

## 2301 港湾コンテナターミナルにおける自動搬送システムの信頼度設計

### Reliability Design of an Automated Transportation System in a Seaport Container Terminal System

正 星野智史 (東京工業大学)      正 太田 順 (東京大学)

Satoshi HOSHINO, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN  
Jun OTA, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, JAPAN

**Abstract**— For a design of a seaport container terminal, we have to take into account failure and repair of robots in addition to the robots maintenance. In this paper, we develop an operational model in which each robot is preventively maintained and repaired while operating on the basis of the reliability engineering. After that, we design the robots' reliability, i.e., MTBF (Mean Time Between Failure) in addition to the number of robots. For this purpose, we propose a design methodology in order to obtain the combinatorial design solution for a given demand.

**Key Words:** Seaport container terminal, automated transportation system, reliability design, MTBF

#### 1. 緒言

信頼度とは、ある時間あるいは期間においてあるアイテムが正常に動いている確率のことで、後述する平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failure) から求めることができる。

港湾コンテナターミナルにおける自動搬送システムでは、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故障やメンテナンスまでを考慮した設計は行われていない [1]。したがって本研究では、作業ロボットの信頼性 [2] [3] を考慮に入れ、ロボットが故障する可能性を想定し、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を行う。そして、作業ロボットのメンテナンスを適切に行いながら、要求仕様を満たすシステムを低コストで構築するために、ロボットの MTBF に関する性能を作業ロボットの投入台数とともに、要求仕様に対して適切に設計する。

#### 2. チャレンジングポイント

本研究では、Fig.1 に示されている自動搬送システム内で稼働する AGV (Automated Guided Vehicle) と ATC (Automated Transfer Crane) の信頼性を考慮に入れ、これらの作業ロボットが故障する可能性を含め、メンテナンスおよび修理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。そのため、以下のチャレンジングポイントを解決する。

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、
2. メンテナンスと故障・修理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を行わなくてはならない。

そこで、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ならびに故障・

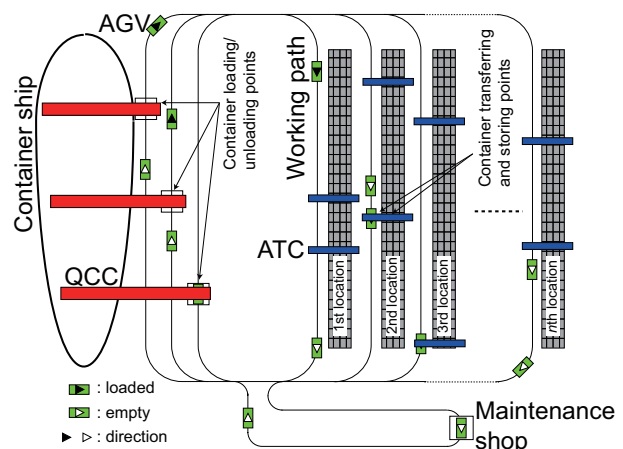


Fig.1 Horizontal AGV Transportation System

修理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. 港湾コンテナ自動搬送システム

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搬送システムとしては、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 [4]。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。当該システムでは、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 が投入されており、コンテナは以下の手順にしたがい取扱れる。

1. QCC から AGV へのコンテナ荷役
2. AGV によるコンテナ搬送
3. AGV による ATC 呼び出し
4. AGV から ATC へのコンテナ受渡し
5. ATC によるコンテナ蔵置

ただし、QCC による AGV へのコンテナ荷役時間、AGV から ATC へのコンテナ受渡し時間、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. 作業ロボットのメンテナンスと故障・修理時における作業モデル

本研究では、各作業ロボットは、MTBF による信頼度に基づき、これが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。メンテナンスを受ける時間は、部品の点検、消耗品の交換、主要部品の交換を行う場合に応じて決定される。さらに、作業ロボットが故障した場合には、事後修理を行う。AGV ならびに ATC は、ある故障確率によって故障する。その場合、当該ロボットはその場にて停止し、故障の程度に応じた修理を受ける。

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、作業モデルを構築する必要がある。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。一方、コンテナを蔵置し終えた ATC は、作業を行っているコンテナ蔵置ロケーションからはずれてメンテナンスを受ける。ただし、ロケーション上の 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 [4]、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。

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

##### 5.2 作業ロボットの故障率と信頼度

本研究では、作業ロボットの故障時間密度関数が指数分布に従っているとすると、この場合、作業ロボットの時刻  $t$  における故障率  $\lambda(t)$  は、式 (1) のとおり一定となる。さらに、時刻  $0 \sim t$  における作業ロボットの信頼度は式 (2) から算出することができ、各ロボットはこの信頼度を基にメンテナンスモードに入るタイミ

ングを決定する。また、作業ロボットの平均故障間隔の初期値  $MTBF_{init}$  は、式 (3) となる。

$$\lambda(t) = \lambda_0 \quad (1)$$

$$R(t) = e^{-\lambda_0 t} \quad (2)$$

$$MTBF_{init} = \int_0^{\infty} R(t) dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda_0 t} dt = \frac{1}{\lambda_0} \quad (3)$$

