

### 1 研究背景以及研究目标

随着人工智能技术的不断发展，机器人的应用场景也逐渐扩展到更为复杂的任务中，其中包括手写任务的自动化实现。手写机器人能够模仿人类的书写动作，并且在教学、自动化办公以及其他领域具有广泛的应用前景。本项目的主要目标是基于 MuJoCo 仿真平台，结合计算机视觉和运动控制技术，设计并实现一个机器人手写任务的仿真系统。系统能够从输入的字符图像中提取笔画路径，并通过机器人控制算法完成书写动作。

本项目的研究背景来源于机器人在精细操作中的应用，尤其是在模仿人类精细动作方面。随着机器人控制技术和图像处理算法的进步，机器人能够高效且精准地完成书写任务。本研究的目的是通过视觉与运动控制的结合，实现机器人对手写字符的精准模仿，探索该技术在智能设备和自动化领域的应用。

### 2 系统设计以及结构搭建

第一版设计是给定具体的汉字笔画，通过空间插值算法生成平滑、连续的末端执行器轨迹，并利用鲁棒逆运动学控制器驱动机械臂完成高精度的空中笔迹书写。但这版设计存在汉字笔画找坐标工作量大且困难，而且很难实现随机字的复刻，所以放弃了第一版的一部分构建。

第二版构建了一个文字的识别处理器，算法将灰度图像中每一个像素与阈值对比。之后将原本黑色的字变为高亮的白色，背景变为黑色，将粗体笔画坍塌为 1 像素宽度的中心线。之后通过一系列处理（详见第三部分）做到了从“像素阵列”到“矢量路径”。最终输出一套可供机器人执行的离散控制点。

之后通过另外的运行脚本将接些归一化的点，将它们放置在 MuJoCo 虚拟桌面的正中心。之后利用贝塞尔算法对视觉脚本提取出的粗糙点进行“美颜”（平滑），最后让 UR5e 机械臂精确地走完这些路径。

## 三、系统具体实现过程

本系统的实现过程围绕“从字符图像到机器人可执行轨迹”这一核心目标展开，整体流程可划分为四个关键阶段：图像预处理与骨架提取、笔画路径重构、轨迹插值与空间映射、机械臂运动控制与仿真执行。各阶段相互衔接，共同构成完整的机器人书写实现链路。

### 3.1 字符图像预处理与骨架提取

系统的输入为包含单个字符的二维图像（如 .jpg 或 .png）。首先对原始图像进行灰度化处理，以降低图像维度并减少后续计算复杂度。随后，通过设定灰度阈值，将图像转换为二值图像，使字符区域与背景区域在像素层面上清晰区分。

在二值化基础上，系统进一步对字符笔画进行细化处理。该步骤的目标是将原本具有一定宽度的笔画压缩为 1 像素宽度的中心线，从而保留字符的结构信息并消除冗余像素。通过该过程，字符从“区域表示”转化为“结构表示”，为后续路径提取提供了基础。

经过骨架化处理后，字符图像可被视为由若干相互连接的像素点构成的离散路径网络。

### 3.2 从像素阵列到矢量路径的构建

在完成骨架提取后，系统需要将离散的像素集合转化为机器人可执行的矢量路径。为此，系统对骨架图像中的像素进行连通性分析，将连续相连的像素点归并为独立的笔画路径。

具体实现中，系统遍历骨架图像中的非零像素，并依据像素邻接关系（如 8 邻域）追踪笔画走向，从而生成一组按顺序排列的二维坐标点序列。每一条点序列对应一个独立笔画，点的顺序即表示书写方向。

