3次元曲面をもつ機器の超音波探傷などに供する 実用6軸マニピュレータの開発*

林 哲 司^{*1}, 都 築 鋭^{*2}, 常 脇 寛^{*2}

Development of 6-Axis Portable Manipulator which Traces over 3-Dimensional Curved Surface for Ultrasonic Inspection

Tetsuji HAYASHI, Satoshi TSUZUKI and Hiroshi TSUNEWAKI

A 6-axis portable manipulator, weighing 120 N (12.3 kg) which traces over a 3-dimensional curved surface for ultrasonic testing has been developed. The manipulator body is made of carbon-fiber-reinforced plastic and magnesium alloy. A feature of the system is that deviation of the manipulator from its nominal path caused by arm bending due to its own weight can be corrected. The deviation is calculated by premeasuring spring coefficients and hysteresis characteristics of the arm structure. In a mock-up calibration performance test the accuracy was shown to be as high as that of a human inspector. The manipulator can be installed within 3 minutes by a single person. Joint angles are calculated with a direct memory access (DMA) handler using a poling method. Signals are transmitted to servo-controllers through an optical fiber of 2.5 Mbps.

Key Words: Robotics, Portable 6-Axis Manipulator, 3-Dimensional Tracing, Generating Motion, Positioning, Distortion Correction, DMA Handler, Ultrasonic Inspection, Development

1. 緒 言

圧力容器・配管の母材内部の欠陥の検出には、超音波探傷法等が用いられる。原子力発電プラントでは、作業場所が放射線環境ということもあって、この検査作業の機械化が進められてきた。直管部用には、レーン式の自動検査装置が導入されている^{*1)}。容器の出入口、配管の分岐部などは、3次元曲面をもち、かつ、各所に点在するので、自由度が大きい6軸マニピュレータが有効と考えた^{*2)}。探傷では探触子が常に一定の力で表面に垂直に押し付けられる必要がある。これらの条件を満たす、可搬式(ロボット質量120N)の実用マニピュレータを試作し、標準の探傷性能試験片で模擬探傷作業を実施し、良好の結果を得たので報告する。なお、このマニピュレータ技術は、超音波探傷作業に限定されるものでなく、ロボット技術全般に共通するものである。

2. マニピュレータの基本仕様の検討

圧力容器・配管の3次元曲面を適切になぞることが

でき、かつ、取付け及びロボットの操作が容易なマニピュレータ・システムを構築するための検討を行った。

2. 1 対象作業の分類と要求事項

- (1) 検査対象箇所は、点在するため、ロボット本体は、容易に持ち運び・取付け・調整ができ、ロボットの制御、検査データ処理系とも接続が容易なこと。
- (2) 探触子(超音波の受・発信)と検査表面との接触状態が正しく制御されること。
- (3) マニピュレータの動作状態(位置、姿勢)及び探傷データの集録を常時自動的に監視できる機能をもつこと。

写真 1 マニピュレータ本体

* 原稿受付 平成4年11月20日。

^{*1)} 正員、三菱重工業(株)神戸造船所(〒652 神戸市兵庫区和田崎町1-1-1)。

^{*2)} 三菱重工業(株)高砂研究所(〒676 高砂市新井町新浜2-1-1)。

2.2 マニピュレータの基本仕様

2.2.1 マニピュレータ本体 (表 1, 図 1)

前第 2.1 項の検討の結果 (詳細略: 現在現地で
行われている探傷作業の実例の分析から), マニピ
ュレータの腕の長さを 848 mm として, 6 軸構成 (リ
ンク長・関節種類) を検討した (図 1)。また, 探
触子の質量を 50 N, 探触子速度 (最大) を 4"
(100 mm) / S とし, 構造設計を行った。従来の
マニピュレータは, 組立て作業などに供する固定式で
ロボット質量は余り問題とされなかった。可搬式では,
筆者らが開発した 6 軸マニピュレータで 65 Kg (可
搬力 22 Kg, アーム長さ 1000 mm) が最も軽い
ものであった*3)。前項の基本仕様 (概ね 20 Kg 目
標) を達成するためには, 機械剛性を高くし, 軽量化
を図る必要があり, 本体構造部材に CFRP 及びマグ
ネシウム合金 (低比重材料) を用い, 薄肉箱形構造と
し断面係数, 断面 2 次モーメントを向上させた。また,
剛性低下が発生しやすい軸受は, 両持ち構造とした。こ
の結果, マニピュレータ本体質量は, 120 N (12.
3 Kg) となった。

2.2.2 マニピュレータ・システムの構成 (図

2) マニピュレータのサーボ・コントローラと
初期位置調整及び運転中監視用 ITV をマニピュレ
ータ機側とし, 中央制御室とを光ファイバ・ケーブル
で結び, 中央のホスト・コンピュータ (本実験では, N

