

# 港湾物流 AGV 搬送システムの最適設計とレイアウト評価

## Optimal Design and Evaluation of AGV Transportation Systems

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

Satoshi HOSHINO\*, Jun OTA\*, Akiko SHINOZAKI\*\*, Hideki HASHIMOTO\*\*  
\*The University of Tokyo \*\*Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

**Abstract**— In this paper, two designs for optimal Automated Guided Vehicle (AGV) transportation systems are presented. One is vertical and the other, horizontal. For these systems, the hybrid design methodology proposed here is used. Therefore, we describe how to model and formulate these transportation systems and derive the design parameters, that is, the optimal design solutions. We next evaluate these two transportation systems based on the various transportation requirements, that is, the demands from a port authority. For this purpose, we compare the systems based on the total costs in constructing them. Finally, the evaluation and analytical results are provided, and the most convenient system is presented based on the validity of each system for the given demand.

**Key Words:** AGV transportation system, optimal design, layout-evaluation

### 1. 緒言

本研究では、港湾物流における大規模搬送システムとして、Fig.1 が示す 2 種類の AGV 搬送システムを対象に、最適設計およびシステムの構築コストに基づいた各搬送システムの有効性の評価を行う。本研究は、1) システムの最適設計、および、2) 構築コストに基づいたシステムの有効性の評価、といった 2 つのチャレンジングポイントを有する。最適設計に関して、本研究では、システムに投入するエージェント台数を設計対象とする。これら最適に設計されたパラメータに基づいたシステムの構築コストを比較し、システムへの要求仕様に対する有効性の評価を行う。

搬送システムの最適設計に関する研究では、数理モデルを用いた手法 [1][2] ならびに、シミュレーションによる順問題解法 [3] などが提案されている。しかしながらこれら提案されている設計論では、1) 数理モデルのみではモデル化誤差、すなわち実システムにおけるエージェント群の搬送挙動までを包含した設計は困難である、2) Genetic Algorithm (GA) などによる繰返し順問題解法にに基づいた設計法では、最適解を得るまでに膨大な計算時間を必要とする、などといった問題が存在する。これらの設計問題に対し、星野らは上記二つの手法をハイブリッドに用いた設計論の提案を行っている [4]。本研究でも、搬送システムの最適設計を行う際に本設計論を適用する。

搬送システムの比較、評価、ならびに解析に関する研究では、Chin らにより様々な搬送システムに対し、投入コストによる有効性の評価が行われている [5]。しかしながら、天降り的にパラメータを決定する設計法では、システムの最適性が考慮されておらず、また、様々な要求仕様に対する搬送システムの有効性を評価することは困難である。一方、星野らは搬送時間を基に設計パラメータによる搬送システムの有効性を示している [6]。この結果より、小規模搬送システムに対しては垂直型が有効であり、一方大規模搬送システムに対しては水平型が有効であることが示されている。

以上、本研究では、Fig.1 が示す垂直型および水平型の搬送システムを設計および評価対象とし、これら各システムの要求仕様に対する最適設計ならびに設計パラメータに基づいた構築コストによる定量的な比較を行う。そして、要求仕様に対する搬送システムの有効性を示す。

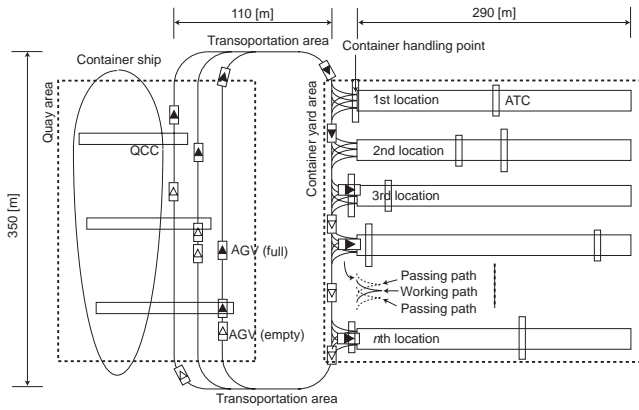
### 2. AGV 搬送システム

Fig.1(a) はすでに無人型として導入されている垂直型 AGV 搬送システム、Fig.1(b) は有人型として運用されている水平型 AGV 搬送システムを示す。垂直型の搬送システムでは、AGV 台数、ATC 台数、待避経路数、水平型の搬送システムでは、AGV 台数、ATC 台数をそれぞれ設計対象とする。本研究では最適設計のため、埠頭、搬送、蔵置の 3 種類、4 つのエリアに分割する。埠頭エリアでは、Quay Container Crane (QCC) がコンテナ船と AGV 間に存在してコンテナの受け渡し作業を行う (Fig.2)。搬送エリアでは、AGV によるコンテナ搬送が行われ、蔵置エリアでは、AGV と Automated Transfer Crane (ATC) によるコンテナの受け渡し作業ならびに、ATC によるコンテナ搬送および蔵置作業が行われる (Fig.3,4)。なお、システム内で稼働するエージェント群の搬送スベックは全て実際の仕様書 [8] に基づいている。

