



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 119991654 A

(43) 申请公布日 2025. 05. 13

(21) 申请号 202510456299.X

(51) Int.Cl.

(22) 申请日 2025.04.11

G06T 7/00 (2017.01)

(71) 申请人 中铁建设集团有限公司

G06T 7/80 (2017.01)

地址 100049 北京市石景山区石景山路20号

G06V 10/75 (2022.01)

G06V 10/74 (2022.01)

申请人 中国铁路成都局集团有限公司客站建设指挥部
重庆大学(72) 发明人 王俊超 刘伯军 汪韦韦 彭鹤吟
陈鹏 刘喜芳 谢强 涂正楠
傅翔(74) 专利代理机构 四川伯诚志专专利代理事务
所(普通合伙) 51440
专利代理师 钟睿

权利要求书2页 说明书15页 附图1页

(54) 发明名称

基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法

(57) 摘要

本发明涉及机器视觉技术领域,更进一步地,涉及基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法。所述方法包括:步骤1:通过相机获取玻璃幕墙的原始图像;采用偏振成像技术获取玻璃幕墙的表面反射特性;基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像;步骤2:从补偿图像中提取特征向量,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量;步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值;步骤4:根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差。本发明使误差评估更加精准。

步骤1: 通过相机获取玻璃幕墙的原始图像;采用偏振成像技术获取玻璃幕墙的表面反射特性;基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像

步骤2: 从补偿图像中提取特征向量,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量

步骤3: 根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值

步骤4: 根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差

1. 基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,所述方法包括:

步骤1:通过相机获取玻璃幕墙的原始图像;采用偏振成像技术获取玻璃幕墙的表面反射特性;基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像; [可以用机器学习改进](#)

步骤2:从补偿图像中提取特征向量,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量;

步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值;

步骤4:根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差。

2. 如权利要求1所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,通过如下公式,获取玻璃幕墙的表面反射特性:

$$R(\theta, \phi) = \frac{(n_1 - n_2)^2 + 4n_1 n_2 \sin^2(\phi)}{(n_1 + n_2)^2} \cdot \cos^2(\theta - \theta_p);$$

其中, $R(\theta, \phi)$ 表示玻璃幕墙表面在入射角 θ 和相位角 ϕ 下的表面反射特性; n_1 表示空气的折射率; n_2 表示玻璃幕墙的折射率,取值范围为1.5到1.7; θ 表示光线入射角; ϕ 表示相位角; θ_p 表示偏振光主轴角度。

3. 如权利要求2所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,通过如下公式,基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像:

$$I_{true}(p) = \frac{I_{raw}(p) \cdot R(\theta, \phi) I_{env}(p)}{1 - R(\theta, \phi)} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{internal}^2};$$

其中, $I_{true}(p)$ 表示补偿图像在任意点 p 处的强度; $I_{raw}(p)$ 为原始图像在任意点 p 处的强度; $\rho_{internal}$ 为玻璃幕墙内部界面的反射率; $I_{env}(p)$ 为环境光在任意点 p 处的强度。

4. 如权利要求3所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,步骤2中,通过如下公式,从补偿图像中提取特征向量:

$$F(p) = \nabla I_{true}(p) \cdot G_\sigma \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1};$$

其中, $G_\sigma(p)$ 表示尺度为 σ 的高斯滤波器; $\nabla I_{true}(p)$ 表示 $I_{true}(p)$ 的梯度; $F(p)$ 表示任意点 p 处的特征向量。

5. 如权利要求4所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,步骤2中,通过如下公式,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量:

$$M(p_1, p_2) = \frac{F(p_1) \cdot F(p_2)}{\|F(p_1)\| \cdot \|F(p_2)\|} \cdot \exp\left(-\frac{\|I_{true}(p_1) - I_{true}(p_2)\|^2}{2\sigma_I^2}\right);$$

其中, $F(p_1)$ 表示点 p_1 处的特征向量; $F(p_2)$ 表示点 p_2 处的特征向量; $I_{true}(p_1)$ 表示补偿图像在点 p_1 处的强度; $I_{true}(p_2)$ 表示补偿图像在点 p_2 处的强度; $\|\cdot\|$ 表示L1范数运算; σ_I 表示图像强度匹配的敏感度参数;若玻璃幕墙为高透明平板玻璃, σ_I 取值范围为8到12;若玻璃幕墙为磨砂玻璃, σ_I 取值范围为12到18;若玻璃幕墙为镀膜玻璃, σ_I 取值范围为15到20;若玻璃幕墙为彩色玻璃, σ_I 取值范围为18到25; $M(p_1, p_2)$ 表示点 p_1 与点 p_2 的匹配度量;

通过计算所有点之间的匹配度量的均值,得到平均匹配度量 M 。

6. 如权利要求5所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,步

骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值的表达式为:

$$P(x, y) = C + \frac{d \cdot \|T - C\|}{\sqrt{f^2 + (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}} \cdot \frac{[x - c_x, y - c_y, f]^T}{\|[x - c_x, y - c_y, f]\|};$$

其中, x 为任意点 P 的X轴坐标; y 为任意点 P 的Y轴坐标; d 表示深度值; c_x 为相机的主点X轴坐标; c_y 表示相机的主点Y轴坐标; C 表示相机光心位置; T 表示投影仪的位置; f 表示相机焦距; T^T 为转置符号。

7.如权利要求6所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,深度值 d 通过如下公式计算得到:

$$d = \frac{\|T - C\| \cdot \sin(\theta_T)}{\sin(\theta_C + \theta_T)};$$

$$\theta_C = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}}{f}\right);$$

$$\theta_T = \arcsin\left(\frac{M\lambda}{B}\right);$$

其中, θ_C 表示相机视线与光轴的夹角; θ_T 表示投影仪视线与投影轴的夹角; B 表示相机与投影仪的基线距离; λ 表示结构光波长。

8.如权利要求7所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,步骤4中,通过如下公式,根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差:

$$D(x, y) = P(x, y) - P_{design}(x, y);$$

$$E_{total} = \sqrt{\|D(x, y)\|^2 \cdot W(x, y) \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1}};$$

其中, $P_{design}(x, y)$ 表示设计标准模板在坐标为 (x, y) 的点处的标准值; $D(x, y)$ 为差值; E_{total} 为误差值; $W(x, y)$ 为坐标为 (x, y) 的点的权重值。

9.如权利要求8所述的基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,其特征在于,权重值 $W(x, y)$ 使用如下公式进行表示:

$$W(x, y) = \exp\left(-\frac{\|P(x, y) - P_{center}(x, y)\|^2}{2\sigma_W^2}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\|\nabla F(p)\|^2}{2\sigma_F^2}\right)\right);$$

其中, σ_W 为空间权重的衰减参数,为设定值; $\nabla F(p)$ 表示点 P 处的特征梯度; σ_F 为特征强度权重的敏感度参数,为设定值; $\sigma_W > \sigma_F$; P_{center} 为设计标准模板中的中心值。

基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于机器视觉技术领域,具体涉及基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法。

背景技术

[0002] 玻璃幕墙作为现代建筑的重要组成部分,广泛应用于高层建筑、商业综合体和地标性建筑中。其主要优点包括良好的透光性、美观性以及优异的隔热和隔音性能。然而,由于玻璃幕墙结构的特殊性,其施工误差的控制对于幕墙的整体质量、安全性和美观度具有至关重要的影响。在实际施工过程中,由于安装偏差、材料加工误差、温度应力变形以及结构支撑体系的影响,玻璃幕墙可能会产生局部或整体的形变,这种误差如果得不到有效控制,可能会导致密封不严、结构稳定性下降、光污染加剧等问题。因此,如何高效、精准地检测玻璃幕墙的施工误差,成为幕墙工程质量控制中的关键技术难题。

[0003] 传统的人工测量主要依赖水准仪、钢尺、经纬仪等测量工具,施工人员通过人工方式测量幕墙的关键节点和基准线,并与设计标准进行比对。这种方法虽然具有一定的适用性,但存在以下主要问题:测量精度受限:人工测量依赖于施工人员的经验,且易受到环境因素(如风力、光照条件等)的影响,导致测量误差较大,通常误差在毫米级别,很难达到高精度要求。效率低下:对于大面积幕墙,人工测量耗时长,测量点位有限,难以实现对整个幕墙的全面检测。数据处理困难:人工测量数据通常以表格记录,难以形成直观的误差分布图,不利于后续分析和施工调整。

