

文章编号: 1001-3806(2021)05-0620-05

基于法向特征提取的曲面自适应检测算法研究

贾秀梅

(中北大学 信息与通信工程学院 电工电子国家级实验教学示范中心, 太原 030051)

摘要: 为了使机械臂探头端在扫描过程中始终垂直于待测件表面, 提出了一种基于法向特征提取的曲面自适应检测算法。系统采用光学扫描的方法获取待测件表面 3 维数据, 再通过法向提取算法推导用于位姿校正的映射函数, 最后完成扫描路径的自适应规划。在 MATLAB 中对样件点云进行了杂散点剔除, 并通过 QUALIFY 软件完成待测件的 3 维重建; 对 150mm × 200mm × 10mm 的曲面样块进行了光学扫描与路径优化实验。结果表明, 位置测试精度在 x 轴、 y 轴、 z 轴方向上的最大偏差分别为 0.5142mm, 0.2645mm 和 1.4265mm; 整体位置偏差最大值为 1.1135mm, 平均值为 0.5647mm; 在将该偏差作为补偿参量代入机械臂规划路径后, 可以实现扫描过程中探头位姿的在线调整。此研究对自动化测试系统中要求探头与待测件严格垂直的应用领域具有重要意义。

关键词: 信号处理; 法向特征提取; 自适应检测; 路径规划

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.05.014

Research on surface adaptive detection algorithm based on normal feature extraction

JIA Xiumei

(National Electrical and Electronic Laboratory Teaching Exemplary Center, School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to make the probe end of the robotic arm always be perpendicular to the surface of the tested workpiece during the scanning process, an adaptive detection algorithm for curved surfaces based on normal feature extraction was proposed. The 3-D data of the surface of the test piece was acquired by the optical scanning device. The mapping function used for pose correction was derived by the normal extraction algorithm. Finally, the adaptive planning of the scan path was completed. In MATLAB, stray points were removed from the sample point cloud, and the three-dimensional reconstruction of the test piece was completed through the QUALIFY software. In the experiment, a curved sample block with a size of 150mm × 200mm × 10mm was optically scanned and path optimized. The test results show that the maximum deviation of the position test accuracy in the x -axis, y -axis, and z -axis directions are 0.5142mm, 0.2645mm, and 1.4265mm respectively. The maximum value of the overall position deviation is 1.1135mm, and the average value is 0.5647mm. After substituting the deviation as a compensation parameter into the planned path of the manipulator, the system realizes the online adjustment of the probe pose during the scanning process. This research is of great significance to the application fields that require the probe to be strictly perpendicular to the tested workpiece in the automated test system.

Key words: signal processing; normal feature extraction; adaptive detection; path planning

引言

在智能化装配、智能化检测领域, 采用机械臂完成对测试样件扫描并保证探头始终与样件平面垂直是确

保测试精度的重要方法^[1]。而由于样件实际表面与样件数模之间存在差异, 故为了获取准确的法向角度, 设计具有自适应路径规划的扫描控制算法十分重要。

早在 20 世纪 80 年代初, 国外在机械化控制领域就出现了在线校正的研究^[2-5]。CONNOLLY 等人^[6]开展了基于机器人自动化平台的研究, 针对安装过程中出现的偏差校正。PAN 等人^[7]提出了一种离线校正算法, 对具有高自由度的装配过程具有很好的调整效果, 为机械臂焊接提供在线位姿的调整。GUO 等

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61603352)

作者简介: 贾秀梅(1979-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为控制理论与控制工程。

E-mail: jiaxiumeinuc@sina.com

收稿日期: 2020-09-23; 收到修改稿日期: 2020-11-05

人^[8]曾对大深度结构件的焊接工艺进行优化,采用 CAD 模型配合测试数据的方式实现了全自动离线调校。MOROZOV 等人^[9]采用 KUKAKR-5 型机械臂在飞机机翼蒙皮检测中,应用自反馈校正算法,使调校精度优于 5mm。FU 等人^[10]针对多机配合机械操作进行优化,运用正逆运动学和轨迹规划算法,实现了在线调校平台的搭建。REN 等人^[11]采用激光跟踪设备配合最小二乘法对机器人在线标定,完成运动学模型的修正,使定位精度得到了显著提升。

