

PRISM による DSM/オルソ画像の作成

高久淳一*¹・田殿武雄*²

DSM and ORI Generation Using PRISM

Junichi TAKAKU*¹ and Takeo TADONO*²

Abstract

Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping (PRISM) carried at Advanced Land Observing Satellite (ALOS) is expected to generate worldwide topographic data in respects of its high resolution and stereoscopic observation. The algorithms for generating Digital Surface Model (DSM) and Ortho-Rectified Image (ORI) have been developed for those objectives in Earth Observation Research Center/Japan Aerospace Exploration Agency (EORC/JAXA). During first one year following the successful ALOS launch, the capabilities of the algorithm have been widely tested. In this paper, intermediate results of performance analysis of DSM and corresponding ORI processing are described. First, the geometric model analysis of PRISM sensor is presented with the experimental results of the orientation processing. Then, the performance analysis of DSM and ORI generated with the PRISM geometric model is presented. The accuracy assessment results of generated DSM are presented from the comparison with high accuracy and high resolution reference DSM data sets of LiDAR DSM and Aerial Photo DSM. The accuracy assessment results of generated ORI are presented from the comparison with GCP.

Keywords : digital surface model (DSM), ortho-rectified image (ORI), PRISM, ALOS

1. はじめに

PRISM は、ALOS の主要なミッションの一つである全球スケールでの 1/25,000 程度の地図の作成・更新のために開発・搭載されたセンサであり、PRISM データによる DSM/オルソ画像の作成方式の確立は、このミッションの達成に直接的に寄与する主要な課題となっている。

DSM/オルソ画像の自動作成技術に関しては、伝統的な航空写真測量をベースとした方式についてこれまで様々な研究が行われてきており、航空写真のスキャンニングによるデジタル化及びデジタル画像のステレオマッチング技術、汎用の計算機スペックの進化と相まって実用化が進められてきている。また、~3m 程度の高い地上分解能をもつ人工衛星搭載の光学センサデータを用いた DSM/オルソ画像の自動作成についても、近年、IKONOS や QuickBird 等の商用衛星データの普及に伴う成果等¹⁾²⁾ が挙げられるようになってきた。但し、これらの衛星に関しては DSM の作成を第一目的とした衛星ではなく、ステレオ観測を常時行うような機構ではないため、計画生産的にデータを整備

するには向かない。また、SPOT-5 については、ステレオ観測を行うセンサ (HRS) を有しており、成果品としての DEM³⁾ を販売している。これら以外の DSM 作成のアプローチとしては、LiDAR を用いた高解像度かつ高精度な DSM 計測が実用化されており、国土地理院によりこれらを用いた数値地図 5m メッシュ DEM の整備等も徐々に進んできているが、LiDAR の場合、一度に取得できるデータ取得範囲が衛星データと比較して狭いために全球スケールでのデータの整備にはコストが掛かりすぎるという懸念がある。また、衛星データを用いた全球スケールでの DSM 整備という観点からは、レーダ干渉技術を用いた SRTM が有名であるが、一般に公開されているデータについては、解像度及び精度共にいわゆる 1/25,000 程度の地図作成には不十分である。

一方 PRISM は、先に述べたように地図作成に係る DSM/オルソ画像の作成に主眼を置いて開発されたセンサであり、軌道方向トリプレットステレオ (前方視/直下視/後方視) の常時観測を行うという IKONOS や QuickBird にはない機能を有している。この機能により、ステレオ画像間の取得時刻差が前方と直下及び直下と後方でそれぞれ約

(2007. 4. 10 受付, 2007. 7. 17 改訂受理)

*1 財団法人リモート・センシング技術センター開発部

〒106-0032 東京都港区六本木 1-9-9 六本木ファーストビル7階

*2 独立行政法人宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

*1 Remote Sensing Technology Center of Japan, Technical Development Department, Roppongi first building 7F, 1-9-9 Roppongi, Minato-Ku, Tokyo 106-0032, Japan

*2 Earth Observation Research Center, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

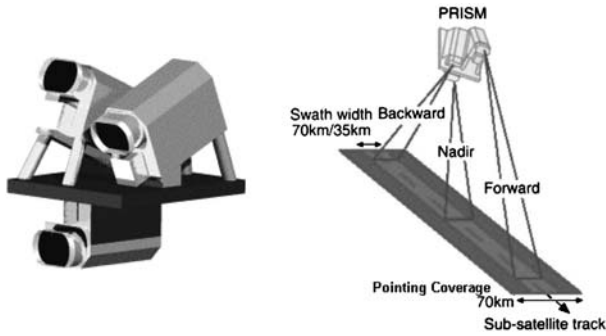


Fig. 1 PRISM configuration.

Table 1 Stereo observation specs of high-resolution satellite optical sensors.

	ALOS PRISM	IKONOS Pan	QuickBird Pan	SPOT-5 HRS
B/H	1.0 (F-B) 0.5 (F-N or B-N)	0.54-0.83	0.6-2.0	0.84
Resolution	2.5m	0.82m	0.61-0.72m	5m (along track)
Swath	35km	11.3-13.8km	16.5km	120km
Quantization	8bits	11bits	11bits	8bits

45 秒という中で、常時安定してトリプレットステレオデータセットが得られるという特徴を持っている (Fig. 1)。またその他のステレオ観測に係る主な特長について他センサの特徴^{a)}との比較を Table 1 に示す。PRISM からの DSM/オルソ画像作成を行うためには、これらの PRISM に固有な特徴に沿った専用のアルゴリズムを開発する必要がある。筆者らは JAXA/EORC におけるこれらのアルゴリズム整備に向けて ALOS の打上げ前からヘリコプタ搭載の TLS 等を用いたアルゴリズム開発及びシミュレーションを行ってきた^{4)~6)}。開発にあたっての主な検討課題としては、

- ・ PRISM 画像の標定技術及び幾何モデル解析技術
 - ・ PRISM トリプレットステレオ画像のマッチング技術
- といったものに集約される。また、DSM/オルソ画像の作成精度としては、上記 PRISM の特徴及び 1/25,000 程度の地図作成への適用を踏まえて Table 2 のように設定されている。本報告では、これら幾何モデル解析及び DSM/オルソ画像の作成方式の詳細について述べると共に、現在までに得られているテストサイトの観測データを用いた評価結果について述べる。

2. PRISM 幾何モデル校正及び標定方式

2.1 概要

衛星搭載の光学ラインセンサの標定計算においては、伝統的な写真測量における GCP の共線条件を使用した標定計算手法を発展させたものとしてこれまで多くの技法が提案されてきている⁷⁾⁸⁾。一方、ALOS プロジェクトの技術検証の一つとして、衛星搭載の GPS/Star Tracker (STT) 計測データのみにより GCP なしで外部標定要素を自動的に

^{a)} <http://www.idi.or.jp/tech/survey00.htm> 参照

Table 2 Target accuracies of DSM/ORI.

	Height accuracy	Planimetric accuracy
DSM	5.0m(1 σ)	2.5m(1 σ)
ORI	-	5.0m(1 σ)

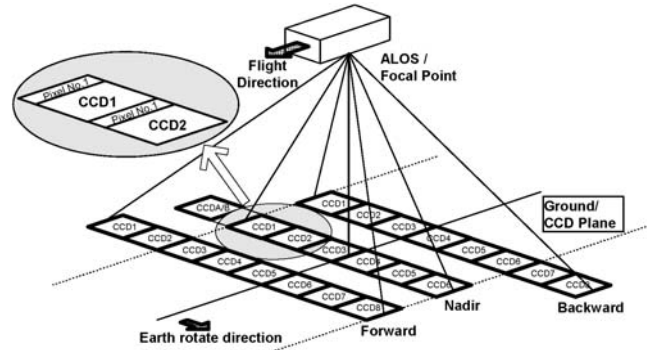


Fig. 2 PRISM CCD units configuration.

決定するという技術目標が設定されている⁹⁾。ここで、衛星軌道データとして計測される GPS に関しては、目標の精度 (<1 m 3 σ) を達成していることが Satellite Laser Ranging (SLR) 局を使用した検証で確認されているが、衛星姿勢データとしての STT データ及び STT と前方視/直下視/後方視センサの間の各アライメント (センサアライメント) 精度によるセンサの指向精度に関しては現時点での校正検証結果からは目標の精度を達成するには至っていない。よって、少なくとも目標精度を達成するためには、外部標定要素の指向成分である STT データ及びセンサアライメントの誤差に対して GCP を用いた修正が必要であると共、これらの指向誤差の傾向を分析し、GCP による修正を行っていない指向データそのものの精度を上記技術目標に照らして確認しておく必要がある。また、センサモデルの内部標定要素の評価/決定には PRISM 固有のセンサモデルに適合した方式を考慮する必要がある。なおここで言う「指向」とは、幾何モデル一般で表現される視線ベクトルの要素について「方向」に当たる成分を指しており、衛星姿勢データの「姿勢」と区別して記述するために使用している。

2.2 PRISM センサモデル及び内部標定方式

PRISM は観測幅をカバーするラインセンサとして各約 5,000 素子のディテクタから成る複数 (直下視で 6, 前方視/後方視で 8) の CCD (ユニット) を一列に並べた構成になっており (Fig. 2)、画像データもこの CCD 単位で出力される機構になっている。トリプレットステレオ観測で実際にデータが取得されるのは、これら CCD の内各方向視でほぼ地上の同一の領域をカバーする最大 4 ユニットでありどの CCD が使用されるかは各バスでの観測計画に依存している。また、ラインセンサに対する内部標定要素である焦点距離、主点位置、投影面でのディテクタ位置等に代用される打上げ前の計測データ (CCD アライメント) もそれらを定義する CCD 座標系の計測値として CCD 毎に与

えられる。これら CCD アライメント精度を軌道上の実観測データに対して評価するに当たっては、航空写真フィルムの指標に該当するようなりファレンスは存在しないため GCP を用いて行う以外にないが、一般に GCP のみを用いた推定において内部標定要素の一部は外部標定要素と従属な関係にあり切り分けての推定が困難な場合が多い⁸⁾。一方、外部標定計算やそれに引き続いての DSM/オルソ画像の作成は、観測単位で連続した任意の最大 4 つの CCD を一度に取り扱う必要があるため、少なくとも外部標定要素では修正の困難なユニット間の相対的な CCD アライメント誤差が認められる場合は事前に取り除いておく必要がある。これらの誤差を評価及び修正するための内部標定方式としては、1 シーンの中で得られた複数の CCD 画像に撮像された GCP の誤差について、外部標定要素としてのシーン全体のバイアス成分を取り除いた残差を評価し、CCD ユニット毎に沿ったシステムチックな残差が認められる場合は、これらを相対 CCD アライメント誤差とみなしてモデル化する方式とした。また、これらの評価結果について複数シーン分蓄積し、動的な外部標定要素のバイアス成分に対して、相対 CCD アライメントは静的であるという前提の基にこれらを統計的に整理することで軌道上相対 CCD アライメント校正値として固定する方式とした。

