

(32) GAを用いたトラス構造物のヘルスマニタリング Health Monitoring of Truss Structure Using Genetic Algorithm

石田良平* 大野秀基** 杉山吉彦***

Ryohei ISHIDA Hideki OHNO Yoshihiko SUGIYAMA

The present report describes a static health monitoring of two dimensional truss structure. The health monitoring scheme using the nodal displacement data of the structure is proposed. The health monitoring problem is formulated as an error minimization problem between observed and computed displacement data. The finite element method (FEM) is used to calculate the nodal displacement of the truss with virtually damaged members. The virtually damaged members are defined as the structural members without stiffness. Such a truss is referred to virtually damaged truss. To detect the damaged members effectively, the genetic algorithm (GA) is used. To illustrate effectiveness of the proposed scheme, computer simulations are performed.

Key Word: Two Dimensional Truss, Damage Detection, Health Monitoring, Genetic Algorithm, Finite Element Method, Inverse Problem.

1.はじめに

大型宇宙構造物、原子力発電設備、海上空港などのように、人間が直接目視によって構造物に生じた欠陥を見つけることができない場合が多い。これらの構造物を健全な状態に保つためには、何らかの手段で生じた欠陥の位置や程度を同定し、適切な補修手段を取る必要がある。欠陥同定は、一般に逆問題として定式化される。すなわち、観測可能な物理量から、構造物に生じた欠陥の位置や形状を同定する問題と考えられる。欠陥同定に用いられる手法としては、境界要素法などの順解析手法とカルマンフィルタアルゴリズムとを組み合わせた手法^{1,2)}、ニューラルネットワークを用いた手法^{3,4)}などが用いられている。この場合、欠陥の位置や形状を仮定し、それに基づく順解析結果と観測値との間の残差の二乗和を最小化する問題として定式化される。しかし、従来の欠陥同定手法では、欠陥数が既知として、欠陥の位置や形状を同定する場合が多い。一般には、欠陥数も未知である場合がほとんどであるため、欠陥数を含めて同定しようという研究⁵⁻⁷⁾もある。一方、著者らによって、連続体に生じた欠陥を、連続体の部分的な剛性の低下としてとらえた欠陥同定スキームが提案されている⁸⁾。

本論文で取り上げるトラス構造物の欠損部材同定に関する研究としては、従来から動的な問題として扱われてきている⁹⁻¹²⁾。これらは、構造物の固有振動数とそれに対応する振動モードにおける振動形態

* 工博 大阪府立大学講師 工学部航空宇宙工学科 (〒593 堺市学園町1-1)

** 工修 関西国際空港(株) 交通管理部 鉄道管理課 (〒549 泉佐野市泉州空港北1番地)

*** 工博 大阪府立大学教授 工学部航空宇宙工学科 (〒593 堺市学園町1-1)

を用いておこなわれる。動的手法における問題点としては、同定精度を上げるためには高次の振動モードをも考えなければならないが、固有振動数は高次になるほど接近し、検出も困難になる。また、残存部材の持っている質量の影響も考えなければならない。

静的な荷重下にあるトラス構造物に部材欠損が生じたとすれば、変形状態も変化する。なお、ここで言う部材欠損とは、構造部材として全く機能しない、いわば、部材が切断された状態をいうものと定義する。このとき、負荷条件や支持条件などの境界条件が変化しないものとすれば、その条件のもとで部材欠損のある構造物の変形状態は一意的に決まる。さらに、トラス構造物は、節点とそれらをつなぐ部材とから構成される離散構造物であるという特長を持っている。

以上の点から、本研究では、有限要素法と遺伝的アルゴリズムを組み合わせたトラス構造物の静的欠損部材同定を考える。ここでは、部材の欠損を、部材が完全に切断され、力を受け持てないものとして定義する。欠損部材に対して無剛性部材を定義することによって、有限要素法による解析において、部材構成を変えることなく、部材が欠損した構造を表すことができることを示す。次に、遺伝的アルゴリズムの欠損部材同定への適用について述べ、最後に、数値例を示す。

