

垂直搬送機能の Q 学習による 部分解接続最適化手法

Optimization method using Q-learning for Connecting Partial Solutions of Vertical Transport Function

岡本和也^{1*} 内田雅喜¹ 小出幸和¹ 加藤紀彦² 野田五十樹³

Kazuya OKAMOTO, Masaki UCHIDA, Yukikazu KOIDE, Norihiko KATO and Itsuki NODA

¹ 国立研究開発法人 産業技術総合研究所

¹ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

² 株式会社 豊田自動織機

² Toyota Industries Corporation

³ 北海道大学

³ Hokkaido University

Abstract: In this study, optimization method for operation of transfer machine having the vertical transport function is presented. At first, optimization operation of a small number of products is calculated. The result is as partial solution. And, optimization operation of many products is calculated by connecting partial solutions. Learning model is constructed by Q-learning for connecting partial solutions. This paper describes the optimization method and experimental result.

1 はじめに

近年、少子高齢化に伴う労働力人口の減少[1]、e-コマース（電子商取引）の拡大[2]による多頻度・小口配送、効率・迅速性への対応など、物流を取り巻く環境や改善ニーズは急激に変化している。

この急激な変化に対応するため、物流倉庫内における搬送能力の向上が進められている。その1つに自動倉庫がある。物流倉庫内に設置される自動倉庫は、省スペース化のために多層階構造になっていることが多い。多層階の倉庫に商品を自動投入するためには、垂直搬送機能が必要になる。図1のように、垂直搬送機は商品を投入するコンベアと商品を保管する棚の間に設置される。コンベアから連続的に投入される多数の商品を各階の棚へ搬送する。垂直搬送機が商品を各階の棚に搬送する速度は、物流倉庫の搬送能力に繋がる。そのため垂直搬送機の搬送能力向上が物流倉庫の課題の1つになっている。

本研究では、商品を垂直方向に搬送する垂直搬送機の能力向上に関する研究を行った。

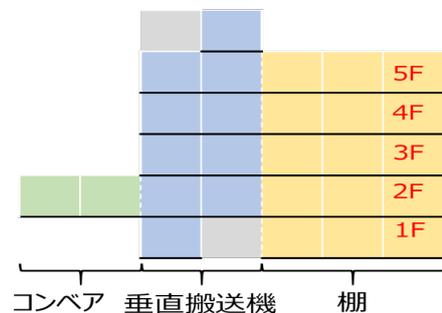


図1 自動倉庫の概略図

2 垂直搬送機

本研究では、交互動作式の垂直搬送機を対象とする。本稿では、交互動作式の垂直搬送機を垂直搬送機と記載する。

垂直搬送機は、コンベアから棚へ商品を搬送するために、図2のように商品の左右移動と上下移動を繰り返す。左右移動は、各階で独立に移動できる。上下移動は、搬送機の左部分と右部分がそれぞれ一体になっており、それぞれが逆方向に動作する。つまり、左部分が下移動すると右部分が上移動し、左

*連絡先：国立研究開発法人 産業技術総合研究所
〒135-0064 東京都江東区青海 2-3-26
E-mail: kazuya.okamoto@aist.go.jp

部分が上移動すると右部分が下移動する。商品がコンベアから棚へ搬送される動作例を図3に示す。2個の商品をコンベアから棚へ搬送することを考える。それぞれの商品は、棚の1階と4階に搬送される。初めに商品は、横移動を2回繰り返し搬送機内に移動する(①)。上下移動を1回行い、各商品は1階と3階に移動する(②)。また横移動を1回行い、1階に向かう商品は棚に搬送される(③)。上下移動を1回行い、商品は4階に移動する(④)。最後に横移動を1回行い、4階に向かう商品は棚に搬送される(⑤)。

