

# 人を含んだ実世界エージェントの協調系における プランニングと実行

## Multi-Task Planning for Cooperative Environments with Human and Real-World Agents

松原 慶幸<sup>†</sup>, 上野 敦志, 沢田 篤史, 武田 英明, 西田 豊明  
Yoshiyuki MATSUBARA, Atsushi UENO, Atsushi SAWADA,  
Hideaki TAKEDA and Toyoaki Nishida

奈良先端科学技術大学院大学  
Nara Institute of Science and Technology

**Abstract:** In an environment in which people and robots coexist, robots are often expected to behave cooperatively according to asynchronous requests of people. In this paper, we propose a new method of multi-task planning using agents called *mediator* and *watcher*. Based on this method, we develop an experimental environment in which various kinds of robots cooperatively support works of people. Our planning method assumes that human requirements or tasks for robots are extracted by *watcher*. The extracted tasks are passed to *mediator* which bridges from human requirements to robots' actions. *Mediator* simulates behavior of robots to accomplish the task. At the same time, it decomposes the tasks into subtasks, assigns them to robots, and makes a plan. *Mediator* also requests robots to execute the plan coping with obstacles in the course of execution. If the execution fails, re-planning and re-execution procedure will be taken by *mediator*. The planning method is adopted to the environment in which various kinds of autonomous robots and people coexist. The experience shows the method enables robots to behave flexibly enough to meet the asynchronous requirements.

## 1 はじめに

我々は、ロボットと人間が混在する作業環境において、人間とロボットと計算機が協調することにより環境全体で人間の作業支援をする環境の構築を目指している。このとき、複数の人間が共存する作業環境では環境に対する要求は非同期に発生する。

この作業支援環境を構築するには、要求される作業を複数同時にプランニング(マルチタスクプランニング)する必要がある。マルチタスクプランニングの手法として、一つのプランナが全ての作業についてプランニングする手法、作業を実行するロボットごとにプランニングを行なう手法、作業ごとにプランニングを行なう手法がある。3番目の手法を取ることにより機能が分散されプランナの作成が容易となる。また、非同期に作業が要求される場合には作業が依頼されるごとにプランニングし直すよりも

効率良くプランニングを行なうことができる。しかし、この手法はプランナ間で競合が起こるため、生成されたプランを実行する際にこの競合を吸収する機能を付加する。これにより、非同期に作業が要求される環境においては、この手法が有効であると考えられる。

本稿では、この手法に基づき、メディエータおよびウォッチャと呼ばれる二種類のエージェントを用いたマルチタスクプランニングの手法を提案する。ウォッチャが環境中を観察することにより、作業の要求を抽出し、作業が抽出されるごとにメディエータを立ち上げ、作業を依頼する。メディエータは作業が依頼されると、その時の環境状況からシングルタスクプランニングを行ないプランを生成する。さらにメディエータは、実行の際に起こる競合に対応しながら生成されたプランの実行をロボットに指示する実行が失敗した場合には、その時点から再プランニングおよび再実行を行なう。

本稿では、提案するプランニング手法を異種の自律型ロボットが人間と混在する環境に適応し、人間から非同期に要求される作業のロボットによる柔軟な協調により支援が可能となることを報告する。

<sup>†</sup>連絡先: 奈良先端科学技術大学院大学  
情報科学研究科 知能情報処理学講座  
〒630-01 奈良県生駒市高山町 8916-5  
Tel: 07437-2-5265 Fax: 07437-2-5269  
E-mail: yosiyu-m@is.aist-nara.ac.jp

## 2 人の作業支援環境

人の作業支援を行なうためには、機能を補い合うための異なる機能を持つ自律型ロボットによる協調が必要となる。また、この協調のためのプランニング手法が必要となる。以下ではエージェント協調のためのプランニングとロボットの協調方式の背景について述べる。

### 2.1 協調のためのプランニング

協調問題解決 [2] として複数のエージェントのためのプランニングは従来から研究されている。初期においては固定的な問題を前提に研究が進められた。Konolige は他のエージェントに処理を頼むことを含めてプランをたてる研究を行なった [4]。一方、Georgeff らは独立に構築された複数のエージェントのプランを一ヶ所で同期するアルゴリズムを提案した [1]。

