

Trust, self-confidence, and operators' adaptation to automation

Lee, J. D. and Moray, N.

International Journal of Human-Computer Studies, 1994, Vol. 40, No. 1, pp. 153-184

1. Introduction

1.1. Supervisory Control, Automation, and Trust

- 科学技術の向上とシステムの複雑さが増すに伴い、オペレータの役割も変わる
 - 完全マニュアル～異なるレベルのコンピュータ制御
 - 人間は、監視制御の役割を持ち、様々なレベルの自動／手動制御を通してシステムと関わる(Sheridan & Johanssen, 1976)
- Muir(1989)
 - 監視制御の状況における人間－機械の関係に介在する信頼の役割について検討
 - 自動化への信頼の変化と自動化使用の変化には一致がある
- Lee & Moray(1992)
 - ある状況では、自動化使用の変化が、自動化への信頼の変化に一致しない
 - 自動化使用は、自動化への信頼だけでなく、オペレータの能力への自信にも依存すると考えられる

1.2. Self-Confidence

- いくつかの研究で、人々は自分の能力に過信することが示されている(Fischhoff & MacGregor, 1982; Fischhoff, Slovic & Lichtenstein, 1977)
 - 判断課題を用いた研究では、情報が与えられるほど、過信が増す
 - ◇ Oskamp(1982)の臨床診断課題を使用した実験
 - 被験者の判断の正確さを少し改善させるような情報を与えた場合でも、被験者は自分の判断に大きな自信を持つ
 - Fischhoff(1982)は、自分の能力への過信は、一般的なバイアスであると主張
- 人間と自動化とのインタラクションという観点で、この結果を解釈した場合
 - 手動制御を使用すれば、自信は上昇すると考えられる
 - ◇ 手動制御が成功したとき、自信の上昇は明らか
 - それと同時に、自動制御の割り当ては減少し、適切な自動化使用が妨害される
- この研究では、信頼、自信、そして自動化使用の関係について検討を行う

2. Methodology

2.1. Process Control Task

- 半自動制御を使用
 - 半自動：自動制御／手動制御の選択が可能
- 監視制御の状況を再現
 - 基本的に自動制御を行い，必要であれば，手動制御を行う
- 課題には，ジュース低温殺菌プラントを使用(Muir(1989)や Huey(1989)によって使用)

2.2. Characteristics of The System

- Figure 1 は，課題に使用したジュース低温殺菌プラントシミュレータ
- ジュースを十分に低温殺菌し，タンクに流し込む
- サブシステムの操作が必要
 - 原料ポンプ(Feedstock pump)：ジュースの流れを操作
 - 蒸気ポンプ(Steam pump)：蒸気の流れを操作
 - 蒸気暖房装置(Steam heater)：蒸気を発生させる熱エネルギー量の操作
 → 自動／手動制御で行う
- 手動制御の場合，値をキーボードから入力
- 殺菌温度が高すぎれば，ジュースはゴミ箱へ流れ込む
- 殺菌が十分でなければ，ジュースはリサイクル
- 自動制御では，制御アルゴリズムをもとに制御が行われる

2.3. Automatic Feedstock Pump Control Algorithm

- Table 1 は，自動制御アルゴリズムについて先行研究との比較を示している

TABLE 1
The control algorithms of the feedstock pump used in Lee and Moray (1992) and the current experiment

Used in Lee and Moray (1992)		Current experiment	
Input vat range	Control relation	Input vat range	Control relation
>750	$Ptar = Ptar + 17$	>750	$Prate = Prate + (setpoint + 10 - Prate)/3$
600-750	$Ptar = Vatin + 8$	600-750	$Ptar = Ptar + 2$
400-600	$Ptar = Vatin + 3$		
350-400	$Ptar = Ptar - 3$	300-600	$Prate = Prate + (setpoint - Prate)/2$
150-350	$Ptar = Vatin - 8$	150-300	$Ptar = Ptar - 2$
<150	$Ptar = Ptar + 16$	<150	$Prate = Prate - 8.23$

$Ptar$ = target pump rate, $Prate$ = current pump rate, $Vatin$ = inflow rate to the input vat, $setpoint$ = mean inflow rate to the input vat.

- Lee & Moray(1992)
 - $Ptar$ ：原料ポンプから出るジュースの量
 - $Vatin$ ：タンクへ流し込まれるジュースの量

- 原料ポンプから出るジュースの量は、タンクに入っているジュースの量を基準に変化
→ ジュースの 90%以上を殺菌するのは不可能

◇ ほとんどの被験者が手動制御を使用

- 今回の研究

- Prate : 原料ポンプから出るジュースの量
- タンクに入っているジュースの量を 300~600 に保つように設定
→ 全てのサブシステムを自動制御にすると、ジュースの 75%~80%を殺菌
- 原料ポンプを自動制御、蒸気ポンプと蒸気暖房装置を手動制御
→ ジュースの 90%以上を殺菌することが可能
- ◇ 基本的に自動制御を行い、必要であれば、手動制御を行うよう促す

2.4. The Operators' Task

- 1日2時間のセッションを2日実施

- 1日目

- プラント制御の目的、プラントに生じるエラーの可能性、熱水圧についての記述を手渡す
- 10 試行(1 試行 3 分)の練習
◇ 全てのサブシステムを自動/手動制御で行う。試行ごとに切り替え可能
- 10 試行(1 試行 6 分)の本試行
◇ 各サブシステムを自動/手動制御で行う。好きなタイミングで切り替え可能

- ジュースの 90%以上を殺菌できれば、1 試行につき 10 セントの報酬

- タンクが空になると、プラントが停止

- タンクのジュースが溢れると、ゴミ箱へ流れ込む

- 報酬から引かれる

- ディスプレイ

- 自動/手動制御の表示
- タンクに入っているジュースの量
◇ タンクが空、または溢れそうになると警告メッセージ
- 殺菌温度 : too hot, too cold, 殺菌済み → パイプの色の変化で表示

