

## 学術論文

## 分節型主要配管内検査点検ロボットの開発

藤原 茂<sup>\*1</sup> 金原了二<sup>\*1</sup> 岡田徳次<sup>\*2</sup> 実森毅<sup>\*1</sup>Development of an Articulated Multi-Vehicle Robot  
for Monitoring and Testing In PipeShigeru Fujiwara<sup>\*1</sup>, Ryouji Kanehara<sup>\*1</sup>, Tokuji Okada<sup>\*2</sup> and Tsuyoshi Sanemori<sup>\*1</sup>

This paper describes a composition of an articulated multi-vehicle robot in pipe, structure of each vehicle, and their control systems. Output pressure versus extension characteristic of the newly developed two-stage air cylinder, reduction of the wave reflection in a wheel-type ultrasonic probe, umbilical cable assembly housing optical fibers, air tubes and electric cables are treated. The articulated robot is designed and fabricated to demonstrate its travelling performance and automatic scanning of five probes for non-destructive test of a weld bead to the longitudinal direction. The results show that the robot can travel in the pipe of radius 520~800[mmφ] from its entrance to the distance 150[m]. The robot can pick up surrounding color images and transmit them to the ground station's monitor with sharpness. Also, the NDT is shown to be possible except in the vicinity of elbow area of the pipe.

**Key Words:** Ultrasonic NDT, In Pipe Robot, Locomotion, Tractive Vehicle, Slip Ring

## 1. はじめに

各種の非破壊検査法を利用して配管を管外から検査することは、欠陥箇所の早期発見のために非常に重要である[1]。しかし、管は地上に限らず、高所、狭隘部、地中、水中と広範囲な場所に設置され、また、検査の障害となる被覆材を外側に有することもあり、検査が必ずしも容易であるとは限らない。

そこで、管内に非破壊検査のための渦流センサや超音波センサ、或いはカメラ等の機材を入れて検査が行われる。すでに、ボアスコープ等が実用化され細径管内の欠陥検査に役立てられ、管外からの操作により見たいところが見られる[2][3]。管径が数インチ以下の単調な管においては、線材を一端から押したり引いたりするだけで機材を管内部に比較的容易に出し入れでき、端部位置の制御性は高い。このため、小口径管内部の清掃作業等には十分対応できる[4]。しかし、検査箇所までの距離が増すと線材の剛性は低下し、制御性は極度に低下する。そのため、線材に代わるものとして、機材を内部に出し入れするキャリアが必要になる。この要求は、検査箇所が入口に近くても複雑な形状の管や分岐管においては高い。

上記キャリアには、高度な移動能力が必要で福田らは渦流センサを利用してT字部の選択走行を可能にした[5]。富田らは、複数個の球体をフレキシブルカップリングで結合し、曲が

り管部の移動能力を高めた[6]。鈴森は、遊星歯車を利用して押し付け力と駆動力を同時に発生させ、2インチ管内のエルボ部やT字部を走行する装置を試作した[7]。その他、垂直部や屈曲部の通過を考慮した開発がある。

また、中口径管内に機材を運ぶキャリアとしてボール車輪を有するMerite(IPRIV)[8]、エアシリンダ内蔵のステップ駆動型装置[9][10]、横移動車輪を利用したMogrer[11]やFerret[12]、連結車の前後に操舵輪を持つ走行ロボット[13]、等がある。また、実用的装置が特許として出願されている[14][15][16]。さらに、水圧鉄管の様な大口径管内用キャリアも開発されている[17]。しかし、実際に機材を搭載して奥まで入り、検査や作業を行って無事戻れる信頼性は高くない。米国ガス協会(GRI)のプロジェクトでは機材を運ぶことは計画されておらず、複雑な管内を走行するキャリアの基本概念がまとめられたにすぎない[18]。このプロジェクトでは自由度の多い走行車をいかに制御するか等多くの難問が予想され、今後の展開に大きな期待が寄せられている。

今回、Mogrerの実験で示された車輪型走行車[11]の特長を生かし、管内径520~800[mmφ]、管肉厚20~50[mm]、π/2エルボ曲率1.5DR<sup>†</sup>以上、垂直部30[m]、Y分岐1箇所を含む約150[m]先までの配管内検査点検ロボットとして、分節型ロボットを開発し、超音波探傷装置による亀裂箇所の検査を行った。本稿は、分節型主要配管内検査点検ロボットの構成、走行車の構造、そして制御システム全体を明らかにし、実験による

<sup>†</sup>エルボ曲率1.5 DRとは配管曲率半径と配管内径との比が1.5であることを指す。

原稿受付 1993年4月5日

<sup>\*1</sup>シーエックスアール

<sup>\*2</sup>新潟大学工学部

<sup>\*3</sup>CXR Corporation

<sup>\*4</sup>Faculty of Engineering, Niigata University

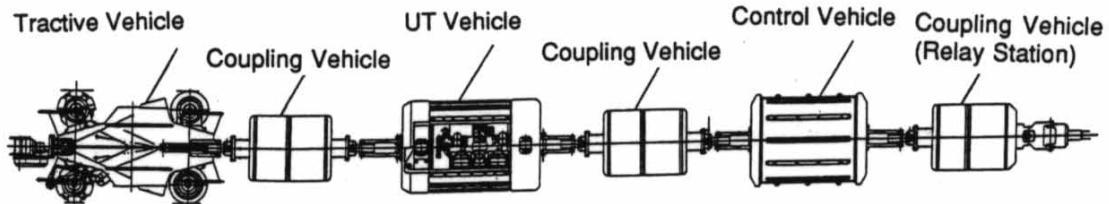


Fig. 1 Line up of the articulated multi-vehicle robot for monitoring and testing in pipe

牽引、操舵、プロープ走査、データ収集に関する性能について報告する。エアシリンダの突っ張り力対変位特性、車輪型プローブの性能改善、光複合ケーブル、等についても考察する。

## 2. 分節型ロボットの構造と全体構成

検査に必要なすべての機材をロボットに搭載できればデータの入力から処理まで集中的に行えるので効率的である。しかし、管内を遠くまで進む場合、ロボットの負荷は増大する。そのため、ロボットの各種機能を幾つかの分節型走行車に分担させ、1個当たりの走行車の負担を軽減した。具体的にはロボットを牽引車、検査(UT)車、制御車、連結車に分けた。Fig. 1は、外形図を基にした各分節車の繋ぎを示す。以下、各部の構造、構成、性能、について詳しく説明する。

### 2.1 牽引車

4車輪を有し、前部の2輪はリム上の5箇所に真横に自由に回転する小車輪を備え、断続的に横滑りを可能にする(Fig. 2参照)。後部の2輪は、通常の車輪で独立操舵機能を持つ。この操舵機能と横滑り機能により牽引車は、管の膨らむ方向を自動的に追跡しながら管軸方向のみならず、スパイラル(軸斜)方向にも移動する。そして、操舵角の指令いかんによってはY分岐管も通過する。

押し付け力の発生にはばねが有効であるが[19]、エアシリンダを使うと一般に幅広い管径の変化に対して車体の自立に必要な押し付け力が得られる。低い車体を大きな管径変化(800-520=280[mm])に適応させるため、突っ張り力を作り出すシリンダを2段式にした(Fig. 2参照)。このため、管径が大きくなると1段目より面積の小さい2段目のシリンダの出力で押し付け力が定まる。また、緊急時としてエア圧を零にして車体を管外に取り出すことも考えねばならず、そのとき車高を縮める必要がある。このため、車高に比例する収縮力を車体に常時作用させることになり、押し付け力は管径の増大と共に減少する傾向を示す。Fig. 3は、2段式シリンダの長さ(H)と押し付け力の実測結果を示す。3段式にすると管径変化への適応能力は向上するが、伸展時の押し付け力が小さくなる。これは、構造的に同心状の多段シリンダの径を同一にできないことに因る。エアは、圧縮性を有するため液体と異なり高速動作に適さないが、車高の遅速な変化には十分追従する。