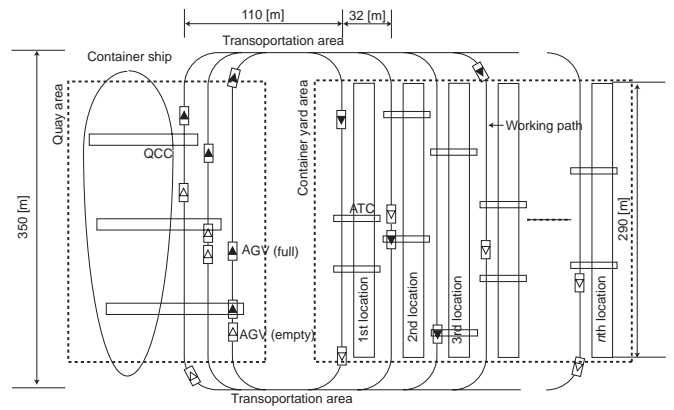
#### 2.1 垂直型 AGV 搬送システム

垂直型の搬送システムでは、コンテナ蔵置場所であるロケーションがコンテナ船に対して垂直に配置されている (Fig.1a)。搬送システムの特徴としては、(1) AGV の搬送経路長はロケーションの数に依存しない、(2) ATC とのコンテナ受け渡し地点が定められているため、ATC 自身もコンテナを把持しながら搬送および蔵置作業を行う (Fig.3)、(3) 受け渡し地点は 1 ロケーションあたり一箇所、などといったことがあげられる。そのため、AGV は経路を短時間で搬送することが可能となるが、受け渡し地点にてすでに AGV が作業を行っている場合などは、待避経路上にて待機する必要がある。

垂直型の搬送システムでは鉄道車輪式 ATC である



(a) Vertical transportation system



(b) Horizontal transportation system

Fig.1 Two types of AGV transportation systems in automated port container terminals (top view)

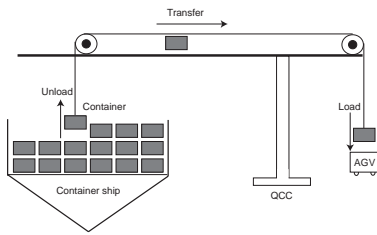


Fig.2 Loading/Unloading operation by AGVs and QCCs in the quay area (side view)

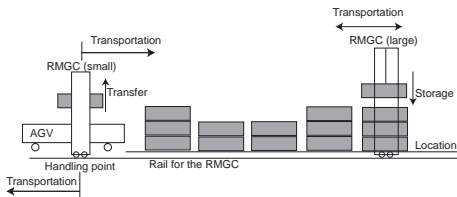


Fig.3 Transporting/Transferring/Storing operation by AGVs and RMGCs in the container yard area (side view in the vertical system)

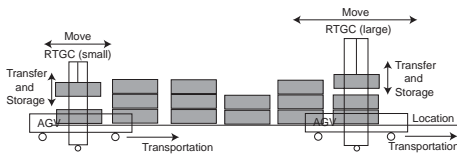


Fig.4 Transporting/Transferring/Storing operation by AGVs and RTGCs in the container yard area (side view in the horizontal system)

Rail Mounted Gantry Crane (RMGC) が導入されている。RMGC は一般的に 1 ロケーションに対し 2 台投入されていることから、本研究でも 1 ロケーションあたり 2 台の RMGC を投入することとする。なお、これら 2 台の RMGC はそれぞれ大小異なったサイズのもが導入されるため、作業時における同ロケーション上での交差は可能である。

