

基于 Markov 决策过程的交互虚拟人情感计算模型^{*}

王国江 王志良 陈锋军 王玉洁 祝长生 陶 伟

(北京科技大学信息工程学院 北京 100083)

摘 要 情感在生物体的交流和适应性方面起到了关键作用。同样,交互虚拟人也需要有恰如其分的表达情感的能力。由于具有情感交互能力的虚拟人在虚拟现实、电子教育、娱乐等领域均有着广阔的应用前景,当前,在虚拟人中加入情感成分的研究受到了越来越多的重视。本文提出了一个人工心理的情感计算模型,模型用马尔可夫过程来描述情感的变化过程,并且使用马尔可夫决策过程建立了情感、个性与环境之间的联系,并且我们把该模型应用到了一个交互虚拟人系统中。研究结果表明,模型能够构建具有不同性格特征的虚拟人,使之产生较为自然的情感反应。

关键词 交互虚拟人,情感模型,人工心理,马尔可夫决策过程

Emotion Model of Interactive Virtual Humans Based on MDP

WANG Guo-Jiang WANG Zhi-Liang CHEN Feng-Jun WANG Yu-Jie ZHU Cheng-Sheng TAO Wei

(School of Information Engineering, University of Science & Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract Emotion plays an essential role in adaptation and social communication in organism. Similarly, appropriately timed and clearly expressed emotion is a central required for believable interactive virtual humans. Presently, incorporating emotion into virtual humans is gain increasing attention in academia and industry. This strong interest is driven by a wide spectrum of promising applications in many areas such as virtual reality, e-learning, entertainment, etc. This paper discusses a system that allows the design of emotion for interactive virtual human. We introduce an emotion model of artificial psychology, in which the transition of emotion can be viewed as a Markov process and the relation of emotion, external incentive and personality can be describes by Markov decision processes(MDP). In order to demonstrate the approach, we integrate the emotion model into a system composed of voice recognition and a realistic facial model. Thus, the model can be used for generating a variety of emotional expression of autonomous, interactive virtual humans.

Keywords Interactive virtual humans, Emotion model, Artificial psychology, Markov decision processes

1 前言

情感智能是人类智能的重要方面,它在生物体的感知、交流、决策、适应性等方面均起到了至关重要的作用^[1]。近些年来,对于情感的研究越来越受到人工智能领域重视,情感智能被认为是智能机器中不可或缺的一个方面^[2~4]。人们希望能够探索出有效地方法和体系,来模拟情感在生物体中所扮演的一些角色,用以增强虚拟人或机器人的自治能力、适应能力以及人机交互的能力。

当前,对于情感模拟的研究已经取得了一定的进展,已经出现了一些应用于虚拟人或其他人工智能体的情感模型。D. Canamero 模仿了情感的生物化学处理过程,构造了一个虚拟人的生理系统来模拟人类的生理系统,通过人造荷尔蒙的变化导致情绪的产生,其情感模型考虑的主要是动机的强度^[5]。C. Breazeal 提出的机器人动机系统包含了情感和驱力两个相关联的子系统,驱力用来表现的是机器人的内部需要^[6]。G. Ball 等使用贝叶斯置信网络(BBN)来模拟对话虚拟人的情感和个性^[7]。类似的一个研究还有 S. Kshirasagar 提出的情感模型,也采用了贝叶斯置信网络来对情感和个性建模,但引入了心境的概念作为它们之间的衔接^[8]。在 O. Popovici Vlad 等的研究中,采用了模糊规则模仿虚拟自治 agent 的情绪^[9]。El-Nasr 等也采用了模糊逻辑来作为事件和

情感状态之间的映射^[10]。Aard-Jan van Kesteren 等应用神经网络实现了在虚拟环境中仿真智能体情感的原型系统,可以表现出较为自然的情感行为^[11]。