牽引車の走行や操舵は基本的に管外の地上局からのオペレータの指令によって行われ、制御に必要な情報を得るために本体のローリング(管周方向回転)とピッキング(管軸方向からの傾き)、そして、重力に対する傾きを入力する2個の傾斜計( $\pm \pi/2$ )と1個のジャイロスコープが取り付けられる。牽引車

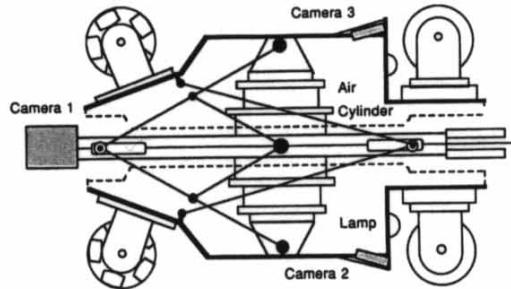


Fig. 2 Plain structure of the tractive vehicle

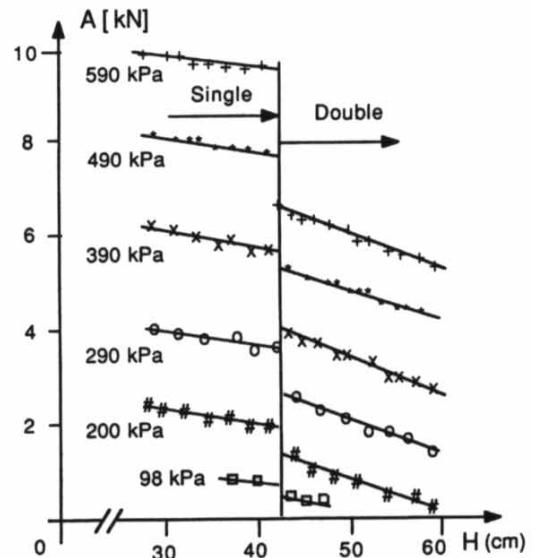


Fig. 3 Characteristic of extension force A versus length H of the two-stage air cylinder

の役割は、後続の走行車を牽引することにあり、前部に目視のためのカメラを、また、後部に2つの操舵輪の制御状態を監視するカメラを搭載する。

Fig. 4は、牽引力を導出するためのリンク構造を表す。この構造は、基本的に四節リンク機構(パンタグラフ機構)であり、点 $S_1$ と $S_2$ は本体の前後方向に自由に滑動して高さを変えられる特徴を有する( $h = H/2 = 150 \sim 200$ [mm])。上下対称の性質から、各リンクに作用する力は、後方をX軸、上方をY軸とする座標系で図のように示される。ただし、Tは牽引力、 $Q_1, Q_2$

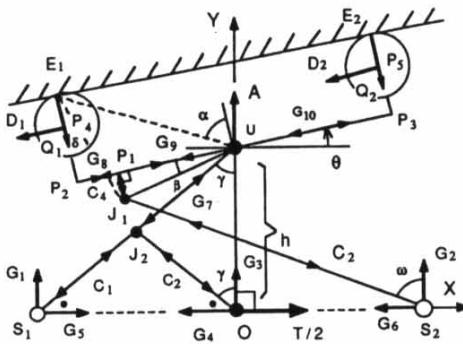


Fig. 4 Force components of the tractive vehicle. Symbols are defined such that  $l_1 = US_1$ ,  $l_2 = OJ_2$ ,  $l_3 = J_1S_2$ ,  $l_4 = J_2S_1$ ,  $l_5 = UP_2$ ,  $l_6 = UP_3$ ,  $l_7 = UP_1$ ,  $l_8 = J_1P_1$ ,  $l_9 = P_2P_4$ ,  $l_{10} = P_3P_5$ ,  $r_1 = P_4E_1$ ,  $r_2 = P_5E_2$

は車輪圧、 $G_1, G_2, \dots, G_{10}$  は作用力を表す未知数である。一方、車輪の駆動力  $D_1, D_2$  とエアシリンダの伸展力  $A$  は指定される。また、 $h$  や  $\theta$  は管のサイズや形によって指定される。これらを関連づけて力やモーメントの平衡式を作ると次の 13 元連立 1 次方程式が得られる。

$$\begin{bmatrix} T \\ Q_1 \\ Q_2 \\ \vdots \\ C_{ij} \\ G_1 \\ G_2 \\ \vdots \\ G_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_i \\ B_{13} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中の  $C_{ij}$  は、リンク長  $l_1 \sim l_{10}$ 、車輪径  $r_1, r_2$ 、及び車高  $h$  と管のテーパ角  $\theta$  によって表される定数であり、 $T, Q_1, Q_2, G_m (m=1 \sim 10)$  の 13 個の未知数は一意的に定まる。すなわち、力の X 軸、及び Y 軸成分和をそれぞれ零にする式と、接觸点  $E_1$  と  $E_2$ 、及び軸支点  $J_1, U, S_1, O, J_2, S_2$  に接続される各リンクのモーメントを零にする式を利用して式(1)が定まり、13 個の未知数の値が定まる。具体的計算については付録を参照されたい。

式(1)は  $A$  や  $\theta$  の変化に対する牽引力等の変化を知るさいに役立てられる。また、この式を使って、軽負荷のリンクを細くして軽量化するなど、走行車の構造設計に反映させるための貴重な情報を得ることができる。Fig. 5 は、 $D_1=D_2=1.47[\text{kN}]$ 、 $A=4.9[\text{kN}]$ 、 $h=200[\text{mm}]$  のもとで牽引力  $T$ 、車輪圧  $Q_1, Q_2$ 、その他の値が管のテーパ角  $\theta$  の影響を受けて変わることを示す。ただし、 $l_1=340, l_2=l_4=170, l_3=310, l_5=l_6=260, l_7=156, l_8=56, l_9=27.5, r_1=r_2=85$ 、(いずれも単位は [mm]) の場合を示す。図から例えば、 $C_2, G_3$  は  $\theta=\pi/5[\text{rad}]$  附近で符号を変え、常に正とは限らないことが分かる。このため、点  $O$  の軸支部やリンク  $OJ_2$  を圧縮にも引っ張りにも耐える構造に設計しなければならないことが示される。

## 2.2 超音波探傷 (UT) 車

長手溶接部超音波探傷システムを搭載する点検車で、駆動車輪を持たず、牽引されて移動する。UT 車は、目視では得られない管壁の欠陥(傷)を超音波を使って探すことを使命とする。

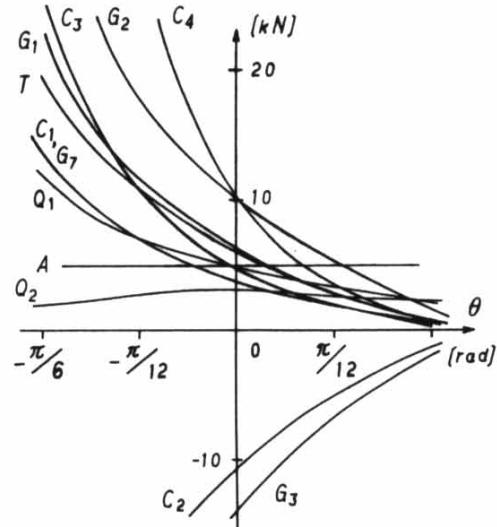


Fig. 5 Calculated results of  $T, Q_1, Q_2, G_1, G_2, G_3, G_7, C_1, C_2, C_3, C_4$ , versus  $\theta$