### 2.1.1 搬送手順

- step1 AGV が埠頭エリアにおいてコンテナを受け取り (Fig.2), 搬送エリアへと向かう。
- step2 AGV は搬送エリアを通り, 目的ロケーションの存在するコンテナ蔵置エリアへと向かう。
- step3 目的ロケーションと接している受け渡し地点に到着したら, RMGC との間でコンテナの受け渡しを行う (Fig.3)。RMGC がすでに作業状態にある場合, AGV はその場に待機する。
- step4 コンテナを渡した AGV はふたたび搬送エリアを通り埠頭エリアへと戻る。
- step5 コンテナを受け取った RMGC は目的蔵置位置へとコンテナを搬送し, 蔵置を行ったのち, ふたたび受け渡し地点へと戻る (Fig.3)。

本研究では 1 つのコンテナを蔵置する作業の流れ (step1 ~ step4) をタスクと呼ぶ。

### 2.2 水平型 AGV 搬送システム

水平型の搬送システムでは, コンテナ蔵置場所であるロケーションがコンテナ船に対して水平に配置されている (Fig.1b)。搬送システムの特徴としては, (1) AGV の搬送経路長がロケーションの数に依存して増加する, (2) AGV はロケーション内のコンテナ蔵置位置まで搬送を行うため, ATC は搬送作業を行わず, AGV-ATC 間でのコンテナ受け渡しならびに蔵置作業のみを行う (Fig.4), (3) 受け渡し地点はロケーション上のいずれかの蔵置位置 (複数), などといったことがあげられる。そのため, 同時に複数台の AGV-ATC によるコンテナの受け渡し作業が可能となるが, 一方, ロケーションの数によっては垂直型に比べ搬送経路長が長くなってしまいうため, 搬送効率や AGV ガイドテープなどの設置コストを考慮する必要がある。

水平型の搬送システムではゴムタイヤ式 ATC である Rubber Tire Gangry Crane (RTGC) が導入される。RTGC も RMGC 同様, 一般的に 1 ロケーションに対し大小サイズの異なる 2 台が投入され, 作業時には同ロケーション上において交差が可能である。

### 2.2.1 搬送手順

- step1 AGV は埠頭エリアにおいてコンテナを受け取り, 搬送エリアへと向かう。

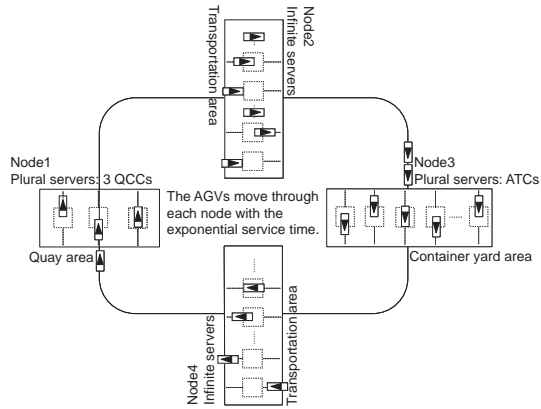


Fig.5 Modeling the AGV transportation system by the single cyclic queuing network

- step2 AGVは搬送エリアを通り、目的ロケーションの存在するコンテナ蔵置エリアへと向かう。
- step3 AGVは目的ロケーション内の蔵置位置まで向かい、到着したらコンテナ受け渡しのためRTGCを呼び、待機状態になる。RTGCが蔵置位置に到着した時点でコンテナの受け渡しを行う (Fig.4)。
- step4 コンテナを渡したAGVはふたたび搬送エリアを通り埠頭エリアへと戻る。
- step5 コンテナを受け取ったRTGCはその場にてコンテナの蔵置作業を行い、次のAGVからの指令を待つ (Fig.4)。

### 3. 最適設計

#### 3.1 搬送システムのモデル化

Fig.5に、各搬送システムに対して巡回型単一待ち行列モデル [7] を適用した結果を示す。各搬送システムは最適設計のため3種類、4つのエリアに分割されているため、同様のモデル化が可能となる。ここで、各エリアにはモデル化に際し、用途に合わせ複数サーバならびに無限サーバがそれぞれノードとして割り当てられる。ノード1および3、すなわち埠頭ならびにコンテナ蔵置エリアにおいては、AGVとコンテナのやりとりをする複数台のQCCならびにATC群が存在する。したがってこれらのノードには複数サーバを割り当てる。一方、ノード2および4、すなわちコンテナ搬送エリアにおいては、AGVのみによる搬送作業しか行われておらず、無限台のエージェントがAGVとコンテナのやりとりを行っていると考えることができ、したがって無限サーバを割り当てる。

