

# 化学プラント劣化診断技術の研究

## ー 化学反応塔表面腐食診断ロボット用マニピュレータの開発と制御ー

中川 健司\*

### 1. はじめに

太平洋に面した茨城県東部には鹿島臨海工業地帯が広がっており、鹿島コンビナートはその中に位置する。屋外の配管及び塔類は、省エネルギー対策として保温材で断熱してあり、その表面は雨風の影響を防ぐために、厚さ0.3mm程度の鉄板で覆われている。配管・塔類は、鉄板の隙間からの雨水の侵入と塩害の影響をうけて、内部配管材の錆の進行が著しく、外面腐食が進行しており、表面劣化が激しい。

そのために、足場を組み、人の手によって保温材を剥がして、目視による管の表面の検査が計画的に実行されている。この作業は高所でも行われる為に、仮設足場の設置費用が大きくかかる上に点検に長時間を要する。また、点検の期間中は、プラントは稼働させないので、プラントの生産効率が低下する。高さ100mの1基の化学反応塔の表面の腐食検査を行う為の仮設足場設置費は約1億円になり、検査期間は1ヵ月に及ぶ。鹿島東部コンビナートでは、24社の石油化学プラントが稼働しており、970ha(300万坪)の敷地に検査の対象となる塔は約15000基、配管は約10万kmあり、その表面腐食劣化診断費用は大きな負担となっている。

そこで、化学プラントの表面の腐食による劣化を診断に要するコストの低減と所用検査時間を短縮する為に、プラントの稼働状態でのメンテナンスシステムが必要である。メンテナンスシステムは、検査をする為のセンサとそのセンサを搭載して塔・配管を移動する移動マニピュレータから構成される。設備稼働状態での外部診断を行う為に、保温材を剥離せずにその上から、中性子を利用した塔の表面にある水分を検出する装置(Fig.2)とX線を利用して配管の錆による腐食を検出する装置が、平成18年度から茨城県工業技術センター等を中心に産学官連携で開発が進められており、実用化に向けた取り組みが行われている1)。一方で、化学反応塔へセンサを持ってアクセスし、塔の表面の腐食を走査するロボットシステムは、開発されておらず実用化されてない。

我々は、少しでも実用化に向けた化学反応塔メンテナンスシステムを開発する事が大きな目的であり、具体的にFig.1に示す実際の化学反応塔を開発の対象に定めている。本稿では、まず、想定している化学反応塔メンテナンスシステムについて述べて、次にそのシステムの中で用いるセンサを持ち運びながら塔の表面を走査する等身大マニピュレータの製作について述べる。

### 2. 化学反応塔メンテナンスシステム

Fig.1に示した化学反応塔を対象とし表面腐食診断ロボットシステムを述べる。



Fig.1 検査対象とした化学プラント反応塔

#### 2.1 システムの構成

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つ:Wb、プラットフォーム:P0、レール機構:R、振動抑制アーム3つ:Ad、移動マニピュレータ:W1,W2、センサ2つ:S、からなり、システム全体の構成を図3に示す。システムは円形のリング形状をしており、ベースは、塔の頭部に固定された上で、クレーン車によって常に上から吊される。システムのベースには6つのウィンチがついており、ウィンチのワイヤはプラットフォームに繋がっており、プラットフォームの重さを支えている。また、プラットフォームの風等による横方向の振動を3つアームで吸収する。システムのプラットフォームは左右対称の構造にする。

全体の長さが約1.6mの先端に約50Kgのセンサを取り付けるため、剛性が高い割に自重を比較的軽くできる、6自由度のスチュワートプラットフォーム型パラレルリンク機構をもつマニピュレータ2)を2つ、プラットフォームにとりつける。塔の表面にある様々な突起物を回避するために6つの自由度をもたせた。プラットフォームは、一部分に円弧状のレール機構を持ち、マニピュレータの根本を取り付けて、手先には表面の腐食を検出するためのセンサを取り付ける。塔とマニピュレータを斜め上から見たモデルをFig.4に示す。

