

JAERI-M

88-108

核融合炉真空容器内保守マニピュレータ
設計システムの開発

1988年6月

安達 潤一*・小林 武司・飯田 浩正

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

JAERI-M レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所技術情報部情報資料課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）
あて、お申しこしください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-11 茨城
県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

JAERI-M reports are issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Information Division, Department
of Technical Information, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun,
Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1988

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 山田軽印刷所

核融合炉真空容器内保守マニピュレータ設計システムの開発

日本原子力研究所那珂研究所核融合実験炉特別チーム

安達 潤一^{*}・小林 武司・飯田 浩正

(1988年5月19日受理)

従来、ロボット・マニピュレータの設計に際しては、設計指標として動作範囲、最大アウトリーチ等のパラメータが用いられていた。また、最近では、計算機支援システムとして種々のシミュレーションコード等が開発され、動作、姿勢、干渉等の検討、動荷重解析などが行なえるようになってきた。しかし、設計の評価指標は必ずしも定量化しておらず、設計者の経験やノウハウによる部分が少なくない。

一方、最近、マニピュレータの操作能力を定量的に表わす指標が種々提案されている。そこで、今回、核融合炉真空容器内保守マニピュレータの評価指標として有効と思われるものとして、その中の1つである可操作度を採用した、上記マニピュレータの機構設計用コードを開発した。

本コードを次期大型トカマク装置(FER)の真空容器内保守マニピュレータの設計に適用し、有効性を確認した。

本コードは核融合炉用に限らず、広く、障害物を含む作業空間での最適な操作性を実現するマニピュレータの機構設計に利用可能である。

那珂研究所：〒311-01 茨城県那珂郡那珂町大字向山801-1

* 外来研究員 川崎重工業(株)

Development of Design System for In-vessel
Manipulator of Fusion Reactor

Junichi ADACHI*, Takeshi KOBAYASHI and Hiromasa IIDA

Fusion Experimental Reactor Team
Naka Fusion Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Naka-machi, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 19, 1988)

Parameters such as the scope of movement and the maximum outreach have been used as the performance index for the design of manipulators so far. Recently many computer aided design systems have been developed to carry out studies of movements, postures and interference problems and analyses of dynamic loads and so on. But most of the above mentioned design approaches are based on experiences and know-hows of designers and do not use the quantitative indexes.

On the other hand, some quantitative measures of manipulating ability of manipulators have been proposed recently. In this paper, we have developed a design system for arm mechanisms adopting the measure of manipulability as the quantitative measures of manipulating ability of robot arms, which is useful to evaluate the manipulation performance of in-vessel manipulators for fusion reactors.

The present design system has been applied to design the in-vessel manipulator for the Fusion Experimental Reactor (FER) to confirm the effectiveness, and is useful to design arm mechanisms for realization of optimum manipulation performance in other fields.

Keywords: Manipulator, Fusion Reactor, Remote Maintenance Design System, In-vessel Maintenance, Measure of Manipulability, Optimum Problem, Next Step Tokamak, Remote Systems Technology

* Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

目 次

1. 序	1
2. 真空容器内保守マニピュレータの概要	1
2.1 真空容器内保守マニピュレータの特徴	1
2.2 アーム機構の選定	2
3. 計算モデル	7
3.1 設計手法の流れ	7
3.2 評価関数（アームの設計指標）	7
3.2.1 可操作度の定義と性質	7
3.2.2 真空容器内保守マニピュレータの可操作度	8
3.3 計算モデル	10
3.3.1 平均可操作度の導出	10
3.3.2 制約条件の定式化	12
3.3.3 解析のアルゴリズム	14
4. 適用例 - 次期大型装置 (FER)	18
5. 結 び	18
謝 辞	19
参考文 献	19

Contents

1. Introduction	1
2. Summary of In-vessel Manipulator	1
2.1 Characteristics of In-vessel Manipulator	1
2.2 Selection of Arm Mechanism	2
3. Calculation Model	7
3.1 Flow of Design Approach	7
3.2 Performance Index (Performance Index for Design of Arm) ...	7
3.2.1 Definition and Properties of Measure of Manipulability	7
3.2.2 Measure of Manipulability for In-vessel Manipulator	8
3.3 Calculation Model	10
3.3.1 Introduction of Average Measure of Manipulability ...	10
3.3.2 Formulation of Constraint Conditions	12
3.3.3 Algorithm of Calculation	14
4. An Example of Application - FER	18
5. Conclusion	18
Acknowledgements	19
References	19

1. 序

現在までに、産業用ロボットのほか、原子力分野においても各種のロボット、マニピュレータが開発されてきた。これらのマニピュレータの設計に際しては、従来その使用目的等に応じて動作範囲、最大アウトリーチ等のパラメータが設計指標として用いられることが多かった。また、最近では、シミュレーションコードを始めとする、種々のコンピュータ設計支援システムが開発され^{1), 2)}、姿勢、動作、干渉などの検討、動荷重解析などを行なえるようになってきた。しかし、これらの設計システムにおいても設計指標は必ずしも定量化しておらず、設計者の経験やノウハウに依存したものが少なくない。たとえば、最近開発されているシミュレーションコードなどを用い、ディスプレー上で対話型で設計を進めるなどのシステムでは、従来のように試作、試験などを行なわなければならない方法にくらべ、ハードウェア製作、改造などの工程が必要最少限に抑えられるので、設計／開発コスト及び期間の大幅な減少の可能性が大きい。しかし、システムに定量化した設計指標が組込まれていないため、システム使用者は、十分な経験を有した設計者であることが必要である。

いっぽう、最近、マニピュレータの操作能力を定量的に表わす指標が種々提案されている³⁾。核融合炉真空容器内保守マニピュレータの機構上の特徴を考慮すると、上記指標の中で、可操作度が有力な評価指標となりうると思われる。したがって、今回、機構最適化のための評価関数として可操作度を採用した核融合炉真空容器内保守マニピュレータ設計システムを開発した。

2. 真空容器内保守マニピュレータの概要

2.1 真空容器内保守マニピュレータの特徴

J T - 60等大型トカマクに引き続いで建設され、D - T燃焼実験が計画されている次期装置真空容器内構造物は高放射化のため、人が接近し、直接保守することが不可能となる。そのため、真空容器内保守作業は遠隔操作が不可欠となる。真空容器内構造物(特に、第1壁)の保守システムは種々提案及び開発されているが^{4), 5)}、in-situ 保守を行なう場合、マニピュレータを使用することが必要となる。原研において設計が進められている次期大型トカマク装置(FER) との真空容器内保守マニピュレータの設計例をFig. 2.1⁶⁾ に示す。

トカマク装置ではトーラス形状をしたプラズマを収納する真空容器の周間に、プラズマ閉込め及び加熱のため多数のトロイダル磁場(T F)コイルとポロイダル磁場(P F)コイルが配置されている。さらに、T Fコイル、P Fコイル間空間を利用して、プラズマ追加熱のための加熱ポート、プラズマ計測のための計測ポート、工学試験のためのテストポートなどとともに、真空容器内保守のためのメンテナンスポートが設けられている。上記FERではメンテナンスポートはトーラ

