

# 産業機器への自動計画の適用に関する取り組み

## Application of Automated Planning to Industrial Systems

越 智 公 友 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部  
近 藤 智佳子 高度情報マネジメント統括本部企画開発部 博士（工学）  
前 田 宗 彦 技術開発本部総合開発センター制御技術開発部  
河 野 幸 弘 情報システム部 部長

近年、産業機械システムでは多機能化に伴い、システムの複雑化が進んでいる。それらは各装置が部品や作業の種類に応じて柔軟に同期しながら一連の動作を行うため、各装置の動作条件を考慮してシステム全体の動作手順を設計するには多くの時間が必要となる。この問題に対応するため、装置の構成と動作の制約条件からシステム全体の動作手順を自動生成する自動計画という手法に取り組んでいる。本稿では自動計画についての概要と、産業用ロボットシステムを例とした自動計画の適用と自動生成された動作手順の評価について述べる。

Recently, industrial systems have become more and more complex due to increases in functionality. As a result, the task of designing the sequence of each device and robot constituting the system has become highly time-consuming. We researched a technique called “Automated Planning” to automatically generate the sequence based on a model of the system configuration and the constraint conditions on the movements of the device and robot. In this paper, we describe the proposed planning method, and present an example application and the results of the evaluation using an industrial robot.

### 1. 緒 言

近年、産業機械システムの複雑化が進んでいる。システムが複雑化するに従い、①各装置の動作条件を考慮してシステム全体の動作手順を設計するには多くの時間が必要となる②構成要素である各装置の増減や動作条件の変更に伴う設計見直しに多大な労力が必要となる、といった課題が顕在化してきた。これらの課題を解決するための手法の一つとして、自動計画<sup>(1), (2)</sup> (Automated Planning) がある。

筆者らは、自動計画を用いた産業機械システムの動作手順の自動生成について検討を行った。

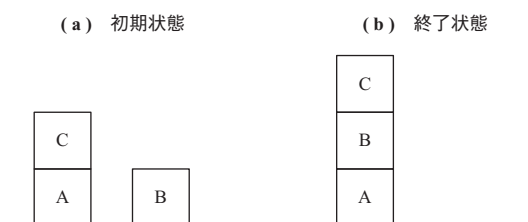
たとえば、複数台のロボットから成るセル生産方式の産業用ロボットシステムは、ロボット間の干渉などの制約からシステム全体の動作手順の作成に多くの時間を要する。筆者らはセル生産方式の産業用ロボットを例として、自動計画を用いた動作手順の自動生成手法の評価を行った。

本稿では、自動計画の概要と、自動計画を用いて自動生成した産業用ロボットシステムの動作手順の評価結果について述べる。

### 2. 自動計画技術

#### 2.1 プランニング問題

ある状態（初期状態）のものを目的の状態（終了状態）にするまでに必要な動作と、その順序（動作手順）を求める問題をプランニング問題と呼ぶ。プランニング問題の古典的な例として、積み木の世界 (Blocks World) と呼ばれる問題がある。この問題は第1図に示すような積み木の初期状態と終了状態、および第1表に示すような問題の中で利用可能な動作の一覧と、各動作の制約条件および効果が与えられた場合に、初期状態の積み木を終了状態にするための動作と動作手順を得ることが目的である。たとえば第1図、第1表に示す問題の解は、第2図に示すように、①CをAから床に移動②Bを床からAに

