

# 面向三维动画自动生成的路径规划<sup>①</sup>

郝亮亮, 林海华

(北京工业大学 计算机学院, 北京 100124)

**摘 要:** 全过程计算机辅助自动生成动画技术由中科院陆汝钫院士于上世纪 90 年代提出, 这一技术的目标是将适当的故事以受限自然语言的方式输入计算机, 由开始一直到动画的生成, 每一步都是在计算机的辅助下完成. 在动画生成过程中, 如何规划运动对象路径是影响动画效果的重要因素. 为此, 提出基于动画场景规划信息的路径规划方法, 该方法通过预定义的路径定性规划语言 PADL 描述规划需求, 然后通过利用扩展的 A\* 算法规划路径并生成路径定量规划语言 PCAL 描述的路径, 最后采用运动图方法合成路径运动动画. 实验表明, 该方法能有效地自动生成符合指定要求的路径动画.

**关键词:** 路径规划; 三维动画; 定量规划; 定性规划; 运动图

## Path Planning for Automation of Computer 3D Animation Generation

HAO Liang-Liang, LIN Hai-Hua

(Computer College, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Ruqian Lu, academician of Chinese Academy of science, put forward project “full life cycle automation of computer animation generation” in the 1990s. This technology inputs proper story with limited natural language to the computer, and from the beginning to animation generation, every step was completed in the computer assisted. In the animation, how to plan the character path has become the important factor that affects the animation effect. In this paper, a path planning method based on the animation scene planning information in PADL was proposed, in which A\* algorithm is used with restricted conditions to create PCAL, finally animation was made by Motion Graph. Experiments showed that the method could automatically generate the path animation that met the specified requirements.

**Key words:** path planning; 3D animation; quantitative planning; qualitative planning; motion graph

计算机辅助动画生成是人工智能和计算机图形学领域一项长期致力于研究的课题<sup>[1]</sup>, 其中, 中科院陆汝钫院士首次在国际上提出全过程计算机辅助自动生成动画技术, 这一技术的目标是将一个适当的故事以受限语言的方式输入计算机, 由此开始到动画的最终生成, 每一个环节都是在计算机的辅助下完成, 并应用这一技术研发了“天鹅”系统<sup>[2]</sup>, 使借助计算机来完成从故事文本到动画的自动生成成为一种可能. 而路径规划作为动画自动生成系统中的重要组成部分, 它的任务是在动画空间中寻找一条由起始点到目标点的无碰撞路径. 同时, 路径规划也是智能化控制领域的热点问题, 在未来的基于合成演员的动画系统中, 运

动将由人工智能、机器人技术等自动生成<sup>[3]</sup>.

路径规划的研究主要集中在路径规划系统和路径规划算法两个方面. 目前, 已经有许多学者对智能化的运动规划系统实现进行了研究, 如 Ridsdake<sup>[4]</sup>等研究了面向任务规划的动画系统, 任务规划采用基于规则的运动分析方法研究面向目标的动画系统和运动描述方法, 能够实现路径规划、动力学分析、运动学分析等. Karl Smis<sup>[5]</sup>建立了一个虚拟生物进化系统, 采用遗传算法模拟生物的形态和神经系统, 生成它们的运动和形态, 并通过不同的进化函数仿真特定行为的进化过程. Kuffner<sup>[6]</sup>提出了一整套算法框架能够在复杂的二维虚拟环境中处理虚拟人运动规划问题, 并利用

① 收稿时间:2015-08-25;收到修改稿时间:2015-10-19

计算机模拟的视觉模型和记忆模型实现了动态环境下的路径规划。而对于路径规划算法,一部分研究人员着眼于改进传统方法,张彪<sup>[7]</sup>等采用三维栅格方式表示地图,并扩展D\*考虑机器人尺寸的方式生成多条路径;吴登峰<sup>[8]</sup>等人采用栅格化建模方法将环境分块,设计了“点到点”的路径规划方法;石久根<sup>[9]</sup>等基于分层分段的方法,利用Voronoi图理论离线生成路径;乔慧芬<sup>[10]</sup>等提出人工势场法预规划路径,并采用RRT算法实时局部规划的算法。另一部分研究人员将人工智能应用在路径规划中,卢月品<sup>[11]</sup>等通过借助Dijkstra算法得到基准路径,然后通过遗传算法优化路径;赖智铭<sup>[12]</sup>等采用栅格法全局规划,然后通过基于滑动窗口和蚁群优化算法二次路径规划,朱大奇<sup>[13]</sup>等通过三维栅格与神经元映射的方式建立三维生物启发神经网络模型,通过神经元活性输出自主规划路径。

