



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 117036474 B

(45) 授权公告日 2024.10.25

(21) 申请号 202310992687.0

(56) 对比文件

(22) 申请日 2023.08.08

CN 105144196 A, 2015.12.09

CN 106996769 A, 2017.08.01

(65) 同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 117036474 A

审查员 刘梅

(43) 申请公布日 2023.11.10

(73) 专利权人 天津大学

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

(72) 发明人 冯伟 陈豪杰 张乾 李楠 崔晓

王柏钦 万亮

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代

理事务所 12201

专利代理师 韩帅

(51) Int. Cl.

G06T 7/73 (2017.01)

G06V 10/75 (2022.01)

权利要求书4页 说明书10页 附图2页

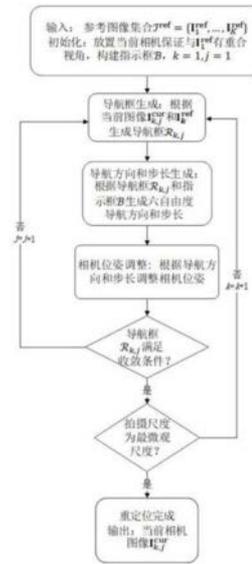
(54) 发明名称

一种面向微观尺度的主动相机重定位方法

相机进行内参标定。

(57) 摘要

本发明公开了一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,所述方法包括以下步骤:步骤一:构建指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ ;步骤二:根据获取当前主动相机图像  $\mathbf{I}_{k,j}^{cur}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{ref}$  生成导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ ;步骤三:根据导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$  和指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  生成主动相机六自由度导航方向  $(w_{k,j}^{rx}, w_{k,j}^{ry}, w_{k,j}^{rz}, w_{k,j}^{tx}, w_{k,j}^{ty}, w_{k,j}^{tz})$  与导航步长  $(s_{k,j}^{rx}, s_{k,j}^{ry}, s_{k,j}^{rz}, s_{k,j}^{tx}, s_{k,j}^{ty}, s_{k,j}^{tz})$ ;步骤四:根据导航方向与导航步长调整主动相机空间位姿;步骤五:若导航框不满足收敛条件,  $j = j + 1$ , 跳至步骤二, 否则跳至步骤六;步骤六:若当前为最小拍摄尺度, 即  $k = K$ , 则重定位完成; 否则, 令  $j = 1, k = k + 1$ , 进入下一尺度, 跳至步骤二, 本发明在主动相机重定位过程中, 通过尺度接力的方式实现从宏观尺度到微观尺度的逐层递进的重定位, 无需对



1. 一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,其特征在于,所述方法包括以下步骤:

步骤一:初始化:给定历史参考拍摄图像集 $\mathcal{J}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ ,调整当前主动相机与图像 $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$ 有重合视角,构建指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ ;并设置 $k=1$ 表示尺度索引, $j=1$ 表示某尺度下相机调整次数的索引;

其中: $K$ 表示尺度总数量, $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$ 为最宏观尺度拍摄图像, $\mathbf{I}_K^{\text{ref}}$ 为最微观尺度拍摄图像, $\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4$ 分别为指示框左上、右上、左下、右下四个顶点坐标;

步骤二:根据获取当前主动相机图像 $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ 和参考图像 $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$ 生成导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ ,所述步骤二中导航框生成过程,包括如下步骤:

201:对当前图像 $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ 和参考图像 $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$ 进行特征提取及特征匹配得到一系列匹配点对 $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$ ,其中 $i$ 为匹配点对的索引;

202:根据所有匹配对 $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$ 计算单应矩阵 $\mathbf{H}_{k,j}$ ;

203:用单应矩阵 $\mathbf{H}_{k,j}$ 对指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ 进行变换得到导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ ,其中:令指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ 为 $\mathbf{b}^1 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ , $\mathbf{b}^2 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ , $\mathbf{b}^3 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ , $\mathbf{b}^4 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ ,其中: $w$ 和 $h$ 分别表示图像宽高;上标 $T$ 表示转置操作;

通过如下公式将指示框 $\mathcal{B}$ 中坐标经单应矩阵 $\mathbf{H}_{k,j}$ 变换得到导航框 $\mathcal{R}$ 所有顶点坐标;

$$\mathbf{d}_{k,j}^m = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^m,$$

其中, $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ 表示第 $k$ 个尺度下第 $j$ 次调整时当前主动相机图像, $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$ 为四个顶点坐标; $1 \leq m \leq 4$ ,上式中 $\mathbf{b}^m$ 和 $\mathbf{d}_{k,j}^m$ 均表示齐次坐标;

步骤三:根据导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ 和指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ 生成主动相机六自由度导航方向 $(w_{k,j}^{\text{rx}}, w_{k,j}^{\text{ry}}, w_{k,j}^{\text{rz}}, w_{k,j}^{\text{tx}}, w_{k,j}^{\text{ty}}, w_{k,j}^{\text{tz}})$ 与导航步长 $(s_{k,j}^{\text{rx}}, s_{k,j}^{\text{ry}}, s_{k,j}^{\text{rz}}, s_{k,j}^{\text{tx}}, s_{k,j}^{\text{ty}}, s_{k,j}^{\text{tz}})$ ,

其中: $\text{rx}, \text{ry}, \text{rz}$ 分别表示 $x, y, z$ 三个轴旋转自由度, $\text{tx}, \text{ty}, \text{tz}$ 分别表示 $x, y, z$ 三个轴的平移自由度;

步骤四:根据导航方向与导航步长调整主动相机空间位姿;

步骤五:若导航框不满足六个自由度的导航方向均为0的收敛条件, $j = j+1$ ,跳至步骤二,否则跳至步骤六;

步骤六:若当前为最小拍摄尺度,即 $k=K$ ,则重定位完成;否则,令 $j=1, k=k+1$ ,进入下一尺度,跳至步骤二。

2. 根据权利要求1所述的一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,其特征在于,所述步骤3中相机六自由度导航方向生成过程,包括如下步骤:

301:三个平移自由度导航方向 $w_{k,j}^{tx}$ 、 $w_{k,j}^{ty}$ 、 $w_{k,j}^{tz}$ 的计算:令导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 和指示框 $\mathcal{B}$ 的中心坐标分别为 $\mathbf{d}_{k,j}^c$ 和 $\mathbf{b}^c$ ,分别利用 $\mathbf{d}_{k,j}^c$ 和 $\mathbf{b}^c$ 在x、y轴坐标的差计算x、y轴平移自由度导航方向 $w_{k,j}^{tx}$ 和 $w_{k,j}^{ty}$ ,利用 $\mathcal{R}_{k,j}$ 和 $\mathcal{B}$ 围成区域的面积差来计算z轴平移自由度的导航方向 $w_{k,j}^{tz}$ ;其中:对于三个平移自由度导航方向,计算如下所示,

$$\begin{aligned} \text{x轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{tx} &= \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) > \tau_{tx} \\ 1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) < -\tau_{tx}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \\ \text{y轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{ty} &= \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) > \tau_{ty} \\ 1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) < -\tau_{ty}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \\ \text{z轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{tz} &= \begin{cases} 1, & \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) > \tau_{tz} \\ -1, & \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) < -\tau_{tz}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned}$$

