DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.040

基于立体视觉的遥操作工程机器人自主作业系统*

唐新星[1]　倪　涛[2]　何丽鹏[1]　张邦成[1]　高金库[3]

(1.长春工业大学机电工程学院,长春 130022;2.吉林大学机械科学与工程学院,长春 130025;
3.吉林油田天然气公司,松原 138000)

【摘要】 建立了基于立体视觉技术的遥操作工程机器人自主作业控制系统。采用立体视觉技术实现对目标物体的形状自动识别与空间定位,进行了遥操作工程机器人运动学方程求解、运动轨迹规划与控制的研究。针对液压伺服控制系统具有非线性、参数不确定的特点,设计了模糊控制器。最后,在遥操作工程机器人实验台上进行了自主作业控制实验。实验结果表明,所构建的基于立体视觉技术的工程机器人自主作业控制系统,能够完成初步的自主作业任务,且作业过程比较流畅。

关键词:遥操作工程机器人　自主作业　立体视觉　轨迹规划　模糊控制

中图分类号:TP24;TP391.41　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2012)10-0224-05

Autonomous Task Control System of Construction Tele-robot Based on Stereo Vision

Tang Xinxing[1]　Ni Tao[2]　He Lipeng[1]　Zhang Bangcheng[1]　Gao Jinku[3]

(1. *School of Mechatronic Engineering*, *Changchun University of Technology*, *Changchun* 130022, *China*
2. *Institute of Mechanical Science and Engineering*, *Jilin University*, *Changchun* 130025, *China*
3. *Jilin Oil Field Natural Gas Company*, *Songyuan* 138000, *China*)

Abstract

In order to enhance the autonomy of construction tele-robot (CTR), a complete autonomous task control system of CTR based on stereo vision technology was established. Firstly, automation recognition and space location of the target object were studied by stereo vision and image processing technology. And then, forward and reverse kinematics equations, trajectory planning and control were discussed. To make the autonomous movement smoothly, trajectory function must be continuous and smooth, and expectation joint displacement and velocity would be obtained by forward kinematics equation. A fuzzy controller was designed. Finally, experiments of the autonomous task control were carried out on CTR test-bed. The experiments results indicated that autonomous task control system of CTR based on stereo vision technology was reliable and safe to complete their task, and task process was smooth.

Key words　Construction tele-robot, Autonomous task, Stereo vision, Trajectory planning, Fuzzy control

引言

在危险的极限作业环境中,遥操作工程机器人技术得到了广泛应用[1~2]。但是遥操作工程机器人系统的通信环节,由于受干扰和传输条件的限制,有时传回的信号带有大量噪声和较长的时间滞后,严重时系统根本无法正常工作。为此,本文将立体视觉技术引入工程机器人遥操作领域,建立基于立体视觉技术的遥操作工程机器人自主作业控制系统。

收稿日期:2011-11-28　修回日期:2012-01-17

*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA040201)和吉林省自然科学基金资助项目(201115153)

作者简介:唐新星,讲师,博士,主要从事工程机器人、图像处理、视觉仿生研究,E-mail:petertang1975@sina.com

1　遥操作工程机器人自主作业系统原理

遥操作工程机器人由末端执行器代替液压挖掘机铲斗而成，4 自由度都使用液压伺服驱动，如图 1 所示。末端执行器由一对啮合齿轮、抓手和四连杆机构组成，抓手由安装于前臂上的液压缸驱动，经四连杆机构并驱使主动齿轮啮合被动齿轮，实现抓手的开合。这样的结构设计可保证抓手两边的抓取力相等。

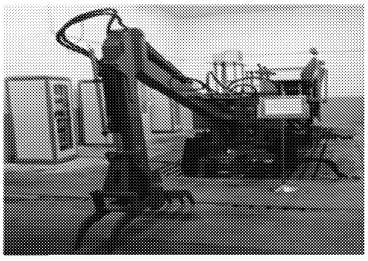


图 1　遥操作工程机器人结构

Fig. 1　Structure of tele-operation construction robot

遥操作工程机器人自主作业控制系统主要包括基于立体视觉技术的目标物体自动识别与空间定位系统、遥操作工程机器人轨迹规划与控制系统，其原理如图 2 所示。目标物体自动识别与空间定位系统根据目标物体的图像来计算其空间位置信息，位置信息被规范化处理后，遥操作工程机器人进行运动轨迹规划，自主靠近并抓取目标物体，按作业要求将其放到指定位置。在自主作业过程中有 2 个关键环节：得到目标物体的准确位置信息和进行遥操作工程机器人的运动轨迹规划。整个系统存在 2 个坐标系：即摄像机世界坐标系和遥操作工程机器人世界坐标系。

