

2002 年度修士論文

デジタル写真測量による三次元地形モデルの自動生成

Automated generation of digital elevation model by digital photogrammetry

2003 年 1 月

指導教員 高木 方隆

高知工科大学大学院基盤工学専攻
社会システム工学コース 1055152
野村 努

論文要旨

地すべりとは斜面の土塊が移動する現象である．この地すべりによる災害を未然に防ぐためには地すべりの挙動把握が重要である．現在，地すべりの挙動把握は孔内傾斜計や伸縮計を用いて行われている．しかし，伸縮計や孔内傾斜計は点の計測であるため，地すべり全体の挙動把握は難しい．地すべり全体の挙動把握には三次元地形モデルを用いて行う面的な計測が望まれる．

最近，安価で高精度に三次元地形モデルを生成することができるデジタル写真測量という計測技術が注目されている．このデジタル写真測量の計測精度に影響を与える要因としてデジタルカメラの解像度，撮影距離， B/H （基線比）がある．特に， B/H はステレオマッチングの精度に影響を与える．この B/H とステレオマッチングの精度の関係は衛星リモートセンシングで議論されてきた．しかし，近接デジタル写真測量ではあまり議論されていない．また，土地被覆とステレオマッチングの関係についても衛星リモートセンシングではあまり議論されていないため，これらの関係について明らかにしておくかなければならない．

本研究の目的は，まずデジタル写真測量を用いて三次元地形モデルを自動生成するシステムを開発する．さらに，このシステムを用いて B/H と土地被覆が各精度に与える影響について明らかにするために，以下の3つの項目について検討を行う．そして，デジタル写真測量における最適なカメラ位置について言及する．

- ・ B/H が計測精度に与える影響．
- ・ B/H がステレオマッチング精度に与える影響．
- ・ 土地被覆がステレオマッチングに与える影響．

研究の結果，以下のことがわかった．

- ・ $B/H=1\sim 2$ で安定した計測精度を得る．
- ・ B/H が1より小さくなるとステレオマッチング精度は高くなる．
- ・ 土地被覆が均一の場合，ステレオマッチングが困難である．

この結果から理想的なカメラ位置は $B/H=1$ である．仮に撮影距離20m， $B/H=1$ で撮影した画像を用いて本システムで三次元地形モデルを生成した場合，6cm未満の精度の三次元地形モデルを期待することができる．

Abstract

Landslide is phenomenon which mass of soil moves. In order to prevent landslide, understanding of landslide behavior is important. Behavior of landslide is measured using extensometer or inclinometer. However, using extensometer or inclinometer is point measurement. It is difficult to understand the behavior of whole landslide. To recognize the behavior of whole landslide, DEM(digital elevation model) must be generated and detected changing.

Nowadays, there is measurement technology of digital photogrammetry which can make DEM cheaply and with high accuracy. Resolution of digital camera, object distance, and B/H (baseline ratio) become factor of measurement accuracy in digital photogrammetry. Especially, B/H gives influence to accuracy which is related stereo matching. Usually, relationship between stereo matching and B/H was discussed in satellite remote sensing. However, digital photogrammetry in close range is not discussed. And, relationship between stereo matching and landcover was not discussed in satellite remote sensing. Therefore, it is necessary to clarify that how much B/H and landcover influences to accuracy in close range photogrammetry.

An objective of this study is developing automated 3 dimensional measurement system for landslide monitoring. Moreover, B/H and landcover evaluated influence to accuracy which is clarified using 3 dimensional measurement system. This study examines following three items. And, make reference to optimal camera position in digital photogrammetry.

- To investigate B/H gives to measurement accuracy.
- To investigate B/H gives to stereo matching accuracy.
- To investigate landcover give to number of stereo matching points.

From the result of research, following have been understood.

- Stabilized measurement accuracy in B/H 1-2 is acquired.
- The accuracy of stereo matching will become high when B/H becomes less than 1.
- Stereo matching is difficult when land covering is uniform.

Therefore, ideal camera position showed B/H1. In case of 20m distance from the object and B/H1, developed 3 dimensional measurement system can be expected less than 6cm accuracy.

Keywords: Digital photogrammetry, DEM, Landslide, Stereo matching, B/H

目次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 目的	3
1.3 論文の構成	3
2. 三次元地形モデル自動生成システム	4
2.1 デジタル写真測量の原理	4
2.2 システム概要	6
2.3 外部標定	7
2.3.1 外部評定の概要	7
2.3.2 射影変換式の係数の算出	7
2.3.3 外部評定要素の近似値算出	8
2.3.4 外部評定要素の近似値補正	9
2.4 ステレオマッチング	12
2.4.1 ステレオマッチングの概要	12
2.4.2 ステレオマッチングアルゴリズム	13
2.5 三次元座標算出	16
2.6 DATA 形式の変換	18
2.7 オルソ画像	18
3. 三次元地形モデル自動生成システムを用いた精度評価	20
3.1 対象エリア	20
3.2 基準点	20
3.3 撮影	21
3.4 精度検証	23
3.4.1 精度検証の目的	23
3.4.2 精度検証の方法	23
3.4.3 推定誤差量の算出	24
3.4.4 精度検証結果 (X 軸)	27
3.4.5 精度検証結果 (Y 軸)	28
3.4.6 精度検証結果 (Z 軸)	29
3.4.7 考察	29
3.5 ステレオマッチング精度検証	30
3.5.1 ステレオマッチング精度検証の目的	30
3.5.2 ステレオマッチング精度検証の方法	30
3.5.3 ステレオマッチング精度検証の結果	30

3.5.4 考察.....	31
3.6 三次元地形モデルの生成.....	32
3.6.1 三次元地形モデルの生成の目的.....	32
3.6.2 三次元地形モデルの生成の方法.....	32
3.6.3 三次元地形モデルの生成の結果.....	33
3.6.4 考察.....	35
4. 結論.....	37
参考文献.....	39
謝辞.....	40
付録.....	41
A 使用画像.....	41
B PC.....	46
C 基準点.....	46

目次

図 2.1	写真の幾何学	4
図 2.2	共線条件	5
図 2.3	本システムの流れ	6
図 2.4	単写真標定の流れ	7
図 2.5	射影変換	7
図 2.6	外部標定要素の近似値補正の流れ	9
図 2.7	AREA BASED MATCHING	12
図 2.8	FEATURE BASED MATCHING	13
図 2.9	ステレオマッチングの流れ	14
図 2.10	射影変換による探索位置の推定	14
図 2.11	SSDA 法	15
図 2.12	三次元座標の算出	17
図 2.13	DATA 形式の変換	18
図 2.14	中心投影と正射投影	19
図 3.1	対象エリア	20
図 3.2	対空標識	21
図 3.3	基準点配置図 (X,Y)	21
図 3.4	バルーン搭載型デジタルカメラ	22
図 3.5	カメラ位置	22
図 3.6	推定誤差量算出モデル	24
図 3.7	X 軸の推定誤差量	25
図 3.8	Y 軸の推定誤差量	26
図 3.9	Z 軸の推定誤差量	26
図 3.10	B/H と X 軸の誤差	27
図 3.11	B/H と Y 軸の誤差	28
図 3.12	B/H と Z 軸の誤差	29
図 3.13	ステレオマッチング成功率	31
図 3.14	使用画像	32
図 3.15	計測された三次元座標の分布 (X,Y)	33
図 3.16	DEM	33
図 3.17	オルソ画像	34
図 3.18	オルソ画像と計測された三次元座標 (X,Y)	34
図 3.19	鳥瞰図	35
図 A.1	高度 20M , B/H1	41

☒ A.2 高度 20M , B/H1.5.....	41
☒ A.3 高度 20M , B/H2.....	41
☒ A.4 高度 20M , B/H2.5.....	42
☒ A.5 高度 30M , B/H0.67.....	42
☒ A.6 高度 30M , B/H1.....	42
☒ A.7 高度 30M , B/H1.33.....	43
☒ A.8 高度 30M , B/H1.67.....	43
☒ A.9 高度 30M , B/H2.33.....	43
☒ A.10 高度 30M , B/H2.67.....	44
☒ A.11 高度 40M , B/H0.5.....	44
☒ A.12 高度 40M , B/H1.....	44
☒ A.13 高度 40M , B/H1.5.....	45
☒ A.14 高度 40M , B/H2.....	45
☒ A.15 高度 40M , B/H2.5.....	45

表目次

表 3.1 撮影高度と基線長.....	23
表 3.2 内部標定要素.....	23
表 B.1 スペック.....	46
表 C.1 基準点.....	46

1. 序論

1.1 背景

地すべりとは、斜面を構成する地山の内部において力学的なバランスが何らかの原因によって破壊され、地中に発生した破壊面を境としてそれよりも上側に存在する斜面構成物質が重力の作用により連続的または間欠的に比較的緩慢な速度で移動する現象である。地すべり地においては、地表に亀裂や段差・隆起や陥没・崩壊などの変状が発生する。これがその場所を利用している人間の生活や各種の構造物に対して重大な脅威と損害をもたらす¹⁾。

この地すべりは、一日に 0.01mm から 10mm 程度移動すると言われている。地すべりによる災害を未然に防ぎ、あるいは災害を最小限に食い止めるためには、地すべりの挙動把握が重要である。地すべりの挙動把握は、現在孔内傾斜計や伸縮計などを用いて行われている。また、地すべりの挙動把握の研究の 1 つに吉澤らの行った「地すべりの挙動解析における写真測量の応用」²⁾がある。この研究では、写真測量によって 57 点の移動方向と移動速度を求め、この 2 つのデータから地すべり挙動特性を判読することが可能であるという結果を残している。しかし、孔内傾斜計や伸縮計、吉澤らの行った研究から得られる点あるいは変位追跡点(地すべりの変位を追跡するための点)の変位ベクトルのデータでは、地すべり全体の挙動把握は難しいと考えられる。門田らの行った「地形測量における測点数と精度の関係」³⁾の研究によると 2km×2km のなだらかな地形を標高誤差 1m のランダムな点で表現するには少なくとも 1000 点以上の測点が必要であるとされている。地すべり地では、地すべりによって滑落崖などが発生し、複雑な起伏をしている。つまり、吉澤らが研究に使用した 150m×150m のエリアを標高誤差 5cm で表現するためには、少なくとも何百点という測点が必要であると考えられる。地すべりの挙動把握を行うには、この何百点という測点から生成する三次元地形モデルを用いた面的な計測が望ましい。また、地すべりの移動量から地すべり地の三次元地形モデルは 5cm 以内の高い精度で生成されていることが望ましいと考えられる。しかし、高い精度の三次元地形モデルは生成するのに時間とコストが必要となる。現在、四国には地すべり防止区域が 1200 箇所以上存在し、このことから地すべり地の詳細な三次元地形モデルは安価で効率のよいシステムで構築する必要がある。

現在、安価で高精度の計測が可能であると注目を集めているデジタル写真測量という計測技術がある。デジタル写真測量とは、デジタルカメラで撮影した画像を用いて、画像に写されている被写体の三次元座標を測定する手法である。このデジタル写真測量には以下に示すようなメリットがある。

- ・ 写真に写っている被写体の三次元座標が取得可能である。
- ・ 現地作業が大幅に短縮できる。

- ・ 画像と基準点のデータを保存しておけば，後日三次元座標を計測することができる．
- ・ 安価に測量を行うことができる．

また，フィルムを用いた一般的な写真測量と比較してデジタル写真測量には以下のようなメリットがある．

- ・ フィルムの現像による時間損失がなくなり，リアルタイムでの計測に期待できる．
- ・ 解析図化機に変わりパソコンを用いて，容易かつ効率的に写真座標を取得することが可能である．
- ・ 焦点距離が短いためピントが合わせやすく計測に適している．
- ・ フィルムに変わり CCD (Charge Coupled Device) を用いているため平面性が一定である．
- ・ フィルムは現像の状態が同一でないため同じ輝度でもばらつきが生まれるが，デジタルカメラでは CCD を用いているため安定した輝度を得ることができる．

このデジタル写真測量で使用されるデジタルカメラは，数年前まで 40 万画素クラスが主流であったが，現在では 500 万画素を越える高性能なデジタルカメラも登場している．デジタルカメラの高性能化に伴い，デジタル写真測量の高精度化も進んできていると言える．実際に，中田らの行った「デジタル写真測量からみた 300 万画素デジタルスチルカメラでの精度検証」⁴⁾では，現在販売されている 300 万画素クラスを中心としたデジタルカメラはイメージセンシングの発展に十分寄与しうるものであるという結果を残している．また，この 300 万画素クラスを中心としたデジタルカメラの実勢価格は 10 万円を切り，デジタルカメラは高性能化だけでなく低コスト化も進んでいる．

デジタル写真測量の計測精度に影響を与える要因として解像度，撮影距離， B/H (基線比) がある．解像度は，デジタルカメラのレンズと CCD の性能によって変わる．また，撮影距離はデジタルカメラの解像度が一定であることから撮影距離が小さくなるほど精度が良くなる．これは，一般のフィルムカメラが撮影対象に合わせてレンズやフィルムを交換し解像度を調整するのに対して，現在販売されているデジタルカメラはレンズを交換できるものが少なく．また，CCD を交換できるデジタルカメラは現時点では発売されていないという背景からきている．一方， B/H が精度に与える影響については近接デジタル写真測量では，あまり議論されていない．その理由は，デジタル写真測量による解析の多くが衛星や航空機から撮影された画像を用いて行われてきたためである．衛星や航空機から撮影される多くの画像は，撮影高度が高いことからステレオマッチング (対応点を自動で探索する手法) を行う上でオクルージョン (地形の起伏によって起こる隠れ) の影響が小さいという特徴がある．地上での計測では， B/H の大きな画像や低高度の画像を用いて行う解析も多くあると考えられ， B/H が精度及びステレオマッチング精度に与える影響について明らかにする必要がある．また，地上では撮影距離が短いため土地被覆がステレオマッチングに影響を与えると考えられ，この影響についても明らかにしておかなければならない．これらの影響を明らかにすることは，近接デジタル写真測量の撮影計画を行う上での有益な

