

小径管検査ロボットの位置認識技術

多田 達実, 鈴木 慎一

Position Recognition Techniques for Small Diameter Pipe Investing Robot

Tatsumi TADA, Shinichi SUZUKI

キーワード：小径管，検査，ロボット，位置認識

1. はじめに

地中にはガス管や上下水道管など多くの管が埋設されておりその検査作業では、GPSや地中レーダーなどが利用できず、検査結果と検査位置との対応付けをリアルタイムに行うことができないことから作業に多くの時間を要している。そのため、小径管の地中位置をリアルタイムに計測できる技術確立が我々の生活に直結するライフラインのメンテナンスにおいて緊急な課題となっている。本研究では、管検査ロボットに内蔵された角速度センサ（ジャイロ）や加速度センサなどから得られる冗長な情報と管内検査ロボットの送り出し距離情報から、地中埋設小径管（ $\phi 50\sim 200\text{mm}$ ）の三次元地中位置をリアルタイムに推定することができるシステム（図1）の基本技術開発に取り組んだ。

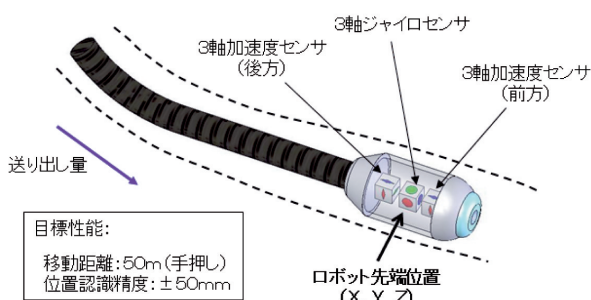


図1 小径管検査ロボットのイメージ

2. 位置計測原理

本研究では、ロボットにジャイロの他に複数の3軸方向加速度センサを内蔵させ、それらの値とロボットの送り出し距離の情報から最も確からしい三次元地中位置を推定する技術開発を行った。センサ情報から三次元位置を推定する方法を図2の位置認識原理図により説明する。ジャイロと複数の3軸方向加速度センサを内蔵したセンサカプセルのある時刻の3次元姿勢（ α, β, γ ）（ α :ロール方向角, β :ピッチ方向角, γ :ヨー方向角）をそれらのセンサ情報から求め、その値とセンサカプセルを管に沿って挿入する時の押し込み量（ L ）から以下の方法でセンサカプセルの管内位置を求める。

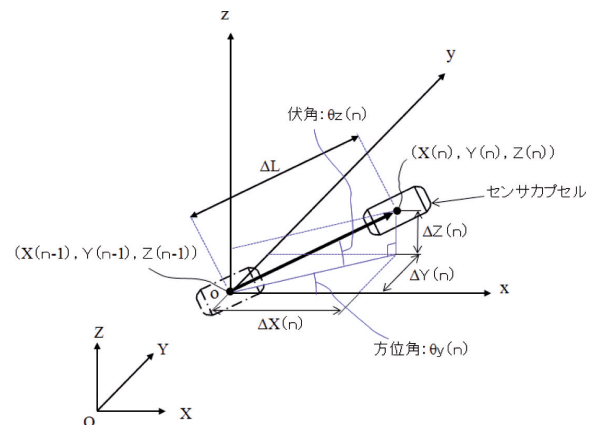


図2 位置認識原理

本方法では、計測した時点のセンサカプセルの姿勢（ $\alpha(n), \beta(n), \gamma(n)$ ）からその時点の方位角 $\theta_y(n)$ と伏角 $\theta_z(n)$ を求め、センサカプセルは計測のサンプリング時間 Δt にセンサカプセルの進行方向（本研究ではセンサカプセルの長手方向）に送り出し量として計測される変位量 ΔL 進むものと

