

写真測量技術を用いた

I-8 2D デジタル画像からの3D モデル空間の創出に関する基礎研究

A Study for Producing 3D Model Space from 2D Digital Picture using Photogrammetry Technology

村木広和* 田中成典** 古田 均** 北川悦司* 野田 肇**

Hirokazu Muraki Shigenori Tanaka Hitoshi Furuta Etsuji Kitagawa Hajime Noda

【抄録】

近年、コンピュータ技術の進歩に伴い3次元のCADやCGが注目されてきた。また、デジタルカメラの発展に伴い、2次元の画像データから、3次元座標データを取得するための写真測量技術に関心が高まってきた。しかし、昨今ニーズが高まりつつある地上写真測量では、地図作成などに用いられる航空写真測量に比べ、専門家でも撮影方法や観測点の決定が困難であるため、精度の高い3次元座標データを取得するには、膨大な労力と時間を必要とする。そのため、ほとんど実用化されていないのが現状である。

そこで、本研究では、高額な機材や専門家の知識を必要とせず、誰もが2次元のデジタル写真を撮影するだけで、簡単に、しかも素早く3Dモデル空間を創出できるシステムの研究開発を目的とする。

【Abstract】

With the advance of computer technologies, 3D CAD and CG have been noticed in recent years. This tendency has also led to the increase of interest toward a photogrammetry technique, which is used to acquire 3D data from two pieces of 2D digital picture. By using this technique, the measuring of an object from a distance, which had been difficult, can now be easily done.

In present study, we have established a new technology by using an automatic decision method which can obtain the optimal passpoint. This technique offers everybody to obtain 3D data easily.

【キーワード】

写真測量技術, デジタルカメラ, 2D デジタル画像, 最適パスポイント,
遺伝的アルゴリズム, 3D モデル, CG

【Keywords】

Photogrammetry Technology, Digital Camera, 2D-Digital Picture, Optimal Passpoint,
Genetic Algorithm, 3D-Model, Computer Graphics

1. まえがき

今日の情報機器の発達に伴い、様々な分野におけるデジタルデータの活用、といった風

潮は、加速の一途を辿っている。しかし、このようなデジタル化の流れは、情報機器の技術革新のみによって実現されるものではなく、

* 関西大学大学院 総合情報学研究科

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

** 関西大学 総合情報学部

〒569-1095 大阪府高槻市霊仙寺 2-1-1 (TEL) 0726-90-2404 (FAX) 0726-90-2491

従来のアナログ機器を用いた作業を代替するソフトウェアの存在があって、初めて実現可能になると考えられる。このような背景の下、本研究では、地図作成を主目的とする従来の写真測量技術では十分な精度を得ることができなかった近接な被写体に対する測量、いわゆる、地上写真測量を可能とするアルゴリズムを考案する。そして、高額な機材や専門家の知識を必要とせず、誰もがデジタル写真を撮影するだけで、簡単に、素早く、しかも高精度に3Dモデル空間を創出できるシステムの研究開発を目指す。

2. システムの概要

航空写真を用いた航空写真測量においては、撮影高度の約 1/5000 の誤差で地上の位置を計測することができるまでに向上してきた。しかし、その技術をそのまま地上写真測量に適用した場合、高精度な3次元座標データを取得することは困難である。これは、撮影写真の被写界深度が大きいことに起因するためと考えられる。そこで、本研究では、文献[1]-[3]で体系化されている写真測量技術を基本として、自動的に最適なパスポイント（観測点）を決定することによって被写界深度の計測誤差を最小に抑える手法を考案する。

3. デジタル写真測量

本研究では、写真の像は、被写体から反射された光がレンズ中心を直進してフィルムの平面に投影される、という共線条件と、2つの投影中心とその像が同一平面内に含まれる、という共面条件を利用する。具体的には、文献[1]で体系化されている共面条件を用いて投影中心を結ぶ方法（図1）により、3次元座標データを算出する。デジタル写真測量[4]は、内部標定、相互標定、絶対標定の3つのフェーズで行われる。流れを図2に示す。

