

## 面法線計測センサを用いる埋設管先曲折方向の識別\*

長谷川 直樹\*<sup>1</sup>, 岡田 徳次\*<sup>2</sup>, 清水 年美\*<sup>3</sup>Recognition of Connected Direction of a Buried Pipe's End  
Using a Surface-Normal SensorNaoki HASEGAWA, Tokuji OKADA\*\*<sup>4</sup> and Toshimi SHIMIZU\*\* Faculty of Engineering, Niigata University,  
8050 Ikarashi-nincho, Niigata-shi, Niigata, 950-2181 Japan

This paper proposes a method to recognize connected direction of a buried pipe's end using a surface-normal sensor. The method uses a range sensor and a pair of wedge-prisms for the purpose of collecting three or more distance data in a small surface of measurement object. To make a laser beam shift a little bit from main optical axis of the range sensor, a driving mechanism is assembled for rotating the pair of wedge-prisms. We attach the sensor at entrance of a pipe and measure the connected direction of a linked pipe at the other end making an elbow. Firstly we describe the measurement principle of the surface-normal sensor. Then, we apply the sensor to recognize the direction of life line pipes feeding gas, water, steam and so on. We simulate the measurement of tracking an elbow connecting water pipes to collect its direction data. Comparing the data with experimental data, shows usefulness of the method for tracing unknown pipe arrangement.

**Key Words:** Laser, Sensor, Optical Measurement, Laser Range Sensor, Surface-Normal, Wedge-Prism, Pipe Direction, Buried Pipe Layout

## 1. はじめに

工場の敷地には、水や油、ガス等を搬送供給するパイプが配りめぐらされ、日常の運転において流出事故を未然に防ぐ管理が十分に施されている。このため、配管のレイアウトは重要な資料として保管され、老朽化した部分の検査や修理、取替も比較的容易な体制にある。一般家庭においても、規模こそ異なるが、各種のパイプが配りめぐらされていることは同様である。しかし、敷設後の管理は一般的によいとは言えず、レイアウトを記す資料を保管する家庭は少ない。また、工場とは異なり、家の美観を損なわぬよう地中や壁内に配管を埋めることが多い。そして、搬送物の漏れやパイプ内の堆積物等に原因する異常が発生する場合の修理は、土を掘り起こしたり壁を剥がすという大がかりな作業になることが多い。このような場合、直接手で触れられる箇所のパイプを利用して、修理、修繕に役立つ配管レイアウトを調べ出すことが非常に有効と考えられる。

例えば、地面に垂直に立ち上がる水道管があり、そこから地中のどの深さでどちらの方向に曲がるかの埋設状態を調べる技術が役に立つ。現状において埋設状況を把握する手段として、管端面からピアノ線等を挿し入れる方法があるが、突き当たるまでの距離が分かるだけで、曲折方向を識別するのは困難である。ファイバースコープで管内を観察する方法は、長い距離になるとファイバのねじれで方向が正確に掴めない。このため、ねじれの影響を受けない手段が必要となり、計測設備は大がかりになる傾向をもつ。このような用途には、非接触で遠方に突き当たる管壁の傾きを検出する技術が重要と考えられる。

これまで面法線の検出法として、光学的手段による様々な方法が提案されている。例えば、対象面に光を照射しその反射方向を観測する<sup>(1)</sup>、円周状に配置したLED<sup>(2)</sup>やリングパターン光<sup>(3)(4)</sup>の変形を観測する、変調光の位相差を測定する<sup>(5)</sup>、円錐光束とカメラの前進運動を利用し法線と三次元座標を同時に推定する<sup>(6)</sup>等である。また、太いパイプのように視野が広がれば、三次元レンジファインダの使用も考えられる。これには距離増大に伴う分解能低下を明らかにした報告<sup>(7)</sup>もある。これらの検出法は一般に光を放射状に飛ばし、長距離での分解能向上が難しい、システム構成が複雑で

\* 原稿受付 2005年12月15日。

<sup>1</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科(〒950-2181 新潟市五十嵐2の町8050)。<sup>2</sup> 正員、新潟大学工学部。<sup>3</sup> 正員、新潟大学大学院自然科学研究科。

E-mail: okada@bc.niigata-u.ac.jp

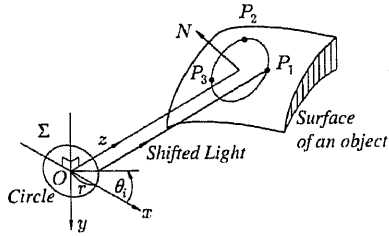


Fig. 1 Light beam shift for the surface-normal measurement.

