

II-5 トータルステーションによる高精度な多測点自動変位計測システム

The high-precision deformation measurements system by total stations

桑原 清¹・宮崎裕道²・近藤高弘³

Kuwabara Kiyoshi, Miyazaki Hiromichi, and Kondoh Takahiro

抄録：トータルステーションを用いて長期間構造物の変位計測を行うと、トータルステーションを取付けた架台などが列車振動や温度その他の自然要因で傾斜・変位する現象が現れ、高精度で安定した測定結果を得ることが困難である。また、鉄道のように測点が直線状に並ぶ場合には、トータルステーションの視野内に複数のターゲットが入り測定不能となる場合もある。これらの課題を克服し長期間に渡り高精度で安定した計測を可能とした自動計測システムについて報告する。

キーワード：近接工事、変位計測、トータルステーション、三次元座標変換、行列式

Keywords : proximity construction, deformation measurement, Total Station, and 3-dimensional coordinates conversion, a determinant

1. はじめに

近接工事に伴う構造物等の変位・変位の計測には、従来は水盛式沈下計や電子スタッフなどが用いられてきた。これらの計測機器は、計測の方向成分が鉛直、水平または傾斜などの一次元のみであった。また、既設構造物が鉄道や高架橋のような場合、影響が線状に長く及ぶ事例もあり、この場合、測点側のセンサーが多数となり配線の煩雑化や設置工事費のコストアップなどの問題が生じていた。

これらの対応として近年、自動視準式のトータルステーション（以下 TS）が用いられるようになった。しかしながら、単純に TS だけを用いると、気温や日射、振動などによる TS 設置架台自体の変位・変形が発生するため、計測値の安定性や精度が低下し、TS が本来持つ性能を活かすことが難しかった。

そこで、TS を活用した計測の測定誤差について、一般に用いられている補正方法のみでは不十分と考え、TS 設置位置そのものが変位してもその影響をキャンセルできるマトリックス演算手法を考案した。

このマトリックス演算手法を用いた計測システム（HyPoS：ハイボス）は、長期安定性や精度を格段に向上させた。HyPoS に市販の自動視準式 TS を接続するだけで、考案したマトリックス演算が利用でき、100m 先の三次元変位量を 1mm の精度で、自動的に測定できる。マトリックス演算の効果は、TS の設置架台に日射等による微妙な傾斜や変位が発生しても影響さ

れず、高い測定精度が維持できることである。

本報告は通称 HyPoS と呼んでいる TS を用いた変位計測システムについて報告する。

2. HyPoS の概要

（1）HyPoS の構成

HyPoS は、市販の自動視準型トータルステーションを接続することで、内蔵されたマトリックス演算処理機能によって、簡単に高精度な「多測点自動変位計測システム」として構築する事ができる。

システムの構成を以下に示す。

- ・ TS（1秒読み自動視準型 TS）
- ・ HyPoS
- ・ パソコン（データ収集用）

＜以下オプション＞

- ・ TS シェルター（自動開閉式）
- ・ ターゲットシャッターシステム

HyPoS は、マトリックス演算処理および TS の制御・TS シェルターの制御等を行い、計測時は気象補正・振動検出再計測機能や雨天時のシェルター開閉などの機能をもっている。また、TS シェルターは、TS を防護するドーム開閉昇降式の収納装置である。ターゲットシャッターシステムについては後述する。

HyPoS の利用に当たり測点とは別に、立体的に基準点 4 点以上を配置する。

HyPoS の利用者は、面倒な補正計算や計測時の振動

1：正会員 JR東日本 東京工事事務所 工事管理室

（〒151-8512 東京都渋谷区代々木 2-2-6, Tel : 03-3379-4353, E-mail : k-kuwabara@jreast.co.jp）

2：正会員 大成建設(株) 土木本部 機械部 (163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

3：非会員 大成建設(株) 土木本部 機械部 (163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1)

