

文章编号:1001-9081(2007)10-2559-04

改进的基于凸壳仿射不变量的图像识别和配准算法

朱 政,赵卫东,王志成

(同济大学 CAD 研究中心,上海 200092)

(zuze_me@163.com)

摘 要:提出了一种新的基于凸壳和仿射不变量的图像识别和配准的方法。该方法利用从参考图和测试图中得到的特征点提取其凸壳,并计算凸壳的仿射不变特征向量。通过比较参考图和测试图特征向量的一致性,建立它们的仿射变换关系,最后利用凸壳内特征点的匹配来实现识别和配准。该方法的优点是即使目标物体被部分覆盖或者缺损,其图像也能够达到较好的识别和配准效果。

关键词:凸壳;仿射不变量;仿射变换;图像识别;图像配准

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A

Improved image recognition and registration algorithm based on convex hull and affine invariant

ZHU Zheng, ZHAO Wei-dong, WANG Zhi-cheng

(Research Center of CAD, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: An improved image recognition and registration algorithm based on convex hull and affine invariant was presented. The convex hulls were extracted from the feature points of the reference and test images, and then the affine invariants were calculated. These invariants were used to establish the correspondence between the convex hull vertices of the test image and the reference image in order to undo the affine transformation between them, and then a feature points matching approach for recognition followed this. This method is very well suited to handle the occasions that the object in the image has undergone an affine transformation and is partly covered.

Key words: convex hull; affine invariant; affine transformation; image recognition; image registration

0 引言

图像识别是计算机视觉中的一个重要领域,其首要的基本问题是图像间的匹配,即找到一幅图像与已知目标物体或其图像之间是否存在部分或者全部的对对应关系。特征匹配是各种图像匹配处理中常用的一种方法,它是利用目标物体的某些特征在经过某种变化后仍保持不变的特性实现图像匹配的方法,这些不变的特性被称为不变量。常用的不变量包括距不变量、几何不变量^[1,2]、B 样条不变量^[3]和仿射不变量等。

目标物体与其图像之间的变换实际上是一种透视投影关系,一般来说,这种变换是非线性的。但是,当目标沿着光轴方向的尺度远小于目标中心到摄像机的距离时,透视投影变换可以近似为仿射变换^[4]。因此,可以通过找到同一目标在不同仿射变换下的仿射不变量作为目标特征,实现不同角度的目标的识别。

常用的仿射不变量是面积不变量,即在仿射对应下,任何一对对应三角形面积之比等于常数。换句话讲,任意两个三角形面积之比是仿射不变量。一般利用仿射不变量进行特征匹配必须在目标特征完整的情况下才能达到良好的效果。但是在实际情况下,图像中的物体往往有一部分被覆盖或者缺损,因此文献[5]提出了一种利用凸壳仿射不变量的方法实

现不完整目标的配准,然后用特征点匹配的方法识别物体。但是文献[5]的方法对于凸壳的要求较高,如果物体被覆盖或者缺失的部分比较多,就无法被识别出了。本文对文献[5]的方法进行了改进,并建立了特征点与特征向量之间的关系函数来加快特征向量的查找。本方法降低了对凸壳的要求,并加快了特征向量的比对,在物体缺失度较高的情况下,其图像也可以达到很好的识别和配准的效果。

1 仿射变换和仿射不变性

一个二维空间的仿射变换可以表示为:

$$X' = AX + B \quad (1)$$

其中 $A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$ 是仿射矩阵,满足非奇异性,即 $\det(A) \neq 0$ 。仿射矩阵用来改变图像的大小、旋转和扭曲程度。 $B = [b_1, b_2]$,表示相对坐标平移。 X' 是坐标 X 经过仿射变换后的结果。

仿射变换有许多重要性质^[5],其中的一个重要性质是:一个目标图像的面积在仿射变换后等于它原始图像的面积乘上仿射矩阵的行列式,即 $V' = \det(A)V$ 。

由仿射变换的定义和性质,可以得出下面两个仿射不变量:

- 1) 两条封闭曲线所围成的面积之比是仿射不变量。
- 2) 两个三角形的面积之比是仿射不变量。

收稿日期:2007-04-13;修回日期:2007-06-18。

作者简介:朱政(1981-),男,上海人,硕士研究生,主要研究方向:CAD 及企业信息化技术、图形图像处理; 赵卫东(1965-),男,山东青岛人,研究员,博士生导师,博士,主要研究方向:企业信息化、图形图像处理等; 王志成(1975-),男,江苏泰兴人,讲师,博士,主要研究方向:图形图像处理、目标检测与跟踪等。

