

並列化実装した動的計画法による 最適なエレベータ運行ルールの計算

稲元 勉[†] 太田 能[†] 玉置 久[†] 村尾 元[‡]

1 はじめに

ある程度以上の規模を持つ建物における鉛直方向の移動には、一般にエレベータシステム (ES) が用いられる。ES に備えられたエレベータ (かご) の最適な運行計画を求めることは一種の組合せ最適化問題であり、現実規模の ES を対象とした求解は困難である。しかしながら、計算機技術が発展し並列計算が比較的容易となっていることから、小規模な ES であれば、最適なかご運行ルールを数値計算により求めることができると思われる。この結果は、現実の ES へそのまま適用することはできないが、既存のヒューリスティクスの絶対的な (最適ルールに対する相対的な) 評価を可能としたり、新たなヒューリスティクスの示唆を与えうると期待される。

以上の背景のもと、本稿では、確率的離散事象システムのモデリング手法のひとつである記号的 2 値符号化スキーム (SBCS) [1] を用いてシステムの状態遷移関数を定式化することで、エレベータ運行計画問題への動的計画法 [2] の適用が可能となることを示す。続いて、SBCS の特徴を利用して計算量を削減し、計算を並列化することで、2 かご 3 階床という最小規模の ES であれば、システム利用者 (客) の移動パターン (交通流) の 3 つの典型例でそれぞれ最適なかご運行ルールを現実的な時間内に求められること、および最適ルールの既存手法 [3] に対する有効性を示す。

2 エレベータ運行計画問題

エレベータ運行計画問題 (EOP) は、客の不満足度および ES の消費電力量などが最小となるよう、客へのかご割当ておよび各かごの上下動を計画する問題である [4]。EOP は Pickup and Delivery 問題のひとつとして分類できるが、その特徴として、(i) システム状態の計測や計画の実施には十分高い周波数で動作するデジタルコンピュータが用いられる、(ii) 運搬対象である客の情報を事前に利用できない、(iii) 客の情報はホール呼び/かご呼びという処理単位として部分的にしか計測できない、といった点が挙げられる。これらを踏

まえて、かごの運行計画は計画期間 T にわたる多段決定によって定められると考える。また、計画開始時点におけるかごの位置および計画期間に到着する客の到着時刻、出発階床、目的階床の組合せからなるデータを考え、これを例題とよび、複数の例題にわたる平均の有効性としてかご運行ルールを評価する。具体的には、かご運行ルール R の N_e 個の例題にわたる目的関数 $\tilde{F}(R)$ を、次の式 (1) のように定める。

$$\tilde{F}(R) := \frac{1}{N_e N_p} \sum_{e=1}^{N_e} \sum_{t=1}^T c_e(t). \quad (1)$$

ここで、 N_p は計画期間に到着する客数を、 $c_e(t)$ は R を例題 e へ適用した場合に離散時刻 t において登録されているホール呼び数を、それぞれ表す。また、他の多くの研究と同様、ホール呼びへのかご割当てだけを決定変数とし、かごの上下動は広く使用されている Selective Collective ルール [4] により計算されるとする。

3 動的計画法の構成

ES は、十分短い間隔で状態が計測されるときにマルコフ性を有するとみなせることから、EOP は $\alpha (< 1)$ で割引かれた無限期間のマルコフ決定過程 (MDP) として近似できる。MDP の最適解は動的計画法 [2] を適用することで求められるが、この際、即時コストを与える関数にくわえて、システムの状態遷移確率および状態空間が必要である。前者は、SBCS [1] を用いて、一般化された外乱といえる状況入力の生起確率を考え、状態および状態遷移関数を、 N_x 個の 2 値状態変数からなるベクトル、 N_x 個の要素からなるベクトル値関数としてそれぞれモデル化することで与えることができる。後者は、 $\tilde{\mathcal{X}} = \lim_{n \rightarrow \infty} \mathcal{X}_n$ として近似的に求めることができる。ここで、 \mathcal{X}_n は次の式 (2) により計算される。

$$\mathcal{X}_{n+1} := \bigcup_{x \in \mathcal{X}_n} \bigcup_{a \in \mathcal{A}_x} \bigcup_{w \in \mathcal{W}} \{g(x, a, w)\}. \quad (2)$$

ただし、 \mathcal{X}_0 は種となる状態集合であり、 \mathcal{A}_x は状態 x でとることができる決定の集合を、 \mathcal{W} は状況入力空間を、 $g(x, a, w)$ は状態 x にて状況入力 w を受けているシステムへ決定 a を与えたときの遷移先状態を表す。

