

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 12 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560532

研究課題名(和文) マルチカーエレベータ群管理制御器の形式手法に基づく開発システムの実現

研究課題名(英文) Realization of Multi-Car Elevator Group Controller Development System Based on Formal Methods

研究代表者

山口 真悟 (Yamaguchi, Shingo)

山口大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：00294653

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：1. マルチカーエレベータシステムのペトリネットモデル、状態遷移モデル及び数理計画モデルと、その解析法を開発した。2. 群管理制御器の仕様を時相論理により記述する方法を確立した。3. 群管理制御器の基本動作を状態遷移で形式化し、それらを組み合わせて新たな動作を構築する方法を開発した。4. 状態遷移モデルに対し、モデル検査ツールSPINを適用する方法を開発した。5. 数理計画モデルに対し、制約プログラミングと混合整数計画問題のハイブリッド解法を開発した。そして1.～5.の成果を組み合わせ、マルチカーエレベータシステムの群管理制御器を形式手法に基づいて開発するシステムを実現した。

研究成果の概要(英文)：1. We proposed a Petri net model, a state transition model, and a mathematical programming model of multi-car elevator systems, and gave their analysis methods. 2. We established a method of specifying requirements for group controllers as temporal logic expressions. 3. We formalized basic operations of group controllers as building blocks, and proposed a method to design a new group controller by combining them. 4. We developed a method to apply SPIN model checker to the state transition model. 5. We developed a hybrid method of constraint program and mixed integer program for the mathematical programming model. And combining the results of 1. to 5., we realized a system for developing multi-car elevator group controller on the basis of formal methods.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：エレベータ 形式手法 モデル化 ペトリネット モデル検査 数理計画問題 群管理 制御工学

1. 研究開始当初の背景

横浜ランドマークタワーは日本有数の高層ビルであるが、このビルにおいてエレベータが占有する空間は全体の1/3に達するといわれている。近年、ビルの高性能化や大規模化に伴い、エレベータの評価指標の中心は従来のサービス時間や待ち時間から輸送能力へ移行する傾向がある。輸送能力の向上を図る技術として、マルチカーエレベータが脚光を浴びている。マルチカーエレベータは一つの昇降路に複数台のカゴを設置し、それぞれを独立に運転できるエレベータである。理想的には、同一の昇降路面積で輸送能力をカゴの数だけ倍増することができる。しかしながら、カゴ同士の衝突やデッドロックという従来のエレベータにはなかった新しい問題が生じる。衝突やデッドロックといったマルチカーエレベータ特有の制約を満たしつつ、マルチカーエレベータシステムのポテンシャルを發揮する群管理制御器が必要である。

報告者らは2007年に電子情報通信学会基礎・境界ソサイエティの活性化事業の一つとして、マルチカーエレベータシステムの群管理制御器を開発するコンペティション（CSTソリューションコンペティション2007）を実施している。それ以来、当該コンペティションは合計3回実施され、多種多様な群管理制御器が提案されている。しかしながら、それらは理論的な解析が行われておらず、未だ断片的な成果にとどまっている。またエレベータ群管理制御器の形式的なモデル（例えばS. MarkonらのS-ring）も提案されているが、マルチカーエレベータシステムを対象としたものではない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、マルチカーエレベータシステムの群管理制御器を形式手法に基づいて開発するシステムを実現することである。これにより単に効率が良いだけでなく、安心・安全で省エネルギーかつ乗り心地の良い群管理制御器の開発を促し、マルチカーエレベータシステムの実用化の加速を目指すものである。

本研究には3つの学術的な特色がある。1つ目の特色はマルチカーエレベータシステムならびに、その群管理制御器の形式的なモデルを提案することである。本モデルが研究開発の共通基盤となれば、当該領域の研究成果が比較可能になり、その結果、研究開発が促進されるものと考えている。2つ目の特色は、マルチカーエレベータシステムの群管理制御アルゴリズムを体系化することである。マルチカーエレベータシステムの群管理制御アル