指標として今後役立つと考えられる。

地すべり地の三次元地形モデルの用途を考えたとき，地すべりの監視，挙動把握，地形分類が考えられる。これら用途は，それぞれに要求精度が異なる。たとえば，地すべりの監視では，わずかな動きも計測できなければならぬため 1mm の精度が必要である。一方，地すべりの挙動把握は，5cm 以内の精度があれば移動量の大きな地すべりや長期的な地すべりの挙動把握が可能である。また，地形分類を行う場合には，約 8m の精度が必要である⁵⁾。デジタル写真測量を用いて三次元地形モデルの生成を考えたとき，これら用途の中で要求精度を満たすことができるのは，挙動把握と地形分類であると考えられる。つまり，デジタル写真測量によって生成される三次元地形モデルの精度は 5cm 以内を目指すことが妥当である。

1.2 目的

本研究の目的は，まずデジタル写真測量を用いて三次元地形モデルを自動生成するシステムを開発する。この三次元地形モデル自動生成システムの生成精度は，地すべりの挙動把握の要求精度から 5cm 以内を目標とする。三次元地形モデル自動生成システムの開発によって三次元地形モデル生成に掛かる時間とコストを大幅に削減することが可能になると考えられる。

近接デジタル写真測量は，衛星や航空機で撮影された画像を用いて生成される三次元地形モデルに比べて高精度の三次元地形モデルを生成することが可能である。しかし，近接デジタル写真測量は衛星や航空機に比べて撮影距離が短いため，ステレオマッチングが困難になる。これは，起伏の影響でオクルージョンが発生することと，土地被覆が均一な場合にマッチングが困難なためである。一般に衛星や航空機によるデジタル写真測量では，B/H1 未満の画像を用いてステレオマッチングが行われる。そこで，本研究では B/H1 以上の画像を用いて B/H がステレオマッチングの精度と計測精度に与える影響を明らかにする。また，本研究では土地被覆がステレオマッチングに与える影響について明らかにする。これらの影響を明らかにすることは，近接デジタル写真測量において高精度の三次元地形モデルを効率的に生成する上で有益な指標となると考えられる。そして，最後に各影響の結果から近接デジタル写真測量における最適なカメラ位置について言及する。

1.3 論文の構成

本論文では 2 章で三次元地形モデルの自動生成システムについて述べる。3 章では，三次元地形モデルの自動生成システムを用いて B/H や土地被覆が各精度に与える影響についての精度評価を行い，その考察を述べる。最後に 4 章では，本研究における結論を述べ，本論文をまとめる。

2. 三次元地形モデル自動生成システム

2.1 デジタル写真測量の原理

デジタル写真測量とは、写真という、平面上に写された像の形から被写体の三次元座標を求める手法である。写真はデジタルカメラで写され、被写体はレンズを通して CCD の 2 次元平面に投影される（図 2.1 参照）。

デジタル写真測量において被写体、レンズ中心および CCD 上の像点が一直線上にあるという幾何学が唯一の条件であり、この条件を共線条件と言う（図 2.2 参照）。また、この投影方法を中心投影とよぶ。共線条件を式で表わしたものが式 2.1 である。

2 次元の写真から被写体の三次元座標を求めることは、単写真のみでは不可能である。そこで、異なる位置から撮影した 2 枚の写真を用いて得られる 2 つの視線ベクトルから三次元座標を求める。

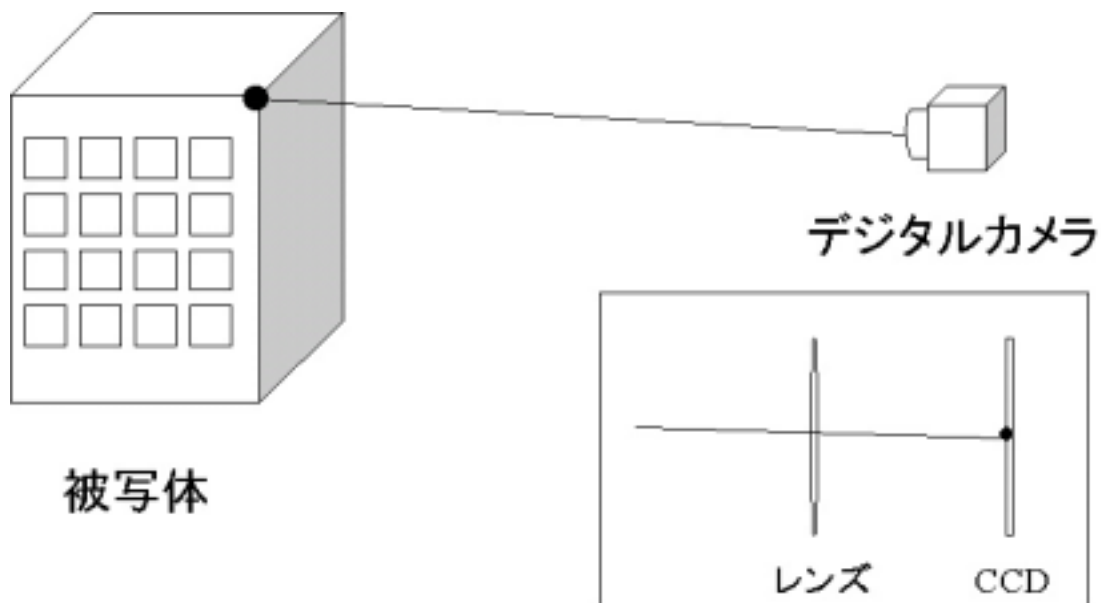


図 2.1 写真の幾何学



図 2.2 共線条件

$$\begin{aligned}
 x &= -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
 y &= -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)}
 \end{aligned}
 \tag{式 2.1}$$

ここで,

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & -\sin \omega \\ 0 & \sin \omega & \cos \omega \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \kappa & -\sin \kappa & 0 \\ \sin \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}
 \tag{式 2.2}$$

X, Y, Z : 対象物の三次元座標

X_0, Y_0, Z_0 : 投影中心の三次元座標

x, y : 対象物の写真座標

φ, ω, κ : X, Y, Z 軸に対するセンサの傾き

c : 焦点距離

2.2 システム概要

本システムは、2枚の画像と地上基準点の三次元座標及び写真座標、そして、使用したデジタルカメラの内部標定要素を入力することで三次元地形モデルを自動で生成するシステムである。また、本システムは生成された三次元地形モデルを ESRI 社の ArcView によって DEM (Digital Elevation Model) に変換することでオルソ画像を生成することが可能である。

内部標定要素とは、焦点距離やレンズの歪、CCD の中心点といったデジタルカメラの特性のことを言う。この内部標定要素は、デジタルカメラによって 1 台 1 台違うため、デジタル写真測量に使用するデジタルカメラはそれぞれ内部標定要素を求めておかななくてはならない。図 2.3 は本システムの流れを表わしたものである。



図 2.3 本システムの流れ

2.3 外部標定

2.3.1 外部評定の概要

外部標定とは、被写体を撮影したときのデジタルカメラの位置 (X_0, Y_0, Z_0) と傾き (α, β) を求めることを言い、求められたカメラ位置と傾きは外部標定要素と言う (図 2.2 参照)。この外部標定要素は、共線条件を基本とする単写真標定によって求めることができる。図 2.4 は単写真標定の流れを表わしたものである。なお、この単写真標定で外部評定要素を求めるには、1 枚の写真の中に 4 点以上の地上基準点が必要となる。

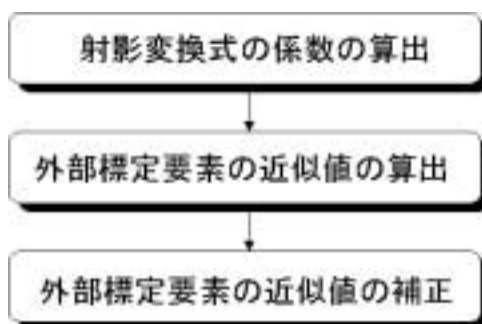


図 2.4 単写真標定の流れ

2.3.2 射影変換式の係数の算出

射影変換とは、図 2.5 に示されるように CCD 面上のある点の写真座標が、ほかの平面に投影されるような変換を言う。この射影変換を式で表したものが式 2.3 である。

この射影変換係数 $b_1 \sim b_8$ は 4 点以上の地上基準点 (X, Y, Z) とその地上基準点の写真座標 (x, y) から最小二乗法によって求めることができる。なお、最小二乗法を用いるときには、式 2.4 に示すように、式 2.3 の分母を払い、線形の観測方程式に変換しておく必要がある。

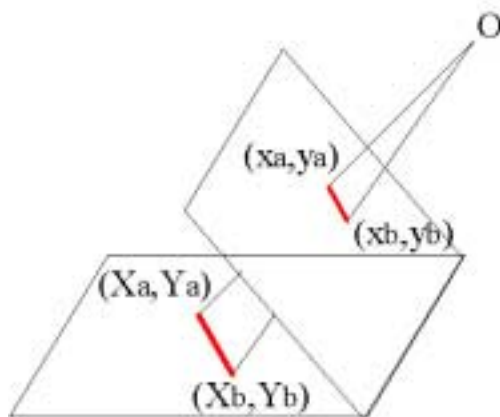


図 2.5 射影変換

$$\begin{aligned}
X &= \frac{b_1x + b_2y + b_3}{b_7x + b_8y + 1} \\
Y &= \frac{b_4x + b_5y + b_6}{b_7x + b_8y + 1}
\end{aligned}
\tag{式 2.3}$$

$b_1 \sim b_8$: 射影変換係数

$$\begin{aligned}
X &= b_1x + b_2y + b_3 - b_7xX - b_8yX \\
Y &= b_4x + b_5y + b_6 - b_7xY - b_8yY
\end{aligned}
\tag{式 2.4}$$

2.3.3 外部評定要素の近似値算出

次に，外部評定要素の近似値は，射影変換式から得られた射影変換係数 $b_1 \sim b_8$ を式 2.5 に代入することで求めることができる．

$$\begin{aligned}
\omega &= \tan^{-1}(cb_8) \\
\varphi &= \tan^{-1}(-cb_7 \cos \omega) \\
k &= \tan^{-1}\{-(A_1A_3 - A_2A_4)/(A_1A_2 + A_3A_4)\} \\
Z_0 &= c \cos \omega \sqrt{(A_2^2 + A_3^2)/(A_1^2 + A_4^2)} + Z_m \\
X_0 &= b_3 - (\tan \omega \sin \kappa / \cos \varphi - \tan \varphi \cos \kappa)(Z_m - Z_0) \\
Y_0 &= b_6 - (\tan \omega \cos \kappa / \cos \varphi - \tan \varphi \sin \kappa)(Z_m - Z_0)
\end{aligned}
\tag{式 2.5}$$

ここで，

$$\begin{aligned}
A_1 &= 1 + \tan^2 \varphi \\
A_2 &= b_1 + b_2 \tan \varphi / \sin \omega \\
A_3 &= b_4 + b_5 \tan \varphi / \sin \omega \\
A_4 &= \tan \varphi / (\cos \varphi \tan \omega) \\
Z_m &= \text{基準点の平均標高}
\end{aligned}
\tag{式 2.6}$$

2.3.4 外部評定要素の近似値補正

外部評定要素の近似値補正は、図 2.6 の流れで行われる。まず、式 2.1 を外部標定要素に関する関数として式 2.7 のようにおきなおす。次に、式 2.8 に外部標定要素の近似値を代入すると $2 \times n$ (基準点数) の数の観測方程式が得られる。最小二乗法を用いて補正値の X_0, Y_0, Z_0 を求め、式 2.10 で近似値の補正を行う。最後に、式 2.11 で中等誤差を求め、前後の繰り返し 1 回の偏差 $\sigma_i - \sigma_{i-1}$ が $1 \mu\text{m}$ 以下になったときに近似値を外部標定要素とし近似値の補正は終了する。1 回目あるいは偏差が $1 \mu\text{m}$ 以上の場合には補正値の算出から再度行う。

