

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25280029

研究課題名(和文) 情報ネットワークにおける機能的進化機構の創出

研究課題名(英文) Autonomous Function Composition and Evolution for Information Network

研究代表者

若宮 直紀 (Wakamiya, Naoki)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50283742

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：通信サービスに対する要求が多様かつ変化する環境において、モジュール化した機能を動的に構成し、提供する機能構成手法、および、サービス要求に対して効果的な機能モジュールの組み合わせを再構成ならびに取捨選択する構造的・機能的進化機構を構築し、シミュレーション評価により有効性を示した。シミュレーション評価では、リクエストに対してユーザのスコアに基づいたマッチングを行い、遺伝的アルゴリズムによる組み合わせテーブルの更新によって、削除対象の機能モジュールの選択を行うことにより、ユーザのリクエストの変化に対して適応的な機能提供がなされることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Information networks have been introducing new or improved protocols one after another to satisfy diverse requirements of a variety of emerging applications. Consequently, current network systems have become considerably large, complex, and even fragile. In this work, to accomplish a sustainable network system which autonomously adapts to diverse requests by dynamically generating necessary control mechanisms, we propose an autonomous function composition method. More specifically, each node has small pieces of networking functions, called function modules, and appropriately combines them to answer each service request. Combinations are refined taking into account the degree of satisfaction of users by a genetic algorithm. Through simulation experiments, we verify that our proposal can adapt to changes in requests in the multi-user environment.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：情報ネットワーク 自己組織化制御 ネットワーク制御 生物ダイナミクス 遺伝的アルゴリズム

1. 研究開始当初の背景

インターネットの普及を背景に、様々なアプリケーションやシステムがインターネットを基盤として展開されている。特に近年は、Internet of Things (IoT)、すなわち、インターネットにあらゆるモノがつながり、モバイル端末やセンサーデバイス等のモノ同士の情報交換によって、今までにはない新たなアプリケーションやシステムの立ち上げが検討されつつある。情報交換の基盤となる情報ネットワークに求められる社会的役割は今後も拡大し続けるものと考えられる。特に、新たなアプリケーションやシステムにおいて生じる機能的要件や性能的要件を満たす通信サービスの構築が情報ネットワークに求められている。

ところが、情報ネットワークは必ずしもアプリケーションやシステムの多様化や品質要求の高度化に答えられない状況にある。従来の情報ネットワークの研究開発においては、伝送速度などの工学的な性能指標の向上や、パケット配送遅延やスループットなどの性能指標の向上が広く考えられてきた。遅延やスループットなどの一般化された性能指標では不十分なアプリケーションが登場した際には、個別の研究開発によってアプリケーションに特化した通信プロトコルや通信システムによって、所望の通信サービスをインターネット等に組み入れることで対応してきた。

今日のインターネットは、多種多様な通信プロトコルが混在して動作することとなり、新たな通信サービスを組み入れる際にも既存の特定の用途で導入されたプロトコルとの整合性が問題となっている。その結果、将来的に生じるであろう新しい通信サービスの要求に対して、新たな機能追加により対応していくことは困難となりつつある。

2. 研究の目的

本研究では、アプリケーションが要求する新たな通信サービスに対して、機能追加ではなく機能創発、および、機能進化により対応し適応する機能的進化機構の創出を目的とする。アプリケーションが必要とする機能を有機的に創発し、かつ、創発した機能群を連結することによって実現される通信サービスをアプリケーションに提供する機能的進化機構を構築する。

3. 研究の方法

研究の方法として、通信サービスの基本となる機能モジュール（プロトコル API もしくはプログラムそのもの）を組み合わせることによって、アプリケーションが要求する通信サービスを創発する機能創発機構を構築する。機能モジュールとは、前述の通信相手の存在を確認する機能や、センサーデバイス等からの情報収集機能、制御サーバ等からの情報伝

