

レーザートラッカーAT-402 近距離測定精度調査

PRECISION TESTS WITH LEICA LASERTRACKER AT402 IN SHORT-RANGE MEASUREMENT

木内淳^{#,A)}, 木村洋昭^{B)}, 松井佐久夫^{B)}, 安積則義^{B)}, 甲斐智也^{A)}

Jun Kiuchi^{#,A)}, Hiroaki Kimura^{B)}, Sakuo Matsui^{B)}, Noriyoshi Azumi^{B)}, Tomoya Kai^{A)}

^{A)} SPring-8 Service Co., Ltd.

^{B)} RIKEN

Abstract

We have carried out precision tests with Leica lasertracker AT402 in short-range (4–6m) measurement. Its typical precision value is $7.5\mu\text{m}+3\mu\text{m}/\text{m}$. We set 6 measured points on stone precision tables, and obtained 24 data sets with different tracker positions. From the measurement, deviations (1σ) of the three-dimensional precision were $9\mu\text{m}$ for 4m, and $13\mu\text{m}$ for 6m, and the total precision was estimated to be $1.3\mu\text{m}+2\mu\text{m}/\text{m}$. Using this value, a calculated error (1σ) of network analysis was estimated to be $8\mu\text{m}$ and it was good agreement with obtained deviation of the most probable values by network analysis using 8 data sets with 3 tracker positions.

1. はじめに

SPring-8 の X 線自由電子レーザー施設(SACLA)では、加速管やアンジュレータなどの機器のアライメントや建屋変位の測量に、Leica Geosystems 社製のレーザートラッカーAT402 を使用している^[1]。このトラッカーは絶対距離計を装備しており、3次元位置精度のメーカー提示スペックは $\pm 15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ (最大許容誤差)、 $7.5\mu\text{m}+3\mu\text{m}/\text{m}$ (典型的な値)で、5m では最大 $45\mu\text{m}$ 、 $22.5\mu\text{m}$ である^[2]。

我々は将来の加速器高度化に備えて、長さ 4m の架台上での機器のアライメントを想定し、このトラッカーの3次元位置精度を調査した。

精度に関しては、このトラッカーを実際に使用してみるとメーカースペックよりも高精度という感触を得ており、またネットワーク解析の場合でも解析上の誤差は測定者の感覚より大きいと感じているので、複数回の測定を行い、得られたデータの分散を評価した。一方、確度はこのトラッカーより精度の高いオートコリメータの測定結果を基準として差を求めた。

トラッカーの測定誤差要因として、器械点・測点近傍の環境変化(温度・気圧等)や操作オペレーターの作業熟練度(リフレクターの設置誤差等)が挙げられる。上記の誤差要因を極力小さくするため、測定を行った建屋内の環境変化を $\pm 1^\circ\text{C}$ になるように測定時間等を調整し、熟練者が操作した。

またトラッカーの気象補正係数は $1\text{ppm}/1^\circ\text{C} \cdot 1\text{ppm}/4\text{hPa}$ であり、補正値は今回調査した環境で $1.7\mu\text{m}/\text{m}$ 程度となる。測定最長距離は約 6m なので、メーカースペック $\pm 15\mu\text{m}+6\mu\text{m}/\text{m}$ に加味される気象補正値は僅かであり、本測定結果は器械単体の精度であると考えられる。

[#] kiuchi@spring8.or.jp

2. 精度調査

2.1 測定概要

Figure 1 に示す石定盤上(2m 石定盤 $\times 2$ 台、斑れい岩製、熱膨張係数は $5.4 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ であるが解析には入っていない)に 6ヶ所の測定基準座を固定し、位置を変えた 6ヶ所の器械点から測定した。これを 1セットとし、1日2回(午前・午後)計4日間繰り返した。測定は正反平均測定(正5秒+反5秒の精密測定モード)で行った。比較対象とする真値は最初に測定した6測点 $\times 6$ 器械点のデータからネットワーク解析を行い、得られた最確値を使用した。Table 1 に精度調査項目を示す。4m 以内・6m 以内は 1 器械点からの測定とした。これは、実際の機器アライメント据付現場で、トラッカーを使用(1器械点)する状況を想定しており、その際のアライメント可能な精度を調査した。

