

(69) 安全地帯からの地下探査及び地上位置計測が可能な技術の開発とその活用方法について

澤部咲余¹・山本恭史²・福田和弘³・南橋丈二⁴

¹正会員 NTTインフラネット(株) 技術開発部 (〒103-0004 東京中央区東日本橋 1-8-1)
E-mail : sakiyo-sawabe@hqt.nttinf.co.jp

²正会員 NTTインフラネット(株) 技術開発部 (〒103-0004 東京中央区東日本橋 1-8-1)
E-mail : yasufumi-yamamoto@hqt.nttinf.co.jp

³正会員 NTTインフラネット(株) 九州支店 事業開発部 (〒103-0004 東京中央区東日本橋 1-8-1)
E-mail : kazuhiko-fukuda@ksh.nttinf.co.jp

⁴正会員 NTTインフラネット(株) 技術開発部 (〒103-0004 東京中央区東日本橋 1-8-1)
E-mail : jouji-minamihashi@hqt.nttinf.co.jp

従来の電磁誘導法を用いた埋設物探査技術は、埋設物直上での計測が必要であった。車道下埋設物を探査する場合、道路規制を伴う危険作業があり、筆者らは、歩道上等の安全な場所から離隔探査可能な新たな探査技術を開発した。探査に平行し実施するオフセット計測や地物測量作業についても、デジタルカメラによる写真撮影により地上位置の高精度三次元計測を可能とするステレオ計測技術を開発した。これら技術の組み合わせにより、作業の安全性と効率性向上を実現した。本論文では開発した技術について、活用方法と併せて紹介する。

Key Words : *exploration of buried object, electromagnetic induction method, sonde method, Three-dimensional measurement, stereo camera, digital image correlation*

1. はじめに

道路掘削等の路上工事に伴うライフライン設備事故を防止するため、地中探査レーダや電磁誘導探査装置を用いた非開削による地下埋設物探査技術が幅広く活用されている。筆者らは地下に埋設された通信ケーブル、管路などの設備の安全確保ため、電磁誘導法探査技術の高度化、適用領域の拡大を図り、地下埋設物探査装置を開発運用してきた¹⁾²⁾。

従来の技術は、埋設物ライン直上付近で計測するため、多くのライフライン設備が埋設されている車道下の探査では、道路規制を行いながら危険な作業を実施していた。従来の直上探査技術をもとに離隔探査技術を開発し、車道下埋設物を安全な歩道上から探査が可能な電磁誘導法探査技術を実用化した³⁾。その後の開発により性能を高め、探査可能距離の拡大を実現した。

一方、交通量の多い車道や立入が難しい場所での探査を実施する場合、探査作業と平行して凶化等に必要なおフセットのマーキング、メジャーによる計測や地物等の測量が必要である。これらの作業につ

いても探査と同様に危険な車道上での作業になることから、より簡便にかつ安全に測量作業が実施できる技術を現場から求められていた。探査箇所周辺の基準点や地物間の距離を歩道上等から容易に計測できる手法の研究開発を進め、市販のデジタルカメラを用いて撮影したステレオ画像から高精度な三次元空間計測が可能となる技術を開発した。

これら2つの異なる探査計測技術を組み合わせ運用することにより、作業の効率化と安全確保に繋がるものと期待されている。

本文では、新たに開発した離隔探査が可能な電磁誘導法探査技術とデジタルカメラを用いた地上部のステレオ計測技術について紹介する。

2. 離隔探査が可能な電磁誘導法探査技術

(1) 探査技術の概要

新たに開発した離隔探査システムは図-1に示すように磁界を発生させるソルダ発信機(有限長ソレノイドコイル)と発生した磁界(磁束密度の変化)を検知

する受信機にて構成される。受信機はフィールドセンススパーと呼び、X-Y-Z 軸の3方向のコイルが装着された上下2つのセンサー部を持ち、複数のコイルにより磁界を検知する仕組みである。

ソンド発信機(図-2)から発生する磁界は、図-3に示すように磁気双極子を作る電場と同じダイポール型(磁石NS極の磁力線)であり、磁束密度の関係式として式(1)にモデル化できる。受信機では発信機より発生する磁界を受信し装置内の演算装置により、パラメータ解析、エラー排除を施し、ソンド発信機の位置をリアルタイムで自動算出できる⁴⁾。

(2) 探査システムの特徴⁵⁾

受信機はGPSアンテナ、RTK-GPS本体、磁界受信コイル、各種センサー類を内蔵したフィールドセンススパーにより構成される。1台を親機として操作PCを接続し、もう1台を子機として2台を用いるDual Sparシステムとして運用される(図-4)。