播機能などを提供するプロトコル API やプログラムである。本課題では、インターネットにおける経路制御機能やフロー制御機能に加え、センサーネットワークを対象として提案されたアルゴリズムやプロトコルによりもたらされる機能を対象として、機能創発の可否や機能創発により得られるネットワーク性能を整理し、機能創発に必要な機能組み合わせ規則の整備を行う。

次に、通信サービス要求の増加への対応として、機能組み合わせを切り替えることによって、通信遅延やレイテンシの最良化を図る。

また、アプリケーションが要求する通信サービスの変動に対して機能の取捨選択を行う機能的進化機構を遺伝的アルゴリズムにより構築する。

4. 研究成果

通信サービスに対する要求が多様かつ変化する環境において、自律的な機能の適応によって適切な通信サービスを提供できる情報ネットワークを実現するための手法として、モジュール化した機能を動的に構成し、提供する機能構成手法、および、サービス要求に対して効果的な機能モジュールの組み合わせを再構成ならびに取捨選択する構造的・機能的進化機構を構築し、シミュレーション評価により有効性を示した。シミュレーション評価では、リクエストに対してユーザのスコアに基づいたマッチングを行い、遺伝的アルゴリズムによる組み合わせテーブルの更新においては、ユーザのスコアに基づいた交叉対象の選択と、全ユーザのスコアに基づいた削除対象の選択を行うことにより、ユーザのリクエストの変化に対して適応的な機能提供が実現されることを明らかにした。

また、機能モジュールが結合される機能結合ネットワークを構築する際に、ネットワーク全体のトポロジー情報を用いることなく自己組織的にトポロジーを組み替える手法を考案し、平均ホップ長が短く、かつ、機能モジュールの削除に対してロバストとなる機能結合ネットワーク構築手法を提案している。

さらに、情報ネットワーク・システムの実システムであるインターネットにおける機能モジュールの結合の様相を明らかにするために、Linux カーネルにおけるインターネットプロトコルスタックの実装を題材として、プロトコル間及びプロトコル内の機能モジュールの結合構造とその進化の様相を分析した。分析の結果、Linux カーネルのバージョン 2.6.27 から 3.6.17 におけるネットワーク関連の関数の呼び出し関係に着目して分析した結果、ノード数・リンク数は増加しているものの、次数分布やパス長の分布は変化していないことが明らかとなった。しかし、機能モジュール間の独立性を示す尺度であるモジュラリティを評価した結果、機能モジュール間の独立性が高くないことがわかった。

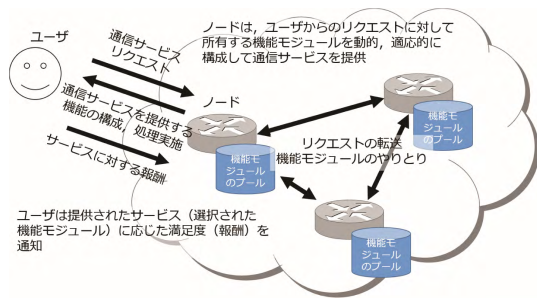


図 1: 機能の動的構成によるサービス提供

以降では、考案した機能的進化機構に関する研究成果の詳細を述べる。

1に、本研究で想定する機能の動的構成によるサービス提供モデルを示す。ユーザから送出されたサービス要求に対し、ノードが適切な機能モジュールを組み合わせることによって、機能を動的に構成する。機能モジュールとしては、Fraglet のように単一の処理を指定するタプルや、データのソート処理やパケットの生成、送出のように単一の機能に対するプログラムコードを想定している。ユーザは、望む処理に対応する機能モジュールを指定したメッセージをネットワークに送出することでサービスを要求する。このメッセージをリクエストメッセージ、リクエストメッセージによる機能モジュール群の指定をリクエストと呼ぶ。ノードは、複数の機能モジュールを保持しており、受信したリクエストメッセージで指定された機能モジュールを組み合わせ、メッセージを処理する。

