

建築物被害査定のエクスパート・システム

石塚 満

(東京大学・生産技術研究所)

1. まえがき

本稿は地震振動を受けた建築物を主対象とするルール化した知識に基づく被害査定システムを記しているが、これは日本の実状でなくアメリカの土木・構造工学分野の実状に即して設計されたものであることを最初に明記しておく。

構造物被害査定の役割と技術の現状は Yao によって紹介されている¹⁾。例えば、強い地震振動の後、部分的崩壊が起きたような少数の構造物を同定することは容易であるが、他の多くの構造物の被害程度を正しく把握し、修理の必要性、その方法を正しく判定することは容易ではない。被害査定は経験を積んだ少数の専門家によって行われていたのが現状である。今日までに構造物被害査定の幾つかの手法が提案され、また関連研究として構造物の災害に対する耐性評価に関する幾つかの方法が開発されてきた²⁾⁻⁵⁾。しかし、被害査定への合理的かつシステムティックな方法は確立されておらず¹⁾。

Fu と Yao は1979年にこの問題はパターン認識の理論により扱えることを示唆した⁶⁾。しかし対象となる建築物の条件は多種多様であるので、1980年より被害査定システムは専門家の知識を集積し、推論により回答を導くエキスパート・システムを枠組として構成されることになった。

システム構築の基礎理論として、不確実性 (uncertainty) とあいまい性 (impreciseness or fuzziness) を伴う知識を利用する場合の合理的な推論法が開発された⁷⁾⁻¹¹⁾。ここではそのような知識を含む知識ベースをもつ建築物被害査定のエキスパート・システム SPERIL (Structural PERIL)¹²⁾¹³⁾ の1版の概略を、その推論理論と共に示す。SPERIL は言語Cで書かれ、UNIX のOS上で動作している。

2. エクスパート・システムによる接近

人間の専門家のもつ知識の効率的利用は人工知能手法を活用し複雑な実社会の問題の解決を目指すエキスパート・システムの中心課題である。エキスパート・システムの構築に関する研究分野は知識工学と名付けられた¹⁴⁾。エキスパート・システムは基本的に i) 知識ベースと ii) 推論機構とから成る。

複雑な判定問題においては、関連する知識を多数の小知識の集まりとして表すのが効率的となる。Problem Reduction 法¹⁵⁾¹⁶⁾は問題を幾つかの部分問題へ分割するガイドラインを与える。部分問題は更に簡単な部分問題へと分割される。従って、問題は階層的に記述される。

プログラミング・システム¹⁷⁾¹⁸⁾は下位の部分ゴールと観察された証拠から、上位の部分ゴールあるいは最終ゴールを推論するのに使われる小知識を表現するのに都合の良い方法を与える。

プログラミング・システムの基本形は記号処理であるが、現実社会の判定問題では、状況は真偽の2値で表わされるように明確でないことが多い。そこには二種の不確実性が存在する。オーは観察された証拠に付随する不確実性であり、オニは表明された知識に付随する不確実性である。故にこの不確実さを効果的に扱える推論機構が必要となる。

不確実さを伴う判定問題においては、部分問題間のAND/OR関係に加えて、文献⁹⁾で COMB と表わされている結合関係も重要となる。結合関係とはゴールが二つ以上の証拠により、独立に支持されるような部分問題への分割を指す。これにより、問題は例えば図1のように AND/OR/COMB木により記述できることとなる。

AND、OR関係に対する推論は容易であり、それぞれある確実性測度上で min, max 演算を採用できる。従って、COMB関係に対する合理的な推論法を、確実性測度の定義

