



群ロボットの作業分担のための適応スケジューリング システムの開発

鈴木 剛** 先野嘉人*** 藤井輝夫† 浅間 一** 遠藤 勲††

Development of an Adaptive Scheduling System for Task Assignment of a Multirobot

Tsuyoshi SUZUKI, Yoshito SAKINO, Teruo FUJII, Hajime ASAMA and Isao ENDO

An adaptive multirobot scheduling system was studied in order to introduce intelligent robots in a plant and to maintain the plant effectively. Necessary information for the plant maintenance tasks was classified by character that are a variable and a fixed information. In order to assign maintenance tasks to the robots, the scheduling system uses the fixed information of own databases, and gathers the variable information from the robots and a human operator adaptively. From numerical experiments it has been confirmed that the adaptive scheduling system could perform its original idea of adjusting the scheduling of maintenance operation even when an accident occurred in the plant or when a robot was disabled.

Key words: multiple robots, scheduling system, plant maintenance, adaptive system

1. 緒 言

プラント内のメンテナンス作業は、作業要求がプラントの状態によって多様に変化するため自動化が難しく、作業員が手作業で行っているのが現状である。このような多様な作業要求に柔軟に対処できるシステムとして、マルチエージェントから構成されるロボットシステムが注目されている¹⁾。これは、自律したロボットや計算機など、複数のロボット要素から構成され、それらロボット群が協調することによって、柔軟性、多機能性、頑健性等を発揮させようとするシステムである。従来、これらに関する研究では、自律ロボット間でいかに協力的に作業を行わせるかが主眼とされてきた。しかし、ロボットによるプラント内作業を想定した場合、ロボットがプラントの状態をどう検出し、そこで発生する作業をどのように獲得するかについては議論されていない。ロボットのセンシング能力には限界があり、プラント内の状態をすべてのロボットが常に把握することは困難である。

通常、プラントの状態はプラントの制御を行うインタフェースシステムや異常診断システムによって監視されている。従って、このインタフェースがロボット群と情報交換しながら作業をスケジューリングできるようにすれば、プラントの状態に応じて発生する様々な作業に対して、適応的にロボットを割り当て実行させることが可能であると考えられる(図1)。

そこで、本論文では、ロボット群によるプラント内作業を想定し、プラント内で発生する作業に適応的にロボットを割り当てるためのスケジューリング手法について議論する。また、シミュレーション実験により本手法の有用性について検証する。

2. 群ロボットのスケジューリング

従来のスケジューリングシステムの多くは、対象とするシステムの情報を集中的に管理するものであり²⁾、莫大な情報を処理する必要があるためシステム全体が複雑で大規模なものとなっていた。さらに、作業箇所や作業内容等スケジュール時の入力があらかじめ決定されているため、作業環境や手順の変化によって必要となるシステムの変更が行えないなどの問題があった。このような集中管理型システムの問題を解決するために、自律分散の概念を取り入れたスケジューリングシステムが期待を集めているが³⁾、それらのシステムもあらかじめ作業手順や作業時間等がある程度決まっているため、システム故障時の修復作業のように状況に応じて内容が変化するような作業に対処するのは困難であると考えられる。

一方、群ロボットシステムの研究では、作業分配や協調チームの組織化に関する研究も行われている⁴⁾。しかし、作業内容は決まっており、それを実行するロボットの機能も単一であるため、多様な作業・多様なロボットには対応していない。

