

## 研究課題終了時評価表

1. 研究課題名	AIを活用した地物自動抽出に関する研究
2. 提案課・室名問合せ先	国土地理院 地理地殻活動研究センター 地理情報解析研究室 代表担当者:地理情報解析研究室 大野 裕幸
3. 研究期間	平成30年4月～令和5年3月(5年間)
4. 予算	特別研究経費 55,758千円 (5年間の総額)
5. 分科会委員	(主査)久保 純子、山本 佳世子、若林 芳樹
6. 研究開発とその成果の概要	<p>空中写真測量は、使用するデータやソフトウェアはデジタル化されている一方で、途中工程はアナログ時代と変わらない労働集約的な手法が用いられている。本研究は、空中写真測量の図化の工程を対象として、人工知能(AI)の技術を用いた画像認識技術を導入することによって空中写真画像に写った地物の種類と範囲を特定し、地理空間情報として自動的に抽出する手法を開発することを目的としている。その手段として、畳み込みニューラルネットワーク(CNN)と深層学習を用いたセマンティックセグメンテーションを用いることとし、まず前半の3年間でハイパーパラメータを探索し、後半の2年間でそのハイパーパラメータに基づいて地物抽出を行うAIの学習を進めるという研究手法を採った。さらに、空中写真画像上で抽出されたままの状態では単なる画像に過ぎないため、それを地理空間情報化するために第一後処理工程、ラスタベクタ変換、正射変換及び第二後処理工程の各工程のパラメータチューニング並びにプログラムへの実装を行い、最終的に自動図化機構の構築に成功した。各工程の成果の概要を次に示す。</p> <p>(1)地物抽出用AI</p> <p>対象地物を40項目(この項目の分類方法は、研究を進める上での分類であり、達成度評価の際の作業規程の準則の標準図式に基づく分類方法とは異なる)にカテゴリ分けし、当初はマルチカテゴリでのAI構築を目指したが、地物の存在シェアに起因する性能の偏りの影響が大きかったため、項目ごとのシングルカテゴリのAIを構築することとした。このAIは、入力された画像に含まれる対象地物のみを指定色に色付けするという能力を有す。当初、40項目のAI構築に取り組み、13項目は本質的に本研究の手法が適合しないこと(5項目)及び学習データ作成におけるリソース不足の問題(8項目)から構築を断念し、27項目についてそれぞれの学習済モデル(地物抽出用AI)を得た。それぞれの抽出性能は、性能評価の指標となるF値0.800以上の項目が9項目、0.700以上0.800未満の項目が3項目、0.600以上0.700未満の項目が6項目、0.600未満の項目が9項目となった。F値の最高はタンクの0.855、最低は果樹園の0.312であった(2023年2月時点)。</p> <p>作成した学習データは、40項目合計で37,136枚(2023年2月時点。572×572サイズ。中間評価時の286×286サイズ換算では185,680枚)で、F値0.800以上となった項目の学習データは、国土地理院ウェブサイトからダウンロード可能な形で公表(<a href="https://gisstar.gsi.go.jp/gsi-dataset/index.html">https://gisstar.gsi.go.jp/gsi-dataset/index.html</a>)。</p> <p>作成した検証データは、2007年度～2021年度にデジタルカメラを用いて地上画素寸法20cm級で撮影された全地区から1枚ずつ機械的に抽出した画像を40項目のマルチカテゴリで塗分けた画像(1000×1000ピクセルのもの338枚、572×572ピクセルのもの230枚)を基本とし、Trueピクセル数が少ない項目は、3000×3000ピクセルのシングルカテゴリの塗分け画像を追加した。性能評価に用</p>

いたF値は、この検証データを推論した結果から算出した。

#### (2)第一後処理工程

第一後処理工程は、地物抽出用AIにより色付けされた空中写真画像からノイズや抽出時の穴あきを除去する処理を実施する工程である。対象地物を示す指定色の画素とそれ以外の画素で二値化したうえで膨張、収縮、閾値を用いたラスタ塊削除等の機能を有するラスタ演算用のプログラムを構築した。各処理の組み合わせとパラメータは、項目ごとに、また、別の項目の処理結果との演算といったチューニングをすることによって、誤抽出部分を削除することで適合率(Precision)を向上させることができ、AIのみによる抽出性能をさらに高めることが可能である。