[0004] 随着光学测量技术的发展,激光扫描测量逐步应用于幕墙施工误差检测中。该方法利用激光扫描仪对幕墙表面进行点云采集,并通过计算幕墙点云数据与设计模型之间的偏差,实现误差分析。这种方法具有较高的测量精度(可达毫米级),并且能够获取幕墙的整体形态信息。然而,该技术仍然存在以下问题:设备成本高:激光扫描仪价格昂贵,使用成本较高,不适用于中小型项目或施工预算有限的工程。数据处理复杂:激光扫描生成的大量点云数据需要进行复杂的后处理,包括去噪、配准、重建等过程,计算量大,对施工现场的计算设备要求较高。易受玻璃反射影响:玻璃幕墙具有高反射率的特点,导致激光扫描在玻璃表面产生信号丢失或干扰,影响数据的准确性,尤其是在光照条件较复杂的情况下,测量结果的稳定性难以保证。

发明内容

[0005] 本发明的主要目的在于提供基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,通过偏振成像减少玻璃幕墙的镜面反射干扰,利用高精度特征匹配算法确保点位稳定,结合结构光测量计算深度信息,并采用优化的误差权重计算模型,使误差评估更加精准。相较于现有技术,本发明不仅提升了玻璃幕墙施工误差的检测精度,降低了环境光照和材质反射对测量的影响,还提高了计算效率,能够适应不同类型的玻璃幕墙材料。

[0006] 为了解决上述问题,本发明的技术方案是这样实现的:

基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,所述方法包括:

步骤1:通过相机获取玻璃幕墙的原始图像;采用偏振成像技术获取玻璃幕墙的表面反射特性;基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像;

步骤2:从补偿图像中提取特征向量,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量;

步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值;

步骤4:根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差。

[0007] 进一步的,通过如下公式,获取玻璃幕墙的表面反射特性:

$$R(\theta, \phi) = \frac{(n_1 - n_2)^2 + 4n_1 n_2 \sin^2(\phi)}{(n_1 + n_2)^2} \cdot \cos^2(\theta - \theta_p);$$

其中, $R(\theta, \phi)$ 表示玻璃幕墙表面在入射角 θ 和相位角 ϕ 下的表面反射特性; n_1 表示空气的折射率; n_2 表示玻璃幕墙的折射率,取值范围为1.5到1.7; θ 表示光线入射角; ϕ 表示相位角; θ_p 表示偏振光主轴角度。

[0008] 进一步的,通过如下公式,基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像:

$$I_{true}(p) = \frac{I_{raw}(p) \cdot R(\theta, \phi) \cdot I_{env}(p)}{1 - R(\theta, \phi)} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{internal}^2};$$

其中, $I_{true}(p)$ 表示补偿图像在任意点 p 处的强度; $I_{raw}(p)$ 为原始图像在任意点 p 处的强度; $\rho_{internal}$ 为玻璃幕墙内部界面的反射率; $I_{env}(p)$ 为环境光在任意点 p 处的强度。

[0009] 进一步的,步骤2中,通过如下公式,从补偿图像中提取特征向量:

$$F(p) = \nabla I_{true}(p) \cdot G_\sigma \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1};$$

其中, $G_\sigma(p)$ 表示尺度为 σ 的高斯滤波器; $\nabla I_{true}(p)$ 表示 $I_{true}(p)$ 的梯度; $F(p)$ 表示任意点 p 处的特征向量。

[0010] 进一步的,步骤2中,通过如下公式,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量:

$$M(p_1, p_2) = \frac{F(p_1) \cdot F(p_2)}{\|F(p_1)\| \cdot \|F(p_2)\|} \cdot \exp\left(-\frac{\|I_{true}(p_1) - I_{true}(p_2)\|^2}{2\sigma_l^2}\right);$$

其中, $F(p_1)$ 表示点 p_1 处的特征向量; $F(p_2)$ 表示点 p_2 处的特征向量; $I_{true}(p_1)$ 表示补偿图像在点 p_1 处的强度; $I_{true}(p_2)$ 表示补偿图像在点 p_2 处的强度; $\|\cdot\|$ 表示L1范数运算; σ_l 表示图像强度匹配的敏感度参数;若玻璃幕墙为高透明平板玻璃, σ_l 取值范围为8到12;若玻璃幕墙为磨砂玻璃, σ_l 取值范围为12到18;若玻璃幕墙为镀膜玻璃, σ_l 取值范围为15到20;若玻璃幕墙为彩色玻璃, σ_l 取值范围为18到25; $M(p_1, p_2)$ 表示点 p_1 与点 p_2 的匹配度量;通过计算所有点之间的匹配度量的均值,得到平均匹配度量 M 。

[0011] 进一步的,步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值:

$$P(x, y) = C + \frac{d \cdot \|T - C\|}{\sqrt{f^2 + (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}} \cdot \frac{[x - c_x, y - c_y, f]^T}{\|[x - c_x, y - c_y, f]\|};$$

其中, x 为任意点 P 的 X 轴坐标; y 为任意点 P 的 Y 轴坐标; d 表示深度值; c_x 为相机的主点 X 轴坐标; c_y 表示相机的主点 Y 轴坐标; C 表示相机光心位置; T 表示投影仪的位置; f 表示相机焦距。

[0012] 进一步的, 深度值 d 通过如下公式计算得到:

$$d = \frac{\|T - C\| \cdot \sin(\theta_T)}{\sin(\theta_C + \theta_T)};$$

$$\theta_C = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}}{f}\right);$$

$$\theta_T = \arcsin\left(\frac{M\lambda}{B}\right);$$

其中, θ_C 表示相机视线与光轴的夹角; θ_T 表示投影仪视线与投影轴的夹角; B 表示相机与投影仪的基线距离; λ 表示结构光波长。

[0013] 进一步的, 步骤 4 中, 通过如下公式, 根据二维点坐标修正值, 与设计标准模板进行比对, 分析变形并评估误差:

$$D(x, y) = P(x, y) - P_{design}(x, y);$$

$$E_{total} = \sqrt{\|D(x, y)\|^2 \cdot W(x, y) \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1}};$$

其中, $P_{design}(x, y)$ 表示设计标准模板在坐标为 (x, y) 的点处的标准值; $D(x, y)$ 为差值; E_{total} 为误差值; $W(x, y)$ 为坐标为 (x, y) 的点的权重值。

[0014] 进一步的, 权重值 $W(x, y)$ 使用如下公式进行表示:

$$W(x, y) = \exp\left(-\frac{\|P(x, y) - P_{center}(x, y)\|^2}{2\sigma_W^2}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-\frac{\|\nabla F(p)\|^2}{2\sigma_F^2}\right)\right);$$

其中, σ_W 为空间权重的衰减参数, 为设定值; σ_F 为特征强度权重的敏感度参数, 为设定值; $\sigma_W > \sigma_F$; P_{center} 为设计标准模板中的中心值。

[0015] 本发明的一种基于精细化仿真优化的球形网壳结构节点受力分析方法, 具有以下有益效果: 玻璃幕墙的高反射性常常导致成像过程中出现强光干扰, 影响特征提取的准确性。本发明采用偏振成像技术获取幕墙表面的反射特性, 并利用数学模型对图像进行反射强度补偿, 从而显著降低镜面反射影响, 提高图像质量, 使得特征点能够稳定提取。传统计算机视觉方法在玻璃幕墙环境中匹配精度较低, 而本发明采用基于梯度信息和高斯滤波的特征提取方法, 并结合匹配度量计算, 提高了点匹配的稳定性和精度, 确保后续误差计算基于高质量数据。通过数学模型计算幕墙表面的光学反射特性, 并基于该模型对图像进行反射强度补偿, 确保即使在不同光照条件下, 系统仍能获得高质量的特征图像。传统的双目立体视觉方法在玻璃幕墙环境中容易失败, 而本发明结合结构光投影, 利用匹配度量计算点的深度信息, 并通过相机和投影仪的几何关系优化计算, 确保即使在高反射环境下, 也能获得准确的深度数据。在误差计算中, 引入了基于高斯分布的空间衰减权重, 确保关键区域 (如幕墙边缘和拼接处) 的误差权重较高, 而对误差影响较小的平坦区域权重较低, 从而优化整体误差评估结果。

附图说明

[0016] 图1为本发明实施例提供的一种基于精细化仿真优化的球形网壳结构节点受力分析方法的方法流程示意图。

具体实施方式

[0017] 为了使本技术领域的人员更好地理解本发明方案,下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分的实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都应当属于本发明保护的范围。