和以上模型不同的是,在人工心理^[12,13]的研究中,我们认为情感是一种非线性动态的过程,个体情感是情感网络中的一部分,它受到原有情感的影响,并影响着那些后来的情感,因而,情感的变化过程可以用马尔可夫过程来描述。更进一步的考虑,情感的心理状态作为内部机制可以引发情感表现的变化,而个性在情感心理状态的变迁中起着重要的作用,因此在选择最优的情感表现序列时应同时考虑环境因素、个性和情感心理状态的影响。马尔可夫决策过程为建立这些联系提供了很好的方法,因此本文依据马尔可夫决策过程构建了虚拟人情感模型,并应用到了一个交互虚拟人系统中。

2 情感和个性的数值描述

2.1 情感状态空间及概率描述

情感是瞬变的心理及生理现象,它代表机体对不断变化的环境所采取的适应模式^[14]。为了有效地描述虚拟人的情感,需要建立情感状态空间来表达虚拟人自发情感所处的状态及其变化、转移的活动空间。目前心理学中对于在如何描绘情绪上主要有 3 种方法:基本情绪法、维度法与合成法。合成法混合了维度和基本情绪理论,兼有维度法的简洁性和基

^{*}国家自然科学基金项目(No. 60573059);北京市现代信息科学与网络技术重点实验室基金项目(No. TDX0503);北京科技大学校重点基金项目。王国江 博士后,主要研究方向:人工心理、智能人机交互、机器人。

本情绪的直观性的特点。因此本文借鉴 Plutchik^[15]提出的合成方法来建立情感空间。

Plutchik 认为所有情绪都表现出强度的不同,如从忧郁到悲痛;任何情绪在与其他情绪相似的程度上都不同,如憎恨与愤怒比厌恶与惊奇更为相似;任何情绪都有相对立的两极如憎恨与接受,愉快与悲伤。他采用强度、相似性和两极性 3 个维量并用一个倒立的锥体,在锥体切面上分隔为块,切面上的每一块代表一种原始情绪。共有 8 种原始情绪,每种原始情绪都随自下而上强度的增大而有不同的形式;截面上处于相邻位置的情绪是相似的,处于对角位置的情绪是相对立的。

为了使情感空间的数值化处理更为方便,我们把 Plutchik 三维锥体简化为二维圆面,如图 1 所示。圆面中描述了 n 种原始情感,表示的是情感的心理状态。并且把每个情感心理状态的分为 m 个不同的强度,也表述在二维圆面之上,情感强度我们用来表示具体的面部表情。情感强度值依据与相邻状态的距离逐次降低,这样做的目的是使情感的过渡更加平稳自然,形式上更容易描述。

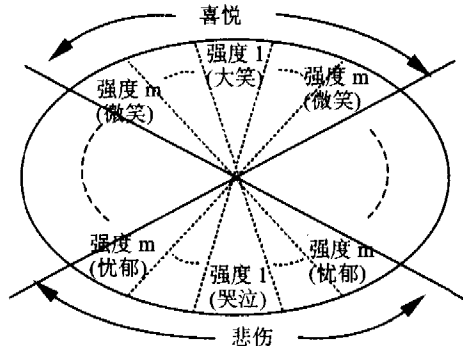


图 1 情感状态空间

设情感空间包含有 n 种基本情感,那么可以得到情感状态空间集合 $E = \{e_i | i=1, 2, \dots, n\}$ 。用随机变量 X 表示情感状态。设 p_i 为 $X=e_i$ (取第种情感心理状态) 的概率,且满足:

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1, 0 \leq p_i \leq 1, (i \in [1, 2, \dots, n])$$

这样,情感心理状态的概率空间模型可表示成:

$$\begin{pmatrix} E \\ P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_1 & e_2 & \dots & e_n \\ p_1 & p_2 & \dots & p_n \end{pmatrix}$$