2.3 外部標定方式

ALOS の GPS から得られる軌道データは ECR (地球に固定された地心座標系)での座標値として与えられる。また STT から得られる姿勢データは、衛星座標と ECI (慣性座標)との回転を示すパラメータとして与えられる¹⁰⁾。ここで衛星座標は、衛星重心を原点とし、衛星の Roll 軸、Pitch 軸、Yaw 軸をそれぞれ X 軸 (衛星進行方向が+)、Y 軸 (衛星進行方向右が+)、Z 軸 (地心方向が+)とした座標系である。よって姿勢データは International Earth Rotation Service (IERS) 情報から得られる ECI-ECR 変換のパラメータを使用して衛星座標と ECR の回転を示すパラメータに変換し使用する。一方、画像座標及び CCD アライメントにより定義される CCD 座標と衛星座標との間は方向視毎のセンサアライメントとして打上げ前計測値が与えられる¹⁰⁾。ここで画像座標は、デジタル画像データの左上を原点として、ディテクタ (カラム) 方向を x 、ライン方向を y とした座標系である。また、CCD 座標は、写真測量一般のカメラ座標に当たる座標系であり、CCD 配列面における光学主点を原点に、CCD 配列と直交した軌道方向を X 軸 (進行方向が+)、CCD 配列に沿う方向を Y 軸 (CCD 番号降順が+)、光軸方向を Z 軸 (地上方向が+)とした座標系である。外部標定で使用する共線条件式を以下により定義する。

$$\begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0(t) \\ Y_0(t) \\ Z_0(t) \end{bmatrix} + \lambda M(t) \begin{bmatrix} x_i + vx_i \\ y_i + vy_i \\ -c \end{bmatrix}_{l,n} \quad (1)$$

ここで X_i, Y_i, Z_i は GCP- i の ECR 座標、 x_i, y_i, c は GCP- i の

画像座標 x (CCD 毎のディテクタアドレス) と CCD アライメントにより定義される CCD 座標、 I は方向視種別 (前方/直下/後方)、 n は x に該当する CCD 番号、 t は GCP- i の画像座標 y に該当する時刻、 $X_0(t), Y_0(t), Z_0(t)$ は t における軌道位置、 $M(t)$ は t における ECR と CCD 座標の変換行列、 λ はスケールファクタ、 vx_i, vy_i は GCP- i の CCD 座標上残差である。なお、軌道データに関しては、十分な精度が確認されていることから、軌道位置誤差の成分は含まれていない。また、

$$M(t) = M_{ph} \cdot M_{att}(t) \cdot M_e \cdot M_{or} \quad (2)$$

であり、ここで、 $M_{att}(t)$ は t における姿勢データ (衛星座標を地上座標 ECR に変換する回転行列)、 M_{or} は放射計 I の CCD 座標を衛星座標に変換する回転行列 (打上げ前計測センサアライメント)、 M_{ph} は物理現象 (大気効果、光行差) を補償する回転行列、 M_e は姿勢データ誤差とセンサアライメント誤差の合成に該当する回転行列である。また、

$$M_e = R_y[\theta] \cdot R_x[\phi] \cdot R_z[\phi] \quad (3)$$

であり、ここで、 $R_x[\phi], R_y[\theta], R_z[\phi]$ は以下に示す X, Y, Z 軸周りの各回転行列である。

$$\begin{aligned} R_x[\phi] &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \\ R_y[\theta] &= \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix} \\ R_z[\phi] &= \begin{pmatrix} \cos\phi & -\sin\phi & 0 \\ \sin\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

シーン毎に行う放射計 I の外部標定は、シーン内に計測された m 個の GCP- i ($i=1, \dots, m$) により定義される式 (1) の vx_i, vy_i を最小化するように式 (3) の衛星座標における指向誤差オイラー角 ϕ (Roll)、 θ (Pitch)、 ϕ (Yaw) を最小二乗法で求める処理と定義される。なお、これら ϕ, θ, ϕ については、 t に依存した変動成分を含むことも考えられるが、1 シーン (約 5 秒) 内での変動成分は事前に行った GCP 誤差解析により十分小さいことが確認されているため、ここでは未知数に含めていない。すなわち、1 シーンの外部標定要素の未知数としては、方向視毎に 3 つ (ϕ, θ, ϕ) となる。

2.4 相対 CCD アライメント校正

内部標定要素としての CCD アライメントは、外部標定計算結果の残差 vx_i, vy_i について、CCD ユニット毎のディテクタアドレス x に沿ったシステムチックな誤差を相対誤差とみなし一回帰直線によりモデル化することで校正する。すなわち

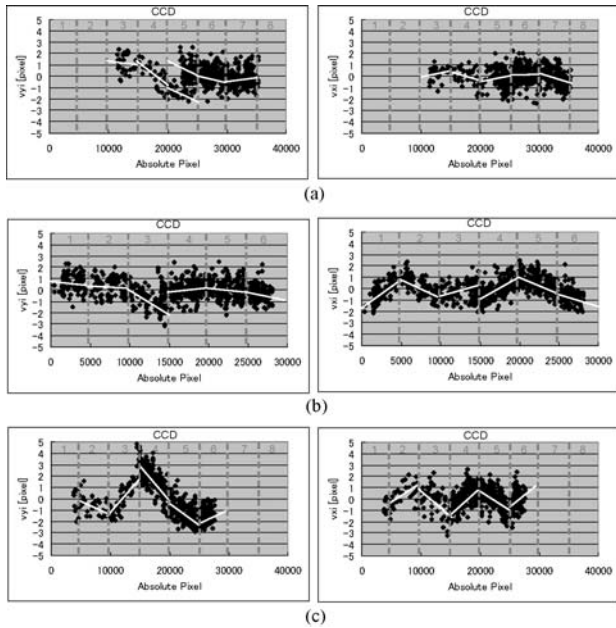


Fig. 3 vx_i , vy_i distributions vs. CCD detector address
(a) Forward (b) Nadir (c) Backward.

$$\Delta vx_i = \Delta vx_n + x \cdot gx_n$$

$$\Delta vy_i = \Delta vy_n + x \cdot gy_n \quad (5)$$

でありここで、 Δvx_i , Δvy_i は CCD 相対アライメントの GCP- i に対する修正成分、 Δvx_n , Δvy_n は CCD- n の相対アライメント誤差オフセット成分、 gx_n , gy_n は CCD- n の相対アライメント誤差傾き成分である。サンプルには 2006/4/6 から 2006/8/8 の間に観測された前方/直下/後方毎にそれぞれ 13/15/14 シーンの周密 GCP サイト¹¹⁾ を含む様々な GCP 検証サイトシーンを用いた。シーン毎に計測された GCP は最小 5 点、最大 209 点、平均 57 点の方向視毎に計 706/943/734 点である。外部標定計算においては相対 CCD アライメント誤差が未知であるため指定したすべての点を標定点として使用し行った。各サンプルに対し式 (1)~(4) を用いた外部標定計算により得られた GCP 全点の vx_i , vy_i について CCD 毎のディテクタアドレス x (CCD-1 からの連番である Absolute Pixel) と対比した結果 (画像座標における画素単位に換算) を Fig. 3 に示す。外部標定によりシーン毎のバイアス成分を取り除いた残差からは、Fig. 3 に示すような CCD 毎のシステムチックな誤差が観測された。これらについて一回帰分析により式 (5) の各係数を決定し相対 CCD アライメント誤差として校正を行った。各係数による一回帰ラインを併せて Fig. 3 に示す。なお、2.2 で述べたように一度の観測で連続して使用される CCD は最大 4 ユニットであり、前方視で CCD-3~6 (前半) 或いは CCD-5~8 (後半)、直下視で CCD-1~4 (前半) 或いは CCD-3~6 (後半)、後方視で CCD-1~4 (前半) 或いは CCD-3~6 (後半) の組み合わせを基本に行われている。ここで、式 (5) の Δvx_n , Δvy_n は、その n に関するバイアス成分について外部標定要素の ϕ , θ と相関が高いため、

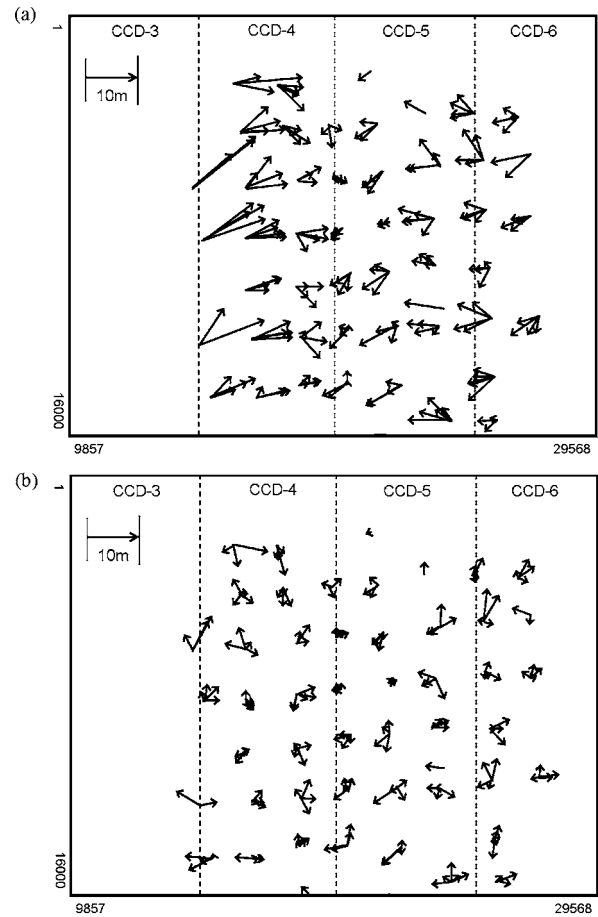


Fig. 4 GCP residuals (arrows specify residual vectors $[vx_i, vy_i]$ projected on image coordinates) comparison between pre-calibrated and post-calibrated relative CCD alignments (a) pre-cal (b) post-cal.