2 利用改进方法实现图像的认识和配准

2.1 凸壳

所谓凸壳,就是能包含平面上所有点的最小的凸边形,如图 1 所示。

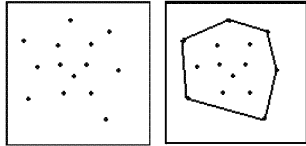


图 1 点集及其凸包

凸壳有许多适合形状表示和分析的重要性质^[5,6]:1) 唯一性,即一组点集只含有一个凸壳;2) 计算的高效性,从 n 个点中生成凸壳的复杂度上限为 $O(M \log_2 \frac{n}{2})$,最好情况下能达到 $O(N)$;3) 如果原始点集改变,那么它的凸壳也将随之受到影响。

2.2 改进的凸壳仿射不变特征向量

对一幅目标图像进行特征提取后,我们在图像上得到一组特征点,根据凸壳的性质 1,可以从这些特征点中得到唯一的一个凸壳。而性质 3 表明,当图像经过仿射变换或者被部分遮蔽后,这些特征点形成的凸壳与原来的凸壳相比可能会有很大的不同。如图 2 所示,假设左边的图是目标图像的特征点所形成的凸壳图像,当目标发生旋转并且被部分覆盖(黑色部分为被覆盖的区域)后,其凸壳图像变为右图所示,这两个凸壳从顶点数到形状都有很大的不同。因此要建立这两幅图的仿射变换关系,必须找到两个凸壳中的某种不变量。文献[5]方法以凸壳上连续四点生成一个六维的仿射不变特征向量作为不变量,在一般情况下能够达到配准和识别的效果。但在如图 2 这种情况下,测试图上无法找到与参考图对应的连续四个顶点,我们的方法克服了这一限制,利用任意四点,而不是连续四点中生成特征向量。但是,由此生成的特征向量的数量将会大幅增加,需要找到一个根据凸壳顶点,快速查找到对应的特征向量的方法,来加速特征向量的比对,本文中提出了一种方法,建立了顶点与特征向量索引的对应关系。此外,六维的特征向量有很大的冗余,所以,本文将特征向量的维数减少到了三维。

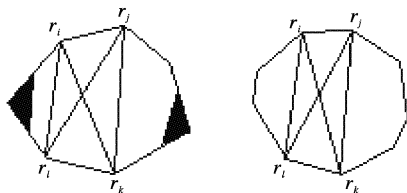


图 2 凸壳及其仿射变换

在以下的论述中,假设点 r_i 的坐标为 $r(i) = \begin{cases} x_i \\ y_i \\ z_i \end{cases}$,三个不

共线的点 r_i, r_j, r_k 所围成的三角形的面积为 $S_{i,j,k} = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_i & y_i & 1 \\ x_j & y_j & 1 \\ x_k & y_k & 1 \end{vmatrix}$ 。并且所有表示为 (r_i, r_j, r_k) 和 (r_i, r_j, r_k, r_l) 形

式的点在凸壳上都是按照顺时针排序的。

如果在目标原图的凸壳上含有完全不共线的四个点 (r_i, r_j, r_k, r_l) ,并且这四个点没有被遮挡,那么在仿射变换后的图像上必定含有四个一一对应的点 (r'_i, r'_j, r'_k, r'_l) 。由于四个

点完全不共线,所以它们可以生成四个三角形 $(r_i, r_j, r_k), (r_i, r_j, r_l), (r_i, r_k, r_l), (r_j, r_k, r_l)$,它们的面积表示为 $S_{i,j,k}, S_{i,j,l}, S_{i,k,l}, S_{j,k,l}$ 。相对地,经仿射变换后,亦可得到四个三角形 $(r'_i, r'_j, r'_k), (r'_i, r'_j, r'_l), (r'_i, r'_k, r'_l), (r'_j, r'_k, r'_l)$ 及其面积 $S_{i,j,k'}, S_{i,j,l'}, S_{i,k,l'}, S_{j,k,l'}$ 。根据仿射变换的性质,得到以下的等式:

$$\begin{aligned} S_{i,j,k'} &= \det(A) S_{i,j,k}, S_{i,j,l'} = \det(A) S_{i,j,l}, \\ S_{i,k,l'} &= \det(A) S_{i,k,l}, S_{j,k,l'} = \det(A) S_{j,k,l} \end{aligned} \quad (2)$$

