

Multi-Robot Coordination and Optimal Maintenance for Fault-Tolerant Systems

正 星野智史 (東京工業大学) 関 宏也 (東京工業大学) 正 太田 順 (東京大学)

Satoshi HOSHINO and Hiroya SEKI, Tokyo TECH, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, JAPAN
Jun OTA, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba, JAPAN

Abstract— Ensuring fault tolerance of robotic systems is a challenge for factory automation. For this challenge, we propose behavior coordination strategies and optimal maintenance policy for multiple mobile robots. The coordination strategies enable a system to continue operating even if a working robot undergoes preventive maintenance or fails and undergoes corrective maintenance. In addition, working robots are allowed to undergo preventive maintenance at an optimal interval and corrective maintenance each time they fail. Finally, through simulation experiments, we demonstrate that the behavior coordination strategies and optimal maintenance policy are both effective for the fault-tolerant systems.

Key Words: Fault tolerance, multi-robot systems, behavior coordination, optimal maintenance

1. 緒言

ロボットを導入することにより工場の自動化を図る際、システムの耐故障性を保証することが課題となる。本システムでは、予防保全（点検）や事後保全（修理）を受けるために停止中のロボットが、他のロボットの妨害となり得る。本研究では、これら保全を受けているロボットから他のロボット群が妨害されず、稼働し続けることをシステムの耐故障性と定義する。

文献 [1] では、自律移動ロボットは頻繁に故障し、そのときの平均故障間隔は約 8 時間であったことが報告されている。マテハンシステムを対象とした研究では、事後保全に加え予防保全の重要性についても議論がなされているが [2]、群ロボットシステムを対象とした研究では、保全問題は扱われていない。したがって本研究では、耐故障性の高いロボットシステム実現に向け、ロボット群の行動制御と最適保全に焦点をあてる。

本研究では、ロボット群制御として、環境状況の変化へ反射的に対応するための行動戦略を提案する。これによりロボットは、保全を受けているロボットが存在しても稼働し続けることができる。さらに、信頼性工学に基づき、ロボットの故障ならびに予防と事後保全のための活動方策を数理的にモデル化する。これにより、ロボットは最適な周期で予防保全を受け、故障の都度事後保全を受けることとなる。

本稿の後半では、シミュレーション実験を行い、ロボット群行動制御戦略と最適保全方策の耐故障性に対する有効性を示す。

2. ロボット群制御

2.1 ハイブリッド型行動戦略

著者らは従来、システムの通常運転時におけるロボット群制御を目的に、タスク割当てと経路計画戦略を提案してきた [3]。そのため、本研究で提案する行動戦略

は、システムの状態、すなわち通常運転か故障運転により、通常時行動戦略とハイブリッドに適用される。

2.2 耐故障タスク割当て戦略

タスクを実行中のロボットに加え、保全中のロボットを考慮した上で、ロボット間での実行負荷を均等化するようにタスクを割当てるため、式 (1) の目的関数を耐故障タスク割当て戦略として導入する。

$$\min \sum_{k \in K_p} \sum_{n \in N} Task_{n,k} \{ (ExeTask_n + mr_n) - Task_{n,k} \} \quad (1)$$

k は参照タスク、 K_p は全タスク K に対する部分タスク参照範囲である ($K_p \in K$)。 n はタスクの実行場所、 $ExeTask_n$ は実行場所にいるロボットとそこへ向かっているロボットの総数、 mr_n は実行場所 n 付近で保全中のロボットの台数を示している。 $Task_{n,k}$ には、 k 番目のタスクに対して、 n が実行場所としてタスクに規定してあるかどうかにより二値変数 (0 か 1) が与えられている。

2.3 耐故障経路計画戦略

タスク実行中あるいは保全中の停止ロボットを迂回しながら、目的地までの最短経路を移動するため、以下の目的関数を耐故障経路計画戦略として導入する。

$$\min \sum_{r \in R} (\alpha r_o + \beta r_m) \quad (2)$$

式 (2) は、計画中の経路上に存在するロボット群の集合 R に対して、タスク実行中のロボット r_o と保全中のロボット r_m の総和が最小となる経路が最適経路として得られることを示している。 α と β は、タスク実行中と保全中の停止ロボットに対する重み係数であり、各ロボットからの妨害の影響度により決定する。

