

## 地震直後のライフライン被害の早期推定システムに関する一考察

山口大学工学部 正員○清野純史  
山口大学工学部 正員 三浦房紀

1.はじめに 本研究の目的は、ライフライン被害が地盤変状と密接に関連していることに着目し、被災直後の地盤変状をGPS(Global Positioning System)を用いて高精度かつリアルタイムで測位し、この地盤変状のデータをGIS(Geographical Information System)を用いて地理情報とリンクさせ、ライフライン被害状況の迅速な把握を行うシステムについての基礎的な考察を行うことである。このシステムによれば、地域内のどの地点で被害が発生しているかが瞬時にわかることになり、この第一次被災情報を逐次得られる新たな情報によってアップデートしていけば、ライフライン施設の被災状況の把握のみならず復旧作業を強力に支援することができる。

2. GPSとGIS GPSは地球から約2万kmの6軌道を周回する18個(将来24個)の衛星から送られてくるメッセージを受信し、個のデータを処理することにより測定点の位置や高さを計測するシステムである<sup>1)2)3)</sup>。本報のように「リアルタイム」ということを念頭に置く場合には、観測されるGPSデータの入手時間など、情報を収集するのに要する時間を考慮して計画を立てねばならない。この衛星を使った測位システムの概略を示したものが図-1である。一方、GISとは空間的あるいは地理的な情報を扱うように設計されたコンピューターシステムである。それは、1)データベース機能、2)情報解析機能、3)プレゼンテーション機能の3つの機能が統合されて構成されている。これらの機能により、位置などの空間的関係を表す情報とその他の属性情報を統合し、特定の目的のために解析・検索・変換などを行って、その結果を端末ディスプレイや紙面に空間的に視覚化することが可能である<sup>4)5)6)</sup>。

本計画におけるモニタリングの目的は、ライフライン施設の迅速な被災状況の把握であるので、被災箇所のおよその位置が視覚的に捉えられなければならない。したがって、GPSによりリアルタイムで得られた測位情報を瞬時に解析し、これをGISを利用してわかりやすい形で表示する。もちろん、これは被災箇所の概略推定のための第一情報であり、他のシステムから逐次新たな情報が入ってくる。したがって、GISにはこの新たな情報を取り入れて被災箇所に関する情報をアップデートする機能も取り入れる必要がある。

3. リアルタイムモニタリング 地震災害に強い都市造りのためには、耐震設計に代表されるような構造物のハード面の強化やオフライン的な被害予測のみならず、オンライン地震情報の積極利用や地震直後の被災状況の早期把握もまた重要な課題である。このためには、避難対策や緊急対策、2次災害発生防止、そして復旧、復興に至る過程で新たな情報がリアルタイムで入手できるようなシステムの構築が望まれる。現在の都市機能を支えるライフラインシステムにも、様々な形でこの地震情報のリアルタイム検知、伝達システムが作動している<sup>7)</sup>。

GPS測量で得られた観測点変位からは、FEMと同じ考え方で簡単に地盤ひずみが求められるので、地盤ひずみとライフライン被害の対応関係がわかれば図-2のように被災状況の把握が可能となる。ただし、新たな情報(例えば、どこそこの場所でガス管が壊れているというような点としての情報)が入手された場合には、それまでに推定された被災状況は当然更新されなければならない。このような場合には次に述べるような逐次推定アルゴリズムに従った推定<sup>8)</sup>が必要である。

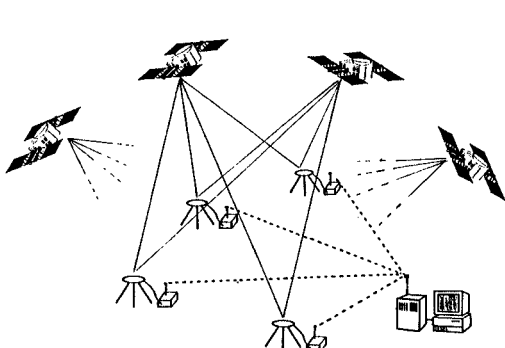


図-1 GPSとGISによるモニタリングの概要

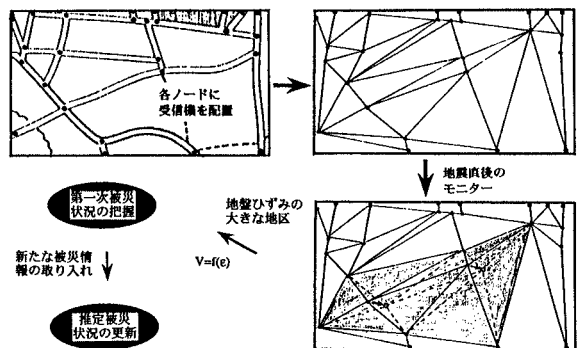


図-2 GPS測量に基づく被災状況の把握と更新

4. 推定被災状況の更新 いま、被災状況を表す物理量の観測値を $y$ 、その状態量を $z$ とおく。これらは、以下のようにそれぞれ $m$ 個、 $n$ 個のスカラ量で構成されているものとする。

