第Ｉ部門　　観測更新アルゴリズムを取り入れたリアルタイム地震被害推定に関する研究

京都大学工学研究科　正　員　土岐　憲三
京都大学工学研究科　正　員　清野　純史
山口大学工学部　正　員　三浦　房紀
京都大学大学院　学生員　○村田　北斗

1.目的　地震発生直後に対象地域全体の地震動や地震被害の空間分布特性を推定することは、災害対策上不可欠である。しかし、災害は時空間で波及するものであるから、新たな情報が入るごとに推定は更新されなければならない。本研究では、従来不偏性を満たしていなかったアルゴリズムに対して、不偏性を考慮した更新推定アルゴリズムを構築し、実際問題への適用を図った。

2.解析手法　クリッギング[1]は空間上で得られた、ある物理量に関する少数の標本データから空間上の任意点における標本値を推定するものである。この推定では以下の仮定をする。

（ⅰ）標本場$z(\bar{s})$はトレンド成分$m(\bar{s})$とランダム成分$w(\bar{s})$の和として表される。

（ⅱ）空間上のＮ個の標本点 $\bar{t}_i(i=1,2,\cdots N)$において標本値が$z(\bar{t}_i)$として与えられていると、任意点の推定量$\hat{z}(\bar{s})$は、標本値$z(\bar{t}_i)$に重み係数$\lambda_i$を掛けた線形代数和として表される。

この仮定のもとで推定量の不偏性を満たし推定誤差分散が最小となるときの$\hat{z}(\bar{s})$を推定値とする。推定値を求めるために不偏推定をラグランジュ条件として、推定点における推定誤差分散をλ_iで偏微分して0とするとλ_iについて次式の観測方程式を得る。

$$\begin{bmatrix} H_n & F_L^T \\ F_L & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \vec{\lambda}_N \\ -\vec{\mu}_L \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} h_n \\ f_L \end{Bmatrix} \tag{1}$$

ここでH_nは観測点間のランダム成分$w(\bar{t}_i)$の共分散、h_nは観測点のランダム成分$w(\bar{t}_i)$と推定点のランダム成分$w(\bar{s})$の間の共分散、F_L, f_Lはラグランジュ条件に関する項であり、$\vec{\lambda}, -\vec{\mu}$はそれぞれ重み、ラグランジュ乗数である。

この方程式を解いて$\vec{\lambda}$を求め、（ⅱ）の仮定に従って線形代数和をとると推定値が決まる。既知の標本点から得られている標本情報に新しく得た標本点の情報を重ねることで、推定値を逐次更新する方法は、以下の式で表される。

$$\hat{z}_{N+1}(\bar{s}) = k_1\vec{z}_N + k_2 z_{N+1} \tag{2}$$

ここでk_1、k_2は以前の情報から定まる係数、$\vec{z}_N$はＮ個の標本点をベクトル表示したものである。このアルゴリズムを用いると、地震発生時に時間経過とともに増える地震動情報、地震被害情報に対して新しく情報が入るごとに観測方程式を解き直す必要がなく、短時間で推定計算が行える。

式（２）のアルゴリズムは、不偏性を満足せずに推定誤差分散を最小とする推定法[2]であるが、本研究では不偏性を満たすような漸化アルゴリズムを以下のように構築した。

標本点がＮ個の場合とＮ＋１個の場合の式（１）の観測方程式における解の関係を導くと次式を得る。

$$\hat{z}_{N+1}(\bar{s}) = \left\{\vec{\lambda}_N(\bar{s}) - \lambda_{N+1}(\bar{s})\vec{\lambda}_N(\bar{t}_{N+1})\right\}\vec{z}_N + \lambda_{N+1}(\bar{s}) z_{N+1} \tag{3}$$

ここで$\vec{\lambda}_N(\bar{s})$は、標本点Ｎ個での推定点の重みベクトル、$\vec{\lambda}_N(\bar{t}_{N+1})$は標本点Ｎ個での新しい標本点における重みベクトル、$\lambda_{N+1}(\bar{s})$は新しい標本点による重みである。また、$\lambda_{N+1}(\bar{s})$は以前の情報の関数として次式で表される。

$$\lambda_{N+1}(\bar{s}) = f\left(\vec{\lambda}_N(\bar{s}), \vec{\lambda}_N(\bar{t}_{N+1}), -\vec{\mu}_L(\bar{s}), -\vec{\mu}_L(\bar{t}_{N+1})\right) \tag{4}$$

ここに、関数fは（　）内の１次関数として簡潔に表現できる。したがって、新しい重み$\lambda_{N+1}(\bar{s})$も既知の情報として得られるので、式（３）も式（２）の形で表現できる。

