

# 基于外极线分区的动态立体匹配算法

彭军舰<sup>1,2</sup>, 刘 霁<sup>1,2</sup>, 耿沿锋<sup>1,2</sup>, 韩建达<sup>1</sup>, 唐延东<sup>1</sup>

(1. 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要:** 基于区域的立体匹配算法仅针对支撑窗内的灰度信息定义匹配代价函数, 导致在弱(无)纹理区域采用 WTA 优化出现歧义性。该文在外极线分区的基础上, 改用区域作为匹配单元, 针对歧义性区域, 在代价函数中引入遮挡项和平滑项, 并按照区域优先级的高低, 动态匹配相应区域, 获得可靠的视差信息。实验证明, 该算法在保持实时性的同时对弱纹理区域处理具有有效性。

**关键词:** 立体视觉; 外极线分区; 视差图; 弱纹理区域

## Dynamic Stereo Matching Algorithm Based on Epipolar Line Segment

PENG Jun-jian<sup>1,2</sup>, LIU Ji<sup>1,2</sup>, GENG Yan-feng<sup>1,2</sup>, HAN Jian-da<sup>1</sup>, TANG Yan-dong<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**【Abstract】** In region-based stereo matching algorithm, the ambiguity parts, which can not be optimized by WTA, normally are considered as error matches and are discarded. This paper presents a novel approach based on epipolar line segment. It adopts 1-D region as match unit and introduces occlusion and smooth terms to construct a new match cost function, density disparity map can be obtained in virtue of static and dynamic matching strategy. Experimental results validate the algorithm to textureless regions and real-time.

**【Key words】** stereo vision; epipolar line segment; disparity map; textureless region

### 1 概述

立体视觉技术被广泛应用到视觉导航、目标检测与跟踪、障碍物检测等场合。受限于算法复杂度, 目前广泛应用的仍是基于区域的局部匹配算法。

局部匹配算法通常经由像素点代价计算、支撑区域聚类以及代价优化 3 个阶段实现<sup>[1]</sup>。鉴于 WTA(Winner-Take-All)优化的便捷性, 在代价优化阶段, 几乎所有算法均采用它来优化代价函数<sup>[2-3]</sup>。在纹理较为丰富的区域, 常规代价函数如 SAD, SSD 等具有图 1(a)所示的变化曲线, WTA 优化算法显现了良好的性能。但是在弱纹理区域, 有限的支撑区域导致作用区域内的灰度特征存在较高的相似性, 代价函数变化缓慢, 如图 1(b)所示, 此时 WTA 优化算法就失效了。对于该现象, 众多算法均是定义合适的指标, 检测出对应情况, 将获得的视差归属为误匹配, 予以丢弃<sup>[1-3]</sup>。针对匹配阶段存在误匹配的区域, 通常在后处理阶段, 采用插补手段填充误匹配区域的视差。倘若存在较多的误匹配区域, 则插补算法表现非常糟糕的性能, 严重影响后续处理如三维重建或机器人避障。

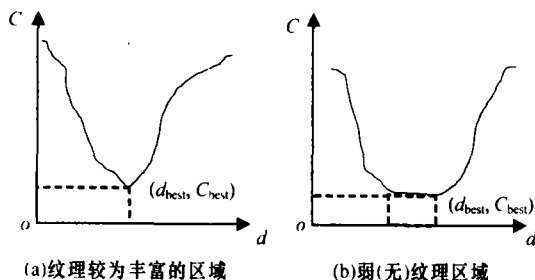


图 1 常规代价函数在不同区域的典型形式

为了解决弱(无)纹理区域 WTA 优化常规代价函数的歧义性, 同时兼顾算法实时性, 本文提出了一种基于外极线分区的动态匹配算法。该算法抛弃了传统的采用像素点作为匹配单元的方法, 改用由外极线分区获得的一维区域作为匹配单元, 采用不同形式的代价函数处理不同的区域, 获得可靠的视差。对于纹理较为丰富的区域, 采用仅含有数据项的匹配代价函数; 针对 WTA 优化存在歧义性的区域, 采用含有数据项、遮挡项和平滑项的代价函数, 根据区域的动态优先级决定的顺序, 计算未匹配区域的视差。实验结果表明, 本算法相比其他区域匹配算法, 通过可靠的计算弱(无)纹理区域视差改善了视差图, 同时保持边沿视差不连续性, 部分克服了“前向膨胀”现象。

