球形貯槽検査用ロボットの開発

川口圭史* 曾木忠幸* 甲斐 昇*
森崎弘康* 早川秀樹*

Development of an Inspection Robot for Spherical Storage Tanks

Yoshifumi Kawaguchi*, Tadayuki Sogi*, Noboru Kai*,
Hiroyasu Morisaki* and Hideki Hayakawa*

Recently new ultrasonic flaw detection system called TOFD method is utilized to externally inspect the inner and outer surfaces of weld seams on spherical storage tanks while tanks are in use. In this system, the robot mounted the sensors is not only permitted to travel along the weld seam rapidly but also required to follow the weld seam precisely. In this paper, the development of a magnetic-wheeled robot that can follow the weld seam within 5 mm based on feedback control is described. Since October 1999, this robot has been in experimental operation on an actual spherical tank. Practical introduction of this robot will shorten inspection time by about one week from the conventional 23 days, and will reduce the conventional number of inspectors required from 4 to 2-3.

Key Words: Mobile Robot, Inspection, TOFD Method, Magnetic Wheel, 2D Laser Displacement Sensor

1. はじめに

全国552基[1]の球形ガスホルダー（以降GH）等の球形貯槽の検査は所有事業者にとって極めて重要な業務である。このため日常検査以外に定期的（GH：10年ごと）に溶接線付近の探傷検査が行われている。この検査には開放検査『球形貯槽を開放し、内外面から磁粉探傷を行う検査』、および供用中検査『球形貯槽を開放せず、外面からの超音波探傷を行う検査』の2種類が認められている。検査性能としては開放検査が優れているが、球形貯槽の用途（GH：ガス供給量の調整）および検査コストを考えると供用中検査の意義は大きい（ただし、GHでは少なくとも2回に1回は開放検査が義務づけられている[2]）。

近年GHの供用中検査に用いる超音波探傷法としてパルス反射法以外にTOFD法[3]が導入されている。このTOFD法は溶接線を挟んで一对の送受信センサを設置する方法（透過型）であり、溶接線と平行にセンサを移動させる高速探傷が可能である。これにより従来のパルス反射法用の移動速度の遅い真空吸着式ロボット[4]よりも、より高速移動が可能で効率化をもたらす検査ロボットが利用可能となった。

球形貯槽・壁面・管内などの高速移動用検査ロボットとしては磁石を用いた車輪型のロボット[5]～[8]がすでに提案されている。しかしTOFDセンサを搭載したロボットはその検査目

的から溶接線に正確に追従した高速移動が必要である。しかし、これらのロボットでは、そのような検討は十分になされていなかった。

本稿では2回の試作[9]～[11]を経て、開発した球形貯槽供用中検査用ロボットの報告をする。このロボットは溶接線検知センサと姿勢検知センサで左右車輪速度をフィードバック制御することにより、正確に溶接線追従し高速移動を実現している。

2. T O F D 法

TOFD (Time Of Flight Diffraction) 法は広い指向角（約70度）を持つ超音波を発生させ、傷端部での回折波（360度方向）を検出する透過型の探傷検査である[3]。複数センサの反射波に基づき検査を行うパルス反射法と異なり、Fig. 1の原理図から分かるように、平行走査による高速探傷検査が可能である。本ロボットに搭載しているTOFD探傷装置は15 [MHz]という高周波の探触子を用いて高分解能を得ている。

この探傷装置はロボットの後部に搭載されており、搭載に際して以下の工夫がなされている。

- 探触子の接触媒質は水を用い、地上ポンプからチューブを介して供給する
- バネによる探触子押し付け力が溶接線乗越え時に支障となるため、地上から操作可能な探触子昇降装置を設置する
- ロボットの移動速度の拘束を緩めるために、ロボット搭載エンコーダの値を探傷装置に取り込み（横軸として）探傷画面を表示する（Fig. 1参照）

原稿受付 2002年4月1日

*大阪ガス株式会社

*OSAKA GAS CO., LTD.