ある等、実用上の問題がある。距離の測定方向をポリゴンミラー等でスキャンする方法では、Time-of-flight技術を応用した商品化<sup>(8)</sup>や、移動ロボット用レンジセンサの開発が進められている<sup>(9)(10)</sup>。特に、この方法は、ある断面内の距離データを広範囲に取得し易い。ただし、制御が複雑になり、距離の増大とともに分解能が低下する傾向があるのは否めない。その他、2枚のミラー走査や複数のレーザ光源を切り替える方法もあるが、状況は同様である。また、これらの方法は比較的広い空間の認識に用いられるため、細い管の内部の認識には不向きである。

本稿で述べる識別は、小領域面内にある物体までの距離と光照射面の法線を計測可能にする面法線センサを使用する。前半で面法線センサによる計測法の概略を述べ、後半で配管の継ぎ方向を認識する方法を提案する。具体的に、水道管先にあるエルボの取付け角度の計測について、シミュレーションによる計測値の推定、実験の結果、及びセンサの設置ずれが計測結果に及ぼす影響について述べる。そして提案する面法線センサが埋設管先曲折方向の識別に有効なことを示す。

## 2. 面法線計測法

水道管等埋設物の継ぎ部における曲折方向を管端面から計測する方法を提案する。具体的に、土砂を掘り起こさず、また、壁を壊さず管前方にあるエルボまでの距離とその取付け角度の計測法を明らかにする。計測手段として、著者らが提案する面法線センサを用いる<sup>(11)~(13)</sup>。距離0.5~5[m]にある小領域面の法線方向を簡単な構成で入力することを目的とし、2枚の楔形プリズムを用いてレーザ距離計からの照射光を中央の光軸と平行にシフトさせ、さらに回転させることで照射位置を可変とし、円周上の複数点の距離をもとに対象面の法線を計算する。

**2.1 基本原理** 距離計の測定基準点を  $O$ 、前方を  $z$ 、設置基準面を  $x, y$  とするセンサ座標系  $\Sigma$  (原点は  $O$ ) を図1のように定める。照射光を中央の光軸と

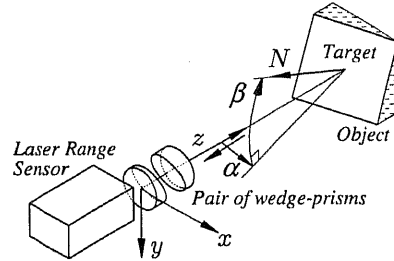


Fig. 2 Illustration of the light paths outgoing to the object and coming back from the target after reflection.

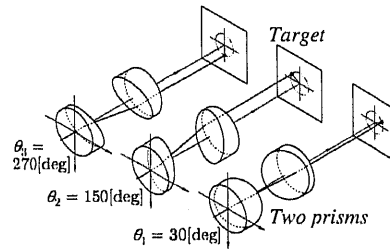


Fig. 3 Rotation angle  $\theta$  takes a role to make the optical beam shift on a cylinder of radius  $r$ .

平行に半径  $r$  だけシフトさせる。この時の回転角をシフト角  $\theta_i$ 、照射位置を  $P_i$ 、対象物表面の法線ベクトルを  $N$  とする。  $\theta_i$  を変えて照射点をずらし、少なくとも任意の3点  $P_i (i=1, 2, 3)$  までの距離を計測して3点を通る平面を同定し、次式から物体表面の法線ベクトル  $N$  (以後、単に法線  $N$  と記す) を算出する。

$$N = (\overline{P_1 P_2} \times \overline{P_1 P_3}) / |\overline{P_1 P_2} \times \overline{P_1 P_3}| \quad (1)$$

これは、照射面が平面でない時、3点中央の法線  $N$  と異なるが、表面の連続性を考えると曲率半径が大きい場合、照射面を代表する法線と見なせる。本センサはこの原理に基づく。