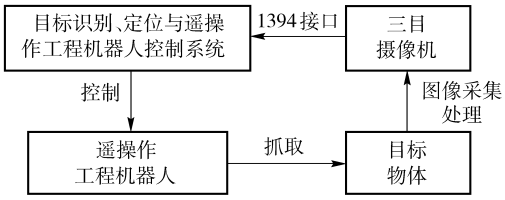


图 2　遥操作工程机器人自主作业控制系统的工作原理

Fig. 2　Working principle of autonomous task control system for tele-operation construction robot

2　目标物体自动识别与空间定位系统

2.1　摄像机几何模型

摄像机几何模型是对三维物体成像过程的一种数学描述，通常选择透射投影模型作为摄像机几何模型，如图 3 所示。图中包含 4 个坐标系，即世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$、摄像机坐标系 $C_i x_c y_c z_c$、图像坐标系 $O_i' x_i y_i$ 以及像素坐标系 $O_i u_i v_i (i = 1,2,3)$[3]。其中像素坐标系反映了图像阵列中的像素位置，其坐标原点 O_i 位于图像平面的左上角，坐标轴 u_i、v_i ($i = 1,2,3$) 分别平行于图像坐标系坐标轴，图像处理过程主要在此坐标系下进行。图像阵列中的每个像素点都具有整数坐标，但为了提高图像处理的精度，也用小数来表示像素与像素之间的点。空间点 P 在4 个坐标系中分别表示为 (x^w, y^w, z^w)、(x_i^c, y_i^c, z_i^c)、(x_i, y_i) 和 (u_i, v_i) ($i = 1,2,3$)。为提高图像处理速度，选择世界坐标系与摄像机坐标系重合。

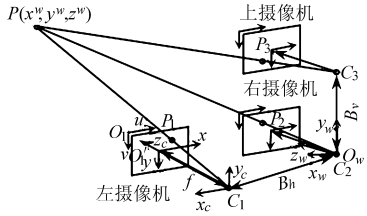


图 3　摄像机模型

Fig. 3　Camera model

2.2　图像分割及像素标记

阈值法是目前最简单、流行的图像分割技术，其中阈值的选取是关键[4]。在一幅图像中，目标和背景之间的边界点属于目标还是背景的模糊性最大，而图像中其他像素点属于目标或背景的模糊性则反比于其灰度与分割阈值之间的距离，这使模糊集合理论在图像分割中的应用有了理论基础[5~7]。以灰度直方图为基础，进行模糊阈值分割，即

$$I_T(i,j) = \begin{cases} 1 & (T \in [T_1, T_2]) \\ 0 & (T \notin [T_1, T_2]) \end{cases} \tag{1}$$

式中　T_1、T_2——输入图像的黑、白阈值

为从二值化图像中提取出多个有效的兴趣区域，需要对其进行像素标记，而获知像素间的连通形式是建立图像目标边界和确定区域元素的重要方法。为防止标记被分离，采用标记传播法对 8 个单位的光栅扫描结果进行像素标记。图像分割及像素标记的结果如图 4 所示。

2.3　匹配计算与三维重建

由于摄像机的 3 个摄像头呈直角三角形分布，水平与垂直基线的长度分别为 B_h 和 B_v，匹配计算则分别根据垂直方向和水平方向的基线来进行。根据图 3，则有

$$Z_d = \sqrt{\left(\frac{B_h f}{d_h}\right)^2 - \left[\frac{B_v^2(v_2 + d_v) - d_v(v_3 + d_v)}{d_v(B_v - d_v)}\right]^2} \tag{2}$$

