



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 117745844 A

(43) 申请公布日 2024. 03. 22

(21) 申请号 202311780173.5

(22) 申请日 2023.12.22

(71) 申请人 西北工业大学

地址 710072 陕西省西安市碑林区友谊西路127号

(72) 发明人 魏祥智 史经纬 周莉 张晓博
王占学 邓文剑 肖洪 黄盛

(74) 专利代理机构 西安凯多思知识产权代理事务
所(普通合伙) 61290

专利代理师 云燕春

(51) Int. Cl.

G06T 7/80 (2017.01)

G06T 7/73 (2017.01)

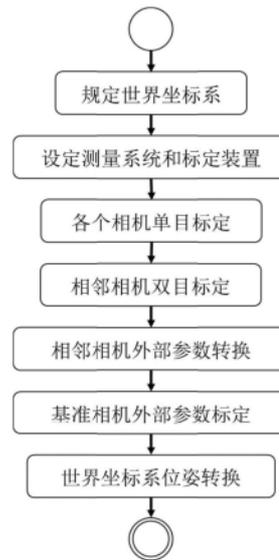
权利要求书2页 说明书8页 附图4页

(54) 发明名称

一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法及系统

(57) 摘要

本发明一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法及系统,属于流动显示和测量领域;方法步骤为:定义世界坐标系;布置测量系统和标定装置;对各个相机进行单目标定,得到每个相机的内部参数;对相邻相机进行双目标定,得到相邻相机的相对外部参数;通过对相邻相机的相对外部参数转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿;对基准相机的外部参数标定,即标定基准相机在世界坐标系中的外部参数;计算所有相机在世界坐标系中的位置和姿态,结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系,完成多相机标定。本发明解决了现有技术中大夹角布置时多相机外部参数标定精度较低,单方向关联转换误差过度累加,整体误差偏大的问题。



1. 一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于具体步骤如下:
 定义世界坐标系;
 布置测量系统和标定装置;所述测量系统为多台相机,标定装置为带有标定图案的多个标定板;
 对各个相机进行单目标定,得到每个相机的内部参数;
 基于每个相机的内部参数,对相邻相机进行双目标定,得到相邻相机的相对外部参数;
 通过对相邻相机的相对外部参数转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿;
 基于相机的内部参数,对基准相机的外部参数标定,即标定基准相机在世界坐标系中的外部参数;
 基于基准相机在世界坐标系中的外部参数,计算基准相机在世界坐标系中的位姿;进而将基准相机坐标系中各个相机的位姿转换至世界坐标系,得到所有相机在世界坐标系中的位置和姿态,结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系,完成多相机标定。
2. 根据权利要求1所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述世界坐标系根据所需测量流场区域确定,取流动开始截面中点为原点,流动方向为x轴,再根据右手系原则确定y轴和z轴方向。
3. 根据权利要求1所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述测量系统的多台相机位于同一平面内并沿周向设置,该平面与流体流动方向垂直。
4. 根据权利要求1所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述标定板的标定图案为二维棋盘格,平贴于标定板上;所述棋盘格的单位格尺寸根据测量距离确定,测量距离越大,单位格尺寸越大,测量距离越小,单位格尺寸越小。
5. 根据权利要求1所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述各个相机进行单目标定的方法为,将各标定板分别置于各个相机对焦的背景图案平面处,拍摄随机放置的不同位置、不同姿态的标定图像不少于20张;采用张正友标定法,以标定板平面为X-Y平面,垂直标定板方向为Z方向,建立标定板坐标系,则标定板标定图案的Z坐标均为0,结合标定图案单元格的物理尺寸,得到其角点的坐标 $(X_q, Y_q, 0)$;检测标定图像上的标定图案角点,形成关于成像模型参数的方程组,优化求解即可获得每个相机的内部参数。
6. 根据权利要求5所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述相邻相机进行双目标定的方法为,将标定板置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,此处介于待测流场和背景图案之间,获得相较待测流场处更清晰的标定图像;以共同拍摄的标定板为关联坐标系,将所述每个相机的内部参数作为已知信息,计算相邻相机的相对外部参数。
7. 根据权利要求6所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:进行相邻相机双目标定时,标定板的位置确定与测量系统设置相关,即相邻相机之间的距离越小,标定板越靠近背景板,相邻相机之间的距离越大,标定板越靠近待测流场区域。
8. 根据权利要求7所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,其特征在于:所述获得基准相机坐标系中各个相机的位姿的方法为,通过相邻相机的相对外部参数转换得到基准相机坐标系中的相机位姿, $O_b = O_a R_{ab}^{-1}$, $L_b = L_a - O_b T_{ab}$, 其中, O_a 、 L_a 和 O_b 、 L_b 分别为相

机a和相机b的位姿, R_{ab} 和 T_{ab} 分别为相机a和相机b之间的相对旋转矩阵和相对位移向量;选取位于中间的相机为基准相机,在基准相机坐标系中对所述相邻相机外部参数分别向右和向左依次进行转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿。