メンテナンス作業では、定期点検のような作業内容が既知の

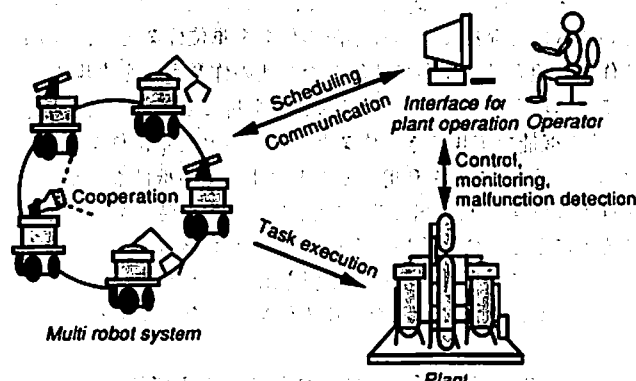


Fig. 1 A concept of a scheduling system

* 原稿受付 平成 11 年 12 月 3 日
 ** 正会員 理化学研究所 (和光市広沢 2-1)
 *** 理化学研究所 (当時東京理科大学大学院所属、現、大阪府警察；
 大阪市中央区大手前 3-1-16)
 † 理化学研究所 (現、東京大学生産技術研究所；港区六本木 7-22-1)
 †† 理化学研究所

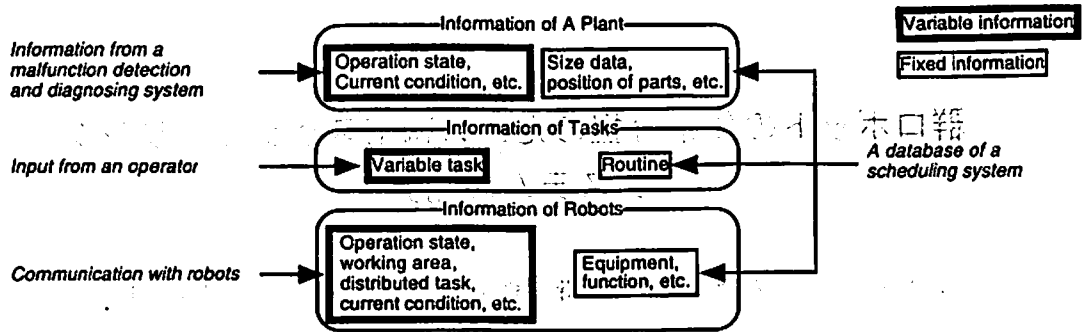


Fig. 2 Information for scheduling

定型作業だけでなく、非定常状態において発生する、作業内容が変化する非定型作業も行わなければならない。また、作業中に、別の箇所が故障したり、作業中のロボットが故障してしまうなどの状況も考えられる。そのため、このような想定外の状況においても、柔軟にスケジューリングできる機能が必要となる。さらに、本システムで想定しているような群ロボットシステムには、様々な協調形態によって発揮できる多機能性が期待される。従って、このようなロボット群の多機能性も考慮しなければならない。そこで、本論文では、これらの問題に対し、以下の手法を提案する。

(1) データの分類とネゴシエーションによるデータ収集によるスケジューリング

スケジューリングに必要な情報を考えると、ロボットやプラントの状態など状況によって変化する情報と、プラントの大きさなど時間的に変化しない情報とがある。情報の集中化を防ぐためには、変化する情報は各主体が管理し、必要に応じて収集するほうが望ましい。そこで、情報を分類・分散し、変化する情報に関しては必要時にスケジューリングシステムが集め、それに応じて作業にロボットを割り当てる分散適応スケジューリング手法を提案する。図2に、スケジューリングに必要な情報とその分類を示す。例えば、プラントの状態は異常診断システムから、非定型作業時の手順は操作員から、また、ロボットの情報はロボットと通信することによって獲得しスケジューリングを行う。このような方法により、プラントやロボットに故障等の問題が発生した場合にも適宜スケジューリングシステムが情報を収集し再スケジューリングを行うことで、状況に応じた適応的なスケジューリングが行えると考えられる。

(2) ロボット機能と作業とを対応させた単位作業データベースの構築、および、単位作業の組合せによる作業表現

ロボットの多機能性を考慮すると、様々な作業要求に対し、その作業を実行可能な機能を持つロボットを割り当てるためのデータ表現が必要となる。そこで、ここでは、ロボットの持っている機能で発揮できる最小限の作業を単位作業とし、この単位作業の組合せによって連続した一連の作業手順を表現する。つまり、ロボットが持っている装備で発揮できる潜在的な機能と、その機能で実現できる作業とを対応させた単位作業をデータベース化し、これを利用することによって多機能なロボットを様々な作業に割り当てる。また、非定型作業時に発生する作業要求に応じて作業手順を変更する場合は、操作員が単位作業データベースから作業データを引き出し、単位作業をその場で組み合わせ、状況に適した一連の作業手順を作成する。

