文章编号：1000-8608(2018)01-0032-06

一种自主研磨机器人搜索未知自由曲面模型技术研究

王文忠*[1]，高金刚[2]，李　锟[1]，杨　利[1]，杨　旭[3]

（1.长春工程学院 工程训练中心，吉林 长春　130012；
2.长春工程学院 机电工程学院，吉林 长春　130012；
3.吉林大学 机械科学与工程学院，吉林 长春　130022）

摘要： 为解决正交双目立体视觉自主研磨机器人对未知自由曲面的加工问题，结合全区域搜索技术、待加工轮廓的选择算法和曲面边界识别方法，提出一种适用于未知曲面加工的自主搜索方法，实现了研磨机器人对非结构化环境中未知曲面的目标搜索任务.研磨机器人利用线激光和视觉传感器来感知未知待加工曲面，采用光轴正交的两个相机同时采集研磨曲面轮廓的图像，并利用模糊逻辑方法进行局部路径规划，在此基础上通过全区域搜索技术实现对未知待加工区域的遍历.同时采用图像处理技术，即动态边界识别方法辨识目标并确定其位置.该未知待加工曲面自主搜索方法可以从曲面任意位置开始加工，算法对于非结构化自由曲面具有良好的适应性.实验结果验证了算法的可行性.

关键词： 自主研磨机器人；模糊逻辑；全区域搜索；曲面边界识别

中图分类号：TP242.26　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.7511/dllgxb201801005

0　引　言

在结构化环境和重复作业任务方面，传统的工业机器人已大量投入使用.对于完全未知的非结构化环境，机器人在完成任务（子任务）的过程中需要与周围环境进行交互.现阶段机器人的智能和自主能力仍很薄弱，这对如何实现现代机器人与人在相同的非结构化空间和环境中协同作业，实时在线完成非确定性的任务提出了新的要求.在提升作业能力、改善人机交互方面，需要突破三维环境感知、规划和导航等单元技术[1].为使机器人在任务空间中准确定位需要解决环境地图的识别和路径规划、全区域搜索遍历和局部搜索等技术问题，学者们应用了度量法、拓扑法、遗传算法及模糊逻辑算法等[2-5].由于具有占用存储资源少和可实时完成路径规划的优点，模糊逻辑算法得到广泛应用.对于解决在线感知能力、在线实时交互、动态未知环境中自主作业等问题[1]，Johnson 等利用激光距离传感器对机器人的工作曲面进行 3D 识别和定位[6]，Hamel 等结合人机交互与激光和视觉技术实现了未知环境的感知和建模[7]，Ramos 等研究了利用图像与传感器实现物体图像特征信息的提取[8]，Kaltsoukalas 等将机器视觉传感数据和相关方法结合研究了焊接路径规划[9]，郭玉波等[10]分析了正交双目立体视觉获取特征信息的检测误差模型.

本文提出一种研磨机器人在加工未知曲面模型的情况下，能够自主搜索待加工区域特征的算法.

1　研磨机器人系统

如图 1 所示，整个研磨机器人系统由机器人本体、PMAC 卡控制系统、数据及视觉处理工作站、视觉传感器组成.

自主研磨机器人系统的计算机通过 RS-232 接口与机器人控制器之间实现通信，工作站主要负责视觉传感器的图像采集和信息处理，并给 PMAC 卡控制系统发送机器人的运动指令；自主研磨机器人的 PMAC 卡控制器负责接收工作站运动命令和机器人各关节状态信息并控制机器人各关节在加工过程中的协调运动，数据及视觉处

收稿日期：2017-09-05；　**修回日期：**2017-11-28.
基金项目：国家自然科学基金青年基金资助项目(51505185)；吉林省科技发展计划重点科技攻关资助项目(20140204011GX).
作者简介：王文忠*(1968-)，男，博士，副教授，E-mail：jlwwz@126.com.

理系统在 Windows 操作系统下用 Visual C++2010 平台统一集成开发.

