

高効率 AGV 搬送システムの設計

Design of a Highly Efficient AGV Transportation System

正 星野 智史 (東京大学) 正 太田 順 (東京大学)

篠崎 朗子 (三菱重工) 橋本 英樹 (三菱重工業)

Satoshi HOSHINO and Jun OTA

The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

Akiko SHINOZAKI and Hideki HASHIMOTO

Mitsubishi Heavy Industries, LTD., 3000 Tana, Sagamihara, Kanagawa, Japan

Abstract— This paper focuses on a design of a highly efficient Automated Guided Vehicle (AGV) transportation system. Therefore, we first attempt to construct the detailed system management models, such as agent cooperation, container storage scheduling, and container transportation planning. Then, we optimally design the systems that are constructed with the use of the management models. Comparisons of the systems are made to evaluate operation efficiency based on the total construction cost. Finally, we make clear the highly efficient management model for the AGV transportation system, and discuss a need to take into consideration the efficient system management methodology.

Key Words: AGV, highly efficient transportation system, management model, optimal design

1. 緒言

本研究では、港湾自動コンテナターミナル (ACT: Automated Container Terminal) 内で稼動する荷役・搬送・蔵置といった、多種多様なロボット群による高効率な自動搬送システムを構築する。その際、(I) 搬送システムの最適設計 [1], (II) 搬送システムの比較・評価・解析 [2][3], (III) 搬送システムの効率的運用, の三つの問題を同時に考慮する必要がある。ACT を対象にした従来研究より、あるコストモデルの下では、垂直型に比べ水平型の AGV 搬送システムが有効であると確認されている [2][3]。したがって本研究でも、Fig.1 に示す水平型 AGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムを対象とし、問題 (III) について考慮し、高効率搬送システムの最適設計を行う。本研究ではまず、運用モデルを以下の 3 つと定義し、これらの構築を行う。

- 異質エージェント間における協調行動則の設計
- コンテナ蔵置場所での蔵置順序の設計
- コンテナの搬送・蔵置先の設計

次いで、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 [1] 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 (Rubber-Tired Gantry Crane) 台数の算出を行い、各搬送システムの構築コストの比較ならびに評価を行う。そして、高効率 AGV 搬送システムの設計を行い、運用モデルの構築コストへ与える影響を考察し、運用法を考慮することの必要性について検証する。

2. ACT における AGV 搬送システム

2.1 搬送システム・レイアウト設定

搬送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、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。QCC (Quay Container Crane) の投入台数は、埠頭の空間的制約より 3 台とし、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。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。コンテナ蔵置場所となるロケーションに関して、本研究では、1 ロケーションあたり、320 [TEU: Twenty-foot Equivalent Units] (4 Rows \times 20 Bays \times 4 Tiers) のコンテナ蔵置キャパシティを有するものとする。AGV, RTGC, ならびに QCC の作業仕様は文献 [4] に基づき設定した。

2.2 問題設定

本研究では、AGV および RTGC の投入台数の他に、エージェントの行動則、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といった各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。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らつきができないように蔵置を行い、これを蔵置制約とする。

2.3 搬送手順

AGV は Fig.1 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。

- Step 1. QCC による AGV へのコンテナ荷役
- Step 2. コンテナ搬送・蔵置ロケーションの割り当て
- Step 3. AGV によるコンテナ搬送
- Step 4. AGV の目的作業位置到着
- Step 5. AGV と RTGC とのコンテナの受け渡し作業
- Step 6. RTGC によるコンテナ蔵置
- Step 7. AGV は埠頭エリアへ (Step 1 へ)

3. 協調行動則の設計

3.1 行動則のフレームワーク

従来研究として、吉村や太田らは、全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などといった協調行動に注目している [5][6]。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

