

移动机器人视觉避障技术研究现状与未来

胡华梅, 肖晓明, 蔡自兴
(中南大学信息科学与工程学院智能所, 湖南 长沙 410083)
E-mail:huameihu@163.com

摘要:视觉避障的主要功能是利用视觉信息对各种场景进行识别,从而确定移动机器人的可行区域。其关键技术是障碍物的检测与识别。本文综述了基于视觉系统的移动机器人避障技术的现状,对移动机器人利用视觉信息的各种实时障碍物检测与定位技术进行了较为详细的分析,指出了每种方法的优点、不足、使用条件及难点问题。最后介绍了移动机器人视觉避障技术的发展趋势。

关键词:障碍物检测 图像分割 边缘检测 光流计算

Present State and Future Development of Vision-Based Obstacle Avoidance for Mobile Robot Research

Hu Huamei, Xiao Xiaoming, Cai Zixing
College of Information Science and Engineering, Central South University 410083
E-mail:huameihu@163.com

Abstract: The main function of Vision-based obstacle avoidance is identifying various scene with vision information, and determining feasible areas for mobile robot. Object detection and identify is it's key technology. In this paper, the present situation of obstacle avoidance for mobile robots based on vision system is summarized. We analyze the technologies of real-time obstacle detection and location for mobile robot in detail, using vision information. In addition, it points out each method's advantages, disadvantages, suitable condition and difficult problems. At last, the development trends of vision-based obstacle avoidance system for mobile robots is introduced.

Key words: obstacle detection, image segment, edge detection, evaluation of optical flow

1. 引言

智能机器人是能够在道路和野外连续地实时自主运动的机器人,是当今科技研究领域的热点,体现了信息科学与人工智能技术的最新成果。现代机器人已经不仅仅在工业制造方面,而且在军事、民用、科学研究等许多方面得到了广泛的应用。

随着机器人技术的发展,它们的工作环境也从单纯的室内环境变成了今天的各种环境,包括天空、地下、地面等。其中地面作为人类大部分活动的场所,同样地面移动机器人的研究也是最广泛的。由于机器人所处环境是多变不可预测的,且机器人所要完成的任务也越来越复杂,因此如何在未知环境下检测出障碍物并对静态和动态两种障碍物实现实时避障是移动机器人技术关键中的关键。根据统计,人类接受的信息60%以上是来自视觉,人类视觉为人类提供了关于周围环境最详细可靠的信息。在移动机器人导航避障的实际应用过程中,为了达到一定的实时性我们不需要像人类视觉一样来区分不同的外界事物,简单的避障只需要分辨可行区域和障碍物,以及得到障碍物的一些深度信息。近年来,视觉传感器在移动机器人导航,障碍物识别中的应用越来越受人们重视,一方面由于计算机图像处理能力和技术的发展,加之视觉系统具有信号探测范围宽,目标信息完整等优势;另一方面由于激光雷达和超声的原理都是通过主动发射脉冲和接受反射脉冲来测距的,多个机器人一起工作时相互之间可能产生干扰,同时它们对一些吸收性透明性强的障碍物无法识别。因此,视觉导航技术逐渐成为移动机器人的关键技术之一。它的主要功能包括对各种道路场景进行识别和理解、障碍物的快速识别和检测,确定移动机器人的可行区域。目前视觉避障技术仍存在着一些瓶颈问题有待解决,如数据量大,定位精确度低,实时性差,在雾天、太阳直射以及黑暗的环境下视觉信息获取性差等。

本文将对移动机器人视觉避障技术的国内外现状进行综述,详细介绍几种障碍物检测技

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(编号: 60234030);
中南大学科学研究基金资助项目(编号: 1811-76176)

术。在以后的研究中, 本人将对其作进一步的实践过程研究。

2. 基于视觉避障的主要研究范畴

基于视觉传感器信息, 在具有动态和静态障碍物的未知复杂环境下, 自主移动机器人采取相应的避障控制方法的研究主要有三个方面:

- (1) 根据多个摄像机等视觉传感器所采集的图像信息识别障碍物的存在性
- (2) 对识别出的需要避障的障碍物获取其深度信息包括障碍物的距离、角度、大小、相对机器人的运动情况及障碍物跟踪等问题。
- (3) 根据已获得的障碍物信息, 选取合适的避障算法, 实现在线实时避障。

