広域ネットワークに対応したマルチエージェント組織化支援システム

Agent Organization system for Multi-agent based Network Management

寺内 敦

Atsushi Terauchi

NTT 未来ねっと研究所, 早稲田大学 情報生産システム研究科

NTT Network Innovation Labs., Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University
terauchi.atsushi@lab.ntt.co.jp

明石 修

Osamu Akashi

NTT 未来ねっと研究所

NTT Network Innovation Labs.
akashi.osamu@lab.ntt.co.jp

丸山 充

Mitsuru Maruyama

(同 上)

maruyama.mitsuru@lab.ntt.co.jp

菅原 俊治

Toshiharu Sugawara

早稲田大学 基幹理工学部

Graduate School of Fundamental Science and Engineering, Waseda University
sugawara@waseda.jp

福田 健介

Kensuke Fukuda

国立情報学研究所

National Institute of Informatics
kensuke@nii.ac.jp

廣津 登志夫

Toshio Hirotsu

豊橋技術科学大学

Toyohashi University of Technology
hirotsu@ics.tut.ac.jp

栗原 聡

Satoshi Kurihara

大阪大学

Osaka University
kurihara@sanken.osaka-u.ac.jp

小柳 恵一

Keiichi Koyanagi

早稲田大学 情報生産システム研究科

Graduate School of Information, Production and Systems, Waseda University
keiichi.koyanagi@waseda.jp

keywords: network management, multi-agent system

Summary

An agent organization system for multi-agent based network management, called ARTISTE, is proposed. For a multi-agent system (MAS) to solve problems effectively, it is important to organize agents appropriately. Organizing agents adaptively on the Internet, however, is not easy, because the status of the Internet changes dynamically in a short time and no one can have a complete view of the whole network. The aims of ARTISTE are to form an agent organization in accordance with the current Internet and its problem-solving context and to provide organizational information for target MASs. ARTISTE operates as an independent system with respect to any MAS. To organize agents, ARTISTE collects information about agents' abilities and statuses, network information such as topologies, and a problem-dependent requirement from a target MAS. ARTISTE is designed as an MAS, and it can collect the information about the network and the target MAS from multiple observation points. Furthermore, ARTISTE agents exchange their own local information in order to create a more global view of the network and the distribution of the agents. Our performance evaluation showed that ARTISTE works with sufficient performance for use in the actual Internet environment.

1. は じ め に

インターネットは近年その巨大化および複雑化が進んでおり、アプリケーションやサービスの品質に対する要求の高まりもあって、インターネットを適切に管理制御することはますます難しくなっている。そのため、イン

ターネットの管理の自動化、高度化への AI の応用が期待されるが、元来インターネットは集中的な管理主体を持たない分散システムであり、この特徴が管理の自動化を困難にしている。

マクロな視点で見た場合、インターネットは独立した主体が管理運用する AS (Autonomous System) が相互

接続した巨大な分散システムと捉えられる。個々の管理主体は通常自分が管理する AS 内しか観測制御できず他の AS の状態を知ることができないため、複数の AS を跨る広域ネットワークを管理・制御するには AS (管理主体) 同士による協調作業が必要である。例えば、インターネットで通信を行うためには経路情報を適切にネットワーク全体に伝搬させる必要があるが、この経路情報の伝搬は経路情報を受信した AS が、さらに別の AS に経路情報を転送するという AS 間の協調によって実現されている。各 AS における転送作業はそれぞれの AS のポリシーに従って行われており、他の AS がそれを観測したり制御することはできない。そのため、経路情報の伝搬障害が起きたとしても特定の AS からの観測のみで原因を知ることができず経路を伝搬した AS が協調して原因を調査する必要がある。別の例として、高品質の動画など大容量のコンテンツをインターネットで転送する場合、転送経路上の AS の 1 つでも十分な転送速度が確保できなければ転送の遅延などの問題が発生する。この場合も各 AS では自分以外の AS のトラフィックの状態を知ることができないことから、原因となる AS の発見など問題解決には AS の協調が不可欠である。

このように、本質的に AS 間の分散協調作業である広域ネットワークの管理の自動化を単一システムによる集中管理で実現することは不可能であり、分散構造を持つマルチエージェントシステム (以下、MAS)[Durfee 90] を用いたアプローチが特に有効であると考えられる。実際にこのアプローチに基づいて多くの提案がなされている [Willmott 00, 今野 05, 内山 06, Gavalas 02, Akashi 05, 寺内 04, Tran 03, Hefeeda 04]。

一般に MAS を使った作業ではエージェント間の協調が必要であり、この協調作業を効果的に実行するためには、実行する作業の内容やエージェントの状態などに基づいて選択された適切なエージェント群が協調作業を行うことが重要である [Willmott 00]。この選択が適切になされていない場合、例えば、協調相手のエージェントが依頼した作業を実行するための機能を持たない、問題解決に必要な情報を観測できない、高負荷などのため依頼された作業を実行できない場合には協調がうまくいかず結果として作業の実行が失敗する可能性がある。本稿では、MAS において要求されるエージェントの機能や配置を考慮しながら協調相手とすべきエージェント群を選択する作業をエージェントの組織化と呼ぶ。組織化はエージェント間の協調を行うすべての MAS が行うべき作業であり、それ故に適切な組織化を実現することはこれらの MAS に共通した要求であると言える。

通常、組織化は可能性のある作業を想定した上で事前に完了させておくか、MAS による作業の実行中にエージェントによって動的に行うことが想定される。しかし、事前に組織化を行う場合、各エージェントは自分以外のエージェント情報を管理しなければならない。そのため、

エージェントの数が大きい場合やエージェントの状態が頻繁に変化する場合などには、この情報の維持管理コストが大きくなるため、適切な選択が難しくなる。さらに、広域ネットワーク管理用の MAS では、エージェントの組織化のために他に AS を跨る広範囲のネットワーク情報が必要であるが、集中管理機構を持たない分散システムであるインターネットに関して、そのような広範囲の情報を観測収集することは容易なことではない。

我々は広域ネットワーク管理の高度化、自動化を目指して AS 間経路診断、低負荷によるコンテンツ配信などを行う MAS[Akashi 05, 寺内 04] の提案を行っている。これらの広域ネットワーク管理用の MAS を運用する上でもエージェント情報の維持管理やネットワーク情報の収集の困難さに伴うエージェントの組織化のコストの高さが大きな問題となっていた。

