



山东大学
SHANDONG UNIVERSITY

毕业论文(设计)

论文(设计)题目:

基于 VR 的陶瓷表面图案示教绘制 ——VR 部分

姓 名_____刘诗婷_____

学 号_____201918130217_____

学 院_____计算机科学与技术_____

专 业_____计算机科学与技术_____

年 级_____19 级_____

指导教师_____赵海森_____

2023 年 05 月 09 日

摘 要

陶瓷艺术作品在中国有着悠久的历史和文化底蕴，但随着时代的变迁和人们审美观念的变化，市场对个性化定制的需求逐渐增加。面向陶瓷表面的图案绘制工艺，传统的手工绘画制作方式在定制化上具有优势，但效率低下，并不适合大量生产。而其他诸如印花、贴花、数字印刷工艺等虽然能快速高效地将图案添加到产品上，但是在定制化的生产中有诸多限制，也缺乏丰富的纹理效果。

为了探索同时满足定制化和大量生产的工艺，本文提出借助虚拟现实技术，采用示教的方式获取经验丰富的陶瓷手工艺技师的绘制轨迹，然后使用机械臂控制画笔复刻该轨迹，在模型上完成相应的绘制任务。用户可以通过 VR 头戴式设备和手柄控制器在三维空间中对陶瓷胚体进行绘画，同时实时捕捉记录画笔轨迹。接下来，使用机械臂控制画笔按照同样的轨迹在真实的陶瓷上进行绘画，达到和手绘相同的效果。

本项目是一个团队项目，本文主要关注其 VR 和轨迹获取的部分，使用 HTC Vive 设备构造了绘画环境，实现了绘画轨迹的获取，对轨迹进行了部分优化，研究了绘画结果的实时交互，同时，探讨了项目未来的发展方向。

关键词： 虚拟现实；陶瓷绘画；轨迹捕捉

ABSTRACT

Ceramic art works have a long history and cultural heritage in China, but with the changes of the times and people's aesthetic concepts, the market demand for personalized customization is gradually increasing. For the pattern drawing process on ceramic surfaces, the traditional manual painting production method has advantages in customization, but it is inefficient and not suitable for mass production. While other processes such as printing, decals, and digital printing can quickly and efficiently add patterns to products, there are many limitations in customized production and a lack of rich texture effects.

In order to explore a process that satisfies customization and mass production at the same time, this paper proposes to use virtual reality technology to obtain the drawing trajectory of an experienced ceramic craftsman by means of teaching, and then use the robotic arm to control the brush to reproduce the trajectory and complete it on the model. corresponding drawing tasks. Users can draw on the ceramic body in three-dimensional space through the VR head-mounted device and the handle controller, while capturing and recording the brush trajectory in real time. Next, use the robotic arm to control the paintbrush to paint on the real ceramics in the same trajectory to achieve the same effect as hand-painting.

This project is a team project. This article mainly focuses on the trajectory acquisition part. Using HTC Vive equipment to construct the painting environment, realize the acquisition of the painting trajectory, partially optimize the trajectory, and study the real-time interaction of the painting results. At the same time, discuss The future direction of the project.

Keywords: Virtual Reality; Ceramic painting; Track capture.

目 录

第 1 章 绪 论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.1.1 陶瓷绘画.....	1
1.1.2 VR 技术.....	2
1.2 研究目的与意义.....	3
1.3 本文主要工作.....	4
1.4 论文组织结构.....	4
第 2 章 陶瓷表面绘画示教系统设计.....	5
2.1 设计目标.....	5
2.2 核心技术.....	5
2.2.1 HTC Vive.....	5
2.2.2 Unity 引擎.....	6
2.2.3 SteamVR.....	6
2.3 系统架构.....	6
第 3 章 轨迹获取.....	8
3.1 搭建环境.....	8
3.2 绘画轨迹的捕捉和传输.....	9
3.2.1 捕捉画笔的轨迹.....	9
3.2.2 碰撞检测.....	10
3.2.3 轨迹的记录和输出.....	11
3.2.4 轨迹优化.....	12
3.3 实现绘画效果.....	12
第 4 章 总结与展望.....	16
4.1 本文总结.....	16
4.2 不足之处.....	16
4.3 未来展望.....	16
4.3.1 增加功能.....	16

4.3.2 提高精度.....	17
4.3.3 轨迹的优化.....	17
4.3.4 应用前景.....	18
致 谢.....	19
参考文献.....	20

第1章 绪 论

1.1 研究背景

中国陶瓷是世界上历史最悠久、技术最成熟、品种最丰富、造型最精美的陶瓷之一，有着深厚的文化底蕴和民俗特色。它的历史源远流长，可以追溯到新石器时代。在随后的几千年中，中国陶瓷经历了不断的发展和演变，成为中国传统艺术中的瑰宝之一。

中国的陶瓷艺术以其复杂的工艺和精湛的技法而闻名于世。陶瓷的制作需要经过多个环节，包括粘土制作、造型、饰面、烧制等^[1]。不同的陶瓷制作地区有着各自的工艺和技法，如汝窑的釉下彩、景德镇的青花等，这些技法和工艺经过了数千年的传承和发展，至今仍有重要的地位和影响。

1.1.1 陶瓷绘画

本文主要关注的是陶瓷表面绘画工艺。在陶瓷绘画方面，主要有以下几种工艺^[2]：

手绘工艺：手绘是一种传统的陶瓷绘画方法，常常需要经过多年的训练和实践才能达到高水平。手绘陶瓷通常采用瓷漆或者彩料进行绘制，通常需要专业的陶瓷师傅手持绘画工具，对陶瓷表面进行细致的涂画，创作出各种不同的设计和图案。通常用于制作精美的艺术品或定制的礼品等小批量或个性化定制的产品。

印花工艺：采用特殊的印刷机器，在图案的印刷板上涂上瓷料，然后将图案印在陶瓷上。使用丝网印刷、柔印、平版印刷等技术，印花可以实现高度复杂的图案和设计，也可以快速地在大批量制造的陶瓷上印刷图案^[3]。

贴花工艺：将图案印在特殊纸张上，然后将纸张贴在陶瓷表面，通过加热或水处理将纸张上的图案转移到陶瓷表面，再进行二次烧制。这种方法可以实现高度的图案复杂度和色彩层次感，通常用于陶瓷制品生产线上的大批量生产。

