

待ち行列ネットワーク理論による 港湾物流 AGV システムの性能評価法

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

Performance evaluation of AGV system in a port delivery by using Queuing network theory

Satoshi HOSHINO[†], Jun OTA[†], Akiko SHINOZAKI^{††}, Hideki HASHIMOTO^{††}
[†]The University of Tokyo ^{††}Mitsubishi Heavy Industries, LTD.

Abstract— In this paper, we propose a design methodology for the AGV transportation system for a port container terminal and performance evaluation by using the queuing network theory. In this study, we deal with an actual transportation system as a combinational optimization problem. Therefore, the working path, passing path, and working multi-agents such as AGVs (Automated Guided Vehicles), container cranes, and transfer cranes are included in this system. We describe how to deliver these design parameters by the performance evaluation of an AGV transportation system. Finally, the combination of optimal design solutions is delivered.

Key Words: AGV (Automated Guided Vehicle), Transportation System in a Port Container Terminal, Queuing Network Theory, Optimal Design, 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。これは、貨物船が埠頭に停泊できる時間があらかじめ港湾管理者側により定められており、それを越えた停泊が困難であるためである。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および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、1. 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⁾²⁾³⁾と、2. シミュレーション・ベースで順問題を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(埠頭~蔵置場所)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り、さらに、AGV同士の干

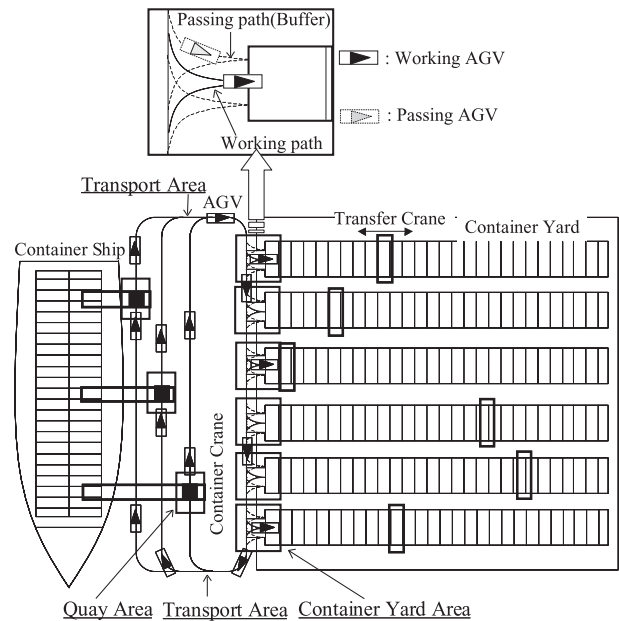


Fig.1 Layout of AGV Transportation System

渉による搬送への影響も考慮されていない。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、シミュレーションによるAGVの最適な稼働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、従来研究では待ち行列理論のみによる局所的、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れていない。本研究では、Fig.1 に示すヨーロッパのコンテナ埠頭で既に実用化されている AGV 搬送システムの最適設計を行う。その際、以下の効果が上げられる設計論の確立を目指す。

1. 搬送システム内での AGV の大まかな全体挙動を表現することができる。
2. シミュレーション・ベースの最適化手法に比べ、高速に設計を行うことができる。
3. 設計したシステムの性能評価をすることができる。

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、次の問題が生じる。

- AGV 投入台数を変えると、搬送時間までが変化してしまう。

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ることにより、繰返し計算を行うことで、AGV 同士の干渉による搬送時間の遅れまでを正確にシミュレート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 AGV コンテナ搬送システム

2.1 搬送レイアウト

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）内にコンテナヤードに搬送することを作業目的とする。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、トランスファークレーンが稼動する 3 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。

2.2 AGV 搬送システム

Fig.1 のシステム内を、AGV はコンテナを搬送するために以下の手順で作業命令を遂行し終えるまで巡回する（以下、AGV によるコンテナ 1 個の搬送作業のことをタスクと呼ぶこととする）。

- step1 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。
- step2 コンテナ蔵置エリアにあるコンテナヤードのいずれかが当該コンテナの目的ヤードになる。
- step3 AGV が目的ヤードに到達する。作業路をすでに AGV が占有している場合、後から到着した AGV は退避経路上に向かう。前の AGV の作業が終了すると退避経路が作業経路となり、コンテナの受け渡しを行う。
- step4 コンテナ蔵置エリアで稼動するトランスファークレーンが、一定時間をかけて作業経路上のコンテナを受取り、ヤード内の適切な場所まで搬送する。
- step5 コンテナを積み下ろした AGV は、再び埠頭エリアへ戻る（step1 へ）。

