

汎用多軸アームと動作経路の自動生成手法

General-Purpose Multijoint Manipulator and Algorithm for Automatically Generating Motion Trajectories

笠井 茂 松崎 謙司

■ KASAI Shigeru

■ MATSUZAKI Kenji

高経年化した原子力発電プラントが増加しており、稼働率向上のため、原子炉内の点検や保全作業を短時間で実施することが求められている。

東芝は、水中や放射線環境下で使用可能な汎用多軸アームと、アームが周辺構造物と干渉することなく動作できる経路を自動生成する手法を開発した。これにより、原子炉内作業を従来に比べ短い準備期間と短い施工時間で行うことが可能となる。原子力発電所、再処理施設、及び核融合実験炉などで遠隔作業装置としての適用を目指している。

With the increasing number of aged nuclear power plants in recent years, the shortening of safety inspection and maintenance periods has become necessary to improve operational efficiency.

Toshiba has developed a general-purpose multijoint manipulator that can be used underwater and in radiation environments. In addition, we have developed an algorithm to automatically generate motion trajectories of the manipulator so as to avoid collisions with other structures in its surroundings. This system can realize shorter preparation and operation periods for maintenance work in nuclear reactor vessels. We are planning to apply this system as a remote handling device for nuclear plants, reprocessing facilities, and nuclear fusion experimental reactors.

1 まえがき

国内外の原子力発電所では、高経年化に伴う原子炉内構造物の点検・保全作業の重要性が高まっている。また同時にプラントの稼働率向上のため、プラントを停止して行う作業の時間短縮が強く求められている。

原子炉内は水中や放射線環境下であることから、人間が作業を行うことは不可能である。そのため、施工装置を遠隔操作によって、炉内構造物と干渉させることなく対象箇所到達させ作業を行う必要がある。

施工装置は、溶接や切削など作業の種類によって決まる工具の部分“施工ヘッド”と、その施工ヘッドを対象箇所に向けて支持する位置決め装置で構成される。

東芝は従来、作業の種類と対象箇所に応じて、施工ヘッドと位置決め装置を専用の施工装置として開発し適用してきた。専用の施工装置は、設計・製作が作業の種類や対象箇所ごとに必要になるため、長い準備期間を要していた。また、施工中に作業の種類や対象箇所が変わるたびに施工装置の交換作業が必要となり、施工時間が長くなる原因になっていた。

そこで当社は、準備期間と施工時間の短縮を目指し、様々な作業の種類と対象箇所に共通の位置決め装置として使用できる、7軸の汎用多軸アームを開発した。7軸の機構とすることで、アームと周辺構造物との干渉を回避することができる。その結果、可動範囲が広がるとともに様々な用途と空間環境に適用可能となり、汎用な位置決め装置とすることができる。

一方、多軸アームのような様々な姿勢をとることが可能な装置を原子炉内で使用する場合、作業前に、構造物との干渉がないことを確認することに多大な時間を要していた。そこで、汎用多軸アームの開発と並行して、周辺構造物との干渉を回避した動作経路を自動生成する手法も開発した。

ここでは、汎用多軸アーム及び動作経路の自動生成手法の概要と特長について述べる。

2 多軸アームの概要

開発した多軸アームの全景と軸配置を図1に、主な仕様を表1に示す。

アームの手先を任意の位置と向きに位置決めする場合、手先位置で3軸、手先向きで3軸の計6軸の機構が最低限必要になる。しかし、多軸アームを6軸で構成すると、手先の位置と向きを決めた際、アームの姿勢は一つしかとれない。このため、周辺構造物との干渉があった場合に姿勢を変更して干渉を回避することができない。

人間の腕は、7軸の多軸アームに相当し、手先と肩を固定した状態でも肘（ひじ）の位置を変えることができる。この多軸アームも、姿勢を変化させることで周辺構造物との干渉を回避できるように、7軸の構成としている。

この多軸アームは、耐水や耐放射線の仕様であるとともに、半径1,100 mmの広い可動範囲と搬送できる質量が10 kgという能力を持っており、原子炉内作業に広く適用可能としている。

