

自動コンテナターミナルにおける運用を考慮した AGV 搬送システムの設計[†]

星野 智史*・太田 順*
篠崎 朗子**・橋本 英樹**

Design of an AGV Transportation System by Considering Management in an ACT

Satoshi HOSHINO*, Jun OTA*,
Akiko SHINOZAKI** and Hideki HASHIMOTO**

Abstract: The development of a highly efficient management methodology for an Automated Container Terminal (ACT) poses a problem for port authorities. The focus here is on a transportation system for an Automated Guided Vehicle (AGV) for an ACT. In this paper, we construct the detailed management models, i.e., agent cooperation, container storage scheduling, and container transportation planning for the system. Then, we optimally design systems that are constructed with the use of the constructed management models. Comparisons of the systems are made to evaluate cost effectiveness based on the total construction cost and validity of the management models. Finally, we integrally solve the problem such as the design of the AGV transportation system by considering system management.

Keywords: AGV transportation system, design and management methodology, agent cooperation, container storage scheduling, container transportation planning.

1. 序論

近年の港湾物流におけるコンテナ貨物の取り扱い量は、アジアを中心に世界規模で年々増加傾向にある¹⁾。このような傾向から、港湾物流システムの自動化に対する需要が高まり、様々な視点から自動化に向けた研究がなされている^{2), 3)}。これら港湾コンテナターミナルの自動化に向けた研究の中には、マルチエージェントを適用するための分散エージェントシステムアーキテクチャの提案を行っているものも存在する^{4), 5)}。本研究においても、システム内で稼動する荷役・搬送・蔵置機械群をそれぞれ作業エージェント群としてとらえ、これら多種多様なエージェント群による高効率な自動搬送システムを構築する。構築にあたっては、以下に示す三つの問題を、統合的に解決する必要がある。

- (I) 搬送システムの最適設計
- (II) 搬送システムの比較・評価・解析
- (III) 搬送システムの効率的運用

問題 (I) は、「搬送システムに対する要求仕様を満たす最小限の作業エージェント投入台数の組合せを短時間で導出する」、という設計方法論に関する問題のことである。設計

段階に費やす時間コスト、およびシステムの構築コスト削減のためには本問題を解決するための設計方法論が必要となる。星野らは待ち行列ネットワーク理論ならびに搬送モデル(シミュレータ)をハイブリッドに用いた AGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムの最適設計方法論の提案を行っている⁶⁾。また、搬送システムのレイアウトに対して、垂直型や水平型といった搬送システムが存在する場合、各レイアウト特性の比較および評価を行い、最も効率的に搬送を行うレイアウトを把握する必要がある。そのため、問題 (II) を考慮する必要があり、星野らは本問題に対し、搬送時間に基づいたシステムの特性比較を行っている⁷⁾。また、問題 (I) および (II) を統合的に扱った研究として、様々な搬送システムを想定し、最も高効率な搬送システムの評価をシミュレーションモデルのみを用いて行っているものも存在する⁸⁾。星野らも問題 (I) および (II) を統合的に扱い、搬送システムを構築するための総合コストを最適設計パラメータに基づいて比較し、有効性の評価・解析を行っている⁹⁾。

これら従来研究の、「より効率的な搬送システムの構築を行う」という観点から、ある種のコスト設定の下では、港湾自動コンテナターミナルにおいて従来導入されてきた垂直型 AGV 搬送システムに比べ、水平型 AGV 搬送システムが有効であることがわかっている⁹⁾。そこで、本研究でも Fig.1 に示す水平型 AGV 搬送システムの構築を行う。しかしながら、水平型搬送システムでは AGV 以外にもコンテナ蔵置エリアにおいて稼動する RTGC (Rubber-Tired Gantry

[†] 第 17 回自律分散システムシンポジウムで一部発表 (2005.1)

* 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

** 三菱重工業(株) 相模原市田名 3000

* School of Engineering, The University of Tokyo

** Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

(Received April 25, 2005)

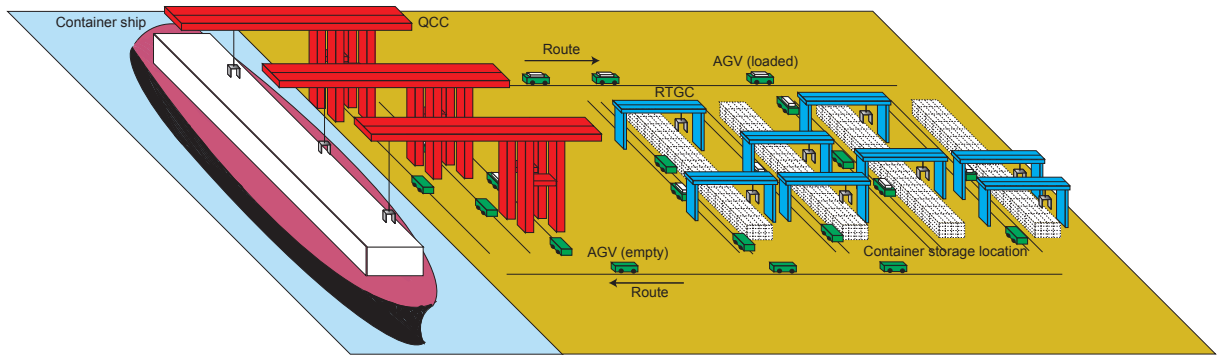


Fig. 1 The actual horizontal AGV transportation system in an automated container terminal (ACT)

Crane) もシステムにおける重要な作業エージェントとなるため、垂直型と比べ、搬送システム全体として複雑な制御を行う必要がある。以上のことから本研究では、「可能な限り短時間でコンテナ船に積み残されているコンテナ群を蔵置エリアへと搬送・蔵置する」といった、搬送システムの効率的な運用方法論である問題 (III) について考慮し、高効率搬送システムの設計を行う。

自動コンテナターミナルにおける搬送システムの運用法に関する従来研究として、様々な運用パラメータを決定することにより作業シナリオを生成し、これらをイベントベースシミュレーションにより評価するといったことがなされている¹⁰⁾。しかしながら、主に埠頭側 (コンテナ船～埠頭) でのコンテナ荷役作業のシナリオに注目しており、陸側でのコンテナ搬送および蔵置問題に関しては、コンテナの搬送先の決定を行うのみにとどまっている。これに対し本研究では、陸側における作業の詳細なモデル化を行う。すなわち、「当該コンテナを蔵置エリア内のどこへ搬送・蔵置するか、それらの順番はどうするか、蔵置エリアではどの RTGC が作業を担当するか、当該 RTGC をどのタイミングで決定するか」、などといったことについて考慮する。そのため、運用モデルを以下の 3 つと定義し、これらの設計を行う必要がある。

●異質エージェント間における協調行動則の設計

AGV 搬送システムでは様々なエージェント群が稼働しているため、作業仕様の異なるエージェント群により同一の作業を効率的に行うためには、各エージェントに適した行動則設計を行う必要がある。

●コンテナ蔵置場所での蔵置順序の設計 (蔵置スケジューリング)

