研　究　速　報

研　究　速　報

中解像度衛星画像を用いた濃度値確率モデルに基づく被害判読法

Damage Detection Method Based on Probability Model of Digital Numbers Using Middle-Resolution Satellite Imagery

小檜山　雅　之*・ミゲル エストラーダ*・山　崎　文　雄*
Masayuki KOHIYAMA, Miguel ESTRADA and Fumio YAMAZAKI

1. は　じ　め　に

近年，高解像度衛星画像が容易に入手できるようになり，注目を集めている．しかし，Landsat-TM，SPOT-HRV，EOS/ASTERといった，地上分解能10～30m程度の中解像度衛星画像も，災害時の被害把握のために活用すべきであろう．理由としては，①走査幅が広く，広域災害の様子を捉えることが可能，②撮影した画像の蓄積があり，災害時に被災前の画像が入手できる（災害後の画像と比較できる）可能性が高い，③単位面積あたりの画像のコストが高解像度のものよりもかなり安い，といったことが挙げられる．加えて，災害時には，使える情報は総動員して対応にあたるべきであり，被害状況をより正確・迅速に把握するために，高解像度画像だけでなく，中解像度画像を用いた被害判読手法の開発も推し進める必要がある．

本報では，Kohiyamaら[1]が提案する夜間観測画像を用いた被害推定手法を一般化し，中解像度衛星画像の画素の濃度値（デジタル値，以下DN）がランダム変数である性質に基づき，有意検定によって被害判読する手法を提案する．本手法を用いれば，一般的な変化抽出法に存在する閾値決定の不確定性，恣意性，困難さを回避することが可能である．

2. 衛星画像の変化抽出法における閾値決定の問題

植生や土地利用の変遷，都市域の拡大など，衛星画像を用い地表の変化を捉える研究は数多く行なわれている．その手法として，土地被覆分類の比較，画像差分演算，画像比演算，指標値差分演算（植生指標，タッセルドキャップ変換の主成分等），主成分分析，変化ベクトル分析などの方法が提案されている[2]．しかし，大半の方法は最終段階で，変化の有無を閾値により判定する．つまり閾値Tにより，DNの集合（多時期の画像も意味する）である画像ベクトルDNを，0または1の2値応答変数に変換する．

$$change(x,y)=\begin{cases}0 & (f(\mathbf{DN})\le T)\\ 1 & (f(\mathbf{DN})>T)\end{cases} \qquad (1)$$

ここで，(x,y)は変化有無を調べる対象地点の地表座標である．

閾値Tは，一般に解析者によって経験的あるいは統計的に与えられる．閾値が与えられれば，森林から都市域，被害なしから被害ありといった，カテゴリー属性の変化を評価することができるが，地震災害の判読においては，閾値を決めるのに必要な被災状況を捉えた参照データが少なく，信頼性に問題が残る．また，都市に存在する構造物は多様であり，ある特定の地域で設定された閾値が他地域でも適用できる保証はなく，閾値が地域ごとに異なっている可能性もある．

Morisetteら[3]は一般化線形モデルを用いて被害判読を行い，変化抽出結果の地図を（カテゴリーの）変化確率で表すことを提案している．Kohiyamaら[1]は被害推定結果の地図の表現で有意水準を用いている．これらの確率的表示は人々に評価結果の信頼性を伝えるという長所がある．地震被害判読を考えたとき，Morisetteら[3]の提案する一般化線形モデル（ロジットモデル，プロビットモデルなど）を用いた手法は，モデル当てはめの際に，サンプルデータとして被災地を含む画像が必要になる．したがって，前述した参照データが少ない問題と，都市の地域性の問題を回避することができないため，一般化線形モデルに代わる新たな手法を考案する必要がある．

3. 画像濃度値のランダム性と確率モデル

本報で提案する被害推定法は，地上のある特定地点を撮影した衛星画像のDNはランダム変数と見なせるという原理に基づいている．すなわち，DNは災害がない通常時でも撮影のたびに変動する．以下，光学・電子系リモートセ

*東京大学生産技術研究所　人間・社会部門

ンシングシステムのセンサモデル[4]に基づき，DNがランダム変数であること式で示す．

まず，衛星上のセンサの走査によりバンドbの放射輝度s_bは電気信号e_bに変換される．

$$e_b(x,y)=\iint s_b(\alpha,\beta)\,PSF(x-\alpha,y-\beta)\,d\alpha d\beta \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(2)$$

ここで，PSFはセンサシステム全体の点像分布関数である（図1にLandsat TMの例を示す）．

続いて，アナログ・デジタル（A/D）変換器は電気信号を離散的なデジタル値$P(x,y)$に変換，量子化を行なう．

$$P(x,y)=\mathrm{int}(gain_b\times e_b(x,y)+offset_b) \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(3)$$

