

実搬送システムへの設計支援方法論

Design Support Methodology for an Actual 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, Sagami-hara, Kanagawa, Japan

Abstract— In order to redesign an existing AGV (Automated Guided Vehicle) transportation system in a port terminal, it is needed to adequately evaluate and analyze the system. For this purpose, this paper proposes the design support methodology for an actual transportation system. In the methodology, an optimal design methodology that has proposed by the authors is used to take into account bottlenecks in the transportation system. These bottlenecks are the traffic congestions caused by the AGVs. Also, this paper describes a logic tree based on the idea of the MECE (Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive) in order to ease the bottlenecks.

Key Words: AGV, transportation system, redesign, bottleneck, logic tree, MECE.

1. 緒言

イタリアの Tyrrherian やオランダの Rotterdam では、既に当該港湾ターミナルにおいて実際に稼動している搬送システムを事例研究の対象として、評価および解析のためのシミュレーションモデルが提案されている [1][2]。

既存の AGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムに対し、AGV などの追加投入といった要望がある。しかしながら、システム的环境スペックに対して、必要以上に AGV を投入した場合、そのシステムはオーバースペックとなり、システム内にボトルネック、すなわち、稼動している AGV 群による搬送渋滞が生じてしまうことがある。従来、既存の搬送システムの再設計を行う際には、定点観測などにより、ボトルネック箇所や、システムスループットの評価ならびに解析、などといったことがなされてきた。しかしながら、このような試行錯誤的なアプローチでは、再設計に至るまでの時間およびコストがかかってしまう。また、再設計されたシステムの最適性も考慮することが困難となる。そのため、システムを再設計する際には、既存のシステムに対しあらかじめ適切な評価ならびに解析を行う必要がある。そして、ボトルネックが可能な限り生じないような再設計を行う必要がある。

そこで本研究では、これまでに提案してきた AGV 搬送システムの最適設計方法論 [3] を、Fig.1 が示す実搬送システムに適用し、既存のシステムに対する数理的な評価・解析・再設計を行うための設計支援方法論を提案する。そのため、システムの再設計を行うための MECE (Mutually Exclusive, Collectively Exhaustive) の概念に基づいたロジックツリーについて述べる。これにより、試行錯誤的なアプローチを行う必要がなくな、その結果、再設計を行うための時間およびコストの削減が可能となる。

2. チャレンジングポイント

本研究では、いかにして実搬送システム内に生じているボトルネックを可能な限り短時間で把握し削減するか、といったことが課題となる。しかしながら、シ

ステムがオーバースペックになってしまっている状態では、システム内のある場所におけるボトルネックを何らかの対策により解消しても、その結果、別の場所にボトルネックが生じてしまう可能性がある。そのため本研究では、以下のチャレンジングポイントを克服する必要がある。

C.P.(I) AGV 搬送システム内のボトルネックの検出・解消

C.P.(II) 搬送システムのバランスの考慮

Roser らは、ボトルネック検出の重要性に注目し、AGV システムにおけるいくつかのボトルネック検出法の比較を行っている [4]。しかしながら、システムの数理的なモデル化などはなされていない。そのため、チャレンジングポイント (I) に対しては、文献 [3] で提案されている待ち行列ネットワーク理論を用いた設計方法論を適用することにより、数理モデルによるシステムの評価および解析を行う。そして、ボトルネック解消のために、MECE を考慮したロジックツリーを構築する。チャレンジングポイント (II) に対しては、搬送エージェントである AGV のスペックと、搬送システム的环境スペックのバランスを考慮する。たとえば、AGV の投入台数や搬送能力などの AGV に関するスペックが搬送システム的环境スペックを上回ってしまっている、すなわちシステムがオーバースペック状態にある場合、ボトルネック箇所に対し、試行錯誤的な改善あるいは再設計を行っても、その結果、新たに他の場所でボトルネックが生じてしまう可能性がある。一方、経路長や経路数、ならびに各エリアにおいて AGV とコンテナのやりとりを行うエージェントの投入台数や処理能力といった搬送システム的环境スペックが AGV のスペックを上回ってしまっている場合、ボトルネックは生じないかもしれないが、システム内において常にアイドル状態になってしまっているエージェントが生じてしまい、非効率な搬送システムとなってしまう。以上のことから、高い搬送効率を維持した状態で、ボトルネックを解消するためには、AGV と環境のスペックを均等にしよう搬送システムを構築する必要がある。

