

Research on Thermal Compensation Method of Laser Tracker Re-Location Accuracy in Aircraft Assembly

Zhangjun Jin^{1,2}, Chunsong Ke¹, Ruibin Xiong¹, Tengwei Qiu¹, Wei Zhang¹

¹Mechanical & Electrical Engineering Institute, Ningbo Polytechnic, Ningbo Zhejiang

²Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Email: leopard85@zju.edu.cn

Received: Aug. 9th, 2019; accepted: Aug. 29th, 2019; published: Sep. 4th, 2019

Abstract

The measurement accuracy of the laser tracker is one of the most important factors that impact the aircraft assembly quality. The temperature alteration in assembly factory will result in location movements of ERS points, which has become a crucial problem in re-locating the laser tracker. To improve the relocation accuracy of laser tracker, a new compensation method based on precise thermal deformation error theory is proposed in this paper. By comparing the nominal coordinates and measured coordinates of ERS points, the deformation compensation coefficients of ERS points in X, Y, Z directions of assembly coordinate system are calculated, and iterative method is developed in registration process to correct the coordinates of ERS points and obtain the optimal transformation parameters. Finally, the engineering example shows that the compensation method has good compensation precision, with our new compensation method, the maximum registration error can be reduced by 38.6%, and the average registration error can be reduced by 38.7%.

Keywords

Laser Tracker, Registration Error, ERS Point, Thermal Deformation Compensation

飞机装配中激光跟踪仪转站精度热补偿方法研究

金涨军^{1,2}, 柯春松¹, 熊瑞斌¹, 裘腾威¹, 张威¹

¹宁波职业技术学院, 机电工程学院, 浙江 宁波

²宁波大学, 机械工程与力学学院, 浙江 宁波

Email: leopard85@zju.edu.cn

收稿日期: 2019年8月9日; 录用日期: 2019年8月29日; 发布日期: 2019年9月4日

文章引用: 金涨军, 柯春松, 熊瑞斌, 裘腾威, 张威. 飞机装配中激光跟踪仪转站精度热补偿方法研究[J]. 国际航空航天科学, 2019, 7(3): 63-71. DOI: 10.12677/jast.2019.73008

摘要

激光跟踪仪转站精度是影响飞机装配质量的重要因素。装配现场温度变化导致ERS点位置产生偏移, 已经成为影响激光跟踪仪转站精度的最大误差源。为了提高转站精度, 本文提出一种基于精密热变形理论的激光跟踪仪转站精度补偿方法, 该方法通过比较ERS点的实际测量值和转站参数计算值, 来估计ERS点在X, Y, Z方向上的形体热变形系数。利用迭代的方法对ERS点的实际位置进行修正, 并逐步逼近真实的转站参数。工程实例证明本文所提出的补偿方法具有很好的补偿精度, 其中最大转站误差最大降低38.6%, 平均转站误差下降38.7%。

关键词

激光跟踪仪, 转站精度, 公共观测点, 热变形补偿

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

飞机数字化装配技术以基于单一产品数据源的数字量协调体系为基本特点, 其中数字化测量技术为实现数字化精确装配提供基础保障[1], 而测量系统的精度是决定飞机最终装配质量的重要因素[2]。激光跟踪仪因其测量技术成熟, 测量精度高, 技术配置灵活, 在飞机数字化装配系统中得到广泛应用[3]。由于飞机部件尺寸较大、装配工装复杂, 为了覆盖飞机部件所有特征点的测量, 需要经常地移动激光跟踪仪设备。不同站位激光跟踪仪测量数据相互独立, 需要通过转站的方法将测量数据转换到统一的参考坐标系下。激光跟踪仪转站是通过测量一组公共观测点(ERS点)进行匹配实现的, 其目的是获得激光跟踪仪测量坐标系到装配坐标系的转换参数(转站参数)。显然, 转站参数的误差是决定整个测量系统测量精度的直接因素。

