

# 機械式立体駐車場におけるスケジューリング

阿瀬 始

## 1. はじめに

車の数が非常に多い日本、とくに大都市等では、特定の目的のために車が集まるような場所・地域には、数百台以上が収納できる大規模駐車場が必要となる。ショッピングセンター、イベントセンター、病院などがその例である。駐車場には大別して自走式と機械式[1]があるが、土地の広さに対する収納台数という点では機械式が優り、大規模駐車場に適している。駐車場における客に対するサービスの向上という観点からは、入庫あるいは出庫を迅速に行うこと、人や物(車)に対する安全性を高めることが要求される。自走式では運転者に行き先等について適切なガイドを示す程度のことしかできないが、機械式では台車の運行をうまく管理することにより作業効率を大きく改善することが可能である。以下にこの問題をスケジューリングという観点からとらえて論じる。

## 2. 機械式立体駐車場

最も基本的な機械式立体駐車場の構造は、図1に示すものであり、複数階からなる。入庫エレベータと出庫エレベータが1台ずつあり、それぞれ入庫口と各階、出庫口と各階を結んでいる。各階には台車が2台ずつあり、レーン上を自由に移動し、駐車室とエレベータ室間の車の出し入れを行う。駐車室はレーンの両側に、一つずつレーンに沿って配置されている(ただし、入庫および出庫エレベータ室になっている室には車は駐車できない)。この型の駐車場を単列型駐車場という。エレベータと台車の構成はこれが基本であるが、駐車室の配置には他にも代表的なものがあり、図2は駐車室が二つずつレーンに沿って配置されたもので、複列型駐車場と言われる。図3は単列型と複列型が混在したタイプの駐車場である。複列型は収納効率をとにか

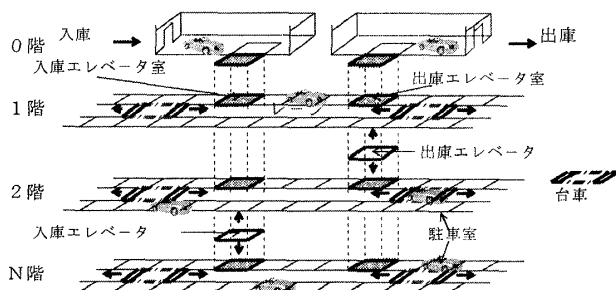


図1 単列型機械式立体駐車場

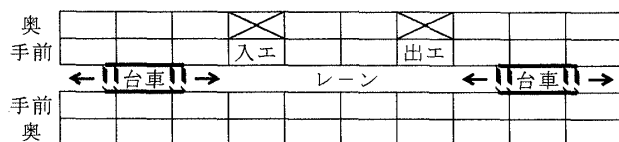


図2 複列型駐車場の一つの階の平面図

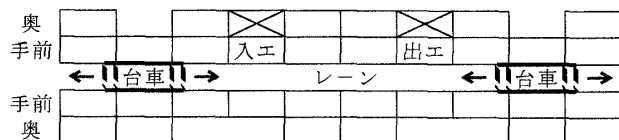


図3 混在型駐車場の一つの階の平面図

く上げたいという場合によく採用され、混在型は地下に作られる場合が多く、収納効率を上げたいので複列型にしたいのだが、空間的な制約のため部分的に複列にできない所が生じるという場合によく採用される。

## 3. スケジューリング問題

### 3.1 入庫処理と出庫処理

入庫要求に対し、その入庫車を階  $j$  の駐車室に格納するとすると、入庫エレベータと階  $j$  の台車は図4のダイアグラムの上図と下図に示す一連の動作を行う。上図は階  $j$  に車を入庫するため、入庫エレベータが四つの部分作業  $E_1^p \sim E_4^p$  からなる処理を行う様子を示している。ただし、縦軸はエレベータの位置(階0と階  $j$ )、横軸は時間である。

