142 原子炉運転員認知行動のシミュレーションと可視化

文沢 元雄*, 中川 隆志**

Simulation and Visualization of Operator's Cognition and Behavior in Nuclear Power Plant

Motoo FUMIZAWA, Takashi NAKAGAWA

ABSTRACT

Workload is one of the key factors with respect to reducing the human error at the operation in the commercialized nuclear power plants (NPP). In order to produce a high quality design of human machine interface (HMI), the evaluation and simulation method is developed to analyze operator's workload and the method adopted the model proposed by Reason. The workload such as length of the eye movement and moving length of the operators were visualized in CRT image during the simulation, then recorded as movie-file.

Keywords: Workload, Human error, Simulation, Cognitive mechanism, AVI-file, Cinepac form

1. 結 論

原子炉運転員のヒューマンエラーを左右する重要なファクターの1つにワークロードがある。ここでワークロードとは視線移動距離、動線移動距離、記憶容量などである。ヒューマンエラーの低減すなわちワークロードの低減を図るには、原子炉制御盤(Human Machine Interfaces :HMI)を操作する運転員のワークロードを定量的並びに正確に評価する必要がある。制御盤配列や手順を重視したHMI設計を人的要因の観点から評価分析ができるシステムは中川らによって開発されている[1]。このシステムを、SEAMAID (Simulation-based Evaluation and Analysis support system for MAn-machine Interface Design) と称する[1]。

HMI設計で重要なワークロードは時間的に急激に変化する抽象的な情報であり、これらの情報を正確に捉えるのは容易ではない。本研究では、これらの抽象情報をできるだけ正確にまた容易に評価するため、ワークロードをCRT上で可視化し、動画として表現するシミュレーション手法を開発した。

2. SEAMAIDの特徴

SEAMAIDは、運転員とHMI・プラントによる動的特性を模擬し、このシミュレーション結果を用いた評価の支

Fig. 1 Configuration of SEAMAID System

援を行うことができる[1]。SEAMAIDのシステム構成をFig.1に示す。分散シミュレーション部は、3つのシミュレータである運転員シミュレータ、HMIシミュレータ、プラントシミュレータから構成される。運転員シミュレータは、運転マニュアルに従ったプラント異常時の対応行動を実行する。HMIシミュレータは、HMI設備の機能を実行する。プラントシミュレータは、原子力発電所のフルスコープシミュレータである。相互作用分析器は、この分散シミュレーション部で実行された結果を評価する。SEAMAIDの特色を以下にまとめる。

* 正会員 (財) 原子力発電技術機構

** 正会員 三菱電機 (株)

- (1) 評価のための運転員を使った実験を行う場合には、被験者の個体差や学習効果を考慮しなければならないが、SEAMAIDでは、これらの効果を考える必要がなく、設計案を比較することができる。
- (2) 分析者は、実際の模型を作ることなく、HMIのイメージを把握することができる。
- (3) シミュレーション結果を再生することで、特定の相互作用に注目して、運転員がHMIをどのように理解し運転したかを確認できる。
- (4) 評価可能なワークロードの指標は移動距離、視線移動距離、作業時間、FWM積算値、PWM積算値である。

3. 運転員と HMI の相互作用シミュレーション方法

3. 1 運転員モデル

運転員のモデルは、J. Reason 教授が提唱しているヒューマンモデルの枠組み[2]や、その他の認知心理学で合意されている概念を組み合わせで構築している。主なモジュールの機能を Fig.2 に示す[1]。

Fig. 2 System architecture of Operator Simulator

- (1) 共有メモリ 1 : HMI シミュレータから運転員シミュレータへの通信領域。ここには、警報情報と、焦点の当たっている HMI 情報が入力される。
- (2) 共有メモリ 2 : 運転員シミュレータから、HMI シミュレータへの通信領域。ここには、運転員の操作情報と、運転員の焦点の当たっている HMI 情報が入力される。
- (3) PWM : HMI シミュレータから、あるいは、知識ベースデータベースからの情報を一時的に格納する領域。ここでの情報は無意識に処理される。
- (4) FWM (焦点記憶) プロセス : このプロセスは、以下

の 4 つのデータ処理を行う。(i) PWM から FWM への情報の転送、(ii) FWM 内の情報を、重要度 (目立ち度や焦点情報との類似度から計算される) に従って優先順位付けをする、(iii) FWM の情報のチャンク化、(iv) 文脈維持の観点からの知識ベースデータベースとの相互作用

(5) FWM : 意識的処理が行われる制限された領域。

ルールベースエンジン : もっとも高い重要度を持つ焦点情報と知識ベースデータベースとのキーワードによる検索を行う。

(6) 診断エンジン : 関連する情報が検索されなかった場合に、診断エンジンが、ルールベースエンジンで処理できるよう、より簡単な情報に分解する[3]。

(7) 知識データベース : 長期記憶に対応する部分。ペトリネットが、詳細な運転手順からなる知識データベースを表現するために用いられている。

それゆえ、運転員の認知的な挙動は、このようなシミュレーションサイクルによって実行される。FWM の使用領域は、一つの認知的資源として計算することができる。

3. 2 HMI シミュレータ

HMI シミュレータは、HMI 設計情報データベースを参照して、実際の HMI と同じように振る舞う。HMI シミュレータは、プラントシミュレータについて、様々な装置類の状態を通信する。一方、運転員シミュレータとは、運転員の行う操作に関連した情報を受け取り、運転員シミュレータには、視野内の装置情報を送信する。

