

基于红外传感皮肤的多关节机器人自主运动方法研究

曹政才¹ 付宜利² 吴启迪¹ 王树国² 靳保²

摘要 本文研究了障碍环境下多关节机器人自主实时避障运动理论、技术与方法。研制的新型红外传感皮肤,可以为多关节机器人提供所需要的周围环境信息。针对非结构化环境下的多关节机器人实时避障问题,提出了一种未知环境下的机器人模糊路径实时规划新方法。实验结果表明:基于研制的红外传感皮肤和模糊运动规划算法,多关节机器人可以在未知或时变环境下自主工作。

关键词 多关节机器人, 传感皮肤, 模糊逻辑, 运动规划
中图分类号 TP24

Research on Method of Self-operation for Multi-joint Robot Based on the Infrared Sensor Skin

CAO Zheng-Cai¹ FU Yi-Li² WU Qi-Di¹
WANG Shu-Guo² JIN-Bao²

Abstract This paper researches the self-operation and real-time obstacle avoidance theory, technique and method for multi-joint robot in obstacle environments. The developed new infrared sensor skin is used to build a description of the robot's surroundings. The new robot motion planning approach, which uses the fuzzy logic method, is proposed for collision avoidance of multi-joint robot operating in unstructured environments. The experimental result shows that the multi-joint robot can work autonomously in unknown or time-varying environments based on the developed infrared sensor skin and the proposed fuzzy motion control algorithm.

Key words Multi-joint robot, sensor skin, fuzzy logic, motion planning

1 引言

目前,机器人的研究正朝着精密、特种、自主及智能化等方向发展,机器人智能化需要获取自身及周围环境的大量信息,并根据这些信息采取相应的决策,这是机器人在未知或时变环境下自主工作所必须解决的理论与技术。这对于手臂型多关节机器人尤其困难,世界上还没有很好的解决方法^[1,2]。

本文主要研究基于红外传感皮肤实时反馈未知障碍环境中物体的距离和位置信息,实现多关节机器人在障碍环境中基于传感器信息反馈的自主运行,这将在很大程度上提高机器人智能程度,并扩展其应用领域。

2 红外传感皮肤系统

研制的“红外传感皮肤”指的是模块化、灵活、带有数据处理能力的微型红外传感器阵列,覆盖在机器人表面。依赖

于皮肤上的红外传感器和信号处理电路来感知外部环境,实时给出外部环境信息,解决多关节机器人实时避障的首要问题。

2.1 红外传感皮肤研制

机器人红外传感皮肤选用美国杜邦公司生产的聚酰亚胺薄膜双面覆上 35 μm 铜箔作为电路板的基材,应用显微机械加工技术和标准集成电路安装技术制成。

图 1 为研制的红外传感皮肤示意图,该红外传感皮肤厚度为 0.15mm,面积为:图 1(a) $3.025 \times 10^5 \text{mm}^2$ 和图 1(b) $1.2 \times 10^5 \text{mm}^2$,分别粘贴在多关节的机器人、小手臂上。为了消除大臂和小臂上红外传感皮肤信号间的干扰,图 1(a) 和图 1(b) 上红外传感器发射频率不同且保持 2:1 比率,采用同步调制法^[3],将发光管输出光强信号调制,接收管只接收到同一频率的调制信号,这样接收到的信号完全是发光管发出后被物体反射回的信号,可以保证测量的精确性。传感皮肤测距的范围为 20mm~230mm,其中在 60mm~150mm 范围内测量是准确的、分辨率高,最大误差为 5mm。

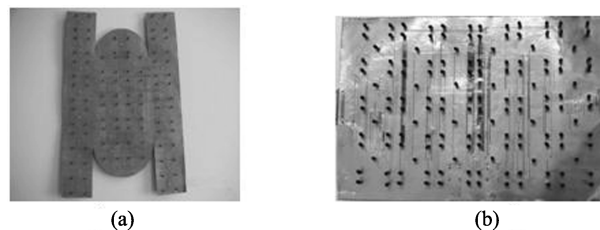


图 1 红外传感皮肤示意图

Fig. 1 Schematic diagram of infrared sensor skin

2.2 红外传感皮肤的信号处理

红外传感皮肤系统中由于处理传感器信息量大(192 对微型红外传感器),采集频率高,控制回路复杂,为了便于传感器信号的处理,采用模块化结构,用高速的 DSP+CPLD 并行进行传感器信号处理^[4]。图 2 是系统信号处理原理图。