喷涂工艺：使用喷涂机在陶瓷表面喷涂涂料，然后进行二次烧制，这种方法可以实现丰富的色彩和渐变效果。喷涂工艺通常用于生产工业陶瓷制品，例如瓷砖和卫浴用品等。

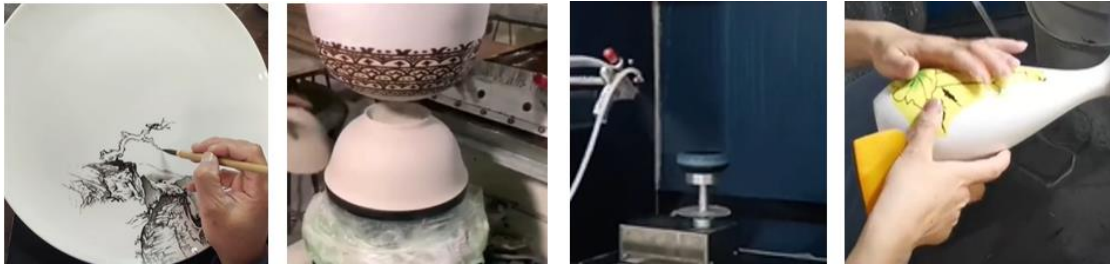


图 1 不同的陶瓷表面绘画工艺，从左至右依次为手绘、印花、喷涂、贴花

这些工艺各有优缺点，在实际生产中需要根据产品特点和生产要求选择合适的工艺。传统的手工绘画制作方式在定制化上具有优势，但效率低下，并不适合大量生产。而其他诸如印花、贴花等工艺虽然能快速高效地将图案添加到产品上，但是在定制化的生产中有诸多限制。随着科技的不断进步，现代的数码印刷和激光刻画技术也逐渐应用于陶瓷绘画领域，直接利用数字技术打印图案。虽然这种技术也能在定制化上具有优势，但相比手工绘画，缺乏了丰富的纹理效果。

随着时代的发展，陶瓷表面图案绘制技术更加注重创意和个性化。为满足个性化需求，越来越多的人需要定制化的陶瓷产品^[4]。然而，由于经验丰富的陶瓷绘画手艺人数量有限，如何提高绘画的效率和质量成为了一个难题。因此，我们采用了一种获取绘画轨迹，然后使用机械臂复刻轨迹在陶瓷上进行绘画的方法，对轨迹进行调整和风格化，从而实现既能借助机械来实现大规模生产，又能做到人工绘制的多样化、个性化，通过数字化技术，为陶瓷表面图案绘制工艺的发展提供新的方向。

1.1.2 VR 技术

为了获取有经验的手艺人在绘画时的画笔轨迹，需要一个精确的传感器来获取轨迹。但能专门用于此的传感器难以获得，于是本文选择了 VR 技术，使用 VR 设备自带的传感器、位置定位等功能来获取目标轨迹。

VR 技术，即 Virtual Reality，最早由美国的乔·拉尼尔在 20 世纪 80 年代初提出。虚拟现实技术是集计算机技术、传感器技术、人类心理学及生理学于一体的综合技术，其是通过利用计算机仿真系统模拟外界环境，主要模拟对象有环境、技能、传感设备和感知等，为用户提供多信息、三维动态、交互式的仿真体验^[5]。



图 2 虚拟现实技术的仿真交互

在陶瓷制造过程中，通过虚拟现实技术，工人可以在虚拟环境中进行操作演示和培训，有助于提高工作效率和质量。另外，VR 技术也被应用于陶瓷设计和展示领域。设计师可以使用虚拟现实技术来创建陶瓷图案和造型，实时调整和预览设计效果。同时，VR 技术也可以用来创建陶瓷展览的虚拟现实展示，提供更加直观、丰富的观展体验^[6]。

总的来说，VR 技术在陶瓷领域的应用还比较新颖，但已经得到了一些制造商、设计师和艺术家的关注和尝试。未来，随着 VR 技术的不断发展和普及，它在陶瓷领域的应用前景也将越来越广泛。

1.2 研究目的与意义

传统的陶瓷绘画工艺需要手工绘制，耗时费力且容易出现失误。为了满足越来越多的个性化定制需求，在有经验的陶瓷绘画师傅人手较为缺少的情况下，传统的手工绘画必须和现代的数字化技术相结合，尽可能的在减少人工投入的同时提高绘画的效率和质量。因此，本文采用获取绘画轨迹，在经过处理和优化后，使用机械臂控制画笔，在陶瓷胚上绘画的方法，试图在足够灵活的定制化需求中，实现较高产能。本文主要关注的是轨迹获取和用户交互两个部分。

为了获取绘画轨迹，需要较为精确的工具。VR 技术可以提供较高精度的交互体验，用户可以直接使用手柄进行画画，并且可以在虚拟环境中实时预览绘画结果。VR 设备将精确的传感器和沉浸式的实时体验相结合，用户能在输入过程中快速获得绘画结果的反馈。设备还可以记录用户的所有动作和手势，以便后续的分析 and 改进。

使用机械臂操控毛笔进行绘画的做法已有研究^[7]。采用带有旋转关节的机械臂，可以通过计算控制笔的位置和姿势，模仿人类绘画技术^[8]。

基于 VR 的陶瓷表面示教绘画是一项全新的技术探索，通过对该技术进行研究，有助于推动 VR 技术在陶瓷艺术领域的应用和创新，提升陶瓷绘画的创作效率和品质。VR 技术在陶瓷艺术领域的应用不仅可以提高制造业的自动化和智能化水平，同时也有助于推动制造业的转型升级，推动我国陶瓷行业的可持续发展。将数字化工具和传统陶瓷工业相结合，能促进国内陶瓷文化的传承和创新，同时也可以拓宽陶瓷艺术的国际视野，促进文化艺术的交流和融合。

1.3 本文主要工作

本文采用了 unity 引擎，在 HTC Vive 设备上进行了 VR 开发。目标轨迹为毛笔的运动轨迹，即运动时的空间位置和姿态。在虚拟环境中创建一个毛笔模型，用户在绘画时使用手柄抓起毛笔，对三维物体进行绘画，模拟绘画时的状况，获取毛笔的运动轨迹和姿态，并输出到文件中。然后采用射线碰撞检测的方法，得到笔头在物体上绘画时物体的 uv 值，动态地改变它的纹理，然后将新的纹理附到原本的纹理上。

