

# 化学プラント劣化診断技術の研究

## －化学プラント外面腐食診断装置の研究－

中川 健司\* 小石川 勝男\*

### 1. はじめに

茨城県の鹿島コンビナートをはじめ全国の石油化学コンビナートでは建設以来 30～40 数年を経て、老朽化の問題を抱えている。とりわけ雨水や塩害による配管や化学反応塔の外面腐食・劣化に起因する内容物(高温・高圧の石油化合物)の漏洩事故が近年増加しつつある。配管や塔の劣化点検においては、安全性の観点から、現状の部分点検から全面点検への移行が必要となってくる。しかしながら、現状では仮設足場を組み、人手により検査を行っているため、検査にかかる費用や時間、検査時のプラント停止による生産性の低下などが深刻な問題となっている。

茨城県では産学官連携による化学プラント劣化診断技術開発を推進するため、(株)日立エンジニアリング・アンド・サービス、三菱化学(株)、筑波大学、千葉工業大学、茨城県工業技術センターが中心となって、劣化診断センサと点検自動化技術の開発に取り組んでいる。

### 2. 目的

本研究もこの活動の一環であり、化学反応塔の表面腐食診断ロボットシステム開発を目標としたプレスタディ研究として位置付けられている。本報告では、システムの主構成要素として試作開発しているパラレルリンク型マニピュレータの機構と制御システム、および障害物回避を含む塔表面走査手法について述べる。

### 3. 研究内容

具体的な研究内容と、今年度までに開発した要素技術について詳説する。

#### 3.1 化学反応塔メンテナンスシステムの構想

実用化を志向するため、本研究では図 1 に示す高さ 25m、直径 3m の鹿島地区に実在する化学反応塔を検査対象として想定している。システム全体の構成を図 2 に示す。システムは、クレーン:C、システムベース:B0、システムベース上のウィンチ×6:Wb、プラットフォーム:P0、レール機構:R、振動抑制アーム×3:Ad、移動マニピュレータ×2:W1, W2、腐食診断センサ×2:S、からなる。システムは円形のリング形状をしており、ベースを塔の頭頂部に固定した上で、クレーン車により常に上方に吊り上げられる。プラットフォームには腐食診断センサを手先に搭載したマニピュレータ 2 機が設置され、ベース上の 6 つのウィンチによりプラットフォーム自体が係留・駆動される。マニピュレータと

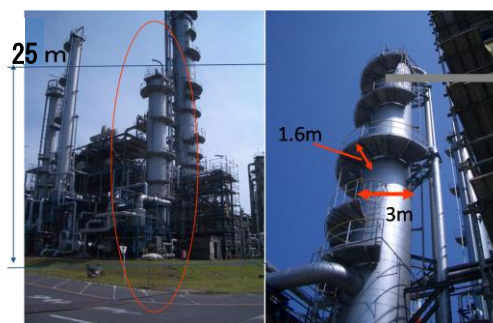


図 1 検査対象とする化学反応塔

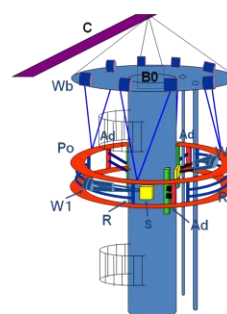


図 2 化学反応塔の表面腐食診断ロボットシステム全景

ウィンチの駆動により、センサによる塔表面の走査を実現する。マニピュレータは全体の長さ 1.6m の先端にセンサを搭載するため、剛性の高さに比べ本体自重を軽量化できるスチュワートプラットフォーム型のパラレルリンク機構を採用し、試作開発を行った<sup>[1][2]</sup>。

#### 3.2 パラレルリンク型マニピュレータの試作

開発したマニピュレータを図 3 に、そのシステム構成を図 4 に示す。本体自重のキャンセルと、内力による剛性強化を勘案し、手先からワイヤ、滑車を経由してカウンターウェイトを付加してある。シリンダーの伸縮駆動にはブラシレス DC モータを用い、シリンダー長の計測には相対移動量を検出するためのロータリーエンコーダと、初期位置出しのためのフォトインタラプタを使用する。手先に搭載するセンサとしては、重量約 5Kg の中性子水分計を想定している<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 逆運動学を用いた手先位置制御

パラレルメカニズムには、シリアルメカニズムとは対照的に、関節角から手先位置姿勢を求める順運動学解析が一般に困難であり、手先位置姿勢から関節角を求める逆運動学解析が容易であるという特性がある。本研究においては解析の容易な逆運動学を位置制御に応用することにした。以下、解析内容について述べる。