[†] 神戸大学大学院工学研究科

[‡] 神戸大学大学院国際文化学術研究科

Table 1: Computational times [sec]

Traffic pattern	State space	Opt. value function
Down-peak	12.22	60.93
Two-way	1,692.35	6,967
Inter-floor	96,241	204,437

最適なかご運行ルールは、状態 x にて決定 a を与えたときにシステムが状態 x' へ遷移する確率を表す $p_{x,x'}^a$ 、および最適価値関数 $J^*(\cdot)$ に基づいて与えることができる。状態遷移確率の計算量は、その計算が状況入力空間にわたるため大きい。状態遷移関数を代数的に処理し状況入力空間を部分状態空間に局所化することで、ある程度削減できる [1]。最適価値関数は、動的計画法の代表的手法である報酬反復法を用いて $J^*(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} J_n(x)$ として求めることができる。ここで、 $J_n(x)$ は次の式 (3) により計算される。

$$J_0(x) := 0, \\ J_{n+1}(x) := \min_{a \in A_x} \sum_{x' \in \tilde{X}} p_{x,x'}^a (C(x') + \alpha J_n(x')). \quad (3)$$

ただし、 $C(x)$ は状態 x の即時コストを表す。

式 (2), (3) は多数の状態にわたる計算から構成されるが、これらは異なるプロセッサで並行して行うことができる [5]。

4 計算例

本稿では、CPU がクアッドコア Xeon 3 GHz \times 2、主メモリ量が 32 GBytes という 8 つのプロセッサを備える計算機を用いて、2 かご 3 階床という最小規模の ES を対象とし、状態空間、および割引率が $\alpha = 0.9$ である場合の最適価値関数を、退社時の down-peak 交通流、昼食時の two-way 交通流、執務時間帯の inter-floor 交通流という 3 つの交通流 [4] について、それぞれ計算した。この計算に要した時間を、表 1 へ示す。なお、報酬反復法の終了条件は、価値関数の差分のプロセッサにわたる最大値が 10^{-10} 以下になることとした。

表 1 より、計算時間が最長である inter-floor 交通流のための最適価値関数の計算も、2 日強で終了していることが確認される。

最適価値関数に基づく最適なかご運行ルールの有効性を、既存のかご割当て手法 [3] に対する目的関数値比の 1,000 個の例題にわたる統計量として、表 2 へ示す。

表 2 より、最適なかご運行ルールは、(i) 既存手法よりも平均的に有効である、(ii) 既存手法との性能差は、

Table 2: Relative effectiveness of opt. rules

Traffic pattern	Min.	Avg.	Max.
Down-peak	0.91236	0.979647	1.06039
Two-way	0.793003	0.979141	1.15068
Inter-floor	0.775623	0.968269	1.16270

down-peak, two-way, inter-floor 交通流の順に大きくなっていることが確認される。

5 まとめと今後の課題

本稿では、記号的 2 値符号化スキームを用いることでエレベータ運行計画問題をマルコフ決定過程としてモデル化できること、および代数計算と並列計算を利用することで最小規模のエレベータシステム (ES) に対しては 3 つの代表的な交通流における最適なかご運行ルールを現実的な時間で求められることを示した。今後の課題として、中規模な ES を対象とすることや、本稿で示した枠組みの、他の確率的離散事象システムを対象とする最適計画・制御問題への適用可能性に関する調査が挙げられる。

参考文献

- [1] 稲元 勉, 太田 能, 玉置 久, 村尾 元: “代数計算を用いた状態遷移関数の局所化による 2 値符号化モデルのための動的計画法の計算量の削減”, 平成 20 年電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集 (CD-ROM), pp. 993–998, 2008.
- [2] Dimitri P. Bertsekas: “Dynamic Programming: Deterministic and Stochastic Models”, PRENTICE-HALL, Inc., 1987.
- [3] 平沢宏太郎, 葛貫壮四郎, 岩坂達夫, 金子 隆, 河竹好一: “エレベータ群管理における呼び割付け方式”, 電学論 C, Vol. 99, No. 2, pp. 27–32, 1979.
- [4] Gina Barney: “Elevator Traffic Handbook — Theory and Practice”, Spon Press, 2003.
- [5] 稲元 勉, 太田 能, 玉置 久, 村尾 元: “非一様な状態遷移を示す確率的離散事象システムの可達状態計算の並列化”, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2008 講演論文集, pp. 251–256, 2008.