综上所述,在机械臂自动校正控制方面虽然已经有了很多的研究^[12-14],但是大部分研究都是具体针对某一个特定领域中具体一项机械操作而言的,即机械臂运动路径具有显著特点。随着测试要求的不断提高,在很多新的应用中要求测试位姿能够持续保持垂直于待测样件的表面,这样就需要系统具有针对待测工件表面面形误差分析及自适应校正的能力。针对此需求,本文中提出了一种基于法向特征提取的曲面检测自动补偿算法,并根据法向信息完成了自适应路径规划。

1 系统组成

为了获取待测表面的精确面形分布^[15],并根据面形分布提供曲面法向信息,从而为机械臂提供精确的规划路径,搭建了基于法向特征提取的曲面自动检测系统,系统结构如图 1 所示。

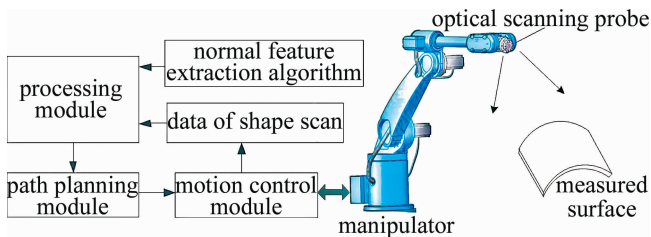


Fig. 1 Surface automatic detection system based on normal feature extraction

如图 1 所示,系统由处理模块、路径规划模块、运动控制模块和光学扫描探头组成。光学扫描探头对待测表面进行检测并将外形扫描数据传输给处理模块,同时,结合预先设计好的自动补偿算法对外形与机械臂位姿关系进行解算分析,从而给出保证法向垂直的轨迹补偿参量。将自适应补偿参量导入路径规划模块,完成对运动控制模块的实时校正,从而使机械臂具有实时自适应法向校正的扫描路径,为垂直检测提供精确的路径保障。

2 算法设计

2.1 光学扫描探头的测量机理

光学扫描^[16]探头部分采用三目视觉检测技术,由 3 个线阵 CCD 传感器构成,通过捕获标识点的反射光完成待测物体的 3 维重构。首先,测量 3 组双目视觉^[17]中的坐标 P_1, P_2 和 P_3 ,通过重心法^[18]进行坐标对齐,测试原理如图 2a 所示。

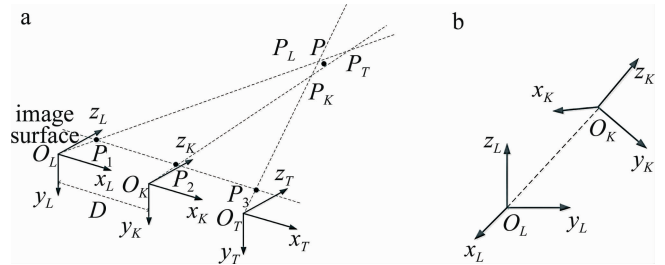


Fig. 2 Trinocular measurement principle and coordinate relationship
a—system structure b—coordinate transformation relationship

设将三目系统统一位置后的主点坐标为 (u_0, v_0) , 3 个相机的焦距均为 f 并等距放置,间距为 D 。设 P_1 点的坐标是 (u_1, v_1) , P_2 点的坐标是 (u_2, v_2) , P_3 点的坐标是 (u_3, v_3) , 则系统获取的目标坐标可表示为 $P_L(x_L, y_L, z_L)$, $P_K(x_K, y_K, z_K)$ 和 $P_T(x_T, y_T, z_T)$, 关于 3 个相机测试值可以由主点坐标和测试点坐标表示为:

$$\begin{cases} x_L = \frac{D(u_1 - u_0)}{u_1 - u_2}, y_L = \frac{D(v_1 - v_0)}{u_1 - u_2}, z_L = \frac{Df}{u_1 - u_2} \\ x_K = \frac{D(u_2 - u_0)}{u_2 - u_3}, y_K = \frac{D(v_2 - v_0)}{u_2 - u_3}, z_K = \frac{Df}{u_2 - u_3} \\ x_T = \frac{D(u_3 - u_0)}{u_3 - u_1}, y_T = \frac{D(v_3 - v_0)}{u_3 - u_1}, z_T = \frac{Df}{u_3 - u_1} \end{cases} \quad (1)$$

