

地震計の最適配置に関する基礎研究

BASIC STUDY ON OPTIMAL SEISMIC SENSOR LOCATIONS

吉田郁政*・佐藤忠信**・足立幸郎***

Ikumasa YOSHIDA, Tadanobu SATOU and Yukio ADACHI

*正会員 工博 東電設計(株)地盤構造部(〒110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3)

**正会員 工博 京都大学防災研究所(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

***正会員 阪神高速道路公団 工務部設計課(〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

Optimal location for placing seismograph along freeway is discussed. First the theory of spatial distribution estimation of earthquake intensity is presented and the index which indicates the quality of the sensor locations is proposed based on the estimation error of the spatial distribution. The optimal sensor location problems can be formulated as optimization problem in which the objective function is the sensor location index and design parameters are locations of the sensors. Real coded GA is used for the optimization. After the outline of the real coded GA is presented, optimal sensor location is determined by using the proposed methodology.

Key Words : optimal sensor location, Kriging, spatial distribution, real coded GA

1. はじめに

多くの構造物や施設に対して様々な計測を行い、安全性のモニターを行うことが広く行われるようになってきた。しかし、計測器の最適配置位置を定量的に検討することは少なく、多くの場合は経験的に決めている。計測を行うことの目的は、一般に観測情報から何らかの推定、判断を行うことにある。最適配置の問題はこうした推定、判断を最も効率的に行うことのできる配置を探索する問題と定義することができる。このような観点から考えると定量的に最適配置位置を評価するには、1) 観測配置に対する評価指数の設定(性能、効率の定量化)、2) 配置位置に関する評価指数の最適化、の2ステップに分けて考える必要がある。

地震動計測の目的は構造物の振動制御や損傷度の検出、災害時の復旧計画立案、など多岐にわたる。定量的な評価を行うには、まず最初に計測の目的を明確に定め、そのための方法について整理、定式化しておく必要がある。その方法に従って評価指数は設定されるべきである。本研究における計測の目的は限られた観測点から高速道路施設に沿って地震動強度を推定することとする。こうした地震動強度の推定は内挿、外挿の問題としてとらえることができ、Kriging¹⁾²⁾などの確率論に基づく空間分布推定手法を用いることができる。こうした方法では推定値の他に推定誤差のレベルも求められるため、これをもとに観測配置の評価指数を定義することができる。ただし、推定点は高速道路施設に沿った全域であるため、全体的な誤差レベル(信頼性レベル)を表す指数を求める必要がある。こうした要求に答える指数として情報エントロピーや推定誤差の共分散行列のノルムが考えられる³⁾⁴⁾⁵⁾。

評価指数の定式化ができれば次は最適化の問題となる。最適化は工学における基本的な要求事項であり、日常的に行われている。これまで多くの場合経験的にこの最適化が行われてきたが、計算機や計算アルゴリズムの発達に伴い、最適化手法の適用が現実的な手段となってきた。多くの最適化手法は局所解を探索するものであり、多峰性の問題に対しては初期値に依存した解が得られる。それに対して、大域解を探索するアルゴリズムも近年盛んに研究されるようになり、その中でも有望な方法とされているのが遺伝的アルゴリズム GA(Genetic Algorithm)⁶⁾⁷⁾である。大多数のGAは2進法を基本とする方法であるが、最適化効率を高める工夫として実数を用いたGAの研究も進められている⁸⁾⁹⁾。

確率的解釈から評価指数を設定しGAを用いて最適化するという試みは基盤位置の推定を対象として行われた例があり、良好な結果が得られたことが報告されている¹⁰⁾。本研究では同様な枠組みのもと、高速道路に沿って地震計を配置する問題を対象として、計器の最適な設置位置について定量的な評価を試みた。空間分布推定法の理論から観測配置の評価指標を誘導、定義し、実数型GAを用いて最も良好な評価指数を示す観測点配置を探索した。