AGV 搬送システムでは、作業指令は複数の地点から発生し、かつ作業目的地が複数である (多点間搬送)。そのため、AGV が行う搬送および RTGC が行う蔵置作業の効率化を図るため、作業を行う順序をスケジューリングする必要がある。

●コンテナの搬送・蔵置先の設計 (搬送計画)

多点間搬送を行う AGV 搬送システムにおいて、どの作業目的地へコンテナを搬送・蔵置するか、あらかじめ計画する必

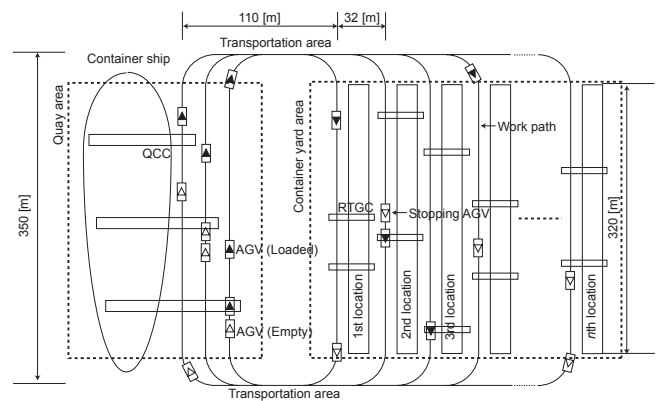


Fig. 2 Horizontal layout of AGV transportation system (top view)

要がある。

ついで、これら構築された各運用モデルを水平型 AGV 搬送システムへ実装する。提案した設計方法論⁶⁾を用いることにより、様々な要求仕様に対する AGV および RTGC 台数の算出を行う。そして、構築された各システムの作業効率を意味する構築コストの比較ならびに評価を行う。最後に、最も効率的な運用法を考察することで、問題 (III) を考慮しながら問題 (I) を解決する。

本論文では、2 章で港湾自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムについて述べ、3 章ではエージェント間における協調行動則の設計を行う。4 章ではコンテナ蔵置スケジューリングについて述べ、5 章ではコンテナ搬送計画について述べる。そして、6 章では、3~5 章の運用モデルを考慮した AGV 搬送システムの設計を行う。

2. 港湾自動コンテナターミナルにおける AGV 搬送システム

2.1 レイアウト設定

システムのレイアウトに関して、本研究では、Fig.1 の水平型 AGV 搬送システムを、最適設計のため Fig.2 に示すように、埠頭、搬送、コンテナ蔵置の 3 種類、4 つのエリアに分割して考える。実際の港湾自動コンテナターミナルでは、埠頭の幅 (1 [Berth]) はあらかじめ固定されてい

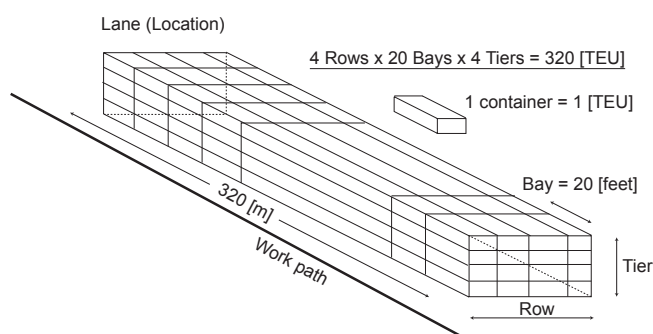


Fig. 3 Container storage location

る．そのため，一般的には埠頭の長さに応じた台数の QCC (Quay Container Crane) がトップダウン的に投入される．したがって本研究では Fig.2 が示すとおり，1 [Berth] の長さを 350 [m] とし，3 台の QCC を投入し，これらを設計対象とはしない．なお，コンテナ搬送指令は埠頭エリアにおいて各 3 台の QCC から均等に出される．さらに，各ロケーションに投入される RTGC 台数は 2 台とした．また，コンテナ蔵置エリアにおける AGV の作業経路を 1 本と設定した．ここで，作業経路とは，蔵置エリア内における AGV の搬送および RTGC とのコンテナの受け渡しを行うための専用経路を意味する．

Fig.3 にコンテナ蔵置場所となるコンテナ蔵置ロケーションを示す．本研究では，1 ロケーションあたり，320 [TEU] (4 Rows × 20 Bays × 4 Tiers) のコンテナ蔵置キャパシティを有するものとする．ここで，TEU とは“Twenty-foot Equivalent Unit” のことで，20 フィートコンテナ換算のコンテナ取り扱い個数の単位のことを意味する．

2.2 問題設定

本研究では問題設定として，AGV および RTGC の投入台数の他に，以下に示す運用項目を設計対象とする．また，設計された AGV および RTGC のパラメータは，構築されたシステムにおける評価要素となる．本研究では後述するコストモデルを設計の際の評価関数として導入し，AGV および RTGC の投入台数を算出し，構築コストの比較ならびに評価を行う．制約条件に関しては，コンテナ蔵置エリアにおける各ロケーションの最終蔵置率に大きなばつぎができないように蔵置を行い，これを蔵置制約とする．本研究では実際の自動コンテナターミナルにおける蔵置率を考慮し，コンテナの搬送・蔵置を行う際，各ロケーションの蔵置率が，平均蔵置率に対して $\pm 30\%$ 以内になるようにする．

- ・ AGV 投入台数
- ・ RTGC 投入台数
- ・ エージェントの行動則
- ・ コンテナ蔵置スケジューリング
- ・ コンテナ搬送計画

2.3 搬送手順

AGV は Fig.2 のシステム内を，以下の手順で RTGC と協調行動をとりながら巡回搬送する．

Table 1 Specifications of the AGV, RTGC, and QCC

AGV		Loaded / Empty
Max. traveling velocity	[m/s]	5.56 / 6.94
Acceleration	[m/s ²]	0.15 / 0.15
Deceleration	[m/s ²]	0.63 / 0.63
RTGC		
Max. traveling velocity	[m/s]	2.5
Acceleration	[m/s ²]	0.1
Deceleration	[m/s ²]	0.4
Storing time	[s]	30
Transferring time	[s]	30
QCC		
Loading/unloading time	[s]	60

STEP 1. 埠頭エリアで稼動する QCC がコンテナ船から AGV へコンテナを荷役する．

STEP 2. コンテナ蔵置エリアにあるコンテナ蔵置ロケーションのいずれかの場所が当該コンテナの目的搬送・蔵置先になる．

STEP 3. AGV は搬送エリアを通りコンテナ蔵置エリアへと向かう．

STEP 4. 作業経路を走行し，AGV が目的ロケーションに隣接する受け渡し・蔵置位置に到達する．

STEP 5. AGV は RTGC とコンテナの受け渡し作業を行う．

STEP 6. 受け渡されたコンテナは，RTGC によりロケーション内へと蔵置される．作業を終了した RTGC はアイドリング状態になり，つぎの蔵置指令を待つ．

STEP 7. コンテナを受け渡した AGV は，再び搬送エリアを通り，埠頭エリアへと戻る (STEP 1 へ) ．

2.4 エージェントの作業仕様

Table1 に AGV, RTGC, および QCC の仕様を示す¹¹⁾．AGV はコンテナを搬送中の場合と非搬送の場合でそれぞれ走行速度ならびに加減速度が異なるため，それらは“Loaded” および“Empty” で示されている．RTGC は移動走行時以外の仕様として，コンテナ蔵置エリアにおけるコンテナの受け渡しならびに蔵置作業に要する時間が示されている．QCC は自身による移動は行わないため，埠頭エリアにおけるコンテナの荷役作業に要する時間ののみが示されている．