#### (3)ラスタベクタ変換

第一後処理工程の処理結果である二値画像から輪郭線抽出によってベクトルデータ化するプログラムを構築した。この時点では、得られるベクトルデータは画像座標系の座標値しか有しておらず、地理座標とはなっていない。また、この時点ではピクセルを正方形とみなしてその辺を忠実にベクトルデータ化しているため、得られるデータはギザギザの形状となる。そこで1点間隔で強制的に点を間引く処理を加えており、形状をある程度直線的に改善させることができる。なお、ラスタベクタ変換の手法として輪郭線抽出を用いているため、得られるベクトルデータは必ず右側が対象地物の向きのポリゴンデータとなる。

#### (4)正射変換

本研究は、入力される空中写真画像を正射変換してからAI等で地物抽出するのではなく、AI等によって抽出された地物のベクトルデータを正射変換するという手法を用いる点が特徴である。正射変換には測量成果として得られたカメラパラメータと既存の基盤地図情報のDEMを用いた。当初、正射変換したデータには地域的にかなり大きい誤差(数十メートルに及ぶ位置ズレ)が確認されていたが、基本測量の測量成果であるカメラパラメータは平面直角座標で方位角が算出されていることにより、座標系原点からの距離に応じて方位角(真北の向き)にズレが生じていること(子午線収差)が原因であると判明したため、これを簡易に補正する手法を適用したことで、正射変換も自動的に実施可能となった。最終的にこの工程を自動化できたことにより、自動図化の実現につなげることができた。

#### (5)第二後処理工程

正射変換後のデータは、空中写真画像に写っている対象地物の範囲が抽出された経緯度座標のポリゴンデータとなっている。本工程では、一定の割合でオーバーラップして撮影された隣接する空中写真画像及び一定の割合でサイドラップを設けて撮影されている隣接コースの空中写真画像から得られたポリゴンデータをすべてマージする処理を行う。隣接する画像では、同じ場所が30度~40度程度傾いた光軸で撮影されている(いわゆる倒れ込み)ため、それらの画像からAIで抽出されたデータは、1枚の画像では上部が別の地物で遮蔽されたようなケースでも対象地物が映っていて抽出されている可能性が高まる。そのため、本工程を実施することによって、再現率(Recall)も向上させることができ、結果的にAIによる抽出性能を(2)の段階よりもさらに向上させることができる。地物や条件によっては、これによってRecallが0.99程度まで向上する場合がある(撮影地区CKT20193の太陽光発電設備の自動図化では、抽出すべき箇所200か所以上に対し、抽出されなかった箇所は千葉県市原市の山倉水上太陽光発電所の1か所のみであった)。また、地物に

	<p>よっては面積や規模による取舍選択の基準が設けられていることがあるが、各ポリゴンの面積を閾値とした取舍選択も可能である。</p> <p>これらの5つの工程は、すべて自動処理が可能なプログラムとして構築したことから、前の工程の出力結果を次の工程の入力に引き渡すようバッチ処理を行うことで、空中写真の入力から、経緯度座標による対象地物のポリゴンデータの取得までを一貫して自動処理させることが可能となった。これが、自動図化機構である。</p> <p>ただし、一般論としては、自動図化の結果には地物抽出用AIの性能によってある程度の誤抽出や抽出漏れが含まれるため、その結果を点検するための人的リソースは必要となる。また、自動図化に必要なAIの性能は一律ではなく、地物によってF値0.800でも不十分なものがある。例えば、道路は影の影響の除去が必要であるし、建物は倒れ込みの影響の除去が必要である。一方で、F値0.800未満でも人間による測量結果より優れていると思われるもの(自然植生や一部の既耕地など、主に点型の地図記号のもの、さらに駐車場はF=0.779ながら点型記号化する元データとしては完璧に近い抽出状況)もある。</p> <p>本研究を通じて、自動図化においては全般に影が再現率(Recall)に与える影響が大きいことが分かったことから、撮影時点で工夫するか(早朝、夕刻の撮影は避ける、晴れの日よりは曇りの日の撮影を優先する等)、今後、影の影響を除去するための研究を実施することが、より自動図化の性能を向上させるうえでの課題と考えられる。</p>
<p>7. 終了時評価時点における当初目標の達成度</p>	<p><b>【当初目標】</b></p> <p>画像や各種センサ情報から自動的に地物を分類・抽出するAIを開発する。具体的には次の3目標。(事前評価票から)</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 公共測量における作業規程の準則に記載された地図情報レベル2500の地物のうち、行政界、建物記号及び等高線を除く93項目のうち40項目以上について、基盤地図情報の精度の範囲内で、人間が半読した場合に匹敵する抽出成功率の達成を目指す。</li> <li>② レコード数ベースで80%以上の抽出率を達成することが望ましい。</li> <li>③ AIで抽出した地物情報を用いてリアルタイムな更新を再帰的に実施できる地物教師データベースの構築方法を検討</li> </ol> <p><b>【達成度】</b></p> <p>空中写真画像から自動的に地物を分類・抽出するAIの開発に成功し、正射変換及び後処理まで自動処理する自動図化機構を完成させた。自動図化が可能となったことは、特に具体的な目標③の考え方に影響を与えた。一方で、当初掲げた数値目標には達成できなかったものがある。個別目標の達成度は次のとおり。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>① 「基盤地図情報の精度の範囲内」という位置精度の目標に関しては、正射変換時のカメラパラメータに含まれるバイアスの原因が平面直角座標系と経緯度座標系間の真北の方位角のズレであると究明されたことから、適切に補正されたカメラパラメータを用いることで2500レベルの基盤地図情報とほぼ一致する(変化がない地域で道路縁ポリゴンの差分を取ると位置ズレによる残渣がほとんど残らない)成果が得られた。これは、地図情報レベル25000の基盤地図情報</li> </ol>