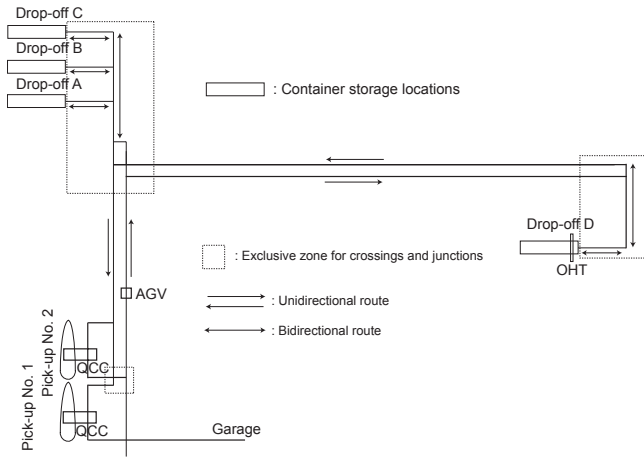


Fig.1 Actual AGV Transportation System

3. AGV 搬送システム

3.1 システム設定

Fig.1 において、AGV は矢印で示された単方向の搬送経路上を走行する。ただし、各 Drop-off エリアに入る経路のみ、双方向により構成され、AGV はここでスイッチバック行動をとる。また、システム内には作業を行わない AGV が待機するためのガレージが設けられ、作業を終了した AGV はガレージへと戻る。各 Pick-up エリアにおいては、それぞれ 1 台の QCC (Quay Container Crane) が投入され、荷役作業を行う。Drop-off エリアでは、A, B, C, D の 4 つのコンテナ蔵置ロケーションに対しそれぞれ 4 台の OHC (Overhead Hoist Crane) が投入され、コンテナの搬送・蔵置作業を行う。点線の枠は、AGV の排他ゾーンを示している。排他ゾーンは、経路の交差、分岐・合流地点における AGV 同士によるデッドロックを回避するために設けられる。したがって、1 台の AGV が排他ゾーンに進入中に他の AGV が当該ゾーンに進入することはできない。また、搬送指令は、各 Pick-up エリアの QCC から均等に出され、搬送先も各 Drop-off エリアのロケーションに対して均等に決定される。

3.2 搬送手順

AGV は以下に示す搬送手順でコンテナを Pick-up エリアより Drop-off エリア内のロケーションへと搬送する。また、作業を終了した AGV はガレージへと待避する。

- 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 OHC によるコンテナの受け渡し作業
- Step 6. OHC によるコンテナ搬送・蔵置
- Step 7. AGV は Pick-up エリアへ (Step 1 へ)

3.3 搬送シミュレータ

Fig.2 に、本研究で開発した搬送シミュレータを示す。本シミュレータを、設計プロセスにおいて、後述する待ち行列ネットワークとハイブリッドに用いることにより、高速かつ最適な設計が可能となる [3]。