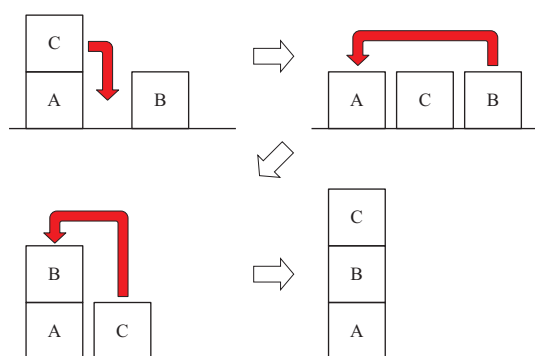


第1図 積み木の世界の初期状態、終了状態  
Fig. 1 Example of initial and goal states of blocks

第 1 表 積み木の世界 動作一覧

Table 1 Example of action list performed on blocks

	動 作	制 約 条 件	効 果
1	A を B から床に移動	1. B の上に A がある。 2. A の上に何も無い。	1. 「B の上に A がある」ではない。 2. 床の上に A がある。 3. B の上に何も無い。
2	A を C から床に移動	1. C の上に A がある。 2. A の上に何も無い。	1. 「C の上に A がある」ではない。 2. 床の上に A がある。 3. C の上に何も無い。
3	A を B から C に移動		
4	A を C から B に移動		
...			
18	C を床から B に移動	1. 床の上に C がある。 2. C の上に何も無い。 3. B の上に何も無い。	1. 「B の上に何も無い」ではない。 2. 「床の上に C がある」ではない。 3. B の上に C がある。



第 2 図 積み木の世界 求める動作手順  
Fig. 2 Plan for the given problem

移動 ③ C を床から B に移動, という 3 動作と動作手順となる。

## 2.2 自動計画手法

自動計画は人工知能の一分野であり, 前述したプランニング問題などを解決することを目的としている。積み木の世界のような単純な問題だけでなく, 時間や資源の制約を考慮した産業分野への応用問題に近い問題を解決する手法も存在する。また, 自動計画は特定の問題を対象とするのではなく, さまざまな領域の問題に適用できるように発展してきたことから, 自由度が高く, 拡張しやすいという利点をもっている。後述する汎用記述言語と, 汎用記述言語に対応した汎用プランニング手法を用いることで, 動作手順の自動生成への適用が容易になる。

## 2.3 汎用記述言語

汎用記述言語は, プランニング問題を表現するために考えられた言語であり, 表現できる問題の幅が広いという特徴をもつ。筆者らは PDDL<sup>(3)</sup> (Planning Domain Definition Language) と呼ばれる汎用記述言語を採用した。

PDDL は, 人工知能の自動計画/スケジューリング分野における標準的な記述言語である。アルゴリズムとの分離性が高く, 自動計画/スケジューリングアルゴリズムの性能を競う競技会である IPC (International Planning Competition) において, 問題を表現するための言語として用いられている。