每种情感心理状态又分为 m 种强度。则

$$e(i) = [e_1^i, e_2^i, \dots, e_m^i], e_k^i \in [0, 1], \sum e_k^i = 1$$

我们定义 $dis(e(i), e(j))$ 为状态 $e(i)$ 和 $e(j)$ 之间的距离,则

$$dis(e(i), e(j)) = \sqrt{(e_1^i - e_1^j)^2 + \dots + (e_m^i - e_m^j)^2}$$

因此空间中情感的相似程度可以用不同情绪状态之间距离来定义。设 S_{ij} 为情感状态 e_i 和 e_j 之间的相似度,则

$$S_{ij} = 1 - 2dis(e(i), e(j)) / n$$

例如,当 $e(j) = e(i)$ 时, $S_{ij} = 1$ 表明情绪与它本身的相似程度为 1;而 $S_{ij} = 0$ 表示此时情感状态 e_i 和 e_j 是互为对立的情绪,它们在情感圆面上处于对角位置。

到此,我们就构建了情感变化的概率性模型。这样的情感空间把每个情感心理状态都细分为不同的强度,并且情感状态空间位置间的相似程度影响到转移的概率大小。

2.2 个性的数值化

个性是决定人的独特的行为和思想的个人内部的身心系

统的动力组织^[16]。它有活动倾向方面的特征,不同的个性引起的行为表现并不是完全相同的,而是在一个可接受的范围内变化的,各不相同。

对于个性的分类与描述有不同的方法,例如 PEN 模型^[17]用三维 (psychoticism, extraversion, neuroticism) 来描述个性;OCEAN 模型^[18]把人类的个性分为五维 (Openness, Conscientiousness, Extraversion, Agreeableness, Neuroticism);EFA 模型^[19]采用了三维 (Extroversion, Fear, Aggression) 建立了个性空间。这些模型中的每一维都刻画了个性的独特性质。在本文,我们综合考虑了这些模型的特点以及易于实现数值化描述的要求,选取了其中最具代表性的一个维度 Extraversion,如图 2 所示。

个性模型个性特征由个性参数 q 在这个维上的位置决定, q 的取值范围是 $[0, 1]$ 。个性参数取值越大,表明其个性越外向化,倾向于达到更大的积极情感 (positive emotion),而个性参数取值越大,则表示其更可能会倾向于达到更大的消极情感 (negative emotion)。而且我们可以把个性空间与情感空间建立起联系。如设有 n 种情感状态, $q_i \in [(n-1)/n, 1]$ 时认为虚拟人有最乐观的性格,趋向于达到喜悦的情感状态。并且它和情感状态之间也可以用相似度来表示,如设喜悦的状态为 $e(i)$, $q_i \in [(n-1)/n, 1]$ 时 $S_{qi} = 1$ 。

3 基于 MDP 的情感模型

在确定了情绪的情感分类和个性描述之后,可以通过基于规则的方式来建立环境刺激、个性和情感行为的选择之间的映射。可是,如此基于规则的系统不能够得到较为可信的情感表现行为,这主要是因为不确定性是人类情感行为的一个重要方面^[8]。因此,我们需要一个计算模型能够处理不确定性同时又能建立它们之间的联系,我们选用马尔可夫决策过程来进行情感建模。

3.1 模型分析

正如神经网络一样,在给定的时间内,每一个网络中细胞元的状态是它相邻细胞原先状态的函数,个体情绪也是情感网络中的一部分,而且它们也类似地受它们原有情绪的影响,并影响着那些后来的情绪。因而,我们可以用马尔可夫过程来描述情感的这种特性。马尔可夫过程假定状态转移的可能性只依赖于系统现在的状态,只有那些刚发生而不是已经发生很久的情绪状态影响着情绪是否转移。

在本文,我们希望建立起环境激励、个性、情感心理状态和虚拟人表情之间的联系,换句话说,我们希望求出在环境激励和个性影响下情感心理状态的转移矩阵 p_{ij} ,并且建立起情感心理状态 $E(t)$ 和最佳情感表现 $a(t)$ 之间的一个映射 π^* 。我们使用马尔可夫决策过程来计算这个映射 π^* 。

