

行人运动建模技术综述^{*}

胡清梅^{a, b}, 方卫宁^{a, b}, 郭北苑^{a, b}, 李广燕^a

(北京交通大学 a. 轨道交通控制与安全国家重点实验室; b. 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘 要: 随着计算机数值模拟技术的迅速发展, 行人运动仿真技术开始成为人群疏散仿真、城市规划和计算机疏散软件开发方面的研究热点。介绍了对行人建模仿真的初步研究, 重点介绍了基于行人行为的微观行人运动建模方法, 并对各个模型进行了比较分析和研究展望。

关键词: 行人运动模型; 疏散仿真; 行人行为

中图分类号: TP319 文献标志码: A 文章编号: 1001-3695(2009)02-0444-04

Review on pedestrian simulation model

HU Qing-mei^{a, b}, FANG Wei-ning^{a, b}, GUO Bei-yuan^{a, b}, LI Guang-yan^a

(a. State Key Laboratory of Rail Traffic Control & Safety, b. School of Mechanical, Electronic & Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Along with the rapid development of computer simulation technology, pedestrian movement simulation technology has become a research focus of crowd evacuation simulation, urban planning and software development of crowd evacuation. This paper introduced the latest achievement of pedestrian movement simulation, with the emphasis on microscopic pedestrian simulation model. In the end, gave comparative analysis of all models and some research prospects.
Key words: pedestrian simulation model; evacuation simulation; pedestrian behavior

0 引言

行人运动模型是对现实世界中行人行为特征的抽象和数学描述。建立通用的行人运动模型具有很大难度。一方面, 人是自然界最复杂的智能体, 日常生活中的每一件小动作, 如喝水、购物, 其背后都隐含着复杂的感知和决策过程, 在这些方面人类对于自身认识还相当不够; 另一方面, 现实世界人群中的每个人都是一个独立的智能体, 即使拥有共同的目标, 每个人的立场、性格也不相同, 甚至对于共同目标的认识也不尽相同, 因此, 很难抽象出隐藏在复杂现象背后的共性特征。不过尽管人的行为是比较复杂的, 有时或多或少地表现出无序, 但仍然还是可以找到规律性。国外学者曾得出这样一些结论, 如行人对于绕道或者向相反方向运动表示出强烈的厌恶心理; 行人总是与他人或公共设施边界保持一定的距离; 行人有时会重复别人的行为方式; 在拥挤场合, 人群通常会因为恐慌造成推挤和惊跑, 从而导致冲撞践踏并引起伤亡事故等。

关于人群拥挤行为的研究最早始于三十年前, 早期的研究是建立在直接观察的基础上。Polus 等人^[1]提出了一种 level-of-service 的方式设计人的行为。但这种方式不能有效地对群集人流进行预测, 因此, 不少学者对此进行了改进, 提出了多种, 但是这些模型均没有考虑拥挤人群的自相互影响, 所以, 在实际应用中因人流的相互干扰而遇到很大障碍。Henderson 教

授^[2]曾提出一个有建设意义的设想, 他将拥挤的人流近似于气体或流体, 这种设想得到了部分证实。但实际空气动力学或流体力学应用于人群必须进行适当的修正, 应考虑人与人之间交互的影响, 如避让、减速等因素。尽管这种理论可以用数学公式来表达, 对于单个个体的人进行行为建模是合适的, 但是流体力学方程组的解很难获得。因此, 目前国外学者的研究主要集中在人群行为的微观模型研究上, 相关的模型有磁力模型、气体格子模型、元胞自动机模型和社会力模型^[3, 4]等。

