

基于概率区间的不确定性动作建模研究

田尊华 赵 龙 贾 焰

(国防科学技术大学计算机学院 长沙 410073)

摘 要 对不确定性动作建模有助于提高虚拟角色行为表现的逼真度和可信度。现有行为模型由于动作缺少必要的不确定性而显得重复、单调,为此,提出了利用概率区间对角色不确定性动作建模的方法。基于区间代数提出了概率区间的概念,并指出了概率区间的完备性问题,着重研究了正态概率区间的数学运算及其完备化的加性和乘性方法。与代数区间相比,概率区间能够更加精确地描述动作的不确定性效应。以坦克虚拟角色为例,研究了正态区间在不确定性动作建模中的应用,通过对射击动作的不确定性建模验证了所提方法的合理性和有效性。

关键词 不确定性动作,概率区间,虚拟现实,行为建模

中图法分类号 TP391

文献标识码 A

Research on Modeling Action with Uncertain Results Based on Probability Interval

TIAN Zun-hua ZHAO Long JIA Yan

(School of Computer Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract To model the uncertain actions of virtual characters is helpful to improve the fidelity and credibility of its behavioral representation. Because the existing behavioral models are lack of necessary uncertainty, the characters often behave in a repeated and monotonous way. With probability interval, a method to model uncertain results of characters' action was proposed. Based on interval algebra, the concepts of probability interval and its completion were defined. Completion methods of probability interval were given, centering on normal probability interval, some operations were defined, and additional and multiplicative compensation methods to complete normal probability interval were discussed. Compared with algebra interval, probability interval can describe effects of actions more precisely. As an example, the uncertain actions of virtual tanks were discussed and normal interval was applied to model the uncertain actions of it. The proposed methods were validated through modeling the uncertain actions such as shooting.

Keywords Uncertain action, Probability interval, Virtual reality, Behavior modeling

对虚拟角色行为的不确定性建模可以增强虚拟角色的真实感和可信度。动作是最基本的行为,现实中人类由于外在因素的影响和自身能力的制约,动作总是不精确的,动作效应总是存在一定的不确定性^[1-3]。在虚拟环境中真实地再现虚拟角色动作的不确定性可以更好地满足相关应用需求^[4,5]。

目前,在对动作建模时,要么缺乏对动作不确定性的考虑,要么就是以一种随意的方式来处理,如在结果集合中随机选择一个作为动作效应。Funge 为了处理不确定性感知数据,在情景演算中引入区间代数,不仅简化了不确定数据的表示,也便于计算机实现^[6]。但将区间数引入不确定性动作建模时,无法考虑动作效应在区间上的分布情况,这不符合现实情况。比如人的步长和射击精度都应符合正态分布。

首先给出了不确定性动作的基本概念,将区间代数扩展为概率区间,指出了概率区间的完备性及其完备化方法。着重针对正态区间进行了讨论,研究了正态区间的基本运算和完备化。以坦克虚拟角色为例,研究了正态区间在不确定性动作建模中的应用,通过对射击动作的不确定性建模验证了

方法的合理性和有效性。

1 不确定性动作

定义 1(不确定性测度^[7]) Γ 为非空集合, $\mathcal{L}$ 为 Γ 上的 σ -代数, 为 $\mathcal{L}$ 上的每个元素 Λ 赋予一个数 $\mathcal{M}(\Lambda)$, 如果 $\mathcal{M}$ 满足:

- (1) $\mathcal{M}(\Gamma) = 1$;
- (2) 当 $\Lambda_1 \subset \Lambda_2$ 时, 有 $\mathcal{M}(\Lambda_1) \leq \mathcal{M}(\Lambda_2)$;
- (3) 对于任意的 Λ , 有 $\mathcal{M}(\Lambda) + \mathcal{M}(\Lambda^c) = 1$;
- (4) 对于每个可数序列 $\{\Lambda_i\}$, 有

$$\mathcal{M}\left(\bigcup_{i=1}^{\infty} \Lambda_i\right) \leq \sum_{i=1}^{\infty} \mathcal{M}(\Lambda_i)$$

