

基于点云数据的干涉分析在仪器支架自动化装配中的应用

李耀阳¹, 于炳涛², 高亮³, 吴昊月², 白建炜², 李志坚²

¹海装驻北京地区第一军事代表室, 北京

²首都航天机械有限公司, 北京

³中国航天科技集团, 北京

收稿日期: 2024年3月9日; 录用日期: 2024年4月3日; 发布日期: 2024年4月10日

摘要

本文针对舱段内部仪器支架安装过程中, 支架与筋条干涉影响自动化装配的问题, 研究了一种基于点云数据的支架干涉分析与调整算法。通过分析支架角点与筋条的位置关系确定干涉现象, 并根据分析结果对干涉支架的位置进行调整和补偿, 指导后续自动化装配。以某舱段支架装配为例, 利用该算法实现模型的自动装配。试验件装配结果表明, 该算法有效、可靠, 为舱段产品的自动化装配提供了重要手段。

关键词

点云数据, 干涉分析, 自动化装配

Application of Interference Analysis Based on Point Cloud Data in Automated Assembly of Instrument Supports

Yaoyang Li¹, Bingtao Yu², Liang Gao³, Haoyue Wu², Jianwei Bai², Zhijian Li²

¹First Military Representative Office of the Naval Equipment Department in Beijing, Beijing

²Capital Aerospace Machinery Company Limited, Beijing

³China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing

Received: Mar. 9th, 2024; accepted: Apr. 3rd, 2024; published: Apr. 10th, 2024

Abstract

In this paper, an interference analysis and adjustment algorithm of support based on point cloud

文章引用: 李耀阳, 于炳涛, 高亮, 吴昊月, 白建炜, 李志坚. 基于点云数据的干涉分析在仪器支架自动化装配中的应用[J]. 机械工程与技术, 2024, 13(2): 113-120. DOI: 10.12677/met.2024.132014

data is studied to solve the problem that support and bar interference affect automatic assembly during the installation of instrument support in cabin. The interference phenomenon is determined by analyzing the position relationship between the corner point and the bar, and the position of the interference bracket is adjusted and compensated according to the analysis result, which guides the subsequent automatic assembly. Taking the assembly of a cabin support as an example, the algorithm is used to realize the automatic assembly of the model. Experimental assembly results show that the algorithm is effective and reliable, and provides an important means for automatic assembly of cabin products.

Keywords

Point Cloud Data, Interference Analysis, Automatic Assembly

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

航空航天产品舱段内部装配有电缆支架、仪器安装支架等，该类零件铆接装配生产仍然采用传统的手工工艺，即手工划线定位支架、手工制孔、手动气动锤击铆接。手工装配生产效率不高、质量可靠性低，增加了产品超差和报废的风险。

采用自动钻铆技术实现支架自动化装配是提高舱段装配质量与效率的有效途径。自动化装配是采用自动定位的方式，扫描舱段生成点云数据，建立舱段三维模型，读取舱段理论模型和仪器支架理论位置规划装配路径，抓取、定位支架实现自动装配。自动化装配过程中，由于零件加工偏差、定位偏差、装配变形等影响，仪器支架经常会发生和舱段内型面特征或其他装配件干涉问题，影响了自动化装配的实施过程。因此，如何通过分析舱段点云数据，自动识别支架干涉现象同时调整装配位置成为亟待解决的问题。

当前，国内外对于点云数据分析与修正方面做了大量研究。如：XIE 等[1]利用三维扫描仪对飞机蒙皮的空间模型进行了分析和获取，并用于检测铆钉的质量。WANG 等利用高动态范围条纹投射法实现表面三维重构[2]。周海陶[3]等提出基于铸件点云对飞边打磨点进行提取和打磨路径拟合的方法，解决了由于模型与铸件尺寸相差较大导致的欠打磨或打磨过度的问题；李荣华[4]等人以解决空间非合作目标位姿测量问题为目的，提出了一种面向空间非合作目标的点云智能配准算法，在配准后对配准结果进行位姿图优化。

本文以舱段装配仪器支架为研究对象，分析支架角点与舱段表面点云位置关系，设计一种基于点云数据的支架干涉分析与调整算法，解决舱段自动装配过程中仪器支架干涉的技术难题，提高产品装配质量和生产效率。

2. 基于点云数据的支架干涉分析与调整算法

基于点云数据的支架干涉分析与调整算法流程如图 1 所示。其中，首先通过理论位置读取获取点云数据和支架角点，之后进行基于支架基准的高度偏差值计算，利用被测件表面突出结构会对角点附近点云空间分布产生影响的特点进行干涉检查，最后计算变换矩阵完成干涉调整。