在我国, 人群拥挤行为的研究还处于起步阶段, 研究范围仅局限在建筑火灾安全疏散模型的研究上, 研究单位比较少。1997 年东北大学的陈全根据火灾中人的行为特点^[5], 对人在火灾中避难行为规律进行了初步计算机模拟仿真; 此后, 武汉大学方正等人^[6]提出了一种建筑疏散的网络模型; 中国科技大学火灾科学国家重点实验杨立中等人, 建立了基于元胞自动机的火灾疏散模型^[7], 针对火灾紧急情况制定了特殊的规则。以方正的网络网格模型为例, 该模型首先将建筑物按功能划分为网络单元, 根据人员可能的移动方向确定网络流向, 再在网络单元内部划分网格, 人员在网络单元内按网格移动。确定了人员的移动速度和方向及初始位置后, 即可按拉格朗日法计算人员的新位置, 直到所有人员全部撤离建筑物为止。最后通过编制人员疏散移动仿真计算机应用软件, 计算出人员疏散时间, 进而可以对安全疏散设计进行评价。

收稿日期: 2008-05-26; 修回日期: 2008-08-08 基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(9052007); 国家自然科学基金资助项目(50308002); 轨道交通控制与安全国家重点实验室开放课题基金资助项目(SKL2007K004)

作者简介: 胡清梅(1982-), 女, 湖北宜昌人, 博士研究生, 主要研究方向为轨道交通安全与人因工程、轨道交通安全模拟与仿真(manybaixue@gmail.com); 方卫宁(1968-), 男, 浙江杭州人, 教授, 博士, 主要研究方向为轨道交通安全与人因工程、轨道交通安全模拟与仿真; 郭北苑(1973-), 男, 江西信丰人, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为轨道交通车辆工业设计、图像处理; 李广燕(1960-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要研究方向为安全与人因工程。

1 行人运动建模技术

目前通用的人群运动建模方法均处于初步研究阶段, 实际应用有一定难度。宏观模型中忽略了个体之间的差异, 这与实际情况是不相符合的。由于微观模型可以对行人流的详细行为进行描述, 近来它们引起了更多关注。其中代表性的模型有磁力模型、气体格子模型、排队论模型、元胞自动机模型和社会力模型等。下面对这些模型进行详细介绍。

1.1 磁力模型

Shigeyuki 等人^[4]提出了磁力模型的概念。在该模型中, 行人被认为是位于磁场中的磁体, 行人和障碍物是正磁极, 出口或目的地则是负磁极, 根据同性磁极相排斥、异性磁极相吸引的原理, 行人会受到负磁极的吸引力而走向出口或目的地。在运动过程中, 行人之间、行人和障碍物之间会由于同性磁极而互相排斥。

要应用磁力模型, 在仿真之间有一些参数需要初始化, 如目的地、位置、最大速度、方向、开始的时间等。根据库仑定律 (Coulomb's law), 速度会随加速度无限增大, 因此在行人运动中, 需要限定最大速度。

根据磁力模型的原理, 可以利用库仑定律来计算行人磁体所受到的作用力。库仑定律的表达式如下:

$$F = 1/4 \epsilon_0 \times 1/r \times (Q_1 \times Q_2) / s^2 \tag{1}$$

其中: Q_1 、 Q_2 为磁体的磁性强度; s 为两个微粒间的距离; ϵ_0 为电容率; ϵ_r 为相对电容率。

将库仑定律应用到磁力模型中时, 需要对式 (1) 作一定的修改, 将 $1/4 \epsilon_0$ 和 ϵ_r 替换成与行人运动相关的常量 k 。另外, 行人的受力是有方向的, 因此需要乘一个矢量方向 \vec{s} (从行人指向目的地磁极), 这样该计算公式可写成如下形式:

$$\vec{F} = k \times [(Q_1 \times Q_2) / s^2] \vec{s} \tag{2}$$

从式 (2) 中可以看出, 如果 Q_1 和 Q_2 具有相同的磁极, 行人间就会相互排斥; 反之, 如果磁极不同, 比如具有正磁极的行人和具有负磁极的目的地, 就会有吸引力产生, 吸引行人向目的地运动。当多个磁体相互作用时, 力的作用是可以相互叠加的。

