

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

加藤 暢^{1,a)} 高岡 久裕¹ 樋口 昌宏¹ 大山 博史²

概要: 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の途中で動的に決定される。我々は、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ている。これは、物流計画をプロセス代数の一種である多重 Ambient Calculus(MAC) でモデル化し、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。本稿ではまず本監視システムの実装について述べる。ところで、自動的に生成されるモデルが物流計画の内容を正確に反映していない場合、この監視活動は無意味なものになってしまう。そこで本稿では、このモデルが、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提案する。

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

Model Checking for Dynamic Freight Schedule with Multiple Ambient Calculus

TORU KATO^{1,a)} HISAHIRO TAKAOKA¹ MASAHIRO HIGUCHI¹ HIROSHI OHYAMA²

Abstract: 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 are developing 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. This paper shows the implementation of the system. If the model includes wrong information, however, the system would be useless. Thus, this paper also proposes a model checking system that confirms the model satisfies the properties expected to the freight plan that dynamically changes.

Keywords: Process Algebra, Ambient Calculus, Maritime Logistics, Model Checking

1. 序論

1.1 コンテナ輸送と管理について

海上輸送におけるコンテナ輸送の急速な増加に伴い、コンテナの輸送を RFID タグにより管理する仕組みは近年高い関心を集めている [11], [13]。これらに共通する考え方

は、タグの ID とコンテナ情報をデータベースなどで紐付けしておき、リーダーで読み取った ID をネットワークを介してデータベースを持つサーバに送り、個々のコンテナの動きをサーバ側で監視するというものである。従ってこれらは、無線 LAN やインターネットなどネットワーク環境が常に活用できることを前提とした仕組みになっている。

これに対し我々は、コンテナ情報の管理を中央のサーバに頼るのではなく、タグ (研究初期にはバーコード) そのものには書き込んだ情報を元にコンテナの取扱いを監視する方法を研究してきた [3], [4], [6], [7]。

¹ 近畿大学大学院総合理工学研究科
Kindai univ, HigashiOsaka, Osaka 577-8502, Japan

² 広島商船高等専門学校
NIT Hiroshima College, Toyoda, Hiroshima 725-0231, Japan

a) kato@info.kindai.ac.jp

我々が提案しているこれらの方法は、物流システム全体を Ambient Calculus(AC)[2] またはその拡張である多重 Ambient Calculus(MAC)[5] のプロセス式でモデル化し、プロセス式の遷移としてコンテナの動きを表現するものである。タグに書き込む情報はコンテナの動作を表すプロセス式であり、RFID リーダで読み取ったコンテナの式を船や港などを表すプロセス式と並行合成し、遷移可能かどうかを確認することでコンテナの取扱いの正しさを確認する。これにより、コンテナターミナルで行われている、年間数十万個にも及ぶ目視によるコンテナの積み込み・積み下ろしの確認作業を自動化することを目指している。

1.2 動的な物流計画に対応した監視機能の提案 (目的 1)

実際の輸送では、繁忙期など貨物の量が急激に増加することがあり、通常はコンテナをどの船に載せるのかはあらかじめ決められていない。この決定は輸送中に行われる。

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。本報告の目的の一つは、上記の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文献 [3] で提案した物流監視システムに取り入れ、より現実に対応した監視ができるシステムを提案することである。

1.3 動的な計画に対応したモデル検査の提案 (目的 2)

文献 [4], [6] 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。特に文献 [4] では、多重 Ambient Calculus に対して定義される弱双模倣等価性 [5] 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。本報告のもう一つの目的は、文献 [4] で提案した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することである。

