

2002 年度修士論文

高分解能衛星画像における地上基準点の取得方法

ACQUISITION METHOD OF GROUND CONTROL POINTS
FOR HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

2003 年 1 月

指導教員 高木 方隆

高知工科大学大学院工学研究科
基盤工学専攻社会システム工学コース
門田 貴江

論文要旨

近年、空間分解能 1m 未満という高分解能衛星画像は色々な分野で活発に利用され、また研究されている。その中でも特に既存地図の更新や GIS データの重ね合わせに高分解能衛星画像の利用が期待されている。高分解能衛星画像を幾何補正する場合は地上基準点の取得が必要である。しかしながら高分解能衛星画像の幾何補正には、基準点の取得に問題が残されている。例えば、縮尺 1:2500 の地図を用いて地上基準点を取得しようとしても、高分解能衛星画像と対応する地図上の道路の境界（歩道、小さな橋等）が明確に表されていない場合が多い。また、衛星画像はカメラの幾何学と同様、中心投影されている。そのため高さのある建物の地上の四隅の角を地上基準点として取得しようとしても、建物の角の位置が特定出来ないことがある。以上のことから、地図から地上基準点を容易に取得することは困難な場合が多く、GPS などを用いて衛星画像に対応する地上基準点を取得することが重要となってくる。しかしながら GPS を用いて地上基準点を取得するには、多くの時間と労力が必要となる。地図、GPS から地上基準点を取得する方法以外に、航空写真を用いたイメージマッチング方法もある。これは航空写真をテンプレート画像として IKONOS 衛星画像と重ねることにより地上基準点を取得するものである。この方法は C. Fraser(2002)¹⁵⁾らによって研究されており、オルソ航空写真と IKONOS 衛星画像を用いてイメージマッチングを行い幾何補正している。しかしながら、どのような地物を含むテンプレート画像が利用可能かについては検討されていない。そのため、イメージマッチングで利用可能なテンプレート画像の選定が重要となってくる。現在、国土交通省など各省庁はデジタルオルソ航空写真の作成・公開・提供を目指している。もしデジタルオルソ画像が容易に利用可能になれば、より効率良く地上基準点を取得出来、幾何補正が行えるはずである。

本論文の目的は、高分解能衛星画像の幾何補正において、地上基準点の取得方法の評価を行うことである。地上基準点の取得方法と評価は以下のように設定した。

- 縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点を用いて高分解能衛星画像を幾何補正する。平均二乗誤差で補正誤差を表し、地上基準点の精度を評価する。
- GPS を用いて取得した地上基準点を使用して高分解能衛星画像の幾何補正を行う。平均二乗誤差で補正誤差を表し、地上基準点の精度を評価する。
- IKONOS 衛星画像と航空写真を用いたイメージマッチングを行う。そしてイメージマッチングで利用できるテンプレート画像を選定する。

今回使用した高分解能衛星画像は IKONOS 衛星画像である。縮尺 1:2500 の地図と GPS から取得した地上基準点の幾何補正方法は、三次元アフィン変換を選定した。この方法は門田(2002)¹¹⁾、山川(2002)^{12),13),14)}らの研究により、高分解能衛星画像の幾何補正で十

分に適応可能であることが判明している。

結果は 縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点は十分な精度が無いことが判明した。一方 GPS から取得した地上基準点は平均二乗誤差が 1m 以内であり、高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能であることが確認出来た。航空写真を用いたイメージマッチングのマッチング方法は、相関法を用いた。その結果小さな橋、T 字・Y 字・S カーブの道路、屋根の文字を含むテンプレート画像がイメージマッチングに適応可能であると判断出来た。

したがって、今後デジタルオルソ航空写真が容易に利用可能になれば、今回選定した地物を含むテンプレート画像を用いてイメージマッチングを行うことが出来る。そしてより効率良く基準点が取得出来、幾何補正が行えるようになるだろう。

ABSTRACT

ACQUISITION METHOD OF GROUND CONTROL POINTS FOR HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

Takae KADOTA

High resolution satellite imageries, whose resolution is less than 1m, have been used in many fields. They are needed for overlay other GIS data, or updating existing map. In order to carry out geometric correction of high resolution satellite imageries, ground control points (GCPs) are required. However in the acquisition of GCPs, some problems for high resolution satellite imagery were encountered. When GCPs were acquired from map of scale 1:2500, position of the road had fuzzy boundary which include is sidewalk etc. Moreover, since satellite imageries were generated by central projection, it was difficult to interpret the corners of buildings on the ground. Therefore extraction of GCPs from the map may be difficult. So acquisition of GCPs using GPS is expected. Though accuracy of measurement has enough, GPS surveying needs much time and effort. Acquisition of ground coordinate by using image matching from aerial photography can save time and effort. If image matching between aerial images and high resolution satellite imageries is possible, GCPs can be acquired more easily compared with GPS surveying. Image matching has been studied by C.Fraser(2002)¹⁵⁾. However, the suitable template image which can be used for image matching is not discussed yet.

In this study, the acquisition methods of GCPs were evaluated as follows.

- Comparison the geometric correction results using GCPs that were acquired from 1:2500 map and GCPs that were acquired by field surveying using GPS.
- Image matching between IKONOS imageries and aerial images was carried out.

In this study, IKONOS imagery was used as high resolution satellite imagery. 3 dimensional affine transform was selected for the geometric correction of IKONOS imageries.

Result showed that GCPs acquired from the 1:2500 scale map did not have enough accuracy. On the other hand, GCPs acquired by GPS were able to be acquired less than 1m root mean square error (RMSE), and it turned out that GPS had enough accuracy. Next, image matching was carried out using aerial

photograph to acquire GCPs. Correlation coefficients were calculated for the image matching. Small bridge, road shape and painting character were efficient for image matching.

Therefore if orthogonal aerial photography is available, it may be possible to obtain GCPs on the imageries using the image matching.

KEY WORDS : Ground Control Points, Geometric Correction, Image Matching, High resolution

目次

1	序論	
1.1	背景	1
1.2	目的	3
1.3	本論文の構成	3
2	地上基準点を利用した幾何補正手法	
2.1	幾何補正とは	4
2.1	二次元射影変換	5
2.2	三次元射影変換	7
2.3	二次元アフィン変換	9
3.4	三次元アフィン変換	10
3.5	幾何補正手法の決定	12
3	今回使用した高分解能衛星画像	13
4	地図から取得した地上基準点の精度検証	
4.1	使用した地図データ	16
4.2	地物からの地上基準点の取得	16
4.3	結果	20
4.4	考察	24
5	GPS から取得した地上基準点の精度検証	
5.1	地物から地上基準点の選定	25
5.2	基準点観測	28
5.3	結果	29
5.4	考察	33
6	イメージマッチングによる利用可能なテンプレート画像の検討	
6.1	使用した航空写真	34
6.2	イメージマッチングの方法	35
6.3	使用したテンプレート画像	37
6.4	結果	39
6.5	考察	41

7 結論.....	42
謝辞.....	44
参考文献.....	45
付録	
A 現地観測	
A.1 縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点データベース.....	49
A.2 GPS を用いて取得した地上基準点データベース.....	50
B 学会発表論文.....	51
B.1 日本測量学会 (2002).....	52
B.2 ACRS2002 (2002).....	56

図表目次

図 2.1	二次の射影変換	5
図 2.2	アフィン歪み	22
図 4.1	河川に架かる大きな橋	17
図 4.2	小川に架かる小さな橋	18
図 4.3	T 字路道路	18
図 4.4	Y 字路道路	18
図 4.5	縮尺 1:2500 の地図を用いて取得した基準点と検証点の配置	19
図 4.6	地図による幾何補正の誤差ベクトル	22
図 4.7	幾何補正された IKONOS 衛星画像に重ねられた縮尺 1:2500 の地図	23
図 5.1	駐車場	26
図 5.2	水路の橋	26
図 5.3	田畑のあぜ道	26
図 5.4	GPS を用いて取得した基準点と検証点の配置	27
図 5.5	GPS を用いた幾何補正の誤差ベクトル	31
図 5.6	幾何補正された IKONOS 衛星画像に重ねられた縮尺 1:2500 の地図	32
図 6.1	幾何補正前	34
図 6.2	幾何補正後	34
図 6.3	イメージマッチングに用いる入力画像とテンプレート画像	36
図 6.4	IKONOS 衛星画像 (分解能 1m)	36
図 6.5	航空写真 (分解能 0.5m)	36
図 6.6	イメージマッチング画像 (大きな橋)	37
図 6.7	イメージマッチング画像 (小さな橋)	37
図 6.8	イメージマッチング画像 (T 字路道路)	38
図 6.9	イメージマッチング画像 (Y 字路道路)	38
図 6.10	イメージマッチング画像 (S カーブ道路)	38
図 6.11	イメージマッチング画像 (プール)	38
図 6.12	イメージマッチング画像 (道路の停止線)	39
図 6.13	イメージマッチング画像 (屋根の文字)	39
表 3.1	IKONOS 衛星の仕様	14
表 3.2	IKONOS 衛星画像の仕様	15
表 4.1	縮尺 1:2500 の地図の詳細	16
表 4.2	縮尺 1:2500 の地図を用いた場合の基準点候補	17

表 4.3	基準点の補正誤差.....	20
表 4.4	検証点の補正誤差.....	20
表 4.5	三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差.....	21
表 4.6	基準点 2 点を外して三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差.....	24
表 5.1	GPS を用いた場合の基準点候補.....	25
表 5.2	GPS 受信機の仕様.....	28
表 5.3	基準点の補正誤差.....	29
表 5.4	検証点の補正誤差.....	29
表 5.5	三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差.....	30
表 6.1	イメージマッチングに用いた画像サイズ.....	37
表 6.2	イメージマッチングに使用するテンプレート画像の有効性結果.....	40
表 A.1	縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点.....	49
表 A.2	GPS を用いて取得した地上基準点.....	50

1. 序論

1.1 背景

近年，空間分解能 1m 未満という高分解能衛星画像は，既存地図の更新，土地利用の把握や国土・都市開発計画への適応，山地災害などの被害状況の把握や監視等活発に利用されている．また高分解能衛星画像研究のプロジェクトも発足しており，色々とところで研究が行われている．例えば基礎研究の分野においては，衛星画像位置精度検証^{1),2),3)}，分類及び変化抽出^{4),5),6)}，などが研究されている．応用研究では，生態系調査⁷⁾，災害調査⁸⁾，不浸透域の抽出に関する研究⁹⁾，ゴミ不法投棄問題¹⁰⁾，などを取り扱っている．現在，国土地理院が地図作成の規定を行い，市町村が発行している縮尺 1:5000 や縮尺 1:2500 の地図は，一般的に普及しており盛んに利用されている．しかし作成された時期が古いため，地図に描かれていない地物が存在する．そのため高分解能衛星画像は，特に既存地図の更新についての利用に期待されている．

高分解能衛星画像を用いて既存地図の更新を行う場合は，衛星画像の位置を補正することが重要となる．現在，高分解能衛星画像の基礎研究として研究されている衛星画像位置精度検証には，高分解能衛星画像の幾何補正手法が研究されている．門田（2002）¹¹⁾，山川（2002）^{12),13),14)}らによると，三次元アフィン変換は高分解能衛星画像の幾何補正に適応可能であることが判明している．従来，直下視以外の衛星画像を幾何補正する場合は，中心投影の幾何学に従い，三次元射影変換などの式で補正されてきた．なお撮影された地域は少なからず高低差があるため三次元の変換式を用いて補正できる．しかし約 11km × 11km の比較的狭い範囲で，高度 680km 上空から撮影された高分解能衛星画像 IKONOS 衛星画像は，線形変換である三次元アフィン変換でも幾何補正が可能である．三次元アフィン変換が適応出来れば，三次元射影変換よりも少ない基準点で幾何補正が行え，基準点データの整備も容易となる．三次元アフィン変換・三次元射影変換を含め衛星画像を幾何補正する場合は，画像上で明瞭に識別できる画像基準点 (u,v) と，それに対応する地上基準点 (x,y,z) が必要である．衛星画像において，幾何補正の変換式の未知係数は地上基準点と画像基準点を用いて最小二乗法により決定されるため，地上基準点は幾何補正の精度に直接影響を及ぼすこととなる．そのため地上基準点の取得は非常に重要である．

しかしながら，高分解能衛星画像の幾何補正を行う場合，地上基準点の取得には問題がある．例えば，高分解能衛星画像において地上基準点を取得する際，縮尺 1:2500 の地図を使用することは可能である．しかし高分解能衛星画像と対応する地図上の道路の位置（歩道，小さな橋等）は，道路との境界が明確に表されていない場合が多い．そのため，地上基準点を取得しにくいことがある．また，衛星画像はカメラの幾何学と同様，中心投影されている．従って，高さのある建物の地上の四隅の角を地上基準点として取得しようとしても，建物の角の位置が特定出来ないことがある．以上のことから，地図から地上基準点を容易に取得することは困難な場合が多く，GPS などを用いて衛星画像に対応する地上基

準点を取得することが重要となってくる。しかしながら GPS を用いて地上基準点を取得するには、多くの時間と労力が必要となる。

地図や GPS から地上基準点を取得する以外に、航空写真を用いる方法もある。航空写真の一部の画像をテンプレートとして、衛星画像と対応させることにより、位置情報を取得するイメージマッチングという手法である。イメージマッチングを用いることで、GPS よりもより効率良く地上基準点を取得できると考えられる。この方法は既に Clive Fraser(2002)¹⁵⁾らが試みている。Paul Dare, Nicki Pendlebury, Clive Fraser らによる「DIGITAL ORTHOMOSAICS AS A SOURCE OF CONTROL FOR GEOMETRICALLY CORRECTING HIGHRESOLUTION SATELLITE IMAGERY」¹⁵⁾によると、IKONOS 衛星画像と航空写真から作成したグレイスケールのデジタルオルソモザイク画像を用いてイメージマッチングを行い、幾何補正を行っている。幾何補正の結果は平均二乗誤差で表すと、X が 0.64m、Y が 0.60m であり、高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能となっている。しかし幾何補正の対象範囲は、従来の IKONOS 衛星画像の撮影範囲である 11km × 11km を切り取って 7km 四方とし、特に標高差 100m 以下という比較的平坦で狭い範囲と設定している。前頁で述べた既存地図の更新を行う場合は、山間地域などを含む衛星画像全体を幾何補正しなければならない。そのため対象範囲を切り取って幾何補正を行うことは適切でない。またイメージマッチングを行う場合には、どのような地物を表したテンプレート画像がイメージマッチングに適しているのかまだ検討されていない。

現在、国土交通省では GIS 整備・普及実施計画を、通商産業省など各省庁は国土空間データ基盤整備等実施計画を進めている。これらは空間データ基盤及び基本空間データの整備・提供、メタデータ及びクリアリングハウス整備、その他 GIS に関連した取組みを定め、もって、国土空間データ基盤の着実な推進を図ることを目標としている。計画の中には、正射投影変換（オルソ化）されたデジタル画像を作成し、公開、提供に努めると述べられている。これらの計画から、オルソ画像の作成、普及は国の方針に裏づけされており、今後オルソ画像は全国的に展開していくと考えられる。そのため、オルソ画像を用いてイメージマッチングを行い、地上基準点を取得し、効率良く幾何補正していくことは、可能であり、また重要となって来るだろう。

1.2 目的

本論文の目的は、高分解能衛星画像の幾何補正において、地上基準点の取得方法の評価を行うことである。地上基準点の取得方法と評価は以下のように設定した。

- 縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点を用いて高分解能衛星画像を幾何補正する。平均二乗誤差で補正誤差を表し、地上基準点の精度を評価する。
- GPS を用いて取得した地上基準点を使用して高分解能衛星画像の幾何補正を行う。平均二乗誤差で補正誤差を表し、地上基準点の精度を評価する。
- IKONOS 衛星画像と航空写真を用いたイメージマッチングを行う。そしてイメージマッチングで利用できるテンプレート画像を選定する。

本来、低分解能衛星画像を幾何補正する場合は、海岸線等を使って地上基準点を取得していた。それに対して高分解能衛星画像は対象範囲が狭く、画像から識別できる地物も多く存在することから、海岸線ではなく地物を地上基準点として使用の方が望ましいと考えられる。現在存在する地上基準点としては、国土地理院が整備している三角点がある。これは公共測量等を行う場合に用いるものであり、高分解能衛星画像の地上基準点には用いられにくい。なぜならば三角点が衛星画像上で確認出来ないからである。

そこで本論文の目的を達成することによって、効率の良い地上基準点の取得方法が明らかになる。それにより高分解能衛星画像の幾何補正において利用できる地上基準点の整備が可能となるはずである。この整備された地上基準点を用いることにより、容易に高分解能衛星画像を幾何補正することが出来る。そして高分解能衛星画像で期待されている既存地図の更新を定期的に、かつ迅速に行うことが可能となるだろう。

1.3 本論文の構成

本論文では、まず 2 章で高分解能衛星画像を幾何補正する際の変換式の選定を行った。3 章では今回使用した高分解能衛星画像について述べた。次に決定した幾何補正の変換式を用いて、4 章では地図、5 章では GPS から取得した地上基準点の精度検証をそれぞれ行った。その際に、地図、GPS それぞれにおいて高分解能衛星画像の幾何補正に利用できる基準点の候補を挙げ、使用可能かどうかの検討をした。6 章では航空写真を用いたイメージマッチングを行った。ここではテンプレート画像として利用可能な画像を選定し、その有効性について検討を行った。そして最後に 7 章で本研究の結論を述べた。

2 地上基準点を利用した幾何補正手法

2.1 幾何補正とは

画像の幾何補正とは、幾何学的歪みがある画像からその歪みを除去することを言う。幾何補正手法の手順について述べる。

補正式の決定

画像に含まれている幾何学的歪の性質や補正のために利用出来るデータを考慮して変換式（座標変換式）を決定する。

パラメータ（未知係数）計算

画像座標とそれに対応する地上基準点等を用いて、変換式のパラメータ（未知係数）を求める。

変換式の妥当性の検討

幾何学的な歪みが十分に補正されたかどうかを確認し、変換式の妥当性の検討を行う。最小二乗法を用いて決定されたパラメータにより、変換後の座標を求める。そしてその座標の誤差を算出し、変換式の妥当性を検討する。変換式が妥当ではないと判断された場合は、新たな変換式について見当を行い、補正に利用した画像座標や地上基準点のデータの見直しを行う。

再配列・内挿

補正後の画像を出力するために再配列と内挿を行う。で決定した変換式を用いて入力画像の画像データを並べ直す。これを再配列と言う。再配列にあたって計算される座標は必ずしも整数値とはならないため、周囲の画素値から内挿により新しい画素の値を求める。

内挿方法は三つの種類に分かれる。

(1) 最近隣内挿 (nearest neighbor)

再配列後の画像データを際近隣の画像データで置き換える。位置誤差は最大 0.5 画素であるが、現画像データを崩さない、処理速度が速いという利点がある。

(2) 双一次内挿 (Bi-linear)

内挿点の近隣 4 点の画素値を用いて、求める値を線形式で内挿する。この方法の欠点は現画像データが壊れることがある。

(3) 3 次たたき込み内挿 (cubic convolution)

内挿点の周囲 16 点の画素値を用いて、求める画素値を 3 次たたき込み関数で内挿する。これも現画像データが壊れる欠点があるものの、コントラストおよびエッジが強調された画像が作成される。