### (1) 探触子

車輪型の探触子を管内で使用した例はほとんどないが、この探触子は標準探触子に比べてスケール付着等の表面粗さの影響を受けにくく、試験片表面の凹凸等に左右されずに安定して接触し、また、接触媒質として水を使用でき、かつその量を少なくできるなどのメリットを有するので管内用に適する。このような利点を生かし、溶接部の探触子として車輪型斜角探傷子を採用する。

探触子の取り付け状況は Fig. 6 に示される。UT 車の軸を基準にして互いに逆方向にある探触子群をブロック 1 とブロック 2 に分け、ブロック 1 に  $\pi/4$  縦割れ用探触子と  $\pi/3$  縦割れ用探触子を、また、ブロック 2 に  $\pi/4$  縦割れ用探触子と  $\pi/3$  縦割れ用探触子、及び  $\pi/4$  横割れ用探触子、ピードセンサ、ピード監視用カメラ、カメラ用ハロゲンランプを組み込んだ。ここで、縦割れと横割れは、傷がそれぞれ管軸方向、管周方向に走ることを意味する。また、角度は、車輪から超音波が放射される角で、試験片に音波が入射する角度を指す。

一般に、面状欠陥の場合欠陥面に対して音波が垂直方向から入射する場合最も大きな反射エコーが得られる。また、管断面方向の表面に開口した欠陥に対して  $2\pi/9 \sim 5\pi/18[\text{rad}]$  で入射する場合、最も大きな反射エコーが得られる。したがって、欠陥の方向性により最適な入射角は異なるが、管断面方向の欠陥に対して傷が表面近傍にある時  $\pi/4[\text{rad}]$ 、内部にある時  $\pi/2[\text{rad}]$  に近い値に選ぶのがよい。この場合、Fig. 7 のように内部から探傷する場合の内表面入射角  $\theta_1$  と外表面入射角  $\theta_0$  間に

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_0 / (1 - 2(t/D)) \quad (2)$$

の関係が成立する。ただし、 $D$  と  $t$  はそれぞれ、管外径、管板厚を指す。

以上を考慮し、内外表面検査に  $\pi/4[\text{rad}]$ 、内部欠陥検査に  $\pi/3[\text{rad}]$  の探触子を採用する。また、車輪型探触子両側に

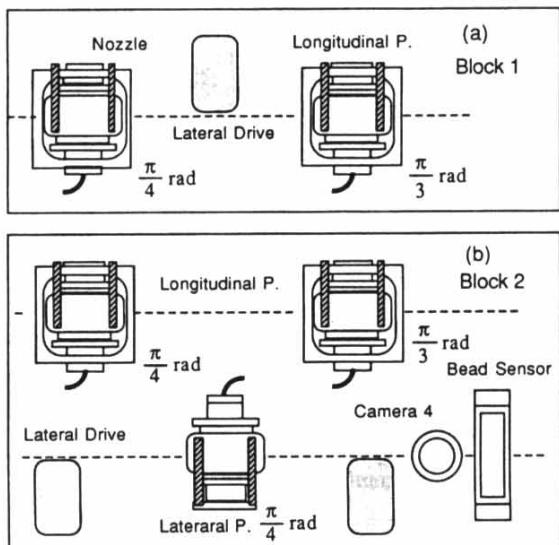


Fig. 6 Allocation of the probes for ultrasonic test on the UT vehicle. (a) Block 1, (b) Block 2

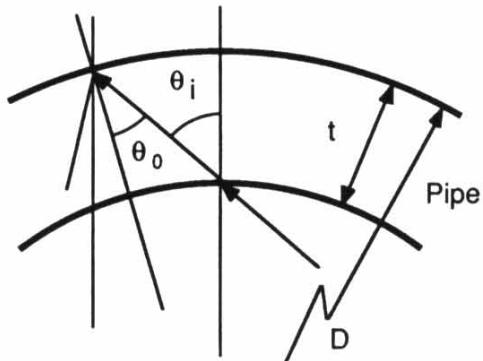


Fig. 7 Geometrical illustration of the ultrasonic transmission in the wheel-type probe

62[mm $\phi$ ] の接地ガイドを装備し、車輪探触子の接触を一定、かつ、安定に保つ。これにより、探触子の押し付け量がほぼ一定となり、入射点の位置や感度の変化を軽減できる。さらに、探触子は、最大  $\pi/9[\text{rad}]$  のジンバル機構で保持され、管径が変化しても管内壁に垂直に接する。

#### (2) 回転駆動機構

探触子ブロックを縮めた状態でこれらを円周方向に移動させるための回転駆動機構を設ける。回転の駆動は各ブロックとも 2 個の DD モータで行われ、回転量はロータリエンコーダによって検出される。また、接触型のメカニカルなスイッチによって回転の始点と終点を検出する。回転動作のストロークと速度はそれぞれ、 $37\pi/18[\text{rad}]$ ,  $\pi/18[\text{rad}/\text{s}]$  である。回転角度にオーバーラップ分があり全周を完全に走査できる。

#### (3) 軸芯サポート機構

探触子で管内面を安定に走査するには、UT 車の軸を常に管中心軸上に位置付けねばならない。このため、UT 車を管中心

に保持する軸芯サポート機構を設ける。これは、伸縮脚を UT 車の前後 2 箇所で 3 方向に同期させて伸ばす構造を有する ( $2\pi/3[\text{rad}]$  ごとに分割される)。各脚は 25[mm $\phi$ ] のエアシリンダを 2 本組み合わせ、490[kPa] で 480N の押し付け力を発生する。エアシリンダ数は 12 であるので総押し付け力は 2.88[kN] に達し、UT 車軸芯の確実な保持が可能である。各脚の張り出しストロークは 200[mm] である。

伸縮脚が張り出して UT 車を軸芯に保持後、長手溶接部の溶接方向への探触子走査を容易にするため、伸縮脚先端に 50[mm $\phi$ ] のウレタン車輪を設置する。さらに、伸縮センサを前後に各 1 個設けて伸縮状態を確認すると共に一部の脚先車輪にエンコーダを使用して UT 車の管軸方向への進行距離を計測する。

#### (4) 探触子ブロック伸縮機構

探触子を取り付ける 2 つのブロック (Fig. 6 参照) を管内壁に押し付ける機構である。リンクで結合される各ブロックの 1 対のアーム部は互いに同期して伸縮する。各探触子はさらに、シリンダにより内壁に押し付けられる。ただし、2 つのブロックの探触子が同時期に管壁に押し付けられることはない。アーム部の伸縮と探触子の押し付けを行うエアシリンダの径はそれぞれ、32[mm $\phi$ ], 25[mm $\phi$ ] である。これらは、エア圧 490[kPa] で作動するのでそれぞれ 392[kN], 245[kN] の力となる。アーム部と探触子のストロークは、それぞれ 200[mm], 20[mm] である。アーム部と探触子の収縮は、装備された専用のリードスイッチで検出される。

#### (5) ビードセンサ機構

主要配管の長手溶接部余盛の大部分は滑らかに仕上げ加工されるので、ロボットに取り付けた目視用カメラでその位置を確認することは困難な場合が多い。このため、別の手段としてビードセンサを探触子ブロック 2 に装備し、溶接位置を数[mm] の精度で検知することにする。ビードセンサは、渦電流の原理を利用したものでアームを伸張させて管内壁との間にギャップ (2~8[mm] 可変) を保って接する構造である。