エンドエフェクタ位置を  $\mathbf{x} = (x, y, z)$  と、また姿勢を Roll-Pitch-Yaw 角を用いて  $(\varphi, \theta, \psi)$  とおく。このとき、回転行列  $\mathbf{R}$  は次のようになる。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$R_{11} = \cos \theta \cos \psi \quad (2)$$

$$R_{12} = -\cos \theta \sin \psi \quad (3)$$

$$R_{13} = \sin \theta \quad (4)$$

$$R_{21} = \sin \varphi \sin \theta \cos \psi + \cos \varphi \sin \psi \quad (5)$$

$$R_{22} = -\sin \varphi \sin \theta \sin \psi + \cos \varphi \cos \psi \quad (6)$$

$$R_{23} = -\sin \varphi \cos \theta \quad (7)$$

$$R_{31} = -\cos \varphi \sin \theta \cos \psi + \sin \varphi \sin \psi \quad (8)$$

$$R_{32} = \cos \varphi \sin \theta \sin \psi + \sin \varphi \cos \psi \quad (9)$$

$$R_{33} = \cos \varphi \cos \theta \quad (10)$$

図 5 に示したベクトルの相関から、 $i$  番目のシリンダーの幾何ベクトル  $\mathbf{l}_i$  (根元から先端方向)は、

$$\mathbf{l}_i = \mathbf{x} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i \quad (11)$$

と表せる。ただし  $\mathbf{a}_i$  ,  $\mathbf{b}_i$  はエンドエフェクタ上、ベース上それぞれにおける  $O$  ,  $O'$  から、 $i$  番目のシリンダーのユニバーサルジョイント回転中心への位置ベクトルである。これより、求めるシリンダーの長さは次式によって算出できる。

$$l_i = \|\mathbf{l}_i\| = \|\mathbf{x} + \mathbf{R} \cdot \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i\| \quad (12)$$

上式中、 $\mathbf{a}_i$  と  $\mathbf{b}_i$  はマニピュレータの機構パラメータであり定数となるから、残るパラメータとしてマニピュレータ手先の原点  $O$  からの平進・回転の移動量  $(\mathbf{x}, \mathbf{R})$  を指定すれば、そのときに各シリンダーに要求されるシリンダー長を求めることができる。そこで、目標とするマニピュレータ手先の位置姿勢  $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^{ref}$  を与えたとき、その位置姿勢における各シリンダーの長さを  $(l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^{ref}$  とおくと、

$$l_i^{ref} = \|\mathbf{x}^{ref} + \mathbf{R}^{ref} \cdot \mathbf{a}_i - \mathbf{b}_i\| \quad (13)$$

(13)式より、任意の手先位置姿勢におけるシリンダー長の目標値を得ることができる。以上がパラレルメカニズムの逆運動学解析となる。

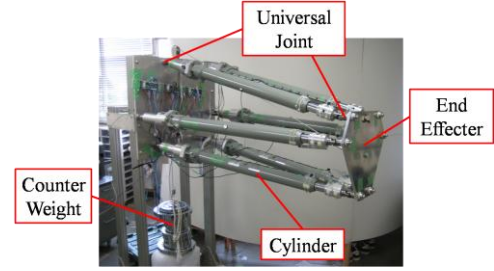


図 3 パラレルリンク型マニピュレータ試作機

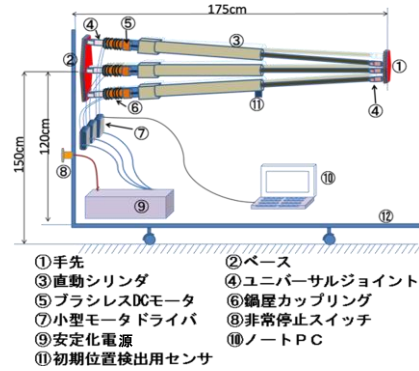


図 4 システム構成

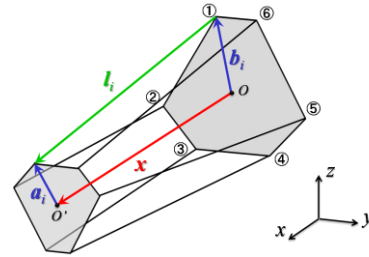


図 5 幾何ベクトル設定

### 3.4 軌道追従制御

前項の逆運動学計算を用いて、マニピュレータ手先位置姿勢の位置制御を行う。実装したソフトウェア処理のフローチャートを図 6 に示す。フローチャート中の具体的な処理内容は、以下の通りである。

