

全方向移動機構を有する配管表面検査ロボットの自律移動

Autonomous Movement of Pipe Inspection Robot with Omnidirectional Mobile Mechanism

○鈴木 章一郎^{*1}, 岡野 秀晴^{*2}, 光田 司^{*3}, 鈴木 雅之^{*4},

Shoichiro SUZUKI^{*1}, Hideharu OKANO^{*2}
Tsukasa MITSUTA^{*3}, Masayuki SUZUKI^{*4},

^{*1}秋田県立大学大学院, ^{*2}秋田県立大学^{*2}

^{*3}(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構, ^{*4}(株)安川電機

^{*1}Graduate School at Akita Prefectural University, ^{*2}Akita Prefectural University,
^{*3}JOGMEC, ^{*4}YASKAWA

キーワード: 配管表面検査ロボット (Pipe Inspection Robot), 脚車輪構造 (Leg-wheel Unit),
磁気車輪 (Magnetic Wheel), 移動ロボット (Moving Robot)

連絡先: 〒015-0055 秋田県由利本荘市土谷字海老ノ口 84-4 秋田県立大学
システム科学技術学部 機械知能システム学科 ロボット工学研究室
TEL 0184-27-2220 E-mail: m09a006@akita-pu.ac.jp

1. 緒言

石油プラントには、大小様々な径や種類の配管が複雑に配置されており、配管中の原油に含まれる不純物の沈殿に起因する配管の肉厚の減少や腐食等が原因で、漏洩、火災、爆発等の事故の発生が懸念されている。そのため、定期的な配管検査により事故を未然に防ぐ必要がある。石油プラントでは、強磁性の炭素鋼鋼管 (SGP: Steel Gas Pipe) が多用されており、水平・垂直配管、水平・垂直曲管、バルブ、フランジ、止め具等が配管系を構成している。本研究では、石油プラントの配管系において、自律でSGPの肉厚を検査するロボットの開発を目的とする。

配管の検査方法について考えると、検査装置を搭載した移動ロボットが、配管内部で検査をおこなう内部検査と、配管外部に吸着して検査をおこなう外部検査に分類される。石油プラントの配管系に対して、内部検査を用いるためには、プラントの移動の停止、除液作業が必要となる。しかし、外部検査を用いると、プラントの移動中に検査ができ、プラントの停止、除液の手間と時間を節約できることから、外部検査が望まれている。現在までに、外部検査用ロボットの実用化例として、UDPが報告されている⁰⁾。UDPは、超音波探触子を移動装置に

搭載した構造であり、作業員による遠隔操作で直線配管の肉厚検査をおこなう。しかし、UDPの移動範囲は、直線配管に限定され、フランジ、バルブ、止め具等の障害物の乗り越え、回避ができない。また、配管系には高所等の危険区域が存在し、仮設した作業用足場の上で検査をおこなう作業員に危険が伴う。

また、外部検査用ロボットの研究について、福田らが三個の車輪をもち単独走行が可能な三両を連結したロボットを開発し、フランジ乗り越え移動を可能とした⁰⁾。また、伸縮する本体と二本のアームから構成され、尺取り虫形式を応用した移動方式でT字配管の通過を可能とするロボット⁰⁾、吸盤を搭載し形状記憶合金をアクチュエータとする二本のフレキシブルアームとスライド部から構成されるロボット⁰⁾が報告されている。しかし、これらのロボットは対応する配管径が限定されていた。以上のことを考慮して本研究では、配管の外部検査用ロボットの開発をおこなう。ロボットは脚車輪ユニットを剛体に連結した構造で、磁石車輪による配管への吸着、車輪の上昇によるフランジ等の障害物の自律乗り越え、水平・垂直曲管での自律移動をおこなう。

2. 配管検査ロボット

2.1 仕様 ロボットの仕様を表 1, 全体を図 1 に示す。全長 458 mm, 全幅 235 mm, 全高 308 mm, 質量 5.28 kg であり, 伸縮機構をもつ六基の脚車輪ユニットから構成される。脚車輪ユニットは, 質量 0.78 kg, 伸縮長さ 110 mm である。また, 呼び径が 250A 以上の配管を対象とするが, 200A (216.3 mm) の直線配管にも対応できる構造とする。