[0018] 实施例1,参考图1:基于计算机视觉的玻璃幕墙施工误差检测方法,所述方法包括:

步骤1:通过相机获取玻璃幕墙的原始图像;采用偏振成像技术获取玻璃幕墙的表面反射特性;基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到补偿图像;

玻璃幕墙的主要成分是硅酸盐材料,其表面光滑且具有较高的反射率。在光线入射到玻璃表面时,会发生部分反射和部分透射。这种反射可以分为两种形式:一种是镜面反射,即光线按照反射定律发生规律性反射;另一种是漫反射,即由于玻璃表面存在微观不均匀性,部分光线以非规律性的方向反射。这两种反射对计算机视觉系统的影响截然不同。漫反射是计算机视觉技术能够有效利用的有效信息,因为它能够真实地反映玻璃表面的物理形态,而镜面反射则是需要补偿和去除的干扰信息。由于玻璃幕墙的反射特性随入射角度和材料折射率的变化而变化,因此在进行误差检测时,首先需要精确获取玻璃幕墙的反射特性,并基于此进行图像的反射补偿,从而获得更加可靠的视觉信息。

[0019] 在本方法中,偏振成像技术被引入,以有效分离玻璃幕墙的镜面反射分量和漫反射分量。光在玻璃表面反射时,部分光波的电场振动方向会发生改变,使得反射光呈现出一定的偏振特性。利用这一物理现象,可以通过偏振相机或附加偏振滤光片获取不同偏振方向下的图像,并通过特定的数学模型计算出玻璃幕墙在特定入射角度和相位角条件下的反射率。偏振滤光片通常采用可变角度调节模式,以获取玻璃幕墙在多个偏振角度下的反射情况,从而建立完整的反射特性模型。该模型能够描述玻璃在不同入射条件下的反射行为,为后续的图像补偿提供必要的物理参数。

[0020] 当偏振成像获取到玻璃幕墙的表面反射特性后,计算机视觉系统需要基于这些特性对原始图像进行强度反射补偿,以去除镜面反射的干扰,使得图像中保留的主要是幕墙表面的真实信息。补偿的核心思想是通过建立数学模型,分离出镜面反射分量,并用合理的方式恢复出幕墙表面的漫反射信息。由于镜面反射的强度与玻璃的折射率、入射角度以及光的波长密切相关,因此计算机视觉系统需要结合这些参数,利用物理补偿公式对图像中的每个像素点进行校正。具体而言,每个像素的真实强度可以通过扣除其受镜面反射影响的部分,并结合玻璃内部界面的反射率进行归一化,从而恢复其应有的光照信息。通过这种方式,计算机视觉系统能够有效抑制镜面反射,提高图像的对比度和清晰度,为后续的特征提取和误差检测提供更加可靠的基础数据。偏振成像技术能够在复杂光照环境下分离幕墙的有效信息,使得计算机视觉系统在强反射背景下仍然能够准确感知幕墙的真实形态。此

外,传统的图像去反射方法通常依赖于多角度成像或高动态范围成像,这些方法不仅增加了系统的复杂度,而且在玻璃幕墙检测场景中难以适用。而本发明采用偏振成像结合物理建模的方法,仅需单视角成像,即可实现高效的反射补偿,使得误差检测系统能够在普通施工现场环境下稳定工作。此外,该方法通过利用玻璃幕墙的物理光学特性进行图像补偿,避免了数据驱动模型可能引入的不确定性,提高了系统的通用性和鲁棒性。

[0021] 步骤2:从补偿图像中提取特征向量,根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量;

首先,玻璃幕墙经过反射补偿后,仍然可能存在局部光照变化以及残余的反射影响。为了确保特征提取的稳定性,系统需要基于图像的梯度信息来增强边缘特征。梯度计算是计算机视觉中特征提取的基本手段之一,它能够有效地捕捉图像的边缘信息,即像素强度发生剧烈变化的区域。在玻璃幕墙的场景中,边缘信息往往对应于幕墙的结构特征,如玻璃板块的接缝、幕墙的固定框架以及局部的微小变形。因此,通过计算图像的梯度幅值和方向,可以获得玻璃幕墙表面的基础特征,增强其在匹配计算中的可识别性。在获得基础的梯度特征后,为了进一步增强系统的鲁棒性,需要引入高斯滤波进行平滑处理。玻璃幕墙的表面可能由于光照、污染物或加工误差产生微小的噪声,这些噪声如果直接参与特征提取,可能会影响匹配精度。高斯滤波器的作用是对图像进行尺度空间处理,使得系统在不同尺度下都能稳定地提取特征,并减少局部噪声的影响。特别是在玻璃幕墙场景中,考虑到不同材质(如透明玻璃、磨砂玻璃、镀膜玻璃)的不同反射特性,高斯滤波可以起到一定的归一化作用,使得不同材质的幕墙表面特征能够更好地被统一处理。此外,由于玻璃幕墙的边缘特征强度受反射率的影响较大,因此在计算梯度特征时,需要结合反射特性参数对特征值进行归一化,以避免因不同材质的反射率不同而导致特征提取的非均衡性。

计算梯度特征->高斯滤波降噪->归一化增强

让特征提取更具一致性,不会因为光照或材质差异导致误差

[0022] 在完成特征提取后,系统需要计算图像中各个点之间的匹配度量,以建立像素级别的特征关系。匹配度量是计算机视觉中用于衡量两个像素点或区域之间相似程度的重要方法。在玻璃幕墙误差检测任务中,匹配度量的计算直接决定了后续重建修正的精度,因此其计算方法需要结合玻璃幕墙材料的特性进行优化。匹配度量的计算通常基于两个核心原则,其一是特征向量的相似性,其二是像素强度的相似性。特征向量的相似性可以通过余弦相似度度量进行计算,确保提取到的特征向量在方向和幅值上都能够保持一定的对齐性。而像素强度的相似性则需要基于高斯模型进行度量,以衡量两个点之间的亮度差异对匹配度量的影响。为了适应不同类型的玻璃幕墙材料,本发明的方法在匹配度量计算中引入了不同的敏感度参数。玻璃幕墙的透明度、表面粗糙度以及镀膜情况都会影响匹配度量的计算,因此在计算过程中,需要根据不同的玻璃材质设定相应的匹配参数。例如,在高透明玻璃幕墙上,匹配度量需要更加关注局部纹理信息,而在磨砂玻璃或镀膜玻璃幕墙上,则需要更关注整体的结构信息。因此,通过自适应调整匹配参数,本方法能够确保在不同类型的玻璃幕墙上都能实现高精度的特征匹配。在反射补偿和特征提取之后,通过比较特征向量与像素强度的相似性,确定不同点之间的对应关系,为后续的幕墙误差检测和形变重建提供准确的匹配基础。

梯度特征->特征向量

[0023] 步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值;

在计算机视觉的成像过程中,任何真实世界中的物体都会通过相机透射到一个二维图像平面上,这一成像过程受到相机的内外部参数的影响。相机的内部参数包括焦距、主点坐标、畸变系数等,而外部参数则涉及相机的旋转和位移。由于玻璃幕墙的施工误差检测

依赖于精确的坐标计算,因此为了确保检测精度,系统需要对这些影响进行补偿和校正。特别是在玻璃幕墙的场景下,成像过程中可能存在非线性畸变,例如镜头畸变、投影偏差以及光学折射等问题。如果不进行坐标修正,可能会导致误差评估过程中某些关键点位的定位偏差,从而影响误差计算的可靠性。因此,系统首先需要利用相机标定数据对原始图像进行畸变校正,去除因镜头变形导致的几何扭曲,使得图像中的点位能够更加准确地反映幕墙的真实投影位置。在完成畸变校正后,系统需要结合匹配度量来优化点位的坐标修正。匹配度量是用于衡量图像中各个点之间相似程度的数学指标,它能够帮助系统确定哪些点位是稳定可靠的,哪些点位可能由于光照或反射因素而产生漂移。在玻璃幕墙施工误差检测的场景中,由于幕墙表面的材质、安装精度以及环境光照的影响,相机所获取的图像可能存在一定程度的扭曲和偏差。因此,在坐标修正时,需要重点关注匹配度较低的点,并利用其周围匹配度较高的邻域点进行插值修正,使得整个图像的点位坐标更加一致,从而提高误差计算的准确性。匹配度量的计算通常结合特征向量的相似性和像素强度的相似性,通过这些度量方法,可以有效地判断图像中的哪些点在变换后仍然能够保持较高的稳定性,而哪些点需要进行进一步的调整。除了利用匹配度量优化坐标修正外,本方法还结合相机的投影关系,对点位进行精确的几何变换。由于玻璃幕墙的结构通常较为规则,且施工误差一般表现为局部的形变或者整体的位移,因此可以利用投影变换模型对坐标进行调整,以确保点位在图像中的分布更加符合幕墙的实际几何形态。在计算机视觉中,投影变换是将一个点从原始坐标系映射到另一个坐标系的数学方法,它能够基于相机的成像模型和标定参数,对图像中的点坐标进行调整,使得其位置更加接近真实世界的幕墙结构。在本方法的实现中,投影变换的核心在于利用匹配度量计算得到的点对信息,通过最优变换计算,使得所有点在变换后的坐标系中尽可能地对齐,从而提高误差检测的精度。

