

防衛省における OR 活動と研究事例

片山 隆仁, 増田 拓也

防衛省における OR 活動の概要を紹介し、併せて研究事例を掲載する。具体的には「UAV による目標位置標定の精度向上に関する研究」と題して、UAV 撮影画像を用いて目標位置の標定精度を向上させる方法を紹介する。これは、撮影時の機体の緯度経度、3 次元的な傾き、撮影高度を用いて純幾何学的に目標位置を推定するものであり、それ以外のなんら特殊な機能を必要としないので汎用性が高い。この方法を、参考品として購入した民生品の UAV に適用し、標定精度の向上を実際に確認する。また、実験結果から標定誤差の要因分析を実施し、その結果を運用に反映する。

キーワード：防衛力整備、部隊運用、OR 組織、OR の実施、データ解析、UAV

1. OR 活動の概要

防衛省においては、「OR 活動」は、「分析（業務）」または「分析評価」という言葉で表現されることが多く、これらはあたかも同義語のように使用されている。OR 活動には OR 担当組織の設立以来 50 年の歴史があり、「防衛力整備に資する分析」と「部隊運用に資する分析」に区分して実施されてきた。防衛本省における OR 業務は、前者「防衛力整備」に密接に関係しており、努めて科学的分析評価を行うことにより、政府計画である中期防衛力整備計画（現行の計画は平成 17 年度から 21 年度までの 5 年間でカバーしている）をはじめ防衛省内の各種の計画立案に役立たせるため、その時々の課題に取り組んできた。それらは、航空機等をはじめとする主要装備品の機種選定（トピックとしては、FX、SAMX 等と呼称される）や構築しようとする防衛力の定量的な見積り作業に代表される。防衛力の能力見積りについてももう少し具体的に表現すると、航空自衛隊の防空作戦の場合であれば、侵入航空機の発見、発見した航空機の識別、敵の航空機に対する戦闘機や地对空ミサイルでの要撃・撃破という一連の作戦行動に関する与えられた局面におけるパフォーマンス（達成度）評価である。海上自衛隊の周辺海域防衛であれば、哨戒機や護衛艦による哨戒、敵の水上艦艇や潜水艦を発見した場合の洋上撃破（対水上戦や

対潜水艦戦）に関するパフォーマンス評価、陸上自衛隊の内陸部における敵地上部隊の撃破作戦のパフォーマンス評価（地上戦闘能力）といった各種の作戦ごとに防衛能力の定量的な見積りを例示することができる。

これをさらに進めれば、計画しようとする各種代替案に関し、該当する作戦場面における対処能力を見積ることにより各種代替案の比較検討が可能となるので、これをもって意思決定者への基礎資料とすることができる。

他方、「部隊運用に資する分析」に関しては、所与の装備体系を登場させる場面を想定し、望ましい効果を最大化し、逆に望ましくないマイナス要素を最小化するというように、手持ちの防衛力を最大限活用することを目指して最適なオペレーションを求めるといって、文字通りオペレーションズ・リサーチであり、自衛艦隊司令部や航空総隊司令部のほか幹部学校などの陸海空自衛隊に置かれている OR 組織がそれぞれの所掌分野を担任している。これらの OR 活動をまとめれば、計画立案→新規導入装備品の運用法の確立→部隊における実運用→将来導入すべき装備品の姿を描く→計画立案…という一連のサイクルすべての面で必要な OR 作業を通じて軍事組織としての合理的な諸活動に役立たせているといえる。今後の作戦遂行能力の見積りについては、統合運用の観点が重視され作戦運用をより一元的に行うことになるので、従来の陸海空自衛隊として個別に見積っていたものに加え、より統合的観点からの見積りが求められており、新たな手法等を開発発展させる必要性がいわれている。

以上のような分析評価に使用されるツールは、諸先輩の努力により脈々と構築してきた分析評価モデル体系を基に、必要な新機能を付加し、より精緻なモデル

かたやま たかひと
防衛省 航空幕僚監部防衛課
〒162-8804 新宿区市谷本村町 5-1
ますだ たくや
陸上自衛隊 研究本部総合研究部
〒178-0061 練馬区大泉学園町

