空間掃引を用いた産業用マニピュレータの教示*

前田 雄 介*¹, 潮 田 達 也*²

Teaching of Industrial Manipulators by Manual Volume Sweeping

Yusuke MAEDA*³ and Tatsuya USHIODA^{*}Division of Systems Research, Faculty of Engineering, Yokohama National University,
79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 240-8501 Japan

In this paper, we propose a robot teaching method for industrial manipulators. It enables novice human operators to teach "good" robot motions in a short period of time. First in this method, a human operator makes a robot manipulator sweep a volume by its bodies. The manipulator is equipped with a force sensor on its wrist and damping-controlled; the operator can move it freely by grasping its end-effector. The swept volume stands for (a part of) the manipulator's free space, because the manipulator has passed through the volume without collisions. Next, the obtained swept volume is used by a motion planner to generate a well-optimized path of the manipulator automatically. Finally, the planned motion is executed by the manipulator. Even non-skilled operators can generate robot motions with short cycle time by doing the above procedure. The effectiveness of our method was successfully demonstrated in teaching experiments for a comparison with other conventional methods.

Key Words: Manipulator, Robot, Planning, Robot Teaching, Swept Volumes, Motion Planning

1. 序 論

現在の産業用ロボットマニピュレータに作業を行わせるためには教示が必要であり、ティーチングプレイバックなどの方法でオペレータがロボットの動作を詳細に教えなければならない。しかし、教示は非熟練者には時間のかかる厄介な作業であり、この手間が中小企業などへのロボットの普及を阻む一つの大きな要因になっている。このため、非熟練者にとっても簡単なロボット教示法の実現が強く望まれている。

これまでも教示を簡単化するための取り組みはさまざまに行われている。たとえばオフライン教示⁽¹⁾は、実ロボットを占有せずに安全に教示を行う手法として普及が進んでいる。また、マニピュレータの動作計画アルゴリズムは精力的に研究されており^{(2)~(5)}、(準)最適なロボットの動作を自動生成することも可能となっている。

しかし、オフライン教示には、仮想環境と実環境との不一致の問題がある。ロボットの設置位置や動作には必ず誤差が存在するため、実環境での動作実行時に

はその分の調整が必要となり、これは面倒な作業である。さらに、動作計画アルゴリズムによる動作の自動生成を行うためには、障害物などの環境情報をシステムに取り込む必要があるが、これもかなりの手間を要する。

オンラインでの教示に関しては、直感的な教示法として直接教示⁽⁶⁾が一部で用いられている。直接教示では、ロボットが力制御された状態で、オペレータがエンドエフェクタをつかんで適切な位置に動かすことで、望みの動作経路を指定する。実機を用いた教示であるため、ロボットの高い繰り返し精度を利用できるメリットがある。これはティーチングペンダントを使うのに比べると非熟練者にとって分かりやすい教示法であるが、オペレータ自身が「良い」ロボットの動作を考えて教えなければならないことには変わらない。たとえばロボットのサイクルタイムを短縮化したいと考えたとき、最適な動作を教示するためには各軸の仕様やロボットの運動学の非線形性を把握しておく必要があり、非熟練者にとっては簡単とは言えない。

そこで本論文では、非熟練者でも容易に品質の高い教示を行えるような手法の提案を行う。この手法では、オペレータはマニピュレータの手先を持ってさまざまに動かし、そのボディで空間を掃引させる。この掃引

* 原稿受付 2007年8月13日。

¹ 正員、横浜国立大学大学院工学研究院(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)。² 横浜国立大学大学院工学府。
E-mail: maeda@ynu.ac.jp

Fig. 1 Overview of Proposed Robot Programming Method

空間の情報を動作計画アルゴリズムで利用することにより、特別な知識・技能が無くてもサイクルタイムの短いロボットの動作を教示できるようにすることを目指す。

2. 提案する教示手法の概要

長谷川らはロボットの遠隔操作システムにおいて、ロボットのボディが掃引した空間の情報に基づいて、障害物のない自由空間の情報を獲得する、というアイデアを提案している⁽⁷⁾。本論文では、このアイデアを、通常の産業用マニピュレータの教示に利用することを考える。

教示の手順は以下のようになる（図1）。

1. マニピュレータを、直接教示の際と同様にダンピング制御する。オペレータがマニピュレータの手先を持って、障害物にぶつからないようにさまざまに動かし、マニピュレータのボディで空間を掃引する（図2）。この間のマニピュレータの関節角情報をすべて記録しておく。また、ロボットの動作開始位置、終了位置もこのときに教示しておく。
2. 記録された関節角情報を用いて、マニピュレータのボディが掃引した空間を計算する（図3）。この掃引空間は、マニピュレータが障害物にぶつからない自由空間（の一部）となる⁽⁸⁾。