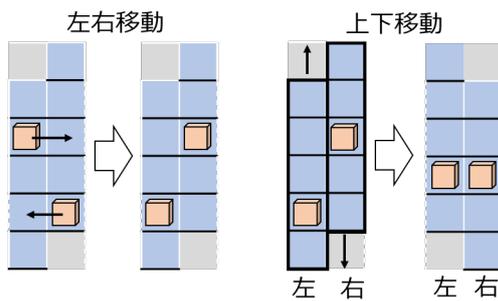


図2 垂直搬送機内の商品移動

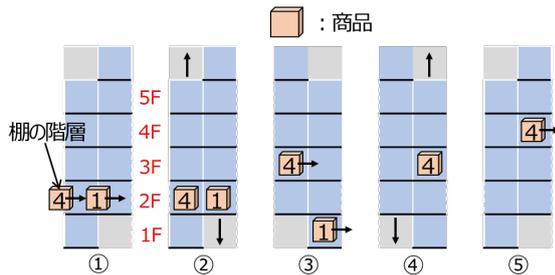


図3 商品移動の動作例

図3に商品が搬送される動作例を示したが、商品の搬送を高速化するためには、連続的に投入される商品を効率良く各階に搬送する必要がある。この時、垂直搬送機内には複数の商品があるため、垂直搬送機内の商品の位置及び搬送先となる階を考慮し、効率よく商品を搬送できる左右移動、上下移動の順番を算出することが求められる。

3 関連研究

搬送能力の向上に関する研究として、製鉄所の原料ヤードにおける水平方向の搬送経路を作成する研究がなされている[3]。しかし本研究の対象である交互動作式の垂直搬送機を対象に適切な動作順を導出する手法については研究がなされていない。

そのため本研究では、効率よく商品を搬送できる左右移動、上下移動の順番を算出する手法を提案し、垂直搬送機的能力向上に対する提案手法の効果を確認した。

4 垂直搬送機の動作探索

4.1 問題設定

垂直搬送機の動作探索問題の概要を図4に示す。図4の商品内の数字は、各商品の搬送先となる階を示す。この搬送先の階を決められた複数の商品をコンベアから棚へ搬送する。この時、より速く商品を棚に搬送できる垂直搬送機の左右移動と上下移動の適切な順番を求める問題を対象とする。

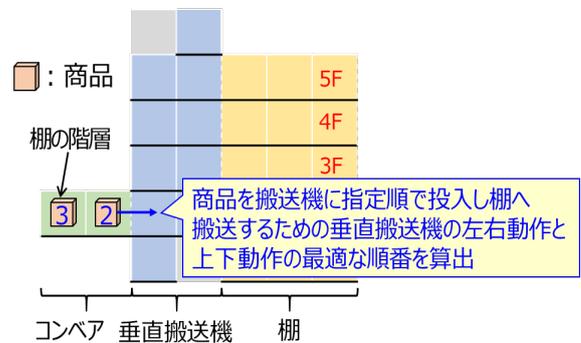


図4 垂直搬送機の動作探索問題の概要

4.2 探索方法

前節に記載した問題に対して、探索手法としてA*アルゴリズム[4]を適用した。スタート地点をコンベア、ゴール地点を各商品ごとに決められた棚の各階とした。また、各商品の位置は、図5に示す座標系を設定し計算した。

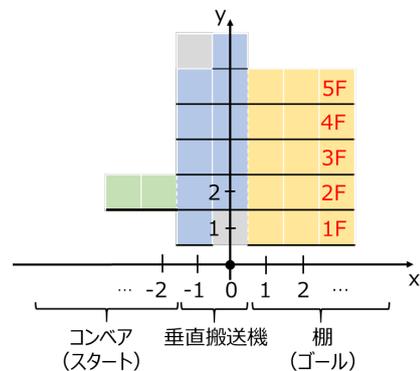


図5 垂直搬送機の動作探索時の商品位置を示す座標系

4.3 探索結果

A*アルゴリズムを用いて垂直搬送機に投入する商品数を1つずつ増やし、垂直搬送機の動作探索を行った。計算時間を表1に示す。商品数の増加に対して、計算時間が指数関数的に増加した。

表1の商品数は、コンベアから投入される商品の数になる。問題数は、垂直搬送機の初期状態の組合せ数を示す。例えば、商品数が3、棚が5階建ての場合、垂直搬送機の状態が左上がりか右上がりの2通りがあるため、問題数は、 $5^3 \times 2 = 250$ 通りとなる。計算時間比は商品数3の計算時間(中央値)を1とした時の時間比を示す。計算時間比(最大)は最も計算に時間を要した問題の時間比を示す。