図2は、一對の楔形プリズムと距離計を組み合わせたセンサを用いて、平板面法線を計測する状況を示す。法線の  $y$  軸、 $x$  軸回りの回転角をそれぞれ  $\alpha, \beta$  と定義する。そして、図3のように筒を120[deg]ずつ回転させて3点の距離を計測し、式(1)から法線  $N$  を求め、次式から  $\alpha, \beta$  を逆算する。

$$\alpha = \arctan(-n_x/n_z) \quad (2)$$

$$\beta = \arcsin(-n_y) \quad (3)$$

ただし、 $n_x, n_y, n_z$  は、法線  $N$  の  $x, y, z$  成分をそれぞれ表す。

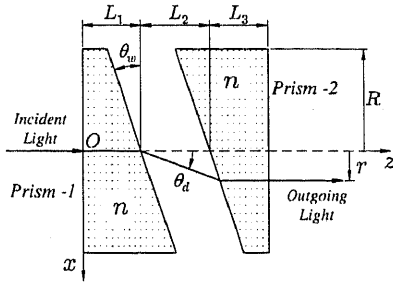


Fig. 4 Light beam shift by making two wedge-prisms face together with a parallel gap.

一般に照射点数（シフト角の分割数に等しく、記号  $M$  で表す）を増すと法線計測の誤差は低減する<sup>(14)</sup>。この場合、法線  $N$  は、 $P_i$  ( $i=1-M$ ) により定まる最小自乗近似平面から算出する。なお、シフト角は、全周  $360[\text{deg}]$  を等分割する値にするのが一般的である。

2.2 ビームシフト光学系 照射光を平行にシフトさせるための光学系として、図4に示す円筒状楔形プリズムを用いる。ただし、2枚のプリズムの寸法や光学特性は同一で、隙間を作って平行に向き合わせる。使用するプリズムの仕様は、楔角  $\theta_w=18.13[\text{deg}]$ 、中心部プリズム厚  $L_1=L_3=7.09[\text{mm}]$ （最薄部厚  $3[\text{mm}]$ ）、半径  $R=12.5[\text{mm}]$ 、使用波長（ $635[\text{nm}]$ ）における屈折率  $n=1.515$  である。第1プリズムへの入射光は第2プリズムから平行に出射する。図中の偏向角  $\theta_d$  とビームシフト  $r$  は、 $\theta_w$ 、 $n$ 、 $L_2$  を用いて

$$\theta_d = \arcsin(n \sin \theta_w) - \theta_w \quad (4)$$

$$r = L_2 / (\cot \theta_d - \tan \theta_w) \quad (5)$$

2枚のプリズムを一体化して筒内に固定し、筒軸周りに回転させると出射光は入射光軸から平行に  $r$  だけ離れる。前記寸法下の  $\theta_d$  は、式(4)から  $10.0[\text{deg}]$  となる。また、本稿では  $r$  を  $6[\text{mm}]$  に設定するため、 $L_2$  は式(5)を逆算して  $32.07[\text{mm}]$  となる。

図5は、距離計に光学系を組み合わせて前記方法を実現する筒回転駆動装置付面法線計測装置の外観を示す。ただし、距離計としてパルス変調光の位相差計測を原理とする市販のレーザー距離計 Leica Geosystems 製 DISTO pro4a を用いる<sup>(15)</sup>。これは、光伝搬時間を入力情報とするので、挿入した楔形ビームシフト光学系内に生じる光路差の影響を受ける。このため、プリズム内の通過時間と、プリズム間隙内斜進時間に関わる距離補正が必要である。照射面からの反射光が照射光と同様プリズムを通るため光路差  $z_{adj}$  は、図4中の変数

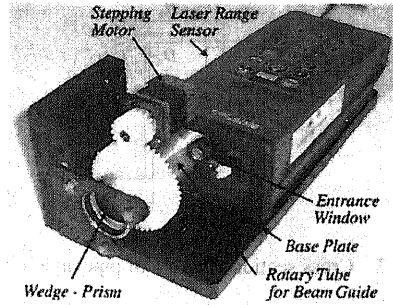


Fig. 5 Outlook of the renovated setup with the prisms driven by a stepping motor.

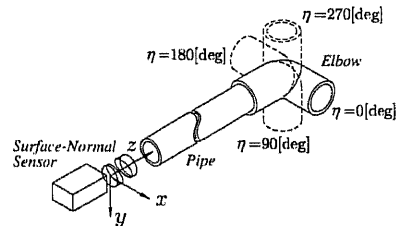


Fig. 6 Measurement of a connected pipe direction at an elbow joint.

