

人-人と人-自動化システムの協同における パフォーマンスの鋭敏性に関する実験的検討

Experimental investigation of sensitivity to performance in human-human
and human-automation cooperation

前東晃礼¹ 三輪和久¹ 小島一晃²

Akihiro Maehigashi¹, Kazuhisa Miwa¹, and Kazuaki Kojima²

¹名古屋大学大学院情報学研究科

¹Graduate School of Informatics, Nagoya University

²帝京大学ラーニングテクノロジー開発室

²Technology Laboratory, Teikyo University

Abstract: This study investigated the delegation of tasks to a partner in cooperation with a human partner and with an automation system as a system partner. In the experiment, a line-tracing task was used, in which the performance in the task of the participants and their partners was dynamically altered at multiple levels. The participants were informed that their task partners were human (human condition) or automation system (system condition). However, in reality, all participants performed their task with an automation system. The results showed that sensitivity to change in the task performance of the participants and their partners was higher, and the suitability of task delegation was greater in the system condition than in the human condition. These results were discussed based on the previous studies.

はじめに

自動化システムとの協同

近年、AIの発展など、自動化システムがいたるところに入り込んでいる。自動化システムは、人間が行う活動を肩代わりするシステムである[1]。現在は、お掃除ロボットや自動運転システムなどの自動化システムが普及し、今後、人間の様々な活動が自動化されていくだろう。自動化システムは、環境からの入力に対して、一定の自律性を有する意思決定機構を持つ人工物である。そのため、人間の身体機能や認知機能を拡張する道具とは異なり、道具を利用した活動よりも、チームパートナーとの協同として扱われる[2]。

自動化システムとの協同において、システムユーザは、監視制御の役割を持つ[3]。監視制御において最も重要であることは、自動化システムの自動遂行とユーザによるマニュアル遂行のパフォーマンスを監視して、その優劣に基づいて、システムへの課題の委託を決定することである。規範的に考えて、システムの方が高パフォーマンスを示すときはシステ

ムに課題を委託して、ユーザの方が高パフォーマンスを示すときはユーザ自ら課題を行う必要がある。しかし、システムへの不適切な課題の委託である Misuse または Disuse が生じることがある。Misuse は、ユーザが自ら行うべき課題をシステムに任せることであり、また、Disuse は、マニュアル遂行が優越する状況下で、システムに課題を委託することである[1]。たとえば、自動運転システムは、悪天候下では、前方の状況を正常に認識しない可能性がある。そのようなマニュアル遂行が優越する状況下で、自動運転システムに運転を任せることが Misuse である。一方、自動運転システムによって、他の車両の急な割り込みに対応できる状況であるにも関わらず、システムに運転を任せないことが Disuse である。

上記のように、自動化システムは、身体機能を拡張するナイフやハンマーなどの古典的な道具や、認知機能を拡張するコンピュータなどの認知的人工物とは異なる第3世代の道具であり[4]、人類にとっての新しいパートナーの出現と捉えることができる。この状況において、自動化システムとの協同の性質を知ること、特に人間との協同と差を理解することが重要である。

自動化システムへの委託の決定要因

自律性を有する自動化システムは、その内部の情報処理が複雑であり、環境からの影響や、ユーザの働きかけに対する応答がどのように処理されるかを把握することは困難である[5]。このような自動化システムに対して、ユーザは信頼を形成し、その信頼に基づいて自動化システムへの課題の委託を決定することが実験的に明らかにされてきた。

Lee and Moray [6]は、ジュースプラントを用いて、システムへの信頼と課題の委託の関係について実験的検討を行った。この課題では、コンピュータのモニター上にジュースプラントが再現され、実験参加者は、自動化システムに課題を委託するか、自分で課題の操作を行うかを決定しながらジュースの低温殺菌を行う必要があった。課題中に、自動化システムは、エラーを起こして正常に稼動しなくなるように設定された。また、課題中には、一定間隔で、自動化システムに対する信頼の主観評定が測定された。実験の結果、システムエラーが発生した後に、システムに対する信頼は低下し、それに伴い、参加者がシステムに課題を委託する割合は低下することが明らかとなった。また、システムが正常な稼動を再開した後に、低下した信頼は徐々に回復し、それに伴い、システムに課題を委託する割合も徐々に回復することが明らかとなった。このようなシステムへの信頼と課題委託との関係は、その他の実験研究でも同様に確認されている[7]。