そこで本稿では、[Akashi 05, 寺内 04, Tran 03, Hefeeda 04] などの AS を超えた広域ネットワークを管理する MAS を対象にして、ネットワーク上の位置など特定の条件を満たすエージェント群を動的に探索・同定することによりエージェント間の組織化を支援するエージェント組織化支援システム ARTISTE (Agents' Roles and Topological Information management System for agent TEamwork) を提案する。

ARTISTE は次の特長を持つ。(1) 広域ネットワーク管理用 MAS における組織化作業の共通性に着目して ARTISTE を MAS と独立した共通の基盤とすることにより、複数の MAS に支援機能を提供することが可能である。(2) 組織化のために必要な情報を複数の AS で分散観測することで、単一の AS での観測では獲得の難しい広域ネットワークポロジ情報などを利用した組織化が可能である。

ARTISTE を用いることにより、広域ネットワーク管理用 MAS では組織化を静的に行う必要がある場合と比べて MAS の運用コストを下げるができる。さらに、MAS 本来の問題解決の処理とエージェントの組織化に関する情報や処理を分離できることからネットワーク管理用 MAS を構築するためのコストが低減される効果を確認した。

本稿の構成は以下の通りである。はじめに広域ネットワークの管理用 MAS におけるエージェント組織化の問題を 2 章で説明する。これを解決するための組織化支援機構への要求条件を整理して組織化支援システム ARTISTE の提案を 3 章で行う。4 章で ARTISTE によるエージェントの組織化手法の詳細について説明する。5 章では実装した ARTISTE システムを用いて行った評価実験の結果と ARTISTE の有効性、妥当性の評価について述べる。6 章で本研究と他の研究との関連について考察した後、本稿をまとめる。

図 1 単一のエージェントによるネットワーク情報の獲得

2. 広域ネットワーク管理用 MAS におけるエージェント組織化の問題

一般的な MAS において組織化を行う場合、エージェントの能力や保持する情報などを元にしてエージェントの選択を行うが、ネットワーク管理用 MAS において組織化を行う場合、それらに加えてネットワークトポロジ、トラフィック、観測できる経路情報といった実ネットワークに関する情報に基づいて組織化を行うことが求められる。

特に、本稿で対象とする広域ネットワーク管理用の MAS では、広域ネットワーク管理が AS 間の協調作業であることから分るとおり、エージェントは離れた AS 上に分散配置されている必要がある。そのため、エージェントの組織化には各エージェントが動作している環境、すなわち地理的に離れた別の AS に関するネットワーク情報が必要であることになる。しかし、一般に AS は独立した組織によって運営されており、組織同士の利害関係やセキュリティ上の理由から AS 内部の情報を他 AS から観測することは許可していないことが多い。そのため、各々の AS に配置されたエージェントは他の AS で観測できる経路情報やトラフィックを知ることとはできず、自分が配置された AS 周辺のネットワークに関する部分的な情報しか観測できない。

個々のエージェントが部分的なネットワーク情報しか観測できないことを図 1 を用いて説明する。この例では AS_y が自分の近傍の AS 間トポロジを取得しようとしているものとする。トポロジの取得には AS 間での経路情報交換に使われる標準プロトコルである BGP (Border Gateway Protocol) [Rekhter 95] でやりとりされる AS-Path 情報を利用する。AS-Path 情報とは経路情報が転送される際に経由した AS のリストである。実際のルータ (AS_y 上にあるものとする) から得られる AS-path 情報の出力例を以下に示す。

```
Address Metric Path
0x6122 0 ASy AS2 AS1 ASx
0x6213 0 ASy AS4 AS5 AS6
....
```

各行が 1 つの経路情報に相当し、Path カラムがその経路の AS-path 情報である。最初の行の AS-path 情報は、当該経路が AS_x によって生成され、 AS_1, AS_2 をこの順番で経由して AS_y で受信されたことを示す。このことか

ら、“ $AS_y - AS_2 - AS_1 - AS_x$ ” という AS 間の接続が存在することが分かる。2 行目以降についても同様に各行から AS 間接続情報が得られるため、それらをまとめることで特定の AS から観測した AS 間トポロジを取得できる。

このとき、 AS_x から AS_y へ経路情報が AS_1, AS_2 を経由して転送されているとすると、 AS_y は “ $AS_y - AS_2 - AS_1 - AS_x$ ” という Path が形成されていることを知ることができる。さらに、 AS_y は自分と直接接続された AS の存在は分かるので、 AS_4 の存在も把握できる。しかし、これらの情報だけでは AS_y から図中の AS_3 の存在を知ることができず、結果として図に示した部分的なトポロジしか獲得できないことが分かる。

このとき、例えば AS_y 上のエージェントが経路診断やトラフィック制御の目的で AS_x と直接接続された AS 上のエージェントと協調する必要があるとしても、自分が獲得できるトポロジ情報からは該当するエージェントが AS_4 上のエージェントであることしか把握できず、存在の分からない AS_3 上のエージェントとは協調が行えないことになる。

以上をまとめると、広域ネットワーク管理用 MAS においてはエージェントの協調相手を適切に選択するためには、エージェントの配置先である AS から観測できる局所的な情報に加えて、近隣の AS を含む、より広い範囲のネットワークに関する情報が求められるが、集中的な管理システムを持たないインターネット上ではこのような広い範囲の視点からの情報を得ることは容易ではない。

よって、これらの問題を解決して広域ネットワーク管理用 MAS の適切な組織化を行うためには、広域ネットワーク情報の収集機能を備えたエージェント組織化支援機構が必要である。

3. 提案方式

本章では広域ネットワーク管理用 MAS 向けのエージェント組織化支援機構に対する要求条件を整理した後、それらを考慮した組織化支援機構 ARTISTE を提案する。

3.1 アーキテクチャ

エージェントの組織化機構は本来個々の MAS に固有のものと考えられる。しかし、ネットワーク管理のような MAS 本来の作業のための処理や知識に加えて、エージェント選択のための知識や手続きを混在させることは MAS の構成を複雑化させ構築コストの増大および実行速度や保守性の低下を招く。

