

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[†]

星野 智史*・太田 順*
篠崎 朗子**・橋本 英樹**

Optimal Design Methodology for an AGV Transportation System by Using Queuing Network Theory

Satoshi HOSHINO*, Jun OTA*,
Akiko SHINOZAKI** and Hideki HASHIMOTO**

Abstract: In this paper, we propose an optimal design methodology for an AGV transportation system, using the queuing network theory and simulation model. In this study, we deal with the AGV transportation system as an actual transportation system; then, consider the design problem as a combinatorial optimization design problem. Therefore, some paths and working multi-agents are included in this system as the design objects: working path, passing path, Automated Guided Vehicles (AGVs), Automated Transfer Cranes (ATCs) and container cranes. We describe the way to derive these design parameters, that is to say: the optimal combinatorial design solutions on the base of the performance evaluation of the AGV transportation system by using the proposed design methodology.

Keywords: AGV, transportation system, queuing network theory, optimal design methodology, multi-agent system

1. 序論

港湾物流における搬送システムに要求される制約として、「貨物船により運ばれてきた荷物をいかにして時間内に蔵置場所へ運びきるか」という問題が存在する。本研究ではこの搬送制約に対し、搬送システムの効率化すなわち最適設計を行うことで、当該問題を解決する。

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。すなわち、搬送システムの最適設計を行うためには、(1) 要求仕様を満たすための各作業エージェントの最適台数 (2) エージェント間で荷物の受け渡しを行う際に必要となる最適作業経路数についてそれぞれ評価基準に基づいた設計を行う必要がある。しかしながら、現実問題としてこのような設計論は確立されておらず、結果的に搬送現場に携わる作業者の経験に基づいた設計がなされてきた。

搬送システムの設計に関する従来研究は主に、(i) 数理モデルに基づいたシステムの局所的な解析・最適化を行うことにより設計を行う手法^{1)~3)} と、(ii) シミュレーションペ

ースで順問題を繰り返し解くことにより設計を行う手法^{4), 5)} の2つに大別することができる。

阿部らは石炭搬送のためのベルトコンベヤ搬送システム最適設計のために、開放型待ち行列を適用した設計方法論の提案を行っている^{1), 2)}。しかし、AGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムのようなマルチエージェントシステムのモデル化には不十分である。星野らは港湾物流システムにおける AGV 搬送システムを設計対象に、開放型待ち行列による設計方法論の提案を行っている³⁾。しかし、搬送システム内を巡回する AGV は考慮されておらずモデル化は不十分である。一方、千葉らは、AGV 搬送システム全体の最適化という観点から、GA を用いたシミュレーションによる AGV の最適な稼動台数および走行経路の統合的な設計に関する研究を行ってきた⁴⁾。Liu らは、様々な搬送環境を想定した場合の代表的な搬送レイアウトをいくつか列挙し、シミュレーションによりコストモデルに基づいた評価を行う研究を行ってきた⁵⁾。しかしながら、これらは共にシミュレーションに基づきシステムの最適化を図ろうとする手法 (Simulation-based optimization) であり、最適設計には膨大な時間を必要とする。

このように、従来研究では数理モデルとして待ち行列理論のみによる局所的な設計方法論、あるいはシミュレーションベースによる膨大な時間を要する設計方法論の提案はなされているものの、AGV 搬送システムを考慮したシステムの大域的な設計を最適かつ高速に行う方法論の提案はなさ

[†] 第 16 回自律分散システムシンポジウムで一部発表 (2004.1)

* 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

** 三菱重工業 (株) 相模原市田名 3000

* School of Engineering, The University of Tokyo

** Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

(Received November 22, 2004)

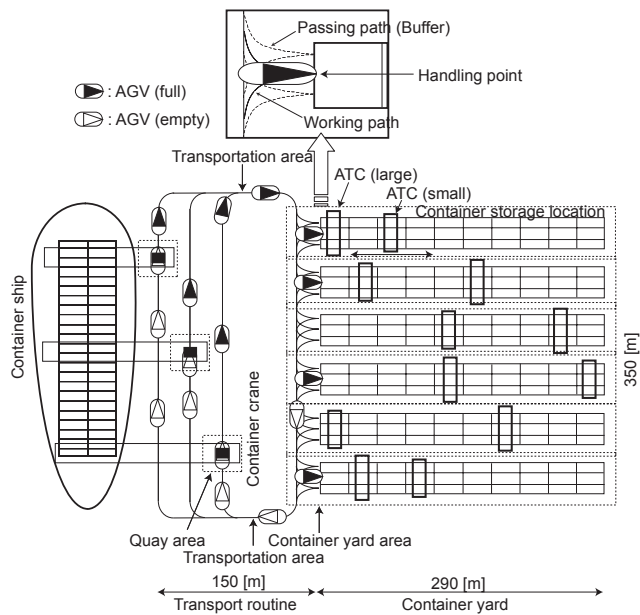


Fig. 1 Vertical layout of AGV transportation system

れていない。本研究では、Fig.1 に示す AGV 搬送システムの最適設計を行う。その際、次のような設計課題が考慮されなくてはならない。

1. マルチエージェントシステムとしての搬送システムのモデル化および大域的なシステムの最適設計
2. シミュレーションベースのみの手法に比べて組合せ最適解を高速に算出できる方法論の提案
3. 設計したシステムの性能評価

上記設計課題を満たすため、本研究では大規模計算機システム等の解析・設計に用いられている待ち行列ネットワーク理論を適用する。しかしながら、待ち行列ネットワーク理論のみによりシステムの最適化を図ろうとした場合、数理的なモデル化は可能であるものの、実際のシステム内では、AGV 投入台数を変えることにより搬送渋滞、あるいは AGV 間同士での干渉が生じてしまうことがあり、その結果搬送時間までが変化してしまうことがある。そのため、本設計問題では次のようなチャレンジングポイントが生じる。