表 1 マニピュレータの仕様

Model	Electric Multijoint Manipulator
Robot Weight	120N(12.3Kg)
Pay Load	50N
Moving Speed	0.174 rad/ S
Arm Length	848 mm
Degree of Freedom	6

図 1 マニピュレータの軸構成

DG DS7540 II を使用) で, ロボットの運動制御及び探傷
データの集録を行う。システムの性能を表 2 に示す

2.2.3 マニピュレータの剛性 (制御上, 機構
上) の向上対策 探傷作業では, マニピュレータの
いずれの姿勢でも, 常に一定の接触圧が保証される必
要がある。例えば, 下面からの探傷時には, マニピ
ュレータの質量を補償しなければならない。また, マニ
ピュレータの本体の質量を下げるために, 機械的剛性
を制限したので, 本体の捻じれや曲がりの誤差を生ん
でいる。これを制御のソフト・ウェアで補償するた
めに, 下記の対策を行った。

(1) 捻じれ, 曲げの補正制御

ロボットの質量によって発生する捻じれ, 曲げによ
るたわみ両を算出するため, 図 3 に示す各状態にお
けるパネ定数及びヒステリシス特性を実測した (表
3)。例えば, A 軸に静負荷 1 Nm が加わると A 軸

表 2 システムの性能

Item	Specification
Position Accuracy	±1mm
Max. Path Velocity	100 mm/S
Control Method	Continuous Path
Communication System	Optical Fiber
Data Transfer Rate	2.5 Mbps
Sampling Time	10 m S

図 2 システム構成

図 3 アームに働く外力の分類

の捻じれが生じ、マニピュレータ先端の位置のずれは、たわみ分3.5mm、ガタ分0.3mmとして算出される。

本補正法を導入したマニピュレータの各軸の指令値(Data table)算出のプログラムを図5の座標系において図4のごとく構成とした。

ノズルと容器等の複雑な形状モデルを図5の座標とすれば、機器の被検査面は回転体として扱えるので、検査面上の任意の点Pは、母線の回転角 θ 、母線の始点からの距離Yとで表現される簡単な母線座標系で定義できる。

検査面の任意の点のロボット座標系における位置及び検査面の法線ベクトルを求め(図4中*1)、マニピュレータ先端に取付けた探触子(プローブ)がこ

表3 たわみ量-モーメント・ヒステリシス特性測定結果

Kind of Distortion	Moment	Spring Coefficient(rad/Nm)	distortion (rad)
Tortional	M_1	7.4×10^{-5}	4.0×10^{-4}
Twist	M_2	6.0×10^{-5}	2.4×10^{-4}
Bending	M_3	4.3×10^{-5}	2.3×10^{-4}

図4 データ作成プログラム

の点に接するときのマニピュレータ各軸の回転角を算出する(*2)。マニピュレータの姿勢における、重力及びプローブ押し付け力の反力によって生じる各軸に加わるモーメントを図3に示すごとく3方向に分解する。軸の捻じれ、アームの捻じれ及びアームの曲げに關し予め測定したヒステリシス特性値より、3つのモーメントに起因する関節軸、アームの捻じれ・曲がり量を求め(*3)、プローブの位置及び姿勢の変位量を求める(*4)。この変位量を補正する各関節軸の回転角指令値を算出する(*5)。このようにして検査する全面についての制御用データ・テーブルを作成する。

(2) 探傷検査用制御システムの開発

探傷作業からの要求と上記のたわみ補正を満たすために、本マニピュレータの制御指令のサンプリング・タイムは、10msが要求される。このため、位置制御ループをソフト・ウェアのCP(Continuous Path)制御とし、速度制御ループの演算を高速化するため高速DMAハンドラを開発した。

(3) 高速DMA(Direct memory access)ハンドラ

OS(Operating System)のオーバ・ヘッド時間を低減するため、各ステップの変化を割り込み手法によるのではなく、ステータスの変化したかを制御周期毎に読みとるポーリング手法*4,5)を採用した。また、データの送受信の効率をあげるため、信号変換等の処理を行っている間も制御演算ができるようハンドラの送信モードと受信モードを分離した。制御データの送受信の実効伝送速度は2.5Mbpsとなった。

2.2.4 3次元曲面へのなじみ機構 検査表面とのなじみ性を確保するために、探触子(UTプローブ)を自動的に表面に平行とする機能をもつジンバル機構(羅針盤の支持機構に同じ)で保持した(写真2)。

図5 母線座標系の定義

3. 探傷性能確認試験と考察

3.1 マニピュレータの性能の探傷精度への影響

超音波探傷法では、音波を発振する点 (P') から、探触子をもつ発振角度 α で発振し、反射面 (Flaw) からの波を受信するまでの時間で距離 (x) を計測する。したがって、マニピュレータの位置精度誤差 (ΔP) は、真の欠陥の位置の同定で誤差となる (図 6)。また、曲面の場合には、法線とのずれ角度 ($\Delta\alpha$)