- 被験者

- 大学生 12 名
- 1 時間につき 3.5 \$ + 課題の報酬

2.5. Introduction of Faults

- 2 日目
 - プラントにエラーが発生
- 最初の 6 試行は通常通り，残り 12 試行で 2 つのエラー
 - 6 試行の間，原料ポンプが手動制御のときにエラー
 - 6 試行の間，原料ポンプが自動制御のときにエラー
 - ◇ 順序はカウンターバランス
- Figure 2 は，エラーの箇所を示す
 - 原料ポンプからのジュースの流出が 30%増加／減少する
 - 自動／手動制御の切り替えにより回避できる
- Figure 3 は，実験計画を示す

2.6. Subjective Questions

- 各サブシステムの信頼と自信について 10 段階の評定
 - 各試行後に評定
 1. **How high was your self-confidence in controlling the feedstock pump?**
 2. **How much did you trust the automatic controller of the feedstock pump?**
 3. **How high was your self-confidence in controlling the steam pump?**
 4. **How much did you trust the automatic controller of the steam pump?**
 5. **How high was your self-confidence in controlling the steam heater?**
 6. **How much did you trust the automatic controller of the steam heater?**
- 主観評価に関して，Lee & Moray(1992)とは 2 点異なる
 - 自動化への信頼についてのみ評価するのではなく，自信についても評価する
 - 全体的にではなく，各サブシステムについて信頼と自信の評価を行う

3. Results

3.1. A General Overview and A Qualitative Analysis of Allocation Strategies

- Figure 4 は，ジュースの殺菌率と，タンクが空になりプラントが停止した回数を示す
- Figure 5 は信頼性の変化，Figure 6 は自信の変化を示す
- Figure 7 は，各サブシステムの自動制御使用率を示す
- Figure 4-7(a)は，自動制御エラー → 手動制御エラー
- Figure 4-7(b)は，手動制御エラー → 自動制御エラー
- 1 つ目のエラーは 17 試行から発生，2 つ目は 23 試行から発生

- Figure 4
 - 実験が進むにつれてパフォーマンスは上昇
 - エラー発生によりパフォーマンスが少し低下
- Figure 4(a), (b)の比較
 - (a) : エラーが発生している間, プラントの停止はあるが, パフォーマンスは一定
 - (b) : 自動化のエラーが発生している間, パフォーマンスが少し低下
 - パフォーマンスへのエラーの影響はあまりない
- Figure 7(a), (b) の比較
 - Figure 7(a)よりも, (b)で自動制御使用が多い
 - ◇ 特に蒸気暖房装置に大きな差
 - この結果は, Figure 5, 6にも反映されている
- Figure 5(b), 6(b)
 - 蒸気暖房装置に関して, 信頼が自信を大きく上回っている
- Table 2 は, 2日目の最初の6試行で, 各被験者が自動制御を使用した割合を示す

TABLE 2

The average use (in percent) of the automatic controllers by each of the 12 operators during the first six trials of the second day, with the standard deviation in parentheses

Operator	Feedstock pump (S.D.)	Steam pump (S.D.)	Steam heater (S.D.)
Group AM	99.75	86.16	0.75
1	(0.61)	(33.85)	(0.88)
2	25.41	100.00	18.08
	(36.85)	(0.00)	(40.14)
3	0.83	1.83	85.25
	(0.81)	(1.12)	(20.45)
4	91.50	5.25	100.00
	(9.57)	(8.72)	(0.00)
5	4.41	100.00	2.00
	(7.93)	(0.00)	(4.89)
6	8.58	1.58	100.00
	(7.53)	(1.16)	(0.00)
Group MA	0.75	2.75	3.47
7	(0.41)	(1.29)	(1.68)
8	15.75	100.00	100.00
	(9.77)	(0.00)	(0.00)
9	0.75	3.58	4.75
	(0.41)	(2.31)	(1.69)
10	3.41	0.75	100.00
	(3.78)	(1.83)	(0.00)
11	0.75	100.00	18.83
	(0.52)	(0.00)	(39.96)
12	59.83	83.33	16.66
	(26.27)	(40.82)	(40.82)

- 被験者 3 名だけが，原料ポンプの自動制御を使用(オペレータ：1, 4, 12)
- ほとんどの被験者が，蒸気ポンプ，または，蒸気暖房装置の自動制御を使用
- 自動/手動制御の切り替えがあまりない
- 自動制御を使用させることに部分的に成功

- Table 3 は，各被験者の自動/手動制御の使用方略を示している

- 「A」：自動制御が 85%以上
- 「M」：自動制御が 15%以下
- 「MX」：自動/手動制御の混合

TABLE 3

The allocation strategies of operators 1–12, where each row represents a different combination of automatic and manual control and the numbers represent the operators who adopted those allocation schemes

Feedstock pump	Steam pump	Steam heater	Normal	Fault with manual	Fault with automatic
A	A	M	1	1	
A	MX	MX			4
A	M	A	4	4	
MX	A	A	8	8	8
MX	A	MX	2		
MX	A	M		2, 5, 12	
MX	MX	M			1, 2, 12
MX	M	A		6	6
MX	MX	MX	12		
MX	M	M		7	
M	A	M	5	11	5
M	M	A	3, 6, 10, 11	3, 10	3, 10, 11
M	M	M	7, 9	9	7, 9

M represents an average of less than 15% reliance on the automation, A represents a greater than 85% reliance on the automation, and MX represents a mixture of automatic and manual control (greater than 15%, but less than 85%).

- エラーがないとき
 - ◇ 12 名中 9 名が，各サブシステムで完全自動/手動制御を使用
- 手動制御のエラー
 - ◇ 原料ポンプに関して，3 名のみ自動制御使用が多くなる(オペレータ：5, 6, 7)
- 自動制御のエラー
 - ◇ 原料ポンプに関して，ほぼ完璧に自動制御を行っていたオペレータの手動制御使用が多くなる(オペレータ：1)?