Fig. 2 Manual Volume Sweeping

Fig. 3 Calculation of a Swept Volume

Fig. 4 Motion Planning

3. 動作計画アルゴリズムを用いて、動作開始位置と終了位置を結ぶ掃引空間内の経路を自動生成する（図4）。

4. 得られた経路に従って、ロボットを動かし、作業を実行させる（図5）。

この方法では、オペレータの手で空間掃引をすることで、マニピュレータの自由空間の情報を、簡便かつ直感的に獲得することができる。そして、この自由空間の情報に基づいて動作計画アルゴリズムを用いることで、「良い」ロボットの動作（たとえばサイクルタイムの短い動作）を求めることができる。この一連の教示手順は、特別な技能を必要としないため、非熟練者でも品質の高い教示が実現できるようになると期待される。

3. 空間掃引

提案する教示手法では、まず、マニピュレータを力制御（ダンピング制御）し、外力によって自由に動かせるようにする。そして、オペレータが（直接教示のように）手でマニピュレータを動かす（図2）。直接教示と異なるのは、マニピュレータの望みの動作自体

Fig. 5 Execution of Planned Motion

Fig. 6 Swept Volume

はここでは教える必要が無いことである。オペレータは、障害物にぶつからないようにマニピュレータのボディで周りの空間をさまざまに掃引するだけである。この掃引の間の関節角情報はすべて記録しておく。

ここで、コンフィギュレーション空間（関節空間）におけるマニピュレータの動作は一次元の軌跡であるのに対し、デカルト空間における掃引空間は三次元の体積を持つことに注意されたい。この掃引空間はマニピュレータの自由空間の一部となる。なぜなら、そのボディが障害物にぶつからずに通過した空間だからである。この掃引空間内には、マニピュレータが実際にはとらなかったコンフィギュレーションも含まれるため、これによって多様なロボット動作の生成が可能となる。

なお、このステップではマニピュレータの動作開始位置と終了位置も合わせて指定することにする。マニピュレータの繰り返し精度の高さを利用することで、これら重要な点での位置精度を確保する。

4. 掃引空間の計算

次に、記録された関節角情報とマニピュレータのボディの形状情報から、掃引空間の計算を行う。掃引空間の厳密な表現は難しいので、ここでは octree を用いた近似表現を用いる。

計算に当たっては、まず記録された関節角情報をソートし、重複するコンフィギュレーションを除去する。そして、各サンプリング時間でのマニピュレータのボディおよびマニピュレータの作業空間のボクセル

Fig. 7 Experimental Setup

との干渉チェックを行うことで、掃引空間を表現する octree を生成する。すべての干渉チェックが終わったときに得られる octree は、マニピュレータの自由空間（の一部）を表している（図6）。

5. 動作計画と実行

前のステップで計算された掃引空間の余集合は、仮想的な障害物と考えることができる。そこで、動作計画アルゴリズムを用いて、この仮想障害物にぶつからないような、動作開始点と終了点を結ぶ経路を求める。この動作計画問題はごく一般的なものであるため、種々のアルゴリズムが適用できるが、マニピュレータのサイクルタイムを短縮するような経路が求まることが望ましい。

最後に、得られた経路に従ってロボットを動かすことによって、教示は完了する。

6. 実験環境

教示実験を行うために、図7に示す実験環境を用意した。

6.1 ハードウェア環境 三菱電機製6自由度マニピュレータ RV-1A を用い、Ethernet 経由で 7.1 [ms] 間隔で PC から指令を送り制御を行う。関節角データも同じ間隔で PC に送って記録する。また、ニッタ製の6軸力センサ 67M25A-140 をマニピュレータの手首に取り付け、力制御に用いる。

6.2 ソフトウェア環境 マニピュレータの制御プログラムは ART-Linux⁽⁹⁾ 上で動作させる。空間掃引時には、ノイズによる誤動作を避けるため、わずかに不感帯を設けてマニピュレータをダンピング制御する。

掃引空間の計算のプログラムでは、干渉チェックに FreeSOLID⁽¹⁰⁾ を利用し、マニピュレータは5つの直方体と2つの円筒（いずれも剛体）で近似する。掃

Fig. 8 Planned Path by MPK

Fig. 9 Target Task

引空間を表現するために、マニピュレータの作業空間をすっぽり覆うような一辺 1200 [mm] の立方体を考え、これを最小のボクセルのサイズが一辺約 9.4 [mm] ($= 1200/2^7$ [mm]) となるように分割して octree 表現する。