其中第三个方面的研究可以借鉴一些非视觉传感器的避障算法, 在本文中我们主要讨论前两个方面的国内外研究情况。

3. 国内外主要研究现状

在移动机器人导航技术中, 目前对障碍物的定义一般主要分两种情况: 一种是对比较平坦的地面上而言, 如室内地板或高速道路上, 障碍物被定义为高出或低于地面的且大于一定尺寸的物体; 另一种是在非结构化道路或越野等情况下, 大于一个极限坡度, 移动机器人无法逾越的区域。总的来说, 障碍物是机器人在行进过程中随机出现的, 形状不可预测的物体, 我们很难对其下一个万能的定义。从直觉上讲, 任何在机器人行进方向上形成一定阻碍作用的物体都可以称为障碍物。

移动机器人的视觉系统在获得环境的图像信息基础上, 要使其从中自动分离障碍物并取得障碍物的精确数学描述, 以便采取实时的避障算法是一个难度很大而又亟待解决的问题, 国内外学者经过多年的研究, 提出了许多方法^[1-9]。但在实用上或多或少地受到一定限制。

目前, 基于视觉信息的障碍物识别及定位研究得较深的主要方向有四个:

3.1 利用颜色信息进行图像分割

这种方法主要是利用道路与障碍物的颜色差异来区分可行区域与可疑障碍区, 场地的可行区域背景须与障碍物有明显的颜色特征信息。采集的图像必须是彩色。目前在全自主型足球机器人, 非完整自主车, 割草机器人中等研究应用比较多。^[5-10]

颜色的表色系统有RGB、HES、YUV三种, 一般地, 移动机器人避障视觉系统主要采用HIS表色系统。由于不同物体很少具有相同的色度和饱和度, 同时强度分量受环境光照影响大, 但对颜色分割的影响不大。因此, 在区分可行区域与障碍物时, 采用HIS表色系统的色调H和饱和度S作为判别依据。对亮度图像进行直方图阈值分割, 可分离出可行区域与可疑障碍区。一般步骤是先得到路面的参考色调值再根据及时路面参考色调值进行直方图阈值分割。^[9]实现时要采集机器人正前方路面色调图像内一方形区域, 计算路面的平均参考色调值 H_r (要保证区域内不存在障碍物。在选择避障算法时, 要保证机器人正前方一定距离内无障碍物), 该参考值是动态变化的, 其中对于前后两次采集的路面参考值 H_r 有较大变化的则认为后一次失效, 这样可避免突如其来的动态障碍物处于机器人较近的正前方时所引起的失误。得到路面参考色调值 H_r 后, 根据区域增长法对图像进行分割是一个比较有效的方法。计算某像素领域内的平均色调值与 H_r 差值的绝对值 $S(i, j)$, 如果 $S(i, j)$ 大于设定的阈值 T 就认为是障碍物可疑区, 否则为可行区域。这种方法判别出的障碍物可疑区只表示它们与可行区域路面颜色不同, 也可能是可行区域上的树叶, 水迹, 阴影覆盖。基于此缺点, 一些学者采用一种改进的分割方法^[7]。在分割的时候, 独立的峰应具备一定的峰高, 一定的峰高及峰谷比, 然后进行一些数学形态学的腐蚀和膨胀处理, 去除噪音空洞。

此方法的难点是怎样确定平均参考色调值 H_r 。缺点是对于复杂的道路路面色调变化较大的场景如越野状态等, 必须采用立体视觉和其它传感器信息融合才能解决。

在利用颜色信息识别和定位时, 也有部分学者采用YUV表色系统进行研究^[10]。在YUV颜色空间中, Y值表示的亮度变化大, 主要采用U, V进行颜色判断。在机器人足球系统中, 利用YUV颜色空间识别, 对光照具有较强的鲁棒性, 但在进行阈值分割时较HIS空间难。

3.2 利用边缘检测技术检测出障碍物边缘信息

图像最基本的特征是边缘, 边缘是图像性区域和另一个属性区域的交接处, 是区域属性发生突变的地方, 是图像中不确定性最大的地方, 也是图像信息最集中的地方, 图像的边缘包含着丰富的信息。提取出边缘能将障碍物和背景区分开来。因此, 图像的边缘提取在机器