由此可以计算 P 点坐标为:

$$\begin{cases} x = \frac{1}{3}(x_L + x_K + x_T) \\ y = \frac{1}{3}(y_L + y_K + y_T) \\ z = \frac{1}{3}(z_L + z_K + z_T) \end{cases} \quad (2)$$

当机械臂上的某点运动时, O_L 坐标系与 O_K 坐标系之间的对应关系如图 2b 所示,则坐标系 $\{K\}$ 相对坐标系 $\{L\}$ 的位姿可表示为:

$$\begin{cases} \{K\} = \{ {}^L R_K, {}^L P_K \} \\ {}^L R_K^{-1} = {}^L R_K^T \\ | {}^L R_K | = 1 \end{cases} \quad (3)$$

式中, ${}^L R_K$ 为旋转矩阵,表征两个坐标系的方位关系, ${}^L P_K$ 为位移矩阵,表征两个坐标系的位置关系,上

标 L 表示选用的参考坐标系,下标 K 表示目标对应的坐标系。由此可见,(3)式中两项分别表示坐标系的方位变换关系和位置变换关系,从而构成两个坐标系之间的位姿换算关系。

2.2 法向特征提取

精确提取法向信息的前提是尽可能构造与实际目标接近的曲面,重构质量决定了法向提取精度,故为了获取更逼真的重建模型,设计了基于分段矢量构造的曲面重建算法。对 u 和 v 两个参量进行分析,则曲面的法向可以表示为 u 的 1 阶偏导矢与 v 的 1 阶偏导矢的叉乘, u 和 v 的偏导矢通过 Jacobi 迭代法^[19-20] 计算。则设 u 方向的第 p 次与 v 方向的第 q 次的交汇曲面可采用矢量函数表示为:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j}}, \quad (0 \leq u, v \leq 1) \quad (4)$$

式中, $P_{i,j}$ 表示两个方向对应的控制点, $N_{i,p}(u)$ 表示节点 U 上第 p 次的 B 样条基函数, $N_{j,q}(v)$ 表示节点 V 上第 q 次的 B 样条基函数, n 和 m 分别表示 i 和 j 方向上的点数总量, $\omega_{i,j}$ 表示权重系数。为简化方程,设:

$$C = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) \omega_{i,j} P_{i,j} \quad (5)$$

则对于任意方向 α 上的矢量函数可以表示为:

$$S_\alpha = (C_\alpha - \omega_\alpha S) \omega_{i,j}^{-1} \quad (6)$$

式中, α 表示 u, v, uu, vv 或 uv (C_α 和 S_α 表示 α 方向对应的 C 和 S)。则 3 个方向的偏导矢可写成:

$$\begin{cases} S_{uw} = (C_{uw} - \omega_{uw} S - \omega_u S_v - \omega_v S_u) \omega_{i,j}^{-1} \\ S_{uu} = (C_{uu} - \omega_{uu} S - 2\omega_u S_u) \omega_{i,j}^{-1} \\ S_{vv} = (C_{vv} - \omega_{vv} S - 2\omega_v S_v) \omega_{i,j}^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

式中,下标 u 和 v 分别表示对应的两个方向,则曲面上一点 $P(u_0, v_0)$ 处的曲面法向量可以表示成:

$$F = S_{u_0 v_0} \times S_{v_0 u_0} \quad (8)$$

由此可见,相比通过实验校正、仿真模拟校正或统计计算校正的方法而言,本算法利用获取曲面法向完成校正优化,对测试曲面的曲率范围、测试误差形式等具有极大的适应性。既能避免由数据处理优化参量造成的局部最优问题,又能不受曲面变化趋势的限制,其位姿调整效果得到了更好的优化。

