近接デジタル写真測量における精度要因と精度評価

Factors and Estimation of Accuracy in Digital Close Range
Photogrammetry using Digital Cameras

柳 秀治*・近津 博文**

Hideharu YANAGI and Hirofumi CHIKATSU

Abstract : Recently, pixel numbers and functions of digital cameras are amazingly increasing by modern semiconductor and digital technology, and there are many low-priced digital cameras which have more than 10 mega pixels on the market in Japan. In these circumstances, digital photogrammetry using digital cameras are enormously expected in various application fields.

There is a large body of literature on the calibration of digital cameras and circle target detection, location. Target detection and location with subpixel accuracy had been investigated as a star tracker issue, and many centering algorithms have been carried out. It is widely accepted that the least squares modeling of ellipse fitting is the most accurate algorithm. However, there are still problems for efficient close range photogrammetry. These problems are reconfirmation for the target detection and location with subpixel accuracy based on real data which were taken indoors and an indicator for estimating the accuracy of normal close range photogrammetry using digital cameras.

With this motive, the empirical testing of several algorithms for target detection and location with subpixel accuracy and an indicator for estimating the accuracy are investigated in this paper using real data which were taken indoors acquired 7 digital cameras which have 7.2 mega pixels to 14.7 mega pixels.

1. はじめに

ここ10年程の間にデジタルカメラの高解像度・多機能化および低価格化が飛躍的な勢いで進む中、デジタルカメラによる近接デジタル写真測量に対する期待は大きく、これまでにデジタルカメラの実用化に関する多数の研究が報告されている(例えば、近津ら, 2001; Habib and Morgan, 2003; Fraser and Hanley, 2004; Laebe and Foerstner, 2004)。これらの研究はカメラキャリブレーションに関するものを扱ったものであり、筆者らも同様な背景から長年にわたりデジタ

ルカメラの近接デジタル写真測量への応用を学術的に検証してきた結果、筆者らが現在までに検証を行ってきたデジタルカメラは50機種にも達し、これらの結果からデジタルカメラを近接デジタル写真測量に利用する場合には焦点距離、主点位置やレンズ歪みなどの内部標定要素の評価が重要であることを示してきた(高橋・近津, 2010)。

いっぽう、デジタルカメラによる近接デジタル写真測量の実施に当たっては図形の中心位置を計算しやすい円形ターゲットが多く使用されているが、高精度近接デジタル写真測量のためには効率的なターゲット抽出およびターゲット中心をサブピクセル単位で取得することが必要となる。円形ターゲットの抽出、中心位置のサブピクセル単位での取得の必要性は1970年代後半に人工衛星の姿勢制御(例えば、Brook and Purll, 1979)として始まったものであるが、CCDカメラの普及に伴い近接デジタル写真測量の分野においても1980年代より多くの研究が行われている(例えば、ターゲット抽出については Zhou, 1986; Wong and Ho, 1986;

* 東京電機大学理工学部

School of Science and Engineering, Tokyo Denki University

**東京電機大学理工学部理工学科 建築・都市環境学系

Division of Architectural, Civil and Environmental Engineering, Tokyo Denki University

「写真測量とリモートセンシング」VOL. 50, NO. 1, 2011

Trinder, 1989 ; Snow et al., 1993, ターゲットの位置決めについては面積重心法 (Wong, 1986), 加重面積重心法 (Trinder, 1989), Fill 法 (Clarke et al., 1993), Scan-line 法 (Shortis et al., 1994(a)), テンプレートマッチング法 (Shortis et al., 1994(b)), Linear model 法 (Havelock, 1989 ; Trinder et al., 1995), Vernier 法 (West and Clarke, 1990), 交点法 (Zhou, 1986), 楕円 fitting 法 (Trinder et al., 1995), Star operator (Luhmann, 1986), Star operator+楕円 fitting 法 (Schaefer and Murai, 1988))。特に, これら多くの研究の成果として直径15画素以上の円形ターゲット中心の位置決めには Star operator+楕円 fitting が最適であると総括されている (Luhmann et al., 2006)。本研究ではこの定説に対して改めて新しい手法を提案するものではないが, これらの研究の多くはシミュレーションデータを用いたものであることを考慮すると, 近接デジタル写真測量の実用化のためには実際に撮影された画像を利用した検討が必要であると考ええる。

そこで, 本研究では円形ターゲットの中心位置取得に関する既往研究のレビューを視野に入れて720～1470万画素のデジタルカメラ7機種および実際のテストターゲットを用いて, 最初にしきい値設定法, ターゲット中心の位置決め手法が計測精度に及ぼす影響について改めて室内実験により検証を行ない, デジタルカメラによる効率的な近接高精度デジタル写真測量を実現するためのターゲット中心座標の算出方法の検討を行なうこととする。次に, 異なる撮影条件によって撮影された画像および先の検討結果を用いて写真測量における計測精度推定方法についても検討を行なうこととする。

2. 実験概要

実験は図1に示すテストターゲット (H:480mm, W:640mm, D:20mm)を用いて, 各カメラに対する画像縮尺がほぼ一定となるように撮影高度を調整し, 各カメラに対して基線比0.34の収束撮影状態において左右画像にテストターゲット全体が写るようにステレオ撮影を5回ずつ行なうものであるが, 各画像は撮影ごとにレンズを焦点距離のテレ端に移動させた後, ワイド端に戻して取得されたものである。また, ターゲットの大きさ(直径)は20mm, ターゲット間隔は40mm, ターゲットの中央3列は高さ20mmであり, 各円形ターゲットの加工精度は $\pm 0.05\text{mm}$ である。精度検証は図中の白丸で印した基準点13点を用いてカメラキャリブレーションをそれぞれ実施し, 黒枠で印した検証点86点に対する三次元座標を算出して評価を行なうこととする。なお, 本研究での結果は5回測定の実平均値である。また, 本研究で使用したカメラ7機種の主な諸元を表1に示す。