Fig. 1 Location of defect on specimen and corresponding image

Size	Length 536mm Width 428mm Height 177mm
Weight	27.5kg
Speed	0-3 m/min
Power Source	DC 30 V supplied from outside source
Sensors	2-Dimensional Laser Displacement Sensor Ultrasonic Flaw Detection Probe (TOFD method) 3-Axis Tiltmeter Odometers Hall Sensors Color CCD Camera

Fig. 2 Picture and specification of the robot

3. 球形貯槽検査用ロボット

Fig. 2に開発した球形貯槽走行ロボットの写真および仕様を示す。本ロボットは球形貯槽への付着のためにネオジム鉄系の永久磁石（付着力 539 [N/輪]）をそれぞれ一つ用いた四輪独立駆動 [5] [8] を採用している（前後の独立性は主に動作確認用）。さらに磁石車輪の付着状態を改善するため、車輪を球形貯槽に合わせた曲率とするだけでなく、前後車輪間にねじれ機構を採用している。ただしロボットが上下方向に移動姿勢をとっている場合には車輪の空転が発生する。この転がりを防止するため、停止時および電源遮断時に車輪をロックできる機構を採用している。走行速度は最大 3 [m/分] であるが、検査時は TOFD 探傷装置の処理能力から 1~2 [m/分] としている。

TOFD 探傷装置には検査用に水供給チューブが必要であり、エネルギー的な自立の優位性は低いため、本ロボットでは地上からケーブルでエネルギーを供給している。

本ロボットには、後述する溶接線検知センサ（レーザ変位センサ）、姿勢検知センサのほかにエンコーダ（四輪すべて）、溶

Fig. 3 Construction of 2D laser displacement sensor

接線確認用 CCD カメラ（スリットレーザ付）、ロボット内部の温度センサ（2箇所）、付着状態確認用ホールセンサ（四輪すべて）[12] が搭載されている。特にホールセンサは以下のような多

Fig. 4 Example of weld seam contour measurement

様な用途がある。

- 溶接線乗越え時の状況（安定性）確認
- 車輪の磁石が割れた際の検知
- ロボットが球形貯槽から剥離している状態（レーザが眼に当たる危険性のある状態）の検知（眼球防護）

さらに本ロボットの目的はTOFD探傷検査の効率化（検査の継続・簡単な操作）であり、この観点から設計・開発に際しては以下の点に特に留意した。

- 入手しやすい汎用交換部品採用
- 複合ケーブル（通信・エネルギー・水）の採用
- 消耗品（モータ・ギア・車輪）取替が簡便な構造
- 運搬の容易なアイデア（ロボットの複数取手・専用箱）
- 優れた操作性（CCDカメラ画像も制御用PCで表示）

4. 溶接線検知センサ

球形貯槽検査用ロボットの溶接線検知として、渦電流を用いる方法がすでに提案されている[13]。しかし、装置が大型になったり、母材の影響による誤差があるため、本ロボットではFig. 3に示すレーザ変位センサ[14]（検知横幅40[mm]，サンプリング周期30[ms]，取込データ50点，高さ精度±10[μm]）をロボット頭部に搭載している。これにより溶接線断面形状を計測し（Fig. 4参照），0.3[mm]以上の高さを持つ溶接線の中心位置が計算できる（実験結果：位置誤差の標準偏差2.3[mm]）。中心位置の判定は以下の規準で行う。

- レーザの高さ最大値が0.3[mm]未満の場合は判定不能とする（フィードバック制御にはゼロを返す）
- 高さ最大値が0.3～1.0[mm]の場合は，高さ最大値の位置を中心位置とする
- 高さ最大値が1.0[mm]以上かつ最大値よりも0.5[mm]小さい値の2点の幅（3点以上の場合は最大）が10[mm]未満の場合は，高さ最大値の位置を中心位置とする
- 高さ最大値が1.0[mm]以上かつ最大値よりも0.5[mm]小さい値の2点の幅（3点以上の場合は最大）が10[mm]以上の場合は，その幅の中央を中心位置とする

この計算はロボット搭載のCPUで行い，ピーク位置のみを地上PCへ通信している。またFig. 5に示す走行試験データより，ロボット走行に伴う振動の影響を受け難いことを確認した。

Fig. 5 Variation of weld seam center

5. 姿勢検知センサ

本ロボットの姿勢検知には3軸の静電容量式傾斜センサを用いている。3軸傾斜センサの各出力 x, y, z （ x 軸をロボットの車輪軸と平行な軸（上から見て左→右）， y 軸をロボットの前進方向と一致する軸とする）は，その軸が重力ベクトルとなす角度を ψ_i （ $i = x, y, z$ ）としたときに

$$i = a_i \cos \psi_i + b_i \quad (i = x, y, z) \quad (1)$$

となる。ただし a_i, b_i はそれぞれ既知の定数である。

また球形貯槽付着の拘束条件から，Fig. 6で定義した緯度 ϕ （北緯を正值で表現）およびロボットと溶接線（溶接線は等緯度または等経度線しかない）との角度である振り角 θ に関して次式が成立する。

$$\phi = \sin^{-1} z \quad (2)$$

$$\theta = \sin^{-1} (x / \cos \phi) \quad (3)$$

および

$$\theta = \cos^{-1} (-y / \cos \phi) \quad (4)$$

ここで，緯度はその定義から $-\pi/2 < \phi < \pi/2$ であり，式(2)は一意解を持つ。また式(3)，(4)より振り角も一意に決

Fig. 6 Definition of latitude and azimuth for the robot

Fig. 7 Results of automatic weld seam following test on specimen

定できる。式 (3), (4) の使い分けとしては θ の絶対値が小さい縦方向の移動は式 (3), 横方向は式 (4) というように誤差の影響の少ない方を選んでいく。