1.4 论文组织结构

本文共分为五章。

第 1 章为绪论部分，简要介绍了陶瓷绘画的研究背景、意义以及采用 VR 技术的必要性，并对本文所作的工作进行了简要介绍。在章节的最后介绍了本文的组织结构。第 2 章介绍了系统的设计目标和使用的核心技术，展示了系统架构图。第 3 章介绍了系统功能的具体实现过程。第 4 章讨论了系统的不足之处和未来发展方向。

第2章 陶瓷表面绘画示教系统设计

2.1 设计目标

利用虚拟现实技术，使用户能够通过手柄在虚拟环境中进行绘画。准确记录和保存用户在虚拟环境中绘画时画笔的轨迹。通过捕捉手柄的位置和方向信息，实时记录用户的绘画动作，并将其以一定的数据格式进行保存，以便后续的数据分析和应用。系统应能够将用户的绘画过程进行实时的可视化展示，在虚拟环境中，将绘画过程中的效果实时展现给用户，具备用户友好的界面和交互设计，使用户能够轻松上手并进行自由绘画。

2.2 核心技术

2.2.1 HTC Vive

HTC Vive 是一款由 HTC 和 Valve 合作推出的虚拟现实头戴式设备，它包括一个头戴式显示器和两个手柄，可实现高质量的虚拟现实体验。



图 3 HTC Vive 设备

HTC Vive 拥有高分辨率的 OLED 显示器和高保真的耳机，能够提供逼真的图像和身临其境的声音体验。该设备支持 360 度的全景视角，让用户在虚拟环境中自由移动和探索更多内容。此外，配备两个手柄，可以精准地跟踪用户的手部动作，使用户能够自如地在虚拟环境中操作。还采用了房间级别的定位追踪技术，能够精准地跟踪用户在房间内的位置和移动。

总之，HTC Vive 是一款高质量、精准、逼真的虚拟现实头戴式设备，为用户提供了身临其境的虚拟现实体验。

2.2.2 Unity 引擎

Unity 引擎是一款由 Unity Technologies 开发的跨平台游戏引擎。它支持 Windows、MacOS、Linux、iOS、Android、Xbox、PlayStation 和 Web 等多个平台。可用于创建 2D 和 3D 游戏，也可用于虚拟现实(VR)和增强现实(AR)应用程序。提供了许多内置工具和组件，使开发者可以轻松地创建游戏对象、应用物理引擎、管理游戏资源、实现游戏逻辑和用户界面等。Unity3D 还支持 C# 和 UnityScript 等编程语言，并具有良好的社区支持和广泛的开发文档。由于其易于使用和广泛的适用性，Unity3D 被广泛应用于游戏开发、虚拟现实、增强现实、培训和教育等领域^[9]。

2.2.3 SteamVR

SteamVR 插件是一款适用于 Unity3D 引擎的插件^[10]，它提供了一系列的 API 和工具，用于访问 SteamVR 系统和硬件的功能，包括头戴显示器追踪、手柄追踪、空间定位、用户输入、音频输出等，使开发者能够在 Unity3D 中轻松地创建 VR 应用程序，并在 SteamVR 平台上运行这些应用程序。开发者可以使用 SteamVR 插件来创建逼真的虚拟现实体验，通过 SteamVR 的跟踪技术，可以在虚拟现实环境中实现准确的头部追踪、手部追踪和物体位置追踪，以及实现用户与虚拟世界进行自然互动。SteamVR 还提供了一些其他的工具和资源，包括交互设计指南、虚拟现实优化技巧和免费的虚拟现实样本场景等，以帮助开发者更好地理解和使用 SteamVR 平台。同时，SteamVR 还提供了 SteamVR 插件的源代码，使开发者可以深入了解 SteamVR 的内部工作原理，并根据自己的需求进行定制。

2.3 系统架构

我们的系统由以下几个部分组成：VR 头显（HTC Vive）、绘画示教工具（VR 手柄）和软件系统。

在 VR 头显中，我们使用 SteamVR 插件来获取手柄姿态信息，以及房间级别的定位追踪信息。这些信息将发送到电脑主机，用于计算手柄位置和运动轨迹。

用户带上头显，使用手柄进行绘画，传感器会捕捉用户的绘画动作和轨迹，

并将轨迹保存在文件中。

使用 Unity3D 游戏引擎来实现 VR 绘画应用程序。在该应用程序中，实现绘画工具和绘画结果的显示。绘画轨迹将传输到 Unity3D 引擎，使用虚拟笔刷进行可视化，并在 VR 头显中实时显示绘画结果。

以下是系统的架构图：

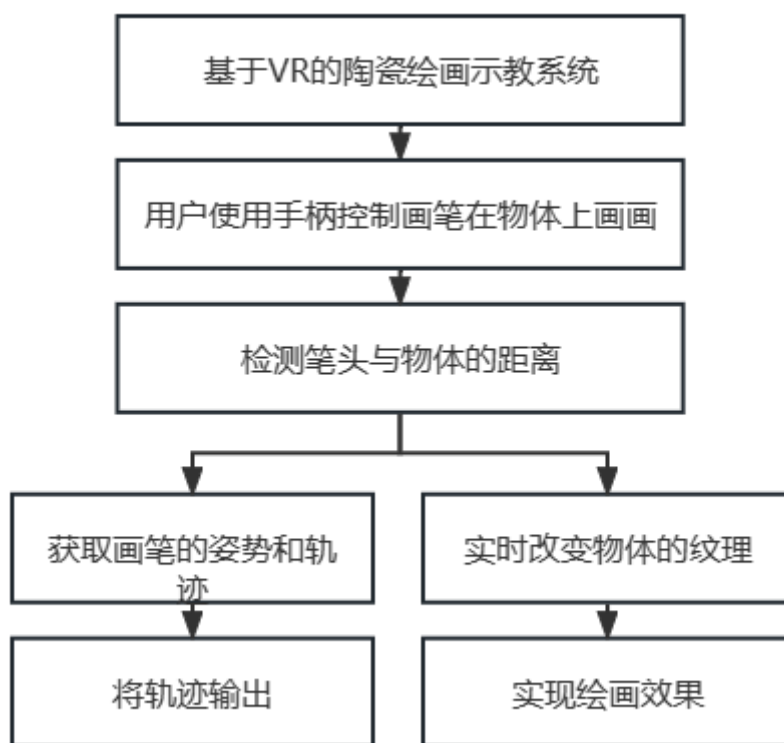


图 4 系统架构图

第3章 轨迹获取

3.1 搭建环境

在 Unity 官网上下载并安装最新版的 Unity 软件。在安装过程中，选择所需的组件和模块，选中与 HTC Vive 兼容的 SteamVR 插件。

在 Steam 平台上下载并安装 SteamVR，这是 HTC Vive 设备的软件组件之一。

将 HTC Vive 设备连接到电脑，在 HTC Vive 官网上下载 Viveport 和 Vive 软件，Viveport 是 HTC Vive 的另一个应用商店，可以访问各种虚拟现实应用程序和游戏，而 Vive 用于更新头戴式显示器的驱动程序和软件。

