

ACO による複雑ネットワークの創発と実世界応用

Emergence of Complex Networks by ACO and Its Application to Real-World Problems

澤井 秀文*1
Hidefumi Sawai

佐藤 彰洋*2
Aki-Hiro Sato

*1 国立研究開発法人情報通信研究機構 National Institute of Information and Communications Technology, *2 京都大学大学院情報学研究科/ JST PRESTO Graduate School of Informatics, Kyoto University / JST PRESTO

Ant Colony Optimization (ACO) is an algorithm inspired by ants' collective behavior, and has been applied to various optimization problems such as numerical analysis and combinatorial optimization. Inspiring by the concept of ACO, we propose a purely bottom-up method that can emerge a novel small-world network from a random graph, its theoretical analysis of the emerged network, its hierarchical architectures, and several real-world applications in the fields of information and communication technologies and logistics.

1. はじめに

蟻の集団行動からヒントを得た Ant Colony Optimization (ACO) [Bonabeau1999] はこれまで数値解析や組み合わせ最適化などの様々な最適化問題に適用されてきた。ACO の考え方をを用いて、ランダムグラフから完全にボトムアップにスモールワールド・ネットワーク(Small-World Network)を創発する手法について説明し、創発したネットワークの理論解析と階層化、情報通信分野・ロジスティクス分野における様々な実世界応用について述べる。

2. スモールワールド・ネットワークの創発

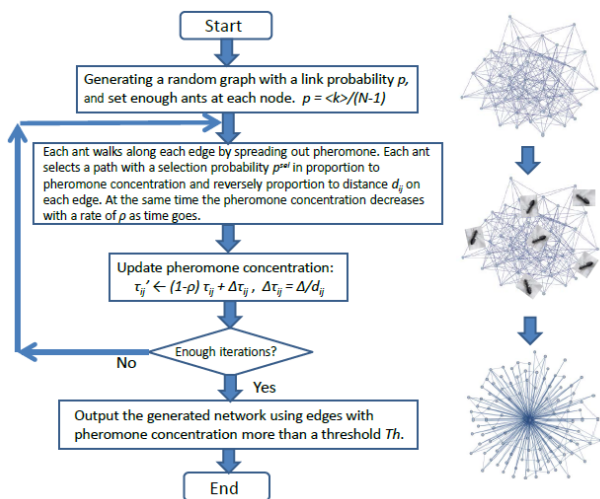


Fig.1. Flowchart of ACO for generation of new small-world networks from random graph.

ACO からヒントを得て、ランダムグラフから完全にボトムアップで新しいスモールワールド・ネットワークを創発するアルゴリズムのフローチャートを図1に示す。蟻がネットワーク上のノード i にいる場合に、次のノード j への道を確率的に選択する時のロジックを示す。フェロモン濃度 τ_{ij} に比例し、ノード間距離 d_{ij} に反比例する確率 p^{sel}_{ij} で道が選択される(図2)。この動作は完全に非同期で行われる。

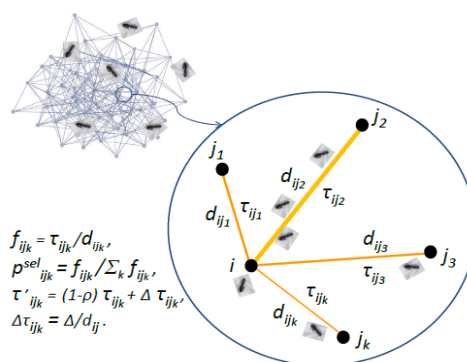


Fig.2. How to select a path for ants.

3. 創発したネットワークの理論解析と階層化

$N=100, p=0.1169697, \rho=0.05, \Delta\tau=0.5, Th=0.03$

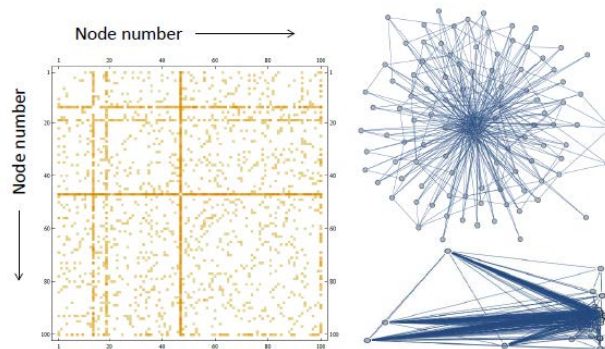


Fig.3. Adjacency matrix with pheromone concentration (left) and its corresponding networks from two different viewpoints (right).

図1のフローチャートに基づいて創発したマルチスター型のネットワークと隣接行列を図3に示す。図4には、スターノード数が n の時のマルチスター型ネットワーク (n -Star ネットワークと呼ぶ)とその階層アーキテクチャを示す。

平均次数 $\langle k \rangle$, 平均経路長 L , クラスタリング係数 C は次式のように解析的に求めることができる。但し、 m は周辺リンク数である [Sawai2012]。

連絡先: 澤井 秀文, 国立研究開発法人 情報通信研究機構
ユニバーサルコミュニケーション研究所, sawai@nict.go.jp

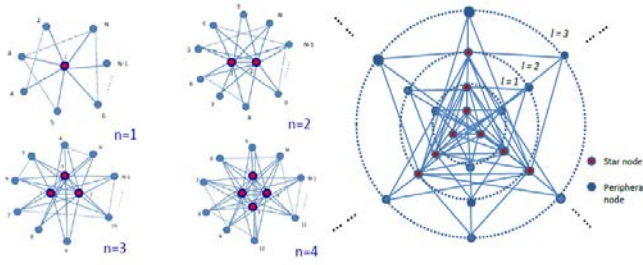


Fig.4. Structure of n -Star Network with the number of star nodes, $n=1, 2, 3$ and 4 at the center (left), and a hierarchical structure for n -Star networks (right).

