

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00040

研究課題名(和文) 多重Ambient 計算とRFID機器を用いた物流監視システム構築に関する研究

研究課題名(英文) A Handling Management System for Freight with Multiple Ambient Calculus and RFID Devices

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) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：海上コンテナ輸送では、気象や貨物量の急激な変化など様々な要因を考慮し、使用する船や中継港などは輸送中に動的に決定される。本研究では、このような動的な物流計画を対象とし、コンテナ取扱の妥当性を自動的に判定する監視システムを開発した。本システムは、プロセス代数の一種である多重 Ambient Calculus(MAC)で物流計画全体をモデル化し、RFID機器を用いて捉えたコンテナの挙動とモデルを比較することで、コンテナ取扱の妥当性を判定するものである。さらに本研究では、MACにより表現されるモデルが、動的に変化する物流システムの所期の性質を満たすことを自動的に確認するモデル検査システムを開発した。

研究成果の概要(英文)：The vessels and hub ports used in maritime logistics of container are dynamically determined depending on various factors such as weather condition or the sudden increase of amount of containers. Aiming supervising such dynamically changing freight plans, we have developed a freight management system that can not only monitor the handling of containers with RFID devices but also confirms the correctness of it by modeling whole the freight plans with Multiple Ambient Calculus(MAC) that is a kind of process algebra. We have also developed a model checking system that confirms the model satisfies the properties expected to the freight plan that dynamically changes.

研究分野：情報学

キーワード：物流システム モデル化 モデル検査 プロセス代数 Ambient Calculus

1. 研究開始当初の背景

国際物流の取扱量の増加とともに、貨物の取り違え防止や貨物に対するセキュリティへの要求が高まっている。これに対し 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キング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。

その一環として我々は先行研究において、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、このモデルに添って物流システムを管理する監視システムを提案した。その監視システムは、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、RFID で検知した物の移動とプロセス式の遷移を対比し、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。

しかしモデル検査システムを実際に構築し実験を重ねる中で、AC によるモデル化では物流システムのもつ「大規模」かつ「数量の動的な変化」という性質を正確に反映することが困難であることが明らかになった。この問題に対し、我々は「大規模かつ数量の動的な変化」に対しても正確なモデル化が可能な多重 Ambient Calculus (MAC)の提案と、この言語の処理系の構築を行い、当初の目的である海上物流監視システム開発を進めた。

2. 研究の目的

目的1 (多重 Ambient Calculus を用いた物流監視システム) 船の乗換えを含むコンテナの海上輸送では、コンテナが次に載せ換えられる船は運送途中で動的に決定される。先行研究で提案した物流監視システムでは、コンテナが港に到着した時点で次に乗り換えるべき船を、港を表すプロセスから動的に取得する仕組みは実装していた。ただしそのプロセス式はあらかじめ用意してあるものだけであり、以下に述べる実際の物流システムの持つ性質に充分対応できるものではなかった。コンテナターミナル運営会社、フォワーダー会社、大手船会社にインタビューによる調査を行った結果、単に天候の影響だけではなく、繁忙期など貨物の量が急激に増加する場合には、本来載せ換えられるはずであった船が利用できなくなり、別の船が割り当てられる場合も少なくないことがわかった。その際にどの船を選択すれば良いかなどの意思決定を支援するソフトウェアが利用されているが、最終的にどのコンテナをどの船に優先して載せるか、後回しにするかなどの決定は様々な要因を考慮し人間が行っている。このようにコンテナの輸送経路は、様々な要因の元で動的に決定され、コンテナターミナル

ルには、コンテナが到着する一日前までにその情報がマニフェストという書類によって船会社から伝えられる。コンテナターミナルではマニフェストに基づいて、コンテナの積み込み、積み下ろしのリストが生成され、そのリストを基に積み込み積み下ろし作業や確認作業が行われている。このようなコンテナ輸送をモデル化し、動的に設定される複雑な経路を辿るコンテナの取扱いを正しく監視するためには、モデルの自動生成機能も動的な変更に対応させる必要がある。

本研究では MAC を用い、例えば、コンテナ数 10 個は港 A で、数 10 個は港 B で積み下ろす、あるいは途中の港で数 10 個をさらに積み込む、積み替える等の、より現実には則した複雑な経路を辿る物流システムのモデル化ができるよう既存のシステムを拡張し、様々な形式の物流システムに対する監視が可能なシステムを構築する。