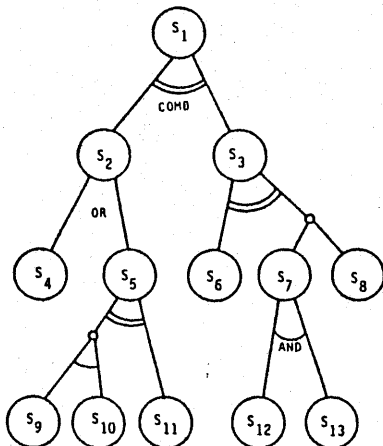


図1. 不確実性を伴う問題に対する AND/OR/COMB 木

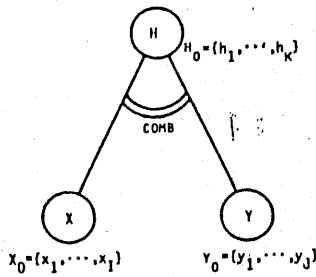


図2. 異なる証拠の結合による推論

では、この目的のために直観的な結合関数が用いられた⁽¹⁷⁾⁽²⁰⁾。Duda, Hart, Nilsson は主観的 Bayes 確率を確実性測度として用いる場合に対する結合による推論法を示している⁽²¹⁾。Bayes 確率とこの変形に対する結合関数は筆者等によって示されて⁽⁸⁾⁽⁹⁾。これらに対し、筆者等⁽⁹⁾⁽¹¹⁾、その他⁽²²⁾⁻⁽²⁴⁾により不確実性を伴う推論に

かける Dempster & Shafer 理論⁽²⁵⁾⁽²⁶⁾の重要性が認識された。Dempster & Shafer 理論は主観にかかると不確実性の理論的な扱いを可能とする。統計的な推論法ではしばしば証拠間の独立性等の理想化された仮定が課せられるが、そのような仮定の成立が疑わしいときには、代替策としてファジィ論理を基礎とする推論法が効果的となる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

と共に定めることが必要となる。

あるゴール状態あるならば仮説 H に対してこの独立な証拠状態 X と Y が得られたらという図2の基本状況を考えよう。ここで知識ベースに次のルールをもたせようとする。

Rule 1

IF: X is X_1
 THEN: H is H_{x1} with C_{x1}
 ELSE IF: X is X_2
 THEN: H is H_{x2} with C_{x2}
 ...
 ELSE: H is H_0

Rule 2

IF: Y is Y_1
 THEN: H is H_{y1} with C_{y1}
 ELSE IF: Y is Y_2
 THEN: H is H_{y2} with C_{y2}
 ...
 ELSE: H is H_0

ここで $X_1, X_2, Y_1, Y_2, H_{x1}, H_{x2}, H_{y1}, H_{y2}$ は有限な全集合 X_0, Y_0, H_0 のそれぞれ部分集合、 $C_{x1}, C_{x2}, C_{y1}, C_{y2}$ は確実性測度(とりあえず $0 \sim 1$ の値)を表わして示すとする。課題は11かにしてゴールあるならば仮説状態の確実性測度を推論するかということとなる。

代表的な医療診断システムである MYCIN

3. Dempster & Shafer 理論とそのファジィ集合への拡張

1967年、Dempster は Bayes 確率に適さぬ主観的不確実性を扱うために、下界および上界確率 (lower and upper probs.) と名付けた有用な概念を提示した⁽²⁵⁾。Shafer はこの Dempster 理論を洗練させた⁽²⁶⁾。

Dempster & Shafer 理論の基本確率 $m(A_i)$ は、部分集合 A_i にとり定められて⁽¹⁾いるが、 A_i 内の各素に自由に動ける非可動確率質量として想像し得る。下界確率はこの基本確率を用いて、

$$P_*(A_1) = \sum_{A_i \in A_1} m(A_i), \quad (1)$$

と定義される。即ち、部分集合 A_i 内にとり定められた基本確率の和である。

m_1 と m_2 を独立な証拠により推論されたある仮説状態に関する基本確率量とすると、Dempster の結合規則はこれらの次式による結合により新たな基本確率を与えらるとして示す。

$$m(A_k) = \frac{\sum_{A_{11} \cap A_{2j} = A_k} m_1(A_{11}) m_2(A_{2j})}{1 - \sum_{A_{11} \cap A_{2j} = \phi} m_1(A_{11}) m_2(A_{2j})} \quad (A_k \neq \phi) \quad (2)$$

