

# 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

古川 宏

筑波大学大学院システム情報工学研究科 〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1

E-mail: furukawa@risk.tsukuba.ac.jp

**あらまし** 自律型エージェントチームの操作・監視における状況把握の困難性を緩和し、ユーザの多様な制御方策（戦略）にも適応可能な情報提供環境の実現を目指している。このために、複雑なヒューマン・マシン・インタフェースの設計論として提案されている Ecological Interface Design を基盤とし、抽象度・詳細度が異なる多様な情報を直観的表示により提供する戦略適応型機能階層インタフェースの開発を進めている。本研究では、ロボットチーム競技シミュレーションによる被験者実験を通し、個々に異なる戦略に対して十分な情報を有効的に提供可能であることを確認することで、この基本的な有効性を明らかにした。

**キーワード** ヒューマン・ロボット・インタフェース, 機能的インタフェース, マルチエージェントシステム

## Functional Display Design for Supporting Multiple Agent Operations with a Variety of Strategies

Hiroshi FURUKAWA

Graduate School of Systems and Information Engineering, University of Tsukuba

1-1-1 Tenoudai, Tsukuba, Ibaraki, 305-8573 Japan

E-mail: furukawa@risk.tsukuba.ac.jp

**Abstract** When supervising a team of agents, e.g. agent-based automation, the operator's task is not only the manipulation of each agent but also achievement of the top goal that is assigned to the entire team of humans and agents. A main goal of this study is development of a design concept based on Ecological Interface Design (EID) for human supervision of multiple robot systems providing information about states of functions. This paper describes an experimental study conducted to reveal basic efficacy using an experimental test-bed robot simulation. The necessity, usefulness and adequacy of the functional indications were evaluated under the condition that the wide variety of strategies was used for operations.

**Keyword** Human-Robot Interface, Functional Displays, Multiple Agent System

### 1. 序論

様々な環境に適応可能となるシステムを目指し、robustness, flexibility や adaptability を向上するために、agent-based automation の適用が進められている[1]。マルチエージェントシステムのスーパーバイザーには、全体を監視し、適切な指示を適時にエージェントに与える役割が課せられる。しかし、エージェントの自律化、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エージェントチーム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。

この抜本的解決策として、メンタルモデルの外在化・明示化によりユーザの認知的負荷の適切化を図る Ecological Interface Design (EID)[2][3]を、エージェントチームを対象とした状態把握（モニタリング）支援機

構の基本設計基盤とすることが提案されている[1][4][5]。EID 設計論では、ユーザが有するメンタルモデルの工学的記述モデルを、直接的に知覚可能とするヒューマンインタフェースを提案している。Abstraction- Decomposition Space (ADS)とは、対象システムにおける目的と手段の関係を階層的に表現した目的-手段モデルであり、ユーザによる目的指向型の行動を記述するために用いられる[6][7]。最上位にはシステム全体の目標となる機能が、下位のレベルにはこの機能を達成させるための手段となる機能が順次記述され、最下位レベルにはシステムの物理的構造が記述されている。通常、ユーザはこの知識を基盤とすることで、最上位目標も含めた不全な機能の把握と、状態改善のために利用可能な下位機能（手段）の同定を行う。

マルチエージェントのように対象タスクが複雑な場合でも、EID 設計論に基づいたヒューマンインタフ

ユースにより、ユーザの認知的負荷が軽減すると期待できる。これまでにロボットを対象とした検討が実施されているが[8][9], 知見のさらなる獲得と具体的な設計論の確立が期待されている。

著者は、マルチエージェントシステムを対象として、EID 設計論に基づくヒューマン・ロボット・インタフェース(HRI)設計論の確立を目指している[4][5]。先行研究では、マルチロボットシミュレーションを対象とした被験者実験により、EID 設計概念に基づく HRI の基本的な実行可能性と問題点を確認した[4][5]。ユーザが利用する情報は各自の戦略に大きく依存すること、よって有効性の評価には、戦略を要因として考慮する必要があることを確認している。本研究では、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。

