

港湾コンテナターミナルにおける 作業ロボットの故障を考慮したシステム運用

星野 智史¹ 太田 順²

¹ 東京工業大学 ² 東京大学

System Operation Considering the Malfunction of Robots in a Seaport Container Terminal

Satoshi HOSHINO¹ Jun OTA²

¹Tokyo Institute of Technology ²The University of Tokyo

Abstract For the efficient maintenance and repair of robots, in this paper, we focus on suitable operational models in order to utilize the mutual substitutability of the operation among robots that have similar function. For this purpose, we categorize the system operational status into three, and develop operational models of the robots. After that, we propose a flexible system management method. By applying the proposed method, each robot responds to changing operational statuses reactively with the developed hybrid operational models. Finally, we discuss the effectiveness of the proposed management method on the basis of the system throughput.

Key Words: Reliability, maintenance, malfunction, reactive and hybrid operation, mutual substitutability, AGV, ATC.

1. 緒言

海に面した港湾コンテナターミナルでは、多種多様な作業機械がロボットとして稼働している。当該ターミナルシステムに対しては、特に塩害などの影響から、システム内で稼働する作業ロボットの信頼性、すなわちメンテナンスや故障などを考慮する必要がある。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¹⁾。一方、港湾コンテナターミナルシステムを扱った従来研究では、著者らによる作業ロボットの信頼度設計を行ったものにとどまっている²⁾。ただし、作業ロボットは信頼度に基づきメンテナンスを受けるものの、故障は全く生じないものと仮定されている。

実際の港湾コンテナターミナルシステムでは、作業ロボットが偶発的に故障することを前提に、メンテナンスや修理を行ったとしても作業効率の損失を最小とするため、あらかじめ多めに見積もられた数のロボットが用意され、それらが状況に応じて使用されている。しかしながらこのような対策では、必要とされるロボットの投入台数は増加してしまい、その結果システムの施設コストが高くなってしまう。そのため本研究では、システム運用の側面から当該問題にアプローチする。

Fig.1 に本研究で対象とする港湾コンテナターミナルにおける自動搬送システムを示す。当該搬送システムは水平型のAGV (Automated Guided Vehicle) 搬送システムと呼ばれるもので、垂直型のレイアウトを有する同様のシステムと比べ、作業ロボットを効率的に稼働させることで、その有効性が示されている³⁾。そこで本研究では、当該システム内で稼働する作業ロボットの効率的なメンテナンスならびに故障とそれに対する修理までを考慮したシステム運用を行う。

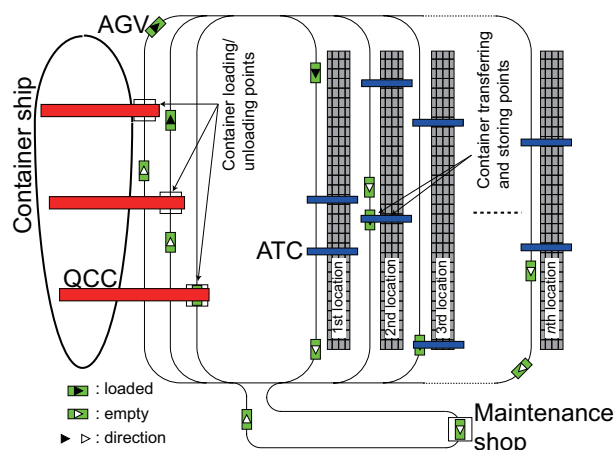


Fig.1 Horizontal AGV transportation system in a seaport container terminal (top view)

2. 港湾コンテナターミナルシステム

2.1 水平型 AGV 搬送システム

本研究では、Fig.1 に示す水平型 AGV 搬送システムを対象とする。当該システム内では、埠頭側に QCC (Quay Container Crane)、陸側にある蔵置ヤード内には ATC (Automated Transfer Crane)、海から蔵置ヤードをコンテナ搬送のために往来する AGV がそれぞれ稼働している。本稿では以降、AGV と ATC のことを作業ロボットと呼ぶこととする。コンテナを蔵置するためのロケーションは、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。また、埠頭サイズならびに蔵置ロケーションのサイズより、本研究では、埠頭側に合計で 3 台の QCC を、1 ロケーションに 2 台の ATC を投入するものとした。