2.3 自适应路径规划

在检测轨迹上的采样点越多位姿越精确,但计算量也会大幅增加,所以需要折中考虑精度与速度之间

的矛盾,本文中设计了一种自适应算法,根据曲率特征调节插值量,从而在保证面形精度的前提下降低总采样点,限制函数可写成:

$$M = \int d(\rho) dl' \quad (9)$$

式中, M 为插值总数, $d(\rho)$ 表示插入密度 d 与路径曲率 ρ 的函数关系, l' 为路径长度。可见,测试路径不但符合系统垂向检测的要求,同时还能保证同精度条件下的测试速度。

因为系统具备在线获取法向特征信息的能力,所以将(8)式的法向量作为反馈参量对机械臂进行控制,使机械臂探头部分的位姿实时调整至与曲面垂直,保障检测精度,使曲面检测自动补偿,形成自适应控制。

3 数据采集与曲面重建仿真

系统设置扫描范围为 $80\text{mm} \times 80\text{mm}$,通过三目视觉系统对待测结构进行测量,获取点云并导入 MATLAB,利用待测件几何外形特征完成对杂散点的滤波,形成有效点云集合,如图 3a 所示。在此基础上,采用 GEOMAGIC QUALIFY 软件将点云数据重建成目标 3 维模型,如图 3b 所示。

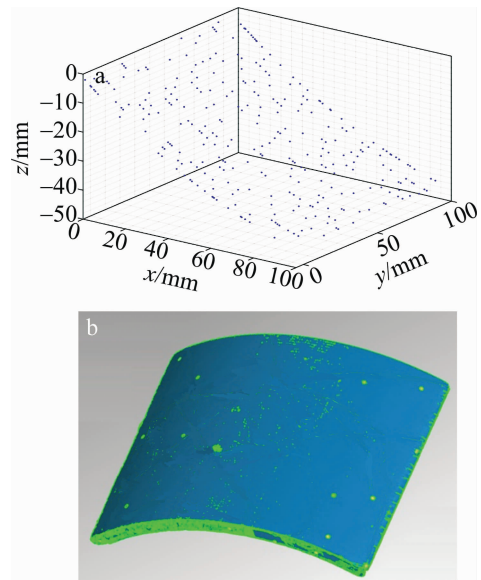


Fig. 3 Scanned data and its reconstruction effect
a—point cloud collection b—reconstruction model

在通过系统扫描获取拟检测工件外形结构后,将其导入 MATLAB 中,对扫描过程中的杂散点进行消除,消除后结果如图 3a 所示。可见支撑结构点集合、杂散点集合、随机噪声点集合均被大幅抑制,所剩信号点集合可以看出工件外形轮廓。然后通过三角面片连通

的方式将点云重建成 3 维模型,重建后结果如图 3b 所示,为面形曲率计算提供数据支撑,从而实现扫描路径自适应规划的设计初衷。

4 实验

测试针对尺寸为 150mm × 200mm × 10mm 的曲面样块进行,系统单次扫描区域为 80mm × 80mm,为实现整个样件扫描过程中机械臂探头方向与测试件表面垂直的设计目的,采用基于法向特征提取的曲面检测自动补偿算法,用于验证路径轨迹的自适应调整效果。

4.1 位置偏差检测

为了验证本算法对基于点云数据的曲面重建优化效果,针对同一个待测样块,将基于本算法的曲面重建结果与未经本算法优化的曲面重建结果进行对比。分别针对同一坐标系下的 3 个方向 (x, y, z) 及其空间绝对偏差距离 ($D_{xyz} = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$) 进行对比,测试数据点分别从路径轨迹上分段选取 5 个点,共计 45 个点,测试结果如表 1 所示。

Table 1 Comparison of position deviation

direction	non-optimized		optimized	
	maximum value/mm	average value/mm	maximum value/mm	average value/mm
x	2.4157	1.9863	0.6124	0.2135
y	0.9847	0.4458	0.6287	0.2758
z	3.3487	3.0247	0.8147	0.3124
D_{xyz}	4.2548	3.6741	1.1135	0.5647