仮定する。以下の式(1)～(16)に位置を求める計算式を列挙する。

なお、式を表現する変数は以下を意味する。

- X(n), Y(n), Z(n) : 現時点のセンサユニットの位置
- X(n-1), Y(n-1), Z(n-1) : 1サンプルの前のセンサユニットの位置
- $\theta_y(n)$: 現時点のセンサユニットの方位角
- $\theta_z(n)$: 現時点のセンサユニットの伏角
- $\theta_y(n-1)$: 1サンプルの前のセンサユニットの方位角
- $\theta_z(n-1)$: 1サンプルの前のセンサユニットの伏角
- $\alpha(n)$: 現時点のセンサユニットのローリング角
- $\beta(n)$: 現時点のセンサユニットのピッチング角
- $\gamma(n)$: 現時点のセンサユニットのヨーイング角

1サンプル前後の位置の関係:

$$X(n) = X(n-1) + \Delta X(n) \dots\dots\dots (1)$$

$$Y(n) = Y(n-1) + \Delta Y(n) \dots\dots\dots (2)$$

$$Z(n) = Z(n-1) + \Delta Z(n) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、送り出し量と方位角、伏角から

$$\Delta L(n) = L(n) - L(n-1) \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta X(n) = \Delta L(n) \cdot \cos \theta_y(n) \cdot \cos \theta_z(n) \dots\dots\dots (5)$$

$$\Delta Y(n) = \Delta L(n) \cdot \sin \theta_y(n) \cdot \cos \theta_z(n) \dots\dots\dots (6)$$

$$\Delta Z(n) = \Delta L(n) \cdot \sin \theta_z(n) \dots\dots\dots (7)$$

1サンプル前後の方位角、伏角の関係:

$$\theta_y(n) = \theta_y(n-1) + \Delta \theta_y(n) \dots\dots\dots (8)$$

$$\theta_z(n) = \theta_z(n-1) + \Delta \theta_z(n) \dots\dots\dots (9)$$

ここで、方位角と伏角は現時点のセンサカプセルの姿勢($\alpha(n)$, $\beta(n)$, $\gamma(n)$)から

$$\Delta \theta_y(n) = \Delta \beta \cdot \sin \alpha(n) - \Delta \gamma \cdot \cos \alpha(n) \dots\dots\dots (10)$$

$$\Delta \theta_z(n) = \Delta \beta \cdot \cos \alpha(n) + \Delta \gamma \cdot \sin \alpha(n) \dots\dots\dots (11)$$

と求められる。

また、センサカプセルの姿勢($\alpha(n)$, $\beta(n)$, $\gamma(n)$)は、1サンプル前の姿勢($\alpha(n-1)$, $\beta(n-1)$, $\gamma(n-1)$)とローリング、ピッチ、ヨー方向回りの角速度($\omega_\alpha(n)$, $\omega_\beta(n)$, $\omega_\gamma(n)$)から以下のように求められる。

$$\alpha(n) = \alpha(n-1) + \omega_\alpha(n) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (12)$$

$$\beta(n) = \beta(n-1) + \omega_\beta(n) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (13)$$

$$\gamma(n) = \gamma(n-1) + \omega_\gamma(n) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (14)$$

$$\Delta \alpha(n) = \omega_\alpha(n) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (15)$$

$$\Delta \beta(n) = \omega_\beta(n) \cdot \Delta t \dots\dots\dots (16)$$

以上の式は、ジャイロセンサなどから得られるロール、ピッチ、ヨー軸回りの角速度からセンサユニットの姿勢(α , β , γ)を求めることを示しているが、使用するセンサの特性(感度)やセンサカプセルの動きの早さ・状態などに応じて以下のセンサ信号の組み合わせから求めることができる。

低速時: 3軸加速度センサで計測される重力方向から推定

中速時: 2組の3軸加速度センサ計測値から推定

高速時: 3軸ジャイロセンサ計測値から推定

3. センサカプセルと計測システム

本研究で設計し、製作したセンサカプセルの構造を図3に、その外観写真を図4に示す。センサカプセルは、内径50mm程度の小径な管に挿入して使用することを考え外径38mm、長さ90mmに収まる寸法とした。また内部にはカプセルの前方と後方2箇所にて3軸加速度センサを各1個、センサカプセルの中央部にロール、ピッチ、ヨー方向の回転角速度を捉える3つの単軸ジャイロを固定した。図5、表1と図6、表2、それぞれに本研究で使用した単軸ジャイロセンサと3軸加速度センサの外観と仕様を示す。