2.2 コンテナ取扱い作業

本研究では、数ある港湾コンテナ物流のうち、以下に記す船から蔵置ヤードまでのコンテナ荷役、搬送、受渡し、蔵置といったコンテナ取扱い作業のみに焦点を絞る。

1. QCC が船から AGV へコンテナを荷役する。
2. AGV がヤード内の目的蔵置ロケーションまでコンテナを搬送する。
3. ヤードレーンに進入直後、AGV がコンテナ受渡し相手となる ATC を呼び出す。
4. AGV から ATC へのコンテナ受渡し作業を開始する。
5. ATC へコンテナの受渡しを終えた AGV は、QCC のところへと向かう。
6. コンテナを受け取った ATC は、コンテナを蔵置する。

コンテナ取扱いタスクは 3 台の QCC から均等に発生、すなわち、各 QCC から均等にコンテナの荷役が行われ、AGV に荷役されたコンテナについてはコンテナ蔵置ヤード内の目的蔵置ロケーションに対して均等に割り当てられるようにした。なお、作業タスクは、ロケーション上で稼働している ATC の総移動量が最小化されるようにその実行順序をスケジューリングする⁴⁾。

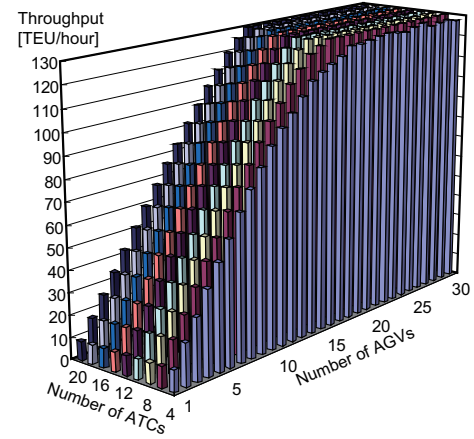
3. チャレンジングポイント

Fig.2 に AGV と ATC の投入台数に対するコンテナ取扱い作業のシミュレーション結果を示す。Fig.2(a) は作業ロボットのメンテナンスを行わず、かつ作業ロボットの故障が全く発生しない理想的な状態のシステムスループット、Fig.2(b) はメンテナンスを定期的に行い、かつ作業ロボットの偶発的な故障に対して修理を行ったシステムのスループットを示している。なお、Fig.2(b) では AGV の平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failure) を 50 [hour]、ATC の MTBF を 40 [hour] とした。この結果から、Fig.2(a) では AGV と ATC の投入台数にともないスループットも増加し、最終的に 130 [TEU/hour] 周辺に収束していることが分かる。一方、Fig.2(b) では、スループットは最大でも 120 [TEU/hour] 以下となり、台数によっては収束せず、メンテナンスと故障の影響によりスループットが大幅に減少してしまう場合があった。

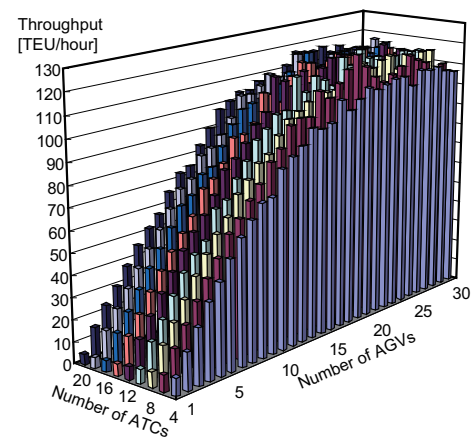
この結果は、メンテナンスを行わず、かつ故障が全く発生しないことを前提とした運用法や、定期的なメンテナンスは行うが、故障ロボットに対して修理を行いながらもシステムを効率良く稼働させるための作業モデルがない運用法では、作業ロボットの効率的なメンテナンスならびに偶発的な故障に対する修理を考慮したシステムを運用するのに不十分であることを示している。そこで本研究では、以下のチャレンジングポイントを解決する必要がある。