動作計画には Motion Planning Kit (MPK)⁽¹¹⁾ に実装されている SBL (a single-query bi-directional probabilistic roadmap planner with lazy collision checking)⁽¹²⁾ を用いる。SBL によって得られる経路はジグザグだが、MPK のスムージング機能によって改善できる (図 8)。この機能では、経路中にランダムに 2 点を取り、その間を衝突なしに直線で結べるかどうかを調べ、結べる場合はそれを新たな経路とする、という処理を繰り返す。また、関節変数を各関節の最大速度で正規化して表現することで、各軸の仕様を考慮した上での「最短」経路が得られるようにする。

なお、以降の計算結果は Core 2 Duo E6600 CPU (2.4GHz) を搭載した Linux PC での結果である。

6.3 対象とする作業 ここでは対象作業として、簡単なピックアンドプレイス作業を考える。ただし、問題を単純にするために、グリッパの開閉は考えず、移動動作だけを扱う。マニピュレータは動作開始位置から終了位置まで、障害物を回避しながら移動することになる (図 9)。

動作開始位置・終了位置付近での空間掃引の手間を省くために、ここではこれらの位置の上方に経由点を設定し、これを空間掃引時に併せて指定することと

した。マニピュレータは動作開始位置からこの経由点まで (あるいは経由点から動作終了位置まで) は直線補間で動作し、経由点の間は動作計画アルゴリズムによって得られた経路で動作する。

7. 教 示 実 験

7.1 実験条件 提案手法の評価を行うために、他の教示手法との比較実験を行った。

空間掃引を利用したロボット教示 本論文での提案手法である。SBL で乱数が利用されていることの影響を抑えるため、毎回動作計画を三回繰り返し、最もサイクルタイムの短い経路を採用することとした。マニピュレータは、得られた経路に沿って最高速で動作させる。なお、今回の実験環境では、空間掃引の進行状況をオペレータに呈示する機能を実装していない。このため、これ以上空間掃引をやっても無意味であると提案手法の開発者が経験的に判断した時点で、掃引の中止を指示することとした。

ティーチングペンダントを使った教示再生 オペレータはティーチングペンダントを使って経由点を複数指定する。続いて MoveMaster 言語のプログラムを入力し、マニピュレータを経由点に沿って最高速で直線補間動作させる。

直接教示による教示再生 オペレータは直接教示によって複数の経由点を指定する。すなわち、力制御状態でエンドエフェクタを持って望みの位置に動かす。続いて MoveMaster 言語のプログラムを入力し、マニピュレータを経由点に沿って最高速で直線補間動作させる。

以上の 3 つの方法について、産業用マニピュレータの教示経験の無い 5 人の被験者で教示実験を行った。

7.2 実験結果 表 1 に、提案手法における掃引空間の計算結果を示す。また、教示にかかった時間の総計を図 10 に示す。一見、直接教示が最も良く、また本論文の提案手法が最も悪いように思われる。しかし、オペレータの作業時間と比べると、提案手法は他の手法と大差ないことが分かる (図 11)。これは、提案手法においては、時間がかかっているのは自動処理の部分 (掃引空間の計算および動作計画) であるためである (図 12)。

教示された動作のサイクルタイムを比較すると、提案手法は他の手法に比べて、オペレータ E の場合 (MPK の動作計画が失敗したため結果を載せていない) を除けば、22~44% のサイクルタイム短縮が実現されている (図 13)。したがって、本論文の提案手法は、多くの場合において、オペレータの作業時間をそれほど増

Table 1 Calculated Swept Volumes

Operator	A	B	C	D	E
# of recorded configurations	52 714	60 654	73 806	48 489	85 097
# of unique configurations	49 804	55 893	68 400	42 959	82 739
# of nodes in octree	24 477	25 652	26 748	23 644	22 304
swept volume [m ³]	0.174	0.184	0.191	0.171	0.152

やさずに、短いサイクルタイムの動作を教示できると考えられる。

7.3 考察 以上の結果から、提案手法は、非熟練者にとっても容易な教示手法でありながら、「良い」ロボットの動作を生成可能であることが分かる。

提案手法の一つの問題は、動作計画の失敗の問題である。オペレータ E の場合では、MPK が経路を見つけることに失敗してしまった。これは掃引が不十分だったために狭隘部ができてしまったことが理由であると考えられる。このような場合への対策として、空間掃引時の最初に、オペレータが必ず動作開始位置から終了位置まで一回動かすようにすることが考えられる。そうしておけば、動作計画が失敗してしまった場合は、このときの経路（もしくはこれをスムージングした経路）を改善の策として用いることができる。また、別の対策法として、追加の空間掃引を行って狭隘部の解消を図ることも可能である。

