



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 115979231 B

(45) 授权公告日 2023.07.18

(21) 申请号 202310265200.9

G01B 11/00 (2006.01)

(22) 申请日 2023.03.20

(56) 对比文件

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 113580148 A, 2021.11.02

申请公布号 CN 115979231 A

CN 112949098 A, 2021.06.11

CN 115619877 A, 2023.01.17

(43) 申请公布日 2023.04.18

JP 2009097985 A, 2009.05.07

(73) 专利权人 广东工业大学

US 2021088322 A1, 2021.03.25

地址 510060 广东省广州市越秀区东风东
路729号大院

CN 113359461 A, 2021.09.07

US 2012163656 A1, 2012.06.28

(72) 发明人 高健 陈迪赛 罗于恒 张揽宇
郑卓鋆 吴国庆 陈新

康信勇、赵翼翔、陈新. 基于SimMechanics的
六自由度机械臂仿真研究.《机床与液压》.2016,
第第44卷卷(第第23期期),第23-29页.

(74) 专利代理机构 北京集佳知识产权代理有限
公司 11227

审查员 白芸

专利代理师 任文生

(51) Int. Cl.

G01C 15/00 (2006.01)

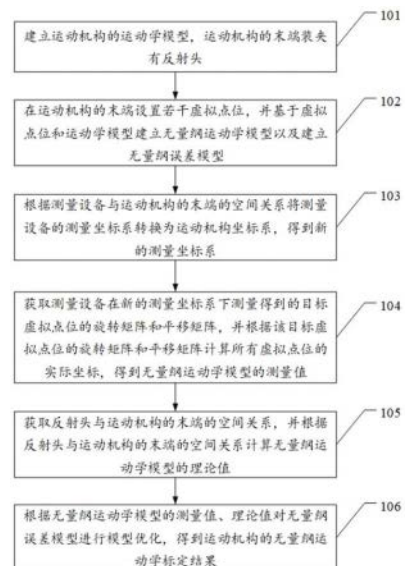
权利要求书4页 说明书13页 附图3页

(54) 发明名称

一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法及其相关装置

(57) 摘要

本申请公开了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法及其相关装置,建立运动机构的运动学模型,在运动机构末端设置若干虚拟点位,以建立无量纲运动学模型和无量纲误差模型;根据测量设备与运动机构末端的空间关系将测量坐标系转换为运动机构坐标系,并获取测量设备在新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,进而计算所有虚拟点位的实际坐标,得到无量纲运动学模型的测量值;根据反射头与运动机构末端的空间关系计算无量纲运动学模型的理论值;根据测量值、理论值对无量纲误差模型进行优化得到标定结果,改善了现有技术在进行运动学标定时,存在的引入过多的装夹误差、断光续接误差,以及标定过程繁琐的技术问题。



1. 一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,其特征在于,包括:

建立运动机构的运动学模型,所述运动机构的末端装夹有反射头;

在所述运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于所述虚拟点位和所述运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;

根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;

获取所述测量设备在所述新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到所述无量纲运动学模型的测量值,所述目标虚拟点位为反射头坐标系的原点;

获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,并根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值;

根据所述无量纲运动学模型的测量值、理论值对所述无量纲误差模型进行模型优化,得到所述运动机构的无量纲运动学标定结果;

所述根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系,包括:

通过测量设备跟踪测量所述运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹;

分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心,并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径;

将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值,得到运动机构原点;

通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点,并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线;

基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系,得到新的测量坐标系;

所述获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,包括:

将运动机构复位,通过所述测量设备测量第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵,所述第一虚拟点位为反射头坐标系的原点;

根据所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系。

2. 根据权利要求1所述的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,其特征在于,所述无量纲运动学模型为:

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4]^T;$$

$$\begin{cases} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_{1x} & \mathbf{p}_{1y} & \mathbf{p}_{1z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 & 0 & 0]^T \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_{2x} & \mathbf{p}_{2y} & \mathbf{p}_{2z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a & 0 & 0]^T \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_{3x} & \mathbf{p}_{3y} & \mathbf{p}_{3z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 & b & 0]^T \\ \mathbf{p}_4 = [\mathbf{p}_{4x} & \mathbf{p}_{4y} & \mathbf{p}_{4z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a & b & 0]^T \end{cases};$$

式中, P 表示无量纲运动学模型, \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 、 \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[\mathbf{p}_{1x} \mathbf{p}_{1y} \mathbf{p}_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{2x} \mathbf{p}_{2y} \mathbf{p}_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{3x} \mathbf{p}_{3y} \mathbf{p}_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{4x} \mathbf{p}_{4y} \mathbf{p}_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标; T_{OT} 为测量点的平移矩阵, R_{OT} 为测量点的旋转矩阵, a 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_2 在反射头坐标系的 x 轴上的距离, b 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_3 在反射头坐标系的 y 轴上的距离。

3. 一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置,其特征在于,包括:

第一建立单元,用于建立运动机构的运动学模型,所述运动机构的末端装夹有反射头;

第二建立单元,用于在所述运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于所述虚拟点位和所述运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;

转换单元,用于根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;

测量单元,用于获取所述测量设备在所述新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到所述无量纲运动学模型的测量值,所述目标虚拟点位为反射头坐标系的原点;

计算单元,用于获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,并根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值;

优化单元,用于根据所述无量纲运动学模型的测量值、理论值对所述无量纲误差模型进行模型优化,得到所述运动机构的无量纲运动学标定结果;

所述转换单元,具体用于:

通过测量设备跟踪测量所述运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹;

分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心,并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径;

将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值,得到运动机构原点;

通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点,并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线;
 基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系,得到新的测量坐标系;
 所述计算单元,具体用于:

将运动机构复位,通过所述测量设备测量第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵,
 所述第一虚拟点位为反射头坐标系的原点;

根据所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵获取所述反射头与所述运动机构的末端的
 空间关系;

根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值。

4. 根据权利要求3所述的基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置,其特征在于,所述无量纲运动学模型为:

$$P = [p_1 \quad p_2 \quad p_3 \quad p_4]^T ;$$

$$\begin{cases} p_1 = [p_{1x} \quad p_{1y} \quad p_{1z}]^T = T_{OT} + R_{OT} [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ p_2 = [p_{2x} \quad p_{2y} \quad p_{2z}]^T = T_{OT} + R_{OT} [a \quad 0 \quad 0]^T \\ p_3 = [p_{3x} \quad p_{3y} \quad p_{3z}]^T = T_{OT} + R_{OT} [0 \quad b \quad 0]^T \\ p_4 = [p_{4x} \quad p_{4y} \quad p_{4z}]^T = T_{OT} + R_{OT} [a \quad b \quad 0]^T \end{cases} ;$$

式中, P 表示无量纲运动学模型, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[p_{1x} \quad p_{1y} \quad p_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标, $[p_{2x} \quad p_{2y} \quad p_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[p_{3x} \quad p_{3y} \quad p_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标, $[p_{4x} \quad p_{4y} \quad p_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标; T_{OT} 为测量点的平移矩阵, R_{OT} 为测量点的旋转矩阵, a 为点 p_1 和点 p_2 在反射头坐标系的 x 轴上的距离, b 为点 p_1 和点 p_3 在反射头坐标系的 y 轴上的距离。

5. 一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定设备,其特征在于,所述设备包括处理器以及存储器;

所述存储器用于存储程序代码,并将所述程序代码传输给所述处理器;

所述处理器用于根据所述程序代码中的指令执行权利要求1-2任一项所述的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法。

6. 一种计算机可读存储介质,其特征在于,所述计算机可读存储介质用于存储程序代码,所述程序代码被处理器执行时实现权利要求1-2任一项所述的基于虚拟点位的无量纲

运动学标定方法。

一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法及其相关装置

技术领域

[0001] 本申请涉及运动学标定技术领域,尤其涉及一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法及其相关装置。