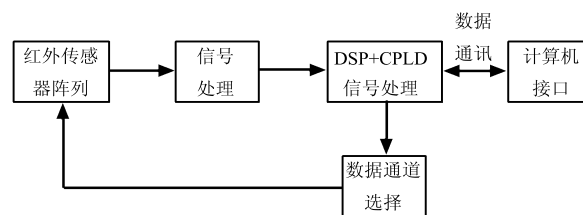


图 2 信号采集与处理系统的原理框图

Fig. 2 Principle diagram of data acquisition and processing system

由红外传感皮肤实际输出可知^[1]:噪声干扰源主要是温度变化、50Hz 工频电源和 100Hz 日光灯闪烁等白噪声干扰。这里采用 FFT+Hanning 窗进行传感器数字信号处理,提取信号的功率谱,达到抑制干扰信号的目的,可以明显提高机器人敏感皮肤性能和系统的实时性。

图 3 为传感信号功率谱图,是 DSP 处理程序调试通过之后,接上传感器信号进行实际的传感数据采集,红外传感器实际工作频率为 560Hz。在 100Hz, 200Hz, 300Hz, 400Hz, 500Hz 处的五个谱峰是由于 50Hz 工频电源、日光灯 100Hz 的闪烁及它高次谐波所造成的。它们的强度已经可以和传感

收稿日期 2005-12-22 收修改稿日期 2006-10-22
Received December 22, 2005; in revised form October 22, 2006
国家自然科学基金(50105002)资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (50105002)
1. 同济大学 CIMS 研究中心 上海 200092 2. 哈尔滨工业大学机器人研究所 哈尔滨 150001
1. CIMS Research Center, Tongji University, Shanghai 200092 2. Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
DOI: 10.1360/aas-007-0664

器的信号相比拟了, 如果采用模拟信号处理方法是容易把它们区分开的, 而在此处借助于对信号在频域内的展开处理起来要容易得多. 提取传感器信号对应的谱线的幅值作为输出, 该信号就反映了传感器与障碍物之间的距离.

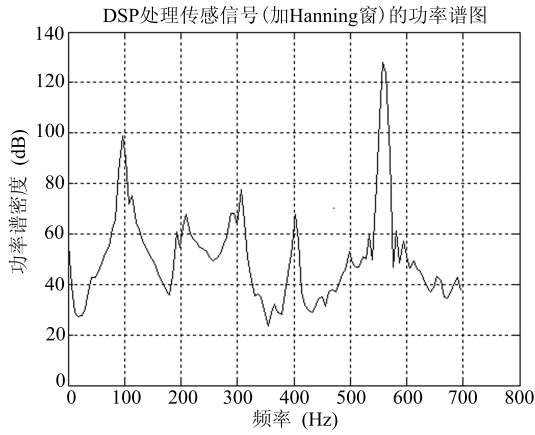


图3 传感信号的功率谱图
Fig.3 PSD diagram of sensor

3 路径规划

机器人路径规划的目的是根据要达到的目标姿态以及周围障碍物信息, 控制机器人在避开障碍物的条件下达到目标点. Cheung 和 Lumelsky 研制的机器人控制系统, 路径规划采用 C-空间 (Configuration space) 方法^[5~7], 该方法的计算量大, 不适合机器人实时避障要求. Gerke 和 Hoyer 将模糊方法应用在多机器人路径规划中^[8], 所采用的方法需要首先对机器人进行离线规划, 不适合存在未知障碍的情形.

本文给出了一种基于行为的模糊路径规划方法^[9]. 在 RX60 型机器人工作过程中, 机器人位置控制是由最基本的 3 个自由度完成的, 通过模糊控制方法控制机器人的各关节, 实现路径规划. 这种方法适合机器人在未知环境下的实时避

障.

