

DOI:10.16356/j.1005-2615.2016.01.016

## 智能移动三坐标辅助定位的自适应控制方法

韩 锋 田 威 刘明爽 蒋 昊

(南京航空航天大学机电学院,南京,210016)

**摘要:**飞机部件的外形测量与误差评估是提升飞机装配质量的关键。针对测量工作要求高精度、高效率 and 无需专用工装的情况,同时针对被测对象外形尺寸大、各部位测量规范不同等难点,提出一种基于激光跟踪仪的智能移动三坐标辅助定位自适应控制技术。该技术以激光跟踪仪作为测量工具,以直角三坐标伺服机构作为靶标的辅助定位装置,通过对直角三坐标伺服机构及导航小车进行任务规划与优化;同时激光跟踪仪实时反馈靶标目标位置,从而以最优路径的方式实现对测量机构多站位自主移动的全闭环自适应控制,提高了靶标的定位精度及测量效率。本文在线对测量数据进行了快速处理,得出了误差分布图,并精确地反映了测量点位的误差。实验结果表明:该方法可实现大尺寸部件的高精度快速测量,满足飞机大部件的测量要求。

**关键词:**激光跟踪仪;直角三坐标伺服机构;导航小车;靶标;实时反馈

**中图分类号:**V26      **文献标志码:**A      **文章编号:**1005-2615(2016)01-0098-08

### Adaptive Control Method Based on Intelligent Three-Dimensional Mobile Platform

Han Feng, Tian Wei, Liu Mingshuang, Jiang Hao

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

**Abstract:** The shape measurement and the error evaluation of aircraft components are keys to the improvement of aircraft assembly quality. Since the target object is usually very large and different components have different test standards, to fulfill the demands of high precision, high efficiency and no special tooling for the measure system, an adaptive control method of intelligent three-dimensional (3D) mobile platform based on laser tracker is proposed. This technology uses the laser tracker as measurement tool and regards rectangular 3D servo mechanism as the auxiliary positioning device for the target. By receiving the target position from the tracer dynamically, an entire closed-loop control of multi-station and autonomous mobile of the measurement mechanism with the optimal path is realized based on the task planning and the optimization of the 3D servo mechanism and the guided vehicle, thus improving the positioning accuracy of the target and the efficiency of measurement at the same time. The measured data are analyzed online rapidly, and the error distribution is obtained, which accurately reflects the measure error. Experimental results show that the method has high precision and can be used to measure large components effectively, which meets the requirements of aircraft component measurement.

**Key words:** laser tracker; rectangular 3D servo mechanism; guided vehicle; target; real-time feedback

**基金项目:**国家自然科学基金(51105205)资助项目;航空科学基金(2013ZE52067)资助项目。

**收稿日期:**2014-09-17;**修订日期:**2015-11-24

**通信作者:**田威,男,副教授,E-mail:tw-nj@nuaa.edu.cn。

**引用格式:**韩锋,田威,刘明爽,等.智能移动三坐标辅助定位的自适应控制方法[J].南京航空航天大学学报,2016,48(1):98-105. Han Feng, Tian Wei, Liu Mingshuang, et al. Adaptive control method based on intelligent three-dimensional mobile platform[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2016, 48(1): 98-105.

随着航空制造业朝着高精度、低成本及数字化、柔性化方向的快速发展,飞机零部件的加工和装配越来越依赖于大尺寸测量技术和系统提供的技术保证,除了使用传统的工装夹具定位方法对产品进行检测外,也越来越多地使用便携灵活的大尺寸空间坐标测量设备对产品进行质量控制<sup>[1-2]</sup>。然而,传统的大尺寸测量手段有限、操作复杂并且测量效率低,有时还必须借助于昂贵的机械夹具,严重地影响了生产效率,尤其是对一些复杂曲面的测量、特征线上数据点的测量,更是难以满足测量要求<sup>[3-5]</sup>。近年来,各主机厂对飞机大部件的外形检测大部分采用划线检测法,依靠人工在待测产品上画特征线,再手持激光跟踪仪靶标对特征线上的点位进行逐一测量。由于跟踪仪靶标为球形状,其定位精度不容易控制,工人的画线误差、手持靶标的定位误差都会影响最终的测量精度,同时测量效率低,增加了工人的劳动量。因此,航空企业对低成本、高效率、高精度和新型便捷的大尺寸测量技术的研究愈来愈迫切。