を用いて

$$z_{adj} = (n-1)(L_1 + L_3) + (\cos \theta_d - 1)L_2 \quad (6)$$

$r$  が  $6[\text{mm}]$  の時の  $z_{adj}$  は  $6.82[\text{mm}]$  と計算される。この値は、正確な距離を定める際に、組込み前の距離計単独の読み値から減じる量として装置に固有な補正距離となる。この他、計測精度を高める目的で光学系の取付け位置や角度を調整し、シフト量及び光路長を補正する<sup>(12)</sup>。

### 3. 埋設管先曲折方向の識別

3.1 識別対象 水道管を対象にエルボの取付け角の識別を考察する。実際に、日本工業規格 JIS K6742 及び K6743（水道用硬質塩化ビニル管、同継手）準拠の VP 管と直角エルボを取上げる。管の呼び径（管の内径  $D_n$ ）は、 $20, 25, 30, 40, 50[\text{mm}]$  の5種類とする。管内は灰色（マンセル N4 相当）で使用物には未使用物程の光沢はない。

計測状況を図6に示す。管の先端に取付けられるエルボの方向角を  $x$  軸を基準とする角度  $\eta$  で表す。管の長さは  $0.5 \sim 5[\text{m}]$  である。2箇所支持される管を3方向に位置調整可能なステージに置き、 $z$  軸を管中心軸上に位置付ける。エルボのもう一方の口には更に別の管が繋がる。ただし、実験では扱いを容易にするた

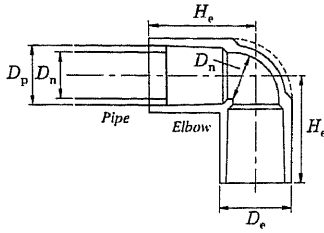
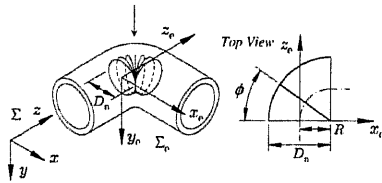


Fig. 7 Cross section diagram of pipe and elbow.

Table 1 Dimensions of pipe and elbow in millimeter.

Nominal diameter $D_n$	$D_p$	$D_e$	$H_e$
20	26	33	50
25	32	40	58
30	38	46	65
40	48	57	82
50	60	70	96

Fig. 8 Inside of the elbow and definition of the coordinate system  $\Sigma_e$ .

め結合管を短く切り落とした。

管及びエルボの断面図を図7に、呼び径毎の寸法を表1に示す。エルボ内壁部は、呼び径  $D_n$  と同じ直径で直角に方向を変えるように設計されているのが分かる。同図左から管内部を進む照射光は、エルボ内壁部を照射し、反射光の一部は再び左方に戻る。エルボの結合部はテーパ状であるが、曲がり部内壁は一様に変形するのがほとんどである。

**3.2 計測される距離の理論値** 計測面を定義するセンサ座標系を図8のように  $\Sigma$  で表す。また、エルボ座標系  $\Sigma_e$  の原点を方向転換開始円の中心に取り、座標軸を同図左のように定義する。エルボ内壁部は直径  $D_n$  (半径を  $R$ ) の円集合である。同図右は上からの透視図を示す。  $z_e$  軸上にあるエルボ内壁面は  $45[\text{deg}]$  以下の傾きであることが分かる。  $\phi$  を媒介変数にすると、  $x_e, y_e$  を指定する時の照射面上  $z_e$  値は、以下の連立解として一意に定まる。

$$\{x_e - R(1 - \cos \phi)\}^2 + y_e^2 + (z_e - R \sin \phi)^2 = R^2 \quad (7)$$

$$z_e = (R - x_e) \tan \phi \quad (8)$$

事実、  $\phi$  を消去し次式が得られる。

$$z_e^2 = \left( R + \sqrt{R^2 - y_e^2} \right)^2 - (R - x_e)^2 \quad (9)$$

Table 2 Calculated results of  $\alpha_a, \beta_a$  and  $\eta_a$  under certain conditions of  $D_n, \eta$  and  $M$ .