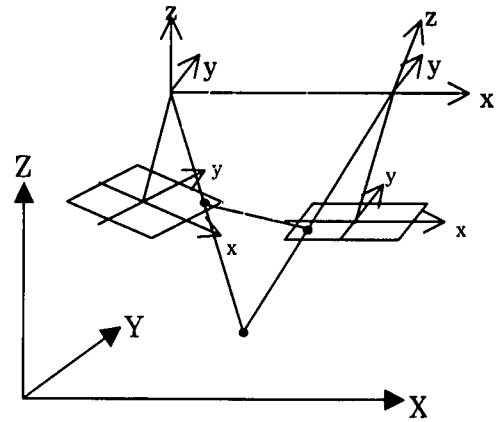


図1 共面条件を用いて投影中心を結ぶ方法

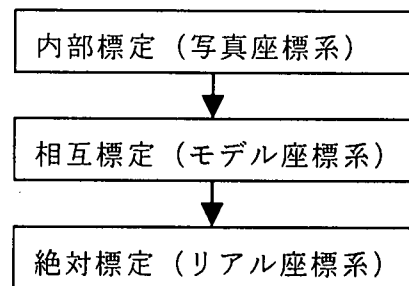


図2 デジタル写真測量の流れ

3. 1 内部標定

内部標定のフェーズでは、カメラの機械誤差やレンズの屈折などによって発生する共線条件を妨げる要因[5][6]を除去する。そして、画像編集ソフトで計測した任意の座標系から、写真の中心を原点とした写真座標系にアフィン変換を用いて変換する。本研究では、デジタルカメラを用いることを想定しているため、写真フィルムの歪みや座標軸の歪みなどを考慮しない。そのため、本研究では、アフィン変換によって補正されるスキュー歪み、縮尺、原点の移動量のみを補正する。本研究で用いたアフィン変換式は、次式(1)である。

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax + by + c \\ y' &= dx + ey + f \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

3. 2 相互標定

相互標定のフェーズでは、共面条件を用いて投影中心を結ぶ方法により、左右2枚の写真が撮影された時のレンズ中心の位置 (B_{x1}, B_{y1}, B_{z1}) (B_{x2}, B_{y2}, B_{z2}) と、カメラの傾き $(\omega_1, \kappa_1, \phi_1)$ $(\omega_2, \kappa_2, \phi_2)$ を算出

する。そして、レンズ中心の位置とカメラの傾きを用いて、被写体の3次元座標データを算出する。ここで、算出された3次元座標データは、左の投影中心を原点とし、左右の投影中心間の距離を1とした相対的なモデル座標を取る。

3. 3 絶対標定

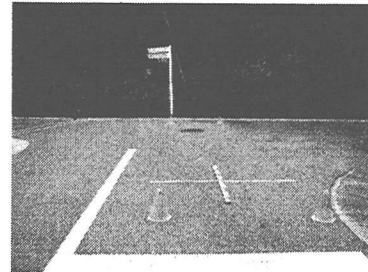
絶対標定のフェーズでは、任意に設置した基準点を用いて、相互標定で算出された相対的な3次元座標データを現実世界の縮尺のリアル座標系に変換する。

通常、航空写真では、広範囲な撮影を可能にする航空カメラを用いているため、地球曲率の補正を行う。しかし、本研究では、一般に市販されているデジタルカメラを用いた地上写真を想定しているため、この補正は考慮しない。

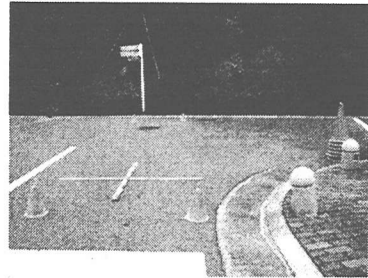
4. システムの開発と検証

4. 1 従来の写真測量を用いた解析

写真測量では、基準点や、距離などを測るための計測点（計測パスポイント）のみでは、高精度な3次元座標データを取得することは困難である。高精度な3次元座標データを取得するためには、写真全体にバランス良く任意にパスポイント（任意パスポイント）を取る必要がある。2枚の近接地上写真（図3）を用いて、任意パスポイントをバランス良く9点取り、第3章の写真測量の方法に従って、地物の計測を行った。その結果、表1に示すように、精度の良くない3次元座標データしか取得できなかった。そこで、多くのパスポイントを採用しても精度が向上しないという点に着目し、複数のパスポイントの中から最適なパスポイントを決定することにより、被写界深度の計測誤差を少なくできる方法を考案する必要が生じた。



左から撮影した写真



右から撮影した写真
図3 近接地上写真

表1 解析結果（従来の写真測量）

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.66	1.55232	-0.10768	-6.48684
点2-点3間	9.15	2.57675	-6.57325	-71.83879
点3-点4間	1.63	0.77108	-0.85892	-52.69463
点1-点4間	9.12	2.35296	-6.76704	-74.19999

