自動化するための研究を実施し、リアルタイムでの測量を行えることを実証した。これにより、簡便かつ迅速な被害査定システムの構築を可能にする基本技術を構築することができたと考える。

## 参考文献

- 1) C. W. Groetsch : 大西和榮, 田沼一実, 山本昌宏訳, はじめての逆問題, サイエンス社, 2002.
- 2) 尾崎幸雄 : 写真測量 第5版, 森北出版, 1995.
- 3) 長谷川均 : リモートセンシングデータ解析の基礎, 古今書院, 1998.
- 4) K. R. Koch : Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, Springer, 1987.
- 5) 原田健久 : 測量計算法, 鹿島出版会, 2001.
- 6) 秋本圭一, 服部進, 岡本厚, 井本治孝 : CCDカメラを用いた大型構造物の3次元精密計測, 計測自動制御学会講演会, 109C-1, 1998.
- 7) D. R. Marr : 乾敏郎, 安藤広志訳, ビジョン—視覚の計算理論と脳内表現—, 産業図書, 1987.
- 8) 松山隆司, 久野義徳, 井宮淳 : コンピュータービジョン 技術評論と将来展望, 新技術コミュニケーションズ, 1998.
- 9) 谷内田正彦 : ロボットビジョン, 昭晃堂, 1990.
- 10) 岡本厚・大西有三・張春 : 精密写真測量による岩盤変位計測方法について, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 229-232, 1998.
- 11) C. Zhang : Rock Displacement Measurement by Precise Close Range Photogrammetric System, 京都大学大学院工学研究科博士論文, 2000.
- 12) 秋本圭一 : 情報化施工のためのデジタル画像計測法に関する研究, 京都大学大学院工学研究科博士論文, 2002.
- 13) 徐剛, 辻三郎 : 3次元ビジョン, 共立出版, 1998.
- 14) Ullman : The Interpretation of Visual Motion, MIT Press, Cambridge, MA, 1979.
- 15) 岡本厚, 大西有三, 藤原弘一 : 精密写真測量による不連続面計測について, 第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 286-289, 1996.
- 16) Y. Ohnishi, C. Zhang, S. Nishiyama, K. Hayashi and A. Okamoto, Precise Close Range Photogrammetry System in Rock Displacement, '99 Japan-Korea Joint Symposium on Rock Engineering, Fukuoka, pp. 239-246, 1999.



- 17) C. W. Groetsch : 金子晃, 山本昌宏, 滝口孝志訳, 数理科学における逆問題, サイエンス社, 1996.
- 18) C. Lanczos : Linear Diggerential Operators, Van Nostrand-Reinhold, Princeton, New Jersey, 1961.
- 19) C. Wunsch and J. F. Minster : Methods for box models and ocean circulation tracers, Mathematical programming and non-linear inverse theory, J. Geophys. Res, Vol. 87, pp. 5647-5662.
- 20) 久保司郎 : 逆問題, 培風館, 1992.
- 21) 日本写真測量学会 : 解析写真測量, 1996.
- 22) Y. A. Abdel-Aziz and H. M. Karara : Direct of linear taransformation from comparator coordinates into object space coordinated, In ASP Symposium into Close-range Photogrammetry, Falls Church, Virginia, American Society of Photogrammetry, pp. 1-18, 1971.
- 23) E. K. Mikhail, J. S. Bethel and J. C. McGlone : Introduction to Modern Photogrammetry, John Wiley & Sons, Inc., 2001.
- 24) G. Healey and R. Kondepudy : CCD camera calibration and noise estimation, CVPR, pp. 90-95, 1992.
- 25) 村井俊治・松岡龍治・奥田勉 : セルフキャリブレーション付きバンドル法の精度比較, 東京大学生産技術研究所報告, Vol. 29, No. 6, pp. 4-11, 1981.
- 26) J. Weng, P. Cohen and M. Herniou : Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation, T-PAMI, Vol. 14, pp. 965-980, 1992.
- 27) D. C. Brown : Calibration of Close-range Camera, X II Congress of the International Society of Photogrammetry, 1972.
- 28) H. Ebner, Self Calibration Block Adjustment, X III Congress of the International Society for Photogrammetry, Helsinki, 1976.
- 29) S. I. Granshaw : Bundle Adjustment Methods in Engineering Photo- grammetry, Photogrammetric Record, Vol. 10, No. 56, pp. 181-207, 1980.
- 30) P. R. Wolf and B. A. Dewitt : Elements of Photogrammetry with Applications in GIS. McGraw-Hill 3<sup>rd</sup> edition, 2000.

