

# 都市の警備配置問題を高速に解く AI数理技術

## AI Technology for Quickly Solving Urban Security Positioning Problems

● 岩下洋哲 ● 大堀耕太郎 ● 穴井宏和

### あらまし

犯罪被害を最小化するために、警備側が取るべき行動をゲーム理論によって数理的に分析する技術は「警備ゲーム」と呼ばれ、近年、人工知能(AI)やマルチエージェントの研究分野で注目されている。またこれは、既に米国などの複数の公的機関でも活用が始まっている技術である。しかし、攻撃目標に向かう犯罪者を検問所で確保する「都市ネットワーク警備ゲーム」は難しい問題として知られており、これまで現実の大都市規模の問題を安定して取り扱える解法がないことが実用化の障害となっていた。この課題を解決するために、筆者らはAI数理技術を応用した最小カット配置とグラフ縮約の手法を開発した。最小カット配置のアルゴリズムは、最大の警備効果を達成するための警備員の効率的な配置場所を探し出す。グラフ縮約による単純化は、計算コストが問題の大きさに対して指数的に増大する都市ネットワーク警備ゲームにおいて、計算速度の劇的な改善をもたらす。

本稿では、これらの開発手法を解説するとともに、東京23区の大規模問題(約20万ノード)に対する試行結果を紹介する。

### Abstract

Security games are used for mathematically optimizing security countermeasures in order to minimize the effects of criminal activity. Their use has been attracting attention in the fields of artificial intelligence (AI) and multi-agent systems, and they are now being put to practical use by several U.S. public agencies. However, the use of urban network security games to analyze the problem of catching criminals at road checkpoints is difficult, which has hindered their application to city-scale networks. To overcome this difficulty, we have developed min-cut arrangement and graph contraction algorithms. The min-cut arrangement algorithm identifies candidate checkpoint locations that maximize security. The graph contraction algorithm reduces the problem, leading to a dramatic reduction in computational time for urban network security games, for which the computational cost increases exponentially with the size of the problem. In this paper, we introduce these algorithms and present results for a 200,000-node problem centered on Tokyo's 23 wards.

## まえがき

都市や空港などにおけるセキュリティ対策では、犯罪が想定される全ての対象を同時に警備することが理想である。一方、それを日常的に行うには膨大なコストがかかる。そのため、限られた警備資源の中でいかに効果的な警備を実現するかが、実際の警備計画における重要な課題となっている。また、警備の効果を評価するためには、犯罪者の行動特性や心理特性を考慮しながら被害のリスクを定量化するなどの高度な分析が必要である。これまでの警備計画は、主として専門家の経験と勘に委ねられていた。しかし、高度化する組織犯罪などへの危機感が高まる中、警備計画への人工知能(AI)技術の活用が期待されている。

AI分野において、複数の主体で構成された複雑なシステムを分析する技術はマルチエージェント技術と呼ばれる。その中でも、近年、警備計画決定問題にゲーム理論を応用した「警備ゲーム(security games)」と呼ばれる技術の開発が活発になっている。<sup>(1)-(3)</sup> 警備ゲームの技術には、数理的なモデル化や問題規模への対応(スケーラビリティ改善)など、個別の警備対象に依存した問題解決法が含まれる。いくつかの対象に関する技術は実用レベルに達しており、既にロサンゼルス国際空港,<sup>(4)</sup> 連邦航空保安局,<sup>(5)</sup> アメリカ沿岸警備隊,<sup>(6),(7)</sup> ロサンゼルス郡保安局<sup>(8)</sup>などで利用されている。しかしその一方で、まだ実用化を阻む課題が残されている対象も少なくない。

富士通研究所では、国立大学法人電気通信大学と共同で、警備ゲームに関するAI数理技術の研究を行っている。本稿では、そのテーマの一つである都市ネットワーク警備ゲームのスケーラビリティ改善技術に関する新しい研究成果<sup>(9)</sup>の概要を紹介する。

