

Automation design in advanced control rooms of the modernized nuclear power plants

Chiuhsiang Joe Lin, Tzu-Chung Yenn, Chih-Wei Yang

Safety Science, 2010, Vol. 48, pp. 63-71

1. 導入

- 発電所における自動化技術が発達するにつれて、操作者はシステムが何を行っているのかわからなくなってくる
 - return-to-normal アラームが自動的にリセットされると、操作者はアラームに気づかない(et al. Huang, 2007)
 - out-of-the-loop(OOTL) performance problem(Endsley and Kiris, 1995)
 - … 状況認識や手動での操作能力の低下による”無用心”や”自己満足”からくるもの
- OOTL performance problem を防ぐために、多くの研究が行われてきた
 - Human-centered automation(Billings, 1991,1997)
 - ◇ 最終決定権を持つのは人間でなければならない
- 自動化のレベルについての検討
 - 機能に応じて自動化は再構築されなければならない(Parasuraman et al., 2000)
 - Levels of automation(LOA)
 - ◇ 人間と自動化の協調形態
 - ◇ 人の状態や環境に合わせて動的に LOAs を調整…adaptive automation

1.1 Intermediate levels of automation(LOAs) and adaptive automation(AA)

- Endsley と Kaber の研究(1999)
 - LOA の提案(Table 1)
 - 4つの一般的な制御システムの機能を使った LOAs
 - (1) monitoring displays(ディスプレイの監視)
 - (2) generating processing options(処理の選択肢の構築)
 - (3) selecting an ‘optimal’ option(最適な選択肢の選択)
 - (4) implementing option((3)の選択肢の実行)
 - 通常の状態では、LOAs は人間の選択肢の構成とパフォーマンスを向上するようなコンピュータの実行を合成する
 - システムが選択肢を与えると、操作者は、新しい情報や自分自身の選択の誤りによるパフォーマンスに気づかなくなる

Table1 : LOAs taxonomy(Endsley and Kaber, 1999)

Levels of automation	Roles			
	Monitoring	Generating	Selecting	Implementing
10 Full automation	computer	computer	computer	computer
9 Supervisory control	Human/computer	computer	computer	computer
8 Automated decision making	Human/computer	Human/computer	computer	computer
7 Rigid system	Human/computer	computer	Human	computer
6 Blended decision making	Human/computer	Human/computer	Human/computer	computer
5 Decision support	Human/computer	Human/computer	Human	computer
4 Shared control	Human/computer	Human/computer	Human	Human/computer
3 Batch processing	Human/computer	Human	Human	computer
2 Action support	Human/computer	Human	Human	Human/computer
1 Manual control	Human	Human	Human	Human

- Kaber らによる研究(2000)
 - 遠隔操縦ロボットを使った実験
 - LOAs の違いによるパフォーマンス、操作者の状況認識とワークロードの影響を分析
 - ◇ Table1 のレベル 2、3、5、9、10 で行った
 - 実験結果
 - ◇ 通常の操作状態では、LOAs が高いとパフォーマンスが高くなる
 - ◇ システムが不具合を起こしている状態では、LOAs が低いときに、操作者の状況認識が高くなり、パフォーマンスが良くなる
- Kaber と Riley の研究(1999)
 - 人間のワークロードの維持と OOTL performance problems を減少させるための手法として、adaptive automation(AA)を提案

1.2 Human-automation interaction and human information processing(HIP)

- Wright と Kaber による研究(2005)
 - チームのパフォーマンスを LOAs の違いにより分析
 - 実験結果
 - ◇ Monitoring の自動化は、チーム内のコミュニケーションに影響を与える
 - ◇ Generating の自動化は、チームワークのパフォーマンスを高める
 - ◇ Selecting の自動化は、チームの協調を低める
- Kaber らによる研究(2006)
 - 動的なシステムでの情報処理をサポートするための AA の影響の分析
 - 4つの情報処理機能
 - (1) 情報の取得(Monitoring)
 - (2) 情報の分析(Generating)

(3) 行動の決定(Selecting)

(4) 行動の実行(Implementing)