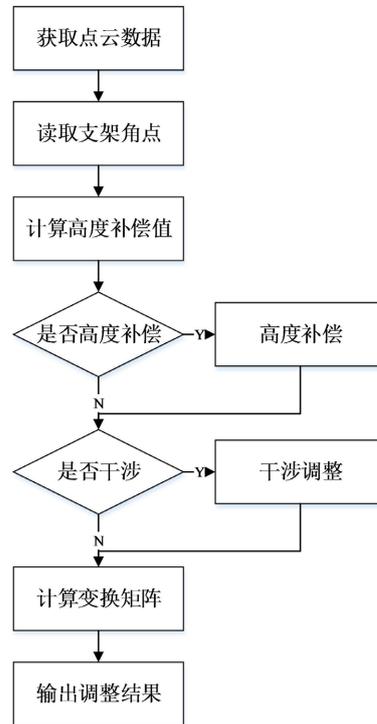


Figure 1. Interference analysis and adjustment method of support based on point cloud

图 1. 基于点云的支架干涉分析与调整方法

- 理论位置读取

利用支架的 CAD 模型，获取支架的外包络矩形的角点坐标作为支架的理论位置。在进行干涉分析之前读取外包络角点坐标和支架的网格数据为后续分析提供理论位置。

- 高度偏差值计算

按固定的零点基准测量点云上端面的高度与被测件理论上端面高度的差值，得到被测件的高度补偿值。将所有点云数据按 z 轴大小排序，得到有序点集 Z 。由于点云密度较大，为了避免噪声带来的影响，选取 z 轴值最大的第 5000 个点 Z_{5000} 到第 15,000 个点 Z_{15000} 求平均值

$$\bar{Z} = \frac{\sum_{i=5000}^{15000} Z_i}{10000} \quad (2.1)$$

将 \bar{Z} 作为被测件上端面的平均高度，与理论高度比较得到高度补偿值。

- 干涉分析

主要利用被测件表面突出结构会对角点附近点云空间分布产生影响的特点进行干涉检查。对输入支架的每个角点 $P(x, y, z)$ 进行遍历，首先以角点为中心，支架外包络矩形对角线长的 2 倍为半径建立球形包围盒，获得角点附近局部点云数据。按给定搜索半径对角点进行固定半径邻域搜索，得到邻域点集 $N\{P_i(x_i, y_i, z_i) | dis(P_i, P) < r, i = 1, \dots, k\}$

按下式(2.2)对邻域求取重心：

$$P_{center} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k P_i \quad (2.2)$$

利用邻域重心按下式(2.3)可以求得邻域的协方差矩阵 C ：

$$C = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (P_i - P_{center})(P_i - P_{center})^T \quad (2.3)$$

根据协方差矩阵的特征向可以获得角点的法线方向 V 。邻域重心与角点的连线在角点法线上的投影距离为：

$$D_{normal} = V \cdot P_{center} \quad (2.4)$$

以此判断支架与被测件表面的贴合情况。根据支架与被测件表面的贴合情况，删除邻域中远离被测件表面的点，再次计算邻域重心 $P'_{center}(x', y', z')$ ，计算该重心与角点的欧式距离为

$$D = \sqrt{(X - x')^2 + (Y - y')^2 + (Z - z')^2} \quad (2.5)$$

则两点在支架平面上的投影距离

$$D_{proj} = \sqrt{D^2 - D_{normal}^2} \quad (2.6)$$

将投影距离与给定的阈值比较判断支架的干涉情况，大于距离阈值则认为干涉。

• 干涉调整

对于存在干涉的支架，将角点调整至邻域重心所在位置即完成干涉调整。

调整前后的角点点集分别为 $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 和 $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$ ，计算两者间的变换矩阵，实际上就是求解优化问题：

$$(R, T) = \operatorname{argmin}_{i=1}^n \|R \cdot P_i + T - q_i\|^2 \quad (2.7)$$

