

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 5 日現在

機関番号：34315

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25330078

研究課題名(和文) 文脈指向プログラムの深化と応用に関する研究

研究課題名(英文) Deepening Study on Context-Oriented Programming

研究代表者

紙名 哲生 (KAMINA, Tetsuo)

立命館大学・情報理工学部・任期制講師

研究者番号：90431882

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：文脈指向プログラミング(COP)は文脈によって変化する振る舞いをモジュール化し、統制された方法でそれらを切り替える方法を提供する。本研究では、数多くのものが乱立していたCOPの言語機構を整理し、COP機構をソフトウェア開発の中でどのように用いていくべきかを明らかにしたソフトウェア開発方法論と、それに基づいて設計した、既存のCOP機構を一般化・包含する新たなCOP言語を実現した。またその言語仕様を理論レベルで厳密に定義し、言語実現上の諸問題をそれに基づいて解決した。

研究成果の概要(英文)：Context-oriented programming (COP) languages modularize context-dependent behaviors in multiple classes into layers. These languages have layer activation mechanisms so that the behaviors in layers take effect on a particular unit of computation during a particular period of time. Existing COP languages have different layer activation mechanisms, and each of them has its own advantages. We developed a software development methodology that guides how to utilize these constructs in software development. Based on this, we further developed a new COP language that generalizes these constructs. In particular, we formalized a core language to study how to tackle the technical problems that arise in realizing that language. Based on this formalization, we also constructed a compiler of that language.

研究分野：ソフトウェア科学

キーワード：プログラミング言語 プログラミングパラダイム 方法論 モジュラリティ 理論化

## 1. 研究開始当初の背景

システムに対する要求は、それが用いられる文脈によって変わるものが多い。例えば、歩行者ナビゲーションシステムの要求を考えると、それが用いられる文脈に屋外・屋内がある。屋外では街路図の表示が求められ、GPS が使えるのに対し、屋内では建物のフロアプランが役に立ち、GPS を用いた現在位置取得は精度がよくないので無線 LAN や RFID を用いた位置取得のほうが望ましい。文脈指向プログラミング (COP) はこのような文脈によって変化する振る舞いをモジュール化し、統制された方法でそれらを切り替えるものとして、期待が高まっている。これまでに数多くの COP 言語が提案されており、代表的なものに ContextJ や、研究代表者らの開発した EventCJ などがある。

COP 言語には、文脈に依存した振る舞いをモジュール化する機構 (■という) と、文脈の変化に応じて実行時に層を切り替える機構 (■の活性化という) が存在する。層は、アスペクト指向言語におけるアスペクトに近い言語機構で、特定の文脈でのみ実行されるシステムの振る舞いの差分をまとめたものである。層の活性化は、時間的な文脈の変化と、それが影響を及ぼす空間的な範囲の二つの側面から指定される。例えば ContextJ の場合、層の活性化が起こるタイミングを、プログラム中の動的スコープをブロック構造で指定することによって記述できる。層の活性化が及ぶ範囲はそのコードを実行しているスレッドである。EventCJ の場合、層の活性化が起こるタイミングは AspectJ のポイントカット記述で宣言的に指定し、そのときにどのように層が切り替わるかを規則として記述する。層の活性化が及ぶ範囲は、指定された (複数の) オブジェクトか、アプリケーション全体である。

これら以外にも COP 言語は数多く存在し、層と層の活性化を主たる言語要素として、表現力の異なる様々な機構が乱立している。

## 2. 研究の目的

このように発展してきた COP において、未だに明らかにされていない根源的な問題がある。それは、(1)そもそもどのようなときに COP を用いればよいのか? という問題と、(2)数ある COP の機構をどのように使い分ければよいのか? という問題である。本研究課題では、この問題に答えるために、既存の COP 言語を包含する新たな言語モデルを提案し、それに基づくソフトウェア開発方法論と、その言語がどのような構文・意味論を持つのかを明らかにする。具体的には、次の三点を本研究の目的とする。

✓ COP に基づくソフトウェア開発方法論

を構築し、ソフトウェア開発の手法から見て COP 言語がどうあるべきかを明らかにする。

- ✓ 上の分析に基づいて、以下の機構に関して COP の言語モデルを再検討する。
  - 文脈の空間的範囲を指定する機構
  - 文脈の時間的範囲を指定する機構
  - 文脈と振る舞いとの関係を指定する機構
- ✓ 上の検討に基づいて言語仕様を理論化し、意味論を明らかにする。また、言語処理系やソフトウェア開発方法論を支援するツールの実装を行い、本研究の内容を具体化する。

