

汎用プランニング技術を用いた産業用ロボットシステムにおける 動作手順自動生成手法の開発

越智 公友, ○ 前田 宗彦 (株式会社 IHI)

Development of an Automated Sequence Generation Method for Industrial Robotics

Systems by Domain Independent Planning

Kimitomo Ochi, ○ Munehiko Maeda (IHI Corporation)

Abstract

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.

キーワード：ロボットシステム, プランニング, 動作シーケンスの自動生成
(Robot System, Planning, Sequence Generation)

1. 緒言

近年、産業用ロボットは高度化してきており、複雑な作業を行うことができるようになった。複雑な作業が可能なロボットの例として、セル生産式の組立ロボットがある。ある種の組立ロボットで用いられるアームロボットは、1台で複数種類の部品の組み付けや搬送、ねじ止めなどの異なる作業を実施することができ、同じロボットを何台か組み合わせることで、製品を組み立てることができるものがある。

そういったシステムでは、個々のロボットの動作軌道や制御方法は自律化が進んでいる。例えば、組み立て操作の一部の動作軌道を自動的に生成することで、システムとしての安定性が高くなるなどの成果があがっている。一方で、全体の組立工程の動作手順についてはシステムエンジニアが経験をたよりにフローチャートを作成しているのが現状である。

そのうえで、各装置の動作条件や挙動が複雑になったことで各動作に必要な時間を考慮して効率の良い動作手順を得るために多くの労力と時間が必要となった。また、システムを構成する機器の増減や、動作条件の変更、もしくは個別の装置の性能向上による作業時間の変化などにたいしても、その都度、コストと時間をかけて動作手順を作成する必要がある。

我々は、動作手順を求める問題をプランニングの問題に帰着させることで、自動計画技術[1], [2] (Automated Planning) で研究されている汎用プランニング手法を用いてロボットシステムの動作手順を自動生成する手法を開発した。本手法はシステムへの依存度が少ない。そのため、様々な仕様を持ち、今後も適用領域が拡大されていくと考えられるロボットシステムに対しても、有用に機能すると考えられる。また、本手法を用いて動作手順の作成を自動化することで、小規模な仕様変更時の動作手順の生成が容易になる。

このような動作手順の自動生成の取り組みは、複数のモジュール形式のプリンタの用紙の移動の動作手順の自動生成に適用された事例がある[3]。本稿では、その手法と類似の方法で、組立ロボットシステムの動作手順の自動生成を行った。

2. 組立ロボットシステム

本研究は、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において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という問題を解決するために始めたものである。

本章では、セル生産方式の産業用ロボットを例として、従来の動作手順作成の方法について記述する。

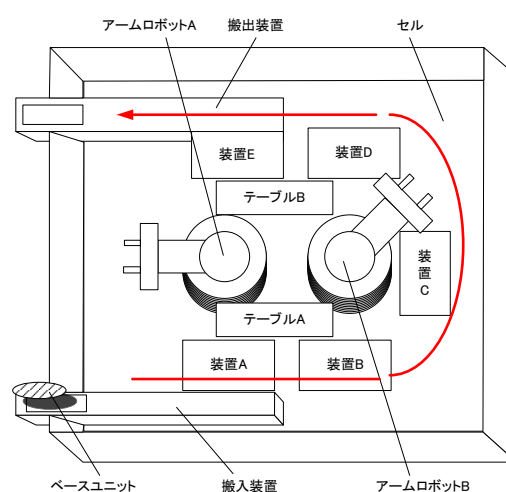


Fig. 1 Diagram of the robot system

2. 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図 1 に示す。ロボットセルでは、図 1 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。

2. 1. 1 ロボットセルの構成要素

図 1 に示す通り、ロボットセルは以下の 5 つからなる。

- (1) アームロボット
セルの中央のアームロボット A と、装置 C 側に寄った所にあるアームロボット B がある。アームロボット A は装置 C を除くすべての装置とテーブルに、アームロボット B は全ての装置とテーブルにアクセスが可能である。また、アームの向きや先端の位置から、アームの在籍する場所を提議する。
- (2) 装置
装置 A, 装置 B, 装置 C, 装置 D, 装置 E がある。装置上にベースユニットが有る場合、ベースユニットの加工が可能である。装置上にベースユニットが有り、装置にアームロボットが在籍し、移動先の装置またはテーブルに在籍するアームロボットがアクセス可能な場合、ベースユニットを搬送することが可能である。



Fig. 2 Example of Sequence of the robot system.

