

2平行レーザーシートの投光による下水管形状計測ロボット*

川末紀功仁^{*1}, 酒井将司^{*2}, 脇山輝史^{*2}, 大山茂樹^{*3}, 千田 尚^{*4}

Sewer Pipe Measurement Robot Using Parallel Laser Sheets

Kikuhito KAWASUE^{*5}, Shoji SAKAI, Terufumi WAKIYAMA,
Shigeki OHYAMA and Hisashi SENDA

^{*5}Miyazaki University, Faculty of Engineering
1-1, Gakuen Kibanadai Nishi, Miyazaki, 889-2192, JAPAN

Sewer pipes over 380,000 kilometers in total are existed under the ground in Japan. However, worn pipes have been increased and a number of subsidences of a ground caused by the collapse were occurred. Recently, the inspection of the pipe is executed by the moving cart with CCD camera. Currently human inspector judges the condition of the pipe by the images recorded by the CCD camera. It should be noted that the judgment by the human causes the individual variation since it depends on the person's sense. Quantitative measurement is required.

In this paper, the 3D quantitative measurement system for a sewer pipe is introduced. Two parallel laser sheets are projected from the inside of the pipe and the two circular laser streaks appeared on the inside surface of the pipe are recorded by the CCD. The measurement of the cross-section is established by analyzing the recorded streaks. Amount of displacement between two circular streaks are used to detect the tilt of the system against the axis of the pipe. The pipe is reconstructed by stacking of the cross-sections on considering the moved distance and the tilt of the robot. The automatic calibration using a liquid crystal display is also introduced in this paper. The calibration method reduces the lens distortion of a wide-angle lens and a high accurate measurement is established. Experimental result shows the feasibility of the system.

Key Words: Sewer, Pipe measurement, Image processing, Laser, Calibration, 3 Dimensional

1. 緒 言

国内の下水管は高度成長期から急激に整備され、平成16年度末における下水管路の延長は全国で約38万キロに達している。しかしながら、設計耐用年数(約50年)を超過する下水管が今後増加することが危惧されている⁽¹⁾。道路陥没は人身事故や交通障害などを引き起こし、社会的に重大な影響を与えかねないため早急な対応が必要である。現在、国内に埋設されている下水管の約8割は人が入ることができない直径450mm以下の管であるため、CCDカメラを備えた下水管走行車^{(2)~(4)}によって撮影された画像の観察から管の状態を判断する方法がとられている。しかしながら、人の感覚的な判断による検査では検査結果に作業者の

個人差が生じるので定量的な計測が望まれる。福田ら⁽⁵⁾⁽⁶⁾によって超音波エコーを用いて肉厚を測定することで空調管の腐食状態を定量化する試みがなされているが、下水管の場合、管内の凹凸が大きく、探触子と管内面の良好な接触が保てないため、下水管走行車での利用は難しい。

一方、CCDとレーザを組み合わせた光切断法による画像計測手法は非接触計測が可能であり、細管内面の損傷を計測する方法などが提案されている⁽⁷⁾⁽⁸⁾。しかしながら、下水管など比較的大径の管内形状を下水管走行車で計測するには、管軸と走行車の相対的な傾きを考慮する必要がある。

そこで、CCDカメラと平行な2枚のレーザーシートの投光により下水管形状および管軸とロボット本体の相対的な傾きを同時に計測するロボットを試作した⁽⁹⁾。管内部から管軸に対し垂直方向にレーザーシートを投光し、管内面に現れるリング状軌跡をCCDで撮影することで管内面の断面形状を計測する。また、投光するレーザを2枚の平行なレーザーシートとすると管内面には2つのリング状軌跡が現れる。走行ロボットが管軸

*原稿受付 0000年00月00日

^{*1} 正員, 宮崎大学工学部 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

^{*2} 宮崎大学大学院工学研究科

^{*3} ビーマウントプロダクツ

^{*4} (株)大林道路

E-mail: kawasue@cc.miyazaki-u.ac.jp

に対して傾いていると、撮影される2つのリング状軌跡が傾きに依りてずれるのでそのずれ量から走行ロボット本体の傾きを検出する。

本論文では、計測原理、キャリブレーションおよび下水管形状計測結果を紹介する。

2. システム構成

図1に計測装置の全体像を示す。ロボット本体はパルスモータによって駆動される。ロボット前方に取り付けられたレーザ投光器によって投光された2平行レーザ光を管内で周方向に高速回転させ、管内面に現れたリング状軌跡の形状をCCDカメラで撮影する。下水管内面が腐食によって変形しているとリング状軌跡の形状変化として現れる。撮影されたリング状軌跡をコンピュータに取り込み、画像解析を行う。