2. 評価指数の定式化

2.1 推定の基礎理論

空間分布が正規分布に従う確率場であると仮定し、平均値分布と自己相関関数で記述されるとする。この確率場を離散化し、有限の点における推定問題とすると、

確率場の推定問題は多変量正規分布に従う確率ベクトルの推定問題となり、その確率的性質は平均値ベクトルと共分散行列で記述される。共分散行列は自己相関関数より求めることができる。

確率的性質を規定する記号を、 $\mathbf{x}$:未知量ベクトル、 $\bar{\mathbf{x}}$:未知量の平均値ベクトル、 $\mathbf{M}$:未知量ベクトルの共分散行列、と定義する。次のようにいくつかの離散点で観測量が与えられるとする。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \quad (1)$$

この式は、観測方程式と呼ばれている。観測量 $\mathbf{z}$ は未知量ベクトル $\mathbf{x}$ の関数 $\mathbf{H}$ で与えられ、観測量誤差 $\mathbf{v}$ が混入しているとする。 $\mathbf{v}$ も正規分布に従いその共分散行列は $\mathbf{R}$ で与えられ、未知量ベクトルとは独立とする。

$$E \left[\begin{pmatrix} \mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}} \\ \mathbf{v} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T & \mathbf{v}^T \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \quad (2)$$

以上の問題設定のもとで観測量が与えられた時の最適な推定を考える。最適な推定値 $\hat{\mathbf{x}}$ は観測量 $\mathbf{z}$ が与えられた時の未知量 $\mathbf{x}$ の条件付確率 $P(\mathbf{x}/\mathbf{z})$ を最大にすると定義すると、 $\mathbf{x}$ も $\mathbf{v}$ も正規分布に従うため $P(\mathbf{x}/\mathbf{z})$ を最大にする $\hat{\mathbf{x}}$ は、次の目的関数 J を最小にすることが簡単に導かれる。

$$J = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}) + (\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x}))^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H}(\mathbf{x})) \quad (3)$$

一般にはこの目的関数 J を最小化する $\hat{\mathbf{x}}$ を陽な形で求めることは困難なので、なんらかの最小化手法を用いることとなる。

以上は、観測量と未知量の関係が非線形の場合も含めた一般的な記述であったが、今度は線形の場合に限定して考えてみる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{v} \quad (4)$$

この場合は、目的関数の最小点が極値の条件により次式で簡単に求まる。

$$\hat{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{P}\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (5)$$

$$\mathbf{P} = (\mathbf{H}^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H} + \mathbf{M}^{-1})^{-1} \quad (6)$$

式(5)(6)は次の形に変形することができる。

$$\hat{\mathbf{x}} = \bar{\mathbf{x}} + \mathbf{K}(\mathbf{z} - \mathbf{H}\bar{\mathbf{x}}) \quad (7)$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{M}\mathbf{H}^T (\mathbf{H}\mathbf{M}\mathbf{H}^T + \mathbf{R})^{-1} \quad (8)$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{M} - \mathbf{K}\mathbf{H}\mathbf{M} \quad (9)$$

式(7)(8)(9)は、カルマンフィルターの観測更新アルゴリズムとして知られており、 $\mathbf{K}$ はカルマンゲインと呼ばれている。詳細については多くの入門書、教科書¹¹⁾¹²⁾が出版されているのでそれらを参照されたい。

2.2 空間分布推定手法の基礎理論

これまでに述べてきた理論を基に空間分布の推定問題を考える。いくつかの点で観測量が得られているとして、その空間分布の推定を行う。その際観測された量にも誤差が含まれているとする。観測点におけるベクトルを $\mathbf{x}_1$ 、観測点以外におけるベクトルを $\mathbf{x}_2$ とし、未知量ベクトル $\mathbf{x}$ はその全体とする。

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} \quad (10)$$

その場合の観測方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{z} = \mathbf{H}\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} + \mathbf{v} \quad (11)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は単位行列を表している。未知量ベクトルの事前（観測量によって更新される前）の共分散行列 $\mathbf{M}$ を次のように分割して考える。