### 2 基于外极线分区的动态匹配算法

#### 2.1 图像的外极线分区

考虑算法实时性, 采用基于梯度的分割算法进行区域划分。为了降低纹理对分割结果的影响, 本算法采用双域滤波(bilateral filter)快速算法预处理待分割的图像。由于后续的匹配算法限制或鼓励视差跳变的主要决策因素取决于图像分割获得的边沿, 倘若存在未分割的视差跳变的边沿, 必然会导致匹配结果中出现亮条纹现象。因此, 在边沿检测的过程中, 需选取合适的参数, 保证检测出所有真实边沿的同时, 避免

**基金项目:** 中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿基金资助项目(07A1210101)

**作者简介:** 彭军舰(1982-), 男, 硕士研究生, 主研方向: 机器人视觉导航与避障; 刘 霁, 耿沿锋, 硕士研究生; 韩建达、唐延东, 研究员、博士生导师

**收稿日期:** 2008-05-20 **E-mail:** junjianp@sia.cn

出现过多的纹理边沿。根据分割得到的边沿,对参考图像进行一维分区,将2个边沿之间的部分编码为一个区域,记为 $R(i, j_1, j_2)$ ,或简称为 $R(i$  表征该区域行索引,  $j_1, j_2$  分别表征该区域的左右边界列索引)。

## 2.2 静态匹配

在匹配过程中,按照预定的顺序(通常是从上至下,从左至右的顺序)匹配过程称为静态匹配。

在静态匹配过程中,对每一区域 $R(i, j_1, j_2)$ 采用常规代价函数计算匹配代价,匹配算子可以为SAD, SSD等。本算法采用SAD算子。需要注意的是,该算法采用的匹配基元是外极线区域,为了减轻一维分区导致的亮条纹,本文设计了特殊的关联窗:以区域为中心,取其周围 $w$ 宽度的邻域作为支撑区域。在区域的左右两端未采用其邻域,目的是避免支撑区域跨越两种不同的视差区域。因此,匹配代价函数的具体形式为

$$F(R(i, j_1, j_2), d) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \sum_{k=-w}^w |I_r(i+k, j+k) - I_t(i+k, j+k-d)| \quad (1)$$

其中,  $I_r, I_t$  分别表示参考图像和扫描图像;  $w$  表示关联窗的尺寸的1/2,这里假定是方形关联窗。

由于匹配中缺少后向检验环节,因此认定已获得的结果均是可靠的。若存在伪真视差(即误匹配在视差检验环节中判定为正确视差),则会影响动态匹配过程中视差计算。因此,在WTA优化过程中,采用如下的校验指标剔除具有图1(b)所示的函数曲线形式的不可靠匹配:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{error}} &= (C(R, d_{\text{sec}}) - C(R, d_{\text{best}})) / C(R, d_{\text{best}}) \\ \tau_{\text{shape}} &= \sum_{i=1}^3 |d_i - d_{\text{best}}| \\ \tau_{\text{dist}} &= \sum_{i=1}^3 |C(R, d_i) - C(R, d_{\text{best}})| \end{aligned} \quad (2)$$

其中 $d_{\text{best}}, d_{\text{sec}}$ 为式(1)获得的最优和次优视差,值得注意的是选取的次优视差 $d_{\text{sec}}$ 满足 $|d_{\text{sec}} - d_{\text{best}}| > 1$ ;  $d_i, C(R, d_i)$ ,  $i=1, 2, 3$ 为文献[3]定义的伪最小值集。