[0024] 步骤4:根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差。

[0025] 玻璃幕墙的设计标准模板是一个预先定义的理想几何模型,它通常是根据建筑设计方案生成的精确数据,包含幕墙每个单元的标准尺寸、安装角度、接缝间距等关键信息。在施工过程中,由于受外界环境、材料误差、安装工艺等因素的影响,实际安装的幕墙往往会与理论设计存在一定偏差,因此,需要通过误差检测系统来判断幕墙的施工精度是否符合设计要求。在本发明的方法中,误差计算的基本原理是通过比对修正后的二维点坐标与标准模板的对应坐标,计算两者之间的差值,并采用数学模型对误差进行量化和可视化,使得施工人员能够直观地了解幕墙的偏移情况,并采取必要的调整措施。在计算误差的过程中,系统首先需要建立一个误差度量模型,该模型用于衡量每个点的实际坐标与设计标准坐标之间的偏移程度。玻璃幕墙的误差可以分为多个维度,例如水平方向的平移误差、垂直方向的偏移误差,以及局部的形变量误差等。为了提高误差计算的准确性,本方法引入了基于权重分布的误差计算模型,该模型能够根据不同区域的误差贡献度,赋予不同的计算权重,以确保测量结果更加符合实际情况。例如,在幕墙的边缘区域,由于安装过程中通常会有较大的应力集中效应,导致误差可能会相对较大,因此在计算误差时,需要对这些区域赋予更高的权重,以确保系统能够更准确地反映幕墙的整体误差分布情况。而对于幕墙的中央区域,由于材料的刚性支撑较强,误差通常较小,因此系统可以对这些区域的误差计算赋予较低的权重,以减少计算复杂度并提高分析的稳定性。

[0026] 在误差计算完成后,系统还需要对误差结果进行进一步的分析和可视化,以便施

需要插值修正的点,通常是相对于周围的匹配度较低的点

拍摄误差具有随机性、孤立性、不符合物理规律,将这些低匹配度的点进行修正

匹配度的空间分布:如果匹配度低的点在图像中某一特定区域内集中出现,而不仅仅是随机分布,说明该区域可能存在结构性问题,例如幕墙变形。
区域性匹配度偏差:如果某一区域的匹配度显著低于全局均值,则可以推测该区域的结构可能与标准模板存在偏差。

工人员能够直观地理解误差分布情况,并据此进行施工调整。本方法采用颜色编码的方式对误差进行可视化标注,即根据误差的大小和方向,在检测结果中以不同的颜色进行区分,使得施工人员可以迅速判断哪些区域的误差较大,哪些区域的误差较小。例如,对于误差较大的区域,可以使用红色进行标注,而对于误差较小的区域,则可以使用绿色进行标注。通过这种方式,施工人员可以快速识别幕墙表面的关键误差区域,并根据检测结果调整施工工艺,以提高幕墙的整体安装精度。此外,在误差分析的过程中,系统还可以通过统计方法对整体误差趋势进行评估,以判断施工误差的分布规律。例如,若误差在整个幕墙表面呈现出一定的线性变化趋势,则可能表明幕墙的整体安装存在系统性偏移,这可能是由于测量基准点的误差或安装基准线的偏移所导致的。而若误差呈现出局部不规则分布,则可能表明幕墙的局部区域存在材料变形或支撑结构的不均匀受力。因此,通过误差分布的统计分析,系统能够为施工管理人员提供更加深入的误差评估结果,使得他们可以采取针对性的施工优化措施,以确保幕墙的安装质量符合设计标准。

[0027] 实施例2:通过如下公式,获取玻璃幕墙的表面反射特性:

$$R(\theta, \phi) = \frac{(n_1 - n_2)^2 + 4n_1 n_2 \sin^2(\phi)}{(n_1 + n_2)^2} \cdot \cos^2(\theta - \theta_p);$$

其中, $R(\theta, \phi)$ 表示玻璃幕墙表面在入射角 θ 和相位角 ϕ 下的表面反射特性; n_1 表示空气的折射率; n_2 表示玻璃幕墙的折射率,取值范围为1.5到1.7; θ 表示光线入射角; ϕ 表示相位角; θ_p 表示偏振光主轴角度。

[0028] 具体的,在公式中, $R(\theta, \phi)$ 代表了玻璃幕墙表面在给定入射角 θ 和相位角 ϕ 条件下的反射率。它用于描述光线入射到玻璃幕墙表面时,发生的反射光强度占入射光强度的比例。由于玻璃是典型的透明材料,其表面的反射行为不仅取决于光的入射角度,还受到玻璃和空气之间的折射率差异影响。因此,该公式中包含了材料折射率 n_1 和 n_2 的计算项,分别表示空气和玻璃的折射率,其中空气的折射率通常取 $n_1 = 1$,而玻璃幕墙的折射率 n_2 则取值在1.5到1.7之间。折射率的不同会影响光线在玻璃表面的反射强度,从而导致不同类型玻璃幕墙的反射特性有所不同,例如普通浮法玻璃、低辐射镀膜玻璃或调光玻璃等材料均表现出不同的反射行为。该公式的分子部分 $(n_1 - n_2)^2 + 4n_1 n_2 \sin^2(\phi)$ 主要用于描述玻璃幕墙表面在不同相位角 ϕ 作用下的反射特性,其中 $\sin^2(\phi)$ 反映了光的相位角对于反射率的影响。在玻璃幕墙的偏振成像测量过程中,相位角 ϕ 直接影响反射光的强度和偏振方向,因此该项在公式中起到了表征偏振光反射特性的作用。当 ϕ 取不同值时,光的偏振方向发生变化,使得玻璃表面的反射率也随之改变。此外,该公式的分母部分 $(n_1 + n_2)^2$ 用于归一化处理,使得计算结果始终保持在合理的物理范围内,避免数值溢出或不符合光学规律的情况发生。此外,该公式的最后一项 $\cos^2(\theta - \theta_p)$ 进一步考虑了光的偏振主轴角度 θ_p 对反射率的影响。由于玻璃幕墙在建筑中通常处于不同的安装角度,且入射光线的方向随时间变化,因此需要引入偏振光主轴角度 θ_p 来进行补偿,以确保计算出的反射率能够准确匹配实际的光学测量情况。当 $\theta = \theta_p$ 时,该项的值最大,表明此时偏振方向与玻璃表面的反射行为完全吻合,从而使得反射率计算更加精准。而当 θ 偏离 θ_p 时,反射率会随着角度变化而逐渐减小,反映了玻璃幕墙在不同入射条件下的光学反射变化规律。

[0029] 实施例3:通过如下公式,基于表面反射特性对原始图像进行强度反射补偿,得到

补偿图像:

$$I_{true}(p) = \frac{I_{raw}(p) - R(\theta, \phi) I_{env}(p)}{1 - R(\theta, \phi)} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{internal}^2};$$

其中, $I_{true}(p)$ 表示补偿图像在任意点 p 处的强度; $I_{raw}(p)$ 为原始图像在任意点 p 处的强度; $\rho_{internal}$ 为玻璃幕墙内部界面的反射率; $I_{env}(p)$ 为环境光在任意点 p 处的强度。

