

空中三角測量の全自動化によるオルソ画像作成の効率化に関する研究 Improvement of Orthoimage Productivity by Full-Automated Aerial Triangulation

地理地殻活動研究センター 大野裕幸
Geography and Crustal Dynamics Research Center Hiroyuki OHNO

要 旨

国土地理院は、1936 年以降に撮影された大量の空中写真を保有しているが、オルソ画像として地理院地図等で提供しているのは 1970 年代以降の比較的新しいものが中心であり、その中には必ずしも品質が良好とは言えないものも含まれている。過去の空中写真は、現在とは土地利用が大幅に異なるケースも多いため、地図や測量の専門家であっても利用しにくく、専門知識を持たないユーザの利便性も考慮すると、オルソ化して地図と重畳できる状態で提供することが望ましい。

しかし、過去の空中写真をオルソ化するには空中三角測量という工程を経る必要があるため、一般に作業効率が悪く、過去のオルソ画像の整備はなかなか進捗しにくい状況にある。

そこで、空中三角測量をはじめとするオルソ画像の作成工程を、コンピュータビジョン分野で用いられている画像処理技術を導入することによって可能な限り自動化する特別研究に取り組んだ。このたび、その作業効率を大幅に向上させる手法の開発に成功したので、その詳細を報告する。

1. はじめに

国土地理院は、1936 年以降に旧陸軍や米軍が撮影した空中写真に加え、地理調査所時代の 1957 年以降に撮影した大量の空中写真を保有しており、その合計枚数は 120 万枚を超える。しかし、空中写真のままでは、そこに映っているものや状況を把握したり、抽出したりすることはできても、その情報を地図上に重畳させたり、他の情報と組み合わせたりすることには困難を伴う。それを容易にするためには、空中写真を正射変換してオルソモザイク画像（以下「オルソ画像」という。）にすることが有効である。過去の空中写真をオルソ画像化したものは、災害調査や土地の変遷の調査、地理教育などの分野で強いニーズがあるため、現在でも 1960 年代の三大都市圏の空中写真を徐々にオルソ画像化して地理院地図で公開範囲の拡大を図る取り組みが行われている。

技術的観点から見ると、オルソ画像作成の際には、写真撮影時の

カメラの位置と向きを示す外部標定要素が必要となるが、外部標定要素を GNSS/IMU 装置により高精度に計測することが一般的になったのは 2007 年以降であり、2006 年以前に撮影された写真の外部標定要素を得るには基本的に空中三角測量を実施しなければならない。しかし、空中三角測量では、多数の基準点の配置や、重複する画像間でのパスポイント、タイポイントの取得、調整計算の実施など、現代ではある程度計算機による自動化がされるようになったとはいえ、依然として手動による多くの工数を必要としており、オルソ画像作成の効率は良いとは言えない。既存手法の作業効率は、国土交通省国土政策局が、国土情報整備事業（旧国土庁経費）により 1974～1990 年度に撮影した空中写真約 46 万枚を、2004～2009 年度にかけてオルソ画像化した際の事例から 1 人日あたり約 30 枚と推定される。

この作業効率では、未だオルソ画像化されていない過去の空中写真をオルソ画像化する場合、国土地理院（地理調査所時代を含む）が撮影した約 45 万枚を対象とした場合に 6.4 億円程度の費用を要することが見込まれ、その実施は困難と考えられる。

本研究は、2014～2016 年度の特別研究として、2006 年以前に撮影された過去の空中写真を対象とし、作業効率を大幅に向上させるオルソ画像作成手法の開発を実施したもので、その実施内容と成果について報告する。

2. 研究対象の空中写真と達成目標

本研究の目的は、外部標定要素を持たない空中写真をオルソ画像化する作業効率を大幅に向上させる手法を開発することである。国土地理院が保有する空中写真は、図-1 に示すように約 126 万枚あるが、本研究の対象となる GNSS/IMU 装置による外部標定要素の計測が実施されていない写真の数は、2017

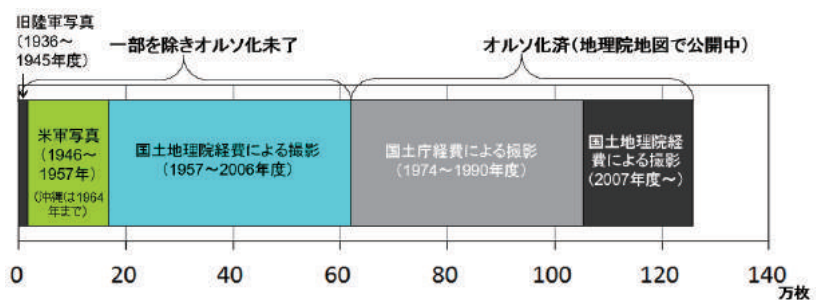


図-1 国土地理院が保有する空中写真

年2月22日集計時点で戦前に旧陸軍により撮影されたもの 17,374 枚、戦後米軍により撮影されたもの 146,784 枚、1957 年～2006 年に地理調査所及び国土地理院により撮影されたもの（国土庁経費によるものを含む）894,101 枚の合計 1,058,259 枚である。このうち、旧陸軍写真を除く写真のほとんどが 1200dpi 又は 1270dpi で密着写真をスキャンしたデジタルデータとして整備されていることから、本研究では、空中写真データとしてこの画像データを用いた。旧陸軍写真は 1200dpi でスキャンされたデータが存在しなかったため、400dpi の画像データを用いた。

これらの空中写真についての外部標定要素は計測されていないが、配点図から撮影の概略位置をデジタルデータ化した撮影位置情報が存在したため、概略の主点位置情報としてこれを用いた。この主点位置情報の精度は最大で 1km 程度の水平誤差が含まれる可能性があるほか、撮影時の飛行高度が記録されていない場合もあった。

そのほか、空中写真データを確認したところ、北が上となる向きに回転が加えられているものがほとんどであること、一部にフレーム部分が削除されている画像が見られること（2002 年撮影の写真及び米軍写真）、主要なカメラだけでも 10 種類以上が用いられていること、撮影時のカメラの焦点距離が不明な地区も多数に上るといふ雑多な状況であった。