1. 序

現在までに、産業用ロボットのほか、原子力分野においても各種のロボット、マニピュレータが開発されてきた。これらのマニピュレータの設計に際しては、従来その使用目的等に応じて動作範囲、最大アウトリーチ等のパラメータが設計指標として用いられることが多かった。また、最近では、シミュレーションコードを始めとする、種々のコンピュータ設計支援システムが開発され^{1), 2)}、姿勢、動作、干渉などの検討、動荷重解析などを行なえるようになってきた。しかし、これらの設計システムにおいても設計指標は必ずしも定量化しておらず、設計者の経験やノウハウに依存したものが少なくない。たとえば、最近開発されているシミュレーションコードなどを用い、ディスプレー上で対話型で設計を進めるなどのシステムでは、従来のように試作、試験などを行なわなければならない方法にくらべ、ハードウェア製作、改造などの工程が必要最少限に抑えられるので、設計／開発コスト及び期間の大幅な減少の可能性が大きい。しかし、システムに定量化した設計指標が組込まれていないため、システム使用者は、十分な経験を有した設計者であることが必要である。

いっぽう、最近、マニピュレータの操作能力を定量的に表わす指標が種々提案されている³⁾。核融合炉真空容器内保守マニピュレータの機構上の特徴を考慮すると、上記指標の中で、可操作度が有力な評価指標となりうると思われる。したがって、今回、機構最適化のための評価関数として可操作度を採用した核融合炉真空容器内保守マニピュレータ設計システムを開発した。

2. 真空容器内保守マニピュレータの概要

2.1 真空容器内保守マニピュレータの特徴

J T - 60等大型トカマクに引き続いで建設され、D - T燃焼実験が計画されている次期装置真空容器内構造物は高放射化のため、人が接近し、直接保守することが不可能となる。そのため、真空容器内保守作業は遠隔操作が不可欠となる。真空容器内構造物(特に、第1壁)の保守システムは種々提案及び開発されているが^{4), 5)}、in-situ 保守を行なう場合、マニピュレータを使用することが必要となる。原研において設計が進められている次期大型トカマク装置(FER) とその真空容器内保守マニピュレータの設計例をFig. 2.1⁶⁾ に示す。

トカマク装置ではトーラス形状をしたプラズマを収納する真空容器の周囲に、プラズマ閉込め及び加熱のため多数のトロイダル磁場(T F)コイルとポロイダル磁場(P F)コイルが配置されている。さらに、T Fコイル、P Fコイル間空間を利用して、プラズマ追加熱のための加熱ポート、プラズマ計測のための計測ポート、工学試験のためのテストポートなどとともに、真空容器内保守のためのメンテナンスポートが設けられている。上記FERではメンテナンスポートはトーラ

スの対向する 2 つのポートに配置され、各ポートから左右にそれぞれ 90° の範囲を対象領域としている。

真空容器内保守マニピュレータシステムの基本構成は Fig. 2.1 に示されるように、作業用マニピュレータ本体とそれを所定領域まで搬送するためのトランスポータとから成っている。本設計例では、第 1 壁保護のためアーマタイルが取付けられることを考慮し、第 1 壁に荷重をかけないように、トランスポータとして多関節アーム機構を採用している。トランスポータは可搬重量が大きく、剛性が高いことが要求され、ほぼプラズマ中心に沿って円弧状に所定領域まで作業マニピュレータを進行（搬送）させ、各軸をロックし、作業用マニピュレータ作業時の支持を行なう。作業用マニピュレータは到達点近傍（トロイダル方向）のポロイダル方向一周面の第 1 壁面を作業領域とし、第 1 壁の点検・検査、アーマタイル交換などの作業を行なう。

本真空容器内保守マニピュレータの機構面での特徴、要求項は以下のように考えられる。

対象作業空間が予かじめ設定されており、作業用マニピュレータはその作業空間専用でよい。すなわち、他の多くのマニピュレータのように多種類の対象物を汎用的に取扱うために広範な領域を作業空間として設定する必要がない。また、産業用ロボットなどと異なり、高速性はそれほど重要でなく、作業空間での操作性、精度が重視される。したがって、一定の作業空間での操作性の最も良いアーム機構が望まれる。

2.2 アーム機構の選定

(1) 自由度

一般に、アーム先端の位置、姿勢を任意に設定するためには最低 6 自由度必要であり、障害物回避や特異姿勢回避のためには、7 自由度以上とし、冗長自由度を持つことが望ましい。しかし、7 自由度以上の場合、解の多価性や計算時間の増大といった問題が発生する。

いっぽう、真空容器内保守マニピュレータは作業場所への接近はトランスポータにより行なわれ、かつ、トランスポータ先端（マニピュレータ土台）から作業領域（第 1 壁面）の間には問題となるような障害物はほとんど存在しないので、マニピュレータ自身の障害物回避はそれほど重要ではない。また、本マニピュレータでは作業空間が前もって指定されているので、特異姿勢を回避するように、機構、制御などの点で設計しておくことが可能である。

したがって、作業用マニピュレータの自由度はエンドエフェクタを除いて 6 とする。

(2) 自由度の構成と配置

アームの各関節自由度を回転機構とする場合、最適構成とする組合せとして、Fig. 2.2 に示すような ROS (Regional Optimum Structure) と OOS (Orientational Optimum Structure) が提案されている⁷⁾。新井によると⁸⁾、ROS とは手先の位置決めに寄与する自由度の中で、リンクの長さを正規化した時にその動作領域が最大となる機構であり、また、OOS は主に手先の方向決めに寄与する自由度の中で、手先の方向を表わす立体角が最大になる、すなわち、手先の器用さに優れた機構であるとされている。したがって、アームを付け根に近い第 1 アーム（狭義のアーム）とハンドに近い第 2 アーム（手先アーム）に分解して考えると、第 1 アームとして ROS 機構、第 2 アームとして OOS 機構を選定すれば動作領域と手先の器用さに関して最適な腕機構を

構成することが可能となるとしている。

OOSの中では、根元のアクチュエータの負荷低減のため、手先になるべくアクチュエータが集中しない構造としてはR-P-RかR-P-Pが望ましく、また、この両者の中ではR-P-Rが設計しやすい⁷⁾。したがって、自由度構成は第1アームがR-P-P、第2アームがR-P-R、すなわち、全体として、R-P-P-R-P-Rとする（Fig. 2.3）。