9.一种基于三维背景导向纹影的多相机标定系统,其特征在于:包括由多台相机组成的测量系统、由多个标定板组成的标定装置及上位机;用于实施权利要求1-8任一项所述基于三维背景导向纹影的多相机标定方法;

所述多台相机位于同一平面内并沿周向设置,该平面与流体流动方向垂直;

所述标定板上带有标定图案,所述标定图案的单位尺寸根据测量距离确定,测量距离越大,单位尺寸越大,测量距离越小,单位尺寸越小。

所述上位机用于测量数据的采集与处理。

10.根据权利要求9所述一种基于三维背景导向纹影的多相机标定系统,其特征在于:所述上位机包括至少一个处理器,以及所述至少一个处理器通信连接的存储器;其中,所述存储器存储有可被所述至少一个处理器执行的计算机程序,所述计算机程序被所述至少一个处理器执行,以使所述至少一个处理器能够执行所述基于三维背景导向纹影的多相机标定方法。

一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法及系统

技术领域

[0001] 本发明属于流动显示和测量领域,具体涉及一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法及系统。

背景技术

[0002] 背景导向纹影(Background Oriented Schlieren,BOS)因其方法简便、定量计算、无粒子播撒等优点在流场测量领域获得日益广泛的应用。但同传统纹影方法类似,BOS显示的是通过流场光线的积分效果。为了得到流场的三维定量信息,研究人员提出了三维背景导向纹影,在与流动方向垂直的平面内布置多台相机和多个相应的背景图案,从不同角度同时对流动拍摄记录,再使用三维重构算法得到流场三维数据。多相机标定是其中关键的一步,标定结果的精度将直接影响到三维重构流场的准确性。

[0003] 在三维背景导向纹影这类相机布置夹角较大的层析测量系统中,通常难以保证标定板同时被所有相机完整成像。无法仅通过一次标定获得统一世界坐标系中所有相机的外部参数,需要把多相机标定分解为多个相邻相机双目标定。三维背景导向纹影由于其方法的固有限制存在散焦问题,所有相机均聚焦于对应的背景图案而非待测流场区域,使得在待测流场位置拍摄的标定图像相对模糊,给多相机标定带来困难。

[0004] 目前主要有两种标定方法,方法一为:先令所有相机聚焦于待测流场标定其外部参数,再令相机重新聚焦于背景图案前标定内部参数。这种方法的优点为标定板始终位于相机的焦点,能够有效避免散焦问题,但缺点是在重新聚焦的过程中会不可避免地触碰相机,造成外部参数改变。方法二为:保持相机聚焦于背景图案不变,分别将标定板置于背景图案处标定内部参数和待测流场处标定外部参数。这种方法无需重新对焦,但所有相机外部参数的标定都是在成像较为模糊的待测流场处进行的,棋盘格角点探测精度较低。且两种方法在相邻相机外部参数转换中均采用单向转换,多次转换后误差会累积并影响标定精度。随着目前对三维重构流场精度要求不断提高,参与重构的相机数目基本在十二个以上,有必要发展新的基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,减小标定误差。

发明内容

[0005] 要解决的技术问题:

[0006] 为了避免现有技术的不足之处,本发明提供一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,用于计算三维背景导向纹影测量系统中多相机的内部参数及在统一世界坐标系中的外部参数。本发明解决了现有技术中大夹角布置时多相机外部参数标定精度较低,单方向关联转换误差过度累加,整体误差偏大的问题。

[0007] 本发明的技术方案是:一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,具体步骤如下:

[0008] 定义世界坐标系;

[0009] 布置测量系统和标定装置;所述测量系统为多台相机,标定装置为带有标定图案

的多个标定板；

[0010] 对各个相机进行单目标定,得到每个相机的内部参数；

[0011] 基于每个相机的内部参数,对相邻相机进行双目标定,得到相邻相机的相对外部参数；

[0012] 通过对相邻相机的相对外部参数转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿；

[0013] 基于相机的内部参数,对基准相机的外部参数标定,即标定基准相机在世界坐标系中的外部参数；

[0014] 基于基准相机在世界坐标系中的外部参数,计算基准相机在世界坐标系中的位姿；进而将基准相机坐标系中各个相机的位姿转换至世界坐标系,得到所有相机在世界坐标系中的位置和姿态,结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系,完成多相机标定。

[0015] 本发明的进一步技术方案是:所述世界坐标系根据所需测量流场区域确定,取流动开始截面中点为原点,流动方向为x轴,再根据右手系原则确定y轴和z轴方向。

[0016] 本发明的进一步技术方案是:所述测量系统的多台相机位于同一平面内并沿周向设置,该平面与流体流动方向垂直。

[0017] 本发明的进一步技术方案是:所述标定板的标定图案为二维棋盘格,平贴于标定板上;所述棋盘格的单位格尺寸根据测量距离确定,测量距离越大,单位格尺寸越大,测量距离越小,单位格尺寸越小。

