

存在镜面反射时的立体匹配研究

卢思军 唐振民 郭龙源 卢阿丽

(南京理工大学计算机科学与技术系 南京 210094)

摘 要 传统的立体匹配方法建立在 Lambertian 的漫反射模型之上,漫反射模型的立体匹配在一个图像中大部分是有效的,但是在处理图像中包含镜面反射部分时结果会产生严重的匹配错误。为了解决这个问题,根据二色反射模型引入一种漫反射和镜面反射的分离方法,匹配图像中存在镜面反射部分时先滤除掉镜面反射再进行匹配,在镜面反射部分也能匹配得到正确的视差。实验结果证明该方法很有效。

关键词 机器视觉,立体匹配,漫反射,镜面反射,色度

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A

Research on Binocular Stereo Matching in the Presence of Specular Reflections

LU Si-jun TANG Zhen-min GUO Long-yuan LU A-li

(Department of Computer Science & Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract Traditional stereo correspondence algorithms rely heavily on the Lambertian model of diffuse reflectance. While this diffuse assumption is generally valid for much of an image, processing of regions that contain specular reflections can result in severe matching errors. We addressed the problem of binocular stereo dense matching in the presence of specular reflections by introducing a novel correspondence measurement which separates reflection components based on chromaticity. Accurate depth can be estimated for both diffuse and specular regions. Unlike the previous works which seek to eliminate or avoid specular reflections using image preprocessing or multibaseline stereo, our approach works in its presence. Experiments with both synthetic demonstrate the effectiveness and robustness of our approach.

Keywords Machine vision, Stereo matching, Diffuse reflection, Specular reflection, Chromaticity

近 10 年,立体匹配已经成为计算机视觉领域的中心问题。在传统的双目立体匹配算法中,一种最普遍的假设是图像对中匹配像素的灰度是一致的,这种 Lambertian 假设在图像中存在镜面反射时是错误的。原因是镜面反射像素灰度值除了与景物的实际亮度有关,更多的是与摄像方向有关,因此左右图像中在镜面反射区域的匹配像素的灰度值不相等。我们的思想是开发一种不受镜面反射影响的匹配测度,在存在镜面反射区域时利用二色反射模型滤除掉镜面反射部分,只留漫反射部分,这样在镜面反射部分也能得到正确的视差。目前已经在做一部分解决立体匹配中镜面反射的工作。Bhat 和 Nayar^[3]在分析立体趋异和表面粗糙度之间的关系时考虑到存在镜面反射正确立体匹配的可能性。在文献[2]中,他们提供了一种三目系统,在计算对应像素的立体匹配时,尽量选择避免该像素产生镜面反射两张图片。Brelstaff 和 Blake^[4]在立体匹配之前剪除图像中存在镜面反射的部分。Bkutomi 和 Danade^[8]也采用了这种方法。文献[5]在一种可变结构的框架下估计景物的模型。文献[6]采用多基线的方法处理镜面反射问题,通过彩色图像之间直方图的差别来判断镜面反射部分,然后将检测到的镜面反射像素部分当作遮挡来处理。文献[3]中,Bhat 和 Nayar 讨论了在镜面反射时匹配点灰度

差异最小的情况,但是在镜面反射区域,仍然不能得到正确的景物视差。

存在镜面反射部分立体匹配最主要的困难是,在镜面反射区域采用什么方法来建立匹配点的可靠测度。Zhou Wei 和 Chandra Kambhamettu^[9]通过 Torrance-Sparrow 镜面反射模型在发生了镜面反射的部分建立了一种新的匹配测度。由于“镜面+漫”二色反射模型中漫反射和镜面反射在最大色度上有很大不同,因此镜面反射的区域最大色度一般都比较小,而且利用色度能够把发生镜面反射像素点的镜面反射和漫反射分离。我们的方法是先滤除掉镜面反射,在发生了镜面反射的区域只留漫反射的情况下建立匹配测度。由于在二色反射模型中利用色度分离镜面反射,在镜面反射区域视差估计的准确性能够得到很大提高。

1 传统匹配测度

一般来说,传统的立体匹配测度有 3 种类型:以点为基础的匹配测度、以区域为基础的匹配测度和以状态为基础的匹配测度。在双目立体稠密匹配中,用得最多的是以点为基础的匹配测度和以区域为基础的匹配测度。点匹配测度直接比较对应点的灰度或色彩差异,最普通的点匹配测度方法是