那么 $\mathcal{M}$ 就称为不确定性测度。

定义 2(不确定性空间^[7]) 不确定性空间定义为 $\Omega = \langle \Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M} \rangle$, 其中 Γ 为非空集合, $\mathcal{L}$ 为 Γ 上的 σ -代数, $\mathcal{M}$ 为不确定性测度。

定义 3(不确定性函数) 不确定性函数定义为不确定性空间 $\Omega = \langle \Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M} \rangle$ 上不确定取值的随机变量。

定义 4(动作) 动作是虚拟角色可以直接付诸执行的基

到稿日期:2009-02-20 返修日期:2009-05-05 本文受 863 国家高技术发展计划(2006AAJ210)资助。

田尊华(1976—),男,博士生,主要研究方向为虚拟现实等,E-mail: tzh_nudt@yahoo.com.cn;赵 龙(1958—),男,研究员,主要研究方向为虚拟现实与可视化、分布式计算机系统;贾 焰(1960—),女,教授,博士生导师,CCF 高级会员,主要研究方向为分布式计算、数据库等。

本行动。动作记为 a , 在实现上动作往往表现为带有一定参数的函数。

每个动作的执行都是为了达到某个具体的目的, 但由于外部干扰和动作执行者自身能力的各种制约, 动作的执行结果往往具有不确定性, 考虑了这种不确定性的动作, 就是不确定性动作。下面给出不确定性动作的形式化定义。

定义 5(不确定性动作) 如果动作 a 的执行结果在不确定性空间 $\Omega = \langle \Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M} \rangle$ 取值, 且 Γ 为执行动作 a 后所有可能的结果, $\mathcal{M}$ 为各种结果可能性的测度, 那么动作 a 就称为不确定性动作。

2 概率区间

2.1 区间代数

定义 6(区间数)^[8,9] 设 R 为实数, 对于任意的 $a^-, a^+ \in R$, 且 $a^- \leq a^+$, 则称闭区间 $a = [a^-, a^+]$ 为一个区间数。记 R 上的全体区间数的集合为 T_R , 基于 T_R 可以定义区间数的各种运算[区间分析/区间代数]。

在对虚拟角色的不确定性动作建模时, 可以将动作的所有可能结果组成的集合看作一个区间数。如在对坦克行进建模时, 可以将坦克的速度表示为一个区间数 $v = [v^-, v^+]$, 坦克一段时间内行进的路程也可以表示为 $s = [s^-, s^+]$, 坦克射击的弹着点散布半径可以表示为 $r = [0, r^+]$ 等。区间数虽然可以表示不确定性动作, 但是其表达的信息还比较粗糙, 比如, 坦克射击的着弹点在各种半径上的概率显然是不均匀的, 而区间数却无法表达动作结果在区间上的分布情况。

2.2 概率区间定义

定义 7(概率区间) 概率区间可以表示为 $p = \langle I, \phi \rangle$, 其中, I 为区间数, $\phi: I \rightarrow [0, 1]$ 为区间上的概率函数, 且 $\int_I \phi(x) dx = 1$, 或 $\sum_{x \in I} \phi(x) = 1$ 。

图 1 是概率区间的图形表示, 从中可以看出, 相比区间数, 概率区间具有如下特点:

1) 概率区间不仅指出了区间的范围, 而且刻画了区间上的分布情况。因此, 要定义一个概率区间数时, 还需要对区间上的分布 ϕ 进行刻画。

2) 概率区间的表达能力更强, 区间是概率区间的一个特例, 当把区间看作是均匀分布时, 区间就成为了均匀分布的概率区间。

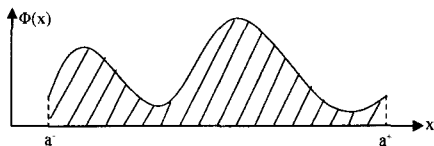


图 1 概率区间数 $\langle [a^-, a^+], \phi \rangle$

那么是否可以利用概率区间对不确定性动作建模呢? 首先给出如下定理。

定理 1 概率区间是一种不确定性空间。

证明: 这是一个构造问题, 只要从概率区间构造出不确定性空间, 结论即可得到证明。假设概率区间为 $p = \langle I, \phi \rangle$, 令 $\Gamma = I$, $\mathcal{M} = \phi$, 以及 $\mathcal{L} = \Gamma$ 上的 σ -代数, 这样就从 P 构造了不确定性空间 $\Omega = \langle \Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M} \rangle$, 因此结论得证。