実際、現在までに開発されているマニピュレータをみてもこの自由度構成のものが多い。

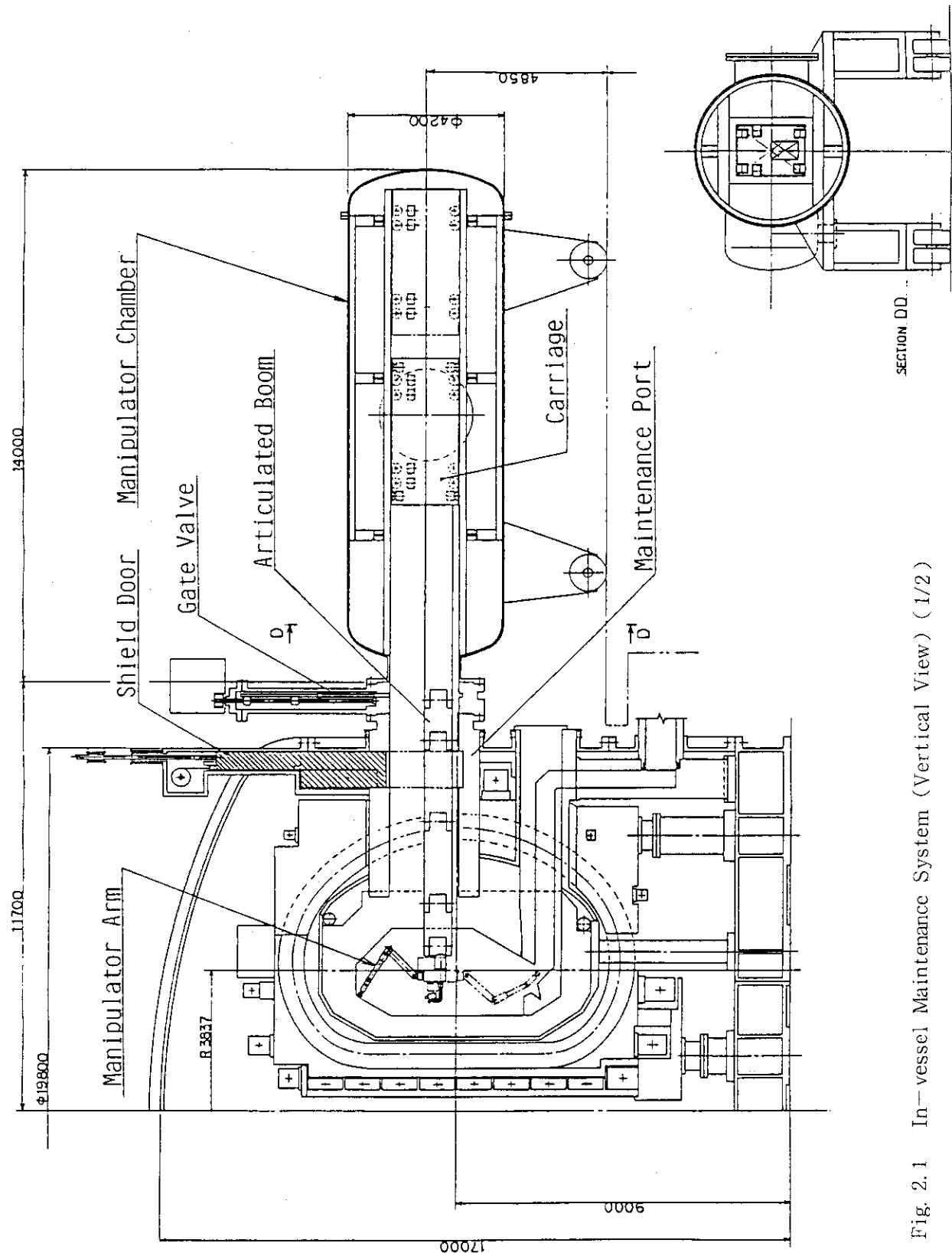


Fig. 2.1 In-vessel Maintenance System (Vertical View) (1/2)

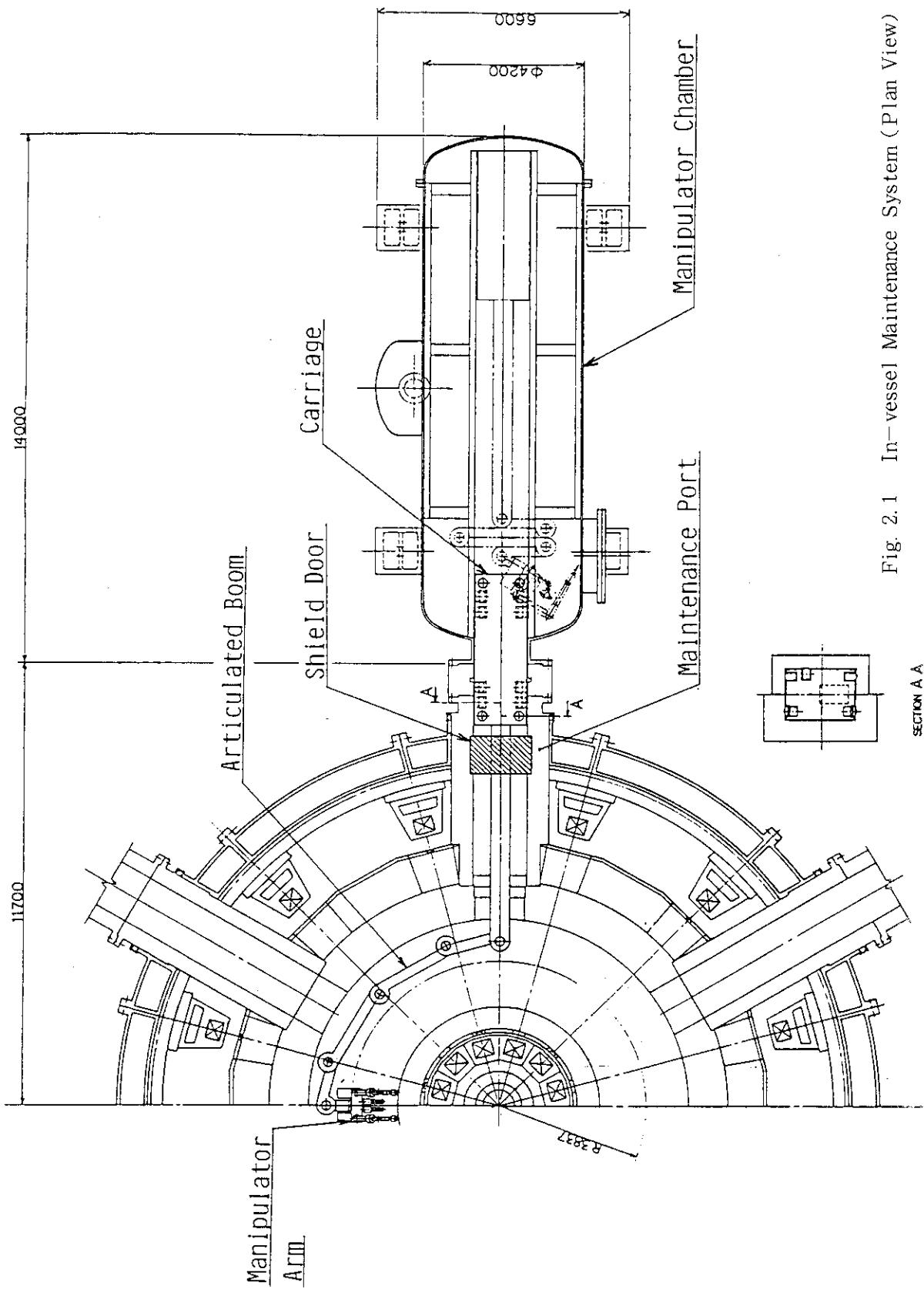


Fig. 2.1 In-vessel Maintenance System (Plan View) (2/2)