図1 テストターゲット

表1 カメラ諸元

Maker 機種名	SONY CyberShot DSC-T10	SONY CyberShot DSC-N1	Canon IXY DIGITAL 910IS	Canon IXY DIGITAL 25IS	PENTAX Optio W60	FUJIFILM FinePix F50fd	Nikon COOLPIX S710
画素数 (Megapixel)	7.2	8	8	10	10	12	14.7
撮像素子	1/2.5" CCD	1/1.8" CCD	1/2.5" CCD	1/2.3" CCD	1/2.3" CCD	1/1.6" CCD	1/1.72" CCD
解像度	3072×2304	3264×2448	3264×2448	3648×2736	3648×2736	4000×3000	4352×3264
焦点距離 (mm)	6.33	7.9	4.6	6.2	5.0	8.0	6.0
焦点距離 (mm) (35mm 換算)	38	38	28	35	28	35	28
撮影高度 (mm)	893	866	753	945	631	829	665

3. 精度要因

デジタル写真測量において精度に影響を与える要因としては1) カメラキャリブレーションモデル, 2) レンズ歪みモデルおよび3) ターゲット中心の座標精度, 4) 基準点の配置, 5) 基線比などに大別される。本研究では1), 2)を内的要因, 3)~5)を外的要因と定義するが, 1), 2)については写真測量学的観点からデジタルカメラの安定性, 信頼性, 堅牢性についてすでに報告しているので(高橋・近津, 2010), 本研究では外的要因が計測精度に及ぼす影響について検討を行なうこととする。

ただし, 本研究でいうカメラキャリブレーションとは, 空間後方交会法により外部標定要素{カメラの位置(X_0, Y_0, Z_0), 姿勢(ω, φ, κ)}および内部標定要素{主点位置(u_0, v_0), 焦点距離(f), スケールファクタ(a), セン断係数(b), レンズ歪み係数(K_1, K_2, K_3, P_1, P_2)}を求めることであり, 各基準点に対して誘導される下記の共線条件式が観測方程式となる。

$$\begin{cases} x = -f \frac{m_{11}(X-X_0) + m_{12}(Y-Y_0) + m_{13}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \\ y = -f \frac{m_{21}(X-X_0) + m_{22}(Y-Y_0) + m_{23}(Z-Z_0)}{m_{31}(X-X_0) + m_{32}(Y-Y_0) + m_{33}(Z-Z_0)} \end{cases} \quad (1)$$

ここに, x, y : 画像座標, X, Y, Z : 基準点の三次元座標, $m_{11} \sim m_{33}$: 回転角 ω, φ, κ からなる回転要素

カメラキャリブレーションモデルとは上記の観測方程式を解く際に主点位置, 焦点距離, スケールファクタおよびセン断係数の取り扱いを意味するもので, 本研究ではこれらのパラメータはすべて未知量とする。また, レンズ歪みモデルとは放射方向歪みおよび接線方向歪みの取り扱いを意味するもので, 本研究ではBrown (1971) により提案され, 現在広く利用されている放射方向歪みと接線方向歪みを考慮した式(2)を採用するものとする。したがって, この場合には歪み係数 $K_1 \sim K_3$ および P_1, P_2 が未知量となる。

$$\begin{aligned} x &= x' + \frac{x'}{r} (K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) + P_1 (r^2 + 2x'^2) \\ &\quad + 2P_2 x' y' \\ y &= y' + \frac{y'}{r} (K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7) + P_2 (r^2 + 2y'^2) \\ &\quad + 2P_1 x' y' \end{aligned} \quad (2)$$

ここに, $r = \sqrt{x'^2 + y'^2}$, x, y : レンズ歪み補正後の画像

座標, x', y' : レンズ歪み補正前の画像座標, K_1, K_2, K_3 : 放射方向歪み係数, P_1, P_2 : 接線方向歪み係数

3.1 外的要因

デジタル写真測量における主な外的要因としてはターゲット中心の座標精度, 基準点数およびその配置, 基線比が挙げられるが, 基準点数およびその配置については未知量(16個)に対して十分な観測方程式(26個)が得られるよう高さを持つ基準点を含めて基準点13点を均等に配置することによりこの問題の影響は無視できるものとした。また, 基線比については各カメラに共通な値を採用し, かつ各カメラに対する画像縮尺がほぼ一定となるように撮影高度を調整することによりこの問題の影響は無視することとした。

いっぽう, ターゲットの中心座標精度に影響を及ぼす要因としてはターゲットサイズ, ターゲット間隔, カメラの収束角, 照明問題があり, これらの課題についても多くの報告がある。例えばSchaefer and Murai (1988) はターゲットサイズ(直径)には少なくとも15画素以上が必要であることおよび収束角が30°以上になると精度が低下するとしている。Trinder (1989) はターゲットを覆うようにマスクサイズを設定し, マスク内の輝度分布をガウス分布とみなしたとき, ターゲットサイズには4 σ 以上の大きさが必要であるとしている。また, El-Hakim (1986) はターゲット間隔としては少なくともターゲットサイズの4/3以上が必要であるとしている。本研究ではこれらの既往の研究を基にモニター上におけるターゲットの大きさおよびターゲット間隔を十分な値(ターゲットサイズ約75画素, ターゲット間隔約160画素)となるように撮影高度(カメラからターゲット間の距離)を調整することにより, これらの問題がターゲットの中心座標に及ぼす影響は無視できるものとした。なお, 照明問題については以下において述べるしきい値設定法において検討することとする。したがって, ここでの課題はターゲット抽出とターゲット中心の位置決め問題に集約される。

3.1.1 ターゲット抽出

工業計測のように一様な照明下の場合にはターゲットと背景との輝度情報(Heuvel and Kroon, 1992)あるいは露出補正による撮影(Shortis et al., 1994(b))によりターゲット域は背景より自動分類されるが, 一般的な不均一な照明下での自動分類は工業計測とは異

なる。例えば図2は本研究で使用したターゲットを大津の自動しきい値設定法（大津，1980）で自動分類を行なった事例である。

図2より撮影は室内空間で行われたにも関わらず照明の不均一性によりターゲットの自動分類は不完全であることが理解される。したがって、一般には次の処理としてターゲットをカバーできるマスクを手動または半手動で設定し、マスク内の統計量(Wong and Ho, 1986; Trinder, 1989; Shortis et al., 1995)あるいはNearest-mean classification (Zhou, 1986), ヒストグラム (El-Hakim, 1986; Schaefer and Murai, 1988), 輝度断面図 (Chen and Clarke, 1992) などの利用によりしきい値処理を行なった後、さらにターゲットの幾何学的特徴を利用してターゲットが抽出されることとなる (Wong and Ho, 1986; Chen and Clarke, 1992)。