ユーザからのリクエストに対しては、保持している機能モジュールから適切なものを選択して機能を構成する必要がある。機能モジュールのマッチング手法としては、機能モジュールごとに、リクエストへの機能の提供結果に基づいたスコアを付けて、スコアに基づいた機能モジュール単位のマッチングを行うことも可能である。しかしながら、本研究で対象とする機能モジュールの組み合わせによる機能創発を実現するためには、は単独で機能を提供できるものではないため、スコアを機能モジュールに対して定義するのではなく、スコアを機能モジュールの組み合わせに対して定義する必要がある。なお、機能モジュールの機能や種類の増加に伴って、スコアにもとづく機能モジュールの組み合わせの差別化や、スコアの管理が困難となる。そこで、リクエストに対して機能モジュールの組み合わせをあらかじめ選出し、テーブルに保持しておき、その組み合わせテーブル内から機能モジュールの組み合わせを選択する方式を採用し、遺伝的アルゴリズムを用いて組み合わせテーブルを更新することで、よりリクエストに適合した、あるいは、適合することが期待される組み合わせをテーブルに作成し、これを動的に更新することで、ユーザーリクエストに対する効果的なマッチングを実施する。以降では、組み合わせテーブルの構成方法、およ

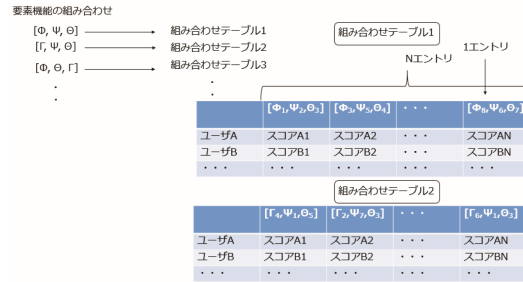


図 2: 機能組み合わせテーブルの構成

び、テーブルの動的更新の方法を述べる。

ノードは機能モジュールを複数保持しており、リクエストに対して効果的な機能モジュールの組み合わせを選択するため、組み合わせテーブルと呼ばれる管理表を用いる。組み合わせテーブルは、 $[\Phi, \phi, \Theta]$, $[F, \phi, \Theta]$, $[\phi, \Theta, F]$, $[\Phi, \phi, \Theta, \Omega]$ など、要素機能の組み合わせごとに作られ、それぞれ N 個のエントリからなる (図 2)。

一つのエントリには、機能モジュールの組み合わせと、ユーザごとのその組み合わせに対するスコアが、ノードの認識しているユーザ数分だけ含まれる。ユーザ A の組み合わせ i ($1 \leq i \leq N$) に対するスコアを $score_{Ai}$ ($0 \leq score_{Ai}$) と表記する。組み合わせテーブルが一定期間使用されなかった場合、その組み合わせテーブルを削除する。また、機能モジュールの移動機構が導入された場合には、機能モジュールの移動によって、組み合わせテーブル内に実現できない組み合わせが発生すると、その組み合わせを削除し、ノード内にある機能モジュールからランダムに新しい組み合わせを構成、追加する。

ノードは、リクエストメッセージを受信すると、リクエストにもとづいて機能モジュールを組み合わせ処理をする。リクエストが特定の機能モジュールとその組み合わせを指定している場合には、組み合わせの先頭から順に、指定された機能モジュールを適用する。指定された機能モジュールがノードに存在しない場合には、処理を中断し、リクエストメッセージを隣接ノードに転送するとともに、組み合わせテーブルのエントリを新たに作成する。新たに作成された組み合わせテーブルのエントリは、リクエストされた各要素機能に対応する機能モジュールをランダムに選択し組み合わせたものとする。また、ノードが構成した機能を用いてリクエストメッセージを処理しユーザに通知すると、ユーザは処理結果に応じた報酬をノードに通知する。報酬は、各要素機能につき 0 以上 1 以下とする。ノードは、獲得した報酬にもとづいて、以下の式により、組み合わせテーブル内のスコアを更新する。

$$score_{Ai} \leftarrow score_{Ai} \times \alpha + (reward_{Ai})^\beta \times (1 - \alpha)$$

