

# 基于结构光的3D重建

赵东威

南京大学电子学院  
电路与系统

2013年5月20日



# 3D重建

## ① 初步介绍

- 概念与应用
- 方法分类
- 技术挑战

## ② 结构光为颜色条纹

- 系统架构和流程
- 颜色校正
- 线条提取
- 峰值定位
- 其他问题
- 重建结果

## ③ 基于格雷码光栅的3D重建

- 特征投影
- 特征提取
- 重建结果

## ④ 摄像机-投影仪系统定标

## ⑤ 结论



└ 初步介绍

└ 概念与应用

# 3D重建的应用

美国Smithsonian博物馆对藏品3D重建：



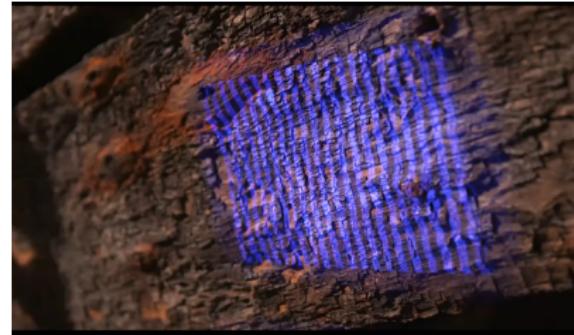
# 3D重建的应用

美国Smithsonian博物馆对藏品3D重建：



# 3D重建的应用

美国Smithsonian博物馆对藏品3D重建：



# 3D重建的应用

美国Smithsonian博物馆对藏品3D重建：



# 3D重建的应用

美国Smithsonian博物馆对藏品3D重建：



# 3D重建的概念

3D重建是指用声、光等方法，获取物体表面3D信息的过程。

## 方法分类

- 主动方法：光源受特别控制，帮助获取3维信息
- 被动方法：光源没有特别控制，只是影响图像质量
- 单观察点：只有一个视角
- 多观察点：多视角

## 方法分类

- 主动方法：光源受特别控制，帮助获取3维信息
- 被动方法：光源没有特别控制，只是影响图像质量
- 单观察点：只有一个视角
- 多观察点：多视角

## 方法分类

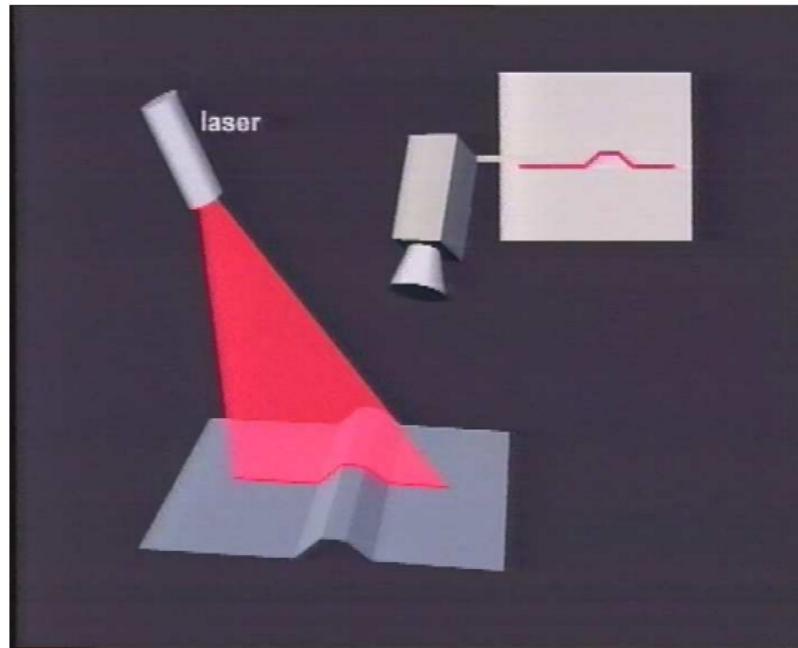
- 主动方法：光源受特别控制，帮助获取3维信息
- 被动方法：光源没有特别控制，只是影响图像质量
- 单观察点：只有一个视角
- 多观察点：多视角