其中, $\mathbf{b}^c$ 和 $\mathbf{d}_{k,j}^c$ 分别表示指示框 $\mathcal{B}$ 和导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 中心点坐标,即 $\mathbf{b}^c = \left[ \frac{\mathbf{b}^1 + \mathbf{b}^4}{2}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{d}_{k,j}^c = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^c$ ;

302:三个旋转自由度导航方向 $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ 的计算:分别根据导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 上下边长长度差、左右边长长度差、 $\mathcal{R}_{k,j}$ 的左右边中点的纵坐标差来分别计算三个旋转自由度的导航方向 $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ ,其中:

对于三个旋转自由度导航方向,计算如下所示,

$$\begin{aligned} \text{x轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{rx} &= \begin{cases} 1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| > \tau_{rx} \\ -1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| < -\tau_{rx}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \\ \text{y轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{ry} &= \begin{cases} 1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| > \tau_{ry} \\ -1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| < -\tau_{ry}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \\ \text{z轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{rz} &= \begin{cases} 1, & \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) > \tau_{rz} \\ -1, & \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) < -\tau_{rz}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \end{aligned}$$

其中: $\tau_{rx}$ 、 $\tau_{ry}$ 、 $\tau_{rz}$ 分别代表对应旋转自由度判断收敛的阈值。

3. 根据权利要求1所述的一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,其特征在于,所述步骤3中相机六自由度导航步长生成过程,包括如下步骤:

401:三个平移自由度导航步长 $s_{k,j}^{tx}$ 、 $s_{k,j}^{ty}$ 、 $s_{k,j}^{tz}$ 的计算:如果为当前尺度下的第一次平移

运动,即 $j=1$ 时,那么给定一个初始平移步长 $s_k^{\text{tra}}$ ,并令 $s_{k,j}^{\text{tx}} = s_{k,j}^{\text{ty}} = s_{k,j}^{\text{tz}} = s_k^{\text{tra}}$ ;否则,所述导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整平移步长,具体有:

$$s_{k,j}^{\text{tx}} = s_{k,j-1}^{\text{tx}} \left| \frac{d_{k,j}^c(1) - b^c(1)}{d_{k,j}^c(1) - d_{k,j-1}^c(1)} \right|,$$

$$s_{k,j}^{\text{ty}} = s_{k,j-1}^{\text{ty}} \left| \frac{d_{k,j}^c(2) - b^c(2)}{d_{k,j}^c(2) - d_{k,j-1}^c(2)} \right|,$$

$$s_{k,j}^{\text{tz}} = s_{k,j-1}^{\text{tz}} \left| \frac{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{B})}{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j-1})} \right|,$$

其中: $\text{Area}(\cdot)$ 表示计算面积的函数,符号(1)和(2)表示对应向量的第1和第2个元素;

402:三个旋转自由度导航步长 $s_{k,j}^{\text{rx}}$ 、 $s_{k,j}^{\text{ry}}$ 、 $s_{k,j}^{\text{rz}}$ 的计算:如果为当前尺度下的第一次平移运动,即 $j=1$ 时,那么给定一个初始旋转步长 $s_k^{\text{rot}}$ ,并令 $s_{k,j}^{\text{rx}} = s_{k,j}^{\text{ry}} = s_{k,j}^{\text{rz}} = s_k^{\text{rot}}$ ;否则,根据导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整旋转步长,具体有:

$$s_{k,j}^{\text{rx}} = s_{k,j-1}^{\text{rx}} \left| \frac{\|d_{k,j}^1 - d_{k,j}^2\| / \|d_{k,j}^3 - d_{k,j}^4\| - 1}{\|d_{k,j}^1 - d_{k,j}^2\| / \|d_{k,j}^3 - d_{k,j}^4\| - \|d_{k,j-1}^1 - d_{k,j-1}^2\| / \|d_{k,j-1}^3 - d_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$s_{k,j}^{\text{ry}} = s_{k,j-1}^{\text{ry}} \left| \frac{\|d_{k,j}^1 - d_{k,j}^3\| / \|d_{k,j}^2 - d_{k,j}^4\| - 1}{\|d_{k,j}^1 - d_{k,j}^3\| / \|d_{k,j}^2 - d_{k,j}^4\| - \|d_{k,j-1}^1 - d_{k,j-1}^3\| / \|d_{k,j-1}^2 - d_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$s_{k,j}^{\text{rz}} = s_{k,j-1}^{\text{rz}} \left| \frac{d_{k,j}^l(2) / d_{k,j}^r(2) - 1}{|d_{k,j}^l(2) / d_{k,j}^r(2) - d_{k,j-1}^l(2) / d_{k,j-1}^r(2)|} \right|,$$

其中:符号 $\|\cdot\|$ 表示求向量的模,即向量的长度, $d_{k,j}^l$ 和 $d_{k,j}^r$ 分别表示导航框左边框和右边框的中点坐标,即有 $d_{k,j}^l = \frac{d_{k,j}^1 + d_{k,j}^3}{2}$ 和 $d_{k,j}^r = \frac{d_{k,j}^2 + d_{k,j}^4}{2}$ ;上式利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 上下边长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的x轴旋转步长 $s_{k,j}^{\text{rx}}$ ,利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 左右边长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的y轴旋转步长 $s_{k,j}^{\text{ry}}$ ,利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 左右边长中点在上次调整后的纵坐标比例变化来推断出当前时刻最优的z轴旋转步长 $s_{k,j}^{\text{rz}}$ 。

4. 根据权利要求1所述的一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,其特征在于,所述步骤4中根据导航方向与导航步长调整主动相机空间位姿过程,包括如下步骤:

采用先旋转再平移的相机位姿调整策略,即当y轴旋转导航方向不为0时,不对x轴平移进行调整,同样在x轴旋转导航方向不为0时也不对y轴平移进行调整;

主动相机在六个自由度下的运动调整量如下:

$$\text{x轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{\text{tx}} s_{k,j}^{\text{tx}}, & \text{如果 } w_{k,j}^{\text{ry}} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$\text{y轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{\text{ty}} s_{k,j}^{\text{ty}}, & \text{如果 } w_{k,j}^{\text{rx}} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$\text{z轴平移自由度调整量} = w_{k,j}^{\text{tz}} s_{k,j}^{\text{tz}},$$

$$\text{x轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{\text{rx}} s_{k,j}^{\text{rx}},$$

y 轴旋转自由度调整量 =  $w_{k,j}^{ry} S_{k,j}^{ry}$ ,

z 轴旋转自由度调整量 =  $w_{k,j}^{rz} S_{k,j}^{rz}$ 。

## 一种面向微观尺度的主动相机重定位方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于人工智能、计算机视觉领域,涉及主动视觉技术,具体为一种面向微观尺度的主动相机重定位方法。

### 背景技术

[0002] 主动相机重定位旨在物理真实地将相机六自由度位姿恢复到与历史拍摄时相同位姿,进而获得同一目标空间一致的两次观测图像,在环境监测、历史文化遗产预防性保护、微小变化检测等领域发挥着重要作用,是主动视觉技术的一个重要应用。主动相机重定位过程包括相机的相对位姿估计和相机的动态调整,相机的调整由机械平台完成。

