

令和元年5月31日現在

機関番号：33917  
研究種目：基盤研究(C) (一般)  
研究期間：2016～2018  
課題番号：16K00110  
研究課題名(和文) サイバーフィジカルシステムのためのアーキテクチャ指向ソフトウェア開発支援環境

研究課題名(英文) An Architecture Centric Software Development Environment for Cyber Physical Systems

研究代表者  
沢田 篤史 (SAWADA, ATSUSHI)  
南山大学・理工学部・教授

研究者番号：40273841  
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：様々なデバイスがネットワーク接続されたサイバーフィジカルシステム(CPS)のソフトウェアには、システムを取り巻く状況(コンテキスト)に対して柔軟に振舞いを変更する仕組みが求められる。本研究では、自己適用技術を用いてシステムの振舞いを変更させるためのソフトウェアアーキテクチャを、PBR(Policy Based Reconfiguration)パターンとして整理した。PBRパターンは、コンテキストに応じた振舞い変更のための汎用的なパターンである。本研究では、PBRパターンに基づくアーキテクチャをCPSソフトウェアの基本構造と位置づけ、仕様記述、設計、プログラム実現のための開発支援環境を整備した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、現実世界における複雑な環境情報の変化を柔軟にとらえ、それに応じた適切な振舞いを提供するCPSソフトウェアの構造をPBRパターンとして定式化した点にある。本研究の社会的意義は、PBRパターンを基本構造に取り入れたアーキテクチャを中心に据え、複雑な環境情報に柔軟に適応することのできるCPSソフトウェアを、効率的に実現するとともに、その保守性を高めるための工学的な基盤を整備した点にある。

研究成果の概要(英文)：Mechanisms of self-adaptation to the surrounding context information are required for the control software for cyber physical systems (CPS) which consist of various network-connected embedded devices. We propose a software pattern called PBR (policy based reconfiguration) which can be a generic architecture for CPS software with facilities for self-adaptation or context-awareness. In this study, we design a development environment for specifying, designing, implementing flexible CPS software systems.

研究分野：ソフトウェア工学

キーワード：ソフトウェアアーキテクチャ 組み込みシステム 開発支援環境 コンテキストウェアネス 形式仕様記述 自己適用型ソフトウェア

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ネットワーク接続された組込みデバイスからなるサイバーフィジカルシステム (Cyber Physical Systems: 以下, CPS) を制御するソフトウェア (以下, CPS ソフトウェア) の開発においては, その性質上, システムを構成するデバイスやネットワーク, さらにシステムを取り巻く環境の多様性を考慮することが求められる。特定のハードウェアや外部環境を前提とする組込みソフトウェアの開発支援に関する研究は国内外でも盛んに行われてきた。これら研究の成果である開発支援ツールもソフトウェアであることから, 多様なデバイス, 環境へ適応させるためには好都合と言えるが, 一方で変更や組み合わせの自由度が極端に高いことから, 対象や局面を限った場当たりの支援に留まり, 工学的な開発基盤を与えるまでに至っていないことが問題である。

ソフトウェアの基本構造を定めるアーキテクチャ設計では様々な視点から多面的な検討がなされ, 設計結果と設計判断とが一定の形式の下に文書化される。CPS ソフトウェアでは, そのアーキテクチャがデバイスやネットワークの構成, 設置・利用の環境に起因する整合性制約や追跡関係などの多様な意味関係を反映して設計されることになる。CPS ソフトウェアを開発するプロセスでは, これらの意味関係が満たすべき制約を保ちながらプロダクトが洗練され進化する。すなわち, CPS ソフトウェアのアーキテクチャと開発プロセスは互いを制約し, 影響を与えあう関係にあり, この意味で, アーキテクチャは CPS ソフトウェア開発プロセスを規定するメタレベルの記述である。CPS ソフトウェアのアーキテクチャが制約し, 影響を与える開発プロセスを, 構成要素との意味関係を含むメタレベル記述として抽象化し, それらを形式的に記述することで, CPS ソフトウェア開発支援のための, 共通の統合方式の確立が可能になるという着想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は, CPS ソフトウェアの開発のために, 統合的な支援を提供する工学的基盤を確立することである。デバイスやネットワークの構成を反映して設計されるソフトウェアアーキテクチャと, CPS ソフトウェアの開発プロセスが互いに影響を与えたとの認識に基づき, プロセス統合型アーキテクチャモデルを定義する。このモデルを中心に据え, 開発支援ツール統合方式, および並列分散システムとして実現される CPS ソフトウェアの形式検証手法を確立する。この取り組みを通じ, IoT アプリケーションなど, CPS ソフトウェアを開発するための系統的な支援基盤を提供する。