- 待ち行列ネットワーク理論のみでは AGV 同士の干渉による搬送の影響、すなわち数理モデル化誤差までを考慮したシステムの最適設計が困難

そこで本研究では、提案手法において待ち行列ネットワーク理論とシミュレーションベースによる手法とを融合させ、繰返し設計を行うことで、モデル化誤差である AGV の渋滞による搬送時間の変化までを正確に考慮した設計方法論の提案および、その有効性の確認を行うことを目的とする。

2. 港湾物流における AGV 搬送システム

2.1 AGV 搬送システム

Fig.1 において、コンテナ船に積まれた多数個のコンテナを全て一定時間（搬送要求時間）内にコンテナ蔵置ロケー

ション（Container storage location）へ搬送することを作業目的とする。ここでロケーションとは、コンテナを蔵置するためのスペースのことで、1 ロケーションは 30×290 [m] の蔵置スペースを有する。この作業を実現するために、本研究では AGV 搬送システムをそれぞれコンテナクレーン、AGV、ATC（Automated Transfer Crane）が稼動する 3 種類、4 つのエリア（埠頭エリア、搬送エリア、コンテナ蔵置エリア）に分けて設計を行う。AGV は Fig.1 のシステム内を以下の手順で作業命令を遂行し終わるまで巡回する。また設計条件として、1 ロケーション当りサイズの違う ATC が 2 台投入される。これにより、ATC はコンテナ蔵置作業を行う際に同ロケーション上で交差することが可能となる。さらに、各ロケーションにはコンテナ受け渡し位置（Handling point）が設けられ、ここで AGV と ATC によるコンテナの受け渡し作業が行われる。ただし、コンテナの受け渡し位置は各ロケーションに 1 箇所のみ設けられているため、1 つの受け渡し位置において同時に複数台の AGV-ATC によるコンテナの受け渡し作業を行うことはできない。

- step 1. 埠頭エリアで稼動するコンテナクレーンがコンテナ船から AGV へコンテナを荷積みする。
- step 2. コンテナ蔵置エリアにあるコンテナロケーション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 は搬送エリアを通過してコンテナ蔵置エリアへと向かう。
- step 4. AGV が目的ロケーションに接する受け渡し位置に到達する。作業路（Working path）をすでに AGV が占有している場合、後から到着した AGV は待避経路上（Passing path）に向かう。前の AGV の作業が終了すると待避経路が作業経路となる。
- step 5. ATC がすでにコンテナ受け渡し位置にいる場合、AGV は ATC にコンテナを受け渡すが、ATC が搬送作業中の場合、AGV はその場にて ATC の到着を待つ。
- step 6. 受け渡されたコンテナは、ATC によりロケーション内のいずれかの場所まで搬送・蔵置される。作業を終了した ATC は再び受け渡し位置へと向かう。
- step 7. コンテナを受け渡した AGV は、再び搬送エリアを通過して埠頭エリアへと戻る（step 1 へ）。

2.2 問題設定

AGV の向かうべきコンテナクレーンおよびロケーションに関しては、本来、コンテナ船に残っているコンテナの状態およびロケーションにすでに蔵置されているコンテナの状態などにより適切に選択されるべきである。しかしながら本研究では、簡単のため、各コンテナクレーンおよび目的ロケーションはそれぞれ一様な確率で決定されるものとする。ただし、作業経路上に AGV が存在していないコンテナクレーンならびにロケーションが優先的にこれら AGV の目的地となる。

また本研究では、AGV が各エリアを通過するのに要する時間をそれぞれ時間コストと定義した。そして、埠頭エリア

およびコンテナ蔵置エリアにおける時間コストに対して影響をおよぼす AGV-コンテナクレーンならびに AGV-ATC 間におけるコンテナのやり取りに要する作業時間は、エージェントの台数に影響を受けないことからそれぞれ一定時間とした。コンテナクレーン台数に関しては、埠頭エリアの大きさという物理的制約より 3 台で固定し、設計対象とはしない。

2.3 組合せ最適化問題

2.3.1 設計対象

本研究において設計対象となるパラメータについて以下に示す。

- ・ AGV 台数
- ・ ATC 台数
- ・ 待避経路 (= 待機バッファ) 数

これらの設計パラメータは AGV 搬送システムを構築する際の各要素となる。そのため、システムの最適設計を行うためには、各設計パラメータを最適に導出する必要がある。本設計問題はこれら複数の設計パラメータの同時最適化を行うため、組合せ最適化問題に属する。

2.3.2 制約条件

本研究では、設計を行う際に、総搬送コンテナ数およびコンテナ搬送を完遂する最大時間 (搬送要求時間) を与え、以下に示す要求スループットを制約条件と設定した。

$$\text{要求スループット} = \frac{\text{総搬送コンテナ数}}{\text{搬送要求時間}}$$

3. 待ち行列ネットワーク理論⁶⁾

3.1 巡回型待ち行列ネットワーク

待ち行列ネットワーク理論には、大別して開放型と閉鎖型の 2 種類のネットワークがある。閉鎖型待ち行列ネットワークとは、ある一定台数のエージェントがサーバと待ち行列から成るノードにより構成されたネットワーク内を移動し、その際、ネットワークの内外に進入・退去するエージェントが 1 台も存在しない移動経路のことをいう⁷⁾。そしてこの閉鎖型待ち行列ネットワークの中で、経路に分岐がなく、かつ 2 つ以上の待ち行列 (ノード j , ノード数 N) の間をエージェントが順に巡る構造をしたネットワークを巡回型待ち行列ネットワーク⁸⁾ という。Fig.2 はシステム内にネットワークが一つのみ存在する場合、すなわち巡回型単一連鎖待ち行列ネットワークにおいて、状態 n から $n+1$ に対してエージェントがノード間を遷移する一例を示している。Fig.2(a) において、ノード ($j=1$) で作業中の 1 番のエージェントのみが次のノード ($j=2$) へと移動すると、次に待っていたエージェント (待ち行列の 2 番目) はサーバへ進入し、エージェント 3 番と 4 番はそれぞれ待ち行列の一つ先へと進む (Fig.2(b))。