[0018] 本发明的进一步技术方案是:所述各个相机进行单目标定的方法为,将各标定板分别置于各个相机对焦的背景图案平面处,拍摄随机放置的不同位置、不同姿态的标定图像不少于20张;采用张正友标定法,以标定板平面为X-Y平面,垂直标定板方向为Z方向,建立标定板坐标系,则标定板标定图案的Z坐标均为0,结合标定图案单元格的物理尺寸,得到其角点的坐标 $(X_q, Y_q, 0)$;检测标定图像上的标定图案角点,形成关于成像模型参数的方程组,优化求解即可获得每个相机的内部参数。

[0019] 本发明的进一步技术方案是:所述相邻相机进行双目标定的方法为,将标定板置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,此处介于待测流场和背景图案之间,获得相较于待测流场处更清晰的标定图像;以共同拍摄的标定板为关联坐标系,将所述每个相机的内部参数作为已知信息,计算相邻相机的相对外部参数。

[0020] 本发明的进一步技术方案是:进行相邻相机双目标定时,标定板的位置确定与测量系统设置相关,即相邻相机之间的距离越小,标定板越靠近背景板,相邻相机之间的距离越大,标定板越靠近待测流场区域。

[0021] 本发明的进一步技术方案是:所述获得基准相机坐标系中各个相机的位姿的方法为,通过相邻相机的相对外部参数转换得到基准相机坐标系中的相机位姿, $O_b = O_a R_{ab}^{-1}$, $L_b = L_a - O_b T_{ab}$,其中, O_a 、 L_a 和 O_b 、 L_b 分别为相机a和相机b的位姿, R_{ab} 和 T_{ab} 分别为相机a和相机b之间的相对旋转矩阵和相对位移向量;选取位于中间的相机为基准相机,在基准相机坐标系中对所述相邻相机外部参数分别向右和向左依次进行转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿。

[0022] 一种基于三维背景导向纹影的多相机标定系统,包括由多台相机组成的测量系统、由多个标定板组成的标定装置及上位机；

[0023] 所述多台相机位于同一平面内并沿周向设置,该平面与流体流动方向垂直；

[0024] 所述标定板上带有标定图案,所述标定图案的单位尺寸根据测量距离确定,测量距离越大,单位尺寸越大,测量距离越小,单位尺寸越小。

[0025] 所述上位机用于测量数据的采集与处理。

[0026] 本发明的进一步技术方案是:所述上位机包括至少一个处理器,以及所述至少一个处理器通信连接的存储器;其中,所述存储器存储有可被所述至少一个处理器执行的计算机程序,所述计算机程序被所述至少一个处理器执行,以使所述至少一个处理器能够执行所述基于三维背景导向纹影的多相机标定方法。

[0027] 有益效果

[0028] 本发明的有益效果在于:应用本发明的基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,在不调节相机焦距的前提下有效避免了散焦问题和外部参数转换过程中误差累加过多,提高了多相机标定精度。引入“基准相机”,将多相机对外部参数标定和世界坐标系相机位姿计算分开,即外部参数标定时标定板可以不位于待测流场处,而是位于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,此处介于待测流场和背景图案之间,具体位置与层析测量系统设置有关,能够获得相较待测流场处更清晰的标定图像。最后只对“基准相机”做与待测流场处的外部参数计算,借助“基准相机”把所有相机外部参数转换至世界坐标系。将标定图像较为模糊的外部参数标定过程由所有相机对减少至一台相机。“基准相机”选取在中间位置,分别向右和向左依次进行多相机外参转换,将误差累加过程缩短为一半。

附图说明

[0029] 图1是根据本发明实施例可选的一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法流程图示意图;

[0030] 图2是根据本发明实施例可选的一种各个相机单目标定实验布置示意图;

[0031] 图3是根据本发明实施例可选的一种相邻相机双目标定实验布置示意图;

[0032] 图4是根据本发明实施例可选的一种基准相机外部参数标定实验布置示意图;

[0033] 图5是根据本发明实施例可选的一种标定板1示意图;

[0034] 图6是根据本发明实施例可选的一种标定板2示意图;

[0035] 图7是根据本发明实施例可选的一种多相机标定结果示意图。

[0036] 附图标记说明:1、基准相机;2、基准相机左侧相机;3、基准相机右侧相机;4、待测流场流动开始截面;5、方格尺寸15mm的标定板1;6、方格尺寸10mm的标定板2;7、印有随机点图案的背景板;8、三维背景导向纹影测量系统实施例中的相机5;9、三维背景导向纹影测量系统实施例中的相机6;10、三维背景导向纹影测量系统实施例中的相机7。

具体实施方式

[0037] 下面通过参考附图描述的实施例是示例性的,旨在用于解释本发明,而不能理解为对本发明的限制。

[0038] 基于现有技术中三维背景导向纹影这类相机标定时,一种方法是标定板始终位于相机的焦点,能够有效避免散焦问题,但缺点是在重新聚焦的过程中会不可避免地触碰相机,造成外部参数改变;另一种方法是所有相机外部参数的标定都是在成像较为模糊的待测流场处进行的,棋盘格角点探测精度较低。且两种方法在相邻相机外部参数转换中均采

