

# 基于 MRF 和颜色空间的立体图像匹配算法

方恒, 吴怀宇

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**为了提高立体图像匹配的效率和准确度,对基于马尔可夫随机场(Markov Random Fields, MRF)的立体图像匹配算法进行改进,提出一种基于 MRF 和颜色空间的立体图像匹配算法。该算法利用颜色距离构建匹配代价函数,以充分利用彩色图像中的颜色信息,并采用加速的信度传播算法进行能量最小化。分别利用灰度信息、RGB 信息、HSI 信息进行立体匹配实验。实验结果表明,改进后的算法能加快收敛,降低误匹配率。

**关键词:**颜色空间;立体匹配;信度传播;马尔可夫随机场

中图分类号:TP391

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2008)12-0028-04

## Stereo Matching Based on MRF and Color Space

FANG Heng, WU Huai-yu

(College of Information Science and Engineering,

Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:**For advancing the efficiency and accuracy of stereo matching, improved the stereo matching algorithm based on MRF, then proposed a stereo matching algorithm based on MRF and color space. This algorithm utilized color distance to construct the matching cost function for making full use of the color information of color image, and utilized accelerated belief propagation algorithm to minimize the energy. Intensity, RGB and HSI information were used to make stereo matching experiment. Experiment results demonstrate that the algorithm improved can speed up the convergence and reduce the mismatching rate.

**Key words:**color space; stereo matching; belief propagation; MRF

### 0 引言

立体匹配是计算机视觉中的关键问题。传统的立体匹配算法大多通过对灰度图像的匹配来获得最终的视差图。随着彩色图像传感器的和其他硬件价格的降低,彩色图像处理越来越多地受到关注。文献[1]中将颜色段和动态规划用于立体匹配,文献[2~4]等将颜色信息和局部匹配方法结合。文中在 MRF 全局匹配算法中利用图像的颜色信息构建代价函数,然后采用加速的信度传播算法进行能量最小化,经过较少的迭代次数就可以得到高准确度的视差图,对比实验表明,基于 MRF 和颜色空间的立体匹配算法可以得到更精确的匹配结果。

### 1 立体匹配的 MRF 模型

立体匹配可以建模为三个耦合的 MRF,模型的一

维结构如图 1 所示<sup>[5]</sup>。

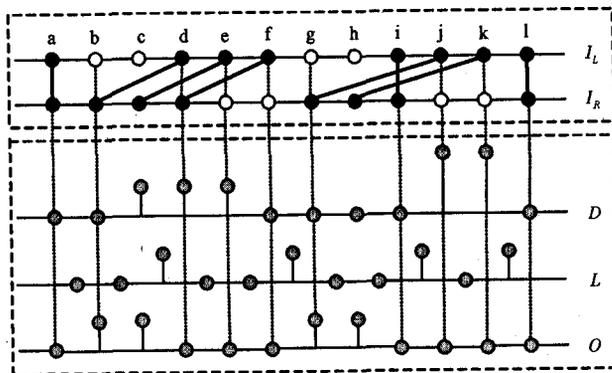


图 1 立体匹配一维模型

图 1 中,  $D$  是定义在参考图像网格结构上的平坦视差场,  $L$  表示参考图像中不连续部分的空间线过程,  $O$  表示参考图像中遮挡部分的空间二值过程,  $I_L$  和  $I_R$  分别表示左图像(参考图像)和右图像,粗线连接的点表示左右图像中的匹配点。后面将 MRF 中的点称为结点。

根据贝叶斯准则,给定一个立体图像对  $I = \{I_L, I_R\}$ ,  $I_L$  和  $I_R$  分别表示左图像和右图像,  $D, L, O$  的联

收稿日期:2008-03-10

作者简介:方恒(1984-),男,安徽太湖人,硕士研究生,主要研究领域为图像处理、智能控制等;吴怀宇,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为智能控制、光机电系统集成。

合后验概率为<sup>[5]</sup>:

$$P(D, L, O | I) = \frac{P(I | D, L, O)P(D, L, O)}{P(I)} \quad (1)$$

于是,立体匹配问题转化为 MRF 的最大后验概率 (MAP) 的求解问题。通过定义兼容函数  $\Psi(\cdot)$  和  $\Phi(\cdot)$ , MRF 的联合概率可写为<sup>[6]</sup>:

$$p(x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_N) = \prod_{(i,j)} \Psi(x_i, x_j) \prod_s \Phi(x_s, y_s) \quad (2)$$