当前最优路径方法众多,但根据对环境信息的把握程度可分为基于先验完全信息的全局路径规划和基于传感器信息的局部路径规划。三维动画自动生成系统规划过程中能够获取所有场景信息,需要对全局环境进行处理,而A\*算法是全局路径规划中最典型和成熟的方法,能够较快处理图的规模比较大的情况,算法灵活,适用性强,所以文中路径规划算法核心采用A\*算法。

文中我们结合陆汝钤院士的“天鹅”系统的设计思路,采用分层的思想,通过定义路径运动定性描述语言PADL对路径运动信息进行定性表达,再由定量计算解释为路径运动的定量描述语言PCAL。其中,PADL就是对路径运动信息进行高级地、定性地抽象,而PCAL则使用精确的定量信息表达动画中的运动情况。通过在定性层生成定性的动作描述序列,然后将定性描述通过定量层的动作计算转化为动画的定量描述,通过扩展A\*算法选择最优路径并依靠动作图实现路径动画。由于人工智能方法往往比传统路径规划算法运算成本高,根据动画实际需要,通过改进传统A\*算法,提高系统运行效率。

## 1 路径规划定性描述

每个动画都具有一定的故事情节。无论故事情节最初采用语言还是文字形式来表达,最终都需要转化为计算机可以操作的指令。定性路径规划实际上是将指定情节以形式化的路径动画描述语言PADL来描述某一路径运动的过程。一般来说,路径运动可以拆分

为一个或多个动作片段,一个完整的路径运动是一个符合某种规律的动作片段序列。我们将独立的动作片段作为规划的最小单位,一个动作片段主要包含动作主体、动作时间、动作名等固有属性。

动作主体是执行某一动作的角色。根据不同的因素可以划分为不同的种类,其中,按主体数量因素可以分为单角色和多角色;按主体类型又可以分为人、动物、物体等。

动作时间是描述某一动作执行时间长短的度量。帧是动画中最小单位的单幅影像画面,一帧就是一副静止的画面,连续的帧形成动画,这里采用帧序号来描述动作的开始时间和终止时间。

动作类型是动作片段所执行动作的标识,通过指定动作名来确定该动作片段从动作库选取哪一类型动作。

初始位置描述动作开始时的位置。位置属性有相对位置和绝对位置两种描述方式。相对位置方式是通过参照物的相对位置来说明,根据模型标注的坐标轴确定方向,例如“在A房子后”可以描述为on\_behind\_of(houseA),通过表示参照方位的修饰词in\_front\_of, behind\_of, on\_left\_of, on\_right\_of, on\_top\_of等表示距离远近程度的修饰词close, far, very close, very far等来补充描述;绝对位置方式可以定量地描述目标位置的三维坐标,该方式使用时需要场景地图完全了解。

此外,一个动作片段还有可选属性,通过可选属性的不同组合可以丰富地描述运动情况,更可以增加扩展性。因此它们对于路径规划有至关重要的作用,主要有以下几种可选属性:

动作对象描述动作主体在做某一动作时交互的物体,交互性的动作需要这个参数表达动作施加的角色,主要是实物模型。

目标位置描述动作结束时的位置,同样可以通过相对位置和绝对位置描述该属性,添加了该属性后路径运动的终点位置将受到约束。

根据以上属性设计,我们定义了路径运动的定性描述语言PADL的语法结构([ ]表示是可选的, < >表示是可变化的)如下:

<路径运动>: : =<动作语句>[<动作语句>].

<动作语句>: : =<动作类型>, <动作主体>, <运动时间>, <初始位置>[<可选参数序列>].

<动作时间>: : =<起始时间>[<起始时间>, <终止时间>].

<可选参数序列>: :=[<动作对象>, <目标位置>, <重复次数>, <透明度>, <缩放>, <颜色>, .....].

## 2 规划最优路径

动画是一种动态的艺术,成功的动画应当赋予虚拟人“生命”,根据动画效果的表现力需要,在实际应用中,我们对路径选择设定了表1中的4点目标(优先级随序号增大而递减).