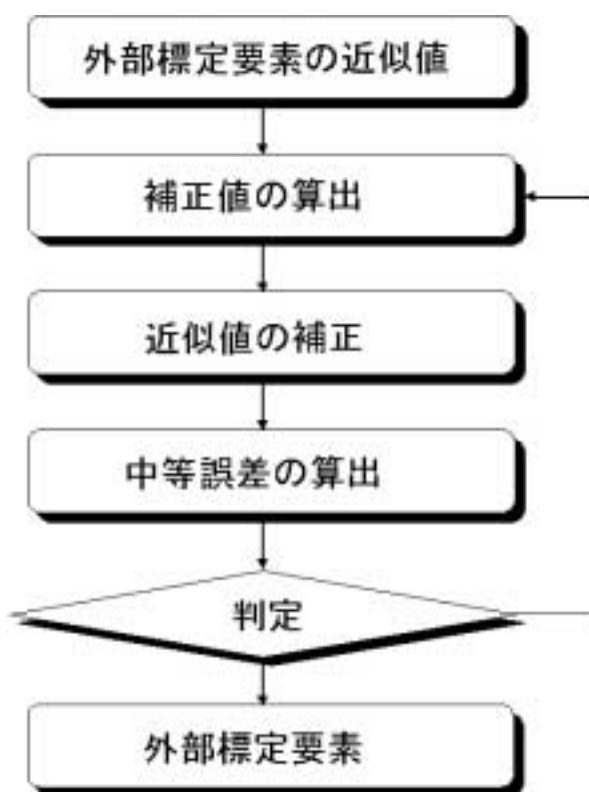


図 2.6 外部標定要素の近似値補正の流れ

$$\begin{aligned}
 F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) &= -c \frac{a_{11}(X - X_0) + a_{12}(Y - Y_0) + a_{13}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} - x = 0 \\
 G(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) &= -c \frac{a_{21}(X - X_0) + a_{22}(Y - Y_0) + a_{23}(Z - Z_0)}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} - y = 0
 \end{aligned}
 \tag{式 2.7}$$

$$\begin{aligned}
& F(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad F(X_{00}, Y_{00}, Z_{00}, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0) \\
& -\frac{\partial F}{\partial X_0} X_0 - \frac{\partial F}{\partial Y_0} Y_0 - \frac{\partial F}{\partial Z_0} Z_0 - \frac{\partial F}{\partial \omega} \omega - \frac{\partial F}{\partial \varphi} \varphi - \frac{\partial F}{\partial \kappa} \kappa = 0 \\
& G(X_0, Y_0, Z_0, \omega, \varphi, \kappa) \quad G(X_{00}, Y_{00}, Z_{00}, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0) \\
& -\frac{\partial G}{\partial X_0} X_0 - \frac{\partial G}{\partial Y_0} Y_0 - \frac{\partial G}{\partial Z_0} Z_0 - \frac{\partial G}{\partial \omega} \omega - \frac{\partial G}{\partial \varphi} \varphi - \frac{\partial G}{\partial \kappa} \kappa = 0
\end{aligned} \tag{式 2.8}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F}{\partial X_0} &= \frac{ca_{11} + xa_{31}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial F}{\partial Y_0} &= \frac{ca_{12} + xa_{32}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial F}{\partial Z_0} &= \frac{ca_{13} + xa_{33}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial F}{\partial \omega} &= \frac{xy}{c} \\
\frac{\partial F}{\partial \varphi} &= -\frac{x^2}{c} \cos \omega - y \sin \omega - c \cos \omega \\
\frac{\partial F}{\partial \kappa} &= \frac{\partial F}{\partial X_0} (Y - Y_0) - \frac{\partial F}{\partial Y_0} (X - X_0) \\
\frac{\partial G}{\partial X_0} &= \frac{ca_{21} + xa_{31}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial G}{\partial Y_0} &= \frac{ca_{22} + xa_{32}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial G}{\partial Z_0} &= \frac{ca_{23} + xa_{33}}{a_{31}(X - X_0) + a_{32}(Y - Y_0) + a_{33}(Z - Z_0)} \\
\frac{\partial G}{\partial \omega} &= c + \frac{y^2}{c} \\
\frac{\partial G}{\partial \varphi} &= x \sin \omega - \frac{xy}{c} \cos \omega \\
\frac{\partial G}{\partial \kappa} &= \frac{\partial G}{\partial X_0} (Y - Y_0) - \frac{\partial G}{\partial Y_0} (X - X_0)
\end{aligned} \tag{式 2.9}$$

$$\begin{aligned}
X_0 &= X_{00} - X_0 \\
Y_0 &= Y_{00} - Y_0 \\
Z_0 &= Z_{00} - Z_0 \\
\omega &= \omega_0 - \omega \\
\varphi &= \varphi_0 - \varphi \\
\kappa &= \kappa_0 - \kappa
\end{aligned}
\tag{式 2.10}$$

$$\delta = \pm \sqrt{\frac{\sum v_{xi}^2 + \sum v_{yi}^2}{2n-6}}
\tag{式 2.11}$$

ここで,

$$\begin{aligned}
v_x &= F(X_{00}, Y_{00}, Z_{00}, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0) \\
&-\frac{\partial F}{\partial X_0} X_0 - \frac{\partial F}{\partial Y_0} Y_0 - \frac{\partial F}{\partial Z_0} Z_0 - \frac{\partial F}{\partial \omega} \omega - \frac{\partial F}{\partial \varphi} \varphi - \frac{\partial F}{\partial \kappa} \kappa \\
v_y &= G(X_{00}, Y_{00}, Z_{00}, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0) \\
&-\frac{\partial G}{\partial X_0} X_0 - \frac{\partial G}{\partial Y_0} Y_0 - \frac{\partial G}{\partial Z_0} Z_0 - \frac{\partial G}{\partial \omega} \omega - \frac{\partial G}{\partial \varphi} \varphi - \frac{\partial G}{\partial \kappa} \kappa
\end{aligned}
\tag{式 2.12}$$

2.4 ステレオマッチング

2.4.1 ステレオマッチングの概要

ステレオマッチングとは、撮影された2枚の画像の対応点を自動で探索する手法である。このステレオマッチングは過去の研究において様々な手法が提案されているが、これらは大きく以下の2つに分類することができる。

- ・ Area Based Matching

Area Based Matching とは、画像の領域同士を対応させる手法のことを言う。具体的には、基準画像のある点を探索画像から探す際に、その点とその点の周りの輝度の情報を手がかりに類似度の高い部分を探索する手法のことを言う（図 2.7 参照）。Area Based Matching はアルゴリズムが容易で解が安定していることから一般的に利用されるステレオマッチング手法である。

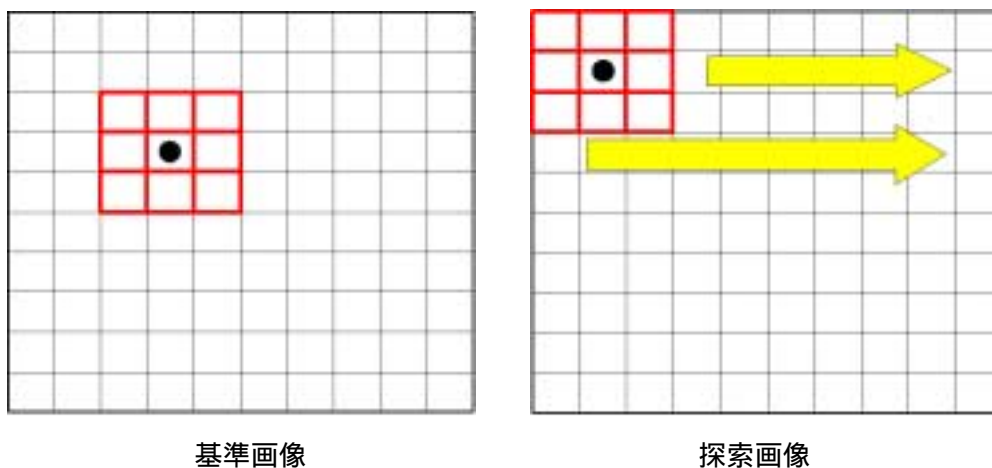


図 2.7 Area Based Matching

・ Feature Based Matching

Feature Based Matching とは、画像からエッジ等の特徴を抽出し、2 枚の画像の特徴同士を対応させるステレオマッチング手法である（図 2.8 参照）。一般的に、対応点探索の計算速度は Area Based Matching よりも早い。しかし、特徴の抽出が難しく、また特徴の抽出方法によっては類似度の高い部分が多く現れる多対応の問題がある。

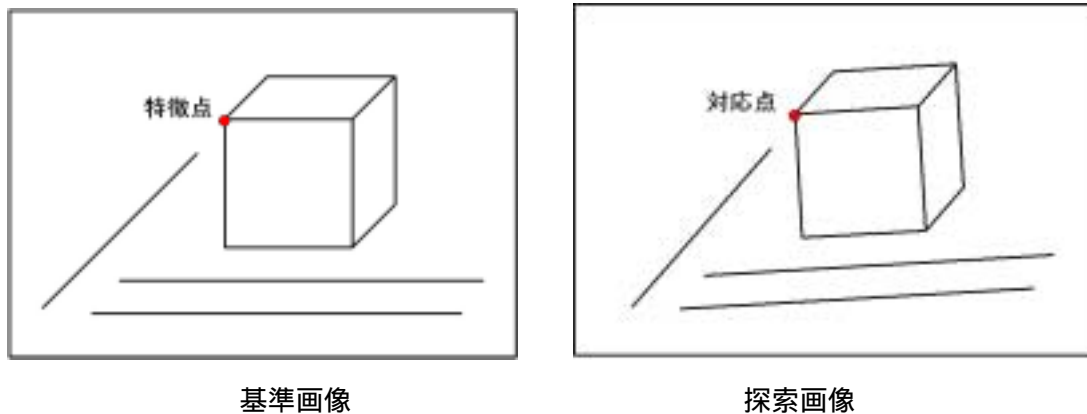


図 2.8 Feature Based Matching

今回の研究の目的は、地すべり地の三次元地形モデルを自動生成するためのシステム開発である。三次元地形モデルの生成には地すべり地の画像が用いられる。地すべり地の画像は植生などの影響で似通ったエッジが発生しやすいため Feature Based Matching では多対応が多くなると考えられる。そこで、本システムでは高いマッチング精度を保つために Area Based Matching を用いる。

2.4.2 ステレオマッチングアルゴリズム

本システムのステレオマッチングアルゴリズムは、射影変換を用いることによって高いマッチング精度と効率的な対応点探索を実現している。具体的には、図 2.9 のような流れでステレオマッチングは行われている。まず、基準画像のある点の画像座標を写真座標に変換し、式 2.3 の射影変換式に代入する。射影変換式から得られた地上座標を式 2.13 の射影変換の逆変換式に代入し、探索画像の写真座標を求める（図 2.10 参照）。次に写真座標を画像座標に変換し、画像座標の周りを SSDA 法と面積相関法を使用して対応点の探索を行う。最後に、対応点とするかどうかの判定は、残差の合計あるいは相関係数にある閾値を設けて行う。

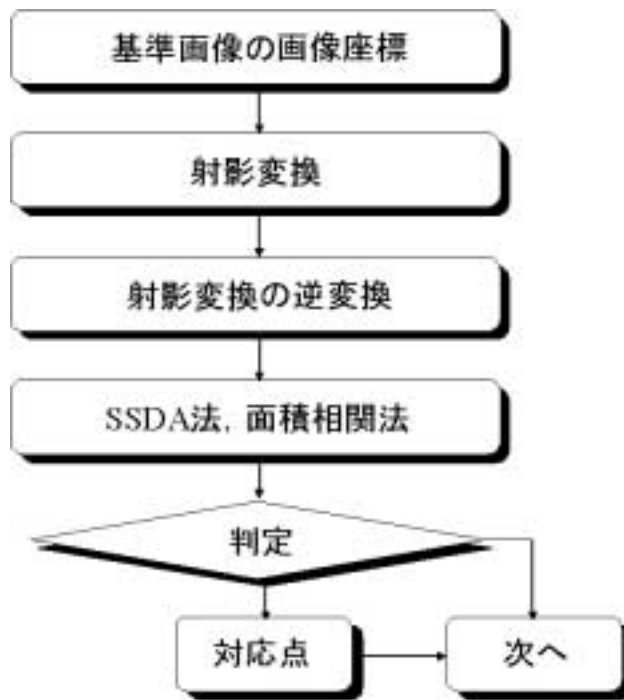


図 2.9 ステレオマッチングの流れ

$$x = \frac{(b_5 - b_8 b_6)X + (b_8 b_3 - b_2)Y + (b_6 b_2 - b_3 b_5)}{(b_4 b_8 - b_7 b_5)X + (b_7 b_2 - b_1 b_8)Y + (b_1 b_5 - b_4 b_2)}$$

$$y = \frac{(b_7 b_6 - b_4)X + (b_1 - b_7 b_3)Y + (b_4 b_3 - b_1 b_6)}{(b_4 b_8 - b_7 b_5)X + (b_7 b_2 - b_1 b_8)Y + (b_1 b_5 - b_4 b_2)}$$

式 2.13

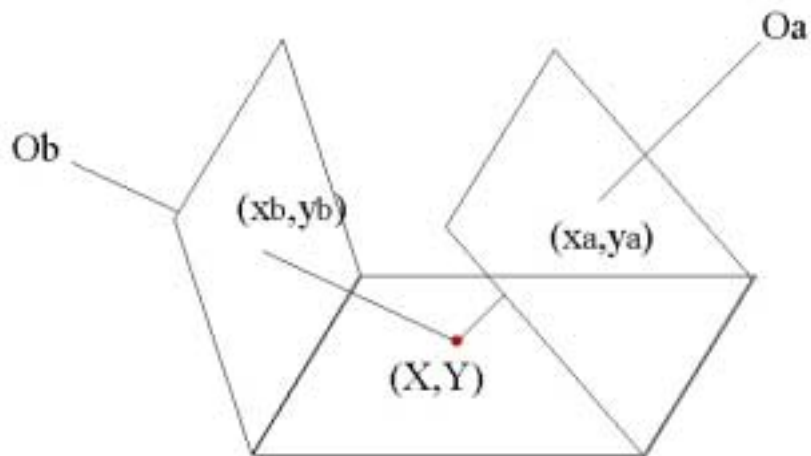


図 2.10 射影変換による探索位置の推定

以下に本システムのステレオマッチングで使用した SSDA 法と面積相関法について説明する。

・SSDA 法

SSDA 法は、残差逐次検定法と呼ばれ、輝度値を減算することにより画像マッチングを行う手法である。具体的には、基準画像のある点とその周りの点の輝度値を探索画像の輝度値と減算していき、残差の合計が最小のところを対応点とする手法である(図 2.11 参照)。SSDA 法は、式 2.14 によって計算される。