ERS点作为现场参考坐标系的基准, 被固定地安装在飞机装配平台或工装上, 其理论位置应保持固定不变。然而装配车间温度的变化会导致整个装配平台发生热变形, ERS点的位置随之产生位移。此时ERS点的实际模型和理论模型产生偏差, 导致转站后得到的坐标系偏离理论的参考坐标系。飞机装配平台尺寸可达数十米, 温度变化引起装配平台尺寸的热变形是比较严重的。以钢材为例(取热膨胀系数为 $1.2e-5/^{\circ}C$), 当飞机装配平台整体长度为30米, 室内温度达到5摄氏度时, 平台尺寸的变化量即可达到1.8 mm。而我国西北地区年度温度可变可达到30多摄氏度, 因此温度变化已经成为影响现场测量精度的最主要因素。通过构建恒温的装配车间可以有效抑制热变形, 但是成本昂贵。因此, 通过优化转站算法对热变形误差进行补偿无疑是一个经济有效的方法。Horn [4]为了提高匹配精度, 在转站算法求解过程中引入一个缩放因子s, 来表示匹配点组的各项同性缩放比例, 但是该算法并非严格基于热变形原理, 只能补偿两个点组之间的整体相似度误差, 因此该算法更适用于图像匹配领域。杨宝旒[5]通过有限元仿真的方法获得装配工装的线性热变形规律, 利用单位温度热变形系数矩阵对ERS点的理论位置进行补偿, 其缺点是有限元仿真结果不能准确反映真实工装的热变形情况。俞慈君[6]基于物体热变形理论建立工装的三维热变形模型, 构建修正后的最小加权误差函数对转站误差进行优化, 其在转站过程中采用 3σ 准则对ERS点进行删选, 剔除异常点来提高测量精度, 但是该方法中热补偿系数来自于算法估计, 而非真实的测量数据。金涨军[7]对激光跟踪仪转站过程的误差传递进行分析, 提出了转站参数误差的估计模型, 但是该模型并没有考虑温度变化的影响。

为了提高激光跟踪仪的现场测量精度,本文提出一种基于精密热变形理论的激光跟踪仪转站精度补偿方法。本文首先介绍了激光跟踪仪转站误差补偿的基本方法,然后针对目前方法的不足之处,提出了一种基于精密热变形理论的转站精度热补偿方法。该方法通过 ERS 点的实际测量位置与转站参数计算值,分别估计 ERS 点在装配坐标系下 X, Y, Z 方向上的形变热变形系数;利用迭代算法对 ERS 点的实际位置进行修正,并逐步逼近求解真实的转站参数。最后通过工程实例证实本文提出的热补偿方法相比于目前所用的补偿方法具有更好的补偿精度。

2. 激光跟踪仪转站误差

在飞机装配现场,由于飞机部件尺寸较大和现场各种装配工装、设备的遮挡,需要多次移动激光跟踪仪到不同的站位来完成飞机装配过程的测量任务。每台激光跟踪仪具有独立的测量坐标系,为了融合来自不同站位的测量数据,需要通过转站的方法将激光跟踪仪测量坐标系转换到统一的参考坐标系下。激光跟踪仪转站是通过测量一组 ERS 点的实际位置来实现的(图 1),其本质是三维点组的刚体匹配问题。假设 ERS 点在装配坐标系下的理论坐标为 y_i ,在激光跟踪仪测量坐标系下为 x_i 。转站参数用 $T(x, y, z)$ 和 $R(\alpha, \beta, \gamma)$ 来表示,其中 T 表示激光跟踪仪测量坐标系相对于装配坐标系的平移向量, R 表示激光跟踪仪测量坐标系相对于装配坐标系的旋转矩阵, α, β, γ 是相应的 RPY 角。

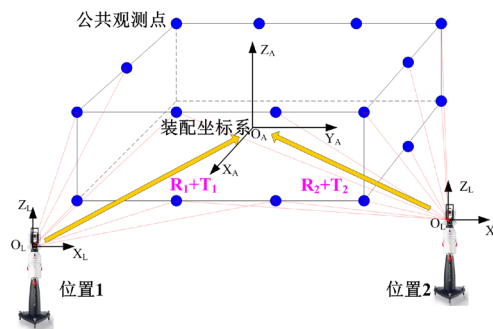


Figure 1. The principle of laser tracker re-location
图 1. 激光跟踪仪转站基本原理

通过构建所有 ERS 点的匹配误差 Σ 的最小二乘函数(公式 1),求解转站参数 R 和 T 的最佳估计值。

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^N \|Rx_i + T - y_i\|^2 \quad (1)$$