在连接 HTC Vive 后，需要在 SteamVR 上对房间环境进行设置。本文由于不需要大量位移，所以选择仅站立模式。



图 5 SteamVR 环境设置

然后在 Unity 中创建新项目，并选择 3D 模板，在 Unity 中导入并添加 SteamVR 插件，以便 Unity 能够与 HTC Vive 设备进行交互。在 Unity 中创建虚拟环境，包括所需的虚拟对象、材料、纹理、灯光和其他相关元素。

首先在虚拟空间中构造一个毛笔模型。它包括笔杆和笔头两个部分。笔杆是一个细长圆柱体，笔头抽象为一个圆球，用于判断与绘画对象的碰撞^[1]。根据 VR 场景的比例进行大小和位置的调整。用户可以通过手柄操纵该毛笔模型来实现绘画功能。为了增强模型的真实感，在模型上添加了物理材质和碰撞体。

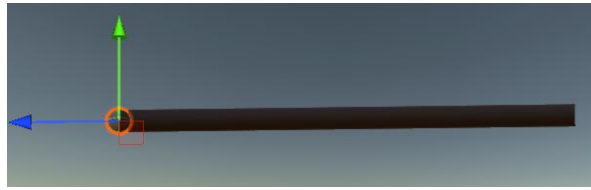


图 6 画笔的模型设置

然后构建绘画对象，由于本文只是对轨迹获取和绘画结果进行了初步研究，此处将绘画对象抽象为一个圆柱体。

在 VR 环境中，通过构造一个合适的绘画环境，可以使用户在 VR 环境中更加沉浸式地进行绘画操作，提高用户的体验和操作效率。一个合适的绘画环境应该包括用于摆放绘画对象的桌子、用户的活动空间以及光照环境等。本文通过构造真实尺寸和比例的桌子，使用户更容易操作。在设定用户的活动空间时，将默认进入空间设置在桌子前，保证用户进入环境后，绘画对象就出现在面前。本项目并不需要过大的活动空间，只需要在绘画对象周围的一小段范围内即可，于是设置绘画对象周围。此外，在虚拟空间中添加合适的光源，以模拟真实环境下的光照情况，使得用户在 VR 环境中可以更加真实地感受到绘画过程。本文采用的方案是使用默认的点光源，光源位于用户背后，光照方向从背后射向桌子，用户绘画时不会受到光照阴影的影响。

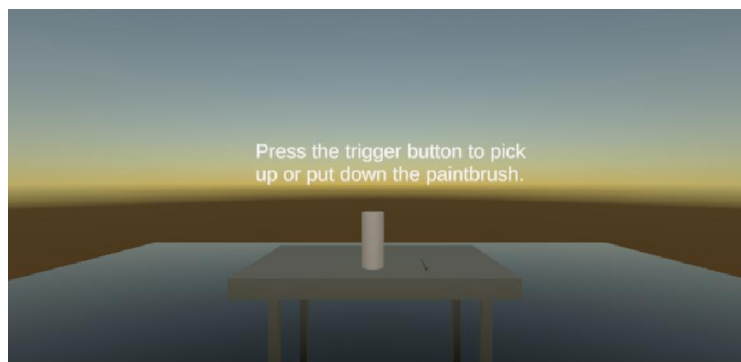


图 7 虚拟环境展示

3.2 绘画轨迹的捕捉和传输

3.2.1 捕捉画笔的轨迹

用户进入环境后，按下手柄的 trigger 键，即可拿起画笔，对绘画对象进行绘画。使用 SteamVR 插件中的 SteamVR_Behaviour_Pose 组件可以检测手柄的触发键是否被按下。

本文中对拿起画笔后画笔的姿态进行了调整，根据手柄惯用位置的前方方向，调整画笔的姿态，确保笔头的方向与手柄惯用位置的前方一致，手对画笔能较好的控制。在每一帧的 `Update` 函数中，记录画笔的笔杆方向、笔杆位置和笔头位置等信息，然后将每一帧记录的画笔状态保存到本地的文件中。

3.2.2 碰撞检测

在本项目中，由于绘画对象是不规则的三维物体，不能通过画笔笔头的位置直接通过数学方法计算出画笔与绘画对象的距离。

对于不规则形状的三维物体，可以使用物体表面的碰撞检测来判断画笔是否在画画^[12]。具体来说，可以使用 `Mesh Collider` 组件将绘画对象的网格模型转化为可以用于碰撞检测的物体表面。然后，在画笔上添加一个 `Collider` 组件，使其能够进行碰撞检测。当画笔与绘画对象的碰撞检测结果为真时，即可判断画笔在画画。

射线碰撞检测是用于检测游戏对象与场景中其他对象之间的交互作用的一种重要技术。它通常用于实现角色移动、物体拾取、射击等功能，通过发射一条从某一位置出发的射线，检测射线与其他对象的交叉来判断是否碰撞^[13]。

本文中，射线碰撞检测被用于判断画笔与绘画对象的距离，从而判断是否正在绘画状态，即什么时候将画笔的位置转换为画出的轨迹的位置。具体步骤如下：

首先创建射线，使用 `Ray` 函数来创建射线，本文设置射线的起点为画笔的笔头，方向沿笔杆的方向。在发射射线之后，使用 `Physics.Raycast` 方法进行检测，如果射线与场景中的对象发生了碰撞，则返回 `true`，同时可以获取交点等信息。

由于笔头抽象为一个小圆球，直径约为 0.01，于是将与球心沿射线方向 0.015 的距离视作碰撞检测区域，如果绘画对象进入这个区域，则表示正在绘画中。于是对射线在 0.015 的距离进行检测，若检测到目标物体相交，则再进行下一步。