## 方法分类

- 主动方法：光源受特别控制，帮助获取3维信息
- 被动方法：光源没有特别控制，只是影响图像质量
- 单观察点：只有一个视角
- 多观察点：多视角

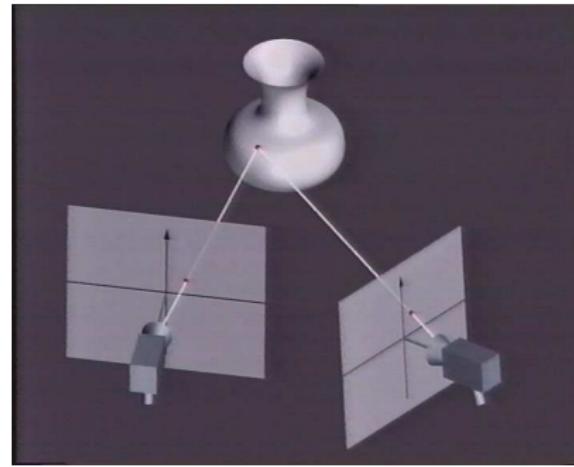
# 主动方法

一种简单的情况



# 被动方法

## Stereo



## 其他方法

- Time-of-Flight
- Shape-from-Shading
- Shape-from-Silhouettes
- 混合：Shape-from-Silhouettes 和 stereo

# 技术挑战

- 物体形状复杂，高精度高灵敏度来获取凹陷，处理遮挡
- 物体种类和材料多样，表面性质各异
- 自动选择重建方法
- 语义3D识别
- 重建尺度范围大

# 技术挑战

- 物体形状复杂，高精度高灵敏度来获取凹陷，处理遮挡
- 物体种类和材料多样，表面性质各异
- 自动选择重建方法
- 语义3D识别
- 重建尺度范围大

# 技术挑战

- 物体形状复杂，高精度高灵敏度来获取凹陷，处理遮挡
- 物体种类和材料多样，表面性质各异
- 自动选择重建方法
- 语义3D识别
- 重建尺度范围大

# 技术挑战

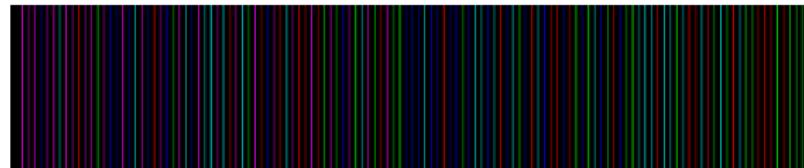
- 物体形状复杂，高精度高灵敏度来获取凹陷，处理遮挡
- 物体种类和材料多样，表面性质各异
- 自动选择重建方法
- 语义3D识别
- 重建尺度范围大