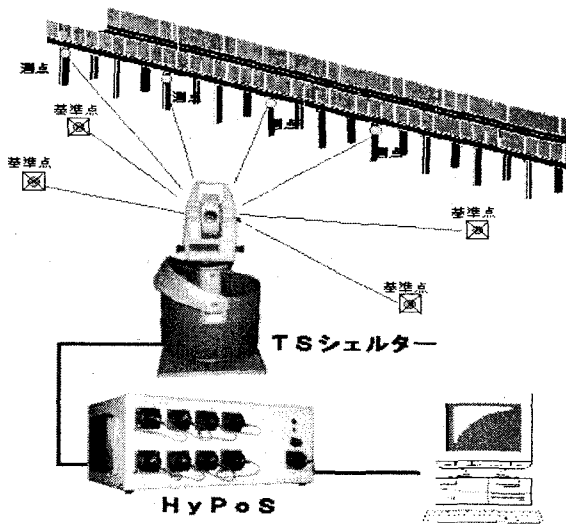


図-1 HyPoSシステム構成

表-1 HyPoSの機能比較

	HyPoS	他のトータルステーション を用いたシステム
気象補正機能	HyPoSには気象センサーを内蔵しており、気温、気圧、湿度の気象補正を行う。	気象補正機能は別途
処理方法	マトリックス演算処理による三次元リアルタイム座標変換にて高精度を確保 従来の補正方法は用いない。	幾何学的計算処理のみ補正を行う場合基準 点の鉛直角の補正を行う場合が一般的
TS設置架台の 影響	TS設置架台が微妙に傾斜したり、 変位しても影響を受けず測定可能	設置架台の傾斜および変位には対応できな い。
測定時振動対策	測定時振動がある場合自動的に再測定 して信頼できるデータを確保する。 (振動計内蔵)	測定時の振動があっても測定してしまう。
実用精度	100m地点で±1.0mm以内	距離によって変わるが 累積で±5～10mm程度

や気象データの取り込みなど意識する事なく、現在の計測結果を要求するだけで、長期間にわたり高精度な測定結果を入手できる(100m先で1mm以内の測定精度)。

また、マトリックス演算によりTSの設置架台が微妙に傾斜したり変位しても測定精度に影響を与えず計測する事が可能になっている。

HyPoSとその他TSシステムの機能比較を表-1に示す。

(2) マトリックス演算の原理

TSを利用して、構造物の変状・変位量を長期に観測しようとする発想は以前よりあった。その発想は、測量機で精密にmm単位で測量している現実から、単に測量機を利用して構造物を監視すればmm単位の精度で観測できるだろうとするものである。

確かに測量するとmm単位の精度で測定できる。しかし多くの場合、長期観測を続けるとその精度劣化は数倍以上にもなる。測量機を利用した多くの変状・変位計測の問題がこの点にある。

測量技術は幾何学体系によって構築された完成技術であり、測量そのものと精度には何の矛盾点も見出せない。しかし変状・変位を測定するとこの幾何学体系では説明できない矛盾が発生する。これは、測量では座標系が固定されている事が前提に幾何学が成り立つ

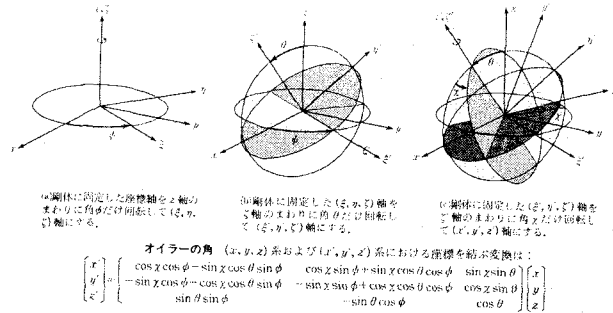


図-2 オイラー角の原理¹⁾

ているからであり、実際に長期観測する測量機は自然界の影響(日射や温度変化など)を受け常に同じ状態に固定され初期の座標系を維持することが事実上不可能であるために精度劣化をおこす。