さらに複数の広域ネットワーク管理用 MAS を開発する場合を想定すると、それぞれの MAS が独自に組織化機構を持つことは、図 2 に示すように類似の処理が MAS 毎に実装されることになり非効率であると共に、それぞれの MAS でも構築コストの増大や保守性の低下といっ

図2 個々のMASが組織化を行う場合

表1 MASの組織化において用いる情報

ENCORE [Akashi 05]	エージェントの状態（能力） AS間トポロジ情報 各ASにおける接続数
寺内らのシステム [寺内 04]	エージェントの状態 （キャッシュの種類、量） ノード間の距離（ホップ数、RTT）
Tranらのシステム [Tran 03]	エージェントの状態（能力） ノード間の距離 ノードの負荷（トラフィック）
hefeedaらのシステム [Hefeeda 04]	ノードの負荷（トラフィック） 配置先AS番号 配置先のネットワーク prefix

た問題を抱えることになる。

組織化機構に求められる機能やアーキテクチャを明確にするために実際のMASにおける組織化の方法や用いられる情報を調査した。本稿では検討対象のMASとして、AS間経路診断システムENCORE[Akashi 05]、寺内らの動画配信システム[寺内 04]、Tranらの動画配信システム[Tran 03]、hefeedaらの動画配信システム[Hefeeda 04]を選択した。これらのMASではそれぞれAS間での経路診断、広域ネットワーク上での動画配信といった作業を複数のエージェントにより実現するもので対象とするMASの要件を満たしている。これらのシステムでエージェントを組織化する際に利用している情報を表1にまとめる。

この表からエージェントを組織化するための情報として各MASともエージェントの情報に加えてトポロジなどのネットワーク情報を用いていることが分かる。そして、近隣のネットワーク機器との情報交換や遠方のエージェントとの連携により、必要とされるネットワークトポロジや経路情報の到達性、トラフィックなどの情報を収集し、特定の条件の下にあるエージェントを動的に探索する作業はいずれのMASにおいても共通に行われることが分かった。

以上のように、広域ネットワーク管理用MASのための組織化ではその手順や必要とする情報にある程度の共通性があることが分かった。我々はこの共通性に着目し、MASの組織化に必要な情報を一元的に収集管理して特定の条件下にあるエージェント群を動的に探索・同定する機能を複数の広域ネットワーク管理用MASに対して

図3 提案するエージェントアーキテクチャ

提供できる共通の基盤としてエージェント組織化機構を実現する。

3.2 広域ネットワーク情報の収集

2章で述べたとおり、広域ネットワーク管理用MASにおけるエージェントの組織化においては、特定の観測地点(AS)から観測できるネットワーク情報に加えて、より広い視点から観測したネットワーク情報が必要であるが、インターネットでは単一地点からの観測ではそのような広範囲のネットワーク情報を取得することは難しい。そのため、組織化機構を集中型の単一システムによる実現したのでは組織化に必要なネットワーク情報を十分に観測できないため、組織化機構に求められる条件を満たすことができない。

そこで、我々が提案する組織化機構はインターネットと同じく分散協調型の構造を持つマルチエージェントアーキテクチャによって実現することとした。そして、ネットワーク上に配置されたエージェントがそれぞれ局所的な情報を分散観測し、エージェントが協調することによって広域ネットワーク情報を取得するアプローチを採用した。

3.3 エージェント組織化支援システム ARTISTE

以上の検討を元に、本稿ではエージェント組織化支援システムARTISTEを提案する。ARTISTEを含むエージェントアーキテクチャを図3に示す。本モデルでは実際に広域ネットワークの管理作業を行うMAS(図上部)とARTISTE(図中部)が共にインターネット上で連携して動作する。以降、前者のMASをARTISTEと区別するために、ネットワークMAS(NMAS)と呼ぶ。

3.1節での検討から、ARTISTEはNMASとは独立したシステムとして実現した。そして、NMASとARTISTE間で連携するためのインタフェースとしてNMASからARTISTEに協調エージェントを探索するための条件を送信し、ARTISTEは送信された条件に合致するエージェ

ントの情報を返答するという一般的な query-reply プロトコルを採用した。インタフェースを簡便かつ汎用的なものにすることにより, ARTISTE は多くの NMAS と連携可能になる。見方を変えると, ARTISTE は NMAS に対して一種のメディアータシステムあるいはネームサーバとして動作すると言える。

さらに, 3.2 節での検討に基づき, ARTISTE は複数の自律エージェントからなる MAS として実現し, ネットワーク上に分散配置したエージェント (以下, ARTISTE エージェント) によってネットワーク情報を複数地点から観測する。2 章で述べたように, 本稿で対象とする NMAS は AS 間での協調作業をサポートすることが目的であるから AS 毎にエージェントが配置されているとしてよい。さらに, 同じく 2 章で示したように特定の AS から他 AS の情報を観測することは困難であることから, ネットワーク情報および NMAS のエージェント情報を最も効率よく収集するためには ARTISTE エージェントは AS 毎に配置されることが最適であると言える。以降では ARTISTE エージェントは AS 毎に配置されているものとして議論を進める。ARTISTE エージェントの最適な配置は NMAS の構成やネットワーク構造によって変化するため検討の必要な問題と考えられるが, 本稿での議論の範囲外とする。

個々の ARTISTE エージェントは配置先 AS 内のネットワーク機器や NMAS エージェントの情報を取得する。各 ARTISTE エージェントは自分が配置された AS 以外の AS で観測されるネットワーク情報が必要なときは, 適宜協調して情報の交換を行う。ARTISTE エージェント間での協調の際にはエージェントを探索する必要があるが, 既存の P2P システムなどで提案されているエージェント探索のための手法, すなわち, 集中型データベース, 探索メッセージのフラッディング, DHT (Distributed Hash Table) [Stoica 01, Zhao 04, Rowstron 01] などの方法を利用するものとする。

4. ARTISTE による組織化支援

本章では ARTISTE を用いて NMAS のエージェントを組織化する手順を説明する。ARTISTE によるエージェントの組織化は次の 3 ステップに分けられる。

- (1) ARTISTE による情報収集
 - (2) NMAS による探索条件の送信
 - (3) ARTISTE による NMAS エージェントの探索
- 各ステップ毎の設計方針や機能要件を以下で説明する。

4.1 ARTISTE による情報収集

表 1 に示した通り, ARTISTE による組織化支援のためには対象とする NMAS のエージェント情報およびエージェントが配置された AS の局所的な情報および複数の AS を含む広域ネットワーク情報を収集する必要がある。

