

# 基于Canny算子边缘特征匹配的双目深度测量

## Binocular Depth Measurement Based on Edge Feature Matching of Canny Operator

韩云生 刘国栋 刘光宇 (江南大学 通信与控制工程学院 江苏 无锡 214122)

**摘要:** 为解决当前类人足球比赛场地上基于球心匹配的足球深度测量算法低精确度的问题,提出了一种采用Canny算子提取稀疏足球边缘作为立体匹配特征的深度测量方法。该方法在边缘上均匀抽取像素点作为待匹配点,使用“对应局部遍历匹配”法进行立体匹配,平均匹配点对应的图像深度作为足球深度。结果误差控制在比赛允许的范围之内,运用到比赛中绩效显著,满足比赛实时和精度要求。

**关键词:** Canny算子 匹配 深度测量 立体视觉 边缘检测

### 1 引言

模仿人类利用双眼感知物体距离的方法,运用两台摄像机对同一景物从不同位置或角度拍摄成像,并根据成像视差来确定物体的深度信息,以实现物体三维信息的感知,这就是双目视觉<sup>[1]</sup>。深度计算,即深度测量是该领域研究的热点。

本文主要研究在类人机器人足球比赛中如何根据机器人双目采集的图像恢复足球的深度信息,为决策环节提供依据。深度测量实现的关键技术在于特征提取和特征匹配,实际考察比赛场景,对于足球这样的目标物体,要恢复它的深度,第一步就是要在足球上提取特征,很容易想到的就是提取出左右图像中足球圆心,省去特征匹配步骤直接利用圆心像素点对的坐标进行计算<sup>[2]</sup>。笔者对这一算法进行了仿真实验,发现结果误差较大,分析算法,发现算法的纰漏在于:其一,研究摄像机的拍摄模型可以看出左右图像上的圆心并非准确对应足球上的同一物理点,两个圆心所对应的物理点之间偏离程度和双目摄像机的基线距离、光轴夹角等有关。其二,利用现有的分割技术无法实现足球的完整准确分割,从而无法精确地计算出圆心坐标,这样就谈不上深度计算的精确度了。在平行双目摄像系统中,上述算法仅当窄基线、目标物在两个摄像机之间正前方时才能获得相对准确的深度信息。鉴于这样的局限性,笔者决定寻找图像足球的其

他特征进行匹配,例如角点或者边缘。经过试验决定采用Canny算子检测出的边缘点作为匹配特征。在特征匹配算法上采用“对应局部遍历匹配”的区域相关模板匹配算法。

### 2 边缘特征提取

#### 2.1 足球分割

这一阶段的目的是通过HSI阈值法来实现图像上足球的分割,近似求出左右圆的圆心 $O_1$ 、 $O_2$ 和半径 $R_1$ 、 $R_2$ 。

在视觉系统中常用的图像分割方法主要有区域增长法和阈值法两大类。区域增长法由于采用递归方式,所以速度较慢,因而在实时较高的系统中应用逐渐减少。基于此,本课题中使用阈值法分割图像。预先分析彩色图像上足球区域像素值的直方图来确定分割阈值。由于整个系统中,目标图像的H、S、I值保持相对恒定,故阈值可以预先静态采集获得。如图1所示,在HSI颜色空间中,每个颜色类由6个阈值描述,每一维两个阈值,分别表示该颜色类在该维中的最大值和最小值,3个色彩向量(H, S, I)就在色彩空间中确定了一个长方体<sup>[3]</sup>。当一个待识别的像素在色彩空间中的位置落在这个长方体中时,就认为该像素属于目标区域。最后利用圆本身的形态特征把整个图像区域中的非圆上干扰点剔除,利用重心法求解出图像上足

