

カイト気球を用いた簡易空中写真測量

Oshima, Taichi / MIYASHITA, Kiyoe / 宮下, 清栄 / 大嶋,
太市

(出版者 / Publisher)

法政大学工学部

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

Bulletin of the Faculty of Engineering, Hosei University / 法政大学工学部
研究集報

(巻 / Volume)

22

(開始ページ / Start Page)

157

(終了ページ / End Page)

168

(発行年 / Year)

1986-03

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00004037>

カイト気球を用いた簡易空中写真測量

大 嶋 太 市*・宮 下 清 栄*

Aerial Photogrammetry Using Kite Balloon

Taichi OSHIMA* and Kiyoe MIYASHITA*

Abstract

Users themselves wish to take aerial photographs by means of easy handling and cheap system from several hundred meters high, for environmental study.

The objectives of the study are to develop a kite balloon camera system with 35 mm camera gyro-controlled of which allows to obtain stereo-photographs from up to 600 m and to establish the methodology for three dimensional measurement.

Analytical stereo-photogrammetry can be applied for three dimensional photogram-non-metric camera when the camera is calibrated in advance.

The result of the experiment showed that the accuracy of three dimensional measurement was ± 3 cm in position, ± 6 cm in height in the case of 100 m flight height.

§1. はじめに

今日、簡便にしかも安価に数百メートル上空から空中写真を撮影し、災害や環境調査等に利用する研究が種々行われている。また、搭載されるカメラは非測定用のカメラを用いていた場合が多くなってきた。

著者らも、非測用の35mmカメラを用いてカイト気球による空中写真撮影システムの研究を行ってきた。

本研究は、35mmカメラを測定用に用いるために、外部標定要素だけでなく、画面距離、主点位置ずれ、レンズディストーションの係数、フィルム歪の係数など、いわゆる内部標定要素を求め、立体写真から3次元座標を求める手法を用いた。また、指標付きで、しかも内部標定要素が検定してあるカメラを用いた実験も併せて行った。簡便な空中写真撮影システムとしてカイト気球を用いシステムの改良を行って来た結果手軽に立体空中写真を撮影できるシステムが得られた。

§2. 非測定用カメラによる写真測量

一般に35mmカメラは非測定用カメラであり、指標がなく、主点位置、画面距離、レンズ歪、フィルム平面度などの幾何学的要素が正確に与えられていない。

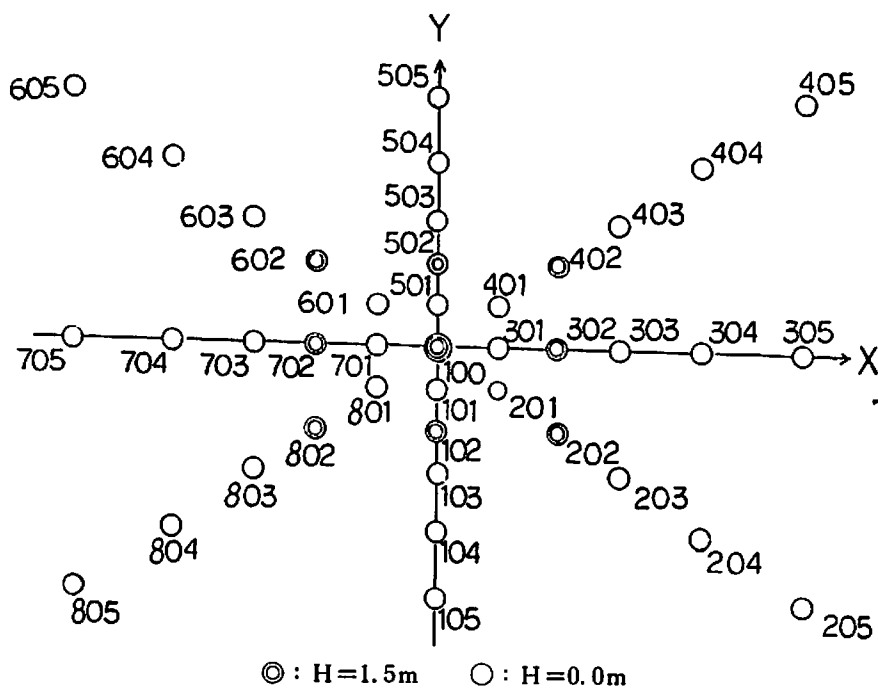
* 土木工学科

そこで、本研究では、極めて良い精度に3次元的に配置された基準点を用いて解析的に主点位置ずれ (x_0, y_0) 、画面距離 f 、レンズ歪を与える関数の係数 k_1, k_2 、フィルム曲面を与える多項式の係数 $p_1 \sim p_6$ の内部標定要素を求める手法を用いた。

