

シールド自動測量システムの開発と実施例

Development and Example of an Automatic Survey System for Shield Tunneling

御竹中土木 ○菅野 正徳
藤井 義文
坂口 修司

シールド工法は、土木工事の中でもここ数年めざましい技術の進歩が見られる工法の一つである。施工における掘進、方向制御、覆工、裏込め注入、掘削土処理などの各作業工程が機械化、ロボット化され周辺地盤・構造物への影響と合わせて集中管理されるようになってきた。

本報告は、シールド機の方角制御に関する機械化、省力化を目的とした自動測量システムの概要といくつかの現場での実施例を紹介し、その適用範囲および今後の課題等のついて検討したものである。

【キーワード】シールド工法、自動測量システム、方向制御、自動化、省力化

1. はじめに

シールド工法において高精度かつ能率的な施工を行うためには掘進中のシールド機の位置・姿勢を常時把握し、計画線上に掘進するように適切な方向制御を行う必要がある。

方向制御のために従来行ってきた人為測量は、狭い坑内における作業であり、また掘進作業の支障にならないようにするために必ずしも各リングの掘進時に毎回測量し、その結果を掘進管理に反映させるものではなかった。したがって、シールド機の現在位置や姿勢角の測量作業を自動化することは単に測量作業にかかる人為作業を省力化するのみならず、頻度の高い測量結果をリアルタイムで掘進管理にフィードバックすることによって施工精度を向上させることにもつながる。

本稿では、方向制御のための自動測量システムの一例として測定に画像処理装置を使用したシステムを紹介する。

2. 自動測量システムの種類

現在、一般的に使用されている自動測量システムは、シールド機の位置・姿勢の測定方法によって次のように大別される。

- ①レーザー方式
- ②ジャイロコンパス方式
- ③画像処理方式
- ④その他の方式

これらの方式は、どれも一長一短があり万能なシステムとなるものは少ない。したがって、自動測量システムの導入に当たっては対象工事の工法、径、線形など施工条件を十分に検討した上で適応する方式のシステムを選定する必要がある。

自動測量システムの測定方式別の比較を表-1に示す。

3. 画像処理装置を使用した自動測量システム

(1) システムの構成

本システムは、シールド機内に設置するターゲット、後方セグメントに設置する検出装置、地上の管理室に設置する計測演算装置で構成されている。システムの構成を図-1に示す。

表-1 測定方式別の自動測量システム比較

		画像処理方式	レーザー方式	ジャイロコンパス方式
主要使用機器		・画像処理装置 ・トータルステーション	・レーザー発光器 ・光波距離計	・ジャイロコンパス
測定方法	姿勢角	・正三角形を構成する3個の発光体の位置関係を後方に設置したTVカメラで検出し、画像処理を行ってシールド機のピッチング角、ローリング角、ヨーイング角を演算する	・シールド機の後方よりレーザー光を投射し、シールド機内に設けた受光盤で検出する ・姿勢角は受光盤内の前後2箇所の受光位置の差から、ピッチング角とヨーイング角を演算する	・シールド機内に設置したジャイロコンパスでシールド機の方位角を検出する
	変位	・トータルステーションから得られる角度と距離からシールド機の座標を演算する	・レーザー発光器の発射角と受光盤内の受光位置よりシールド機の座標を演算する	・シールド機の方位角と掘進距離から基準点との相対位置関係を演算する
	測定項目	・ピッチング角 ・ローリング角 ・ヨーイング角 ・座標位置	・ピッチング角 ・ヨーイング角 ・座標位置	・ヨーイング角 ・基準点からの相対位置
補助手段		・特になし	・ローリング計	・ピッチング・ローリング計 ・光波距離計
測量精度		・各姿勢角（ピッチング角、ローリング角、ヨーイング角）とも $\pm 0.1^\circ$ 以下 ・変位量 2 mm	・ピッチング角 $\pm 0.1^\circ$ ・ヨーイング角 $\pm 0.1^\circ$ ・変位量 2 mm（推定値）	・ヨーイング角 $\pm 0.2^\circ$ ・変位量 5 mm 以内 ※一定距離毎に補正が必要（推定値）
測定可能距離		150 ~ 200 m	150 m程度	制約なし （ただし補正が必要）
線形条件		・急曲線部は不適	・曲線部は不適	・制約なし （ただしシールド機が横すべりした場合、測量精度が低下する）
設置上の制約		・後方の検出装置よりシールド機内のターゲットが見通せる必要がある	・レーザー光の通過するスペースが必要である ・シールド機内のレーザー受光盤が大きい	・シールド機内に設置するジャイロコンパスの大きさ、耐久性にやや問題がある ・安定するのに時間がかかる