收稿时间:2009-03-05

球区域的圆心和半径，如图 2(a)所示，圆边缘标注线内部分即为分割出来足球。

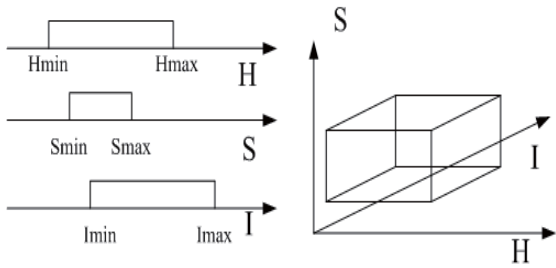


图 1 足球 HIS 阈值空间

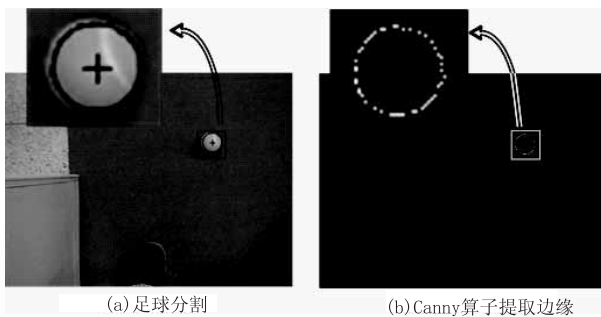


图 2 足球分割和边缘提取

2.2 Canny 边缘检测算子<sup>[4]</sup>

本节首先利用 Canny 算子检测出图像上足球区域圆的细致单像素点边缘，再根据上节分割中求出的近似圆心和半径就可以在圆上找出均匀找出 8 个点作为待匹配的特征点。

Canny 边缘检测算子的目标是找到一个最优的边缘检测算法，下面是最优化的性能指标：

信噪比准则，既不漏检真实边缘，也不把非边缘点作为边缘点检出，使输出的信噪比最大。信噪比的数学表达式：

$$SNR = \frac{\left| \int_{-W}^{+W} G(-x)f(x)dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-W}^{+W} f^2(x)dx}} \quad (1)$$

其中， $f(x)$  是边界  $[-W,W]$  上的滤波器脉冲响应， $G(-x)$  代表边缘函数， $n_0$  是高斯噪声的均方根。若信噪比越大，则边缘提取质量越好。

定位精度准则，即检测出的边缘位置要和图像上的真正边缘的位置尽量接近。定位精度的数学表达

式为：

$$Localization = \frac{\left| \int_{-W}^{+W} G'(-x)f'(x)dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-W}^{+W} f'^2(-x)dx}} \quad (2)$$

其中， $G'(-x)$  和  $f'(x)$  分别表示和  $G(-x)$  和  $f(x)$  的一阶导数，Localization 越大，说明定位越准确。

单边边缘响应准则，即单个边缘产生的多个响应的概率要低，虚假边缘响应应得到最大抑制。 $f(x)$  对噪声的响应中，两个相邻最大值间的距离为  $x_{max}(f)$ ，的零交叉点平均距离为  $x_{zc}(f)$ ，两者间的关系是：

$$x_{max}(f) = 2x_{zc}(f) = 2\pi \left( \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x)dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x)dx} \right)^{1/2} = kW \quad (3)$$

若满足此准则，就能保证单边缘只有一个响应。

Canny 发现这个问题的解可以由高斯函数的一阶导数去逼近。对于二维图像应用以上准则，可利用二维高斯函数  $G$  在方向  $\vec{n}$  的一阶导数  $G_n$  卷积图像  $I$  来提取边缘。

Canny 算法步骤如下：

用高斯滤波器平滑图像。Canny 算法使用的二维高斯函为：

$$H(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (4)$$

平滑后图像为：

$$G(x,y) = I(x,y) * H(x,y) \quad (5)$$

用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向。一阶差分卷积模板如下：

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix}, H_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \varphi_1(x,y) &= G(x,y) * H_1(x,y) \\ \varphi_2(x,y) &= G(x,y) * H_2(x,y) \\ \varphi(x,y) &= \sqrt{\varphi_1^2(x,y) + \varphi_2^2(x,y)} \\ \theta_\varphi(x,y) &= \tan^{-1}\left(\frac{\varphi_2(x,y)}{\varphi_1(x,y)}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