2. 欠損部材と無剛性部材のアナロジー

2.1 トラスの有限要素法概略 図1に示す長さ L のトラス部材の弾性変形挙動について考える。いま、 x' 軸を部材の軸に沿って取るものとする。二つの節点 i および j の軸方向変位を、それぞれ、 U_i および U_j で表すと、部材の伸び ΔL は $U_j - U_i$ で表される。部材に生ずる応力は、 E を材料の縦弾性係数として、 $\sigma = E(U_j - U_i)/L$ で表される。部材の断面積を A 、両節点に作用する軸方向外力を F_i および F_j で、それぞれ、表すと、節点における力の釣り合いから、次式が成立しなければならない。

$$\begin{aligned} AE(U_i - U_j)L &= F_i, \\ AE(U_j - U_i)L &= F_j. \end{aligned} \quad (1)$$

さらに、図2に示した x および y 方向の変位ならびに力の定義によって、最終的に次のようなマトリックス表現が得られる。

$$\frac{AE}{L} \begin{bmatrix} l^2 & lm & -l^2 & -lm \\ lm & m^2 & -lm & -m^2 \\ -l^2 & -lm & l^2 & lm \\ -lm & -m^2 & lm & m^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} f_i \\ g_i \\ f_j \\ g_j \end{Bmatrix} \quad (2)$$

ただし、 $l = \cos\theta$, $m = \sin\theta$ であり、 f および g は x および y 方向節点力成分である。

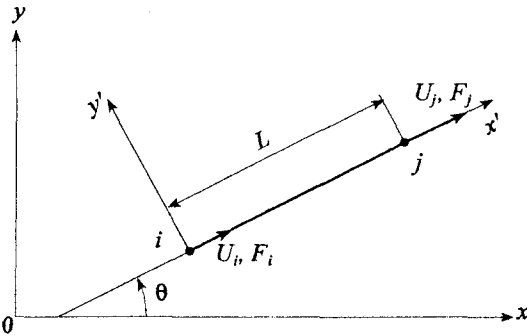


図1 部材座標系での表現

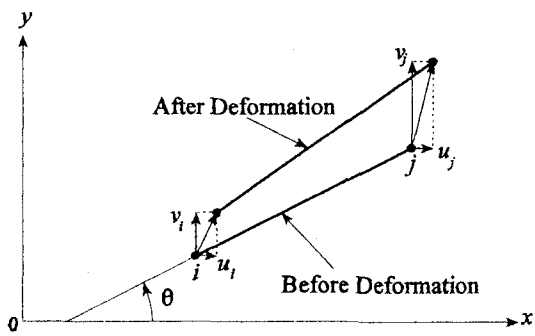


図2 全体座標系での表現

合の欠損構造の総数は、 N^2 個になる。

1部材欠損の場合は N 回以内の有限要素法計算で欠損部材の同定が可能である。2部材欠損の場合でも、たかだか最大 $N(N-1)$ 回の計算で欠損部材の同定が可能であり、このような場合に対して遺伝的アルゴリズムの適用はほとんど意味がない。2部材欠損の場合、 $N(N-1)$ 回以下の回数の計算で欠損部材の同定が可能であれば、意味を持つが、遺伝的アルゴリズムの適用は、3部材以上の欠損部材がある場合で初めて意味を持つと考えられる。

しかし、汎用のプログラムとして用いる場合は、1部材欠損、2部材欠損の場合を含めて考えなければならぬので、本研究では次のような規則を採用する。

- 1) N ビットの文字列でトラスを表す。
- 2) 部材数以上(二倍程度)の文字列を生成する。
- 3) エリート保存戦略をとる。
- 4) 選択においては、ルーレットルールを用いる。
- 5) 目的関数として、観測値と計算値との残差の二乗和を用いる。
- 6) 適応度の計算においては、指数関数を用いる。

2)では、初期文字列集団として、1部材欠損を表す文字列と健全構造を表す文字列を生成する。これによって、1部材欠損の場合を、考えられる構造の数より多い計算回数が必要ではあるものの、同定できる。また、2部材以上が欠損した複数部材欠損構造は、すべて1部材欠損構造間の交叉や突然変異によって生成できる。3)のエリート保存戦略は、適応度がもっとも高い構造を次の世代に残す。5)本問題は、観測値と計算値との誤差の二乗和、すなわち、全観測変位数を K 、観測変位を $u_{(obs,k)}$ 、変位観測点に相当する点での変位の計算値を $u_{(calc,k)}$ で表して、

$$R = \sum_{k=1}^K \{u_{(obs,k)} - u_{(calc,k)}\}^2 \quad (4)$$

を目的関数としている。本問題では、この目的関数が零になるときの文字列が解であるため、目的関数そのものを適応度関数として用いることができない。そこで、指数関数 $f=e^{-R}$ を適応度関数として用いる。すなわち、適応度が1になる場合が解になっている。