ここで，$gain_b$，$offset_b$はA/D変換器の線形変換パラメタである．この式は，連続的な空間座標を離散的な座標に変換することを暗黙に含んでいる．したがって，空間座標の離散化により取得画像の位相差（画像ピクセルの中心のずれ）が生じる．すなわち，対象物とピクセル中心の格子点との相対的な位置ずれが存在している．この位相差（位置ずれ）は一般に予測不可能であり，以下，衛星軌道方向・軌道直行方向ともに±0.5ピクセルの範囲で値をもつ2次元一様分布を仮定する．

被害判読解析では，災害前後など2時期や多時期の画像が用いられるが，前述の位置ずれを解消するため，ある一つの画像に合致するよう位置合せが行なわれる．その際に最もよく用いられるのが3次畳込み内挿法であり，位置合せ後の画像のDN，$Q(x,y)$は

$$Q(x,y)=\mathrm{int}\left(\begin{bmatrix}\mathrm{sinc}(1+t)\\ \mathrm{sinc}(t)\\ \mathrm{sinc}(1-t)\\ \mathrm{sinc}(2-t)\end{bmatrix}^T\begin{bmatrix}P_{11}&P_{12}&P_{13}&P_{14}\\ P_{21}&P_{22}&P_{23}&P_{24}\\ P_{31}&P_{32}&P_{33}&P_{34}\\ P_{41}&P_{42}&P_{43}&P_{44}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{sinc}(1+s)\\ \mathrm{sinc}(s)\\ \mathrm{sinc}(1-s)\\ \mathrm{sinc}(2-s)\end{bmatrix}\right) \quad \cdot(4)$$

で与えられる．ここで，関数$\mathrm{sinc}(x)=\sin(\pi x)/(\pi x)$である．座標（$x$, y）は位置合せ後の座標系による．またP_{ij}は，図2に示されるような点（x, y）を取り囲む位置合せ前の16点のDNを表す．

ベクトル（s, t）は位相差を表し，2方向の要素の定義域はともに（0, 1）である．前述のとおり，このベクトルは2次元一様分布にしたがうランダム変数と仮定する．

したがって，（3）式の離散化がないものとすると，位置合せ後の画像のDN, $Q(x,y)$は，

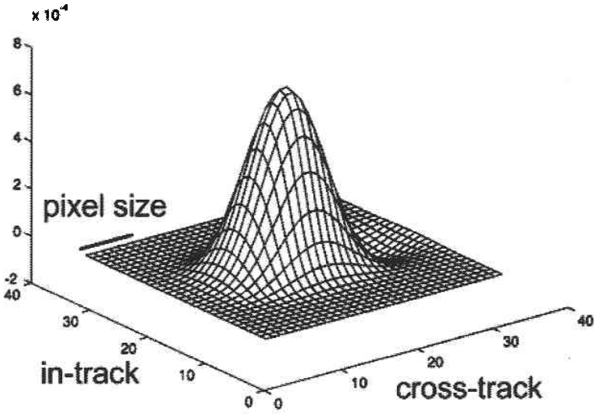

図1　点像分布関数（Landsat/TMの例[4]）

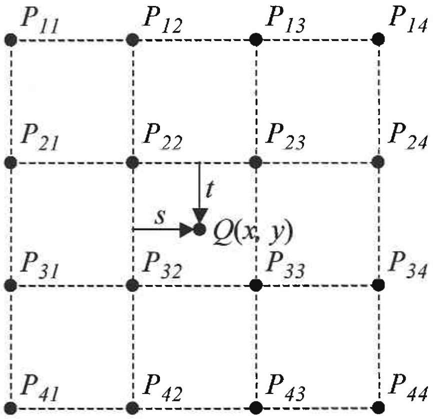

図2　3次畳込み内挿法の参照点

$$Q(x,y) \approx \mathrm{int}(gain_b\iint s_b(\alpha,\beta)\,SPSF(x-\alpha,y-\beta)\,d\alpha d\beta + offset_b) \quad \cdots\cdots(5\,\mathrm{a})$$

$$SPSF(x,y)=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{4}W_{ij}\,PSF(x-x_{ij},y-y_{ij}) \quad \cdots\cdots(5\,\mathrm{b})$$

$$\left[W_{ij}\right]=\begin{bmatrix}\mathrm{sinc}(1+t)\\ \mathrm{sinc}(t)\\ \mathrm{sinc}(1-t)\\ \mathrm{sinc}(2-t)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{sinc}(1+s)\\ \mathrm{sinc}(s)\\ \mathrm{sinc}(1-s)\\ \mathrm{sinc}(2-s)\end{bmatrix}^T \quad \cdots\cdots\cdots\cdots(5\,\mathrm{c})$$