最近では、変動する環境中で、自律的あるいは協調して動作するエージェントモデルの研究 [7] が盛んになっている。また、動的な環境での問題解決を行なっている共同プラン生成に関する研究 [8] も行なわれている。この研究ではエージェントは部分的なプランを持ち寄る。各エージェントのプラン間には不整合もあり得るが、エージェント群は機会主義的に共同動作の可能性を推定し、整合する共同プランを作り上げる。

### 2.2 ロボットの協調方式

ロボットの協調方式には、通信を用いる方法と用いない方法がある。

通信を用いない方法の例として、観察に基づく協調」が挙げられる [5]。ロボットの高度な観察機能により、分散自律ロボットの協調を実現する方法である。各ロボットは互いに行動を観察し、その結果と現在の状況に応じて適切な協調行動を行なう。この方式の協調では、他のロボットの行動を観察のみで理解するのが困難であることが問題になる。

通信を用いる方法は、通信を用いて自分の行動を伝達し、また、相手から行動を伝達してもらうことにより相互理解する方法である。実際、ロボットはそれぞれ開発された経緯が異なるため、一般にロボットが持つ知識は各ロボット固有の知識となっている。したがって、ロボットの固有の知識をそのまま伝達しても相互理解することは困難であることが問題になる。この問題の研究例として、ロボットをエージェントとし、エージェント間で共有できるメッセージを定義することで異種ロボットの協調を柔軟に行なう研究 [9] [3] がある。

## 3 実世界エージェントの構成

異種ロボット間で相互理解するため自律型ロボットのエージェント化を行なう。エージェント化した自律型ロボットを実世界エージェントと呼ぶ。但し、ロボットのエージェント化とはエージェント間で共有できる知識を伝達することができ、伝達された知識を利用できる機能をロボットに持たせることとする。

実世界エージェントは他のエージェントとの通信部分を担当する通信サブエージェント、実世界エー

ジェントの頭脳に相当し、このサブエージェントを含む実世界エージェントの状態を管理する機能、伝達されたメッセージをハードウェアサブエージェントが理解できるメッセージに変換する機能を持つ論理サブエージェント、自律的な行動が可能で通信機能を持つロボットに相当するハードウェアサブエージェントから構成される。実世界エージェントを機能面で支援するための協力エージェントは、実世界エージェントと密な関係を持つ。協力エージェントとして、実世界エージェントの移動を監視し移動に関する障害が起こった場合にはその仲介を行なうオブザーバと、人とのコミュニケーションを円滑に行なうコミュニケーションエージェントがあげられる。詳しくは [6] を参照されたい。

以下にエージェントとして用いたロボットをあげる。

1. **双腕搭載搬送用行動型ロボット (Kappa1a)**  
本機は 2 台のカメラ、4 本のマイクロホンアレー、超音波センサー、赤外線センサー、接触センサー、6 自由度でグリッパーを持つ腕を 2 台有し環境地図をもとに移動する自律走行型ロボットである。
2. **搬送用行動型ロボット (Kappa1b)**  
本機は、物の搬送を主目的とし、腕を搭載していない点以外は Kappa1a と同様の仕様である。
3. **自律型棚 (Rack)**  
本機は棚と収納および取り出し動作を行なう搬送テーブルから構成されており、合計 9 個のセルから収納物の取り出しを行なうことが可能である。
4. **自律型ドア (Door)**  
本機は扉の駆動部と計算機から構成されている。ネットワーク上の計算機から、シリアル回線につながった制御装置により扉の開閉を行なう。

## 4 実世界エージェント協調実現のためのアーキテクチャ

本システムの構成要素を図 1 に示す。A さん、B さん

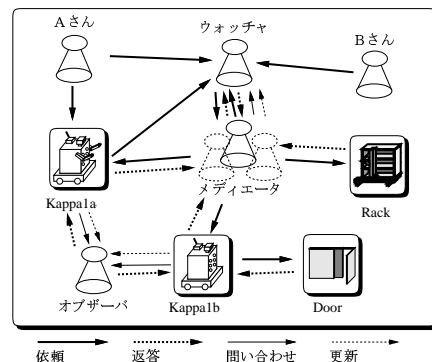


図 1: 環境構成

んのそれぞれから作業が依頼されるとする。作業はロボットに直接要求される場合と、計算機を通して要求される場合がある。環境中を監視しているエージェント (ウォッチャ) が作業の要求を抽出するとブ