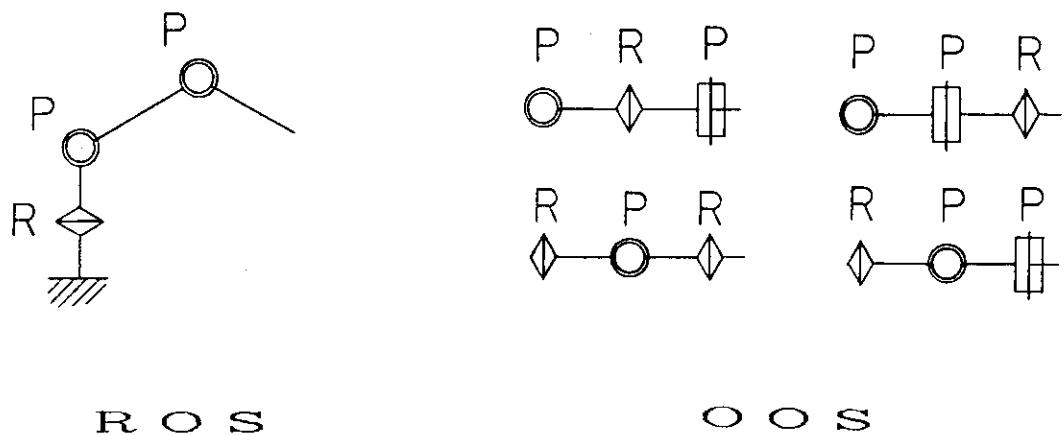


Fig. 2.2 Optimum Structure of Arm

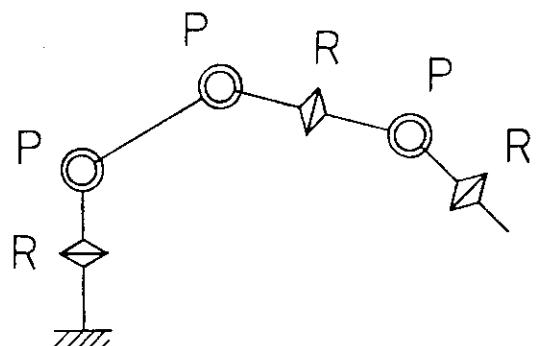


Fig. 2.3 Configuration of In-vessel Manipulator Arm

3. 計算モデル

3.1 設計手法の流れ

設計手法の流れを Fig. 3.1 に示す。

真空容器内保守マニピュレータでは、第一壁面がその作業空間であると同時に禁止領域（障害空間）である。本設計手法では、マニピュレータームの手先が指定した作業空間にある時、次節で定義される評価関数を最大とするような各リンク長さを求めるという一種の最適問題を解くということに帰着する。この最適化の制約条件はアームが前述の禁止領域に入り込まない、すなわち、アームと第一壁面とが干渉しないということである。

このような制約条件付き最適値問題において、解が在存する場合、関節機構の設計条件に利用するため、作業空間全域をカバーするような各関節の動作範囲を計算する。

このような設計手法の性質から、本設計システムは真空容器内保守マニピュレータに限らず、広く、障害物を含む、特定の作業空間での最適な操作性を実現するマニピュレータの機構設計に利用可能である。

3.2 評価関数（アームの設計指標）

本設計システムで評価関数として採用する可操作度を以下に概説する。

ロボットアームおよび指の操作能力を定量的に表わす指標として可操作度 (measure of manipulability)⁹⁾ の概念が提案されている。⁹⁾ 本概念は運動学的性能に関する評価基準であるが、アームの機構設計に対して比較的有用である。たとえば、アームの操作能力上の問題点として、自由度縮退を発生する特異姿勢があるが、可操作度は特異点からの一種の距離を表わすので、特異姿勢回避が可能である。

以下、可操作度の定義と性質を示す。

3.2.1 可操作度の定義と性質^{3), 9)}

n 自由度アームの関節変数を $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ とする（添字 T は転置を表す）。手先の位置、姿勢を表わす状態ベクトルを $p = (p_1, p_2, \dots, p_m)^T$ ($m \leq n$) とする。

θ と p の幾何学的関係は

$$p = f(\theta) \quad (3-1)$$

で与えられるものとする。

これを時間変数で微分すると

$$\dot{p} = J(\theta) \dot{\theta} \quad (3-2)$$

となる。ただし, $\dot{\mathbf{p}} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$, $\dot{\theta} = \frac{d\theta}{dt}$, $J(\theta) = \frac{df(\theta)}{d\theta} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ ($m \times n$ 実行列の集合) であり, $J(\theta)$ はヤコビ行列と呼ばれる。

定義

$$w = \sqrt{\det J(\theta) J^T(\theta)} \quad (3-3)$$

で与えられるスカラー w を (θ における \mathbf{p} に関する) マニピュレータの可操作度と呼ぶ。

可操作度 w は以下の性質を有する。

(i) J の特異値分解を

$$J = U \Sigma V^T \quad (3-4)$$

とする。ただし, $U \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $V \in \mathbb{R}^{n \times n}$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} \sigma_1 & & & \\ & \sigma_2 & & \\ & & \ddots & \\ & 0 & & \sigma_m \end{pmatrix} \in \mathbb{R}^{m \times n}$$

である。このとき, w は J の特異値 $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m$ の積として

$$w = \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_m \quad (3-5)$$

(ii) $\|\dot{\theta}\| = \dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_2^2 + \dots + \dot{\theta}_n^2 \leq 1$ を満足するような関節速度 $\dot{\theta}$ を用いて実現できる \mathbf{r} のすべての集合は, \mathbb{R}^m 空間内の楕円体 (可操作性楕円体) となり, その主軸は, $\sigma_1 \mathbf{u}_1, \sigma_2 \mathbf{u}_2, \dots, \sigma_m \mathbf{u}_m$, で与えられる。ただし \mathbf{u}_i は U の第 i 列ベクトルを表す。すなわち, w は可操作性楕円体の体積に比例する。

(iii) $m = n$ の場合, すなわち, 冗長性をもたないマニピュレータの場合には, 可操作度 w は

$$w = |\det J(\theta)| \quad (3-6)$$

となる。

ある作業空間全体にわたる作業性能を評価する場合は以下に示す, 作業空間内の可操作度の平均値 (平均可操作度) $\bar{w}^{(10)}$ を指標として使用する。

$$\bar{w} = \frac{\int_{p_m} \int_{p_{m-1}} \dots \int_{p_1} w \, dp_1 \, dp_2 \dots \, dp_m}{\int_{p_m} \int_{p_{m-1}} \dots \int_{p_1} dp_1 \, dp_2 \dots \, dp_m} \quad (3-7)$$

3.2.2 真空容器内保守マニピュレータの可操作度

(3-7) 式より, 指定された作業空間での平均可操作度 \bar{w} を求めるためには, (3-6) 式より, アームのヤコビ行列式 $\det J$ が定式化されていることが必要である。以下で, 本マニピュレータアームのヤコビ行列式の定式化を行なう。

まず, 計算式の簡単化のため, Fig. 3.2 に示すように, 手先の 2 自由度を方向決めのためのもとのとして分離する。また簡略化アームの手先状態ベクトルは位置のみを考えて, $\mathbf{p} = [x, y, z]^T$

とすると、 p は関節角 θ_4 に無関係のため、 p は $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ で決定されるので、関節変数を $\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^T$ として、 p と θ は次式の関係で表わされる。

$$p = \begin{bmatrix} (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & s_1 \\ (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & c_1 \\ d_1 - a_2 s_2 + d_4 c_{23} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

$$\text{ただし, } c_i = \cos \theta_i$$

$$s_i = \sin \theta_i$$

$$c_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$$

$$s_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$$

(3-8) 式を時間 t で微分すると

$$\dot{p} = \begin{bmatrix} c_1 (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & s_1 (d_4 c_{23} - a_2 s_2) & s_1 d_4 c_{23} \\ -s_1 (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & c_1 (d_4 c_{23} - a_2 s_2) & c_1 d_4 c_{23} \\ 0 & -(d_4 s_{23} + a_2 c_2) & -d_4 s_{23} \end{bmatrix} \dot{\theta} \quad (3-9)$$

となるから、ヤコビ行列は次式となる。

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} c_1 (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & s_1 (d_4 c_{23} - a_2 s_2) & s_1 d_4 c_{23} \\ -s_1 (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) & c_1 (d_4 c_{23} - a_2 s_2) & c_1 d_4 c_{23} \\ 0 & -(d_4 s_{23} + a_2 c_2) & -d_4 s_{23} \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

したがって、ヤコビ行列式は

$$\det J = a_2 d_4 (a_2 c_2 + d_4 s_{23}) c_3 \quad (3-11)$$

となる。(3-8) 式の関係より、ヤコビ行列式を p の関数として表わすと、次式のようになる。

$$\det J = \pm a_2 d_4 \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2 + (z - d_1)^2 - (a_2^2 + d_4^2))^2}{4 a_2^2 d_4^2}} \quad (3-12)$$