2. 海上物流システム

海上物流の分野では近年ハブ&スポークシステムと呼ばれる輸送システムが普及している。本研究ではハブ&スポークシステム上で複雑な経路を辿るコンテナ輸送を対象とする。

2.1 物流定義書類

物流システムの動作は書類を使って規定され、その書類

に基づいてコンテナの取扱いあるいは船の運航などの作業が行われる。様々な書類の中で、最終的にどの船にどのコンテナを載せるのかはマニフェスト (図 1) と呼ばれる船積み指示書で規定される。

| MANIFEST | | | | | |
|------------|----------------|------------|------------|---------|----|
| for | HONGKONG | | | | |
| at | KOBE | SHIP | OTSUKAMARU | VOY NO. | v2 |
| Booking# | Container# | NEXT SHIP | Last POD | B/L# | |
| 7180076560 | KATO7180087560 | SANADAMARU | HONGKONG | 1345 | |
| 7180076560 | KATO7180087561 | SANADAMARU | HONGKONG | 1595 | |
| 7180076560 | KATO7180087562 | SANADAMARU | HONGKONG | 2354 | |
| 7180076561 | ATM7180087545 | TAKAMARU | OSAKA | 2534 | |

図 1 マニフェストの例

Fig. 1 sample of manifest

コンテナが港に到着する前日までに、次に載せ換えられる船が船会社により決定され、その内容がマニフェストとしてコンテナターミナルに送られる。

3. Ambient Calculus(AC) と多重 Ambient Calculus(MAC)

AC は、Microsoft Research の Luca Cardelli と Andrew D.Gordon によって開発されたプロセス代数であり、動的な階層構造を持つシステムを形式的に表現することができる。この特徴を活かして、ネットワーク上で動的に情報をやり取りするための様々な実装が提案されている [8], [9]。また、この特徴により物流システムの持つ階層構造を簡潔に表現できる。

3.1 記述例と同期のための制御用 ambient

MAC を用いた物流システムの記述例を示す。東京港 TK から大阪港 OSK 行きのコンテナ $co1$ を、東京港のコンテナヤード CY から積み込んで大阪港へ航行する船 $SHIP$ で輸送する物流は式 (1) により表現できる。

$$\begin{aligned}
 &TK[\\
 &\quad CY[\\
 &\quad\quad co1[open\ startLoad \\
 &\quad\quad\quad .\ out\ CY.\ in\ SHIP.\ lcomp[out\ co1] \\
 &\quad\quad] \\
 &\quad] \\
 &] \mid \\
 &SHIP[\\
 &\quad in\ TK.\ startLoad[out\ SHIP.\ in\ CY.\ in\ co1] \\
 &\quad \mid open\ lcomp.\ out\ TK.\ in\ OSK.\ out\ OSK \\
 &], \\
 &TK[] \mid SHIP[in\ TK.\ out\ TK.\ in\ OSK.\ out\ OSK]
 \end{aligned} \tag{1}$$

式 (1) に現れる TK , OSK , CY , $SHIP$ は大域 ambient 名であり、これらの名前をもつ ambient はそれぞれ東京港、大阪港、コンテナヤード、船を表している。 $co1$, $lcomp$, $startLoad$ は個別 ambient 名である。 $co1[]$ はコンテナを表

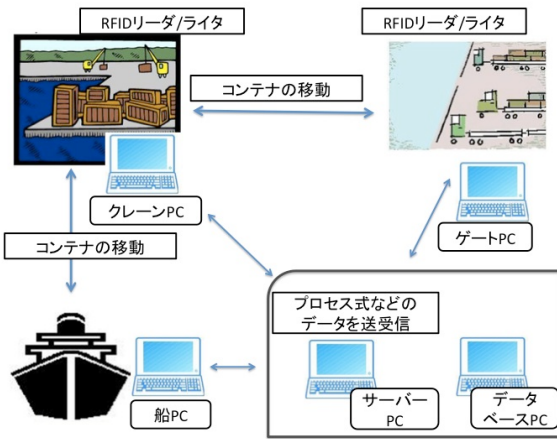


図 2 機器の配置

Fig. 2 Devices location

す ambient であり、本稿では特にこの部分をコンテナ式と呼び、コンテナの本来の動作を表すコンテナの個別式との区別を明確化する。コンテナ式はコンテナの個別式の一部であるが、本稿で提案する物流監視システムにおいてはコンテナ式のみが RFID タグに書き込まれる。