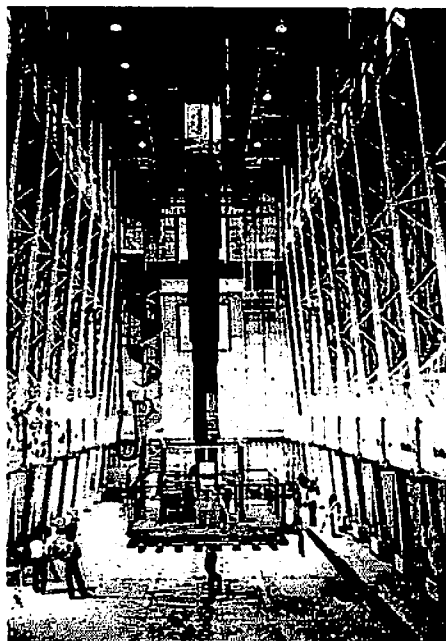
本実験に使用したカメラはオリンパスOM-1 ($f=28\text{mm}$) とニコンF3 ($f=50\text{mm}$) の35mmカメラとハッセルブラットMK70 ($f=60\text{mm}$) の6×6板カメラを使用した。

2.1 試験地における写真撮影

建設省国土地理院のリモートセンシング棟内に設けられた試験地に極めて良い精度の基準点を

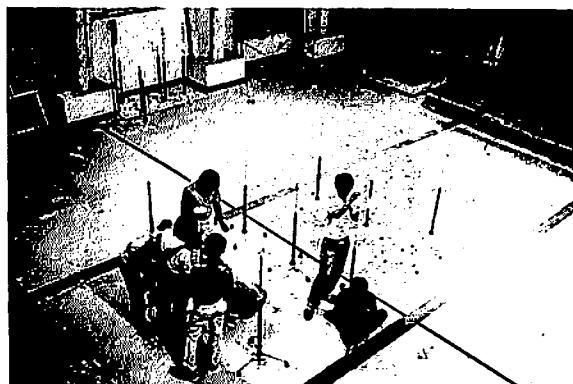


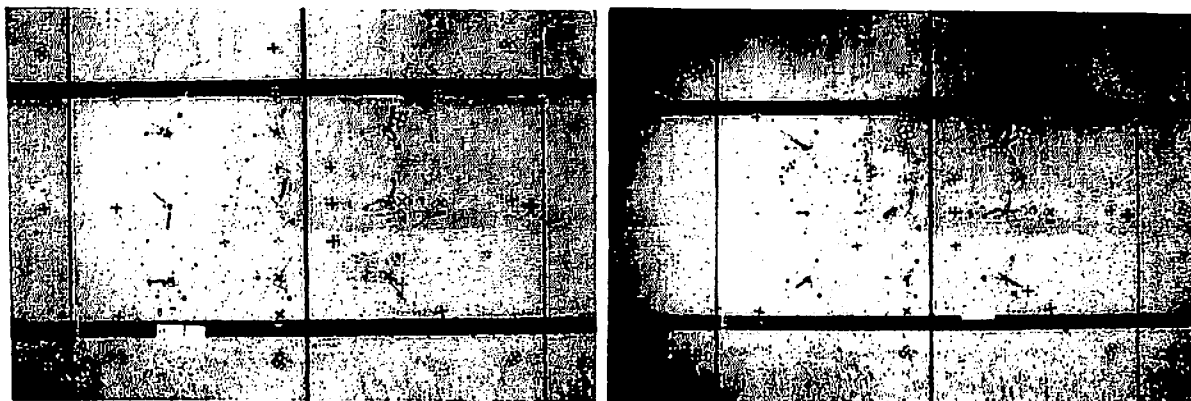
◎ : H=1.5m ○ : H=0.0m
 図1 室内試験地の基準点配置



◀写真1 試験地概観 (ゴンドラ)

