

港湾物流 AGV 搬送システムのレイアウト評価

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

An Evaluation of Different Types of AGV Transportation Systems

*Satoshi HOSHINO[†], Jun OTA[†], Akiko SHINOZAKI^{††}, Hideki HASHIMOTO^{††}

[†]The University of Tokyo ^{††}Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

Abstract— In this paper, we propose and evaluate two different types of AGV transportation systems, namely the vertical and horizontal transportation systems. We first design these systems for each requirement then, evaluate and analyze them based on the number of agents, throughput, and cost. Finally, the validity of each transportation system for the given requirements is discussed.

Key Words: Vertical and Horizontal AGV Transportation System, Comparison and Evaluation, Optimal Design, ATC (Automated Transfer Crane), QCC (Quay Container Crane)

1. 序論

本研究では、大規模搬送システムとして、港湾物流における AGV 搬送システムのレイアウト評価を行う。そのため、レイアウトの異なる 2 種類の AGV 搬送システムの構築を行う (Fig.2)。

搬送システムの最適設計に関する研究では、千葉らにより GA を用いた設計論などが提案されている [1]。しかしながら、繰返し順問題解法による設計法では、最適解を得るまでに膨大な計算時間を必要とするといった問題が存在する。この問題に対し、星野らは待ち行列ネットワーク理論を用いた設計論の提案を行ってきた [2]。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、搬送時間とコストによる有効性の評価が行われている [3]。しかしながら、トップダウン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し、解析することは困難である。Ottjes や Duinkerken らは、シミュレータ上で詳細な搬送システムを再現し、評価ならびに解析を行っている [4][5]。しかしながら、その適用範囲は狭く、様々な搬送システムに対する定量的な評価を行うことは困難となる。

本研究では搬送システムの定量的な比較ならびに評価を行うため、提案した最適設計論を用いて要求仕様に対する最適設計を行う。また、評価する対象として新たな搬送システムの提案を行い、得られた設計パラメータの解析を行うことで、提案する搬送システムの有効性を示す。

2. AGV 搬送システム

本研究では、Fig.2 に示す 2 種類の AGV 搬送システムを扱う。Fig.2(a) はすでに導入されている垂直型 AGV 搬送システム、Fig.2(b) は本研究で提案する水平型 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

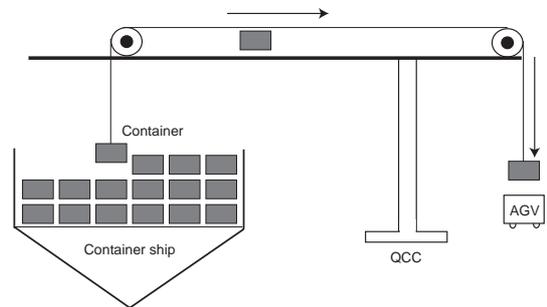


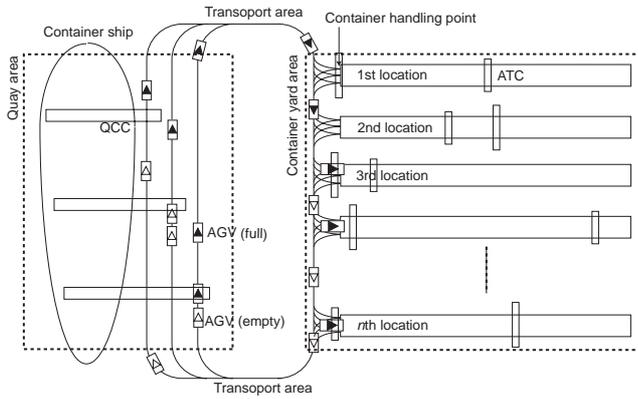
Fig.1 AGV and QCC in the Quay Area (Side View)

設計対象とする。本研究では、これら搬送システムの最適設計を行うため、埠頭・搬送・蔵置の 3 つのエリアに分割する。埠頭エリアでは、QCC (Quay Container Crane) 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.1)。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 ATC (Automated Transfer Crane) 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)。

