地図表現の高度化についての開発
−50000 レベル地図表現の検討及び電子地形図提供システムの改良−

実施期間　平成 26 年度～平成 30 年度
基本図情報部地図情報技術開発室　本多　美涼　　中村　孝之

1. はじめに

平成 20 年に提案された「デジタル時代の地理空間情報体系の構築」に基づき，5 万分 1 地形図は更新を停止しているが,2 万 5 千分 1 地形図より広範囲を一覧できる地形図として現在もニーズがある．このため，これまでも電子国土基本図（地図情報）を使用して 5 万分 1 地形図図式に準じた図式描画を行う方法について検討されており，平成 25 年度までに電子地形図生成ツール DKGX に実装済みだが，市街地での注記や記号の重複，複雑な道路形状の表現などに課題を残している．平成 28 年度は，図式表現の変更も視野に入れ，電子地形図 25000 の地図表現（図-1）をベースに，既存の電子国土基本図及び 20 万レベルの国土広域情報を使用して，転位，総描，属性の追加取得といった手作業での編集を極力行うことなく実現可能な 50000 レベルの地図表現（図-2）を検討した．

また，外国人にわかりやすい地図表現検討会の成果を元に作成された「地名等の英語表記規程」（平成 28 年国地達第 10 号）に整合した英語注記を地理院地図で提供することとしている．外国人向け地図記号についても同検討会の成果を踏まえた具体の地図記号が作成，決定され，国土地理院が英語版地図を作成する際に順次適用することとしている．英語版地図提供仕様の検討に使用することを想定し,DKGX を改良し英語版電子地形図 25000 及び地理院タイル ZL15～17 の画像作成機能を追加した．

2. 50000 レベル地図表現の検討

2.1 検討内容

2.1.1 取捨選択

従来の 5 万分 1 地形図では，2 万 5 千分 1 地形図をベースに地物の規模，重要度による取捨選択が行われている．電子国土基本図では，地物の表示優先度を表す属性は取得されておらず，編集者の判断を必要とする従来と同様の取捨選択を機械的に行うことは困難だが,記号(道路や建物記号など）や注記のサイズを 25000 レベルと同じ図上サイズで表記（相対的に 2 倍に拡大）すると，特に都市部において多数重複が発生するため，取捨選択は必須である．

注記と建物記号，表示項目同士の重複を避け，図郭内にバランス良く注記，記号を配置するため，建物記号や土地利用名，建物名など一部の注記については注記及び記号の密度の低い国土広域情報を使用することとした．また,注記文字列が占めるスペースを減らすため「丁目」を算用数字のみで表記した（例えば三丁目の「(三)」を

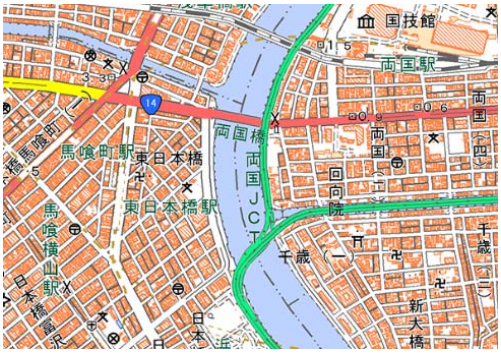


図-1　電子地形図 25000
「東京首部」の一部

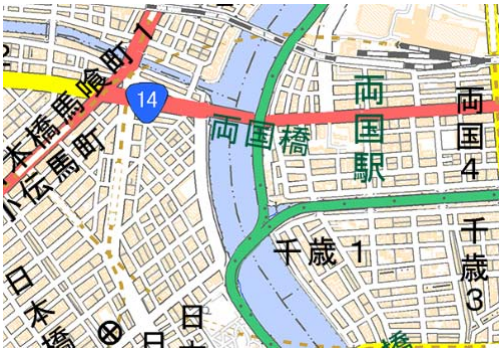


図-2　電子地形図 5 万試作図
「東京東北部」の一部

「３」で表記).

道路については分離帯を非表示とし，その他，鉄道，建物等は全て表示とした．水部については，国土広域情報を使用し，一級及び二級河川とそれにつながる湖沼及びその他規模の大きな湖沼を表示することとした．表-1 に主な地物毎の使用データと表現をまとめた．

表-1　主な地物毎の使用データ及び表現

地物		使用データ	表現 ※割合(%)は 5 万分 1 地形図と比較した図上サイズの縮小率
行政界		電子国土基本図	線幅 50%
道路		電子国土基本図の道路中心線	二条道路:記号幅員 75% 一条道路:色を明るく, 線幅 50% 庭園路, 石段:色を明るく, 記号幅員 50% 分離帯非表示
鉄道		電子国土基本図の鉄道中心線	路線:記号幅 75% 駅:記号幅 50%
建築物		電子国土基本図	色を明るく
海岸線		電子国土基本図	線幅 50%
二条河川, 湖沼		国土広域情報 20 万	水涯線幅 50%
一条河川		国土広域情報 20 万	線幅 50%
水部構造物線		電子国土基本図	線幅 50%
土地利用		電子国土基本図	特定地区界:線幅 50% 植生:記号サイズ 75%
基準点		電子基準点 一等･二等三角点	記号サイズ 100%
標高点		表示しない	—
等高線		電子国土基本図を 100m, 20m 間隔に間引き	線幅 50%
注記	行政区画	電子国土基本図	字大 100%
	居住地名	電子国土基本図	字大 100% （丁目は算用数字のみで表示） 集落名称(通称)非表示
	自然地名	電子国土基本図	字大 100%
	交通施設名	橋･ﾄﾝﾈﾙ:電子国土基本図 その他:国土広域情報 20 万	
	土地利用名	国土広域情報 20 万	
	建物名	国土広域情報 20 万	
建物等記号		国土広域情報 20 万(NTX) 市役所, 区役所, 町村役場 警察署, 郵便局 大学, 高校 灯台 神社, 寺院 工場, 油井･ガス井, 発電所	記号サイズ 100%

2.1.2 記号サイズ

従来の 5 万分 1 地形図図式では記号の図上サイズは 2 万 5 千分 1 地形図図式と原則同じだが, 転位, 総描を行わない場合，特に地物が混み合った場所で，並走する線状地物同士の重複が発生するなど判

読困難となる（図-3）．これを極力回避するため，注記，建物記号を除く全ての地物について，記号サイズを縮小した．この際，重要度や見やすさを検討し，二条道路や鉄道を 5 万分 1 地形図と比較して 75%，一条道路や庭園路，坑口を同 50%とするなどメリハリをつけた縮小率とした．

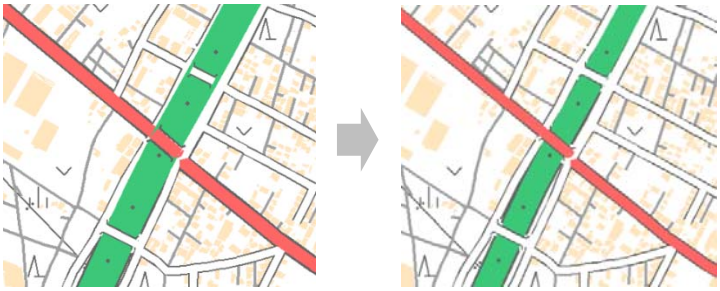


図-3　線状地物の重複

2.1.3 記号表示色

従来の 5 万分 1 地形図図式では 2 万 5 千分 1 地形図図式とほぼ同じ配色となっている．電子地形図 25000 の配色のまま地物の規模，重要度による取捨選択をせずに 50000 レベル地図表現を行うと，見づらく煩雑になる．そこで，電子地形図 20 万の配色を参考にしつつ，表示すべきだが優先度が低い地物（一条道路や庭園路，建物外周線など）についてはより明るい（薄い）色で表示し目立たないようにした．

2.2 課題

注記，記号の取捨選択については，数は減ったものの依然重複が発生している（図-4）．また，国土広域情報の注記を 50000 レベルにそのまま用いると注記位置が対象から離れてしまうなど不適切な配置となってしまう場合がある（図-5）．いずれも手作業での編集が必要だが，編集量が極力少なくなるよう，20 万レベルの注記位置からの 50000 レベル注記の自動配置手法の検討が必要である．従来の考え方とは異なるが，高速道路や鉄道などの路線名は対象物の中心線上に注記するということも考えられる．

