

長尺測長器の幾何学誤差補正方法の確立*

和合 健**

長尺測長器の精度向上を図るために、案内ガイド上を走行するキャリジの姿勢誤差補正を行った。姿勢誤差補正方法は、長尺測長器で目盛りとしているレーザ干渉計を利用して、位置決め用光学系から角度用光学系に置き換えてキャリジの姿勢誤差（角度）を測定し、自己補償による結果を利用する方法とした。姿勢誤差補正を適用した結果、測定誤差（標準値との差）は平均値で補正無しが 0.162 mm、補正有りが 0.060 mm に改善した。

キーワード：長尺寸法、姿勢誤差、補正、レーザ干渉計

Study of Compensation of Orientation Error for Long Size Measuring Instrument

WAGO Takeshi

Key words : Long size, Orientation Error, Compensation, laser interferometer

1 はじめに

大型部品及び装置の寸法測定は、大型ガントリー型座標測定機の使用が一般的であったが、最近ではトラック式ハンディ型非接触式スキャナ及び同接触式プローブ（以下、トラック式測定器）を利用した長尺寸法測定器が広く活用されている。トラック式測定器は手軽に長尺寸法測定が実現できる反面、現場環境温度や校正劣化に起因する偏り誤差が生じ易いため寸法標準器により偏り誤差を取り除く必要がある。そこで我々は作業現場での長尺寸法測定時に使用者校正で使用する寸法標準器を提案した¹⁾。提案した寸法標準器は測定部が SUS 材、棒状管体部が CFRP（炭素繊維強化プラスチック）からなる複数の部材で構成されているため、一義的に文献から線膨張係数（以下、CTE）を得ることが出来ず、実際に測定して求める必要があった。CTE の測定は複数の温度域で寸法測定を行う必要があり、我々が開発を進めている図 1 に示す可搬式長尺測長器²⁾（以下、WASUM）は目盛りをレーザ干渉計としたことで温度変動に対して頑健性を持つことから WASUM が CTE 測定に適すると

考え、CTE の値付けを試した。その結果、WASUM の寸法測定性能は正確さとばらつきの双方で更なる精度向上が必要となった。

姿勢誤差を取り除くための一連の補正技術が構築できれば、長尺物の寸法測定での誤差低減が図られ、寸法標準器の CTE 測定での精度向上に繋がることから WASUM の改良を検討した。特に、正確さの向上を目的としてキャリジの走行運動時に生じる姿勢誤差の補正方法を検討した。

2 実験方法

2-1 運動誤差

案内ガイドをキャリジが走行すると案内ガイドの曲がり（非真直性）から運動誤差が生じる。図 2 に直進軸の運動誤差モデル³⁾を示す。キャリジの走行方向を X として E_{XX} を直進位置決め誤差、 E_{YX} 、 E_{ZX} を真直度誤差、 E_{AX} 、 E_{BX} 、 E_{CX} を姿勢誤差という。次に、直進 3 軸の幾何学モデル式³⁾を式(1)～(3)、図 3 に直進 3 軸の軸構成を示す。式(1)～(3)の右辺の項を定めることで、幾何学誤差 e_x 、 e_y 、 e_z を求めることが出来る。

$$e_x(x, y, z) = E_{XX}(x) + E_{XY}(y) + E_{XZ}(Z) + (E_{B(OX)Z} + E_{BX}(x) + E_{BY}(y))z - (E_{C(OX)Y} + E_{CX}(x))y \dots (1)$$

$$e_y(x, y, z) = E_{YX}(x) + E_{YY}(y) + E_{YZ}(Z) - (E_{A(OY)Z} + E_{AX}(x) + E_{AY}(y))z \dots (2)$$

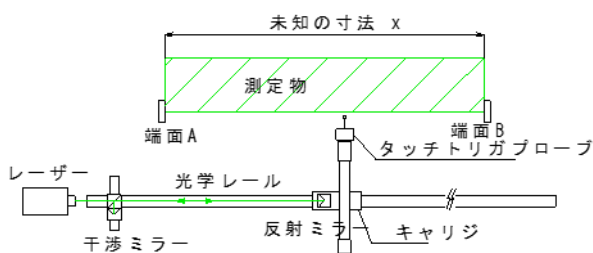


図 1 可搬式長尺測長器 (WASUM) の概要

* 令和 3 年度技術シーズ創生・発展研究事業 可能性調査研究
** 素形材プロセス技術部

$$e_z(x, y, z) = E_{ZX}(x) + E_{ZY}(y) + E_{ZZ}(Z) + E_{A(0Y)Z} + E_{AX}(x)y \dots (3)$$

