

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 における自動搬送システムの運用と設計[†]

星野 智史*・太田 順**

Management and Design of an Automated Transportation System
in a Seaport Container Terminal Considering the Reliability of Operating Robots

Satoshi HOSHINO* and Jun OTA**

For the design of an automated transportation system in an actual seaport container terminal, it is necessary to take into consideration an occurrence of a malfunction of an operating robot and maintenance activities, such as the correction for failed robots and periodic prevention of operating robots. Therefore, these maintenance activities have to be simulated on the basis of the reliability engineering in the system management. For an efficient system management, we develop an operation model in which each robot gets into a maintenance mode while operating according to its reliability. In this paper, we aim to design the robots performance on MTBF (Mean Time Between Failure) based on the robots reliability in addition to the number of robots (AGV: Automated Guided Vehicle and ATC: Automated Transfer Crane). In the design process, we derive combinatorial design parameters for an imposed demand. After that, in order to derive the combinatorial design solution for the demand, we consider a system management cost which includes a system construction cost and penalty cost. The systems, that consist of the combinatorial design solutions, are evaluated on the basis of the system management costs. Finally, we show the effectiveness of the system design in addition to its management, in consideration of the reliability of the operating robots.

Key Words: Seaport container terminal, automated transportation system, maintenance, reliability, MTBF.

1. 序 論

近年の港湾コンテナターミナルにおける貨物取扱量は、アジアを中心に世界規模で年々増加傾向にある¹⁾。このような傾向から、港湾コンテナターミナルの自動化に対する需要が高まり、様々な視点から自動化に向けた研究がなされている²⁾。

関連研究を含め、著者らはこれまでに、港湾コンテナターミナルにおける高効率自動搬送システムの実現を目指し、Fig. 1が示すAGV (Automated Guided Vehicle)搬送システムに注目してきた。そして、他の関連・従来研究なども含め、(I) 作業ロボットの投入台数設計^{3) 4)}、(II) 搬送システムのレイアウト評価・設計^{4) 5)}、(III) 搬送システムの作業戦略設計^{6) 7) 8) 9)}、(IV) 既存の搬送システムに対する改善・改修設計¹⁰⁾、(V) ロボットの作業仕様設計^{11) 12)}、などといったことがなされてきた。

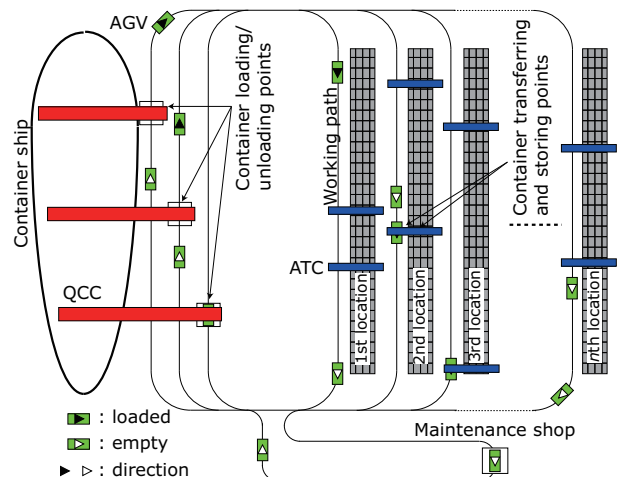


Fig. 1 Horizontal AGV Transportation System in a Seaport Container Terminal (top view)

[†] 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2007) で一部発表 (2007・10)

* 東京工業大学資源化学研究所 横浜市緑区長津田 4259

** 東京大学大学院工学系研究科 文京区本郷 7-3-1

* Chemical Resources Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Kanagawa

** Faculty of Engineering, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo

(Received June 13, 2008)

生産・製造現場におけるマテリアルハンドリングシステムを扱った研究では、設備の耐久性などといった観点から、システムの信頼性が考慮されてきた¹³⁾。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、上述した従来の設計方法論 (I) ~ (V)

において、搬送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システムの運用ならびに設計は行われていない。すなわち、これら提案されている設計方法論により搬送システムを設計した場合、システムを構築するためのコストならびに要求仕様（システムスループット [TEU (Twenty-foot Equivalent Unit) /hour]：要求される総搬送コンテナ数 / 要求される作業完遂時間）のみが制約条件として考慮されてきていた。そのため、故障やメンテナンスが原因となり要求仕様を満たせず、港湾管理会社に対してペナルティが科せられてしまう可能性が生じる。なお、本論文における作業ロボットとは、Fig. 1 に示されている AGV と ATC (Automated Transfer Crane) を指すものとする。また、メンテナンスには、1. 初期不良に対する改良保全、2. 機能低下に対する予防保全、3. 故障に対する事後保全（修理）、4. 要求機能レベルの変化に対する改良保全、などがあるが¹⁴⁾、本稿では、システムの通常運転時を想定し、2 と 3 の保全作業のことを総称してメンテナンスと呼ぶこととする。

本研究では、上述した作業ロボットの故障やメンテナンス、すなわち、信頼性を考慮に入れたシステムの運用、そしてその下でのシステム設計を行なう。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、投入されるロボットに依存する。すなわち、

- 安価で信頼性の低い作業ロボットを投入した場合、頻繁に起こり得るロボットの故障とそれに伴う修理、あるいは予防保全を数多く行わなくてはならない。そのため、コンテナの取扱い作業が遅れ、この遅延に対するペナルティが科されるか、それらを見越したロボット台数が必要となる。
- 一方、メンテナンスフリーのような高価で信頼性の高い作業ロボットを投入した場合、ロボット自体の初期投入コストがかかってしまう。

といったことが挙げられる。

そこで、作業ロボットの故障とメンテナンス、すなわち、修理と予防保全作業をシステム運用に反映させるため、信頼性工学^{15) 16)}における故障率と信頼度を導入する。ここで、故障率とは、ある時点で正常に動いているロボットが、引き続き単位時間内に故障する割合、信頼度とはある時間間隔（期間）においてロボットが正常に動いている確率のことである。そして、効率的なシステム運用のため、作業開始時、ロボットがその先の作業期間に対する信頼度をみずから算出し、この信頼度に基づき定期的な予防保全を受けながら、作業を行なうモデルを構築する。さらに、作業ロボットのメンテナンスを行なっても、要求仕様を満たすシステムを低コストで設計するため、ロボットの平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failure) に関する性能を、これらの投入台数とともに、適切に決定する。なお本研究では、作業ロボットの投入台数と MTBF の性能により得られるシステムの構築コスト、ならびに作業ロボットのメンテナンスにより、要求仕様を満たせなかった場合に科せられるペナルティコストを加えた、システムの運用コストを基に設計を行なう。