手法開発の目標は、地理院地図での閲覧に耐えられるレベルの品質を有するオルソ画像が作成できること、即ち、1970 年代の旧国土庁オルソ画像タイルと同等以上の品質とし、その精度向上も図るため旧国土庁経費撮影分の空中写真も研究対象に含めた。また、1 人の作業者が 1 日に 500 枚以上の空中写真を処理できること（ただし、画質が劣る米軍写真、旧陸軍写真は除く。）という数値目標を掲げた。

3. オルソ画像化の手法

外部標定要素を持たない画像をオルソ化する手法は、解析図化機やデジタル図化機を使用した空中三角測量とバンドル調整によって外部標定要素を求め、画素マッチングやブレイクライン法などを併用して数値標高モデル（DEM）を作成し、画像を正射変換してモザイクする手法（建設省国土地理院、1986）が一般的に用いられていたと考えられる。また、数値標高モデルとして既存の DEM を使用して作成するケースもある。これに対し、近年ではバンドルブロック調整ソフト（いわゆる SfM ソフト）を用いてオルソ化する手法（高桑、2015）が用いられるようになったが、写真の高精度な外部標定要素が与えられない状況では、計算量及び作業量が膨大となり作業効率の向上に寄与したとはいえない状況にあった。

そこで、本研究では、オルソ作成に必要な工程を

可能な限り自動化することを基本方針とし、空中三角測量には SfM ソフトを用い、最も工数を要する GCP 配置の工程を自動化するシステム開発を行うとともに、既存の DEM を用いて正射変換することによりオルソ画像を従来よりも約 20 倍高い作業効率で作成する手法を開発した。写真測量における空中三角測量と SfM は、後者が極力処理を自動化している点を除き、違いはない（織田、2016）。また、正射変換に既存の DEM を用いるため、本手法により作成されるオルソ画像はいわゆる簡易オルソ画像となる。SfM ソフトには強力なスクリプト機能を有する Agisoft 社の「Photoscan Professional 1.2.6」を用いた。Photoscan は、調整計算のアルゴリズムは公表されていないが、高桑が用いたバンドルブロック調整ソフトを使用した場合とほぼ同等のオルソ画像を作成することができる（早坂ほか、2015）。さらに、測量であればあらかじめカメラの検定を実施してカメラの内部標定要素を固定値として与えるが、本手法が対象とする過去の空中写真はカメラの検定データが入手できないため、レンズの焦点距離が記録されている場合を除き、そのほかの内部標定要素やレンズディストーション値などは、SfM ソフトによる推定値を用いた。また、焦点距離が不明な場合は、同型カメラの焦点距離を初期値として与え、調整計算の際に補正を行うことにした。

本研究では、オルソ画像作成までに必要な工程を、次の 5 つの工程に分けて個々にシステム及びツールの構築を実施した。各システム及びツールは、入出力の仕様を簡便かつ明確にし、必要があれば次の工程のシステム及びツールに自動的に値を渡して処理を継続できるようあらかじめ考慮して実装した。次章にて工程ごとに開発内容を述べる。

- 1) 画像の確認と向きの統一
- 2) カメラ毎の幾何条件の統一とフレームの削除
- 3) カメラ位置と姿勢の推定（空中三角測量）
- 4) GCP の付与と調整計算
- 5) 正射変換及びオルソモザイク、タイル出力

4. オルソ画像作成工程ごとの開発内容

4.1 画像の確認と向きの統一

第 1 の工程として、入力する空中写真データの確認と向きを一定方向に揃える処理を行った。空中写真データは、撮影コース毎に向きが揃っているとみなし、撮影コース毎に 1 枚の空中写真データの向きをサムネイルの目視により確認し、フレームのインジケータ部分が画像の上側となる向きに回転をかけて揃える処理を行った（図-2）。ただし、地理調査所時代の 1950 年代に撮影された地区では、1 つのコース番号の中に複数の撮影コースが含まれることが後に判明したことから、すべての空中写真データのサ

ムネイルを目視確認して回転処理を行う必要が生じた。米軍写真は、フレームのインジケータ部分がスキャン時にカットされている写真が大半を占めることから、サムネイルでは向きの確認ができず、1枚ずつ画像を開いて写真指標の形状から向きを揃える処理を行った。

回転処理は、フリーソフトの ImageMagick の convert コマンド (Ver.7 以降は Magick コマンド) を使用し、バッチ処理により夜間等を実施できるようにした。

4.2 カメラ毎の幾何条件の統一とフレームの削除

4.2.1 構築手法

SfM ソフトのマッチングミスによる空中三角測量の失敗のリスクを低減するため、入力する空中写真画像の幾何条件はカメラ毎に統一されていることが望ましい。そのためには、空中写真画像上で写真指標の位置を精密に計測する必要がある。写真指標が計測できれば、対角又は対向する写真指標間を結ぶ直線の交点を計算することで主点位置を求めることができる (図-3)。主点と写真指標の位置が正しく求まっていれば、その位置に応じた補正処理を空中写真画像に加えることでカメラ毎に幾何条件を統一することができる。

本研究では、コンピュータビジョンの分野で画像処理の基本技術として古くから使われているテンプレートマッチングを用いることで、極めて信頼性の高い写真指標の検出を可能とした。テンプレートマッチングとは、入力画像上でテンプレート画像を少しずつずらしながら類似度を求め、類似度が閾値以上又は最大となる位置を検出する手法である (Duda ほか, 1973)。実装には、コンピュータビジョンのフリーのライブラリである OpenCV2.4 を使い、空中写真画像上で4か所の写真指標を検出して主点位置を計算し、それぞれの座標値をテキストとして出力する C++言語のプログラムとして構築した。類似度の算出には、matchTemplate 関数を使用し、パラメータは TM_CCORR_NORMED を用いた。テンプレート画像は、カメラ毎に変更する必要があることと、空中写真画像上の写真指標の配置や指標間の関係もカメラ毎に異なることから、プログラムはカメラ毎に構築した。同時に、写真指標の座標から画像座標系の水平軸に対する回転角と、指標間のピクセル数も出力してエラーチェックを自動的に実施可能として、後続工程の工数削減も考慮した。