利用仿射变换的第二性质,我们从式(2)中得到三组相等的仿射不变量:

$$\begin{aligned} I(i,j,k)(i,j,l) &\text{ 和 } I'(i,j,k)(i,j,l) \\ I(i,j,k)(i,k,l) &\text{ 和 } I'(i,j,k)(i,k,l) \\ I(i,j,k)(j,k,l) &\text{ 和 } I'(i,j,k)(j,k,l) \end{aligned}$$

其中:

$$I(o,p,q)(r,s,t) = \frac{S_{o,p,q}}{S_{r,s,t}} = \frac{S_{o,p,q'}}{S_{r,s,t'}} = I'(o,p,q)(r,s,t); \quad (3)$$

$\{o,p,q\}, \{r,s,t\} \in \{i,j,k,l\}$

通过这三组仿射不变量,组成两个相同的特征向量:

$$\begin{aligned} I(i,j,k,l) &= \{I(i,j,k)(i,j,l), I(i,j,k)(i,k,l), I(i,j,k)(j,k,l)\} \\ I'(i,j,k,l) &= \{I'(i,j,k)(i,j,l), I'(i,j,k)(i,k,l), I'(i,j,k)(j,k,l)\} \end{aligned}$$

综上所述,通过凸壳上完全不共线的四个点 (r_i, r_j, r_k, r_l) 和它们仿射变换后的对应点 (r'_i, r'_j, r'_k, r'_l) ,我们就可以计算出两个仿射不变量特征向量 $I(i,j,k,l)$ 和 $I'(i,j,k,l)$,并且 $I(i,j,k,l) = I'(i,j,k,l)$ 。在本文中,以此特征向量作为凸壳的仿射不变量。

2.3 建立特征向量的查找函数

对于如何存储这些特征向量,达到根据对应的顶点快速查找和比对的目的,一个有效的方法是建立一张几何哈希表^[5]。在本文中,将特征向量根据顶点的顺序按序存储,建立如下的查找函数:

$$Index(i,j,k,l) = h_1(i) + h_2(j-i-1) + h_3(k-j-1) + h_4(l-k-1) \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} h_1(x) = h_1(x-1) + \binom{n-x}{3}, \\ h_1(0) = 0 \\ h_2(x) = h_2(x-1) + \binom{n-i-1-x}{2}, \\ h_2(0) = 0 \\ h_3(x) = h_3(x-1) + n-j-1-x, \\ h_3(0) = 0 \\ h_4(x) = x_0. \end{cases}$$

利用这一公式,我们能方便地根据已知的四个顶点查找它们所对应的特征向量,加速特征向量的比对。找到一对相同的特征向量,就可以得到四对相应的特征点。在获取足够多的特征点后,就能建立凸壳顶点的仿射对应关系。

2.4 仿射变换参数的获得及通过特征点的比对实现目标识别

经过上一步特征向量的比对,从中得到了数对特征点,利用这些特征点,可以计算出仿射变换公式中的 6 个参数 $(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2)$ 。一般而言,只要有 3 对特征点,就能够得到这 6 个参数,不过得到的特征点的数量一般都大于 3 对,所以为了减小误差,可以通过最小二乘法求得这些未知数:假设

有 n 个顶点对 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)\}$ 和 $\{(x'_1, y'_1), (x'_2, y'_2), \dots, (x'_n, y'_n)\}$, $n > 3$ 。为使公式 $F(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, b_1, b_2) = \sum_{i=1}^n (X' - AX - B)^2$ 达到最小,对公式 F 分别求导,使得 $\frac{\partial F}{\partial a_{11}} = \frac{\partial F}{\partial a_{12}} = \frac{\partial F}{\partial a_{21}} = \frac{\partial F}{\partial a_{22}} = \frac{\partial F}{\partial b_1} = \frac{\partial F}{\partial b_2} = 0$,解此联立方程就求得了仿射变换的 6 个参数。