(3-12)式より、手先が $p = [x, y, z]^T$ の位置にある時の可操作度は

$$w = a_2 d_4 \sqrt{x^2 + y^2} \cdot \sqrt{1 - \frac{(x^2 + y^2 + (z - d_1)^2 - (a_2^2 + d_4^2))^2}{4 a_2^2 d_4^2}} \quad (3-13)$$

であり、作業空間全体の平均可操作度は(3-13)式を使い、次式で求められる。

$$\bar{w} = \frac{\int_x \int_y \int_z w dx dy dz}{\int_x \int_y \int_z dx dy dz} \quad (3-14)$$

(3-11)式より、可操作度は θ_1 に無関係であることがわかる。すなわち、(3-13)式より、可操作度は、手先位置を $x-y$ 平面に投影した時の基準座標原点からの距離 $r (= \sqrt{x^2 + y^2})$ に依存し、手先位置への θ_1 へは依存していない。そこで、

$$\begin{cases} x = r \cos \varphi \\ y = r \sin \varphi \end{cases} \quad (3-15)$$

とおき、直交座標系から円筒座標系に座標交換すると(3-13)式、(3-14)式はそれぞれ次式のようになる。

$$w = a_2 d_4 r \sqrt{1 - \frac{\{r^2 + (z - d_1)^2 - (a_2^2 + d_4^2)\}^2}{4 a_2^2 d_4^2}} \quad (3-16)$$

$$\bar{w} = \frac{\int_r \int_\varphi \int_z w r dr d\varphi dz}{\int_r \int_\varphi \int_z r dr d\varphi dz} \quad (3-17)$$

手先の動作領域を r, z に無関係に $\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2$ と設定すれば、すなわち、第1関節の作動角 θ_1 が (φ_1, φ_2) となるような範囲を動作領域と設定すれば、(3-17)式は

$$\bar{w} = \frac{\int_r \int_z w r dr dz}{\int_r \int_z r dr dz} \quad (3-18)$$

3.3 計算モデル

3.3.1 平均可操作度の導出

(1) 可操作度に関する最適解

可操作度が最適値をとるための条件を求める。

$$a_2 + d_4 = \ell \quad (\text{一定}) \quad (3-19)$$

とおくと、(3-16), (3-17)式より

$$\bar{w} = \frac{\int_r \int_z \frac{r^2}{2} \sqrt{\{r^2 + (z - d_1)^2 - (2a_2 - \ell)^2\}[\ell^2 - \{x^2 + (z - d_1)^2\}]} dr dz}{\int_r \int_z r dr dz} \quad (3-20)$$

(3-19)式を a_2 で偏微分すると

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial a_2} = \frac{(\ell - 2a_2) \int_r \int_z \frac{r^2 \sqrt{\ell^2 - \{r^2 + (z - d_1)^2\}}}{\sqrt{r^2 + (z - d_1)^2 - (2a_2 - \ell)^2}} dr dz}{\int_r \int_z r dr dz} \quad (3-21)$$

ここで、 $\partial \bar{w} / \partial a_2 = 0$ とおくと

$$\ell - 2a_2 = 0$$

$$\text{すなわち}, \quad a_2 = d_4 = \frac{\ell}{2} \quad (3-22)$$

が得られる。(3-16), (3-17), (3-21)式より、 \bar{w} の最適値 \bar{w}_{opt} は、 d_1 と ℓ (第2, 3リンク長の和) を使って次式で表わされる。

$$\begin{aligned}\overline{w}_{opt} &= \frac{\frac{\ell^2}{4}}{\int_r \int_z r dr dz} \int_r \int_z r^2 \sqrt{1 - \frac{4 \{ r^2 + (z - d_1)^2 - \frac{\ell^2}{2} \}^2}{\ell^4}} dr dz \\ &= \frac{\frac{\ell^2}{4} \int_r \int_z f dr dz}{\int_r \int_z r dr dz} \quad (3-23)\end{aligned}$$

ただし

$$f = r^2 \sqrt{1 - \frac{4 \{ r^2 + (z - d_1)^2 - \frac{\ell^2}{2} \}^2}{\ell^4}} \quad (3-24)$$

(2) \overline{w}_{opt} の数値解

(3-18) 式から、 \overline{w} は任意の $r - z$ 面で考えればよい。今、作業対象領域が第1壁面であることから、作業空間を曲面に限定し、それと $r - z$ 面との交線を作業空間とする。さらに、この交線を折線近似する。すなわち、 $r - z$ 面での手先の軌跡を $P_1(r_1, z_1) \rightarrow P_2(r_2, z_2) \rightarrow \dots \rightarrow P_k(r_k, z_k)$ とする。このとき、変数は1次元化され

$$\int_r \int_z f dr dz = \sum_{i=1}^{k-1} F_i \quad (3-25)$$

$$F_i = \begin{cases} \int_{r_i}^{r_{i+1}} f dr & (r_i \neq r_{i+1}) \\ \int_{z_i}^{z_{i+1}} f dz & (r_i = r_{i+1}) \end{cases} \quad (3-26)$$

$$\int_r \int_z r dr dz = \sum_{i=1}^{k-1} R_i \quad (3-27)$$

$$R_i = \begin{cases} \frac{1}{2} (r_{i+1}^2 - r_i^2) & (r_i \neq r_{i+1}) \\ r_i (z_{i+1} - z_i) & (r_i = r_{i+1}) \end{cases} \quad (3-28)$$

となり、

$$\overline{w}_{opt} = \frac{\frac{\ell^2}{4} \sum_{i=1}^{k-1} F_i}{\sum_{i=1}^{k-1} R_i} \quad (3-29)$$

(3) F_i の計算

以下で求まる f について (3-26) 式により数値積分すれば F_i が求まる。

1) $r_i \neq r_{i+1}$ のとき

直線 $P_i P_{i+1}$ の方程式を

$$z = a_i r + b_i \quad (3-30)$$

とすると、

$$r^2 + (z - d_1)^2 = (1 + a_i^2) r^2 + 2 a_i (b_i - d_1) r + (b_i - d_1)^2 \quad (3-31)$$

より

$$f = r^2 \sqrt{1 - \frac{4 \{(1 + a_i^2) r^2 + 2 a_i (b_i - d_i) r + (b_i - d_i)^2 - \frac{\ell^2}{2}\}^2}{\ell^4}} \quad (3-32)$$

ただし,

$$a_i = (z_{i+1} - z_i) / (r_{i+1} - r_i) \quad (3-33)$$

$$b_i = (z_i r_{i+1} - z_{i+1} r_i) / (r_{i+1} - r_i) \quad (3-34)$$

2) $r_i = r_{i+1}$ のとき

直線 $P_i P_{i+1}$ の方程式は、 $r = r_i$ で表されるので、

$$f = r_i^2 \sqrt{1 - \frac{4 \{r_i^2 + (z - d_i)^2 - \frac{\ell^2}{2}\}^2}{\ell^4}} \quad (3-35)$$

3.3.2 制約条件の定式化

(1) 手先及び肩の制約条件

制約条件は以下の通りである。

$$(A) \quad \ell^2 \geq r^2 + (z - d_i)^2 \geq 0 \quad (3-36)$$

$$(B) \quad b_j, b_{cj} \geq d_i \geq 0 \quad (3-37)$$

(b_j, b_{cj} はそれぞれ作業空間、障害空間と z 軸との交点の z 座標)