如果式(2)中的指标满足

$$(\tau_{\text{error}} \geq \lambda_{\text{error}}) \wedge ((\tau_{\text{shape}} > \lambda_{\text{shape}}) \vee (\tau_{\text{dist}} > \lambda_{\text{dist}}))$$

则区域 $R$ 内的视差 $d_{\text{best}}$ 是可靠的,将该区域标记为匹配区域,并用 $d_{\text{best}}$ 填充视差图 $D$ 的对应区域。

## 2.3 动态匹配过程

在静态匹配过程中,匹配操作的顺序是预先知道的。动态匹配匹配操作的顺序是由区域优先级的高低所决定的,未匹配区域的优先级根据其邻域内的视差信息来确定。当一个区域获得合适的视差后,会立即更新其邻域的优先级,因此,无法预知匹配顺序。因匹配操作的顺序不可预知而称为动态匹配。

针对静态匹配过程中标记的未匹配区域,仅仅采用支撑窗内的灰度信息已不能获取正确的视差,需要考虑更大邻域的视差信息。针对未匹配的区域,在式(1)的基础上,引入了简单的遮挡项和平滑项<sup>[4]</sup>,采用匹配代价函数计算匹配代价:

$$F(R(i, j_1, j_2), d) = C_{\text{Data}}(R, d) + C_{\text{Occlu}}(R, d) + C_{\text{Smooth}}(R, d) \quad (3)$$

### 2.3.1 遮挡项的设计

考虑到遮挡项计算的便利性,遵循视差对应原则,建立了关于扫描图像的视差图 $D_1$ 。根据顺序性约束以及分析“前向膨胀”现象产生的原因,以像素点为单位,设计了如下策略生成 $D_1(i, j)$ :

$$D_1(i, j) = \min\{D(i, j') \mid \forall j' \in I_0 \wedge D(i, j') \text{def.}, j' - D(i, j') = j\} \quad (4)$$

其中,  $D$  表征参考图像 $I_0$ 的视差图。

在匹配过程中,鼓励目标函数将待匹配区域映射到扫描图像的未匹配区域,惩罚与顺序性约束相矛盾的遮挡现象,设计了如下的遮挡项表达式:

$$C_{\text{Occlu}}(R(i, j_1, j_2), d) = \sum_{j=j_1}^{j_2} \begin{cases} 0 & D_1(i, j-d) \text{undef.} \\ \lambda_{\text{occ}} & D_1(i, j-d) \geq d \\ 2\lambda_{\text{occ}} & D_1(i, j-d) < d \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3.2 平滑项的设计

采用待匹配区域邻域内的视差信息来构建平滑项。外极线分区是以边沿为分界点,分界点正是深度不连续之处。在该点上应该鼓励视差跳变而非惩罚它,在设计平滑项时,应将它排除在外。令 $N$ 表示待匹配区域 $R$ 的上下方向上的邻域,即 $N = \{(p, q) \mid |p - q| = 1, p_j = q_j, p \in R\}$ ,其中,  $p, q$  代表2个像素点,下标 $i, j$ 表征像素点的空间坐标。平滑项代价表达式定义为

$$C_{\text{Smooth}}(R, d) = \lambda_{\text{smooth}} \times |\{q \mid q \in N, D(q, q_j) \neq d \wedge D(q, q_j) \text{undef.}\}| \quad (6)$$

其中,  $\lambda_{\text{smooth}}$  是平滑项的惩罚系数,为一常数。

### 2.3.3 动态优先级

动态匹配的对象是在静态匹配过程中存在歧义性的区域,消除歧义性方法是引入相邻区域的视差信息。邻域信息丰富的区域理应优先处理,为此根据待匹配区域邻域内的视差信息的完整性来定义动态优先级。

令 $N'(R)$ 表示待匹配区域 $R$ 的邻域,  $N'(R) = \{q \mid |q_i - p_i| = 1 \vee |q_j - p_j| = 1, p \in R\}$ 。则动态优先级定义为 $N'(R)$ 内已匹配的像素点集合的势与 $N'(R)$ 集合的势的比值。

$$\tau_{\text{dynam-prior}} = \frac{|\{q \mid D(q, q_j) \text{def.}, q \in N'(R)\}|}{|N'(R)|} \quad (7)$$

