

可搬性の高い小型計測装置の研究

長谷川 辰雄*、田中 慎造**

岩手県と青森県にまたがる国内最大級の不法投棄の全量撤去には、575億円の膨大な費用が推定され、環境面と経済面の両方で国民への負担が大きくなっている。この原因について、行政の管理責任が問われる中、他の都道府県において、廃棄物監視予算が膨らんでいる現状にある（数千万円～1億円）。不法投棄の未然防止は、発見後に対処するよりも、環境面・経済面の両方に効果的がある。このことから、環境監視用の空撮に搭載可能な小型画像計測装置を開発した。本装置は、空撮対象物の3次元計測を実現する基盤技術を確認するための試作装置として開発した。この基盤技術には2台の画像センサによるステレオビジョン法を用いたソフトウェアとして実現した。

キーワード：環境監視、3次元計測、空撮

The Development of Portable 3D Measurement Device

HASEGAWA Tatsuo and TANAKA Shinzo

Unauthorized dumping of domestic maximum in Iwate and Aomori is very huge and the removal cost is estimated at 57.5 billion yen. The national burden becomes large in the natural environment and the economy. The budget of the unauthorized dumping watch in each all prefectures is very large. The prevention of illegal throwing away is more effective than to deal with it after the occurrence in the natural environment and the economy. We developed the miniature measurement device which could take pictures of aerial photograph for the natural environment watch. This device was developed as a trial device to establish the base technology for which to realize the three-dimensional measurement of the aerial photograph. This technology was realized as software, which used stereophonic vision.

key words: environment monitoring, 3-D measurement, aerial photograph

1 緒 言

廃棄物の不法投棄による環境への悪影響を未然に防ぐために、不法投棄の監視パトロールが急務となっている。現状では、自治体が主体となった人海戦術による監視が多く、監視カメラによる自動化など、作業の効率化が求められている。

本研究は、上空からの広域的な監視を目的に、低価格でメンテナンスが容易なラジコン飛行体(カイト型、飛行船型など)に搭載可能な画像センサ装置の開発が目的である。この画像センサは、ステレオ画像計測による不法投棄箇所の高さの計測や、広範囲な土木測量を可能とする。現状では実機飛行機の航空写真が主流であるが、コスト高や上空300m以下での撮影が困難という問題点がある。そこで、本研究では、土木建築用の3次元計測を目的に、上空150m程度の空撮を前提とした小型3次元計測装置の要素技術を開発した。空撮の画像計測の問題は、自然光による画像ノイズの影響にある。太陽光の直射や反射によって画像の品質が安定せず、計測精度を不安定にさせている。3次元計測で一般的なレーザ光線を用いたスリット光投影法においても、太陽光の外乱によって、レーザ光を捉えにくい箇所があり、安定した計測ができない。これに対して、ステレオ画像計測では、画像のみで計測するため、画像自体の品質を向上させる必要がある。ここで定義する画像品質とは、ステレオ画像計測に必要な左

右画像の対応点の正確さであり、これをいかに自動的に特定するかが本研究のテーマである。

2 実験方法

対象物が建物、自動車などの明瞭な特徴を持つ人工物は、ステレオの対応点を特定しやすいが、廃棄物監視のように自然界にある山林・野原などの非人工物の特徴は捉えにくい。特に屋外の画像は天候(太陽光)の影響に左右されやすい。そこで、自動化が難しい左右対応点の決定を、手作業で行っている現状がある。これには、対象物の種類によって明確に判断がつかなく、作業時間を要している。そこで、本研究ではこの作業を容易化するために図1に示す手順によって対応点決定の特徴づけを行った。