到稿日期:2008-12-08 返修日期:2009-02-25 本文受国家部委项目(J1500C002)资助。

卢思军(1975—),男,博士生,主要研究方向为机器人视觉、智能系统,E-mail:lusijun2002@163.com;唐振民(1961—),男,博士,教授,主要研究方向为机器人视觉、智能系统。

squared differences(SD)和 absolute differences (AD)^[8]。区域匹配假设以匹配点为中心的窗口内像素的视差是恒定的,比较以匹配点为中心的两个窗口像素灰度的差异。区域匹配测度有 sum-of-absolute-differences (SAD)和 Normalized cross correlation (NCC)^[8]。区域匹配测度通常用在局部匹配方法中,点匹配测试通常用在全局匹配方法中。还有其它一些匹配测度,如以梯度为基础的测度和非参数测度,这些匹配测度都是假设图像符合 Lambertian 假设模型。但是在存在镜面反射的区域,像素的灰度值和色彩有很大的不同,用以上这些匹配测度会产生严重的错误。

2 镜面反射模型

漫反射由光线内在的散射引起,与摄像的方向和角度无关。漫反射的色彩由材料的载色体性质决定。镜面反射来自材料边界的反射,因此它更多地依靠观察方向,镜面反射的色彩范围更多的是受到光源的影响。按照二色反射模型^[7],从不同种类物体反射的光线是由镜面反射和漫反射两部分线性组合而成的。

考虑二色反射模型和数字摄像机图像构成,图像灰度能描述如下:

$$I_c = w_d(X) \int_{\Omega} S(\lambda) E(\lambda) q_c(\lambda) d\lambda + w_s(X) \int_{\Omega} E(\lambda) q_c(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中, $X = \{x, y\}$ 是二维图像的坐标, q_c 是三维矢量, c 代表红、绿、蓝三元色 (r, g, b), $w_d(X)$ 和 $w_s(X)$ 分别是漫反射和镜面反射的权重系数, $S(\lambda)$ 是漫反射比函数, $E(\lambda)$ 是照明光谱能量分配函数, Ω 是摄像可见光谱范围。

通过简化,式(1)可以写为:

$$I_c(x) = w_d(X) B_c + w_s(X) G_c \quad (2)$$

其中, $B_c = \int_{\Omega} S(\lambda) E(\lambda) q_c(\lambda) d\lambda$, $G_c = \int_{\Omega} E(\lambda) q_c(\lambda) d\lambda$ 。式

(2)右边第一部分代表漫反射成分,第二部分代表镜面反射成分。

分离漫反射和镜面反射的方法建立在色度的基础上,根据文献[1],色度定义如下:

$$\sigma_c(X) = \frac{I_c}{\sum I_i(X)} \quad (3)$$

其中, $\sum I_i(X) = I_r(X) + I_g(X) + I_b(X)$ 。

由式(2)和色度定义的式(3)可以看到,仅存在漫反射时, $w_s = 0$, 色度会与 w_d 无关。对只有漫反射的色度定义如下:

$$\Lambda_c = \frac{B_c}{\sum B_i} \quad (4)$$

另一方面,当只存在镜面反射时, $w_d = 0$, 色度会与 w_s 无关。对只有镜面反射的色度定义如下:

$$\Gamma_c = \frac{G_c}{\sum G_i} \quad (5)$$

联合式(4)和式(5),式(2)可以写为:

$$I_c(X) = m_d(X) \Lambda_c + m_s(X) \Gamma_c \quad (6)$$

其中,

$$m_d(X) = w_d(X) \sum B_i \quad (7)$$

$$m_s(X) = w_s(X) \sum G_i \quad (8)$$

我们也能够设置 $\sum \sigma_i = \sum \Lambda_i = \sum \Gamma_i = 1$ 。结果由于 $c = \{r, g, b\}$, 会有 3 种类型的色度: 图像色度 σ_c , 漫反射色度 Λ_c 和镜面反射色度 Γ_c 。