2.2 構造 ロボットの機構を図 2, 構造を図 3 に示す。ロボットは, 三自由度を有する脚車輪ユニットを前部, 中央部, 後部の左右に配置し, 全十八自由度を有する。各部の左右対称構造の脚車輪ユニットは, 前ユニット, 中央ユニット, 後ユニットを構成し, 剛体のユニット連結部に固定される。

脚車輪ユニットは, 磁石車輪, 駆動部, ステアリング部, リフト部から構成され, 各部に駆動部用モータ, ステアリング部用モータ, リフト部用モータが搭載される。

脚車輪ユニットに搭載される車輪は, 全てネオジウム磁石製で, ロボットは配管に吸着して移動をおこなう。

ステアリング部は, ステアリング部用モータによる車輪のステアリング動作をおこなう。車輪は, スライドレールとギアボックスを連結するステアリング部用シャフトを中心に回転する。回転範囲は, 図 3 に示すステアリング角 0 deg の状態から, 時計回りと反時計回りに 90 deg であり, 回転の限界地点をリミットスイッチで検出する。また, ステアリング部用シャフトの内部にはポテンシオメータが搭載される。

リフト部は, リフト部用モータにより配管に吸着する車輪の上昇, 下降をおこなう。また, リフト部には, 車輪の上限, 下限位置を検出するリミットスイッチが搭載される。

2.3 磁石車輪 車輪の形状を図 4 に示す。車輪は, リング型のネオジウム磁石をラバー (材質 NR) で被覆した構造である。吸着力 (ラバー被覆時) は, 69.5 N で, ロボットは磁石車輪を六個搭載しており, 全吸着力 f は 417 N である。総吸着力はロボットの質量に対して十分な力を有しており, 検査装置の種類や仕様を選定することで将来的には検査装置を搭載することが可能である。

Table 1 Specification of the robot

Robot	Length	458	mm
	Width	235	mm
	Height	308	mm
	Mass	5.28	kg
Leg-wheel unit	Slide length	110	mm
	Mass	0.78	kg