当前应用广泛的大部件外形测量设备有三坐标测量机、激光雷达、激光扫描仪、关节式坐标测量机及视觉测量系统等,这些设备各有特点,能够在一般环境下满足大多数零部件的常规测量。三坐标测量机测量精度高、通用性好,但其不适用于按照预定轨迹对飞机部件特征线上众多的点位进行自动化测量,测量范围有限,尤其是针对主机厂各大部件的外形测量。激光雷达及激光扫描仪测量效率高,方便快捷,但是应用成本高。和三坐标测量机比较,关节式坐标测量机的测头安置非常灵活,测量柔性好,但由于关节臂长的限制,测量范围有限。目前有些厂家通过在其测头上附加小型结构光扫描仪来实现对产品的三维快速扫描,如 Faro 公司的产品 ScanArm,但这种设备存在测量精度的限制,同时增加了成本<sup>[6-7]</sup>。视觉测量系统测量效率高,但测量精度容易受到环境的影响,容易出现失真。

鉴于航空企业对飞机部件外形测量所提出的低成本、高精度和高效率的要求,结合部件外形尺寸不一、测量点数多且同一部件不同部位测量要求不同的特点,提出一种新型的基于激光跟踪仪的辅助三坐标定位技术。该技术融合了数据提取技术、离线编程技术、数据通讯技术、控制技术和数据处理技术于一体,运用激光跟踪仪的三维坐标信息反

馈实现系统的全闭环控制,提高了靶标的定位精度,克服了三坐标测量机测量范围有限、便携性差和自动化测量程度低的不足,而且很好地继承了激光跟踪仪测量精度高的优点,方便快捷的数据处理形式为反映飞机大部件的制造误差提供了保障。

## 1 系统组成及工作原理

整个测量系统由计算机、激光跟踪仪、直角三坐标伺服机构和导航小车等组成,激光跟踪仪的靶标由三坐标伺服机构夹持,如图 1 所示。系统工作原理为:首先,依据测量规范从待测产品 CAD 数模中提取待测信息<sup>[8]</sup>,并将提取的信息进行任务规划与优化;其次,建立相关坐标系统之间的关联,通过跟踪仪实时反馈靶标的三维坐标信息,对测量机构在运动过程中产生的定位误差进行实时补偿,当靶标接触待测点时,激光跟踪仪采集并存储数据,当该站位测量任务完成后,导航小车自动运行到下一站位,重建直角三坐标伺服机构坐标系,同时系统自动加载该站位的测量任务,重复以上测量工作,直至整个测量站位的任务完成;最后,当测量任务结束,系统在线对测量数据进行处理,并生成相应的误差报告。

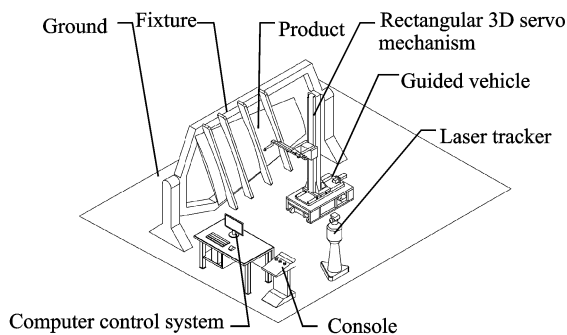


图 1 测量系统结构

Fig. 1 Structure of measuring system

## 2 基于激光跟踪仪的三维坐标信息实时反馈自适应控制技术

### 2.1 控制系统组成

系统总体架构采用主/从式结构。上位机采用嵌入式工业控制计算机作为硬件平台,操作系统采用 Win XP。下位机包括直角三坐标伺服机构及导航小车控制器 TwinCAT PLC 和激光跟踪仪控制器。工控机与直角三坐标伺服机构及导航小车控制器通过 EtherCAT 总线连接,利用 ADS. OCX 自动化组件完成数据采集、交换和 PLC 状态监控

等工作,而工控机与跟踪仪控制器采用 Ethernet 总线连接,通过 TCP/IP 协议实现客户端与服务端之间对数据采集的交互与存储。系统组态如图 2 所示。

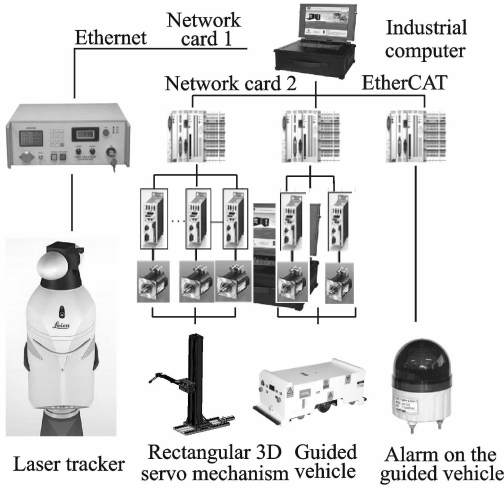


图 2 系统组态

Fig. 2 System configuration

### 2.2 三维坐标信息实时反馈的自适应控制策略

本文采用基于激光跟踪仪三维坐标信息实时反馈的自适应控制策略,解决了通过传统元器件进行反馈控制,致使定位精度低的不足,同时运用分解速度控制方法使直角三坐标机构各伺服轴能协调统一运动,消除了三轴不同步引起的不平稳现象<sup>[9-10]</sup>。通过伺服电机编码器自身的速度反馈实现测量速度的半闭环控制,以满足测量机构“快进-工进-快退”的测量要求,从而使辅助定位机构能安全运行。