図3は図2の結果に対して、ヒストグラムおよびターゲットの幾何学的特徴（ターゲットサイズおよび式(3)で算出される円形度）を用いてターゲットの自動抽出を行なった結果である。

$$\text{円形度} = 4\pi s / l^2 \quad (3)$$

図2 不均一な照明下でのターゲット抽出例

図3 抽出されたターゲット

ここに、 s : ターゲット部の総画素数、 l : ターゲット部の周囲長

3.1.2 ターゲット中心の算出

ターゲットの中心座標は面積重心法 (Rosenfeld and Kak, 1982) により算出するのが一番シンプルな方法であるが、不均一な照明条件において効果があるとされる加重面積重心法 (Trinder, 1989; Chen and Clarke, 1992), テンプレートを用いたテンプレートマッチング法 (West and Clarke, 1990; Trinder et al., 1995), モーメント保存法により抽出されるターゲットの両端点を利用する交点法 (Zhou, 1986) およびターゲットのエッジ抽出を行なった後に楕円関数を当てはめる楕円 fitting 法 (Trinder et al., 1995), さらにエッジ点とターゲット中心を結ぶ放射線分に対する変曲点を新たなエッジ点とする Star operator 処理と楕円 fitting 法の組み合わせ (Schaefer and Murai, 1988) など多くの方法が検討されている。これらの方法はターゲットと背景の分離に対するしきい値設定問題から順次処理過程をボトムアップすることにより大きく以下の3 Step (3.2~3.4) に分類される。

したがって、ここでは以下に示すしきい値設定法と各 Step におけるターゲット中心の位置決めが計測精度に及ぼす影響を検討することとする。なお、検討するしきい値設定法は Shortis らの研究 (Shortis et al., 1995) で使用された4通りに大津の自動しきい値設定法を加えた以下の5通りとする。

1. マスク内のターゲット域および背景に対する各平均値と 3σ によりしきい値を設定 (Zhou, 1986)。
2. マスク内の (最小輝度値+最大輝度値) / 3 をしきい値とする (Trinder et al., 1995)。
3. マスク内の (平均輝度値と最小輝度値) / 2 をしきい値とする (Wong and Ho, 1986; Trinder, 1989)。
4. マスク周りの最大輝度値に一定値を加えた値をしきい値とする (Snow et al., 1993)。
5. 大津の自動しきい値設定法 (大津, 1980)

3.1.3 大津の自動しきい値設定法

図4は輝度レベル L の画像に対する2次元領域における正規化ヒストグラムを表したものであり、画像をしきい値 k により2値化を行ない二つの領域 (C_1 , C_2) に分割することを考える。

図4 ヒストグラム

いま、確率エレメント $p(x_i)$ とは出現したある輝度レベルの画素数を総画素数で除した値とすると、確率エレメントはある輝度レベルの画素が発生する確率を表すことになる。そこで、 μ_1, μ_2 を領域 C_1, C_2 に対する平均輝度値とすると平均二乗誤差は、

$$e^2 = \sum_{i=0}^k (x_i - \mu_1)^2 p(x_i) + \sum_{i=k+1}^L (x_i - \mu_2)^2 p(x_i) \quad (4)$$

であるから、しきい値 k は式(4)の最小解、すなわち式(5)より、

$$\frac{\partial e^2}{\partial k} = (k^2 - \mu_1)^2 p(k) - (k^2 - \mu_2)^2 p(k) = 0 \quad (5)$$

$$k = \frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \quad (6)$$

となり、ここにしきい値設定問題は μ_1, μ_2 の最適解を求めることになる。

さて、領域 C_1, C_2 に対する平均輝度値 μ_1, μ_2 はそれぞれ次式であるから、

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^k x_i p(x_i) / \sum_{i=0}^k p(x_i) \quad \mu_2 = \sum_{i=k+1}^L x_i p(x_i) / \sum_{i=k+1}^L p(x_i) \quad (7)$$

$$\omega_1 = \sum_{i=0}^k p(x_i), \quad \omega_2 = 1 - \omega_1 \quad (8)$$

とすると各領域に対する分散 σ_1^2, σ_2^2 は、

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^k \frac{(x_i - \mu_1)^2 p(x_i)}{\omega_1}, \quad \sigma_2^2 = \sum_{i=k+1}^L \frac{(x_i - \mu_2)^2 p(x_i)}{\omega_2} \quad (9)$$

式(9)を次式のように改めると、

$$\omega_1 \sigma_1^2 = \sum_{i=0}^k (x_i - \mu_1)^2 p(x_i), \quad \omega_2 \sigma_2^2 = \sum_{i=k+1}^L (x_i - \mu_2)^2 p(x_i) \quad (10)$$

しきい値 k に対する平均二乗誤差を表す式(10)は次式となる。

$$e(k)^2 = \sum_{i=0}^k (x_i - \mu_1)^2 p(x_i) + \sum_{i=k+1}^L (x_i - \mu_2)^2 p(x_i) = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (11)$$

次に、

$$\sigma_w^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 \quad (12)$$

と表すと、しきい値 k に対する平均二乗誤差は、

$$e(k)^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2 = \sigma_w^2 \quad (13)$$

となる。

さらに画像全体に対する平均輝度値を μ_T として、

$$\sigma_B^2 = \omega_1 (\mu_1 - \mu_T)^2 + \omega_2 (\mu_2 - \mu_T)^2 \quad (14)$$

とすると、

$$\sigma_w^2 + \sigma_B^2 = \sigma_T^2 \quad (15)$$

が誘導される。

ところで、 σ_T^2 は一定値であるから平均二乗誤差の最小解を求めることは σ_w^2 を最小にすることであり、これは式(15)より σ_B^2 を最大にすることと同値となる。すなわち、式(14)を整理して得られる次式がここでの目的関数となり、これを最大とする $L-1$ 通りのしきい値を探索することになる。

$$\sigma_B^2 = \omega_1 \omega_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (16)$$