人视觉系统的避障中起着非常重要的作用。近年来,国内外对边缘检测技术做了不少新的研究。^[11]现有的图像边缘提取方法可以分为三大类:一类是基于某种固定的局部运算方法,如:微分法,拟合法等,它们是属于经典的边缘提取方法。其中微分算子包括常用的罗伯交叉算子(Roberts Cross)、索贝尔算子(Sobel)、拉普拉斯高斯算子(LOG)和Canny算子。相比而言,Canny算子提取的边缘最为完整,但处理时间要长。第二类则是以能量最小化为准则的全局提取方法,从全局最优的观点提取边缘。如松弛法,神经网络分析法等^[12]。King^[13]等提出的模糊边缘检测方法能有效地将物体从背景中分离出来,但该方法有运行速度缓慢造成细节信息丢失的特点。另一些学者提出了一种改进的新型模糊边缘检测,在质量和速度上都得到了改善。^[14]第三类是以小波变换^[15]、数学形态学、分形理论^[16]等近年来发展起来的高新技术为代表的图像边缘提取方法。小波变换有良好的时-频局部特性,非常适合于图像处理。另外在高速公路由于背景多为天空、山、和树木等,使用图像分形维法提取边缘是较好的工具。一般说来,天空、山和树木等背景分形维较小,而人造物如汽车等障碍物的边缘分形维较大。分形维的最大优点是对噪音极不敏感,鲁棒性很高。

边缘检测的缺点是提取出边缘不仅仅是障碍物的边缘,也可能是路面的裂缝,阴影,及周围环境等等,且在越野环境下不适合。

利用颜色信息进行分割和利用边缘检测技术都可以得到障碍物的深度信息,求出任意形状物体的几何中心、距离、高度等,以便采取合适的避障方法。^[17-22]设目标障碍物的几何

中心坐标为 $C(R)=(X(R), Y(R))$, 其中 $X(R)=\frac{\sum X}{A(R)}$, $Y(R)=\frac{\sum Y}{A(R)}$ 这里 R 为分离出的障碍区域, $A(R)$ 为区域 R 内的像素点数。距离信息的获取对于不同的视觉摄像机设备要考虑其应用条件。单目摄像机机器人和障碍物之间的距离 $Y=\frac{H(K_1F-h\tan\beta)}{K_2F\tan\beta+h}$ 式中: β 为摄像机的倾

斜角, f 为焦距, H 为摄像机的安装高度, d 为成像平面的长, h 为成像平面的高, K_1 , K_2 为常量。而对于双目视觉时,需计算左右图像中匹配区域形心点之间的视差 d ,然后计算距离参数 $Y=\frac{Bf\cos(\alpha+\beta)}{d\cos\beta}$ 其中 f 为焦距, B 为两摄像机的基线宽度, α 为摄像机光轴与水平面的夹角, β 为物点与光轴的夹角。当机器人的摄像头为水平放置时,类似于人的双目获得物体深度信息过程,应满足光学几何原理,距离参数 $Y=fI/d$, f 为焦距, I 为左右两个相机光学中心的距离, d 为左右图像中匹配区域形心点之间的视差。

利用视觉传感器的这种方法得到的障碍物位置信息,只对较近的障碍物比较精确,远处障碍物的精确定位我们可以结合其它传感器来获得。

3.3利用光流场的计算实现障碍物动态检测。

物体带光学特征部位的移动投影到图像平面上就形成光流。光流表达了图像的变化,它包含了运动物体的信息,可用来确定观测者对目标的运动情况。这种方法只适应检测较近的动态障碍物,但机器人能产生迅速连续的反映。光流场的计算最初是由Horn和Schunck于1981年提出的^[23],它是一种以灰度梯度基本不变或亮度恒定的约束假设为基础的。到目前为止,各式各样的光流场计算的新的、改进算法不断涌现,其中许多是基于一阶时空梯度技术的^[24]。利用它实现障碍物的检测有两条途径。^[25-27]一种途径是基于光流的分析,模仿昆虫的视觉行为。这种方法分成两步,首先通过分析图像序列的光流场而得到机器人的自运动,然后将二维光流场的发散性作为障碍物的定性度量。D.Lambrinos^[28]等就模仿蜜蜂的视觉机制研制了基于光流场的能在走廊行走的机器人。另一种途径是建立起一种基于光流的视觉与行为模型。^[29-30]在一定环境下,机器人动作和其所引起图像变化的光流场之间存在着某中对应关系。先在标准环境下(没有障碍物的环境),建立起机器人的每个动作与其所产生的光流场 P_i 之间的关系,计算光流场与驱动电机命令之间的关系。一般采用区域匹配法对图像区域计算光流。当机器人处于工作环境时,若机器人的前方存在障碍物,那么在运动过程中视