3.2 性能評価法

3.2.1 評価基準

Ottjes らはロッテルダム港を題材に、専用の搬送シミュ

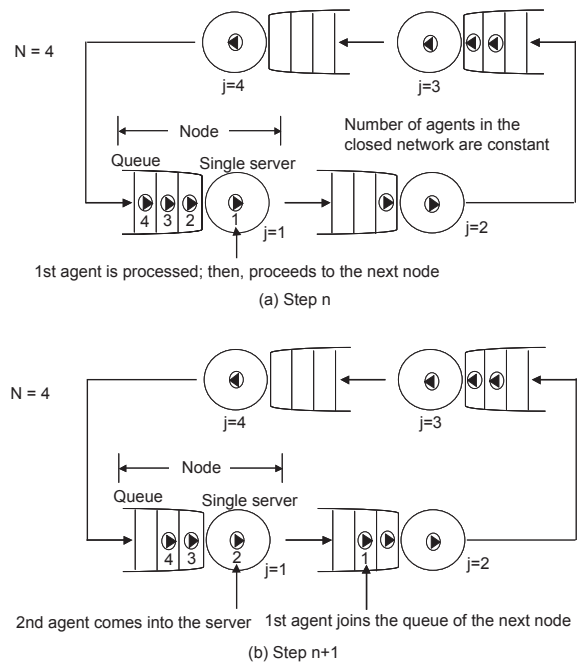


Fig. 2 A state transition diagram in the cyclic queuing network composed by a single server

レータを開発し、搬送機器をそれぞれエージェントとしてとらえ、自動化ターミナルの設計を行っている^{9), 10)}。この際、いくつかの性能評価指標 (Performance indicators) がシステムの性能を評価するために用いられている。

本研究では、この待ち行列ネットワークを搬送システム、ネットワーク内を移動するエージェントをシステム内で搬送作業を行う AGV と定義する。そして各搬送エリアに対してそれぞれノードを割り当て、ノード数、ノードに要求される時間コスト、ノードにおけるサーバ数、トラヒック係数、およびノードへの相対訪問回数を入力として得られる (a) コンテナ搬送量であるシステムスループット、(b) 各ノードに平均的に滞在する AGV 台数、(c) AGV による各ノード内のサーバ使用率である交通密度、を評価基準として設計ならびに解析を行う。(a) は AGV による単位時間あたりのコンテナ搬送数を評価するために用いる。システムスループットが要求スループットを満たした場合、そのときの AGV 台数および、ATC 台数が設計される。(b) は必要な待避経路数を算出するために用いる。(c) はシステム内のボトルネックとなっているノードを見つけるために用いる。すなわち、(a) および (b) は設計基準として、(c) はシステムの解析のために用いられる。

3.2.2 評価式

本研究では提案する設計アルゴリズムにおいて、3.2.1 項の (a)(b) で述べたとおり、投入 AGV 台数および待避経路設計のため、(1)(2)(3) 式を、(c) で述べた設計されたシステムのボトルネック箇所の解析のために (4) 式をそれぞれ用いる。

•スループット

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

•平均滞在 AGV 台数 (無限サーバ)

$$\phi_j(K) = h_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (2)$$

•平均滞在 AGV 台数 (複数サーバ)

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

•交通密度

$$\alpha_j(K) = \rho_j \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (4)$$

ただし,

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 ($j=1, \dots, N$)

ρ_j : ノード j のトラヒック係数

h_j : ノード j への AGV の相対訪問回数

$G(x)$: 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 ($0 \leq x \leq K$)

$q(x)$: あるノードに AGV が x 台存在する際のたたみ込み係数

ここで, ρ_j は {AGV のノード j への相対訪問回数} \times {ノード j における時間コスト} のことである. h_j の相対訪問回数とは, ノード j を AGV が訪問した回数を意味する. 本研究では搬送システムのモデル化にあたって, 巡回型単一連鎖待ち行列ネットワーク (Fig.2) を適用するため, 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} として計算を行う. これらの値は解析対象のシステムのスペックから計算することができる. 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. 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. 本研究では正規化定数を計算するためにたたみ込み演算を行う⁷⁾. 以下に正規化定数算出のための計算プロセスを記述する.

配列 $G(x), q(x)$ ($x = 0, \dots, K$) を用意し, 初期化を行った後以下の手順を実行する.

$$G(x) \leftarrow \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x \neq 0 \end{cases}$$

- 1 for ($j = 1; j \leq N; j++$) {
- 2 for ($x = 0; x \leq K; x++$) {
- 3

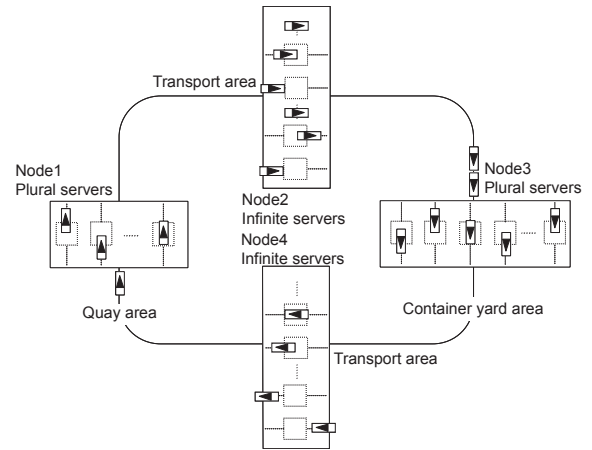


Fig.3 Modeling the transportation system

$$q(x) \leftarrow \begin{cases} \frac{h_j^x}{x!}, & x \leq S_j \\ \frac{x}{S_j! S_j^{x-S_j}} \frac{h_j^x}{x!}, & S_j < x \end{cases}$$

- 4 }
5 for ($k = K; k \geq 0; k--$) {
6 $G(k) \leftarrow \sum_{y=0}^k q(y) G(k-y)$
7 }
8 }

ここで, S_j ($j=1, \dots, N$) とはノード j で稼動しているサーバ数のことであり, 次章でその具体的なパラメータを設定する.

