

文章编号 1004-924X(2015)增-0546-08

## 基于支撑点的立体匹配

张学贺\*, 赵 杰, 李 戈, 侯珍秀

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为了使立体匹配算法能够兼具较高运算效率和良好的视差匹配精度,提出一种基于稳定支撑点的立体匹配算法。该算法利用 Canny 最优边缘算子检测图像的边缘点作为“支撑点”,应用 Delaunay 三角剖分算法将整个待匹配视图划分成一系列相连的二维三角面片;然后以三角形作为匹配基元构建视差模型进行初始视差估计;最后根据三角形共用顶点的特性修正视差值,进而得到最终的视差图。使用 Middlebury 算法测试平台提供的立体图对算法进行了实验验证。结果表明:本文算法的定位精度高,误匹配率低,匹配时间约为 1 s,视差图的匹配精度约为 93%,在获取高精度视差图的同时具备良好的匹配速度,为立体匹配算法的实际应用奠定了良好的基础,在基于双目视觉的路径导航系统中也有着良好的应用前景。

**关键词:**立体匹配;边缘检测;支撑点;Delaunay 三角剖分;视差图

**中图分类号:**TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152313.0546

## Stereo matching based on support points

ZHANG Xue-he\*, ZHAO Jie, LI Ge, HOU Zhen-xiu

(State Key Laboratory of Robotics and System,  
Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)  
\* Corresponding author, E-mail: 11B908024@hit.edu.cn

**Abstract:** A stereo matching method based on stable support points was proposed to improve its computing speed and disparity accuracy. With the method, a canny edge operator was used to detect the edge points of the image and act them as ‘supporting points’. Then those points were processed by a Delaunay triangulation algorithm to divide the whole image into a series of linked triangular facets. These facets were used as matching elements to compose the basic modules to perform a rude estimation of image disparity. Finally, according to the triangular property of shared vertices, the estimated disparity was refined and the disparity map was obtained. The method was tested by Middlebury stereo pairs on the platform, Experimental results show that the time cost of the method is about 1 s and the matching accuracy is 93% as compared with ground truth map. The proposed method has higher positioning accuracy and lower error mathing rate, and improves both the computing speed and computing accuracy. It forms a steady foundation and good application prospect for robot’s path planning system with stereo camera devices.

**Key words:** stereo matching; edge detection; support point; Delaunay triangulation; disparity map

收稿日期:2015-04-17;修订日期:2015-05-19.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61473104);机器人技术与系统国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主研究课题资助项目(No. SKLRS201302C);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(HIT. NSRIF. 201644)

## 1 引言

近年来移动机器人导航的研究热点主要集中在实时、准确地获取机器人工作空间的三维信息。立体匹配算法是三维场景重构研究中的关键问题,其匹配速度与精度在移动机器人视觉导航和自主定位过程中起着至关重要的作用。

文献[1]对 2002 年以前的立体匹配方法进行系统的整理和归纳,并根据算法是否包含全局最优函数,将算法划分为局部立体匹配算法和全局立体匹配算法。局部匹配算法<sup>[2]</sup>通常采用固定形状和大小的支撑窗口计算匹配代价,经过代价聚合之后得到视差,但是由于实际物体表面存在纹理、褶皱、不规则曲面等信息,致使待处理图像的视差具有不连续性,局部窗口的形状和大小难以选择,虽然运算速度较快,但其匹配结果具有边缘效应、匹配精度较低,难以满足实际应用需求。全局立体匹配算法主要是采用全局的优化理论方法估计视差,建立全局能量函数,通过全局能量函数的最小化得到最优视差值。文献[1]中详细讨论和比较了关于 MRF(Markov Random Field)全局最优化算法中用到的模拟退火、最大流、图割、置信传播<sup>[3]</sup>等算法。尽管全局优化方法得到的视差图(Disparity Space Image, DSI)精确度较高,但是其建模过程复杂,求解需要大量运算时间,以 Graph Cut<sup>[4]</sup>算法为例,从标准测试图获取视差图像需要 20 s 以上的时间。