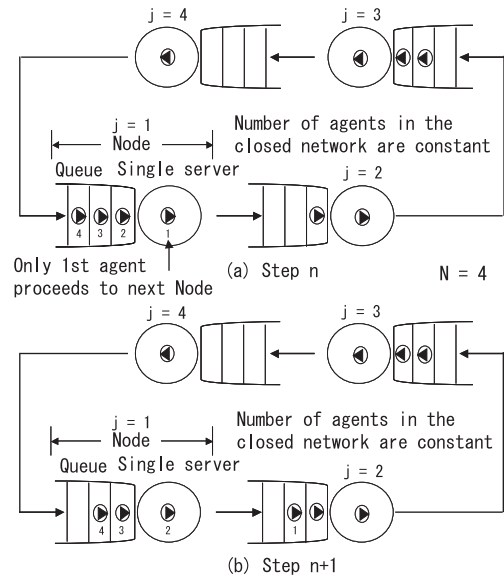


Fig.2 A State Transition Diagram in the Cyclic Queuing Network Composed by a Single Server

2.3 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
- トランスファークレーン台数（＝ヤード数）
- 退避経路（＝待機パツファ）数

これらの設計パラメータを、「要求仕様を満たす必要最低限の AGV 台数およびトランスファークレーン台数」という評価関数を基に設計する。

2.3.2 制約条件

全てのコンテナは制約時間内にコンテナ船からコンテナ蔵置エリアに搬送されなければならない。その際、コンテナの運び先は本来、コンテナヤードにすでに積まれているコンテナの状況などに応じて適切に選択されるべきだが、ここでは簡単のため、各ヤード様な確率で目的ヤードとなるようにした。また、コンテナクレーンおよびトランスファークレーンの作業時間もコンテナを置く場所により変動するはずであるが、これら各クレーンの作業時間も一定の時間とみなした。また、コンテナクレーン台数に関しては、本報で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。

3. 待ち行列ネットワーク理論⁶⁾

本章では、待ち行列ネットワーク理論における閉鎖型待ち行列ネットワークの中で、最も基本的なモデルである巡回型待ち行列ネットワークについて、搬送システムへ適用した場合の評価法について述べる。

3.1 巡回型待ち行列ネットワーク

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ノード（受け付けと待ち行列）により構成されたネットワーク内を移動し、ネットワークの内

外に進入・退去するエージェントが1台もないような移動経路のことを言う⁷⁾。そしてこの閉鎖型待ち行列ネットワークの中で、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)。Fig.2では、状態 n から $n+1$ におけるシステムの遷移を示している。Fig.2(a)において、1番のエージェントのみが次のノードへと移動すると、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番はそれぞれ列の一つ先へと進む(Fig.2(b))。

3.2 システム性能評価法

3.2.1 評価基準

本研究では、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、ノード数、ノードに要求される処理時間、ノードにおけるサーバ数、トラヒック係数、およびノードへ相対訪問回数を入力として得られる(a)交通密度、(b)スループット、(c)各ノードに平均的に滞在するAGV台数を評価基準として設計を行う。(a)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。(b)はAGVによる単位時間あたりのタスク遂行数を評価するために用いる。(c)は、滞在AGV台数より、必要な退避経路数を算出するために用いる。

3.2.2 システム性能評価式

システムの性能評価には以下の(1)(2)(3)(4)式を用いる。

- 交通密度

$$\alpha_{j1}(K) = \rho_{j1} \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (1)$$

- スループット

$$\tau_{j1}(K) = h_{j1} \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (2)$$

- 平均滞在AGV台数(無限サーバ)

$$\phi_{j1}(K) = h_{j1} \frac{G(K-1)}{G(K)} \quad (3)$$

- 平均滞在AGV台数(複数サーバ)

$$\phi_{j1}(K) = \frac{1}{G(K)} \sum_{0 \leq x_j \leq K} x_{j1} q_j(x_j) G_{[j]}(K-x_j) \quad (4)$$