表1 路径选择目标

目标	内容
真实性	动作对象和环境不会发生穿越
条件性	路径运动应当符合定性规划的属性信息
显著性	路径运动应当获得明显的动作效果
多样性	多次路径运动规划结果应当避免重复

### 2.1 创建三维栅格场景

场景是动画中的背景环境,如图1(a),路径动画场景主要由障碍物模型和地形模型组成,我们对整个场景采用1\*1的网格进行二维栅格化,存储障碍物和模型的位置.我们主要采取以下步骤进行建模:

#### 算法1

Step1. 计算所有障碍物和地形模型的立方体或圆柱体包围盒,如图1(b),取投影面积最小的包围盒为模型的包围盒,如图1(c),并加入序列LIST( $m$ ),  $m \in \{m_n, n \in Z^+\}$ .

Step2. 依次从序列LIST( $m$ )选取模型.对于模型 $m_n$ 的投影,如果投影为矩形,取顶点坐标整数部分为坐标构成栅格区域R( $m_n$ );如果投影为圆形,四个顶点都落在投影内的栅格构成栅格区域P( $m_n$ ),如图1(d).

Step3. 重复Step2,直至序列LIST( $m$ )为空.

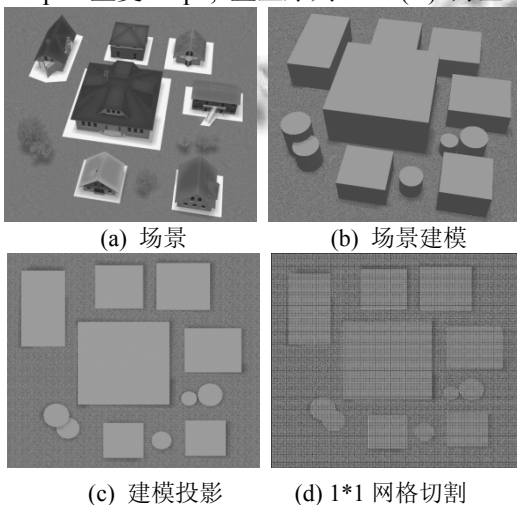


图1 场景三维栅格建模示意图

### 2.2 找寻所有可行路径

A\*算法是静态环境中路径规划最有效和最常用的方法,A\*算法只考虑了路径消耗,可以求得最短路径.但是,最短路径并不一定是动画中具有表现力效果的那条最优路径.我们假设任何无障碍的从起点到终点的路径都是可行路径,如果设可行路径集合K,最优路径p,那么一定满足:如果k存在,那么 $p \in K$ .我们考虑通过规划多条可行路径作为最优路径备选的可行路径集合,为此利用A\*算法规划多条路径.

首先,设 $M=(S,E)$ 代表栅格地图,其中S表示虚拟人可以活动的栅格,E表示这些可能位置的边界.函数 $U(s)$ 表示某一栅格s的邻域, $v(s)$ 则表示运动对象是否已经到达栅格s处.每次规划需要给定一个初始栅格 $s_{start}$ 和目标栅格 $s_{goal} \in S$ ,并设置规划备选路径数目N.

假设估计函数 $g(s)$ 记录了从初始状态到每一个其他状态的消耗:

$$g(s) = \begin{cases} 0, & \text{if } s = s_{start} \\ \min_{s' \in U(s)} (g(s) + c(s, s')), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

其中,函数 $0 < c(s, s') \leq \infty$ 用来存储从状态s变为状态s'的消耗, $c(s, s') = \infty$ 意味着从栅格s到s'栅格不可通行.同时,使用启发函数 $h(s, s_{goal})$ 来估计到达目标位置的路径消耗.

#### 算法2

Step1. 将所有的 $s \in S$ 和 $h(s)$ 都设为1,并且将 $v(s)$ 设为0.同时,使 $g(s_{start})=0$ 并且s设为CLOSED,即不需要再次到达该栅格.

Step2. 对所有的栅格 $s \in U(s_{start})$ 计算函数 $g(s)$ 和 $h(s, s_{goal})$ 的数值,如果栅格s没有设为CLOSED,就将其加入OPEN序列,OPEN序列中存储着运动对象需要达到的栅格并通过k(s)函数来排序

$$k(s) = g(s) + h(s, s_{goal}) \quad (2)$$

$$h(s, s_{goal}) = |s_{goal}.x - s.x| + |s_{goal}.y - s.y| \quad (3)$$

k(s)数值最小的栅格被排在OPEN序列的顶端,当栅格 $s \in U(s_{start})$ 被放入OPEN序列后,序列顶部的栅格s被弹出并且状态设为CLOSED.

Step3. 对OPEN序列排列完成后,将k(s)数值最小的栅格弹出,重复Step2直到 $v(s_{goal})$ 为true为止.如果OPEN序列为空,则表明没有合适的路径,否则表明已经找到从 $s_{start}$ 到达 $s_{goal}$ 的路径,记录获得一条备选路径.