#### (6) 溶接位置監視カメラ機構

ビードセンサの検査壁を監視するため、カメラ機構を探触子ブロック 2 に装備する。この機構は、超広角レンズ (焦点距離 30[mm])、小型 CCD カメラとハロゲンランプ照明装置で構成され、管の継目の溶接箇所の検査に重要な情報を提供する。

#### (7) 接触媒質供給機構

ピニールチューブ (4[mm $\phi$ ]) によって外部から接触媒質 (水) を供給する方式を採用し、スリップリングを介して回転機構に導き、その後内蔵の電磁弁によるオン・オフ動作で 5 つの探触子接触面に吹き付ける。吹き付けノズルとして、向きを調整しやすい銅製のパイプを使用した。毎分の供給量は 50[ml] であるが 10[ml] 程度にすることも可能である。

#### (8) 水とエアのスリップリング機構

接触媒質の水とシリンダ駆動用のエアを回転駆動部を介して供給するため、軸芯部にスリップリングを設ける。スリップリングはエア 2 系統、水 1 系統を有し、各々の口径は 12[mm] である。

### 2.3 制御車

制御車は、牽引車関連のモータドライバ、前方視カメラと後方視カメラのアンプ、カメラ切換器、そしてUT車関連の超音波送受信回路、探触子切換器、アーム部ドライバ、ビードセンサ用コントローラ、等を搭載する。丸みを持たせた形状を有し、ケース外側に設けたレールによって内壁面を滑りながら移動し、脱輪の心配のない構造となっている。

### 2.4 連結車

牽引車、UT車、制御車、ケーブル間に牽引力や電力、そして制御情報を伝える連結車を配置して各車間を迅速かつ容易に接続できるものとする。連結車は、2DOFのジョイントを前後に有し、これが連結車以外の走行車の前後に設けられる円弧状のリンク(半径131[mm])と結合し、各走行車を管周方向回転に関して剛に連結する。UT車と制御車間の連結車内には牽引車に取り付けるジャイロスコープのアンプを、また、制御車とケーブル間の最後尾連結車(以下、機上局と呼ぶ)内に光通信の中継局を装備する。各車間にケーブル、エアホース、水ホースのコネクタ機能を持たせるため、連結部の中心部は案内用の穴を有する。結合点を円弧上に定める理由は、エルボー部でのケーブル束の急激な屈曲をなくすことにある。

## 3. 装置の制御

牽引車の車輪とカメラの制御、及びUT車上の探触子関連の伸縮と回転制御について述べる。

### 3.1 牽引車の駆動力と操舵制御

牽引車のみが駆動力を出し、他の走行車はこれに牽引され、連結車を介して運動的に動く。このため、ほとんどの分節車は、曲がり部で管壁に接触して滑る。各車の外径が牽引車と比べて小さいのは、滑動部を小さくして移動しやすくするためにある。

牽引車は地上局からの指令により作動する。地上局のオペレータは、牽引車の前後の車輪や管壁の様子をモニタ画面を見ながら判断し、指令を下す。このとき、2つの操舵輪を独立に制御する個別制御モードと、一定の関係を保ちながら制御するジョイスティックモードとが用意されている。

ジョイスティックモードは、レバーを前後に倒して前後進を、また、左右に倒して倒し具合に応じた操舵角を設定する。ただし、この時スパイラル方向と周方向の2モードがあり、車輪の進行方向が相対的に異なる。すなわち、上下車輪の操舵角がスパイラルモードでは管軸方向に対して逆方向、周方向モードでは同一方向となる(Fig. 8 参照)。スパイラルモードは走行中に遭遇する穴等での脱輪の回避、また、周方向モードは分岐管への進入、等に有効な制御である。

### 3.2 カメラの制御

ロボットに搭載されるカメラは、牽引車に3台、UT車に1台の合計4台である。特に、牽引車の先端に搭載される目視検査用カメラは、首振り、回転、ズーム、フォーカス、アイリスを地上局のオペレータからの指令で制御する。首振りと回転の動作範囲はそれぞれ、 $\pm\pi/2$ 、 $\pm\pi[\text{rad}]$ である。フォーカス範囲は5~300[cm]である。目視検査以外のカメラ3台については地上でロボットを管内に入れる時設定した状態で使われる。

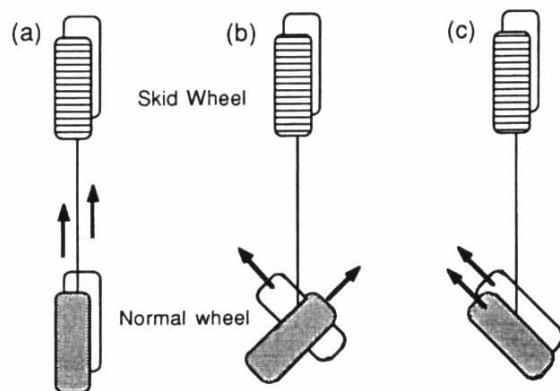


Fig. 8 Three steering modes. (a) Straight Mode, (b) Spiral Mode, (c) Circumferential Mode

カメラ3台分の信号処理回路を装備するのは、コスト的にも、また、スペース的にも得策でないので1台のドライバとアンプを切り換えて制御する回路を開発した。この様な切り換え回路は、すべて制御車に搭載されている。

### 3.3 UT部制御

UT部制御の主要なものは、探触子プロックの伸縮と回転である。具体的には、6個の軸芯サポート用、4個の探触子アーム部用、5個の探触子伸縮用、の電磁バルブと、探触子プロック回転用のDDモータの制御である。その他、接触媒質用の電磁バルブ、ビードセンサ伸縮用モータ、溶接位置監視カメラ用照明、等の制御がある。これらの制御装置は、すべて制御車に搭載され、地上局のオペレータやパソコンからの指令で作動する。制御の状態は、地上局のパネルにLEDで表示される。

### 3.4 通信システムの構成

#### (1) 光複合ケーブル

地上局からロボットを制御するための信号チャンネル数は30を越え、通常のケーブルを使うとケーブル束の肥大化は避けられない。また、ケーブル束の柔軟性も失われる。そこで、光通信ケーブルを採用し、また、その保護と補強を考えてシリンドラ駆動用エアチューブや照明用電力線の一本化を行う。Fig. 9は試作した光複合ケーブルの断面を示す。(a)は、光ケーブル断面、(b)は光複合ケーブル断面である。光複合ケーブルは、 $1[\text{mm}\phi]$ の心線を3本撚り合わせた外径 $3[\text{mm}\phi]$ の束をテンションメンバとして中央に置き、その周囲に電力線( $2[\text{mm}\phi]$ の線6本)と、エア供給チューブ( $4[\text{mm}\phi]$ もしくは $6[\text{mm}\phi]$ チューブ6本)を配置する。1.5[mm]厚のナイロンシースを有する光複合ケーブルの外径は約35[mm]で1[m]当たりの質量は1.48[kg]である。

ケーブルの取扱を容易にするためのケーブルドラム(リング径150[cm])を使用してその送出と巻戻しを行うこととし、地上局にスリップリングを装備する。なお、前進時においてケーブルの張力は、ロードセルと電動ウィンチを用いて常時約784[kN]を保つように制御される。