Dempster & Shafer 理論の I/F スパートシステムの推論への適用は容易であり、-7の推論手順は以下のようである。まず Rule 1 に対して各前提の下界確率 $P_*(X_i)$ ($i=1, 2, \dots$) を計算し、次にこれに確実性尺度 C_{X_i} を掛け、この量を次のように結論部を示された集合 H_{X_i} の基本確率として割り付ける。

$$m(H_{X_i}) = P_*(X_i) C_{X_i} \quad (3)$$

同様に、Rule 2 と証拠状態 γ から $m(H_{\gamma_i})$ を推論する。この H に関する確率量の割り付けを (2) 式により統合する。

不確実性に加え、知識を明確規定の集合 (crisp sets) で表現するよりもファジィ集合で表した方が適当なことがある。例えば SPERIL で用いられている slight, moderate, severe なる表現は、十分に規定されてはいないが、専門家にとりては意味をなす表現である。故に、この種の知識を活用するため、Dempster & Shafer 理論をこの本質を失なうことなくファジィ集合へ拡張する⁹⁾¹⁰⁾。

全集 A_0 内のファジィ部分集合 A_1 が他のファジィ部分集合 A_2 に含まれる程度を次のように定義する。

$$I(A_1 \subseteq A_2) = \min_a \{1, 1 - \mu_{A_1}(a) + \mu_{A_2}(a)\} / \max_a \{\mu_{A_1}(a)\} \quad (4)$$

ここで $\mu_{A_1}(a)$, $\mu_{A_2}(a)$ はそれぞれ A_1 , A_2 のメンバーシップ関数である。ファジィ集合 A_1 と A_2 が共通部分をもつ程度を次のように定義する。

$$J(A_1, A_2) = \frac{\max_a \{\mu_{A_1 \cap A_2}(a)\}}{\min\{\max_a \{\mu_{A_1}(a)\}, \max_a \{\mu_{A_2}(a)\}\}} \quad (5)$$

$$\mu_{A_1 \cap A_2} = \min\{\mu_{A_1}(a), \mu_{A_2}(a)\} \quad (6)$$

ファジィ集合 A_1 と A_2 の共通部分が ϕ (空集合) である程度を $1 - J(A_1, A_2)$ で定義する。

以上の定義により、(1) 式、(2) 式はそれぞれ

次のように一般化される。

$$P_*(A_1) = \sum_{A_j} I(A_j, A_1) m(A_j) \quad (7)$$

$$I(A_k) = \frac{\sum_{A_{11} \cap A_{2j} = A_k} J(A_{11}, A_{2j}) m_1(A_{11}) m_2(A_{2j})}{\sum_{A_{11}, A_{2j}} \{1 - J(A_{11}, A_{2j})\} m_1(A_{11}) m_2(A_{2j})} \quad (8)$$

従って、これにより、不確実性と不明確性を伴う一つの合理的な推論法が与えられた。

4. SPERIL システム

SPERIL は特に地震振動を受けた建築物を対象とする被害査定 of I/F スパートシステムである。そのオリジナルの詳細は文献¹²⁾に記載されており、ここではその概要を述べる。知識ベースに書かれていた専門知識は、構造物被害モデル研究の第一人者である Purdue 大学工本工学科 J. T. P. Yao 教授から主として得られたものであり、構造物地震応答シミュレーションの第一人者である Illinois 大学工本工学科 M. A. Sozen 教授からのデータと意見を一部参考にして得られている。

本被害判定に役立つ主要な情報源は i) 建築物各所の目視による検査²⁷⁾²⁸⁾ と ii) 地震期間中に得られた建築物に設置された地震計記録の解析²⁹⁾ である。これらのデータの解析は建築物の構造材料、高さ、設計等の個々の条件により大きく影響される。小知識は図 3 の枠組に基づいて集積されており、所定のルール形式で書かれていた。

ルールの形式は表 1 に例示されているように、人間及びコンピュータが共に容易に解釈できるように設計されている。ファジィ等級をもつ知識を表現するために、次のファジィ部分集合表現が許されている。

no, slig(slight), mode(moderate),
seve(severe), dest(destructive),
uk(unknown--全集)