以上、本研究では、作業ロボットの信頼性を考慮したシス

テム運用を行なった下で、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および MTBF の性能設計を行なうことを目的とする。そのため、作業ロボットの予防保全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なう。そして、これらの有効性について論じる。

2. チャレンジングポイント

本研究では、Fig. 1 に示されている搬送システム内で稼働する AGV と ATC 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、適切にメンテナンスを行な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なう。すなわち、

- (1) 本搬送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、作業ロボットの定期的な予防保全も効率良く行わなくてはならない、といったシステム運用に関する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) ロボットのメンテナンスによって、コンテナ取扱い作業が遅れた場合、それによって生ずるペナルティを含め、システムの運用コストも考慮に入れた設計、すなわち、システム設計に関するチャレンジングポイントも同時に解決することが必要となる。

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 おのおのが遂行する作業の相互代替可能性を活かした、予防保全時作業モデルを構成する。具体的には、各作業ロボットが与えられた要求作業をこなしながら、この先ある期間作業したことを前提に見積もられる信頼度に基づき、予防保全を受けるモデルを構築する。このとき、Fig. 1 に示されているとおり、AGV は経路上ではなく、メンテナンスショップと呼ばれる作業場を設け、そこへ向かうようにする。一方 ATC は、予防保全を受ける際、コンテナを蔵置するためのロケーションの端へ向かうようにする。なお、コンテナ取扱い作業の手順の詳細については 3 章で、ロボットのメンテナンス時における作業モデルの詳細については 4 章で述べる。

チャレンジングポイント(2)に対しては、従来の設計方法論が構築コストおよび要求仕様のみ焦点をあてていたのに対し、本研究では、提案設計方法論の枠組みにおいて、作業ロボットのメンテナンスを考慮に入れ、作業遅延によるペナルティコストも含めた、システムの運用コストに基づいた設計を行なう。信頼性を考慮した搬送システムの設計方法論については、5 章で述べる。

3. 港湾コンテナターミナルにおける自動搬送システム

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。

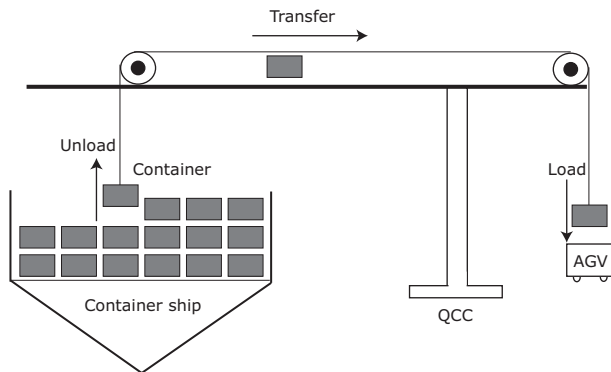


Fig. 2 Loading/Unloading Operation by QCCs in the Quay Area (side view)

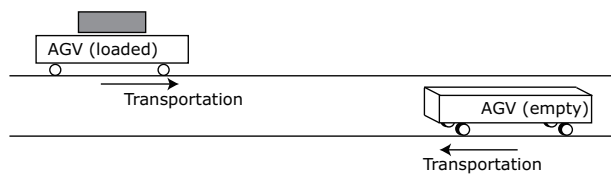


Fig. 3 Transportation by AGVs in the Transportation Area

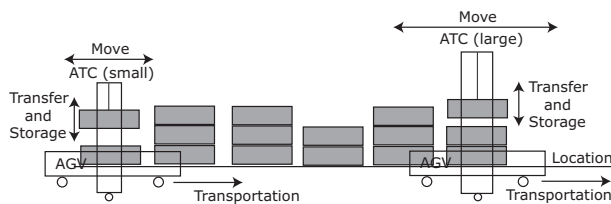


Fig. 4 Transferring/Storing Operation by ATCs in the Container Yard Area (side view)

水平型 AGV 搬送システムでは、コンテナ蔵置ロケーション群が、コンテナ船に対して水平に配置されている。一般的に、港湾コンテナターミナル AGV 搬送システムでは、AGV は一方向に巡回するようにしてコンテナの搬送作業を行っている。したがって Fig. 1 においても、AGV の搬送経路は、それぞれ時計回りに 1 本の単方向経路で構成されている。

本研究ではシステム設計のため、搬送システムを埠頭、搬送、蔵置の 3 種類の作業エリアに分割する。ここで、各エリアにおけるロボットの作業内容を Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4 のように定義する。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。実際の港湾コンテナターミナルでは、各ロケーション上に 1 台あるいは大小サイズの異なる 2 台の ATC が投入されている。したがって本研究でも、Fig. 1 が示す AGV 搬送システム内の各ロケーションに対して、大小サイズの異なる 2 台の ATC が投入されているものとした。そのため、これら 2 台の ATC は、相互に交差可能である。QCC の投入台数に関しては、埠頭エリアにおける岸壁のサイズにより決定される。

コンテナ船により埠頭まで運び込まれたコンテナは、埠頭エリアのコンテナ荷役位置にて QCC により AGV へと荷役

され、搬送エリアを AGV により搬送され、蔵置エリアにおいて AGV から ATC へと受け渡され、最後に ATC により蔵置される。

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) に従い、コンテナ船に積まれたコンテナをすべて所定の場所へ搬送・蔵置し終えるまで、システム内での作業を続ける。

- (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なう。
- (2) AGV は搬送エリアを通過して、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なう。
- (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) 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、この 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 からの指令を待つ。