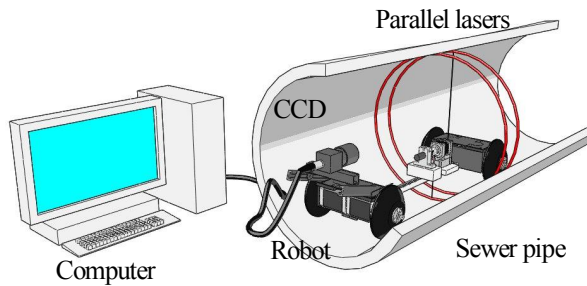


Fig.1 System Setup

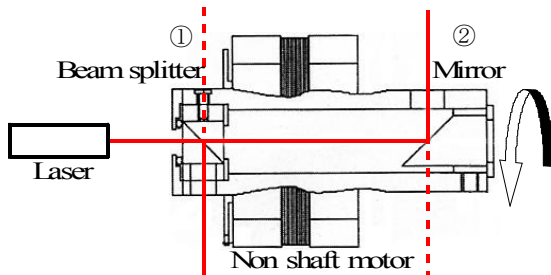


Fig.2 Laser projector

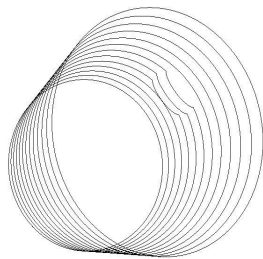


Fig.3 Reconstructed image of the pipe

図2に製作したレーザ投光器の概観を示す。中空軸モータの中空軸片側に透過率50%のビームスプリッタ①を固定し、逆側にはビームスプリッタの反射面に対して180度位相がずれるようにミラー②を取り付けている。これによりモータ軸に対し垂直方向に2本のレーザ光が投光される。モータの中空軸を高速回転することで管内面に2つのリング状軌跡が描かれる。図3のようにリング状軌跡を基に算出した断面形状をロボットの移動距離と管軸に対するロボットの傾きを考慮しながら積み重ねることで管内面の三次元形状を復元する。

3. キャリブレーション

画像計測におけるキャリブレーションは、その善し悪しが計測精度に影響するため重要な作業であるが、一般的に煩雑である。そこで、液晶ディスプレイに表示された基準点をCCDカメラで撮影することにより、レンズ歪みを考慮したキャリブレーションを自動的に行う手法を提案する。液晶の膨大な数の発光素子を有効利用したものであり、自動的に高精細なキャリブレーションが実現できる。本システムではレンズ歪みを補正した後に、カメラ座標とワールド座標の関係を求めることで正確なキャリブレーションを行う。

3.1 歪み補正 国内で使用されている下水管の径は約200~700mmで様々である。ロボットの小型化のためにカメラと計測断面間の距離を長く取れないので、下水管の様々な径を網羅するには広角レンズを使用する必要がある。ただし、広角レンズは、樽型歪みが大きいので、予めこの歪みを補正する必要がある。Tsai⁽¹⁰⁾らは歪み補正前の受像面上の点 (X_d, Y_d) と補正後の (X_u, Y_u) の関係を以下のように定義している。

$$\begin{cases} X_u = X_d(1+kR^2) \\ Y_u = Y_d(1+kR^2) \end{cases} \quad (1)$$

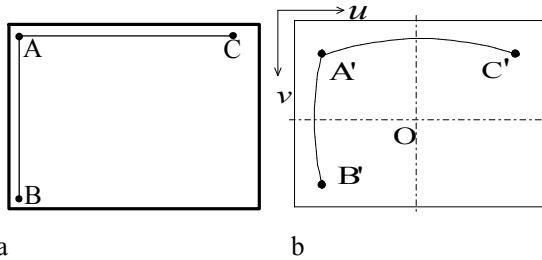
ここで

$$R^2 = X_d^2 + Y_d^2 \quad \text{である。}$$

(X_u, Y_u) および (X_d, Y_d) はレンズの光軸とCCDの交わる光軸中心を原点Oとした座標系にあり、Rはこの原点から (X_d, Y_d) までの距離とする。ただし、コンピュータに取り込んだ画像データの中心がこの光軸中心Oと一致しているとは限らない。レンズの焦点距離を変化させ、画像上で変位しない部分を探すなど⁽¹¹⁾の光軸中心Oを見つける方法が考えられるが、本システムでは液晶ディスプレイを用い、次のような手続きで画像デ