式中　d_h、d_v——目标点 P 在水平和垂直方向上的成像视差

v_3、v_2——目标点 P 在上摄橡机和右摄像机成像平面中的纵坐标

f——摄像机焦距

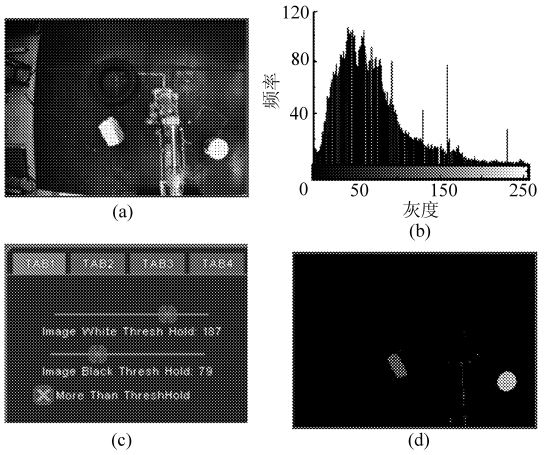


图 4 图像处理与像素标记的结果

Fig. 4 Image processing and pixel labeling

(a) 输入图像 (b) 灰度直方图 (c) 阈值设定 (d) 像素标记

x、y 的坐标可根据深度信息 Z_d 计算出来。

为更好地获得三维目标物体的空间视觉效果,在摄像机标定和图像匹配的基础上,根据匹配计算所得到的三维离散点模型,生成物体的表面纹理,进行目标三维重建。受到匹配方法的局限性以及目标物体遮挡、阴影等因素的影响,对立体匹配后恢复出一些稀疏的数据点进行插值,得到更稠密的控制点数据。

3 遥操作工程机器人轨迹规划

3.1 运动学正解和逆解

遥操作工程机器人运动学正解是根据遥操作工程机器人相邻连杆的相对位置确定其抓手终端的实时位置。为确定遥操作工程机器人抓手终端的实时位置,建立如图 5 所示的世界坐标系 $O_w x_w y_w z_w$,其坐标原点位于遥操作工程机器人的旋转关节处,并与基坐标系 $O_0 x_0 y_0 z_0$ 重合。而其他各连杆坐标系 $O_1 x_1 y_1 z_1$、$O_2 x_2 y_2 z_2$ 和 $O_3 x_3 y_3 z_3$ 则根据 D-H 原则来确定。

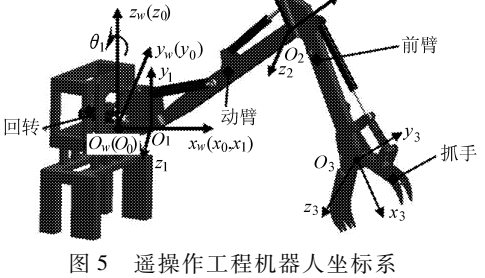


图 5 遥操作工程机器人坐标系

Fig. 5 Coordinate system of tele-operation robot

运动学逆解则是根据遥操作工程机器人抓手终端的期望位置来确定各自由度关节角。由于遥操作工程机器人的抓手能够自由张合,且几何关系复杂,关节角 θ_4 的计算采用拟合法求解,限定 $\theta_4 \in [4°, 70°]$。因此,在进行逆运动学方程运算时以腕关节原点 O_3 作为目标点来进行。假设点 O_3 在世界坐标系下的齐次变换形式是 $\boldsymbol{O}_3^w = [x \quad y \quad z \quad 1]^{\mathrm{T}}$ 则有

$$\begin{cases} x = X(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \\ y = Y(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \\ z = Z(\theta_1, \theta_2, \theta_3) \end{cases} \tag{3}$$

对式(3)按一阶泰勒级数展开,并进一步整理,则有

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_1 \\ \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial X}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial X}{\partial \theta_2} & \dfrac{\partial X}{\partial \theta_3} \\ \dfrac{\partial Y}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial Y}{\partial \theta_2} & \dfrac{\partial Y}{\partial \theta_3} \\ \dfrac{\partial Z}{\partial \theta_1} & \dfrac{\partial Z}{\partial \theta_2} & \dfrac{\partial Z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} \tag{4}$$

通过选择合适的步长,根据 $[x \ y \ z]^{\mathrm{T}} = [x_0 \ y_0 \ z_0]^{\mathrm{T}} + [\Delta x \ \Delta y \ \Delta z]^{\mathrm{T}}$ 不断地进行迭代,由式(4)则可以求得各自由度关节角 $[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]^{\mathrm{T}} = [\theta_{10} \ \theta_{20} \ \theta_{30}]^{\mathrm{T}} + [\Delta\theta_1 \ \Delta\theta_2 \ \Delta\theta_3]^{\mathrm{T}}$。其中,$[x_0 \quad y_0 \quad z_0]^{\mathrm{T}}$ 对应于机械手初始关节角 $[\theta_{10} \quad \theta_{20} \quad \theta_{30}]^{\mathrm{T}}$ 的坐标。为使得到的各自由度关节角更加合理,用 $\theta_1 \in [-55°, 70°]$、$\theta_2 \in [28°, 52°]$、$\theta_3 \in [214°, 318°]$ 加以判断和限定。对于以液压驱动的遥操作工程机器人系统,在对其进行自主作业控制时,还需要将各关节自由度的角位移转换为相应的各关节液压缸的直线位移。