図 4 エージェントによる部分的なネットワーク情報の観測

それぞれの情報の内容や具体的な収集手順を説明する。

§ 1 エージェント情報

エージェントの状態や能力を表現する情報は NMAS によって異なるが, それらをすべて ARTISTE が収集すると ARTISTE が個々の NMAS に関する情報を持つ必要があり, ARTISTE の汎用性が失われる。

そこで, ARTISTE では NMAS のエージェントが持つ情報のうち, 複数の NMAS で共通的に利用される情報のみを収集する。具体的には, IP アドレス, 接続先ポートなど静的な情報に加えて, 各エージェントの動作状態を収集する。前者は ARTISTE エージェントに設定として与え, 後者は NMAS エージェントと定期的に通信して取得する。

エージェントが実行できるタスクの種類など NMAS に依存する情報は ARTISTE の収集対象には含めない。このような問題依存の情報により協調相手のエージェントを選択したい場合, まず ARTISTE を用いて汎用的な条件により協調相手の候補を絞り込み, 選ばれた候補の中から個々の NMAS が実際の協調相手を決定すればよい。

§ 2 広域ネットワーク情報

まず, 個々の ARTISTE エージェントは自分の配置先 AS から観測できる局所的なネットワーク情報を, 配置先 AS 上の BGP ルータ*1から収集する。具体的には, ARTISTE エージェントがルータに接続し, 適切なコマンドを実行することで AS-path 情報などのネットワーク情報を取得する。接続先のルータのアドレスやログインするために必要な認証情報は ARTISTE エージェントにあらかじめ与えておくものとする。

次に, 個々のエージェントが情報交換して広域ネットワーク情報を収集する方法を, 2 章と同様に AS 間トポロジを収集する場合を例にして示す。図 1 で示した状況下では AS_y 上のエージェントは AS_x と AS_y 間の部分的なトポロジしか観測できないことを 2 章で説明した。ここで, 図 4 に示すように AS_y からの経路情報が AS_4, AS_3 経由で AS_x に伝搬されている場合を考える。この場合も AS_x 上のエージェントは AS_2 の存在が分からず部分的なトポロジしか観測できない。このとき, AS_y から経路情報が AS_x に伝報されているという条件を追加しても AS_y が観測できるトポロジには全く影響がないことに注意する。

*1 BGP を用いて他 AS と経路情報を交換しているルータ

表 2 探索条件に用いる attribute 節

名前	意味
ipaddress	指定されたIPアドレスを持つエージェント
prefix	指定prefix上に配置されているエージェント(一つめのパラメータがネットワークアドレス, 二つめがマスク長を示す)
status	指定したstatusを持つエージェント(動作中であればin, 停止していればout)
neighbor	指定ASから指定距離(=ホップ数)以内で接続されたAS上に配置されたエージェント(一つめのパラメータがAS番号, 二つめが距離を示す)
asnumber	指定AS上に配置されたエージェント

ARTISTE ではこのような場合にエージェントが観測した情報を交換することで, より正確な広域ネットワーク情報を取得することを可能にしている. このトポロジの例では, AS_x と AS_y が観測したトポロジ情報を互いに交換する. それにより, AS_x では AS_2 , AS_y では AS_3 を含む完全な近傍のトポロジを得ることができ, 局所的な観測では得られない広域ネットワーク情報を獲得できる.

エージェント間の情報交換により他 AS の情報を獲得する手法はトポロジ情報以外の情報にも適用できる. 例えば, AS におけるトラフィック量など外部 AS からは観測不可能な情報も, 当該 AS 上のエージェントが観測した情報を交換することにより容易に得られる.

4.2 NMAS による探索条件の送信

ARTISTE と NMAS 間のインタフェースである探索条件について説明する. ここでの探索条件とは NMAS のエージェントの協調相手のエージェントが持つべき状態やネットワーク上の位置に関する情報を形式的に表現したものである. この探索条件は NMAS での問題に依存するため NMAS で生成する. 作成方法や手順については各 NMAS で自由に決定してよく, ARTISTE は関知しない. ARTISTE で用いる探索条件の一般的な形式を以下に示す.

```

query ::= query <condition>
condition ::= <attribute> | (and|or <condition>+)
attribute ::= <ip>|<asnum>|<neighbor>|
<prefix>|<status>
ip ::= ipaddress <IP アドレス>
asnum ::= asnumber <AS 番号>
neighbor ::= neighbor <AS 番号> <ホップ数>
prefix ::= prefix <プレフィックス> <マスク長>
status ::= status <"in">|<"out">

```

各 attribute 節の意味は表 2 に示す.

例えば, (query (and (status in) (neighbor AS1 2))) という探索条件は AS1 から 2 ホップ以内の AS に配置されていて, かつ, 動作中のエージェントを探索することを意味する.

なお, 表 2 には本稿で対象とする広域ネットワーク管理において頻繁に利用されるもののみを挙げている. これら以外にも適用する分野に応じて attribute 節を拡張す

ることで, 広域ネットワーク管理だけでなく AS 内ネットワークや LAN 管理といった異なる場面でも ARTISTE を適用可能になる.

4.3 エージェントの探索手順

本章では ARTISTE が NMAS から送られた条件に合致するエージェントを探索する手順を説明する. 以下の説明では, 次の条件の元で ARTISTE および NMAS が動作していることを前提とする.

- AS 上には NMAS および ARTISTE エージェントが各 1 つずつ動作し, 同一 AS 内でのエージェント間およびエージェントと BGP ルータ間の通信に必要な情報は各エージェントに予め与えられている.
- すべての ARTISTE エージェントの情報を登録した集中型データベース (以下, DB) があるものとし, ARTISTE エージェント間での協調の際には本 DB を使う.
- 前記 DB において, 各 ARTISTE エージェントは AS 番号によって一意に特定できるものとする.

探索手順を以下に示す.

(1) 起動および待機

各 ARTISTE エージェントは起動時に設定として与えられた情報を読み込み, NMAS からの探索条件の待機状態に入る. NMAS エージェントの動作状況やネットワーク状態など変動する情報の収集は待機中でも定期的に繰り返す.

(2) NMAS から探索条件の受信

NMAS エージェントはエージェント協調が必要になった場合に, 同一 AS 上の ARTISTE エージェントに協調すべきエージェントの探索条件を送る.

