

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.06.007

叶片机器人砂带磨抛点云匹配算法优化*

陈 巍, 严思杰*, 张家军, 张海洋

(华中科技大学 机械科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为解决机器人磨抛路径中工件坐标系难以计算的问题及校正工件装夹误差,将三维点云配准技术应用到叶片机器人砂带磨抛系统中。由三维激光扫描仪扫描工件型面获得工件点云,采用基于主成分分析(PCA)的全局配准算法和改进的迭代最近点(ICP)算法完成了扫描点云和工件模型离散点云间以及不同工件扫描点云间的匹配,以获取工件坐标系和校正工件装夹误差。相关仿真和试验结果表明,优化后的算法在匹配速度与精度上有了长足改进,且加工后产品精度和质量都能满足实际加工要求。

关键词: 机器人砂带磨抛; 点云匹配; 主成分分析; 迭代最近点

中图分类号: TH161; TG586 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2014)06-0711-05

Optimization of point cloud registration algorithm in robotic belt grinding of turbine blade

CHEN Wei, YAN Si-jie, ZHANG Jia-jun, ZHANG Hai-yang

(School of Mechanical Science & Engineering, Huazhong University of Science & Technology,
Wuhan 430074, China)

Abstract: Aiming at solving the problem of calculating the workpiece coordinate system in the robot grinding paths and calibrate the clamping error, the 3D point cloud registration technology was applied to the robotic belt grinding system for turbine blades. After acquiring the point cloud of workpiece by 3D laser scanner, the combination of principal component analysis (PCA) algorithm and improved iterative closest point (ICP) algorithm were employed to match the scanning points and discrete points of part model, then the workpiece coordinate system was obtained and the clamping error was known. Simulation and experimental results indicate that the registration speed and accuracy of the optimized algorithm are fully improved, and the machining accuracy and surface quality can meet the actual machining requirements.

Key words: robotic belt grinding; point cloud registration; principal component analysis (PCA); improved iterative closest point (ICP)

0 引 言

叶片类复杂曲面零件作为汽轮机、螺旋桨、航空发动机的关键零部件广泛应用于能源、运载和国防等行业,其几何精度和表面质量直接影响能源动力设备的工作效率^[1]。一般来说,叶片主要为不锈钢、钛合金及镍基合金钢等难加工材料^[2],通过铸造或模锻工艺制

成毛坯后,须进行后续的繁琐复杂机械加工。以目前国内1 m长某型高温合金叶片粗精铣加工为例,其零件外形结构复杂不规则、加工时间长^[3],加工基准需要反复地切换。在加工过程中系统振颤及加工硬化造成让刀及刀具崩刃和磨损现象严重,不容易保证尺寸和精度要求,故零件的表面完整性较差。因此,这些型面的最后加工几乎普遍依赖于磨抛。从加工效率来看,叶片精铣和磨抛两道工序的加工工时超过总冷加工工

收稿日期: 2013-11-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375196)

作者简介: 陈 巍(1989-),男,湖南邵阳人,主要从事机器人磨削和数控装备方面的研究。E-mail: weichen2011@hust.edu.cn

通信联系人: 严思杰,男,副教授,硕士生导师。E-mail: yansijie@vip.sina.com

时的50%,但精铣后的表面粗糙度往往大于 $Ra\ 1.6$,达不到零件所需质量要求,而磨抛后的表面粗糙度要求小于 $Ra\ 0.8$,且型面精度要求小于 $0.12\ \text{mm}$ 。这远远体现不出发动机的压缩效率。因此,传统的手工磨抛从加工效率、型面精度、表面质量、产品质量一致性以及加工环境上已无法满足现有零件加工要求,将逐渐被高柔性、高加工精度的工业机器人砂带磨抛系统取代。

由于机器人砂带磨抛系统中的叶片类零件曲面复杂,无加工基准面,需要辅助确定加工基准、计算加工余量、辅助定位装夹,这些都涉及到复杂曲面零件的寻位匹配和点到曲面离散点的匹配问题^[4]。在叶片机器人磨抛系统中,点云匹配的目的在于获取工件坐标系和校正装夹误差。目前,广泛采用的点云匹配方法主要包括粗匹配法,例如主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)法^[5]、自旋图像(Spin-image)法^[6]、随机采样一致性(RANdomSampleConsensus, RANSAC)算法^[7]和精匹配法,如迭代最近点算法(Iterative Closest Point, ICP)^[8]。实际生产中,叶片坐标系和机器人末端坐标系的偏移量较大,直接用ICP算法进行匹配容易达到局部最优^[9],需要经过粗匹配之后再行精匹配。

