

1 アプリケーション創発のための 適応型ネットワーキング アーキテクチャ：Ja-Net

UCI/NTTリサーチプロフェッサ

須田 達也 suda@ics.uci.edu

NTT未来ねっと研究所

板生 知子 tomoko@ma.onlab.ntt.co.jp

NTT未来ねっと研究所

今田 美幸 imada@ma.onlab.ntt.co.jp

NTT未来ねっと研究所

田中 聡 satoshi@ma.onlab.ntt.co.jp

NTT未来ねっと研究所

松尾 真人 matsuo@ma.onlab.ntt.co.jp

NTT未来ねっと研究所

中村 哲也 tetsuya@ma.onlab.ntt.co.jp

NTT未来ねっと研究所

大塚 卓哉 otsuka@ma.onlab.ntt.co.jp

大規模分散ネットワーク環境において、ユーザの嗜好や行動パターンに対して適応するアプリケーションを創発するためのネットワークアーキテクチャJa-Net (Jack-in-the-Net) について述べる。Ja-Netは生物学的な仕組みを取り入れることにより、将来のネットワークで提供されるアプリケーションに必要な適応能力、スケーラビリティ、可用性を実現するものである。Ja-Netでは、自律的なコンポーネントであるサイバーエンティティ (CE) を組織化することによってアプリケーションを創発する。そして、ユーザの嗜好や行動パターンに応じて創発されたアプリケーションを評価し、ユーザにとって有効でないCEを淘汰することにより、アプリケーションをユーザの嗜好や行動パターンに適応させる。本稿では、Ja-Netのアーキテクチャの概要とそこで提供されるアプリケーション例について述べる。



◎はじめに

将来のネットワークは、携帯端末、ウェアラブルコンピュータ、センサなどのスモールデバイスや、家電、自動車などの個人の生活に密着した多種多様なデバイ

スを取り込んだ大規模分散システムへと発展し、家庭、仕事、旅行、レジャーなど個人のあらゆる生活シーンに浸透していくと思われる。我々は、このような将来のネットワークを“ユニバーサルネットワーク”と呼んでいる。ユニバーサルネットワーク上では、ユーザの携帯電話、ウェアラブルコンピュータやセンサなどのデバイスを介して取得できる実世界の情報を活用することで、従来のネットワークアーキテクチャではサポートできなかった新しいタイプのアプリケーションが実現できるようになる。たとえば、ユーザの衣服に埋め込まれた生体情報センサからユーザの体温、心拍数の情報を取得し、ユーザが疲労気味のときには自動的に子供やペットの映像をスクリーンセーバに表示するとか、あるいはユーザの体調が優れないときには、ユーザの携帯端末から自動的に掛かり付けの病院に接続し、医師と対話を行うなどのように、アプリケーションをパーソナライズすることができるようになる。また、レストランや映画館などを訪れる不特定多数のユーザを対象に、レストランで食事のユーザの興味に合った映画の予告編をレストラン内の大型画面に表示したりとか、レストランを訪れたユーザがよく立ち寄る映画館の割引クーポンをレストランで食事をしたユーザの携帯端末に配信するなど、レストランという場

