柔軟構造形管内走行検査ロボット用水素吸蔵合金駆動ゴム製ガス圧 アクチュエータとその応用に関する研究*

福田 敏男^{*1}, 細貝 英実^{*1}, 上村 昌宏^{*2}

A Study on Rubber Gas Actuators Driven by the Hydrogen Storage Alloy for In-pipe Inspection Mobile Robots with Flexible Structure and on an Application

Toshio FUKUDA, Hidemi HOSOKAI, and Masahiro UEMURA

This paper deals with rubber actuators using Hydrogen Storage Alloy for an in-pipe inspection robot, which has the capability of moving inside pipelines with two inches diameter. Since in-pipe inspection robots require flexible mechanisms for going through complicated construction of pipeline networks, the actuators which are light in weight and flexible must first be developed rather than using conventional actuators. For this purpose, rubber actuators with both stretching and shrinking characteristics are shown here for the application of such a robot. The proposed robot uses these actuators with six degrees of freedom, so that it has more flexibility and adaptability in motion: it can move in the inch worm mode through pipelines and has adaptability to the change of pipe diameters and also of passing over the L-joints and T-joints of pipelines. The method of activating the robot is proposed as the robot dock method, thus the robot actuators can initially be activated by hydrogen gas. The control method is also shown with an example of the T-joint movement.

Key Words: Application of Control, Rubber Actuator, Hydrogen Storage Alloy, In-pipe Inspection Mobile Robot, Inch Worm Movement, Flexibility and Adaptability.

1. はじめに

原子力発電所, 化学プラント, 都市ガスなどの配管においては保全のために検査診断が必要である。従来配管の検査診断作業はおもに人間によって行われてきたが, 現在はロボットを使った方法が各方面で試みられている。検査診断作業をロボット化すれば危険を伴う作業から人間が解放され, 人間の進入が困難な空間における作業が可能となり, また作業精度の向上も図られる^{(1)~(7)}。

従来の管内走行検査ロボットの多くは大中口径管を対象としており, 小口径管を対象とした例は少ない。また, 曲折管や垂直管などを含む複雑な配管においては, 曲折部通過の難しさから対応が遅れている⁽⁸⁾。そこで著者らは2 inch 管を対象としたL字管の通過が可能な管内走行検査ロボット1号機を製作したが, 管内壁の凹凸や管内径の変化に対する適応, T字管の通過など移動機構に関する課題が残されてきた⁽³⁾。管内壁の凹凸や管内径の変化への対応に関しては, 配管内壁の形状に自己適応する機構も報告されているが小口

径管を対象とした自走形移動機構への適用は難しい⁽⁹⁾。

本論文では, ロボットの仕様条件を次のように設定した。

(1) 2 inch 管 (内径 50 mm) の内部を自走できる構造であること。

(2) 継手部などの管内径変化 (±20 %以内) や管内壁の凹凸に対応しフレキシブルに走破できること。

(3) L字管, T字管を任意の方向に通過できること。

(4) 水平管, 鉛直管を問わず移動できること。

(5) 活性管内での作業を目的とし, 枝管を含め管内流体の流通を遮断しないこと。

これを満足させる機構として柔軟構造形を提案する。これを実現するために試作した加圧伸張形のゴム製ガス圧アクチュエータの機構とその特性および水素吸蔵合金によるその駆動機構を示す。このアクチュエータは多量の水素ガスを可逆的に吸排でき温度に依存した平衡解離圧を示す水素吸蔵合金を用いて, 小形軽量化することを可能とする。そこでこのアクチュエータを応用したガス圧の変化で伸縮動作をする伸縮率の高いゴム製アクチュエータを複数個組合せた構造により伸縮, 反り, 支持動作を行い尺取り虫式で移動する

