

自動化システムと警報システムの利用に関する実験的検討

Experimental Investigation of Use of Automation and Alert Systems

前東 晃礼[†], 三輪 和久[‡], 寺井 仁^{††}, 小島 一晃^{‡‡}, 森田 純哉[†]
 Akihiro Maehigashi, Kazuhisa Miwa, Hitoshi Terai, Kazuaki Kojima, Junya Morita

[†]名古屋大学未来社会創造機構, [‡]名古屋大学大学院情報科学研究科
^{††}名古屋大学大学院情報科学研究科/JST CREST, ^{‡‡}帝京大学ラーニングテクノロジー開発室
[†] Institute of Innovation for Future Society, Nagoya University
[‡] Graduate School of Information Science, Nagoya University
^{††} Graduate School of Information Science, Nagoya University/ JST CREST
^{‡‡} Learning Technology Laboratory, Teikyo University
 mhigashi@cog.human.nagoya-u.ac.jp

Abstract

In this study, we experimentally investigated the effects of the interaction between two individual systems, an automation system that conducts tasks and an alert system that monitors automation performance and alerts users to automation failures. The experimental results were discussed on the basis of the theory shown in previous studies.

Keywords — Automation system; Alert system; Trust; Miss; False alarm

1. はじめに

近年の科学技術の発展により、自動化システムが普及してきた。自動化システムは、人間の活動を肩代わりして自律的に課題を遂行するテクノロジーである[1]。ユーザは、自動化システムを使用することによって、作業負荷を削減できる。しかし、自動化システムを使用する上での問題は、自動化システムはエラーを起こし、深刻な事故を招く恐れがあるという点である[2]。そのため、ユーザは自動化システムを使用する際、自動化システムの稼動状況を監視して、自動化システムにエラーが生じた際は、そのエラーに対応する必要がある[3]。

警報システムは、自動化システムの稼動状況をユーザの代わりに監視して、自動化システムにエラーが生じた際は、そのエラーを警報によりユーザに通知するシステムである[4]。警報システムの使用によって、ユーザは、自動化システムの監視における作業負荷を削減し、自動化システムのエラーの見逃しを防ぐことができる。しかし、警報

システムを使用する上での問題は、自動化システムだけではなく、警報システムも Miss(未検出)または False alarm(誤検出、以下 FA)といったエラーを起こすという点である[5]。

このようなエラーを起こす可能性のある 2 種類のシステムを利用する際に生じる問題は、いずれか一方、または両方のシステムにエラーが生じた際に、ユーザは、実際に何が生じているかを理解し、エラー原因を同定することが困難であるという点である。これまでの自動化システムや警報システムに関する研究では、自動化システムや警報システムを使用する際、ユーザは、システムに対する信頼を評価パラメータとして、システム内部や外界の状況を推測することが明らかにされてきた。先行研究で明らかにされた内容は以下のよう

- **Preceding Findings(PF) I**: 自動化システムのパフォーマンスは、ユーザの自動化システムに対する信頼を決定する。具体的には、自動化システムのエラーは、ユーザの自動化システムに対する信頼を低下させる[3]。
- **PF II**: 警報システムに関する先行研究の実験結果は、警報システムの Miss と FA が、ユーザの警報システムに対する信頼を低下させることを予測する[5]。
- **PF III**: ユーザの警報システムに対する信頼は、**True alarm**(自動化システムのエラーに対する警報、以下 TA)への反応に影響する。特に、

FA の生じる警報システムを使用する際、ユーザは、警報システムに対する信頼を低下させ、警報を無視して TA への反応が遅くなる (Cry-Wolf Effect) [4].