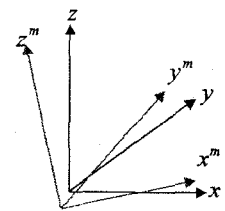


図-3 4C4の座標系

即ち、測量機の微妙な変位や傾きで座標系そのものが変化してしまう。TS設置架台の傾き等の発生により、初期に観測した座標点とある時間経過して観測する座標系では、実際には変位が発生していない測点であっても変位が発生したかのように観測されてしまう。

この解決策として座標系の傾きを計測する方法が考えられるが、実際この三軸の傾きを計測したとしても三軸の傾きからは元の座標系への計算は不可逆的になり計算は成立しない。

この三次元座標系の問題に取り組んだのがスイスの数学者 Leonhard Euler 1707-1783 (オイラー) で、オイラー角としてその原理を発表している。

筆者らは、オイラー角の行列パラメーターを同一平面上にない基準点4点の測定値から逆に計算する方法を考案した。この手法をマトリックス演算と呼び、これにより長期観測時の座標系の傾きを初期状態の座標系に戻す事ができるようになり、変状・変位を測量機の精度で確保することができるようになった。

基準点4点からマトリックス演算を行う手法を4C4と呼んでいる。4C4マトリックス演算機能は、初期座標系からの三軸の回転と三次元の変位移動が発生した座標系の変換を可能にするものである。図-3に4C4座標系を示す。

3. 実証試験および結果

(1) 屋内基本試験

カタログ調査により、測定精度に関わる、測距および測角の測定精度の優れていた2機種(ライカ

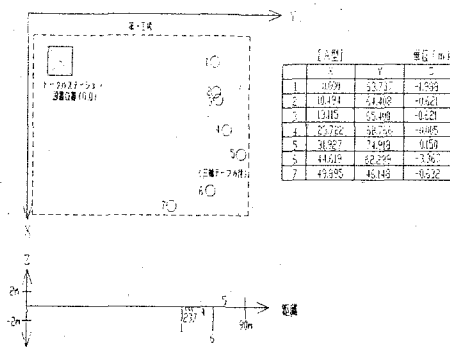


図-4 屋内配置図

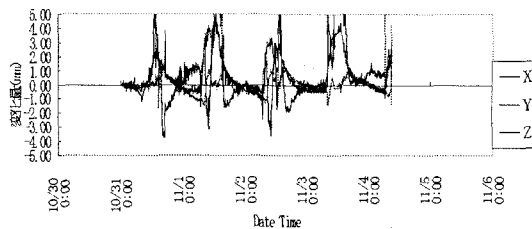


図-5 No.2ターゲットの従来方式の計測結果

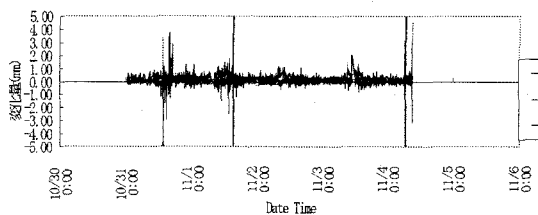


図-6 マトリックス演算を用いた計測結果

TCA-1800、ジオジメータ 640 型) を選定し屋内試験を行った。

屋内試験場所として工場内に7個のターゲットを設置して順次視準した。各TSの測距データは気温、気圧、湿度による気象補正を行い24時間連続で計測した。

図-4に測定配置図を示す。No. 5のターゲットには三軸方向に各々、所定量微動させ、計測値と微動量を比較することで分解能を確認した。その結果両TS共に81.5m離れた位置で0.1mmの移動量を検出することができた。

この状態でターゲットの計測座標を従来の方法で三次元座標に変換したターゲット No. 2 の計測結果を図-5に示す。

この4日間の連続計測データから、明らかに日変化がTSの計測結果に現れている。即ち実際には変位が無いのに、計測結果には変位が一日を通して変化するような観測結果となっている。

図-5のデータをもとに、基準点4点を用いる4C4マトリックス演算をシミュレーションした結果を図-6に示す。図-6の基準点は屋内試験ターゲットNo. (1-3-6-7)を用いた。