Step4. 若达到备选路径数目  $N$ , 算法结束, 否则转至 Step1, 并将已规划的备选路径经过的栅格消耗设置为不可通行, 即  $c(s,s') = \infty$ .

算法 2 可以得到图 2(a)中的路径, 但实际情况下, 运动对象的运动可能占据多个网格, 如图 2(b), 为此, 对每一条备选路径, 需要执行路径修正算法调整可行路径位置保证运动对象具有基本的活动范围, 不与障碍物发生碰撞. 运动对象的活动范围可以由常量的最大运动姿态  $MAX$  和最小运动姿态  $MIN$  确定. 对每条可通行路径执行如下算法:

**算法 3**

Step1. 遍历可通行路径的栅格, 检测当前栅格是否是目标栅格, 若是, 转至 Step6, 否则转至 Step2.

Step2. 检测 Step1 中的栅格是否能容纳运动对象的最大运动姿态  $MAX$ , 若能, 转至 Step1, 否则转至 Step3.

Step3. 检测是否具有足够的空间来进行旋转, 若能, 将当前栅格加入 JUMP 序列, 转至 Step1 并将下一网格加入 TARGET 序列, 否则转至 Step4.

Step4. 检测是否具有足够的空间使运动对象以最小运动姿态  $MIN$  停止在当前栅格, 若能, 则标记当前栅格为终止栅格, 此时, 终止栅格不是目标栅格, 并转到 Step6, 否则转至 Step5.

Step5. 将当前栅格向远离障碍物的方向平移一格, 转至 Step3.

Step6. 依次从 JUMP 和 TARGET 序列中取出栅格分别作为初始栅格 和目标栅格, 执行 A\*算法补全从初始栅格到达终止栅格的路径.

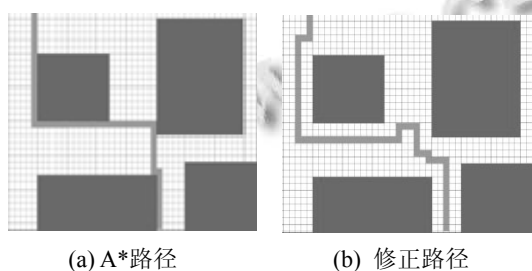


图 2 A\*算法路径规划和修正算法效果示意图

**2.3 选择最优路径**

多条备选路径最终只能选择最合适的一条应用于路径动画中, 考虑到动画对最优路径选择的特殊要求, 我们设计了最优路径选择算法.

**算法 4**

Step1. 遍历可通行备选路径, 检测路径是否能到达终点, 若能, 存入比较序列  $C$ , 否则存入候补序列  $A$ .

Step2. 分别选取比较序列  $C$  和候补序列  $A$  中路径 JUMP 序列栅格数目最多的路径, 即选取旋转次数最多的路径  $C_{MAX}$  和  $A_{MAX}$ , 其中, 当旋转次数最多的路径有多条时, 随机选取一条.

Step3. 如果比较序列  $C$  不为空, 那么  $C_{MAX}$  为最优路径, 否则  $A_{MAX}$  为最优路径.

**3 路径规划定量描述**

定量路径规划是对定性路径规划得到的 PADL 文件的量化解释和实现, 量化解释的依据是已知动作对象和场景环境的几何特征, 运动参数之间的关系和物理知识. 需要注意, 动作 PCAL 是低层次的动画控制语言, 所包含的信息全部是定量数值信息, 并不具备易读性. 若想从定量层对动画进行干预, 通过修改该 PCAL 的数值来改变生成的动画效果, 用户必须要理解动画中具体关键帧中数据所代表的含义.

我们规定 PCAL 量化表示形式如下:

<运动路径>: : =<路径>[<路径>].

<路径>: : =<起点坐标>, <终点坐标>, <开始帧数>, <结束帧数>, <动作名>.

**4 合成路径运动**

我们通过定性规划和定量规划将路径运动转化为一组动作序列的合成问题. 因此, 可以采用 Kovar<sup>[14]</sup>提出的基于运动图的运动合成方法. 运动图是一种依赖运动捕捉数据库的方法, 描述了运动数据帧之间地相似关系. 在运动图中, 运动片段被作为图的节点, 如果, 如果一个动作片段能够平滑的过渡到另一个动作片段, 那么就构成一条有向边. 当运动图构建完成后, 对运动图的任意遍历都会得到一段平滑运动片段序列. 根据规划结果, 遍历运动图即可得到路径运动序列, 合并生成路径运动.