当笔头与绘画对象发生碰撞时，将状态设定为正在绘画中，标志着一笔画的开始，并将该部分轨迹标记为有效轨迹。这个状态的设定可以确保有效轨迹的捕捉和记录。然而，除了有效轨迹，其他部分的轨迹也具有重要作用。在每一笔落下之间，画笔的轨迹也需要被读取和记录，以便进行绘画过程的准确模拟或传递给机械臂进行绘画。考虑轨迹的用途在于传递给机械臂绘画，所以不能在获取有效轨迹之后，鲁莽地将画笔直接从一个有效轨迹的末尾状态平移到另一个有效

轨迹的初始状态，这有可能导致画笔在平移过程中碰撞到绘画对象的其他部分。所以在画笔状态转换时，需要考虑平移路径的安全性，以避免不必要的碰撞。

3.2.3 轨迹的记录和输出

将画笔的轨迹以一定的数据格式输出到文件中。画笔的轨迹实际上就是画笔的空间位置和方向的二元组以及时间的集合。为了将绘画轨迹传输到机械臂，让机械臂采用该轨迹进行对应的绘画，需要确保机械臂能够精准地定位物体和画笔的位置。在虚拟环境中需要选择一个参考点作为原点，使该参考点与机械臂的坐标系相对应。本文选择了绘画物体摆放的桌面作为参考平面，使绘画物体摆放位置的中心位置作为原点。这样做可以简化坐标系的设置和转换过程，并且对于机械臂和绘画轨迹之间的空间关系有一个明确的参考点，实现时只需要将物体摆放在一个固定设置好的平面上，使物体的中心对准平面的中心即可。

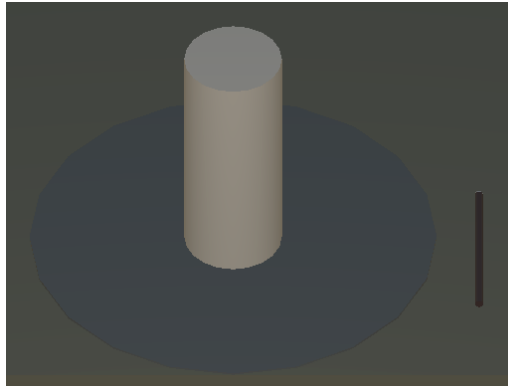


图 8 将物体放到一个固定平面的中心

然后将虚拟环境中的坐标进行转换，根据(1)中的转换将虚拟环境中的绝对坐标转换为以该点为原点 O 的相对坐标。在将绘画轨迹传输给机械臂后，只需要根据位置偏移值，对机械臂进行校准就能够使机械臂准确的定位到绘画物体和画笔的位置。

$$\begin{cases} x = x_p - x_o \\ y = y_p - y_o \\ z = z_p - z_o \end{cases} \quad (1)$$

画笔的位置或方向改变的速度在陶瓷绘画中也是非常关键的一部分，这关系到绘画材料在物体上的状态，可能影响绘画材料在物体表面的涂布厚度、绘画作品的纹理和笔触效果，以及绘画材料在物体表面的流动性和扩散性。所以记录画笔轨迹的时间戳是十分必要的。

在 Unity 的 C# 脚本中，File 类是用于读写文件和目录的类之一。通过该类

可以创建、复制、删除和移动文件和目录，以及读取和写入文件中的内容。本文的文本输出正是以此实现的。

本文在每一帧中，捕捉画笔在虚拟空间中的位置和方向，并将其保存为一系列的位置和方向向量。将这些向量按照时间顺序输出到一个文件中，使用 CSV 格式，每行包含时间戳、位置坐标和方向向量。在数据之间使用逗号进行分隔，并添加标题行以指示每个字段的含义。在读入数据时，可以逐行读取文件并解析每一帧的位置和方向向量，用于重现画笔的轨迹。

3.2.4 轨迹优化

根据时间戳判断两次绘画之间的时间间隔，如果时间间隔较长，则可以剪掉这段时间内的轨迹，并对这段时间内的轨迹进行平滑处理。

然后根据画笔与绘画物体中心的距离判断画笔是否离开了绘画物体，在画笔离开绘画物体一定距离后，忽略画笔的轨迹，等到画笔再次靠近绘画物体后再重新关注画笔的轨迹。对于剪切掉的轨迹或离开绘画物体期间的轨迹，可以对其进行处理，让画笔按一定规则移动到新的位置。

3.3 实现绘画效果

在计算机图形学中，纹理是由一个二维图像（或称为纹理图像）组成的，它被应用到三维模型的表面上。纹理图像可以包含颜色信息、光照信息、法线信息等，这些信息与模型的几何结构相结合，产生出逼真的外观效果。实现绘画效果的方式有多种，其中一种是通过将轨迹点序列映射到绘画对象表面上。这可以通过在绘画对象表面上生成一个新的纹理，或者修改现有纹理来实现。无论哪种方式，都需要在每个绘画轨迹点处计算笔刷的大小和颜色，以便绘制出平滑的曲线。同时，还需要考虑绘画轨迹与绘画对象之间的混合方式，以确保绘画效果与环境相协调。

如图 9 所示，在三维计算机图形学中，一个 3D 模型通常被表示为一个由三角形构成的网格，每个三角形由三个顶点和它们的法线向量组成。当渲染这个模型时，将对每个三角形进行光照和纹理贴图等处理，最终将其映射到屏幕上^[14]。纹理是由一个二维图像（或称为纹理图像）组成的，纹理图像可以包含颜色信息、光照信息、法线信息等，这些信息与模型的几何结构相结合，产生出逼真的外观

效果^[15]。因此，绘画操作也需要在这个三角形网格上进行，通过将轨迹点映射到对应位置的纹理上来实现绘画效果。

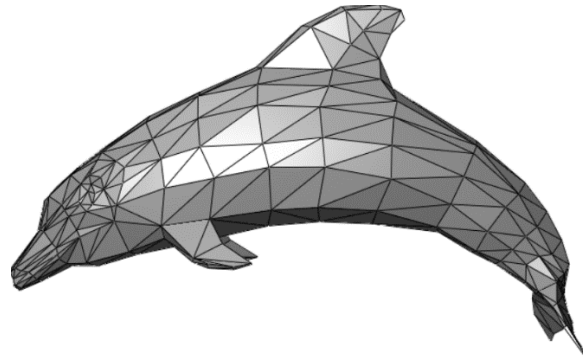


图 9 使用三维网格表示的鲸鱼模型

在三维建模中，当我们要将一张图片或者纹理贴到模型表面时，需要为模型表面上的每个三角形分配对应的 uv 坐标，也就是确定每个三角形所对应纹理贴图上的哪个区域，以便正确地将纹理贴图映射到模型表面。绘制的流程如下图所示：