本システムは、親機と子機を一つの大きな受信機と見立てたシステムとなっており、GPS衛星から取得した親機と子機の位置及び時間情報を元に2台の同期が取られる仕組みである。そのため、親機と子機は地上の任意の場所に設置可能であり、2台の設置間隔を広げるほど探査可能な範囲が広がるという特長をもち、親機と子機の設置間隔の他、使用する発信機の種類により異なる。初期型の982Hzソンド発信機の場合、親機子機の設置中心位置から最大8mまで離れた位置の探査が可能であったが、高出力タイプの512Hzソンド発信機の開発により、探査可能範囲を最大12mまで拡大した。車道内、特に交差点内のスムーズな探査を実現することが可能となった。探査結果は、図-1に示す親機を基準としたオフセット(X軸方向)、レンジ(Y軸方向)、デプス深度(Z軸方向)の距離数値に変換されアウトプットされる。探査結果の理論誤差は、探査結果ベクトル長の5%以内であり、各X-Y-Z軸成分にかかる。

(3) 探査の方法と効果

事前準備として、現地で使用するソンド発信機のキャリブレーションを実施する。キャリブレーション値は既知の値としてソンド発信機の種別毎に決まっており、PC内に初期値として登録されている。現地のノイズ等を確認し探査作業を開始する。

受信機は、親機と子機を探査対象箇所近辺に設置する。このとき、親機のX軸とY軸を道路方向に合わせて設置すると探査結果の現地確認作業が容易になる。作業はソンド発信機をローリングワイヤーの先端に接続し、手前のマンホール等から管路内に挿入し送り出し探査を実施する。

探査結果は親機を基準としたソンド発信機のオフセット(X軸方向)、レンジ(Y軸方向)、デプス深度(Z軸方向)の距離数値の他、傾き(ピッチ角・ヨー角)が得られる。ソンド発信機を動かしながら探査を実施することから、埋設管路の位置を地下空間の三次元データとして捉えることが可能となった。

図-5にソンド発信機最大の離れを想定した精度検証結果を示す。オフセット0mのポイントに親機を設置し、オフセット12mのポイントに子機を設置している。親機-子機の線分の中心から約12m半径の計測可能範囲内(計測できないブラインドスポットを除く)における、計測ポイント毎のオフセット(X軸方向)、レンジ(Y軸方向)、デプス深度(Z軸方向)誤差(%)を全346地点で理論誤差5%以内にあるか確認した。理論誤差を超える結果が24地点(6.9%)見受けられるものの(破線)、装置設置精度や周辺ノイズ環境による精度低下分を考慮しても、誤差8%以内であり、現場での使用環境に十分許容できる精度を有していると考えている。

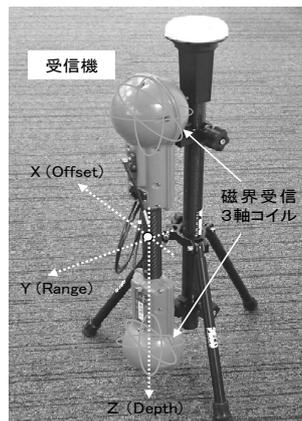


図-1 受信機



図-2 発信機

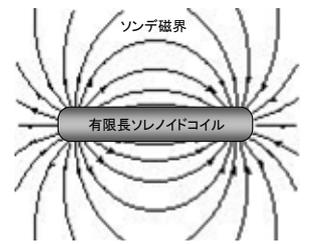


図-3 発生磁界分布

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} (3(u^T z)z - u) \quad \text{式(1)}$$

B: 磁束密度 (T)

μ_0 : 真空の透磁率 ($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

H: 磁場の強さ(磁界強度) [A/m]

r: ソンドからの受信機までの距離 [m]

