

3606 港湾自動コンテナターミナルにおける搬送システムの統合的設計

Integrated Design of a Transportation System in a Seaport Container Terminal

正 星野智史 (東京工業大学) 正 太田 順 (東京大学)

Satoshi HOSHINO, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN
Jun OTA, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN

Abstract— In addition to designs of input number of machines, system layout, and management model, we take into consideration machines' specifications for imposed demands. This is the proposed integrated design methodology for a transportation system in an automated seaport container terminal, in this paper. The objective of this research is to maximize the system efficiency while minimizing the changes of the specifications. For this objective, we evaluate the specifications; then, make clear the effects on the system. Based on the results, we downgrade and upgrade the specifications and then, we finally design the number of machines and the specifications appropriately for imposed demands.

Key Words: Integrated Design, seaport container terminal, automated transportation system

1. 緒言

我々はこれまでに、港湾自動コンテナターミナルを想定し、当該ターミナル内におけるコンテナ搬送作業の高効率化を目指し、AGV (Automated Guided Vehicle) といった作業機器などを投入した AGV 搬送システム (Fig.1 参照) の設計方法論に関する研究を行ってきた。そこでは、1. 作業機器の投入台数設計 [1], 2. システムのレイアウト評価ならびに設計 [2], 3. システムの運用モデル設計 [3], などといったことを行ってきた。一方で、実搬送システムに提案設計方法論を適用し、4. 既存の搬送システムに対する改善・改修設計も行ってきた [4]。

しかしながら、これら従来研究では、当該搬送システムに投入されている作業機器の種類やその仕様などはあらかじめ定められており [5], 作業仕様自体への設計に関する言及はなされていない。このような状況において、現場の設計者からは「上述の1~4の設計課題に加えて、より低コスト・高効率な搬送システムを構築するために、作業機器の仕様も搬送要求にあわせて適切に設計する」という課題が与えられている。なお、本研究では、搬送要求=要求スループット [TEU/hour]: 要求される総搬送コンテナ数 / 要求されるコンテナ搬送完了時間、とする。

従来研究において、ヒューリスティック法に基づき最も効率的な作業機器を選択する方法論が提案されている (MATHES: MATerial Handling Equipment Selection) [6]。この他にも、近年の港湾自動コンテナターミナルの動向から、作業機器としては、埠頭側に投入される埠頭クレーン (QCC: Quay Container Crane), コンテナ搬送のために投入される無人搬送車 (AGV), 蔵置ヤード側においてコンテナの蔵置作業を行うために投入されている門型式移動クレーンなどが稼働していることが分かる [7] [8]。

以上のことから本研究では、上述した3種類の作業機器群を当該搬送システム内において稼働する作業機器として想定し、それらの作業仕様まで適切に設計することで高効率搬送システムを構築する。なお、従来研究が主に焦点を当ててきた前述の1~4に加えて、本研究では、作業仕様も設計対象としているため、こ

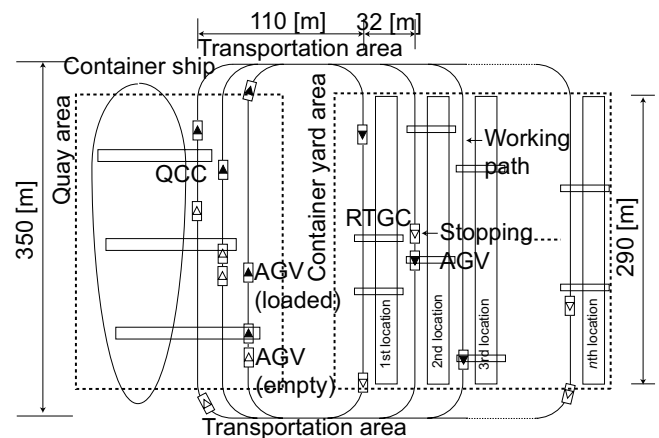


Fig.1 Horizontal AGV Transportation System in an Automated Seaport Container Terminal

