

3つである．

- ・ ロケーション数
- ・ 1 ロケーションあたりの待機バッファ数
- ・ AGV 台数

搬送効率向上のために、これらのパラメータを適切に設定する必要がある．なお、埠頭クレーン数はここでは $m=3$ 台と固定した．

これらの設計パラメータを算出するためには、まずシステム内にどの程度エージェントが存在し、タスクを遂行しているかを定量的に把握する必要がある．本研究では、待ち行列理論を適用することが有効であると考え、本理論に基づいた計画器を開発し、搬送システムの設計を行う．

3. 待ち行列理論

待ち行列理論は、システム内における混雑具合を交通密度 (ρ) とし、これが $0 < \rho < 1$ のときを前提とし、このときのシステム内における待ち行列の長さを確率を基に、定量的に示そうとする理論である．

システム内における単位時間当りの搬送エージェントの到着数 (到着率) を λ とすると、到着頻度 (平均到着時間) を T_a とし、 $T_a = 1/\lambda$ で表すことができる．また、単位時間当りの処理エージェントによる処理数を μ とし、処理頻度 (平均処理時間) を T_s とすると、 $T_s = 1/\mu$ と表すことができる．したがって、 $T_a < T_s$ となる場合は ρ が理論の前提条件を満たさなくなる．そこで、 T_s の値を増やす必要があり、処理エージェントの処理能力を向上させるか、あるいは処理エージェントの台数を増やすことが考えられる．本研究では、処理エージェントの処理能力は有限であることから、台数を増やすことで条件を満たすこととした．

大規模搬送システムでは、システム内にエージェントが多数存在する．これらのうち、処理エージェントの台数を c とし、搬送エージェントの到着頻度および処理頻度がそれぞれ指数分布をなす場合、このような待ち行列システムは $M/M/c$ モデルとなる．このとき、システムの交通密度 ρ は、

$$\rho = \frac{a}{c} = \frac{\lambda}{c\mu} \quad (1)$$

となる．ここで、式 (1) における a は $a = \lambda/\mu$ のことである．これは $c = 1$ のとき、すなわち $M/M/1$ システムにおける交通密度のことである．この a を用いて、ある時刻において、搬送エージェントがシステムに到着した際に、そのシステム内に他の搬送エージェントが 1 台もない確率 P_0 を求めることができる．

$$P_0 = \left\{ \sum_{n=0}^{c-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^c}{(c-1)!(c-a)} \right\}^{-1} \quad (2)$$

(1)(2) 式より、システムにおける搬送エージェントの平均待ち行列長さ L_q は、

$$L_q = \frac{\rho a^c}{c!(1-\rho)^2} P_0 \quad (3)$$

で求めることができ、

$$W_b = \frac{L_q}{c} \quad (4)$$

より、1 ロケーションあたりに要求される待機バッファの数を算出することができる．

4. 搬送システムへの導入

4.1 本研究での定義

以下に本研究における設計対象の定義について述べる．

- 搬送エージェント：AGV を意味する．船から埠頭クレーンにより積み下ろされたコンテナを受け取り、ロケーションまでの搬送を行う．
- 処理エージェント：ロケーションクレーンを意味する．AGV によりロケーションまで搬送されたコンテナを、AGV から積み下ろす作業を行うエージェント．
- 搬送エージェント到着頻度：AGV のロケーション側への到着する頻度を意味する．本研究では、AGV の到着頻度 = 埠頭クレーンにおけるタスクの発生頻度と考える．
- 処理頻度：ロケーションクレーン 1 台が AGV を 1 台処理する、すなわちコンテナの積み下ろし作業を行う頻度を意味する．
- 処理エージェント数：ロケーションの数を意味する．従って、交通密度 $\rho > 1$ の場合、ロケーションの数を 1 つずつ増やしていき、 $\rho < 1$ となるときのロケーションの数を準最適ロケーション数とする．