▼写真2 基準点





H = 8 m
H = 13 m
写真3 オリンパス OM-1 により撮影された写真例

配置する(図1)。中央から8つの放射方向にそれぞれ5点ずつ、合計41点の基準点を配置した。このうち中央の基準点を含む9点は1.5mの高さとし、その他の基準点は0mと、3次元的配置とした。

写真撮影は、写真1に示すゴンドラより鉛直下方または少し傾けて撮影した。撮影高度は8mと13mで行い、撮影位置は中央基準を0地点とし、X軸方向に基線長±1m、±2mおよび0地点の5箇所から撮影した。写真3にオリンパス OM-1 により撮影された写真例を示す。

2.2 単写真標定によるセルフキャリブレーション

本研究で使用した基式は次のようである。

$$x = -f \frac{a_{11}(X-X_0) + a_{12}(Y-Y_0) + a_{13}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x$$

$$y = -f \frac{a_{21}(X-X_0) + a_{22}(Y-Y_0) + a_{23}(Z-Z_0)}{a_{31}(X-X_0) + a_{32}(Y-Y_0) + a_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y$$

ここで

(X, Y, Z); 対象物の地上座標

(X₀, Y₀, Z₀); 投影中心の地上座標

f ; 焦点距離

(x, y); 対応する写真像の写真座標

a_{ij} ; 回転行列の要素

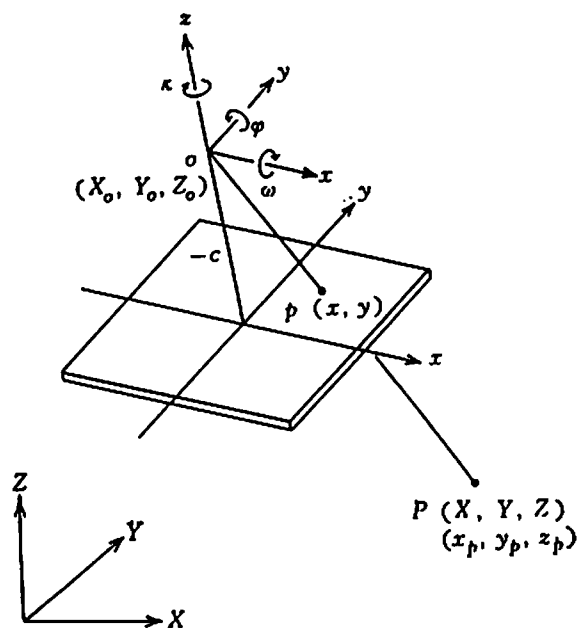


図2 単写真の幾何学

$$R = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos k & -\sin k & 0 \\ \sin k & \cos k & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$(\Delta x, \Delta y)$; 内部標定要素の補正量

$$\Delta x = x_0 + x(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (p_1 x + p_2 y + p_3 xy + p_4 y^2)$$

$$\Delta y = y_0 + y(k_1 r^2 + k_2 r^4) + (p_5 xy + p_6 x^2)$$

$$r^2 = (x^2 + y^2) / f^2$$

ここで

(x_0, y_0) ; 主点位置ずれ

(k_1, k_2) ; 放射方向わい曲収差の係数

$(p_1 \sim p_6)$; フィルム変形の係数

測定用カメラでは $X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, k$ の6つの外部標定のみが未知変量とするのに対し、非測定用カメラでは外部標定要素のほか、上記の様に $x_0, y_0, k_1, k_2, p_1 \sim p_6$ の内部標定要素を未知変量として扱った。

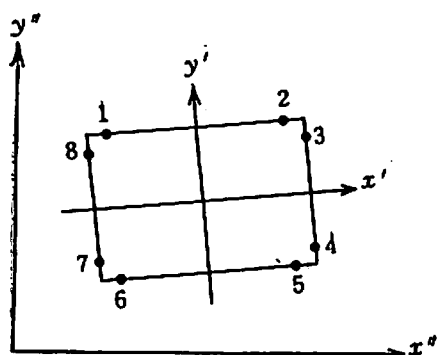


図3 非測定用カメラの指標座標のきめ方

写真座標の測定は、原ネガフィルムをそのまま用い、本学の東独ツァイスイエナ社製のステレオコンパレータ(最小読取值 $1 \mu\text{m}$)を使用し、単写真毎に独立に2回観測を行った。