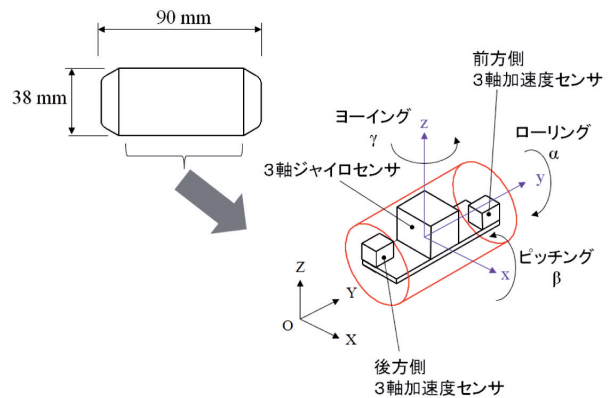


図3 センサカプセルの構造

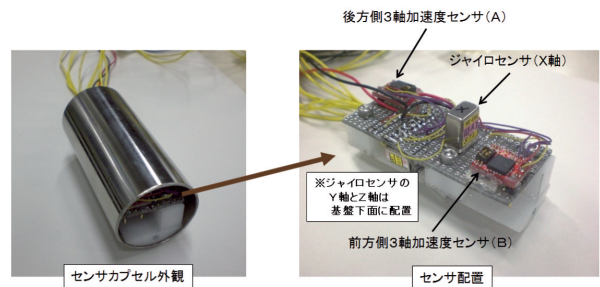


図4 センサカプセル

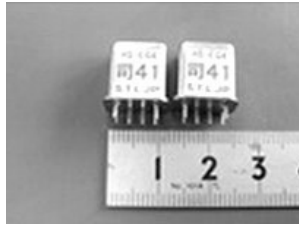


図5 ジャイロセンサ

表1 ジャイロセンサの仕様

項目	仕様
メーカー	STL-JAPAN製
型番	司41
検出角速度	±80度/秒
出力感度	25mV/度/秒、CW回転時+
温度影響	動作温度範囲内±5%
動作温度	-40~80°C(宇宙空間可)
取付姿勢	水平±5°以内
駆動電圧	DC3~7V、5V±5%標準
出力リップル	DC10mVpp以下
出力電圧	DC0.3~4.7V±5%(5V時)
出力電流	最大1mA
消費電流	6mA以下
外寸	8.5×12.6×12.4mm/2g



図7 センサカプセルと送り出し量計測部

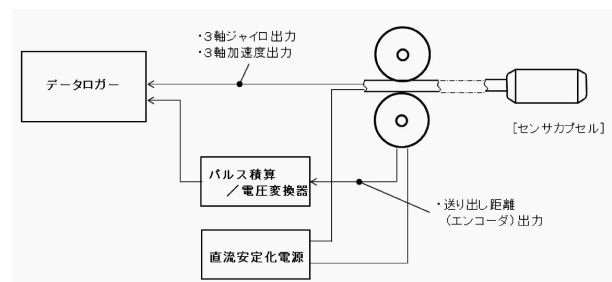


図8 試験システム

また、送り出し量の計測のため、図7に示すようにセンサカプセルの後端に固定したワイヤーを挟み込み、ワイヤーの送り出し量に比例したパルスを出力する計測部を製作した。

以上のセンサカプセルに内蔵した3軸方法の角速度を計測する3つの単軸ジャイロセンサと2つの3軸加速度センサ、およびセンサカプセルの送り出し量計測部から得られる信号は、図8に示すようにそれぞれ電圧信号として一つのデータロガーで同時に計測・記録した。

4. 計測試験

前述のセンサカプセルの性能を図9に示す室内試験において確認した。試験では、床に配置した管(外径75mm、内径65mm、透明樹脂管)の一端からセンサカプセルを挿入し、入り口と逆側からセンサカプセルに固定したワイヤーを巻き取ることでセンサカプセルを移動させた。図10に試験の様子を示す。また、試験で計測したカプセル内蔵センサの計測データを図11に、そのデータを用いてセンサカプセルの姿勢を推定した結果(ローリング角度: α)を図12に、前述の計測原理に基づき推定した管位置結果を図13に示す。