为解决立体匹配中匹配速度与匹配精度相互制约的问题,研究人员开展了大量的研究工作。文献[5]采用支撑点扩展快速立体匹配方法,使用吉布斯随机场描述能量函数,用支撑点扩展方法求解各像素的视差值。该匹配算法视差图精度高,与传统置信传播算法、图割法相比速度有显著提高。文献[6]中采用 AD-census 进行匹配代价初始化,进行代价聚合后采用沿扫描线添加平滑约束的方法提高了匹配的效果和精度,对标准测试图的匹配速度全部都在 1 s 以下。文献[7]所提出的高效大尺度立体匹配方法(ELAS)首先使用 Sobel 边缘检测算子得到索引视图的稳定支撑点,然后进行 Delaunay 三角剖分,通过构建的视差先验模型估计视差,其优点在于匹配速度快,缺点在于视差图的精度还有待提高,在三维重建和目标识别的应用方面必须结合使用其他传感器。文献[8-9]算法的基本思想都是使用三角剖分方

法,假设同三角形内的所有像素具有相同的视差值,将三角形区域作为匹配单元,虽然能够得到致密的视差图<sup>[10]</sup>,但是运行时间较慢,在某些三角形区域容易造成视差图的过度平滑。

基于此,本文提出一种基于 Delaunay 三角剖分的立体匹配算法,首先对索引视图使用 Canny 算子求取稳定的边缘点作为支撑点;然后使用分治法对支撑点集进行 Delaunay 三角剖分,将剖分后的三角形面片作为匹配基元,建立视差模型估计视差。接下来,根据三角形共用顶点的特性,对初始视差进行修正。最后实验验证了本文算法的有效性。

## 2 Canny 边缘检测

图像的边缘是指图像中局部区域亮度变化显著的部分,是周围像素灰度有阶跃变化或屋顶变化的像素的集合。图像边缘部分集中了图像的大部分信息,且广泛存在于物体与背景之间、物体与物体之间,基元与基元之间。图像边缘的确定与提取对于整个图像场景的识别与理解非常重要,同时也是图像分割所依赖的重要特征。常用的边缘检测算子中:Laplace 算子通常会产生双边界,Sobel 算子、Robert 算子,Prewitt 算子等对噪声敏感容易形成非闭合区域<sup>[11]</sup>,边缘检测的效果往往不理想。

Canny 算子检测边缘的实质是求信号函数的极大值问题来判定图像边缘像素点。传统 Canny 边缘检测步骤如下:

### (1) 图像平滑

将图像与高斯平滑滤波器进行卷积运算, $\sigma$ 代表图像的平滑程度:

$$S(x, y) = G(x, y; \sigma) * I(x, y). \quad (1)$$

其次使用一阶有限差分计算偏导数的两个阵列:

$$D_x(x, y) \approx (S(x+1, y) - S(x, y) + S(x+1, y+1) - S(x, y+1))/2, \quad (2)$$

$$D_y(x, y) \approx (S(x, y+1) - S(x, y) + S(x+1, y+1) - S(x+1, y))/2. \quad (3)$$

### (2) 计算梯度幅值和方位角

$$M(x, y) = \sqrt{D_x(x, y)^2 + D_y(x, y)^2}, \quad (4)$$

$$\theta(x, y) = \arctan(D_y(x, y)/D_x(x, y)). \quad (5)$$

$M(x, y)$  为梯度幅值大小,代表图像边缘的强度。 $\theta(x, y)$  为梯度方向角的大小。

### (3) 非极大值抑制

沿梯度角方向检测梯度幅值的极大值点,即

边缘点。遍历 8 个方向的像素,将像素偏导值与相邻像素的模值进行比较,取其最大值为边缘点,将该像素的灰度值设置为零。

#### (4) 用双阈值算法检测和连接边缘

采用双阈值检测得到两幅边缘图像,首先使用大阈值把边缘连接成轮廓,当到达轮廓端点时,从小阈值图像中寻找可以连接到轮廓上的边缘。

虽然 Canny 算子可以适用于不同的场合,它的参数允许根据不同实现的特定要求进行调整,以识别不同的边缘特性,具有边缘信息漏检率最小、误检率最小、边缘定位精度高、边缘响应次数最少等优点<sup>[12]</sup>。但是 Canny 算法的高、低阈值参数是人为设定的,不能根据图像的边缘特征来定,阈值不同,边缘检测效果也不同,即对于不同的图像不具有自适应性。选取适当的阈值对图像边缘检测非常重要,而人工获得的阈值,很难得到较好的边缘检测效果。鉴于此,在应用 Canny 算子进行图像边缘检测时,采用文献<sup>[12]</sup>提出的基于梯度幅度直方图和类内方差最小化自适应确定高低阈值的方法;不需要人为设定阈值,自动根据不同的图片,求取适合自身的阈值。在边缘连接过程中,采用模糊控制算法得到单像素边缘。这种方法剔除了人为干扰试验结果的因素,适用于工程实际和对实时性要求较高的场合。

