# 未知环境下移动机器人单目视觉导航算法

战 强 吴 佳

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

**摘 要**: 提出了一种未知环境下移动机器人单目视觉导航算法,算法包括障碍物检测、单目视觉测距和局部路径规划3部分. 为减小光照等环境因素对基于特征的障碍物检测的影响,对彩色图像在HSI颜色空间中用基于像素的直方图比较进行分割,获取障碍物轮廓序列的图像坐标点集. 在单目视觉测距中,通过几何关系推导法建立图像坐标系和机器人坐标系间的变换关系,进而实现由障碍物图像位置计算其与机器人间的实际距离. 局部路径规划对摄像机梯形视场区域转换后的矩形区域建立模型划分栅格,由障碍物轮廓序列图像坐标和单目视觉测距计算构建障碍物栅格图,并用提出的栅格搜索算法搜索障碍物栅格图,得到机器人安全行驶路径. 实际环境中进行的实验结果表明,算法能有效减小反光、阴影等的影响,在未知环境中正确规划出机器人局部可行路径实现导航.

**关 键 词**: 障碍物检测; 单目视觉; 测距; 路径规划; 未知环境

**中图分类号**: TP 242. 6

**文献标识码**: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2008)06-0613-05

## Monocular vision-based navigation algorithm for mobile robots in unknown environments

Zhan Qiang Wu Jia

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A monocular vision-based navigation algorithm for mobile robots moving in unknown environments was presented, which consists of obstacle detection, monocular vision based distance measurement and local path planning. In order to decrease the impact of lighting disturbance on obstacle detection, pixel-based image segmentation in HSI color space was used to get the set of the image coordinates of the obstacle boundaries by comparing histograms of current image window and reference image window. In order to realize distance measuring between obstacles and a robot, a transformation equation between the vision coordinates and the robot coordinates was deduced by geometrical reasoning. Grid map was used to model the rectangular area transformed from the trapezoidal field of view of the camera and grids with obstacles were marked according to the obstacle boundaries and the measured distance. With a new searching method a safe local path for the robot was found by searching the grid map. Experiments done in real environments show that less sensitive to highlight and shading, the proposed algorithm could correctly plan a safe local path to navigate the robot.

Key words: obstacle detection; monocular vision; distance measurement; path planning; unknown environment

自主导航是自主移动机器人必须具备的功能,而障碍物检测是其中一个重要组成部分. 多数自主移动机器人利用从传感器获得的距离数据进行障碍物检测,这类传感器主要包括超声波传感器、激光测距仪、雷达、立体视觉、光流和深度图等. 用单目视觉检测障碍物则通常需要依靠环境

**收稿日期**: 2007-07-13

**基金项目**: 国家863计划资助项目(2007AA04Z252);国家自然科学基金资助项目(50705003)

**作者简介**: 战 强(1972-),男,山东青岛人,副教授, qzhan@buaa.edu.cn.

的外观特征来实现. 文献[1-3]提出的单目视觉障碍物检测方法受环境因素的影响很大,限制了它们只能在特定的环境和条件下才能有效地实现障碍物的检测. 文献[1]的环境是人工环境,人为地消除了许多自然环境中存在的干扰因素,如统一颜色、消除阴影、地面无纹理等. 文献[3]的方法类似运动检测,通过两幅连续图像的差来检测障碍物. 同时,当道路的纹理较多时这种方法就失效了. 目前单目视觉系统一般采用对应点标定法来获取图像深度信息,若标定过程中点的世界坐标对应的图像坐标不够精确,转换结果会因此而波动. 同时,标定是在摄像机的高度和各角度都已确定的情况下进行,任意一个参数的变化都将导致重新标定,因此只适用于摄像机位置固定的情况. 文献[4]提出的单目视觉测距方法要求摄像机的全部视场与地面相交,但是这种拍摄方式并不是普遍存在的. 文献[5]提出的方法是针对路面有车道线或平行线的情况. 路径规划是移动机器人导航最基本的环节之一,它是按照任务要求搜索一条从起始状态到目标状态的最优或近似最优的无碰撞路径,主要有全局路径规划和局部路径规划两类[6-8]. 由于未知环境中的单目视觉导航的机器人只有摄像机视场范围内的局部环境信息,所以只能进行局部路径规划.