3. スケジューリングシステムの構築

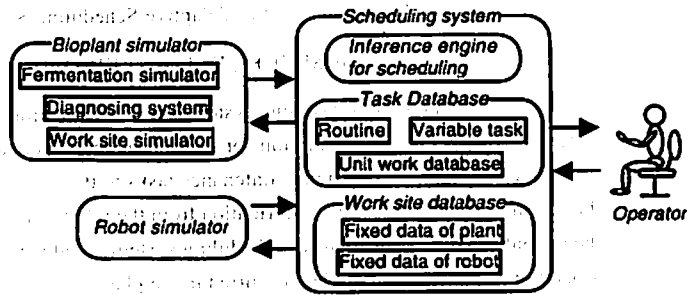


Fig. 3 The scheme of scheduling system

本手法の有用性を検証するために、バイオプラントのシミュレータを対象としてスケジューリングシステムの構築を行った。システムの構成を図3に示す。バイオプラントシミュレータは、菌体の培養を模擬するものであり、また、異常発生時には診断システムによって異常原因を究明することが可能である。システム構築に使用したソフトは、Gensym Corporation製G2リアルタイムエキスパートシステムである。

スケジューリングシステムの構築にあたって、まず情報の分散化を行うために、作業環境、および、ロボットのシミュレータを構築した。作業環境シミュレータは、プラントの状態をシミュレートするものであり、プラントの稼働状況に応じて作業中、待機中、メンテナンス中などの状態をスケジューリングシステムに知らせる。また、非定型作業を発生させるために、ランダム時間にいくつかの箇所が故障を起こすようにした。ここで、プラント内の定型作業は、培養終了時に培養槽、槽に接続されるパイプ、および、菌体の栄養源を注入するバルブの各箇所の洗浄であり、また、非定型作業はシステム故障時に発生する故障修復作業である。

ロボットシミュレータはロボットの作業状況をシミュレートするものであり、ここでは、作業を行う装備を持つロボットとして、カメラロボット3台、フォークリフトロボット4台、マニピュレータロボット6台を構築し、各装備で実行できる機能を表1のように対応づけた。また、ロボットは、自己の状態(予約状況、作業状況等)を情報として保持しており、スケジューリングシステムの要請に応じてこれらの情報を通信する。また、ロボットもランダム時間に故障するようにした。

Table 1 Correspondence between the robots and functions

Function	Robots	Camera	Forklift	Manipulator
Observation		OK		
Transportation			OK	
Lift up and down			OK	OK
Installing and detaching				OK
washing				OK

Table 2 Task sequence for routine

Unit task	Necessary function	Necessary robots	Time s
1) Preparation of washing tools	Transportation	2	10
2) Washing of work site	Manipulation	3	15
3) Putting back tools	Transportation	2	10
4) Observation of task execution	Vision	1	35

次に、単位作業データベースの構築を行った。ここで、単位作業は、作業対象、作業を行うために必要なロボットの機能と台数、および、作業実行時間を持つクラスとして表した。作業に応じてこれらのデータを書き換えることにより、単位作業を表すことができる。このようにして定義した単位作業をデータベース化したものから、各単位作業のデータを引き出し、それらを手順として組み合わせることで、一連の工程を持った作業を表すことができる。例えば定型作業である洗浄作業は、表2のようになる。

また、柔軟なスケジューリングを行うために、図4に示すアルゴリズムをルールとした。まず、スケジューリングシステムは、あらかじめ定型作業の作業手順を操作員に提示し作業開始時間を入力してもらう。そのデータから、スケジューリングシステムがロボット群に通信し、作業の告知を行う。それに対し、作業可能なロボットが返答する。すべてのロボットから返答がきたら、スケジューリングシステムは、作業可能なロボットが作業に必要な台数を満たしているか計算し、満たしていればロボットに作業を依頼する。台数を満たしていない場合は、作業実行に必要な台数が確保できるよう、作業の開始時刻を調整する。