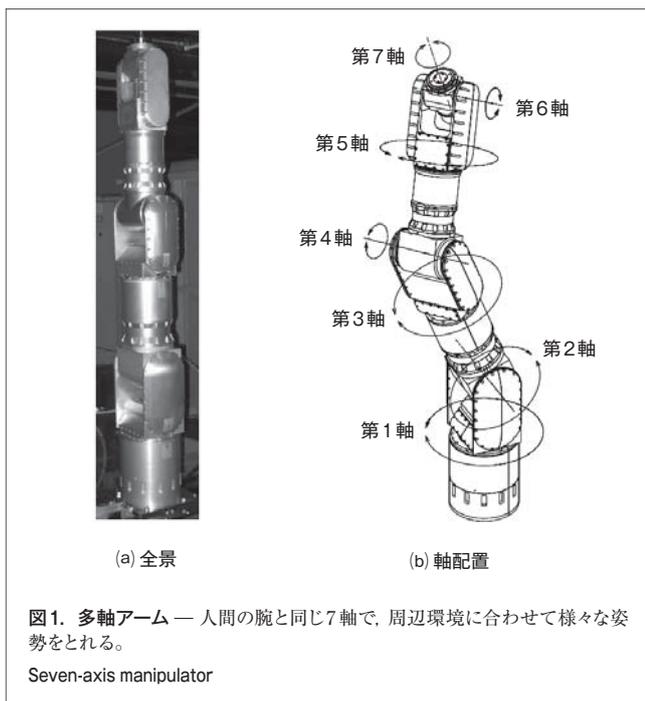


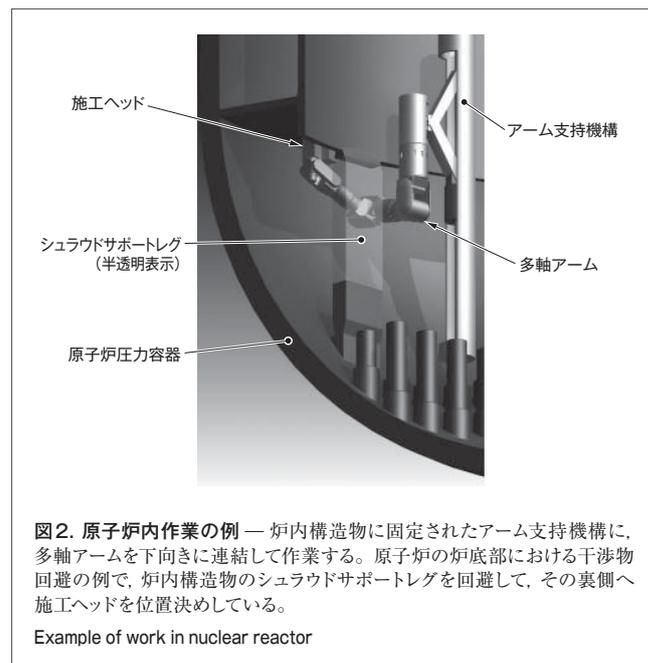
表1. 多軸アームの仕様
Specifications of seven-axis manipulator

| 項目 | 仕様 |
|---------|---|
| 軸数 | 7 |
| 可搬質量 | 10 kg |
| アーム本体質量 | 55 kg (気中) |
| アーム長 | 1,600 mm |
| アーム最大太さ | 250 mm (直径) |
| 使用環境 | <ul style="list-style-type: none"> ・水中 ・気中 (防じん, 防滴) ・放射線 (γ線) 下 |

構成部材をはじめモータやセンサには原子炉内で使用実績のあるものを用いて耐放射線性を確保している。また、このアームは沸騰水型原子炉の炉底部で使用するため、炉心支持板という構造物の直径約275 mmの穴を通過可能な寸法とし、外形も穴通過の際に引っ掛かりのない形状としている。

この多軸アームが沸騰水型原子炉の炉底部で炉内構造物“シュラウドサポートレグ”を回避し、その裏側へアーム手先を位置決めするようすを図2に示す。多軸アームは、炉上部から挿入し、炉底部の構造物に固定されたアーム支持機構に連結して使用する。また、アーム先端には作業の種類に応じて交換可能な施工ヘッドを搭載し、様々な作業に対応できる。