#### 3.2 ハイブリッド設計プロセス

Fig.6に用いるハイブリッド設計プロセスの概要を示す。計算式ならびにアルゴリズムの詳細に関しては、文献 [4] を参考にされたい。本提案アルゴリズムにより、設計対象であるAGV、ATC、そして待避経路に関する最適解を導出する。

本設計プロセスは、巡回型単一待ち行列ネットワーク理論に基づいたタスクフローアナライザと実システムを模倣した搬送シミュレータから構成されている。設計要求が与えられると、それに対する数理的理論値が設計パラメータとして算出される。次いで算出された

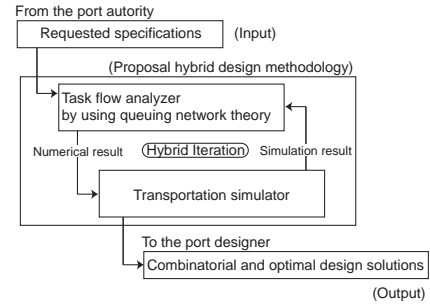


Fig.6 Proposed hybrid design process

パラメータを基に搬送シミュレーションが行われ、理論値通りの結果が算出されるか否かの評価を行う。本設計プロセスを設計解導出までハイブリッドに繰り返すことにより、モデル化誤差を考慮し、かつ少ない計算時間で最適解を算出することが可能となる。

なお、今回の最適設計ならびに評価実験においては、搬送要求を単位時間における搬送タスク量 (以降、スループットと呼ぶ) とし、コンテナ搬送量、すなわち搬送タスクを600、要求スループットをそれぞれ、10、20、30、...、と与えたときの各搬送システムにおける設計解を導出し、それらを基に評価を行う。

## 4. レイアウト評価

### 4.1 評価基準

導出された設計解に対し、それぞれのエージェントを投入するために必要とされるコスト比を評価係数として与え、Eq.(1)(2)から垂直型、水平型搬送システムにおける総合コスト ( $TC_v, TC_h$ ) を算出する。ここで、QCCに関しては埠頭の大きさという物理的制約があることから、3台と固定してシステムを構築し、評価の要素とはしない。

- 垂直型 AGV 搬送システム

$$TC_v = a \times AGVs + b \times RMGCs + d \times route \quad (1)$$

- 水平型 AGV 搬送システム

$$TC_h = a \times AGVs + c \times RTGCs + d \times route \quad (2)$$

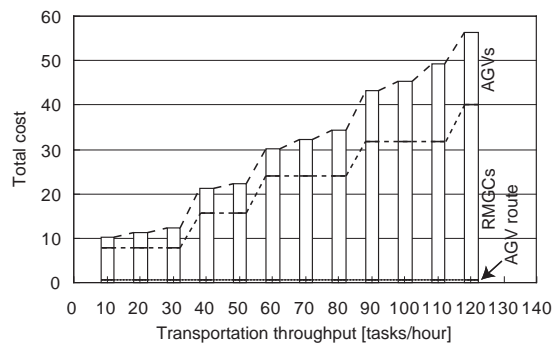
ここで、 $a, b, c, d$  はそれぞれ重み係数のことで、実際のコスト比に関する考察から、それぞれ、 $a = 1, b = 4, c = 2, d = 1.5 \times 10^{-4}$  と設定した。

### 4.2 構築コスト比較による有効性の評価

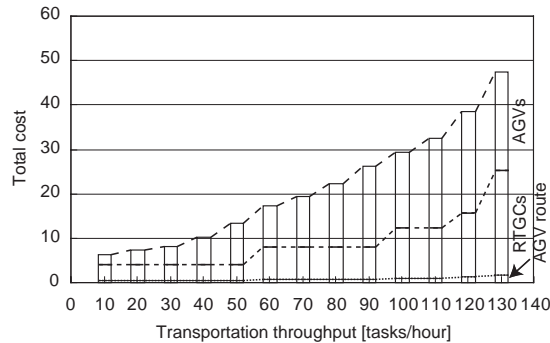
比較結果を Fig.7 に示す。この結果より、各搬送要求に対して、垂直型に比べ水平型搬送システムの方がより低コストでシステムの構築が可能となることが分かった。本結果が得られた要因としては、水平型搬送システムの方が搬送性能の高いAGVを重点的に搬送に用いているためと考える。なお、埠頭側に生じたボトルネックにより搬送効率が上がらなくなり、スループット140以上では設計解を得ることができなかった。