### (1) 直角三坐标实时反馈自适应控制

直角三坐标伺服机构控制结构如图 3 所示,  $u_r(t)$  表示待测目标位置输入,  $u_0$  表示靠近产品表面的定位点位置输入,  $u(t)$  表示激光跟踪仪的实时位置反馈,  $\dot{u}_r(t)$  表示经过位置控制器的速度输出,  $\dot{u}(t)$  表示电机编码器的速度反馈。利用激光跟踪仪检测靶标位置并实时反馈给辅助定位机构控制器,控制器根据反馈信息计算以下两种偏差:①待测点位置 and 实际位置偏差  $u_r(t) - u(t)$ ; ②定位点位置 and 实际位置偏差  $u_r(t) - u_0$ 。对于第①种偏差,根据偏差值对伺服轴进行速度分配,使测量机构以全闭环的运行方式实现伺服轴的协调同步运行、同时到达,以提高辅助定位机构的定位精度及运行稳定性。对于第②种偏差,当  $u_r(t) - u_0$  逐渐减小时,表示靶标越来越接近定位点,期间测量机构快速进给运动到定位点,到达测量点位后,通过速度调节使靶标慢速进给靠近产品进行测量,当靶标接触产品并完成数据采集工作后,靶标快速退回。

### (2) 导航小车定时反馈自适应控制

在导航小车换站运动过程中,激光跟踪仪定时反馈靶标的目标位置,通过相邻时间间隔靶标位置所形成的向量与导航小车前进方向的目标向量进行比对,以直线插补的方式修正导航小车直线前进所产生的偏差,直至小车到达目标站位。其控制结构如图 4 所示,  $v$  表示小车直线前进方向的目标向量,  $v(t + \Delta t) - v(t)$  表示相邻时间间隔导航小车经过的位置所形成的向量。

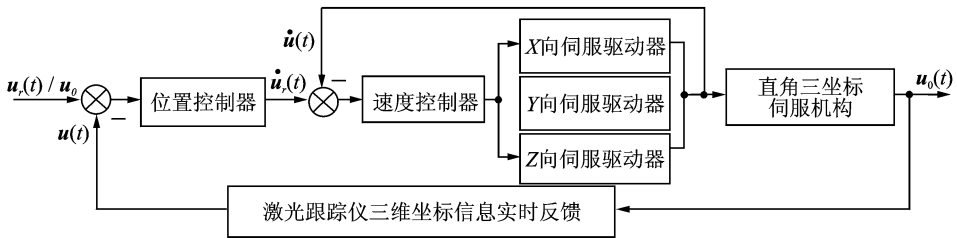


图 3 直角三坐标伺服机构反馈控制

Fig. 3 Feedback control of rectangular 3D servo mechanism

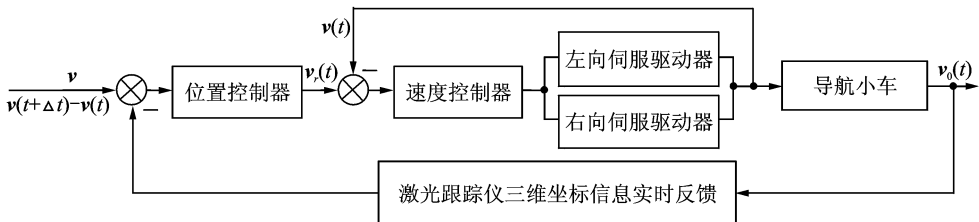


图 4 导航小车反馈控制

Fig. 4 Feedback control of guided vehicle

### 3 自适应控制任务规划与数据后处理

#### 3.1 自适应控制任务规划方法

自适应控制任务规划涉及到数据提取、偏置、坐标转换及辅助定位机构路径规划等。文中提出一种遗传-蚁群混合优化算法,对直角三坐标伺服机构进行路径规划与优化,首先利用遗传算法的随机搜索、快速及全局收敛性产生最短路径的初始解,并将其转化为蚁群算法的初始信息素分布,然后利用蚁群算法的并行性、正反馈机制以及求解效率高等特征寻求最优解。通过这种方式,减少了蚁群算法的搜索时间,在提高整体求解速率的同时也保证了所得解为全局最优<sup>[11-13]</sup>。