1)  $E_1^p$  は入庫口(階0)で扉を開き車を移載し扉を閉める、

あせ はじめ

NKK

〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1

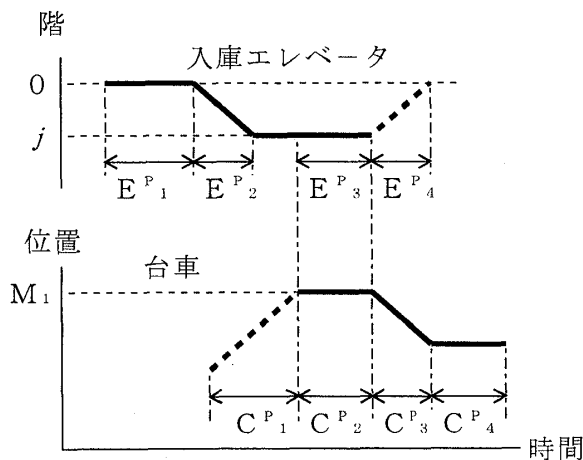


図4 入庫作業ダイアグラム

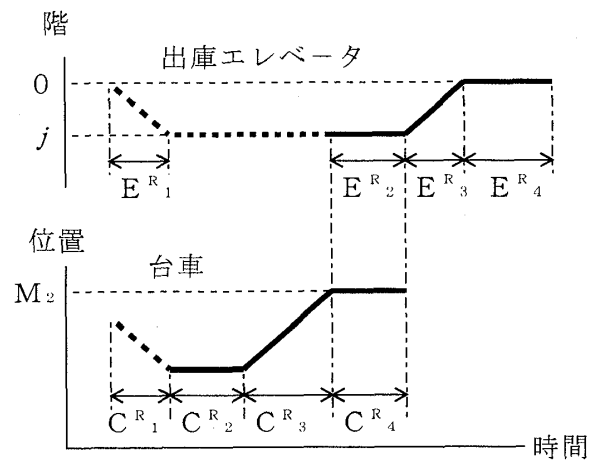


図5 出庫作業ダイアグラム

- 2)  $E^P_2$  は車を積載して階  $j$  への移動,
- 3)  $E^P_3$  は台車の到着を待ち車を台車へ移載,
- 4)  $E^P_4$  は階  $j$  から階 0 に空で移動,

これに対し、下図は入庫処理をする階  $j$  の台車が四つの部分作業  $C^P_1 \sim C^P_4$  からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $C^P_1$  は入庫エレベータ室への空移動,
- 2)  $C^P_2$  は入庫エレベータから車の移載,
- 3)  $C^P_3$  は車を積載して入庫する駐車室への移動,
- 4)  $C^P_4$  は台車から駐車室への車の移載,

ただし、縦軸は階  $j$  におけるこの台車の水平位置を表している。

一方出庫要求に対し、その出庫車が階  $j$  の駐車室に格納されているとすると、出庫エレベータと階  $j$  の台車は図5のダイアグラムの上図と下図に示す一連の動作を行う。上図は階  $j$  に格納されている車の出庫のため、出庫エレベータが四つの部分作業  $E^R_1 \sim E^R_4$  からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $E^R_1$  は出庫口 (階 0) から階  $j$  への空移動,
- 2) その後台車の到着を待ち  $E^R_2$  は台車から車の移載,
- 3)  $E^R_3$  は車を積載して階  $j$  から出庫口への移動,
- 4)  $E^R_4$  は扉を開き車を出し扉を閉める,

これに対し、下図は出庫処理をする階  $j$  の台車が四つの部分作業  $C^R_1 \sim C^R_4$  からなる処理を行う様子を示している。

- 1)  $C^R_1$  は出庫車の格納されている駐車室への空移動,
- 2)  $C^R_2$  は駐車室から車の移載,
- 3)  $C^R_3$  は車を積載して出庫エレベータ室への移動,
- 4)  $C^R_4$  は出庫エレベータに車の移載,

図4と図5のダイアグラムにおいて、実線は車を積載している状態、破線は車を積載していない状態を表す。

入庫処理においては、部分作業  $E^P_3$  と  $C^P_2$  は同期して行われなければならないから、 $E^P_2$  と  $E^P_3$  の間、あるいは  $C^P_1$  と  $C^P_2$  の間に通常は待ち時間が発生する。また出庫処理においては、部分作業  $E^R_2$  と  $C^R_4$  は同期して行われなければならないから、 $E^R_1$  と  $E^R_2$  の間、あるいは  $C^R_3$  と  $C^R_4$  の間に通常は待ち時間が発生する。

複数台の入出庫要求に対しては図4と図5の処理を繰り返すことになる。ただし、各階に2台ずつある台車は同一レーン上を走行するので、両台車はある距離 ( $=\delta$ ) までしか接近できない。両台車が距離  $\delta$  以内に接近あるいは相手台車の向こう側に移動しようとする状態を干渉と呼び、干渉が発生する時にはどちらかの台車が干渉が生じない所まで退避し待機するという干渉回避処理が必要となる。したがって、台車のダイアグラムは一般に干渉回避動作を含む複雑なものとなる。