本文的主要任务是,给出一种受环境干扰因素影响较小的障碍物检测方法,用移动中的单摄像机测量距离得到障碍物实际位置,并在此基础上进行实时局部路径规划,实现机器人在未知的环境中安全行驶.

## 1 单目视觉导航算法原理

本文提出的未知环境下单目视觉导航算法包括障碍物检测、单目视觉测距和局部路径规划3部分. 首先,需对环境做适当假设:①机器人初始位置处没有障碍物;②地面平整;③没有悬挂障碍物;④障碍物与地面的交界线在图像中可见. 这些假设对于普通室内和室外的未知环境是合理的.

假设②和假设③构成了"表面齐平约束",假设①和假设④与表面齐平约束共同暗示,从图像底部自下向上进行检测处理,最先获得的障碍是距离机器人最近障碍物. 同时,这几点假设也为用单目视觉测量障碍和摄像机间距离提供了前提条件.

### 1.1 障碍物检测

障碍物检测是对拍摄的彩色图像进行图像处理提取障碍物,并获得其在图像中的位置信息. 根据环境假设暗示的条件,用障碍物轮廓线,即障碍物与地面交线,来代表障碍物在图像中的位置. 它将图像分成具有不同意义的部分,图像中位于轮廓线上方部分代表了障碍物区域或不可行驶区域,位于轮廓线下方部分则代表可行驶区域.

基于以下原因,算法在HSI空间处理彩色图像:①目前彩色图像使用的颜色模型,多数是面向硬件应用的,与人类感知颜色的规律相差甚远. RGB颜色模型是其中应用最广泛的一种,这种模型中,各颜色特征是高度相关的,并且无法用两种颜色在RGB空间中的距离来区别它们的相似程度. ②HSI颜色模型建立在人类对颜色感知的基础上,更符合人类的视觉规律[9-11]. 它将彩色图像所包含的信息分成了强度成分($I$)和颜色成分($H, S$),转换公式如下[12]:

$$\left.\begin{aligned} H &= \begin{cases} \theta & B \le G \\ 360^\circ - \theta & B > G \end{cases} \\ \theta &= \arccos\left\{\frac{\frac{1}{2}[(R-G)+(R-B)]}{[(R-G)^2+(R-G)(G-B)]^{1/2}}\right\} \\ S &= 1 - \frac{3}{R+G+B}[\min(R,G,B)] \\ I &= \frac{1}{3}(R+G+B) \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

独立出来的颜色成分受光照变化影响很小. 同时,根据转换公式(1),可以推得$H$分量具备以下特征:

1) 对RGB三分量的等比例变化具有不变性:

$$H(kR, kG, kB) = H(R, G, B) \tag{2}$$

2) 对RGB三分量的等量偏移具有不变性:

$$H(R+k, G+k, B+k) = H(R, G, B) \tag{3}$$

未知环境中光照情况不可预测,而光照条件对于视觉图像处理包括本算法的障碍物检测来说是关键影响因素之一. HSI颜色模型分量具备的特点,使得在此空间进行图像处理的算法受光照的影响大大减小,这为正确地从环境中检测出障碍物提供了保证.

障碍物检测的主要目的是要获得障碍物与地面的交线,并得到交线的图像坐标点集,具体步骤为:①对拍摄的彩色图像进行5×5高斯滤波,降低噪声的影响;②用公式(1)将图像从RGB颜色模型转换到HS颜色模型;③分别统计参考窗口和当前窗口$H$和$S$两分量的直方图;④比较当前窗口与参考窗口的直方图,判断是否存在障碍物,若存在则获取其在图像中的坐标.

参考窗口和当前窗口直方图比较计算公式为

$$\left.\begin{aligned} D_1 &= \sum_{v=0}^{255} | h_c(v) - h_b(v) | \\ D_2 &= \sum_{v=0}^{255} | s_c(v) - s_b(v) | \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

其中, $v$值为任意 $H(S)$分量值; $h_c$ ($s_c$)代表当前窗口直方图; $h_b$ ($s_b$)代表参考窗口直方图. 当 $D_1 + D_2$ 大于设定值时,认为当前窗口内存在障碍物. $D_1 + D_2$ 值的设定由窗口大小决定.

