

管内走査センサーによる位置同定と管路形状計測

○高橋裕信 小貫剛（（株）アプライド・ビジョン・システムズ）

増田順一 大橋稔明 小松道正（（株）NTEC）

1. 管路計測の必要性

近年無電柱化で話題になっているように、電力線や通信線の地下埋設がすすめられている。ところが埋設された時期が古いものを中心に、埋設後の道路拡幅等の地上の現況変更のために、正確な埋設位置がわかりにくくなっている。このため埋設管路の周辺の掘削工事では慎重な工事が求められ、電線の切断といった事故も懸念されている。掘削せず埋設管路の位置や経路を正確に知ることが必要とされており、現在は埋設物の位置の計測には以下のような方法が広く利用されている[1]。

(1) 電磁誘導法

計測対象とする管路に低周波の電流を流すか管内に発信源を挿入して、発生した磁界の方位・角度を地表で計測し、地下の位置・深度を推定する。この方法では地表や土中の計測対象の管路以外の金属構造物の影響を受けやすく、精度が低下する問題がある。

(2) 地下レーダー法

高周波の電磁波を地下に向かって発射し、反射波の波形から土中の構造物を検出する。深度が大きくなると検出が困難になる問題がある。

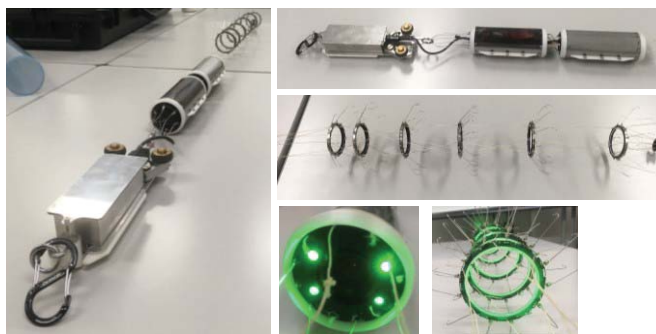
(3) 加速度法

ロボットや航空機の自己位置計測で用いられるように、計測する管内に加速度・角加速度センサー(IMU)を入れて牽引し計測する方法がある。IMUからの信号を積分し速度、角速度を推定し、さらに積分して位置と方位を求めることができる。しかし、センサーのサンプリング間隔より短い衝撃や、温度変化等によるセンサー値のドリフトがあると、誤差が累積し大きな計測誤差となる。例えば通信路の幹線では、埋設管の距離は最大200mある上に、5メートル以下の既成品の管を継いでいるために衝撃が発生しやすく、この方法の適用を困難にしている。

2. 画像センサーの利用

加速度法の問題を解決するため、管路の局所的な曲がりや内側から画像計測し、それらを結合して管路全体の形状を計測する方法を提案する。加速度法と同じように地下管路の一端からロープで牽引するが、そのセンサーの後方に円形のマークを複数設置して、これをセンサー後方に向けたカメラで撮影する。マークは管の中心となるように維持されているので、複数のマークのから管路の中心の曲がりやが推定できる。

センサーの進行量については管の内面に接触するロータリーセンサーを用いて進行距離を得ている。



センサー全体(左)、本体部(右上)、マーカ部(右中)、光源とカメラユニット、発光時の反射

図1 計測装置構成

積分を繰り返す加速度法と違い、センサー周辺の管路の方位の変異は画像から得られた管路形状から、進行方向の位置はロータリーセンサーから直接得られる。このため本報告の方法は精度の向上と衝撃の影響の排除が期待できる。

(2) 装置の構成

図1にセンサー本体を示した。今回、対象とする管は直径が約80mmで、最小の曲率半径を3000mmでも確実に通過させるため、3つのユニットに分割した。

牽引方向に対して先頭のユニットには電源および進行量を計測するロータリーエンコーダを左右に2個設置している。エンコーダは管内面の左右に接触し、左右いずれかにすべりがあっても検出ソフトウェアで互いに補償するようになっている。

二番目のユニットには制御用のPCがあり、測定中は独立して画像等の収集を自動的に行う。測定の前には、外部から制御でき、収集したデータを取り出すことができる。

三番目のユニットには本体後方のリングマークを撮影するためのLED照明と、産業用のグローバルシャッターCMOSカメラが入っている。さらに後述するようにカメラの鉛直方向への傾きを検出するためにIMUがカメラに付着している。

センサー本体の後方で115cmにわたって、6つの円環型のマーカユニットを牽引している。ユニットを管の中心に維持するために、それぞれの周囲に線形のバネが12本ついている。図2にマーカに向けたカメラから撮影した画像を示した。撮影して得られる6つの楕円の長径がほぼ等間隔となるように、それぞれのマーカの間隔は、本体のカメラから近い部分では短く、遠い部分では長くなるようにした。それぞれのマーカは黒い金属部材の上に、カメラ側に向けた面に直径50mmの円が2mmの幅で、白い再帰反射塗料で描いた。