### 3.2 スケジューリング問題

機械式立体駐車場におけるスケジューリング問題とは、入庫および出庫要求に対する待ち行列を最短で処理するような、各階に2台ずつある台車のスケジュール (台車割り当てと干渉回避方法) を決定する問題である。前述した公共施設、ショッピングセンター、病院などに設置された機械式立体駐車場の場合は、駐車場の利用は1日単位と考えてよく、1日の初めは入庫主体、1日の終わりは出庫主体、そして途中の時間帯は入庫と出庫が入り混じる形態と考えられる。したがって、入庫、出庫、入出庫それぞれに対応して、スケジューリング問題が存在する。入庫スケジューリング問題と出庫スケジューリング問題の大きな違いは、出庫の時には各出庫車の格納されている駐車室は決まっているのに対して、入庫のときには入庫先は決まっ

いなくて、そのとき空いている駐車室を任意に選択できることである。入庫室の選択はこれ自体で大きな問題であるので、ここでは入庫室がすでに与えられたとし、台車のスケジューリングに焦点を絞る。

## 4. 解法

### 4.1 厳密解法

#### 4.1.1 単列型1階出庫スケジューリング

最初に、単列型の1階だけからなる駐車場の出庫スケジューリングの場合を論じ、その結果をほかの場合へ拡張するという流れで議論を進める。

出庫スケジューリング問題は、出庫要求をすべて処理するような、各階に2台ずつある台車の一連の出庫ダイアグラムを決定することである。前述したように、台車間に干渉が発生すると、干渉回避と待機という作業がどちらかの台車に発生し、そのためダイアグラムが複雑になる。それゆえ、このような問題に対して厳密解法は難しいように思われるが、以下のように考えると厳密解法を設計することができる。

今、全部で $n$ 台の車の出庫作業に対し、 $k$ 台目を出庫エレベータに積載し終わった時点 $\tau(k)$ から $k+1$ 台目を出庫エレベータに積載し終える時点 $\tau(k+1)$ までの時間区間 $[\tau(k), \tau(k+1)]$ を考える。時点 $\tau(k)$ では、 $k$ 台目の出庫作業をした台車は出庫エレベータ室の位置にいる。相手台車は、時間区間 $[\tau(k-1), \tau(k)]$ で干渉があった場合、2台の台車が1次元のレーン上しか動かないことと出庫作業しかならないことから、出庫エレベータ室 $\pm\delta$ の位置にいる（符号は2台の台車の位置関係で決まる）。すなわち干渉を回避して待機中である。ただし、車をすでに積載済みの場合とまだ積載していない場合のどちらもあり得る。時間区間 $[\tau(k-1), \tau(k)]$ で干渉がなかった場合、やはり2台の台車が1次元のレーン上しか動かないことと出庫作業しかならないことから、相手台車が相手台車の前回の出庫作業終了時点から時点 $\tau(k)$ までは干渉が発生していないことがわかる。そこで、出庫 $k$ の処理が終了した時点に対応する状態 $k(a, b, c, d)$ を次のように定義する。

**【定義1】** 単列型1階出庫スケジューリング問題の状態 $k(a, b, c, d)$

$a$  : 車 $k$ を出庫した台車番号,  $a=1, 2$

$b$  : 相手台車が処理中の出庫車の番号

$$k+1 \leq b \leq n$$

または  $b=\phi$ (作業しない)

$c$  : 干渉の有無と相手台車の積載状態

$=0$  : 干渉なし

$=1$  : 干渉が有り相手台車は車 $b$ を積載している

$=2$  : 干渉が有り相手台車は車を積載していない

$d$  : [相手台車の前回の出庫終了時刻 $-\tau(k)$ ]を離散化した値

状態 $k(a, b, c, d)$ が与えられたとき、車 $k$ を出庫した台車 $a$ に次に処理する出庫車を与えれば、各台車の干渉を無視したダイアグラムが求められる。その結果、干渉が発生するかどうか判定できる。干渉が発生したときどちらの台車を優先するかを決めると、この状態の遷移先の状態 $k+1(a', b', c', d')$ が決まり、状態遷移に対応する時間 $[\tau(k+1) - \tau(k)]$ を求めることができる。 $w(k, k+1) = \tau(k+1) - \tau(k)$ とおくと、 $w(k, k+1)$ は一般に次のように書ける。