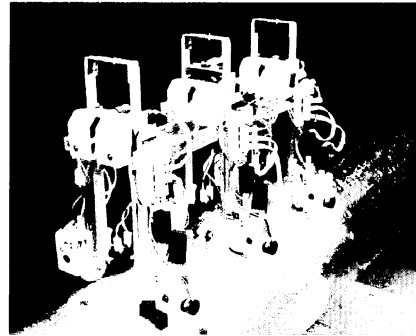


Fig. 1 General view of the robot

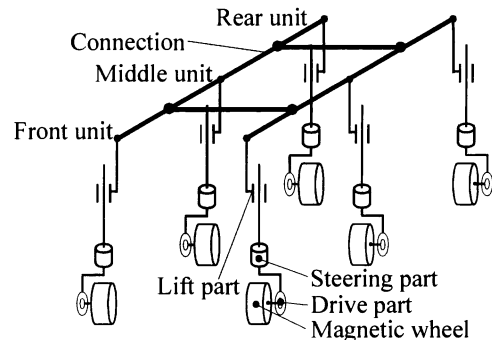


Fig. 2 Mechanism of the robot

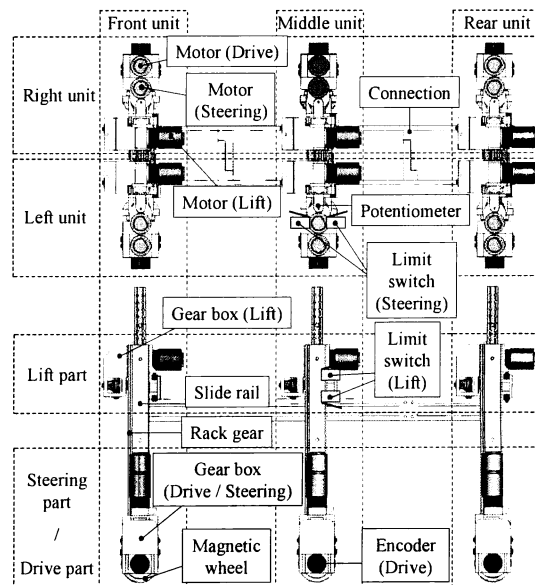


Fig. 3 Construction of the robot

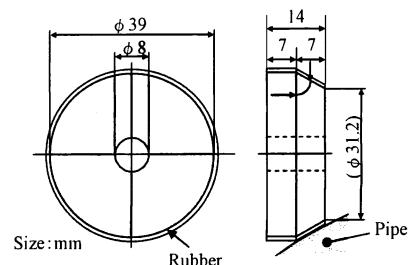


Fig. 4 Magnetic wheels

2.4 システム構成 ロボットのシステム構成を、図 5 に示す。システムは、ロボット本体、制御基板、制御用 PC および外部電源から構成される。ロボット本体は、脚車輪ユニットと自律移動用センサから構成される。自律移動用センサには、距離センサを、各ユニットの下部に計六個と前、後ユニットの上部に計二個、近接センサを中央ユニットの下部、傾斜角センサを前ユニットの上部、加速度センサを中央ユニットの上部に搭載する。

制御基板には、各部用モータの制御をおこなうモータドライバが十八個搭載される。

制御用 PC には、デジタル出力ボードや各センサの信号を入力するデジタル入力ボード、AD ボード、カウンタボードが搭載される。ボードに入力された各センサの信号は、制御用 PC へ送信され、信号に応じモータの制御信号をモータドライバへ出力する。

外部電源は、制御基板用、各センサ用、各ボード用を使用する。

以上のシステムをもつロボットは、配管上での自律移動と制御用 PC による遠隔操作を可能とする。

3. 運動方程式

ロボットが、角度 θ rad の傾斜配管上を移動する際の動特性について調べるため運動方程式を求めると

$$\left(\frac{n}{r^2}J + M\right)\ddot{x} + D\dot{x} = \frac{k}{r}\tau - \{Mg \sin \theta + \mu(f + Mg \cos \theta)\} \quad (1)$$

となる⁹⁾。 J は慣性モーメント kg m^2 、 M はロボットの質量 kg 、 D は走行抵抗係数 Ns/m 、 x は位置 m 、 g は重力加速度 m/s^2 、 n は車軸数、 r は車輪の半径 m 、 k は駆動車軸数、 τ は駆動トルク Nm 、 μ は車輪がり摩擦係数 (配管と車輪)、 f は全磁石車輪の吸着力 N である。

4. 移動方法

4.1 全方向移動 全方向移動では、ロボットは水平・垂直の直線配管を移動対象として、図 6 に示す (a) 直進移動、(b) 円周方向移動をおこなう。

直進移動では、ロボットは駆動部を用いて六輪で移動する。水平配管上面部では、配管の円周方向に発生する傾斜角を傾斜角センサで検出して、最前ユニットのステアリング部を用いて補正移動をおこなう。

円周方向移動では、ロボットはステアリング部により、全車輪を円周方向へ向けた状態で、水平配管上面部と底面部の間を移動する。ロボットは、直進移動と円周方向移動を組み合わせることで、バルブ、T 字配管等の回避移動を可能とする。

4.2 障害物自律乗り越え移動 障害物自律乗り越え移動では、障害物としてフランジを対象とする。

4.2.1 障害物検出方法 距離センサを用いた障害物検出処理について説明する (図 7)。パラメータとして、 V_i は距離センサ (PSD i , $i=1 \sim 8$) の出力電圧、 V_T はしきい値である。処理が開始されると、しきい値 V_T として距離センサが障害物を検出する際の出力電圧を設定する。ロボットは $V_i < V_T$ であれば移動をおこなう。出力電圧 V_i は障害物に近づくると上昇し、ロボットは $V_i \geq V_T$ であれば移動を停止し、処理を完了する。