3.2 马尔可夫决策过程

马尔可夫决策方法是建立在马尔可夫过程基础上的一种动态优化方法,适用于无后效性结构的动态不确定环境下的序贯性决策。一个马尔可夫决策过程包含以下 4 个元素^[20]: $\{X, (A(i), i \in X), P, R\}$, 其中: X 是可列非空状态集,是系统所有可能状态的集合; $A(i)$ 是系统处于一个给定状态时所有可能的决策行为的集合; $R = r(i, a)$ 称为报酬函数,表示任意时刻系统处于状态 i 采取决策行为 a 时,所获得的期望报酬; $P = p_{ij}(a)$ 表示系统处于状态 i , 采取决策行为 a 的条件下转移到状态 j 的概率。策略 π 表达的是在每一个状态中应该采取哪一个动作。

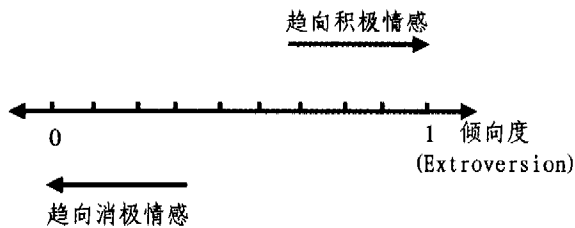


图2 个性的描述

3.3 情感计算模型

在情感模型中,状态集 X 对应为情感空间中的情感心理状态集 E ; $A(i)$ 对应的是情感强度集 $e(i)=[e_i^1, e_i^2, \dots, e_i^n]$, 表示的是一系列具体的面部表情动作。如,在快乐的心理状态下,相应的表情行为有微笑,笑和大笑等。

一个表情行为 $a \in A$ 的选择将使得它所从属的情感心理状态与其它情感心理状态之间的距离发生变化,即: $dis(e(i), e(j)) = \sqrt{(e_i^1 - e_j^1)^2 + \dots + (e_i^n - e_j^n)^2}$, 从而使得相似度发生相应的变化,导致情感心理状态的以 $p_{ij}(a)$ 为转移矩阵发生转换。

对于转移概率矩阵的确定,我们做这样的关于情感转移方向的假设:(1)某一时刻情感空间里的某一情感心理状态,在下时刻转移到其他情感心理状态的可能性随相似程度的增大而单调上升,随状态之间的相似度的减小而单调下降;(2)在没有外部激励的情况下,情感状态向个性点的方向转移的速率最大;(3)在不考虑个性的情况下,情感状态向外部激励点的方向转移的速率最大;(4)情感强度越强则趋向于保持原状态,强度越弱则趋向于向其它状态转变。

我们可以依据这样的假设来确定转移概率。设外部激励信号的强度为 φ , 我们可以得到在外部激励和个性影响下的转移概率:

$$p_{ij}(a) = S_{ij}(a) \cdot \varphi / \sum (S_{ij}(a) \cdot \varphi)$$

其中 φ 是个性和外部激励的综合影响系数:

$$\varphi = (S_{ij}(a) / \sum S_{ij}(a)) \cdot (S_k(a) / \sum S_k(a))$$

在给定的时间,一个状态下会有不同的动作,每一种动作都产生不同的报酬,来作为对动作有益程度的估计。在建立虚拟人的情感模型中,我们需要考虑人在做决策时所受到的一些影响,其中个性起着重要的作用。例如,当一个人有乐观的个性,他更趋向选择较为积极的表情动作,而悲观的人会更倾向于消极的情绪。因此不同个性对报酬函数的影响是不同的,模型中认为更符合个性方向的动作获得更大的报酬值。我们用 $r(E, a)$ 来定义报酬函数, $r(E, a)$ 是定义在 $i \in E$ 和 $a \in A(i)$ 上的实值函数。那么:

$$r(E, a) = S_{ij}(a)$$

在得到转移概率矩阵和报酬函数之后,就能够计算出策略 π^* 。我们采用有限阶段平均代价模型并且通过策略迭代算法来求得 π^* 。

4 情感虚拟人系统

为了检验模型的效果,我们构建了一个交互虚拟人系统,系统由语音识别、语音合成以及一个真实感人脸模型组成。我们主要观察在不同的激励和个性下虚拟人的情感反应。

4.1 语音识别与合成

系统采用 Pattek ASR SDK 来实现中文语音的识别,采用讯飞语音合成开发包 (iFly TTS SDK) 来实现虚拟人的语

言输出。我们建立了一个小规模的字词数据库,可以针对某个特定的主题与人对话,但是,对话的范围目前仍有一定的限制。我们在词库中选择了一些词句建立了与外部激励之间的关联。如“你好”我们赋予为能够激励起强度为 0.8 的喜悦的情感心理状态。

4.2 真实感人脸合成

我们的虚拟人形象是一个真实感人脸模型,构成模型的三维数据网格是通过三维扫描仪人脸的得到,由三维网格点和网格点围成的多边形面片构成。在多边形网格中定义了眼睛、鼻子、额头、下巴等特征点,特征点的作用是定义了人脸部特征的形状和位置。

在实现脸部表情变形和动画时,我们使用了面部肌肉模拟运动驱动方法,这种方法是通过脸部肌肉的变形来生成人脸表情动作。我们采用了 Ekman 的面部动作编码系统^[21] (Facial Action Coding System, FACS), 它对人脸肌肉各部分动作进行了完整的描述。FACS 包含 46 个基本动作单元 (AUs), 各个独立动作单元的结合能够产生大量不同的脸部表情。在 FACS 的 44 个运动单元中有 24 个运动单元与人的表情有关,我们选取了其中的 14 个运动单元,可以表达 6 种基本表情。

在真实感人脸模型中,我们结合了运动方向和特征点来表达每一个 AU。每一个 AU 被分解成 5 点强度,因此可以通过结合 AU 的数目和它们的强度来合成一些过渡的表情。

4.3 实验结果

施加不同的激励信号,虚拟人的情感模型中状态转移概率矩阵会产生变化,针对每种刺激分别有一个状态转移概率矩阵与之对应。而且,具有不同个性特征的人,在同样的激励下的状态转移矩阵也是不同的,如乐观向上的人从任何一种心情出发向好的心情的转移概率都要大于悲观失望的人,他们在同一种心理状态下所呈现出来的面部表情强度也并不一致。

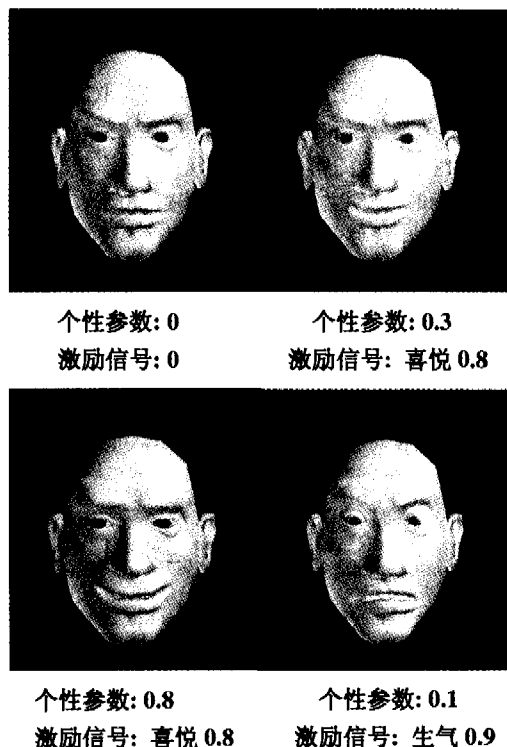


图3 虚拟人的面部表情变化

我们通过调整个性参数来表达虚拟人的不同的个性。在开始对话之前,虚拟人的表情是平静的,随着交互的进行,虚拟人会改变它的情感表现。一个正向的激励并不意味着一定展示出笑脸,因为情感心理状态的变化是按照一定概率出现的。但是,因为对立情感的相似度为0,一个激励不会引发出与激励状态截然相反的表情,如输入语音“你好”,虚拟人不会展示出悲哀的表情行为,这就避免了虚拟人表情行为的不可理解性。图3显示了虚拟人在交互期间的一些面部表情变化。

