

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 12 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2010～2014

課題番号：22240002

研究課題名(和文)ポスト・アスペクト指向時代の階層的分割と横断的分割を統合するモジュール化の研究

研究課題名(英文)A Study on modularization mechanisms to integrate hierarchical and crosscutting decomposition for the post-aspect era

研究代表者

千葉 滋 (Chiba, Shigeru)

東京大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：80282713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 38,100,000円

研究成果の概要(和文)：ソフトウェアのモジュール化技術は、現在のソフトウェア開発の鍵となる技術の一つである。本研究では、従来別々の言語機構を用いて実現されてきた階層的モジュール分割と横断的モジュール分割を統一的に扱える言語機構を研究した。新しい言語機構を考案し、その周辺技術を包括的に研究することで、ポスト・アスペクト指向と呼べるものを生み出すことをめざした。主に、述語ディスパッチ機構と文脈指向プログラミングに基づく言語機構をそれぞれ研究し、階層的な分割と横断的な分割を統一的に扱えるようにした。さらにそれらの言語機構について、基礎理論やモデリングの視点から包括的に研究した。

研究成果の概要(英文)：Software modularization is a key component of modern software development. This work studied language constructs supporting both hierarchical and crosscutting modularization. The two kinds of modularization had been supported by separate constructs. The aim of this work was develop post-aspect orientation through comprehensive study on the topic. This work mainly studied language constructs based on predicate dispatching and context-oriented programming and thereby it developed constructs that can deal with both hierarchical and crosscutting decomposition in a unified way. The work also studied the constructs from the viewpoints of theoretical foundation and modeling.

研究分野：ソフトウェア

キーワード：ソフトウェア・モジュール化 オブジェクト指向 アスペクト指向 文脈指向

1. 研究開始当初の背景

現在のソフトウェア開発において、鍵となる技術のひとつはソフトウェアのモジュール化技術である。これにより、ソフトウェアを機能部品単位で再利用したり、既存ソフトウェアシステムの大半をそのまま残し、修正拡張が必要な部分だけを選択的に交換し、利用者の要請の変化に柔軟にソフトウェアを改良したりしてゆくことが容易になる。モジュール化技術の重要性は古くから知られており、活発に研究されてきた。オブジェクト指向は、その中でも最も成功し産業界に普及した研究成果である。また研究開始当初までの10年間ほどはアスペクト指向の研究が世界的に活発になされ、横断的関心事のモジュール化の重要性が認識されるようになってきた。それを実現す機構も研究され、研究成果の一部はすでに産業界に広く浸透し、IBM や redhat などの当時の先進的企業を表に、実際の製品開発に利用されていた。

関心事とは、ソフトウェアを構成する個々の要素的な機能や性質のことである。オブジェクト指向は階層的に構成される関心事をモジュール化するのに優れた技術であるが、アスペクト指向は横断的といわれる関心事のモジュール化に優れている。横断的とは、他の関心事との結びつきが強く、従来技法でプログラムを書くと、他のいくつかの関心事と混ざってしまうような関心事を意味する。本研究グループのメンバは、この横断的関心事およびアスペクト指向の研究を長年実施してきており、国際的な研究コミュニティにおける同分野の先端的な研究の一翼をになつてきた。

しかしながら、10年以上にわたる世界的なアスペクト指向の研究は一定の成果をあげ、成果の一部は産業界で利用されるようになったが、例えばオブジェクト指向ほどには広く普及しているとはいいがたかった。例えば有名なアスペクト指向言語である AspectJ は産業界でも広く知られているが、産業界における主要な開発言語の地位は得られていない。産業界での普及がすすまない原因は、これまでのアスペクト指向の研究が、横断的関心事のための横断的モジュール分割の機構を、従来の階層型モジュール分割の機構とは別に用意するものであったためと、本研究グループは考え、この二重性を排除する研究が必要であるとして本研究を開始するに至った。

2. 研究の目的

本研究グループは、ポスト・アスペクト指向といえる新たなモジュール化技術を生み出すことを目的に本研究を実施した。アスペクト指向が広く普及しない原因のひとつと考えた階層的分割と横断的分割の二重性を排除し、両者を統一的に扱えるソフトウェアの