4. システム設計

4.1 搬送システムのモデル化

Fig.1 を巡回型待ち行列ネットワークによりモデル化すると, それぞれ 4 つのエリアに対しノード 1~4 を割り当て, コンテナクレーンおよび ATC の稼動しているロケーション数をノード 1 および 3 におけるサーバ数として, Fig.3 のようになる. AGV はコンテナ搬送が全て終了するまでノード間を巡回する. このとき, 各ノードを通過するのに要する時間コストに関して, ノード 1 では, 前の AGV がコンテナクレーンによる処理を受けてから, 次の AGV がコンテナクレーンによる処理を終了するまでの時間 (= Node 1), ノード 2 および 4 では, 搬送エリアを走行している時間 (= Node 2, 4), ノード 3 では, AGV がコンテナ受け渡し位置に到着してから ATC にコンテナの受け渡しを完了するまでの時間 (= Node 3), と定義する.

コンテナの受け渡し作業を行うエリア (ノード 1, 3) では, 場合によっては作業を待つ AGV の待ち行列が生じるが, 搬送エリア (ノード 2, 4) ではコンテナを搬送する AGV のみが存在し, 待ち行列は生じない. したがって, ノード 1 および 3 ではコンテナクレーンおよび ATC が複数台稼動する複数サーバを, ノード 2 および 4 では搬送にかかる時間

Table 1 Specification of AGV and ATC

	AGV (full)/(empty)	ATC (full)/(empty)
Max. speed [m/s]	5.56/6.94	2.0/2.25
Rotational speed [m/s]	1.39/1.39	—
Acceleration [m/s ²]	0.15/0.15	0.1/0.1
Deceleration [m/s ²]	0.63/0.63	0.4/0.4

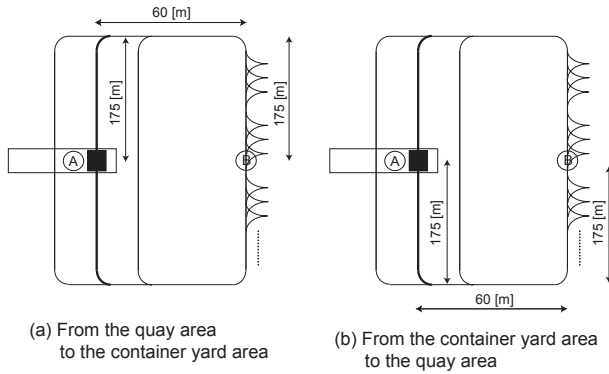


Fig. 4 Modeling of transport routing

コストを表現するための無限サーバを適用した。すなわち、3.2.2 項の S_j をそれぞれ、 $S_1 = 3$ (コンテナクレーン台数)、 $S_2 = \infty$ 、 $S_3 = ATC$ 台数/2、 $S_4 = \infty$ 、と設定した。AGV はモデル化された搬送システム内の各ノードを、それぞれ指数分布に従った時間コストに基づき通過して行く。

4.2 エージェントの搬送仕様と経路

AGV と ATC の搬送仕様を Table1 に示す。AGV および ATC は、コンテナ搬送時と非搬送時で移動の最高速度が異なるため、それらは“full (搬送時)” および “empty (非搬送時)” で示されている。

AGV の搬送経路を Fig.4 と考え、AGV は埠頭側の搬送経路三本のうち中央 (太線) の経路を走行し、埠頭エリア (A) からコンテナ蔵置エリア (B) へ往來するものと近似すると、Fig.4(a) の示す AGV が埠頭エリアからコンテナ蔵置エリアに搬送する時間 (A → B) をノード 2 に要する時間コスト、Fig.4(b) の示す空の AGV がコンテナ蔵置エリアより埠頭エリアに移動する時間 (B → A) をノード 4 に要する時間コストと見なすことができる。このとき、AGV の渋滞が存在しなければ各ノード 2、4 における搬送時間コストが従う時間分布の期待値は Table1 の搬送スペックならびに、Fig.4 の近似された搬送経路を基にして行った搬送シミュレーション結果より、Node 2 = 165[s]、Node 4 = 122[s] と求めることができる。

一方、各エージェント間でコンテナの荷積み・受け渡し作業を行っているノード 1 および 3 では、2.2 節の問題設定より作業時間 = 時間コスト となり、Node 1 = 60[s]、Node 3 = 30[s] とする。ただし、ノード 3 のコンテナ蔵置エリアにおいて、AGV がコンテナ受け渡し位置に到着した際に、ATC がコンテナ受け渡し位置にいない場合、AGV は作業経路にて待機する必要がある。また、AGV 投入台数を増やす