其中  $N$  是结点的编号,  $(i, j)$  表示一对相邻的结点,  $x_s$  是结点  $s$  的状态变量,  $y_s$  是表示灰度差的状态变量,  $\Psi(x_i, x_j)$  是相邻的结点  $i, j$  的状态变量的兼容函数,  $\Phi(x_s, y_s)$  是结点  $s$  的匹配兼容函数。对公式(2)取负对数得到能量表达式:

$$E(x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_N) = \sum_{(i,j)} -\log \Psi(x_i, x_j) + \sum_s -\log \Phi(x_s, y_s) \quad (3)$$

在文献[7]中,能量表达式为:

$$E(x_1, x_2, \dots, x_N, y_1, y_2, \dots, y_N) = \sum_{(i,j)} V(x_i, x_j) + \sum_s D(x_s, y_s) \quad (4)$$

其中  $V(\cdot)$  和  $D(\cdot)$  是能量函数,能量函数  $V(\cdot)$  一般采用 Potts 模型<sup>[6]</sup>,  $D(\cdot)$  一般采用基于灰度差的代价函数。一种鲁棒性能较好的代价函数为<sup>[7]</sup>:

$$F(x, d_s, I) = \min\{\bar{d}(s, s', I)/\sigma_f, \bar{d}(s', s, I)/\sigma_f\} \quad (5)$$

$$\bar{d}(s, s', I) = \min\{|I_L(s) - I_R(s')|, |I_L(s) - I_R(s')^+|, |I_L(s) - I_R(s')^-|\} \quad (6)$$

其中  $s'$  是左图像中点  $s$  视差为  $d_s$  时右图像中对应的点,  $I_L(s)$  是点  $s$  的灰度值,  $I_R(s')$  是点  $s'$  和其左邻点的灰度线性插值中值,  $I_R(s')^+$  是点  $s'$  和其右邻点的灰度线性插值中值。 $\sigma_f$  是需要估计的噪声方差,  $\bar{d}(s', s, I)$  是  $\bar{d}(s, s', I)$  的对称版本。

## 2 颜色距离构建代价函数

传统 MRF 方法的代价函数只利用了图像的灰度信息,文中利用图像颜色空间的信息构建匹配代价函数,并选取了两种模型差异较大的颜色空间 RGB 和 HSI。

在 RGB 模型中,颜色距离可以用欧氏距离表示:

$$d(c_1, c_2) = ((R_1 - R_2)^2 + (G_1 - G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2)^{1/2} \quad (7)$$

其中  $c_1, c_2$  表示两种颜色,  $R, G, B$  是 RGB 空间颜色分量。从而基于 RGB 颜色的匹配代价函数表示为:

$$C_{RGB}(s, s') = k((R_s - R_{s'})^2 + (G_s - G_{s'})^2 + (B_s - B_{s'})^2)^{1/2} \quad (8)$$

其中  $s, s'$  分别表示左、右图像中待匹配的点,  $k$  是比例系数,用来调整匹配代价的范围。

在 HSI 模型中,颜色距离不适合用欧氏距离表示,通常表示为<sup>[4]</sup>:

$$d(c_1, c_2) = \sqrt{(I_1 - I_2)^2 + S_1^2 + S_2^2 - 2S_1S_2\cos\theta} \quad (9)$$

$$\theta = \begin{cases} |H_1 - H_2| & \text{if } |H_1 - H_2| \leq \pi \\ 2\pi - |H_1 - H_2| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

其中  $c_1, c_2$  表示两种颜色,  $H, S, I$  是 HSI 空间的颜色分量,类似于 RGB 空间可以得到 HSI 空间的匹配代价函数  $C_{HSI}(\cdot)$ 。

为了使用信度传播算法,必须将代价函数转化为兼容函数,以 RGB 空间为例,转换公式为<sup>[6]</sup>:

$$\Phi(s, s') = e^{-C_{RGB}/D} \quad (11)$$

其中  $s, s'$  表示左右图像中待匹配的点,  $D$  是常数。注意,这里的兼容函数  $\Phi(s, s')$  和公式(2)中的  $\Phi(x_s, y_s)$  是等价的,  $s'$  是像素点  $s$  视差为  $x$  时右图像中对应的点。得到兼容函数以后就可以利用信度传播算法来进行能量最小化。

