

# 作業ロボットの信頼性を考慮した 港湾コンテナターミナルシステムの設計

星野智史(東京工業大学) 太田 順(東京大学)

## Design of a Seaport Container Terminal System Considering the Reliability of Operating Robots

\*Satoshi HOSHINO (Tokyo Institute of Technology), Jun OTA (The University of Tokyo)

**Abstract**— For the design of a seaport container terminal system, it is necessary to take into account the maintenance of operating robots. For this purpose, we develop an operation model in which each robot enters a maintenance mode while operating on the basis of its reliability. We also aim to design the mean time between failure (MTBF) as well as the number of robots. However, this is a combinatorial design problem. Therefore, we propose a design methodology in order to derive one combinatorial design solution for a given demand by considering a system management cost. Finally, we present the validity of the proposed design methodology and designed systems.

**Key Words:** Seaport Container Terminal System, AGV, ATC, Design, Reliability, MTBF

### 1. 序論

港湾コンテナターミナルシステムでは、特に塩害などの影響から、システム全体としての耐久性や耐故障性が重要視されている。しかしながら、当該システム内で稼働する作業ロボットのメンテナンスまでを考慮した設計は行われていない。したがって、作業ロボットのメンテナンス、すなわち信頼性 [1] [2] を考慮に入れた設計を行う必要がある。そこで本研究では、ロボットが定期的にメンテナンスを受けながら作業を行うシステムの運用ならびに設計を行う。作業ロボットの信頼性を考慮することがシステムへ与える影響に関しては、投入される作業ロボットに依存する。すなわち、

- メンテナンスフリーのような高価なロボットを投入した場合、投入コストがかかってしまう。
- 頻繁に作業ロボットのメンテナンスを行う場合、メンテナンスに時間が割かれ、その結果、多数の作業ロボットを投入したコストパフォーマンスの低いシステムとなってしまう。
- 作業ロボットが故障するまでメンテナンスを行わない場合、システムはロボットが故障時において作業を中断せざるを得ないため、要求仕様を満たせず、ペナルティが科されてしまう。

これらの問題に対し、本研究では、与えられた要求仕様に対する作業ロボットの投入台数設計に加え、当該ロボットの MTBF (Mean Time Between Failure: 平均故障間隔) に関する性能設計を行う。そのため、作業ロボットのメンテナンス時における作業モデルおよび、システムの運用コストまでを考慮した設計方法論の提案を行う。そして、設計されたシステムの有効性を示す。

### 2. チャレンジングポイント

本研究では、Fig.1 に示されている港湾コンテナターミナルシステム内で稼働する AGV (Auto-

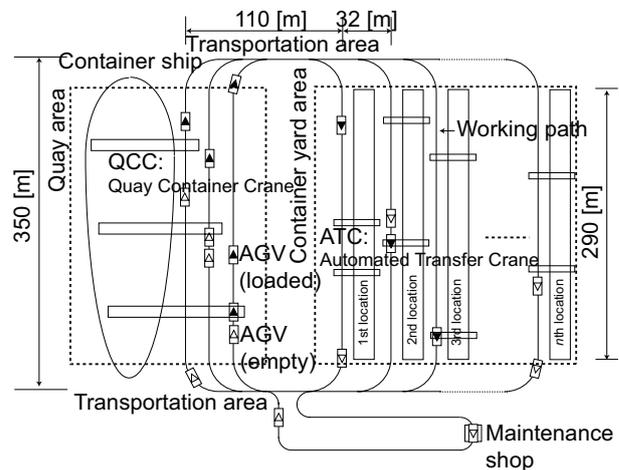


Fig.1 Horizontal AGV Transportation System in a Seaport Container Terminal (top view)

mated Guided Vehicle) と ATC (Automated Transfer Crane) の信頼性を考慮に入れ、これら作業ロボットのメンテナンスを行いながら要求仕様を満たすためのシステム運用ならびに設計を行う。すなわち、