[0003] 目前,最先进的主动相机重定位算法在文化遗产微小变化检测任务中取得了巨大成功。但需要注意的是,这些监测都是在宏观尺度下进行重定位的,此外这些方法需要对相机的内参进行预先标定,利用内参信息通过位姿估计算法实现相机相对位姿差异的求解。然而,诸多精细化的监测任务需要在观测目标的微观尺度下进行,例如高精产品瑕疵检测或精细化微变检测等,这些瑕疵或变化可能仅有微米级尺度,而现有的主动相机重定位方法及相关相机产品并不能适用于上述需求。视觉精准定位需要在初始时刻当前相机和历史参考图像共视区域,而由于微观尺度(通常观测范围在1毫米左右)极小难以保证上述条件,因此最可行的方式是采用尺度接力从宏观尺度逐步过度到微观尺度下的相机重定位。在此过程中相机变焦范围不仅大而且连续,这使得相机的内参标定变得不可行,进而导致现有主动相机重定位方法无法适用于微观尺度下。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在问题,本发明提供了一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,该方法在主动相机重定位过程中,通过尺度接力的方式实现从宏观尺度到微观尺度的逐层递进的重定位,无需对相机进行内参标定。

[0005] 本发明中面向微观尺度的主动相机重定位方法是通过以下技术方案实现的:

[0006] 一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,所述方法包括以下步骤:

[0007] 步骤一:初始化:给定历史参考拍摄图像集  $\mathcal{I}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ ,调整当前主动相机与图像  $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$  有重合视角,构建指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ ;并设置  $k=1$  表示尺度索引,  $j=1$  表示某尺度下相机调整次数的索引;

[0008] 其中: $K$ 表示尺度总数量,  $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$  为最宏观尺度拍摄图像,  $\mathbf{I}_K^{\text{ref}}$  为最微观尺度拍摄图像,  $\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4$  分别指示框为左上、右上、左下、右下四个顶点坐标;

[0009] 步骤二:根据获取当前主动相机图像  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$  生成导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ ,其中:  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  表示第  $k$  个尺度下第  $j$  次调整时当前主动相机图像,  $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$  为四个顶点坐标;

[0010] 步骤三:根据导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$  和指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  生成主动相机六自由度导航方向  $(w_{k,j}^{rx}, w_{k,j}^{ry}, w_{k,j}^{rz}, w_{k,j}^{tx}, w_{k,j}^{ty}, w_{k,j}^{tz})$  与导航步长

$(s_{k,j}^{rx}, s_{k,j}^{ry}, s_{k,j}^{rz}, s_{k,j}^{tx}, s_{k,j}^{ty}, s_{k,j}^{tz})$ ,

[0011] 其中:rx、ry、rz分别表示x、y、z三个轴旋转自由度,tx、ty、tz分别表示x、y、z三个轴的平移自由度;

[0012] 步骤四:根据导航方向与导航步长调整主动相机空间位姿;

[0013] 步骤五:若导航框不满足六个自由度的导航方向均为0的收敛条件,  $j = j+1$ , 跳至步骤二, 否则跳至步骤六;其中:所述收敛条件为:

[0014] 步骤六:若当前为最小拍摄尺度, 即  $k = K$ , 则重定位完成; 否则, 令  $j = 1, k = k+1$ , 进入下一尺度, 跳至步骤二。

[0015] 进一步, 所述步骤二中导航框生成过程, 包括如下步骤:

[0016] 201: 对当前图像  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$  进行特征提取及特征匹配得到一系列匹配点对  $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$ , 其中  $i$  为匹配点对的索引;

[0017] 202: 根据所有匹配对  $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$  计算单应矩阵  $\mathbf{H}_{k,j}$ ;

[0018] 203: 用单应矩阵  $\mathbf{H}_{k,j}$  对指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  进行变换得到导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ , 其中: 令指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  为

$\mathbf{b}^1 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^2 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^3 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^4 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ , 其中:  $w$  和  $h$  分别表示图像宽高; 上标  $T$  表示转置操作;

[0019] 通过如下公式将指示框  $\mathcal{B}$  中坐标经单应矩阵  $\mathbf{H}_{k,j}$  变换得到导航框  $\mathcal{R}$  所有顶点坐标;

[0020]  $\mathbf{d}_{k,j}^m = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^m$ ,

[0021] 其中,  $1 \leq m \leq 4$ , 上式中  $\mathbf{b}^m$  和  $\mathbf{d}_{k,j}^m$  均表示齐次坐标。

[0022] 进一步, 所述步骤3中相机六自由度导航方向生成过程, 包括如下步骤:

[0023] 301: 三个平移自由度导航方向  $w_{k,j}^{tx}$ 、 $w_{k,j}^{ty}$ 、 $w_{k,j}^{tz}$  的计算: 令导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  和指示框  $\mathcal{B}$  的中心坐标分别为  $\mathbf{d}_{k,j}^c$  和  $\mathbf{b}^c$ , 分别利用  $\mathbf{d}_{k,j}^c$  和  $\mathbf{b}^c$  在  $x$ 、 $y$  轴坐标的差计算  $x$ 、 $y$  轴平移自由度导航方向  $w_{k,j}^{tx}$  和  $w_{k,j}^{ty}$ , 利用  $\mathcal{R}_{k,j}$  和  $\mathcal{B}$  围成区域的面积差来计算  $z$  轴平移自由度的导航方向  $w_{k,j}^{tz}$ ; 其中: 对于三个平移自由度导航方向, 计算如下所示,

[0024]  $x$  轴平移自由度方向  $w_{k,j}^{tx} = \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) > \tau_{tx} \\ 1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) < -\tau_{tx} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

[0025]  $y$  轴平移自由度方向  $w_{k,j}^{ty} = \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) > \tau_{ty} \\ 1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) < -\tau_{ty} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

$$[0026] \quad z \text{轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{tz} = \begin{cases} 1, \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) > \tau_{tz} \\ -1, \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) > -\tau_{tz}, \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases}$$

[0027] 其中,  $b^c$  和  $\mathbf{d}_{k,j}^c$  分别表示指示框  $\mathcal{B}$  和导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  中心点坐标, 即  $\mathbf{b}^c = \left[ \frac{b^1+b^4}{2}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{d}_{k,j}^c = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^c$ ;

[0028] 302: 三个旋转自由度导航方向  $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$  的计算: 分别根据导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  上下边长长度差、左右边长长度差、 $\mathcal{R}_{k,j}$  的左右边中点的纵坐标差来分别计算三个旋转自由度的导航方向  $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ , 其中:

[0029] 对于三个旋转自由度导航方向, 计算如下所示,

$$[0030] \quad x \text{轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{rx} = \begin{cases} 1, \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| > \tau_{rx} \\ -1, \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| < -\tau_{rx}, \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases}$$

$$[0031] \quad y \text{轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{ry} = \begin{cases} 1, \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| > \tau_{ry} \\ -1, \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| < -\tau_{ry}, \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases}$$

$$[0032] \quad z \text{轴旋转自由度方向 } w_{k,j}^{rz} = \begin{cases} 1, \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) > \tau_{rz} \\ -1, \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) > -\tau_{rz}, \\ 0, \quad \text{其它} \end{cases}$$

[0033] 其中:  $\tau_{rx}$ ,  $\tau_{ry}$ ,  $\tau_{rz}$  分别代表对应旋转自由度判断收敛的阈值。

[0034] 进一步, 所述步骤3中相机六自由度导航步长生成过程, 包括如下步骤:

[0035] 401: 三个平移自由度导航步长  $s_{k,j}^{tx}$ 、 $s_{k,j}^{ty}$ 、 $s_{k,j}^{tz}$  的计算: 如果为当前尺度下的第一次平移运动, 即  $j=1$  时, 那么给定一个初始平移步长  $s_k^{tra}$ , 并令  $s_{k,j}^{tx} = s_{k,j}^{ty} = s_{k,j}^{tz} = s_k^{tra}$ ; 否则, 所述导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整平移步长, 具体有:

$$[0036] \quad s_{k,j}^{tx} = s_{k,j-1}^{tx} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^c(1) - \mathbf{b}^c(1)}{\mathbf{d}_{k,j}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j-1}^c(1)} \right|,$$

$$[0037] \quad s_{k,j}^{ty} = s_{k,j-1}^{ty} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^c(2) - \mathbf{b}^c(2)}{\mathbf{d}_{k,j}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j-1}^c(2)} \right|,$$

$$[0038] \quad s_{k,j}^{tz} = s_{k,j-1}^{tz} \left| \frac{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{B})}{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j-1})} \right|,$$

[0039] 其中:  $\text{Area}(\cdot)$  表示计算面积的函数, 符号 (1) 和 (2) 表示对应向量的第1和第2个元素;

[0040] 402: 三个旋转自由度导航步长  $s_{k,j}^{rx}$ 、 $s_{k,j}^{ry}$ 、 $s_{k,j}^{rz}$  的计算: 如果为当前尺度下的第一次平移运动, 即  $j=1$  时, 那么给定一个初始旋转步长  $s_k^{\text{rot}}$ , 并令  $s_{k,j}^{rx} = s_{k,j}^{ry} = s_{k,j}^{rz} = s_k^{\text{rot}}$ ; 否

则,根据导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整旋转步长,具体有:

$$[0041] \quad s_{k,j}^{rx} = s_{k,j-1}^{rx} \left| \frac{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - 1}{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - \|\mathbf{d}_{k,j-1}^1 - \mathbf{d}_{k,j-1}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j-1}^3 - \mathbf{d}_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$[0042] \quad s_{k,j}^{ry} = s_{k,j-1}^{ry} \left| \frac{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^2 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - 1}{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^2 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - \|\mathbf{d}_{k,j-1}^1 - \mathbf{d}_{k,j-1}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j-1}^2 - \mathbf{d}_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$[0043] \quad s_{k,j}^{rz} = s_{k,j-1}^{rz} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - 1}{|\mathbf{d}_{k,j}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j-1}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j-1}^R(2)|} \right|,$$

[0044] 其中:符号 $\|\cdot\|$ 表示求向量的模,即向量的长度, $\mathbf{d}_{k,j}^L$ 和 $\mathbf{d}_{k,j}^R$ 分别表示导航框左边框和右边框的中点坐标,即有 $\mathbf{d}_{k,j}^L = \frac{\mathbf{d}_{k,j}^1 + \mathbf{d}_{k,j}^3}{2}$ 和 $\mathbf{d}_{k,j}^R = \frac{\mathbf{d}_{k,j}^2 + \mathbf{d}_{k,j}^4}{2}$ ;上式利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 上下边

长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的x轴旋转步长 $s_{k,j}^{rx}$ ,利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 左右边长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的y轴旋转步长 $s_{k,j}^{ry}$ ,利用导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 左右边长中点在上次调整后的纵坐标比例变化来推断出当前时刻最优的z轴旋转步长 $s_{k,j}^{rz}$ 。进一步,所述步骤4中根据导航方向与导航步长调整主动相机空间位姿过程,包括如下步骤:

[0045] 采用先旋转再平移的相机位姿调整策略,即当y轴旋转导航方向不为0时,不对x轴平移进行调整,同样在x轴旋转导航方向不为0时也不对y轴平移进行调整;

[0046] 主动相机在六个自由度下的运动调整量如下:

$$[0047] \quad x \text{ 轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{tx} s_{k,j}^{tx}, & \text{如果 } w_{k,j}^{ry} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$[0048] \quad y \text{ 轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{ty} s_{k,j}^{ty}, & \text{如果 } w_{k,j}^{rx} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$[0049] \quad z \text{ 轴平移自由度调整量} = w_{k,j}^{tz} s_{k,j}^{tz},$$

$$[0050] \quad x \text{ 轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{rx} s_{k,j}^{rx},$$

$$[0051] \quad y \text{ 轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{ry} s_{k,j}^{ry},$$

$$[0052] \quad z \text{ 轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{rz} s_{k,j}^{rz}。$$

[0053] 有益效果

[0054] 本发明提供的技术方案的有益效果是:

[0055] 1. 基于视觉的相机重定位又需要当前相机与参考图像具有初始共视区域。但由于微观尺度区域极小,初始共视区域极难保障,因此导致现有的主动相机重定位方法无法适用于微观尺度。而本发明基于尺度接力策略有效解决了上述难题,使微观尺度下的相机重定位成为可能。

[0056] 2. 本发明在主动相机重定位过程中,通过尺度接力的方式实现从宏观尺度到微观

尺度的逐层递进的重定位,无需对相机进行内参标定,避免了连续变焦相机标定难题。

[0057] 3.本发明提面向微观尺度的主动相机重定位方法利用尺度接力策略通过机械平台可自动将当前相机恢复至历史微观图像拍摄相同位姿,获取空间一致的微观图像数据;本发明首次实现了目标表面微观尺度下的相机精确重定位,可有效支撑高值目标的精细化感知任务(如微变检测、身份识别等)。

## 附图说明

[0058] 图1为一种面向微观尺度的主动相机重定位方法流程图

[0059] 图2为微观尺度下相机重定位实例图

[0060] 图3为本方法和现有最优方法在微观尺度下相机重定位精度比较 (AFD值)

[0061] 图4为本方法和现有最优方法在宏观尺度下相机重定位精度比较 (AFD值)