4. 多重 Ambient Calculus を用いた物流監視システム

本システムは、コンテナの移動が物流書類の内容を記述した MAC の全体式の遷移に沿ったものであるかを調べるものである。

4.1 機器の配置と分散処理について

本システムの機器の配置を図 2 に示す。それぞれの機器の役割は以下の通りである。

- ゲートをコンテナが通りコンテナヤードへと入ることを監視するためのゲート PC
- コンテナヤードから船へのコンテナの積み込み、及び船からコンテナヤードへの積み降ろしを監視するためにクレーンに取り付ける PC
- 積み込むべきコンテナが積まれてから、あるいは積み降ろすべきコンテナが積み降ろされてから船が出航するといった同期的な動作を監視するための船 PC
- コンテナに貼り付けた RFID タグに自動的にコンテナ式を書き込む処理を行うため、コンテナ式と RFID タグの ID を管理するためのデータベースを持つ PC
- これらの PC を管理するサーバの役割を持つ PC

本システムは、上記のような複数の PC を用いる分散型となっている。多くのコンテナ移動に関する通信が 1 つのサーバに集中することを避けるという一般的な分散システムの利点ももちろんあるが、RFID 機器で検知したコンテナ移動の情報をタグで管理し、タグから読み取ったコンテナ式を含む個別式が現実の移動と同じように遷移可能であ

るかどうかの検査を、中央のサーバには頼らず現場の PC で行うことが分散型にする理由である。本システムの対象は、屋外でのコンテナ積み込み積み降ろしであり、特に国外のローカル港の PC と継続的に通信可能であるとは限らない。そのため本システムでは、一つのコンテナを積み込みあるいは積み下ろしするごとに、リーダーライトを制御する PC と中央サーバが通信しその妥当性を判断するのではなく、その妥当性を、タグに記述されたコンテナ式を含む個別式に照らし合わせて判断する方法を採用している。

5. プロセス式自動生成機能

プロセス式自動生成機能は、物流監視システムにおいて使用される MAC のプロセス式を、物流書類から読み取った情報を基に自動的に生成するものである。本機能により、船の航路をプロセス式で表現した個別式、各コンテナの積み込み、積み降ろしなどの情報を表現したコンテナの個別式が生成され、これらの式からなる全体式によって物流計画全体をモデル化することができる。船の個別式は、船会社が管理する船の運航表 3 と、マニフェストに記載されている船の名前から生成される。

| PORT | | HONGKONG | | | | | |
|--------|-------|------------------|------------------|-----|-------|-------|-------|
| 船名 | 船種 | 入港予定時刻 | 出港予定時刻 | 全長 | 総トン数 | 前港 | 次港 |
| SHIP A | 一般貨物船 | 2017/11/26/15:00 | - | 75m | 500トン | TOKYO | - |
| SHIP B | 一般貨物船 | 2017/11/26/17:00 | - | 75m | 500トン | TOKYO | - |
| SHIP C | 一般貨物船 | - | 2017/11/27/12:00 | 75m | 500トン | - | DUBAI |
| SHIP D | 一般貨物船 | - | 2017/12/4/12:00 | 75m | 500トン | - | DUBAI |

図 3 コンテナ船運航表の例

Fig. 3 sample of diagram

6. 物流システムのための Ambient Logic

文献 [4], [10] において我々は、様相論理の一種である Ambient Logic(AL)[1] を用いて物流システムが満たすべき性質を記述し、物流システムを表す全体式がその性質を満たすことを確認できるモデル検査システムを提案した。

6.1 検査する性質と論理式

本稿では、物流システムが持つべき性質として次の 2 点を定め、AL の論理式で表現する。

定義 6.1 (目標とする検査項目)

- p1: いつか必ず co は $PORT_B$ に輸送される。

$$\Box \Diamond (\heartsuit co[T] \Rightarrow \heartsuit PORT_B [CY[co[T] | T] | T]). \quad (2)$$

- p2: 港の外では co の積み下しは行われぬ。

$$\Box (\heartsuit co[T] \Rightarrow \neg (co[T] | T)) \quad (3)$$

式 (2) の $CY[co[T] | T]$ の部分はコンテナヤード CY の中にコンテナ co が存在しており、また $co[T] | T$ でコンテナヤード CY の中に、さらにコンテナ co 以外が存在し