##### 3.1.1 数据提取及偏置处理

根据待测产品测量规范,从产品 CAD 数模提取测量数据。由于在测量过程中并非靶标中心接触待测产品,因此需要对所提取的数据沿产品外法方向做偏置处理。设产品任一点坐标为  $(x, y, z)$ , 外法矢量为  $(x \cdot dir, y \cdot dir, z \cdot dir)$ , 靶标半径为  $r$ , 则经过偏置后点的坐标值  $(x', y', z')$  为

$$\begin{aligned} (x', y', z') = & \\ & \left( x + r \times \frac{x \cdot dir}{\sqrt{(x \cdot dir)^2 + (y \cdot dir)^2 + (z \cdot dir)^2}}, y + \right. \\ & r \times \frac{y \cdot dir}{\sqrt{(x \cdot dir)^2 + (y \cdot dir)^2 + (z \cdot dir)^2}}, z + \\ & \left. r \times \frac{z \cdot dir}{\sqrt{(x \cdot dir)^2 + (y \cdot dir)^2 + (z \cdot dir)^2}} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

##### 3.1.2 导航小车任务规划

由于直角三坐标伺服机构在导航小车上行程有限,为了扩展机构的工作范围,在进行大部件三维测量时需要控制导航小车在站位与站位之间的移动,并尽量减少导航小车往返运动次数,以保证系统运行效率。为此,对导航小车的任务规划尤为重要。

设直角三坐标伺服机构在导航小车上沿  $X$  行程为  $d$ , 即站位与站位之间的距离为  $d$ , 设第一个站位坐标为  $S_0 = (x_0, y_0, z_0)$ , 则第  $k$  个站位的坐标为

$$S_k = (x_k, y_k, z_k) = (x_0 + (k-1) \times d, y_0, z_0) \quad (2)$$

直角三坐标伺服机构在第  $k$  站位的实际工作区域为

$$\begin{aligned} \omega(S_k) = & \{x_{k-1} < x < x_k\} = \\ & \{x_0 + (k-2) \times d < x < x_0 + (k-1) \times d\} \quad (3) \end{aligned}$$

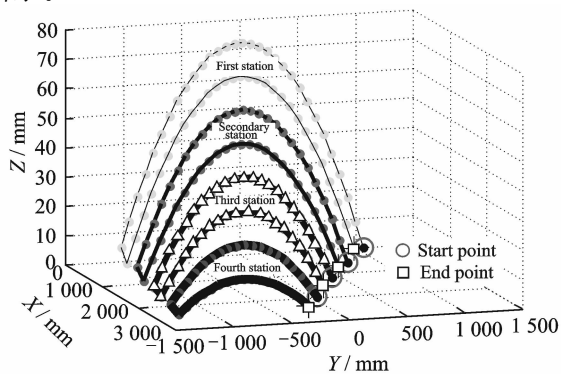
通过遍历直角三坐标伺服机构坐标系下经过偏置处理的数据,按照式(3)中不同站位上的工作区域将各点坐标顺序划分到不同站位,完成导航小车在不同站位上的任务规划。

#### 3.1.3 直角三坐标伺服机构任务规划

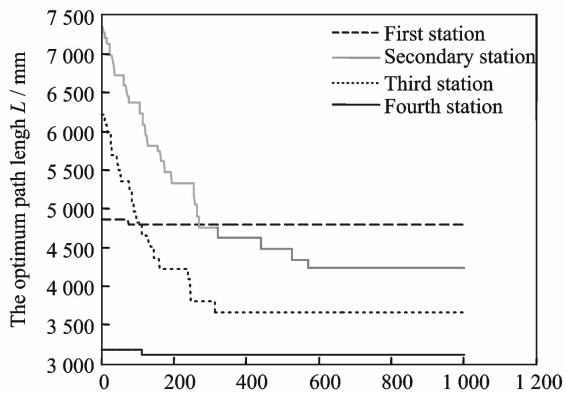
将产品待测量点  $i$  的位置坐标记为  $(x_i, y_i, z_i)$ , 点  $i$  与点  $j$  之间的距离记为  $d(c_i, c_j)$ ,  $p_i$  表示第  $i$  个测量点位。假设共有  $n$  个测量点,以自然数子集  $\{1, 2, \dots, n\}$  进行编号,测量路径的全局优化结果就是寻找自然数子集  $\{1, 2, \dots, n\}$  的一个排列  $R_p = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ , 以靶标移动路径最短为评价标准,通过遗传-蚁群混合优化算法进行求解<sup>[14-15]</sup>, 即

$$\min L = \min \sum_{i=1}^{n-1} d(c_{p_i}, c_{p_{i+1}}) + d(c_{p_n}, c_{p_1}) \quad (4)$$