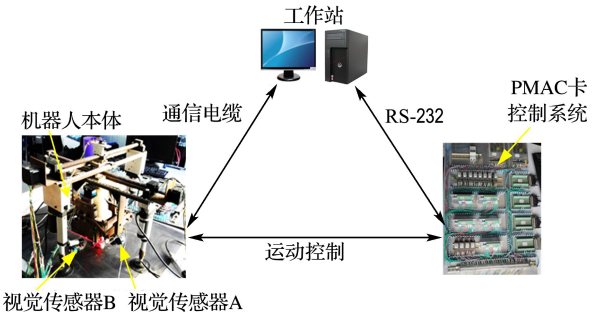


图 1　自主研磨机器人系统

Fig. 1　Robot system for autonomous grinding

2　基于模糊逻辑的搜索

为使自主研磨机器人具有对整个待加工曲面进行实时遍历搜索的能力，本文提出一种机器人可以从未知曲面的任意位置出发，在加工过程中实时制订搜索策略，应用模糊逻辑算法对局部未知曲面进行实时路径规划方法. 同时通过机器人直角坐标移动平台的光栅尺反馈信息来标记已加工区域和未加工区域的属性，并指定搜索陷阱和逃离策略，避免系统进入死循环[2]，保证机器人具有实现全区域搜索能力.

2.1　局部路径规划的模糊逻辑算法

根据本文的自主研磨机器人结构，系统采用行切法轨迹规划的走刀方式. 在研磨机器人每次执行加工路径的过程中，首先将相机 A 确定的待加工曲面的局部轮廓 A' 与相机 B 确定的待加工曲面的局部轮廓 B' 的交点作为起刀点，并沿着局部轮廓 B' 的方向进行该轮廓的加工；加工完该段轮廓后，沿着轮廓 A' 的方向移动一个切削行距，然后重复上述加工过程. 机器人系统的实时局部路径规划主要利用相机 A、B 所采集待加工曲面的表面轮廓特征信息来完成. 正交双目立体视觉模型如图 2 所示，自主研磨机器人共有两个相机，相机固接于研磨工具的末端，位于与机器人的两个互相垂直的丝杠同方向，在两个互相垂直的丝杠方向上分别安装有光栅尺，通过光栅尺可得到在两个丝杠方向上的移动距离. 相机 A 的相机坐标系和图像坐标系为 O_a-$X_aY_aZ_a$ 和 O_1-x_1y_1，相机 B 的相机坐标系和图像坐标系为 O_b-$X_bY_bZ_b$ 和 O_2-x_2y_2，研磨工具上线段 PQ 在 O_1-x_1y_1 和 O_2-x_2y_2 的投影为 p_1q_1 和 p_2q_2[11-13]，系统通过获得操作臂整体部分距每个丝杠导轨两端的实时距离，控制机器人的操作臂整体部分在 Y 轴与 Z 轴的运动，Y 轴的运动范围为 0～100 mm，Z 轴的运动范围为 0～200 mm[14].

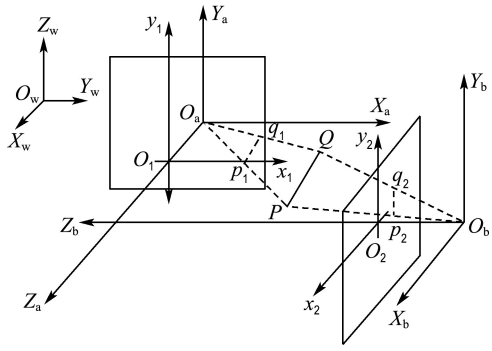


图 2　正交双目立体视觉模型

Fig. 2　Model of orthogonal binocular stereovision

在研磨机器人加工过程中，基于光栅尺反馈的距离信息，利用数据融合得到机器人左、右、上、下方向上操作臂整体与丝杠导轨两端之间的距离，并将其作为模糊控制器的输入，其中左、右和上、下方向距离数值的论域分别为[0，100] mm 与[0，200] mm，其模糊集合定义为{NEAR，FAR}，分别代表操作臂整体与丝杠导轨两端较近、较远. 沿着左、右方向的模糊集合定义为{LF，LN，Z，RN，RF}，其中 LF、LN、Z、RN、RF 分别代表设定操作臂整体方位的左向较大、左向较小、中间不动、右向较小、右向较大. 沿着上、下方向的模糊集合定义为{UF，UN，Z，DN，DF}，其中 UF、UN、Z、DN、DF 分别代表设定操作臂整体方位的向上较大、向上较小、中间不动、向下较小、向下较大(规定机器人沿着 Y_1 的正向为左，沿着 Y_1 的负向为右，沿着 Z_1 的正向为上，沿着 Z_1 的负向为下[14]).