z: ソンドから受信機までの単位 m 当りのベクトル

u: ソンド発信機の長手方向に沿った単位 m 当りのベクトル

u^T : u の転置行列

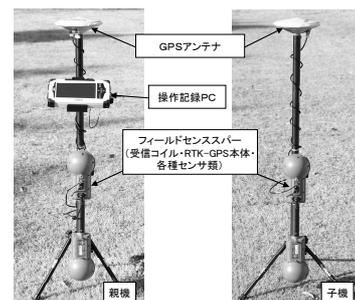


図-4 受信機の機器構成

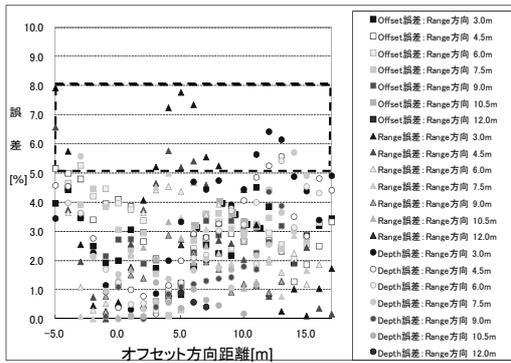


図-5 精度検証結果

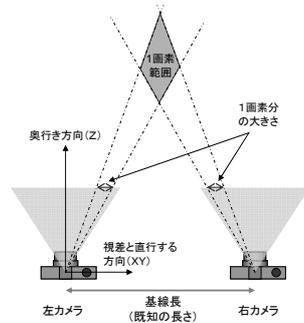


図-7 理論誤差の考え方

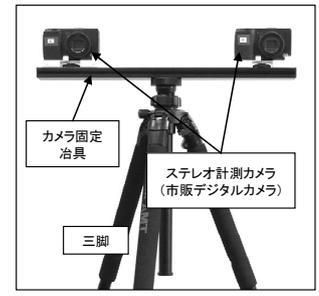


図-8 ステレオ計測システム

3. 高精度三次元ステレオ計測技術

(1) 計測技術の概要

a) ステレオ計測の原理

2台のカメラ撮影によるステレオ計測の原理は図-6に示すように三角測量⁶⁾と同じ原理であり、既知の1辺(基線長)と2角の測定によって三角形の大きさが決まる。すなわち、空間内のある一点を左右2台のカメラで同時に撮影すると、カメラから見たその点の位置が計算できることとなる。

本開発では、左右画像対応点の自動抽出を可能にしたデジタル画像関連技術⁷⁾⁸⁾を導入し、撮影対象物の三次元点群を容易に生成することを実現した。これにより、人為的な計測誤差を排除すると共に、ステレオ計測作業の効率を大幅な改善が可能となった。

b) ステレオ計測精度

図-7にステレオ計測の理論誤差の考え方を模式化したものを示す。ステレオ計測の精度は、撮影するカメラの解像度(画素数)と基線長に主に影響される。カメラ撮像板内のステレオ対応点の1画素は、実際の空間内では計測対象物のある長さ範囲内として特定される。そのため、カメラ画素数の増加に比例して視差と直行する平面方向(XY)の精度が向上する。一方、左右カメラの視差、すなわち基線長が空間の奥行き方向(Z)の精度に影響を及ぼす。基線長の長さに反比例して奥行き方向の精度が向上する。対象物までの距離と精度の関係では、XY方向は距離に比例し、Z方向は距離に反比例しながら精度が低下していく。

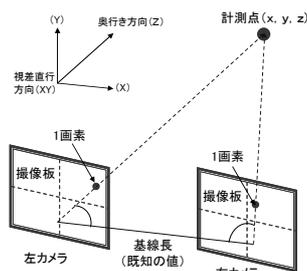


図-6 ステレオ計測の原理

(2) 計測システムの特徴

開発したステレオ計測システム装置を図-8に示す。本システムでは、前述した画素数、基線長の情報の他に、レンズひずみ等のカメラ固有の情報を元にカメラキャリブレーションを実施する必要がある。このキャリブレーションを簡素化するため、カメラを同一軸上に正確に固定できる治具を開発した。計測対象物に応じて基線長の異なる複数の治具を使い分ける。

市販のデジタルカメラの特徴として、オートフォーカス機能や、ズーム機能が組み込まれており、撮影される画像範囲(画角)が撮影の度に变化してしまうため、キャリブレーション作業の精度が保てず、ステレオ計測用として運用するには不向きであった。そこで、ユーザーがカメラの撮影条件を細かく設定できる市販のデジタルカメラを複数機種選定し、ズーム位置(焦点距離)、ピント位置(フォーカス距離)、絞り値(f値)、ISO感度、画像サイズ等の設定情報を保存でき、全てのカメラを同一の条件で撮影できる仕様とした。これにより、事前に装置毎のキャリブレーションデータを作成するだけで、細かい設定を実施する必要がなくなり、シャッターを切るだけの作業に専念できる。