前半及び後半それぞれの内部の相対的な誤差としては正しく推定されても、前半と後半の間の相対関係については外部標定要素に吸収されてしまい厳密に推定できていない可能性がある。よって、前半と後半の接合部に自明なバイアス成分が認められた場合は、これを吸収する修正項を適宜加えている。

決定された式 (5) における Δvx_i , Δvy_i による校正を行った vx_i , vy_i について、GCP 230 点を取得した 2006/4/30 観測周密 GCP サイト (埼玉県北部) 1 シーン (後方視) における CCD 相対アライメント校正前後の残差 (画像座標に投影) 分布比較を Fig. 4 に示す。校正により外部標定結果としての GCP のシーン内でのシステムチックな残差成分がほぼ取り除かれていることが確認できる。

2.5 指向誤差の傾向分析及び指向データ精度

GCP を使用しない、すなわち外部標定計算による標定要素の修正を行わずに幾何モデルを使用する場合は、外部標定要素として定義した指向データとしての STT 姿勢計測データ及びセンサアライメントの誤差がそのまま幾何精度に反映される。よって、プロジェクトの技術目標でもあ

Table 3 Estimated exterior orientation parameters stats.

		ϕ (Roll)	θ (Pitch)	ψ (Yaw)
FWD 13 Scenes	Bias [deg]	-0.11982	0.01070	-0.07485
	σ [deg]	0.00161	0.00211	0.00355
NDR 15 Scenes	Bias [deg]	-0.01600	0.02304	0.02419
	σ [deg]	0.00049	0.00130	0.00519
BWD 14 Scenes	Bias [deg]	0.05457	-0.00391	-0.02623
	σ [deg]	0.00318	0.00236	0.00745

る GCP なしでの幾何モデル決定精度を評価するにあたって、これら指向データの誤差にオフセットバイアス及び異なる観測日や観測域等に沿ったシーン間でのシステムチックな傾向が存在する場合は、幾何モデルに適用しておく必要がある。ここで指向誤差の傾向分析に関しては、外部標定の未知数として推定されたサンプルシーンの各指向誤差について行えばよい。なお、ここで前方及び後方視の ϕ と θ に関しては、地上での位置誤差に対しての相関が比較的高いため、特に GCP の数が少ないシーンの外部標定ではそれぞれを独立に見た場合に正しい推定ができていない可能性がある。

一方、外部標定結果の誤差角について、校正済みの CCD アライメントを用いて再度求めなおしたサンプルシーンの結果統計値 (Table 3) を比較すると、 ϕ については角度誤差のばらつきは最も大きい後方視で 0.007 度 (1σ) と比較的大きいものの、地上での位置誤差に換算すると画像内で誤差最大となる両端において 2.1 m (1σ) 程度であり、対して θ は、角度誤差のばらつきは最大で後方視の 0.003 度 (1σ) であるが、地上換算では、36 m (1σ) となる。すなわち、 ϕ 及び θ を同時に推定した結果としては、地上誤差に対する指向誤差の感度差を差し引いても ϕ より θ の変動の成分の割合が大きいことが予想される。よって、指向誤差の傾向分析を行うに当たっては ϕ をその変動のバイアス値で固定しても幾何精度に与える影響は無視できると仮定し、 ϕ を除いた θ と ψ の 2 つについて、改めて外部標定計算を行った結果について評価する。すなわち、式 (3) の ϕ , θ , ψ については、以下のように再定義する。

$$\begin{aligned} \phi &= \phi_0 + \Delta\phi \\ \theta &= \theta_0 + \Delta\theta \\ \psi &= \psi_0 \end{aligned} \tag{6}$$

ここで、 ϕ_0, θ_0, ψ_0 は Table 3 に示した各角度のバイアス値、 $\Delta\phi, \Delta\theta$ は傾向分析で推定する指向誤差 (未知数) である。

2.6 長期/短期傾向分析

指向誤差 $\Delta\phi, \Delta\theta$ の傾向としては、観測日単位の長期と軌道周回単位の短期の 2 種類で評価する。なお、長期に関しては、STT 姿勢計測データのパラメータ変更のために、2006/9/5 に式 (2) の衛星座標の定義が変更されている。よって、観測日 d の期間をこの日の前後 (P1, P2) に分けて評価する。また短期に関しては、衛星日照/日陰の熱変動に沿ったアライメント変動が主な要因として考えられ、軌道周回における衛星の食明けを基点としたパラメータ s の

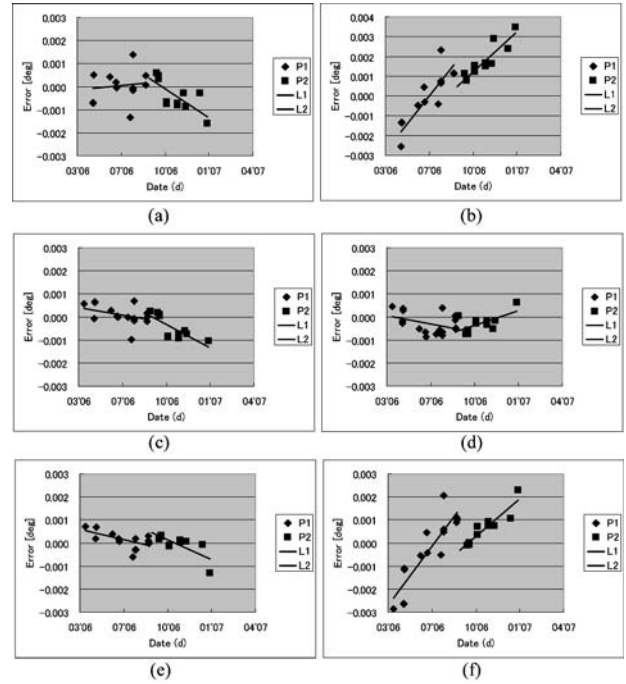


Fig. 5 Estimated $\Delta\phi, \Delta\theta$ trends vs. d (a) Forward $\Delta\phi$ (b) Forward $\Delta\theta$ (c) Nadir (d) Nadir (e) Backward (f) Backward $\Delta\theta$.

使用が提案されている¹⁰⁾。 s の定義は以下により示される。

$$s = \frac{T_{sc} - T_{ec}}{T} \tag{7}$$

ここで、 T_{sc} はシーン中心の時刻、 T_{ec} は衛星食明けの時刻、 T は軌道周回周期 (98.7 分) である。サンプルとしては、相対アライメント校正で用いたシーンに対し期間 P1 で前方/直下/後方毎にそれぞれ 13/17/16 シーン、期間 P2 で 11/11/10 シーンとなるようシーンを追加した。シーン毎に計測された GCP は方向視毎に P1 で計 663/1066/833 点、P2 で計 391/367/387 点である。また、各シーン内での標定計算による各 GCP の残差はほぼ 1 画素 (2.5 m) 以内であった。

$\Delta\phi, \Delta\theta$ について、 d 及び s に関する傾向を分析した結果 d による依存性が比較的高い結果を示した。よってまず d による傾向を示すと共に、一次回帰直線によりモデル化を行った。結果を Fig. 5 に示す。長期 d による傾向としては、まず $\Delta\theta$ について、前方及び後方視においてほぼ同じような傾向となっており、P1, P2 を通してほぼ ± 0.003 程度程度の比較的大きなほぼ線形の変動を示している。一方、直下については比較的小さい。また、 $\Delta\phi$ については多少のばらつきはあるものの全方向視でほぼ同じような傾向となっており、P1, P2 を通して ± 0.001 程度程度のほぼ線形の変動を示していることが確認された。次に短期 s について、 d による線形の誤差を取り除いたデータで傾向分析を行った。すなわち $\Delta L_{\Delta\phi}, \Delta L_{\Delta\theta}$ を d による $\Delta\phi, \Delta\theta$ の回帰直線

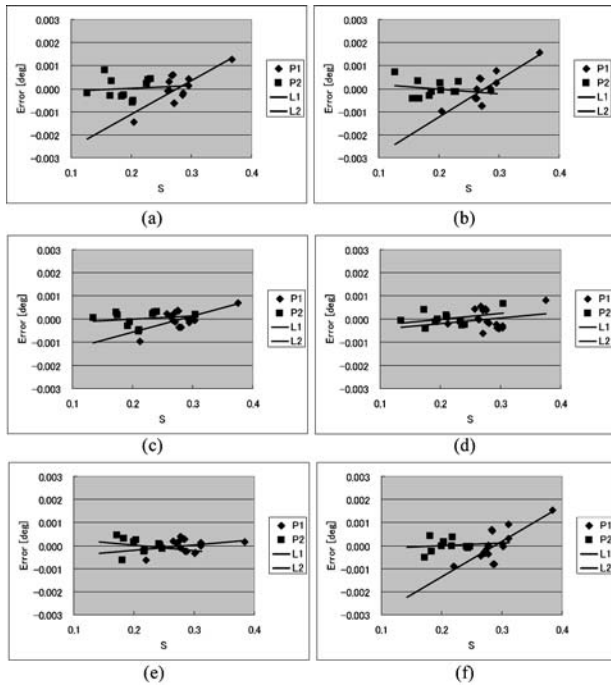


Fig. 6 Estimated $L_{\Delta\phi}$, $L_{\Delta\theta}$ trends vs. s (a) Forward $L_{\Delta\phi}$ (b) Forward $L_{\Delta\theta}$ (c) Nadir $L_{\Delta\phi}$ (d) Nadir $L_{\Delta\theta}$ (e) Backward $L_{\Delta\phi}$ (f) Backward $L_{\Delta\theta}$.