制約条件(A)は、物理的には手先の位置 (r, z) がひじ (第3関節) を伸ばして、肩 (第2関節)を中心回転させた範囲より内側にあることであり、数式上では、(3-24)式右辺の $\sqrt{\quad}$ 内が負でないことである。また、制約条件(A)はリンク長 $a_2, d_4 (= \ell / 2)$ が正又は0であることも包含している。

制約条件(B)はリンク長 d_i が正 (又は0) でかつ肩が作業空間及び障害空間と干渉しないことを意味している。

上記制約条件は各作業線分区間 $P_i P_{i+1}$ で満足される必要がある。以下、上記制約条件をコーディング上便利なように d_i に関して整理し直す。

(3-36) 式より

$$\ell^2 - r^2 \geq (z - d_i)^2 \geq -r^2$$

ここで、 $(z - d_i)^2 \geq 0$ を考慮して

$$\sqrt{\ell^2 - r^2} \geq |z - d_i| \geq 0$$

$$\text{すなわち}, -\sqrt{\ell^2 - r^2} \leq d_i - z \leq \sqrt{\ell^2 - r^2}$$

$$z - \sqrt{\ell^2 - r^2} \leq d_i \leq z + \sqrt{\ell^2 - r^2} \quad (3-38)$$

(3-37), (3-38) 式より

$$\text{Max} [0, z - \sqrt{\ell^2 - r^2}] \leq d_1 \leq \text{Min} [b_j, b_{ej}, z + \sqrt{\ell^2 - r^2}] \quad (3-39)$$

これが、ある ℓ に対して、全作業空間にわたって成立するための条件は

$$d_{1\min}(\ell) = \text{Max} [0, g_{c1}(r_1, z_1), g_{c1}(r_2, z_2), \dots, g_{c1}(r_k, z_k)] \quad (3-40)$$

$$d_{1\max}(\ell) = \text{Min} [b_j, b_{ej}, g_{c2}(r_1, z_1), g_{c2}(r_2, z_2), \dots, g_{c2}(r_k, z_k)] \quad (3-41)$$

とおき、

$$d_{1\min}(\ell) \leq d_1 \leq d_{1\max}(\ell) \quad (3-42)$$

である。

ただし、

$$g_{c1}(r, z) = z - \sqrt{\ell^2 - r^2} \quad (3-43)$$

$$g_{c2}(r, z) = z + \sqrt{\ell^2 - r^2} \quad (3-44)$$

(2) ひじの制約条件

手先の位置を $P(r, z)$ と指定するとき、Fig. 3.3 に示されるように 2 つの姿勢をとることができます。本システムでは、2 つのうち、障害物と干渉しない姿勢が少なくとも 1 つとりうればよいこととする。このような姿勢をとりうるためには、 $\ell (= a_z + d_4)$ に上限があることが Fig. 3.3 より予想される。

すなわち、手先が $P_i \rightarrow P_{i+1}$ ($i = 1, 2, \dots, k-1$) の軌跡を通ると、ひじが障害多角形 $P_{c1}, P_{c2}, \dots, P_{ck'}$ と干渉しない姿勢を少なくとも 1 つとりうる場合の ℓ の最大値を $\ell_{i\max}$ とすると ℓ の最大値 ℓ_{\max} は次式で求まる。

$$\ell_{\max} = \text{Min} [\ell_{1\max}, \ell_{2\max}, \dots, \ell_{(k-1)\max}] \quad (3-45)$$

上式より、 ℓ に関する制約条件は下記のようになる。

$$0 \leq \ell \leq \ell_{\max} \quad (3-46)$$

なお、手先の位置が $P(r, z)$ のとき、ひじの位置 $P_e(r_e, z_e)$ は次式で求められる。

$$r_e = \frac{\ell}{2} c_2 \quad (3-47)$$

$$z_e = d_1 - \frac{\ell}{2} s_2 \quad (3-48)$$

$$c_2 = \frac{\pm \frac{\ell}{2} (z - d_1) \sqrt{\ell - \frac{4}{\ell^4} \{ r^2 + (z - d_1)^2 - \frac{\ell^2}{2} \}^2 + \frac{r}{\ell} \{ r^2 + (z - d_1)^2 \}}}{r^2 + (z - d_1)^2} \quad (3-49)$$

$$s_2 = \frac{\pm \frac{\ell}{2} r \sqrt{1 - \frac{4}{\ell^4} \{ r^2 + (z - d_1)^2 - \frac{\ell^2}{2} \}^2 - \frac{z - d_1}{\ell} \{ r^2 + (z - d_1)^2 \}}}{r^2 + (z - d_1)^2} \quad (3-50)$$

(複号同順)

3.3.3 解析のアルゴリズム

前項までの計算モデルにもとづく解法の手順を Fig. 3.4 に示す。

(i) 作業領域、禁止領域の入力

作業領域、禁止領域ともトーラス形状をしていることを考慮し、第1関節角 $\theta_1 = 0^\circ$ のときの形状をそれぞれ点列 P_1, P_2, \dots, P_k 及び $P_{c1}, P_{c2}, \dots, P_{ck}$ で与える。第1関節角が θ_1 のときの作業領域、禁止領域はともに次式で求められる。

$$r' = -R_0 \cos \theta_1 + \sqrt{(R_0 + r)^2 - R_0^2 \sin^2 \theta_1} \quad (3-51)$$

$$z' = z \quad (3-52)$$

ここで、 R_0 はマニピュレータアーム根元のトーラス中心からの距離である。

(ii) ℓ の初期値の計算

ℓ の初期値として、下記のようにして求まる ℓ の最小値 ℓ_{\min} を求める。

(3-43) 式又は (3-44) 式より明らかのように、 $\ell \geq r$ であるから、

$$\ell_{\min} \geq \text{Max}[r_1, r_2, \dots, r_k] \quad (3-53)$$

① $\ell = \text{Max}[r_1, r_2, \dots, r_k]$ のとき、(3-43) 式が成立すれば、

$$\ell_{\min} = \text{Max}[r_1, r_2, \dots, r_k] \quad (3-54)$$

② $\ell = \text{Max}[r_1, r_2, \dots, r_k]$ のとき、(3-43) 式が成立しなければ、 ℓ_{\min} は次式の根として求められる。

$$d_{1\min}(\ell) = d_{1\max}(\ell) \quad (3-55)$$

(iii) $\ell = \ell_{\min}$ とおき、 d_1 の最適値 $d_{1\text{opt}}(\ell)$ 、 \bar{w} の極大値 $\bar{w}_{\text{opt}}(\ell)$ の計算

区間 $[d_{1\min}(\ell), d_{1\max}(\ell)]$ を黄金分割法で探索する。 \bar{w} の計算における数値積分には適応型ニュートン・コツ 9 点則 (SSL II) を使用した。

(iv) ℓ_{\max} の計算

(3-45) 式にもとづき、 ℓ_{\max} を求める。

$\ell_{\max} < \ell_{\min}$ であれば、障害图形とひじが干渉することになり、解は存在しないので、計算を打ち切る。

(v) $\ell = \ell_{\max}$ とおき、 $d_{1\text{opt}}(\ell)$ 、 $\bar{w}_{\text{opt}}(\ell)$ の計算

区間 $[d_{1\min}(\ell), d_{1\max}(\ell)]$ を黄金分割法で探索する。(iii) と同様、 \bar{w} の計算における数値積分には適応型ニュートン・コツ 9 点則 (SSL II) を使用した。