2.4 目的地変更戦略

ロボットが既に与えられたタスクを実行するために目的場所へ向かっている最中、この実行場所付近で別のロボットが保全を受けることになった場合、2.2節と2.3節の2つの行動戦略を用いても、当該ロボットは、この保全中のロボットにより停止を余儀なくされる。

そこで、目的地変更戦略として、タスク実行場所へ向かうロボットに対して、目的地付近にて新たに保全を受けることになったロボットが発生した場合、このタスクをキャンセルし、その他の未実行タスクと交換、すなわち、目的地を変更することを許可する。ただし、キャンセルされたタスクは、ロボットの保全が終了後、同一のロボットにより再度実行されるものとする。

3. ロボット群最適保全

3.1 予防保全（点検）と事後保全（修理）

保全活動が行われるシステムでは、一般に、システムを構成する部品の故障率が、バスタブ曲線における磨耗故障期にあるものと仮定されている。磨耗故障期では、部品は時間とともに劣化する。したがって、故障ロボットに対する事後保全に加え周期的な予防保全を行い、状態の点検や場合によっては故障する前に部品を交換するなどといったことが行われている。

著者らはこれまでに、ロボットの信頼度に基づき、天狗的に予防保全の周期を決定する保全方策を提案してきた [4]。しかしながらこの保全方策では、必要以上に予防保全あるいは事後保全を受けるロボットの台数が増加し、耐故障性に悪影響を及ぼす恐れがある。

合理的な保全活動を行うためには、保全を受けるために停止するロボット群の台数が最小化されるような最適保全方策が必要となる。そのため、本研究では信頼性工学に基づきロボットの故障と保全方策を数理的にモデル化する。これにより、稼働中のロボットは最適な周期で予防保全を受け、故障率にしがって故障したロボットはその都度事後保全を受けることとなる。

3.2 ロボットの故障

本研究では、磨耗故障期にあるロボットは、故障に関する確率密度関数がワイブル分布にしたがうものと仮定する。これにより、ある時刻 t におけるロボットの故障率は、式 (3) から求めることができる。ここで、 m と η はワイブル分布の形状とスケールを決定するパラメータであり、 $m > 0$ 、 $\eta > 0$ である。

$$h(t) = \frac{mt^{m-1}}{\eta^m} \quad (3)$$

このとき、平均故障間隔 (MTBF: Mean Time Between Failures) と m 、 η の関係は、式 (4) となる。したがって、スケールパラメータ η は、形状パラメータ m と平均故障間隔 $MTBF$ が与えられると求めること

ができ、これによりロボットは自らの故障率 $h(t)$ を計算する。ロボットの故障は、時刻 t での故障率に基づき偶発的に発生し、その場で事後保全を受けるために停止する。

$$MTBF = \eta \Gamma \left(\frac{1}{m} + 1 \right) \quad (4)$$

3.3 最適保全方策

本研究では、アベイラビリティを指標とし、これに基づき予防保全の周期を最適に決定するための保全方策を提案する。アベイラビリティとは、保全を受けることにより、ある時刻においてロボットが稼働状態にある確率のことである。

定性的に、アベイラビリティは、十分長い時間経過すれば ($t \rightarrow \infty$)、一定値に漸近する性質を持つ。そのため、稼働時間と定義すると、時刻 t でのアベイラビリティは以下の式 (5) から求めることができる。なお、 T はシステムが故障せず、かつ、予防保全を受けるまでの時間であり、 T_1 と T_2 は、それぞれ予防保全と事後保全に要する時間の平均値のことである。

$$A(T) = \frac{T}{T_2 \int_0^T h(t) dt + T_1 + T} \quad (5)$$

したがって、アベイラビリティが最大となる予防保全の周期 T は、式 (5) に式 (3) を代入し、これを T で偏微分した式 (6) の解として与えられる。

$$\frac{T_2 \left(\frac{T}{\eta} \right)^m + T_1 + T - T \left(\frac{T_2 m T^{m-1}}{\eta^m} + 1 \right)}{\left\{ T_2 \left(\frac{T}{\eta} \right)^m + T_1 + T \right\}^2} = 0 \quad (6)$$