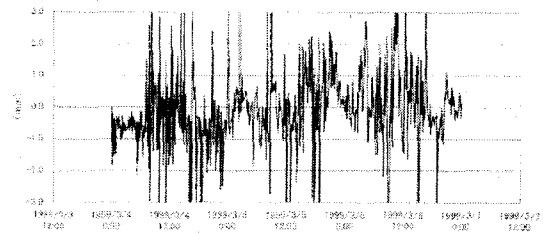


図-7 列車振動の影響による計測結果

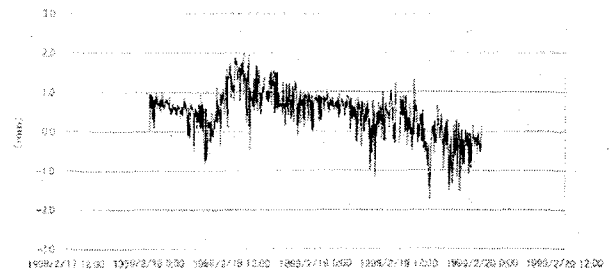


図-8 振動影響排除による計測結果

この手法により、計測結果はほぼTSのカタログ精度に近づき、日変化の影響を受けずに非常に安定した結果を得ることができた。

なお、マトリックス演算手法による2機種の差異はほとんど無く、ほぼ同等の性能を有するものとする。

(2) 計測時振動による影響の処理

計測時の振動の影響を調べるため、鉄道列車通過の振動を受けやすい場所にTSを設置して試験を行った。

その結果、マトリックス演算手法における長期間計測で最も計測結果に影響を与えたのが振動であった。

図-7に計測中に列車振動の影響を受けた様子を示す。

列車振動の影響を取り除く測定方法として、今回測定値と前回測定値との絶対差とその時の振動加速度値から再計測を判定する処理方法を考案してその有効性を確認した。

振動加速度計で計測した計測値を設定振動値と比較して、計測結果が有効か無効かを判定する。続いて前回計測値と現計測値との絶対差を求め、設定した計測閾値と比較して再計測を実施するかを判断する。

この処理方法により、計測時振動影響を受けたイレギュラーな計測を排除し、安定した計測結果が得られ、かつ実際の変位を捕えることができた。図-8に計測時の振動影響を上記の手順で排除した時の結果を示す。

4. ターゲットシャッターシステム

TS自動計測システムにおいては、TSの望遠鏡視野内に同時に複数の測点用ターゲットプリズムが見えてしまうとTSから正しい計測データが得られないという欠点があり、現在は、同一視野内に入らないようにやむを得ず測点をズラしたりTS台数を増やす等して対処してきた。特に、一直線状に細かいピッチでターゲ

