

平成21年 6月 5日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18500104  
 研究課題名（和文）エージェントチーム制御における個人戦略の多様性に適応する機能表示インタフェース  
 研究課題名（英文）Function-Based Adaptable Interface Design for Supporting Multiple Agent Operations with Different Types of Strategies  
 研究代表者  
 古川 宏（FURUKAWA HIROSHI）  
 筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授  
 研究者番号：90311597

研究成果の概要：実環境向けマルチ・エージェント・システム操作では、個々に多様な戦略を状況適応的に使用することから、操作者に適切な情報を提供することは困難を伴う。そこで、多様な抽象度・詳細度情報を提供する機能階層インタフェースを提案し、マルチ・ロボットを具体的対象とした評価実験を実施した。これより、多様な状況・戦略に対し十分な情報を提示できうること、直観的機能表示が有用であること、サブタスク単位での表示情報を系統的に選択可能であることを確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,900,000	0	1,900,000
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	480,000	3,980,000

研究分野：認知システム工学

科研費の分科・細目：情報学・知能情報学

キーワード：人間機械システム，マルチ・エージェント，ヒューマン・ロボット・インタフェース，状況把握支援，個人戦略，認知的タスク，機能モデリング

## 1. 研究開始当初の背景

(1)マルチ・エージェントの状況把握支援：様々な環境を対象とするシステムでは、高いrobustness, flexibility, adaptabilityが求められることが多い。この有力なアプローチの一つがマルチ・エージェント・システムであり、特に人が到達しにくい場所や危険となる場所を対象としたマルチ・ロボット(MRS)の適用が進められている。操作者には、全体を監視し、適切な指示を適時に各ロボットに与える役割が課せられる。しかし、ロボットの自

律化・高機能化などの技術の革新的な発展が進められている一方で、厳しい時間制約、人の思考・行動およびエージェントとの相互作用の複雑さ、扱う情報の膨大さなどを考慮した適切な監視方策は未だ理論的基盤を確立するにいたっていない。このような状況から、MRSを対象としたヒューマン・ロボット・インタフェース(HRI)の研究が注目されている。

(2)基盤手法と対象課題：この解決策として、メンタルモデルの外在化・明示化により操作

者の認知的負荷の適切化を図るエコロジカル・インタフェース (EID)設計論の利用が提案されている。この設計法では、メンタルモデルの工学的記述モデルとして、システムの機能階層モデル Abstraction-Decomposition Space (ADS)を用いる。この外在化により、制御計画の立案と実施における操作者の負荷を抑えることが可能となる。特に負荷が高い状況では、この重要性は大きい。

研究代表者等による MRS シミュレーションを対象とした先行研究では、個々人が多様な、しかもお互いに異なる戦略を用いていること、時間制約が厳しい状況ではその差が大きいこと、さらに単一デザインのインタフェースでは提示情報の充分性に問題があることを明らかとした。

ここで重要なのは、各戦略に必要とする情報が異なる点である。利用戦略は多様であり、各個人において状況適応的な使い分けがある上に、個人間で内容の差が大きいことも、インタフェース設計の困難さを高めている。さらに、情報提示に用いるディスプレイ面積は限られており、表現可能な情報には制限がある。本研究は、この戦略の多様性に対応可能なヒューマン・エージェント・インタフェース設計法を検討対象とした。

(3)関連する研究：マルチ・エージェント制御用インタフェースは、状態把握（モニタリング）支援用と制御（命令・指示）支援用とに大別できる。前者に関しては、ビデオ映像や仮想 3D ディスプレイによるスキルベース制御の支援、警報や注意喚起、対応策候補の提示等を中心としたルールベース制御の支援を対象とした研究が多く、ミッション全体の目標を考慮した知識ベース制御の支援についてはほとんど実施されていない[1]。

また、エージェントの機能を表示する研究として[2]があるが、到達可能性という単一機能を移動時間により表現しているのみであり、支援範囲が限られている。操作者は状況に適応してレベルを変化させ状況の評価を行っていることから、情報の多層性が本質的に必要である。

[1] G. Calhoun, H. Ruff, J. Nelson, and M Draper, "Survey of Decision Support Control/Display Concepts: Classification, Lessons, Learned, and Application to Unmanned Aerial Vehicle Supervisory Control," Proc. 11th Int. Conf. Human-Computer Interaction (2005) 9 pages.