4.2.2 写真指標の検出と主点座標の算出

テンプレートマッチングの対象となる写真指標はカメラによって大きく異なる。テンプレートマッチングでは、テンプレート画像の選び方でマッチング

の成功率が大きく異なることがある。ウィルド社の RC 系列の航空測量用カメラ (RC-5, RC-8, RC-10, RC-20, RC-30 等) では、写真指標がシンボル状の形状となっている (図-4, 図-6) こと、さらに指標内に×状の線が表示されていることを利用し、テンプレート画像として×状の中心部分を用いることで検出率を高めることができた。検出精度は、空中写真約 28 万枚の約 111 万箇所の指標に対し、99.917% で±1 ピクセルであった。検出に失敗したのは5地区の918箇所で、このうち3地区は指標のボケがひどいもの (CCB7523)、擦り傷があるもの (CB709Y)、指標に加工痕が見られるもの (CB6910Y) といった、指標に何らかの問題があるケースであった。残りの2地区は、写真縁に焼き付けられた「KODAK」という文字列のOとDの間に誤検出が生じたというものに限局しており、指標に問題のない地区ではほぼ100%の検出が可能となった (図-4)。

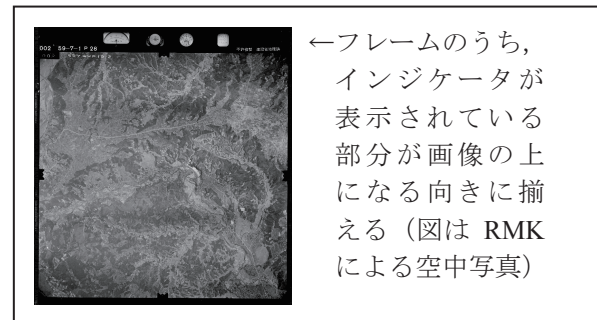


図-2 空中写真の向きの統一

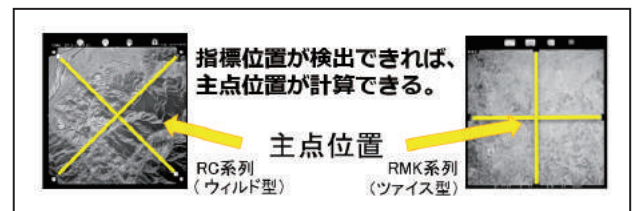


図-3 写真指標と主点位置の関係

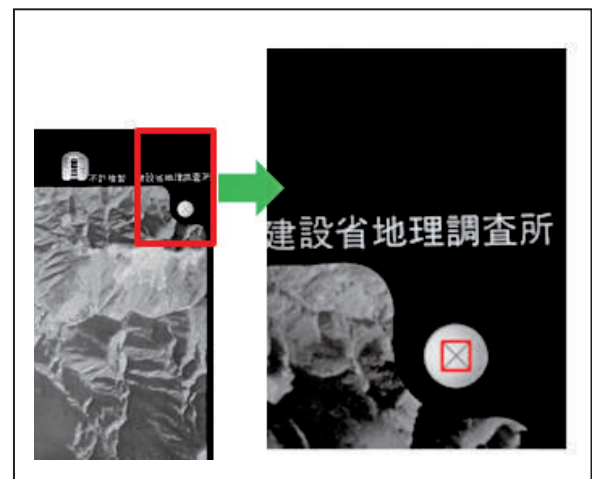


図-4 RC-5 の写真指標検出例

一方、ツァイス社の RMK 系列の航空測量用カメラの写真指標は、フレーム形状を利用したものとなっている（図-5、図-6）。そのため、背景に写った影や周辺減光の影響を受けやすく、目視でも指標が明瞭に確認できないケースなどもあり、約 2 万枚約 8 万箇所の指標に対して約 97%で±10 ピクセルの検出精度にとどまった。

RC 系列、RMK 系列とも、指標の検出エラーは、指標間の角度やピクセル数、指標毎の検出値のばらつき具合から容易に発見することができる。検出エラーを発見した場合、指標の再計測は手動で行い、その後、主点座標の再計算を行う。使用したカメラ毎のテンプレート画像（後述する米軍 K-17 系列のカメラを除く）を図-6 に示す。

米軍写真の撮影で使用されたカメラは、地区数ベースで約 7 割が K-17 系列、少数が T-11 と K-22、残り約 2 割がカメラ種別不明となっている。K-22 の写真指標は K-17 系列のものとほぼ同じであり、カメラ種別が不明とされる地区も、写真指標の形状を見る限り K-17 系列が大部分を占めていると思われることから、米軍写真は、K-17 系列と T-11 の 2 種類のカメラに大別されると考えて良いと思われる。このうち、T-11 の一部には、図-6 に示したようなシンボル状の写真指標が使用されているものがあり、これについては RC 系列のカメラと同様、写真指標の抽出は容易で、検出精度は 99%であった。一方、K-17 系列では、RMK 系列に似たフレーム境界の形状を利用した写真指標が使われている。その形状は、矢印を半分に切ったようなもの（図-7）となっており、テンプレートマッチングの際に RMK 系列以上に地上の影の影響を受けやすい。また、テンプレートマッチングの際に画像中心方向に位置ズレして検出されやすく、そのズレの量が 50 ピクセルを超えるケースも続出した。そのため、K-17 系列の写真指標抽出

では、図-7 のような大小 2 種類のテンプレート画像を用いてテンプレートマッチングを 2 段階に分けて実施する手法を開発した。即ち、まず、大きなテンプレート画像で指標の概略位置を検出し（図-7 の赤枠）、次にその範囲内で小さなテンプレート画像を用いて指標位置を特定する（図-7 の黄枠）というものである。これによって、検出に成功した場合のズレの量を大きく低減させることができた。しかし、周辺減光や地表の影の影響による検出ミスはカバーしきれず、K-17 系列の指標検出精度は約 71%で±10 ピクセルにとどまった。

4.2.3 主点位置のばらつきを利用した異常の検出

次に、写真の向きやその他の異常がないかどうかを確認するための手段として、主点座標のばらつきを検査する手法を開発した。

まず、主点座標と画像の異常との関係性を調べるため、RC 系列の撮影地区 27 地区 20,189 枚と RMK 系列の撮影地区 17 地区 2,745 枚を対象として、Microsoft Excel を用いて主点座標のばらつきを地区毎にグラフ化するとともに、X 方向、Y 方向それぞれの標準偏差を算出し、画像の異常との関係性を目視で確認した。