经 Canny 边缘检测后得到索引视图的边缘图像,考虑到获取的支撑点集数量较大,对后续的三角剖分算法的执行时间有一定的影响,从而会影响整个视差图的匹配时间。经实验验证,对边缘检测后的图像隔行取点,在保持边缘细节的前提下,也能获得良好的支撑效果。处理后的支撑点图像如图 1 所示。从图中可以看出所有的支撑点沿图像边缘均匀分布。

### 3 支撑点的三角剖分

对参考视图进行 2D 三角剖分的目的是将图像分割成覆盖整幅图像平面且彼此相连的三角形网格,将视差图描述为一系列具有相同或者相近视差值的三角形区域。三角形网格反映出像素点与其邻近像素点间的拓扑连接关系,正确的拓扑连接关系将能揭示像素点集所蕴涵的形状和拓扑结构。对于视差平滑区域,在保证视差不连续区域和边缘细节的前提下,三角形划分应该足够大以减少匹配的歧义性。在视差连续区域,顶点密

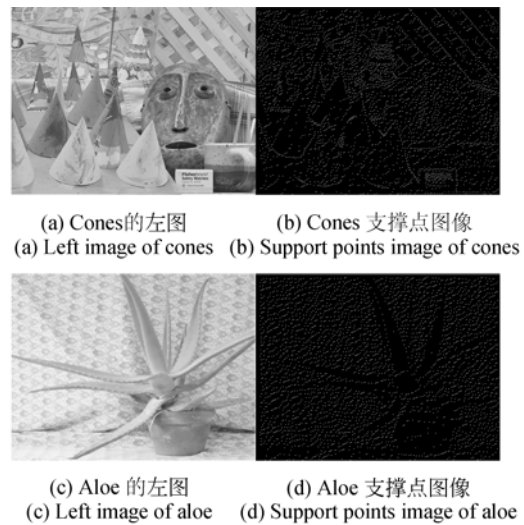


图 1 Canny 边缘检测支撑点图像

Fig. 1 Support points images detected by Canny edge operator

度与数量应该很少,利于加快匹配速度。在视差不连续区域为了正确描述物体的形状,顶点数量应该足够多,以便能更好地保证后续视差图匹配精度平面的三角剖分方式有多种,其中最具代表性的 Delaunay 三角剖分具有以下特征:

- 1) 唯一性:对于一组确定的二维离散点集,其 Delaunay 三角剖分是唯一的。
- 2) 封闭性:三角网的外边界构成了点击  $p$  的凸包。
- 3) 空圆特性:任何 Delaunay 三角形的外接圆内不包含其他数据点。
- 4) 最大化最小角特性:如果将三角网中的每个三角形的最小角按升序排列,则 Delaunay 三角网的排列得到的数值最大。因此, Delaunay 三角网是“最接近于规则化”的三角网<sup>[13]</sup>。

目前常用的 Delaunay 三角剖分算法有逐点插入法、三角网生长法和分治法。逐点插入法的实现简单高效,占用内存较小,但其时间复杂度差;三角网生长法由于效率相对较低,目前采用较少;分治法的效率最高。因此本文使用分治法对初始的离散点集进行三角剖分。

采用分治法对图像支撑点集进行三角剖分的实现步骤:

- (1) 对图像上所有的点集按  $x$  坐标非递减排序,对于  $x$  坐标相同的点,再按  $y$  坐标非递减排序;

(2)将图像平面上的点集按数量划分成近似相等的左右两个子集  $L, R$ ;

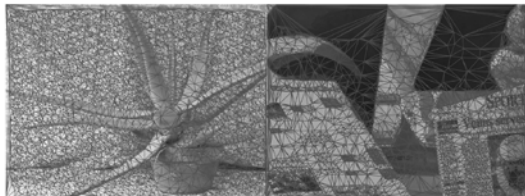
(3)分别完成两个子集  $L, R$  的 Delaunay 三角剖分;