ゴリズムの基本的な枠組みとアルゴリズム部品を抽出し、新たなアルゴリズムを創造する基礎を提供できると考えている。3つ目の特色は群管理制御器の検証にモデル検査を活用することである。検証を自動的かつ網羅的に行うモデル検査は、安心・安全が最優先のエレベータシステムの検証に必須の技術になると考えている。本研究の成果は、プレコンペティティブ（precompetitive）な領域であるマルチカーエレベータシステムの群管理制御を研究開発するための共通基盤を実現するものであり、オープンイノベーションによる研究開発を導くものと期待される。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために、まず次の①～⑤の項目を明らかにする。

- ① マルチカーエレベータシステムの形式的なモデル
マルチカーエレベータシステムの動作を表すグラフィカルで数学的かつシミュレーション可能なモデルを構築する。
- ② 群管理制御器の形式的な仕様記述
①のモデルに基づいて、群管理制御器の論理的な仕様や性能的な仕様を形式的に記述する。
- ③ 群管理制御器の系統的な構築法の確立
先行研究により得られた群管理制御器の制御アルゴリズムを解析し、それらの枠組みを整理することによって、新たな制御アルゴリズムの構築法を確立する。
- ④ 群管理制御器のモデル検査法
③で開発した群管理制御器が②の論理的な仕様を満たすかどうかを検証する方法を明らかにする。
- ⑤ 群管理制御器の性能評価法
③で開発した群管理制御器が②の性能的な仕様を満たすかどうかを検証する方法を明らかにする。

そして、①～⑤の成果を合わせて、

- ⑥ 群管理制御器開発システムの実現
マルチカーエレベータシステムの群管理制御器を形式手法に基づいて開発するシステムを実現する。

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① マルチカーエレベータシステムの形式的なモデル

マルチカーエレベータシステムに対する3種類の数理モデルを提案し、それらの特性を明かにした。以下では、昇降路数が x 、1昇降路当たりのカゴ数が y 、サービス階床数が z のエレベータシステムを $xSyCzF$ と記すことにする。

一つ目はペトリネットモデルである。図1に $2S2C5F$ のモデルを示す。モデル化の詳細

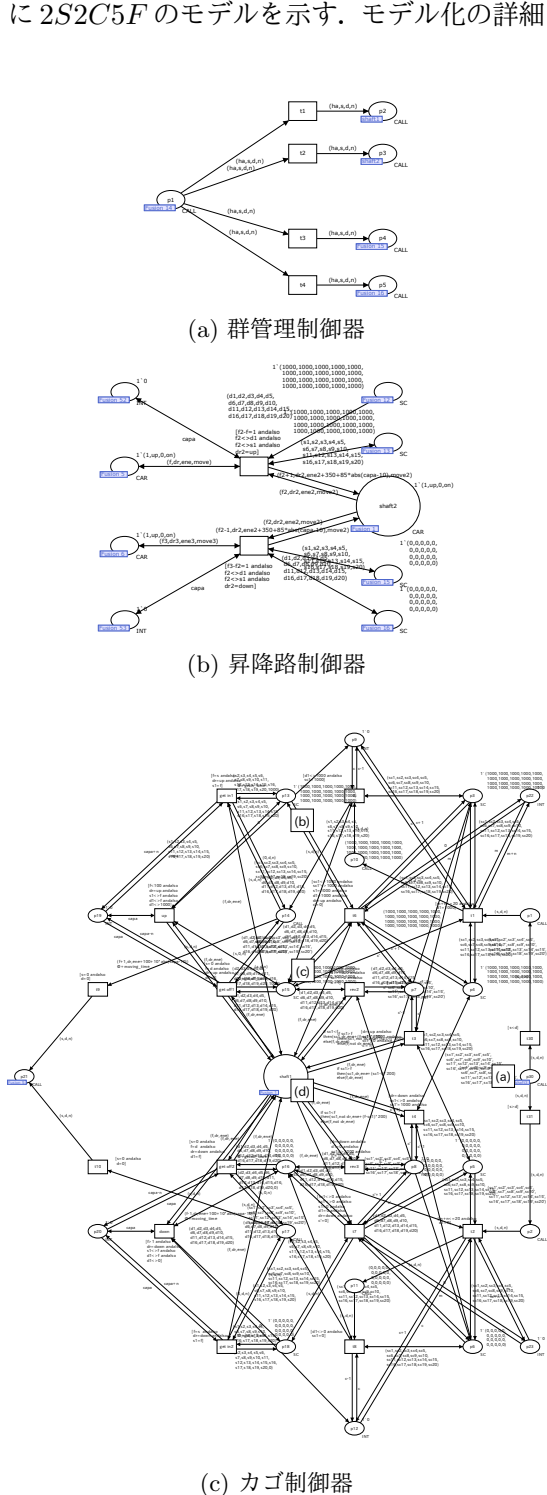
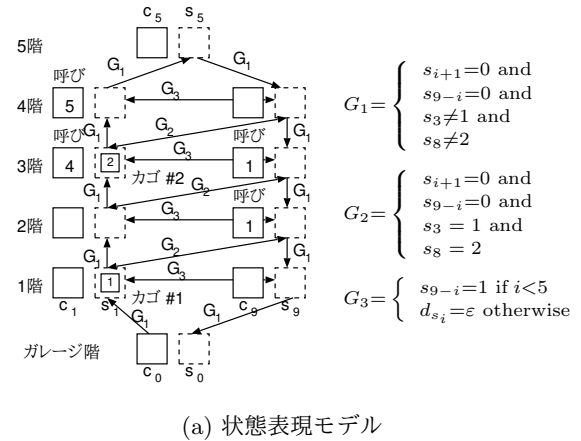