本研究で使用した画像は256階調の濃淡画像であるから255通りのしきい値を検討する必要があるが、本研究では総当たりで目的関数を最大とするしきい値探索を行なうこととした。また、本研究では各ターゲットと背景との面積比率が等しくなるようにマスクを自動発生させた後、ターゲットと背景の分離を行なった。

3.2 面積重心 (Step 1)

ここでの検討事項は上記しきい値設定法により分離されたターゲットに対して式(17)および式(18)に示す面積重心法あるいは加重面積重心法を適用する場合である。なお、隣接ターゲットとの混合を避けるために提

表2 各しきい値設定法と面積重心および加重面積重心を用いた場合の計測精度

カメラ名	中心位置 決定手法	しきい値設定法				
		3σ	$(\min + \max)/3$	$(\text{mean} + \min)/2$	$\max + 5$	大津
T10	面積重心	1/15923	1/11168	1/5995	1/10024	1/16962
	加重平均	1/13159	1/9423	1/5499	1/11948	1/13153
N1	面積重心	1/21959	1/21117	1/11325	1/15281	1/24209
	加重平均	1/16991	1/15678	1/9636	1/16318	1/17338
910IS	面積重心	1/12438	1/16039	1/11795	1/10158	1/14911
	加重平均	1/16460	1/18208	1/12725	1/15224	1/18119
25IS	面積重心	1/14231	1/14956	1/14559	1/11127	1/13810
	加重平均	1/15987	1/15974	1/15225	1/15103	1/15428
W60	面積重心	1/18301	1/14606	1/11329	1/12704	1/17539
	加重平均	1/14737	1/12126	1/10004	1/13615	1/14184
F50fd	面積重心	1/14446	1/15259	1/14933	1/7001	1/15250
	加重平均	1/16492	1/15218	1/14510	1/12675	1/15227
S710	面積重心	1/11176	1/17445	1/12713	1/11176	1/17587
	加重平均	1/13321	1/14937	1/11303	1/12062	1/15500

3σ ：マスク内のターゲット域および背景に対する各平均値と 3σ によりしきい値を設定する。

$(\min + \max)/3$ ：マスク内の（最小輝度値＋最大輝度値）/ 3 をしきい値とする。

$(\text{mean} + \min)/2$ ：マスク内の（平均輝度値と最小輝度値）/ 2 をしきい値とする。

$\max + 5$ ：マスク周りの最大輝度値に一定値を加えた値しきい値とする。

大津：大津の自動しきい値設定法

案された Fill algorithm による加重面積重心法 (Clarke et al., 1993) や Fill algorithm の改良版である Scan-line 法 (Shortis et al., 1994(a)) もこの範疇に属するものであるが、本研究ではターゲット間距離は十分に確保されているためこれらの方法は考慮しないこととする。

$$x = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m i g_{ij}, \quad y = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m j g_{ij}, \quad M = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g_{ij} \quad (17)$$

$$x = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m i g_{ij} w_{ij}, \quad y = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m j g_{ij} w_{ij}, \quad M = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g_{ij} w_{ij} \quad (18)$$

ここで、 m, n ：画像サイズ、 i, j ：Pixel の位置、 g_{ij} ：2 値化画像における背景部もしくはターゲット部 (0 or 1)、 w_{ij} ：濃淡画像内における g_{ij} の輝度値

ところで、本実験では撮影高度が機種ごとに異なっているため、撮影高度が計測精度に及ぼす影響を消去する必要がある。そこで、本研究では式(19)より算出される Proportional accuracy (Fraser, 1988) を用いて計測精度を検討することとする。表2に各しきい値設定法と面積重心および加重面積重心を用いた場合の

図5 照明の影響

$$\left(1 - \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}}\right) \times 255$$

ここに、 $x_{\max}$ ：ターゲット内部の輝度値の最大値、 $x_{\min}$ ：ターゲット内部の輝度値の最小値、 x ：ターゲット内部の輝度値

Proportional accuracy を示す。

$$\text{Proportional accuracy} = \frac{\sqrt{(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2)/3}}{\sqrt{DX^2 + DY^2 + DZ^2}} \quad (19)$$

ここに、 DX, DY, DZ ：対象物の X, Y, Z 方向の大きさ、 $\sigma_{x,y,z}$ ：検証点に対する平均二乗誤差

Trinder (1989) は Wong (1986) の面積重心法では不均一照明の影響を受けるため加重面積重心法を提案したが、本研究の場合には図5に示すようにターゲット内部において照明の影響が大きく、表2より加重面積重心法では逆に計測精度が低下する危険性のあることが確認された。なお、図5はターゲット内部の輝度値に対して線形変換を行ない、階調性を強調した画像である。

また、表2より各しきい値設定法と計測精度との関係はカメラごとに異なるが、全機種に共通して大津の自動しきい値設定法は高い精度を示していることが理解される。したがって、以降におけるしきい値設定法には大津の自動しきい値設定法を採用することとする。

3.3 楕円 fitting (Step 2)

ここでの処理は抽出されたターゲットに対し、各ターゲットのエッジ点抽出を行なった後、楕円 fitting あるいはテンプレートマッチングを行なう場合である。しかし、テンプレートマッチングの場合はテンプレート中心の初期値に影響を受けること (Trinder et al., 1995), 大きなターゲットに関してはテンプレートマッチングより楕円 fitting の方が高精度であること (Luhmann et al., 2006) などから、ここでは楕円 fitting にのみ着目することとする。また、エッジ点抽出法としては Linear model 法 (Havelock, 1989), Scan-line 法 (Shortis et al., 1994(a)), Foerstner Operator 法 (Trinder et al., 1995) などがあるが本研究では大津の自動しきい値設定法により抽出されたターゲットに対してサブピクセル単位でのエッジ抽出が可能である Linear model 法と画素単位でのエッジ抽出法である Scan-line 法によりエッジ点の抽出を行なうこととする。