4. メンテナンスを考慮したシステム運用

4.1 作業ロボットの故障とメンテナンス

Savsar は、フレキシブル生産システムにおける数種類の MTBF を有する作業機械に対して、それらのメンテナンスを行なうタイミングを決定するための方策を提案し、その有効性を示している¹⁷⁾。本研究では、ロボットはみずからの信頼度に基づき、この値がある閾値に達するかあるいは下回ったら、予防保全のためメンテナンスモードに入るよう設定した。さらに、作業ロボットが故障した場合には、修理を行なう。AGV ならびに ATC は、ある故障率に従って故障する。故障した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。

なお、作業ロボットの予防保全に関して、AGV も ATC も、すでに他の AGV あるいは ATC が予防保全を受けている状態にあったとしても、自分の信頼度が設定されている閾値以下となる期間作業を実行した場合、メンテナンスモードに入るものと設定した。すなわち、場合によっては同時刻に複数台の作業ロボットがメンテナンスモードになるようにした。ここで、メンテナンスモードとは、作業ロボットが予防保全を受ける状態になることであり、本研究では現場の作業者の数を考慮し、AGV も ATC もメンテナンスモードに入っているもののうち、それぞれ 1 台のみが予防保全を受けられるものとした。このとき、他のロボットの作業の妨げにならないよう、コンテナを ATC へ受け渡した AGV は、搬送経路の

外に存在するメンテナンスショップへ向かい (Fig. 1 参照), コンテナを蔵置し終えた ATC は, 作業を行なっているコンテナ蔵置ロケーションから外れて予防保全を受ける. 予防保全を受ける時間は故障の場合と同様に, 部品の点検, 消耗品の交換, 主要部品の交換を行なう場合に応じて決定される.

4.2 ロボットの予防保全時における作業モデル

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, 2 章で述べたとおり, 同じ機能を有する当該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, 作業ロボットの予防保全を効率良く行な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ため, 上述したとおり, メンテナンスショップを設けることにより, システムとしての並列化を行なった. すなわち, AGV がすべ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, 本搬送システムは稼働する. なお, AGV はメンテナンスショップに進入してきたものから順に予防保全を受けるものとした.

一方, ATC に関しては, 3.1 節で述べたとおり, 1 ロケーションに 2 台投入されているため, あるロケーション上の 1 台の ATC がメンテナンスモードに入ったとしても, もう 1 台の ATC によりこのロケーションでの作業は遂行される. しかしながら, 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 は予防保全時における作業を遂行する.

- ATC が稼働するロケーション群のうち, 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 から優先的に予防保全を受ける.
- すべてのロケーションにて, いずれかの ATC が作業を行なっている場合は, メンテナンスモードに入った ATC から順に予防保全を受ける.

Fig. 5 に, 1 台の ATC がメンテナンスモードになった際, もう一方の ATC による AGV とのコンテナ受け渡し, 所定位置へのコンテナ蔵置を行なう作業を示す. Fig. 5(a) では 2 台の ATC が作業を行なっているが, Fig. 5(b) では片方の ATC がメンテナンスモードに入る. このとき, もう一方の ATC はみずからの作業を終えると, メンテナンスモードに入った ATC の作業をサポートするために, 上方で作業待機中の AGV のところへと向かう (Fig. 5(c) 参照). ロケーション上でのコンテナ受け渡しおよび蔵置作業に関しては, 1 台の ATC がメンテナンスモードに入った場合においても, このような作業モデルを採用することにより, 可能な限り作業を中断することなくシステムを運用することができる.

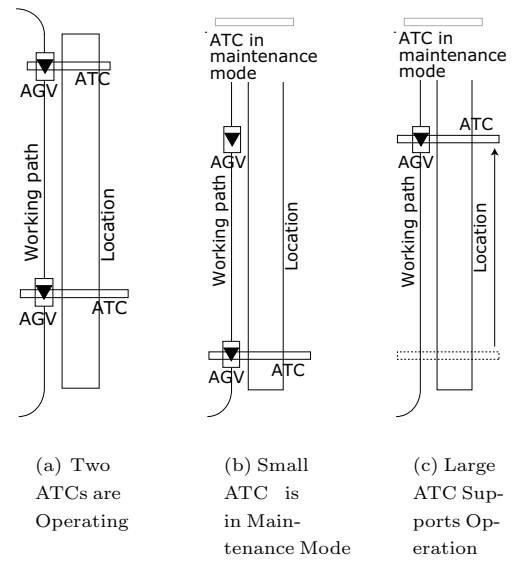


Fig. 5 Operation Model in Maintenance Mode

5. 信頼性を考慮した設計方法論

5.1 設計パラメータ

本研究では, 以下の 2 つを搬送システムを設計するためのパラメータとする.

- 作業ロボットの投入台数 (AGV, ATC)
- 作業ロボットの平均故障間隔に関する性能 (MTBF)

作業ロボットの投入台数に関しては, AGV と ATC を具体的な設計パラメータとする. ただし, 設計プロセスにおいてむやみに投入台数が増加するのを回避するため, AGV ならびに ATC の最大投入台数を設計の前段階で設ける. 本搬送システム内において稼働するロボットとして, QCC も存在するが, 3.1 節でも述べたとおり, 岸壁のサイズといった制約により設計パラメータとはしない. 作業ロボットの MTBF の詳細に関しては, 現実的な範囲内にていくつかの解の候補を設定し, この中から要求仕様に対して最も適した値を決定する.

5.2 作業ロボットの故障率と信頼度

信頼性を考慮し, 作業ロボットを構成する部品が, 時間とともに劣化し, 故障率が増加すること, すなわち, 故障率を表すバスタブ曲線の磨耗故障期 (IFR: Increasing Failure Rate) を想定する. この場合, 作業ロボットの故障が発生する前に定期的に点検し, 耐用寿命に達した部品を交換するための予防保全が有効である.