除了根据库仑定律所计算得出的施加于行人的作用力之外, 还需添加另一个作用力作用于行人以避免与他人相撞。当某个特定区域的一个行人与另外一个行人发生交互时, 可添加一个排斥力作用于该行人, 产生一定的加速度, 使得该行人改变其运动方向以避免与他人相撞。加速度的计算式如下:

$$a = \tan^{-1} \frac{F \cos \theta}{v_A} \tag{3}$$

其中: a 为作用于行人 A 的作用力 (该作用力改变了其运动方向) 所产生的加速度; v_A 为行人 A 的当前速度; θ 为行人 A 的原速度方向与行人 A 和 B 之间连线的夹角; θ' 为行人 A 改变后的运动方向与行人 A 和 B 之间连线的夹角。

磁力模型曾被有效地应用到火灾疏散、地铁站的候车大厅中的行人运动和旅馆的中央大厅中的行人运动等场景中。在火灾疏散中, 该模型可以计算人群逃出建筑物的时间。但该模型的缺点在于每个行人的力负荷参数的确定是由实验得出的, 没有理论计算公式, 在实际中不能得到很好的验证, 而且该模

型也不能体现人群运动的宏观特性。

1.2 排队论模型

在排队论模型中, 行人的运动是基于概率函数, 行人按一定的概率到达服务点, 获取服务和离开队列。排队网络模型的三个基本的构成要素是动态实体的到达模式、排队规则和服务器和服务机制 (如 FIFO、先进先出机制)。在以研究疏散为目的的微观行人运动仿真中, 先后有好几位学者都提出了行人流相关的排队网络模型^[8], 并将该模型应用到建筑物的疏散仿真研究中。下面举例介绍 Lovas 的随机排队模型。

Lovas 将随机模型应用到建筑物中的人群运动中, 提出排队网络模型。在模型中, 建筑物被划分成网格, 节点代表房间, 连接代表门, 行人被视为是单一的流动体。运动时, 行人从某个节点出发, 依据一定的概率 (该概率由概率公式计算得出) 从所有可能的连接中选择一个连接 (如果选择的连接不可用, 行人就必须等待或寻找新的连接); 然后到达一个新的节点, 每个行人都选择尽可能快和安全地移向出口, 其移动的路径和疏散时间记录在每个节点中。在此模型基础上开发的仿真软件有 EVACSIM, 主要是用于建筑物的疏散仿真。

排队网络模型有很好的视觉化效果, 可以模拟排队系统中的瓶颈效应。而且可以计算评估疏散时间。但是行人的行为, 如碰撞等在模型中体现得不太明显, 尤其在拥挤环境下不太真实。

1.3 气体格子模型

格子气体模型是一种介于微观和宏观行人流建模方法之间的一种建模方法, 近几年研究较少, 主要是日本的学者在这个模型上研究较多。到目前为止, 已经成功建立了很多格子气体模型, 如带有出口的大厅、双向通道、多向通道、人流交汇场景等。

格子气体模型最常用的有偏随机模型^[9], 其建模方法是将平面划分为一个个小格子或三角形, 人员占据交点处, 并且每个行人的运动方向是前、左、右三个方向, 根据这三个方向的确定值大小来决定下一步运动方向。图 1 是一个目标点在右方的行人的所有运动可能, 共有八种。

- (a) $p_{t,x} = D + (1 - D) \beta$; $p_{t,-y} = (1 - D) \beta$; $p_{t,y} = (1 - D) \beta$
- (b) $p_{t,x} = D + (1 - D) \beta$; $p_{t,-y} = (1 - D) \beta$; $p_{t,y} = 0$
- (c) $p_{t,x} = D + (1 - D) \beta$; $p_{t,y} = (1 - D) \beta$; $p_{t,-y} = 0$
- (d) $p_{t,y} = 1 - \beta$, $p_{t,-y} = 1 - \beta$, $p_{t,x} = 0$
- (e) $p_{t,x} = 1$, $p_{t,y} = 0$, $p_{t,-y} = 0$
- (f) $p_{t,y} = 1$, $p_{t,-y} = 0$, $p_{t,x} = 0$
- (g) $p_{t,-y} = 1$, $p_{t,y} = 0$, $p_{t,x} = 0$
- (h) $p_{t,x} = p_{t,-y} = p_{t,y} = 0$