となる．ここで，（x_{ij}, y_{ij}）は（x, y）を取り囲む16点P_{ij}の座標を表す．式（5 a, b, c）は$Q(x,y)$がランダム変数であることを示している．したがって，同一対象物を撮影したDNは撮影のたびごとに変動することがわかる．

なお，位置合せは1ピクセル以下の精度で達成されるが，誤差0とはならないため，DNのランダム性は更に増すことになる．また，センサシステムの電気的ノイズ，大気補正誤差，画像間の太陽位置の違い（陰影など），植物の季節変動，土壌湿潤率の差，走査角度に応じた撮影角度および分解能の変化なども，明らかにランダム性を増大させる．式（5 a, b, c）の定式化で無視した，式（3）の量子化誤差も要因の一つである．

4. 濃度値のランダム性に基づく被害判読手法

(1) 濃度値確率分布のモデル化

前節で定式化を行なったように，DNはそれぞれの地点でランダム変数としてモデル化することができる．確率分布の評価方法としては，まず高解像度の画像をもとに，式（5 a, b, c）と2次元一様分布（s, t）からモデルを算出することが考えられる．また，多数の実観測画像を用いれば，前節で述べた様々な誤差要因を含めた確率分布を求めることができる．災害発生前の中解像度衛星画像は，その数は限られてはいるものの，その災害以前に同一（あるいは類似）地域の別の災害事例画像を得ることに比べれば，はるかに容易である．

なお，都市をいくつかの地域（例えば木造密集市街地，商業地域等）に分類し，同一分類内のピクセルは同じ変動モデルを持つと仮定してモデル化することも考えられる．しかしこの場合，本来各地点で異なる確率分布モデルを同一視するため，各分類の確率分布の分散は明らかに単一地点のものよりも大きくなる．よって，被害判読精度は低下する考えられる．

(2) 有意検定による被害判読（変化抽出）

DNあるいはDN変動の確率分布$Pr(Q)$が求まれば，平常時に撮影した画像濃度値がどの範囲にあるかを把握することができる．帰無仮説として

H_0：地点（x, y）の濃度値$q(x, y)$が得られたとき，qは確率分布$Pr(Q)$のサンプルである．

を設定し，有意水準αで棄却できるかを検定する．もし，qがある変動幅に収まっており棄却できなければ，地表の変化がないものと考えざるをえない．しかし棄却できれば，それは通常の変動を超え地表に変化があった（被害があった）と判断できる．

したがって，各地点ごとに有意検定を実施し，棄却できる有意水準$\alpha(x, y)$を求める．αは以下を満足する（図3）．

$$\int_{\mu-|q-\mu|}^{\mu+|q-\mu|} pr(Q)dQ = 1-\alpha \quad \cdots\cdots (6)$$

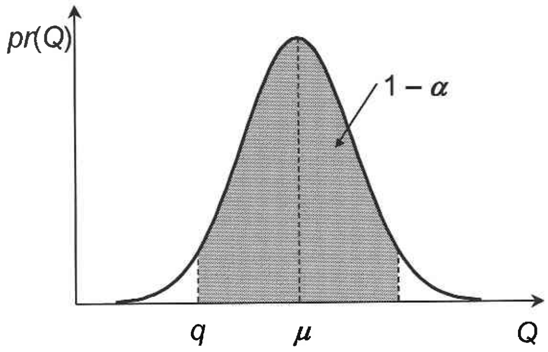

図3　危険率$1-\alpha$の評価（図の例では$q < \mu$）

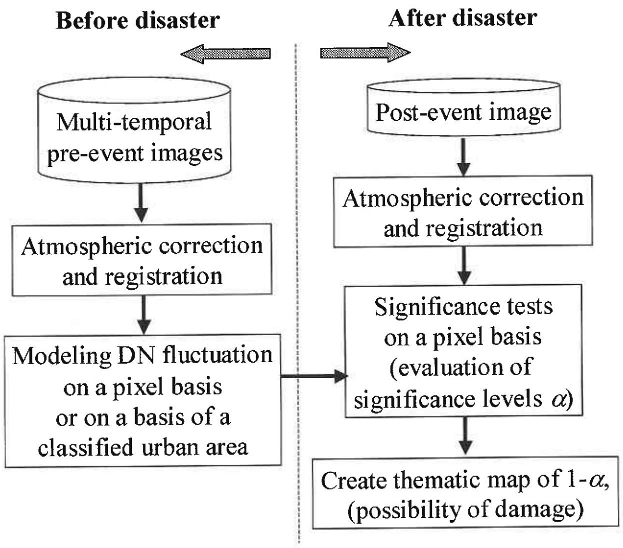

図4　IFM法の被害判読フロー

ここで$pr(Q)$は$Pr(Q)$の確率密度関数，μは分布の平均である．$Pr(Q)$は正規分布である必要はなく，任意の分布で構わない．しかし，式（6）からαを特定するために，平均μが既知である必要がある．