$D_n$	$\eta$	$M$	$\alpha_a$	$\beta_a$	$\eta_a$
20	0	3	32.64	3.45	6.38
		4	32.33	0	0
	90	3	0	-35.30	90
		4	0	-32.33	90
	180	3	-32.64	3.45	173.62
		4	-32.33	0	180
270	3	0	29.88	270	
	4	0	32.33	270	
50	0	3	30.37	1.18	2.33
		4	30.32	0	0
	90	3	0	-31.36	90
		4	0	-30.32	90
	180	3	-30.37	1.18	177.67
		4	-30.32	0	180
270	3	0	29.35	270	
	4	0	30.32	270	

さらに、  $z_e$  軸を  $z$  軸に一致させ、エルボを図6に示す取付け角  $\eta$  にする時、座標系  $\Sigma$  の  $x, y$  と  $\Sigma_e$  の  $x_e, y_e$  との間に以下の関係がある。

$$\begin{pmatrix} x_e \\ y_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \eta & \sin \eta \\ -\sin \eta & \cos \eta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (10)$$

式(10)を式(9)に代入し、両座標系の原点間の距離  $Z$  を用いると、座標系  $\Sigma$  の  $x_i, y_i$  座標に対するエルボ内壁面までの距離  $z$  を計算できる。

$$z = Z + z_e \quad (11)$$

$$= Z + \left[ \left\{ R + \sqrt{R^2 - (-x_i \sin \eta + y_i \cos \eta)^2} \right\}^2 - \left\{ R - (x_i \cos \eta + y_i \sin \eta) \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

**3.3 法線の理論値** 座標系  $\Sigma$  上の  $(x_i, y_i)$  は、シフト角  $\theta_i$  ( $i=1-M$ ) を使い

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \theta_i \\ -r \sin \theta_i \end{pmatrix} \quad (13)$$

同時に、対応する  $z_i$  が求まる。そして、  $M$  個の点を順次照射して得られる最小自乗近似平面から法線  $N$  を求める。ただし、照射領域が平面でない場合、法線  $N$  は管中央軸延長上にある領域の法線と異なるが、前記理由により代表する法線とみなし、式(2)、(3)を使って  $\alpha, \beta$  を算出し、下式からエルボの取付け角  $\eta_a$ 、すなわち結合管の曲折方向を求める。

$$\begin{aligned} \eta_a &= \arctan(n_y/n_x) \\ &= \arcsin \left( n_y / \sqrt{n_x^2 + n_y^2} \right) \\ &= \arcsin \left( -\sin \beta / \sqrt{1 - \cos^2 \alpha \cos^2 \beta} \right) \end{aligned} \quad (14)$$

具体的に、  $r=6[\text{mm}]$ 、シフト角  $\theta_i$  を  $M=3$  の時、  $30, 150, 270[\text{deg}]$ 、  $M=4$  の時、  $0, 90, 180, 270[\text{deg}]$  と

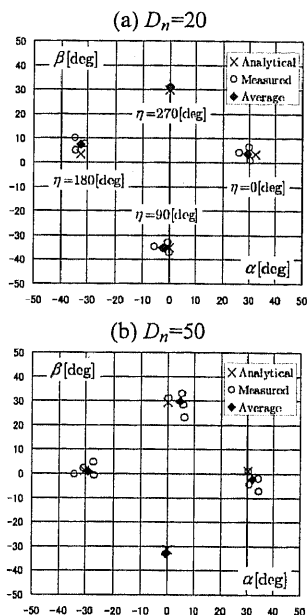


Fig. 9 Comparison of analytical and experimental results ( $M=3$ ).

し、またエルボの呼び径  $D_n$  を 20 及び 50[mm] とし、 $\eta$  の設定値を 0, 90, 180, 270[deg] とする時の  $\alpha$ ,  $\beta$  の計算値  $\alpha_a$ ,  $\beta_a$ , 及び  $\eta$  の計算値  $\eta_a$  を表 2 に示す。なお、この理論値は照射光の平行性から配管長に関係しない。 $M=3$  の場合、ビームシフトパターンは上下非対称となるため、 $\eta$  が 0 及び 180[deg] の時、識別に違い (誤差) を生じる。これは  $D_n=20$ [mm] の時、最大 6[deg] 程度である。 $M=4$  では理論上の誤差はない。なお、エルボまでの距離は  $z_i$  の平均値から求める。厳密に言えば、対象面が凹面のため、管中心軸延長上の距離より短くなるが、その差は、曲率半径の小さい  $D_n=20$ [mm] の時、最大でも 1.5[mm] 程度である。

**3.4 識別実験** 管先に繋がるエルボの設定角度を変え、センサを使って計測した。距離データが最大になる方向を手掛かりに光軸を合わせた。 $M=3$  と 4 の実験結果を図 9 と図 10 に示す。ただし、配管長はいずれも 1[m] の場合であり、前節から求める計算値を  $\times$ 、5 回の測定結果を  $\circ$ 、その平均値を  $\blacklozenge$  で表す。