由于彩色图像在亮度较低即 $I$值较小时噪声较严重,同时 $H$分量值在饱和度 $S$较低时其行为是随机的. 计算用于比较的直方图时,只统计大于设定最小 $I$值和 $S$值的 $H$值和 $S$值像素数目. 处理结果会随设定的最小 $I$值和 $S$值的不同而变化.

图 1所示为原始图像及窗口示意图. 宽度和高度分别为 $w_1$ 和图像高度的竖直条由左向右以像素增量扫描图像,大小为 $w_1 \times h_1$ 的窗口在竖直条内由底至上以像素增量扫描图像,最佳的 $w_1$ 和 $h_1$ 的值可通过尝试实验的方法获得. 根据两窗口的直方图比较结果,每个竖直条可获得一个障碍物高度数据,扫描完整幅图像得到代表图像中障碍物高度的序列,即轮廓线图像坐标点集. 由于水平、竖直方向扫描以像素为增量进行,得到的障碍物的高度序列达到单像素精度.

图 2为对图 1进行处理后获得的障碍物轮廓线,它较准确地反应了障碍物与地面的交线. 图像中位于轮廓线上方的部分是不可行区域 (障碍物桌子),轮廓线下方的部分为可行区域 (地面).

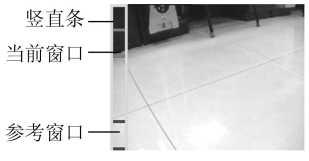



图 1　原始图像及窗口示意图

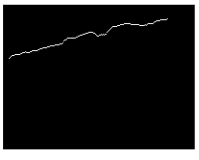


图 2　障碍物轮廓线

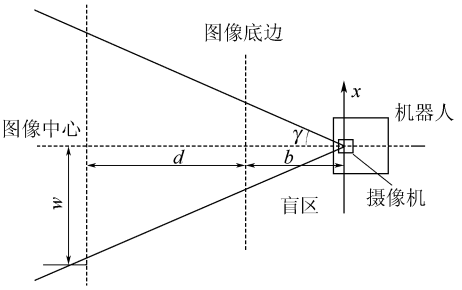
## 1.2　单目视觉测距

本节中用摄像机模型几何关系推导法给出图像坐标与机器人坐标的转换关系,实现单目视觉计算距离.

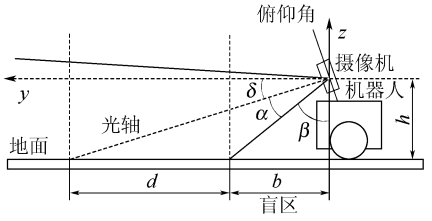
如图 3所示,摄像机以一定的俯仰角度安装在机器人上拍摄其前方图像,光轴与地面保持相交. 从图中得出 4个重要的几何关系:

$$\left.\begin{aligned} &\alpha + \beta + \delta = 90° \\ &\tan\beta = b/h \\ &\tan(\alpha + \beta) = (b + d)/h \\ &\tan\gamma = w/(b + d) \end{aligned}\right\} \quad (5)$$

其中, $h$直接通过测量获得; $b$, $d$, $w$ 通过在地面上放置有精确尺寸标注的方格纸测量.




a　水平视场角视图

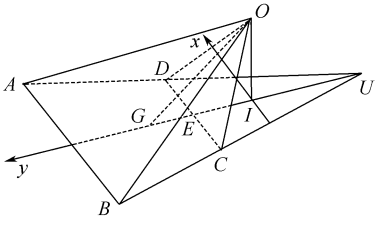



b　垂直视场角视图

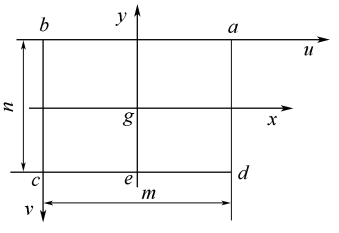
2α—垂直视场角; 2γ—水平视场角; δ—摄像机俯仰角; $b$—摄像机前方盲区长度; $d$—摄像机光轴与地面的焦点处沿 $y$轴视场的长度; $h$—摄像机的安装高度; 2$w$—摄像机光轴与地面焦点处平行 $x$轴视场宽度.