これらのメンバーシップ関数は図 4 のように与えられている。ルールの機能としては、7007 システムの基本機能、即ち「もし前提が

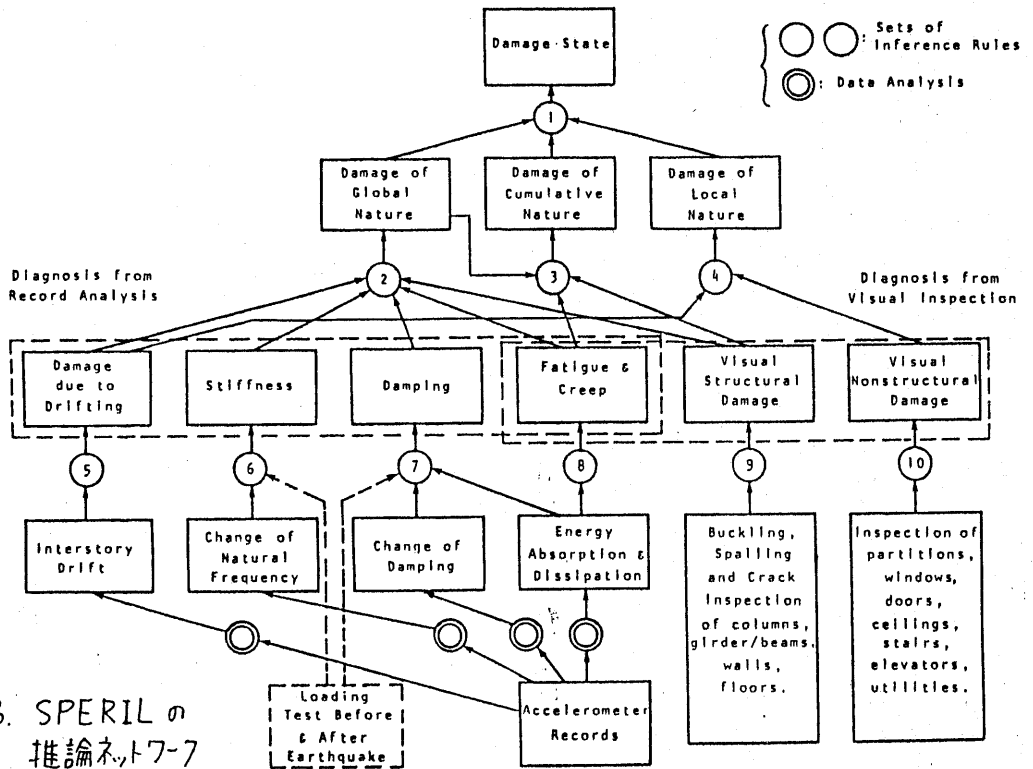


図3. SPERILの推論ネットワーク

満たされていなければ、結論部の動作を実行する”が強調されている。動作はこの場合、部分ゴールに対応するSTMと結びつけたメモリの更新である。

STMはプロダクション・システムで言うグローバル・データベース中のデータに相当し、ここでは推論のための作業メモリとして働き、入力データ又は推論されたデータが蓄えられる。SPERIL第1版ではSTMは内容により次の4種に分類されている。

- Type 1 フェジ等級の確率性測度
- Type 2 言語データ
- Type 3 数値データ
- Type 4 yes-no データ

STMがアクセスされると、この種別が参照され、ルール文の適切な翻訳へと進む。

推論ネットワークの深さは特に深くはないので、効率的な探索は特に配慮されていない。図3の節々に相当するルール集合の適用順序は一応次のように前もって定められている。

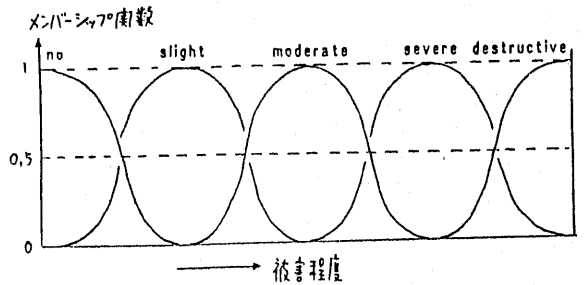


図4. SPERILのフェジ部分集合のメンバーシップ関数

“05”, “06”, “07”, “08”, “09”, “10”, “02”, “03”, “04”, “01”
 これは Bottom-Up 探索 あるいは データ駆動形探索に相当している。

推論プロセスはルールベース内の関連するルールを見出し、評価する。前提評価時にもSTMがまだ書き込まれていないことが命令と、データを取得するために質問が寄せられる。質問文は質問ファイルを参照して寄せられる。中々らしい不必要な質問の発生を避けるため、制御フローには動作文が