[2] J. Jin and L. Rothrock, "A Visualization Framework for Bounding Physical Activities -Toward a Quantification of Gibsonian- Based Fields," Proc. Human Factors and Ergonomics Society 49h Annual Meeting (2005) pp. 397-401.

## 2. 研究の目的

本研究は、上述の個人戦略の多様性に関する問題に対する抜本的解決を目指し、個人戦略適応型機能表示インタフェースの提案と有効性評価を目的とした。

具体的には、MRS のシミュレーションを対象とした HRI のプロトタイプの構築と、認知工学的な評価実験を実施することで、下記の小目的の達成を目指した。

- 提案手法の実現可能性の評価：タスクのモデル化における ADS の有用性、機能状態表示の実行可能性、タスク実施における機能表示の有用性を確認する。
- 表示機能情報の充分性の評価：操作者が多様な戦略を使用する状況に対し、提案設計法により、個々が必要とする情報を提供可能であることを確認する。
- サブタスク向け情報選択法の検討：各サブタスク用の個別表示を設計するため、各目標レベルに十分な情報を機能階層モデルに基づき選択でき得るか、検討する。

## 3. 研究の方法

上記の小目的の達成に向け、3 つの実験的研究（研究(a)(b)(c)）を実施した。

(1)対象ミッション：実際のロボット群を精密にモデル化した実験用テストベッドである RoboFlag シミュレーションを対象とした。操作者のタスクは、ロボットを用いて敵陣内の“旗”を確保し、これを自陣の Home zone へ相手より早く持ち帰ることである。図 1 に、既存の操作用画面を示す。利用可能な操作は、手動操作と 2 種の自動制御であり、操作者には適切に組み合わせて用いることが要求される。敵側チームの挙動は上記の 2 種の自動制御の組み合わせで実現している。

本ミッションでは、状況は短時間で動的に変化することから、操作者には迅速な状況理解と対応が必要である。しかも、局所的な理解のみならず、全体の状況を理解し、戦略を策定し、適切な指示をロボットへ与える必要がある。



図 1: RoboFlag の操作画面（オリジナル）

(2)研究(a) 提案手法の実現可能性の評価：対象とするタスクについて ADS による機能モデルを構築し、この ADS モデルを用いて有用な機能表示を設計する。

①ADS による機能モデル構築：先行研究において本タスクの複雑性が高いことを確認しており、当初からタスク全体を適用対象とした場合には人間・ロボット間の相互作用を詳細に解析することが困難であると予想された。よって本実験では、設計論の実行可能性の評価を効果的に実施することを目指し、2つの主要機能（"Offence"と"Defense"）の下位よりミッションの達成に重要な機能を各1つずつ選択し、今回の適用対象とした。

②対象機能を対象としたディスプレイ表示の設計：各々の機能状態を明示する表示手段として、各ロボットおよびオブジェクト間の物理的関係に基づいて状態を図示する表現法を用いた。

③評価実験：既成のインタフェースを使用するグループと、機能表示を取り入れたインタフェースを使用するグループとした。また1試行はいずれかのチームが旗をホームゾーンまで持ち込むまでとし、これにより勝敗を決定した。本実験は5試行とし、評価に用いる数種類の定性的および定量的なパフォーマンスデータを測定した。また、各試行直後の自由記述による自己報告により、被験者が採用した戦略と表示情報の利用方法を確認した。

(3) 研究(b) 表示機能情報の十分性の評価：設計論の有効性と妥当性を確認するために、提案設計論に基づいた HRI プロトタイプシステムを用いることで、多様な戦略における機能情報の有用性、十分性、必要性を評価した。

①機能状態表示の設計：ADS およびインタフェースは研究(a)と同じものを使用した。

②評価実験：先行研究では敵ロボットが用いる戦略が単調かつ単純であったため、被験者が用いる戦略も単調となった。本研究では、被験者が多様な戦略を用いるよう、敵ロボットのコースやタイミングを任意に変更することで戦略の複雑化と高度化を図った。各試行直後の自由記述による自己報告により、被験者が採用した戦略と表示情報の利用方法を確認した。