机器人在 Y 轴方向上的运动距离取决于相机 B 获得的当前待加工曲面的局部轮廓信息的模糊推理结果，该信息通过模糊推理后作为模糊控制器的输出，模糊集合定义为{TLF，TLN，TZ，TRN，TRF}，其中 TLF、TLN、TZ、TRN、TRF 分别代表机器人向左移动较大、向左移动较小、中间、向右移动较小、向右移动较大. 同样在 Z 轴方向上的运动距离取决于相机 A 获得的当前待加工曲面的局部轮廓信息的模糊推理结果，该信息通过模糊推理后作为模糊控制器的输出，模糊集合定义为{TUF，TUN，TZ，TDN，TDF}，其中 TUF、TUN、TZ、TDN、TDF 分别代表机器人向上移动较大、向

上移动较小、中间、向下移动较小、向下移动较大.

图 3 表示了 Y 轴与 Z 轴的模糊控制器输入输出变量所对应的隶属度,通过经验得到对应的输入输出变量之间的关系.在大量实验结果的基础上,利用 Matlab 工具箱和模糊推理算法生成模糊控制表,作为研磨机器人实时规划运动轨迹的依据.

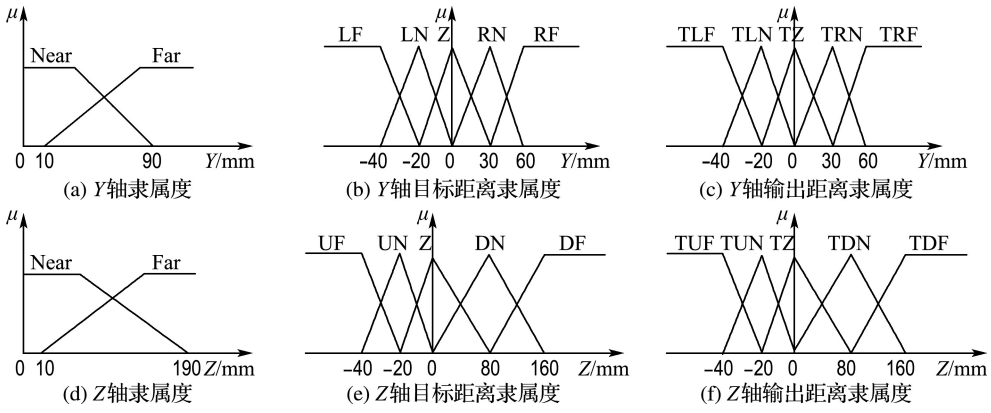


图 3 模糊控制隶属度函数

Fig. 3 Membership functions of fuzzy control

2.2 基于全区域的模糊逻辑搜索策略

基于全区域的模糊逻辑搜索策略根据机器人系统的直角坐标移动平台在 Y 轴与 Z 轴的最大移动距离和机器人各关节光栅尺反馈的信息,在线将搜索区域划分成多个长方形网格区域.每个长方形网格是可一次研磨搜索的最大区域,全区域加工算法由基于加工路径规划的连续加工策略与逃离单次网格加工死循环策略构成.

研磨机器人从当前位置开始,在连续加工每个长方形网格区域时,依次按照前述的模糊逻辑所规划的路径进行加工,可以完成对当前区域的加工.然后,根据对已加工完的区域获取的当前区域边界信息,判定新的加工方向,选择新的待加工区域.当机器人到达一个新的未加工网格时,机器人将进行目标区域识别,若其是不符合加工条件的区域,则继续应用模糊逻辑所规划的路径搜索下一个网格位置.在加工过程中,当机器人通过已加工网格区域的次数大于设定的阈值时,则判定机器人已经处于搜索陷阱,实施搜索陷阱逃离策略.