3 从图像中分离镜面反射

通常情况下处理的图像都是太阳光源,图像的镜面反射部分是纯白色 ($\Gamma_r = \Gamma_g = \Gamma_b$)。分离镜面反射方法建立在最大色度、镜面反射灰度和漫反射点这 3 部分之上^[1]。最大色度定义如下:

$$\hat{\sigma}(X) = \frac{\max(I_r(X), I_g(X), I_b(X))}{\sum I_i(X)} \quad (9)$$

通过假设一个单一颜色照明的均一表面,在一个二维色度灰度空间, x 轴代表 $\hat{\sigma}$, y 轴代表 $\hat{I}$, $\hat{I}$ 是和 $\hat{\sigma}$ 同一颜色通道的图像灰度。从图 1 中可以看到,漫反射点全部在镜面反射点的右边。所以说,按照色度或是最大色度定义,不管 m_d 如何变化,漫反射点的色度都是一个常量。相反,镜面反射的色度随着 m_s 变化。根据镜面反射点和漫反射点色度的不同,我们设计了从二色反射中分离镜面反射部分的方法。

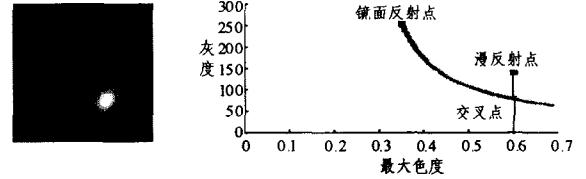


图 1 二维色度空间

假设点镜面反射点 $I_c(x_1)$ 和漫反射点 $I_c(x_2)$ 具有相同的颜色表面,投影到色度灰度二维空间,漫反射点的最大色度 $\hat{\sigma}$ 总是会比镜面反射点的最大色度 $\hat{\sigma}$ 要大。如果镜面反射部分的颜色是纯白色: $\Gamma_r(x_1) = \Gamma_g(x_1) = \Gamma_b(x_1)$, 分等级地减去镜面反射点所有通道的灰度,然后把它们投影到此空间,发现有的点形成一条曲线,如图 1 所示,这条曲线满足以下方程:

$$\hat{I} = m_d(\hat{\Lambda} - \hat{\Gamma}) \left(\frac{\hat{\sigma}}{\hat{\sigma} - \hat{\Gamma}} \right) \quad (10)$$

推导过程如下。

由式(3)和式(6)有:

$$\sigma_c(x) = \frac{m_d(x) \Lambda_c + m_s(x) \Gamma_c}{m_d(x) \sum \Lambda_i + m_s(x) \sum \Gamma_i} \quad (11)$$

将等(7)和式(8)代入式(11),有:

$$\hat{\sigma} = \frac{m_d \hat{\Lambda} + m_s \hat{\Gamma}}{m_d + m_s} \quad (12)$$

由式(12)可得:

$$m_s = \frac{\hat{\sigma} m_d - m_d \hat{\Lambda}}{\hat{\Gamma} - \hat{\sigma}} \quad (13)$$

将式(13)代入式(6),就是式(10)。式(10)中 $\hat{\Lambda}$ 和 $\hat{\Gamma}$ 分别是对应 $\hat{\sigma}$ 颜色通道的漫反射色度和镜面反射色度。

从图 1 中可以观察到曲线和直线有一个交点。在这个交点,镜面反射的 m_s 等于 0, 因此交点处就是除去镜面反射留下的漫反射部分。交点能通过下面的计算求得。前面提到,所有颜色通道的照明色度和等于 1, 因此如果 $\Gamma_r = \Gamma_g = \Gamma_b$, 那么 $\Gamma_c = \frac{1}{3}$, 从式(7)可知, $m_d = \sum I_i^{diff}$, $\sum I_i^{diff}$ 是所有颜色通道的漫反射部分总的灰度。由式(7)和式(10)可以得到:

$$\sum I_i^{diff} = \frac{\hat{I}(3\hat{\sigma} - 1)}{\hat{\sigma}(3\hat{\Lambda} - 1)} \quad (14)$$

为了计算 $\sum I_i^{diff}$, 就要知道 $\hat{\Lambda}(x_1)$ 的值。既然 $I_c(x_1)$ 和漫

反射点 $I_c(x_2)$ 是有相同表面颜色的两个点,那么 $\hat{\Lambda}(x_1)$ 可以从 $I_c(x_2)$ 求得,有 $\hat{\Lambda}(x_1) = \hat{\sigma}(x_2)$ 。