图 3　摄像机视场示意图

根据小孔成像模型,把单目视觉系统简化为摄像机投影模型,如图 4所示.




a　投影关系




b　图像平面

$O$—摄像机镜头光心; $G$—光轴与地面的交点; $I$—$O$ 点在地面的垂直投影; $ABCD$—摄像机拍摄到的梯形区域; 线段 $EI$对应图 3中的 $b$; 图 4a中的 $ABCDE$与 4b图中的 $abcde$对应; $m$, $n$—图像的宽和高,即图像分辨率为 $m \times n$; $x$-$y$坐标系—机器人坐标系; $u$-$v$坐标系—图像坐标系.

图 4　摄像机投影几何模型

图像每列像素对应的垂直视场角度为 2α/($n$ - 1),每行像素对应的水平视场角度为 2γ/($m$ - 1). 由此可得,对于图像中任意点像素

$(u, v)$,其沿 $y$轴的距离由公式 (6)计算:

$$y = h\tan(\beta + 2\alpha(n - 1 - v)/(n - 1)) \quad (6)$$

其沿 $x$轴的长度由公式 (7)计算得到:

$$x = y\tan(\gamma(2u - m + 1)/(m - 1)) \quad (7)$$

其中,$\alpha, \beta, \gamma$由公式 (5)计算; $m \times n$是图像分辨率. 由于机器人坐标系原点建立在机器人上,因此由公式 (7)计算出的 $x$值有正负之分.

式 (6)和式 (7)即为图像坐标与机器人坐标间的转换关系. 通过障碍物检测可获得障碍物在图像中的位置,即轮廓线图像坐标 $\{(u, v)\}$,根据式 (6)、式 (7)可得到它们在机器人坐标系中对应坐标 $\{(x, y)\}$. $y$值即为障碍物与机器人的距离, $x$值则为障碍物在 $x$-$y$坐标系中与机器人沿 $x$轴向的相对位置. 这样,从 $(u, v)$通过转换计算得到 $(x, y)$,实现了用单目视觉测量距离.

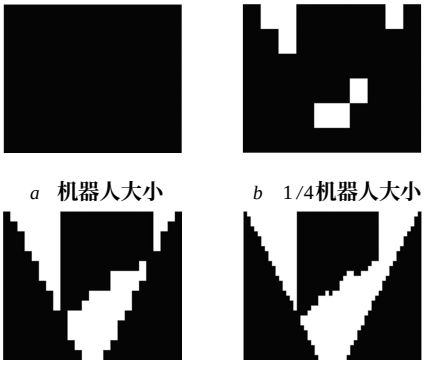
### 1.3 局部路径规划

摄像机拍摄的图像显示了机器人即将活动的区域,此区域的平面大小以及障碍物在此区域中的位置信息可由前两节给出的方法得到,即通过障碍物检测方法检测环境中的障碍物并取得其在图像坐标系中的位置;通过单目视觉测距的方法计算出活动区域的大小,将障碍物的图像坐标位置换算到机器人坐标系中.

考虑机器人活动的平面状况,用栅格法为图像对应的实际区域建立模型. 将此区域划分栅格,用序号法为其编号. 根据障碍物在机器人坐标系中的位置设置栅格值,即将存在障碍物的栅格设其值为 1,没有障碍物的栅格设其值为 0,构成障碍物栅格图.

在对摄像机拍摄的机器人前方区域划分栅格时,由于摄像机前方视场为梯形区域,若直接对此梯形区域划分栅格,会大大增加计算量,因此首先将梯形区域转换为矩形区域,对此矩形区域划分栅格. 具体的方法是以梯形区域的高和较长底边为矩形区域的相邻两边得到矩形区域,并以某一栅格粒度划分矩形区域. 由于矩形区域包含了摄像机视场不可见的部分,将摄像机不可见区域在矩形区域中相应的栅格的值设置为 1.