4. 2 全解探索を用いた解析

4. 2. 1 全解探索の概要

多くのパスポイントから最適なパスポイントを決定することは、専門家でも困難な作業である。そこで、任意パスポイントを10点前後取り、自動的に最適な任意パスポイントの組み合わせを決定する手法（図4）を考案する。

まず、焦点距離やピクセル数といったカメラ情報を入力し、写真の4隅（指標）の座標を算出する。次に、基準点やパスポイントの座標を画像編集ソフトなどにより測定し、算出された指標の座標を用いてアフィン変換を行う。そして、相互標定と絶対標定を行い3次元座標データを算出する。最終的に、取得された3次元座標データの基準点残差を用いて、最適な任意パスポイントの組み合わせを決定する。

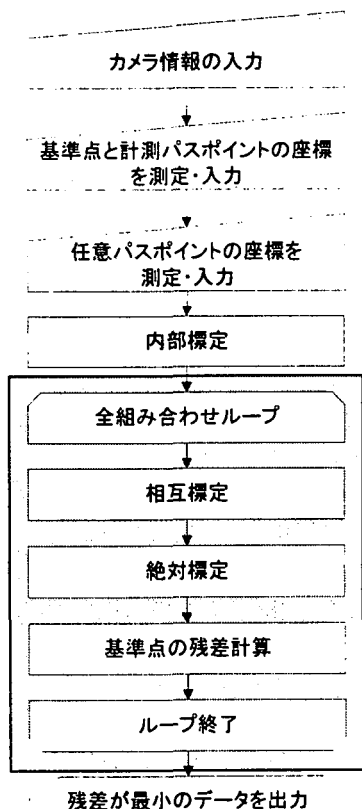


図4 全解探索の流れ

4. 2. 2 任意パスポイントの取り方

本システムでは、任意パスポイントを10点前後取ることによって、自動的に最適な任意パスポイントの組み合わせを決定する。まず、1) それぞれの写真の4隅を取る。ただし、基準点や計測パスポイントが4隅にある時は採用しない。次に、2) 写真の4隅の midpoint を取る。ただし、基準点や計測パスポイントが4隅の midpoint にある時は採用しない。最後に、3) 前述の1)と2)で採用した点に加えて、基準点や計測パスポイント以外に合計10点前後の任意パスポイントを取る。以上の3つの手順に従って、任意パスポイントを決定する。

4. 2. 3 解析結果

図3の写真を用いて任意パスポイントを9点取り、システムが自動的に最適なパスポイントを決定した。そのパスポイントを用いた計測結果を表2に示す。平均誤差が数パーセントに収まり、高精度の3次元座標データを取得することができた。

しかし、本システムでは、 n 点のパスポイントを用いた場合、 $2^n - 1$ 通りの組み合わせから

最適解を求めている。そのため、球や曲面などの計測パスポイントを多く取る必要がある場合などでは、膨大な計算時間が必要となる。そこで、最適解探索を高速化する方法を考案する必要が生じた。

表2 解析結果 (全解探索を用いた写真測量)

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
1-2点間	1.66	1.74311	0.08311	5.00639
2-3点間	9.15	9.19218	0.04218	0.46101
3-4点間	1.63	1.72057	0.09057	5.55665
4-1点間	9.12	8.90323	0.21677	2.37690

4. 3 GAを用いたパスポイント決定方法

最適なパスポイントの決定のために、非線形な組み合わせ問題に適した遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm) の手法[7]を用いる。この方法を用いると、最適ではないが、準最適解を高速に算出することができる。任意パスポイントは、全解探索を用いた場合と同様の方法で10点前後取る。計測パスポイントと任意パスポイントを併用し、1個体とする。そして、選択、交叉、突然変異の手順を繰り返し、準最適解を求める。評価となる目的関数としては、相互標定により算出された縦視差と、絶対標定により算出された基準点の残差を用いる。そして、準最適なパスポイントによって算出されるレンズ中心座標とカメラの傾きを用いて、計測パスポイントの3次元座標データを算出する。システムの流れとしては、図4の全解探索の箇所(網掛け)を図5に変更する。