其中 N 为参与转站的 ERS 点的数量。

SVD 分解法[8][9]、正交矩阵法[4]、四元数法[10]是常用的求解刚体匹配问题的解析算法。

为了提高点组的匹配精度, Horn [4]在匹配过程加入比例因子 s 对匹配精度进行补偿, s 是各向同性缩放因子,表示两组点集在匹配前后的整体相似程度:

$$\Sigma = \sum_{i=1}^N \|sRx_i + T - y_i\|^2 \quad (2)$$

该方法运用于图像处理领域,可以很好的提高图像匹配的精度,但对于激光跟踪仪转站则存在很多局限。首先,ERS 点热位移的存在会同时导致激光跟踪仪的平移参数和旋转参数估计值的变化,而 Horn 的方法只针对平移参数进行修正,而忽视了旋转参数,这与事实不符;其次,装配工装热变形情况复杂,不同尺寸方向上的形变和热变形系数是不同的,无法用一个单一的比例缩放因子 s 来表示。为了解决这些问题,本文提出了一种基于精密热变形理论的激光跟踪仪转站补偿方法。

3. 转站热热变形补偿算法

3.1. 精密热变形误差理论

对于精密仪器而言,随着测量技术的发展和测量仪器精度的提高,因温度变化引起的测量误差占测量总误差的比重越来越大,到20世纪末和21世纪初,温度引起的误差已经占到测量总误差的50%以上[11]。传统的物体热变形理论只考虑了几何尺寸、材料热膨胀系数、和温度三个因素,构建线性热变形理论模型。实际上,物体的热变形还受到其形体结构、组装方式等多因素的影响。为了提高精密测量精度,合肥工业大学费业泰教授提出了考虑形体结构影响的热变形误差模型[12][13]:

$$\begin{aligned} s_i &= f(\alpha, k) \\ k &= \varphi(L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n) \end{aligned} \quad (3)$$

式中: s_i 表示物体某尺寸 L 的形体热变形系数, α 是材料热膨胀系数, k 为形体结构因子, 其值取决于物体的形体结构和其他关联尺寸 L_i 。 L_i 表示物体其他与尺寸 L 相关联的尺寸。根据该理论, 物体不同尺寸之间以及连接结构对热变形存在相互耦合的影响, 热变形后物体的尺寸变化并非各向同性的。

对于一些形体结构复杂的物体, 其形体结构因子计算是非常复杂的。因此, 对于复杂物体某一尺寸的形体热变形量, 可以通过实验测量的方法, 通过公式(4)计算获得。

$$\Delta L = s_i L (t_2 - t_1) \quad (4)$$

3.2. ERS 点形体热变形系数计算

由于材料、形状结构和连接方法的不同, 装配平台在其主要尺寸(长宽高)方向上会表现出各向异性的热膨胀特性, 布置在其上的 ERS 点也将随着装配平台展现出各向异性的热位移特性。由于装配平台结构复杂, 从理论上计算形体结构因子是及其困难的。通过比较 ERS 点在温度变化前后的位置直接对形体热变形系数进行估计, 是一个更为经济合理的选择。

假设 ERS 点 P_i 在装配坐标系下的理论坐标为 P_{iA} , 热变形后在装配坐标系中的实际位置为 P_{iB} , 则该 ERS 点在 XYZ 三个方向上的形体热变形系数为:

$$\begin{cases} s_{ix} = (P_{iBx} - P_{Ox}) / (P_{iAx} - P_{Ox}) \\ s_{iy} = (P_{iBy} - P_{Oy}) / (P_{iAy} - P_{Oy}) \\ s_{iz} = (P_{iBz} - P_{Oz}) / (P_{iAz} - P_{Oz}) \end{cases} \quad (5)$$