背景技术

[0002] 随着微电子、军工、航空航天等技术的发展,对零件加工精度和复杂度的要求越来越高,以高精密五轴机床、高精度机器人等为代表的多自由度机构备受青睐。但由于制造与装配误差,导致运动机构的实际结构与理论结构存在较大偏差,降低了定位精度。

[0003] 运动学标定是一种能有效提高定位精度的方法,但其非常依赖于准确的标定模型和测量值。现有方法在进行运动机构的运动学标定时,其建模的对象往往是三个位置与三个姿态,由于位置与姿态是不同量纲的数值,导致一起优化时会出现分配不均的问题。而针对此问题提出的无量纲模型需要在末端上测量4点的位置信息,在大范围高精度测量的前提下,往往采用激光跟踪仪进行测量。但现有测量方法在利用4个反射头获取4点位置时,会引入激光跟踪仪的断光续接误差;而利用1个反射头获取4点位置时,会引入机构的重复定位误差或夹具的二次装夹误差,也使得实验流程更加繁琐;另外,这些方法都会引入过多的装夹误差。

发明内容

[0004] 本申请提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法及其相关装置,用于改善现有技术在进行运动学标定时,存在的引入过多的装夹误差、断光续接误差,以及标定过程繁琐的技术问题。

[0005] 有鉴于此,本申请第一方面提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,包括:

[0006] 建立运动机构的运动学模型,所述运动机构的末端装夹有反射头;

[0007] 在所述运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于所述虚拟点位和所述运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;

[0008] 根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;

[0009] 获取所述测量设备在所述新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到所述无量纲运动学模型的测量值,所述目标虚拟点位为反射头坐标系的原点;

[0010] 获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,并根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值;

[0011] 根据所述无量纲运动学模型的测量值、理论值对所述无量纲误差模型进行模型优化,得到所述运动机构的无量纲运动学标定结果。

[0012] 可选的,所述无量纲运动学模型为:

$$\begin{aligned}
 [0013] \quad \mathbf{P} &= [\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_4]^T; \\
 [0014] \quad \begin{cases} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad b \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_4 = [\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad b \quad 0]^T \end{cases};
 \end{aligned}$$

[0015] 式中, \mathbf{P} 表示无量纲运动学模型, \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 、 \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标; \mathbf{T}_{OT} 为测量点的平移矩阵, \mathbf{R}_{OT} 为测量点的旋转矩阵, a 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_2 在反射头坐标系的x轴上的距离, b 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_3 在反射头坐标系的y轴上的距离。

[0016] 可选的,所述根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系,包括:

[0017] 通过测量设备跟踪测量所述运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹;

[0018] 分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心,并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径;

[0019] 将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值,得到运动机构原点;

[0020] 通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点,并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线;

[0021] 基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系,得到新的测量坐标系。

[0022] 可选的,所述获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,包括:

[0023] 将运动机构复位,通过所述测量设备测量所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵,所述第一虚拟点位为反射头坐标系的原点;

[0024] 根据所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系。

[0025] 本申请第二方面提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置,包括:

[0026] 第一建立单元,用于建立运动机构的运动学模型,所述运动机构的末端装夹有反射头;

[0027] 第二建立单元,用于在所述运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于所述虚拟点位和所述运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;

[0028] 转换单元,用于根据测量设备与所述运动机构的末端的空间关系将所述测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;

[0029] 测量单元,用于获取所述测量设备在所述新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到所述无量纲运动学模型的测量值,所述目标虚拟点位为反射头坐标系的原点;

[0030] 计算单元,用于获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系,并根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值;