3.1 模糊路径规划策略

在本文提出的模糊路径规划中, 机器人的每个关节由一个模糊控制器控制. 每个关节的模糊控制器输入包括可能和手臂发生碰撞的障碍物到手臂表面的距离以及关节当前角度和目标角度的差. 每个控制器的输入和输出如图 4(见本页下方) 所示. 每个循环中, 关节模糊控制器的输出由机器人关节执行. 手臂每个面和最近的障碍物的距离通过覆盖在手臂上面的红外传感器阵列获得. 大小臂上下左右 8 个面范围内的距离分别为 $d_{1left}, d_{1right}, d_{1up}, d_{1down}, d_{2left}, d_{2right}, d_{2up}, d_{2down}$, 下标中 1 表示大臂传感器获得的距离, 2 表示小臂传感器获得的距离^[10].

每个关节独立地由一个模糊控制器控制, 模糊控制器输入有:

1) 关节目标角度 $\theta_{i,target}, (i = 1, 2, 3)$ 和当前角度 θ_i 的差 $\Delta\theta_i$.

2) 机器人手臂和最近障碍物的距离.

每个关节的控制器输入距离并不包括大小臂的所有面, 只包括当机器人这个关节角度变化时手臂可能与障碍物发生碰撞的那些面, 如图 4 所示, 模糊控制器的输出是关节角度的增量 τ_i . 这个阶段中的模糊推理采用 MIN-MAX 合成法, 解模糊过程采用重心法.

3.2 关节模糊控制器

由于关节 1、2、3 模糊控制过程相似, 以关节 1 为例来说明关节模糊控制器设计过程^[10].

由于关节 1 的角度变化使得机器人手臂和小臂的左右表面可能与障碍物发生碰撞, 所以控制器的输入包括大臂和小臂的左右两侧障碍物最小距离 $d_{1left}, d_{1right}, d_{2left}, d_{2right}$, 以及目标角度 $\theta_{1,target}$ 和当前角度 θ_1 的差 $\Delta\theta_1 = \theta_{1,target} - \theta_1$. 当目标姿态在机器人左侧时 $\Delta\theta_1$ 为正, 当目标姿态在机器人右侧时 $\Delta\theta_1$ 为负. 输出为关节 1 的角度增量 τ_1 , 正为左, 负为右.

图 5 是 $d_j(d_{1left}, d_{1right}, d_{2left}, d_{2right}), \Delta\theta_1$ 和 τ_i 的模糊成员函数.