#### 2.2 システムの動作

システムのベースとプラットフォームは始め一つのリングとして一体化しており、クレーン車によって塔の頭部まで運ばれ、システムベースが塔の天辺に固定される。次にベースに取り付けた6個のウィンチを制御し、プラットフォームをベースから分離して下げる。ある程度下がったところで、振動を押さえる為の3つの直動アームが塔に向かって伸びて塔を押さえる。そして、マニピュレータの手先が伸びて上下左右に動き、

\*技術融合部門

障害物を回避しながら塔の表面を走査する。また二つのマニピュレータはプラットフォームのバランスをとるためになるべく点対称に動く。

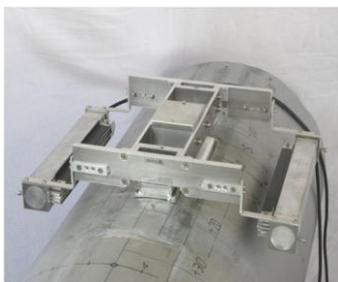


Fig. 2 配管用に開発された中性子源を使用した水分検出センサ

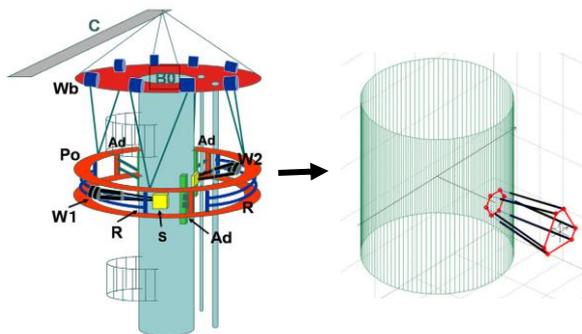


Fig. 3 (左) 化学反応塔の表面腐食診断ロボットシステムと  
Fig. 4(右) スチュワートプラットフォーム型パラレルリンク機構

プラットフォームは6本のワイヤの長さを制御する事で左右にそれぞれ60度ほど回転させる事が可能であり、マニピュレータは根本を固定した状態で左右合わせて60度ほど水平方向の走査を行う。従って、塔の周回方向は三回に分けて走査が行われる。一つの円周の走査が終わると、振動抑制アームを畳み、ワイヤが再び伸びてプラットフォームは下側に移動して、3つの直動アームによる固定動作が始まり走査が繰り返される。ただし、塔の低い部分は人間によって走査を行う事とし、人間が簡単に移動できる場所は人間がセンサをもって走査を行うことにする。

### 3. マニピュレータの設計

#### 3.1 マニピュレータの設計手順と仕様

スチュワートプラットフォーム型パラレルリンク機構を持つマニピュレータを設計し製作する。始めに手先の可動範囲と手先の耐加重及び手先の移動速度について仕様を定めた。次に、アクチュエータとして用いる直動シリンダーを決定し、モータとジョイントも併せて選択した。軽量の割にトルクが大きく、小型モータと組み合わせる事が可能なシリンダーは比較的选择肢が少ない為、先に直動シリンダーを決定した。そして、マニピュレータが定めた仕様を満足できるように、マニピュレータの手先と根本の形状と大きさを決定した。

まず、想定している化学反応塔のメンテナンスシステムで用いるマニピュレータの仕様を決定した。手先に中性子センサを持ち運ぶ必要があるため、手先に5kgの荷重を持たせて移動させる事にし、手先の動く速度

は最大0.5m/secとした。マニピュレータの根本の設置位置と塔の表面までの最短距離は1.2mとした。水平に保った手先を塔の表面に沿わせた時の水平方向の走査範囲は、塔の中心角で表すと左右方向に片側30degずつとした。また、垂直方向の走査範囲は、上下方向にそれぞれ1 ± 0.1mとした。

