

光ファイバジャイロを用いた小口径推進曲線施工

小西 真治¹・朝比奈 峰之²・田村 晋治郎³・山田 俊則⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 事業推進室 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:konishi@rtri.or.jp

²公益財団法人鉄道総合技術研究所 車両構造技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:asahina@rtri.or.jp

³株式会社ジェイアール総研情報システム (〒186-0001 東京都国立市北1-7-23 国立ビル3F)
E-mail:stamura@jrsci.co.jp

⁴工協社 (〒910-0826 福井市上中町28-11)
E-mail:dolphin7@mitene.or.jp

地上作業を伴わない小口径推進工法を実現するために、光ファイバジャイロを用いた推進機の位置検知システムを開発し、曲線施工を伴う現場で適用試験を行った。その結果、実用化可能な精度が得られたので報告する。

Key Words : fiber optic gyroscope, small diameter tunnel, pipe-trushing method, curve construction

1. はじめに

近年、下水道などの小口径トンネルの対象となる現場の地上は狭隘かつ交通量が多い道路であることが多く、また曲線施工を必要とされる場合が増えている。しかし、現状では小口径推進工事での曲線施工は、地上から電磁波で掘削機の位置を検知するか、推進工法をあきらめて開削工法で施工されている。いずれにしろ地上での作業が発生するが、様々な問題を引き起こしている。そこで、地上作業のない非開削工法のみによる施工時の位置検知システムとして、掘進機に設置した小型ジャイロで得られた方向角のデータから位置を測定できるシステムを開

発し、現場で適用確認試験を行った。

2. 位置検知検知システム

(1) 光ファイバジャイロシステム

図-1 に小口径推進装置と小型光ファイバジャイロを用いた位置検知システムを示す。システム化にあたっては、①小型ジャイロによる方位角計測、②ジャイロの傾斜角測定、③ジャイロ波形のサンプリング、④ノイズの除去、⑤各データをもとにした位置計算アルゴリズム、について適切な手法を開発した。

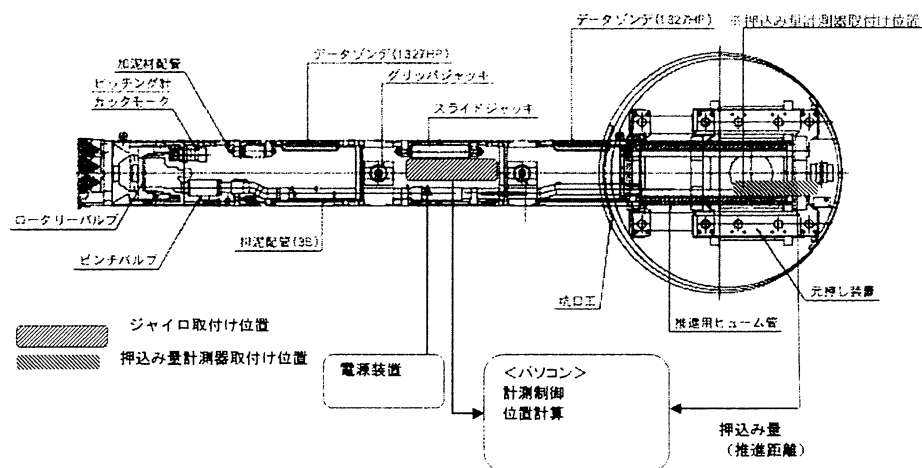


図-1 小口径推進装置と小型光ファイバジャイロを用いた位置検知システム

(2) 位置算定の原理

本システムではジャイロの鉛直方向と地球の地軸を基準とし、ジャイロで計測した方位角を用いて幾何学な計算で位置を求めている。位置算定原理を図-2に示す。ここでは、測定原点P0を基準に、現在の先端位置をP1、次の時点の位置をP2、・・・Pnとする。実際の管が通っている掘削軌跡に対して、測定原点P0の座標が既知で2点間（推進距離に相当）をLとすると、管の真北からの角度 θ_1 がわかれば、現在の管先端位置P1を（南北位置、東西位置）式(1)の形で表せる。