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \alpha_r + \beta_r \cdot d \\ \Delta\theta &= \alpha_p + \beta_p \cdot d \end{aligned} \tag{8}$$

からのそれぞれ残差として評価した。ここで $\alpha_r, \beta_r, \alpha_p, \beta_p$ は d による回帰直線パラメータである。結果を Fig. 6 に示す。短期 s における傾向としては、 $s=0.3$ 付近までは比較的安定しているが $s=0.4$ 付近の 1 サンプルシーンのみ傾向が異なる結果を示している。また、P1, P2 で独立に評価した場合に傾向が異なるような結果を示しているが、サンプルシーンが P1, P2 でそれぞれ偏っており、全体をバランスよく表現できているとは言い難い。特に s が 0.3 以上のサンプルを追加しての解析は今後の課題である。なお、現状の結果に対しては P1, P2 で独立な回帰直線によりモデル化を行った場合は比較的残差の少ないモデル化が行える。総合的な現時点での指向誤差傾向分析の結果として、長期 d 及び短期 s のパラメータのそれぞれ P1, P2 での回帰分析でのモデル化による残差の標準偏差 $\sigma_{\Delta\phi}, \sigma_{\Delta\theta}$ について Table 4 に示す。すなわち、 $\sigma_{\Delta\phi}, \sigma_{\Delta\theta}$ を

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= (\alpha_r + \beta_r \cdot d) + (\gamma_r + \lambda_r \cdot s) \\ \Delta\theta &= (\alpha_p + \beta_p \cdot d) + (\gamma_p + \lambda_p \cdot s) \end{aligned} \tag{9}$$

からのそれぞれ残差の標準偏差として示している。ここで $\gamma_r, \lambda_r, \gamma_p, \lambda_p$ は s による回帰直線パラメータである。また簡易換算の地上距離は以下により算出している。

$$X = Alt \tan(\sigma_{\Delta\phi})$$

Table 4 Residuals sigma of linear regressions for 'd' and 's'.

	No. of Scenes (P1/P2)	Linear regression residuals sigma [deg]		Linear regression residuals sigma in ground level [m]		
		Roll ($\sigma_{\Delta\phi}$)	Pitch ($\sigma_{\Delta\theta}$)	X	Y	XY(RSS)
F	11/13	0.000430	0.000366	5.2	5.3	7.4
N	11/17	0.000285	0.000349	3.4	4.2	5.4
B	10/16	0.000279	0.000367	3.4	5.3	6.3

$$\begin{aligned} X &= Alt \tan(\sigma_{\Delta\phi}) \\ Y &= Alt \tan(\sigma_{\Delta\theta}) \text{ 直下の場合} \\ Y &= Alt (\tan(23.8 + \sigma_{\Delta\phi}) - \tan(23.8)) \text{ 前方/後方の場合} \end{aligned} \tag{10}$$

ここで、 Alt はノミナル衛星高度 (691,650 m) である。これらの結果から、指向誤差 $\Delta\phi, \Delta\theta$ のシーン間での変動に対して観測日に依存した長期 d 及び軌道周回に依存した短期 s による一次回帰のモデル化を行えば、現時点で GPS による位置計測データ、STT による姿勢計測データ及びセンサアライメントデータのみを使用し、GCP と標定計算による指向誤差の修正がなくても前方/直下/後方でそれぞれほぼ 7.4 m/5.4 m/6.3 m (1σ) 程度のほぼオフセット的な水平誤差範囲で幾何モデル決定が行える可能性があると言える。

3. DSM 作成方式

3.1 概要

DSM 作成に係るデジタル画像の自動マッチングによるステレオ対応点の作成は、これまで様々な方式が提案されてきているが一般にパラメータ設定が難しく対象とするエリアのテクスチャや起伏によって最適なパラメータが異なる場合が多い。すなわち、これらの設定はオペレータの経験に依る部分が大きく、その熟練度が作成される DSM の品質に影響する。衛星画像によって広域の DSM を一度に且つ大量に処理するような自動マッチングのアルゴリズムを検討するに当たっては、これらのパラメータ設定をなるべく容易にするような配慮が必要になる。また、PRISM はトリプレットステレオ観測という特徴的な機構となっているため、これを十分に生かすような専用のアルゴリズムを提案する必要がある。

3.2 マッチングアルゴリズム

マッチング処理によるステレオ対応点の探索としては、基準とする画像上で定義された任意のポイントについて、対応するステレオ画像の同じポイントを見つける処理となるが、基準とする画像上にどのような基準でポイントを選択するかが問題となる。ポイントの選択としては、大きく二つの方式に分類され、一つは前処理として画像上の特徴をフィルタ等により抽出しこの特徴点についてポイントを定義する (特徴点マッチング) 方式であり、もう一つは画像上に等間隔のグリッドを設けてポイントを定義する (エ

リアマッチング)方式である。またこれらを組み合わせて使用するような方式¹²⁾も提案されている。特徴点マッチングの利点としては、前処理によるフィルタ等を用いた特徴抽出が上手く機能すれば、相関の取りやすいポイントのみをマッチングすることができ、ミスマッチの確率を下げることもできると共に起伏の少ないエリアに少ないステレオ対応点、起伏の多いエリアに多くのステレオ対応点を指定することで、全体としてバランスの良いステレオ対応点の分布を設けることができる。一方、欠点としては、特徴抽出のためのフィルタやパラメータのチューニングが難しいこと、及び作成されるステレオ対応点は不規則な分布となるため、正規格子にリサンプリングするような場合にそのモデリング等のパラメータチューニングが問題になることが挙げられる。一方これと比較したエリアマッチングの利点としては、特徴抽出のパラメータ調整の必要がないこと、得られるステレオ対応点の分布もグリッドに沿うため正規格子に近い分布になることが挙げられる。欠点としては、特徴の少ない相関の取りにくいようなポイントについてもマッチングを行うため、信頼性の低いステレオ対応点をミスマッチとして何らかの指標によるフィルタ等で取り除くような後処理が必要になることである。本方式では前述のパラメータ設定の容易さを考慮して、エリアマッチング方式を採用した。

3.3 デジタル画像パターンマッチング手法

デジタル濃淡画像のパターンマッチング手法としては、画素単位のマッチングとして相互相関による方法、SSDA法などが用いられてきた⁷⁾⁸⁾。また、サブピクセル単位でのマッチング方式としては、基本的に画素単位のマッチング結果を初期値とした2次関数のフィッティングや最小二乗マッチング¹³⁾などが提案されている。PRISMでは方式の単純さやパラメータ設定の容易さ、精度等のバランスを考慮して、式(11)に示す相互相関係数 ρ による画素単位のマッチング及び近傍の相互相関係数3点を用いた式(12)による2次関数のフィッティングにてサブピクセル単位でのマッチング結果視差 P_{sub} を得る方式とした。

$$\rho = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sigma_x \sigma_y} \tag{11}$$

$$P_{sub} = P + \frac{\rho_{+1} - \rho_{-1}}{4\rho - 2\rho_{+1} - 2\rho_{-1}} \tag{12}$$

ここで、 x_i, y_i は各相関窓内のデータ、 \bar{x}, \bar{y} は各相関窓内のデータ平均値、 σ_x, σ_y は各相関窓内のデータ標準偏差である。また P は画素単位のマッチング結果視差、 $\rho_{-1}, \rho, \rho_{+1}$ は3点(P の前画素、 P, P の後画素)の相互相関係数である。

3.4 エピポーラ幾何の適用と3方向視の活用

ステレオ画像間でのマッチングを効率的に行うためには、エピポーラ幾何⁷⁾⁸⁾に基づいた視差方向の次元化が必須となる。一般に衛星搭載のラインセンサは、ライン投影であるため投影中心がライン毎に変化し画像間での厳密

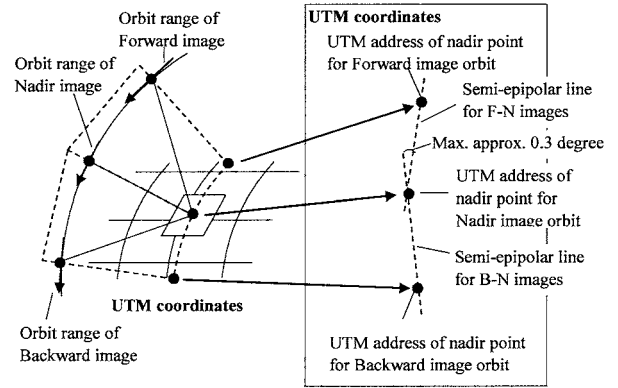


Fig. 7 Semi-epipolar line on UTM.

なエピポーラ直線は存在しないが、1シーン内で考えればその軌道は十分安定であり近似的なエピポーラ幾何が使用可能である。PRISMの場合トリプレットステレオ画像でありこれらを同時に用いたマッチングを実現するためには3つの画像間で同時にエピポーラ幾何を満たす直線を求める必要がある。ここで、各画像をUTM地図上の近似エピポーラ直線に沿うフレームに投影してマッチングを行うことを想定し、前方/直下/後方それぞれの軌道区間の中心の直下点のUTM座標をそれぞれ結んだものを近似エピポーラ直線とみなした場合、前方-直下視画像で近似したエピポーラ直線と後方-直下視画像で近似したエピポーラ直線とのなす角を実際のALOS軌道に当てはめて試算したところ最大約0.3度の角度となることが確認された(Fig. 7)。一方、3方向視のマッチングの組み合わせに関しては前方視と後方視、前方視と直下視、直下視と後方視という3つのパターンが考えられるが、これらの冗長性を活かした同時に3画像間のステレオ対応点を探索する方式が望ましい。

本方式によるPRISMトリプレット画像のマッチングでは、直下視画像のグリッドを基準に、前方視及び後方視それぞれのステレオ対応点を同時に探索する方式を採用している⁴⁾。これは直下視画像のグリッドを中心とした相関窓に対して、前方視及び後方視の相関窓を視差方向に同時に移動し、それぞれの相互相関係数の合計 ρ_{FB} が最大となるポイントを各ステレオ対応点とする方式である。すなわち ρ_{FB} は

$$\rho_{FB} = \rho_F + \rho_B \tag{13}$$

であり ρ_F, ρ_B はそれぞれ前方-直下及び後方-直下による相互相関係数である。また、相関窓の移動はエピポーラ直線を縦方向とするUTMフレーム投影画像上で行うこととし、エピポーラ直線は、前方-直下視と後方-直下視のそれぞれで算出した直線の平均とする。この場合、それぞれのエピポーラ直線に関しては、最大約0.15度の誤差を持つことになり、画像上の縦視差で4000m程度(B/H=0.5で8000m程度の高さ範囲)の探索を行う場合は、最大10m

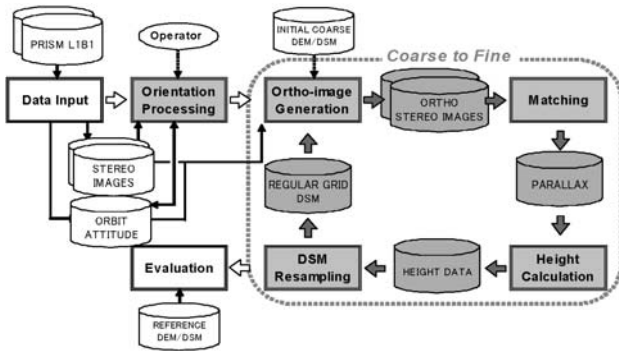


Fig. 8 DSM generation flow with CTF operation.