- メンテナンスや故障により修理を受けるロボットが発生した場合、当該ロボットが他の作業ロボットの妨害とならないよう、可能な限り Fig.2(a) が示す結果に近づくようなシステム運用を行う。

そこで本研究では、各ロボットの作業の相互代替可能性を活かすための作業モデルを考える。そのため、当該システムの稼働状況を、1. ロボットが 1 台もメンテナンスを受けずか



(a) No robots maintenance and malfunction



(b) Robots maintenance and malfunction

Fig.2 Container-handling simulation: system throughputs

つ故障せず通常通り稼働しているシステム、2. ロボットが 1 台でもメンテナンスモードに入った際のシステム、3. ロボットが 1 台でも故障した際のシステム、の 3 つに分類し、これらの状況に対する適切な作業モデルを構築する。そして、1 ~ 3 の各状況に対してロボットが各自のハイブリッド作業モデルをリアクティブに切替えることで、メンテナンスや故障による稼働状況の変動に柔軟に対応するシステム運用法を提案する。

4. 信頼性

本研究では、システム内で稼働する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。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。したがって、各作業ロボットはこの λ_0 に従って偶発的に故障する。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、各作業ロボットはこの信頼度を基にメンテナンスを受け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。

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

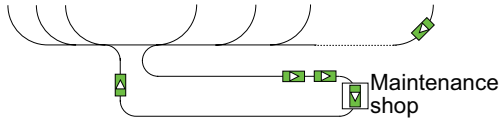


Fig.3 AGV operational model in maintenance mode

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

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

式 (1), (2), (3) より, AGV と ATC の MTBF の初期値に対する故障率 $\lambda(t)$ は $MTBF_{init}$ の逆数より算出可能である. 同様に, 信頼度 $R(t)$ もこの $MTBF_{init}$ から求めることができる.

さらに本研究では, 各作業ロボットの MTBF が累積作業時間にに応じて減少することも考慮に入れる. 各作業ロボットの MTBF は, その初期値 $MTBF_{init}$ から, 1 時間ごとの累積作業時間 (hour) に対して, x ずつ減少することとした (式 (4)). したがって, 故障率 $\lambda(t)$ と信頼度 $R(t)$ も, この MTBF より再度計算される.

$$MTBF = MTBF_{init} - x \times \text{hour} \quad (4)$$

5. システム運用法

5.1 通常時の作業モデル⁽⁴⁾

システムが通常通り稼働している状況の作業モデルでは, AGV に対して割当てられたコンテナの搬送タスク, すなわち目的地は, 当該 AGV の走行中に変更されることなく, 走行レーンが現在地からの最短距離が選択される. ATC は各ロケーション上にて自分の担当する作業エリアを有し, 他の ATC の作業の代替は行わない.

5.2 メンテナンス時における作業モデル

本研究では, AGV と ATC でそれぞれ 1 台ずつのみメンテナンスが受けられるものとする. そのため, 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作業モデルが必要となる.

AGV の場合, どの走行レーン上でもメンテナンスを受けることが可能となると, 当該 AGV がその他の AGV のコンテナ搬送作業に対する妨害となってしまう. そのため, Fig.3 が示すように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った. すなわち, システム内で稼働する全ての AGV が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, 当該システムは稼働する. また, メンテナンスショップでは到着した AGV から順番にメンテナンスを受ける.