* 平成元年3月17日 九州支部第42期総会講演会において講演, 原稿受付 昭和63年4月19日。

^{*1} 正員, 東京理科大学工学部 (〒162 東京都新宿区神楽坂1-3)。

^{*2} 学生員, 東京理科大学大学院。

ロボットの基本構造と動作および基本移動モードについて述べる。さらにこのロボットの水素吸蔵合金のドック式活性化処理方法を示す。ロボットの制御方法としてドライビングアクチュエータの曲折動作について述べ、T字管通過モードの曲折軌道制御例を示す。以上により従来の管内走行検査ロボットのアクチュエータとは異なりゴムのような柔らかい物質を構造体として本体を柔軟に変形させながら移動する柔軟構造形ロボットの有効性を示す。

2. 柔軟構造形ロボットの提案

一般にロボットの移動機構は車輪方式、クローラ方式、脚方式などあるいはこれらの組合せである。不整地走行など接地面の凹凸に適応した移動にはクローラ方式さらに脚方式が有用となり、機構的に複雑化する傾向にある。このように一般的な剛体機構の移動方式により仕様条件を満足する移動機構を実現することは、機構の複雑化や重量の増大を招き、難しい。そこで、ゴム風船のように内圧で膨張収縮する柔軟なゴム袋式アクチュエータを組合せた単純な機構によって、ロボット本体がフレキシブルに変態しながらぜん動方式や尺取り虫方式などで移動する柔軟構造形ロボットを提案する。柔軟構造形は次のような特長が挙げられ、仕様条件を満たす小径管内移動機構として有効であると考えられる。

- (1) ゴム袋式アクチュエータは大きな動作変位を得ることが可能であり、またそれ自体がサスペンションなどの融通機能を持つため機構が単純化される。
- (2) 構造体(ゴムなど)の比重が小さく、ガス圧作動のため大幅な軽量化の可能性がある。
- (3) 圧力制御機構に対しては、多量の水素を可逆的に吸収放出できる水素吸蔵合金の利用によって、単純で小形な機構を実現することが可能となる。

図1 アクチュエータの基本構造

3. 伸張形ゴム製ガス圧アクチュエータの機構と特性

3.1 基本構造と基本動作 今回試作したゴム袋式の柔軟構造形ロボット用アクチュエータは、図1に示すようにゴムチューブをナイロンスリーブで覆い両端を口金で固定密封するというシンプルな基本構造を有するものとした。口金の一端は内圧制御用接続口である。ゴムチューブは市販の外径5mm内径3mm(材質はNR)を、ナイロンスリーブはケーブル外被用でナイロン繊維を筒状によりを施して編み上げられたもの(最小径2.5mm, 最大径6mm)を使用している。ナイロンスリーブは加圧によるゴムチューブの変形を規定し、軸方向の変位に変換する。

ナイロンスリーブの長さをその内径がゴムチューブ外径と等しいときの長さで比較して、ナイロンスリーブ長とゴムチューブ長の比 S/T 値(>1)を変えるとアクチュエータの伸縮特性を操作できる。大別して加圧時の挙動から収縮形と伸張形に分けられる。収縮形($S/T=1$)はマッキベン形ゴム人工筋として知られている⁽¹⁰⁾。最大収縮率は20%程度である。本ロボットに採用した伸張形($S/T>1$)は加圧時に50%以上の伸張率と高剛性化を可能とし、減圧すればゴムの弾性力で収縮する。伸張形の特性はゴムチューブとナイロンスリーブ間の摩擦によって顕著な影響(ヒステリシスの増大, 不安定化)を受けるため接触面を潤滑し改善している。

3.2 伸張形ゴム製ガス圧アクチュエータを応用した管内移動機構の基本構造 伸張形ゴム製ガス圧アクチュエータは、図2に示すような単純な柔軟構造形の管内移動機構に適切なアクチュエータとして応用されうる。尺取り虫式移動のため基本的に、初期状態[図2(a)]より管内壁を突っ張って位置姿勢を保持するホールディング部と、進行方向に対して真直に伸縮[図2(b)]あるいは曲折伸縮し、位置姿勢を変化させ

