新旧制御盤比較におけるタスク評価への FLIA の応用*

(第 2 報, クラスタ分析によるタスクの区分け)

佐野典秀^{*1}, 高橋亮 —^{*2}

Application of FLIA to the Evaluation of Newly Incorporated Control Panel (2nd Report, Determination of Balance of Manipulated/Automated Phase by Cluster Analysis)

Norihide SANO and Ryoichi TAKAHASHI

Human reliability in a complex system has been studied to establish safety systems by analyzing the operator's performance in a control room of a nuclear power plant. In this paper, results of a mathematical model and a questionnaire given to plant designers and operators led to the proposal of a fuzzy tool for evaluating the quality of recent automated control systems. The first report described a method which is capable of calculating human performance by summing the weighted utility of attributes. The modified fuzzy measures learning identification algorithm (FLIA) reduces a set of attributes until human tasks are represented clearly. A change in the performance is illustrated on a two-dimensional map of the dominant attributes as a function of the automated level. The designers and the operators determined the balance of the manipulated/automated phase on the map after careful individual interviews. In the present paper, we attempt to interpret the boundary with a cluster analysis theory, where the Euclidian square distance and the nearest neighbor method are applied. The evaluated aspect of the boundary on the map can be divided into the manipulated/automated phase. It is shown that the calculated boundary is equal to the vertical bisector between the center of gravity of the clusters. The analytical boundary agrees precisely with the questionnaire result.

Key Words: Reliability Engineering, Fuzzy Set Theory, Safety Engineering, Human Reliability, Human Factor, FLIA, Fuzzy Integrals, Cluster Analysis

1. 緒 言

原子力発電プラントや航空機においては常に高い信頼性および安全性の確保が求められている。アメリカスリーマイルアイランド原子力発電所事故後、人間の過誤を原因とする事故防止の観点から、システムにおけるヒューマンファクタに関する議論がなされてきた。その結果、重要なプラントパラメータの表示改善および中央制御室レイアウトに関する人間工学的改善、計測技術の導入をはじめとするさまざまな対策がなされ効果をあげている。一方、システムの複雑化につれて原子力発電所の中央制御室や航空機のコックピット等の評価において、従来の設計者の立場から見た評価に、加えてその機械を操作・運転する立場の人間から見た人間-機械系の評価を考慮し、両者の意見を統合してシステム全体の設計の検討を行うことの重要性が以前にもまして出てきた。システムが複雑になる

につれて設計者が実際に自らの設計したシステムを運転する機会は、減少し、一方、運転員のもつ貴重な運転の経験は主観的な言語的表現とならざるを得ないためにその伝達が難しく、運転員の語った表現が正確に設計者に伝わりにくくなりつつある。

新しい技術をシステムに導入するに際して、設計者の意図するシステムに対する考えと、実際にシステムを操作していく運転員の考えとの間に微妙なニュアンスの違いがあっては、人間の信頼性の向上は難しい。両者の円滑な意見の交換は非常に重要である。

前報¹⁾では運転員と設計者の両者に対して新型旧型制御盤の比較を行う評価を言語的表現(hedge+primitive term)⁽²⁾を回答の主体としたアンケート調査により行い、結果をファジィ測度を用いて、測度の同定を試みた。ファジィ測度を同定する手法として、FLIA(Fuzzy measure Learning Identification Algorithm)⁽³⁾を利用した。

さらに、同定された測度から属性間の重複関係を知り、他の属性と大きく重なる属性は削除していく改良型 FLIA を提案した。この改良型 FLIA によって属性を二つまで絞り込み、この二つの属性を軸とした平面

* 原稿受付 1995 年 7 月 18 日。

^{*1} 正員、静岡学園短期大学 (〒426 藤枝市駿河台 4-1-1)。

^{*2} 正員、東京工業大学工学部 (〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1)。

図(マップ)上にシステムの評価を布置した。このマップにより自らの行った評価が可視化され、運転員・設計者は自動/手動の抽象的な判断が客観的に表示できるようになった。

本報では評価されたタスクをクラスタ分析により分類した。さらにこの分類を基にマップ上で、おのおののクラスタの重心を求め、重心間を結んだ線分の垂直二等分線を引き、これを数理解析的に求めた境界線とした。運転員・設計者が自ら引いた、前報の自動/手動の境界線と本報で求めた数理解析的な境界線の比較を行った。両者はおおむね一致した。