## 2. 提案設計論の適用と評価実験

### 2.1. RoboFlag シミュレーション

本研究では、実際のロボットを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[10]。ユーザのタスクは、味方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。各陣内では、相手ロボットとの物理的接触によりこれを作動停止状態とすることができる。各ロボットのセンサには有効距離があり、この範囲(Detection range)内のみ相手ロボットおよび障害物を検出可能となっている。図 1 に、ロボットチームの操作用インタフェース画面を示す。

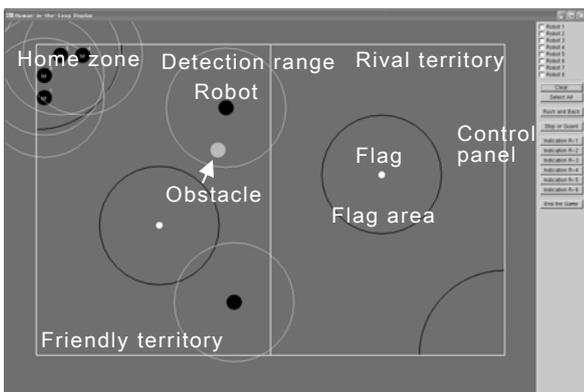


図 1: RoboFlag シミュレーションの操作画面

ユーザが選択可能な操作は、手動操作と自動制御である。手動操作では、マウスを用いてロボットの目標地点を画面上で指示する。自動制御には、Rush and Back (R&B)と Stop or Guard (S/G)の2種類が用意され

ている。前者を指示するとロボットは旗まで直行し、確保後に Home zone へ帰還する動作をとる。後者では、指示された地点 (Home position) で待機状態となり、敵ロボットが Detection range に入域すると防御動作を実施する。

状況は短時間で動的に変化することから、ユーザ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。

### 2.2. 機能状態表示インタフェースの設計

本節では、本研究で用いた機能表示について、提案の HRI 設計法に基づく設計過程を説明する。基本となる本ミッションの ADS は、先行研究において構築済みである[4][5]。この主タスクは 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。ADS には多くの機能が規定されているが、先行研究での被験者実験の解析結果に基づき[11], ミッション達成に重要であり、ユーザにとって状態の把握が困難である 4 機能を選択し、今回の適用対象とした。また、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關係に基づいて状態を図示する表現法を用いた。これは、各機能の状態、そして他機能との関連について、ユーザの直感的把握を可能とすることが目的である。

図 2 に主要機能の Offence の下位機能である Avoid opponents を頂点とした ADS の一部を示す。図中の Set way-point such as not to encounter opponents の達成には、進入コースの周りの状況を、特に敵ロボットの位置を理解・評価することが必要である。この実施はユーザのタスクであり、重要な機能の一つであることから、この State comprehension near courses を提案手法の適用対象とした。

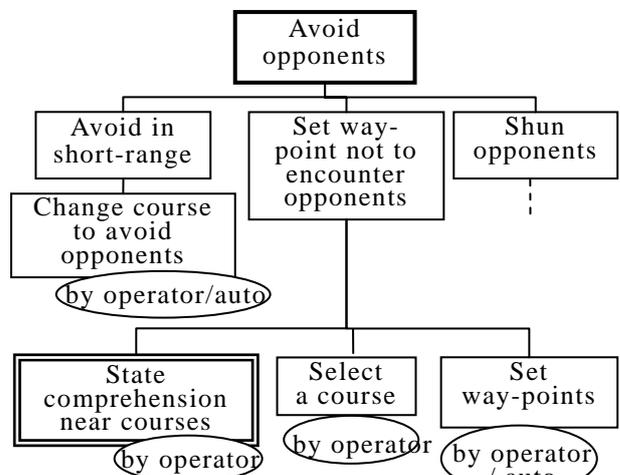


図 2: Avoid opponents 機能を頂点とした ADS

この機能の状態を明確に表現することを目的とした機能表示(functional display)を図3に示す。ロボットを中心とした白線の円はセンサの検出可能領域を、旗を中心とした黒線の円は Flag area を示している。ロボットと旗を結ぶ白線はロボットの進路(Trajectory)を、検出可能領域と Flag area を結ぶ線はロボットが前進する過程で相手ロボットの存在を検出可能となる領域を示している。この領域(Field of Play)は同時に、相手ロボットにより味方ロボットが攻撃され得る領域であることから、ロボットの安全な進行には領域内の状況把握が重要となる。仮に状況が不明な領域がある場合、偵察を実施するなどの対応が考えられる。