(3) 探索条件の解析

NMAS から探索条件を受信した ARTISTE エージェントは送られた探索条件を解析し, 探索条件に含まれる asnumber 節や prefix, ipaddress 節の値を取得する. これらの値が自分の配置先と一致しない場合は他 AS のエージェントとの協調が必要と判断される. このとき, 条件に neighbor 節が含まれている場合はステップ 4 に進む. 含まれていない場合はステップ 5 に進む.

(4) neighbor 節の処理

neighbor 節は直接ネットワークの位置を示していないが, 2 章や 4.1.2 節での議論から分かれるとおり意味的には特定の AS の集合を表している. すなわち, neighbor 節は asnumber 節の集合に変換することが可能である. 図 4 で示したネットワークを例に説明する. (query (neighbor AS_x 1)) という探索条件を例にすると, この neighbor 節の表す「 AS_x から 1 ホップで接続された AS」は図より AS_1 , AS_3 である. よって, この探索条件は (query (or (asnumber AS_1) (asnumber AS_3))) と等価であることが分か

図 5 エージェントの探索手順

る．変換の手順を以下に示す．

- a neighbor 節の第一引数の AS 上の ARTISTE エージェントを集中 DB を使って検索し，結果の ARTISTE エージェントに対して neighbor 節が表す AS の集合を問い合わせる．
 - b 問い合わせを受けた ARTISTE エージェントでは自分の配置先 AS の BGP ルータから AS-path 情報を取得し，それを解析して合致する AS の集合を求めて返答する．
 - c 返答を受けた ARTISTE エージェントでは，結果を元に neighbor 節を asnumber 節の集合に変換した新たな探索条件を作る．
- (5) ARTISTE エージェントの探索
ステップ 3 および 4 で得た asnumber 節の値をキーにして DB を検索し，当該 AS に配置された ARTISTE エージェントの IP アドレスやポート番号など通信に必要な情報を取得する．
- (6) 探索条件の転送
ステップ 5 で得られた ARTISTE エージェント (群) に対して探索条件を転送する．
- (7) 転送先での検査
前ステップにおいて探索条件を転送された ARTISTE エージェントは，同一 AS 上の NMAS エージェントが送られた条件に合致するかを検査する．合致した場合は NMAS エージェントの IP アドレス，合致しなかった場合はその旨を示すメッセージを転送元の ARTISTE エージェントに返送する．
- (8) 検査結果の統合および NMAS への返答
転送元の ARTISTE エージェントでは転送先からの検査結果がすべて集まったら，それらをまとめて問い合わせ元の NMAS エージェントに対して探索結果として返答する．

手順の概略を図 5 に示す．

図 6 システム構成図

5. 評価

5.1 実験環境

§1 システム構成

3 章，4 章での検討を元に ARTISTE システムを実装した．そして，AS 間経路情報診断システム ENCORE[Akashi 05]を対象の NMAS とし，ENCORE(ARTISTE に対応させるために一部改造)と ARTISTE が連携動作する実験システムを構成した．実験システムの構成を図 6 に示す．

本システムは以下の 4 つの構成要素から成る．

(1) ARTISTE エージェント

商用の Lisp で実装され FreeBSD 6.1R 上で動作する．ARTISTE エージェント間の通信処理は XML-RPC[XML] を利用して実装した．

(2) 情報レポジトリ

全 ARTISTE エージェントの情報 (IP アドレスや配置先 AS など) が登録されている．ARTISTE エージェント間で協調を行う際は，AS 番号などを検索キーとして ARTISTE エージェントを探索し，IP アドレスやポート番号などの必要な情報を取得した上で通信を行う．実験システムでは本レポジトリは LDAP を用いて実装した．

(3) BGP ルータ

各 AS に配置されているルータで BGP により他の AS と経路情報を交換する．実験システムでは ARTISTE エージェントがルータに telnet でログインして適切なコマンドを実行することでネットワーク情報を取得できるように実装した．例えば，AS 間トポロジを使ったエージェントの探索を行う際に利用する AS-path 情報を取得するためには，管理者としてログインした後に “show ip bgp”^{*2} というコマンドを実行すれば AS-path 情報を含む BGP でやりとりされる情報が取得できる．

(4) ENCORE エージェント

ARTISTE エージェントと同様に，商用の Lisp で

*2 BGP ルータが Cisco 社製である場合

図 7 実験ネットワーク構成図

実装され FreeBSD 6.1R 上で動作する．ENCORE エージェント間の通信処理も同じく XML-RPC を用いて実装した．ENCORE エージェントと ARTISTE エージェント間の通信も XML-RPC を利用して実装を行った．XML-RPC は多数の OS や言語処理系に対応した実装が提供されているため，ARTISTE と NMAS 間の通信処理の汎用性を高めることができる．

§ 2 実験ネットワーク

構築した実験システムを動作させるために市販の仮想マシンソフトウェアおよび同ソフトウェアの仮想ネットワーク機能を使って 12 個のプライベート AS からなる実験用ネットワークを構築した．実験ネットワークの構成図を図 7 に示す．

実験ネットワーク上の各 AS では仮想ホストが各々 2 つ動作しており，1 つのホスト上では ARTISTE エージェントおよび ENCORE エージェントが 1 つずつ動作しており，もう一つのホスト上ではフリーのルータソフトウェア quagga[QUA] が動作しており，BGP ルータとして機能する．また，この実験ネットワークはインターネットとは接続していないが，実際のインターネットへの適用時の性能を検証するために実際のインターネットから取得したフルルート（約 16 万の経路情報）を BGP ルータ間で流通させている．

5.2 実験結果

作成した実験システムを使って ARTISTE の有効性の基本評価を行った．以下にその結果について述べる．

§ 1 ARTISTE による組織化の有効性

ENCORE などの NMAS でエージェント間の協調を行う場合，ARTISTE を使わないとすると，それぞれのエージェントでは協調相手のエージェントの IP アドレス，役割などの情報を協調の前に予め準備しておく必要がある．さらに，これらの情報はネットワークの状態や協調相手の変化に応じて随時変更しなければならない．ARTISTE を用いれば協調相手のエージェントを動的に探索することができるようになるため，協調相手エージェ

表 3 協調エージェントに関する設定 (ARTISTE 利用無)