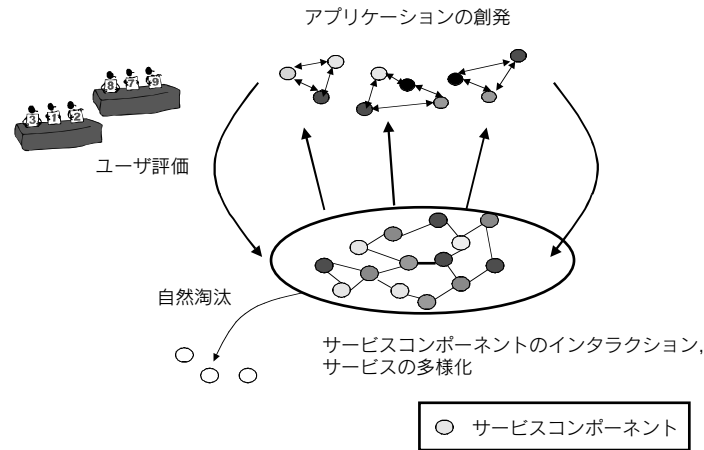


図-1 Ja-Netにおける創発と進化の概念

において自然発生に作られるコミュニティのユーザの嗜好や行動パターンに応じたアプリケーションをネットワークからユーザに積極的に提案することにより、ユーザの潜在的・曖昧なニーズに対しても対応することが可能となる。

ユニバーサルネットワークで上述のアプリケーションを実現するには、アプリケーションやネットワークのインフラストラクチャ自体がユーザの要求や状況に合わせて変化し、新たな機能・形態を創造する適応能力を備え持つことが望まれる。また多種多様なアプリケーションを提供するため、ネットワーク上の莫大な数のユーザ、多種多様なデバイス、ソフトウェア、情報などをアプリケーションの構成要素とすることも必要となる。したがって、莫大な構成要素・アプリケーションが動的に変化する状況でも、上記のようなアプリケーションを安定して提供し続けるスケーラビリティや可用性が重要となる。

以上の考えに基づき、筆者らは、ユニバーサルネットワークにおいてユーザに対して適応可能なアプリケーションを創発するためのネットワークアーキテクチャJack-in-the-Net (Ja-Net)^{1), 2)}を提案している。Ja-Netでは、ユーザの位置、嗜好、興味だけでなく、ユーザの行動パターンや習慣、健康状態、感情、ユーザ間の社会関係など、ユーザの個々の生活シーンにおいて現れる多様な状況に対してアプリケーションが適応することを目標としている。生物界・自然界は、適応性、スケーラビリティ、可用性などの特徴を自動的に生み出す(創発)機能を保持していることを鑑み、筆者らはJa-Netの実現においては生物学的アプローチを適用し、アプリケーションが生物のごとく適応進化するシステ

ムを目指している。本稿では、Ja-Netの基本概念と、Ja-Netによる適応可能なアプリケーションの実現方式を紹介する。

◎Ja-Netにおける基本概念

生物界・自然界では、各生物の固体は、単純なポリシにしたがって自律的に行動し、自身を取り囲む局所的な環境でインタラクションすることにより、組織や社会としてのグローバルな秩序を生み出している(これを創発と呼ぶ)。さらに、環境に適合しない固体が死滅することによる種の自然淘汰や、突然変異などによる新たな機能の生成により進化が促進され、システム全体が環境変化に追従する。このように、多様性や局所的あるいは大局的な変化に対し、自然界は集中管理メカニズム不在の環境下でうまく適応している。このことから、Ja-Netでは、生物界・自然界の持つ特質である創発と進化という概念^{3)~6)}を適用することで、大規模分散システムにおけるアプリケーションの自律的な適応能力を実現する(図-1)。

•創 発

アプリケーションの創発を実現するため、Ja-Netではネットワークを介して利用できるすべての装置・ソフト・情報などのコンポーネントや個々のユーザを、自律的に振る舞うオブジェクトであるサイバーエンティティ(CE)でモデル化する。このとき、アプリケーションは、複数のCEがインタラクションすることによって提供される。個々のCEはアプリケーションを構成する単純な機能(ここでは、サービスと呼ぶ)を実現してお

り、複製、死、移動などの生物的な動作を行う。

Ja-Netでは、CE間でリレーションシップ(関係性)を生成することによって、アプリケーションを構成する(創発)。創発されたアプリケーションを利用したユーザは、自身の満足度に基づいてアプリケーションを評価し、結果をJa-Netにフィードバックする。良い評価の時には、CE間のリレーションシップが強められる。一方、悪い評価の時にはCE間のリレーションシップが弱められる。このようにして、Ja-Netはユーザの評価に基づいてユーザの嗜好に合うアプリケーションを提供する。