3.2. Trust, Self-Confidence, and Reliance upon Automatic Controllers

- Table 2, 3, Figure 4~7 では，自動制御使用と主観評価の関係が上手く検討できない
- 自動制御使用と主観評価の関係について 5 つの検討

- ① 1名の被験者の行動を分析
- ② 自動制御使用と主観評価の相関関係
- ③ 関数に当てはめた分析
- ④ 自動制御使用と主観評価が一致しない状況の検討
- ⑤ 自動制御使用と経験について

3.2.1. A qualitative analysis of the use of automation

- Figure 8 は、オペレータ 6 の原料ポンプに関する信頼、自信の変化と自動制御使用率を示す
 - エラー発生までは、基本的に信頼よりも自信の方が高い
 - ◇ 自動制御使用率は 20%以下
 - 手動制御のエラーが発生し、自信が低下、信頼が上昇
 - ◇ 自動制御使用率が上昇
 - 自動制御のエラーが発生し、信頼が低下、自信が上昇
 - ◇ 自動制御使用率が低下
- オペレータ 6 は、完全自動/手動制御を使用
 - 基本的に他の被験者も同様
- 自動制御を使用しているとき、信頼が自信を上回り
- 手動制御を使用しているとき、自身が信頼を上回る

3.2.2. Multitrait-multimethod analysis

- Table 4 は、各サブシステムにおける信頼と自信の差分(T - SC)と自動制御使用率の相関関係を示す
 - 値は、被験者ごとに、信頼と自信の差分と自動制御使用率の相関係数を求め、z 変換し、z 値を平均したもの

TABLE 4

A Multitrait-multimethod matrix showing the mean of z-transformed correlation coefficients of the difference between trust and self-confidence and the use of the automatic controllers for 12 operators, n = 28 for each operator. T - SC is the difference between operators' subjective ratings of trust and self-confidence

	Use of automatic feedstock pump	Use of automatic steam pump	Use of automatic steam heater
T - SC feedstock pump	0.32 ($p < 0.005$)	-0.01 N.S.	0.10 N.S.
T - SC steam pump	0.08 N.S.	0.27 ($p < 0.005$)	0.00 N.S.
T - SC steam heater	0.10 N.S.	-0.05 N.S.	0.53 ($p < 0.001$)

- 各サブシステムで、信頼と自信の差分と自動制御使用率に相関がみられた
 - ◇ 信頼と自信の差は、自動制御使用に影響
- 一つのサブシステムにおける信頼と自信の差分は、他のサブシステムの自動制御使用には影響しない
 - ◇ 被験者は、各サブシステムを個別に評価し、自動/手動制御を使用する

3.2.3. Logit functions

- Figure 9, 10, 11 は、信頼と自信の差分と、自動制御使用率をロジットフィットしたグラフ
 - 全被験者のデータを使用
 - ロジットモデル： $y=100/(1+\text{Exp}[s(x-b)])$
 - ◇ x ：信頼と自信の差分
 - ◇ y ：自動制御使用率
 - ◇ b ：バイアス(数が大きければ傾斜は右寄り)
 - ◇ s ：傾斜(数が大きければ急な傾斜)
 - 急な傾斜：信頼、自信の変化に対して完全自動/手動制御を選択
 - 緩やかな傾斜：信頼、自信の変化に対して、自動制御使用率の変化が少ない
- b (バイアス)について
 - 原料ポンプ：1.01
 - 蒸気ポンプ：0.24
 - 蒸気暖房装置：1.30
 - 手動制御を使用する傾向
($T-SC$ の差分が大きくなると自動制御を選択しない)
 - ◇ 先行研究(Muir, 1989; Lee & Muir, 1992)の結果と一致
- 蒸気暖房装置のバイアスが他より高かったことに関して
 - 蒸気暖房装置の働きが他に比べて不透明であった可能性
 - 蒸気ポンプと蒸気暖房装置を同時に自動制御するべきでないと考えた可能性
 - 自動化を信用していたのに使用しない
- s (傾斜)について
 - 原料ポンプ：0.40
 - 蒸気ポンプ：0.65
 - 蒸気暖房装置：1.40
- 蒸気暖房装置に関して
 - 信頼と自信の差分の変化に対して、自動制御使用率は大きく変化する

- 原料ポンプに関して
 - 信頼と自信の差分の変化に対して、自動制御使用率はあまり変化しない
- この結果は、Table 3 の結果と一致する

3.2.4. Exploratory behavior and interacting subsystems

- Figure 12 は、信頼が自信を上回ったときに、手動制御を使用した割合を示す
 - 信頼と自信の差分と、自動制御使用の不一致
 - 50%以上の試行で、この不一致が見られた
 - Early : 11~16 試行, Late : 21~27 試行
 - 1 日目に不一致が生じ、2 日目でも生じ続けた
- 探索的行動
 - 手動制御の能力を確認するために生じた可能性
 - Sheridan & Ferrell (1974)
 - ◇ Evaluation steps
 - ドライバーは環境の変化に適応するため、システムの反応を評価する
- 各サブシステムは独立していると理解しているが、自動/手動制御の組み合わせを考えた可能性

3.2.5. Time series model of trust, self-confidence and automation

- Figure 13 は、ARMAV(autoregressive moving average vector)モデルを示す
- モデルの妥当性
 - 原料ポンプ : 60.9%
 - 蒸気ポンプ : 80.5%
 - 蒸気暖房装置 : 86.5%
- 自動制御使用率は、過去の経験にも依存
 - 自動制御を使用すると、次の試行でも、自動制御の使用が誘発されると考えられる

→ 先行研究(Edwards, 1968; Tversky & Kahneman, 1974; Dorner, 1987)