また 1 器械点でアライメントを行った後、最終的な相対位置を把握するために行う 3 器械点でのネットワーク測量精度を調査した。これらの測定概要図を Figure 2 に示す。なお、ネットワーク解析には New River Kinematics 社製の 3 次元計測ソフトである Spatial Analyzer (SA) に付随するネットワーク解析プログラム(USMN)を使用した。測定した 8 セットのデータをそれぞれネットワーク解析した結果の最確値のばらつきを調べ、真値とした 6 器械点での結果と比較した。

座標系は測点 P1 を原点に、レベル・方向基準を P6 とした左手系とし、器械点移動毎に座標系を作成した。新規に座標系を作成するため、原点 P1(XYZ) とレベル・方向基準の P6(XY) の測定結果は常にゼロとなる。P3 については V ブロックで 240mm 嵩上げし、他測点と相違が見られるか併せて調査した。

Table 1: List of Survey Item

Survey item	# of tracker position	# of data set
Less than 4m	1	24
Less than 6m	1	24
6m-network survey	3	8

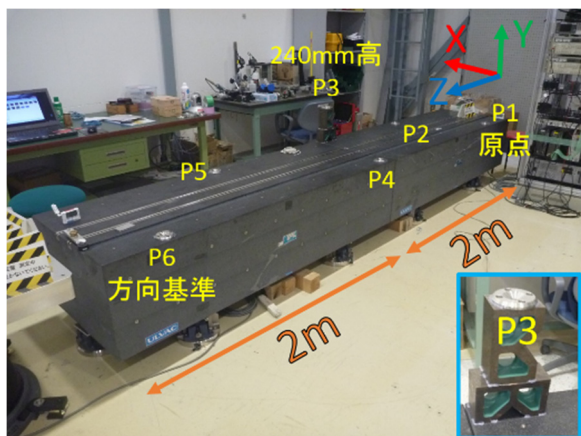


Figure 1: Measured points on stone surface tables.

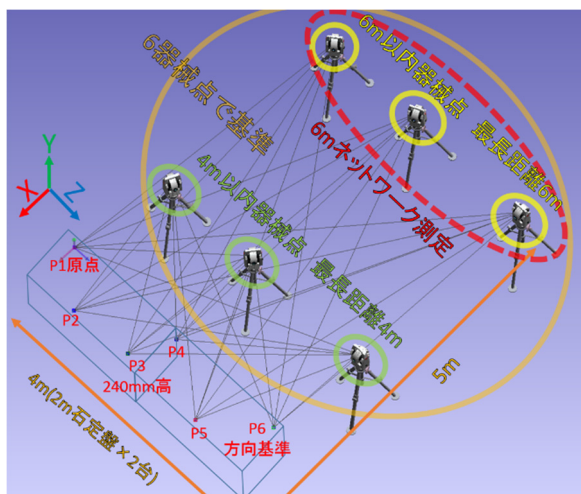


Figure 2: Schematic view of precision test.

2.2 測定結果

標準偏差(1 σ)と最大誤差の結果一覧を Table 2 に示す。AT402 から 4m 以内の測定では 3 次元の標準偏差(1 σ)が 9 μm 、6m 以内での標準偏差(1 σ)が 13 μm となった。4m 測定の詳細をプロットした Figure 3, 6m 測定の詳細をプロットした Figure 4 に示す通り、基準値との偏差は系統的なものではなく、ランダム性の強いバラつきとなっている。240mm 嵩上げた P3 についても他測点との顕著な違いは見られなかった。トラッカーは 3 次元の位置を計測するが、その設置位置によって各座標の精度は変わる。本測定では石定盤短手方向にトラッカーを設置したので、絶