1. 当該システムの運用時において、他のコンテナ取扱い作業同様、作業ロボットのメンテナンスも効率良く行わなくてはならない、

といったチャレンジングポイントを解決する必要がある。さらに、

2. メンテナンスを運用に取り入れることによって生じる作業遅延、すなわちペナルティも考慮に入れた設計、

が必要となる。

そこで本研究では、チャレンジングポイント1に対して、AGV や ATC 各々が遂行する作業の相互代替可能

性を活かしたメンテナンス作業モデルを構成する。チャレンジングポイント 2 に対しては、当該設計方法論の枠組みにおいて、作業ロボットがメンテナンスを受けるモデルを考慮に入れ、システムの運用コストを取り入れた設計を行う。

### 3. 港湾コンテナターミナルシステム

#### 3.1 AGV 搬送システム

従来研究において、港湾コンテナターミナルにおける自動化システムとしては、水平型のレイアウトを有する AGV 搬送システムの有効性が示されている [3]。そこで本研究でも、Fig.1 に示す水平型 AGV 搬送システムを設計対象とする。なお、コンテナを蔵置するためのロケーションに関しては、1 ロケーションあたり、320[TEU (Twenty-foot Equivalent Unit)] の蔵置スペースを有しているものとする。システム設計のため、埠頭、搬送、蔵置、搬送の 3 種類 4 つに分割された作業エリアでは、埠頭エリアに QCC (Quay Container Crane)、搬送エリアに AGV、そして蔵置エリアにはゴムタイヤ式の ATC が投入されている。ここで、QCC の投入台数に関しては、埠頭の岸壁サイズにより 3 台とした。

#### 3.2 コンテナ取扱い作業手順

作業ロボットは以下の作業手順 (1)~(7) にしたがって、当該システム内での作業を行う。

1. AGV が埠頭エリアにおいて稼働している QCC の下へ到着したら、QCC はコンテナ船より AGV へコンテナの荷積み作業を行う。
2. AGV は搬送エリアを通過して、埠頭より蔵置エリア内における当該コンテナの目的蔵置ロケーションまで搬送を行う。
3. AGV はコンテナ蔵置位置に隣接するコンテナ受け渡し位置まで向かい、ATC を呼び出す。
4. 当該ロケーション上に、アイドル状態にある ATC が存在する場合は、当該 ATC が受け渡し相手として AGV の位置まで向かうことができるが、そうでない場合、AGV はその場にて ATC を呼び続ける。
5. ATC が AGV の待機位置までやってきたら、コンテナ受け渡し作業を開始する。
6. ATC へコンテナの受け渡しを終えた AGV は、再びコンテナを積むために搬送エリアを通り、埠頭エリアで稼働する QCC のところへと向かう。
7. コンテナを受け取った ATC は、その場のコンテナ蔵置位置にコンテナを蔵置し、次の AGV からの指令をその場にて待つ。

ただし、QCC による AGV へのコンテナ荷役時間、AGV から ATC へのコンテナ受け渡し時間、そして ATC によるコンテナの蔵置時間はそれぞれ、60, 30, 30 [s] とした。

#### 4. メンテナンス時における作業モデル

メンテナンスには、1. 初期不良に対する改良、2. 機能低下に対する予防、3. 故障に対する事後、4. 要求機能レベルの変化に対する改良、の 4 つがある [4]。これらのうち、本研究では、2 の機能低下に対する予防メン

テナンスを行う。すなわち、各作業ロボットは、MTBF による信頼度に基づき、ある閾値を下回ったら作業を停止し、メンテナンスモードに入るよう設定した。

複数台の AGV および ATC が同時にメンテナンスモードに入った場合、同じ機能を有するロボット同士が遂行する作業の相互代替可能性を活かすよう、作業ロボットのメンテナンスを効率良く行わなくてはならない。AGV の場合、搬送経路上でメンテナンスモードとなってしまうと、他の AGV の搬送作業の妨害となってしまう。そのため、搬送経路外にメンテナンスショップを設けることにより (Fig.1 参照)、システムとしての並列化を行った。すなわち、AGV が全てメンテナンスモードになりメンテナンスショップに向かうとき以外は、当該搬送システムは稼働する。一方、ATC に関しては、ロケーション上における 2 台の ATC が同時にメンテナンスモードに入ってしまった場合、当該ロケーションにおける作業遂行が滞ってしまい、その結果、システム全体としても作業が中断してしまう可能性がある。そこで本研究では、以下に示す 2 つのルールを設け、これに基づき ATC はメンテナンス時における作業を遂行する。