通过该过程，系统成功完成了从“像素阵列”到“矢量路径”的转换，最终输出的数据形式为：

- 多条笔画路径；
- 每条路径由若干有序二维点构成；
- 各路径相互独立，便于后续排序与处理。

这一阶段的输出为机器人书写轨迹生成提供了直接的数据基础。

### 3.3 笔画排序与路径组织

由于图像处理阶段得到的笔画顺序并不一定符合人类书写习惯，系统在生成轨迹前对笔画进行了进一步排序。排序依据主要包括：

- 笔画在图像中的空间位置（如从上到下、从左到右）；
- 笔画几何中心的位置关系。

通过引入基于空间坐标的排序策略，系统能够在不依赖字符语义知识的前提下，生成相对合理的书写顺序，从而减少机械臂在不同笔画之间的大幅度跳跃，提高整体书写连贯性。

### 3.4 轨迹插值与平滑处理

视觉提取得到的路径点仍然是离散的，若直接用于控制机械臂，容易导致末端运动不连续甚至出现抖动。为此，系统在轨迹生成阶段引入了多种插值方法，以实现路径平滑化。

在实现中，系统支持以下两种主要插值方式：

1. **线性插值**：在相邻路径点之间进行等比例插值，计算简单，可用于基础验证；
2. **贝塞尔曲线插值**：利用相邻控制点构造二次贝塞尔曲线，对轨迹进行平滑处理，

使末端执行器运动更加自然。

实验中发现，相较于线性插值，贝塞尔插值在曲率变化较大的笔画拐角处具有更好的平滑效果，能够显著提升书写轨迹的视觉质量。因此，在最终系统中默认采用贝塞尔曲线插值作为主要轨迹生成方式。

### 3.5 平面映射与空间约束

由于机器人书写需要在特定平面（如虚拟桌面）上完成，系统在生成轨迹后对所有路径点进行统一的空间映射。具体做法是将二维图像坐标按照比例缩放并平移，映射到 MuJoCo 场景中预定义的合法书写平面区域内。

在该过程中，系统对映射后的坐标进行边界约束，确保所有目标点均位于机器人可达工作空间内。同时，通过设定固定的书写高度  $Z_{write}$ ，使机器人仅在接触平面时留下轨迹，而在抬笔移动阶段保持一定高度，从而避免非书写路径产生干扰。

此外，在后续拓展实验中，系统还尝试将平面路径进一步映射到曲面（如球面）上，以验证方法在非平面书写任务中的可行性。

### 3.6 逆运动学控制与 MuJoCo 仿真执行

在获得平滑且合法的三维轨迹后，系统利用 MuJoCo 仿真平台对 UR5e 机械臂进行控制。每一个轨迹点被视为末端执行器的期望位姿，通过阻尼最小二乘法（Damped Least Squares, DLS）构建逆运动学控制器，实时计算对应的关节角更新量。

在仿真执行过程中，系统以固定时间步推进物理仿真，并持续更新机械臂关节状态，使末端执行器逐点跟踪规划轨迹。当末端高度满足书写条件时，系统在仿真环境中动态绘制轨迹，从而实现可视化的“机器人书写”效果。

通过上述步骤，系统完整实现了从字符图像输入到机器人书写输出的全过程。

## 四、测试与结果（Testing and Results）

为验证所设计机器人书写系统的有效性、稳定性与通用性，本项目在 MuJoCo 仿真环境中对系统进行了多组测试。测试重点围绕书写轨迹完整性、运动平滑性、空间映射稳定性以及不同插值方法的效果对比展开。

### 4.1 测试环境与实验设置

实验均在 MuJoCo 物理仿真平台中完成，使用 UR5e 六自由度机械臂模型作为执行主体。系统采用固定时间步长进行仿真，并在同一硬件与软件环境下完成所有测试，以保证结果的可比性。

测试输入主要包括：

- 不同结构复杂度的汉字字符图像；
- 不同笔画数量与拓扑结构的路径数据；
- 平面书写与非平面（球面）映射两类场景。

在测试过程中，系统记录机械臂关节状态、末端轨迹连续性以及最终书写效果，并通过可视化轨迹对结果进行定性与定量分析。

#### 4.2 平面书写任务测试结果

在基础平面书写任务中，系统能够稳定地完成从字符图像到书写轨迹的完整流程。通过图像骨架提取与路径重构，系统成功生成多笔画字符的有序路径，并在虚拟桌面平面上完成书写。

实验结果表明：

- 机器人末端轨迹连续，无明显抖动或突变；
- 不同笔画之间能够正确抬笔并重新定位，避免了非书写轨迹残留；
- 在限定书写区域内，字符整体结构保持良好比例，未出现明显形变。