このような構成にすると、新しい種類の作業が必要となった場合に、新規の設計・製作は施工ヘッドだけでよいため、準備期間を短縮できる。また、作業の種類によって交換が必要な装置は施工ヘッドだけとなり、施工中、装置交換の作業時間を減らすことができる。更に、多軸アームの広い可動範囲から、



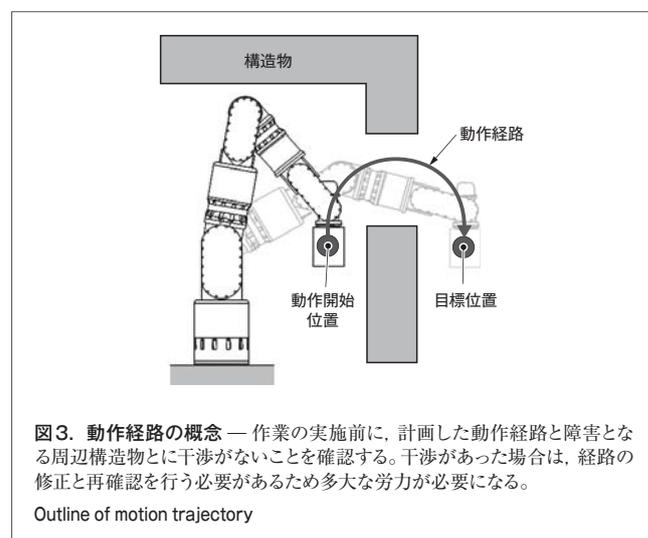
作業対象箇所への移動に伴う装置移動の作業回数を減らすことができる。

3 多軸アームの動作経路を自動生成する手法

3.1 従来の課題

多軸アームを動作させるには、図3に示すように、まず手先の動作経路を計画し、その経路に沿うようにアームの姿勢を制御するのが一般的である。通常は、実際に作業を行う前に3次元シミュレーションによってアームの動作と姿勢を確認し、周辺構造物との干渉が発生する場合は、動作経路の修正と再確認を繰り返して行う必要がある。

特に、高い位置精度が求められる作業では、施工中に現場



で計測した構造物の形状データに基づいて、経路の修正とシミュレーションによる再確認が必要であるため、時間を要していた。

当社は動作経路の計画時間の短縮を目的として、干渉を回避した経路を構造物の3次元形状データを基に自動的に生成する手法を開発した。

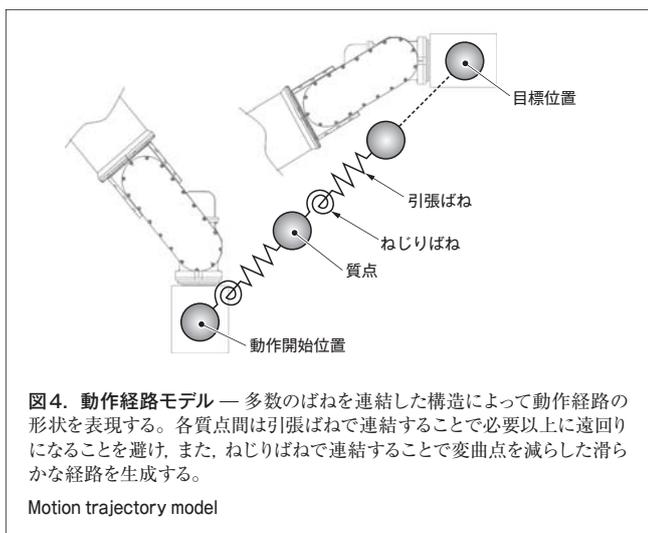
3.2 動作経路の自動生成

多軸アームの手先の動作経路を自動生成する手法としては、ポテンシャル場を用いたものが代表的である^{(1),(2)}。これは、障害物がある領域のポテンシャルが高く、逆に目標位置では低くなるようなポテンシャル場を生成し、ポテンシャルが減少する方向を探索して手先を移動させることで、障害物を回避しながら目標位置へ到達させる方法である。