2.2 二次元射影変換

射影変換は、ある平面 L 上の点 (x, y) が 投影中心 O に関して、他の平面 L' 上の点 (u, v) として投影されるような変換である (図 2.1)。このような中心投影の幾何学は、レンズの中心を中心として投影されるカメラの写真に当てはまる。中心投影された画像は、レンズ直下の物体の高さの位置はそのままであるが、物体の高さとその距離に従って投影位置がずれていく特性がある。二次元の射影変換は、水面や建物の壁、地図などの図面等のような平面を写真に撮った場合に適応出来る。また傾きのある写真を他の傾きの写真に変換する偏歪修正の時にも行われる。

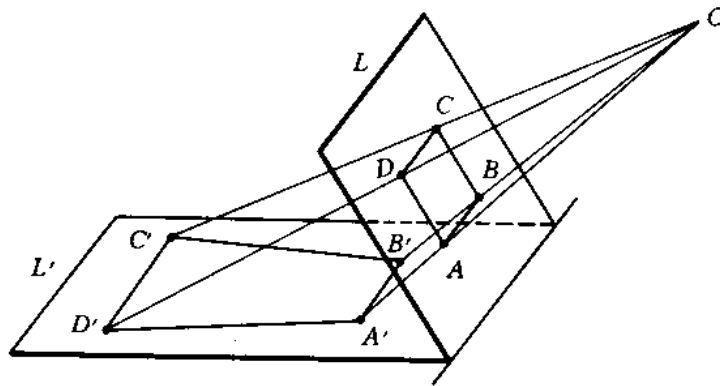


図 2.1 二次の射影変換

二次元射影変換は以下の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{a_1x + a_2y + a_3}{a_7x + a_8y + 1} \\ v &= \frac{a_4x + a_5y + a_6}{a_7x + a_8y + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

ここで、

u, v : 画像座標

x, y : 地上座標

$a_1 \sim a_8$: 未知係数

未知係数は u, v の式を合わせて 8 個あるが、両方の式の分母は同じ係数である。未知係数は 8 個であるが 5 点以上の基準点を用いることにより未知係数を算出することが出来る。未知係数は、地上基準点 (x, y) とそれに対応する画像基準点 (u, v) を用いて最小二乗法をあてはめさせる。最小二乗法を適応させるには、式 2.1 の分母を払い、線形の変換式に変換する。

$$\left. \begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3 - a_7xu - a_8yu \\ v &= a_4x + a_5y + a_6 - a_7xv - a_8yv \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

それぞれの式の左辺にある u, v を右辺に移項し，式を二乗する．

$$\left. \begin{aligned} \phi_u &= (a_1x + a_2y + a_3 - a_7xu - a_8yu - u)^2 \\ \phi_v &= (a_4x + a_5y + a_6 - a_7xv - a_8yv - v)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

二乗した式(2.3)において，それぞれ $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ の偏微分をとる． ϕ_u の式を行列で表すと以下の式で表される．

$$\begin{bmatrix} x^2 & xy & x & -x^2u & -xyu \\ xy & y^2 & y & -xyu & -y^2u \\ x & y & 1 & -xu & -yu \\ -x^2u & -xyu & -xu & x^2u^2 & xyu^2 \\ -xyu & -y^2u & -yu & xyu^2 & y^2u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ u \\ -xu^2 \\ -yu^2 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ここで，行列式を以下のように設定する．

$$A = \begin{bmatrix} x^2 & xy & x & -x^2u & -xyu \\ xy & y^2 & y & -xyu & -y^2u \\ x & y & 1 & -xu & -yu \\ -x^2u & -xyu & -xu & x^2u^2 & xyu^2 \\ -xyu & -y^2u & -yu & xyu^2 & y^2u^2 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ u \\ -xu^2 \\ -yu^2 \end{bmatrix}$$

$$(E) \leftrightarrow AX = b \quad (2.5)$$

正方行列式 A が正則とすると，逆行列 A^{-1} が存在するので，

$$X = A^{-1}b \quad (2.6)$$

となる．従って A^{-1} を求めることより， a_1, a_2, a_3, a_7, a_8 を求めることが出来る．これを ϕ_v の式でも同様に計算し，未知係数を求める． ϕ_v の式では次のようになる．

$$\begin{bmatrix} x^2 & xy & x & -x^2v & -xyv \\ xy & y^2 & y & -xyv & -y^2v \\ x & y & 1 & -xv & -yv \\ -x^2v & -xyv & -xv & x^2v^2 & xyv^2 \\ -xyv & -y^2v & -yv & xyv^2 & y^2v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_4 \\ a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xv \\ yv \\ v \\ -xv^2 \\ -yv^2 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

これらの計算から求めた係数 $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8$ を用いて，二次の射影変換を行う．

なお，逆行列の求め方には，クラメールの公式，ガウスの消去法などがある．クラメールの公式は，低次の行列の場合は比較的求めやすい方法である．しかし次元が多くなると，それに連れて求める式が複雑で計算量が多くなり，誤差も大きくなる欠点がある．そのため逆行列の計算はガウス消去を用いることが好ましい．

2.3 三次元射影変換

射影変換は，三次元の物体 (x, y, z) が，ある平面 (u, v) に中心投影で投影される場合にも適応できる．この場合の変換方法を三次元射影変換という．三次元射影変換は，平面を写真に撮った時に使用するのとは適切ではないが，高低差のある地形を撮影した航空写真を変換する際には適している．

三次元射影変換の式は以下で表される．

$$\left. \begin{aligned} u &= \frac{a_1x + a_2y + a_3z + a_4}{a_9x + a_{10}y + a_{11}z + 1} \\ v &= \frac{a_5x + a_6y + a_7z + a_8}{a_9x + a_{10}y + a_{11}z + 1} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

ここで，

u, v : 画像座標

x, y, z : 地上座標

$a_1 \sim a_{11}$: 未知係数

この変換式では最低7つ以上の基準点があれば未知係数を求めることができる．式内の未知係数を求めるために，分母を払い，線形の式に変化する．

$$\left. \begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3z + a_4 - a_9xu - a_{10}yu - a_{11}zu \\ v &= a_5x + a_6y + a_7z + a_8 - a_9xv - a_{10}yv - a_{11}zv \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

この二つの式に最小二乗法をあてはめる．

$$\left. \begin{aligned} \phi_u &= (a_1x + a_2y + a_3z + a_4 - a_9xu - a_{10}yu - a_{11}zu - u)^2 \\ \phi_v &= (a_5x + a_6y + a_7z + a_8 - a_9xv - a_{10}yv - a_{11}zv - v)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

それぞれ式を展開し， $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, a_7, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}$ の偏微分をとり，行列式で表すと以下ようになる．

$$\phi_u \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x & -x^2u & -xyu & -xzu \\ xy & y^2 & yz & y & -xyu & -y^2u & -yzu \\ xz & yz & z^2 & z & -xzu & -yzu & -z^2u \\ x & y & z & 1 & -xu & -yu & -zu \\ -x^2u & -xyu & -xzu & -xu & x^2u^2 & xyu^2 & xzu^2 \\ -xyu & -y^2u & -yzu & -yu & xyu^2 & y^2u^2 & yzu^2 \\ -xzu & -yzu & -z^2u & -zu & xzu^2 & yzu^2 & z^2u^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ zu \\ u \\ -xu^2 \\ -yu^2 \\ -zu^2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$\phi_v \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x & -x^2v & -xyv & -xzv \\ xy & y^2 & yz & y & -xyv & -y^2v & -yzv \\ xz & yz & z^2 & z & -xzv & -yzv & -z^2v \\ x & y & z & 1 & -xv & -yv & -zv \\ -x^2v & -xyv & -xzv & -xv & x^2v^2 & xyv^2 & xzv^2 \\ -xyv & -y^2v & -yzv & -yv & xyv^2 & y^2v^2 & yzv^2 \\ -xzv & -yzv & -z^2v & -zv & xzv^2 & yzv^2 & z^2v^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_5 \\ a_6 \\ a_7 \\ a_8 \\ a_9 \\ a_{10} \\ a_{11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xv \\ yv \\ zv \\ v \\ -xv^2 \\ -yv^2 \\ -zv^2 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

そして二次元射影変換と同様に，逆行列を求め，未知係数を算出する．この場合も，求める逆行列が7次正方行列であるため，ガウスの消去法やガウス・ジョルダン法を用いることが望ましい．最後に逆行列を使って求めた係数を三次元射影変換に代入し，変換式として利用する．

2.4 二次元アフィン変換

アフィン変換は、ユークリッド幾何学における線形変換であり、画像に含まれる平行移動、回転、拡大・縮小、スキュー歪の幾何学的な変換を行う場合に使用される。その中でも二次元 (x, y) での変換を二次元アフィン変換と言う。以下に二次元アフィン変換で補正可能な幾何学的歪みを記す。

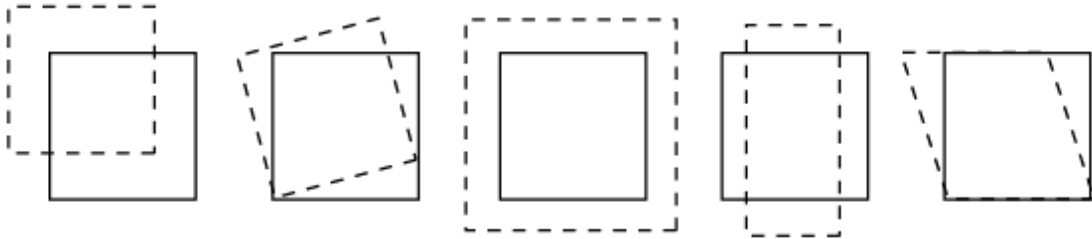


図 2.2 アフィン歪み

二次元アフィン変換は、以下の式で表される。

$$\left. \begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3 \\ v &= b_1x + b_2y + b_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

ここで

u, v : 画像座標

x, y : 地上座標

$a_1 \sim a_3, b_1 \sim b_3$: 未知係数

未知係数は、最小二乗法を用いて求める。左辺の u, v を右辺に移項し、二つの式それぞれを二乗する。

$$\left. \begin{aligned} \phi_u &= (a_1x + a_2y + a_3 - u)^2 \\ \phi_v &= (b_1x + b_2y + b_3 - v)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.14)$$

各係数 $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$ の偏微分を求め、 ϕ_u, ϕ_v についてそれぞれ行列で表す。

$$\phi_u \begin{bmatrix} x^2 & xy & x \\ xy & y^2 & y \\ x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ u \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\phi_v \begin{bmatrix} x^2 & xy & x \\ xy & y^2 & y \\ x & y & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xv \\ yv \\ v \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

ここで ϕ_u の行列式において以下のように設定する .

$$A = \begin{bmatrix} x^2 & xy & x \\ xy & y^2 & y \\ x & y & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ u \end{bmatrix}$$

正方行列式 A が正則とすると , 逆行列 A^{-1} が存在するので ,

$$X = A^{-1}b \quad (2.17)$$

が成り立つ . そのため未知係数 a_1, a_2, a_3 は A の逆行列を求めることによって導くことができる . 同様に未知係数 b_1, b_2, b_3 を求める . そしてこれらの求めた係数を用いて , 幾何補正したい画像に二次元アフィン変換を適応させる .

なお行列式の求め方は , 射影変換同様 , ガウスの消去法を用いることが望ましい .

2.5 三次元アフィン変換

三次元アフィン変換は , x, y, z を含む三次元の線形変換である . そして二次元アフィン変換と同様に平行移動 , 回転 , 拡大・縮尺 , スキュー歪による幾何補正が可能である .

三次元アフィン変換の式は以下で表される .

$$\left. \begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3z + a_4 \\ v &= b_1x + b_2y + b_3z + b_4 \end{aligned} \right\} \quad (2.18)$$

ここで,

u, v : 画像座標

x, y, z : 地上座標

$a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$: 未知係数

未知係数は , 最小二乗法を用いて算出する . $a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$ の偏微分を求めるために,

左辺の u, v を右辺に移項し、二つの式をそれぞれ二乗する.

$$\left. \begin{aligned} \phi_u &= (a_1x + a_2y + a_3z + a_4 - u)^2 \\ \phi_v &= (b_1x + b_2y + b_3z + b_4 - v)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.19)$$

$a_1 \sim a_4, b_1 \sim b_4$ の偏微分を求め、行列で表すと以下のようになる.

$$\phi_u \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x \\ xy & y^2 & yz & y \\ xz & yz & z^2 & z \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ zu \\ u \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

$$\phi_v \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x \\ xy & y^2 & yz & y \\ xz & yz & z^2 & z \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} xv \\ yv \\ zv \\ v \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

ここで二次元アフィン変換と同様に ϕ_u の行列式において以下のように設定する .

$$A = \begin{bmatrix} x^2 & xy & xz & x \\ xy & y^2 & yz & y \\ xz & yz & z^2 & z \\ x & y & z & 1 \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix}, \quad b = \begin{bmatrix} xu \\ yu \\ zu \\ u \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

正方行列式 A が正則とすると、逆行列 A^{-1} が存在するので、

$$X = A^{-1}b \quad (2.23)$$

が成り立つ. そのため未知係数 $a_1 \sim a_4$ は A の逆行列を求めることによって導くことが出来る. 同様に未知係数 $b_1 \sim b_4$ も求める. そしてこれらの求めた係数を用いて、幾何補正したい画像に三次元アフィン変換を適応させる .

なお行列式の求め方も二次元アフィン変換や二次・三次元射影変換と同様にしてガウスの消去法を用いる方が良い .

2.6 幾何補正手法の選定

門田 (2002)¹¹⁾, 山川 (2002)^{12),13),14)}らによると、高分解能衛星画像の幾何補正は、三次元アフィン変換で十分に適応できることが既に示されている。また Clive Fraser(2002)¹⁵⁾ は、IKONOS 衛星画像の幾何補正において、二次元アフィン変換、三次元アフィン変換共に幾何補正誤差を平均二乗誤差で 1m 以内にさせている。この場合は、対象地域の標高が約 100m で比較的高低差の少ない地域であり、また IKONOS 衛星画像を切り取っていたため二次元アフィン変換でも適応出来ている。しかし本論文で使用した IKONOS 衛星画像の標高差は場所によって約 400m にもなるため、三次元アフィン変換の適応が望ましい。そのため本論文では、地図と GPS から取得した地上基準点の精度検証を行う場合に、幾何補正の手法として三次元アフィン変換を使用した。

3 今回使用した高分解能衛星画像

今回高分解能衛星画像として使用した画像は、IKONOS 衛星画像である。IKONOS 衛星画像は 1999 年 9 月 24 日、米国スペースイメージング社がカリフォルニア州バンバーク空軍基地からロッキード・マーチン社のアテナロケットで打ち上げられた。IKONOS は、高度約 680km の極軌道を時速約 2 万 km で 1 時間 38 分ごとに周回しており、対象地域を約 1m の高い分解能で撮影出来る。IKONOS 衛星画像の特徴は、1m(衛星直下では最高 82m) という高い分解能と位置精度、ステレオ撮影による高さデータ(5m メッシュ、誤差 Z 方向 $\pm 1.6\text{m}$) の取得などである。衛星全体を振りながら、パス直交連続撮影やパス方向連続撮影などが可能なため、最大 5000km² の広範なエリアを一度に撮影することが出来る。データの量子化ビット数は、通常の 8 ビット(256 階調)から 11 ビット(2048 階調)にレベルアップされており、影や薄い雲のような識別しにくい領域の情報も判別できると言われている。センサーには可視光のセンサー以外に近赤外線センサーを搭載していることから、肉眼では見る事の出来ない植生の活性度の調査、水質汚染などの判別にも期待されている。

米国スペースイメージング社の株主である三菱商事株式会社は平成 10 年 5 月に IKONOS 衛星画像の国内販売企業として、日本スペースイメージング株式会社を設立した。販売製品にはデジタルジオ画像、デジタルオルソ・ライト画像、デジタルオルソ・エキスパート画像がある。デジタルジオ画像は、地球の曲面による歪みを補正した画像で、位置精度の補正は行っていない。デジタルオルソ・ライト画像は、地球の曲面による歪みと地表の起伏による歪みを補正しており、位置精度は $\pm 3.5\text{m}$ までとなっている。デジタルオルソ・エキスパート画像は、地球の曲面による歪みと地表の起伏による歪みを補正しており、デジタルオルソ・ライト画像よりもさらに高い位置精度 $\pm 1.75\text{m}$ (縮尺 1/2500 精度)となっている。

本論文で使用した IKONOS 衛星画像は、地球の曲面による歪みを補正したデジタルジオ画像を用いた。撮影範囲は高知県香美郡土佐山田町を含んだ約 11km \times 11km であり、市街地、大学、工場、森林、河川、田畑、港などが存在している。特徴としては、高層ビルが無く、農地が多いことが挙げられる。画像上での標高差は、およそ 400m である。撮影日は 2000 年 6 月 15 日であり、一年を通して植生の量が多い時期に撮影されている。表 2 に IKONOS 画像の仕様を示す。

表 3.1 IKONOS 衛星の仕様

項目	詳細
衛星名称	IKONOS
運用国	米国
運用機関	SPACE IMAGING
打ち上げ日	日本時間 '99年9月25日午前3時21分
次世代機	2003年頃
設計寿命	7年
回帰日数	11日(直下より10度以内に戻る場合)
再撮日数	1.0m解像度の場合 3日に1回可能 2.1m解像度の場合 毎日可能
軌道傾斜角	98.12°
軌道の種類	太陽同期極軌道
衛星高度	680km
センサータイプ	リニアアレイ
検知素子	CCD
素子数	パנקロマティック 13816個 マルチスペクトル 3454個
波長域	パנקロマティック 0.45-0.90 μm 青 0.45-0.52 μm 緑 0.52-0.60 μm 赤 0.63-0.69 μm 近赤外 0.76-0.90 μm
走査方法	プッシュブルーム・ウィスクブルーム パנקロマティック 直下 0.82m
地上分解能(GSD)	マルチスペクトル オフナディア 26° 1.0m 直下 3.3m オフナディア 26° 4.0m
走査幅	直下 11.3km 1mGDS 13.8km
ポインティング	全方向・角度は無制限/但し、通常45° 迄
量子化ビット数	各ピクセル11ビット
GPS無い場合	水平精度 6.0m(RMSE) 鉛直精度 5.3m(RMSE)
GPS有る場合	水平精度 1.0m(RMSE) 鉛直精度 1.6m(RMSE)
最大撮影範囲	モノ(単画像)撮影 解像度1.0m以下 4700平方km(縦横比1:2) 解像度1.3m以下 10000平方km(縦横比1:2) ステレオ画像 解像度1.0m以下 5200平方km(400km×13km) 解像度1.3m以下 9300平方km(550km×17km)
直接受信範囲	受信局より半径2500km内
データレコーダー	64GB(100シーン [1シーン=11km×11km])
ダウンリンク	320Mbps
撮影時刻	10時30分前後(日本の場合)

表 3.2 使用した IKONOS 衛星画像の仕様

項目	詳細
Sensor	IKONOS-2
Acquired Nominal GSD	
Cross Scan	0.86 m
Along Scan	0.84 m
Scan Direction	0°
Nominal Collection Azimuth	263.9600°
Nominal Collection Elevation	76.68608°
Sun Angle Azimuth	114.7576°
Sun Angle Elevation	69.25115°
Acquisition Date/Tim	2000年06月15日 10:43
撮影エリア	高知県 土佐山田町
面積(km ²)	134.848
製品レベル	デジタルジオ画像
センサタイプ	パンシャープン(4バンド)
地図投影法	Transverse Mercator
楕円体	Bessel
datum	Tokyo (4)
ピクセルサイズ(m)	Pansharpend Multispectral = 1.0
ファイルフォーマット	GeoTIFF
ビット数/画素	11bits
位置情報	
左上	緯度
	経度
	X
	Y
右下	緯度
	経度
	X
	Y
画像サイズ	
カラム	11866
ライン	12311