平均誤差の集計結果を図 11 に示す。ただし、図中の  $\Delta\alpha$ ,  $\Delta\beta$  は測定結果の平均値から真値を引いた値、 $\Delta\gamma$  は下式で計算される実質的な角度誤差の平均値である。

$$\Delta\gamma = \arccos(\cos \Delta\alpha \cos \Delta\beta) \quad (15)$$

この結果から、 $D_n=20, 25$  の場合、ほぼ 6[deg] 以内の

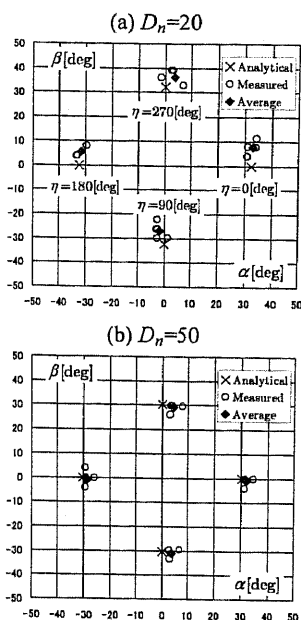


Fig. 10 Comparison of analytical and experimental results ( $M=4$ ).

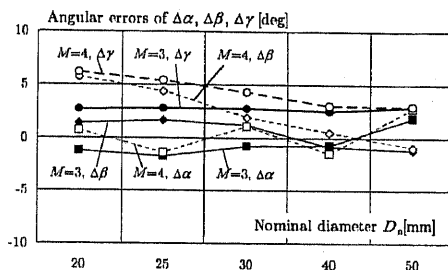


Fig. 11 Average of experimental errors related to  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  depending on  $D_n$ .

誤差で計測できることが分かる。

式 (14) を使って計測されるエルボの取付け角  $\eta_a$  を求める。設定値  $\eta$  との誤差  $\Delta\eta$  を図 12 に示す。この結果から、 $D_n$  の大きい方が誤差を小さくする傾向にあるのが分かる。20[mm] で誤差 15[deg] 以内、30[mm] 以上で 5~10[deg] である。また、 $M$  が 3 と 4 で大きな差は見られない。これらの結果から、結合管の曲折角の識別が可能であることを確認できる。

#### 4. センサの取付け不具合の影響

前節では、センサの光軸が管中央軸を通り、エルボが管に対し直角に曲がる場合を想定した。しかし、セ

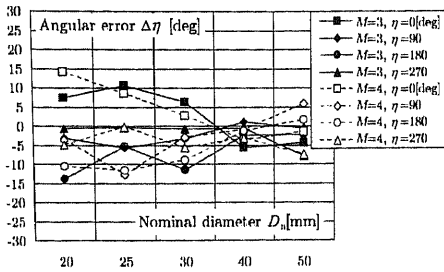


Fig. 12 Error of measured angles of connected pipe ( $=\Delta\eta$ ) at elbow joint depending on  $D_n$ .

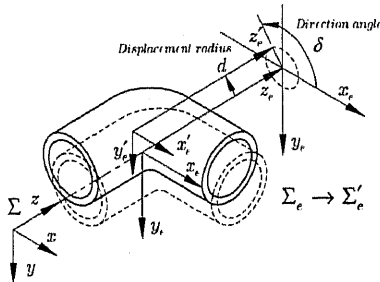


Fig. 13 Error parameters of  $d$  and  $\delta$  in coordinate  $\Sigma_e$ .

ンサの取付けに不具合があると、法線の計測は影響を受ける。その主要因子は、管が光軸に対して平行にずれる場合、及びエルボが管に対して傾く場合にあると考えられる。

**4.1 光軸ずれの影響** 管軸がセンサ軸に対し平行にずれる時の影響を調べる。図13のように、光軸ずれを距離  $d$ 、方向角  $\delta$  で与える時、式(13)は次となる。

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \theta_i - d \cos \delta \\ -r \sin \theta_i + d \sin \delta \end{pmatrix} \quad (16)$$

そこで、 $d$ を1及び2[mm]とし、 $\delta$ を10[deg]刻みで変える場合の $\alpha$ 、 $\beta$ を求め、 $M=3$ 、 $D_n=20$ 及び50の結果を図14に示す。 $\eta$ は45[deg]刻みで設定した。中央のデータは $d=0$ の場合である。 $d$ を1、2[mm]に増すと、 $\alpha$ と $\beta$ はともに大きく変動するのが分かる。図(a)と(b)を比較すると、 $D_n$ が小さい時、影響が大になることも分かる。ずれに計測誤差が加わると誤認識の危険性もある。従って、実測時には、光軸合わせのための補助治具の使用や手順の確認により、ずれを最小限に抑える必要がある。