ータにおける光軸中心Oの位置および式(1)の定数kの値を算出した。図4において、

- (1) 液晶ディスプレイ上の左上角に点Aを表示させる。
- (2) 液晶ディスプレイをCCDカメラで正面から撮影する。
- (3) 撮影された画像上(図4b)で点A'と点B'の水平座標(u)が等しくなるように点Bを液晶ディスプレイ左下角に表示させる。
- (4) (3)と同様に撮影された画像上で点A'と点C'の垂直座標(v)が等しくなるように点Cを液晶ディスプレイ右上角に表示させる。
- (5) 液晶ディスプレイ上で直線ABおよび直線ACを結ぶ



a. Base points displayed on the LCD
b. Distorted image recorded by CCD with wide lens.

Fig. 4 Lens distortion correction procedure

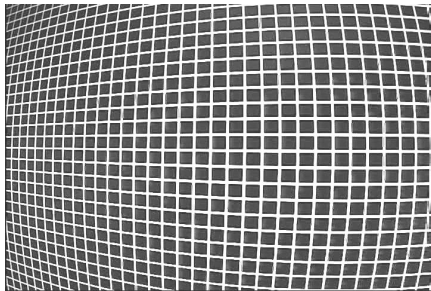


Fig. 5 Original image with distortion

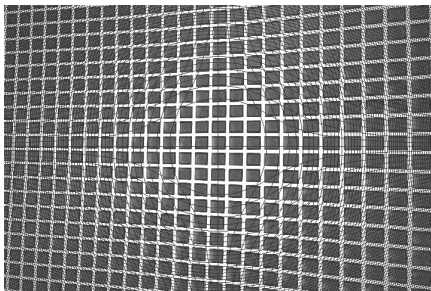


Fig.6 Reconstructed image by distortion reduction procedure

- (6) 樽型に歪んで撮影された曲線A'B'および曲線A'C'の近似曲線を最小2乗法によって求める。
- (7) 求めた近似曲線のuおよびvの極小値から樽型歪みの中心Oを算出する。これがレンズ光軸とCCDの交わる光軸中心Oである。
- (8) 曲線A'B'上の点が式(1)によってXuが一定な直線上に変換されるようにkの値を決定する。

広角レンズで撮影した画像の例を図5に、また、上述した手法によって歪み補正を行った結果を図6に示す。レンズによっては歪みが若干残るが、次節で説明する通り、画像を小領域に分け、それぞれの領域毎に結像面画像とワールド座標の変換式を作成することで、更に歪みが補正される。

3. 2 液晶を用いたキャリブレーション 図7のようにカメラの焦点からCCDの結像面までの距離をfと置くと、計測点P(x_p,y_p,z_p)に対応する結像面上の点(x_i,y_i)は、カメラの焦点を原点としたカメラ座標系において、

$$x_i = f \frac{x_p}{z_p}, y_i = f \frac{y_p}{z_p} \quad (2)$$

で与えられる⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

また、z_c=λとおいて線形化すると、この関係は以下の行列で表される。

$$\lambda \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

ワールド座標系(x_w,y_w,z_w)で表すために拡大、回転と平行移動を考慮すると、3×4のC行列(カメラパラメータ)を用いて、以下のように記述できる。

$$\lambda \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

また、ワールド座標のx_w,y_w軸を計測位置となるレーザーシート面上に重ねると、z_w=0となり、以下のように簡略化できる。

$$\lambda \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} \\ c_{31} & c_{32} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