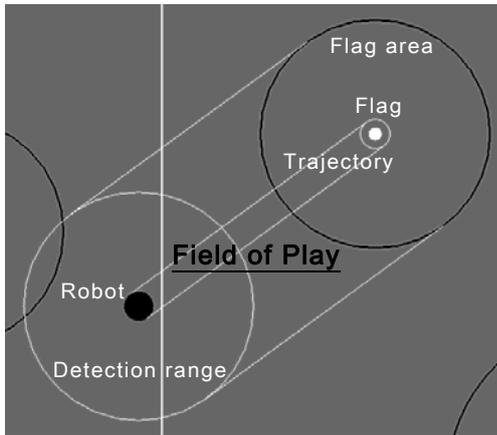


図 3: State comprehension near courses の状態を示す機能表示

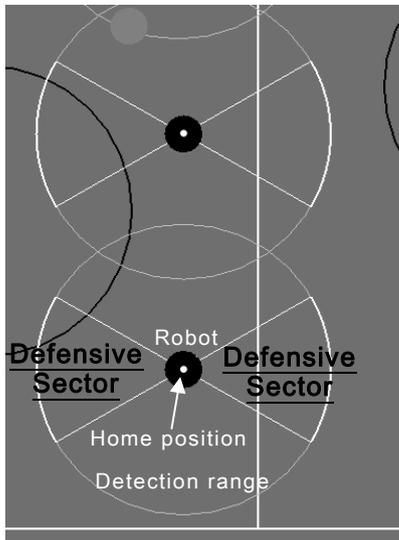


図 4: Cooperation between defensive robots の状態を示す機能表示

Defense 機能の下位機能である Cooperation between defensive robots は、複数のロボットにより実現され得る機能であり、重要な機能となっている。設計した表示を図4に示す。前述の Detection range (ロボットを

中心とした白線の円)に追記されている扇型の区域(Defensive Sector)は、S/Gモードで稼働中のロボットが高い防御能力を有している範囲を指している。一方、この区域外では、区域内と比較し、侵入する敵ロボットを防御する可能性が低い。また、“防御ロボットのセクタ間の間隔”は、チームの防御能力を表現する指標として利用可能とした。

第3及び第4の機能表示は、味方ロボットおよび敵ロボットの回避機能と抑止機能の状態を対象とした。各 Ally Movement および Opponent Movement は棒グラフ状の表示であり、その指示方向によりロボットの進行方向を、長さにより速度を表現している。

### 2.3. 評価実験

設計した機能情報の有効性、必要性、十分性を評価するため、2段階構成の評価実験を実施した。ここで、各試行が同等の条件となるよう、敵ロボットの制御は前述の自動操作を組み合わせることで完全自動としている。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[4][5]。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ている。1試行はいずれかのチームが旗を Home zone まで持ち込むまでとし、これにより勝敗を決定した。

評価実験における被験者は計21名(大学あるいは大学院学生)であり、無作為に7人ずつの3グループに配分した。MOグループは第1段階で機能表示インタフェース、第2段階で既成のインタフェースを、OMグループは既成インタフェース、機能表示インタフェースの順に、OOグループでは両段階とも既成インタフェースを使用した。

第1段階では、説明を受けた後、実際にゲームを実施することで、タスク、ゲームのルール、インタフェースの利用法、ロボット制御のスキルを会得した。この訓練フェーズの終了条件は、各被験者が適切と考える戦略・作戦を見出すまで、あるいは80分経過するまでとした。訓練フェーズ後の本実験は10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。第2段階では、時間制限を15分とした訓練フェーズに引き続き、同様に本実験を10試行実施した。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. 評価実験の結果