## 3 信度传播算法

信度传播算法是一种在网络中传递消息的推理算法,在马尔可夫网络中消息的传递如图 2 所示<sup>[5]</sup>。

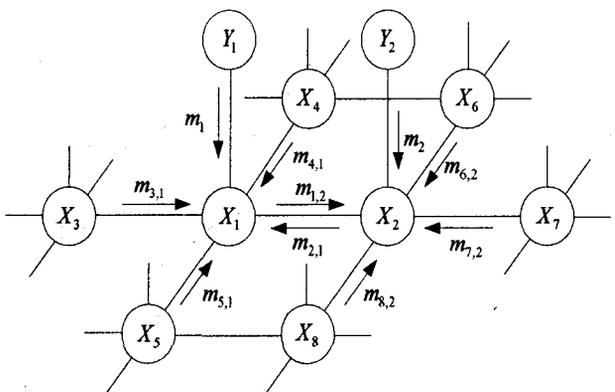


图 2 马尔可夫网络消息传播

图 2 中  $\{x_s\}$  是隐变量,  $\{y_s\}$  是观测变量。 $(m_{s,t})$  表示从结点  $s$  传递给结点  $t$  的消息。

信度传播算法有两种:和 - 积(Sum - Product) 和最大 - 积(Max - Product)。和 - 积计算每个结点的边缘分布概率,而最大 - 积计算整个 MRF 的最大后验概率<sup>[6]</sup>,所以文中采用最大 - 积算法。消息更新表达式为<sup>[5]</sup>:

$$m_{s,t}(x_t) =$$

$$\alpha \max_{x_s} \Psi(x_s, x_t) \Phi(x_s, y_s) \prod_{k \in N(s) \setminus t} m_{k,s}(x_s) \quad (12)$$

其中  $s, t$  是相邻的结点,  $m_{s,t}(x_t)$  表示从  $s$  传递给  $t$  的消息,  $\Psi(x_s, x_t)$  和  $\Phi(x_s, y_s)$  是兼容函数,  $N(s)$  表示  $s$  的邻域,  $\alpha$  是归一化常数。

信度传播算法的消息传播方式也有两种:同步传播和加速传播。在同步传播方式中,每个结点计算传递给各自邻域接点的消息,当每个结点计算完成之后,消息也就传播到每一个结点了,然后用于计算下一次迭代中的消息;在加速传播方式中,消息只沿一个方向传播,并且马上更新各个结点的消息。

结点的消息更新后,下一步就是计算各个结点的信度,计算信度的公式为:

$$b_s(x_s) = \alpha \Phi(x_s, y_s) \prod_{k \in N(s)} m_{k,s}(x_s) \quad (13)$$

其中  $\Phi(x_s, y_s)$  是兼容函数,  $m_{k,s}(x_s)$  是结点  $k$  传递给结点  $s$  的消息,  $N(s)$  表示  $s$  的邻域,  $\alpha$  是归一化常数。结点信度计算出来之后,就可以计算该结点的最大可能视差值,公式为:

$$x_s^{MAP} = \arg \max_{x_k} b_s(x_k) \quad (14)$$

其中 MAP 是最大后验概率,  $x_k$  表示结点的所有可能视差值。

#### 4 实验结果与分析

采用立体匹配经典测试图像 Tsukuba 进行实验,实验平台为 Matlab7.0。

实验 1 比较信度传播算法中的两种消息传播方式:同步传播方式和加速传播方式。实验采用 HSI 颜色距离构造的代价函数,比例系数  $k = 1$ ;Potts 模型参数:梯度域值  $\Delta I = 4$ ,模型参数  $P = 4, S = 20$ ;兼容函数转换公式(11)中参数  $D = 50$ 。实验结果如图 3 所示。

图 3 中,(a)、(c)、(e)分别是同步传播方式下迭代 1、8、32 次的结果,(b)、(d)、(f)是加速传播方式下迭代 1、4、8 次的结果。可以看出,同步传播方式收敛很慢,而加速传播方式只需迭代较少次数就可以收敛到较好的结果。从同步传播和加速传播的消息更新机制可以知道,在宽度为  $W$  的图像中,消息从一边传递到另一边,同步传播需要  $W$  次迭代,而加速传播只需要 1 代,因而加速传播收敛较快。另外,加速传播方式不需要保存上次迭代的消息,存储空间只需要同步传播方式的一半。