カメラパラメータCは、既知の世界座標 (x_w, y_w) と対応する結像面座標 (x_i, y_i) の組み合わせを複数点入力することで決定できる。本システムでは、図8のようにレーザ投光面に液晶ディスプレイを設置し、液晶ディスプレイに表示されたドットパターンをCCDカメラで撮影することでこの入力を自動的に行う⁽¹⁴⁾。正確なキャリブレーションを実施するために、できるだけ多くの組み合わせを入力し、結像面の小領域ごとに異なるカメラパラメータを算出する。短時間で多数の組み合わせを入力するために、各点の点滅方法を2進コード化することで各点の識別を行う。CCDカメラで点滅に同期させて撮影し、時系列的な点滅の状態から各点を区別する。例えば表1に従って各校正点を4回点滅させ、時系列的に並べると15個の校正点の識別ができる。n回の点滅で $2^n - 1$ 個の校正点を識別できるので、図9のような10回の点滅では1,023個の対応点を識別できる。100万個の基準点でも20回の点滅でコード化が可能である。カメラの取り込み周期に同期させて撮影することで瞬時に多数の組み合わせを検出できる。検出された各点の世界座標と結像面座標の組み合わせを基に対応表(表2)を作成する。式(5)を展開して整理すると

$$\begin{cases} c_{11}x_w + c_{12}y_w + c_{13} - c_{31}x_i x_w - c_{32}x_i y_w = x_i \\ c_{21}x_w + c_{22}y_w + c_{23} - c_{31}y_i x_w - c_{32}y_i y_w = y_i \end{cases} \quad (6)$$

の2つの式が得られる。したがって、 c_{11} から c_{32} までの8個の未知数は、同一直線上にない4個以上の基準点を用いて以下の連立方程式により算出する。

$$\begin{bmatrix} x_{w1} & y_{w1} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{i1}x_{w1} & -x_{i1}y_{w1} \\ 0 & 0 & 0 & x_{w1} & y_{w1} & 1 & -y_{i1}x_{w1} & -y_{i1}y_{w1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{wn} & y_{wn} & 1 & 0 & 0 & 0 & -x_{in}x_{wn} & -x_{in}y_{wn} \\ 0 & 0 & 0 & x_{wn} & y_{wn} & 1 & -y_{in}x_{wn} & -y_{in}y_{wn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{12} \\ \vdots \\ c_{31} \\ c_{32} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{i1} \\ y_{i1} \\ \vdots \\ x_{in} \\ y_{in} \end{bmatrix} \quad (7)$$

これを

$$A \cdot C = I \quad (8)$$

と表すと、最小2乗法により、

$$C = (A^T A)^{-1} A^T I \quad (9)$$

で、未知数 c_{11} から c_{32} が算出される。

よってカメラ座標から世界座標への算出式は以下のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{31}x_i - c_{11} & c_{32}x_i - c_{12} \\ c_{31}y_i - c_{21} & c_{32}y_i - c_{22} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} c_{13} - x_i \\ c_{23} - y_i \end{bmatrix} \quad (10)$$

表2をもとに基準点を4個以上含む小領域ごとに異なる変換式を算出することで、高精細なキャリブレーションが実現できる。

小領域ごとに定められた変換式(10)を用いてあらかじめCCDの全面素について変換テーブルを作成する。図10は広角レンズで撮影された画像(図5)の全面素を作成された変換テーブルによって世界座標に変換し、表示し直したものである。広角レンズによって斜めから撮影された格子(図5)が3.1と3.2のステップによって歪みの無い世界座標データに変換されていることがわかる。レーザシート面上でキャリブレーションを行うため、図10から確認できるように世界座標データは同一平面上に存在する。計測時には、リング状軌跡が現れる画素位置に対応する世界座標を作成した変換テーブルから参照することで、リアルタイム計測を実現する。

精度評価のために、液晶ディスプレイの任意の位置に輝点を表示し検証を行ったところ、計測誤差は平均0.16mmで最大でも0.4mm程度であった。

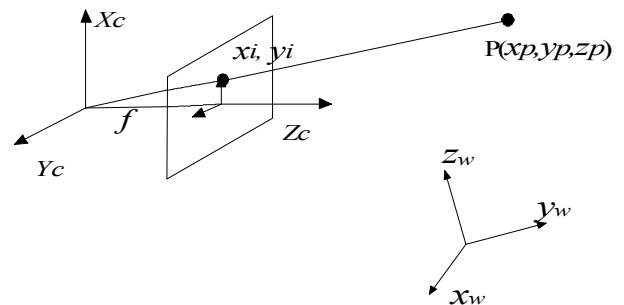


Fig.7 Relation between camera coordinate and world coordinate

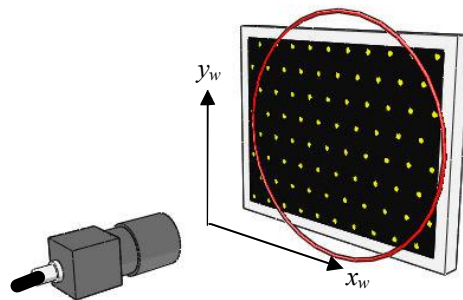


Fig. 8 Calibration setup

Table 1 Encoded pattern on LCD (1:On 0:OFF)

