

# シールド工事で測量機器の盛替え不要の 自動連続測量システム

## ステレオカメラ自動測量システム「MWMS™ (マームシステム)」の開発

山崎 友 啓

シールド工事における測量管理の効率化や施工精度の向上を目的に、ステレオカメラを用いた新たな自動測量技術「MWMS™ (マームシステム：Measuring Worm Method System)」を開発した。本システムは、固定したステレオカメラを用いて撮影したシールド機内の画像を解析することで、掘進中も連続してシールド機の位置（平面、垂直座標）と姿勢（ピッチング、ローリング、ヨーイング）を把握できる測量技術である。測量作業の省力化と、既往の自動測量技術では適用が難しかった小口径シールドトンネルへの適用を可能とした。

キーワード：AI、シールド、掘進管理、自動測量、ステレオカメラ

### 1. はじめに

社会課題である労働人口の減少を背景に、ICT等を活用した生産性の向上が加速的に進むなか、シールド工事においても作業の効率化や省人化、品質・安全管理の向上を目的として、AI (Artificial Intelligence: 人工知能) を導入した技術の開発が進められている。

シールド工事では既に機械化が進んでいるため、さらなる省人化を進めることは容易ではない。またシールド工事は、掘進中の推力や切羽圧等の掘進データの

ほかに、坑内測量データ、セグメント計測データ、裏込め材注入データ等の数値化されたデータが数多くあり、全てのデータを網羅して状況に応じた適切な管理を行うには熟練技術者のノウハウが必要となってくる。そのため単なる省人化だけでなく、熟練技術者不足にも対応した技術が求められる。

そこで当社は、上記課題に対応するためAIを用いてシールド機の自動運転を実現する図-1のAI Transform Shield® (以下、本システムという)を開発した。