实验 2 分别采用基于灰度差的代价函数、基于 RGB 颜色距离的代价函数( $k = 0.25$ )、基于 HSI 颜色距离的代价函数( $k = 1$ ),对 Tsukuba 进行匹配实验。在实验中,基于灰度差的代价函数采用公式(5)所示函

数( $\delta_f = 4$ ),消息传播采用加速传播方式,Potts 模型和兼容函数转换公式的参数选取与实验 1 相同,迭代 8 次,最后得到的匹配结果如图 4 所示。

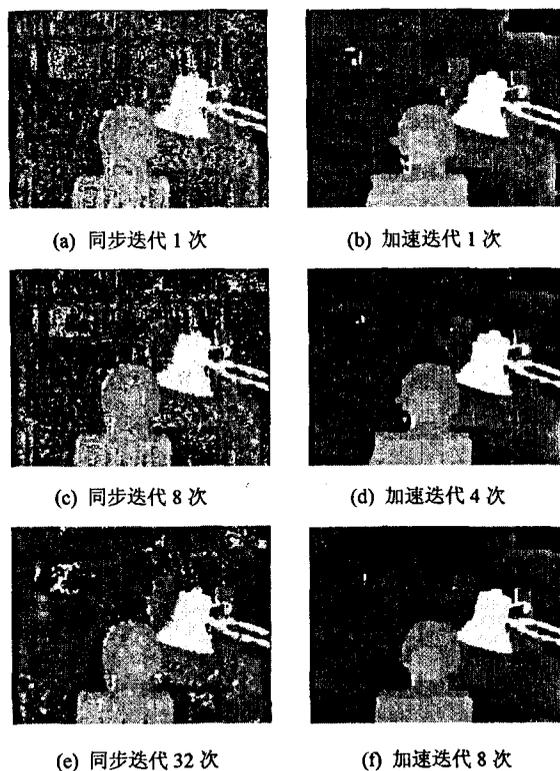


图 3 同步传播和加速传播比较

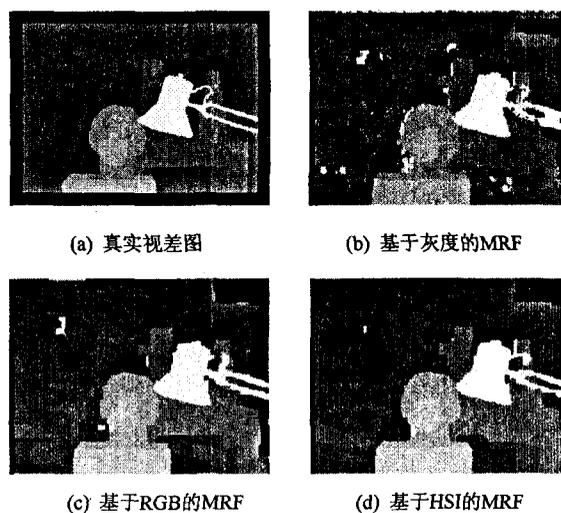


图 4 匹配结果比较

图 4 中,(a)是真实的视差图,(b)、(c)、(d)分别是利用灰度、RGB、HSI 信息得到的视差图。很明显可以看出,利用 RGB 和 HSI 信息得到的视差图比利用灰度信息得到的视差图更加平滑,特别是图像中的边缘区域,利用灰度信息得到的视差图有很大的噪声,而利用 RGB 和 HIS 信息得到的视差图只出现了少量的亮点,由此可知,在边缘不连续区域,基于颜色距离的匹配代价可以提供更丰富的信息,能改善匹配效果。为了从

客观上评价匹配效果的好坏,引入三个评价指标<sup>[8]</sup>:

- \*  $B_{\bar{O}}$  — 非遮挡区匹配误差大于 1 的百分比。
- \*  $B_{\bar{T}}$  — 非纹理区匹配误差大于 1 的百分比。
- \*  $B_D$  — 接近不连续区匹配误差大于 1 的百分比。

$B_{\bar{O}}$ 、 $B_{\bar{T}}$ 、 $B_D$  的表达式分别为:

$$B_{\bar{O}} = \frac{1}{N} \sum_{s \in \bar{O}} (|d(s) - d_T(s)| > 1) \quad (15)$$

$$B_{\bar{T}} = \frac{1}{N} \sum_{s \in \bar{T}} (|d(s) - d_T(s)| > 1) \quad (16)$$

$$B_D = \frac{1}{N} \sum_{s \in D} (|d(s) - d_T(s)| > 1) \quad (17)$$

公式(15)~(17)中  $N$  分别是对应区域的总像素点个数,  $d(s)$  表示像素点的视差估计值,  $d_T(s)$  是像素点的实际视差值。对图 4 中的(b)、(c)、(d) 计算  $B_{\bar{O}}$ 、 $B_{\bar{T}}$ 、 $B_D$  得到结果如表 1 所示。