次に、プラントの故障などにより非定型作業が発生した場合

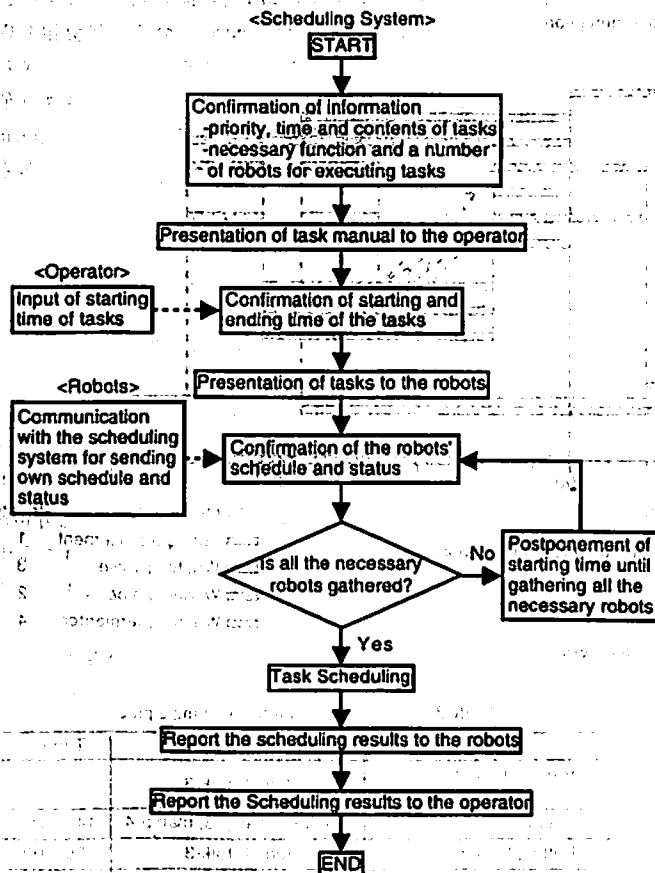


Fig. 4 An algorithm of task scheduling

には、異常診断システムやロボットがその情報をスケジューリングシステムに通信する。このとき、スケジューリングシステムは操作員に対し再スケジューリングが必要かどうかの確認を行い、また、同時に作業手順に変更があれば操作員に入力してもらい、再スケジューリングの通知をロボット群に送る。それに対し、再びロボットが返答し、その後、前述の手順に沿って再スケジューリングを行う。

なお、ここで使用したバイオプラントのシミュレータは、約40時間の培養実験を130sで模擬するため、このシミュレーション時間を基準に作業時間等を設定した。

4. 群ロボットのスケジューリング実験

4.1 実験の概要

構築したシステムを用いて、プラントやロボットの状態に応じた柔軟なスケジューリングが可能であるか実験を行った。操作員は、各定型作業の開始時間を入力し、スケジューリングを開始する。本実験では、入力を行った順番に作業の優先度が高いとした。すべての定型作業のスケジューリングが終了した後、培養を行う。培養が成功すると、ロボットが割り当てられた定型のメンテナンス作業を行い次の培養の準備をする。しかし、異常が検出されプラントの故障が判明すると、既に決定していた定型作業のスケジューリング内容を破棄し再スケジューリングを実行する。このとき、作業手順が不明のものについては、その時の状況に応じて操作員に入力してもらう。このようにして、スケジューリング実験を行い、各メンテナンス作業に割り当てられたロボットの作業時間を調べた。

4.2 結果および考察

図5に、ガントチャート形式で表したスケジューリング結果の一例を示す。この図は、縦軸にロボット名と作業箇所、横軸に時間をとったもので、各作業箇所のメンテナンス時間と、作業に割り当てられた各ロボットの作業時間を表している。