そこで本研究では, 作業ロボットの故障時間間隔の確率密度関数がワイブル分布に従うものとし, これに基づき, ロボットの故障率ならびに信頼度を見積もる. 各ロボットは, 時刻 t にて式 (1) が示す故障率により故障し, また, 作業期間 t ($0 \sim t$) に対する信頼度は, 式 (2) から算出する. したがって, この作業期間 t に対する信頼度を基に, 予防保全を行なうタイミングを決定する. ただし, m はワイブル分布の形状パラ

メータ, η は尺度パラメータのことであり, $m > 0, \eta > 0$ である.

$$h(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^m} \quad (1)$$

$$R(t) = \exp \left[- \left(\frac{t}{\eta} \right)^m \right] \quad (2)$$

$0 < m \leq 1$ のときのワイブル分布の形状は, バスタブ曲線の初期故障期 (DFR: Decreasing Failure Rate) ならびに偶発故障期 (CFR: Constant Failure Rate) となる. したがって, IFR に対応したワイブル分布とするため, 形状パラメータを $1 < m$ とする. 尺度パラメータ η は, 時間軸上での単位を規定しており, η を変化させることにより, 分布の形状時間軸方向に伸縮することができる. 形状パラメータ, 尺度パラメータ, そして平均故障間隔 MTBF との関係は, 式 (3) となる. ここで $\Gamma(1/m + 1)$ とは, 形状パラメータにより得られるガンマ関数値のことであり, ガンマ関数は, $\Gamma(n) = \int_0^\infty \exp(-x)x^{n-1}dx$ と定義される.

$$MTBF = \eta \Gamma \left(\frac{1}{m} + 1 \right) \quad (3)$$

したがって本研究では, ある与えられた形状パラメータと MTBF の解の候補から, 式 (3) により尺度パラメータ η を求め, これに基づき, 故障率 $h(t)$ と信頼度 $R(t)$ を算出する. そして, $h(t)$ に従い故障した作業ロボットの修理を行ない, かつ, 作業期間 t に対する信頼度 $R(t)$ を基に予防保全を行ないながら, システムを運用し, その際のコストを考慮した上で, 要求仕様に対する作業ロボットの投入台数設計および MTBF の設計を行なう.

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 (4)) を評価する. 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ロボットがすべてのコンテナ搬送を完了できなかった, すなわち, 作業未完遂だった場合, そのときの船内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,

α	AGV の導入に関するコスト係数,
β	ATC の導入に関するコスト係数,
γ_{agv}	AGV の MTBF に関するコスト係数,
γ_{atc}	ATC の MTBF に関するコスト係数,
δ	ペナルティコスト係数,
n_u	要求作業時間内における作業未完遂回数,
n_{con-i}	要求作業未完遂時における, コンテナ残存数, である. ここで, n_u の要求作業時間内における作業未完遂回数とは, 入港してきたコンテナ船に対し, 与えられた要求作業時間内に, 船内に積まれているすべてのコンテナを搬送できなかった場合の回数のことである. 例えば, j 隻入港してきたコンテナ船のうち, 3 隻のコンテナ船に積まれているコンテナの搬送を, 要求作業時間内に完遂できなかった場合, $n_u = 3$ となる.

5.4 設計プロセス

本設計プロセスは, 1. 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, すなわち構築コストを算出するステップ, 2. 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ない, システム運用コストにより最終的な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.

第 1 ステップにおいて, 作業タスクを実行中, どの AGV ならびに ATC も故障せず, かつメンテナンスモードに入らない場合, 著者らによって提案されている数理モデルとシミュレーションをハイブリッドに組合せた設計方法論を適用することにより, 投入台数に関する設計パラメータの算出を行なう. このとき, MTBF はシミュレーションに実装することで, それらの組合せを探索する. ただし, 作業ロボットが故障した場合, 4.1 節で述べたとおり, その場にて必要に応じた修理が施される. そのため, 当該ロボットが故障した場所を含む作業エリアを通過するのに要する時間は, 通常時に比べ膨大なものになってしまう. また, 予防保全を行なっている期間はロボット台数が減るため, 投入台数に対してあらかじめ数理モデルにより算出したスループットを満たせなくなってしまう. したがって, 作業ロボットに対するメンテナンスを行なった場合, 従来研究にて提案した設計方法論では, 解となる設計パラメータの組合せを算出することが困難になってしまう. この場合, シミュレーションにより設計パラメータの組合せを変え, 得られたスループットを与えられた要求仕様に対して評価し, 設計パラメータの組合せを算出する.

第 2 ステップでは, システム運用の観点から, コンテナ船が N 隻入港した場合を想定し, 第 1 ステップで算出された設計パラメータに基づいて, N 回のシミュレーションを行なう. なお, ハイブリッド設計方法論の詳細な説明に関しては, 文献^{3) 4)}に述べられているため, 本稿では, 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.

Fig. 6 に, シミュレーションによる設計プロセスを示し, その詳細を以下に記す. 本設計プロセスにおいて, 第 1 ステップに含まれる設計プロセス (4) では, ATC の投入台数をインクリメントしても AGV の投入台数が減少しない場合, 設

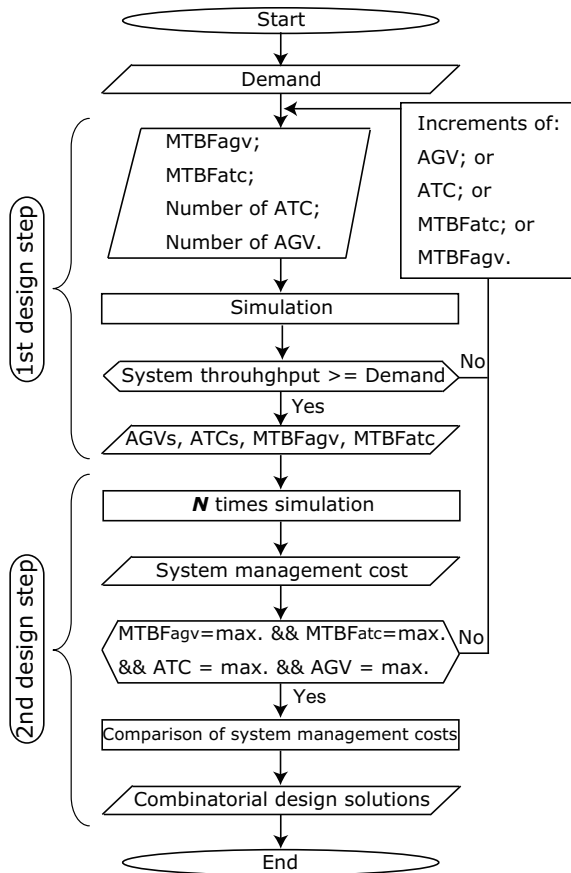


Fig. 6 Simulation-based Design Process

計プロセスは終了し、第2ステップに含まれる設計プロセス(8)へと進む。

- (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なう。
- (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 N 回の搬送シミュレーションを行なう。
- (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, $MTBF_{atc}$, $MTBF_{agv}$ 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すべ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。