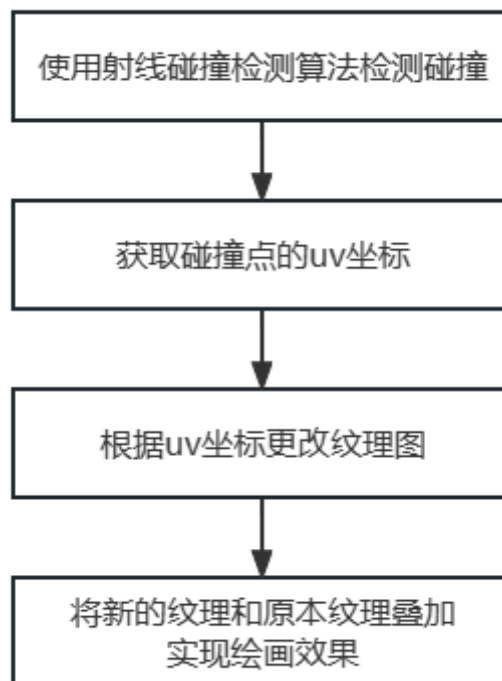


图 10 绘制流程

uv 坐标系一般采用从左下角(0,0)到右上角(1,1)的坐标系，这些值对应于纹理图像中的位置，以便确定贴图的位置应该如何映射到模型表面上。通过将正确的 uv 坐标与纹理贴图相结合，可以在三维模型表面上渲染出非常逼真的纹理

效果。

在通过射线检测到碰撞后，通过 `RaycastHit.textureCoord` 属性可以获取到碰撞点在绘画对象纹理上的 `uv` 值。根据 `uv` 值，可以换算出绘画点在纹理上的位置，对该位置的纹理进行修改。采用实时纹理绘制的方法，在绘制过程中将用户绘制的效果实时更新到纹理中，再覆盖到物体上^[16]。具体可以实现为在每一帧绘制结束后，将用户绘制的部分转换为新的纹理，并将其贴到原有的纹理上。这个过程可以使用 Unity 引擎中的 `RenderTarget` 实现。

`Render Texture` 是 Unity 中的一种纹理，可以在渲染时用作渲染目标。它可以用于实现各种效果，例如镜子、屏幕后处理、水面反射等。`Render Texture` 会在渲染时保留渲染结果，可以用作后续渲染的输入，例如用作新的材质纹理。`Render Texture` 可以在场景中的摄像机上进行设置，也可以通过代码动态创建。使用 `Render Texture` 可以使游戏中的效果更加细腻逼真。

在采用 `Render Texture` 绘动态地渲染出绘画纹理后，采用 `Shader Graph` 将其与原纹理相结合。

值得一提的是，此时需要将渲染管线切换为 `URP`，即通用渲染管道。切换完毕后可能使物体原本的纹理变为粉红色，需要注意纹理的切换，使其适应新的渲染管线。

`Shader Graph` 是 Unity 引擎的一个可视化着色器编辑器，可以让开发者通过图形化界面创建自定义的着色器效果。在 `Shader Graph` 中，开发者可以通过拖拽和连接节点的方式来定义着色器的输入和输出，例如颜色、法线、`UV` 坐标等，并在节点中设置相应的运算和操作。这些节点最终会转换为一个可编译的着色器程序，在运行时渲染物体时将其应用于对应的材质上。使用 `Shader Graph` 可以大大简化着色器编写的难度，使得开发者能够更快速地创建出复杂的着色器效果，同时还能够实时预览结果。

当使用 `Shader Graph` 进行纹理结合时，通常使用 `Blend` 节点，该节点有两个输入和一个输出，输入可以是纹理、颜色、数字等，可以通过不同的组合来实现不同的纹理结合效果。

本文首先创建了一个新的 `Shader Graph`，并创建两个 `Texture 2D` 节点用于输入纹理 A 和 B。在节点面板中，找到 `Blend` 节点，并将纹理 A 和 B 连接到 `Blend`

节点的两个输入。Blend 中的 Blend Mode 参数具有多种模式，其中，Multiply（乘法）节点是一种用于将两个输入值相乘的数学操作节点。它将两个输入的数值相乘，生成一个新的输出值。在纹理结合中，可以使用 Multiply 节点将两个纹理图层叠加在一起，从而创建出更复杂的纹理效果。而 Add（加法）是另一种数学操作节点，它可以将两个输入数值相加并输出它们的和。将原纹理与绘画纹理进行加法混合，能使得绘画部分的颜色更鲜明突出。Subtract 用于计算两个值的差，常常用于控制纹理或颜色的混合，将一个值从另一个值中减去。在将绘画纹理与原始纹理相结合时，Subtract 操作可以用于将绘画纹理的颜色值从原始纹理的颜色值中减去，以实现纹理混合效果。对绘画对象原本的纹理和绘画纹理进行组合，最终的 shader graph 构造如图 3 所示。