### 3. 研究の方法

本研究は, 次の三つの重点研究課題

- (a) プロセス統合型アーキテクチャモデルの定式化
- (b) 開発支援ツールの統合方式の確立
- (c) CPS ソフトウェアの形式検証手法の確立

に焦点をあて, 相互に補完しながら進めた。

重点研究課題(a)では, 研究代表者の沢田が中心となり, CPS ソフトウェアのアーキテクチャ設計に影響を与える要因を開発の局面ごとに抽象化・構造化することで, コンテキストに依存して振舞いを変化させるアーキテクチャパターンについて考察した。

重点研究課題(b)では, 研究分担者の野呂が中心となり, (a)で定式化したパターンを CPS ソフトウェアのアーキテクチャ設計プロセスにメタレベル適用することで, 開発状況に応じた支援ツールの統合方式について考察した。

重点研究課題(c)では, 研究分担者の張が中心となり, 並行分散システムとして実現される CPS ソフトウェアについて, 特にきわめて近い時間間隔で非同期に発生するイベントに対する, システムの振舞いの整合性を検証する方式について考察した。

### 4. 研究成果

前掲した重点研究課題を通じて, 本研究では次のような成果を得た。

- (1) CPS ソフトウェアのためのアーキテクチャパターン (PBR パターン) の定式化

CPS ソフトウェアをはじめとするインタラクティブシステムにおいては, システムがそれを取り巻く環境に応じて振舞いを変化させる動的再構成の機構を実現する必要がある。本研究では, MVC アーキテクチャに対して, コンテキスト指向プログラミング技術とアスペクト指向アーキテクチャ設計の考え方を統合的に適用することで, 図 1 に示す, インタラクティブシステムのための共通アーキテクチャ CSA/I-Sys (Common Software Architecture for Interactive Systems) の設計を行い, 事例による検証を行った。

得られたアーキテクチャを抽象化することで, CPS ソフトウェアに求められる動的再構成機構をアーキテクチャ設計レベルで実現するためのパターンとして PBR (Policy Based Reconfiguration) パターン (図 2) を定義した。PBR パターンを用いることで, CPS 開発において考慮すべき横断的関心事の分離と, 環境に応じたシステムの振舞いの変化を動的なアスペクト負荷の仕組みとして実現することができる。PBR パターンを統一的に用いてアーキテクチャを定義することで, アーキテクチャ自身, それに基づく設計, さらにコードの理解が容易になり, 保守や再利用など, アーキテクチャ中心の開発プロセスを状況に

応じて支援する枠組みを提供することが可能となる。(雑誌論文 , , , , )

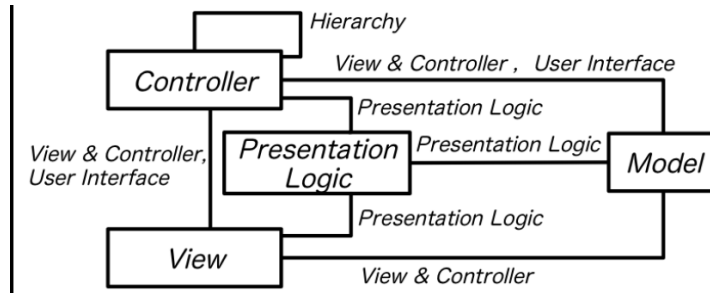


図1 . CSA / I-Sys ( 参照アーキテクチャ )