この SSDA 法は、演算処理が加減算のみであることから計算速度が速いという特徴を持っている。また、残差に対してある閾値を決めておき、残差がその閾値以上になったときに処理を打ち切ることができるという特徴を持っている。

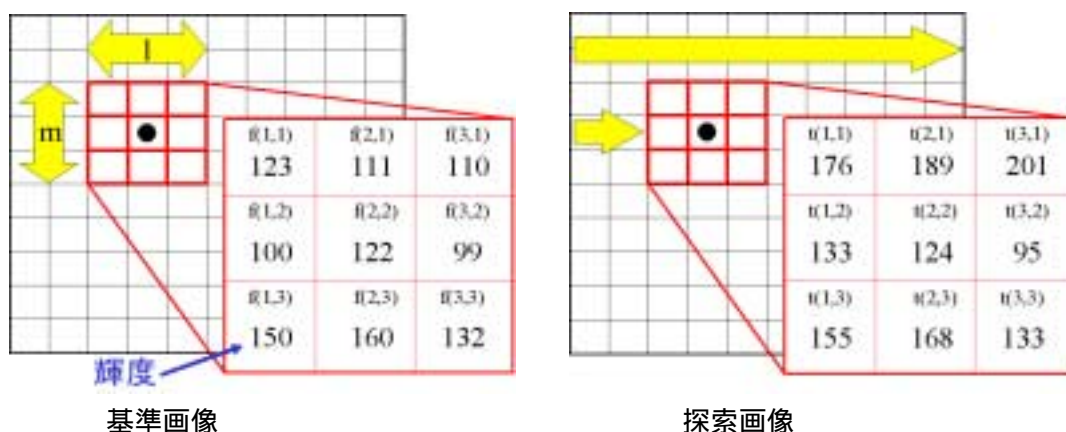


図 2.11 SSDA 法

$$S_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^l |f(u, v) - t(u, v)| \tag{式 2.14}$$

S_{ij} : 画素位置 (i, j) における残差

$f(u, v)$: 基準画像のテンプレート位置

$t(u, v)$: 探索画像のテンプレート位置

$l \times m$: テンプレートサイズ

・面積相関法

面積相関法は、基準画像のある点とその周りの点の輝度値と探索画像の輝度値との相関係数を求めていき、その相関係数がもっとも高かったところを対応点とする手法である。面積相関法は、式 2.15 によって計算される。

この面積相関法は、SSDA 法に比べて計算速度は遅く、処理の打ち切りができないという欠点を持つが、安定した解を得ることができるという特徴を持っている。

$$C_{ij} = \sum_{u=1}^m \sum_{v=1}^l \frac{(f(u,v) - f_{ave})(t(u,v) - t_{ave})}{\sqrt{f_s t_s}} \quad \text{式 2.15}$$

ここで、

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

式 2.16

C_{ij} ：画素位置 (i,j) における相関係数

f_{ave} ：基準画像のテンプレートの輝度平均

t_{ave} ：探索画像のテンプレートの輝度平均

2.5 三次元座標算出

2つの画像の対応点を用いて算出される2本の視線ベクトルは、理論的に1点で交わる。その1点で交差したところが三次元座標として決定される(図 2.12 参照)。しかし、外部標定要素やマッチングエラーなどの要因によって視線ベクトルは1点で交わらない。そこで、2つの視線ベクトルが最も近づいた地点の中点をその対応点の三次元座標とするのが一般的な三次元座標算出方法である。

三次元座標は、式 2.17 で得られる2直線の中点を求めることで算出することができる。

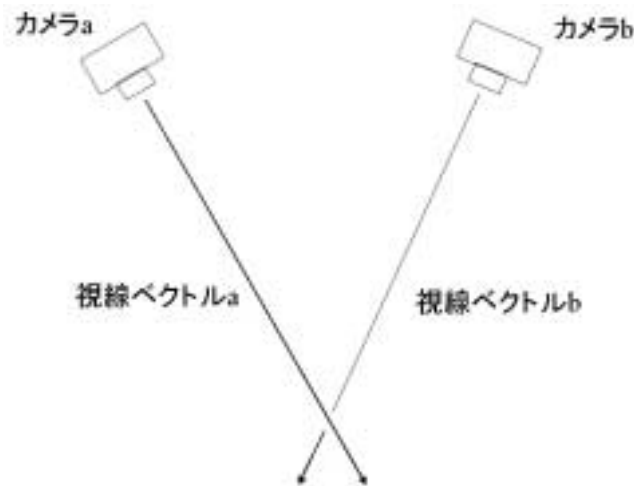


図 2.12 三次元座標の算出

$$\begin{aligned}
 \text{直線}a: \begin{pmatrix} X_a \\ Y_a \\ Z_a \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X_{a0} \\ Y_{a0} \\ Z_{a0} \end{pmatrix} + ta \begin{pmatrix} v_{ax} \\ v_{ay} \\ v_{az} \end{pmatrix} \\
 \text{直線}b: \begin{pmatrix} X_b \\ Y_b \\ Z_b \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} X_{b0} \\ Y_{b0} \\ Z_{b0} \end{pmatrix} + tb \begin{pmatrix} v_{bx} \\ v_{by} \\ v_{bz} \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

式 2.17

ここで、

$(X_{a0}, Y_{a0}, Z_{a0}), (X_{b0}, Y_{b0}, Z_{b0})$: カメラ位置

$(v_{ax}, v_{ay}, v_{az}), (v_{bx}, v_{by}, v_{bz})$: 直線の単位ベクトル

$$\begin{aligned}
 ta &= \frac{EC - 2DB}{4AD - C^2} \\
 tb &= \frac{BC - 2AE}{4AD - C^2}
 \end{aligned}$$

式 2.18

$$A = v_{ax}^2 + v_{ay}^2 + v_{az}^2$$

$$B = 2\{v_{ax}(X_{a0} - X_{b0}) + v_{ay}(Y_{a0} - Y_{b0}) + v_{az}(Z_{a0} - Z_{b0})\}$$

$$C = -2(v_{ax}v_{bx} + v_{ay}v_{by} + v_{az}v_{bz})$$

$$D = v_{bx}^2 + v_{by}^2 + v_{bz}^2$$

$$E = 2\{v_{bx}(X_{b0} - X_{a0}) + v_{by}(Y_{b0} - Y_{a0}) + v_{bz}(Z_{b0} - Z_{a0})\}$$

式 2.19

2.6 DATA 形式の変換

この研究における DATA 形式の変換とは、ランダムな三次元座標のポイントデータを DEM に変換することを指す。この DATA 形式の変換は、ArcView を使って行う。まず、ランダムなポイントのデータを不整三角網 (TIN) のデータに変換する。次に、不整三角網のデータを正方格子のメッシュの DEM に変換する。

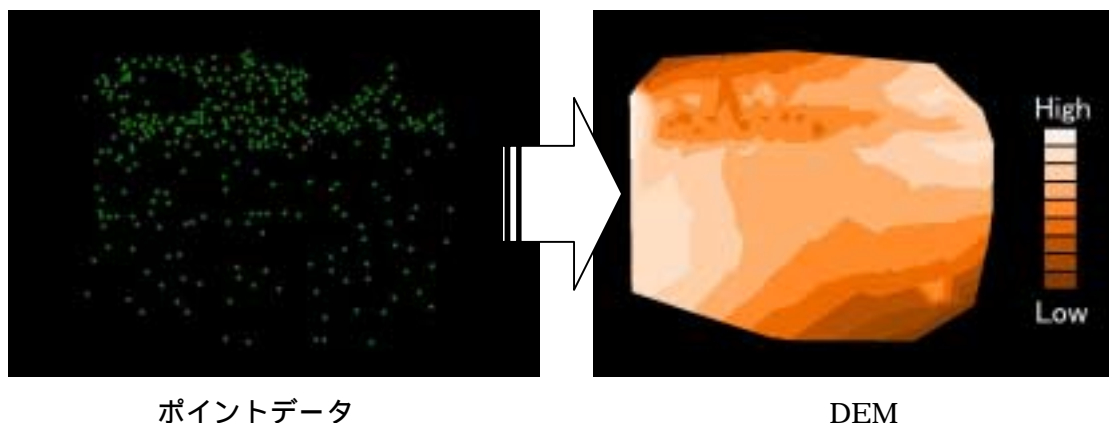


図 2.13 DATA 形式の変換

2.7 オルソ画像

オルソ画像とは、中心投影で撮影された画像を正射投影に変換した画像のことを言う(図 2.14 参照)。オルソ画像の生成には、画像とその画像の外部標定要素、DEM が必要となる。まず、DEM から得られる地上座標を共線条件式 (式 2.1) に代入し、写真座標を求める。次に、写真座標を画像座標に変換し、その画像座標の輝度値を画像から求める。最後の得られた輝度値を DEM と対応するように再配列すればオルソ画像を生成することができる。このオルソ画像は、以下のようなメリットを持っている。

- ・ 地図と重ねあわせができる

様々なスケールの地図と重ね合わせができ、また GIS の背景として活用できる。

- ・ 変化抽出に活用できる

複数のオルソ画像 (季節ごと、年代ごと) の重ね合わせによる変化抽出や比較が可能となる。

- ・ 立体画像地図を作成できる

オルソ画像は、地形による歪みが除かれていることから様々な方向からの鳥瞰図や 3D アニメーションの作成が可能になる。

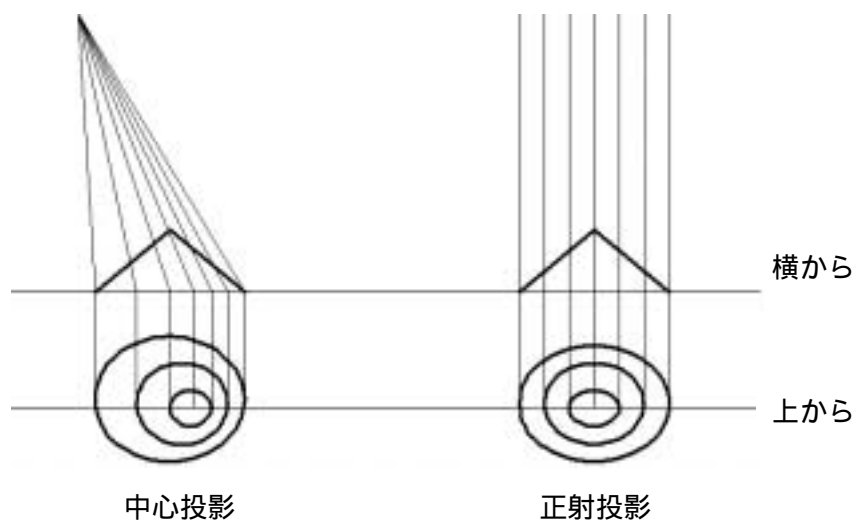


図 2.14 中心投影と正射投影

3. 三次元地形モデル自動生成システムを用いた精度評価

3.1 対象エリア

精度評価を行う対象エリアは図 3.1 のような場所である。この実験エリアは、植生や道路といった点で土地被覆が地すべり地と似ており、また高知工科大学の敷地内にあるという点で本研究の対象エリアとして決定した。この対象エリアは、東西方向に約 30m、南北方向に約 18m、高低差は約 3m である。

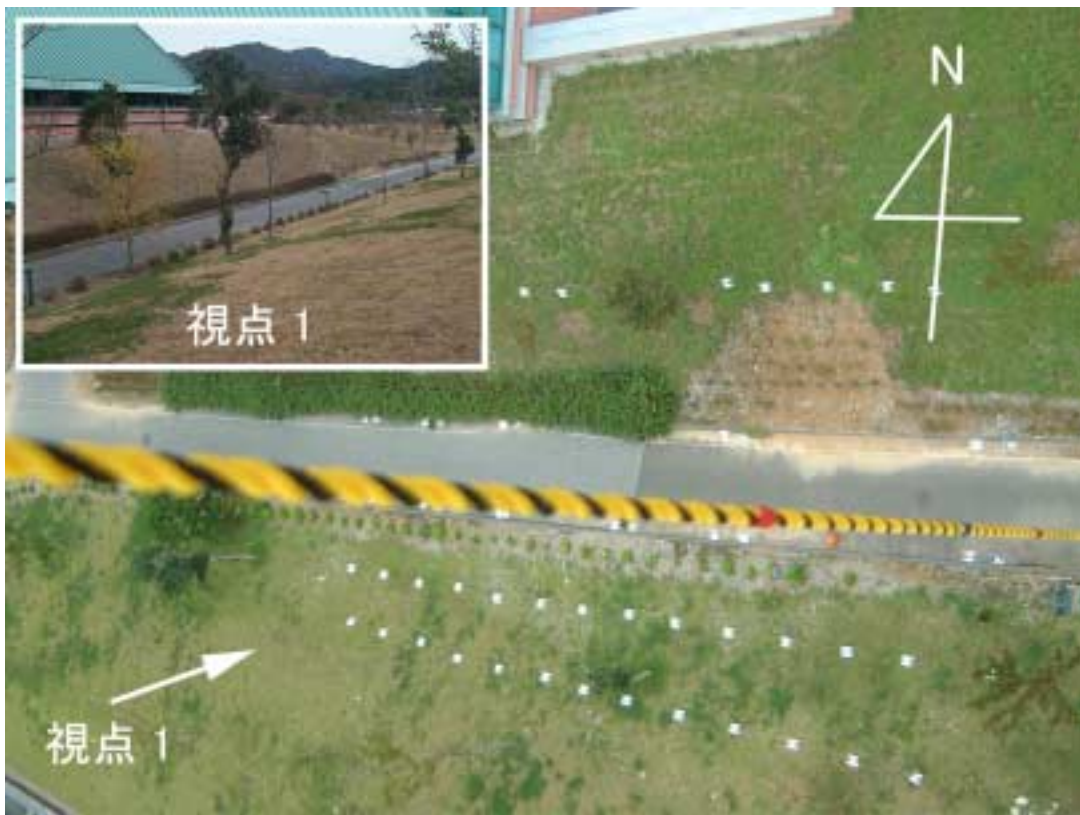


図 3.1 対象エリア

3.2 基準点

図 3.2 のような対空標識を基準点とし、対象エリアに図 3.3 のように配置した。対空標識の大きさは A3 サイズ (297×420mm) である。基準点は、GPS で計測した 2 点からトータルステーションを用いて三次元座標の計測を行った。なお、図 3.1 の道路上の基準点は計測中に移動した可能性が高いため、本研究では基準点として使用しなかった。