# 技术挑战

- 物体形状复杂，高精度高灵敏度来获取凹陷，处理遮挡
- 物体种类和材料多样，表面性质各异
- 自动选择重建方法
- 语义3D识别
- 重建尺度范围大

# 本文方法

- de bruijn序列编码的颜色线条



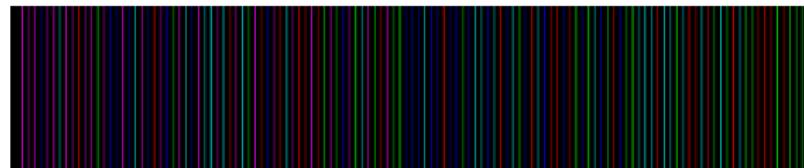
- 格雷码光栅+相移码



- 空间编码和时间编码

# 本文方法

- de bruijn序列编码的颜色线条



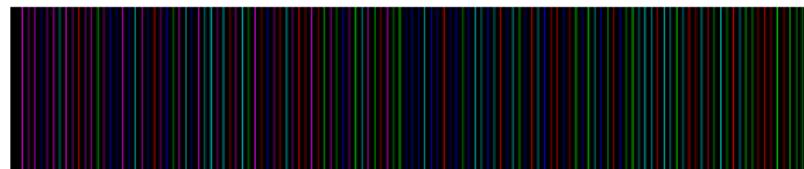
- 格雷码光栅+相移码



- 空间编码和时间编码

# 本文方法

- de bruijn序列编码的颜色线条



- 格雷码光栅+相移码



- 空间编码和时间编码

# 3D重建

## ① 初步介绍

- 概念与应用
- 方法分类
- 技术挑战

## ② 结构光为颜色条纹

- 系统架构和流程
- 颜色校正
- 线条提取
- 峰值定位
- 其他问题
- 重建结果

## ③ 基于格雷码光栅的3D重建

- 特征投影
- 特征提取
- 重建结果

## ④ 摄像机-投影仪系统定标

## ⑤ 结论

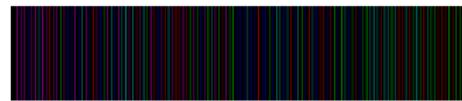


基于结构光的3D重建

└ 结构光为颜色条纹

└ 系统架构和流程

## 系统组成



后续的处理



# 后续的处理

- ① 检测线条
- ② 确定线条的峰值位置
- ③ 确定线条的颜色
- ④ 线条匹配、计算3D坐标

## 后续的处理

- ① 检测线条
- ② 确定线条的峰值位置
- ③ 确定线条的颜色
- ④ 线条匹配、计算3D坐标

## 后续的处理

- ① 检测线条
- ② 确定线条的峰值位置
- ③ 确定线条的颜色
- ④ 线条匹配、计算3D坐标

## 后续的处理

- ① 检测线条
- ② 确定线条的峰值位置
- ③ 确定线条的颜色
- ④ 线条匹配、计算3D坐标

## 挑战和难点

- ① 物体表面也有颜色（如肤色）  
怎么对颜色原来颜色准确判断？
- ② 环境光的亮度引入干扰  
怎么设计检测线条的算法，找得全，找得准？
- ③ 选什么位置代表线条位置？

## 挑战和难点

- ① 物体表面也有颜色（如肤色）  
怎么对颜色原来颜色准确判断？
- ② 环境光的亮度引入干扰  
怎么设计检测线条的算法，找得全，找得准？
- ③ 选什么位置代表线条位置？

## 挑战和难点

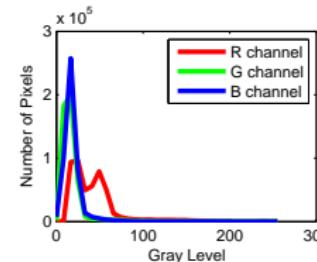
- ① 物体表面也有颜色（如肤色）  
怎么对颜色原来颜色准确判断？
- ② 环境光的亮度引入干扰  
怎么设计检测线条的算法，找得全，找得准？
- ③ 选什么位置代表线条位置？

## 挑战和难点

- ① 物体表面也有颜色（如肤色）  
怎么对颜色原来颜色准确判断？
- ② 环境光的亮度引入干扰  
怎么设计检测线条的算法，找得全，找得准？
- ③ 选什么位置代表线条位置？

# 颜色畸变

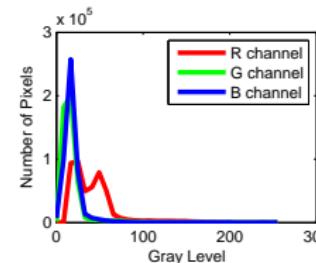
- 颜色校正之前



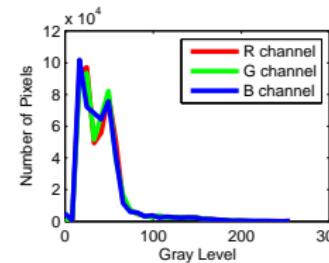
- 颜色校正之后

# 颜色畸变

- 颜色校正之前



- 颜色校正之后



# 颜色畸变模型

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \left( \underbrace{\begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix}}_{I_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix}}_O \right)$$

# 颜色畸变模型

投射图像



$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\left( \begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix} \right)}_{I_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix}}_O$$

# 颜色畸变模型



$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\left( \begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix} \right)}_{I_p + O}$$

# 颜色畸变模型

反射率矩阵 投射图像 环境光



$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\left( \begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix} \right)}_{I_p + O}$$

# 颜色畸变模型

crosstalk矩阵      反射率矩阵      投射图像      环境光

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix}}_{I_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix}}_O$$

# 颜色畸变模型

拍摄图像    crosstalk矩阵              反射率矩阵    投射图像    环境光

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix}}_{I_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix}}_O$$