用单向转换,多次转换后误差会累积并影响标定精度。因此,本发明提供一种基于三维背景导向纹影的多相机标定方法,将标定板分别置于各个相机对焦的背景图案平面处标定各个相机的内部参数。把多相机标定问题分解为多个相邻相机双目标定,将标定板置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,以共同拍摄的标定板为关联坐标系,计算相邻相机的相对外部参数。选取中间的相机为基准相机,在基准相机坐标系中对相邻相机外部参数分别向右和向左依次进行转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿。将标定板置于待测流场中心处,标定基准相机在标定板坐标系中的外部参数。根据基准相机外部参数以及标定板和世界坐标系原点的相对位置关系,计算基准相机在世界坐标系中的位姿。借助基准相机将各个相机的位姿转换至世界坐标系,得到所有相机在世界坐标系中的位置和姿态,结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系,完成多相机标定。具体步骤如下:

[0039] 步骤一,规定世界坐标系。根据所需测量流场区域,确定世界坐标系原点和坐标轴方向,一般而言,取流动开始截面中点为原点,流动方向为x轴,再根据右手系原则确定y轴和z轴方向。

[0040] 步骤二,设定测量系统和标定装置。固定测量系统的多台相机,使相机分别对焦于对应的背景图案。采用每个格子尺寸已知的二维棋盘格为标定图案,平贴于标定板。为提高标定精度,需要保证格子尺寸准确性,标定板平整度等。

[0041] 具体的,所述测量系统的多台相机位于同一平面内并沿周向设置,该平面与流体流动方向垂直。

[0042] 具体的,所述标定板的标定图案为二维棋盘格,平贴于标定板上;所述棋盘格的单位格尺寸根据测量距离确定,测量距离越大,单位格尺寸越大,测量距离越小,单位格尺寸越小。

[0043] 步骤三,各个相机单目标定。将标定板分别置于各个相机对焦的背景图案平面处,拍摄不同位置,不同姿态的标定图像不少于20张。采用张正友标定法,以标定板平面为X-Y平面,垂直标定板方向为Z方向,建立标定板坐标系,则棋盘格的Z坐标均为0,结合每个格子的物理尺寸,可知其角点的坐标 $(X_q, Y_q, 0)$ 。检测标定图像上的棋盘格角点,形成关于成像模型参数的方程组,优化求解即可获得相机的内部参数。

[0044] 步骤四,相邻相机双目标定。将标定板置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,此处介于待测流场和背景图案之间,具体位置与层析测量系统设置有关,能够获得相较待测流场处更清晰的标定图像。以共同拍摄的标定板为关联坐标系,步骤三所得每个相机内部参数为已知信息,计算相邻相机的相对外部参数。

[0045] 具体的,进行相邻相机双目标定时,标定板的位置确定与测量系统设置相关,即相邻相机之间的距离越小,标定板越靠近背景板,相邻相机之间的距离越大,标定板越靠近待测流场区域。

[0046] 步骤五,相邻相机外部参数转换。通过相邻相机相对外部参数转换得到基准相机坐标系中的相机位姿, $O_b = O_a R_{ab}^{-1}$, $L_b = L_a - O_b T_{ab}$, 其中, O_a 、 L_a 和 O_b 、 L_b 分别为相机a和相机b的位姿, R_{ab} 和 T_{ab} 分别为相机a和相机b之间的相对旋转矩阵和相对位移向量。选取中间的相机为基准相机,在基准相机坐标系中对步骤四所得相邻相机外部参数分别向右和向左依次进行转换,获得基准相机坐标系中各个相机的位姿。

[0047] 步骤六,基准相机外部参数标定。将标定板置于待测流场中心处,步骤三所得基准

相机内部参数为已知信息,标定基准相机在世界坐标系中的外部参数。

[0048] 步骤七,世界坐标系位姿转换。根据基准相机在世界坐标系中的外部参数以及标定板与世界坐标系原点的相对位置关系,计算基准相机在世界坐标系中的位姿。借助基准相机在世界坐标系中的位姿,将基准相机坐标系中各个相机的位姿转换至世界坐标系,得到所有相机在世界坐标系中的位置和姿态,结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系,完成多相机标定。

[0049] 因此,本发明在不调节相机焦距的前提下有效避免了散焦问题,减小重投影误差,避免外部参数转换过程中误差累加过多,提高了多相机标定精度。

[0050] 以下结合附图对上述技术方案作进一步说明:

[0051] 参见图1-图4,基于张正友标定法和双目相机标定原理,将多相机标定问题分解为多个相邻相机双目标定。首先,将标定板分别置于各个相机对焦的背景图案平面处标定各个相机的内部参数。其次,将标定板置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处,以共同拍摄的标定板为关联坐标系,计算相邻相机的相对外部参数。最后,将标定板置于待测流场中心处,标定基准相机在标定板坐标系中的外部参数。

[0052] 本发明方案的具体实施例包含以下步骤。

[0053] 步骤一,规定世界坐标系。根据所需测量流场区域,确定世界坐标系原点和坐标轴方向,一般而言,取流动开始截面中点为原点,流动方向为x轴,再根据右手系原则确定y轴和z轴方向。