4.2 搬送システムのモデル化

待ち行列理論による搬送システムのモデル化のための仮定について述べる．

AGV

- ・ 埠頭クレーンから発生するタスクの頻度は一様な確率分布を持つことから、タスク発生頻度を満たす十分な台数の AGV が存在しているものとしてモデルを構築する．

ロケーションクレーン

- ・ ロケーションクレーンの処理頻度は指数分布に従っているとする．
- ・ 搬送システム全体のコストを考えた場合、1 つのロケーションに複数台のロケーションクレーンを稼働させることは現実的ではない．そのため、本稿では 1 つのロケーションに 1 台のロケーションクレーンが稼働しているものとする．すなわち、ロケーション数 = ロケーションクレーンの台数と考える．

埠頭クレーン

- ・ 埠頭クレーンのコンテナの積み荷・積み下ろし作業の頻度は指数分布に従っている．
- ・ 埠頭クレーンは 1 つの経路に対して 1 台が稼働する．

搬送経路

- ・ 待ち行列理論は開ループシステムを前提としているため、Fig.3 に示すように、1. ロケーション側に入ってくる搬送エージェント、2. ロケーションから出て行く搬送エージェント、の局所的な開ループシステムとして考える．
- ・ 埠頭側での AGV 搬送経路長は十分に設計されているため、埠頭側での渋滞による搬送効率の低下は考えない．

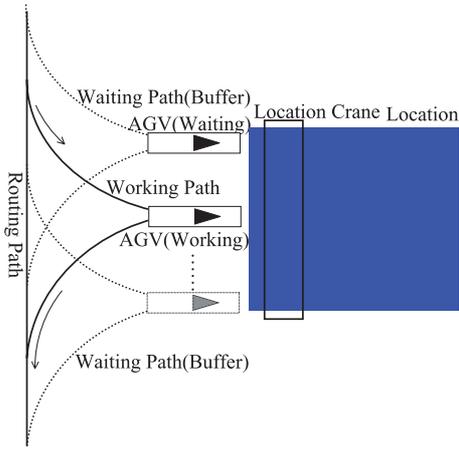


Fig.2 Waiting Buffer on the Working Path

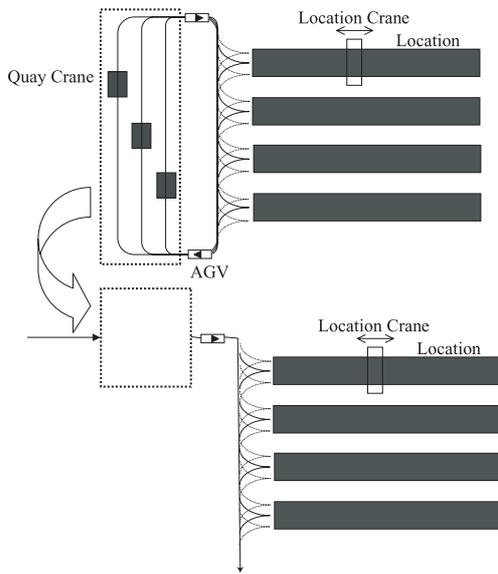


Fig.3 Modeling of Transportation System

- ・ 搬送タスクはロケーションに対してランダムに割り当てられているため、連続して同じロケーションに連続してタスクが割り振られる可能性がある。この場合、AGV 渋滞の緩和のために Fig.2 のようにして、待機バッファを確保する必要がある。
- ・ 埠頭クレーンによるコンテナの処理頻度が一定であり、かつ前述した通り AGV 台数も十分であるため、Fig.3 に示すように、複数台稼動する埠頭クレーンのシステムを一まとめにして考える。

5. 設計アルゴリズム

Fig.4 に待ち行列理論を適用した設計アルゴリズムを示す。従来型のシステム設計¹⁾では、要求タスクや搬送時間が与えられ、それを満たすようにシミュレーションによる設計を行ってきた。しかし、この方法では本研究のように設計対象が複数ある場合、全てに対してシミュレーションを行わねばならず、膨大な計算時間を費やしてしまい非常に困難な設計作業となる。これに対し、本研究では以下のような設計アルゴリズムを提案する。