我们认为, 连接相似的动作帧能够获得平滑的运动. 因此, 当路径运动转化为关键帧动画时, 就需要计算前后动作帧的相似程度, 从运动图中选取最接近的变化, 动作对象才能具有更平滑的运动.

通常, 欧氏距离用来计算几何距离. 所以, 动作帧  $f$  和  $f'$  的相似程度可以用对应关节点  $p_i$  和  $p'_i$  的欧氏距离和来表示,

$$D(f, f') = \sum_i \|p_i - T_{x,z} R_{\theta_y} p_i\| \quad (4)$$

其中，动作帧进行相似程度比较时首先应该进行对齐，即通过 x 轴，z 轴方向的平移矩阵  $T_{x,z}$  和 y 轴方向的旋转矩阵  $R_{\theta_y}$  将对象根骨骼调整到相同的初始坐标和朝向角度。

我们通过半自动标注建立了动作数据库，动作库由不同类型的动作(对应于 PCAL 的 action name)构成，每个动作类型又包含若干不同变化的运动片段(帧数均大于 10 帧)，通过实验确定仅保存每个片段的前 10 帧和后 10 帧的关节位置数据作为连接平滑度判断参数存入数据库。对于运动片段  $C_1$  和  $C_2$ ，我们通过以下公式度量平滑度：

$$S(C_1, C_2) = \frac{1}{10} \sum_{n=1}^{10} D(f_{10-n}^{C_1}, f_n^{C_2}) \quad (5)$$

其中，公式中动作片段  $C_1$  作为前段动作采用后 10 帧位置数据，动作片段  $C_2$  作为后段动作采用前 10 帧位置数据计算，计算时按照  $C_1$  第 10 帧开始的降序与  $C_2$  第 1 帧开始的增序求得计算欧氏距离和的平均值作为平滑标准，最后搜索选取  $S$  最小值的片段进行连接。

### 5 实验结果与讨论

我们选用 CMU 动作采集数据，从 2605 个 BVH 动作文件中选取部分数据构成动作数据库，其中，动作数据库通过有选择地抽取 BVH 动作文件的部分帧序列作为运动片段。抽取的运动片段不能直接入库，需要经过人物根关节坐标和角度的标准化。

实验中采用 1\*1 个单位的网格进行二维栅格化，假设从一个栅格移动到相邻的栅格上的最小代价 1。实验使用动画制作软件 Maya 作为底层动画的制作和生成平台，人物模型高度 30 个单位，躯干宽 4 个单位，臂长 10 个单位，为此，A\*扩展算法中设定最大运动姿态 MAX 为 24 个单位，旋转姿态为 14 个单位，最小静止姿态 MIN 为 6 个单位。程序运行在 DELL 酷睿双核图形工作站上，动画通过 10 台曙光标配刀片服务器渲染合成。采用图 3 中的 PADL 文件作为输入请求进行实验。

图 4 显示了给定起点 start 和终点 end 并设定备选路径数目 N=3 时的规划效果，最终由于标号为 2 的路径旋转较多被选为了最优路径，生成图 5 的 PCAL 文件。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<PADL>
<PathAction id="1">
  <ActionType>SlowWalk</ActionType>
  <ActionObject>girl</ActionObject>
  <MovementTime>
    <StartTime>1</StartTime>
    <EndTime>50</EndTime>
  </MovementTime>
  <InitialPosition mode="relative">
    <Direction>behind_of</Direction>
    <Reference>houseBig01</Reference>
  </InitialPosition>
</PathAction>
<PathAction id="2">
  <ActionType>FastRun</ActionType>
  <ActionObject>girl</ActionObject>
  <MovementTime>
    <StartTime>51</StartTime>
    <EndTime>120</EndTime>
  </MovementTime>
  <InitialPosition mode="absolute">
    <Direction>end</Direction>
  </InitialPosition>
</PathAction>
</PADL>
```

图 3 PADL 文件

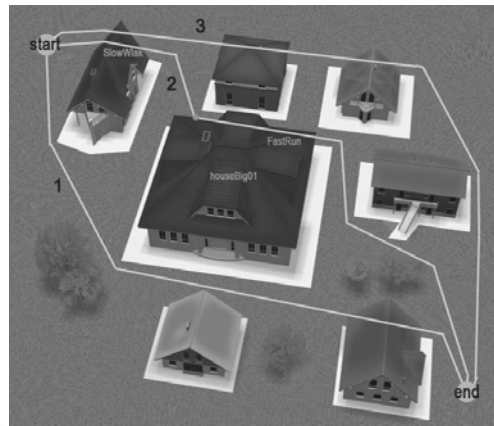


图 4 路径规划路线结果

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<PCAL>
<Path id="1">
  <StartPoint>-20,0,60</StartPoint>
  <EndPoint>50,0,90</EndPoint>
  <StartFrame>1</StartFrame>
  <EndFrame>16</EndFrame>
  <ActionName>SlowWalk05</ActionName>
</Path >
<Path id="2">
  <StartPoint>50,0,90</StartPoint>
  <EndPoint>80,0,100</EndPoint>
  <StartFrame>17</StartFrame>
  <EndFrame>32</EndFrame>
  <ActionName>SlowWalk09</ActionName>
</Path >
<Path id="3">
</Path >
<Path id="4">
</Path >
<Path id="5">
</Path >
<Path id="6">
</Path >
<Path id="7">
</Path >
</PCAL>
```