2. 問題の設定

本研究の評価対象は、原子力発電プラントの中央制御室におけるタスクである。これらは、運転員が制御盤を通して行う原子炉の起動および停止作業の中で重要と考えられている 10 種の作業である。新型と旧型の制御盤のそれぞれに対して運転員と設計者が自動化に関する評価を行った。つまり、旧型制御盤から新型への移行は自動化の範囲に広がりを含み、運転員と設計者のそれぞれがこの現在の自動化の方向にどのような意識をもっているかを考察した。

2.1 評価対象 原子力発電プラントの起動/停止作業中において、緊急スクラムに直接結びつく可能性が高いために、特に緊張し心理的にストレスを感じ、高度に熟練した技術を必要とするために運転員が特に注意を払う一連の作業として、制御棒挿入と IRM レンジ切り替え、タービン同期接続を、評価するタスク

として取上げそれぞれのタスクを、新旧型の制御盤によって行った場合を比較した。また異常時の緊急対応における新旧制御盤の評価も同時に比較するために、制御棒挿入と IRM レンジ切り替えの作業については、異常発生時におけるものと通常時の対応を評価タスクとした。表 1 に評価対象とした合計 10 個のタスクを示す。

2.2 アンケート対象者 評価対象として原子力発電プラントの中央制御室における制御盤を通して行う作業を取上げ、その作業を新型旧型制御盤を利用して行った場合それぞれについての比較評価を行った。その際、評価を行うアンケート対象者としては、十数年にわたって原子力発電プラントの運転に従事してきたベテラン運転員 3 名と同じく十数年にわたって原子力発電プラントメーカーにおいて設計に携わってきた設計者 3 名を選んだ。

3. 解析方法

システムの信頼性を評価するには、専門家の豊富な経験に基づく判断が重要となる。この際、経験を基にした評価は、不良設定な問題なので数式による表現が困難である。一方、実験心理学の分野では経験を基にした判断は、数値的な表現よりもむしろ言語的表現によるほうが一貫した回答が得られる⁽⁴⁾ことが知られている。そこで、言語的表現(hedge+premitive term)を使って微妙な表現を可能にしたアンケート調査を行い、解析する段階で、hedge+premitive term をファジィ集合に変換した。

専門家の評価を数値的に表現し計算する手法として SLIM MAUD⁽⁵⁾があるが、この手法では、専門家の言語的表記による評価の特徴である優加法性(amplificative)・劣加法性(offset)の取扱いが容易でない。ファジィ測度を導入して人間の行う評価が、完全加法的(complete additive)ではない場合に対処した。

本研究は、次の手順に従って解析を行った。

(1) 運転員・設計者の意見をもとに評価構造を言語的属性を使用して仮定する。この段階では、考えられるすべての属性 x_i を挙げ詳述する($x_1 \sim x_n$)。

(2) タスクごとに全属性の観点から運転員・設計者がそれぞれ詳細な評価 $h(x_i)$ を行う。さらにタスクごとに包括的評価 Z を合せて行う。この評価は、すべての言語的表現(hedge+premitive term)を用いる。

(3) hedge+premitive term の評価を数量化する。ファジィ積分により総合評価 Z_c を計算し、包括的評価 Z との差を最小にする測度 $g(K_i)$ を求める。測度の

Table 1 Tasks

Conventional panel	
no.1) insertion of control rods	
normal power-decreasing stage	
no.3) switching Intermediate Range	
Monitor on power-decreasing stage	
no.5) synchronizing turbine with	
generator on start up stage	
no.7) insertion of control rods on non-	
fatal decreasing of reactor water level	
no.9) switching Intermediate Range Monitor	
on failure in water level controller	
Newly incorporated panel	
no.2) insertion of control rods	
normal power-decreasing stage	
no.4) switching Intermediate Range	
Monitor on power-decreasing stage	
no.6) synchronizing turbine with	
generator on start up stage	
no.8) insertion of control rods on non-	
fatal decreasing of reactor water level	
no.10) switching Intermediate Range Monitor	
on failure in water level controller	

重複度から、他の属性と大きく重なり合う属性 x_k を削除する。残りの属性群 $\{x_1, x_2, \dots, x_{k-1}, x_{k+1}, \dots, x_n\}$ から総合評価 Z_c を計算し、再び包括的評価 Z との差を最小にする測度 $g(K_i)$ を求める。最も重複度の高い属性を削除する。この作業を属性が二つ (x_i, x_m) になるまで反復的に行う。