ランニングおよび実行依頼をするエージェント(メディアータ)に名前を付けて立ち上げ、そのメディアータに作業を依頼する。メディアータは依頼される作業を実世界エージェントが実行できるタスク列に分解し、そのタスク列をそれぞれ実世界エージェントに割り当て、実行を依頼する。また、自律型ロボットが移動する際、移動状況を監視しているエージェント(オブザーバ)に他の自律型ロボットの移動状況を問い合わせることにより移動経路を作成し移動する。移動に関して競合が起こった場合にはオブザーバがその仲介を行なう。

## 5 マルタスクプランニング

プランニングに必要な環境状況を把握し、作業が依頼されるたびにメディアータを立ち上げ、そのメディアータに作業を実行依頼するウォッチャと、プランニングと生成されたプランの実行依頼の機能を持つメディアータの協調によりマルチタスクプランニングおよび生成されたタスク列の実行依頼を行なう手法について説明する。

### 5.1 ウォッチャの機能

ウォッチャの機能は以下の通りである。

- 環境中から作業が要求されたら、メディアータに名前つけて起動し、要求された作業をメディアータに依頼する。
- プランニングに必要な環境状況を監視しており、環境状況に関する問い合わせに答える。
- メディアータからの作業実行による状況変化の報告により、環境状況に関する知識を更新する。

### 5.2 ウォッチャの動作

ウォッチャに作業が依頼される時の動作を図2aに示す。人間から作業を依頼されるとメディアータに

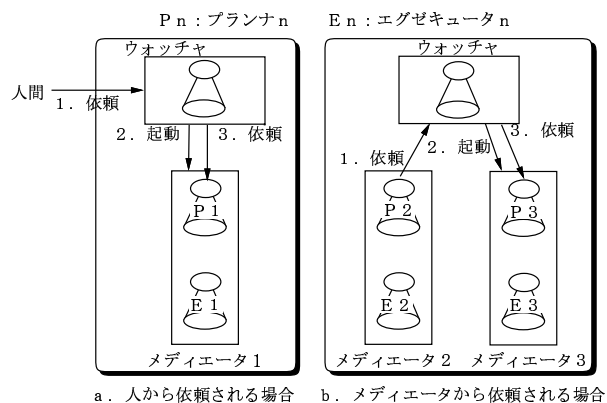
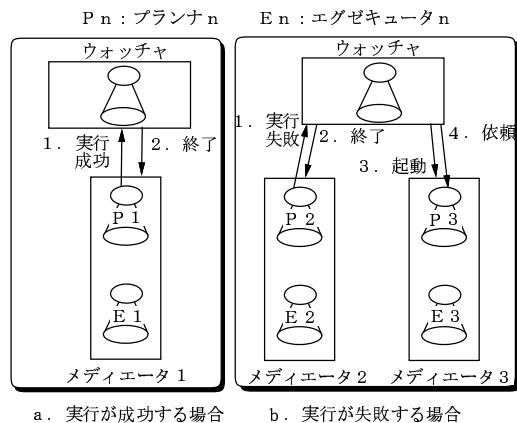


図 2: 作業が要求される時の動作

名前をつけを立ち上げ、そのメディアータのプランナ部に作業を依頼する。作業は人間からウォッチャに直接依頼されるのではなく、計算機上のインターフェースを通してか、実世界エージェントを通して依頼される。また、メディアータからウォッチャに作業を依頼する時も図2bのように、ウォッチャはメ

ディアータを起動し、そのメディアータのプランナ部に作業を依頼する。

依頼した作業が終了した時の動作を図3aに示す。実行が成功した場合は、そのメディアータを終了させる。実行が失敗した場合の動作を図3bに示す。この場合、失敗したそのメディアータを終了させ、後から、新たにメディアータを立ち上げ、失敗した作業を再度依頼する。



a. 実行が成功する場合 b. 実行が失敗する場合

図 3: 実行が終了した時の動作

### 5.3 メディアータの機能

メディアータの機能は作業のプランニングと実行である。これらの機能をそれぞれプランナ部とエグゼキュータ部に分ける。プランナ部では、属性値の決定、作業の行為分解、エージェントの割り当て、再プランニングを行なう。プランの実行では、タスクの実行依頼、エージェントの束縛、タスク実行の保留および破棄を行なう。