写真 2 ジンバル機構

表 4 探傷試験結果

	Direction of Defect	Testing Direction	Direction of Incidence	Puls Amplitude of Defect	
				Automatic Testing (%)	Manual Testing (%)
Vessel	Circumferential Defect	45°	Right-Left	108 (1A)	81 (1M)
			Left-Right	130 (2A)	104 (2M)
	Axial Defect	60°	Right-Left	60 (3A)	56 (3M)
			Left-Right	90 (4A)	63 (4M)
Saddle	Circumferential Defect	45°	Up-Down	82	80
			Down-Up	102	125
	Radical Defect	60°	Up-Down	66	74
			Down-Up	156	230

図 6 超音波探傷原理

が欠陥位置同定の誤差要因となる (図 8 で傷の位置 (Notch: $\blacktriangle$) に収れんできない理由)。

人手による「手探傷」では、表面上に「掛書き線」を設け、欠陥の位置を同定するので、誤差は 1 mm 程度となる。本マニピュレータ・システムを用いた探傷作業では、上記「手探傷」の精度を基準に、同程度の精度が得られているかで判定した。

3.2 マニピュレータ・システムによる探傷試験と結果

図 6 超音波探傷原理

(a) Vessel

(b) Saddle

図 7 探傷試験供試対と計測結果

る代表的な2つの例について検証した(表4)。即ち、円筒容器の内表面傷(人工的に設ける。以下同じ)(図7a)、及び容器出口ノズル(サドル)の内面傷(図7b)に対し、表面から探傷した。表4は、検出感度からの同定結果で、手探傷と同程度の性能を示した。また、図7は、表面の番地(ロボット・システム上の位置)から傷位置を推定した結果(Automatic)であり、手探傷(Manual)と同等の性能を有していると判断した。

4. マニピュレーション技術の汎用作業への応用の考察

本研究の主目的が超音波探傷への実用化にあった。このため表面へのなじみ性の考察やたわみの補正などで特殊な工夫(ハンドラ)をした。しかし、軽量化(12Kg)や制御法は、ロボットの汎用作業への適用にも寄与するものであり、この観点からの考察を行う。

4.1 可搬式汎用アームの可能性 ペイロード(可搬力)50N、アーム長さ850mmでロボット質量120Nのアームの実証結果は、一般作業用汎用アーム(例えば、ペイロード100N、アーム長さ1000mmで、ロボット質量300N程度)の可能性を示唆している。また、一人でロボット本体の取付け及びケーブル結線の実験を行い、全体を約3分で実行している。

4.2 制御アルゴリズム及びコンピュータ・ネットワーク 本システムでは、探傷位置座標を正確に求めるため(探傷作業の特殊性)、幾何学的な計算でたわみ量を補正する方法による第2.2.2の構成としているが、表面のなぞり機能のみならば、力制御(力センサとソフト・ウェア)によることもできる。本研究では、探傷データ集録と同期制御をするために、ホスト・コンピュータにNDG DS7540Ⅱを使用した。マニピュレータの制御のみには、パーソナル・コンピュータ(例えば、PC98レベル)で構成することで、制御装置の可搬性を向上できる。

4.3 剛性補正制御 ロボットの軽量化・可搬性は、ロボットの適用範囲の拡大の大きな要因である。このため、機械構造・制御の剛性の低下を招くが、これをソフト・ウェア的に補正することは、軽量化・高精度化の相反する要求を整合させる手法として有効といえる。

5. 結 論

- (1) 3次元曲面の超音波探傷を6軸マニピュレータで実行し、手探傷と同等以上の精度を得られることを実用機仕様の汎用機で実証した。
- (2) 高速DMAハンドラを用いることにより、ロボット質量によるたわみ等を補正し、全体のサンプリング・タイムとして10msを得た。
- (3) ペイロード50N、アーム長さ850mmでロボット質量120Nは、可搬式汎用アームとしても有効である。
- (4) 本試作マニピュレータの取付けを、一人で3分で実施できることを確認した。
- (5) 上記の結果は、6軸マニピュレータによる3次元曲面からの超音波探傷に有効であることの外に、今後の導入が期待されている悪環境作業(いわゆる3K作業)への簡易的な汎用アームの適用の可能性を示唆していると考えられる。なお、筆者らは、この経験に基づき可搬式汎用アームの開発を進めている。

参考文献

- 1) 上田: 原子力プラント配管用自動超音波探傷装置の開発・実用化について 配管技術 '91.8. pp98-102
- 2) 常脇: 可搬式汎用マニピュレータシステムの開発 三菱原子力技報 第57号(平成2年) pp35-40
- 3) 林: 汎用作業に供する実用マニピュレータの高度化の試み 日本産業ロボット工業会「ロボット」第90号(H5.1) pp72-81
- 4) 「データ伝送の基礎知識」(電気通信社協会編)
- 5) 「コンピュータ通信とネットワーク」(共立出版株式会社)