4 地図から取得した地上基準点の精度検証

4.1 使用した地図データ

使用した地図は、縮尺 1:2500 の都市計画図及び縮尺 1:5000 の森林基本図である。これらの地図は、紙地図をスキャンしてデジタル画像に変え、その後ベクトルデータに変換したものである。データ提供主体は高知県企画振興部情報企画課であり、作成もとは NTT データである。これらの地図には、河川、官公署、区界、工場、池、湖、駐車場、鉄道、土堤、道路、病院、防波堤等が描かれている。(表 4.1)

標高データは数値地図 50m メッシュを用いた。これは国土地理院が発行している縮尺 1:25000 の地形図に描かれている等高線を計測してベクトルデータを作成し、それから計算によって求めた数値標高モデル (DEM:Digital Elevation Model) データである。

表 4.1 縮尺 1:2500 の地図の詳細

項目	内容
データ提供主体-機関名	高知県
データ提供主体-部局, 課室名	企画振興部情報企画課
レイヤ, 統計・台帳データ項目	河川, 官公署, 区界, 工場, 池・湖, 駐車場, 鉄道, 土堤, 道路, 病院, 防波堤等
データ構造	ポリゴン, ライン, ポイント, サークル・アーク
縮尺・解像度	2500
空間データ管理座標系	日本平面直角座標系(4系)
データ作成年月日	1993年3月1日
データ範囲	土佐山田町, 野市町, 香我美町, 赤岡町, 吉川村, 南国市

4.2 地物からの地上基準点の選定

縮尺 1:2500 の地図に描かれている地物は多く存在する。しかし縮尺 1:2500 の地図を用いて地上基準点を取得する場合、歩道などは道路との境界線が明瞭でないため分かりにくいことが多い。そのため、衛星画像で明瞭に識別でき、地図からも容易に発見出来る地物の選定を行った。

表 4.2 は縮尺 1:2500 の地図の基準点候補を表している。選定結果は “ Good ”、 “ Fair ”、 “ Poor ” で示した。 “ Good ” の地物は基準点および検証点に、 “ Fair ” は検証点のみに、 “ Poor ” はそのどちらにも使用しなかった。

表 4.2 縮尺 1:2500 の地図を用いた場合の基準点候補

地物	コメント	選定結果
河川に架かる大きな橋	衛星画像では、川砂利が原因で橋の付け根が分かりにくい場合がある	Good
小川に架かる小さな橋	場合によっては地図・衛星画像で分かりにくい橋がある	Good
歩道	道路との境界が曖昧で基準点が取得しにくい	Poor
道路の交差点	衛星画像で明瞭に見える場合は、基準点として使用できる	Good
建物の屋根	衛星画像は中心投影されており建物の位置が地図とずれているため、取得しづらい	Poor
道路のセンターライン	地図には明記していなかった	Poor
学校のプール	地図はプールサイドなど明確に表されておらず、分かりにくい	Poor

図 4.1～図 4.4 は、基準点として選定した地物の選定場所を表している。どの図も左側が IKONOS 衛星画像、右側が縮尺 1:2500 の地図の画像である。図 4.1 は河川に架かる大きな橋であり、基準点は橋の根元を選んだ。しかし大きな橋は、川砂利が存在することによって衛星画像の橋の付け根が鮮明にならず、その場所が分かりにくくなる。そして基準点を設置するのが難しくなる。従って河川に架かる橋全てが基準点候補となる訳ではないので注意が必要である。図 4.2 は河川ほど大きくない水路に架かる小さな橋である。基準点は橋の根元に基準点を置こうとしたが、地図・衛星画像の両方とも、橋と道路が明確に表されていない場合があった。しかし今回の対象地域は田畑が多く存在することから、大きな橋に比べ小川などに架かる小さな橋の方が数は多い。そのため、衛星画像・地図共に明確に表されている橋が存在するならば、小さな橋を基準点として用いることは可能である。今回選んだ小さな橋は、衛星画像・地図共に明確に表されているものは基準点を橋の付け根に設置し、地図もしくは衛星画像が明確でない場合は橋の中心部分に基準点を置いた。図 4.3 は道路の T 字路交差点、図 4.4 は道路の Y 字路交差点である。Y 字路交差点は衛星画像の道路と畑の境界が分かりにくかったが、1 点だけ取得した。今回は、T 字路交差点は基準点と検証点に、Y 字路交差点は検証点のみに用いた。

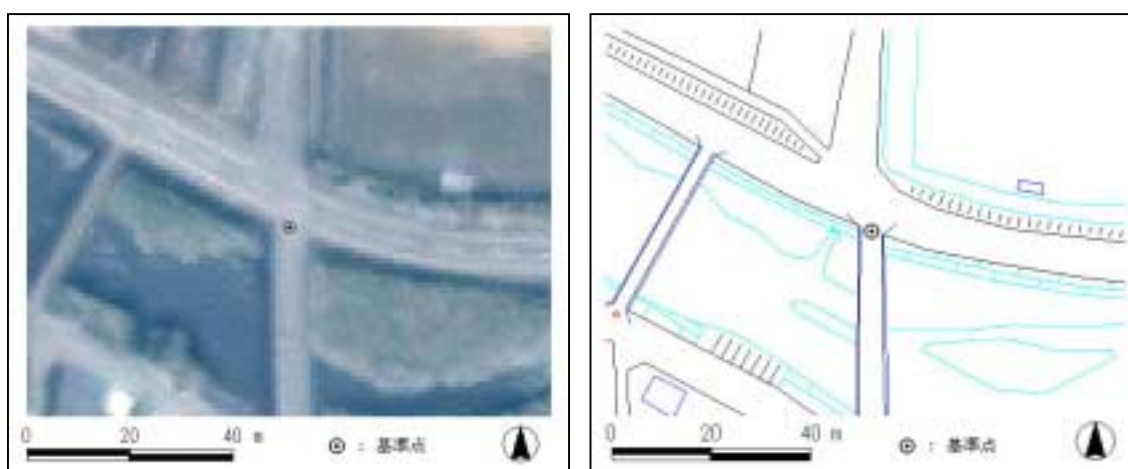


図 4.1 河川に架かる大きな橋



図 4.2 小川に架かる小さな橋



図 4.3 T字路道路

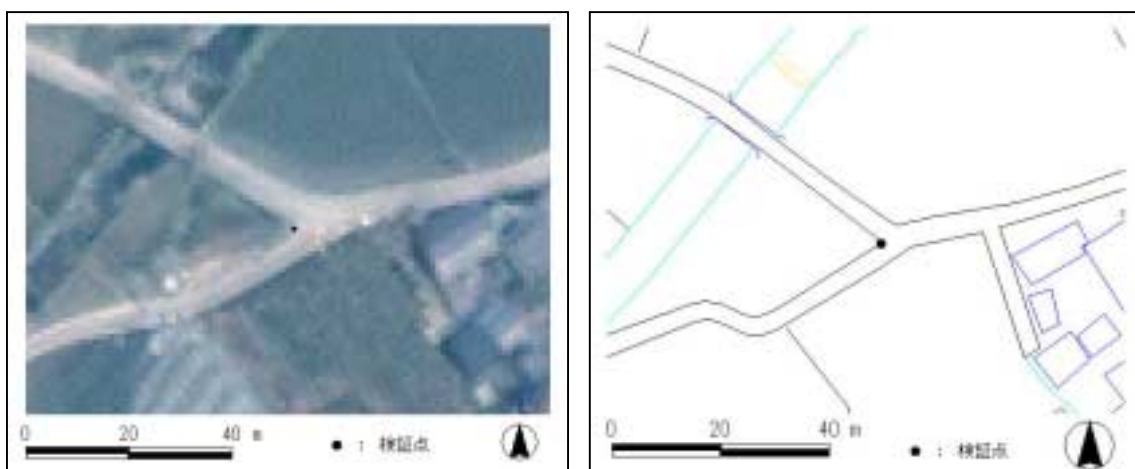


図 4.4 Y字路道路

図 4.5 は地図から取得した基準点と検証点の配置を表している。基準点は二重丸，検証点は一重丸である。基準点は標高の高い場所から低い場所まで均等な配置を試みた。しかし山地には道路や橋があまり存在せず，基準点の取得が困難であった。そのため基準点の配置は若干偏りがある。また検証点の場合も北・北東部の山間地域での配置は少なく，田畑に集中している場所もある。今回は，基準点は 8 点，検証点は 30 点取得し，総数 38 点となった。

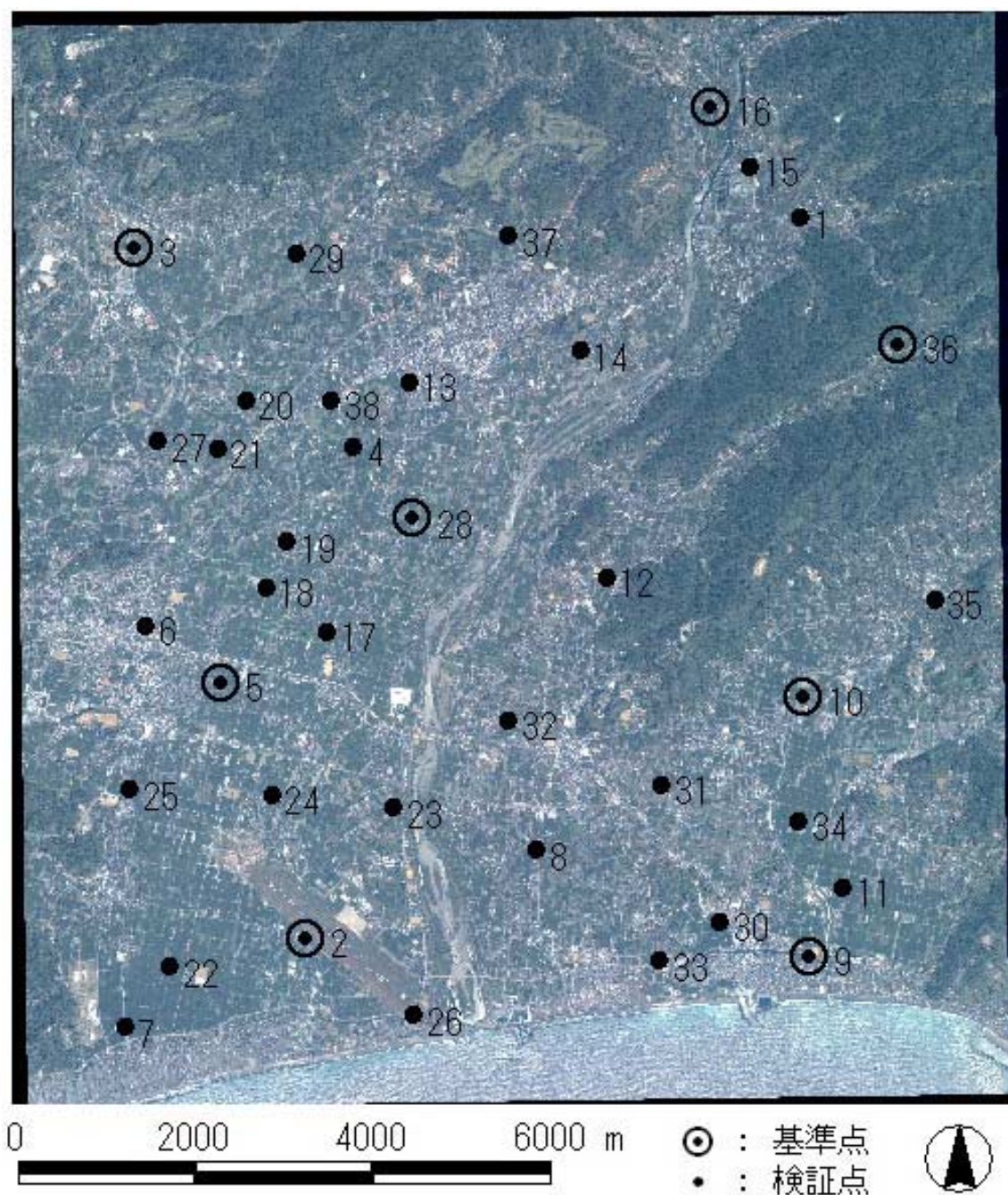


図 4.5 縮尺 1:2500 の地図を用いて取得した基準点と検証点の配置

4.3 結果

地図から取得した地上座標とそれに対応する画像座標を用いて、三次元アフィン変換を適応させた。そして求めた係数と地上座標から画像座標を算出し、元の値との差を取ることにより平均二乗誤差を求めた。平均二乗誤差は基準点、検証点とも算出した。補正前と補正後の画像座標の差を表 4.3 に、平均二乗誤差を表 4.4 に表す。単位はいずれも m である。なお表 4.3, 表 4.4 の NO は、地図から取得した基準点・検証点の番号であり、付録 A にその配置図と地上座標・画像座標情報を載せている。

表 4.3 基準点の補正誤差

NO	基準点	
	u	v
2	0.0056	-0.0037
8	0.7002	-0.2506
11	-0.7687	0.3281
18	0.4448	-0.2278
28	-0.2295	0.2093
32	-0.6670	0.3965
39	0.9069	-0.7642
42	-0.3922	0.3123

表 4.4 検証点の補正誤差

NO	検証点	
	u	v
1	-0.7673	-1.3001
4	-1.2135	0.6960
6	-1.1191	-1.2492
7	-0.3016	0.2743
8	0.7475	0.0849
11	-1.4084	-1.3169
12	3.0100	-0.7928
13	0.8714	-0.5184
14	0.3296	-0.3557
15	-1.9429	0.7173
17	1.0219	0.8968
18	-1.2092	0.6518
19	0.3365	0.7319
20	0.6144	-9.3090
21	0.0544	0.0873
22	-2.4309	-0.8111
23	-1.3583	0.0176
24	-0.3740	0.2137
25	0.9263	-1.3384
26	0.6756	-0.1770
27	-0.5758	-1.2505
29	-0.6791	-2.0421
30	-2.0736	0.7901
31	-0.3670	0.2529
32	-0.1241	1.7691
33	-1.2217	2.0976
34	-0.6342	2.3032
35	-1.4218	1.7883
37	-0.0766	-0.8846
38	2.3708	-9.3331

表 4.3 は補正誤差が 1m 以内となっている。表 4.4 は補正誤差が u , v とともに 1m 以内のものもあるが、1m を超えている検証点も多い。特に NO.20 と NO.38 の検証点は、 v 方向の誤差が約 9m にも及んでいる。また山間地域で取得した NO.12 の検証点も他のもの比べて u 方向の補正誤差が大きい。今回 1 点だけ使用した Y 字路道路 (NO.35) は、 u , v どちらの場合も 1m 以上となっている。これは衛星画像の Y 字路の検証点の取り方が曖昧であったためである。

表 4.5 は、表 4.3 , 表 4.4 を平均二乗誤差で表してまとめたものである。単位は m で表示している。この表より、基準点は u , v どちらの場合も 1m 以内の誤差におさまっている。しかし検証点の場合は u , v 両方とも 1m 以上の誤差となっている。特に v の誤差が大きいことが分かる。またどちらの場合も u より v の方が、誤差が大きい。

表 4.5 三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差

平均二乗誤差	MAP	
	u	v
基準点(m)	0.5832	0.6371
検証点(m)	1.2155	2.6356

図 4.6 は、地図から取得した地上基準点を用いて幾何補正をした誤差をベクトルで表したものである。単位はピクセルであり、誤差ベクトルは 200 倍に拡大している。この図から特に北西方向の地域の二つのベクトル誤差が大きいことが分かる (図 4.6 のア参照)。これらのベクトル誤差は NO.20 と NO.38 である。また北西方向ほどではないが、南西方向の範囲も誤差が大きくなっている (図 4.6 のイ , ウ参照)。全体的に地図の誤差は大きいと言える。

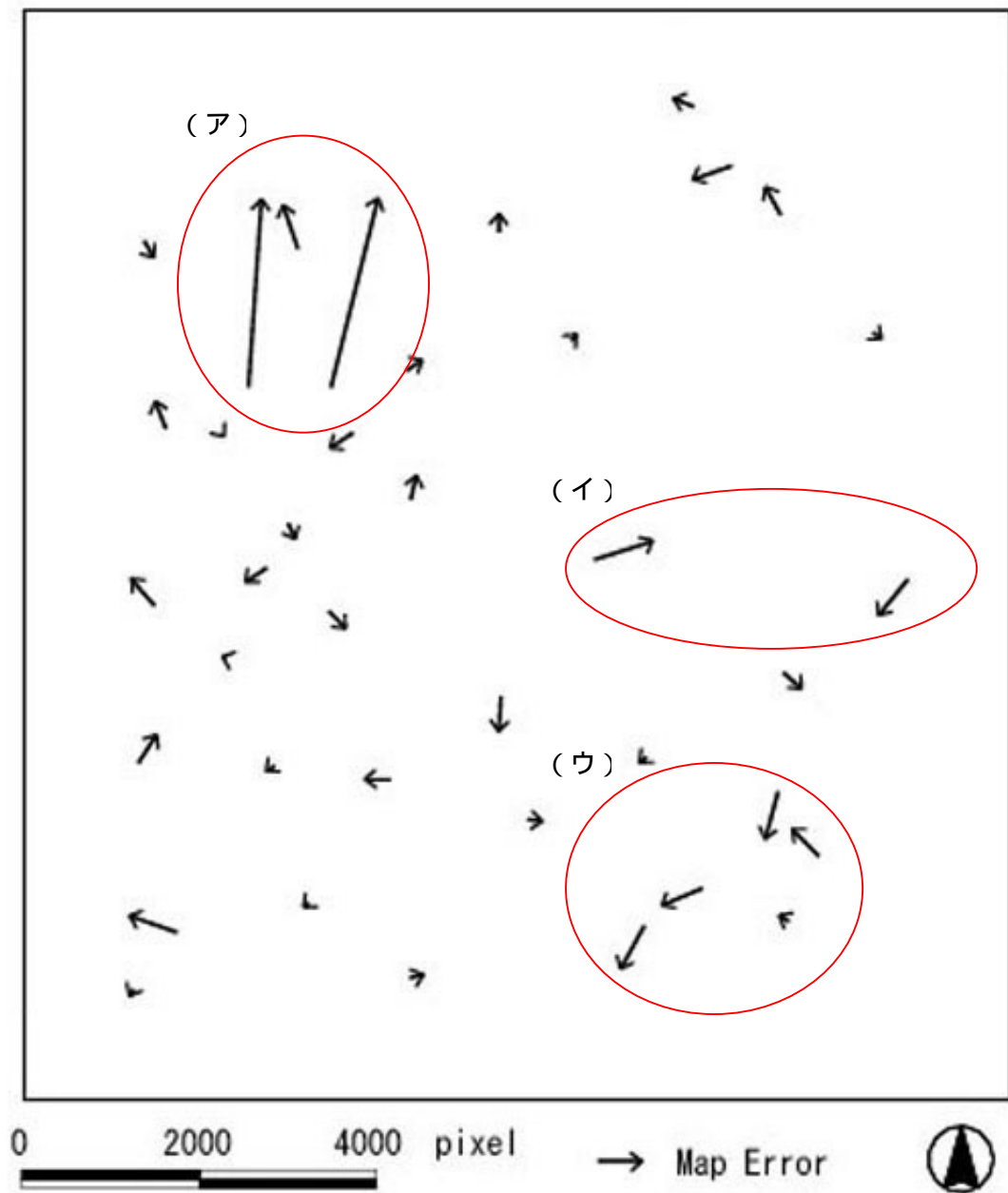


図 4.6 地図による幾何補正の誤差ベクトル

図 4.7 は、幾何補正された IKONOS 画像に縮尺 1:2500 の地図を重ねたものである。これらの範囲は補正誤差が v 方向で約 9m となった NO.20 と NO.38 の検証点の周辺である(図 4.6 のア参照)。これらの図から、今回使用した縮尺 1:2500 の地図が、北方向に大きくずれていることが分かる。