ここで、観測された値は機械座標であるため、写真の中心を原点とした写真座標に変換しなければならないが非測定用カメラでは、指標がないため図3に示すように、四辺上にそれぞれ2点ずつ、合計8点を選び、アフィン変換に最小二乗法をあてはめて、各辺の中心を求め指標座標系に代替させている。

標定は、次の4つのケースに分けて行った。

(1) ケース1

内部標定要素の初期近似解を与えて、外部標定要素のみを求める。未知変量は、カメラ位置 (X_0, Y_0, Z_0) とカメラの傾き (ω, φ, k) の6個である。

(2) ケース2

ケース1で求めた多部標定要素および主点位置ずれ (x_0, y_0) 、焦点距離 f の合計9個の未知変量を求める。

表1 オリンパス OM-1 の表定要素

標定要素	X=+2 m	X=+1 m	X=0 m	X=-1 m	X=-2 m	平均値
画面距離 (mm)	28.144895	28.116159	28.111610	28.123866	28.097620	28.11883
主点位置ずれ X_p (mm)	0.112821	0.119975	0.107373	0.129291	0.115021	0.11689
Y_p (mm)	0.023717	0.005486	0.023828	0.035665	0.025675	0.02287
レンズ歪 K1	1.43E-4	1.44E-4	1.52E-4	1.46E-4	1.50E-4	1.47E-4
K2	-2.14E-7	-2.20E-7	-2.30E-7	-2.19E-7	-2.30E-7	-2.23E-7
フィルムわん曲 P1	-1.62E-3	-8.81E-4	-1.72E-3	-1.27E-3	-1.27E-4	-1.40E-3
P2	-1.31E-3	-5.21E-4	-7.00E-4	-3.80E-4	-1.27E-4	-3.48E-4
P3	2.46E-5	6.72E-5	5.52E-5	2.38E-5	2.87E-5	3.99E-5
P4	4.21E-5	3.33E-5	6.29E-5	5.64E-6	8.11E-6	3.04E-5
P5	4.12E-5	1.97E-5	3.55E-6	-2.35E-5	-5.25E-5	4.08E-6
P6	-2.47E-5	-4.85E-5	-1.34E-5	-3.17E-5	-3.04E-5	-2.97E-5

表2 単写真標定の精度 (m)

	高さ	基線長	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4
オリ ン パ ス	13 M	+2	24.125	17.802	4.091	3.477
		+1	22.880	19.895	4.550	3.903
		0	22.973	21.027	4.733	3.832
		-1	27.660	16.517	4.185	3.278
		-2	24.753	19.928	5.141	4.623
O M 1	8 M	+2	38.726	38.930	7.454	4.944
		+1	44.636	40.548	7.117	5.322
		0	53.473	43.876	8.439	5.136
		-1	43.997	41.465	6.443	4.056
		-2	42.848	41.747	6.833	5.228

(3) ケース 3

ケース 2 で求めた外部標定要素および主点位置ずれ，焦点距離を与えて，レンズディストーションの係数 k_1, k_2 を求める。

(4) ケース 4

ケース 3 で求めた標定要素を与えて，フィルム平面度の歪の係数 $p_1 \sim p_6$ を求める。

2.3 結果及び考察

表 1 にオリンパス OM-1 で高度 8 m から撮影した内部標定要素を示す。内部標定要素は，写真毎にばらつきがあるが，ばらつきの傾向はほぼ同じである。そこで，平均値を求め，解析に用いた非測定用カメラの内部標定要素とした。

表 2 に単写真標定の精度を示す。ネガ上での中等誤差を表わす。これより内部標定要素を考慮するほど精度が向上することがわかる。特に，焦点距離，主点位置ずれ，レンズ歪までを考慮するケース 3 において飛躍的に精度の向上が認められる。これは，非測定用カメラにおいては，レンズ歪がかなり大きいいため，これを補正することにより，測定用に利用可能であると言える。す