4. 可視化手法

4. 1 CRT への表示方法

CRT への動線移動経路画面は、HMI シミュレータによって描画されている。描画アルゴリズムは、警報などの情報が共有メモリを通じて、運転員シミュレータに送られる。運転員シミュレータは、ペトリネットで規定された手順で、順番に「見る」、「思い出す」などのタスクを実行する。このタスク一つ毎に、Fig.2 に示すように、「PWM」→「FWM プロセス」→「FWM」→「Rule-Base Engine」→「PWM」のループを一回りする。このとき、「移動する」においては、実際に運転員シミュレータの共有メモリ 2 にこれらの内容が書き込まれ、また HMI シミュレータに読み込まれる。この情報に基づいて、HMI シミュレータの動線画面は更新される。

4. 2 動画作成手法

EWS の画面をデジタルビデオカメラで撮影し、記録された映像情報 (NTSC) をキャプチャーして、非圧縮 AVI ファイルに変換した。画面フリッカー防止のためシャッター速度を 1 / 2 秒とした。取得した非圧縮 AVI ファイルをビデオ編集ソフト (Adobe Premiere Ver.5.1) を用いて矢印・説明文を付加し、cinpac 形式で圧縮し、ムービーファイルを作成した。この (ムービーファイルは自己解凍形式で圧縮した状態で保管している。デジタルビデオカメラの仕様は、以下のとおり。

SONY 社製 Digital Handy cam

DCR-PC100:

総画素数 : 1/4 インチ 107万画素

有効画素数: 動画34万画素、静止画100万画素

5. シミュレーション

5.1 評価条件

プラント: 電気出力約80万kWのPWR、

中央制御盤: オリジナル設計にCRT1面またはCRT3面を配置。オリジナル設計はハードウェアスイッチ、ランプやメータなど従来計器のみから構成(Fig.3参照)。

運転体制: 当直長、運転員1(一次系)、運転員2(二次系)

異常事象: 原子炉トリップ時の対応

Fig.3 HMI design of CRT-1 type

5.2 評価結果

シミュレーションによる運転員1及び運転員2の視線・動線の位置をFig.4に示す。またFig.5に異常事象発生後の視線移動及び動線移動の様子を示す。Fig.4(a)は両運転員が離れている状態を示し、Fig.5(b)は両運転員が衝突した状態(距離が0.5m以内)を示す。このように運転員間の相互関係が動画的扱いで明確に示すことができる。また動線移動距離と記憶容量の指標であるFWM積算値の相互関係を詳細に示したのが、Fig.5である。この図の左図は、原子炉トリップ時の対応の運転マニュアルでの個々のタスクにおける移動距離の推移を示した。ハードウェア使用時に、CRT3面案がCRT1面案に比べて、5番目のタスク(加圧器圧力確認)で非常に大きくなっている。この差の原因を調査するために、さらに詳細な分析を行った。右側の図は、加圧器圧力確認の運転マニュアルでの個々のサブタスクにおける移動距離とFWM積算値の推移である。両指標は相関関係が高いことを示している。

これらの評価結果を基にワークロードの低減を図った

修正設計を容易に行うことが可能である。

6. 結論

抽象情報をできるだけ正確にまた容易に評価するため、ワークロードをCRT上で可視化し、動画として表現するシミュレーション手法を開発した。動画により運転員間の衝突など相互関係を明確に示すことができ、制御盤設計の特徴を容易に把握できることを示した。

なお、本研究を遂行するに当たり、京都大学の吉川榮和教授、三菱電機のDr. Wei Wu、原子力発電技術機構ヒューマンファクターセンターの門田一雄所長、亀田晃之様には貴重な助言を戴き、深く感謝いたします。またこの研究は、通産省資源エネルギー庁の委託事業により実施された。

(a) Operators location

(b) Operators visual point

Fig.4 The location of the operator's workload

(a) Departed case of the two operators

(b) Conflicted case of the two operators

Fig.5 The variation of two operators location and visual points

参考文献

- [1] T. Nakagawa, et al., "Simulation based evaluation of Man-Machine Interface in power plant", Proceedings of Cognitive Systems Engineering in Process Control CSEPC 96, pp.332-338, 1996.
- [2] J. Reason, "Human Error", Cambridge University Press, 1990
- [3] W. Wu, et al., "Study on Developing a Computerized Model of Human Cognitive Behaviors in Monitoring and Diagnosing Plant Transients", Proc. of 1998 IEEE International Conference on SMC, 1998.

Fig. 6 Example of detailed result