实现动态优先级,算法上需要借助链表这类数据结构。采用单向链表,针对未匹配区域,设计了如下的操作策略:

- (1) 将所有未匹配区域注册到链表中。
- (2) 计算每个区域的动态优先级。
- (3) 按照动态优先级对链表排序,优先级越高的区域在链表中的位置越靠近表头。
- (4) 从链表的表头开始,针对每一区域 $R(i, j_1, j_2)$ :
  - 1) 按照式(2)计算匹配代价,采用WTA优化获得最佳视差 $d_{\text{best}}$ ;
  - 2) 将 $d_{\text{best}}$ 赋值给 $D(i, j), j = j_1, j_2, \dots, j_2$ ;
  - 3) 按照式(3)计算 $D_1(i, j)$ 部分的视差信息;
  - 4) 更新 $R(i, j_1, j_2)$ 的邻域内未匹配区域的优先级;
  - 5) 若存在未匹配区域,返回步骤(2),否则退出。

## 3 算法实现

图2为本算法的流程。下面分别介绍各模块的实现和功能:

### (1) 图像预处理模块

图像预处理模块主要有3项功能:1)矫正原始图像对,使之满足外极线约束;2)使用双域滤波的快速算法,滤出图像中的高频和直流分量,消除亮度差异和光照变化对匹配的影响;3)弱化纹理对梯度分割算法的干扰。

### (2) 外极线分区

外极线分区模块负责将参考图上的每一条外极线分割为同性区域(如图3(b)所示)。考虑到效率的原因,没有采用mean-shift诸类的分割算法<sup>[4]</sup>,而是采用了简单的边沿检测算法,通过在预处理阶段以及匹配阶段采用特殊的策略(参见

2.2 节)来抑制过分割的不良影响。

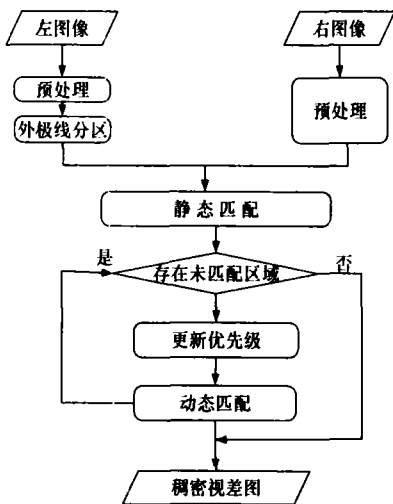


图2 算法流程示意图

### (3)静态匹配

静态匹配采用式(1)作为代价函数,计算每一外极线区域的视差,并根据匹配校验进行合理的标记。静态匹配的目的在于获取纹理较为丰富区域的视差信息,同时将 WTA 优化存在歧义性的区域标记为未匹配区域。在图 3(c)中,白色部分表示未匹配区域,其他部分为正确匹配的区域。

### (4)动态匹配

为了最大限度地弱化仿真视差的影响,针对静态匹配中未匹配区域,根据式(7)确定每一区域的优先级,优先级高的区域优先按照式(3)计算视差。在该过程中,当一区域获得对应视差之后,它的视差信息将为邻区域的代价函数给予更多的支持。按照信息量充裕程度确定优先级的原则,将动态更新其邻区域的优先级。经过动态匹配所有未匹配区域,获得可靠的稠密视差图,如图 3 所示。