### 4.3 設計パラメータの解析

各要求仕様に対する導出された最適解を Fig.8 および Fig.9 に示す。Fig.8 より、要求仕様の低い段階では各システムに投入されるAGV台数は変わらないが、徐々に要求仕様を高めるにつれて水平型に投入されるAGV台数の方が多くなっていることが分かる。これは、水



(a) Total cost and ratio of the vertical transportation system



(b) Total cost and ratio of the horizontal transportation system

Fig.7 Comparison of the total construction cost and ratio of the design parameters each AGV transportation system

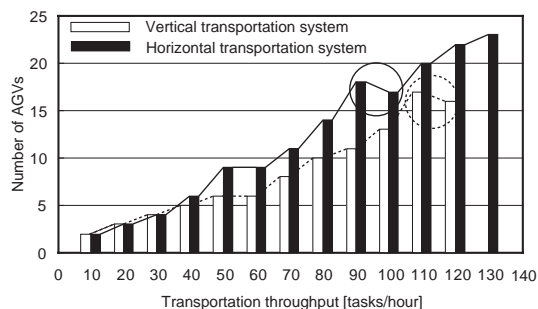


Fig.8 Tendency of the design solutions of the number of AGVs

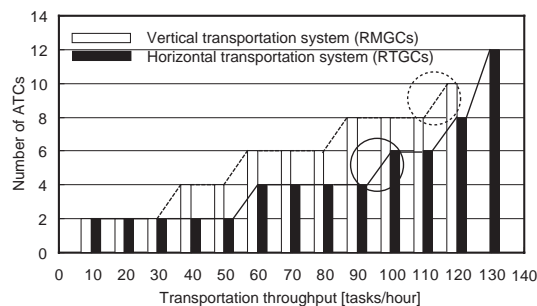


Fig.9 Tendency of the design solutions of the number of ATCs

平型搬送システム自体が AGV による搬送に重点をおいているためである。一方 Fig.9 より、投入する ATC の台数では、要求仕様が高まるにつれ、垂直型における RMGC の台数が水平型における RTGC の台数を上回る結果となった。これは、垂直型の搬送システムでは RMGC による搬送が行われているため、蔵置作業しか行わない水平型搬送システムに比べ十分な台数が必要であるためだと考える。

エージェント台数の変化の様子では、Fig.8 において要求仕様が垂直型と水平型でそれぞれ 90~100、110~120 に高められる際、AGV 台数が減少していることが分かる。これは、Fig.9 における各要求仕様に対する ATC 台数が増加する際に見られる変化であり、ATC を多く投入することにより、AGV 台数を減少させることが可能な場合があることを示している。

以上のことより、要求仕様に対する有効な搬送を実現するためには、搬送性能の高い AGV に可能な限り搬送を行わせ、ATC は蔵置位置で蔵置作業のみを行うシステム、すなわち水平型 AGV 搬送システムが、今回の要求仕様に対しては有効であることが分かった。

## 5. 結論

本研究では、港湾物流における AGV 搬送システムを題材に、提案した設計論を用いて要求仕様に対する最適設計を行った。そして、得られた設計解に基づいて、構築されたシステムのコストの比較、評価、そして設計パラメータの解析を行うことで水平型 AGV 搬送システムの有効性を示した。

今後は、水平型 AGV 搬送システムの効率的な搬送を実現するため、システム管理のための方法論に関する研究を行う必要があると考える。

## 参考文献

- [1] Abe M. *et al.* : The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (1st Report), Proc. of Int. Conf. on Materials-Handling Equipment and Logistics, pp. 133-143, 1991.
- [2] Abe M. *et al.* : The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (2nd Report), Proc. of Int. Conf. on Materials-Handling Equipment and Logistics, pp. 144-157, 1991.
- [3] Chiba R. *et al.* : "Integrated Design with Classification of Transporter Routing for AGV Systems", Proc. 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems, pp. 1820-1825, 2002.
- [4] Hoshino S. *et al.* : "Optimal Design Methodology for an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory", 7th Int. Symp. on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2004.
- [5] Chin-I. *et al.* : "Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals", IEEE Tran. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, No. 1, March (2002).
- [6] Hoshino S. *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.
- [7] Gordon W.J. *et al.* : "Closed Queuing Systems with Exponential Servers", Oper. Res. 15, 2, pp. 254-265, 1967.
- [8] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD: "Advanced Technology Cargo Handling Systems", Products Guide, 2004.