図1: $2S2C5F$ のペトリネットモデル

は雑誌論文1, 学会発表1, 2, 6, 8を参照されたい。ペトリネットモデルの特徴は整備された理論体系とCPN Toolsに代表されるリッチなツールが利用可能なことである。

二つ目はS-ringを拡張した状態遷移モデルである。図2に $1S2C5F$ のモデルを示す。モデル化の詳細は学会発表3, 5を参照されたい。状態遷移モデルの特徴は簡潔さと表現能力である。



(a) 状態表現モデル

$\xi(t)$	到着	π	$\xi(t+1)$	$\xi(t)$	到着	π	$\xi(t+1)$
000xx	無		000xx	01001	無	0	00011
	有		100xx		2		
100xx	有		10000	11001	有	0	10011
					1		
01000	無	0	00100	11001	有	0	10011
		2	01000			1	
		3	00010			2	
	有	0	10100	11001	有	0	10011
		1	01000			1	
		2	11000			2	
11000	有	0	10100	01010	無	0	00100
		1	01000			2	01010
		2	11000			3	
		3	10010			3	
001x0	無		001x0	11010	有	0	10100
	有		101x0		1	01010	
101x0	有		101x0	11010	有	0	10100
						2	11010
01100	有	0	01100	11010	有	0	10100
		2				1	01010
		3	00110			2	11010
11100	有	0	11100	01110	有	0	01110
		1	01100			2	11010
		2	11100			3	
	有	0	11100	11110	有	0	11110
		1	01100			1	01110
		2	11100			2	11110
					3		

(b) 状態遷移表

$$\pi^g = \begin{cases} 0 & \text{if } s_i=1, c_i=5 \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$$

(c) ポリシー (グリーディ)

図2: $1S2C5F$ の状態遷移モデル

三つ目は数理計画モデルである。カゴ制御と割り当て問題を混合整数計画問題としてモデル化した。モデル化の詳細は学会発表4, 7, 9を参照されたい。目的関数はサービス完

了時間と未処理呼び数、速度の絶対値和の重み付き線形和である。速度の絶対値和はカゴが不必要に動くことを防ぐために加えている。制約条件は、衝突回避のため同じ昇降路内のカゴ同士が隣接しないこと、カゴの乗車人数が定員以下であることなどである。数理計画モデルの特徴は多数の制約条件を扱える表現能力と高性能なソルバーが利用できることである。