E_{XZ} : 誤差運動で並進誤差と呼ばれる直進位置決め誤差。添え字の第一列は誤差の方向であり A~C は X~Z 軸周りの姿勢誤差、第二列はどの軸の誤差かを表す。

$E_{C(0X)Y}$: 軸平均線の幾何誤差であり、添え字の第一列は誤差の方向、第二列の「0」は軸平均線の幾何誤差であることを示し、「0」の右隣はどの軸を基準とした誤差かを表す。第三列はどの軸の誤差かを表す。

E_{C0Y} : 軸平均線の幾何誤差であり、添え字の第一列は誤差の方向、第二列の「0」は軸平均線の幾何誤差であることを示す。第三列はどの軸の誤差かを表す。

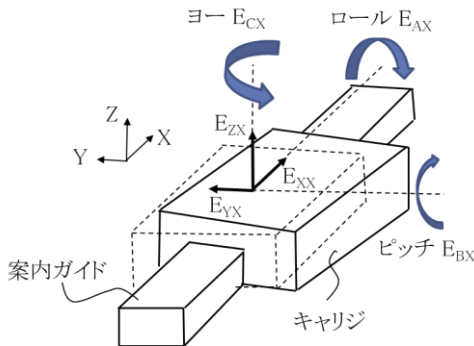


図 2 直進軸の運動誤差

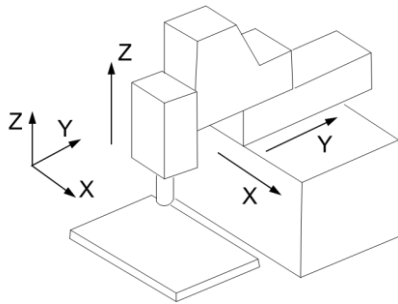


図 3 直進 3 軸の軸構成

2-2 姿勢誤差の測定方法

図 4 に WASUM での光学系配置を示す。長尺物の寸法測定では、位置決め用光学系を取り付けることで反射ミラーの位置から測定物の寸法測定を行う。光学系を角度測定用に置き換えることで、案内ガイドを走行する時のキャリジの姿勢誤差が測定でき、WASUM の自己補償が行える。図 5 に角度測定原理を示す。角度測定は反射ミラーが傾くことで L1 と L2 に光路差が生じ、この光路差から三角関数による計算で角度が算出できる。

角度用光学系にて測定したピッチングを図 6、ヨーイングを図 7 に示す。この測定での繰り返し誤差を求めるために、0~3700 mm の一軸方向位置を 100 mm

間隔で 38 か所を繰り返し 3 回測定した。繰り返し誤差は 1 か所 3 個の分布幅を位置 0 mm を除く 37 個の平均値として求めた。ピッチングは、繰り返し誤差 1.6 μ rad (腕長さ 100 mm で 1.8 μ m)、ばらつきは σ 1.2 μ m、ヨーイングでは、繰り返し誤差 1.3 μ rad (腕長さ 100 mm で 0.5 μ m)、ばらつきは σ 0.6 μ m となった。その結果、各位置でのピッチング及びヨーイングは高い再現性を示し、姿勢誤差補正が適用できることを確認した。