#### (2) 全体制御システム

ロボットは、牽引車を先頭に連結車、UT車、連結車、制御

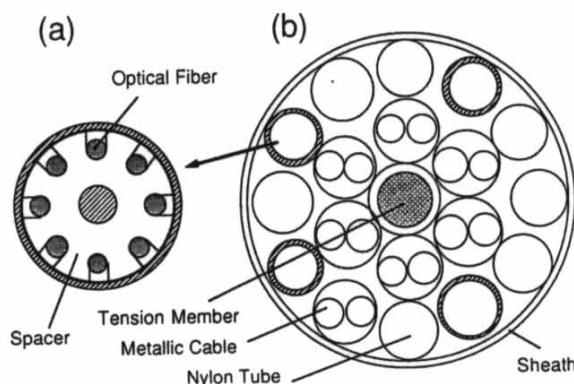


Fig. 9 Assembly of the umbilical cable

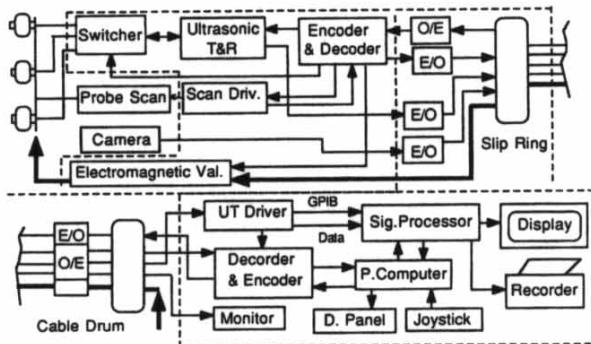


Fig. 10 Blockdiagram of the ultrasonic test

車、連結車（機上局）の順で Fig. 1 のように繋がれる。また、UT 車の探触子を管内壁に当て、接触媒質を吹き付けて超音波探傷を行うための制御システムは Fig. 10 に示される。このシステムは、大きく UT 車、制御車、機上局、地上局の 4 ブロックに分かれる。図中の O/E, E/O は、それぞれ、光から電気、そして電気から光への信号の変換器を示す。

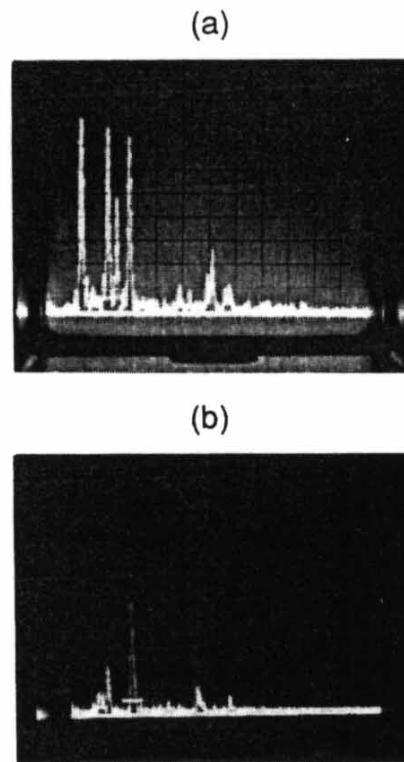
#### 4. 車輪型斜角探触子による探傷実験

斜角探触子の性能改善と UT 車に取り付けた探触子の走査法等について述べる。

##### 4.1 車輪型探触子へのコリメータの応用効果

一般的の車輪型探触子（例えば、ステブリー社製）は、検査面に馴染みやすく、また、その走査が簡単である。しかし、車輪内での雑多な散乱エコーの発生や車輪内水距離、及び車輪ゴム及び反射板による感度の低下等の弱点もある。

後者の弱点は、車輪や探触子の基本的原理より生じるもので改良は困難であるが、前者の弱点は、ビームの広がりを絞る、音波吸収材をつけて反射波を軽減するなどして超音波の車輪内反射を除去することで解決する。本研究では、車輪内に余分な超音波の散乱を無くすコリメータを取り付けることで対応し、Fig. 11 の (a) から (b) に改善できた（周波数 2.25[MHz]）。実験ではこのような改良を加えた探触子を UT 車に搭載することにする。

Fig. 11 Reflected waves in the wheel-type probe.  
(a) without collimator, (b) with collimator

Task \ State	State	Leg	Arm	Probe Base	Tractor	Revolve
Probes	Stretch	Expand	Push	Move	No	
Bead Sensor	Stretch	Expand	Pull	Stop	Rotate	
No	Stretch	Shrink	Push	Stop	Rotate	
No	Stretch	Shrink	Pull	Move	No	
Locomotion	Fold	Shrink	Pull	Move	No	

Fig. 12 Combinational states of the operation for the test

#### 4.2 接触媒質

探傷面が粗い場合の接触媒質は粘性が高く、かつ音響インピーダンスの大きいもの程超音波の伝達特性の点から有利である。これは、標準探触子について言えるが、車輪型探触子の場合、探傷面の凹凸に対し車輪が良く馴染み、比較的少量の接触媒質で良好な接触状態が得られる。このことから実験では、被検査体に対して無害で、供給後の残存液処理性の良い水を用い、これを地上局から送給し、各々の探触子の近傍から吹き付ける。

#### 4.3 探触子の制御

探触子やビードセンサが使用可能な状態にあるか否かは探触子ブロックのアームや探触子の伸縮状態によって異なる。これらの関係は、Fig. 12 の組合せで示される。

#### 4.4 走査方法

斜角探傷での探触子走査方法として一般に Fig. 13 に示され

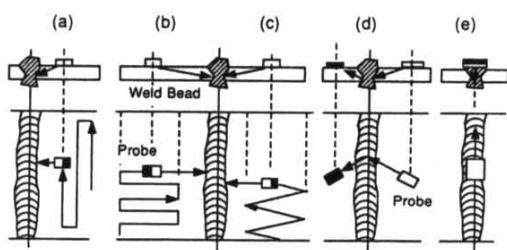


Fig. 13 Various strategies of scanning probes

る横方形走査(a), 縦方形走査(b), ジグザグ走査(c)がある。これらは、縦割れ、融合不良、溶込み不良、プローホール、スラグ巻き込み等の探傷に用いられる。また、横割れ探傷の場合は、図中のまたぎ走査(d), 溶接線上走査(e)が用いられる。

本研究では、2.2節の(1)で示したように縦割れ検査用として入射角 $\pi/4$ と $\pi/3$ の車輪型斜角探触子(三菱電機製FD-610)を用い、横方形走査を採用する。また、ブロック1の探触子で溶接部の片側を検査し、その後プローブ台を回転させ、ブロック2の探触子でもう一方の側を検査するという、片面両側探傷法を採用する。さらに、溶接部の横割れ検査を実施する目的で、1個の $\pi/4$ の探触子を軸方向に走査し、溶接線上的探傷検査を行うこととする。なお、軸方向走査は、軸芯保持脚を伸ばしたまま牽引車を前後に移動させて行う。

長手溶接部位置は、UT車に搭載したビードセンサを周方向に走査することにより検知する。余盛りが認められる場合は、カメラによる目視によって検知する。探触子ブロック1と2は、ビードセンサ、及びカメラを使って回転制御により円周上の任意の位置に移動する。これに伴い各ブロック上の探触子は、アームの伸びた状態で指定された角度に位置づけられると同時に、専用のエアシリンダで押し出され、その動作が確認されると、回転用のアームが縮む。この状態が実現するとき、探傷が可能になる。

### 5. ロボットによる走行と探傷の実験

分節型のロボットを試作し、走行と探傷の実験を行った。Fig. 14とFig. 15は、試作した牽引車とUTの外観である。すべてが専用のDDモータ(Inlandモータ社製 QT-2404)で駆動される。ただし、モータの発生トルクはピーク時で406.7[Ncm]であり、ハーモニックギア(1/100)に直結されて406.7[Nm]に増大される。走行車の設計仕様は2.1節後半の計算で示した通りであり(Fig. 4参照)、Fig. 4中の駆動トルク $D_1, D_2$ の最大値は4.784[kgf-m]となる。ここで、エアシリンダの伸展圧を $A=4.9[\text{kN}]$ として $\theta=\pi/12[\text{rad}]$ のレデューサ管内の走行を考えると、(1)式から牽引力 $T$ や車輪圧 $Q_1, Q_2$ その他の値が算出される。すなわち、 $T=3.23, Q_1=3.46, Q_2=2.62, G_1=3.58, G_2=6.19, G_3=-8.12, G_4=G_5=G_6=0, G_7=2.10, G_8=G_9=G_{10}=1.47$ (いずれも単位は[kN])が得られる。これらの値の妥当性は実験で確認された。