— 実験結果

- ◇ 知覚機能は、重大なイベントの発見に有効である
- ◇ 行動の決定の自動化は、ワークロードを減少させる

1.3 Model development for levels of automation

- Lin らによる LOA 決定のモデル(2008)
 - Skill-Rule-Knowledge(SRK) human behavior classification framework
 - 人間の振る舞いによって、機能(**monitoring**、**generating**、**selecting**、**implementing**)の自動化を決定
 - ◇ Skill-based のミス
操作者の状況認識、次の行動の意図が正しいが、行動の実行にミスがある場合(操作ミスなど)
 - **implementing** を自動化する
 - ◇ Skill-based の間違い
操作者の記憶ミス(物忘れなど)
 - **monitoring** を自動化する
 - ◇ Rule-based のミス
次に行う行動の選択が、望ましい結果にならない場合(計画のミス)
 - **selecting** を自動化する
 - ◇ Knowledge-based のミス
状況認識のし損ないによる不適切な行動決定が行われた場合
 - **generating** を自動化する

近年、システムの LOAs の議論が盛んである。しかし、様々な LOAs の影響を比較している研究が行われているが、先進的な原子力発電所のメインコントロールルームについてのものや、制御ルームのデジタル化の人的要因の影響を扱ったものは少ない。

本研究は、NPPs(原子力発電所)の文脈内での LOAs の影響の調査をする。LOA の段階に対応した 4 つのレベルを持ったシミュレーションシステムを使って、実験を行った。

2. 実験

2.1 目的

- NPPs(Nuclear power plants)において、LOAs の違いによるシステムの操作のパフォーマンスの影響を比較する

2.2 実験参加者

- 工学部の学部生と大学院生 20 名(女性 7 名、男性 13 名)
- 20～28 歳
- 19/20 は右利き
- システム操作の練習のために 16 時間以上(2～4 日)のトレーニングを受けた

2.3 実験装置

- PC(1280×1024 モニタ、Pentium 4 3.00GHz)を使って行う
- 実験課題は、Huan ら(2006, 2007)と Yenn ら(2006)によって使用された① PCTRAN(personal computer transient analyzer)システムと②alarm processing システムの修正版を使用
- ①と②はイーサネットを介して接続

2.4 実験課題

2.4.1 サブタスク

- メインタスク中にランダムで行われる
- ホワイトボード上の”signal”と”noise”を感知し、返答する
 - signal と noise はホワイトボード上の赤いドットで表現される
 - signal : 赤いドットが 2 つのとき
 - noise : 赤いドットが 1 つのとき

Table2 : The four out come of signal detection theory in the secondary task.

	●● as Signal	● as Noise
Reply "Signal"	Hit	False alarm
Reply "Noise"	Miss	Correct rejection

- Hit 率、Miss 率、false alarms 率、correct rejection 率、反応時間を記録する

2.4.2 メインタスク

- PCTRAN システムを使用する(別紙)
 - 原子炉制御シミュレータ(水の流量、制御棒の操作など)
 - 5 つの false alarm
 - 実験では 2 つの設定のいずれかで行われる
 - (1) Integrated Operating Procedure(IOP)
 - LOA 9 と LOA 2 に相当する 2 つの操作モードを持つ
 - (a) Supervisory control (LOA 9)

LOA のレベル 9 に相当

(b) Action support (LOA 2)

LOA のレベル 2 に相当

- “semi-automatic”ボタンで Action support モードに切り替える
- “manual”ボタンで manual control(LOA 1)モードに切り替える

(2) Abnormal Operating Procedure(AOP)

- この設定では、5つのアラームが鳴るように設定されている
例) 流量が増えすぎたり減りすぎたりすると、アラームが鳴る
- LOA 6 と LOA 5 に相当する 2つの操作モードを持つ

(a) Blended decision-making (LOA 6)

LOA のレベル 6 に相当

(b) Shared control (LOA 5)

LOA のレベル 5 に相当

2.5 実験計画

- 実験参加者はランダムに 2 グループに分けられる(IOP と AOP にそれぞれ 10 人)
- 実験は 20 分を 2 回行う(間に 10 分休憩を取る)
- 独立変数 … LOA の 4 レベル(LOA 2、LOA 5、LOA 6、LOA 9)
- 従属変数
 - (1) システムの操作者のワークロード(NASA-TLX を使う)
 - (2) サブタスクのパフォーマンス(反応時間とエラー)
 - (3) 操作者の状況認識(SAGAT を使う)