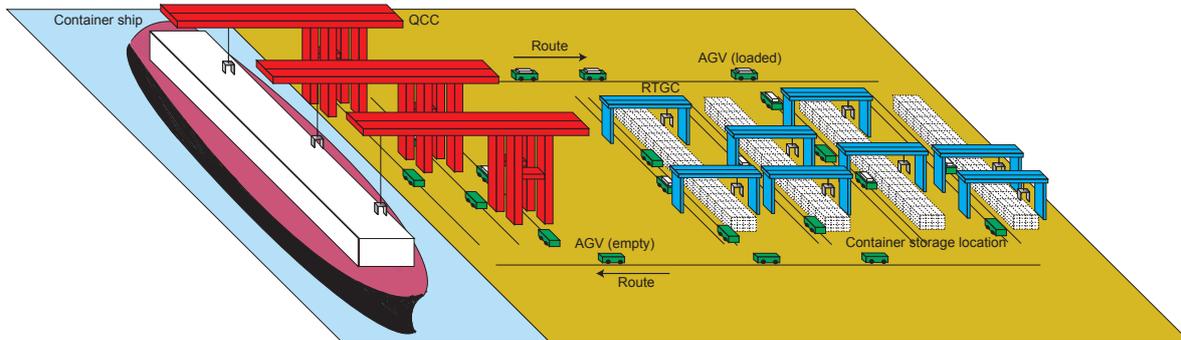


Fig.1 The Actual Horizontal AGV Transportation System in an Automated Container Terminal (ACT)

の仕様が異なるため、全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効率的な協調行動を実現することは困難となる。そのため本研究では、(i) AGV の RTGC 選択法（近傍選択法，作業空間選択法），(ii) 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），について注目し，行動則設計を行う。

3.2 行動則設計

3.2.1 近傍選択法+目的位置到着後

AGV が作業目的位置に到着した際，当該ロケーション上で稼動している各 RTGC までの距離をセンシングする。このとき 2 台の RTGC ともアイドル状態の場合，AGV と各 RTGC との相対距離により，近くに位置している RTGC が受け渡し相手として選択・呼び出される。ただし，近くにいる RTGC 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 は遠くに位置している RTGC を選択する。

3.2.2 作業空間選択法+目的位置到着後

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 の選択行動過程では，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。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，各 RTGC は 4 Rows × 10 Bays × 4 Tiers の作業空間を有する。

3.2.3 近傍選択法+目的作業経路進入後

AGV 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 を受け渡し相手として選択する。当該 RTGC 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。このとき，3.2.1 項同様，一方の RTGC が近い位置にいても，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他方の RTGC 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

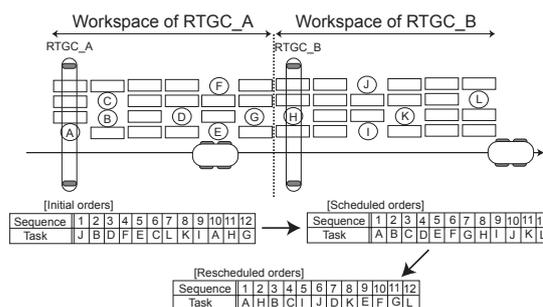


Fig.2 Example of Container Storage Scheduling

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。

3.2.4 作業空間選択法+目的作業経路進入後

AGV 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した作業空間を有する RTGC を認識する。そして当該 RTGC を選択し，目的位置へと呼び出す。呼び出された RTGC は移動を開始する。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

ACT 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 [7][8]。しかしながらこれらの研究では，任意に生成された搬送・蔵置指令をどの AGV へ割り当てるかといったことのみが議論されており，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 ランダムコンテナ蔵置

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.2 の

Table 1 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 Selection, WS: Workspace-based Selection, RS: Random Selection
 DP: on the Destination Point, WP: on the Work Path, ×: Random storage, ○: Storage scheduling

“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 には全て (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。

4.3 コンテナ蔵置スケジューリング法

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, 各 RTGC に対して均等となるように与えている。Fig.2 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, 任意に生成された蔵置指令に対し, (A) に基づき RTGC が一方向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。次いで, (B) に基づいた再スケジューリングを行う。すなわち, Fig.2 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。そして, これを “Rescheduled orders” とする。

5. コンテナ搬送計画

5.1 搬送計画のフレームワーク

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。ロケーション上での蔵置制約として, 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。

5.2 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。

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全て均等としている。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.3)。なお Fig.3 の横軸に関して, 第 1

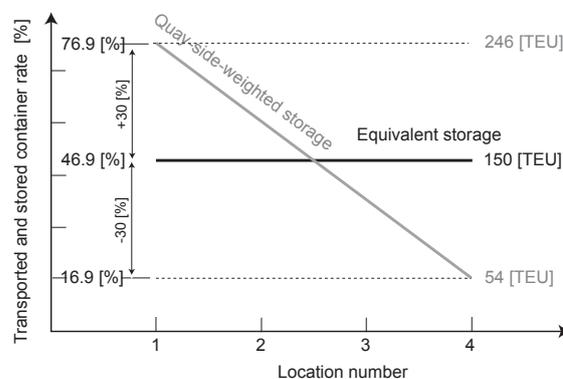


Fig.3 Example of equivalent and quay-side-weighted transportation dispatching rule