由式(6),镜面反射部分即为:

$$m_s(x_1) = \frac{\sum I_i(x_1) - \sum I_i^{diff}(x_1)}{3} \quad (15)$$

最后从发生了镜面反射点的灰度 I_c 中减去镜面反射部分 m_s ,就可以求得漫反射部分的灰度:

$$I_c^{diff}(x_1) = I_c(x_1) - m_s(x_1) \quad (16)$$

4 滤除镜面反射的立体匹配

图4中按照 Torrance-Sparrow 镜面反射模型在 Sawtooth 右图像中加入镜面反射。在图像中发生了镜面反射的点,亮度一般比较大。图2是 Torrance-Sparrow 原图像和加入镜面反射图像 RGB 三通道灰度值后产生的图像,可以看出发生了镜面反射的部分,亮度比其它位置的亮度要大。图2(d)中最上面突出的部分,也就是 RGB 三通道灰度值相加和最大的部分,正好对应加入镜面反射的图像中间上面的部分。可以看出,发生了镜面反射的部分,最大色度都会比较小。

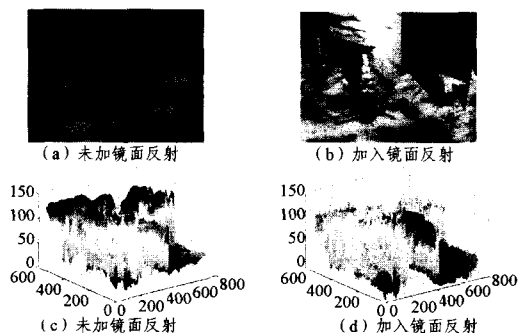


图2 RGB三通道灰度和

但是图像中有很多浅色部分也很容易被认是发生了镜面反射。立体匹配中,一般选择的最大视差范围是20个像素。在左图像中,以右图像亮度大的点相同坐标向右10个位置为中心,取 20×20 的窗口,在窗口内取最大色度大小在中间的200个点的色度平均值作为 $\hat{\sigma}(x_2)$ 。然后比较该点色度值 $\hat{\sigma}(x_1)$ 和 $\hat{\sigma}(x_2)$,在没发生镜面反射的浅色的 $\hat{\sigma}(x_1)$ 和 $\hat{\sigma}(x_2)$ 的值会比较接近,发生了镜面反射的地方 $\hat{\sigma}(x_2)$ 比 $\hat{\sigma}(x_1)$ 大很多。

图3是未加镜面反射时 Sparrow 左右图像130行所有点最大色度的比较。我们看到130行的所有点镜面反射色度曲线是基本一致的,只是在横坐标上有稍微移动,所以用左图 20×20 内最大色度大小在中间的200个点的色度平均值作为 $\hat{\sigma}(x_2)$ 是正确的。

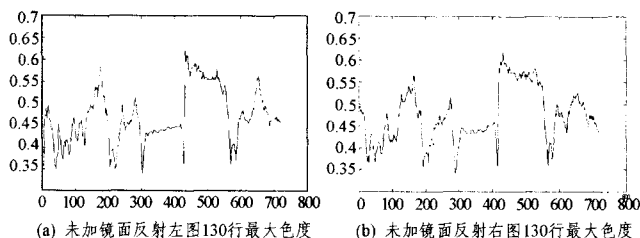


图3 未加镜面反射左右图130行最大色度

同时,一个单独的点不可能发生镜面反射。如果一个小

窗口内仅几个点来判断是发生了镜面反射,那个这几个点可以认为都是假的镜面反射。取 10×10 的窗口,如果窗口中判断镜面反射的点少于5个,那么认为这个窗口内所有点都没有发生镜面反射。

有了 $\hat{\sigma}(x_2)$ 的值,利用式(14)、式(15)和式(16)就可以求出该镜面反射点漫反射部分的灰度值。然后利用漫反射部分的灰度值进行立体匹配。其它没发生镜面反射、只发生了漫反射的点,直接用灰度值进行立体匹配。

从上面的描述可以看到,分离镜面反射的规则是以点为基础的。分离了镜面反射后只存在漫反射的图像,能适用于以点为基础和以区域为基础的立体匹配。

5 实验结果及分析

由于目前可得到的立体匹配图像对都是漫反射图像,为了检测本文算法在镜面反射时立体匹配的有效性,人为地在图像中加入镜面反射。镜面反射加入过程为:首先以真实视差为基础重建景物的3D模型,然后按照 Torrance-Sparrow 镜面反射模型,在图像中加入镜面反射,如图4所示。