てもよいことを示している．◆ $PORT_B[CY[co[T] | T] | T]$ は、プロセスのどこかで $PORT_B[CY[co[T] | T] | T]$ という階層構造が存在することを示している．この式の前に ◆ $co[T] \Rightarrow$ をつけることにより、全体式 $\{P_1, \dots, P_n\}$ の中で co アンビエントを持つ個別式 P_i に対してのみ上記の条件の成立を検査することになる．さらにこの式に $\square \diamond$ をつけることで、どのような遷移が行われたとしてもどこかでその状態が必ず成り立つことを示している．

p2 の性質は、コンテナを積み込む直前または積み下した直後は $(PORT_A[\diamond co[T] | T])$ が成り立ち、積み込み、積み下ろしができるのは、それぞれ港の中でしか行われなないので“コンテナがトップレベル (他の全ての ambient の外) に存在することはない”と言い換えることができ (3) 式で表すことができる．

7. モデル検査システム

本検査システムでは、与えられた MAC の全体式に対して初めに状態遷移グラフ (7.1 節で詳述) を作成する．遷移グラフの各ノードは、遷移途中の全体式の構造を表す構文木を持っている．この構文木の *capability action* のリストと木の親子関係を見ることで可能な遷移を見つけて全体式を遷移させ、遷移後の構文木をもつ新たなノードをグラフに追加する．可能な遷移が複数ある場合 (Ship1 が先に Port に入る場合と Ship2 が先に Port に入る場合等) に枝分かれが生じる．

このようにして生成した遷移グラフを深さ優先で探査し、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い、その全体式が定義 6.1 に示した性質 p1 と p2 を満たすかどうかを確認する．

7.1 状態遷移グラフ

遷移グラフの構造を図 4 に示す．MAC のプロセス式が表す非決定的な性質 (例えばどのコンテナを先に積み下ろしたり積み込むか) による枝分かれは文献 [4] のモデル検査システムでも同じように発生する．それに加え中継港での輸送経路を考慮した分岐も発生させる．

状態遷移グラフの各ノードは、遷移経路を表す実行可能な遷移の情報と、それぞれの遷移経路から到達する子ノード情報、複数のプロセス定義のリストである definition リスト、そして各ノードにおける全体式を構文木として持っている (図 5) ．

図 5 に示した構文木内の個別式内の各ノードは、ambient 名、子 ambient の情報、capability 情報を持つ．この capability 情報と、構文木から成る各 ambient の関係を見ることで次に実行可能な遷移を見つけ、遷移させることで状態遷移グラフの生成を行う．