| | T ₁ | T ₂ | T ₃ | T ₄ |
|----------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Point 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| Point 2 | 0 | 0 | 1 | 0 |
| Point 3 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| Point 4 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| Point 5 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| Point 14 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| Point 15 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Table 2 Look up table between world coordinate and camera coordinate

| World coordinates | | Camera coordinates | |
|-------------------|----------|--------------------|----------|
| x_{w1} | y_{w1} | x_{i1} | y_{i1} |
| x_{w2} | y_{w2} | x_{i2} | y_{i2} |
| x_{w3} | y_{w3} | x_{i3} | y_{i3} |
| x_{w4} | y_{w4} | x_{i4} | y_{i4} |
| x_{w5} | y_{w5} | x_{i5} | y_{i5} |
| x_{w6} | y_{w6} | x_{i6} | y_{i6} |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| x_{wm} | y_{wm} | x_{im} | y_{im} |

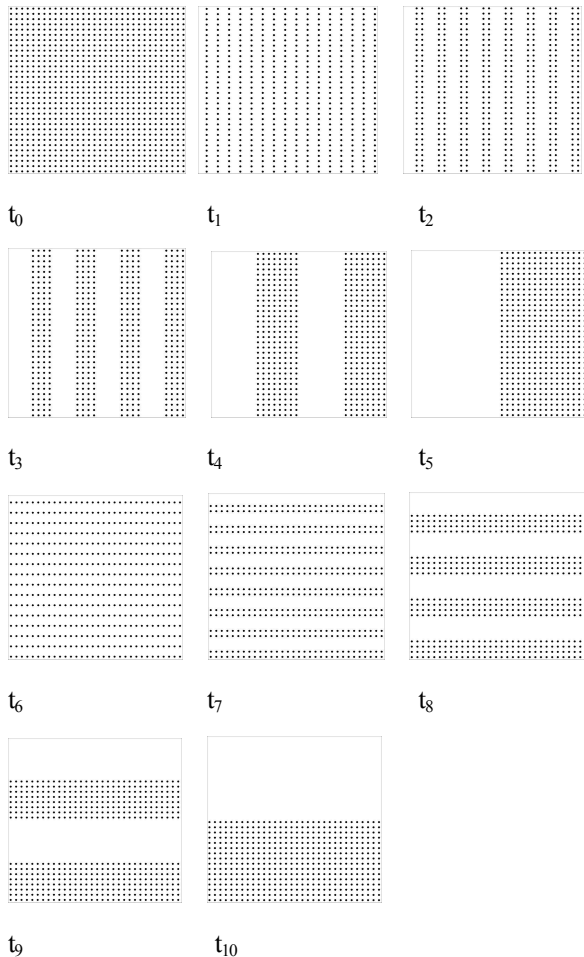
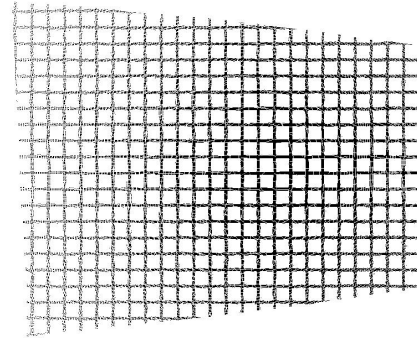
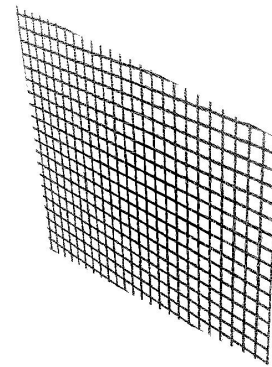


Fig.9 Example of dots pattern on LCD (1024 dots)



(a)



(b)