図 3.2 対空標識

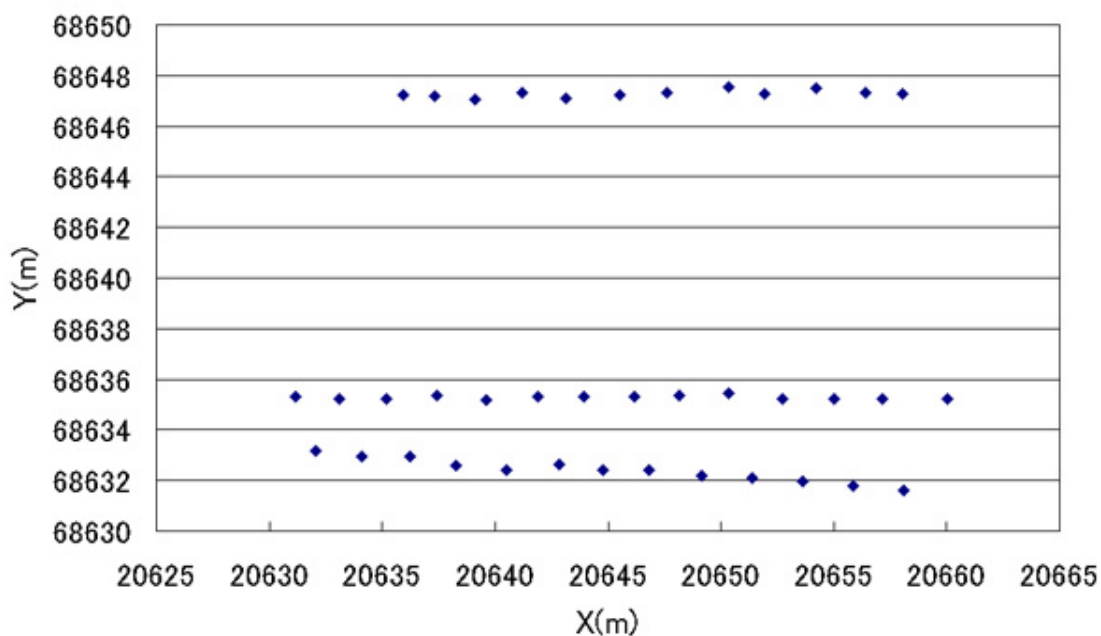


図 3.3 基準点配置図 (X,Y)

3.3 撮影

撮影は、図 3.4 のようにバルーンにデジタルカメラ (Fuji FinePix4700z) を搭載して 20m, 30m, 40m の高度で行った。基線長は道路に沿って 20m から 100m まで変化させて 30 枚の画像を撮影した (図 3.5, 表 3.1 参照)。なお、今回使用したバルーン搭載型のデジタルカメラは、デジタルカメラの傾きを自由に変えることができる構造となっている。また、撮影に使用したデジタルカメラの内部標定要素は、Eos Systems Inc. の PhotoModelerPro 同梱のキャリブレーションソフトを使用して算出し、表 3.2 のような結果を得た。



図 3.4 バルーン搭載型デジタルカメラ

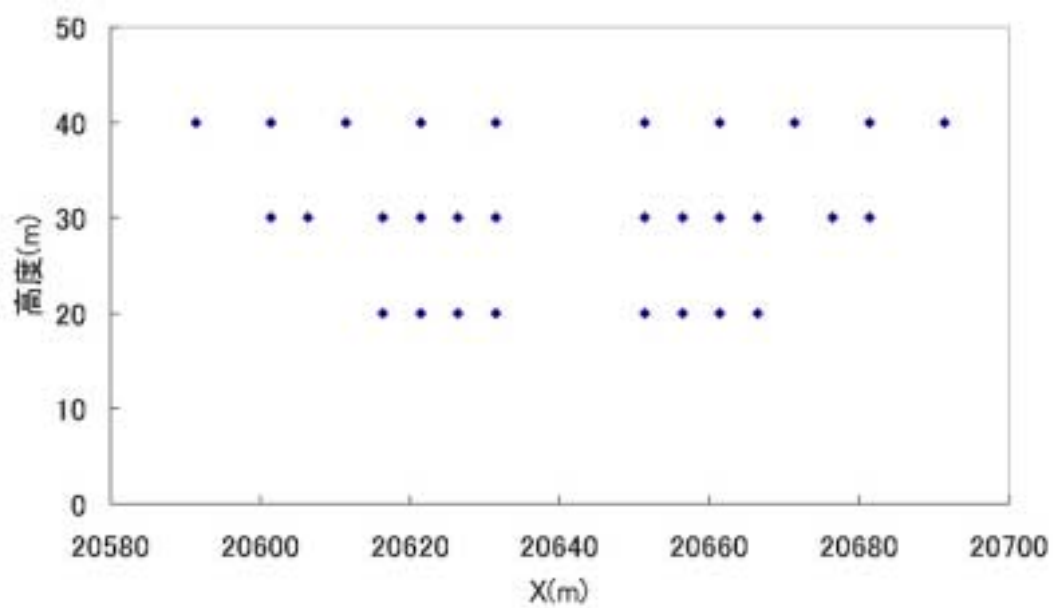


図 3.5 カメラ位置

表 3.1 撮影高度と基線長

		高度(m)		
		20	30	40
基 線 長 (m)	20	○	○	○
	30	○	○	
	40	○	○	○
	50	○	○	
	60			○
	70		○	
	80		○	○
	90			
	100			○

表 3.2 内部標定要素

焦点距離	8.2979mm	
画像サイズ	u : 2400	v : 1800
CCDサイズ	W : 7.5239mm	H : 5.6500mm
中心点	3.8071mm	2.9107mm

3.4 精度検証

3.4.1 精度検証の目的

地すべりは1日に0.01mmから10mm程度の移動を行う。このことから地すべりの挙動把握を行う場合には5cm以内の精度の三次元地形モデルが望まれる。一方、三次元地形モデルを用いた地形分類を行う場合には8mの精度でよい。このように三次元地形モデルの要求精度は、使用する用途によって大きく変わる。この要求精度に合わせて撮影距離やB/Hを変えて三次元地形モデルを生成する必要がある。精度検証では、三次元地形モデル自動生成システムを用いて撮影距離及びB/Hが精度に与える影響を明らかにすることが目的である。

3.4.2 精度検証の方法

精度検証は、2枚の画像に写っている9つの基準点の地上座標と目視によって抽出した基準点の写真座標と同じく目視によって抽出した4つの検証点の写真座標を本システムに入力し、検証点の地上座標を求める。得られた検証点の地上座標から、実際にGPSとトータルステーションを用いて計測した値を減算し、その誤差量を求める。得られた誤差量を推定誤差量のグラフにプロットし、B/Hが精度に与える影響を検証する。

3.4.3 推定誤差量の算出

B/H が精度に与える影響について明らかにするために、まず推定誤差量の算出を行う。図 3.6 は、対応点のミスマッチングによって推定される誤差量の算出方法を表した図である。具体的には、2つのデジタルカメラから伸びる視線ベクトルを1画素ずらしたときに推定される誤差量 X,Y,Z を求める図である。推定誤差量 X,Y,Z は、式 3.1 によって算出される。

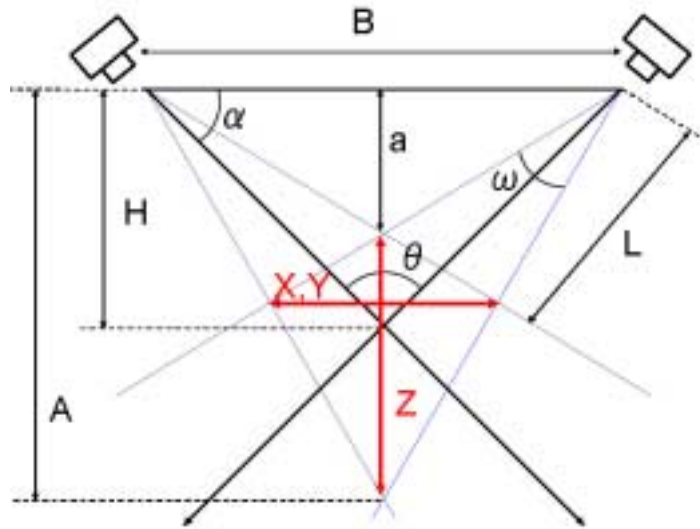


図 3.6 推定誤差量算出モデル

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \frac{-\theta}{2} \\
 L &= \frac{B}{\sin \theta} \sin\left(\alpha - \frac{\omega}{2}\right) \\
 X, Y &= \frac{B}{2} - L \cos\left(\alpha + \frac{\omega}{2}\right) \\
 Z &= \frac{B}{2} \left\{ \tan\left(\alpha + \frac{\omega}{2}\right) - \tan\left(\alpha - \frac{\omega}{2}\right) \right\}
 \end{aligned}
 \tag{式 3.1}$$

：空間分解能 (rad)

：カメラ位置のなす角度 (rad)

B：基線長

H：高度

推定誤差量の算出結果を図 3.7, 図 3.8, 図 3.9 に示す。図 3.7 は, X 軸の推定誤差量を表したグラフである。横軸が B/H。縦軸が誤差量を表している。このグラフから B/H が大きくなるにしたがって誤差量も比例して大きくなることがわかる。また, 高度が高くなるにしたがって誤差量が大きくなることがわかる。図 3.8 は, Y 軸の推定誤差量を表したグラフである。Y 軸は, X 軸とほぼ同様の誤差傾向を示していることがわかる。図 3.9 は, Z 軸の推定誤差量を表したグラフである。Z 軸は, X 軸, Y 軸と逆に B/H が大きくなるほど誤差が小さくなっていることがわかる。これら推定誤差量の結果から B/H1 から 2 が X 軸, Y 軸, Z 軸において安定した精度を得ることがわかった。