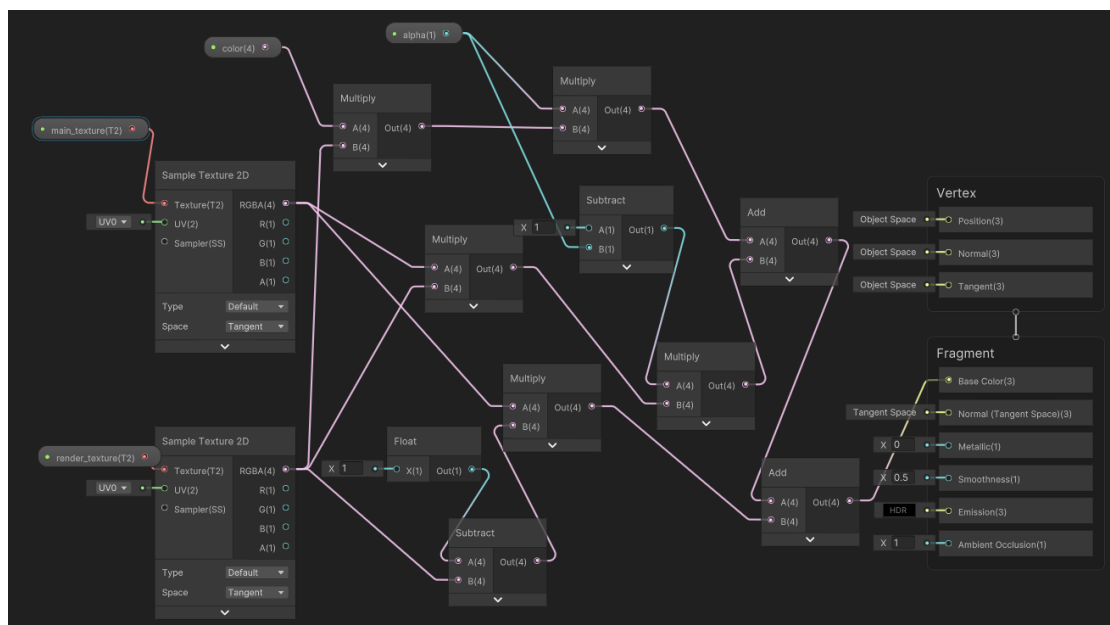


图 11 构建 shader graph

将最后的输出连接到 Fragment 模块，用于控制像素的颜色、透明度等属性，从而实现所需要的视觉效果。

创建一个新的材质（Material），将构建完成的 Shader Graph 的 Asset 拖拽到该材质的 Shader 中。然后将该材质应用于要渲染的对象。将 Render Texture 和绘画对象原本的 Texture 作为输入添加到 shader graph 中，就能在用户绘画的时候动态地显现出绘画效果，从而给用户实时反馈的绘画体验。

第4章 总结与展望

4.1 本文总结

本文的主要研究目标是在陶瓷绘画领域应用虚拟现实技术，以捕捉用户绘画时毛笔的运动轨迹，并将轨迹传递给机械臂进行绘画。同时，研究了基于 VR 的绘画实时交互效果，并探讨了该技术的未来发展方向。

通过使用 VR 设备，用户可以在虚拟空间中进行绘画，而毛笔的运动轨迹能够被准确捕捉和记录下来。这种方法为陶瓷绘画提供了一种新的创作方式和工具，可以更好地满足个性化需求，并提高工艺制作的效率和质量。此外，本文还对绘画轨迹进行了优化和处理，去除部分干扰因素。

本文提出的基于 VR 的绘画轨迹捕捉方法具有实用性和应用价值。它为陶瓷绘画领域的研究和开发提供了新的思路和技术支持。同时对未来发展方向进行了讨论，可以为相关领域的研究和开发提供一定的参考和借鉴。

4.2 不足之处

使用 VR 进行绘画轨迹捕捉时，由于手柄的精度有限^[17]，以及在虚拟空间中的绘画对象可能与现实中的物体存在差异，因此可能会对精确度造成一定的限制。同时，由于绘画过程中的干扰因素较多，如手的晃动、绘画对象的旋转等，也会对精确度造成一定的影响。在用户体验方面，没有做好完整的 ui 设计，没有实现完整的绘画过程。在交互性上没有特别好的体现出 VR 的沉浸式体验的特质。

4.3 未来展望

4.3.1 增加功能

可以增加更多的绘画物体选择，以及允许用户进行更多的自定义设置，从而提高绘画物体的多样性和可定制性。可以考虑增加一些交互功能，例如撤销、重做、保存、分享等，增加绘画的趣味性和互动性。

为了进一步满足个性化和定制化的需求，可以考虑增加对特定轨迹进行颜色

转换或部分替换的功能。用户可以根据具体需求选择和定制绘画轨迹，以创造独特的艺术品或定制化产品，满足市场上个性化需求不断增长的趋势。

4.3.2 提高精度

为了提高绘画结果与原本绘画轨迹的相似性，需要开发具有更高精度的传感器作为轨迹捕捉的工具。使用更高分辨率的相机、更精细的位置跟踪器或更灵敏的压力传感器，可以捕捉更准确的轨迹。此外，还可以考虑采用深度学习技术进行轨迹修复和优化，以进一步提高绘画轨迹的质量和精度。采用更高精度和更稳定的传感器，可以提高绘画轨迹的准确性和稳定性，从而减少误差和抖动。它可以提供高度精确的手工艺艺术品制作体验，获取更精确的轨迹追踪，从而实现高水平的手绘效果。

4.3.3 轨迹的优化

由于在虚拟空间中作画，逐帧采样，可能会出现获取轨迹不够平滑的情况。对此进行优化，可以增加绘画轨迹的采样率，即增加记录绘画轨迹的数据点数量。通过更频繁地记录画笔位置和方向的变化，可以更准确地捕捉到绘画的细节和曲线，从而提高轨迹的平滑度。也可以使用插值算法对绘画轨迹进行平滑处理。通过根据已有的轨迹点，在其之间生成额外的中间点，使轨迹线条更加平滑连续。常用的插值算法包括线性插值、贝塞尔曲线等，根据需求选择合适的插值方法^[18]。还可以用平滑滤波器对绘画轨迹进行滤波处理，平滑滤波器可以通过降低绘画轨迹中的高频噪声和震荡，使轨迹更加平滑，或者采用轨迹优化算法，根据预定义的规则和约束，使用贝塞尔曲线拟合或样条曲线拟合等方法，通过调整曲线控制点来优化轨迹的形状和平滑度。

除了提高平滑度之外，对轨迹进行风格化可以为绘画带来更多的表现力和艺术感。可以通过增加一些随机性或规则性的干扰来改变轨迹的外观。可以使用噪声，例如 Perlin 噪声、Simplex 噪声等，通过调整参数和缩放来控制噪声的强度和频率，根据笔画的速度和方向来控制噪声的强度和频率，以达到更自然的效果^[19]。还可以在轨迹的基础上添加一些微小的抖动，使其看起来更加自然和真实。抖动可以是随机的，也可以是根据某种规律或模式生成的。也可以根据用户的速度和方向来调整抖动的强度和频率。可以使用深度学习技术对绘画轨迹进行研究，