Fig. 10 Image of world coordinate on the lookup table (a)

Front view (b) Tilt view

4 . 管内形状計測

4. 1 軌跡の検出 CCDカメラの画像取り込み周期を 60Hz, 露光時間を 1/60[s], レーザ投光器の回転数を 30Hz とした場合, 図 2 のようにビームスプリッタとミラーは位相を 180 度ずらしてあるので, 撮影される軌跡は, 図 1 1 のような向かい合った半円軌跡として描かれる. ①と②はそれぞれカメラに近い方のリング軌跡と遠い方のリング軌跡である. 各画面でそれぞれの軌跡を画像処理により切り出した後, 時間的に連続した 2 画面を合成することで 2 つの閉じたリング軌跡を検出する. このように 2 本のレーザの投光方向の位相を 180 度ずらすことで, それぞれのリング軌跡の切り出しを容易にしている.

4. 2 傾きの検出 管内の状態によりロボットが管軸に対して図 1 2 のように傾斜している場合が想定される. この場合, 2 平行レーザによって描画される 2 つの円軌跡はロボットと管軸の傾斜方向にずれて撮影される. 図 1 3 に傾斜時の円軌跡を示す. リング

状軌跡が現れる画素位置に対応するワールド座標を変換テーブルを用いて求めた後、それぞれの円軌跡の中心をハフ変換⁽¹⁵⁾を用いて求める。

また、円軌跡の管軸に対する傾斜は以下の式で表せる。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{d}{L}\right) \quad (11)$$

ここで、 d は2つの円軌跡の中心のずれ量で、 L は2つの円軌跡の間隔である。図 1 4 は内径 300mm 管における傾きの計測性能を評価した結果である。 $L=50\text{mm}$ の場合で誤差は 0.2 度程度であり、十分な精度を有することが確認できた。

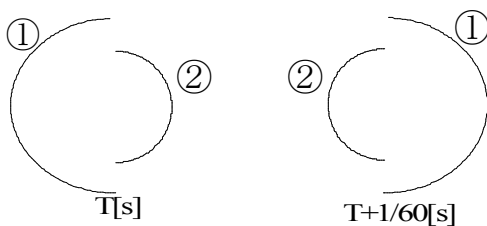


Fig. 11 Sample of recorded streaks

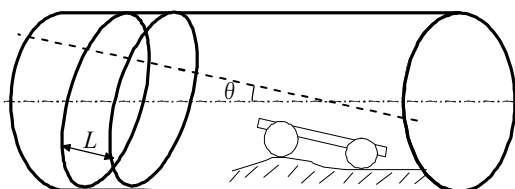


Fig. 12 Parallel lasers projected by a robot with slope

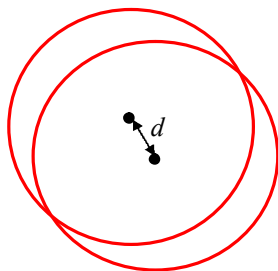


Fig. 13 Deviation between two streaks

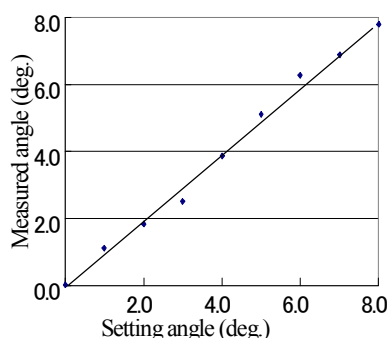


Fig. 14 Measurement result of the slope of the robot against the pipe

4. 3 計測の流れ 計測の流れを図 1 5 に示す。第 3 節で述べた較正法によって、レンズ歪みが削減されると共にカメラ座標からレーザ平面上のワールド座標への変換テーブルが算出される。算出されたテーブルはレーザ平面とカメラの相対的な位置関係を変更しない限り同一のものが利用できる。

変換テーブルを作成した後、ロボットを計測開始位置に走行させ、レーザ軌跡の撮影を行う。レーザ軌跡が現れる画素位置に対応するワールド座標を変換テーブルを用いて求めることで計測断面形状を算出する。また、2つの円軌跡のずれ量からロボット本体の傾き θ (計測断面の管軸に対する傾き) を検出する。ロボットの移動距離と管軸に対するロボットの傾きを考慮しながら計測断面を積み重ねることでコンピュータ上に管内面の三次元形状を復元する。