表1. SPERILのルールの例

```

Rule0201
  IF:MAT is r/c
  THEN IF:ST1 is dest
    THEN:GLO dest 0.6
  ELSE IF:ST1 is seve
    THEN:GLO seve 0.6
  ELSE IF:ST1 is mode
    THEN:GLO mode 0.6
  ELSE IF:ST1 is slig
    THEN:GLO slig 0.6
  ELSE IF:ST1 is no
    THEN:GLO no 0.6
  ELSE:GLO uk

Rule0501
  IF:MAT is r/c
  THEN IF:ISD <= -8.9
    THEN:DRI uk 1
  ELSE IF:ISD <= 0.4
    THEN:DRI no 0.9
  ELSE IF:ISD <= 0.8
    THEN:DRI slig 0.9
  ELSE IF:ISD <= 1.3
    THEN:DRI mode 0.9
  ELSE IF:ISD <= 2.0
    THEN:DRI seve 0.9
  ELSE IF:ISD > 2.0
    THEN:DRI dest 0.9
  ELSE:DRI uk

Rule0901
  IF:MAT is steel
  THEN IF:S01 is yes (partial collaps)
    THEN:VST dest 1
  ELSE IF:S02 is yes (buckling of column)
    THEN:VST dest 0.5
    and:VST seve 0.5
  ELSE IF:S03 is yes (buckling of girder/beam)
    or:S04 is yes (buckling of diagonal bracing)
    or:S05 is yes (deformation or loosing of joint)
    THEN:VST seve 0.9
  ELSE IF:S06 is yes (spalling/crack on shear wall)
    THEN:VST mode 0.8
  ELSE IF:S07 is yes (spalling/crack on exterior/interior wall)
    or:S03 is yes (spalling/crack on floor)
    THEN:VST mode 0.5
    and:VST slig 0.5
  ELSE IF:S01 is no
    and:S02 is no
    and:S03 is no
    and:S04 is no
    and:S05 is no
    and:S06 is no
    and:S07 is no
    and:S08 is no
    THEN:VST no 1
  ELSE:VST uk
  
```

Abbreviatins

dest	destructive
seve	severe
mode	moderate
slig	slight
no	no
uk	unknown

r/c reinforced concrete

GLO	damage of global nature
DRI	damage due to drifting
ST1	damage of stiffness
VST	visual damage of structural member
MAT	material of structure
ISD	interstory drift
S01	check items of visual structural damage for steel
S08	

起動される可能性がない場合に対してスキップ経路が設けられている。これらによって推論のための必要最小限の質問が発せられる。

1 ルールの処理後、結果は指定されたSTMの更新に使用される。Type 1 a STMに対しては、独立な証拠からの推論として、更新は拡張された Dempster & Shafer 理論によって実行される。最終判定は被害状態に対応する最終ゴールにおけるファジィ部分集合の下界確率に基づいてなされる。どのファジィ部分集合も所定の閾値(0.2)以上の下界確率が得られなかった場合には「適切な回答なし」が選択される。従って、回答は次のどなかとなる。

- 1) no damaged,
- 2) slight damage,
- 3) moderate damage,
- 4) severe damage,
- 5) destructive damage,
- 6) no appropriate answer.

5. まとめ

建築物被害査定のエクスパート・システム SPERIL オール版の推論理論と構成の概要を示した。パターン認識による認識率のような性能評価は、系統下、事例が不足しているため得られなかったが、専門家である J. T. P. Yao 教授からは彼の判断と矛盾しないとの評価を得ている。(事例不足の内題故に、パターン認識的接近が困難であり、専門家の知識に頼るエクスパート・システムの方法が採用されたことを想起された。) 同時に、現在のルールをより特定の条件の対象に対する、より詳細なルールに置き換えていく努力も必要であることが指摘されている。専門家からのシステムティックな知識の獲得法は残された課題の一つである。

謝辞 Purdue 大学 James T. P. Yao
 教授 (School of Civil Eng.) K.S. Fu
 教授 (School of Electrical Eng.) の御
 援助に感謝します。また東大尾上守夫教
 授, 安田靖彦教授, 阪大田中幸吉教授が
 とも御支援に力を注いだことに記し感謝し
 ます。