最終的に，危険率$1-\alpha$の分布図を作成すれば，被害発生の信憑性（確率）を示す地図となる．

(3) 被害判読の手順

本研究の被害判読法は，画像の変動モデルに基づいているのでImage Fluctuation Model Method（IFM法）と名付ける．図4にIFM法の被害判読のフローを示す．

以下，被害判読手順を説明する．

災害前に可能な処理：
ステップ1：災害前の画像を収集する．
ステップ2：画像間の位置合せと大気補正を行なう．

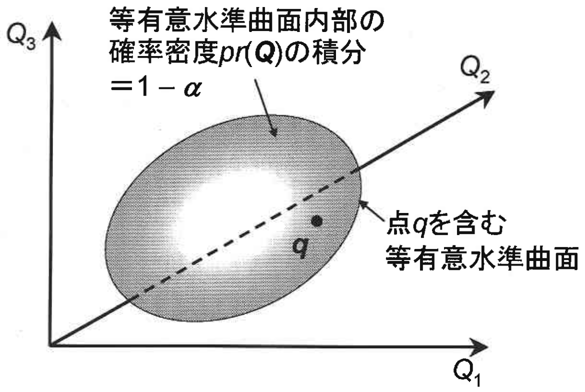

図5　多次元確率分布へ拡張したときの有意水準αの決定

ステップ3：上記処理結果をもとに，各ピクセル位置（あるいはいくつかの地域分類）で濃度値変動モデル $Pr(Q)$ を評価する．

災害後の処理：
ステップ4：災害後の画像を取得する．
ステップ5：災害前の画像との位置合せと大気補正を行なう．
ステップ6：帰無仮説 H_0 に関し，ピクセルごとに有意検定を行い，棄却可能な有意水準αを求める．
ステップ7：危険率1－αの分布図を作成する．

濃度値 Q については，各バンドの値に限らず，様々な指標値，主成分などを用いることができる．また，Q と $Pr(Q)$ は，多次元確率分布を導入することで，多変数に容易に拡張できる．Q を多次元に拡張したときの有意水準αの決定は図5に示されるように，点 q を含む等有意水準曲面の内部空間の確率密度 $pr(Q)$ の積分が1－αとなることが条件となる．

もし，濃度値変動のモデルとして，多次元正規分布を仮定すれば，有意水準αの等値面は超楕円体になり，Daiら[5]が提案する楕円体変化抽出法（ECD法）とよく似た形となる．ECD法は多次元差分画像を用い，マハラノビスの距離に基づいた判別関数で変化有無を判定する．したがって，判別の等閾値面は超楕円体である．しかし，ECD法で必要な閾値の設定は，IFM法では不要であり，本質的にECD法と異なる．

そもそもIFM法では正規分布を仮定する必然性が存在しないため，有意水準αの等値面は超楕円体になるとは限らない．また，IFM法の最終的な判読結果は，各ピクセルの有意水準を示し，被害判読結果の信頼性を反映したものである．したがって，確率の解釈は図を参照する人間に委ねられ，通常，危険率95％や99％といった値が目安となろう．

5. ま　と　め

センサモデルに基づき，中解像度衛星画像の特定位置の濃度値は通常時でも変動していることを示した．この原理に基づき被害判読手法，濃度値変動モデル法（Image Fluctuation Model Method）を提案した．本手法は，濃度値変動モデルを事前に評価することで，有意水準αの有意検定により異常な画素を見出すものである．また，被害判読結果は危険率1－αで表され，一般的な変化抽出手法に存在する変化判定閾値の設定に関わる問題を回避することができる．

今後，高解像度衛星画像を用いた濃度値変動モデル評価，複数の中解像度衛星画像を用いた濃度値変動モデル評価を行い，地震被害後に撮影された画像を用い手法の妥当性を検証する予定である．

（2003年9月10日受理）

参　考　文　献

1) Kohiyama, M., Hayashi, H., Maki, N., Higashida, M., Kroehl, H.W., Elvidge, C.D., and Hobson, V.R. 2003. Early damaged area estimation system using DMSP/OLS night-time imagery, *International Journal of Remote Sensing* (in press).
2) Singh, A. 1989. Digital change detection techniques using remotely-sensed data, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, No. 6, pp. 989-1003.
3) Morisette, J. T., Khorram, S., and Mace, T. 1999. Land-cover change detection enhanced with generalized linear models, *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 20, No. 14, pp. 2703–2721.
4) Schowengerdt R. A. 1997. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing, Second Edition, Academic Press, San Diego, USA.
5) Dai, X. and Khorram, S. 1998. The Effects of Image Misregistraion on the Accuracy of Remotely Sensed Change Detection, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5, pp. 1566–1577.