すべての内部標定要素を考慮したケース4では $3 \sim 6 \mu\text{m}$ の誤差で標定可能であり、測定用カメラとほぼ同じ程度に改善された。

2.4 指標付カメラの概要

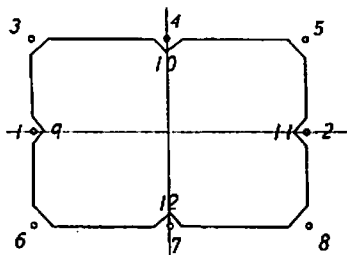
非測定用カメラには、指標が無いことは上述したとおりであるが、フィルムの四辺が直線であると仮定して指標座標に変換しているが、実際は少なからず凹凸が見られる。また、指標がないために観測の苦難さも多々見られた。非測定用カメラも最低限指標付きになれば、より精度の向上が可能であると思われる。そこで、新たに市販された、指標付きの非測定用カメラも実験に加えた。このカメラは、指標の他に、焦点距離、主点位置ずれ、レンズ歪がメーカーから検定値としてデータが供給される。以下にカメラの概要を示す。

表3 コンタックス RTSII のデータ表

a) 指標検定値

	X	Y
1.	-16.991	0
2.	+17.004	0
3.	-16.991	+10.999
4.	+ 0.003	+10.995
5.	+17.008	+11.001
6.	-16.991	-10.994
7.	+ 0.009	-10.999
8.	+17.005	-10.997
9.	-16.013	- 0.001
10.	- 0.002	+10.018
11.	+16.014	+ 0.004
12.	+ 0.010	-10.005

写真主点位置
(カメラをフィルム側より見る)
XY軸 (-0.324, -0.102)



b) 画像ディストーション

0	5	7.5	10	12.5	15	17.5	20	(mm)
0	- 7	-23	-54	-101	-165	-275	-342	(1/1000mm)
0	-0.14	-0.31	-0.53	-0.80	-1.09	-1.38	-1.68	(%)

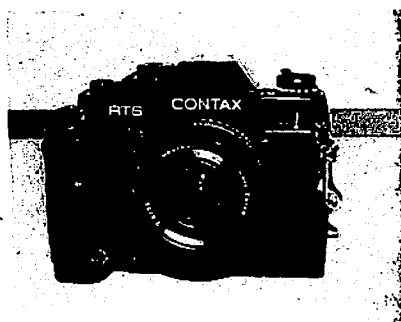


写真4 コンタックス RTSII カメラ

カメラ; CONTAX RTS II QUARTZ

レンズ; DISTAGON T* 35mm F1.4

焦点距離 F=35.743mm

重量; 1,340g

シャッター; ストロボ付無線操作

巻取り; コンタックスリアルタイムワイド-W-3, 1コマ撮り

その他のデータは表3に示すとおりである。

§3. カイト気球による空中写真撮影システム

非測定用カメラを用いても解析的にキャリブレーションを行うことにより、3次元測定が可能であることがたしかめられたので、この非測定用カメラを搭載して、簡便に空中写真撮影を行うシステムの開発を行った。

現在、無人プラットフォームとしては、ラジコン飛行機、ラジコンヘリコプター、カイト気球、クレーンなどがあるが、操作性などを考慮して、本システムではカイト気球を用いることにした。

3.1 特 徴

気球は2本の糸をつけるため安定して上昇し、ガス容量、風などにもよるが約600m程度まで上昇可能である。また糸の長さ懸垂状態から高さ位置が推定できる。移動は糸を持った人間が歩いて移動するため非常に容易であるが、その反面、定点観測には向くが、広く移動する目的には向かない。気球は折りたたむと大変小さくなり、またヘリウムガスの充填、排出も簡単にできるなど準備は非常に容易であるが、気球は非常に薄いビニール製のため、穴があきやすいので取り扱いに注意する必要がある。

3.2 機 材

必要な機械は以下のとおりである。

a. プラットフォーム

(1) 気球：塩化ビニール製

- i) ヘリウムガス；5.25m³
- ii) 船型；飛行船型（流線形）
- iii) 大きさ；長さ 5.0m，直径 1.2m
- iv) 搭載重量；約 2.5kg
- v) 支持方式；糸（2本支持）

(2) カメラ：35ミリカメラ

- i) オリンパス OM-1 f=28mm
- ii) コンタックス RTSII f=35mm
- iii) シャッター；ストロボ付無線操作
- iv) 巻取り；モータードライブ1コマ撮り