② 群管理制御器の形式的な仕様記述

群管理制御器の仕様を線形時相論理により記述する方法を明らかにした。詳細は学会発表3を参照されたい。これにより時間経過によって変化する性質を検査することを可能にした。また状態遷移モデルに対する具体的な記述例のリストを作成した。

表 1: 群管理制御器の仕様記述例
カゴがあるとき、呼びは無くなる $\square((s[z]==1 \ \&\& \ prob>=30) \rightarrow (c[z]==0))$
必ず呼びは処理される $\square((c[z]==1) \rightarrow \langle (c[z]==0) \rangle)$
駆け込み乗車を防ぐ $\square((s[z]==1 \ \&\& \ 0<=prob \ \&\& \ prob<30) \rightarrow X(c[z]==1))$

③ 群管理制御器の系統的な構築法の確立

群管理制御器の基本動作を状態遷移で形式化した。実際、マルチカーエレベータの群管理で典型的な三つの制御方式(グリーディ、昇降路内一方向運転、ゾーン運転)をモデル化した。詳細は学会発表2を参照されたい。グリーディ方式は既に述べたとおりである。昇降路内一方向運転方式では、昇降路内のカゴ同士の進行方向が向かい合う動作は行わない。1S2C5Fの昇降路内一方向運転方式を表現したポリシーを以下に示す。

$$\pi^s = \begin{cases} 0 & \text{if } s_i=1, c_i=5 \\ 1 & \text{otherwise} \\ 2 & \text{if } i=5, s_6 \neq 1 \text{ or } i=0, s_1 \neq 2 \end{cases}$$

ゾーン運転方式では乗客の乗り降りが行われる階全体を昇降路内のカゴ台数分のゾーンに分割し、各カゴが担当するゾーン内で発生する呼びに対応する。1S2C5Fのゾーン運転方式を表現したポリシーを以下に示す。

$$\pi^z = \begin{cases} 0 & \text{if } s_i=1, c_i \geq 3 \\ 1 & \text{otherwise} \\ 3 & \text{if } s_2=1 \text{ or } i \geq 7, s_i=2, d_2=\varepsilon \end{cases}$$

報告者らはパーキング戦略などの新しい運転方式を提案している。詳細は雑誌論文3, 4, 5を参照されたい。ポリシーによる運転方式の部品化を進め、それらを合成することによって、さらに効率の良い運転方式が得られると考えられる。

④ 群管理制御器のモデル検査法

群管理制御器の状態遷移モデルが論理的な仕様を満たすかどうかをモデル検査ツールSPINを用いて検証する方法を開発した。詳細は学会発表3, 5を参照されたい。さらに時間を含めたモデル検査を目指し、時間ペトリネットモデルを時間オートマトンに変換し、モデル検査ツールUPPAALを利用する方法も検討した。詳細は雑誌論文2を参照されたい。

⑤ 群管理制御器の性能評価法

群管理制御器が性能的な仕様を満たすかどうかを評価するために、群管理制御器の数理計画モデルに対し、制約プログラミングと混合整数計画問題のハイブリッド解法を開発した。計算機実験を通じて、提案法が従来法よりも効率的に乗客を輸送できることを示している。詳細は学会発表4, 7, 9を参照されたい。

⑥ 群管理制御器開発システムの実現

①~⑤の成果を合わせて、マルチカーエレベータシステムの群管理制御器を形式手法に基づいて開発する手法を開発した。詳細は学会発表3, 5を参照されたい。

<< 群管理制御器の開発手法 >>

入力：要求仕様

出力：要求仕様を満たした群管理制御器の状態遷移モデル

1° (設計ステップ) 群管理制御器を状態遷移モデルとして設計する。

2° (テストステップ) 設計結果をPromelaや線形時相論理式で記述し、SPINでテストする。テストの結果が真ならば設計結果を出力する。そうでなければ群管理制御器を再設計する。