## 背景

本章では、警備ゲームの概要を紹介した後、その一つである都市ネットワーク警備ゲームの難しさについて述べる。

### ● 警備ゲーム

警備ゲームは、警備側プレイヤー(警察や警備会社)と攻撃側プレイヤー(犯罪者や犯罪組織)

が互いの行動を読み合いながら、合理的に行動する状況を数理的にモデル化したものである。各プレイヤーは、それぞれの純粋戦略(実行可能な行動)の集合を持つ。また、両者が持つ純粋戦略の全ての組み合わせに対して、それぞれが得る利得は決まっており、両者ともに自己の利得の最大化を目指す。警備計画には混合戦略、すなわち純粋戦略を確率的に選択する戦略を採用できる。警備計画をランダムに選択する「乱択化」は、警備計画を事前に調査したり盗み出したりする巧妙な犯罪者に備えるための重要な要素である。

例えば、離れた場所に価値60のターゲットAと価値30のターゲットBがあり、配置できる警備員は一人しかいない状況があるとする。警備側と攻撃側は、警備あるいは攻撃するターゲットをそれぞれ一つ選択する。選択したターゲットが同じであれば被害は発生しないが、異なる場合は攻撃を受け、ターゲットの価値と同じ被害が発生する。このとき、AもしくはBの一方のみを選択する、あるいはAとBを交互に選択するといった決定的な警備計画は、選択ルールを推測する能力を持った犯罪者に対しては全く無防備である。一方、AとBを等確率でランダムに選択する警備計画では、犯罪者がAを攻撃するときの被害の期待値は30、Bを攻撃するときの被害の期待値は15となる。最も巧妙な犯罪者を想定するときは、AとBの選択確率を2対1に設定する警備計画が最適であり、その場合の被害の期待値は20となる。

警備ゲームの多くは線形計画問題や整数計画問題に帰着するため、小規模なものはそのまま汎用の最適化ソルバーを使って解くことができる。しかし現実の問題には、膨大な数の戦略や複雑な利得構造が存在するため、問題に合わせた解法の工夫が必要になることも珍しくない。

### ● 都市ネットワーク警備ゲーム

都市ネットワーク警備ゲームは、ターゲットに向かって移動する犯罪者を確保するための警備ゲームである。図-1のように、都市のネットワークはグラフ構造で表現される。グラフはノードとエッジで構成され、一部のノード間はエッジで接続される。また、グラフのいくつかのノードが、「ソース」または「ターゲット」としてラベル付けされている。ソースは犯罪者の進入地点、ターゲッ