(3) ジャイロ

- i) 方向制御；無線操作
- ii) 方向；鉛直，4方向切り替え

b. 地上局



写真5 気球による撮影システム I

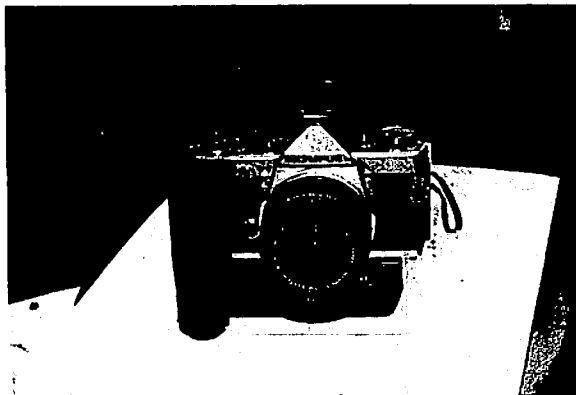


写真6 オリンパス OM-1

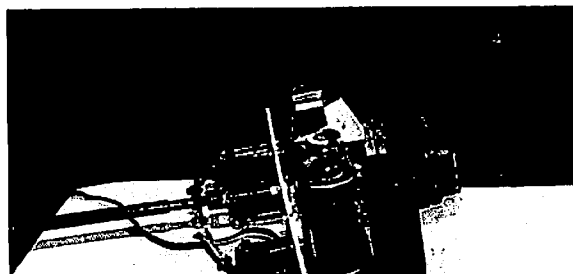


写真7 ジャイロ

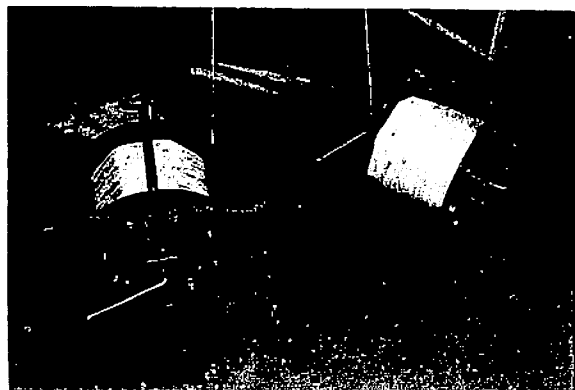
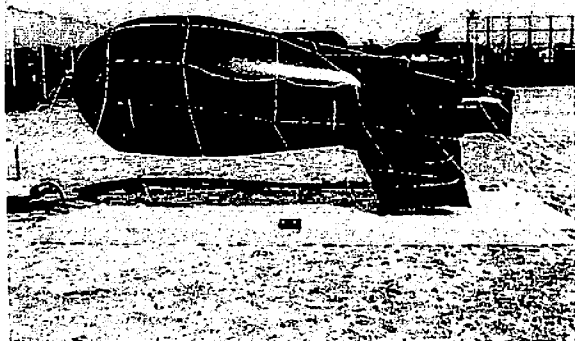


写真8 地上局

(1) 無線操作盤

- i) シャッターボタン
- ii) ジャイロ方向制御

(2) 吊り下げ糸巻: 2基

- i) 総延長: 600m
- ii) 目盛: 20mごとにマーク
- iii) 糸: テイジンテトロン トローリングライン 張力 36kg

(3) 離着陸用シート, ビニール製

- i) 大きさ: 5.2m×3.6m
- ii) 作業: 解梱, ガス充填, 排出, 折たたみ

(4) ヘリウムボンベ

- i) 容量: 7 m³
- ii) 長さ: 1.37m
- iii) 価格: 約2万円/本

(5) 係留ネット; ナイロン製

- i) 大きさ: 8m×5m
- ii) 目的: 気球の地上係留

3.3 撮影システム

撮影システムは写真5に示すように, 飛行船型, 三枚羽根のカイト気球を用い, 前方の吊り下げ糸より地上の操作用リールと結び, 後方の吊り下げ糸にはカメラや受信機等を収納する発砲スチロール製で流線型にした吊り下げ箱が約2mの糸で吊るされている。

しかし, このカメラの収納した吊り下げ箱の吊り下げ糸と気玉の吊り下げ糸との接点を中心に回転, 振れなどが生じ, 気球の動きとカメラの動きがバラバラになることが多々生じた。この点を考慮してカメラの方向を変えるジャイロがとりつけられているが数10m上空のカメラの向きを地上から確認することは困難であり, ほとんど無理であった。

