

令和 3 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K12744

研究課題名(和文) 敵対者を考慮したマルチエージェント経路探索のためのアルゴリズム開発

研究課題名(英文) Algorithms for Multi-Agent Path Finding with Adversarial Settings

研究代表者

波多野 大督 (Hatano, Daisuke)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・特別研究員

研究者番号：10709728

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：ドローンなどの無人機を警備等に用いる場合、複数の無人機の順路を計算するだけでなく、無人機を妨害しようとする敵対者への対応も重要となる。本研究課題の目的は、敵対者が存在する環境下において複数の無人機の経路を効率的に探索することである。上記の目的を達成するために、以下の3つの課題について取り組んだ。

(1) シュタッケルベルグゲームを用いた定式化の提案とその効率的なアルゴリズムの開発 (2) 提携を提供するプレイヤーへの利得を考慮した提携構造形成問題のモデル化 (3) 許可構造下における線形コストをもつ協力ゲームに対する効率的なシャプレイ値計算

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究結果をより発展させていくことで、敵対者が存在するような、より一般的な環境下において、複数無人機の経路探索が可能になる。また、無人機の中には他者が保有する無人機と協調的に行動をする必要がある場合がある。この場合、全体の利益を優先する協調的な無人機のみならず、自身の利益を優先する無人機との協調が必要なケースも考える必要がある。本研究結果はこれらの問題に対応するための基盤技術の一つとなると考えている。

研究成果の概要(英文)：In case of using drones for security, it is important not only to calculate a route of each drone, but also to consider the existence of an adversary who interrupts them. My goal is to find drone routes efficiently under the environment that the adversary exists. To this end, we achieved the following three problems: (1) Constructing a new formalization of multi-agent path finding problems using Stackelberg games and proposing an efficient algorithm for finding a Stackelberg equilibrium, (2) constructing a new model of coalition structure generation problems under consideration that a benefit for a player who provides a coalition structure, and (3) proposing an efficient algorithm for computing the Shapley value of cooperative games with linear cost function on permission structures.

研究分野：ゲーム理論

キーワード：協力ゲーム マルチエージェント経路探索 シュタッケルベルグゲーム 費用分配問題

### 1. 研究開始当初の背景

近年、Internet of Things (IoT) が注目されており、ドローンやKivaシステム、ロボット掃除機などを代表とする無人機を利用した研究が盛んである。特に、時間的な拘束が長い警備において、疲れることがない無人機の重要性は増している。無人機を用いた警備として、農業の害虫駆除、路上の巡回、山火事の追跡などの応用研究が考えられている。本研究課題では、人間などの意思を持つものを監視の対象とすることを考える。2020年に開催される東京オリンピックにおいてドローンによる警備が検討されていることから、人間を監視対象とすることの重要性は明らかである。無人機を用いた警備を行う上で問題となるのが、どの無人機がどの経路を巡視するかを決める点である。この問題は、プランニングのコミュニティにおいて、マルチエージェント経路探索問題 (Multi Agent Path Finding: MAP)として知られている。MAPの目的は、エージェント (無人機) 間の衝突を考慮した経路の探索である。無人機を用いた警備においても、建物内などの狭い空間で用いられることは十分に考えられるため、無人機間の衝突を考慮する必要がある。一方で、無人機は人間の行動を予測した経路探索を行う必要があるが、従来のMAPでは環境内に無人機以外の存在がないことを前提としているため、MAPとして表現できない。一般的に、人間を最悪の行動を取るもの、つまり敵対者、として扱うことで最悪の場合を想定することができる。このような敵対者が存在する問題を扱う方法として、ゲーム理論が用いられる。そこで、本研究課題では、図1に示す2つの性質 (プランニング、ゲーム理論) をもつ経路探索問題の定義と、そのための効率的なアルゴリズム開発を目的とする。