- j 補完網 (j -complement network)

$$G_{[j]}(K) = \sum_{x_1 + \dots + x_{j-1} + x_{j+1} + \dots + x_N = K} \prod_{i=1, i \neq j}^N q_i(x_i) \quad (5)$$

ただし、

- K : AGV投入台数
- ρ_{j1} : トラヒック係数
- h_{j1} : AGVの相対訪問回数
- $G(K)$: 正規化定数
- $G_{[j]}(K)$: j 補完網における正規化定数
- N : ノード数

x_j : ノード j 周りのAGV台数

ここで、 ρ_{j1} は {AGVのノード j への相対訪問回数} \times {ノード j におけるサーバの処理時間} のことである。また、 h_{j1} はノードに対するAGVの相対訪問回数のことであり、本研究では巡回するネットワークが一つの場合、すなわち巡回型単一連鎖待ち行列ネットワーク(Fig.2)を扱うため、相対訪問回数は各ノード全て同じとして考える。したがって、タスク数 = 相対訪問回数である。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 $G(K)$ 導出の手続きを適用して、解を得たものである。正規化定数を求める方法には、たたみ込み法⁷⁾やMVA (Mean Value Analysis)⁹⁾など、いくつかの計算方法が考案されているが、本研究では正規化定数を効率よく計算するためにたたみ込み演算による算出を行う。以下に計算プロセスを載せる。

配列 $G(K)$, $q(K)$ 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 <= N; j++) {
2   for (x = 0; x <= K; x++) {
3     
$$q_j(x_j) \leftarrow \begin{cases} \frac{h_j^{x_j}}{x_j!}, & \|x_j\| \leq S_j \\ \frac{\|x_j\|}{S_j! S_j^{\|x_j\| - S_j}} \frac{h_j^{x_j}}{x_j!}, & S_j < \|x_j\| \end{cases}$$

4   }
5   for (k = K; k >= 0; k--) {
6     
$$G(x) \leftarrow \sum_{0 \leq y \leq K} G(y) q(x-y)$$