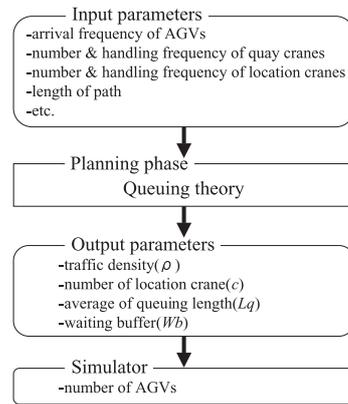


Fig.4 Optimal Design Algorithm by Queuing Theory

1. 設計計画器となる待ち行列理論に、AGV、埠頭クレーン、ロケーションクレーンの処理・到達頻度、経路長が搬送システムの仕様として入力される。
2. (1)(2)(3) 式により、交通密度 ρ 、準最適ロケーション台数 c 、平均待ち行列長さ L_q を算出する。
3. (4) 式により、システムに要求される待機バッファを Fig.2 のようにして追加する。
4. 搬送シミュレーションを行い、搬送時間を考慮した AGV の最適台数を決定する。

本手法により、理論および、ある評価基準に基づいたシステムの設計が可能となり、かつ設計に要するコストも軽減することができる。

6. システム設計

6.1 入力パラメータ

Fig.1 のレイアウトにおいて、 $W=400[m]$ 、 $l_l=14[m]$ 、 $lw=32[m]$ 、 $l_q=2[m]$ 、 $lc=100[m]$ とし、システム設計のための入力パラメータを以下のように与えた。

- ・ タスク数：600
- ・ 埠頭クレーン台数：3 台
- ・ タスク発生頻度： $T_a = 1/\lambda = 28[\text{sec}]$
- ・ タスク処理頻度： $T_s = 1/\mu = 120[\text{sec}]$

6.2 システム計画

入力パラメータより求めた Fig.5 より、ロケーションクレーンの台数が 5 台のとき、(1) 式より $\rho = 0.87$ となることから、これを準最適ロケーション台数とする。次に、このときの平均待ち行列長さが (3) 式より $L_q=4.5$ になることから、(4) 式を用いて $W_b = 0.9$ すなわち 1 つのロケーションに 1 つの待機バッファが必要となるのがわかる。

6.3 シミュレーション実験

計画されたシステムに適切な AGV 台数を求めるために、シミュレーション実験を行った。また、本実験において、要求される搬送完遂時間を $30000[\text{sec}]$ とした。Fig.6 において、要求される搬送完遂時間より、AGV 台数 12 台が、要求されるタスク完遂時間に対して最適であることが分かる。また、Fig.7 より AGV 投入台数をむやみに増やしても、搬送効率は上がらないことが確認できる。

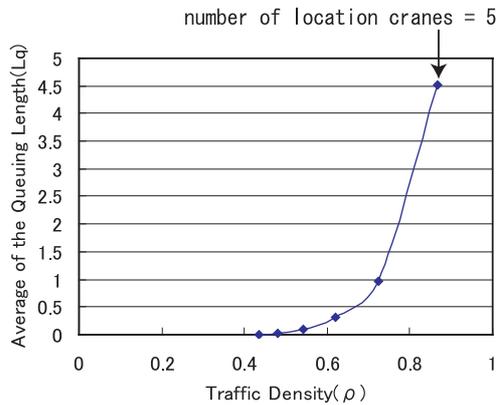


Fig.5 Relation between the Traffic Density and the Average of the Length of Queuing Theory