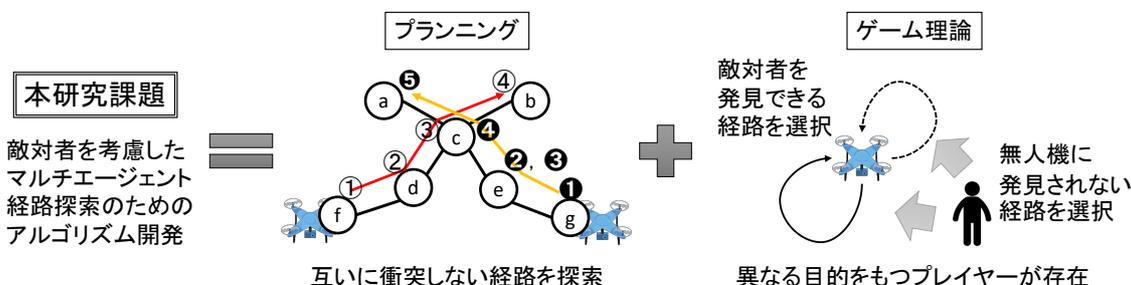


図1 本研究課題で考慮する経路探索における2つの特徴

### 2. 研究の目的

本研究では、以下の3つの課題に取り組む。

(1) 敵対者が存在する環境下におけるマルチエージェント経路探索問題のモデル化とその解を求めるためのアルゴリズムを開発する。

(2) 他者の無人機が存在する場合、互いに自身の利益を追求しつつも、協調的に同じタスクをこなす必要がある。そこで、利己的な無人機が存在する場合でも協調的にタスクを達成できるチーム編成方法を開発する。

(3) 無人機が持つタスクが異なる場合、そのタスクの重要度により、無人機の重要度が異なる。一般的に、各無人機の重要度が偏らないように分散することがセキュリティ上望ましい。ここでは、特にタスク間の優先順序制約がある状況において、無人機の貢献度を計算する効率的なアルゴリズムを開発する。

### 3. 研究の方法

(1) 無人機と敵対者の2種類の意思決定者が存在するプランニング問題を定式化する。無人機は何日間にも渡って警備を行うことを鑑みると、敵対者は無人機の巡視の規則性を十分に調べたのちに経路を探索すると考えるのが妥当である。つまり、この問題は、無人機が戦略を選択した後に敵対者が戦略を選択する、展開型ゲームとして表現できる。本研究課題では、展開型ゲームの一種であるシュタッケルベルグゲームを用いることを検討している。次に、上記の問題に対する効率的なアルゴリズムを提案する。この問題を解く上で困難な点は、戦略(経路)の数がグラフのサイズに比例して爆発的に増加する点である。これは、利得関数が予め与えられている一般のゲームと比較して利得関数の生成にかかるコストが高いことを意味している。そのため、本研究課題では、利得関数を直接生成することなく問題が解けるアルゴリズムの開発を目標とする。

(2) 協力ゲームにおける提携構造形成問題を用いて課題の解決を図る。しかし、従来の提携構造形成問題では、提携を組むプレイヤーの利益のみが考慮される。シェアリングサービスなどを含む実問題では、サービスを利用する人（提携を組むプレイヤー）とそのサービスを提供する人（提携を提供するプレイヤー）が存在することがある。そのため、提携を組むプレイヤーだけではなく、提携を提供するプレイヤーへの利益も考慮したモデルを開発する必要がある。この問題をモデル化するために、協力ゲームの解概念の一つである、弱最小コアを用いた。弱最小コアは一人当たりの平均余剰が最小となるような割り当てのことを指す。つまり、一人あたり弱最小コアの余剰分を値上げしても、提供された提携を離れる動機をもたないことを意味する。本モデルでは、この余剰の総和を提携を提供するプレイヤーの利益とした。本研究では、この余剰の総和が最大となるような提携を効率的に求めるアルゴリズムを開発する。

(3) 協力ゲームにおける解概念の一つであるシャプレイ値を用いて無人機の貢献度を測る。しかし、本研究課題では、無人機間に優先順序が設定されていることを想定する。例えば、無人機ごとに異なるタスクを持つ場合、そのタスクの重要度に応じて優先的に行動できるなどである。この問題は従来の協力ゲームに優先順序制約がある問題と捉えることができる。この問題は許可構造つき協力ゲームとしてみなすことができる。しかし、一般的に許可構造付き協力ゲームではシャプレイ値の計算が難しく、プレイヤー数に対して指数時間かかることが知られている。そこで、本研究課題では、特性関数が線形である場合を仮定することで、シャプレイ値を効率的に計算可能なアルゴリズムの開発を目指す。

#### 4. 研究成果

(1) シュタツケルベルグゲームを用いた敵対者が存在するモデル化とその均衡点を求めるためのアルゴリズムの開発 [Hatano, et.al. 2019]