また，防災利用や広範囲を把握する観点から重要な地物（小中高等学校名など）に対し注記するという考え方もあるが，このような電子地形図 25000 でも電子地形図 20 万でも注記されていない名称を注記すると両縮尺の図をつなぐ一貫性のある表現ではなくなる．各地物を注記あるいは建物記号のいずれで表現するかについて 25000，20 万レベルと合わせて一体的に考え方を整理することも必要と思われる．

図-4　注記の重複の例

図-5　不適切な注記配置の例

3. DKGX への英語版電子地形図作成機能追加

外国人にわかりやすい地図表現検討会の成果に基づき決定された外国人向け地図記号のうち，従来の電子地形図 25000 の表示項目である「郵便局」「交番」「博物館」及び「病院」並びに新規に「鉄道駅」記号を追加した．「鉄道駅」記号については，鉄道中心線アークの中央に発生させることとした．外国人向け地図記号がない建物記号については，従来の記号の表示/非表示を選択できる（図-6）．また，英語版表示切替メニューを選択した際に表示される英語版注記及び外国人向け地図記号について，日本語版注記及び従来の記号と異なるサイズで表示可能とした（図-7）．

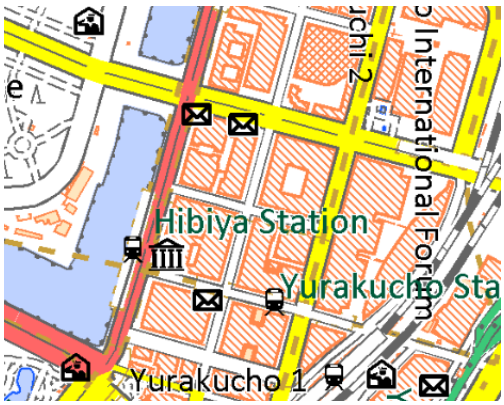


図-6　既存の地図記号を非表示

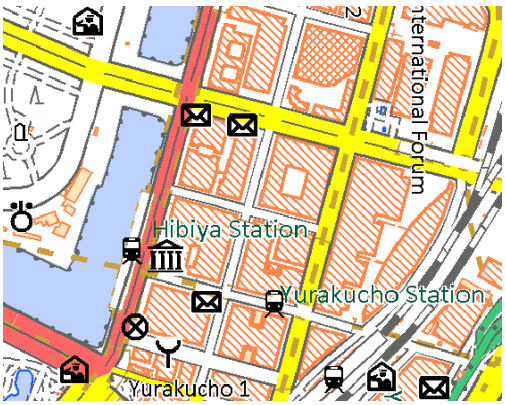


図-7　字大を 70%縮小した例

4. まとめ

極力手作業により編集することなく実現可能な 50000 レベルの地図表現を検討し，5 万分 1 地形図図式とは異なる取得基準，記号サイズ，表示色とすることにより，ある程度の見やすい地図表現を実現した．しかしながら，現状では特に注記，建物記号の配置について手作業による編集が必須であり，実用化に向けより効率的なデータ整備手法の検討が必要である．また，DKGX に英語版電子地形図 25000 作成機能を追加することにより，英語版地理院タイル ZL15～17 提供仕様の検討を行うための環境が整った．

参考文献

大野裕幸（2010）：電子国土基本図からの 5 万分 1 地図の完全自動生成，測図部技術報告，19，36-41.

渡部金一郎，野口真弓，吉松直貴，波多江萌，石毛正一（2016）：国土広域情報の整備について，国土地理院時報，126，93-96.

光学衛星画像を用いた地図作成に関する研究
－地上画素寸法30cm級の衛星画像を用いた地図作成に関する共同研究（第2年次）－

実施期間　平成27年度～平成28年度
基本図情報部地図情報技術開発室　早坂　寿人　髙橋　祥
南　秀和　中村　孝之

1. はじめに

地図情報技術開発室では，平成27年度から2年間の予定で，地上画素寸法30cm級のWorldView-3衛星画像に関する共同研究を（株）NTTデータと実施した．平成28年度はステレオ図化を実施し，判読性や図化精度について検証した．

2. 検証地域

三浦地区，つくば地区，箱根地区の三つのステレオペア画像を使用した．三浦地区は，パンシャープン画像及びパンクロマティック画像でそれぞれモデルを組み，建物と道路縁をステレオ図化し，判読性を比較検証した．また，つくば地区と箱根地区では等高線を図化し，その精度検証を行った．なお，画像の標定は，前年度の検証結果に基づき，RPCモデルをGCP5点で補正することにより行った．

3. 判読性の確認

三浦地区の図化データ（図-1）について，基盤地図情報と比較することで高い水平精度を持つことが確認された．一方，建物形状を誤判読した例や，建物や道路を認識できなかった例が見られた．影や色調などの影響で，地物の正確な取得に難しさが感じられるなど判読性に課題が確認された．判読が困難となる要因としては以下が考えられる．

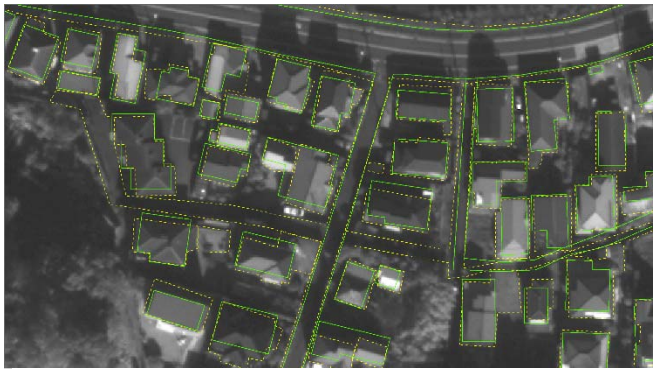


図-1　図化データの例（三浦地区）
破線:パンシャープンオルソ
実線:パンクロマティックステレオ

- 太陽高度：今回は12月撮影の画像を使用したため，影の影響が大きかった．影部分を階調補正することで判読性が改善する余地があるが，航空写真と異なり複数のモデルから判読できるわけではないため，より好条件の画像が推奨される．
- 色情報：特に建物密集地では，個々の建物の区分け（識別）に色情報が必須である．
- 輝度：ペア画像間で，同一地物の輝度が大きく異なっていると実体視の妨げとなる．
- BH比：図化する地域の起伏や高低差に合わせて，適切なBH比のペア画像を選ぶ必要がある．
- オフナディア角：ペア画像のオフナディア角がともに大きいと，実体視が困難になる．どちらか一方はほぼ直下視の画像であることが死角を減らす上で有用である．

4. 等高線の精度検証

等高線の精度を評価する定量的な手法は，先行研究で事例を確認できなかったため，今回，航空レーザ測量によるグラウンドデータを正解値とする等高線の精度評価方法を新たに考案した．具体的に

は，図-2 に示すとおり，図化した等高線から 50cm のバッファを発生させ，そのバッファ内に存在する航空レーザ測量による点群データとの比較により，等高線の精度を評価した．

その結果，つくば地区（表-1）において，地表面が明瞭に見える場所の等高線に限れば，RMSE1.0m 程度，標準偏差 0.5m 前後の高い精度が得られた．同様に，別の作業者が箱根地区（表-2）で行った図化でも，地表面を直接計測できる場所では，RMSE1.0m 程度，標準偏差 0.5m 程度という結果が得られた．但し，山林など植生下の推定が必要なエリアや影，地形が急変しているエリアを含んだ等高線（920m,910m,900m）では顕著に精度低下が見られた．作業者によって地形にメスマークを合わせる癖（やや浮かせ気味，やや沈め気味など）があるものの，いずれも地図情報レベル 2500 の等高線図化に必要な精度をほぼ満たす結果が得られた．

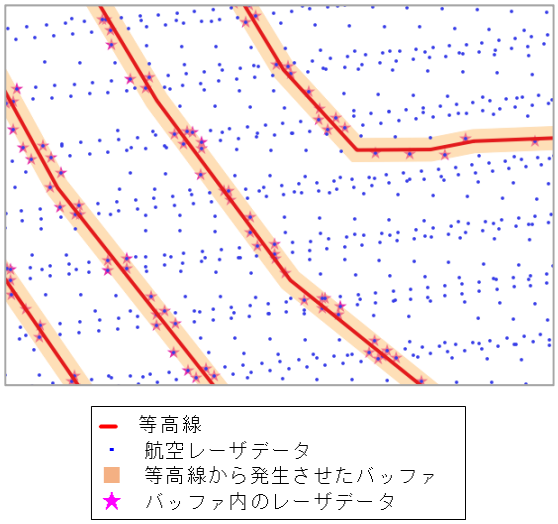


図-2　等高線の精度検証方法

表-1　等高線の精度（つくば地区）

等高線	Ave(m)	Max(m)	Min(m)	STD(m)	RMSE(m)	点数
40m	39.3	40.7	37.4	0.7	1.0	512
38m	37.8	38.9	36.4	0.3	0.4	528
36m	35.6	36.8	33.0	0.7	0.8	369
34m	33.8	34.8	32.4	0.4	0.5	354
32m	31.9	33.1	30.7	0.5	0.5	419
30m	29.6	30.8	27.4	0.6	0.7	323