 - ◇ 仮説や判断に矛盾する情報が与えられても、仮説や判断を変えない傾向
- 更に、自動制御使用率は個人差にも依存
 - 自動化への信頼が高いにも関わらず、手動制御を熟達させようとする
 - 自動化を信頼していないけれど、自動制御を使用し、厳しく監視する

4. Conclusion

- この研究では、自動化使用における自信の重要性について検討した

- その結果、自動化使用は、信頼と自信の差分に依存することが明らかとなった

- 信頼と自信の差分の変化は、自動化使用の変化と強く一致する
 - デザイナーは、オペレータの主観的信頼と自信について考慮する必要がある
 - 適切なパフォーマンスのフィードバックを与え、適切な自動化使用を促すべき
- 自動化使用は、過去に自動化を使用した経験に依存する
 - 誤って自動化を使用する可能性
 - 容易に自動／手動を切り替えられる構造が必要
- オペレータは手動を使用するバイアスを持っている
 - デザイナーは、自動化のパフォーマンスが優れていても、オペレータは手動操作を行う可能性を考慮する必要がある

- **Future work**
 - 実際の環境は、今回の実験で使用したシステムより複雑である
 - 様々な自動化使用に影響する要因の検討が必要
 - 信頼と自信がどのように自動化使用に影響するのか、詳細な検討が必要

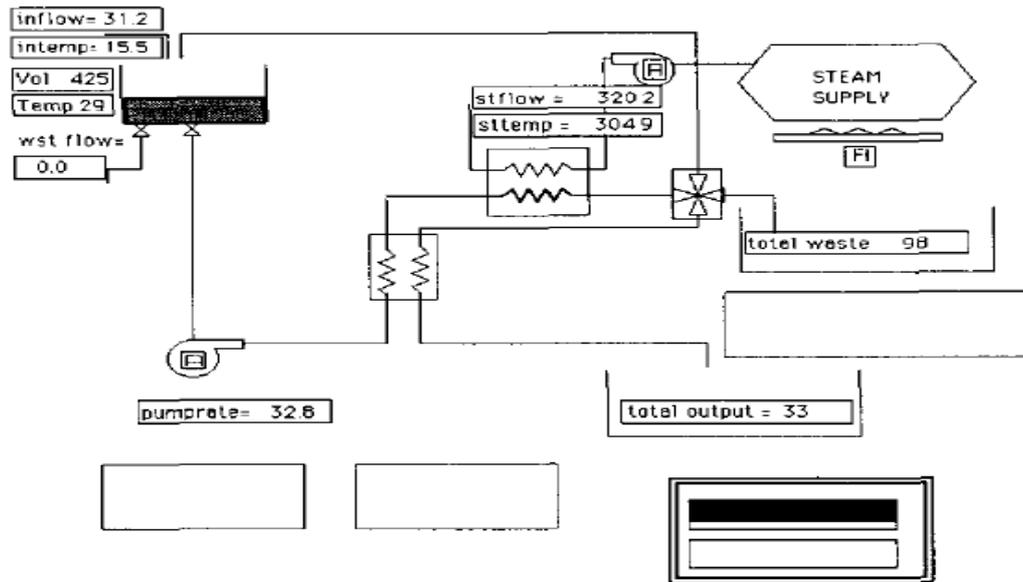


FIGURE 1. The mimic diagram of the pasteurization plant.

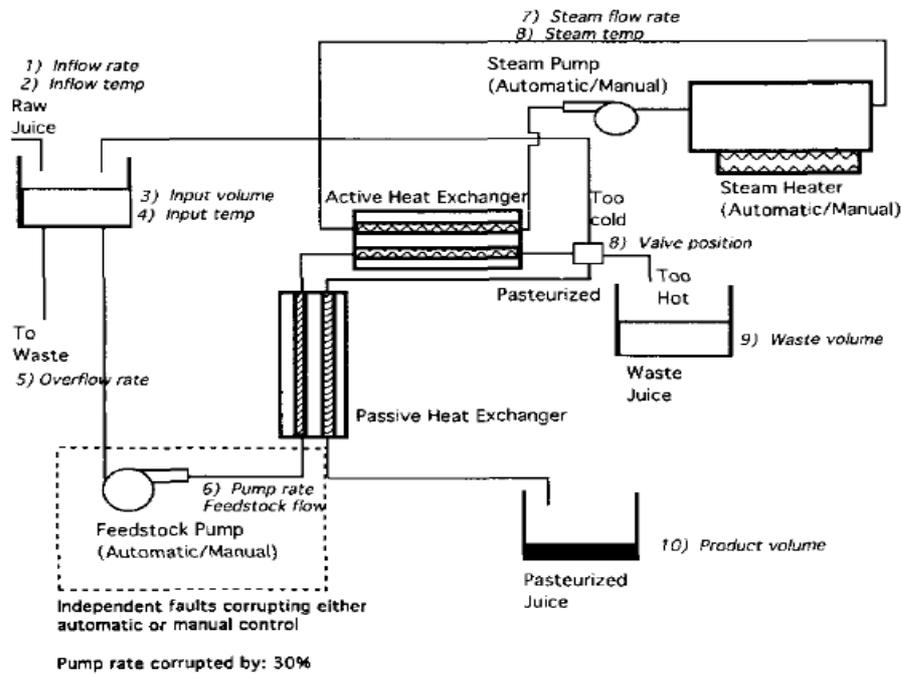


FIGURE 2. An illustration of the plant with the location of the faulty subsystem encircled by a dotted line.