3.2 轨迹规划

为保证遥操作工程机器人自主作业过程平稳,要求所规划的轨迹函数必须是连续、平滑的。在进行遥操作工程机器人轨迹规划时,位置、速度控制是重点和核心,因遥操作工程机器人 4 个液压缸运动不是正交关系,及受目标物体位置的影响,应对遥操作工程机器人姿态的瞬时变化有严格要求,否则可能出现遥操作工程机器人抓不到目标物体的现象[8~9]。因此,选择在直角坐标空间进行遥操作工程机器人自主作业轨迹规划,其实质是通过对轨迹函数进行插补运算实现轨迹离散点的过程。若离散点间隔很大,则遥操作工程机器人的实际运动轨迹与设定轨迹会有较大的误差,反之则可以足够的精度逼近设定轨迹。进行轨迹点离散化时选择逐点比较直线插补算法。在获取轨迹离散点后,根据运动学逆解将其返回到关节空间进行控制,反过来,轨迹规划又会影响工程机器人的运动学正特性。

3.3 模糊控制器的设计

针对液压伺服控制系统具有非线性、参数不确定的特点,以及在运动学方程求解时几何关系的非线性,在进行工程机器人自主作业轨迹规划时,为系统设计了模糊控制器,保证控制系统具有良好的轨迹规划特性。

图 6 所示为工程机器人自主作业模糊控制系统

的结构图。根据工程机器人自主作业控制系统的特点，选择各关节角误差 e 及其变化率 $\dot{e}$ 为模糊控制器的输入，以比例阀的控制量 u 作为模糊控制器的输出。由比例阀对液压缸伸缩量进行控制，使工程机器人的关节角向目标值靠近，逐步消除偏差，最终达到理想的控制效果。模糊控制器的框图如图 7 所示。

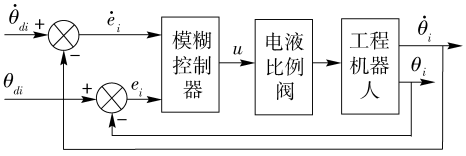


图 6　遥操作工程机器人自主作业模糊控制系统结构图

Fig. 6　Structure diagram autonomous task fuzzy control system of tele-operation construction robot

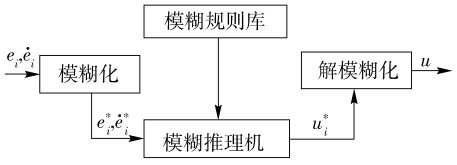


图 7　模糊控制器框图

Fig. 7　Block diagram of fuzzy controller

关节角误差为

$$e_i = \theta_{di} - \theta_i \quad (i = 1,2,3,4) \tag{5}$$

式中　θ_{di}——各关节期望的关节角

θ_i——各关节实际的关节角

将采样所需要的真实论域分别转换为模糊控制器内部论域：{ -6, -5, -4, -3, -2, -1,0,1,2,3,4,5,6}。选择映射关系为

$$Y = \frac{12}{b-a}\left(X - \frac{a+b}{2}\right) \tag{6}$$

式中　X——实际变化范围$[a,b]$

Y——将$[a,b]$ 区间精确变量转换为[-6, 6]区间的变量

当 Y 不是整数时，把它归入最接近 Y 的整数。对$(e_i^*, \dot{e}_i^*)$，u^* 采用 7 个模糊语言变量来描述，记为{NL,NM,NS,ZE,PS,PM,PL}，利用三角形法分别对 e_i^*、$\dot{e}_i^*$、u^* 建立隶属度函数，如图 8 所示。