- あるロケーションで稼働する ATC のうち、2 台ともメンテナンスモードに入っているロケーションが存在する場合、当該ロケーション上のいずれか一方の ATC から優先的にメンテナンスを受ける。
- 全てのロケーションにて、いずれか一方の ATC が作業を行っている場合は、メンテナンスモードに入ったものから順にメンテナンスを受ける。

### 5. 設計方法論

#### 5.1 設計パラメータ

本研究では、システムレイアウトは水平型 [3]、運用モデルは“均等搬送計画に基づいて決定された搬送先へ AGV が向かい、作業経路進入後、作業空間選択法に基づいて ATC を呼び出し、ATC の移動量が最小化されるようにスケジューリングされた順番で、作業指令をこなしていく運用方法 [5]”を採用する。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。

- 作業ロボットの投入台数 (AGV, ATC)
- 作業ロボットの MTBF

#### 5.2 作業ロボットの信頼度

本研究では、当該搬送システム内で稼働する作業ロボットの時刻  $t$  における故障率  $\lambda(t)$  が、時間に関係なく一定の場合 ( $\lambda(t) = \lambda_0$ )、すなわち指数分布に従っているとすると、時刻  $t$  における作業ロボットの故障率は指数分布に従うものと仮定すると、時刻  $0 \sim t$  における作業ロボットの信頼度は式 (1) から算出することができ、本研究では、この信頼度を基にメンテナンスを行うタイミングを決定する。

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \quad (1)$$

また、故障率が指数分布に従う作業ロボットの平均故障間隔、すなわち MTBF は式 (2) となる。式 (1) と (2) より、故障率  $\lambda(t)$  は MTBF の逆数より算出可能で

あり，MTBF により信頼度を求めることができる．

$$MTBF = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0} \quad (2)$$

そこで本研究では，いくつかの MTBF を設定し，作業時間  $t$  に対する信頼度  $R(t)$  を基にメンテナンスを行いながら，システムの運用コストならびに要求仕様を考慮した上で，作業ロボットの投入台数設計および MTBF の設計を行う．また，一度メンテナンスを行った作業ロボットの  $R(t)$  は，メンテナンスを行った時刻において，1 へとリセットする．

### 5.3 システム運用コスト

本研究では，複数の設計パラメータの組合せから，要求仕様に対する設計解を算出する過程において，システムの運用コスト（式（3））を考慮する．システムの運用コスト（ $C_m$ ）は，設計パラメータに基づいて算出されるシステムの構築コスト（ $C_c$ ）に，構築された当該システムが要求作業を完遂できなかった場合に科されるペナルティコスト（ $C_p$ ）を加えたコストとなっている．

$$C_m = C_c + C_p \quad (3)$$

式（4）はシステムの構築コストを示している．本研究では，投入する AGV および ATC の設備コストならびに MTBF の違いによる開発コストを乗じ，それらを足しあわせた値をシステムの構築コストとする．式（5）はペナルティコストのことであり，要求作業時間内に作業ロボットがコンテナを搬送し終えなかった場合，そのときのコンテナ船におけるコンテナの残存数にペナルティ係数を乗じた値となっている．

$$C_c = \alpha \times \gamma_{agv} \times AGVs + \beta \times \gamma_{atc} \times ATCs \quad (4)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^{n_u} \delta n_{con,i} \quad (5)$$

ただし，

- $\alpha$  AGV の導入に関するコスト係数，
- $\beta$  ATC の導入に関するコスト係数，
- $\gamma_{agv}$  AGV の MTBF に関するコスト係数，
- $\gamma_{atc}$  ATC の MTBF に関するコスト係数，
- $\delta$  ペナルティコスト係数，
- $n_u$  要求作業時間内の作業未完遂回数，
- $n_{con,i}$  要求作業未完遂時のコンテナ残存数．