2.6 実験手順

- 実験は以下の手順で行われる
 - (1) 30 分間トレーニングを行う
 - (2) 10 分間休憩
 - (3) 実験前の状況認識を測定(SAGAT を使う)
 - (4) 20 分間メインタスクを行う
 - (5) 状況認識の測定(SAGAT)とワークロードの測定(NASA-TLX)
 - (6) 10 分間休憩
 - (7) 20 分間メインタスクを行う
 - (8) 状況認識の測定(SAGAT)とワークロードの測定(NASA-TLX)
 - (9) ワークロードを測定(NASA-TLX を使う)

2.7 SAGAT と NASA-TLX について

- SAGAT

- 状況認識の測定に用いる
- 状況認識のレベル

レベル1：何かが起きていることの知覚

→ 操作画面のコンポーネントの色やサイズについての質問

レベル2：何が起きているかの理解

→ コンポーネントの目的、機能、意味、それぞれのコンポーネントの関係などについての質問

レベル3：次に何が起きるかの予測

→ 現在の数値情報と未来の数値の予測についての質問

⇒それぞれスコア化する

- NASA-TLX

- ワークロードの測定に用いる
- 6つの指標を使う(別紙)

(1)Mental demand

(2)Physical demand

(3)Temporal demand

(4)Performance

(5)Effort

(6)Frustration

⇒スコア化する

2.8 仮説

- LOA が高くなるにつれて
 - ワークロードと状況認識は下がる
 - サブタスクでの反応時間は短くなる
- LOA が低くなるにつれて
 - サブタスクのエラー率が高くなり、反応時間が長くなる

3. 結果

3.1 メインタスクのワークロード(NASA-TLX)

- IOP と AOP の比較
有意な差は見られなかった
- LOAs の比較
4つの自動化レベルに有意な差が見られた($F(3, 36) = 3.36, p = .029$)
→ 下位検定の結果、LOA 6 と LOA 2 の間に有意な差が見られた(Fig 1)

3.2 サブタスクのパフォーマンス

- エラーについて
 - Table 2 の Misses と false alarms のときがエラー
 - 4つの自動化レベルに有意な差は見られなかった
- 反応時間について
4つの自動化レベルに有意な差が見られた($F(3, 36) = 7.44, p = .001$)
→ 下位検定の結果、LOA 5、LOA 6、LOA 9 は LOA 2 のときより反応時間が有意に短かった(Fig 2)

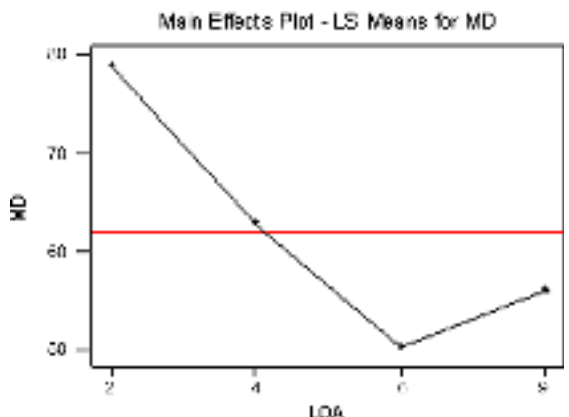


Fig 1. Main effects plot for mental workload.

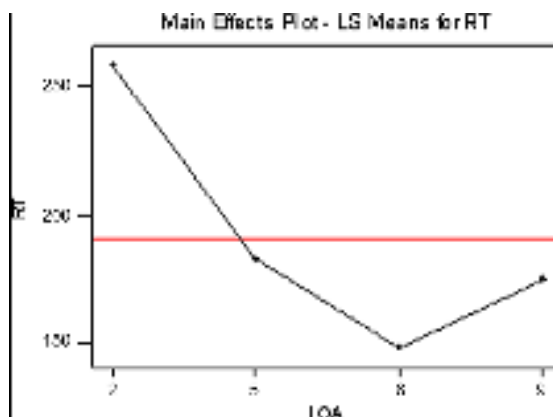


Fig 2. Main effects plot for response time.

