

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500104

研究課題名(和文) 物流システムに対するプロセス代数を用いた配送監視システムの構築に関する研究

研究課題名(英文) A Handling Management System for Freight with Process Algebra

研究代表者

加藤 暢 (KATO, Toru)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号：00330233

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物流システムに対する貨物の取扱いの形式的な監視を目的として、物流システムをプロセス代数を用いてモデル化する方法の確立、及び貨物の移動が正しく行われているかを監視するシステムの開発を行った。

モデル化のための記述方法の定式化においては、既存のプロセス代数を拡張し、物流システムのモデル化に特化した多重Ambient Calculusを提案した。これにより物流システムの持つ階層構造、並列性などが適切に表現できるようになった。さらに、物流システムをモデル化した式と、UHF帯RFID機器を用いて検知した貨物の移動を対比させることにより取扱いの監視を行うシステムを構築した。

研究成果の概要(英文)：We have proposed a way of modeling freight system with a process algebra and constructed a handling management system for freights in order to establish a formal way to supervise how containers are treated during shipping.

The Multiple Ambient Calculus(MAC) is a kind of process algebra which we have proposed to model freight systems for accurately describing nested structure and concurrency of freight systems. We also have constructed a handling management system that can supervise the treatment of containers by sensing movement of them using UHF RFID devices and comparing the movement to the model written in MAC recorded in RFID tags on the containers.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：サービス構築基盤技術 物流システム プロセス代数 モデル検査

### 1. 研究開始当初の背景

近年、国際物流の取扱量は大型コンテナ船の就航などにより、ますます増大している。取扱量の増加とともに、貨物の取り違え防止や、(特に 9.11 テロ以降) 貨物に対するセキュリティへの要求なども今まで以上に厳しくなっており、コンテナ管理の必要性が高まっていく中で、どのようにコンテナを管理していくかについて、物流業界では様々な方法を模索している。RFID 機器を用いコンテナの位置情報や内容の情報などを取得し、コンテナに対するトレーサビリティやトラック機能を持つシステムの研究が、現在様々な機関で行われている。例えば、大手海運会社では RFID を用いた位置情報の取得などを実験している。また、2007 年 3 月には海上コンテナに IC タグを取り付けて、位置追跡を行う実験が行われた。この実験は、米国土安全保障省、国土交通省の協力の下、海上コンテナに GPS 機能を持った発信可能な IC タグを取り付け、海上や陸上での位置を把握するものである。さらに日本通運株式会社でも、UHF 帯の RFID による貨物追跡システムを導入し、2008 年 9 月 30 日から運用が開始されるなど、IC タグを用いた物流監視システムは今後ますます普及していくものと考えられる。

しかし物流システムは、荷物、コンテナ、コンテナ船というように、複数のより小さなパッケージを収容したパッケージがより大きなパッケージに収容されるという階層構造を持っており、しかもその階層構造が変化しながら輸送されるという特徴を持っている。コンテナの位置情報のみに着目した上記の検査方法では、物流システムのもつ階層構造がどのように変化しながら貨物が輸送されたのかという、より厳密な検査を行なうことができない。

### 2. 研究の目的

そこで本研究では、プロセス代数の一種である Ambient Calculus(AC)を用いた形式的記述に基づく物流システムのモデル化を行ない、このモデルに沿って物流システムを管理する監視システムを構築する。AC とは、動的な階層構造を持つシステムを形式的に記述するための言語であり、この特徴から物流システムのもつ階層構造を簡潔に表現することが出来る。本監視システムは、送り状、B/L Instructions, Container Packing List といった実際に貿易で使われる書類を元に自動的に AC プロセス式の生成を行うプロセス式生成システム、および、生成されたプロセス式の遷移と RFID で検知した物の移動とを対比し、その移動が正しいものであるかどうかを監視するシステムからなる。これらのシステムにより、貿易書類で規定された輸送計画通りに貨物輸送が行われているかどうかを自動的に監視することが可能となる。