- i. 初期化  
リミットスイッチ (実際はフォトインタラプタ) が反応するまで各シリンダーを縮め、変数の初期化を行う。
- ii. 目標手先位置・姿勢指定  
目標位置姿勢  $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^{ref}$  を入力。  
現在は簡易的に、設定ファイルに時系列での目標位置を記入し、その間をスプライン補間することにより実現している。
- iii. 逆運動学計算  
(12)式を用いて、 $(x, y, z, \varphi, \theta, \psi)^{ref}$   
 $\Rightarrow (l_1, l_2, l_3, l_4, l_5, l_6)^{ref}$  を計算。
- iv. シリンダー長制御 (PID 制御)  
シリンダー長について、PID 制御を行う。  
出力電圧にリミッタを設けてある。
- v. 終了処理  
初期姿勢に戻り、プログラムを終了する。

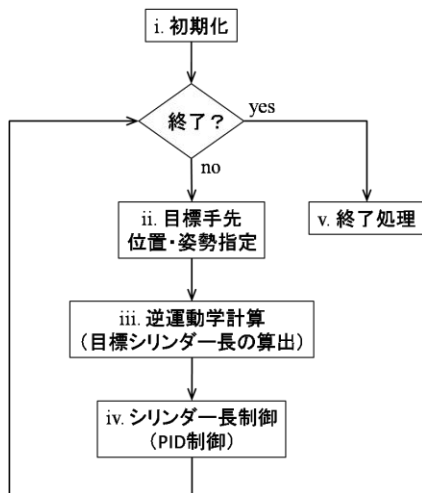


図 6 制御プログラムのフローチャート

### 3.5 駆動実験

前項の制御方式を用いて、マニピュレータの駆動実験を行った。そのときのマニピュレータ動作の様子を図 7 に、動作時に与えた手先位置姿勢の目標値を図 8、図 9(縦方向動作)、図 10、図 11(横方向動作)に示す。

また、逆運動学計算により求めたシリンダー長の目標値と、それに対応するシリンダー長の実測値(制御結果)の比較を図 12、図 13、図 14、図 15 に図示する。この結果から、目標手先位置姿勢を実現するためのシリンダー長目標値に、各シリンダーにおいて正しく追ってきていることが分かる。順運動学計算が実装されていないため、現状では関節座標系レベルでの評価になるが、マニピュレータ手先位置姿勢の制御が実現できたと言える<sup>[4]</sup>。

### 3.6 塔形状の計測と障害物回避軌道の生成

マニピュレータの手先に搭載した測域センサ(レーザ距離計)により塔の 3 次元形状を計測した(図 16)。反応塔には図 1 に見られるように梯子やバルコニー等の障害物が存在するため、塔の 3 次元形状データを入力として、「障害物を回避しつつセンサ走査を行える軌道」を生成する手法・プログラムを作成した<sup>[5]</sup>。

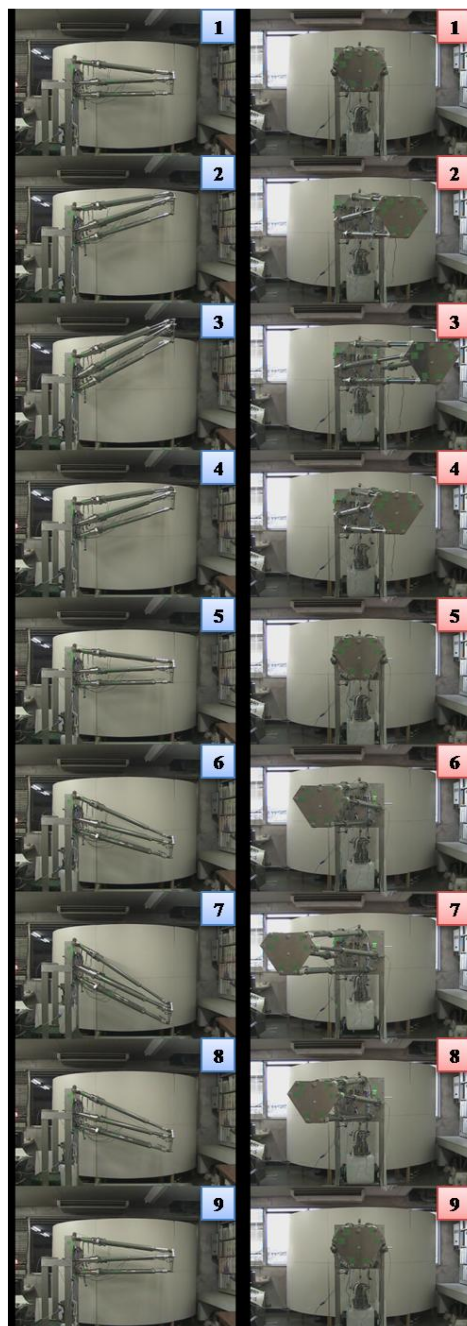


図 7 マニピュレータ動作の様子  
(左:縦方向動作, 右:横方向動作)