(4)把  $L, R$  两个子集的 Delaunay 三角剖分合并;

(5)递归执行步骤 2 到步骤 4,直至所有数据点都参与了 Delaunay 三角网的构造。



(a) Cones左图像三角剖分结果 (b) Teddy左图像三角剖分结果  
(a) Triangulation result of Cones's left image (b) Triangulation result of Teddy's left image



(c) Aloe左图像三角剖分结果 (d) Venus左图像三角剖分结果  
(c) Triangulation result of Aloe's left image (d) Triangulation result of Venus's left image

图 2 标准测试图像三角剖分结果

Fig. 2 Triangulation results of standard test images

采用分治法对标准测试图像:Cones、Teddy、Aloe、Venus 左视图求取的支撑点进行 Delaunay 三角剖分的结果如图 2 所示,可以看出剖分后的三角面片较为平滑并且很好地保持了物体的边缘特征。

## 4 视差求解

### 4.1 初始视差估计

对索引视图进行 2D Delaunay 三角剖分后,假定每个三角形都具有均匀的初始视差值。视差估计的第一步是给每一个三角剖分面片赋予一个唯一的视差值。方法如下:

对于索引视图中任意一个三角形面片  $t_j$ ,假定  $M_j(d)$  为  $t_j$  在图像  $R$  上视差为  $d$  的匹配函数。匹配函数的选择基于像素直方图的匹配程度及其处理图像间亮度变化的能力。以参考视图中的三角形面片  $t_j$  为例,对于  $t_j$  中的任一像素点,计

算比率:

$$r_c^d(x) = I^c(x)/I^c(x+d). \quad (6)$$

$I'$  为图像  $I$  对应的待匹配图像,  $d$  为视差值。分别计算各颜色通道  $c \in \{R, G, B\}$  比率值并将其与相应的直方图累加。精确视差值的理想匹配结果应使得所有像素直方图和颜色通道都具有相同的比率。如果匹配效果好,那么直方图的分布中应该有一些栅格的值很大而其余的都较小。通过研究图像均方差和图像熵等方法,发现根据公式(6)求取的  $r_c^d(x)$  峰值的效率比较高、效果良好。三角剖分  $T_j$  在图像  $r$  具有视差  $d$  的匹配函数  $M_{jr}(d)$  定义如下:

$$M_{jr}(d) = \frac{1}{3A_j} \max_l \left\{ \sum_{c \in \{R, G, B\}} \beta_{l-1}^c(d) + \beta_l^c(d) + \beta_{l+1}^c(d) \right\}. \quad (7)$$

$A_j$  为三角面片  $t_j$  的面积,  $l$  为直方图栅格索引下标。公式(6)的含义为计算每个颜色通道内  $r_c^d(x)$  比率为  $0.7 \sim 1.1$  的 20 pixel 直方图栅格  $\beta_l^c(d)$ ,找出 3 个邻接直方图栅格的最大和值作为最佳匹配。对于任意的视差值  $d$ ,都有  $0 \leq M_{jr}(d) \leq 1$ 。3 个邻接直方图栅格和的最大值几乎包含了所有像素,所以匹配程度越好,  $M_{jr}(d)$  的值越接近 1。匹配中选择三角形作为匹配基元是因为每个三角形都与其他 3 个确定的三角形存在共用边。这个特性在聚合过程中可以直接进行扩展,广泛应用于基于像素的立体匹配算法中,在基于区域的方法中不常见。在聚合阶段选择最优视差之前,邻接区域的匹配代价也纳入考虑范围。假设  $\Delta_j$  为三角面片  $t_j$  邻接三角形的数量,聚合后的匹配函数定义如下:

$$M'_j = M_j + \sum_{i \in \Delta_j} \omega_{ij} M_i, \quad \omega_{ij} = e^{-B_{ij}^2/(2\sigma^2)}. \quad (8)$$