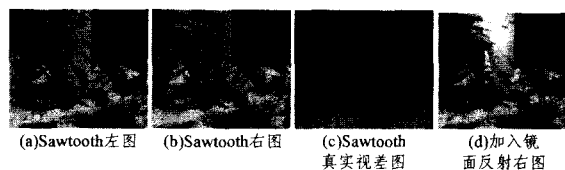


图4 Sawtooth 图像

分离镜面反射的规则是以点为基础的,所以同时适用于本地和全局的立体匹配方法。图5是采用以区域为基础的 SSD 算法和以点为基础的 DP(动态规划)方法。与本文中改进的先滤除镜面反射结果进行立体匹配结果比较,明显看到镜面反射部分本文的方法更为准确。



图5 匹配结果

结束语 本文提出了一种解决存在镜面反射时的立体匹配方法。因为假设图像采用 Lambertian 反射模型,所以传统的立体匹配方法在镜面反射区域匹配会出错。传统对待镜面反射的情况是尽量避免镜面反射,或是在立体匹配时剪除掉镜面反射部分,用插值的方法估计镜面反射部分的视差。我们处理这个问题是采用“漫反射+镜面反射”模型,利用漫反射和镜面反射在最大色度上的不同,设计了一种从镜面反射区域分离出镜面反射再进行匹配的方法。实验证明,该算法在镜面反射区域的匹配是正确的。

参考文献

- [1] Tan R T, Nishino K, Ikeuchi K. Reflection Components Separation based on Chromaticity and Noise Analysis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(10): 1373-1379
- [2] Bhat D, Nayar S K. Stereo in the presence of specular reflection [C]// IEEE ICCV. 1995: 1086-1092

(下转封三)

P	9	9	9
R	3.58	5.22	5.22
MT	0.60	0.42	0.42

从评价结果可以看出,四参数与五参数的丢失率是相当的,比三参数情况下减少了 0.18,明显优于三参数的检索结果。因此,对纹理图片的检索,不宜选用三参数。

另对四参数与五参数组合以检索结果中相关图像的平均排序评价,得到表 2 的结果。

表 2 相关图像的排序评价

评价量	四参数算法	五参数算法
AVRR	5.11	5.06
IAVRR	4.5	4.5
AVRR/IAVRR	1.14	1.12

可见,五参数查询结果 AVRR 虽然更接近 IAVRR,但区别并不大。

值得注意的是,实验对各种算法的检索时间进行了记录,在检索 400 多幅图像时,四参数的检索时间比五参数检索时间减少了 1.6 秒。这说明四参数的提取速度明显优于五参数。随着检索图片的增多,提取速度将相差更多,这对于实际应用中的图像检索技术是十分重要的。

结束语 综合分析表明,利用灰度共生矩阵进行基于纹理的图像检索,可提取四参数,采用加权的街区距离匹配,可平衡计算量及检索效果的双重需求,获得较满意的效果。同时,也应该看到,面临复杂的用户需求,一个单一的图像检索系统并不能得到最优解。如何通过多种算法的结合来更好地描述图像特征,并利用相关性反馈技术使图像同实际语义相

联系,在未来很长一段时间内都将是图像检索工作者研究的方向。

参考文献

- [1] Yan Ye. Text Image Compression Based on Pattern Matching [D]. University of California, 2002
- [2] Kia Omid E, Doermann David S, Rosenfeld Azriel, et al. Symbolic Compression and Processing of Document Images[J]. Computer Vision and Image Understanding, 1998, 70(3): 335-349
- [3] Karadimitriou K, Fenstermacher M. Image compression in medical image databases using set redundancy[C]// IEEE Proceedings of Data Compression Conference, 1997. DCC '97. March 1997: 445
- [4] Karadimitriou K, Tyler J M. The centroid method for compressing sets of similar images[J]. Pattern Recognition Letters, 1998, 19: 585-593
- [5] Lee Jiann-Der, Wan Shu-Yen, Ma Chenn-Min, et al. Compression Sets of Similar Images Using Hybrid Compression Model [C]// Proceedings 2002 IEEE International Conference on Multimedia and Expo, 2002. ICME '02
- [6] 杨有, 尚晋. 一种政府资源档案图像的二值化方法[J]. 计算机科学, 2007, 34(3): 227-229
- [7] Inglis S J. Lossless Document Image Compression[D]. University of Waikato, New Zealand, 1999
- [8] Hough P V C. Method and Means for Recognizing Complex Patterns[P]. US Patent 3,069,654, Dec. 1962
- [9] Woods R C. Digital Image Processing Second Edition[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2006: 532-534
- [10] Wong I Y, Casey R G, Wahl E M. Document Analysis System. IBM J. Research Develop, 1982, 26(6): 647-656
- [11] 杨波, 汪同庆, 叶俊勇. 带噪图像的多阈值零树编码方法[J]. 光电工程, 2004, 31(3): 60-63