[0030] 具体的, 在该公式中, $I_{true}(p)$ 代表补偿后的图像强度, 即在经过反射补偿处理后, 每个像素点 p 处的真实光照信息。由于原始图像 $I_{raw}(p)$ 受到镜面反射的影响, 导致其在某些区域的亮度异常增大, 使得幕墙表面的特征细节难以分辨, 因此需要通过计算机视觉方法对其进行校正。校正的基本原理是利用玻璃幕墙的表面反射率 $R(\theta, \phi)$ 计算出反射光对原始图像的贡献, 并将其从图像中扣除, 从而恢复幕墙表面的真实光照分布。这里, $R(\theta, \phi)$ 由前述的光学模型计算得到, 它描述了光线在不同入射角 θ 和相位角 ϕ 下的反射强度, 决定了玻璃幕墙对环境光的镜面反射贡献。在该计算过程中, 环境光 $I_{env}(p)$ 是一个重要的变量, 它表示了玻璃幕墙所处环境中的光照强度。由于玻璃幕墙通常处于复杂的户外环境, 环境光源可能包括太阳光、天空光、周围建筑物的反射光等, 因此其影响是复杂且难以预测的。本方法通过偏振成像技术获取环境光的影响信息, 并利用物理模型对其进行估计, 使得补偿计算更加准确。在公式中, $R(\theta, \phi) \cdot I_{env}(p)$ 这一项表示玻璃幕墙在某个像素点 p 处, 由于镜面反射而导致的环境光贡献, 它是需要从原始图像中去除的干扰分量。因此, 公式的分子部分 $I_{raw}(p) - R(\theta, \phi) \cdot I_{env}(p)$ 计算了扣除反射光后剩余的图像信息。然而, 光线在玻璃幕墙上的反射不仅仅发生在表面层, 还可能涉及玻璃内部界面的多次反射。这是因为玻璃是半透明介质, 部分入射光会穿透表面进入玻璃内部, 并在内部界面处发生反射, 从而进一步影响最终成像的亮度。因此, 公式的分母部分 $(1 - R(\theta, \phi))$ 用于对整体光照分布进行归一化, 以补偿由玻璃内部反射导致的亮度偏差。同时, 为了进一步减少玻璃内部界面反射的影响, 该公式还引入了玻璃内部界面反射率 $\rho_{internal}$ 进行修正, 其中 $\frac{1}{1 - \rho_{internal}^2}$ 这一项表示玻璃内部反射对整体亮度的影响校正, 使得最终补偿图像能够更加接近玻璃幕墙的真实表面信息。该方法不仅基于玻璃幕墙的光学特性进行反射去除, 同时还结合了实际的环境光照影响, 使得补偿效果更加精准。相比于传统的图像处理方法, 如直方图均衡化或自适应滤波等仅基于图像统计特征的方法, 本方法的物理建模方式能够更精准地分离出反射光分量, 并有效恢复玻璃幕墙的真实视觉信息。此外, 本方法还能适应不同类型的玻璃幕墙材料, 例如透明玻璃、低辐射玻璃、镀膜玻璃等, 因为其补偿计算基于折射率和反射率的物理参数, 而这些参数可以根据具体材料进行调整, 从而确保补偿模型能够适用于不同幕墙结构的检测需求。在实际应用中, 该反射补偿模型能够显著提高误差检测的精度, 使得计算机视觉系统在复杂光照环境下仍然能够准确识别玻璃幕墙的结构特征。例如, 在强烈阳光照射下, 未经过补偿的图像可能会由于过度的镜面反射而出现较大的亮度不均匀性, 导致边缘检测和特征匹配的准确度下降, 而经过该补偿公式处理后的图像, 其亮度分布将更加均衡, 使得系统能够更可靠地提取幕墙表面的有效信息, 从而提高误差检测和施工质量评估的精度。

[0031] 实施例4: 步骤2中, 通过如下公式, 从补偿图像中提取特征向量:

$$F(p) = \nabla I_{true}(p) \cdot G_{\sigma} \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1};$$

其中, $G_{\sigma}(p)$ 表示尺度为 σ 的高斯滤波器; $\nabla I_{true}(p)$ 表示 $I_{true}(p)$ 的梯度; $F(p)$ 表示任意点 p 处的特征向量。

[0032] 具体的, 在该公式中, $F(p)$ 代表在任意像素点 p 处计算得到的特征向量, 该特征向量用于描述该像素点在玻璃幕墙表面上的局部结构信息。在计算机视觉任务中, 特征向量通常用于匹配和对齐不同图像中的对应点, 因此其稳定性对于后续的匹配计算至关重要。为了提取稳定的特征信息, 本方法首先计算补偿后的图像 $I_{true}(p)$ 的梯度, 即 $\nabla I_{true}(p)$ 。梯度计算的作用在于突出图像中的边缘和纹理信息, 增强幕墙表面的结构特征, 使得系统能够更加准确地识别幕墙的边界和形变区域。由于玻璃幕墙的特征通常较为稀疏, 直接使用灰度值作为匹配依据的效果较差, 而梯度信息能够更好地描述图像的局部变化, 从而提高特征提取的效果。然而, 梯度计算本身容易受到噪声的影响, 尤其是在玻璃幕墙检测场景下, 由于幕墙表面可能存在局部光照变化、污染物或者施工误差导致的微小纹理干扰, 使得梯度计算结果可能出现过度响应或局部异常。因此, 本方法引入了高斯滤波器 G_{σ} 对梯度计算结果进行平滑处理。高斯滤波是一种常用的图像处理方法, 它能够在保留图像主要特征的同时, 减少随机噪声的干扰, 使得特征提取过程更加稳健。在本公式中, 高斯滤波器的尺度参数 σ 需要根据具体应用场景进行调整, 通常较小的 σ 值用于提取细节特征, 而较大的 σ 值用于提取全局结构信息。在玻璃幕墙误差检测任务中, 系统可以根据幕墙表面材质的不同, 自适应地调整 σ 的值, 以优化特征提取的效果。

[0033] 此外, 由于玻璃幕墙的反射率 $R(\theta, \phi)$ 会影响梯度计算的结果, 因此本方法在特征提取过程中还引入了一个归一化项 $(1 - R(\theta, \phi))^{-1}$, 用于补偿由于反射造成的梯度值不均匀问题。玻璃幕墙的反射率在不同角度下变化较大, 特别是在大角度入射光的情况下, 某些区域的反射率可能接近 1, 导致图像在这些区域的对比度降低, 从而影响梯度计算的准确性。因此, 该归一化项的作用在于放大低反射区域的梯度响应, 确保即使在高反射条件下, 系统依然能够提取到稳定的特征向量。通过这种方式, 系统能够适应不同类型的玻璃幕墙材料, 包括透明玻璃、镀膜玻璃和低辐射玻璃等, 并在不同的光照环境下保持特征提取的稳定性。这一特征提取方法结合了物理建模和图像处理的双重优势, 使得玻璃幕墙的特征提取过程不仅能够减少反射干扰, 还能增强有效信息, 确保特征向量在不同环境下的稳定性。相比于传统的特征提取方法, 例如 SIFT (尺度不变特征变换) 或 SURF (加速鲁棒特征), 本方法专门针对玻璃幕墙的特殊光学特性进行了优化, 避免了高光滑度表面对特征点匹配稳定性的影响。同时, 由于本方法基于图像梯度计算, 避免了复杂的多尺度特征提取过程, 因此计算量更低, 能够满足实际工程应用中对实时性的要求。

[0034] 实施例 5: 步骤 2 中, 通过如下公式, 根据特征向量计算补偿图像中各个点之间的匹配度量:

$$M(p_1, p_2) = \frac{F(p_1) \cdot F(p_2)}{\|F(p_1)\| \cdot \|F(p_2)\|} \cdot \exp \left(-\frac{\|I_{true}(p_1) - I_{true}(p_2)\|^2}{2\sigma_I^2} \right) \text{ 其中, } F(p_1) \text{ 表示点 } p_1$$

处的特征向量; $F(p_2)$ 表示点 p_2 处的特征向量; $I_{true}(p_1)$ 表示补偿图像在点 p_1 处的强度; $I_{true}(p_2)$ 表示补偿图像在点 p_2 处的强度; $\|\cdot\|$ 表示 L1 范数运算; σ_I 表示图像强度匹配的敏感度参数; 若玻璃幕墙为高透明平板玻璃, σ_I 取值范围为 8 到 12; 若玻璃幕墙为磨砂玻璃, σ_I 取值范围为 12 到 18; 若玻璃幕墙为镀膜玻璃, σ_I 取值范围为 15 到 20; 若玻璃幕墙为彩色玻璃, σ_I 取值范围