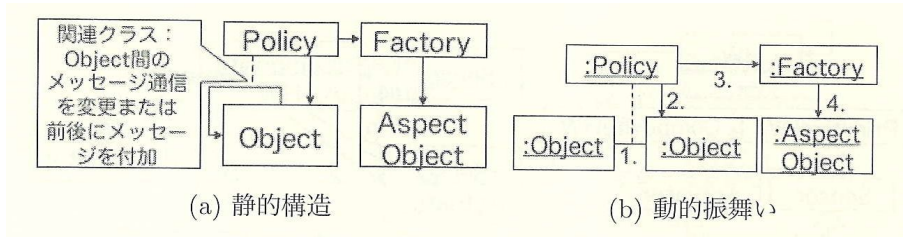


図2 . PBRパターン

(2) プログラムコード生成系のための共通アーキテクチャとそのメタレベル適用  
 CPS ソフトウェアの開発するプロセスでは、アーキテクチャに基づくアプリケーションフレームワークとともに、フレームワークを利用したプログラムコードの自動生成ツールを整備する必要がある。ソフトウェアアーキテクチャと開発プロセスは、互いに影響を与えあう関係にあることから、アーキテクチャに基づくプログラムコードの自動生成ツールを開発するプロセスは、そのアーキテクチャから影響を受ける。本研究では、(1)で提案した共通アーキテクチャを前提に、MDA (Model Driven Architecture) に基づくアーキテクチャをメタレベルに適用することで(図3)、プログラムコードの自動生成ツールの自動生成(メタ生成系)の実現に向けた考察を行った。(学会発表 , 雑誌論文 )

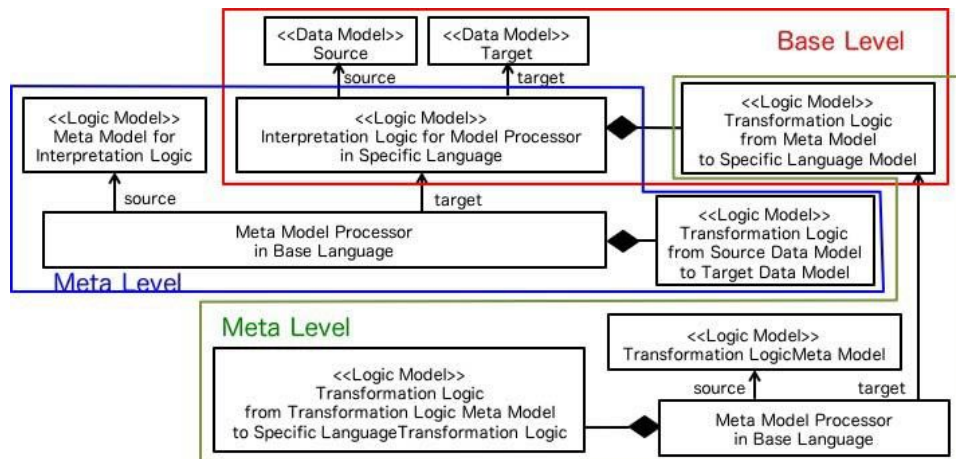


図3 . MDAに基づくプログラムコード自動生成系のためのメタアーキテクチャ

(3) CPS システムのための形式仕様記述と検証法の提案  
 CPS をはじめとする並行システムの開発では、複数のハードウェア装置の下で複数の事象が非同期に発生しうる。このようなシステムにおいては、同時に発生する事象を考慮する必要がある。本研究では、同時の事象を含んだ振舞いを形式的に記述して分析する方法を提案し、自動販売機制御の事例を用いてその有用性について議論した。また、CPS システムのための形式仕様記述のためのメタモデルとして、(1),(2)の成果でも基礎概念として共通に用いた MVC アーキテクチャを適用し、詳細化関係を考慮した構成要素および要素間の関係について整理した。この整理結果を形式仕様言語 VDM-SL による宣言的で簡潔な関数を用いたテンプレートとしてまとめた。(雑誌論文 , , , , )

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計12件)