●進化

Ja-Netでは、アプリケーションを提供する上で有効なCEのコピーを作り、また有効でないCEをJa-Netから取り除く(自然淘汰)ことによって、アプリケーションの進化を促す。自然淘汰を実現するために、Ja-Netではエネルギーという概念を導入する。すなわち、CEは、活動を維持するためにエネルギーを必要とする。CEはサービスを提供することでエネルギーを獲得し、またネットワークリソースを使用したり、実行環境のランタイムサービスを利用することによってエネルギーを消費する。創発によって多種多様なアプリケーションがユーザに提供される過程で、個々のCEはアプリケーションを介して間接的にユーザから評価を受ける。この結果、ユーザの嗜好に合うアプリケーションを提供しているCEはエネルギーが増え、複製が数多く作られる。また、ユーザの嗜好に合わないアプリケーションを提供しているCEはやがてエネルギーがなくなることにより死滅する。

Ja-Netは、創発によるアプリケーションの多様化と、自然淘汰によって促進されるアプリケーションの進化を手段として適応するシステムである。つまり、創発された多様なアプリケーションの中から、個々のユーザが気に入ったものを繰り返し利用しているうちに、ユーザの嗜好に基づいてアプリケーション(CE)が淘汰され、予測不可能なユーザニーズに対しても、柔軟に適応することができる。また、ネットワーク側で多様なアプリケーションの選択肢を用意することから、ユーザにとってみれば予想外あるいは潜在的なニーズに合ったアプリケーションがネットワークにより提案されることになる。ちなみに、Jack-in-the-Netは、Jack-in-the-Box(びっくり箱)をもじったもので、ネットワークの中から楽しい、驚きのあるアプリケーションが生まれるという意味である。

◎Ja-Net ネットワーキングアーキテクチャ

■ノード構成

Ja-Net アーキテクチャを構成するノードを図-2に示す。Ja-NetプラットフォームはネイティブOS上のバーチャルマシンで動作し、CEの実行環境およびリレーションシップ管理やエネルギー管理など、すべてのCEに共通的な機能をサポートする。Ja-NetプラットフォームはCPUやメモリのリソースを管理し、CEはJa-Netプラットフォーム上で動作する。