図2 柔軟構造形ロボットの基本構造・動作モデル

るドライビング部から構成される。

3.3 移動機構用アクチュエータとしての特性

3.2節で述べた移動機構に応用した場合の伸張形ゴム製ガス圧アクチュエータの特性を空気圧を用いて実験した。

3.3.1 ドライビングアクチュエータとしての伸縮特性 アクチュエータの初期有効長さは80 mmとし、両端部は軸線上の動きのみに拘束され、両端から25 mmの位置に長さ10 mmの滑りサポート（圧縮力による横たわみを抑制する）を設けた（図3）。軸線方向に圧縮力または引張力を負荷し、0 MPaから0.49 MPaでの加圧、減圧過程に対する変位率（初期有効長さに対する変位量）を測定し、図4に示す結果を得た。

図3 ドライビングアクチュエータの伸縮特性実験

図4 ドライビングアクチュエータの静的伸縮特性

図5 ドライビングアクチュエータの動的特性実験例

動特性に関しては8 Hz程度までの追従が確認された。周期的入力（圧力）に対する応答（変位）の実験結果を図5に示す。

3.3.2 ホールディングアクチュエータとしての突張り力特性 アクチュエータの初期有効長さは35 mm、両端部間オフセット30 mmで壁面に向けてアーチ形に固定している（図6）。この場合の突張り力はアクチュエータの突張り形態（壁面に垂直に突っ張った形態、座屈して突っ張った形態）によって異なり、その最小、最大値を図7のように得た。例えば、管径がφ50のとき0.39 MPaに加圧すれば最小2.5 N、最大7.5 Nとなる。

3.4 水素吸蔵合金による作動ガス供給・圧力制御機構 多量の水素を可逆的に吸収放出し温度に依存した平衡解離圧を示す水素吸蔵合金を利用すれば、図8に示すような簡単で小形な機構によって、温度制御により作動ガスの供給、圧力制御が可能となる。少量の水素吸蔵合金封入された反応容器はフィルタを介してアクチュエータと直結され、この閉空間は高純度水素ガスで満たされている。また、アクチュエータ反応容

図6 ホールディングアクチュエータの突張り力特性実験

図7 ホールディングアクチュエータの突張り力特性

器間には活性化処理用の開放弁が設けられている (5・2 節)。本機構に使用している水素吸蔵合金はランタン系で最大吸蔵量は $0.15 \text{ m}^3/\text{kg}$ 、図 9 に示すような温度-圧力特性を有し、アクチュエータの駆動に必要な作動ガス圧を $40 \sim 90^\circ\text{C}$ で発生する。これは水素吸蔵合金の自然冷却到達温度と構造材料の耐熱強度に適合したものとした。

アクチュエータの作動圧制御はその作動圧に対する水素吸蔵合金の平衡解離圧を反応容器の電気ヒータによって温度制御して行う。反応容器の温度制御系を図 10 に示す。サーミスタによって温度を検出し A/D 変換器を介してコンピュータに取り込む。算出された操作量を D/A 変換器でアナログ量に変え、パルス幅変調された信号によりヒータの電力制御を行う。検出量として温度と圧力の双方をセンシングすることが望ましいが、簡単のため温度のみを検出している。

4. ロボットの基本構造・動作 および移動モード

4-1 ロボットの基本構造 ロボットは図 1 に示すように 2 組のホールディングユニットとそれらを連

図 8 水素吸蔵合金によるアクチュエータの駆動機構

図 9 水素吸蔵合金の温度-圧力特性

結する 4 本のドライビングアクチュエータから成る。ホールディングユニットは 4 本のホールディングアクチュエータとそれらを固定する剛体フレームから構成される。1 組のホールディングユニットで安定した管内壁支持動作を得るとともに管軸に対する投影面積を小さくするため、支持脚となるホールディングアクチュエータは 4 本放射状に配置し、おのおのアーチ形を形成して支持する管の軸方向に長さを持って接するように張っている。1 組のホールディングユニットの 4 本のアクチュエータは同時作動である。ドライビングアクチュエータは大きな伸縮量を得るため本体の全長を使い、4 本は軸対称に配置され、独立な駆動が可能な構造とした。外観を図 11 に、諸元を表 1 に示す。1 号機⁽³⁾と比較して、外径 40 % の小形化と 60 % の軽量