$$y_m(x) = \{y(x_1) \ y(x_2) \ \cdots \ y(x_m)\}^T \quad (1)$$

$$z_n(x) = \{z(x_1) \ z(x_2) \ \cdots \ z(x_n)\}^T \quad (2)$$

さらに、簡単のため  $m=n$  とし、観測方程式が次式で与えられているものとする。

$$y_n(x) = M_n z_n(x) + R_n w_n(x) \quad (3)$$

ここに、 $y_n(x)$ 、 $z_n(x)$ 、 $w_n(x)$  は $n$ 次元ベクトル、 $M_n$ 、 $R_n$  は $n \times n$ マトリクスである。観測点 $x_i (i=1, \dots, n)$ 以外の任意の点 $x_0$ における状態量の推定値を $z(x_0)$ とすると、 $y_n(x)$ は次式ようになる。

$$\begin{aligned} y_n(x) &= [0 \mid M_n] \{z(x_0) \ z_n^T(x)\}^T + R_n w_n(x) \\ &= M_{0n} z_{0n}(x) + R_n w_n(x) \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $z_{0n}(x)$  は $n+1$ 次元ベクトル、 $M_{0n}$  は $n \times n+1$ マトリクスである。

いま、 $z_{0n}(x)$ の最適推定式を次式のように $n$ 個の観測値の線形結合から求められるものとする。

$$\hat{z}_{0n}(x) = \Lambda_n y_n(x) \quad (5)$$

$$\hat{z}_{0n}(x) = \{\hat{z}(x_0) \ \hat{z}(x_1) \ \cdots \ \hat{z}(x_n)\}^T \quad (6)$$

ここに、 $\Lambda_n$  は $n+1 \times n$ の重み係数マトリクスである。ここで、以下の式

$$C = \text{tr} E[\{z_{0n}(x) - \hat{z}_{0n}(x)\} \{z_{0n}(x) - \hat{z}_{0n}(x)\}^T] \quad (7)$$

を最小とするような規範を考えると、 $\Lambda_n$ は次式ようになる。

$$\Lambda_n = Q_n M_{0n}^T (M_{0n}^T Q_n M_{0n}^T + R_n W_n R_n^T)^{-1} M_{0n}^T Q_n \quad (8)$$

ここに、 $Q_n$ 、 $W_n$ はそれぞれ

$$E\{z_{0n}(x) z_{0n}^T(x)\} \quad (9)$$

$$E\{w_n(x) w_n^T(x)\} \quad (10)$$

なる相関マトリクス、および誤差共分散マトリクスである。このときの推定誤差共分散マトリクス $P_n$ は次式で表される。

$$P_n = Q_n - Q_n M_{0n}^T (M_{0n}^T Q_n M_{0n}^T + R_n W_n R_n^T)^{-1} M_{0n}^T Q_n \quad (11)$$

さて、 $n+1$ 個めの観測値が得られたとすると

$$y_{n+1}(x) = \{y(x_1) \ \cdots \ y(x_n) \ y(x_{n+1})\}^T \quad (12)$$

であり、最適推定値

$$\hat{z}_{0n+1}(x) = \{\hat{z}_{0n}^T(x) \mid \hat{z}(x_{n+1})\}^T \quad (13)$$

は、 $n+1 \times n+2$ マトリクスである $\Lambda_{n+1}$ を用いて式(5)と同様

$$\hat{z}_{0n+1}(x) = \Lambda_{n+1} y_{n+1}(x) \quad (14)$$

とおくことにより、式(7)の最小化と同じ手順にしたがって以下のように求めることができる。

$$\hat{z}_{0n+1}(x) = A \hat{z}_{0n}(x) + K y_{n+1}(x) \quad (15)$$

すなわち、最適推定値は $n+1$ 個めの観測値が得られる前の推定値と、 $y_{n+1}$ に重み $K$ を加えた新しい情報 $K y_{n+1}$ の和として求めることができる。カルマンフィルタアルゴリズムと同様、このゲイン $K$ と係数 $A$ を考えると、観測点数が増加するごとに推定値が更新される。本報で理論的に考察したシステムにより、推定された被災第一情報はその後の新たな情報により逐次アップデートが可能となる。

参考文献 1) 大成建設：The Taisei GPS System, 大成GPSシステム紹介パンフレット。2) 清水則一・桜井春輔：GPSの岩盤変位計測への適用、資源と素材、Vol.109, pp.1-7, 1993。3) 風間 聡・沢本正樹：リモートセンシングによる地上観測、土木学会誌、Vol.80, 1995。4) 高阪宏行：行政とビジネスのための地理情報システム、古今書院。5) 町田 聡：地理情報システム、山海堂。6) 鎌田靖彦：地図情報システム入門、日刊工業新聞社。7) 野田 茂・目黒公郎：リアルタイム地震工学を目指して、第22回地盤震動シンポジウム、1994。8) 清野純史・土岐憲三・佐藤忠信：堆積層厚データ処理のためのサンプリング点の最適配置について、第26回土質工学研究発表会、pp.195-198, 1991。