觉所产生的光流则与标准环境下的光流场有所不同。比较标准环境下产生的光流场 P_i 与障碍物环境内的光流场 P_i (obs), 经归一化后计算均值误差, 超出误差阈值范围的被认为是障碍物潜在区。光流场法能够把光流计算得到的运动量作为一个重要的识别特征来判断运动障碍物, 缺点是当障碍物与背景图像的对比度太小, 或图像由于噪音、阴影、透明性、遮挡性等原因时^[31], 会使得计算出的光流分布不是十分可靠、精确, 同时光流场的计算也很耗时。优点是在机器人执行任务时, 不需要进行摄像机校准和三维环境重建, 利用这样的视觉与行为模型驱动, 通过光流场的计算获取障碍物的信息能够加速机器人与环境之间的信息交互, 减少机器学习的复杂度, 实时地对环境变化做出较快反应。

3.4 直接判别图像中像点的高度

这种方法是判断像点是否位于地面上, 高于或低于地面一定阈值的被认为是障碍点。只适合在比较平坦的环境下。判断像素点的高低方法主要有两个途径。途径一是对属于机器人行进道路前方的每一个像素点计算其高度信息。^[7]在双目视觉移动机器人中, 需先计算左右

图像中匹配区域型心点之间的视差 d , 则可障碍点的高度 $PH = H - \frac{Bf \sin(\alpha + \beta)}{d \cos \beta}$, 其中 H 为摄

像机安装高度, f 为焦距, B 为基线宽度, α 为摄像机光轴与水平面的夹角, β 为物点与光轴的夹角。当 $PH < TH$ (设定阈值) 时, 判为路面。当机器人的摄像机为水平放置时, 先计算出

距离深度信息, 则高度 $PH = \frac{\Delta d Y H}{f_i}$ 。

其中火星探测器勇气号和机遇号的障碍物检测就是先对图像中的每一像点进行高峰、左右视点匹配及小点过滤, 再据其像点的高度、斜坡度判别是否为障碍物, 同时建立一个障碍物的远近层次图, 当前时刻只考虑较近层次的障碍物。^[32]

途径二是基于图像平面与机器人行走地面之间的一种映射变换矩阵。^[33]先定义一实时的映射变换矩阵使地面的点与图像平面的像点一一对应。地面坐标系为 $OXYZ$, 图像坐标为二维图像 OUV , 可补充一分量 ρ 使地面坐标系和图像坐标系对应, 对于 OXY 上的一点 (X, Y) 左

右两个相机成像平面上存在相应的像点 (U', V') 和 (U'', V'') 这两个点通过实时匹配算法计算

$$\begin{bmatrix} U_l \\ V_l \\ \rho_l \end{bmatrix} = L_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} U_r \\ V_r \\ \rho_r \end{bmatrix} = R_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$$

得到映射变换矩阵 $L_{3 \times 3}, R_{3 \times 3}$ 使 $\begin{bmatrix} U_l \\ V_l \\ \rho_l \end{bmatrix} = L_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} U_r \\ V_r \\ \rho_r \end{bmatrix} = R_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}$ 。结合以上二式, 便可得到左右图像上像点的关系。如果点 (X, Y) 位于机器人行走地面上, 则通过映射计算的像点坐标与通过匹配算法验证的对应的像点坐标重合在一起, 反之, 则意味着点 (X, Y) 高于或低于机器人行走地面, 不满足事先建立的地面与成像平面之间的映射关系。

这种方法能够检测出距离5m内, 高度大于10cm的障碍物, 难点是在建立地面与成像平面之间的映射关系时达到实时性。不适应越野等地面凹凸不平的环境。

这四种中前两种方法主要是对图像进行处理后两种方法则着重对图像的分析。另外还有很多学者着眼于用对称点, 基于三维重建的重投影变换的立体视差分析, 通过立体匹配比较绝对误差, 神经网络, 基于图像纹理等方法来解决障碍物的检测。^[34-35]