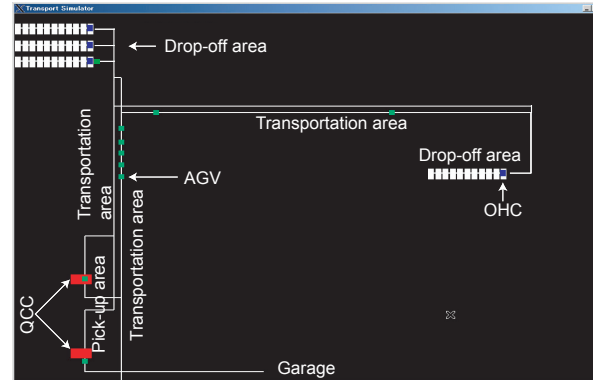


Fig.2 Developed Transportation Simulator

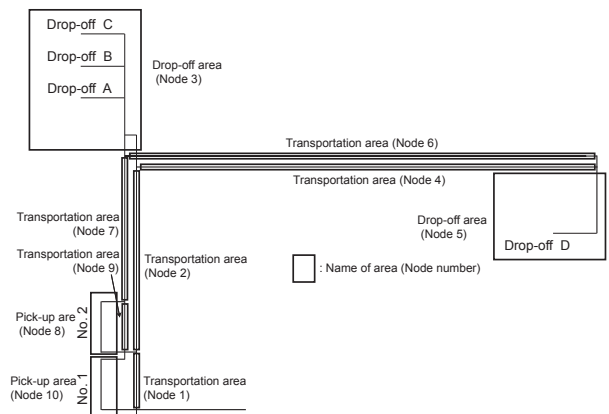


Fig.3 Assigned nodes to areas

Fig.2 において、QCC は AGV が Pick-up エリアに到着すると作業を開始する。ここで、QCC によるコンテナの荷役時間は 60[s] とした。AGV はコンテナの荷積み状態に関わらず、経路上にあるトランスポンドユニットを介して通信を行い、他の AGV との間隔制御、速度制御、排他ゾーンにおける制御を行う。その際、走行速度は経路により異なり、搬送エリアでは 2.78[m/s]、Pick-up ならびに Drop-off エリアでは 1.39[m/s] を最高速度とし、車間距離を制御しながらこれら規定速度に従う。Drop-off エリアにおける AGV と OHC とのコンテナの受け渡しに要する時間は 30[s] とした。

4. AGV 搬送システムのモデル化・定式化

4.1 モデル化

Vandaele らは、開放型待ち行列モデルを用いた交通量のモデル化を行っている [5]。しかしながら、開放型では巡回するシステム全体のモデル化を行うことが困難である。そのため本研究では、Fig.1 の AGV 搬送システムに対して、閉鎖型待ち行列ネットワークモデルを適用し、システム全体のモデル化を行う。そのため、まずはじめに各エリアを Fig.3 が示すように 10 個のノードに分割する。分岐・合流点ならびに経路の交差点の有無によりそれぞれノードが適用される。各ノードは、単一、複数、無限サーバのいずれからなる。ノード 3 は A, B, C の 3 つのロケーションがあり、3 台の OHC が作業していることから、サーバ 3 台の複数サーバ、ノード 5 は 1 台の OHC が作業しているため、サーバ 1 台

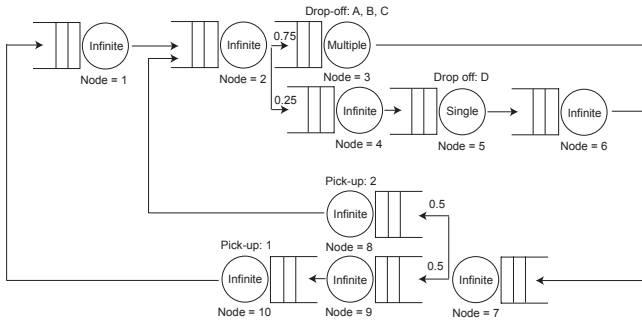


Fig.4 Modeled System With the Use of the Closed Queuing Network

の単一サーバ，その他のノードは AGV の移動時間コストを表現するため，無限サーバを適用する．これらノードにより構成された AGV 搬送システムは，Fig.4 に示すようにネットワークモデルとして表現することができる．Fig.4 において，ネットワークが分岐する箇所には，AGV が進む際の遷移率が示されている．これらの値は，3.1 節に述べたタスクの均等な割当てという前提の下に定められている．

4.2 定式化

Fig.4 より，AGV 搬送システムにおける単位時間のコンテナ搬送量であるスループットは，(1) 式に示すようにして定式化することができる．本研究では，このスループットを要求仕様に対する設計基準とし，これを満たすよう AGV 台数 (K) を設計する．

$$\tau_j(K) = \theta_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (1)$$

(2)~(4) 式は各ノードに平均的に滞在する AGV 台数を示している．単一 (2) 式・複数 (3) 式・無限サーバ (4) 式により構成されたネットワーク内において，ボトルネックノードを数理的に検出することができる．

$$\phi_j(K) = h_j \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x \leq K-1} q_j(x) G(K-1-x) \quad (2)$$

$$\phi_j(K) = \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x \leq K} x q_j(x) G_{[j]}(K-x) \quad (3)$$

$$\phi_j(K) = h_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (4)$$

ここで，

N : システム内の総ノード数

K : システム内を巡回搬送する AGV の投入台数

j : ノード番号 ($j=1, \dots, N$)

θ_j : ノード j への AGV の相対訪問回数

h_j : ノード j のトラヒック係数

$G(x)$: システム内に x 台の AGV が存在する際の正規化定数 ($0 \leq x \leq K$)