(a) 定型作業時

図5(a)は、定型作業である洗浄作業にロボットを割り当てるために、培養前に行ったスケジューリングの結果である。ここで、例えば、優先度1の作業「パイプの洗浄」(■のライン)は、培養後130sから165sまでに行う。これに対し、スケジューリングの結果、各ロボットが表3のように割り当てられている。同様に、優先度2「バルブの洗浄」(□のライン)、優先度3「培養槽の洗浄」(○のライン)に関しても各作業にロボットが割り当てられている。これらのラインがそれぞれ重なっていないことから、すべての作業にロボットが同時刻に重複なく割り当てられていることが確認できる。

(b) プラント故障時

定型作業のスケジューリング後、培養操作を開始し培養を行った結果、127sの時点で異常診断部が異常を検出し、診断を開始した。その結果、培養に必要なビタミンを供給するバルブ中のばねの老朽化が原因でバルブが開かず異常が起こったことが判明した。図5(b)は、その時に行われた再スケジューリングの結果である。この時、新たに発生した非定型作業「ばねの交換」(■のライン)を最優先の作業としてスケジューリングシステムが判断し、他の作業の優先度を下げてスケジューリングを行っている。ここでは、ばねの交換作業として、表4に示すように、(1) 交換部品の準備、(2) 故障部分の分解、(3) 故障部品の取り外し、(4) 交換部品の取付け、(5) 交換部分の組立、