このように、ユーザは、自動化システムのパフォーマンスから信頼を形成し、その信頼に基づいてシステムへの課題の委託を決定する。そのため、ユーザがシステムのパフォーマンスを高く見積もり、システムを過信した場合に Misuse が生じる。一方、ユーザがシステムのパフォーマンスを低く見積もり、システムに過度の不信を持った場合に Disuse が生じる[1]。

本研究の関心と特徴

本研究の関心は、自動化システムとの協同におけるシステムへの課題委託の特性を、人間との協同の場合と対比的に理解することである。これまでに、人間との協同とシステムとの協同の比較検討を行った先行研究[8][9]は、課題遂行中のパートナーのエラーに対する対応という限定的な活動を扱っていた。それに対して、本研究は、課題遂行中に、自分とパートナーとのパフォーマンスの優劣が動的に変化する状況を設定し、それに伴うパートナーへの課題の委託行動を観察することで、自動化システムへの委託の性質を理解する。

仮説

自動化システムとの協同におけるシステムへの課題委託の決定要因に関して、上述のように、システムへの信頼はシステム課題委託の決定に影響することが明らかにされている[6][7]。一方、人間との協同において、人の行動と人間への信頼は必ずしも一致しない[10]。信頼の程度に関わらず、敵対行動または協力的行動をとる。これらのことから、本研究では以下の仮説 1 について検討を行う。

仮説 1: パートナーへの信頼と課題委託の関連は、システムとの協同で現れ、人間との協同では現れない。

また、人間との協同とシステムとの協同を比較した先行研究[8][9]では、人間との協同よりもシステムとの協同で、ユーザ自身またはパートナーの課題遂行のエラーが生じた際、そのエラーへの鋭敏性は高くなる傾向がみられた。つまり、パートナーのエラー発生時には自分で操作を行い、そして参加者自身のエラー発生時にはパートナーに課題を委託する傾向がみられた。

このことから、パフォーマンスの優劣の変化に対する課題の委託においても、システムとの協同では、自分とパートナーのパフォーマンス変化に対する鋭敏性は高くなると考えられる。また、それにより、人間との協同よりもシステムとの協同で、課題委託の適切性が高くなると考えられる。つまり、パートナーの方が高パフォーマンスを示すときにシステムに課題を委託し、また、ユーザの方が高パフォーマンスを示すときに自分で課題を遂行する傾向がみられる可能性がある。本研究の仮説 2 は以下である。

仮説 2: 人間との協同よりもシステムとの協同で、自分とパートナーのパフォーマンス変化に対する鋭敏性は高くなる。それに伴い、課題委託の適切性が高くなる。

実験課題

本実験では、Maehigashi, Miwa, Terai, Kojima, and Morita [11]で用いられた路線追従課題(図 1)を使用した。この課題では、参加者は、赤丸のビークルで路線の追従を行った。ビークルが路線から離れると操作失敗となり、課題の得点が減点された。課題中に、参加者は、自動追従システムに課題を任せるパートナー委託モードと、参加者自らが課題を行う自己操作モードのいずれかを選択することが可能であった。パートナー委託モードでは、自動追従システムがビ

ークルの操作を遂行し、また、自己操作モードでは、参加者はキーボード上の左右の矢印キーを押してビークルの操作を行った。参加者は、スペースキーを押すことによって、モードの切り替えを行うことが可能であった。

これらの課題では、パートナー委託モードと自己操作モードのパフォーマンスを変化させるために、各モードの能力を実験的に操作した。具体的には、パートナー委託モードの能力(CP: Capability of partner's operation)と自己操作モードの能力(CS: Capability of self-operation)に各5水準(30, 40, 50, 60, 70)の能力値を設け、課題遂行中に、両モードの能力値が独立して変化するように設定した。CPとCSの能力値が高いほど、それぞれのモードによる路線追従は容易であった。たとえば、CPまたはCSの値が30であれば、直線には対応できるが、カーブに対応できず、カーブした路線を追従することが困難であった。また、CPまたはCSの値が50であれば、路線の緩いカーブには対応できるが、急なカーブには対応できなかった。そして、CPまたはCSの値が70であれば、ほぼ全ての路線のカーブに対応でき、完璧に近い路線追従を行うことが可能であった。