(VII) ℓ と d_1 の最適値の組合せを計算

ℓ に関し、区間 $[\ell_{\min}, \ell_{\max}]$ を黄金分割法で探索する。すなわち、境界点 ℓ_{\min} , ℓ_{\max} と分割点 ℓ' , ℓ'' における $d_{1\text{opt}}(1)$, $\bar{w}_{\text{opt}}(\ell)$ を順次計算し、区間の幅 $\Delta\ell = \ell_{\max} - \ell_{\min}$ が微小値 ϵ 以下になるときの ℓ 及び d_1 を最適解とする。

(VII) 最適解に関する各関節の作動範囲の計算

手先位置 $(r, z)^T$ に対する関節角 θ_2 は (3-49)～(3-50) 式より、また、関節角 θ_3 は次式より求まる。

$$s_3 = \frac{2}{\ell^2} \{ r^2 + (z - d_1)^2 \} - 1 \quad (3-56)$$

$$c_3 = \pm \sqrt{1 - \frac{4 \{ r^2 + (z - d_1)^2 - \ell^2/2 \}^2}{\ell^4}} \quad (3-57)$$

ただし、(3-49)～(3-50) 式及び (3-57) 式は複号同順である。

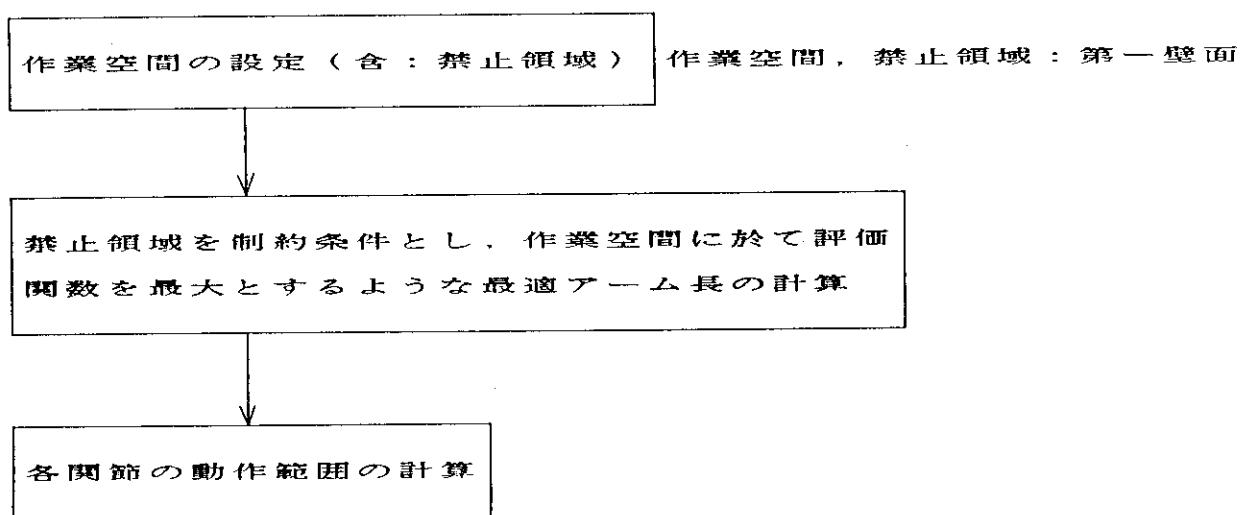


Fig. 3.1 Flow of Design Approach

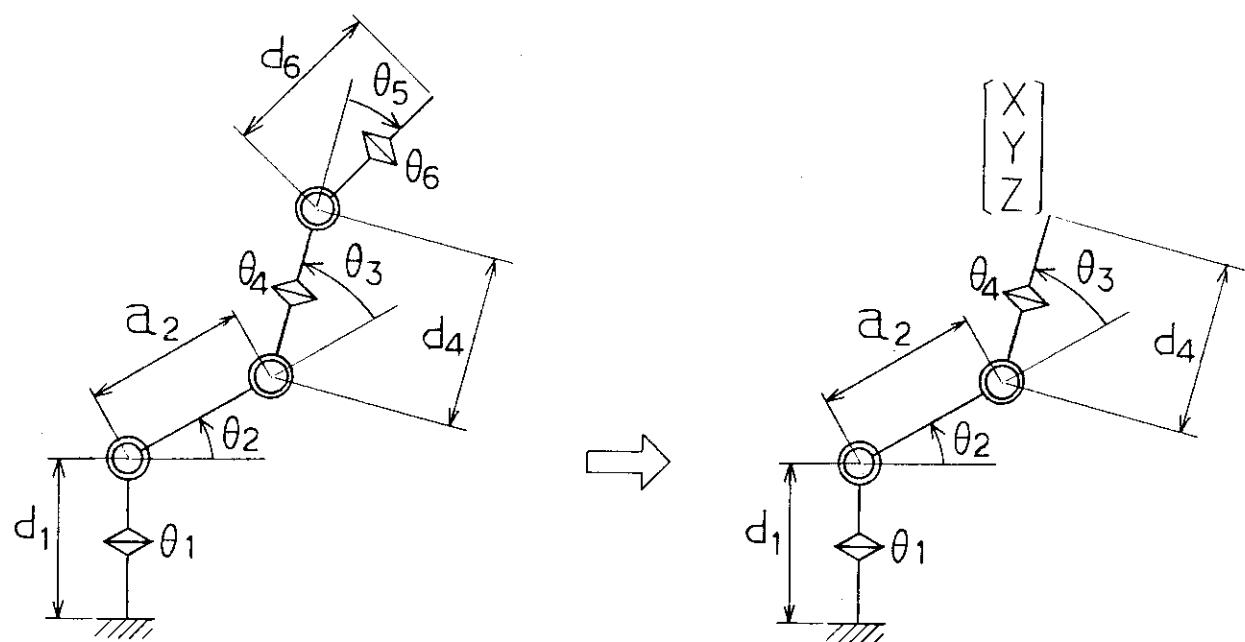
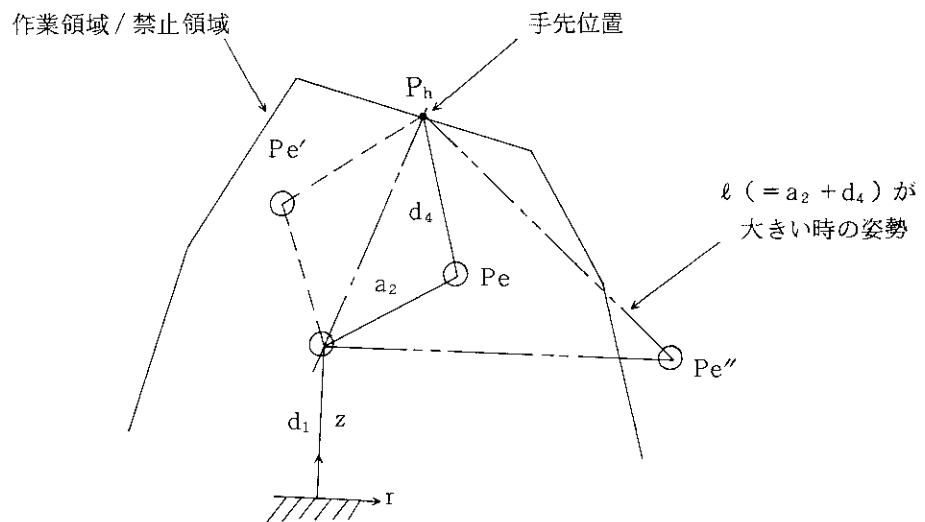