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & \mathbf{M}_{12} \\ \mathbf{M}_{12}^T & \mathbf{M}_{22} \end{bmatrix} \quad (12)$$

上記条件のもとでは、式(8)のカルマンゲインは次のように表される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} \\ \mathbf{M}_{12}^T \end{bmatrix} \left[\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R} \right]^{-1} \quad (13)$$

従って、未知ベクトルの推定は次の形で行われる。

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\mathbf{x}}_1 \\ \bar{\mathbf{x}}_2 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} \\ \mathbf{M}_{12}^T \end{bmatrix} \left[\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R} \right]^{-1} (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}_1) \quad (14)$$

また、事後の共分散行列は、

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{P}_{11} & \mathbf{P}_{12} \\ \mathbf{P}_{12}^T & \mathbf{P}_{22} \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、

$$\mathbf{P}_{11} = \mathbf{M}_{11} - \mathbf{M}_{11}(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{M}_{11} \quad (16)$$

$$\mathbf{P}_{12} = \mathbf{M}_{12} - \mathbf{M}_{11}(\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{M}_{12} \quad (17)$$

$$\mathbf{P}_{22} = \mathbf{M}_{22} - \mathbf{M}_{12}^T (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{M}_{12} \quad (18)$$

となる。

さらに、観測量誤差がない、すなわち $\mathbf{R} = \mathbf{0}$ とすると、式(13)(14)(18)は次のように簡略化される。

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{M}_{12}^T \mathbf{M}_{11}^{-1} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{pmatrix} \mathbf{x}_1 \\ \mathbf{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{z} \\ \mathbf{x}_2 + \mathbf{M}_{12}^T \mathbf{M}_{11}^{-1} (\mathbf{z} - \bar{\mathbf{x}}_1) \end{pmatrix} \quad (20)$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{M}_{22} - \mathbf{M}_{12}^T \mathbf{M}_{11}^{-1} \mathbf{M}_{12} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式(20)(21)は、観測量誤差を考慮していないシンプルクリッキングの式と対応している¹³⁾。本研究では観測量誤差も考慮した、より一般的な式(14)(18)を用いて空間分布推定を議論する。

事前の共分散行列 $\mathbf{M}$ は、自己相関関数 $R(d_1, d_2)$ を基に設定される。本研究では、次式で与えられる Gauss 型の自己相関関数を用いることとする。

$$R(d_1, d_2) = \sigma^2 \exp \left[- \left(\left(\frac{d_1}{a_1} \right)^2 + \left(\frac{d_2}{a_2} \right)^2 \right) \right] \quad (22)$$

ここで、 σ : 場の標準偏差

d_1, d_2 : 2点間の各座標軸方向の距離

a_1, a_2 : 各座標方向への自己相関距離

2.3 最適な地震計配置のための評価指数

確率論に基づく空間分布推定手法では推定誤差も評価できることから、これを最も小さくするように地震計配置を考えることが合理的になる。本研究における評価点は高速道路施設に沿った点となり、その共分散行列は式(18)に示されている $\mathbf{P}_{22}$ となる。評価指数としてはいくつかの方法が考えられるが、ここではトレースを用いて地震計配置の評価指数を次式のように定義する

$$J = \frac{\text{trace} \mathbf{P}_{22}}{\text{trace} \mathbf{M}_{22}} = \frac{\text{trace}(\mathbf{M}_{22} - \mathbf{M}_{12}^T (\mathbf{M}_{11} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{M}_{12})}{\text{trace} \mathbf{M}_{22}} \quad (23)$$

評価指数 J は 0 から 1.0 の数値となり、小さいほど好ましい観測点配置であることを示す指数となっている。本研究ではこの評価指数 J を用いて観測点配置の優劣を評価する。

3. 遺伝的アルゴリズムを用いた評価指数の最小化

本研究では配置する地震計の数に応じて最適な配置位置を示すことを目指して、地震計の数と評価指数の2目的最適化を行う。本研究で用いた遺伝的アルゴリズムによる2目的関数最適化の方法及び実数型 GA について簡単に解説する。