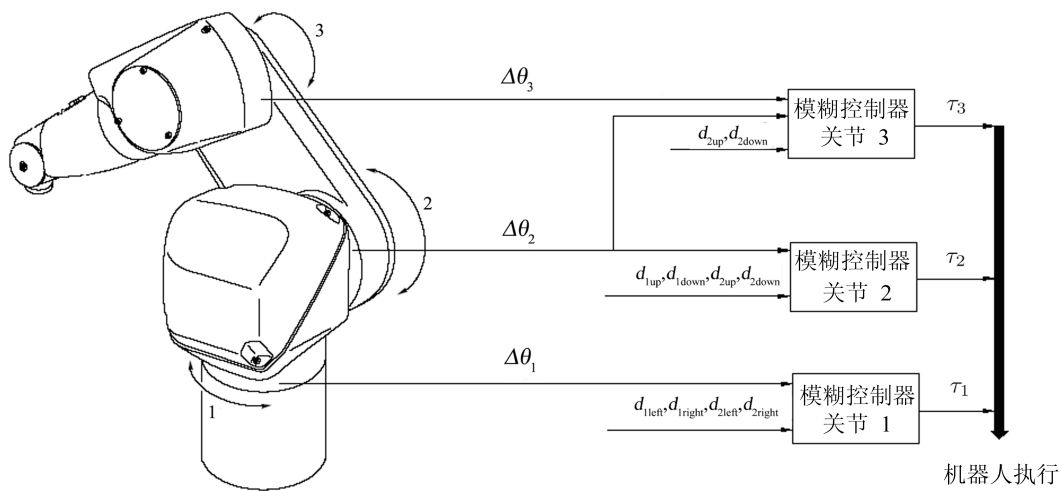


图4 模糊控制器输入和输出
Fig.4 Input and output of the fuzzy controller

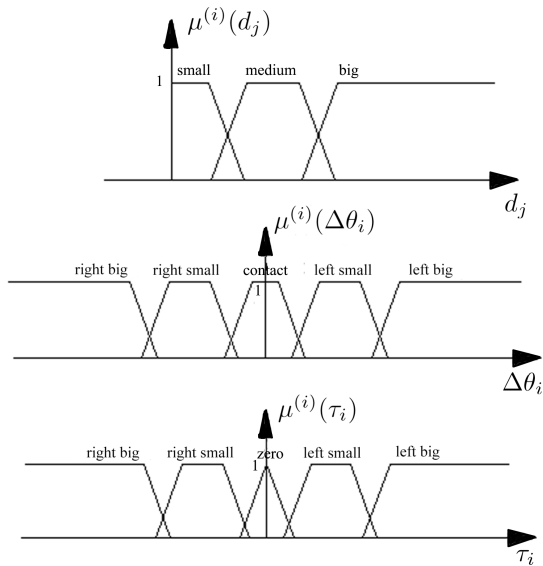


图 5 模糊成员函数
Fig. 5 Fuzzy membership functions

模糊控制器采用 Mamdani 模型, 模糊控制规则可以写成下面的形式:

R_j : IF d_{1left} is A_{1j} AND d_{1right} is A_{2j} AND d_{2left} is A_{3j} AND d_{2right} is A_{4j} AND $\Delta\theta_1$ is A_{5j} THEN τ_i is A_{6j} .

其中 $A_{ij}(i = 1, 2, \dots, 6; j = 1, 2, \dots, n)$ 分别为对应变量的模糊语言描述.

控制关节 1 的模糊控制器设计原则如下:

1) 当目标姿态在机器人左侧时控制机器人向左侧移动,

当目标姿态在机器人右侧时控制机器人向右侧移动;

2) 如果目标侧的障碍物离机器人手臂很近, 关节输出就为零;

3) 在避免碰撞的前提下, 在每一步尽量地接近目标姿态;

4) 对于到大臂和小臂表面距离相同的障碍物, 关节 2 转动时小臂会首先发生碰撞, 不需考虑大臂碰撞的情形.

模糊控制规则见文献 [9].

4 实验

实验在 Staubli RX60 机器人上进行, 实验系统如图 6 所示. 该机器人具有 6 个自由度, 机器人位置控制是由前 3 个自由度实现的, 为了验证红外传感皮肤性能及控制算法, 做了以下几种实验, 图 7(见本页下方) 为避障实验图. 障碍物:



图 6 基于红外传感皮肤的机器人自主运动控制实验系统
Fig. 6 Autonomous motion control experiment system for robot based on infrared sensor skin



(a)



(b)



(c)

图 7 避障实验

Fig. 7 Obstacle collision avoidance experimental setup

(a) 不同颜色物体且排放不规则; (b) 手; (c) 移动物体 (100mm/s) 和静止不动的不同颜色物体. 我们控制机器人的前 3 个关节. 红外传感皮肤为机器人提供周围障碍物信息, 红外传感器得到的距离信息通过串口传到一台 Pentium-4 1.6GHz 计算机. 多层耦合模糊控制器在计算机运行, 得到机器人 3 个关节的角度增量, 传递给机器人控制器, 驱动机器人运动. 实验过程中机器人周围环境存在多种类型的障碍, 模糊规划方法依靠传感皮肤提供的信息, 有效地控制机器人避开障碍, 达到目标姿态, 满足系统要求.

5 结论

本文给出了一种在未知或时变环境下基于红外传感皮肤多关节机器人自主运动的方法. 该方法由红外传感皮肤提供机器人周围环境信息, 通过模糊控制方法控制机器人的各关节, 实现路径规划, 使机器人安全到达目标. 实验结果表明了该系统可以在未知障碍环境中自主工作, 这为机器人在空间和海洋探索、军事作战、危险环境作业, 甚至在未来的服务业工作中都提供了理论指导与技术支持.