$$P1 = (L \cos \theta_1, L \sin \theta_1) \quad (1)$$

さらに管が推進した場合、前回の原点がP1にくるのでN番目の先端座標は式(2)により、掘削原点からの積算求めることができる。

$$Pn = P0 + \sum (L \cos \theta_i, L \sin \theta_i) \quad (2)$$

なお、実際の計算では機体の傾きを傾斜計で計測し3次元空間での計算に拡張している。

(3) 方位計測方法

方位角はジャイロで地球の自転によって発生する角速度を計測して求める。具体的には、図-3に示すZ軸（ジャイロの鉛直軸）周りにジャイロを少しずつ回転させて、

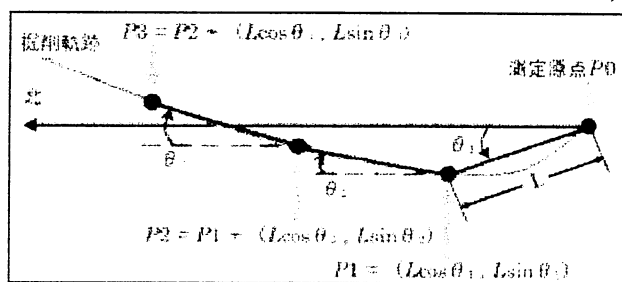


図-2 位置算定の原理

その都度角速度を計測し、角速度が最大になる方向を求める。ジャイロの角速度検出方向と地球の自転方向が一致した時が、センサ出力が最大となり、これが真北方向となる。すなわち図-4のジャイロ回転角 θ_0 がこれに当たる。また、直角になった時出力がゼロ、逆向きに一致したときマイナスの最大値になる。その後、ジャイロの感度軸（ジャイロの方向の基軸）と掘進装置の軸の関係を整理して掘削機の方位角を算出する。実際に検出される出力信号は、図-5に示す「回転軸が傾いた時のジャイロ出力」のラインのようなサイン波になる。しかし、現実の掘削機はピッチング、ローリングで傾いており、ジャイロも図-6に示すように傾いている。そこで、ジャイロ固定台に取り付けた傾斜計の値から補正をかけて、図-5に示す「回転軸が鉛直の時のジャイロ出力」のラインを算出し機体の方位角を求めている。また、ジャイロによる測定の微小なバラツキをなくするため、反転して計測を行っている。精度よく最大角速度位置を求めるため、1回方向角を定めるのに、100回以上の角速度測定を行っている。この様にして求めた方位角と元押し装置部に装着した押込み量計測装置で計測した1ピッチあたりの推進距離から掘削機的位置を算出する。ジャイロ波形のサンプリングプログラム、ノイズ除去方法、位置計算ソフトウェアは本システムのために新たに開発した。これらは、鉄道の振り子列車の制御で用いている考え方から発生してきた技術である。