根据定理 1 和定义 5 可以知道, 概率区间可以用于对不确定性动作建模。

2.3 概率区间的完备化

定义 8(概率区间的完备性) 概率区间中概率指派函数 ϕ 必须满足 $\int_I \phi(x) dx = 1$, 或 $\sum_{x \in I} \phi(x) = 1$ 的性质。

在对不确定性动作建模时, 概率区间的完备性可以保证动作必有一个执行结果。但是当 I 为有限区间时, 对于很多分布来讲, 概率区间 $p = \langle I, \phi \rangle$ 就无法满足完备性要求。在应用概率区间对虚拟角色的不确定性动作建模时, 需要将不完备的概率区间变为完备的。

定义 9(概率区间的完备化) 将不完备的概率区间转换为完备概率区间的过程称为概率区间的完备化。

概率区间完备化的两个目的: 1) 能够保证动作效应概率为 100%; 2) 数学上的完美。

概率区间具体可以采取两种策略, 即加性补偿法和乘性补偿法。如下面要讨论的正态区间一般情况下都需要进行完备化。

定义 10(加性补偿) 假设 $p = \langle I, \phi \rangle$ 为不完备的概率区间, 那么将概率函数 $\phi(x)$ 增加一个非 0 项 $\delta(x)$, 使得概率函数在 I 内的积分为 1。即

$$\int_I (\phi(x) + \delta(x)) dx = 1 \quad (1)$$

因此, 经过加性补偿后, p 就完备化了。则有

$$\int_I \delta(x) dx = C \quad (2)$$

其中, $C = 1 - \int_I \phi(x) dx$ 为常数。经过补偿后的概率函数为

$$\phi' = \phi + \delta \quad (3)$$

显然, 由式(2)求得的 $\delta(x)$ 不是惟一的, 但可以通过增加条件使之惟一化, 如假定 $\delta(x)$ 为常数, 那么, 由式(2)可求得

$$\delta(x) = C / (d - c) \quad (4)$$

经过加性补偿后的概率区间可以表示为 $p_s = \langle I, \phi, \delta \rangle$ 或 $p_s = \langle I, \phi + \delta \rangle$ 。

定义 11(乘性补偿) 假设 $p = \langle I, \phi \rangle$ 为不完备的概率区间, 那么将概率函数 $\phi(x)$ 乘以一个非 0 因子 $\delta(x)$, 使得概率函数在 I 内的积分为 1。即

$$\int_I \phi(x) \cdot \delta(x) dx = 1 \quad (5)$$

因此, 经过乘性补偿后, p 就完备化了。经过补偿后的概率函数为

$$\phi' = \phi \cdot \delta \quad (6)$$

显然, 由式(5)求得的 $\delta(x)$ 不是惟一的, 但可以通过增加条件使之惟一化, 如假定 $\delta(x)$ 为常数, 那么, 由式(5)可求得

$$\delta(x) = 1 / (\int_I \phi(x) dx) \quad (7)$$

经过加性补偿后的概率区间可以表示为 $p_m = \langle I, \phi, \delta_m \rangle$ 或 $p_s = \langle I, \phi \cdot \delta \rangle$ 。

3 正态区间

在实际的应用中, 正态分布是最常见的, 也是不确定性动作建模中最常遇到的, 下面专门针对正态分布的概率区间进行讨论。

3.1 定义

定义 12(正态区间) 如果概率区间 $p = \langle I, \phi \rangle$ 中的概率函数 ϕ 是正态密度函数, 那么就称 p 为正态区间。概率函数

ϕ 可以用正态分布参数 μ 和 σ^2 表示。为此, 正态区间可以表示为 $N = \langle I, \mu, \sigma^2 \rangle$ 。图 2 是正态区间的图示。

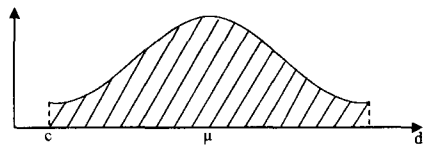


图 2 正态区间

定义 13(正态区间数) 参数都为常数的正态区间称为正态区间数, 如 $\langle [-4, 4], 0, 0.2 \rangle$ 。所有正态区间数组成的集合称为正态区间数集, 记为 T_N , 即 $T_N = \{ \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle \mid c, d, \mu, \sigma \in R, c \leq d \}$ 。

