

三次元空間への持続的発展が可能な分散協調無線ネットワークの研究

山本 高至 京都大学情報学研究科助教

1 はじめに

無線ネットワークは点から線、面、そして三次元空間に広がりつつある。例えば無線 LAN がホットスポットから動線展開、面展開型に発展している。また、ユビキタスネット社会の実現には、さらに三次元的広がりを持つ無線ネットワークの展開が不可欠となるだろう。最もその必要性が高く先進的なアプリケーションの一つは、生体内、生体内外間および生体周辺での通信により健康と安全を守る、ボディエリアネットワークである。ボディエリアネットワークでは三次元展開に加え、電磁環境の生体への影響を抑える必要がある。

また、周知の通り周波数の有効利用が無線通信の大きな課題である。干渉の問題から、同一チャネルを用いるには離れて行く必要がある。二次元上であれば円状の排他的な通信エリアが決まるが、三次元上では球状であり、競合した場合には同時に通信できない無線デバイス数が多く、非効率な通信は三次元展開の妨げとなる。

本研究の目的は、複数の無線デバイスの分散協調動作により、無線ネットワークの通信容量・通信品質を向上させるとともに干渉の低減を図り、無線ネットワークの三次元空間上への持続的発展を実現することである。

2 ゲーム理論の適用範囲

本研究では、分散制御を学問的に取り扱うために非協力ゲーム理論における知見を導入する。特に、相互作用とダイナミクスを扱うことのできるポテンシャルゲームに着目する。まず、非協力ゲームについて、それが分散制御、特にリソース制御[1]の議論に用いることができることを示す。

ゲーム理論 (game theory) [4, 5] とは、複数の意志決定主体が存在し、各主体間に相互作用がある状況で、各主体が取り得る選択肢の中から自己の目的関数が最大となる選択肢を決定するという分散的な意志決定を扱う理論である。この理論にはゲーム理論という呼称がついているが、ゲームという言葉は「パワー・ゲーム」というような言葉の中で使われる「競争」や「駆け引き」といった意味で用いられている。「携帯ゲーム機」というような言葉の中で使われ、ゲームという言葉から最もイメージされやすい「遊び」という意味とは異なることに注意が必要である。

この分散的な意志決定は、一種の分散的最適化問題と見ることもできる。ただし、2.4 節で述べたような最適化は全体合理性、すなわちシステム全体として追求する目的が設定されていることを前提とするのに対し、ゲーム理論では個人合理性、すなわち個々の意志決定主体は自己の目的関数を最大化するという前提をおく点において本質的に異なることを念頭に置く必要がある。

無線分散ネットワークにおけるリソース制御[1]やコグニティブ無線[8, 9]などに存在する本質的な問題は干渉という無線特有の相互作用であり、ゲーム理論を用いて扱える形に定式化できることが多い。このため、何らかの理由により計算機シミュレーションや実験でなく理論的解析が必要となった場合、あるいは計算機シミュレーションや実験の結果を理論的に解析することが必要となった場合に、ゲーム理論は有用な理論となりうる。ただし、ゲーム理論の適用にあたっては、どのような問題に適用可能なのかについて特に注意が必要であり、これを説明する。

2-1 非協力ゲームと単目的最適化

ゲーム理論とは、「ゲーム」と呼ばれる最適化問題を扱う理論である。本項では「ゲーム」と、単目的最適化 (single-objective optimization) 問題、多目的最適化 (multi-objective optimization) 問題という他の最適化問題との相違について述べ、ゲーム理論の適用可能な最適化問題、すなわち「ゲーム」を厳密にする。また、集中制御、分散制御を数学的に定式化する際に、どの最適化問題の形にするべきかを述べる。