由表中数据可知,在 3 个方向上,优化后的位置偏差均优于未经优化的结果,其中,在 x 和 z 方向的校正结果十分明显,在 y 方向的校正结果有改善,但改善效果不大。分析认为产生此现象的原因主要是待测结构的曲面分布造成的, xy 和 zy 的切面均为直线,而 xz 的切面为曲线,故在 y 方向上曲率几乎不变,受重力、夹持力等影响小,其位置偏差也相对较小。可见,采用优化算法后,该算法可以减小对待测物表面的位置测量误差,从而获得更好的垂直照射轨迹。

4.2 实验结果分析

依据优化算法对曲面面形位置偏差的校正,完成了对待测件扫描路径的优化分析,在单次采集视场内的 90mm × 100mm ($x \times y$) 的范围内,路径规划如图 4a 所示,并对抽样点 $x \times y = 25\text{mm} \times 20\text{mm}$ 的测试点进行位置偏差分析,从而获取曲面检测过程中的自适应补偿参量,误差分布曲线如图 4b ~ 图 4d 所示。

由图 4a 中给出的分层抽样点可以得到整个待测

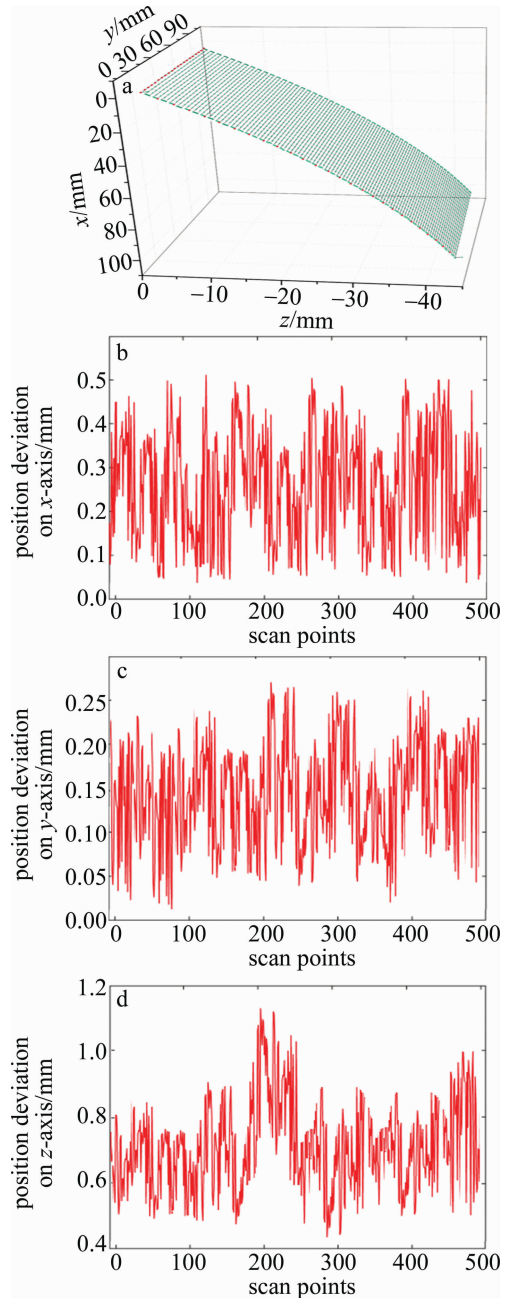


Fig. 4 Scanning path planning and the position deviation distribution of scanning points

a—scan path planning b—x-axis position deviation distribution
c—y-axis position deviation distribution d—z-axis position deviation distribution

体曲面面形测试点的分布形式,从而对算法在整个曲面进行法向对其轨迹优化的普适性进行验证。对扫描的 500 个测试点数据进行了位置偏差分析,实验结果显示,在 x 轴方向上最大偏差为 0.5142mm,平均偏差为 0.3245mm;在 y 轴方向上最大偏差为 0.2645mm,平均偏差为 0.1478mm;在 z 轴方向上最大偏差为 1.4265mm,平均偏差为 0.7485mm。整体测试结果与

标准位置的分段测试结果基本相符,将该数据由 GEOMAGIC QUALIFY 的通信模块传输给机械臂控制单元,将修正参量校正机械臂探头位置的位姿,达到在线调整的目的。