3.3 状況認識

状況認識についての質問に関して、正しかったら 2 点、部分的に合っていたら 1 点、間違っていたら 0 点としてスコアをつけた

- SAGAT の level 1 について(Fig 3)
4つの自動化レベルに有意な差が見られた($F(3, 36) = 3.34, p = .030$)
→ 下位検定の結果、LOA 6 は LOA 2 よりスコアが有意に高かった
- SAGAT の level 2 について(Fig 4)
4つの自動化レベルに有意な差が見られた($F(3, 36) = 6.25, p = .002$)
→ 下位検定の結果、LOA 6 は LOA 2 や LOA 9 よりスコアが有意に高かった
- SAGAT の level 3 について(Fig 5)

4つの自動化レベルに有意な差が見られた($F(3, 36) = 4.02, p = .014$)

→ 下位検定の結果、LOA 6はLOA 2やLOA 9よりスコアが有意に高かった

Kaber と Endsley(2004)は、level 2のSAとNASA-TLXには関係があることを確認した。また、Wickens と Hollands(2000)もまた、adaptive automationのモデルを提案した。彼らは、高いメンタルワークロードと状況認識を必要とするタスクは、manual modeにするように提案した。逆に、低いメンタルワークロードと状況認識を必要とするタスクでは、full automationにするように提案した。低いメンタルワークロードと高い状況認識を必要とする状況、高いワークロードと低い状況認識を必要とする状況では、adaptive automationを使い、そのレベルを調整する。

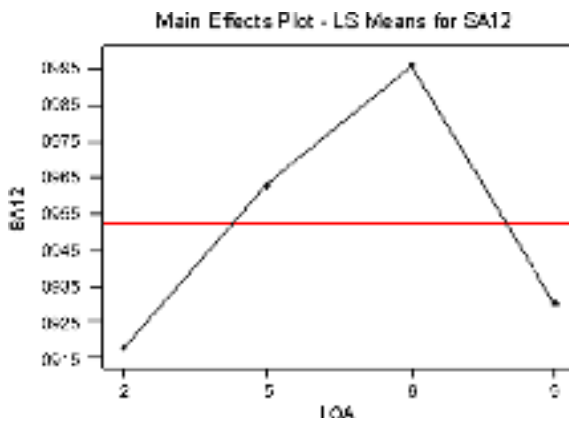


Fig 3. Main effects plot for level 1 SA questions.

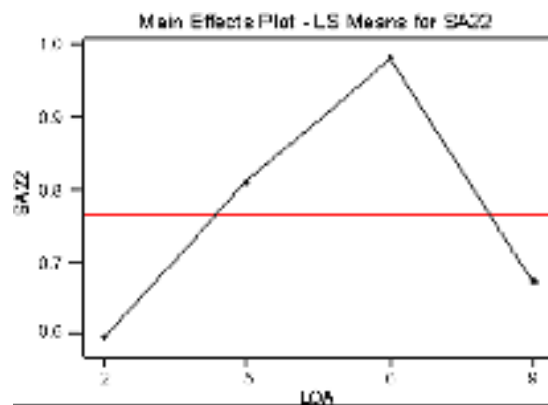


Fig 4. Main effects plot for level 2 SA questions.

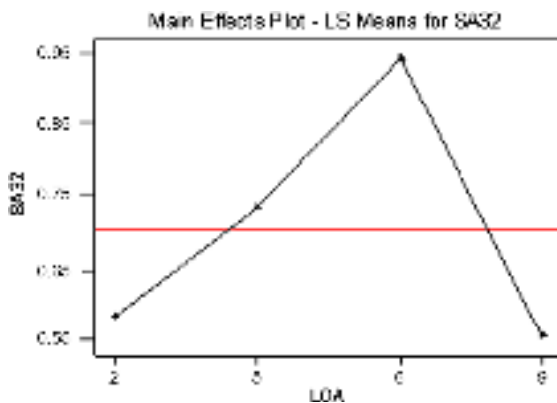


Fig 5. Main effects plot for level 3 SA questions.