ENCORE	寺内らのストリーム配信システム
(<code>investigation .</code> (<code>"a.b.c.d.e" :asnumber 65401</code>) (<code>"f.g.h.i.j" :asnumber 65402</code>))	<code><neighbors></code> <code><neighbor></code> <code><address>"a.b.c.d.e"</address></code> <code></neighbor></code> <code></neighbors></code>

表 4 協調エージェントに関する設定 (ARTISTE 利用時)

	ARTISTE 利用時
ENCORE	(<code>query (neighbor 65412 2)</code>)
寺内らのストリーム配信システム	

ントの事前設定やその維持管理が不要になるという効果が得られる．これらの効果が実際に得られることを実験システムを使って検証した．

検証では，図 7 上の AS65416 上のエージェントが「AS65412 から 2 ホップ以内に接続された AS 上のエージェント（群）」と協調したいという要求を持っている場合を例にした．図 7 よりこの要求を満たすエージェントは AS65401, 65402, 65403, 65404, 65414, 65417, 65418 上で動作するエージェントであることが分かる．実際の NMAS でこれらを指定する際の設定を ENCORE と寺内らのストリーム配信システム [寺内 04] の場合を例にして表 3 に示す．

これに対して，ARTISTE を用いる場合は，NMAS から前述の要求条件を 4.2 節 に示した記法に従って記述し ARTISTE に送信すればよいので表 4 に示した設定を行うのみでよい．この例のように，システムが全く異なっても，要求条件が同じであれば同一の処理でエージェントの組織化ができることは ARTISTE の汎用性，再利用性が十分に高いことを示している．

実際に，本実験において協調エージェントに関する静的な設定を ENCORE から削除し表 4 で示した条件を使って ARTISTE を使った探索を行うように変更したところ，ARTISTE から ENCORE への返答として AS65401, 65402, 65403, 65404, 65414, 65417, 65418 上で動作するエージェントの IP アドレスが取得できることを確認した．

さらに，ネットワーク状態の変化に ARTISTE の組織化が追従できることを確認するため，AS65412 と AS65404 間と AS65404 と AS65402 間の接続を切断した後で同じ探索条件を用いてエージェント探索を行った．この場合は AS65401, 65402, 65403, 65414, 65417, 65418 上のエージェントが条件に合致することが図 7 より分かる．このような変更があった場合，ARTISTE を使っていなければ NMAS の要求が変化していなくても設定の変更が必要になる．これに対して ARTISTE を用いれば要求が同じであれば表 4 の設定を変える必要はないので，従来の設定変更コストが削減できる．実際に ARTISTE を用いて探索した結果，前述の AS 上のエージェントが正

表 5 ARTISTE および NMAS の開発規模

	組織化機構を分離	組織化機構を統合
ENCORE	約39K	約42.5K(=39K+3.5K)
ARTISTE	約3.5K	

しく返答されることを確認した。

以上より, ARTISTE を NMAS と併せて利用することによって協調エージェントに関する設定の維持管理をしなくともネットワーク状態の変化に追従して適切な協調エージェントを動的に選択できることが分かり, ARTISTE による組織化支援が NMAS を運用する上で有効であることが確認できた。

§ 2 組織化機構の分離効果

ARTISTE を用いることによるもう一つの利点は, NMAS 構築の際に経路診断など NMAS 本来の問題解決に関わる処理と組織化の処理を分離できることである。例えば, NMAS が前述の「AS65412 から 2 ホップ以内に接続された AS 上のエージェント (群)」と協調する場合を考えると, ARTISTE を用いなければ問題解決のための協調を行う前に,

- (1) AS65412 から観測した AS-path 情報の取得
- (2) AS-path を解析して 65412 から 2 ホップ以内の AS の取得
- (3) 前述の AS 上に配置された NMAS エージェントの探索

という組織化の処理を行う必要がある。そのため, タスクのためのコードと組織化のためのコードが同一システム内に混在することになる。ARTISTE を導入すれば組織化のコードを NMAS から分離, 省略することができるため, システムのコード量の削減効果が得られる。この効果を確認するために, 作成した ARTISTE システムおよび NMAS の一つである ENCORE の開発規模を調査した。その結果を表 5 に示す。

ARTISTE を導入せず NMAS が独自に組織化機構を持つとすると, MAS にはそれぞれ本来の問題解決のコードに加えて組織化に関するコードを含めなければならない。このコード量は ARTISTE の規模に相当すると考えられるため, その場合は本来の問題解決のコードのみの場合に加えて約 3.5K ステップのコードが増えることが表 5 から分かる。逆に言うと, 組織化機構を分離することによって, 約 3.5K ステップのコードが削減できることになる。例えば ENCORE の場合を考えると, 組織化機構を分離した場合は分離しない場合と比べて $3.5K/42K \approx 8.3\%$ の工数削減が実現できたことになる。

5.2.1 節でも説明したとおり, ARTISTE は複数のシステムに対して適用できる再利用性もあるため, 同様の探索機能を必要とする NMAS を開発する場合にも ARTISTE を導入することで同規模の開発規模削減効果が期待できる。さらに, 3.1 節に述べたように組織化処理の分離を行うことはコード全体の見通しを向上させ MAS の構成

表 6 ARTISTE の応答時間

ホップ数 (探索範囲)	1	2	3	4	5
応答時間 (ms)	743	856	1967	6504	7734
ホップ数 (探索範囲)	6	7	8	9	
応答時間 (ms)	7732	7810	7758	7739	

の複雑化およびそれに伴う実行速度や保守性の低下を避けるという効果も期待できる。

以上より, ARTISTE の利用した組織化機能の分離は NMAS の構築する上での工数削減や構造の簡単化による動作品質の向上といった有益な効果をもたらすものと言える。

§ 3 性能

次に, ARTISTE によるエージェント探索のための応答時間を計測した。その結果を表 6 に示す。

ARTISTE の応答時間の内訳を調べると, 本実験の ARTISTE では集中型のレボジトリを利用していることもあり, 他 ARTISTE エージェントの探索や通信には殆ど通信コストはかからず, ENCORE エージェントや BGP ルータとの通信も通信量が多くないため非常に短い時間で完了した。この時間は ARTISTE エージェントの数が増えても殆ど変化しないものと考えられる。しかし, AS-path 情報から AS 間トポロジを作る過程およびそれを利用したエージェントの探索処理が処理時間の大半を占めていることが分かった。