3. エージェント間における協調行動則の設計

3.1 行動則のフレームワーク

均質なエージェントシステムを扱った研究として，吉村らは，群ロボットを用いた多数物体の二点間における繰返し搬送計画を行っている¹²⁾．しかしながら，多点間搬送に関する議論はなされていない．太田らは，ベルトコンベア搭載型 AGV の協調による物体の搬送システムの構築を行っている¹³⁾．これら従来研究では，すべて同一種のエージェント群による物体の搬送および受け渡し動作である協調行動に注目している．しかしながら，異質なシステムを扱う本研究では，エージェント間での仕様が異なるため，すべてのエージェントに対して同様の行動則を設計しただけでは

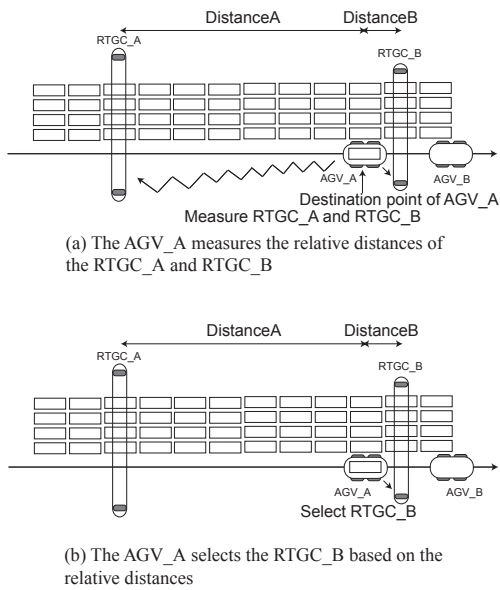


Fig. 4 Distance-based RTGC selection when an AGV arrives at a destination point (top view)

効率的な協調行動を実現することは困難となる。たとえば、Table1 より、AGV と比べ移動性能の低い RTGC はロケーション上において俊敏な行動をとることが不可能である。そのため、前述の協調行動 (STEP 4 ~ 6) のみでは、AGV が先に目的位置に到着し、そこへ RTGC が後から向かってくる作業工程になってしまうため、受け渡し作業開始までに時間がかかってしまう。すなわち、異種エージェント間における効率的な作業の実現のためには、「いつ、どこで、いかにして協調行動を行うか」といったことを考慮する必要がある。そのため本研究では、以下に記す (i) AGV の RTGC 選択法、(ii) AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング、について注目し、 $2 \times 2 = 4$ 通りの行動則設計を行う。

- AGV の RTGC 選択法
 - 近傍選択法
 - 作業空間選択法
- AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング
 - 作業経路上の目的位置到着後
 - 目的作業経路進入後

次節において、それぞれの行動則について説明する。

3.2 行動則設計

3.2.1 AGV による近傍選択法に基づいた目的位置到着後の RTGC 選択・呼び出し

Fig.4 は AGV の目的作業位置到着時における近傍選択法による RTGC 選択行動過程を示している。AGV_A が作業目的位置に到着した際、当該ロケーション上で稼働している各 RTGC までの距離をセンシングする (Fig.4(a))。このとき 2 台の RTGC ともアイドル状態の場合、AGV_A と RTGC_A ならびに RTGC_B との相対距離により、AGV_A に近い方に位置する RTGC_B が受け渡し相手として選択・呼び出される (Fig.4(b))。ただし、RTGC_B が近い位置に

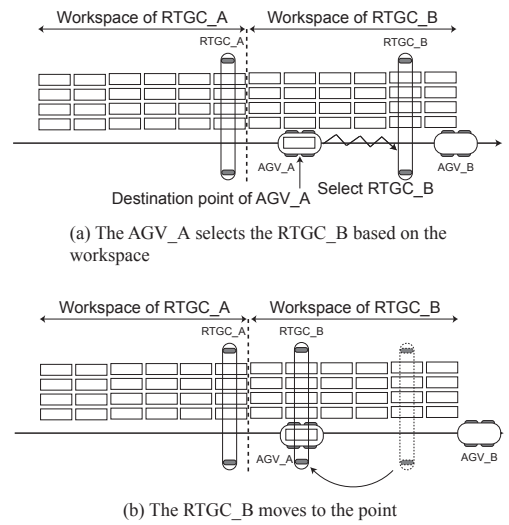


Fig. 5 Workspace-based RTGC selection when an AGV arrives at a destination point (top view)

いる場合においても、RTGC_B が (1) すでに他の AGV によりコンテナの受け渡し相手として選択・呼び出しされている場合、あるいは (2) コンテナ受け渡し・蔵置作業中の場合、AGV_A は遠くに位置している RTGC_A を選択する。

3.2.2 AGV による作業空間選択法に基づいた目的位置到着後の RTGC 選択・呼び出し

Fig.5 に AGV の目的作業位置到着時における作業空間に基づいた RTGC の選択行動過程を示す。この場合、RTGC 間での交差行動は行わず、各 RTGC に対してそれぞれ独立した作業空間を割り当て、割り当てられた作業空間内における受け渡し・蔵置作業を各 RTGC が受け持つようにする。Fig.5(a) の示すとおり、AGV_A が作業目的位置に到着し、コンテナ受け渡し RTGC を選択する際、目的位置に対して、RTGC_A が RTGC_B に比べ、近いところに位置している。しかしながら、当該コンテナの受け渡し・蔵置作業空間が違ふことから、AGV_A は RTGC_B を選択し、目的地へと呼び出す (Fig.5(b))。なお、本研究では各ロケーションに投入される 2 台の RTGC に対して均等に作業空間を割り当てた。すなわち、Fig.3 より各 RTGC は 4 Rows \times 10 Bays \times 4 Tires の作業空間を有する。

3.2.3 AGV による近傍選択法に基づいた目的作業経路進入後の RTGC 選択・呼び出し

Fig.6 は AGV の作業経路進入時における、近傍選択法に基づいた RTGC の選択・呼び出し行動過程を示している。AGV_A は作業経路に進入後、各 RTGC と通信を行い、走行中に目的地に対する各 RTGC との相対距離をセンシングし、目的位置に近い方に位置する RTGC_B を受け渡し相手として選択する (Fig.6(a))。RTGC_B には AGV が目的位置に到着する前に同様の目的位置が設定され、移動を開始する (Fig.6(b))。