表1 計算時間比

商品数	問題数	計算時間比	
		中央値	最大
3	250	1	4
4	1250	1	70
5	6250	8	4433
6	31250	1806	3184775

この結果から、数十個の商品が連続的に投入されるような場合、計算時間が膨大となるため、A*アルゴリズムでは垂直搬送機の適切な動作を算出できないことが分かった。実際の現場では、数十個、数百個単位で連続して商品が投入されることが想定されるため、より多くの商品を対象とした垂直搬送機の適切な動作の算出は重要と考える。そこで本研究では、より多くの商品が連続して投入される場合に対応できる垂直搬送機の適切な動作を探索する手法を提案した。

5 提案手法

5.1 概要

提案手法は、A*アルゴリズムで探索した動作を部分解とし、Q学習を用いて部分解同士を適切に接続することで、連続的に投入される多数の商品に対する垂直搬送機の適切な動作を求める。図6に提案手法の概要を示す。図6の商品内の数字は、各商品の搬送先となる棚の階を示す。商品列は垂直搬送機に搬送する順番を示し、図中の右から順に垂直搬送機に搬送することを示す。この時、提案手法では、多数の商品を含む商品列を少数の商品列に分け、その

少数の商品列に対してA*アルゴリズムを用いて探索した垂直搬送機の適切な動作を部分解として繋げる。

A*アルゴリズムによる垂直搬送機の動作探索結果から、1つの商品列に対して、その商品列を棚に搬送する時間が最小となる垂直搬送機の適切な動作が複数あることが分かっている。つまり、1つの商品列に対して部分解が複数個存在する。

従って、部分解を接続する際、多数の商品を含む商品列を棚に搬送する時間がより短くなるように、それら複数個の部分解の中から適切な解を選択することが求められる。この選択を行う学習モデルをQ学習[5-6]を用いて構築した。次節でその詳細を示す。

商品: 

部分解: 商品列を棚に格納する時間を最小とする垂直搬送機の動作順序

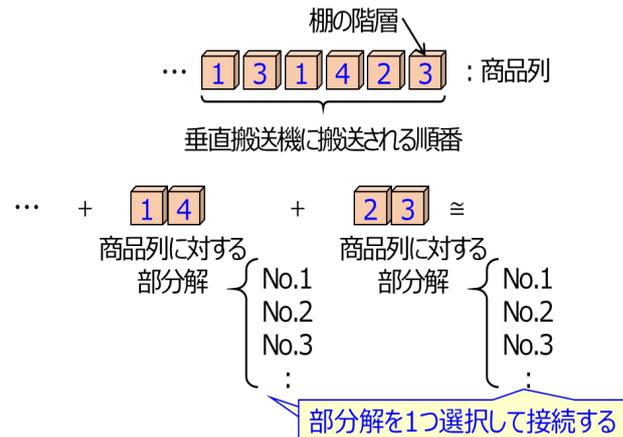


図6 提案手法の概要

5.2 Q学習を用いた部分解の接続手法

5.2.1 学習モデルの概要

前節で記載した部分解を接続する際、多数の商品を含む商品列を棚に搬送する動作回数がより少なくなるように、複数個の部分解の中から適切な解を選択することができる学習モデルを構築した。具体的には、図7のように、先発の商品列に対する垂直搬送機動作の部分解に対して、後発の商品列に対する垂直搬送機動作の部分解を適切に選択する学習モデルを構築した。

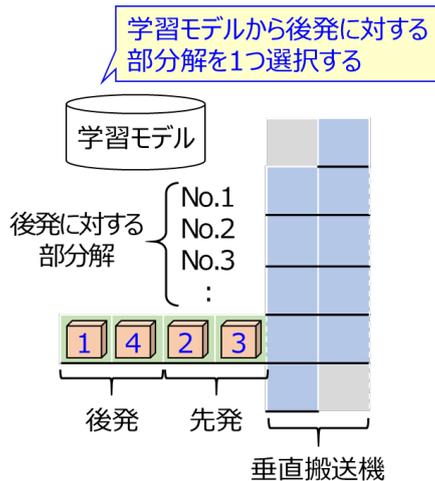


図7 学習モデルの概要

5.2.2 学習モデルの構築

Q学習を用いて学習モデルを構築した。5.2.1記載の学習モデルを構築するため、Qテーブルを表2のように構成した。表2の各項目の説明を下記に示す。

- G_t : 先発の商品列
- e_t : 先発の部分解番号
(複数の部分解が存在するため、それぞれにナンバリングしたもの)
- G_{t+1} : 後発の商品列
- e_{t+1} : 後発の部分解番号
- Q : Q値
- r_t : 先発と後発の部分解接続後の垂直搬送機の動作回数