a) ターゲット

ターゲットは、位置および姿勢角検出のために使用する正三角形を形成する3個の発光ダイオード（LED）と光波距離計用の反射プリズムで構成されている。3個のLEDの間隔（正三角形の一辺の長さ）はシールド機の掘進に伴う距離の増加によって姿勢角の測定精度が低下するのを防止するために、50mm~200mmの範囲で4段階に変化できる構造としている。ターゲットの外観を写真-1に示す。

b) 検出装置

検出装置は、電子式測距測角儀（トータルステーション）とTVカメラとで構成されている。トータルステーションは水平、垂直角の微調整およびフォーカス調整にモータ駆動装置を取り付けており、地上の管理室から遠隔制御が可能である。

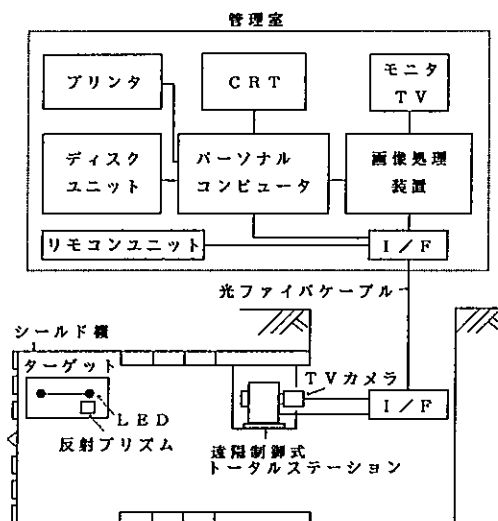


図-1 自動測量システムの構成

また、TVカメラの倍率は4倍、8倍を測定距離に応じて選択するようになっている。検出装置の外観を写真-2に示す。

c) 計測演算装置

計測演算装置は画像処理装置とパーソナルコンピュータで構成されている。画像処理装置は画面座標系として512×384画素の座標を持ち、TVカメラの映像信号を入力して明暗に二値化することにより画面の中の移動する輝点(ターゲットの3個のLED)を抽出して、その重心位置を画面座標系のX-Y座標値として検出する装置である。

パーソナルコンピュータは画像処理装置の座標出力と、トータルステーションから得られる測距測角値をもとにフロッピーディスクに記憶してあるトンネル計画線に対するシールド機の変位量、姿勢角を演算する。測演算装置の外観を写真-3に示す。

本システムを構成する主要機器の仕様を表-2に示す。

(2) 測量原理

本システムによるシールド機の姿勢角検出原理の概要を図-2に示す。シールド機内に正三角形状にLEDを配置し、それをTVカメラで撮影しその画像を画像処理して三角形の頂点3個の投影座標を得る。ヨーイング、ピッチング、ローリングが生ずることにより、投影された3個の頂点の位置関係は図に示すように変化する。実際の場合は、ヨーイング、ピッチング、ローリングの3要素が複合して発生するため、3個の頂点の相互位置関係から計算して各要素の姿勢角を求める。

また、シールド機の上下左右の変位量は画像処理装置上で求めたターゲットの移動量とTVカメラの視準位置から求めることができる。

(3) 位置・姿勢の検出性能

a) 位置の検出性能

位置の検出精度はターゲットの三角形の一辺の長さや画像処理装置の画面上での大きさの比率で決まる。つまり、三角形の一辺の長さ200mmのターゲットを画像処理装置の画面上に200ドットの大きさで写し出した場合、分解能は1mmとなり、シールド機的位置は1mm単位で検出できることにな