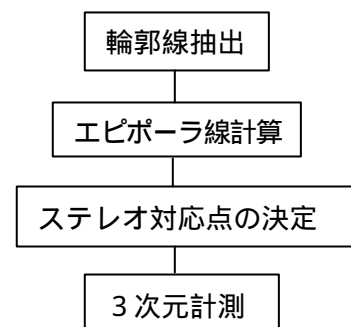


図1 全体処理手順

* 電子機械技術部

** 電子機械技術部(現 岩手県立産業技術短大学校水沢校)

2-1 輪郭線の抽出

物体の特徴を捉える手法として、対象物の輪郭線を使用する
場合が多い。これは背景と対象物との境界が、比較的明確
であり画像処理しやすいという理由からである。輪郭線の抽
出アルゴリズムに、代表的なソーベル空間フィルタ¹⁾を用い
た。この特徴は画像の縦・横方向の画素勾配を強調するた
めに、建物などの人工物の輪郭線を捉えやすい特徴がある。ソ
ーベル空間フィルタを図2に示す。

-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

(a) 横方向

(b) 縦方向

図2 ソーベル・空間フィルタ

ソーベルフィルタによる微分の大きさを示すフィルタを式
(1)に示す

$$g(i, j) = \sqrt{(g_H(i, j))^2 + (g_V(i, j))^2} \quad \dots (1)$$

ただし、

$g_H(i, j)$ は i 方向のソーベルフィルタ

$g_V(i, j)$ は j 方向のソーベルフィルタ

2-2 エピポーラ線の計算

物体の輪郭線が得られると、その輪郭線を元に左右画像の
対応点を決定できる。しかし、特徴が明確な箇所を多く含む
建物や自動車などの人工物に対して、山林・野原などは、輪
郭線が得られても明確に対応点となる特徴が少ない。そこで、
この不明瞭な対応点を決定するためにエピポーラ線²⁾の計算
を行った。エピポーラ線とは、図3に示すように、3次元空
間点 x_1 と2台のカメラの焦点 C, C' を結ぶ三角形によって得
られる画像上の線分 L, L' である。

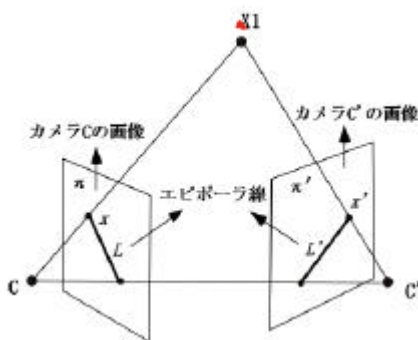


図3 エピポーラ線

カメラ C の画像点 x が観測されたとき、 x は直線 L 上に存
在し、同様に x' は直線 L' 上に存在する。このように、エ
ピポーラ線は点同士の対応関係を表している。つまり、画像平
面 π 上の点を決定すると、画像平面 π' 上のエピポーラ線上

に、その対応する点が存在する。エピポーラ線を求めるには、
図3に示すエピポーラ幾何を図4に示すベクトル図へ展開して
考えると、式(2)で表すことができる。

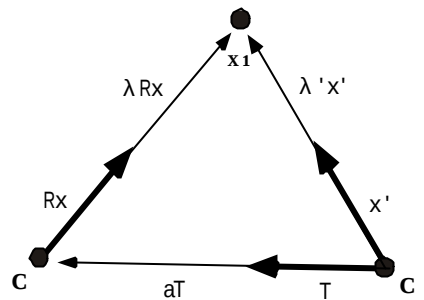


図4 エピポーラ幾何のベクトル図

$$x' = Rx + aT \quad \dots (2)$$

これは、3つのベクトル x' 、 Rx 、 T が同一平面上にあること
を示している。したがって式(3)が成り立つ。

$$x'^T (T \times Rx) = 0 \quad \dots (3)$$

2つのカメラの画像座標をそれぞれ m, m' とし、式(3)に代入
すると式(4)で表される。これがエピポーラ方程式であり、 F を
基礎行列(Fundamental Matrix)と呼ぶ。

$$\tilde{m}^T F \tilde{m} = 0 \quad \dots (4)$$

ただし、 $F = A'^T [T]_x A$

A, A' は2台のカメラパラメータである。

2つのカメラに撮影された同一点は、必ず式(4)のエピポーラ方
程式を満たすことになる。基礎行列 F の自由度は7であるので、
8点以上の対応点が得られれば線形解法によって F を求めるこ
とができる。この手法は8ポイントアルゴリズムと呼ばれ、基
礎行列を求める一般的な手法であり、本研究で実装を試みた。

