

文章编号: 1001-0920(2004)01-0040-04

双足机器人实时障碍检测视觉系统

崔巍, 强文义, 陈兴林

(哈尔滨工业大学 控制科学与工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 提出一种双足步行机器人的实时障碍检测视觉系统。基于图像平面与机器人行走地面之间的映射变换矩阵的唯一性准则, 判别图像中的像点是否位于地面上, 高于或低于地面的点被认为是障碍点。为减少实际行走过程中系统外部和内部参数变化对映射变换矩阵的影响, 系统加入了在线校正映射变换矩阵模块。在提取出障碍物边缘后, 通过对三维信息的简单恢复, 建立了机器人行走空间的障碍投影图。该系统计算量小, 可靠性强, 能基本满足双足步行机器人实时避障的要求。

关键词: 双足机器人; 实时障碍检测; 特征点; 映射变换矩阵

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Real time obstacle detection system for biped robot

CU I W ei, Q I A N G W en-yi, C H E N X ing-lin

(Department of Control Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China
Correspondent: CU I W ei, E-mail: cui26wei@sina.com)

Abstract: A real time obstacle detection system that uses a stereo pair of cameras but needs no 3D reconstruction of the surroundings is presented. At first, the projective transformation matrix between the image plane and the ground plane on that the biped robot walks is established. Next, planar projection stereopsis method is used to decide whether or not each point in a stereo image exists on a ground plane. In order to decrease the effects on the projective transformation matrix caused by the variety of outer or inter system parameters, an on-line adjusting module is adopted. After extraction the edge map of obstacles, a free-space map can be created by simple recovery to 3D information of obstacles. The system is simple and robust enough to make the robot avoid obstacles in time.

Key words: biped robot; real time obstacle detection; character points; projective transformation matrix

1 引言

智能机器人获取外界环境的三维信息, 主要是通过以下 3 条途径: 激光测距、声纳测距和立体视觉技术。其中基于立体视觉原理的环境重建技术, 以其低能量消耗和高可靠性的优点, 在智能机器人导航应用中扮演着重要的角色^[1]。传统的立体视觉障碍检测系统通常采用 3D 重建技术, 计算复杂, 不能满足机器人实时避障的要求。为此, 一些研究人员提出利用成像平面与机器人行走地面之间映射变换矩阵的唯一性准则, 进行障碍检测。但当映射矩阵建立起

来后, 高于或低于地面的点都不符合这种映射关系。

本文针对机器人实际行走过程中上下起伏, 随着摄像机成像平面与地面相对几何位置的不断变化, 摄像机图像坐标系与地面坐标系之间的映射关系也同时变化这一事实, 加入映射变换矩阵在线校正模块, 保证了障碍检测的精度。通过对障碍物三维信息的简单恢复, 建立了整个行走环境的障碍投影分布图, 为双足机器人自主避障策略的制定提供了有利的数据支持。

该系统的流程如图 1 所示。它主要实现以下功

收稿日期: 2002-07-25; 修回日期: 2002-12-26

作者简介: 崔巍(1975—), 男, 吉林省吉林市人, 博士生, 从事计算机视觉、模式识别等研究; 强文义(1937—), 男, 江苏无锡人, 教授, 博士生导师, 从事智能机器人、智能控制等研究。