$G_{[j]}(x)$: システム内に x 台の AGV が存在する際の j 補完網における正規化定数 ($0 \leq x \leq K$)

$q_j(x)$: ノード j に AGV が x 台存在する際のたたみ込み係数

θ_j に関して，ネットワークに分岐がない場合，相対訪問回数は各ノードで等しくなり，{相対訪問回数} = {総搬送コンテナ数} となる．しかしながら，Fig.4 より，本ネットワークモデルの場合，AGV の搬送経路が分岐あるいは合流している箇所が存在する．その場合，{各分岐点における遷移率} × {総搬送コンテナ数} により，各ノードにおける相対訪問回数を算出する． h_j のトラヒック係数は， $\theta_j \times \{ノード j$ における時間コスト} により算出することができる．正規化定数 $G(K)$ とは，各ノード周りの定常状態になる確率の和を 1 にするための定数のことである (5) 式)． j 補完網とは対象とする閉鎖型待ち行列ネットワークの中から j 番目のノードを取り除いて得られる正規化定数のことであり， $G_{[j]}(K)$ はその j 補完網に対して上述の正規化定数導出と同様の手続きにより，解を得たものである (6) 式)．

$$G(K) = \sum_{x_1+x_2+\dots+x_N=K} \prod_{j=1}^N q_j(x) \quad (5)$$

$$G_{[j]}(K) = \sum_{x_1+\dots+x_{j-1}+x_{j+1}+\dots+x_N=K} \prod_{i=1, i \neq j}^N q_i(x) \quad (6)$$

(5)(6) 式におけるそれぞれのたたみ込み係数に関しては，単一 (7) 式・複数 (8) 式・無限サーバ (9) 式) が適用されたそれぞれのノードに対して，以下の式から算出することができる．

$$q_j(x) = h_j^x \quad (7)$$

$$q_j(x) = \begin{cases} \frac{h_j^x}{x!}, & x \leq S_j \\ \frac{x}{S_j! S_j^{x-S_j}} \frac{h_j^x}{x!}, & S_j < x \end{cases} \quad (8)$$

$$q_j(x) = \frac{h_j^x}{x!} \quad (9)$$

ここで S_j は，複数サーバによる構成されているノード j で稼動しているサーバ数 (S 台) を意味している．

5. 設計支援方法論

5.1 ロジックツリーによる影響分析

(2)~(4) 式および (8) 式より，再設計の際，ボトルネックに影響を与えるパラメータは， K ， h_j ， S_j であることが分かる．また， h_j は θ_j とノードを通過するのにかかる時間コスト，さらに θ_j は遷移率と搬送コンテナ数より算出することができる．以上のことから，ボトルネックを解消するためのロジックツリーは以下の Fig.5 のようになる．

- AGV の投入台数：AGV の投入台数を変更することにより，AGV 渋滞を緩和することができる．
- トラヒック係数：相対訪問回数 × 時間コスト

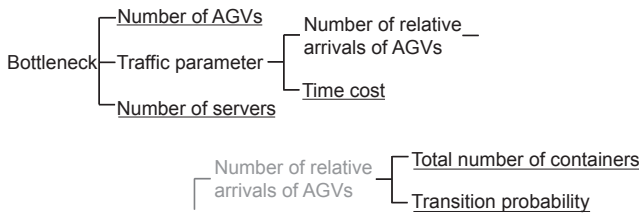


Fig.5 Logic Tree Based on the MECE

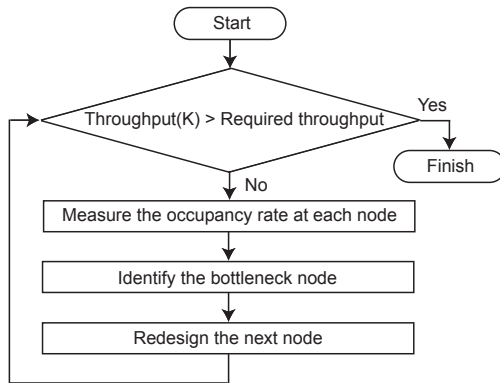


Fig.6 Proposed Redesigning Process

- 相対訪問回数：総コンテナ搬送数 × 搬送遷移率
 - * 搬送コンテナ数：搬送コンテナ数を変更することにより，AGV 渋滞を緩和することができる。
 - * 遷移率：搬送遷移率を変更することにより，渋滞が生じているエリアへ向かう AGV 台数を減らすことができる。
- 時間コスト：AGV が各ノードを通過するのに要する時間コスト，すなわち搬送能力（速度）は搬送経路長などを変更することにより，AGV 渋滞を緩和することができる。
- サーバ数：サーバ数に相当する搬送経路数を変更することにより，渋滞を緩和することができる。