れを本稿では統合的設計と呼ぶこととする。

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 AGV 搬送システムの概要

Fig.1 に本研究で対象とする水平型 AGV 搬送システムを示す。水平型 AGV 搬送システムでは、コンテナ蔵置ロケーション群が、コンテナ船に対して水平に配置されている。なお、当該ロケーションは1ロケーションあたり、640 [TEU] の蔵置スペースを有しているものとする。

本研究ではシステム設計のため、当該搬送システムを埠頭、搬送、蔵置、搬送の3種類4つの作業エリアに分割する。序論で述べた通り、作業機器群として埠頭エリアに QCC, 搬送エリアに AGV, そして蔵置エリアにはゴムタイヤの門型式移動クレーンである RTGC (Rubber-Tired Gantry Crane) が投入されている。なお、各ロケーションに対して大小サイズの異なる2台の RTGC が投入されるものとする。また、QCC の投入台数に関しては、埠頭エリアにおける岸壁のサイズ

Table 1 Machines' specifications divided 4 levels: slow, normal, fast, and faster

Specification	slow	normal [5]	fast	faster
Loading/Unloading speed by QCC [s]	75	60	45	30
Transportation speed by AGV (loaded/empty) [m/s]	4.17/5.20	5.56/6.94	8.34/10.41	12.88/13.88
Moving speed by RTGC [m/s]	1.93	2.25	3.87	4.5
Transferring/Storing speed by RTGC [s]	45/45	30/30	22.5/22.5	15/15

により決定されるパラメータであり、本研究では、3台とした。現状では、これら3種類の作業機器の仕様は、[5]に記載されている通りとなっている。以降、本稿において特にことわりがない限り、各機器はこれらの仕様の基、作業を行うものとする。

2.2 作業手順

コンテナは以下の作業手順により処理される。

1. QCCによるコンテナ船からAGVへの荷役
2. AGVによる目的地までの搬送
3. ロケーション上をRTGCが移動
4. AGVからRTGCへのコンテナ受け渡し
5. AGVはQCCの所へ、作業を終えたRTGCはその場に待機（手順1へ）

2.3 各エリアにおける作業

コンテナ船により埠頭まで運び込まれたコンテナは、搬送システム内で作業を行っている機器群により、蔵置エリア内の所定の場所まで搬送・蔵置されていく。ここで、各エリアにおける機器の作業内容を以下のように定義する。

埠頭エリア QCCによるコンテナ船からAGVへのコンテナへの荷役作業が行われている。

搬送エリア AGVによる埠頭エリアからコンテナ蔵置エリアまでのコンテナ搬送が行われている。

蔵置エリア 目的蔵置位置に隣接する場所においてAGVからRTGCへとコンテナが受け渡され、RTGCによるコンテナの蔵置作業が行われている。

3. チャレンジングポイント

本研究では、「どの作業機器のどの仕様をどれだけ変更すると、システム全体としてどれだけ効率が良くなるか」といった作業機器の仕様設計を考慮した統合的な設計を行う。ただし、この時、全ての作業機器群の仕様を変更することは技術的にもコスト面からも現実的ではない。したがって、できるだけ作業機器の仕様の変更を最小限にとどめながら、最大限にシステムの効率化を図る必要がある。さらに、本研究では多種多様な設計パラメータを対象にしており、かつ、これら設計パラメータは互いに影響をおよぼしあうため、当該設計問題は複雑な組合せ問題となる。これが本研究におけるチャレンジングポイントとなる。

当該チャレンジングポイントに対して、本研究では搬送システムに影響を与える、あるいはそうでない作業機器とその仕様は何かを明らかにする。これにより、

低機能化設計が可能な仕様と高機能化設計が必要な仕様を明確にする。そのためのアプローチとして、本研究では、QCCによるコンテナの荷役ならびにRTGCによるコンテナの受け取り・蔵置速度の他に、主たる作業機器であるAGVによる搬送速度（在荷時/空荷時）、RTGCによる移動速度の4つの作業仕様を評価の対象とする。