3.1 2目的最適化の場合の交叉，エリート保存

適合度はパレートランキング⁷⁾を用いて評価する。基本的な方法は目的関数が1つの場合と同様であるが、多目的の場合は適合度が高くても個体によって性質が大きく異なることがあるため、ある程度性質が類似した解の間で交叉した方が有効になる。例えば、目的関数 z_1 は大きいのが目的関数 z_2 は小さいパレート解とその逆のパレート解では性質が大きく異なる。そこで、図-1

に示すように、両端のパレート解を頂点とする二等辺直角三角形を考え、その第3の頂点を原点として各解の間の角度 θ を算定する。まず、ルーレット戦略によってランダムに2つの解を選び、両者の角度 θ をもとに算定した確率 P_x によって交叉を行うか否かを判定する。

$$P_x = \exp \left(- \left(\frac{\theta}{\theta_a} \right)^2 \right) \quad (24)$$

ここで、 θ_a は入力値であり、小さく設定すると近い解間で交叉が行われ、大きくすると無制約の場合に近くなる。

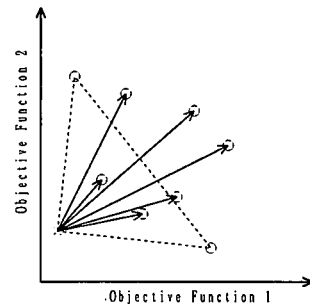


図-1 多目的最適化の場合の交叉 解の近さの考え方

パレート解がエリート保存の対象となるが、宣言したエリート数よりもパレート解の数が上回った場合は宣言した分だけ保存することとした。その場合、多様性を持った解が残るように、目的関数ごとにそれぞれ最小となる解を選択し、残りは解空間の距離が離れている順から選ぶこととした。逆にパレート解の数が宣言したエリート数よりも少ない場合は、パレート解以外を保存しても意味がないと考え、パレート解の数だけエリート保存した。

3.2 実数交叉の考え方

正規分布を用いた実数交叉の方法はいくつか提案されているが、本研究ではそのうちの次に示す Type-1 から Type-3 までの3つの方法について紹介する。これら3つの方法の概念を図-2に示す。

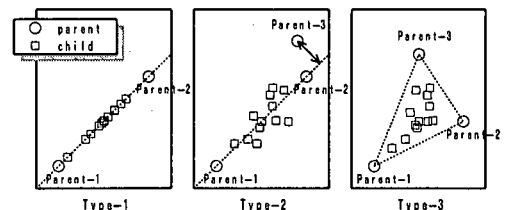


図-2 解空間における実数型交叉の概念

Type-1 の交叉では次式によって次世代の個体が作ら

れる。

$$\vec{c} = \frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2}{2} + \alpha \frac{\vec{p}_1 - \vec{p}_2}{2} \quad (25)$$

ここで、 $\vec{p}_1$ と $\vec{p}_2$ は解空間における親ベクトルを表しており、 $\vec{c}$ が次世代の個体、すなわち子供ベクトルを表している。親の形質が近い場合は子供の多様性も少なく、離れている場合には多様性が増す。 $\alpha \sim N(0, \sigma_x)$ は子供の多様性をコントロールするパラメタである。標準偏差 σ_x は入力する GA パラメタの一つであり、大きく設定すると子供の多様性が増す傾向にある。

Type-1 では子供は両親によって作られる 1 次元部分空間に作られる、いいかえると解空間内の両親を通る直線上に作られる。設計変数（最適化の対象となる変数）が全部で n 個あるとすると、Type-2 では n 次元空間に生成されたランダムなベクトルが Type-1 の方法で作られた個体に加えられる。そのため、Type-2 の個体は n 次元空間に生成されることになる。そのベクトルのばらつきの大きさは第 3 の親を考えて、第 3 の親から第 1, 2 の親によって作られる 1 次元部分空間（直線）への距離によって決められる。第 3 の親は補足的な存在であり、子供が特定の空間に押し込められることを防ぐためのものである。Type-3 では子供は 3 個体の親によって作られる 2 次元空間に以下の式によって生成される。

$$\vec{c}_1 = \frac{\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3}{3} + \alpha_1 \frac{2\vec{p}_2 - \vec{p}_3 - \vec{p}_1}{3} + \alpha_2 \frac{2\vec{p}_3 - \vec{p}_1 - \vec{p}_2}{3} \quad (26)$$