に置き換えたりしながら、あるいは注目している観点に応じて詳細度を換えたモデルを整備しながら分析業務を遂行している。

2. OR 組織と要員

OR に従事している組織は図 1 のとおりである。

防衛省の内部部局には装備能力評価官およびシステム分析班、統合幕僚監部の計画部防衛計画課の分析室、陸上自衛隊研究本部総合研究部の 5 課および分析企画官、海上幕僚監部防衛部防衛課の分析室および分析企画官、航空幕僚監部防衛部防衛課の分析室および分析企画官が、いわば本省における分析組織であり、防衛力整備に係る計画立案のための OR 活動を行っている。

このほか陸海空自衛隊にも OR 組織が置かれており、部隊運用に資する分析、教義（ドクトリン）の開発、実動演習を計算機上に再構成することを通じて戦技・戦法の研究、将来装備品に対する期待すべき機能・性能を明らかにすること等の業務に従事している。

OR に携わっている要員には自衛官および技官があり、前述の OR 組織に配置されている。

大雑把に全体人数を表現すれば、自衛官約 40 名、技官約 60 名、合計約 100 名の規模である。このほかにも、防衛大学の教官として OR 教育に当たっている先生たちもカウントすればもっと大きい数になる。もし防衛省の OR 活動に関与してみたいと希望される方は、これら自衛官、技官、教官として採用される道が開かれていますので、職員採用情報等をご覧ください。

3. 将来の姿

この記事を執筆中の現在、政府の防衛省改革に関する有識者会議（座長・南直哉東京電力顧問）から、組織改革と不祥事防止策を盛り込んだ最終報告書が総理大臣に提出された。この報告書によれば、これまで内

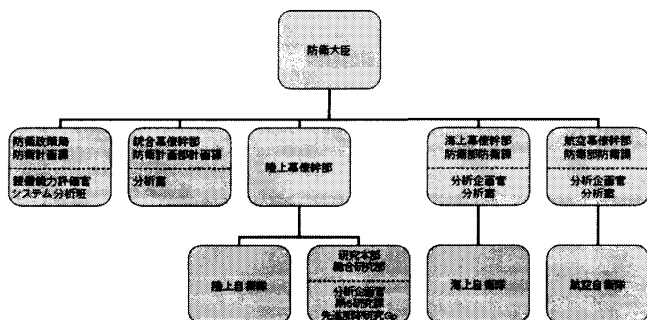


図 1 防衛省の OR 組織

局、統幕および陸海空幕の OR 活動の紹介として記述してきた防衛力整備に係る部門が一元化される可能性がある。具体的な組織の在り方については今後の議論によることになるものの、本省に置かれる OR 組織を取り巻く環境が劇的な変化に直面することは想像に難くない。大きく変革する時代にあつてこそ、OR 活動の基本すなわち、将来環境を見通し、本来の目標を最高度に達成することを意図し、明瞭に把握できていることと不明確な事項をきっちり区別し、考えられ得る代替案を幅広く案出し、それぞれについて検討評価するという正に OR 機能の真価が問われることになる。私たちの属する組織という直接で身近な課題にも OR 的に果敢に取り組む勇気とエネルギーを発揮していきたい。紺屋の白袴であってはならないのだから。

4. 研究事例紹介—UAV による目標位置標定の精度向上に関する研究—

4.1 摘要

UAV 撮影画像を用いて目標位置の標定精度を向上させる方法を紹介する。これは、撮影時の機体の緯度経度、3 次元的な傾き、撮影高度を用いて純幾何学的に目標位置を推定するものであり、それ以外のなんら特殊な機能を必要としないので汎用性が高い。この方法を、参考品として購入した民生品の UAV に適用し、標定精度の向上を実際に確認する。また、実験結果から標定誤差の要因分析を実施し、その結果を運用に反映する。

4.2 はじめに

一般的な科学の発展過程を考えると、図 2 のようになるものと思われる。すなわち、まず現象の観察からその現象の裏に潜む法則性を発見し、仮説を構築する。そして、今度はその仮説に基づき、実験結果を予測し、実際の実験でこの仮説を検証する。そしてこの実験結果に基づき再び、仮説の修正・破棄・構築等が行われる。これらがスパイラル的に繰り返されることでその