	<p>報も含め、当該空中写真から抽出されるすべての情報が地図情報レベル2500の位置精度を与えられるようになったことを意味する(正射変換に使用するDEMの整備時期以降に地形改変が行われている場合や高架道路などDEMが示す標高と異なる高さで構築されている地物を除く)。一方、「人間が判読した場合に匹敵する抽出成功率」は、定量的に評価するためにF値<math>\geq 0.800</math>という性能評価目標を設定したところ、これをクリアした項目は目標の40項目に対して12項目(作業規程の準則における標準図式ベースの項目数で、事前評価時の項目数の考え方に基づく)に留まった。</p> <p>② ①を達成した12項目のレコード数ベースのシェアは79.15%であった。ただし、このシェアには太陽光発電設備と防波堤のレコード数が含まれていない(国土地理院ではデータを取得していないため)。我が国における太陽光発電設備(メガソーラー)は堅牢建物(レコード数のシェア1.6%)より多いと思われ、これを含めると80%という数値目標はクリアしていると思われる。</p> <p>③ 本研究の成果は、常に空中写真撮影された全域を図化し直す手法であり、局所的な「更新」という概念が無くなっている。そのため、「リアルタイムな更新を再帰的に実施するデータベース」という考え方とそぐわなくなったことから、本項目の検討に代えて、全域図化によるデータ作成を実現する技術の検討(=自動図化機構の構築)を実施した。AIによる地図作成は、全データを毎回作成することを前提にする方が生産性・コスト・リアルタイム性の観点から有利と思われ、長期的にはそれを前提とした技術開発を指向することが望ましいと考える。なお、局所的な更新を念頭においた変化情報の抽出は自動図化機構で図化した2時期の図化データ、又は既存の国土基本情報データとの間での差分を抽出するという方法で実施している。</p>
<p>8. 必要性、効率性、有効性等の観点からの評価</p>	<p>(1)必要性の観点からの評価</p> <p>空中写真測量において、図化の工程は労働集約型の工程のまま今日まで至っており、データや機材のデジタル化の恩恵が乏しい状況に置かれている。また、図化はデジタルステレオ図化機という特殊なソフトウェアを用いて、判読のスキルを有する測量技術者が実施する必要がある、これまでコンピュータによる代替は困難と思われてきた。一方で、一時的にAIの技術を用いた画像認識によって図化が自動化できるのではないかとされた時期があり、本研究もその時期に開始されているが、2020年ごろ以降、空中写真や衛星画像を対象とした図化や地図調製の分野でAIに関する研究発表数は増加していないように見受けられる。おそらく、AIによる画像認識のみで自動図化を達成することは困難であるとの認識が広がったためと思われる、本研究でも開始2年目ごろの時点でその認識を有していた。</p> <p>そのため、本研究では、従来の研究アプローチであるオルソ画像を入力とした画像認識の手法では目標達成は困難と判断し、オルソ画像から空中写真画像そのものを入力する方針に変更した(中間評価資料に記載)。さらに、AIの技術のみではなくラスタベクタ変換や正射変換など、従来技術も取り込むことによって、AIの技術で不足する点を従来技術で補完し(本研究で実装したラスタ演算によるノイズの低減やベクトルデータ化した後で正射変換を加え、多数の空中写真の図化データをマージする技術を指す)、従来の技術では不可能であった点をAIの技術で具現化する(AIの画像認識による高い抽出性能を指す)ことによって、目的的地物の自動図化とい</p>