## 3. 研究の方法

まず、多くの事例をもとに COP に基づくソフトウェア開発方法論を検討し、それに基づいて文脈の時間的範囲の記述力、文脈の空間的範囲の記述力、層と文脈の関係記述の観点から、既存の文脈指向言語である EventCJ を評価し、改善すべき点を示す。それに基づいて COP 言語の仕様の再検討を行う。またその仕様が、既存の COP 言語の良い性質を壊さないかを調べるため、言語仕様の理論化を行う。具体的には、言語の意味論を形式に定義し、明らかにするとともに、その「良い性質」を定理化し、それを理論的に証明する。そして本研究成果を具体化するため、言語処理系などのツールを実装する。

## 4. 研究成果

(1) 文脈指向ソフトウェア開発方法論 COSE を構築した。文脈に依存した振る舞いを実現するための言語要素が数多くあるなかで、どのような場合に COP を使うべきかをソフトウェア開発の初期段階で明らかにするため、要求仕様から文脈とそれに依存した要求を抽出し、それらの中から COP を用いるべき要求を見つける手法を提案した。小さな例題からはじめ、より具体的な事例研究として迷路探索ロボットのシミュレータの開発などを通して、この手法で抽出された要求が、COP の層と対等に対応し、手順に従って COP の言語要素に落とし込むことができることを示した。

(2) 既存の COP 言語で提案されてきた様々な層活性の機構を一般化し、シンプルな言語機構としてまとめ上げた新しい COP 言語である ServalCJ を実現した。まず、複数の異なる COP 機構を同時に一つのアプリケーション内で用いたい場合があることを具体例で示し、そのうえでそれらを時間的範囲と空間的範囲の考え方で特徴づけ、それに基づいて既存の COP を一般化・包含する層の活性化機構を実現した。しかし、単に複数の言語機構を一つの言語に混ぜ合わせるだけでは

両者の意味論間において矛盾が発生するという問題がある。ServalCJ ではその矛盾を回避する新たな意味論が実現され、それにより既存の様々な層活性の機構をシンプルな言語機構として統合した。

また ServalCJ の意味論を形式化し、上述した矛盾（オブジェクト毎の活性化と大域的な活性化の衝突や、同期的な活性化と非同期的な活性化の衝突）を核言語レベルで識別し、言語の意味論を形式的に正確に記述することによって問題の解決方法を理論的に示した。またそれに基づいて、ServalCJ での異なる層活性機構を統合する際、それらの活性化の優先度が保存される性質を定理化し（優先度保存定理）それを証明した。またこの意味論に基づいて ServalCJ のコンパイラを実現し、パフォーマンス評価を行って実用性を示した。

(3) これらの研究成果は権威ある国際会議や英文論文誌などで発表され、国際的に高い評価を得ている。いずれの成果も、COP に関連する国際会議を中心に、参照される傾向にある。また、COSE については、ソフトウェア開発における各工程それぞれにおいて、COP を用いる方法について今後明らかにすべき研究課題を明確にしており、当該分野の今後の進展を促すものとなっている。

(4) 当初の研究計画には含まれなかった進展もある。層内基底メソッド（層活性によって、新たなメソッドがオブジェクトに追加される機構）を、ServalCJ のような非同期的な層活性を許す言語で型安全に実現するのは難しいという問題が研究遂行中に明らかになった。この問題を解決するため、メソッド探索に、メソッド呼び出し時の静的スコープを含める新たなメソッドディスパッチ機構を ServalCJ 上で実現した。さらにその成果を形式化し、型安全性を証明した。

(5) 今後の展望としては、COP とリアクティブプログラミングの融合があげられる。もともと両者は、対象とするアプリケーション領域を通じて関連が深い。本研究で実現した層の活性化の一般化は、リアクティブプログラミングの機構を層の活性化に応用することでも実現でき、それによってさらなる言語仕様の簡素化が可能になることが、研究遂行中に明らかになりはじめた。当該研究課題においては、ServalCJ にリアクティブプログラミングの要素を取り入れた層の活性化方法の検討と、その準備として、Java にリアクティブプログラミングの機構を入れた単純な言語拡張を試作した。今後は、近年進展の目覚ましいリアクティブプログラミングを含むより洗練された COP の機構を実現し、ソフトウェア開発の諸問題に応用していくことが期待される。

## 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計15件)

Tetsuo Kamina, Introducing Lightweight Reactive Values to Java, SPLASH '16 Companion: Conference on Systems, Programming, Languages, and Applications: Software for Humanity Proceedings, 査読有, 1 巻, 2016, 27-28  
DOI: 10.1145/2984043.2989215

Noriyuki Suzuki, Tetsuo Kamina, Katsuhisa Maruyama, Detecting Invalid Layer Combinations Using Control-Flow Analysis for Android, In Proceedings of the 8th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2016, 27-32  
DOI: 10.1145/2951965.2951970

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Tetsuo Tamai, Context-Oriented Software Development with Generalized Layer Activation Mechanism, LNCS Transactions on Modularity and Composition, 査読有, 1 巻, 2016, 3-40  
DOI: 10.1007/978-3-319-46969-0\_1