表 1 諸元

Weight	80 g
Outside Diameter min. max.	32 mm 65
Length min. max.	90 mm 130
Displacement / Cycle max.	40 mm
Force for Supporting min. max.	3 N 24 N
Driving Force max.	24 N

図 10 反応容器の温度制御系構造

図 11 ロボットの外観

化を実現している。

4.2 基本動作 2組のホールディングユニットはそれぞれ加圧されると管内壁に垂直な4方向に伸び、突っ張って位置姿勢を保持することができる。4本のドライビングアクチュエータは加圧減圧により2組のホールディングユニット間の伸縮すなわち本体を進行方向への伸び縮み、また4本の傾斜伸縮により本体を反らせることができる。これらの動作を組合せると、図12、13に示すような直進走行、T字管通過などが可能となる。

4.3 基本移動モード

4.3.1 直進モード 直進モードは、次のようなサイクルで実現される。(1)進行方向に対して後部ホールディングユニットで支持し、前部ホールディングユニットの支持を解除する。(2)4本のドライビングアクチュエータを同時に伸ばし前部ホールディングユニットを進行方向に押し出す。(3)前部ホールディングユニットを支持状態にする。(4)後部ホールディングユニットの支持を解除する。(5)ドライビングアクチュエータを縮め、後部ホールディングユニットを引き寄せる。(6)後部ホールディングユニットを支持状態にする。

4.3.2 T字管通過モード T字管曲折通過は、次のようにして行う。(1)後部ホールディングユニットを曲折通過初期設定位置で支持状態にし、前部ホールディングユニットの支持を解除する。(2)曲折側のドライビングアクチュエータと相対的に逆側のドライビングアクチュエータを伸張させ、本体を反らせて前部ホールディングユニットを分岐管に突っ込む。(この場合の4本のドライビングアクチュエータの制御方法は6.1節に示す)(3)前部ホールディングユニットを支持状態にする。(4)後部ホールディングユニットの

支持を解除する。(5)ドライビングアクチュエータを収縮させ、後部ホールディングユニットを引き寄せる。(6)後部ホールディングユニットを支持状態にする。

5. ロボットの駆動機構と活性化処理

5.1 ロボットの駆動機構 図14のロボット機構モデルに表されているように、酸素吸蔵合金を用いることによって小形、軽量化されたガス圧供給・圧力制御機構(3.4節)のロボットへの搭載を実現した。各ホールディングユニットにホールディングアクチュエータ駆動用1個、ドライビングアクチュエータ駆動用2個それぞれ搭載し、剛体フレーム内のマニホールドでアクチュエータと直結することにより、計6チャンネルの独立した駆動を可能にしている。さらに活性化処理用開放弁が各駆動系に設けられ、5.2節による方法で簡単に活性化される。このような酸素吸蔵合金を使った駆動機構を搭載した本ロボットを実現することによって、ガス圧駆動方式移動機構の将来的な自律化に対する可能性、また基本的な防爆構造のため活性管内作業への適応性があることが示された。

5.2 ドック式活性化処理方法 酸素吸蔵合金を機能させるためには活性化処理を施し、常に水素ガスの雰囲気下に保持する必要がある。活性化処理は真空下で不純ガスを抜き取り、高純度の高圧(数MPa)水素ガス導入により水素を吸蔵させて行う。本ロボットに使用する酸素吸蔵合金を活性化する手順として、(1)活性化した酸素吸蔵合金を何らかの方法で外気と遮断しロボットに封入する、あるいは、(2)活性化していない酸素吸蔵合金をあらかじめ封入しておきロボット内で活性化するという二つが考えられる。(1)の手順では封入作業における外気との遮断、作動ガス空

図12 直進移動モード

図13 T字管通過モード

図14 活性化ドックとロボットの概略

間の水素ガス充てん方法などに問題が残り、(2)の手順では活性化処理時の高圧ガス導入による破損防止対策、活性化装置との接続機構などが必要となる。要求されることは、活性化処理時に必要とされるロボットの付加機構を最少にし、ロボットに搭載した水素吸蔵合金の活性化状態を容易かつ確実に実現することである。これらを満足する手順(2)による活性化処理方法としてドック式を考案した。差圧による破損対策に関しては、作動ガス空間と等しい圧力を外部に付加して差圧をなくすことでその必要性がなくなる。