#### 5.3.1 プランナ部の動作

プランナ部に作業が依頼される時の動作を図4aに示す。プランナは作業が依頼されると環境状況を

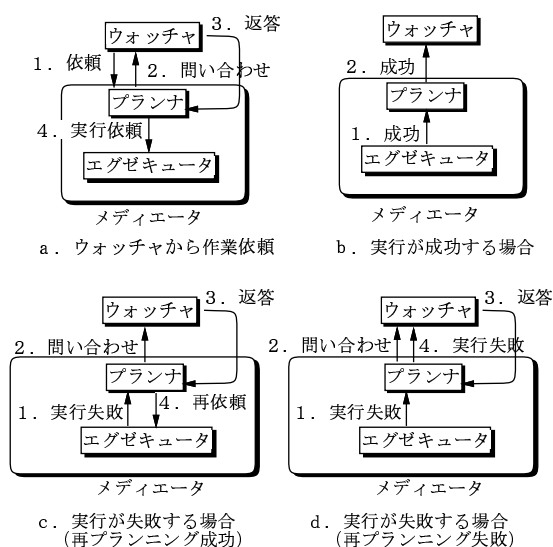


図 4: プランナの動作

ウォッチャに問い合わせる。この環境状況に従ってプランニングを行ない、生成したプランをエグゼキュ

タに依頼する。エグゼキュータからプランの実行が成功したと伝えられると、図 4b に示すように成功したことをウォッチャに知らせる。

図 4c,d のように、実行が失敗した場合、プランナはウォッチャに失敗した時点の環境状況を問い合わせ、その状況に従って、再プランニングを行なう。これにより、再プランが生成される場合は図 4c のように再度実行依頼を行なう。他のプランが生成されなかった場合は図 4d のように実行が失敗したことをウォッチャに伝える。

### 5.3.2 エグゼキュータ部の動作

エグゼキュータ部では、図 5a のようにプラン実行が依頼されると、必要なエージェントの獲得を行なう。獲得できた場合は図 5c のように実世界エージェントに実行依頼する。実行が成功したら、エグゼキュータ部はこの実行による状況変化をウォッチャに伝える。図 5c の 1, 2, 3 をタスク列全てを実行するまで繰り返す。実行が失敗した場合は図 5d のように失敗したことをプランナ部に伝える。

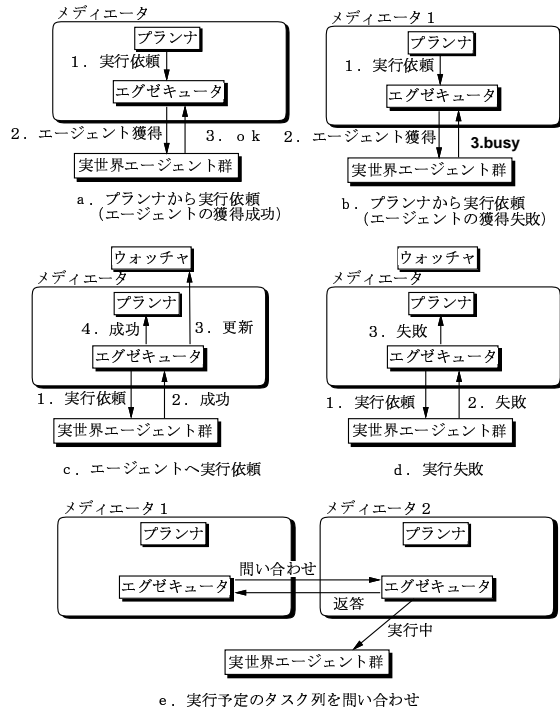


図 5: エグゼキュータの動作

必要なエージェントが他のプランを実行中の場合は、図 5b のようにそのエージェントを束縛できない。この場合、図 5e のように、そのエージェントを束縛しているエグゼキュータに今後の予定を問い合わせ、この予定に従って実行を保留するか、破棄するかを判断する。