图 5 PCAL 文件(只显示 id=1, id=2, 路径未全部显示)



(a) 行走

(b) 跑步

图6 动画合成效果

图6显示了根据PADL合成路径动画的不同动作片段,动作对象能够正确的执行规划的动作。实验表明,通过不同层次的规划描述,可以将路径规划的问题逐步解决,通过改进不同的层次,能够逐步优化路径规划效果。

## 6 结语

本文针对三维动画自动生成系统中的路径规划技术进行了研究,通过采用分层思想,将路径规划问题划分为定性规划和定量计算两部分,并分别设计了PADL和PCAL语言从不同粒度来形式化地描述路径规划情况。为了实现路径规划动画,我们建立栅格地图,通过扩展A\*算法选择最优路径,采用运动图的方法使其应用于动画自动生成技术。我们的工作是对陆汝钤院士“天鹅”系统地一步探索,成功地设计了动画路径规划的整体架构。

然而,从实验中发现依旧有许多具体问题,比如,栅格地图对复杂路面的表达有限,如何更精确表示障碍物和提高算法效率,运动图方法受限于动作数据库的丰富程度等问题。为此,需要扩大数据库的规模,增加动作数据的精细度;然而,动作数据库不能无限扩展,过大的数据库会显著增加搜索计算量,最终动画效率可能会受限于数据库的大小或质量,为此可以

考虑研究对现有数据合成加工获得更新动作的方法,如何得到数据库的规模和搜索方法的平衡点也是进一步的研究重点。

## 参考文献

- 1 Lu RQ, Zhang SM. Automatic Generation of Computer Animation. New York/London: Springer, 2002: 68-69.
- 2 陆汝钤,张松懋.从故事到动画片从故事到动画片—全过程计算机辅助动画自动生成.自动化学报,2002,28(15):321-348.
- 3 Thalmann NM. Computer Animation. Springer, 1990.
- 4 Ridsdale G. The interactive specification for human animation. Proc. Graphics Interface '86. 1986. 121-130.
- 5 Sims K. Evolving virtual creatures. ACM SIGGRAPH '94. 1994. 15-44.
- 6 Kuffner JJ. Autonomous agents for realtime animation[Ph.D. Thesis]. California, USA: Stanford University, Department of Computer Science, 1999.
- 7 张彪,曹其新,王雯珊.使用三维栅格地图的移动机器人路径规划.西安交通大学学报,2013,45:57-61.
- 8 吴登峰,梅志千,尹力伟,李向国.一种未知环境下室内移动机器人路径规划新算法.机电工程,2015,3:389-392.
- 9 石久根,李凯业.基于分层改进D\*算法的室内路径规划.计算机应用研究,2015,32.
- 10 乔慧芬,潘广贞,元琴.移动机器人的实时路径规划研究与仿真.计算机仿真,2015,1:406-410.
- 11 卢月品,赵阳,孟跃强,刘佳.基于改进遗传算法的狭窄空间路径规划.计算机应用研究,2015,2:413-418.
- 12 赖智铭,郭躬德.基于滑动窗口和蚁群优化算法的二次路径规划算法.计算机应用,2015,1:172-178.
- 13 朱大奇,孙兵,李利.基于生物启发模型的AUV三维自主路径规划与安全避障算法.控制与决策,2015,5:798-806.
- 14 Kovar L, Gleicher M, Pighin F. Motion graphs. University of Wisconsin-Madison, SIGGRAPH '02, 2002.