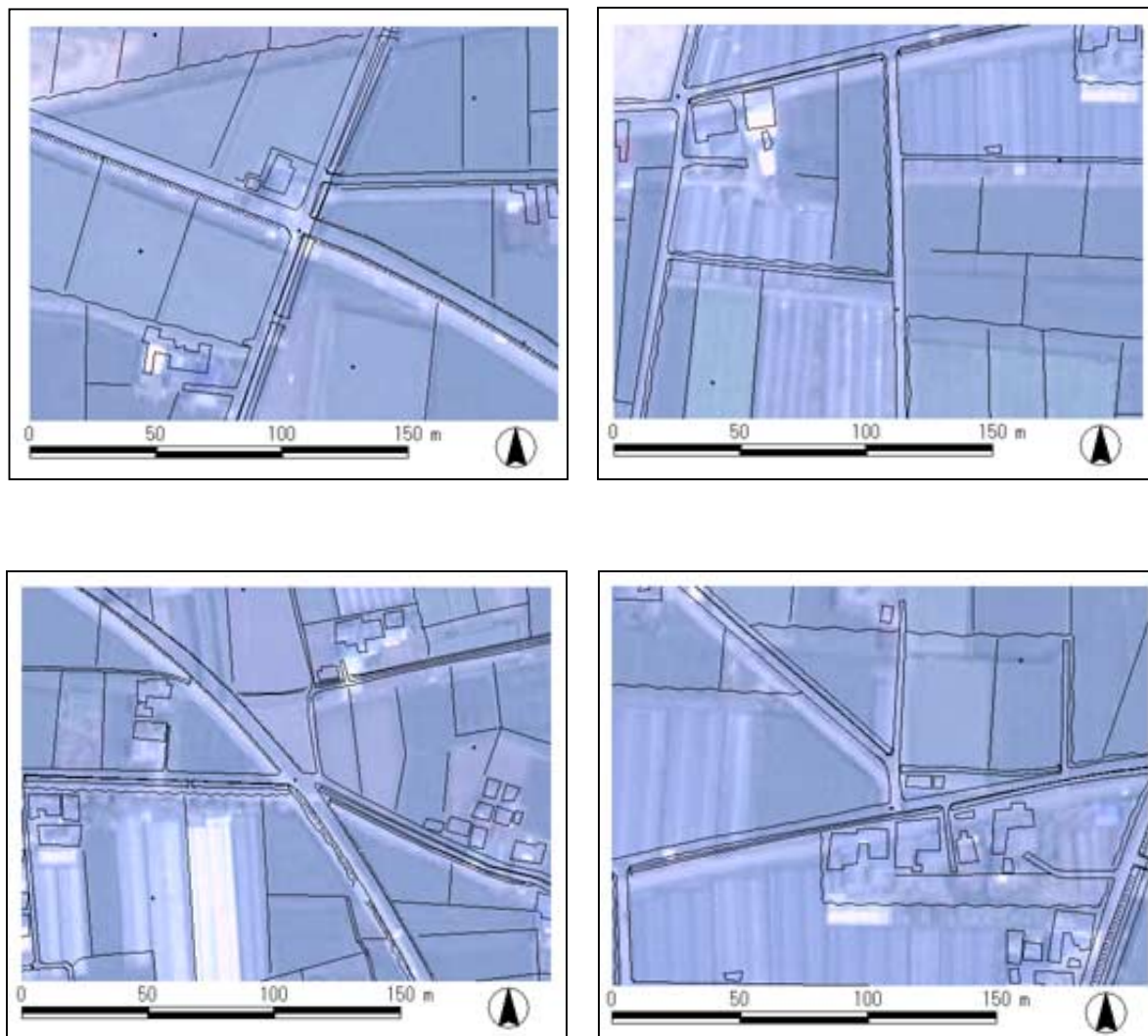


図 4.7 幾何補正された IKONOS 衛星画像に重ねられた縮尺 1:2500 の地図

以上の結果から縮尺 1:2500 の地図は、十分な精度を持っておらず、品質管理が悪いことが分かった。そこで、今度は誤差の大きかった NO.20 と NO.38 の基準点を外し、三次元アフィン変換を適応させ幾何補正を行った。表 4.6 は基準点 2 点を外した場合の平均二乗誤差を表している。単位は m である。この表から、検証点の u 座標は、補正誤差の大きかった基準点を外す前よりも、およそ 1.5m も平均二乗誤差の値が小さくなった。しかし検証点の平均二乗誤差はどちらも 1m 以内を上回った。

表 4.6 検証点 2 点を外して三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差

平均二乗誤差	MAP	
	u	v
基準点(m)	0.5832	0.6371
検証点(m)	1.2048	1.1121

4.4 考察

今回使用した縮尺 1:2500 の地図による IKONOS 衛星画像の幾何補正は、検証点で 1m 以上の誤差となった。特に検証点の内の 2 点は約 9m の誤差が生じた。そこで誤差の大きかった基準点 2 点を外して幾何補正を行った。その結果平均二乗誤差は、基準点 2 点を外す前よりも小さくなったが、補正誤差は 1m を超えたままだった。そのため縮尺 1:2500 の地図は精度が不十分であり、品質管理が悪いことが分かった。しかし、基準点の平均二乗誤差は 1m 以下であり、また検証点の中にも補正誤差が 1m 以下のものも含まれている。そのため十分に気を付けて地上基準点を取得することが出来れば、高分解能衛星画像の幾何補正に縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点は適応できると思われる。

5 GPS から取得した地上基準点の精度検証

5.1 地物からの地上基準点の選定

高分解能衛星画像で識別できる地物は数多く存在する．しかし GPS を用いて地上基準点を取得する場合，実際に計測可能な基準点の選定は容易ではない．例えば道路のセンターラインは車が通るため危険で，観測は困難である．そこで画像から識別しやすく，現地観測においても安全に計測出来，かつ容易に発見できる地物を選定した．

表 5.1 は高分解能衛星画像の基準点候補を表している．選定結果は“ Good ”，“ Fair ”，“ Poor ”で示した．“ Good ”の地物は基準点および検証点に，“ Fair ”は検証点のみに，“ Poor ”はそのどちらにも使用しなかった．

表 5.1 GPS を用いた場合の基準点候補

地物	コメント	選定結果
河川に架かる橋	車や歩行者が通るため危険でかつ迷惑	Poor
公園の遊具	画像での判別が不可能	Poor
田畑のあぜ道	同じような田畑が密集する場所は分かりづらく、道が変化している場合もある	Fair
田畑の水路に架かる橋	通行の邪魔にならず、観測が容易に行えた	Good
駐車場の白線	店の駐車場の場合は、営業の邪魔にならないように注意が必要	Good
道路のセンターライン	車が通るため危険、観測は困難	Poor
学校のプール	事前に許可が必要となるため非効率	Poor
ヘリポート	土佐山田町近辺には存在しなかった	Poor

図 5.1～図 5.3 は，基準点として選定した地物の選定場所を表している．どの図も左側が IKONOS 衛星画像，右側が実際に現地観測した時の画像である．駐車場の白線では，駐車スペースの四隅のいずれかを測点に選んだ．田畑などの小さな水路に架かる橋では，橋のたもとの中心部分をメジャーで測定し，基準点を設けた．田畑のあぜ道では，道の特長点である交差部分に測点を設けた．しかしあぜ道は道と田畑の区別が付きにくく，また道が衛星画像と比べて変化している可能性もあるため，基準点には使用せず，検証点だけに用いた．なお駐車場においては，観測したい場所が既に駐車されていたり，営業中の店舗の駐車場で観測を行う場合は邪魔になることも多い．そのため安全で，かつ容易に観測することの出来る田畑などの水路に架かる橋の方が，より観測しやすいと言える．しかし田畑などの水路に架かる橋では，田植えや収穫時などの忙しい時期になると，迷惑をかける場合もあるので，観測する場合は十分に注意しなければいけない．また農地の少ない大都市などの地域になれば，小さな水路もあまり存在しなくなることから，基準点候補の追加検討を行う必要があるだろう．

図9は基準点と検証点の配置を表している．基準点は二重丸，検証点は一重丸である．基準点の配置は，均等になるように試みたが，北東に山間地域が存在することから，この地域での基準点の取得が困難だった．そのため基準点の配置には若干の偏りがある．

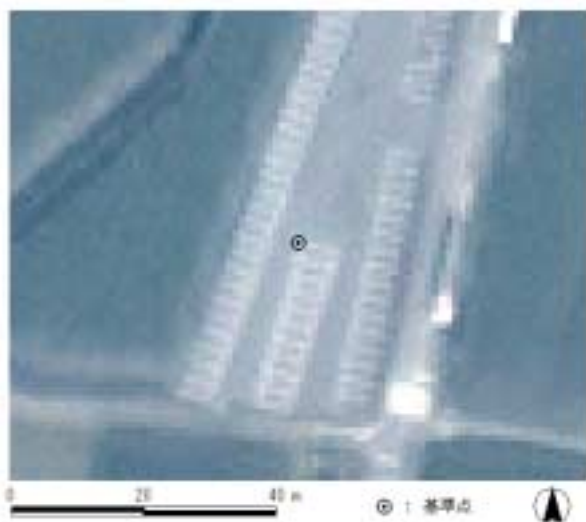


図 5.1 駐車場



図 5.2 水路の橋



図 5.3 田畑のあぜ道

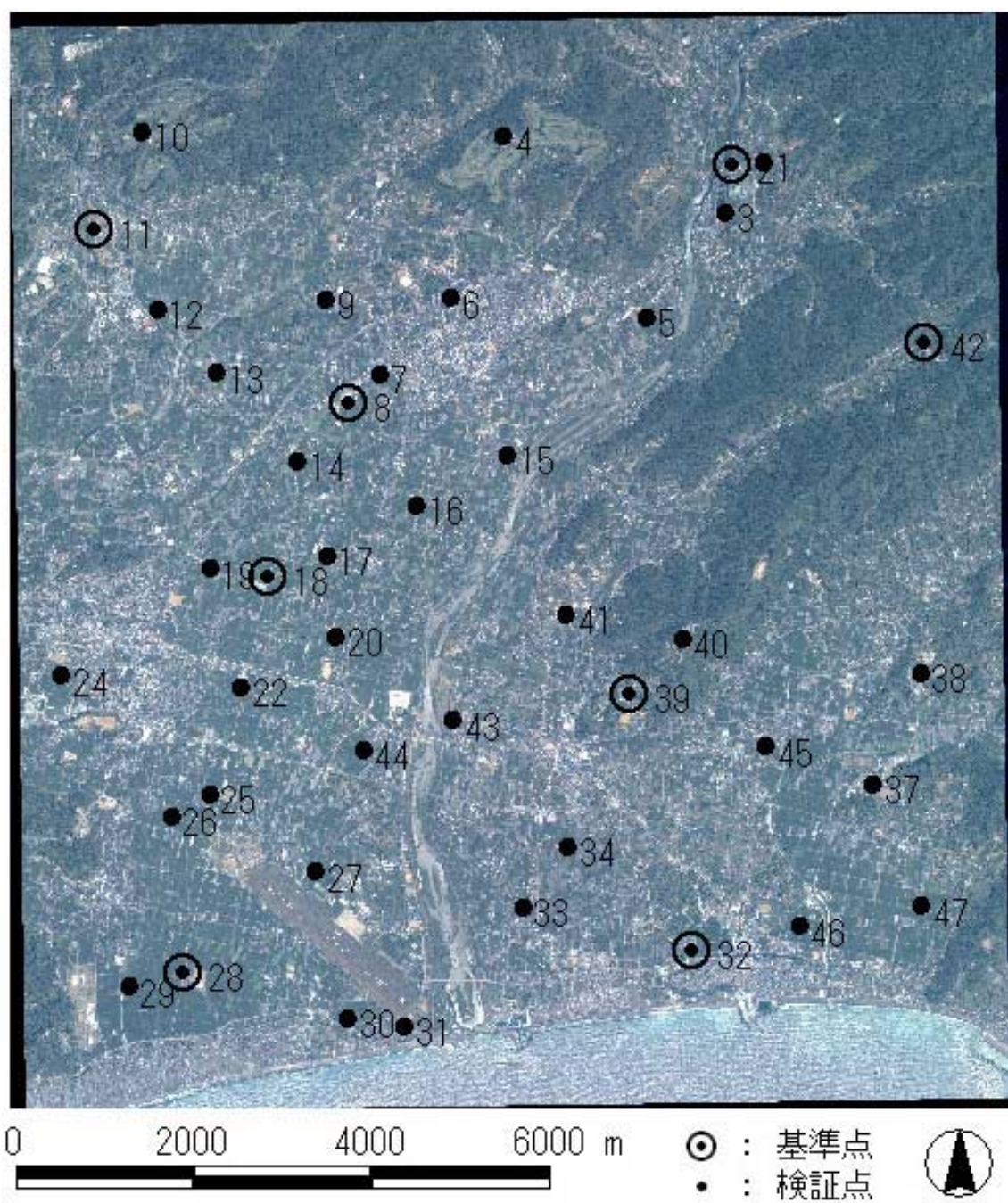


図 5.4 GPS を用いて取得した基準点と検証点の配置

5.2 基準点観測

地上基準点座標の取得は、GPS による高速スタティック測量で行った。取得した座標系は、衛星画像と同じ平面直角座標系の第 1 系である。使用した GPS 受信機は TOPCON 製の GP-SX1 である。記録間隔は 30 秒に一回であり、1 点につき約 20 分間観測を行った。基準局は高知工科大学の本館屋上に設置した。

この観測での最大基線長は約 11.26km となり、GPS 受信機の精度は水平方向で、約 3cm 以内の誤差となった。水路の橋の基準点は、現地で基準点となる橋のたもとの中心部分をメジャーを用いて計測した。田畑のあぜ道においても、道の交差部分の中心をメジャーを用いて測定し、基準点を設置した。これらの場合の誤差は少なくとも 5cm 以内と見込んでいる。今回は基準点として 8 点、検証点として 35 点取得し、総数 43 点となった。

なお、この観測の解析の結果、フロート解が 2 点出たが、その測点は検証点データとして用いた。

観測日数は、2002 年 3 月 1 日～2002 年 3 月 31 日までであり、その間 9 日間にかけて観測した。観測中は、衛星画像が撮影されてから 2 年の年月が過ぎたこともあり、現地に行かないと基準点付近の状況が分からず、基準点となる地物が存在しないこともあった。また衛星画像上において容易に発見できる地物を選定しても、現地観測になると土地勘も必要となるため、目的の地物を見つけるだけでも大変な時間と労力を要する場所が多かった。そのため、一点観測する時間は移動を含め約 1 時間要し、一日に観測した基準点数は最高で 7 点であった。

表 5.2 GPS 受信機の仕様

項目		仕様
メーカー		TOPCON
品名		GP-SX1
チャンネル数		12チャンネル並列処理
受信電波		L1 C/Aコード、搬送波
精度(D: 基線長)	スタティック	水平：5mm+1ppm×D (≤10km) 5mm+2ppm×D (>10km)
	キネマティック	高低：10mm+2ppm×D 20mm+2ppm×D

5.3 結果

GPS で観測した地上座標とそれに対応する画像座標を用いて、三次元アフィン変換を適応させた。そして求めた係数と地上座標から画像座標を算出し、元の値との差を取ることにより平均二乗誤差を求めた。平均二乗誤差は基準点、検証点ともに算出した。補正前と補正後の画像座標の差を表 5.3 に、平均二乗誤差を表 5.4 に表す。単位はいずれも m である。なお表 5.3, 表 5.4 の NO は、GPS を用いて取得した基準点・検証点の番号であり、付録 A にその配置図と地上座標・画像座標情報を載せている。

表 5.3 基準点の補正誤差

NO	基準点	
	u	v
2	0.0056	-0.0037
8	0.7002	-0.2506
11	-0.7687	0.3281
18	0.4448	-0.2278
28	-0.2295	0.2093
32	-0.6670	0.3965
39	0.9069	-0.7642
42	-0.3922	0.3123

表 5.4 検証点の補正誤差

NO	検証点	
	u	v
1	1.7170	0.0853
3	-0.3424	0.1434
4	2.8555	-0.4335
5	1.3704	0.2292
6	0.4333	0.5821
7	1.6426	-0.1166
9	0.9106	0.1327
10	1.3587	-0.0140
12	-1.0384	0.6134
13	0.0539	0.5517
14	0.2982	-0.1233
15	0.3453	1.0332
16	1.0262	-0.2827
17	0.3597	-0.1620
19	0.4619	-0.1378
20	1.8835	-0.2691
22	0.5048	-0.5878
24	-1.4807	-0.3812
25	-0.4929	-0.5410
26	-0.9917	-0.4416
27	-0.1327	0.4019
29	-1.6569	-0.7291
30	-0.4766	-0.3170
31	-0.5133	-0.5363
33	-0.7795	-0.2362
34	-0.1094	-0.4008
37	-0.9133	0.3949
38	-0.5734	1.1279
40	0.7813	-1.1483
41	0.6870	-0.0248
43	-0.8706	-1.5714
44	0.2828	-1.0860
45	0.3036	-0.3987
46	-0.1251	0.0682
47	-0.4673	-0.0391

表 5.3, 表 5.4 から, 補正誤差はほぼ 1m 以内の誤差となっている。1m を大きく超えた検証点は, 大学周辺や, 山の上のゴルフ場など, 標高の高い所となっている。

表 5.5 は, 表 5.3, 表 5.4 を平均二乗誤差で表してまとめたものである。単位は m で表している。この表から, 幾何補正による平均二乗誤差は, 基準点・検証点とも v より u の方が大きい。これは地図の平均二乗誤差の結果と逆である。また基準点よりも検証点の方が, 誤差が大きい。しかし基準点・検証点といずれの場合も, 平均二乗誤差は 1m 以内におさまっていることが分かる。

表 5.5 三次元アフィン変換を用いた GPS の平均二乗誤差

平均二乗誤差	GPS	
	u	v
基準点(m)	0.5866	0.3716
検証点(m)	0.9958	0.5562

図 5.5 は, GPS から取得した地上基準点を用いて幾何補正をした誤差をベクトルで表したものである。単位はピクセルであり, 誤差ベクトルは 200 倍に拡大している。この図から, ほとんどの誤差ベクトルは 1 ピクセル以下ということもあり, 小さいことが分かる。しかしながら, 北側の一部の地域(図 5.5 アの参照)は他の誤差ベクトルに比べ, 誤差が大きくなっている。この地域は山間部であり, 標高が高いからであると思われる。