本課題において、課題得点を最大化させるためには、各組合せにおいてパートナー委託モードと自己操作モードにおける追従パフォーマンスを比較して、両モードの優劣に基づいて、高いパフォーマンスを示すモードを選択する必要がある。

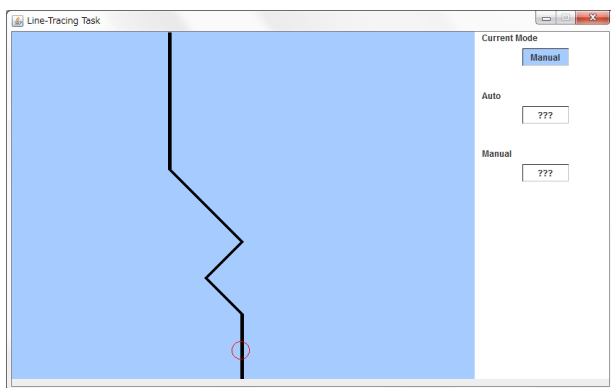


図 1: 路線追従課題

実験

方法

参加者

参加者は、大学生 41 名であった。システム条件に 20 名、ヒューマン条件に 21 名がランダムに割り振られた。

手続き

まず、参加者に、路線追従課題について説明し、その後、課題のパートナーについて説明した。システム条件では、課題のパートナーが自動追従システムであると教示した。また、ヒューマン条件では、課題のパートナーが実験室内の他の参加者であると教示した。しかし、実際には、両条件とも、パートナーは自動追従システムであった。さらに、課題の目標として、課題終了後に、課題得点ができる限り高くなることを目指して課題を行うように教示した。課題について説明を行った後、練習課題を行ったとして、1 試行 40 秒の試行を 4 回実施した。

練習課題の後に、本課題を行った。本課題では、 $5(\text{CP} : 30,40,50,60,70) \times 5(\text{CS} : 30,40,50,60,70)$ の全 25 試行を参加者ごとにランダムな順で実施した。各試行は 40 秒で切り替わった。また、課題画面上に CP と CS の値は表示しなかった。試行が切り替わる際は、課題画面中央に「操作能力が変更されました」と表示した。課題中に、パートナー委託モードと自己操作モードへの切り替えは参加者の自由であった。

システム条件では、課題画面に、パートナー委託モードを選択中は「Auto」、自己操作モード選択中は「Manual」と表示した。一方、ヒューマン条件では、課題画面に、パートナー委託モードを選択中は「Follower」、自己操作モード選択中は「Leader」と表示した。

課題終了後には、参加者に、パートナーに対する課題遂行への信頼評定(1: 全く信頼できなかった～7: 非常に信頼できた)を行わせた。さらに、操作切り替えの判断方法(自由記述)について回答させた。

結果

除外データに関して、課題をパートナーに委託した割合である委託率、課題得点、課題中の操作の切り替え回数について、各条件で、平均から 4SD 以上であった参加者を除外した。その結果、操作の切り替え回数が 4SD 以上であったヒューマン条件の参加者 1 名を除外した。そのため、各条件 20 名のデータに基づいて以下の分析を行った。

まず、仮説 1 の検討を行う。課題終了後のパートナーへの信頼の主観評定と、課題全体の委託率について相関分析を行った。その結果、システム条件では、信頼と委託率の相関が有意であった($r = .52, p < .05$)。一方、ヒューマン条件では、相関は有意ではなかった($r = .14, p = .55$)。この結果から、パートナーへの信頼と課題委託の関連は、システムとの協同で現れ、人間との協同では現れないことが明らかにされ、仮説 1 は支持された。

次に、仮説 2 のパフォーマンス変化に対する鋭敏

性について検討を行うために、委託率にロジスティック回帰を実施した(図2)。実測データとロジスティック回帰から予測されるモデルとの適合度について確認を行うため、Hosmer-Lemeshow 検定を行った結果、システム条件($\chi^2(8) = 0.27, p = .1$)とヒューマン条件($\chi^2(8) = 1.74, p = .98$)の両方で、適合度に問題はみられなかった。以下に算出されたロジスティック回帰式を示す。

