

14. マトリックス演算手法を用いたトータルステーション変状計測システム

東日本旅客鉄道(株)：桑原 清、
大成建設(株)：宮崎 裕道、*近藤 高弘

1. はじめに

近接工事に伴う構造物等の変位・変状の計測には、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^{1)、2)}。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複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、新しい方法として自動追尾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、長期安定性や精度などが低下し、TSの利便性を活かすことが難しかった。

我々は、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：ハイポス）は、長期安定性や精度を格段に向上させた。HyPoSに市販の自動追尾式TSを接続するだけで、内蔵され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を用いた変状計測システムについて報告するものである。

2. 開発内容と来歴

近接工事に用いる変状計測システムにTSを活用し、構造物の変位・変形、地盤変形等を監視する事を目的として、東日本旅客鉄道(株)と大成建設(株)で共同開発を行った。

平成 9年度：TS基本性能の確認試験、およびデータ補正アルゴリズムの研究を実施

平成10年度：マトリックス演算アルゴリズムを用いた長期安定性の試験、およびマトリックス演算アルゴリズムを用いたユーザインターフェースの設計試作を実施

平成11年度：試作HyPoSによる長期安定性・性能試験、および従来方法での測定とHyPoSとの比較試験の実施

以上の来歴によりHyPoSが開発され、一般ユーザでも、難解なアルゴリズムを意識しないで利用できるTS変状計測システムを完成した。

3. HyPoSの概要

HyPoSは、市販の自動追尾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」として構築することができる³⁾。

システムの構成を以下に示す。

- ・ TS (1秒読み自動追尾型TS) : 1台
- ・ HyPoS : 1台
- ・ TSシェルター (自動開閉式) : 1台
- ・ パソコン (データ収集用) : 1台

HyPoSには、マトリックス演算処理およびTSの制御・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たせてある。

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。

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。

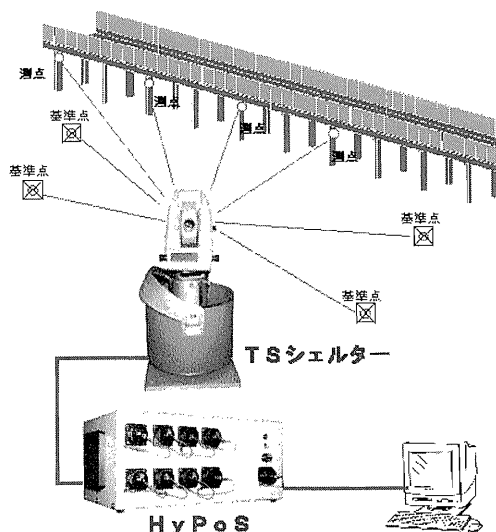


図-1 HyPoSシステム構成図

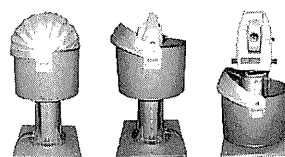


写真-1 TSシェルター開閉状況

	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 実績で±5~10mm程度

表-1 HyPoSとその他TSシステムの機能比較

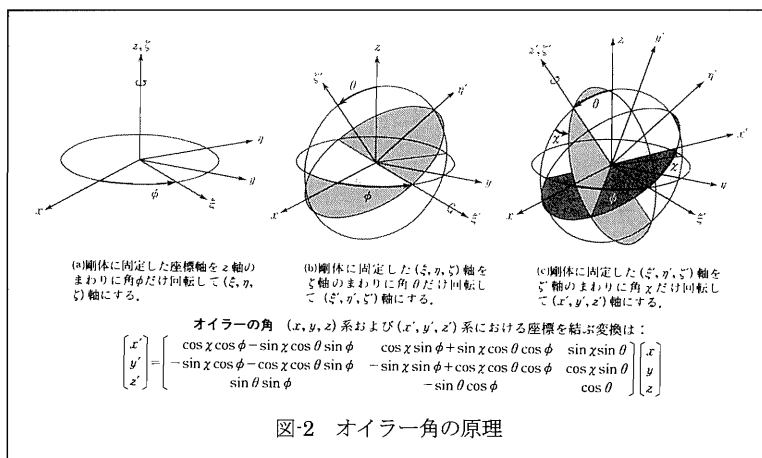
4. マトリックス演算の原理

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る。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。