表-2　等高線の精度（箱根地区）

等高線	Ave(m)	Max(m)	Min(m)	STD(m)	RMSE(m)	点数
920m	918.2	924.9	905.6	2.8	3.4	2965
910m	907.9	915.4	889.1	3.3	3.9	2776
908m	908.5	909.4	906.0	0.5	0.7	544
906m	906.7	907.4	904.6	0.3	0.8	972
904m	904.8	906.6	903.9	0.3	0.9	2514
902m	902.6	904.6	901.1	0.4	0.7	2494
900m	899.1	906.3	875.1	3.8	3.9	5887

5. まとめと今後の課題

WorldView-3 画像によるステレオ図化では，先行の他の高分解能衛星画像の研究同様，明瞭に判読できる地物については高い水平精度を持つことが確認された．一方で，地物の取得漏れや誤取得が多々起こりうる．高さ精度は，地表面が明瞭に見える場所に限れば，高い精度が得られた．しかし，影の影響で判読性が低いエリアや山林では精度低下が著しかった（表-2）．

今後の課題として，画像判読性の改善（もしくは利用者側で判読しやすいよう調整すること）と，ステレオペアが満たすべき条件（BH 比やオフナディア角，方向角等）の検討が挙げられる．

参考文献

藤原博行，瀧繁幸，大塚力，大野裕幸（2013）：Pleiades 画像を用いて作成した地図情報の精度評価，国土地理院調査研究年報(平成 25 年度)，66-69

航空機 SAR による災害状況把握に関する研究（第 3 年次）

実施期間　平成 26 年度～平成 30 年度
基本図情報部地図情報技術開発室　髙橋　祥　早坂　寿人
南　秀和　中村　孝之

1. はじめに

航空機搭載型合成開口レーダ（以下「航空機 SAR」という.）は，マイクロ波を用いた能動型のセンサである．マイクロ波は雲や噴煙等を透過するため，光学センサでの情報収集が困難な条件下においても，地表面の状況を把握できる可能性がある．地図情報技術開発室では，火山等の災害発生状況を迅速に把握するため，国土地理院の測量用航空機「くにかぜⅢ」に搭載する航空機 SAR により取得したデータから作成する反射強度画像及び DSM（以下「SARDSM」という.）を用いて，地形の変化状況を定量的に把握する手法及び土砂崩落発生箇所等を把握する手法を検討している.

平成 28 年度は,広範囲に作成した SARDSM の精度を面的に検証し,今後の改善の余地を検討した.

2. SARDSM 作成方法

SARDSM の作成には，国土地理院が運用している SAR 観測機器の開発元である（株）アルウェットテクノロジーが提供している解析ソフト「SARPro」を使用した．同ソフトでは，通常は 2 つの補正パラメータ（ロール角オフセット，アンテナ間距離オフセット）を入力する．ロール角オフセットはレンジ方向（電波照射方向）の全体的な傾きを補正し，アンテナ間距離オフセットはコース全体の高さを補正する．現在，この補正パラメータを決定する作業は，作業者の経験に基づく試行錯誤に拠っている．具体的には，まず任意の 1 コースを対象にパラメータを変えながら何度も DSM を作成し，その DSM を既存の航空レーザ測量による DSM（以下「レーザ DSM」という.）と目視で比較して，最も整合性が高いと思われる DSM が作成されたパラメータを採用し，他コースにも適用している．レーザ DSM との位置合わせに地上基準点は使用していない．このように補正パラメータの決定に際しては定量的な評価を行っておらず，測量的な精度管理ができているとは言えない状況である．今回作成した DSM に関しても，パラメータの決定に 2 日費やしたが，これが最適と言える根拠はない.

3. SARDSM の精度検証

これまでの SARDSM 精度検証では，静岡県伊東市の大室山周辺（500m×500m）を対象に，山頂付近に設置した調整点一点を用いた上下方向一律シフト補正によって，レーザ DSM との較差が最大 16.28m，RMSE が 2.04m という結果を得ている（伊藤ほか，2013）.

今回は，より広範囲の DSM について精度を把握するため，つくば地区（観測日 2016 年 6 月 17 日，オフナディア角 65°，観測高度約 2400m，コース長約 15km，計 4 コース）を対象として検証を実施した．つくば地区を選定したのは，平坦であり広域的な傾向をつかみやすいことによる.

検証方法は，SARDSM 点群と 2007 年の航空レーザファーストパルス点群との比較による．コース内に平坦かつ 2007～2016 年の間に地表の変化がなかったと思われるグラウンド等（19 箇所）を選定し，その中に直径 30m の円形の領域を検証サイトとして設定し，サイト内に含まれる点群の平均値同士を比較した．サイトの配置図を図-1 に示す．なお，すべてのコースにすべてのサイトが含まれるわけではない.

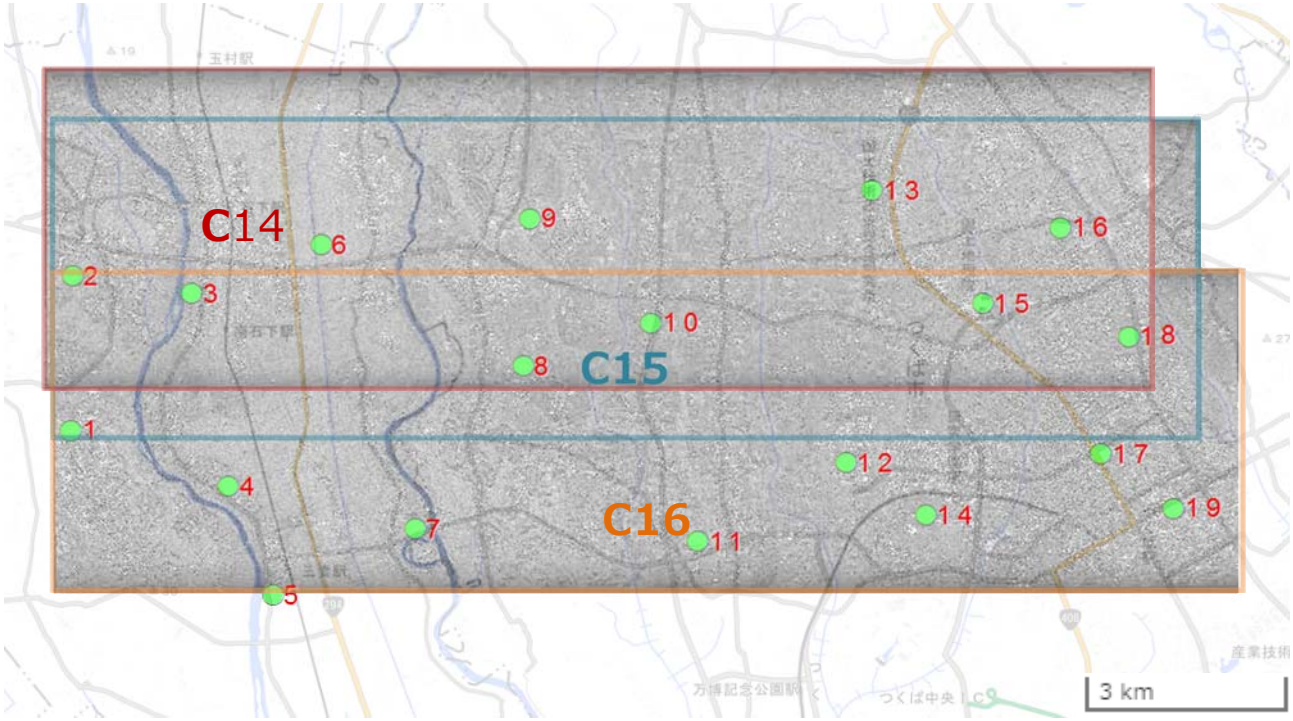


図-1　検証サイトの配置

結果を図-2 に示す．SARDSM の作成にあたっては C15 において補正パラメータを決定し，このパラメータを他のコースにも適用した．C15，C16 は東向きフライト（電波は南から照射），C14 は西向きフライト（北から電波照射）である．また，C14 は同じコースを 2 回観測した．DSM の較差は概ね 5～10m に収まり，RMSE は 6.39m となった．ただし，局所的には 20m 程度の較差が生じている．

