

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560483

研究課題名(和文) 詳細モデルに基づくマルチカーエレベータ群管理システムの高度化

研究課題名(英文) Development of Group Control for Multi-Car Elevator Systems based on a Detailed Model

研究代表者

田中 俊二 (Tanaka, Shunji)

京都大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：90324657

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円、(間接経費) 750,000円

研究成果の概要(和文)：各エレベータシャフトに複数台のかごを設置するマルチカーエレベータシステムの群管理に関する研究を行った。各階での停車時間が事前にはわからないという現実的なシステムのモデルを考慮してかご間の逆走・衝突を回避する方法として、かごが次に訪れる階を動的に最適化する方法を構成した。また、即時案内方式・非即時案内方式の両方式のもとで乗客をかごに割り当てる呼び割り当て方法として、各かごの分担階を決めるゾーニングと、乗客のサービス完了時間の予測値を最小化する方法を組み合わせた方法を提案した。さらに、計算機シミュレーションを行って、衝突・逆走回避方法の妥当性や割り当て方法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：This study treated a group control problem for multi-car elevator systems where more than one car is installed in every elevator shaft. A collision and reversal avoidance method that dynamically optimizes the floors to be visited next by cars was constructed based on a realistic model of the system such that floor stoppage time of a car cannot be known in advance. Next, call allocation methods under immediate and delayed guidance policies were proposed that combine zoning and minimization of predicted passenger service time. Then, the validity of the collision and reversal avoidance method and the effectiveness of the proposed group control method were investigated and verified by computer simulation.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・システム工学

キーワード：マルチカーエレベータ 群管理 モデル化 衝突回避 呼び割り当て 最適化

### 1. 研究開始当初の背景

各エレベータシャフトに複数台のかごを設置するマルチカーエレベータシステムは、フロア専有面積を増加させることなく輸送能力を向上させることができるエレベータシステムとして近年注目を集めている。実際、各シャフトに2台のかごを設置するシステムは、すでに Thyssenkrupp 社により実用化されている (TWIN)。一方、研究レベルでは、マルチカーエレベータのかごを群として効率よく制御するための群管理アルゴリズムを競う、学生対象のコンペティションが開催されている。そして、このコンペティションで用いられたシミュレータ MceSim をベースに群管理に関する研究が行われてきている。しかし、このシミュレータは群管理の性能評価に主眼を置いているため、各階での停車時間は乗客人数にかかわらず一定、かごの移動速度は1秒単位でステップ状に変化する、など、マルチカーエレベータシステムのモデルとしては単純化されたものが用いられていた。より現実に近いモデルに基づく研究も存在するものの、同一シャフト内のかご同士の衝突回避を単純化するためにかごの移動方向に制限をかけていた。また、研究代表者らの研究においては、かごの移動方向に制限をかけていないものの、シャフトあたりのかご台数が2台の場合しか扱うことができなかった。

### 2. 研究の目的

1. を踏まえ、シャフト内に2台以上のかごを設置するマルチカーエレベータシステムに関する研究として、

- ・かごの加減速や加減速度変化率も考慮する
- ・かごの移動方向に制限を設けない
- ・各階には行き先階を直接登録するボタンを設ける(行き先階登録方式)が、自分の行き先階がすでに登録されている場合は、あらかじめボタンを押すことはしない。したがって、各階で待機中の乗客人数を正確に知ることはできない、また、各階での停車時間は事前に知ることはできない。

というより現実的なシステムのモデルに基づいて、かご間の衝突回避や乗客をかごに割り当てる方法(呼び割り当て方法)の検討を行う。そして、マルチカーエレベータ群管理の高度化を目指す。

### 3. 研究の方法

マルチカーエレベータシステムの詳細なモデルに基づいて群管理を考える場合、直接的に詳細モデルを扱うのが困難であることが予想される。そこで、群管理システムとして、簡略モデルを内部に持つ図1の構造を想定する。ここで逆走とは、乗車中の乗客の進行方向とは逆方向にかごが移動する運行を指す。乗客に不快感を与えるため、このような運行は通常のエレベータシステムでは禁止されている。この群管理システムにより、