(4) 研究(c) サブタスク適応的畫面設計の実現性の検討：表示する機能情報の選択は、EID 設計論に基づくヒューマンインタフェース構築に欠くことができない処理過程である。これは、全タスク実施に用いられる機能情報の多さと、実際に情報表示に用いられるデバイスの物理的制約から必須となる。よって、EID に基づく HRI の構築には、状況あるいは個々のタスクに専用のディスプレイを準備

する等の対応が必要になると考えられる。

本研究では、状態を表示する機能の選択（情報選択）に注目し、この手法開発に向け、タスクと機能情報の利用方策の関係を確認する観測実験を実施した。具体的には、目標の異なる典型的なタスク 2 種を対象として、抽象レベルの異なる機能情報 2 種の各々の利用方法、必要性、有用性を評価した。

①機能状態表示の設計：ADS は研究(a)にて構築したものを使用した。ここでは、ミッション達成に重要であり、かつ、操作者にとって状態の把握が困難である機能 4 種を選択し、高レベルの 2 機能と低レベルの 2 機能を各々対象とした 2 種の機能状態表示を設計した。

②評価実験：本研究では、2 種の異なる目標を有するタスクを用いた。タスク 1 は、いずれかのチームが旗を Home zone まで持ち込んだ時点にて勝敗を決定した。時間制限は設けていない。このとき、操作者は 1 画面を用いて、1 試合を実施する。タスク 2 は時間制限（3 分間）を設け、この間に獲得した旗の総数により勝敗を決めるルールとした。このとき操作者は 2 画面を用いて、2 試合を同時に実施する。タスク 1 より高い負荷となると同時に、局所的状況より大局的状況の把握が重要となることを狙いとしている。

各被験者は、2 種のタスクに対し 3 種の異なる表示を個別に用いた試行を実施した。このとき、数種類の定性的および定量的なパフォーマンスデータを測定している。また、各試行直後の自由記述による自己報告により、被験者が採用した戦略と表示情報の利用方法を確認した。

#### 4. 研究成果

(1)研究(a) 提案手法の実現可能性の評価

①ADS に基づく機能階層モデルの作成：ADS に基づき、本タスクの機能モデルを構築した。主タスクは Offence と Defense の 2 つであり、ADS はこの二大タスクを各々頂点とした階層的な機能モデルとなる。図 2 に主要機能の 1 つである"Offence"を頂点とした ADS の概略図を示す。

②機能状態表示の設計：2 つの主要機能（"Offence"と"Defense"）の下位よりミッションの達成に重要な機能を各 1 つずつ選択し、今回の適用対象とした。"Offence"側の機能の状態を明確に表現することを目的としたディスプレイを図 3 に示す。

③評価実験：

(i)各試行における旗の確保回数に ANOVA テストを適用したところ、2 条件間の差は有意となった ( $F(1, 20) = 6.164, p = 0.022^{**}$ )。この結果は、攻撃タスクにおいて、各被験者の能力や戦略に関わらず、機能情報の表示が優位性を有していることを示すものである。

(ii)今回構築した機能表示により悪影響が生

じる可能性が低いこと、よって、実施したインタフェースの設計に顕著な不具合がなかったことを確認した。

(iii)被験者による戦略等に関する報告より、個々が採用した戦略の違いに注目した解析を実施した。結果の一例として、攻撃タスクにて使用した戦略と機能情報の利用の有無を表1に示す。

(iv)被験者による各機能表示の使用過程に関する解析から、“被験者が訓練を通して獲得した機能の理解”と“設計において ADS を基盤として定義した機能”が整合していることと、“想定した機能に基づいて実験者が設計した機能表示”が被験者による機能状態の把握において有効に用いられたことを確認した。これより、小規模ながらも、局所および全体に対し迅速な状況理解を支援する機能表示を設計・作成することが可能であることを確認した。