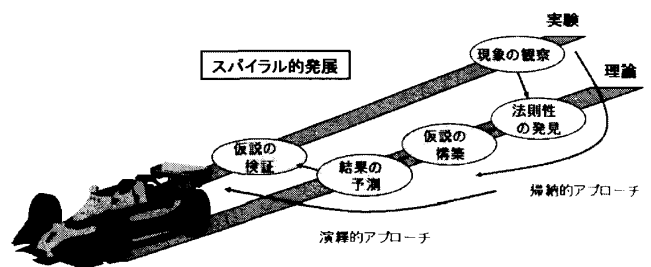


図 2 一般的な科学の発展過程

分野が発展していく。この過程の中で前半の「現象→理論」の部分は帰納的アプローチと呼ばれ、「理論→現象」の部分は演繹的アプローチと呼ばれる。どちらが欠けてもその分野の継続的な発展はなく、一方だけが発展しているように見えている場合であっても、それは他方を固定して片輪で可動できる範囲をただ回っているに過ぎない。しかし、規模にもよるが、一般に実験を行うにはそれなりの時間と労力が必要で、しかも必ずしも「綺麗な」結果ばかりが得られるとも限らないので、帰納的アプローチは、ともすれば敬遠されがちであり、その結果として研究が演繹的アプローチに偏りその場に停止してスピンを続ける分野に成り下がる恐れもある。そうした状況に一石投じたいという思いとともに、OR手法は、この帰納的アプローチにおいても強力なツールになり得るとの思いから、本稿を著した次第である。

4.3 研究概要

航空機や自動車など人間が搭乗して操作するプラットフォームを有人機と呼ぶのに対して、これらを自動あるいは遠隔操縦によって無人化したものを無人機と呼ぶ。無人機は、人間の危険や負担を軽減するために活躍が期待されている。その中で、無人航空機(UAV)あるいは無人航空システム(UAS)は被災地や山間地等において被災者や遭難者の発見等に活躍が期待されている。

そこで本稿では UAV が撮影した画像を用いて、目標位置の標定精度を向上させる方法を紹介する。この方法は、画像中の目標の相対的な位置および撮影時の機体の緯度経度、3次元的な傾き、撮影高度を用いて純幾何学的に目標位置を推定するものである。したがって、これらのデータを取得できる航空機からの画像であれば、どんなものにも本方法は適用可能である。

本稿では実際に参考品として購入した民生品の UAV に本方法を適用し、標定精度向上の確認および標定精度に影響を与える要因の分析も行う。

この UAV では撮影時の機体絶対位置(緯度、経度、海拔高度)が飛行ログとして記録されるため、目標位置の第1近似としては、この飛行ログに記録された機体位置を用いればよいが、高度および航空機と目標を結ぶ線と航空機から地面に下ろした垂線との間の角度が大きくなると、標定誤差が大きくなってしまう。そこで本稿では以下で述べるような方法で撮影画像を用いた精度の向上を図る。

この UAV は、撮影時の機体絶対位置に加えて機体

の傾き(ピッチ角、ロール角、ヨー角)も記録されるため、撮影時の機体およびカメラの状況が把握できる。次節では、これらのデータおよび画像中の目標の相対位置を用いることにより、目標位置を標定する方法を紹介する。

4.5節では、実際にこの UAV を飛行させて取得した画像に対して4.4節で提案した方法を適用した結果を示す。

4.6節では、4.5節で得られた標定結果と撮影時との各種データとの比較から標定精度に影響を与える要因を特定した結果を示す。

4.7節では、4.6節で得られた結果を UAV の運用へ反映する。

4.4 標定論理

4.4.1 用語説明

対地高度および撮影高度、海拔高度とは、それぞれ図3で示されるような高度である。本稿では、撮影時の地表面の起伏は穏やかであり、対地高度と撮影高度との間の差は無視できるほど小さいものとする。

4.4.2 概要

標定の基本的な考え方は次の通りである。まず、画像に写った目標が、画像全体の中で相対的にどの辺に位置しているかを特定する。次に、カメラの中心からこの点に向かって伸ばしたベクトルを撮影ログに記録されている、撮影時の機体の3次元的な傾きに従って回転させる。回転後のベクトルを撮影高度の分だけ延長してゆき、地表面と交わった点が、機体から見た目標の相対的な位置とする。後は、同じく撮影ログに記録されている撮影時の機体の緯度経度と併せて考えれば目標の緯度経度を算出できる。