式中, s_x , s_y , s_z 分别表示 ERS 点在长宽高三个方向的形体热变形系数; P_O 表示 ERS 点的热膨胀中心。

对于布置有 N 个 ERS 点的装配平台而言, 为了减少形体热变形系数的计算误差, 取每个 ERS 点的形体热变形系数的算术平均值, 作为 ERS 点的整体形体热变形系数:

$$\begin{cases} s_x = \sum_{i=1}^N s_{ix} / N \\ s_y = \sum_{i=1}^N s_{iy} / N \\ s_z = \sum_{i=1}^N s_{iz} / N \end{cases} \quad (6)$$

在式(5)中, ERS 点在装配坐标系下的实际位置 P_{iB} 为是无法直接通过测量得到的, 它需要通过激光跟踪仪的实际测量值和转站参数估计而得到:

$$P_{iB} = R \cdot {}^L P_{iB} + T \quad (7)$$

其中 ${}^L P_{iB}$ 是该 ERS 点在激光跟踪仪下的实际测量位置。

由于转站参数 R 和 T 的理论值是未知的, 是由 ERS 点的实测坐标通过匹配算法计算获得, 而为了获得更高精度的转站参数, 又需要使用转站参数来计算 ERS 点的形体热变形系数。显然, 转站参数和 ERS 点的形体热变形系数之间相互影响, 无法使用传统的解析方式求解。为了解决这个问题, 本文开发了一种迭代计算方法, 利用当前转站参数值来计算和逼近真实的形体热变形系数。

3.2. 激光跟踪仪转站热补偿算法

转站热变形补偿算法首先对原始测量数据进行匹配计算, 获得相应的转站参数的近似值。然后使用该转站参数近似值估算 ERS 点的形体热变形系数, 并对 ERS 点的实际位置进行修正。再使用修正后的 ERS 点的位置和理论位置进行匹配计算新的转站参数。如此循环往复迭代, 直至转站误差达到我们事先设定的容差标准。其详细计算算法如下所示:

第一步, 参数初始化: 令初始迭代次数 $K = 1$, 形体热变形系数 $s_x^1 = s_y^1 = s_z^1 = 1$, 转站参数旋转矩阵 R^1 为单位矩阵, 平移矩阵 T^1 为零矩阵。

第二步: 使用 ERS 点的实际位置 ${}^L P_{iB}^K$ 与其理论值 P_{iA} 匹配, 计算当前转站参数 R^K 和 T^K 最佳估计值。其中当 K 等于 1 时, ${}^L P_{iB}^1 = {}^L P_{iB}$ 。

第三步: 判断当前的转站误差是否符合测量容差要求。若转站误差已经满足容差要求或则迭代次数达到最大值 K_{\max} , 则迭代结束, 此时转站参数合理估计值为 R^K 和 T^K ; 若转站容差尚未满足容差要求且迭代次数小于最大值 K_{\max} , 则需要计算新的热形体热变形系数:

$$\begin{cases} s_x^{K+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{iBx}^K - P_{iAx}) / (P_{iAx} - P_{iOx}) \\ s_y^{K+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{iBy}^K - P_{iAy}) / (P_{iAy} - P_{iOy}) \\ s_z^{K+1} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_{iBz}^K - P_{iAz}) / (P_{iAz} - P_{iOz}) \end{cases} \quad (8)$$

式中 $P_{iB}^K = R^K \cdot {}^L P_{iB}^K + T^K$, 表示 ERS 点在装配坐标系下的实际位置。

第四步: 根据计算得到的形体热变形系数, 对 ERS 点在装配坐标系下的实际位置进行修正:

$$\begin{cases} P_{iBx}^K = \frac{P_{iBx}^K + (s_x^{K+1} - 1)P_{iOx}}{s_x^{K+1}} \\ P_{iBy}^K = \frac{P_{iBy}^K + (s_y^{K+1} - 1)P_{iOy}}{s_y^{K+1}} \\ P_{iBz}^K = \frac{P_{iBz}^K + (s_z^{K+1} - 1)P_{iOz}}{s_z^{K+1}} \end{cases} \quad (9)$$