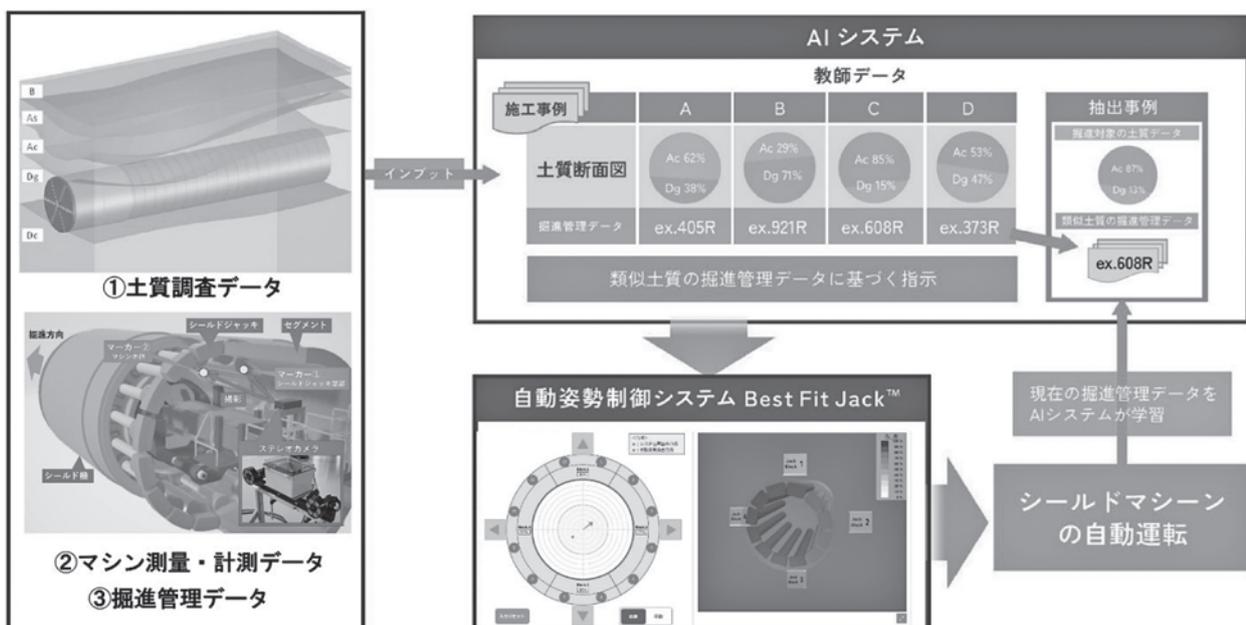


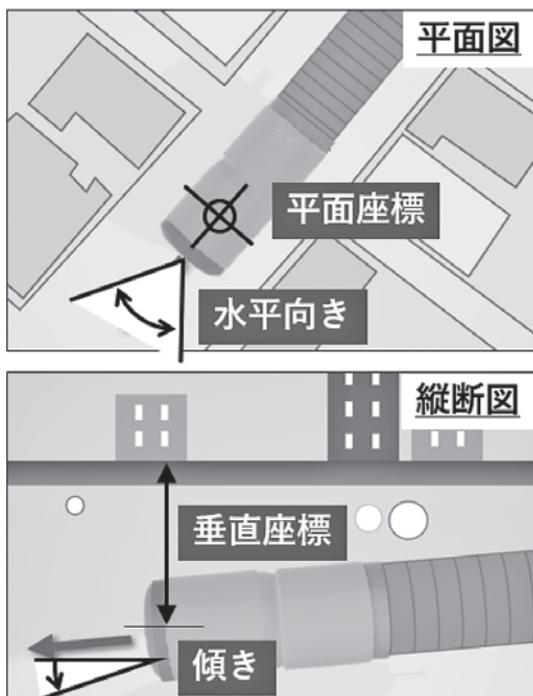
図-1 本システムのイメージ図

## 2. 坑内自動測量システム

本システムを活かすには、リアルタイムに図—2で示すシールド機の位置（平面、垂直座標）と姿勢（ピッチング、ローリング、ヨーイング）を把握することが前提であり、自動測量等のセンシング技術の活用が不可欠である。

既存の自動測量技術は、坑内のセグメントに自動追尾トータルステーションを設置し、後方の基準点と前方のシールド機内に設けた複数のターゲットを測量する。その結果を専用のプログラムで処理し、掘進中のシールド機の位置を把握しながら掘進を行っている。しかしこの方法では、例えば曲線掘進時は徐々にシールド機内のターゲットが視準できなくなるため、トータルステーションを都度移設しなければならない。また、トンネル坑内が狭い場合は、運搬台車の走行に支障となるためトータルステーションの設置ができない等の問題があった。自動追尾型トータルステーションが使用できる条件は、比較的トンネル断面が大きい場合（6m程度）に限られる。それよりも小さい断面ではトータルステーションの設置自体が難しいため、既往の自動測量技術が適用できない。

そのため、小口径シールド工事においても適用可能な自動測量技術として、ステレオカメラを活用した新たな方法の開発を行った。ステレオカメラとはその名の通り2つのカメラで構成されている距離測定のできるセンサ、即ち測距センサの一つである。2つのカメ



図—2 シールド機の位置と姿勢

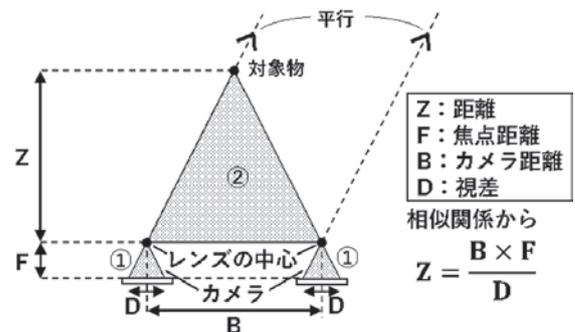
ラで撮った画像の見え方の違いをもとに、画像処理によって物体までの距離を計測する。

図—3に示すように、左右のカメラの見え方の差である視差Dを底辺、カメラの焦点距離Fを高さにもつ三角形①と、左右のカメラ距離Bを底辺、対象物との距離Zを高さとする三角形②の相似関係から測距を行っている。また、写真内の特徴点を複数計測し算出することで奥行情報、位置情報を取得する。