- (3) テーブル
テーブル A とテーブル B が有る。テーブル上にベースユニットがあり、アームロボットがそのテーブルにある場合にベースユニットの加工が可能である。テーブル上にベースユニットが有り、テーブルにアームロボットが在籍し、そのアームロボットが移動先の装置またはテーブルにアクセス可能な場合、ベースユニットを搬送することが可能である。
- (4) ベースユニット
組立を行う製品のベースとなる部品である。
- (5) 搬送装置
セル外にあるベースユニットを装置上に搬送する搬入装置と、装置上にあるベースユニットをセル外へ搬送する搬出装置がある。

2. 1. 2 ロボットセルの動作

ロボットセルは主に以下の 3 種類の操作で成り立つ。

- (1) アームロボットの移動
アームロボットの在籍する場所を移動させる。
- (2) ベースユニットへの加工操作
テーブルまたは装置上にあるベースユニットを加工する。
- (3) ベースユニットの把持・搬送操作
テーブルや装置上にあるベースユニットを他の場所へ移動させる。また、セル外からセル内への移動も含む。

2. 1. 3 動作制約

今回対象とした組み立てロボットシステムにおける動作制約は、以下の 3 つである。

- (1) ベースユニットの各加工工程に対して装置もしくはテーブルが指定される。ベースユニットの加工は、工程毎に指定された装置もしくはでテーブルで行う必要が有る。
- (2) アームロボットは、他のアームロボットがアクセスしている装置もしくはテーブルにアクセスできない。
- (3) アームロボット、各装置および各テーブルが 1 度に把持できるベースユニットは 1 個である。

2. 2 計画の必要性

たとえば、図 2 に記述したロボットシステムの動作手順で、

テーブル A にあるベースユニット 1 に対して①テーブル A 上で加工 2 を施し、②テーブル A から装置 B に搬送し、③装置 B 上で加工 3 を施す、という操作と、装置 A にあるベースユニット 2 に④装置 A 上で加工 1 を施す、という操作で、⑤最終的にアームロボット A は装置 A で、アームロボット B は装置 C で待機する、という条件を満たす動作手順を考える。

その場合、図 2 の案 1～案 3 のような動作手順を考えることができる。どの動作手順もベースユニットに対して実施する操作は同じである。しかし、工程間の待ち時間や、ロボットの移動回数の違いによって作業完了までに必要な時間に変化する。例の場合であれば、案 3 の動作手順を用いて製品の作成を行うことで、案 1 や案 2 の動作手順を用いたロボットシステムよりも効率よく作業を行うことができることがわかる。

このように、動作手順の変更だけで装置の効率は変化する。そして、図 2 に記述するロボットシステムにおいて、アームを用いる操作が 7 手順あった場合、製品を 4 個作成する場合に 1 億通り以上の動作手順が存在するが、1 億通り以上のパターンを全て検討したうえで、最も効率のよい動作手順を採用することは不可能である。そのため、現在はシステムの設計者がノウハウと経験をもとに動作手順を定めているのが実情である。筆者らは人工知能の 1 分野である自動計画の技術を用いて動作手順の自動生成を試みた。また、自動計画技術の中でも、特定のアプリケーションに依存しない汎用プランニングの手法を用いた。そのことにより、様々なロボットシステムにおいても共通して利用可能になる。

3. 自動計画技術

3. 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。

筆者らが扱うプランニング問題は、状態集合 $P = \{0, 1\}^n$ ($n \in \mathbb{N}$)、作用素集合 $O = \{o | o: P \mapsto P\}$ 、初期状態 $s \in P$ 、終了条件 $G \subset P$ 、コスト関数 $cost: O \rightarrow \mathbb{R}$ の 5 つ組 $(P, O, s, G, cost)$ で表現される。ただし、作用素集合の元 o にた

いして、状態 s が作用素 o の前提条件を満たさない場合、動作 o は恒等写像として定義する。

プランニング問題の解は、 O の元の列 $\{o_i\}_{i=0,1,\dots,k}$ ($k \in \mathbb{N}$) で、 $o_k \circ o_{k-1} \circ \dots \circ o_1 \circ o_0(s) \in G$ を満たすものである。また、筆者らの目的は、 $\sum_i cost(o_i)$ を最小にする解を求めることである。

3. 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。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。

3. 3 汎用記述言語

汎用記述言語は、現実世界のシステムをプランニング問題に変換するために考えられた言語である。実際の装置の状態の取りうる状態の集合を状態集合 P に置き換え、装置の動作の集合を作用素集合 O に置き換えるための言語の仕様が与えられる。

筆者らは Planning Domain Definition Language (PDDL)[4] 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。