3.4 自動化レベルを使用する傾向について

- AOPでLOAsの高いレベル(LOA 6)を好む参加者の割合と、IOPでLOAsの高いレベル(LOA 9)を好む参加者の割合は同じであった(90%)

- LOAs の低いレベルのときより高いレベルの時のほうが、ワークロードが低く反応時間が短いにもかかわらず、'planning(generating)'と'decision(selecting)'については LOAs の低いレベルが使用する

→ 実験参加者は、行動を決定する時は LOAs を低いレベルにするのを好む

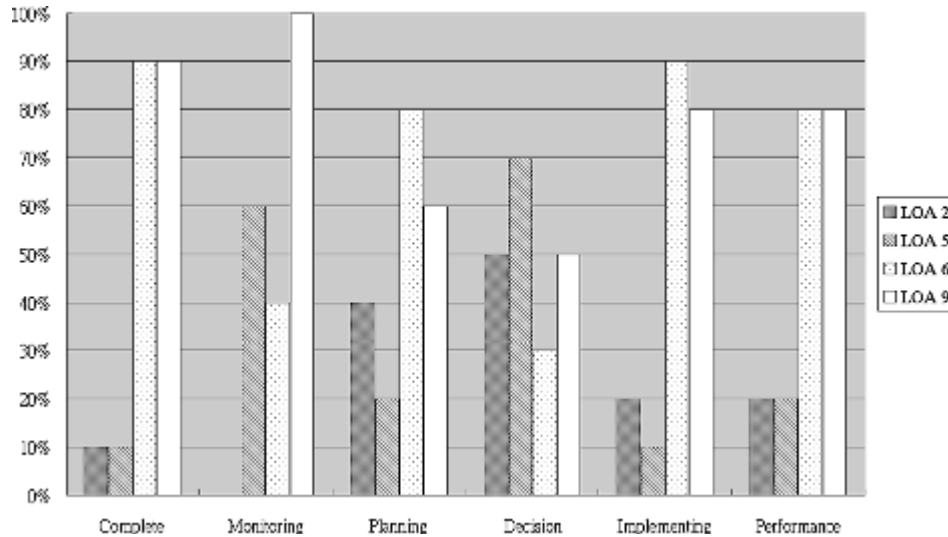


Fig 6 Subjective ratings for level 2, 5, 6, and 9 of LOAs.

4. 考察

- 本研究では、LOA の違いによるサブタスクのパフォーマンス、状況認識、ワークロードを比較した
 - 実験参加者のワークロードについて
 - LOA が高くなるにつれて、ワークロードは低くなる
 - それに伴い、サブタスクの反応時間が短くなる
 - 状況認識について
 - ◇ Endsley & Kiris(1995)の結果と一致する
 - LOA が適切な時は、full automation なときより状況認識が良い (特に状況認識のレベル 3)
 - ◇ 本研究ではさらに、LOA が低い時も状況認識が悪いことを確認した
 - 状況認識のレベル 1 とレベル 2 のとき
 - LOA 6 は LOA 2 よりスコアが有意に高かった
 - サブタスクについて
 - ◇ 反応時間
 - LOA 2 の時、他のレベルより反応時間が短かった
 - LOA が低い時、メインタスクにより注意を向ける必要があり、サブタスクのパフォーマンスが落ちる(Kaber & Riley(1999)と一致)
- generation(選択肢の構築)や selecting(行動の決定)と implementation(行動の実

行)が一体化した LOA(LOA 6)では、状況認識が高く、ワークロードも低い

— LOA が低い場合(LOA 2 や LOA 4)や LOA が高い場合(LOA 9)と比較したときに、LOA 6 は状況認識が高く、ワークロードも低い

- 自動化はワークロードを下げるが、full automation はお勧めしない
 - OOTL performance problems を引き起こすため
- monitoring(監視)や implementation(行動の実行)は、ワークロードや状況認識に影響を与えない
 - しかし、generation(選択肢の構築)や selecting(行動の決定)は影響を与える (Endley & Kiris(1995)や Endley & Kaber(1999)と一致)

5. まとめ

- 本研究では、様々な自動化レベルにおいての実験的分析を行った
 - Endsley と Kaber(1999)の LOAs とその決定のフレームワークは、LOAs の違いによるワークロードや状況認識の影響の比較に使用された
- ルール、知識ベースの過ちを分析した
 - そのようなヒューマンエラーを防ぐために、自動化の 3 つのモード (monitoring automation、generating automation、selecting automation)を推奨する
- 本研究の結果より、中間的な自動化レベルはメンタルワークロードを減らし、状況認識を増やすことがわかった