単目的最適化問題とは、一つの目的関数をもつ最適化問題を指す。一方、非協力ゲームにおいて最もシンプルな戦略形 2 人ゲームは、単目的最適化の表現を用いれば、次式のような 2 つの単目的最適化問題を組合せた問題である。

$$\max_{x_1} f_1(x_1, x_2), x_1 \in X_1$$

$$\max_{x_2} f_2(x_1, x_2), x_2 \in X_2$$

第1式のみであれば単目的最適化問題であり、 x_2 を所与として、目的関数 f_1 が最大となるような変数 x_1 を集合 X_1 の中から決定するという意味である。単目的最適化問題であるため、その最適解を求める手法としては目的関数や制約条件の性質に応じて線形計画法や凸最適化を用いることができる。非協力ゲームが単目的最適化問題と違うポイントとして注意すべきことは、単目的最適化問題が複数存在すること、かつそれら個々の単目的最適化問題においては、目的関数 f_1 に対して変数 x_1 のみというように1変数しか変更できず、変更できない変数があること、加えて変数 x_1 の変更が他の単目的最適化問題に影響を与えるという相互作用が存在することである。単目的最適化の枠組みのみでは扱えない最適化問題を扱うのが非協力ゲーム理論である。

ゲームの解としては、単目的最適化問題に対する最適解の意味とは異なり、分散的な最適化の結果の予測として、ナッシュ均衡と呼ばれる均衡の概念を用いる。非協力ゲーム理論では、ゲームとして定式化した後のナッシュ均衡の求め方を与えるが、注意が必要なことは、ナッシュ均衡に至る制御手法を必ずしも扱えるとは限らないことである。ナッシュ均衡に至る分散制御手法は、後で述べるポテンシャルゲームなどのゲームにおいては存在することが証明できるが、一般のゲームには存在するとは限らない。

2-2 非協力ゲームと多目的最適化

非協力ゲームは、二つの目的関数からなるベクトル (f_1, f_2) の最大化問題

$$\max_{x_1, x_2} (f_1(x_1, x_2), f_2(x_1, x_2)), x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$$

とも異なることに注意が必要である。この問題は多目的最適化問題と呼ばれる。多目的最適化問題の解は一般に一意には定められず、複数の目的関数が同時に実現可能な値を描いた場合、それらの目的関数すべてに関して上回る点がない境界が解となる。この境界のことをパレートフロンティアと呼ぶ。非協力ゲームと多目的最適化問題は、前提が個人合理性と全体合理性という点で本質的に異なる問題であるため、非協力ゲーム理論の中のナッシュ均衡を求める議論が、パレートフロンティア上の点を求めるために用いることができるとは限らない。

また、非協力ゲームと多目的最適化問題は、複数の目的関数 f_1 と f_2 を反映した新たな目的関数 f (例えば $f(x_1, x_2) = f_1(x_1, x_2) + f_2(x_1, x_2)$)を用いた単目的最適化問題

$$\max_{x_1, x_2} f(x_1, x_2), x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$$

とも本質的に異なることに注意が必要である。

2-3 集中制御、分散協力型制御、分散非協力型制御

複数の主体による分散制御、あるいはそれを定式化した分散最適化問題は様々な構造のものがある。これらを明確に分類するため、目的関数がシステム全体としての特性を表すもの、すなわち全体合理性を追求するものを分散協力型と呼び、主体ごとに異なる目的関数を持つもの、すなわち個人合理性を前提とするものを分散非協力型と呼んで区別する。このように分類すれば、分散協力型制御を定式化する場合には単目的最適化問題とするべきであり、分散非協力型制御は非協力ゲームとするべきである。ゲーム理論で扱われる問題を先に述べたように「ゲーム」と呼ぶが、単目的最適化問題と対比させるため、分散非協力型最適化問題とも呼ぶ。また、単目的最適化問題を、目的を一にする複数の主体が分散的に解くという意味の問題を分散協力型最適化問題と呼び、分散非協力型最適化問題と区別する。目的関数の一つの集中制御は、単目的最適化として定式化するのが適切である。

3 戦略形ゲーム

ゲーム理論の中で、プレイヤー間の協力を前提としないものを非協力ゲームと呼ぶ。まず、非協力ゲームを扱う非協力ゲーム理論(non-cooperative game theory)において最も基本的な戦略形ゲーム(game in strategic form)の定義と、対応する解概念であるナッシュ均衡(Nash equilibrium)について述べる。

3-1 戦略形ゲームの定義

戦略形ゲームはプレイヤー(player)、戦略(strategy)、効用(utility)という3つの要素からなる。プレイヤーとは、独立な意思決定主体を意味する。プレイヤー数が n の場合、プレイヤーの集合を $N = \{1, \dots, n\}$ と表記する。