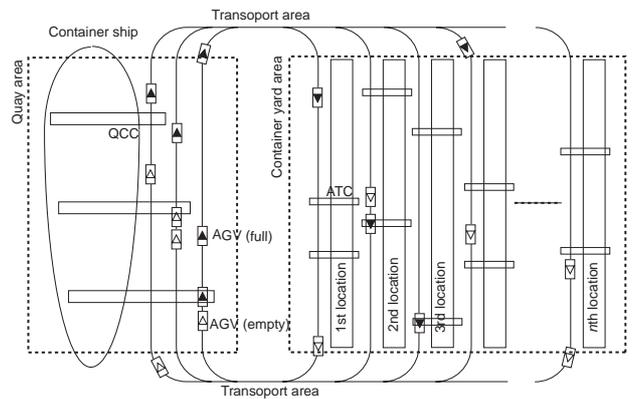
2.1 垂直型 AGV 搬送システム

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.2a)。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 RMGC (Rail Mounted Gantry Crane) 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



(a) Vertical transportation system



(b) Horizontal transportation system

Fig.2 Two Types of the AGV Transportation Systems (Top View)

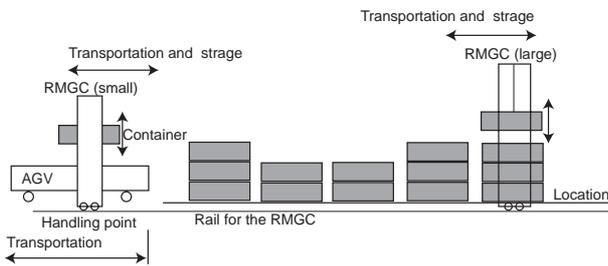


Fig.3 AGV and RMGC in the Container Yard Area (Side View)

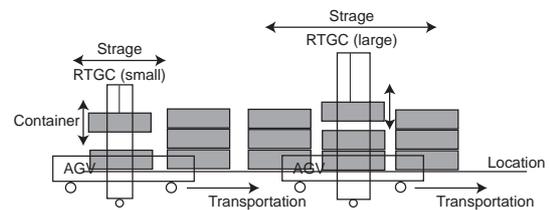


Fig.4 AGV and RTGC in the Container Yard Area (Side View)

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ので導入されるため、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

AGVはまず、埠頭エリアにおいてFig.1に示すようにしてコンテナ船よりコンテナを受け取り、搬送エリアへと向かう。コンテナを受け取ったAGVにはそのコンテナの蔵置される目的ロケーション情報が与えられる。

- step1 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。
- step2 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。
- step3 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。
- step4 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)。Step1へ。

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.2b)。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)となる、などといったことがあげられる。そのため、ロケーションの数によっては垂直型に比べ搬送経路が長くなってしまいう問題はあるものの、AGVの搬送速度とATCの搬送速度の違いを考慮すれば、搬送時間に対する影響は無視である。また、複数ある受け渡し地点により、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。

水平型の搬送システムではゴムタイヤ式ATCであるRTGC(Rubber Tire Gangry Crane)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

垂直型搬送システム同様、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。

- step1 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。
- step2 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)。

Table 1 Specification of AGV, RMGC, and RTGC

	AGV	RMGC	RTGC
最高速度 [m/s]	5.56/6.94	2.0/2.5	2.0
曲速度 [m/s]	1.39/1.39	-	-
加速度 [m/s ²]	0.15/0.15	0.1/0.1	0.1
減速度 [m/s ²]	0.63/0.63	0.4/0.4	0.4

step3 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。

step4 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)。Step1 へ。

2.3 問題設定

Fig.1, 3, および 4 より、埠頭エリアならびにコンテナ蔵置エリアにおいてコンテナの受け渡しに要する時間は、本来コンテナの位置により一定ではない。しかしながら、本研究ではモデル化のためこれらエージェント間における受け渡しの時間は全て一定とする。したがって、AGV 同士の干渉により搬送エリアで余分に要する時間ならびに ATC とのコンテナ受け渡し作業に入るまでの待機時間を考慮しながら設計を行う。また、垂直型搬送システムにおいては、待ち行列ルールの一つである FIFO ルール (First In First Out rule) を適用するため、作業を行っていない RMGC が存在するロケーションを優先的にコンテナの目的ロケーションとした。水平型搬送システムにおいては、目的ロケーションはラムダムに決定される。