令 \bar{P} 、 \bar{q} 分别为两个点集的重心，则有 $\bar{T} = \bar{q} - R \cdot \bar{P}$ ，令 $x_i = P_i - \bar{P}$ ， $y_i = q_i - \bar{q}$ ，则优化问题可以转换为

$$R = \operatorname{argmin} \sum_{i=1}^n \|(Rx_i) - y_i\|^2 \quad (2.8)$$

式中 $x_i = P_i - \bar{P}$ ， $y_i = q_i - \bar{q}$ 可以使用 SVD 法求解该优化问题。令协方差矩阵 $S = XY^T$ ，对 S 进行 SVD 分解有 $S = U \Sigma V^T$ ，则旋转矩阵 $R = VU^T$ ，平移向量 $T = \bar{q} - R\bar{P}$ ，得到了平移向量 T 和旋转矩阵 R ，输出变换矩阵，完成对干涉支架的调整，指导后续划线。

3. 案例分析

3.1. 试验件的制备

以某舱段仪器支架的自动化装配过程为例，开展案例分析。试验样机为直径 2 米，高 0.72 米的网格加筋舱段，舱段材料为铸铝。舱段内部安装仪器支架共计 4 项，每项 5 件，尺寸范围为 2A14 铝合金，分别安装在不同位置，具体位置尺寸见表 1。采用具体理论安装位置信息列表如下。其中，A 向为沿舱段周向掘起始点的角度位置，Y 向为沿舱段轴向掘起始点的距离。

Table 1. Theoretical position information of the instrument support of the test piece
表 1. 试验件仪器支架的理论位置信息

序号	图号	数量	理论位置(mm)									
			1#		2#		3#		4#		5#	
			A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向
1	ZJ1	5	2.5°	32	3.7°	97	5.75°	162	9.25°	227	12°	292
2	ZJ2	5	2.5°	97	3.7°	162	5.75°	227	9.25°	292	12°	32

续表

3	ZJ3	5	2.5°	162	3.7°	227	5.75°	292	9.25°	32	12°	97
4	ZJ4	5	2.5°	227	3.7°	292	5.75°	32	9.25°	97	12°	162

3.2. 试验装置及原理

针对航天舱段测量精度要求高的特点,采用基于双目立体视觉的相移条纹投影测量系统进行点云数据的测量。该技术利用条纹投射器向被测物投射相移正弦条纹,使用两台相机拍摄条纹,经解相与相位展开,再利用双目立体视觉原理计算出物体的三维形貌,得到舱段表面点云数据,具有效率高、数据点密集、测量精度高的优点,有利于提高后续偏差分析的精度。测量完成后,采用上海拓璞数控技术有限公司研制的双机器人自动钻铆系统完成仪器支架的自动装配。测量系统和装配系统的实物如图2所示。

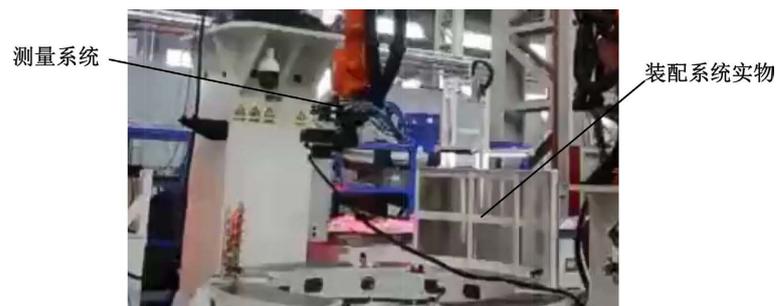


Figure 2. Physical measurement and assembly systems

图2. 测量系统和装配系统的实物

3.3. 试验过程

1) 预设舱段信息

如图3所示,在进行扫描工作前,设置预设的舱段信息,并导入需要分析对比的仪器支架的输入文件后进行自动处理工作。仪器支架输入文件在离线编程软件中由试验产品的仪器支架的三维模型处理后生成,结合自动装配系统的分析软件中预设舱段编号信息,安装仪器支架编号信息,用于确保输出文件可以自动补偿到仪器支架的自动钻铆加工程序之中。



Figure 3. Preset cabin information before point cloud data processing

图3. 点云数据处理前预设舱段信息

2) 获取点云数据

根据舱段的直径和高度编制扫描相机的扫描路径，控制转台以及机器人的末端相机逐层分段对舱体进行扫描获取点云数据。将采集的所有分段的点云数据进行噪点处理并利用测头坐标系与机器人末端坐标系、机器人末端坐标系与全局坐标系之间的刚体变换矩阵，实现多视点云的快速、精确拼接，形成点云模型，如图4所示。



Figure 4. Scanning point cloud model after processing
图4. 处理后的扫描点云模型

3) 读取支架角点

在点云拼接处理过程中，合并舱段扫描点云数据以及预设的舱段信息中的仪器支架输入文件中的支架角点数据。将拼接来源设置为舱段测量点云数据，拼接目标设置为导入的仪器支架的角点数据，先在自动拼接模式下进行粗配准，然后在最近点迭代模式下完成精配准，仪器支架的角点位置为图5中绿点标志处。