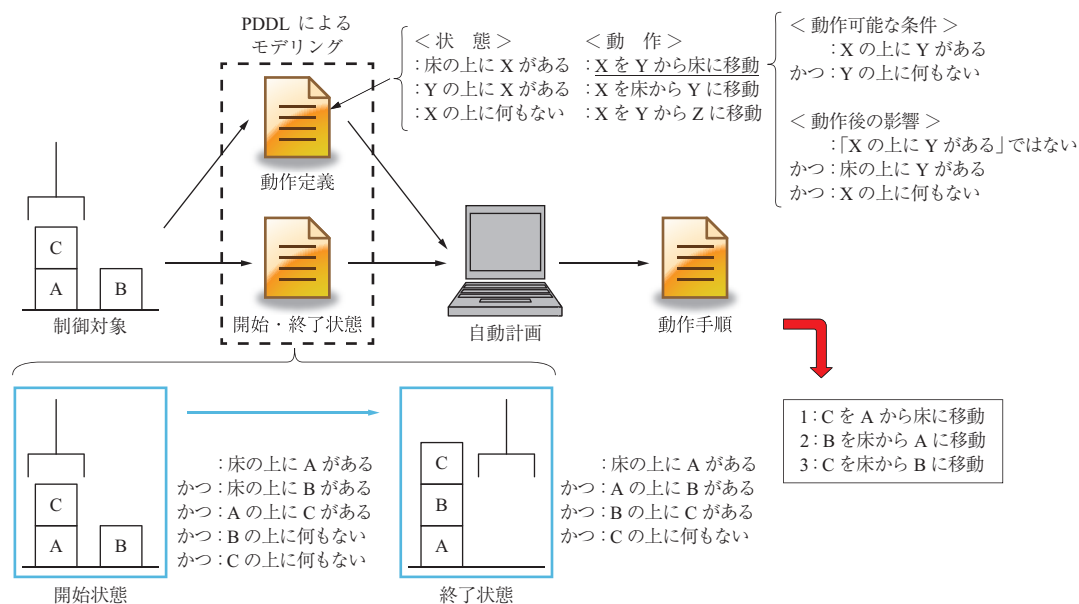
## 2.4 汎用プランニング手法

汎用プランニング手法は, 汎用記述言語で記述されたモデルを用いて動作手順を生成するための手法である。個々のモデルの特徴や性質を用いず, 汎用的な手法のみを用いて動作手順を作成するため, モデルへの依存度が低い。汎用プランニング手法を用いた既存のソフトウェア (汎用プランニングソフトウェア) も多く開発されており, The Fast Downward Planning System<sup>(4)</sup>, BLACK BOX<sup>(5)</sup>などが有名である。筆者らは, The Fast Downward Planning System を参考に, 最適化性能を向上させるための仕組みと, 時間の概念を考慮した動作手順を出力できる仕組みを加えた汎用プランニングソフトウェアを開発した。

## 2.5 自動計画手法を用いる利点

自動計画を用いた動作手順の自動生成の例 (自動計画システム構成) を第 3 図に示す。システムの構成, 各装置の動作の制約条件と動作後の状態を記述した動作定義に関するモデル, およびシステムの開始・終了状態を記述したモデルを作成することで, 各装置が動作を行った場合に装置の状態がどのように変化するかを追跡しながら, 目的の終了状態になるまでに必要な各装置の一連の動作 (動作手順) を見つける。

自動計画手法を利用する利点は, 設計者はモデルの作成のみを行えばよいということである。動作手順を作成する



第3図 自動計画システム構成  
 Fig.3 Automated Planning system

ため、制約条件を満たしながら全体の作業時間が短くなる動作の組み合わせを求めると、この作業を手で行う場合、経験を積んだ設計者が長い時間を費やして行う必要がある。一方、自動計画を用いる場合は、動作の組み合わせを求め作業は汎用プランニング手法を用いて自動的に行うことができるため、設計者を動作手順の作成に要する長い時間から解放できる。

また、人手で動作手順を作成する場合には、作成された動作手順の効率は個人の能力に依存する。自動計画を用いることで、個人の能力に依存することなく、効率の良い動作手順の生成が可能である。

### 3. 組立ロボットシステムを例とした評価

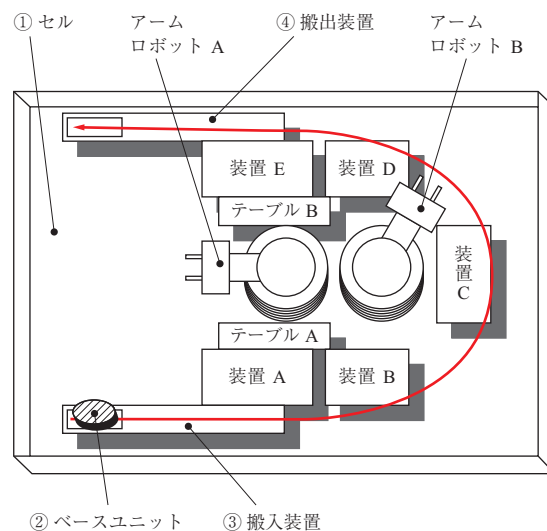
セル生産方式の組立ロボットシステムの動作手順の自動生成を例に、自動計画手法を適用し、性能の評価を行った。

#### 3.1 組立ロボットシステムの仕様

対象とした組立ロボットシステムの模式図を第4図に示す。ロボットセルでは、第4図の矢印の方向にベースユニット（組み立てる製品のメイン部分）を搬送しながら、部品の組み付けを行う。セルの具体的な動きと制約は以下のとおりである。

##### 3.1.1 ロボットセルの動作

- (1) セル①の中に配置された2台のアームロボットAおよびBと5台の装置A～Eが搬送や組み付けを行う。
- (2) 搬入装置③は、ベースユニット②をセル内へ搬入