### 3.1. 被験者の戦略と機能情報の利用方法

本節では、各被験者が使用した戦略、機能表示により提供された機能情報の利用方法、そしてその間の関

係について取り上げる。機能表示インタフェースを使用した MO および OM グループについて、第 2 本実験直後に、主として使用した戦略、各機能情報の具体的な利用方法と必要性・有用性について、筆記および口頭により報告してもらった。表 1 および表 2 に、MO グループおよび OM グループの結果を示す。なお、機能情報の使用方法と有用性・必要性については、各被験者が明言したもののみを示している。

防御タスクに対しては、両グループの 14 名全員が数台のロボットをタスク実施に割り当てている。このうち 11 名は、訓練の結果、各ロボットの配置箇所を固定とし、Defensive Sector は使用していない。他の 3 名については、試行ごとに状況適応的に変更しており、この際に Defensive Sector を利用している。また、敵ロボットへの直接的な迎撃時には、全ての被験者は、手動操作か自動制御(S/Gモード)かに関わらず、Defensive Area, Opponent Movement, Ally Movement の 3 タイプから少なくとも 1 種類の機能表示を利用している。

攻撃タスクにおいては、旗へ到達する際と確保後に Home zone へ帰還する際とに用いる戦略として、次の 4 種が観測されている。Adaptive routing では、試合中に生じる敵側防御線の空隙を見つけ、これを通るルートを設定する。よって、使用するルートは、毎回、状況適応的に決定される。訓練時に、敵ロボットの検知範囲に入域することなく敵陣を通過可能なルートを確認できる場合がある。このときには通過ルートは固定となり、この戦略をここでは Fixed detour と呼ぶ。Feint 戦略では、味方ロボットを敵ロボットの近傍を通過させ、このロボットを誘い出す。このとき生じた空隙を他のロボットが利用することで、安全に敵陣を通過させることができる。最後の戦略である Swift attack では、試合開始直後に味方ロボットを旗へ送り出す方法であり、旗へ移動する際にのみ利用可能な戦略となる。

Fixed detour 戦略を使用した被験者のうち、ルート策定に関連した 2 種の機能表示、すなわち Trajectory および Field of play を使用したものはなかった。この戦略では状態の把握は必ずしも必要ではないため、必要性は低いと考えられる。一方、他の 3 戦略では攻撃タスクに関与しているロボットの状態を把握することは重要である。実際、機能表示を使用した被験者は、当該表示の有用性を指摘している。機能表示を使用しなかった被験者については、状態把握を適切に実施するに足りる能力を身につけており、機能情報の必要性が低いとの報告があった。

### 3.2. 提示した機能情報の十分性

今回設計したインタフェースが提供する機能情報の十分性を評価するため、前述の第 2 本実験直後の被験者による報告において、機能的インタフェース上に

提示された情報以外について、有用と考えられる機能情報を確認した。結果、11 名は十分な情報が提供されたと回答しており、他の 3 名は味方ロボットの意図に関する情報が有効となりえると指摘している。この例として、敵ロボットからの回避を目的とした移動方向の変更に関し、その意思決定過程を表示することがあげられている。

エージェントの意図は、達成を図る目的と、このために使用する手段から構成されていると捉える事ができる。これは本研究で対象としている機能の状態表示そのものではないが、機能の状態の変化を予測するに有用な情報であると考えられる。筆者は、EID を基盤とした自動系の意図表示法を提案しており[12]、マルチエージェント環境における適応についても、今後検討を進める予定としている。

### 3.3. 評価指標の統計的データ解析

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。用いた評価指標は、全体の勝率と、各試行の試合時間、被験者側および敵側における旗の確保回数、各々の作動停止状態の回数、そして各々について最初に旗を確保するまでに要した時間である。検定は、インタフェースの使用履歴も考慮に入れ、次の 3 条件下で実施した。【解析 I】MO グループの第 1 本実験（機能表示）と OM グループの第 1 本実験（既成表示）、【解析 II】OM グループの第 2 本実験（機能表示）と OO グループの第 2 本実験（既成表示）：両者とも第 1 本実験で既成表示を使用、【解析 III】MO グループの第 2 本実験（既成表示）と OO グループの第 2 本実験（既成表示）：第 1 本実験において前者は機能表示を、後者は既成表示を使用。