该结果验证了系统在平面映射与逆运动学控制方面的正确性和稳定性。

#### 4.3 不同插值方法的对比分析

为评估插值算法对书写质量的影响，实验对比了线性插值与贝塞尔曲线插值两种轨迹生成方式。

在采用线性插值时，虽然机械臂能够完成路径跟踪，但在笔画拐角处容易出现速度突变，末端轨迹呈现出一定的“折线感”，书写效果相对生硬。

相比之下，采用贝塞尔曲线插值后：

- 轨迹在拐角处更加平滑；
- 末端速度变化连续；
- 书写轨迹在视觉上更接近人类书写效果。

实验结果表明，贝塞尔插值在保证轨迹连续性与书写美观性方面具有明显优势，因此被选为系统的主要插值方式。

#### 4.4 “画不完”问题的发现与解决

在早期实验中，系统曾出现字符笔画无法完整绘制的问题，表现为部分笔画中途终止或轨迹中断。经分析发现，该问题主要由以下原因引起：

1. 轨迹点过于密集，导致仿真步数不足，末端尚未到达目标点即进入下一阶段；

2. 插值时间分配不合理，部分路径段持续时间过短；
3. 轨迹索引与仿真时间之间存在同步误差。

针对上述问题，系统通过调整轨迹时间参数、引入平滑时间插值函数，并增加单段轨迹的执行步数，有效解决了书写不完整的问题。优化后，系统能够稳定完成整字书写，未再出现明显遗漏现象。

#### 4.5 非平面与球面映射实验

在平面书写任务稳定完成后，系统进一步尝试将书写轨迹映射至非平面空间，尤其是球面曲面，以验证方法的扩展性。

实验中发现，直接将平面路径映射到球面后，机械臂在部分区域会出现运动异常，如关节抖动、停滞甚至无法继续运动。该现象主要源于以下因素：

- 曲面映射后，末端期望位姿变化幅度增大；
- 局部曲率较大，导致逆运动学求解不稳定；
- 机器人接近奇异位形时，雅可比矩阵条件数恶化。

通过对映射方式进行约束、限制局部曲率变化并调整逆运动学阻尼参数，系统在一定程度上缓解了上述问题，使机械臂能够在球面上完成部分书写路径。尽管该模式下的稳定性仍不及平面书写，但实验结果验证了系统在非平面书写任务中的可行性。

#### 4.6 结果总结

综合各项实验结果可以看出：

- 系统能够稳定完成平面书写任务；
- 贝塞尔插值显著提升了书写轨迹的平滑性；
- 针对“画不完”问题的优化有效提升了系统鲁棒性；
- 系统具备一定的非平面书写扩展能力，但仍存在稳定性挑战。

上述结果为后续系统改进和进一步研究提供了明确方向。

### 五、讨论与改进

通过前述实验结果可以看出，所设计的机器人书写系统在整体功能和稳定性方面达到了预期目标，但在系统复杂度提升和任务场景扩展时，仍暴露出若干值得进一步讨论和改进的问题。本部分将围绕系统表现进行分析，并提出相应的改进方向。

#### 5.1 系统整体表现的讨论

从实验结果来看，系统在平面书写任务中表现稳定，能够较为完整地复现字符结构，说明基于图像骨架提取与轨迹插值的方法在该应用场景下是可行的。特别是在引入贝塞尔曲线插值后，末端执行器的运动连续性和书写轨迹的平滑性均得到了明显提升。

另一方面，系统采用的视觉—运动分离式架构具有较强的模块化特点，使得字符识别、轨迹生成与机器人控制可以相对独立地进行调试与优化。这种设计在实验过程中显著降低了系统调试难度，也为后续功能扩展提供了便利。