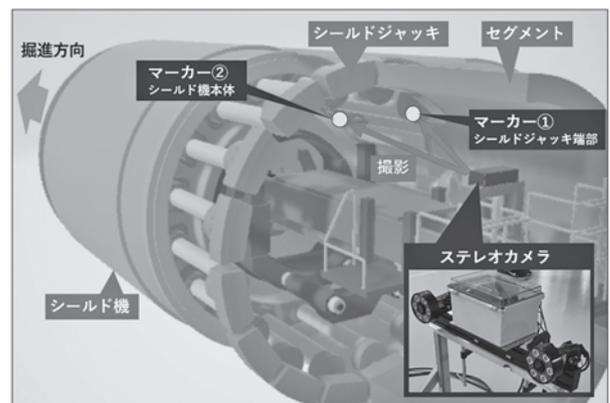
現場で適用する際は、図—4に示すように、作業デッキにステレオカメラを設置し、シールドジャッキ端部にマーカーを3つ、シールド機にマーカーを3つ設置する。シールド機のマーカーの座標は事前にトータルステーションを用いて座標を計測しておき、これら6つのマーカーを撮影することで各マーカーの座標を算出する。図—5にステレオカメラ測量手順図を示す。

## 3. ステレオカメラによる計測システム室内測定実験

ステレオカメラ計測の精度の検証のため、室内実験を行った。実際に現場実証実験を行う想定で、ステレオカメラ間の距離を450mmとした。また、カメラ周囲にリング型赤外線LED照明を設置することで他の照明の影響の低減を図った（写真—1）。ステレオカ