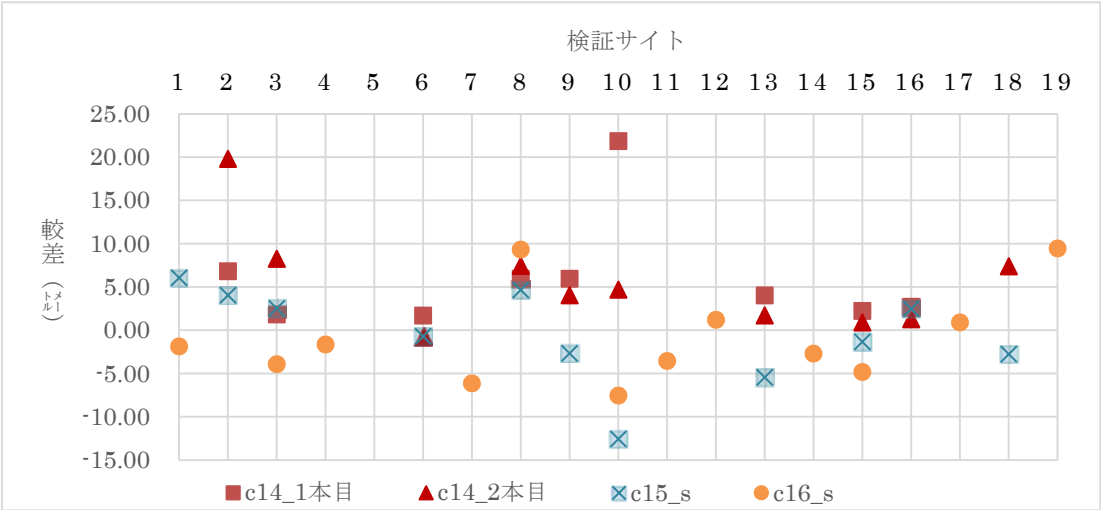


図-2　SARDSM とレーザ DSM との較差

4. 変化箇所抽出の検証

災害時に SARDSM を作成する目的は，火山噴火や土砂災害の前後の DSM を比較し，変化した部分とその地形変化量を把握することにある．今回，精度検証に使用した点群データを 5m メッシュに加工して，高さが変化した箇所の抽出を試みた．

図-3 左図は，近年大規模な沿線開発が行われたつくば市の研究学園駅周辺において 2007 年のレー

ザ DSM と 2016 年の SARDSM（C16）を比較した結果である．ショッピングモールやマンションなどの新たな建造物によって高くなった箇所や，林が伐採されて低くなった箇所が検出されている．良好なデータが得られた場合，事前のレーザ DSM と比較して 10m 程度以上の高さ変化のあった箇所を主な変化箇所として抽出できる可能性がある．

2016 年の SARDSM を 2007 年のレーザ DSM と比較して
■10m 以上高い　■10m 以上低い

2004 年撮影空中写真

2015 年撮影空中写真

500 m

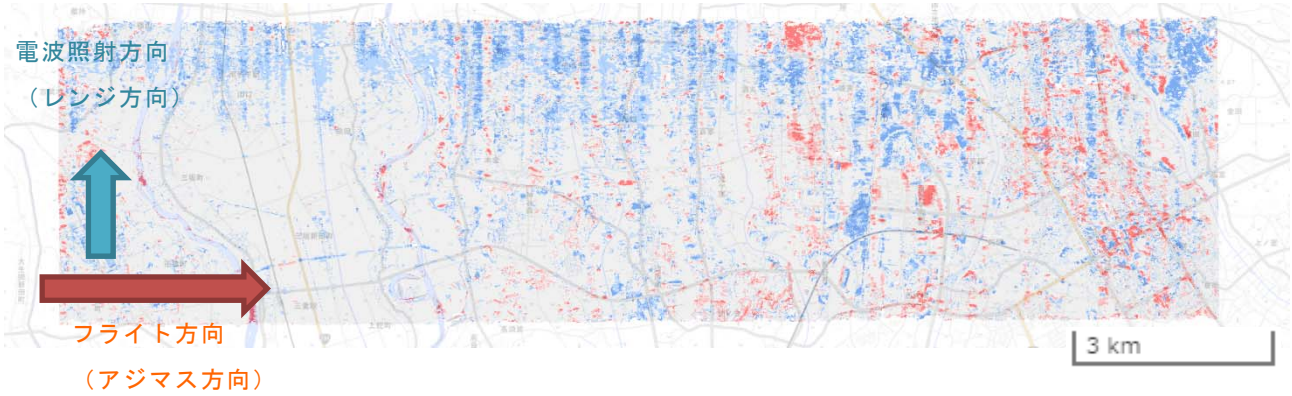
図-3　SARDSM とレーザ DSM の比較による変化箇所検出

5. SARDSM の誤差の要因について

検証サイトによる検証結果や，変化抽出を試みて誤抽出された箇所の確認により，系統的と思われるいくつかの誤差要因が明らかになった．

① 全体的な高さ・低さ：図-2 に見られるように，コースごとに高め，低めの傾向が確認できる．これは今回のアンテナ間距離オフセット値が最適値ではないことを示している．

② 全体的な傾き：C16 のコース全体の DSM 較差を図-4 に示す．これによると，航空機 SAR から遠い方が低い傾向にあり，より適切なロール角オフセット値が存在しうることを示している．

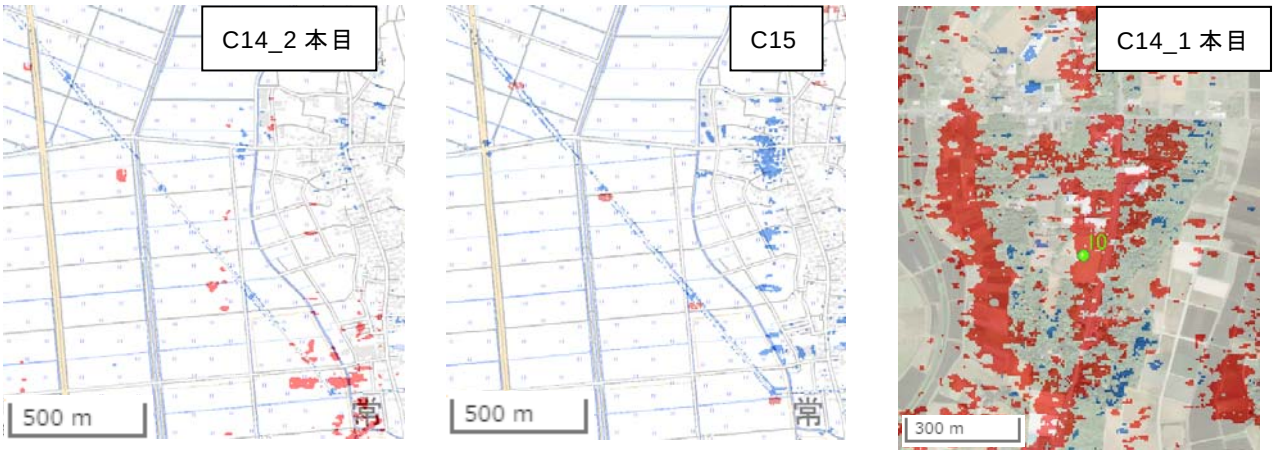


2016 年の SARDSM を 2007 年のレーザ DSM と比較して　■10m 以上高い　■10m 以上低い

図-4　コース全体の DSM 較差（C16）

③ 縦縞：図-4 では，レンジ方向に平行な縞が生じている．反射強度画像にも同様に縞が生じていれば飛行機の動揺によるものであり，反射強度画像が正常であれば物理的にアンテナを動かして偏流角を補正する際のノイズと考えられる．今回はいずれの事例も見られるが，多くは後者である．