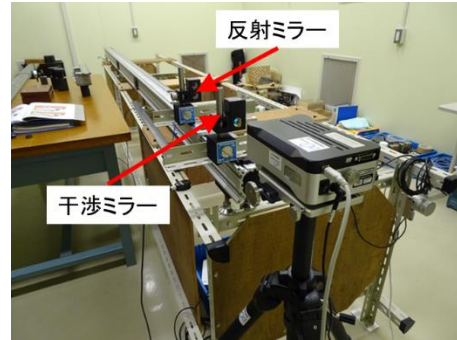


図 4 WASUM の光学系配置

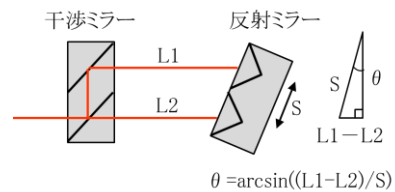


図 5 角度測定原理

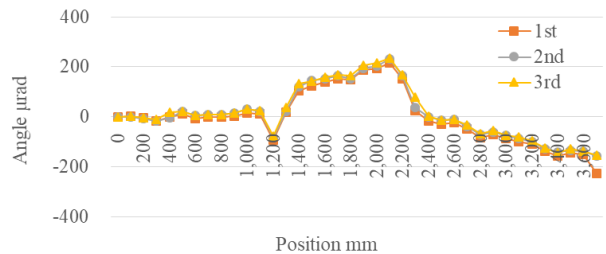


図 6 角度用光学系で測定したピッチング

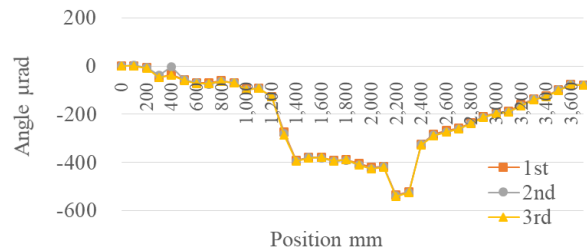


図 7 角度用光学系で測定したヨーイング

2-3 姿勢誤差の補正方法

WASUM は X 軸のみの構成であるため、式 (1) ~ (3) において Y 及び Z 軸の項を除くと幾何学誤差は式 (4) と

なる。

$$e_x(x, y, z) = E_{XX}(x) + E_{BX}(x)z - E_{CX}(x)y \quad \dots (4)$$

ここで $e_x(x, y, z)$ はX軸の誤差、 $E_{XX}(x)$ はX軸の送り方向位置決め誤差、 $E_{BX}(x)z$ はZ軸のB軸回りの誤差(ピッチング誤差)、 $E_{CX}(x)y$ はY軸のC軸回りの誤差(ヨーイング誤差)となる。式(4)をWASUMの場合に置き換えるためにピッチングの姿勢誤差補正方法(図8)とヨーイングの姿勢誤差補正方法(図9)を基に、式(5)~(7)のとおり姿勢誤差補正を定式化した。

$$L_{cp}(i) = x(i) - pi(i) - ya(i) \quad (i=0 \dots 3700 \text{ mm}) \quad \dots (5)$$

$$pi(i) = (L_2 - L_1) \sin \theta_{zx} \quad \dots (6)$$

$$ya(i) = L_3 \sin \theta_{xy} \quad \dots (7)$$

$L_{cp}(i)$: 補正後の測定値(mm)、 $x(i)$: 測定値(mm)、 $pi(i)$: ピッチング(mm)、 $ya(i)$: ヨーイング(mm)

誤差マップの作成方法は図10のとおり、レーザ干渉計の角度用光学系で測定したWASUMのピッチングとヨーイング(μrad)をExcelVBAで作成したマクロプログラムにより長さの単位(mm)に変換する方法とし、得られた誤差マップを図11に示す。制御プログラムへの姿勢誤差補正の組み込みは図12の※部のとおり、制御プログラムの開始直後に補正可否の分岐として組み入れた。