$$w(k, k+1) = \max\{2g(1, 0) + T_E, \phi\} + T_S;$$

$$k=1, \dots, n-1$$

ここに、 $g(p, q)$ はエレベータの階 $p$ から $q$ への移動時間、 $T_E$ は出庫口での作業時間、 $T_S$ は台車から出庫エレベータへの車の移載時間、 $\phi$ は $\tau(k)$ から出庫 $k+1$ を処理する台車が車を積載して出庫エレベータ室に到着するまでの時間である。 $\phi$ は陽に表現できるのだが、状態 $k(a, b, c, d)$ 、 $k+1$ 番目の出庫車の駐車室の位置、 $b'$ 、干渉時の優先台車に依存し、9通りできる[4]。

この状態を節点に対応させ、節点間を結ぶ枝に重み $w(k, k+1)$ を与えると重み付き有向グラフ（多段ネットワークとも見なせる）ができる。ただし、始点は各台車の出庫作業開始初期位置に対応する。このとき、出庫スケジューリング問題はこの重み付き有向グラフの始点から終点に至る最短経路を求める問題になり、動的計画法（DP）[2]に基づくアルゴリズムにより厳密に解くことができる。

#### 4.1.2 単列型多階出庫スケジューリング

階が複数ある場合は、1階だけの場合と異なり、出庫エレベータの到着時刻が他の階における作業に依存する。したがって、 $w(k, k+1)$ が決定されるためには状態に他の階の情報もすべて含まれていなければならない。その解決策の一つは各階の状態の直積で状態を定義する方法であり、次のような定義となる。

**【定義2】** 単列型多階出庫スケジューリング問題の状態 $k((a_1, b_1, c_1, d_1, e_1), \dots, (a_n, b_n, c_n, d_n, e_n))$

$a_j$  : 階  $j$  で最近の出庫処理をした台車番号  $\in \{1, 2\}$

$b_j$  : 階  $j$  における相手台車が処理中の出庫車の番号,  $k+1 \leq b_j \leq n$  または  $b_j = \phi$  (作業しない)

$c_j$  : 階  $j$  における干渉の有無と相手台車の積載状態.

$d_j$  : 階  $j$  における [相手台車の前回の出庫終了時刻 - 前回の出庫終了時刻] を離散化した値

$e_j$  : [階  $j$  における最近の出庫作業終了時刻 - 出庫  $k$  の作業終了時刻] を離散化した値

この定義における変数  $e_1, \dots, e_n$  は, 各階における基準時刻のずれを調整するために導入されたものである.

この状態によって, 多階の場合も, 出庫  $k+1$  と  $k$  が同じ階の場合と異なる階の場合の場合分けを考慮すると,  $w(k, k+1)$  が陽に表現できる. したがって, やはり DP に基づくアルゴリズムにより厳密に解くことができる.

出庫スケジューリング問題に対するこの厳密解法の計算量は文献[3]によると次のようになる.

$$\text{節点数} = O(D^n E^{n-1} n^{n+1})$$

$$\text{枝数} = O(D^n E^{n-1} n^{n+1})$$

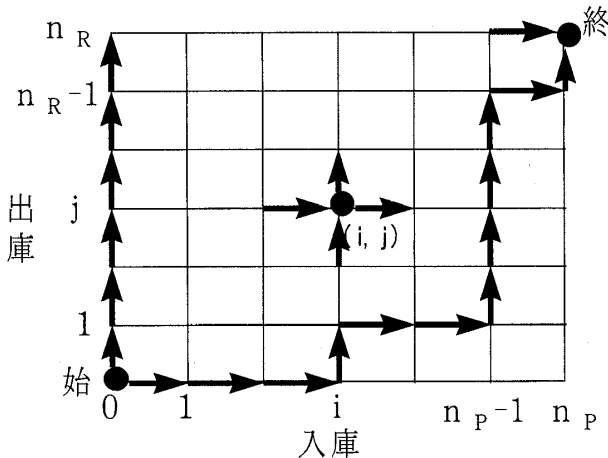
$n$  : 出庫数,  $D, E$  :  $d_j, e_j$  の最大個数

これらの式によると, 計算量は出庫待ち行列の数に対して多項式オーダーであり, 階数に対しては指数オーダーである.