第4図 組立ロボット模式図  
 Fig.4 Diagram of the robot system

する。

- (3) 2台のアームロボットAおよびBは、搬入装置、後述の搬出装置④、装置A～E間でのベースユニットの搬送や、ベースユニットへの部品の組み付けを行う。
- (4) 装置A～Eは、ベースユニットへの部品の組み付けを行う。
- (5) 搬出装置は、作業が終わったベースユニットをセルから次工程へ搬送する。

##### 3.1.2 動作制約

- (1) 2台のアームロボットAおよびBは同時に同一の装置にアクセスできない。

- (2) 2台のアームロボット A および B と装置 A ～ E は干渉しない範囲で独立・並行して動作が可能である。
- (3) セルの中には複数のベースユニットが存在してもよい。
- (4) ベースユニットへの部品の組み付けは、装置 A から E へと順番に行わなければならない。
- (5) ベースユニットの間で組み付け順序の優先順位はなく、セルの中に複数のベースユニットがある場合は、どのベースユニットから作業を行ってもよい。

### 3.2 評価方法

汎用記述言語で作成した組立ロボットシステムのモデルと、開発した汎用プランニングソフトウェアを用いて動作手順を生成する。

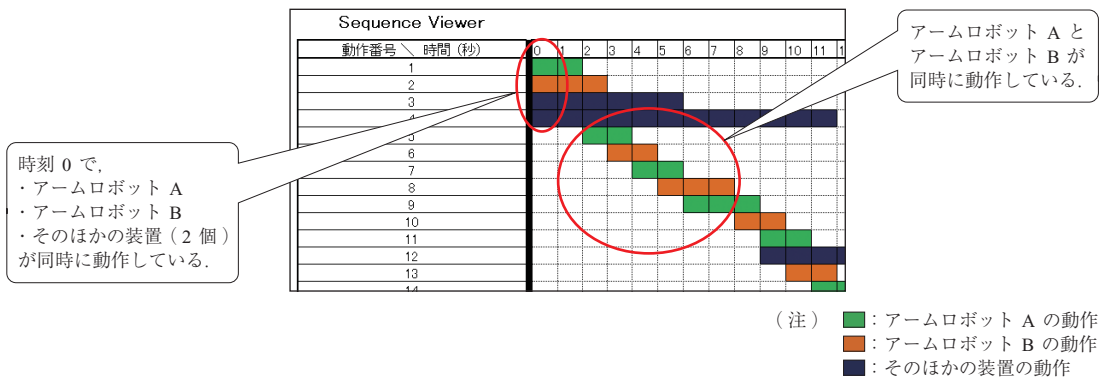
自動計画で得られた動作手順について、① 各装置の制約条件を考慮した動作手順が得られていること ② 人手で作成した動作手順と同程度以下の作業時間となる動作手順