対距離計の測定比重が大きくなる X 方向は特に精度が良かった。一方角度エンコーダの測定比重が大きくなる石定盤長手 Z 方向(水平エンコーダ)と上下 Y 方向(鉛直エンコーダ)について、同等の精度のエンコーダを使用していると思われるのに Y 方向の精度が良いのは、測定に使用している角度の範囲が狭いためと考えている。

Figure 5 にメーカー仕様と本測定結果をプロットした図を示した。本測定結果から測定条件を整えれば 6m 程度の近距離で 1 σ (XYZ)=13 μm 、4m では 9 μm という非常に高精度な測定を行うことができると言える。これは、メーカー提示参考値である Typical Value ($\pm 7.5\mu\text{m} + 3\mu\text{m}/\text{m}$) の半分程度である。二つの計測値から求めたトラッカーの計測精度は 1.3 $\mu\text{m} + 2\mu\text{m}/\text{m}$ (1 σ) という値になる。

多角(複数器械点)から測定を行ったデータをネットワーク解析することで精度は更に良くなる。トラッカーは距離の精度に比べ角度精度のほうが悪いので、通常トラッカーから見てエラー分布は距離方向に潰れた楕円体になり、平面図では楕円に近い形となる。XZ 平面に沿った複数の器械点から測定することで、X と Z に関しては情報が増えるので特に Z の精度が向上する。しかし上下方向である Y の精度はあまり向上しない。Figure 6 に示したネットワーク測量エラー分布を見ると 3 方向から測定することで、エラー分布の楕円は小さくなり、併せてバラつき(1 σ)も小さくなっていることがわかる。

またネットワーク解析をする上で必要なのがトラッカーの精度(距離と角度のエラー)であり、結果はこの値を使用し求める。これらの値はメーカーから初期値が与えられており、AT402 では距離エラー 7.6 μm 、角度エラー 1 秒と安全側の数値が提供されている。通常、この値はメーカー側とユーザー側の摩擦を避けるため変更しないが、今回の計測から得られた精度である距離:1.3 μm 、角度:0.45 秒を使ってネットワーク解析を行うと、実測定結果で求めたエラー(XYZ)と同程度になった。

ネットワーク解析では器械に最適な精度を与えることにより、解析上の誤差と実測定の誤差から生じる測定感覚のズレを修正することができると思われる。

Table 2: Result of Measurement and Analysis

1 σ & Maximum Error	dX (mm)	dY (mm)	dZ (mm)	dXYZ (mm)
4m_1 σ	0.003	0.004	0.008	0.009
6m_1 σ	0.004	0.005	0.011	0.013
6m_Network_1 σ	0.002	0.004	0.005	0.006
Error(1 σ) of Network Analysis	0.002	0.007	0.004	0.008
1.3 μm , 0.45sec				
4m_Maximum	0.009	0.012	-0.023	0.027
6m_Maximum	-0.014	0.016	-0.028	0.036
6m_Network Maximum	0.007	0.010	-0.012	0.017

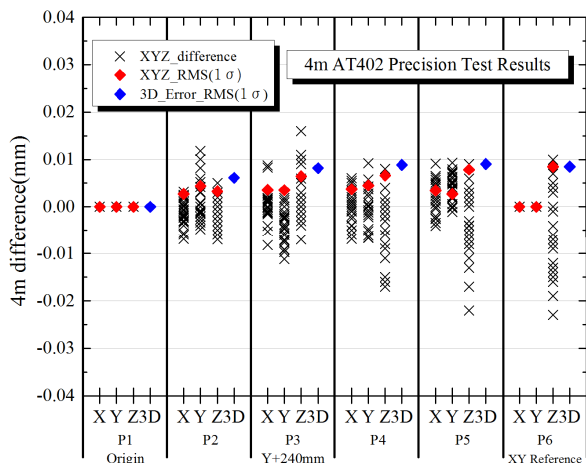


Figure 3: Result of measurement in 4m-distance.