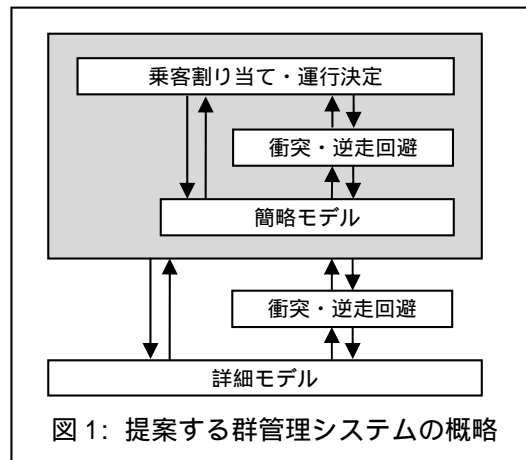


図1: 提案する群管理システムの概略

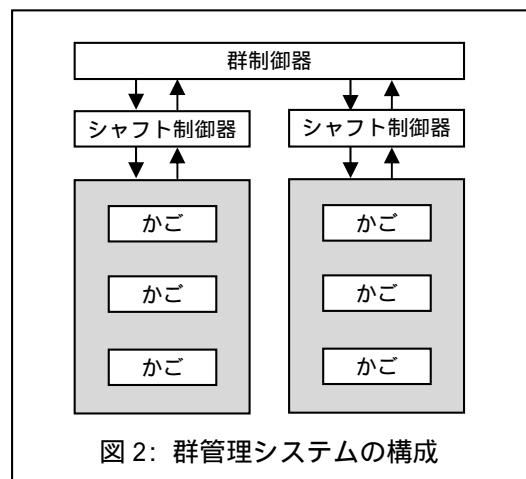


図2: 群管理システムの構成

詳細モデル上で衝突が起こらないことを保証しつつ、簡略モデルを用いて衝突・逆走回避や呼び割り当ての評価・最適化を行うものとする。

具体的な検討項目は以下のとおりである。

#### (1) 簡略モデルの検討・構築

簡略モデルとしてふさわしいモデルを構築する。このために、簡略モデル上で衝突・逆走回避および運行決定を行った結果と、詳細モデルに基づくシミュレータ上での結果との比較検討を行う。

#### (2) 衝突・逆走回避方法の検討

(1)の知見をもとに、詳細モデルに対する衝突・逆走回避方法の検討を行う。とくに、シャフト内のかご台数が3台以上の場合にも適用できるように、アルゴリズムを改善する。

#### (3) 呼び割り当て・運行決定アルゴリズムの検討

(1),(2)を踏まえ、乗客をかごに割り当てる呼び割り当て方法・割り当てられた乗客を運んでいくための運行を決定する方法を検討する。その際、乗客に乗車すべきシャフト・かごを案内する方式として、フロアでボタンが押されるとすぐに案内する即時案内方式と、乗車すべきかごが到着する直前に案内する非即時案内方式の両者を比較検討する。前者は乗客にとって利便性が高く、後者は呼び割り当ての自由度が高いという特徴がある。

以上3点について、図2に示す構造を持つ

群管理システムを想定し、研究を行う。図中、群制御器が呼びの割り当ておよび各かごの基本的な運行スケジュールの生成を担当し、シャフト制御器が衝突・逆走回避を担当するものとする。

#### 4. 研究成果

##### (1) 簡略モデルに関する検討

簡略モデルの検討を行うために、呼び(乗客)の割り当てがあらかじめ与えられているものとして、1本のシャフト内で衝突・逆走が起こらないようかごを運行させる問題を考えた。かごの移動速度は一定で単位時間に1階移動するとした簡略モデルを対象とし、すべての乗客が時刻0に発生するオフライン状況下においてかごの運行を決定する問題を混合整数計画問題として定式化するとともに、分枝限定法による解法を構成した。また、乗客が次々に発生するオンライン状況下における運行決定問題も扱えるよう定式化を拡張した。そして、シミュレーションにより簡略モデルの妥当性を検討した。その結果、以下の知見が得られた。

(a) 停車時間(扉開閉時間・乗降時間)を考慮しないモデルでは、かご台数増加による輸送効率改善効果がほとんど見られない。したがって、マルチカーエレベータにより輸送効率が改善するのは、かごあたりの停車回数を減らすことで停車ロスを低減できるためであると考えられる。簡略モデルを構築する際には、停車時間を適切に考慮する必要がある。

(b) 呼び割り当てをランダムに決定した場合とゾーニング(かごごとに担当階を決めて乗客を割り当てる方法)により決定した場合を比較すると、ゾーニングを用いた方がかご台数増加による輸送効率改善効果が高かった。これは、マルチカーエレベータによる輸送効率改善には適切な呼び割り当ても重要であることを示唆している。