システム条件:

$$\text{委託率} = 100 / 1 + e^{-(0.059 + 0.038CP - 0.046CS)}$$

ヒューマン条件:

$$\text{委託率} = 100 / 1 + e^{-(0.509 + 0.022CP - 0.031CS)}$$

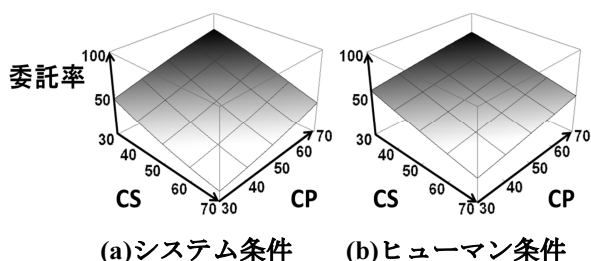


図2: ロジスティック回帰により予測された(a)システム条件と(b)ヒューマン条件における委託率の予測平面。

ロジスティック回帰で算出された回帰式から、オッズ比の値を算出した(表1)。CPのオッズ比の値は、CPの値の変化に伴う委託率の変化量を示す。また、CSのオッズ比の値は、CSの値の変化に伴う委託率の変化量を示す。CPまたはCSのオッズ比の値が1よりも高い値を示すほど、CPまたはCSの値の変化に伴う委託率の増加が大きいことを示す。一方、CPまたはCSのオッズ比の値が1よりも低い値を示すほど、CPまたはCSの値の変化に伴う委託率の低下が大きいことを示す。

オッズ比の値を算出した結果、CPのオッズ比の値に関して、両条件で1を上回り、かつ、ヒューマン条件よりもシステム条件で値は大きかった。つまり、ヒューマン条件よりも、システム条件で、CPの値の増加に伴う委託率の増加が大きいことが示された。また、CSのオッズ比の値に関して、両条件で1を下回り、かつ、ヒューマン条件よりもシステム条件で値は小さかった。つまり、ヒューマン条件よりも、システム条件で、CSの値の増加に伴う委託率の低下が大きいことが示された。

オッズ比で示された委託率の変化を図3に示す。

図3から、CPとCSのいずれの値の変化に対しても、ヒューマン条件よりもシステム条件の委託率の変化が大きいことがみてとれる。これらの結果から、人間との協同よりもシステムとの協同で、自分とパートナーのパフォーマンス変化に対する鋭敏性は高くなることが示された。

表1: CPとCSのオッズ比の値

	CPの オッズ比の値	CSの オッズ比の値
システム条件	1.038	0.954
ヒューマン条件	1.022	0.968

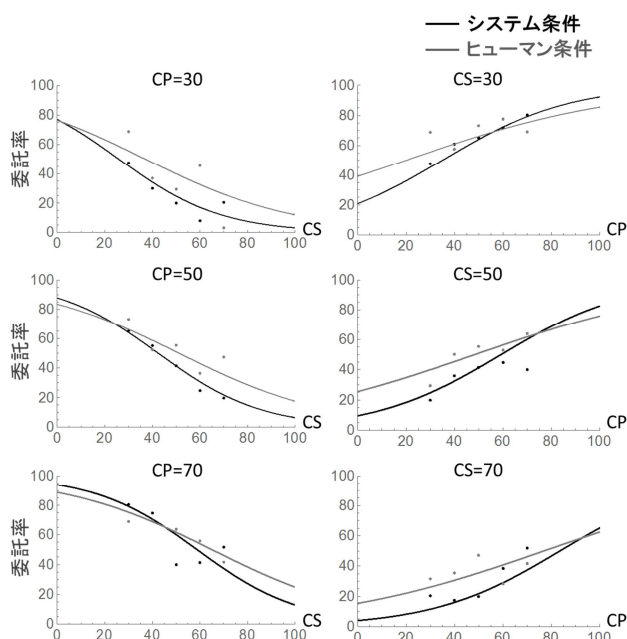


図3: CSとCPが30, 50, 70のときの断面図。各断面のドットは実測値、曲線はロジスティック回帰で算出された予測平面を示す。

最後に、仮説2の課題委託の適切性について検討を行うために、パートナー委託モードと自己操作モードが優位な状況に分けた分析を実施した。具体的には、CSよりもCPの値が高い10箇所(パートナー委託優位)と、CPよりもCSの値が高い10箇所(自己操作優位)のそれぞれで、各条件の委託率を比較した(図4)。パートナー委託優位な状況では、参加者よりもパートナーの方が高いパフォーマンスを示すことができた。そのため、課題をパートナーに任せて、委託率を高めることが適切な課題の委託といえる。一方、自己操作優位な状況では、パートナーよりも参加者の方が高いパフォーマンスを示すことができた。そのため、課題をパートナーに任せて、委託率