一方 ATC に関しては, 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 により当該ロケーションでの作業は遂行される. Fig.4 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 により AGV とのコンテナ受渡し・蔵置作業が代行される様子を示す. Fig.4(a) では 2 台の ATC が作業を行っているが, Fig.4(b) では片方の

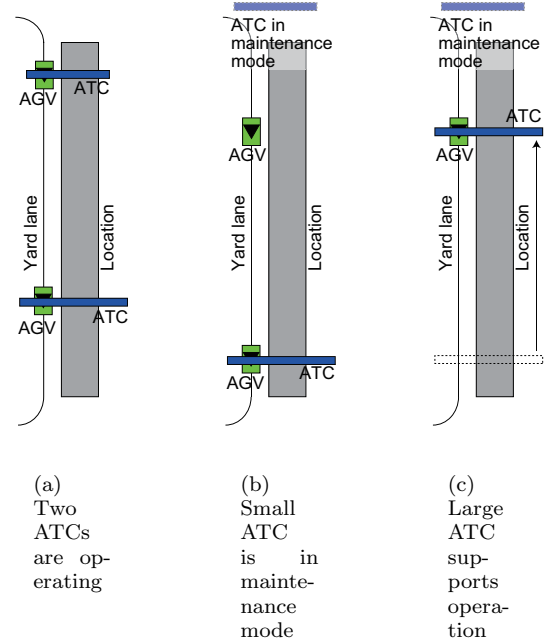


Fig.4 ATC operational model in maintenance mode

ATC がメンテナンスモードに入る. このとき, 2 台の ATC 間で通信を行い, もう一方の ATC は現行の作業を終えると, メンテナンスモードに入った ATC の作業を代替するために, 上方で作業待機中の AGV のところへと向かう (Fig.4(c) 参照). 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 つのメンテナン斯拉ールを設ける.

- 2 台の ATC とともに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.

5.3 故障・修理時における作業モデル

メンテナンスを定期的に行ったとしても, 作業ロボットの偶発的な故障を完全に予防することは困難である. そのため, メンテナンス時における作業モデル同様, 偶発的な故障が起こった際, 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. 本研究では, レーンが複数設置されている埠頭側ならびに蔵置ヤード側での作業モデルに注目した.

5.3.1 埠頭側での作業モデル

- 目的地 (QCC) あるいはそのレーン上に故障中の AGV が存在した場合, 当該目的地からの距離が近い QCC を優先的に目的地として再選択し, 走行レーンを切替える. ただし, 優先度が同等となる QCC が複数ある場合, AGV の走行距離を考慮し, ヤード側に位置する QCC から優先的に目的地として再選択し, 走行レーンを切替える.