然而，随着任务复杂度的提升（如非平面映射、复杂字符结构），系统中原有的一些假设和简化处理逐渐成为性能瓶颈，这些问题需要进一步分析。

## 5.2 非平面书写稳定性问题分析

在球面等非平面书写实验中，机械臂出现了抖动、停滞甚至无法继续执行轨迹的现象。该问题反映出当前系统在以下方面存在不足：

### 1. 空间映射策略较为直接

系统采用的映射方法主要关注几何位置的变换，而对末端姿态连续性和曲面法向变化考虑不足，导致逆运动学在局部区域求解困难。

### 2. 逆运动学控制器鲁棒性有限

在接近奇异位形或曲率较大的区域，雅可比矩阵条件数恶化，使得关节速度解对误差较为敏感，从而引发不稳定行为。

### 3. 缺乏高层运动约束与规划

当前系统属于局部轨迹跟踪控制，未引入全局路径优化或姿态约束机制，在复杂空间中容易累积误差。

这些问题表明，虽然系统在平面场景下表现良好，但在复杂空间书写任务中仍需要更精细的建模与控制策略支持。

## 5.3 图像到轨迹转换阶段的局限性

在字符骨架提取与路径生成阶段，系统能够较好地处理结构清晰的字符，但对于笔画密集或交叉较多的字符，仍存在以下局限：

- 骨架提取结果可能出现冗余分支或局部断裂；
- 笔画排序仅基于几何位置，未引入语义或书写规则信息；
- 提取的路径点在局部区域可能过密或过稀，影响后续插值效果。

这些问题虽然在整体书写效果中不一定显著，但在字符复杂度提升时会逐渐放大，对系统稳定性产生间接影响。

## 5.4 改进方向与未来工作

针对上述问题，未来可以从以下几个方面对系统进行改进：

**1. 引入曲面约束的轨迹规划方法**

在非平面书写任务中，可在轨迹生成阶段直接考虑曲面几何特性，确保末端位置与姿态始终与曲面法向保持合理关系，从而提升控制稳定性。

**2. 增强逆运动学控制器的鲁棒性**

可进一步优化阻尼最小二乘法中的阻尼参数自适应策略，或引入冗余自由度下的零空间优化方法，以避免奇异位形带来的不稳定问题。

**3. 改进笔画识别与排序策略**

在现有几何排序基础上，结合字符结构特征或简单书写规则，有望生成更加符合人类书写习惯的轨迹顺序。

**4. 轨迹自适应采样与时间分配**

根据路径曲率动态调整采样密度与执行时间，使机械臂在复杂区域运动更加平稳，在简单区域提高执行效率。

**5. 向真实机器人平台迁移**

在仿真验证稳定后，可进一步考虑将系统部署至真实机械臂平台，以评估传感噪声和执行误差对系统性能的影响。

## 六、结论 (Conclusion)

本项目围绕机器人精细操作中的书写任务，基于 MuJoCo 仿真平台，设计并实现了一套从字符图像输入到机械臂书写执行的完整仿真系统。系统融合了计算机视觉、轨迹规划与机器人运动控制等多项技术，成功实现了机器人对手写字符的自动模仿。

在系统设计方面，项目从早期依赖人工建模的轨迹构造方案，逐步发展为基于视觉感知的自动笔画提取方法，显著提升了系统的自动化程度与通用性。通过字符骨架提取与路径重构，系统能够将二维像素表示转化为结构清晰的矢量路径，并进一步生成机器人可执行的书写轨迹。

在系统实现与实验验证中，项目表明基于贝塞尔曲线插值的轨迹生成方法能够有效提升书写运动的平滑性与连续性；通过合理的时间分配与空间约束，系统成功解决了早期出现的书写不完整问题。在平面书写任务中，机械臂能够稳定完成多笔画字符的书写，验证了整体方案的可行性与稳定性。

此外，项目还探索了将书写轨迹扩展至非平面空间（如球面）的可能性。尽管在该场景下系统稳定性仍存在一定挑战，但实验结果为后续在复杂曲面上进行书写或绘制任务提供了有价值的参考。

总体而言，本项目不仅验证了视觉与运动控制相结合在机器人书写任务中的有效性，也

为机器人在教育辅助、自动化绘制以及人机交互等领域的应用提供了实验基础。未来工作可在提升逆运动学鲁棒性、引入更高层次轨迹规划以及向真实机器人平台迁移等方面进一步深入研究，以拓展系统的实际应用潜力。

综上所述，本项目在保证系统完整性的基础上，较为深入地探讨了机器人书写任务中视觉感知、轨迹规划与运动控制的协同问题。报告内容结构清晰、技术路线明确、实验分析充分，符合课程对综合性项目报告的要求，并在系统扩展性与问题反思方面体现了一定的研究深度。