4.4.3 細部

(1) 画像四隅の位置座標

まず、カメラの中心から画像の中心へ伸びる、撮影方向をz軸に持つような、カメラに固定された座標系

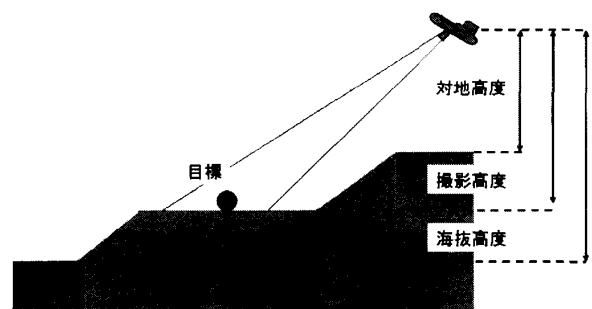


図3 用語説明

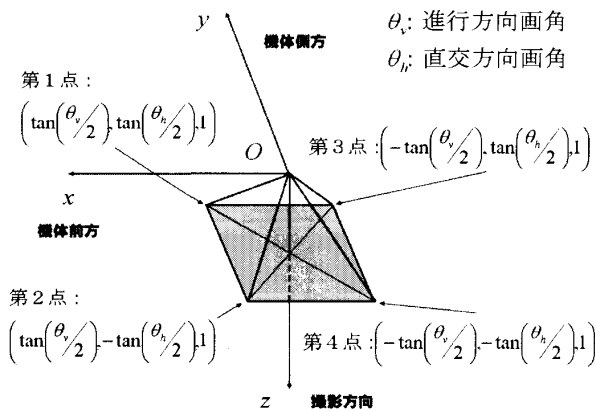


図4 画像四隅の座標位置

を図4のようにとる。この座標系はカメラとともに移動・回転することになる。カメラの画角（単位：ラジアン）を進行方向および直交方向それぞれ θ_v および θ_h とすると、カメラの中心から1m下方に仮想的に置いたフレームの四隅の座標はそれぞれ図4に示したようになる。

(2) 画像中の目標位置

撮影された画像は、機体前方に頭を向けながら図4をz軸に沿って原点方向から眺めたものである。この画像中の、上から $\alpha: 1-\alpha$ 、左から $\beta: 1-\beta$ の位置 ($0 \leq \alpha \leq 1, 0 \leq \beta \leq 1$) に目標が写っていたとすると、目標位置 (x_t, y_t) は、4.4.3節(1)で求めた画像四隅の座標を利用して、

$$x_t = (2\alpha - 1)\tan(\theta_v/2)$$

$$y_t = (1 - 2\beta)\tan(\theta_h/2)$$

と求まる。

(3) 3次元角度

カメラに固定されたx-y-z座標系から見れば、カメラの下方1mの仮想画面上に投影された目標の位置は、機体の姿勢によらず、常に、 $r_t = {}^t(x_t, y_t, 1)$ である。しかし、座標系を変えればその位置座標は変わってくる。特に、座標原点はこの座標系と共有（したがってカメラとともに移動）しつつも、X-Y平面が常に地表面と平行で、X軸が常時北を向いているようなX-Y-Z座標系から見れば、投影位置の座標は r_t を回転したものになっている。そこでこのX-Y-Z座標系を使って機体のピッチ角、ロール角、およびヨー角（単位：ラジアン）をそれぞれ図5のように定義する。ただし、回転はZ軸、Y軸、X軸の順であるとする。

(4) 目標位置の3次元回転

4.4.3節(2)で求めた画像中の目標位置を4.4.3節(3)

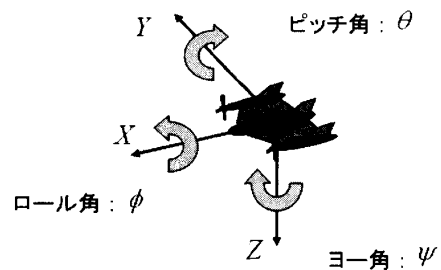


図5 機体の傾き

の定義に従って回転させた後の位置座標は、

$$r_t = R_x(\phi) \cdot R_Y(\theta_{\text{roll}}) \cdot R_z(\psi) \cdot R_Y(\theta_{\text{relative}}) r_t \quad (1)$$