■サイバーエンティティの構造

CEは、属性情報(Attribute)、ボディ(Body)、動作(Behavior)の3つを主構成要素とする(図-3)。

属性情報は、CE自身に関する情報であり、ユニークな識別子(以下、CE-idと呼ぶ)や提供可能なサービス

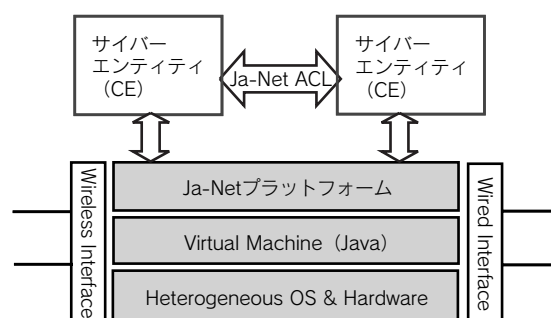


図-2 Ja-Netノードの構成

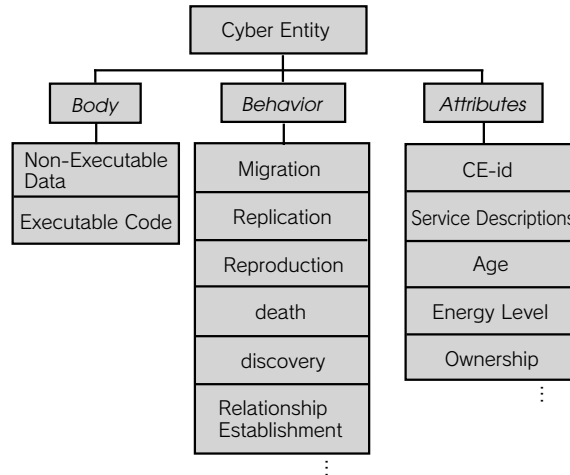


図-3 サイバーエンティティの構造

に関する記述，年齢などである．ボディは，CEが提供するサービスを実装したプログラムであり，データやユーザプロファイルなど実行不可能なもの，アプリケーションコードなど実行可能なものを含む．動作は，サービスとは独立な，各CEが共通に持つ機能であり，移動，複製などモバイルエージェントの基本機能以外に，リレーションシップ管理，エネルギー管理，交配，死，突然変異などのJa-Net特有の動作がある．CEは周囲のCEおよびリソースなどの情報やその変化をセンシングする能力を持ち，状況に応じて自身の動作やサービスを起動する．

次節以降に，CEの動作，サービスのインタラクションについて説明する．

■サイバーエンティティの動作

CEは周囲のCEおよびリソースなどの情報やその変化をセンシングすることにより，適切な動作を起動する．具体的には，Ja-Netプラットフォームから送信される傾向情報といったような外部イベントをトリガに起動する．動作を起動する意思決定論理や起動トリガはCEごとに異なる．たとえば，リレーションシップを生成する相手の選択基準や，移動のタイミングなどは，サービスの特長によっても異なる．これは，CEの開発者によって実装される．

ここではCEの動作の一部を説明する．

• エネルギーの交換

CEはサービスを提供することでエネルギーを獲得し，リソースを利用する対価としてエネルギーを支払う．

• リレーションシップの生成

CEは連携してアプリケーションを提供できるCEとリレーションシップを生成する．そして，ユーザの評価に基づいてリレーションシップの有効度を変更し，有効な相手を学習する．

• 移動

CEは環境をセンシングし，ノードからノードへ移動する．移動先ノードの判定論理はCEごとに異なる．例としては，エネルギーの供給源に近づくように移動する，リレーションシップの強い相手がいる方へ移動する，などがある．

• 複製および交配

CEは自分の複製を作ることができる．その際，突然変異により元のCEとは異なる動作を持たせることができる．さらに，2つの親CEから子CEを生成することができる．その際，子CEの動作は親CEの動作を交配させて持たせることができる．

• 死

CEはエネルギーを使い果たすと死ぬ．無駄な動作によってエネルギーを消費するのみのCEは死にやすく，効率的にエネルギーを獲得できるCEが生き残る．

■サイバーエンティティのボディによるサービスの提供

CEは，そのボディに，アプリケーションに関連した特定の機能を実装する．ボディは，有限状態オートマ

トンとして実装され、機能を実行するアクションと状態遷移ルールが定義される。CEは、実世界あるいはネットワーク内の局所的な環境をセンシングすることで自発的にアクションを起動する場合と、ユーザからのリクエストによってアクションを起動する場合がある。前者の例としては、健康センサを介してユーザの健康状態を感知して照明を変化させるとか、新しいCEがノードに移動してきたことをセンスして広告メッセージを出すなどという場合がある。いったん1つのCEのアクションが起動すると、そのCEから他のCEにメッセージを送信することによって、連鎖的にCEのアクションが起動され、結果的に複数のCEによってアプリケーションを提供することができる。

◎アプリケーションの適応進化

ここでは、リレーションシップに基づくCEの組織化によるアプリケーションの創発⁷⁾と、進化のためのエネルギーによる自然淘汰の実現方式⁸⁾に関して、その概略を紹介する。

■リレーションシップに基づくアプリケーションの創発

CEは他のCEとの間にリレーションシップを生成し、その内容をリレーションシップテーブルに保持する。リレーションシップはCEから見た他のCEに関する情報のキャッシュとして見える。リレーションシップの構成を表-1に示す。リレーションシップには、CEを特定するCE-idとともに、その有効度(以下、ストレンクスと呼ぶ)が保持される。サービス属性は、サービスの意味的な情報で、CEが提供するサービスを表すタイプやキーワードである。