针对现有方法在解决机器人砂带磨抛叶片匹配问题时的不足,本研究采用PCA算法和改进后的ICP算法的组合来实现点云和CAD模型的匹配。

1 叶片机器人砂带磨抛系统

目前已被广泛应用的叶片机器人砂带磨抛系统示意图如图1所示。

机器人夹持叶片经过扫描仪扫描并校正装夹误差后,分别在1,2,3号磨削机处进行粗磨、精磨和抛光,其中内弧面用小轮磨削,外弧面用大轮磨削。通过设定安装在磨削机横梁上的气缸压力来控制磨削力大小,磨削机砂轮的转速则可以在程序中设定。

该系统采用智通机器人系统有限公司的RobotScan三维激光扫描仪,扫描仪精度为 $0.06\ \text{mm}$;机器人采用ABB IRB6650S-125/3.5机器人,重复定位精度为 $0.11\ \text{mm}$,低于扫描仪精度,因此零件加工精度主要受机器人重复定位精度影响。

2 点云匹配算法

2.1 问题描述

ABB机器人系统中常见的执行指令如下:

MoveLTarget, Speed, Zone, Tooldata\

WObj:=Wobjdata;

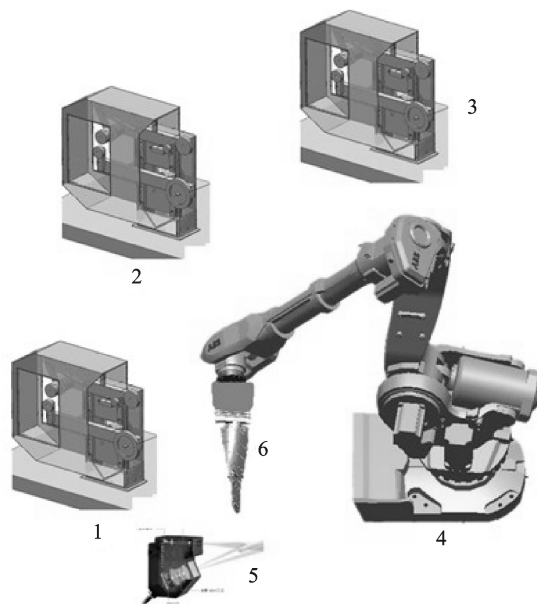


图1 机器人磨抛系统示意图

1,2,3—磨削机;4—ABB机器人本体;5—三维扫描仪;6—叶片

其中:Target—工件(叶片)上目标点的位置信息;Tooldata—工具坐标系,可通过机器人系统自带的标定方法获得;Wobjdata—工件坐标系,当机器人夹持叶片时,表示的是叶片坐标系在机器人末端法兰盘坐标系(tool0)下的坐标(坐标系如图2所示)。工件坐标系若采用人工计算,不仅过程繁琐,而且叶片加工对系统精度要求高,难以达到加工要求。

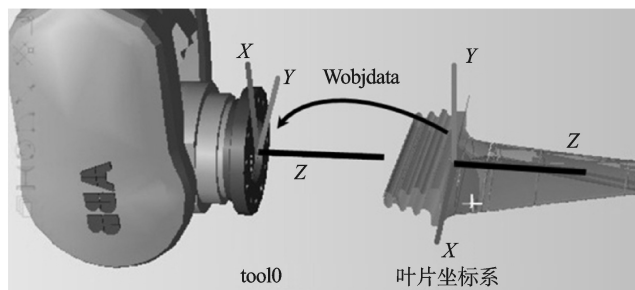


图2 工件坐标系 Wobjdata(为便于显示,已隐藏夹具)