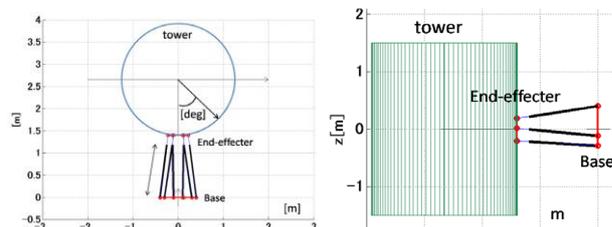


Fig. 5(左) 真上から見た時の塔とマニピュレータの位置関係  
Fig. 6(右) 真横から見た時の塔とマニピュレータの位置関係

これらの仕様を簡単にまとめると、最大約1.6m 伸ばして手先に5kg 持たせて、上下に約2m、左右に約60deg 動く大型のマニピュレータとなる。

#### 3.2 アクチュエータの選択とマニピュレータの手先と根本の形状及び大きさの設計

直動シリンダーの必要な出力を計算するために、横にしたマニピュレータを、両辺の長さが2m、底辺の長さが1mの横にした2等辺三角形とみだてて、手先に相当する三角形の頂点に、縦向きに5kgf に力が加わっている時の、両辺と平行方向にかかる力を求めた。そして、その値を定常出力にもつ直動シリンダーを選択した。選択した直動シリンダーは、伸縮部分の長さが0.6m、固定部分の長さが約1.0m であり、また、シリンダーの最大出力は100kgf (1kN) である。また、シリンダー内のボールねじを回すために必要なトルクと必要な手先速度で回転するモータ及び減速機を決めた。

取り付けるマニピュレータの根本位置と塔の位置は決っており、また、伸縮シリンダーの固定部分と伸縮部分の長さも物理的に決っているので、手先と根本の形状とその長さに関するパラメータを設計する。これらのパラメータを、適切に決定することで要求仕様を満たすマニピュレータを製作する事ができる。パラレルリンクの手先と根本の形状を適当に設計すると、水平に姿勢を維持するだけでも選択した直動シリンダーの最大出力(100kgf) を越える場合が多くあり、また、可動範囲が狭くなる。可動範囲を広く、選択したアクチュエータで制御するためには適切な設計が必要である。3)

手先と根本形状を設計する際に、選択したシリンダー同士の干渉を避ける為に、マニピュレータの根本部分と手先部分のシリンダー軸と軸の取り付け間隔を最低0.2m以上あける必要があった。また、加工機器の扱える大きさの制限より、マニピュレータを構成する根本の大きさは縦と横の長さが共に最大0.8m 以内の正方形より小さいこと事が条件となった。手先と根本の形状及び大きさを決定するためのパラメータの探索を行い形状を決定した。

マニピュレータの手先と根本の形状を、大きい正三角形から、3つの小さい正三角形を3つのそれぞれの頂点から切り取った、六角形とした。すると、決定すべきパラメータは、根本と手先それぞれの正三角形の一辺の長さ(Lb, Le) と切り取る正三角形の一辺の長さ(Lbc, Lec) の4つとなる。仕様と制約条件を踏まえて、この4つのパラメータ(Lb, Le, Lbc, Lec) を選択し決定するために用いた具体的な条件は・手先を決める大きい三角形の一辺(Le) の長さは0.6m以上1m 以下  
根本を決める大きい三角形の一辺(Lb) の長さは0.6m 以上1.5 m 以下

- ・切り取る小さい正三角形の一辺(Lbc, Lec) の長さは、手先と根本共に、0.2m 以上1m 以下
- ・水平方向の最大可動範囲が左右合わせて64deg 以上
- ・垂直方向の可動範囲は上下合わせて1.8m 以上
- ・根本の面積が一辺0.8cm の正方形以下
- ・手先を水平に1.2m 伸ばして、さらに、垂直に1m に上げた姿勢Fig. 9 で手先に20kgf の力を与えた時に、全ての1本の直動シリンダーにかかる力の絶対値が、100kgf 以下(シリンダーが伸びる最大値を僅かに越えているがより厳しい姿勢での力を計算するため)とした。