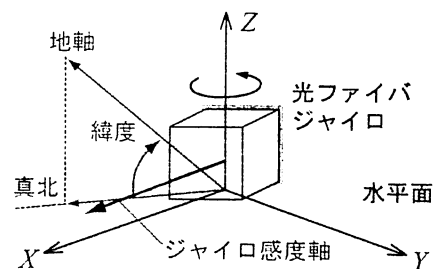


図-3 ジャイロと地軸の関係

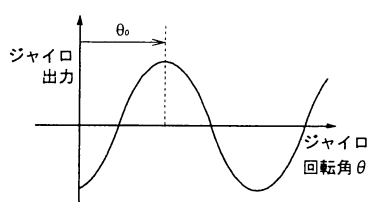


図-4 ジャイロの角速度出力と回転角の関係

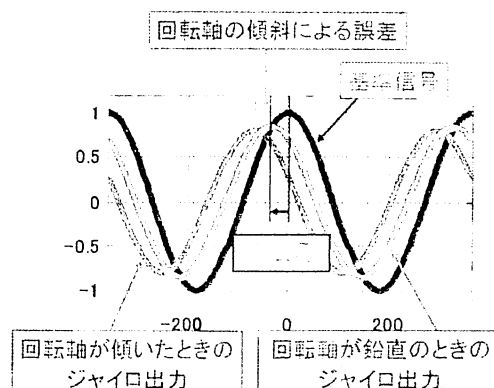


図-5 ジャイロの傾斜を考慮した方位角の求め方

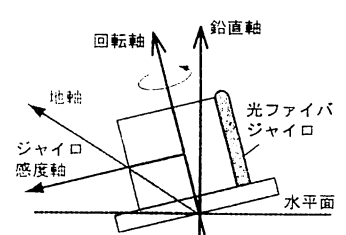


図-6 実際のジャイロの状態

3. 現場適用試験

本システムの実用化を目的に実現場で掘進機の位置検知およびそのデータによる方向制御を用い適用性を確認した¹⁾。対象とした工事の平面図を図-7、縦断図を図-8、地上の状況を写真-1に示す。工事は、高耐荷力泥土圧推進工法によるφ300mmヒューム管の下水道設置工事である。施工掘進距離 $L=77.38\text{m}$ 、曲線半径 $R=80\text{m}$ の左カーブ、平均土かぶり 2.49m 、設計勾配 2.0% 、掘進位置の地質は、風化花崗岩、 N 値 $35\sim 50$ である。

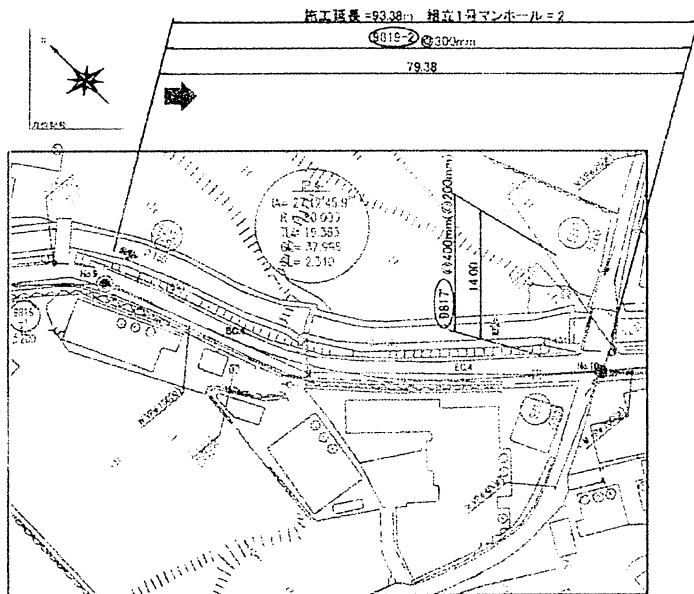


図-7 平面図

ジャイロで計測した方位データおよび発進坑の元押し装置に取り付けた押込み量計測装置のデータを計測パソコンに取り込み位置計算を行った。直線部は光学測量、曲線部は電磁波ロケータによる位置検知を並行して行い本システムの計測精度を確認した。

ジャイロ部外観を写真-2、工事状況を写真-3に示す。また、計測用パソコンの操作画面を写真-4に示す。操作画面には、必要に応じて写真-5のように計画線と現在位置、および進行予測や到達予測位置を表示することができる。