- 31) D. C. Brown : Close-Range Camera Calibration, Photogrammetric Engineering, Vol. 37, No. 8, pp. 855-866, 1971
- 32) T. A. Clarke, J. F. Fryer and X. Wang : The principal point and CCD cameras, Photogrammetric Record, Vol. 16, No. 92, pp. 293-312, 1998.
- 33) 田島稔・小牧和雄：最小二乗法の理論とその応用 [改訂版]，東洋書店，1996
- 34) 中根勝見：測量データの3次元処理，東洋書店，1994
- 35) 柳井晴夫・竹内啓：射影行列・一般逆行列・特異値分解，東京大学出版会，1983.
- 36) 大西有三，西山哲，矢野隆夫，緒方健治，松山裕幸：精密写真測量技術の斜面監視システムへの適用に関する研究：土木学会論文集 No. 771/Ⅲ-68, 2004.
- 37) 瀧本 和宏, 大西 有三, 西山 哲, 矢野 隆夫: 精密写真測量を用いた斜面変位計測に関する研究, 土木学会年次学術講演会講演概要集第3部 Vol. 59, pp. 3-189, 2004
- 38) 長野洋平，大西有三，西山哲，大窪克己，浜崎智洋，天野浄行：斜面モニタリングへの精密写真測量の適用，第61回土木学会年次講演会，3-218，2006.
- 39) 長野洋平，大西有三，西山哲：精密写真測量を用いた斜面モニタリングに関する研究，土木学会関西支部年次講演会，Ⅲ-4，2006.
- 40) 金川真二，大西有三，西山哲，矢野隆夫，龍明治：先験情報により高度化した精密写真測量による斜面動体観測，土木学会関西支部年次講演会，Ⅲ-1，2007.
- 41) 長野洋平，大西有三，西山哲，村上治，浜崎智洋，天野浄行：精密写真測量の斜面モニタリングへの応用について，第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 201-206，2007.

## 助成研究者紹介

おおにし ゆうぞう  
大西 有三

現職：京都大学大学院工学研究科都市環境工学専攻ジオフロント環境工学講座  
(ph.D, 工学博士)

### 主な著書：

- ・ 計算力学レクチャーシリーズ6 不連続変形法 (丸善, 平成17年)
- ・ 岩盤崩壊の考え方 (土木学会 平成16年)
- ・ ブロック理論と岩盤工学への応用 (土木工学社, 平成4年)
- ・ やかりやすい岩盤力学 (鹿島出版会 昭和59年)

# STUDY ON A REAL-TIME ASSESSMENT SYSTEM OF DAMAGE BY MEASUREMENT METHOD USING DIGITAL IMAGES

Ohnishi, Y.<sup>1</sup> Nishiyama, S.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Urban and Environment Engineering, Kyoto University

Japan often suffers natural disasters such as earthquakes, typhoons, and localized torrential downpours, as well as frequent geohazards. In our country, however, rapid urban development is increasing serious slope hazard damages, so that urgent repair work is required to minimize resultant damages. Considering this situation, this study presents a new measurement system for real-time assessment system using digital camera images. This system bases on photogrammetric technology that has been used not only for map production but also for quality control of industrial products. This system has the following characteristics:

- Measurement involves photographing from a distance only, eliminating the need for sophisticated techniques to improve accuracy as in conventional survey.
- The necessary measurement hardware consists of a digital camera and a personal computer only, which brings down measurement cost.
- The use of digital images allows real-time measurement, where the process from importing images to a computer to calculating shapes and volumes of objects only a few minutes.