そのため、予防保全を行うための最適な周期は、式 (7) から求めることができる。ロボットは自らの稼働時間がこの T に達したら、予防保全を受けるために停止する。

$$T = \eta \left\{ \frac{T_1}{T_2(m-1)} \right\}^{1/m} \quad (7)$$

4. シミュレーション実験

4.1 条件設定

Fig.1 に、本シミュレーション実験で対象とする自律移動ロボット群を用いた材料搬送システムを示す。本システムにて、ロボット群は材料を初期ステーションから荷下るしステーションに向かって循環搬送する。保全は経路上のその場にて、一定時間かけて行われる。

2.2節の耐故障タスク割当て戦略に関して、部分参照範囲は 10 ($K_p = 10$)、2.3節の耐故障経路計画戦略における重み係数は、 $\alpha = 1$ 、 $\beta = 3$ とした。故障率に関しては、平均故障間隔を $MTBF = 8$ [h]、形状パラメータを $m = 2$ とした。また、予防保全にかかる時間 T_1 は 600 [s] (≈ 0.167 [h])、事後保全にかかる時間 T_2 は 1800 [s] (0.5 [h]) とした。

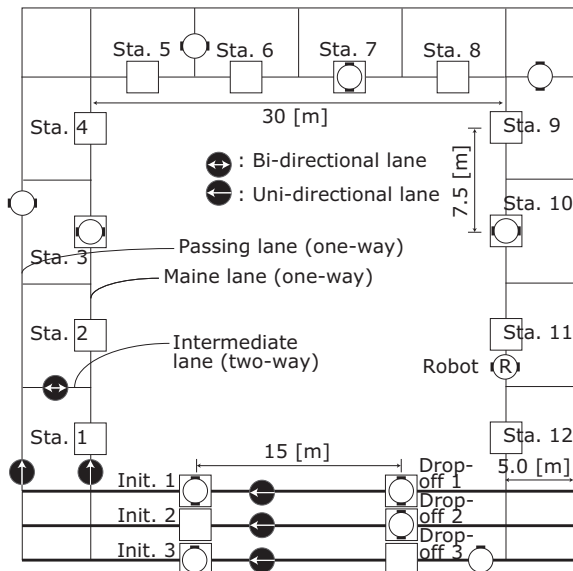


Fig.1 Robotic Material Transport System

式 (7) ならびに上記の設定条件より、最適予防保全周期は 18762 [s] となる。本実験では比較のため、この他 3 つの保全方をロボット群へ適用する。方策 1 では事後保全のみを、方策 2 と 3 では、事後保全に加え、それぞれ頻度の低いあるいは高い予防保全を行い、その周期を 10000, 30000 [s] とした。

4.2 ロボット群行動制御戦略と最適保全方策の有効性

Fig.2 に、保全活動を行った際のシステムの運転時間と故障が全く発生せず保全も行わない理想的なシステムの運転時間を比べ、各保全方策による運転時間増加量を棒グラフで示す。また、理想的なシステムの運転時間も折れ線で示す。なお、PM と CM はそれぞれ予防保全と事後保全を意味している。

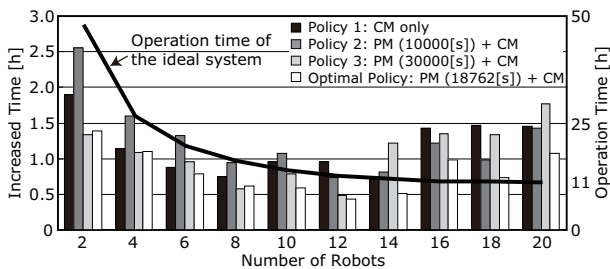


Fig.2 Comparison of Fault Tolerance

保全を行うことにより、時間増加量、すなわちシステムの耐故障性は、投入台数に対して 12 台までは改善された。しかしながら、理想的なシステムの運転時間が 11 [h] に収束した後、保全を行ったシステムの耐故障性は悪化する結果となった。ただしこれは、行動制御戦略や最適保全方策が有効でなくなったのではなく、システムの容量が原因である。理想的なシステムと比べ、どの結果も運転時間が増加したが、最適保全方策を適用した結果では、その増加量が最も少なかった。