目的2 (Ambient Logic を用いた物流システムのモデル検査) 物流書類から生成されるモデルに誤った式が混入した場合、あるいは物流書類そのものに人為的な誤りがあった場合、生成されたプロセス式に沿った物流の監視は無意味になる。従って、プロセス式そのものの正当性を確認することが必要となる。そこで本研究ではこの課題を解決するために、物流システムの満たすべき性質の記述体系を定式化し、さらにそのモデル検査を行うシステムを開発する。先行研究で構築したモデル検査システムでは、物流システムに要求される、"いつか必ず貨物は目的地に輸送される"、"貨物が目的地に着くまでは、途中の寄港地等では下ろされることはない"、というような性質を様相論理の一種である Ambient Logic のサブセットを用いて記述し、生成されたプロセス式が記述した性質すべてを満たしていることを形式的な手法で検査する方法を提案した。本研究ではこのシステムを拡張し、目的1で述べたような複雑な経路を辿る輸送についてもモデル検査を可能とすることを目的とする。さらに、目的1で述べた物流監視システムとこのモデル検査システムを融合し、確実な物流監視を自動的に行うことのできるシステム構築を最終的な目標とする。

3. 研究の方法

海上輸送システムに対する監視システムの構築では次の2項目を実施する。1. 複雑な輸送経路に対応できるプロセス式生成システムの構築、2. RFID 機器制御系の拡張。これらの項目について詳しく説明する。又、目的2で述べたモデル検査システムの拡張に関する実装方法について述べる。

3.1. MAC による物流システムのモデル化

実際の海上貨物輸送では、いくつものフィードバック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、目的地のフィード港へ輸送される。またその経路上で積み込み、積み降ろしが発生する。現在何種類かの輸送形態を想定した実験が可能な段階ではあるが、どのような輸送形態であってもモデル化が可能となるよう処理系の拡張を行う。そのためには中継港での乗り換え作業をモデル化するための仕組みを構築する必要がある。具体的には、中継港で実際に行われる乗り換えのための事務作業(どのコンテナをどの船からどの船に載せかえるかの決定)をモデル化するためのルーティング制御機構を MAC で構築する。コンテナが中継港で積み降ろされた際に、次に載せられるべき船がこれにより自動的に決定されるようになる。さらにこの制御機構さえも物流書類から自動生成できるようプロセス式生成システムを拡張する。

3.2. RFID 機器を用いた監視システムの改良

本研究では現在、数メートルの距離で情報の読み書きが可能な UHF 帯 RFID 機器を 4 台用いて、貨物移動監視実験を繰り返している。しかしより大規模な実験を行うためには、RFID タグ読み書き精度及び読み書き速度を向上させる必要がある。そのため、機器に付属するライブラリの使用方法の高度化、及び読み書きする式そのものの簡素化を行う。

3.3. モデル検査システムの拡張

目的 2 で述べたモデル検査システム構築のために、コンテナ輸送中に船会社から届く可能性のある全てのマニフェストを想定し、全てのマニフェストに対し意味のある組み合わせを抽出し、その組み合わせに基づく状態遷移グラフを作成する仕組みを構築する。先行研究のモデル検査システムで生成される状態遷移グラフに対し組み合わせ数が増大するが、弱双模倣等価に元づく状態数削減の効果により、実用的な時間で検査が終わるよう実装可能である。

4. 研究成果

本研究の主要な成果である 4 つの項目について述べる。

4.1. MAC を用いた監視システムの構築

目的 1 で述べたようなコンテナの乗換えに関する問題に対応できる仕組みを先行研究で提案した物流監視システムに取り入れ、より現実に即した監視ができるシステムを構築した。コンテナの積換えをモデル化するためには、コンテナが仕向港に到着するまでにどの船に積み込み、どの港で積み換えればよいかを指定する必要がある。しかし、実際の海上物流の現場では先に述べたようにコンテナを載せた船が中継港に到着する 1 日前までに次にどの船に載せるのかを決定するため、当初の計画の中で積換の詳細を書類で指定することは無い。そこで本研究では、こ

のような海上物流における動的な経路設定作業をプロセス式に反映させるために、船が中継港に入る前に中継港に設置するサーバ PC にマニフェストを送るように実装した。サーバ PC では積み替え対象となる各コンテナが次にどの船に載せられるのかという情報をマニフェストから取りだし、その情報を持った部分式を生成する。この部分式は definition と呼ばれる MAC のマクロ式の形で生成される。そしてコンテナが積み降ろされる際に definition を基に具体的なプロセス式が展開される事で、動的に設定される実際の物流経路を正確に監視できるようになった。本監視システムについて学会発表し(①, ②, ③, ⑤, ⑥)、現在雑誌投稿準備中である。

4.2. 動的な計画に対応したモデル検査システム

先行研究で提案したモデル検査手法は、物流システムに求められる性質をあらかじめ生成済みのプロセス式が満たすかどうかを確認するものであった。これらの手法では、プロセス式を遷移させ全ての非決定的な選択を表す遷移グラフを生成し、そのグラフを深さ優先で探索し、各ノードの全体式に対して非時相式の検査を木の親子関係を見ながら行い、sometime modality や everytime modality のような時間的な検査を経路を見ながら行っている。ただし単純な方法では、現実の物流システムの持つ非決定的な性質や膨大なコンテナ数に起因する状態空間爆発が容易に発生するため、先行研究では、多重 Ambient Calculus に対して定義される弱双模倣等価性を利用したグラフの枝刈りを行うことで状態空間爆発問題を回避する方法を提案している。