在这里, D 表示人员运动的倾向, 在不同的情况下有不同的取值, 但一般情况下取 $D=0.5$ 。人员在三个运动方向 $p_{t,-y}$ 、 $p_{t,x}$ 、 $p_{t,y}$ 中选取计算值最大的方向作为下一步的运动方向。运动速度为一次走一个格点。

一般来说, 现在对于格子气体模型已经从单个行人的角度开始建模, 比起宏观人流模型有所进步, 但是较复杂; 由于在建模中没有考虑彼此之间的相互作用, 比起微观人流模型又显得精确度不够, 较为粗糙。但是, 它也具有宏观模型和微观模型所不具有的长处, 结合两者的优点也许在将来会是一个人流建

模的方向。

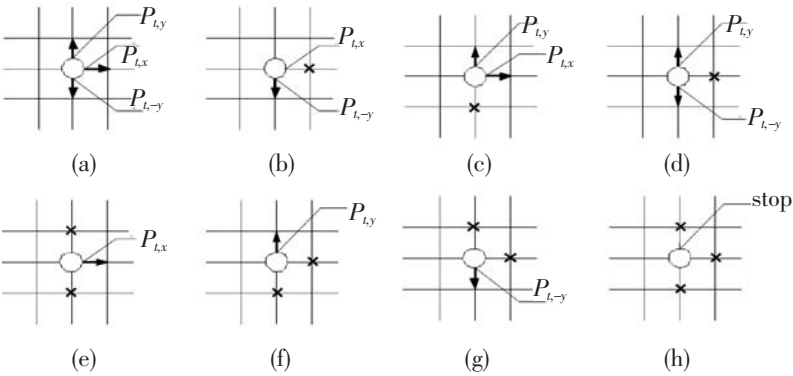


图 1 气体格子中右行行人所有可能的运动方向

1.4 元胞自动机模型

元胞自动机是由大量简单一致的个体通过局部联系组成的离散、分散及空间可扩展系统。最早由 von Neumann 等人提出来,起初主要用于模拟生命系统所具有的自复制功能。近年来,人们对元胞自动机模型的兴趣大增,原因是这类简单的模型能十分方便地复制出复杂的现象或动态演化过程中的吸引子、自组织和混沌现象。

这种方法已经非常成功地应用于车辆流建模和交通网络的建模上,并且已经被证实对于一系列密度条件下的复杂交通流仿真有很好的近似性。其中最经典的是 Wolfram 建立的第 184 号元胞自动机模型。其他模型一般都是在该模型的基础上进行改进以模拟更真实、复杂的情况,比较有代表性的是 N-S 模型和 F-I 模型。N-S 模型是一个简化的模型,每一步都是模拟实际交通流各种特性所必需的,它为更复杂的情况(如两车道和双向交通流等)或城市交通流提供了基本规则。这些模型揭示了车辆速度的非线性变化规律,再现了真实交通流中的阻塞、时走时停等现象的发展过程,成功解释了交通流中的激波自组织临界现象,在指导城市交通建设方面起到了重要的作用。这些交通流模型也为元胞自动机行人流模型规则的制定提供了基本依据。但是,研究者发现将这种理论应用于行人流的建模是一件很困难的事情。因为行人流比车流运动更复杂、更无规律;行人流不像车流有固定的出入口,行人运动灵活性更大,不拘束于类似车流的路线;行人流比车流更容易发生交汇、碰撞,并且运动加速减速过程比车辆短很多。