The purpose of this study is to develop an automatic measurement photogrammetric system for assessing damages by geohazards. By the automatic measurement procedure, the measurement work will be able to be made as simple as possible and the measurement system will be spread in lot of regions that suffer natural disasters. This study also reports on the results of experimental measurements performed in some fields. The proposed measurement system needs further measurement-related element technology data, such as data on the relationship between the measurement precision and the number of images and the camera model. We plan to do further research in response to the requirements of damage sites with the aim to complete the proposed measurement system.

**KEYWORDS:** *photogrammetry, assessment system of damage, real-time measurement.*

研究成果の要約

助成番号	第2006-5号	研究者・所属
第2006-5号	デジタル画像計測法を活用したリアルタイム被害査定システムの構築	大西 有三 京都大学大学院工学研究科

1. はじめに

災害が発生した際、どこでどの程度の被害が発生しているのかを早期にかつ正確に把握することは、対策作業の効率化による被害の拡大を防ぎ、また被害査定作業の迅速化による復旧作業の効率化を実現させるために重要となる。本研究は現地にて撮影されたデジタル画像から、被害の軽減を図る行動の決定や復旧を早期に実現するための被害査定作業を、誰でも容易にリアルタイムで行うことが可能なシステムの構築を目指すものである。

2. 本研究による被害査定システム

本研究開発はデジタルカメラで撮影するだけで対象物の形状や体積などを測量することが可能なシステムの構築を実現する。そのシステムの概念は下図の通りである。



3. 開発した計測技術の特性評価結果

30m 離れた対象物を様々な角度から 600 万画素のデジタルカメラで撮影し、本計測システムを用いた場合の計測精度（分解能で表示）を検証した実験結果を示す。図-1 は被写体と撮影位置の関係を示しており、図-2 のように撮影位置を最適化することで高精度の計測が可能であることが分かる。この実験の場合、デジタルカメラのレンズ歪みなどのカメラが持つ系統誤差をあらかじめ補正することなく、各撮影位置においてカメラを 4 回転させ、合 24 枚

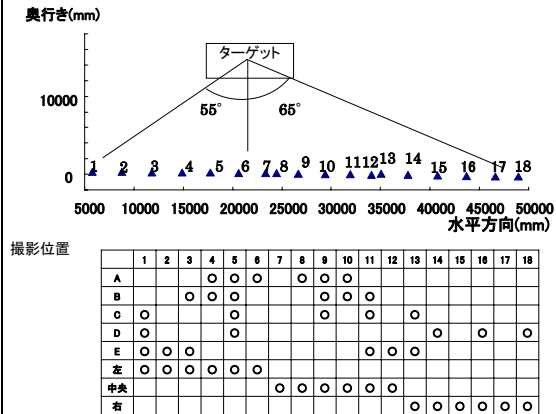


図-1 撮影条件:番号の位置で撮影したことを表す

図中の記号は撮影位置を表す。

● 手動認識

● 自動認識

分解能 (mm)

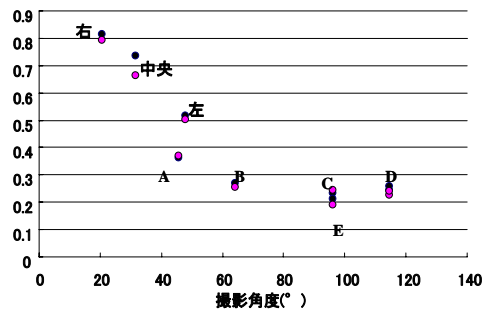


図-2 撮影角度と精度の関係(レンズ焦点距離35mm)

の画像を用いて解析した。これより、市販のデジタルカメラを利用しても高精度の計測が可能であることが実証できた。また、本研究では撮影から解析までパソコン上で自動的に解析するシステムを構築したが、図-2の結果に示すように（自動認識と表示）、手動で対象物上の計測点となる標点を認識させたもの（手動認識と表示）と同等の精度が得られることも実証できた。

4. 結論

本研究により、市販のデジタルカメラとパソコンからなる低コストのシステムによって、現位置で画像を撮影するだけで高精度に対象物の計測が可能な測量システムの構築が実現できた。