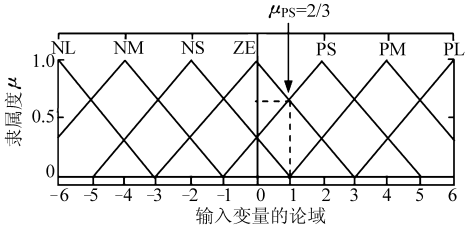


图 8　输入变量的模糊隶属度函数

Fig. 8　Membership function of input variable

模糊控制规则主要根据操作者的经验来制定。根据经验总结，确定推理规则共 49 条，部分推理规则的形式如下所示

(R1) If e_i^* is ZE and $\dot{e}_i^*$ is ZE, then u^* is ZE

(R2) If e_i^* is ZE and $\dot{e}_i^*$ is NS, then u^* is NS

(R3) If e_i^* is NM and $\dot{e}_i^*$ is ZE, then u^* is NM

(R4) If e_i^* is NM and $\dot{e}_i^*$ is NB, then u^* is NL

输出量的模糊规则强度则由各模糊控制规则的交运算获取[10~11]，即

$$\mu_{\mathrm{NL}}(u^*) = \min(\mu_{\mathrm{NM}}(e^*), \mu_{\mathrm{NL}}(\dot{e}^*)) \tag{7}$$

式中　$\mu_{\mathrm{NL}}(u^*)$——规则 R4 时的规则强度

$\mu_{\mathrm{NM}}(e^*)$——对应模糊集合 NM，偏差 e 转换到离散化论域的输入变量 e^* 的隶属度

$\mu_{\mathrm{NL}}(\dot{e}^*)$——对应模糊集合 NL，误差变化率转换到离散化论域的输入变量 $\dot{e}^*$ 的隶属度

模糊控制器的输出量是一个模糊集合，利用重心法反模糊化后将模糊量转换为精确控制量，即

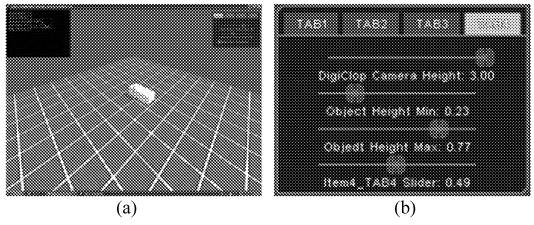
$$u = \frac{\sum_{\mathrm{Ri}} \mu_{\mathrm{Ri}}(u_{\mathrm{Ri}}^*)\, u_{\mathrm{Ri}}}{\sum_{\mathrm{Ri}} \mu_{\mathrm{Ri}}(u_{\mathrm{Ri}}^*)} \tag{8}$$

根据不同的 i 制成模糊控制查询表。模糊控制器即可根据实际的运行情况查询表中的数据，实现对电液比例阀的电压控制。

4　实验结果

4.1　目标物体的空间定位

在对含有目标物体的图像进行处理、匹配计算等后，编制了基于 OpenGL 技术的目标物体自动识别与空间定位系统控制程序，实验选择的目标物体是一方形白色石块[12]。将事先已经标定好的摄像机固定于遥操作工程机器人的正上方，且距离地面的距离为 3.0 m，其实验结果如图 9 所示。实验结果表明，基于立体视觉技术的目标物体自动识别与空间定位系统能获得目标物体的准确位置，并进行目标的三维重建。



(a)　(b)

图 9　目标物体自动识别与空间定位

Fig. 9　Automatic recognition and spatial orientation of target object

(a) 实时程序界面　(b) 摄像机与目标信息

4.2　抓取检测与夹持力测定实验

在进行遥操作工程机器人抓取判断、夹持力测

定时,采取手动闭环控制的办法。遥操作工程机器人从初始位置张到最大并保持一段时间,之后逐渐收缩并抓取目标物体,抓紧后保持一段时间后松开物体,如此反复。在抓紧目标物体(方形白色石块)时,液压缸驱动力波动范围为[-5 300 N, -4 200 N],根据遥操作工程机器人的特性,确定液压缸处于完全缩回和完全伸出状态时所产生的最大驱动力分别为1 000 N 和 -5 000 N,而抓紧目标物体时的驱动力约为 -4 800 N。