5 结 论

针对自由曲面工件扫描过程中探头与工件表面不能实时垂直的问题进行了深入地分析,研究了一种具有自适应调整的机械臂路径规划系统,提出了基于法向特征提取的曲面自适应检测算法。通过仿真分析与实验对比发现,本系统在 3 个坐标轴维向上可以有效地获取与待测表面的位置偏差,从而解算机械臂探头的位姿调整参量。由此可见,该算法提供的修正参量可用于机械臂轨迹及位姿的在线补偿

参 考 文 献

- [1] IM K H, HSU D K, CHIOU C P, *et al.* Influence of terahertz waves on the penetration in thick FRP composite materials[J]. AIP Conference Proceedings, 2014, 1581(1): 1568-1575.
- [2] PARK S H, JANG J W, KIM H S. Non-destructive evaluation of the hidden voids in integrated circuit packages using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2015, 25(9): 095007.
- [3] LING Sh M, HUANG Y Q. Research on the application of robot art in the simulation teaching of industrial robot programming[J]. Journal of HuNan Industry Polytechnic, 2016, 16(4): 9-11 (in Chinese).
- [4] YASSER A, MICHEL T. Fiber reinforced elastomeric isolators for the seismic isolation of bridges [J]. Composite Structures, 2016, 160(1): 300-311.
- [5] QU X J, MENG B, LIU Ch. Onsite global calibration and optimization of combining measurement for large free-form surfaces part[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2015, 9(1): 2384-2392 (in Chinese).
- [6] CONNOLLY T, CHRISTINE B. Technology and applications of ABB robot studio[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2009, 36(6): 540-545.
- [7] PAN Z, POLDEN J, LARKIN N, *et al.* Recent progress on programming methods for industrial robots[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2012, 28(2): 87-94.
- [8] GUO J J, LIU X Y, JIANG N, *et al.* Highly stretchable strain sensing hydrogel optical fibers[J]. Advanced Materials, 2016, 28(46): 10244-10249.
- [9] MOROZOV M, PIERCE S G, MACLEOD C N, *et al.* Off-line scan path planning for robotic NDT [J]. Measurement, 2018, 12(2): 284-290.
- [10] FU B, HU F F, CHEN L, *et al.* The multi-robot simulation platform research and realize based on OpenGL[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2016, 1(1): 20-23 (in Chinese).
- [11] REN Y J, ZHU J G, YANG X Y, *et al.* Method of robot calibration based on laser tracker[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(9): 195-200 (in Chinese).
- [12] CHEN M P, ZHAO H H, WEN E W, *et al.* Kinematic calibration and experimental research of six degrees of freedom industrial robot [J]. Journal of University of Jinan (Science and Technology Edition), 2019, 33(3): 229-235 (in Chinese).
- [13] LIU P, HUANG L, SHI X M, *et al.* Quality control of white body based on three coordinate measuring machine[J]. Automobile Parts, 2013, 3(5): 39-41 (in Chinese).
- [14] ZHENG L Y, MCMAHON C A, LI L, *et al.* Key characteristics management in product lifecycle management: A survey of methodologies and practices[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2008, B22(2): 989-1008.
- [15] POPA D O, STEPHANOU H E. Micro and mesoscale robotic assembly[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2004, 6(1): 52-71.
- [16] XIAO X W, MA G L, ZENG G Y, *et al.* Research on orthogonal vision and inclinometer combination spatial pose measurement method [J]. Laser Technology, 2020, 44(3): 278-282 (in Chinese).
- [17] LOBO J, DIAS J. Relative pose calibration between visual and inertial sensors [J]. The International Journal of Robotics Research, 2007, 26(6): 561-575.
- [18] LIANG Zh G, ZHAN J M, SHI W Q, *et al.* Effect of scanning path on deformation of laser cladding coating on thin-walled part[J]. Laser Technology, 2020, 44(4): 447-450 (in Chinese).
- [19] MENG Ch J, YANG Z L, LI H. The improved algorithm on the double dimensional Jacobi matrix inverse eigenvalue problem [J]. Mathematica Numerica Sinica, 2019, 41(3): 335-342 (in Chinese).
- [20] YU Sh Ch, KANG X F, ZH N, *et al.* Study of aircraft level-testing measurement technology based on laser tracker and iGPS [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 21(1): 119-121 (in Chinese).