ここで、 $\alpha_1, \alpha_2 \sim N(0, \sigma_x)$ であり、意味合いは Type-1 と同様である。同じようにして第 2, 第 3 の子供 $\vec{c}_2, \vec{c}_3$ も生成される。

Type-1,2 では子供は両親（第 1, 2 の親）の重心を中心に、Type-3 では 3 個体の親の重心を中心に生成される。重心からのばらつきは親同士の距離が大きければ多くなり、距離が小さくなればばらつきも小さくなる。

突然変異は各設計変数に乱数 v を加えることによって考慮する。そのばらつきの大きさは解析者が決めるパラメタとなる。なお、本研究では実数型の GA を用いたが、一概にその優位性は結論できない。ある例題について単純な 2 進法型と実数型 GA の比較を行ったところ実数型の方が効率が良好だったが¹⁴⁾、領域可変にするなどの工夫で効率のよい 2 進法型の GA¹⁵⁾ も提案されていることを補足しておく。

3.3 パレート解集合の評価

1 目的関数の場合は各世代ごとに最も優秀な個体の目的関数に注目することにより、収束の判定材料とすることができる。2 目的最適化の場合も各世代のパレート解集合の優秀さを定量的に表す指標があると便利である。そこで本研究では図-3 に示すように、目的関数

空間においてパレート解によって定義される面積 S_1, S_2 を考え、次式によってパレート解集合の評価指数 J を定義した。

$$J = \frac{S_2}{S_1 + S_2} \times 100 \quad (27)$$

評価指数は 0 から 100 の間の数値となり、値が小さいほど好ましいパレート解が得られたことを意味する。

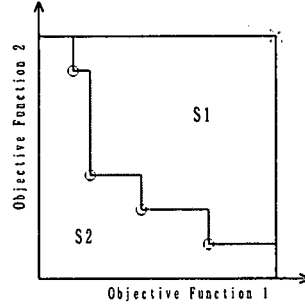


図-3 パレート解集合の評価指数 $= \frac{S_2}{S_1 + S_2} \times 100$

4. 新設地震計の最適位置の検討

高速道路施設に沿った最適な地震計設置位置について、前述の評価指数と Type-3 の実数型 GA を用いて検討を行う。観測点数と評価指数はトレードオフの関係にあるため観測点数も目的関数と考えて 2 目的関数最適化として定式化し、観測点数に応じた最適な設置位置を探索する。

検討対象とする高速道路の位置と既設の地震計の位置を図-4 に示す。この路線上の任意の場所に地震計を設置できるとする。図には他機関の既設地震計の位置も示している。阪神高速道路公団の既設地震計は 5 地点、他機関の既設地震計も 5 地点に設置されている。

4.1 新設地震計が 1 個の場合の最適化

新設する地震計の数が 1 個の場合には GA などの最適化手法を用いる必要はなく、適当な間隔で路線上に地震計を想定して順番に評価指数を求めればよい。図-4 に示す路線上の 0 番から 73 番までの設置位置について、阪神高速道路公団の既設 5 地点を考慮して評価指数を算定した。その結果を図-5 に示す。自己相関距離は 0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 の 5 ケースについて計算を行っている。ここでの自己相関距離は路線の全延長で基準化しており、全延長を 1.0 としたときの値となっている。

自己相関距離を大きくすると全体的に評価指数が小さくなるが、好ましい地震計設置位置の傾向は大きくは変わらずに 14, 44, 55, 62 付近で評価指数が極小となっている。別途、他機関の地震計 5 地点も含めた計