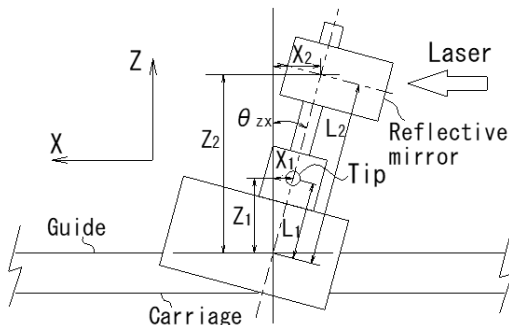


図8 ピッチングの姿勢誤差補正方法

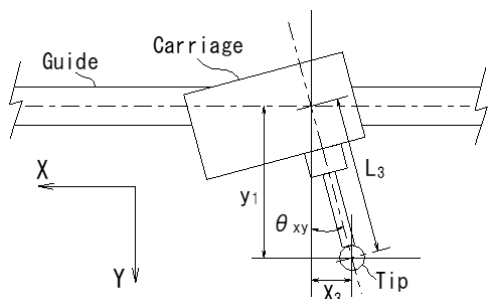


図9 ヨーイングの姿勢誤差補正方法

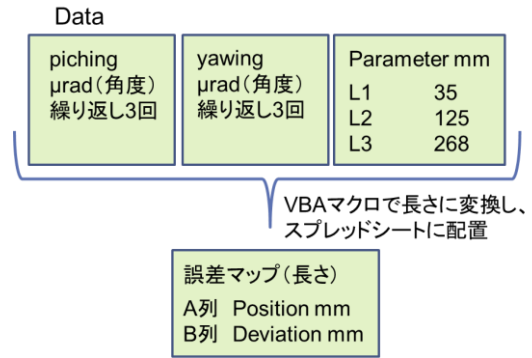


図10 誤差マップの作成方法

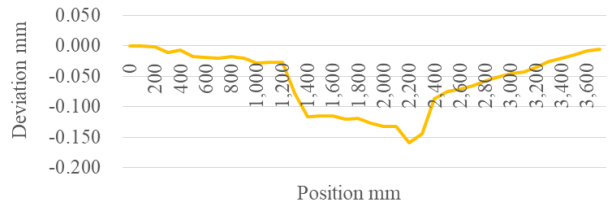


図11 姿勢誤差補正用誤差マップ

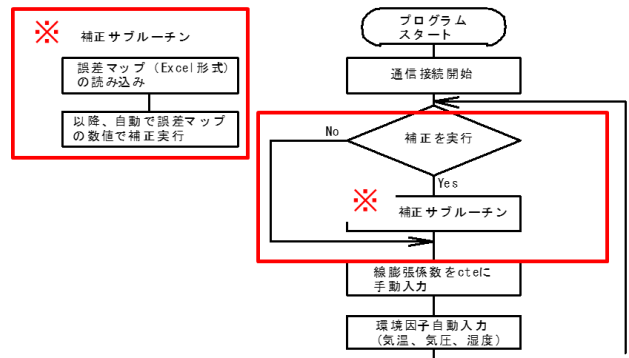


図12 制御プログラムへの姿勢誤差補正サブルーチンの組み込み

3 姿勢誤差補正の検証

3-1 位置での検証

図13のヨーイングが均一な位置A(位置770-1270mm)と変化が大きい位置B(1060-1560mm)で姿勢誤差補正の効果を検証した結果を表1に示す。測定物はブロックゲージ500mm(以下、GB500)とした。表1のdevは標準値との差、 σ はばらつき、nは繰り返し数である。この結果からdev及び σ とも補正

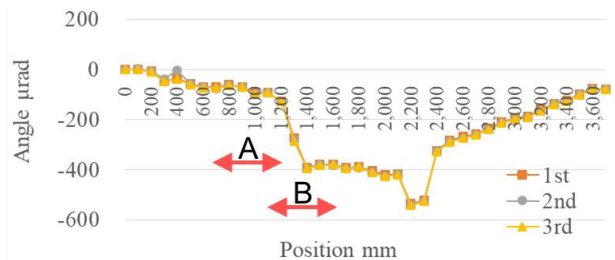


図13 測定位置

表 1 測定位置の違いによる結果

(上 : dev、下 : σ)

dev	n=9				mm
	A: 位置770-1270mm		B: 位置1060-1560mm		
反復	補正なし	補正あり	補正なし	補正あり	
1	0.018	0.000	0.002	0.005	
2	-	0.004	-	-	
3	-	0.003	-	-	
average	0.018	0.002	0.002	0.005	

σ	n=9				mm
	A: 位置770-1270mm		B: 位置1060-1560mm		
反復	補正なし	補正あり	補正なし	補正あり	
1	0.018	0.009	0.005	0.005	
2	-	0.011	-	-	
3	-	0.005	-	-	
average	0.018	0.009	0.005	0.005	