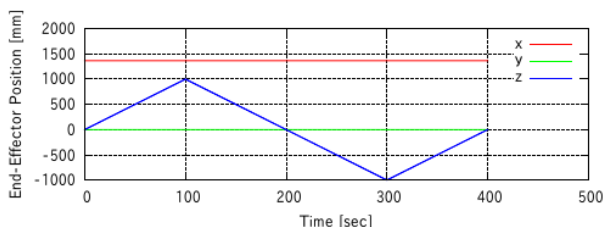


図 8 手先位置の目標値(縦方向動作)

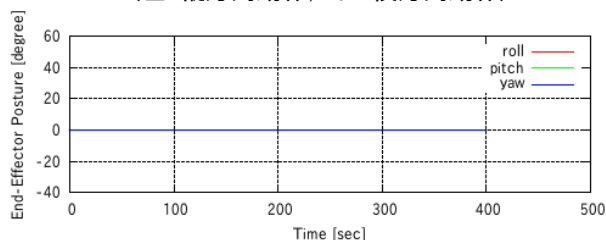


図 9 手先姿勢の目標値(縦方向動作)

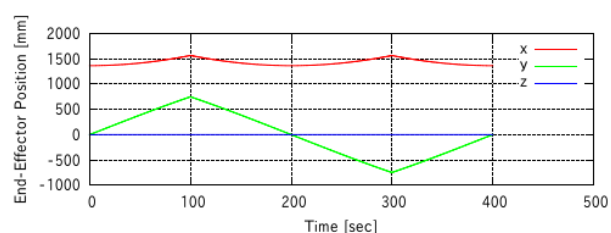


図 10 手先位置の目標値(横方向動作)

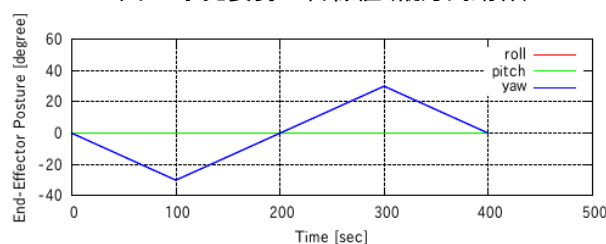


図 11 手先姿勢の目標値(横方向動作)

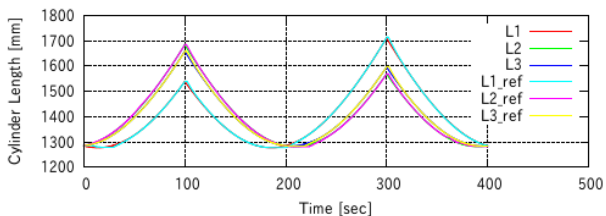


図 12 シリンダー長①～③(縦方向動作)

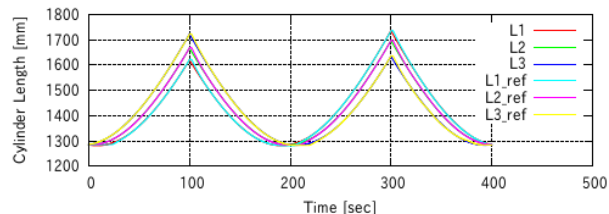


図 14 シリンダー長①～③(横方向動作)

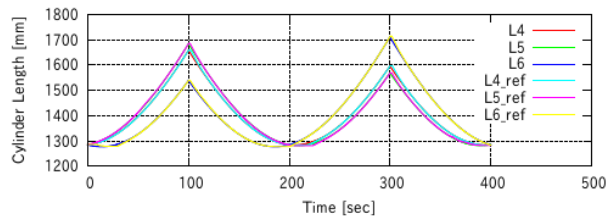


図 13 シリンダー長④～⑥(縦方向動作)

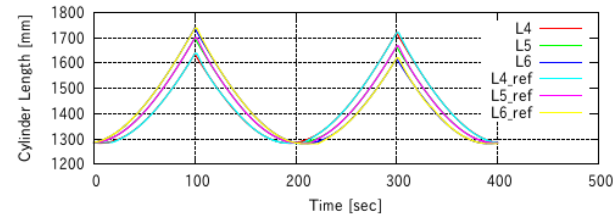


図 15 シリンダー長④～⑥(横方向動作)