因此,本研究采用三维扫描和点云配准技术来实现工件坐标系的标定:用标定好的扫描仪扫描工件的特征面,获取工件型面在扫描仪坐标系下的坐标,并同时记录机器人在对应点的位姿信息,经过坐标转换可以得到扫描点在机器人末端坐标系(tool0)下的坐标,将转换后的点云和工件的CAD模型进行匹配,得到工件坐标系(Wobjdata)。

由于叶片为单端夹持,在进行批量加工时,每次装夹叶片时,必然存在偏差,导致叶片和末端法兰盘的相对位置发生变化,而加工路径中的点(Target)不变,如不对工件坐标系进行补偿,加工一致性难以保证。所

以,本研究利用点云匹配来修正装夹误差:选取一片加工质量达到要求的叶片的扫描点云作为标准点云,其工件坐标系作为标准工件坐标系,将其他点云和标准点云进行匹配,获得匹配误差,将该误差补偿到标准工件坐标系,得到的就是修正后的工件坐标系。

此外,由于夹具的存在,叶片坐标系和机器人末端坐标系偏移量和旋转角度较大,获取工件坐标系耗时大。不过同一类型的叶片只需做一次,而校正装夹误差,每次加工前都需要进行,实时性要求高,但装夹误差一般较小。本研究采用PCA算法和经“外插法”优化的ICP算法来获得工件坐标系,用优化过的ICP算法校正装夹误差。

2.2 PCA 算法

PCA算法是通过分析离散点云的分布规律,找到一种正交线性变换 T ,通过 T 变换,将原有坐标系 W_0 下的数据变换到一个新的坐标系 W_1 ,其基本原理是:首先求得点云的中心点作为新坐标系的原点,然后,计算点云的协方差矩阵 C 及其特征向量 $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)^{[10]}$:

$$C = \begin{bmatrix} \text{cov}(X, X) & \text{cov}(X, Y) & \text{cov}(X, Z) \\ \text{cov}(Y, X) & \text{cov}(Y, Y) & \text{cov}(Y, Z) \\ \text{cov}(Z, X) & \text{cov}(Z, Y) & \text{cov}(Z, Z) \end{bmatrix}$$

式中: X, Y, Z 一点云矩阵的3个列向量; C 一实对称矩阵。

故 $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ 相互垂直,这正好符合坐标系的特点,这3个特征向量的方向分别表示: $\vec{e}_1$ 一点云分布最密集的方向; $\vec{e}_2$ —与 $\vec{e}_1$ 垂直平面中点云分布最密集的方向; $\vec{e}_3$ 一点云分布最稀疏的方向。新坐标系 W_1 即可表示为 $W_1(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$; T 变换的作用就是使得 W_0 的 XYZ 轴和 $(\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$ 重合。

由于叶片模型的点云数据分布状态是固定的,那么 W_1 和 W_0 的位置是固定不变的,因此,分别对扫描点云和叶片CAD模型点云进行PCA分析,获得变换 T_1, T_2 ,由 T_1, T_2 可得到工件坐标系 W_{obj} ,如图3所示。

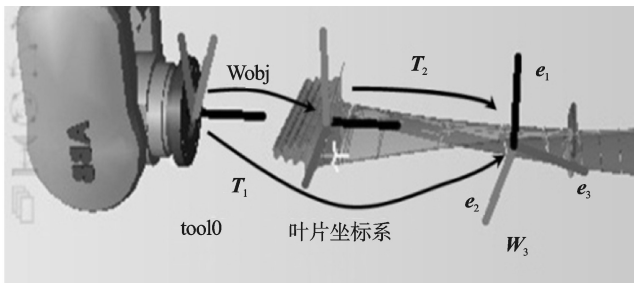


图3 求工件坐标系 W_{obj}

PCA算法得到的坐标系 W_{obj} 只是一个粗略值,目的是给后续的ICP算法提供初始变换,以减少ICP算法迭代次数和时间。

2.3 ICP 算法优化

ICP算法的目的是求得目标点云和参考点云间的旋转 R 变换和平移 T 变换,使目标点云经过 R, T 变换后和参考点云的距离最短。假设目标点云 M 的坐标为 $\{M_i, i=1, 2, \dots, n_m\}$ 及参考点云 D 的坐标为 $\{D_i, i=1, 2, \dots, n_d\}$,在第 k 次迭代中计算与点云 M 的坐标相对应的对应点坐标为 $\{D_i^k, i=1, 2, \dots, n_d\}$,计算 M 与 D^k 之间的变换矩阵并对原变换进行更新,直到数据间平均距离小于给定值 τ ,即满足式 $F(R, T) = \sum_{i=1}^n \|D_i - (R \cdot M_i + T)\|^2$ 最小。ICP算法基本步骤如下:

- (1) 在 M 中取点云 $M_i^k \in M (i=1, 2, \dots, n_m)$;
- (2) 在 D 中搜索 M_i^k 对应点 $D_i^k \in D^k$,使 $\|D_i^k - M_i^k\|$ 最小;
- (3) 在条件(2)下计算旋转矩阵 R^k 与平移向量 T^k ;
- (4) 计算 $M^{k+1} = \{M_i^{k+1} = R^k M_i^k + T^k, M_i^k \in M\}$;
- (5) 计算 $d^{k+1} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|D_i^k - M_i^{k+1}\|^2$ 。

若 d^{k+1} 不小于给定的 τ ,返回到步骤(2),直至 $d^{k+1} < \tau$ 或到达最大的迭代次数为止。

用四元数 (q_w, q_x, q_y, q_z) 来代替旋转矩阵 R , (T_x, T_y, T_z) 表示平移矩阵 T ,则点云间的变换可用7维向量 $\vec{q}$ 表示: $\vec{q} = [T_x, T_y, T_z, q_w, q_x, q_y, q_z]^T$ 。ICP算法每次迭代的结果就是找到对应的 $\vec{q}$,设第 k 次迭代的变换为 $\vec{q}_k$,第 k 次和第 $k-1$ 次迭代的变化值为: $\Delta_k = \vec{q}_k - \vec{q}_{k-1}$, Δ_k 表示了算法迭代的方向,相邻两次迭代方向的夹角为:

$$\theta_k = a \cos \left(\frac{\Delta_k \cdot \Delta_{k-1}}{\|\Delta_k\| \|\Delta_{k-1}\|} \right) \quad (2)$$

当 θ_k, θ_{k-1} 较小时,即 $\vec{q}_k, \vec{q}_{k-1}, \vec{q}_{k-2}$ 变化较小,为了减少迭代次数,提高收敛速度,可利用“外插法”来计算新的 $\vec{q}_k$,由3点 $(E_k, 0), (E_{k-1}, -\Delta_k), (E_{k-2}, -\Delta_k - \Delta_{k-1})$ 分别拟合直线和抛物线,结果如图4所示,可求得直线和横轴的交点 v_1 、抛物线顶点的横坐标 v_2 。

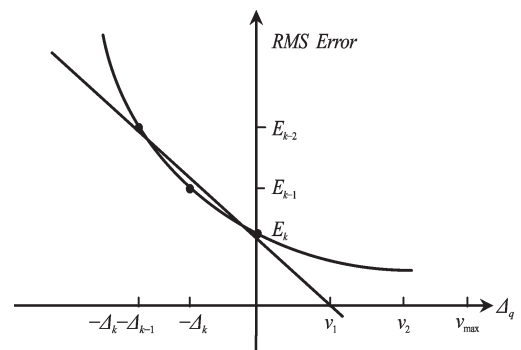


图4 采用“外插法”加速ICP算法收敛的拟合结果

为防止 $\vec{q}'_k$ 过大, 设定一个最大值 $v_{\max}$ (实验中取 $v_{\max} = 12 \Delta_k$), 则 $\vec{q}'_k = \vec{q}_k + \min(v_1, v_2, v_{\max}) \cdot \Delta_k / |\Delta_k|$ 。以下是普通的ICP算法和经“外插法”优化的ICP算法对比如图5、表1所示。