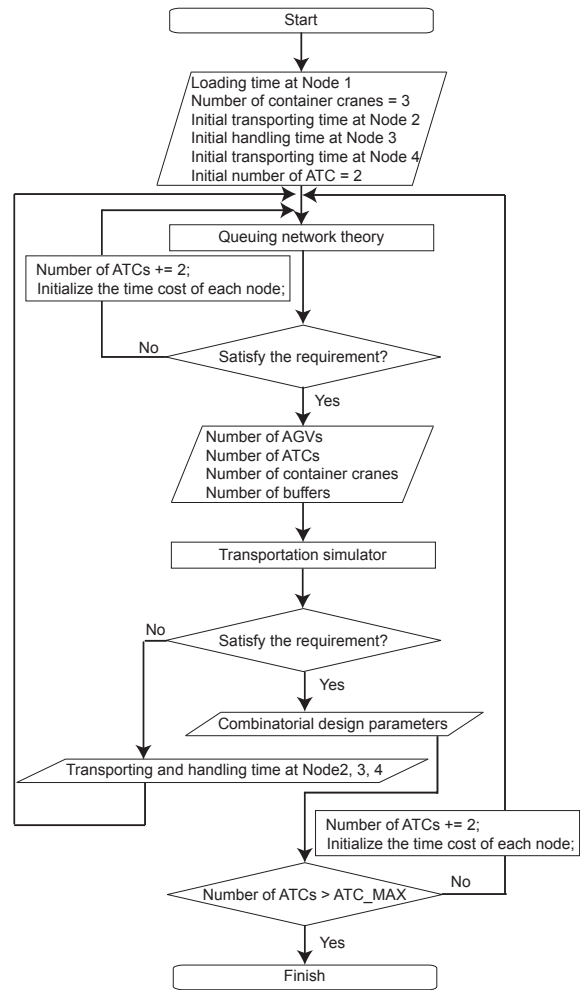


Fig. 5 Design algorithm by using the queuing network theory

ことによる AGV 同士の交通渋滞の影響を考慮すると、ノード 2、3、4 に要する時間分布およびその期待値は AGV および ATC の投入台数ならびに搬送挙動により変化する値となる。ノード 1 に関しては、コンテナクレーンの投入台数は固定であり、また、ATC のように自らが移動しながら搬送作業を行うこともない。すなわち、コンテナクレーンは AGV の台数に依存することなく、コンテナ船との間でコンテナの受け渡しを行うことができる。そのため、ノード 1 に要する時間分布およびその期待値は、コンテナ船に積まれているコンテナの状態のみに依存するものとする。本研究では、待ち行列ネットワーク理論によるモデル化を行うため、これらの時間分布を指数分布として考える。

4.3 設計アルゴリズム

Fig.5 に提案アルゴリズムを示す。本設計アルゴリズムにおいて、搬送シミュレータは (1) 設計結果の検証 (2) AGV 同士の渋滞による時間コストの変化量の算出のために用いられる。また本設計問題は組合せ最適化問題に属するため、解を一意に導出するには、たとえばエージェントの投入コストなどの評価関数を用いる必要がある。しかしながら、各エージェントの投入コストなどは港湾物流を扱う管理者側により


```

Queuing network theory
for (int k = 0; k < AGV_MAX; k++) {
  throughput = calc_throughput(k); — Eq.(1)
  if (throughput >= requirement) {
    buffers = design_buffers(k); — Eq.(2)(3)
    traffic_intensity = analyze_bottleneck(k); — Eq.(4)
    break;
  }
}

```

Fig. 6 Calculation process in the queuing network theory

一様に決定することが困難となる。さらに、AGV と ATC 台数の解空間において、AGV 台数を最適に設計するためには ATC 台数が最適に設計することが不可能となる場合が生じる。そこで、本研究では、本組合せ最適化問題を AGV および ATC 投入台数の多目的最適化問題と考え、AGV と ATC の投入台数をそれぞれ最小化するような組合せ最適解、すなわちパレート最適解 (Pareto optimal solution) を導出することとする。以下に Fig.5 が示す設計アルゴリズムの詳細を述べる。

まず、各ノードにおける時間コスト、コンテナクレーンおよび ATC 台数を初期入力とし、待ち行列ネットワーク理論によりシステムスループットが算出される。このとき、4.2 節より、各ノードにおける初期入力時間コストとして、Node 1 = 60[s], Node 2 = 165[s], Node 3 = 30[s], Node 4 = 122[s], が用いられる。また、ATC およびコンテナクレーンの初期入力台数をそれぞれ 2 台、3 台と設定した。ただし設計プロセスにおいて、コンテナクレーン台数は 2.2 節の問題設定より 3 台と、また、ノード 1 における時間コストも 60[s] と固定とする。

Fig.6 に待ち行列ネットワーク理論の中で行われている計算プロセスを示す。(1) 式に基づいて、AGV 台数を変えた際に算出された各 AGV の投入台数に対するスループットを評価し、与えられた要求仕様を満たす場合、最適 AGV および ATC 台数が算出される。続いて、これら算出された AGV および ATC 台数に基づき、(2)(3) 式を用いて各ノードに平均的に滞在する AGV 台数を算出する。算出された平均滞在 AGV 台数と各ノードの容量を基に、待避経路数を設計する。たとえば、ノード 3 には初期状態ではロケーションの数 (1/2×ATC 台数) だけ作業路が設定されているため、ノード 3 の平均滞在 AGV 台数がこの作業路数を上回ると、それに対応した待避経路が設計されることとなる。これら設計パラメータおよびコンテナクレーン台数がシミュレータへの入力値として得られる。なお、(4) 式は 5 章のシステム解析で用い、直接設計には用いない。要求仕様を満たさない場合、ATC 台数を変え、各ノードにおける時間コストを初期化し、再度設計を繰り返す。なお今回の設計では、AGV ならびに ATC の投入台数が無意味に増加することを避けるため、最大 AGV 投入台数を $AGV_MAX = 30$ 、最大 ATC 台数を $ATC_MAX = 20$ 台とした。