④ 位置ずれ：送電線付近で，較差の大きな地点が規則的に並んでおり，これは鉄塔の DSM の位置ずれに拠るものと考えられる．C14_2 本目は SARDSM が西北西に 140m ほど，C15 は南に 20m ほどずれているようにみえる（図-5 左・中）．また，図-2 で誤差の特に大きかった地点（C14_1 本目のサイト 10，C14_2 本目のサイト 2）の周辺では，検証サイトの東側の林の木々の DSM が西にずれたため，高い値の誤差が生じたものと思われる（図-5 右）．



2016 年の SARDSM を 2007 年のレーザ DSM と比較して　■10m 以上高い　■10m 以上低い

図-5　位置ずれによる誤差の例

6. まとめ

SARDSM の精度を面的に評価したところ，様々な要因により現状では 10m 程度の高さの誤差があり，局所的には 20m 以上の誤差が発生しうることを確認した．そして，一見するとランダムに見える誤差の中に，系統的な誤差がいくつかあることが明らかになった．系統的な誤差は，アンテナを物理的に動かさない観測方法に変更する，アンテナケーブルをノイズの少ないものに交換する，解析ソフトを改良するなどの対応により，ある程度改善される見込みがある．現状では，好条件で 10m 程度以上の高さ変化を抽出できるが，より高精度に安定的に高さ変化を抽出できるようになる可能性がある．

航空機 SAR は，雲や噴煙を通して地表面の状況を把握できることから期待が高い一方で，現状得られる成果は期待に十分応えられるとは言えない．航空機 SAR での観測が有効な場面において，良好な成果を迅速に提供できるよう，引き続き SARDSM の高精度化や作成の迅速化の検討を行いたい．

参考文献

伊藤裕之，笹川啓，藤原博行，大野裕幸（2013）：航空機 SAR 改修と湛水域抽出について，国土地理院時報，124，29-34.

伊藤裕之，藤原博行，笹川啓，大野裕幸（2012）：新型航空機 SAR 等の精度検証及び MMS による道路更新用データ取得方法に関する研究（第 2 年次），平成 24 年度調査研究年報，56-59.

早坂寿人，山田美隆，瀧繁幸，大野裕幸（2015）航空機 SAR による災害状況把握に関する研究，平成 27 年度調査研究年報，62-63.

社会基盤としての3次元地図の整備・更新技術の開発
−効率的かつ廉価な空間のモデリングシステムの開発−

実施期間　平成27年度～平成29年度
基本図情報部地図情報技術開発室　宮地　邦英　中村　孝之
南　秀和　菅井　秀翔

1. はじめに

準天頂衛星等による衛星測位技術，地理空間情報技術や情報通信技術（ICT）などの進展により，国民はもとより，2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会を代表的な機会として今後増加する外国人旅行者に対しても，歩行者の円滑な移動支援や適切な情報提供，災害時の避難誘導等を可能とする「高精度測位社会」の実現が期待されている．しかしながら，高精度測位社会の基盤として必要な屋内測位技術や3次元地図については，測位や地図を扱う企業等がそれぞれの技術で取り組み始めるにとどまり，測位環境や3次元地図整備に関する様々な取組を秩序だったものにする上で重要な技術基準やガイドラインも存在していない．また，サービス提供に必要な精度を持つ3次元地図の体系的・経済的な整備・更新の方法にも課題が残されていることから，これら共通の基盤整備が進展せず，結果として各種新サービス実現の遅れにつながっている．

そこで国土地理院では，高精度測位社会の実現にかかる課題を解決するため，国土交通省の推進する「高精度測位社会プロジェクト」と連携して，国土交通省総合技術開発プロジェクト（以下「総プロ」という.）の枠組みにより平成27年度より3ヶ年で，ビル街など衛星測位が困難な箇所の測位環境の改善と屋内外測位の相互連携，3 次元地図の整備・更新に関する技術開発を行っている．基本図情報部地図情報技術開発室では，本技術開発のうち3次元地図を効率的かつ廉価に整備・更新するための技術開発を担当し，平成28年度に「効率的かつ廉価な空間のモデリングシステム」（以下「モデリングシステム」という.）を開発した．

2. モデリング手法の調査及び評価ツールの作成

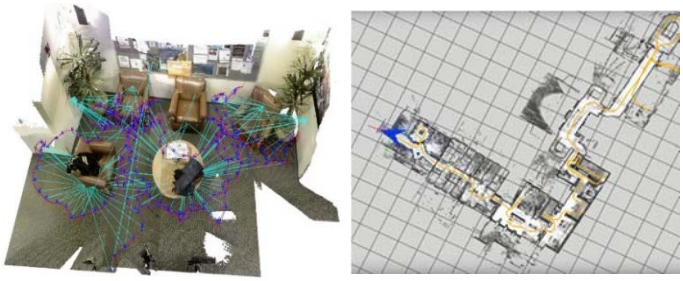
モデリングシステムの開発に先立ち，平成27年度に空間のモデリング手法の調査を実施した．さらに，調査結果より有望と考えられるモデリング手法を2種類選定して評価ツールを作成し，当該ツールでのモデリングの結果をもとにモデリングシステムに採用する手法を決定した．

2.1 モデリング手法の調査

屋内3次元地図の整備が進まない要因の1つとして高コストが挙げられることから，3次元地図を効率的かつ廉価に整備・更新するためのモデリングシステム開発の前提として，高価なレーザスキャナや IMU 等の計測機器を用いる必要のない，コンピュータビジョンによる空間のモデリング手法を調査対象とした．

コンピュータビジョンとは，画像から被写体の様々な情報を抽出する技術であり，同技術による 3次元モデリングが本格的に研究され始めたのは2000年代に入ってからである．まず，現在では写真測量分野でも用いられるようになったSfM（Structure from Motion）及びMVS（Multi-View Stereo）による3次元モデリング（図-1）が，映画や3Dゲームなどの特殊映像分野や建築業界などの分野で使う目的で研究され始めた．一方，SLAM（Simultaneous Localization and Mapping）は自律移動型ロボットの自己位置推定と周辺環境地図の構築をリアルタイムに行う手法として研究され始めた．初期の頃はレ

図-1　SfM/MVS で再現した椅子の 3 次元形状と写真の撮影位置



左　http://www.vision.rwth-aachen.de/publication/0025/
右　https://opensource.googleblog.com/2016/10/introducing-cartographer.html

図-2　vSLAM で再現した屋内空間の 3 次元形状とカメラの移動軌跡

ンジファインダーや 3D レーザスキャナ等の測距センサによる SLAM が研究されていが，このセンサをカメラに変えた vSLAM（Visual-SLAM）（図-2）がコンピュータビジョンに浸透していった. SfM/MVS と vSLAM の違いは，バッチ処理かリアルタイム処理かの違いであり，カメラ位置及び周辺環境位置の推定手法は概ね同じ原理である．近年では，RGB カメラに赤外線の深度（Depth）センサが付いた「Kinect」を始め比較的安価に深度データが得られるセンサが出回ってきたことにより，RGB-D による vSLAM（以下「RGB-D vSLAM」という.）の研究が盛んになってきている. また, これまでの SfM/MVS 及び vSLAM では画像上の特徴点を抽出して用いるモデリング手法が主であったが，近年では，画像のすべての画素を用いてモデリングを行う「Dense Visual SLAM」も研究の対象になっている.

モデリングシステムに採用するモデリング手法を選定するため，これら SfM/MVS 及び vSLAM のうち 8 種類のモデリング手法について簡易調査を行うとともに，①開発実現性（技術的な難易度），②再現性（見込まれるモデルの現実空間の再現度），③精度（見込まれるモデルの相対精度），④空間的範囲（計測・モデル化が可能な距離），⑤作業コスト（計測及びモデル破綻時の修正に要する労力），⑥開発コスト（必要な機能のうち新規開発を要する割合），⑦処理速度（モデル化に要する時間），⑧評価ツール実現性（オープンソースツールの利用可否）の観点で比較を行った．これらの比較結果より，計測時にリアルタイムにモデリングが可能で作業コストが低く，主たる適用対象が屋内空間であり測定可能距離が数メートルの安価な深度センサでも有効であるとの観点から，RGB-D vSLAM を後述の評価ツール作成対象の手法として選定した.