#### 4.1.3 単列型1階入出庫スケジューリング

入庫先の駐車室は与えられているという条件のもとでの入出庫スケジューリングを考える. 出庫スケジューリングと異なるのは以下の点である.

1) 入出庫処理の進行は, 図6に示す入庫-出庫平面



格子点  $(i, j)$  : 入庫  $i$  が終了, 出庫  $j$  が終了

図6 入出庫処理の進行

上の格子点を後戻りなく進む. 入庫が連続しても, 出庫が連続してもよい.

2) 出庫スケジューリングの場合の状態だけでは, ダイアグラムを一意に決めることができない.

2)の意味を詳しく言うと, 出庫スケジューリングにおいては, 図5における  $C^R_1 \sim C^R_4$  までを一つの作業単位として, 2台の台車の1作業単位においてはただか1回しか干渉が発生しなかったため, 定義1の状態であった. しかしながら, 入出庫スケジューリングにおいてはこの作業単位では干渉が2回発生する場合もある. この2回あり得る干渉の発生点と干渉時の優先台車の情報を与えればダイアグラムを一意に決定することができるが, 場合分けが煩雑である. そこで, 次のように作業単位を小さくした.

1) 入庫においては, 図4における  $C^P_1$  と  $C^P_2, C^P_3$  と  $C^P_4$  をそれぞれ一つの作業単位とし, 前者を  $U^P_1$ , 後者  $U^P_2$  ととする.

2) 出庫においては, 図5における  $C^R_1$  と  $C^R_2, C^R_3$  と  $C^R_4$  をそれぞれ一つの作業単位とし, 前者を  $U^R_1$ , 後者  $U^R_2$  ととする.

このとき, 2台の台車の1作業単位においてはただか1回しか干渉が発生しない. そこで, 入出庫スケジューリング問題においては, 次のように状態を定義する

**【定義3】** 入出庫スケジューリング問題に対する状態  $(p, r)(a_1, a_2, b_1, b_2, t_1, t_2, q_1, q_2)$

$p$  : 現在処理対象となっている入庫番号

$r$  : 現在処理対象となっている出庫番号

$a_i$  : 台車  $i$  が処理する入庫/出庫番号;  $i = \{1, 2\}$

$b_i$  : 台車  $i$  が処理する作業単位;  $i = \{U^R_1, U^R_2\}$

$t_i$  : 台車  $i$  の作業単位  $b_i$  の開始時刻;  $i = \{1, 2\}$

$q_i$  : 台車  $i$  の作業単位  $b_i$  の開始位置;  $i = \{1, 2\}$

ここに  $a_1$  と  $a_2$  は,  $p$  以降の入庫番号あるいは  $r$  以降の出庫番号のどれかであり,  $a_1 \neq a_2$  であり,  $p$  と  $r$  のうち少なくとも一つは  $a_1$  と  $a_2$  のどちらかに設定されていなければならない. 時刻  $t_1$  と  $t_2$  のうちどちらかは0である.

ある状態から遷移する次の状態は, 干渉があったときにどちらの台車を優先するかということと, 入庫番号  $p$  または出庫番号  $r$  が +1 進むときに状態を更新させた方の台車が次に残りの入庫/出庫のどれを処理するかを与えれば確定する[4]. 多階の場合への拡張は出庫スケジューリングの場合と同様である.

#### 4.1.4 複列型1階出庫スケジューリング

複列型駐車場における出庫を考える。手前の駐車室の車を出庫する場合は単列型の場合と全く同じであるが、奥の駐車室の車を出庫するには2台の台車が協力して以下の手順を行わなければならない。

- 1) 台車1が手前の駐車室の車を積載して待避する。
- 2) 台車2が奥の駐車室の車を積載して出庫する。
- 3) 台車1が待避していた車を元の駐車室に戻す。

この手順を図示したのが図7である。もちろん、台車1と台車2の役割を交換することができる。この手順のうち、3)で元の駐車室に戻すという作業をしないという選択もあり得る。手前の駐車室の車が奥の駐車室の車の次の出庫であれば、明らかに戻す必要はない。また、すぐ次でなくとも次の次かさらにその次位であれば、戻さない方が良い可能性がある。

この協力作業と待避車を戻す/戻さないの選択があるため、作業単位を図5における $C^R_1 \sim C^R_4$ までとすると場合分けが多くて煩雑になる。そこで、入出庫の場合と同様に作業単位を小さくして状態を定義し、状態の遷移を考える。