を高めることは不適切な課題の委託といえる。

パートナー委託モードと自己操作モードが優位な状況ごとに、条件間で委託率を比較した結果、パートナー委託優位な状況では、両条件間に委託率に有意差はみられなかった($t(38) = 0.78, n. s.$)。一方、自己操作優位な状況では、ヒューマン条件よりもシステム条件で委託率は有意に低かった($t(38) = 3.88, p < .001$)。つまり、自己操作優位な状況のとき、ヒューマン条件よりもシステム条件で、適切な課題の委託が行われた。この結果から、人間との協同よりもシステムとの協同で、課題委託の適切性が高くなることが明らかとなった。

これらのロジスティック回帰分析、各モードの優位性に分けた委託率の分析の結果から、仮説 2 が支持された。

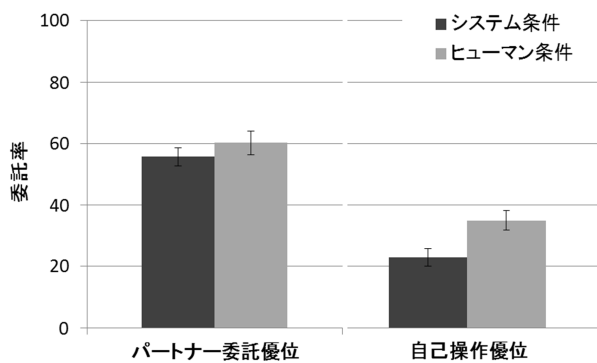


図 4: パートナー委託モードと自己操作モードの優位な状況における委託率。エラーバーは標準誤差を示す。

総合考察

本研究では、自動化システムとの協同におけるシステムへの課題委託の特性を、人間との協同の場合と対比的に理解するために、自分とパートナーとのパフォーマンスの優劣が動的に変化する状況を設定し、それに伴うパートナーへの課題の委託、または自分への課題の割り当てについて検討を行った。自動化システムの高度化が進む中、このようなシステムをチームパートナーと捉えて、システムとの協同活動を人間との協同と比較することは重要である。

実験の結果、仮説 1 に関して、パートナーへの信頼と課題委託の関連は、システムとの協同で現れ、人間との協同では現れないことが確認された。自動化システムとの協同においては、システムパフォーマンスに基づいて信頼を形成し、その信頼に基づいて、システムへの課題の委託を決定する[4]。しかし、人間との協同においては、パートナーへの信頼がな

くても、お互いの望みが一致することなどにより協力的な行動をとることがある[10]。そのため、システムとの協同では、信頼は課題の委託を決定する重要な要因であるが、人間との協同では、信頼以外の要因が課題の委託に影響すると考えられる。人間との協同とシステムとの協同を比較した先行研究[8][9]では、このような信頼と委託率との直接的な関係の違いは検討されなかったが、本研究では、信頼と委託率との関係の違いを示した。

また、仮説 2 に関して、人間との協同よりもシステムとの協同で、自分とパートナーのパフォーマンス変化に対する鋭敏性と、課題委託の適切性は高くなることが確認された。人間との協同におけるパートナーへの課題委託の要因の一つとして、社会心理学の分野で示されている「労力の均等化」が考えられる。システムとの協同においては、課題遂行の責任はユーザに集中する[3]。しかし、人間との協同を行う際、課題遂行の責任は、自分とパートナーに分散される[12]。このように人間との協同で、課題遂行の責任が分散する状況では、人間は、自分とパートナーの活動労力を均等にしようとする「労力の均等化」が生じる[13]。人間はこの「労力の均等化」に敏感であり、特に、自分が気づかない間に、パートナーが自分に頼り、活動労力を低めること (Free-rider 効果) を敏感に察知して、それを避けようとする[14]。