なお、距離センサとして、フランジ等の低い障害物を検出する場合は図 5 において PSD 1 ~ 6 を使用する。

4.2.2 乗り越え移動方法 フランジ自律乗り越えの移動方法を図 8 に示し、順に説明する。(1) 距離センサでフランジを検出して移動を停止。(2) 車輪を配管から引き離す。(3) 中央、後の四輪移動。(4) 車輪を下降。

以降、中央、後ユニットも同様の動作をおこなう。

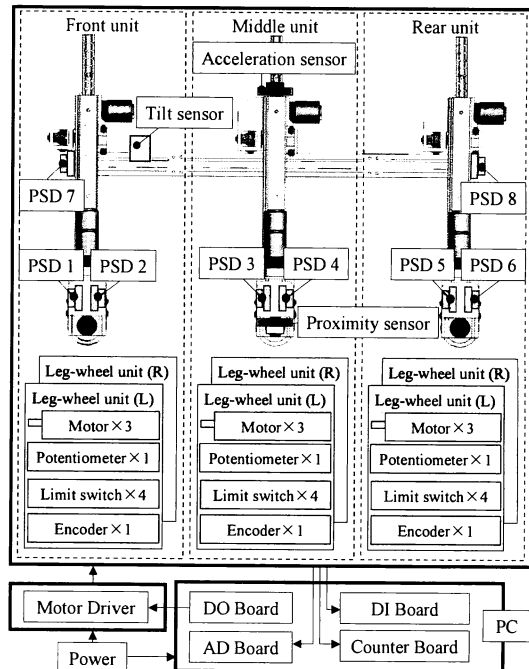


Fig. 5 System of the robot

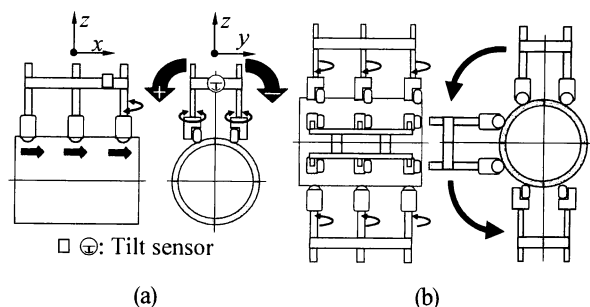


Fig. 6 Movement on the horizontal pipe

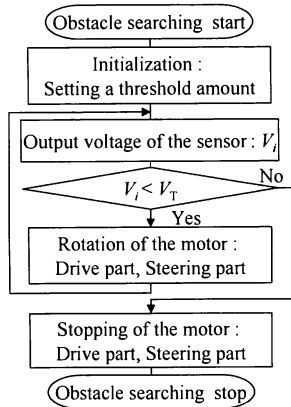


Fig. 7 Obstacle searching algorithm

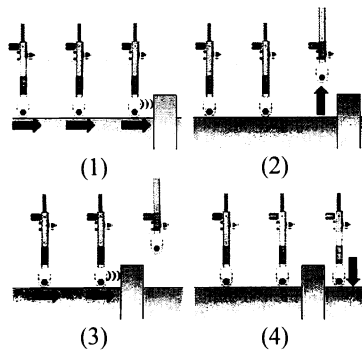


Fig. 8 Sequence by which the robot traverses a flange

4.3 水平曲管自律移動 水平曲管自律移動を実現するためには、水平曲管の検出と水平曲管上での旋回移動をおこなう必要がある。

4.3.1 水平曲管検出方法 溶接線の高さの検出をおこなう。溶接線は、配管同士の接合方法として一般的である溶接の際に生じる。

製作した溶接線の検出センサを図9に示す。検出センサは、脚車輪ユニットに固定された近接センサと車輪付きアームから構成され、樹脂の板にウレタンゴムの車輪を搭載した車輪付きアームは関節をもつ。検出センサは、中央ユニットの左右の中間に搭載される。検出は図10に示すように、車輪付きアームが溶接線に乗り上げ、近接センサの測定距離が d_L から d_L' に変化することによる出力電圧の変化を測定する。