## 6 人の作業支援の実現

### 6.1 協調動作の分類

非同期に要求される作業支援を行なう時のウォッチャとメディエータの動作を以下に分類し、後節で

それぞれの動作について述べる。

- 作業が独立している場合。
- 作業間で競合が起こる場合。
- 作業が分割される場合。
- エージェントの移動に関して競合が起こる場合。

### 6.2 作業支援の実行情例

#### 6.2.1 作業が独立している場合

協調動作による作業支援例を図 6 に示す。例として作業 A「A さんのところに solaris のマニュアルを持ってくる」を要求された場合のエージェント間のメッセージを図 8 に示す。図 8 の先頭番号は図 6 の番号に対応する。図 8 の (1~5) でメディエータが立ち上がり、要求された作業がプランニングされ、実世界エージェントに分解したタスクを実行依頼し始める。(6~11) では Kappa1b が棚の前に移動する。(12~16) では Rack がマニュアルを Kappa1b に渡す。(17~21) では Kappa1b が A さんの前に移動する。(22~24) では Kappa1b が A さんにマニュアルを渡す。(25,26) では作業を終了したメディエータを終了させる。

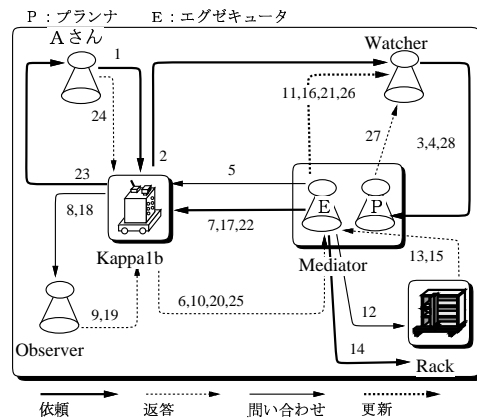


図 6: 協調動作時のメッセージフロー例

```
(fetch (object solaris)
      (destination human1))
↓
((move (subject Kappa1b)
      (from (at Kappa1b))
      (to (in_front_of Rack)))
 (handover (object solaris)
           (from_place (on Rack))
           (to_place (on Kappa1b))
           (subject Rack))
 (move (subject Kappa1b)
      (from (at Kappa1b))
      (to (in_front_of Human2)))
 (tell (subject Kappa1b)
       (at Kappa1b)
       (content (talk Here_you_are))))
```

図 7: プランニング例

#### 6.2.2 作業が分割される場合

人から実世界エージェントに直接作業が要求されるとメディエータのプランナ部はプランニングの際、

そのエージェントを優先してタスクの割り当てを行なう。しかし、そのエージェントが機能面において要求された作業を実行できない場合がある。その場合プランナ部は、そのエージェントを待機場所へ移動させる作業をウォッチャに要求し、人から要求された作業を他のエージェントに割り当て実行する。例えば、図 9では、「コーヒーを持つことができない kappa1b に「コーヒーが持ってくる」作業が要求された場合、メディエータはこの作業を kappa1a に割り当て、kappa1b を待機位置に移動する作業をウォッチャに要求する。

1. Human1 が Kappa1b に作業Aを依頼する。
2. Kappa1b はウォッチャに作業Aを依頼する。
3. ウォッチャはメディエータを立ち上げる。
4. 作業Aをプランナ部 (P) に依頼する。
5. プランナ部は作業Aのプランニングをし、図7に示すようなタスク列を生成する、エグゼキュータ部 (E) はタスクを依頼する Kappa1b に「今、仕事ができますか」問い合わせる。
6. Kappa1b はメディエータに「OK」を返す
7. メディエータは Kappa1b に「Rackの前へ移動」を依頼する。
8. Kappa1b はオブザーバに「他の実世界エージェントの移動状態」を問い合わせる。
9. オブザーバは「Kappa1aがW2にいる」と返答する。
10. Kappa1b は Kappa1a の状態を考慮し、棚の前までの経路を作成し移動後、「OK」を返す。
11. エグゼキュータ部は「Kappa1bが棚の前に移動したこと」をウォッチャに伝える。
12. エグゼキュータ部は次のタスク「マニュアルの取り出し」のため、Rackに「今、仕事ができるか」問い合わせる。
13. Rackはエグゼキュータ部に「OK」を返す。
14. エグゼキュータ部はRackに「マニュアルの取りだし」を依頼する。
15. Rackは取りだし終了後、エグゼキュータ部に「OK」を返す。
16. エグゼキュータ部は「Kappa1bの上にマニュアルが載ったこと」をウォッチャに伝える。
17. エグゼキュータ部は Kappa1b に「Human1の前へ移動」を依頼する。
18. Kappa1b はオブザーバに「他の実世界エージェントの移動状態」を問い合わせる。
19. オブザーバは「Kappa1aがW5にいる」と返答する。
20. Kappa1b は Kappa1a の状態を考慮し、Aさんの前までの経路を作成し、移動後、エグゼキュータ部に「OK」を返す。
21. エグゼキュータ部は「Kappa1bがHuman1の前に移動したこと」をウォッチャに伝える。
22. エグゼキュータ部は Kappa1b に「solarisのマニュアルをHuman1に渡す」を依頼する。
23. Kappa1b はAさんにマニュアルを渡し、メディエータに「OK」を返す。
24. エグゼキュータ部は「Kappa1bの上に何も載っていないこと」をウォッチャに伝える。
25. プランナ部はウォッチャに作業Aが終了したことを伝える。
26. ウォッチャはメディエータを終了させる。