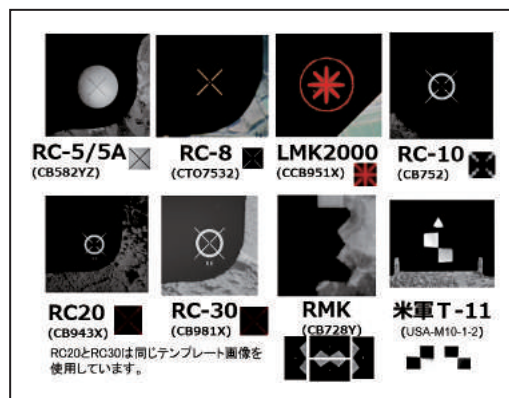


図-6 カメラ毎の指標とテンプレート画像

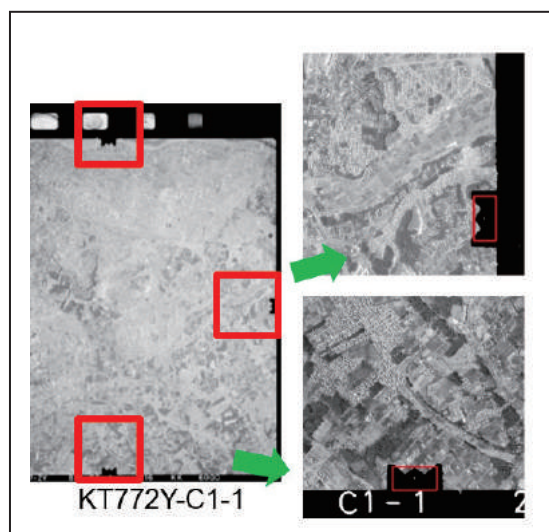


図-5 RMK の写真指標検出例

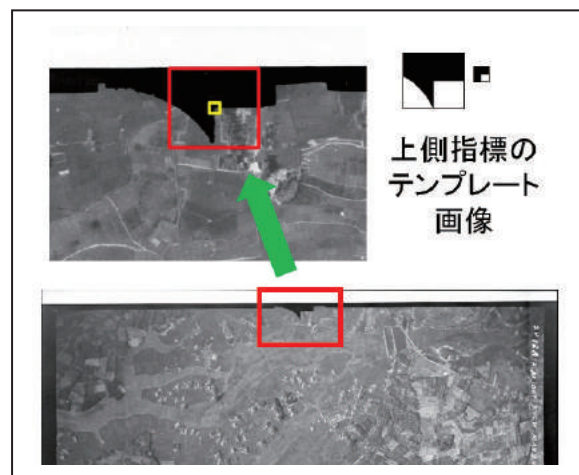


図-7 米軍 K-17 系列の写真指標検出例

その結果から、概ね 9 割の地区では標準偏差が X 方向、Y 方向いずれも 13 ピクセル以内に収まっている一方で、異常が無い地区でも標準偏差が 50 ピクセルを超える場合が少数ながら存在することが確認された。また、調査地区のうち唯一、1 枚の画像に向きの異常が確認された CTO7523(写真枚数 1,874 枚、使用カメラ RC-10) の標準偏差は、X 方向が 1.64 ピクセル、Y 方向が 2.70 ピクセルであったことから、標準偏差の多寡と画像の異常との相関は低いと判断した。一方、異常が確認された画像の主点位置は、平均から 1000 ピクセル程度乖離していたことから、グラフ上で異常の存在を示唆するばらつきを確認することができた(図-8)。そこで、さらに RC 系列、RMK 系列を無作為に含む約 500 地区、約 14 万枚について、グラフ上で異常の存在を示唆するばらつきの有無と画像の異常との関係を調査したところ 56 地区で何らかのエラーを確認した。これらの経験的な蓄積から、地区ごとに主点座標の標準偏差 σ に対し、 10σ 以上又は平均値から X 方向、Y 方向どちらか一方でも 400 ピクセル以上離れた主点が存在する場合をエラーの可能性が高いと判断する閾値とした。エラーの可能性が高いと判断された地区は、グラフを目視確認してエラーの有無を判断する必要がある。このうち、38 地区で確認された画像の向きエラーは、もともとコース内でイレギュラーに向きが違っている場合と、主点座標を示すレコードが欠落しているために前工程での回転処理がされていないケースが見られ、原因としては後者の方が多い。後者の場合は、画像の数と主点座標を示すレコード数が整合しないので、本工程の入力時にエラーとして検出することもできる。また、撮影に使用したカメラの情報が間違っているケースも検出することが確認された。この場合は、使用するテンプレート画像が異なるため写真指標の検出にほぼ 100%失敗し、主点座標が不規則に広くばらつくため、容易に検出できる。これは、カメラに応じた指標検出をやり直すことで収束する。

ただし、米軍写真の場合は状況が異なる。例えば

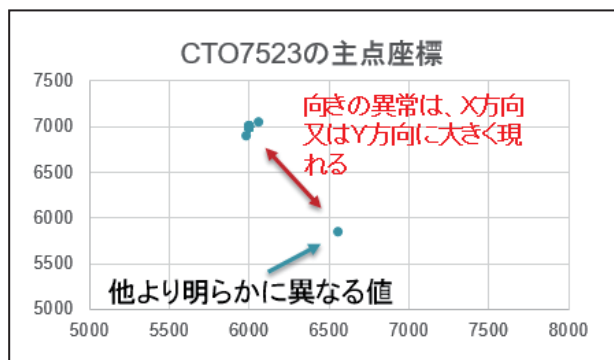


図-8 主点位置のばらつきを利用した画像の異常検出

USA-M84-A-6(撮影に使用したカメラ: K-17, 写真枚数 122 枚)ですべての写真指標位置を全数目視確認の上で算出したエラーの無い主点座標のばらつきを調べたところ、X 方向で約 800 ピクセル、Y 方向で約 1200 ピクセルの範囲に不規則にばらつく(図-9)ことが判明したため、異常を識別する閾値を設定することはできなかった。