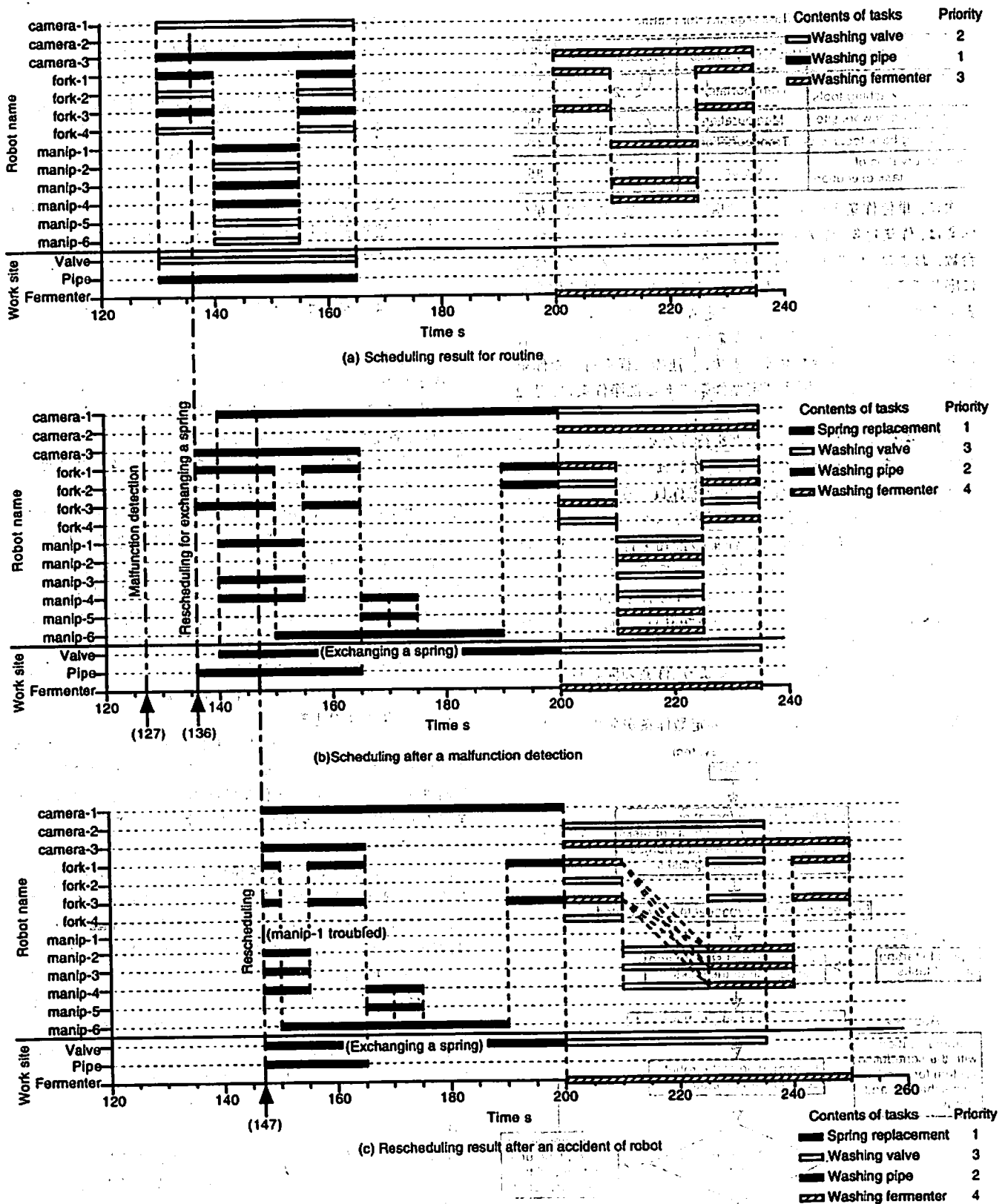


Fig. 5 Scheduling result

(6)故障部品の片づけを操作員が設定した。この作業要求に応じてスケジューリングシステムは136s以降の作業に対し再スケジューリングを行った。その結果スケジューリングシステムはばねの交換作業に対し表5のようにロボットを割り当てた。また、図より、優先度3の定型作業「バルブの洗浄」(□のライン)は、非定型作業「ばねの交換」の終了まで時間がずらされていることがわかる。ばねの交換作業は140~200sに行

Table 3 Scheduling result for washing a pipe

Unit task	Assigned robots	Time s
1) Preparation of washing tools	fork-1, fork-3	130 - 140
2) Washing of work site	manip-1, manip-3, manip-4	140 - 155
3) Putting back tools	fork-1, fork-3	155 - 165
4) Observation of task execution	camera-3	130 - 165

Table 4 Task sequence for exchanging a spring

Contents of new task	Necessary function	Necessary robots	Time s
1) Preparation of a new Spring	Transportation	2	10
2) Disassemble of a troubled place	Manipulation	3	15
3) Detaching a troubled spring	Manipulation	2	5
4) Installing the new spring	Manipulation	1	15
5) Assemble of the repaired place	Manipulation	1	15
6) Taking away the old spring	Transportation	1	10
7) Observation of task execution	Vision	1	60

Table 5 Scheduling result for exchanging a spring

Contents of new task	Assigned robots	Time s
1) Preparation of a new Spring	fork-1, fork-3	140 - 150
2) Disassemble of a troubled place	manip-6	150 - 165
3) Detaching a troubled spring	manip-4, manip-5, manip-6	165 - 170
4) Installing the new spring	manip-4, manip-5, manip-6	170 - 175
5) Assemble of the repaired place	manip-6	175 - 190
6) Taking away the old spring	fork-1, fork-3	190 - 200
7) Observation of task execution	camera-1	140 - 200

なうことを操作員が決定したため、既に130sから行われていたバルブの洗浄作業は、ばねの交換作業の後に回され優先度4の「培養槽の洗浄」(○のライン)と並行して行われるようスケジューリングされた。ただし、このとき既に「パイプの洗浄」(■のライン)を行っているロボット camera-3, manip-1, manip-3, manip-4には新しい作業の発生による影響はなく、引き続き前の作業に割り当てられていることがわかる。これより、システムの状態とロボットの作業状況に対応して、柔軟にスケジューリングできていることが確認できた。