プレイヤー $i \in N$ の戦略の集合 A_i を戦略集合と呼び、全プレイヤーの戦略集合の直積集合を $A = \prod_{i \in N} A_i$ と表記する。個々のプレイヤーの選択枝 $a_i \in A_i$ を戦略と呼び、全プレイヤーの戦略の組合せを $a \in A$ と表記する。ここで、ゲーム理論特有の表記として、プレイヤー i 以外の戦略を

$$a_{-i} = (a_1, \dots, a_{i-1}, a_{i+1}, \dots, a_n)$$

と表記し、これを用いた次の表記を用いる。

$$(a'_i, a_{-i}) = (a_1, \dots, a_{i-1}, a'_i, a_{i+1}, \dots, a_n)$$

各プレイヤーの戦略の決定に伴い、プレイヤーはそれぞれ何らかの結果を得る。この結果を各プレイヤーが望ましいものほど大きな値となるように評価した値を効用と呼ぶ。プレイヤー i の得る結果、すなわち効用は、プレイヤー i のとる戦略 a_i の関数であるのみならず、他のプレイヤーのとる戦略の組 a_{-i} の関数でもある。この関係を効用関数 $u_i : A \rightarrow R$ と呼び、各プレイヤーのとった戦略が a の場合のプレイヤー i の効用を $u_i(a)$ と表す。

戦略形ゲームは、先に述べたようにプレイヤー、戦略、効用関数の 3 要素 $(N, A, \{u_i\}_{i \in N})$ で構成される。この $(N, A, \{u_i\}_{i \in N})$ という表現は、次の分散非協力型最適化問題を表す。

$$\max_{a_i \in A_i} u_i(a_1, \dots, a_n)$$

:

$$\max_{a_n \in A_n} u_n(a_1, \dots, a_n)$$

今後の議論において、ゲームの要素 $N, A, \{u_i\}_{i \in N}$ はすべてのプレイヤーの共通知識であると仮定する。この仮定のゲームを情報完備ゲーム (game with complete information) と呼び、情報完備ゲームのみを扱う。各プレイヤーは、他のプレイヤーが最終的に決定する戦略に関する知識なしに、自己の効用を可能な限り最大化するように戦略を決定する状況を考える。このように自己の効用を可能な限り最大化する選択を合理的選択 (rational choice) と呼ぶ。

現実世界においては、 $(N, A, \{u_i\}_{i \in N})$ の要素すべてが共通知識というのは非現実的と考えられる状況もあると考えられる。そのような状況を扱うために他プレイヤーの効用関数を完全には知らない情報不完備ゲーム (game with incomplete information) [1, 2] と呼ばれるゲームも研究されている。

3-2 最適応答

戦略形ゲーム $(N, A, \{u_i\}_{i \in N})$ において、プレイヤー $i \in N$ が選択すべき戦略について考える。プレイヤー i の目的は、自身の効用 u_i を最大化する戦略を選択することである。先に述べたようにユーザ i の効用 u_i は a_i のみならず a_{-i} の関数である。そこで、まず、他プレイヤーの戦略の組 a_{-i} が固定されている場合に、自身の効用を最大化する戦略を考える。この戦略を a_{-i} に対するプレイヤー i の最適応答 (best response) 戦略 a_{-i} と呼び、次式が成り立つ戦略 a_{-i} により定義される。

$$u_i(a^*_i, a_{-i}) = \max_{a_i \in A_i} u_i(a_i, a_{-i})$$

他プレイヤーの戦略 a_{-i} が固定されていれば、最適応答戦略 a^*_i を求める問題は目的関数を u_i とする単目的最適化問題である。これに対し、他プレイヤーも同時に最適応答戦略を決定する状況を扱う理論がゲーム理論と位置づけられる。

3-3 ナッシュ均衡点

すべてのプレイヤーが最適応答戦略をとるとどのような結果となるだろうか。この問題に対しては初期状態などを含めた議論が必要となる。非協力ゲーム理論においてはそのような議論の代わりに、すべてのプレイヤーが最適応答戦略をとる場合の理論的予測として、現時点でとっている戦略が全プレイヤーに関して最適応答となっており、各プレイヤーは自分だけ戦略を変更すると効用が低下するため戦略を変更する動機を持たない均衡点を考える。この点をナッシュ均衡点と呼ぶ。式で表現すると、戦略の組 $a^* = (a^*_1, a^*_{-1}) \in A$ がナッシュ均衡点であるのは、次式が成り立つ場合である。

$$u_i(a^*_i, a^*_{-i}) = \max_{a_i \in A_i} u_i(a_i, a^*_{-i}), \quad \forall i \in N$$