##### (2) 衝突・逆走回避方法

図2の群管理システムにおけるシャフト制御器は、群制御器により生成されたかごの基本的な運行(そのかごに割り当てられた乗客の呼び階・行き先階を巡る順序)を衝突・逆走が発生しない運行に修正し、実際にかごを動かす役割を担う。このシャフト制御器における衝突・逆走回避方法として、既提案の動的な最適化に基づく方法の改善を行った。

本方法では、各階での停車時間を事前に知ることができない詳細モデル上での衝突・逆走回避を実現するため、かごが移動可能な時点で、次に向かう階を衝突・逆走が発生しないよう決定する。その際、移動可能なかごについては次に向かう階で、移動不可能なかごは現在の階で、それぞれ無限時間停車するものとみなす。そして、いずれかのかごが移動可能となった時点で再びかごが次に向かう階を決定する。これを繰り返し適用することで衝突・逆走が発生しない運行を生成

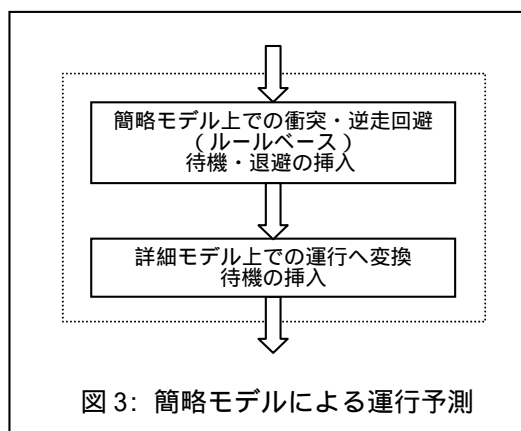


図3: 簡略モデルによる運行予測

する。基本的には、群制御器が決定した階を巡る順序を守りながら、それらの階における待機時間を延長する(待機挿入)、あるいは別の階への退避を挿入することで衝突を回避するが、この方法では逆走が回避不可能となる場合がある。そのような場合に限り、群制御器が決定した階を巡る順序をシャフト制御器において変更できるものとした。さらに、かごが動くことのできない状況(デッドロック)を回避する枠組みを組み込んだ。

さらに、よりよい衝突・逆走回避を行うため、いくつかの評価指標を導入して、それらを最適化するように次に向かう階を決定するものとした。なかでも重要な評価指標は次の3つである。

(a) 群制御器が決定した階を巡る順序を変更したかご台数

(b) 不自然な運行(かごの進行方向と同一方向の乗客を乗車させず通り過ぎてしまう、など)となるかご台数

(c) 乗客のサービス完了時間平均(または2乗平均)

ここで、サービス完了時間とは、乗客がフロアにやってきてから、自分の行き先階でかごを降車し終わるまでの時間を指す。(a)は、運行スケジュールの不要な変更を抑制するためのものであり、(c)はより効率的な運行を生成するためのものである。

(b),(c)の評価指標の計算には、次に向かう階以降の運行スケジュールが必要となる。そこで、この運行スケジュールを簡略モデルにより予測するものとした。

簡略モデルとしては、かごの加減速および停車時間を考慮しないものを用い、そのモデル上でルールにより衝突・逆走回避を行う。しかし、(1)の検討により停車時間を考慮することの重要性が明らかとなっているため、得られた簡略モデル上での運行スケジュールを、待機を適切に挿入して詳細モデル上での運行スケジュールに変換するものとした(図3)。このようにして得られた運行スケジュールをもとに評価指標を計算する。

##### (3) 呼び割り当て・運行決定方法の検討

割り当てられた乗客を運ぶための運行にはセレクトティブコレクティブ運行(通常のエレベータシステムにおいて広く用いられて

いる運行方式)を用いるものとして、以下の検討を行った。

#### (a) ゾーニングの効果の検討

乗客の平均サービス完了時間を最小化するようにかごに割り当てる方法と、シャフト内のかご選択はゾーニングにより行い、シャフト選択においてのみ平均サービス完了時間を最小化する方法の比較を行った。ただし、運行スケジュールの予測には、(2)の衝突・逆走回避と同様、図3の簡略モデルに基づく方法を用いるものとして、平均サービス完了時間の計算を行った。その結果、ゾーニングを併用する方がより良好な結果が得られた。そこで、ゾーニングにおける各かごの担当階を決定する方法として、確率モデルに基づく方法を検討したところ、シミュレーションの結果と比較して、良好な近似を与えることが確認された。