机器人的加工过程通过未加工网格位置链表和已加工网格位置链表来记录,其算法的过程如下:

Step 1 当机器人在任意一个网格位置中,设 n(初值为 0)为连续搜索网格位置的次数,$\boldsymbol{P}_i=\begin{pmatrix}x_i\\y_i\end{pmatrix}$为机器人当前网格位置,首先根据研磨机器人光栅尺反馈信息判断操作臂整体在 Y 轴和 Z 轴方向与每个丝杠导轨两端的距离,以确定其在 Y 轴和 Z 轴的下一步可能的移动方向.然后判断对应方向上是否有未到达的潜在网格位置,并将未搜索的网格记录在未搜索位置链表中,若重复记录则将其删除.随后,转入 Step 4 调整在 Y 轴或 Z 轴方向的运动并搜索下一个网格.对于已记录在搜索位置链表的网格,则判断机器人是否进入搜索陷阱,搜索位置的次数 $n=n+1$ 转到 Step 2.

Step 2 判断研磨机器人是否陷入了搜索陷阱,若记录连续搜索位置的次数 n 大于等于某一设定值 N,转入 Step 3,当 $n<N$ 时转入 Step 4.设定值 N 的初始值可由式(1)计算得到:

$$N=\left\lceil\frac{S}{3\times S_e}\right\rceil;\ N\geqslant 0 \tag{1}$$

式中:S_e 为设定的搜索网格的面积,S 为整个搜索区域的面积.

Step 3 系统查询机器人未搜索位置链表中与当前位置距离最近的未搜索网格位置,并控制机器人运动到该未搜索位置,如果查询时未搜索位置链表为空,则退出搜索.在机器人运动到未搜索位置时,PMAC 卡控制系统将实时跟踪和计算指定的未搜索位置与机器人当前位置之间的方位,并利用模糊控制算法实现机器人到达指定网格的最优规划路径.当机器人移动到未搜索网格位置时,系统将该网格节点添加到已搜索位置链表中,并从未搜索位置链表中删除该网格节点,设定 $N=N/2$,$n=0$,并将机器人的当前位置记录为 $\boldsymbol{P}_i$,然后转入 Step 4.

Step 4 设定搜索网格边长为 l,并将目标方位的值设为 0 作为模糊控制算法的输入变量.机

器人的运动由系统中局部路径规划算法进行控制，机器人的实时位置 $\boldsymbol{P}_{i+1}$ 通过光栅尺记录，当上一个位置 $\boldsymbol{P}_i$ 与实时位置 $\boldsymbol{P}_{i+1}$ 的距离大于 l 时，即 $\|\boldsymbol{P}_i-\boldsymbol{P}_{i+1}\|>l$，控制系统将停止机器人运动，说明机器人已经处于指定的未搜索网格中，此时可以转入 Step 1 中.

计算机器人连续搜索算法中未搜索网格坐标的方法为若 Z 轴或 Y 轴与其两端对应的极限位置之间距离大于某一设定值 D，则判定可能有未搜索网格，并根据搜索网格的大小计算各个未搜索区域的坐标位置.

设在机器人当前坐标系 O_o 中有待搜索点 P，它与 Y_o 轴的夹角为 α_o，O_oP 长度为 d，P 点在当前坐标系 O_o 中坐标为 $\boldsymbol{P}_o=(y_o \quad z_o \quad \theta_o)^T$，$\theta_o$ 为 P 点在当前坐标系 O_o 中的方位角. 机器人当前坐标系原点 O_o 在基坐标系 O_b 中的坐标为 $\boldsymbol{O}_{ob}=(y_{ob} \quad z_{ob} \quad \theta_{ob})^T$，$\theta_{ob}$ 为机器人当前坐标系原点 O_o 在基坐标系 O_b 中的方位角. 待搜索点 P 在基坐标系中的坐标为 $\boldsymbol{P}_b=(p_{by} \quad p_{bz} \quad \theta_b)^T$，$\theta_b$ 为待搜索点 P 在基坐标系中的方位角，由图 4 得