非協力ゲーム理論においては多くの場合、ナッシュ均衡点を分散非協力型最適化の理論的予測として考える。

3-4 パレート最適

ナッシュ均衡の性質を議論するため、多目的最適化問題の解、すなわちパレートフロンティアの性質であるパレート最適を導入する。多目的最適化問題と非協力ゲーム (分散非協力型最適化問題) は本質的に異なる問題であるため、各々の解であるパレートフロンティアとナッシュ均衡にも直接的関係はない。

戦略形ゲームにおいて、効用ベクトル $u(a) = (u_1(a), \dots, u_n(a))$ の集合、すなわち次式により定義される集合を実現可能集合 (feasible set) と呼ぶ。

$$U = \{u(a), a \in A\}$$

実現可能集合の中で、実現される最大のもをを求める問題は次の多目的最適化問題である。

$$\max_{u(a) \in U} u(a)$$

あるプレイヤーの効用を上げるためには、他のプレイヤーの効用を下げざるを得ない、つまり、両方のプレイヤーにとって、より望ましい戦略の組がないような効用の集合をパレートフロンティアと呼び、パレートフロン

ティア上の効用を実現する戦略組はパレート最適 (Pareto optimal) であるという。一方、パレートフロンティアの内側の点は、パレートフロンティア上の点に移動することで他のすべてのプレイヤーの効用を減らすことなくあるプレイヤーの効用を改善することができる。一般に、 $a \in A$ に対し、

$$u(a') > u(a)$$

を満たす効用ベクトル $u(a') \in U$ が存在しない場合、 a あるいは $u(a)$ はパレート最適という。先に述べたようにナッシュ均衡とパレート最適は直接関係なく、ナッシュ均衡はパレート最適とは限らない。ナッシュ均衡がパレート最適とならない代表的な例として、囚人のジレンマ (prisoners' dilemma) という状況が知られている。

3-5 ポテンシャルゲーム

これまでに、ナッシュ均衡の求め方を述べた。ナッシュ均衡に収束するような各プレイヤーの戦略決定方法があれば、分散非協力型制御のために用いることができるが、一般にはこのような性質を持つ戦略決定方法が存在するとは限らない。次に述べるポテンシャルゲーム (potential game) [7, 17] と呼ばれるゲームにおいては、ナッシュ均衡への収束が保証されている戦略決定法が存在するため、分散非協力制御への応用が期待される。

ポテンシャルゲームとは、ポテンシャル関数が存在するゲームのことを指す。戦略形ゲーム $(N, A, \{u_i\}_{i \in N})$ のポテンシャル関数とは、次の性質を持つ関数 $f: A \rightarrow \mathbb{R}$ により定義される

$$u_i(a_i, a_{-i}) - u_i(a'_i, a_{-i}) = f(a_i, a_{-i}) - f(a'_i, a_{-i}), \quad a_i, a'_i \in A_i, \quad \forall i \in N$$

すなわち、あらゆるプレイヤーの戦略変更に伴う自己の効用の変化が、システムにおいて一意の関数に表すことのできる場合である。ポテンシャルゲームにおいては、あるタイミングで1プレイヤーのみが現時点よりも自己の効用が増加するように戦略を変更するようなダイナミクスが、ナッシュ均衡に収束することが保証される。この理由を説明する。このような戦略の変更を $a(0), a(1), a(2), \dots$ とする。例えば、戦略組が $a(0)$ から $a(1)$ となる際に戦略を変更したプレイヤーを i とすると、 $u_i(a(0)) < u_i(a(1))$ を満たす。この場合、ポテンシャル関数の定義により $f(a(0)) < f(a(1))$ が成り立つ。したがって、 $a(0), a(1), a(2), \dots$ といずれかのプレイヤーの最適応答により戦略が変更されると、 $f(a(0)) < f(a(1)) < f(a(2)) < \dots$ が成り立つ。A が有限であれば、効用の変更は有限回数で終了する。また、効用の変更が終了した点では、すべてのプレイヤーが最適応答戦略を取っているため、収束点はナッシュ均衡である。特に、ポテンシャル関数が戦略に関して凹関数であれば、ポテンシャル関数の局所最適値は大域的最適値と一致するため、収束点であるナッシュ均衡点はポテンシャル関数を最大化する。