4. 問題設定

4.1 設計パラメータ

AGV搬送システムの統合的設計を行う本研究では、作業機器の投入台数、システムレイアウト、運用モデル、そして作業機器の仕様などが設計対象となる。ただし、これまでに述べてきた通り、搬送要求に対する有効なシステムレイアウトおよび、運用モデルはすでに著者らによって示されてきた[2][3]。そのため本研究では、システムレイアウトはFig.1が示す水平型、運用モデルは、「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、作業空間選択法に基づきRTGCを呼び出す」モデルとし、その上で、以下の2つを設計パラメータとすることとした。

- 作業機器の投入台数（AGV, RTGC）
- 作業機器の仕様

なお、搬送要求に対する作業機器投入台数の設計方法論に関しては、著者らによって提案されている最適設計方法論を適用した[1]。

4.2 評価対象となる作業機器群の仕様

本研究では、以下に示す4つの作業仕様を評価ならびに評価対象とする。なお、AGVならびにRTGCの加速度および減速度に関しては、[5]に記載してあるものと同様のものを設定した。

- QCCによるコンテナ荷役速度
- AGVによる搬送速度（最高速度）
- RTGCによる移動速度（最高速度）
- RTGCによるコンテナ受け取り・蔵置速度

Table 1が示す通り、4つの作業仕様に対して、仕様書[5]に記載してある仕様を「標準」とし、「遅い」、「標準」、「速い」、「さらに速い」、の4段階にそれぞれを分割する。これは、作業機器の低機能・高機能化設計を行うことを意味している。

4.3 コストモデル

本研究では以下に示すコストモデルを設計段階において導入し、算出されたAGVおよびRTGC台数に基

づいた構築コストの比較ならびに評価を行う。

$$\text{構築コスト} = \alpha \times \text{AGV 投入台数} + \beta \times \text{RTGC 投入台数} + \gamma \times \text{QCC 投入台数}$$

ここで、 α 、 β 、 γ は、AGV、RMGC、QCCのコスト係数のことで、これらの値は、 $\alpha:\beta:\gamma = 1:2:4$ と設定した。これに、4段階の仕様の違い、すなわち作業機器の高機能化に向けた開発コストならびに低機能化を行った際のコストも構築コスト算出過程において含めるため、開発コスト=コスト係数を50[%]増加、低機能化コスト=コスト係数を20[%]削減、と設定した。たとえば、AGVの低機能化・高機能化を行う際、 α は、slow=0.8, normal=1.0, fast=1.5, faster=2.0, となる。

5. 作業仕様を考慮した統合的設計

5.1 設計プロセス

作業機器の仕様と投入台数の組合せ設計問題を解くための設計プロセスを以下に記す。

1. 各作業機器の仕様を変更
2. 作業仕様が搬送システムのスループットに与える影響評価
3. 2の結果に基づき各作業仕様の低機能化・高機能化
4. 3を行った上で実装、作業機器の投入台数設計 [1]
5. 4により導解された台数に基づき、各作業仕様を変更した際の構築コスト算出
6. 要求仕様に対して最も低コストでシステムを構築できる作業仕様と投入台数の組合せを導出

なお、作業仕様を変更する際には1つの仕様のみとし、他の仕様は全て「標準」とした。作業機器群の仕様評価を行うため、本研究では、以下に示す3つの規模のAGV搬送システム(QCC台数, AGV台数, RTGC台数)に対して、各仕様をパラメータとし、それらを変更した作業機器群を投入する。

- 小規模搬送システム: (3, 1, 2)
- 中規模搬送システム: (3, 10, 6)
- 大規模搬送システム: (3, 20, 10)

5.2 作業仕様によるスループットの比較と評価

Fig.2, Fig.3, Fig.4に、大中小それぞれのAGV搬送システムに対して、各作業仕様を変更した際に得られたシステムスループットの比較結果を示す。横軸が作業機器の仕様項目、縦軸が各仕様を「遅い」「標準」「速い」「さらに速い」の4段階に変更した際得られたシステムスループットを示している。