このため, 撮影されたフィルムに対して3次元測定に利用できる立体写真は数組という結果であった。そこで, このシステムは斜写真の撮影等に利用すものとして, 正確な立体写真を撮影するためのシステムの改良を行った。

正確な立体写真を撮影するための改良点は目を持つこと, すなわちビデオカメラを搭載し, 所定の場所を定めて撮影することが最良と思われる。しかし, われわれの用いている気球では搭載重量の関係からビデオカメラを搭載することは不可能であり, かつ価格の面でも高価なシステムとなり, 著者らの目的である安価なシステムとは言いがたい。そこで, システムの改良点を次のように定めた。

- (1) 吊り下げ箱の回転を防止し, 気球とカメラの方向を同一にする。
- (2) カメラ本体の振れ, 傾きを防止する。

まず, (1)に対しては今までの発砲スチロール製の吊り下げ箱をやめ, 約2mのアルミ棒を用

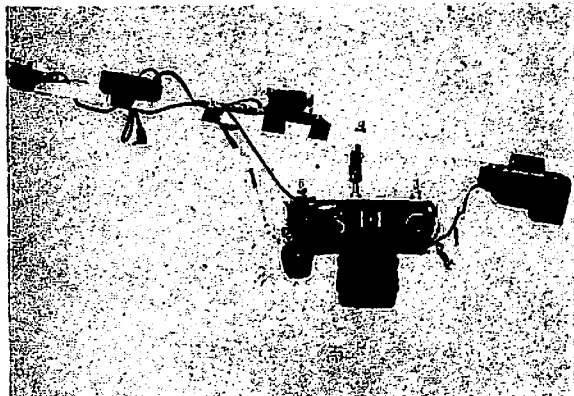


写真9 気球による撮影システムⅡ

い、しかも気球の後端からの吊り糸でのみ結び付けていたものを、前・後端からの吊り糸にアルミ棒の両端を結び付けるようにした。また、このアルミ棒にカメラを固定することにより、カメラは回転がなくなり、しかも気球の向きとアルミ棒の向きは常に同一方向になる。

次に、(2)に対してはアルミ棒とカメラの重心との接点にボールジョイント（常に鉛直になるよう設計されたジョイント）を用いることによ

りカメラは常に鉛直下方を向くように設計した。

以上のような改良を行った結果、かなりの確率で正確な立体写真を撮影することができた。

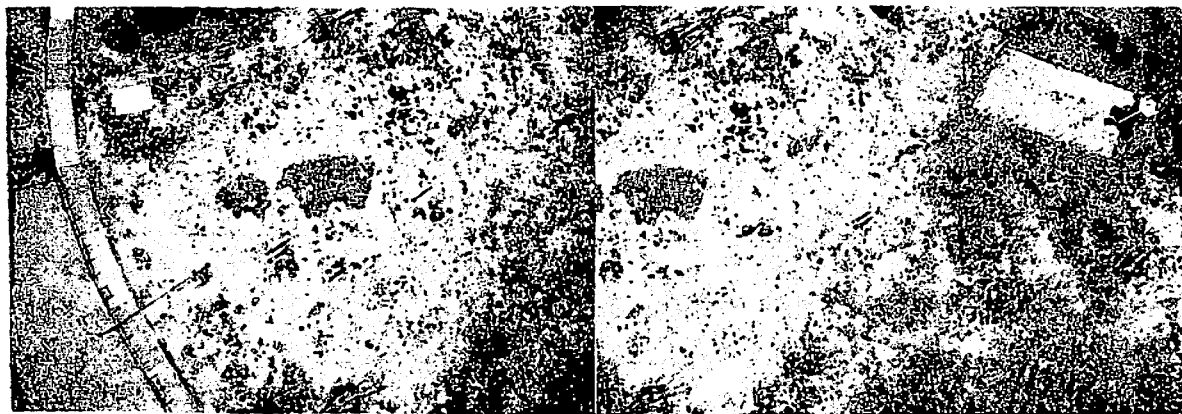
改良された撮影システムを写真9に示す。

§4. 3次元座標測定の実用例

昭和59年12月10日、都立小金井公園の縦、約180m、横約100m、高低差約5mの地域をテスト



(a) オリンパス OM-1



(b) コンタックス RTSII
写真10 撮影例

表4 精度表(計算値と測地座標値の差)