となる。ただし、ここで θ_{relative} は機体を水平に置いたときにカメラが機体に対してなすピッチ角（真下をゼロとし、上向きを正とする）、 θ_{roll} は機体自身のピッチ角であり、ここで r_t は4.4.3節(2)で求めた回転前の画像中目標位置

$$r_t = {}^t(x_t, y_t, 1)$$

であり、 R_x, R_Y および R_z はそれぞれX軸、Y軸、およびZ軸まわりの3次元回転行列である。

(5) 機体から見た目標の相対位置

4.4.3節(4)で求めた回転後の目標位置とカメラの中心とを結んだ直線を撮影高度の分だけ延伸し、地表面と交わった点が機体から見た目標の相対位置となる。具体的には、目標の相対位置 r''_t は、式(1)で求めた回転後の画像中の目標位置 r'_t および撮影高度 h (m) を用いて、

$${}^t(x''_t, y''_t, h) = {}^t r''_t = t \cdot {}^t r'_t = t \cdot {}^t(x'_t, y'_t, z'_t),$$

$$\therefore t = h/z'_t, \quad x''_t = x'_t \cdot h/z'_t, \quad y''_t = y'_t \cdot h/z'_t$$

となる。

4.5 実データへの適用

参考品として購入した民生品のUAVを用いて実飛行および撮影を行った。この過程で撮影された画像は計985枚に及び、これらの内、図6のように実際に目標を撮影しているものは69枚に上った。これら69枚の画像を用いて目標の標定位置の算出を行った。まず、第1次近似として、撮影時の機体位置を用いて目標の標定位置としたものと、実位置との誤差を測ってみると、標定誤差の平均は99.1mであった。これに対して、それぞれの撮影画像から前節で説明した標定方法を用いて標定位置を算出した場合、標定誤差の平均値は38.8mであり、先の第1次近似の場合と比べると、実に60.3もの精度向上となっている。

4.6 標定精度の要因分析

前節の標定結果を基に、標定誤差と撮影時の各種デ

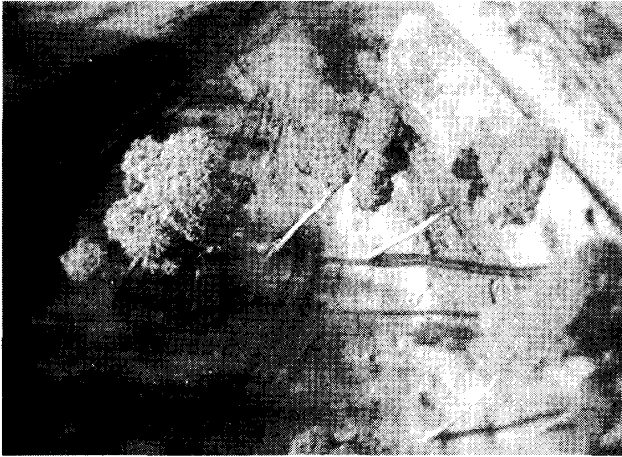


図6 撮影画像

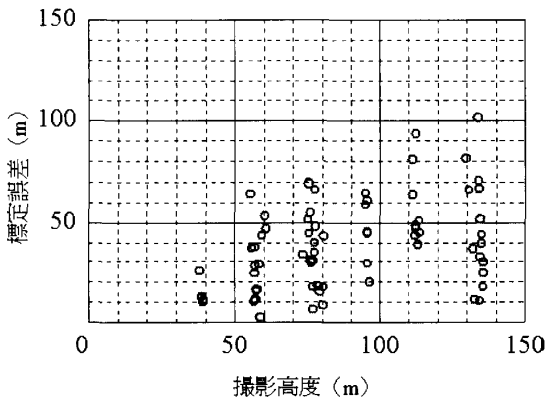


図7 撮影高度と標定誤差

一タとを比較することにより精度に影響を与える要因を分析した。本節ではその結果を示す。

4.6.1 撮影高度と標定誤差の関係

図7に示すように撮影高度が増すごとに標定誤差のバラつきが増加していることが判る。これは、角度の誤差の影響や、画像中の目標位置の誤差の影響が、撮影高度が大きくなればなるほど大きくなるためであると考えられる。同一高度中の標定誤差の変化は他の要因の変化によるものであると考えられる。