本研究では、パスポイントの決定方法にGAを用いることにより、全解探索と同じぐらい高精度の3次元座標データを高速に得ることが可能となった。

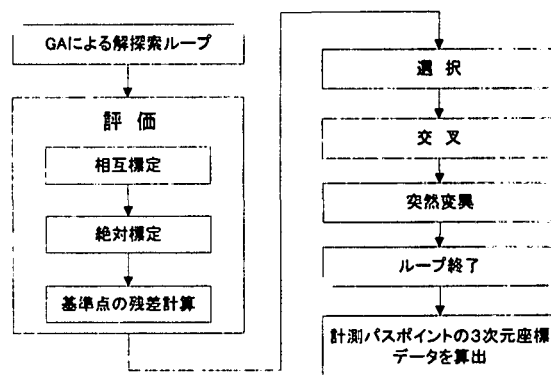


図5 GAによるパスポイントの決定

5. 3Dモデルのトランスレータ機能

本研究では、3次元座標データを用いて可視化する手段にVRMLを利用する。VRMLは、ISO規格であり、インターネット上で情報共有が可能な言語である。本機能では、写真測量技術で算出された3次元座標データを用いて、被写体のCGモデリングを行う。3次元座標データは、点データの集まりである。そのため、VRMLが実行可能なファイル形式に変換するためのトランスレータ機能を有するインターフェイスの開発を目指す。具体的には、将来、CADへの活用も考慮して、3次元座標データ群を面モデル(サーフェイスモデル)の構成要素に分類する。

6. 実証実験

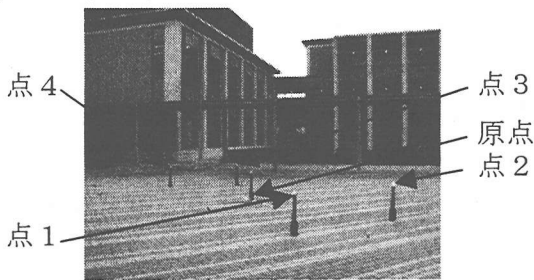
実証実験では、様々な撮影方法による精度の検証、被写体形状の取得、そして、CGモデリングへの応用について検証する。

6.1 撮影方法と精度

本実験では、被写体に対して収斂撮影と平行撮影の方法を議論すると共に、三脚を用いてカメラの高さと傾きを固定し、撮影距離を変えながら絶対精度の検証を行う。

6.1.1 収斂撮影

原点から7.5m, 12.5m, 17.5m 離れ、図6(7.5m)に示すように約55°の収斂撮影を行った。



左から撮影した写真



右から撮影した写真

図6 収斂撮影

(1) 原点から7.5m

原点から7.5m離れた2枚の写真(図6)を用いて、計測パスポイントを8点、任意パスポイントを9点取り、全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは5点選出された。その結果、表3に示すように、計測パスポイント間は、あまり精度が良くなかった。

表3 7.5mの解析結果

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	1.31478	-0.48522	-26.95650
点2-点3間	5.97	5.15146	-0.81854	-13.71081
点3-点4間	1.89	2.16945	0.27945	14.78590
点1-点4間	6.55	6.08174	0.46826	7.14907

(2) 原点から12.5m

原点から12.5m離れた時、計測パスポイントを8点、任意パスポイントを9点取り、全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは4点選出された。その結果、表4に示すように、計測パスポイント間の精度は、7.5m離れた時と変わらず、向上しなかった。

表4 12.5mの解析結果

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	1.56164	-0.23836	-13.24224
点2-点3間	5.97	7.01490	1.04490	17.50250
点3-点4間	1.89	2.57623	0.68623	36.30864
点1-点4間	6.55	8.13889	1.58889	24.25794

(3) 原点から17.5m

原点から17.5m離れた時、計測パスポイントを8点、任意パスポイントを9点取り、全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは3点選出された。その結果、表5に示すように、7.5m, 12.5mに比べ、精度が悪くなった。

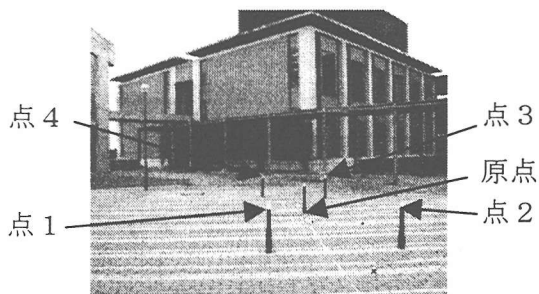
解析結果が悪くなった理由としては、撮影距離が離れたため、1ピクセルに写る画像が広範囲になり、座標を正確に取得できなかったためであると考えられる。