センサカプセルの姿勢推定については、カプセルの移動速度が0.4m/sであり、ジャイロから得られる角速度から求める方法で問題がなく、3軸加速度センサ情報からセンサカプセルの姿勢を精度良く推定するには動きが静的で運動による

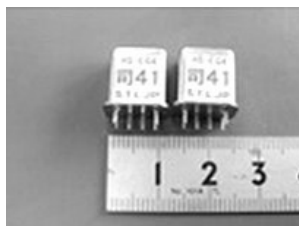


図6 3軸加速度センサの外観

表2 3軸加速度センサの仕様

項目	仕様
メーカー	浅草千研製
型番	AS-3ACC
測定加速度	6G/4G/1.5G 可変
測定傾斜角	-90° ~ 90°
感度	1.5Gモード時 800mV/G(±7.5%)
	2Gモード時 600mV/G(±7.5%)
	4Gモード時 400mV/G(±7.5%)
	6Gモード時 200mV/G(±7.5%)
応答周波数	X, Y: 350Hz Z: 150Hz
耐衝撃	±2000G
動作温度	-20~85°C
他軸感度	±5%
駆動電圧	DC3.3V または DC4.3~16V
オフセット電圧	1.65V(±10%)
(0G時の出力)	
消費電流	7mA以下
外寸	13×15mm

加速度の重畳がない状況である必要があることが分かった。また、管位置の推定については、姿勢推定方法や位置推定方法による誤差の累積により、目標精度±50mmに対して精度±150mmと不十分であることが分かった。