$$\langle k \rangle = \frac{n(2N-n-1)+2m}{N}; \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \binom{N-n}{2}$$

$$L = \frac{2N(N-n-1)+n(n+1)-2m}{N(N-1)}; \quad n = 1, 2, 3, \dots, N, \quad m = 0, 1, 2, \dots, \binom{N-n}{2}$$

$$C = \frac{\frac{n\binom{n-1}{2} + (n-1)(N-n)}{\binom{N-1}{2}} + (N-n)}{N}; \quad n = 2, 3, \dots, N, \quad m = 0.$$

$$C = 0; \quad n = 1, \quad m = 0.$$

4. 情報通信やロジスティクス分野への応用



Fig.4. Example of global airline network based on the multi-star small-world network ($n=7$).

創発したネットワーク構造は、究極のsmall-worldの性質を持つため、通信効率や輸送効率の高いネットワークを構築できる。本稿では、ロジスティクス分野への応用例として、航空輸送ネットワークの再編に適用した例を示す。図4はマルチスター型small-world・ネットワーク構造に基づいた航空輸送ネットワークの構成の一例である。 n (図4の場合 $n = 7$) 個のスターノードから成る n -Star ネットワークを構成することにより、空港停止耐性の大きな国際航空輸送ネットワーク構造を示している。

図5に「リスク (R : Risk)」「経済性 (E : Economy)」「利便性 (C : Convenience)」の指標を新たに定量的に定義し、これらの指標 (R, E, C)を同時に向上させることが可能な多目的最適化の手法を開発してきた [Sawai2014]。

図6には、日本国内における航空輸送ネットワークにおける上記3つの指標 (R, E, C)を、現状の値から多目的最適化の手法を用いて改善した結果を示す [Sawai2014]。現状の値 (初期値) に比べ、リスク指標 R は減少し、経済性指標 E と利便性指標 C は共に改善されていることがわかる。

図7に、過去1000年間に発生したカタログ記録にある、波高

Risk: Physical exposure of network
 $R(J_{ij}) = \sum_{i=1}^N Haz_i \sum_{j \in Edge(i)} J_{ij}$

Economy: average no. of passengers per flight distance
 $E(J_{ij}) = 1/N \sum_{i=1}^N \sum_{j \in Edge(i)} J_{ij} / (F_{ij} D_{ij})$

Convenience: average no. of passengers per flight distance and no. of transits
 $C(J_{ij}) = 1/(N(N-1)) \sum_{i,j,i \neq j} \sum_{(k,l) \in path(i,j)} J_{kl} / (l_{kl} D_{kl})$

J_{ij} : number of passengers between airports i and j ,
 F_{ij} : number of flights between airports i and j ,
 D_{ij} : geodesic distance between airports i and j .

Fig.5 The definition of R, E and C where each metric is a function of the number of passengers J_{ij} .

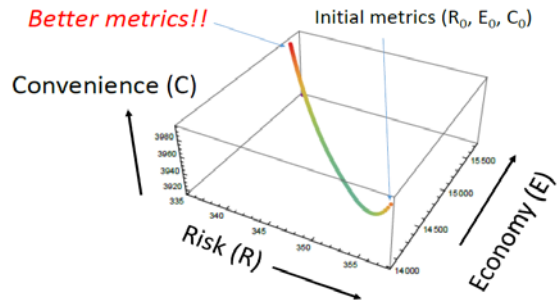


Fig.6 An example of results that improved three metrics better than those of a current domestic airline network.

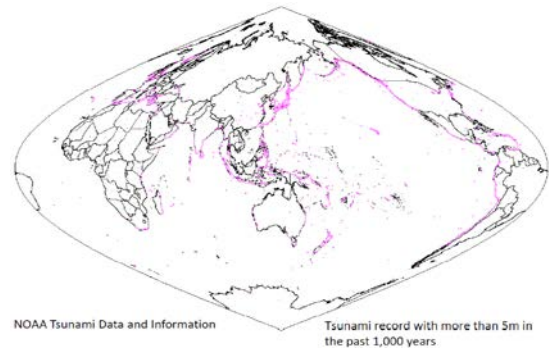


Fig.7 Geographical positions of 23,057 tsunami run-up events in the last 1,000 years. The filled pink circles represent locations where such events have occurred. Its depth in color corresponds to the water height recorded in the catalog data.

5m 以上の津波の記録が存在する位置を示す [Sato2016]。

5. おわりに

蟻の集団行動にヒントして自己組織的に新しいsmall-world・ネットワークを創発する方法と実世界への応用を述べた。

参考文献

[Bonabeau1999] E. Bonabeau, M. Dorigo, G. Theraulaz, "Swarm Intelligence, From Natural to Artificial Systems", Oxford University Press, 1999.
[Sawai2012] H. Sawai, "Exploring A New Small-World Network for Real-World Applications", Proc. of Networked Digital Technologies, Dubai, UAE, Apr. 2012
[Sawai2014] H. Sawai, Aki-Hiro Sato, "Multi-Objective Optimization for Resilient Airline Networks Using Socioeconomic-Environmental Data", IEEE Int. Conf. on Big Data, Washington D.C., U.S.A., Oct. 2014.
[Sato2016] Aki-Hiro Sato, H. Sawai, "Risk Assessment for a Global Air Transportation System Using Socioeconomic-Technological-Environmental Databases", IEEE COMPSAC 2016, Atlanta, USA, in preparation.