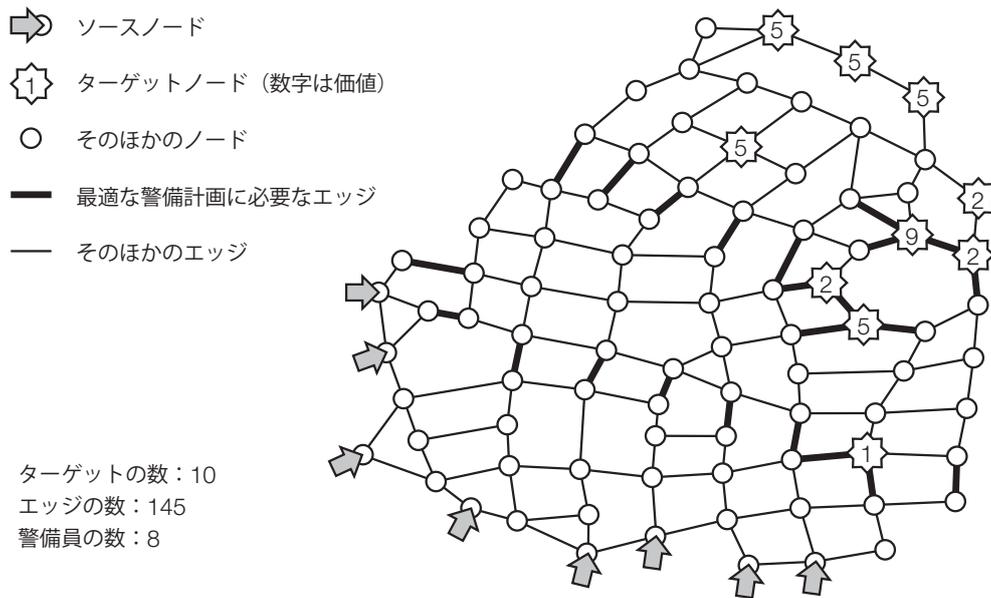


図-1 都市ネットワーク警備問題

トは犯罪者の攻撃地点を示す。それぞれのターゲットには、それが攻撃された際の被害を表す「価値」が与えられている。警備側は、任意に選んだ $k$ 本のエッジにそれぞれ一人ずつ警備員を配置する。犯罪者は、任意のソースから任意のターゲットへの経路を一つ選択する。選択した経路が警備員のいるエッジを含まない場合に限り、攻撃されたターゲットの価値に対応した被害が発生する。

小規模な問題の例を図-1に示す。基本的な警備ゲームではターゲットそのものに警備員を配置するが、都市ネットワーク警備ゲームではエッジの上に警備員を配置するため、純粋戦略の数はずっと多くなる。10個のターゲットから8人の警備員の配置場所を選ぶ組み合わせは45通りであるのに対して、145本のエッジから8人の警備員の配置場所を選ぶ組み合わせは3兆9,817億6,282万6,470通りもある。純粋戦略の増加は攻撃側では更に大きく、ターゲットを選ぶだけなら10通りであったものが、このゲームでは9,806兆3,706億4,560万5,329通りの経路を考慮する必要がある。線形計画問題としての基本的な定式化では、両者の純粋戦略の数がそのまま変数あるいは制約条件の数に対応する。数万から数十万のノードとエッジで構成される現実の都市ネットワークにおける純粋戦略は、数え上げることさえ不可能なほどの数になる。このため、実用化にはスケーラビリティの高い計算手法

の開発が必須であった。

これまでに、AI分野を代表する国際会議でも複数の手法が提案されてきたが、<sup>(10)-(12)</sup> 数万あるいは数十万ノード規模の問題を安定して取り扱える解法は見つかっていなかった。従来の最善の手法(以下、従来手法)<sup>(12)</sup>では、膨大な数の純粋戦略の上でゲームの均衡を求める定式化はそのままに、ダブルオラクル法<sup>(13)</sup>の改良やその他の技術の組み合わせによって実問題への適用を可能としている。ダブルオラクル法では、良い混合戦略を構成するためには必ずしも全ての純粋戦略を使用する(0でない確率を割り当てる)必要がないことを利用し、両プレイヤーが使用する純粋戦略の部分集合を拡大しながら反復計算して均衡を求める。筆者らによる従来手法を用いた追実験では、計算の収束までに必要な純粋戦略の数には問題によるばらつきが大きく、数万エッジ規模の問題を数秒で解ける場合もあれば、1日かけても解けない場合もあることを確認した。更に速く安定的に解を得るためには、区別する純粋戦略の数を抜本的に削減するような、数理モデル上の改善が必要と考えられた。

### 開発した技術

実際に、従来手法で得られた警備計画を観察すると、警備側が純粋戦略集合の一部分しか使用しないことに加えて、警備員が配置される可能性の

ある場所もエッジ集合の一部であることが確認できる。例えば、図-1の問題に対する最適な警備計画の一つは、図の太線で示されたエッジだけで作ることができる。筆者らはこの性質を利用することで、計算コストの大幅な削減に成功した。開発したアルゴリズムでは、警備員を配置するエッジ（候補エッジ）の集合を拡大しながら、反復計算によって解を求める。