先行研究では、自動化システムと警報システムは、異なる別のシステムとして、それぞれのシステムごとに上記の検討が行われてきた。それに対し、本研究では、自動化システムと警報システムの2種類のシステム間の相互作用に関する検討を行う。図1は、これまでの先行研究で検討されてきた内容と、本研究で検討を行う内容をまとめた概念図である。本研究のリサーチクエッションは以下である。

- Research question(RQ) I :自動化システムのパフォーマンスは、ユーザの警報システムに対する信頼に影響するか？
- RQ II :警報システムのパフォーマンスは、ユーザの自動化システムに対する信頼に影響するか？
- RQ III :ユーザの自動化システムに対する信頼は、TA への反応に影響するか？

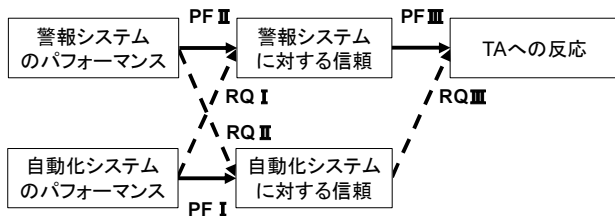


図1 先行研究で検討された内容(PF: Previous finding)と本研究で検討を行った内容(RQ: Research question)を示す概念図。実線は先行研究で明らかになったパス，破線は本研究で検討を行ったパスを示す。

2. 実験課題

我々は、探索課題と追従課題を同時に行う2重課題を作成した(図2)。図1における自動化システムは追従課題を遂行するシステムを示し、警報システムは、この追従課題の自動化システムを監視するシステムとして設定されている。探索課題では、参加者が、画面の上から下へ探索刺激が流れる妨害刺激(T)の中からターゲット刺激(ミラーL)

を検出し、ターゲットが画面上の二重線(検出領域)の内側にある状態でスペースキーを押す必要があった。ターゲットが正しく検出された場合、ターゲットの色は赤に変化した。ターゲットの検出ミス、または誤検出の場合、探索課題の得点は減点される。追従課題では、自動化システムが、画面の上から下へスクロールする路線を○印のカーソルとして表示されるビークルで追従を行う。基本的に、自動化システムは完璧な追従を行うが、課題中のある時点で自動化システムにエラーが生じ、10秒間ビークルは路線を追従しなくなるように設定されている。参加者は、自動化システムの稼動状況を監視して、自動化システムのエラーを検出した場合、左右の矢印キーを押して、ビークルを手動で操作する必要がある。ビークルが路線から外れた場合、追従課題の得点は減点される。実験では、追従課題で、自動化システムにエラーが生じた際、探索課題の画面上に赤い枠が警報として表示され、自動化システムにエラーが生じたことを参加者に通知した。また、自動化システムのエラーの後に、自動化システムは正常な稼動を再開し、その際、探索課題と追従課題の画面上に、「自動化システムの性能が回復しました」と表示した。更に、探索課題と追従課題は、2つのモニターに個別に表示され、参加者の正面に探索課題を表示するモニターが設置され、参加者の右側に追従課題を表示するモニターが設置された。

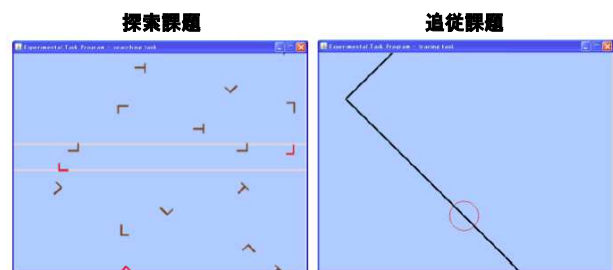


図2 二重課題

3. 実験1

3.1 方法

3.1.1 参加者

実験参加者は、大学生40名であった。

3.1.2 手続き

要因計画は、2 要因混合要因計画である。要因は、(1)自動化システムのパフォーマンス(高/低)参加者間；(2)警報システムのパフォーマンス(Hit/Miss/FA)参加者内であった。

参加者は、12 分間の課題を 3 試行行った。全参加者の内 21 名は、自動化システムのパフォーマンス高条件に、残りの 19 名は低条件にランダムに振り分けられた。自動化システムのパフォーマンス要因に関しては、3 試行にわたって、課題中に自動化システムのエラーが、高条件では 4 回生じ、低条件では 8 回生じた。次に、警報システムのパフォーマンス要因に関して、各試行は、以下で述べる警報システムの各パフォーマンス条件(Hit/Miss/FA)のいずれかが設定されており、設定順序はカウンターバランスがとられた。Hit 条件では、全てのエラーを Hit するように設定された。Miss 条件では、全てのエラーの内の半分を Hit し、もう半分を Miss するように設定された。FA 条件では、全てのエラーを Hit し、更に自動化システムのエラーと同じ回数 FA が生じるように設定された。