ロケーションから順に埠頭側より配置されている。また, 1 ロケーションあたりのコンテナ蔵置容量は 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容量” 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.3 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。ここで, 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 $\pm 30\%$ 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. 搬送システムの最適設計

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了時間より得られる要求仕様 (スループット) から, 設計解算までの設計手順について述べる。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, Table1 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 [1] の設計方法論を適用した。ここで, モデル 1) は, 文献 [1] において用いられてきた従来の運用モデルのことで, 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である。

Process 1. 要求仕様の入力

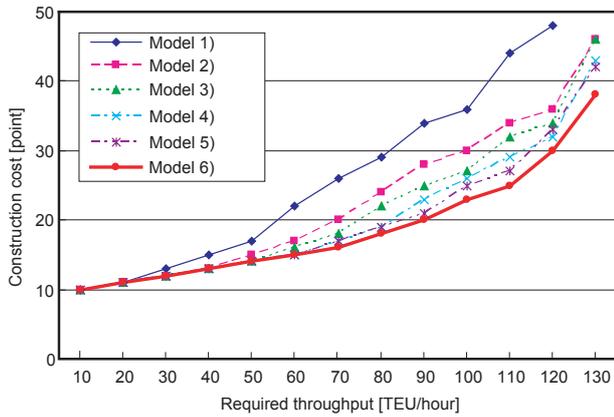


Fig.4 Comparison Results of the Total Construction Costs Under the Random Container Transportation

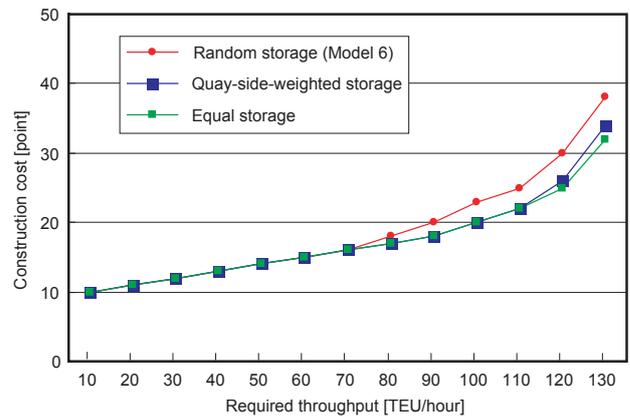


Fig.5 Comparison Results of the Total Construction Costs Under the all Transportation Rules

Process 2. 運用モデルの実装

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 より算出された運用モデルに, 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

Process 3 および 4 において, 構築コストを算出するために本研究では以下に示すコストモデルを用いる. a, b はコスト係数のことであり, $a : b = 1 : 2$ に設定した.

$$\text{Construction cost} = a \times \text{AGVs} + b \times \text{RTGCs}$$

6.2 運用モデルによる作業効率の評価

Fig.4 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分かる. 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] となり, 最大値に対して約 38[%] の効率化を確認した.

ランダム蔵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分かった. 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分かった.

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分かった.

6.3 高効率運用法についての考察

Fig.5 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 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. 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分かった.

以上のことから, 均等搬送計画によりコンテナの搬送・蔵置目的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分かった. また, 運用法までを考慮した設計を行う必要があることを確認した.

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, 搬送システムの運用までを考慮した設計を行い, その有効性を確認した.

参考文献

- [1] 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, pp 1-9, 2005.
<http://srv01.sice.or.jp/~ia-j/>
- [2] S. Hoshino *et al.*: “Comparison of an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory”, Proc. 2004 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems, pp. 3785-3790, 2004.
- [3] S. Hoshino *et al.*: “Optimal Design, Evaluation, and Analysis of AGV Transportation Systems Based on Various Transportation Demands”, Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automat., pp. 1412-1418, 2005.
- [4] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.: “Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide”, 2004.
- [5] 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, pp. 499-507, 1998.
- [6] 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, 658, pp. 1905-1911, 2001.
- [7] Martin Gunow *et al.*: “Dispatching Multi-load AGVs in Highly Automated Seaport Container Terminals”, OR Spectrum, 26, 1, pp. 211-235, 2004.
- [8] 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, pp. 3-6, 2003.