4. 发展趋势

目前视觉传感器在实际应用过程中的避障还受很多方面限制。但随着图像处理技术、通讯传感器技术、电子技术等的飞速发展, 基于视觉的避障将有更大的发展空间。它的发展趋势包括下面几个方面:

- (1) 利用颜色信息区分可行区域和障碍物的移动机器人技术的研究是当今研究的热点。在道路和障碍物颜色有差异的场景中如足球机器人, 高尔夫机器人, 割草机器人等应用盛广。其技术中的一些关键问题还有待解决, 如: 在光照变化或其方向发生变化, 图像不饱和的条件下, 怎样进行直方图阈值的选择; 怎样有效消除道路阴影或非主色道路的影响等
- (2) 在对采集图像进行障碍物的自动检测原理时可更多的模仿人类和动物的视觉行为,

得到一种基于仿生学的障碍物检测原理。虽然,目前这种研究仍然处于实验室的演示阶段,但是可以预计的是随着对人类及其它动物视觉行为了解的不断深入,在这个领域的研究一定会有新的突破。

- (3) 多种视觉障碍物检测方法相结合或者把视觉信息与其它传感器信息相融合,达到更好的准确度。^[7]例如,先利用颜色信息划分出可疑障碍区,再利用可疑障碍点的高度信息判断真伪障碍物,这样可以消除只利用一种方法所带来的不足。另外在实时在用其它传感器实现多传感器信息融合达到精确的定位信息。
- (4) 在避障算法方面的研究中,目前已有学者利用前沿知识解决一些局部问题,在后阶段将更多的结合神经网络、模糊控制、遗传算法等前沿学科的最新知识,从全局的角度应用在移动机器人的视觉系统中。

5. 结论

综上所述,基于视觉的移动机器人避障技术已经取得了很多可喜的进展,研究成果令人鼓舞,但还远未达到实时及全自主的要求,在未知复杂环境下很多还只能实现半自主。随着视觉采集设备质量,计算机图像处理技术等的不不断提高,视觉传感器一定会在智能移动机器人的障碍物识别及定位及避障中扮演着重要角色。

参考文献

- (1) Williamson T, Thorpe C. A trinocular stereo system for highway obstacle detection. In: proc. of IEEE Int conf on Robotics and automation, 1999, 3: 2267-2273
- (2) Vander. W, Groen. F. Stereo-based navigation in unstructured environment [c]. Hungary: IEEE Instrumentation and Measurement Technology conference. 2001: 2038-2042
- (3) 张明路, 关柏青, 丁承君. 基于彩色视觉和模糊控制的移动机器人路径跟踪. 中国机械工程, 2002, 13(8): 636-639
- (4) She AC. Segmentation of Road Scenes Using Color and Fractal-Based Texture Classification [C]. Austin: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Texas, 11, 1994: 1026-1030
- (5) 李庆忠, 顾伟康. 移动机器人道路图像的快速分割方法. 青岛海洋大学学报. 2003, 33(5): 764-770
- (6) Mandelbaum R, Hansen M. Vision for autonomous mobility: image processing. on the VPE-200 in Proc. of IEEE Intl. symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation (CIRA) Intelligence Systems and Semiotics (ISAS) 1998: 671-676
- (7) 李庆忠, 陈显华, 顾伟康. 基于彩色立体视觉的障碍物快速检测方法. 计算机科学. 2003, 30(9): 72-75
- (8) 欧宗瑛, 袁野, 张艳珍. 基于颜色信息足球机器人视觉跟踪算法. 大连理工大学学报. 2000, 40(6): 729-732
- (9) 王志刚, 孙培峰, 罗志增. 基于视觉的足球机器人快速识别技术. 机电工程. 2003, 20(6): 53-55
- (10) 何超, 熊蓉, 戴连奎. 足球机器人视觉图像的快速识别. 中国图像图形学报. 2003, 8(3): 271-275
- (11) 李虎, 孙即祥, 邵晓芳, 毛玲. 图像边缘提取方法及展望. 计算机工程与应用. 2004, 14: 70-75
- (12) K Etamad, R Chellappa. A neural network based edge detector. Proc IJCNN, 1993: 132-137
- (13) 王艳红, 尹朝万. 障碍物信息模糊识别的实用方法. 沈阳工业大学学报. 1999, 21(2): 133-135
- (14) Pal S K, King R A. Image Description and Primitive Extraction Using Fuzzy Sets [J]. IEEE Trans on Systems Man and Cybernetics, 1983(1): 35
- (15) Cormac Herley, Zixiang Xiong. Joint space-frequency segmentation using balanced wavelet packed trees for least-cost image representation. [J] IEEE Trans On Image Processing, 1997, 6(9): 1213-1230
- (16) 周欣, 黄席樾, 樊友平, 刘涛. 汽车智能辅助驾驶系统中的单目视觉导航技术. 机器人. 2003, 4(25): 291-295
- (17) 陈尔奎, 喻俊志, 王硕, 谭民. 一种基于视觉的仿生机器鱼实时避障综合方法. 控制与决策. 2004, 19(4): 452-458
- (18) Chen G Y, Tsai W H. Vision-Based Obstacle detection and avoidance for autonomous Land Vehicle Navigation in Outdoors Roads [J] Automation in Construction. 2000, 10: 1-25
- (19) Chow Y H, Ronald C. Obstacle Avoidance of Legged Robot without 3D Reconstruction of the Surroundings [R]. Hong Kong: The Chinese University of Hong Kong. 1999
- (20) 席志红, 原新, 许辉. 基于视觉的移动机器人实时避障和导航. 哈尔滨工程大学学报. 2002, 23(5): 107-110
- (21) Sami Atiya, Gregory D, Hager, et. Real-time Vision-based Robot Localization [J] IEEE Transactions on Robotics and Automation 1999 785-794