4.2.4 幾何条件の統一とフレームの削除

検出された空中写真画像の異常をすべて解消すれば、RC 系列の写真では画像の左上と右上の写真指標位置を結ぶベクトルから、RMK 系列では、写真中段の左と右の写真指標位置を結ぶベクトルから、画像座標系の水平軸に対する角度を計算し、主点座標を中心としてその角度分だけ回転処理を加えることで、空中写真画像の向きを左右の指標が水平となる向きに揃えることができる。さらに主点座標を中心として、カメラ毎に固定したピクセル数の矩形範囲をクリッピングすることで、地区毎かつカメラ毎に幾何条件が統一されたフレームの無い空中写真データ群が得られる。このときのクリッピングサイズは、フレームと干渉しない範囲で撮影コースの進行方向に対して直交する側、すなわち、サイドラップ率をできるだけ高く取れる矩形として設定した。1270dpi でスキャンされた空中写真画像のカメラ毎の標準的なクリッピングサイズを表-1 に示す。このとき、地区毎にクリッピング後の画像の解像度がわずかに異なるが、レンズディストーション等の幾何条件は地区毎、カメラ毎に揃っていれば支障がないため、地区間での解像度の調整を行う必要は無い。

なお、この時点の空中写真データの向きは、4.4 の GCP 付与の際の入力条件と異なることから、クリッピングの際にそれに応じた画像の向きに回転する処理も行った。具体的には、RC-5, RC-5A, RC-8 以外のカメラによる空中写真データは、撮影順に画像を並べたときに後に撮影された画像が上下方向に並ぶが、これを右側に並ぶ向き(写っている内容が順に左に流れる向き)になるよう時計回りに 90 度又は

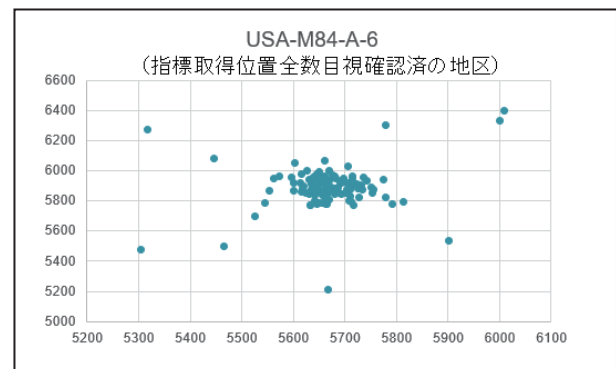


図-9 米軍写真の主点座標のばらつきの例

270 度回転させる処理を加える。クリッピングサイズとの関係から、この工程の処理が終わった時点の空中写真データは米軍 K-17B を除き縦長の矩形に揃った画像となる。

表-1 カメラ毎の標準的なクリッピングサイズ

カメラ 種 別	クリッピングサイズ	
	X 方向	Y 方向
RC-5	10,300	10,600
RC-5A	9,900	11,100
RC-8	9,900	11,100
RC-10	11,100	10,000
RC-20	11,200	10,100
RC-30	10,800	9,800
RMK	11,000	10,700
RMKA	10,900	10,700
米軍 K-17	10,200	10,100
米軍 K-17B	10,200	10,200
米軍 T-11	10,500	10,200

4.3 カメラの位置と姿勢の推定（空中三角測量）

幾何条件が統一された空中写真データ群は、Photoscan に入力し、カメラのアラインメントを行う。これは、空中三角測量におけるカメラの初期位置を算出するもので、Photoscan が持つ機能を用いて容易に実行することができる。

Photoscan には、Photoscan Python というスクリプト機能が提供されているが、そのままでは外部プログラムから Photoscan Python を呼び出すことができず、大量のバッチ処理を行うことは難しい。しかし、Photoscan のメーカーである Agisoft 社の FORUM では、Photoscan Python を外部から呼び出す方法が投稿されており（Agisoft Forum, 2014）、その方法を用いることで多数の地区のカメラ初期位置の推定をバッチ処理で実行することが可能となった。カメラの位

置と姿勢の推定処理終了後の例（CKT952X）を図-10 に示す。このカメラアラインメントを実行する際の要求精度は、後に調整計算を実施するため「中」で十分である。この地区では、296 枚の写真のうち、水部（海部）が支配的な写真 4 枚は、外部標定要素の初期値の算出に失敗している。水域のオルソ画像を作成する必要はないため、アラインメントが成功した画像で陸域がカバーされていればアラインメントに失敗した画像はそのままとしても差し支えない。

4.4 GCP の付与と調整計算

本研究では、作業効率向上のためのボトルネックである GCP の付与に要する作業時間を短縮するため、GCP 自動選点システムを開発した。このシステムは、既存のオルソ画像タイルを教師として、テンプレートマッチングにより空中写真データ上でオルソ画像タイルと類似度が高い範囲を探索し、マッチした場所でオルソ画像タイルの中心に相当する画素を GCP として出力するという機能を有する（大野, 2017）。GCP の自動付与では、教師となるオルソタイル画像から概ね 15 年の期間に撮影された画像でなければ実用的な数の選点がされない。そのため、最も古い 60～70 年前に撮影された米軍写真等のオルソ画像を作成するためには、新しいものから順次オルソ画像を作成して、それをより古い年代の空中写真における GCP 自動選点の教師として再帰的に用いることを、その間の 3 世代から 4 世代のオルソ画像について繰り返しながら作成していかなければならない。仮に、地理院地図で公開されている 1970 年代のオルソ画像タイルが使用できれば間に 1 世代程度のオルソ画像を作成するだけで良くなるが、残念ながら 1970 年代のオルソ画像タイルはデータに不備が多数見られることから（国土地理院, 2010）、教師タイルとして使用するのとは適当でない。なお、GCP の標高値は、地理院タイルの標高タイルを用い、線形内挿法で算出した。

GCP 自動選点システムを使用すると、例えば、1995 年の撮影地区 CKT952X では、地理院地図で公開されている最新の空中写真のオルソ画像（タイル種別 ort）及び簡易空中写真のオルソ画像（タイル種別 airphoto）（国土地理院, 2017）を教師として選点すると、3,985 点が選点された。図-11 は、これを Photoscan 上で marker として展開して表示させた結果を示している。この結果では、地区南側の森林が優勢の地域で GCP 選点数が少なくなっている部分が見られるものの、概ね地区全域に万遍なく多数の GCP が選点されており、良好な選点結果となった。しかし、教師タイルが未整備であったり、森林や水域が支配的であったりすることが原因で部分的に自動選点に失敗する範囲が生じることも多い。その場