ここで 3.2.1 項同様、RTGC_B が近い位置にいても、

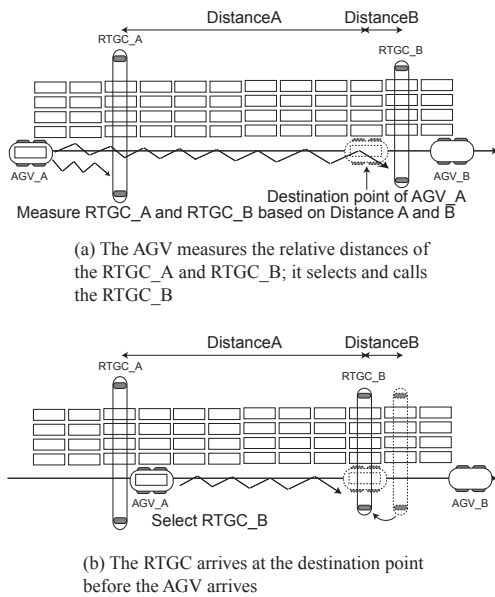


Fig. 6 Distance-based RTGC selection when an AGV goes into a work path (top view)

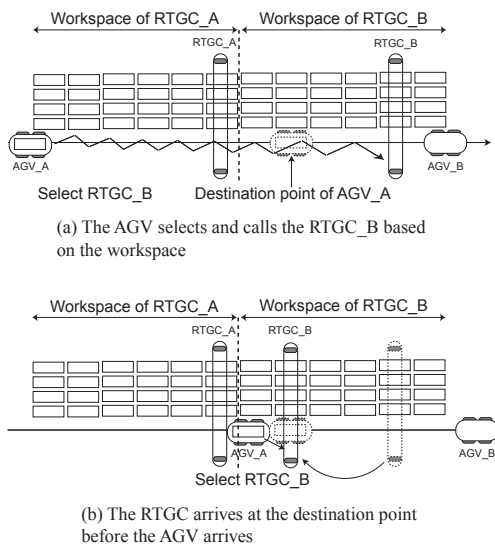


Fig. 7 Workspace-based RTGC selection when an AGV goes into a work path (top view)

RTGC_B が状態 (1) あるいは (2) にある場合などは、AGV は遠くに位置している RTGC_A を選択する必要がある。また、作業経路上における AGV の走行密度が高くなるにつれ、前方ですでに RTGC と通信を行っている AGV や RTGC を選択・呼び出しを行っている AGV が存在する場合が増加する。その場合、後方 AGV は当該 AGV の通信が終了するまで通信を開始しないものとする。なお、AGV-RTGC 間での通信は、コンテナの受け渡し作業開始時まで行われる。

3.2.4 AGV による作業空間選択法に基づいた目的作業経路進入後の RTGC 選択・呼び出し

Fig. 7 は AGV の作業経路進入時における、作業空間選択法に基づいた RTGC の選択・呼び出し行動過程を示してい

る。AGV_A は作業経路に進入後、各 RTGC と通信を行い、当該コンテナの目的蔵置位置に対応する作業空間を有した RTGC を認識する。そして RTGC_B を選択し、目的位置へと呼び出す (Fig. 7(a))。呼び出された RTGC_B は移動を開始する (Fig. 7(b))。

作業空間選択法においても 3.2.3 項同様、前方ですでに RTGC と通信を行っている AGV や RTGC を選択・呼び出しを行っている AGV が存在する場合、当該 AGV の通信が終了するまで通信を開始しないものとする。

4. コンテナ蔵置スケジューリング

4.1 蔵置スケジューリングのフレームワーク

自動コンテナターミナルにおけるコンテナ蔵置スケジューリングに関する従来研究では、AGV に対して、何らかのディスパッチングルールに基づき蔵置指令を与え、それらの性能評価を行っている^{14), 15)}。しかしながらこれらの研究では、作業エージェントとして AGV のみが用いられているため、蔵置エリアにおける異種エージェント間での協調行動などは考慮されていない。そのため、任意に生成された搬送・蔵置指令に対し、これらをどの AGV へ割り当てるかといったことのみが議論されている。すなわち、各ロケーションに対する搬送作業の順番は考慮されているが、ロケーション上における蔵置作業の順番を考慮した搬送・蔵置指令の割り当てに関しては議論されていない。そこで本研究では、各ロケーション上における作業順序のスケジューリングについて、作業順序を考慮しないランダム蔵置の場合と、作業順序を考慮した場合について設計する。

4.2 ランダム蔵置

ランダム蔵置とは、各ロケーション上における作業順序が考慮されていない蔵置法のことである。Fig. 8 の “Initial orders” がコンテナ搬送計画により決定されたコンテナ搬送・蔵置指令の初期状態を示している。蔵置位置 A~L にはすべて (Row, Bay) 情報が収められている。ランダム蔵置の場合、AGV はこれら生成されたコンテナ搬送指令を初期状態のまま順番に実行し、搬送されたコンテナは RTGC により順番に蔵置される。したがって、ランダム蔵置では、作業時の RTGC の総移動量が無駄に増加してしまう場合が存在する。そのため、作業経路上における AGV の渋滞が発生してしまい、作業効率は悪化してしまうことが予測される。

4.3 蔵置スケジューリングを適用したコンテナ搬送・蔵置

本研究では、任意に生成された蔵置指令に対して、RTGC の移動性能を考慮する、すなわち、(A) RTGC の総移動量の最小化、(B) 各ロケーションおよび作業経路上における AGV-RTGC の作業密度の均等化、を目的としたコンテナ蔵置スケジューリングを行う。そのため、まずはじめに各ロケーションに対して RTGC の作業空間を設ける。なお、ここでの作業空間は、3.2.2 項と同様に、各 RTGC に対して均等となるように与えている。Fig. 8 の RTGC_A ならびに RTGC_B の位置を作業開始時の初期位置とし、任意に生

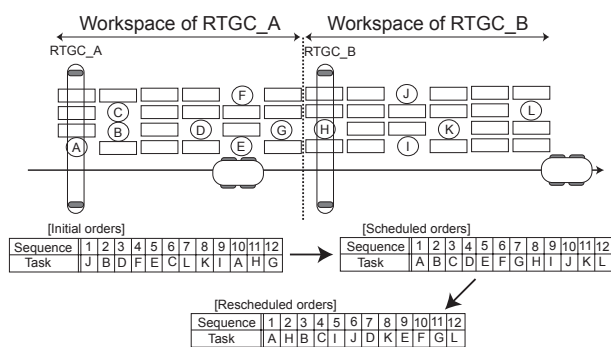


Fig. 8 Example of container storage scheduling (top view)

成された蔵置指令に対し、(A)に基づき RTGC が一方へ移動しながら作業を行えるように作業順序を入れ替え、これを“Scheduled orders”とする。本スケジューリングにより、ロケーション上における RTGC の往復運動は無くなる。しかしながらこれらスケジューリングされた蔵置指令をそのまま実行しようとすると、 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \dots$ の順番で作業を行うため、ロケーション左側で作業を行っている RTGC_A の作業密度が高くなってしまふ。そのため、(B)に基づいた再スケジューリングを行う。すなわち、Fig.8 の示す各 RTGC の作業初期位置から近い場所で行われる蔵置作業の順に、指令の順番を入れ替える。Fig.8 の作業指令 D および K といった、各 RTGC の初期作業位置からの距離が等しかった場合、これらの作業順序はランダムに決定する。そして、これを“Rescheduled orders”とする。なお、本節では説明のため、ロケーション数が一本の場合のみを扱っているが、ロケーション数が 2 本以上の場合も、同様のスケジューリングが各ロケーションに対して行われる。その際、コンテナをどのロケーションへ搬送・蔵置するかは、次章で述べるコンテナ搬送計画により算出されるコンテナ搬送頻度に基づき、乱数により決定する。AGV はこれらオフラインでスケジューリングされた搬送指令を順に実行し、搬送されたコンテナは順番に RTGC により蔵置される。