(4) 二つの代表重要属性 x_i, x_m を軸にした二次元マップ $h(x_i) \times h(x_m)$ 上に包括的評価を布置する。

(5) このマップを運転員・設計者に示し、個々に対する面接調査を通して、それぞれのタスクの布置された評価結果を実際に示しながら、どのタスクは機械によって自動化した作業が可能であり、どのタスクは運転員の手動による作業とすべきかを表した境界線を運転員・設計者自身の手によって描かせる。

一方、(2)のアンケート調査の結果から

(3)' 類似度(距離)を求める。ここでは、ユークリッド平方距離を類似度として使用した。

(4)' この距離から最短距離法によってクラスタの統合を次々に行い、その過程をデンドログラムに描く。

(5)' デンドログラムを利用して二つのクラスタに分類する。

(6)' 分類されたタスクの配置を基におのおののクラスタの重心を求める。次に重心を線分で結ぶ。この線分の垂直二等分線を描き、これを、数理解的に求めた境界線とする。この境界線と(5)の運転員・設計者自身の引いた境界線とを比較する。

3.1 アンケート調査 前述の10個のタスク(表1)を評価するために、あらかじめ運転員・設計者の意見を求め、22個の言語的属性を使った評価構造を仮定として得た。この22個の言語的属性の観点から、10個のタスクの評価ができるものとした⁽¹⁾。

アンケートとして、一つのタスクについて22の質問項目を用意し、言語的属性ごとに行う詳細な評価の回答 $h(x_i)$ は言語的表現(5 hedges $\times$ 2 primitive terms)の中から選ぶものとした。また、タスクごとの包括的評価 Z についても同様に言語的表現(15 hedges $\times$ 2 primitive terms)の中から選択するものとした。

3.2 改良型 FLIA アンケートの結果得られた回答をファジィ集合に変換し、図1に示すような改良型 FLIA に $h(x_i), Z$ として入力する。改良型 FLIA では、アンケート調査で得られた回答から、1回めの計算では22個の属性に対する評価からの計算による総合評価値 Z_c と評価者の回答の総合評価 Z の誤差を最小にする重み $g(K_i)$ を同定する。同定された $g(K_i)$ か

Fig. 1 Block diagram of modified FLIA

ら、重複度(degree of overlap)⁽³⁾を計算し、他の属性との重複の度合の最も大きい属性を消去する。残された21個の属性に対する評価から再び重みを同定し、重複度の最も大きい属性を求め消去する。このような反復を属性が2個に絞り込まれるまで繰返す。

ファジィ積分 Z_c は以下の式で定義される。

$$Z_c = \int_K h(x_i) \cdot g(\cdot) \\ = \bigvee_{i=1}^{22} [h(x_i) \wedge g(K_i)] \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

$$\begin{aligned} h(x_i) & \text{は、属性 } x_i \text{ に対する評価値,} \\ K & = \{x_1, x_2, \dots, x_{22}\} \\ h: K & \rightarrow [0, 1], \\ h(x_{ii}) & \geq h(x_{i+1}) \quad (1 \leq ii \leq 22), \\ K_i & = \{x_1, x_2, \dots, x_i\} \quad (i=1, 2, \dots, 22), \\ g: 2^K & \rightarrow [0, 1] \\ g(\emptyset) & = 0, \quad g(K) = 1, \\ A, B \in 2^K, \quad A \subseteq B & \rightarrow g(A) \leq g(B) \end{aligned}$$

3.3 二次元マップ 改良型 FLIA により絞り込まれた二つの重要属性を縦軸と横軸に取り、それぞれのタスクの二つの属性に対するアンケート調査の回答の hedge を10段階に直し、タスクごとの回答の結果を平面図(マップ)上に布置する。

3.4 境界線 描かれたマップを示しながら、運

転員・諸計者に対して、アンケート調査により得られた解析結果の説明を行い、運転員・設計者の感想を求める。マップについての同意が得られたならば、運転員・設計者自身の手によってマップ上に自動/手動の境界線を引かせる。