この方法では、経路の途中で局所的にポテンシャルの低い箇所“ローカルミニマム”が存在すると、手先位置の経路探索時に手先がそこに停留してしまい、目標位置に到達できないという問題が知られている。しかし、実環境における複雑な形状の構造物に対して、ローカルミニマムの存在しないポテンシャル場を作成することは困難である。また、この方法では、必要以上に大きく回り回り、構造物の形状に合わせて不要な変曲点を含む経路になるという問題も知られている。

そこで、構造物に接近するほど斥力^(注1)が大きくなるような斥力ベクトル場と、手先の動作経路の形状を多数のばねを連結した構造によって表現した動作経路モデルを用いて、経路形状を生成する手法を開発した。この手法は、動作経路モデルのばね張力と斥力ベクトル場の斥力が釣り合う形状を力学計算により算出することで、構造物を回避しつつ滑らかな動作経路を生成するというものである。

この手法で使用する斥力ベクトル場は、構造物との距離情報



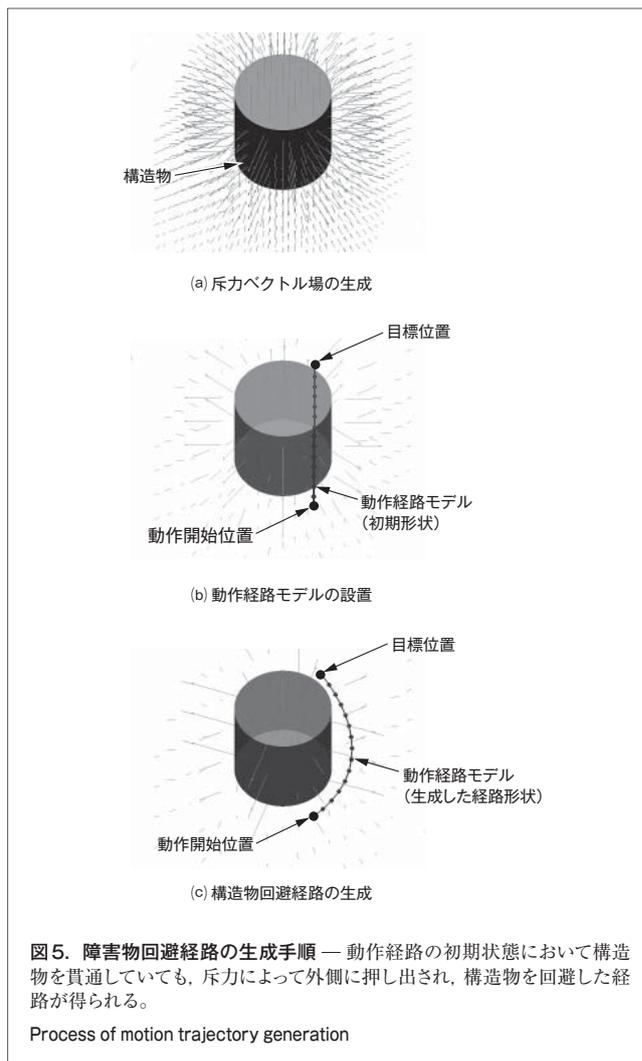
(注1) 二つの物体に働く力で、相互の距離を遠ざけるように働く力(引力の反対)。

に基づいた単純な計算によって算出できるため、構造物の形状が複雑な場合でも容易に生成できる。また、ポテンシャル法のように手先位置を移動させながら経路探索を行うのではなく、動作開始位置と目標位置がつながれたモデルで経路形状を決定するため、手先位置が停留する問題も発生しない。

この手法で用いる動作経路モデルは、図4に示すように、複数の質点間を引張ばねとねじりばねで連結した構造でモデル化している。引張ばねが収縮する力の作用により、必要以上に遠回りとなることを避けた経路を生成することができる。また、ねじりばねによって直線形状に変形する力を作用させることにより、変曲点を減らして滑らかな経路を生成することが可能である。