## 6. システム設計

### 6.1 設計条件

本研究では，設計対象となる AGV の最大投入台数に関しては 30 台まで，ATC の最大投入台数に関しては 20 台とした．また，MTBF の性能に関しては，文献 [6] と [7] を参考にし，AGV と ATC でそれぞれ Table1 に記されているとおり，「標準（normal）」から「低い（low）」，そして「高い（high）」，「さらに高い（higher）」の 4 つを設計対象とする．各作業ロボットのメンテナンスを行うタイミングに関しては，信頼度が  $R(t) \leq 0.9$  となった時点でメンテナンスモードに入るよう設定し

Table 1 MTBF of AGV and ATC

	MTBF <sub>agv</sub> [hour]	MTBF <sub>atc</sub> [hour]
low	50	40
normal	100	80
high	150	120
higher	200	160

た．ただし，搬送シミュレーション開始時においては，各作業ロボットの信頼度の初期値は  $0.9 < R(t) \leq 1.0$  でランダムに設定した．メンテナンス時間に関しては，AGV は 0.5 [hour]，ATC は 0.4 [hour] を費やしてメンテナンスが行われるものと設定した．

式（4）と式（5）のコスト係数は，作業ロボットのライフサイクルコストならびに設置コストなどを加味し， $\alpha = 1$ ， $\beta = 2$  とした．さらに，4 段階の MTBF に関する性能の違い，すなわち作業ロボット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を含めるため， $\gamma_{agv}$  と  $\gamma_{atc}$  をそれぞれ 0.8（「低い」），1.0（「標準」），1.5（「高い」），2.0（「さらに高い」）とした．また，要求作業未完遂時における残存コンテナに対するペナルティコストは  $\delta = 0.05$  とした．

要求作業に関しては，要求仕様としてスループットを与える．コンテナ船に積み込まれているコンテナの数は 600 [TEU]，要求仕様は 10 ~ 130 [TEU/hour] とした．ただし，1 ロケーションには最大で 320 [TEU] のコンテナしか蔵置することができないため，最低でもロケーションが 2 本，すなわち 4 台以上の ATC を投入する．

### 6.2 設計プロセス

以下にシミュレーションによる組合せ設計解の算出プロセスについて述べる．本設計プロセスは，(I) 要求仕様に対して，それを満たす設計パラメータの組合せを算出するステップ，(II) 算出された設計パラメータに基づきシミュレーションを行い，システム運用コストにより最終的に組合せ設計解を算出するステップ，の 2 つのステップから構成される．

1. 搬送システムに対して要求仕様を与える．
2. AGV の MTBF，ATC の MTBF，ATC の台数，AGV の台数を設定する．
3. 搬送シミュレーションを行う．
4. 要求仕様をシステムが満たさなかった場合，6.1 節で設定した条件の範囲で，AGV，ATC，MTBF<sub>atc</sub>，MTBF<sub>agv</sub> の順にパラメータをインクリメントする．
5. 要求仕様をシステムが満たす場合，当該設計パラメータの組合せを算出する．
6. 算出された解の組合せに基づき 10 回の搬送シミュレーションを行う．
7. システム運用コストを算出する．
8. 4 つの設計パラメータがそれぞれ設定した上限に達していない場合，AGV，ATC，MTBF<sub>atc</sub>，MTBF<sub>agv</sub> の順でパラメータをインクリメントする．
9. 4 つの設計パラメータが全て設定した上限に達し

Table 2 Combinatorial Design Solutions

Demand	AGVs	ATCs	MTBF <sub>agv</sub>	MTBF <sub>atc</sub>	C <sub>m</sub>	C <sub>d</sub>
10	2	4	50	40	8	12
20	3	4	50	40	8.8	13.2
30	4	4	50	40	9.6	14.4
40	6	4	50	40	11.2	14.8
50	8	4	50	40	12.8	17.2
60	8	4	100	40	16.1	19.1
70	9	4	100	40	19.8	19.2
80	11	4	100	40	23.4	21.2
90	13	4	100	40	26.3	26.5
100	16	4	100	40	31.9	39
110	14	4	100	120	42.8	46.3
120	15	6	100	120	49.4	62
130	22	12	100	80	68.6	95.3