各走行車の総重量とサイズは、牽引車において1.12[kN],  $990 \times 505 \times 370[\text{mm}^3]$ 、UT車において1.17[kN],  $400\phi \times 958(640)[\text{mm}^3]$ 、制御車において1.06[kN],  $400\phi \times$

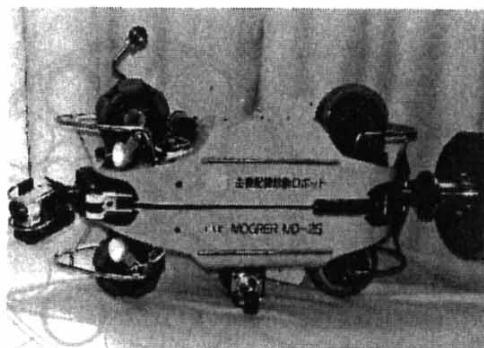


Fig. 14 Overview of the tractive vehicle

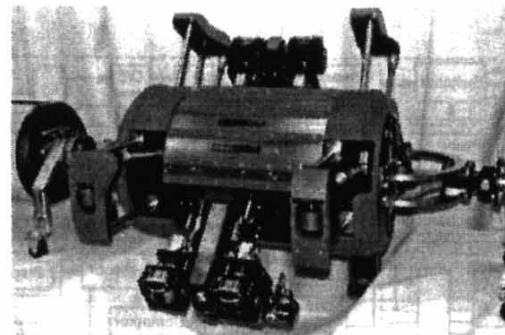


Fig. 15 Overview of the UT station

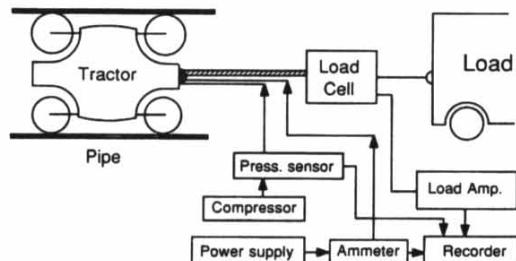


Fig. 16 Experimental set for measuring the tractive force

$930(530)[\text{mm}^3]$ 、機上局において0.19[kN]、 $288\phi \times 580[\text{mm}^3]$ である。ただし、括弧内数字は結合リンク部を除く長さを示す。

ロボットを専用の治具を使って管内に入れ、走行性能に関する実験を行い、牽引力と探触子の位置決め精度を測定する。牽引力の測定ではFig. 16に示すように、牽引車の後尾にロードセルを接続して直管内の最大牽引力を測定した。その結果は7.84[kN]であり、Fig. 5中の $\theta=0$ におけるTの値に近く妥当であることを確認した。また、地上局から見るべき方向や距離を指令して管内の映像を鮮明に入力でき、管内のモニタ機能が良好であることが分かった。Fig. 17とFig. 18は、管入口からおよそ114.27[m]先のエルボ部と30.55[m]先の接合溶接部のモニタ画面をそれぞれ示す。そして走行速度2[m/分]を実現した。



Fig. 17 Color image monitored at the distance of 114.2 m in pipe

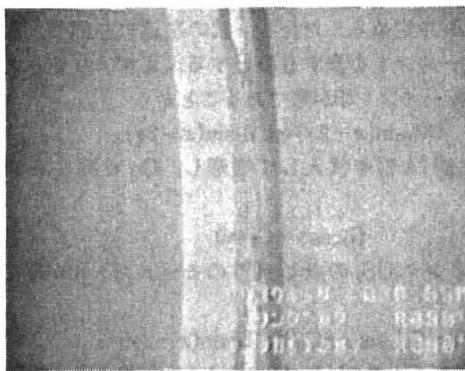


Fig. 18 Side image monitored at the distance of 30.55 m in pipe

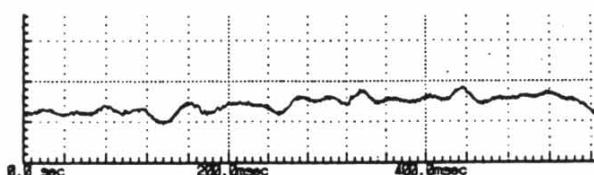


Fig. 19 Signals from a probe of the UT vehicle

探触子の位置決めに関しては管軸方向(0~570[mm])と管周方向(0~ $2\pi$ [rad])においてそれぞれ、2[mm], 1[mm]を記録した。長手溶接部位置の検出手段として渦流型ピードセンサ(キーエンス製FH-410, 419)を使い、センサの走行路を変えて5~10回程度の走査を行った。1[m]当たりの探傷時間は2時間である。Fig. 19は長手溶接部検査用プローブからの信号を記録したデータの一例を示す。探傷のための水の吹き付けは十分満足できるものであった。

後退時の検査では引っ張り補助としてケーブルにテンションを与えることが有効であった。エルボの前後約2[m]の範囲内では、軸方向の制御精度が悪化する。これは、連結車とUT車が同一軸上になくなり、UT車の固定脚がその影響を受けて伸縮することに因るものと考えられる。エルボ内部ではUT車の安定した脚支持が困難となり、探傷は非常に困難であつた。

た。

走行車の水平に対する傾斜角は牽引車に搭載された傾斜計やジャイロスコープによって検出され、走行車はケーブル軸周りのロール角を累積しないように操舵される。このため、長距離進行時のケーブルの捩れの心配は発生しなかった。また、各走行車間を剛に接続したことに因る操舵性能の低下は発生しなかった。これは、牽引車以外の走行車に摺動部材を付けて管軸や管周方向に対し滑りやすくした効果によるもと考えられる。したがって、ケーブルの捩れや走行車のロールが走行を妨げることはなかった。そして、リアルタイムで取り込まれる映像を見ることで走行車は揺れや振動のない安定な走行を行うことを確認できる。

ケーブルの牽引抵抗は、走行路の形状や管の姿勢によって複雑に変わるが、特に、曲折箇所で大きな値になった。この値は、走行車が管内に進み込める限界を定めるときに必要なデータとして重要であり、試作装置の牽引抵抗の1[m]当たりの換算値はおよそ10.8[N]と測定された(ケーブルの単位長質量は1.48[kg])。したがって、19.135[kN](=406.7×4/85)の牽引力を出せる試作装置では水平深度1.78[Km]が限界であることが分かる。

後退時に車輪を溝などに落し入れることが心配されたが、オペレータは前進時に得られた情報を手がかりとし、また、後方車輪監視カメラからの画像をモニタしながら適切な操舵指令を与えることで150[m]先からの後退走行も可能にした。ただし、ケーブルの走行妨害を無くすため、後退した距離に相当する長さのケーブルを地上局のウィンチで巻取る操作が必要であった。このようなウィンチを用意することで電源の遮断等の非常時における走行車の回収も可能であった。

## 6. おわりに

分節型管内検査点検ロボットの構造や制御を明らかにし、牽引力の算出式を導出した。また、ロボットを試作して曲がり部や垂直部、そしてY分岐(チーズ)を有する管内を走行させ、管内の目視検査と長手方向溶接箇所の探傷試験を行うための5つの車輪型探触子の切り換え走査制御等の実験を行った。その結果、次のことが明らかになった。