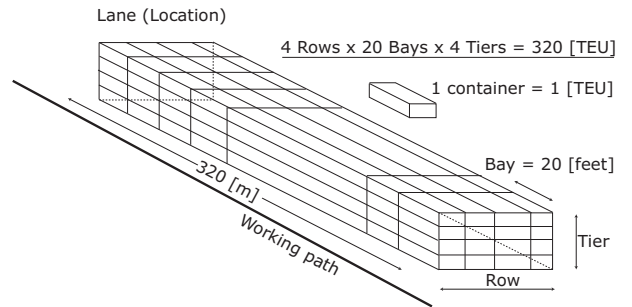


Fig. 7 Container Storage Location

6. システム設計

6.1 条件設定

本節では、これまでに述べてきた作業ロボットの故障ならびにメンテナンスを考慮したAGV搬送システムの運用、および本設計方法論によるシステム設計を行なうための具体的な条件設定を行なう。なお、以下に記す各条件は、一般的な港湾コンテナターミナルを考慮した上で設定されているが、必要に応じて変更することは可能である。

6.1.1 システムレイアウト

1隻の船が着岸する埠頭1パースのサイズは最大で約350[m]程度である。そこで、Fig. 1が示すAGV搬送システムでも、コンテナ船が着岸するスペースは350[m]とした。また、埠頭から蔵置エリアまでの距離、蔵置エリア内の各ロケーションの間隔は、それぞれ110[m], 32[m]とした。蔵置エリアにおけるコンテナ蔵置ロケーションは、Fig. 7が示すとおり、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。

6.1.2 作業戦略

港湾コンテナターミナルでは、入港した船から、指定のコンテナすべてが蔵置されるまでの時間とそのときに投入された機器の台数から、埠頭と蔵置エリアでの作業平均時間が算出され、これがシステム全体での性能として評価される。そこで本研究においても、3.2節の手順(1), (5), (7)に関して、平均作業時間を設定する。すなわち、QCCの荷役時間をコンテナ船に積み込まれているコンテナの状態に依存することなく、一定の時間とした。また、AGVからATCへのコンテナの受け渡し時間ならびにATCによるコンテナ蔵置時間に関しても同様に、ロケーション上のコンテナ蔵置位置にかかわらず一定とした。手順(2), (3), (4)では、“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戦略⁹⁾”を採用する。ただし、ロケーション上の蔵置位置ならびに手順(6)におけるQCCの選択はランダムに行なわれるものとした。

6.1.3 ロボットの作業性能

Table 1にAGV, ATC, およびQCCの作業性能を示

Table 1 Operation Performance of AGV, ATC, and QCC

AGV		loaded / empty
max. transportation speed	[m/s]	5.56 / 6.94
acceleration	[m/s ²]	0.15 / 0.15
deceleration	[m/s ²]	0.63 / 0.63
ATC		
max. moving speed	[m/s]	2.5
acceleration	[m/s ²]	0.1
deceleration	[m/s ²]	0.4
storing time	[s]	30
transferring time	[s]	30
QCC		
loading/unloading time	[s]	60

す¹⁸⁾。AGV はコンテナを搬送中の場合と非搬送の場合でそれぞれ最高移動速度が異なるため、それらは“loaded”および“empty”で示されている。ATC は移動速度以外の性能として、コンテナ蔵置エリアにおけるコンテナの受け渡しならびに蔵置作業に要する時間が示されている。QCC は自身による移動は行わないため、埠頭エリアにおけるコンテナの荷役作業に要する時間のみが示されている。Table 1 より、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] となる。

6.1.4 ロボットの信頼性

MTBF の性能に関しては、文献^{19) 20)}を参考にした。そして、AGV と ATC でそれぞれ Table 2 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。また、5.2 節で述べたとおり、2 種類の形状パラメータとして、 $m = 2$, $m = 3$ を設けた。各作業ロボットの予防保全を行なうタイミングに関しては、作業開始時に作業期間 t に対する信頼度を算出し、 $R(t) \leq 0.9$ となる期間 t を求め、作業時刻がこの t に達した時点でメンテナンスモードに入るよう設定した。予防保全を受けたロボットの信頼度は、その時点で $t = 0$ とし、 $R(t) = 1.0$ へとリセットする。またこれに伴い、故障率も $h(t) = 0.0$ へリセットされる。故障したロボットに対しては、修理後の時点で $t = 0$ とし、 $R(t) = 1.0$, $h(t) = 0.0$ とリセットする。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。4.1 節で述べたメンテナンス時間に関しては、作業ロボットの部品点検、消耗部品の交換、主要部品の交換を行なう場合を考慮し、AGV が 0.3 ~ 0.5 [hour]、ATC が 0.2 ~ 0.4 [hour] を費やして予防保全が行なわれるものと設定した。なお、これらの時間はランダムに決定される。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なわれるものとした。これら修理時間もランダムに決定される。なお、ロボットの故障率を含め、信頼度の初期値、ならびにメンテナンスに要する時間を決める際には、すべて一様乱数を使用した。

Table 2 MTBF of AGV and ATC

Grade	MTBF _{agv} [hour]	MTBF _{atc} [hour]
low	50	40
normal	100	80
high	150	120
higher	200	160

6.1.5 コスト係数

5.3 節で説明したそれぞれの係数に関して、これらの値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なった際のコストを含めるため、 γ_{agv} と γ_{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係数は $\delta = 0.05$ とした。

6.1.6 設計

5.4 節で述べた設計プロセスに関して、コンテナ船に積み込まれている搬送すべきコンテナの数、すなわちタスクの総数は 600 [TEU]、要求仕様は 10 ~ 130 [TEU/hour] まで 20 ずつとした。ただし、Fig. 7 が示すとおり、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なう。設計対象となる AGV の最大投入台数に関しては 30 台、ATC の最大投入台数に関しては 20 台とした。したがって、ある設計パラメータの組合せが要求仕様を満たさなかった場合、AGV は 1 台、ATC は 2 台、MTBF_{agv} は 50、MTBF_{atc} は 40 ずつインクリメントされる。