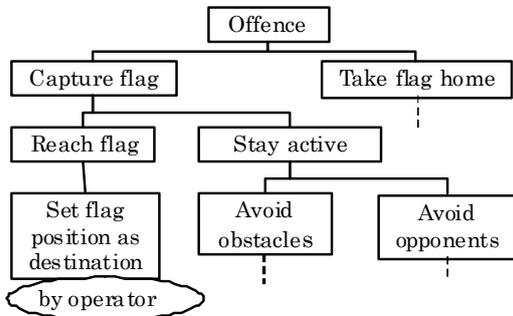


図2: "Offence"機能を頂点とした ADS

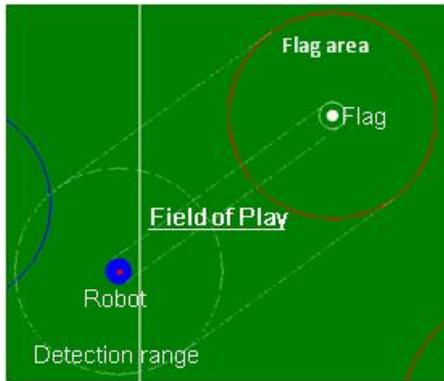


図3: "State comprehension near courses"機能の状態を示すディスプレイ表示

表1: 攻撃タスクにおける戦略と Field of Play の利用形態に基づく被験者の分類

戦略	機能表示の利用 (Field of play)	
	利用	未使用
自動制御の利用	M1, M2, M7, M10	M11
手動制御	none	M3, M4, M5, M6, M8, M9

(2) 研究(b) 表示機能情報の十分性の評価:

①戦略の多様性: 研究(a)と比較し、今回の実験では多様な戦略が用いられており、機能表示の有用性、十分性、必要性を評価するに適した状況となっていることを確認した。

②提供情報の十分性: 機能表示の利用内容の解析から、各被験者による各表示の有用性と必要性の主観的評価を捉える事が可能である。被験者は各々の戦略において、有用と考える情報を選択し活用できていることを確認した。ここで、被験者の主観的評価結果から、使用した機能表示から、タスク実施に十分な機能情報を獲得できていることも確認した。

以上より、提案法に基づき作成したインタフェースにおいて、個々に異なる多様な戦略に対し、操作者が有用と考えられる機能的情報を適応的に選択かつ活用することが可能になっていたと考えられる。これより、操作者に対し、adaptableあるいはflexibleである情報環境が構築されていると判断できる。

(3) 研究(c) サブタスク向け情報選択の検討

①機能状態表示の設計: 図4に示す機能表示 "Individual display" は、上記の低レベル機能2種 "Inactivate opponents" と "Shun opponents" の状態を明確に表現することを目的とした。自陣では、敵ロボットとの距離に対する評価関数を用いることで "Inactivate opponents" の達成度を評価し、これを対応する色の変化として各ロボット上に表示した。一方、敵陣では、右下の評価関数を用いて、機能 "Shun opponents" の達成度を評価し、同様に各ロボットに表示している。

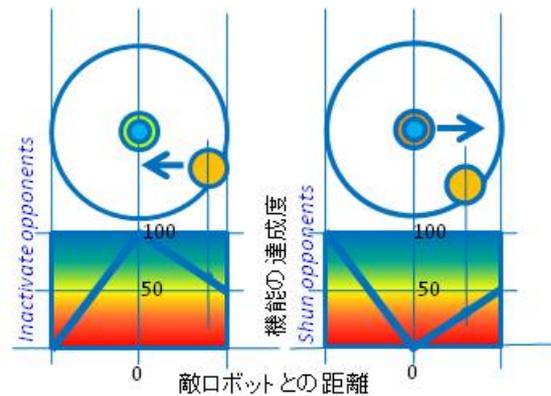


図4: 機能表示 "Individual display"

図5の機能表示 "Field display" は、上記2種の機能より高レベルの機能である "Defensive ability of the defensive robot team" と "Offensive ability of the offensive robot team" を対象とした。自陣と敵陣を各4エリアに分割し、各エリア内に存在するロボット群をチームとして定義した。自陣における前者の機能を各ロボットの "Inactivate

opponents”の達成度の平均により、後者の機能の達成度を敵陣エリアの各ロボットの”Shun opponents”の達成度平均により定義した。

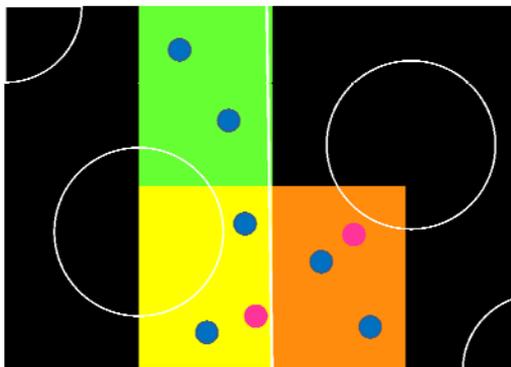


図 5：機能表示 ”Field display”