結果として、全ての評価指標および解析条件において、グループ間の差は有意ではなかった。しかし同時に、機能表示インタフェースの使用によるパフォーマンスの悪化を示す兆候も見られなかった。

また、各評価指標においてデータが広く分布していることから、各条件下において、使用した戦略や機能表示の実際の使用の有無等、さらなる条件を考慮した解析が必要と考えられる。

## 4. 考察

実験条件を変更することで、先行研究と比較して、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を設定できたと考える。

3.1 節で示した機能表示の利用方法については、各被験者による各表示の有用性と必要性の主観的な評価と捉える事が可能である。被験者は訓練を通じて、各々

表 1: MO グループの各被験者が用いた戦略と機能表示の利用方法

Participants		MO1	MO2	MO3	MO4	MO5	MO6	MO7	total
<b>DEFENSE</b>									
<b>Disposition</b>									
positions	fixed	yes		yes	yes	yes	yes	yes	6
	adaptively set		yes						1
functional display	Defensive area		used		occasionally				1.5
<b>Defensive action</b>									
mode mainly used	automated (S/G)	chose	chose	chose	chose	chose	chose	chose	7
	manual								0
functional display	Defensive area			used		used	used	used	4
	Opponent movement	used	used		used			used	4
	Ally movement								0
<b>OFFENSE</b>									
<b>Route to reach flag</b>									
strategy	adaptive routing	chose		chose		chose		chose	4
	fixed detour						chose		1
	feint		chose		chose				2
	swift								0
functional display	Trajectory	used			used			used	3
	Field of play		used						1
<b>Route to back home</b>									
strategy	adaptive routing			chose				chose	2
	fixed detour						chose		1
	feint	chose	chose		chose	chose			4
	swift								0
functional display	Trajectory	used			used			used	3
	Field of play		used						1
<b>Offensive action</b>									
functional display	Opponent movement	used						used	2
	Ally movement		used					used	3

表 2: OM グループの各被験者が用いた戦略と機能表示の利用方法

Participants		OM1	OM2	OM3	OM4	OM5	OM6	OM7	total
<b>DEFENSE</b>									
<b>Disposition</b>									
positions	fixed	yes	yes	yes	yes			yes	5
	adaptively set					yes	yes		2
functional display	Defensive area					used	used		2
<b>Defensive action</b>									
mode mainly used	automated (S/G)		chose	chose	chose	chose	chose	chose	5.5
	manual	chose		chose					1.5
functional display	Defensive area						used		1
	Opponent movement	used	used	used	used		used	used	6
	Ally movement					used		used	2
<b>OFFENSE</b>									
<b>Route to reach flag</b>									
strategy	adaptive routing								0
	fixed detour							chose	1
	feint	chose		chose	chose	chose			4
	swift		chose				chose		2
functional display	Trajectory				used				1
	Field of play								0
<b>Route to back home</b>									
strategy	adaptive routing		chose		chose				2
	fixed detour							chose	1
	feint	chose		chose		chose	chose		4
	swift								0
functional display	Trajectory				used				1
	Field of play		used						1
<b>Offensive action</b>									
functional display	Opponent movement	used	used	used	used		used	used	6
	Ally movement					used		used	2

の戦略において、有用と考える情報を選択し、活用している。また、MO および OM の両グループとも既成インタフェースをも利用しており、機能表示の必要性を容易に評価可能としていた。さらに、3.2 節の結果から、使用した機能表示インタフェースが、タスクの

実施に十分な機能情報を提供できていることも、主観的評価によってではあるが確認できている。以上より、今回設計した機能表示インタフェースでは、異なる多様な戦略に対して、ユーザにとって有用と考えられる機能表示を、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。これは、ユーザに対し、*adaptable* あるいは *flexible* である情報環境が構築されていると判断することができる。

さらに、3.3 節の結果からは、機能表示インタフェースにより悪影響が生じる可能性が低いこと、よって、インタフェースの設計において顕著な不具合がなかったことが確認できたと考えられる。