[0054] 步骤二,设定测量系统和标定装置。相机数目根据实验需要确定,理论上,数目越多,重构效果越好,但相应的成本和计算量也会增加,通常选择8~24台工业相机。相机到待测流场的距离是背景导向纹影的一个重要问题,距离过近则会导致灵敏度偏低,距离过远则会降低空间分辨率,需要根据具体待测流场范围,结合经验和试验确定。本实施例使用14台工业相机和4块印有随机点图案的背景板,14台工业相机分为4组,与4块背景板共同构成八边形结构,相机到待测流场距离为1000mm。固定测量系统的14台相机,使相机分别对焦于对应的背景板。采用程序生成两种棋盘格图案,均包括 12×9 个正方形,每个正方形尺寸分别为15mm和10mm,平贴于厚10mm的亚克力板上作为标定板1和标定板2。标定板1被置于背景板及附近位置进行标定,标定板2被置于待测流场位置进行标定。

[0055] 步骤三,各个相机单目标定。将标定板1分别置于各个相机对焦的背景板处,拍摄不同位置,不同姿态的标定图像不少于20张,本实施例为35张。标定板最好能完整地出现在采集图像的上、下、左、右各个位置,而非只出现在图像中间,并可以倾斜适当角度,而非全部与背景板平行。采用张正友标定法,以标定板平面为X-Y平面,垂直标定板方向为Z方向,建立标定板坐标系,则棋盘格的Z坐标均为0,结合每个格子的物理尺寸15mm,可知其角点的坐标 $(X_0, Y_0, 0)$ 。此时,由针孔相机成像模型可得:

$$[0056] \quad Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 & 0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = KM \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0057] 其中, Z_c 为尺度因子, (u, v) 为像素坐标, (u_0, v_0) 为图像坐标系原点在像素坐标系

中的坐标, f 为焦距, dx 和 dy 分别为X轴和Y轴方向每个像素的大小, $R \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为旋转矩阵, $T \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为位移向量, K 为相机内部参数矩阵, 由相机本身决定, M 为外部参数矩阵, 与相机的空间位置和旋转姿态有关。检测标定图像上的棋盘格角点, 形成关于成像模型参数的方程组, 优化求解即可获得相机的内部参数。

[0058] 步骤四, 相邻相机双目标定。将标定板1置于距离背景图案最近的相邻相机公共视场处, 以共同拍摄的标定板为关联坐标系, 步骤三所得内部参数为已知信息, 计算相邻相机的相对外部参数。以相机a和b为例:

[0059] 相邻相机a和b同时拍摄同一张标定板在不同位置 and 不同角度的标定图像H组, 以标定板平面为X-Y平面, 垂直标定板方向为Z方向, 建立关联标定板坐标系 $(X_{con}, Y_{con}, Z_{con})$, 由相机成像模型可得:

$$[0060] \quad \begin{bmatrix} u_a \\ v_a \\ 1 \end{bmatrix} = K_a \begin{bmatrix} R_a^h & T_a^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{con}^h \\ Y_{con}^h \\ Z_{con}^h \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$[0061] \quad \begin{bmatrix} u_b \\ v_b \\ 1 \end{bmatrix} = K_b \begin{bmatrix} R_b^h & T_b^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{con}^h \\ Y_{con}^h \\ Z_{con}^h \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0062] 其中, (u_a, v_a) 和 (u_b, v_b) 分别为相机a和相机b的像素坐标, K_a 和 K_b 分别为两台相机的内部参数矩阵, R_a^h 、 T_a^h 和 R_b^h 、 T_b^h 分别为两台相机相对第h ($1 \leq h \leq H$) 组标定板图像的旋转矩阵和位移向量, $(X_{con}^h, Y_{con}^h, Z_{con}^h)$ 为第h组标定板图像的坐标。借助关联标定板坐标系可以求解两台相机之间的相对位置关系, 令 R_{ab}^h 和 T_{ab}^h 为第h组标定靶图像中相机b相对于相机a的旋转矩阵和位移向量:

$$[0063] \quad \begin{bmatrix} R_b^h & T_b^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{ab}^h & T_{ab}^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a^h & T_a^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

[0064] 则:

$$[0065] \quad \begin{bmatrix} R_{ab}^h & T_{ab}^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_b^h & T_b^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_a^h & T_a^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} R_b^h R_a^{h-1} & T_b^h - R_b^h R_a^{h-1} T_a^h \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0066] 即:

$$[0067] \quad \begin{cases} R_{ab}^h = R_b^h R_a^{h-1} \\ T_{ab}^h = T_b^h - R_b^h R_a^{h-1} T_a^h \end{cases} \quad (6)$$

[0068] 对 $R_{ab}^1 \sim R_{ab}^H$ 和 $T_{ab}^1 \sim T_{ab}^H$ 取中值并优化得到相机b相对于相机a的旋转矩阵和位移向量 R_{ab} 和 T_{ab} 。依此类推, 分别对相机b-c、c-d、……, 开展相邻相机双目标定, 依次获得相邻相机的相对外部参数。