本実験においても、ヒューマン条件では、参加者は、参加者とパートナーのパフォーマンスの優劣だけに基づいて課題委託を決定したのではなく、パートナーとの「労力の均等化」を考慮して課題委託を決定した可能性が考えられる。つまり、参加者自身とパートナーの間で、課題遂行時間を均等にしようとした可能性がある。特に、パートナーよりも参加者が高いパフォーマンスを示す状況で「労力の均等化」の調整を行った結果、パフォーマンス変化への鋭敏性が全体的に低くなり、参加者が優位な状況で、パートナーへの不適切な課題の委託が生じた可能性がある。

実際に、ヒューマン条件の課題全体の委託率($M = 50.82, SD = 7.48$)は 50% 前後に落ち着いた。また、課題終了後に、参加者に、操作切り替えの判断方法について自由記述を書かせたところ、ヒューマン条件の参加者 3 名は、自分とパートナーとの課題遂行時間が均等になるように意識したことを、明確に記述していた。これらの結果は、ヒューマン条件の参加者が、「労力の均等化」を考慮した可能性を支持する。

...

謝辞

この研究に貢献した名古屋大学情報文化学部伊藤健太君に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] Parasuraman R., and Riley V.: Humans and automation: Use, misuse, disuse, abuse, *Human Factors*, Vol.39, No. 2, pp. 230–253, (1997)
- [2] Paris C. R., Salas E., and Cannon-Bowers J. A.: Teamwork in multi-person systems: A review and analysis, *Ergonomics*, Vol. 43, No. 8, pp. 1052–1075, (2000)
- [3] Lee J. D. and See K. A.: Trust in automation: Designing for appropriate reliance, *Human Factors*, Vol. 46, No. 1, pp. 50–80, (2004)
- [4] 前東晃礼, 三輪和久, 寺井仁: 自動化システムの使用と信頼の役割, *認知科学*, Vol. 21, No. 1, pp. 100-112, (2014)
- [5] Rasmussen J.: *Information Processing and Human-Machine Interaction: An Approach to Cognitive Engineering*. NY: Elsevier Science Publishing, (1986)
- [6] Lee J. D., and Moray N.: Trust, control strategies and allocation of function in human-machine systems, *Ergonomics*, Vol. 35, No. 10, pp. 1243–1270, (1992)
- [7] Muir B. M.: Trust in automation: Part I. Theoretical issues in the study of trust and human intervention in automated systems, *Ergonomics*, Vol. 37, No. 11, pp. 1905–1922, (1994)
- [8] Dzindolet M. T., Pierce L. G., Beck H. P., and Dawe L. A.: The perceived utility of human and automated aids in a visual detection task, *Human Factors*, Vol. 44, No. 1, pp. 79–94, (2002)
- [9] Lewandowsky S., Mundy M., and Tan G.P.A.: The dynamics of trust: Comparing humans to automation, *Journal of Experimental Psychology: Applied*, Vol. 6, No. 2, pp. 104–123, (2000)
- [1 0] Mayer C., Davis J. H., and Schoorman F. D.: An integrative model of organizational trust, *The Academy of Management Review*, Vol. 20, No. 3, pp. 709–734, (1995)
- [1 1] Maehigashi A., Miwa K., Terai H., Kojima K., and Morita J.: Selection strategy of effort control: alloCption of function to manual operator or automation system. In L. Carlson, C. Hölscher, & T. Shipley (Eds.), *Proceedings of the 33rd Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp. 1977–1982). Austin, TX: Cognitive Science Society, (2011)
- [1 2] Darley J., and Latané B.: Bystander intervention in emergencies: Diffusion of responsibility, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 8, No. 4, pp. 377–383, (1968)
- [1 3] Jackson J. M., and Harkins S. G.: Equity in effort: An explanation of the social loafing effect, *Journal of Personality and Social Psychology*, Vol. 49, No. 5, pp. 1199–1206, (1985)
- [1 4] Shepperd J. A.: Productivity loss in performance groups: A motivation analysis, *Psychological Bulletin*, Vol. 113, No. 1, pp. 67–81, (1993)