そして、この手法を実行する群管理制御器開発システムÉclairを実現した。現行のÉclairは状態遷移モデルとしてS-ringを採用している。Éclairの動作画面を図3と4に示す。

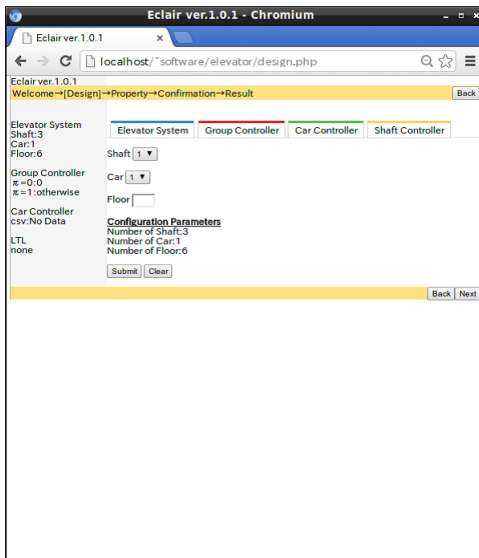


図 3: データの登録画面

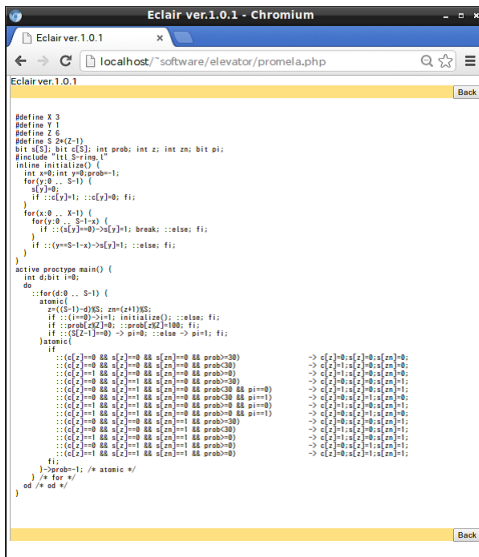


図 4: 変換により得られた Promela

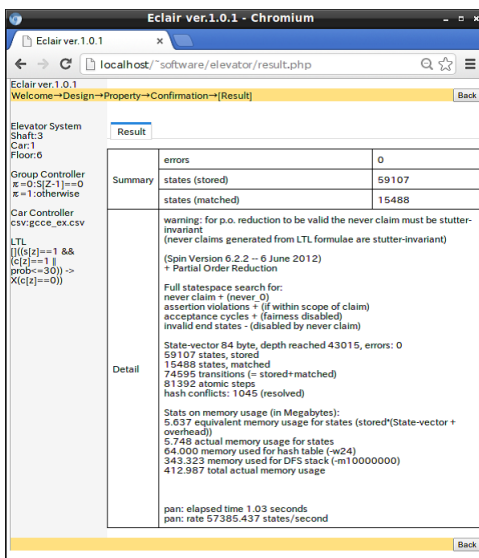


図 4: 検査結果

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト, 今後の展望

本研究の研究成果を社会・国民に発信するため, (i) 2013年10月1~4日, 幕張メッセで開催の国際会議 IEEE GCCE 2013において, 報告者らがオーガナイザとしてスペシャルセッション「Smart Elevators」を開催した。また (ii) 2014年3月6~7日, 愛媛大学で開催の電子情報通信学会システム数理と応用研究会において, 報告者らがオーガナイザとしてスペシャルセッション「スマートエレベータ」を開催した。さらに, システムやモデルデータは『<http://web.cc.yamaguchi-u.ac.jp/~shingo/mce/>』において公開している。以上の活動により, 本研究の成果は広く知れ渡りつつある。現在, 成果をまとめた1編の論文を学術雑誌に投稿中である。今後の活動は, 本研究の成果を当該分野の研究開発の共通基盤として浸透させていくことがあげられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (5 件)