3-6 電力制御

リソース制御の代表例として電力制御をゲーム理論的に取り扱う方法を述べる。N 対の送信・受信ノード間で同時に通信を行う際に、送信・受信ノードが非協力的に個々のリンク容量を最大化するように電力を選択するとどのような結果となるかを考える。ノード組の集合を $N = \{1, \dots, n\}$ と表す。送信ノード $i \in N$ は対応する受信ノード i に対して、最大電力 P_i 以下の電力 p_i で送信する。干渉は帯域全体に渡る加法性ガウス雑音と等価と仮定する。送信ノード j と受信ノード i の間のリンク利得を g_{ij} 、受信ノード i の雑音電力を n_i とすると、受信ノード i の受信信号電力は $g_{ii}p_i$ 、受信干渉電力は $\sum_{j \in N - \{i\}} g_{ij}p_j$ となるため、受信ノード i における受信 SINR は $g_{ii}p_i / (\sum_{j \in N - \{i\}} g_{ij}p_j + n_i)$ と表せる。この問題は、ノード組をプレイヤー、電力 p_i ($0 < p_i < P_i$) を戦略とし、次の効用関数を持つ戦略形ゲームと見なせる。

$$u_i(p_i, p_{-i}) = \log_2(1 + g_{ii}p_i / (\sum_{j \in N - \{i\}} g_{ij}p_j + n_i))$$

この戦略形ゲームのナッシュ均衡点を求めるために、まず最適応答を求める。効用関数 u_i は p_i に関して単調増加であるため、他プレイヤーの戦略 p_{-i} に対する最適応答戦略 p_i^* は、 p_{-i} によらず、 $p_i^* = P_i$ である。ナッシュ均衡点はすべてのプレイヤーの最適応答の交点であるため、最大電力を選択する状況となる。効用関数として前式と異なるものを設定すれば様々な制御が実現できるが、効用関数の設定はヒューリスティックであるため、詳細は議論しない。代表的な研究として文献[2, 10-16] がある。

4 チャネル選択

次に、本研究で扱うチャネル選択の詳細を述べる。

4-1 干渉電力を低減させるチャネル選択

有限数のチャネルを、n 組の送信・受信ノードが各々の効用関数に従い、各々1チャネルずつ選択するチャネル選択問題を考える。一般にこのようなチャネル選択が収束するとは限らないが、効用関数の設定によっては収束を保証することが可能である。このような状況は、送受信ノード組をプレイヤーとし、プレイヤー $i \in$

$N = \{1, \dots, n\}$ が選択可能なチャンネルの集合を戦略空間 C_i とする戦略形ゲームと見なすことができ、非協力ゲーム理論を用いて議論することができる。

興味深い効用関数の設定法として、次式のように干渉電力を用いる方法[3]を紹介する。

$$u_1(c_i, c_{-i}) = - \sum_{j \in N \setminus \{i\}} g_{ij} p_j \delta_{c_j, c_i} - \sum_{j \in N \setminus \{i\}} g_{ji} p_i \delta_{c_i, c_j}$$

p_i はプレイヤー i の送信電力、 g_{ij} は送信ノード j と受信ノード i の間のリンク利得、 δ_{c_j, c_i} はクロネッカー・デルタであり、選択したチャンネルが同じ場合に干渉が生じることを意味する。右辺第1項は受信ノード i の被干渉電力、第2項は送信ノード i が及ぼす与干渉電力にそれぞれ負号をつけた形となっている。

この戦略形ゲーム $(N, \prod_{i \in N} C_i, \{u_1\}_{i \in N})$ は、次の関数とそのポテンシャル関数となることが証明されるため、ポテンシャルゲームである[3]。

$$f_1(c_i, c_{-i}) = -(1/2) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus \{i\}} (g_{ij} p_j \delta_{c_j, c_i} + g_{ji} p_i \delta_{c_i, c_j})$$