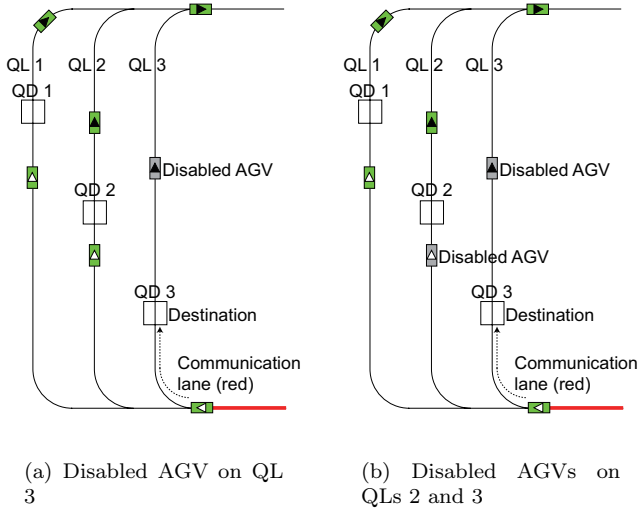


Fig.5 Operational model in the quay side

Fig.5 に埠頭側で AGV が故障した際の他の AGV の作業モデルの一例を示す．なお，埠頭側では，3 本の埠頭レーン (QL: Quay Lane) 上にそれぞれ 1 台の QCC が稼働している．Fig.5(a) は，赤色の通信レーン上を走行中の AGV の埠頭側目的地 (QD: Quay Destination) が QD 3 であることを示している．しかしながら通信レーン上で他の AGV と通信を行い，QL 3 上に故障中の AGV が存在しているため，この場合，QD 3 に最も近い QD 2 が埠頭側目的地として変更され，QL 3 から 2 へと走行レーンを切替える．Fig.5(b) は埠頭側目的地 QD 3 に対して，QL 3 と 2 上で故障 AGV が存在する場合を示している．この場合，AGV は QD 1 を埠頭側目的地とし，QL 3 → 2 → 1 と走行レーンを切替える．ただし，全てのレーン上に故障中の AGV が存在する場合は，目的地ならびに走行レーンの変更は行わない．

5.3.2 蔵置ヤード側での作業モデル

- 目的地 (ロケーション) とそのレーン上に故障中の ATC あるいは AGV が存在した場合，当該ロケーションより埠頭側に位置するロケーションのうち，当該ロケーションからの距離が近いものを優先的に目的地として再選択し，走行レーンを切替える．
- 目的ロケーションより埠頭側に位置するロケーションとレーンの全てにおいて故障中の ATC あるいは AGV が存在した場合，当該ロケーションより陸側に位置するロケーションのうち，当該ロケーションから近いものを優先的に目的地として再選択し，走行レーンを切替える．
- 目的ロケーションが変更されても，ロケーション上での目的蔵置位置は変更されない．

Fig.6 はコンテナ蔵置ヤード内で AGV あるいは ATC が故障した際の作業モデルの一例を示している．Fig.6(a) では，赤色の通信レーンを走行中の AGV のヤード側目的地 (YD: Yard Destination) がヤードレーン (YL: Yard Lane) YL 3 に隣接する 3rd ロケーション上の YD 3 であるが，他の AGV および ATC と通信を行った結果，YL 3 上に故障中の AGV が存在することが判明した場合を示している．したがって，

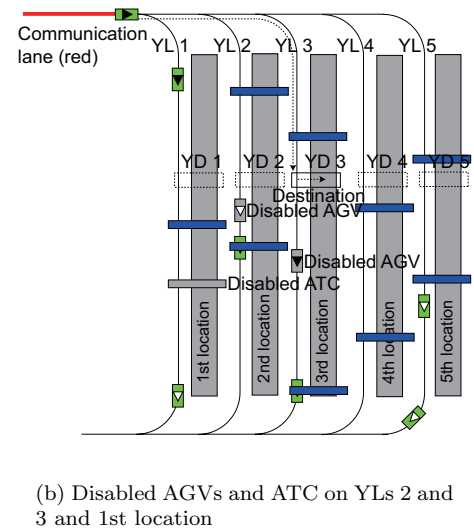
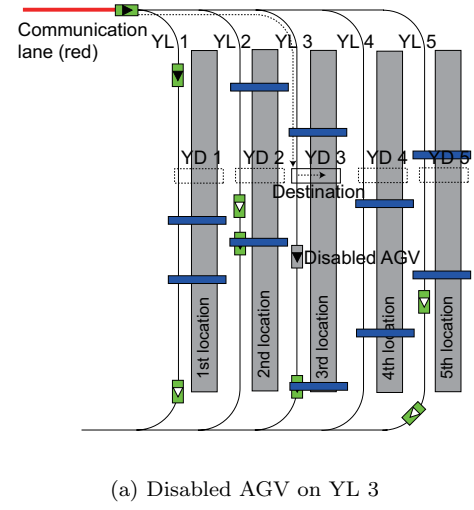


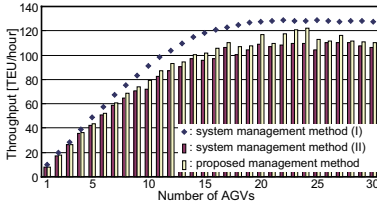
Fig.6 Operational model in the container storage yard