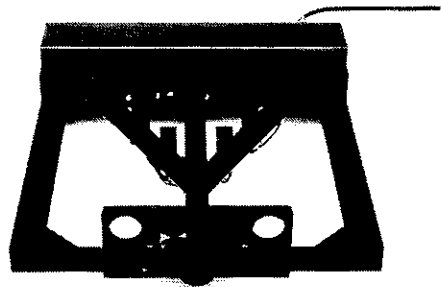


写真-1 ターゲット

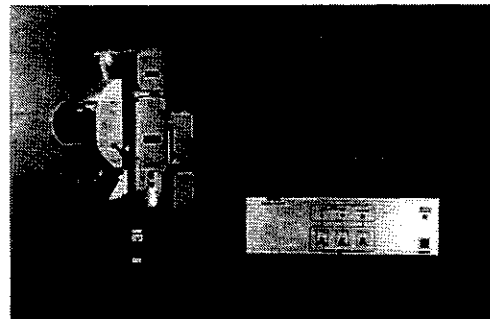


写真-2 検出装置

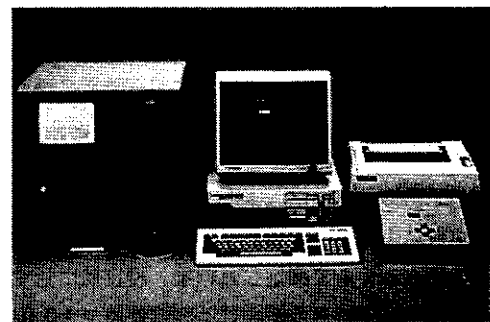


写真-3 計測演算装置

表-2 主要機器の仕様

機 器 名 称	仕 様	備 考
ター ゲッ ト	LED 赤色可視 輝度調節機構付 反射プリズム $\phi 24\text{mm}$ コーナプリズム 3ヶ	
検出 装置	トータルステーション 測距精度 $\pm(5\text{mm}+5\text{ppm}\cdot\text{D})\text{mm}$ 測角精度 $10''$ 以内 遠隔操作範囲 $\pm 2^\circ(\text{H}\cdot\text{V})$ リレーレンズ 4倍、8倍切換	DTM-10 (ニコン)
計測 演算 装置	TVカメラ CCD固体撮像素子 画素数 384(H)×490(V) 画像処理装置 分解能 512×384 画素 重心位置計算出力 0.1 輝点自動追尾	TI-26A (NEC) G2120 (応用計測)
	パーソナルコンピュータ CPU 16bit RAM 640KB	PC9801VM21 (NEC)
	リモコン ユニット 水平、垂直、フォーカスを デジタル信号でコントロール	

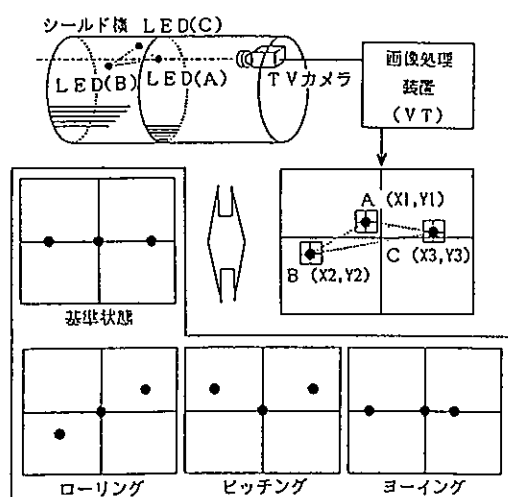


図-2 姿勢角の検出原理

る。

b) 姿勢の検出性能

姿勢角の検出精度は画像処理装置の画面座標に得られるターゲットの大きさに依存し、大きさがある程度小さくなった場合、誤差が大きくなる。実用上の目安としてターゲットのLEDで構成される三角形の一辺の長さが画像処理装置の画面座標上で200ドット(1画素を1ドットと称する)程度を確保できるように、測定距離に応じてレンズ倍率およびターゲットの大きさを変化させる。

実験によると、ある姿勢角を設定したターゲットを本システムで測定した結果、設定値に対する測定値のばらつきの範囲は95%信頼値で $\pm 0.04^\circ$ であった。