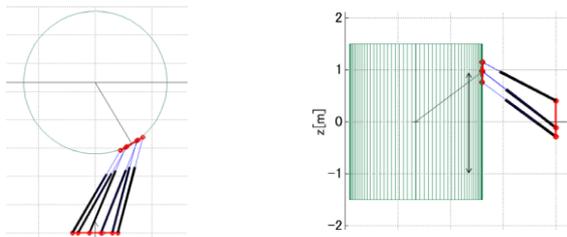


Fig. 8 水平方向最大角度を求める時の姿勢

Fig. 9 シリンダーに加わる力を計算する時の姿勢

上記の全ての条件を満たす4つのパラメータの組合せを、手先と根本を決める大きな三角形については0.1mずつ、また、小さな三角形については0.01m ずつ変化させて、総当たりによる探索を行って導出した。マニピュレータの水平方向についての最大可動範囲[deg]とは、手先を塔の表面上に接して沿わせながら、0.1degずつ水平に開いて動かしてゆき、6本のシリンダーの内1本でも全長が1.6m を超えた時の、手先中心と塔の中心が作る角度である。同様の方法を用いて、垂直方向の最大可動範囲[m] も水平位置から手先が伸びたところまでの距離として求めた。

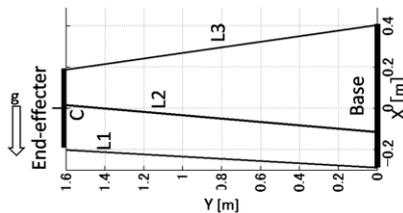


Fig. 10 各シリンダに加わる力の計算で用いた横から見たマニピュレータの2次元平面モデル、並びに、仕様を満たすように設計した手先と根本の形状をもつ横から見たマニピュレータ

パラメータの探索では、直動シリンダーの伸縮部分の重さと手先に取り付けるセンサの重さを考慮して、

手先には20kgf を与えた時に直動シリンダーに加わる力を求めた4)。この時、マニピュレータを正面に伸ばしている時には左右対称形であるので、実際の計算は、手先に加わる力を10kgf として、マニピュレータを真横から見て直動シリンダーが3本(L1,L2,L3) になっている2次元平面モデル(Fig.10) と見立てて計算した。

### 3.3 手先と根本形状のパラメータ探索の結果と決定

パラメータの探索を計算によって行った結果、4つのパラメータの組合せの総数は26320 通りあった。この内、制約条件と仕様を満たす事ができた組合せは24 通りであった。この事から、今回のマニピュレータの製作では、絶妙に適切なパラメータが必要であった事がわかる。24 通りの中かから、最も水平方向の可動範囲が大きい組合せに決定した。4つのパラメータ [ Lb=1.00mLe=0.70m Lbc=0.21m Lec=0.25m ] となり、水平方向の左右の可動範囲は64.2deg, 垂直方向の上下の可動範囲は1.84m となった。決定した手先と根本の形状をFig. 11に示し、真横から見た図をFig. 10 に示す。手先を最も高く持ち上げた姿勢で、各シリンダーに加わる力は、 [ L1=42.15kgf, L2=-95.76kgf, L3=48.86kgf ] であった。符号が負の向きはシリンダーを縮ませる方向に力が加わっている事を示しており、L1 とL3 については、シリンダーを引っ張る向きに、また、L2 については縮む向きに力が加えられている。真横からみると三本の直動シリンダーによって支えられており、シリンダーに加わっている力の向きは、真中の1本のシリンダーL2 だけが、残り2本のシリンダーとは逆向きである。また、真中のシリンダーL2 に加わる力の絶対値が最も大きい。手先に加える力の向きを逆転した場合は、各シリンダーに加わる力の向きだけが反転し、力の大きさの絶対値は同じであった。つまり、手先に加わる荷重の向きが反転しても、シリンダーに加わる力の向きが逆転するだけである。マニピュレータは左右については対称であるが、上下方向については非対称である。縮む向きに力が加わる直動シリンダーを1本にして、残りの2本は引張られる方向に力が働く向きに根本の上下を決定した。この時、先程定めたパラメータを用いると、マニピュレータを真横からみてシリンダーの間隔が狭くなっている方を下側にして取り付けることとした(Fig. 11)。