4.6.2 画像中心からの距離と標定誤差の関係

撮影画像、図6をよく見るとレンズの性質から画像の周辺部がぼやけていることが判る。この影響で画像の周辺部では標定精度が落ちることが予想される。これを検証するためには目標が撮影されている箇所が画像の中心からどれだけ離れているかを定量化する必要がある。このため次のような距離の概念を導入する。

(1) 画像中心からの距離

進行方向および直交方向の画素数がそれぞれ N_v 画素および N_h 画素からなる画像の左隅から δ 、上端か

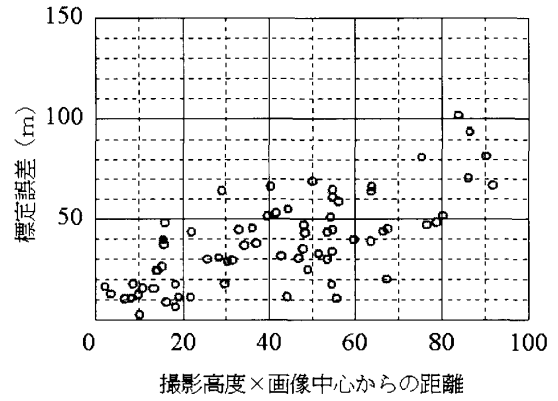


図8 撮影高度×画像中心からの距離と標定誤差

ら γ の位置に目標が写っていた場合、画像中心からの距離 d を

$$d = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\left(\frac{\delta - (N_h - 1)/2}{(n_h - 1)/2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma - (N_v - 1)/2}{(n_v - 1)/2}\right)^2}$$

と定義する。この定義から解るようにこの距離は、0 から1までの値をとる。

(2) d と標定誤差の関係

画像中心から目標位置までの距離 d と標定誤差との間には相関が認められた (相関係数: 0.68)。事前の予想通り、撮影高度と標定誤差の関係と同様、画像中心からの距離が大きくなればなるほど標定誤差のバラつきも大きくなることが判った。これは、画像の中心からの距離が大きくなればそれだけ1画素当たりのカバーする領域が大きくなるため、画像中の目標位置を特定する際の誤差が標定誤差に及ぼす影響が大きくなること、および周縁部ではレンズが湾曲しているため、魚眼レンズのような働きをして本来、見えるはずのないものまで見えてしまっているため標定誤差が大きくなってしまっているものと考えられる。撮影高度と同様、同一距離中の標定誤差の変動は他の要因の変化によるものであると考えられる。

4.6.3 撮影高度× d と標定誤差

幾何学的に考えて、上述した撮影高度と画像中心からの距離はそれぞれお互いの標定誤差への寄与を増幅させる関係にあるように思われる。すなわち上掲した、それぞれと標定誤差との関係のグラフにおいて横軸同一点上の標定誤差の変動は互いの増大によるものであるように思われる。そのことを定量的に示す。すなわち、撮影高度および画像中心からの距離の積と標定誤差との間には図8のようにやや強い相関 (相関係数: 0.71) が見られる。

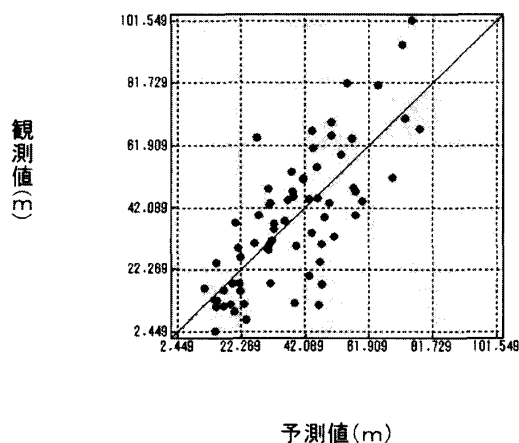


図9 重回帰分析結果

4.6.4 機体と目標間の平面距離

一般に目標からの距離が離れば標定誤差が増大することが予想される。今回は実験であるから目標の実位置が判明しているため、撮影時の目標と機体の間の距離が判り、実際、撮影時の（目標－機体）間の平面距離と標定誤差の間には、相関が見られた（相関係数：0.64）。