为18到25; $M(p_1, p_2)$ 表示点 p_1 与点 p_2 的匹配度量;通过计算所有点之间的匹配度量的均值,得到平均匹配度量 M 。

[0035] 具体的,公式的第一部分为基于特征向量的余弦相似度计算: $\frac{F(p_1) \cdot F(p_2)}{\|F(p_1)\| \cdot \|F(p_2)\|}$,这一部分的计算目的是衡量两个点的特征向量在方向上的相似程度。由于玻璃幕墙的表面通常是平滑的,其局部区域可能缺乏明显的纹理信息,因此基于像素强度的直接匹配方法可能无法准确区分不同点的相似性,而使用特征向量的方式可以更稳定地提取玻璃幕墙表面的局部结构信息。在该公式中, $F(p_1)$ 和 $F(p_2)$ 分别表示点 p_1 和 p_2 处的特征向量,而分母部分 $\|F(p_1)\| \cdot \|F(p_2)\|$ 进行归一化处理,使得计算结果仅依赖于特征向量的方向,而不受特征向量幅值的影响。这种归一化方式称为余弦相似度(cosinesimilarity),它在计算机视觉领域广泛应用于特征匹配和图像检索任务。具体而言,余弦相似度的值域在 $[-1,1]$ 之间,当两个特征向量方向完全一致时,该值为1,表示两个点的局部结构高度相似;当两个向量方向完全相反时,该值为-1,表示两者完全不匹配;当两个向量正交时,该值为0,表示两者没有关联性。在玻璃幕墙的误差检测任务中,特征向量通常是基于梯度信息和高斯滤波计算得到的,因此该匹配方法能够在不同光照条件下保持较好的稳定性,并减少高反射环境下的误匹配情况。

[0036] 然而,仅仅依赖特征向量的相似性并不足以保证匹配计算的准确性,因为玻璃幕墙的表面反射特性可能会导致某些区域的梯度信息发生畸变,从而影响特征向量的稳定性。因此,为了进一步增强匹配的鲁棒性,本方法在匹配计算中引入了基于图像强度差异的加权修正因子,即: $\exp\left(-\frac{\|I_{\text{true}}(p_1) - I_{\text{true}}(p_2)\|^2}{2\sigma_I^2}\right)$;该项用于衡量两个点在补偿图像上的光

强度相似程度,并通过指数衰减方式调整匹配置信度。直观上,该加权因子可以理解为:如果两个点在补偿图像上的光强度差异较小,则它们的匹配度量值应较高,而如果两个点的光强度差异较大,则匹配度量值应较低。指数函数的形式确保了匹配度随着光强度差异的增大而呈现非线性下降,使得系统能够更有效地忽略由于局部光照变化或玻璃幕墙材质不同而导致的光强度变化。例如,在玻璃幕墙的某些区域,可能由于外界环境光的影响导致局部亮度升高,而该指数函数能够自动降低这些区域的匹配置信度,从而减少匹配误差。参数 σ_I 在该计算中起到了敏感度调节的作用,它决定了系统对光强度变化的响应程度。在玻璃幕墙的不同材质下,该参数的最优取值是不同的。例如,对于高透明玻璃,光的传播主要以透射为主,表面反射率相对较低,因此在匹配计算时,系统需要对较小的光强度差异更加敏感,因此 σ_I 的取值应较小(8到12)。而对于磨砂玻璃,由于其表面具有较强的散射特性,光强度的局部变化较大,因此匹配计算需要较低的敏感度,以避免因光照变化导致匹配误差过大,因此 σ_I 取值范围应在12到18之间。同样地,对于镀膜玻璃,由于其表面结构较复杂,反射特性随入射角度的变化较大,因此 σ_I 的取值应更大(15到20),以确保匹配计算的稳定性。而对于彩色玻璃,由于其表面颜色可能影响光强度的感知,因此匹配计算需要较大的鲁棒性,此时 σ_I 取值范围应在18到25之间。通过自适应调整 σ_I ,本方法能够针对不同材质的玻璃幕墙自动优化匹配计算,从而保证匹配结果的稳定性和准确性。此外,为了评估整个匹配计算的全局特性,本方法还引入了匹配度量的均值计算,即通过计算所有点之间的平均匹配度量

M ,可以得到整个幕墙表面的匹配趋势。匹配度量均值的统计分析可以用于检测玻璃幕墙的整体施工误差,例如当匹配度量均值较高时,表明玻璃幕墙的整体形态与设计标准较为一致,而当匹配度量均值较低时,可能意味着幕墙在某些区域存在较大的误差。此外,匹配度量均值的空间分布也可以用于识别幕墙表面的局部变形情况。例如,如果某一区域的匹配度量显著低于全局均值,则表明该区域的结构特性与标准模板存在较大偏差,可能需要进行局部修正。

[0037] 实施例6:步骤3:根据各个点之间的匹配度量,结合相机标定参数,进行二维重建修正,得到每个点对应的二维点坐标修正值:

$$P(x, y) = C + \frac{d \cdot \|T - C\|}{\sqrt{f^2 + (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}} \cdot \frac{[x - c_x, y - c_y, f]^T}{\|[x - c_x, y - c_y, f]\|}; \text{其中, } x \text{ 为任意点 } P \text{ 的 } X \text{ 轴坐标; } y$$

为任意点 P 的 Y 轴坐标; d 表示深度值; c_x 为相机的主点 X 轴坐标; c_y 表示相机的主点 Y 轴坐标; C 表示相机光心位置; T 表示投影仪的位置; f 表示相机焦距; T^T 为转置符号。

[0038] 具体的,公式的核心变量是 $P(x, y)$,它代表修正后的二维点坐标,即经过匹配度量和投影几何校正后的点位。由于玻璃幕墙的安装误差通常会在较大尺度上影响幕墙的整体形态,因此误差检测系统需要尽可能准确地计算出每个点的真实位置,从而为后续误差计算提供精准的坐标信息。在计算 $P(x, y)$ 时,需要考虑相机的成像特性,其中 C 代表相机的光心位置,而 f 是相机的焦距。焦距 f 影响了相机的视场角,并决定了图像中的透视投影关系。在玻璃幕墙的误差检测任务中,通常采用短焦距相机,以确保能够获取较大范围的幕墙区域,同时兼顾分辨率。然而,短焦距相机容易引起更明显的透视畸变,因此在进行坐标修正时,必须利用投影变换方法对其进行补偿。为了实现这一补偿,公式中引入了如下投影缩放

因子: $\frac{d \cdot \|T - C\|}{\sqrt{f^2 + (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}}$;这一部分的计算描述了点 (x, y) 在相机坐标系下的缩放变

换关系。其中, d 代表深度值, $\|T - C\|$ 代表相机与投影仪之间的相对距离,而分母部分 $\sqrt{f^2 + (x - c_x)^2 + (y - c_y)^2}$ 表示点 (x, y) 在相机成像平面上的透视缩放因子。该缩放因子的作用在于根据点的投影深度调整其在图像中的位置,使得坐标修正能够充分考虑幕墙点位的空间分布情况。在玻璃幕墙的误差检测任务中,不同的点可能因深度不同而导致其投影缩放比例不同,因此必须通过该缩放因子进行补偿,以确保点位计算的准确性。

[0039] 接下来,公式的最后一项: $\frac{[x - c_x, y - c_y, f]^T}{\|[x - c_x, y - c_y, f]\|}$;这一部分用于描述点 (x, y) 在相机坐

标系中的方向向量。由于玻璃幕墙的误差检测依赖于精准的点位匹配,而相机的透视投影关系可能会导致图像中的点发生一定的畸变,因此需要通过该方向向量计算点坐标的真实投影方向,使得修正后的坐标能够更加准确地反映幕墙的实际位置。该方向向量的计算方法基于相机的光学投影模型,其中 $x - c_x$ 和 $y - c_y$ 分别表示点 (x, y) 相对于相机主点 (c_x, c_y) 的偏移,而 f 代表相机的焦距,确保了方向向量的归一化计算,使得坐标修正过程不会受到投影畸变的影响。这一公式在玻璃幕墙施工误差检测任务中的应用,使得系统能够更加准确地映射幕墙点位的实际坐标,从而提高误差计算的精度。相比于传统的基于平面投影的方法,

该方法结合了匹配计算所得的深度信息,并利用投影变换进行坐标修正,使得系统能够适应不同类型的玻璃幕墙材料,并在复杂光照条件下保持较高的计算稳定性。此外,该方法通过相机标定参数的引入,使得误差检测能够适应不同相机设备,从而提高了系统的适用性。在实际应用中,该二维重建修正方法能够显著提高幕墙误差检测的精度。例如,在普通的施工测量中,由于相机的拍摄角度可能存在偏差,直接基于原始图像进行误差计算可能会导致较大的坐标偏移,而通过该方法进行坐标修正后,系统能够准确地将点位校正到相机的真实坐标系中,从而减少透视畸变对误差检测的影响。此外,该方法还能够适应不同类型的玻璃幕墙材料,例如透明玻璃、低辐射玻璃、镀膜玻璃等,并且能够在复杂光照条件下保持较高的计算稳定性。

