

5. 画像処理装置を使用したシールド自動測量システム

(株)竹中土木：菅野 正徳・大西 常康・鶴岡 孝章

(株)竹中工務店：三上 忠雄

1. まえがき

シールド工事において、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及び姿勢を常時把握し、計画線上を掘進するように適切な方向制御を行う必要がある。

最近ではレーザー光線やジャイロを用いた自動測量システムが開発・実用化されているが、これらの多くは大口径のシールド工事を対象としており、シールド径が小口径化してくるにしたがい機器の小型化や耐環境性などの問題を解決しなければならない。

そこで、中小口径シールド工事を対象としてシールド機の位置及び姿勢をリアルタイムで検出する自動測量システムの開発を行った。本報では、開発した自動測量システムの概要と実施工に適用した結果を報告する。

2. 自動測量システムの基本構想

今回開発した自動測量システムは中小口径シールド工事及び推進工事に適用することを目標とし、下記の項目を基本的な考えとした。

- ① シールド機内に設置するターゲットは、小型、安価で耐環境性に優れたものとする。
- ② 検出装置は、温度、湿度、振動などの影響の少ない後方のセグメントや立坑に設置し、シールド機の位置及び姿勢を遠隔で検出できる装置とする。

この考え方に基づいて、ターゲットとして発光ダイオード（LED）3個を三角形に配置しそれを後方からTVカメラで撮影し、その映像を画像処理することにより3個のLEDの画像上の相互位置関係を求め位置及び姿勢角を演算する方法を考案した。

本システムの最大の特徴は、シールド機の計画線からのずれと計画線に対するピッチング、ローリング、ヨーイングの姿勢角を一つの検出装置によって遠隔で検出できることである。

3. 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-1に示す。シールド機内に正三角形に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、

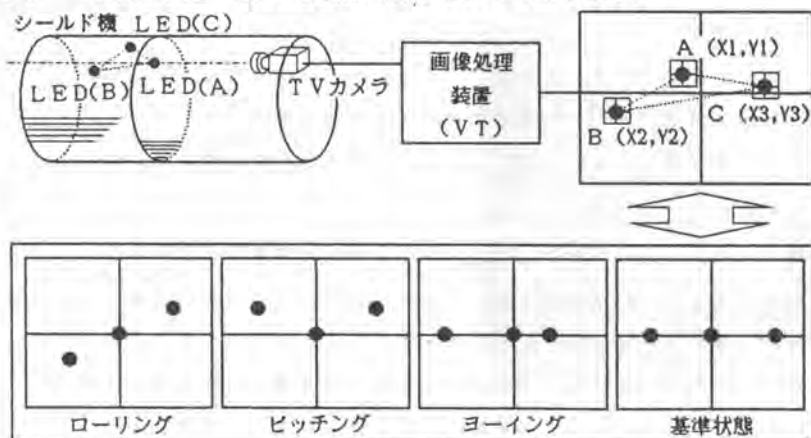


図-1 姿勢角の検出原理

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。ヨーイング、ピッチング、ローリングの3要素が複合して生じる実際の場合は、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移動量は画像処理装置上で求めた変位量とTVカメラの視準線の水平、垂直振り角及び光波距離計で得られたターゲットまでの距離から計算して得られる。

4. 自動測量システムの構成

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-2に示す。

(1) 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、20mm~200mmの範囲で5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。

(2) 検出装置

検出装置は、電子測距測角儀(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、垂直角の微調整及びフォーカス調整にモータ駆動装置を取り付け、地上の管理室から遠隔制御が可能である。TVカメラの倍率は4倍、8倍を測定距離に応じて選択できるようになっている。検出装置の外観を写真-2に示す。

(3) 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、映像の中の移動する輝点(ターゲットの3個のLED)を二値化して抽出し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。

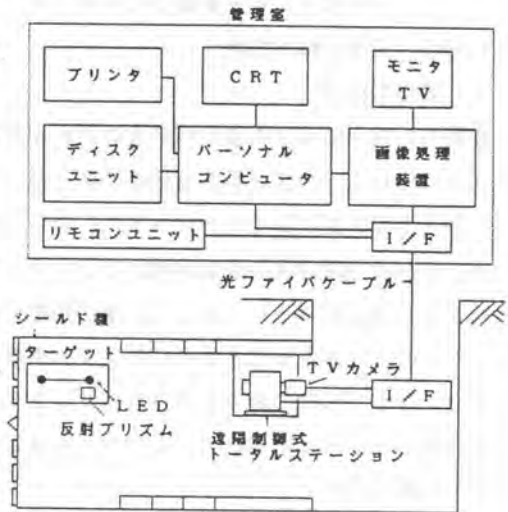


図-2 自動測量システムの構成



写真-1 ターゲット



写真-2 検出装置

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の測距、測角値と、フロッピィディスクに記憶してあるシールド計画線とからシールド機の位置、姿勢を演算する。計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-1に示す。

5. 位置・姿勢の検出性能

(1) 姿勢の検出

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边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)程度を得られるように、測定距離に応じてレンズ倍率及びターゲットの大きさを変化させることにより角度測定誤差の標準偏差 σ として 0.01° 程度の結果が得られる。したがってシステムの姿勢角検出誤差は 3σ で考えても 0.04° 以下と推定される。