PRANICONP C-100				HOSEI-FACOM			
OLYMPUS. OM1 (m)				OLYMPUS. OM1 (m)			
POINT	DXG	DYG	DZG	POINT	DXG	DYG	DZG
512	-.420	.171	.365	512	.022	-.025	-.315
513	-.036	.166	.151	513	.074	-.157	.217
522	.044	-.640	-.438	522	.522	.252	.456
532	.021	.507	-.005	532	.011	-.420	-.008
533	.390	-.205	-.075	533	-.629	.349	-.351
MEAN	.182	.337	.207	MEAN	.252	.241	.269
CONTAX. RTS (m)				CONTAX. RTS (m)			
POINT	DXG	DYG	DZG	POINT	DXG	DYG	DZG
512	-.033	.054	.070	512	-.005	-.007	-.046
513	.012	.017	-.021	513	-.039	.057	.021
522	-.023	-.057	-.102	522	.001	-.079	.092
532	.033	-.012	.089	532	-.014	.004	-.081
533	-.068	.037	-.037	533	.056	.025	.013
MEAN	.034	.035	.064	MEAN	.023	.034	.051

エリアに選定し、28個の標識を設け基準点とし、オリンパスとコンタックスの2種類のカメラにより撮影を行い精度の検討を行った。

オリンパス OM-1 で撮影された写真は、2.1でのべたキャリブレーションにより得られた値を用いて、解析を行い、コンタックスはメーカーからの内部評定要素値を用いて行った。

オリンパス、コンタックスにより撮影された立体写真の例を写真10(a),(b)に示す。

高度100mから撮影した立体写真を著者らのソフトと解析図化機プラニコンプ C-100 により解析した結果を表4に示す。

計算値と測定座標との誤差は、オリンパスでは平面位置、高さ方向で20~30cmの精度であり、コンタックスでは平面位置で2~3cm、高さ方向で5~6cmの精度が得られた。

§5. 結 論

(1) 非測定用カメラでも、試験地で得られたキャリブレーション結果をあたえることにより、十分使用できる精度が得られる。

特に、焦点距離、主点位置ずれ、レンズ歪をキャリブレーション結果から与えることにより、1/2,000~1/4,000の精度が得られる。しかし、フィルムの変形は一枚ごとに異なるものであるから、試験地で得られた値では、精密な補正は行えない。

(2) 指標付きカメラを用いることにより、指標観測精度が向上し、より精密な3次元測定が可能である。

- (3) カイト気球による空中写真撮影が簡便にかつ安価に行い得ることが実験により確かめられた。これにより利用者自身が手軽に、小規模な地域の3次元測定や写真判読に多いに利用できる。

今後の課題としては、非測定用カメラを災害調査や現地調査に簡便に利用できるような地上写真への応用を考得ている。手軽な地上写真撮影システムが確立されることにより、だれもが、手持のカメラにより撮影した写真を用いて後に3次元測定等に利用可能となると思われる。

謝 辞

本研究を遂行するに当たって、研究室の卒研究生、小林義明、高橋欣宏、高畑 仁、望月真人、館野 浩、松井清の学生諸君に多くの野外および室内の作業やシステム作製を行ってもらった。ここに謝意を表したい。

また、非測定用カメラのキャリブレーションは国土地理院に設けられた室内基準点を用いて行われたものである。応用例のテスト地区として都立小金井公園を使用させていただいた。ここに関係各位に深謝致します。

参 考 文 献

- 1) 日本写真測量学会編：解析写真測量，昭和58年。
- 2) 大嶋・宮下：空からの簡易写真測量法について。日本写真測量学会，昭和60年度学術講演会。
- 3) 大嶋・宮下：カイトバルーンによる近距離解析写真測量について，日本写真測量学会，昭和59年度学術講演会。
- 4) 村井・小泉他：カイト気球を用いた空中写真測量とリモートセンシング。写真測量とリモートセンシング，Vol. 21，No. 2，1982年。
- 5) 村井・奥田他：非測定用カメラを用いた解析的写真測量に関する研究。東大生産研究，Vol. 29，No. 6 昭和56年7月。