属性名	意味
CE-id	グローバルにユニークな相手CEの識別子
サービス属性	相手CEの提供するサービスの属性
ストレンクス	相手CEの有効度

表-1 リレーションシップの属性例

• リレーションシップの生成

リレーションシップはインタラクションを通して生成される。新しいノードに移動してきたCEは、そのノード上のCEとリレーションシップを生成するため、Advertiseメッセージをノード内にブロードキャストする。Advertiseメッセージを受け取ったCEは、Advertiseメッセージを送信したCEのCE-idをキーに新しいリレーションシップを生成する。一方、特定のサービスタイプを持つCEや特定の属性を持つCEとの間でリレーションシップを生成するため、CEはRecruitメッセージをブロードキャストする。その際、Recruitメッセージにはリレーションシップを生成したいCEが持つ属性が記述される。Recruitメッセージを受信したCEは、マッチした条件をInformメッセージにして返信する。Informメッセージを受け取ったCEは、必要な情報をリレーションシップテーブルに格納して、リレーションシップを生成する。なお、リレーションシップを用いてCEを発見することにより、より広範囲に渡るCEの発見も可能である。

• 有効なパートナーの学習

CEは、アプリケーションを提供する際に、インタラクションする相手をリレーションシップを用いて選択する。その際に、最初にリレーションシップテーブルを検査し、自分の目的に合うCEを選択する。このとき、キーとして複数の属性を指定することも可能であり、また、指定したキーに合致するCEが複数ある場合もある。たとえば、サービス属性が“travel”というサービスタイプを持つCEを自分のリレーションシップテーブルから検索する。もし複数のCEが選択された場合、ストレンクスを用いて候補を絞り込む。たとえば、ストレンクスの最も高いCEがパートナーとして選択される。よって、ストレンクスの強いリレーションシップがあるCEは、インタラクション相手として選択されること

が多くなる。しかし、弱いリレーションシップしか持てないCEは選択されにくくなる。

リレーションシップのストレンクスは複数CE間のインタラクションから構成されたアプリケーションを享受したユーザがアプリケーションに対する満足度を評価値としてフィードバックすることにより調節される。そして、ユーザの評価が高いアプリケーションを提供したCE間のリレーションシップは強化され、評価が低いアプリケーションを提供したCE間のリレーションシップは弱化する。

● グループの形成

リレーションシップに基づいたインタラクションでは、CEのインタラクション相手は毎回リレーションシップに基づいて選択され、かつそのストレンクスも時々刻々変化するため、複数のユーザから評価の高いアプリケーションの再現性や即応性を保証することはできない。複数のユーザからの評価の高いアプリケーションの再現性や即応性を高めるため、アプリケーションを提供するCEを構成メンバーとするグループ⁹⁾を生成する。具体的には、アプリケーションを繰り返し提供していくことにより、CE間のリレーションシップのストレンクスが強まり、ストレンクスが一定値以上になると、リレーションシップの強いCEが自己の複製を生成する。これらの複製の集まりを固定的なグループとしてアプリケーションを提供することにより、アプリケーションの再現性や即応性を保障する。グループは、単体CEと同様にユニークなグループID、グループとして提供できるサービス内容や寿命などの属性情報、メンバーCEの移動、グループとしての複製の生成などの動作 (behavior) を持つ。

一方、アプリケーションの創発効率を上げるため、アプリケーション提供に先駆けて、CE同士が各々のサービス属性に基づいてあらかじめアプリケーションを提供するCEの組合せを生成しておき、ユーザに提案する。そして、提案したアプリケーションに対し、ユーザからの指示によりCEの追加削除を繰り返し、より効率的にグループを生成する。

■ エネルギーによる自然淘汰

Ja-Net上で活動するCEは、実行環境のランタイムサービスやネットワークリソースを利用することで定期的にエネルギーを消費し、また自身のサービスを提供することでエネルギーを獲得することによって生命活動を維持する。CEは、自身の保持エネルギー値が0になると死滅する。Ja-Netではエネルギーを自然淘汰の手