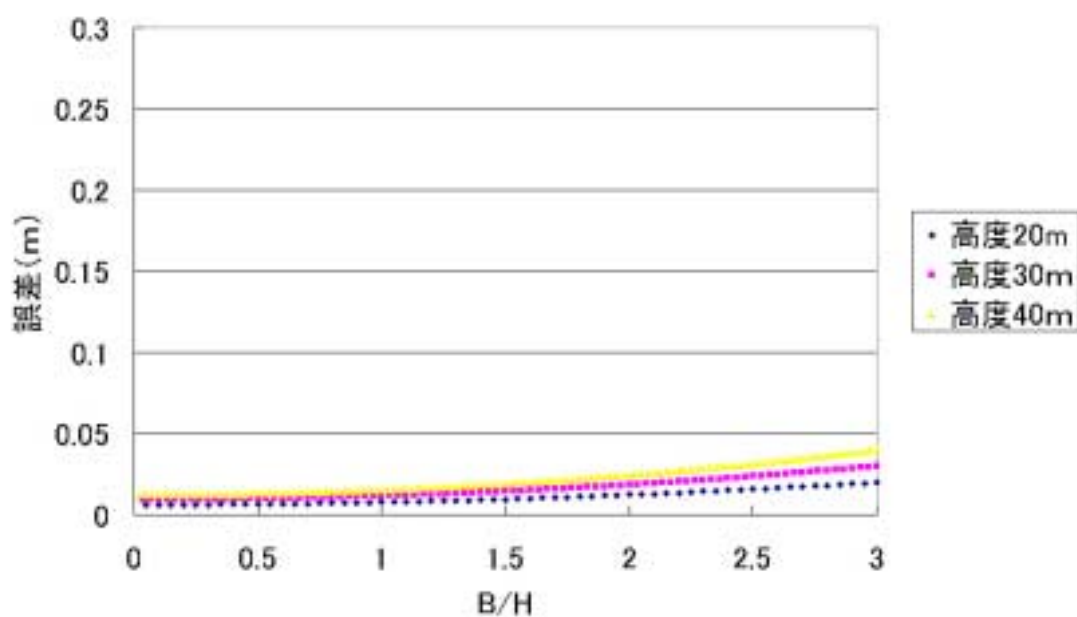


図 3.7 X 軸の推定誤差量

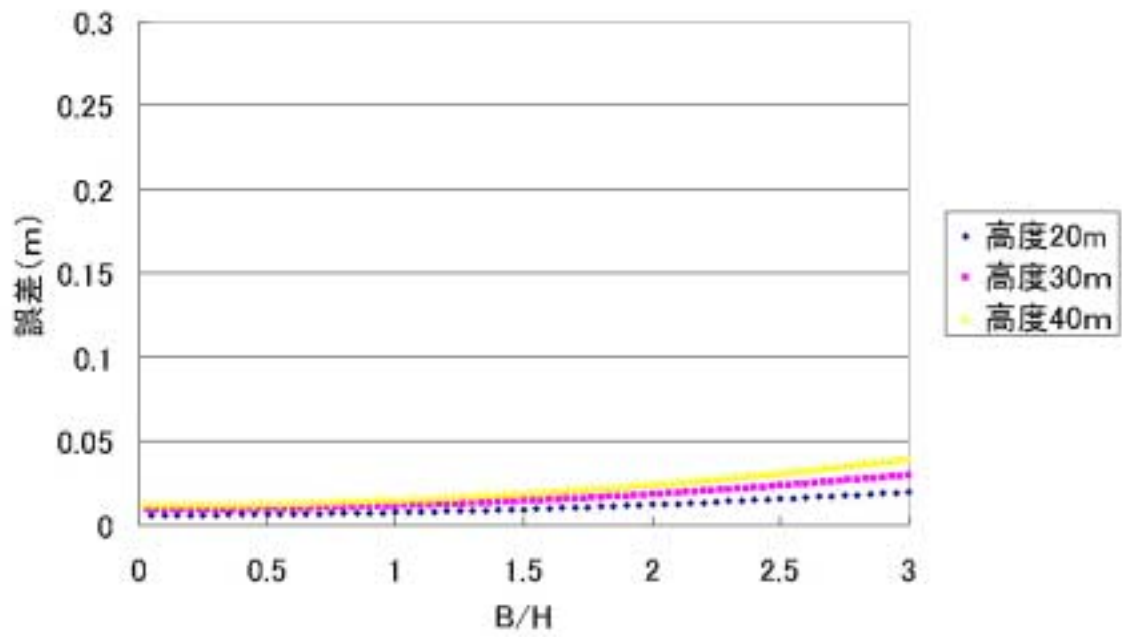


図 3.8 Y軸の推定誤差量

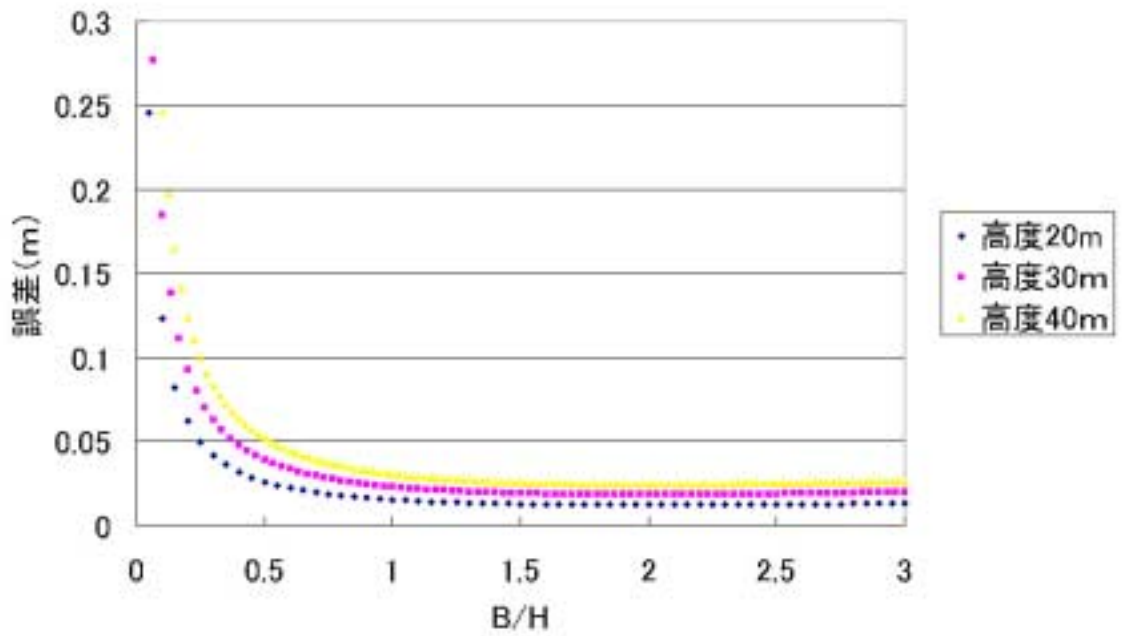


図 3.9 Z軸の推定誤差量

3.4.4 精度検証結果 (X軸)

図 3.10 は、X 軸の推定誤差量のグラフに本システムで得られた 4 点の検証点の誤差平均をプロットしたものである。このグラフからプロットされた点が推定誤差よりも大きいことがわかる。高度別の誤差は、高度 20m の平均誤差量が 4.6cm、高度 30m の平均誤差量が 10.9cm、高度 40m の平均誤差が 13.0cm となっており、高度に比例して誤差が大きくなることがわかる。B/H は 1 から 2 で安定した精度を得ることがわかった。

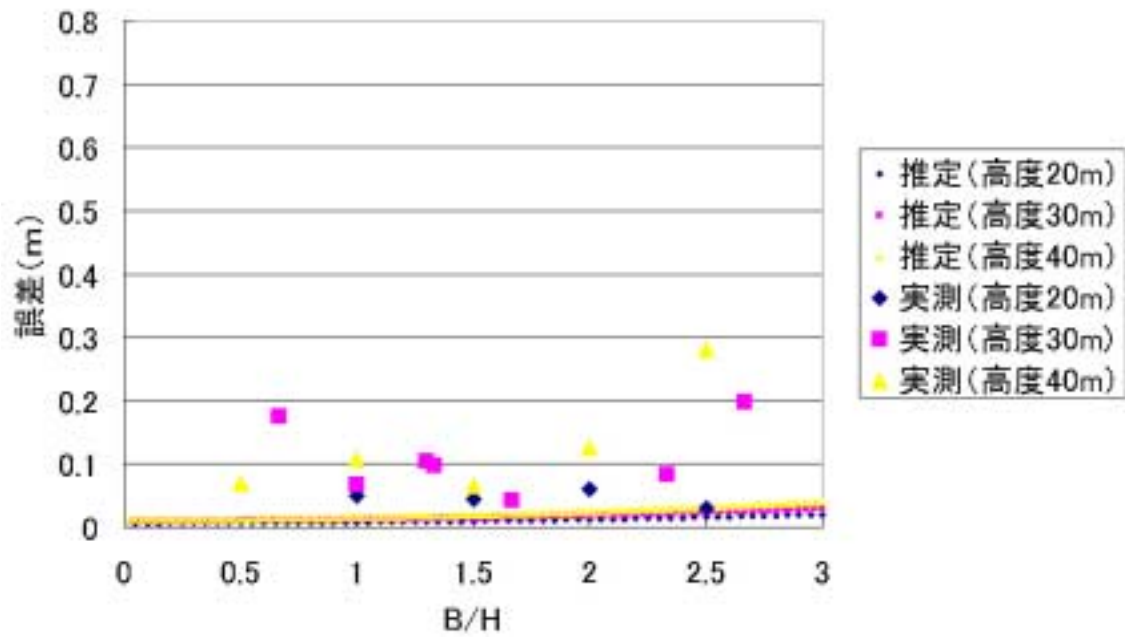


図 3.10 B/H と X 軸の誤差

3.4.5 精度検証結果 (Y 軸)

図 3.11 は、Y 軸の推定誤差量のグラフに本システムで得られた 4 点の検証点の誤差平均をプロットしたものである。このグラフから X 軸と同様にプロットされた点が推定誤差よりも大きいことがわかる。高度別の誤差は、高度 20m の平均誤差量が 5.3cm、高度 30m の平均誤差量が 13.2cm、高度 40m の平均誤差量が 17.8cm となっており、X 軸と同様に高度に比例して誤差が大きくなることがわかる。B/H については X 軸と同様に 1 から 2 で安定した精度を得ることがわかった。

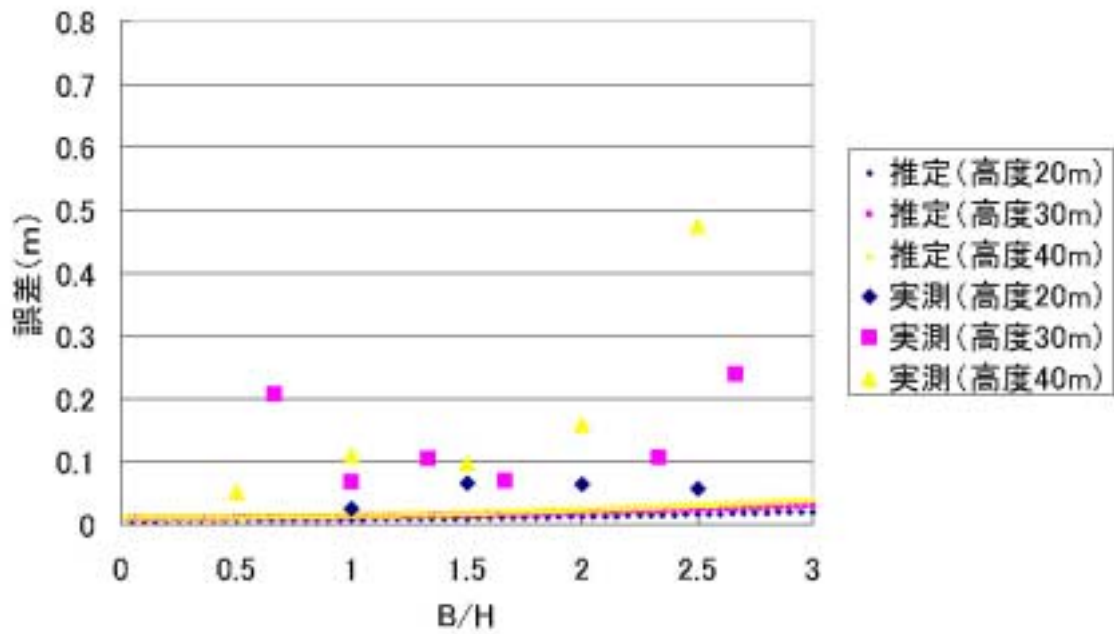


図 3.11 B/H と Y 軸の誤差

3.4.6 精度検証結果 (Z 軸)

図 3.12 は、Z 軸の推定誤差量のグラフに本システムで得られた 4 点の検証点の誤差平均をプロットしたものである。高度別の誤差は、高度 20m の平均誤差量が 7.1cm、高度 30m の平均誤差量が 24.3cm、高度 40m の平均誤差が 23.7cm となっており、高度 30m、40m は高度 20m と比較して大きな誤差を発生した。また、X 軸、Y 軸と比較して全体の誤差量が大きくなった。B/H では推定誤差量と同様に B/H の小さいところで大きな誤差を発生していることがわかった。しかし、反対に B/H が 2.5 や 2.7 といった大きなところでも大きな誤差を発生していることがわかった。Z 軸でも B/H は 1 から 2 で安定した精度を得ることがわかった。

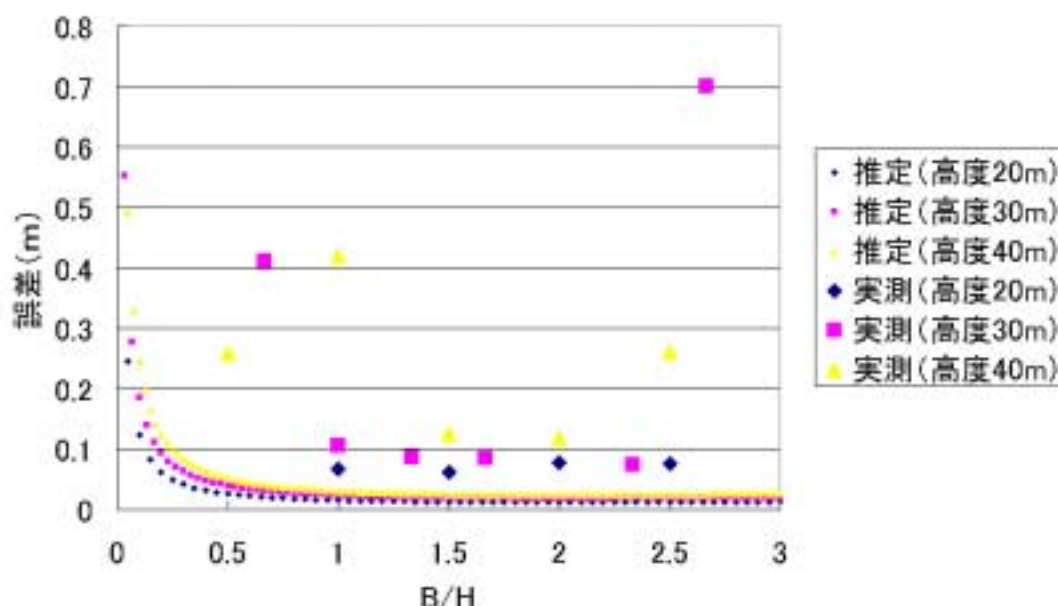


図 3.12 B/H と Z 軸の誤差

3.4.7 考察

精度検証によって X 軸、Y 軸、Z 軸のすべて点で推定誤差量よりも大きな誤差量が発生していることがわかった。これは対応点のミスマッチングのほかに機械誤差や個人誤差といった誤差発生要因があり、その要因によって起こったものであると考えられる。高度については、高度が高くなるほど誤差も大きくなることがわかった。これは推定誤差量の傾向と一致した結果であった。軸別の精度では、X 軸と Y 軸に比べて Z 軸で大きな誤差を発生した。これは推定誤差量からわかるように B/H の小さいところで発生した誤差が反映したものであると考えられる。また、B/H が 2.5 を超えてから大きな誤差を発生することについては、基線長が大きくなることによって画像の傾きが大きくなり、目視による対応点の抽出精度が落ちることによって発生した誤差であると考えられる。