6.2 組合せ設計パラメータの比較

Table 3, Table 4 は、形状パラメータを $m = 2$, $m = 3$ とし、各要求仕様に対して算出された設計パラメータの組合せ (第 1 ステップ) を基に、10 回のシミュレーションを行ない (第 2 ステップ)、得られたシステムの運用コストのうち最小値・最大値をそれぞれ上段・下段に示している。なお、上段は組合せ設計解である。

各要求仕様に対して算出された組合せ設計解 (上段) に着目すると、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、要求仕様 110 [TEU/hour] までは 4 台、130 [TEU/hour] に対しても $m = 2$ では 4 台、 $m = 3$ では 6 台という結果となった。また、MTBF_{agv} と MTBF_{atc} は、AGV と ATC がそれらの投入台数によりどれだけシステムに対して影響を及ぼしているかによって、それぞれ適切に設計されている。例えば、Table 3 では、要求仕様 10 ~ 110 [TEU/hour] に対しては、AGV の投入台数を増加させるのみで十分に対応できているため、ATC の投入台数および AGV と ATC の MTBF をそれぞれ MTBF_{agv} = 50, MTBF_{atc} = 40 [hour]

Table 3 $m = 2$ Combinatorial Design Solutions: Number of AGVs and ATCs, and MTBF of AGV and ATC

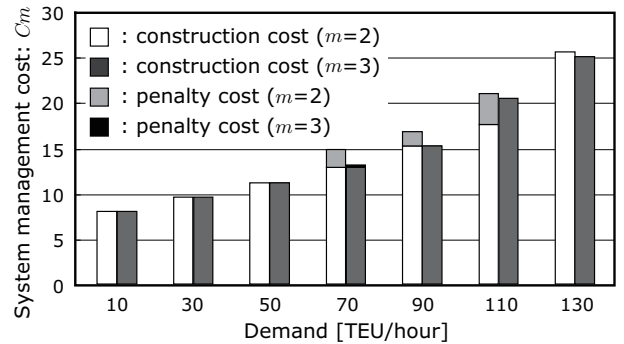
Demand	AGVs	ATCs	MTBF _{agv}	MTBF _{atc}	C_m
10	2	4	50	40	8.0
	2	4	200	160	20.0
30	4	4	50	40	9.6
	4	4	200	160	24.0
50	6	4	50	40	11.2
	6	4	200	160	28.0
70	8	4	50	40	14.9
	8	8	100	120	33.3
90	11	4	50	40	16.8
	10	6	150	160	41.1
110	14	4	50	40	21.0
	10	12	150	160	63.0
130	12	4	50	160	25.6
	20	16	50	120	82.6

Table 4 $m = 3$ Combinatorial Design Solutions: Number of AGVs and ATCs, and MTBF of AGV and ATC

Demand	AGVs	ATCs	MTBF _{agv}	MTBF _{atc}	C_m
10	2	4	50	40	8.0
	2	4	200	160	20.0
30	4	4	50	40	9.6
	4	4	200	160	24.0
50	6	4	50	40	11.2
	6	4	200	160	28.0
70	8	4	50	40	13.1
	8	4	200	160	32.3
90	11	4	50	40	15.2
	4	10	50	160	43.2
110	14	4	100	40	20.4
	13	12	100	160	65.4
130	13	6	100	80	25.0
	21	14	50	160	81.0

と低機能化設計することができた。Table 4でも同様に、10～90 [TEU/hour] に対して、 $MTBF_{agv} = 50$, $MTBF_{atc} = 40$ [hour] と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、それを満たす搬送システムの構築が可能であることを示している。以降、Table 3では、130 [TEU/hour] の要求仕様に対して ATC の投入台数は4台のままだが、 $MTBF_{atc}$ が160 [hour] に高機能化設計され、Table 4では、110と130 [TEU/hour] の要求仕様に対して、AGV, ATC の投入台数を増加させ、さらに、それぞれの MTBF を高機能化設計する結果となった。

Table 3ならびに Table 4の各結果において、要求仕様が10～50 [TEU/h] では、上段の組合せ設計解と下段の組合せ設計パラメータを比較すると、AGV と ATC の投入台数はそれぞれ同じ値で最適値となっていることが分かる。しかしながら、下段では AGV と ATC の MTBF に関する値がそれぞれ解候補の中で最大値に設計されたため、これが原因となり、組合せ設計解によるシステム運用コストに対して、2.5倍コストがかかってしまう結果となった。70 [TEU/h] 以上の要求仕様に対しては、メンテナンスが原因となり、AGV と ATC の投入台数にも差が見られるようになり、その結果、システム運用コストは、2.23～3.23倍 (Table 3), 2.47～3.24倍

**Fig. 8** System Management Cost for Imposed Demands

(Table 4)となった。これらの結果より、AGV と ATC の MTBF も適切に設計すると、同じ要求仕様を満たす AGV と ATC の投入台数に関する設計パラメータの組合せでも、システムの運用コストは大きく異なり、このことから、作業ロボットの信頼度を考慮し設計することの必要性が示された。

6.3 考察

Fig. 8に、Table 3, Table 4の組合せ設計解から得られたシステム運用コストをそれぞれ棒グラフで示す。なお、棒グラフ中の異なる色は、システム運用コストに占める構築コストとペナルティコストの割合のことである。