表2 垂直搬送機のQテーブル例

G_t	e_t	G_{t+1}	e_{t+1}	Q	r_t
[1,1,1]	0	[1,1,1]	0	q_1	r_1
[1,1,1]	0	[1,1,1]	1	q_2	r_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
[5,5,5]	4	[5,5,5]	3	q_{n-1}	r_{n-1}
[5,5,5]	4	[5,5,5]	4	q_n	r_n

表2のQテーブルは、商品列の商品数が3の場合の例になる。1行目は、商品列 $G_t = [1,1,1]$ の部分解 $e_t = 0$ と商品列 $G_{t+1} = [1,1,1]$ の部分解 $e_{t+1} = 0$ を接続したときのQ値が q_1 となり、接続後の動作回数が r_1 となることを示している。

次に、垂直搬送機におけるQ値の更新式は、以下のようになる。

$$Q(G_t, e_t, G_{t+1}, e_{t+1}) \leftarrow Q(G_t, e_t, G_{t+1}, e_{t+1}) + \alpha \left[r_t + \gamma \min_{e_{t+2}} Q(G_{t+1}, e_{t+1}, G_{t+2}, e_{t+2}) - Q(G_t, e_t, G_{t+1}, e_{t+1}) \right] \quad (1)$$

α : 学習率
 γ : 割引率 ($0 \leq \gamma \leq 1$)

式(1)を用いて、Q値を更新し学習モデル(Qテーブル)を作成する。学習モデルの作成フローを図8に示す。図8の指定回数は、Q値が収束し、安定する回数を選択した。

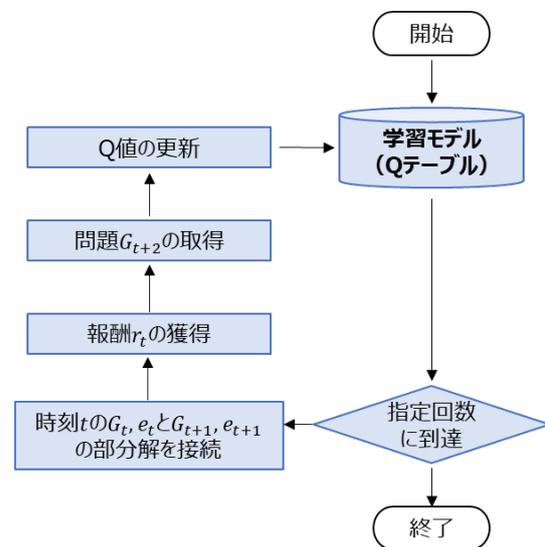


図8 Q学習のフローチャート

5.2.3 後発の商品列の接続方法

部分解同士の接続後、多数の商品を含む商品列を棚に搬送する動作回数がより少なくなるような後発の商品列の接続方法を提案する。

通常考えられる接続方法は、図9のように先発の商品列と後発の商品列を単純に接続する方法である。

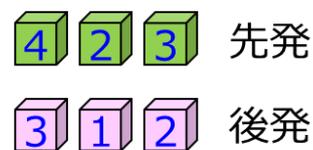


図9 1つ目の先発と後発の商品列

この接続では、図 9 を例にすると、接続後の商品列は図 10 のようになる。

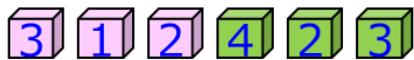


図 10 1つ目の方法で接続した後の商品列

一方で、図 11 のように先発の最後尾と後発の先頭が同一の商品にして接続するパターンも考えられる。

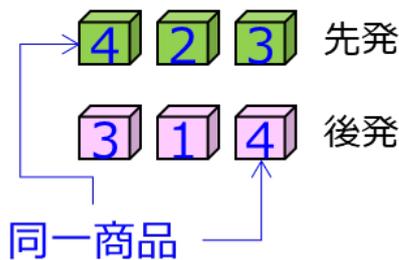


図 11 2つ目の先発と後発の商品列

この接続では、図 11 を例にすると、接続後の商品列は図 12 のようになる。



図 12 2つ目の方法で接続した後の商品列

接続するためには、同一商品を棚へ移動する動作を同じにする。同じ動作にすることで、先発と後発の垂直搬送機の動作の部分解をスムーズに接続できる。

それぞれの接続方法の特徴を表 3 に示す。方法 2 は、垂直搬送機の動作回数を少なくできるが、商品列次第で接続できないことがある。そこで、方法 2 で接続不可の場合のみ、方法 1 で商品列を接続する。