算出された設計パラメータを基に搬送シミュレーションを

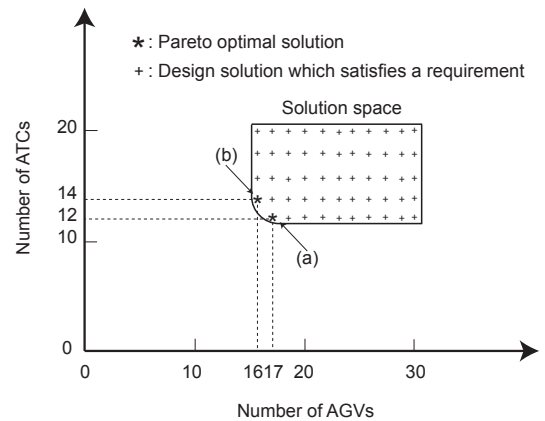


Fig. 7 Pareto optimal solution

Table 2 Average number of AGVs at each node

Case	Node1	Node2	Node3	Node4
a	6	4	3 < Location:6	4
b	5	4	3 < Location:7	4

Table 3 The combination of design parameters and time cost at each node

Case	ATC	AGV	Buffer	Transporting time Node2, 3, 4 [s]
a	12	17	0	178, 45, 144
b	14	16	0	170, 36, 140

行う。シミュレーションによる搬送結果が理論値通り要求仕様を満たす場合、組合せ設計解が算出され、さらに ATC 台数を変えた設計が繰返される。要求仕様を満たさない場合、AGV のノード 2, 3 および 4 に要する時間コストの期待値をシミュレーション結果より算出し、それらを基に積形式解が実際のシステムを近似する形で再度設計を繰返す。なお、提案アルゴリズムにおいて、待ち行列ネットワーク理論を用いることにより得られた計算値および搬送シミュレーションによる結果が同様の要求仕様を満たしているかどうかを判断するため、“Satisfy the requirement” を 2 回用いた。

4.4 制約条件の設定

本研究では、具体的には搬送コンテナ数を 600[個]、搬送要求時間を 5[h] とした。すなわち、搬送要求スループットを 120[個/h] とし、それを満たす設計解を算出した。

4.5 組合せ設計解

4.3 節で述べたとおり、本研究では、多目的最適化問題における組合せ設計解としてパレート最適解の導出を行う。

Fig.7 に得られた AGV および ATC の設計パラメータの解空間を示す。* がパレート最適解、+ が要求仕様を見たすことのできる組合せ設計解を示している。その結果、本設計では a, b の 2 通りの解を得ることができた。また解空間において、AGV と ATC の投入台数はそれぞれパレート最適であることがわかる。

a, b の各ノードにおける平均滞在 AGV 台数を Table2 に示す。ここでは、今後これら平均滞在 AGV 台数より搬送システムの最適経路長なども設計することを視野に入れ、実

Table 4 Transition of the time costs in a design process

Number of Design process	Time costs at Nodes: 1, 2, 3, 4	Design parameters from the queuing network theory (ATCs, AGVs, Buffers)	Recalculated time costs from the transportation simulator at Nodes: 1, 2, 3, 4
1st step	60, 165, 30, 122	ATCs = 2 → No design parameters	No simulation
2nd step	60, 165, 30, 122	ATCs=4, AGVs=23, Buffers=2	60, 828, 114, 169
3rd step	60, 828, 114, 169	ATCs = 4 → No design parameters	No simulation
4th step	60, 165, 30, 122	ATCs=6, AGVs=18, Buffers=1	60, 288, 96, 145
5th step	60, 288, 96, 145	ATCs = 6 → No design parameters	No simulation
6th step	60, 165, 30, 122	ATCs=8, AGVs=18, Buffers=0	60, 246, 65, 157
7th step	60, 246, 65, 157	ATCs=8, AGVs=25, Buffers=1	60, 357, 95, 149
8th step	60, 357, 95, 149	ATCs = 8 → No design parameters	No simulation
9th step	60, 165, 30, 122	ATCs=10, AGVs=17, Buffers=0	60, 186, 71, 144
10th step	60, 186, 71, 144	ATCs=10, AGVs=21, Buffers=1	60, 207, 84, 144
11th step	60, 207, 84, 144	ATCs=10, AGVs=23, Buffers=1	60, 194, 78, 159
12th step	60, 194, 78, 159	ATCs = 10 → No design parameters	No simulation
13th step	60, 165, 30, 122	ATCs=12, AGVs=17, Buffers=0	Satisfy the requirement 60, 178, 45, 144
14th step	60, 165, 30, 122	ATCs=14, AGVs=16, Buffers=0	Satisfy the requirement 60, 170, 36, 140
15th step	60, 165, 30, 122	ATCs=16, AGVs=16, Buffers=0	No simulation
16th step	60, 165, 30, 122	ATCs=18, AGVs=16, Buffers=0	No simulation
17th step	60, 165, 30, 122	ATCs=20, AGVs=16, Buffers=0	No simulation

数で算出された AGV 台数を四捨五入して整数で表記することとした。Table2 より、ノード 3 における平均滞在 AGV 台数は、ロケーションの数より少ないことがわかる。一方、AGV のノード 3 に費やされる時間分布を考慮すると、瞬間的に AGV 台数がロケーション数を上回ることも考えられる。しかしながら、シミュレーションによる搬送性能を確認し、その結果、待ち行列ネットワーク理論により算出された結果と同様の性能が得られたことから、今回の設計では待避経路を 0 本と設計した。

Table3 にそれぞれ得られたパレート解、その際のノード 2, 3, 4 に要した時間コストを示す。

4.6 考察

4.6.1 設計プロセスにおける近似誤差の考察

4.3 節で述べたとおり、Fig.5 中において、本設計プロセスは AGV のノード 2, 3 および 4 に要する搬送時間コストの期待値をシミュレーション結果より算出し、それらを基に積形式解が実際のシステムを近似する形で行われる。したがって、この近似解の誤差が危険側の誤差か安全側の誤差かを検討する必要がある。ここで、危険側とは近似誤差の影響により、AGV の必要台数が実際より多く見積もられてしまい、パレート最適解ではない解が得られる場合のことを意味する。一方、安全側とは、AGV の必要台数が実際よりも少なめに見積もられるため、シミュレーションを行うことにより最終的に最適解を得ることが可能である場合を意味する。