検査センサは、質量 14g と小型、軽量構造で、リフト部による上昇が可能である。また、配管径の種類による距離 d_L の変化に対しても、非接触センサである近接センサによって対応することができる。検出に近接センサのみを用いた場合は、出力が配管の表面状態や材質に影響を受けるが、車輪付きアームを用いることで近接センサは常に一定の面までの距離を検出することが可能になり、安定した出力、感度を維持することができる。

4.3.2 水平曲管旋回移動 水平曲管上での旋回移動では、ロボットは配管径と旋回方向に応じた車輪のステアリング角と速度を算出し、旋回移動をおこなう。各車輪の中心座標 (X_j, Y_j) と旋回中心座標 (X_0, Y_0) の関係を図11に示す ($j=1 \sim 6$)。旋回移動時の条件として、旋回中心座標が中央の車輪の中心座標 (X_2, Y_2) 、 (X_5, Y_5) を結ぶ延長線上に存在すること、また、中央の車輪を上昇させた四輪状態であることとする。

旋回移動時の各車輪のステアリング角 θ_j は、

$$\theta_j = \tan^{-1} \left(\frac{Y_j - Y_0}{X_j - X_0} \right) \quad (2)$$

である。ただし、 $X_j \neq X_0$ である。また、旋回中心座標から各車輪の中心座標までの距離 L_j は、

$$L_j = \sqrt{(X_j - X_0)^2 + (Y_j - Y_0)^2} \quad (3)$$

であり、座標 X_j, Y_j は、図11に示す前後の車輪幅 l 、左右の車輪幅 w 、曲管半径 R を用いて求める。また、移動条件より、旋回移動時のロボットは前後対称の状態なので、 $\theta_1 = \theta_3$ 、 $\theta_4 = \theta_6$ かつ $L_1 = L_3$ 、 $L_4 = L_6$ である。距離 L_j は各車輪の速度 v_j の比に等しいので、

$$\frac{v_1}{L_1} = \frac{v_2}{L_2} = \frac{v_3}{L_3} = \frac{v_4}{L_4} = \frac{v_5}{L_5} = \frac{v_6}{L_6} \quad (4)$$

となり、 $v_1 = v_3$ 、 $v_4 = v_6$ であり、 v_1 から v_6 のいずれかを設定すると速度 v_j を求めることができる。

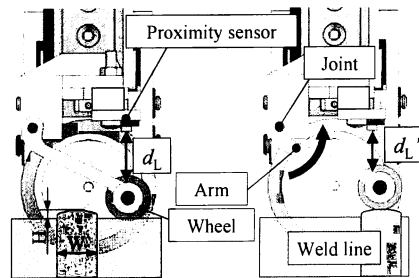


Fig. 9 Detection of the weld line

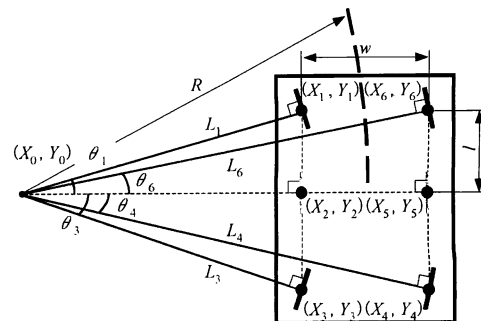


Fig. 10 Geometric relations in the turning

4.3.3 自律移動方法 水平曲管自律移動の方法を説明する。(1) 移動する管の径と旋回方向を指定し、各車輪のステアリング角と速度の算出をおこない、自律移動を開始する。(2) 検出センサで溶接線を検出すると移動停止し、中央部の車輪を上昇させる。(3) 算出したステアリング角まで、前部の車輪に対してステアリング動作をおこなう。(4) 移動を開始し、後部の車輪が溶接線の通過距離に達するとステアリング動作をおこなう。(5) 前部の車輪が逆側の溶接線の通過距離に達するとステアリング角を 0 deg にする。(6) 後部の車輪が逆側の溶接線の通過距離に達するとステアリング角を 0 deg にして移動を停止し、中央部の車輪を下降させ、水平曲管自律移動を完了する。