う、従来は実現不可能であった技術を実動する機構として実装することができた。  
空中写真を入力するだけで目的の地物が判読され、その結果が自動的に図化結果として出力されるようになった、という事実は、測量成果というレベルに対しても、今後図化という工程の生産性を飛躍的に向上させられる可能性を与えるという観点から、実現が求められていた重要な成果を挙げたと言える。

### (2)効率性の観点からの評価

本研究における研究官の人的リソース充当実績は、全期間で計画比約40%にとどまった。そのため、効率的な研究実施方法を工夫することが必要となり、次のような取り組みにより研究実施の効率化を図った。

・サイズの大きい空中写真画像の推論を自動的に実施するソフトウェアを使用し、夜間のコンピュータ資源を利用して大量に推論画像を作成することで、勤務時間は画像の選定と学習データの作成に専念できる研究環境を整備した。

・学習済モデル初期の段階(学習データ数百枚の段階)に現れる性能曲線(F値)の変曲点の出現位置及び性能曲線(Recall)の傾きから、本手法の有効性を早期に見極め、数値目標が未達成となることは承知のうえで対象項目の絞り込みを実施し、効果が出やすい項目にリソースを集中させた。

・自動図化が稼働し始めると、自動図化結果から誤抽出や抽出漏れの箇所が容易に見出せるようになったことから、対象全項目を自動図化にかけて図化データを収集することで対象画像選定のさらなる効率化を図った。

・研究終盤にはAIの性能値の順位付けが明確になってきたことから、目標達成の見込みがある項目に対象を絞り込み、性能上位の項目にリソースを集中させることで成果発現を図った。

これらによって、事前評価時に想定していた学習データ枚数20万枚相当に対して約18万枚相当(2022年12月時点)を作成でき、人的リソースに対して約281%の達成率と効率化できた(人的リソースの80%を学習データ作成に投入したものとして算出)。

計算リソース面では、使用するGPUの性能評価を行い、基準としたGPUに対しGPUごとの性能とコストを指数化してコストパフォーマンスが高いGPUを個別購入し、研究官自ら深層学習用のPCを組み立てることで既製品を購入する場合よりも数倍多くのGPUを確保でき、深層学習の実施に支障が生じなかった。具体的には、事前評価時に想定していたTesla V100というGPUに対し、性能的には1.4倍ながら価格は0.3倍以下というRTX3090及びRTX3080TiというGPUを多数購入したことで、研究費を効率的に執行でき、深層学習の時間短縮効果も大きいものがあつた。研究費はそのほとんどをGPUの購入を中心とした計算機資源の確保に充当した。