なお、Linear model 法は図6に示すように、注目エッジに対して設定されたマスク内の各エッジ点 (x_i, y_i) (図6中の①～⑤) を用いて表される直線式(20)におけるパラメータ d, θ を線分 L と各エッジ点との距離の差 (e_i) に対する最小解として最小二乗法により求めた後(式(21)), 式(22)で算出される値を持ってこのマスクに対応する新たなエッジ点とするものである。

$$L(x_i, y_i) = \sin(\theta)x_i + \cos(\theta)y_i - d = 0 \quad (20)$$

$$E = \sum |e_i| = \sum |\sin(\theta)x_i + \cos(\theta)y_i - d| \rightarrow \min \quad (21)$$

$$x = d \times \sin(\theta), \quad y = d \times \cos(\theta) \quad (22)$$

また、Scan-line 法とは2値化図形に対する境界追跡法であり、いずれの方法も抽出したエッジ点を用いて楕円関数式(23)における未知量 ($a_1 \sim a_6$) を最小二乗法で求めた後、式(24)によりターゲット中心 (x_c, y_c) を算出するものである。なお、図6に示すエッジ点①～⑤

図6 Linear model 法

は、Scan-line 法で抽出されるエッジと同一である。

$$a_1x^2 + 2a_2xy + a_3y^2 + 2a_4x + 2a_5y + a_6 = 0 \quad (23)$$

$$x_c = \frac{a_2a_5 - a_3a_4}{a_1a_3 - a_2^2}, \quad y_c = \frac{a_2a_4 - a_1a_5}{a_1a_3 - a_2^2} \quad (24)$$

ところで、Scan-line 法の場合には境界追跡法によりエッジ点を抽出していく過程において注目エッジに対してマスクを設定し、加重面積重心法を採用することによりエッジ周辺のにじみの影響を除去し、さらに画素単位でのエッジをサブピクセル化することが可能となる。また、Linear model 法の場合には次式に示すようにマスク内の輝度値の平均と各エッジ点に対する輝度値の差の絶対値を重みとする重み付き Linear model 法によりエッジ周辺のにじみの影響を効率的に除去できるものと推定される。

$$E = \sum |e_i| = \sum p_i |\sin(\theta)x_i + \cos(\theta)y_i - d| \rightarrow \min \quad (25)$$

ここに、 p_i : 重み(各マスク内の輝度値の平均と各エッジ点に対する輝度値の差の絶対値)

したがって、ここでは Scan-line 法、Linear model 法以外に上記の加重 Scan-line 法、重み付き Linear model 法を加えた4通りを検討することとするが、これらの手法はターゲット周辺に取るべきエッジ点数、さらにはマスクサイズに影響されるものと推測される。Havelock(1989)は5, 7, 10および15画素のエッジ長に対して Linear model 法を検討した結果、エッジ長が長くなるにつれて精度が向上するとしている。そこで、ここではまず4手法に対して、ターゲットの円周を16, 32, 64, 128, 256等分した各エッジ点に対し 5×5 , 7×7 , 9×9 , 11×11 , 13×13 および 15×15 のマスクを発生し、マスクサイズと計測精度との関連性を検討することとする。

図7 エッジ点数およびマスクサイズと計測精度の関係

図7はF50fdに対する結果である。カメラごとに多少の精度のばらつきが見られるが傾向は全機種とも共通であるので、ここでの考察はF50fdのみとする。

まず、エッジ点数で見た場合、各手法ともエッジ点数の増加に伴い計測精度も向上しているが128点以上では計測精度に差がなくなることが確認される。なお、128点のエッジ点数は周長に対して約2画素に1点の割合でエッジ点を発生させた場合に相当する。いっぽう、マスクサイズで見た場合、加重 Scan-line 法はマスクサイズの影響はほとんど受けないのに対して Linear model 法および重み付き Linear model 法ともにマスクサイズの増加に伴い計測精度が低下する傾向を示していることが理解される。さらに、Scan-line 法および Linear model 法の発展形である加重 Scan-line 法および重み付き Linear model 法は精度向上には寄与しないことが確認された。この原因としては加重 Scan-line 法の場合には加重面積重心法と同じくマスク内の輝度むらの影響と推測される。また、Linear model 法および重み付き Linear model 法はエッジ点のみの輝度情報を利用するためエッジ周辺のにじみの

影響を強く受けるためと推定される。

3.4 Star operator+楕円 fitting (Step 3)

ここでの手法は Step 1 により算出されたターゲット中心と Step 2 により抽出されたエッジ点とを結ぶ放射線分上の輝度の変化曲線に3次多項式 (Schaefer and Murai, 1988), ラグランジュの多項式 (近津・中野, 1996), ガウス曲線 (Overington and Greenway, 1987) などを当てはめて、3次多項式では曲線の変曲点を、ラグランジュの多項式では曲線の重心を、ガウス曲線ではゼロクロス点 (ここではガウス曲線における変曲点) をサブピクセル単位の新たなエッジ点として、さらに楕円 fitting を行なうものである。しかし、変化曲線をガウス曲線と仮定しにくいことから、本研究では3次多項式による曲線の変曲点とラグランジュの多項式による曲線の重心を新たなエッジ点とする2通りを検討することとした。

なお、本研究で使用する Star operator とは図8に示すように放射線分上のエッジ点を中心に、その前後に5点、計11点から構成される変化曲線を対象とする

図8 Star operator

ものであり、ラグランジュの多項式の場合にはこの11点を通る最も滑らかな曲線補間として式(26)に示すラグランジュの公式（桜井 他, 1989）を使用する。

$$L(x) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i(x)}{P_i(x_i)} g_i \quad (26)$$

ここに、 n ：点数（本研究では $n=11$ ）、 g_i ：輝度値、 $P_i(x) = (x-x_1) \cdots (x-x_{i-1})(x-x_{i+1}) \cdots (x-x_n)$

さて、Linear model 法および加重 Scan-line 法と同様に、ここでもエッジ上に配置されるエッジ点数の多少が計測精度に影響を及ぼすと推測される。そこで、ここでは3.3と同様に円形ターゲットを8, 16, 32, 64, 128, 256等分し、エッジ上に均等にエッジ点を配置することとする。

図9はF50fdに対する計測結果を示したものである。なお、カメラごとに多少の精度のばらつきが見られるが傾向は全機種とも共通であるので、ここでの考察もF50fdのみとする。

図9より3.3節(Step 2)と同様に、エッジ点数が128点以上では計測精度に差が見られないことが理解され、精度的側面からはStep 2における計測精度よりも改善されていることがわかる。また、3次多項式と面積重心（表2）の結果を比較し、計測精度に大きな差が見られないことがわかる。