(3) 計測の方法と効果

計測ソフトは、画像を読み込むと画像のExif情報を元に、キャリブレーションデータが自動的に紐付けられ、どの設定データを使用するか選択する必要はない。このとき左右画像の自動関連機能により三次元点群(x,y,z,r,g,bの情報)が生成される。計測時は、表示された単画像から任意の点を選択するだけで、生成された三次元点群からポイントの座標情報が読み込まれる。特徴点の不明確な箇所、白とびや黒つぶれ箇所など自動関連時に三次元化できなかった領域は、左右2画面の選択モードに切替え対応点を手動で抽出できる。本システムでは、2点間の距離、1点と直線の最短距離、1点と面の最短距離、面積、角度を計測できる。ステレオ計測の適用例(図-9)を示す。この他、三次元空間内の任意の座標を用いた様々な計測機能を追加することも可能となっている。



図-9 ステレオ計測の適用例（橋梁部）

4. 具体的な活用方法の提案

本文で紹介してきた新技術は、計測対象から少し離れた位置から計測できることから、車道内に入らず安全な歩道上での作業を可能にするという特徴を持つ。交差点内の探査及び計測に本技術を適用する作業イメージを図-10に示す。本技術の適用により、計画・事前検討、現地作業、機械経費、安全対策、解析等の全ての工程で効率化が図られ、直接費ベースで従来手法と比較して最大で約4割程度の費用を削減することが可能となった(図-11)。比較条件は、車道埋設のNTT通信設備約500m区間、片側2車線道路、交差点1箇所、探査ピッチ10m、管路平面及び縦断面図の作成までを含んだ作業を実施する場合の歩掛を適用した。



図-10 交差点作業イメージ

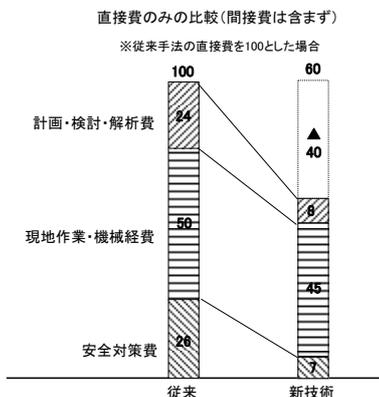


図-11 従来との費用比較

5. 今後の課題とまとめ

今回、安全性と効率性を兼ね備えた地下の離隔探査及び地上のステレオ計測技術を新たに開発し実用化した。費用の削減だけでなく、作業員の転落や車両による飛び込まれ事故の防止など現場の安全確保観点からも本技術の導入効果が期待されている。今後、ステレオ計測技術については、施設管理手法の主流であるGISプラットフォーム⁹⁾との連携の他、更なる精度向上、適用領域の拡大、撮影画像の精度管理手法の確立、三次元点群の絶対座標化など、ユーザー要望を踏まえた技術開発を進めるとともに普及展開を図っていく。

参考文献

- 1) 福田和弘, 福井豊一, 本藤聡一郎: 電磁誘導法を利用した地下埋設物の連続探査における精度向上とGISとの効果的な連携, 2009年度土木情報利用技術論文集 Vol.18, I-13, pp.109-116, 2009.
- 2) 福田和弘, 藤原秀夫, 小高直樹: 電磁誘導法を用いた水道管の非開削埋設物探査技術について, 第23回非開削技術研究発表会論文集, 1.1, pp.1-9, 2012.
- 3) 福田和弘, 藤原秀夫, 福井豊一: 電磁誘導法を利用した地下埋設物調査技術について, 第22回非開削技術研究発表会論文集, 1.1, pp.1-10, 2011.
- 4) James W.Waite, Thorkell Gudmundsson, Dimitar Gargov: Precise Positioning Using a Distributed Sensor Network, Patent US 20110156957, 2011.
- 5) 福井豊一, 福田和弘: データ処理装置, 位置検出システム, データ処理方法, 及びプログラム, 特許第5129387号, 2013.
- 6) 福本武明, 佐野正典, 古河幸雄, 鹿田正昭, 嵯峨晃, 和田康彦, 荻野正嗣, 早川清: 測量学, 朝倉書店, p.79-86, 2006
- 7) 小出智治, 竹内義則, 中坊嘉宏, 向井利春, 大西昇: リニアスライダを用いた高速ステレオビジョンシステム, 社団法人情報処理学会研究報告, p.133, 2008.
- 8) 秋本圭一, 大野崇浩: デジタルカメラを用いた形状計測システムの開発, 第8回ポリテックビジョン, pp.37-41, 2004
- 9) 南橋丈二, THE JOURNAL OF SURVEY 測量, Vol.59, No3, pp.26, 2009.