(c) ロボット故障時

次に、ばねの交換作業を開始してから7s後(147s)に、manip-1が故障したため、manip-1がスケジューリングシステムに自分の故障状況を知らせた。図5(c)は、その情報からスケジューリングシステムが、manip-1を除いて再スケジューリングを行った結果である。このスケジューリングにより、manip-1が実行中であった優先度2の「パイプの洗浄」(■のライン)はmanip-2に割り当てられ、作業が継続された。また、200sから予定されていた優先度3の「バルブの洗浄」(□のライン)においても、manip-1の故障によりmanip-2が作業を代替するようにスケジューリングされたが、これにより、当初バルブの洗浄作業と並行して行われる予定であった優先度4の「培養槽の洗浄」(○のライン)に必要なロボットの台数が確保できなくなってしまう。このため、スケジューリングシステムは当

初200~235sの予定であった培養槽の洗浄を作業時間を200~250sに延長し、作業を完遂できるように調整した。これよりロボットの故障に対応し、作業順序と割り当て時間を調整できることが確認できた。

以上の実験結果より、非定型作業への対応、ロボットの機能を考慮したスケジューリング、プラントおよびロボットの状態に応じたスケジューリング等が可能であることが確認できた。これより、プラントやロボットの状態に適応的なスケジューリングが可能であり、本手法が有用であることが確認できた。

5. 結 言

本論文では、ロボット群によるプラント内作業を想定し、プラント内の作業にロボット割り当てるためのスケジューリング手法について議論した。スケジューリング情報の分散化によりシステム状況に適した情報収集が行え、適応的なスケジューリングが可能となった。また、作業手順をロボットの機能で実現できる単位作業の組合せとして表現し、更に、それらを操作員が状況に応じて組み合わせる手法を用いたことにより、ロボットの多機能性と非定型作業への対応が可能となった。パイオプラントのシミュレータを対象としてシステムを構築しスケジューリング実験を行った結果、プラントやロボットの状態に適応的なスケジューリングが可能であり、提案手法が有用であることを確認できた。

今後、より具体的かつ多様な作業を考慮し、実システムへの対応を図る予定である。

参 考 文 献

- 1) H. Asama: "Trends of Distributed Autonomous Robotic Systems", *Distributed Autonomous Robotic Systems*, eds. H. Asama, T. Fukuda, T. Arai, I. Endo, Springer-Verlag, Tokyo (1994) 3.
- 2) M. Ito: "Trends and Perspective of Researches on Control System Theory", *Distributed Autonomous Robotic Systems 2*, eds. H. Asama, T. Fukuda, T. Arai, I. Endo, Springer-Verlag, Tokyo (1996) 3.
- 3) 離散事象システム研究専門委員会編, 創立30周年記念ベトリネットとその応用, 計測自動制御学会, (1992).
- 4) M. Khattab and F. Choobineh: A New Heuristic for Project Scheduling with A Single Resource Constraint, *Computer and Ind. Eng.* 19, 1 (1990) 514.
- 5) E. M. Ehlers, E. Van Rensburg: An Object-Oriented Manufacturing Scheduling Approach, *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern.*, 26, 1 (1996) 17.
- 6) 森下真一, 沼尾雅之, 戸沢義夫: 協調型スケジューリングシステムによる製鋼工程スケジューリング: エキスパートシステム, *人工知能学会誌*, 5, 2 (1990) 184.
- 7) 長谷部伸治, 北島禎三, 橋本伊織: 最適化機能を有する自律分散型スケジューリングシステム, *日本学術振興会プロセスシステム工学第143委員会平成7年度第1回研究会資料* (1995).
- 8) 富田 守, 黒田千秋, 石田 愈: レシビを用いたパイプレスバッチプラント用自律分散型運転管理システムの提案, *化学工学論文集*, 18, 5 (1992) 629.
- 9) C. Kuroda and M. Ishida: A Proposal for Decentralized Cooperative Decision-Making in Chemical Batch Operation, *Eng. Appl. Artificial Intelligence*, 6, 5 (1993) 407.
- 10) 尾崎功一, 淺岡 一, 石田慶樹, 横田和隆, 松元明弘, 喜悅早人, 遠藤 勲: 自律分散型ロボットシステムにおける通信を用いた協調チーム構成手法の開発と評価, *日本機械学会論文集 (C編)*, 61, 587 (1995) 397.