为验证上述任务规划的效果,从曲面特征线上提取 192 个散乱的测量点进行验证。不同站位测量区域用不同符号表示,空心圆表示起始点,空心矩形表示终点。仿真参数设置为:种群规模  $m = 100$ , 交叉概率  $P_c = 0.7$ , 变异概率  $P_m = 0.1$ , 信息素浓度比重  $\gamma = 1.0$ , 可见度比重  $\epsilon = 5.0$ , 信息强度  $Q = 100$ , 信息素局部与全局挥发系数  $\rho = \theta = 0.5$ 。所得优化路径总长度为 15 799 mm, 仿真结果如图 5 所示。



(a) The optimal path graph



(b) Evolutionary performance figure

图 5 遗传-蚁群混合优化算法最优路径图和进化性能图  
Fig. 5 The optimal path graph and evolutionary performance figure of genetic ant colony hybrid optimization algorithm

### 3.2 基于最小二乘法的坐标转换

要实现靶标的精确定位,主要依赖于对直角三坐标伺服机构的精确控制,这就涉及到直角三坐标伺服机构坐标系的建立。同时,因为数据提取的坐标值相对于产品坐标系,因此需要建立直角三坐标伺服机构坐标系与产品坐标系之间的关联,而产品安装在工装上,其安装位姿在工装坐标系下描述,因此需要进一步建立工装坐标系与直角三坐标伺服机构坐标系的联系。本文采用 Bursa 坐标转换模型构建三者之间的转换关系,如图 6 所示。

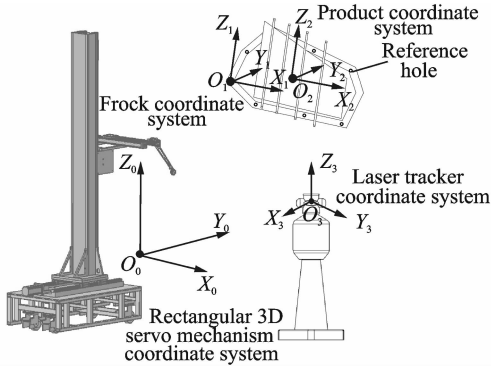


图 6 系统中各坐标系的关系

Fig. 6 Relative relationships of coordinate systems in the servo system

通过工装上一系列具有一定位置关系的公共点,将其映射到两个坐标系下,然后通过坐标转换,实现两坐标系的转换和统一<sup>[16-17]</sup>。两个空间直角坐标转换通常含有 7 个转换参数,即 3 个平移参数  $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ , 3 个旋转参数  $\varphi, \theta, \varphi$ , 1 个尺寸缩放因子  $\epsilon$ 。由直角坐标转换的布尔莎 Bursa 模型得

$$\mathbf{P}^L = (1 + \epsilon)\mathbf{R}\mathbf{P}^P + \Delta\mathbf{P} \quad (5)$$

式中:  $\mathbf{R}$  为旋转矩阵;  $\Delta\mathbf{P}$  为平移矩阵;  $\epsilon$  为尺度缩放因子。将式(5)展开得

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \\ \vdots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \end{cases} \quad m > n \quad (6)$$

即  $f(\mathbf{x})=0$ , 其中  $x_i (i=1, \dots, 7)$  为求解的 7 个转换参数,  $m$  为 3 倍的公共点数。

本文求解转换参数方法如下:

由于式(6)为超定方程,取二次泛函函数为

$$\mu(\mathbf{x}) = \frac{1}{2}f(\mathbf{x})^T f(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m f_i^2(\mathbf{x}) \quad (7)$$

则函数  $\mu(\mathbf{x})$  的极小点  $\mathbf{x}^*$  就是超定方程组的最小二乘解,即有

$$\mu(\mathbf{x}^*) = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} \mu(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n} \frac{1}{2} f(\mathbf{x})^T f(\mathbf{x}) \quad (8)$$

求解非线性超定方程组  $f(\mathbf{x})=0$  的问题从而转化成求多元函数  $\mu(\mathbf{x})$  的极小值问题,由极值存在的必要条件,若  $f(\mathbf{x})$  在定义域可微,令  $\mu(\mathbf{x})$  的梯度函数  $\rho(\mathbf{x}) = \nabla \mu(\mathbf{x}) = 0$ , 即有

$$\rho(\mathbf{x}) = \nabla \mu(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} Df(\mathbf{x})^T f(\mathbf{x}) = 0 \quad (9)$$

式中

$$Df(\mathbf{x})^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_1}{\partial x_n} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (10)$$