図—3 ステレオカメラ測距原理



図—4 ステレオカメラ現場適用イメージ図

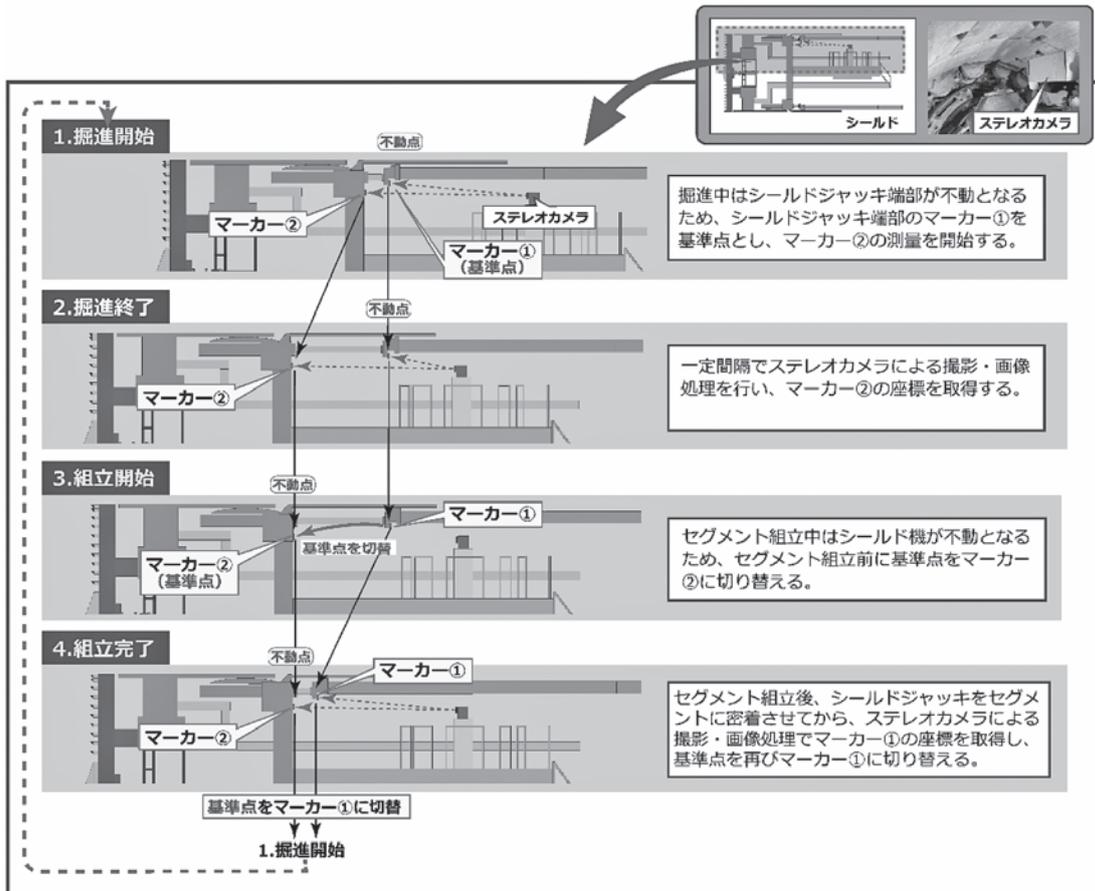


図-5 ステレオカメラ測量手順図

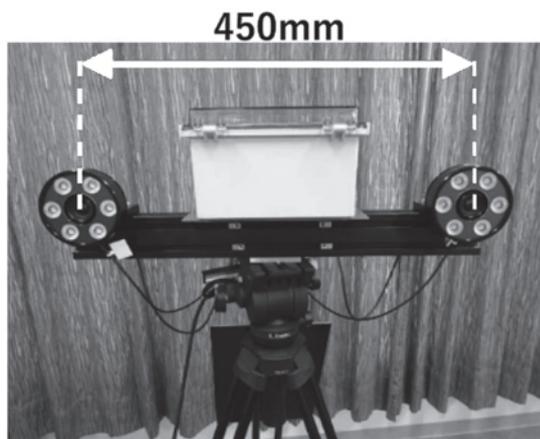


写真-1 ステレオカメラ

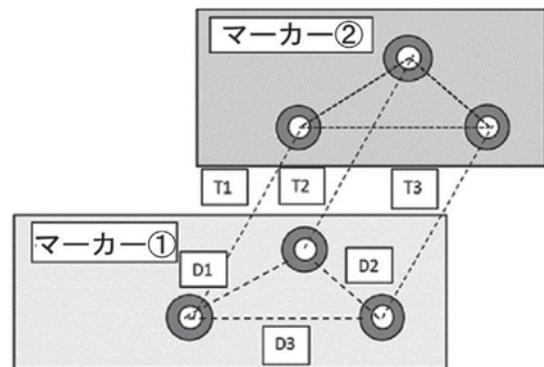


図-6 マーカ-配置図

メラで計測を行う固定マーカ-①・マーカ-②は外径150mmで反射材は40mmを採用した。

次に、このマーカ-を三角形になるように配置し(図-6)、マーカ-①を移動させたときのステレオカメラによる計測結果とトータルステーションによる精度比較を行った(写真-2)。

(1) 点間距離計測

マーカ-①同士の点間距離については測定距離が増

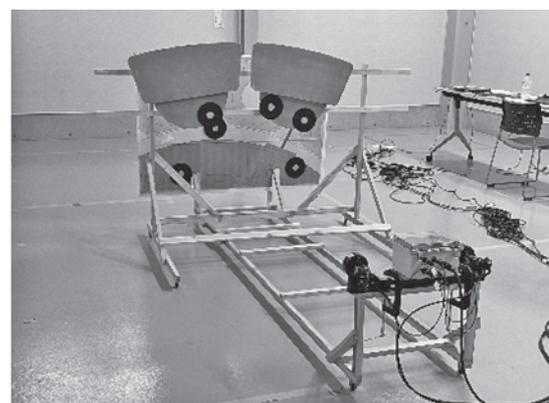


写真-2 室内実験状況

加するにつれて誤差が増加する傾向が見られた。しかし、カメラとの距離が3.5 m 以内であれば計測誤差は4 mm 以内となった(図-7)。

(2) 座標計測

Y 座標(上下)に関しては、計測距離 4.0 m を除いて誤差幅が2.4 mm に収まる結果となった。X 座標(左右)についても計測距離 3.5 m 以内であれば、誤差幅 6 mm に収まる結果となった。Z 座標(前後)については計測距離 3.5 m で 14 mm となっているが、計測距離が増えるにつれて誤差が線形的に増加している傾向がみられた(図-8)。

座標計測について、計測結果から誤差が発生する傾向をとらえることができるため、オフセットや補正をかけることで精度を向上させることができた。調整後の座標計測結果を表-1 に示す。計測誤差は± 2.5 mm 以内となり精度が向上した。