3.2 正态区间运算

设 $N_1, N_2 \in T_N$, 可以定义如下运算。

定义 14(加法运算) 正态区间 N_1 与 N_2 之和 $N = N_1 + N_2$ 定义为

$$N = \langle [c_1 + c_2, d_1 + d_2], \mu_1 + \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \rangle$$

定义 15(减法运算) 正态区间 N_1 与 N_2 之差 $N = N_1 - N_2$ 定义为

$$N = \langle [c_1 - d_2, d_1 - c_2], \mu_1 - \mu_2, \sigma_1^2 + \sigma_2^2 \rangle$$

定义 16(数乘运算) 正态区间 N_1 与非 0 实数 α 的数乘运算 $N = \alpha \cdot N_1 = N_1 \cdot \alpha$ 定义为

$$N = \langle [\alpha \cdot c_1, \alpha \cdot d_1], \alpha \cdot \mu_1, (\alpha \cdot \sigma_1)^2 \rangle$$

定义 17(数加运算) 正态区间 N_1 与实数 α 的数加运算 $N = \alpha + N_1 = N_1 + \alpha$ 定义为

$$N = \langle [\alpha + c_1, \alpha + d_1], \alpha + \mu_1, \sigma^2 \rangle$$

定义 18(正态区间函数运算) 如果 $N_x = \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle$, 函数 $f: [c, d] \rightarrow I_y$ 且 f 在 $[c, d]$ 上可导, 那么记 $N_y = f(N_x)$, N_y 称为 f 在 N_x 处的函数值, N_y 定义为

$$N_y = f(N_x) = \langle I_y, f(\mu), (f'(\mu)|_{x=\mu})^2 \cdot \sigma^2 \rangle$$

其中, $I_y = [\min_{x \in [c, d]} f(x), \max_{x \in [c, d]} f(x)]$ 。

这些区间运算是根据概率论的性质来定义的, 通过这些运算可以方便地实现概率区间的基本运算。比如, 假定虚拟角色执行一个动作时, 该动作的效应符合正态分布, 那么可以将动作效应表示为 $p = \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle$ 。如果考虑到该动作受到一项系统误差 ϵ 的影响, 那么动作效应可用概率区间表示为 $p' = p + \epsilon$, 根据正态区间的数加运算, 可知 $p' = \langle [c + \epsilon, d + \epsilon], \mu + \epsilon, \sigma^2 \rangle$, 如图 3 所示。

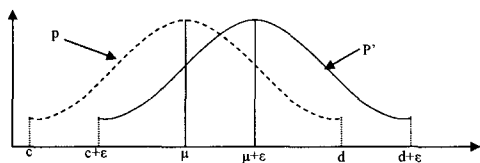


图 3 正态区间的数加运算

3.3 正态区间完备化

定理 2 有限长度的正态区间是不完备的。

证明: 假定 $N = \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle$ 为正态区间, 由于正态分布是定义在无穷区间 $[-\infty, +\infty]$ 上的, 正态密度函数为 $f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$, 且有 $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$ 。对于 $\int_c^d f(x) dx$, 如果 $c > -\infty$ 或 $d < +\infty$, 那么必有

$$\begin{aligned} \int_c^d f(x) dx &= \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx - \int_{-\infty}^c f(x) dx - \int_d^{+\infty} f(x) dx \\ &= 1 - \int_{-\infty}^c f(x) dx - \int_d^{+\infty} f(x) dx \end{aligned}$$

由于 $f(x) > 0$, 且 $c > -\infty$ 或 $d < +\infty$, 因此必有

$$\begin{aligned} 1) & \int_{-\infty}^c f(x) dx > 0 \text{ 且 } \int_d^{+\infty} f(x) dx \geq 0 \text{ 或} \\ 2) & \int_{-\infty}^c f(x) dx \geq 0 \text{ 且 } \int_d^{+\infty} f(x) dx > 0 \end{aligned}$$