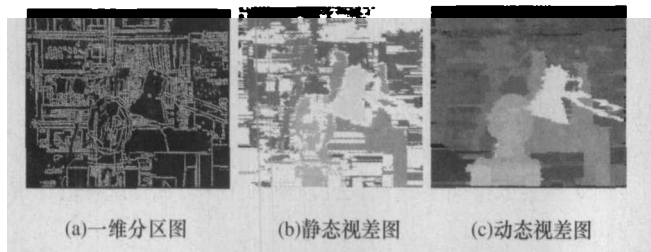


图3 Tsukuba 算法各阶段的处理结果

在 Middlebury 大学的 D. Scharstein, R. Szeliski 提供的测试平台<sup>[1]</sup>上,笔者实现了本算法,并选取与本算法具有一定相关性的算法进行比较实验(见表 1)。在表 1 中,  $\beta_A$  表征非遮挡区域的误匹配率,  $\beta_T$  表征弱(无)纹理区域的误匹配率,  $\beta_D$  表征视差不连续区域的误匹配率,详细定义请参考文献[1]。综合各项指标,本算法优于 SAD 算法和 Scanline Optimization 算法。从表 1 可以看出,本算法相比于 Scanline Optimization,对于 Tsukuba,  $\beta_T$  降低了 49.6%,  $\beta_D$  则减少了 37.4%,通过改善了这些区域的误匹配率,将  $\beta_A$  降低到 3.38;对于 sawtooth,  $\beta_T$  降低了 42.04%,  $\beta_D$  减少了 34.2%,  $\beta_A$  则降低了 27.3%。但是对于 Venus,由于图像中存在较多

的斜板,因此本算法的区域内视差定常假设在一些区域不再成立,导致  $\beta_A$  相比于 SAD 算法,反而增加了 10.3%。

表1 本文方法与相关方法的误匹配率量化比较

算法	Tsukuba			Sawtooth			Venus		
	$\beta_A$	$\beta_T$	$\beta_D$	$\beta_A$	$\beta_T$	$\beta_D$	$\beta_A$	$\beta_T$	$\beta_D$
SAD	14.74	29.11	31.37	31.37	9.33	10.85	8.05	8.88	20.39
Scanl. Opt.	5.08	6.78	11.94	4.06	2.64	11.90	9.44	14.49	18.20
Our Method	3.38	3.37	7.48	2.95	1.53	7.83	8.97	6.63	10.29

为了验证算法的性能,针对真实图也进行了实验(见图 4)。虽然该图的最大视差高达 80,但是本算法仍然能够获得较为理想的效果,与全局算法 Reality-DP<sup>[5]</sup>具有可比性。



图4 真实图的实验结果及比较

## 4 结束语

本文在分析 WTA 优化的优点及产生歧义性的原因的基础上,针对歧义性区域,引入遮挡项和平滑项,设计了新的匹配代价函数,从而保证采用 WTA 优化获得可靠的视差信息。同时经过简单的外极线分区,将图像分割成一系列小的一维区域,选用一维区域作为匹配单元,经过静态和动态 2 个匹配过程,生成稠密的视差图。实验证明,相比于其他基于区域的匹配算法,本算法在增加少量计算开销的代价上,改善了弱纹理或者无纹理区域的匹配结果,同时较好地保持了在边界区域的视差不连续性。

一维分区的质量直接影响本算法的计算速度和匹配质量,选取一种新的分割算法,以及如何减少算法对过分割的敏感性将是下一步需要进行的研究工作。

### 参考文献

- [1] Scharstein D, Szeliski R. Taxonomy and Evaluation of Dense Two-frame Stereo Correspondence Algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1): 7-42.
- [2] Hirschmuller H, Innocent P R, Garibaldi J. Real-time Correlation-based Stereo Vision with Reduced Border Errors[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1): 229-246.
- [3] Stefano L D, Marchionni M, Mattocchia S. A Fast Area-based Stereo Matching Algorithm[J]. Image and Vision Computing, 2004, 22(12): 983-1005.
- [4] Wei Yichen, Quan Long. Region-based Progressive Stereo Matching[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2004: 106-113.
- [5] Gong M, Yang Y H. Near Real-time Reliable Stereo Matching Using Programmable Graphics Hardware[C]//Proceedings of the 2005 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. [S. l.]: IEEE Press, 2005: 924-931.