### ● 最小カット配置アルゴリズム

1本以上のエッジをグラフから取り除いてソースとターゲットを分離することを考える際に、取り除くエッジの数が最小となるエッジ集合は最小カットと呼ばれる。単一のターゲットに対する最適な警備計画は、最小カットの上に警備員を配置するものであることが知られている。<sup>(14)</sup> 最小カットを構成するエッジの数 $w$ が警備員の数 $k$ 以下であれば、ターゲットを完璧に警備することができ、被害の期待値は0である。一方、エッジの数 $w$ が警備員の数 $k$ より多いときは $w$ 本のエッジから $k$ 本を一樣ランダムに選んで警備する計画が最善であり、価値 $U(t)$ のターゲットに対する被害の期待値は $U(t) \cdot k/w$ となる。

価値の異なる複数のターゲットが存在するときでも、個別のターゲットあるいは複数のターゲットの組み合わせに関する最小カットから候補エッジを選択するのは良い考えであろう。しかし、様々

な最小カットの中でどれを選択すれば良いかは自明ではない。その一方で、ターゲットの数 $|T|$ が大きい場合に $2^{|T|}-1$ 通りの組み合わせの全てを考慮することは、現実的ではない。選択する最小カットが少なすぎると警備の質が低下し、多すぎると計算コストが増大する問題が生じる。

筆者らは、候補エッジの集合と警備計画を同時に改善していく手法によって、この課題を解決した。アルゴリズムの概要は次のとおりである。

- (1) 候補エッジ集合 $C$ の初期値を空集合とし、最初の警備計画では何も警備しないこととする。
- (2) 現在の警備計画で最も高い被害期待値を持つターゲットの集合 $T'$ を選択する。
- (3)  $T'$ をソース集合から分離する最小カットを $C$ に追加し、 $C$ が大きくならなければ終了する。
- (4) 新たな $C$ を候補エッジ集合としたときの最適な警備計画を求め、(2)に戻る。

このアルゴリズムで最小カットが選択されていく様子を図-2に示す。最初の警備計画では何も警備しない。そのとき最も高い被害期待値を持つのは価値9のターゲットであるため、1番目の最小カットとして $C_1$ が選択される。 $C_1$ を候補エッジ集合とした場合の2番目の警備計画は、その4本のエッジに警備員を配置するものになる。そうすると、価値9のターゲットが完全に守られるため、次に被害期待値が最も高くなるのは、価値5を持つ五つの

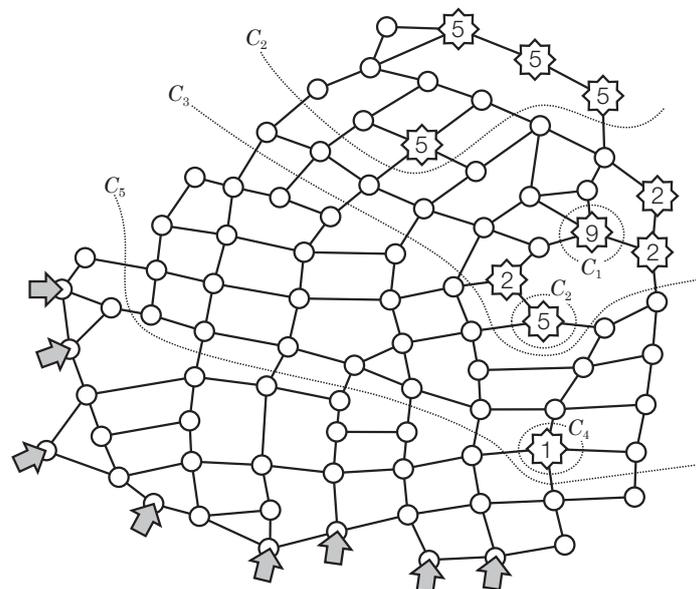


図-2 効果的な警備を実現する最小カット群

ターゲットになる。したがって、2番目に選択される最小カットは、この五つを同時にソースから分離する $C_2$ である。そして、 $C_1$ と $C_2$ を合わせた13本の候補エッジに対する8人の警備員の配置確率を最適化したものが、3番目の警備計画になる。その結果、価値5以上の六つのターゲットの被害期待値が2.228で均衡し、それらを同時にソースから分離する $C_3$ が3番目に選択される。候補エッジ集合に $C_3$ を加えた4番目の警備計画では、 $C_3$ で分離される九つのターゲットの被害期待値がどれも1より低く抑えられる（最大0.824）。次は、取り残された価値1（被害期待値1）のターゲットの警備を強化する $C_4$ が候補エッジ集合に加えられることになる。最後に、同時に全てのターゲットを守る最小カット $C_5$ が加えられ、最悪でも被害期待値0.900を実現する警備計画が完成する。