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Generalized Layer Activation Mechanism for Context-Oriented Programming, LNCS Transactions on Modularity and Composition, 査読有, 1 巻, 2016, 123-166  
DOI: 10.1007/978-3-319-46969-0\_4

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Toward Fluent Module Interactions, Companion Proceedings of the 15th International Conference on Modularity (MODULARITY Companion '16), 査読有, 1 巻, 2016, 158-159  
DOI: 10.1145/2892664.2892689

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Atsushi Igarashi, Method Safety Mechanism for Asynchronous Layer Deactivation, In Proceedings of the 7th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2015, 6:1-6:6

DOI: 10.1145/2786545.2786550

Tomoyuki Aotani, Tetsuo Kamina, Hidehiko Masuhara, Type-Safe Layer-Introduced Base Functions with Imperative Layer Activation, In Proceedings of the 7th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2015, 8:1-8:7

DOI: 10.1145/2786545.2786553

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Generalized Layer Activation Mechanism Through Contexts and Subscribers, In Proceedings of the 14th International Conference on Modularity (MODULARITY '15), 査読有, 1 巻, 2015, 14-28

DOI: 10.1145/2724525.2724570

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, On-Demand Layer Activation for Type-Safe Deactivation, In Proceedings of the 6th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2014, 4:1-4:6

DOI: 10.1145/2637066.2637070

Tomoyuki Aotani, Tetsuo Kamina, Hidehiko Masuhara, Unifying Multiple Layer Activation Mechanisms Using One Event Sequence, In Proceedings of the 6th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2014, 2:1-2:6

DOI: 10.1145/2637066.2637068

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Tetsuo Tamai, Context-Oriented Software Engineering: A Modularity Vision, In Proceedings of the 13th International Conference on Modularity (MODULARITY '14), 査読有, 1 巻, 2014, 85-98

DOI: 10.1145/2577080.2579816

Tomoyuki Aotani, Tetsuo Kamina, Hidehiko Masuhara, Context Holders: Realizing Multiple Layer Activation Mechanisms in a Single Context-Oriented Language, In Proceedings of the 2014 International Workshop on Foundations of Aspect-Oriented Languages (FOAL '14), 査読有, 1 巻, 2014, 3-6

DOI: 10.1145/2588548.2588552

紙名哲生、文脈指向プログラミングの要素技術と展望、コンピュータソフトウェア、査読有、31 巻、2014、3-13

青谷知幸、紙名哲生、増原英彦、オブジェクト毎の層遷移を宣言的に記述できる文脈指向言語 EventCJ、コンピュータソフトウェア、査読有、30 巻、2013、130-147

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, A Unified Context Activation Mechanism, In Proceedings of the 5th International Workshop on Context-Oriented Programming, 査読有, 1 巻, 2013, 2:1-2:6

DOI: 10.1145/2489793.2489795

〔学会発表〕(計6件)

西村雄一、紙名哲生、丸山勝久、ソースコード編集履歴を用いた競合解決支援ツール、日本ソフトウェア科学会 FOSE 2016、2016年12月2日、ことひら温泉 琴参閣(香川県仲多度郡琴平町)

三宅臯、紙名哲生、丸山勝久、Java における関数型インタフェースの拡張、第193回ソフトウェア工学研究発表会、2016年7月13日、北海道立道民活動センター(北海道札幌市)

鈴木紀之、紙名哲生、丸山勝久、層の組み合わせを考慮した文脈指向プログラミング支援、第22回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ(FOSE2015)、2015年11月27日、ほほえみの宿 滝の湯(山形県天童市)

Tetsuo Kamina, Generalized Layer Activation Mechanism in Context-Oriented Programming, 6th Asian Joint Workshop on Information Technologies (RU-DUT Joint Workshop), 2014年10月11日、立命館大学(滋賀県草津市)

紙名哲生、青谷知幸、増原英彦、玉井哲雄、COSE: 文脈に依存した振る舞いをモジュール化するソフトウェア開発手法、第20回ソフトウェア工学の基礎ワークショップ(FOSE2013)、2013年11月29日、ゆのくに天祥(石川県加賀市)

Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, Hidehiko Masuhara, Mapping Context-Dependent Requirements to Event-Based Context-Oriented Programs for Modularity, Workshop on Reactivity, Events and Modularity (REM 2013), 2013年10月28日, Indianapolis, USA

## 6 . 研究組織

### (1)研究代表者

紙名 哲生 (KAMINA, Tetsuo)

立命館大学・情報理工学部・任期制講師

研究者番号：9 0 4 3 1 8 8 2

### (2)研究協力者

青谷 知幸 (AOTANI, Tomoyuki)

増原 英彦 (MASUHARA, Hidehiko)

丸山 勝久 (MARUYAMA, Katsuhisa)

鈴木 紀之 (SUZUKI, Noriyuki)