

港湾物流搬送システムのための コンテナ蔵置計画とエージェント行動則設計

星野 智史[†] 太田 順[†] 篠崎 朗子^{††} 橋本 英樹^{††}
[†] 東京大学 ^{††} 三菱重工業株式会社

Container storage planning and agent behavioral rule designing for an automated port transportation system

Satoshi HOSHINO[†], Jun OTA[†], Akiko SHINOZAKI^{††}, Hideki HASHIMOTO^{††}
[†]The University of Tokyo ^{††}Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

Abstract— In this paper, we construct a horizontal AGV transportation system as an automated port container terminal; then, establish the system that would be more cost effective. Although it is difficult to control the horizontal AGV transportation system for the automation, it has been made clear that the horizontal system is more cost effective than the conventional vertical system. From this point of view, we consider the system management, that is, the container storage planning based on the stored container information and cooperative agent's behavior designing as the multi-agents system for a realization of the effective transportation system.

Key Words: AGV Transportation System, System Management, Container Storage Planning, Cooperative Agent Behavior Designing.

1. 序論

近年の港湾物流におけるコンテナ貨物の荷役・搬送量は年々増加傾向にあり、それにともない物流システムの自動化への需要が高まっている¹⁾。本研究では、AGV (Automated Guided Vehicle) を搬送エージェントとして当該システムに適用することで、港湾物流における自動搬送システムの構築を行う。AGV 搬送システムの構築にあたって要求される課題として、以下に示す三つの問題が存在する。

- (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、システムへの要求仕様に対して、“仕様を満たす最低限の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。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最適設計方法論の提案を行っている²⁾。また、垂直型や水平型の搬送システムが存在する場合、たとえば搬送時間などで各システムの比較を行い、“最も効率的に搬送を行うシステムを評価し選定する”，などといったことを行う必要がある。そのため、問題 (II) を考慮する必要がある。星野らは本問題に対し、搬送時間に基づいたシステムの比較³⁾、および、システムを構築するための総合コストを比較し、それに基づいた有効性の評価・解析を行っている⁴⁾。

これら従来研究の、“より効率的な搬送システムの構築”という観点から、ある種のコスト設定の下では、港湾物流システムにおいて一般的に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分かっている⁴⁾。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 (Container yard area) に

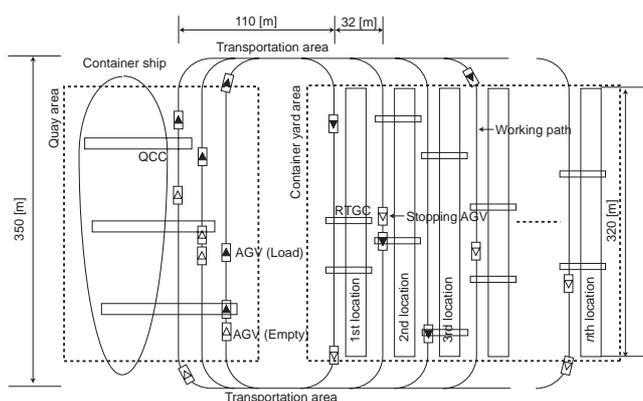


Fig.1 Horizontal AGV Transportation System

おいて稼動する RTGC (Rubber Tired Gantry Crane) もシステムにおける重要なエージェントとなるため、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搬送を終了する”といった、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構築を行う。その際、様々なエージェント群が稼動する異質な港湾物流システムを扱うことから、問題 (III) に対して、まずシステムの正確なモデル化を行う。そのため、コンテナの搬送・蔵置指令、すなわちシステム内のどこへの順番でコンテナを搬送・蔵置するかといったコンテナ蔵置計画、およびそれらを効率的に実行するためのエージェント群の行動則の設計を行う必要がある。本研究ではこの行動則設計に関して、AGV と RTGC 間における協調行動の設計を行う。次いで、モデル化された水平型 AGV 搬送システムに対し、設計パラメータの導出を行う (問題 I)。