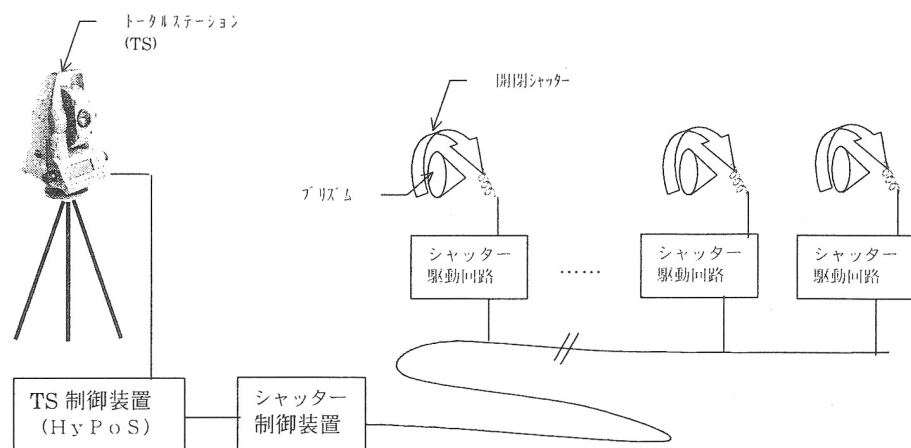


図-9 ターゲットシャッターシステム開発イメージ

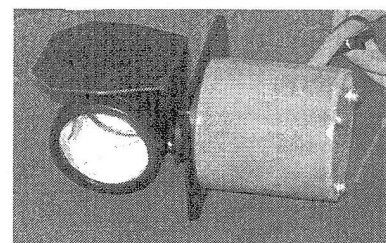


写真-1 試作したシャッター

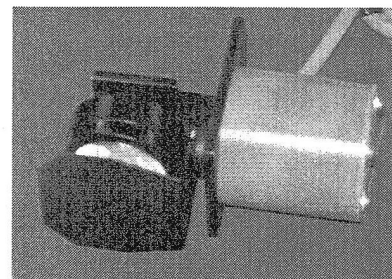


写真-2 試作したシャッター

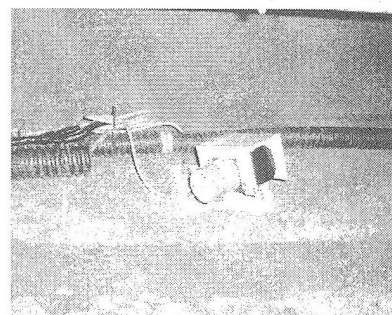


写真-3 フィールド試験

ットプリズムを設置することが多い鉄道構造物の計測においてこの欠点は顕著である。

そこで、同一視野内に複数のターゲットプリズムがあっても目的とする測点以外のプリズム反射面を一時的に遮蔽してしまうターゲット用シャッターシステムを開発した。

シャッターシステムの開発にあたっては、TSを用いた自動計測システムの利点を極力損なわないことを考慮し、開発の目標を以下のようにした。

- 1) 配線は、TSの制御及び測定データを取得するHyPoSの側に設置するシャッター制御装置とターゲットプリズム側のシャッター駆動回路を通信用2芯と電力供給用2芯、計4芯以下でマルチドロップ接続可能とし、配線作業の簡便化を計る。
- 2) シャッター開閉機構は、電力供給に配線が簡単な通信電線 (CP-EV程度) で、しかも長距離配線 (1km程度) が可能なように省電力型とする。
- 3) シャッター機構と駆動回路は、十分な耐環境性および耐久性 (2年程度以上) を有する。
- 4) 低価格であること。

開発イメージを図-9に示す。

シャッターの動作手順は以下のとおりである。

- 1) HyPoS からシャッター制御装置へ現在測定中の測点と現在の状態および次の測点情報を通知する。
- 2) シャッター制御装置から開けるべきシャッターのIDと「開」の信号を送出する。
- 3) 各々のシャッター駆動回路は受信したIDと自己のIDを確認し一致すればシャッター開、不一致ならばシャッター閉の動作を実行する。
- 4) 以降、1)から繰り返す。

また、開発にあたっては以下の試験を実施した。

- 1) 恒温・恒湿槽を用いて、部品及びシャッター試作品の耐環境・耐久性試験。
- 2) シャッターの設計試作及び上記環境試験を含む動作試験。
駆動部品として2種類 (電磁ソレノイド、マイクロモータ) 選定し、設計試作。写真-1, 2 に試作したシャッター

の1例を示す。

- 3) シャッター駆動回路及びシャッター制御装置の設計試作
- 4) フィールド試験
開発したターゲットシャッターが正常に機能し、鉄道軌道において安定して動作するか検証確認のため、秋葉原駅の総武線軌道付近に数個のターゲットシャッターを設置して約1ヶ月間のフィールド試験を実施した。

4. おわりに

本システムは、現場の変位・変状を計測するのに有効でかつ容易に構築することができるシステムであり、これまでに、三十数か所の近接工事で利用された実績がある。また、ターゲットシャッターシステムは、現在複数の現場において実際の計測に使用し、長期耐久性の確認を行うとともに更なる使い勝手の向上を図っている。

本システムを用いる事で、利用者は簡単な操作のみでマトリックス演算手法を利用でき、長期間安定して高精度な計測結果を得ることができる。

参考文献

- 1) 広中平祐 編集代表：現代数理科学事典 (ENCYCLOPAEDIA OF MATHEMATICAL SCIENCES) 大阪書籍株式会社出版、pp.6、1994。