## 具体实施方式

[0062] 下面结合附图对本发明中的技术方案进行清楚、完整地描述。基于本发明中的技术方案,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它实施例,都属于本发明保护的范围。

[0063] 本发明提供了一种面向微观尺度的主动相机重定位方法,包括如下内容

[0064] 1.一种面向微观尺度的主动相机重定位方法

[0065] 该重定位方法通过宏观到微观的相机重定位接力策略,不断减小观测尺度,最终实现微观尺度下的相机重定位。所述方法包括以下步骤:

[0066] 步骤一:初始化:给定历史参考拍摄图像集  $\mathcal{J}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ ,其中K表示尺度总数量。 $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$ 为最宏观尺度拍摄图像, $\mathbf{I}_K^{\text{ref}}$ 为最微观尺度拍摄图像。机械平台搭载相机,人工调整机械平台保证当前相机与图像 $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$ 有重合视角。构建指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ ( $\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4$ 分别为左上、右上、左下、右下四个顶点坐标)。设置k=1表示尺度索引,j=1表示某尺度下相机调整次数的索引;

[0067] 步骤二:导航框生成:获取当前相机图像并命名为 $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ ,表示第k个尺度下第j次调整时当前相机图像。根据 $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ 和参考图像 $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$ 生成导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ ( $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$ 为四个顶点坐标);

[0068] 步骤三:导航方向和步长生成:根据导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ 和指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ 生成相机六自由度导航方向( $w_{k,j}^{\text{rx}}, w_{k,j}^{\text{ry}}, w_{k,j}^{\text{rz}}, w_{k,j}^{\text{tx}}, w_{k,j}^{\text{ty}}, w_{k,j}^{\text{tz}}$ )与导航步长( $s_{k,j}^{\text{rx}}, s_{k,j}^{\text{ry}}, s_{k,j}^{\text{rz}}, s_{k,j}^{\text{tx}}, s_{k,j}^{\text{ty}}, s_{k,j}^{\text{tz}}$ ),其中rx、ry、rz分别表示x、y、z三个轴旋转自由度,tx、ty、tz分别表示x、y、z三个轴的平移自由度;

[0069] 步骤四:相机位姿调整:根据导航方向与导航步长驱动机械平台调整相机空间位姿;

[0070] 步骤五:若导航框不满足收敛条件,j=j+1,跳至步骤二,否则跳至步骤六;

[0071] 步骤六:若当前为最小拍摄尺度,即k=K,则重定位完成;否则,令j=1,k=k+1,进

入下一尺度,跳至步骤二。

[0072] 1) 初始化: 给定历史参考拍摄图像集  $\mathcal{I}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ , 其中K表示尺度总数量。 $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$  为最宏观尺度拍摄图像,  $\mathbf{I}_K^{\text{ref}}$  为最微观尺度拍摄图像。机械平台搭载相机, 人工调整机械平台保证当前相机与图像  $\mathbf{I}_1^{\text{ref}}$  有重合视角。构建指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  ( $\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4$  分别为左上、右上、右下、左下四个顶点坐标)。设置  $k=1$  表示尺度索引,  $j=1$  表示某尺度下相机调整次数的索引。

[0073] 说明1: 参考图像集合的获取

[0074] 对需要重定位的部分进行多尺度的拍摄。每次先从尺度  $k=K$  (即为最终需要完成相机重定位的微观尺度) 进行拍摄图像得到  $\mathbf{I}_K^{\text{ref}}$ , 然后逐步减小相机放大倍数 ( $k=k-1$ ) 并拍摄对应的图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$ , 直到  $k=1$  为止, 最终构成参考拍摄图像集  $\mathcal{I}^{\text{ref}} = \{\mathbf{I}_1^{\text{ref}}, \dots, \mathbf{I}_K^{\text{ref}}\}$ 。在实际应用中, 三个尺度 ( $K=3$ ) 即可满足后续尺度接力重定位的需求。

[0075] 2) 导航框生成: 获取当前相机图像并命名为  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$ , 表示第  $k$  个尺度下第  $j$  次调整时当前相机图像。根据  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$  生成导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$  ( $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$  为四个顶点坐标)。

[0076] (1) 对当前图像  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$  进行特征提取及特征匹配得到一系列匹配点对  $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$ , 其中  $i$  为匹配点对的索引;

[0077] (2) 根据所有匹配点对  $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$  计算单应矩阵  $H_{k,j}$ ;

[0078] (3) 用单应矩阵  $H_{k,j}$  对指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  进行变换得到导航框  $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ 。

[0079] 说明2: 特征提取及匹配方法

[0080] 本发明采用图像角点特征来实现图像间的特征提取及匹配, 如SIFT特征、ORB特征等均可。

[0081] 说明3: 单应矩阵  $H_{k,j}$  的计算

[0082] 单应矩阵可以将一个二维或三维空间中的点映射到另一个二维或三维空间中的点, 它描述了两个平面之间的映射关系。对于一个平面内的点, 它们的单应矩阵是唯一的, 在二维情况下, 单应矩阵是一个  $3 \times 3$  的矩阵。单应矩阵可通过两幅图像获取的一系列匹配点对进行计算, 该过程属于已有工作, 不在本发明的保护范围。在本发明所述方法中, 本发明利用前图像  $\mathbf{I}_{k,j}^{\text{cur}}$  和参考图像  $\mathbf{I}_k^{\text{ref}}$  计算得到的匹配点对  $\langle \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{ref}}, \mathbf{p}_{k,j,i}^{\text{cur}} \rangle$  来计算单应矩阵  $H_{k,j}$ 。

[0083] 说明4: 指示框  $\mathcal{B}$  和导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  的生成

[0084] 指示框  $\mathcal{B}$  可看作是参考图像拍摄时的位姿状态, 导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  可看作是当前时刻相机位姿状态, 相机重定位过程可看作是通过调整当前相机位姿使得导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  和指示框  $\mathcal{B}$  逐渐重合的过程。指示框  $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$  保持固定不变, 因此在本发明中设置其为

$\mathbf{b}^1 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^2 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^3 = \left[ \frac{w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{b}^4 = \left[ \frac{3w}{4}, \frac{3h}{4}, 1 \right]^T$ , 其中w和h分别表示图像宽高。上标T表示转置操作。

[0085] 对于导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ 来说, 变量k和j分别表示第k个尺度下第j次相机位姿调整时刻, 此外 $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$ 分别表示导航框左上角坐标、右上角坐标、右下角坐标、左下角坐标。 $\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4$ 可通过指示框 $\mathcal{B}$ 中坐标经单应矩阵 $\mathbf{H}_{k,j}$ 变换得到。

[0086] 计算变换坐标的具体方法是:

$$[0087] \quad \mathbf{d}_{k,j}^m = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^m,$$

[0088] 其中,  $1 \leq m \leq 4$ 。由上式便可计算出导航框 $\mathcal{R}$ 所有顶点坐标。注意, 上式中 $\mathbf{b}^m$ 和 $\mathbf{d}_{k,j}^m$ 均表示齐次坐标。