栅格划分时栅格粒度的大小是影响搜索结果的一个关键因素. 若栅格粒度设定过大,则障碍物栅格图中障碍物的面积比实际大,最终导致机器人停滞. 图 5是对图 1所拍摄环境的 4幅不同栅格粒度大小的障碍物栅格图. 可以看到,图 5a所示的障碍物栅格图显示机器人不能向任何方向行走,这与实际环境是不相符的;图 5b所示的障碍物栅格图也与实际不符;图 5c基本与实际相符,但存在局部误差;图 5d所示的小栅格障碍物栅格图则较好地反应了实际情况. 栅格粒度的确定与摄像机视场大小和机器人大小有关,由具体情况而定.



a 机器人大小 b 1/4机器人大小

c 1/25机器人大小 d 1/100机器人大小

图 5 障碍物栅格图

栅格法多用于全局路径规划,目的是在如图 5的障碍物栅格图中规划出从起点到终点的无碰撞路径. 目前有多种搜索算法可以获得最优路径. 对于本算法的应用环境和目的,机器人的起点为其当前所在位置,而终点是未知的,所以不能采用已有的栅格搜索算法来获取路径. 因此,针对具体问题,提出了新的栅格搜索方法.

设障碍物轮廓高度序列为 $h(u)$,图像分辨率为 $m \times n$,定义 $s$为判断搜索方向的标志:

$$s = \frac{1}{n/2}\left(\sum_{u=0}^{n/2-1} h(u) - \sum_{u=n/2}^{n-1} h(u)\right) \quad (8)$$

若 $s > 0$,栅格搜索方向选取右上;若 $s < 0$,栅格搜索方向选取左上.

从障碍物栅格图底部开始按照符合条件的搜索方向搜索,搜索的起始位置为

$$s_t = -x_0/g_w \quad (9)$$

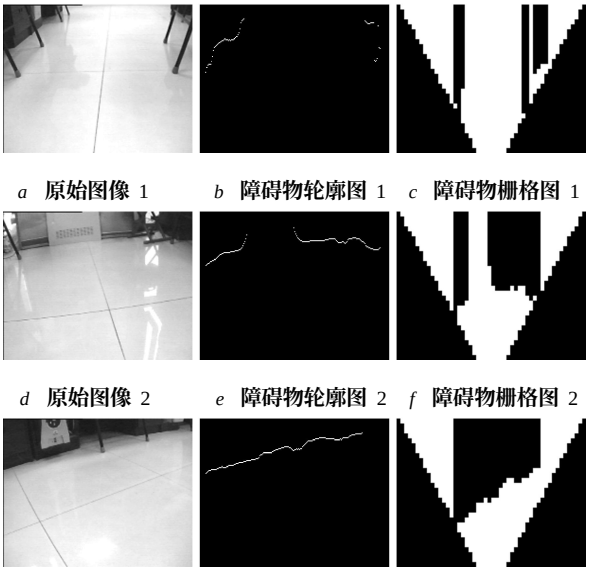
其中, $g_w$为栅格宽度; $x_0$为矩形区域左上角顶点横坐标.

当栅格大小小于机器人的平面尺寸时,搜索栅格图的同时需要判断连续无障碍栅格的总体宽度是否大于机器人的本体宽度,以确保机器人能安全通过. 搜索完整幅障碍物栅格图,可得到一个栅格序号的序列,这个序列即为机器人规划出的路径.

## 2 实验结果及分析

在实验室内部的实际环境中,利用单摄像机分别对 3种不同类型区域拍摄图像,对算法进行实验. 算法采用 VC++6.0编写. 选取的实验数据为:图像分辨率为 200×150;扫描窗口大小为

15 ×30,障碍物判断阈值为 350;最小亮度为 9;最小饱和度为 25; $b$ = 37 cm; $d$ = 35 cm; $w$ = 37/2 cm; $h$ = 39 cm;机器人平面尺寸为 55 cm ×40 cm;栅格大小为 1/10机器人;原始图像及其处理后的障碍物轮廓图、障碍物栅格图如图 6所示,规划出的可行路径如图 7所示.