[0069] 步骤五, 相邻相机外部参数转换。将相机坐标系转换回世界坐标系以确定相机在世界坐标系中的位置和姿态:

$$[0070] \quad \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

[0071] 其中, $O \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 为位姿旋转矩阵, $L \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ 为位姿位移向量, 组合为相机位姿矩阵 P。显然, 相机位姿矩阵 P 与外部参数矩阵 M 互逆, 即 $P = M^{-1}$, 于是有:

$$[0072] \quad \begin{bmatrix} O & L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} R^{-1} & -R^{-1}T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

[0073] 由式 (6) 和式 (8) 可得:

$$[0074] \quad \begin{cases} O_b = O_a R_{ab}^{-1} \\ L_b = L_a - O_b T_{ab} \end{cases} \quad (9)$$

[0075] 其中, O_a 、 L_a 和 O_b 、 L_b 分别为相机 a 和相机 b 的位姿。式 (9) 通过相邻相机相对外部参数转换得到相机位姿。以相机 a 为基准相机, 分别对相机 a 右侧的 b、c、……和相机 a 左侧的 b'、c'、……, 开展相邻相机相对外部参数转换, 依次获得所有相机在基准相机 a 坐标系中的位姿。本实施例选取相机 6 为基准相机, 分别向左右两侧标定并转换相邻相机, 右侧顺序为: 6-5、5-4、4-3、3-2、2-1, 左侧顺序为: 6-7、7-8、8-9、9-10、10-11、11-12、12-13、13-14。

[0076] 步骤六, 基准相机外部参数标定。将标定板 2 置于待测流场中心处, 步骤三所得基准相机内部参数为已知信息, 标定基准相机在标定板 2 坐标系中的外部参数 R_6 和 T_6 。

[0077] 步骤七, 世界坐标系位姿转换。根据基准相机外部参数 R_6 和 T_6 以及标定板 2 与世界坐标系原点的相对位置关系, 计算基准相机 6 在世界坐标系中的位姿 O_6 、 L_6 。借助基准相机将各个相机的位姿转换至世界坐标系, 得到所有相机在世界坐标系中的位置和姿态, 结合内部参数建立像素坐标系与世界坐标系联系, 完成多相机标定。

[0078] 表 1 给出了本实施例三维背景导向纹影测量系统多相机标定结果, 全部 14 台相机的数据量较大, 因此只列出了相机 5、相机 6 和相机 7 的参数信息。

[0079] 表 1 三维背景导向纹影测量系统多相机标定结果

参数	相机 5	相机 6	相机 7
内参矩阵	$\begin{bmatrix} 10721 & 0 & 1044.9 \\ 0 & 10713 & 994.5 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10759 & 0 & 1311.9 \\ 0 & 10763 & 1079.4 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 11092 & 0 & 1324.0 \\ 0 & 11075 & 1147.0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$
[0080] 旋转矩阵	$\begin{bmatrix} 0.9990 & 0.0066 & 0.0449 \\ 0.0050 & -0.9993 & 0.0365 \\ 0.0451 & -0.0362 & -0.9983 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9998 & 0.0017 & 0.0189 \\ 0.0037 & -0.9941 & -0.1080 \\ 0.0186 & 0.1081 & -0.9940 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9996 & -0.0041 & 0.0277 \\ 0.0099 & -0.8729 & -0.4879 \\ 0.0262 & 0.4880 & -0.8725 \end{bmatrix}$
位移向量	$[-88.6, 28.8, 1047.3]^T$	$[-91.7, -141.7, 1060.3]^T$	$[-87.2, -517.9, 1017.1]^T$
相邻相机 夹角	8.29 °	/	-23.01 °
重投影误差/ pixel	0.2484	0.2517	0.2369

[0081] 图 7 给出了使用多相机标定外部参数所绘制的相机空间位置分布, 待测流场中心为世界坐标系原点。从图中可以看到, 14 台相机分为四组, 每组基本位于同一直线, 分布于

Y-Z平面,相机光轴指向原点。其中相机5到世界坐标原点平面的标定距离(位移向量Z向分量)为1047.3mm,与设计距离1000.0mm基本一致,平均重投影误差约为0.24pixel,相机内部参数也具有较高的标定精度,表明本多相机标定方法能够较为准确地实现大夹角分布的多相机空间位置和旋转姿态求解。

[0082] 为了验证步骤四中“距离背景图案最近的相邻相机公共视场处”能获得相较“待测流场”处精度更高的标定结果,表2给出相机6在两个位置拍摄相同类型标定板和相同标定图像数量时的平均重投影误差对比。可以看到相机6在“距离背景图案最近的相邻相机公共视场处”的平均重投影误差明显更低。

[0083] 表2相机6在不同位置的平均重投影误差

	标定板位置	距离背景图案最近的相邻 相机公共视场处	待测流场处
[0084]	重投影误差 /pixel	0.2517	0.5907

[0085] 尽管上面已经示出和描述了本发明的实施例,可以理解的是,上述实施例是示例性的,不能理解为对本发明的限制,本领域的普通技术人员在不脱离本发明的原理和宗旨的情况下在本发明的范围内可以对上述实施例进行变化、修改、替换和变型。