法として使うことにより、アプリケーションの多様化とCEの進化の実現を目指している。

Ja-Net実行環境は、ある時点でのネットワーク環境やユーザ評価に適応し、またそれらの変化への追従可能とするために、ユーザの評価をうける機会の均等化と、ユーザの評価を自然淘汰に反映できる程度にCEを死滅させない仕組みを実現している⁸⁾。具体的には、ある時空間においてあまり使われていないCEに対して、他の実行環境上への移動を促すことで他CEとのインタラクションの機会を増やしたり、またそのようなCEが消費するエネルギーの値を少なくすることによって、死滅させないようにする。

ある時空間で行われるユーザによるアプリケーションの評価だけからCEの有効性を判断してしまうのは、ユーザ評価や環境の極端な変化や局所性などに対処できない可能性があり、多様性や冗長性を排除する結果、変化への追従、適応能力を削いでしまう。それゆえ上記のような手法により自然淘汰を制御することで、さまざまな変化に対して適応できるようになる。

◎ アプリケーションの例

■ パーソナライズド・サービス

ここでは、個人の嗜好や行動パターンに適応するアプリケーション例について述べる。

健太郎が帰宅し、玄関のドアを開ける。このとき、玄関ドアに付いているセンサを制御するCEがドアの動きを感知し、“玄関ドアが開いた”というメッセージをブロードキャストする。ビデオカメラを制御するCEはそのメッセージを受け、玄関の動く物体を記録し始めると同時に、その画像を健太郎の弟である章太郎の机の上のPCで動作するイメージ解析のCEに配信する。イメージ解析のCEはビデオカメラCEから送られてくるイメージを解析し、玄関に入ってきたのが健太郎であることを認識する。そのとき、イメージ解析CEは“健太郎が帰宅した”というメッセージをブロードキャストする。そのメッセージを受け取った居間のステレオを制御するCEは、Miles DavisのJAZZのMP3を持ったCEを見つけ、その音楽を流し始める。しかし、健太郎はJAZZが好きではなく、ステレオのボリュームを下げる。この動作により、居間のステレオセットCEが持つMiles Davisの音楽CEへのリレーションシップは弱くなる。そこで、ステレオセットCEはディスカバリ機構を起動して、Backstreet BoysのMP3を持っているCEを探索し、その音楽を演奏し始める。このとき、健太郎がステレオのボリュームを

上げることによって、ステレオセットCEとBackstreet Boysの音楽CEとの間のリレーションシップは強化される。翌日、健太郎が帰宅した際、前日と同様、Miles Davisの音楽が流れる。しかし、健太郎がボリュームを下げることにより、ステレオセットCEとMiles Davisの音楽CEとのリレーションシップはますます弱くなる。前日と同様に、Backstreet Boysの音楽CEがディスカバリされ、それが演奏を始める。そして、健太郎はボリュームを大きくすることにより、Backstreet Boysの音楽CEとのリレーションシップは強化されていく。そして、数日後には、健太郎が帰宅した際には、Backstreet Boysの曲が自動的に演奏される。

■コミュニティ指向の広告サービス

ネットワーク上で自然発生的に形成されるコミュニティのユーザの嗜好や使い方に適応するアプリケーションについて述べる。

ここでは、New YorkのTimes Squareや新宿のアルタ前のように、大きな映像表示装置(大型スクリーン)とその前にたくさんの人々が行き交うところを想定する。以下では、この場所をTimes Squareと呼ぶ。多くの人々がTimes Squareを訪れ、大型スクリーンの前でおしゃべりしたり、ウィンドウショッピングしたり、カフェでお茶を飲んだりして、そして去っていく。これらの人の多くは、自分の携帯電話かPDAを持ち、それらはアドホックなネットワークで他の携帯電話やPDAと通信できるものとする。この携帯電話やPDAの上では、ユーザプロフィールを持ち、ユーザの状況をモニタしているCEが動作している。同様に、大型スクリーンにもCEが動作し、大型スクリーン上への映像の表示を制御すると同時に、近くにあるCEとの通信を行っている。Times Squareのお店では、お店の商業的のビデオクリップを持ったCEを実装し、お店のPCの上で動作させている。そのお店に行ったお客さんは、お客さんの携帯やPDA上にお店の商業的のビデオクリップを持ったCEをダウンロードする。