而 Gauss-Newton 算法计算模型

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \mathbf{P}_k \\ Df(\mathbf{x}_k)^T Df(\mathbf{x}_k) \mathbf{P}_k = Df(\mathbf{x}_k)^T f(\mathbf{x}_k) \end{cases} \quad (11)$$

将函数  $f(\mathbf{x})$  在  $\mathbf{x}_k$  点进行泰勒展开

$$f(\mathbf{x}) \approx Df(\mathbf{x}_k)(\mathbf{x} - \mathbf{x}_k) - f(\mathbf{x}_k)$$

将其代入式(10)得

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - [Df(\mathbf{x}_k)^T Df(\mathbf{x}_k)]^{-1} Df(\mathbf{x}_k)^T f(\mathbf{x}_k) \quad (12)$$

根据式(12)选取初始值进行迭代,在迭代过程中直至相邻 7 个参数向量差的范数小于某阈值时停止迭代,即可得到最小二乘法下的最优解。

### 3.3 数据后处理方法

针对特征线上数据点的测量,通过设定一个临界距离值  $\delta$ ,如果扫描线方向上的点到曲面距离  $d > \delta$  时会产生噪声点,对其进行标记和记录,若  $d < \delta$ ,则中间点不是噪声点应保留<sup>[18]</sup>。

从三坐标的测量原理可知,最终的测量结果实际上是靶标中心在整个测量过程中的轨迹。并且最终通过实际拟合曲面与理论曲面的比较来判断产品的加工精度会有一些的误差<sup>[19]</sup>。对此,本文通过将去噪后的测量数据点  $P(x, y, z)$  导入原 CAD 数模中,求取点  $P$  在数模表面上的投影点  $P'(x', y', z')$ ,并设提取的数据点经偏置处理后对应的理论点为  $Q(x'', y'', z'')$ ,则系统在  $X, Y, Z$  3 个方向的定位误差可用式(13)评估

$$\Delta x = x'' - x, \Delta y = y'' - y, \Delta z = z'' - z \quad (13)$$

待测产品上该点的制造误差为

$$u = \text{Dis}(P, P') - r =$$

$$\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2} - r \quad (14)$$

沿  $X, Y, Z$  3 个方向的误差分量分别为

$$u_x = u \cdot \cos \theta_x = u \cdot \frac{x-x'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \quad (15)$$

$$u_y = u \cdot \cos \theta_y = u \cdot \frac{y-y'}{\sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}} \quad (16)$$

$$u_z = u \cdot \cos\theta_z = u \cdot \frac{z - z'}{\sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2}} \quad (17)$$

该方法不用对测量数据进行拟合处理,也不需要和数据拟合生成的曲面进行靶标半径偏移补偿,处理时间快,可以精确反映曲面上该测量点的偏差。

### 4 实验验证

为了验证所设计系统的可行性,以某主机厂提供的某型号右侧内副翼为测量对象进行了实验,分别验证了系统的定位精度以及产品的制造误差。

**验证 1** 根据右侧内副翼的测量要求,从 CAD 数模中按照特征线对测量数据点位进行提取、偏移,并进行数据规划与优化,将优化后的数据发送给控制器,控制靶标对右侧内副翼进行测量。系统定位精度如表 1 所示,沿 X,Y,Z 3 个方向上的平均

定位误差分别为  $\overline{\Delta x} = 0.044\ 3\ \text{mm}$ ,  $\overline{\Delta y} = -0.009\ 8\ \text{mm}$ ,  $\overline{\Delta z} = -0.031\ 9\ \text{mm}$ 。由于直角三坐标伺服机构的总质量主要集中在 X 向滑台上,同时 Z 向移动的机构质量大于 Y 向移动的机构质量,加之 Z 向大尺寸立柱的安装势必会对 Z 向测量误差造成更大影响,因此 X 向定位误差最大,Z 向定位误差大于 Y 向定位误差,符合实际。

**验证 2** 某主机厂对产品制造误差的控制要求是 0.4 mm,直角三坐标伺服机构测量与人工手持跟踪仪靶标测量对比如表 2 所示。可以看出,与人工测量相比较,不论是测量效率或是靶标的定位精度,该辅助定位系统都有明显的优势。如图 7 所示,实线表示曲面上的特征线,星号表示直角三坐标测量时靶标中心轨迹,十字符号表示人工测量时靶标中心轨迹。