モジュール化機構を生み出し、それについて包括的な研究を実施し、実用化することをめざした。一般的なプログラミング言語では、階層的分割によるモジュール化が主流で、例えばクラス継承のような言語機構を提供している。AspectJ 言語に代表されるアスペクト指向言語では、これに加えてアスペクトのような横断的分割のための言語機構を提供する。このためソフトウェア開発者は、階層的分割にはクラスを、横断的分割のためにはアスペクトを、と使い分けなければならない。このため、構文、セマンティクス、再利用法、モデリング法、コーディング技法など全てが二重になってしまう。ソフトウェア開発者にとっては学習の負担が大きく、プログラミング言語や開発ツールの仕様も肥大化、複雑化してしまう。本研究グループは、この二重化がアスペクト指向の普及を妨げていると考え、階層的分割と横断的分割を統一的に扱うモジュール化機構を研究開発することを目的として研究を実施した。また単に新たなモジュール化機構を開発するだけでなく、そのような機構の基礎理論やモデリング技術についても研究し、研究の実用性を高めることを目的とした。

3. 研究の方法

本研究は主に、述語ディスパッチ機構と文脈指向プログラミングを軸に、これらを改良・拡張する方向で進めた。研究グループをモデリング、設計・実現、理論化の3つのサブグループに分け、それぞれの側面から階層的分割と横断的分割を統一的に扱う新たなソフトウェアのモジュール化機構を研究した。モデリングは、玉井、中島が、設計・実現は鶴林、千葉、増原が、理論化は五十嵐、紙名が主に担当した。またドイツ Potsdam 大学 HPI の Hirschfeld 教授を研究協力者に迎え、国際的な研究の展開をはかった。

研究の実施にあたっては、サブグループ間の連携をうながすため、毎年4回程度、全体会合を開催し研究グループ全体で相乗効果がでるようにした。また平成23年には国際ワークショップを本研究グループが主導して開催するなどして、国際的な研究成果の発信をおこなうようにした。

4. 研究成果

(1) 述語ディスパッチ機構を拡張した、階層的分割と横断的分割を統一的に扱えるモジュール化機構を研究開発した。また、このモジュール化機構を組み込んだプログラミング言語 GluonJ を開発し一般公開した。GluonJ 言語は Java 言語の拡張として実現した。さらに GluonJ 言語の理論面からの研究として、その型システムを設計し、その性質を研究した。それにより横断的分割については、一定のモジュラリティが確保されているものの、

部分的にモジュラリティが失われており、型検査のためには大域的なプログラムの解析が必要であることを明らかにした。本研究の成果は ACM OOPSLA 2010 にて発表した [8]。また GluonJ 言語の実用的な利用例として、一般の技術者向けの書籍を執筆し、その中で活用し、GluonJ 言語の有用性を示した [27]。

(2) 文脈指向プログラミングを拡張、一般化し、述語ディスパッチに基づく機構とは異なる別な統一モジュール化機構についても研究した。

まず文脈指向とイベント指向を統合した EventCJ 言語を開発した [9]。従来の文脈指向言語は、現在のプログラム実行に同期して起こる活性制御の機構を持っており、非同期的に起こる外部環境の変化に応じて起こる振る舞いの変化を記述することが難しかった。EventCJ は非同期的に起こるイベントと、それに伴って追加削除される層を紐付けることによってこの問題を解決した。さらに、層の活性制御を状態遷移として捉えることにより、層の活性制御に関する性質をモデル検査器 SPIN で検証する機構を実現した。

また、ポツダム大の Hirschfeld 教授と共同で、基礎言語モデル L の設計を行った。L ではクラスによるメソッドディスパッチと層によるメソッドディスパッチを统一的に扱い、オブジェクト指向とその発展である mixin などを含める機構とすることを目指した。本研究では、基本モデルの設計 [23]、mixin と同等の詳細化機構 [24]、層の間で共有される状態の扱いと可視属性の整理 [22] を実施した。

文脈指向プログラミングにおける型安全性の研究についても実施した。文脈指向プログラミングでは層の活性化・不活性化によって、クラスに対して動的にメソッドが追加・削除されるので、例え同じ式でもそれが現れる文脈によってインタフェースが異なる可能性があり、従来のやり方での型による安全性を保証することが難しい。この問題を、各プログラムの実行地点で活性化されている層の集合を見積もることができる型システムを導入することで解決した [19]。さらにこの知見を生かして文脈指向プログラミング言語 JCop の型システムの改良にも取り組んだ [26]。

また、文脈指向プログラミングのための UML 設計モデリング手法 UML4COP を開発した [20, 21]。UML4COP により、設計モデルとプログラムコードのトレーサビリティ検証が可能になった。文脈指向プログラミングでは、文脈に依存した振る舞いを通常の振る舞いから分離できるため、従来はトレーサビリティの保証が難しかった。さらに SMT ベースの支援環境 CJAdviser を開発し、文脈指向プログラミングのデバッグ環境について取り組んだ [18]。CJAdviser は、ContextJ*プログラムの実行トレースを文脈依存グラフに変