なお本研究では、各作業ロボットの MTBF が累積作業時間に応じて減少することも設計の段階で考慮する。

##### 5.3 システム運用コスト

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 (4)) 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。

$$C_m = C_c + C_p \quad (4)$$

式 (5) はシステムの構築コストを示している。本研究では、QCC の投入台数は一定としているため、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 (6) 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未完であった場合、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。

$$C_c = \alpha \times \gamma_{agv} \times AGVs + \beta \times \gamma_{atc} \times ATCs \quad (5)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^{n_u} \delta n_{con-i} \quad (6)$$

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。

##### 5.4 設計プロセス

以下に組合せ設計解の算出プロセスについて述べる。

1. 搬送システムに対して要求仕様を入力
2. AGV の MTBF, ATC の MTBF, ATC の台数, AGV の台数を設定
3. 搬送シミュレーションの実行
4. 要求仕様をシステムが満たさなかった場合、与えられた設計条件の範囲で、AGV, ATC,  $MTBF_{atc}$ ,  $MTBF_{agv}$  の順にパラメータをインクリメント
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
6. 算出された解の組合せに基づき  $N$  回の搬送シミュレーションを実行

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

7. システム運用コストの算出
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
9. 4つの設計パラメータが全て設定した上限に達した場合、システム運用コストを比較
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

## 6. システム設計

### 6.1 条件設定

システムレイアウトに関して、蔵置エリアにおけるコンテナ蔵置ロケーションは、1ロケーションあたり、320 (4 [Row] × 20 [Bay] × 4 [Tier]) [TEU] の蔵置スペースを有しているものとする。QCCの投入台数は、350 [m] の埠頭サイズにより3台とした。

MTBFの性能に関しては、AGVとATCでそれぞれTable1に記されているとおり「標準」から「低い」、そして「高い」「さらに高い」の4つを設計対象とする。各作業ロボットは、時刻 $t$ での信頼度が $R(t) \leq 0.9$ となった時点でメンテナンスモードに入るよう設定した。なお、一度メンテナンスを受けた作業ロボットの $R(t)$ は、その時刻において、1へとリセットする。ただし、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。メンテナンスは、AGVが0.3~0.5 [hour]、ATCが0.2~0.4 [hour]でランダムに決められた時間を費やして行われるものとした。作業ロボットが故障した際には、その場にて、AGVは0.5~1.0 [hour]、ATCは0.4~1.0 [hour]の時間を費やして修理が行われるものとした。これら修理時間もランダムに決定される。さらに5.2節より、各作業ロボットのMTBFは、その初期値MTBF<sub>init</sub>から、1時間ごとの累積作業時間 (hour) に対して、0.1ずつ減少することとした(式(7))。

$$MTBF = MTBF_{init} - 0.1 \times hour \quad (7)$$

5.3節で述べた各係数は、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 2$ 、 $\gamma_{agv}$ 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」)、ペナルティコストは $\delta = 0.05$ とした。

コンテナ船に積み込まれているコンテナ(タスク)の総数は600 [TEU]、課される要求仕様は10~120 [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。システムの運用コストを計算するために、 $N = 10$ 、すなわち600 [TEU] 積みの

Table 2 Combinatorial Design Solutions

Demand	AGVs	ATCs	MTBF <sub>agv</sub>	MTBF <sub>atc</sub>	C <sub>m</sub>	C <sub>max</sub>
10	2	4	50	40	8.0	21.5
20	3	4	100	40	9.4	39.2
30	4	4	100	40	10.4	51.7
40	5	4	100	40	12.0	63.8
50	6	4	100	40	12.4	71.7
60	7	4	100	40	16.4	90.3
70	9	4	100	40	16.9	113.4
80	9	4	150	80	25.8	111.0
90	11	4	100	120	28.5	109.8
100	15	4	150	40	32.9	124.7
110	15	4	150	40	42.4	122.6
120	16	6	150	40	46.7	165.3

コンテナ船が10隻入港した場合を想定し、10回のシミュレーションを行う。設計対象となるAGVの最大投入台数は30台まで、ATCの最大投入台数は20台とした。

### 6.2 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を示す。本設計で設定した諸条件では、AGVの投入台数はおおむね要求仕様に伴い増加する結果となった。一方、ATCの投入台数はMTBF<sub>atc</sub>のパラメータを適切に設計することで、要求仕様110 [TEU/hour]までは4台、120 [TEU/hour]に対しても6台という結果となった。