# 颜色畸变模型

拍摄图像    crosstalk矩阵              反射率矩阵    投射图像    环境光

$$\underbrace{\begin{bmatrix} c^r \\ c^g \\ c^b \end{bmatrix}}_{I_c} = \underbrace{\begin{bmatrix} x_{rr} & x_{rg} & x_{rb} \\ x_{gr} & x_{gg} & x_{gb} \\ x_{br} & x_{bg} & x_{bb} \end{bmatrix}}_X \underbrace{\begin{bmatrix} a^r & 0 & 0 \\ 0 & a^g & 0 \\ 0 & 0 & a^b \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} p^r \\ p^g \\ p^b \end{bmatrix}}_{I_p} + \underbrace{\begin{bmatrix} o^r \\ o^g \\ o^b \end{bmatrix}}_O$$

crosstalk校正可以事先静态进行

# 相对反射率校正

计算步骤：

- ① 保持  $R$  通道不变，计算  $G$  通道和  $B$  通道对  $R$  通道的反射率
- ② 利用Earth Mover's Distance，计算  $G$  通道灰度级  $i$  到  $R$  通道灰度  $j$  的流  $f_{ij}$
- ③  $G$  通道灰度级  $i$  的新灰度为：

$$\text{new}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{255} (f_{ij}j)}{\sum_{j=1}^{255} f_{ij}}$$

# 相对反射率校正

计算步骤：

- ① 保持  $R$  通道不变，计算  $G$  通道和  $B$  通道对  $R$  通道的反射率
- ② 利用 Earth Mover's Distance，计算  $G$  通道灰度级  $i$  到  $R$  通道灰度  $j$  的流  $f_{ij}$
- ③  $G$  通道灰度级  $i$  的新灰度为：

$$\text{new}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{255} (f_{ij}j)}{\sum_{j=1}^{255} f_{ij}}$$

# 相对反射率校正

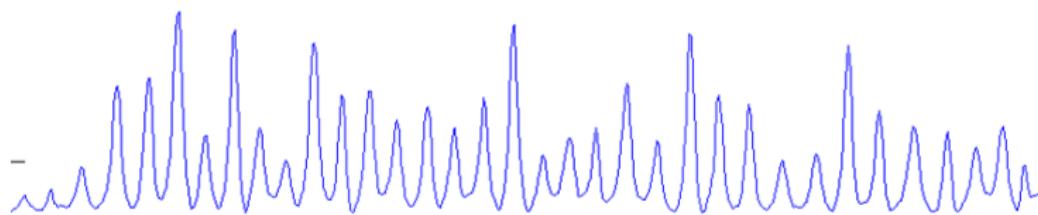
计算步骤：

- ① 保持  $R$  通道不变，计算  $G$  通道和  $B$  通道对  $R$  通道的反射率
- ② 利用 Earth Mover's Distance，计算  $G$  通道灰度级  $i$  到  $R$  通道灰度  $j$  的流  $f_{ij}$
- ③  $G$  通道灰度级  $i$  的新灰度为：

$$\text{new}(i) = \frac{\sum_{j=1}^{255} (f_{ij}j)}{\sum_{j=1}^{255} f_{ij}}$$

## 线条检测

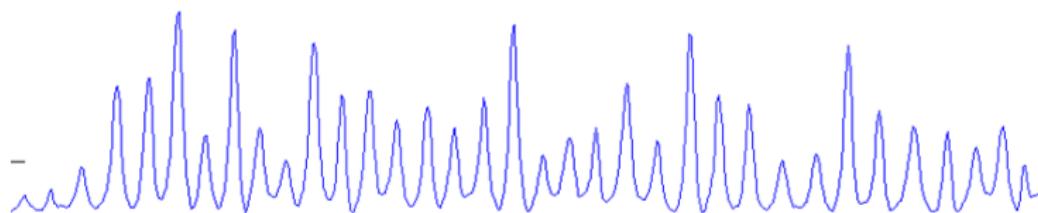
$m$  通道:



- 强线条和弱线条强度相差太大
- 很难找到合适阈值用于分割

## 线条检测

$m$  通道:



- 强线条和弱线条强度相差太大
- 很难找到合适阈值用于分割

基于结构光的3D重建

└ 结构光为颜色条纹

└ 线条提取

## 离散趋势变换

思想：

- 不关心具体的数值，只关心数值变大或变小的趋势
- 设定窗口，定量趋势变化

## 离散趋势变换

思想：

- 不关心具体的数值，只关心数值变大或变小的趋势
- 设定窗口，定量趋势变化

# 离散趋势变换

思想：

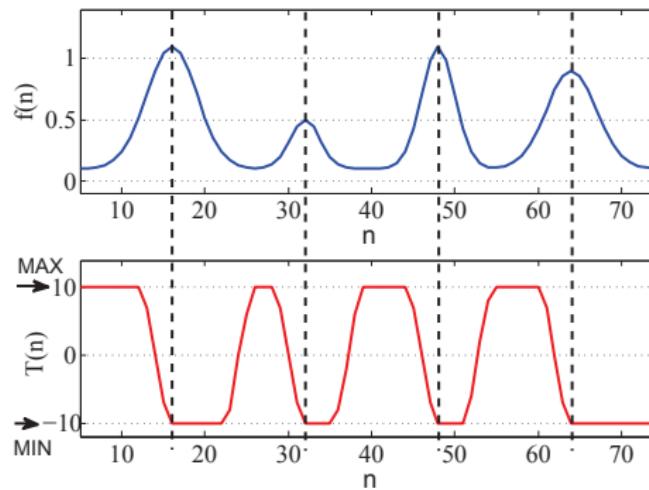
- 不关心具体的数值，只关心数值变大或变小的趋势
- 设定窗口，定量趋势变化

$$T_j = \sum_{k=h+1}^{j+N} \sum_{h=j}^{j+N-1} sign(M_k - M_h)$$

$$sign(a) = \begin{cases} 1 & a > 0 \\ 0 & a = 0 \\ -1 & a < 0 \end{cases}$$

# 离散趋势变换 continue

转换效果



基于结构光的3D重建

└ 结构光为颜色条纹

└ 线条提取

## 线条识别效果



阈值法和离散趋势变换提取的结果对比

## 亚像素峰值定位方法

定义  $M$  通道:

$$M_i = \max(R_i, G_i, B_i) - \min(R_i, G_i, B_i)$$

加权平均，但只取峰值附近的点:

$$I_{estimated} = \frac{\sum i \cdot M_i}{\sum i}, \text{ for } M_i \geq \alpha M_{max}$$

## 定位效果和其他方法的对比



本文方法



概率法



中点



最大值点

## 其他的处理

- 颜色识别放在HSV 空间进行  
好处是能够防止环境光对颜色识别的影响
- 线条的匹配使用动态规划  
`score`函数为连续3 根线条的联合匹配程度，鼓励连续匹配

## 其他的处理

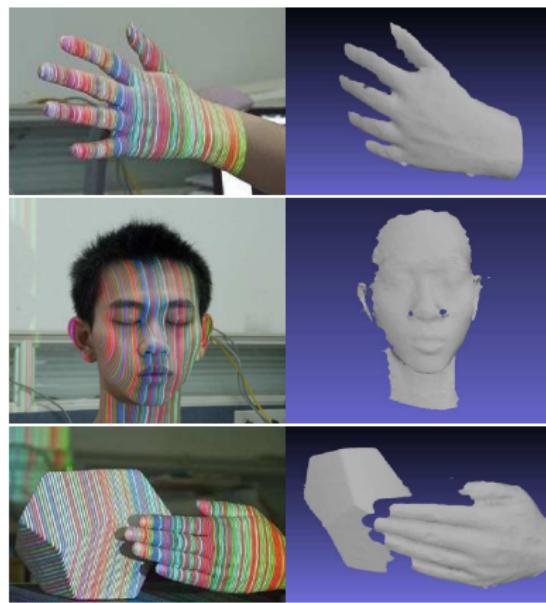
- 颜色识别放在HSV 空间进行  
好处是能够防止环境光对颜色识别的影响
- 线条的匹配使用动态规划  
`score`函数为连续3 根线条的联合匹配程度，鼓励连续匹配