実際の交叉においては、Sortingの後、文字列集団を三つに分割する。第1のグループは、次の世代へそのまま残す。第2のグループの中から選択された文字列を親として交叉を行う。第3のグループに対しては、各文字列でランダムに1部材を選んで欠損させる。また、常に、健全構造を表す文字列を入れておく。

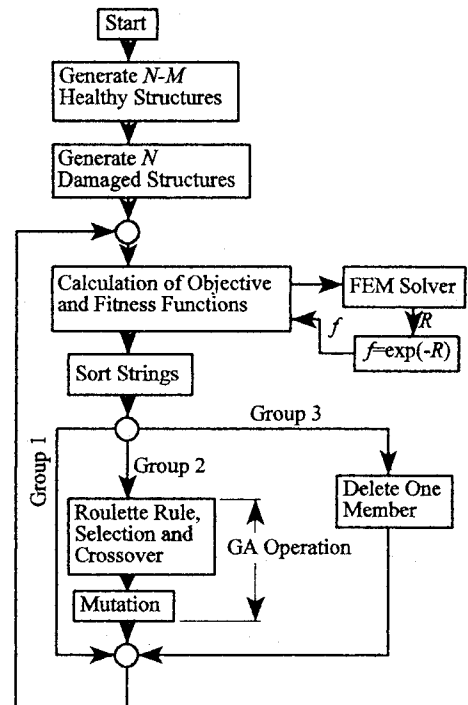


図4 同定プロセス

N 部材トラスに対して、 $M(>N)$ 個の文字列を生成して欠損部材を同定する場合の流れを図4に示す。

4.数値計算例

数値計算例として、図5に示す25節点72部材平面不静定トラス構造を考える。図6に、部材番号を示す。

数値計算では、観測点の数の欠損部材同定への影響を考慮するため、次の二つの場合について考える。

CASE A:全節点を変位観測点とする。

CASE B:載荷点のみを変位観測点とする。

以下に、2部材欠損と3部材欠損の場合についてそれぞれ述べる。ただし、以下の例では、一世代あたりの文字列数は150であり、1,000世代を上限としている。

4.1 2部材欠損

72部材のうち、2部材が欠損した場合の例題として、図7に示す部材51と55とが欠損した状況を考える。10回の試行結果を表1に示す。表の数値は、正しく同定されるまでの世代数である。

この表から、10回の試行において欠損部材の同定に必要とされた世代数の平均は、CASE Aで75世代、CASE Bで175世代であった。ただ、CASE Bでは、8回目の試行において、970世代を要しており、これが平均を極端に上げているため、これを除いて平均すると、86世代である。

4.2 3部材欠損

3部材欠損の例として、図8に示すような、部材39,42および53が欠損した状況を考える。同定条件などは、2部材欠損の場合と同じである。結果

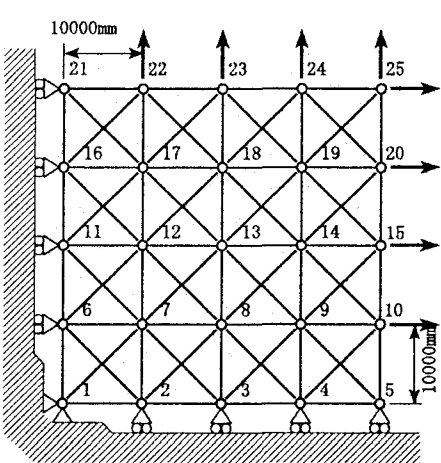


図5 25節点72部材平面不静定トラス

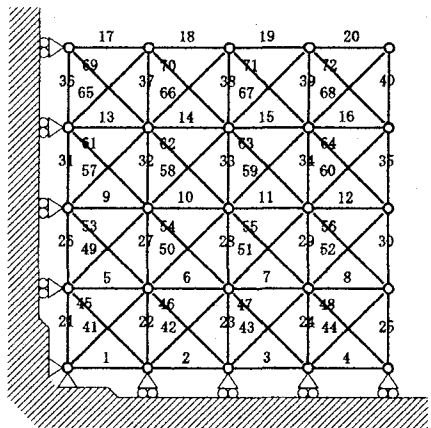


図6 平面不静定トラスの部材番号

表1 2部材欠損の結果(部材#51 and 55)

Trial #	CASE A	CASE B
1	46	52
2	114	50
3	91	162
4	210	214
5	44	45
6	54	21
7	15	50
8	103	970
9	28	61
10	41	119