- ① ロボットを分節型にすることで負荷が分散し、本体の設計やシステムの制御が簡単になる。
- ② 管内部を150[m]先まで目視できる。
- ③ 1対の横移動車輪と1対の操舵輪の制御により、管内の直進、スパイラル走行、円周方向走行が実現し、分岐部の通過も可能になる。
- ④ エアシリンダをアクチュエータとして用いることにより、ロボットは大きな突っ張り力を得るとともに、幅広い管径変化に適応する。また、緊急時の突っ張り力解除が容易になり、システムの異常時に、走行車の回収が可能になる。
- ⑤ UT車の前後に3方に伸びる脚を取り付けることで管周方向の探傷を安定に行える。
- ⑥ 車輪型探触子が管内検査に有効である。しかも、接触媒質として安価な水を利用できる。
- ⑦ 1台のプロセッサで複数台の撮像素子を切り替え走査する

ことでカメラの信号処理装置数の節約が図られ、また、電力や牽引車の負荷を軽減できる。

以上のメリットとは逆に、探傷できる領域が管径変化の少ない箇所に限られることが明らかになった。このデメリットは、UT車に円周方向と同様、管軸方向に移動するメカニズムが必要なことを示唆する。脚はUT車を管内に保持するので、管軸方向への移動に駆動輪を使うことは必ずしも必要ない。したがって、探触子用アームをUT車の回転軸方向に滑動させることにより、このデメリットは解消するものと思われる。

今後、上記デメリットの解消のほか、走行車の軽量化、探触子の位置制御精度の向上に向けた検討を重ね、分節型ロボットをより使いやすいものに改善していくことが重要な課題であると考えている。

## 参考文献

- [1] 細貝、福田：“自律形配管診断ロボットの研究”，日本機械学会論文集，vol. C 51, no. 467, pp. 1655-1662, 1986.
- [2] 佐々木、小沢：“作業における検査ロボット”，化学工業，vol. 48, no. 7, pp. 502-504, 1984.
- [3] 佐藤、渡辺、深川、加藤：“化学プラントの安全確認システム”，ロボティクス・自動化システムシンポジウム予稿集, pp. 195-198, 1988.
- [4] 黒木、小久保、織田、内藤、森谷：“レール式復水器細管清掃ロボットの開発”，日本機械学会ロボメカ講演論文集, vol. B, pp. 283-284, 1992.
- [5] 福田、細貝：“管内走行検査ロボットの研究”，日本機械学会論文集, vol. C 52, no. 477, pp. 1584-1588, 1986.
- [6] 富田、高木、栗田、坂本、内藤：“小口径導管検査ロボットの開発”，日立評論, vol. 68, pp. 793-796, 1986.
- [7] 鈴森、阿部、島村：“2インチ配管内点検ロボットの開発”，第8回日本ロボット学会学術講演予稿集, pp. 203-204, 1990.
- [8] J. Ventut et al.: “Vehicles with wheels and legs: The in pipe remote inspection vehicle and his family,” in Proc. 3rd RoMan-Sy, pp. 476-487, 1978.
- [9] “新技術トピックス”，日経メカニカル, 4月, p. 68, 1984.
- [10] 青木：“パイプマウス”，配管技術, vol. 25, pp. 150-154, 1983.
- [11] 岡田、実森：“管内監視用走行車、モグラ”，計測自動制御学会論文集, vol. 22, no. 8, pp. 897-903, 1986.
- [12] T. Okada and T. Kanade: “A three-wheeled self-adjusting vehicle in a pipe, Ferret-1”, J. Robotics Research, vol. 6, no. 4, pp. 60-75, 1987.
- [13] 田口、堀、前野、河原崎：“管内走行ロボットの研究”，第8回日本ロボット学会学術講演予稿集, pp. 205-206, 1990.
- [14] J. D. Cummings, S. Marcos and C. E. Hatcher: “Internal pipe coating apparatus,” United States Patent 3078823, 1963.
- [15] Colditz and Martin: “Fahrwerk fuer Innenisoliergeräte,” German Patent 125290, 1977.
- [16] T. Okada, “Self-traversing vehicle for pipe,” EPC Patent, no. 177112, no. P 3571345, Germany, 1989.
- [17] 藤沢：水圧鉄管用点検ロボットの開発研究，日本鋼管技報, no. 118, 1987.
- [18] F. W. Hudson: “The gas mouse,” J. of Pipeline & Gas, pp. 22-26, July, 1988.
- [19] 岡田：“力発生用パンタグラフ機構の設計”，日本ロボット学会誌, vol. 4, no. 2, pp. 109-118, 1986.

## 付録

Fig. 4において、パンタグラフ機構の前後の節点  $S_1, S_2$  の動作は上下方向に拘束されるが、前後方向に自由に滑動するので

$$G_4 = G_5 = G_6 = 0 \quad (A 1)$$

したがって、式(1)中の行列要素  $C_{i,j}$  と  $B_i$  は、事実上それぞれ 10 行 10 列 ( $i, j = 1 \sim 10$ )、及び 10 行 1 列 ( $i = 1 \sim 10$ ) で表され、

10 元の連立 1 次方程式が得られる。パンタグラフを構成するリンク  $J_2S_1$  に作用する力  $C_1$  は、

$$C_1 = G_1 \cos \gamma \quad (A 2)$$

ただし、 $\gamma$  は角  $S_1UO$  を表す。

$$\gamma = \cos^{-1}(h/l_1) \quad (A 3)$$

また、リンク  $J_2O$  と  $J_1S_2$  に作用する力  $C_2, C_3$  は、

$$C_2 = G_3 \cos \gamma - T / 2 \sin \gamma \quad (A 4)$$

$$C_3 = G_2 \cos \omega \quad (A 5)$$

ただし、 $\omega$  は線分  $J_1S_2$  と  $UO$  の交角を表し、角  $J_1UP_1$  を表す  $\beta$  と管のテーパ角  $\theta$  を使って表される。

$$\omega = \cos^{-1}((h - \sqrt{l_2^2 + l_3^2} \sin(\theta + \beta)) / l_3) \quad (A 6)$$

$$\beta = \tan^{-1}(l_7 + l_8) \quad (A 7)$$

さらに、リンク  $J_1P_1$  に作用する力  $C_4$  が次式で表される。

$$C_4 = G_2 \cos \omega / \cos(\omega - \theta) \quad (A 8)$$

以下、パンタグラフのバランス時の条件を導出して、行列要素  $C_{i,j}$  と  $B_i$  を定める。ただし、式の左辺に左周り、右辺に右周りのモーメントを表すものとする。まず、リンク  $OJ_2$  の点  $O$  周りのモーメント和が零であることから

$$G_7 l_2 \sin(\pi - 2\gamma) = C_1 l_2 \sin(\pi - 2\gamma) \quad (A 9)$$

式(A 9)に式(A 2)を代入して整理し、 $C_{i,j}$  に関する式が定まる。

$$G_1 \cos \gamma - G_7 = 0 \quad (A 10)$$

さらに、リンク  $US_1$  の点  $U$  周りのモーメント和が零であることから、

$$0 = G_1 l_1 \sin \gamma + C_2 (l_1 - l_4) \sin(\pi - 2\gamma) \quad (A 11)$$

リンク  $l_2$  に関する式(A 4)を式(A 11)に代入して  $C_2$  を消去し、 $C_{2,j}$  に関する式が得られる。

$$T / (l_1 - l_4) \sin \gamma - G_1 l_1 - 2G_3 (l_1 - l_4) \cos^2 \gamma = 0 \quad (A 12)$$