5. 形状計測実験

内径 300mm の下水管内でロボットを走行させて形状計測を行った。レンズ($f=4.5\text{mm}$)と 2 枚のレーザ投光面の距離は 250mm および 300mm である。使用した計測ロボットの写真を図 1 6 に示す。

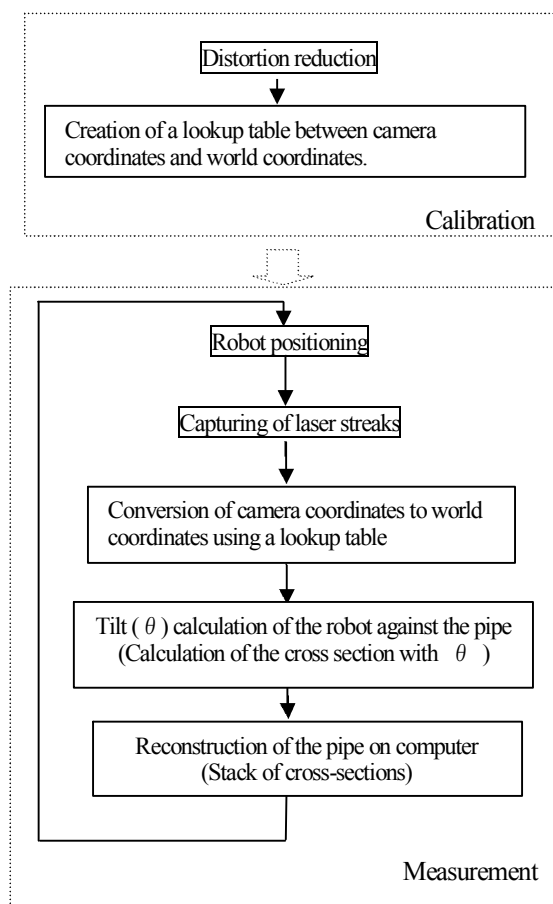


Fig. 15 Flowchart of measurement

下水管内面に粘土で作成したAとBの文字を図17のように貼り付けて計測を行った。ロボットを5 mm/sで走行させ、毎秒3断面の計測を行った。計測された断面形状を管軸方向に重ねることで、コンピュータ上に形状を復元した例を図18に示す。また、図19は文字を貼り付けた部分の拡大図を示す。

下水管内の腐食を想定し、人為的に10mmの高さの段差を作り、本計測器で計測したところ、誤差は平均で0.36 mm、最大で0.6 mm程度であった。

ロボット走行中にオンラインで計測結果を出力する場合には、フレームメモリからの画像データ読み込みなどに時間を要するため、毎秒3断面の計測が限界である。サンプリング周期を短くしたい場合や測定時間を短縮したい場合にはロボット走行中に画像を別途記録媒体に保存し、後で記録媒体からコンピュータに画像データを読み込んで処理を行う。

6. 結 言

下水管内を走行し、管内面形状を計測するシステムを提案した。画像処理技術を用いることで、下水管内面形状が自動的に計測され、三次元データがコンピュータに取り込まれる。2平行レーザを投光することで、撮影される2つの円軌跡のずれから管軸に対するロボットの傾きを検出できる。また、液晶ディスプレイを用いてカメラのレンズ歪み補正とキャリブレーションを実施する方法を提案した。液晶の膨大な数の発光素子を有効利用したものであり、自動的に高精細なキャリブレーションが実現できる。下水管内面に人為的に作った段差を計測した場合の誤差は0.6mm以内で下水管の検査装置としては十分な性能であることを確認した。

実際の下水管では内面のぬめりや変色があり、実験室内の実験では想定できない課題が生じる可能性がある。今後は、装置に防水対策を施し、現場での実験を実施する必要がある。