が得られていること（つまり、自動計画によって人手と同程度以上の効率の動作手順が得られていること）、の確認を行う。

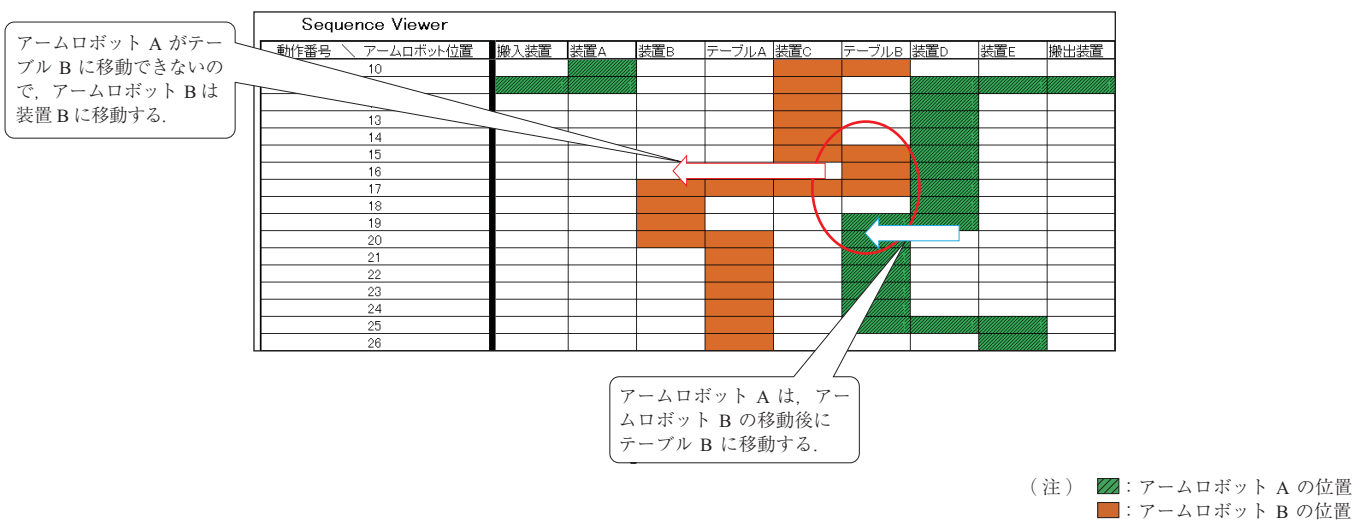
### 3.3 結果

今回の組立ロボットシステムにおいて生成された動作手順のガントチャートの一部を第5図に示す。開始時刻において、動作1のアームロボット A、動作2のアームロボット B、動作3と動作4のそのほかの装置の四つの機器が同時並行的に動作していることが分かる。また、3～8秒の間においても、アームロボット A（緑色の帯）とアームロボット B（オレンジ色の帯）が同時に動作していることが分かる。

生成されたガントチャートを基に、各動作実行時のアームロボットの位置を示したものが第6図である。第6図において、緑色のセルがアームロボット A の、オレンジ色のセルがアームロボット B の位置を示す。動作17から動作19において、得られた動作手順がテーブル B での



第5図 生成された動作手順のガントチャート  
Fig. 5 Gantt chart of the formulated plan



第6図 生成された動作手順のアームロボットの位置  
Fig. 6 Arm robots' positions according to the formulated plan

干渉を回避していることが確認できる。

この例では、人手で作成した動作手順で要する作業時間を 100 とすると、自動計画によって生成された動作手順で要する作業時間は 95 であった。対象とする問題や条件にもよるが、自動計画を用いることで人手で作成した動作手順と同程度以上の効率をもった動作手順を自動生成できることが確認できた。

#### 4. 結 言

自動計画を用いた産業機械システムの動作手順の自動生成を提案した。自動計画を用いることで、人手での動作手順の作成に要する時間を減らしながら効率的な動作手順を生成することが可能である。組立ロボットの動作手順の生成に汎用プランニングソフトウェアを用いた自動計画を適用し、妥当な動作手順を生成できること、人手で作成したものと同程度の効率の動作手順が生成できることを確認した。

今後も自動計画手法の最適化性能の向上や対象とする装置のモデル作成を補助する仕組み作りなどを進め、IHI グループ製品の動作効率の向上を図っていく。

#### 参 考 文 献

- (1) Malik Ghallab, Dana Nau and Paolo Traverso :  
AUTOMATED PLANNING theory and practice  
Morgan Kaufmann Publishers (2004.5)
- (2) Stuart Russell and Peter Norvig : エージェントア  
プローチ人工知能 第2版 古川康一訳 共立出版  
2008年
- (3) Drew McDermott and the AIPS-98 Planning  
Competition Committee : PDDL-The Planning  
Domain Definition Language Technical Report  
CVC TR98003/DCS TR1165 (1998)
- (4) Malte Helmert : The Fast Downward Planning  
System Journal of Artificial Intelligence Research  
Vol.26 Issue1 (2006.5) pp.191 - 246
- (5) Henry Kautz and Bart Selman : BLACKBOX A  
New Approach to the Application of Theorem Proving  
to Problem Solving Working notes of the AIPS-  
98 Workshop on Planning as Combinatorial Search  
Pittsburgh, PA (1998)