成立, 故有 $\int_c^d f(x) dx < 1$, 因此 N 是不完备的。

下面分别使用加性补偿法和乘性补偿法对正态区间进行完备化。

1) 正态区间的加性补偿

假设 $N = \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle$ 为不完备的正态区间, 那么 $\phi(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \phi' = \phi + \delta, \text{ 令 } \delta \text{ 为常数, 由式(4)知}$$

$$\delta = (1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int_c^d f(x) dx) / (d - c) \quad (8)$$

经过加性补偿后的正态区间可以表示为 $N_s = \langle [c, d], \mu, \sigma^2, \delta_s \rangle$, 如图 4(a) 所示。

2) 正态区间的乘性补偿

假设 $N = \langle [c, d], \mu, \sigma^2 \rangle$ 为不完备的正态区间, 那么 $\phi(x) =$

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \phi' = \phi \cdot \delta, \text{ 令 } \delta \text{ 为常数, 由式(4)知}$$

$$\delta = \sqrt{2\pi\sigma} / (\int_c^d e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx) \quad (9)$$

经过乘性补偿后的正态区间可以表示为 $N_m = \langle [c, d], \mu, \sigma^2, \delta_m \rangle$, 如图 4(b) 所示。

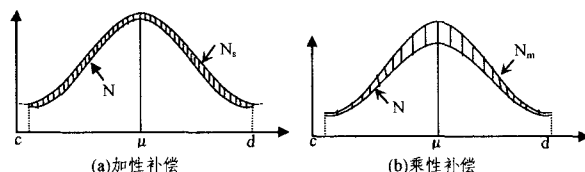


图 4 正态区间的完备化

从图 4 可以看出: 加性补偿相当于在区间 $[c, d]$ 上增加一个均匀分布, 区间各处增加的概率相等; 而乘性补偿则相当于增加了另一个正态分布, 完备化后的概率与原概率成比例。概率区间的完备化实质是要将区间之外的概率补充到区间内, 使得在区间内的概率等于 1。对于正态区间的完备化, 则是将区间之外的截尾概率补充到正态区间内。

4 实验与分析

为了验证概率区间对虚拟角色不确定性动作建模的合理性和有效性, 以一个简单的坦克对战仿真为例, 构建了图 5 所示的仿真演示环境。在图 5 中有红蓝双方各 5 辆坦克进行对战, 在对虚拟坦克的射击动作建模时, 利用正态概率区间对这些动作的效应进行建模。

假定坦克射击目标时, 以目标为中心的落点半径服从正态分布, 如图 5(b) 所示, 坦克射击动作的结果可以用正态区间 $N_m = \langle [0, d], 0, \sigma^2, \delta \rangle$ 表示, 其中最大偏差 d 、方差 σ^2 和概率补偿 δ 都是可变参数。图 5(b) 中 $f(r)$ 为完备化的概率密度函数, 由 σ^2 和

(下转第 207 页)

参考文献

- [1] Klinkenberg R. Learning Drifting Concepts Example Selection vs Example Weighting[J]. In Intelligent Data Analysis (IDA), Special Issue on Incremental Learning Systems Capable of Dealing with Concept Drift, 2004, 8(3): 281-300
- [2] Littlestone N, Warmuth M K. The weighted majority algorithm [J]. Information and Computation, 1994, 108: 212-261
- [3] Freund Y, Schapire R. A decision-theoretic generalization of on-line learning and an application to boosting[J]. J. Computer and Sys. Sciences, 1997, 55: 119-139
- [4] Street W N, Kim Y S. A streaming ensemble algorithm for large-scale classification [C] // Proceeding of the 7th ACM SIGKDD Int. Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. 2001: 377-382
- [5] Kolter J Z, Maloof M A. Using additive expert ensembles to cope with concept drift[C]//Proceedings of the Twenty-second International Conference on Machine Learning. New York, NY: ACM Press, 2005: 449-456
- [6] 孙岳, 毛国君, 等. 基于多分类器的数据流中的概念漂移挖掘