4.3 自主作业实验

实验采样周期为 10 ms,选择 30 ms 进行一次数据处理。控制开始后,为防止出现遥操作工程机器人抓地的现象,按如下步骤进行遥操作工程机器人运动规划:遥操作工程机器人抬起手臂到某一位置后,再接近目标物体,握紧目标物体后并将其运送到目标位置,遥操作工程机器人再回到初始位置,为下一次作业做准备。以动臂轨迹跟踪为例,根据目标物体自动识别与空间定位系统所获取的目标物体初始位置以及待搬运的目标位置,计算后设定的动臂关节角轨迹如图 10 中的虚线所示,而实线则为在控制过程中实际的关节角轨迹。从实验结果可以看出,所建立的遥操作工程机器人自主作业控制系统,能够按照设定的运动轨迹,自主完成作业任务。但在动臂举升的过程中,由于动臂要克服重力做功以及关节角计算存在的非线性,致使设定的目标轨迹与实际轨迹之间误差较大。

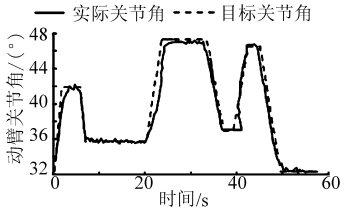


图 10 动臂关节的目标与实际关节角轨迹跟踪

Fig. 10 Target and actual joint angle trajectory tracking of boom

5 结论

(1)建立了基于立体视觉技术的遥操作工程机器人自主作业实验系统,并通过轨迹规划与目标物体抓取检测控制,初步实现了工程机器人的自主作业,作业过程比较流畅。

(2)以灰度直方图为基础,采用模糊阈值分割法实现了对目标物体有效信息的提取,据此进行目标物体的像素标记与深度信息计算。

(3)采用模糊控制技术实现遥操作机器人自主作业的轨迹规划,取得了较好的控制效果。结果表明模糊控制技术对具有大惯性、非线性、滞后的遥操作机器人控制系统具有强大的功能。

参 考 文 献

1 Kim Dongmok, Kim Jongwon, Lee Kyouhee, et al. Excavator tele-operation system using a human arm[J]. Automation in Construction, 2009,18(2):173 ~ 182.

2 Yamada H, Muto T. Development of a hydraulic tele-operated construction robot using virtual reality-new master-slave control method and an evaluation of a visual feedback system[J]. International Journal of Fluid Power, 2003, 4(2):35 ~ 42.

3 唐新星,赵丁选,黄海东,等. 改进的工程机器人立体视觉标定方法[J]. 吉林大学学报:工学版,2007,37(2):391 ~ 395.
Tang Xinxing, Zhao Dingxuan, Huang Haidong, et al. Modified stereo vision calibration method for construction robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,37(2):391 ~ 395. (in Chinese)

4 Liu Dong, Jiang Zhaohui, Feng Huanqing. A novel fuzzy classification entropy approach to image thresholding[J]. Pattern Recognition Letters, 2006, 27(7):1 968 ~ 1 975.

5 董金勇,王建仑,李道亮,等. 田间枣树叶片复杂目标图像综合分割方法[J]. 农业机械学报,2011,42(1):165 ~ 170.
Dong Jinyong, Wang Jianlun, Li Daoliang, et al. Complex target image of field jujube leaf segmentation based on integrated technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1): 165 ~ 170. (in Chinese)

6 刘文波,甄子洋,刘媛媛,等. 改进的基于二维直方图的最大模糊熵分割方法[J]. 南京航空航天大学学报,2008,40(5): 692 ~ 695.
Liu Wenbo, Zhen Ziyang, Liu Yuanyuan, et al. Improved maximum fuzzy entropy method based on two-dimensional histogram [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008, 40(5): 692 ~ 695. (in Chinese)

7 Li Linyi, Li Deren. Fuzzy entropy image segmentation based on particle swarm optimization[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(9): 1 167 ~ 1 171.

8 朱世强,刘松国,王宣银,等. 机械手时间最优脉动连续轨迹规划算法[J]. 机械工程学报,2010,46(3):47 ~ 52.
Zhu Shiqiang, Liu Songguo, Wang Xuanyin, et al. Time-optimal and jerk-continuous trajectory planning algorithm for manipulators[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(3):47 ~ 52. (in Chinese)

(下转第 214 页)

10 鲍官军, 邵铁锋, 李尚会, 等. 气动柔性摆动关节静态模型[J]. 农业机械学报,2011, 42(6): 198 ~ 202.
Bao Guanjun, Shao Tiefeng, Li Shanghui, et al. Static model of flexible pneumatic swaying joint [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 198 ~ 202. (in Chinese)

11 鲍官军. 气动柔性驱动器 FPA 的特性及其在多指灵巧手设计中的应用研究[D]. 杭州:浙江工业大学,2006.
Bao Guanjun. Research on characteristics of flexible pneumatic actuator FPA and its application in multi-fingered dexterous hand design [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2006. (in Chinese)

12 Yang Qinghua, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Research on novel flexible pneumatic actuator FPA [C]// Proceedings of IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics, 2004: 385 ~ 389.