$\omega_{ij}$  为三角形  $t_i$  和  $t_j$  的颜色相似性测度函数,可通过计算 2 个三角形 RGB 颜色值的巴氏距离  $B_{ij}$  得出。参数  $\sigma$  用来控制指数函数的衰减程度。随着  $\sigma$  的增大,邻接三角形的支撑权重增大,使得匹配函数更加平滑,但可能会导致图像边缘变得模糊。通过实验对比人为地设定  $\sigma = 0.16$ ,以实现函数平滑和边缘模糊的折中。任一三角形  $t_j$  的初始视差值给定为  $D_j = \operatorname{argmax}(m'_j(d))$ 。经过这个步骤能得到一幅分段连续的视差图。接下来就要进行视差不连续区域的平滑与视差值的

修正。

#### 4.2 视差修正

在视差修正过程中,待修正三角形顶点的视差值要依据其与邻接三角形的相似性做出修改,这样相似三角形顶点的视差值才能比较接近。因几乎所有三角形顶点的视差值都要做出修正,所以最终结果是视差图的分段线性描述。

假设顶点  $V$  是  $N$  个三角形的共用顶点,  $D_j(j=1, \dots, N)$  为该顶点在各个三角形上的视差值。本文目标是为顶点  $V$  找到一个修正的视差值  $d_j$  使得邻接三角形的视差差异减小,例如:当三角面片的颜色相近时。当邻接三角形不同的时候视差值应尽可能保持不变,以便更好地保持图像中物体的边缘。视差修正步骤可以阐述为一个最优化的问题,最终的目的是使其目标函数  $E$  最小化:

$$E = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \omega_{ij} (d_i - d_j)^2 + \sum_{j=1}^N a_j (d_j - D_j)^2. \quad (9)$$

式中:  $\omega_{ij}$  为邻接三角形  $i$  与  $j$  的相似性权重,  $a_j$  为获取初始视差值  $D_j$  的置信度。右式的前一项可以看作是一个正则项,当所有的视差值  $d_j$  都相同时此项取得最小值。右式中第二项为数据的准确程度,当  $d_j = D_j$  时达到最小,例如:修正后的视差与初始的视差值相同。则顶点  $V$  的  $E$  函数最小化可以通过一个  $N \times N$  的线性系统来解决。

为了解决这个问题,在保证视差准确和平滑的前提下,关键就在于权重  $\omega_{ij}$  和  $a_j$  的选取。如果  $a_j$  的值比较大,视差值的准确度随之增大。反之,当  $\omega_{ij}$  比较大时,视差图的平滑程度增加。因此,  $a_j$  的选取应该基于三角面片  $j$  的初始匹配算法。  $a_j$  的选取可以通过下式:

$$a_j = \frac{\sum M_{jR}}{CP_j}. \quad (10)$$

式中:  $M_{jR}$  为三角形  $t_j$  相对于的图像  $R$  的匹配函数;  $C=3$  为颜色通道数量;  $P_j$  为三角形  $t_j$  内的像

素个数;  $a_j$  所代表的含义为所有颜色通道内 3 个取得最大和值的直方图栅格内所含像素点与三角形  $t_j$  内像素点个数的比值,其值越接近 1 匹配效果越好,反之匹配程度越差。

当三角形  $i$  与  $j$  相似时,相似项  $\omega_{ij}$  的值应该很大,从而使  $d_i$  与  $d_j$  对应的视差值更加接近。

关键的问题在于如何确定支撑权重  $\omega_{ij}$ , 参照文献[14],像素颜色的相似性与几何接近性已经成为经典的格式塔心理学中视觉聚集的两大关键因素。假设像素的颜色相似性与几何接近性是相互独立的事件,则支撑权重  $\omega_{ij}$  定义为:

$$\omega_{ij} = \frac{1}{A_i} \exp\left(\frac{\delta_{ij}}{\gamma_c} + \frac{d_{ij}}{\gamma_d}\right). \quad (11)$$

式中:  $\delta_{ij}$  为相似性距离,定义为三角面片  $t_i$  和  $t_j$  内 RGB 颜色的平均欧氏距离,其可以通过下式计算得到:

$$\delta_{ij} = \|I(i) - I(j)\|_2. \quad (12)$$

式中:  $\|\cdot\|_2$  为 2 阶范式,  $I(\cdot)$  表示像素的灰度值。

$d_{ij}$  为三角面片  $t_i$  和  $t_j$  质心的空间距离,表示如下:

$$d_{ij} = \|i(x, y) - j(x', y')\|_2. \quad (13)$$

参数  $\gamma_c$  与  $\gamma_d$  为控制支撑权重函数衰减的阈值。根据实验结果对比,当  $\gamma_c = 10$ ,  $\gamma_d = 12$  时取得了良好的支撑效果。