本研究ではそのモデル検査手法を拡張し、動的な物流計画に対応できるモデル検査手法を提案した。具体的には、各中継港に与えられる可能性のあるマニフェストに対応する definition をあらかじめ想定しそれぞれ複数生成する。どの definition を用いるかという選択は、どの経路を選ぶのかという選択を表すことになり、この definition の数だけ遷移グラフのノードから枝分かれを発生させる。これにより、考え得る全ての経路を表す状態遷移グラフを得ることができる。本検査システムについて学会発表し(①), 現在雑誌投稿準備中である。

4.3. MAC のための統合開発環境

物流監視システムにおけるプロセス式生成システムは、マニフェストや他の物流書類から物流システムを正確にモデル化するプログラムである。これは雛形のプロセス式に物流書類から読み取った情報を適宜埋め込み全体のプロセス式を生成するものである。このような仕組みを構築するためには、あらかじめ手作業で適切なプロセス式を考案しなければならないが、そのためには一般のプ

プログラミング言語同様支援環境が不可欠である。先行研究では AC に対応した統合開発環境 (IDE) を提案している。本研究ではその IDE を基礎として、以下の特徴的な機能を有する MAC のための IDE を構築した。(1) MAC 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。MAC 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、MAC 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。以上の成果を、米国テキサスで開催された国際会議にて発表した(④)。

4.4. 物流システムモデル化のために時間拡張された AC の提案

AC を含め、プロセス代数を用いて対象となるシステムをモデル化する場合、式の遷移は記述対象となっているシステムにおいて瞬時的に実行されるイベントに対応するものと解釈され、実行可能なイベント系列の集合によってシステムの振る舞いを指定するものとする。通常のプロセス代数では実時間を記述する枠組みを備えていないため、イベント間の時間間隔は考慮されない。しかし、物流のような複数のオブジェクトの移動が離散的に発生するシステムを表現しようとすると、オブジェクトの移動や積み込みに一定の時間を要する等の時間制約を適切に表現する必要がある。

そこで本研究では、AC を時間拡張した混合型時間アンビエント計算 (以下、HTAC と呼ぶ) と、HTAC を用いた物流計画記述を提案した。HTAC では、AC のケーパビリティに加え、期限切れで無効化する有効期限付きのケーパビリティと、指定した時間だけ待機するケーパビリティを導入した。ケーパビリティの追加により、AC の特徴であった階層構造の動的な変化の表現に加え、タイムアウト動作を特別な構文を用意することなく指定することや、二つのイベント間の発生間隔の上下限を指定することが可能となる。タイムアウト動作の指定により一定時間指定したイベントを行わなければ別のイベントへの変更を指定することができ、イベント間の発生間隔の指定によりオブジェクトの移動時間などを指定できるようになる。以上の結果を論文としてまとめ情報処理学会論文誌に採録された([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 1 件)

- [1] 藤坂吉秀, 稲森啓太, 樋口昌宏, 加藤暢, 物流記述のための混合型時間アンビエント計算, 情報処理学会論文誌: プログラミング, Vol. 10, No. 4, 12-27

(2017).

[学会発表] (計 6 件)

- ① 高岡久裕, 加藤暢, 樋口昌宏, 大山博史, 多重 Ambient Calculus を用いた動的な海上物流計画に対するモデル検査, 情報処理学会 MPS 研究会第 117 回研究会, 2018 年 3 月 1 日, 鹿児島県指宿市民会館.
- ② 高岡久裕, 加藤暢, 多重 Ambient Calculus を用いた物流監視システムの構築, 第 79 回情報処理学会全国大会 2017 年 3 月 16 日, 名古屋大学.
- ③ 加藤暢, A Freight Management System with the Multiple Ambient Calculus, Proc of 2017 International Conference for Leading Young Computer Scientists, p. 41, 2017 年 2 月 27 日, 沖縄コンベンションセンター.
- ④ 加藤暢, 島津愛実, 樋口昌宏, 大山博史 Integrated Development Environment for the Multiple Ambient Calculus for Modeling Freight Systems, Proc of the twelfth annual IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, pp. 367-372, 2016 年 8 月 22 日, 米国テキサス州 The Worthington Renaissance ホテル.
- ⑤ 宮井亜人夢, 加藤暢, 樋口昌宏, 大山博史, 多重 Ambient Calculus を用いた海上物流監視システムのための動的経路設定機能, 第 108 回情報処理学会プログラミング研究会, 2016 年 2 月 28 日, 東京大学.
- ⑥ 加藤暢, 樋口昌宏, Experiment of a Freight Management System with the Multiple Ambient Calculus, Proc of the Second International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry, pp. 191-198, 2015 年 8 月 18 日, マルタ共和国 The Palace ホテル.

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