● グラフ縮約による単純化

上記のアルゴリズムでは、警備配置が候補エッジに制約された中で最適な警備計画を求める問題を繰り返し解く必要がある。ここでは、その計算を劇的に効率化する手法を紹介する。

候補エッジ制約のもとでは、候補外のエッジに関する犯罪者の動きの差異は両プレイヤーの利得に対して全く影響を与えない。そこで筆者らは、それらのエッジを無視して単純化した新しいモデルを導入した。候補外のエッジとそれに隣接するノードで構成される連結成分を考え、それぞれを一つのノードに縮約したグラフを考える。例えば

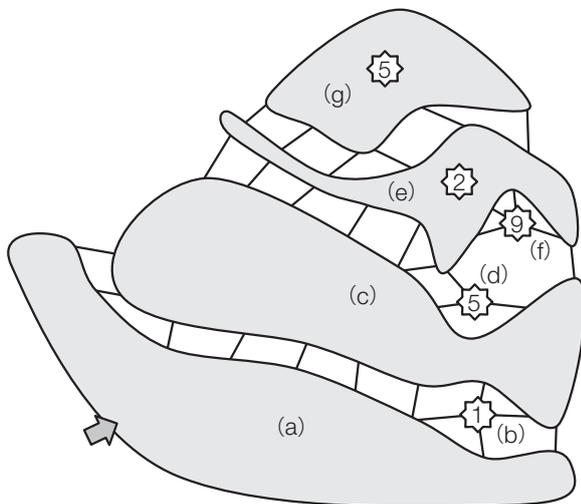


図-3 候補外エッジの縮約

図-2において、 $C_1 \sim C_5$ の全てを候補エッジ制約とする場合、グラフは図-3のように縮約される。更に、同じノード対を結ぶ複数のエッジは区別する必要がないため、この問題は図-4のような重み付きグラフにまで単純化できる。ここで、重みはエッジの容量を示す。各エッジには、その容量までの警備員を配置でき、各エッジを通過する犯罪者が警備員と出会う確率は、その容量に対する配置された警備員数の割合に等しい。単純化された都市ネットワークの上で求められた最適な警備計画は、元の都市ネットワークに対応付けても（候補エッジ制約のもとで）最適であることが理論的に保証される。<sup>(9)</sup>

単純化されたグラフの上で考えることにより、警備側と攻撃側の両プレイヤーが持つ純粋戦略の数は大幅に削減される。図-4のモデルでは、8人の警備員を配置するパターンが2,690通り、ソースからターゲットへの経路はわずか18通りにまで削減されている。

試 行 結 果

本技術が大規模問題に適用可能であることを確認するため、現実の道路ネットワークを用いた性能検証を行った。OpenStreetMap<sup>(15)</sup> から北緯35.5322 ~ 35.8189度、東経139.583 ~ 139.920度の東京23区を含む領域を抽出したデータを用いて計算した結果を表-1に示す。この領域のノード数は202,547、エッジ数は329,609であった。ソースおよびターゲットとしてランダムにそれぞれ20個のノードを選び、各ターゲットには価値として

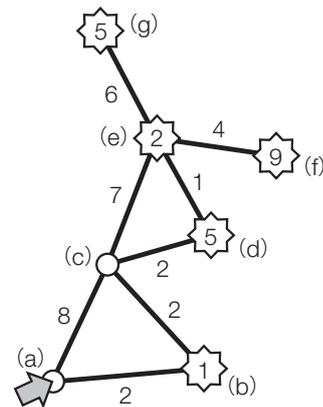


図-4 単純化された都市ネットワーク

表-1 警備員の数と計算時間の関係

警備員の数	10	20	30	40	50	60	70
被害期待値	4.71	2.91	1.88	1.25	0.71	0.24	0.00
計算時間 (秒)	149	222	254	257	291	291	101