References

- 1 Cao Zheng-Cai. Research on the system of robotics sensitive skin based-on infrared sensors[Ph. D. dissertation], Harbin Institute of Technology, 2005
(曹政才. 基于红外传感器的机器人敏感皮肤系统的研究 [博士学位论文], 哈尔滨工业大学, 2005)
- 2 Zavlantas P G, Tzafestas S G. Industrial robot navigation and obstacle avoidance employing fuzzy logic. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2000, **27**(1-2): 85~97
- 3 Wang Shu-Guo, Cao Zheng-Cai, Fu Yi-Li, Jin Bao. Research on the new robotics sensitive skin based on infrared sensor. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(6): 923~927
(王树国, 曹政才, 付宜利, 靳保. 基于红外传感器的新型机器人敏感皮肤. 上海交通大学, 2005, **39**(6): 923~927)
- 4 Cao Zheng-Cai, Fu Yi-Li, Wang Shu-Guo. Signal processing system of the new robotics sensitive skin. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, **41**(5): 21~25
(曹政才, 付宜利, 王树国. 新型的机器人敏感皮肤信号处理系统. 机械工程学报, 2005, **41**(5): 21~25)
- 5 Cheung E, Lumelsky V. Motion planning for a whole-sensitive robot arm manipulator. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1990, **1**. 344~349
- 6 Dngan U. Fault tolerance system for modularized sensitive skin[Ph. D. dissertation], University of Wisconsin-Madison, 1999
- 7 Cheung E, Lumelsky V. Development of sensitive skin for a 3D robot arm operating in an uncertain environment. In:

Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 1989. 1056~1061

- 8 Gerke M, Hoyer H. Fuzzy collision avoidance for industrial robots. In: Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 1995, **2**. 510~517
- 9 Fu Yi-Li, Jin Bao, Wang Shu-Guo, Cao Zheng-Cai. Behavior-based robot fuzzy motion planning approach in unknown environment. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, **42**(5): 120~125
(付宜利, 靳保, 王树国, 曹政才. 未知环境下基于行为的机器人模糊路径规划方法. 机械工程学报, 2006, **42**(5): 120~125)
- 10 Jin Bao, Fu Yi-Li, Wang Shu-Guo, Cao Zheng-Cai. Robot fuzzy motion planning approach in unknown environments. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, **37**(10): 1315~1317
(靳保, 付宜利, 王树国, 曹政才. 未知环境下机器人实时模糊路径规划方法. 哈尔滨工业大学学报, 2005, **37**(10): 1315~1317)

曹政才 同济大学 CIMS 研究中心博士后. 主要研究方向为复杂制造过程建模, 优化与控制, 机器人传感技术, 机器人智能控制. 本文通信作者. Email: giftczc@163.com

(CAO Zheng-Cai Postdoctor at CIMS Research Center, Tongji University. His research interest covers modeling, optimization and control for sophisticated process, sensor technique, and intelligent control of robots. Corresponding author of this paper.)

付宜利 哈尔滨工业大学机器人研究所教授. 主要研究方向为自主机器人控制, 医疗机器人, 数字化制造和虚拟现实.

(FU Yi-Li Professor at Robotics Institute, Harbin Institute of Technology. His research interest covers autonomous robot control, medical robotics, digital manufacturing, and virtual reality.)

吴启迪 同济大学控制科学与工程系教授. 主要研究方向为复杂过程的建模、优化与控制.

(WU Qi-Di Professor at Department of Control Science and Engineering, Tongji University. Her research interest covers modeling, optimization, and control for sophisticated process.)

王树国 哈尔滨工业大学机器人研究所教授. 主要研究方向为机器人技术, 医疗机器人和虚拟现实.

(WANG Shu-Guo Professor at Robotics Institute, Harbin Institute of Technology. His research interest covers robot technology, medical robotics, and virtual reality.)

靳保 哈尔滨工业大学机器人研究所博士研究生. 主要研究方向为机器人运动控制技术.

(JIN Bao Ph.D. candidate at Robotics Institute, Harbin Institute of Technology. His research interest is robot kinematic control technology.)