Fig. 3.2 Simplification of Arm Model



手先位置 P_h が指定された時、ひじの位置は Pe , Pe' とも可能。

また、 $l (= a_2 + d_4)$ が大きい時、ひじが禁止領域と干渉

Fig. 3.3 Postures with respect to a given position of hand

4. 適用例一次期大型装置 (FER)

本コードを用いて、現在、当所において設計研究が行なわれている次期大型トカマク装置 (FER) に対し、適用を行なった。

対象炉型……'86 FER Cost MiNi 炉⁶⁾

(1) 設計条件

アームの付け根……TFコイルの中心

対象領域…………第1壁ポロイダル方向全周トロイダル方向 $|\theta_1| \leq 20^\circ$

ただし、プラズマ断面が縦長のため、第1壁面上半分と下半分はアーム付け根を旋回させることによりアクセスするものとする。

アーム太さ…………200 mm

手先長さ d_6 ……250 mm

(2) 計算結果

下記の計算結果が得られた。

$$d_1 = 363 \text{ mm}$$

$$a_2 = d_6 = 1181 \text{ mm}$$

$$-15.2^\circ \leq \theta_2 \leq 263.8^\circ$$

$$|\theta_3| \leq 89^\circ$$

5. 結び

今回、核融合炉真空容器内保守マニピュレータの機構設計用コードの開発を行なった。

従来、与えられたアーム機構に対するシミュレーションコード等は多数開発されているが、設計者のノウハウや経験にもとづき決めたアーム機構をシミュレーションし、その結果を機構にフィードバックするという設計手法がほとんどであった。今回、開発したシステムは、この設計の上流部分の機構設計に関して、比較的簡単な定量的指標を用い、設計者の経験やノウハウをあまり要求しないことに特徴がある。したがって、本システムは比較的経験の浅い設計者にも十分利用可能である。

今回は、現在、当所において設計研究を進めている次期大型トカマク装置 (FER) に適用し、その有用性を確認したが、本コードは、計算モデルからも明らかのように、核融合炉に限らず、障害物を含む作業空間での最適な操作性を実現するマニピュレータの機構設計に広く、利用可能である。

4. 適用例一次期大型装置 (FER)

本コードを用いて、現在、当所において設計研究が行なわれている次期大型トカマク装置 (FER) に対し、適用を行なった。

対象炉型……'86 FER Cost MiNi 炉⁶⁾

(1) 設計条件

アームの付け根……TFコイルの中心

対象領域…………第1壁ボロイダル方向全周トロイダル方向 $|\theta_1| \leq 20^\circ$

ただし、プラズマ断面が縦長のため、第1壁面上半分と下半分はアーム付け根を旋回させることによりアクセスするものとする。

アーム太さ…………200 mm

手先長さ d_6 ……250 mm

(2) 計算結果

下記の計算結果が得られた。

$$d_1 = 363 \text{ mm}$$

$$a_2 = d_6 = 1181 \text{ mm}$$

$$-15.2^\circ \leq \theta_2 \leq 263.8^\circ$$

$$|\theta_3| \leq 89^\circ$$

5. 結び

今回、核融合炉真空容器内保守マニピュレータの機構設計用コードの開発を行なった。

従来、与えられたアーム機構に対するシミュレーションコード等は多数開発されているが、設計者のノウハウや経験にもとづき決めたアーム機構をシミュレーションし、その結果を機構にフィードバックするという設計手法がほとんどであった。今回、開発したシステムは、この設計の上流部分の機構設計に関して、比較的簡単な定量的指標を用い、設計者の経験やノウハウをあまり要求しないことに特徴がある。したがって、本システムは比較的経験の浅い設計者にも十分利用可能である。

今回は、現在、当所において設計研究を進めている次期大型トカマク装置 (FER) に適用し、その有用性を確認したが、本コードは、計算モデルからも明らかなように、核融合炉に限らず、障害物を含む作業空間での最適な操作性を実現するマニピュレータの機構設計に広く、利用可能である。

謝 辞

本研究を実施するにあたり、貴重な御討論、御助言をいただいた、川崎重工業（株）五百井清氏、工業技術院新井健生氏に深く謝意を表します。また、炉設計研究室立川克浩氏、臨界プラズマ研究部田村早苗部長及び那珂研究所吉川允二所長に多くの御支援と御助言を頂いたことを感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 三橋寛治, "ロボット配置計画とシミュレーション", 日本ロボット学会誌 3-2, 52/58, (1985)
- 2) 中土宣明, 他, "ロボット設計のための計算機援用システム", JAACE 第28回システムと制御研究発表講演会予稿集, 151 / 152, (1985. 5)
- 3) 吉川恒夫, "ロボット機構の運動特性評価", 日本ロボット学会誌 5-4, 60/64, (1987)
- 4) "核融合炉設計及び研究開発の現状と課題", 255 / 307, 日本原子力学会, (1983. 4)
- 5) 安達潤一, 他, "核融合炉の分解・修理", FAPIG 第 114 号, 31 / 37, (1986. 11)
- 6) 小林武司, 他, "核融合次期装置設計(昭和61年度設計報告書) -炉本体構造設計-", JAERI-M 87-139, (1987. 9)
- 7) Y. C. Tsai, A. H. Soni, "The Effect of Link Parameter on the Working Space of General 3 R Robot Arms", Mechanism and Machine Theory, Vol. 19, No 1, 9 / 16, (1984)
- 8) 新井健夫, "作業用ロボットの機構と制御に関する基礎研究", 機械技術研究所報告第 138 号, (1987. 2)
- 9) 吉川恒夫, "ロボットアームの可操作度", 日本ロボット学会誌 2-1, 63/67, (1984. 2)
- 10) 内山勝, 他, "ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価", 計測自動制御学会論文集 21-2, 82/88, (1985. 2)

謝 辞

本研究を実施するにあたり、貴重な御討論、御助言をいただいた、川崎重工業（株）五百井清氏、工業技術院新井健生氏に深く謝意を表します。また、炉設計研究室立川克浩氏、臨界プラズマ研究部田村早苗部長及び那珂研究所吉川允二所長に多くの御支援と御助言を頂いたことを感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 三橋寛治, “ロボット配置計画とシミュレーション”, 日本ロボット学会誌 3-2, 52/58, (1985)
- 2) 中土宣明, 他, “ロボット設計のための計算機援用システム”, JAACE 第28回システムと制御研究発表講演会予稿集, 151 / 152, (1985. 5)
- 3) 吉川恒夫, “ロボット機構の運動特性評価”, 日本ロボット学会誌 5-4, 60/64, (1987)
- 4) “核融合炉設計及び研究開発の現状と課題”, 255 / 307, 日本原子力学会, (1983. 4)
- 5) 安達潤一, 他, “核融合炉の分解・修理”, FAPIG 第 114 号, 31 / 37, (1986. 11)
- 6) 小林武司, 他, “核融合次期装置設計(昭和61年度設計報告書) -炉本体構造設計-” JAERI-M 87-139, (1987. 9)
- 7) Y. C. Tsai, A. H. Soni, “The Effect of Link Parameter on the Working Space of General 3 R Robot Arms”, Mechanism and Machine Theory, Vol. 19, No 1, 9 / 16, (1984)
- 8) 新井健夫, “作業用ロボットの機構と制御に関する基礎研究”, 機械技術研究所報告第 138 号, (1987. 2)
- 9) 吉川恒夫, “ロボットアームの可操作度”, 日本ロボット学会誌 2-1, 63 / 67, (1984. 2)
- 10) 内山勝, 他, “ヤコビ行列式によるロボットアームの機構評価”, 計測自動制御学会論文集 21-2, 82 / 88, (1985. 2)