4.4 垂直曲管自律移動 垂直曲管自律移動を実現するためには、垂直曲管の検出と垂直曲管上での旋回移動をおこなう必要がある。

4.4.1 自律移動方法 垂直曲管自律移動として、水平状態から垂直状態への内側移動について説明する。

水平配管上面部での直進移動をおこない、距離センサ (PSD7) を用いて、障害物検出処理で垂直曲管を検出後、移動を停止させ中央部の車輪を上昇。水平直線配管から曲管を通過し、垂直直線配管への移動をおこなう。加速度センサが垂直配管への到着を検出すると移動を停止し、中央部の車輪を下降させ移動を完了する。

5. 試験

5.1 フランジ自律乗り越え移動 呼び径 200A のフランジ (高さ 63.5 mm, 幅 104 mm) 付き配管に対し、水平上面部、水平底面部、垂直において、自律乗り越え移動試験をおこなった。

試験の結果、各配管においてロボットは、フランジを検出してからフランジを通過して、後部の車輪を下降させるまでの動作を自律でおこなった (図 11)。試験での平均移動速度と移動時間は、水平配管上面部では速度 18.7 mm/s 、時間 153 s 、であった。

5.2 溶接線検出 呼び径 250A (267.4 mm)、300A (318.5 mm) の配管に対し、溶接線の検出センサの試験をおこなった。試験は溶接線が前ユニットと中央ユニットの中間地点に存在する位置より移動を開始し、検出センサが溶接線を乗り越えると移動を停止する。また、近接センサは、 0.1 s ごとに電圧値の出力をおこなう。溶接線の平均高さは、250A で 2.2 mm 、300A で 3.0 mm である。試験結果を図 12 に示す。図 12 の $7.6 \sim 8.6 \text{ s}$ において、検出センサの出力電圧が増加し検出センサにより図 9 に示す近接センサと車輪付きアームとの距離 d'_1 を検出できることがわかる。

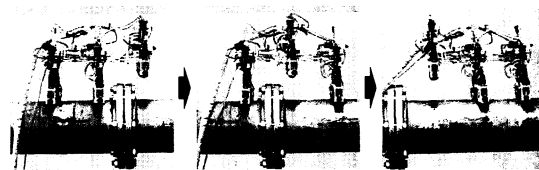


Fig. 11 Flange traversing experiment

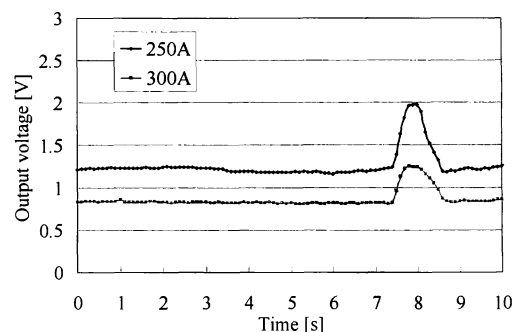


Fig. 12 Experimental result

また、各呼び径の配管において測定距離 d_1 が異なることで出力電圧に違いが生じており、検出センサを用いて異なる径の配管の溶接線を検出できることがわかる。

5.3 水平曲管自律移動 呼び径 250A、300A の水平曲管 (90 deg) での自律移動試験をおこなった。試験では、各配管において、左右の旋回移動をおこなう。

試験の結果、自律での水平旋回移動をすることができた。右旋回移動 (250A) の様子を図 13 に示す。移動時間は、呼び径 250A での左旋回が 100 s 、右旋回が 98 s 、300A では左旋回が 106 s 、右旋回が 104 s であった。

5.4 垂直曲管自律移動 呼び径 200A の垂直曲管での①垂直状態から水平状態、②水平状態から垂直状態の二種類の内側移動試験をおこなった。試験の結果、動作①、②で、垂直曲管の自律移動をおこなうことができた (図 14)。移動時間は、動作①では 100 s 、動作②では 98 s であった。