有相同凸壳的参考图和目标图表示的并不一定是同一个物体的图像,我们必须利用凸壳内的其他特征点实现图像的识别和配准。当获得仿射变换的参数后,首先要将参考图内的所有特征点映射到测试图中,一般来说,这些特征点所对应的坐标上都应该有测试图的特征点(由于误差,参考图的特征点经过仿射变换后,坐标并不一定与测试图的特征点重合,可以设定一个阈值 ϕ ,当两点的距离小于 ϕ 时,则表示它们是同一点)。不过由于有目标被部分覆盖或者残缺的情况,部分特征点经映射后,并没有匹配的测试图特征点。所以,我们设定阈值 θ ,当参考图中已匹配的特征点与所有的特征点的比值大于阈值 θ 时,表示识别成功,反之,则说明两幅图像中的物体可能有相同的凸壳,但是它们并不表示是同一个物体。阈值 θ 的大小与图像的不完整程度有关。在实际的特征点比对中,目标物体被覆盖或者残缺的部分只在整体中占有一小部分,一般不超过 20%,但是还应考虑图像中噪声点对识别的影响。在本文的实验中,我们将 θ 设为 70%,识别的效果最佳。

3 算法流程及实验

在应用本算法对图像进行识别和配准之前,首先需要得到参考图和测试图的特征点以及它们的凸壳。由于特征点的提取和凸壳的计算并不是本算法的重点,所以本文中假设已经提取了图像的特征点和凸壳的顶点。

3.1 算法的基本思想

首先,计算参考图和测试图上的所有特征向量。对于参考图凸壳上的每四个顶点 (r_i, r_j, r_k, r_l) ,在测试图上有可能含有它们的对应点 r'_i, r'_j, r'_k, r'_l ,并且它们的排列顺序有四种情况 (r'_i, r'_j, r'_k, r'_l) , (r'_j, r'_k, r'_l, r'_i) , (r'_k, r'_l, r'_i, r'_j) , (r'_l, r'_i, r'_j, r'_k) 。所以计算特征向量时,参考图上每四个顶点计算一组特征向量,而在测试图上每四个点需计算四组特征向量。

在计算得到特征向量后,按照凸壳顶点的排列顺序存储,利用式(4)便可以快速查找到这些特征向量。

其次,用二维数组 $P(m, n)$ 储存匹配的特征点,其中 m 和 n 分别为参考图和测试图的凸壳的顶点数,设初值为 0。将两幅图像的特征向量两两比对,当 $\|I(i, j, k, l) - I'(p, q, r, s)\| < \delta$ (δ 是事先预定的阈值),将 $P(i, p), P(j, q), P(k, r), P(l, s)$ 的值增加 1。比较完成后,扫描 $P(m, n)$ 中的每一行,找到这一行上的一个非 0 的最大值,这个值所对应的两个维数就是参考图与测试图中匹配的一对特征点。经过一遍扫描,就可以得到所有匹配的特征点,然后利用最小二乘法计算出仿射变换中的各个参数。

最后,使用仿射变换将参考图上的特征点映射到测试图中。统计出在两张图像中相匹配的特征点数目。当匹配的特征点的数目与参考图所有特征点数目之比大于 70%,则返回目标识别成功。反之,返回目标无法识别。

3.2 仿真比较实验

本文的算法是对文献[5]方法的改进,克服了参考图和测试图的目标凸壳必须含有连续对应的四个顶点的限制,为

了测试该改进算法的识别效果,我们把两种方法进行了实验比较。

本实验以图 3 为例,第一张为参考图,其余两张图都是对第一张图进行旋转和部分删减后的测试图。其中,测试图 1 含有与参考图相对应的连续四个凸壳顶点,而测试图 2 中没有这个条件。我们提取了这三张图的角点作为特征点。

测试图 1 满足文献[5]的要求,计算两张图像的仿射不变特征向量,得到测试图 1 与参考图的对应特征向量 $\{I'(1, 2, 5, 9) = \{1.597, 0.811, 0.622\}\}$ 和 $\{I(0, 1, 4, 5) = \{1.605, 0.808, 0.616\}\}$ 。利用这组特征向量所对应的特征点,计算仿射变换参数为 $A = \begin{Bmatrix} 0.700 & 0.709 \\ -0.713 & 0.712 \end{Bmatrix}, B = \begin{Bmatrix} -93.9 \\ 165.3 \end{Bmatrix}$ 。最后通过仿射变换将参考图中 16 个特征点的坐标映射到测试图 1 中,取得与之对应的特征点共 14 个,达到了事先设定的 70% 的阈值,因此识别成功。然而在测试图 2 的凸壳中无法找到与参考图凸壳对应的四个连续顶点,文献[5]的方法在这种情况下不再适用,因此识别失败。表 1 所示为利用文献[5]的方法得到的参考图和测试图对应的特征点及识别结果,其中数字表示顶点编号, x 表示无对应点。