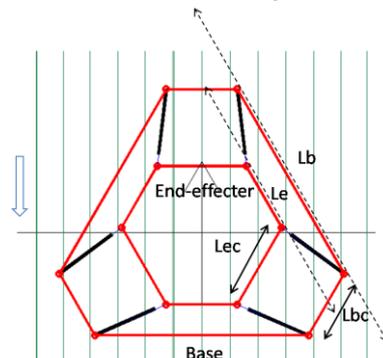


Fig. 11 手先と根本の上下の取り付け方向、並びに、仕様を満たすように設計した根本と手先の形状

#### 4. 製作したマニピュレータと実験装置

製作したマニピュレータの実験装置の概要をFig. 12 に示す。モータにはブラシレスDC モータを使用し、PWM スwitchング方式によって電流制御を行う。モータ軸とシリンダー軸はカップリングを通して接続し、根本と手先にユニバーサルジョイントと取り付けてシリンダーと連結した。マニピュレータは1.5m の高さにかスタをもち台にとりつけて、手押しによって移動ができる。この台には、非常停止ボタンと2ch の小型モータドライバを3 つ、そして36V30A の直流電源とノートPC がのる。各直動シリンダーには初期位置を検出するセンサを取り付けてある。ノートPC とモータドライバはCAN通信を行う。真横から見た時のマニピュレータの実験装置をFig. 13に正面から見た場合をFig. 15に示す。また、直径が実物と等しい反応塔の模型とマニピュレータをFig. 14に示す。

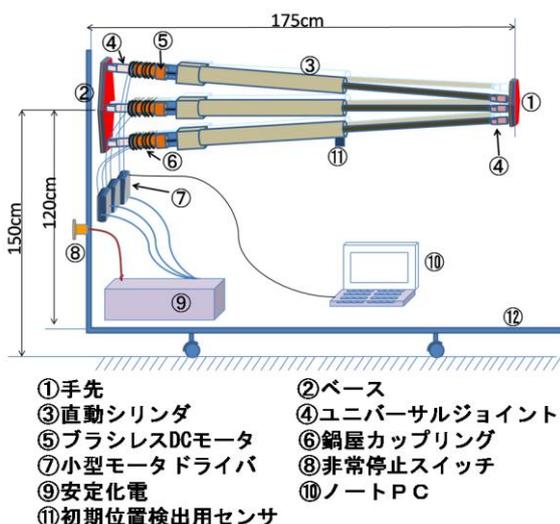


Fig. 12 マニピュレータの実験装置の概要

#### 5. まとめ

化学反応塔のメンテナンスシステムのための、センサを持ち運び塔の表面を走査するマニピュレータの設計と開発を行った。マニピュレータには、スチュワートプラットフォーム型パラレルリンクメカニズムを採用して、実物大のパラレルマニピュレータを試作する事を目標とし、マニピュレータの実験システムを試作した。最適なマニピュレータを設計するために、手先と根本の形状を決定する4つのパラメータを定めて、適切な値を探索して決定した。この時、選択した直動シリンダーに基づいて、シリンダーの長さや太さ及びリンクにかかる力が最大出力以下となるように考慮した。シリンダリンク同士の干渉をさけるために取り付け間隔について考慮した。さらに、手先に荷重が加わった時にシリンダーにかかる力が最大出力以下となるように考慮した。その上で、マニピュレータの仕様を満たすことが出来る用に手先と根本の形状を設計し、実際にマニピュレータと実験装置を製作した。仕様を満たす事ができる形状はかなり限られており、スチュワート型パラレルリンク式マニピュレータの設計と製作ではパラメータ探索がかなり重要であったといえる。

#### 謝辞

本研究にあたりご協力頂きました千葉工業大学未来ロボット技術研究センターの小柳栄次教授、吉田智章氏並びに、筑波大学油田信一教授に深く感謝致します。



Fig. 13 製作したマニピュレータの実験装置



Fig. 14 マニピュレータと直径が実物大の反応塔の模型



Fig. 15 前面から見た製作したマニピュレータ

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 新井:”パラレルメカニズムを適用したロボット機構と作業応用”,日本ロボット学会誌Vol.10 No.6,pp.727-731, 1992
- 3) 竹囲: 化学プラント劣化診断装置関連の特殊ロボットに関する研究 :茨城県工業技術センター研究報告Vol36
- 4)新井:”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