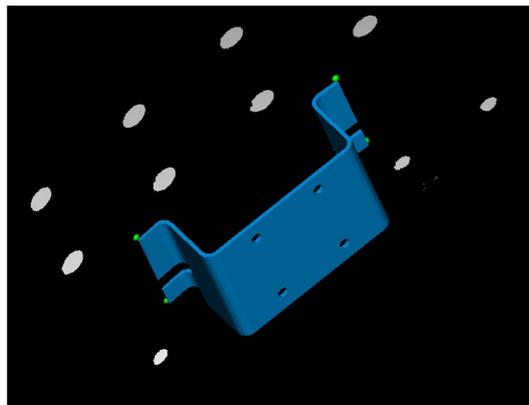


Figure 5. Comparison between theoretical models of typical scaffolds and scanning point cloud processing models
图5. 典型支架的理论模型与扫描点云处理模型对比

4) 高度补偿与干涉调整

在拼接分析过程中计算高度补偿数值，将测试对象设置为舱段测量点云数据，参考对象设置为导入的仪器支架模型数据进行偏差分析，计算二者之间的偏差，确定支架位置的调整方向及调整数值，得出

支架的最终装配位置，并生成 output 文件进行高度补偿和干涉调整，如图 6 所示。文件数据包含三个直线轴、三个角度轴的偏移量以及数据校验值。文件导入到离线编程软件中，在生产程序自动钻铆程序时，会将试验产品仪器支架的加工点位自动进行调整补偿。

```

;RackNo:27-001-1
-2.552917 0.094540 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 -1.453378
;RackNo:27-001-2
-2.507568 0.093353 -0.000000 -0.000000 0.000000 -0.000000 -1.319215
;RackNo:27-001-3
-1.345764 1.254944 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 2.912180
;RackNo:27-001-4
-1.821045 1.821045 0.000000 -0.000000 0.000000 -0.000000 1.050000
;RackNo:27-001-5
0.353973 0.850525 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 2.414498
;RackNo:27-002-1
-2.507568 0.093353 -0.000000 -0.000000 0.000000 -0.000000 -1.319215
;RackNo:27-002-2
-1.345764 1.254944 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 2.912180
;RackNo:27-002-3
-1.821045 1.821045 0.000000 -0.000000 0.000000 -0.000000 1.050000
;RackNo:27-002-4
0.353973 0.850525 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 2.414498
;RackNo:27-002-5
-2.552917 0.094540 0.000000 0.000000 -0.000000 0.000000 -1.453378

```

Figure 6. Typical bracket compensates output files

图 6. 典型支架补偿输出的文件

3.4. 结果对比与分析

为了获取实验结果，采用三坐标测量仪对装配完成的试验样机进行了仪器支架安装位置的测量。测量结果与力量结果对比见表 2。

Table 2. Comparison between the theoretical position and actual assembly position of the test piece instrument bracket

表 2. 试验件仪器支架的理论位置和实际装配位置对比

序号	图号	数量	相对坐标原点的位置(mm)										
			1#		2#		3#		4#		5#		
			A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向	A 向	Y 向	
1		理论	2.5°	32	3.7°	97	5.75°	162	9.25°	227	12°	292	
2	ZJ1	5	实测	2.48	31.69	3.67	96.87	5.74	161.54	9.27	226.73	12.01	291.74
3		偏差	-0.02	-0.31	-0.03	-0.13	-0.01	-0.46	0.02	-0.27	0.01	-0.26	
4		理论	2.5°	97	3.7°	162	5.75°	227	9.25°	292	12°	32	
5	ZJ2	5	实测	2.45	97.5	3.69	162.06	5.73	227.39	9.23	292.07	11.98	32.03
6		偏差	-0.05	0.5	-0.01	0.06	-0.02	0.39	-0.02	0.07	-0.02	0.03	
7		理论	2.5°	162	3.7°	227	5.75°	292	9.25°	32	12°	97	
8	ZJ3	5	实测	2.49	161.66	3.68	226.59	5.74	291.95	9.23	31.99	12.02	96.61
9		偏差	-0.01	-0.34	-0.02	-0.41	-0.01	-0.05	-0.02	-0.01	0.02	-0.39	