##### ①研究概要

まずシュタツケルベルグゲームによる敵対者が存在する場合のモデル化を行い、次にその効率的なアルゴリズムを開発した。シュタツケルベルグゲームは先行者と追従者による二人プレイヤーゲームであり、先行者、追従者の順に戦略を決める。この時に、追従者は先行者が出す戦略の分布を知っており、それに応じて戦略を変更できる。両者の利得関数は独立に存在し、先行者と追従者の戦略が決まることで値が決まる。このゲームの目的は、シュタツケルベルグ均衡と呼ばれる均衡解を求めることである。本研究では、より一般的なモデルとして両者の利得関数が劣モジュラ関数であるシュタツケルベルグゲームを定式化し、その均衡解を効率的に求めるアルゴリズムを提案した。劣モジュラ関数は、経済学でよく知られている限界効用逓減性を持つ集合関数の一つで、ある要素を関数に加えた時の増分が元の集合のサイズが大きいほど大きくなる関数である。本研究では、劣モジュラ関数をもつゲームとして広告の費用配分に着目しているが、多くの結果は関数が劣モジュラであればそのまま転用できる。

##### ②応用例

図2は広告の費用配分における先行者と追従者の戦略の取り方の違いを示した図である。2部グラフの左は広告媒体を示し、右は顧客を表す。各プレイヤーの戦略はどの広告をうつ広告媒体の集合である。図2(a)は先行者が $u_1$ と $u_2$ に広告を打ったことを示して居る。それにより $v_1, v_2, v_3$ の顧客が商品を購入したことを示している。その後、図2(b)において、追従者は $u_3$ に広告をうち $v_2$ と $v_3$ の顧客を獲得している。つまり、先行者はなるべく追従者の戦略によって、利得を減らされないように戦略を決定する必要がある。

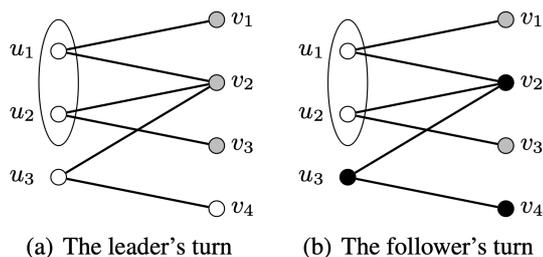


図2 先行者と追従者の戦略の違い

##### ③本研究の貢献

劣モジュラ関数をもつゲームにおいてシュタツケルベルグ均衡解を厳密に求める問題はNP-hardに属するため、近似的な均衡解を新たに定義し、近似解を求めるアルゴリズムを開発した。具体的には、理論的に解の精度保証が可能なアルゴリズムであるApproxと精度保証はないが実応用問題において経験的に良い解を求められる効率的なアルゴリズムPropの2つを提案した。また、ある特定の問題設定において、対象となる問題が入力の線形サイズで線形計画問題として表記できることを示した。つまり、この特定の問題においては、効率的にシュタツケルベルグ均衡解が求められる。

実データを用いて、提案アルゴリズムの評価を行なった。表1は、各アルゴリズムが獲得した顧客数を示しており、この数が多いほど優れたアルゴリズムであることを示している。 $n, m, |E|$ はそれぞれ二部グラフの左ノード、右ノード、枝の数に対応している。 $D_F$ は各枝に載

表1 実データによる評価実験

MovieLens $((n, m,  E ) = (20, 844, 3506))$				Yahoo! Webscope $((n, m,  E ) = (50, 447, 871))$					
$\mathcal{D}_{\mathcal{F}}$	$(k_L, k_F)$	Greedy	Approx	Prop.	$\mathcal{D}_{\mathcal{F}}$	$(k_L, k_F)$	Greedy	Approx	Prop.
$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(1, 2)	37.05	37.05	37.05	$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(1, 2)	5.42	5.42	5.46
$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(2, 2)	65.10	65.10	65.24	$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(2, 2)	10.68	10.68	10.72
$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(4, 2)	114.22	114.22	114.22	$\mathcal{U}(0, 0.2)$	(4, 2)	19.56	19.56	19.55
$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(1, 2)	14.34	14.55	17.22	$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(1, 2)	2.20	3.00	3.67
$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(2, 2)	24.22	29.97	31.87	$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(2, 2)	5.03	6.36	7.05
$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(4, 2)	54.46	54.46	56.12	$\mathcal{U}(0.1, 0.9)$	(4, 2)	11.72	12.68	13.31

っている顧客を獲得できる確率を示す。  $k_L, k_F$  はそれぞれ先行者、追隨者が選択可能な広告媒体の数を意味する。表1より、比較対象である貪欲法と比較してApproxは同等程度の質の解を発見するのに対して、Prop.はほとんどの問題において、良質な解を発見できている。また、解の質だけではなく、求解にかかる時間においてもPropが最も効率よく解を探索できることが実験を通して判明した。