3. 最適設計

3.1 エージェントスペック

各搬送エージェントの搬送スペックを Table1 に示す。速度表示は搬送作業を行わない RTGC 以外はそれぞれ (在荷時) / (空荷時) で示されている。

3.2 搬送経路

Fig.5 に近似した各搬送システムにおける AGV の搬送経路を示す。AGV は各搬送システム内において、黒の太線上を走行するものとする。AGV 同士による交通渋滞が生じない場合、Table1 より各搬送エリア (A → B, B → A) に要する時間はそれぞれ垂直型と水平型では 165, 122[s] (Fig.5a), および $\{440 + x \times (n-1)/2\}/2.57$ [s], $\{440 + x \times (n-1)/2\}/3.48$ [s] (Fig.5b) と計算から求めることができる。ここで、 x はコンテナ蔵置エリアにおける AGV 作業経路の間隔を意味しており、本研究では $x = 32$ [m] と設定した。 n はロケーションの数を示している。また、問題設定より、埠頭エリアにおよびコンテナ蔵置エリアにおけるエージェント間でのコンテナ受け渡し作業に要する時間はそれぞれ 60[s] および 30[s] とした。以上、これらの値は待ち行列ネットワーク理論に対する初期入力となる。

3.3 最適パラメータの導出

各搬送システムの要求仕様に応じた最適設計解を導出する。今回の比較実験においては、要求仕様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

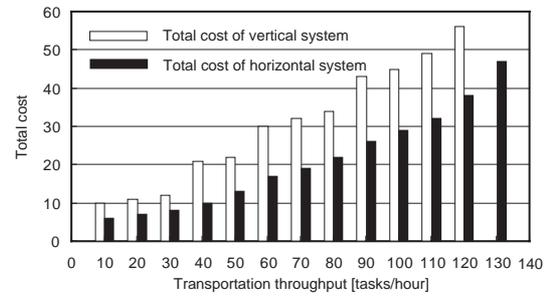


Fig.6 Comparison Results of Each AGV Transportation System

ぶ) とした。搬送タスクを 600 とし、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。なお、計算式ならびにアルゴリズムの詳細に関しては、文献 [2] を参考にされたい。

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、以下のような式から垂直型・水平型搬送システムにおける総合コストを算出する。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

$$Totalcost = \alpha \times AGVs + \beta \times RMGCs$$

- 水平型 AGV 搬送システム

$$Totalcost = \alpha \times AGVs + \gamma \times RTGCs$$

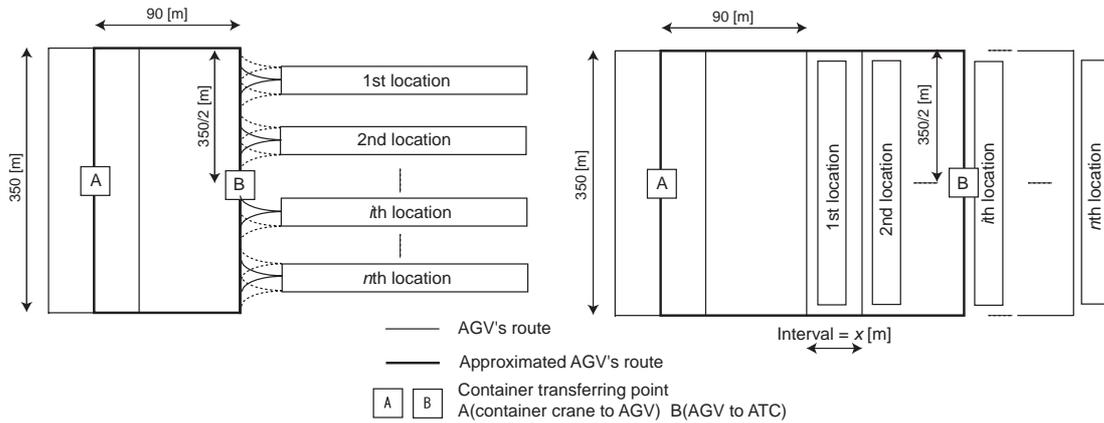
ここで、 α, β, γ はそれぞれ評価係数のことで、今回の実験では、 $Input\ cost : AGV < RTGC < RMGC$ の関係を考慮し、 $\alpha = 1, \beta = 4, \gamma = 2$ とした。