精度検証の結果から B/H を 1~2 で安定した精度を得ることがわかった。本システムを用いて 10cm 以内の三次元地形モデルを生成する場合、B/H1~2、撮影高度 20m 以内にするのが望ましい。しかし、解析に使用するデジタルカメラの解像度を上げることによって撮影高度を高くすることが可能であると考えられる。

3.5 ステレオマッチング精度検証

3.5.1 ステレオマッチング精度検証の目的

精度評価では、デジタルカメラを傾けて撮影するシステムにより B/H の大きな対象エリアの画像の取得を行った。ステレオマッチング精度検証では、この B/H の大きな対象エリアの画像を用いて B/H がステレオマッチング精度に及ぼす影響について明らかにすることを目的としている。また、同時にテンプレートサイズがステレオマッチング精度に及ぼす影響するについても検証を行う。

3.5.2 ステレオマッチング精度検証の方法

ステレオマッチング精度検証の方法は、まず基準画像と探索画像の対応する点の画像座標を目視によって 15 点抽出する。次に、基準画像の画像座標を本システムに入力し、対応点の探索を行う。得られた対応点を目視と比較し、その差が 2Pixel 以内であればステレオマッチングが成功したとする。全 15 点中の成功率を B/H 及びテンプレートサイズ別に求めてステレオマッチングの精度を検証する。なお、ステレオマッチングの精度検証には高度 30m で基線長 20, 30, 40, 50m (B/H0.67, 1, 1.33, 1.67) の画像を使用する。また、デジタルカメラを平行に並べた一般的なカメラ位置と比較するために過去に撮影した同じエリアの画像を使用した。この画像の高度は 20m で基線長 5m (B/H0.25) である。

3.5.3 ステレオマッチング精度検証の結果

図 3.13 はステレオマッチング精度検証の結果である。横軸のテンプレートサイズとは、基準画像のある点を探索画像から探す際に、その点とその点の周りの輝度の情報を手がかりに類似度の高い部分を探索する。このある点を中心とした領域をテンプレートサイズという。一般的には 3×3 Pixel や 7×7 Pixel といった正方形のテンプレートが用いられる。図 3.13 の横軸は、この正方形のテンプレートの一辺の大きさを表している。

B/H 別のステレオマッチングの成功率は、B/H0.25 が平均 72%、B/H0.67 が平均 42%、B/H1 が平均 35%であり、B/H1.33 と B/H1.67 についてはどのテンプレートサイズにおいても成功率は 0%であった。また、平行に撮影を行った B/H0.25 はすべてのテンプレートサイズにおいて他の B/H よりも高い成功率を示していることがわかった。

テンプレートサイズがステレオマッチング精度に及ぼす影響は、図 3.13 からテンプレートサイズが大きくなるにしたがって成功率が上がるがあるピークを超えると逆に成功率が

下がることになる．また，B/H によって成功率のピークのテンプレートサイズが異なることがわかった．

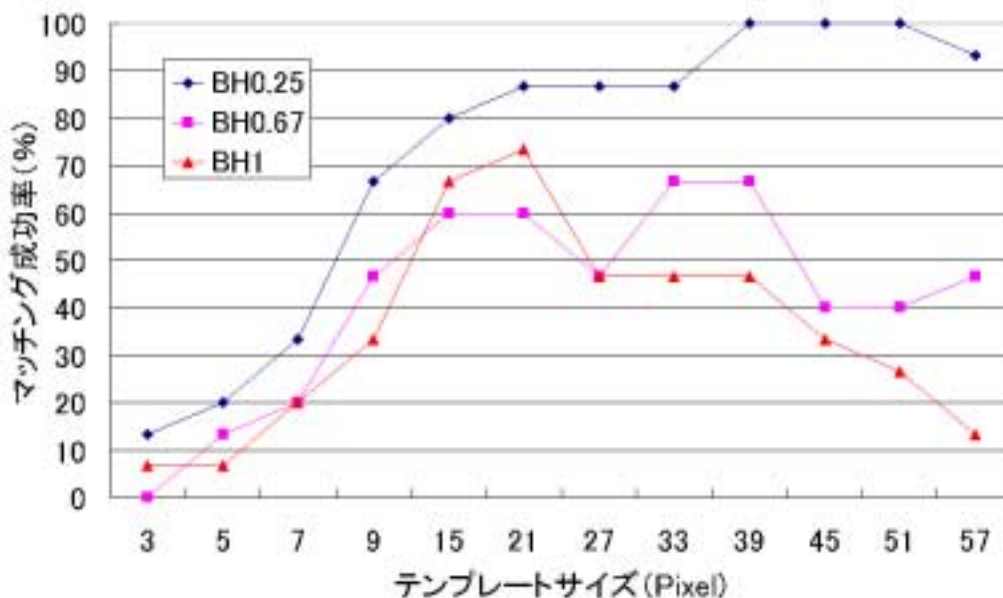


図 3.13 ステレオマッチング成功率

3.5.4 考察

ステレオマッチング精度検証の結果から B/H が大きくなるにしたがって成功率が下がることがわかった．これは，B/H が大きくなることによって画像に傾きが生じ，同じ物体が違うものに見えることで起こると考えられる．また，撮影方向によって明るさが変化することも原因の 1 つであると考えられる．次に，テンプレートサイズ別のマッチング成功率は，テンプレートサイズが大きくなるにしたがって成功率は上がるが，あるピークを超えると逆に成功率が下がるという傾向があることがわかった．これは，テンプレートサイズが小さい時には画像の傾きによるマッチング誤差が少ないためステレオマッチングの成功率は上がる．しかし，テンプレートサイズが大きくなるにつれて傾きによるマッチング誤差が大きくなり，あるテンプレートサイズまで大きくなると別の場所を対応点として決定することによって起こると考えられる．また，成功率のピークがテンプレートサイズによって異なるのは B/H によって傾きが異なるためであると考えられる．

ステレオマッチング精度検証の結果から本システムのステレオマッチングアルゴリズムは B/H1 までステレオマッチングで対応点を抽出することが可能であることがわかった．また，B/H1 までであればテンプレートサイズ 21×21Pixel で安定した成功率を得ることができるとわかった．しかし，今回の実験では撮影時刻の違いや画像の回転などの影響が含まれるため，実際には B/H1 よりも大きな B/H でも対応点の抽出が可能であると考えられる．

3.6 三次元地形モデルの生成

3.6.1 三次元地形モデルの生成の目的

三次元地形モデルの生成では，精度検証とステレオマッチング精度検証の結果を踏まえて実際に三次元地形モデルの生成し，生成における問題点を抽出することを目的としている．また，同時に土地被覆がステレオマッチングに与える影響についても検証を行う．

3.6.2 三次元地形モデルの生成の方法

精度検証とステレオマッチング精度検証の結果から高度 30m，B/H1 の画像（図 3.14 参照）を用いて，テンプレートサイズ 21 × 21Pixel で三次元地形モデルを生成する．基準点は，対空標識が鮮明に写されていて，かつ画像全体に分布するように左画像から 19 点，右画像から 30 点選んだ．また，相関 0.57 以上，残差 300 以下を閾値としてステレオマッチングを行った．なお，ステレオマッチングを行うために画像は，あらかじめ 90 度回転させている．



左画像

右画像

図 3.14 使用画像

3.6.3 三次元地形モデルの生成の結果

図 3.15 は、本システムで得られた三次元座標を XY 座標で表したものである。座標数は 2571 点である。図 3.16 は ArcView によって生成した対象エリアの DEM である。図 3.17 は、DEM を用いて生成したオルソ画像である。図 3.18 は、オルソ画像に座標をプロットした図である。この図から高い木や道路などではステレオマッチングの成功率が低いことがわかる。図 3.19 は、DEM にオルソ画像を重ねて得られた鳥瞰図である。オルソ画像までの生成時間は、基準点データの作成（基準点観測を除く）に約 1 時間、三次元座標取得に約 6 時間、DATA 形式の変換に約 1 時間、オルソ画像生成に約 30 分、トータルで 8 時間 30 分であった。

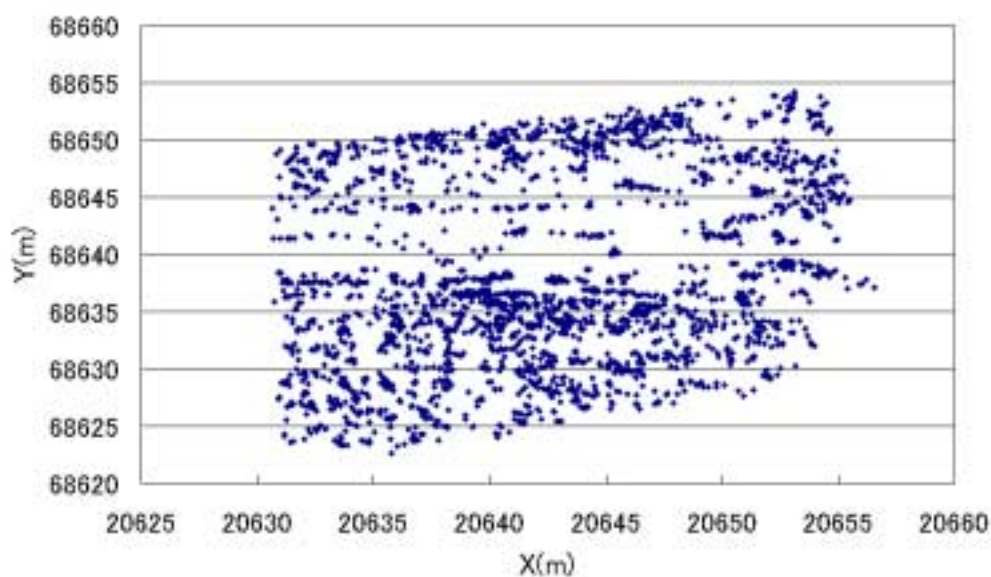


図 3.15 計測された三次元座標の分布 (X,Y)

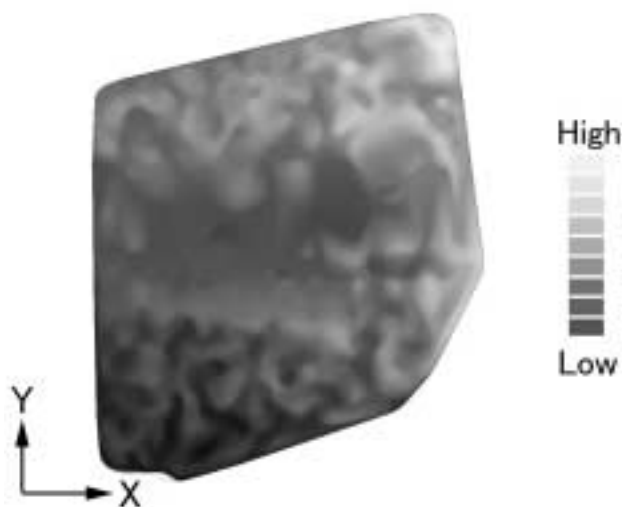


図 3.16 DEM



左画像

右画像

図 3.17 オルソ画像

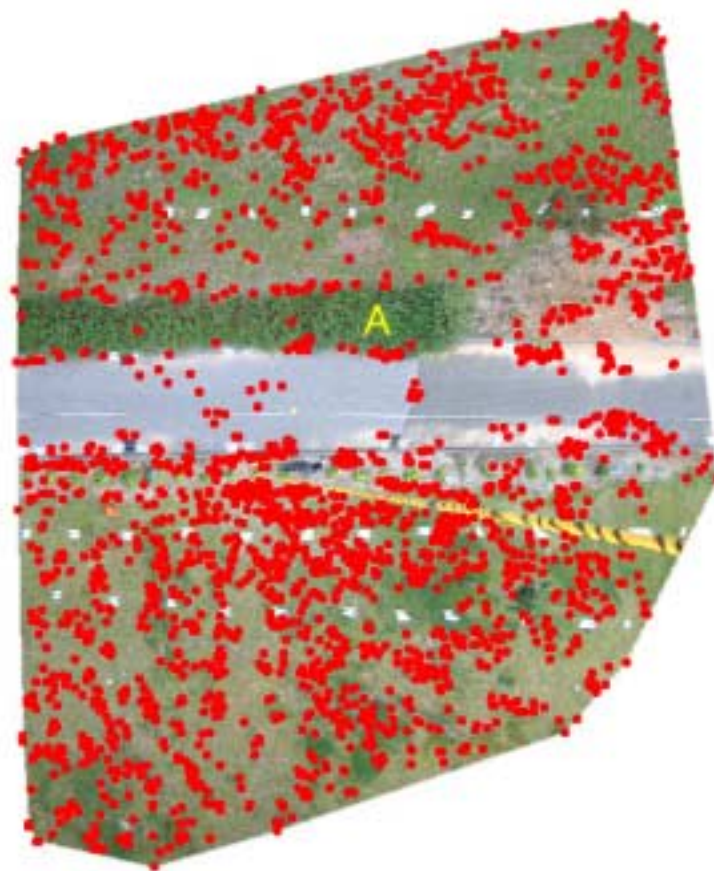


図 3.18 オルソ画像と計測された三次元座標 (X,Y)