表5 17.5mの解析結果

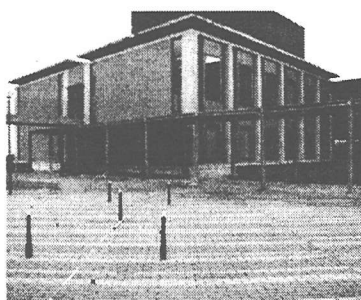
計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	2.54167	0.74167	41.20408
点2-点3間	5.97	4.10853	-1.86147	-31.18035
点3-点4間	1.89	1.93745	0.04745	2.51059
点1-点4間	6.55	4.22325	-2.32675	-35.52292

6. 1. 2 平行撮影

原点から 7.5m, 12.5m, 17.5m 離れて, 図 7 (7.5m) のように平行撮影を行った。



左から撮影した写真



右から撮影した写真

図 7 平行撮影

(1) 原点から 7.5m

原点から 7.5m 離れた 2 枚の写真 (図 7) を用いて, 計測パスポイントを 8 点, 任意パスポイントを 9 点取り, 全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは 3 点選出された。その結果, 表 6 に示すように, 計測パスポイント間の精度は, 非常に良好であった。したがって, 高精度の 3 次元座標データを取得することができた。

表 6 7.5m の解析結果

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	1.79569	-0.00431	-0.23955
点2-点3間	5.97	5.94482	-0.02518	-0.42183
点3-点4間	1.89	1.97264	0.08264	4.37244
点1-点4間	6.55	6.54680	0.00320	0.04882

(2) 原点から 12.5m

原点から 12.5m 離れた時, 計測パスポイントを 8 点, 任意パスポイントを 9 点取り, 全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは 5 点選出された。その結果, 表 7 に示すように計測パスポイント間の精度は高かった。

表 7 12.5m の解析結果

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	1.79778	-0.00222	-0.12332
点2-点3間	5.97	6.05982	0.08982	1.50451
点3-点4間	1.89	1.96973	0.07973	4.21860
点1-点4間	6.55	6.63595	0.08595	1.31218

(3) 原点から 17.5m

原点から 17.5m 離れた時, 計測パスポイントを 8 点, 任意パスポイントを 10 点取り, 全解探索のシステムを適用した。任意パスポイントは 4 点選出された。その結果, 表 8 に示すように 7.5m, 12.5m に比べ, 精度が悪くなった。

解析結果が悪くなった理由としては, 6. 1. 1 収斂撮影と同様, 撮影距離が離れたため 1 ピクセルに写る画像が広範囲になり, 座標を正確に取得できなかったためであると考えられる。

表 8 17.5m の解析結果

計測パスポイント間	実測値(m)	観測値(m)	誤差(m)	誤差率(%)
点1-点2間	1.80	1.78335	-0.01665	-0.92502
点2-点3間	5.97	6.55657	0.58657	9.82530
点3-点4間	1.89	2.01957	0.12957	6.85576
点1-点4間	6.55	7.07733	0.52733	8.05084

6. 1. 3 考察

収斂撮影では, 2 点間距離を約 1 m 以内の誤差で算出することができるが, 精度が要求される測量業務や 3D モデリングにはあまり利用できないことがわかった。しかし, これまで困難とされてきた地上写真測量の収斂撮影も, 全解探索のシステムを用いることにより, 従来の写真測量と比較して精度は向上した。

平行撮影では, これまで困難とされてきた地上写真測量でも, 2 点間距離を約 10cm 以内の誤差で算出することができ, 精度が要求される測量業務や 3D モデリングなどの情報処理業務に利用可能であることがわかった。

撮影距離に関しては, 本実験で用いたデジタルカメラ (211 万画素) の場合, 撮影距離 15m 以内が望ましいことがわかった。ただし, このことは, カメラの画素数やレンズの種類に依存する事項である。したがって, 距離と精度の関係は, デジタルカメラの性能に依存する。

6. 2 被写体形状の取得

本実験では, 身近に存在するボトルの大まかな形状を測定する手法を考案する。

6. 2. 1 撮影方法

図8のように被写体を周回し、4面から撮影した写真を用いる。各面の撮影方法には、平行撮影を用いる。また、各面の撮影では、隣接面上の計測パスポイントが重複するように撮影する。