表 1 误匹配率对比

视差图	$B_{\bar{O}}(\%)$	$B_{\bar{T}}(\%)$	$B_D(\%)$
b(灰度)	2.15	0.82	15.13
c(RGB)	1.72	0.74	9.54
d(HSI)	1.69	0.76	10.32

由表 1 可以看出,利用 RGB 和 HIS 信息的算法在非遮挡区、非纹理区和不连续区的误匹配率均小于利用灰度信息的算法,特别是在不连续区,误匹配率显著降低,显示出基于颜色空间的算法在不连续区的匹配上有很大的优势。

## 5 结束语

对测试图片的匹配比较实验表明,利用颜色信息代替灰度信息构建匹配代价函数,可以为立体图像对的全局匹配提供更丰富的信息。相对于基于灰度的 MRF 立体匹配算法,基于颜色空间的 MRF 算法可

以得到精确度更高的匹配结果。尽管加入颜色信息降低了误匹配率,但是不连续区的误匹配率还是很大,进一步工作可以研究更加有效地处理不连续区匹配的匹配方法。

## 参考文献:

- [1] Cai Xuan - ping, Zhou Dong - xiang, Li Gan - hua, et al. A stereo matching algorithm based on color segments[C]//IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems. Edmonton, Canada: [s. n. ], 2005: 3372 - 3377.
- [2] 顾 征, 苏显渝. 采用色彩相似性约束的立体匹配[J]. 光电工程, 2007, 34(1): 95 - 99.
- [3] 郭龙源, 夏永泉, 杨静宇. 一种改进的彩色图像匹配算法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(27): 98 - 104.
- [4] Chambon S, Cruzil A. Color stereo matching using correlation measures[J]. Complex Systems Intelligence and Modern Technological Applications, 2004, 23(5): 520 - 525.
- [5] Sun Jian, Zheng Nan - ning, Shum Heung - yeung. Stereo matching using belief propagation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(7): 1 - 14.
- [6] Tappen M F, Freeman W T. Comparison of graph cuts with belief propagation for stereo, using identical MRF parameters [C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Nice, France: [s. n. ], 2003: 900 - 907.
- [7] Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1222 - 1239.
- [8] Scharstein D, Szeliski R. A taxonomy and evaluation of dense two - frame stereo correspondence algorithms[J]. International Journal of Computer Vision, 2002, 47(1): 7 - 42.

(上接第 27 页)

户程序可以通过 Elastos Service 机制寻找特定的设备驱动实例提供的服务。如果能够获取到驱动程序的服务接口 IDriver, 就可以通过 IDriver 的方法来请求设备的 I/O 服务了。以“驱动程序接口的实现与配置”一文中所举的鼠标驱动为例, 客户程序可以实现如图 6 所示。

## 4 结束语

着重介绍了在嵌入式操作系统 elastos 平台下, 基于 CAR 构件技术的驱动程序开发模型, 它和传统的操作系统驱动程序模型有所不同, 它降低了驱动程序和系统其它部分之间的耦合程度, 而且能够更清晰地描述硬件设备, 使驱动程序更便于使用。

## 参考文献:

- [1] 上海科泰世纪技术有限公司. Elastos 资料大全[EB/OL]. 2006 - 10. <http://www.koretide.com.cn>.
- [2] 上海科泰世纪技术有限公司. CAR 构件技术与编程模型[EB/OL]. 2006 - 10. <http://www.koretide.com.cn>.
- [3] 上海科泰世纪技术有限公司. Elastos 技术白皮书[EB/OL]. 2006 - 10. <http://www.koretide.com.cn>.
- [4] Chen Rong. The Application of Middleware Technology in Embedded OS[C]// Workshop on Embedded System, In Conjunction with the ICYCS(6th). Hangzhou: [s. n. ], 2001: 1 - 3.
- [5] 潘爱民. COM 原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999: 25 - 32.
- [6] Corbet J, Kroah - Hartman G, Rubini A. Linux Device Drivers[M]. 3rd Edition. [s. l. ]: O'Reilly, 2005.