$$\begin{aligned} y_o&=d\cos\alpha_o \\ z_o&=d\sin\alpha_o \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} p_{by} \\ p_{bz} \end{pmatrix}=\begin{pmatrix} \cos\theta_{ob} & -\sin\theta_{ob} \\ \sin\theta_{ob} & \cos\theta_{ob} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} y_o \\ z_o \end{pmatrix}+\begin{pmatrix} y_{ob} \\ z_{ob} \end{pmatrix} \tag{3}$$

$$\theta_b=\theta_o+\alpha_o$$

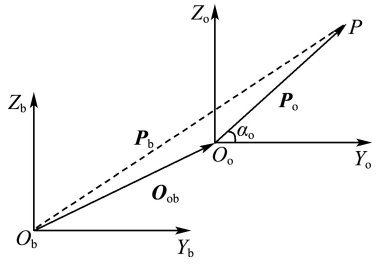


图 4　正交坐标平台运动

Fig. 4　Orthogonal coordinate platform motion

3　研磨工具头的轨迹规划及待加工曲面边界确定

3.1　研磨工具头的轨迹规划

每次研磨加工前，自主研磨机器人首先自动回到由直角坐标构成的移动平台原点，即由相机 A 确定的待加工曲面的局部轮廓 A' 与相机 B 确定的待加工曲面的局部轮廓 B' 的交点，作为起刀点. 然后根据相机 B 确定的待加工曲面的局部轮廓 B' 选择沿着该轮廓向左或者向右进行加工，研磨工具头加工到曲面边界后，再根据相机 A 确定的待加工曲面的局部轮廓 A' 选择向上或者向下进行走刀.

3.2　待加工曲面边界确定

对于相机 A 确定的待加工曲面的局部轮廓 A' 与相机 B 确定的待加工曲面的局部轮廓 B'，如果由两者对应的轮廓特征得到的激光线出现了梯度变化大的情况，且超出了预先设定的误差值，即判断该处为局部轮廓 A' 或者局部轮廓 B' 边界.

轮廓边界判断算法的基本步骤如下：

(1)图像预处理

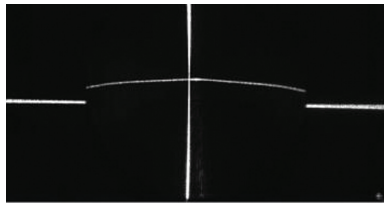
目标轮廓如图 5(a)所示，利用 Otsu 大津阈值法[15]的最佳阈值对加工过程中采集的图像进行预处理，并利用抛物线拟合法对激光线中心进行提取，获得激光线的深度信息图，即目标轮廓高度信息.

(2)填充丢失的数据点与三次 B 样条曲线拟合

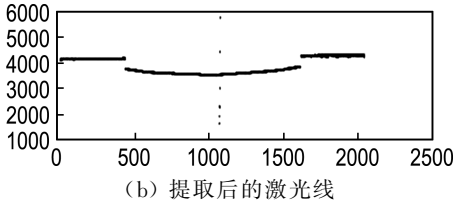
由于提取的激光线是间断的，如图 5(b)所示，对于这些间断的激光线，可以应用三次均匀 B 样条曲线算法对这些点进行拟合[14].

(3) 轮廓边界判定

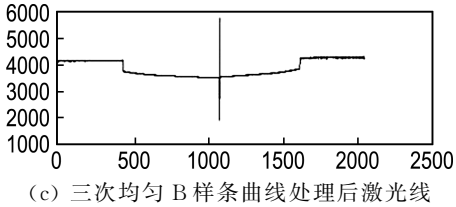
对于拟合后的三次 B 样条曲线(图 5(c))，如出现梯度变化大的点，超出了预先设定的误差值，即判断该处为边界.