表 3 各接続方法の特徴

方法	接続後の動作回数	接続の可能性
1	多い	可能
2	少ない	不可の場合あり

しかし、この方法で商品列を接続すると、後発の商品列の長さが方法 1 と方法 2 で異なってしまい、後発の商品列に対する部分解選択の Q 値を正しく評価できない。そこで、後発の商品列が常に同じ商品数となるよう部分解の商品列の数に応じて接続方法を選択した。

図 13 に例を示す。商品数 3 と 3、4 と 3、3 と 4、4 と 4 の部分解接続に対して、商品数の組合せに応じて以下の接続方法を実施した。商品数 3 と 4 または 4 と 4 の部分解を接続する場合は、方法 2 である同一商品の動作を基準に接続する方法を実施した。商品数 3 と 3、4 と 3 の部分解を接続する場合は、方法 1 で接続を実施した。

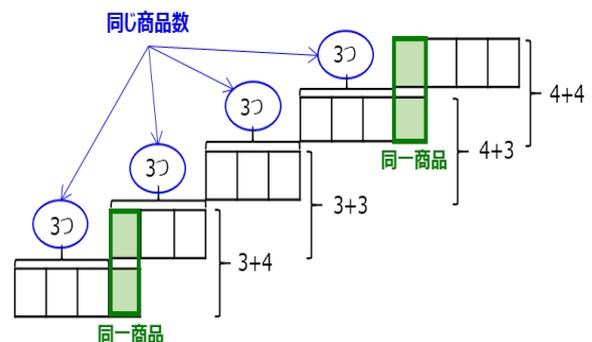


図 13 接続方法の例

6 実験

学習モデルの効果を確認するため、垂直搬送機の搬送能力を評価する実験を行った。ここで搬送能力とは、1 時間あたりにコンベアから棚へ搬送できる商品数とした。

6.1 実験準備

商品数 3 と 4 の全商品列に対し、A*アルゴリズムで探索し、それぞれの垂直搬送機の動作について、全ての最適解を求め、部分解を導出した。

商品数 3 : 125 通りの商品列

商品数 4 : 625 通りの商品列

A*アルゴリズムで導出した部分解を元に、商品数 3 と 4 の商品列に対して適切な後発の部分解を算出する学習モデル (Q テーブル) を構築した。学習率 $\alpha = 0.3$ 、割引率 $\gamma = 0.8$ 、学習回数 $n = 1,000,000$ として学習を実施し、図 14 のように学習回数を重ねるごとに Q 値が収束していくことを確認した。

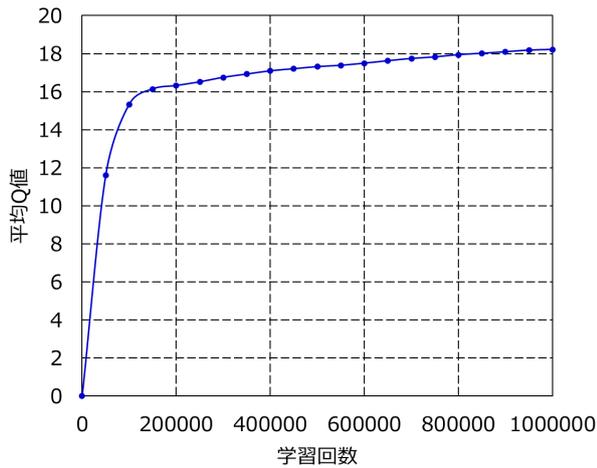


図 14 学習回数ごとの Q 値

6.2 実験条件

商品数 50 で搬送先の階層が異なる 50 パターンの商品列を作成した. 各パターンで商品数 50 を搬送するために要する搬送能力を計算した. 搬送能力 C_{vss} [個/h] の計算式を式(2)に示す.

$$C_{vss} = \frac{3600 \times 50}{t} \quad (2)$$

ここで, t は 50 個の商品を搬送するために要した時間[s]である.