そもそも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っているからである。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のである。



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。それに対して実際に変位が発生していない測点は、初期に観測した座標点とある時刻経過して観測する座標系ではTS設置架台の傾き等が発生してしまい変位が無く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。



写真-2
Leonhard Euler

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) である。オイラー角としてその原理を発表している⁴⁾。

そこで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点から逆に計算する方法を考案した。この手法をマトリクス演算と呼び、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。

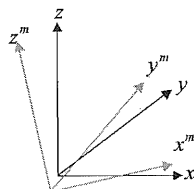


図-3 4C4の座標系

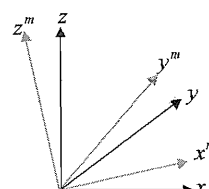


図-4 3C3の座標系

基準点4点からマトリクス演算を行う手法を4C4と呼んでいる。4C4マトリクス演算機能は、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。

また基準点3点からなるマトリクス演算を3C3と呼び、初期の座標系の三軸回転成分のみを変換可能にするものである。

5. 実証試験および結果

5-1. 屋内基本試験

試験で用いるTSの機能および性能をカタログ調査した結果、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TCA-1800、ジオジメータ640型）を用いて屋内試験を行った。

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-5に示す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-6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。

この解決策としてマトリクス演算による手法が有効になる。図-6のデータをもとに、基準点4点を用いる4C4マトリクス演算をシミュレーションした結果を図-7に示す。図-7の基準点は屋内試験ターゲットNo.(1-3-6-7)を用いた。

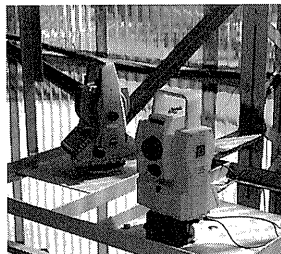


写真-3 TCA-1800と640型

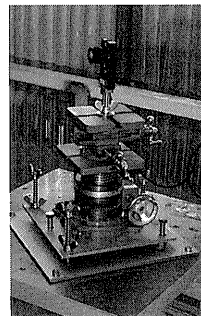


写真-4 三軸テーブル

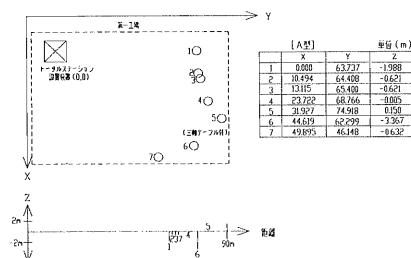


図-5 屋内配置図

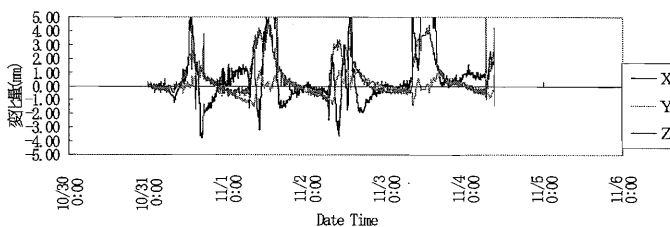


図-6 No.2ターゲットの従来方式の計測結果

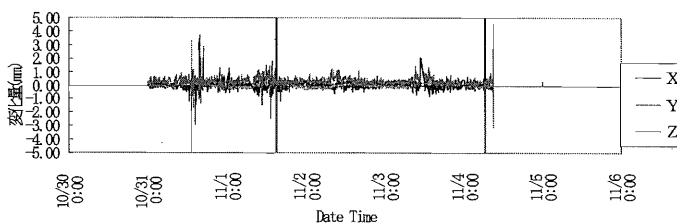


図-7 No.2ターゲットにマトリクス演算を用いた計測結果

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。

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。

5-2. 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-8に計測

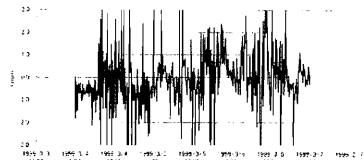


図-8 列車振動の影響による計測結果

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、振動加速度および前回計測値との絶対差を比較判定して、再計測を行う処理方法を考案してその有効性を確認した。振動・計測しきい値による処理アルゴリズムを図-9に示す。