程度の横視差となる。よって、後述の Coarse To Fine 法では、これらを十分に吸収できる程度の平均化率で探索を行っていく必要がある。

3.5 CTF の適用

Coarse To Fine 法 (CTF) による階層的なマッチング手法⁷⁾⁸⁾は、比較的視差が大きいステレオ画像に対して安定したマッチング結果を得る方式として従来から用いられているが、本アルゴリズムについても同様に CTF を適用している。なお、CTF の適用に関しては、(1) 対象とするステレオ画像について、画像は単に平均化し、現段の視差の探索基点を前段のマッチング結果から得ることで探索範囲を絞り込んでいく方式、(2) 各階層でのマッチング画像を前段のマッチング結果から算出した DSM でオルソ画像化した上で平均化し、探索基点は一定のまま探索範囲を絞り込んでいく方式、の 2 通りが考えられるが、本方式では後者 (2) を採用している (Fig. 8)。なお、CTF の初段は、20 pixel (50 m) 程度の平均化率を設定すれば、上記エピソード直線の近似誤差に伴う横視差が最大 0.2 画素程度となり十分一次元探索が行えると考える。また、CTF の 2 段以降の縦視差探索範囲は初段の平均化率に相当する 20 pixel (50 m) 程度となりこの場合の横視差は 0.1 m 程度で無視できる。

3.6 パラメータ (相関窓サイズ) の自動最適化

相互相関によるマッチングにおいて相関窓のサイズは、設定の困難なパラメータの一つである。一般的にサイズは、より小さいほうがエリアの細かい特徴を捉えやすく地形の空間的に高周波な成分を精度良く抽出することができる反面テクスチャに乏しいエリアやノイズに弱い。一方、より大きいほうがノイズ等に対する安定性は上昇するが、空間周波数の高い地形特徴は抽出できずに結果としての DSM が全体的になまったような形状になってしまう他、計算時間も増加するという欠点を持つ。相関窓のサイズを自動的に最適化するためには、これらの特徴のトレードオフをバランスよく満たす方式が必要となる。本方式では、相関係数の探索範囲における変動を関数として捉え、この極値に関する傾向を利用することでグリッド毎に自動的に最適なサイズを決定する方式を採用している⁴⁾。

Table 5 Test scenes (triplet stereo pair).

No.	Ref. DSM Sites	Obs. Date	No. of GCPs	No. of TPs
1	Saitama	2006/4/30	230	9
2	Okazaki	2006/6/21	42	9
3	Thun / Bern / SW	2006/9/21	54	9

Table 6 Reference DSM data sites.

Site	Source	Size	Height Range	Ground Resolution	Height Accuracy	Source Date
Saitama	LIDAR	14.0x12.0km	100m	1m	<1m	2002
Thun	Aerial Photo	7.5x14.5km	500m	2.5m	0.5~2.5m	2004
SW	Aerial Photo	7.5x14.5km	1000m	2.5m	0.5~2.5m	2004
Bern	Aerial Photo	11.0x11.5km	400m	2.5m	0.5~2.5m	2004
Okazaki	Aerial Photo	6.0x6.0km	400m	10m	~10m	2005

4. DSM 作成精度

4.1 テストデータ

DSM 作成に係る幾何モデル校正及びマッチングアルゴリズムの検証については、これまで JAXA/EORC における検証作業として行っているシーンの中から以下 5 つの DSM 検証サイトを含む 3 シーンの各トリプレットステレオ画像セットを用いた DSM 作成及び評価検証結果について示す。使用したシーン及び DSM 検証サイト参照データについてそれぞれ Table 5, Table 6 に示す。Okazaki 検証サイトについては、参照データの高さ精度が目標精度の 5 m (1σ) に対してやや不足していると思われるが、誤差の傾向を確認するための参考データとして使用することとした。

4.2 標定精度

各テストシーンに対する標定計算方式としては、式 (1)~(4) 及び式 (6) で示される外部標定モデル以外に GCP なしの場合の外部標定モデルについても検討を行った。なお、GCP を使用しない場合、標定計算のためのタイポイント (TP) のみによる相互標定にて 3 方向視間の相対的なモデル決定を行うこととなるが、直下視画像のモデルを固定して相対的な前方及び後方視画像のモデルを合わせ込むような以下に示す 2 つのモデルにより行う方式とした。

- i. **R-RP** (前方の Roll 及び後方の Roll/Pitch) モデル
直下の $\Delta\phi = \Delta\theta = 0$, 前方の $\Delta\theta = 0$ (固定)
前方の $\Delta\phi$ (Roll) と後方の $\Delta\phi$ (Roll) 及び $\Delta\theta$ (Pitch) の 3 つの未知数で相互標定計算
- ii. **RP-R** (前方の Roll/Pitch 及び後方の Roll) モデル
直下の $\Delta\phi = \Delta\theta = 0$, 後方の $\Delta\theta = 0$ (固定)
前方の $\Delta\phi$ (Roll) 及び $\Delta\theta$ (Pitch) と後方の $\Delta\phi$ (Roll) の 3 つの未知数で相互標定計算

これらのモデルを使用した場合の絶対水平精度は直下視の主に ϕ, θ の精度に依存し、また絶対高さ精度は R-RP の場合は前方視、RP-R の場合は後方視の主に θ の精度に依存する。なお、各固定した $\Delta\phi, \Delta\theta$ については 2. で推定した式 (9) を適用した。GCP の点数としては、使用しない (0 点) の場合の 2 つのモデル (R-RP/ RP-R) 及び 1 点、9 点、

Table 7 Triplet triangulation residuals and errors of Scene 1.

No. of GCPs	0(R-RP)	0(RP-R)	1	9	25	230
σ_{xy} [m]	-	-	-	0.83	1.67	1.79
σ_z [m]	-	-	-	1.67	1.62	1.75
No. of ICPs	230	230	229	221	205	0
RMSE _{xy} [m]	6.43	6.72	2.18	2.14	1.94	-
RMSE _z [m]	8.72	12.85	2.09	2.04	2.07	-

Table 8 Triplet triangulation residuals and errors of Scene 2.

No. of GCPs	0(R-RP)	0(RP-R)	1	9	25	42
σ_{xy} [m]	-	-	-	1.96	2.13	2
σ_z [m]	-	-	-	2.21	2.4	1.29
No. of ICPs	42	42	41	33	17	0
RMSE _{xy} [m]	6.18	6.77	2.32	2.09	1.87	-
RMSE _z [m]	23.07	28.73	3.4	2.7	2.78	-

Table 9 Triplet triangulation residuals and errors of Scene 3.

No. of GCPs	1	9	25	54
σ_{xy} [m]	-	2.08	2.03	1.72
σ_z [m]	-	3.5	3.02	1.24
No. of ICPs	53	45	29	0
RMSE _{xy} [m]	1.87	1.73	1.55	-
RMSE _z [m]	3.02	2.81	2.95	-

25 点、計測全点の場合について標定計算及び 3 方向視画像の 3 次元計測精度の評価を行った。なお、GCP 1 点からの標定計算については、未知数として式 (6) のモデルを使用し、全点を使用する場合以外は傾向分析と同様の全方向視の ϕ を固定するモデルを使用している。

シーン毎の評価結果を Table 7~9 及び Fig. 9~11 に示す。なお、Table 7~9 の σ は標定計算に使用した GCP の残差標準偏差、RMSE は標定計算に使用しなかった独立評価点 (ICP) の誤差 RMS である。なお、シーン 3 については、式 (9) の推定に使用したときの標準の STT 姿勢計測データ (高精度姿勢決定値) が使用できないシーンであったため、傾向の異なる姿勢データ (オンボードデータ) を便宜上使用している。よって、このシーンについては、式 (9) で定義した指向データの誤差モデルは適用できないため、GCP 0 点の場合の標定計算は行っていない。

標定計算の結果としては、GCP なしの TP のみによる相互標定の場合においても水平方向精度で最大 6.8 mRMSE、高さ方向精度で最大 28.7 mRMSE 程度で決定できていることが確認できる。これは 2. の検証結果にはほぼ合致する値であるが、高さ方向の最大誤差がやや大きいと思われる、引き続きサンプルを追加しての検証が望ましい。また、GCP 1 点のみによる標定計算でも水平方向で最大 2.3 mRMSE、高さ方向では、最大 3.4 mRMSE 程度の精度に向上することが確認された。

4.3 マッチング

DSM 作成のグリッド間隔は 4 画素 (10 m) とし、これを

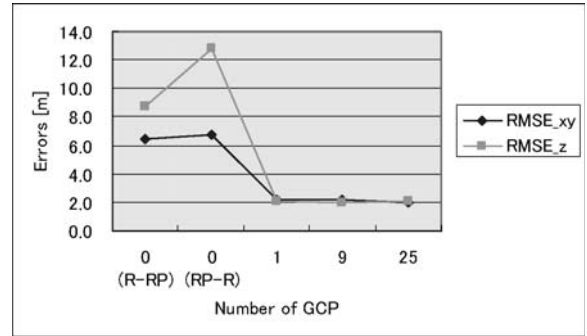


Fig. 9 ICP RMSE vs. no. of GCP for Scene 1.

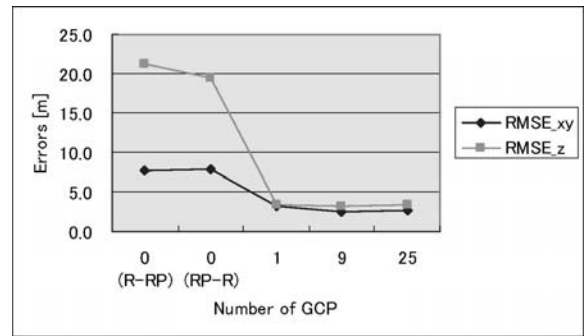


Fig. 10 ICP RMSE vs. no. of GCP for Scene 2.