ドック式活性化処理方法の概略は次のようである。ロボットを耐圧容器(ドックと称す)に入れ、各アクチュエータの作動ガス空間とその外部(ドック内)のガスを開放弁を通じて流通させ、ドック全体を活性化条件に保つことによりロボット内の水素吸蔵合金を活性化させる。その後ドック外より遠隔操作で開放弁を閉じることによって、活性化した水素吸蔵合金はロボット内で高純度水素ガスの雰囲気中に保たれる。活性化のためにロボットに付加される機構は、各アクチュエータの作動ガス空間を開放する簡単な弁(ピンの挿入により開く)のみである。図14にドックとロボットの概略図を示す。

活性化処理の手順は以下のとおりである。(1)押し棒を介してオープンナを押しつけることによりロボットを支持フレームに固定する。同時に支持フレームとオープンナに取付けた弁開放兼ロボット固定用ピンが挿入され開放弁が開く。(2)ロボットを固定した支持フレームをドックシリンダにいれ密閉する。(3)ドックに接続した活性化処理装置によって真空保持(10^{-3} Torr以下で数h間)、水素ガスで加圧(約3.5 MPaで数十min)した後大気圧まで減圧する。(4)押し棒を戻すとドック外より遠隔操作で開放弁が閉じられ外気と遮断される。同時にロボットは支持フレームへの固定が解除される。このようにしてロボット内の水素吸蔵合金を容易に活性化することができる。

6. ロボットの制御方法

6.1 ドライビングアクチュエータの拘束条件

4本のドライビングアクチュエータの変位を $l_i(i=1, 2, 3, 4)$ とすると直進時は、

$$l_1 = l_2 = l_3 = l_4 \quad (1)$$

となるように制御する。曲折時のドライビングアクチュエータが形成する動作形態を図15のように仮定する。すなわちドライビングアクチュエータの軸線は2組のホールディングユニットの向かい合った面を含む二つの平面の交線までの距離を半径、垂線の足を中心

とした円弧上にあるとする。このときドライビングアクチュエータの変位は次式により算出される。

$$l_1 = (d - R \cos \theta_1) \theta_2 \quad (2)$$

$$l_2 = (d - R \sin \theta_1) \theta_2 \quad (3)$$

$$l_3 = (d + R \cos \theta_1) \theta_2 \quad (4)$$

$$l_4 = (d + R \sin \theta_1) \theta_2 \quad (5)$$

曲折時には常にこれらの関係を満たすように l_i を制御し、動作形態を拘束する。ここに、 R はホールディングユニットの軸線とドライビングアクチュエータの軸線との距離(定数)であり、 θ_1 は曲折方向角、 d はロボットの軸線の曲率半径、 θ_2 は曲折角を表す。

6.2 曲折時における変換行列とヤコビ行列
ホールディングユニットA, Bに座標系を設定する(図15)。AからBへの変換行列 T_B は、

$$T_B = \begin{bmatrix} S_1^2(1-C_2)+C_2 & -S_1C_1(1-C_2) \\ -S_1C_1(1-C_2) & C_1^2(1-C_2)+C_2 \\ -C_1S_2 & -S_1S_2 \\ 0 & 0 \\ C_1S_2 & d(1-C_2)C_1 \\ S_1S_2 & d(1-C_2)S_1 \\ C_2 & dS_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

で表され、ヤコビ行列は、

$$\begin{bmatrix} r_{dx} \\ r_{dy} \\ r_{dz} \\ r_{\delta x} \\ r_{\delta y} \\ r_{\delta z} \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} d\theta_1 \\ d\theta_2 \\ dd \end{bmatrix} \quad (7)$$