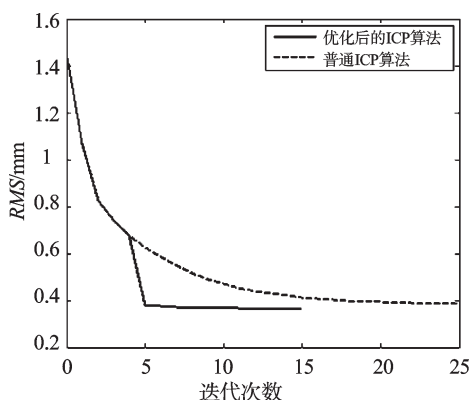


图5 匹配效果对比

表1 匹配结果对比

	n	t/s	RMS
普通ICP	25	32	0.385
优化ICP	11	12	0.357
点数	点1:195 612点2:209 524		

由图5和表1可知, 经过“外插法”优化的ICP算法在收敛速度和匹配精度两个方面均优于普通的ICP算法。

3 仿真与试验

3.1 虚拟仿真

利用PCA算法和ICP算法分别求得变换矩阵 T_1 , R_1 和 T_2 , R_2 , 则工件坐标系 $Wobj$ 可用平移变换 T 和旋转变换 R 表示:

$$\begin{cases} T = R_2 \cdot T_1 + T_2 \\ R = R_2 \cdot R_1 \end{cases} \quad (3)$$

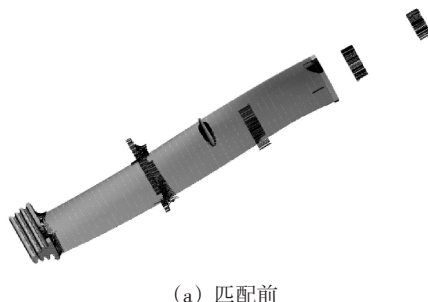
将旋转矩阵 R 转化为四元数 (q_w, q_x, q_y, q_z) , 用 (T_x, T_y, T_z) 表示平移矩阵 T , 则工件坐标系 $Wobj = [(T_x, T_y, T_z), (q_w, q_x, q_y, q_z)]$, 得到工件坐标系之后即可控制机器人抓持工件(叶片)按照离线编程生成的加工路径运动。

本研究采用某型号汽轮机叶片作为实验对象, 将叶片的三维模型离散为点云, 与扫描得到的实体点云信息进行匹配, 匹配结果如图6所示。

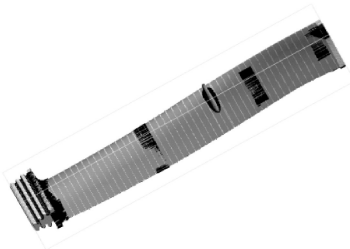
3.2 机器人磨抛试验

为了对仿真结果进行验证, 笔者开展了相关实验研究, 现场加工图如图7所示。本次试验中, 粗磨、精磨砂带为陶瓷磨料, 目数分别为P120和P240, 抛光采

用尼龙带, 磨削压力为0.15 MPa, 砂轮速度为大轮(直径350 mm)1 000 r/min, 小轮(直径76 mm)1 400 r/min, 加工效果如图8所示。