この関数はシステム内のすべての受信ノードにおける干渉電力に負号をつけた値を意味する。

ポテンシャルゲームでは効用関数が最大となる最適応答戦略を逐次的に選択することで、有限回数でナッシュ均衡に収束する。したがって、各プレイヤーが独立に効用関数を増加させるような逐次的チャンネル更新、すなわち被干渉電力と与干渉電力の和を低減するようにチャンネルを選択すると、ポテンシャル関数は単調に増加し、ナッシュ均衡に収束する。この方式を用いるためには、受信ノード i はその被干渉電力を、送信ノード i はその与干渉電力を推定する必要がある。

4-2 干渉信号数を低減させるチャンネル選択

この方式を拡張する形で、干渉電力が閾値 T 以上の干渉信号の数を最小化するチャンネル割り当てを考える。このためには、効用関数として次の関数 u_2 を用いればよい

$$u_2(c_i, c_{-i}) = - \sum_{j \in N \setminus \{i\}} H(g_{ij} p_j - T) \delta_{c_j, c_i} - \sum_{j \in N \setminus \{i\}} H(g_{ji} p_i - T) \delta_{c_i, c_j}$$

ここで $H: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ は単位ステップ関数である。

$$H(x) = 1, \quad x > 0$$

$$0, \quad x \leq 0$$

この効用関数を用いたゲーム $(N, \prod_{i \in N} C_i, \{u_2\}_{i \in N})$ は次の関数 f_2 をポテンシャル関数とするポテンシャルゲームであることが証明できる。

$$f_2(c_i, c_{-i}) = -(1/2) \sum_{i \in N} \sum_{j \in N \setminus \{i\}} [H(g_{ij} p_j - T) \delta_{c_j, c_i} + H(g_{ji} p_i - T) \delta_{c_i, c_j}]$$

4-3 シミュレーション結果

200m 四方のエリアに、30 ペアの送信・受信ノードを想定する。送信ノードの送信電力はすべて等しく ($p_i = P$)、帯域幅の等しい4つのチャンネルのうち一つをランダムに選択したのち、最適応答に従いチャンネルを変更していくと仮定する ($C_i = \{1, 2, 3, 4\}$)。電波伝搬としては自由空間伝搬を想定した。図1は収束後のチャンネル選択結果の一例であり、チャンネルが地理的に繰り返して利用されていることが分かる。