張 漢明, 野呂 昌満, 沢田 篤史, MVC アーキテクチャに基づく形式仕様記述プロセスに関する考察, 情報処理学会研究報告(組込みシステム), Vol. 2019-EMB-50, No. 41, 査読無, 2019, pp. 1-7.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, コンテキスト協調を考慮した IoT システムのためのソフトウェアアーキテクチャの設計, ソフトウェア工学の基礎 XXV 日本ソフトウェア科学会 FOSE2018, 査読有, 2018, pp. 135-140.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, インタラクティブシステムのための共通アーキテクチャの設計, コンピュータソフトウェア, Vol. 35, No. 3, 査読有, 2018, pp. 3-15.

doi.org/10.11309/jssst.35.3

張 漢明, 野呂 昌満, 沢田 篤史, MVC アーキテクチャのメタレベル適用による形式仕様モデルに関する考察, ソフトウェア工学の基礎 XXIV 日本ソフトウェア科学会 FOSE2017, 査読有, 2017, pp. 183-188.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, インタラクティブシステムのための共通アーキテクチャの設計, ソフトウェア工学の基礎 XXIV 日本ソフトウェア科学会 FOSE2017, 査読有, 2017, pp. 129-134.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, 繁田 雅信, 谷口 弘一, コンテキストウェアネスを考慮した組込みシステムのためのアスペクト指向アーキテクチャの設計, ソフトウェア工学の基礎 XXIV 日本ソフトウェア科学会 FOSE2017, 査読有, 2017, pp. 3-12.

Atsushi Esaka, Masami Noro, Atsushi Sawada, Design of Common Software Architecture as Base for Application Generator and Meta-Generator for Interactive Systems, Proc. the 41st Annual Computer Software and Application Conference, Vol. 2 (The 5th IEEE International COMPSAC Workshop on Consumer Devices and Systems (CDS2017)), 査読有, 2017, pp. 323-328.

doi.org/10.1109/COMPSAC.2017.102

張 漢明, 野呂 昌満, 沢田 篤史, 複数事象の発生を含意した区間振る舞い記述法とその検証法の提案, コンピュータソフトウェア, Vol. 34, No. 2, 査読有, 2017, pp. 3-15.

doi.org/10.11309/jssst.34.2\_3

張 漢明, 野呂 昌満, 沢田 篤史, MVC アーキテクチャのメタレベル適用による形式仕様モデルに関する考察, 情報処理学会研究報告(組込みシステム), Vol. 2017-EMB-44, No. 44, 査読無, 2017, pp. 1-6.

張 漢明, 野呂 昌満, 沢田 篤史, 並列事象の同時生起を考慮した振る舞い仕様記述法に関する考察, ソフトウェア工学の基礎 XXIII 日本ソフトウェア科学会 FOSE2016 (ライブ論文), 査読無, 2016, pp. 255-256.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, 繁田 雅信, 谷口 弘一, コンテキストウェアネスを考慮した組込みシステムのためのアスペクト指向アーキテクチャの適用と実現, ソフトウェア工学の基礎 XXIII 日本ソフトウェア科学会 FOSE2016, 査読有, 2016, pp. 175-180.

江坂 篤侍, 野呂 昌満, 沢田 篤史, 繁田 雅信, 谷口 弘一, 組込みシステムへのコンテキスト指向プログラミング技術の適用, 情報処理学会研究報告(ソフトウェア工学), Vol. 2016-SE-193, No. 10, 査読無, 2016, pp. 1-8.

### 〔学会発表〕(計1件)

Atsushi Esaka, Atsushi Sawada, Masami Noro, Design of Common Software Architecture as Base for Application Generator and Meta-Generator for Interactive Systems, The 35<sup>th</sup> International Conference on Conceptual Modeling (Poster Session), 2016.

### 〔図書〕(計0件)

### 〔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

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名: 野呂 昌満

ローマ字氏名：NORO MASAMI

所属研究機関名：南山大学

部局名：理工学部

職名：教授

研究者番号（8桁）：  
40189452

研究分担者氏名：張 漢明

ローマ字氏名：CHANG HAN-MYUNG

所属研究機関名：南山大学

部局名：理工学部

職名：准教授

研究者番号（8桁）：  
90329756

(2)研究協力者

研究協力者氏名：江坂 篤侍

ローマ字氏名：ESAKA ATSUSHI

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。