3. 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のプランニング問題に対して、プランニング問題の解を与え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 [5]、BLACK BOX [6] などが有名である。

3. 5 モデリングの例

2 章で説明した組立ロボットシステムを、PDDL を用いてモデル化した。たとえば、アームロボット A が装置 A 上に在籍し((at armA deviceA))、アームロボット B が装置 D 上に在籍している((at armB deviceD))状態は以下のような命題のリストで表される。

```
(at armA deviceA) (at armB deviceD)
(available deviceB) (available deviceD)
(available deviceE) (available TableA)
(available TableB)
```

PDDL では、リストに記述されている命題を真(1)、記述されていない命題を偽(0)として扱う。よって、装置の状態の取りうる要素を設定することで、装置の状態をブール値のベクトル情報に変換することが可能である。

アームロボット A が装置 A から装置 B へ移動した場合、移動後の状態は以下のように表される。

```
(at armA deviceB) (at armB deviceD)
(available deviceA) (available deviceD)
(available deviceE) (available TableA)
(available TableB)
```

アームロボット A が装置 A 上に在籍しなくなったので、(at

armA deviceA)は記述されず、偽となる。また、アームロボット A が装置 B 上に在籍することから、(at armA deviceB)が記述され、真となる。

また、アームロボットが装置 A から装置 B へ移動する動作 o_i は、以下のように表現される。

```
movearm armA deviceA deviceB
:precondition (and (at armA deviceA)
                   (available deviceB))
:effect (and (at armA deviceB)
             (available deviceA)
             (not (at armA deviceA))
             (not (available deviceB))
             (increase (cost) n))
```

precondition は動作を実行するのに真であることが必要なものの集合である。一方、effect は、リストに記述する命題(例の場合は (at armA deviceB) と (available deviceA)) と、not と同じカッコに含まれるリストから削除する命題((at armA deviceA) と (available deviceB))が記述されている。

この操作を前述したアームロボット A が装置 A 上に在籍し、アームロボット B が装置 D 上に在籍している状態に作用されると、アームロボット A が装置 B 上に在籍し、アームロボット B が装置 D 上に在籍している状態になることが確認できる。

また、動作 o_i にコスト関数を作用させた場合の値 $cost(o_i)$ の値は、システムにおいて動作 o に対応する操作を行う際に必要な動作時間とする。よって、設計データや試験を行うなどして、装置 A から装置 B へ移動するのに必要な時間を求めた結果を値 $cost(o_i)$ の値として用いる。

探索の初期状態は、装置の定常状態の初期状態を設定した。探索の終了条件は、装置の定常状態の終了状態を設定した。

4. 評価

4. 1 探索手法

PDDL を用いることで、既存の汎用プランニングソフトウェアを利用することが可能になる。我々は図 1 に示す組立ロボットの動作仕様の洗い出しを行い、装置のモデルを作成した。そして、The Fast Downward Planning System を用いてプランニングを行った。The Fast Downward Planning System は、シーケンシャルな条件下で動作コストが小さいプランを求めることが可能なプランニングソフトウェアである。一方、ロボットシステムは複数の操作が同時並行的に実施されるため、作成されたプランに対して後処理的を行い、実行可能な動作を並行して実施した場合の動作手順と製品の作成に必要な時間を求めた。また、求めた動作時間を用いて本手法の性能を評価した。

4. 2 結果

プランニングを行った結果、事前に検討していた装置の仕様を満たす動作手順を得ることができた。また、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。

5. まとめと今後の課題

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。

また、本手法を行うための課題として、装置や動作の仕様が明確になっている必要がある。しかしながら、ロボットシステムの仕様の洗い出しには労力が必要である。また、仕様の明確化が完全でない場合、本手法で作成した動作手順が実施できない場合や、実施できたとしても効率が悪くなる場合がある。そのため、本手法を有用に活用するには、フレキシブルに動作し、動作制約が明確で例外が少ないロボットシステムを開発することが必要である。

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] Minh B. Do and Wheeler Ruml and Rong Zhou: On-line Planning and Scheduling: An Application to Controlling Modular Printers the Twenty-Third AAAI Conference on Artificial Intelligence (2008)
- [4] Drew McDermott and the AIPS-98 Planning Competition Committee : PDDL-The Planning Domain Definition Language Technical Report CVC TR98003/DCS TR1165 (1998)
- [5] Malte Helmert : The Fast Downward Planning System Journal of Artificial Intelligence Research Vol.26 Issue1 (2006. 5) pp. 191 — 246
- [6] 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)