6. 溶接線追従制御

本ロボットは TOFD 探傷装置を走査させるという目的から、溶接線ピーク位置から ± 5 [mm] 以内のずれで追従しなければならない。そこで走査速度 (左右輪の平均速度) 一定となるように前述の溶接線検知センサと姿勢検知センサによるフィードバック制御を左右車輪に施す。

溶接線検知センサの値を L [mm], 姿勢検知センサより得られる振り角 θ [rad], 目標振り角 (定数) を θ' [rad], ロボットの左右輪の速度を v_L, v_R [mm/s] とするとロボットの挙動は以下のようになる。

Fig. 8 Field testing

Fig. 9 Controller

$$dL/dt = -v \sin(\theta - \theta') \quad (5)$$

$$d\theta/dt = \omega \quad (6)$$

$$v = (v_L + v_R)/2 \quad (7)$$

$$\omega = (v_R - v_L)/w \quad (8)$$

ただし w [mm] は車輪間隔

式 (5) は $(\theta - \theta') \ll 1$ と近似すると

$$dL/dt = -v(\theta - \theta') \quad (5')$$

と書き直せるので、式 (5)', (6) は L に関する 2 階の線形微分方程式となる。 ω を L と $(\theta - \theta')$ の線形結合値としてフィードバックすれば $L, (\theta - \theta')$ を安定化できることになる (v が一定であることから、得られた ω により v_L, v_R は一意に決まる)。

Fig. 7 に余盛りの小さい現場溶接線を模擬したテストピース上での制御結果を示す。ロボットの初期姿勢が溶接線に対し約 20 度傾いていても、距離 1 [m] 以内で許容範囲内にずれ量を修正でき、その後も許容範囲を超えることはなかった。

ここで用いた方法は通常の状態フィードバックであり、初期状態が不適切である場合や外乱の影響によっては目標値を保証することはできない。このため本方法の妥当性 (実用性) は実際の球形貯槽での走行試験結果で評価する必要がある。

7. 現場適用

1999 年 8 月に実際の GH (直径約 30 [m]) において、剥離の

Fig. 10 System configuration

危険性の高い下半球で走行試験を行った (Fig. 8 参照)。その結果、溶接線縦走行 (上向き)、横走行 (右向き、左向き) の両方で良好な溶接線追従性能を確認できた。また初期状態の設定に関しても、『操作者によるおおまかな位置設定 (溶接線ピーク位置が測定レンジ範囲内) 後に初期設定のために (事前) 自動走行を施す』ことが効果的であると分かった。また懸念されていた外乱の影響はほとんどなかった。

この結果を受けて本ロボットを2000年10月から大阪ガス (株) 伏見供給所のGHの供用中検査に適用した (すでにTOFD法は採用済)。その結果1日に最大120[m]の検査が実現し (従来約50[m])、大幅な検査効率の向上が実現した。

ただし縦溶接線の検査 (地上装置固定で左右3本ずつの検査が可能) を行う際に、操作者の視野からロボットが外れる状況が発生した。そこでロボットの基本操作 (前進後退、旋回、レーザON/OFF、自動手動切替、自動スタート/ストップ) が可能な無線操作機を開発した (Fig. 9 参照)。その結果、最終的に構成されたシステムの情報の流れを Fig. 10 に示す。

8. フィードフォワード制御追加による横方向検査性能改善

本ロボットが横方向の溶接線検査を行う場合に、その軌跡は赤道 (中央) 以外は球の最大円を描くことができない。このため左右輪を同速度で移動すると、(外乱の影響ではなく) 最大円を描く方向にずれていく。これは横方向の検査では常にフィードバック制御が機能していることを示す。しかしこれは緯度 ϕ により決まる (事前に分かる) ため、フィードフォワード制御を追加し、フィードバックの負荷を減らすことが望ましい。