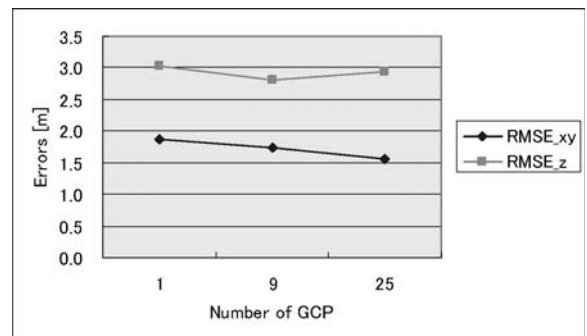


Fig. 11 ICP RMSE vs. no. of GCP for Scene 3.

最終的な DSM プロダクトとしての 0.3 秒 (約 10 m) の等緯度経度座標にリサンプリングしている。評価は、参照 DSM について PRISM から作成した DSM と同じ 0.3 秒の等緯度経度座標にリサンプリングして高さ方向のみの比較を行っている。雲や陸水域等のマッチング不可エリアに関しては、前処理としてマニュアル作業によるマスク処理を行い、評価の統計値からは外している。作成された DSM について、ミスマッチ領域の除去等の編集作業は行っていない。なお、DSM の作成は、GCP 0 点、1 点、全点での標定モデルに対して行い、結果の比較を行った。各シーンのサイト毎の作成 DSM の可視化画像 (マスク領域を含む) を Fig. 12~16 にまた比較結果 (高さ精度) 統計値を Table 10 示す。

DSM 高さ精度のバイアス値としては、GCP 0 点、1 点、全点での標定結果 ICP 誤差統計値 (Table 7~9) に対して

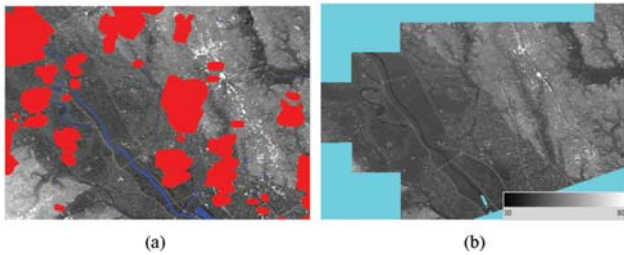


Fig. 12 DSM gray-scale images of Scene1-Saitama (color areas are invalid masks) (a) PRISM-DSM (b) LiDAR-DSM.

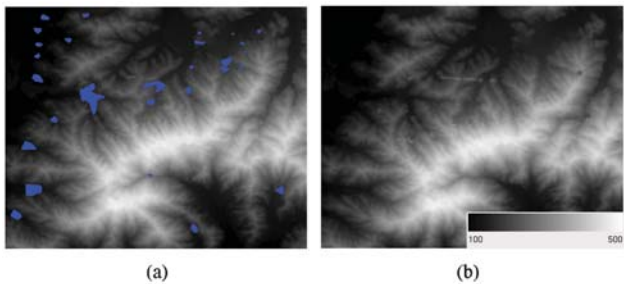


Fig. 13 DSM gray-scale images of Scene2-Okazaki (color areas are invalid masks) (a) PRISM-DSM (b) Aerial Photo-DSM.

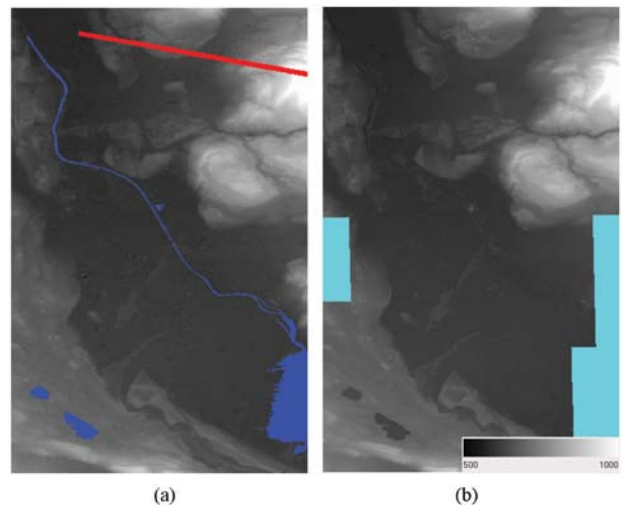


Fig. 14 DSM gray-scale images of Scene3-Thun (color areas are invalid masks) (a) PRISM-DSM (b) Aerial Photo-DSM.

ほぼ妥当な結果となっている。なお、GCP 点数が異なる場合においても作成した DSM 高さ精度の標準偏差 (SD) はほぼ変わらない傾向を示した。これは、DSM グリッド間隔 10 m 程度での水平方向誤差は、GCP 点数を 0 点及び 1 点のみ使用した場合と全点を使用した場合でほぼ変わらないことを示している。また、高さ精度の RMSE について GCP 全点を使用した場合をサイト毎に見ると、比較的平坦で主に田園等の平野や高層ビルを含む都市部等で構成さ

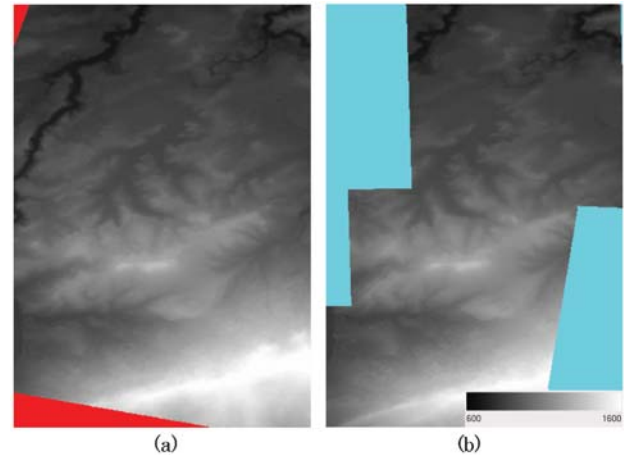


Fig. 15 DSM gray-scale images of Scene3-SW (color areas are invalid masks) (a) PRISM-DSM (b) Aerial Photo-DSM.

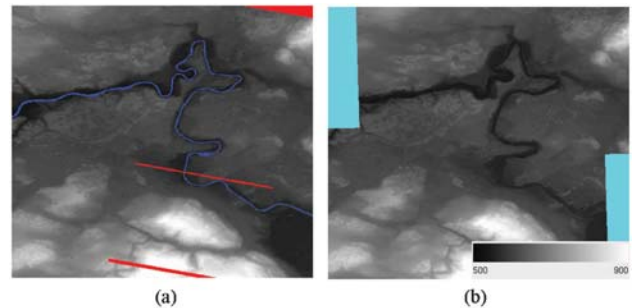


Fig. 16 DSM gray-scale images of Scene3-Bern (color areas are invalid masks) (a) PRISM-DSM (b) Aerial Photo-DSM.

れた Saitama に関しては 4.8 m 程度となった。また、山岳部や田園また市街地など様々な地形を含んだサイト Okazaki, Thun, SW, Bern については、ほぼ 5.8~7.5 m 程度となっている。

4.4 地形特徴依存性

DSM 作成の精度に係るマッチング精度は、対象とするエリアのテクスチャや森林、建物等立体構造物の有無等の地形特徴に依存することが考えられる。よって、テストサイトのマッチング画像から目視により領域として同じ特徴が集中するエリアについて切り出し、該当する DSM 高さ精度の評価を行った。結果を Table 11 に示す。地形特徴に依存した DSM 精度を見る限りでは、Paddy (水田) のような比較的フラットなエリア (No. 1, 2, 10) においては、2~3 mRMSE の高い精度で DSM が作成できていることが確認できる。ただし、フラットなエリアであっても畑等のエリア No. 13, 17 においては、7~8 mRMSE に悪化する傾向が見られる。これら地形としてフラットな領域は、傾向としてテクスチャが乏しい画像となっていることが多く、エリアを構成する要素 (水田や畑等) の微妙な違いと、画像ノイズ、及び 3 方向視での入射角の違いによる見え方の

Table 10 DSM height accuracy.

Site	Model	Points	Bias [m]	SD [m]	RMSE [m]	Max [m]	Min [m]
Saitama	0-GCP (R-RP)	1260372	10.37	4.79	11.42	121	-165
	1-GCP	1260918	2.36	4.76	5.32	110	-171
	230-GCP	1258857	0.84	4.76	4.83	103	-171
Okazaki	0-GCP (R-RP)	538875	23.48	6.06	24.25	127	-68
	1-GCP	538879	2.71	5.80	6.41	108	-95
	42-GCP	538880	0.11	5.78	5.78	105	-99
Thun	1-GCP	1477962	-1.12	5.75	5.86	92	-90
	54-GCP	1478007	0.98	5.77	5.85	94	-92
SW	1-GCP	1044128	4.08	7.42	8.47	99	-132
	54-GCP	1044113	1.07	7.38	7.46	90	-135
Bern	1-GCP	1821894	1.11	5.88	5.99	87	-57
	54-GCP	1822015	-1.33	5.74	5.89	64	-58

Table 11 DSM height accuracy depending on terrain characteristics.