もう一つの問題は、計算に要する時間である。計算中はオペレータは拘束されないので他の作業を行うことが可能ではあるが、教示にかかる総時間はやはり短いほうが望ましい。図 12 に示すように、計算時間の大半は掃引空間の計算に費やされている。空間掃引時に記録されたコンフィギュレーションの数を n 、octree の最大分割レベルを d （すなわち、一边を $1/2^d$ まで分割する）とすると、計算量は最悪で $O(8^d n)$ となる。したがって、掃引空間の正確な表現を求めるのであれば、よりいっそうの計算量の削減が必要となる。Octree を構成する部分木は完全に並列に計算できるので、コンピュータの台数を増やせば、安直に計算量を減らすことができる。

教示実験において、何人かのオペレータは、提案手法に対する感想として、十分な空間掃引ができたか否かの判断が難しいと述べている。リアルタイムに掃引空間を計算し表示することが、一つの対策になると考えられる。

さらに、空間掃引に要する時間の削減のために、マニピュレータの手先に掃引用アタッチメントを装着することも考えられる（図 14）。適切な形状・大きさの

Fig. 14 Attachment for Efficient Volume Sweeping

アタッチメントを利用することで、空間掃引の効率化と安全化が図れると思われる。

8. 結 論

本論文では、産業用マニピュレータのための教示手法の提案を行った。この手法は、マニピュレータのボディの掃引空間が、障害物にぶつからない自由空間を表すという長谷川らのアイデア⁽⁷⁾に基づいている。

提案手法においては、オペレータがさまざまにマニピュレータを動かしてそのボディで空間を掃引することによって、特別な技能や経験を要することなく、サイクルタイムの短いロボットの動作を教示することが可能になる。教示実験においても、提案手法は他の一般的な手法と比較して、オペレータの作業時間はあまり変わらないが、良い動作の教示を行えることが示された。

今後の課題としては、種々のロボット作業に対する提案手法の有効性の検証、および 7.3 節で述べた問題点の解決が挙げられる。

文 献

- (1) Matsushima, K., Offline Teaching, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 13, No. 5 (1995), pp. 611–614.
- (2) Hwang, Y. K., and Ahuja, N., Gross Motion Planning—a Survey, *ACM Computing Surveys*, Vol. 24, No. 3 (1992), pp. 219–291.
- (3) Shiller, Z., Optimal Robot Motion Planning and Work-Cell Layout Design, *Robotica*, Vol. 15, No. 1 (1997), pp. 31–40.
- (4) Latombe, J.-C., Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts, *International Journal of Robotics Research*, Vol. 18, No. 11 (1999), pp. 1119–1128.

Fig. 10 Total Time for Robot Programming

Fig. 11 Time for Manual Operations

Fig. 12 Time for Computation in Our Proposed Method

Fig. 13 Cycle Time of Programmed Motions

- (5) Ando, S., A Fast Collision-Free Path Planning Method for a General Robot Manipulator, *Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (2003), pp. 2871–2877.
- (6) Sugimoto, K., Industrial Applications of Force Feedback Control, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 9, No. 6 (1991), pp. 794–798.
- (7) Hasegawa, T. et al., Collision-Free Path Planning of a Telerobotic Manipulator based on Swept Volume of Teleoperated Manipulator, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 22, No. 4 (2004), pp. 515–518.
- (8) Abdel-Malek, K. et al., Swept Volumes: Foundation, Perspectives, and Applications, *International Journal of*

Shape Modeling, Vol. 12, No. 1 (2006), pp. 87–127.

- (9) Ishiwata, Y., ART-Linux, <http://art-linux.sourceforge.net/>.
- (10) van den Bergen, G., FreeSOLID, <http://sourceforge.net/projects/freesolid/>.
- (11) Schwarzer, F. et al., Motion Planning Kit, <http://ai.stanford.edu/~mitul/mpk/>.
- (12) Sánchez, G. and Latombe, J.-C., A Single-Query Bi-Directional Probabilistic Roadmap Planner with Lazy Collision Checking, *Springer Tracts in Advanced Robotics*, Vol. 6 (2003), pp. 403–418.