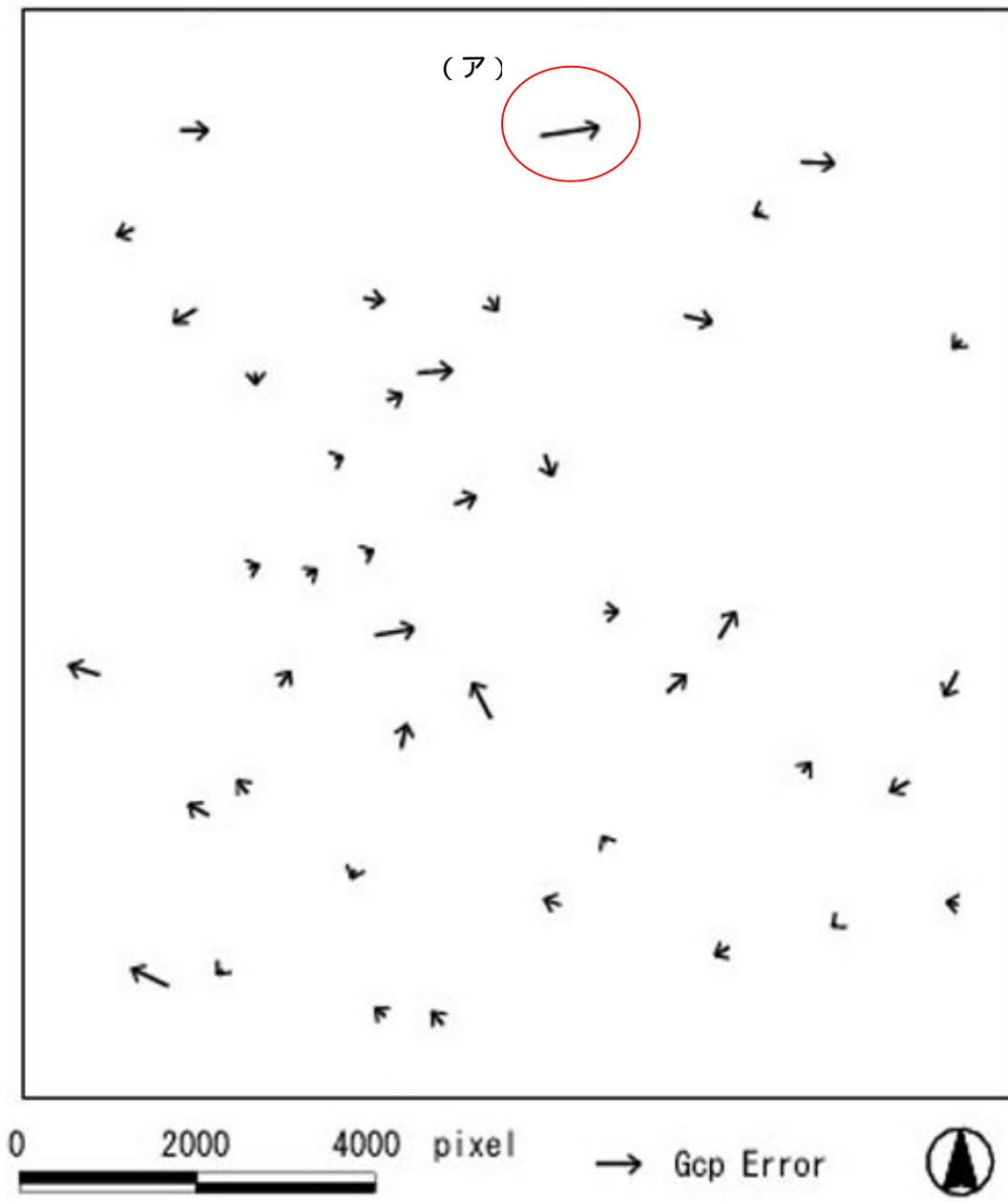


図 5.5 GPS を用いた幾何補正の誤差ベクトル

図 5.6 は幾何補正された IKONOS 画像に縮尺 1:2500 の地図を重ねたものである。左上の図は二番目に誤差の大きかった南西方向にある基準点の周辺を表している。この地域は誤差が大きいのに関わらず、幾何補正された IKONOS 衛星画像に重ねた縮尺 1:2500 の地図はほとんどずれていない。一番誤差の大きかった北部の基準点(図 5.5 のア参照)においては、ゴルフ場の駐車場の白線を観測した。しかし使用した縮尺 1:2500 の地図は古かったため、ゴルフ場が記されていない。そのため衛星画像に重ねることは出来なかった。その他の図は幾何補正誤差が 1m 以内であった基準点の周辺を表している。これらの図も地図と衛星画像はほとんどずれていないことが分かる。

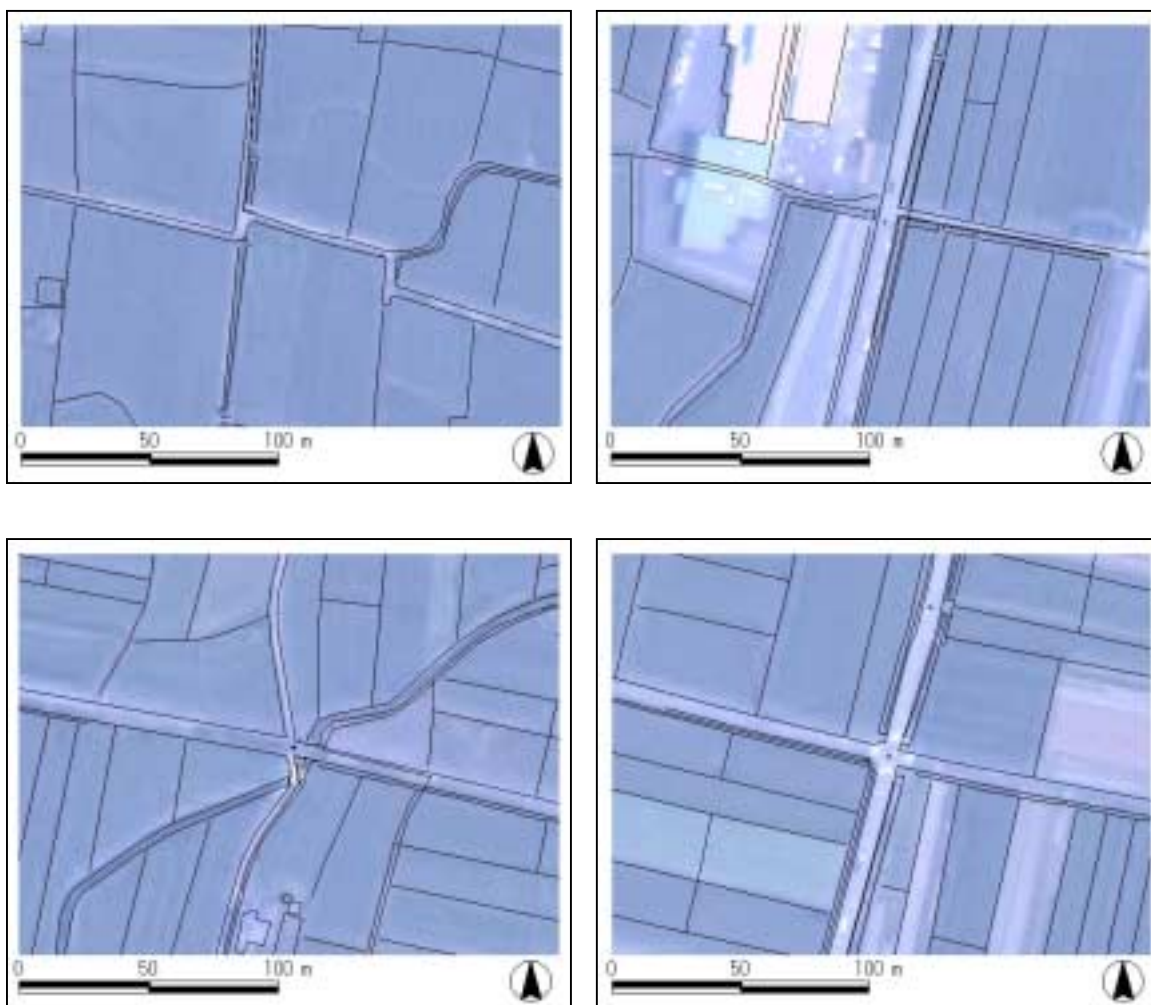


図 5.6 幾何補正された IKONOS 衛星画像に重ねられた縮尺 1:2500 の地図

5.4 考察

今回は基準点 8 点を用いて幾何補正を行った。基準点の配置は均等になるように試みた
が、完全に地形を考慮できなかった。しかし地形を考慮しながら基準点数を増やし、配置
を行うことによって、より幾何補正誤差が少なくなると考えられるだろう。

幾何補正の結果は、平均二乗誤差で表すと 1m 以内となった。また補正誤差をベクトルで
示しても、誤差が極端に大きいものは存在しなかった。以上の結果から GPS を用いて取得
した地上基準点は、高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能であると判断出来た。

7 イメージマッチングによる利用可能なテンプレート画像の検討

縮尺 1:2500 の地図を用いて取得した地上基準点は低い精度であった。GPS を用いて取得した地上基準点は十分な精度があった。しかしながら GPS を用いて観測を行う場合は時間と労力が必要となる。

地図や GPS を用いて地上基準点を取得する以外に、航空写真を用いる方法もある。航空写真をテンプレート画像として IKONOS 衛星画像と重ねることにより地上基準点を取得するものである。この方法は Clive Fraser¹⁵⁾によって高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能であると判明している。しかしどのようなテンプレートが適応可能であるのかまだ検討されていない。したがって本章ではイメージマッチングで適応可能なテンプレート画像の選定を行った。

6.1 使用した航空写真

今回使用した航空写真は、土佐山田町建設都計課が管理している航空写真である。撮影日は 1998 年 10 月 9 日であり、IKONOS 衛星写真と比べておよそ 2 年半の期間が開いている。航空写真は、スキャナーを用いて 300dpi でスキャンを行い、デジタル画像とした。画像は RGB のカラー画像である。画像は幾何補正されていなかったため、三次元射影変換で幾何補正を試みた。しかし画像一枚を補正させるのに最低 7 つの地上基準点が必要であり、画像が無数に存在することから、GPS を用いて地上基準点を幾何補正させることは困難であった。そのため今回は市販のソフトウェアを用いた。幾何補正をするために用いた地上基準点は、GPS で取得した地上基準点を用いて幾何補正された IKONOS 衛星画像を使用した。補正後の分解能は 0.5m と設定した。図 6.1 は補正前の航空写真であり、図 6.2 は補正後のものである。



図 6.1 幾何補正前



図 6.2 幾何補正後

6.2 イメージマッチングの方法

画像をマッチングさせる方法には，SSDA 法 (Sequential Similarity Detection Algorithm) や，面積相関法などがある．以下にその方法について述べる．

・SSDA 法

SSDA 法は残差逐次検定法と呼ばれ，入力画像とテンプレート画像の濃度残差が最小となる画像の位置を求める手法である．この手法の特徴は演算処理が加減算のみであるため高速処理である．さらに残差に対してある閾値を与えておき，残差がその閾値以上になったら，その点に関する処理を打ち切れるという点がある．SSDA 法は式 6.1 で表される．

$$S_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n |f(u,v) - t(u,v)| \quad (6.1)$$

ここで，

S_{ij} : 画素位置(i,j)における残差

$f(u,v)$: 入力画像のテンプレート位置

$t(u,v)$: テンプレート画像のテンプレート位置

$m \times l$: テンプレート画像サイズ

・面積相関法

面積相関法は，入力画像とテンプレート画像との相関値を算出して，最も相関の高かったところを対応点とする手法である．SSDA 法と比べると，演算時間がかかり，処理の打ち切りが出来ない欠点を持つが，得られる解は安定している．面積相関法は式 6.2 で表される．

$$C_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n \frac{(f(u,v) - f_{ave})(t(u,v) - t_{ave})}{\sqrt{f_s t_s}} \quad (6.2)$$

ここで，

$$f_s = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (f(u,v) - f_{ave})^2$$

$$t_s = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^n (t(u,v) - t_{ave})^2$$

C_{ij} : 画素位置(i,j)における相関係数

f_{ave} : 入力画像のテンプレートの輝度平均

t_{ave} : 基準画像のテンプレートの輝度平均

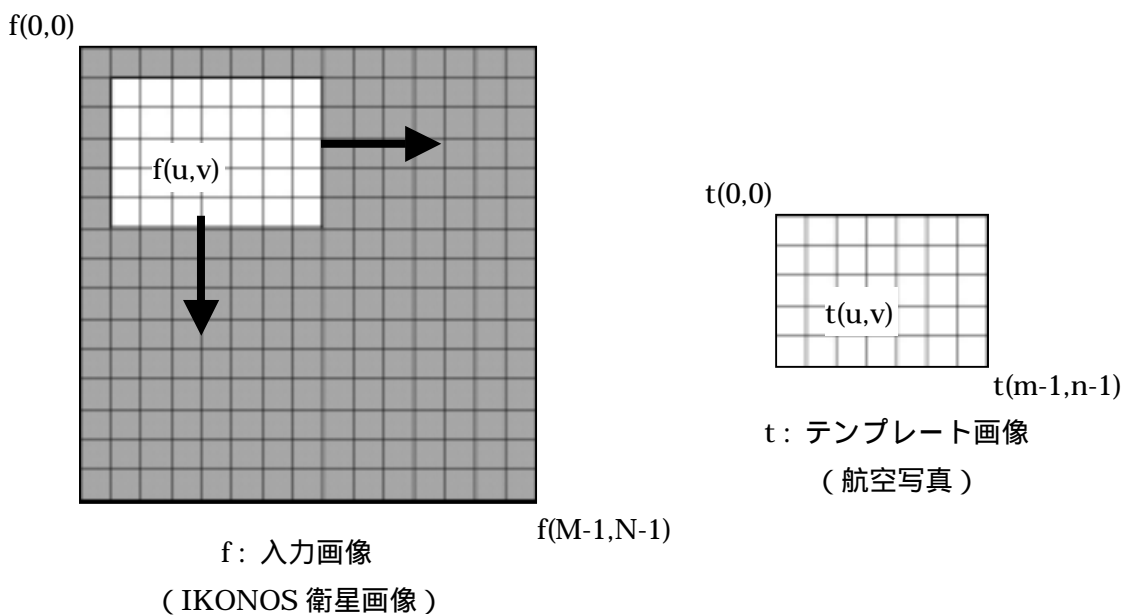


図 6.3 イメージマッチングに用いる入力画像とテンプレート画像

今回行ったイメージマッチングでは，入力画像には IKONOS 衛星画像を，テンプレート画像には航空写真を用いた．マッチングにおいては，走査領域をあらかじめ限定して行ったので，高速処理の SSDA 法ではなく，相関係数の値が安定している面積相関法を用いた．航空写真の分解能は 0.5m，IKONOS 衛星画像は 1m のものを使用しており，航空写真と IKONOS 衛星画像の 1 画素の大きさは対応していない．そのため航空写真の 1 画素を IKONOS 衛星画像の 4 画素分とし，4 画素の輝度値を平均したものを航空写真の 1 画素に対応させてイメージマッチングを試みた．相関が最も高かった場合は，テンプレート画像の左上に対応する IKONOS 衛星画像の座標を算出させた．マッチング結果は，この画像座標を用いて，目視でマッチングしているかを判断した．



図 6.4 IKONOS 衛星画像
(分解能 1m)



図 6.5 航空写真
(分解能 0.5m)

6.3 使用したテンプレート画像

テンプレート画像は，高分解能衛星画像と航空写真で容易に識別が出来，輝度変化がある地物を含んだ画像を選定した．今回は，河川に架かる大きな橋，小さな水路や小川にかかる小さな橋，T字路・Y字路・Sカーブの道路，プール，道路の白い停止線，屋根の文字を選んだ．表 6.1 はテンプレート画像（航空写真）と入力画像（IKONOS 衛星画像）の画像サイズをピクセルで表している．図 6.6～図 6.13 はイメージマッチングに用いたテンプレート画像と入力画像である．

表 6.1 イメージマッチングに用いた画像サイズ

地物	IKONOS衛星画像 (pixel)		航空写真 (pixel)	
	幅(W)	高さ(H)	幅(W)	高さ(H)
大きな橋	58	123	52	122
小さな橋	24	22	22	18
T字路道路	35	32	22	14
Y字路道路	30	30	28	26
S字カーブ道路	60	53	36	38
プール	70	60	54	34
道路の停止線	19	17	16	16
屋根の文字	42	34	34	30

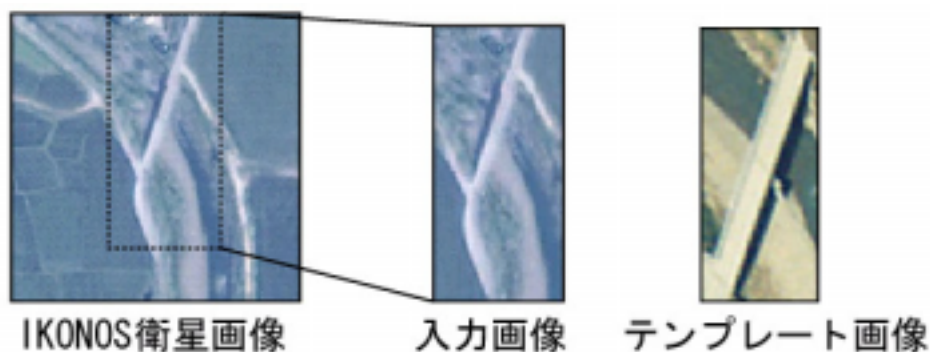


図 6.6 イメージマッチング画像（大きな橋）

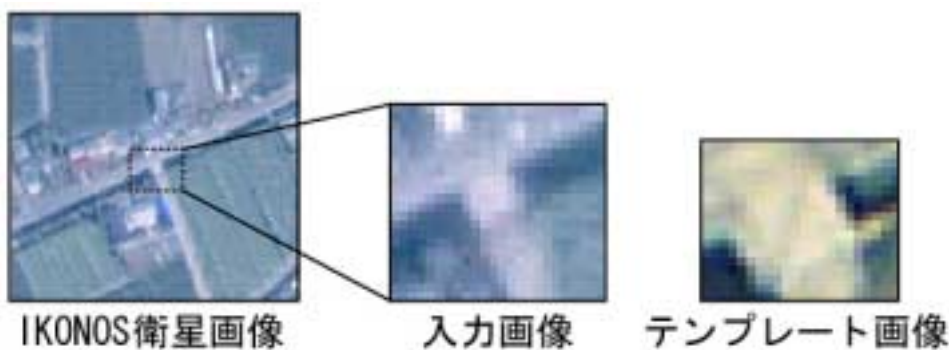


図 6.7 イメージマッチング画像（小さな橋）

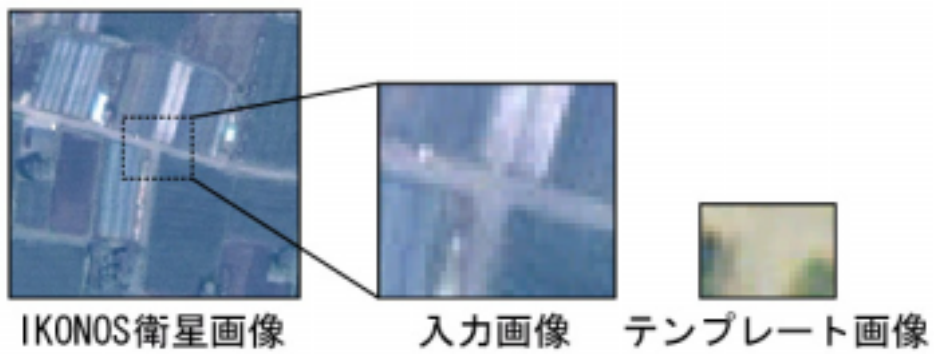


図 6.8 イメージマッチング画像 (T字路道路)