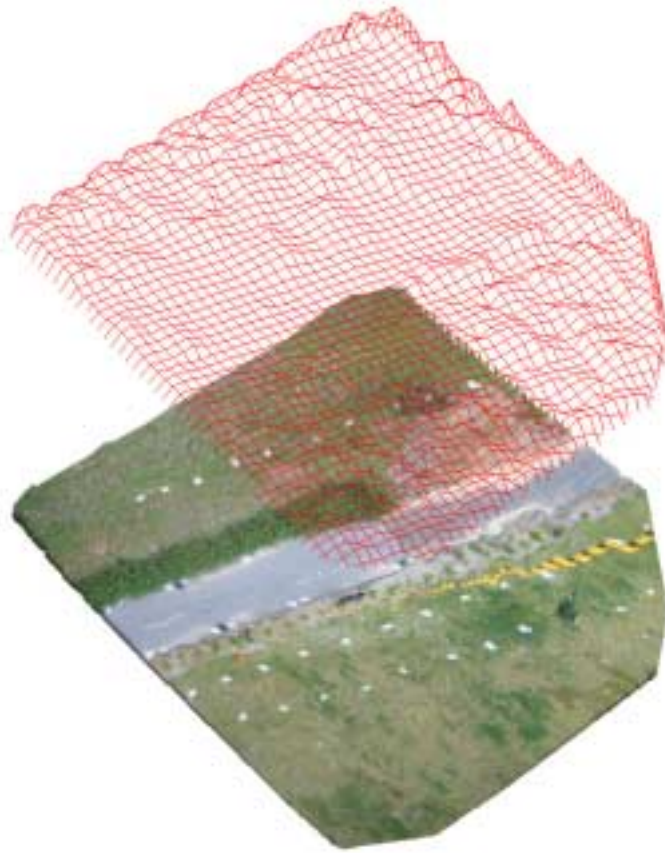


図 3.19 鳥瞰図

3.6.4 考察

三次元地形モデルを生成する上で、ステレオマッチングの閾値を決定という問題が発生した。ステレオマッチングでは、一般的に相関係数の閾値を高く、また残差の閾値を低く設定することでミスマッチングは少なくなる。しかし、閾値の設定が正しくないと得られる対応点数が少なくなり、密な三次元地形モデルを生成することができないという問題が発生する。また、逆に対応点数には問題ないがミスマッチングが多くなるという問題も発生する。適切な閾値を決定することは効率的に密な三次元地形モデルを生成する上で欠かせない要因である。また、ミスマッチングを軽減するという点においても大きな要因であると言える。本研究で生成した三次元地形モデルは、ステレオマッチングの閾値を低く設定したことによってミスマッチングがいくつか発生し、そのミスマッチングによる誤差を消す作業が30分ほど必要になった。このミスマッチングを軽減するには多くの条件の下でテストマッチングを行い、適切な閾値の指標を求める必要がある。また、そのほかの問題として B/H が大きな画像では高い木などによってオクルージョンが起これば対応点の取得が

出来ないという問題が発生した。

土地被覆がステレオマッチングに与える影響は、周りの地形と比較して高い木などでステレオマッチングの成功率が低くなることがわかった。これは、左右の画像で見えている部分が異なるため成功率が低くなると考えられる。実際に、図 3.18 を見ると道路沿いの植生（図 3.18 の A）は数点しか対応点を取得できていないことがわかる。この植生の高さは約 1m である。つまり、これは高度 30m、B/H 1 の場合、1m の高さでもステレオマッチングに影響を与えるということを表している。また、道路においてステレオマッチングの成功率が低くなることがわかった。これは、道路では周りの輝度の値が比較的均一であるために対応点の候補を絞りきれないということが考えられる。実際に、図 3.18 を見ると道路の中央部に比べて道路の端の部分のほうが成功率は高いことがわかる。つまり、本システムのステレオマッチングアルゴリズムは均一な輝度のところよりも輝度の変化の大きなところのほうが成功率は高くなると考えられる。

4. 結論

本論文では、2枚の写真から三次元地形モデルを自動で生成するシステムの開発を行った。また、そのシステムを用いて B/H 及び土地被覆が各精度に与える影響について以下の成果を得ることができた。

() B/H が計測精度に及ぼす影響

- ・ 推定誤差と同様に、B/H が小さいときには奥行き方向 (Z 軸) で大きな誤差を発生する。
- ・ 推定誤差と同様に、B/H1 ~ 2 で安定した精度を得ることができる。

() B/H がステレオマッチング精度に及ぼす影響

- ・ 本システムのステレオマッチングアルゴリズムは、B/H が大きくなるほど成功率が小さくなり、B/H が 1 を超えると対応点の探索ができなくなる。
- ・ B/H によって成功率の高いテンプレートサイズが存在する。
B/H0.25 ではテンプレートサイズ 39 × 39Pixel ~ 51 × 51Pixel。
B/H0.67 ではテンプレートサイズ 33 × 33Pixel ~ 39 × 39Pixel。
B/H1 ではテンプレートサイズ 21 × 21Pixel。

() 土地被覆がステレオマッチングに及ぼす影響

- ・ B/H1, 撮影距離 30m の場合、1m 以上の高さの植生でもステレオマッチングで得られる点は減少する。
- ・ 本システムのステレオマッチングアルゴリズムは、輝度 (土地被覆) の均一なところよりも輝度の変化が大きいところのほうがステレオマッチングの成功率は高くなる。

() その他

- ・ 推定誤差と同様に、撮影距離に比例して誤差が大きくなる。
- ・ テンプレートサイズが大きくなるほどステレオマッチングの成功率は上がるが、あるピークを境に成功率が減少する。
- ・ 目視においても B/H が 2.5 を超えると対応点抽出精度が落ちる。

研究の結果から本システムの理想的なカメラ位置及びテンプレートサイズは、B/H1、テンプレートサイズ 21 × 21Pixel であった。この結果を踏まえ高度 20m、B/H1 で三次元地形モデルを生成した場合、6cm 未満の精度の三次元地形モデルが得られると予想される。この結果は、地すべりの挙動追跡を行う上で、まだ精度面の不安を抱えており改良の必要があると考えられる。しかし、この精度面についてはデジタルカメラの高性能化に伴い、

今後向上が期待できる要因であると言える。仮に本研究で使用したデジタルカメラの解像度が2倍になれば推定される誤差は1/2になり、高度20m以内、 $B/H1$ で撮影することで5cm以内の精度の三次元地形モデルを生成することも十分に可能であると考えられる。5cm以内の三次元地形モデルであれば移動量の大きな地すべりや長期的な地すべりの監視で本システムを適用することが可能であると考えられる。ステレオマッチングアルゴリズムについては、 B/H が1~2において安定した精度を得られるという結果から $B/H2$ までを高い精度で対応点を探索することが可能なステレオマッチングアルゴリズムに改良する必要がある。

参考文献

- 1) 吉澤孝和：防災プロジェクトへの測量技術の応用，応用測量論文集，1-1，pp.21-28，1990．
- 2) 吉澤孝和・西澤茂高・三澤敏雄・根岸六郎：地すべり挙動解析における写真測量の応用，写真測量とリモートセンシング，Vol.30，No.5，pp8-20，1991．
- 3) 門田貴江・吉野敦雄・高木方隆：地形測量における測点数と精度の関係，写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集，pp247-250，2000．
- 4) 中田隆司・近津博文：デジタル写真測量からみた300万画素デジタルスチルカメラの精度検証，写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集，pp283-286，2000．
- 5) 菊池有起・野村努・高木方隆：地形計測における要求精度，写真測量学会平成13年度秋季学術講演会発表論文集，pp255-258，2001．
- 6) SPOT画像を用いたステレオマッチング，写真測量学会昭和63年度秋季学術講演会発表論文集，pp59-64，1997．
- 7) 村井俊二：空間情報工学，日本測量協会発行，1999．
- 8) 解析写真測量委員会編，解析写真測量，日本写真測量学会発行，1983．
- 9) 動体計測研究会編，イメージセンシング，日本測量協会発行，1997
- 10) 「測量」編集委員会・編，高性能化するデジタルカメラと計測への応用，日本写真測量協会発行，2000．
- 11) 野村努・高木方隆：デジタル写真測量による地すべり地の三次元移動追跡への適用可能性，写真測量学会平成12年度秋季学術講演会発表論文集，pp287-290，2000．
- 12) 光岡操・野村努・高木方隆：地すべりGISのためのバルーン搭載型CCDカメラによる三次元計測，地理情報学会平成13年度講演会，pp93-96，2001．
- 13) Edward M.Mikhail・James S.Bethel・J.Chris Mcglone：INTRODUCTION TO MODERN PHOTOGRAMMETRY，2001
- 14) 武井有恒：地すべり・崩壊・土石流，鹿島出版社，1980
- 15) 村木広和・田中成典・古田均：デジタル測量入門，森北出版株式会社，2000
- 16) 小野塚良三：林冠ギャロップに着目した写真判読とデジタル写真測量システムによる八幡平澄川地すべり土塊の変位量計測，地すべり学会地すべり，Vol.35，No2，pp69-76，1998
- 17) 佐々木一郎，新谷融：地すべり地の平面形態の運動的考察，地すべり学会地すべり，Vol.37，No1，pp11-17，2000

謝辞

本研究の機会を与えてくださり、また数々の有益なご指導を与えてくださいました社会システム工学科の高木方隆助教授に深甚の謝意を表します。

副指導教官としてご助言を下さいました情報システム工学科の竹田史章教授に心から感謝致します。

中間発表などにおいて適切にご助言を下さいました社会システム工学科の島弘教授、藤澤伸光教授、村上雅博教授、渡邊法美助教授、大内雅博助教授に深く感謝致します。

ヘリウムの配達で無理なお願いを聞いていただいた徳島酸素工業の一楽浩之さんに深く感謝致します。

日頃から、研究及び英語などにおいてご助言を下さいました Jong Hyeok JEONG さん、誠にありがとうございました。

また、貴重な時間を割いて観測に協力してくれた浅野裕史君、門田貴江さん、元久慎哉君、吉野敦雄君、光岡操君、菊池有起君、栃本祥児君、氏家浩二君、浦岡竜二君、柏原智志君、清岡香菜さん、誠にありがとうございました。特に、研究の一端を担ってくれた光岡操君、栃本祥児君に深く感謝致します。

日々の生活を共にした社会システム工学科の皆様、いつも学生達を支えてくださった山本麻矢秘書、西村有加秘書どうもありがとうございました。

最後に、影ながら支えてくれた家族と友人に心から感謝します。

付録

A 使用画像

以下の図は解析に用いた画像である。

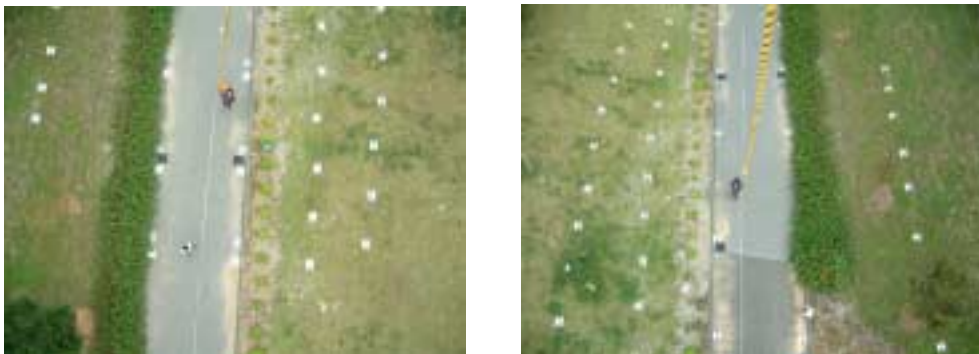


図 20 高度 20m , B/H1



図 21 高度 20m , B/H1.5



図 22 高度 20m , B/H2



图 23 高度 20m , B/H2.5



图 24 高度 30m , B/H0.67



图 25 高度 30m , B/H1



图 26 高度 30m , B/H1.33



图 27 高度 30m , B/H1.67



图 28 高度 30m , B/H2.33



图 29 高度 30m , B/H2.67



图 30 高度 40m , B/H0.5



图 31 高度 40m , B/H1



图 32 高度 40m , B/H1.5



图 33 高度 40m , B/H2



图 34 高度 40m , B/H2.5

B PC

表 B.1 は、3 章の精度評価に使用した PC のスペックである。なお、解析は Microsoft 社の Visual C++を用いて行った。

表 B.1 スペック

CPU	AMD Athlon XP 2000MHz
MEMORY	DDR RAM 524MB
OS	Windows2000

C 基準点

表 C.1 は、3 章の精度評価で使用した基準点の座標である。

表 C.2 基準点

NO	X	Y	Z
1	20635.947	68647.211	64.904
2	20637.306	68647.190	64.869
3	20639.110	68647.062	64.812
4	20641.214	68647.333	65.026
5	20643.159	68647.117	64.978
6	20645.511	68647.242	64.934
7	20647.597	68647.303	64.918
8	20650.319	68647.555	64.942
9	20651.920	68647.270	64.906
10	20654.204	68647.491	64.865
11	20656.411	68647.331	64.837
12	20658.024	68647.258	64.789
13	20660.036	68635.216	63.453
14	20657.163	68635.201	63.550
15	20655.028	68635.244	63.636
16	20652.703	68635.230	63.694
17	20650.356	68635.431	63.765
18	20648.179	68635.374	63.625
19	20646.155	68635.323	63.666
20	20643.933	68635.307	63.722
21	20641.873	68635.303	63.570
22	20639.599	68635.181	63.649
23	20637.412	68635.358	63.513
24	20635.162	68635.244	63.457
25	20633.121	68635.234	63.413
26	20631.145	68635.292	63.526
27	20632.066	68633.151	64.219
28	20634.104	68632.958	64.165
29	20636.251	68632.935	64.197
30	20638.253	68632.600	64.107
31	20640.490	68632.417	64.180
32	20642.833	68632.622	64.133
33	20644.782	68632.407	64.288
34	20646.794	68632.401	64.289
35	20649.168	68632.181	64.503
36	20651.406	68632.109	64.398
37	20653.621	68631.967	64.302
38	20655.849	68631.785	64.208
39	20658.072	68631.602	64.111