

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 自律連合型基盤システムの構築

2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

研究代表者： 加藤 和彦 (筑波大学大学院システム情報工学研究科 教授)

主たる共同研究者：

米澤 明憲 (東京大学大学院情報理工学系研究科 教授)(~平成 19年 3月)

中尾 彰宏 (東京大学大学院情報学環 准教授) (平成19年4月~)

北川 博之 (筑波大学システム情報工学研究科) 教授

井田 哲雄(筑波大学システム情報工学研究科 教授)(~平成 20年 10月)

3. 研究内容及び成果：

### 研究内容

インターネットは、ローカルなネットワークを相互接続するネットワークとして発展してきたものであるが、単に地球規模で広域的かつ巨大なネットワークの相互接続網であるだけでなく、巨大数の自律ネットワークの、微妙とも言える協調・連合によって維持された、中央管理者や中央管理ポリシーのない分散システムと見ることができる。さらにインターネットは成長する、複雑ネットワーク (complex network) の一種であり、何らかの全体計画的な設計の元で成長していくのではなく、ローカルに隣接するネットワーク管理者の同意に基づき、総体として成長していく。本研究では、インターネットを一つの分散システム環境と見なし、その上で分散サービスを構築・提供するための基盤技術の開発を行った。基盤ソフトウェアを構成する、オペレーティングシステムとミドルウェア層、ネットワーク層、データインターオペラビリティ層、プログラミング言語層の4層に渡って、今後の情報社会の発展に寄与し得ると考えられる技術開発を総合的に行った(図1参照)。

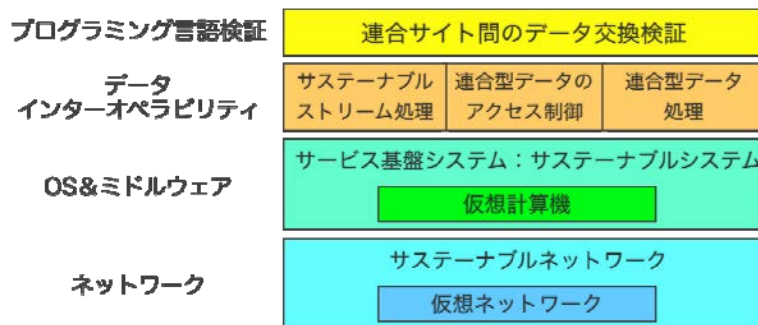


図1 自律連合型基盤システムの概要

### 成果

#### I オペレーティングシステムとミドルウェア層

- ・ 仮想計算機を利用した特定のサービスによらない障害対策手法を開発した。インターネット環境における自律連合システムのためのサステナブルサービスという概念を着想し、その着想に基づいたシステム的设计と実装を行った。2007年秋頃からクラウドコンピューティングシステムと呼ばれる概念が注目されるようになったが、本システムは、クラウドコンピューティングシステムの基盤システムとして機能し得るシステムである。
- ・ 提案自律連合システムの要素技術となる仮想計算機技術を開発した。具体的には、軽量仮想機械モニタである Scrap Book User-Mode Linux (SBUML)、および、ネットワークで結合された複数の計算機を、仮想的な一つの並列計算機と OS に認識させることができる並列仮想計算機モニタを開発した。
- ・ 広域分散アーカイブストレージに関する研究を進めた。複雑ネットワークの一種であるスモールワールドモデルに基づいた広域分散アーカイブストレージ的设计と、その基本的な性質の評価を行った。

- ・プロセスレベル仮想化技術を用いて、現実の分散アプリケーションの動作テスト・性質調査を可能とするシステムを開発した。20 台の PC クラスタ上で、実際の P2P アプリケーションを 6000 個の仮想ノードで立ち上げ、稼働させることができる。
- ・OS 環境をインストールした仮想ディスクをネットワーク上のサーバに置き、インターネットを介して OS をブートするシステムの開発を行った。インターネットのレイテンシーを考慮し、ディスクブロックの最適転送手法、近くのサーバ検索により、高速ブートを可能とする最適化手法を開発した。また、仮想ディスクを管理するサーバをサステナブルシステムとして稼働させるシステムの開発も行った。