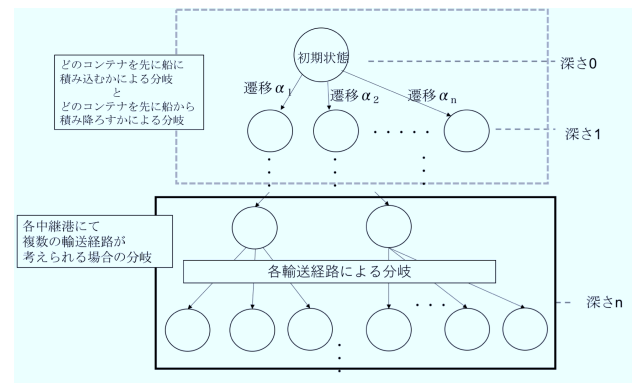


図 4 状態遷移グラフ

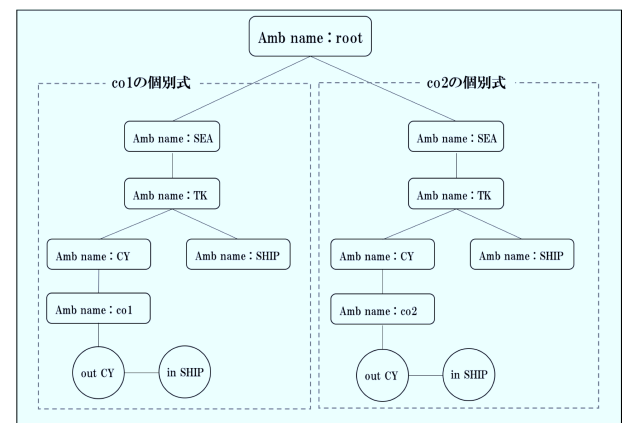


図 5 各ノードが持つ構文木

ここで、 $co1$ と $co2$ は $out\ CY.in\ SHIP$ が実行可能な状態である．そのため、 $co1$ が先に船に $SHIP$ に入る場合と、 $co2$ が先に船に入る場合の 2 つの場合分けが存在するため、単純に考えると図 5 の構文木を持つノードからは 2 つの子ノードが発生する．このようなコンテナが多く存在するほど、コンテナの積み込み順は爆発的に増加し、例えば 1000 個のコンテナの積み込み順は $1000!$ 通り存在してしまう．また、中継港から次の港への輸送経路が複数存在する場合の枝分かれ (図 4 の各輸送経路による分岐) も考慮しなければならないため、ノード数が膨大となり状態空間爆発が発生してしまう．本研究では、前者の枝分かれに対しては文献 [4] で提案された弱双模倣等価関係に基づく方法を用い、状態空間爆発の抑制を図る．

一般に、文献 [5] で定義された弱双模倣等価関係 $\simeq_{\mathcal{L}(I)}$ は任意の AL の論理式 f の真偽を保存するわけではないが、 f の極大非時相式が ◆ $co[T] \Rightarrow f$ の形をしている場合は保存されることが示されている．本研究で行うモデル検査で使用される論理式 (2) と (3) はこの形をしている．従って、検査対象の全体式 \bar{P} のモデル検査を、それと弱双模倣等価でより規模の小さい輸送を表す不変式である I に対するモデル検査に帰着させることができる．この性質を利用し、本研究で提案するモデル検査の手順を以下のように定めた．

- 1). 検査対象の全体式 \bar{P} に対する不変式 I を求める．

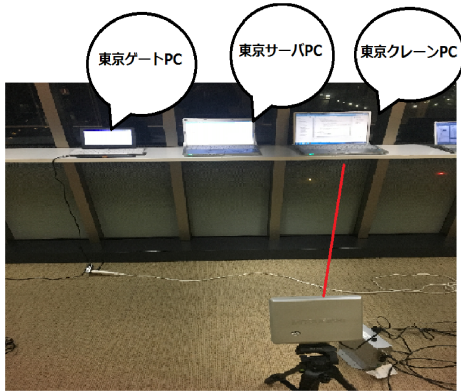


図 6 屋内実験の様子
 Fig. 6 Indoor experiment

- 2). $I \simeq_{\mathcal{L}(I)} \bar{P}$ を確認する .
- 3). I に対し, 状態遷移グラフを生成する .
- 4). 状態遷移グラフを深さ優先探索し, 式 (2) と (3) の真偽を確認する .

8. 実験

本章では, 監視システムの実現性を示すために行った屋内実験, 及びモデル検査システムの性能を確認するために行った実験について述べる. 使用した RFID リーダ・ライタは三菱電機社製の RF-RW312, RFID アンテナは三菱電機社製 RF-ATCP012 である. RF タグは金属対応タグであり, 容量が 500 バイトである.

8.1 実験 1(監視システムの屋内実験)

「コンテナ 5 個を船 A で東京港から大阪港へ運んだ後, 大阪港で別の船に積み換えて香港港へ運ぶ」という想定で行った屋内実験について示す. これは, 本監視システムが動的な経路設定に対応できることを確認するための実験である.

まずコンテナ 5 個が船 A に積み込まれる. その際, タグから取得したコンテナ ID に対応した個別式が期待どおりに遷移したことから, その積み込みに誤りがないことを確認し, 遷移後のコンテナ式がタグに書き込まれた. コンテナの積み込みが完了した後, 船 A を東京港から出航させた. 船 A が東京港から大阪港へ移動している最中に, マニフェストのエクセルファイルをトップサーバから大阪港のサーバ PC に送り, 大阪港のクレーン PC にそれらのコンテナを船 C に積み込むという情報が送られた. この情報を基に乗り換え用の船への積み込み確認が中継港で行われ, 仕向港まで正しくコンテナが移送されたこと確認できた.

8.2 モデル検査実験

物流システムを表現したいくつかの全体式を対象に, 所

期の性質を表現した AL の論理式が満たされるかどうかの検査実験を行った. 実験に使用した計算機の仕様を表 1 に示す.