第五步: 根据当前转站参数和经过修正后的 ERS 点的位置, 对 ERS 点在激光跟踪仪坐标系下的实际位置进行修正。

$${}^L P_{iB}^{K+1} = (R^K)^{-1} (P_{iB}^K - T^K) \quad (10)$$

第六步: 令 $K = K + 1$, 然后返回第二步继续。

4. 工程实例

以某型飞机中机身段的部件装配现场的测量数据为样本,对本文提出的激光跟踪仪转站热变形补偿方法进行了验证,测量现场如图2所示。实验中测量设备采用的是来自徕卡公司的激光跟踪仪 AT-901 LR。在该部件装配现场,一共布置了 10 ERS 点,其编号和理论值如表 1 所示。激光跟踪仪通过测量这 10 个 ERS 点的实际位置完成转站。通过对测量数据和转站数据进行分析,验证本文提出的激光跟踪仪转站热变形补偿方法进行验证。本文试验中,膨胀中心为平台的几何中心位置(13982.000,0.000,0.000)。



Figure 2. The on-site measurement of laser tracker
图 2. 激光跟踪仪现场转站测量

Table 1. The nominal location of ERS point

表 1. ERS 点理论值

编号	理论值		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
DR1	13461.968	3057.356	-54542.795
DR2	13466.772	3054.398	-52879.890
DR3	13372.692	-5704.690	-53469.053
DR4	17868.137	-55702.911	-53471.318
DR5	24865.070	-55706.868	-52934.769
DR6	27871.058	-55709.286	-54273.616
DR7	13465.374	-53041.617	-52678.224
DR8	24775.934	-53046.248	-52798.255
DR9	27767.353	-53051.349	-54605.147
DR10	27776.304	-53050.347	-52914.038

以其中某次转站测量数据为例,对本文算法的收敛性和补偿效果进行分析。表 2 所示为转站过程中 ERS 点的实际测量值及其对应的匹配误差,表 3 为经过热变形补偿后,ERS 点的测量值及其对应的匹配误差。显然,在经过热变形补偿后,激光跟踪仪对 ERS 点的实际测量值已经非常接近其理论值,其匹配误差控制在 0.3 mm 以内。

Table 2. The measurements and registration errors of ERS points
表 2. ERS 点测量值与匹配误差

编号	实测值				匹配误差	
	X (mm)	X (mm)	X (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
DR1	7469.063	7469.063	7469.063	-0.506	0.199	-0.158
DR2	7471.955	7471.955	7471.955	-0.454	0.302	0.094
DR3	-1286.494	-1286.494	-1286.494	-0.622	-0.071	-0.021
DR4	-1351.244	-1351.244	-1351.244	-0.090	0.068	0.085
DR5	-1456.311	-1456.311	-1456.311	0.443	-0.200	0.005
DR6	-1508.002	-1508.002	-1508.002	0.512	-0.166	-0.170
DR7	1377.654	1377.654	1377.654	-0.597	0.042	0.036
DR8	1205.720	1205.720	1205.720	0.361	-0.109	0.044
DR9	1149.769	1149.769	1149.769	0.416	0.021	-0.033
DR10	1156.872	1156.872	1156.872	0.535	-0.086	0.119

Table 3. The measurements and registration errors of ERS points after compenstion
表 3. ERS 点补偿后的测量值与匹配误差

编号	补偿后的测量值			匹配误差		
	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	ΔX (mm)	ΔY (mm)	ΔZ (mm)
DR1	13462.202	3057.309	-4542.635	0.234	-0.047	0.160
DR2	13467.016	3054.251	-2879.981	0.244	-0.147	-0.091
DR3	13372.826	-5704.464	-3469.015	0.134	0.226	0.038
DR4	17867.940	-5702.865	-3471.394	-0.197	0.046	-0.076
DR5	24864.940	-5706.614	-2934.776	-0.130	0.254	-0.007
DR6	27870.865	-5709.094	-4273.454	-0.193	0.192	0.162
DR7	13465.581	-3041.504	-2678.247	0.207	0.113	-0.023
DR8	24775.910	-3046.084	-2798.306	-0.024	0.164	-0.051
DR9	27767.171	-3051.345	-4605.126	-0.182	0.004	0.021
DR10	27776.101	-3050.233	-2914.169	-0.203	0.114	-0.131