结论 本文提出了一个基于马尔可夫决策过程的情感计算模型,并且把这个模型应用到了一个虚拟人系统中。我们的目的并不是要探讨自然情感的发生机制,而在于探索交互虚拟人的情感处理方法,使交互过程显得更为自然。更进一步的工作是希望在系统中加入视觉反馈,如表情识别等。另外,我们也希望能够扩展这个情感计算模型,例如,加入动机模块和内部需求模块。

参考文献

- 1 Buck R. The psychology of emotion. In: *Mind and Brain. Dialogues in Cognitive Neuroscience*, LeDoux J E, Hirst W, eds. New York: Cambridge University Press, 1986. 275~300
- 2 Sloman A. Beyond shallow models of emotion. *Cognitive Processing*, 2001, 1(1):530~539
- 3 Picard R. *Affective Computing*. Cambridge, Mass, London, England: MIT Press, 1997
- 4 Minsky M. The emotion machine. <http://Web.media.mit.edu/~minsky/>
- 5 Canamero L. Emotions and adaptation in autonomous agents: a design perspective. *Cybernetics And Systems: An International Journal*, 2001, 32:507~529
- 6 Breazeal C. Function meets style: insights from emotion theory applied to HRI. *Systems, Man and Cybernetics, Part C, IEEE Transactions on*, 2004, 34:187~194
- 7 Ball G, Breese J. Emotion and personality in conversational character. In: Cassell J, Sullivan J, Prevost S, et al, eds. *Embodied Conversational Agents*. Cambridge, MA: MIT Press, 2000
- 8 Kshirsagar S. A Multilayer Personality Model. In: *SMART-*

- GRAPH '02: Proceedings of the 2nd International Symposium on Smart Graphics, New York, NY, USA, ACM Press, 2002. 107~115
- 9 Vlad O P, Vachkov G, Fukuda T. Fuzzy emotion interpolation system for emotional autonomous agents. In: *SICE 2002. Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, Vol. 5. 2000. 3157~3162
- 10 El Jed M, Pallamin N, Dugdale J. Modelling character emotion in an interactive virtual environment. In: *Proceedings of AISB 2004 Symposium: Motion, Emotion and Cognition*. 29 March-1 April 2004
- 11 van Kesteren A J, op den Akker R, Poe M, et al. Simulation of emotions of agents in virtual environments using neural networks. In: Jokinen K, Heylen D, Nijholt A eds. *Learning to Behave: Internalising Knowledge*. Twente Workshop on Language Technology 18(TWLT 18), Leper, Belgium, November 2000. 137~147
- 12 王志良. 人工心理学——关于更接近人脑工作模式的科学. *北京科技大学学报*, 2000, 22(5):478~481
- 13 Xue Weimin, Wei Zhehua, Wang Zhiliang. The Research of Artificial Psychology Model. In: *IEEE TENCON'02*, Vol 1. Beijing, China. October 2002, 691~693
- 14 Davidson R J, Abercrombie H, Nitschke J B, et al. Regional brain function, emotion and disorders of emotion. *Current Opinion in Neurobiology*, 1999, 9(2):228~234
- 15 Plutchik R. The nature of Emotions. *American Scientist*, 2001, 89:344~350
- 16 Allport G W. *The Nature of Personality: Selected Papers*. Addison-Wesley Press, Inc, 1950
- 17 Eysenck S, Eysenck H, Barrett P. A revised version of the psychoticism scale. *Personality and Individual Differences*, 6, 1985, 21~29
- 18 Costa P T, McCrae R R. Normal personality assessment in clinical practice: The NEO personality inventory. *Psychological Assessment*, 1992
- 19 Wilson I. The Artificial Emotion Engine. driving emotional behavior. In: *AAAI Spring Symposium on Artificial Intelligence and Interactive Entertainment*, 2000
- 20 Dolgov D A, Durfee E H. Resource Allocation and Policy Formulation for Multiple Resource-Limited Agents Under Uncertainty. In: *Proceedings of the International Conference on Automated Planning and Scheduling*, June 2004
- 21 Ekman E, Friesen W. *Facial Action Coding System*. Consulting Psychologists Press, 1977