また、全ての警報システムのパフォーマンス条件で、最初と最後に生じる自動化システムのエラーのタイミングが統一され、その際、警報システムは TA を表示して、そのエラーを Hit するように設定された。最初の TA へのユーザの反応に基づいて、参加者間、および試行間の実験条件の等質性が判断された。その上で最後の TA へのユーザの反応に基づいて RQIII について検討を行った。

参加者には、探索課題と追従課題の両方で、できるだけ高い得点をとるように教示した。また、追従課題では、自動化システムにエラーが生じた場合にのみ、ピークルを手動で操作するように教示した。課題の終了後には、自動化システムと警報システムに対する信頼性のアンケートを個別に実施した。参加者には、各システムに対して 7 段階(1:全く信頼できなかった、2:ほとんど信頼できなかった、3:あまり信頼できなかった、4:どちらでもない、5:やや信頼できた、6:わりと信頼できた、7:非常に信頼できた)の評定を行わせた。この

アンケートの結果に基づいて、RQI および RQII について検討した。

3.2 予測

システム間の評定、および反応に関して、以下が予測される。

まず、RQI に関して、もし自動化システムのパフォーマンスが警報システムに対する信頼に影響するのであれば、以下の予測 1 が期待される。

- 予測 1:自動化システムのパフォーマンス高条件で、低条件に対して、警報システムに対する信頼が高くなる。

RQII に関して、警報システムに関する先行研究では、Miss の生じる警報システムを使用する際、ユーザは、警報システムに対する信頼を低下させ、警報システムに依存せずに、ユーザが自ら自動化システムの作動状況の監視を行うことが明らかにされている[5]。このような現象は、Miss の生じる警報システムを使用するときのみ生じ、エラーを起こさない警報システムや FA の生じる警報システムを使用する際には生じない[5]。このことから、警報システムのパフォーマンスが自動化システムに対する信頼に影響するのであれば、以下の予測 2 が期待される。

- 予測 2:警報システムのパフォーマンス Miss 条件で、Hit 条件と FA 条件に対して、自動化システムに対する信頼が低くなる。

RQIII に関して、自動化システムに関する先行研究では、自動化システムに対する過信は、自動化システムの監視の怠りや異常状態の見逃しを招くこと(Complacency)が指摘されている[6]。このことから、もし自動化システムに対する信頼が TA への反応に影響するのであれば、以下の予測 3 が期待される。

- 予測 3:自動化システムのパフォーマンス高条件で、低条件に対して、自動化システムに対する信頼が高いと共に、最後の TA への反応が遅くなる。

3.3 結果

実験 1 の分析では、全ての従属変数に関して、2(自動化システムのパフォーマンス:高/低)×3(警

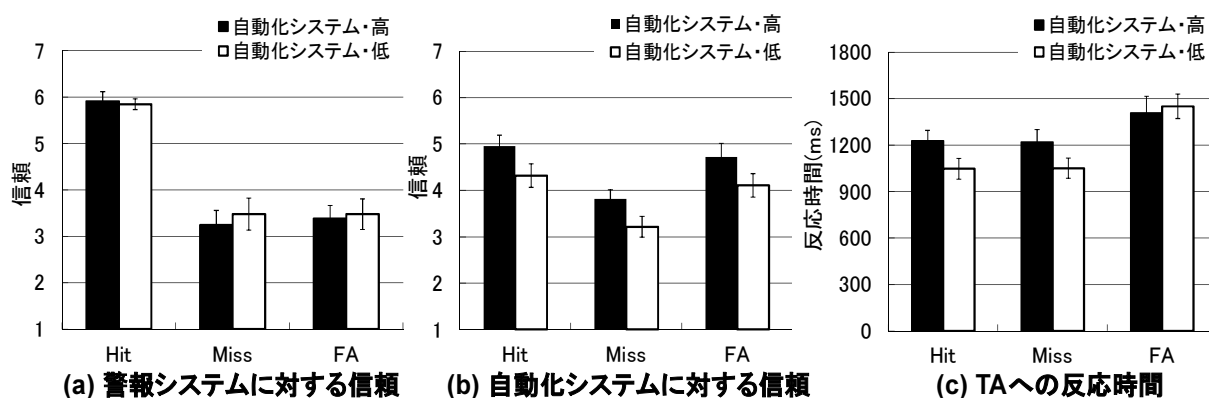


図3 (a)警報システムに対する信頼, (b)自動化システムに対する信頼, (c)TA への反応時間.