$\varphi(x,y)$  图像上点  $(x, y)$  处的梯度幅度值， $\theta_\varphi(x,y)$  是梯度方向。

对梯度幅值进行非极大值抑制。如果在梯度方

向上的两个像素的幅值均小于  $I(x, y)$  的梯度幅值, 则其有可能是边缘像素, 否则肯定不是边缘像素, 将其梯度设置为 0。

用双阈值算法检测和连接边缘。双阈值算法对非极大值抑制图像作用两个阈值  $T_1$  和  $T_2$ , 且  $T_2 > T_1$ , 从而可以得到两个阈值边缘图像  $N1[i, j]$  和  $N2[i, j]$ 。由于  $N2[i, j]$  使用高阈值得到, 因而含有很少的假边缘, 但有间断(不闭合)。双阈值法要在  $N2[i, j]$  中把边缘连接成轮廓, 当到达轮廓的端点时, 该算法就在  $N1[i, j]$  的 8 邻域内寻找可以连接到轮廓上的边缘, 这样, 算法不断地在  $N1[i, j]$  中收集边缘, 直到将  $N2[i, j]$  连接起来为止。

设上节分割出足球的圆心是  $O$ 、半径是  $R$ , 为了减少运算量, 作者对图像上以  $O$  为中心  $(R+dr) \times (R+dr)$  (因分割过程中检测出来的  $R$  比实际半径偏小, 附加大于 0 的半径补偿差值  $dr$ ,  $dr$  是经验值, 本课题取值 2~4) 的区域利用 Canny 算子检测出来的足球边缘图 2(b) 所示。

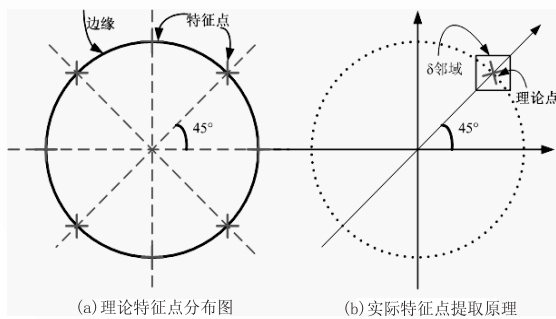


图 3 特征点抽取原理图

### 2.3 提取特征

笔者提取稀疏边缘特征作为待匹配点, 如图 3(a) 所示, 在圆边缘上均匀提取 8 个点, 相邻点间隔  $45^\circ$ 。但在实际检测出来的边缘上很难准确定位满足这样要求的 8 个点, 下面方法就近似提取 8 个这样的特征点, 如下。

根据前面分割中求解出来的圆心和半径, 可以求解出圆在任意方向的理论近似边缘像素点坐标  $E(x, y)$ 。但由于 Canny 算子提取的单边缘可能是间断的, 所以  $E(x, y)$  可能不在 Canny 算子检测出来的边缘上。为了克服这个缺点, 可在以点  $E$  为中心的  $\delta$  邻域内寻找已检出的边缘点,  $\delta$  邻域可以是圆、矩形等视情况而定, 在邻域内的所有点中随机取一点作为匹配点, 原理如图 3(b) 所示。

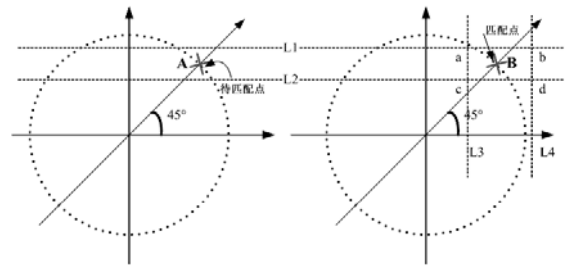


图 4 匹配原理示意图

根据这种提取方法可以在左圆和右圆上分别提取 8 个边缘特征点, 根据成像原理可以看出即使左右圆上相同角度提取出来的特征点也不能保证是匹配点对。这是由于我们拍摄角度的不同造成了左右圆的边缘不能完全重合, 所以对于一个圆上提取出来的特征点要单独在另外圆边缘附近寻找匹配点, 下面小节解决匹配问题。