5. コンテナ搬送計画

5.1 搬送計画のフレームワーク

コンテナ搬送計画に関して、どのロケーション上のどの蔵置位置にどの程度のコンテナを搬送したら最も作業効率が良くなるのかということについて、あらかじめ最適搬送計画を行うことは可能である。しかしながら、自動コンテナターミナルのような大規模な搬送システムにおいては、最適な搬送計画を行うために膨大な計算時間を必要とし、さらに、最適搬送計画を行ったとしても実際のシステム内においてエージェント群が計画通りに作業を遂行することが極めて困難である。また、埠頭側のロケーションに重点的に搬送・蔵置を行うことにより、短い搬送経路による作業時間の短縮が可能であるが、RTGC の各ロケーションに対する投入バランスを考慮すると、ロケーション毎にある程度の負荷分散を行う

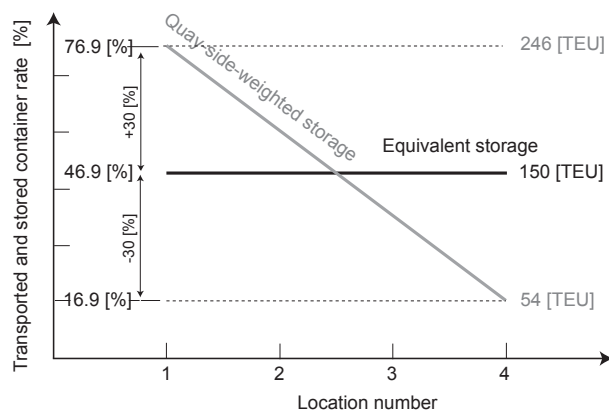


Fig. 9 Example of equal and quay-side-weighted transportation dispatching rule

必要がある。そこで本研究では、コンテナ搬送計画を行う際に、コンテナの搬送・蔵置先をランダムに決定するランダム搬送以外に、均等搬送および埠頭側加重搬送ルールを設け、これら搬送ルールに基づいた各ロケーションに対する搬送・蔵置コンテナ数を、蔵置制約を満たす範囲内で短時間に決定する。ここで、簡単化のため、作業開始時にはロケーション上に蔵置されているコンテナはないものとして搬送計画を行った。なお、蔵置されているコンテナが存在する場合は、Fig.3 の示すコンテナ蔵置キャパシティを減じることにより、同様の搬送計画を行うことができる。

5.2 ランダム搬送

ランダム搬送ルールでは、コンテナの搬送・蔵置される目的ロケーションはランダムに決定される。そのため、各ロケーション毎の搬送コンテナ数が乱数の影響により多少不均等になる。ロケーション上での蔵置制約として、Fig.3 より、1 ロケーションあたりに最大で蔵置できるコンテナ数は 320[TEU] とする。

5.3 均等搬送

均等搬送ルールでは、各ロケーションに搬送されるコンテナの数はすべて均等としている。したがって、総搬送コンテナ数が 600[TEU] でロケーション数が 4 本の場合、各ロケーションには 150[TEU] 搬送されることとなる (Fig.9)。なお Fig.9 の横軸に関して、第 1 ロケーションから順に埠頭側より配置されている。また、Fig.3 より 1 ロケーションあたりのコンテナ蔵置キャパシティは 320[TEU] であることから、最終蔵置率は各ロケーションで均等の 46.9[%] となる。ここで、蔵置率とは、“蔵置されたコンテナ数 / ロケーションのコンテナ蔵置キャパシティ”を意味している。

5.4 埠頭側加重搬送

埠頭側加重搬送ルールでは、Fig.9 が示すとおり、埠頭側のロケーションより優先的に搬送を行う。しかしながら、埠頭側より順にロケーションのコンテナ蔵置キャパシティの上限に達するまでコンテナを搬送・蔵置しては、結果として蔵置率の極端に高い埠頭側のロケーションと、そうでない

Table 2 System management models under random transportation

RTGC selection method	RS	DS	DS	DS	DS	WS	WS	WS	WS
RTGC selection & call-out timing	DP	DP	WP	DP	WP	DP	WP	DP	WP
Container storage scheduling	×	×	×	○	○	×	×	○	○
Management model number	1)	2)	3)	-	-	-	4)	5)	6)

DS: Distance-based RTGC selection, WS: Workspace-based RTGC selection, RS: Random RTGC selection
DP: on the Destination Point, WP: on the Work Path, ×: Random storage, ○: Storage scheduling

ロケーションが生じてしまうことになる。実際の搬送現場ではこのようなことは行われておらず、本研究でも 2.2 節での議論を考慮し、蔵置制約として、均等搬送を行った際の各ロケーションの最終蔵置率に対して、最大、最小蔵置率がそれぞれ ±30[%] の蔵置率におさまるように、搬送・蔵置コンテナ数に勾配をつけ搬送計画を行う。したがって、総搬送コンテナ数が 600[TEU] で、ロケーション数が 4 本の場合、埠頭側の第 1 ロケーションより順に第 4 ロケーションまで、246, 198, 102, 54[TEU] だけ搬送される。

6. システム設計

6.1 設計手順

入力として与えられる総搬送コンテナ数および要求搬送完遂時間より得られる要求仕様から、設計解算までの設計手順について述べる。なお本研究では、要求仕様として、後述するスループットを用いた。3, 4, 5 章で構築してきた AGV 搬送システムの運用モデルをすべて実装した場合、4 通りの行動則、2 通りの蔵置スケジューリング、3 通りの搬送計画となり、評価する対象が膨大になってしまう。そのため、まずはじめにコンテナ搬送計画をランダム搬送に固定し、Table2 に示す各運用モデル 1)~6) に基づいたシステムを構築する。AGV および RTGC の投入台数を設計する際には、文献⁶⁾ の設計方法論を適用した。

PROCESS 1. 要求仕様の入力。

PROCESS 2. 3, 4 章で構築してきた AGV 搬送システムの運用モデルをシステムへ実装。

PROCESS 3. 投入台数の設計、構築コストの評価、および、最もコストの低い運用モデルの算出。

PROCESS 4. PROCESS 3 から算出された運用モデルに、5 章で構築したコンテナ搬送計画として均等および埠頭側加重搬送ルールを適用。

PROCESS 5. 投入台数の設計、構築コストの評価、最もコストの低い運用モデル、およびそのときの AGV, RTGC 投入台数を設計解として算出。

エージェント行動則およびコンテナ蔵置スケジューリングに関して、RTGC 選択法 (DS, WS)、選択・呼び出しタイミング (DP, WP)、コンテナ蔵置スケジューリングの有無 (×, ○) をそれぞれ実装すると、合計 8 パターンのシステムが考えられる (Table2)。これに、文献⁶⁾ において用いられてきた従来の運用モデルとして、ランダム蔵置の下 AGV が目的位置に到着後、RTGC をランダムに選択する方法 (モデル 1) を構築した。Table2 において、蔵置ス