報システムのパフォーマンス:Hit/Miss/FA)のANOVAを実施した. まず, RQ I について検討を行うため, 課題終了後の警報システムに対する信頼性評定の結果について分析を行った. 図3aは, 警報システムに対する信頼性評定の結果を示す. 分析を行った結果, 交互作用($F(2, 76)=1.16, n.s.$)と自動化システムのパフォーマンス要因の主効果($F(1, 38)=1.13, n.s.$)はみられなかった. また, 警報システムのパフォーマンス要因に主効果がみられた($F(2, 76)=58.53, p<.001$). 自動化システムのパフォーマンス要因に主効果がみられなかったため, 予測1は確認されなかった.

次に, RQ II について検討を行うため, 課題終了後の自動化システムに対する信頼性のアンケート結果について分析を行った. 図3bは, 自動化システムに対する信頼性評定の結果を示す. 分析を行った結果, 交互作用はみられなかった($F(2, 76)=0.01, n.s.$). また, 自動化システムのパフォーマンス要因に主効果がみられ, 自動化システムのパフォーマンス低条件よりも高条件で信頼が高いことが示された($F(1, 38)=5.09, p<.05$). 更に, 警報システムのパフォーマンス要因に主効果がみられた($F(2, 76)=20.26, p<.001$). ライアン法による多重比較を行った結果, Hit条件よりもMiss条件で信頼は低く($p<.001$), FA条件よりもMiss条件で信頼は低い($p<.001$)ことが示された. Hit条件とFA条件の間に有意差はみられなかった($n.s.$). 分析の結果, 警報システムのパフォーマンスMiss条件で, Hit条件とFA条件よりも信頼が低いことから, 予測2が確認された. また, 自動化シス

テムのパフォーマンス要因の主効果が確認されたことを前提にして, RQ III に関する検討を行った.

RQ III について検討を行うため, 最後のTAへの反応時間について分析を行った. 図3cは, 最後のTAへの反応時間を示す. 分析を行った結果, 交互作用($F(2, 76)=1.36, n.s.$)と自動化システムのパフォーマンス要因の主効果($F(1, 38)=1.88, n.s.$)はみられなかった. また, 警報システムのパフォーマンス要因の主効果がみられた($F(2, 76)=9.85, p<.001$). 分析の結果, 自動化システムのパフォーマンス要因の主効果はみられず, 予測3は確認されなかった.

なお, 最初のTAへの反応時間について分析の結果は, 交互作用($F(2, 76)=0.05, n.s.$), 自動化システムのパフォーマンス要因の主効果($F(1, 38)=2.50, n.s.$), そして, 警報システムのパフォーマンス要因の主効果($F(2, 76)=0.56, n.s.$)のいずれも有意ではなかった.

RQ III について検討を行った結果, 自動化システムに対する信頼は, TAへの反応には影響しないことが示された. ただし, この結果に関しては疑義がある. この実験では, 自動化システムのパフォーマンス高条件では, 自動化システムのエラーが4回生じ, 低条件では8回生じるように設定された. その自動化システムのエラーの回数を基準に, Miss条件の場合は全てのエラー内の半分でMissが生じ, FA条件の場合はエラーの回数の2倍FAが生じるように設定された. そのため, 自動化システムのパフォーマンス高条件と低条件で, MissとFAを経験する回数が異なる. その結果,

Miss と FA を経験した回数という第 3 の要因が、参加者の反応に影響した可能性が考えられる。この疑義をリジェクトするために、我々は以下の実験 2 を行った。