表 1 系统定位精度

Tab. 1 Positioning accuracy of measurement mechanism

测量点	偏置后的理论值			测量值		
	X	Y	Z	X	Y	Z
$P_1$	1 599.608 6	12 223.116 0	325.424 1	1 599.422 8	12 223.062 1	325.403 9
$P_2$	1 549.366 5	12 130.596 2	386.753 0	1 549.374 6	12 130.572 1	386.804 6
$P_3$	1 471.419 8	12 097.204 9	430.436 1	1 471.365 8	12 097.165 7	430.487 7
$P_4$	1 478.034 6	12 002.045 2	459.119 9	1 478.067 1	12 002.069 8	459.089 9
$P_5$	1 410.955 3	12 043.406 5	482.344 6	1 410.963 7	12 043.458 7	482.381 1
$P_6$	1 414.943 0	11 980.854 6	511.519 9	1 414.919 1	11 980.812 1	511.565 6
$P_7$	1 360.701 4	12 000.339 2	524.045 7	1 360.714 6	12 000.453 8	524.077 9
$P_8$	1 397.977 2	11 940.024 4	582.767 0	1 397.935 8	11 940.112 9	582.810 1
$P_9$	1 300.202 5	11 924.675 8	636.051 4	1 300.075 7	11 924.655 1	636.089 2
$P_{10}$	1 302.964 0	11 869.284 3	695.486 3	1 302.953 1	11 869.323 9	695.530 3
$P_{11}$	1 281.121 3	11 807.596 8	735.944 0	1 281.049 1	11 807.631 4	735.986 4
$P_{12}$	1 231.435 1	11 824.969 2	788.627 0	1 231.356 6	11 824.913 4	788.675 7
平均误差	$\overline{\Delta x} =$ 0.044 3	$\overline{\Delta y} =$ -0.009 8	$\overline{\Delta z} =$ -0.031 9	综合误差	$\sqrt{\overline{\Delta x^2} + \overline{\Delta y^2} + \overline{\Delta z^2}} =$ 0.055 5	

表 2 产品误差统计及效率评估

Tab. 2 Product deflection statistics and efficiency evaluation

项目	直角三坐标 伺服机构测试 (204 个点)	人工手持跟踪仪 靶标测量 (186 个点)
	最大误差/mm	2.541 6
最小误差/mm	-2.214 7	-1.964 8
占总误差 百分比/%	$0 <  \rho  \leq 0.2$	19.12
	$0.2 <  \rho  \leq 0.4$	43.63
	$0.4 <  \rho  \leq 0.6$	25.98
	$0.6 <  \rho  \leq 0.8$	7.35
	$ \rho  > 0.8$	3.92
定位精度/mm	0.055 5	$\geq 2$
测量效率/(个·min <sup>-1</sup> )	50~100	10~20

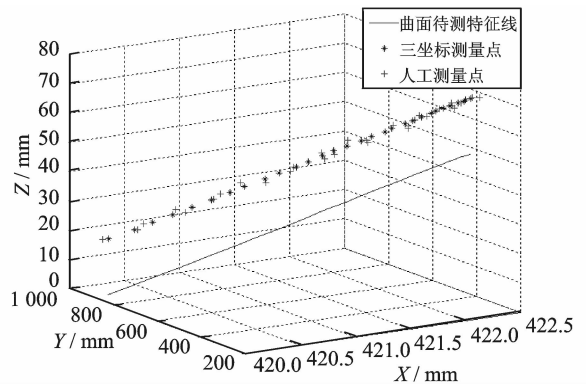


图 7 直角三坐标测量与人工测量比较

Fig. 7 Comparison between rectangular 3D measurement and manual measurement

## 5 结 论

(1) 本文提出的基于激光跟踪仪的智能移动三坐标辅助定位自适应控制技术,以导航小车作为测量机构的移动平台,依托CAD数模提取的目标数据作为控制三坐标伺服轴的桥梁,通过激光跟踪仪实时反馈靶标位置,实现了在不增加测量工装、不影响装配工序的情况下飞机大部件现场数字化三维测量,较好地解决了机构测量范围有限、表面测量点云密集、各部分测量要求不同及机构定位误差大等测量难题。

(2) 采用遗传-蚁群混合优化算法对导航小车及直角三坐标伺服机构进行任务规划,减少了系统的空行程时间,提高了工作效率,实现了测量自动化。

(3) 运用本文提出的测量及数据处理方法,对某主机厂某型号右侧内副翼进行现场实际测量和数据处理分析均取得了良好的效果,为飞机大部件的误差评估提供了有效的方法和数据基础。

### 参考文献:

[1] 郑联语,朱绪胜,姜丽萍. 大尺寸测量技术在航空制造业中的应用及关键技术[J]. 航空制造技术, 2013, 427(7): 38-41.  
Zheng Lianyu, Zhu Xusheng, Jiang Liping. Application of large-scale measurement in aviation manufacturing and its key technology[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013, 427(7): 38-41.