図15 曲折モードのドライビングアクチュエータの制御方法

(a) T字管曲折動作軌道

(b) パラメータ変化

図 16 曲折動作軌道例とパラメータ変化

$$J = \begin{bmatrix} -d(1-S_2)S_1 & 0 & -(1-C_2)C_1 \\ d(1-S_2)C_1 & 0 & -(1-C_2)S_1 \\ 0 & d & S_2 \\ -C_1S_2 & -S_1 & 0 \\ S_1S_2 & C_1C_2 & 0 \\ C_2 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

で表される。ただし、 $C_i = \cos \theta_i$ 、 $S_i = \sin \theta_i$ である。変換行列は二つのホールディングユニットの相対的な位置と姿勢を記述することができる。ヤコビ行列によってドライビングアクチュエータの動作状態の微小変位によるホールディングユニットの位置姿勢の微小変化がわかる。これらによってホールディングユニットを管壁と接触しないように動作させることが可能となる。

6.3 曲折動作軌道例 管径 50 mm, 曲折方向角 $\theta_1=0$ の場合の T 字管通過におけるホールディングユ

ニットの曲折動作時の軌道例と各パラメータの相対的变化を図 16 に示す。これは初期位置姿勢から目標位置姿勢まで l_3 を等速に変位させ、 l_1 の変位開始時期を遅らせている。このように曲折角 θ_2 と曲率半径 d を適切に変化させるような l_i を与えることにより曲折管通過が可能となる。

7. ま と め

本論文では、小径管内移動ロボットの管径変化や管壁凹凸へのフレキシブルな適応、T 字管の通過、活性管における移動などを目的とした柔軟構造形ロボット用水素吸蔵合金駆動ゴム製ガス圧アクチュエータに関する成果を次のように得た。

(1) 小形、軽量で収縮形（マッキベン形ゴム人工筋）に対して伸縮率が 3 倍以上、伸縮両作動の伸張形ゴム製ガス圧アクチュエータを試作し、その特性実験により柔軟構造形ロボット用アクチュエータとして有用であることを確認した。

(2) このアクチュエータを用いることによって、本体の伸縮、反り、支持動作を組合せた尺取り虫式で移動する柔軟構造形移動機構が小形、軽量化されて実現した。

(3) 水素吸蔵合金を利用することによりゴム製ガス圧アクチュエータの作動ガス供給、圧力制御機構が小形・軽量化、基本的な防爆構造化され、本体への搭載を実現した。これによって活性管内作業の適応性と将来的な自律化の可能性が示された。

(4) ドック式活性化処理法を構築することにより、活性化処理に伴うロボット本体への付加機構が抑制され、本体内部での活性化処理を容易に行うことを可能とした。

(5) ドライビングアクチュエータの基本制御方法を提案し、T 字管曲折時の軌道例を示した。

本移動機構において、動作速度向上とエネルギー効率向上のための水素吸蔵合金の加熱、冷却方法や機能低下を防ぐ水素ガスのシーリングの実用的な方法などについて問題が残されている。また、本論文は移動機構としてのアクチュエータシステムが基幹となっており、センサシステムに関しては考慮していないがロボットシステムとして今後の課題である。

文 献

- (1) 福田, 極限作業用知能ロボット, (1986), 1, マグロウヒルブック.
- (2) 細貝・福田, 機論, 51-467, C (1985), 1655.
- (3) 福田・細貝, 機論, 52-477, C (1986), 1584.
- (4) 細貝・福田, 機論, 53-486, C (1987), 399.

1384 柔軟構造形管内走行検査ロボット用水素吸蔵合金駆動ゴム製ガス圧アクチュエータとその応用に関する研究

- (5) 福田・細貝・大塚, 機論, 53-492, C (1987), 1788.
 - (6) 福田・細貝・大塚, 機論, 53-495, C (1987), 2325.
 - (7) 佐々木・長谷川・小沢, ロボット, (1986), 98.
 - (8) 富田・ほか4名, 日立評論, 98-10 (1986), 31-34.
 - (9) 岡田, SICE 論文集, 21-7 (1985), 733.
 - (10) 宇野, ゴム人工筋とロボットへの応用, 油圧と空気圧, 17-3 (1986), 175.
 - (11) 伊藤・笹井, 水素吸蔵合金の理論入門, (1986), 日本重化学工業, 11-13.
-