ロボットの車輪幅に相当する緯度差 2δ (これは球径 r に依存) とすると赤道側車輪および極側車輪の全周移動距離はそれぞれ

$$2\pi r \cos(\phi - \delta) \quad (9)$$

$$2\pi r \cos(\phi + \delta) \quad (10)$$

となるため、赤道側の車輪のスピードを

$$\cos(\phi - \delta) / \cos(\phi + \delta) \quad (11)$$

比だけ上げたフィードフォワード制御を施せばよい。また δ は

十分小さいので式 (11) を

$$(\cos \phi + \delta \sin \phi) / (\cos \phi - \delta \sin \phi) \quad (12)$$

と近似しても構わない。

さらに車輪と球形貯槽との接地状態の微妙な変化により重力方向へ横滑りを起こす場合がまれにある。このため横方向の検査にはTOFD探触子の位置を検査に支障のない範囲で球頂側に設定している。

9. ま と め

本稿ではTOFD法センサを搭載させた、溶接線付近の高速探傷検査が可能な球形貯槽検査用ロボットの開発について述べた。

すでに本ロボットは実際の球形ガスホルダーで供用中検査に適用し、良好な結果を得ている。これによりGHの供用中検査においては平均検査期間23日が18日に、検査・操作員が4人から2~3人に削減される見通しである。今後は現場実績を重ねてさらに信頼性を向上させていく。

参 考 文 献

- [1] 社団法人日本ガス協会：ガス事業便覧 (平成13年度版)。p.172, 社団法人日本ガス協会, 2001.
- [2] 社団法人日本ガス協会：球形ガスホルダー指針。p.247, 社団法人日本ガス協会, 1989.
- [3] 西田, 藤本：“TOFD法を利用した超音波探傷技術”, 溶接技術, no.10, pp.72-79, 1995.
- [4] 柘植：“球形ガスホルダーの検査ロボット”, 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.599-601, 1992.
- [5] 中村：“球形ガスホルダー脚栓隅肉溶接部自動検査ロボット”, センサ技術, vol.10, no.2, pp.77-80, 1990.
- [6] 佐藤：“実用ロボット技術に必要なもの—壁面ロボット, 管内ロボットを例に—”, 日本ロボット学会誌, vol.12, no.8, pp.1132-1136, 1994.
- [7] 萩尾, 田中, 藤沢, 佐藤：“車輪型壁面走行ロボットの開発”, 日本鋼管技報, no.122, pp.176-181, 1988.
- [8] 川口, 吉田, 車谷, 菊田：“鉄管内走行ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, vol.14, no.1, pp.137-143, 1996.
- [9] 曾木, 川口, 早川, 森崎, 甲斐, 大河：“球形ホルダー走行ロボットの開発”, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp.345-346, 1999.
- [10] 曾木, 川口, 甲斐, 大河：“球形貯槽検査用ロボットの開発”, SI-2000, pp.223-224, 2000.

- [11] J. Sogi, Y. Kawaguchi, H. Morisaki, K. Ohkawa, N. Kai and H. Hayakawa: "Inspection Robot for Spherical Storage Tanks," IECON-2000, pp.393-398, 2000.
- [12] 川口, 吉田, 巖, 菊田: "鉄管内走行ロボットのセンサと円周方向走行", 日本ロボット学会誌, vol.15, no.8, pp.1164-1171, 1997.

- [13] 中村: "無軌道式超音波探傷装置", 日本ロボット学会誌, vol.10, no.5, pp.601-603, 1992.
- [14] キーエンス株式会社: 二次元レーザ変位センサインストラクションマニュアル.

川口圭史 (Yoshifumi Kawaguchi)

1964年4月7日生。1989年神戸大学大学院修士課程修了。同年より大阪ガス株式会社に勤務。1992～1993年オハイオ州立大学客員研究員。現在導管維持管理技術の開発に従事。工学博士。
(日本ロボット学会正会員)

曾木忠幸 (Tadayuki Sogi)

1965年7月30日生。1989年東京大学工学部卒業。同年より大阪ガス株式会社に勤務。現在導管維持管理技術の開発に従事。

甲斐 昇 (Noboru Kai)

1949年6月19日生。1967年大阪ガス高等学園卒業。同年より大阪ガス株式会社に勤務。現在生産設備維持管理技術の開発に従事。

森崎弘康 (Hiroyasu Morisaki)

1969年9月11日生。1995年大阪大学大学院修士課程修了。同年より大阪ガス株式会社に勤務。現在導管の溶接・検査技術の開発に従事。

早川秀樹 (Hideki Hayakawa)

1962年4月8日生。1987年大阪大学大学院修士課程修了。同年、大阪ガス(株)総合研究所に入所。1990～1994年ATR視聴覚機構研究所, ATR人間情報通信研究所に出向。現在、大阪ガス(株)開発研究部シニアリサーチャー。計測・診断技術の開発に従事。工学博士。電子情報通信学会, 日本非破壊検査協会, 物理探査学会各会員。