以上を総括すると、ターゲット抽出には大津の自動しきい値設定法が有効であることが確認された。また、中心位置の算出には3次多項式を用いたStar operator+楕円 fittingが有効であることが理解されるが、計算処理の煩雑さを考慮すると面積重心による算出方法が効率的であることが確認された。

図9 Star operator および 3次多項式とラグランジュの多項式を用いた計測結果

4. 精度評価指標

ステレオ撮影における撮影計画あるいは計測結果の精度推定を簡便に行なう評価指標の一つとして鉛直写真に対する幾何から誘導される以下の標準精度が広く利用されている（McGlone et al., 2004）。

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{H}{f} \sigma_p, \quad \sigma_z = \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} \sigma_p \quad (27)$$

ここに、 H ：撮影高度、 f ：焦点距離、 B ：基線長、 σ_p ：座標の読み取り誤差

例えば、フリーネットワーク（Fraser, 1984）において利用される以下の精度推定式、

$$\sigma_c = q(d/f) \sigma_p / k^{0.5} \quad (28)$$

ここに、 σ_c ：ターゲット被写体座標の標準誤差、 q ：経験的に算出される幾何学的条件係数、 k ：各カメラステーションにおいて撮影される画像枚数、 σ_p ：座標の読み取り誤差、 d ：平均撮影距離、 f ：カメラの焦点距離

においても、通常ステレオ撮影の場合には平面座標に対して $q=1$ 、奥行座標には $q=(2^{0.5})H/B$ とし、 k はともに1とすると式(28)も式(27)となる。

さて、式(27)は平行撮影を前提とした航空写真測量において誘導されたものであるのに対して、デジタルカメラによる近接デジタル写真測量の場合には収束撮影が一般的であることを考慮すると、収束撮影に対する精度評価に平行撮影を前提とした評価指標を使用することの妥当性について認識しておくことの必要性を感

じる。Abdel-Aziz (1974) はこの問題を解決するために、以下の評価指標式を提案し、

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{H}{f} \left(\frac{1 + \tan \alpha \tan \varphi}{1 - \tan(\alpha - \varphi) \tan \varphi} \right) \sigma_p \\ \sigma_y &= \frac{H}{f} \left(\frac{\sec \varphi}{1 - \tan(\alpha - \varphi) \tan \varphi} \right) \sigma_p \\ \sigma_z &= \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} \left(\frac{1 + \tan \alpha \tan \varphi}{1 - \tan(\alpha - \varphi) \tan \varphi} \right) \sigma_p\end{aligned}\quad (29)$$

ここに、 φ ：収束角、 α ：光軸角 ($\alpha = \tan^{-1}(B/2H)$)

Karara and Abdel-Aziz (1974) は収束角 15° の左右対称なステレオ画像に対して収束角＝光軸角の条件下より誘導される次式を用いて、この指標の妥当性を検証した。しかしながら、デジタルカメラを使った簡便的写真測量の実用化のためにはさらに多くの収束角の変動について把握する必要がある。

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{H}{f} (\sec^2 \varphi) \sigma_p \\ \sigma_y &= \frac{H}{f} (\sec \varphi) \sigma_p \\ \sigma_z &= \sqrt{2} \frac{H}{f} \frac{H}{B} (\sec^2 \varphi) \sigma_p\end{aligned}\quad (30)$$

そこで、本研究では表1に示したデジタルカメラ7機種を用いて左右対称に $10 \sim 60^\circ$ まで5度刻みに撮影されたステレオ画像を用いて(1)左右対称なステレオ画像、(2)非対称なステレオ画像の組み合わせについて評価指標の妥当性を検討することとする。

なお、ここでの実験は基線比0.34の平行撮影状態において左右画像にテストターゲット全体が写るように撮影高度を決定しステレオ撮影を行なった。次に、収束角と光軸角とは一致するものとして、撮影高度、基線長および収束角との関係から誘導される式(31)において収束角を与えて算出される基線長に応じて左右カメラの間隔を調整し収束角ごとにステレオ撮影を5回ずつ行なった。

$$B = 2H \tan \varphi \quad (31)$$

ここに、 H ：撮影高度、 B ：基線長、 φ ：収束角

図10は実験概要を表したものである。また、ここでのレンズ歪みモデルも式(2)に示したBrownのモデルであり、ターゲット中心座標はエッジ長を128分割した後に3次多項式を用いたStar operator+楕円 fitting および面積重心によって算出された結果である。

ところで、式(30)より推定精度に対するパラメータは

図10 実験概要図

H/f , H/B , φ , σ_p であるが、各カメラに対する H/f は一定であるから、結局推定精度に対するパラメータは基線比 (H/B)、収束角 (φ) および座標の読み取り精度 (σ_p) となる。しかし、ここでの実験では撮影高度が機種ごとに異なっているため、撮影高度が計測精度に及ぼす影響を消去する方法として、式(19)の Proportional accuracy を精度指標とする。すなわち、式(27)より推定される各平均二乗誤差 (σ_x , σ_y , σ_z) を式(19)に用いたものを標準平行精度および式(30)より推定される平均二乗誤差を用いたものを標準収束精度とする。同様に、検証点86点に対する平均二乗誤差を用いたものを Proportional accuracy とし、各標準精度と実験結果に対する Proportional accuracy、収束角、基線比および読み取り精度との比較を行なう。

4.1 左右対称なステレオ画像

図11は読み取り精度 ($=\sigma_p$) を 1/16画素とした場合の F50fd に対する標準平行精度、標準収束精度および式(19)より算出される Proportional accuracy との関係を示したものである。この場合、各カメラに対する H , f , σ_p はそれぞれ一定値であるから違いは収束角および基線比の影響のみとなるが、図11よりまず気付くことは、Star operator+楕円 fitting および面積重心とも Proportional accuracy に大きな差が見られないことが確認される。したがって、ここでも面積重心による算出方法が効率的であることが理解される。

次に、標準平行精度は収束角の増加 (B の増加) に伴い上昇しているのに対し、標準収束精度は B の値は平行精度と共通であるにも関わらず収束角が 30° を超えるあたりから低下し、両標準精度との差は収束角の増加とともに大きくなることが確認される。