No.	Site	Terrain char.	Points	Bias[m]	SD[m]	RMS[m]	Max[m]	Min[m]
1	Saitama	Paddy	17892	0.48	2.73	2.77	22	-16
2	Saitama	Paddy	3287	-0.57	1.75	1.85	9	-12
3	Saitama	Urban	24424	3.18	9.78	10.28	64	-120
4	Saitama	Urban	16029	1.06	17.10	17.13	76	-171
5	Saitama	City	25665	1.14	4.08	4.23	40	-22
6	Saitama	City	19695	1.12	3.97	4.12	37	-38
7	Okazaki	Dense Trees	31243	-0.92	6.32	6.38	48	-72
8	Okazaki	City	7155	1.25	2.51	2.80	18	-29
9	Okazaki	City	5680	0.98	3.56	3.69	32	-25
10	Okazaki	Paddy	8023	0.68	2.45	2.55	18	-14
11	Okazaki	Dense Trees	14940	-0.46	4.77	4.79	29	-31
12	Thun	Sparse Trees	5112	3.18	7.58	8.22	35	-25
13	Thun	Grass Field	6120	-0.77	6.80	6.85	31	-35
14	Bern	Dense Trees	7800	-3.81	6.13	7.22	19	-40
15	Bern	City	19431	-1.67	4.72	5.01	38	-32
16	SW	City	7599	-1.78	2.96	3.45	18	-27
17	SW	Truck Farm	7560	-3.59	6.87	7.75	38	-55
18	SW	Dense Trees	6930	9.65	14.80	17.67	90	-19

違いとの組み合わせの影響を受けやすいことが考えられる。建物が密集している領域で、ほぼ比高 20 m 以上の比較的高いビル等を含む Urban (No. 3, 4) に関しては精度が～17 mRMSE/Min -171 m と著しく悪化する傾向が見られた。No. 4 の詳細について Fig. 17 に示す。これら領域については、ビルの床面積に依存して、ビルの屋根の高さが抽出できる場合とできない場合があり、できない場合に大きな誤差になっていることが確認された。また抽出できている場合は比較的精度良く屋根の高さが再現できていることが確認できる。一方高いビルを含まない City の場合 (No. 5, 6, 8, 9, 15, 16) は、3～5 mRMSE の比較的高い精度で DSM が作成できていることが確認できる (Fig. 18)。森林等の木の生えている領域 (No. 7, 11, 12, 17, 18) では、精度はばらつく傾向が見られた。エリアによっては、18 mRMSE/Max 90 m と著しく誤差が大きくなる場合 (No. 18) も確認された (Fig. 19)。なお、検証サイト SW においてはサイト全体としての高さ精度が 7.5 mRMSE と比較的悪い結果となっているが、これら森林域の誤差が主要な原因を占めていたことが確認されている。

4.5 ラジオメトリック性能に関する課題点

作成される DSM の品質について PRISM のラジオメト

リック性能に依存した課題点を挙げる。

① Brighter noise

ディテクタの輝度値が大きく飽和するようなターゲットを観測した場合に、Brighter noise とよばれるラインノイズがまれに発生することがあり、これらの領域での DSM 作成は行えない。よって、このノイズが発生している場合は、前処理としてのマスク処理或いは何らかの除去処理が必要となる。なお、評価に使用したシーン 3 においては該当のノイズが発生しており (Fig. 20)、マスク処理によって評価領域から除外している。

② JPEG ブロックノイズ

PRISM データはオンボードでの JPEG による非可逆圧縮により地上にダウンリンクされるが、この影響によりブロックノイズが発生しマッチング結果に影響する可能性がある。ブロックノイズの発生箇所はランダムであるが特にテクスチャの少ないエリアにおいて DSM の精度に影響を与える可能性が高い。Fig. 21 のケースにおいては、直下視及び後方視においてブロックノイズが顕著であり、一方前方視においてはほとんど発生していない。作成された DSM はこれに起因したミスマッチの影響により中央付近で約 30 m 程度の誤差となっている。DSM 高精度の地形特徴

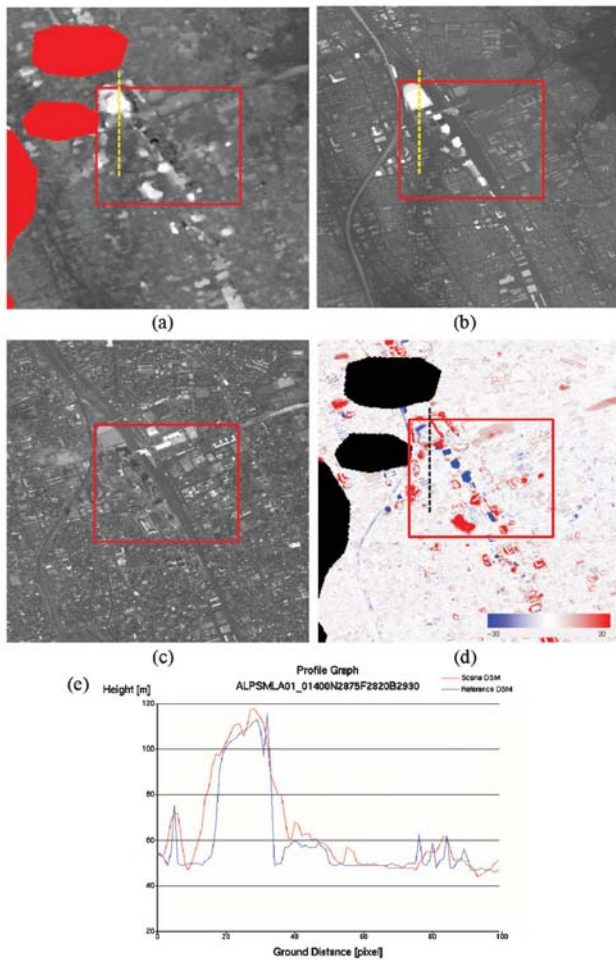


Fig. 17 Area No.4 details (red rect.=target area) (a) PRISM-DSM (b) LiDAR-DSM (c) NDR-image (d) DSM difference-image (PRISM-LiDAR) (e) DSM profile of yellow line.

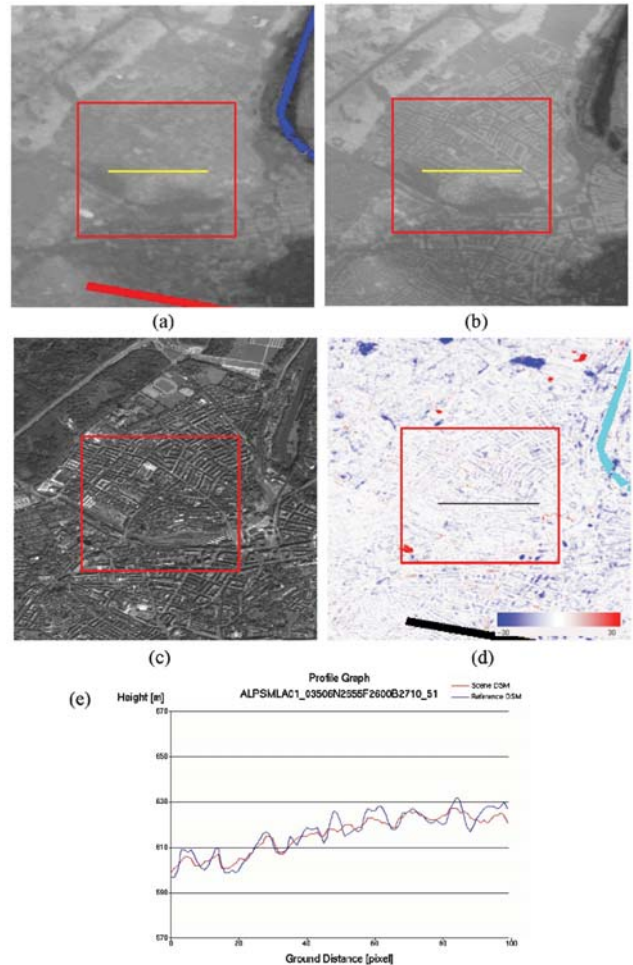


Fig. 18 Area No.15 details (red rect.=target area) (a) PRISM-DSM (b) AP-DSM (c) NDR-image (d) DSM difference-image (PRISM-AP) (e) DSM profile of yellow line.

の依存性評価においてフラットなエリアであってもまれに精度が悪化する傾向が見られたのはこのブロックノイズが主要な原因として考えられる。また、このノイズの影響により画像上での目視による GCP の高精度な計測が困難な場合があり検証作業を難しくしている。

5. オルソ画像精度

DSM 作成の過程においては CTF 処理 (Fig. 8) の中で各 CTF の階層に応じたオルソ画像が自動的に作成されるが、同様の処理を最終的に得られている DSM データに適用することでこれに対応したオルソ画像が得られる。この処理を通して得られた Scene 1 の GCP 全点の標定モデルによるオルソ画像について、GCP を用いた水平精度の評価を行った結果を Table 12 に示す。

結果としては、全方向視についてほぼ 1 pixel 以下の高い精度でオルソ画像が作成されており、標定結果の GCP 水平精度とほぼ一致する結果となっていることが確認され

た。少なくとも GCP を取得している画像上のエリアについては、画像特徴を目視で確認しやすいエリアになっている必要があり、同時に DSM 作成におけるマッチング処理としてもステレオ対応点を取りやすいポイントになっていることが考えられる。よってマッチング誤差は GCP 点の周囲については十分小さく、オルソ画像の精度が標定結果の水平精度とほぼ一致する結果となっていることが考えられる。すなわち GCP を取得した以外の点については DSM 作成精度に依存した水平精度になっていることが予想される。

6. まとめ

PRISM から DSM/オルソ作成を行うことを目的として開発を進めてきたアルゴリズムについて、PRISM 画像の標定方式及び幾何モデル解析方式概要また PRISM トリプレットステレオ画像のマッチング方式の概要を述べると共にそれぞれ実観測データを用いた解析検証を行った。

PRISM 標定方式としては、センサモデル及び GPS/STT

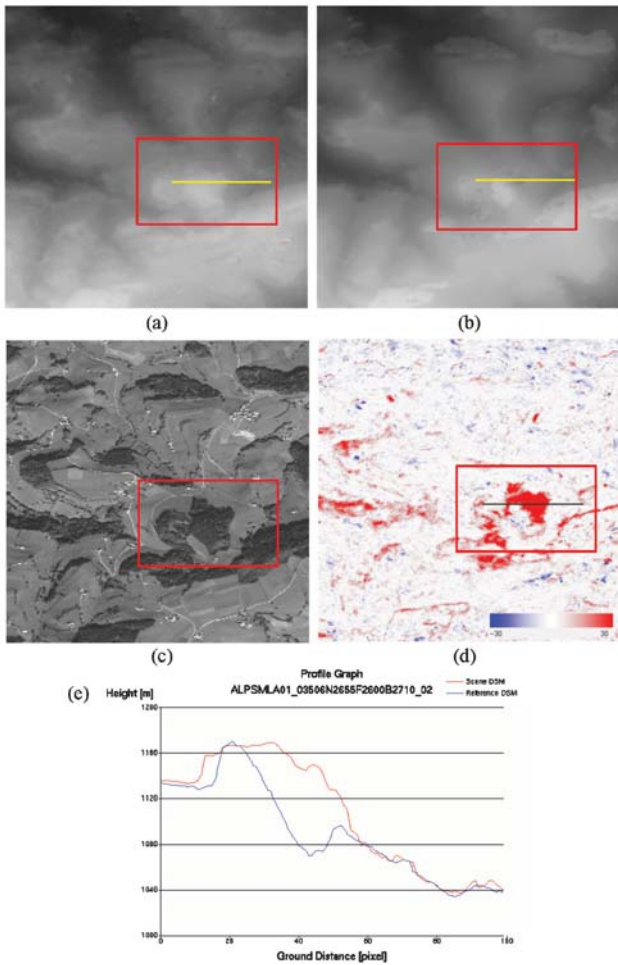


Fig. 19 Area No.18 details (red rect.=target area) (a) PRISM-DSM (b) AP-DSM (c) NDR-image (d) DSM difference-image (PRISM-AP) (e) DSM profile of yellow line.