[0089] 3) 导航方向和步长生成: 根据导航框 $\mathcal{R}_{k,j} = \{\mathbf{d}_{k,j}^1, \dots, \mathbf{d}_{k,j}^4\}$ 和指示框 $\mathcal{B} = \{\mathbf{b}^1, \dots, \mathbf{b}^4\}$ 。

生成相机六自由度导航方向 $(w_{k,j}^{rx}, w_{k,j}^{ry}, w_{k,j}^{rz}, w_{k,j}^{tx}, w_{k,j}^{ty}, w_{k,j}^{tz})$ 与导航步长

$(s_{k,j}^{rx}, s_{k,j}^{ry}, s_{k,j}^{rz}, s_{k,j}^{tx}, s_{k,j}^{ty}, s_{k,j}^{tz})$ , 其中rx、ry、rz分别表示x、y、z三个轴旋转自由度, tx、ty、tz分别表示x、y、z三个轴的平移自由度。

[0090] (1) 三个平移自由度导航方向 $w_{k,j}^{tx}$ 、 $w_{k,j}^{ty}$ 、 $w_{k,j}^{tz}$ 的计算: 令导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 和指示框 $\mathcal{B}$ 的中心坐标分别为 $\mathbf{d}_{k,j}^c$ 和 $\mathbf{b}^c$ , 分别利用 $\mathbf{d}_{k,j}^c$ 和 $\mathbf{b}^c$ 在x、y轴坐标的差计算x、y轴平移自由度导航方向 $w_{k,j}^{tx}$ 和 $w_{k,j}^{ty}$ , 利用 $\mathcal{R}_{k,j}$ 和 $\mathcal{B}$ 围成区域的面积差来计算z轴平移自由度的导航方向 $w_{k,j}^{tz}$ 。

[0091] (2) 三个旋转自由度导航方向 $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ 的计算: 分别根据导航框 $\mathcal{R}_{k,j}$ 上下边长长度差、左右边长长度差、 $\mathcal{R}_{k,j}$ 的左右边中点的纵坐标差来分别计算三个旋转自由度的导航方向 $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ 。

[0092] (3) 三个平移自由度导航步长 $s_{k,j}^{tx}$ 、 $s_{k,j}^{ty}$ 、 $s_{k,j}^{tz}$ 的计算: 如果为当前尺度下的第一次平移运动, 即j=1时, 那么给定一个初始平移步长 $s_k^{tra}$ , 并令 $s_{k,j}^{tx} = s_{k,j}^{ty} = s_{k,j}^{tz} = s_k^{tra}$ ; 否则, 本发明根据导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整平移步长, 具体有:

$$[0093] \quad s_{k,j}^{tx} = s_{k,j-1}^{tx} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^c(1) - \mathbf{b}^c(1)}{\mathbf{d}_{k,j}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j-1}^c(1)} \right|,$$

$$[0094] \quad s_{k,j}^{ty} = s_{k,j-1}^{ty} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^c(2) - \mathbf{b}^c(2)}{\mathbf{d}_{k,j}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j-1}^c(2)} \right|,$$

$$[0095] \quad s_{k,j}^{tz} = s_{k,j-1}^{tz} \left| \frac{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{B})}{\text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j-1})} \right|,$$

[0096] 其中Area( $\cdot$ )表示计算面积的函数, 符号(1)和(2)表示对应向量的第1和第2个元素。

[0097] (4) 三个旋转自由度导航步长  $s_{k,j}^{rx}$ 、 $s_{k,j}^{ry}$ 、 $s_{k,j}^{rz}$  的计算: 如果为当前尺度下的第一次平移运动, 即  $j=1$  时, 那么给定一个初始旋转步长  $s_k^{rot}$ , 并令  $s_{k,j}^{rx} = s_{k,j}^{ry} = s_{k,j}^{rz} = s_k^{rot}$ ; 否则, 本发明根据导航框在上次相机调整后的变化来自适应估计当前时刻相机调整旋转步长, 具体有:

$$[0098] \quad s_{k,j}^{rx} = s_{k,j-1}^{rx} \left| \frac{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - 1}{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - \|\mathbf{d}_{k,j-1}^1 - \mathbf{d}_{k,j-1}^2\| / \|\mathbf{d}_{k,j-1}^3 - \mathbf{d}_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$[0099] \quad s_{k,j}^{ry} = s_{k,j-1}^{ry} \left| \frac{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^2 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - 1}{\|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j}^2 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| - \|\mathbf{d}_{k,j-1}^1 - \mathbf{d}_{k,j-1}^3\| / \|\mathbf{d}_{k,j-1}^2 - \mathbf{d}_{k,j-1}^4\|} \right|,$$

$$[0100] \quad s_{k,j}^{rz} = s_{k,j-1}^{rz} \left| \frac{\mathbf{d}_{k,j}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - 1}{|\mathbf{d}_{k,j}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j-1}^L(2) / \mathbf{d}_{k,j-1}^R(2)|} \right|,$$

[0101] 其中符号  $\|\cdot\|$  表示求向量的模, 即向量的长度,  $\mathbf{d}_{k,j}^L$  和  $\mathbf{d}_{k,j}^R$  分别表示导航框左边框和右边框的中点坐标, 即有  $\mathbf{d}_{k,j}^L = \frac{\mathbf{d}_{k,j}^1 + \mathbf{d}_{k,j}^3}{2}$  和  $\mathbf{d}_{k,j}^R = \frac{\mathbf{d}_{k,j}^2 + \mathbf{d}_{k,j}^4}{2}$ 。上式利用导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  上下边长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的 x 轴旋转步长  $s_{k,j}^{rx}$ , 利用导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  左右边长在上次调整后的比例变化来推断出当前时刻最优的 y 轴旋转步长  $s_{k,j}^{ry}$ , 利用导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  左右边长中点在上次调整后的纵坐标比例变化来推断出当前时刻最优的 z 轴旋转步长  $s_{k,j}^{rz}$ 。

[0102] 说明5: 六个自由度导航方向的计算

[0103] 对于三个平移自由度导航方向, 计算如下所示,

$$[0104] \quad x \text{轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{tx} = \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) > \tau_{tx} \\ 1, & \mathbf{b}^c(1) - \mathbf{d}_{k,j}^c(1) < -\tau_{tx}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$[0105] \quad y \text{轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{ty} = \begin{cases} -1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) > \tau_{ty} \\ 1, & \mathbf{b}^c(2) - \mathbf{d}_{k,j}^c(2) < -\tau_{ty}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$[0106] \quad z \text{轴平移自由度方向 } w_{k,j}^{tz} = \begin{cases} 1, & \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) > \tau_{tz} \\ -1, & \text{Area}(\mathcal{B}) - \text{Area}(\mathcal{R}_{k,j}) < -\tau_{tz}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

[0107] 其中,  $\mathbf{b}^c$  和  $\mathbf{d}_{k,j}^c$  分别表示指示框  $\mathcal{B}$  和导航框  $\mathcal{R}_{k,j}$  中心点坐标, 即