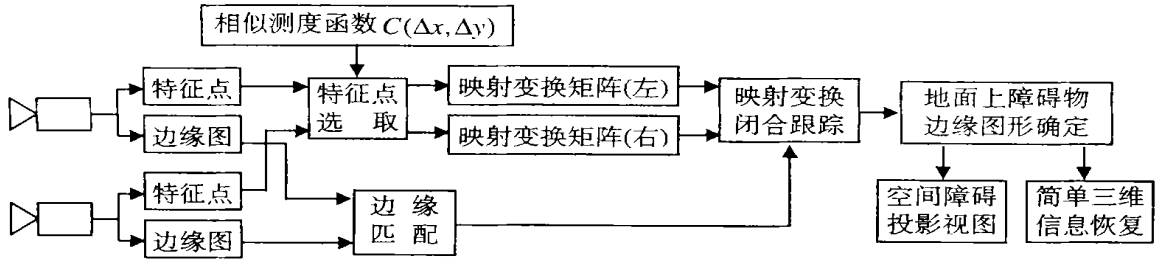


图 1 双足机器人实时障碍检测视觉系统流程

- 能:
- 1) 利用相似测度函数 $C(\Delta x, \Delta y)$ 提取机器人行走地面特征点;
 - 2) 通过最小二乘算法在线计算左右成像平面到地面的映射变换矩阵;
 - 3) 通过对边缘图像的映射变换和闭合跟踪检测出障碍物;
 - 4) 依据光学几何原理对地面上的障碍物体进行简单的三维信息恢复;
 - 5) 建立机器人行走空间的障碍投影图

2 障碍检测的几何原理分析

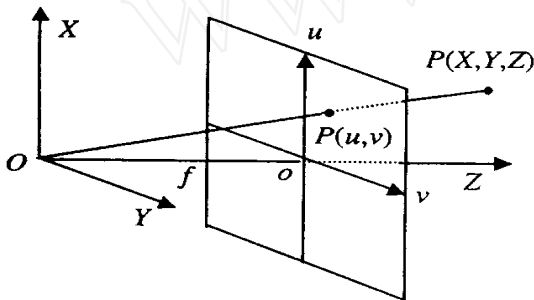


图 2 视觉坐标系

摄像机成像模型满足小孔成像原理, 如图 2 所示 其中: 原点 O 为视点, 即摄像机的光心; 成像平面 ouv 垂直于光轴 OZ , 距光心 O 的距离为摄像机的焦距 f ; 地理坐标系 $OXYZ$ 中一点 P 的 3D 坐标为 $P(X, Y, Z)$, 与它在摄像机成像平面 ouv 上的坐标 $P(u, v)$ 之间存在着 3×4 齐次映射变换矩阵 $H_{3 \times 4}$, 其关系为

$$\begin{bmatrix} \rho u \\ \rho v \\ \rho \end{bmatrix} = H_{3 \times 4} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 ρ 为任意常数

这里的两个坐标系是彼此独立的坐标系统, 因此可采用特殊的方式定义地理坐标系 $OXYZ$. 定义 OXY 坐标平面与机器人行走地面重合 这样, 由式

(1) 便可得到地平面上的一点与它在图像平面上的像点之间的映射变换关系

$$\begin{bmatrix} \rho u \\ \rho v \\ \rho \end{bmatrix} = L_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

地面的点与图像平面上的像点是一一对应的, 因此映射变换矩阵 $L_{3 \times 3}$ 为可逆矩阵^[2].

在实际系统中, 机器人头部平行放置两台摄像机, 对于地面坐标系 OXY 上的一点 (X, Y) , 左右两个像机成像平面上存在相应的像点 (u_l, v_l) 和 (u_r, v_r) , 这两个像点可通过实时匹配算法而得到 根据式(2)可得

$$\begin{bmatrix} \rho_1 u_l \\ \rho_1 v_l \\ \rho_1 \end{bmatrix} = L_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \rho_2 u_r \\ \rho_2 v_r \\ \rho_2 \end{bmatrix} = R_{3 \times 3} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

结合以上二式便可得到左右图像上像点的关系

$$\begin{bmatrix} \rho_1 u_l \\ \rho_1 v_l \\ \rho_1 \end{bmatrix} = L_{3 \times 3} R_{3 \times 3}^{-1} \begin{bmatrix} \rho_2 u_r \\ \rho_2 v_r \\ \rho_2 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

式(5) 提供了利用映射关系唯一性准则来检测机器人行走平面上的点的方法 将右侧图像的边缘图像通过式(5) 映射到左侧边缘图像, 如果点 (X, Y) 位于机器人行走平面上, 则通过映射计算的像点坐标应与通过匹配算法验证的对应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