基于结构光的3D重建

└ 结构光为颜色条纹

└ 重建结果

## 重建效果



# 3D重建

## ① 初步介绍

- 概念与应用
- 方法分类
- 技术挑战

## ② 结构光为颜色条纹

- 系统架构和流程
- 颜色校正
- 线条提取
- 峰值定位
- 其他问题
- 重建结果

## ③ 基于格雷码光栅的3D重建

- 特征投影
- 特征提取
- 重建结果

## ④ 摄像机-投影仪系统定标

## ⑤ 结论

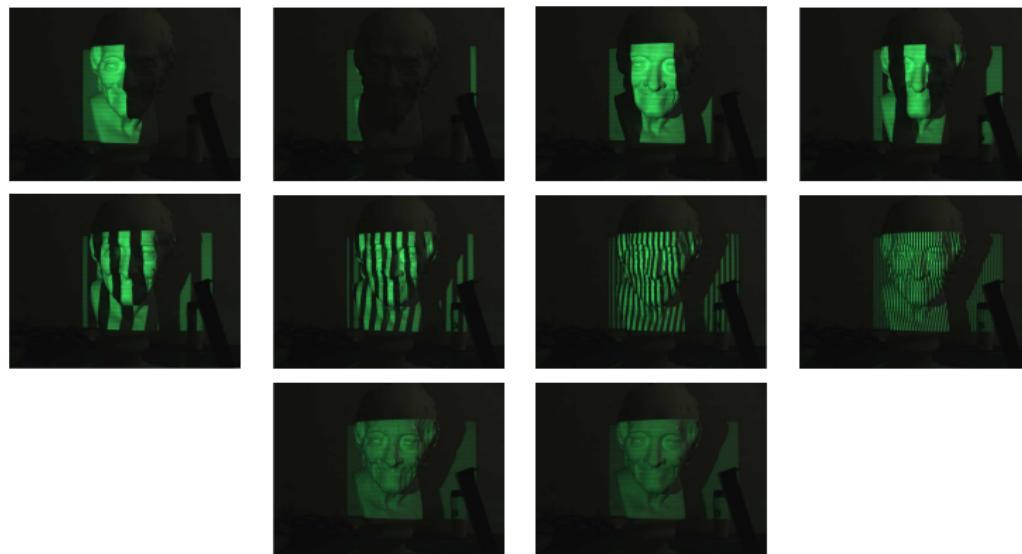


基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 格雷码光栅



最后3幅的亮区暗区交替频率太高，无法处理

基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



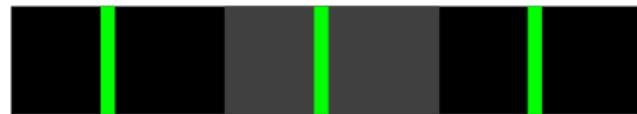
基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征投影

## 替代办法

舍弃交替频率太高的格雷码光栅  
在格雷码光栅最小变化单元内投射位移码



基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

  └ 特征提取

## 后续处理

- 特征提取相对颜色序列结构光简单，不含颜色
- 位移码峰值提取采用与前述相同算法
- 格雷码光栅的边缘确定

基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

  └ 特征提取

## 后续处理

- 特征提取相对颜色序列结构光简单，不含颜色
- 位移码峰值提取采用与前述相同算法
- 格雷码光栅的边缘确定

基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

  └ 特征提取

## 后续处理

- 特征提取相对颜色序列结构光简单，不含颜色
- 位移码峰值提取采用与前述相同算法
- 格雷码光栅的边缘确定

基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 特征提取

## 格雷码光栅的边缘确定

二值化、局部阈值、边缘提取，常规方法很多  
要准确提取边缘还需考虑另一个限制条件：  
边缘应位于最后一条位移码和第一条位移码之间

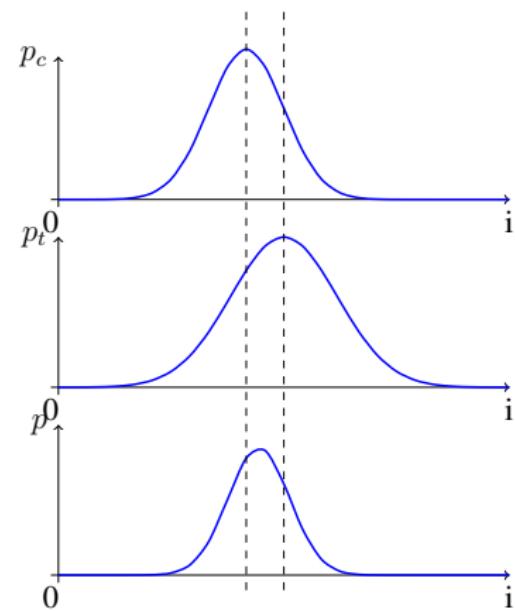
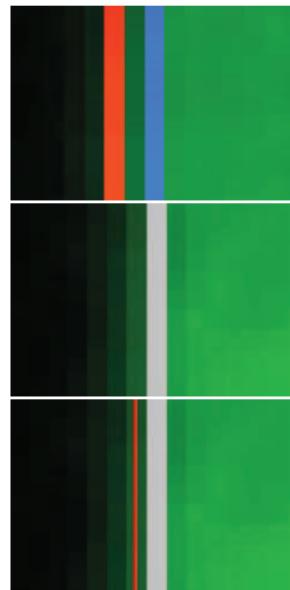