$\mathbf{b}^c = \left[ \frac{\mathbf{b}^1 + \mathbf{b}^4}{2}, 1 \right]^T$ ,  $\mathbf{d}_{k,j}^c = \mathbf{H}_{k,j} \mathbf{b}^c$ 。  $\tau_{tx}$ ,  $\tau_{ty}$ ,  $\tau_{tz}$  分别代表对应平移自由度判断收敛的阈值, 在实验中取5。

[0108] 对于三个旋转自由度导航方向, 计算如下所示,

$$[0109] \quad x\text{轴旋转自由度方向} w_{k,j}^{rx} = \begin{cases} 1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| > \tau_{rx} \\ -1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^1 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^4\| < -\tau_{rx}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$[0110] \quad y\text{轴旋转自由度方向} w_{k,j}^{ry} = \begin{cases} 1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| > \tau_{ry} \\ -1, & \|\mathbf{d}_{k,j}^4 - \mathbf{d}_{k,j}^2\| - \|\mathbf{d}_{k,j}^3 - \mathbf{d}_{k,j}^1\| < -\tau_{ry}, \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$[0111] \quad z\text{轴旋转自由度方向} w_{k,j}^{rz} = \begin{cases} 1, & \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) > \tau_{rz} \\ -1, & \mathbf{d}_{k,j}^R(2) - \mathbf{d}_{k,j}^L(2) < -\tau_{rz}, \text{其中} \tau_{rx}, \tau_{ry}, \tau_{rz} \text{分别代} \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

表对应旋转自由度判断收敛的阈值,在实验中取5。

[0112] 4) 相机位姿调整:根据导航方向与导航步长驱动机械平台调整相机空间位姿。

[0113] 根据已计算的导航方向 ( $w_{k,j}^{rx}$ 、 $w_{k,j}^{ry}$ 、 $w_{k,j}^{rz}$ 、 $w_{k,j}^{tx}$ 、 $w_{k,j}^{ty}$ 、 $w_{k,j}^{tz}$ ) 与导航步长 ( $s_{k,j}^{rx}$ 、 $s_{k,j}^{ry}$ 、 $s_{k,j}^{rz}$ 、 $s_{k,j}^{tx}$ 、 $s_{k,j}^{ty}$ 、 $s_{k,j}^{tz}$ ) 来指导机械平台进行位姿调整。在实际应用中,x轴平移自由度和y轴旋转自由度的导航、y轴平移自由度和x轴旋转自由度的导航间会存在歧义性。具体来说,以x轴平移自由度和y轴旋转为例,当y轴发生旋转时,除了会导致导航框左右边长发生变化外,也会导致导航框中心坐标发生偏移,因此此时本发明无法判断是否存在x轴平移上的位姿差异。同理,当x轴旋转发生旋转运动时,本发明也无法判断y轴是否存在平移运动。为解决上述歧义问题,本发明采用先旋转再平移的相机位姿调整策略,即当y轴旋转导航方向不为0时,本发明不对x轴平移进行调整,同样在x轴旋转导航方向不为0时本发明也不对y轴平移进行调整。因此最终机械平台在六个自由度下的运动调整量如下:

$$[0114] \quad x\text{轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{tx} s_{k,j}^{tx}, & \text{如果} w_{k,j}^{ry} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$[0115] \quad y\text{轴平移自由度调整量} = \begin{cases} w_{k,j}^{ty} s_{k,j}^{ty}, & \text{如果} w_{k,j}^{rx} = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases},$$

$$[0116] \quad z\text{轴平移自由度调整量} = w_{k,j}^{tz} s_{k,j}^{tz},$$

$$[0117] \quad x\text{轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{rx} s_{k,j}^{rx},$$

$$[0118] \quad y\text{轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{ry} s_{k,j}^{ry},$$

$$[0119] \quad z\text{轴旋转自由度调整量} = w_{k,j}^{rz} s_{k,j}^{rz}, :$$

[0120] 5) 若导航框不满足收敛条件,  $j = j+1$ , 跳至步骤二, 否则跳至步骤六。

[0121] 在上一步对相机位姿进行调整后,判断导航框是否满足收敛条件,当六个自由度的导航方向均为0时,说明导航框与指示框已高度重合,该尺度下的相机重定位完成。具体来说,当  $w_{k,j}^{rx} = 0$  且  $w_{k,j}^{ry} = 0$  且  $w_{k,j}^{rz} = 0$  且  $w_{k,j}^{tx} = 0$  且  $w_{k,j}^{ty} = 0$  且  $w_{k,j}^{tz}$  时,达到收敛条件,跳至步骤六,否则说明该尺度下的重定位未完成,  $j = j+1$ , 并跳至步骤二继续进行迭代调整。

[0122] 6) 若当前为最小拍摄尺度,即 $k=K$ ,则重定位完成;否则,令 $j=1, k=k+1$ ,进入下一尺度,跳至步骤二。

[0123] 若当前尺度已达到重定位要求的最微观尺度,即满足 $k=K$ ,说明已对最微观尺度下的参考图像完成了相机重定位,整个算法流程结束,输出即为当前相机图像 $I_{k,j}^{cur}$ 。在实际应用中,本发明通常采用3个尺度( $K=3$ )进行接力即可满足微观尺度重定位需求。

[0124] 2、可行性验证

[0125] 下面结合具体实例对本发明方法进行可行性验证,详见下文描述:

[0126] 本发明共对10个场景进行了对比实验,这些场景涉及电子烟壳、瓷器、青铜器、酒瓶4类目标。对于每个场景,本发明采集3个不同尺度的图像(即 $K=3$ )构建参考图像集合 $J^{ref} = \{I_1^{ref}, \dots, I_K^{ref}\}$ ,并利用本发明方法进行尺度接力的重定位实验。其中最微观拍摄范围约在1毫米左右。本发明采用珞石(Rokae)Xmate ER7机械臂作为机械平台搭载相机。

[0127] 本发明选取特征点平均距离(AFD)作为评价重定位效果的指标。具体来说,本发明对参考图像和重定位完成的图像做特征匹配,所有匹配点对间的欧氏距离平均值即为AFD值。AFD值越小表示重定位精度越高。

[0128] 图3展示了本发明方法和现有最优的相机重定位方法(Active Camera Relocalization from a Single Reference Image without Hand-Eye Calibration)在上述实验设置下的比较,由于现有方法一方面需要准确的相机内参标定且无法有效地对微观尺度图像进行重定位,因此其在重定位过程中始终无法收敛,重定位失败。而本发明方法依靠尺度接力策略且依靠无需相机标定的特点可成功实现对微观尺度参考图像的相机精确重定位。

[0129] 由于现有方法主要设计用于宏观尺度的相机重定位,因此为了更公平的比较,本发明也在宏观尺度下对本发明方法和现有方法进行了比较。实验设置与微观下相机重定位实验类似,共在10个不同场景下进行了测试(拍摄范围约30厘米),区别在于在宏观尺度下本发明方法无需尺度接力,仅需构建一个尺度的参考图像即可。图4展示了上述实验结果,本发明方法与已有最优方法的重定位精度近似,说明了本发明方法不仅可以有效解决微观尺度下的相机重定位难题,也可以用在一般情况下的宏观尺度场景相机重定位,具有极好的普适性和优越性。