2-3 小型計測装置

本研究は、低価格・メンテナンスが容易なラジコン飛行体(カ
イト型、飛行船型など)に搭載可能な画像センサ装置の開発が
目的である。ラジコン飛行体は小型であるため積載可能重量は
かなり制限されるが、必要最低限の空撮機材の重量を5kg以
内とした。これに伴って、開発装置は小型・軽量化を実現する
ために、個々の部品の小型化を工夫した。また、製造コストの
低価格化を目指し、構成部品はすべて汎用品を用いて製作した。

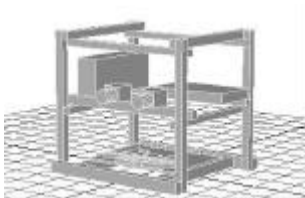
特に制御ボードに Micro-ATX 規格である 170x170mm の小型オ
ールインワンボードの採用と、15mm 角のユニバーサルアルミフ
レームを用いたことで小型化と、組み立ての柔軟性を図った。
また、IEEE1394 規格の小型 CCD(30x31x29mm、45g、60f/s)を採用
したことによって、軽量化と高速撮影を実現した。空撮時は、
風や飛行体姿勢制御の影響による振動が原因で画像がみだれる

場合が多い。この振動の影響をできるだけ少なくするため、60f/sのシャッタースピードの機種を選定した。表1に詳細な小型計測装置の仕様を示す。

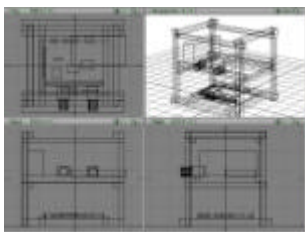
表1 小型計測装置仕様

項目	仕様
CPU	800MHz
メモリ	256MB
制御ボード	Micro-ATX VIA-EPIA-C800
HDD	3.5 型, 5400rpm
IEEE1394 ボード	2 ポート
IEEE1394 カメラ	PGR 社製 Flea 2 台, 640x480, 60f/s, 8bit-mono
電源	200W
重量	4Kg
サイズ	アルミフレーム 250 × 250 × 280mm
OS	Windows2000
開発言語	Microsoft Visual C++ V6.0

開発した小型計測装置の図面と実物写真を図5(a)、(b)、(c)に示す。強度を保つために立方体形状とし、軽量化のためにカバーは付けず、制御ボードやカメラなどの構成部品をフレームに直接取り付け付けた。また、重心バランスが装置中央となるような部品配置となっている。総重量が4kgとなり目標の5kg以下を達成した。



(a) CGモデル



(b) 設計図面



(b) 実物写真

図5 小型計測装置の設計図面と実物写真

3 実験結果

3-1 ソーベル空間フィルタ処理

開発した小型計測装置を用いて左右2つの画像を取得し、

輪郭線を抽出する実験を行った。空撮を想定し撮影は工技センターの東側3階から地表面に向かって行った。左右2つの画像の処理結果は同様なので、左画像の実験結果を図6(a)(b)(c)に示す。



(a) 入力画像 (左) 640x480 画像、8bit モノクロ



(b) ソーベル + 2 値化処理結果



(c) 入力画像 + 輪郭線

図6 ソーベル空間フィルタによる輪郭線強調

図6(b)はソーベルと2値化の2つの処理を行った結果であり、輪郭線が明確に得られていることが分かる。ソーベル処理だけでは見目で分かりにくいため、さらに閾値法による2値化³⁾を行った。図(c)は入力画像と輪郭線を重ね合わせることによって、目視で対象物の特徴を捉えやすくした結果である。