### 3. 研究の方法

本研究は、最終的な目的であるコンテナ海上輸送システムに対する監視システムの構築と実験を行うための準備として以下の(1)~(4)を実施し、そのうえで(5)で述べる実証実験を実施する。

(1) 物流監視システムを構築するためには、船、港、コンテナヤード、コンテナなどに分散されたプロセス式を適切に処理する分散処理系が必要である。まずネットワーク上で AC のプロセスが動作できる分散実行環境を完成させる。

(2) 実際の海上貨物輸送では、いくつものフィーダー港から発送されたコンテナが、大規模なハブ港に集約され、さらに別のハブ港を経由して、目的地のフィーダー港へ輸送される。またその経路上で積み込み、積み降ろしが発生する。そのような輸送動作を形式的に表現するための方法を提案する。

(3) 本研究では現在、書類から生成されたプロセス式を船や港を表す PC、及び RFID タグに分散させる処理を手作業で行っているが、実際の物流システムに本監視システムを適用するためには、式の分散を自動化する方法を確立する必要がある。特に大量のコンテナに付けられた RFID タグに式を正確かつ自動的に分散する方法の確立が重要となる。

(4) 本研究の主目的であるコンテナ移動の検知のためには、数  $m$  の到達距離を持つ UHF 帯 RFID 機器を用いる必要がある。本研究室に既存の機器と本助成により購入する機器を合わせ 5 台の機器を用いて、可能な限り規模の大きな屋外実験を行う。この実験において、複雑な経路をもつ物流システムをシミュレートする。

(5) 以上の準備を終えたのち、宅配などの物流システムを想定した小規模な物流監視実験を行う。この段階で生じる問題点を精査し、実用的な実験に耐えるレベルまで、本監視システムの完成度をあげる。その上で、最終年度には海上物流システム対し本監視システムを適用し、その有効性を確認する。

### 4. 研究成果

本研究の成果は次の 5 点である。

(1) [AC を用いた物流システムのモデル化と監視システムの構築]

当初の計画通り、物流で使用されている各種書類から物流システム全体をモデル化するプロセス式自動生成システム、及び UHF 帯 RFID 機器を用いて貨物の移動を監視するシステムの構築を行った。この物流監視システムの動作検証を行うため、一つの港から一つの港へとコンテナ数個を移送する物流を想

定した屋外実験を行い、本研究の実現性を示した。以上の成果を豪州メルボルンで開かれた国際会議にて発表した(学会発表④)。

### (2) [物流システムをモデル化するための新たな記述方法の確立]

本研究を開始する際に想定していた Ambient Calculus (AC) による物流システムのモデル化にはしかし、(1)で述べた研究の過程で欠点があることが判明した。物流システムでは、一回の輸送に対し貨物の追加やキャンセルが頻発する。しかしながら、AC による物流計画の記述では、1つのプロセス式により物流全体を記述するため、1つの貨物の取扱いに関する記述が式中のさまざまな場所に散在するような書き方をせざるをえず、プロセス式が複雑な形のものになりがちで、記述性、了解性が十分ではなかった。また同様の理由から、同じ手順で取り扱われる貨物が複数存在するといった物流が持っている対称性や、それらの取扱いは任意の順序で行われてもよいといった並行性を十分に表現することが困難であった。さらには、取り扱う貨物が1つ追加されたり、削除されたりする際にも式全体を修正する必要があるという問題があった。そこで本研究では複数のプロセス式により物流計画を記述する多重 Ambient Calculus (MAC) を提案した。MAC では、各プロセス式中の名前は共通名と個別名に分ける。そして、共通名を持つアンビエントに関する遷移はそれらの名前を共有するプロセスで同時に発生する、という制約を遷移規則に導入することでプロセス間の同期を表現する。こうすることで、物流計画を複数のプロセス式に分けて記述することができるため、1つのプロセス式では1つの貨物の取扱いのみを記述するという記述スタイルが可能になる。そのようなスタイルで物流を記述すれば、名前のみが異なり同様の取扱いを要求する貨物が複数存在することを直接的に表現できたり、貨物の追加削除の際の式の修正が格段に容易になる。以上の成果を情報処理学会プログラミング研究会にて発表し(学会発表⑦)、さらに情報処理学会論文誌に採録された(雑誌論文③)。