续表

10		理论	2.5°	227	3.7°	292	5.75°	32	9.25°	97	12°	162	
11	ZJ4	5	实测	2.45	227.25	3.68	292.47	5.72	32.05	9.28	97.29	11.98	162.11
12			偏差	-0.05	0.25	-0.02	0.47	-0.03	0.05	0.03	0.29	-0.02	0.11

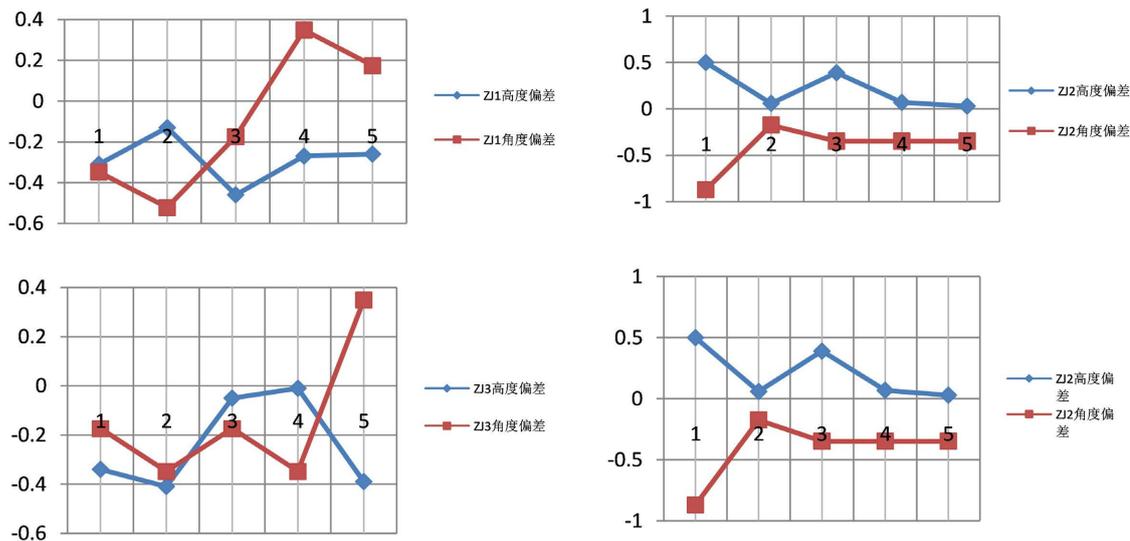


Figure 7. Comparative analysis of theoretical and practical positions

图 7. 理论和实际位置对比分析

分析图 7 可以看出, 试验件装配后, 4 种 20 件仪器支架的安装位置误差在 0.01~1 mm 之间, 满足铆接装配标准要求; 其中, ZJ4 支架的偏差较大, 原因为机器人抓取定位存在偏差。通过试验可以看出, 采用基于点云的数据分析方法可以用于支架的自动定位补偿应用, 证明算法的正确、稳定, 在舱段仪器支架自动化安装过程中具有可推广性。

4. 结论

本文针对舱段自动化装配实施过程中, 内部仪器支架与筋条干涉影响产品装配进程和质量的问题, 基于点云数据, 研究了一种支架干涉分析与调整算法。该算法通过建立点云数据模型, 分析支架与筋条的位置关系以确定干涉现象的表现方式; 设计一种基于支架角点与舱段表面点云位置关系的干涉分析算法, 并根据分析结果对干涉支架的位置进行调整, 指导后续自动化装配。最后, 以某舱段支架装配为例建立试验件, 利用该算法实现模型的自动装配。试验件装配误差在 1 mm 之间, 满足舱段装配要求, 验证了该算法的可行性和有效性, 并为舱段产品的自动化装配提供了重要手段。

参考文献

- [1] Xie, Q., Lu, D.N., Du, K.P., et al. (2020) Aircraft Skin Rivet Detection Based on 3D Point Cloud via Multiple Structures Fitting. *Computer-Aided Design*, **120**, Article ID: 102805. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102805>
- [2] Wang, Y., Zhao, H., Li, X., et al. (2020) High-Accuracy 3-D Sensor for Rivet Inspection Using Fringe Projection Profilometry with Texture Constraint. *Sensors*, **20**, 7270. <https://doi.org/10.3390/s20247270>
- [3] 周海陶, 陈新度, 吴磊. 基于三维点云的铸件飞边打磨点提取及拟合方法[J]. 机电工程技术, 2022, 51(11): 43-46+145.
- [4] 李荣华, 董欣基, 等. 改进 PointNetLK 的点云智能配准与位姿图优化方法[J]. 宇航学报, 2022, 43(11): 1557-1565.