2.2 評価ツールによる評価と採用するモデリング手法の選定

RGB-D vSLAM にも複数の手法があることから，2 種類の手法（特徴点抽出による RGB-D vSLAM 及び Dense Visual による RGB-D vSLAM）について評価用ツールを試作し，比較したうえで採用する手法を選定することとした. 評価用ツールに用いる vSLAM は, 独ミュンヘン工科大学の開発したオープンソースプログラム（特徴点：RGBDSLAM v2, Dense Visual：Dense Visual Odometry and SLAM（以下「DVO-SLAM」という.））とした．また，使用する安価な RGB-D センサは，数種類を比較した結果，深度センサの有効測定距離が 8m と比較的長い Microsoft 社の Kinect v2（図-3）を選定した.

図-3　Kinect v2（Microsoft 社 WEB サイトより引用）

続いて，作成した評価ツールにより，地下街等を想定してテクスチャ（模様）の乏しい地図情報技術開発室前の廊下を計測した．計測した結果を図-4 に示す．RGBDSLAM v2 では，計測箇所のテクスチャが乏しく十分な数の特徴点が追跡できず，モデルが大きく歪んだ．一方，DVO-SLAM では比較的良好なモデルが作成できた．これらの結果より，モデリングシステムは Dense Visual による RGB-D vSLAM を軸に開発することとした.

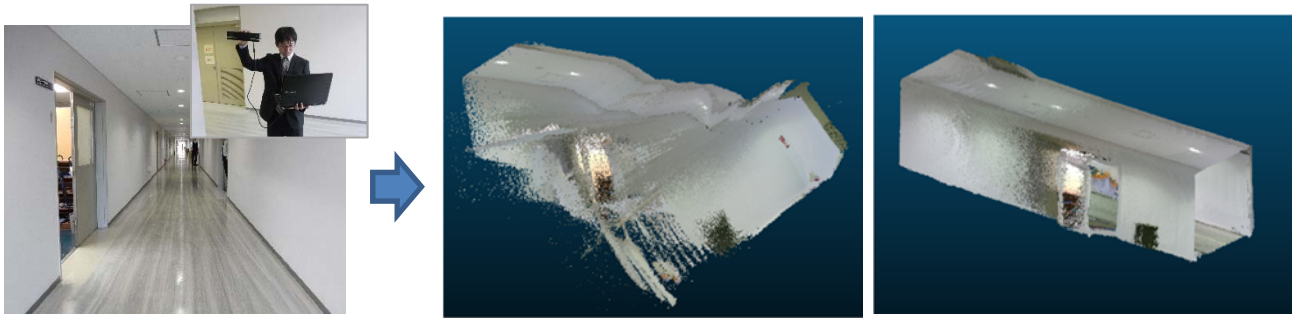


図-4　廊下の計測結果（左：RGBDSLAM v2　右：DVO-SLAM）

3. モデリングシステムの開発

平成 27 年度に実施した調査をもとに，平成 28 年度に Dense Visual による RGB-D vSLAM を採用したモデリングシステムを開発した．一般的に SLAM は計測の継続とともに誤差が蓄積し 3 次元モデルが歪んでいくため，歪みを緩和するための工夫を加える必要がある．そこで，システムの構築方法として，核となる vSLAM には既存のオープンソースのプログラムを改造して使用するとともに，歪みを緩和するための様々な拘束条件を加えることとした．

3.1 システムの構成

本システムは運用上の利便性を考慮し，Microsoft Windows 10 上で動作するものとして開発した．モデリングシステムの構成を図-5 に示す．

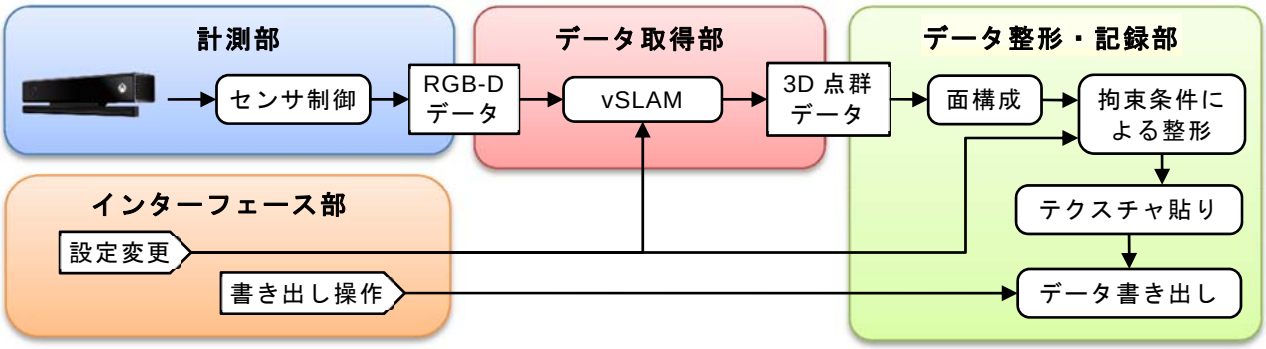


図-5　モデリングシステムの構成

本システムに vSLAM を実装するに当たり，まず，評価ツールとしても用いた「DVO-SLAM」の実装を試みた．この手法は独ミュンヘン工科大学のグループが 2013 年に発表した手法で，移動するカメラの動画からキーフレーム（点群作成時の画像）を抽出し，キーフレーム同士の画素値の差からカメラの移動軌跡と撮影対象の 3 次元形状を復元し 3 次元点群を生成するものであるが，元々ROS（Robot Operating System）上で動作する本プログラムを Windows に移植し実装したところ，計測データの位置合わせが上手くいかず，採用を断念した．次に，英インペリアル・カレッジ・ロンドンのグループが 2014 年に発表した「Dense Planar SLAM」の実装を試みた．この手法は撮影対象の平面領域を抽出して追跡することでカメラの位置と撮影対象の 3 次元形状を復元するものであるが，こちらも実装したところ，計測条件によっては計測データの位置合わせが上手くいかず，採用を断念した．続いて，マイクロソフト社が 2012 年に発表し，オープンソースで公開されている「Kinect Fusion」の実装を試みた．この手法は深度センサの点群から撮影対象のエッジを抽出して比較することでカメラの位置と撮影対象の 3 次元形状を復元するものであり，Dense Visual SLAM には当たらないものの，前述の 2 種類の

SLAM よりも計測結果が良好であったためモデリングシステムに採用した．

本システムに加えた拘束条件としては，まず，主要なターゲットとしている地下街等の屋内空間は壁，床，天井など直交する平面で構成されている部分が多いという特徴を利用し，直交するそれらの法線がなす「支配的な 3 軸」を認識し，計測したある面の法線が支配的な 3 軸となす角度が一定以下の場合は，軸に沿うものとして面の向きや形状を修正する機能を加えた．なお，この拘束条件は一時的に OFF にできるようにし，スロープや，緩やかにカーブしている場所での計測も可能としている．また，一周回って元の位置に戻る等により同じ場所を複数回計測した場合，モデルの同一箇所を結合してズレを修正するとともに，ズレ量の平均化によりモデル全体の歪みを調整する機能を加えた．さらに，床・壁・天井以外にも，円柱，階段，エスカレーターといった特徴的な地物は，大きさと形状からそれと認識して良好に再現できるようにしたほか，しきい値より小さい地物はノイズとしてモデル化しないようにした．

3.2 計測結果

屋内の試験計測結果のうち，見やすさのために天井を削除したものを図-6 に示す．

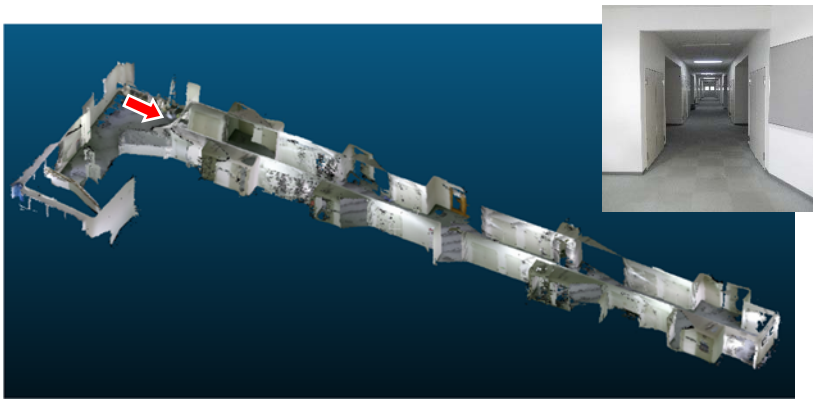


図-6　開発したモデリングシステムで計測した屋内空間（5 回の計測結果を結合 矢印は右上写真の撮影箇所・方向）

テクスチャの乏しい廊下がモデル化できた一方，いくつかの課題があることがわかった．まず vSLAM の制約により一度の計測で 20m 程度の範囲しか計測できないため，短い距離の計測データを別途つなぎ合わせる必要がある．また，カメラの向きを大きく動かした場合や通行人など動くものがある場合にはモデルが崩れてしまうため，慎重に計測する必要があること，空白部をなくすためにカメラの向きを変えて複数回計測する必要があること，モデルが崩れた場合は計測をやり直す必要があることなど，計測上の制約があることがわかった．

4. おわりに

本モデリングシステムの開発は 3 年計画の総プロの 2 年目に実施したものであり，平成 29 年度は総プロの最終年として，本開発のなかで明らかとなった課題と，同総プロの中で別途策定される屋内 3 次元地図の仕様に対応する改修を行う予定である．

さらに，実際の地下街等でテストサイトを設けて，精度検証用の精密な測量及び改修したモデリングシステムによる計測・3 次元地図作成を実施し，精度や現実空間の再現性，3 次元地図作成コストの検証をもって技術の有効性を実証する予定である．

参考文献

Christian Kerl, J¨urgen Sturm, and Daniel Cremers（2013）: Dense Visual SLAM for RGB-D Cameras, IROS 2013.