以上のことから、ロボット群行動制御戦略と最適保全方策により、ロボットの保全を行っても他のロボット群（システム全体として）は稼働し続け、耐故障性が最も高くなることが示された。各保全方策による平均時間増加率をロボットの投入台数の大小、ならびに全台数に分けて Table 1 に示す。

| Policies | 1 | 2 | 3 | Optimal |
|-------------|------|-------------|--------------|------------|
| # of robots | [%] | | | |
| 2 ~ 12 | 5.3 | 6.3 (worst) | 4.2 | 3.8 (best) |
| 14 ~ 20 | 11.4 | 10.0 | 12.7 (worst) | 7.4 (best) |
| Total | 7.8 | 7.8 | 7.6 | 5.3 (best) |

この結果からも、ロボットの投入台数に関係なく、最適保全方策を適用することで耐故障性が最も高くなったことが分かる。一方で、保全方策 2 と 3 を適用すると、予防保全を行ったにもかかわらず、システムの耐故障性は、それぞれ少ないあるいは多いロボット台数の場合で、2 番目に良いか最も悪い結果となった。このことから、天降り的に決定された周期に基づき行われる予防保全は、その頻度とロボットの台数によって反対の効果を耐故障性に対して及ぼすことが分かった。

4.3 頻度と台数が耐故障性に及ぼす効果

同じ平均故障間隔のロボットが投入された場合、ロボットの台数をそれぞれ I と J とし、それらの大小関係が $I < J$ であるとする、システム内における平均故障ロボット台数は $\sum_{i \in I} h_i(t) < \sum_{j \in J} h_j(t)$ となり、ロボット台数の多いシステムでは故障ロボットの存在密度も高くなる。Fig.3 に、比較のため 4 台と 18 台のロボットを投入したシステムを対象に、それぞれ 4 つの保全方策による各ロボットの故障率 ($h(t)$) ならびに平均故障ロボット台数 ($\sum h(t)$) の遷移を示す。

4 台のロボットを投入したシステムでは、Fig.3(b), Fig.3(c), Fig.3(d) での故障ロボット台数が、Fig.3(a) と比べ少なかったことが分かる。これは、予防保全が適切に行われたことを示している。ただし、故障ロボット台数の時間平均の差は小さかった。したがって、台数の少ないシステムでは、行動制御戦略だけで停止ロボットからの妨害に十分対応できたため、予防保全の必要性は低かった。そのため、最適保全方策以外では、周期の長い保全方策 1 と 3 が、短い方策 2 に比べ、耐故障性が高くなる結果となった。

Fig.3(e) ~ Fig.3(h) が示す 18 台のロボットを投入したシステムでは、故障ロボット台数の時間平均の差が大きくなる結果となった。これは、投入台数の増加に伴い故障ロボット台数も増えたことを示している。この場合、短い周期の予防保全が長い周期のものに比べ、故障ロボットの数を抑制することとなった。そのた