[0040] 实施例7:深度值 d 通过如下公式计算得到:

$$d = \frac{\|T-C\| \cdot \sin(\theta_T)}{\sin(\theta_C + \theta_T)};$$

$$\theta_C = \arctan\left(\frac{\sqrt{(x-c_x)^2 + (y-c_y)^2}}{f}\right);$$

$$\theta_T = \arcsin\left(\frac{M\lambda}{B}\right);$$

其中, θ_C 表示相机视线与光轴的夹角; θ_T 表示投影仪视线与投影轴的夹角; B 表示相机与投影仪的基线距离; λ 表示结构光波长。

[0041] 具体的,该方法通过三角测量的原理,建立了一个以相机光心 C 为基准的投影几何模型,利用相机与投影仪之间固定的物理距离作为基线,使得结构光投影产生的条纹信息与实际物体表面深度建立了直接的对应关系,从而解决了在玻璃幕墙这种高反射表面上,传统立体视觉方法容易受到干扰而难以获取深度信息的问题。在公式中,通过将相机与投影仪的几何位置进行配合,计算得出深度 d 的公式形式为 $d = \frac{\|T-C\| \cdot \sin(\theta_T)}{\sin(\theta_C + \theta_T)}$ 。这一表达

式的物理意义在于,将实际物理基线 $\|T-C\|$ 与两个角度之间的正弦函数关系相结合,构成一个典型的三角测量模型。

[0042] 具体而言,投影仪通过结构光在玻璃幕墙上投射出特定波长的光图案,而玻璃幕墙由于其特殊的光学性质,在不同区域会引起投影图案的位移和变形,这种变形信息经过前期匹配度量与特征提取后,能够反映出图案在图像中的偏移量。利用这些偏移量,可以计算出相应的视线角度,从而推导出每个点相对于相机的深度。这里,角度 θ_C 是由相机成像模型计算得到的,它反映了图像中任一点 (x, y) 与相机光轴之间的偏离情况,其计算过程涉及到点与相机主点之间的距离关系以及焦距 f 的影响,而这一角度的大小直接决定了该点在透视投影下的缩放比例。另一方面,角度 θ_T 则来源于结构光技术,通过对平均匹配度量 M 与结构光波长 λ 以及基线距离 B 的函数关系进行反解,从而获得投影仪视线与投影轴之间的夹角。事实上,玻璃幕墙施工误差检测中的结构光系统,其优势就在于利用已知波长的光源以及固定的几何结构,通过条纹图案的畸变测量出物体表面的深度信息,这对于具有高反射性和低纹理的玻璃材料来说,显得尤为重要。

[0043] 整个深度计算过程不仅需要精确测量相机与投影仪之间的物理距离,还依赖于准确标定相机内部参数,如焦距 f 和主点坐标 (c_x, c_y) 等。这些参数的准确标定是构建正确投影模型的前提,只有在此基础上,利用透视投影原理才能将二维图像中的像素位置映射回实

实际物体表面,从而实现精确的深度重建。通过公式中涉及的正弦函数,可以看到,当相机视线与光轴的夹角 θ_c 发生变化时,深度 d 也会相应地调整,这正反映了透视投影中远近物体的大小差异以及视角偏移效应。此外,投影仪视线与投影轴的夹角 θ_T 则起到了调节深度计算灵敏度的作用,其正弦函数的分子部分将结构光波长和匹配度量结合,使得深度信息能够在不同光照条件和材料反射特性下保持稳定。在实际应用中,玻璃幕墙由于其材料特性,往往存在复杂的反射现象和光学折射问题,这使得传统的深度计算方法容易受到干扰而产生较大误差。而本发明通过引入结构光技术,并结合相机与投影仪的精确标定,不仅能够克服高反射性带来的挑战,还能在复杂环境下保持较高的测量精度。利用这种三角测量方法,能够精确地获得每个像素点的深度信息,再与后续的二维坐标修正步骤结合,从而实现整个误差检测系统的高精度测量。值得注意的是,在实际测量过程中,相机与投影仪的安装角度和相对位置可能会因施工现场条件的变化而有所偏差,因此系统通常需要具备自校正能力,以便根据实时采集的数据对这些参数进行动态调整,这也是本发明的一大创新点。此外,利用匹配度量 M 作为计算 θ_T 的依据,使得深度计算能够自适应地反映出玻璃幕墙表面局部结构的细微差别。当幕墙表面由于施工误差或材料缺陷导致局部形变时,匹配度量会显示出相应的异常变化,这种变化直接传递到深度计算中,从而使得系统能够检测出局部区域的深度偏差,并进一步进行误差分析。正是通过这种多层次、多参数结合的深度计算方法,本发明在玻璃幕墙施工误差检测中实现了对形变和安装误差的高精度评估,保证了检测结果的科学性和可靠性。

[0044] 实施例8:步骤4中,通过如下公式,根据二维点坐标修正值,与设计标准模板进行比对,分析变形并评估误差:

$$D(x, y) = P(x, y) - P_{\text{design}}(x, y);$$

$$E_{\text{total}} = \sqrt{\|D(x, y)\|^2 \cdot W(x, y) \cdot (1 - R(\theta, \phi))^{-1}};$$

其中, $P_{\text{design}}(x, y)$ 表示设计标准模板在坐标为 (x, y) 的点处的标准值; $D(x, y)$ 为差值; E_{total} 为误差值; $W(x, y)$ 为坐标为 (x, y) 的点的权重值。

[0045] 具体的,通过计算实际测量点 $P(x, y)$ 与设计标准点 $P_{\text{design}}(x, y)$ 的差值 $D(x, y)$,反映出每个坐标位置上幕墙实际状态与理想状态之间的偏差,再结合权重函数 $W(x, y)$ 和反射率补偿因子 $(1 - R(\theta, \phi))^{-1}$ 进一步校正误差影响,从而得到整体误差 E_{total} 。这种方法既考虑了局部几何形变,又对不同区域的重要性进行了加权处理,使得误差评估结果更符合实际需求。在实际施工过程中,玻璃幕墙由于受到安装工艺、材料特性以及环境光照等多种因素的影响,往往会在某些局部区域产生明显的形变或偏移,而这些误差如果不加以量化,就难以判断施工质量是否达到设计要求。通过本公式,可以将各个点的偏差 $D(x, y) = P(x, y) - P_{\text{design}}(x, y)$ 精确计算出来,其中 $P(x, y)$ 是经过前面步骤中图像补偿、特征提取和坐标修正后得到的实际测量坐标,而 $P_{\text{design}}(x, y)$ 则是根据设计标准模板预先设定的理想坐标。由于在实际测量中,部分点可能受到光学畸变、环境光照变化或反射干扰的影响,使得其测量值存在噪声或误差,因此需要通过计算每个点的差值来识别出实际偏离设计的程度。接下来,误差计算不仅仅停留在差值本身,而是通过对差值的平方和进行加权处

理,进一步反映误差的真实影响。

[0046] 权重函数 $W(x, y)$ 在此起到至关重要的作用,它根据各个点在幕墙中的位置、重要性以及可能的误差敏感性进行分配,常常在幕墙的边缘区域或关键接缝处赋予较高的权重,因为这些区域通常受力较大,或在视觉效果上更为明显,而在中心或对称区域的权重可能较低,以平衡整体误差的分布。此外,为了弥补由于玻璃幕墙表面反射特性对图像采集所造成的不均匀影响,公式中还引入了反射率补偿因子 $(1 - R(\theta, \phi))^{-1}$,这主要是为了对那些因高反射率导致测量信号衰减的区域进行放大,使得最终的误差值能够更加客观地反映出实际施工误差。具体而言,玻璃幕墙在不同入射角 θ 和相位角 ϕ 下,其表面反射率 $R(\theta, \phi)$ 会有所变化,在高反射区域,原始信号可能会被过度抑制,而通过引入反射率补偿,可以在计算时对这些区域的差值进行适当放大,保证误差评估不会因光学特性而失真。最后,通过对加权后的差值平方和进行开方,得到整体误差 E_{total} ,这一过程实际上将所有局部偏差综合起来,形成一个全局误差指标,既反映了局部形变的严重程度,也反映了各个区域对整体误差的贡献。在玻璃幕墙施工中,这种误差指标可以直接用于判断是否需要调整,或者是否存在严重的施工缺陷需要返工。