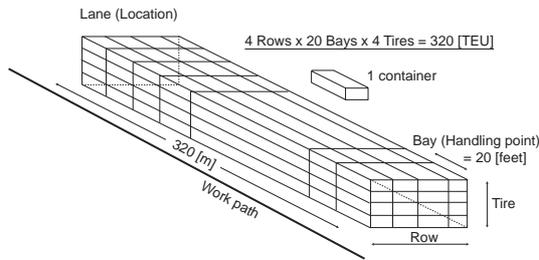


Fig.2 Container storage location

そして、各モデル化されたシステムの構築コストの比較ならびに評価を行い、行動則および蔵置計画の有効性を示すことで当該問題を解決する。

2. 港湾物流 AGV 搬送システム

2.1 搬送手順

Fig.1 のシステム内を、AGV はコンテナを搬送するために以下の手順で RTGC と協調行動をとりながらコンテナを全て搬送し終えるまで巡回する。

- step 1. 埠頭エリア (Quay area) で稼働する QCC (Quay Container Crane) がコンテナ船 (Container ship) 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 (Container storage location) のいずれかが当該コンテナの目的ロケーションになる。
- step 3. AGV は搬送エリア (Transportation area) を通ってコンテナ蔵置エリアへと向かう。
- step 4. 作業経路 (Working path) 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 はアイドル状態になり、次の蔵置指令を待つ。
- step 7. コンテナを受け渡した AGV は、再び搬送エリアを通って埠頭エリアへと戻る (step 1 へ)。

2.2 コンテナ蔵置ロケーション

Fig.2 にコンテナ置き場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、コンテナ 320 [TEU] ($4 \times \text{Rows} + 20 \times \text{Bays} + 4 \times \text{Tires}$) の蔵置スペースを有するものとする。ここで、TEU とは “Twenty-foot Equivalent Units” 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。

2.3 評価要素

本研究では以下に示す AGV ならびに RTGC の投入台数を設計パラメータとする。そしてこれら設計された各パラメータは構築されたシステムの評価要素となる。設計を行う際、AGV および RTGC の投入台数は同時に最適値、すなわち最小台数に決定する必要がある。そのため、本設計問題は組合せ最適化問題として考えることができる。そのため、本研究では後述するコストモデルを導入することにより解を唯一に求めることとする。

Table 1 Specifications of the AGV, RTGC, and QCC

AGV		Load / 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 time	[s]	60

- ・ AGV 台数
- ・ RTGC 台数 (=ロケーション数の 2 倍)

2.4 エージェントの仕様

Table1 に AGV, RTGC, および QCC の仕様を示す⁵⁾。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 “Load” 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みが示されている。

2.5 システム設定

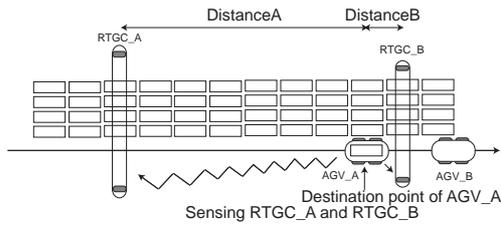
システムのレイアウトに関して、実際の港湾自動コンテナターミナルにおいて、埠頭の幅 (1 [Berth]) はあらかじめ固定されているため、一般的には埠頭の広さに応じた台数の QCC が投入される。したがって本研究では Fig.1 が示すとおり、1 [Berth] の広さを 350 [m] とし、3 台の QCC を投入し設計対象とはしない。さらに、各ロケーションに投入される RTGC 台数は 2 台とした。また、コンテナ蔵置エリアにおける AGV の作業経路数は、1 本と設定した。

コンテナ搬送指令は各 3 台の QCC から均等に出され、コンテナ蔵置目的ロケーションも各ロケーション均等となるようにした。ただし、ロケーション内のどの位置 (Row, Bay) へ蔵置を行うかはあらかじめ任意とした。

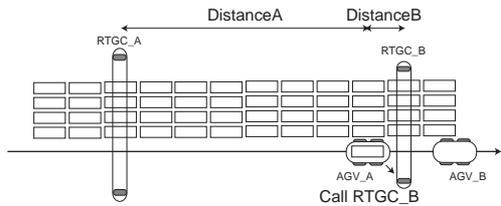
3. エージェント群の行動則設計

3.1 設計概念

同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⁶⁾。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⁷⁾。これら従来研究では、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、エージェント同士の仕様が異なるため、全てのエージェントに対し



(a) The AGV_A measures the relative distances of the RTGC_A and RTGC_B



(b) The AGV_A calls the RTGC_B based on the relative distances

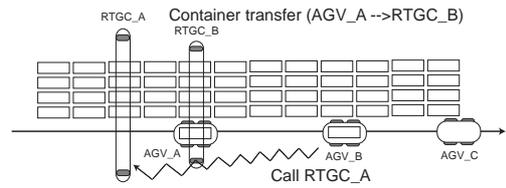
Fig.3 Distance-based selection (An AGV calls an RTGC based on each relative distance when the AGV arrives at the destination point)