### (3) [MAC を用いたモデル検査システム]

MAC により記述された物流システムのモデルは、そのモデル化が正しいことが証明できなければそのモデルに基づいた監視自体が無意味なものになってしまう。そこで本研究では、モデル、つまりプロセス式が物流システムの所期の性質を満たしているかどうかを検証するために、様相論理の一種である Ambient Logic の論理式を用いて性質の記述を行い、プロセス式が論理式を満たすかどうかを自動的に判定することができるモデル検査法を提案した。多数の貨物を扱う物流システムを MAC で表現する場合、貨物の個数ぶんの個別式を記述する必要があり、モデル検

査の際の状態空間爆発が問題となる。そこで本研究では、多数の個別式からなる全体式に対するモデル検査を、より少数の個別式からなる全体式のモデル検査に帰着させ、状態空間爆発が理論上発生しない手法を提案した。さらにその手法に基づくモデル検査システムを構築した。以上の成果を情報処理学会プログラミング研究会にて発表し(学会発表⑥)、さらに情報処理学会論文誌に採録された(雑誌論文②)。

### (4) [MAC を用いた物流監視システム]

(2)で確立した MAC による物流システムのモデル化の方法を実装し、実際のコンテナ輸送で使われる数種類の書類を元に、各コンテナの搬送経路を表現する MAC 式を自動生成するシステムを構築した。又、MAC の個別式を適切な端末へと分散するシステム、及び RFID を用いて検知した貨物の動きや、船の乗り換えが MAC 式の遷移に沿ったものであるかを監視するシステムも同時に実装し、これらのシステムからなる物流監視システムを構築した。さらに本システムの実現性を示すため、簡単なコンテナの輸送及び乗り換えを想定した実証実験を行った。実際の物流におけるハブ・アンド・スポーク・システムではコンテナの乗り換えを行う。そのため、ただ運ぶだけでなく、乗り換えを想定した実験も行った。これらの実験においては、図1に示すように自動車をコンテナに見立て、実際に移動



図1 物流監視実験

する対象を数メートルの距離から RFID 機器によって検知し、その移動とプロセス式の遷移を対比させることにより監視することができた。

以上の成果を情報処理学会全国大会(学会発表⑤)及び情報処理学会プログラミング研究会(学会発表③)にて発表し、さらに情報処理学会論文誌に採録された(雑誌論文①)。

### (5) [AC と MAC のための統合開発環境]

(4)で述べた物流監視システムにおけるプロセス式を自動生成させるためのプロセス式生成システムは、数か所の港を中継して貨物を輸送する複雑な物流には対応できて

いない。そのような物流に対しても正確なプロセス式を生成するためには、分散環境でプロセス式のテストやデバッグが可能な統合開発環境 (IDE) が不可欠であることが判明した。そこで本研究では、Java など一般的な言語に対する IDE の持つ基本的なプログラミング支援機能に加え、AC 特有の性質に対応した以下の 4 つの特徴的な機能を有する IDE を構築した。AC の代数式の持つ動的な階層構造をグラフィカルに記述し、それをプロセス式に変換する機能。AC のプロセス式の持つ非決定的な選択動作に対し、それら全てをプログラマが明示的に選択し逐次実行する機能、実行後に後戻りする機能など、AC 特有の階層構造を変化させるような移動動作に対応したデバッグ機能。ネットワーク上を移動するモバイルプロセスの開発に対応できるように、複数の計算機上で本 IDE を起動し、計算機間を移動する AC のプロセス式 (モバイルプロセス) を動作させながら、動的にプロセス式の編集ができるような分散環境上でのデバッグ機能。Java 言語で作成されたプログラムを ambient で表し、AC の機能を用いてそのプログラムの実行状態を保ったまま計算機間を移動させる機能。以上の成果を、スペインで開催された国際会議 (学会発表②) 及び情報処理学会プログラミング研究会にて発表した (学会発表①)。