運転員 No. 1 は、改良型 FLIA による解析から、重要属性として、「装置の信号、情報に対する容量(no. 20)」と「装置の保守面での操作の冗長性(no. 22)」が抽出されたのでこれらを縦軸、横軸に取った。図2では、例えばタスク no. 1 に対するアンケート調査において、言語的属性 no. 20, no. 22 についてともに「わずかによい(slightly easy)」という回答の hedge が得られたことがわかる。イタリックの文字は、タスク no. 1 に対する包括的評価の hedge を表す。また、面接調査により、運転員自身の手によって自動/手動の境界線を引かせたところ運転員 No. 1 はマップを上下に2等分するかたち(上側が自動化すべき、下側が手動で残すべき領域)で境界線を引いた。

同様に、設計者 No. 1 の回答のマップを図3に示す。設計者 No. 1 は、「自己診断性(no. 7)」と「装置の機械性能の選択性(no. 14)」が重要属性として抽出されたので2軸にとり、タスク評価を平面図上に布置した。面接調査により、境界線を設計者自身の手で引かせたところ、設計者 No. 1 は右上の四角の部分を手動で行うべきところとし、残りを手動で行うべきであるとして境界線を引いた。自動で行うべき領域はさらに、優先順位をつけて(右上三角の領域1が第1に自動化すべき、左下三角の領域2が次に自動化すべきとして)自動化すべき領域を答えた。

図2, 3を比較すると、運転員 No. 1 のマップからは、旧型から新型に変化したことにより、タスクの評

価は、右上から左下に向かって移動している。これは、言語的属性 no. 20, no. 22 の視点から評価すると新型への移行は歓迎していないことを示している。これは、新型制御盤がすべての面でよい方向へ変化したわけではなく、現在の自動化を推し進めることによって生ずる可能性のあるマイナス面に対する懸念が無意識のうちに評価結果に表れたものである。そのことは、運転員 No. 1 の自由討論における証言からも読み取れた。他の運転員、設計者については、旧型から新型への変化においてタスクの評価は左下から右上に移動した。このことより、新型制御盤への移行は、おおむね受け入れられているが、ある面においては、無意識なる懸念の存在も確認された。

3.5 クラスタ分析 マップ上に布置されたタスクごとの回答を以下の手順に従ってクラスタ分析によって分類する。

(1) 回答から運転員・設計者の考えているタスク間の距離を求める。

(2) 最短距離法によってクラスタ統合を次々に行いその過程距離を縦軸に取りデンドログラム(dendrogram)に描く。

(3) デンドログラムから、二つのクラスタにタスクを分類する。

(4) 二つのクラスタ間に境界線を引く。例えば、2つのクラスタの重心を結んだ線分の垂直二等分線により分割する。

3.6 境界線 運転員・設計者が考えていたタスク間の距離をアンケート調査の結果から求めた。ここでは、距離として、次式で表される Euclid square distance を用いた。

Fig. 2 Map of evaluation by operator No. 1

Fig. 3 Map of evaluation by designer No. 1

Table 2 Distance between the tasks

Task Number	Task Number									
	no. 1	no. 2	no. 3	no. 4	no. 5	no. 6	no. 7	no. 8	no. 9	no. 10
no. 1		2.15	0.08	2.95	0.06	2.61	0.13	3.39	0.27	3.17
no. 2			2.55	0.18	2.15	0.12	2.50	0.32	2.32	0.30
no. 3				3.53	0.06	3.15	0.05	4.03	0.37	3.63
no. 4					3.03	0.14	3.50	0.10	3.04	0.40
no. 5						2.69	0.05	3.47	0.23	3.25
no. 6							3.12	0.14	2.82	0.26
no. 7								3.50	0.40	3.60
no. 8									3.50	0.40
no. 9										3.74
no. 10

Fig. 4 Dendrogram (operator No. 1)

Fig. 5 Dendrogram (designer No. 1)

Fig. 6 Boundary by cluster analysis (operator No. 1)

$$\sum_{i=1}^{22} (h_m(x_i) - h_n(x_i))^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $h_n(x_i)$ は、 n 番めのタスクの i 番めの属性に対する評価の回答の hedge を数値化したものである。ただし、 $m \neq n$ とする。