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．そこで本研究では，異種エージェント間における効率的な協調行動の実現のため，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．

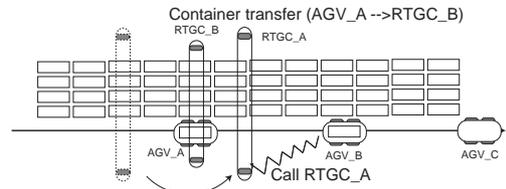
- AGV の RTGC 選択法
 - － 近傍選択法
 - － 作業空間選択法
- AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング
 - － 作業経路上の目的位置到着後
 - － 目的作業経路上進入時

3.2 RTGC 選択法 1：近傍選択法

Fig.3において，AGV_A が目的位置に到着した際，蔵置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 (Fig.3(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される (Fig.3(b)) ．ただし，RTGC_B が近い位置にいる場合においても，RTGC_B が (a) 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されている場合，あるいは (b) コンテナ受け渡し・蔵置作業中の場合などは，AGV_A は遠くに位置している RTGC_A を選択する．このとき，サイズの異なる 2 台の RTGC は互いに交差が可能であるため，各 RTGC はそれぞれが稼動する作業空間 (Work space) を有することはない．そのため，Fig.4(a) の示すとおり，AGV_B が RTGC を選択する際，RTGC_B が AGV_A とコンテナの受け渡し

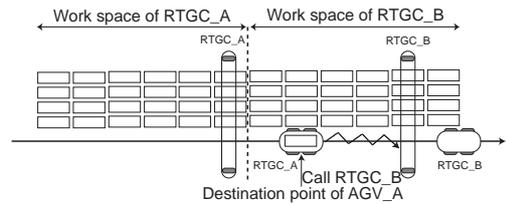


(a) The AGV_B calls The RTGC_A

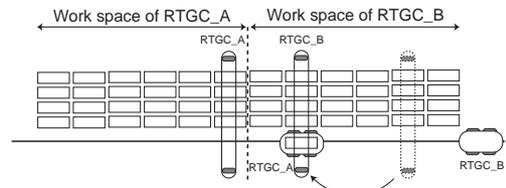


(b) The RTGC_A can cross the RTGC_B with moving

Fig.4 Two RTGCs of different sizes cooperate in one location without work space



(a) The AGV_A calls the RTGC_B based on the work space



(b) The RTGC_B comes to the point

Fig.5 Work-space-based selection (An AGV calls an RTGC based on the work space of the RTGC)

作業中の場合，RTGC_A が AGV_B のコンテナの受け渡し相手として選択される．選択された RTGC_A は，作業中の RTGC_B をまたぐように交差し，目的地へと移動を開始する (Fig.4(b)) ．また，2 台の RTGC とも (a) および (b) の状態の場合，この AGV はその場に待機する．

3.3 RTGC 選択法 2：作業空間選択法

Fig.5 に，1 ロケーションに対し同じサイズの 2 台の RTGC が投入される場合における AGV-RTGC 間での協調行動を示す．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、作業空間が違うことから、AGV_A は RTGC_B をコンテナ蔵置作業空間に基づき選択する。選択された RTGC_B は、RTGC_A と交差することなく目的地へと移動を行う (Fig.5(b))。

3.4 AGV の RTGC 選択・呼び出しタイミング

Table1 より、搬送エージェントでない RTGC はロケーション上での移動速度が遅い。そのため、前述の協調行動のみでは、受け渡し開始までに時間がかかってしまう。そのため本研究では、AGV が作業経路上に進入した際に各 RTGC と通信を行い、走行中にコンテナを受け渡す RTGC を選択し、目的地へと呼ぶ行動則を設計する。

Fig.6 は RTGC 選択法 1 および 2 における RTGC の選択・呼び出し行動を示す。RTGC 選択法 1 において、AGV_A は作業経路上に進入後、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))。一方 RTGC 選択法 2 において、AGV_A は作業経路上に進入後、各 RTGC と通信を行い、作業空間法に基づき RTGC_B を選択し、目的位置へと呼び出す (Fig.6(c))。呼び出された RTGC_B は移動を開始する (Fig.6(d))。