Renato F. Salas-Moreno et al.（2014）: Dense Planar SLAM, ISMAR 2014.

Shahram Izadi et al.（2011）: KinectFusion: Real-time 3D Reconstruction and Interaction Using a Moving Depth Camera, ISMAR 2011.

地理空間情報の三次元化に関する研究開発
−写真測量における小型 UAV の活用に関する精度検証−

実施期間　平成 26 年度～平成 28 年度
基本図情報部地図情報技術開発室　菅井　秀翔　中村　孝之
南　秀和　宮地　邦英
橘　克巳

1. はじめに

近年，無人航空機（UAV）が急速に普及している．UAV を用いれば簡便に高解像度の空中写真を撮影できるため，写真測量用途での活用にも注目が集まっている．写真測量に UAV を活用する際に重要となるのは SfM（Structure from Motion）技術である．SfM 技術は，複数の写真から自動的に抽出した多数の特徴点を用いてカメラの内部標定要素と外部標定要素，対象物の三次元位置を同時に推定する手法である．従来の写真測量では，精密に較正され，内部標定要素が明らかな測量用カメラを用いるが，小型 UAV に搭載される民生用カメラは内部標定要素が明らかではない上，ピント調整により変化する．その点，SfM 技術を用いれば計算の過程で内部標定要素を推定するため，事前に内部標定要素を計測しなくても三次元計測が可能である．そのため，SfM 技術は民生用カメラを搭載した UAV を用いて写真測量を行う上で必須の技術といえる．

一方で，市販の SfM ソフトウェアのアルゴリズムはブラックボックスである．そのため，測量の精度を確保するためには，SfM ソフトウェアの処理の特性を良く理解し，適切に撮影計画を立て，SfM 処理条件を設定することが不可欠である．地図情報技術開発室では，基本測量への UAV 活用を目的として，平成 26 年度～平成 27 年度の 2 ヶ年にわたって UAV，SfM 技術を用いた写真測量の精度検証を行い，地上画素寸法や標定点の配置などの諸条件が三次元計測精度に与える影響について評価を行ってきた．平成 28 年度は，取り扱いが容易な小型 UAV を基本測量（電子国土基本図の修正作業）に用いる場合を想定し，特に撮影の重複率及び SfM 処理時に与える内部標定要素の初期値の 2 条件に着目し，精度検証を行った．

2. 研究内容

2.1 精度検証の内容

精度検証は日本写真測量学会が整備，運営している UAV テストサイト（神奈川県足柄上郡松田町寄，図-1）を利用して行った．およそ長辺 100 m，短辺 40 m の範囲に，TS を用いて計測した 76 点の対空標識が設置してある．テストサイトの大半は平坦な裸地だが，テストサイトを囲むように流れる沢に向かって急激に落ち込み，河床部と平坦面では最大で 10 m 程度の高低差がある．

撮影諸元を表-1 に示す．撮影には，取り扱いが容易な小型 UAV である，DJI 社 Phantom3 Professional を用いた．撮影計画にあたり，地上画素寸法，重複率の基準となる撮影基準面は，テストサイトの大半を占める平坦面とした．

テストサイトの 4 隅及び中央にある対空標識 5 点を標定点として SfM 処理を行った．4 隅の標定点に囲まれた範囲を検証範囲とし，範囲内に位置する 48 点を検証点とした．それぞれの検証点における精度は，SfM ソフトウェア上で検証点が写りこんでいる写真全てに対して刺針（写真座標計測）を行い，検証点座標との較差をもって評価することとした．

表-1 撮影諸元

使用機体	DJI 社　Phantom3 Professional
計画重複率	オーバーラップ、サイドラップともに 90%
対地高度	約 23 m（地上画素寸法 1 cm）
撮影日	平成 29 年 2 月 8 日
撮影枚数	403 枚

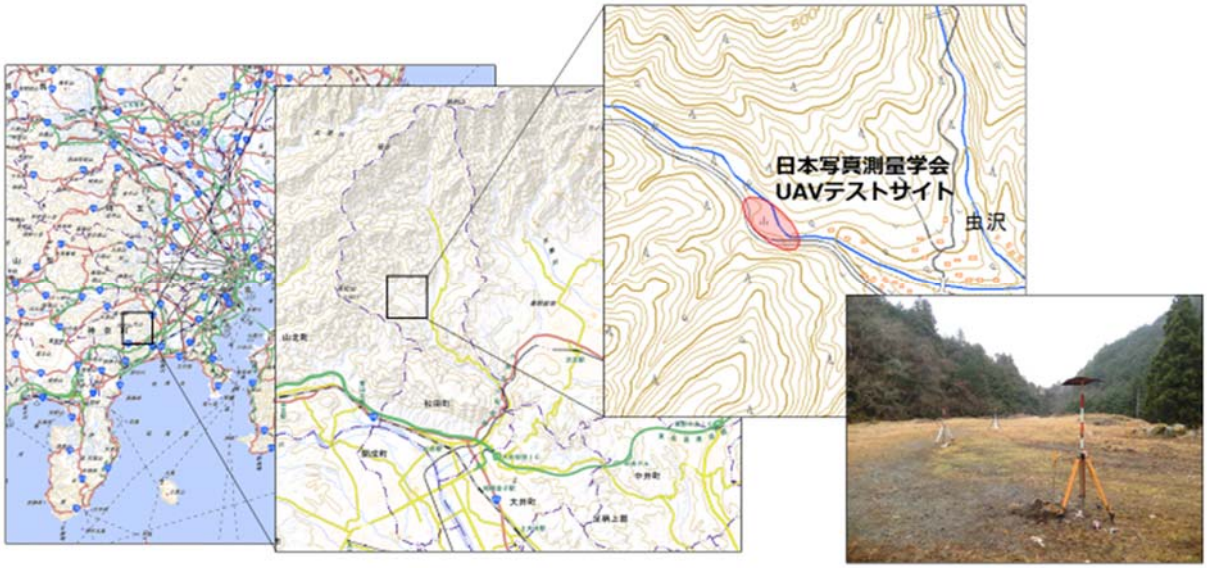


図-1 日本写真測量学会 UAV テストサイトの位置及び様子

2.2 撮影の重複率

一般に，SfM 技術を用いた三次元復元を行うためには，使用する写真は十分に高い重複率が必要とされている．例えば，国土地理院が平成 28 年度末に改正した UAV を用いた公共測量マニュアル（案）では，SfM 技術を前提とした三次元点群測量において，実効のオーバーラップ（以下「OL」という．）80%以上，サイドラップ（以下「SL」という．）60%以上となるような撮影を行うこととされている．しかし高い重複率での撮影は作業効率の低下につながり，精度が確保できる範囲で重複率の要件をどこまで緩和可能かという問題は，基本測量を効率的に行う上で大きな課題である．

本検証では，表-2 に示す 7 通りの重複率で SfM 処理を行い，精度検証を行った．重複率の設定方法は，OL，SL ともに 90%で撮影した写真から各重複率に対応するように写真を間引き，これらの重複率による撮影を擬似的に再現した．