機能表示の利用は、用いる戦略とユーザの能力に大きく依存することから、機能情報の有用性および必要性の客観的に評価するためには、これらの条件を要因とした評価実験が必要である。現在、より多数の被験者による実験を進めており、有用性、必要性、そして十分性に関する定量的かつ客観的な評価を実施する予定である。

## 5. 結論

本論文では、マルチエージェントシステムに対する HRI 設計論の開発に向け、EID 概念に基づく基本的設計論の提案と、プロトタイプシステムの構築、多様な戦略を用いた被験者実験による必要性、有用性、そして十分性の評価について報告した。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、エージェントチームを対象とした操作を適切に支援することが示唆された。さらに、情報の有用性・必要性は戦略に大きく依存することから、更なる評価実験が必要となっている。

本研究が目指している HRI 設計論を確立するためには、ADS に基づいた機能モデルの具体的な設計方法、把握支援が必要な機能の抽出方法、そして選択された機能の状態表示方法等の確立が必要である。今後は、この実現に向け、ユーザが用いる戦略と内在する機能の同定、迅速な把握が困難な機能とその特徴の確認、適切な機能表現法の確立、全 ADS を対象とした機能表示ディスプレイの構築と多様な状況下での評価等を実施することで、提案する HRI 設計論に基づく実用的な設計体系の開発を目指す。

## 6. 謝辞

本研究の一部は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C) 18500104 の支援による。

## 文 献

- [1] J. D. Lee, T. Geb, and E. Pollack, "Ecological interface design (EID) and the management of large numbers of intelligent agents," in *Human Error and System Design and Management*, eds. P. F. Elzer, R. H. Kluwe, and B. Boussoffara, pp.137-151. Springer-Verlag, London, 2000.
- [2] K. J. Vicente and J. Rasmussen, "Ecological interface design: theoretical foundations," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.22, no.4, pp.589-606, April 1992.
- [3] K. J. Vicente, "Ecological interface design: progress and challenges," *Human Factors*, vol.44, no.1, pp 62-78, 2002.
- [4] H. Furukawa, "An ecological interface design approach to human supervision of a robot team," in eds. S. Mukhopadhyay and G. Sen Gupta, *Autonomous Robots and Agents*, pp.163-170, Springer-Verlag, Berlin, 2007.
- [5] H. Furukawa, "Toward ecological interface design for human supervision of a robot team," *Proc. ICARA 2006 - The 3rd International Conference on Autonomous Robots and Agents*, pp. 569-574, Palmerston North, New Zealand, Dec. 2006.
- [6] J. Rasmussen, *Information Processing and Human-machine Interaction*, Elsevier Science Publishing, New York, 1986.
- [7] C. A. Miller and K. J. Vicente, "Comparison of display requirements generated via hierarchical task and abstraction-decomposition space analysis techniques," *International Journal of Cognitive Ergonomics*, vol.5, no.3, pp 335-355, 2001.
- [8] T. Sawaragi, T. Shiose and G. Akashi, "Foundations for designing an ecological interface for mobile robot teleoperation," *Robotics and Autonomous Systems*, vol.31, no.3, pp 193-207, 2000.
- [9] J. Jin and L. Rothrock, "A visualization framework for bounding physical activities: toward a quantification of gibsonian-based fields," *Proc. the Human Factors and Ergonomics Society 49th Annual Meeting*, pp 397-401, Orlando, USA, 2005.
- [10] M. Campbell, R. D'Andrea, D. Schneider, A. Chaudhry, S. Waydo, J. Sullivan, J. Veverka and A. Klochko, "RoboFlag games using systems based hierarchical control," *Proc. the American Control Conference*, pp 661-666, Denver, USA, 2003.
- [11] R. Parasuraman, S. Galster, P. Squire, H. Furukawa and C. Miller, "A flexible delegation-type interface enhances system performance in human supervision of multiple robots: empirical studies with RoboFlag," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol.35, no.4, pp 481-493, 2005.
- [12] H. Furukawa, H. Nakatani and T. Inagaki, "Intention-represented ecological interface design for supporting collaboration with automation: situation awareness and control in inexperienced scenarios," *Proc. Human Performance, Situation Awareness and Automation II*, Vol. I, pp.49-55, Daytona Beach, USA, March 2004.