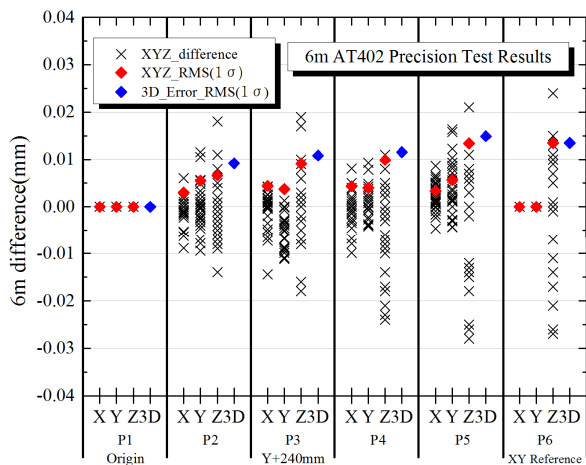


Figure 4: Result of measurement in 6m-distance.

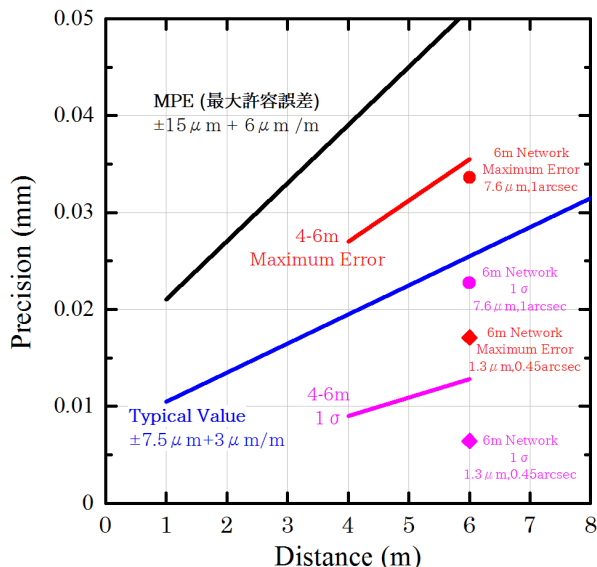


Figure 5: Precision values as functions of measurement distance.

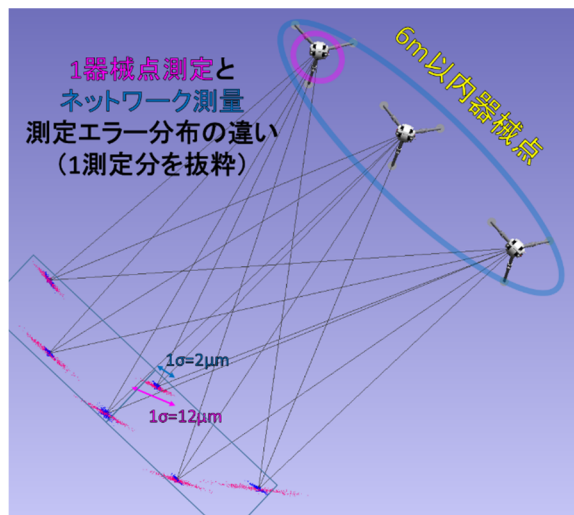


Figure 6: Error clouds of network analysis.