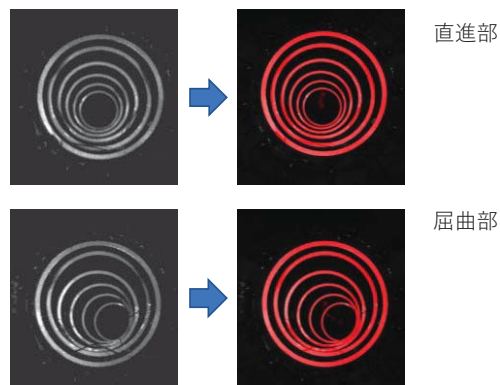


図2 撮影画像とマーカ検出結果

(3)装置の動作

計測は、センサー本体は管路の一端からロープで牽引する。ロータリーエンコーダが一定距離(50mm)の前進を検出するごとに、カメラが後方に続くマーカを撮影し、同時にIMUが計測した値を記録する。

測定対象の管路から引き出された時点で計測を停止する。

(4)後処理

計測終了後、画像処理能力を必要とすることため、外部のPCに無線で計測データを吸い上げ計算処理する。

図2に示したように、撮影画像からマーカを示す楕円を検出する。レンズ系を含めて画像の歪みと透視投影行列等のカメラパラメータは事前に計測している[2]。

空間中のマーカは回転対称であるため5自由度のパラメータで位置と回転が表現できる。最初にカメラから一番近いマーカを検出する。カメラからのおおまかな距離と正確なマーカの直径が既知である。初期値としてカメラの正面に正対しているものとしてパラメータを設定する。続いてシミュレーションで類似した方法で正確なマーカの位置・姿勢を求めた。マーカは傾くことにより画像中では楕円となり、レンズ歪によって複雑な図形となるが、その正確な形状はパラメータから厳密に決定できる。撮影画像と比較することで最適な結果を得られる。

カメラからより遠いマーカは、既に発見した楕円の周辺の部分を黒く塗りつぶした画像を作成し、同じ手順で楕円を探索する。その結果図2右側に示したように検出できる。

管路が強く屈曲した部分では遠いマーカがカメラから見えなくなる。そこで楕円の半分以上が観測できなくなった場合は探索を打ち切る。検出された各マーカのパラメータから、撮影単位でカメラ位置を基準座標とする管路の中心位置と形状がわかる。

本体後部のカメラユニットは管の中心軸と同じ方向の回転はもちろん、わずかだが他の軸も管の方向と異なる回転をしている。そこでカメラに取り付けたIMUの3方向の線形加速度データからカメラ座標系と重力方位の関係が推定でき、鉛直方向をZ軸



図3 S字型模擬管路

とする座標系に管路中心の形状を変換する。水平方向の回転についてもIMUから推定できるが、比較した結果精度も悪く、本方法では利用していない。

前後に連続して撮影された画像の座標系の間は本来6自由度の移動と回転がある。しかし重力方位が一致するため回転については水平方向の回転のみの1自由度となる。移動については撮影ごとに先頭のマーカが決められた距離を移動するので、2自由度となる。そこで、 $(\text{撮影枚数}-1) \times 3$ が管路計測に必要な未知のパラメータ数となる。

一回の撮影で得られる各管路形状は、前後の約40回の撮影結果といずれかの部分で共通している。その共通部分での3次元空間中でのずれが最小となるように、未知の全パラメータを求める。その結果最初の撮影画像の座標系を基準として、撮影ごとの先頭のマーカの中心が求まり、管路全体の形状が得られる。

3. 実験および評価

適用目的の管路は地下に埋設されているが、実験のために地上に図3の模擬管路を敷設し計測した。コントロールとして、トータルステーションと専用の治具で、管中心の直上の位置を計測して比較した。

計測の開始・終了点は一致するものとして、途中での管路のずれは最大5mmであり、良好な結果が得られた。

4. 考察

現在実際の管路環境を模擬した130mの地上管路や、埋設された地下管路での評価試験をすすめている。本報告では内面がスムーズな塩化ビニール製の管を対象としているが、素材や径の異なる管路への適用を検討している。

謝辞

本装置の設計・製造にご協力いただいた泉多一勲氏および開発・試験にご協力いただいた関係各位に感謝する。

参考文献

- [1] JSTT 地下探査技術委員会：“非開削地下探査技術適用の手引き”，日本非開削技術協会,2016.
- [2] 高橋裕信,富田文明：“ロボットビジョンのためのカメラキャリブレーション”，日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 2, pp. 177-184, 1992.