換し、それを SMT ソルバー Yices を用いて解析する。これによりオブジェクトと文脈の間の様々な依存関係を調べることが容易になった。

文脈指向プログラミングにおける文脈は、通常動的に変化する文脈を扱うが、モジュール間の静的な関係も文脈として捉えることができる。これを活用してモジュール間の矛盾を回避する機構の研究をおこなった [4]。

(3) 本研究の研究成果を発信するために、平成 23 年 10 月 17~18 日に、本研究グループが中心となって、中国・上海交通大学にて AOAsia/Pacific ワークショップを開催した。また平成 26 年の COP' 14 ワークショップの開催にも主導的な役割を果たし、文脈指向プログラミングの研究者コミュニティにおける存在感を示した。

(4) 述語ディスパッチ機構、文脈指向プログラミングの他にも、モジュール化機構に関連する様々な要素技術についての研究をおこなった。例えばフィーチャー指向プログラミングの研究 [15] や、制御ソフトウェアと制御対象ハードウェアが強く関連し関心事の分離が困難になっている組み込みソフトウェアのモデリングについての研究 [6] をおこなった。

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 17 件)

[1] 別役 浩平, 千葉 滋, 部分的再ロードによる Java プログラムの再起動の高速化, 情報処理学会論文誌 プログラミング, Vol. 4, No. 3, pp.16-25, 2011 年 6 月

[2] 早船 総一郎, 千葉 滋, Reserved Member 方式によるメンバの実行時追加機構の提案, 情報処理学会論文誌 プログラミング, vol.5, no.3, pp.40-49, 2012 年 8 月.

[3] Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, and Hidehiko Masuhara, Introducing Composite Layers in EventCJ, IPSJ Transactions on Programming 6(1): 1-8, 2013.

[4] 竹下 若菜, 千葉 滋, 破壊的クラス拡張で生じるメソッド衝突を回避可能なモジュール機構 Method Shells とその実装方法, 情報処理学会論文誌 プログラミング, vol.7, no.3, pp.12-21, 2014 年 7 月.

[5] YungYu Zhuang and Shigeru Chiba, Method Slots: Supporting Methods, Events, and Advices by a Single Language Construct, Transactions on Aspect-Oriented Software

Development XI (TAOSD'14), LNCS vol. 8400, Springer, pp.70-108, April 2014.

[6] 古川 覚, 上田 賀一, 中島 震, 組込みシステム検査のための協調解析手法、コンピュータソフトウェア, 31 巻, 307-317, 2014.

[7] Robert Hirschfeld, Hidehiko Masuhara, Atsushi Igarashi, and Tim Felgentreff, Visibility of context-oriented behavior and state in L, Computer Software, 2015 (to appear).

(以下、査読付国際会議の会議録)

[8] Shigeru Chiba, Atsushi Igarashi, and Salikh Zakirov, Mostly modular compilation of crosscutting concerns by contextual predicate dispatch, The ACM Conference on Object-Oriented Programming Systems, Languages, and Applications (OOPSLA 2010), ACM, pp. 539-554, 2010.

[9] Tetsuo Kamina, Tomoyuki Aotani, and Hidehiko Masuhara, EventCJ, A Context-Oriented Programming Language with Declarative Event-based Context Transition, In Proceedings of the 10th Annual Aspect-Oriented Software Development Conference (AOSD.11), pp. 253-264, 2011.

[10] Robert Hirschfeld, Atsushi Igarashi, Hidehiko Masuhara, ContextFJ: A Minimal Core Calculus for Context-Oriented Programming. In Proc. of International Workshop on Foundations of Aspect-Oriented Languages, pp.19-23, 2011.

[11] Tsutomu Kumazawa, and Tetsuo Tamai, Counterexample-based Error Localization of Behavior Models, Bobaru, M. Havelund, K. Holzmann, G. and Joshi, R. eds., NASA Formal Methods(NFM 2011), LNCS 6617, Springer-Verlag, 2011, pp.222-236.

[12] Shigeru Chiba, Michihiro Horie, Kei Kanazawa, Fuminobu Takeyama and Yuuki Teramoto, Do We Really Need Extending Syntax for Advanced Modularity?, In proceedings of the 11th annual international conference on Aspect-oriented Software Development (AOSD 12), pp.95-106, March 2012.

[13] Shumpei Akai, Shigeru Chiba, Method Shelters: Avoiding Conflicts Among Class Extensions Caused by Local Rebinding, In proceedings of the 11th annual international conference on

Aspect-oriented Software Development (AOSD 12), pp.131-142, March 2012.