4.6.5 重回帰分析

これまでに述べた撮影高度および画像中心からの距離、機体と目標間の平面距離を説明変数、標定誤差を目的変数として重回帰分析を行ってみると、回帰式

$$\begin{aligned} \text{標定誤差} = & 0.471 \times (\text{撮影高度} \\ & \times \text{画像中心からの距離}) + 0.340 \\ & \times \text{平面距離} + 5.026 \end{aligned}$$

は比較的良好な精度（重相関係数：0.752，二重調整寄与率：0.539）の予測値を与える（図9）。以上のことから、本節で挙げた撮影高度および画像中心からの距離、機体と目標間の平面距離が標定精度に影響を与えている主要因であることが解った。

4.7 運用上の工夫によるさらなる精度向上

前節までの要因分析で明らかになった因果関係を用いれば、さらなる精度向上を図り、装備品レベルにおける、（所期の）効果に基づいた運用（Effects-Based Approach to Operations）を行うことができるようになる。すなわち、所期の効果（ここでは標定精度）に応じた運用条件を案出することができるようになる。例えば、許容可能な標定誤差として50mを要求すると、今回の取得データの中で、この条件を満たす撮影高度および画像中心からの距離の分布は図10中の○印となり、逆に、この条件を満たさないデータは図中の×印となる。このことから、条件を満たす運用条件

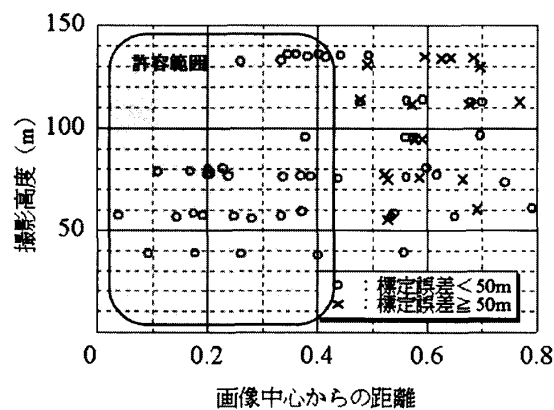


図10 許容範囲

は、図10中の□枠で囲まれた範囲内となる。すなわち、所期の効果を得るためには撮影高度約150m以下で撮影を実施し、画像の中心からの距離が0.4以内に目標が写っているような画像のみを標定用画像として採用すべきである、というのが少なくとも今回得られたデータが教えるところである。したがって、情報を捨てる判断基準も示されることになる。このような運用条件は、所期精度ごとに案出することができる。

4.8 まとめ

UAV取得画像から目標位置を標定する方法を紹介した。この方法は、撮影時の搭載カメラの位置および傾き、撮影高度から純幾何学的に目標の位置を割り出す方法であり、特殊なカメラを搭載していなくとも、これらのデータが取得可能なUAVであればどんなUAVに対しても適用可能である。4.5節では、この方法を実際に参考品として購入した民生品のUAVが撮影した69枚の画像に適用した。この結果、実に60.3mもの精度向上が確認できた。4.6節ではこの標定結果と撮影時の各種データとの比較により、撮影高度および画像中心からの距離、撮影時の機体と目標間の平面距離が標定精度に影響を与えていることを示した。4.7節では、4.6節の分析結果をUAVの運用に反映することにより、装備品レベルにおける、所期の効果（標定精度）に基づいた運用（Effects-Based Approach to Operations）を実現する方法を示した。

今後の課題は、理論面では機体の傾きの中心とカメラの中心とのズレを考慮するなどしてより精度の高い標定式を構築すること、実験面ではより多くのデータを蓄積して運用条件の精度を高めてゆくことである。

最後に、標定員としてご協力いただいた陸上自衛隊研究本部の堀村幸由氏および三原政治氏に謝意を表す。