图 3 清楚地反映了这种映射关系 地面上的一点 Q , 对应的像点分别为 w_l 和 q_r , 高于地面的点 V 在右侧像平面中的像点仍为 q_r , 而在左侧像平面中的像点为 q_l 当用 q_r 的像平面坐标代替式(5) 中的 (u_r, v_r) 时, 所得的坐标为 w_l , 并非 V 点在左侧像平面真

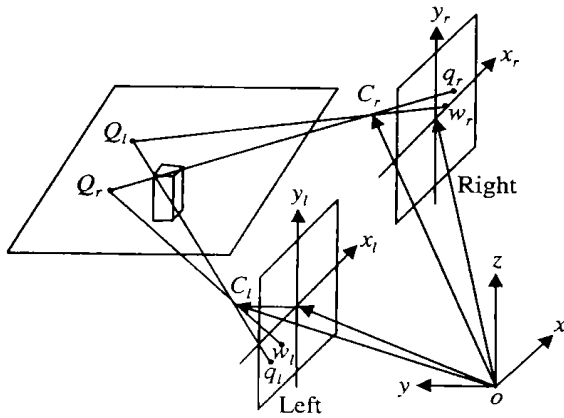


图 3 映射关系

正的像点 q_l 的坐标^[3].

3 映射变换矩阵在线校正

由于摄像机图像坐标系与地面坐标系之间的映射关系不断变化, 映射变换矩阵 $L_{3 \times 3}$ 与 $R_{3 \times 3}$ 需要不断校正. 映射变换矩阵的准确程度直接决定了障碍检测的最终结果, 因此要求 $L_{3 \times 3}$ 与 $R_{3 \times 3}$ 的实时校正算法必须准确可靠. 根据式(2) 设

$$L_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

从而得到

$$\begin{cases} \rho u = a_{11}X + a_{12}Y + a_{13}, \\ \rho v = a_{21}X + a_{22}Y + a_{23}, \\ \rho = a_{31}X + a_{32}Y + a_{33} \end{cases} \quad (7)$$

消去比例因子 ρ , 则有

$$\begin{cases} a_{11}X + a_{12}Y + a_{13} - a_{31}Xu - a_{32}Yu - a_{33}u = 0; \\ a_{21}X + a_{22}Y + a_{23} - a_{31}Xv - a_{32}Yv - a_{33}v = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将映射变换矩阵的系数组成一列向量, 即

$$B = [a_{11} \ a_{12} \ a_{13} \ a_{21} \ a_{22} \ a_{23} \ a_{31} \ a_{32} \ a_{33}], \quad (9)$$

显然, 这些系数可用下式求出:

$$QB = 0 \quad (10)$$

其中 Q 的行向量分别为

$$\begin{cases} q_l = [0 \ 0 \ 0 \ X_k \ Y_k \ 1 \ X_k v_k \ Y_k v_k \ v_k], \\ q_{l-1} = [X_k \ Y_k \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ X_k u_k \ Y_k u_k \ u_k] \end{cases} \quad (11)$$

其中: i 为偶数, $k = i/2$. 给定 6 个已知的地面点及其相应的图像点, 便可由式(10) 推导出映射变换矩阵. 由于式(10) 是齐次的, 可以任选一个系数. 如果 a_{33} 被选为一个单位值, 则 Q 的最后一列可移到式

(10) 的右边, 通过最小二乘回归法便可得到其解.

在实际工作中, 为保证两个映射变换矩阵准确, 要求计算过程中已知地面点在左右像平面上所对应的像点具有最高的匹配程度. 定义这些用来计算映射变换矩阵的图像点为特征点, 衡量特征点匹配程度的函数为相似测度函数.