[14] Shin Nakajima, S. Furukwa, and Y. Ueda, Co-Analysis of SysML and Simulink Models for Cyber-Physical Systems Design, Proc. 2nd Workshop on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications (CPSNA 2012), pp. 473-478, 2012.

[15] Fuminobu Takeyama and Shigeru Chiba, Implementing Feature Interactions with Generic Feature Modules, In proceedings of the 13th international conference on Software Composition (SC'13), LNCS 8088, Springer, pp. 81-96, June 2013.

[16] Wakana Takeshita and Shigeru Chiba, Method Shells: Avoiding Conflicts on Destructive Class Extensions by Implicit Context Switches, In proceedings of the 13th international conference on Software Composition (SC'13), LNCS 8088, Springer, pp. 49-64, 2013,

[17] Shin Nakajima, Everlasting Challenges with the OBJ Language Family, Proc. Specification, Algebra, and Software (SAS 2014), pp. 478-493, 2014.

[学会発表] (計 9 件)

[18] Shizuka Uchio, Naoyasu Ubayashi, and Yasutaka Kamei, CJAdviser: SMT-based Debugging Support for ContextJ*, 3rd Workshop on Context-Oriented Programming (COP 2011), July 25, Germany, 2011.

[19] Atsushi Igarashi, Robert Hirschfeld, and Hidehiko Masuhara, A type system for dynamic layer composition. In Proceedings of the International Workshop on Foundations of Object-Oriented Languages (FOOL2012), October 22, Tucson, AZ, USA, 2012.

[20] Naoyasu Ubayashi and Yasutaka Kamei, UML4COP: UML-based DSML for Context-Aware Systems, 12th Workshop on Domain-Specific Modeling (DSM 2012) (Workshop at SPLASH 2012), October 22, USA, 2012.

[21] Naoyasu Ubayashi, Ai Di, and Yasutaka Kamei, Archface4COP: Architectural Interface for Context-Oriented Programming, 5th Workshop on Context-Oriented Programming (COP 2013), July 2, France, 2013.

[22] Manabu Toyama, Tomoyuki Aotani, Eric

Bodden, Hidehiko Masuhara, and Éric Tanter, Aspect interfaces: Towards separate type-checking of aspect-oriented programs with inter-type declarations, In Proceedings of the 94th IPSJ Workshop on SIG Programming, 2013-1-(4), June 3-4, Akita-city, 2013.

[23] Robert Hirschfeld, Hidehiko Masuhara, and Atsushi Igarashi, L: Context-oriented Programming With Only Layers, In Proceedings of Workshop on Context-Oriented Programming (COP2013), Article No. 2, July 2, France, 2013.

[24] Robert Hirschfeld, Hidehiko Masuhara, and Atsushi Igarashi, Layer and Object Refinement for Context-oriented Programming in L, in Proceedings of IPSJ 95th Workshop on Programming, 2013-2-(2), July 31-Aug 2, Kitakyushu-city, 2013.

[25] Shin Nakajima, Model-based Power Consumption Analysis of Smartphone Applications, Proc. 6th International Workshop on Model Based Architecting and Construction of Embedded Systems (ACES-MB 2013), Sep. 29, USA, 2013.

[26] Hiroaki Inoue, Atsushi Igarashi, Malte Appeltauer and Robert Hirschfeld, Towards Type-Safe JCop: A type system for layer inheritance and first-class layers. In Proc. of International Workshop on Context-Oriented Programming (COP'14), July 29, Sweden, 2014.

[図書] (計1件)

[27] 千葉 滋, 2週間でする！スクリプト言語の作り方, (株)技術評論社、ISBN 978-4-7741-4974-5、2012.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

[その他]

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

千葉 滋 (CHIBA, Shigeru)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・教授

研究者番号： 80282713

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

玉井 哲雄 (TAMAI, Tetsuo)

法政大学・理工学部・教授

研究者番号： 60217172

中島 震 (NAKAJIMA, Shin)

国立情報学研究所・アーキテクチャ科学研究系・教授

研究者番号： 60350211

鶴林 尚靖 (UBAYASHI, Naoyasu)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号： 80372762

増原 英彦 (MASUHARA, Hidehiko)

東京工業大学・情報理工学研究科・教授

研究者番号： 40280937

五十嵐 淳 (IGARASHI, Atsushi)

京都大学・情報学研究科・教授

研究者番号： 40323456

紙名 哲生 (KAMINA, Tetsuo)

立命館大学・情報理工学部・講師

研究者番号： 90431882