以下に、この手法による構造物を回避した動作経路の自動生成の流れを説明する(図5)。

- (1) 構造物との距離に反比例した大きさで、構造物から遠ざかる方向に力が作用するような斥力ベクトルを定義し、作業空間における分布を計算することで斥力ベクトル場を生成(図5(a))。



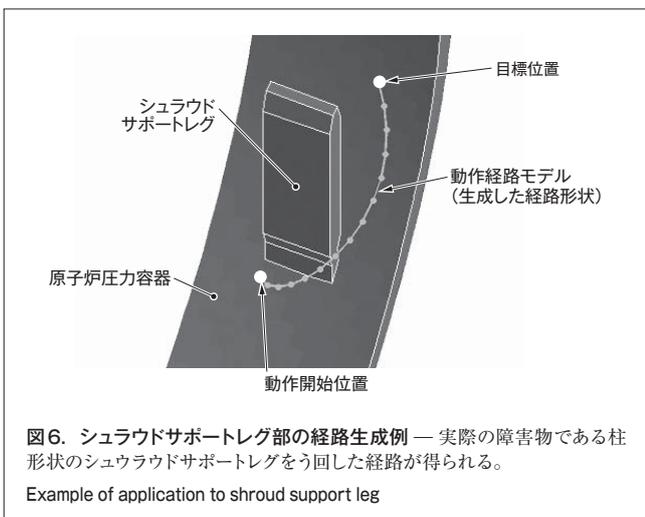
- (2) 動作経路モデルの端点を手先の動作開始位置と目標位置となるように斥力ベクトル場へ設置 (図5(b))。
- (3) 動作経路モデルの両端点の位置を固定して、各質点に斥力ベクトル場に基づく斥力を作用させ、ばね張力とつり合う形状を算出することで構造物を回避する経路を生成 (図5(c))。
- (4) 各質点間を曲線補間することにより滑らかな動作経路を生成。

図5に示した例では、動作経路の初期形状は構造物を貫通しているが、このような状態であっても、斥力によって外側に押し出されることにより構造物を回避した経路が生成される。

シュラウドサポートレグをう回して、シュラウドサポートレグと原子炉圧力容器とに挟まれた領域へ回り込む経路の生成に適用した例を図6に示す。

このようにして生成した手先の動作経路に基づき、開発した多軸アームの7軸を利用して、構造物との距離を保つように姿勢を変化させることで、構造物と干渉することなくアームを動作させることが可能である。

この手法による動作経路の生成は、多軸アームに限定されるものではなく、例えば、原子炉内を遊泳移動して点検を自動的に行うロボットの移動経路の計画にも適用することができる。



4 あとがき

炉内作業の短時間化による原子力発電所の稼働率向上のため、周辺構造物との干渉を回避しながら様々な用途と空間環境に適用できる汎用多軸アームと、その動作経路を自動生成する手法を開発した。これにより、従来に比べ短い準備期間と短い施工時間で原子炉内作業を行うことが可能となる。

この多軸アームは、原子力発電所だけではなく再処理施設や核融合実験炉などでも、放射線環境下の気中あるいは水中での遠隔作業装置として適用を目指している。

文 献

- (1) 楊 向東, ほか. ポテンシャル関数を用いるマニピュレータの衝突回避軌道計画. 日本機械学会論文集C編. 60, 575, 1994, p.2345-2350.
- (2) 樹野淳也, ほか. 帯電ワイヤを用いた多自由度マニピュレータの障害物回避軌道の生成. 電気学会論文誌C. 125, 2, 2005, p.308-313.



笠井 茂 KASAI Shigeru

電力システム社 京浜事業所 機器装置部主務。
ロボットなどの開発機器の設計・製作に従事。日本ロボット学会会員。

Keihin Product Operations



松崎 謙司 MATSUZAKI Kenji

電力システム社 電力・社会システム技術開発センター 機器・システム開発部主務。原子力プラント用保全ロボットの研究・開発に従事。日本ロボット学会会員。

Power and Industrial Systems Research and Development Center