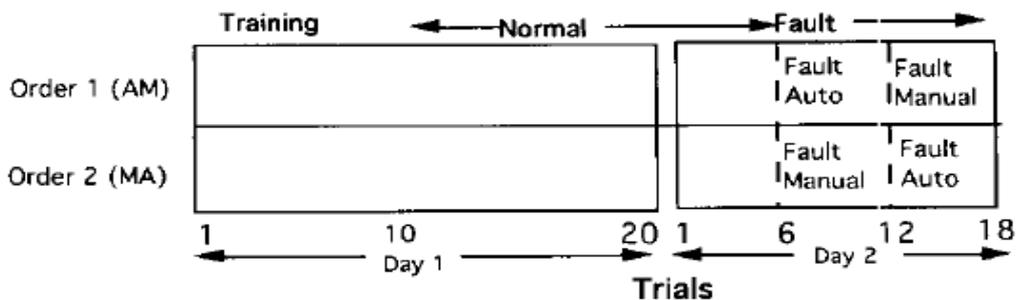


FIGURE 3. The two experimental groups and the occurrence and type of faults.

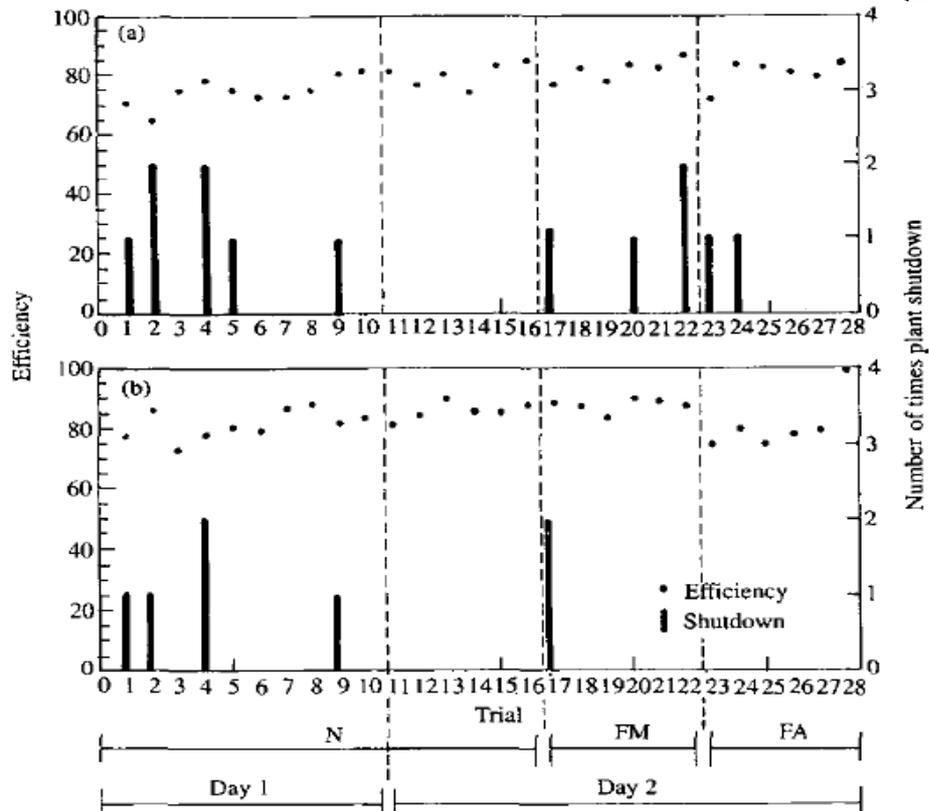


FIGURE 4. The fluctuation of plant efficiency and the occurrence of plant shutdowns, for the two experimental groups: (a) order 1: FA followed by FM; (b) order 2: FM followed by FA. Each point represents data from six operators. (N = normal operations, FM = fault affecting manual control, FA = fault affecting automation.)

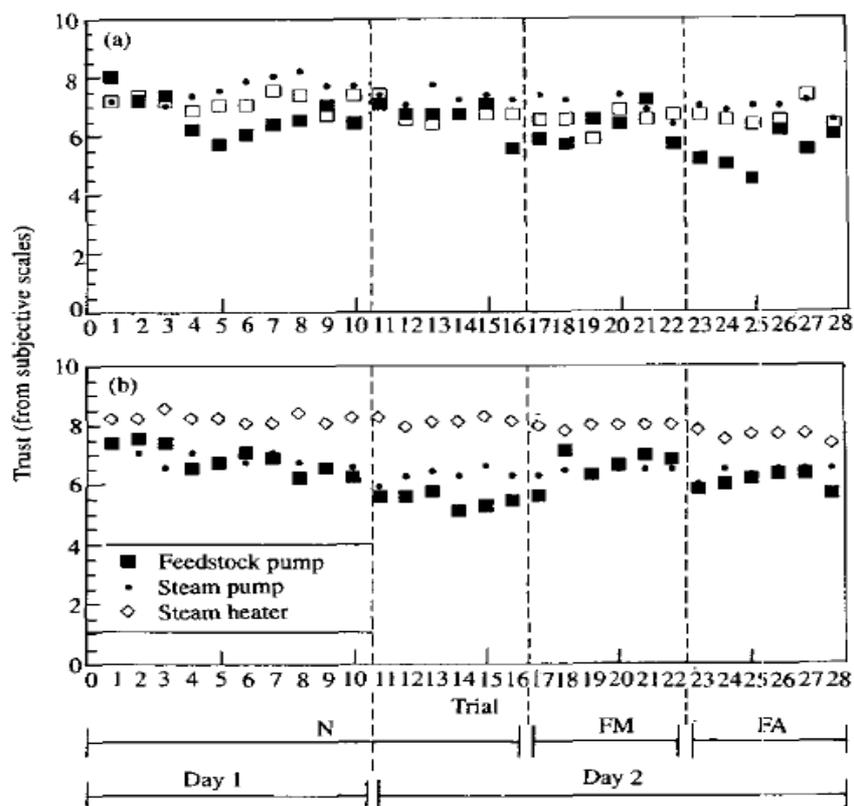


FIGURE 5. The fluctuation of trust in the automatic controllers, for the two experimental groups: (a) order 1: FA followed by FM; (b) order 2: FM followed by FA. Each point represents data from six operators. (N = normal operations, FM = fault affecting manual control, FA = fault affecting automation.)