3. 確度調査

3.1 測定概要

確度(正確度)を調査する上で必要なのが真値であり、トラックの測定値と比較する為、より高精度な機器で測定する必要がある。今回我々は ELCOMAT 社製オートコリメータを使用し、その結果を真値として AT402 と比較した。測定状況を Figure 7 に示す。Table 3 に示した機器の精度表の通り、AT402 の角度精度に対してオートコリメータの角度精度は非常に優れており、今回の設置状況で計測できる角度はピッチングとヨーイングである。

測定は予め精密調整された 4m モータ駆動式ステージ(神津精機製 RKO-2)にオートコリメータ用平面ミラーとレーザートラッカー用 CCR を設置し、自動ステージの車輪間距離である 490mm ピッチでステージを移動させ測定した。オートコリメータの測定値は空気のゆらぎ等のバラつきがあるため、100 回平均(2 測定/1 秒)した。得られたオートコリメータの角度(ピッチング・ヨーイング)とステージ移動量から変位に変換した。

一方、AT402 は 4m 架台上でのアライメントを想定し、4m ステージの中央、距離約 1.2m の場所に設置した。この配置により、測定最大距離はトラックで 2.3m、オートコリメータで 5m になる。両端の測点を基準とした座標を作成し、得られた XY 成分を変位とした。測定は、再現性を確認するため 1 測点について連続 5 回の正反平均測定(正 5 秒+反 5 秒の精密測定モード)をした。

メーカー仕様では AT402 の測定可能最短距離は 1.5m となっているが、1.2m 程度までは測定が可能である。実際の現場では状況により 1.5m 以内の設置になることもあるため、本測定では測定精度の変化がないか併せて調査した。

尚、AT402 と平面ミラーを組み合わせることでオートコリメータとしても使用する事ができ、

ELCOMAT とほぼ同等の精度で測定できた。

またオートコリメータでは測定できないローリングも WYLER 社の水準器 (精度 0.2 秒) を使って計測したが、結局ローリングの回転中心がわからなかったなのでそのデータを解析には使用しなかった。

Table 3: List of Precisions of Instruments

Instrument	Precision	Precision@Far thest position
ELCOMAT 3000	± 0.1 arcsec (20 arcsec-range)	$\pm 2.4\mu\text{m}@5\text{m}$
AT402	$\pm 7.5\mu\text{m} + 3\mu\text{m}/\text{m}$ ($\pm 1.3\mu\text{m} + 2\mu\text{m}/\text{m}$)	$\pm 14\mu\text{m}@2.3\text{m}$ ($\pm 6\mu\text{m}@2.3\text{m}$)

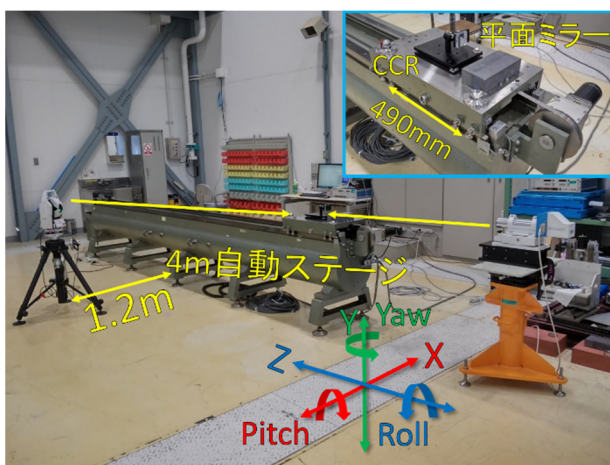


Figure 7: Set up of accuracy test.

3.2 測定結果

Figure 8, Figure 9 に X 方向・Y 方向の測定結果を示す。図中には器械の差と 5 回測定のバラつき (1σ) も併せてプロットしている。ステージの真直度はオートコリメータの結果から、X 方向 $4\mu\text{m}$ 、Y 方向 $7\mu\text{m}$ であった。

オートコリメータの測定バラつきは X・Y 方向とも $0.1\mu\text{m}$ と非常に小さく精度のよい測定ができています。一方の AT402 も 5 回のバラつき平均 (エラーバーの平均) が X 方向 $1\mu\text{m}$ 、Y 方向 $2\mu\text{m}$ となり、こちらも高精度測定ができた。また 1.5m 以内の近距離においてもハード面・ソフト面で主だったエラーはなく通常時と変わらない測定ができた。Table 4 に測定結果を示す。オートコリメータを基準とした時、水平 X 方向の最大差が $-7\mu\text{m}$ 、上下 Y 方向の最大差が $-6\mu\text{m}$ となった。この値は前章で得られたトラックの測定精度 ($\pm 1.3\mu\text{m} + 2\mu\text{m}/\text{m}$) から求められる $6\mu\text{m}@2.3\text{m}$ とほぼ等しく、トラックの計測結果にはステージのローリング成分が加味されている可能性を考慮に入れても、非常によく一致している。