本システムの利用に当たっては、TVカメラの倍率等を調節して画像処理装置の画面座標上で三角形の一辺の長さを200ドット以上に確保できる範囲、すなわち測定距離10m~200mの範囲で使用し、それ以外の場合には検出装置の移動が必要である。

4. 実施例

(1) 測量結果

本システムはプロトタイプを含めて現在までに6ヵ所の現場で使用実績がある。

適用工事の中から掘削機外径2670mmの泥水加圧式シールド工法にて施工を行った工事における測量結果の例を図-3に示す。

当工事では、第2区間640mをほぼ全線にわたって本システムによる自動測量を実施し、同時に従来のセオドライト、レベルによる人為測量も併用した。図-3より自動測量システムによる測量値と人為測量値とを比較すると絶対値は把握できないものの、両者の差異は大きくなく十分実用に耐えることがわかった。

また、現場における掘進管理測量は本来ならばシールドの掘進毎に行うべきことであるが作業の都合上昼夜作業の交替時期に実施するのが一般的となっている。従来の測量作業が1回につき2~3人の人間を要して1時間程度かかっていたことを考えれば、自動測量システムの導入によりこの管理測量作業を常時、自動的に行うことができたため施工管理の省力化に大きく貢献できたといえる。

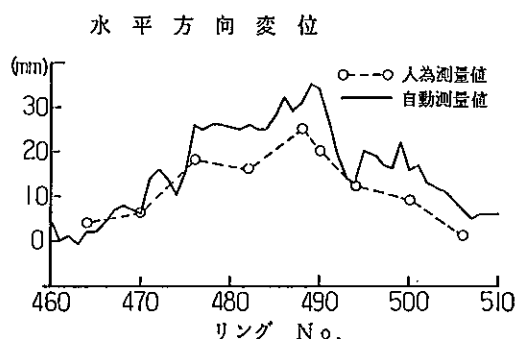


図-3 測量結果

(2) 適用性

自動測量システムはシールド掘進管理の省力化に非常に有効なシステムであるが対象工事の施工条件によっては、その能力を十分に発揮できない場合も出た。

これまでに、本システムを適用した現場の概要とシステムの使用実績を表-3に示す。

a) 効果が発揮される条件

本システムは、測量原理に光学式測定方法を用いているので、測定を行うためには検出装置からシールド機を見通すための空間を確保できること

表-3 自動測量システムの使用実績

記 号	S	H	N	O	M	C
対象構造物	下水道	下水道	下水道	下水道	下水道	下水道
工 法	泥水加圧式 シールド	土圧式シールド	泥漿式シールド	泥漿式シールド	土圧式シールド	泥水加圧式 シールド
掘削機外径	φ3682mm	φ2480mm	φ3280mm	φ2280mm	φ3500mm	φ2670mm
覆工内径	φ3250mm	φ2150mm	φ2894mm	φ1944mm	φ3050mm	φ2350mm
施工延長	918 m	1000 m	150 m + 411 m	460 m	1725 m	314 m + 640 m
工 期	S 60.2 ～ S 61.3	S 61.7 ～ S 63.3	S 61.8 ～ S 62.11	S 61.12 ～ S 62.9	S 62.7 ～ S 64.3	S 62.10 ～ S 64.9
実施時期	S 60.8 ～ S 61.1	S 62.2 ～ S 62.	S 62.4 ～ S 62.7	S 62.7 ～ S 62.8	S 63.2 ～ S 63.8	S 63.7 ～ S 63.9
線 形	40R → 2ヵ所 50R → 2″ 60R → 1″ 100R → 5″ 130R → 1″ 200R → 1″ 300R → 1″	200R → 4ヵ所	250R → 1ヵ所	150R → 1ヵ所	15R → 1ヵ所 20R → 4″ 25R → 3″ 30R → 1″ 50R → 1″ 100R → 4″ 150R → 1″ 500R → 1″	1000R → 1ヵ所
工事の特徴	・施工延長の約 65%が曲線区 間 ・鉄道下横断	・曲線区間が4 ヵ所あるが区 間長が短いた め線形はほぼ 直線に近い	・回転立坑にお いて90° 方向 転換した ・新幹線下横断	・礫破碎型掘削 機を使用	・急曲線区間が 連続する ・二段中折型掘 削機と土砂排 土ポンプ使用	・中間立坑から の両発進施工