表 1 実験環境

| | |
|-----|----------------------------|
| OS | Linux 4.4.92(64bit) |
| CPU | Intel Core i7-7700@3.60GHz |
| メモリ | 62.8GByte |

検査実験で確認する物流システムの所期の性質として, 定義 6.1 に示した $p1$ (式 (2)) と $p2$ (式 (3)) を使用した.

8.2.1 仕向港が同じコンテナのみを対象とした検査実験

仕向港が同じ 150 個のコンテナを扱う物流計画を表現した全体式に対する検査実験を行った. この実験では, 全てのコンテナの仕出・仕向港が同じである物流計画に対する全体式が検査対象となるため, その不変式を 1 つのコンテナからなる全体式とした.

この輸送計画において, 各港でコンテナを積み込むことが可能な船, 及びそこから列挙できる全ての輸送経路は図 7 のようなものとした. 東京港では, ドバイ港へ直接向かう船と, 香港港や上海港に向かう船が選択でき, 香港港と上海港ではドバイ港へ向かう船がそれぞれ 2 つずつ選択できる.

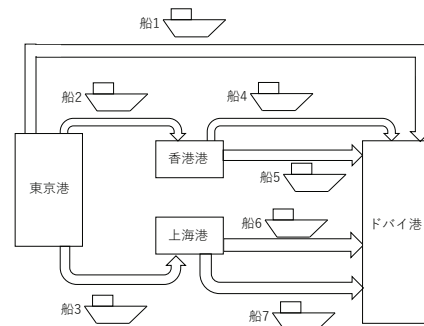


図 7 各港における全ての輸送経路

このような輸送計画に対し, 全てのコンテナが物流システムの所期の性質を満たしているかを確認した. その結果, 全てのコンテナが全ての輸送経路に対し, 仕向港となるドバイ港へ到着するといった結果が得られた. 検査に要した時間は約 117 分 24 秒であった. 内訳は, コンテナ 150 個を輸送する全体式コンテナ 1 個を輸送する全体式との中の弱双模倣等価の検査に 117 分 17 秒, $p1$ の検査に 2 秒, $p2$ の検査に 5 秒である.

8.2.2 仕向港への輸送経路が存在しない可能性のある輸送計画に対する検査実験

この実験では, コンテナ輸送を表した全体式が, 何かしらの不備で間違えた輸送計画となっていた場合, その輸送計画が誤ったものであることを検出できるかを検査する. 輸送経路を図 8 に示す. コンテナの個数は, 東京港から

香港港: 50, 東京港から上海港: 50, 東京港からドバイ港:
 50, 東京港からオランダ港: 50, 計 200 個である .

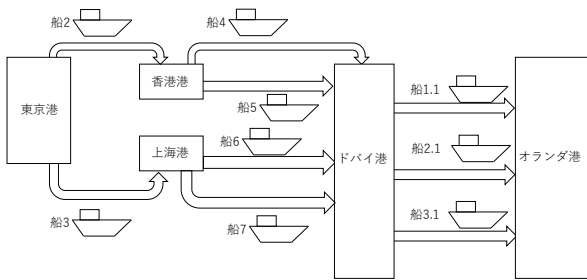


図 8 全ての中継港においてドバイ港へ到達しない輸送経路

図 8 では, 東京港から香港港へ向かう船と上海港へ向かう船が存在する . 香港港へ向かった場合は, 船 4 か船 5 を用いてドバイ港へ向かうことができる . 上海港へ向かった場合は, 船 6 か船 7 を用いてドバイ港へ向かうことができる . しかし, ドバイ港からオランダ港へ向かう船は, 船 1.1, 2.1, 3.1 しか存在せず . これらの船は船 6, 7 の到着よりも前に出航するよう運行表で指定した . このため, 上海を経由してドバイ港にコンテナが到着した際はオランダ港へ向かうことができない . このような到達できない可能性のある仕向港を持つコンテナの個別式からなる全体式に対する検査を行った .