ここで 3.2、3.3 節同様 RTGC が作業空間を有さない場合は、RTGC_B が近い位置にいる場合においても、RTGC_B が (a) あるいは (b) 状態にある場合などは、AGV は遠くに位置している RTGC_A を選択する必要があるが、一方で RTGC が作業空間を有する場合は、空間内で稼働する RTGC がアイドル状態になるのを待つこととなる。また、作業経路上における搬送中の AGV の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 やすでに RTGC を選択している AGV が存在する場合が増加する。その場合、後方 AGV は前方 AGV の通信が終了するまで通信を開始しない。

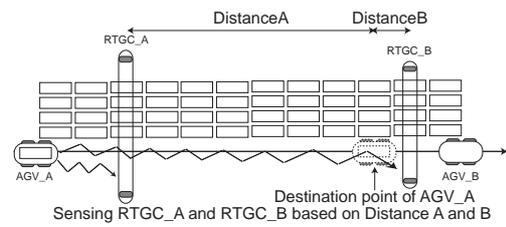
4. 蔵置計画

4.1 ランダム蔵置

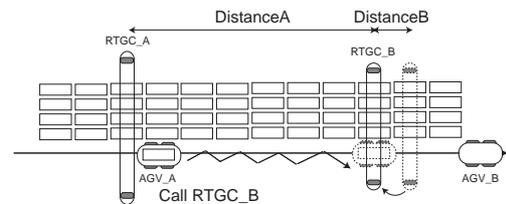
Fig.7 の “Initial task” がコンテナのランダム蔵置の指令状態を示す。空きコンテナ状態 A~L に対し、コンテナ搬送・蔵置に関する指令が初期状態では任意に生成される。また、A~L には全て (Row, Bay) 情報が収められている。ランダム蔵置の場合、AGV はこれら任意に生成されたコンテナ搬送指令に対して順番に実行し、搬送されたコンテナは RTGC により順番に蔵置される。

4.2 RTGC の移動・蔵置性能に基づいた蔵置計画

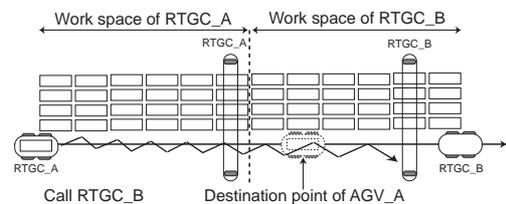
4.1 節で述べたランダム蔵置手法では、RTGC の総移動量が無駄に増加してしまう。また Table1 より、AGV に比べ RTGC の移動速度は半分以下であることから、



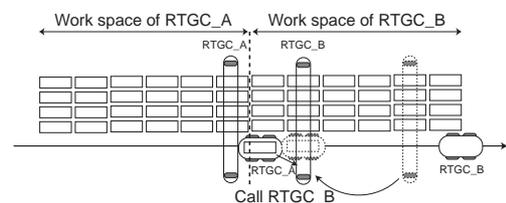
(a) The AGV measures the relative distances of the RTGC_A and RTGC_B; then, selects and calls the RTGC_B



(b) The RTGC arrives at the transferring point before the AGV arrives



(c) The AGV selects and calls the RTGC_B based on the work space



(d) The RTGC arrives at the transferring point before the AGV arrives

Fig.6 An AGV selects and calls an RTGC based on each relative distance or work space when the AGV comes into the working path

任意の蔵置指令に対して順番に対処しては作業経路上における AGV の渋滞が発生してしまい、搬送効率は悪化してしまうことが予測される。

そこで本研究では、任意に生成された搬送・蔵置指令に対して、(1)RTGC の移動量を最小化、そして (2) 各ロケーションおよび作業経路上におけるエージェントの作業密度を低減させる蔵置計画を行う。そのため、各ロケーションに対して RTGC の作業空間を設ける。Fig.7 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、(1)

Table 2 Implementation conditions of the constructed systems

Selection type	RS	DS	DS	DS	DS	WS	WS	WS	WS
Select & Call timing	DP	DP	WP	DP	WP	DP	WP	DP	WP
Container storage planning	×	×	×	○	○	×	×	○	○
Condition number	1)	2)	3)	-	-	-	4)	5)	6)

DS: Distance-based selection, WS: Work-space-based selection, RS: Random selection

DP: on the Destination Point, WP: on the Work Path, ×: Random storage, ○: Storage planning