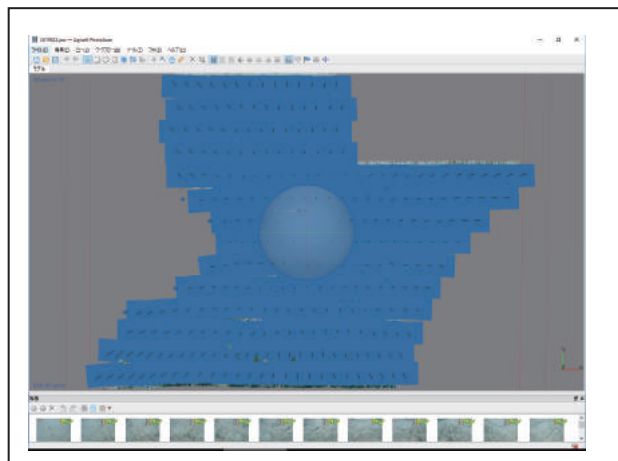


図-10 Photoscanによるカメラの位置と姿勢の推定

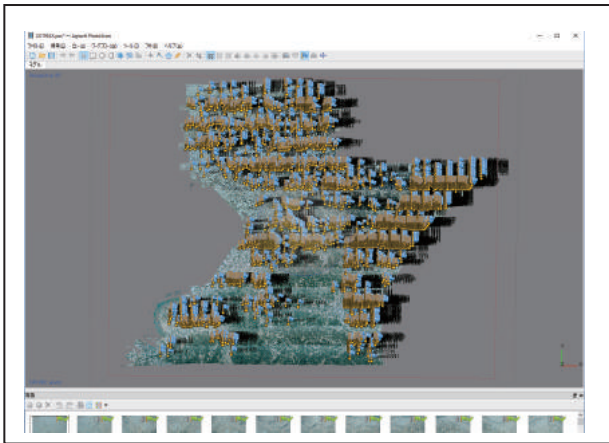


図-11 自動選点された GCP の初期配置

合は、手動で GCP を追加して配置する必要がある。この場合でも、全部の GCP を手動で配置する場合と比較すると、作業に要する時間を大きく削減することができる。

自動選点された GCP は、調整計算の過程で誤抽出の点が削除される（大野，2017）が、GCP が削除されて、空白となった地域には手動で GCP を付与し直す必要がある。GCP の配置は、従来の空中三角測量に必要な基準点数に準じて、空中写真 200 枚あたり 20 点を目安（建設省国土地理院，1986）とすることに加え、約 30 地区でのオルソ画像試作結果から、コースが重複する範囲の両端に 1 点ずつの配置を必須とした。撮影コース間に GCP が配置されていないと、図-12 に示すようなオルソ画像上で写真の不整合が生じる可能性が高いことから、コース間での GCP の配置状況は必ず確認する必要がある。これは、空中写真撮影は、サイドラップ率が基本的に 30% となるよう計画されているはずであるが、実際に撮影された写真のサイドラップは 30% 未満となる場合が



図-12 コース間に GCP が配置されない際に生じやすい不整合

あること、さらに空中写真画像のクリッピングによってサイドラップ率がより一層減少してしまうことから、SfM 処理中で取得されるタイポイントの数が不足気味になるのを補完するためである。

CKT952X の調整計算後の例を図-13 に示す。採用された GCP は 990 点で採用率は約 24.8% である。本地区では採用された GCP の配置のバランスが良かったため、手動による GCP の追加は行わなかった。

本工程が完了すると、空中写真データごとのカメラパラメータ（写真測量における内部標定要素と外部標定要素）とレンズディストーションの推定値が算出される。

4.5 正射変換及びオルソモザイク、タイル出力

カメラパラメータが算出されれば、Photoscan の機能を用いることで正射変換及びオルソモザイク画像を容易に作成することができる。

正射変換には既存の基盤地図情報 10m メッシュ DEM を用いた。基盤地図情報 10m メッシュは、事前に 2 次メッシュ単位で標高値をピクセルの値とした GeoTIFF 画像に変換したもの（以下「DEM 画像」という。）を全国分用意しておき、撮影地区毎にすべての主点位置を内包する矩形を求め、その外側に 2 次メッシュ 1 つ分の距離（東西南北にそれぞれ、緯度で 1/12 度分、経度で 0.125 度分）を追加した範囲を DEM の作成範囲とする。DEM の作成範囲から、これに少しでもかかる 2 次メッシュ番号のリストを作成し、リストアップされた 2 次メッシュの DEM 画像をマージすることで撮影地区を内包する 1 枚の DEM 画像とする。DEM 作成範囲を算出するスクリプトは Perl で構築し、DEM 画像のマージは GDAL の `gdal_merge` コマンドを用いた。

DEM 画像を Photoscan 上にインポートしたら、正射画像に変換し、地理院タイルの ZL18 に相当する地上画素寸法 50cm のオルソモザイク画像を生成する。これを Google Map Tiles 形式でエクスポートす

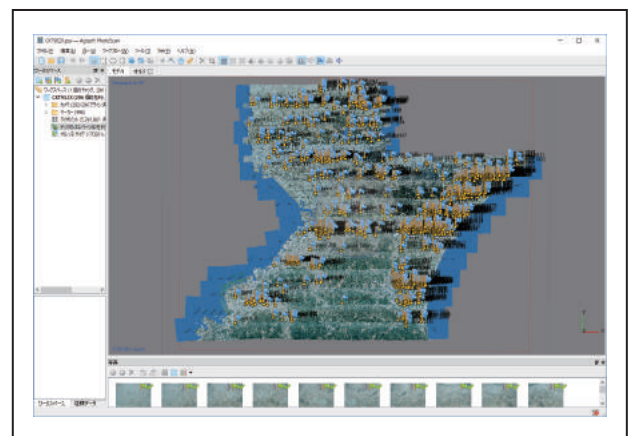


図-13 調整計算終了後の GCP 配置例 (CKT952X)

ることにより、地理院地図でも表示できるオルソ画像タイルを完成させることができる。ただし、Google Map Tiles へのエクスポートは、研究に用いた Photoscan 1.2.6 の Python Script ではサポートされていないため、GUI のメニューから手動で出力させる必要がある。