(2) 提携を提供するプレイヤーへの利得を考慮した提携構造形成問題のモデル化

①研究概要

従来の提携構造形成問題では、プレイヤー集合とその部分集合に対して値を返す特性関数が与えられており、その目的は特性関数の和が最大となるようなプレイヤーの提携（分割）を探す問題である。しかし、現実にはこのような提携が自然に求まることはなく、提携を提供するプレイヤーが別途必要となる。しかし、この設定ではこのプレイヤーは無償で提携を提供する必要があり、あまり現実的ではない。そのため、このプレイヤーに対しても何かしらの報酬が必要となる。この問題をモデル化するために、協力ゲームの解概念の一つである、弱最小コアを用いた。弱最小コアは一人当たりの平均余剰が最小となるような割り当てのことを指す。つまり、一人あたり弱最小コアの余剰分を値上げしても、提供された提携を離れる動機をもたないことを意味する。本モデルでは、この余剰の総和を提携を提供するプレイヤーの利益とした。つまり、本研究ではプレイヤーの提携とその各提携におけるコストの分配を同時に行う。より具体的には、各提携の弱最小コアより得られる余剰の総和が最大となるようなプレイヤーの分割（提携構造）を求めることを目的とし、そのための効率的なアルゴリズムを提案する。

本研究では以下の仮定を用いる。

1. 各提携に属するプレイヤーはそれ以外の提携に移動するインセンティブを持たない。

②応用例

タクシーシェアリングのマッチングを考える。プレイヤーがタクシーの利用者に対応し、特性関数がプレイヤーの部分集合に対してその運賃を返す関数とすると、提携を提供するプレイヤーはマッチングシステムを運営する人と捉えることができる。弱最小コアはシェアをすることにより割り引かれる運賃の平均が最大になるようなプレイヤー間の運賃の割当を意味する。この時に得をした分の運賃をシステムの運営と折半することにより利得を得ることができる。つまり、本研究はマッチングシステムを運用する会社の利益を最大にするような利用者のマッチングを考える問題と捉えることができる。また、①で与えた仮定はマッチングシステムの利用者間でマッチングを変更することがないことを意味しており、WEBベースでマッチングが行われる状況を鑑みると不自然な仮定ではない。

③本研究の貢献

上記の問題に対して、以下の3つのアルゴリズムを提案した。

1. 各プレイヤーの分割に対して何も制約がない問題に対する近似アルゴリズム
  2. 分割の数に制限がある問題に対する近似アルゴリズム
  3. 分割の数かつ各分割のプレイヤー数に制限がある問題に対する近似アルゴリズム
- アルゴリズム1は従来の提携構造形成問題の設定に近くプレイヤーの分割数と各分割のサイズ

表2 アルゴリズム2の実験結果

$k$	Algorithm 2			Theor. 5
	$n = 10^2$ sol. qua.	$n = 10^3$ sol. qua.	$n = 10^4$ sol. qua.	sol. qua.
$0.3n$	0.91	0.91	0.90	0.60
$0.2n$	0.78	0.80	0.79	0.40
$0.1n$	0.55	0.59	0.61	0.20

表3 アルゴリズム3の実験結果

$(k, \ell)$	Algorithm 3			Theor. 6
	$n = 10^2$ sol. qua.	$n = 10^3$ sol. qua.	$n = 10^4$ sol. qua.	sol. qua.
$(0.4n, 4)$	0.92	0.92	0.91	0.60
$(0.3n, 4)$	0.63	0.65	0.66	0.20
$(0.4n, 5)$	0.94	0.94	0.93	0.67
$(0.3n, 5)$	0.75	0.77	0.76	0.33

に制約がない問題に対するアルゴリズムである。それに対して、アルゴリズム2は分割数に制約がある問題に対する近似アルゴリズムである。タクシーの例では、タクシーの数に制限がある場合に対応する。最後にアルゴリズム3は分割数に加えて各分割のサイズに対して制限がある問題に対する近似アルゴリズムである。上記の例では、各タクシーに乗れる人数に制約がある場合に対応する。

表2と表3はタクシーの実データを用いて実験した結果をまとめたもので、それぞれアルゴリズム2と3の実験結果である。評価指標は解の質で測っており、アルゴリズムにより得られた解の値を最適解の値で割った値である。つまり、1に近いほど最適解に近い値が得られていることを示す。問題のパラメータである、 $n, k, \ell$ はそれぞれプレイヤーの数、分割数、各分割のサイズを示す。また、アルゴリズム2と3は近似アルゴリズムであるため、理論的に保証された下界が存在する。定理5と定理6の値が下界の値で実際に得られた値はそれよりも優れた値であることが読み取れる。