②評価実験：

(i)機能的インタフェースの有効性を客観的に評価するため、数種類の評価指標を用いて、インタフェースの差異について統計的検定を実施した。タスク 1 について、T-test を用いた統計的検定を実施したが、ディスプレイ間に有意な差は見られなかった。

タスク 2 では、検定により Field display を使用した時の勝ち数 (表 2) が、Individual display を用いた場合と比較して有意に多いとの結果を得た ( $t = -3.079, df = 11, p = 0.010^*$ )。これより、負荷が高く、大局的な機能状態の把握が必要となるタスク 2 において、高次機能の状態を示す Field display が有用であるとの結果を得た。また、有意ではなかったが、Individual display を用いることで、オリジナル画面よりパフォーマンスが悪化する可能性があることも示唆されている。

表 2：タスク 2 における勝ちゲーム数

	表示のタイプ		
	オリジナル	Individual	Field
平均	1.33	0.83	1.67
標準偏差	1.50	0.58	0.98

(ii)被験者の操作内容やインタビューから各タスクの特徴をまとめた上で、得られた定量的および定性的解析による結果をまとめる。

タスク 1 の特徴：

- ・ 負荷はタスク 2 と比較して低い。
- ・ 勝敗は旗の確保 1 回で即決する。
- ・ 局所的な失敗が勝敗に直結することから、
- ・ 低レベル機能の状態把握が重要となる。

タスク 1 での操作者による表示情報の評価：

- ・ 低レベル機能の状態把握を容易とする操作者にとって、オリジナル画面で情報は十分であった。
- ・ 状態把握を困難と感じる操作者からは、対

応する機能表示ディスプレイが有用であるとの評価を得た。

タスク 1 からの知見：

「負荷が低い状況では、操作者が使用する戦略、実施スキルのレベル、状態把握を必要とする機能、そして操作者の状態把握の能力を考慮した情報選択が有用である。」

タスク 2 の特徴：

- ・ 負荷はタスク 1 と比較して高い。
- ・ 勝敗は制限時間内の優勢度により決定する。
- ・ 局所的な失敗より、大局的な失敗が勝敗に直結することから、
- ・ 高レベル機能の状態把握が重要となる。

タスク 2 での操作者による表示情報の評価：

- ・ 操作者にとって、高レベル機能の状態把握は困難と感じる。
- ・ 多くの操作者は、対応する機能表示ディスプレイが有用であると評価している。

タスク 2 からの知見：

「負荷が高い状況において、高いレベルの機能を把握することが困難なこともあり、負荷が低い状況と比較し、機能の状態把握を支援する必要性は高い。よって、対応する機能状態表示の採用が望まれる。」

(4) 本研究のまとめ：

本研究の目的は、個人戦略の多様性に対応可能な HRI 設計論の確立を目指し、EID 概念に基づくことで MRS を対象とした効率的かつ適切な監視を可能とする個人戦略適応型機能表示インタフェースの提案と有効性の評価である。以下に、得られた知見をまとめる。

①EID 概念に基づく HRI 設計論の開発に向け、被験者実験を通して、その実行可能性の確認を行った。評価実験の結果に対する定量的・定性的解析から、EID 設計論を基盤とした機能情報表示インタフェースを用いることで、ロボットチームを対象とした監視制御を適切に支援しうるとの結果を得た。

②多様な個人戦略が用いられた被験者実験における定量的・定性的解析を通して、EID 設計論を基盤とした機能情報表示インタフェースにより、各戦略に適した形で、エージェントチームの状態把握を支援するに十分な情報を提供可能であることを確認した。