ヤード側目的地の候補 YD 1, 2, 4, 5 のうち，ヤード側目的地は YD 3 から 2 へと変更され，走行レーンは YL 3 から 2 へと変更される．Fig.6(b) では，ヤード側目的地 YD 3 に対して，YL 3 と 2 上に故障中の AGV が，1st ロケーション上に故障中の ATC が存在している．そのため，目的地は YD 4 となり走行レーンも YL 3 → 2 → 1 → 4 と変更される．埠頭側同様，ヤード内全てのレーンあるいはロケーション上で故障中の AGV あるいは ATC が存在した場合，目的地ならびに走行レーンの変更は行われない．

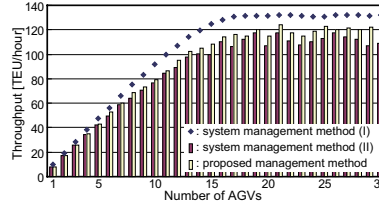
6. シミュレーション実験

6.1 実験条件

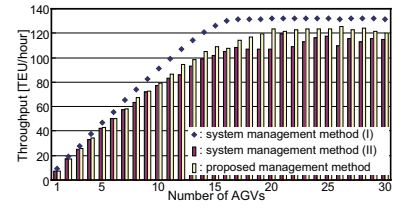
AGV と ATC の MTBF の初期値をそれぞれ文献²⁾で設定したものうち，最も低い値， $MTBF_{agv} = 50$ [hour]， $MTBF_{atc} = 40$ [hour] とした．各作業ロボットのメンテナンスを行うタイミングに関しては，作業時間 t での信頼度が $R(t) \leq 0.9$ となった時点でメンテナンスモードに入るよう設定した．なお，一度メンテナンスを行った作業ロボットの $R(t)$ は，メンテナンスを行った時刻において，1 へとリセットする．ただし，シミュレーション開始時においては，各作業ロボットの信頼度の初期値を $0.9 < R(t) \leq 1.0$ でランダムに



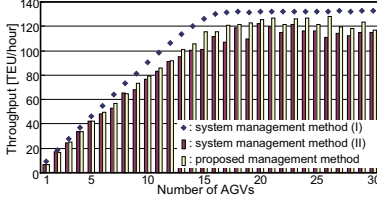
(a) ATCs = 4 (2 locations)



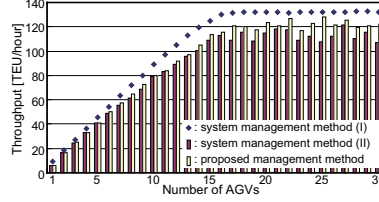
(b) ATCs = 6 (3 locations)



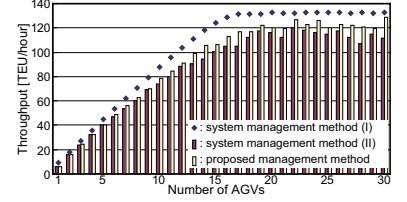
(c) ATCs = 8 (4 locations)



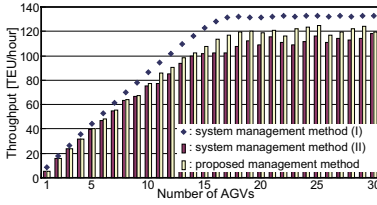
(d) ATCs = 10 (5 locations)



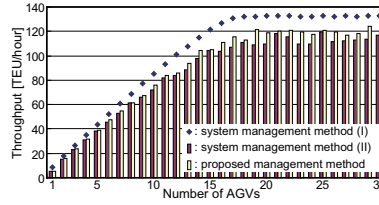
(e) ATCs = 12 (6 locations)