5. 品質及び作業効率の検証と今後の課題

本研究で開発した手法を用いて作成したオルソ画像の品質と、作業効率について検証した結果を示す。

5.1 オルソ画像の品質の検証

5.1.1 定性的な検証

作成したオルソ画像を Google Map Tiles として出力したものをフリーの Web 地図用 JavaScript ライブラリである Leaflet 上で、教師として使用した地理院タイルと重畳して表示できる Web サイトを構築し、両者のズレや、作成したオルソ画像上の問題点を目視で確認した。検証に用いたオルソ画像は、本手法により作成した 72 地区 18,477 枚である（表-2）。

検証は、地区ごとに作成範囲の四隅及び撮影範囲に凹凸がある場合はその凹凸部周辺も必須とし、地区内部は尾根線、谷線などの比高差が大きな地点と平坦な地点をそれぞれ数か所ずつ無作為に選んで、教師画像との位置ズレ、画像の不整合の有無等を目視で確認する方法で実施した。

表-2 検証に用いたオルソ画像の一覧

年代	地域	教師	地区数	枚数
2000	関東	ort	2	719
1990	関東	ort/airphoto	49	8,310
1990	関東	1990	3	1,552
1980	関東	ort/airphoto	6	332
1980	関東	1990	11	7,318
1970	関東	1990	1	246

検証結果は、以下のとおりである。

- 1) 既存の DEM やラップ率が少ない写真を使用したことに起因すると考えられる建物の倒れ込みや橋梁の不整合は見られる。
- 2) 比高差が少ない場所では、概ねズレが道路の車線 1 本分の範囲内に収まっている。
- 3) 比高差が大きい地区では、森林部でズレが大きい箇所がある。GCP より外側で標高が高くなっている箇所にはその傾向が顕著である。
- 4) 2 地区（KT951Y, KT992Y）は、全体に大きな位置ズレが見られ、成果不良と判定される。

全体的な傾向を総括すると、比高差が大きい地区の外縁部を除き概ね良好な成果と判定された。特に、

GCP の選点密度が高い地区ほど良好な成果であった。

5.1.2 定量的な検証

定量的な検証は、米軍写真を参考にして、1940 年代から変化していないと考えられる地点を各市町村に 1 点程度選点して検証点とし、Leaflet の経緯度算出機能を用いてオルソ画像タイル上で経緯度を計測し、平面直角座標に変換してズレの量の標準偏差を算出する手法で実施した。検証点の配置を図-14 に、検証結果を表-3 に示す。このうち、1990 年代と 1980 年代は、GCP 自動選点を含む本手法を適用して作成したオルソ画像、1950 年代と米軍写真は、本手法のうち GCP 自動選点を使用せずすべての GCP を手入力して作成したオルソ画像による検証結果である。

1980 年代のオルソ画像は、本手法で作成した 1990 年代のオルソ画像を教師として作成した、いわば第 2 世代のオルソ画像であるが、誤差の累積は見られない。ただし、1980 年代のオルソ画像は、撮影縮尺が大きい空中写真の比率が高いことが誤差量の減少要因となっている可能性は否定できない。この結果からは、GCP 自動選点や SfM ソフトによる空中三角測量を実施したことに起因する精度悪化は生じていない可能性が高いと考えられる。また、この標準偏差の値は、作業規程の準則第 291 条第 2 項における写真地図の精度のうち、地図情報レベル 5000 における水平位置（標準偏差）の基準値である 5.0m を下回っており、良好な成果であると判定できる。

ただし、茨城県南部という地形が平坦な地域での検証しか実施できていないこと、さらに、この検証方法では位置ズレが生じやすい森林部に検証点を設置することは困難であることから、作成したオルソ画像全体を評価することはできていないという点に留意する必要がある。



図-14 検証点配置

表-3 検証点における水平誤差

年代	教師	検証点数	標準偏差
1990	ort/airphoto	6	1.55m
1980	1990	6	1.38m
1950	なし（手動）	5	4.53m
米軍	なし（手動）	5	5.75m

5.2 作業効率の検証

作業効率は、本手法によりオルソ画像の作成に成功した地区の空中写真の枚数を、オルソ画像を作成するのに要した作業日数で除すことで算出した。オルソ画像作成対象地区は、例外的に年代別の GCP 選点数比較のために作成した 2006 年の撮影地区 2 地区を除き、原則として関東地方の 1999 年の撮影地区から順次遡って作成していくこととした。関東地方は、初期の教師となる地理院地図のオルソ画像タイル（タイル種別 ort 及び airphoto）が房総半島の一部、茨城県の沿岸北部、群馬県の山間部、長野県の山間部については整備されていないものの、比較的整備率が高い地域である。作業日数は、GCP 自動選点システムのβ版が完成した翌日の 2016 年 11 月 1 日を初日として 2017 年 2 月 23 日までの期間に検証のための作業日を 31 日設定し、作業日は、本検証に可能な限り専念することとした。また、作業日に作成したバッチ処理のスクリプトに従って作業日以外や休日・夜間にコンピュータがバッチ処理を実施している期間は、作業による作業が発生していないため、作業日に算入していない。

作業効率の検証に使用した機材は、次に示す機材 A が 3 台、機材 B が 1 台の合計 4 台の PC である。オルソ画像作成は、工程毎に機材に割り付け、1 回のバッチ処理のロット数は原則として 100 地区以上又は 1 万枚以上の規模を確保し、できるだけ休日・夜間を利用したバッチ処理を行うような作業計画を立案した。

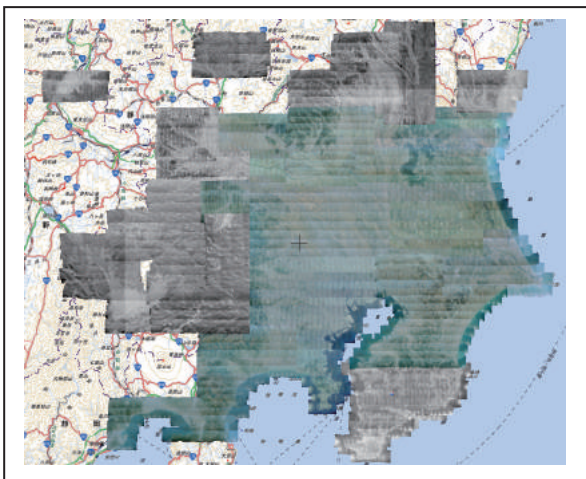


図-15 1990 年代のオルソ画像作成範囲

【機材 A】

- ・ CPU : Intel Xeon E5-2697 2.6GHz×2
- ・ メモリ : 128GB, HDD : 4TB×4
- ・ GPU : NVIDIA GeForce GTX TitanX×2
- ・ OS : Windows 10 Pro