4. 実験 2

4.1 方法

4.1.1 参加者

実験参加者は、大学生 38 名であった。

4.1.2 手続き

要因計画は、2 要因混合要因計画である。要因は、(1)自動化システムのパフォーマンス (高/低) 参加者間; (2)警報システムのパフォーマンス (5 hits/Miss/2 hits/FA) 参加者内であった。

実験 1 と同様の 2 重課題を使用して実験を行った。ただし、実験 2 では、全ての参加者が、警報システムの Miss と FA を同じ回数経験するように操作するため、課題を第 1 フェーズと第 2 フェーズに分けて、第 1 フェーズで自動化システムのパフォーマンス要因の操作を行い、第 2 フェーズで警報システムのパフォーマンス要因の操作を行った。第 1 フェーズ、第 2 フェーズ合わせて 10 分 30 秒の試行を計 4 試行実施した。その他の課題設定は実験 1 と同様である。

まず、第 1 フェーズは 4 分 30 秒間行われた。第 1 フェーズでは、全ての参加者は、警報システムを使用せずに、自力で自動化システムの挙動をモニターしつつ 2 重課題を行った。全参加者の内 20 名は、自動化システムのパフォーマンス高条件に、残りの 18 名は低条件にランダムに振り分けられた。第 1 フェーズの間に自動化システムのエラーが、自動化システムのパフォーマンス高条件では 1 回生じ、低条件では 5 回生じた。第 1 フェーズ終了後に、課題画面はグレイアウトされ、実験 1 と同様の自動化システムに対する信頼性評定のアンケートが実施された。信頼性評定を終えた参加者は、任意のタイミングでキーボードの「R」キーを押すことによって第 2 フェーズを開始した。

続いて、第 2 フェーズは、各警報システムのパフォーマンス条件 (5 hits/Miss/2 hits/FA) の中か

ら 1 つの条件において、6 分間課題に取りくんだ。

4 試行における 4 条件の順番はカウンターバランスが取られた。第 2 フェーズでは、警報システムの Miss の影響について検討を行うため、Miss 条件と比較を行う 5 hits 条件を設け、両条件で自動化システムのエラーが 5 回生じるように設定した。5 hits 条件では、5 回の全てのエラーを Hit するように設定され、Miss 条件では、最初と最後のエラーのみを Hit し、その他のエラーは Miss するように設定された。更に、警報システムの FA の影響について検討を行うため、FA 条件と比較を行う 2 hits 条件を設け、両条件で自動化システムのエラーが 2 回生じるように設定された。2 hits 条件では、2 回の全てエラーを Hit するように設定され、FA 条件では、2 回の全てのエラーを Hit し、更に 1 回目と 2 回目のエラーの間に 3 回 FA が生じるように設定された。第 2 フェーズ終了後には、実験 1 と同様に、自動化システムと警報システムに対する信頼性評定のアンケートを個別に実施した。また、第 2 フェーズでは、最初と最後に生じる自動化システムのエラーのタイミングを統一し、その際、警報システムは TA を表示して、そのエラーを Hit するように設定された。最初と最後の TA へのユーザの反応に基づいて、RQIII について検討を行う。

4.2 予測

RQIII に関して、もし自動化システムに対する信頼が TA への反応に影響するのであれば、以下の予測 4 が期待される。

- 予測 4: 自動化システムのパフォーマンス高条件で、低条件に対して、第 1 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼が高いと共に、第 2 フェーズの最初の TA への反応が遅くなる。

同様に、以下の予測 5 が期待される。

- 予測 5: 自動化システムのパフォーマンス高条件で、低条件に対して、第 2 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼が高いと共に、第 2 フェーズの最後の TA への反応が遅くなる。

また、RQ I と II に関する実験 1 の結果に基づいて、以下が確認されることが期待される。

- 予測 a: 自動化システムのパフォーマンス高条件と低条件で、警報システムに対する信頼に違いはみられない。
- 予測 b: 警報システムのパフォーマンス Miss 条件で、5 hits 条件に対して、第 2 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼が低くなる。一方、警報システムのパフォーマンス 2 hits 条件と FA 条件では、自動化システムに対する信頼に違いはない。