データを用いた外部標定について指向誤差オイラー角のみを標定要素とする方式を提案した。また内部標定としては、CCD アライメントの相対誤差について外部標定と併用して校正する方式について提案し、これを適用することでシーン内のシステムチックな幾何歪が除かれていることを確認した。また、外部標定により推定された指向誤差オイラー角について、改めて ϕ (Yaw) を固定することで長期/短期の傾向分析を行い、それぞれ一回帰直線によるモデル化を行うことで、シーン毎の GCP を用いた標定計算による指向誤差の修正がなくても前方/直下/後方でそれぞれほぼ 7.4/5.4/6.3m (1σ) 程度のオフセット的な水平誤差で幾何モデル決定が行える可能性を示した。

DSM 作成に関しては、5つの検証サイトを含む3シーンの結果として、GCP 0点の場合で、水平/高さ方向それぞれ最大 6.8/28.7 mRMSE 程度、また GCP 1点のみで同じく最大 2.3/3.4 mRMSE 程度の標定精度となった。これらの標定結果から作成した DSM の高さ精度としては、ほぼ標定計算の結果に沿うものとなり、GCP 全点を用いた

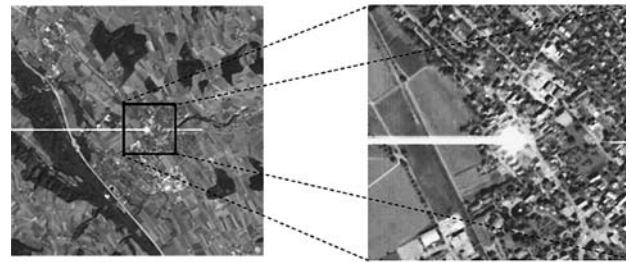


Fig. 20 Brighter noise (Scene3-Nadir).

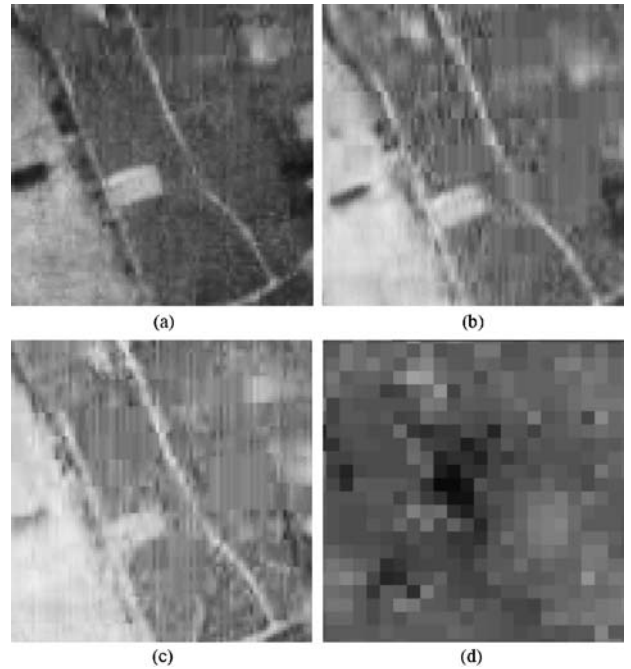


Fig. 21 JPEG noise in Scene1 (180x180 pixels) (a) Forward (b) Nadir (c) Backward (d) Generated DSM.

Table 12 ORI geometric accuracy for Scene 1.

	No. of GCP	Bias [pixel]		Std. dev. [pixel]		RMSE [pixel]	
		Column	Line	Column	Line	Column	Line
FWD	211	-0.38	-0.24	0.51	0.43	0.63	0.49
NDR	214	-0.42	-0.27	0.52	0.47	0.67	0.54
BWD	210	-0.22	-0.11	0.40	0.31	0.46	0.33

場合はフラットなシーンで 4.8 mRMSE 程度、様々な地形が含まれたシーンで、5.8~7.5 mRMSE 程度であった。GCP が存在しない場合でも、高さ方向のオフセット誤差のみ最大 24 m 程度で DSM が作成できる可能性があることが示された。地形特徴依存性としては、水田等のエリア及び町等の人工物のあるエリアでもおおよそ比高 20 m 程度以上の高いビルがなければ、ほぼ 5 m 以内の相対精度で DSM が抽出できていることが確認された。また精度が悪化しているのは、主に森林等の領域と、高いビルのある都市域に集中していることが確認された。なお技術的課題である GCP なしでの目標精度には未だ到達していないが、

これらも含めた今後の課題としては、以下のようなものが挙げられる。

- ・ サンプルデータの追加及び評価結果の蓄積による信頼性の向上
- ・ 幾何校正検証の継続（誤差トレンド解析及び CCD アライメント等センサモデルの精査）と精度向上による特に GCP 0 点での DSM 絶対精度の向上
- ・ ラジオメトリック特徴（JPEG ノイズ等）による影響の詳細調査と対処方式の検討
- ・ 3 方向視マッチングの有効性の検証（2 方向視マッチングとの比較等）

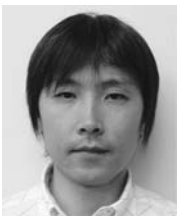
謝辞：本研究は、JAXA/EORC における ALOS 利用研究委託として行われている業務成果である。JAXA/EORC の関係各位、特に島田政信氏、柴崎亮介氏からは研究内容等について多くの貴重な意見を頂いた。また、アルゴリズム開発及びデータ評価に関しては、RESTEC 開発部及び解析研究部の関係各位、特に二村紀子氏、坂本英則氏、河本佐知氏に協力頂いた。また、検証用参照データの多くは、JAXA/EORC 主催の ALOS Cal/Val Science Team (CVST) の中で提供されたものである。特に国土地理院、IGP of ETH Zurich の関係各位からは多大なる協力を頂いた。よってここに記して謝意を表します。

引用文献

- 1) J. Poon, C. S. Fraser, C. Zhang, A. Gruen, L. Zhang : Accuracy evaluation of terrain modelling from IKONOS stereo imagery, IAPRS Vol. 36, Part I/W3, Proc. ISPRS Workshop, Hannover, Germany, 5 pages, 2005 (on CD-ROM).
- 2) T. Toutin : DSM generation and evaluation from QuickBird stereo imagery with 3D physical modelling, INT. J. Remote Sensing, 25 (22), pp. 5181-5193, 2004.
- 3) P. Nonin, S. Piccard : Performance analysis of DEM automatic extraction from SPOT5 sensors, Proc. IEEE IGARSS '03, Toulouse, France, pp. 309-311, 2003.

〔著者紹介〕

●高久 淳一（タカク ジュンイチ）



所属：財団法人リモート・センシング技術センター開発部。1996年工学院大学大学院工学研究科修士課程情報学専攻修了。JAXA/EOC 受信の地球観測衛星光学センサ標準処理ソフトウェア開発等の業務を経て、現在 ALOS 光学センサに関する校正検証及び高次処理アルゴリズムの研究開発に従事。

E-mail : takaku@restec.or.jp

- 4) J. Takaku, N. Futamura, A. Goto, T. Iijima, T. Tadono, M. Matsuoka, M. Shimada, R. Shibasaki : High resolution DEM generation from ALOS PRISM data —triplet image algorithm evaluation—, Proc. IEEE IGARSS'03, Toulouse, France, pp. 1858-1860, 2003.
- 5) J. Takaku, N. Futamura, T. Iijima, T. Tadono, M. Shimada, R. Shibasaki : High resolution DEM generation from ALOS PRISM data —Simulation and Evaluation—, Proc. IEEE IGARSS'04, Anchorage, USA, pp. 4548-4551, 2004.
- 6) J. Takaku, N. Futamura, T. Iijima, T. Tadono, M. Shimada, R. Shibasaki : High resolution DSM generation from ALOS PRISM data —Pre-launch Simulation and Assessment Plans—, Proc. IEEE IGARSS'05, Seoul, South Korea, pp. 460-463, 2005.
- 7) 柴崎亮介：リニアアレイセンサによるステレオ画像を用いた数値地形モデルの自動作成に関する研究，土木研究所報告，171，pp. 1-67，1987.
- 8) 高木幹雄，下田陽久（編）：新編 画像解析ハンドブック，東京大学出版会，東京，2004.
- 9) T. Iwata : Precision Geolocation Determination and Pointing Management for the Advanced Land Observing Satellite (ALOS), Proc. IEEE IGARSS'03, Toulouse, France, pp. 1845-1848, 2003.
- 10) JAXA/EORC : ALOS/PRISM&AVNIR-2 Level 1 Data Processing Algorithm Revision H, NEB-01007, JAXA/EORC, Tokyo, 2006.
- 11) T. Tadono, M. Shimada, M. Watanabe, R. Furuta, T. Hashimoto : Calibration and Validation Plans of ALOS Optical Sensors, Proc. IEEE IGARSS'04, Anchorage, USA, pp. 1831-1834, 2004.
- 12) A. Gruen, L. Zhang, : Automatic DTM Generation from Three Line Scanner (TLS) Images, IAPRS Vol. 34, Part 2A, Graz, Austria, pp. 131-137, 2002.
- 13) A. Gruen : Adaptive least squares correlation : A powerful image matching technique, South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography, 14 (3), pp. 175-187, 1985.

●田殿 武雄（タドノ タケオ）



所属：宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター。1995年長岡技術科学大学院大学修士課程建設工学専攻，1998年同大学院博士後期課程エネルギー・環境工学専攻修了（博士（工学））。1999年から宇宙開発事業団地球観測データ解析研究センター（現宇宙航空研究開発機構地球観測研究センター）にて JERS-1/ALOS 解析研究プロジェクトに在籍。2001年から同事業団開発部員，2006年より現所属研究員。主に ALOS 光学センサの校正検証を担当し，またマイクロ波リモートセンシングを用いた物理量推定アルゴリズム開発を実施。IEEE Geoscience and Remote Sensing Society, 日本リモートセンシング学会，土木学会，水文・水資源学会，日本雪氷学会に所属。

E-mail : tadono.takeo@jaxa.jp