**【定義4】** 複列型出庫スケジューリング問題の状態  $k(a_1, a_2, b_1, b_2, t_1, t_2, q_1, q_2)$

$k$ : 現在処理対象となっている出庫番号

$a_i$ : 台車  $i$  が処理する出庫番号;  $i = \{1, 2\}$

$b_i$ : 台車  $i$  の作業単位;  $i = \{U^R_1, U^R_2, U^R_3, U^R_4\}$

$t_i$ : 台車  $i$  の作業単位  $b_i$  の開始時刻;  $i = \{1, 2\}$

$q_i$ : 台車  $i$  の作業単位  $b_i$  の開始位置;  $i = \{1, 2\}$

ここに、作業単位  $U^R_3$  と  $U^R_4$  は次のものである。

$U^R_3$ : 駐車室に移動し、手前の車の積載待避

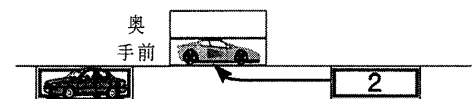
$U^R_4$ : 駐車室に移動し、積載待避車の戻し

このようにしても場合分けは少なくはなく、2台の台

1. 台車1が手前の駐車室の車を積載し待避



2. 台車2が奥（現在手前）の車を積載し出庫



3. 台車1が待避していた車を元の駐車室に戻す



図7 複列型駐車場における奥の駐車室の車の出庫操作

車の以下に示す場合の組み合わせをすべて調べ上げなければならない。

- 1) 次の出庫かつ手前の車の出庫
- 2) 次の次以降の出庫かつ手前の車の出庫
- 3) 次の出庫かつ奥の車の出庫
- 4) 次の次以降の出庫かつ奥の車の出庫
- 5) 手前の車の積載待避
- 6) 積載待避車の戻し
- 7) 積載待避車の出庫

一例として、台車2が手前の車の積載待避で、台車1が次の出庫かつ手前の車の出庫の場合と、次の出庫かつ奥の車の出庫の場合の状態遷移を表1に示す。

#### 4.2 近似解法

動的計画法による厳密解法は多くの計算機メモリを必要とし、計算時間もかかる。したがって、実運用への適用を考える場合には、比較的短時間で質の良い解を得ることのできる近似解法が要求される。

駐車場スケジューリング問題の近似解法としては、

- 1) ヒューリスティックルール
- 2) メタヒューリスティック

が考えられる。ヒューリスティックルールは局所的な情報に基づいて台車の割り当てを行うもので、代表的なものを以下に挙げる。

- 1) 領域分担ルール

台車1と台車2の担当領域をあらかじめ分担しておき、それに基づき台車を割り当てる。

- 2) 動的領域分担ルール

入出庫2台に対し、駐車室の位置関係から台車を割り当てる。

- 3) 3手読みルール

入出庫3台分までの駐車室の配置パターンから、最良と考えられる台車割り当てを行う。

一方、駐車場スケジューリング問題は重み付き有向グラフの最短経路問題に帰着されるから、始点から終点に至るパスを一意的に定める表現を解表現とすればメタヒューリスティックが適用できる。たとえば、単列型多階出庫スケジューリング問題では、解表現は、

$A(m, k) =$  階  $m$  で  $k$  番目の出庫車を処理する台車番号

$B(m, k) =$  階  $m$  で  $k$  番目の出庫処理の時に干渉があった場合の優先台車番号

$m = 1, \dots, N; k = 1, \dots, K_m$

$N$ : 階数,  $K_m$ : 階  $m$  における出庫数

であるので、近傍をどちらかの変数の1成分の値を交

表1 複列型駐車場における状態遷移と作業時間の例

(1) 台車1は次の出庫で手前駐車室の出庫s、台車2は出庫bの手前駐車室の車の積載退避 (s < b)