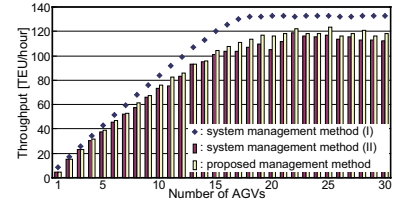
(f) ATCs = 14 (7 locations)



(g) ATCs = 16 (8 locations)



(h) ATCs = 18 (9 locations)



(i) ATCs = 20 (10 locations)

Fig.7 Comparison result of the system management methods on the basis of the throughputs

設定した．さらに式 (4) に関して，各作業ロボットの MTBF は，その初期値 $MTBF_{init}$ から，1 時間ごとの累積作業時間に対して 0.1 ずつ減少する ($x = 0.1$) こととした．

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] を費やしてメンテナンスが行われるものと設定した．なお，これらのメンテナンス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，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．

コンテナ船に積まれているコンテナの数，すなわちタスクの総数は 600 [TEU] とした．ただし，2.1 節でも述べた通り，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．600 [TEU] 積みコンテナ船が 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．その際，AGV の最大投入台数は 30 台，ATC の最大投入台数は 20 台とした．

AGV の搬送性能に関して，コンテナ積載時と空荷時での最高移動速度をそれぞれ 5.56 と 6.94 [m/s] とした．加減速度はコンテナの積載有無に関わらず，0.15 と 0.63 [m/s²] とした．ATC はコンテナの把持搬送を行わないため，通常移動最高速度として 2.5 [m/s]，加減速度はそれぞれ 0.1 と 0.4

[m/s²] とした．また 2.2 節で述べた 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，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．なおこれら各作業ロボットの性能は文献 5) を参照した．

提案運用法の有効性について検討するため，(I) 5.1 節で述べた通常時の作業モデルのみによる運用法で，作業ロボットのメンテナンスを行わず，かつ故障が全く発生しないシステム (Fig.2(a) 参照)，(II) 5.1 節と 5.2 節で述べた 2 つのハイブリッド作業モデルをリアクティブに切替える運用法により，メンテナンスは行うが偶発的に生じる作業ロボットの故障に対しては，そのまま作業モデルを切替えず修理を行うシステム (Fig.2(b) 参照)，との比較を行う．

6.2 実験結果

Fig.7 に，AGV と ATC の投入台数を増加させた際のシステムスループットの比較結果を示している．青 (ひし形) のプロットが運用法 (I) によるメンテナンスを行わず，かつ作業ロボットの故障が全く生じないシステムのスループット，赤い棒グラフが運用法 (II) によるシステムのスループット，白の棒グラフが，5.1 節，5.2 節，5.3 節で述べた 3 つのハイブリッド作業モデルを状況に応じてリアクティブに切替える提案運用法を用いて，メンテナンスならびに故障に対する修理を行った際のシステムスループットを示している．

Table 1 Increase of the system throughput [TEU/hour]

Number of ATCs (locations)	Average [TEU/hour]	Max. [TEU/hour]	Min. [TEU/hour]
4 (2)	6.0	12.3	0.9
6 (3)	7.5	15.0	2.6
8 (4)	9.2	16.6	1.9
10 (5)	7.5	16.7	2.1
12 (6)	9.2	20.5	2.4
14 (7)	7.8	17.2	4.0
16 (8)	8.6	14.2	1.3
18 (9)	6.4	13.0	1.0
20 (10)	5.4	11.6	2.1

この結果から、全ての AGV と ATC の台数の組合せに対して、作業ロボットの定期的なメンテナンスと故障・修理を行うことを考慮したシステムでは、本研究で構築した作業モデルによる運用法の方が運用法 (II) に比べシステムスループットが高くなっていることが分かる。Fig.7(d) ~ Fig.7(f) の結果では、提案運用法によるシステムスループットが、メンテナンスと修理を考慮しない理想状態のシステムを運用した際のスループットに近い値となる場合があった。これは、ロボットの故障が埠頭レーンあるいはヤードレーン上のいずれかの場所で発生し、かつ、各作業ロボットがこの状況の変化に対してハイブリッド作業モデルをリアクティブに切替えることに成功し、その結果、提案運用法がほぼ完全に機能したことを示している。ただし、Fig.7(a) における AGV の投入台数が 26 台のときのスループットのように、運用法 (II) によるシステムスループットとの差がほとんど見られない場合がある。これは、埠頭やヤードレーン上ではなく、AGV が通信レーンのような単一レーン上で故障をしたことが原因である。