文献

- 1) J.T.P. Yao, "Damage Assessment and Reliability Evaluation of Existing Structures," J. of Eng. Struct., Vol.1, pp.245-251, Oct. 1979
- 2) C.G. Culver et al., "Natural Hazard Evaluation of Existing Buildings," NBS Building Sci. Series 61, Jan. 1975
- 3) R.V. Whitman et al., "Seismic Resistance of Existing Buildings," J. of Struct. Div., ASCE, Vol.106, pp.1573-1592, July 1980
- 4) B. Bresler et al., "Practical Evaluation of Structural Reliability," ASCE Conv. & Exp., Reprint80-596, Oct. 1980
- 5) G.C. Pardo et al., "Damage Assessment of Imperial Service Bldg.," ditto, Reprint80-680
- 6) K.S. Fu, J.T.P. Yao, "Pattern Recognition and Damage Assessment," ASCE EMD Specialty Conf. at Austin TX, Sept. 1979
- 7) M. Ishizuka, K.S. Fu, J.T.P. Yao, "Inference Method for Damage Assessment of Existing Structures," Purdue Univ., Civil Eng., CE-STR-80-17, Oct. 1980
- 8) —, —, —, "Inexact Inference for Rule-based Damage Assessment of Existing Structures," IJCAI at Vancouver, Aug. 1981
- 9) —, —, —, "Inference Procedure with Uncertainty for Problem Reduction Method," Purdue Univ., Civil Eng., CE-STR-81-24, Elec. Eng., TR-EE 81-33, Aug. 1981, also submitted to IEEE Trans. PAMI
- 10) —, —, —, "A Rule-Inference Method for Damage Assessment," ASCE Conv. at St. Louis, Preprint 81-502, Oct. 1981
- 11) —, —, —, "A Rule-based Inference with Fuzzy Set for Structural Damage Assessment," to appear in M.M. Gupta and E. Sanchez ed., Fuzzy Information and Decision Processes, North Holland Pub. Co., 1982
- 12) —, —, —, "SPERIL-1: Computer-based Structural Damage Assessment System," Purdue Univ., Civil Eng., CE-STR-81-36, Nov. 1981
- 13) —, —, —, "SPERIL: An Expert System for Damage Assessment of Existing Structures," submitted to ICPR at Munich, Oct 1982
- 14) E.A. Feigenbaum, "The Art of Artificial Intelligence: Theme and Case Studies of Knowledge Engineering," IJCAI, 1977
- 15) N.J. Nilsson, Problem-Solving Method In Artificial Intelligence, McGraw-Hill, 1971
- 16) —, Principles of Artificial Intelligence, Tioga Pub. Co., Palo Alto, 1980
- 17) D.A. Waterman, F. Hayes-Roth, "An Overview of Pattern-Directed Inference Systems," in the same authors ed., Pattern-Directed Inference Systems, Academic Press, 1978
- 18) R. Davis et al., "Production Rules as a Representation for a Knowledge-based Consultation Program, Artificial Intelligence 8, North Holland Pub. Co., 1977
- 19) E.H. Shortliffe, B.G. Buchanan, "A Model of Inexact Reasoning in Medicine," Math. Biosci., Vol.23, pp.351-379, 1975
- 20) E.H. Shortliffe, Computer-based Medical Consultation: MYCIN, American Elsevier, 1976
- 21) R.O. Duda, P. Hart, N.J. Nilsson, "Subjective Bayesian Methods for Rule-based Inference Systems," NCC, 1976
- 22) J.A. Barnett, "Computational Methods for A Mathematical Theory of Evidence," IJCAI, 1981
- 23) L. Friedman, "Extended Plausible Inference," ibid.
- 24) T.D. Garvey et al., "An Inference Technique for Integrating Knowledge from Desparate Sources," ibid.
- 25) A.P. Dempster, "Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping," Annals of Math. Statistics, Vol.38, pp.325-339, 1967
- 26) G. Shafer, A Mathematical Theory of Evidence, Princeton Univ. Press, 1976
- 27) D.J. Dowrick, Earthquake Resistant Design, John Wiley & Sons, 1977
- 28) 又田俊彦 (編著): 地震と建築; 鹿島出版, 1974
- 29) G.C. Hart, J.T.P. Yao, "System Identification in Structural Dynamics," J. of Eng. Mech. Div., ASCE, Vol.103, pp.1089-1104, 1977