6. 2. 2 基準点配置

基準点配置は、図8に示すように、被写体周囲に4本のワイヤーを垂直に垂らし、各ワイヤーに異なる色(赤:R, 緑:G, 黄:Y, 黒:B)の目印を4点付けた。座標系の定義は、赤色基準点の最下位(R1)を(0, 0, 0)とし、表9に示す通り実測値により定義した。また、被写体面には直径5mmの円形シールを220点貼付することで計測パスポイントを構成した。

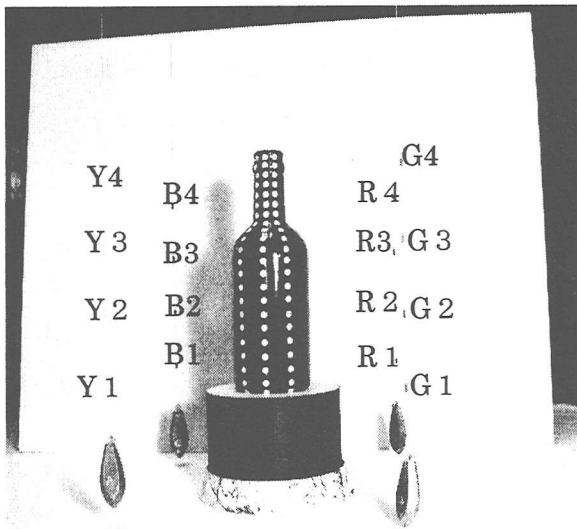


図8 被写体のボトルと基準点配置

表9 基準点座標

基準点番号	3次元座標(cm)		
	X	Y	Z
R1(赤最下位)	0.0	0.0	0.0
R2(赤2段目)	0.0	5.0	0.0
R3(赤3段目)	0.0	10.0	0.0
R4(赤4段目)	0.0	15.0	0.0
G1(緑最下位)	22.8	0.2	0.0
G2(緑2段目)	22.8	5.2	0.0
G3(緑3段目)	22.8	10.1	0.0
G4(緑4段目)	22.8	15.1	0.0
W1(白最下位)	11.6	-2.1	-10.6
W2(白2段目)	11.6	2.9	-10.6
W3(白3段目)	11.6	7.9	-10.6
W4(白4段目)	11.6	12.9	-10.6
Y1(黄最下位)	11.6	-2.0	12.3

6. 2. 3 標定作業

標定作業は、次の手順により行う。

- ① 任意面上の計測パスポイントに対し、GAを用いた探索による写真測量システムを適用し、3次元座標データを取得する。
- ② 算出された3次元座標データの内、重複して撮影されている隣接面上の計測パスポイントを用いて補正する。
- ③ 全4面において、①と②の手順を繰り返し、物体の形状を取得する。

6. 2. 4 考察

本実験では、算出された計測パスポイントの座標を可視化することにより、図9に示すような形状を得ることができた。大まかではあるが、形状を読み取ることができた。

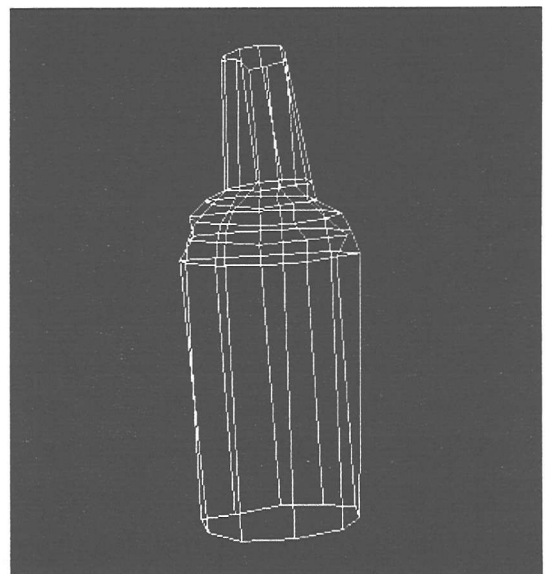


図9 ワイヤーフレームによる可視化

6. 3 CGモデリングへの応用

本実験では、撮影した写真から被写体の3次元形状を算出し、それを基に、CGのモデリングデータを作成する。なお、被写体には、関西大学高槻キャンパス大学院棟を用いた。

6. 3. 1 撮影方法

本実験では、被写体となる建築物が大きく、入り組んだ構造になっているため、地上からの撮影では階段踊り場部分を可視できなかった。このため、被写体前方32mの地点に足場を組み、