まず収束後の特

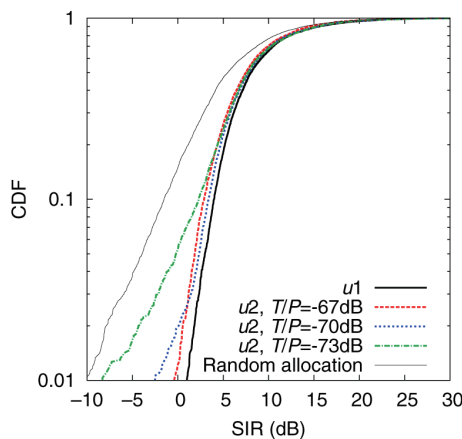


図2 受信信号対干渉電力比

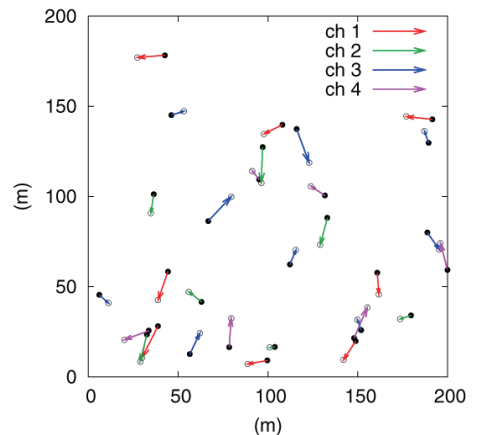


図1 チャンネル選択の例

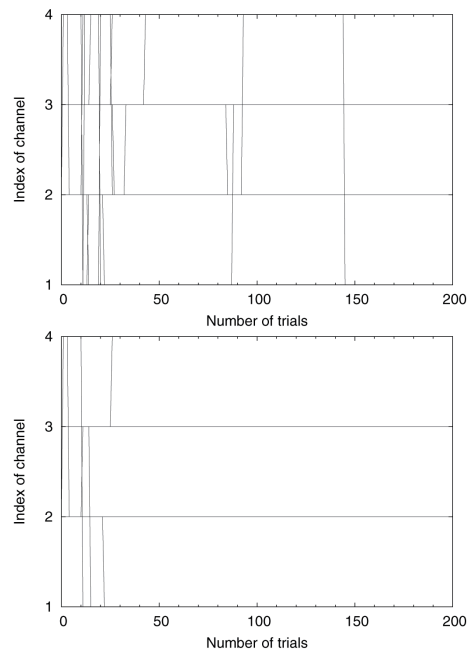


図3 チャンネルの変更 上: u_1 、下: u_2

性を評価する。図2に受信信号電力対干渉電力比 SIR の累積確率密度関数 CDF を示す。これは100 トポロジの平均値である。提案する効用関数 u_2 を用いた場合は、パラメータ T の選択によってはオリジナル

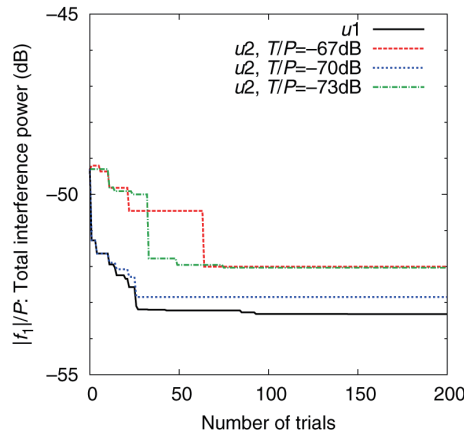


図4 総干渉電力

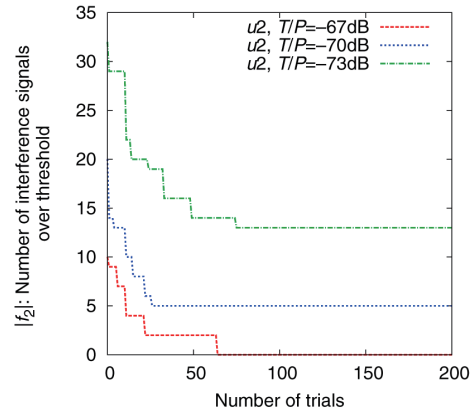


図5 総干渉信号数

ルの効用関数 u_1 を用いた場合に近い値を実現していることが分かる。

次に収束速度を評価する。あるトポロジにおける選択されたチャンネルの変化を図3に示す。効用関数 u_2 を用いた最適応答の方が、 u_1 よりも速くナッシュ均衡点に収束していることが分かる。これは、あるノード組がチャンネルを変更しても、他のノード組における干渉の変化が閾値を超えない範囲内であれば、最適応答に変化が現れないことによる。

図4にネットワーク内の総干渉電力を示す。この値は、ポテンシャル関数 f_1 の絶対値と等しい。効用関数 u_1 を用いた場合には、分散的にチャンネルを選択しているにもかかわらず、ポテンシャルゲームの定義で説明したようにポテンシャル関数 f_1 は単調減少することが確認できる。効用関数 u_2 を用いた場合にはポテンシャル関数 f_1 は多くの場合に減少しているものの、必ずしも単調減少しない。この原因は、効用関数 u_2 を用いた場合は、大きな干渉電力を及ぼす少数の閾値以上の干渉が生じる場合と、比較的小さいが閾値以上となる干渉電力を及ぼす多数の干渉が生じる場合では、後者を避けるように働くためである。

また、図5に閾値を超える干渉信号の数を示す。この値は、ポテンシャル関数 f_2 の絶対値に他ならない。この場合もやはり、効用関数 u_2 を用いた最適応答により、ポテンシャル関数が単調減少することが確認できる。

図6にネットワークスループットを示す。ただし、ネットワークスループットは

$$\sum_{i \in N} \log_2(1 + \text{SIR}_i)$$

$$\text{SIR}_i = g_{ii} p_i / \sum_{j \in N} g_{ij} p_j \delta_{ci, cj}$$

を用いて評価した。効用関数 u_2 を用いた場合には、 u_1 と比較して若干のネットワークスループットの低下と引き替えに、収束速度を向上できていることが分かる。