(2) 位置の検出

画像処理装置上での1ドットに相当する実際の長さは、

(画像処理装置上での単位あたりの長さ)

= (実際の三角形の1辺の長さ)

÷ (画像処理装置上での1辺の長さ)

で求められる。したがって画像処理装置上で一边が200ドットを確保すればターゲットの最大である200mmの三角形を使用した場合でも1ドットが1mmに相当する。したがって検出誤差は ± 1 mm以下となる。

測量精度は以上述べた画像処理装置の検出精度とトータルステーションの測距・測角精度で決定される。本システムでは測量距離10m~200mの範囲で画像処理装置上で200ドット以上を確保でき、実施工に充分適用可能であると判断した。

6. 実施工への適用結果

本システムはプロトタイプを含めて現在までに7ヶ所の作業所で使用実績がある。その中での適用結果を以下に示す。



写真-3 計測演算装置

表-1 主要機器の仕様

機器名称	仕様		備考
ターゲット	LED	緑色可視 輝度調節機構付	
	反射プリズム	e24mm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 $\pm(5\text{mm}+5\text{ppm}\cdot D)\text{mm}$ 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)
	TVカメラ	CCD固体撮像素子 画素数 510(H) \times 492(V)	CS3310B (東京電子)
計測演算装置	画像処理装置	分解能 X512 \times Y384座標 重心位置計算出力 0.1 輝点自動追尾	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	

掘削機外径3520mmの泥水加圧式推進工事において、本システムによる測量及び在来のセオドライト、レベルによる測量によって得た掘削機の位置の比較を表-2に示す。両者の測量結果は、ほぼ一致しており自動測量システムの測量精度は満足できるものと言える。

また、シールド機外径3500mmの土圧式シールド工事における結果を図-3に示す。本システムで測量したシールド機の軌跡とセグメント出来形測量結果（セオドライト、レベルによる測量）を比較すると、セグメントの出来形は自動測量システムによる測量結果の軌跡とほぼ一致しており、本システムで測量したシールド機的位置は数リング先のセグメントの予測位置と考えてよい。したがって、本システムによる位置及び姿勢の測量結果をもとにシールド機が計画線上を進むように方向制御を行えば、従来の数リングおきのセグメント出来形測量より高精度の施工ができることが確認できた。

7. 結論

今回開発した自動測量システムは、目標とした中小口径シールド工事に十分適用可能な装置に完成することができた。本システムの使用によりシールド機的位置及び姿勢を常時把握することが可能となり、高精度かつ能率的なシールド工事の施工に効果を発揮している。

さらに、本システムの測量結果から得られたシールド機の掘進軌跡、シールド機の方向、オペレータの修正操作等のデータを定量的に解析することにより、方向制御の自動化を実現するための研究を行っている。

また、本システムの位置及び姿勢検出機能は、シールド工事以外にも適用可能な分野が考えられるので今後検討を進めていきたい。

表-2 測量結果の比較

管 No	上下方向の変位			左右方向の変位		
	従来 測量 実測値	自動 測量 計測値	差	従来 測量 実測値	自動 測量 計測値	差
	単位 (mm)					
17	+11	+5	6	-20	-20	0
18	+12	+10	2	-21	-23	2
19	+15	+3	12	-20	-20	0
20	+12	+9	3	-23	-15	8
21	+12	+21	9	-22	-19	3
22	+19	+19	0	-18	-16	2
23	+22	—	—	—	—	—
24	—	+13	—	—	-25	—
25	+18	+17	1	-18	-18	0
26	+22	+21	1	—	-8	—
27	+23	+22	1	—	-20	—
28	+18	+13	5	-15	-17	2
29	—	+24	—	—	-20	—
30	+20	+26	6	-22	-22	0
31	+15	+21	6	—	-13	—
32	+19	+22	3	-7	-13	6
33	+11	+22	11	—	-13	—
	差の平均値= 4.7			差の平均値= 2.3		

上、右 方向への変位 → +
下、左 方向への変位 → -

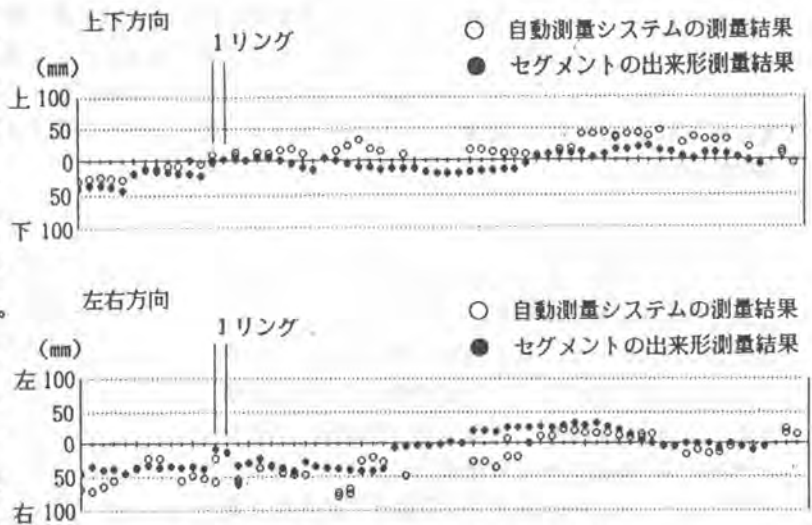


図-3 自動測量結果とセグメント出来形