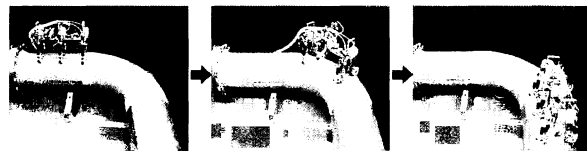


Fig. 13 Autonomous experiment on horizontal curved pipe

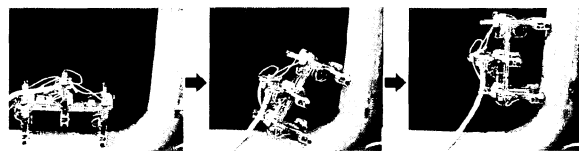


Fig. 14 Autonomous experiment on vertical curved pipe

6. 結 言

本研究では、石油プラントの配管系に対して外部検査をおこなうロボットの開発について述べた。ロボットの構造系では、吸着移動方式として磁石車輪をもつ脚車輪ユニットを剛体に連結したロボットの設計、製作をおこなった。また、制御系では、脚車輪ユニット用センサと自律移動用センサをロボットに搭載して PC を用いた自律および遠隔制御系を構築した。その結果、これらの機能を搭載したロボットは、磁石車輪の駆動、ステアリング動作、配管からの引き離し、上昇といった基本動作をおこない、これらの動作を駆使して直線配管において直進移動と円周方向移動をおこなうことができた。また、ロボットは自律移動用センサを用いて、フランジ自律乗り越え移動、水平曲管自律移動、垂直曲管自律移動が可能となった。

文 献

- (1) Kansai X-ray Co.,Ltd, UDP-24, http://www.kansai-x.co.jp/biz_insp/udp24.html
- (2) Hosokai, H., Fukuda, T., A Study on Automatic Pipeline Diagnostic Robot (1st Report, Design Concept of the Robot and Experimental Evaluation of its Maneuverability and Diagnosability), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 51, No. 467 (1985), pp. 1655-1662.
- (3) Fukuda, T., Hosokai, H., Otsuka, M., A Study on Autonomous Pipeline Maintenance Robot (3rd Report, Structure and Control of Mark III and Obstacle Sensing), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 53, No. 492 (1987), pp. 1788-1794.
- (4) Fukuda, T., Hosokai, H., Otsuka, M., A Study on Autonomous Pipeline Maintenance Robot (4th Report, Joint Control and Its Trajectory Generation for Mark III), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 53, No. 495 (1987), pp. 2325-2330.
- (5) Fukuda, T., Hosokai, H., Shimasaka, N., Kaneshige, M., Iwasaki, S., A Study on Autonomous Maintenance Robot (7th, Report, Mechanism of Mark IV and its Actuator Characteristics), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 56, No. 527 (1990), pp. 1868-1875.
- (6) Fukuda, T., Hosokai, H., Niitsu, S., Kaneshige, M., Iwasaki, S., A Study on an Autonomous Pipeline Maintenance Robot (8th Report, Path Planning and Sensing Planning Expert system with Learning Functions for Mark IV Robot), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 56, No. 532 (1990), pp. 3319-3325.
- (7) Yukawa, T., Komatsubara, S., Ooyama, C., Okano, H., Development of a Mechanism of a Piping Inspection Robot, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol. 71, No. 701 (2005), pp. 200-205.
- (8) Suzuki, M., Yukawa, T., Satoh, Y., Okano, H., Mechanisms of Autonomous Pipe-Surface Inspection Robot with Magnetic Elements, *Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*, (2006-10), pp.3286-3291.
- (9) Suzuki, M., Suzuki, S., Okano, H., Mitsuta, T., Development of Pipe Inspection Robot with Omnidirectional Mobile Mechanism, *Preprints of 25th the Annual Conference of Robotics Society of Japan*, (2007), 3K14.
- (10) Suzuki, M., Yukawa, T., Okano, H., The structure of a pipe-surface inspection robot to avoid the obstacles, *Preprints of 24th the Annual Conference of Robotics Society of Japan*, (2006), 3F32.