ただし，AGV 台数は設計対象であり，総搬送コンテナ数ならびに搬送遷移率などは，港湾管理会社により与えられるパラメータである．また，AGV の搬送能力はハードウェアの仕様によるものであり，経路長はレイアウトに依存していることが多く，変更は困難である．そのため本研究では，Fig.5 より，サーバ数に注目する．すなわち，搬送経路数を増設することにより，ボトルネックを解消する．

5.2 再設計手順

要求仕様に対する再設計の手順について Fig.6 に示す．AGV が K 台投入された搬送システムのスループットが，要求仕様を満たす場合，設計は終了する．Fig.7 は，AGV 台数を投入していった際のシステムスループットを示している．これより，要求スループットが 20[TEU/h] 程度までであれば，AGV5 台までで要求仕様を満たすシステムを設計することが可能であることが分かる．しかしながら，それ以上の要求仕様になる

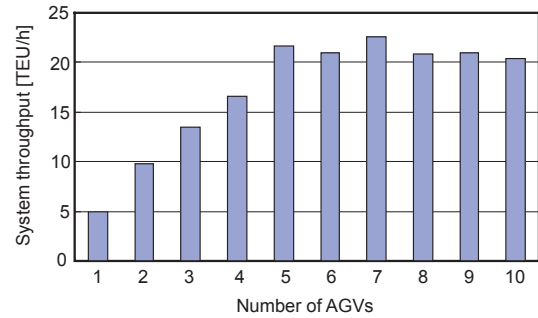


Fig.7 System Throughput for the Number of AGVs

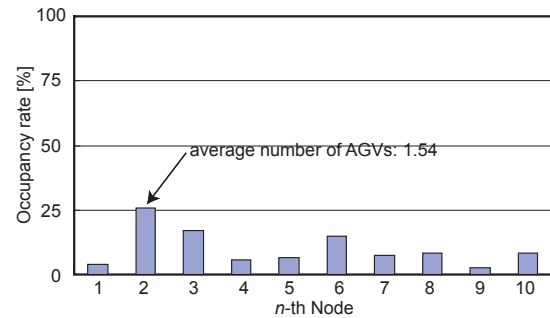


Fig.8 Occupancy Rate in Each Node

と，AGV6 台以降に対するスループットが横ばいになってしまっているため，要求仕様を満たすことが困難となる．そこでボトルネック検出のため，AGV 台数が 6 台になった際のシステム内の各ノードにおける AGV の占有率に着目した (Fig.8) ．

Fig.8 より，ノード 2 における AGV の占有率が最も高いことが分かる．また，このときの AGV の平均滞在台数は 1.54 台であった．そのため，Fig.6 が示す通り，ボトルネックとなっているノードの次のノード，すなわち，ノード 3 および 4 を再設計する必要がある．ここで，ノード 3, 4 の占有率より，ノード 2 に影響を与えているノードはノード 3 であることが分かるため，最終的にノード 3 の再設計を行えば良いことが分かる．

6. 結論

本研究では，AGV 搬送システムに対する最適設計方法論 [3] を，実搬送システムに適用し，既存のシステムに対して，再設計を行うための設計支援方法論を提案した．

参考文献

- [1] L.M. Gambardella *et al.*: "Simulation and Planning of an Intermodal Container Terminal", SIMULATION, Special Issue of on Harbour and Maritime Simulation, Vol. 71, No. 2, pp. 107-116, 1998.
- [2] H.P.M. Veeke *et al.*: "A Generic Simulation Model for Systems of Container Terminals", Proc. of the 16th European Simulation Multiconference, pp. 581-587, 2002.
- [3] 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/>
- [4] C. Roser *et al.*: "Comparison of Bottleneck Detection Methods for AGV Systems", Simulation Conference, 2003. Proceedings of the 2003 Winter, pp. 1192-1198, 2003.
- [5] N. Vandaele *et al.*: "A Queuing-Based Traffic Flow Model", Transportation Research-D: Transportation and Environment, 5, pp. 121-135, 2000.