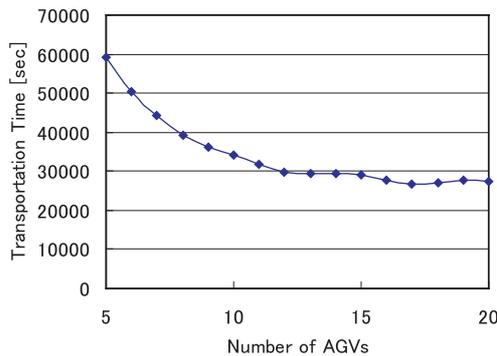


Fig.6 Transportation time using 5 Location Cranes

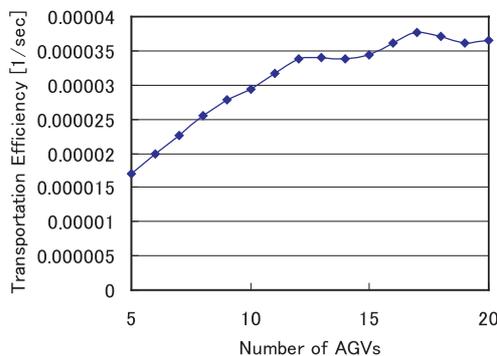


Fig.7 Transportation Efficiency using 5 Location Cranes

6.4 設計結果

以上、本研究において導き出されたシステムの組み合わせ最適解は、以下のようになった。

- ・ ロケーションクレーン台数：5 台
- ・ 待機バッファ数：1 ロケーションあたり 1 本
- ・ AGV 投入台数：12 台

7. 考察

本設計手法の妥当性を確認するため、ロケーションクレーンの台数を 4~6 台にした場合の設計およびシミュレーション実験を行った。Fig.8 を基に考察を行う。AGV 投入台数が少ない範囲ではロケーションクレーン台数の違いによる搬送時間の違いはさほど目立たないが、AGV 台数が増えるにつれてロケーションクレーン台数の少ないものから順にグラフは横ばいになること

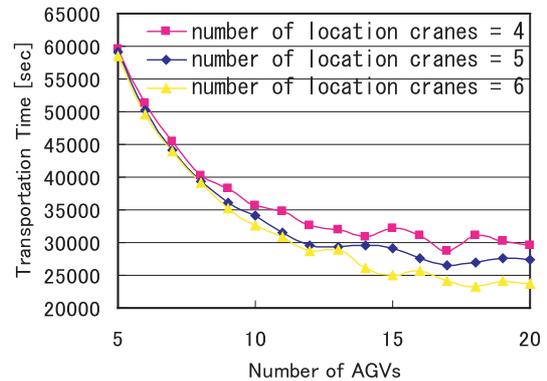


Fig.8 Comparing Result of 5 Number of Cranes with 4 and 6 Number of Cranes

が分かる。これはシステム内で AGV 同士による渋滞が発生したことが原因と考える。閉ループシステムでは、渋滞が起きると、それにより待ち行列が解消されるといった現象が起きる。そのため、閉システムの中においても、大域的なモデル化が必要であると考えられる。そのため、この問題に関しては待ち行列ネットワーク理論を適用することで、解決が図れるものと考ええる。また、待ち行列理論では、空いた窓口に次々とエージェントが到達するようにタスクが割り当てられるが、本実験では、タスクは埠頭クレーンからロケーションへ様に割り当てたため、場合によってはタスクが AGV の作業しているロケーションに重複して割り当てられてしまうためである。今後はタスク割り当ても考慮したシステムの設計を行うことが必要である。

8. 結論

本研究では、既存のシステムを題材に、待ち行列理論を適用した最適なシステムの設計手法およびアルゴリズムを提案した。システムの仕様を入力パラメータとして、平均待ち行列長さを待機バッファにより解消する経路を計画し、これを基に搬送シミュレーション実験を行い AGV 台数を設計した。最後にロケーションクレーンの数による搬送時間の評価を行うことで、本提案手法の有効性を示した。

参考文献

- 1) 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).
- 2) 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).
- 3) P. A. Ioannou, H. Jula, C. I. Liu, K. Vukadinovic, H. Pourmohammadi: Advanced material handling: Automated guided vehicles in agile ports Design, Center for Advanced Transportation Technologies, Univ. Southern California, Los Angeles, Tech. Rep., Oct. (2000).
- 4) 大山達雄: 最適化モデル分析, 日科技連 (1995).