与其他的建模方法相比,元胞自动机不是按照公式进行建模而是根据行为规则,元胞自动机行为模型根据出现的结果改变状态。这也就是元胞自动机的吸引人之处,可以轻易地在计算机上实现,并且与基于公式微观仿真相比,运行速度大大提高。

到目前为止,Blue 和 Adler 对于行人流的元胞自动机模型^[10]进行了大量的研究,建立了双向、四向通道等一系列模型,但是也存在着行为规则过于简单、人员速度单一、不能十分精确反映人员运动状况等缺点。

元胞自动机建模方法如下:

a) 空间划分。一般是将空间均匀地划分为一系列方格矩阵,在普通情况下,设定格子为 0.457 m × 0.457 m,在紧张恐慌情况下设定格子为 0.4 m × 0.4 m。每一个格子只能同时由一个人占据,行人根据运动规则在格子间进行运动。

b) 运动方向。一般设定人员运动方向为前、后、左、右四个方向,但有的模型为了追求与实际情况的相似设定人员的运

动方向为前、后、左、右、左前、右前、左后、右后八个方向。

c) 运动速度。到目前为止,几乎所有的模型均设定人员的速度为定值,这个值一般采用统计得到的值,也就是规定人员一个时间步只能前进一个格子。只有 Blue 在双向通道的元胞自动机模型中设定人员速度为可变的,但也只是在前进的一个方向上可以实现变速。

d) 行为规则。一般都设定人员运动按照向距离目标点最近的格子前进的原则,有的也以人员的自组织行为规则作为运动规则。

1.5 社会力模型

Anders^[3] 和 Helbing 等人^[11] 提出了社会力模型的概念,该模型是以牛顿力学为基础,假设行人受到社会力的作用,从而驱动行人运动。在该模型里,依据行人不同的动机和他在环境中所受到的影响,一共受到三种作用力的影响,即驱动力 f_i^0 、人与人之间的作用力 f_{ij} 和人与障碍物之间的作用力 f_{ib} , 这些力的合力作用于行人,产生一个加速度,其表达式如下:

$$m \frac{d v_i(t)}{dt} = f_i^0 + \sum_{j \in I} f_{ij} + \sum_b f_{ib}$$

(4)

a) 驱动力 (driving force)。主观意识对个体行为的影响可化为个体所受自己施加的“社会力”,体现了行人以渴望的速度移动到目的地的动机。

$$f_i^0 = m_i (\dot{v}_i^0(t) e_i^0 - v_i(t)) / \tau_i$$

(5)

其中: \dot{v}_i^0 为行人期望的速率; $v_i(t)$ 为其实际速度; $e_i^0(t)$ 为期望的运动方向; τ_i 为适应时间。

期望的运动方向可由行人此刻的位置 x_i 和目标位置 p 算出:

$$e_i^0(t) = (p - x_i) / |p - x_i|$$

(6)

b) 人与人之间的作用力 (interactions between pedestrians)。试图与其他行人保持一定的距离所施加的“力”包括社会心理力 (socio-psychological force) $f_{ij}^{soc}(t)$ 和身体接触力 (physical interactions) $f_{ij}^{ph}(t)$ 。设个体 j 对个体 i 的影响力为 $f_{ij}(t)$, 表达式如下:

$$f_{ij}(t) = f_{ij}^{soc}(t) + f_{ij}^{ph}(t)$$

(7)

c) 人与边界之间的作用力 (interactions with boundaries): 边界和障碍对人的影响类似于人与人之间的作用。设边界 b 对个体 i 的“影响力”为

$$f_{ib}(t) = f_{ib}^{soc}(t) + f_{ib}^{ph}(t)$$

(8)

社会力模型能够非常真实地描述现实中的很多现象,是目前所有的仿真模型中最能体现人群真实运动情况的模型,因为模型中的变量所代表的物理意义是可以计算的。仿真的结果也显示了现实生活中的人群运动自组织现象。不过,社会力模型的缺点在于计算量太大,要实现大规模仿真,对于目前的计算机运动速度来说是一个挑战。