た場合、システム運用コストを比較する。

10. 最も低コストでシステムを運用する組合せ設計パラメータを、組合せ設計解として算出する。

### 6.3 組合せ設計解の算出

Table2 に、要求仕様に対して得られた組合せ設計解を示す。C<sub>d</sub> とは、得られた設計パラメータの組合せのうち、最もシステム運用コストが高かったものと低かったもの、すなわち、設計解として得られたパラメータによるシステム運用コスト (C<sub>m</sub>) の差のことを意味している。この結果から、要求仕様を満たす複数の設計解に対して、システム運用コストに基づき比較・評価することの重要性が確認された。

Table2 より、本研究で設定した設計条件の下、要求仕様が 50 [TEU/hour] 以下の場合では、AGV と ATC の MTBF を「低い」に設計しても、システムが要求仕様を満たす組合せ設計解を算出することができた。このことは、要求仕様が低い段階では高機能な AGV や ATC を用いなくても、高効率な搬送システムの構築が可能であることを示している。要求仕様が 60 [TEU/hour] 以上になると、MTBF が「低い」の場合ではその分 AGV の投入台数を多くし、さらにはメンテナンスモードに入る AGV と ATC の台数が増加してしまうことから、要求作業未完遂によってペナルティコストがかかってしまい、それぞれ MTBF<sub>agv</sub> と MTBF<sub>atc</sub> を高機能化した際の設計パラメータの組合せが設計解として得られた。この結果から、作業ロボットの信頼性を考慮に入れ、AGV と ATC の MTBF も適切に設計することの必要性が示された。

### 6.4 考察

Fig.2 に、要求仕様に対して得られた組合せ設計解に基づき、算出したシステム運用コストを示す。要求仕様が 50 [TEU/hour] までは、設計解によるシミュレーションの際、一度も要求作業未完遂だった場合が起きなかったため、システム運用コストにおけるペナルティコストの占める割合が 0 であることが分かる。しかし

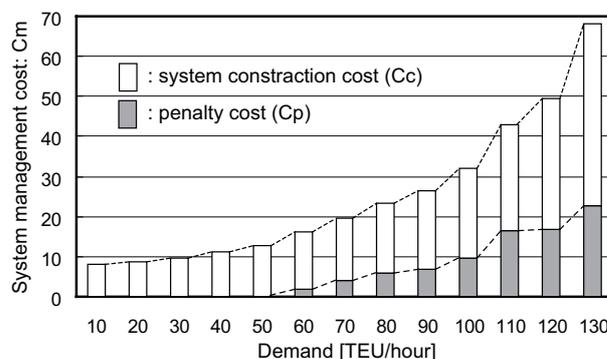


Fig.2 System Management Cost for Imposed Demands

ながら要求仕様が高くなると、ペナルティコストの占める割合が増加し、その結果、システム運用コストも増加していることが分かる。すなわち、要求仕様が高くなるにつれて、ペナルティコストがシステムの運用コストに与える影響が増大するため、この結果からも、作業ロボットの信頼度を考慮し、システム運用コストにペナルティコストを含めて設計を行うことの重要性が示された。

## 7. 結論

本研究では、作業ロボットの信頼性を考慮した港湾コンテナターミナルシステムの設計を行った。信頼性を考慮するため、各作業ロボットはそれらが有する MTBF により、信頼度を基準に作業を行いながらメンテナンスモードに入るモデルを構築した。そして、当該システムの要求仕様に対するコスト最小化を目的としながら、作業ロボットの投入台数ならびにそれらの MTBF の組合せ設計解を算出するための設計方法論を提案した。さらに、設計結果に対する考察を行い、当該システムの有効性を示した。

- [1] 菅野文友: “信頼性工学,” コロナ社, 1980.
- [2] 市川昌弘: “信頼性工学,” 裳華房, 1987.
- [3] S. Hoshino et al.: “Hybrid Design Methodology and Cost-effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems,” IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, (accepted).
- [4] 高田祥三: “ライフサイクル・メンテナンス - LCC を最適化する論理的・合理的設備管理,” JIPM ソリューション, 2006.
- [5] 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, vol. 4, no. 14, pp. 98-108, 2005.
- [6] C. Roser et al.: “Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems,” Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, pp. 1192-1198, 2003.
- [7] T. Yamagishi: “The world’s first automated reticle handling system using OHT,” 2003 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing, pp. 21-24, 2003.