(a) 原始图像



(b) 提取后的激光线



(c) 三次均匀 B 样条曲线处理后激光线

图 5　局部轮廓的边界

Fig. 5　Local curve boundary

4 实验结果

为了验证本文自主搜索技术与基于待加工轮廓的选择和边界识别方法的可行性，选用了图 6 所示的加工样件，加工样件为球面，球面的曲率半径 $R=478$ mm，底面为直径为 58 mm 的圆.

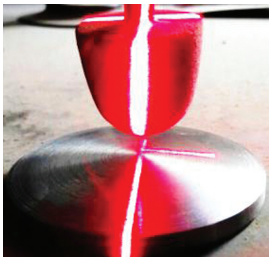


图 6 加工曲面实物

Fig. 6 Grinding surface workpiece

分别获取机器人在基坐标系的位置和加工的目标点在机器人当前坐标系的位置，通过式(2)与式(3)，求取加工的目标点在基坐标系中的位置坐标.

以研磨机器人从加工样件的中心开始加工为例，利用上述搜索方法加工曲面的实验结果见图 7，加工轨迹分为 4 个区域，依次从 $A\rightarrow B\rightarrow C\rightarrow D$ 实现对整个区域的加工.

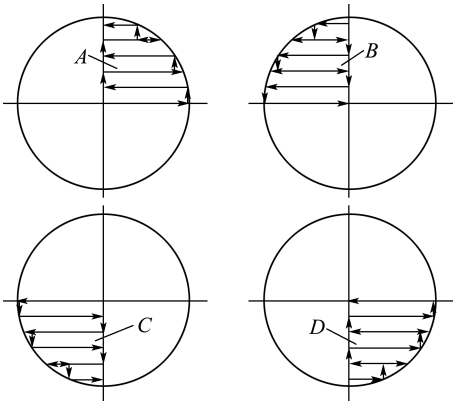


图 7 研磨机器人自主加工曲面实验结果

Fig. 7 Experimental results of robot autonomous grinding surface

5 结 语

本文针对正交双目立体视觉的研磨机器人对未知待加工曲面的加工问题，提出了一种基于未知曲面的自主搜索方法. 应用了基于模糊逻辑的自主搜索方法，该方法包括基于模糊逻辑的全区域覆盖搜索算法和待加工曲面边界确定算法. 实验过程验证，上述算法可在任意位置开始搜索，并且具有较好的选择走刀方向和加工区域的功能，并有效地解决了基于正交双目立体视觉的研磨机器人的自主搜索问题，能够很好地完成自主研磨机器人在未知曲面模型中搜索待加工区域的任务.

参考文献：

[1] 高 峰，郭为忠. 中国机器人的发展战略思考[J]. 机械工程学报，2016，**52**(7)：1-5.
GAO Feng, GUO Weizhong. Thinking of the development strategy of robots in China [J]. **Journal of Mechanical Engineering**, 2016, **52**(7): 1-5. (in Chinese)

[2] 肖 潇，方勇纯，贺 锋，等. 未知环境下移动机器人自主搜索技术研究[J]. 机器人，2007，**29**(3)：224-228.
XIAO Xiao, FANG Yongchun, HE Feng, *et al*. Autonomous search technology for mobile robots under unknown environments [J]. **Robot**, 2007, **29**(3): 224-228. (in Chinese)

[3] 王醒策，张汝波，顾国昌. 基于势场栅格法的机器人全局路径规划[J]. 哈尔滨工程大学学报，2003，**24**(2)：170-174.
WANG Xingce, ZHANG Rubo, GU Guochang. Potential grid based global path planning for robots [J]. **Journal of Harbin Engineering University**, 2003, **24**(2): 170-174. (in Chinese)

[4] 蔡自兴，肖 正，于金霞. 动态环境中移动机器人地图构建的研究进展[J]. 控制工程，2007，**14**(3)：231-235.
CAI Zixing, XIAO Zheng, YU Jinxia. Advances on map building with mobile robots in dynamic environments [J]. **Control Engineering of China**, 2007, **14**(3): 231-235. (in Chinese)

[5] BISWAS J, VELOSO M. WiFi localization and navigation for autonomous indoor mobile robots [C] // **2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Anchorage: IEEE, 2010: 4379-4384.