## 5 实验结果与分析

本文算法实现流程如图 3 所示。首先利用 Canny 最优边缘算子检测出图像的边缘信息,然后对得到的边缘点进行 Delaunay 三角剖分,将整个待匹配视图划分成一系列相连的二维三角面片,接下来构建了视差模型进行初始视差估计,根据三角形共用边的特性进行代价聚合。最后根据三角形共用顶点的特性,对视差值进行修正,进而得到最终的视差图。

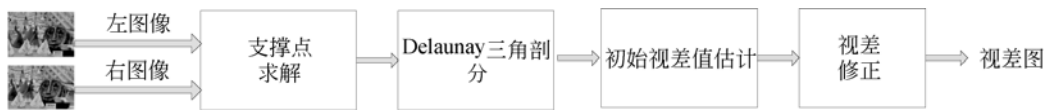


图 3 本文算法实现流程

Fig. 3 Implementation flow of proposed algorithm

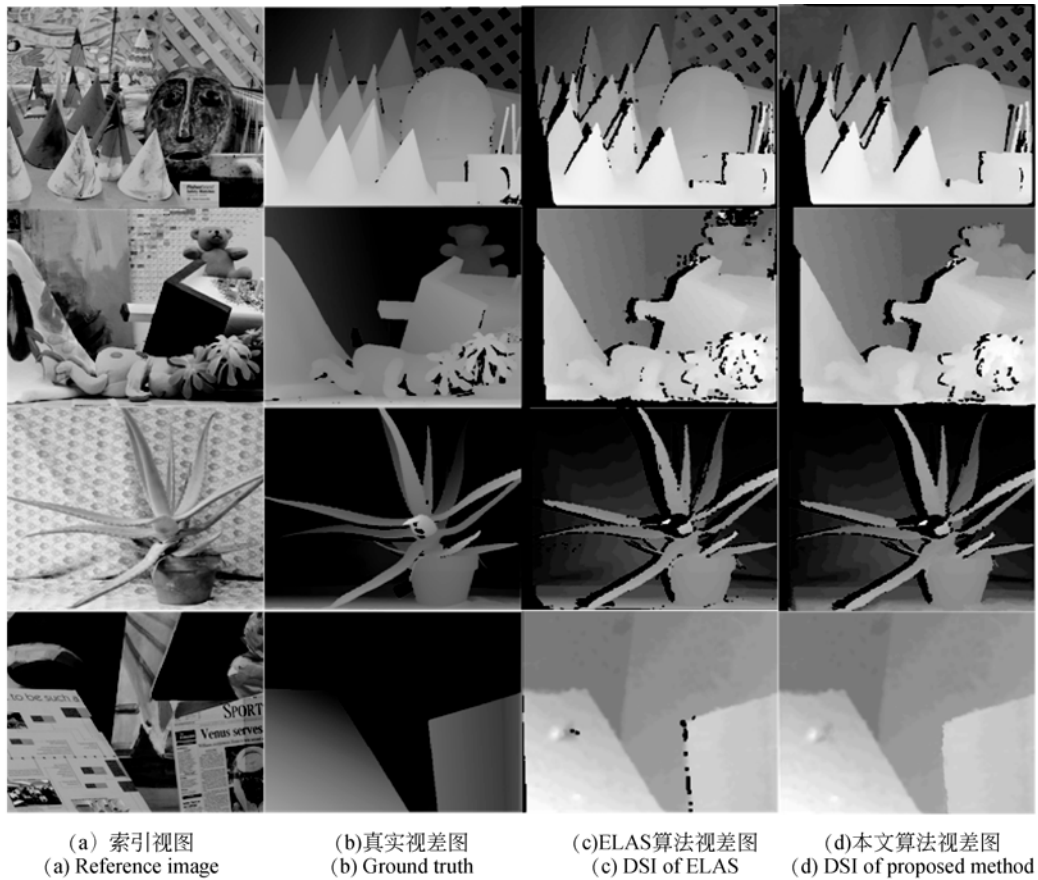


图 4 视差图结果对比

Fig. 4 Comparison results of disparity map

针对算法流程,本文使用 Middelbury 网站提供的标准图对验证了算法的有效性。图像对分别是:Cones 图像对、Teddy 图像对、Aloe 图像对、Venus 图像对。算法硬件平台: Intel (R) Core (TM) i5-2300, 2.79 GHz。算法软件平台: Visual Studio 2008, C++ 语言实现程序设计。视差图对比结果如图 4 所示,非闭合区域的匹配精度与匹配时间的对比如表 1 所示。从图 4 中可以看出,本文算法能够得到轮廓较为清晰的视差图,且在遮挡区域(如 Aloe 图像的左侧)、视差不连续区域(如 Venus 图中的报纸边缘部分)也能获得较好的视差效果,验证了所提算法的有效性。由表 1 可以看出,本文算法的平均匹配时间为 1.043 s, ELAS 算法的平均匹配时间为 1.045 s。本文算法的平均误匹配率为 6.75%, ELAS 算法的平均误匹配率为 7.83%。在匹配时间基本接近的情况下,本文算法的误匹配率要低于 ELAS 算

法,达到了良好的匹配精度,匹配速度与匹配精度都能够满足实际应用的需要,从而体现出了本文算法的优势。