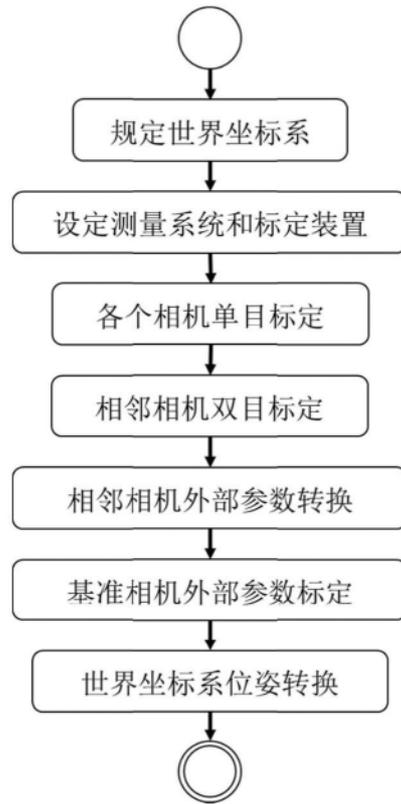


图1

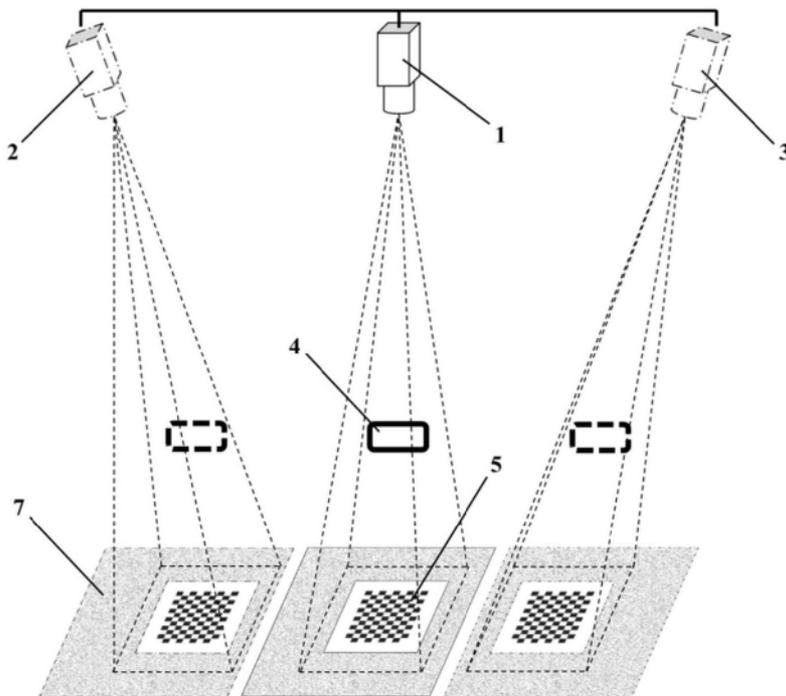


图2

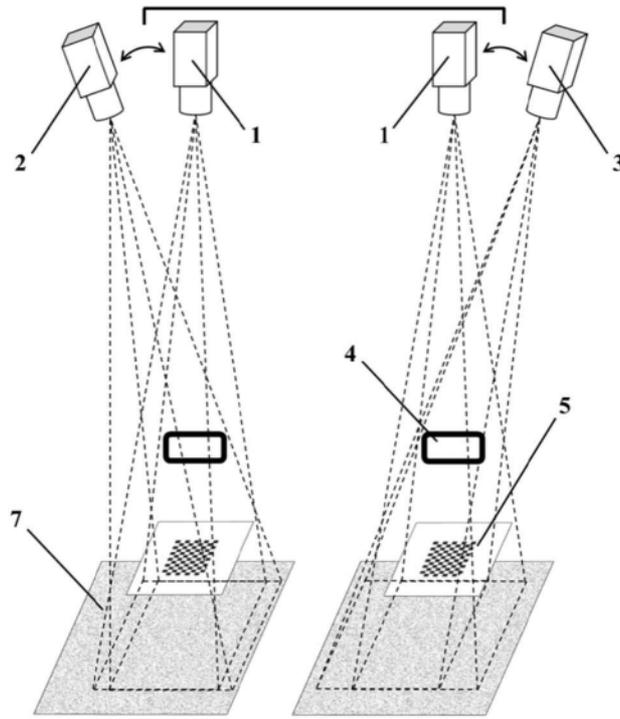


图3

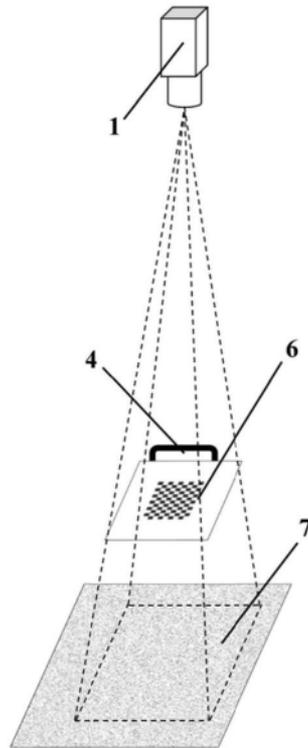