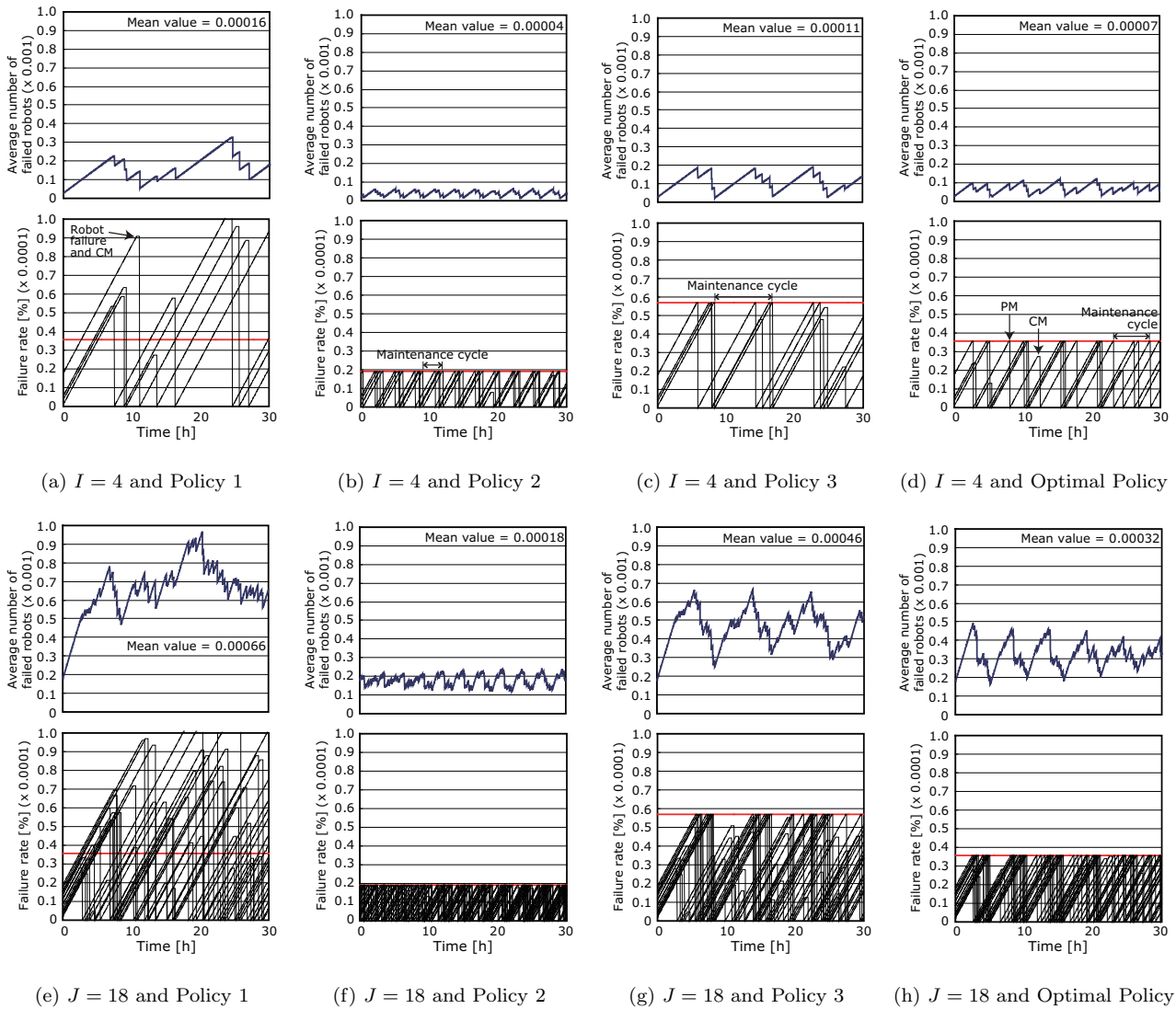


Fig.3 Transitions of Failure Rate and Average Number of Failed Robots

め、行動制御戦略も、保全方策 2 とともに適用することで、より効果的に機能し、耐故障性が高くなる結果となった。一方で、保全方策 1 と 3 は、故障ロボットの台数を抑制できず、そのため行動制御戦略も故障ロボットの密度が高いシステムでは効果的に機能せず、耐故障性が低くなる結果となった。

5. 結論

本研究では、耐故障の高いロボットシステム実現を目指し、ロボット群行動制御戦略ならびに最適保全方策を提案した。これによりロボットは、他のロボットから妨害を受けず、かつ、保全のために停止しているロボット群の台数が最小となるよう保全を受けることが可能となった。シミュレーション実験より、行動戦略を通常時行動戦略とハイブリッドに使用し、さらに、最適保全方策を組合せることで、天下载的に予防保全周期を設定する方策と組合せるのに比べ、投入台数に関係なく最も優れた耐故障性を保証することを示した。

参考文献

- [1] J. Carlson and R.R. Murphy, "Reliability Analysis of Mobile Robots," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 274–281, 2003.
- [2] B.M. Beamon, "Performance, Reliability, and Performability of Material Handling Systems," *International Journal of Production Research*, vol. 3, no. 2, pp. 377–393, 1998.
- [3] S. Hoshino *et al.*, "Multi-Robot Coordination for Flexible Batch Manufacturing Systems Experiencing Bottlenecks," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 887–901, 2010.
- [4] S. Hoshino *et al.*, "Fault-Tolerant Multi-Robot Operational Strategy for Material Transport Systems Considering Maintenance Activity," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol. 22, no. 4, pp. 485–495, 2010.