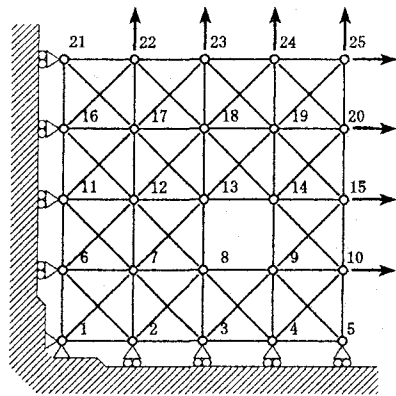


図7 2部材欠損構造(部材#51 and 55)

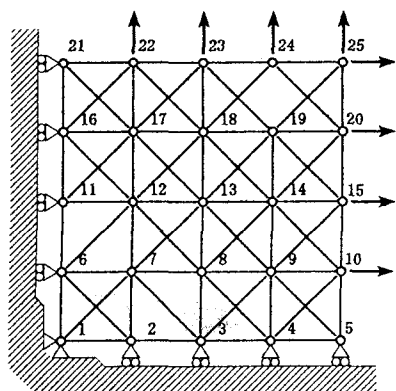


図8 3部材欠損構造(部材#39,42 and 53)

表2 3部材欠損の結果(部材#39,42 and 53)

Trial #	CASE A	CASE B
1	127	(39,41,45)
2	21	241
3	58	(39,41,45)
4	77	45
5	63	(39,49,53)
6	35	(39,41,45)
7	177	70
8	84	(39,46,50)
9	296	56
10	211	53

を表2に示す。表2で、三つの数値を()で

括弧して示してあるのは、いずれも1,000世代を越えて同定に失敗した場合であり、()内の数値は1,000世代終了時に欠損部材として表示された部材番号である。

表2から、CASE Aの場合、すべての試行において欠損部材は同定されており、10回の試行における平均世代数は115世代である。一方、CASE Bでは、10回の試行のうち、5回しか正しく同定されていないことがわかる。

5. まとめ

ここで示した数値計算例において、2部材欠損の場合、CASE AおよびCASE Bのいずれも欠損部材の同定がなされた。一方、3部材欠損の場合、CASE Aの場合のみ欠損部材の同定がなされた。

2部材欠損の場合、平均世代数は、CASE AおよびCASE Bで、それぞれ、75世代および86世代であった。いま考えているトラス構造物は72部材であるから、考えられる部材欠損の組み合わせは、たかだか、 $72 \times 71 = 5,112$ 通りである。一方、CASE AおよびCASE Bそれぞれの平均世代数と生成文字列数との積は、11,250および12,900である。このことから、2部材欠損の場合、遺伝的アルゴリズムによる同定は、考えられる部材欠損の場合をすべて計算するよりも、計算コストがかかることを示している。

3部材欠損の場合、CASE Bの場合を考えなければ、3部材欠損の全組合せ数 $72 \times 71 \times 70 = 357,840$ に対して、平均17,250回の構造解析でよいことになり、約1/20の計算コストでよいことになる。

謝辞

本研究は、平成7年度文部省科学研究費(一般研究(C))による研究の一部として遂行されたものであり、ここに謝意を表するものである。また、本研究をまとめるにあたり協力をいただいた大阪府立大学大学院 長澤知美氏に謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 田中・中村・落合、機論A, 59-564, pp.1868-1872 (1993)
- 2) 中村・田中・落合、機論A, 59-567, pp.2569-2574 (1993)
- 3) 矢川・吉村・大石、機論A, 59-559, pp.526-534 (1993)
- 4) 大石・山田・吉村・矢川、機論A, 60-569, pp.264-271 (1994)
- 5) 古口・渡部・矢田、機論A, 60-572, pp.1029-1034 (1994)
- 6) 中村・田中、機論A, 60-574, pp.1430-1436 (1994)
- 7) 古口・渡部、機論A, 60-580, pp.2863-2870 (1994)
- 8) 石田・村瀬・小山・杉山、機論A, 60-580, pp.2863-2870 (1994)
- 9) Ricles, J.M. and Kosmatka, J.B., AIAA J., Vol.30, No.9, pp.2310-2316 (1992)
- 10) Kabe, A.M., AIAA J., Vol.23, No.9, pp.1431-1436 (1985)
- 11) Kabe, A.M., SAE Transactions, pp.6.825-837 (1986)
- 12) Smith, S.W., Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Inst. and State Univ. (1988)