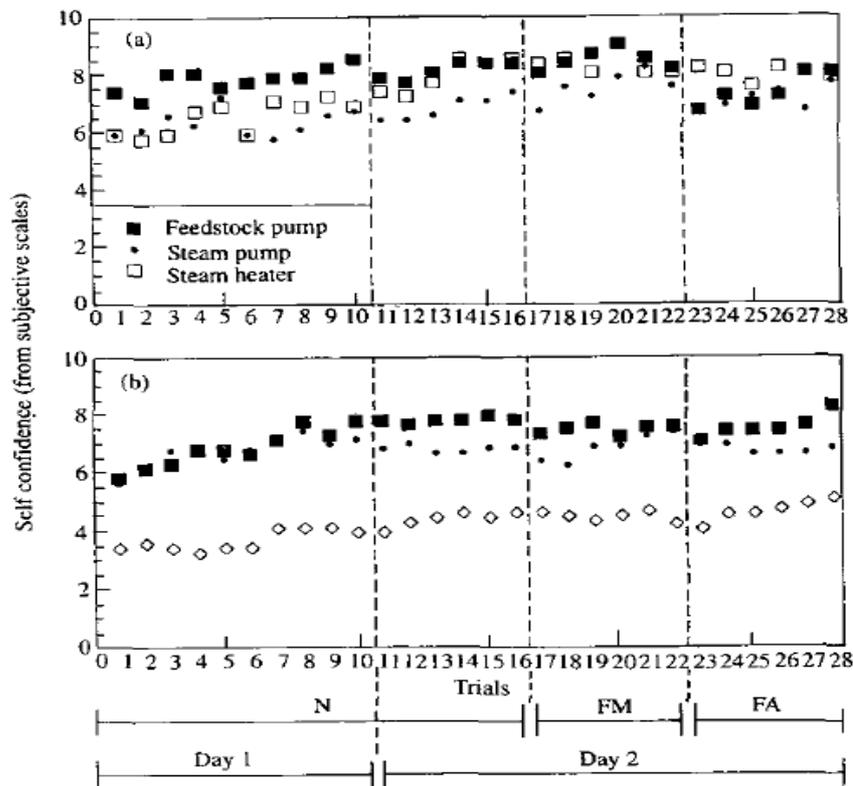


FIGURE 6. The fluctuation of self-confidence in the ability to control the subsystems manually, for the two experimental groups: (a) order 1: FA followed by FM; (b) order 2: FM followed by FA. Each point represents data from six operators. (N = normal operations, FM = fault affecting manual control, FA = fault affecting automation.)

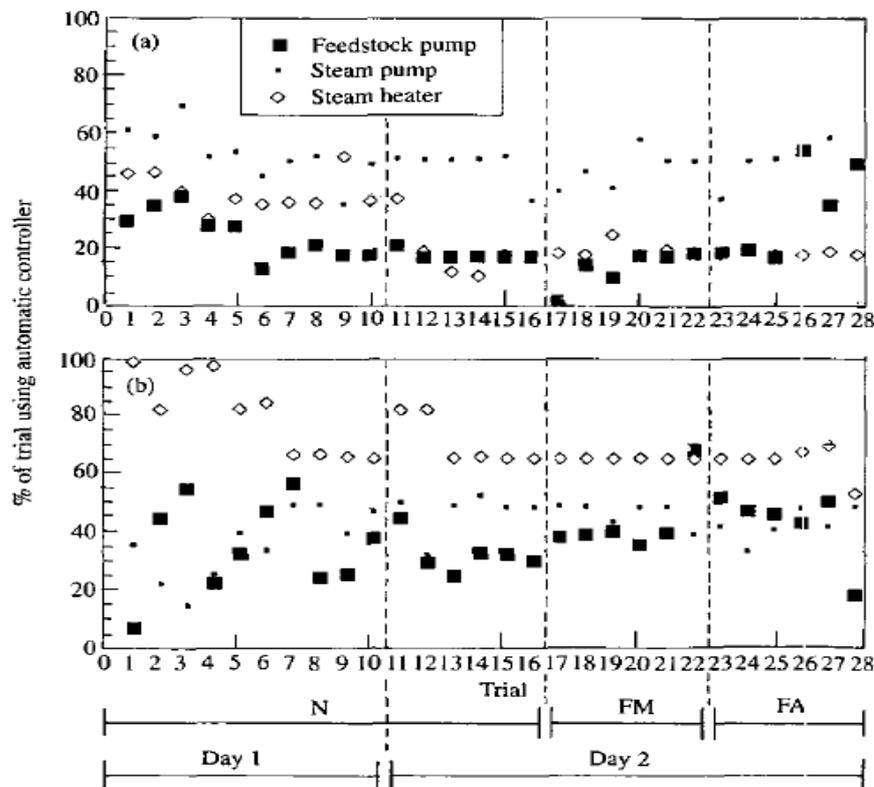


FIGURE 7. The fluctuation of the use of the automatic controllers, for the two experimental groups: (a) order 1: FA followed by FM; (b) order 2: FM followed by FA. Each point represents data from six operators. (N = normal operations, FM = fault affecting manual control, FA = fault affecting automation.)