Table4 に設計プロセスにおける待ち行列ネットワーク理論に対する各ノードの時間コストおよび得られた設計解、シミュレーションから得られた実際に要した時間コストの遷移の様子を示す。初期入力時間コストに対し、Fig.6 の示す待ち行列ネットワークを用いた計算に基づいて各設計パラメータが算出される。ただし、1 ステップ目の示す ATC 台数 2

台の場合は、AGV の投入台数を AGV_MAX まで増加させても、(1) 式から計算されるシステムスループットが要求スループットを満たすことができず、設計パラメータが得られなかった。そのためシミュレーションを行わず、2 ステップ目の設計プロセスで再び初期入力値に基づき ATC の投入台数を 2 台増やして再度計算が行われている。その結果、要求仕様を満たす設計パラメータが得られたため、それらに基づいた搬送シミュレーションが行われる。しかしながら、得られた設計パラメータでは実際には搬送渋滞が起きてしまうため要求仕様を満たすことができない。そこで、シミュレーションにより再計算された各ノードの時間コストを見積もりなおし、それらが再び待ち行列ネットワーク理論への入力値となり、3 ステップ目の設計プロセスへ進む。しかしながら、2 ステップ目のシミュレーション結果より得られた時間コストを入力値として行った 3 ステップ目における計算では、設計パラメータの導出が不可能となったため、ATC 台数が再び 2 台投入され、設計プロセスが進められる。17 ステップ目で ATC 台数が 20 台となったため、ここで設計プロセスが終了した。

本結果より、AGV の投入台数を増やすにつれて、AGV 群による渋滞が頻繁に生じてしまうようになり、各ノードに要する時間コストは、投入する AGV 台数に対して単調増加の傾向を示すことが分かった。一方、待ち行列ネットワーク理論のみでは、AGV 同士の渋滞を考慮することができないため、1 ステップ前の搬送シミュレーションにより得られた各ノードの時間コストに基づき計算が行われる。このことから、待ち行列ネットワーク理論に基づいた計算プロセスに入力される各ノードのコストが実際のコストより常に小さめに見積もられるため、得られた解は実際の解に比べ常に必要

Table 5 Traffic Intensity at Node 1 and 3

Case	Node1 [%]	Node3 [%]
a	92.4	44.5
b	91.9	33.7

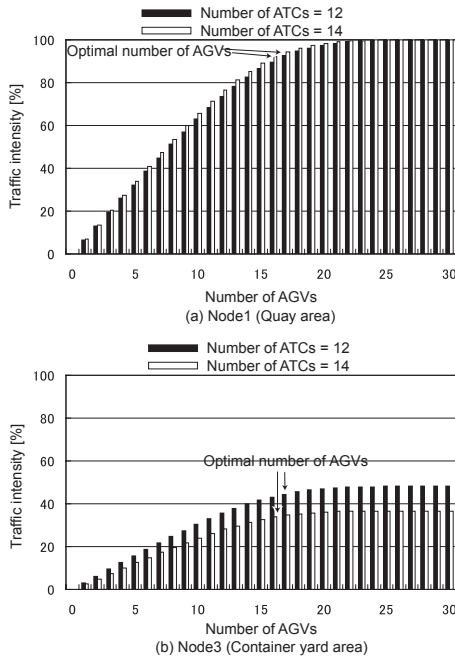


Fig. 8 Performance evaluation by traffic intensity

最少台数以下になることが分かった。したがって、近似誤差を考慮しても、提案する設計アルゴリズムにより最適な解を得ることが可能である。

4.6.2 計算コストの考察

本研究で扱っている設計問題をシミュレーションベースのみで解の組に対する全探索を行おうとした場合、ATC20台に対してAGV30台、さらにたとえば待避経路数最大2本の組合せを全て解こうとすると、900回の試行を行わなくてはならない。これに対し、本手法では待ち行列ネットワーク理論を用いることにより、Fig.7およびTable4が示すように解の探索コストを削減することができる。今回の設計では、解を算出するまでに行った搬送シミュレーションの試行回数が9回、すなわち、全探索法に比べ計算コストが1/100程度で済むことを確認した。また待ち行列ネットワーク理論を用いた設計パラメータの計算時間は0.1[s]以下で、搬送シミュレーションにかかる計算時間と比較して無視できる程度の計算コストである。

このことから、本手法は解の全探索を行うことなく高速に設計解を算出することができると設計手法であると考えられる。

5. システム性能評価

5.1 交通密度

最適設計解 a, b におけるノード1および3の交通密度をTable5に、AGV台数に対するノード1および3における交通密度の変化の様子をFig.8に示す。これらの結果より、