さらに、Proportional accuracy とこれら標準精度とを比較してみると、収束角が大きくなるにしたがい Proportional accuracy と標準平行精度との差は顕著となるが、逆に Proportional accuracy と標準収束精度との間には多少の違いは見られるもののその傾向は

(a) Star operator+楕円 fitting

(b) 面積重心

図11 標準収束精度、標準平行精度および外的精度の関係

同じであることが理解される。また、Karara and Abdel-Aziz (1974) の行なった実験 (収束角15°) で収束精度および計測精度がほぼ一致したことおよび収束角が30°以上になると計測精度は低下するとしている Schaefer and Murai (1988) の報告とも本実験での傾向はほぼ一致する。したがって、収束角が30°以上の場合に平行撮影に基づく式(27)を精度評価指標とすることは計測結果を過小評価する危険性があることになる。

なお、他のカメラについても多少の精度のばらつきが見られるが傾向は全機種とも共通であるので、ここでの考察も F50fd のみとする。

4.2 非対称なステレオ画像

デジタルカメラによる近接デジタル写真測量の場合、左右対称なステレオ撮影が取得されない場合にしばしば直面する。したがって、ここでは図12に示すように左画像をそれぞれの Position に固定して、右画像のみを5°ずつ収束角を増やした場合について検討を行なう。

図13に各 case に対する結果を、表3に収束角とターゲットの円形度および画素数の関係を示す。表3中のターゲット画像は F50fd によりステレオ撮影された左右画像のうち、右画像におけるテストターゲット (図1) の左下部の画像であり、円形度は式(3)により算出された値、画素数はターゲット部 (表3中2値化画像の白色部) の画素の総数を示す。なお、図13(a)中の収束角60°において N1, T10, 910IS の3機種について計測結果が欠落しているが、これは得られたターゲットの画素数が少なく、エッジ上の分割点から中心に向かって5画素を取得できないため、計測が行なえなかったことを示している。図13より Star operator+楕

図12 実験概要図

円 fitting および面積重心とも収束角の増加に伴い計測精度も向上し一定精度に到達した後、緩やかに精度が低下している様子が理解されるが、各 case とも基線比が1.0付近で高精度を示すことが確認される。これは収束角で見ると40~50°となる。

いっぽう、図11 (左右対称なステレオ画像) においても収束角30°における基線比は1.15であることを考慮すると、ステレオ画像による高精度写真測量のためには対称・非対称および収束角に関わらず基線比を1.0程度に取ることが重要であると判断される。また、表3および図11, 13から対称および非対称なステレオ撮影においては円形度が0.80以上となるように撮影されることが重要であると判断される。

4.3 内的精度

計測結果の推定として Proportional accuracy と同様に利用されるものに内的精度がある。内的精度とは最小二乗法における重み係数行列を使った式(32)から算出される標準偏差であるが、検証点に対する内的精度とは各検証点に対する標準偏差の総和を使った式(33)によって得られた値を式(19)に用いたものである (Beyer, 1992)。その結果、すべての機種に対する内的精度も Proportional accuracy と両標準精度との関係と同じ

図13 非対称における計測結果

表3 収束角と円形度および画素数の関係 F50fd

収束角	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	55°	60°
ターゲット 画像											
ターゲット 画像 (2 値化)											
円形度	0.8777	0.9033	0.8952	0.8843	0.8759	0.8293	0.8504	0.8398	0.8256	0.7718	0.7348
画素数 (Pixel)	4522	4059	3558	3098	2561	2133	1692	1325	1006	688	488

傾向であるが、内的精度の方が Proportional accuracy より 2 倍ほど高い精度であった。一般的に Proportional accuracy と内的精度とは一致せず内的精度の方が良い精度を示す傾向にあることが知られている

が(例えば, Shortis et al., 1995 ; Fraser, 1997), 本研究においても同様な結果であることが確認された。

$$\hat{\sigma}_{Xi} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{XiXi}}, \quad \hat{\sigma}_{Yi} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{YiYi}}, \quad \hat{\sigma}_{Zi} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{q_{ZiZi}} \quad (32)$$

ここに、 $\hat{\sigma}_{xi}$, $\hat{\sigma}_{yi}$, $\hat{\sigma}_{zi}$: 各検証点に対する標準偏差, $\hat{\sigma}_0$: 単位重みの標準偏差, q_{xiXi} , q_{yiYi} , q_{ziZi} : 検証点の三次元座標に対する重み係数行列の対角要素とする。

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{xi}^2}{n}}, \quad \hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{yi}^2}{n}}, \quad \hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{\sum \hat{\sigma}_{zi}^2}{n}} \quad (33)$$

ここに $\hat{\sigma}_{xi}$, $\hat{\sigma}_{yi}$, $\hat{\sigma}_{zi}$: 各検証点に対する標準偏差, n : 計測点数, $\hat{\sigma}_x$, $\hat{\sigma}_y$, $\hat{\sigma}_z$: 各軸に対する内的精度

5. 結 論

本研究では、デジタルカメラを使った近接デジタル写真測量における精度要因と精度評価について、7 機種 of デジタルカメラで検証を行なった。精度要因については、実際のテストターゲットを用いて、しきい値設定法、円形ターゲット中心の位置決め手法が計測精度に及ぼす影響について検証を行なった結果、しきい値設定法では大津の自動しきい値設定法が有効であることが検証された。また、中心位置の算出において円形ターゲットの周長を128等分あるいは周長に対して約2画素に1点の割合でエッジ点を配置し、3次多項式を用いた Star operator + 楕円 fitting が有効であることが確認されたが、計算処理の煩雑さを考慮すると計測精度に大きな差が見られない面積重心による算出方法が効率的であることが検証された。

いっぽう、デジタルカメラを使用したステレオ撮影における精度指標については収束角を考慮した(30)式を用いるべきであると理解された。また、デジタルカメラによる高精度写真測量のためには収束角に関わらず基線比を1.0程度に取ることが重要であること、対称・非対称に関わらず、ステレオ撮影時にはターゲットの円形度が0.80以上となるように撮影することが重要であることが確認された。

(受付日2010.11.11, 受理日2011.1.6)

参考文献

大津展之, 1980. 判別および最小2乗基準に基づく自動しきい値選定法, 電子通信学会論文誌, Vol. J63-D, No. 4, pp.349-356.
桜井 明, 石井 好, 吉村和美, 高山文雄, 1989. スプライン関数入門, 東京電機大学出版局, pp.14-18.
高橋洋二, 近津博文, 2010. 近接デジタル写真測量における民生用デジタルカメラの精度評価, 写真測量とリモートセンシング, 49(4), pp.260-268.