【機材 B】

- ・ CPU : Intel Core i7-6700K 4.0GHz × 1
- ・ メモリ : 32GB, HDD : 28TB
- ・ GPU : NVIDIA GeForce GTX750 × 1
- ・ OS : Windows 10 Pro

この結果、作業日 31 日でオルソ画像作成に成功した空中写真は、70 地区 18,300 枚となり、作業性は 1 人日あたり約 590 枚となった。これは、既存手法の作業効率 1 人日あたり約 30 枚と比較して約 20 倍にあたる。作成成果一覧を表-4 に示す。この他に、4.2 節の処理まで終了した空中写真が約 28 万枚である。

5.3 システム適用性と課題の考察

最後に、本システムのオルソ画像作成に対する適用性と課題について考察する。1990 年代の関東地方撮影地区では全 67 地区のうち、離島など 7 地区を除く 60 地区を作成対象とし、53 地区を作成（図-15）、うち成果不良が 3 地区であった。1980 年代の関東地方は、本手法により作成した 1990 年代のオルソ画像タイルを教師とした第 2 世代の成果として作成を進めており、全 85 地区のうち、南関東を中心に 17 地区まで作成できた（図-16）。1970 年代は、1990 年代のオルソ画像タイルを教師として KT763Y (246 枚：茨城県中部～南部を撮影) の 1 地区が作成できたが、1990 年代の教師では総じて GCP 自動選点数が不足気味であり、1980 年代のオルソ画像タイルを新たな教師とする必要がある。

成果不良の地区は、GCP 自動選点の成果が不良で



図-16 1980 年代のオルソ画像作成範囲

あった KT992Y (48 枚: 群馬県沼田市～栃木県鹿沼市付近) 及び KT951Y (129 枚: 長野県山ノ内町～群馬県中之条町付近), 山岳地のため GCP が手動によっても取得できずオルソ画像が作成不可能であった KT904Y (50 枚: 新潟県湯沢町付近), KT891Y (13 枚: 栃木県那須町～福島県西郷村付近) の 4 地区で、いずれも全域で森林が支配的な 1/40,000 の撮影地区

であった。このことから、GCP 自動選点に対応できない森林が支配的な地区では、本手法の適用が困難であり、今後の課題として残ることを確認した。

また、ほぼ全地区の作成に着手した関東地方 1989 年～1999 年撮影地区の作成結果から本手法の適用性を推定すると、地区数で $69/80 = \text{約 } 86\%$ 、空中写真枚数で $16,100/16,634 = \text{約 } 97\%$ となる。

表-4 作業性検証における作成成果一覧

作業日	地区名	合計枚数
2017/2/23	CKT20061X ほか 1 地区	719
2017/1/26	KT873 ほか 6 地区	575
2017/1/18	CKT803 ほか 2 地区	2,049
2017/1/11	CKT802 ほか 2 地区	885
2017/1/6	CKT861 ほか 1 地区	1,573
2017/1/5	CKT891Y ほか 5 地区	2,518
2016/12/21	CKT922X ほか 6 地区	2,363
2016/12/19	CKT805 ほか 3 地区	1,300
2016/12/16	CKT901 ほか 3 地区	1,426
2016/12/12	KT931X ほか 5 地区	987
2016/12/9	KT942 ほか 2 地区	276
2016/12/7	KT981X ほか 3 地区	235
2016/12/2	CKT943X ほか 3 地区	768
2016/12/1	KT971 ほか 4 地区	334
2016/11/24	CKT993X ほか 1 地区	526
2016/11/22	CKT971X	135
2016/11/21	CKT972X ほか 2 地区	767
2016/11/17	CKT981	129
2016/11/16	CKT981X ほか 1 地区	500
2016/11/15	CKT991X	235
他 11 日	準備作業等を実施	0
合計 31 日		18,300

6. まとめ

過去の空中写真からオルソ画像を作成する際の生産性を大幅に向上させるオルソ画像作成手法の開発について報告した。これによって、今後、地理院地図でのオルソ画像公開範囲の拡大への寄与が見込まれるのみでなく、同一地点の多数の年代のオルソ画像を時系列的に分析して新たな知見を得ることも可能になると思われる。特に、三大都市圏以外の地域では、過去のオルソ画像は 1970～80 年代のものしか公開されていない地域も多く、本手法を用いてオルソ画像作成が加速されることによって、専門知識を持たない人でも過去の国土の状況を知る機会が拡大することが期待される。

本研究では、関東地方での 1980 年代以降を中心としたオルソ画像を作成したが、今後も引き続き、関東地方以外の地域や 1970 年代以前の空中写真に本手法を適用して、1940 年代まで遡ってオルソ画像を作成し、全国的かつ全年代に対して本手法が適用可能であることを確認していきたいと考えている。

(公開日：平成 29 年 5 月 8 日)

参 考 文 献

- Agisoft Forum (2014) : Topic: Run script on start, <http://www.agisoft.com/forum/index.php?topic=1843.msg10410#msg10410> (accessed 2 Aug. 2016).
- Duda, R. O. and P. E. Hart (1973) : Pattern Classification and Scene Analysis, Wiley.
- 早坂寿人, 大野裕幸, 大塚力, 関谷洋史, 瀧繁幸 (2015) : UAV による空撮写真を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証, 国土地理院時報, 127, 107-116.
- 建設省国土地理院 (1986) : 基本図測量作業規程, 昭和 61 年 3 月.
- 国土地理院 (2010) : 元データ-国土画像情報 (オルソ化空中写真) -に由来する問題事例, <http://www.gsi.go.jp/common/000090903.pdf> (accessed 23 Feb. 2017).
- 国土地理院 (2017) : 地理院タイル一覧, <http://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html> (accessed 23 Feb. 2017).
- 織田和夫 (2016) : 解説 : Structure from Motion(SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整, 写真測量とリモートセンシング, VOL.55, No.3, 206-209.
- 大野裕幸 (2017) : オルソ画像タイルを用いた GCP 自動選点システムの開発, 日本写真測量学会平成 29 年度年次学術講演会論文集.
- 高桑紀之 (2015) : 過去の空中写真のタイル化, 国土地理院時報, 127, 117-122.