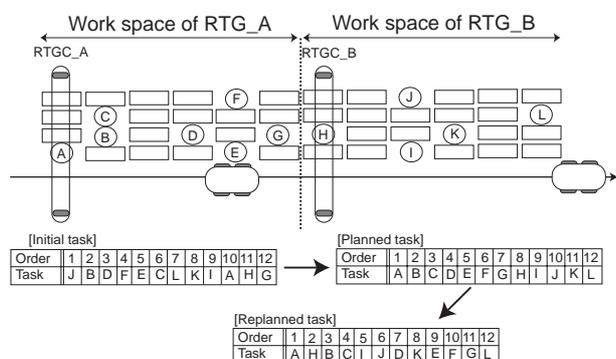


Fig.7 Container storage planning

に基づき指令順序を入れ替え、これを“Planned task”とする。しかしながらこれら計画された蔵置指令をそのまま実行しようとすると、RTGC_A側の作業密度が高くなってしまいうため、(2)を行う。このとき、RTGCの初期位置ならびに各作業空間に基づき Planned Taskを再計画し、これを“Replanned task”とする。

5. 搬送効率の評価

5.1 実装・設計条件

3.章および4.章でモデル化した行動則ならびにコンテナ蔵置計画法の搬送効率へ与える影響を評価するため、Table2に示す実装条件に基づき搬送システムの構築を構築した。RTGC選択法(DS, WS)、選択・呼び出しタイミング(DP, WP)、コンテナ蔵置計画の有無(×, ○)をそれぞれ実装すると、合計8パターンのシステムが構築される。これに従来モデルとの比較のため、条件1)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システムを構築した。ただし、蔵置計画はRTGCの作業空間を基に行われるため、RTGC選択法DSをとり、かつ蔵置計画を行うことはしない。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、それらはTable2で“-”で示されて、システムの構築は行わない。条件4)~6)において、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.2より各RTGCは160[m]、10[Bay]の作業空間を有する。

なお、各条件下におけるエージェント投入台数である設計パラメータの算出には提案設計方法論²⁾を適用した。ただし、投入台数の上限をAGV=30、RTGC=20に設定した。また、搬送・蔵置コンテナ総数を600[TEU]とし、全ての条件下において同様の搬送・蔵置指令を

与えた。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0~130[TEU/hour]と設定した。

5.2 設計パラメータ

Fig.8に各条件の下で構築されたシステムへ投入されるAGVおよびRTGC台数の組合せを示す。その際、以下に示すコストモデルと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そ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.8(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。

条件1)では、要求スループット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.8(a))。これより、従来法では高効率搬送システムの構築が困難であることが分かる。また、Fig.8(c)ならびにFig.8(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響を与えることがあることが分かる。Fig.8(b)~Fig.8(d)より、ランダム蔵置を行った場合では、要求スループット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分かる。これらのことより、ランダム蔵置の場合、行動則設計を行ったのみではスループット130以上の要求仕様を満たすシステムを構築することが困難となることが予想される。

5.3 構築コスト

Fig.9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スループット、縦軸が得られた設計パラメータおよび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。Fig.9より、条件1)の従来手法では明らかに搬送効率が悪いことが分かる。また、要求スループット130に対して設計パラメータが得られなかったため、構築コストも算出されていない。それ以外の条件では、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、要求スループット130で構築コストの差が最大8[point](max. 46, min. 38)となり、max.値に対して約17[%]のコスト削減を確認した。

ランダム蔵置における行動則の有効性の確認を行った条件2)~4)では、条件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