実験用の模擬反応塔において、1440mm×1200mm の走査範囲内に 3 つの障害物を設置し、形状計測と障害物回避軌道の生成を行った結果を図 17 に示す。

#### 4. 検査時間についての考察

中性子水分計による水分計測は、現状で移動中計測に対応していないため、定点観測が必要となり、1 箇所 (300mm×300mm) につき 10 秒程度の計測時間がかかる。マニピュレータの移動速度も考慮すると、塔表面において 1m<sup>2</sup> のエリアを劣化診断計測するのに約 2 分必要となる。高さ 25m、直径 3m の反応塔では総表面面積が約 235m<sup>2</sup> であるから、単純計算で 1 基の塔につき 8 時間となり、塔 1 基/日といった実用性のある検査速度が見込める。

#### 5. まとめと今後の課題

化学反応塔の劣化点検 (腐食診断) のための塔表面走査をタスクとするマニピュレータの試作機と、その制御システムについて報告した。開発した要素技術の組み合わせにより、障害物を回避しつつ反応塔表面を劣化診断センサにより走査することが可能になった。

今後の課題としては、

- 操作者が使い易いユーザインタフェースの開発
- 実環境への適用性などのシステム検証・評価
- 研究開発成果の全体計画への反映

を予定している。なお、本研究は茨城県による「化学プラント劣化診断技術開発」\*の一部となるプレスタディ研究であり、全体計画においては、

- プラントの安全保持、維持補修費の低減
  - 検査時間短縮による産業競争力の強化
  - 診断サービス会社による新産業の創出
- を目標としている。

本研究で開発したマニピュレータ手先移動、障害物回避といった要素技術については、手先に搭載するアタッチメント次第で、例えば壁面の塗装や清掃など、他の用途への適用も可能な技術であり、今後その応用可能性を検討するつもりである。

\* (株) 日立エンジニアリング・アンド・サービス、三菱化学 (株)、共立エンジニアリング (株)、(株) 三友製作所、筑波大学、千葉工業大学、茨城県工業技術センターによる産学官連携プロジェクト

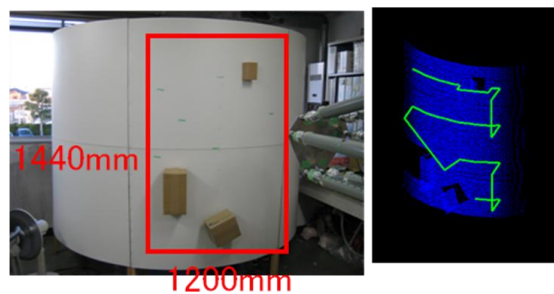


図 16 (左) 測域センサ、(右) 形状計測結果

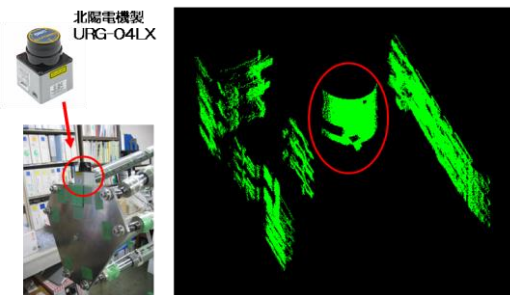


図 17 (左) 走査範囲、(右) 生成された軌道

#### 参考文献

- [1] 竹田年延, 小柳栄次, 吉田智章, 油田信一: “化学反応塔メンテナンスシステム用表面腐食診断マニピュレータの試作”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2008, 1A1-G13, 2008.
- [2] 新井健生: “静力学特性に基づくパラレルリンクマニピュレータの解析と統合”, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 4, pp. 526-533, 1992.
- [3] 服部行也: “RI 中性子源を用いた配管の CUI 評価”, 日本保全学会 第 1 回「検査・評価・保全に関する連携講演会」, 2008.
- [4] 中川健司, 竹田年延, 鴨志田武, 油田信一: “化学反応塔メンテナンスシステムに用いるパラレルリンク型マニピュレータの試作と制御”, 第 27 回 日本ロボット学会学術講演会, 3K2-03, 2009.
- [5] 中川健司, 鴨志田武: “化学反応塔メンテナンスロボットシステムの開発 - 塔の 3 次元形状計測およびマニピュレータによる塔表面走査の制御 -”, 第 10 回 計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3K1-6, 2009.