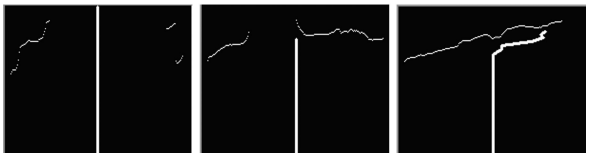


*a* 原始图像 1　*b* 障碍物轮廓图 1　*c* 障碍物栅格图 1

*d* 原始图像 2　*e* 障碍物轮廓图 2　*f* 障碍物栅格图 2

*g* 原始图像 3　*h* 障碍物轮廓图 3　*i* 障碍物栅格图 3

图 6　实验结果图



*a* 图像 1　*b* 图像 2　*c* 图像 3

图 7　局部路径规划图

在 3幅原始彩色图像中,不同程度地存在阴影和反光,图 6d中地面的反光较为严重,由于在 HSI空间中利用 $H$分量特征处理图像, $H$的特点使得算法没有受阴影和反光影响而错误地将它们判断为障碍物,较好地检测出障碍物.用小栅格划分空间,得到符合实际的障碍物栅格图,搜索后得到的路径显示说明,规划的局部路径与实际可行走的路径是相符的.

## 3　结 束 语

本文对未知环境中使用单目视觉为移动机器人导航进行了研究,提出了一种有效的算法.算法利用颜色模型 HSI中 $H$分量的特点,在 HSI中进行基于像素的图像分割来检测障碍物,将图像区域分为障碍物区域和可行驶区域;对摄像机建立投影模型,确定图像坐标和机器人坐标的转换关系,实现单目视觉测量距离;构建障碍物栅格图并搜索此图进行局部路径规划;最后在实际环境中实验并验证了算法的有效性.

## 参考文献 (References)


[1] Ulrich I, Nourbakhsh I. Appearance-based obstacle detection with monocular color vision[C]//Proceedings of the AAAI National Conference on Artificial Intelligence. Menlo Park, California: AAAI Press, 2000: 866 - 871

[2] Bergquist U. Color vision and hue for autonomous vehicle guidance [D]. Sweden: Linkoping University, 1999

[3] DeSouza G N, Kak A C. Vision for mobile robot navigation a survey [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24 (2): 237 - 267

[4] Cheng G, Zelinsky A. Real-time visual behaviors for navigating a mobile robot [C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 1996, 2: 973 - 980

[5] 郭磊,徐友春,李克强,等. 基于单目视觉的实时测距方法研究 [J]. 中国图像图形学报, 2006, 11(1): 74 - 81
Guo Lei, Xu Youchun, Li Keqiang, et al. Study on real-time distance detection based on monocular vision technique [J]. Journal of Image and Graphics, 2006, 11(1): 74 - 81 (in Chinese)

[6] Elemenreich W, Schneider L, Kimer R. A robust certainty grid algorithm for robotic vision [C]//IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems. Piscataway, NJ: IEEE, 2002: 25 - 30

[7] 薄喜柱,洪炳熔. 动态环境下多移动机器人路径规划的一种新方法 [J]. 机器人, 2001, 23 (5): 407 - 410
Bo Xizhu, Hong Bingrong. A method of collision avoidance planning for muti-robots in dynamic environment[J]. Robot, 2001, 23(5): 407 - 410 (in Chinese)

[8] 于红斌,李孝安. 基于栅格法的机器人快速路径规划 [J]. 微电子学与计算机, 2005, 22(6): 98 - 100
Yu Hongbin, Li Xiaoan. Fast path planning based on grid model of robot [J]. Microelectronics and Computer, 2005, 22(6): 98 - 100 (in Chinese)

[9] Wesolkowski S, Tominaga S, Donyr D. Shading and highlight invariant color image segmentation using the MPC algorithm [C]//Marcu G G. Proceedings of SPIE, the International Society for Optical Engineering. Bellingham, WA: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2000, 4300: 229 - 240

[10] Klinker G J, Shafer S A, Kanade T. A physical approach to color image understanding [J]. International Journal of Computer Vision, 1990, 4: 7 - 38

[11] Skarbek W, Koschan A. Color image segmentation: A survey [R/OL]. Berlin: Technical University of Berlin, 1994[2007-07-03]. http://imaging.utk.edu/~koschan/paper/coseg.pdf

[12] 冈萨雷斯. 数字图像处理 [M]. 第 2版. 北京:电子工业出版社, 2003: 235 - 237
Gonzalez R C. Digital image processing [M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronic Industry, 2003: 235 - 237 (in Chinese)


(责任编辑:文丽芳)