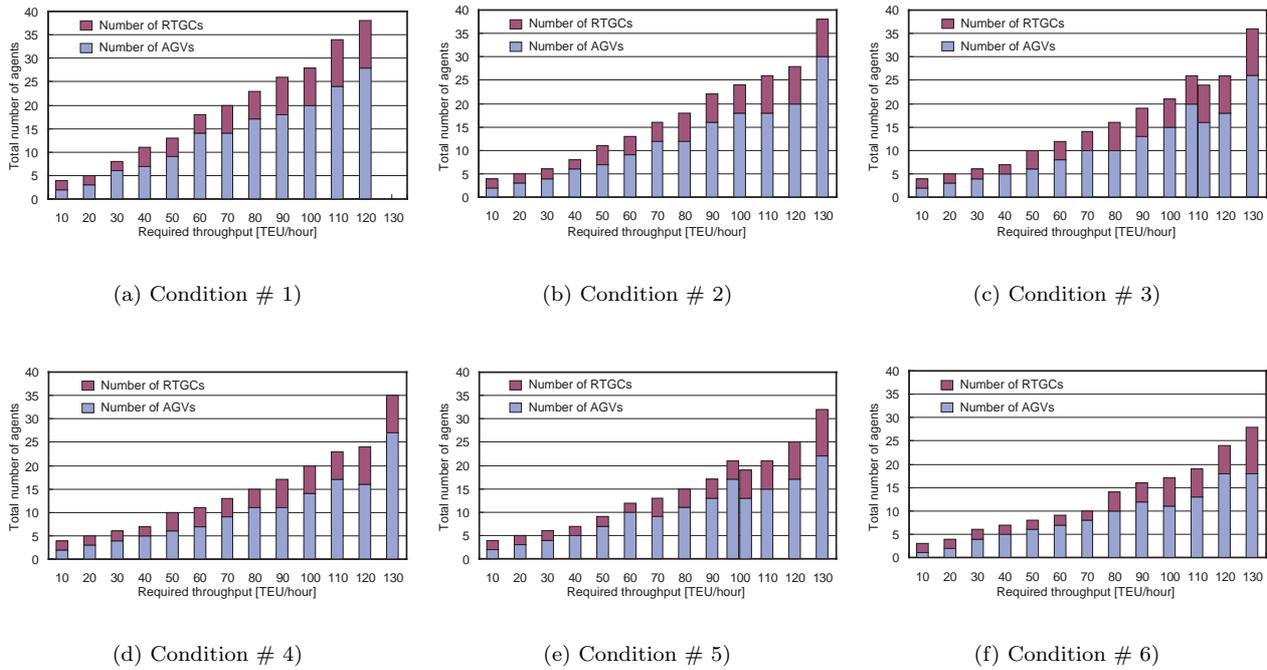


Fig.8 Number of AGVs and RTGCs which constructs a system for a required throughput

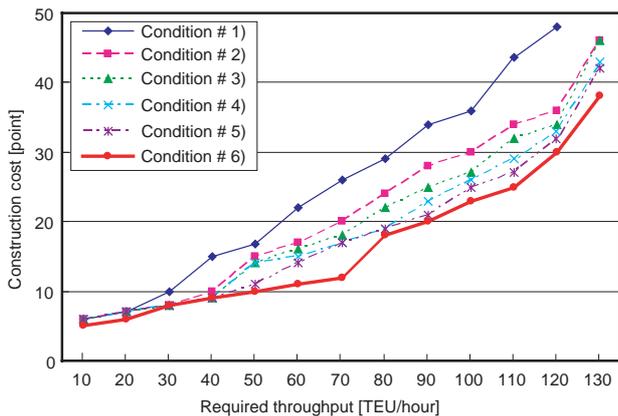


Fig.9 Comparison results of the total construction costs

動則が最も効率的であることが分かった。一方で、条件 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.8(b), Fig.8(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稼働率が高くなり、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ル状態の 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ことが原因であると考えられる。次に蔵置計画を行った場合には、条件 5) に比べ 6) がより効率的に搬送を行うことが分かった。これは、作業空間を設けることにより作業密度を低減させ、その結果、作業経路上での AGV-RTGC 間での通信が有効に機能したことが原因

であると考えられる。

以上のことより、コンテナ蔵置計画を行った上で、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・呼び出しするといった、蔵置計画と行動則設計を同時かつ複合的に行った条件 6) が最も効率的であることが分かった。また、これら詳細なモデルを構築しても、構築コスト算出までに要する搬送シミュレーション時間は従来法と比べ大きな違いがないことも確認した。

6. おわりに

本研究では高効率 AGV 搬送システムの実現のため、搬送システムのモデル化であるエージェント群の行動則設計ならびにコンテナ蔵置計画を行った。そして、構築された各システムに対して設計パラメータの算出、構築コストの比較および評価を行い、有効な搬送システムを示した。

参考文献

- 1) P. Ioannou *et al.* : Advanced Material Handling: Automated Guided Vehicles in Agile Ports, CCDoTT Technical Report, *Center for Advanced Transportation Technologies*, (2001).
- 2) S. Hoshino *et al.* : Optimal Design Methodology for an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory, *7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems*, pp. 391-400, 2004.
- 3) S. Hoshino *et al.* : Comparison of an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory, in *Proc. IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems*, pp. 3785-3790, (2004).
- 4) 星野智史, 他 : 港湾物流 AGV 搬送システムのレイアウト評価, 日本ロボット学会学術講演会, 1G35, (2004).
- 5) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. : Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide, (2004).
- 6) 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, Vol. 16, No. 4, pp. 499-507, (1998).
- 7) 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, pp. 1905-1911, (2001).