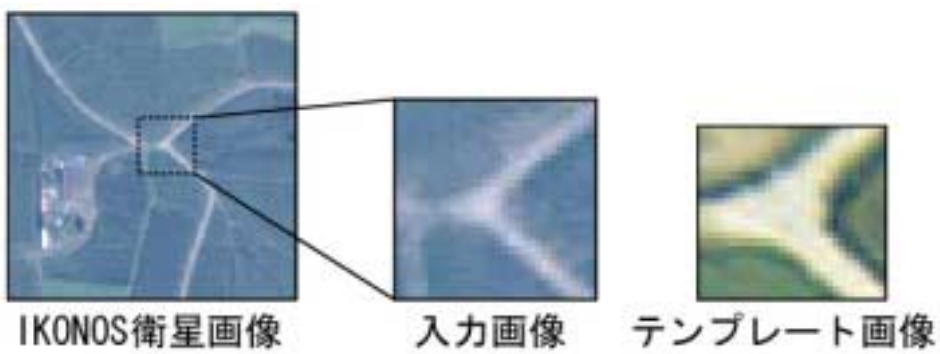


図 6.9 イメージマッチング画像 (Y字路道路)

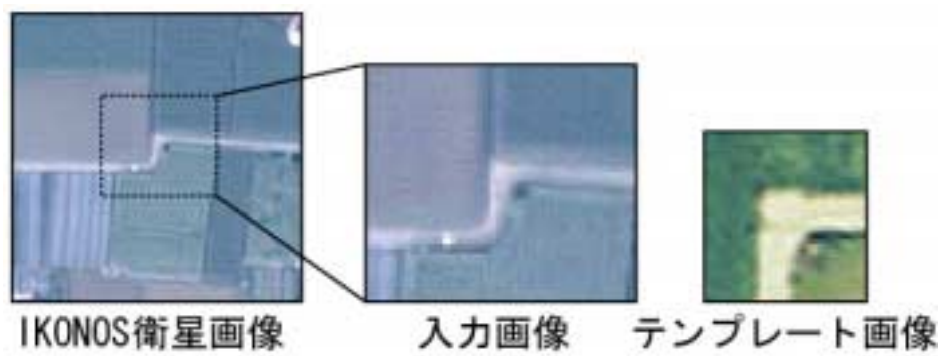


図 6.10 イメージマッチング画像 (S字カーブ道路)

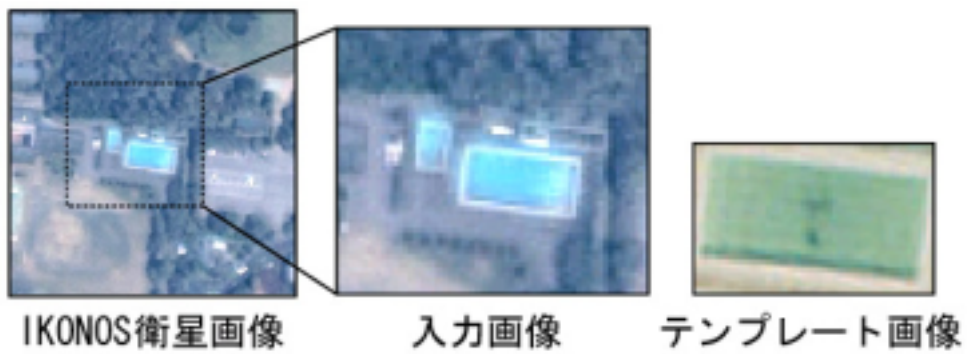


図 6.11 イメージマッチング画像 (プール)

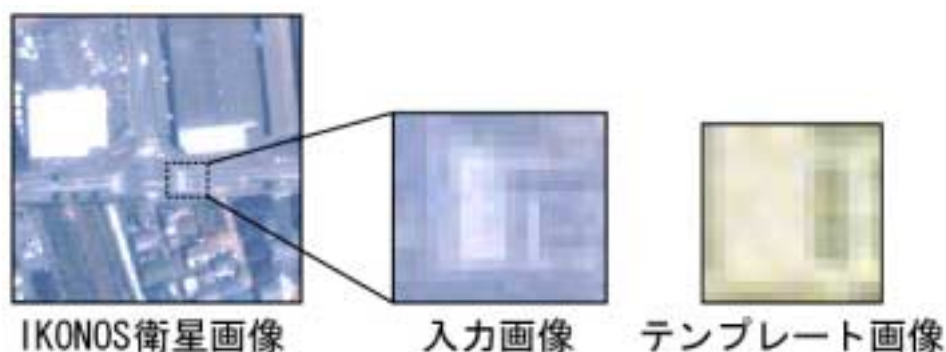


図 6.12 イメージマッチング画像（道路の停止線）

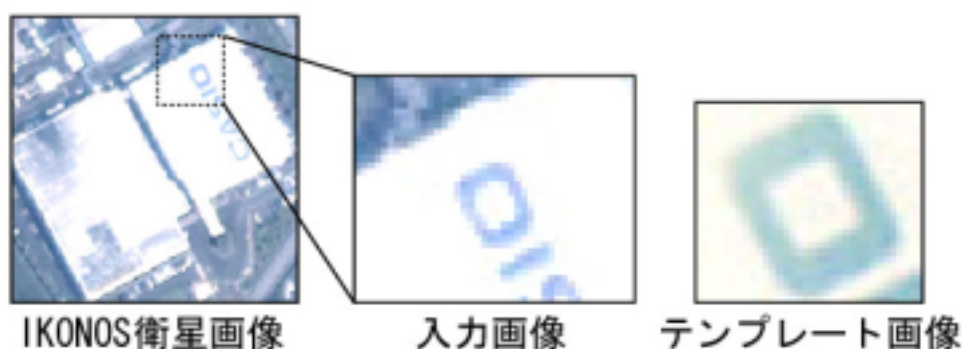


図 6.13 イメージマッチング画像（屋根の文字）

6.4 結果

表 6.2 は、イメージマッチングに使用するテンプレート画像の有効性の結果を表している。結果は、イメージマッチングを行った際に計算された画像座標を元に、目視でマッチングしているかどうか確認した。結果は“ Good ”、“ Fair ”、“ Poor ”で示した。“ Good ”はマッチングが可能なもの、“ Fair ”は相関が低く、また目視では確認しにくいもの、“ Poor ”はマッチングが不可能だったものとした。

河川に架かる大きな橋は、衛星画像上に橋の影が写っており、また川砂利と橋と道路の色が近いことから、橋のたもとが明確ではなかった。そのためマッチングが困難であった。小さな水路などに架かる小さな橋では、橋の影があまり無く、橋の位置も明確であったため、相関係数が高く、マッチングが可能であった。T字路・Y字路・S字カーブの道路は全てマッチング出来た。しかしながら、T字路に比べY字路・S字カーブの道路の相関係数が低かった。プールは、相関係数が低く全くマッチング出来なかった。道路の停止線は衛星画像、航空写真ともあまり明瞭に写っていなかったため、マッチングしづらく、また目視で判断することも難しかった。屋根の文字はRGBのBの相関が低かったが、目視で判断してマッチングしていることを確認した。

表 6.2 イメージマッチングに使用するテンプレート画像の有効性結果

地物	相関係数				コメント	結果
	R + G + B	R	G	B		
大きな橋	1.5555	0.4923	0.4934	0.5698	衛星画像は橋のたもとが鮮明でなく、航空写真は影が存在した。そのためマッチングしにくかった。	Fair
小さな橋	2.5794	0.8659	0.8487	0.8649	橋の位置が明確で、影の影響を受けなかった。	Good
T字路道路	2.5356	0.8009	0.8422	0.8924	道路の形が明確で、マッチングしやすかった。	Good
Y字路道路	2.2985	0.7383	0.7751	0.7852	マッチングが容易だった。しかし衛星画像と航空写真の植生の量の違いと形が原因で、T字路道路より相関が落ちたと考えられる。	Good
S字カーブ道路	2.2548	0.6994	0.7664	0.7890	S字カーブもマッチングが可能であった。しかし今回も衛星画像と航空写真の植生の量の違いと形が原因で、T字路道路より相関が落ちたと思われる。	Good
プール	1.2388	0.4087	0.4213	0.4088	衛星画像のプールの水面と衛星画像のプールの水面の反射が違っていたため、マッチングできなかった。	Poor
道路の停止線	2.0206	0.6636	0.6641	0.6929	航空写真、衛星画像とも停止線が明確ではなかった。	Fair
屋根の文字	1.9936	0.8624	0.8260	0.3052	屋根に描かれている大きな文字はマッチング可能であった。	Good

6.5 考察

イメージマッチングに使用するテンプレート画像の有効性の結果から，小さな橋，T 字路・Y 字路・S 字カーブの道路，屋根の文字はイメージマッチングに用いるテンプレート画像として利用可能であることが判明した．道路の Y 字路・S 字カーブが T 字路よりも相関が低かった理由には，道路の形が T 字路よりも複雑であったことが考えられる．また IKONOS 衛星画像が撮影された季節は 6 月，航空写真が撮影されたのは 10 月ということから，季節による植生の量が二つの画像で違っていたため相関係数に違いが表れた．プールがまったくマッチングしなかった理由には，衛星画像と航空写真のプールの水面の反射が違っていたためマッチングしなかったと推測できる．プールは今回の対象範囲の中にもいくつか存在しており，同じようにマッチングさせてみた．しかしどの場合もマッチング出来なかった．テンプレートの大きさも変えてみたが，結果は同じであった．そのためプールが写っているテンプレート画像は，イメージマッチングには利用できないことが分かった．

通常，テンプレート画像はオルソ画像から作成しなければならない．本論文では，オルソ航空写真を作成することが出来なかった．そのため，もしオルソ航空写真を作成することが出来れば，今回選定したテンプレート画像を用いて GPS よりも用意に地上基準点を取得し，幾何補正を行うことが可能となるはずである．

7 結論

本論文の目的は、高分解能衛星画像の幾何補正において、地上基準点の取得方法の評価を行うことであった。今回使用した方法は以下の3つであった。それぞれの方法についての結論を、そして最後に本論文の結論を述べる。

- 縮尺 1:2500 から取得した地上基準点

縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点を用いて 3 次元アフィン変換を適応させたところ、平均二乗誤差は検証点で 1m を大きく上回る結果となった。特に誤差の大きかった検証点付近の地図を幾何補正された IKONOS 衛星画像にオーバーレイさせると、地図が北方向に約 9m ずれていることが判明した。また 9m ずれている検証点を除いて幾何補正を行っても検証点の平均二乗誤差は 1m 以上となった。従って縮尺 1:2500 の地図は地図自体の精度悪く、品質管理が不十分であると分かった。

- GPS から取得した地上基準点

一点約 20 分間の高速静止測量を用いて GPS から地上基準点を取得し 3 次元アフィン変換を用いて幾何補正を行った。その結果、平均二乗誤差は基準点・検証点とも 1m 以内の誤差に落ち着くことが出来た。従って、GPS から取得した地上基準点は、高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能であると判断出来た。

- イメージマッチングによる利用可能なテンプレート画像の検討

分解能 0.5m の航空写真と分解能 1m の IKONOS 衛星画像を用いてイメージマッチングを行った。テンプレート画像は、河川にかかる大きな橋、小さな橋、T 字路・Y 字路・S 字カーブの道路、プール、道路の停止線、屋根の文字が撮影されている画像を選んだ。結果は、小さな橋、T 字路・Y 字路・S 字カーブの道路、屋根の文字がテンプレート画像として利用可能であると判断出来た。そのため今回選定した地物を含むテンプレート画像を用いてイメージマッチングを行い、地上基準点を取得することによって、幾何補正を行うことが出来る。

以上により、GPS を用いて取得した地上基準点は高分解能衛星画像の幾何補正に十分適応可能であると判断出来た。しかしながら GPS の使用は、多くの時間と労力が必要となるため、効率的ではない。そのため時間と労力を必要とする GPS で地上基準点を取得するよりも、今回選定したテンプレート画像を用いて地上基準点を取得する方が効率的であると言える。今回は航空写真からオルソ画像を作成することは出来なかった。しかし現在、国土交通省や通商産業省など各省庁が計画している GIS 整備・普及実施計画や国土空間データ基盤整備等実施計画などにより、デジタルオルソ画像の作成・公開・提供が進められて

いる．そのため全国のオルソ画像の利用が普及し始めると，効率良く地上基準点を取得でき，幾何補正を行えるはずである．

謝辞

本論文の作成にあたり，多くの方からのご指導を受け，また実際にご足労を頂いたことに感謝の意を表します．

高知県土佐山田町建設都計課の中山泰弘様には，土佐山田町と南国市が撮影された航空写真を貸していただきました．高知県企画振興部情報企画課様には，ベクターに変換された縮尺 1:2500 を提供していただきました．株式会社ジツタの山内様には，GPS の不調があった際に，的確なアドバイスをして頂きました．社会システム工学コースの Jong Hyeok JEONG さん，吉野敦雄君には，プログラミングの知識があまり無かった私の相談に乗ってくださり，力を貸していただきました．社会システム工学科中越絵里子さん，社会システム工学コース菊池有紀君，光岡操君，野村努君には，GPS を用いた基準点観測で大いに協力をいただきました．そして父，母，叔母，叔父は，私を影ながら励まして下さいました．皆様方本当にありがとうございます．

最後に，貴重な意見を授かりました竹田史章教授，高木研究室に配属が決まってからの約 4 年間，沢山の貴重なご指導を頂き，また学会発表やモンゴルでの現地観測など様々な活動の場を与えてくださった高木方隆助教授に感謝の意を表します．

参考文献

- 1) C.Vincent Tao , Yong Hu: 3D Reconstruction methods Based on the Rational Function Model , Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , pp.705 ~ pp.714(July 2002)
- 2) Yong Hu , Vincent Tao: Updating Solutions of the Rational Function Model Using Additional Control Information , Photogrammetric Engineering & Remote Sensing , pp.715 ~ pp.723(July 2002)
- 3) Iam Dowman , John T. Dolloff: An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution , International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B3) , pp.254 ~ pp.266(2000)
- 4) 熊谷潤・趙卉菁・中川雅史・柴崎亮介：高分解能衛星画像からの道路抽出，平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.155 ~ pp.158(2002)
- 5) Jong Hyeok JEONG , Masataka TAKAGI : Updating Positional Accuracy of Bridges Using IKONOS Image ,平成 14 年度年次学術講演会発表論文集 ,日本写真測量学会 ,pp.159 ~ pp.162(2002)
- 6) Jong Hyeok JEONG , Masataka TAKAGI : Extraction of Bridge Positions from IKONOS Images for Accuracy Control of Bridge Database , The 23ed Asian Conference on Remote Sensing November 25-29 2002
- 7) 榊原淳・望月貫一郎・原慶太郎：植生指標を用いた生息地間のコリドー抽出手法の検討 - 高分解能衛星画像を用いた解析 - 平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.281 ~ pp.284(2002)
- 8) 河邑眞・辻野和彦・辻子裕二：高分解能衛星画像を用いた陰影部を含む土砂災害域の検出，写真測量とリモートセンシング 5/2002 vol.41 no.5 , pp.20 ~ pp.28(2002)
- 9) 廣瀬葉子・虫明成生・赤松幸生：高分解能衛星を用いた不浸透域の抽出に関する検討，平成 14 年度秋季学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.147 ~ pp.148(2002)

- 10) 越智士郎・石原伸顕・安岡善大：IKONOS 画像による不法廃棄物の抽出，平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.163 ~ pp.164(2002)
- 11) 門田貴江，中越絵里子，高木方隆：三次元 affine 変換による IKONOS 画像の幾何補正，平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.165 ~ pp.168(2002)
- 12) 山川毅，Clive S. Fraser，Harry B. Hanley: 高解像度 IKONOS 衛星画像を用いた精密 3 次元計測，写真測量とリモートセンシング 2/2002 vol.41 no.2，pp.36 ~ pp.43(2002)
- 13) 山川毅，Clive Fraser，Harry Hanley: 代数学標定モデルによる高分解能 IKONOS 衛星画像の標定，平成 14 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.201 ~ pp.204(2002)
- 14) 山川毅，小野徹，安部進: 高分解能衛星画像の幾何学的解析のためのシミュレーション，平成 13 年度年次学術講演会発表論文集，日本写真測量学会，pp.219 ~ pp.222(2001)
- 15) Paul Dare，Nicki Pendlebury，Clive Fraser：Digital Orthomosaics as a Source of Control for Geometrically Correcting High Resolution Satellite Imagery，The 23ed Asian Conference on Remote Sensing November 25-29 2002
- 16) Takae KADOTA，Masataka TAKAGI：Acquisition Method of Ground Control Points for High Resolution Satellite Imagery，The 23ed Asian Conference on Remote Sensing November 25-29 2002
- 17) 清水則一ほか: 地すべり監視における GPS 変位モニタリングシステムの適用，土と基礎 2，地盤工学会，pp.25 ~ pp.27(2000)
- 18) 及川典生・河合剛匡: 電子基準点を利用した地すべり移動量計測，測量 4，日本測量協会，pp.21 ~ pp.26(2001)
- 19) 中里裕臣，農業土木における GPS 利用技術(その 4) GPS を用いた地すべり調査，農業土木学会誌第七十巻，農業土木学会，pp.47 ~ pp.53(2002)
- 20) Jeffrey Barrette，Peter August，Francis Golet，2000. :Accuracy Assessment of Wetland Boungary Delineation Using Aerial Photography and Digital Orthophotography，PE&RS，pp.409 ~ pp.416

- 21) Erik Nasset :Effects of Differential Single-and Dual-Frequency GPS and GLONASS Observations on Point Accuracy under Forest Canopies , PE&RS , pp.1021 ~ pp.1026(2001)
- 22) Mahendra Kumar , Ofelia T Castro :Practical Aspects of IKONOS Imagery for Mapping ,
The 22ed Asian Conference on Remote Sensing 5-9 November 2001 , Singapore (c) 2001 CRISP , SISV , AARS , pp.1181 ~ pp.1185
- 23) Philip Cheng , Thierry Toutin: Orthorectification and DEM Generation from High Resolution Satellite DATA , The 22ed Asian Conference on Remote Sensing 5-9 November 2001 , Singapore (c) 2001 CRISP , SISV , AARS , pp.1203 ~ pp.1208
- 24) Seung-Ran Park , Taejung Kim :Semi-Automatic Road Extraction Algorithm from IKONOS Image Using Template Matting , The 22ed Asian Conference on Remote Sensing 5-9 November 2001 ,Singapore (c) 2001 CRISP ,SISV ,AARS ,pp.1209 ~ pp.1213
- 25) Cheng-Yi LIN , Chi-Farn CHEN: Automated Extraction of Control Points for High Spatial Resolution Satellite Image , The 22ed Asian Conference on Remote Sensing 5-9 November 2001 , Singapore (c) 2001 CRISP , SISV , AARS , pp.1224 ~ pp.1229
- 26) Jun KUMAG ,Huijing ZHAO ,Masafumi NAKAGAWA ,Ryosuke SHIBASAKI :Road Extraction from High-Resolution Commercial Satellite DataThe 22ed Asian Conference on Remote Sensing 5-9 November 2001 , Singapore (c) 2001 CRISP , SISV , AARS , pp.1322 ~ pp.1325
- 27) Taejung KIM , Seung-ran PARK , Suo Jeong Kyung-Ok KIM : Semi Automatic Tracking of Road Centerlines from High Resolution Remote Sensing Data , The 23ed Asian Conference on Remote Sensing November 25-29 2002
- 28) 「測量」編集委員会・編：高分解能衛星の時代，測量 2000 March , pp.13 ~ pp.20 , 社団法人日本測量協会
- 29) 村井俊治：空間情報工学，社団法人日本測量協会，2000
- 30) 動体計測研究会編：イメージセンシング，社団法人日本測量協会，1997

31) JARS , リモートセンシングハンドブック , 日本リモートセンシング研究会 , 1997

32) 社団法人日本写真測量学会・解析写真測量委員会 : 解析写真測量改訂版 , 社団法人日本写真測量学会 , 1988

33) Space Imaging(2002) , <http://spaceimaging.com> , [Accessed 19th December 2002]

付録

A 現地観測

A.1 縮尺 1:2500 の地図から取得した地上基準点データベース

本論文で使用した基準点には 印を付けている .