4.3 結果

実験 2 の分析では、全ての従属変数に関して、2(自動化システムのパフォーマンス:高/低)×2(警報システムのパフォーマンス:5 hits/Miss)の ANOVA(分析 1)と 2(自動化システムのパフォーマンス:高/低)×2(警報システムのパフォーマンス:2 hits/FA)の ANOVA(分析 2)を行った。まず、第 1 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼性評価のアンケートについて分析を行った。その結果、交互作用(分析 1: $F(1, 36)=1.29, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=1.22, n.s.$)はみられなかった。また、自動化システムのパフォーマンス要因に主効果がみられ、自動化システムのパフォーマンス低条件よりも高条件で、自動化システムに対する信頼が高いことが示された(分析 1: $F(1, 36)=26.25, p<.001$; 分析 2: $F(1, 36)=14.73, p<.001$)。警報システムのパフォーマンス要因の主効果(分析 1: $F(1, 36)=.35, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=.67, n.s.$)はみられなかった。分析の結果、自動化システムのパフォーマンス要因の主効果がみられたことから、この結果を前提にして後続の RQIII に関する検討を行った。

第 2 フェーズの最初の TA への反応時間について分析を行った。図 4 は、第 2 フェーズの最初の TA への反応時間の結果を示す。分析を行った結果、交互作用はみられなかった(分析 1: $F(1, 36)=.56, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=.87, n.s.$)。また、自動化システムのパフォーマンス要因に主効果がみられ、自動化システムのパフォーマンス低条件よりも高条件で、反応時間が長いことが示された

(分析 1: $F(1, 36)=7.56, p<.01$; 分析 2: $F(1, 36)=4.20, p<.05$)。更に、警報システムのパフォーマンス要因の主効果(分析 1: $F(1, 36)=.90, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=1.46, n.s.$)はみられなかった。分析の結果、自動化システムのパフォーマンス要因の主効果がみられたことから、予測 4 が確認された。

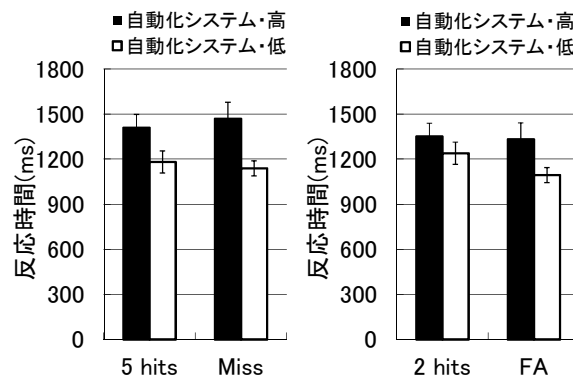


図 4 第 2 フェーズの最初の TA への反応時間

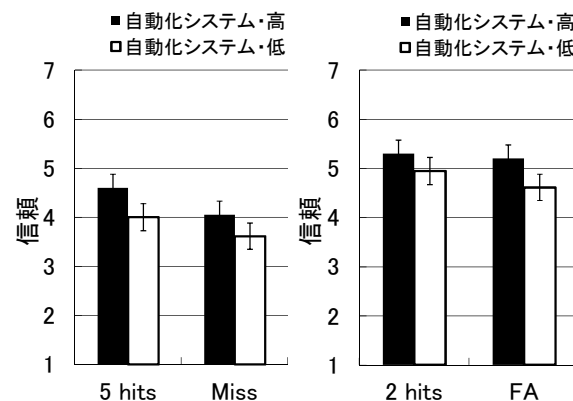


図 5 第 2 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼性評価

次に、第 2 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼性のアンケート結果について分析を行った。図 5 は、第 2 フェーズ終了後の自動化システムに対する信頼性評価の結果を示す。その結果、交互作用(分析 1: $F(1, 36)=.11, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=.44, n.s.$)と自動化システムのパフォーマンス要因の主効果(分析 1: $F(1, 36)=2.73, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=2.46, n.s.$)はみられなかった。更に、警報システムのパフォーマンス要因の主効果に関しては、分析 1 では有意傾向がみられ、Hit 条件よりも Miss 条件で信頼は低いことが示された($F(1, 36)=5.06, p=.06$)。一方、分析 2 では有意差はみられなかった($F(1, 36)=1.53, n.s.$)。分析の結果、自