表 1 文献[5]的识别结果

参考图	测试图 1	测试图 2
0	1	x
1	2	x
2	x	x
3	x	x
4	5	x
5	0	x
识别结果	成功	失败

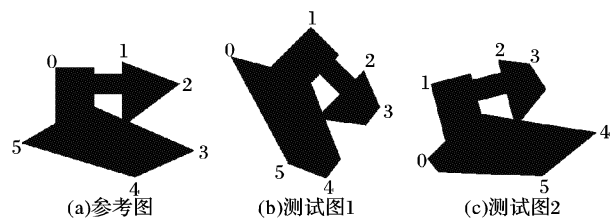


图 3 图像及其仿射变换和部分缺失后的结果

表 2 本文改进方法的识别结果

参考图特征点	测试图 1	测试图 2
0	1	1
1	2	2
2	x	x
3	x	4
4	5	5
5	0	x
识别结果	成功	成功

本文的改进方法对于测试图 1 同样能够识别成功,而且由于克服了连续四个顶点这一限制,我们依然从参考图和测试图 2 中计算出一组对应的特征向量: $I(0, 1, 3, 4) = \{0.821, 0.740, 0.882\}$ 和 $I' = \{0.812, 0.738, 0.893\}$ 。通过这组特征向量所对应的特征点,得到参考图到测试图 2 仿射变换参数 $A = \begin{Bmatrix} 0.970 & 0.246 \\ -0.247 & 0.972 \end{Bmatrix}, B = \begin{Bmatrix} -51.7 \\ 72.1 \end{Bmatrix}$,经过特征点配

准后,图像识别成功。表2是本文方法中得到的参数图和测试图对应特征点和识别结果,数字表示顶点编号,x表示无对应点。

电子图纸的自动审批是办公自动化的一个重要方面。在对电子图纸处理之前,我们需要将其与设计蓝图进行一致性比对。比对的第一步需要将两张图纸进行配准。由于蓝图经过扫描后,其图像除了发生偏移和旋转外,还有可能部分缺失或者模糊不清,如图4(b)所示。本文的方法正好可以克服这一困难,达到配准的效果。

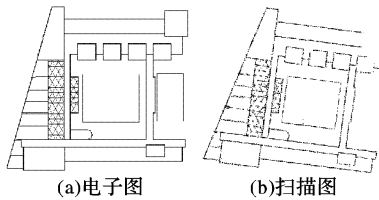


图4 电子图与扫描图的配准

表3 电子图与扫描图中对应的仿射不变特征向量

电子图的特征向量	扫描图的特征向量
(0.857 0.089 0.090)	(0.856 0.088 0.089)
(0.870 0.064 0.065)	(0.867 0.063 0.064)
(0.944 0.101 0.102)	(0.942 0.100 0.101)
(0.960 0.070 0.071)	(0.954 0.069 0.070)
(1.000 0.301 0.310)	(1.000 0.306 0.306)
(0.086 0.085 0.954)	(0.082 0.083 0.956)
(0.017 0.016 0.168)	(0.019 0.017 0.171)
(0.025 0.023 0.200)	(0.027 0.025 0.203)
(0.017 0.015 0.133)	(0.020 0.017 0.135)
(0.017 0.016 0.168)	(0.019 0.017 0.171)

表3为在设定特征向量相似度阈值 δ 为0.0001后,利用本文的方法从图4的电子图和扫描图中得到的一组特征向

(上接第2558页)

址。再查找邻居表,如果有与下一跳地址匹配的记录,用该记录中的MAC地址发送报文;否则,调用地址解析程序解析下一跳IP地址对应的MAC地址,解析成功,更新邻居表,发送报文,解析失败,返回错误。