ここで、reward は報酬とする。 α は平滑化係

数であり、 $0 \leq \alpha \leq 1$ である。また、 β は報酬のスコアに与える効果を定めるパラメータであり $1 \leq \beta$ とする。

上述の手順により、各ノードでは機能モジュールの組み合わせテーブルを作成し、ユーザーリクエストに応じてスコア値を更新する。

次に、遺伝的アルゴリズムを用いた組み合わせテーブルを更新し、機能創発ならびに機能進化を行う。すなわち、リクエストに対して組み合わせをマッチングして、メッセージを処理し、ユーザから報酬を得て組み合わせテーブルのスコアを更新した後、以下の遺伝的アルゴリズムを用いて組み合わせテーブルを更新する。なお、遺伝的アルゴリズムにおける個体あるいは染色体を機能モジュールの組み合わせとし、遺伝子を機能モジュールとする。

1. ユーザ自身のスコアから求められる確率分布 $P(A; i) = \text{score}_{Ai} / \sum_{k=1}^N \text{score}_{Ak}$ によって、親となる組み合わせを二つ選出する。以降、親と呼ぶ。
2. 全ユーザ U のスコアから求められる組み合わせ i の確率分布 $P_{all}(i) = \sum_{u \in U} P(u, i)$ によって、削除する組み合わせを二つ選出する。ただし、選出した時点では組み合わせテーブルから削除は行わない。
3. [機能創発] 二点交叉により、親から子の組み合わせを二つ生成する。子の組み合わせを以降では子と呼ぶ。具体的には、ランダムに交叉点を二点選び、それら交叉点の間に含まれる機能モジュールを親同士で入れ替えることで子を生成する。子のスコアは、親のスコアの平均とし、子の間では等しい。例えば、親 i, j から子 x, y を生成した場合、ユーザごとのスコアを $\text{score}_{ux} = \text{score}_{uy} = (\text{score}_{ui} + \text{score}_{uj})/2$ ($u \in U$) とする。
4. 子のそれぞれについて、一定の確率で突然変異を起こす。具体的には、機能モジュールをランダムに一つ選び、ノード内の他の機能モジュールと入れ替える。
5. 子と同じ組み合わせが組み合わせテーブル内にはないか確認する
6. [構造的・機能的進化] いずれの子も組み合わせテーブルにない場合、削除対象として選んでおいた二つの組み合わせを削除し、子の両方を組み合わせテーブルに加える。子のいずれか一方が組み合わせテーブルにある場合、その子と、削除対象として選んでおいた二つの組み合わせのランダムに選んだ一方を削除して、残った子と、削除対象の組み合わせを組み合わせテーブルに加える。また、いずれの子も組み合わせテーブルに含まれている場合には、二つの子の両方を削除し、削除対