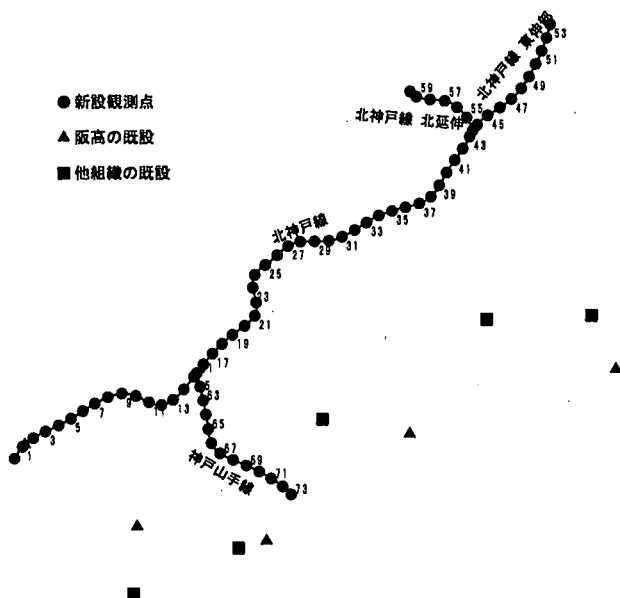


図-4 既設地震計と検討対象路線

算も行ったが、全体的な評価指数は小さくなり推定精度が上がるものの、好ましい地震計設置位置の傾向はあまり変わらなかった。なお、場の標準偏差は500、観測量誤差の標準偏差は10と仮定したが、これらの条件は最適な観測点位置にはあまり大きく影響しない。

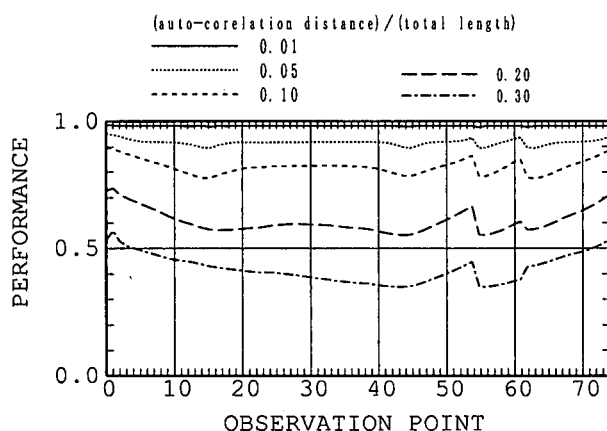


図-5 新設地震計1個の最適な位置 既設地震計5地点を考慮した場合

4.2 新設地震計が1から9個の場合の最適化

遺伝的アルゴリズムGAを用いて、追加する地震計が1個から9個までの場合について設置位置の最適化を行った。その際の自己相関距離は0.05とした。また、既設地震計は阪神高速道路公団の5地点だけを考慮した。最適化は前述のように評価指数と観測点数の2目的関数最適化問題として定式化した。計算に用いたGAパラメータを表-1に示す。最適な地震計設置位置の探索

過程を図-6に示す。図には前述の評価指数を示している。また、図-7には1, 10, 40, 140世代について地震計の数(既設5点を含む)と式(23)で表される観測点配置の評価指数との関係を示す。目的関数の一つとしている地震計の数は整数値であり、定義域が6から14なのでパレート解の数は最大で9個である。世代が進むにつれて評価指数が小さくなっており、第20世代以降も改善幅は小さいものの少しずつ改善されている。最終の第140世代で得られた新設する地震計が3個の場合と7個の場合について図-8, 9に示す。特徴としては比較的等間隔になっていること、路線が分岐する付近に設置されること、が挙げられる。

表-1 地震計設置位置最適に用いたGAパラメータ

世代数	150	人口	150
エリート数	9	突然変異パラメータ σ_v	0.02
交叉パラメータ σ_x	1.0	交叉角 θ_a	15.