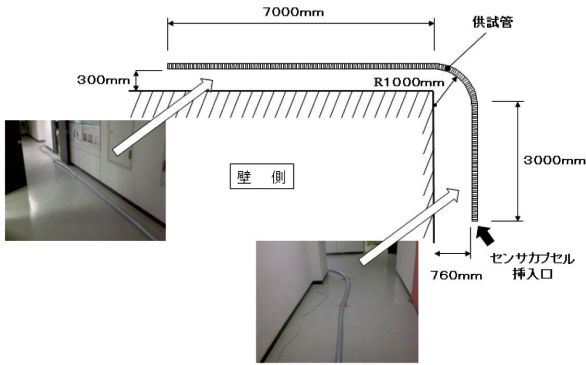


図9 試験における管配置



図10 試験状況

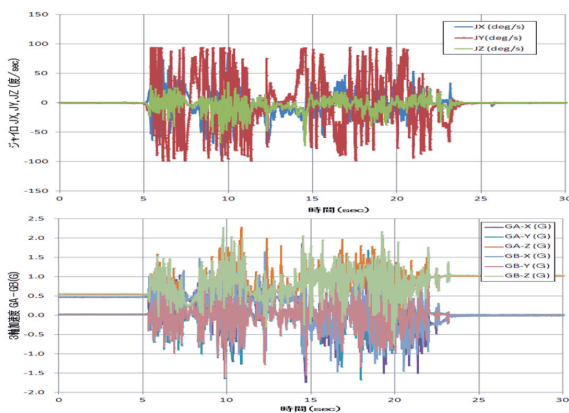


図11 計測データ

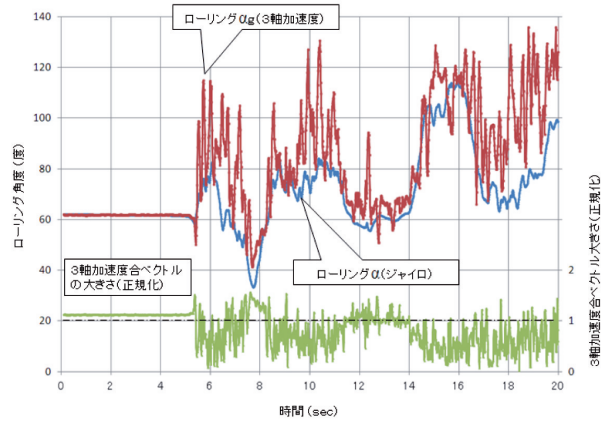


図12 センシングカプセル姿勢推定結果

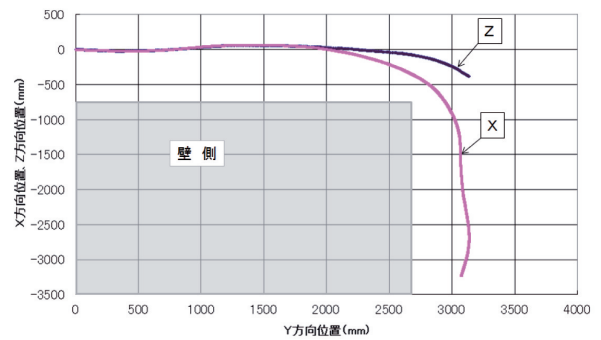


図13 管位置推定結果

5. 図面フィッティング

小径管の検査においては、設計図面との対応関係を常に意識することが必要である。そのため、位置認識センサから得られる位置情報を管内映像へ対応させる機能検討を行い、計測位置情報を管路図面データにフィッティングするプログラムを検討した。位置推定データの図面フィッティングとは、図14に示すように推定位置を最も確からしい図面上の位置に対応させる処理を意味する。その手法はいろいろあるが、本研究では、管を有限の断面の集合体と定義し、推定位置からそれらの全管断面（今回の場合は円断面）への垂線を求め、その長さが最小となるもっとも確からしい断面の図心を求め、推定位置をその点に修正する方法を採用した。本手法を図13のデータに適用し配管位置へのフィッティングを試みた結果を図15に示す。本結果により、本研究の手法が利用可能であることが分かった。

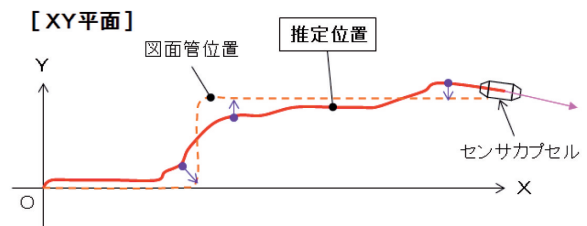


図14 図面フィッティング

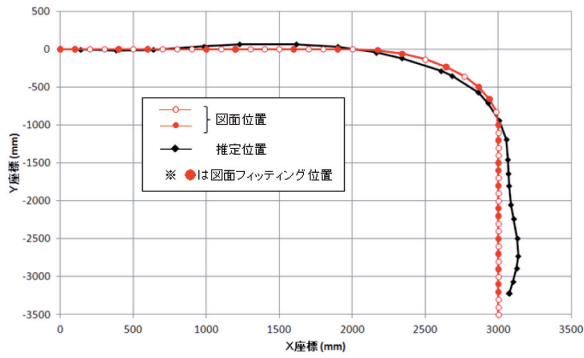


図15 図面フィッティング結果

6. まとめ

本研究では、3軸方向の角速度センサ（ジャイロセンサ）と2個一對の3軸方向加速度センサを内蔵したセンサカプセルとロボットの送り込み距離を計測するユニットから構成する小径管用の三次元地中位置計測システムを製作し、精度は不十分であるが計測可能であることを試験により確認した。また、位置認識センサから得られる位置情報を管内映像へ対応させる機能検討を行い、計測位置情報を管路図面データにフィッティングするプログラムを検討した。現時点において、目標精度を達成するためにはジャイロセンサと加速度センサを内蔵したセンサカプセルの運動に伴う信号の干渉を極力排除する信号処理技術と機構的にはカプセルのねじれを抑えカプセルの運動を単純化することが必要であると考えており、今後も継続してそれらの課題に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 遠山繁樹：機械系のためのロボティクス，総合電子出版社，1989
- 2) 出願人：日本鋼管株式会社，位置計測装置及び計測方法，公開特許公報：特開平5-306933