#### 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 3 件)

① 橋本隆弘, 加藤 暢, 樋口昌宏: 多重 Ambient Calculus と UHF 帯 RFID 機器を用いた海上物流監視システム, 情報処理学会論文誌: プログラミング, 査読有, Vol.6, No.2, pp. 1-12 (2013),

[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=94937&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=8](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=94937&item_no=1&page_id=13&block_id=8).

② 樋口昌宏, 森田哲平, 加藤暢: 多重 Ambient Calculus による物流記述に対する弱双模倣等価性を用いたモデル検査, 情報処理学会論文誌: プログラミング, 査読有, Vol. 5, No. 3, pp. 50-60 (2012),

[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=83514&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=8](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/index.php?active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=83514&item_no=1&page_id=13&block_id=8).

③ 樋口昌宏, 加藤 暢: 物流システム記述のための多重 Ambient Calculus, 情報処理学会論文誌: プログラミング, 査読有, Vol. 5, No. 2, pp. 79-87 (2012).

[https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages\\_view\\_main&active\\_action=repository\\_view\\_main\\_item\\_detail&item\\_id=81617&item\\_no=1&page\\_id=13&block\\_id=8](https://ipsj.ixsq.nii.ac.jp/ej/?action=pages_view_main&active_action=repository_view_main_item_detail&item_id=81617&item_no=1&page_id=13&block_id=8).

[学会発表] (計 7 件)

① 加藤 暢, 宮井亜人夢, 佐々木大和, 樋口昌宏: Ambient Calculus のための統合開発環境, 情報処理学会プログラミング研究第 98 回研究発表会, 2014 年 3 月 18 日, 東京大学.

② 加藤 暢: Integrated Development Environment for the Ambient Calculus, 14th International Conference on Automation & Information (ICAI '13), 2013 年 8 月 8 日, スペインババレンシア TRYP Oceanic ホテル.

③ 橋本隆弘, 加藤 暢, 樋口昌宏: 多重 Ambient Calculus と UHF 帯 RFID 機器を用いた海上物流監視システム, 情報処理学会プログラミング研究第 92 回研究発表会, 2013 年 1 月 15 日, 鹿児島県奄美市 AiAi ひろば.

④ 加藤 暢, 樋口昌宏: A Handling Management System for Freight with the Ambient Calculus and UHF RFID Tags, The 15th International Conference on Network-Based Information Systems, 2012 年 9 月 27 日, 豪州メルボルン La Trobe 大学.

⑤ 橋本隆弘, 加藤 暢, 樋口昌宏: 多重 Ambient Calculus を用いた物流監視システムの構築に関する研究, 情報処理学会第 74 回全国大会, 2012 年 3 月 7 日, 名古屋工業大学.

⑥ 樋口昌宏, 森田哲平, 加藤 暢: 多重 Ambient Calculus による物流記述に対する弱双模倣等価性を用いたモデル検査, 情報処理学会プログラミング研究第 87 回研究発表会, 2012 年 1 月 24 日, 沖縄県久米島町イーブ情報プラザ.

⑦ 樋口昌宏, 加藤 暢: 物流システム記述のための多重 Ambient Calculus, 情報処理学会プログラミング研究第 86 回研究発表会, 2011 年 11 月 2 日, 横浜市神奈川近代文学館.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

加藤 暢 (KATO, Toru)

近畿大学・理工学部・准教授

研究者番号: 00330233