7   }
8 }

```

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、それぞれのエリアをノード1~4、コンテナクレーンおよびトランスファークレーンの台数をノード1および3におけるサーバ台数として、Fig.3のようになる。AGVは要求タスクが全て終了するまでノード間を巡回する。

コンテナの荷積み・下ろし作業を行うエリア(ノード1,3)では作業を待つ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トランスファークレーン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を表現するための無限サーバ⁶⁾を適用し、モデル化を行った。

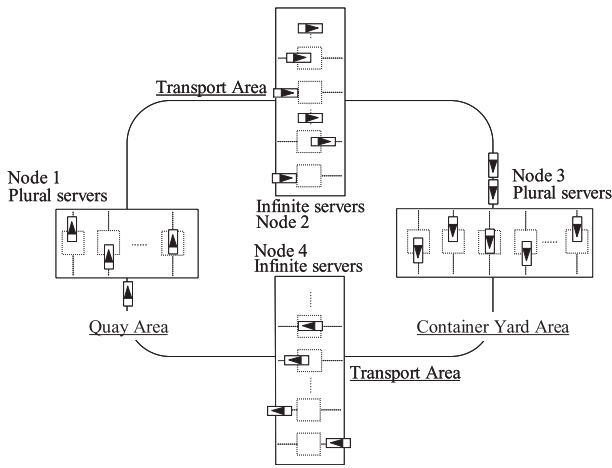


Fig.3 Modeling the Transportation System Layout

Table 1 Specification of AGV

	AGV(full)	AGV(empty)
Max. velocity [m/s]	5.56	6.94
Rotational velocity [m/s]	1.39	1.39
Acceleration [m/s ²]	0.15	0.15
Deceleration [m/s ²]	0.63	0.63

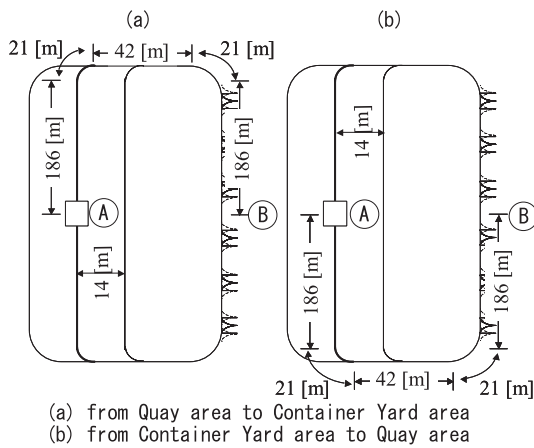


Fig.4 Modeling of Transport Routing

4.2 搬送スペック

AGVは渋滞により他のAGVから走行への干渉を受けないとき、Table1に示した仕様で経路を走行することができる。このとき、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、埠頭エリアからコンテナ蔵置エリアへ往來するものと近似すると、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、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に要する時間と見なすことができ、それらはTable1より、Node2=150[s]、Node4=145[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受け渡し作業を行っているノード1および3では、制約条件より、作業

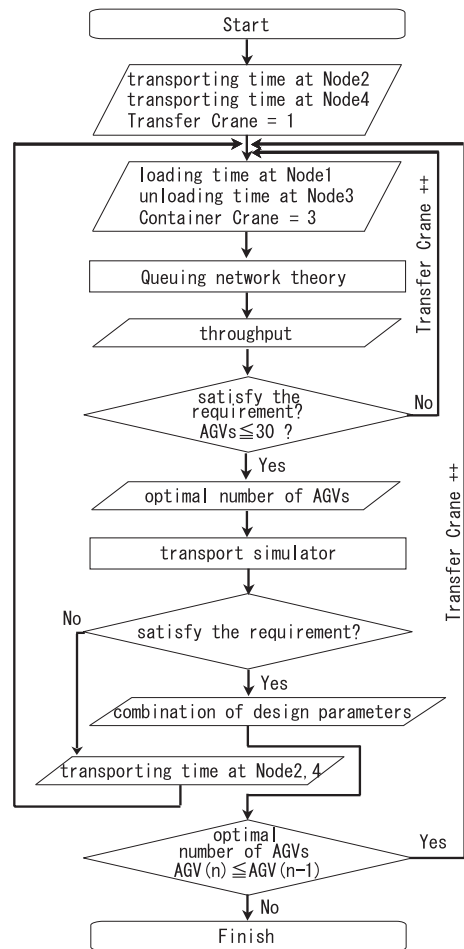


Fig.5 Design Algorithm by Using the Queuing Network Theory

に費やされる時間はNode1=60[s] およびNode3=120[s]で一定と設定した。

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)設計結果の実証(2)AGV同士の干渉による搬送時間遅れ量の算出のために用いられている。

各ノードに要する時間、コンテナクレーンおよびトランスファークレーン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のスループットが算出される。スループットを評価し、要求仕様を満たす場合、そのときの最低AGV台数を最適AGV台数とする。満たさない場合、トランスファークレーン台数を変え設計を繰り返す。なお今回の設計では、AGV台数が無意味に増加することを避けるため、投入台数は最高で30台とした。

算出された最適AGV台数を基に搬送シミュレーションを行う。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、トランスファークレーンおよびAGVの組合せ設計解が算出され、さらにトランスファークレーン台数を変えた設計が繰り返される。要求仕様を満たさない場合、AGVのノード2および4に要する搬送時間をシミュレーション結果より算出し、そ

Table 2 The Combination of Desing Parameters

No.	Container Crane	Transfer Crane	AGV	Transporting Node2, 4 [s]
a	3	7	27	361, 360
b	3	8	21	243, 242
c	3	9	19	203, 203
d	3	10	18	193, 192

れを基に設計を繰返す。

n ステップにおける設計解と $n-1$ ステップにおける設計解を AGV 台数で比較し、減少しなかった場合、処理を終了する。

4.4 要求仕様の設定