6.3 提案運用法の有効性

Table.1 に、Fig.7 の結果に基づき、運用法 (II) と比べた際の提案運用法によるシステムスループットの増加量を示す。なお、スループットの増加量を計算する際、理想状態のシステムを基に比較するため、Fig.7 の各結果における青のプロットが示すシステムスループットが横ばいになった時点での AGV の投入台数を基準とする。すなわち、Fig.7(a) では AGV が 20 台以上、それ以外の結果では AGV が 17 以上投入されたときの、2 つの運用法によるシステムスループットの増加量を計算する。なお、平均とは 2 つのシステムスループットの差の平均値、最大値とはスループットの差の最大値、最小値とはスループットの差の最小値のことである。

提案運用法によりシステムを運用した際のスループットの増加は、平均で 5.4 から 9.2、最大値では 11.6 から 20.5、最小値でも 0.9 から 4.0 という結果となった。スループットの平均値が 9.2 [TEU/hour] 増加することは、システムが 10 時間稼働した場合で約 100 [TEU] のコンテナ取扱量の違いが生じることを意味する。また、最大で約 200 [TEU] のコンテナ取扱量の増加となった。

さらに、ATC (ロケーション本数 $\times$ 2) の投入台数が 6 ~ 16 台のときに、提案運用法が特に有効に機能していることも分かる。これは、蔵置ヤード内のヤードレーンの本数がロケーションの数に応じて増減するためである。提案運用法では、システムの稼働状況に対応し、3 つのハイブリッド作業モデルをリアクティブに切替えながらコンテナ取扱い作業を実行するため、蔵置ヤード内のヤードレーンが少なすぎる場合、例えば ATC が 4 台の場合、2 本あるヤードレーンに対して、AGV が適切にヤード側目的地ならびに走行レーンを切替えることが困難となり、その結果、スループットの増加量は若干低い値となった。また、ATC が 18 や 20 台の場合、9 あるいは 10 本のヤードレーンならびにロケーションが設けられており、AGV や ATC が故障したとしても、タスクは各ロケーションに対して均等に割当てられていることから、当該レーンに続々と AGV が進入してくるといった状況が少なかったため、スループットの増加量が比較的少ない結果となった。ただし、全ての場合においてスループットが上昇する結果が得られたことから、変動するシステムの稼働状況に対する提案運用法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作業ロボットの効率的なメンテナンスならびに故障に対する修理を考慮したシステム運用を行った。そこでは、ロボットの作業に関する相互代替可能性を活かすため、当該ターミナルシステムの稼働状況を 3 つに分類し、これらの状況に対する作業モデルを構築した。作業ロボットは、3 つのハイブリッド作業モデルをリアクティブに切替えることにより、変動するシステムの稼働状況に柔軟に対応することが可能となった。シミュレーション実験を通じて、本運用法の有効性が示された。

参考文献

- 1) B. M. Beamon, Performance, reliability, and performativity of material handling systems, International Journal of Production Research, Vol. 3, No. 2, pp. 377-393, 1998.
- 2) S. Hoshino and J. Ota, Design of an Automated Transportation System in a Seaport Container Terminal for the Reliability of Operating Robots, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007 (accepted).
- 3) 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, Vol. 4, No. 3, pp. 360-372, 2007.
- 4) 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, 第 4 巻, 第 14 号, pp. 98-108, 2005.
- 5) MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD., Advanced Technology Cargo Handling Systems, Products Guide, 2004.