3-2 基礎行列 F の計算結果

輪郭線が得られると画像の特徴が明確となるため、左右画像の対応点を目視によって特定しやすくなる。そこで、基礎行列を得るために輪郭線画像を元に、マウス入力で対応点を決定するソフトウェア・プログラムを作成し実験を行った。図7はそのプログラムによって、8つの対応点を決定した実行結果である。画面上に輪郭線処理された左右画像が上下に表示され、マウスで選択した時点で、ダイアログボックスに対応点座標が自動的に入力される。マウス選択した座標は丸い印が表示され、操作者が既に対応点として入力されていることが分かるように工夫した。エピポーラ線を得るための基礎行列 F を求めるためには最低8つの対応点を決める必要がある⁴⁾が、本プログラムは8つ以上の入力点に対応している。この理由は、基礎行列 F は最小二乗解を用いて計算しているため、精度の良い対応点を多数入力するほど、エピポーラ線の精度が良くなるためである。

今回の実験では、必要最小限の8箇所の入力で基礎行列を求めた。表2はマウス選択した対応点座標値であり、それを元に基礎行列を計算した結果が表3である



図7 左右画像の対応点入力プログラム

表2 対応点座標値

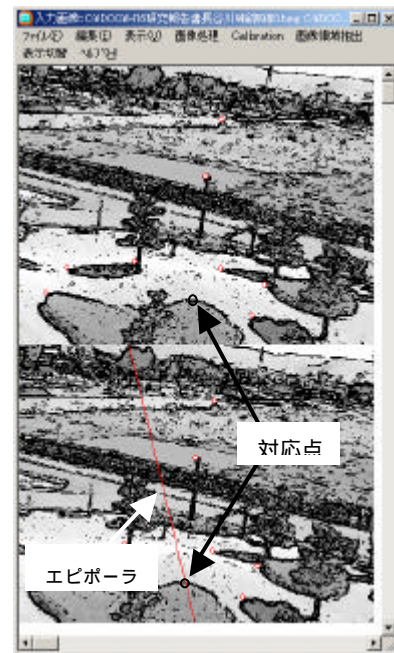
対応点番号	左画像座標値 (x, y)	右画像座標値 (x, y)
1	88, 384	71, 358
2	49, 391	33, 401
3	209, 338	191, 344
4	338, 191	319, 196
5	366, 93	353, 98
6	364, 349	349, 356
7	444, 378	431, 383
8	421, 431	404, 436

表3 基礎行列 F (3×3)

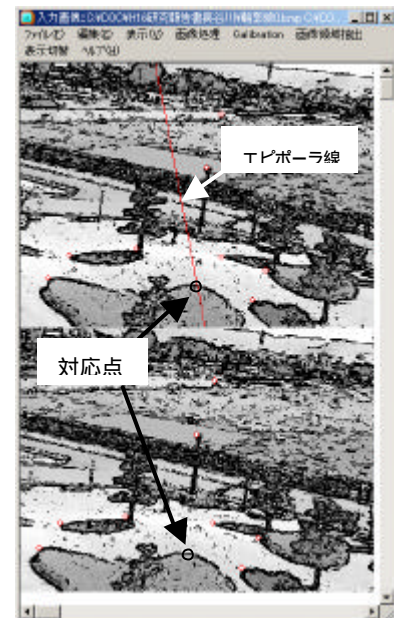
-0.000001	0.000035	-0.000035
-0.000035	0.000001	0.008880
0.007060	-0.008815	-0.155435

3-2 エピポーラ線による対応点の決定

対応点入力プログラムによって基礎行列 F を得ることができたので、左右どちらか一点が決まると、相対する画像のエピポーラ線を求めることが可能となる。図8に左右画像を上下に表示し、エピポーラ線を求めた結果を示す。図8(a)は上の画像の丸印で示した点をマウス選択し、下の画像にその対応するエピポーラ線が表示された結果を示している。図8(b)は逆に下の画像の丸印に対応したエピポーラ線を表示した結果である。