地上約 4 m の地点から撮影を行うことで被写体全体が撮影されるように配慮した。撮影した写真を図 10 に、基準点座標を表 10 に示す。

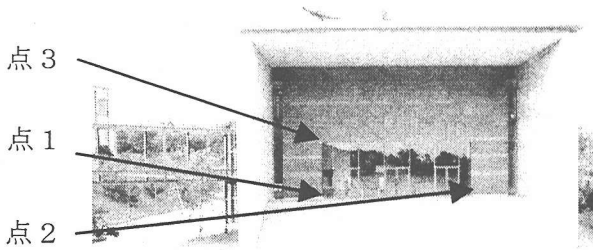


図 10 被写体

表 10 基準点座標

基準点番号	3次元座標(m)		
	X	Y	Z
点1	0.00	0.00	0.00
点2	10.67	0.00	0.00
点3	0.00	0.00	4.34

6. 3. 2 CGモデル化

実験では、全解探索システムによって算出された3次元座標データを用いて、図 11 に示すように VRML によるモデリングを行った。

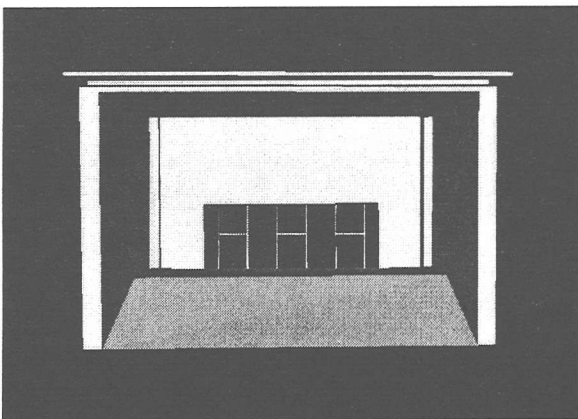


図 11 VRML によるモデリング

図 11 に示す実行例では、3次元座標データをそのまま使用しているため、本来直線的であるべき柱や屋根の部分に歪みが生じている。そこで、座標の平均化を行い修正を施した。さらに、各面に簡単なながらもテクスチャーを貼り付けると、図 12 のように実利用可能な CG モデルが作成できた。

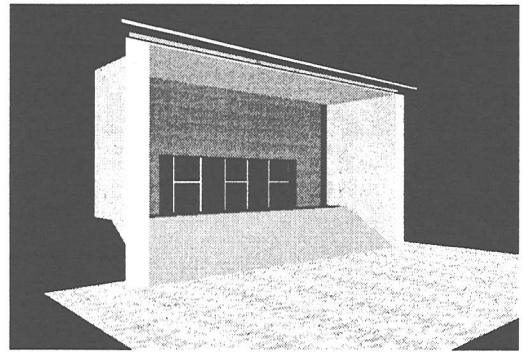


図 12 修正後の CG モデル

7. あとがき

本研究では、自動的に最適なパスポイントを決定することによって、デジタルカメラの種類や撮影方法に関係なく、誰もが容易に3次元座標データを取得できることを実証した。そして、球や曲面など多くの計算時間が必要となる場合は、最適解探索に遺伝的アルゴリズムを用いることにより高速に準最適解を算出する手法を確立した。ただし、画像の対応点取得処理を手動で行っているため、対応点の抽出に時間がかかり、高速に3Dモデルを作成できない問題点がある。今後、対応点取得処理を自動化し、簡単に、素早く、高精度に、実利用可能な3Dモデルを作成する手法について研究を行う必要がある。

参考文献

- [1] 解析写真測量委員会編：解析写真測量（改訂版），日本写真測量学会，1997.4.
- [2] カール・クラウス：写真測量，技術書院，1993.7.
- [3] Panton, D. J. : "A Flexible Approach to Digital Stereo Mapping", Photogrammetric Engineering and Remoto Sensing, vol.44, No.12,pp.1499-1512,1975.
- [4] Richards, J. A. : Remote Sensing Digital Image analysis, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.43-44,1986.
- [5] 日本リモートセンシング研究会：画像の処理と解析，共立出版，1986.
- [6] 高木幹雄，下田陽久：画像解析ハンドブック，東京大学出版会，1998.
- [7] 古田均：遺伝的アルゴリズムを用いた構造工学への応用，森北出版，1997.9.