図 8: 協調動作時のメッセージ例

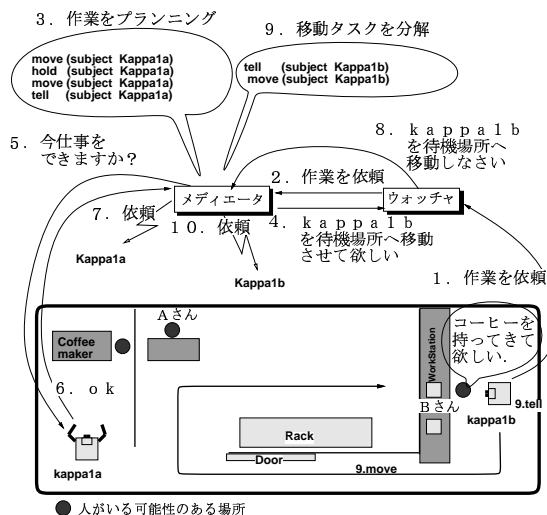


図 9: 作業が分割される場合の動作例

### 6.2.3 移動に関して競合が起こる場合

複数の実世界エージェントが環境中を移動すると実世界エージェント間で衝突回避を行なう必要がある。このため、オブザーバが実世界エージェントの移動状況を把握しており、実世界エージェントはこの状況を問い合わせることにより移動経路を作成する。しかし、状況を問い合わせたところ、目的地への経路上に他の実世界エージェントがいるために移動できない場合が生じる。この場合にはオブザーバが仲介を行ない、障害となっている実世界エージェントを移動させる。しかし、本マルチタスクプランニング手法では障害となる実世界エージェントがタスク実行中の場合はあるエグゼキュータに束縛されているため、オブザーバは仲介を行なうことができない。したがって、この場合は実世界エージェントは障害となる実世界エージェントが障害とならない位置へ移動するまで待機するか、移動を失敗とする。

### 6.2.4 作業間で競合が起こる場合

人間から非同期に作業が要求されると、これらの作業が特定の実世界エージェントを同時に必要とする場合、競合が生じる。この場合、ウォッチャは作業ごとにメディエータを立ち上げ、メディエータはプランニングを行ない、その作業に必要な実世界エージェントを束縛する。最初にその実世界エージェントを束縛したメディエータの作業は実行される。それ以外のメディエータは必要としている実世界エージェントを束縛しているメディエータに今後実行予定のタスク列を問い合わせ、必要としている実世界エージェントが解放されるまでの時間を推測し、後から再度その実世界エージェントを獲得するか、実行しようとしているタスク列を失敗とするかを判断する。例えば図 10のように、「コーヒーを運ぶことができるエージェントは kappa1a だけの時「コーヒーを持ってきくる」作業が二つ以上要求された場合は後からの要求の実行を保留するか、実行を失敗させ、ウォッチャが後から再実行する。

う。これにより、生成されたプラン間で競合が起こった場合でも対応することができる。

以上のことから、非同期に依頼される作業を異なるエージェントの協調により支援する環境を実現するには、作業ごとにプランニングを行ない、生成されたプラン間で生じる競合を実行時に埋め合わせる手法が有効であることが分かった。

## 8 結論と展望

ウォッチャとメディエータの協調によるプランニング手法を複数の人間と異種ロボットが共存する環境に適応することにより、人間から非同期に依頼されるタスクをロボットが柔軟に協調し人間の作業支援を行なうことができることを示した。