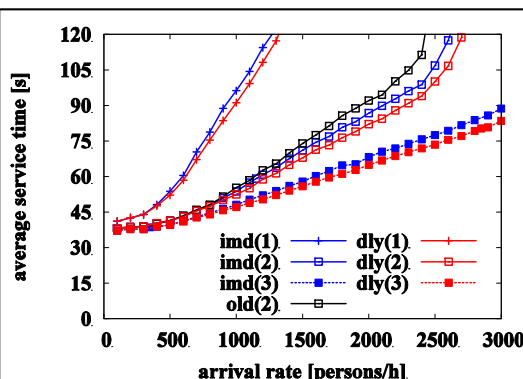
#### (b) 既提案の方法との比較

シャフトあたりのかご台数が2台の場合に関して、研究代表者はすでに同様な枠組による衝突・逆走回避方法を提案している。しかし、この方法では簡略モデルの構築が複雑で、かご台数が3台以上の場合に拡張することが困難であった。そこで、呼び割り当てには同じゾーニングを併用する方法を用いるものとして、既提案の衝突・回避方法(および簡略モデル)と今回提案した方法の比較を行った。図4に、計算機シミュレーション結果の一例(シャフト数4, 30階建て、出勤時を模擬した交通)を示す。図において、横軸は1時間あたりの乗客発生人数、縦軸は最終的に得られた運行における平均および最大サービス完了時間である。また、「old」が既提案の方法、「imd」が今回提案した方法であり、括弧内の数字がシャフトあたりのかご台数を表す。図よりわかるように、提案方法を用いることで、平均・最大サービス完了時間をともに改善できている。これは、簡略モデルの精度が向上したためであると考えられる。また、提案方法においてシャフトあたりのかご台数を3台に増やすことにより、輸送効率をさらに改善できることも確認された。

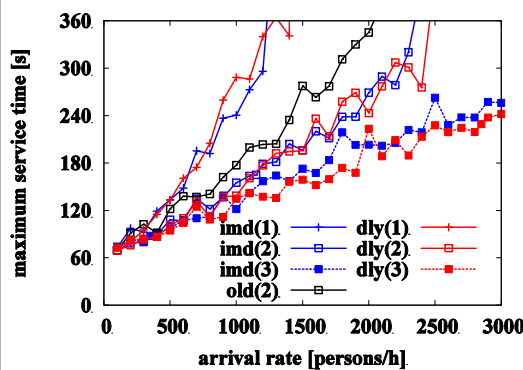
#### (c) 即時案内方式と非即時案内方式の比較

(a),(b)は即時案内方式を用いた際の結果であったが、非即時案内方式の検討も行った。非即時案内方式では、新たに呼びが登録された時点で乗客をいったんかごに割り当てた後、衝突・逆走回避を行うのと同タイミングで、評価関数が最適化されるよう再割り当てを行うものとした。複数の乗客が同時に再割り当て対象となるため、最適な割り当てを求めるのは困難である。そこで、局所探索により準最適な割り当てを求めるものとした。評価関数の計算に必要な運行の予測には即時案内方式と同様、図3の簡略モデルに基づく方法を用いた。また、シャフト内のかご選択のためにゾーニングを併用するものとした。

計算機シミュレーションにより、呼び割り



(a) 平均サービス完了時間



(b) 最大サービス完了時間

図4: シミュレーション結果の一例

当ての評価関数として平均サービス完了時間を用いると、最大サービス完了時間が悪化することがわかった。単純に平均サービス完了時間を最小化すると、再割り当ての際に特定の乗客が後回しにされ続けてしまい、最大サービス完了時間が悪化したものと考えられる。そこで、呼び割り当ての評価関数にはサービス完了時間の二乗平均を用いることにした。そして、即時案内方式・非即時案内方式の比較を行ったところ、非即時案内方式で輸送効率を改善できることがわかった。図4において、「dly」が非即時案内方式の結果を示す。ここでは結果は示さないが、退勤時を模擬した交通状況の場合、非即時案内方式による改善効果はより顕著であった。