(上接第 268 页)

- [3] Bhat D, Nayar S K. Stereo and specular reflection [J]. IJCV, 1998, 26(2): 91-106
- [4] Brelstaff G, Blake A. Detecting specular reflections using Lambertian constraints[C]// Proc. Int. Conf. on Computer Vision. 1988: 297-302
- [5] Jin H, Soatto S, Yezzi A. Multi-view Stereo Beyond Lambert[C]// Proc. IEEE Conf. CVPR. 2003
- [6] Lin S, Li Y, Kang S, et al. Diffuse-Specular Separation and Depth

Recovery from Image Sequences[C]// Proc. European Conf. Computer Vision. 2002: 210-224

- [7] Shafer S. Using Color to Separate Reflection Components[J]. Color Research and Applications, 1985, 10: 43-51
- [8] Yang Y, Yuille A, Lu J. Local, global, and multilevel stereo matching[C]// CVPR. 1993: 274-279
- [9] Zhou Wei, Kambhampettu C. Binocular Stereo Dense Matching in the Presence of Specular Reflections[C]// IEEE Conf. CVPR. 2006

(上接第 285 页)

结束语 在特征造型系统中, 拓扑元素的命名和正确辨识是系统实现的一个关键问题。本文分析了现有拓扑元素命名和辨识方法存在的主要问题, 提出了一种基于特征的拓扑元素命名方法, 有效实现了在模型拓扑结构发生变化时对拓扑元素的唯一命名与正确辨识, 为特征模型的正确修改、重构及维护设计者的设计意图打下了良好的基础。

参考文献

- [1] Marcheix D, Pierra G. A survey of the persistent naming problem[C]// Proc. of the Symposium on Solid Modeling and Applications. Saarbrücken, Germany, 2002: 13-22
- [2] 荆树旭, 何发智, 刘华俊. 拓扑元素永久命名综述[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(5): 545-552
- [3] Bidarra R, Bronsvort W F. Semantic feature modeling[J]. Computer-Aided Design, 2000, 32: 201-225
- [4] Kripac J. A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models[C]// Proc. of the 3rd ACM Symposium on Solid Modeling and Applications. Salt Lake City, Utah: ACM Press, 1995: 21-30

- [5] Capoleas V, Chen X, Hoffmann C M. Generic naming in generative, constraint-based design[J]. Computer-Aided Design, 1996, 28(1): 17-26
- [6] Chen X, Hoffmann C M. On editability of feature-based design [J]. Computer-Aided Design, 1995, 27(12): 905-914
- [7] 苏晓锋, 黄正东, 等. 形状特征中的拓扑元素编码体系[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2000, 12(2): 137-141
- [8] 陈正鸣, 高曙明, 张凤军, 等. 一种拓扑元素的命名和辨识方法[J]. 计算机学报, 2001, 24(11): 1270-1277
- [9] Zheng Jiajun, Fan Ming, Tong Ruofeng, et al. A mechanism for persistently naming topological entities[C]// Proc of the 8th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design. Xiamen, China, 2004: 84-89
- [10] Wang Yan, Bartholomew O N. Geometry-based semantic ID for persistent and interoperable reference in feature-based parametric modeling[J]. Computer-Aided Design, 2005, 37: 1081-1093
- [11] Wang Yanwei, Wu Junjun, Chen Liping, et al. Identity propagation method for tracing alterations of a topological entity in a history-based solid modeling system[J]. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2005, 27(3/4): 305-312
- [12] Marcheix D. A persistent naming of shells[C]// Proc. Ninth International Conference on Computer Aided Design and Computer Graphics. Hong Kong, China, 2005: 259-265