[6] JOHNSON A, LEGER P, HOFFMAN R, *et al*. 3D object modeling and recognition for telerobotic manipulation [J]. **Journal of Engineering and Applied Science**, 1995, **1**(1): 103-110.

[7] HAMEL W R, KRESS R L. Elements of telerobotics necessary for waste clean up automation [C] // **2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation**. Seoul: IEEE, 2001: 393-400.

[8] RAMOS F, UPCROFT B, KUMAR S, *et al*. A Bayesian approach for place recognition [J].

Robotics and Autonomous Systems, 2012, **60**(4): 487-497.

[9] KALTSOUKALAS K, MAKRIS S, CHRYSSOLOURIS G. On generating the motion of industrial robot manipulators [J]. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 2015, **32**: 65-71.

[10] 郭玉波,姚　郁. 双目视觉测量系统结构参数优化问题研究[J]. 红外与激光工程, 2006, **35**(z1):506-510.
GUO Yubo, YAO Yu. Structural parameter optimization of binocular vision measuring system [J]. **Infrared and Laser Engineering**, 2006, **35**(z1):506-510. (in Chinese)

[11] SONG Weidong, MIAO Zhenjiang, WU Hao. Automatic calibration method based on improved camera calibration template [C] // **5th IET International Conference on Wireless, Mobile and Multimedia Networks, ICWMMN 2013**. Beijing: Institution of Engineering and Technology, 2013: 301-305.

[12] LI Jia, DUAN Ping, WANG Jinliang. Binocular stereo vision calibration experiment based on essential matrix [C] // **Proceedings of 2015 IEEE International Conference on Computer and Communications, ICCC 2015**. Chengdu: IEEE, 2015:250-254.

[13] 任秉银,柴立仁,魏　坤,等. 正交双目视觉长轴类零件装配端位姿检测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, **49**(1):60-65.
REN Bingyin, CHAI Liren, WEI Kun, *et al*. A method for measuring 3D pose of assembly end of long shaft part using orthogonal binocular stereovision [J]. **Journal of Harbin Institute of Technology**, 2017, **49**(1):60-65. (in Chinese)

[14] 王文忠. 新型自主研磨作业机器人系统的研究[D]. 长春:吉林大学, 2011.
WANG Wenzhong. Research on a new robot system for autonomous grinding [D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

[15] 何志勇,孙立宁,黄伟国,等. 基于 Otsu 准则和直线截距直方图的阈值分割[J]. 光学精密工程, 2012, **20**(10):2315-2323.
HE Zhiyong, SUN Lining, HUANG Weiguo, *et al*. Thresholding segmentation algorithm based on Otsu criterion and line intercept histogram [J]. **Optics and Precision Engineering**, 2012, **20**(10): 2315-2323. (in Chinese)

Search technology for autonomous grinding robot under unknown freeform surface model

WANG Wenzhong*[1], GAO Jingang[2], LI Kun[1], YANG Li[1], YANG Xu[3]

(1. Engineering Training Center, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;
3. School of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: To automatically grind an unknown freeform surface by the autonomous grinding robot based on orthogonal binocular stereovision, by combining an area coverage search algorithm with a grinding surface selection algorithm for grinded profile, and surface boundary recognition method, an autonomous search strategy under unknown surface is proposed, which enables the grinding robot to fulfill target searching task in unstructured environments. The line laser and visual sensor calibration are utilized in unknown freeform surface recognition, and pictures of grinding curve are taken individually at the same time by two cameras, whose optical axes are perpendicular to each other, and a fuzzy logic algorithm is adopted for local path planning to achieve a thorough search over the concerned area. Simultaneously, an image processing algorithm referred to as dynamic boundary estimate method is proposed to recognize the target and determine its position. The designed search strategy can start from any initial position, and it exhibits exceptional adaptabilities over unstructured freeform surface. Experimental results demonstrate the performance of the proposed search algorithm.

Key words: autonomous grinding robot; fuzzy logic; area coverage search; surface boundary estimate