#### (d) 静的な問題との比較

呼び割り当てによる輸送効率改善の限界を調べるために、すべての乗客の情報が事前にわかっているという仮想的な状況下で、かごへの割り当てを局所探索により最適化した。即時案内方式における結果からの平均サービス完了時間の改善率は、交通状況や乗客発生率にも依存するが、ゾーニングを併用する場合、すなわちシャフトへの割り当てのみを最適化した場合で10%程度、ゾーニングを併用せず、かごへの割り当てを最適化した場合で20%程度であった。しかし、ゾーニングを併用した非即時案内方式においても10%程度の改善が見られたため、交通状況を予測するなどして将来の乗客の情報を利用したとしても、現状の枠組では大幅な輸送効率の

改善は期待できないと考えられる。

(e) 呼び割り当ての評価関数の検討

乗客をかごに割り当てる際の評価関数について、平均サービス完了時間・サービス完了時間の二乗平均以外の評価関数を検討した。その結果、サービス完了時間と待ち時間との重み和を用いることで、わずかながら輸送効率の改善がみられたが、顕著な改善には至らなかった。

(4) まとめ

本研究では、各階での停車時間が事前にわからないという現実的なマルチカーエレベータシステムに対する群管理システム構築方法を提案した。計算時間の短縮など、実用化に向けては解決しなければならない問題もまだまだ多いが、本研究により、マルチカーエレベータシステムに対する群管理システムを構築するために必要な知見が多く得られたものと考えられる。

本研究の研究成果に関しては、国際会議・国内会議において発表を行っており、2012年には、国際会議発表(学会発表7)により Best Paper Award を受賞している。また現在、国際論文誌に論文を投稿中である。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計10件)

- (1) 田原 貴之, 田中 俊二, マルチカーエレベータシステムにおけるオンライン運行決定問題に対する数理的アプローチ, 電子情報通信学会技術報告, Vol. 113, No. 466, MSS2013-84, pp. 55-60, 2014/3/6, 愛媛
- (2) Shunji Tanaka, Takuto Miyoshi, and Daiki Hoshino, A mathematical model of the car operation problem in multi-car elevator systems, IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 228-233, 2013/10/13, マンチェスター(イギリス), 査読あり
- (3) Daiki Hoshino, Takuto Miyoshi, Shunji Tanaka, An MILP approach for the car operation problem in multi-car elevator systems, SICE Annual Conference 2013, pp. 560-563, 2013/9/14, 名古屋, 査読あり
- (4) 三好 巧人, 星野 大樹, 田中 俊二, マルチカーエレベータにおける運行決定問題の数理モデルの検討, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会, 6 pages (CD-ROM), 2013/5/17, 兵庫
- (5) 田中 俊二, マルチカーエレベータにおける非即時案内方式と即時案内方式の比較, 計測自動制御学会システム・情報部門 学術講演会 2012, pp. 88-93, 2012/11/21, 愛知
- (6) 三好 巧人, 田中 俊二, マルチカーエレベータの運行決定問題に対する解法の研究, スケジューリング・シンポジウム 2012, pp. 41-46, 2012/9/29, 東京
- (7) Shunji Tanaka and Daiki Hoshino,

Collision avoidance method for multi-car elevator systems with more than two cars in each shaft, The 14th International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2012), pp. 22-28, 2012/9/19, ウィーン(オーストリア), 査読あり, **Best Paper Award 受賞**

- (8) 星野 大樹, 田中 俊二, 最適化に基づくマルチカーエレベータのかご間衝突回避シャフトあたりのかご台数が3台以上の場合への拡張, 第56回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 277-278, 2012/5/22, 京都
- (9) Shunji Tanaka and Takuto Miyoshi, Performance Comparison between Immediate and Nonimmediate Passenger Guidance in Group Control for a Multi-Car Elevator System, The 13rd International Conference on Harbor, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS2011), pp. 130-135, 2011/9/12, ローマ(イタリア), 査読あり
- (10) 三好 巧人, 田中 俊二, 非即時案内方式を用いたマルチカーエレベータシステムにおける呼び割り当て方法の検討, 第55回システム制御情報学会研究発表講演会, pp. 337-338, 2011/5/17, 大阪

[その他]

ホームページ

<http://turbine.kuee.kyoto-u.ac.jp/~tanaka/elevator/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

田中 俊二 (TANAKA SHUNJI)

京都大学・国際高等教育院/大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 90324657