本研究では船の停泊時間すなわちコンテナ搬送完遂時間を評価基準として、

$$\{\text{搬送要求}\} \leq \{\text{システムスループット}\}$$

を満たしたシステムになるよう設計を行う。搬送タスクを 600 に設定し、搬送要求スループット=100、つまり 6 時間以内で全てのタスクを遂行することを制約条件とし、設計解を算出した。

4.5 設計解

AGV とトランスファークレーン台数を変化させたときの、それぞれ最適な設計解の組合せ (a~d) およびノード 2, 4 に要した時間を Table2 に示す。AGV 台数の増加に伴い、ノード 2, 4 に要する時間も増加していることが分かる。このことより、AGV 台数に依存するスループットとノードに要求される時間は互いにトレードオフの関係にあり、むやみに AGV 台数を増やすことが搬送の悪化につながる場合もあるということが分かる。

Table2 の設計解より得られた各ノードにおける AGV 台数を Table3 に示す。ノード 1 および 3 は { 平均滞在 AGV 台数 } / { (ノード 1, 3 における) クレーン台数 } となっている。

ノード 1, すなわち埠頭エリアでは、物理的制約により各経路に 1 台のみのコンテナクレーンが稼働しているため、作業を待つ AGV が増えても 10 台程度までなら搬送経路上でそのまま待機することが可能なため、退避経路を追加する必要はない。ノード 3, すなわちコンテナ蔵置エリアでは、Fig.1 より分かる通り、トランスファークレーンとコンテナの受け渡しを行うために作業経路上で待機することができる AGV 台数には物理的な限界が存在する。さらに、実際到着する AGV は、時間、目的ヤードに多少のばらつきがあり、これを考慮して、1 ヤードあたり 1 本の退避経路を設計した。

4.6 考察

4.6.1 スループットによる設計結果の考察

本設計手法により得られたスループットを Fig.6 に示す。各トランスファークレーンに対し、AGV 台数がそれぞれ算出された台数 (破線の) 以上であれば搬送要求スループット 100 以上を満たしていることが確

Table 3 Average Number of AGVs at each Node

No.	Node1	Node2	Node3	Node4
a	4/3	10	3/7	10
b	4/3	7	3/8	7
c	4/3	6	3/9	6
d	4/3	6	3/10	5

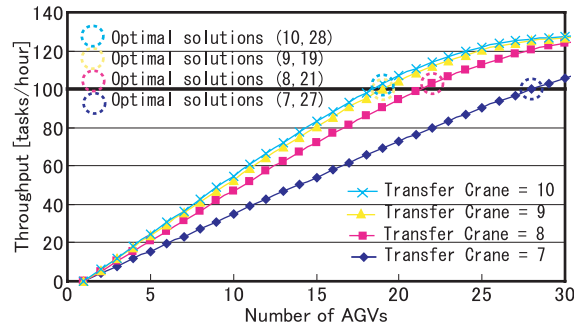


Fig.6 System Throughput

Table 4 Traffic Intensity at Node 1 and 3

No.	Node1 [%]	Node3 [%]
a	77.8	47.6
b	80.0	42.9
c	81.1	38.6
d	79.9	34.2

認できる。この結果より、本提案手法による設計法は妥当であると考えられる。

4.6.2 計算時間の考察

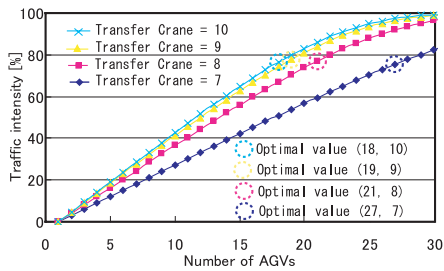
本研究で扱っている設計問題をシミュレーション・ベースで解こうとした場合、全ての解の組に対するシミュレーションを行わなくてはならない。本シミュレータでは 1 回の計算を行うのに約 5 分程度の時間がかかる。トランスファークレーン 10 台に対して AGV30 台、さらに退避経路数最大 1 本の組合せを全て解こうとすると、600 回の試行を行わなくてはならず、約 50 時間かかってしまうことが分かる。これに対し本手法では待ち行列ネットワーク理論により解の組合せを削減することができる。今回の設計では、解を算出するまでに行った計算の試行回数は全部で 24 回、約 2 時間と極めて少ない時間で済むことを確認した。

5. システム性能評価

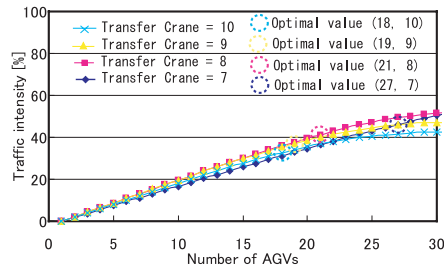
5.1 交通密度

ノード 2 および 4 は無限サーバのため交通密度は 0[%] となるので、埠頭エリアおよびコンテナ蔵置エリアにおける各設計解に対する交通密度 (Table4) を基に評価を行う。Table4 より、搬送要求を満たすトランスファークレーン台数 7 台以上では、システムのボトルネックが埠頭エリア側に存在していることが分かる。

Fig.7 に、AGV 台数に対する各ノードの交通密度を



(a) Traffic intensity at Node1 (Quay area)



(b) Traffic intensity at Node2 (Container yard area)

Fig.7 Performance Evaluation by Traffic Intensity