現在の作業単位	干渉の有無	次の作業単位	次の(t <sub>1</sub> , q <sub>1</sub> )	次の(t <sub>2</sub> , q <sub>2</sub> )	作業時間 w
(U <sup>R<sub>1</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	干渉なし	(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, x(s))	(t <sub>2</sub> - w, p <sub>2</sub> )	t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , x(s)) + T <sub>R</sub>
		(U <sup>R<sub>1</sub></sup> , *)	(t <sub>1</sub> - w, p <sub>1</sub> )	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
	干渉有	台車1退避 (U <sup>R<sub>1</sub></sup> , *)	(0, x(b) - δ)	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
		台車2退避 (U <sup>R<sub>2</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, x(s))	(0, x(s) + δ)	t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , x(s)) + T <sub>R</sub>
(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	干渉なし	(*, U <sup>R<sub>2</sub></sup> )	(0, M <sub>2</sub> )	(t <sub>2</sub> - w, p <sub>2</sub> )	max{E <sub>2</sub> , t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> )} + T <sub>S</sub>
		(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , *)	(t <sub>1</sub> - w, p <sub>1</sub> )	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
	干渉有	台車1退避 (U <sup>R<sub>2</sub></sup> , *)	(0, x(b) - δ)	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
		台車2退避 (*, U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, M <sub>2</sub> )	(0, M <sub>2</sub> + δ)	max{E <sub>2</sub> , t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> )} + T <sub>S</sub>

(2) 台車1は次の出庫で奥の駐車室の出庫s、台車2は出庫bの手前の車の積載退避

(2.1) s = b の場合

現在の作業単位	干渉の有無	次の作業単位	次の(t <sub>1</sub> , q <sub>1</sub> )	次の(t <sub>2</sub> , q <sub>2</sub> )	作業時間 w
(U <sup>R<sub>1</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	干渉なし	(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, x(s))	(t <sub>2</sub> - w, p <sub>2</sub> )	t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , x(s)) + T <sub>R</sub>
		(U <sup>R<sub>1</sub></sup> , *)	(t <sub>1</sub> - w, p <sub>1</sub> )	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
	干渉有	台車1退避 (U <sup>R<sub>1</sub></sup> , *)	(0, x(b) - δ)	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
		台車2退避			

(2.2) s < b の場合

現在の作業単位	干渉の有無	次の作業単位	次の(t <sub>1</sub> , q <sub>1</sub> )	次の(t <sub>2</sub> , q <sub>2</sub> )	作業時間 w
(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	干渉なし	(*, U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, M <sub>2</sub> )	(t <sub>2</sub> - w, p <sub>2</sub> )	max{E <sub>2</sub> , t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> )} + T <sub>S</sub>
		(U <sup>R<sub>2</sub></sup> , *)	(t <sub>1</sub> - w, p <sub>1</sub> )	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
	干渉有	台車1退避 (U <sup>R<sub>2</sub></sup> , *)	(0, x(b) - δ)	(0, x(b))	t <sub>2</sub> + f(p <sub>2</sub> , x(b)) + T <sub>R</sub>
		台車2退避 (*, U <sup>R<sub>3</sub></sup> )	(0, M <sub>2</sub> )	(0, M <sub>2</sub> + δ)	max{E <sub>2</sub> , t <sub>1</sub> + f(p <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> )} + T <sub>S</sub>

(注) x(s) : 出庫sの車の駐車室の位置、 E<sub>2</sub> : 出庫エレベータ到着時刻、 \* : 選択をしないと決まらないことを示す

更した点の集合と定義すれば局所探索アルゴリズムが構成できる。また遺伝アルゴリズムにおける交叉や突然変異も構成できるので、メタヒューリスティック[5]による様々な近似解法を試みることができる。文献[4]では、いくつかのメタヒューリスティックをとりあげ、出庫スケジューリング問題および入出庫スケジューリング問題に対して適用した結果を比較検討している。

## 5. おわりに

機械式立体駐車場のスケジューリング問題をモデル化し、厳密解法と近似解法を紹介した。ただ、厳密解法は駐車場の構造が複雑になると容易ではなくなってくる。今後の研究課題としては、

- 1) 入庫室の決定方法
- 2) 駐車室の移し替えをする場合のスケジューリング

3) より高性能で高速の近似解法が挙げられる。

## 参考文献

- [1] 三星他：立体駐車場設備，建築と社会，Vol. 77, No. 4, pp. 27-65 (1996).
- [2] ベルマン：ダイナミック・プログラミング，東京図書(1973).
- [3] 阿瀬，茨木，柳浦：機械式立体駐車場出庫スケジューリング，システム制御情報学会，Vol. 12, No. 7, pp. 417-427 (1999).
- [4] 阿瀬，茨木，柳浦：機械式立体駐車場入出庫スケジューリング，システム制御情報学会，Vol. 13, No. 11, pp. 494-503 (2000).
- [5] 柳浦，茨木：組み合わせ最適化—メタ戦略を中心として—，朝倉書店 (2001).