自動化システムのパフォーマンス高条件と低条件の間に信頼評定の違いがみられず、予測 5 を検討する前提が確立されなかった。なお、警報システムのパフォーマンス Miss 条件で、Hit 条件よりも自動化システムに対する信頼は低いことから、予測 b が確認された。

次に、第 2 フェーズ終了後の警報システムに対する信頼性のアンケート結果について分析を行った。図 6 は、警報システムに対する信頼性評定の結果を示す。分析を行った結果、交互作用(分析 1: $F(1, 36)=.06, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=.14, n.s.$)と自動化システムのパフォーマンス要因の主効果(分析 1: $F(1, 36)=.06, n.s.$; 分析 2: $F(1, 36)=.72, n.s.$)はみられなかった。また、警報システムのパフォーマンス要因に主効果がみられた(分析 1: $F(1, 36)=126.50, p<.001$; 分析 2: $F(1, 36)=174.52, p<.001$)。分析の結果、自動化システムのパフォーマンス要因の主効果がみられなかったことから、予測 a が確認された。

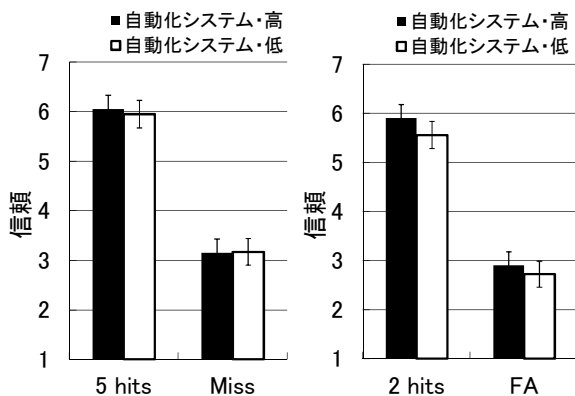


図 6 警報システムに対する信頼性評定

5. 考察

本研究では、自動化システムと警報システムの 2 種類のシステム間の影響について実験的な検討を行った。RQI と II に関して、実験 1 の結果、自動化システムのパフォーマンスは警報システムに対する信頼には影響せず、逆に、警報システムのパフォーマンスは自動化システムに対する信頼に影響した。自動化システムは課題を遂行するシステムであり[1]、課題を遂行する上で最も重要な役割を担う。本研究の参加者は、警報システムの稼

動状況よりも、自動化システムの稼働状況の変化に警戒心を高めていたと考えられる。その結果、参加者の警報システムに対する信頼は安定し、一方、参加者の自動化システムに対する信頼は敏感に変化したと考えられる。

RQIII に関して、実験 2 の結果、自動化システムに対する信頼は TA への反応に影響した。本研究の実験では、自動化システムに対する信頼が高い参加者は、自動化システムのエラーに対する警戒心を低下させ、TA が表示されている場合でも、自動化システムのエラーへの反応が遅れたと考えられる。

参考文献

- [1] Parasuraman, R., & Riley, V. (1997) "Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse", *Human Factors*, Vol. 39, No. 2, pp. 230–253.
- [2] Lee, J. D., & See, K. A. (2004) "Trust in automation: Designing for appropriate reliance", *Human Factors*, Vol. 46, No. 1, pp. 50–80.
- [3] Lee, J. D., & Moray, N., (1992) "Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems", *Ergonomics*, Vol. 35, No. 10, pp. 1243–1270.
- [4] Parasuraman, R., & Wickens, C. D. (2008) "Humans: Still vital after all these years of automation", *Human Factors*, Vol. 50, No. 3, pp. 511–520.
- [5] Dixon, S. R., & Wickens, C. D. (2006) "Automation reliability in unmanned aerial vehicle control: A reliance-compliance model of automation dependence in high workload", *Human Factors*, Vol. 48, No. 3, pp. 474–486.
- [6] Moray, N., & Inagaki, T. (2001) "Attention and complacency", *Theoretical Issues in Ergonomics Science*, Vol. 1, No. 4, pp. 354–365.