13 Wang Zhiheng, Zhang Libin, Bao Guanjun, et al. Design and control of integrated pneumatic dexterous robot finger [J]. Journal of Central South University of Technology, 2011, 18(4): 1 105 ~ 1 114.

14 Wang Zhiheng, Bao Guanjun, Zhang Libin, et al. Development and control of flexible pneumatic wall-climbing robot[J]. Journal of Central South University of Technology, 2009, 16(6): 961 ~ 970.

15 张立彬, 王志恒, 杨庆华, 等. 气动柔性五自由度手指运动分析及控制[J]. 中国机械工程,2008, 19(22): 2 661 ~ 2 665.
Zhang Libin, Wang Zhiheng, Yang Qinghua, et al. Movement analysis and control of flexible pneumatic 5-DOF finger [J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2 661 ~ 2 665. (in Chinese)

16 钱少明, 杨庆华, 鲍官军, 等. 基于气动柔性驱动器的弯曲关节的基本特性研究[J]. 中国机械工程,2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907.
Qian Shaoming, Yang Qinghua, Bao Guanjun, et al. Research on basic characteristics of bending joint based on flexible pneumatic actuator [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(24): 2 903 ~ 2 907. (in Chinese)

17 张立彬, 王志恒, 鲍官军, 等. 基于气动柔性驱动器的侧摆关节特性[J]. 农业工程学报,2009, 25(8): 71 ~ 77.
Zhang Libin, Wang Zhiheng, Bao Guanjun, et al. Characteristics of side-sway joint based on flexible pneumatic actuator [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(8): 71 ~ 77. (in Chinese)

18 Zhang Libin, Wang Zhiheng, Yang Qinghua, et al. Development and simulation of ZJUT Hand based on flexible pneumatic actuator FPA[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 1 634 ~ 1 639.

19 蔡自兴. 机器人学[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

20 Salisbury J K. Active stiffness control of a manipulator in cartesian coordinates [C]// Proceedings of 19th IEEE Conference on Decision and Control Including the Symposium on Adaptive Processes. Stanford: IEEE Press, 1980: 95 ~ 100.

21 Lasky T A, Hsia T C. On force-tracking impedance control of robot manipulators [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento: IEEE Press, 1991: 274 ~ 280.

22 李杰, 韦庆, 文森, 等. 基于阻抗控制的自适应力跟踪方法[J]. 机器人,1999, 21(1): 23 ~ 29.
Li Jie, Wei Qing, Wen Sen, et al. Adaptive force tracking in impedance control [J]. Robot, 1999, 21(1): 23 ~ 29. (in Chinese)

23 Mason M T, Salisbury J K. Robot hands and the mechanics of manipulation [M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1985.

24 郑宇. 多指抓取的封闭性、最优规划与动态力分配研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
Zheng Yu. On the closure properties, optimal planning, and dynamic force distribution in multifingered grasping [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007. (in Chinese)

(上接第 228 页)

9 Likhachev M, Ferguson D. Planning long dynamically feasible maneuvers for autonomous vehicles[J]. The International Journal of Robotics Research, 2009, 28(8):933 ~ 945.

10 杨楠,刘明山,唐新星,等. 沥青混凝土搅拌站模糊预测控制技术[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(6):914 ~ 918.
Yang Nan, Liu Mingshan, Tang Xinxing, et al. Fuzzy prediction control in asphalt concrete mixer[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006, 36(6): 914 ~ 918. (in Chinese)

11 Mohan S, Bhanot S. Comparative study of some adaptive fuzzy algorithms for manipulator control[J]. International Journal of Computational Intelligence, 2006, 3(4): 303 ~ 311.

12 钱谦,裴以建,余江,等. 基于 OpenGL 的关节型机器人实时控制与仿真系统的研究[J]. 云南大学学报:自然科学版,2006,28 (5): 398 ~ 403.
Qian Qian, Pei Yijian, Yu Jiang, et al. Control and simulation system based on the OpenGL joint robot[J]. Journal of Yunan University: Natural Sciences Edition, 2006, 28 (5): 398 ~ 403. (in Chinese)