運転員 No. 1 のアンケート調査結果から求めたタスク間距離を表 2 に示す。

表 2 で求められたタスク間距離を縦軸にとり、最短距離法(nearest neighbor method)によって最も距離の近いクラスタから、次々に統合していきタスクの dendrogram を描くと図 4 が得られる。ここで、最短距離法とは、いま、 K 個のクラスタがあるとして、そのうちの p クラスタと q クラスタを統合して新しい t クラスタをつくり、それによってクラスタ数が $K-1$ 個になる段階を考えてみると、このとき新しくできた t クラスタと別の任意のクラスタ(それを r -クラスタとする)と間の類似度 s_{tr} を、統合する前の p クラスタと r クラスタ、 q クラスタと r クラスタの間の類似度 s_{pr} 、 s_{qr} を用いて

$$s_{tr} = \min(s_{pr}, s_{qr}) \dots \dots \dots (3)$$

と定義できる⁽⁶⁾。この定義を、各クラスタが一つずつの対象を含む場合から逐次適用すると、二つのクラス

タ間の類似度は、それぞれがその二つのクラスタに属する、もっとも類似度の高い(距離の短い)対の類似度により与えられることになる。

図 4 から、二つのクラスタにタスクを分類することができる。すなわち、task(1)、(3)、(5)、(7)、(9)と task(2)、(4)、(6)、(8)、(10)である。これは、旧型と新型の分類に一致する。また、task(3)、(5)、(7)の間の距離が近いことから、運転員 No. 1 はこれらのタスクに対して同レベルと考えていることがわかる。総合評価として答えていた hedge についても同じもしくは近い表現を用いている。これらの結果は、言語的表現を用いた評価システムにおける言葉による評価結果の検討において、一つの手がかりとなるものである。すなわち、運転員・設計者は、いくつかの hedge を厳密に使い分けているわけではなく、あるグループの hedge は、同一程度の評価に対して用いていることがわかる。

図 5 は設計者 No. 1 の回答からタスク間距離を求め、デンドログラムを描いた結果である。こちらも、図 4 と同様に二つのクラスタにタスクを分類することができる。

Fig. 7 Boundary by cluster analysis (designer No. 1)

図6は、運転員 No. 1 のマップにおいてタスクの評価を布置した点を、図4の dendrogram の結果によって、二つのクラスタに分類(クラスタ A, B)し、クラスタごとの重心を求め、重心を結んだ線分に垂直二等分線を引いたものである。

同様に、設計者 No. 1 のアンケート回答結果に対してもクラスタ分析を行い、タスクを二つのクラスタに分類した。さらにこれらのクラスタの重心を求め垂直二等分線を引き、数理解析的境界線とした。図7にその結果を示す。

これらの垂直二等分線は、先に、評価者自身の手によって引かれた自動/手動の境界線におおむね一致した。

4. 結 論

人間の信頼性の評価を行うための手法として hedge を主体としたアンケート調査から、改良型 FLIA によって、ファジィ測度を同定しながら重要属性を絞り込み、評価結果をマップ上に表現しクラスタ分析を応用する方法を提案した。実際の原子力発電プラントにお

けるベテラン運転員と設計者に対するアンケート調査から以下のことがまとめとして得られた。

(1) クラスタ分析によって得られた数理解析的境界線は運転員・設計者自身の手で引かれた境界線とおおむね一致した。

(2) hedge の違いを数量化する一つの方法を得た。すなわち、言葉と言葉の間に距離を仮定し、この距離によって言語的表現である hedge の違いを考察できた。

(3) 運転員・設計者は多くの hedge を厳密に意味の違いを意識して使いわけているわけではなく、いくつかの hedge は非常に近い(あるいは同じ)意味として使用している。

今後の課題として、タスクの距離の取り方や、クラスタ間の距離の取り方、さらには、分類されたクラスタから線を引くための他の手法の検討を行う必要がある。

本研究を進めるにあたり亀田晃之氏 [(財)原子力発電技術機構ヒューマンファクターセンター]、および河合潤氏 [(株)三菱総合研究所] に貴重な議論をいただいた。感謝する。

文 献

- (1) 佐野典秀・高橋亮一, 機論, **62**-596, C(1996), 1439-1445.
- (2) Schmucker, K. J. (鬼沢武久訳), ファジィ集合自然言語演算とリスク解析, (1990), 27-42, 啓学出版.
- (3) Ishii, K. and Sugeno, M., A Model of Human Evaluation Process Using Fuzzy Measure, *Int. J. Man Machine Studies*, Vol. 22(1985), 19-36.
- (4) Kochen, M. and Badre, A. N., On the Precision of Adjectives which Denote Fuzzy Sets, *J. Cybernetics*, **4** 1(1974), 49-59.
- (5) Embrey, D. E., *SLIM MAUD*, NUREG/CR-3518 Vol. 2, (1984).
- (6) 田中豊・脇本和昌, 多変量統計解析法, (1983), 235-244, 現代数学社.