## II ネットワーク層

- ・L3 レベルでネットワークを仮想化し、一台もしくは複数台のコンピュータ上に、計算機資源が許す限りの任意個の仮想ルータを生成し、仮想的なインターネットを構築することを可能とするシステムの開発を行った。
- ・ストリーム通信の中継サービス機能をサステナブルに提供するシステムを開発した。
- ・ネットワークレイヤでサステナビリティを提供するために、DDoS(分散サービス拒否攻撃)に対する耐性を有する仮想ネットワーク技術 **Burrows/overfort** の提案を行った。
- ・耐障害性を向上させるネットワークレイヤ技術として、**one-hop source routing** を用いて、ルータで一度だけパケットを反射させることによってリンク障害を回避する **AIRONE** というシステムの開発を行った。

## III データインターオペラビリティ

- ・自律した連合サイト間でストリームデータ(センサ情報、位置情報、カメラ映像等)の分散処理を行うシステム **StreamSpinner** の開発を行うと共に、そのシステムと OS・ミドルウェア研究で開発したサステナブルシステムの技術を統合して、耐障害性を有しながらストリームデータ処理を行うシステムの開発を行った。
- ・自律的に運用されるサイト群における統合データモデルに基づいた分散処理を行なう「水平方向」のセキュアなメディエーション処理と、アダプタを介して各種情報源から統合データモデルへの変換を行なう「垂直方向」のセキュアなラッピング処理について研究を行った。問合せ発行者のみならず、処理に参加する各自律サイトについてもデータアクセス権を設定するものとし、それら全てに違反しないような問合せ最適化手法を実現した。
- ・構造型 P2P ネットワークの一種である分散ハッシュ表(DHT)を対象に、汎用の XML データ検索・格納機構を開発した。

## IV プログラミング言語検証

- ・プログラム解析の技術を Web プログラムに適用し、Web システムを構成するシステム間で生じる不整合を検証する技術を開発した。プログラムの文字列出力を、文脈自由文法を用いて近似するプログラム解析(文字列解析)技術を考案し、このプログラム解析をサーバサイド・プログラムに適用することで、生成される Web ページの近似を得ることができ、サーバサイド・プログラムの脆弱性の検出や生成される Web ページの妥当性検証が可能になる。この解析をサーバサイド・プログラミング言語 PHP に対して実装し、Web 上で公開した。この解析器を用いてフリーソフトウェアを検査し、妥当性等のプログラムの誤りを発見することに成功した。
- ・サーバサイド・プログラムが生成する Web ページが常に文法的に正しいか(妥当であるか)を文字列解析を用いて検証する研究を行った。
- ・文字列解析と情報流解析を融合することにより、クロスサイトスクリプティング問題を引き起こす脆弱性検出技術の開発を進めており、単純な場合の脆弱性検出に成功している。

#### 4. 事後評価結果

##### 4-1. 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

外部発表に関して、グループ全体としての発表は妥当な数である。特に、Web プログラムの検証技術、データインターオペラビリティの研究に関しては、トップクラスの国際会議での発表や論文誌への採択がなされている。しかしながら、サステナブルモデルの研究における発表は、最近発表が始まっているとはいえ、メジャーな国際会議の発表は少ない。

特許は、時系列データ判定に関するものが出ているが、主研究に関してはモデル構築という分野であって、実際的なソフトウェア開発に注力したこともあり、他の特許は出されていない。開発されたソフトウェア成果として、サステナブルサービスフレームワーク、ScrapBook User-Mode Linux、並列仮想計算機モニタ、軽量仮想計算機モニタ、StreamSpinner、PHP 文字列解析器は、いずれもソースコード数万行以上の大型ソフトウェアであり、オープンソースソフトウェアとして公開済みである。