$m = 2$ の結果より、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する結果となった。ただし、130 [TEU/hour] の要求仕様に対しては、Table 3にて、ATC の MTBF が160 [hour] に高機能化されたことにより、ペナルティコストが再び0となった。一方で、 $m = 3$ の結果では、形状パラメータを大きくしたにもかかわらず、70 [TEU/hour] 以外の要求仕様に対してはペナルティコストがかかっていないことが分かる。また、 $m = 2$ と $m = 3$ のシステム運用コストを比較すると、要求仕様が50 [TEU/hour] 以下では両方とも同じであることが分かる。これは、メンテナンスタイミングを決定する信頼度の閾値を $R(t) \leq 0.9$ としたことで、いずれの要求仕様に対しても、形状パラメータならびにメンテナンスの影響がほぼなかったことを意味している。ただし、要求仕様が70 [TEU/hour] 以上になると、これらがペナルティコストに影響し、システム運用コストに違いが見られるようになった。このとき、同じ要求仕様で運用コストを比較すると、 $m = 3$ の結果がすべてに対して小さい値となった。これは、Fig. 9が示すように、形状パラメータを $m = 2$ としたことにより、 $m = 3$ に比べ、各ロボットの信頼度 $R(t)$ の値が先に0.9以下となり、コンテナ取扱い作業終了までに、より多くの予防保全が行なわれたためである。故障率 $h(t)$ に関しては、時間 t に対して $m = 2$ で1次直線、 $m = 3$ で2次曲線に沿って増加し、これらの平均値が $R(t) \leq 0.9$ となる t の範囲では、ほぼ同じ値となった。す

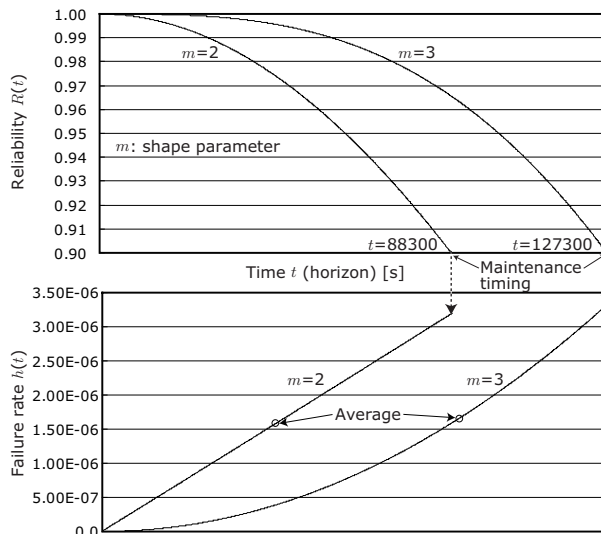


Fig. 9 Reliability and Failure Rate of an AGV

Table 5 Simulation Result with Combinatorial Design Solutions

Demand	n_u	n_{con-i} [TEU]	$(C_p/C_m) \times 100$ [%]	$n_{con-i}/6000$ [%]
$m = 2$				
10	0	0	0.0	0.0
30	0	0	0.0	0.0
50	0	0	0.0	0.0
70	3	41	13.9	0.68
90	1	31	9.3	0.52
110	2	68	16.3	1.13
130	0	0	0.0	0.0
$m = 3$				
10	0	0	0.0	0.0
30	0	0	0.0	0.0
50	0	0	0.0	0.0
70	1	7	2.7	0.12
90	0	0	0.0	0.0
110	0	0	0.0	0.0
130	0	0	0.0	0.0

なわち、両者の運用コストの差は、作業ロボットの故障とそれに対する修理ではなく、予防保全が原因であったことが分かる。なお、Fig. 9は、AGVのMTBFを $MTBF_{agv} = 50$ [hour]、信頼度の初期値を $R(t) = 1.0$ と設定し、1回目のメンテナンスモードに入るまでの信頼度曲線ならびにそれに対応した故障率を、それぞれ $m = 2$ と $m = 3$ に対して示している。

Table 5に、10回の搬送シミュレーションを行なった際の、要求作業未完了だった回数(n_u)、そのときのコンテナ船での残存コンテナ総数(n_{con-i})、システム運用コストに占めるペナルティコストの割合($(C_p/C_m) \times 100$)、総搬送コンテナ数(600×10 [TEU])に対する、残存コンテナ総数の割合($n_{con-i}/6000$)を示す。

この結果から、要求仕様に対して、作業未完了回数とそのときのコンテナ船での残存コンテナ総数が単調増加傾向にないことが分かる。例えば $m = 2$ の場合、要求仕様70 [TEU/hour]

Table 6 Simulation Result without the Preventive Maintenance

Demand	$m = 2$				$m = 3$			
	C_m	C_p	n_u	n_{con-i}	C_m	C_p	n_u	n_{con-i}
10	8.0	0.0	0	0	8.0	0.0	0	0
30	9.6	0.0	0	0	9.6	0.0	0	0
50	11.2	0.0	0	0	12.2	0.97	1	19
70	18.6	5.8	4	117	22.0	9.16	4	183
90	25.3	10.1	5	202	26.6	11.4	5	227
110	39.6	22.0	4	439	37.8	17.4	4	348
130	105.4	79.8	10	1596	72.5	47.5	10	949

では、要求作業未完了が3回あったにもかかわらず、残存コンテナ数の総数は41 [TEU]、一方、要求仕様110 [TEU/hour]に対しては、2回の要求作業未完了だったにもかかわらず残存コンテナの総数は68 [TEU]となった。 $m = 3$ とした場合では、要求仕様70 [TEU/hour]に対して1回のみ要求作業未完了となり、そのときの残存コンテナ総数は7 [TEU]という結果となった。これは、6.1.4項で設定したランダム性に基づいて起こるロボットの故障とそのときの場所、さらにはメンテナンス時間が原因であると考えられる。しかしながら、一様乱数に基づいたシミュレーションのため、複数隻のコンテナ船を想定し、数回～数十回のシミュレーションを実行した上で運用コストを算出することにより、このランダム性が運用コストに与える影響を抑えることができる。そのため、Fig. 8の運用コストは、要求仕様に対して単調増加の傾向を示す結果となった。

以上のことから、Fig. 8の示すシステム運用コストにおけるペナルティコストの割合は、 $9.3 \sim 16.3 (m = 2)$ [%]、 $2.7 (m = 3)$ [%]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 $0.52 \sim 1.13 (m = 2)$ [%]、 $0.12 (m = 3)$ [%]程度であり、実際の港湾におけるコンテナ取扱い作業を考慮しても、現実的な値であると言える。また、本研究における設計条件として、ペナルティコストに関する係数を $\delta = 0.05$ として与えたが、港湾コンテナターミナルを管理する会社ならびに扱うコンテナなどによってこの係数を低く設定した場合、さらにペナルティコスト、すなわちシミュレーションのランダム性が設計結果に及ぼす影響を少なく低く見積もることは可能である。