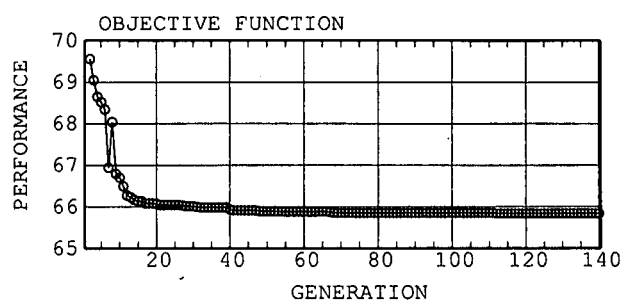


図-6 最適地震計位置の探索 2目的関数最適化における収束過程

5. おわりに

計測機器の最適配置の問題は大きく分けると、1) 観測配置に対する評価指数の設定(性能、効率の定量化)、2) 評価指数に関する最適化問題の解の算定、の2ステップから考えることができる。本研究では地震計の最適配置の問題について、1) 確率論に基づく空間分布推定手法を用いて高速道路施設に沿った地震強度の推定を行うことを想定して評価指数を設定し、2) 遺伝的アルゴリズムGAを用いて地震計設置位置の最適化を行った。こうした方法は一般性があり、地震以外を対象とした最適な計器配置の問題へも適用できる。

今回行った方法は大局的(マクロ)に見て観測情報に偏りが生じないように地震計設置位置を決める方法である。しかし、地震計の設置を考える上で局所的(ミクロ)な要因、例えば地形的な急変部や橋梁などの構造的な重要性も十分に考慮すべきである。また、本研究では最適配置の問題だけを議論したが、地震災害の