ケジューリングは RTGC の作業空間を基に行われるため、RTGC 選択法 DS をとった場合、蔵置スケジューリングが行われることはない。また、RTGC 選択法 WS をとる場合、目的位置よりも作業経路進入後に RTGC を選択し、呼び出した方が効率が良いことは明らかである。したがって、それらを Table2 において “-” で示し、本論文では比較対象とはしない。

6.2 AGV, RTGC 投入台数設計を考慮した設計制約

6.1 節で述べた設計手順にしたがい、実装した運用モデルの下、AGV および RTGC の投入台数を算出する。ただし、無駄にエージェントの投入台数を増やすことを避けるため、投入台数の上限を AGV=30, RTGC=20 に設定した。搬送・蔵置コンテナ総数を 600 [TEU] とした。要求仕様は単位時間あたりのコンテナ搬送量 (Throughput [TEU/hour]) とし、本設計では 10[TEU/hour] から 10 ずつ、最高で 130 [TEU/hour] まで与え、各要求仕様に対する設計解を導出する。

6.3 コストモデル

本設計プロセスにおいては、以下に示すコストモデルを用いることにより、設計パラメータの組合せを唯一に算出する。ただし、コストモデルを導入してもシステムの構築コストが同一の値となる場合があり、その場合に限り設計パラメータを複数算出した (たとえば Fig.10(c) など)。

$$Construction\ cost = a \times AGVs + b \times RTGCs,$$

ここで、 a, b はコスト係数のことであり、本研究では、AGV と RTGC の価格および設備投資費を考慮し、 $a : b = 1 : 2$ に設定した。

6.4 運用モデルによる作業効率の評価

Fig.10 にランダム搬送の下、Table2 の運用モデルをシステムへ実装した結果、得られた設計パラメータである AGV および RTGC 台数の組合せを示す。Fig.11 に得られた構築コストの比較結果を示す。グラフの横軸が要求仕様、縦軸が得られた設計パラメータとコストモデルに基づき算出されたシステムの構築コストを示している。モデル 1) では、要求仕様 130 を満たす設計パラメータを算出することができなかった (Fig.10(a))。つまり、モデル 1) の従来手法では明らかに作業効率が悪いことがわかる。そのため、Fig.11 において、要求仕様 130 に対する構築コストも算出されていない。これより、従来手法では高効率搬送システムの構築が困難であることがわかる。また、Fig.10(c) ならびに Fig.10(e) の設計パラメータが複数算出された場合において、RTGC 台数を増加させることが AGV の投入台数の削減に対して影

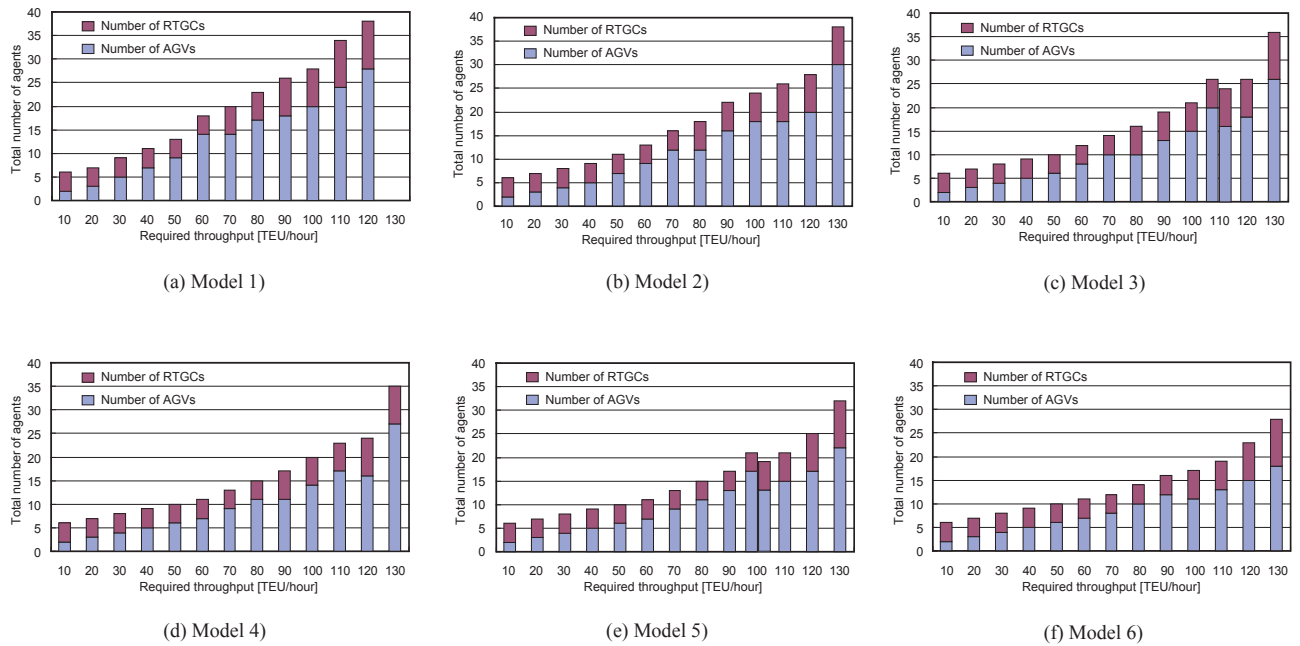


Fig. 10 Number of AGVs and RTGCs that construct a system

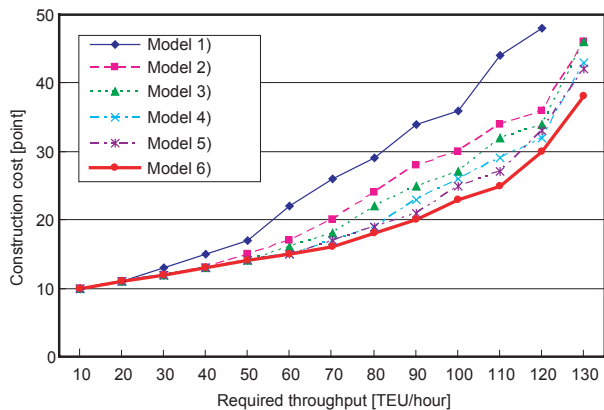


Fig. 11 Comparison results of the total construction costs under the random container transportation

響を与える場合があることがわかる。Fig.10(b)~Fig.10(d)と Fig.10(e), (f) より、ランダム配置では、要求仕様 130 を満たすために、120 までの場合と比べ多くのエージェント、特に AGV を投入する必要があることがわかる。

Fig.11 において、モデル 1) 以外では、要求仕様が低い段階では確認されなかった構築コストの差が、要求仕様が高くなるにつれて顕著になっていることがわかる。その結果、運用を考慮しないで設計されたシステム(モデル 1)との構築コストの差は、要求仕様 120 で最大 18[point] (max. 48, min. 30) となり、最大値に対して約 38[%] の効率化を確認した。