[0047] 实施例9:权重值 $W(x, y)$ 使用如下公式进行表示:

$$W(x, y) = \exp \left(-\frac{\|P(x, y) - P_{center}(x, y)\|^2}{2\sigma_W^2} \right) \cdot \left(1 - \exp \left(-\frac{\|\nabla F(p)\|^2}{2\sigma_F^2} \right) \right);$$

其中, σ_W 为空间权重的衰减参数,为设定值; σ_F 为特征强度权重的敏感度参数,为设定值; $\sigma_W > \sigma_F$; P_{center} 为设计标准模板中的中心值。

[0048] 具体的,本方法采用的权重计算公式由两个主要部分组成,分别描述了空间位置的重要性的影响。第一项是一个基于高斯衰减的空间权重项:

$\exp \left(-\frac{\|P(x, y) - P_{center}(x, y)\|^2}{2\sigma_W^2} \right)$;这一项的物理意义是,根据点 $P(x, y)$ 与设计标准模板中心

点 $P_{center}(x, y)$ 之间的欧几里得距离,采用高斯分布的形式进行加权,使得离中心较远的点权重较小,而靠近中心区域的点权重较大。这里的参数 σ_W 控制了权重的衰减速率,其值越大,说明系统对空间位置的敏感度越低,而当 σ_W 取较小时,权重会快速衰减,表明系统更加关注中心区域。由于玻璃幕墙的施工误差在整体上可能呈现一定的分布特性,例如安装过程中,由于支撑结构和固定框架的影响,误差可能在局部区域更加明显,因此通过这一高斯权重项,可以有效地反映误差在空间中的分布情况,并确保误差计算能够更加准确地评估幕墙的整体形变。然而,仅仅依赖空间位置进行加权是不够的,因为玻璃幕墙的误差不仅取决于坐标偏移,还受到表面特征变化的影响。例如,在幕墙的边缘或拼接处,材料的连接方式可能导致局部的形变更明显,因此需要额外考虑特征梯度的影响。为此,本方法引入了

第二项基于特征梯度的权重计算项: $\left(1 - \exp \left(-\frac{\|\nabla F(p)\|^2}{2\sigma_F^2} \right) \right)$;这一项用于衡量点 p 处特征

变化的强度,并采用指数衰减的方式进行加权。这里, $\nabla F(p)$ 表示点 p 处的特征梯度,它能够描述玻璃幕墙表面的局部变化情况,而参数 σ_F 则控制了特征权重的敏感度。当 σ_F 取较小时,说明系统对局部特征变化更加敏感,而当 σ_F 取较大时,系统对特征变化的响应较弱。由于幕

墙表面的特征变化往往集中在边界区域或接缝处,因此这一项权重的引入能够有效地突出这些区域的影响,并降低平坦区域的误差权重,使得系统在计算误差时能够更加关注关键部位,而不受均匀表面的影响。通过将这两部分权重结合,最终计算得到的权重值 $W(x, y)$ 能够同时反映点在空间中的位置关系以及其局部特征的变化情况。特别是对于玻璃幕墙的拼接区域,由于该区域的误差对整体结构的稳定性影响较大,因此在本方法中,该区域的权重往往较高,从而确保误差计算能够更加准确地反映幕墙的施工质量。而对于幕墙中央的平坦区域,由于其误差对整体结构的影响较小,权重值会相对较低,从而减少误差计算过程中无关区域的影响,使得系统的计算更加高效和精准。这一权重计算方法的优势在于,它不仅考虑了空间因素,还结合了玻璃幕墙表面的实际特征信息,使得误差计算更加符合幕墙的物理特性。相比于传统的均匀权重分布方法,本方法能够更加精准地识别误差的关键区域,并通过合理的加权方式提高检测的精度。此外,由于权重计算采用的是高斯分布和指数衰减函数,因此计算过程具有较高的稳定性,并能够适应不同类型的玻璃幕墙材料和施工环境。在实际应用中,这一方法能够有效提高误差检测的准确性,使得系统不仅能够在高反射环境下保持稳定,还能根据不同幕墙结构自动调整权重分布,以确保误差评估结果的合理性。

[0049] 以上所述,以上实施例仅用以说明本发明的技术方案,而非对其限制;尽管参照前述实施例对本发明进行了详细的说明,本领域的普通技术人员应当理解:其依然可以对前述各实施例所记载的技术方案进行修改,或者对其中部分技术特征进行等同替换;而这些修改或者替换,并不使相应技术方案的本质脱离本发明各实施例技术方案的精神和范围。

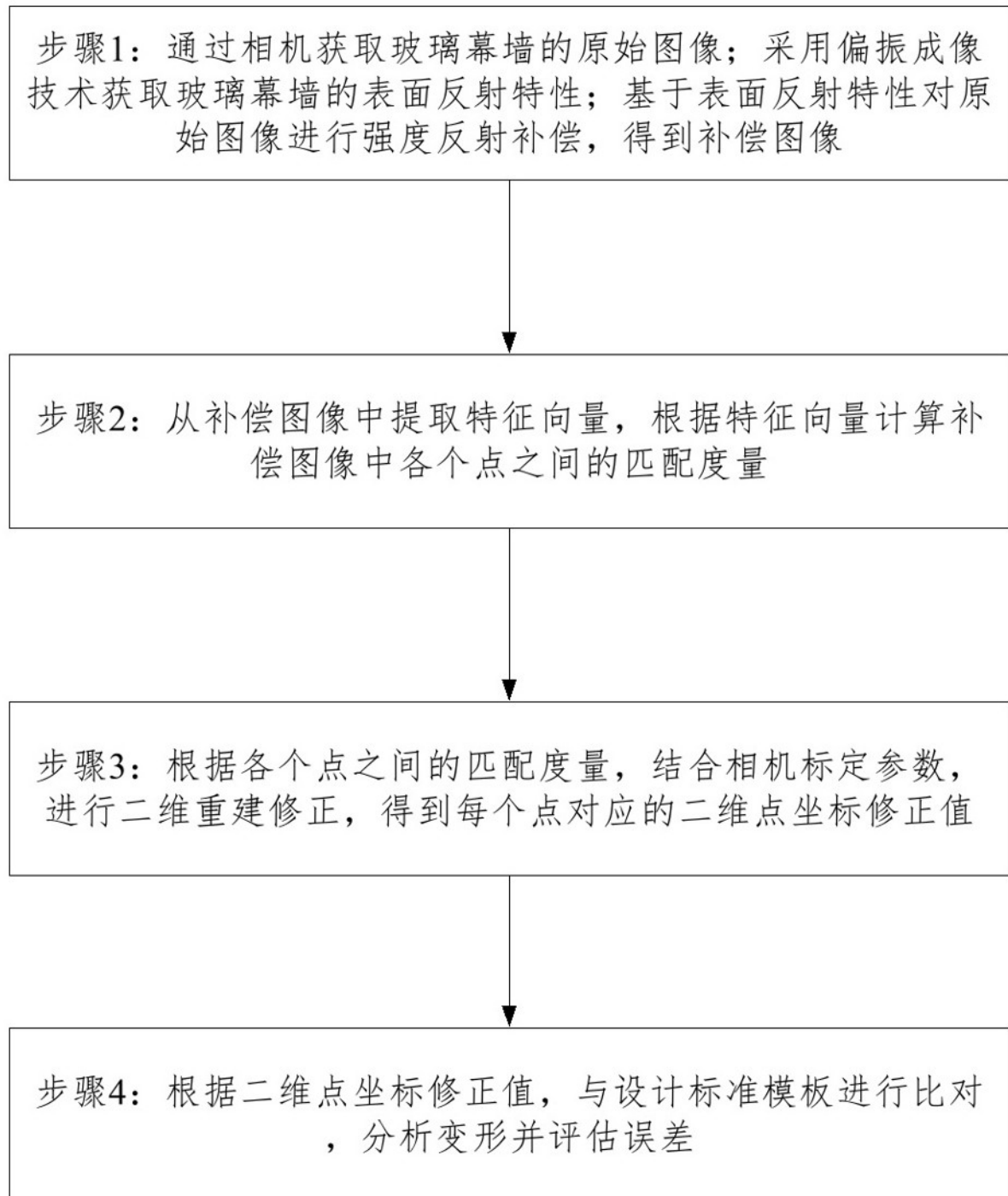


图1