示す．図中の破線の は、得られた設計解を示している．ノード1の交通密度はノード3に比べ先に100[%]に漸近してしまっていることが分かる．すなわち、AGVやトランスファークレーン台数をむやみに増加させても、スループットが向上しないことを示している．したがって、ノード1の交通密度が100[%]に漸近する手前で得られた本設計解は最適であると考えられる．

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周辺における AGV の挙動を Fig.8 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分かる．また、待ちの生じるノード1および3ではコンテナの荷積み・下ろし作業中の 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分かる．

6. おわりに

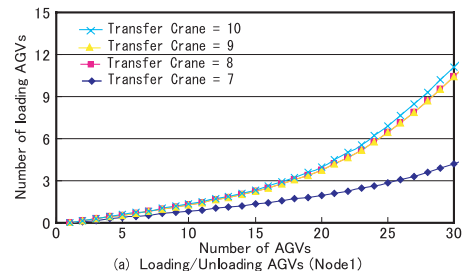
本研究では、待ち行列ネットワーク理論を用いて搬送システムのモデル化・定式化を行い、シミュレーションとの繰返し計算により、搬送時間遅れまでを正確にシミュレートした AGV 搬送システムの最適設計を行った．そして、

- AGV 搬送システムの大まかな全体挙動を表現した．
- シミュレーション・ベースによる手法に比べ高速に解を導出する最適設計方法論の構築を行った．
- 設計したシステムの評価法の提案を行った．

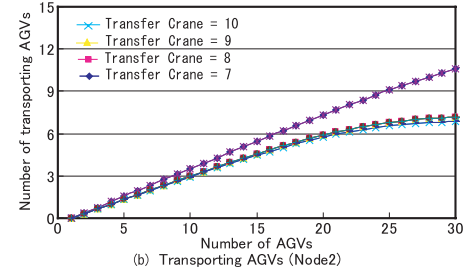
今後は各エージェントの挙動を確率分布に基づいてモデル化し、それらに基づいた設計を行う必要があると考える．

参考文献

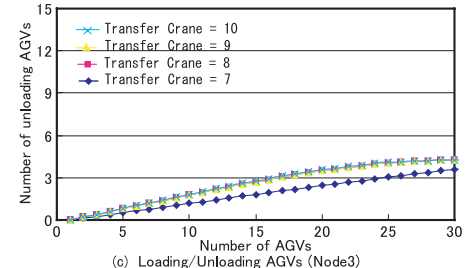
1) Abe M., Ito H., Higuchi Y., Ren Y. : The Optimum Design for Materials Handling-Carrying System in Coaling Wharf (1st Rep : Simulation Analysis based on Monte Carlo



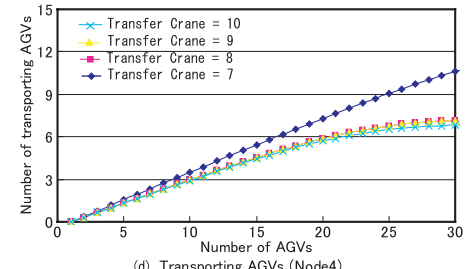
(a) Loading/Unloading AGVs (Node1)



(b) Transporting AGVs (Node2)



(c) Loading/Unloading AGVs (Node3)



(d) Transporting AGVs (Node4)

Fig.8 The Number of AGVs at Each Node

Method), Proc. of International Conference on Materials-Handling Equipment and Logistics,(1991.10), 133-143.

- 2) Abe M., Ito H., Higuchi Y., Tanaka Y. : 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, (1991.10), 144-157.
- 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) Ryosuke Chiba, Jun Ota, Tamio Arai : Integrated Design with Classification of Transporter Routing for AGV Systems , Proc. 2002 IEEE/RSJ Int. Conf. Intell. Robots and Systems, pp. 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 , Vol. 3, No. 1, March (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), pp. 527-531, (1973)
- 8) Gordon, W.J., and Newell, G.F. : Closed queueing systems with exponential servers, Oper. Res. 15, 2 (Apr. 1967), 254-265.
- 9) Reiser, and M., Lavenberg, S. : Mean-Value Analysis of Closed Multichain Queuing Networks, Journal of the ACM, Vol. 27, No. 2, April 1980, 313-322.