この検査実験の結果, 「全てのコンテナが全ての輸送経路に対し, 仕向港へ到達できる」が偽であるという結果が得られた . 検査に要した時間は約 542 分 42 秒であった . 内訳は, コンテナ 200 個を輸送する全体式とコンテナ 4 個を輸送する全体式との間の弱双模倣等価の検査に 541 分 50 秒, p1 の検査に 14 秒, p2 の検査に 38 秒である . またその際に得られる全体式情報から, 目的港へ到達できなかった原因も特定できる .

9. 結論・今後の課題

本発表では, コンテナ海上物流を多重 Ambient Calculus を用いてモデル化し RFID 機器により自動的に監視するシステムにおいて, 輸送経路が動的に変化する場合でも監視を継続できる機能を提案した . この機能により, 多数のコンテナが乗換えを含む複雑な経路を辿るような輸送に対しても柔軟なモデル化が可能となり, より現実に即した監視システムとすることができた . また, いくつかの実験により本システムの実現性を示した .

現在我々は現在日栄インテック社の協力を得て読書きの精度が高いタグ [12] を用いた実験を行っている . さらに, リーダ/ライターもクレーンに取り付ける固定式のものから, より利便性の高いハンディタイプの機器に移行する予定である . これらの機器を利用することにより, 煩雑さを最小限に抑えた確認作業ができると期待している .

今後これらの機器を使えるようミドルウェアを開発し, 本システムの実用性を高める必要がある .

謝辞 本研究を進めるにあたって, コンテナの取扱いの確認作業や動的な船の決定など実際の物流に関する様々な事項をご教示頂きました商船港運, 後藤回酒店, 日本郵船, 商船三井各社に感謝します . また, RFID タグに関しご協力頂きました日栄インテック社に感謝します . 本研究は科研費 (15K00040, 25330095) の助成を受けたものである .

参考文献

- [1] Cardelli, L. and Gordon, A. D.: Any time Anywhere Modal logics for Mobile Ambients, *POPL'00*, Proceedings of the 2000 ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages, pp. 365–377 (2000).
- [2] Cardelli, L. and Gordon, A. D.: Mobile Ambients, *Theoretical Computer Science*, Vol. 240, pp. 177–213 (2000).
- [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, 情報処理学会論文誌: プログラミング, Vol. 6, No. 2, pp. 1–12 (2011).
- [4] 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, Vol. 5, No. 3, pp. 50–60 (2012).
- [5] 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, Vol. 5, No. 2, pp. 79–87 (2012).
- [6] 加藤暢, 樋口昌宏, 植田直人: 物流システムに対する Ambient Logic モデル検査システム, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 3, No. 1, pp. 73–86 (2010).
- [7] Kato, T. and Higuchi, M.: A Handling Management System for Freight with the Ambient Calculus, *International Journal of Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, Vol. 3, pp. 179–188 (2009).
- [8] 岡田翔太, 馬谷誠二, 林 奉公, 八杉昌宏, 湯浅太一: Safe Ambients のための Java フレームワーク, 情報処理学会論文誌: プログラミング, Vol. 4, No. 3, pp. 26–41 (2011).
- [9] 吉岡信和, 田原康之, 本位田真一: モバイルエージェントによる柔軟なコンテンツ流通を実現するアクティブコンテンツ, 情報処理学会論文誌: データベース (TOD), Vol. 44, No. SIG18, pp. 45–57 (2003).
- [10] 加藤暢, 樋口昌宏, 植田直人: 物流システムに対する Ambient Logic モデル検査システム, 情報処理学会論文誌: 数理モデル化と応用, Vol. 3, No. 1, pp. 73–86 (2010).
- [11] 東芝ロジスティクス: 東芝ロジが異業種向けに次世代グローバル混載サービス拡大, カーゴニュース, 10月13日, p. 1 (2015).
- [12] 日栄インテック: RF タグ『金属対応 UHF パッシブタグ』, <http://www.ipros.jp/product/detail/2000229559/> (2015).
- [13] 野村総合研究所: 戦略的国際標準化推進事業 (国際標準共同研究開発事業: 海上コンテナトラッキングシステムに関する標準化に係るフィージビリティスタディ) 成果報告書, www.meti.go.jp/meti_lib/report/2012fy/E002582.pdf (2012).