[0130] 本说明书中的各个实施例均采用递进的方式描述,各个实施例之间相同相似的部分互相参见即可,每个实施例重点说明的都是与其它实施例的不同之处。尤其,对于系统实施例而言,由于其基本相似于方法实施例,所以描述得比较简单,相关之处参见方法实施例的部分说明即可。以上所描述的系统实施例仅仅是示意性的,其中所述作为分离部件说明的单元及模块可以是或者也可以不是物理上分开的。另外,还可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元和模块来实现本实施例方案的目的。本领域普通技术人员在不付出创造性劳动的情况下,即可以理解并实施。

[0131] 以上公开的仅为本发明的优选实施方式,但本发明并非局限于此,任何本领域的技术人员能思之的没有创造性的变化,以及在不脱离本发明原理前提下所作的若干改进和润饰,都应落在本发明的保护范围内。

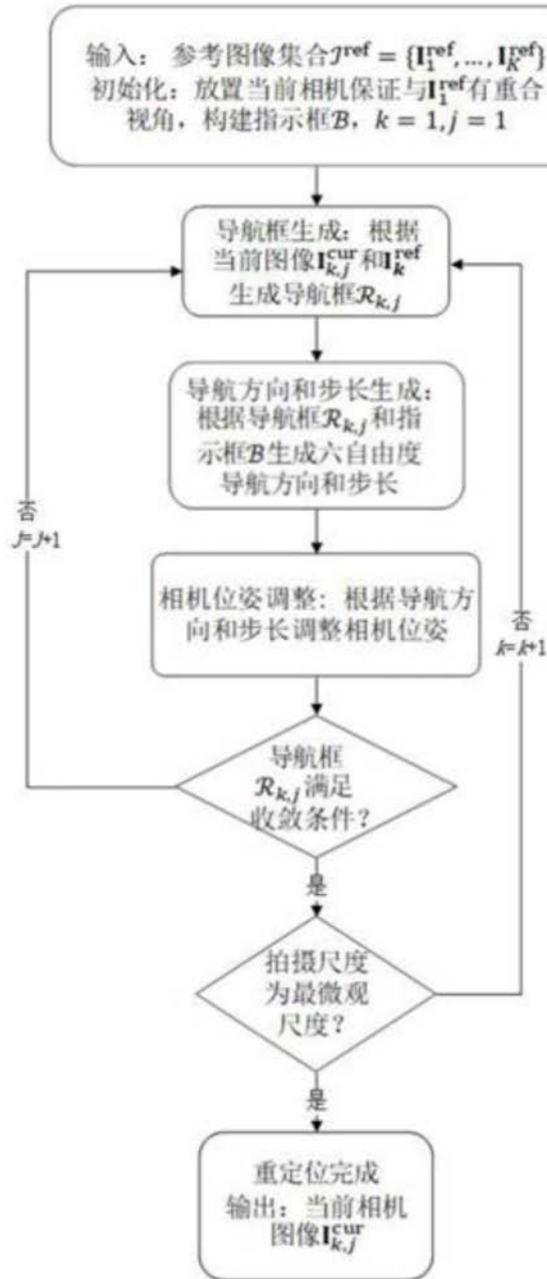


图1

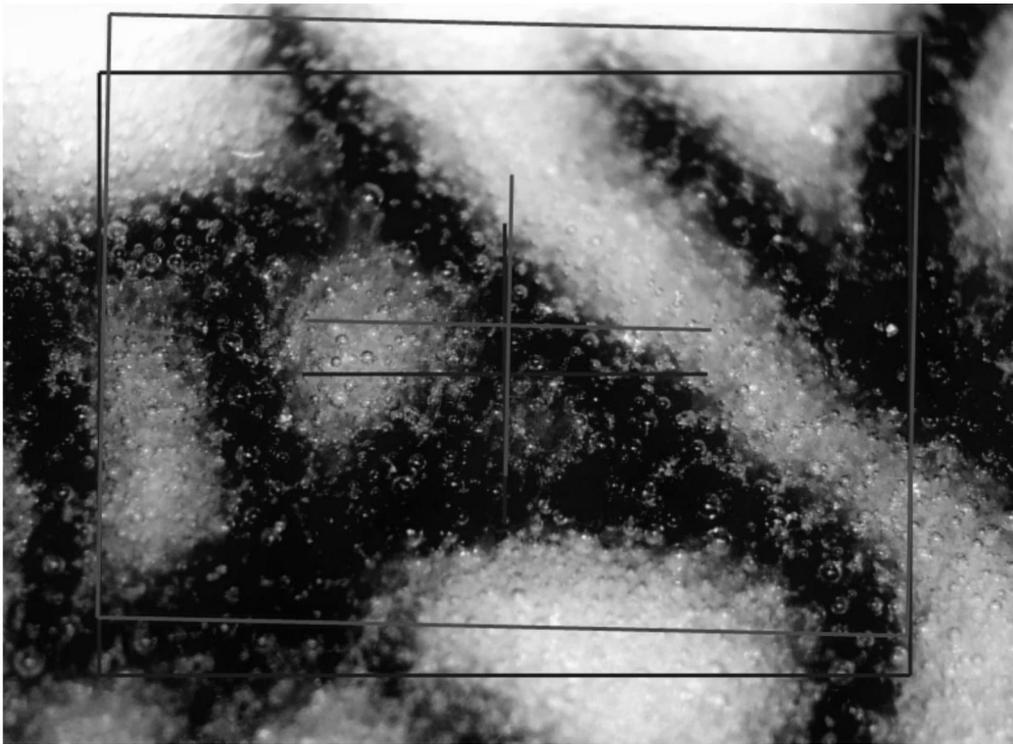


图2

| 场景     | S1           | S2           | S3           | S4           | S5           | S6           | S7           | S8           | S9           | S10          |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 现有最优方法 | 失效           |
| 本专利方法  | <b>1.532</b> | <b>1.378</b> | <b>1.024</b> | <b>0.979</b> | <b>0.995</b> | <b>1.649</b> | <b>1.215</b> | <b>1.106</b> | <b>1.362</b> | <b>1.474</b> |

图3

| 场景     | S1           | S2           | S3           | S4           | S5           | S6           | S7           | S8           | S9           | S10          |
|--------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 现有最优方法 | <b>1.015</b> | 1.353        | <b>0.964</b> | 1.583        | 0.933        | <b>1.264</b> | <b>0.794</b> | 1.155        | <b>1.356</b> | <b>1.406</b> |
| 本专利方法  | 1.211        | <b>1.281</b> | 1.023        | <b>1.177</b> | <b>0.874</b> | 1.521        | 0.928        | <b>0.975</b> | 1.411        | 1.532        |

图4