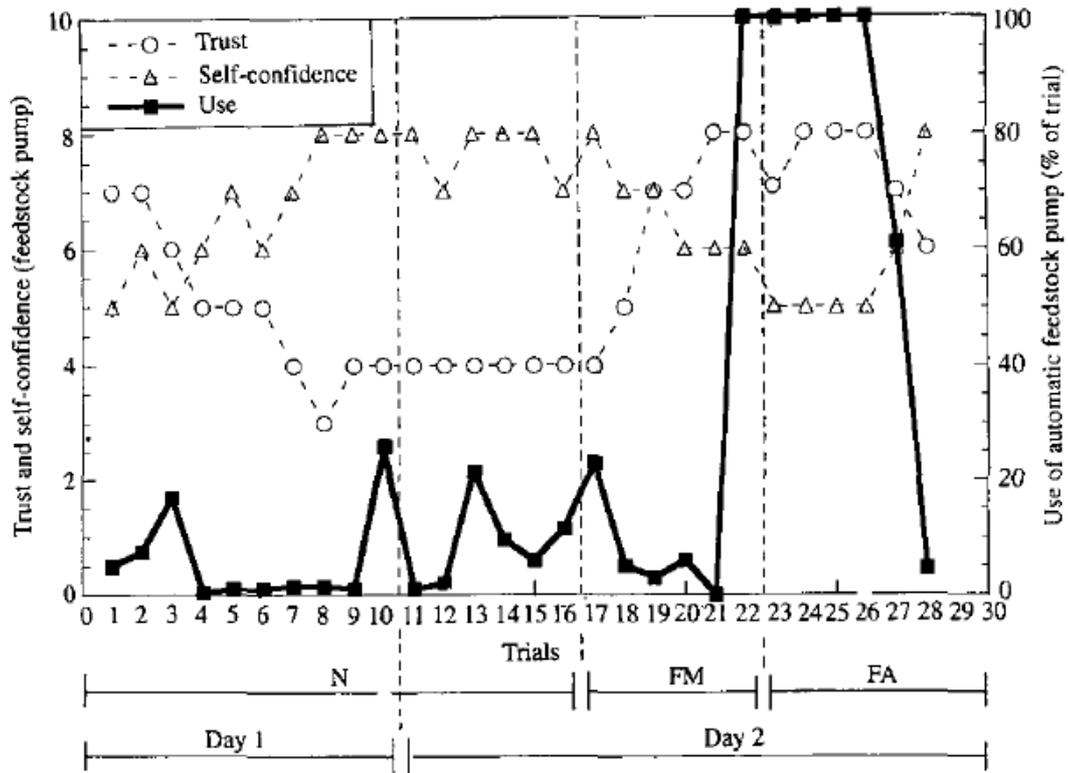


FIGURE 8. Trust, self-confidence, and the use of the automatic feedstock pump for Operator 6. (N = normal operations, FM = fault affecting manual control, FA = fault affecting automation.)

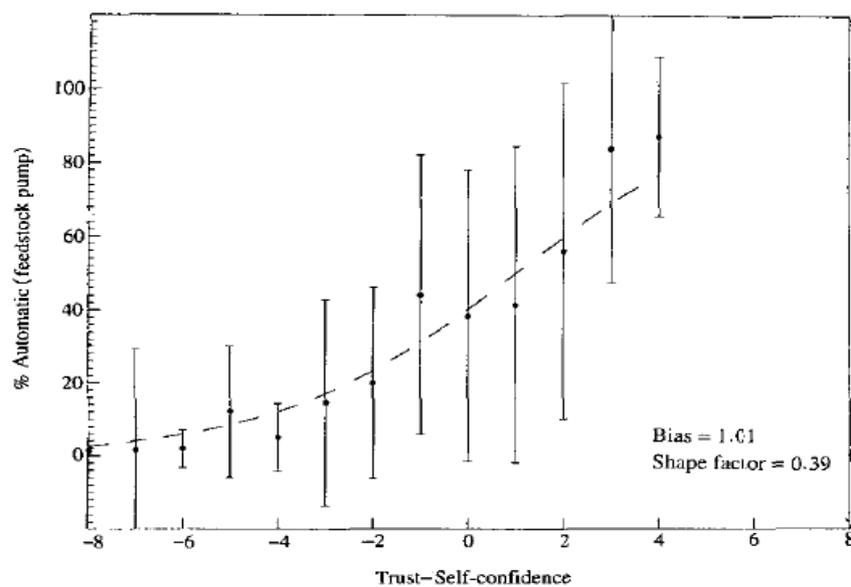


FIGURE 9. The use of the automatic controller of the feedstock pump as a function of the difference between trust and self-confidence (a single outlying data point at $T - SC = 6$ and % Automatic = 0 has been deleted from the graph). This graph represents the pooled data of all the operators, fitted by a logit function.

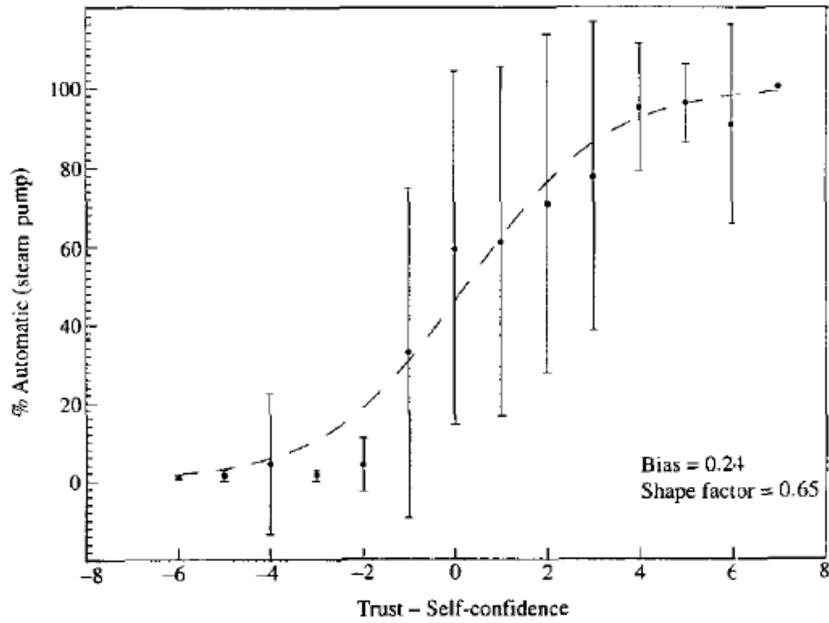


FIGURE 10. The use of the automatic controller of the steam pump as a function of the difference between trust and self-confidence. This graph represents the pooled data of all the operators, fitted by a logit function.