采用实验室前期研制的基于 D-H 坐标系的立体视觉系统(如图 5(a)所示)采集真实场景图像。该立体视觉系统的传动由两个关节构成,分别是旋转关节和俯仰关节。旋转和俯仰关节的角度范围决定了获取场景空间的范围,关节的旋转速度和加速度决定了立体视觉系统的反应灵敏度,关节的旋转精确度反映了立体视觉系统定位的准确程度。对双目立体视觉系统旋转关节和俯仰关节指定的转角范围为  $(-60^\circ, 60^\circ)$ ,角速度为  $90^\circ/\text{s}$ ,定位精度为  $0.8^\circ$ ,该系统使用固定焦距摄像机 WA-922H 完成视觉信息的采集。由图 5(d)得到的视差图效果可以看出,本文算法能较好地应用于真实场景的视差图求取,进一步验证本文算法的有效性。

表 1 不同算法结果比较

Tab. 1 Comparison of different algorithms

	Cones	Teddy	Aloe	Venus
图像分辨率	900×750	900×750	1 282×1 110	950×750
ELAS 算法误匹配率/(%)	5.7	15.5	6.6	3.52
ELAS 算法匹配时间/ms	1 021	1 280	996	876
本文算法误匹配率/(%)	5.4	13.2	5.2	3.2
本文算法匹配时间/ms	1 078	1 224	1 025	854

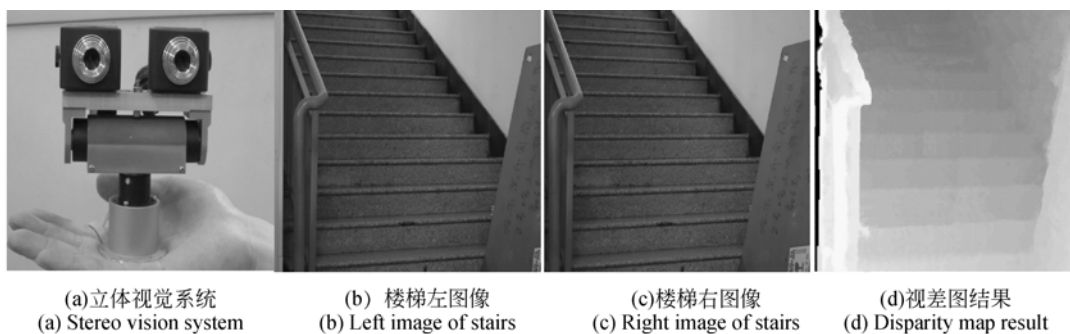


图 5 真实场景实验结果

Fig. 5 Experiment results of real environment

## 6 结 论

本文提出了一种新的基于支撑点的立体匹配算法,充分考虑了图像边缘确定与提取对于整个图像场景识别与理解的重要性,使用自适应 Canny 最优边缘检测算子对图像进行边缘提取,得到图像视差变化的支撑点,边缘定位精度高,有效地减少了误匹配率。将 Delaunay 三角剖分方法所