2.3 SfM 処理時に与える内部標定要素の初期値

先述の通り，SfM ソフトウェアは内部標定要素が未知の場合でも，調整計算の中で推定し三次元復元が可能である．一方で，SfM ソフトウェアでは既知の内部標定要素を固定して三次元解析を行うことや，既知の値を初期値として与えて改めて調整計算することも可能である．カメラの内部標定要素を事前に正確に計測して SfM 処理に用いれば，さらなる精度向上に寄与する可能性があると考えた．

そこで，SfM 処理時に，①既知の内部標定要素を与えず解析した場合（以下「①初期値なし」という．），②既知の内部標定要素を与え，固定値として解析した場合（以下「②初期値固定」という．），③既知の内部標定要素を初期値とし，調整計算した場合（以下「③初期値調整」という．）の計 3 通りで解析を行い，それぞれの精度を比較した．

既知の内部標定要素を得るための計測にあたっては，公益社団法人日本測量協会が提供するカメラ

キャリブレーションサービスを利用した．同サービスで用いるソフトウェアと SfM ソフトウェアではレンズディストーションモデルが異なるため，SfM 処理で用いるためにはパラメータ変換が必要となる．今回，SfM ソフトウェアの一つである Pix4Dmapper 向けの変換手法（神谷ほか，2014）を他のソフトウェア（PhotoScan，ContextCapture）でも使えるように拡張した．

3. 結果及び考察

重複率を変えて解析を行った結果を表-2 に，カメラパラメータの条件を変えて解析を行った結果を表-3 に示す．

表-2 重複率ごとの検証点における RMSE 及び最大誤差（単位は m，かっこ内は最大誤差）

ソフトウェア	OL SL	90% 80%	90% 60%	80% 80%	80% 60%	70% 60%	60% 60%	60% 30%
Agisoft社 PhotoScan	水平	0.018 (0.046)	0.027 (0.045)	0.019 (0.060)	0.037 (0.067)	0.028 (0.058)	0.026 (0.057)	0.027 (0.055)
	高さ	0.073 (0.118)	0.055 (0.115)	0.055 (0.121)	0.055 (0.121)	0.048 (0.102)	0.043 (0.112)	0.044 (0.117)
Bentley社 ContextCapture	水平	0.032 (0.076)	0.037 (0.095)	0.041 (0.073)	0.030 (0.074)	0.029 (0.082)	0.027 (0.071)	0.021 (0.068)
	高さ	0.051 (0.106)	0.079 (0.173)	0.073 (0.156)	0.056 (0.125)	0.056 (0.115)	0.044 (0.092)	0.066 (0.151)
Pix4D社 Pix4Dmapper	水平	0.023 (0.049)	0.025 (0.059)	0.023 (0.057)	0.027 (0.065)	0.028 (0.067)	0.027 (0.065)	0.019 (0.061)
	高さ	0.050 (0.101)	0.048 (0.113)	0.044 (0.106)	0.057 (0.131)	0.055 (0.130)	0.055 (0.130)	0.046 (0.118)

※いずれも内部標定要素は①初期値なしとした場合

表-3 内部標定要素の使用条件ごとの検証点における RMSE 及び最大誤差（単位は m，かっこ内は最大誤差）

ソフトウェア		①初期値なし	②初期値固定	③初期値調整
Agisoft社 PhotoScan	水平	0.027 (0.045)	0.059 (0.119)	0.026 (0.045)
	高さ	0.055 (0.115)	0.386 (0.645)	0.058 (0.108)
Bentley社 ContextCapture	水平	0.037 (0.095)	0.055 (0.110)	0.036 (0.081)
	高さ	0.079 (0.173)	0.125 (0.246)	0.104 (0.179)
Pix4D社 Pix4Dmapper	水平	0.025 (0.059)	0.071 (0.103)	0.025 (0.059)
	高さ	0.048 (0.113)	0.075 (0.141)	0.046 (0.108)

※いずれも OL90%，SL60%の場合

表-2 より，いずれの SfM ソフトウェア，重複率においても RMSE は水平方向で 2～4 cm 程度，高さ方向で 4～8 cm 程度の範囲に概ね収まっており，最大値にも重複率による大きな違いは見られない．このことから，重複率が検証点の精度に与える影響は大きくないという結果となった．ただし，この結果は検証点における精度を比較したものであり，検証点以外の領域全体においても精度に差がない

ことを示すものではない．実際に，SfM 技術で生成した DSM 同士を比較してみると，重複度が低い場合は地形が複数の面の組み合わせとして粗く復元されているのに対し，重複度が高くなるにつれてより細かい地形の起伏まで復元されていることがわかる（図-2）．精度確保に必要な重複率の検討にあたっては，検証点における誤差の評価だけでなく，レーザー計測等のより高精度な手法で計測された正解データとの比較を行う必要があると考えられる．

表-3 からは，いずれの SfM ソフトウェアにおいても既知の内部標定要素を使用しない①初期値なしで最も精度が高いことが示された．③初期値調整でも①と同等程度の精度が得られている一方で，②初期値固定では高さ精度が悪化するという結果が得られた．Phantom3 搭載カメラのような簡便なカメラにおいては，事前に計測された内部標定要素を計測時とは異なる条件で適用することには問題がある可能性がある．

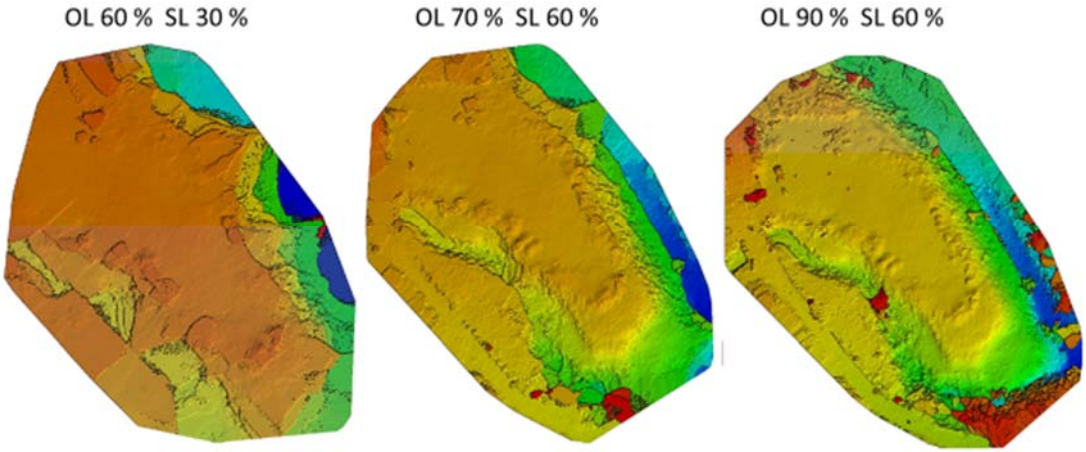


図-2 重複率の異なる写真から復元された UAV テストサイトの DSM の比較（Pix4Dmapper を使用）

4. 結論

小型 UAV を用いた高精度な三次元地形データの取得方法の検討を目的に精度検証を行い，撮影条件，SfM ソフトウェアでの解析条件について以下の結論を得た．

○写真の重複率が検証点における位置精度に与える影響は小さい可能性がある．ただし，重複率の低減を行うためには，高精度の地形モデルを用いた検証点以外での精度比較も含めてより精密に評価する必要がある．

○Phantom3 による写真の SfM 処理にあたり，事前に計測した内部標定要素を与え，固定して解析すると高さ精度が悪化する可能性がある．内部標定要素を与えない場合と与えて調整計算した場合の精度はほぼ同等である．事前にカメラ検定を実施しても実際の撮影の際にはピント調整などにより内部標定要素が変化してしまい，成果物の精度向上には寄与しない可能性がある．

参考文献

神谷泉，飛田幹男，中埜貴元，岩橋純子，坂井尚登，大角光司（2014）：UAV による西之島の撮影と DEM，オルソモザイクの作成，日本写真測量学会平成 26 年度秋季学術講演会発表論文集，13-16.

関谷洋史，大野裕幸，大塚力，瀧繁幸，宮地邦英，大角光司，早坂寿人，関口泰徳（2015）：無人航空機（UAV）による空中写真撮影に関する技術開発（第 1 年次），平成 26 年度調査研究年報，58-61.

橘克巳，大野裕幸，山田美隆，瀧繁幸，宮地邦英，早坂寿人，菅井秀翔（2016）：写真測量における UAV の活用に関する技術開発（第 2 年次），平成 27 年度調査研究年報，66-69.