近津博文, 国井洋一, 中田隆司, 2001. デジタル写真測量からみた300万画素デジタルスチルカメラの精度検証, 写真測量とリモートセンシング, 40(2), pp. 33-38.
近津博文, 中野一也, 1996. ワイヤレス CCD カメラを用いた遺跡測量のリアルタイム化に関する研究, 写真測量とリモートセンシング, 35(4), pp.18-26.
Abdel-Aziz Y.I., 1974. Expected Accuracy of Convergent Photos. Photogrammetric Engineering, Vol. 40, No. 11, pp.1341-1346.
Beyer H.A., 1992. Accurate Calibration of CCD-cameras. In Proceedings of the Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pp.96-101.
Brook R.A., Purll D.J., 1979. Design of a Polaris star sensor using charge-coupled device (CCD) imaging, and LSI and microprocessor-based signal processing. SPIE, Vol. 178, pp.210-220.
Brown D.C., 1971. Close-Range Camera Calibration. Photogrammetric Engineering, 37(8), pp.855-866.
Chen J., Clarke T.A., 1992. The Automatic Recognition, Location and Labeling of Targets in Digital Photogrammetric Engineering Measurement. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 29, Part B5, pp.686-693.
Clarke, T.A. Cooper, M.A.R., Fryer, J.G., 1993. An estimator for the random error in subpixel target location and its use in the bundle adjustment. Optical 3-D measurements techniques II, Pub. Wichmann, Karlsruhe, pp.161-168.
El-Hakim, S.F., 1986. Real-Time Image Metrology with CCD Cameras. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 52, No. 11, pp.1757-1766.
Fraser C.S., 1984. Network Design Considerations for Non-Topographic Photogrammetry. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 50, No. 8, pp.1115-1126.
Fraser, C.S., 1988. State of the art in industrial photogrammetry. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 27(B5), pp. 166-181.
Fraser C.S., 1997. Digital camera self-calibration.

- ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 52, No. 4, pp.149-159.
- Fraser C.S., Hanley H.B., 2004. Developments in Close-Range Photogrammetry for 3D Modelling: the iWitness Example. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI-5/W1, ISSN 1682-1777.
- Habib A.F., Morgan M.F., 2003. Automatic calibration of low-cost digital cameras. *Optical Engineering*, 42(4), pp.948-955.
- Havelock I.D., 1989. Optimal estimation of planar position and orientation for straight edges. *Optical 3-D Measurement techniques*, pp.470-482.
- Karara, H.M., Abdel-Aziz Y.I., 1974. Accuracy Aspects of Non-Metric Imageries. *Photogrammetric Engineering*, 40(10), pp.1107-1330.
- Laebe, T., Foerstner W., 2004. Geometric Stability of Low-Cost Digital Consumer Cameras. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 35(1), pp.528-535.
- Luhmann, T., 1986. Automatic Point Determination in a Reseau-Scanning System. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Com. V, pp.400-408.
- Luhmann, T., Robdon S., Kyle S., Harley I., 2006. *Close Range Photogrammetry*. Whittles Publishing, pp.371-376.
- McGlone, J.C., Mikhail. E.M., Bethel J Mullen R, 2004. *Manual of Photogrammetry*, 5th Edition, The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, pp.822-826.
- Overington, I., Greenway, P., 1987. Practical first-difference edge detection with subpixel accuracy. *Image and Vision Computing*, Volume 5, Issue 3, pp.217-224.
- Rosenfeld, A., Kak, A.C., 1982. *Digital Picture Processing*, Second Edition, Volume 2. ACADEMIC PRESS, INC. pp.286-290.
- Schaefer, H., Murai, S., 1988. Automated Target Detection for Real-Time Camera Calibration. *Proceeding of 9th Asian Conference on Remote Sensing*, pp.H.2-4-1-H.2-4-8.
- Shortis, M.R., Clarke T.A., Short T, 1994(a). A comparison of some techniques for the subpixel location of discrete target images. *SPIE*, Vol. 2350, pp.239-250.
- Shortis, M.R., Thompson, M.W., Hall, C.J., 1994(b). An Application of Digital Close Range Photogrammetry to the Monitoring of Large Scale Engineering Structures. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 28, Part 5/1, pp.365-373.
- Shortis, M.R., Clarke T.A., Robson S., 1995. Practical Testing of the Precision and Accuracy of Target Image Centring Algorithms. *SPIE Vol. 2598*, pp.65-76.
- Snow, W.L., Childers, B.A., Shortis, M.R., 1993. THE CALIBRATION OF VIDEO CAMERAS FOR QUANTITATIVE MEASUREMENTS. *International Instrumentation Symposium, 39th, Proceedings (A93-5435124-35)*, pp.103-130.
- Trinder, J.C., 1989. Precision of digital target location. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 55, No. 6, pp.883-886.
- Trinder, J.C., Jansa, J., Huang, Y., 1995. An assessment of the precision and accuracy of methods of digital target location. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 50, No. 2, pp.12-20.
- van den Heuvel, F.A., Kroon, R.J.G.A., Le Poole, R. S., 1992. DIGITAL CLOSE-RANGE PHOTOGRAMMETRY USING ARTIFICIAL TARGETS. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 29(B5), pp.222-229.
- West, G.A.W., Clarke, T.A., 1990. A survey and examination of subpixel measurement techniques. *SPIE*, Vol. 1395, pp.456-463.
- Wong, K.W., Ho, Wei-Hsin, 1986. Close range mapping with a solid state camera. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 52, No. 1, pp.67-74.
- Zhou, G., 1986. Accurate Determination of Ellipse Centers in Digital Imagery. *ACSM-ASPRS Annual Convention*, Vol. 4, pp.256-264.