通过分析转站热变形补偿算法过程中平均误差(式 11)和最大误差(式 12)的变化趋势情况(图 3), 我们可以清楚的看到该算法整体上是收敛的, 且具有很快的收敛速度。

$$Ave(E) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|e_i\| \quad (11)$$

$$Max(E) = Max\|e_i\| \quad (12)$$

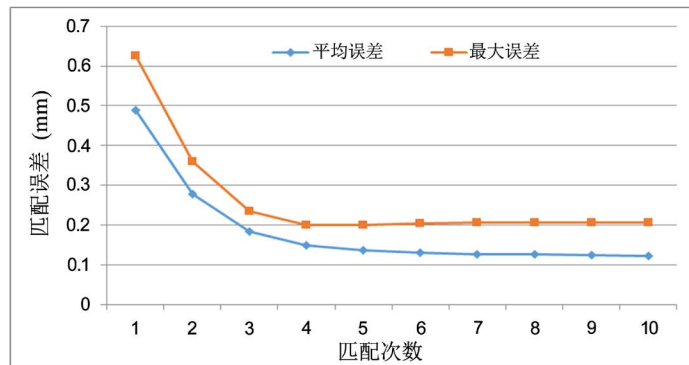


Figure 3. Iteration process of thermal compensation method
图 3. 热变形补偿算法迭代过程

对不同补偿方法下激光跟踪仪转站参数进行对比, 表 4 给出了不同热变形补偿方法计算得到的转站参数。从表 4 中可以看出, Horn 补偿方法只对平移参数进行修正, 而本文提出的热变形补偿方法可同时对平移参数和旋转参数进行修正。

Table 4. The transformation parameters of different compensation method
表 4. 不同补偿方法下的转站参数

补偿方法	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)	α (°)	β (°)	γ (°)
不补偿	16375.954	-4375.457	-2964.166	90.84618	-0.20752	0.22825
Horn 方法	16375.679	-4375.557	-2964.133	90.84618	-0.20752	0.22825
本文方法	16375.421	-4375.328	-2964.156	90.84568	-0.20743	0.22835

本试验在不同环境温度下对 ERS 点进行多次测量转站, 比较本文提出的热变形补偿方法的补偿效果。如图 4 和图 5 所示, 相比于 Horn 补偿方法, 本文所提出的热变形补偿方法可以获得更高的转站精度, 其中最大转站误差相对于 Horn 补偿方法最大降低了 38.6%, 平均转站误差下降了 38.7%。

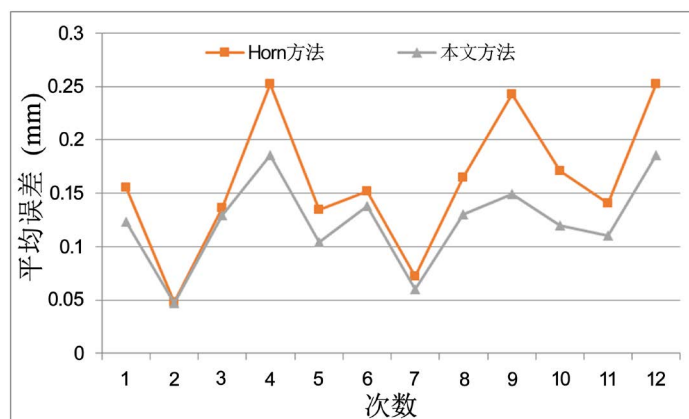


Figure 4. The compare of Ave (E) from different thermal compensation method
图 4. 不同热变形补偿算法平均误差比较

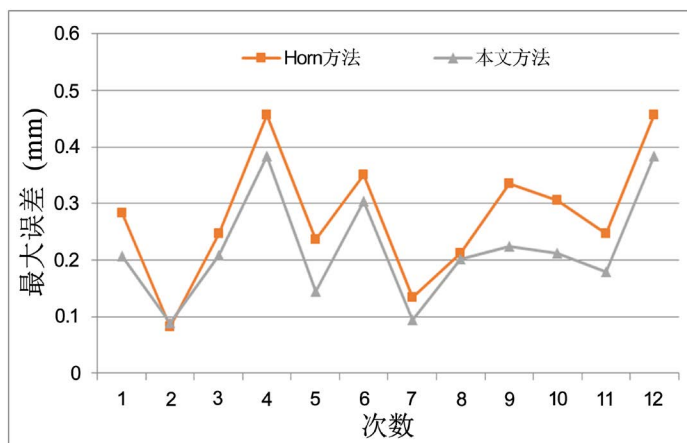


Figure 5. The compare of Max (E) from different thermal compensation method
图 5. 不同热变形补偿算法最大误差比较