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、設定した計測しきい値Sとを比較して再計測を実施するかを判断する。

前回計測値(x_f, y_f, z_f)、現計測結果を(x_s, y_s, z_s)とする。

再計測回数をn回までとする。

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。

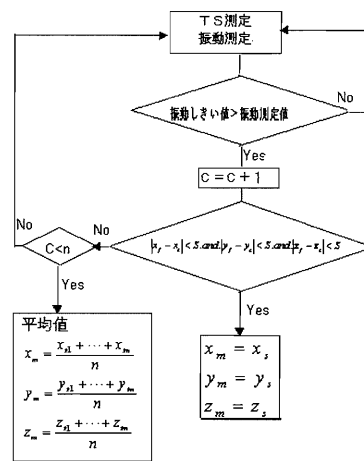


図-9 振動・測定 Algorithm

5-3. 従来計測器との比較検証

本システムの信頼性を検証するため、従来型の計測方法（水盛式沈下計・電子スタッフ（EPS））で計測した時の計測値とHyposで得られた計測値の比較試験を行った。

比較試験は、上下方向に微動可能なスライド機構のある計測機器設置架台上に、水盛式沈下計1・電子スタッフ・TS用ターゲットを設置して行った。

この状態で、スライド架台を上下させ、各方法の計測値を比較し、精度試験を行った。

図-10に水盛式沈下計および電子スタッフ（EPS）のスライド架台強制変位後の応答変化を示す。

スライド架台に強制変位を発生させ、各従来型計測機はその変位量をとらえている。

同様にHyposのスライド架台強制変位による計測変化量を図-11に示す。

強制変位量は2→3→6→10→20→30→15→0→-10→-20→-30→0mmと段階的に変位させたときのターゲットの計測結果（Z軸方向）である。

スライド架台を用いた強制変位による計測結果より、Hy P o Sを用いた計測は、従来計測器と比較しても良好な結果が得られた。

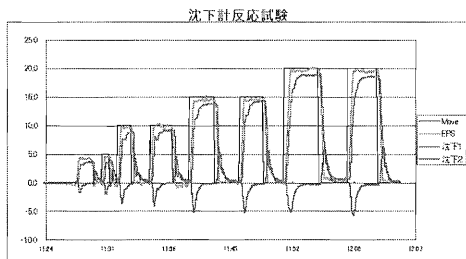


図-10 従来型計測器の強制変位応答結果



図-11 Hy P o S計測による強制変位応答結果

6. おわりに

マトリックス式変位自動計測システムは、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る。

また、現在近接工事に伴う構造物の変位・変状計測として、7箇所の現場でHy P o Sが利用されている。本システムの使用に当たり、従来の測量的な考えと異なる点について留意が必要である。

- ・基準点の配置位置は、幾何学的に立体になるように配置する。
- ・TS設置場所は、日変化で変形する場所に設置しても対応できる。
- ・TS設置場所に間欠的な振動があっても対応できる。

以上のようにHy P o Sを用いる変位計測は、従来のTSのみを用いたシステムとはかなり異にする。

またHy P o Sを用いる事で、一般の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、その高精度な計測結果を得ることができる。



写真-5
ターゲット設置状況

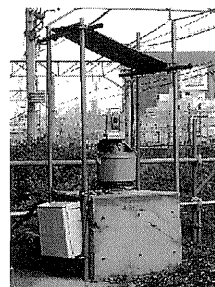


写真-6
Hy P o S設置状況

参考文献

- 1) 土質工学会編：近接施工、1989.
- 2) 宮崎裕道：電子スタッフによる沈下計測システム、測量、Vol45, No.9, pp.30-35、1995.9.
- 3) 古高昇始、桑原清、宮崎裕道、近藤高弘：トータルステーションを利用した計測装置に関する基本試験、土木学会第53会年次学術講演会、VI-353, pp.707-706、1998.10.
- 4) 広中平祐 編集代表：現在数理学事典 (ENCYCLOPAEDIA OF MATHEMATICAL SCIENCES)、大阪書籍株式会社出版、1994.