- ① Shingo Yamaguchi, Norihide Ishida, “Multi-Car Multi-Shaft Elevator System Design Problem and a Solution Method Using CPN Tools,” International Interdisciplinary Journal INFORMATION, 査読有 (掲載決定) .
- ② Shota Nakano, Shingo Yamaguchi, “An Efficient Translation Method from Timed Petri Nets to Timed Automata,” IEICE Transactions Fundamentals, 査読有, vol.E95-A, no.8, pp.1402–1411, 2012.
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.1402
- ③ Alex Valdivielso Chian, Toshiyuki Miyamoto, “Knowledge Reuse Method to Improve the Learning of Interference-Preventive Allocation Policies in Multi-Car Elevators,” IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, vol.E95-A, no.5, pp.990–995, 2012.
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.990
- ④ Alex Valdivielso Chian, Toshiyuki Miyamoto, “Performance Evaluation of an Option-Based Learning Algorithm in Multi-Car Elevator Systems,” IEICE Transactions on Fundamentals, 査読有, vol.E95-A, no.4, pp.835–839, 2012.
DOI: 10.1587/transfun.E95.A.835

- ⑤ Alex Valdivielso Chian, Toshiyuki Miyamoto, “Multicar-Elevator Group Control Algorithm for Interference Prevention and Optimal Call Allocation,” IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, 査読有, Part A, vol.41, no.2, pp.311–322, 2011.
DOI: 10.1109/TSMCA.2010.2064766

[学会発表] (9 件)

- ① 石田憲秀, 山口真悟, “マルチカーマルチ昇降路エレベータシステムの設置問題に対する CPN Tools を用いた解法と考察”, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2014 年 3 月 6 日, 愛媛大学 (松山市) .
- ② 石丸隼也, 山口真悟, “マルチカーシングル昇降路エレベータの群管理制御アルゴリズムを性能評価するための簡易的な数理モデルの提案”, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2014 年 3 月 6 日, 愛媛大学 (松山市) .
- ③ 長藤和也, 山口真悟, “S-ring と SPIN に基づくエレベータ群管理制御器モデル検査システム Éclair の実現と検査能力について”, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2014 年 3 月 6 日, 愛媛大学 (松山市) .
- ④ 峰岸達也, 宮本俊幸, “マルチカーエレベータのかご制御と割り当て問題に対する CP/MIP ハイブリッド手法”, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2013 年 11 月 7 日, 花巻南温泉峡 渡り温泉さつき (花巻市) .
- ⑤ Shingo Yamaguchi, Kazuya Nagafuji, “A formal method of developing elevator group controllers based on S-ring and SPIN,” Proc. of IEEE GCCE 2013, 査読有, 2013 年 10 月 4 日, 幕張メッセ (千葉市) .
- ⑥ Ishida Norihide, Shingo Yamaguchi, “Multi-car multi-shaft elevator system design problem and a solution method based on CPN Tools,” Proc. of IEEE GCCE 2013, 2013 年 10 月 4 日, 幕張メッセ (千葉市) .
- ⑦ Tatsuya Minegishi, Toshiyuki Miyamoto, “A Study of Car Control and Assignment Problem in MCE Systems Using Hybrid Method,” Proc. of IEEE GCCE 2013, 査読有, 2013 年 10 月 4 日, 幕張メッセ (千葉市) .
- ⑧ Shingo Yamaguchi, Norihide Ishida, Ryohei Ueda, “Modeling and Model Checking of Single-Car Multi-Shaft Elevator Systems on CPN Tools,” Proc. of ITC-CSCC 2012, 査読有, 2012 年 7 月 18 日, 北海道大学 (札幌市) .
- ⑨ 峰岸達也, 宮本俊幸, “混合整数計画問題を用いたマルチカーエレベータのかご制御と割り当て問題に関する研究”, 電子情報通信学会システム数理と応用研究会, 2012 年 7 月 3 日, 京都リサーチパーク (京都市) .

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山口 真悟 (YAMAGUCHI, Shingo)
山口大学・大学院理工学研究科・准教授
研究者番号：00294653

(2) 研究分担者

宮本 俊幸 (MIYAMOTO, Toshiyuki)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：00294041