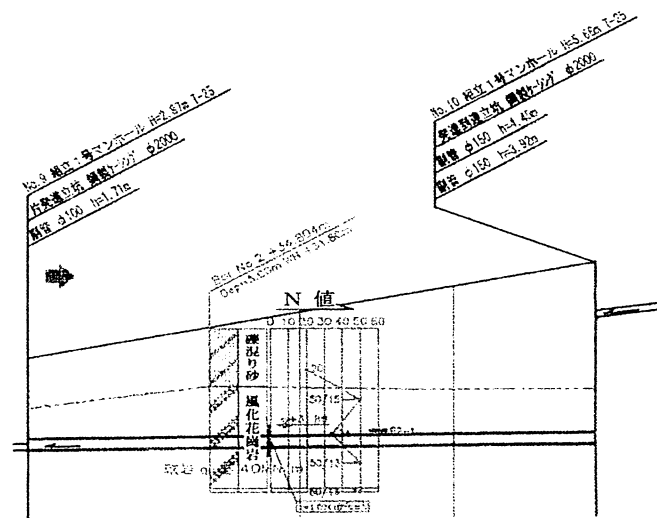


図-8 縦断図



写真-1 地上の状況

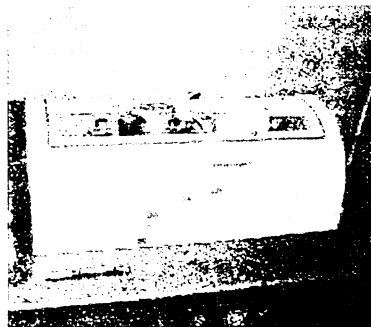


写真-2 ジャイロ部の外観

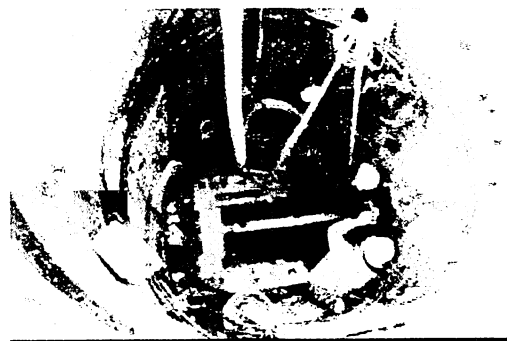


写真-3 工事状況（発進時）

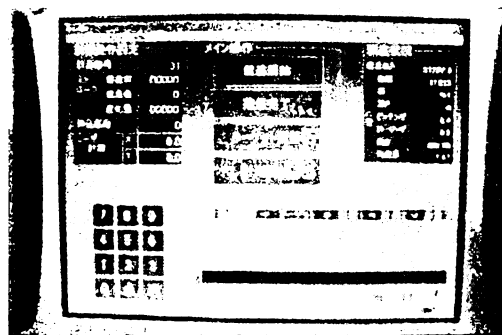


写真-4 ジャイロ操作画面

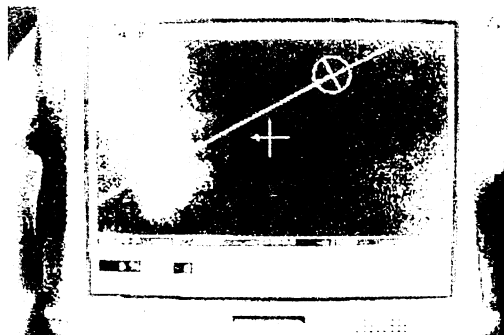


写真-5 到達予測画面

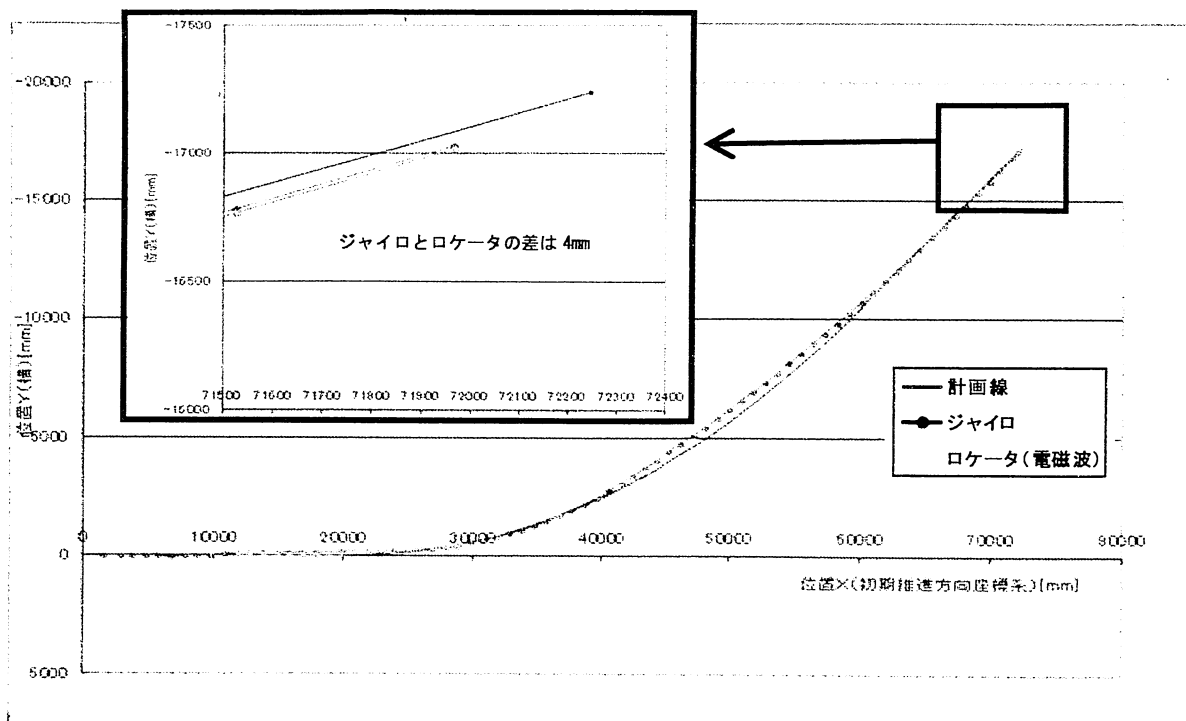


図-9 計測結果

4. 試験施工結果

本システムによる位置検知結果と施工計画線および電磁波ロケータとの比較を図-9に示す。この図は、横軸が初期掘進の方向、縦軸はその直角方向の平面線形図となっている。

到達時における本システムの位置計測結果と実測との差は約4mm、（計算結果：推進長=71 966mm、横位置=-17 027mm、実測：推進長=71 909mm、横位置=-17 031mm）実際の到達位置と計画との誤差は40mm以下となった。電磁波での計測では、最大約±100mm程度の誤差が生じる可能性があり、また電波到達の障害により突発的な変化を示すことがあったが、本システムでの計測結果は安定した軌跡を示しており計測精度として問題ないレベルにあることを確認できた。

5. まとめ

地上作業を伴わない小口径推進工法を実現するために、光ファイバジャイロを用いた推進機の位置検知システムを開発し、曲線施工を伴う現場で適用試験を行った。その結果、到達後の実測との差が約4mmであった。以上より、開発した光ファイバジャイロによる位置計測システムは、小口径推進工事の曲線施工に十分適用できることが確認出来た。

現在、精度確保するため1回の方角角計測で100回以上のジャイロ出力データを取得している。このため16分計測時間を必要としているが、現場施工の実態に合わせて10分以下に短縮する検討を進めている。

参考文献

- 1) 山田俊則：ドルフィン工法協会のあゆみ，月間推進技術，Vol.25, No.6, pp.1-6，公益社団法人 日本推進技術協会，2011.

CURVE-CONSTRUCTION OF SMALL-DIAMETER-PIPE THRUSHING TUNNEL WITH FIBER OPTIC GYROSCOPE

Shinji KONISHI, Mineyuki ASAHINA, Shinjiro TAMURA and Toshinori YAMADA

For removing work on the surface of the small-diameter-pipe thrushin method, we developed a location system with a fiber optic gyroscope and confirmed its field application on a construction site. The results showed good precision for making practical. The report describes outline of the location system and its test results.