自動測量シ ステムの使 用状況	・プロトタイプ 機を使用して 適用性の検討 を行うための 実験工事 ・適用区間は 直線区間100m 曲線区間200m ・性能的にはほ ぼ目標とした 能力を発揮 ・操作性に若干 の問題点が残 った	・実用機が完成 して初めての 実施工適用 ・システムの実 用性を評価す るために人為 測量の結果と の比較を行っ た ・適用区間は施 工延長の約50 %	・第1区間(150 m)において機 器の故障発生 により中断、 第2区間(411 m)では順調に 稼働した ・自動測量シ ステムによる掘 進管理が行わ れ測量作業の 省力化に効果 を発揮 ・今以上の測量 精度、操作性 の向上の要望 が出た	・システム稼働 中、シールド 坑内の熱気によ り陽炎現象が 発生し自動測 量システムの 測定精度が低 下した ・光学式測量方 法の弱点が出 た ・坑内換気の強 化などの対策 を行ったが解 消されず自動 測量システム の適用を途中 で断念した	・曲線区間の多 い工事のため シールド機の 挙動を常時把 握する必要が あり、システ ムは掘進管理 に役立った しかし、急曲 線区間では装 置の設置盛替 を頻繁に行わ なければなら ず実稼働率が 低下した	・第2区間(640 m)のみ適用 ・初期掘進から 全線で自動測 量を実施して 従来の人為測 量の回数を減 らすことがで きたので、か なりの省力化 が図れた

が最低条件となり、また、日当たりの掘進量の多い現場において省力化の効果が大きかった。

本システムの導入効果が十分に発揮されるための対象工事の施工条件は次のようにまとめられた。

- ①線形形状は直線または緩い曲線が多い
- ②装置の設置空間を考慮すると覆工内径2500mm以上で土圧式、泥漿式工法より泥水加圧式工法が望ましい
- ③日当たりの進行量が多く頻繁に測量が必要な場合

b) システム適用上の問題点

本システムの稼働中に発生した主な問題点は次の通りである。

- ①急曲線区間ではカーブ長が長いと装置の盛替作業が頻繁になり、人為測量を主体にせざるを得ない場合が生じた
- ②装置の取扱方法の習熟に時間を要した
- ③装置の設置誤差が発生していないかどうか常に確認が必要な場合があった

これらの問題点の中で、急曲線区間における実用性の低下については本システムの測量原理上やむを得ない問題であった。しかし、その他の事項についてはシステムの操作性、耐久性を向上させることにより解決できるので今後の課題としたい。

5. おわりに

本シールド自動測量システムは、測量作業の省力化だけでなく掘進管理にも大きな効果があった。

しかしながら、本システムに限らず自動測量システムは全般に装置が高額であることから中小規模のシールド工事に用いると工事費に占める測量費の割合が高くなり、費用上の問題からなかなか現場で採用されないことが多い。

このようなことから、今後は自動測量システムの活用範囲を出来形測量などへも広げたり、あるいはシールド機の自動運転システムへと発展させてコストダウン効果を明確にする必要があると考えられる。

【参考文献】

- 1) 鶴岡孝章、三上忠雄：「中小口径シールド工事における測量の自動化」 土木学会第41回学術講演会講演概要集 1986年11月
- 2) 菅野正徳、鈴木昭夫、三上忠雄：「画像処理を使用したシールド自動測量システム」 土木学会最新の施工技術 3 1987年 5月
- 3) Mikami,kanno,Ohnishi,Tsuruoka : [Development of a compact survey system for small shield tunneling] The 5th International Symposium on Robotics in Construction June.1988
- 4) 菅野正徳、大西常康、鶴岡孝章、三上忠雄：「画像処理装置を使用したシールド自動測量システム」 建設機械と施工法シンポジウム 論文集 1988年11月