③目標が異なるサブタスク実施において、対象レベルが異なる機能情報の有用性、必要性、利用方策を観測する認知実験を実施した。この結果、タスク実施に要する負荷量、操作者が使用する戦略、操作者の実施スキルのレベル、タスク実施に状態把握が必要な機能、そして操作者の状態把握の能力などを基礎デ

ータとすることで、“情報選択”（状態表示をすべき機能の選択）を効果的に実施し、各サブタスクに適した情報を提供する個々の機能状態表示を設計・実装することが可能であるとの知見を得た。

④本研究テーマの現状と今後の展望：

マルチ・エージェントの監視・操作・制御・管理に対する EID 設計法の有用性は、以前より示唆されている（例えば[3]）。しかし、ロボットへの適用の現状としては、物理的空間における物理的制約を表示する内容が主であり（例えば[4]）、より高次のタスクやミッションなどのレベルにおける状態把握はあまり検討されていない。しかし、背景でも述べたように、MRS の今後の発展を鑑みた場合、その必要性は明らかである。

よって、本研究の成果は、今後の MRS や、より一般のマルチ・エージェント・システムの開発・実用において、必要不可欠な知見になると考える。

本研究の今後の展開としては、これまでの知見に基づき、EID 設計法に基づいた具体的情報提供の方策について検討・開発を進める予定である。操作者の多様な戦略、ミッションの多様な状況に対応可能な情報提供環境として、十分性の確保のみでは、操作者への情報選択の負担が大きいと考える。すなわち、“十分性”に加え“必要性”も考慮した提供方策が必要となる。

基本的な考え方として、各種タスクや操作者の能力別に多様な表示を用意することで操作者が独自の判断で選択・利用することを許す adaptable interface、目標に対する機能の重要性などにに基づき自動的に提供情報を選択・表示する adaptive interface の 2 方策を併用した提供法を検討している。

[3] J. Lee, G. Thomas, and E. Pollack: “Ecological interface design and the management of large numbers of intelligent agents,” Human Error and System Design and Management, Springer-Verlag (2000) pp. 137-151.

[4] C. Nielsen, M. Goodrich, and R. Ricks, “Ecological interfaces for improving mobile robot teleoperation,” IEEE Trans. Robotics, 23, 5, (2007) pp. 927-941.

5. 主な発表論文等

(研究代表者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① Hiroshi Furukawa, “Usage of different levels of functional information in multiple robot operation,” Proc. ICARA 2009 - The 4th International Conference on Autonomous Robots and Agents, 74-78, 2009, 査読有.

② Hiroshi Furukawa, “An Empirical Study on Ecological Interface Design for Multiple Robot Operations: Feasibility, Efficacy, and Issues,” Recent Advances in Multi-Robot Systems, I-Tech Education and Publishing, 15-32, 2008, 査読有.

③ Hiroshi Furukawa, “Functional display for human supervision of a multiple robot system: adequacy for operations with a variety of strategies,” Proc. 2008 IEEE International Conference on Distributed Human-Machine Systems, 39-44, 2008, 査読有.

④ Hiroshi Furukawa, “An ecological interface design approach to human supervision of a robot team,” Autonomous Robots and Agents, 79, 163-170, 2007, 査読有.

⑤ 古川宏, エージェントチームの監視制御のための機能状態表示インタフェース, 第 12 回ロボティクス・シンポジウム 2007, 314-319, 2007, 査読有.

⑥ Hiroshi Furukawa, “Toward ecological interface design for human supervision of a robot team,” Proc. ICARA 2006 - The 3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents, 569-574, 2006, 査読有.

[学会発表] (計 2 件)

① 古川宏, マルチロボット操作における戦略と利用情報の抽象度, 計測自動制御学会知能システムシンポジウム, 2009 年 3 月 17 日, 京都府京都市キャンパスプラザ京都.

② 古川宏, エージェントチーム操作における戦略の多様性を許容する機能的インタフェース設計, HAI シンポジウム, 2007 年 12 月 5 日, 神奈川県横浜市慶應義塾大学.

6. 研究組織

(1)研究代表者

古川 宏 (FURUKAWA HIROSHI)

筑波大学・大学院システム情報工学研究科・准教授

研究者番号：90311597