表 A.1 縮尺 1:2500 の地図で取得した地上基準点

GCP	X	Y	Z	U	V	基準点
1	21382.90	68101.58	61.00	8869.00	2350.00	
2	15840.15	60013.01	4.00	3316.00	10439.00	○
3	13897.63	67776.93	27.00	1380.00	2671.00	○
4	16354.22	65524.32	29.00	3837.00	4925.00	
5	14877.35	62889.01	12.00	2356.00	7562.00	○
6	14019.35	63516.88	13.00	1500.00	6935.00	
7	13784.15	58998.23	4.00	1262.00	11453.00	
8	18417.66	60992.56	12.00	5892.00	9460.00	
9	21497.16	59808.83	4.00	8968.00	10646.00	○
10	21437.89	62724.83	8.00	8908.00	7728.00	○
11	21865.78	60580.17	3.00	9337.00	9876.00	
12	19201.28	64055.22	34.00	6678.00	6397.00	
13	16979.11	66259.46	37.00	4461.00	4191.00	
14	18906.11	66607.15	34.00	6386.00	3844.00	
15	20813.51	68671.74	63.00	8302.00	1777.00	
16	20360.50	69358.81	62.00	7848.00	1091.00	○
17	16060.64	63446.95	17.00	3538.00	7003.00	
18	15369.27	63944.04	14.00	2849.00	6506.00	
19	15605.51	64456.79	17.00	3084.00	5993.00	
20	15138.08	66069.80	26.00	2619.00	4391.00	
21	14822.91	65512.74	23.00	2304.00	4937.00	
22	14292.21	59682.61	4.00	1772.00	10770.00	
23	16812.31	61471.01	10.00	4290.00	8981.00	
24	15435.46	61617.25	9.00	2913.00	8834.00	
25	13840.04	61670.55	7.00	1317.00	8782.00	
26	17035.32	59138.06	4.00	4509.00	11315.00	
27	14156.38	65592.21	20.00	1638.00	4859.00	
28	17038.48	64730.46	22.00	4517.00	5722.00	○
29	15703.52	67701.15	25.00	3185.00	2751.00	
30	20487.42	60192.12	4.00	7961.00	10261.00	
31	19819.46	61730.75	13.00	7294.00	8722.00	
32	18102.75	62444.64	22.00	5581.00	8005.00	
33	19798.73	59745.36	4.00	7272.00	10706.00	
34	21371.01	61315.48	4.00	8842.00	9136.00	
35	22893.54	63815.27	23.00	10369.00	6636.00	
36	22474.49	66678.77	111.00	9972.00	3769.00	○
37	18086.90	67897.43	49.00	5572.00	2553.00	
38	16106.39	66064.90	32.00	3586.00	4396.00	

A.2 GPS を用いて取得した地上基準点データベース

本論文で使用した基準点には ○印を付けている。

表 A.2 GPS を用いて取得した地上基準点

GCP	X	Y	Z	u	v	基準点
1	20973.89	68748.00	65.26	8461.50	1703.00	
2	20615.70	68731.13	63.34	8105.00	1720.00	○
3	20533.87	68178.15	57.67	8022.00	2273.00	
4	18012.28	69031.27	170.87	5528.00	1415.00	
5	19667.53	67007.82	35.22	7148.00	3444.00	
6	17461.04	67218.17	43.14	4946.00	3232.50	
7	16658.22	66379.14	35.39	4140.00	4072.50	
8	16314.63	66063.32	33.00	3797.00	4388.50	○
9	16057.41	67210.42	33.12	3540.00	3241.00	
10	13967.68	69091.21	146.08	1481.00	1355.00	
11	13458.61	67995.28	33.70	945.00	2455.50	○
12	14166.36	67090.17	18.69	1648.50	3361.00	
13	14838.57	66384.01	24.89	2320.50	4067.00	
14	15742.15	65404.71	28.59	3224.00	5047.00	
15	18095.79	65465.38	25.76	5575.50	4985.50	
16	17075.39	64908.35	22.86	4554.00	5544.00	
17	16077.44	64336.20	18.05	3556.00	6116.00	
18	15416.22	64104.23	16.12	2894.50	6348.00	○
19	14763.82	64183.60	14.30	2242.00	6268.50	
20	16182.83	63430.32	16.78	3659.00	7022.00	
22	15117.77	62867.64	12.89	2595.00	7585.00	
24	13087.91	62983.34	6.59	567.00	7469.00	
25	14759.62	61656.57	9.39	2237.00	8796.00	
26	14328.62	61407.40	8.37	1806.50	9045.00	
27	15956.71	60788.71	6.47	3432.00	9663.00	
28	14462.85	59659.72	3.28	1938.00	10792.00	○
29	13855.40	59500.22	3.20	1332.50	10952.50	
30	16314.64	59153.69	1.82	3788.50	11299.00	
31	16955.73	59054.92	4.73	4430.00	11398.00	
32	20173.48	59922.09	1.73	7645.50	10530.50	○
33	18274.84	60391.74	8.59	5750.00	10061.00	
34	18785.95	61080.95	11.62	6261.00	9372.00	
37	22204.21	61770.53	25.40	9682.00	8681.50	
38	22730.51	63011.70	18.11	10206.00	7440.00	
39	19461.57	62795.46	59.46	6948.00	7656.00	○
40	20002.47	63389.44	247.05	7538.00	7054.00	
41	18757.49	63684.41	29.66	6237.00	6767.50	
42	22752.67	66729.20	144.68	10262.00	3718.00	○
43	17492.14	62491.34	20.51	4971.50	7962.50	
44	16479.23	62160.95	11.91	3955.50	8292.50	
45	21011.37	61894.15	6.44	8483.50	8559.50	
46	21380.43	60175.66	2.93	8851.50	10277.50	
47	22752.83	60407.56	2.69	10223.50	10046.00	

B 学会発表論文

B.1 三次元アフィン変換による IKONOS 衛星画像の幾何補正

門田貴江, 中越絵里子, 高木方隆
平成 14 年度年次学術講演会発表論文集
2002

B.2 ACQUISITION METHOD OF GROUND CONTROL POINTS FOR HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

Takae KADOTA, Masataka TAKAGI
The 23ed Asian Conference on Remote Sensing November 25-29
2002

三次元 affine 変換による IKONOS 画像の幾何補正

高知工科大学 ○門田 貴江
中越絵里子
高木 方隆

1. はじめに

近年、空間分解能 1m 未満という高分解能衛星画像は、既存地図の更新、土地利用の把握や国土・都市開発計画への適応、山地災害などの被災状況の把握や監視等活発に利用されている。しかし、高分解能衛星画像の幾何補正については、基準点の取得に課題が残されている。その高い空間分解能ゆえに、画像での基準点とそれに対応する既存地図の点の抽出が困難なことである。基準点の地上座標の取得に、縮尺 500 分の 1 の既存地図を用いることは容易であるが、道路の位置等は曖昧な部分が多くて、画像座標を特定出来ない場合が多い。また衛星画像は中心投影されているため、高さの異なる地物は既存地図とずれており、対応が困難である。したがって GPS 等を用いて衛星画像に対応する地物の地上座標を取得することは重要である。

従来、直下視以外の衛星画像を幾何補正する場合は、中心投影の幾何学に従い、三次元射影変換などの式で変換されてきた。しかし約 11km×11km の比較的狭い範囲で、高度 680km から撮影された高分解能 IKONOS 衛星画像は線形変換である三次元 affine 変換でも補正が適応可能であると考えられる。三次元 affine 変換が適応出来れば、射影変換よりも少ない基準点で幾何補正が行え、基準点データの整備が容易になる。

2. 目的

本研究は、まず始めに基準点として利用可能な地物の検討を行い、安全に測れ、衛星画像と現地観測で容易に発見出来る基準点を選定する。地上座標は GPS を用いて精密な座標を取得し、様々な高分解能衛星画像に対応可能な基準点のデータベースを作成する。そして幾何補正において三次元 affine 変換を試み、三次元射影変換の結果と比較しながら、精度検証を行う。

3. 使用データと範囲

使用した画像データは、地球の丸みによる歪みを補正したデジタルジオ画像を用いた(表 1)。撮影範囲は高知県香美郡土佐山田町を含んだ約 11km×11km であり、市街地、森林、河川、田畑、港などが存在している。特徴としては、高層ビルは無く、農地が多いことが挙げられる。

4. 地物から基準点の選定

衛星画像で識別できる地物は数多く存在するが、実際に計測可能な基準点の選定は安易ではない。例えば道路のセンターラインは車が通るため危険で、観測は困難である。そこで画像から識別しやすく、現地観測においても安全に計測出来、かつ容易に発見出来る地物を選定した。表 2 にその候補を示し、選定結果を○△×で表した。○の地物は基準点および検証点に、△は検証点のみに、×はどちらにも使用しなかった。

表 1 IKONOS 画像の仕様

項目	詳細
Sensor	IKONOS-2
Cross Scan	0.86 m
Along Scan	0.84 m
Scan Direction	0°
Nominal Collection Azimuth	263.9600°
Nominal Collection Elevation	76.68608°
Sun Angle Azimuth	114.7576°
Sun Angle Elevation	69.25115°
Acquisition Date/Tim	2000年06月15日 10:43
撮影エリア	高知県 土佐山田町
面積(km ²)	134.848
製品レベル	デジタルジオ画像
センサタイプ	パンシャープン(4バンド)
地図投影法	Transverse Mercator
楕円体	Bessel
datum	Tokyo (4)

表 2 基準点候補

地物	コメント	選定結果
河川に架かる橋	車や歩行者が通るため危険でかつ迷惑	×
公園の遊具	画像での判別が不可能	×
田畑のあぜ道	同じような田畑が密集する場所は分かりづらく、道が変化している場合もある	△
田畑の水路に架かる橋	通行の邪魔にならず、観測が容易に行えた	○
駐車場の白線	店の駐車場の場合は、営業の邪魔にならないように注意が必要	○
道路のセンターライン	車が通るため危険、観測は困難	×
学校のプール	事前に許可が必要となるため非効率	×
ヘリポート	土佐山田町近辺には存在しなかった	×

図 1 は、基準点として選定した地物の選定場所を表している。駐車場の白線では、駐車スペースの四隅のいずれかを選んだ。田畑などの小さな水路に架かる橋では、橋のたもとの中心部分に基準点を設けた。なお駐車場においては、観測したい場所に駐車をしていたり、営業中の店舗の駐車場で観測を行う場合、邪魔になることも多い。そのため安全で、かつ容易に観測することの出来る、田畑などの水路に架かる橋の方が、より観測しやすいと言える。しかし、農地の少ない大都市などの地域になれば、小さな水路もあまり存在しなくなることから、基準点候補の追加検討を行う必要があるだろう。

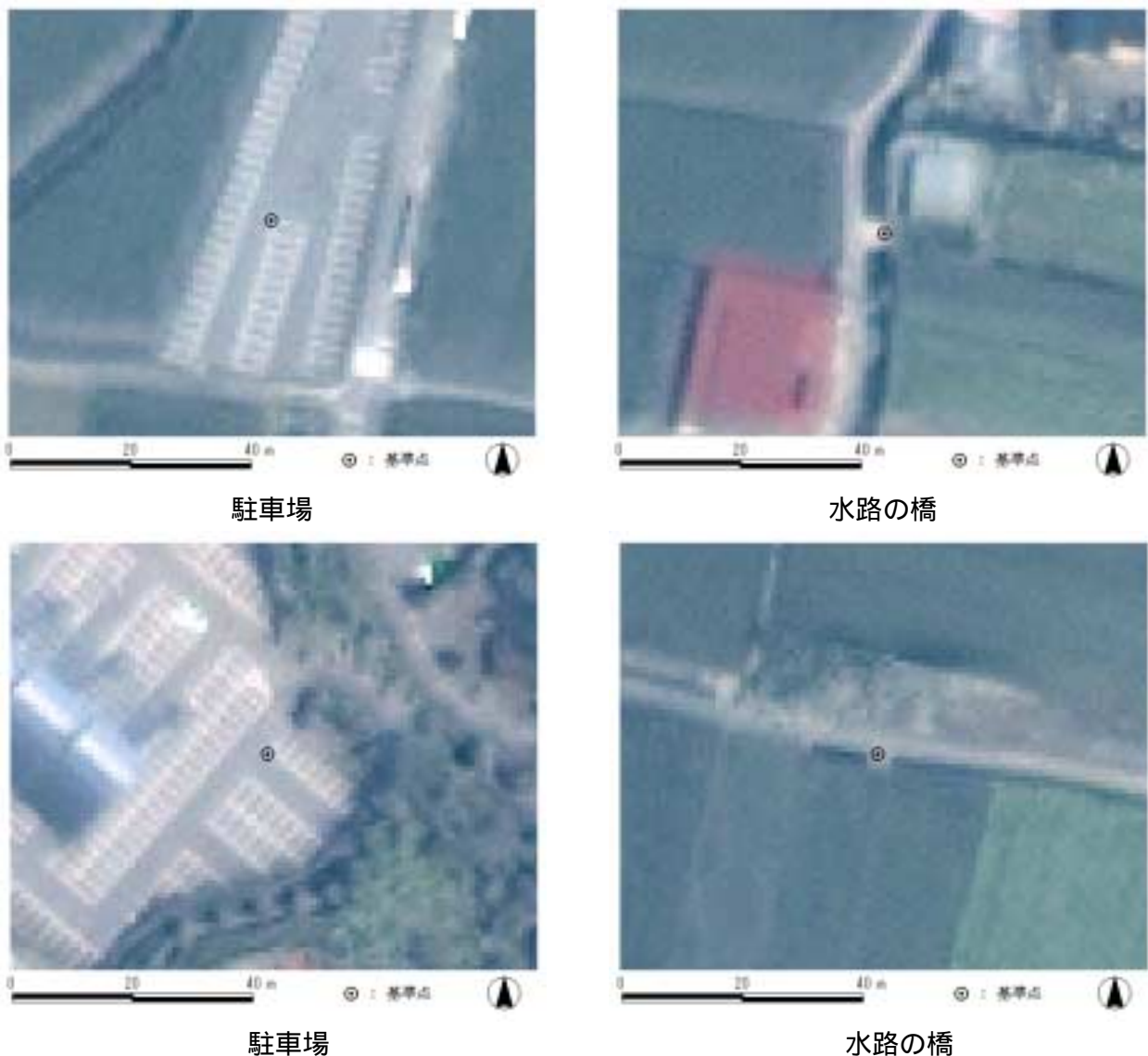


図 1 基準点の測定場所

5. 基準点観測

基準点座標の取得は、GPS の高速スタティック測量を用いた。取得した座標系は、衛星画像と同じ平面直角座標系の第IV系である。使用した GPS 受信機は TOPCON 製 GP-SX1 である(表 3)。記録間隔は 30 秒に一回であり、一点につき約 20 分間観測を行った。基準局は高知工科大学の本館屋上に設置した。

この観測での最大基線長は約 11.26km となり、GPS 受信機の精度は水平方向で、約 3cm 以内の誤差となった。現地では、基準点となる橋のたもとの中心部をメジャーを用いて計測した。この場合の誤差は少なくとも 5cm 以内と見込んでいる。今回は基準点として 20 点、検証点では 23 点取得し、総数 43 点となった。

なお、この観測の解析で、フロート解が二点出たが、その測点は検証点データとして用いた。基準点は画像上で均等な配置を試みた。しかし北東部に山間地域が存在することから、その地域での基準点取得が困難だった。そのため基準点の配置には若干の偏りがある(図 2)。

表 3 GPS 受信機の仕様

項目		仕様
メーカー		TOPCON
品名		GP-SX1
チャンネル数		12チャンネル並列処理
受信電波		L1 C/Aコード、搬送波
精度 (D: 基線長)	スタティック	水平 : 5mm + 1ppm × D (≤10km) 5mm + 2ppm × D (>10km) 高低 : 10mm + 2ppm × D
	キネマティック	20mm + 2ppm × D

6. 幾何補正

6-1 幾何補正手法

GPS で取得した地上座標 (x,y,z) と、それに対応する IKONOS 衛星画像座標 (u,v) から、三次元 affine 変換(1)を用いて、変換式の未知係数を最小二乗法で求めた。

- ・三次元 affine 変換

$$\begin{cases} u = a_1x + a_2y + a_3z + a_4 \\ v = b_1x + b_2y + b_3z + b_4 \end{cases} \text{----- (1)}$$

そして求めた係数と地上座標から、画像座標を算出し、元の値と差を取ることで平均二乗誤差を求めた。平均二乗誤差は基準点と検証点の両方について試みた。また三次元射影変換(2)についても同様の方法により平均二乗誤差を算出した。

- ・三次元射影変換

$$\begin{cases} u = \frac{a_1x + a_2y + a_3z + a_4}{a_9x + a_{10}y + a_{11}z + 1} \\ v = \frac{a_5x + a_6y + a_7z + a_8}{a_9x + a_{10}y + a_{11}z + 1} \end{cases} \text{----- (2)}$$

基準点数はいずれの変換式でも 20 点使用し、検証点は 23 点とした。

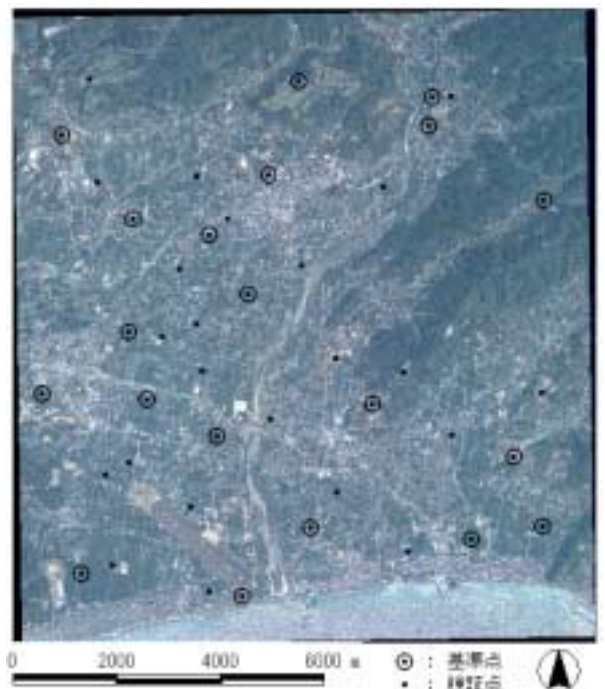


図 2 基準点と検証点の配置

6-2 補正結果

表4は、三次元 affine 変換、三次元射影変換の平均二乗誤差を示したものである。三次元 affine 変換は、基準点の場合、三次元射影変換よりも補正誤差が大きい。しかし検証点においては、若干ではあるが、三次元射影変換より誤差が小さくなっている。またどちらの変換式でも、uよりvの値の方が、誤差が少ないことが分かる。いずれにしても、三次元 affine 変換、三次元射影変換のどちらも、1m 以内の誤差に落ち着くことが出来た。