(a) 匹配前



(b) 匹配后

图6 匹配结果



图7 现场加工图



(a) 叶片加工前



(b) 叶片加工后

图8 叶片加工前、后对比

加工完成的叶片经三坐标测量仪和粗糙度检测仪检测, 型面精度和表面粗糙度均可达到加工要求, 某截面三坐标型面轮廓检测图如图9所示, 外弧面叶

冠端粗糙度测量点示意图如图10所示。在叶片装夹正确的情况下,通过连续加工多片叶片可以校正装夹误差,保证加工精度和表面粗糙度。

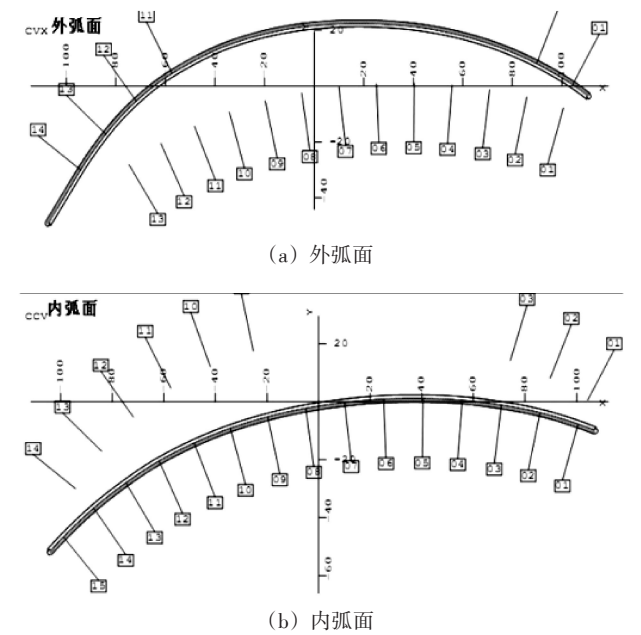


图9 某截面三坐标型面轮廓检测图

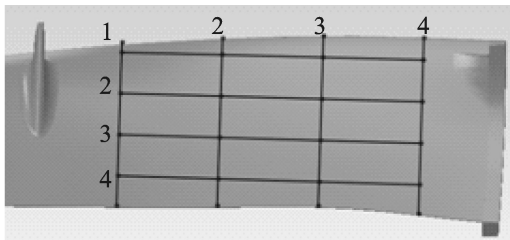


图10 外弧面叶冠端粗糙度测量点示意图

从图8中可看出,抛光后的叶片型面轮廓处在公差带范围内($\pm 0.25\text{ mm}$)。由表3可知,叶片粗糙度实测值远低于工艺要求的粗糙度值($Ra\ 0.8$),且纵向和横向一致性好,人工磨抛后粗糙度值平均值为 $Ra\ 0.6$ 左右,但纵向和横向的粗糙度在 $Ra\ 0.2$ 和 $Ra\ 0.8$ 之间波动。

表2 外弧面型面(点1~15)测量值(单位:mm)

1~5	6~10	11~15
0.131	0.175	0.168
0.153	0.176	0.172
0.154	0.171	0.184
0.164	0.159	0.175
0.148	0.190	0.162

注:公差带为 $\pm 0.25\text{ mm}$

表3 各测量点粗糙度值(Ra)(横向)

	1	2	3	4
1	0.336	0.432	0.335	0.341
2	0.454	0.341	0.332	0.36
3	0.342	0.291	0.284	0.32
4	0.218	0.255	0.276	0.295

4 结束语

本研究将PCA算法和经过“外插法”优化的ICP算法相结合,用于叶片点云的匹配,以获取叶片的工件坐标系。

通过实际应用测试,结果表明,叶片加工型面精度可达到 $\pm 0.25\text{ mm}$ 以内,粗糙度可达到 $Ra\ 0.5$ 以上,能满足实际加工产品的精度和质量要求,并且该算法优化能够校正工件的装夹误差,因而具有较高的实际应用价值。

参考文献(References):

[1] 周金强,杨建中,张栋.大型核电叶片的螺旋磨削刀具轨迹生成[J].机械科学与技术,2012,31(10):1549-1553.

[2] 匡逸强.钛合金在汽轮机叶片上的应用前景研究[J].江苏科技信息,2013(1):67-68.

[3] 刘阳,叶洪涛,张军,等.航空用镍基高温合金切削现状研究[J].航空制造技术,2011(14):48-51.

[4] 刘桂英.点到参数曲面的最小距离的研究[J].机电工程,2012,29(4):474-476.

[5] PEARSON K. On lines and planes of closest fit to systems of points in space [J]. Philosophical Magazine, 1901, 6 (2):559-572.

[6] JOHNSON A E, HEBERT M. Using spin images for efficient object recognition in cluttered 3D scenes[J]. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 1999, 21(5):433-449.

[7] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.

[8] BESL P J, MCKAY N D. Method for registration of 3-D shapes [C]//International Society for Optics and Photonics, 1992.

[9] 梁新合,宋志真.改进的点云精确匹配技术[J].装备制造技术,2008(3):41-42.

[10] 黄行森.三维点云数据配准技术研究[D].大连:大连海事大学自动化与电气工程学院,2010:14-17.

[编辑:张翔]

本文引用格式:

陈巍,严思杰,张家军,等.叶片机器人砂带磨抛点云匹配算法优化[J].机电工程,2014,31(6):711-715.
CHEN Wei, YAN Si-jie, ZHANG Jia-jun, et al. Optimization of point cloud registration algorithm in robotic belt grinding of turbine blade[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(6):711-715.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>