**4.2 角度ずれの影響** エルボが管に対して傾いて取付けられる場合の影響を調べる。図15に示す通り、エルボ座標系の原点を中心に、同座標軸が角 $\xi$ だけ $\zeta$ の角度方向へ回転する時、式(9)の $z_e$ 値が変化する

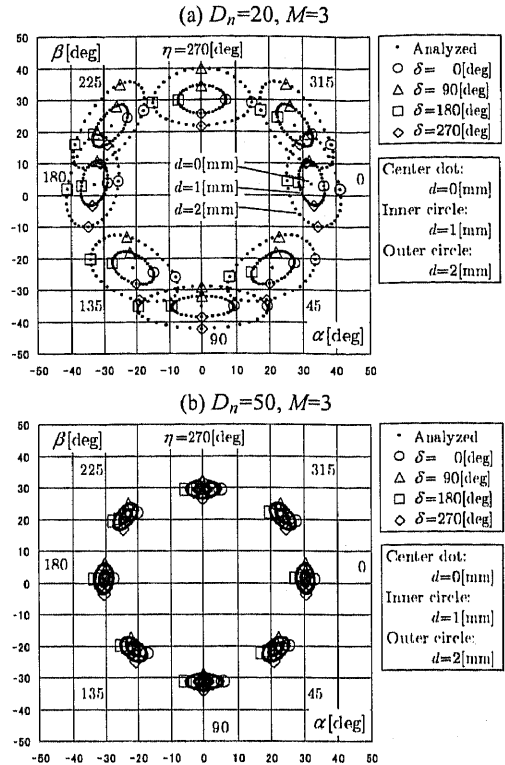


Fig. 14 Error analysis of  $\eta$  affected by  $d$  and  $\delta$ .

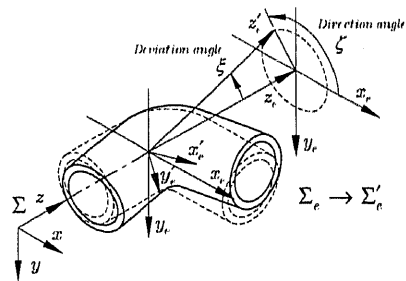


Fig. 15 Error parameters of  $\xi$  and  $\zeta$  in coordinate  $\Sigma_e$ .

る。この状況では、 $z_e$ 軸が $(\sin \xi \cos \zeta, -\sin \xi \sin \zeta, \cos \xi)$ に回転する。 $\xi$ を5[deg]とし、 $\zeta$ を10[deg]刻みで変える場合の $\alpha$ 、 $\beta$ を求め、 $M=3$ 、 $D_n=20$ 及び50の結果を図16に示す。ただし、 $\eta$ は45[deg]刻みとした。図から、 $\eta=0, 180$ [deg]の場合、 $\alpha$ 方向の変化はほとんど見られず、 $\beta$ 方向のみ変化する。また、 $\eta=90, 270$ [deg]の場合、 $\alpha$ と $\beta$ の変化傾向は逆転する。その量は、 $\zeta$ に依存し、最大でほぼ $\xi$ に相当する誤差となり、 $\xi$ の増大とともに変化の幅が広がる。これは、エルボ内壁面の形状に支配される結果であり、 $\zeta$ が $\eta$ と直交する方向に傾く時に大きな誤差を生じ易

文 献

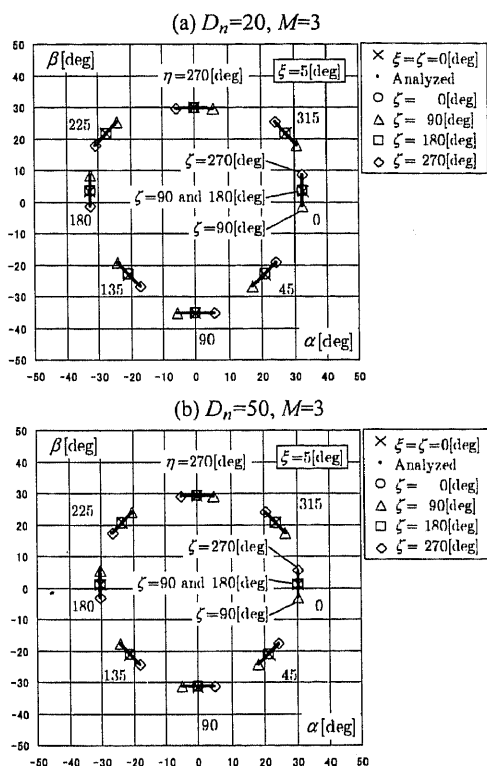


Fig. 16 Error analysis of  $\eta$  affected by  $\xi$  and  $\zeta$ .