表-1 計測結果(座標計測誤差)

	計測誤差(平均)					
	①-1	①-2	①-3	②-1	②-2	②-3
$\Delta x$	1.1	0.0	-0.6	2.0	1.2	1.0
$\Delta y$	1.7	1.0	0.5	0.7	0.4	1.1
$\Delta z$	0.5	1.4	2.5	-2.3	-0.6	0.2

4. 現場での実証

ステレオカメラ測量の実用性を検証するため、当社のシールドトンネル工事現場(シールド機外径 3.0 m)でフィールドテストを行った。その結果、問題なく測量が行え、また計測精度も掘進 1 m あたり 4.0 mm 以内の精度となり、ステレオカメラ測量の実用可能性を確認した(写真-3)。

5. おわりに

シールドの自動測量システムとして、ステレオカメラを使用した計測システムの概要、測定実験について報告した。今後は数多くの現場でフィールドテストを重ね、更なる精度向上を図って、より高精度な計測装置の開発、実用化に向けて取り組む予定である。

また、AI を用いてシールド機の自動運転を実現する AI Transform Shield<sup>®</sup> と連携させ、高精度な掘進

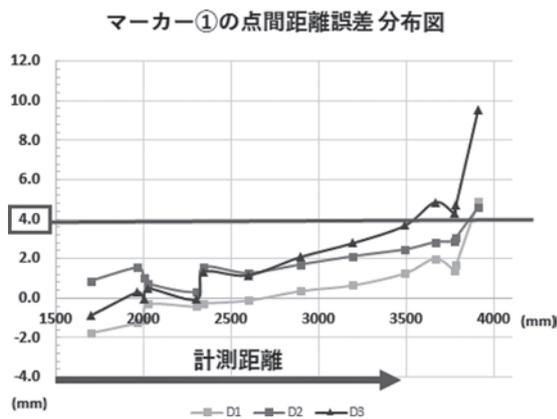


図-7 計測結果(点間距離誤差)

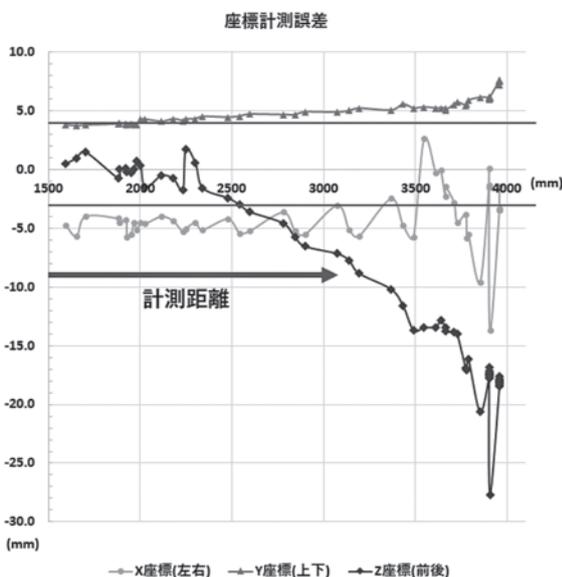


図-8 計測結果(座標計測誤差)

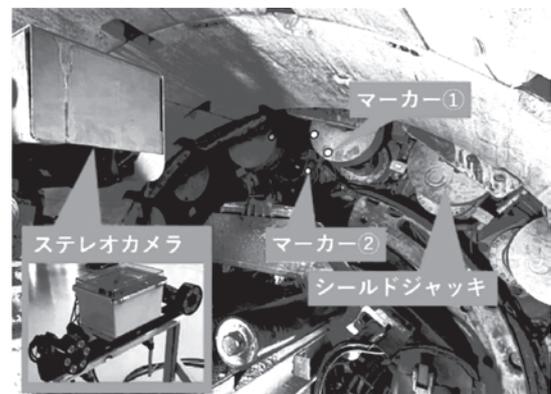


写真-3 現場実証実験状況

管理技術を確立して、品質の高いトンネル構築技術の提供を目指す。



[筆者紹介]  
山崎 友誉 (やまざき ともたか)  
戸田建設株  
土木工事統轄部 土木メカテック部  
課長