在无线传感器网络中,内部节点只有一个接口,为简化下一跳的选择过程,做如下处理:前缀表中按照前缀长度递减排序,并加上链路本地前缀和默认路由,默认路由前缀长度设置为0,是表中的最后一条记录。这样在选择下一跳时,可顺序查找前缀表,第一个找到的就是最长前缀匹配,即使在真正的前缀中找不到匹配的下一跳,最后一条记录是默认路由,肯定能匹配成功。

删去目的地址缓存及其匹配过程。目的地址缓存的目的是提高下一跳选择的效率,在内部节点上的前缀记录实际上只有三条记录:链路本地地址前缀对应的记录;全球地址前缀对应的记录;默认路由。如果还使用目的地址缓存,不仅消耗内存空间和代码空间,而且实际的查询效率也得不到有效提高。

3 结语

本文针对无线传感器网络的硬件和底层协议特点,对标准IPv6协议的功能进行了裁剪和修改,在保证正常的协议行为功能的前提下,有效地简化了IPv6协议栈的实现,为无线

量,利用这些特征向量所得到的对应特征点计算电子图到扫描图的仿射变换参数 $A = \begin{Bmatrix} 0.976 & 0.132 \\ -0.119 & 0.990 \end{Bmatrix}$, $B = \begin{Bmatrix} -46.3 \\ 89.7 \end{Bmatrix}$ 后,将电子图配准到扫描图上,就可以进行一致性的比对了。

4 结语

本文提出了一种新的图像识别和配准的方法。该方法首先从图像特征点中得到凸壳,利用凸壳的仿射不变的特征向量求得对应的特征点。然后通过这些特征点计算出仿射变换的参数。最后将参考图的特征点映射到测试图上,对特征点进行点匹配实现了目标的识别和配准。实验结果表明,本文提出的基于凸壳仿射不变量的图像识别和配准方法对目标发生覆盖或缺损的情况可取得较满意的识别效果。

参考文献:

- [1] MUNDY J, ZISSERMAN A. Geometric Invariance in Machine Vision[M]. MA: MIT Press, 1992.
- [2] FLUSSER J, SUK T. A moment-based approach to registration of images with affine geometric distortion[J]. IEEE Transaction on Geoscience And Remote Sensing, 1994, 32(2): 382-387.
- [3] COHEN F S, HUANG Z, YANG Z. Invariant matching and identification of curves using B-splines curve representation[J]. IEEE Trans. Image Processing, 1995, 4(1): 1-10.
- [4] KHALIL M I, BAYOUMI M M. A dyadic wavelet affine invariant function for 2D shape recognition[J]. IEEE Transaction Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(10): 1152-1164.
- [5] YANG Z, COHEN F S. Image registration and object recognition using affine invariants and convex hulls[J]. IEEE Transaction On Image Processing, 1999, 8(7): 934-946.
- [6] 刘新,刘任任.一种改进的构建凸包的分治算法[J].计算机工程与科学,2006,28(8):63-65.

传感器网络提供了一个很好的通信平台。

文中提到的适配层和IP协议栈,以及未提到的精简的传输层和应用层服务,都已由项目组的所有成员合作实现,并取得很好的效果。其中IP层、ICMPv6和邻居发现协议占用的总代码空间为5.4K左右。

参考文献:

- [1] IEEE 802.15.4-2003, Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)[S]. IEEE Society, 2003.
- [2] HINDEN R, DEERING S. RFC 2373, IP Version 6 Addressing Architecture[S]. 1998.
- [3] DEERING S, HINDEN R. RFC 2460, Internet Protocol Version 6 (IPv6) Specification[S]. 1998.
- [4] NARTEN T, NORDMARK E. RFC 2461, Neighbor Discovery for IP Version 6 (IPv6)[S]. 1998.
- [5] THOMSON S, NARTEN T. RFC 2462, IPv6 Stateless Address Autoconfiguration[S]. 1998.
- [6] DAVIES J. Understanding IPv6[M]. Microsoft Press, 2003.
- [7] CHAKRABARTI S, NORDMARK E. LowPan Neighbor Discovery Extensions[S/OL]. [2007-04-01]. draft-chakrabarti-6lowpan-ipv6-nd-02.txt.
- [8] MONTENERGRO G. Transmission of IPv6 Packets over IEEE 802.15.4 Networks[S/OL]. [2007-04-12]. draft-ietf-6lowpan-format-05.