これらの結果より、システムスループットに対しては、QCCの作業仕様の変更が大きく影響しており、AGVとRTGCの仕様は影響していないことが分かった。これらのことは、QCCの荷役速度に関しては高機能化する必要がある、一方で、AGVの搬送速度とRTGCの移動速度に関しては、低機能化が可能であることを意味している。

5.3 要求仕様に対する作業仕様と投入台数設計

Fig.5は、作業仕様を全て「標準」にしたとき、QCCの荷役速度を「速い」「さらに速い」、の2段階に、AGVの搬送速度、RTGCの移動速度をそれぞれ「遅

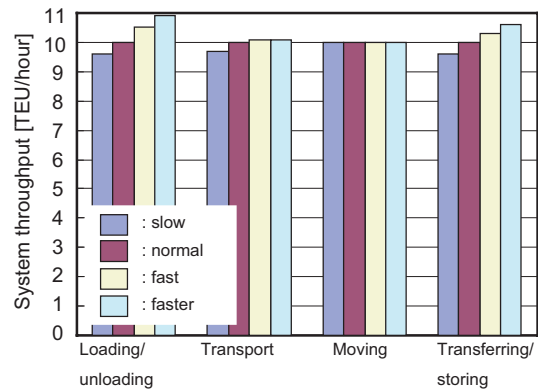


Fig.2 Comparison Result of the Small-scale AGV Transportation System

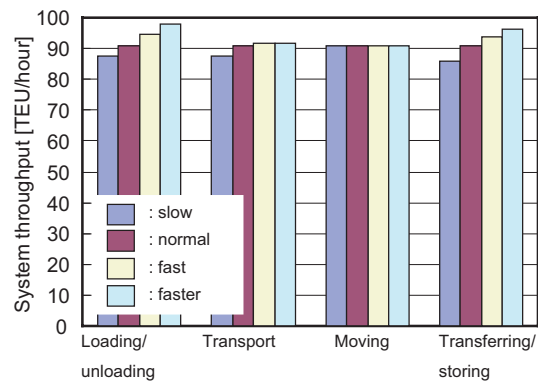


Fig.3 Comparison Result of the Medium-scale AGV Transportation System

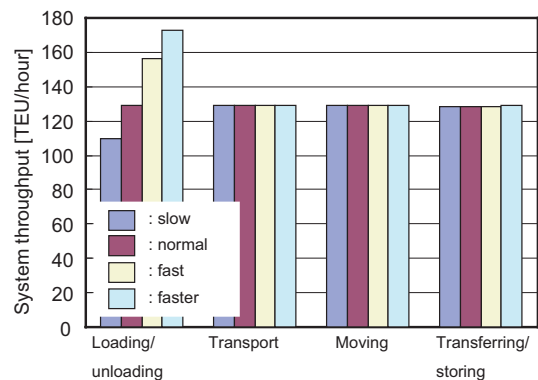


Fig.4 Comparison Result of the Large-scale AGV Transportation System

い」に設計し、当該AGV搬送システムに投入した上で、各搬送要求に対して導解されたAGVとRTGCの投入台数、ならびにQCC台数に基づき、4.3節で述べたコストモデルを適用した結果得られた各構築コストを示している。横軸が搬送要求、縦軸が得られた設計解に基づき搬送システムを設計した際の総合構築コストを示している。これら総合構築コストから、各要求仕様に対して最も低コストでシステム設計を行うパラ