そこで, 実際に実験システム上で AS-path 情報から AS 間トポロジを作成しエージェントの探索範囲, すなわち AS ホップ数を変化させてエージェントを探索した場合の探索時間を測定した。この実験では, 実験システムに流通するフルルートにより AS 間トポロジを作っているため, ここでの測定結果は実際のインターネットでの測定値に近い。

表 6 から分かるように 3 ホップまでの範囲の探索では応答時間は 2 秒以内に収まっているが, それより広い範囲でエージェントを探索すると応答時間が大幅に増加する。よく知られているとおりインターネットは「べき法則」に従うネットワーク構造のため [Faloutsos 99], ホップ数の増加に伴うこの応答時間の急激な増加は合理的である。しかし, 我々が実際のインターネットのトポロジを調査した結果によると, 任意に選んだ AS から 4 ホップで接続される AS 数は殆どの場合約 10000 以上であることが分かっており, このような広大な範囲でエージェントを探索するということは実際の適用では起きないと考えてよい。そのため, ARTISTE の応答時間は現実のネットワークに適用した場合でも問題ない水準と言える。

一方, [Gavalas 02] のように移動エージェントを利用した MAS の場合, エージェント移動に伴って各 ARTISTE エージェントで収集管理する情報を変化させる必要がある。現状のフレームワークではそのためのコストを考慮

していないため、エージェントの移動範囲が大きい場合、十分な性能が得られないことも考えられる。このような場合の対応については今後の課題である。

6. 関 連 研 究

MAS における組織化機構を個々の MAS から独立させるというアプローチは [Tambe 00] でも提案されている。ただし、[Tambe 00] の方法は ARTISTE とは違いネットワークトポロジなどのネットワーク情報の利用を想定していない。

広域ネットワークで動作する NMAS におけるエージェントの組織化においては、動的なルーティング [Willmott 99, Willmott 00]、動画配信 [Tran 03, Sasabe 03] などアプリケーション毎に異なる方法が提案されている。また、インターネット上でオーバレイネットワークを構築する方法 [Touch 01, Anderson 01, Ratnasamy 02] も同様の手法と考えられる。これらはそれぞれに必要な情報を取得してエージェントの組織化を行っているが、類似あるいは同一の情報を利用するアプリケーションも多い。

また [今野 05, 内山 06] では LAN や社内ネットワークを対象として、エージェントの協調による管理手法を提案している。これらの研究ではエージェントの配置や状態は既知としており、それらの手法を AS 間の広域ネットワークに適用した場合には提案する ARTISTE との連携により効率的に動作すると考えられる。

提案する ARTISTE はこのように複数の NMAS および管理手法で共通的に利用可能な情報および手続きを一元的に管理し、さらに ARTISTE と NMAS 間のインタフェースを特定の NMAS に依存しない汎用的なものにすることで、多く提案されている複数の NMAS と共存可能な共通的な枠組みを提供することを可能としている。

7. ま と め

本稿では、MAS の有効な適用分野であるネットワーク管理の中でも AS 間を跨る広域ネットワーク管理を MAS で行う場合を対象にして、協調すべきエージェント群を動的に選択することにより MAS におけるエージェントの組織化を支援するエージェント組織化支援システム ARTISTE を提案した。

ARTISTE を MAS として実現することでネットワークの情報を複数地点から分散観測して情報交換することができ、広域のネットワークトポロジなどの単一地点からの観測では獲得の難しい情報を利用したエージェント選択が可能になることを示した。AS 間経路診断システム ENCORE と ARTISTE が連携動作する実験システムを作成して評価実験を行った結果、ARTISTE の導入によりエージェント協調のための情報を維持管理する必要がなくなり MAS において実際に運用コストの削減ができ

たこと、ARTISTE を共通基盤として実現することにより今後 MAS の開発において開発削減効果が期待できること、そして ARTISTE は実ネットワークへの適用に対しても十分な性能で動作することを示した。

本稿では実験環境を用いて ARTISTE の有効性を示したが、ARTISTE を実際のネットワーク管理に適用していくためにはさらに検討すべき課題がある。その中の 1 つにエージェント間での情報交換の安全性に関する検討がある。AS は独立した組織により運営されているため、一般に AS 間での情報交換は顧客の秘密保持やセキュリティの観点から制限されることが多い。ARTISTE や各 NMAS は各 AS で観測した情報の交換を必要としているが、これらの MAS を導入する各 AS のポリシーに基づいて適切に情報交換を制限する機構が不可欠であると考えている。

今後は、複数の NMAS が共通基盤である ARTISTE を通じて協調するシステムの適用実験を開始し、より高度なネットワーク管理を行うエージェントアーキテクチャの実現に向けた検証を行っていく予定である。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Akashi 05] Akashi, O., Terauchi, A., Fukuda, K., Hirotsu, T., Maruyama, M., and Sugawara, T.: "Detection and Diagnosis of Inter-AS Routing Anomalies by Cooperative Intelligent Agents", *Lecture Notes in Computer Science (Proc. of DSOM'05)*, Vol. 3775, pp. 181–192 (2005)
- [Anderson 01] Anderson, D., Balakrishnan, H., Kaashoek, F., and Morris, R.: "Resilient Overlay Networks", *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, Vol. 35, No. 5, pp. 131–145 (2001)
- [Durfée 90] Durfee, E. H., Lesser, V. R., and Corkill, D. D.: Cooperation through communication in a distributed problem-solving network, in *Cognition, computing, and co-operation*, pp. 159–186, Ablex Publishing Corp. (1990)
- [Faloutsos 99] Faloutsos, M., Faloutsos, P., and Faloutsos, C.: "On power-law relationships of the internet topology", *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, Vol. 29, No. 4, pp. 251–262 (1999)
- [Gavalas 02] Gavalas, D., Greenwood, D., Ghanbari, M., and O'Mahony, M.: "Hierarchical network management: a scalable and dynamic mobile agent-based approach", *Computer Networks*, Vol. 38, No. 6, pp. 693–711 (2002)
- [Hefeeda 04] Hefeeda, M. M., Bhargava, B. K., and Yau, D. K. Y.: "A hybrid architecture for cost-effective on-demand media streaming", *Computer Networks*, Vol. 44, No. 3, pp. 353–382 (2004)
- [QUA] "Quagga Routing Suite" <http://www.quagga.net/>
- [Ratnasamy 02] Ratnasamy, S., Handley, M., Karp, R., and Shenker, S.: "Topologically-Aware Overlay Construction and Server Selection", *IEEE Infocom 2002*, Vol. 3, pp. 1190–1199 (2002)
- [Rekhter 95] Rekhter, Y. and Li, T.: "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)", *RFC1771* (1995)
- [Rowstron 01] Rowstron, A. and Druschel, P.: "Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2218, No. 0, pp. 329–350 (2001)
- [Sasabe 03] Sasabe, M., Wakamiya, N., Murata, M., and Miyahara, H.: "Scalable and Continuous Media Streaming on Peer-to-Peer Networks", *The third International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P'03)*, pp. 92–99