## 格雷码光栅的边缘确定

二值化、局部阈值、边缘提取，常规方法很多  
要准确提取边缘还需考虑另一个限制条件：  
边缘应位于最后一条位移码和第一条位移码之间



# 格雷码光栅的边缘确定 continue

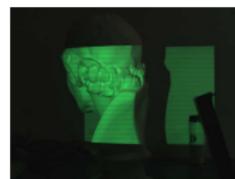
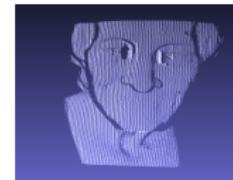


基于结构光的3D重建

└ 基于格雷码光栅的3D重建

└ 重建结果

## 重建效果



# 3D重建

## ① 初步介绍

- 概念与应用
- 方法分类
- 技术挑战

## ② 结构光为颜色条纹

- 系统架构和流程
- 颜色校正
- 线条提取
- 峰值定位
- 其他问题
- 重建结果

## ③ 基于格雷码光栅的3D重建

- 特征投影
- 特征提取
- 重建结果

## ④ 摄像机-投影仪系统定标

## ⑤ 结论

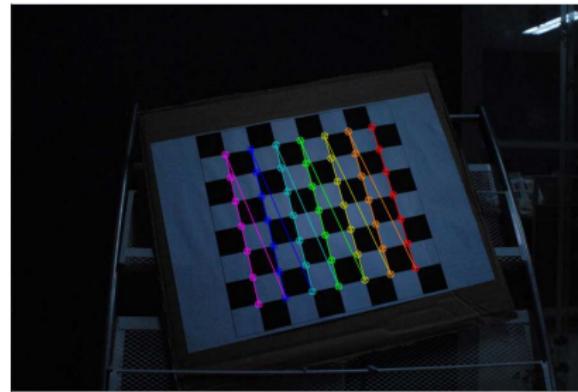


## 为什么定标

- 计算摄像机坐标系与投影仪坐标系间的几何转换关系
- 摄像机与投影仪均会产生畸变

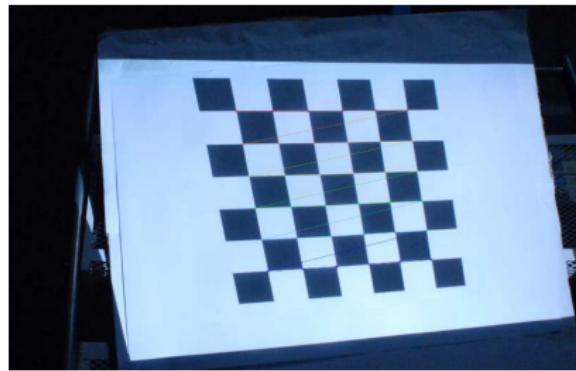
## 摄像机定标

棋盘格: 棋盘格边长确定



## 投影仪定标

棋盘格：投影图像中像素长度确定



# 3D重建

## ① 初步介绍

- 概念与应用
- 方法分类
- 技术挑战

## ② 结构光为颜色条纹

- 系统架构和流程
- 颜色校正
- 线条提取
- 峰值定位
- 其他问题
- 重建结果

## ③ 基于格雷码光栅的3D重建

- 特征投影
- 特征提取
- 重建结果

## ④ 摄像机-投影仪系统定标

## ⑤ 结论



## 创新点

- EMC 用于相对反射率校正
- 提出离散趋势变化，用于线条检测
- 使用  $M$  通道，对线条进行亚像素定位
- 格雷码光栅边缘定位方法

## 创新点

- EMC 用于相对反射率校正
- 提出离散趋势变化，用于线条检测
- 使用  $M$  通道，对线条进行亚像素定位
- 格雷码光栅边缘定位方法

## 创新点

- EMC 用于相对反射率校正
- 提出离散趋势变化，用于线条检测
- 使用  $M$  通道，对线条进行亚像素定位
- 格雷码光栅边缘定位方法

## 创新点

- EMC 用于相对反射率校正
- 提出离散趋势变化，用于线条检测
- 使用  $M$  通道，对线条进行亚像素定位
- 格雷码光栅边缘定位方法