### 3 特征匹配

立体匹配是指根据对所选特征的计算, 建立特征之间的对应关系, 将同一个空间物理点在不同图像中的映像点对应起来, 立体匹配是双目立体视觉中最关键、困难的一步<sup>[5]</sup>。

课题采用基于区域相关的模板匹配, 在算法的设计上继承上节特征提取的思想, 左(右)图提取出来的特征点跟其在右(左)图上的匹配点应该具有很大位置相关性, 匹配点对关于圆心的相对坐标近似相同。基于此作者提出了一种称为“对应局部遍历匹配”的区域相关模板匹配算法, 见图 4。利用立体匹配中的极线约束条件, 在理想情况下点  $A$  和  $B$  应该具有相同的纵向坐标, 但由于左右摄像机模型的差异性以及外部人为操作等造成的误差, 很难满足这样的约束。即使这样, 也不能否定极线约束的作用, 点  $A$  和  $B$  纵向坐标的偏离不会很大, 一般小于 2-3 个像素, 所以匹配点  $B$  在直线  $L1$ 、 $L2$  之间。又根据  $A$  和  $B$  相对于圆心位置的近似相同性, 在横向上可以确定一个坐标范围待匹配, 在图中  $L3$ 、 $L4$  之间。我们获得一个称为“对应局部区域”的搜索区域  $abcd$ , 然后利用区域相关模板匹配算法寻找出点  $B$ 。选择归一化灰度互相关函数来计算相似度, 以避免光照变化对立体匹配的负面影响。模板的大小为  $(2m+1) \times (2n+1)$ ,  $m$ 、 $n$  为正整数, 本文取  $m=n=2$ , 互相关函数定义为:

$$C(x, y, x', y') = \frac{\sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} A \times B}{\sqrt{\sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} A^2 \times \sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} B^2}} \quad (8)$$

$$A = I(x+i, y+j) - \overline{I(x, y)} \quad (9)$$

$$B = I'(x'+i, y'+j) - \overline{I'(x', y')} \quad (10)$$

$$\overline{I(x, y)} = \frac{\sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} I(x+i, y+j)}{(2n+1) \times (2m+1)} \quad (11)$$

$$\overline{I'(x', y')} = \frac{\sum_{i=-n}^{i=n} \sum_{j=-m}^{j=m} I'(x'+i, y'+j)}{(2n+1) \times (2m+1)} \quad (12)$$

式中  $I(x, y)$  表示左(右)图像中某像素点的灰度值,  $I'(x', y')$  表示右图像中某像素点的灰度值,  $\overline{I(x, y)}$  表示左图像中以像素点  $(x, y)$  为中心、 $(2n+1)(2m+1)$  矩形窗口内的所有像素点灰度的平均值, 同理,  $\overline{I'(x', y')}$  表示右(左)图像中以像素点  $(x', y')$  为中心、 $(2n+1) \times (2m+1)$  矩形窗口内的所有像素点灰度的平均值。  $C(x, y, x', y')$  取值最大时的点  $(x', y')$  做为点  $(x, y)$  的匹配点。图 5 是从左图到右图匹配效果示意图。

经过左图到右图、右图到左图的两两匹配运算, 最终可以获得 16 组匹配点对。

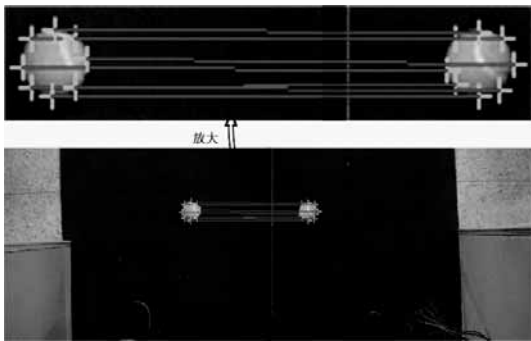


图 5 实际匹配效果图(左到右匹配)