[J]. 自动化学报, 2008, 34(1): 93-97

- [7] Wang H, Fan W, Yu P S, et al. Mining concept - drifting data streams using ensemble classifiers[C]//Proc. 9th ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-2003). ACM Press, 2003: 226-235
- [8] Zhou Z H, Wu J X, Tang W. Ensembling neural networks; many could be better than all[J]. Artificial Intelligence, 2002, 17(1/2): 239-263
- [9] Giacinto G, Roli F. Design of effective neural network ensembles for image classification purposes[J]. Image and Vision Computing, 2001, 19(9/10): 699-707
- [10] Bakker B, Heskes T. Clustering ensembles of neural network models[J]. Neural Networks, 2003, 16: 261-269
- [11] Martinez-Munoz G, Suarez A. Pruning in ordered bagging ensembles[C]//23rd International Conference in Machine Learning. ACM Press, 2006: 609-616
- [12] Tsymbal A, Pechenizkiy M, Cunningham P, et al. Dynamic integration of classifiers for handling concept drift[J]. Information Fusion, 2008, 9(1): 56-68

(上接第 203 页)

δ 决定, r 为跑道落点距目标点的距离。不同的坦克可以选择一组不同的参数值, 这样就可以让不同坦克的射击动作具有不同的水准, 从而更加逼真地模拟现实中各坦克的射击情况。

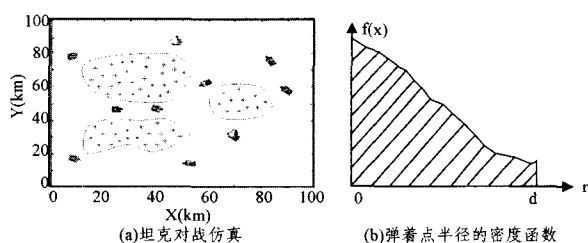


图5 虚拟坦克对战仿真

由实验可知:

1) 坦克在攻击目标时, 只能以一定的概率命中目标, 而不是简单的命中或不命中;

2) 通过调节对射击动作建模的正态区间参数, 可以让不同的坦克具有不同的命中率, 这样就可以模拟各种不同熟练程度的坦克乘员的射击行为。

结束语 1) 基于不确定性空间的概率, 明确了不确定性动作的具体定义; 2) 提出了概率区间的概念及其完备性问题, 与代数区间相比, 用概率区间对不确定性动作建模可以更加精确地刻画动作效应的分布情况; 3) 着重对正态区间进行了讨论, 定义了正态区间、正态区间运算及其完备化结果。可以从如下两方面进一步研究: 1) 将概率区间扩展到二维, 甚至更高维度; 2) 针对特定动作效应分布情况, 定义具体的概率区间并研究相关性质。

参考文献

- [1] Wray R E, Laird J E, Nuxoll A, et al. Synthetic Adversaries for

Urban Combat Training[C]//Proc. of the 2004 Innovative Applications of Artificial Intelligence Conference. San Jose, CA, July 2004

- [2] Raza M, Sastry V V S S. Variability in Behavior of Command Agents with Human-Like Decision Making Strategies[C]//Proc. of Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (uksim 2008). published by IEEE, 2008: 562-567
- [3] Stytz M R. Progress and Prospects for the Development of Computer-generated Actors for Military Simulation; Part 1[J]. Introduction and Background, 2003, 12(3): 311-325
- [4] Cox C, Fu D. AI for Automated Combatants in a Training Application[C]//Proc. of the Second Australasian Conference on Interactive Entertainment. Sydney, Australia: Creativity & Cognition Studios Press, 2005: 57-64
- [5] Tian Z H, Zhao L, Jia Y. Research on Consistent Measurement of Uncertainty Based on Entropy[C]//Proc. of the International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Changsha, China, Published by IEEE CS, 2008: 684-697
- [6] Chery L H, Daniel P L. Interval methods for modeling uncertainty in RC timing analysis[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems (0278-0070), 1992, 12(11): 1388-1401
- [7] Liu B. Uncertainty Theory (2nd ed) [M]. Berlin, German: Springer-Verlag, 2007
- [8] Funge J, Tu X, Terzopoulos D. Cognitive Modeling: Knowledge, Reasoning and Planning for Intelligent Characters[C]//Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM Press, 1999: 29-38
- [9] Funge J. AI for Computer Games and Animation: A cognitive Modeling Approach (1-56881-103-9). USA Natick, MA: A. K. Peters Ltd., 1999