2 模型比较

上述各种行人运动仿真模型都是为了解释人群运动的某种现象而提出的。在所有的模型中明显体现的现象是人群的排队现象,每个行人都因其内在的驱动机制而排队。根据已有

文献的描述。其中社会力模型和元胞自动机模型能体现宏观的行人流运动特性,比如行人的运动速度随密度增加而下降。磁力模型的优点在于能够从很复杂的环境中寻找路径,因为该模型是一种基于疏散和探索式寻径的模型。社会力模型独特的优点在于较强的真实性,能体现人群运动的自组织现象,如图 2 所示。虽然在社会力模型中并没有规则去产生这种现象,但由于行人能够内在自发地运动,产生人群的分层现象,该现象可以在实际生活中密度较高的行人混合流中观察到。

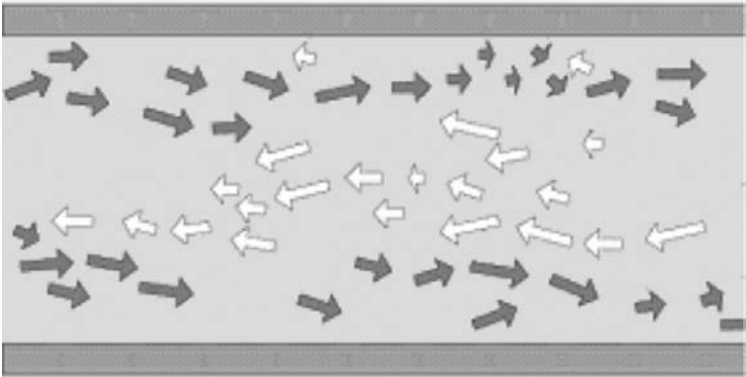


图 2 行人运动的自组织分层现象

网络排队论模型主要在于计算疏散时间,其模型提出的主要目的就是为了模拟紧急情况下的疏散,特别是火灾情况下。国内以此模型为基础,已经演化出了多个火灾疏散模型,通过编制人员疏散移动仿真计算机应用软件,计算出人员疏散时间,进而可以对安全疏散设计进行评价。但该模型的主要缺点在于不能体现人群运动的各种真实的现象。

总的来说,人群运动仿真建模方面尚缺乏通用的建模方法和完善的模型框架。到目前为止,还没有一个模型能完全模拟人在疏散中的各种行为。另外,并非所有的行为都能被充分认识或完全量化。所以,现有的模拟方法中试图把所有人的行为进行量化的思路是难以实现的。在未来的发展中,仍需提出新的模型或理论来解决这一问题,人工智能模拟方法的应用将

成为这一领域的新热点。人工智能模型中还需要进一步处理人的决策行为与环境(包括建筑环境和灾害环境)之间的互动关系。

参考文献:

[1] OLUS A, SCHOFFER J L, USHPIZ A. Pedestrian flow and level of service [J]. Journal of Transportation Engineering, 1983, 109 (4) : 46-56.

[2] HENDERSON L F. On the fluid mechanic of human crowd motions [J]. Transportation Research, 1974, 8(6) : 509-515.

[3] ANDERS J. Pedestrian simulations with the social force model[D]. Dresden, Germany: Dresden University of Technology, 2004.

[4] SHIGEYUKI O, SATOSHI M. A study of simulation model for pedestrian movement with evacuation and queuing[C] //Proc of International Conference on Engineering for Crowd Safety. London: Elsevier Science Ltd, 1993: 271-280.

[5] 肖国清, 陈宝智. 建筑物火灾中人的行为的研究[J]. 人类工效学, 2002, 8(1) : 46-50.

[6] 方正, 卢兆明. 建筑物避难疏散的网格模型[J]. 中国安全科学学报, 2001, 11(4) : 10-13.