研究成果についてみると、サステナブルシステムに関しては、仮想マシン構築などの要素技術に関して大きな成果が出ているが、全体モデルに関しては最近主な国際会議発表が為され始めた状況であり、国際的な評価はまだ定まったとは言えない状況であり、既存技術と比した効果をさらに明らかにしていく必要がある。しかし、新たなモデル提案をしており、その詳細実現技術が固められれば大きなインパクトを与える可能性もあり、今後さらなる研究の深化を期待したい。一方、検証グループでは、WWW プログラムの形式的な検証手法を与えるという、大変優れた成果が出ており、既に国際的にも大きく評価されている。またデータインターオペラビリティグループも R 木の動的更新効率を著しく向上させる手法を提案し国際的な成果が出ている。

一方、当初計画との関連でいえば、主な計画に関しては、当初提案が漠としたものであったこともあり、その具体化が課題であった。実際的なソフトウェア作りを通して、提案モデルを構築するための要素技術を開発してきたが、真にインパクトを見せることのできる中核要素技術がすべて揃った状況にはまだ至っていない。概念としてのサステナブルシステムの提案とその実装は興味深いものの、マージ問題等、技術的に解決していくことが望まれるいくつかの問題が残っており、今後の研究の進展を期待したい。そのためには様々な応用への適用経験を積み、その後、一度抽象化して一般的手法化する必要がある。これが出来れば大変大きな世界を提案することも可能になる。一方、当初の提案にはなかったもので、WWW プログラムの検証手法や、R 木の動的更新効率改善手法など、研究の進展に応じて生まれた面白い成果も出ている。

##### 4-2. 成果の戦略目標・科学技術への貢献

研究成果には、仮想マシン構築や検証手法など、要素技術については面白い成果が出ており、受賞も多い。しかしながら、主たる成果のサステナブルシステムに関しては、国内論文と受賞はあるものの、国際的な評価の確立はこれからである。最近、安心・安全が社会的に注目を浴びていることもあり、ようやく招待講演を受ける状態になり始めている。今後、研究を進め、適用に適した分野を明らかにするとともに、その適用手法が具体的に示されれば、この分野へ大きなインパクトを与える可能性を持っている。

国内外の研究との比較で見れば、このモデル提案自体はオリジナルなものである。従来のミッションクリティカルシステムの構築方式とは異なる、インターネット時代に適合した新たな高信頼システムの構成法提案となっている。そういう意味で研究成果のレベルは高く、また仮想化についての技術は国内でトップレベルにあると言えるが、研究として完成していない部分もあり、国際的な評価はこれからである。インターネット環境での分散処理技術については、GRID、クラウドコンピューティングがあり、それらとの関係や位置づけを明確にしていくとよいであろう。一方、プログラム検証技術に関しては、Web 用スクリプト言語を理論的に解析する技術を世界で始めて提案した。この成果はいち早く外国で利用され、国際的に継続研究を生み、新たな研究分野を形成しており、

国際的にも大きく評価されており、これからの展開が期待できる。

#### 4-3. その他の特記事項(受賞歴など)

本研究の前期 2 年間までの活動が評価され、内閣官房情報セキュリティセンターから声が掛かり、政府が利用することを前提としたセキュア VM の開発に関して、代表者を加藤教授とするチームが平成 18 年度文部科学省科学技術振興調整費(科振費)重要課題解決型研究に採択されて実施中である。総務省、経済産業省、民間企業(日立製作所、NEC、富士通、NTT データ)からの支援・協力も受けている。科振費研究では、クライアントマシン環境用にセキュリティ機能を組み込んだ仮想計算機モニタを独自開発し、Windows、Linux 等をゲスト OS として無修正で動作させることを目指している。サーバ側技術に焦点を当てている当 CREST 研究とは、全く独立なプロジェクトではあるが、研究グループのアクティビティが実績となって採択に至った。また、この CREST 研究との間では、仮想機械技術の開発と利用に関して知見の共有が行われている。

日本の大学において、仮想計算機をフルスクラッチで開発する力をもつ研究グループは多くはなく、当研究グループが仮想計算機を実装する技術において、国内トップレベルにあることの証左の一つと考えられる。受賞に関しては、論文賞や研究賞が 6 件、学生賞が 10 件、その他 2 件の合計 18 件である。

以上