设 $f_l(x, y)$ 和 $f_r(x, y)$ 分别为左右两幅图像, (x_l, y_l) 是 $f_l(x, y)$ 中的一点. 取以 (x_l, y_l) 为中心的某一邻域作为模板 T , 其大小为 $m \times n$. 在 $f_r(x, y)$ 中平移模板 T , 并假设 T 在水平方向平移 Δx , 在垂直方向平移 Δy 后, 它所覆盖的 $f_r(x, y)$ 的第 k 个子图为 S_k . 若 T 与 S_k 相同, 则它们的差为零, 否则不为零. 由此定义 T 与 S_k 之间差别的测度

$$D(T, S_k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j) - T(i, j)]^2 \quad (12)$$

当 $D(T, S_k)$ 最小时, T 与 S_k 达到最佳匹配. 式

(12) 中 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(i, j)]^2$ 与 $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)]^2$ 的值近似为常数, 故定义相似测度函数

$$C(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)T(i, j)]}{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [S_k(i, j)]^2 \right\}^{1/2} \left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(i, j)]^2 \right\}^{1/2}} \quad (13)$$

当 $C(\Delta x, \Delta y)$ 达到最大时, 左图像中的点 (x_l, y_l) 与右图像中的点 $(x_l + \Delta x, y_l + \Delta y)$ 相匹配. 步行机器人的立体视觉系统满足平行立体视觉的条件, 因此匹配过程中 Δy 可近似为零. 这样便将二维空间的搜索转化为一维空间的搜索, 大大减少了计算量. 计算映射变换矩阵按以下步骤进行:

1) 提取左右图像中满足给定相似测度函数值的特征点匹配对;

2) 利用求出的特征点匹配对计算左右图像与地面的映射变换矩阵.

4 障碍物三维信息的简单恢复及障碍物投影分布图的建立

在机器人行走过程中, 决策系统需要了解障碍物体的高度、距离等三维信息, 进而建立整个机器人行走环境的障碍物投影分布图, 以便更好地进行路径规划. 下面就高度、距离信息的恢复问题, 利用前述几何原理进行分析.

对于机器人平行立体视觉系统, 类似于人的双

目获取物体深度信息的过程, 应满足光学几何原理^[4]

$$Y = fI/d. \quad (14)$$

其中: Y 为相机到被测试点的深度距离, f 为相机焦距, I 为左右两个相机光学中心的距离, d 为被测试点在左右图像间的像点视差^[4].

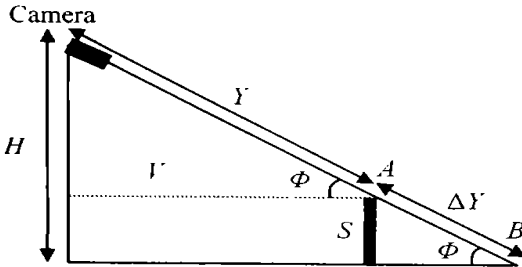


图 4 障碍物高度检测原理

如图 4 所示, 利用式 (14) 可求出障碍物 S 的顶端 A 与地面上的点 B 的深度信息 Y 与 $Y + \Delta Y$. 由第 2 节可知, 点 A 在左右图像中像点的视差 d_A 大于点 B 在左右图像中像点的视差 d_B , 其关系可表示为

$$\Delta d = d_A - d_B = \frac{fI}{Y} - \frac{fI}{Y + \Delta Y} = \frac{fI}{Y} \left[\frac{\Delta Y/Y}{1 + \Delta Y/Y} \right]. \quad (15)$$

由几何关系可知

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{S}{H - S} \Rightarrow \Delta d = \frac{fI}{Y} \left(\frac{S}{H} \right). \quad (16)$$

已知 Y 与 Δd 的值, 由式 (16) 可求出障碍物的高度信息 S . 在双足步行机器人视觉系统中, $I = 350 \text{ mm}$, $H = 1\,250 \text{ mm}$, CCD 像机的分辨率为 795×596 像素. 在机器人行走过程中, 为 Δd 设置一个域值 T . 当 $\Delta d > T$ 时, 认为这一点在空间中所对应的点为障碍物上的点. 通过最小二乘法确定初始地面映射发现, 即使无任何障碍物, 地面上某些点上视差的误差值最大可达到 1.5 个像素, 因此设 $T = 2$ 个像素. 由式 (16) 可知, 此视觉系统可检测出距离为 5 m, 高度为 10 cm 的障碍物.