MTBF<sub>agv</sub>とMTBF<sub>atc</sub>は、AGVとATCがそれらの投入台数によってどれだけシステムに対して影響を及ぼしているかという観点から、それぞれ適切に設計されている。例えば、要求仕様10 [TEU/hour]に対しては、AGV=2、ATC=4で十分対応できているため、MTBF<sub>agv</sub> = 50、MTBF<sub>atc</sub> = 40に設計することができた。このことは、要求仕様が低い段階では高機能なAGVやATCを用いなくとも、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。20~70 [TEU/hour]の要求仕様に対しては、ATCの投入台数は4台で十分だが、AGVの投入台数が、要求仕様を満たす限界に設計されているため、その分、MTBF<sub>agv</sub>が高機能化設計される結果となった。要求仕様80~90 [TEU/hour]に対しては、さらに高機能化設計されたAGVの台数が増えた。またこのとき、ATCの投入台数も要求仕様を満たす限界となり、その結果MTBF<sub>atc</sub>も高機能化設計された。要求仕様が100 [TEU/hour]以上になると、MTBF<sub>agv</sub>を150に高機能化設計する、あるいは、ATCの投入台数を4から6台に設計することで、MTBF<sub>atc</sub>を40と低機能化設計することができた。以上のことから、要求仕様が高くなるにつれて、特にMTBF<sub>agv</sub>が50のままではAGVの故障の頻度やメンテナンスの時間が増え、さらにはAGV自身の投入台数も増やさねばならず、その結果、システムの構築コストとペナルティコストが増大してしまいうことから、当該パラメータ

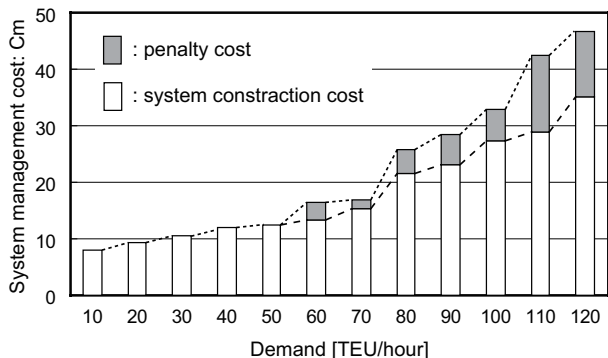


Fig.2 System Management Cost for Imposed Demands

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

Table2 において,  $C_{max}$  とは, 得られた設計パラメータの組合せのうち, 最も高かったシステム運用コストのことを意味している.  $C_{max}$  と  $C_m$  を比べると, 同じ要求仕様を満たす設計パラメータの組合せでも, コスト面では 2~4 倍程度変わることが分かった. このことから, 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.

### 6.3 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達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. しかしながら, 要求仕様が高くなると, 構築コストに加えてペナルティコストの占める割合が増加し, その結果, 要求仕様が 80 と 110 [TEU/hour] を超えたあたりからシステム運用コストが急激に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がナルティコストを含めて最小となるよう設計を行うことの重要性が示された.

Table3 に, 10 回の搬送シミュレーションを行った際の, 要求作業未完達だった回数, そのときのコンテナ船での残存コンテナ総数, システム運用コストに占めるペナルティコストの割合, 総搬送コンテナ数 ( $600 \times 10$  [TEU]) に対する, 残存コンテナ総数の割合を示す.

この結果から, 要求仕様の増加に対して, 要求作業未完達回数が単調増加傾向にないことが分かる. これは, 確率的に起こる作業ロボットの故障とそのときの場所, さらに, 程度に応じてランダムに決められるメンテナンスおよび修理の時間が原因であると考えられる. そのため, 要求仕様 80 [TEU/hour] では, 要求作業未完達が 5 回あったにもかかわらず, 残存コンテナ数の総数は 86 [TEU], 一方, 要求仕様 100 [TEU/hour] に対しては, 1 回の要求作業未完達だったにもかかわらず残存コンテナの総数は 111 [TEU] という結果になった. さらに, ペナルティコストの割合は, 9.0~31.8 [%]

Table 3 Simulation Result with Combinatorial Design Solutions

Demand	# of unfinished simulations	# of left containers [TEU]	Ratio of the penalty cost [%]	Ratio of the # of left containers [%]
10	0	0	0	0
20	0	0	0	0
30	0	0	0	0
40	0	0	0	0
50	0	0	0	0
60	2	60	18.3	1.0
70	2	30	9.0	0.5
80	5	86	16.7	1.4
90	2	110	19.4	1.8
100	1	111	16.8	1.9
110	4	269	31.8	4.5
120	2	232	24.8	3.9

となっているが, 総搬送コンテナ数に対する残存コンテナ総数の割合は 0.5 ~ 4.5 [%] 程度であることが分かった.

### 7. 結論

本研究では, 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, 故障率ならびに信頼度を基準に作業を行いながら, 場合によっては故障し, かつメンテナンスモードに入るモデルを構築した. そして, 要求仕様に対して, 運用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 MTBF を適切に設計した. さらに, 信頼性を考慮し作業ロボットの MTBF も適切に設計したシステムの評価を行い, 当該システムの有効性を示した.

### 謝辞

本研究の一部は, 科研費若手 (B) 19760167 の助成を受けている.

### 参考文献

- [1] 星野智史 他: 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, 第 24 回 日本ロボット学会学術講演会, 2K15, 2007.
- [2] 菅野文友: 信頼性工学, コロナ社, 1980.
- [3] 市川昌弘: 信頼性工学, 裳華房, 1987.
- [4] S. Hoshino *et al.*: Hybrid Design Methodology and Cost-effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems, IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 360-372, 2007.
- [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, 第 4 巻, 第 14 号, pp. 98-108, 2005.