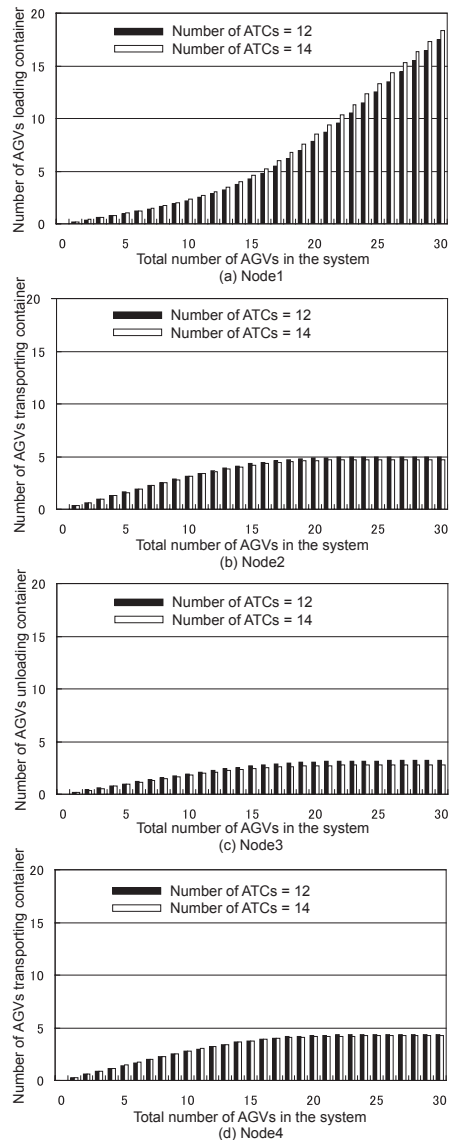


Fig. 9 The number of AGVs at each node

得られた設計パラメータによりシステムを構築した場合、システムのボトルネックが埠頭エリアに存在することがわかる。また、ノード1の交通密度はノード3に比べ先にほぼ100[%]に達してしまっていることから、AGVやATC台数をむやみに増加させても搬送効率の低下にしかならないことが示された。

5.2 平均滞在AGV台数

AGV台数を増加させていったときの各ノードにおける平均AGV滞在台数、すなわちシステム内の各エリアにおけるAGVの挙動をFig.9に示す。待ちの発生しないノード2および4では、搬送中のAGVがどの程度滞在しているかがわかる。また、待ちの生じるノード1および3ではコンテナの受け渡し作業中のAGV台数および、作業待ちしているAGV台数が合計で何台存在しているかがわかる。このとき、Fig.8(a)の示すボトルネックが原因となり、Fig.9(a)が示すようにしてAGV投入台数の増加に伴いノード1にお

ける平均滞在 AGV 台数が極端に増加してしまう傾向がわかる。その結果、これ以上の要求スループットのときには、埠頭エリアにおける作業待ち中の AGV 台数の増加が顕著になり、AGV を投入することにより搬送効率が逆に悪化してしまい、システムとして破綻してしまうことが予想される。

以上のことより、今回設定した以上の搬送要求を満たすためには、上述のボトルネックのことを考慮すると、埠頭エリアにおけるエージェントの作業の効率化を何らかの形で図る必要があると考える。

6. 結論

本研究では AGV 搬送システムの最適設計を行うための設計方法論の提案を行った。そして、

1. マルチエージェントシステムとしての搬送システムのモデル化および大域的なシステムの最適設計を行った。
2. シミュレーションベースのみの手法に比べて組合せ最適解を高速に算出できる方法論の提案を行った。
3. 設計したシステムの性能評価を行った。

また、チャレンジングポイントに対しては、提案手法において待ち行列ネットワーク理論とシミュレーションベースによる手法とを融合させることにより、繰返し設計を行うことで、AGV 同士の干渉による搬送時間の遅れなどといった数理モデル化誤差までを正確に考慮した設計方法論の提案および、その有効性の確認を行った。

今後は各エージェントの挙動を確率分布に基づいてモデル化し、それらに基づいたシステムの設計、ならびに搬送レイアウトの違いによるシステムへの影響の評価を行う必要があると考える。

参考文献

- 1) M. Abe, H. Ito, Y. Higuchi and Y. Ren : The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (1st Rep:Simulation Analysis based on Monte Carlo Method), Proc. of International Conference on Materials-Handling Equipment and Logistics, 133/143(1991)
- 2) M. Abe, H. Ito, Y. Higuchi and Y. Tanaka : The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (2nd Rep:Trends of Materials Handling -Carrying System in Japan), Proc. of International Conference on Materials-Handling Equipment and Logistics, 144/157(1991)
- 3) 星野智史, 他 : 待ち行列理論による AGV 搬送システムの設計, 日本ロボット学会学術講演会, 2B25(2003)
- 4) R. Chiba, J. Ota and T. Arai : Integrated Design with Classification of Transporter Routing for AGV Systems, Proc. 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems, 1820/1825(2002)
- 5) Chin-I. Liu, Hossein Jula, Petros A. Ioannou: Design, Simulation, and Evaluation of Automated Container Terminals, IEEE Tran. on Intelligent Transportation Systems, 3-1, 12/26(2002)
- 6) 紀一誠 : 待ち行列ネットワーク, 朝倉書店 (2002)
- 7) J.P. Buzen : Computational algorithm for closed queueing networks, Comm. ACM, 16-9, 527/531(1973)
- 8) W.J. Gordon and G.F. Newell : Closed queueing systems with exponential servers, Oper. Res. 15, 2, 254/265(1967)

- 9) 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)
- 10) Duinkerken M.B. *et al.* : A Simulation Model for Automated Container Terminals, Proc. of the Business and Industry Simulation Symposium, pp. 134/149(2000)

[著者紹介]

星野智史



2001年宇都宮大学工学部精密機械システム工学専攻卒, 2003年同大学院修士課程修了, 同年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻博士課程に在籍. マルチロボットシステム設計などの研究に従事. 日本ロボット学会, 精密工学会, 日本機械学会, IEEE.

太田 順 (正会員)



1989年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了. 同年新日本製鐵(株)入社. 91年東京大学工学部助手. 94年同講師. 96年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻助教授. この間96-97年Stanford大学Center for Design Research 客員研究員, 群知能ロボット, 大規模搬送システム, ロボットの環境設計等の研究に従事. 博士(工学).

篠崎 朗子



1986年三菱重工業(株)相模原製作所入社. 汎用機・特車事業本部産業車両技術部電子制御設計課主任. 無人搬送車運行管理システム設計に従事.

橋本 英樹



1996年三菱重工業(株)相模原製作所入社. 汎用機・特車事業本部産業車両技術部EV設計課主任. 無人搬送車の設計に従事.