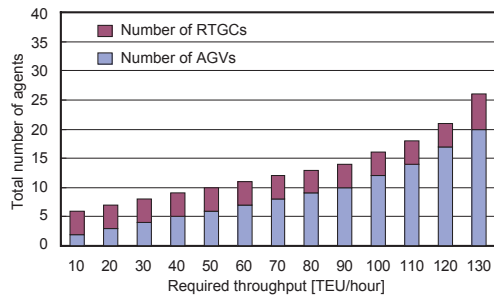
ランダム配置における行動則の有効性の確認を行ったモデル 2)~4) では、モデル 4), すなわち作業経路進入時に作業空間選択法に基づき RTGC を選択・呼び出す行動則が最も効率的であることがわかった。一方で、モデル 2) と 3) で

は、要求仕様が 120 から 130 に高められる際、AGV 投入台数に大きな増加があり (Fig.10(b), Fig.10(c)), 作業経路進入時における RTGC の選択・呼び出しの有効性が確認できなかった。これは、システム内におけるエージェント群の作業密度が高くなり、その結果、作業経路上での AGV 台数が増加する一方でアイドリング状態の RTGC が減少してしまい、AGV が作業経路上を走行中に RTGC と通信を行い、受け渡し目的位置へ移動させることが困難となってしまったためである。つぎに蔵置スケジューリングを行った場合では、モデル 5) に比べ 6) がより効率的に搬送を行うことがわかった。これは、作業空間を RTGC 毎に分離させることにより作業密度を低減させ、その結果、作業経路での AGV-RTGC 間での通信が有効に機能したためであると考えられる。

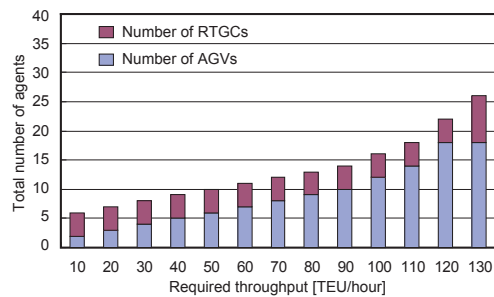
以上のことより、コンテナ蔵置スケジューリングを行った上で、AGV が作業経路上に進入した際 RTGC を作業空間選択法に基づき選択・呼び出しする運用モデル 6) が最も効率的であることがわかった。

6.5 高効率運用法についての考察

Fig.12 は、最も作業効率の高い運用法であるモデル 6) を採用し、コンテナ搬送計画として、均等搬送および埠頭側加重搬送ルールを適用した際に得られた、AGV および RTGC 台数を示している。ランダム搬送による運用モデル 6) の結果、得られた AGV および RTGC の設計パラメータ (Fig.10(f)) と比べ、Fig.12(a) および (b) における AGV と RTGC の台数は少なく算出されていることがわかる。本結果より、ランダム搬送より、均等および埠頭側加重搬送が高効率であることがわかる。ただし、Fig.12(a), (b) とともに、要求仕様 130 に対して RTGC がそれぞれ 6 台、8 台必要と



(a) Management model 6) with equal transportation



(b) Management model 6) with quay-side-weighted transportation

Fig. 12 Number of AGVs and RTGCs that construct a system for a required throughput

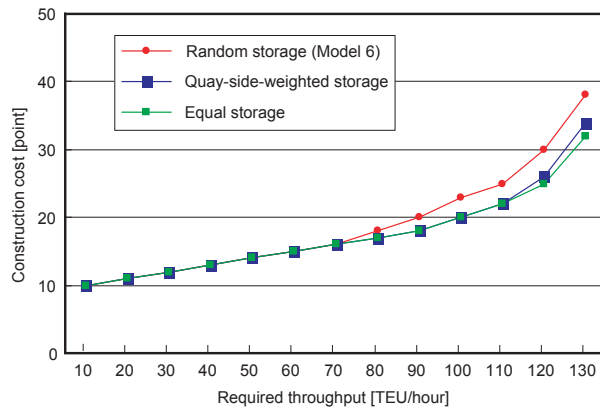


Fig. 13 Comparison results of the total construction costs under the all transportation rules

なっている。これは、ロケーション 2 本の場合では埠頭側加重搬送を行うと極端に第 1 ロケーション上の作業密度が高くなり、作業効率が低下してしまい（第 1 ロケーションへのコンテナ搬送・蔵置数：320[TEU]，第 2 ロケーションへのコンテナ搬送・蔵置数：280[TEU]），そのため、ロケーションが 3 本，4 本必要になったためである。

Fig. 13 に各搬送ルールを運用モデルとして実装した際に得られたシステムの構築コストの比較結果を示す。要求仕様が 70 まででは運用モデルによる構築コストの差はないが、要求仕様が高められるにつれ、ランダム搬送（モデル 6）では均等搬送および埠頭側加重搬送を行った運用モデルに比べ作業効率が悪化してしまっていることがわかる。要求仕様

Table 3 Comparison of transportation times

Number of location	3	4
Optimal plan	5.23 [h]	4.76 [h]
Equal storage	5.32 [h]	4.87 [h]
Quay-side-weighted storage	5.29 [h]	4.84 [h]

が 130 のときに各モデルによる構築コストの差が最大となり、均等搬送では 32[point]，埠頭側加重搬送では 34[point] となった。作業効率では、ランダム搬送を適用したモデル 6) に対し、均等搬送を適用した場合で 16.3[%]，埠頭側加重搬送を適用した場合で 10.5[%] の効率化を確認した。さらに Fig.11 における、従来運用モデル 1) と比較すると、要求仕様 120 の際に、均等搬送の場合で 48[%]，埠頭側加重搬送の場合で 46[%] の効率化が図られた。この結果より、均等搬送ルールに基づいた搬送計画が最も効率的であることがわかった。これは、各ロケーションに投入されている RTGC 台数が均等であるため、埠頭側加重搬送を行った場合、埠頭側の RTGC がボトルネックになってしまうためであると考えられる。

以上のことから、本研究で設定したエージェントの作業仕様（Table 1），コストモデル，および要求仕様に対して得られた AGV および RTGC の投入台数では、均等搬送計画によりコンテナの搬送・蔵置目的のロケーションを決定し、蔵置スケジューリングを行った上で、AGV が作業経路に進入後、RTGC を作業空間選択法に基づき選択・呼び出しする運用法が最も高効率であることがわかった。すなわち、本研究で構築した運用モデルの有効性，および、これら運用までを詳細に考慮した設計を行う必要があることを確認した。また、ランダム蔵置計画による各ロケーションに対するコンテナ搬送・蔵置数のばらつきは、ロケーション 3 本の場合、第 1 ロケーション 180[TEU]，第 2 ロケーション 202[TEU]，第 3 ロケーション 218[TEU]，ロケーション 4 本の場合では、第 1 ロケーション 146[TEU]，第 2 ロケーション 144[TEU]，第 3 ロケーション 149[TEU]，第 4 ロケーション 161[TEU] であった。このロケーション毎のコンテナ搬送・蔵置数の差が、ランダムおよび均等搬送による構築コストの差をもたらしている。