いことを示す。このずれは、エルボ取付け時に生じ、計測時には補正できない。このずれが大きい場合は、より多くの点の内壁面距離を用い  $\eta$  を識別する必要があると考える。

5. ま と め

光照射を環状に走査し、小領域中の複数点の距離情報に基づいて照射面の法線を計測するセンサを用い、配管の継ぎ方向を識別する方法を提案した。具体的に、水道管に結合されるエルボを対象に管が延びる方向を計測する原理と、計測精度を支配する原因を明らかにした。また、計測精度を上げるには、光軸合わせが重要であることを示した。長さ 1[m]、内径 20~50[mm]の管とエルボで実験を行った結果、曲がり角を 15[deg] 以内の誤差で識別可能であることを示した。内径 30[mm] 以上では、5~10[deg] の誤差であった。実用になる結果と考える。この技術は、地震等災害発生時において早期復旧に役立つ配管レイアウトの割出しに有効と考える。今後は、90[deg] 以外のエルボに対する管継ぎ方向の検出や、より長い管を対象にする計測を検討していく予定である。

- (1) Ikeuchi K., Determining Surface Orientations of Specular Surfaces by Using the Photometric Stereo Method, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 3, No. 11 (1981), pp. 661-669.
- (2) Nakamura Y. and Hanafusa H., A New Optical Proximity Sensor for Three Dimensional Autonomous Trajectory Control of Robot Manipulators, *Proceedings of '83 International Conference on Advanced Robotics*, (1983), pp. 179-186.
- (3) Kinoshita G. and Idesawa M., Optical Range Finding Sensor for Measuring System by Projecting Ring Beam Pattern, *Proceedings of '85 International Conference on Advanced Robotics*, (1985), pp. 177-184.
- (4) Okada T. and Rembold U., Proximity Sensor Using a Spiral-Shaped Light Emitting Mechanism, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, Vol. RA7, No. 6 (1991), pp. 798-805.
- (5) Masuda R., Multi-functional Optical Proximity Sensor by Using Phase Information, *Proceedings of '85 International Conference on Advanced Robotics*, (1985), pp. 169-176.
- (6) Feng K. et al., The Measurement of 3-D Object by Pattern Projection and Camera Advance, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 5, No. 6 (1987), pp. 442-451.
- (7) Nagao K. et al., Range Image Matching for Object Recognition in Real Scene, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, Vol. 40, No. 1 (2004), pp. 10-17.
- (8) Itoh T., Laser Measurement Systems: LMS Series, *Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol. 21, No. 1 (2003), pp. 45-47.
- (9) Yuda S. and Ohya A., Range Sensor System for Environment Recognition of Moving Robots (Summary of R&D) (in Japanese), *Robot*, Vol. 161 (2004), pp. 19-22.
- (10) Shimaji N., Range Sensor System for Environment Recognition of Moving Robots (Progress Report) (in Japanese), *Robot*, Vol. 161 (2004), pp. 23-25.
- (11) Hasegawa N. and Okada T., Measurement of a Plane-Normal by Shifting Light Spot Position of a Range Sensor, *Proceedings of 2004 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No. 04-4 (2004), 2A1-H15.
- (12) Hasegawa N. et al., Measurement of Surface-Normal Using a Range Sensor with a Pair of Wedge-Prisms, *Proceedings of IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 2005*, (2005), pp. 1744-1749.
- (13) Hasegawa N. and Okada T., Error Analysis on Beam Shifting Optical System for Plane-Normal Measurement, *Proceedings of 22nd Annual Conference of Robotics Society of Japan*, (2004), 2A12.
- (14) Hasegawa N. et al., Beam Spot Positioning Algorithm for Improving Measurement Accuracy of a Surface-Normal Sensor, *Proceedings of 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics*, No. 05-4 (2005), 1P1-N-032.
- (15) *User Manual of DISTO pro4/pro4a*, (2001), Leica Geosystems AG.