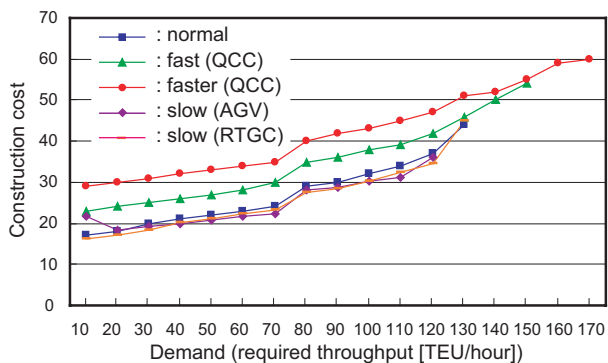


Fig.5 Construction Costs based on the Designed Specifications

Table 2 Design solutions: machine specification and number of machines

Demand	Designed machine spec.	AGV	RTGC	Cost
10	RTGC: slow	1	2	16.2
20	RTGC: slow	2	2	17.2
30	RTGC: slow	3	2	18.2
40	AGV: slow	5	2	20.0
50	AGV: slow	6	2	20.8
60	AGV: slow	7	2	21.6
70	AGV: slow	8	2	22.4
80	RTGC: slow	9	4	27.4
90	RTGC: slow	10	4	28.4
100	AGV: slow RTGC: slow	13 12	4 4	30.4 30.4
110	AGV: slow	14	4	31.2
120	RTGC: slow	16	4	34.4
130	normal	20	6	44.0
140	QCC: fast	20	6	50.0
150	QCC: fast	20	8	54.0
160	QCC: faster	19	8	59.0
170	QCC: faster	20	8	60.0

メータの組合せを、設計解として算出する (Table 2 参照)。なお、本設計プロセスにおいて、搬送すべき総搬送コンテナ数は 600 [TEU] とした。

Fig.5 および Table 2 より、搬送要求が低い段階では、開発コストをかけて QCC の荷役速度を高機能化させることの必要性が確認されず、AGV や RTGC の低機能化にともなうコストが影響し、従来の「標準」の作業仕様を実装した作業機器による AGV 搬送システムよりも、総合構築コストは低い結果となった。しかしながら、搬送要求が 140 [TEU/hour] 以降になると、従来の作業仕様では搬送要求を満たすことができなくなり、その場合、QCC の作業仕様を設計する結果となった。

以上のことから、従来の全て「標準」の仕様に基づい

た作業機器を投入するのではなく、低い搬送要求に対しては低機能に、高い搬送要求に対しては高機能に、それぞれ適切に仕様設計することの妥当性が確認された。

6. 結論

本研究では、高効率 AGV 率搬送システムを構築するため、作業機器の投入台数設計、レイアウト設計、運用モデル設計、そして作業機器の仕様設計などの諸設計問題を統合的に解決するための方法論の提案を行った。その中で、本稿では、特に作業機器設計に焦点を当て、当該仕様を考慮した上で、与えられた搬送要求に対するシステム設計を行った。その結果、本研究で設定した条件の下では、搬送要求によって作業機器の低機能化・高機能化を行うことで、従来の「標準」の作業仕様によるシステム設計よりも、作業機器の仕様変更を最小限にとどめながら、最大限に搬送システムの効率化を図ることができた。この結果は、作業機器の仕様を天下一的に与えるのではなく、評価に基づき、要求仕様に対してそれぞれ適切に開発および設計がなされる必要があることを示している。

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] 星野智史 他：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，第 4 巻，第 1 号，pp. 1-9，2005。
- [2] S. Hoshino *et al.* : Hybrid Design Methodology and Cost-effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, in press.
- [3] 星野智史 他：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，計測自動制御学会産業論文集，第 4 巻，第 14 号，pp. 98-108，2005。
- [4] S. Hoshino *et al.* : Improved Design Methodology for an Existing Automated Transportation System with AGVs in a Seaport Container Terminal, Advanced Robotics, in press.
- [5] MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.: Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide, 2004.
- [6] E.L. Fisher *et al.* : Mathes: An expert system for material handling equipment selection, Engineering Costs and Production Economics, Vo. 14, Issue 4, pp. 297-310, 1988.
- [7] D. Steenken *et al.* : Container Terminal Operation and Operations research - A Classification and literature review, OR Spectrum, Vol. 26, No. 1, pp. 3-49, 2004.
- [8] H.-O. Günther *et al.* : Container Terminals and Automated Transport Systems, Springer-Verlag, 2005.