本手法では他のメディエータからの割り込みによる実行の破綻を防ぐため、ロボットが待機しているときも束縛していることがある。今後、必要に応じてメディエータ間で交渉を行ない、エージェントを効率良く利用できるよう発展させていきたいと考えている。

## 参考文献

- [1] Georgeff, M.P. Communication and Interaction in Multi-Agent Planning. AAAI-83, pp.125-129, 1983.
- [2] 石田 亨, 桑原和宏. 分散人工知能 (1) : 協調問題解決. 人工知能学会誌, Vol.7, No.6, pp.945-954, Nov, 1992.
- [3] 岩田浩司, 鷹合 基行, 沢田篤史, 武田英明, 西田豊明. メディエータを用いた物理エージェントとソフトウェアエージェントの協調環境の構築. 電子情報通信学会技術研究報告, AI95-42, pp.1-8, Jan, 1996.
- [4] Konolige, K. and Nilsson, N.j. Multiple-Agent Planning System AAAI-80, pp.138-141, 1980.
- [5] 國吉康夫. マルチロボットにおける観察に基づく協調. 電子情報通信学会技術研究報告, PRU95-156, pp.49-54, 1995.
- [6] 小林展英, 上野 敦志, 沢田 篤史, 武田 英明, 西田 豊明. 実世界エージェントの協調における人間-ロボット間のコミュニケーション. 人工知能基礎論研究会, Mar, 1997.
- [7] Levesque, H.J., Cohen, P.R. and Nunes, J.H.T. On Acting Together. AAAI-90, pp.94-99, 1990.
- [8] Osawa, E. and Tokoro, M. Collaborative Plan Construction for Multiagent Mutual Planning. MAAMAW91, 1991.
- [9] Hideaki Takeda, Koji Iwata, Motoyuki Takaai, Atsushi Sawada, and Toyoaki Nishida. An ontology-based cooperative environment for real-world agents. Proceedings of Second International Conference on Multiagent Systems, pp.353-360, 1996.

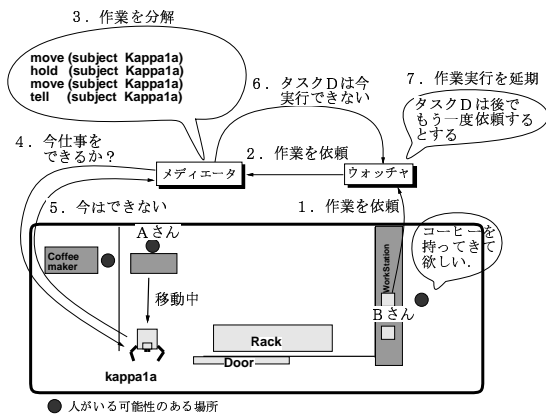


図 10: 競合が起こる場合の動作例

## 7 考察

作業支援の実行結果から考えられる本マルチタスクプランニング手法の各機能についての効果を以下に記す。

### ● ウォッチャ

環境の監視をしており、作業が依頼されるとメディエータを立ち上げ作業実行依頼を行なう。また、実行が失敗した作業を後から再実行依頼を行なう。また、環境状態を把握する機能を持ち、メディエータからの問い合わせに答える。メディエータは作業ごとに立ち上げられ、作業実行が終了と終了してしまうので、環境状態把握機能は欠かせない。

### ● メディエータ (プランナ部)

作業ごとに次のようにプランニングを行なう。要求された作業をエージェントが実行できるタスク列に分解し、それぞれのタスクにエージェントを割り当てを行なう。これにより作業ごとに独立してプランニングできるため非同期に要求される環境でに適している。また、タスク列の実行が失敗した場合には再プランニングを行なうことにより、環境状況の動的な変化に対応することができる。

### ● メディエータ (エグゼキュータ)

生成されたタスク列をエージェントに実行依頼する。実行の際、タスク列に必要な各エージェントをそれぞれ必要となる時からそのエージェントに依頼するタスクがなくなるまで束縛する。これにより、タスク列実行中に他のメディエータに割り込まれることがなくなり、タスク列実行が成功しやすくなる。このため、タスク実行中のエージェントを必要とするメディエータは、必要となるエージェントを束縛しているメディエータに今後実行予定のタスク列を問い合わせ、この予定から必要なエージェントが解放されるまでの時間を推測し、待ち時間が長い場合は実行を失敗とし、短い場合はそのまま待機し、再度そのエージェントの獲得を行な