[2] 马骊群,曹铁泽,王继虎,等. 大尺寸坐标测量技术在大型部件装配应用中的若干问题[J]. 计测技术, 2013, 33(2): 7-12.  
Ma Liqun, Cao Tieze, Wang Jihu, et al. Discussion on inspecting the assembling components by using large volume metrology instruments[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(2): 7-12.

[3] Bruėas D, Suėiedelytė-Visockienė J. Measuring surface geometry of airplane wing by means of two methods[J]. Aviation, 2009, 13(2): 44-49.

[4] Chen Guo. 3D Measurement and stereo reconstruction for aeroengine interior damage[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2004, 17(3): 149-151.

[5] 邵建新,邱自学,袁江,等. 大量程自由曲面的自适应跟踪测量方法研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(9): 1045-1047.  
Shao Jianxin, Qiu Zixue, Yuan Jiang, et al. Re-

search on adaptive tracing measurement method used for wide-range free-form surfaces[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(9): 1045-1047.

[6] 刘胜兰,罗志光,谭高山,等. 飞机复杂装配部件三维数字化综合测量与评估方法[J]. 航空学报, 2013, 34(2): 409-418.  
Liu Shenglan, Luo Zhiguang, Tan Gaoshan, et al. 3D measurement and quality evaluation for complex aircraft assemblies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(2): 409-418.

[7] 黄桂平,钦桂勤. 大尺寸三坐标测量方法与系统[J]. 宇航计测技术, 2007, 27(4): 15-19.  
Huang Guiping, Qin Guiqin. Measurement methods of the large scale 3D coordinate and its system[J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2007, 27(4): 15-19.

[8] Zou Cheng. An off-line programming system for flexible drilling of aircraft wing structures[J]. Assembly Automation, 2011, 31(2): 161-168.

[9] 周俊,姬长英. 基于视觉导航的轮式移动机器人横向最优控制[J]. 机器人, 2004, 24(3): 209-212.  
Zhou Jun, Ji Changying. Lateral optimal control for wheeled mobile robot navigated by machine vision[J]. Robot, 2004, 24(3): 209-212.

[10] 周军,余跃庆. 基于实时位置反馈的模块化机器人轨迹跟踪控制[J]. 北京工业大学学报, 2012, 38(8): 1136-1142.  
Zhou Jun, Yu Yueqing. Trajectory tracking control of modular robot based on real-time position feedback[J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 2012, 38(8): 1136-1142.

[11] Acan A, Member S, Unveren A. A shared-memory ACO+GA hybrid for combinatorial optimization[C]// IEEE Congress on Evolutionary Computation. [S.l.]:IEEE, 2007: 2078-2085.

[12] Leng Sheng, Wei Xiaobin, Zhang Wenyi. Improved ACO scheduling algorithm based on flexible process[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2006, 23(2): 154-160.

[13] 林葵,王伟,张尧文,等. 基于非劣排序遗传算法的三代轮毂轴承多目标优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(6): 865-870.  
Lin Fen, Wang Wei, Zhang Yaowen, et al. Multi-objective optimization for third generation wheel hub bearing based on NSGA-II[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 45

- (6): 865-870.
- [14] 胡耀民,刘伟铭. 基于改进型蚁群算法的最优路径问题求解[J]. 华南理工大学学报:自然科学版, 2010, 38(10): 105-110.
- Hu Yaomin, Liu Weiming. Solving of optimal path problem based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2010, 38(10): 105-110.
- [15] Tang Changhong, Wan Zhiqiang. Application of hybrid genetic algorithm in aeroelastic multidisciplinary design optimization large aircraft[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2013, 30(2): 109-117.
- [16] 姚宜斌,黄承猛,李程春,等. 一种适用于大角度的三维坐标转换参数求解算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2012, 37(3): 253-256.
- Yao Yibin, Huang Chengmeng, Li Chengchun, et al. A new algorithm for solution of transformation parameters of big rotation angle's 3D coordinate[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2012, 37(3): 253-256.
- [17] Yu C, Cui G S, Zheng Y D, et al. The adaptability study of bursa model[C]// International Forum on Information Technology and Applications. [S. l.]: IFITA, 2009: 620-623.
- [18] 刘宏,陶有丽,付家武. 自由曲面扫描线测量点云数据处理技术[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2011(5): 77-80.
- Liu Hong, Tao Youli, Fu Jiawu. Data processing of scanning beam points-cloud based measuring freeform surface[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2011(5): 77-80.
- [19] 仇谷烽,余景池,黄启泰,等. 接触式三坐标测量自由曲面轮廓的数据处理模型[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2813-2820.
- Qiu Gufeng, Yu Jingchi, Huang Qitai, et al. Mathematical model of contacting free form surface contour measurement[J]. Optics and Precision Engineering, 2013, 21(11): 2813-2820.