本測定ではオートコリメータとレーザートラッ

カーという測定原理の違う器械を使用した。予めステージ架台の精密調整を行い、且つ自動ステージを使うことで同時に測定する事ができた。同一の測定条件を整える事で、両機器ともに精度良い測定結果を得ることができたと思われる。

Table 4: Result of Measurement

AT402— ELCOMAT	X-difference Maximum	Y-difference Maximum
Difference(mm)	-0.007	-0.006

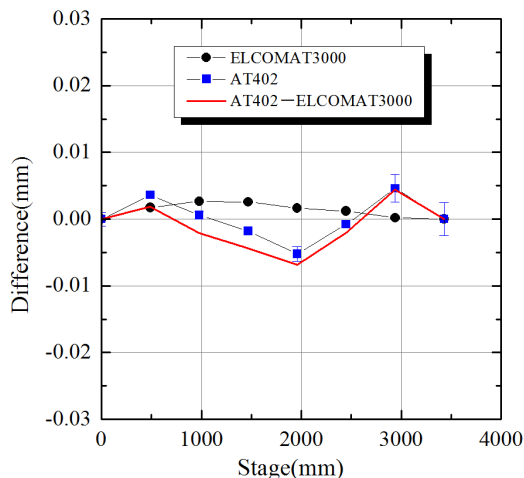


Figure 8: X(Horizontal) difference.

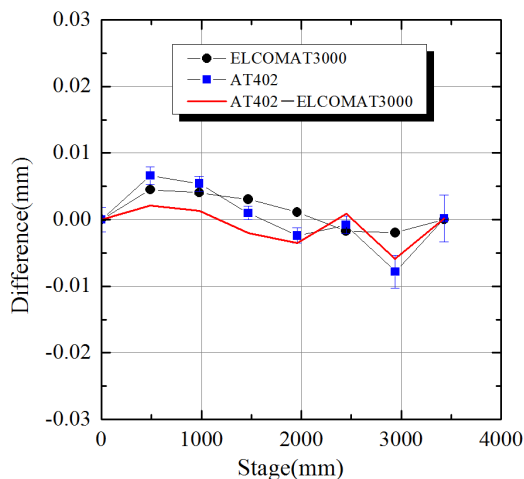


Figure 9: Y(Vertical) difference.

4. まとめ

本調査結果から $4\sim 6\text{m}$ の近距離測定精度は $8\sim 13\mu\text{m}(1\sigma)$ 、 $1.3\mu\text{m} + 2\mu\text{m}/\text{m}(1\sigma)$ であり、確度も同程度であることがわかった。但し、この結果は測定条件(測定環境・操作オペレータの固定等)を一定にして行ったものであり、実際の現場作業では、さら

PASJ2015 THP131

にエラーが加わってくる。メーカーで提示するスペック(許容値)も測定環境が一定している状態での数値であるが、所謂、安全側の数値となっている。

しかし、機器単体の性能を知ることで、どの程度まで高精度な測定ができるか、また通常の測定時に発生しうる測定結果のバラつきなど、器械単体のエラーなのか、或いは外部要因によるものか、これらを判断する指標になり得る。

参考文献

- [1] J. Kiuchi, et al., “レーザートラッカーAT401(Leica)の性能調査と T3(API)との比較”, 本学会 2012 年報告集, p809.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj9/proceedings/PDF/WEPS/WEPS133.pdf
- [2] Leica Absolute Tracker AT401 White Paper
www.leica-geosystems.com