1から10の整数値をランダムに設定した。計算機のCPUには、Intel Xeon プロセッサ E3-1275 (3.60 GHz) を使用した。

この規模の問題は従来手法<sup>(12)</sup>では現実的な時間で解くことができなかったが、本技術では安定して5分以内で解くことに成功した。従来手法で困難なく扱える規模で計算速度を比較した場合、100ノードの問題で平均20倍、200ノードの問題で平均500倍の速度向上を確認している。

## む す び

本稿では、富士通研究所が開発した都市ネットワーク警備ゲームのスケラビリティを大幅に改善する研究成果の概要を紹介した。数理計画法による最適化計算の手法や従来との比較を含む評価結果の詳細については、文献(9)を参照していただきたい。

今後、本研究成果の応用分野を拡大し、都市のセキュリティ技術に貢献していきたい。

## 参考文献

- (1) M. Tambe : Security and Game Theory : Algorithms, Deployed Systems, Lessons Learned. Cambridge University Press, 2011.
- (2) M. Jain et al. : An Overview of Recent Application Trends at the AAMAS Conference : Security, Sustainability, and Safety. In AI Magazine 33 (3), p.14-28, 2012.
- (3) 岩崎 敦ほか : ゲーム理論・メカニズムデザインに関する研究動向. 人工知能学会誌28 (3), 389-396, 2013.
- (4) J. Pita et al. : Deployed Armor Protection : The Application of a Game Theoretic Model for Security at the Los Angeles International Airport. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), p.125-132, 2008.
- (5) J. Tsai et al. : Iris—A Tool for Strategic Security Allocation in Transportation Networks. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), 2009.
- (6) E. Shieh et al. : Protect : A Deployed Game Theoretic System to Protect the Ports of the United States. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), p.13-20, 2012.
- (7) F. Fang et al. : Optimal Patrol Strategy for Protecting Moving Targets with Multiple Mobile Resources. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), p.957-964, 2013.
- (8) Z. Yin et al. : Trusts : Scheduling Randomized Patrols for Fare Inspection in Transit Systems. In Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference (IAAI), 2012.
- (9) H. Iwashita et al. : Simplifying Urban Network Security Games with Cut-Based Graph Contraction. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, p.205-213, 2016.
- (10) J. Tsai et al. : Urban Security : Game-Theoretic Resource Allocation in Networked Physical Domains. In Conference on Artificial Intelligence (AAAI), p.881-886, 2010.
- (11) M. Jain et al. : A Double Oracle Algorithm for Zero-Sum Security Games on Graphs. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), p.327-334, 2011.
- (12) M. Jain et al. : Security Scheduling for Real-World Networks. In International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS), p.215-222, 2013.
- (13) H. Brendan McMahan et al. : Planning in the Presence of Cost Functions Controlled by an

Adversary. In International Conference on Machine Learning, p.536-543, 2003.

(14) A. Washburn et al. : Two-Person Zero-Sum Games for Network Interdiction. In Operations Research 43 (2), p.243-251, 1995.

(15) OpenStreetMap.

<https://www.openstreetmap.org/>

## 著者紹介

---



**岩下洋哲** (いわした ひろあき)

知識情報処理研究所  
人工知能研究センター  
人工知能基盤プロジェクト  
社会課題解決に向けた人工知能技術の  
研究・開発に従事。



**大堀耕太郎** (おおほり こうたろう)

知識情報処理研究所  
人工知能研究センター  
人工知能基盤プロジェクト  
社会課題解決に向けた人工知能技術の  
研究・開発に従事。



**穴井宏和** (あない ひろかず)

知識情報処理研究所  
人工知能研究センター  
人工知能基盤プロジェクト  
数式処理, 最適化, 人工知能の理論・  
応用に関する研究・開発に従事。