当机器人行走空间中有多个不同高度的障碍物时, 利用图 5 所示的方法将障碍物影射到地面上, 其影射区域起始于障碍物与地面的交界线, 终止于障碍物最高边缘在地面上的投影线, 此间的覆盖区域定义为阴影区.

机器人行走空间障碍物的俯视投影平面如图 6 所示. 对于障碍物上一特征点 P , 定义 L 为机器人到障碍物之间的直线距离, 它等于机器人摄像机坐标系原点在地平面上的投影点与 P 点在地面上

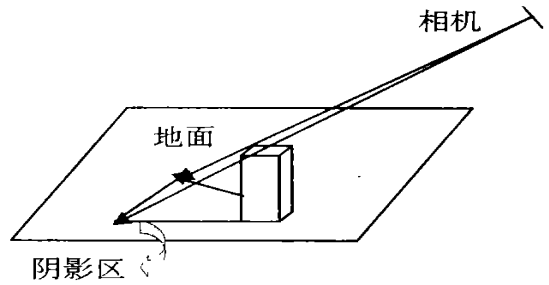


图 5 障碍物阴影区

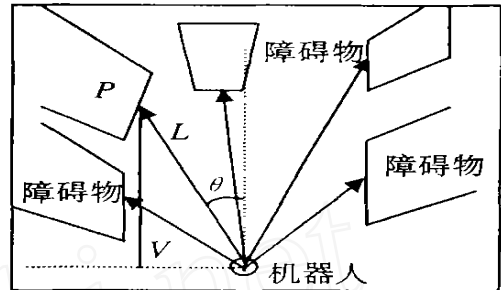


图 6 机器人行走空间障碍物投影

投影点之间的直线距离 V 与图 4 中定义相同, θ 定义为机器人前进方向与障碍物方位的夹角. 由图 6 可以看出, L 与 V 和 θ 之间存在几何关系

$$L = V / \cos(\theta), \quad (17)$$

由图 4 所示的几何原理可求出

$$V = \sqrt{Y^2 - (H - S)^2}. \quad (18)$$

式 (18) 代入 (17), 得

$$L = \sqrt{Y^2 - (H - S)^2} / \cos(\theta). \quad (19)$$

对于机器人行走空间中的每一个障碍物 O_i , 都能建立其特征向量

$$C(O_i) = \{L(O_i), \theta(O_i), S(O_i)\}. \quad (20)$$

其中 $L(O_i)$, $\theta(O_i)$, $S(O_i)$ 分别代表障碍物 O_i 在投影图中的直线距离、偏角及其粗略高度值. 在机器人自主行走时, 实时更新行走空间的障碍物投影图, 为机器人障碍规避及路径规划提供障碍物的方位、高度等三维信息.

5 结 论

本文设计了双足步行机器人的双目立体实时避障视觉系统. 与利用视觉图像实施避障的大部分系统相比, 本系统抛弃了传统的立体匹配、3D 重建、视差图像分析的 3 个固定步骤, 而是基于摄像机成像平面与机器人行走平面映射关系唯一性的准则, 判断像点是否代表地面上的点. 其优点是算法简洁, 可靠性强.