学習モデルの効果を確認するために, 後発解の部分分解選択時にモデルの使用有無で搬送能力の差を確認した.

- i) 使用あり: Q 値が最も高い部分解を選択
- ii) 使用なし: 動作回数が最少の部分解を選択

6.3 結果

図 15 に学習モデルを使用することで向上した搬送能力の割合を示す. 学習モデルを使用しない場合と比較すると, 使用することで搬送能力が平均 10%, 最大 21% 向上した.

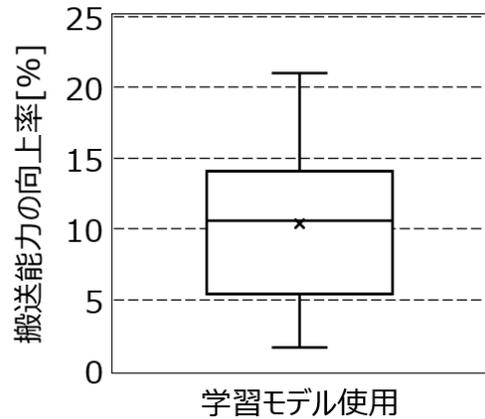


図 15 実験結果

6.4 考察

多数の商品列に対して, 垂直搬送機の適切な動作を導出する手法を提案し, 実験を通して, 垂直搬送機の搬送能力向上に対する提案手法の効果を確認できた. この要因として, 提案手法では出来るだけ多くの商品を垂直搬送機内に投入できていることが考えられる. この点について, 商品の搬送時間のうち, 垂直搬送機内に存在する商品数の割合を調査した. その結果を表 4 に示す.

表 4 にて, 学習モデルを使用した場合は, 学習モデルを使用しない場合に対して, 垂直搬送機内の商品数が 2 つ以上の時間割合が増加していることを確認できた. 本結果から, 搬送能力の向上と垂直搬送機内の商品数には一定の関係があると推察される. この観点から, 搬送能力の向上に繋がる手法の改良について更なる検討を進めたいと考えている.

表 4 商品の搬送時間に対する垂直搬送機内の商品数別時間の割合

垂直搬送機内の 商品数	学習モデルの使用	
	あり	なし
1	7%	17%
2	66%	62%
3	27%	21%

7 結論

本研究では, 多数の商品を搬送する垂直搬送機の効率的な動作順を求める手法を提案した. 提案手法では Q 学習を用いて, 部分解同士を接続することで

効率的な垂直搬送機の動作順序を導出した。実験を通して、提案手法の搬送能力の向上に対する効果を確認した。

今後は、垂直搬送機内の商品数や商品配置と搬送能力の関係について分析し手法改良を進め、搬送能力の向上に繋げる。

謝辞

本研究にご協力いただいた株式会社とめ研究所の後藤様に感謝致します。

参考文献

- [1] 労働力調査（基本集計），”労働力調査（基本集計）2020年（令和2年）平均”，総務省統計局，令和3年1月29日，https://www.meti.go.jp/policy/it_policy/statistics/outlook/210730_new_kohyoshiryo.pdf，（参照 令和3年10月21日）
- [2] 電子商取引実態調査，”令和元年度電子取引に関する市場調査”，経済産業省，令和2年7月22日，<https://www.stat.go.jp/data/roudou/sokuhou/nen/ft/pdf/index1.pdf>，（参照 令和3年10月21日）
- [3] 菊池純二ら，“自律分散エージェントを用いた原料ヤード内鉱石の動的搬送経路計画”，鉄と鋼. 2007, Vol.93, No.10, p.625-633
- [4] 加納政芳，山田雅之，遠藤守(2017)，人工知能原理，コロナ社
- [5] Watkins, C.J.C.H. (1989). Learning from Delayed Rewards. PhD thesis, Cambridge University, Cambridge, England
- [6] Watkins, C.J.C.H., Dayan, P. (1992). Q-learning. Machine Learning, 8:279-292