4.2 評価

比較結果を Fig.6 に示す。本設計問題は組合せ最適化問題に属するため、今回の設計においても制約充足解は複数導出された。Fig.6 は、その中でも総合コストが最も低かったものを示している。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。本実験で設定した以上の高効率搬送を行うためには、埠頭エリアにおける荷役作業の改善が必要となる。

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 (AGV 台数, ATC 台数) を Fig.7 および Fig.8 に示す。Fig.7 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



(a) An approximated AGV's route in the vertical system (b) An approximated AGV's route in the horizontal system

Fig.5 Modeling of Each Transport Routing

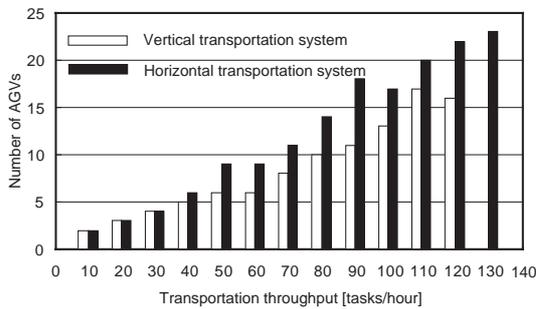


Fig.7 Comparison of the Number of AGVs in each Transportation System

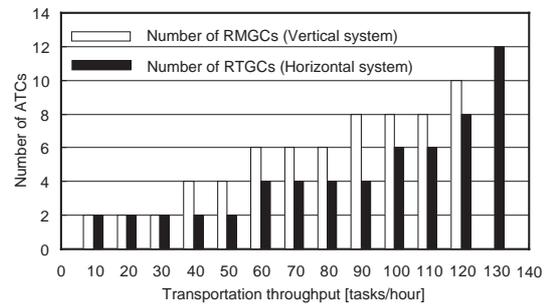


Fig.8 Comparison of the Number of ATCs in each Transportation System

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.8 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.7 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.8 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

本研究ではマルチエージェントシステムとして、港湾物流における AGV 搬送システムを題材に、搬送シ

ステムの定量的な比較ならびに評価を行うため、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。また、評価する対象として新たな搬送システムの提案を行い、得られた設計パラメータの解析を行うことで、提案する搬送システムの有効性を示した。

今後は、提案した水平型搬送システムの効率的な搬送を実現するため、タスク割り当てを行う際の最適スケジューリングならびにエージェント間における協調動作則に関する研究を行う必要があると考える。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Hoshino S. *et al.*: "Optimal Design Methodology for an AGV Transportation System by Using the Queuing Network Theory", 7th International Symposium on Distributed Autonomous Robotic Systems, 2004.
- [3] Chin-I. *et al.*: "Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals", IEEE Tran. on Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, No. 1, March (2002).
- [4] Ottjes J.A. *et al.*: "Simulation of a New Port-Ship Interface Concept for Inter Modal Transport", Proc. of the 11th European Simulation Symposium, 1999.
- [5] Duinkerken M.B. *et al.*: "A Simulation Model for Automated Container Terminals", Proc. of the Business and Industry Simulation Symposium, pp. 134-149, 2000.