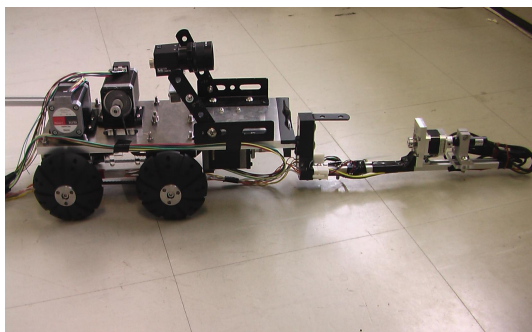


Fig. 16 Measuring robot



Fig. 17 Inside of the measured pipe

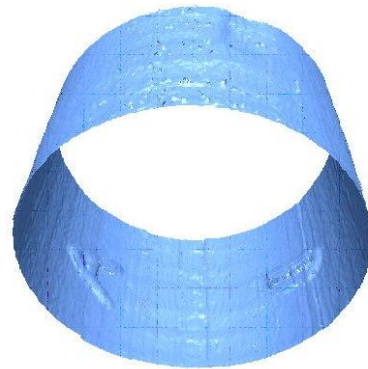


Fig. 18 Reconstructed pipe on computer

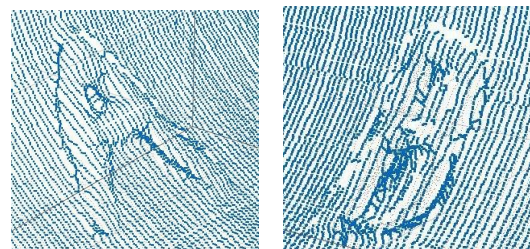


Fig. 19 Reconstructed characters 'A' and 'B'

謝 辞

本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(萌芽研究 18656153)の助成を得て行われた。記して謝意を表す。

文 献

- (1) Sewerage policy research committee “ Report of Sewerage policy to realize circular path”, Ministry of land, infrastructure and transport (2006)
- (2) Ogawa, H, Inspection Robot(P448) for a large pipe, *Journal of Sewerage*, Vol. 27-5(2004), pp.58-59.
- (3) Muramatsu, M., Suga, Y., Ishikawa, M. and Murata, Y., Development of Globular Mobile Robot with Vision System

- for Monitoring Inside of Piping, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.702(2005), pp.278-283.
- (4) Ohta, M., Kajiwara, K., Ishikawa, S. and Kurosu, k., Composing Panoramic Views for Inspecting Inside of Cylindrical Pipes, *Technical Report of IEICE*, R95-16 (1995), pp. 25-30.
 - (5) Fukuda, T., Yui, H., Sakamoto, S., Abe, Y., Hasegawa, Y., Kobayashi, F. and Arai, F., Inference of In-pipe Corrosions States using Wavelet Transformed, *Proceedings of the 12th intelligent system symposium*, No. 02-10(2002-11), pp. 479-482.
 - (6) Fukuda, T., Yui, H., Sakamoto, S., Abe, Y., Hasegawa, Y., Kobayashi, F. and Arai, F., Study on In-Pipe Corrosion Diagnosis System (Corrosion Estimation on Screw Pats Using a Surface SH Probe), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.710(2005), pp.42-49.
 - (7) Tanaka, H., Damage Measurement on Inside of Thin Tube Using Light Section Method (3rd report, Development of the Program which can be Measured the Size of Damage), *Memoirs of Hiroshima city Industrial Technology Center*, Vol.15(2001), pp.55-59.
 - (8) Hasegawa, K. and Sato, Y., Trial manufacture of an endoscope type range finding system, *Technical Report of IEICE*, PRMU98-3(1998), pp.17-24
 - (9) Kawasue, K, Pipe Measurement System, *Japanease Patent Disclosure* 2006-064690 (2006)
 - (10) Tsai,R. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3d machine vision metrology using off-the-shelf tv cameras andlenses, *IEEE Journal of Robotics and Automation*, vol. 3, no. 4(1987),pp. 323-344.
 - (11) Lenz, R.K and Tsai, R.Y, Techniques for Calibration of the Scale Factor and Image Center for High Accuracy 3-D Machine Vision Metrology, *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.10. No.5(1988), pp. 713-720.
 - (12) Inokuchi,S. and Satou,K , *3D Imaging Techniques for Measurement*, Shokodo(1990)
 - (13) Gou, J. and Tsuji, S. ,*Three-dimensional vision*, Kyoritsu Shuppan(1998)
 - (14) Kawasue, K., Aramaki, S. and KIRA,T., Automatic calibration on PIV, *Proceedings of 7th SICE Symposium on Industrial Application System*(2006), pp.9-13.
 - (15) E.R. DAVIES, *Machine Vision: Theory, Algorithms, Practicalities*, Academic press, Harcourt Brace Jovansvich, Publishers.(1990)