このような状況で、大型スクリーンのCEはスクリーンの前にいる多くのユーザのCEとの通信を行い、個人の嗜好情報を収集する。収集された嗜好情報を分析、統合して、大型スクリーンのCEはTimes Squareにいるユーザの嗜好に合ったお店の広告を探して、それを大型スクリーンの上に表示を始める。

多くの人々がTimes Squareを行き交うが、Times Squareの群集の嗜好は短期間に著しくは変化しないものと考えられる。たとえば、たくさんの旅行者が集まったときには、お土産の情報が必要である。近くの劇場での公演が終わったあとでは、公演を見終った人々にはレストランの情報が必要である。このような着実な嗜好の変化を反映し、いくつかの商業的ビデオが大型スクリーン上で表示されるようになり、それらのCE間でのリレーションシップは強化されていくことになる。さらに、頻りに現れる傾向については、対応するCEの組合せをグループとして記録しておくことで、定常的な傾向を再現できるようになる。また、グループの複製が移動することによって、家電ショップにあるパソコンやテレビモニタなどにも表示されるようになる。

◎おわりに

アプリケーション創発のための適応型ネットワークアーキテクチャJa-Netの基本概念とそのアーキテクチャ、それを用いたアプリケーション例について述べた。現在、Ja-Netプラットフォームのプロトタイプ版をJavaを用いて実装した。この詳細は文献2)を参照していただきたい。今後は、システムの安定性やアプリケーション創発の効率化・多様化について検討を進め、いくつかのサービスをJa-Netプラットフォーム上に実装し、PDAを用いた環境での有効性を検証する予定である。

参考文献

- 1) 須田達也, 板生知子, 中村哲也, 松尾真人: サービス創発のための適応型ネットワークアーキテクチャ, 信学論(B), Vol.J84-B, No.3, pp.310-320 (Mar. 2001).
- 2) Itao, T., Nakamura, T., Matsuo, M., Suda, T. and Aoyama, T.: Service Emergence based on Cooperative Interaction of Self-Organizing Entities, Prof. of the IEEE SAINT 2002 (Best Paper).
- 3) Smith, J.: The Problems of Biology, Oxford University Press (1986).
- 4) Kaneko, K. and Ikegami, T.: Evolution of Complex Systems, Asakura Publishing, Japan (1998).
- 5) 有田隆也: 人工生命, 科学技術出版(2000).
- 6) ATR進化システム研究室: 人工生命と進化システム, 東京電機大学出版局(1998).
- 7) Itao, T., Nakamura, T., Matsuo, M., Suda, T. and Aoyama, T.: Adaptive Creation of Network Applications in the Jack-in-the-Net Architecture, Proc. of the IFIP Networking 2002, to appear (May 2002).
- 8) 中村哲也, 松尾真人, 板生知子, 須田達也: 創発型ネットワークサービスシステムJa-Netにおけるシステム制御に関する考察, 新世代ネットワークミドルウェアと分散コンピューティング(NGN)研究会, NGN2001-15 (Dec. 2001).
- 9) 今田美幸, 松尾真人, 須田達也: 自律分散Cyber Entityによるサービス構成方法に関する一考察, 2002年電子情報通信学会総合大会SB-4-3, pp.764-765.
- 10) 大塚卓哉, 松尾真人, 須田達也: サービス創発のための適応型ネットワークアーキテクチャJa-Netにおける適応能力向上方式に関する一考察, 情報処理学会第64回全国大会, 1J-3 (2002).

(平成14年4月23日受付)