(2003)

- [Stoica 01] Stoica, I., Morris, R., Karger, D., Kaashoek, M., and Balakrishnan, H.: "Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications", *Proceedings of the 2001 SIGCOMM conference*, Vol. 31, No. 4, pp. 149–160 (2001)
- [Tambe 00] Tambe, M., Pynadath, D. V., and Chauvat, N.: "Building dynamic agent organizations in cyberspace", *Internet Computing*, Vol. 4, No. 2, pp. 65–73 (2000)
- [Touch 01] Touch, J.: "Dynamic Internet Overlay Deployment and Management Using the X-bone", *Computer Networks*, Vol. 36, No. 2-3, pp. 117–135 (2001)
- [Tran 03] Tran, D. A., Hua, K. A., and Sheu, S.: "A New Caching Architecture for Efficient Video-on-Demand Services on the Internet", *IEEE Symposium on Applications and the Internet (SAINT 2003)*, pp. 172–181 (2003)
- [Willmott 99] Willmott, S. and Faltings, B.: "Active Organisations for Routing", *Lecture Notes in Computer Science (Proc. of IWAN'99)*, Vol. 1653, pp. 262–273 (1999)
- [Willmott 00] Willmott, S. and Faltings, B.: "The Benefits of Environment Adaptive Organisations for Agent Coordination and Network Routing Problems", *Fourth International Conference on Multi-Agent Systems (ICMAS'00)*, pp. 333–340 (2000)
- [XML] "XML-RPC Home Page" <http://www.xmlrpc.com/>
- [Zhao 04] Zhao, B., Huang, L., Stribling, J., Rhea, S., Joseph, A., and Kubiawicz, J.: "Tapestry: a resilient global-scale overlay for service deployment", *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, Vol. 22, No. 1, pp. 41–53 (2004)
- [今野 05] 今野, 吉村, 羽鳥, 岩谷, 阿部, 木下: "能動化された情報資源に基づくネットワーク管理支援方式", *情報処理学会論文誌*, Vol. 46, No. 2, pp. 493–505 (2005)
- [寺内 04] 寺内, 明石, 丸山, 菅原, 福田, 廣津, 栗原: "エージェントの組織化による広帯域ストリーム向け適応型配信アーキテクチャの提案", 第 6 回インターネットテクノロジーワークショップ (WIT2004) 論文集, pp. 27–34 (2004), <http://wit.jssst.or.jp/2004/WIT2004/WIT2004.pdf>
- [内山 06] 内山, 梅津, 安本, 東野: "広域ネットワークにおける自律的なグループ形成機構を用いた分散ネットワークモニタ方式の提案", *情報処理学会論文誌*, Vol. 47, No. 2, pp. 446–454 (2006)

〔担当委員: 武田 英明〕

2007 年 1 月 24 日 受理

——著者紹介——

寺内 敦

1991 年大阪大学基礎工学部制御工学科卒業。同年日本電信電話株式会社入社。現在, NTT 未来ねっと研究所主任研究員。以来, マルチエージェントシステム, 知的ネットワーク制御などの研究に従事。電子情報通信学会会員。

明石 修

1987 年東京工業大学理学部情報科学科卒業。1989 年同大学院理工学研究科情報科学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来, 分散システム, コンピュータネットワーク, マルチエージェントシステムなどの研究に従事。現在, NTT 未来ねっと研究所主幹研究員 (特別研究員)。博士 (理学)。ACM, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。

丸山 充

1985 年電通大学大学院修士課程応用電子工学専攻了。同年日本電信電話株式会社入社。主として, 超高速プロトコル処理システムとマルチエージェントシステムの研究開発に従事。現在, NTT 未来ねっと研究所主幹研究員, 博士 (工学)。電子情報通信学会, 情報処理学会, IEEE 各会員。

菅原 俊治 (正会員)

1982 年早稲田大学大学院理工学研究科数学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。以来, 知識表現, 学習, マルチエージェントシステム, インターネット等の研究に従事。1992–1993 年マサチューセッツ大学アムハースト校客員研究員。2007 年より早稲田大学基幹理工学部教授。博士 (工学)。日本ソフトウェア科学会, 電子情報通信学会, ISOC, IEEE, ACM, AAAI 各会員。

福田 健介

1999 年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻後期博士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。コンピュータネットワーク, 時系列解析, ネットワーク科学などに興味を持つ。2002 年ボストン大学訪問研究員。2006 年より国立情報学研究所アーキテクチャ科学研究系准教授。博士 (工学)。電子情報通信学会, ACM 各会員。

廣津 登志夫

1995 年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻後期博士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。コンピュータネットワーク, オペレーティングシステム, ミドルウェアなどに興味を持つ。現在, 豊橋技術科学大学情報工学系准教授。博士 (工学)。ACM, IEEE-CS, 情報処理学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。

栗原 聡 (正会員)

1992 年慶應義塾大学大学院理工学研究科計算機科学専攻修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。2004 年から大阪大学産業科学研究所知能システム科学研究部門准教授。分散協調人工知能, インターネット, ネットワーク科学等の研究に従事。博士 (工学)。日本ソフトウェア科学会会員。

小柳 恵一

1975 年慶應義塾大学工学部電気学科卒業。1977 年同大学院修士課程了。1998 年大阪大学大学院博士課程了。1977 年日本電電公社 (現日本電信電話株式会社) 入社。博士 (工学)。現在, 早稲田大学大学院情報生産システム研究科教授。電子情報通信学会, ACM 各会員。IEEE Senior Member。