無しでは測定位置による差が見られるが、補正有りでは異なる位置でも良好な結果となり、補正の効果が確認された。

3-2 棒状端度器による検証

棒状端度器 (以下、Cube Bar 850 : CB850) を利用して姿勢誤差補正の効果を検証した。CB850 (測定長さ L=850 mm) は両端に SUS 材の端度器を取り付け、筐体を CFRP (炭素繊維強化プラスチック) で構成した端度器である。測定回数は繰り返し 5 回を 1 セットとして反復 3 回とした。その結果、表 2 のとおり dev は補正無しでは 0.162 mm、補正有りでは 0.060 mm となり姿勢誤差補正の効果が確認できた。 σ は補正の有無による大きな差は見られなかった。

3-3 反復の検証

姿勢誤差補正有りの場合で、反復の誤差を検証した。測定物は GB500 (L=500 mm) として、繰り返し 5 回を 1 セットとして反復 2 回の測定をした。反復の再現性の検証であるため、通常測定時に最初に行う標準器との差をキャンセルする作業前校正は行っていない。表 3 のとおり 1 回目を p、2 回目を q としてその差を求めた。その結果、反復の誤差は 0.038 mm となった。この原因は案内軸のスティックスリップ現象の影響と思われる。

3-4 姿勢誤差補正に係る考察

JIS Z 8103:2000 計測用語で精度は、測定結果の正確さ (かたよりの小さい程度) と精密さ (ばらつきの小さい程度) を含めた、測定量の真の値との一致の度合い、と示されている。ここでの GB500 と CB850 を利用した検証結果から、姿勢誤差補正は dev で示される誤差、つまり正確さの向上に寄与することが確認できた。しかしながら σ で示されるばらつき低減への効果が見られなかった。その理由は、姿勢誤差補正はオフセットによりかたよりの取り除き、その誤差を低減させる方式であるが、ばらつきの原因は他に存在するために σ に変化が見られなかった。実験を行った上で σ の原因を推測すると、WASUM の摩擦滑

り方式案内によるスティックスリップ現象、つまり案内軸上を走行するキャリジの走行運動時に自励振動が生じているため、その振幅が位置決め誤差に関連していると推測した。位置決めのみならず改善が今後の課題として残った。

表 2 CB850 による結果

反復	n=5				std:CMM の測定値	測定位置
	dev		σ			
	補正無し	補正有り	補正無し	補正有り		
1	-	0.056	-	0.038	850.593	814-1665
2	0.162	-	0.010	-	850.593	813-1664
3	-	0.064	-	0.009	850.593	813-1664
average	0.162	0.060	0.010	0.027	-	-

表 3 反復の結果

記号	n=5				std: GB500	測定位置
	dev		σ			
	補正無し	補正有り	補正無し	補正有り		
p	-	-0.252	-	0.013	500.000	823-1334
q	-	-0.290	-	0.013	500.000	824-1334
p-q	-	0.038	-	0.001		

4 結 言

長尺測長器の精度向上を図るために、案内ガイド上を走行するキャリジの姿勢誤差補正を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 姿勢誤差 (角度 μ rad) を正確に測定し、誤差マップが作成できた。その誤差マップを利用した長尺測長器における補正式を定式化し、測定プログラム (VB6.0) を構築した。
- (2) 標準器を GB500 として、姿勢誤差補正の有/無で異なる位置での補正効果を検証した結果、補正有りでは異なる位置で誤差 (標準値との差) が小さくなり、キャリジ姿勢の偶然性が排除されることを確認した。
- (3) 標準器を CB850 (L=850 mm) として、姿勢誤差補正の有/無で測定誤差 (標準値との差) を検証した結果、測定誤差は繰り返し 5 回で補正無しで 0.162 mm、補正有りで 0.060 mm となり、補正効果を確認した。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、インターンシップで実験に加わった岩手大学大学院の高橋由紘君と盛田雄斗君には補正アルゴリズムやデータ取得方法にご協力頂いた。ここで感謝の意を表す。

文 献

- 1) 和合健、生内智、磯部和夫 : 可搬式長大寸法測定器用長さ標準器の開発, 岩手県工業技術センター研究報告第 24 号, (2022)

2) 和合健、竹原英樹、辺見誠雄：レーザ干渉計を利用した大型構造体の高精度寸法計測技術の構築、岩手県工業技術センター研究報告第 23 号，(2021)

3) 茨木創一：工作機械の空間精度、森北出版、p14、p41(2017)