(上接第90页)

结论 本文提出了一种新的基于复合离散混沌映射的对称加密算法,理论分析和仿真实验表明,本文的算法具有良好的密钥敏感性和很大的密钥空间,同时具有较好的抗统计攻击、差分攻击和选择明文攻击能力。不过,由于在加密的过程中,每个密钥的生成要经过多次迭代,因此本文的算法在加密的速度上较文[1]的算法有所降低。

参考文献

- 1 Chen G R, Mao Y B, Chui C K. A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2004, 21:749~761
- 2 Wang K, Pei W J, Zou L H, et al. On the security of 3D Cat map based symmetric image encryption scheme. *Physics Letters*, 2005, A 343: 432~439
- 3 Habutsu T, Nishio Y, Sasase I, et al. A secret key cryptosystem by iterating chaotic map. In: *Lecture Notes Computer Science Advances in Cryptology—Euro Crypt'91*, vol 547, 1991. 127~140
- 4 Pichler F, Scharinger J. Finite dimensional generalized Baker dynamical systems for Encrypt graphic applications. *Lecture Notes in Computer Science*, vol 1030, Springer, Berlin, 1996. 465~476
- 5 Masuda N, Aihara K. Cryptosystems with discredited chaotic maps. *IEEE Trans Circuits Syst—I: Fundamental Theory and Application*, 2002, 49 (1):28~40
- 6 Yen J C, Guo J I. A new chaotic image encryption algorithm. In: *Proceedings of the 1998 National Symposium on Telecommunications*, December 1998. 358~362

- 7 Yen J C, Guo J I. Efficient hierarchical image encryption algorithm and its VLSI realization. *IEEE Proc Vis Image Signal Process*, 2000, 147(2):430~437
- 8 Yen J C, Guo J I. A new chaotic key-based design for image encryption and decryption. In: *ISCAS, IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May Geneva, Switzerland, vol. IV, 2000. 49~52
- 9 Mao Y B, Chen G, Lian S G. A novel fast image encryption scheme based on the 3D chaotic baker map. *Int J Bifurcation Chaos*, 2004, 14(10):3613~3624
- 10 Kocarev L, Jakimovski G. Chaos and cryptography: from chaotic maps to encryption algorithms. *IEEE Trans Circ Syst—I*, 2001, 48(2):163~169
- 11 Li S J, Zheng X. Cryptanalysis of a chaotic image encryption method. In: *IEEE Int Symposium Circuits and Systems*, Scottsdale, AZ, USA, 2002
- 12 Li S J, Mou X Q, Cai Y L, et al. On the security of a chaotic encryption scheme: problems with computerized chaos in finite computing precision. *Computer Physics Communications*, 2003, 153: 52~58
- 13 Alvarez G, Montoya F, Romera M, et al. Cryptanalyzing an improved security modulated chaotic encryption scheme using ciphertext absolute value. *Chaos, Solitons and Fractals*, 2005, 23: 1749~1756
- 14 Alvarez G, Montoya F, Romera M, et al. Cryptanalysis of dynamic look-up table based chaotic cryptosystems. *Physics Letters*, 2004, A 326:211~218
- 15 Alvarez G, Montoya F, Romera M, et al. Cryptanalysis of an ergodic chaotic cipher. *Physics Letters*, 2003, A 311:172~179
- 16 Fridrich J. Symmetric ciphers based on two-dimensional chaotic maps. *Int J Bifurc Chaos*, 1998, 8(6): 1259~1284