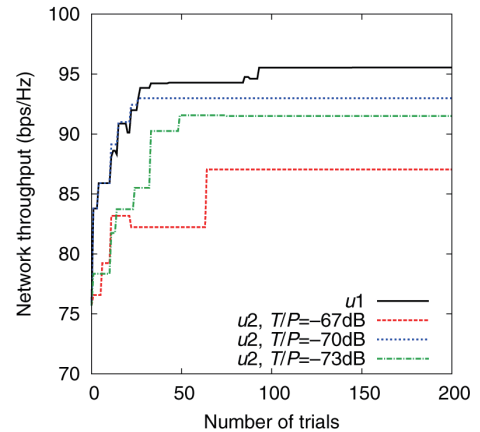


図6 ネットワークスループット

5 まとめ

まず、持続的発展を実現するための分散適応制御を、ゲーム理論を用いて議論可能であることを示した。次に、ポテンシャルゲームの知見を応用し、新たなチャンネル選択方式を検討した。この方式は、閾値を超える干渉信号の数を減少させるように働く。この方式がポテンシャルゲームとして扱えることを証明し、それゆえナッシュ均衡に収束することを示した。この収束が保証される特性が、分散制御においては重要な特性である。計算機シミュレーションにより、閾値を超えない範囲の干渉の変化は最適応答を変化させないため、干渉電力を効用関数と設定した場合と比較してチャンネル選択の変化が少なくなることを確認した。

【参考文献】

- [1] J. Zander and S.L. Kim, Radio Resource Management for Wireless Networks, Artech House, Inc., 2001.

- [2] C. Saraydar, N. Mandayam, and D. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol.50, no.2, pp.291-303, Feb. 2002.
- [3] N. Nie and C. Comaniciu, "Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks," *Mobile Networks and Applications*, vol.11, no.6, pp.779-797, Dec. 2006.
- [4] D. Fudenberg and J. Tirole, *Game Theory*, MIT Press, 1991.
- [5] 岡田章, *ゲーム理論*, 有斐閣, 1996.
- [7] 宇井貴志, "ポテンシャルゲームと離散凹性," 第17回 RAMP シンポジウム論文集, pp.89-105, 2005.
- [8] J. Mitola, "Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio," Doctor of Technology Dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2000.
- [9] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005.
- [10] D. Goodman and N. Mandayam, "Power control for wireless data," *IEEE Pers. Commun. Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 48-54, Apr. 2000.
- [11] A. B. MacKenzie and S. B. Wicker, "Selfish users in Aloha: A game-theoretic approach," *Proc. IEEE VTC 2001-Fall*, pp. 1354-1357, Oct. 2001.
- [12] J. Neel, J. Reed, and R. Gilles, "The role of game theory in the analysis of software radio networks," *Proc. SDR Forum Technical Conference*, Nov. 2002.
- [13] J. O. Neel, J. H. Reed, and R. P. Gilles, "Convergence of cognitive radio networks," *Proc. IEEE WCNC '04*, pp. 2250-2255, Mar. 2004.
- [14] T. Heikkinen, "A potential game approach to distributed power control and scheduling," *Elsevier Computer Networks*, vol. 50, pp. 2295-2311, Sept. 2006.
- [15] M. Bloem, T. Alpcan, and T. Basar, "A stackelberg game for power control and channel allocation in cognitive radio networks," *Proc. GameComm '07*, Oct. 2007.
- [16] J. W. Friedman and C. Mezzetti, "Learning in games by random sampling," *Journal of Economic Theory*, vol. 98, no. 1, pp. 55-84, May 2001.
- [17] D. Monderer and L. S. Shapley, "Potential games," *Games and Economic Behavior*, vol. 14, pp. 124-143, 1996.

〈発表資料〉

題名	掲載誌・学会名等	発表年月
Joint Dynamics of Spectrum Allocation and User Behavior in Spectrum Markets	Proc. IEEE Globecom 2009	2009年12月
ゲーム理論、分散リソース制御	無線分散ネットワーク、電子情報通信学会	未定