### (3) 優先順序制約をもつエージェントの貢献度計算のための効率的なアルゴリズムの開発

#### ①研究概要

従来の協力ゲームでは、プレイヤー間にある構造は考慮されていない。しかし実問題では、しばしばプレイヤー間に何かしらの構造が存在する場合がある。本研究では、特にプレイヤー間に優先順序構造がある場合において、協力ゲームの解概念の一つである、シャプレイ値を効率的に計算する方法を提案する。本研究では、優先順序構造を持つ協力ゲームのモデル化に許可構造付き協力ゲームを利用する。許可構造は、プレイヤーをノード集合とする、有向非巡回グラフで与えられ、ある提携に含まれるプレイヤーの親がその提携に含まれているときその提携を提携可能と呼ぶ。この構造には2種類あり、すべての親が含まれている必要のある、conjunctive設定と、少なくとも一人の親が含まれていけばよい、disjunctive設定がある。このとき、許可構造を満たす集合を提携可能と呼ぶこととする。許可構造上の特性関数は、与えられた集合に対して、最小の提携可能な集合の値を返すものとする。

本研究では上記の問題に対して、以下の2つを仮定した状況でシャプレイ値を計算する。

1. 特性関数が線形である。
2. 提携可能な集合がconjunctiveな許可構造により与えられる。

#### ②応用例

スケジューリング問題におけるタスク間の優先順序はまさに許可構造と合致する。例えば、図3のように5つの異なるタスクがあり、それぞれのタスクに一人の別々のプレイヤーが属しているとする。プレイヤー $v_1$ のタスクは他のどのタスクにも依存しないことを意味しており、 $v_2, v_3$ のタスクはそれぞれともに $v_1$ のタスクが終了していかないと、遂行することができないことを意味する。同様に $v_5$ は $v_2, v_3$ のタスクが終了していかないと、遂行できない。この例において、 $\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ や $\{v_1, v_2, v_3\}$ は提携可能な集合であるが、 $\{v_1, v_2, v_4\}$ や $\{v_2, v_3\}$ は提携可能な集合ではない。これらの提携不可能な集合に対して、特性関数はそれぞれ $\{v_1, v_2\}$ と $\{\emptyset\}$ の値を返す。ここで、特性関数は、与えられた集合に $v_2$ が含まれていれば2を返し、そうでなければ0を返す、線形関数とすると、 $\{v_1, v_2, v_4\}$ に対しては2を返すが、 $\{v_2, v_3\}$ に対しては0を返す。

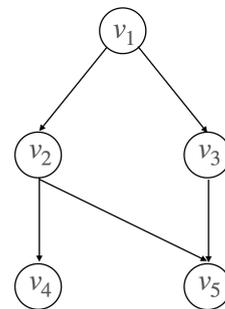


図3 プレイヤー間の優先順序構造の例

#### ③本研究の貢献

本研究の貢献は、①で示した問題に対して多項式時間でシャプレイ値を計算するアルゴリズムを提案したことである。制約のない協力ゲームでは、特性関数が線形である問題のシャプレイ値は、特性関数にそのプレイヤーのみを与えたときに得られる値と一致するため、線形時間で計算可能である。しかし、許可構造上の特性関数は、元の特性関数が線形であっても、線形になるとは限らない。そのため、特性関数が非線形で制約のない協力ゲームに対してシャプレイ値を計算するのと同様の難しさであることに注意されたい。

優先順序構造と似た構造を持つ問題は上記の問題以外にも多数存在する。例えば、学習者の知識構造（例えば、数学を理解するためには算数を理解する必要があるなど）、因果関係、ネットワーク上での影響伝搬やランキングなどが挙げられる。しかし、本研究では①に挙げた2つの仮定があり、これらの問題を表現できるとは限らない。そのため、仮定を取り除けるようなより一般の問題クラスに対する効率的なシャプレイ値計算アルゴリズムを提案することが今後の課題となる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Daisuke Hatano, Yuko Kuroki, Yasushi Kawase, Hanna Sumita, Naonori Kakimura, Ken-ichi Kawarabayashi
2. 発表標題 Non-zero-sum Stackelberg Budget Allocation Game for Computational Advertising
3. 学会等名 16th Pacific Rim International Conference on Artificial Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------