生成的三角网格作为匹配基元,根据图像的灰度信息进行初始视差估计,能够有效地加快视差求解速度。从实验结果可以看出,本文算法的匹配时间约为 1s,匹配精度约为 93%,在获取高精度视差图的同时具备良好的匹配速度。本文下一步所要做的工作是设计一个集成化且能并行进行图像处理的视觉系统,真正应用于六足机器人的双目视觉导航与路径规划的研究之中。

## 参考文献:

- [1] SCHARSTEIN D, SZELISKI R. A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2002, 47(1-3): 7-42.
- [2] YOON K J, KWEON I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 650-656.
- [3] MURPHY K P, WEISS Y, JORDAN M I. Loopy belief propagation for approximate inference: An empirical study[C]. *Proceedings of the Fifteenth Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence*, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1999: 467-475.
- [4] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. Grabcut: Interactive foreground extraction using iterated graph cuts [C]. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*. ACM, 2004, 23(3): 309-314.
- [5] 周自维,樊继壮,赵杰,等. 基于置信传播的立体匹配并行算法[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(11): 2774-2781.  
ZHOU Z W, FAN J Z, ZHAO J, et al.. Parallel stereo matching algorithm base on belief propagation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(11): 2774-2781. (in Chinese)
- [6] MEI X, SUN X, ZHOU M, et al.. On building an accurate stereo matching system on graphics hard-

- ware[C]. 2011 *IEEE International Conference on Computer Vision Workshops (ICCV Workshops)*, IEEE, 2011: 467-474.
- [7] GEIGER A, ROSER M, URTASUN R. *Efficient Large-Scale Stereo Matching* [M]. *Computer Vision-ACCV 2010*. Springer Berlin Heidelberg, 2011: 25-38.
- [8] XIA C, YANG Y, JU R, *et al.*. Effective local stereo matching by extended triangular interpolation [C]. *2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo (ICME)*, 2013: 1-6.
- [9] FICKEL G P, JUNG C R, MALZBENDER T, *et al.*. Stereo matching and view interpolation based on image domain triangulation[J]. *IEEE Trans on Image Processing*, 2013, 22(9):3353-3365.
- [10] FICKEL G P, JUNG C R, SAMADANI R, *et al.*. Stereo matching based on image triangulation for view synthesis[C]. *19th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2012: 2733-2736.
- [11] MAINI R, AGGARWAL H. Study and comparison of various image edge detection techniques[J]. *International Journal of Image Processing (IJIP)*, 2009, 3(1): 1-11.
- [12] 李牧, 闫继红, 李戈, 等. 自适应 Canny 算子边缘检测技术[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2007, 28(9): 1002-1007.
- LI M, YAN J H, LI G, *et al.*. Self-adaptive Canny operator edge detection technique[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2007, 28(9): 1002-1007. (in Chinese)
- [13] MAUR P. Delaunay triangulation in 3D[R]. *Technical Report, Department of Computer Science and Engineering, University of West Bohemia, Pilsen, Czech Republic*, 2002.
- [14] YOON K J, KWEON I S. Adaptive support-weight approach for correspondence search[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(4): 650-656.

#### 作者简介:



张学贺(1985—),男,内蒙古赤峰人,博士研究生,2004年、2008年于辽宁科技大学分别获得学士、硕士学位,主要从事足式机器人立体视觉导航与路径规划、视觉伺服等方面的研究。E-mail: 11B908024@hit.edu.cn



李戈(1977—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,2008年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要研究领域包括机器人视觉、多机器人运动规划、图像处理等。E-mail: lige@hit.edu.cn

#### 导师简介:



赵杰(1968—),男,河北卢龙人,博士,教授,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授,国家“十二五”,“863计划”先进制造领域智能机器人主体专家组组长,1990年、1993年和1996年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为多传感器系统集成及控制技术,基于Internet网络机器人遥控操作技术,Haptic interface及临场感知技术以及自重构模块化机器人技术等。E-mail: jzhao@hit.edu.cn



侯珍秀(1958—),女,教授,博士生导师,1982年、1991年和2006年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要研究方向为航天机电一体化技术、航天材料工程技术、航天密封机构及元器件可靠性优化等。E-mail: houzx5629@hit.edu.cn