图4

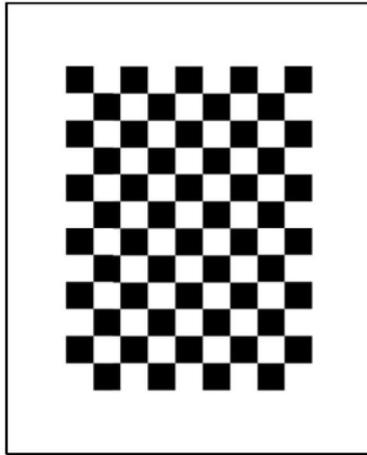


图5

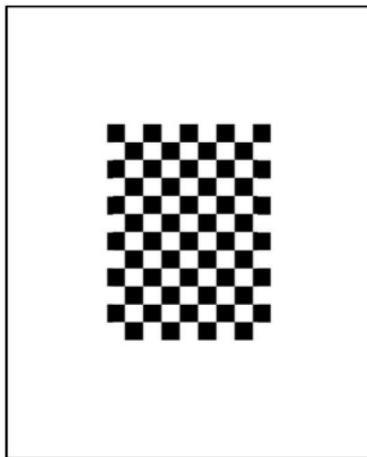


图6

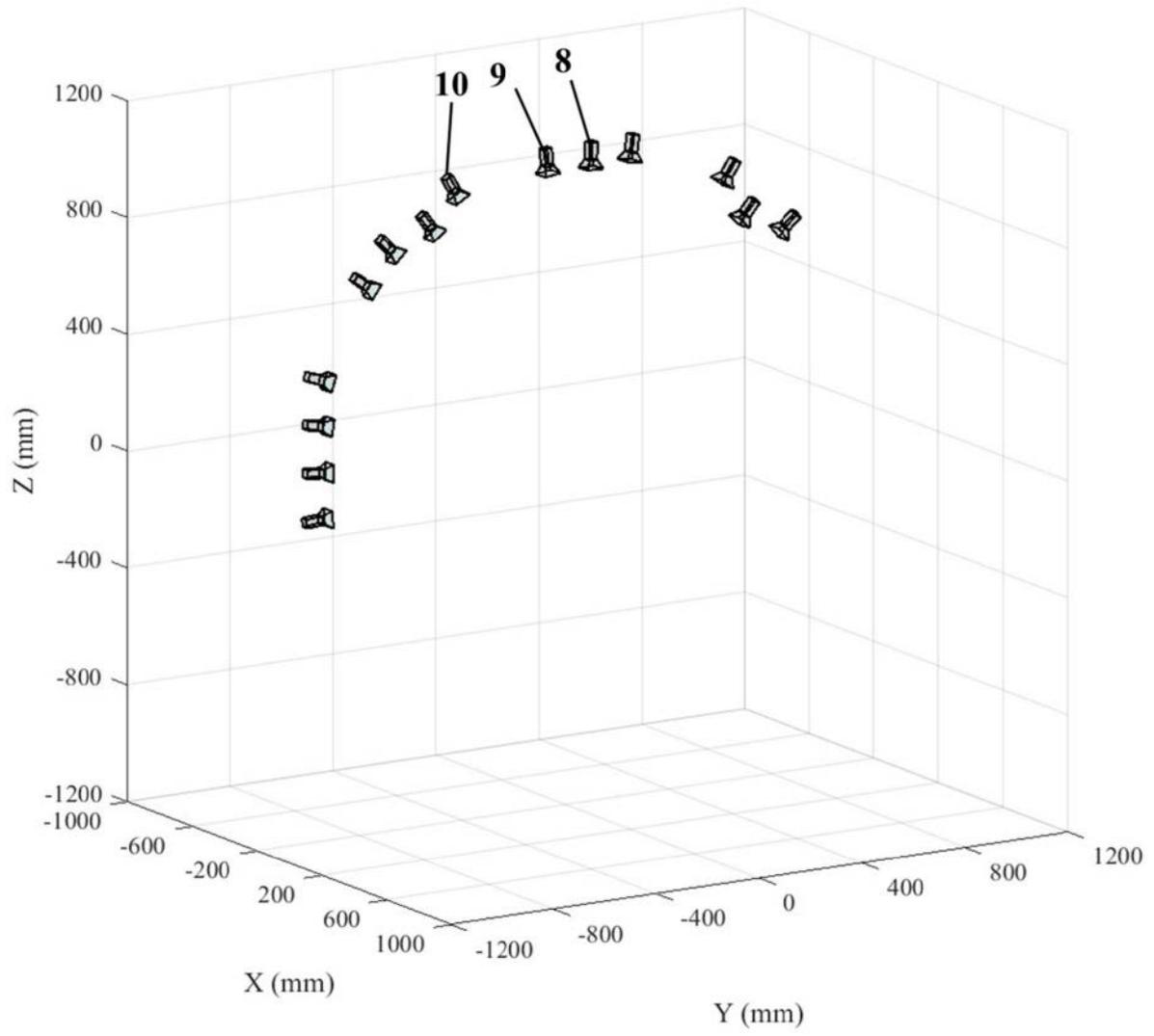


图7