实现轨迹的不同风格化选择。通过训练深度学习模型，将包含不同风格绘画轨迹的数据集作为输入，让模型学习风格特征的表示，并通过生成器网络生成符合所选风格的新轨迹，从而可以实现对绘画轨迹的风格化选择^[20]。用户可以根据自己的喜好和需要，在已有的风格选项中进行选择，并生成具有所选风格的绘画轨迹。这样不仅可以满足用户对个性化和定制化的需求，还能够促进创作的多样性和创新性。需要注意的是，深度学习方法对于轨迹的风格化选择需要充足的训练数据和合适的模型设计。同时，模型的生成结果可能存在一定不确定性和局限性，需要通过进一步的研究和优化来提高生成轨迹的质量和多样性。

4.3.4 应用前景

这项基于 VR 的陶瓷绘画示教技术的应用具有广阔的前景和潜力。它提高了陶瓷绘画领域中定制产业的自动化。机械臂可以根据预先设置的绘画路径，自动完成绘画任务，减少了人工干预的过程，大大提高绘画自动化程度，节约了人力成本。在陶瓷绘画领域，它可以为艺术家、设计师和定制厂商提供全新的工具和方法。

事实上，使用高精度摄像头以及传感器记录画笔的轨迹也是一种发展方向，在现实环境中直接获取陶瓷绘画者绘画时毛笔的轨迹比在虚拟环境中绘画更为真实，对陶瓷绘画者的绘画时干扰更小，更贴近于平时的绘画状态，也更能突出绘画者的手艺。这种方式的缺点是只能全过程复刻，难以选择某些笔触进行修改。

这项技术还可以应用于其他的定制绘画产业中。传统上，定制绘画需要大量的人工操作和时间，而且往往存在人为误差。而采用 VR 绘画示教技术，可以实现绘画任务的自动化和快速执行。机械臂可以根据预设的绘画路径进行绘画，提高了生产效率和质量，并且节约了人力成本。

此外，该技术还可以扩展到其他领域，如艺术教育、数字娱乐和虚拟设计。通过 VR 绘画示教技术，人们可以以更直观、沉浸的方式学习绘画技巧，体验创作的乐趣。同时，在数字娱乐和虚拟设计领域，该技术可以用于创造逼真的绘画效果和交互体验，为用户提供更丰富的娱乐和创作工具^[21]。

总而言之，基于 VR 的陶瓷绘画示教技术的应用前景广阔，它将为艺术创作、定制绘画产业和其他相关领域带来更高效、精确和创新的绘画体验和工具。

致 谢

在本文的写作和系统的设计实现过程中，首先需要感谢的是我的导师赵海森教授，他严肃的科学态度和严谨的治学精神对我产生了深远的影响。从课题的选择到设备的申请再到论文的完成，赵老师始终给予了我悉心的指导，同时还在生活上给了我无微不至的关怀，关注我的就业状况并给予建议。在此，谨向赵老师致以我最诚挚的谢意和最衷心的感谢！

在写论文的过程中，世界卫生组织正式宣布新冠疫情不再构成“国际关注的突发公共卫生事件”，阳光穿过阴霾，大学生活也即将结束，感谢我的室友们在生活上对我的帮助，希望他们顺利毕业，迎接光明的未来。

最后我还要感谢培养我的父母和姐姐，是他们的支持和培养，让我能完成学业。他们一直是我坚实的后盾，我衷心祝愿他们能身体健康，万事如意。

再次感谢所有帮助过我的人！

参考文献

- [1] 汪芸. 小议陶瓷制作工序[J]. 陶瓷研究, 2016 (S2): 104-106.
- [2] 詹益州. 谈谈日用陶瓷的装饰与彩烤[J]. 陶瓷科学与艺术, 2007, 41(2): 17-19.
- [3] 崔利军. 陶瓷业常用装饰工艺及特点[J]. 网印工业, 2017 (3): 46-49.
- [4] 邓春月,王舟.论新时代日用陶瓷的定制化设计发展趋势[J].科技风,2018,0(10):194-194
- [5] 石教英. 虚拟现实基础及实用算法[J]. 2002.
- [6] 陈柏生, 张志阳, 杜吉祥. 德化陶瓷虚拟展厅[J]. 信息化纵横, 2009 (6): 69-71.
- [7] 王玉卓, 闵华松. 基于毛笔建模的机器人书法系统[J]. 智能系统学报, 2021, 16(4): 707-716.
- [8] Junyou Y, Guilin Q, Le M, et al. Behavior-based control of brush drawing robot[C]//Proceedings 2011 International Conference on Transportation, Mechanical, and Electrical Engineering (TMEE). IEEE, 2011: 1148-1151.
- [9] Kim S L, Suk H J, Kang J H, et al. Using Unity 3D to facilitate mobile augmented reality game development[C]//2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2014: 21-26.
- [10] Murray J W. Building virtual reality with Unity and Steam VR[M]. CRC Press, 2017.
- [11] Bandyopadhyay D, Raskar R, Fuchs H. Dynamic shader lamps: Painting on movable objects[C]//Proceedings IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality. IEEE, 2001: 207-216.
- [12] Ericson C. Real-time collision detection[M]. Crc Press, 2004.
- [13] 徐岚.虚拟场景中碰撞检测技术研究[J].福建电脑,2009(5):42-43.
- [14] Haeberli P, Segal M. Texture mapping as a fundamental drawing primitive[C]//Fourth Eurographics Workshop on Rendering. 1993, 259: 266.
- [15] Heckbert P S. Survey of texture mapping[J]. IEEE computer graphics and applications, 1986, 6(11): 56-67.
- [16] Haralick R M. Statistical and structural approaches to texture[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(5): 786-804.
- [17] Niehorster D C, Li L, Lappe M. The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC vive virtual reality system for scientific research[J]. i-Perception, 2017, 8(3): 2041669517708205.
- [18] 任重, 杨灿军, 陈鹰. 轨迹规划中的 B 样条插值算法[J]. 机电工程, 2001, 18(5): 38-39.
- [19] Perlin K. Improving noise[C]//Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 2002: 681-682.
- [20] 方建文, 黄钢, 曹文明. 笔触风格化技术研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(9): 33-37.

- [21] 邹湘军,孙健,何汉武,郑德涛,陈新.虚拟现实技术的演变发展与展望[J].系统仿真学报, 2004,16(9):1905-1909