5. 总结

由温度变化引起的 ERS 点位置偏移已成为影响激光跟踪仪转站误差的最主要因素。为了提高转站精度，本文提出了一种基于精密热变形理论的激光跟踪仪转站精度补偿方法。考虑装配工装复杂的结构、装配和连接方式，通过比较 ERS 点的理论值和实际测量值来估算其在 X, Y, Z 三个方向上的形体热变形系数。利用迭代的计算方式对 ERS 点的实际测量坐标进行补偿，同时结合匹配算法不断修正激光跟踪仪转站参数。工程实例证明本文提出的热补偿方法相比于目前使用的补偿算法具有更好的补偿精度。

参考文献

- [1] 蒋红宇, 王宇波. 飞机自动化装配技术的发展[J]. 航空制造技术, 2012, 418(22): 73-76.
- [2] 邹爱丽, 王亮, 李东升, 等. 数字化测量技术及系统在飞机装配中的应用[J]. 航空制造技术, 2011(21): 72-75.
- [3] Estler, W.T., Edmundson, K.L., Peggs, G.N. and Parker, D.H. (2002) Large-Scale Metrology—An Update. *CIRP Annals*, **51**, 587-609. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61702-8](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61702-8)
- [4] Berthold, K.P.H., Hugh, M.H. and Negahdaripour, S. (1988) Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Orthonormal Matrices. *Journal of the Optical Society of America A*, **5**, 1127-1137. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.5.001127>
- [5] 杨宝旒, 俞慈君, 金涨军, 等. 激光跟踪仪转站热变形误差建模与补偿方法[J]. 航空学报, 2015, 36(9): 3155-3164.
- [6] 俞慈君, 杨宝旒, 金涨军, 等. 基于三维热变形原理的转站误差补偿方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(7): 1208-1214.
- [7] Jin, Z., Yu, C., Li, J. and Ke, Y. (2015) Configuration Analysis of the ERS Points in Large-Volume Metrology System. *Sensors*, **15**, 24397-24408. <https://doi.org/10.3390/s150924397>
- [8] Umeyama, S. (1991) Least-Square Estimation of Transformation Parameters between Two Point Patterns. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **13**, 376-380. <https://doi.org/10.1109/34.88573>
- [9] Arun, K.S., Huang, T.S. and Blostein, S.D. (1987) Least Squares Fitting of Two 3D Point Sets. *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **PAMI-9**, 698-700. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1987.4767965>
- [10] Berthold, K.P.H. (1998) Closed-Form Solution of Absolute Orientation Using Unit Quaternions. *Journal of the Optical Society of America A*, **4**, 629-642. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.4.000629>
- [11] 李桂华. 复杂规则曲面机械零件的热变形理论及应用研究[D]: [博士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2006.
- [12] 费业泰, 李光珂. 精密技术中热变形误差理论研究及探讨[J]. 中国机械工程, 2008, 19(15): 1765-1769.
- [13] 费业泰, 罗战. 精密技术中热变形误差影响的基本问题[J]. 纳米技术与精密工程, 2003, 1(1): 79-84.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网首页：<http://cnki.net/>，点击页面中“外文资源总库 CNKI SCHOLAR”，跳转至：<http://scholar.cnki.net/new>，搜索框内直接输入文章标题，即可查询；
或点击“高级检索”，下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2330-474X，即可查询。
2. 通过知网首页 <http://cnki.net/>顶部“旧版入口”进入知网旧版：<http://www.cnki.net/old/>，左侧选择“国际文献总库”进入，搜索框直接输入文章标题，即可查询。

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：jast@hanspub.org