(a) 上画像の点に対応したエピポーラ線



(b) 下画像の点に対応したエピポーラ線

図8 エピポーラ線の表示

このようにエピポーラ線表示結果から、両画像の対応点がエピポーラ線上にあることが確認できた。操作者が左右の対応点を

決めるとき、一方の点が、他方のどの点に対応するかという問題は、エピポーラ線上を追跡することで対応可能となる。ただし、エピポーラ線と輪郭線との交点は多数求まる場合が多く、自動的に交点を検出することは難しい⁵⁾。特に山林・野原などの自然画像の場合、輪郭線抽出を行っても特徴を捉えにくいケースがある。今回の実験では2台のカメラ間隔が7.5cmと狭かったため視差による影響が少なく、エピポーラ線が精度良く求めることができた。視差とは、ある計測対象となる基準点において、2台のカメラの視線がなす角度(輻輳角)の変化量として定義される。しかし、対象物とカメラの距離に比べ、カメラの間隔が狭いと、左右画像のピクセルのずれ幅が小さくなり、計測誤差が大きくなる。つまり、ある程度の視差がないと計測誤差が大きくなる。視差を大きくするためには、1台のカメラで場所を移動しながら撮影する方が現実的である。

4 結 言

今回の実験では、小型計測装置のハードウェアの試作及びその動作確認と、ステレオ画像計測の対応点入力ソフトウェアの試作及び評価を行った。ハードウェアの試作では、アルミフレーム材の軽量化、ハードディスクをシリコンディスク化、電源を小型リチウム電池にするなど、更に小型・軽量化するための改良点が明確になった。ラジコン飛行体に搭載される小型計測装置は、揺れや振動する状態にさらされることが容易に予想できるため、単純に小型・軽量化を進めることは難しく、耐久性を考慮した装置設計が必要と考える。同様に画像センサについても、撮影時に姿勢が安定しなければ画像がブレてしまうため、今後、安定化の工夫が必要である。

ソフトウェアの試作では、山林や野原など、屋外撮影の困難さが分かった。特に日陰となる部分は実際の対象物の輪郭に添うようにできるため、輪郭線の抽出は、日陰の大きさに影響を受けてしまう。太陽の角度、撮影の角度によって入力画像が異なるという問題は、ステレオ画像計測の誤差に影響を及ぼすため、計測の誤差をどのように解消するかが問題となる。単なる航空写真だけでなく、計測を行うには高品質な画像が必要となる。実験のカメラは小型化を重視して640×480画素であるが、計測の精度を向上させるには最低でも1024×768画素は必要と思われる。今後は振動対策など、具体的な飛行体への搭載を検討し、実用化を目指す予定である。

文 献

- 1) 安居院 猛、長尾 智晴：画像の処理と認識、pp.35-37、昭晃堂(2000)
- 2) 佐藤 淳：コンピュータビジョン、pp.81-96、コロナ社(1999)
- 3) 田村 秀行：コンピュータ画像処理、pp.138-140、オーム社(2002)
- 4) R. Hartley: In defense of the eight-point algorithm, IEEE Trans. PAMI, 19(6), pp.580-593, 1997.
- 5) 佐藤 淳、木下 敬介、ロベルト チボラ：曲面上のエピポーラ幾何と未校正カメラによる視覚誘導、電子情報通信学会、Vol. J82-D- 、 No.9, pp.1401-1410(1999)
- 6) 津邑 公暁、清水 雄歩、中島 康彦、五島 正裕、森真一郎、北村 俊明、富田 眞治：ステレオ画像処理を用いた曖昧再利用の評価、情報処理学会、トランザクション、コンピューティングシステム、Vol. 44, No. SIG11-024, pp.1-8(2003)