また、車輌に関する点  $U$  周りのモーメント和が零から、

$$D_1 l_9 + D_2 l_{10} + Q_1 l_5 = Q_2 l_6 + C_3 \sqrt{l_7^2 + l_8^2} \cos(\theta + \beta - \omega) \quad (A 13)$$

式(A 13)に式(A 5)を代入して  $C_3$  を消去し、 $C_{3,j}$  に関する式が得られる。

$$-Q_1 l_5 + Q_2 l_6 + G_2 \sqrt{l_7^2 + l_8^2} \cos \omega \cos(\theta + \beta - \omega) = D_1 l_9 + D_2 l_{10} \quad (A 14)$$

さらに、点  $E_1$  周りの車輌に関するモーメント和が零であるので、

$$A((l_9 + r_1) \sin \theta + l_5 \cos \theta) + G_7 (\sqrt{l_5^2 + (l_9 + r_1)^2} \sin(\gamma + \theta + \alpha)) = D_1 r_1 + D_2 r_2 + Q(l_5 + l_6) + C_3 \sqrt{(l_8 + l_9 + r_1)^2 + (l_5 - l_7)^2} \sin(\omega - \theta - \delta) \quad (A 15)$$

ただし、 $\alpha$  と  $\delta$  は角  $P_2E_1U$  と角  $P_2E_1J_1$  をそれぞれ表す。

$$\alpha = \tan^{-1}(l_8 / (l_9 + r_1)) \quad (A 16)$$

$$\delta = \tan^{-1}((l_5 - l_7) / (l_9 + r_1 + l_8)) \quad (A 17)$$

ここで、リンク  $l_3$  に関する式(A 5)を式(A 15)に代入して  $C_3$  を消去し、要素  $C_{4,j}$  を定める式が得られる。

$$Q_2(l_5 + l_6) + G_2 \sqrt{(l_8 + l_9 + r_1)^2 + (l_5 - l_7)^2} \cos \omega \sin(\omega - \theta - \delta) - G_7 \sqrt{l_5^2 + (l_8 + r_1)^2} \sin(\gamma + \theta + \alpha) = A((l_9 + r_1) \sin \theta + l_5 \cos \theta) - (D_1 r_1 + D_2 r_2) \quad (A 18)$$

また、車輌に作用する力  $G_8, G_9, G_{10}$  に関して

$$G_8 = G_9 \quad (A 19)$$

$$G_7 \sin(\gamma + \theta) - G_9 - G_{10} = -A \sin \theta \quad (A 20)$$

そして  $C_{5,j}, C_{6,j}$  が得られる。さらに、X 軸方向の力の成分和が零であるので

$$T/2 + Q_1 \sin \theta + Q_2 \sin \theta = (D_1 + D_2) \cos \theta \quad (A 21)$$

この関係式から  $C_{7,j}$  を得る。同様に、Y 軸成分の力の成分和が零であるので

$$Q_1 \cos \theta + Q_2 \cos \theta - G_1 - G_2 - G_3 = A - (D_1 + D_2) \sin \theta \quad (A 22)$$

となり、 $C_{8,j}$  が得られる。また、駆動力  $D_1, D_2$  は車体に直接作用するので

$$G_8 = D_1 \quad (A 23)$$

$$G_{10} = D_2 \quad (A 24)$$

これらの関係は、 $C_{9,j}, C_{10,j}$  に反映される。結局、要素  $C_{i,j}$  が次のように表される。

$$C_{1,4} = \cos \gamma \quad (A 25)$$

$$\begin{aligned} C_{1,7} &= C_{5,9} = C_{6,9} = C_{6,10} = C_{8,4} = C_{8,5} = C_{8,6} \\ &= -1 \end{aligned} \quad (A 26)$$

$$C_{2,1} = (l_1 - l_4) / 2 \sin 2\gamma \quad (A 27)$$

$$C_{2,4} = -l_1 \quad (A 28)$$

$$C_{2,6} = -2(l_1 - l_4) \cos^2 \gamma \quad (A 29)$$

$$C_{3,2} = -l_5 \quad (A 30)$$

$$C_{3,3} = l_6 \quad (A 31)$$

$$C_{3,5} = \sqrt{l_7^2 + l_8^2} \cos \omega \cos(\theta + \beta - \omega) \quad (A 32)$$

$$C_{4,3} = l_5 + l_6 \quad (A 33)$$

$$C_{4,5} = \sqrt{(l_8 + l_9 + r_1)^2 + (l_5 - l_7)^2} \cos \omega \sin(\omega - \theta - \delta) \quad (A 34)$$

$$C_{4,7} = -\sqrt{l_5^2 + (l_9 + r_1)^2} \sin(\gamma + \theta + \alpha) \quad (A 35)$$

$$C_{5,8} = C_{9,8} = C_{10,10} = 1 \quad (A 36)$$

$$C_{6,7} = \sin(\gamma + \theta) \quad (A 37)$$

$$C_{7,1} = 1/2 \quad (A 38)$$

$$C_{7,2} = C_{7,3} = \sin \theta \quad (A 39)$$

$$C_{8,2} = C_{8,3} = \cos \theta \quad (A 40)$$

上記以外の要素はすべて零である。

要素  $B_i$  については次のように表される。

$$B_1 = B_2 = B_5 = 0 \quad (A 41)$$

$$B_3 = D_1 l_9 + D_2 l_{10} \quad (A 42)$$

$$B_4 = A \{(l_9 + r_1) \sin \theta + l_5 \cos \theta\} - (D_1 r_1 + D_2 r_2) \quad (A 43)$$

$$B_6 = -A \sin \theta \quad (A 44)$$

$$B_7 = (D_1 + D_2) \cos \theta \quad (A 45)$$

$$B_8 = A - (D_1 + D_2) \sin \theta \quad (A 46)$$

$$B_9 = D_1 \quad (A 47)$$

$$B_{10} = D_2 \quad (A 48)$$

以上により、未知数  $T, Q_1, Q_2, G_1 \sim G_{10}$  (ただし、 $G_4 = G_5 = G_6 = 0$ ) に関する式が与えられ、それらを連立させて解は一意に定まる。

藤原 茂 (Shigeru Fujiwara)



1948年2月15日生。1970年、岡山大学工学部機械工学科卒業。同年より(株)シーエックスアールに勤務。現在非破壊試験用センサーの研究開発、移動ロボットの点検業務への応用技術の開発等に従事。  
(日本ロボット学会正会員)

岡田徳次 (Tokaji Okada)



1947年3月5日生。1969年、新潟大学工学部電気工学科卒業。同年現電子技術総合研究所に入所。知能ロボットシステムの研究に従事。1987年7月新潟大学工学部に出向。現在情報工学科教授。工学博士。ロボティクス、インテリジェントセンサ等の研究に従事。計測自動制御学会、日本機械学会、電子情報通信学会、IEEE等の会員。  
(日本ロボット学会正会員)

金原了二 (Ryouji Kanehara)



1951年5月25日生。1970年、吳港高等学校電気科卒業。同年より(株)シーエックスアールに勤務。現在自動超音波探傷装置、管内検査装置の研究開発に従事。日本非破壊検査協会会員。

実森 毅 (Tsuyoshi Sanemori)



1930年5月25日生。1946年、旧制広島県立吳第2中学校修了。同年、広島電気通信局に勤務。1958年(株)シーエックスアールに勤務。以来非破壊検査点検技術、管内走行ロボット；モグラ等の研究開発に従事。現在情報メディアの研究開発を担当。日本非破壊検査協会会員。