6.6 コンテナ搬送計画の有効性

5 章において構築した、均等および埠頭側加重搬送ルールの有効性を搬送時間の観点より考察する。そのため、搬送時間が最も短くなるよう各コンテナの搬送・蔵置先が計画された最適搬送計画に基づいて行われた場合の搬送時間，および各搬送ルールに基づいて行われた場合の搬送時間の結果を、それぞれ Table 3 に示す。なお、コンテナの最適搬送計画を行うにあたっては、コンテナの探索きざみは 5[TEU]，蔵置制約として最終蔵置率を最大値，最小値をそれぞれ ± 30 [%] 以内とし、解空間に対する全探索を行った。AGV と RTGC の設計パラメータはそれぞれ天下的に、ロケーション本数が 3 本（AGV 13 台，RTGC 6 台），ロケーション本数が 4 本（AGV 15 台，RTGC 8 台），と設定した。本結果より，

均等ならびに埠頭側加重搬送に比べ、最適コンテナ搬送計画を行った場合の作業時間の効率化が見られる。しかしながら、この程度の時間の短縮による作業効率への影響はほとんどなく、エージェント台数を減らせる程の効率化は達成できなかった。したがって、本研究で設けた搬送ルールは有効であることがわかる。

計算時間に関して、一組の AGV、RTGC 台数パラメータに対するコンテナの最適搬送計画終了までに要した時間は、Pentium 4 CPU 2.8 GHz の計算機を使用し、ロケーション 3 本の場合で約 8 分、ロケーション 4 本で約 2 時間 15 分だった。すなわち、最適搬送計画を様々な要求仕様および運用モデルに対して行った場合、1 回の計画時間 × 要求仕様の数 × 運用モデルの数、だけの計算時間が必要となることがわかる。これに対し、各搬送ルールを適用した際の計算時間は、それぞれ 1 回の計画時間がロケーション数が 3 本で 1.2 秒、4 本では 1.3 秒程度だった。そのため、10~130[TEU/hour] までの 13 通りの要求仕様、および 6 + 2 通りの運用モデルに対して設計を行っても、設計回数の合計は 104 回程度となる。一組の AGV および RTGC の組合せ設計解算に要する時間は、約 10 秒程度であることから、17 分程度ですべての設計解を算出することが可能である。したがって、計算時間の観点からも、本搬送ルールの有効性が確認することができる。

7. 結論

本研究では高効率 AGV 搬送システムの設計のため、システムの運用法に関して、エージェント間における協調行動則の設計、コンテナ蔵置スケジューリング、そしてコンテナ搬送計画などの運用モデルを構築した。そして、これら運用モデルを実装した各搬送システムに対して設計パラメータの算出、構築コストの比較・評価、および運用法の考察を行い、AGV 搬送システムの高効率運用に向けたアプローチについて述べ、自動化に向けた課題 (I) ならびに (III) を統合的に解決した。その結果、運用法を考慮しながらシステムの設計を行うことの重要性も確認された。また、設計段階に必要とされる計算時間に関しても、コンテナ搬送計画に搬送ルールを適用することにより計画時間を短縮することが可能となり、十数分程度での設計が可能であることがわかった。

8. 謝辞

本研究の一部は「東京大学と三菱重工業（株）汎用機・特車事業本部との共同研究」の援助を受けた。

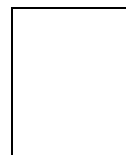
参考文献

- 1) D. Steenken *et al.*: Container Terminal Operation and Operations research - A Classification and literature review, OR Spectrum, **26**-1, 3/49(2004)
- 2) P. Ioannou *et al.*: Advanced Material Handling: Automated Guided Vehicles in Agile Ports, CCDoTT Technical Report, Center for Advanced Transportation Technologies, (2001)

- 3) J. Zhang *et al.*: Automated Container Transport System Between Inland Port and Terminals, 83rd TRB Annual Meeting Interactive Program
- 4) Miguel Rebollo *et al.*: A Multi-Agent System for the Automation of a Port Container Terminal, Autonomous Agents 2000 workshop on Agents in Industry
- 5) Tom Thurston *et al.*: Distributed Agent Architecture for Port Automation, Proceedings of the 26th Annual International Computer Software and Applications Conference, 26/29(2002)
- 6) 星野智史, ほか: 待ち行列ネットワーク理論を用いた AGV 搬送システムの最適設計論, 計測自動制御学会産業論文集, **4**-1, 1/9(2005)
<http://srv01.sice.or.jp/~ia-j/>
- 7) S. Hoshino *et al.*: Comparison of an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory, Proc. 2004 IEEE/RSJ International Conference Intelligent Robots and Systems, 3785/3790(2004)
- 8) C. I. Liu *et al.*: Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals, IEEE Trans. on Intelligent Transportation Systems, **3**-1, 12/26(2002)
- 9) S. Hoshino *et al.*: Optimal Design, Evaluation, and Analysis of AGV Transportation Systems Based on Various Transportation Demands, Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1412/1418(2005)
- 10) Sönke Hartmann: Generating Scenarios for Simulation and Optimization of Container Terminal Logistics, OR Spectrum, **26**-2, 171/192(2004)
- 11) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.: Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide, (2004)
- 12) 吉村裕司, 他: 群ロボットによる多数物体の繰返し搬送計画, 日本ロボット学会誌, **16**-4, 499/507(1998)
- 13) 太田順, 他: ベルトコンベア搭載型 AGV の協調による物体搬送システム, 日本機械学会論文集 (C 編), **67** 巻, 658 号, 1905/1911(2001)
- 14) Martin Gunow *et al.*: Dispatching Multi-load AGVs in Highly Automated Seaport Container Terminals, OR Spectrum, **26**-1, 211/235(2004)
- 15) Chin.I. Liu *et al.*: A Comparison of Different AGV Dispatching Rules in an Automated Container Terminal, The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 3/6(2003)

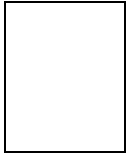
[著者紹介]

星野智史



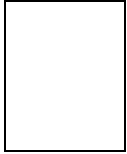
2001 年宇都宮大学工学部精密機械システム工学専攻卒, 2003 年同大学院修士課程修了, 同年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程に在籍。分散管理型大規模群ロボットシステムなどの研究に従事。日本ロボット学会, 精密工学会, 日本機械学会, IEEE などの会員。

太 田 順 (正会員)



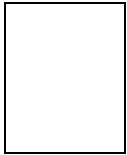
1989 年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了．同年新日本製鐵(株)入社．91 年東京大学工学部助手．94 年同講師．96 年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授．この間 96-97 年 Stanford 大学 Center for Design Research 客員研究員，群知能ロボット，大規模搬送システム，ロボットの環境設計等の研究に従事．博士(工学)．

篠 崎 朗 子



1986 年三菱重工業(株)相模原製作所入社．汎用機・特車事業本部産業車両技術部電子制御設計課主任．無人搬送車運行管理システム設計に従事．

橋 本 英 樹



1996 年三菱重工業(株)相模原製作所入社．汎用機・特車事業本部産業車両技術部 EV 設計課主任．無人搬送車の設計に従事．