Kenzo TOKI, Junji KIYONO, Fusanori MIURA, Hokuto MURATA

このアルゴリズムでは、時間とともに得られる更新点の位置は事前には当然未知であるので、この情報が得られ次第、式(3)、(4)の計算に用いる $\vec{\lambda}_N(\vec{t}_{N+1})$、$\vec{\mu}_L(\vec{t}_{N+1})$ のような更新点における重み計算を行うことになる。

3.適用例　2の解析で行う更新推定計算を具体的に地盤変位で行った。まず、地震発生時に図1の0番に示す3点で初期情報として地盤のx方向変位が観測されると、対象領域での地盤変位は等高線では図2(a)のように推定される。次に随時更新情報が入ると図2(b)、(c)、(d)のように更新推定されてゆく。また、従来の不偏性を満たさない更新アルゴリズムによる推定計算結果も図3(a)、(b)、(c)、(d)に示し両推定法による違いも明らかにした。この結果より、更新前の観測点が3点のときの推定結果はかなり異なるが、更新回数が増えるごとに両推定法での結果は近くなることがわかる。これは、観測点数が増えたために両推定法での推定精度が上がり推定誤差分散が小さくなるためである。また、このアルゴリズムは（1）式を展開して得られているので、更新推定した結果と直接クリッギングによって推定した結果は一致する必要がある。これを初期観測点が3点で3点更新点が加わったときの更新推定による結果（図4）と、観測点6個によるクリッギング推定による結果（図5）の一致により示した。

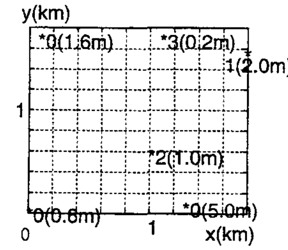
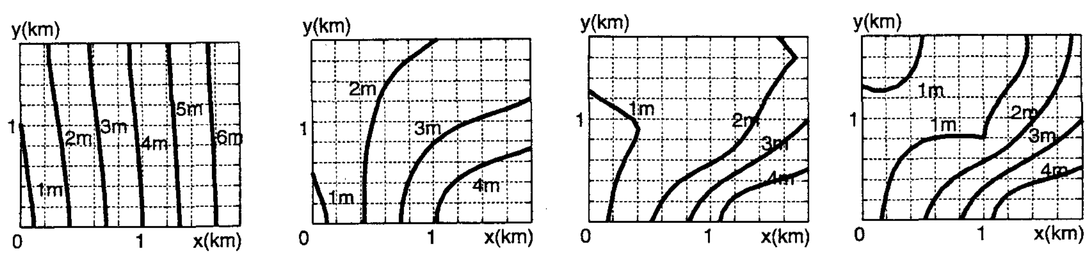


図1　観測点配置図
図内の番号は更新回数を示す
0番は初期観測点を示す
()内はx方向地盤変位を示す

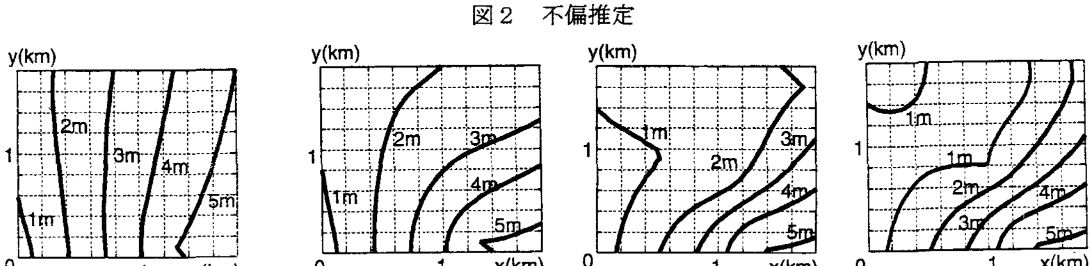
4.まとめ　本研究の成果は、(3)、(4)の簡潔な式を用いてアルゴリズム計算を行うことにより、不偏性を満足しながら従来の更新アルゴリズムよりも速い推定計算を行えることである。

5.参考文献　1）A.G.Jourel et. al: Mining Geostatics, Akcademic Press, 1978　2）三浦, 清野他: GPSを用いた地盤変状の把握とその利用, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, 1997



(a)初期推定　(b)更新1回　(c)更新2回　(d)更新3回

図2　不偏推定



(a)初期推定　(b)更新1回　(c)更新2回　(d)更新3回

図3　従来の推定

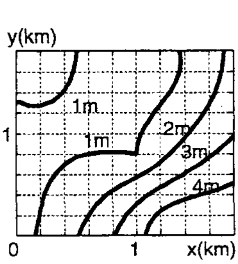


図4　更新推定

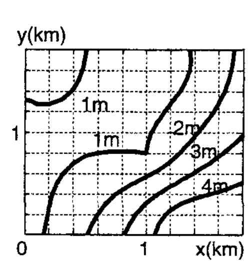


図5　クリッギング推定