表4 幾何補正による平均二乗誤差

平均二乗誤差	三次元 affine 変換		三次元射影変換	
	u	v	u	v
基準点 (m)	0.7967	0.3401	0.4535	0.3143
検証点 (m)	0.8127	0.5138	0.9530	0.5551

7. 考察

今回、安全に測れ、現地観測と衛星画像で容易に発見出来る地上基準点を選定した。そして GPS を用いて座標を取得し、15cm 以内の誤差の基準点データベースを作成出来た。基準点データベースを使って、三次元射影変換と三次元 affine 変換を適応した結果、三次元 affine 変換は、三次元射影変換とほぼ同等の補正結果を得ることが出来ると判断された。したがって、IKONOS 衛星画像を用いて幾何補正する場合は、未知係数が多く、計算式も複雑となる三次元射影変換式を用いなくとも、三次元 affine 変換は、十分に適応することが可能であると言える。なお今回使用した IKONOS 画像はデジタルジオ画像である。その他に未補正の画像や、対象地域がセンサ直下よりも大きく離れるような画像においても検討する必要がある。

8. 今後の課題

本研究では、基準点として GPS を用いて取得した測点と、それに対応する点を IKONOS 衛星画像から取得し、幾何補正を行った。2001 年 10 月に打ちあがったクイックバード衛星の画像は、61cm の高分解能を持つ。そのため、より精度の高い画像座標の取得が課題となる。従って今後は GPS のキネマティック測量で取得した座標から、点のデータだけではなく、ラインやポリゴンを利用したテンプレートを利用し、より高精度な基準点データベースの作成を試みる。

9. 参考文献

- 1) 村井俊治, 空間情報工学, 社団法人日本測量協会, pp60-61
- 2) Mahendra Kumar, Ofelia T Castro, 2001. PRACTICAL ASPECTS OF IKONOS IMAGERY FOR MAPPING, The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, pp1181-1185
- 3) Philip Cheng, Thierry Toutin, 2001. ORTHORECTIFICATION AND DEM GENERATION FROM HIGH RESOLUTION SATELLITE DATA, The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, pp1203-1208

ACQUISITION METHOD OF GROUND CONTROL POINTS FOR HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGERY

Takae KADOTA, Masataka TAKAGI
Department of Infrastructure Systems Engineering
Kochi University of Technology
Tel: (81)-887-52-2409 Fax: (81)-887-52-2420
E-mail: 055138m@gs.kochi-tech.ac.jp
JAPAN

KEY WORDS: Ground Control Points, Geometric Correction, Image Matching, High Resolution

ABSTRACT:

As for geometric correction of high resolution satellite imagery, acquisition of ground control points (GCPs) is important. In this study, acquisition methods of GCPs were evaluated. In this study, IKONOS imagery was used as high resolution satellite imagery. Method of geometric correction was selected 3D affine transform. Firstly, 1:2500 map and fast static GPS surveying were used for acquisition of GCPs. Result showed GCPs acquired from the map did not have enough accuracy. On the other hand, GCPs acquired by GPS were able to be acquired less than 1m correction error, and it turns out that GPS had enough accuracy. Next, image matching was carried out using aerial photograph to acquire GCPs. In the image matching, correlation coefficients were calculated. As template image, small bridge, road shape and painting character were efficient for image matching. Therefore, if true ortho photography was prepared using the laser scanner or three lines sensor, it may become possible to carry out geometric correction.

1. INTRODUCTION

High resolution satellite imageries as less than 1m resolution are used in many fields. For example, updating existing map, land use mapping, urban planning, disaster monitoring, and so on. However acquisition of GCPs has some problems for geometric correction in high resolution satellite imagery. For acquisition of GCPs, map of scale 1:2500 might be easily. That map was published in every urban area in Japan. However, position of the road has fuzzy boundary which is sidewalk etc. Moreover, since satellite imagery is generated by central projection, corner of building on the ground is difficult to interpret. Therefore, extraction of GCPs from the map will be difficult.

2. OBJECTIVES

This study aim is evaluating the acquisition method of GCPs for geometric correction of high resolution satellite imagery using three methods as follows:

- GCPs were acquired from maps. Used maps were generated for urban planning, which is scale 1:2500. These maps are digitized vector data.
- GCPs were acquired by field surveying using GPS. As GPS surveying, fast static method with 1 cycle was applied. Survey period was about 20 minutes in each point, and record interval was every 30 seconds.
- Image matching was carried out using aerial photography. Acquisition date of used aerial photography is Oct 10, 1998.

3. HIGH RESOLUTION SATELLITE IMAGRY

In this study, IKONOS was used as high resolution satellite imagery (Table 1). It was the digital-geo image which was corrected distortion by the roundness of the earth. Test area is selected in Tosayamada, Kochi prefecture, JAPAN. Image area size is about 11km x 11km. There are several small town, deep forest, wide river, many farm lands, port, and so on. There is no skyscraper.

4. METHODOLOGY

Method of geometric correction was used 3D affine transform (Eq.1). 3D affine transform can be adapted for geometric correction of high resolution satellite imagery by Dowman ⁽¹⁾(I Dowman, 2000), Yamakawa ⁽³⁾(T Yamakawa, 2002), Kadota ⁽⁴⁾(T Kadota, 2002).

Table 1. Specification of Used IKONOS Imagery

Item	Detail
Cross Scan	0.86 m
Along Scan	0.84 m
Scan Direction	0°
Nominal Collection Azimuth	263.9600°
Nominal Collection Elevation	76.68608°
Acquisition Date/Time	2000/6/15
Photography Area	Tosayamada Kochi JAPAN
Area (km ²)	134.848
Product Level	Digital-Geo Image
Sensor Type	Pan-Sharpen (4 Bands)
Map Projective Method	Transverse Mercator
Ellipsoid	Bessel
Datum	Tokyo

$$\begin{aligned} u &= a_1x + a_2y + a_3z + a_4 \\ v &= b_1x + b_2y + b_3z + b_4 \end{aligned} \quad \text{----- (Eq.1)}$$

$\left[\begin{array}{l} u, v \quad : \text{Image Coordinates} \\ x, y, z \quad : \text{Ground Coordinates} \\ a_1-a_4, b_1-b_4 \quad : \text{Unknown Coefficient} \end{array} \right]$

At first, unknown coefficients were calculated by least squares method using ground coordinates (x,y,z) and IKONOS imagery coordinates (u,v). Accuracy of ground coordinates was evaluated. Then root mean square errors were calculated using image coordinates.

5. RESULT OF GCPs ACQUISITION FROM 1:2500 MAP

From the map, edge and center of the bridge and intersection of the road were selected as GCPs. Numbers of ground coordinates were 38 points, 8 points were used for GCPs and 30 points were used for verification points. Table 2 shows root mean square errors of map by 3D affine transform. The unit is displayed by meter. In the case of GCPs, root mean square errors showed less than 1m. On the other hand, in the case of verification points, root mean square errors showed over 1m. Figure 1 shows error vectors of geometric correction on verification points. Scales of error vectors were expanded by 200 times. It turns out that northwest area of error vectors had tendency to be large. Figure 2 shows sample of map distortion on satellite image. The map was overlaid on IKONOS satellite imagery which carried out geometric correction, and chosen the place where error vectors were large. Therefore, 1:2500 map did not have enough accuracy.

Table2. Root Mean Square Errors of Map by 3D Affine Transform

RMSE	MAP	
	u	v
Ground Control Points (m)	0.5832	0.6371
Verification Points (m)	1.2155	2.6356

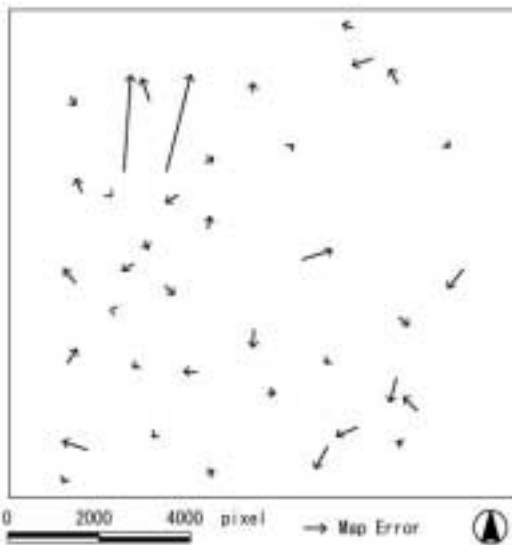


Figure 1. Error Vectors of Geometric Correction Using Map

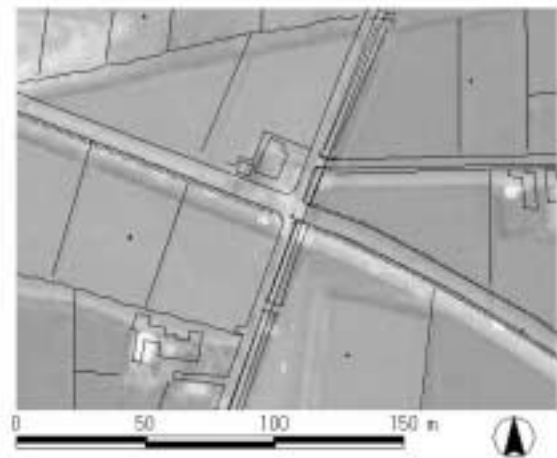


Figure 2. Sample of Map Distortion on Geo-Corrected Satellite Image

6. RESULT OF GCPs ACQUISITION BY GPS

GCPs were selected as the place where it can be surveyed safely and easily in field surveying. For example, small bridge, painting object on parking lot and footpath of field. Numbers of acquired ground coordinates were 43 points, 8 points were used for GCPs and 35 points were used for verification points. Table 3 shows root mean square errors of GPS by 3D affine transform. The unit is displayed by meter. Root mean square errors of GPS are less than 1m. Figure 3 shows error vectors of geometric correction on verification points. Scales of error vectors were expanded by 200 times. Error vectors on almost verification points showed very small. Especially, error on “v” axis showed larger. And error vector in north area had large. As this reason, the place is in the deep forest on the mountain. Figure 4 shows sample of map distortion on satellite image. Though, this image was chosen the place where southwest area error vector is large, map was hardly shifted.

Table3. Root Mean Square Errors of GPS by 3D Affine Transform

RMSE	GPS	
	u	v
Ground Control Points (m)	0.5866	0.3716
Verification Points (m)	0.9958	0.5562

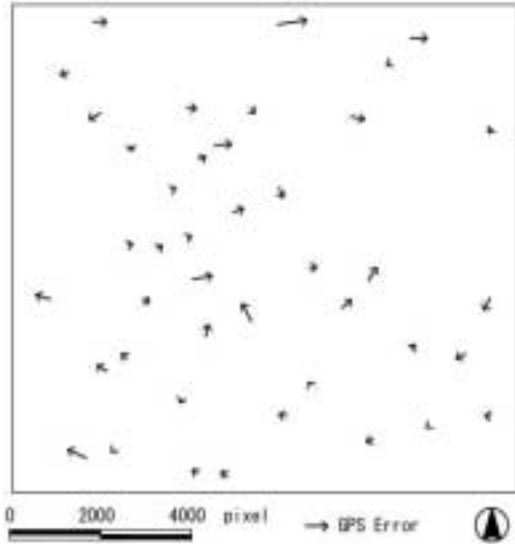


Figure 3. Error Vectors of Geometric Correction Using GPS

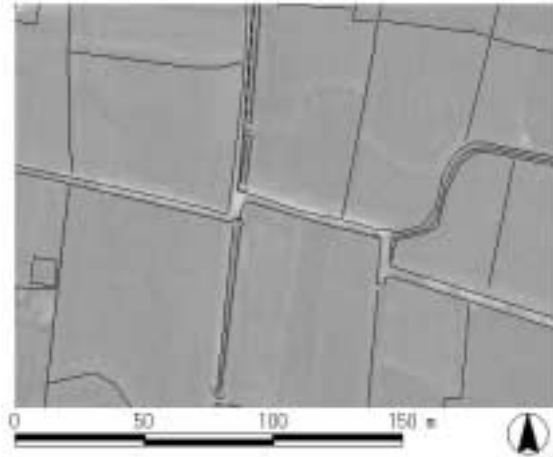


Figure 4. Sample of Map Distortion on Geo-Corrected Satellite Image

7. POSSIBILITY OF IMAGE MATCHING WITH AERIAL PHOTOGRAPHY

Acquisition of ground coordinates using 1:2500 map had made low accuracy. Acquisition using GPS had enough accuracy. However, GPS surveying needs much time and labor. By the way, aerial photography is expected to acquire ground coordinate by using image matching. Therefore, the possibility of image matching was discussed in this chapter.

7.1 Method of Image Matching

Firstly, expected ground objects for image matching were selected. The selected objects were big bridge, small bridge, road shape (T-intersection, Y-intersection, S-curve), pool, painting object on the road. Spatial resolution of aerial photography is 0.5m. Template image for image matching was made from aerial photography. Compared with IKONOS imagery, some roads and fields on aerial photography had difference because there is time lag about 2 years.

The template image was scanned calculating correlation coefficient. And coordinate of the highest correlation were selected. The correlation coefficient was calculated each RGB and added three of them. Figure 5, 6, 7 and 8 show sample images used for image matching.

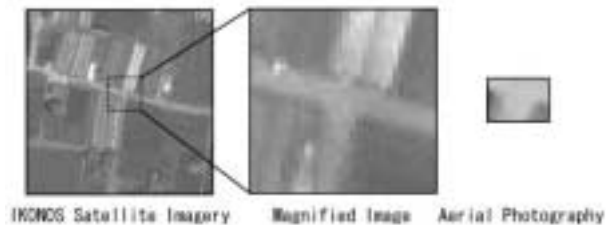


Figure 5. Matching Image of Road (T-Intersection)

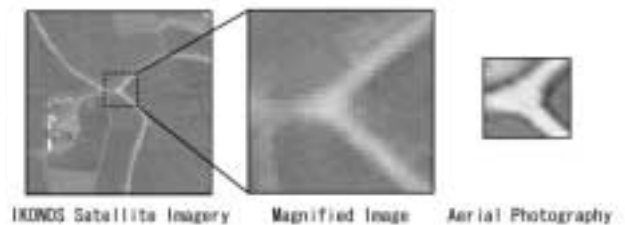


Figure6. Matching Image of Road (Y-Intersection)

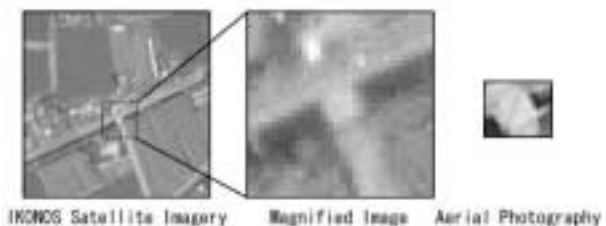


Figure 7. Matching Image of Small Bridge

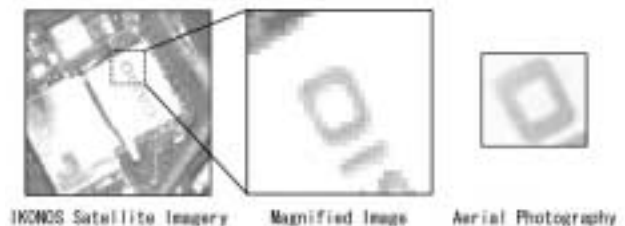


Figure 8. Matching Image of Painting Object

7.2 Result

Table 3 shows result of image matching. Result was classified into three categories with “Good”, “Fair” and “Poor”. “Good” means efficient as GCPs. “Fair” means difficult as GCPs. “Poor” means impossible to use. The small bridge had the highest correlation. This reason is that position of small bridge had clear. As opposed to it, big bridge had shadows and edge of bridge did not have clear, so it was hard to match. The second high correlation indicated on road shape. However, Y-intersection and S-curve have low correlation compared with T-intersection. It is thought that amount of vegetation of IKONOS satellite imagery and aerial photograph was different. Pool was not matched. The reflection of water surface of IKONOS imagery was different from water surface of aerial photography.

Table 4. Result of Image Matching

Ground Object	Correlation Coefficient	R (Correlation Coefficient)	G (Correlation Coefficient)	B(Correlation Coefficient)	Comment	Result
Bridge	1.5555	0.4923	0.4934	0.5698	By the satellite imagery, the edge of bridge was not clear. Aerial photography, there was shadow.	Fair
Small Bridge	2.5794	0.8659	0.8487	0.8649	Its position was clear and it seldom influenced of the shadow.	Good
Road Shape (T-Intersection)	2.5356	0.8009	0.8422	0.8924	Road Shape was clear and it was easy to match.	Good
Road Shape (Y-Intersection)	2.2985	0.7383	0.7751	0.7852	It was easy to match. However, it was thought that the difference in the amount of vegetation of satellite imagery and aerial photograph lowered the correlation coefficient.	Good
Road Shape (S-Curve)	2.2548	0.6994	0.7664	0.7890	It had matched. However, this was also considered that the difference in the amount of vegetation had affected the correlation coefficient.	Good
Pool	1.2388	0.4087	0.4213	0.4088	Matching was difficult. The reflection of water surface on satellite imagery was different from the water surface on aerial photography.	Poor
Painting Object (Line)	2.0206	0.6636	0.6641	0.6929	There were not many clear lines.	Fair
Painting Object (Character)	1.9936	0.8624	0.8260	0.3052	It was easy to match a big character.	Good

Originally template image must be generated from ortho photography. In this study, ortho photography was not created yet. If ortho photography can be created, it may become possible to carry out geometric correction.

8. CONCLUSIONS

Accuracy verification of GCPs from 1:2500 map and GPS was carried out by 3D affine transform. GCPs from the map had larger errors, the map did not have enough accuracy. Since GCPs from GPS had less than 1m errors, geometric correction of high resolution satellite imagery can be adapted in enough accuracy by using GPS.

When aerial photography of 0.5m resolution was used for acquisition of GCPs by image matching, small bridge, road shape and painting character were able to use as template image. In this study, ortho photography was not created. True ortho photography created using the laser scanner or three lines sensor is expected to acquire GCPs.

9. REFERENCES

1. Ian Dowman, John T. Dolloff: “An Evaluation of Rational Functions for Photogrammetric Restitution” International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII(B3), pp254-266(2000).
2. C.Vincent Tao, Yong Hu: “3D Reconstruction Methods Based on the Rational Function Model” Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, pp.705-714(July 2002).
3. Takeshi Yamakawa, Clive Fraser, and Herry Hanley: “Orientation of High Resolution IKONOS Imagery by Algebraic Orientation Model” Lecture papers of Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp.201-204(2002), in Japanese.
4. Takae Kadota, Eriko Nakagoe, and Masataka Takagi: “Geometric Correction of IKONOS Imagery by 3D Affine Transform” Lecture papers of Japan Society of Photogrammetry and Remote Sensing, pp.165-168(2002), in Japanese.
5. Seung-Ran Park, Taejung Kim: “Semi-Automatic Road Extraction Algorithm from IKONOS Images Using Template Matching” Lecture papers of The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, pp.1209-1213(2001).
6. Cheng-Yi LIN, Chi-Farn CHEN: “Automated Extraction of Control Points for High Spatial Resolution Satellite Images” Lecture papers of The 22nd Asian Conference on Remote Sensing, pp.1224-1229(2001).