# **基于深度学习的显示色彩优化系统建模**

****——色域转换与像素级校准的综合解决方案****

## **摘要**

本文针对数字显示中的两大核心问题——****跨设备色彩一致性****与****屏幕自身色彩均匀性****，提出融合深度学习与数学优化的综合解决方案。通过构建ColorSpace色域转换模型和PixelCalibrator像素校准系统，分别解决广色域内容适配标准显示设备的色彩失真问题，以及显示器像素级色彩偏差与亮度不均问题。创新性在于将****人眼感知一致性****作为核心优化目标，通过****多约束损失函数设计****和****局部精细化建模****实现技术突破。实验表明，系统在色域转换中平均色差ΔE<3.0，像素校准后亮度误差≤0.03，色纯度提升10倍以上。

# **1. 问题分析：显示色彩的双重挑战**

## **1.1 跨设备色彩失真（ColorSpace项目背景）**

****矛盾点****：广色域内容（如BT.2020）在标准显示器（sRGB）上出现饱和度损失或色彩偏移

****传统局限****：全局矩阵变换忽视人眼感知特性，边界色彩截断导致失真

****关键需求****：在保证转换效率的同时，维持色彩的自然观感

## **1.2 屏幕自身不均匀性（PixelCalibrator项目背景）**

****现象观察****：

同一颜色在不同屏幕位置显示差异（亮度/色度偏差）

颜色通道串扰导致色彩纯度下降（如显示红色时混入绿/蓝光）

****工程难点****：

全局校准无法解决局部差异

需同时优化亮度、纯度、均匀性三个冲突目标

****解决思路共通性****：二者均需建立****感知优先的局部优化模型****，突破传统全局处理的局限。

# **2. 模型构建：感知驱动的优化框架**

## **2.1 色域转换的核心创新（ColorSpace）**

****感知空间映射****：

将RGB转换至人眼敏感的CIELAB色彩空间进行运算（而非直接处理RGB）

****智能映射替代硬截断****：

设计三层神经网络学习色域边界的最优过渡，避免传统方法的生硬截断

****约束式学习****：

在损失函数中引入色差ΔE上限约束，确保输出色差可控：

## **2.2 像素校准的联合优化（PixelCalibrator）**

****逐像素独立矩阵****：

为每个像素训练3×3变换矩阵，实现局部精细化校正：

****多目标损失函数设计****（核心创新）：

其中：

第一项强制所有像素亮度趋近目标值220

第二项抑制颜色串扰（如显示红色时压制绿/蓝通道）

第三项减少相邻像素矩阵差异以提升均匀性

****技术协同点****：二者均采用****可微分优化框架****（PyTorch/MLX），实现从数学建模到工程部署的闭环。

# **3. 实现效果与验证**

## **3.1 色域转换性能**

| **指标** | **结果** | **优势体现** |
| --- | --- | --- |
| 平均色差ΔE | < 3.0（人眼不可辨阈值） | 感知一致性优于传统方法 |
| 处理速度 | >30,000像素/秒（GPU） | 支持1080P视频实时处理 |
| 边界过渡自然度 | 平滑无截断伪影 | 图2对比示例 |

## **3.2 像素校准效果**

****精度提升****：

亮度误差：0.01~0.03（目标220）

色纯度提升：主通道信号强度/杂散信号 > 250（校准前≈23）

****均匀性优化****：

亮度极差缩小至15-20（校准前>100）

相邻像素差异降低80%（图3热力图对比）

# **4. 创新总结与应用价值**

## **4.1 方法论突破**

****感知优先准则****：将人眼视觉特性转化为可量化的ΔE约束与CIELAB空间运算

****局部精细化建模****：

色域转换中自适应边界处理

像素级独立矩阵实现“微手术式”校准

****多目标协同优化****：通过损失函数权重平衡亮度、纯度、均匀性的冲突需求

## **4.2 应用场景拓展**

| **领域** | **应用案例** |
| --- | --- |
| 影视制作 | HDR视频转SDR播出 |
| 医疗影像 | 跨显示器诊断色彩一致性 |
| 高端显示屏 | 手机/VR设备屏幕出厂校准 |
| 印刷行业 | 设备间色彩管理 |

**附录（关键图表指引）**

****图1****：色域边界映射对比（传统截断 vs 神经网络平滑过渡）

****图2****：BT.2020→sRGB转换效果对比

****图3****：64×64区域校准前后亮度分布热力图

****表1****：像素校准定量指标对比表