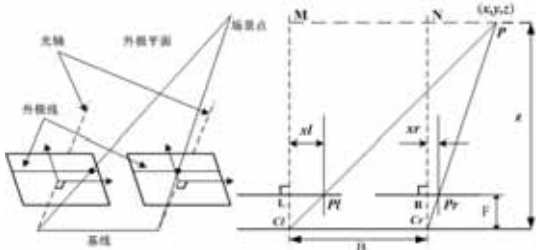


图 6 平行双目模型

## 4 深度恢复

### 4.1 立体测距原理<sup>[6]</sup>

本文使用的双目摄像机模型是双目视觉中最基本的平行双目模型, 其几何模型如图 6 所示, 它由 2 个完全相同的摄像机构成, 2 个图像平面位于一个平面上, 2 个摄像机的坐标轴和光轴相互平行, x 轴重合, B 为基线距离, F 是焦距。场景点 P 在左、右图像平面中的投影点分别为  $P_L$  和  $P_R$ 。假设参考坐标系原点与左透镜中心重合, 深度轴 z 沿光轴方向, 定义视差为  $Disparity = x_l - x_r$ , 根据几何形似关系可得

$$z = \frac{B \times F}{x_l - x_r} \quad (13)$$

由于实验中使用的左右眼摄像机光学中心坐标偏离图像中心较大, 且这种偏离有不一致性, 为了得到正确的视差, 我们需要把图像坐标系原点校正到摄像机标定结果的光学中心位置处, 上面公式中的  $x_l$ 、 $x_r$  就是在校正过的图像坐标系下的坐标。

### 4.2 结果分析

本文的双目视觉系统由一台通用 PC 机和两台敏通公司的型号为 MTV-63V3HP 的工业摄像机组成, MTV-63V3HP 的主要参数: 1/3 英寸 CCD 影像传感, 尺寸大小为 3.6mm4.8mm、CCD 总像素 768(水平)  $\times$  576(垂直), 则水平和垂直方向像元间距:  $dx = \frac{3.6}{576} = dy = \frac{4.8}{768} = 6.25 \mu\text{m}$  基线 B 可以根据需要自己调节, 本文标定  $B = 60\text{cm}$ 。课题关注的深度信息是公式(13)表述的 z, 表 1 是一组测量数据与实际数据的对比。

类人足球比赛中, 需要定位足球的距离一般在 5m 以内, 分析上面的数据, 当摄像机和足球的距离小于 1m 时, 误差精度控制在 2.0%, 5m 以下的误差在 3% 以下, 这的误差满足我们机器人进行决策所需要的位置精确度。

## 5 结语

课题出发点是在足球机器人比赛中由于球体上不易找到匹配特征, 利用双目立体视觉进行测距遇到很大的困难。笔者以丰富的边缘点作为匹配特征, 解决

(下转第 44 页)

了以往匹配特征不足或者不准确的问题,在匹配过程中大幅度收缩了模板相关匹配算法的搜索域,提高了匹配效率,并满足需要的测量精度。算法可以直接移植到嵌入式机器人,应用到实际比赛中。

表 1 实验数据对比

实际 (cm)	测量 (cm)	误差 (%)
32	31.6	1.3
47	47.7	1.9
79	80.1	1.4
120	117.6	2.0
156	159.3	2.1
277	284.7	2.5
385	396.1	2.9
439	431.2	1.8
523	535.6	2.3

## 参考文献

- 1 李志强,杨国胜.双目汇聚摄像系统深度信息测量研究.计算机工程与应用,2007,43(30):65 - 66.
- 2 汪倩倩,申忠宇,张亮.基于双目视觉模型的彩色目标实时检测与定位.南京师范大学学报(工程技术版),2008,8(1):18 - 22.
- 3 Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing Ind ed.北京:电子工业出版社,2003.460 - 464.
- 4 Canny J. A Computational Approach to Edge Detection. IEEE Trans PAMI,1986,8(6):679 - 698.
- 5 Marr D, Vision WH. Freeman and Company. San Francisco,1982.
- 6 贾云得.机器视觉.北京:科学出版社,2000.160 - 162.