6.4 予防保全の有効性

Table 6は、Table 3とTable 4にて各要求仕様に対して算出された組合せ設計解に基づき、信頼性を考慮せず、すなわち、作業ロボットが故障するまで予防保全を受けないシステム運用の下、シミュレーション実験を行ない、その結果を示している。なお、故障したロボットに対しては、その場にて修理を行なった。そして、修理後の時点で $t = 0$ とし、 $R(t) = 1.0$ 、 $h(t) = 0.0$ とリセットした。

作業期間 t に関係なく、ロボットに対する定期的な予防保全を行なわないシステム運用下では、点検にともなう作業時間の遅延ならびにそれに付随するペナルティコストは無視することができる。しかしながら、時間が経過するにつれ故障率が増大し、その結果、 $m = 2$ の場合では要求仕様が70 [TEU/hour]

以上, $m = 3$ の場合では 50 [TEU/hour] 以上に対して, 頻繁に発生する作業ロボットの故障, そしてそれに伴う修理の影響が大きくなっていることが分かる. これにより, ペナルティコストも増加している. さらに, 故障の影響は要求仕様が高くなるにしたがって増大し, 130 [TEU/hour] に対しては, 10 回すべてのシミュレーションでコンテナ搬送作業が未完遂となった.

これらの結果から, 作業ロボットの信頼性を考慮に入れ, 信頼度に基づき定期的な予防保全を行なうシステムの運用を行ないながら, 投入台数や MTBF を設計するとことの有効性が示された.

7. 結 論

本研究では, 港湾コンテナターミナルにおける AGV 搬送システムを題材に, 作業ロボットの信頼性を考慮した自動搬送システムの運用ならびに設計を行なった. 信頼性を考慮するため, 作業中の各ロボット (AGV, ATC) は, 故障率により故障し, 修理され, さらに信頼度により定期的な予防保全を受けるため, 効率的なシステム運用を行なうことを目的としたメンテナンス時における作業モデルを構築した. そして, 本搬送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とともにそれらの平均故障間隔 MTBF も設計対象とした設計方法論を提案した. 設計プロセスでは, システムの構築コストならびにペナルティコストを加えたシステム運用コストを考慮することで, AGV と ATC の投入台数ならびに MTBF の組合せ設計解を算出した. そして, 設計結果より, 信頼性を考慮し, メンテナンス作業を取入れたシステム運用の必要性, ならびに, その下でのシステム設計を行なうことの有効性を示した.

参 考 文 献

- 1) D. Steenken, S. Voss, and R. Stahlbock: Container Terminal Operation and Operations research - A Classification and literature review, *OR Spectrum*, **26-1**, 3/49(2004)
- 2) Hans-Otto Günther and K.H. Kim: Container Terminals and Automated Transport Systems, Springer-Verlag, (2005)
- 3) 星野智史, 太田順, 篠崎朗子, 橋本英樹: 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, 計測自動制御学会産業論文集, **4-1**, 1/9(2005)
<http://srv01.sice.or.jp/~ia-j/>
- 4) S. Hoshino, J. Ota, A. Shinozaki, and H. Hashimoto: Hybrid Design Methodology and Cost-effectiveness Evaluation of AGV Transportation Systems, *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, **4-3**, 360/372(2007)
- 5) C.-I. Liu, H. Jula, K. Vukadinovic, and P. Ioannou: Automated guided vehicle system for two container yard layouts, *Transportation Research - Part C*, **12**, 349/368(2004)
- 6) K.H. Kim and J.W. Bae: A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals, *Transportation Science*, **38-2**, 224/234(2004)
- 7) M. Grunow, H.-O. Günther, and M. Lehmann: Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals, *OR Spectrum*, **26-2**, 211/235(2004)
- 8) J.J.M. Evers and S.A.J. Koppers: Automated guided vehicle traffic control at a container terminal, *Transportation Research - Part A*, **30-1**, 21/34(1996)
- 9) 星野智史, 太田順, 篠崎朗子, 橋本英樹: 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, **4-14**, 98/108(2005)
<http://srv01.sice.or.jp/~ia-j/>
- 10) S. Hoshino, J. Ota, A. Shinozaki, and H. Hashimoto: Improved design methodology for an existing automated transportation system with automated guided vehicles in a seaport container terminal, *Advanced Robotics*, **21-7**, 371/394(2007)
- 11) S. Hoshino and J. Ota: Integrated Design Methodology for an Automated Transportation System in a Seaport Terminal, *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 858/863(2007)
- 12) S. Hoshino and J. Ota: Performance Design of Operating Robots in a Seaport Container-Handling System, *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, 692/697(2007)
- 13) B. M. Beamon: "Performance, reliability, and performability of material handling systems," *International Journal of Production Research*, **3-2**, 377/393(1998)
- 14) 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)
- 15) 菅野文友: 信頼性工学, コロナ社 (1980)
- 16) 市川昌弘: 信頼性工学, 裳華房 (1987)
- 17) M. Savsar: Performance Analysis of an FMS Operating Under Different Failure Rates and Maintenance Policies, *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, **16-3**, 229/249(2005)
- 18) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.: Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide (2004)
- 19) C. Roser, M. Nakano, M. Tanaka: Comparison of bottleneck detection methods for AGV systems, *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, 1192/1198(2003)
- 20) T. Yamagishi: The world's first automated reticle handling system using OHT, *2003 IEEE International Symposium on Semiconductor Manufacturing*, 21/24(2003)

[著 者 紹 介]

星野 智史 (Satoshi Hoshino) (正会員)



1978年10月28日生. 2006年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修了. 同年東京工業大学資源化学研究所助手. 2007年より同助教, 現在に至る. 群知能ロボット, 大規模生産/搬送システムの運用・設計等の研究に従事. IEEE, 日本ロボット学会, 日本機械学会, 計測自動制御学会, 化学工学会の会員. 博士(工学).

太田 順 (Jun Ota) (正会員)



1965年2月19日生. 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. 1991年東京大学工学部助手. 1994年同講師. 1996年より東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻准教授. この間, 1996~1997年スタンフォード大学客員研究員. 2009年同教授, 現在に至る. 群知能ロボットと移動知, 大規模生産/搬送システムの設計, ヒューマンアナリシス等の研究に従事. 博士(工学).