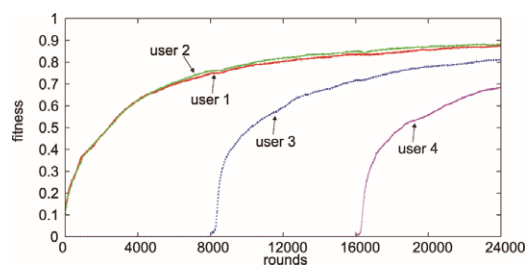


図 3: 機能創発によるサービス適応度の上昇

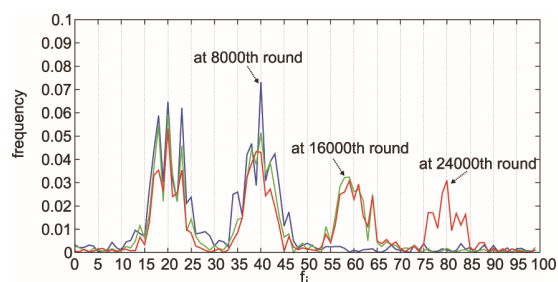


図 4: 各時刻における機能モジュールの組み合わせの発現頻度

象として選んでおいた二つの組み合わせを組み合わせテーブルに戻す。削除対象と同じ組み合わせが生まれた場合、子を削除する

これらの動作による機能的進化機構が、リクエストの変化に対して適応的に動作することを計算機シミュレーションにより確認した。シミュレーションには NetLogo 5.0.4 を用いている。なお、機能的進化機構の有効性を示すことを目的とし、単一ノード（単一の組み合わせテーブル）環境下において、機能創発と機能進化がなされることを確認している。評価結果の一例を図 3 および図 4 に示す。図 3 は、横軸に時間を、縦軸にユーザ要求への適応度を取り、機能モジュールを要求する新たなユーザ user3, user4 がそれぞれ 8000 ラウンド、16000 ラウンド付近で登場した際に、機能が創発され適応度が徐々に上昇している様子を示している。

図 4 は時刻 8000, 16000, 24000 における機能モジュールの組み合わせの発現頻度を示している。時刻 8000 では、user1, user2 が求める機能モジュールの組み合わせ（機能モジュールの組み合わせ ID が 20 付近と 40 付近）が多く発現している様子が見て取れる。また、時刻 16000 では user3 の要求に応じて組み合わせ ID 60 付近の、時刻 24000 では user4 の要求に応じて組み合わせ ID 80 付近の機能モジュールの組み合わせが新たに創発されていることが示されている。これらの評価により、本研究で考案した機能進化機構により、ユーザのリクエストの変化に対して自律的な機能の適応によって機能提供がなされることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

- ① S. Okamoto and N. Wakamiya,
“Autonomous Function Composition
and Evolution for Adaptive
Information Network,” to be
presented at IEEE International
Conference on Autonomic Computing,
July 2016.
- ② S. Okamoto and N. Wakamiya,
“Autonomous Function Composition
for Information Network Adaptive to
Changes in Service Request,” in Proc.
of International Conference on Bio-
inspired Information and
Communication Technologies (BICT
2014), vol. 1, pp. 59-62, Dec. 2014.
DOI: 10.4108/icst.bict.2014.257879
- ③ S. Eum, S. Arakawa, and M. Murata,
“Self-organizing power law topology
for the name resolution system of
ICN,” Journal of Complex Network,
vol. 1 pp. 1-17, Feb. 2014.
DOI: 10.1093/comnet/cnu008

[学会発表] (計 3 件)

- ① 宮川裕孝, 荒川伸一, 村田正幸, “Linux
カーネルを用いたネットワーク機能の接
続関係の分析,” 電子情報通信学会 IN 研
究会, 2015 年 7 月 17 日, 北海道大学
(北海道).
- ② 小泉佑揮, 原田稔, 長谷川亨, “マイク
ロロボットを用いた瓦礫内探索のグラフ
を用いた解析に関する検討,” 電子情報
通信学会総合大会, 2015 年 3 月 10 日,
立命館大学 (滋賀県)
- ③ 若宮直紀, “ゆらぎを活用した情報通信
技術,” 日本学術振興会「分子系の複合
電子機能第 181 委員会」第 18 回研究会,
2014 年 2 月 24 日, 国際高等研究所 (京
都府)

[図書] (計 1 件)

- ① 若宮直紀, 荒川伸一, コロナ社 (情報ネッ
トワーク科学シリーズ), 生命の仕組み
に学ぶ情報ネットワーク設計・制御,
2015, 157

6. 研究組織

(1) 研究代表者

若宮 直紀 (Wakamiya, Naoki)
大阪大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号 : 50283742

(2) 研究分担者

荒川 伸一 (Arakawa, Shin' ichi)
大阪大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号 : 20324741

小泉 佑揮 (Koizumi, Yuki)
大阪大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号 : 50552072

(3) 連携研究者

該当なし