### (3)有効性の観点からの評価

目的の地物の判読を伴う自動図化の実現という課題は、国土地理院でも昭和50年代から多くの研究者が挑戦し、実現できなかった課題であり、自動図化を実現で

	<p>きたことの有効性は大きい。これは、深層学習という手法の導入に負うところが大きい。学習データが一定枚数に達するごとに学習済モデルの性能を評価した結果から、性能曲線のうちRecallの動向に着目することで目標性能に到達するのに必要な見込み枚数や性能向上のための画像選択方針が求められるようになったことも、今後事業へ展開するにあたり、エポックメイキングな事象である。このノウハウを活用することで、目標とする性能の実現に必要な学習データの整備規模と整備方針の見通しが立てられるようになる。</p> <p>一方で、測量成果を最終成果としなければならないという観点では、精度管理の面から影の影響による抽出漏れの改善など、解決しなければならない課題が残されているが、それを考慮しても自動図化が実現したこと、測量成果ほどの精度を必要としない災害対応用の自動図化であれば、実用化レベルに到達していることなどから現時点の自動図化機構ですらも有効性は大きい。特にこれまでは熟練技術者でなければ不可能であった災害判読で、本研究の成果を用いて人間が一切介在せずに自動的に対象災害の発生範囲を図化するAIも完成させている点など、有効性は非常に大きいと自己評価する。</p>												
<p>9. 研究成果の公表状況及び今後の利活用、課題</p>	<table border="0"> <tr> <td>研究報告書</td> <td>5編</td> </tr> <tr> <td>発表論文(査読付)</td> <td>0編</td> </tr> <tr> <td>発表論文(査読なし)</td> <td>0編(国内0、海外0)</td> </tr> <tr> <td>口頭発表</td> <td>3件(国内3、海外0)</td> </tr> <tr> <td>特許等</td> <td>0件</td> </tr> <tr> <td>その他</td> <td>9件(国土地理院技術資料としてのデータ公表)</td> </tr> </table> <p>本研究の成果は、「データ論文」として論文化すべきものを含んでいるが、終了時評価時点では論文化はされていない。ただし、そのバックデータとなる学習データは国土地理院ウェブサイトから国土地理院技術資料として公表済である。</p> <p>また、本研究で構築した自動図化機構の実装事例として総合流域防災対策事業調査費により実施した「AIによる災害状況判読システムの構築」があり、防災ヘリが撮影した映像から事実上リアルタイムに浸水と土砂崩壊の発生場所を判読して共有地図上に自動的に図化していくシステムの構築を令和3年度に完了している。</p> <p>【今後の利活用、課題】</p> <p>国土地理院の事業への展開を考慮すると、道路、建物等の主要地物では、計画的に学習データを追加整備し、地物抽出用AI単独の抽出性能を少なくともあと0.05程度高めて、F<math>\geq</math>0.85クラスとする必要があろう。特に影の部分の処理については工夫が必要で研究要素が残されている。また、AIによる自動図化を行うためには地物の定義に問題がある地物も存在する。例えば、堅牢建物は、たとえコンクリート造りの頑丈な建物であっても2階建て以下は普通建物としなければならない。コンクリート造りの建物かどうかは高確率でAIで判読することはできるが、それが2階建てか3階建てかを的確に見分けるのは、本研究の手法だけでは困難である。また、畑のうち、特に牧草地は荒地と同様の特徴量を呈しており、これを畑と認識させるのはおそらく困難である。これらを解決するには、地上撮影の360度画像の特徴量を結合させるNear/Remote Sensingの手法を導入するか、地物の定義自体をAI</p>	研究報告書	5編	発表論文(査読付)	0編	発表論文(査読なし)	0編(国内0、海外0)	口頭発表	3件(国内3、海外0)	特許等	0件	その他	9件(国土地理院技術資料としてのデータ公表)
研究報告書	5編												
発表論文(査読付)	0編												
発表論文(査読なし)	0編(国内0、海外0)												
口頭発表	3件(国内3、海外0)												
特許等	0件												
その他	9件(国土地理院技術資料としてのデータ公表)												

	<p>に合わせて見直すことが必要であろう。</p> <p>性能評価に用いた検証用データでは、地物のカテゴリが立体視でも特定できない場合は国土基本情報の地図記号を参照するようにしたが、植生記号(既耕地記号を含む)がおそらく測量時期と撮影時期のズレによって写真の状況とは異なるのではと思われるケースが稀ではなく、検証データ作成の際に疑問を感じながら国土基本情報の表記に従ったケースがある。性能評価値が高くない竹林、針葉樹林は、多くの空中写真の推論結果からは良好な判読性で抽出されているように思われ、事業用に展開する際には、検証用のデータの範囲だけでもしっかりと地図記号の正確性を検証しなおすことが望ましい。</p>
--	---

<p>総合評価 (地理分科会で記入)</p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>① 十分に目標を達成できた</li> <li>2. 概ね目標を達成できた</li> <li>3. あまり目標を達成できなかった</li> <li>4. ほとんど目標を達成できなかった</li> </ol> <p>数値目標等は途中で変更したが、変更された目標に対して十分に達成できたと判断した。</p> <p>分科会のコメントとしては以下の3点である。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 今回の研究は非常にレベルの高い研究内容と認める。</li> <li>2. 今後この内容を企業や大学などと共同で研究を進めることを期待する。</li> <li>3. 本研究の成果は高く評価できるが、プロジェクトの途中で人事異動があり、研究体制が縮小されたことは残念である。</li> </ol>
----------------------------	---