[7] 陈涛. 火灾情况下人员疏散模型及应用研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2004.

[8] LOVAS G G. Modeling and simulation of pedestrian traffic flow [J]. Transportation Research Part B, 1994, 28(6) : 429-443.

[9] MASAKUNI M, TAKASHI N. Jamming transition in two-dimensional pedestrian traffic[J]. Physica A, 2000, 275(2) : 281-291.

[10] VICTOR J B, JEFFREY L A. Cellular automata microsimulation for modeling bi-directional pedestrian walkways [J]. Transportation Research Part B, 2001, 35(3) : 293-312.

[11] HELBING D, FARKAS I, VISCSEK T V. Simulating dynamical features of escape panic[J]. Nature, 2000, 407(28) : 487-490.

(上接第 438 页)

[39] ONES M J, REHG J M. Statistical color models with application to skin detection[C] //Proc of Computer Vision and Pattern Recognition. 1999: 274-280.

[40] BOSSON A, CAWLEY G C, CHAN Y. Non-retrieval: blocking pornographic images[C] //Proc of International Conference on Image and Video Retrieval. Berlin: Springer, 2002: 50-60.

[41] DUAN Li-juan, CUI Guo-qin, GAO Wen, et al. Adult image detection method based on skin color model and support vector machine[C] //Proc of the 5th Asian Conference on Computer Vision. 2002: 797-800.

[42] HAMMAMI M, TSISHKOU D, CHEN Li-ming. Adult content Web filtering and face detection using data-mining based skin-color model [C] //Proc of IEEE International Conference on Multimedia and Expo. Piscataway: IEEE Press, 2004: 403-406.

[43] 徐欣欣, 袁华. 一种基于自适应小波不变矩的色情图像过滤方法 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005, 45(1) : 1878-1881.

[44] 赵晓晖, 张福威, 申铨京. 基于亮度自适应色度空间模型肤色算法及应用 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2006, 24(1) : 68-75.

[45] 许强, 江早, 赵宏. 基于图像内容过滤的智能防火墙系统研究与实现 [J]. 计算机研究与发展, 2000, 37(4) : 458-464.

[46] 胡冠宇. 基于肤色之裸体影像侦测之研究 [D]. 台南: 国立成功大

学, 2004.

[47] 杨金锋, 傅周宇, 谭铁牛, 等. 一种新型的基于内容的图像识别与过滤方法 [J]. 通信学报, 2004, 25(7) : 93-106.

[48] 段立娟, 包振山, 毛国君. 多特征特定类型图像过滤方法 [J]. 北京工业大学学报, 2005, 31(4) : 352-357.

[49] 王宇石, 李远宁, 高文. 运用局部形态 SIFT 描述法过滤网络淫秽图像方法的研究 [J]. 刑事技术, 2007(2) : 9-11.

[50] DRIMBREAN A F, CORCORAN P M, CUIC M, et al. Image processing techniques to detect and filter objectionable images based on skin tone and shape recognition [C] //Proc of International Conference on Consumer Electronics. 2001: 278-279.

[51] 段立娟, 崔国勤, 高文, 等. 多层次特定类型图像过滤方法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(5) : 404-409.

[52] ZENG Wei, GAO Wen, ZHANG Tao, et al. Image guarder: an intelligent detector for adult images[C] //Proc of the 6th Asian Conference on Computer Vision. 2004: 198-203.

[53] JEONG C, KIM J, HONG K. Appearance-based nude image detection [C] //Proc of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Washington DC: IEEE Computer Society, 2004: 467-470.

[54] 王少鹏, 孙敏. 基于网页标志的图像内容过滤防火墙的研究 [J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(1) : 119-122.

[55] 蔡群, 陆松年, 杨树堂. 基于音视频特征的不良视频片段检测方法 [J]. 计算机工程, 2007, 33(22) : 240-242.