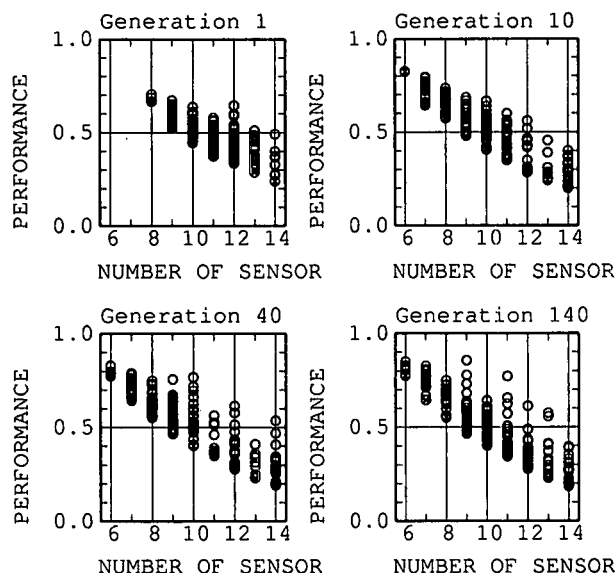


図-7 各世代のパレート最適解 評価指数と地震計の数（既設5点を含む）の関係

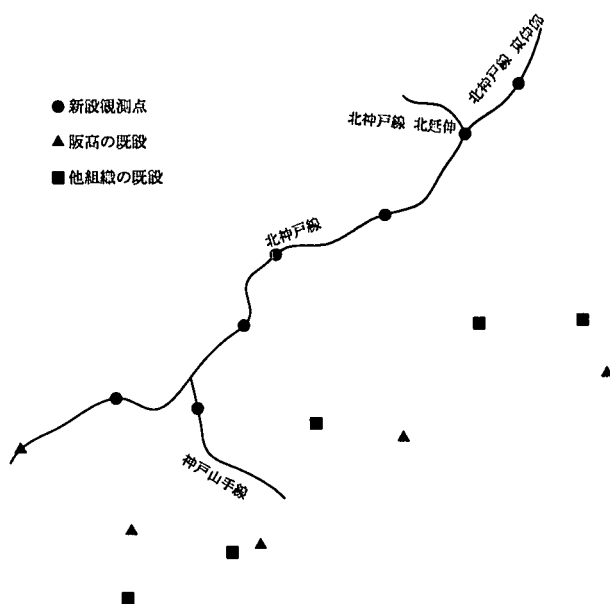


図-9 新設地震計が7個の場合の最適な位置

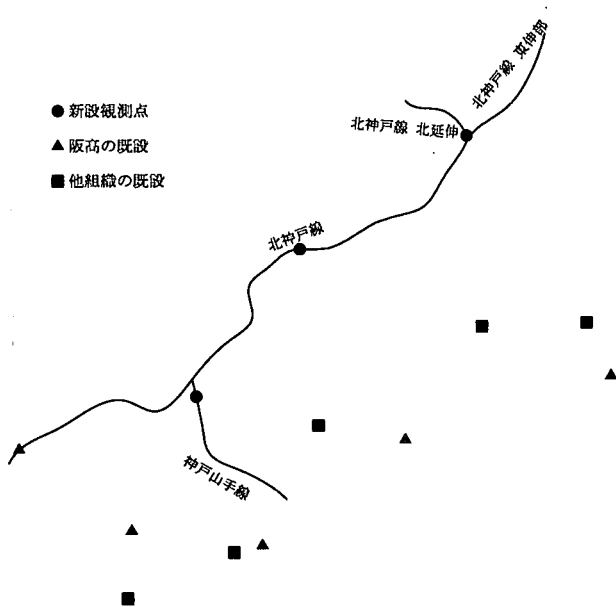


図-8 新設地震計が3個の場合の最適な位置

軽減を図っていくには未観測点における地震動強度や地震動波形の推定を的確に行うことが重要であり、これらも今後の研究課題となる。さらに、これらの情報を基にした、地震後の点検、補修計画も含めた最適な総合防災システム構築の研究も将来的な課題としたい。

参考文献

- 1) Journel, A.G., "Kriging in Terms of Project", Mathematical Geology, Vol.9, No.6, 1977
- 2) Cressie, N., "Statistics for Spatial Data", John Wiley & Sons, 1991
- 3) 吉田郁政, 豊田耕一, 星谷勝: 時間更新を考慮した逆解析

と観測点配置の評価指数, 土木学会論文集, No.543/I-36, pp.271-280, 1996

- 4) Yoshida, I., Toyoda, K. and Hoshiya, M.: Appraisal of Observation Allocation Based on Information Entropy, 7th International Conference on Structural Safety and Reliability, pp.955-958, 1997
- 5) 本城勇介・工藤暢章: 情報エントロピーによる逆解析のための観測計画の評価方法に関する基礎的考察, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.321-333, 1998
- 6) 古田均・杉本博之: 遺伝アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, 1997
- 7) 三宮信夫・喜多一・玉置久・岩本貴司: 遺伝アルゴリズムと最適化, システム制御情報ライブラリー 17, 朝倉書店, 1998
- 8) 小林重信・小野功: 進化型計算に基づくシステム最適化, 計測と制御, 35-7, pp.508-513, 1996
- 9) 喜多一・山村雅幸: 機能分担仮説に基づくGAの設計指針, 計測と制御, 38-10, pp.612-617, 1999
- 10) 本多 眞・鈴木 誠・上田 稔: 基礎地盤面推定のための調査ボーリングの最適配置計画, 土木学会論文集, No.610/III-45, pp.43-55, 1998.
- 11) 加藤寛一郎: 最適制御入門, 東京大学出版会, 1987
- 12) 佐藤忠信: 講座・地盤工学における逆解析・3. 逆解析の手法, 土と基礎, 43-7, 43-8, 1995
- 13) Hoshiya, M. and Yoshida, I., Identification of Conditional Stochastic Gaussian Field, Jour. of EM, ASCE, Vol.122, No.2, pp.101-108, 1996.
- 14) Yoshida, I.: Comparison of Real Coded GA (Genetic Algorithm) and Binary Coded GA, International Conference on Monte Carlo Simulation (MCS2000), pp.81-87, 2000
- 15) 荒川雅生, 萩原一郎: 領域適応型遺伝的アルゴリズムの開発 (精度および求解性の向上のためのオペレータの提案), 機論, 65-638C, p.4156-4163, 1999.10