- (22) 司秉玉, 吕宗涛, 宿国军, 徐心和. 基于视觉非完整自主车的道路避障. 2003, 24(2):107-110
- (23) Horn B.K, Schunck B.G. Determining optical flow. Artificial Intelligence, 1981, 17(1):185-203
- (24) 屈有山, 田维坚, 李英才. 基于并行隔帧差分光流场与灰度分析综合算法的运动目标检测. 光子学报. 2003, 32(2): 182-186
- (25) Giachetti A, Campani M. The Use of Optical Flow for Road Navigation [J] IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(1):34-48
- (26) M inoru A Soda, Thkayuki Nakmura, and Kohhosoda. Behavior Acquisition Via Vision-Based Robot Learning .G.Giralt and G.hirzinger(ED) Robotics Research, The Seventh International symposiums, Springer, 1996, 279-286
- (27) Ohya A, Kosaka A kak. Vision-based navigation by a mobile robot with obstacle using single camara vision and ultrasonic sensing[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1998, 14(6):969-978
- (28) D. Lambrinos. A mobile robot employing insect strategies for navigation. Robotics and Automation system. 30(2000) 39-64
- (29) 梁冰, 洪炳熔, 曙光. 一种基于光流计算的机器人视觉与行为模型. 宇航学报. 2003, 24(5):463-467
- (30) 梁冰, 洪炳熔. 自主机器人视觉与行为模型及避障研究. 电子学报. 2003, 31(12A):2197-2200
- (31) Barron J.L, Fleet D.J, Beauchem in S. Performance of optical flow techniques. [J]. International Journal of Computer Vision, 1994, 12(1):42-47
- (32) Steven B. Goldgerg, Mark W. Maimone, Larry Matthies. Stereo vision and rover navigation software for planetary exploration. In 2002 IEEE Aerospace Conference Proceedings, March 2002, Montana, USA. <http://robotics.jpl.nasa.gov/people/mwm/visnasw/>
- (33) 崔巍, 强文义, 陈兴林. 双足机器人实时障碍物检测视觉系统. 控制与决策. 2004, 19(1): 40-43
- (34) Zhang Z, Weiss R, Hanson A.R. Obstacle detection based on qualitative and quantitative 3Dreconstruction. IEEE Transactions on PAM I, 1997, 19, (1):15-26.
- (35) Mantriss, Bullock D. Vehicle detection using a hardware-implemented neural net[A]. IEEE Expert[c]. January/February. 1997, 15-21.