(下转第 48 页)

表中数据的水平,但由于变异的作用,进一步下降的趋势被抑制 另一方面,由于OSC独立地重组各基因座上的等位基因,在一定程度上破坏了优良积木块的作用,从而难以产生有效的搜索

5 结 论

本文分析了广义交叉算子的遗传漂移现象,证明了SDC,ADC,USC等算子不会导致基因级的遗传漂移,但OSC可引起强烈的遗传漂移,其程度随重组规模的增加而加剧 仿真优化实验表明,OSC的遗传漂移不能提高局部搜索速度,仅产生降低种群多样性的消极效果

提高优良个体的选择概率有可能抵消OSC所引起的基因漂移,但增加了选择自身的遗传漂移 OSC对独立的基因座进行重组,不同基因座的多数基因频率相互独立,对每个基因座采用不同的变异概率并自适应调整变异概率,可能是克服基因漂移的有效方法,但这种措施并不能减少OSC对优良积木块的破坏性 因此,OSC所引起的遗传漂移和破坏力对进化搜索的不利影响是难以克服的

参考文献(References):

- [1] Rechenberg I. *Evolutionsstrategie 94* [M]. Stuttgart: Frommann-Holzboog, 1994

- [2] Beyer H G. Toward a theory of evolution strategies: On the benefits of sex — The $(\mu/\mu, \lambda)$ theory [J]. *Evolutionary Computation*, 1995, 3(1): 81-111.
- [3] 章珂, 刘贵忠. 交叉位置非等概率选取的遗传算法[J]. *信息与控制*, 1997, 26(1): 53-60
(Zhang Ke, Liu Gui-zhong. Selecting crossover site with unequal probability in genetic algorithms [J]. *Information and Control*, 1997, 26(1): 53-60.)
- [4] 张文修, 梁怡. *遗传算法的数学基础* [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000
- [5] Mahfoud S W. Genetic drift in sharing methods [A]. *Proc of the First IEEE Conf on Evolutionary Computation* [C]. Piscataway: IEEE Service Center, 1994 67-72
- [6] Schmitt L M. Theory of genetic algorithms [J]. *Theoretical Computer Science*, 2001, 259(1-2): 1-61.
- [7] Eiben A E. Multiparent recombination [A]. *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators* [C]. New York: Institute of Physics Publishing, 2000 289-307.
- [8] Back T. *Evolutionary Algorithms in Theory and Practice* [M]. New York: Oxford University Press, 1996

(上接第39页)

参考文献(References):

- [1] He Xin-gui, Liang Jiu-zhen. Process neural network [A]. *Proc of Conf on Intelligent Information Processing* [C]. Beijing, 2000 143-146
- [2] 何新贵, 梁久祯, 许少华. 过程神经网络的训练及其应用[J]. *中国工程科学*, 2001, 3(4): 31-35
(He X G, Liang J Z, Xu S H. Learning for process neural networks and its applications [J]. *Engineering*

Science, 2001, 3(4): 31-35.)

- [3] McCulloch W S, Pitts W H. A logical calculus of the ideas immanent in neuron activity [J]. *Bulletin Mathematical Biophysics*, 1943, 5(1): 115-133
- [4] 柳重堪. *正交函数及其应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 1982 7-16
- [5] 韩捷, 张瑞林. *旋转机械故障机理及诊断技术* [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997 91-114

(上接第43页)

为在减少计算量的同时,保证机器人实际行走过程中障碍检测的准确性,根据地面坐标系与摄像机坐标系之间相对位姿的不断变化,系统加入了在线实时校正映射变换矩阵模块和空间障碍物投影图模块,减少了外部参数和系统内部参数变化对障碍检测的影响,增加了系统运行的可靠性

参考文献(References):

- [1] 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.

- [2] Zheng Y, Jones D G, Billings S A, et al. SW ITCJER: A stereo algorithm for ground plane obstacle detection [J]. *Image and Vision Computing*, 1990, 28(8): 57-62
- [3] Badal S, Ravela S. A practical obstacle detection and avoidance system [A]. *Proc of the Second IEEE Workshop* [C]. 1994 97-104
- [4] 高文, 陈熙霖. *计算机视觉* [M]. 北京: 清华大学出版社, 1999