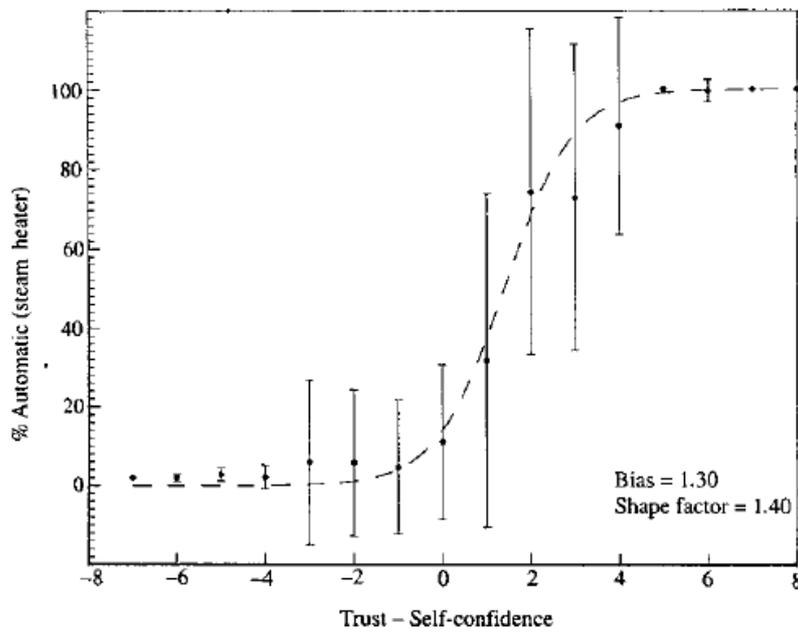


FIGURE 11. The use of the automatic controller of the steam heater as a function of the difference between trust and self-confidence. This graph represents the pooled data of all the operators, fitted by a logit function.

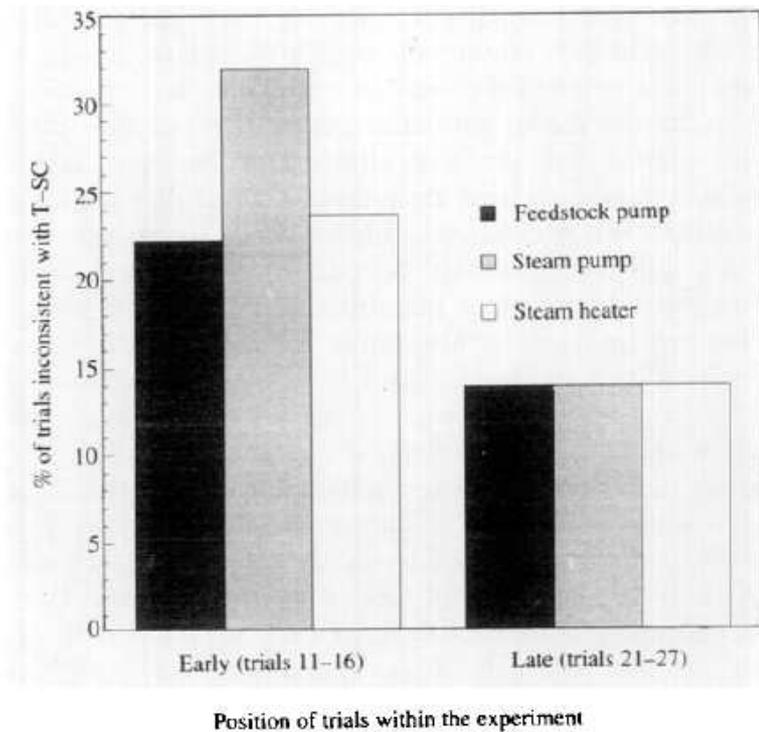


FIGURE 12. The percentage of trials with predominantly manual control, when trust exceeded self-confidence (exploratory behavior). The data in this figure has been pooled over all 12 operators.

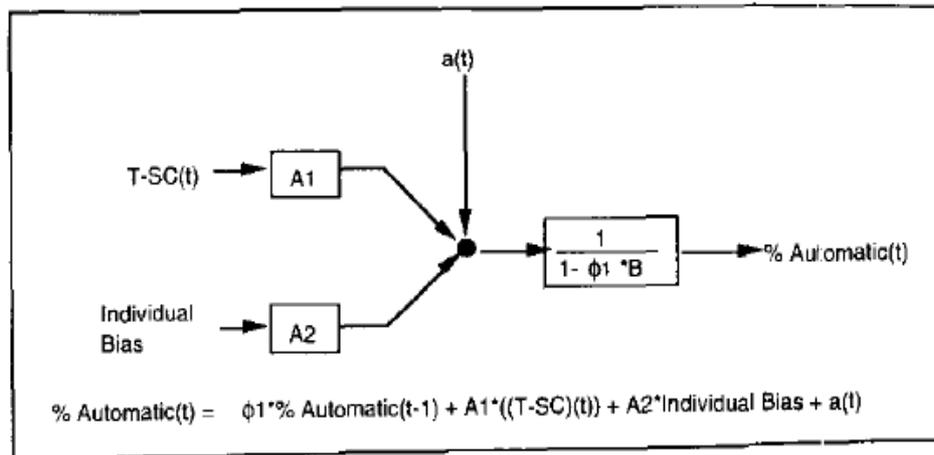


FIGURE 13. A block diagram representation and discrete differential equation showing the factors that influence the use of the automatic controllers. A1 and A2 represent the weights of T-SC and the individual bias towards manual control, a(t) represents normally distributed independent fluctuations, and ϕ represents how strongly the current use of automation depends on the past use of automation.