[0031] 优化单元,用于根据所述无量纲运动学模型的测量值、理论值对所述无量纲误差模型进行模型优化,得到所述运动机构的无量纲运动学标定结果。

[0032] 可选的,所述无量纲运动学模型为:

$$[0033] \quad \mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_4]^T;$$

$$[0034] \quad \begin{cases} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad b \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_4 = [\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad b \quad 0]^T \end{cases};$$

[0035] 式中, \mathbf{P} 表示无量纲运动学模型, \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 、 \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标; \mathbf{T}_{OT} 为测量点的平移矩阵, \mathbf{R}_{OT} 为测量点的旋转矩阵, a 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_2 在反射头坐标系的 x 轴上的距离, b 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_3 在反射头坐标系的 y 轴上的距离。

[0036] 可选的,所述转换单元,具体用于:

[0037] 通过测量设备跟踪测量所述运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹;

[0038] 分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心,并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径;

- [0039] 将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值,得到运动机构原点;
- [0040] 通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点,并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线;
- [0041] 基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系,得到新的测量坐标系。
- [0042] 可选的,所述计算单元,具体用于:
- [0043] 将运动机构复位,通过所述测量设备测量所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵,所述第一虚拟点位为反射头坐标系的原点;
- [0044] 根据所述第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵获取所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系;
- [0045] 根据所述反射头与所述运动机构的末端的空间关系计算所述无量纲运动学模型的理论值。
- [0046] 本申请第三方面提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定设备,所述设备包括处理器以及存储器;
- [0047] 所述存储器用于存储程序代码,并将所述程序代码传输给所述处理器;
- [0048] 所述处理器用于根据所述程序代码中的指令执行第一方面任一种所述的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法。
- [0049] 本申请第四方面提供了一种计算机可读存储介质,所述计算机可读存储介质用于存储程序代码,所述程序代码被处理器执行时实现第一方面任一种所述的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法。
- [0050] 从以上技术方案可以看出,本申请具有以下优点:
- [0051] 本申请提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,包括:建立运动机构的运动学模型,运动机构的末端装夹有反射头;在运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于虚拟点位和运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;根据测量设备与运动机构的末端的空间关系将测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;获取测量设备在新的测量坐标系下测量得到的一个虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到无量纲运动学模型的测量值;获取反射头与运动机构的末端的空间关系,并根据反射头与运动机构的末端的空间关系计算无量纲运动学模型的理论值;根据无量纲运动学模型的测量值、理论值对无量纲误差模型进行模型优化,得到运动机构的无量纲运动学标定结果。
- [0052] 本申请中,通过设置理论的虚拟点位,能够在运动机构进行无量纲运动学标定时,只通过一轮运动与一个反射头获得运动机构末端上的点的位置。由于设置的虚拟点位是理论点,不存在额外的装夹误差,且只需在一轮运动下测量一个反射头,因此避免了在传统方法中引入的断光续接误差与二次装夹误差,以及进行4轮运动的繁琐流程,改善了现有技术在进行运动学标定时,存在的引入过多的装夹误差、断光续接误差,以及标定过程繁琐的技术问题。

附图说明

- [0053] 为了更清楚地说明本申请实施例或现有技术中的技术方案,下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本

申请的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动性的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。

[0054] 图1为本申请实施例提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法的一个流程示意图;

[0055] 图2为本申请实施例提供的一种装夹反射头的五轴机床结构示意图;

[0056] 图3为本申请实施例提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定效果示意图;

[0057] 图4为本申请实施例提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置的一个结构示意图。

具体实施方式

[0058] 为了使本技术领域的人员更好地理解本申请方案,下面将结合本申请实施例中的附图,对本申请实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅是本申请一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本申请中的实施例,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,都属于本申请保护的范围。

[0059] 传统的标定模型包括六个建模对象,即末端的三个位置和三个姿态,但由于位置与姿态的量纲并不一致,导致一起优化时会出现分配不均的问题。而无量纲模型的建模对象为末端多个点的位置,其原理是这些点的位置准确,也就意味着末端的三个姿态也准确。其中,点的数量为4时已被证明能够让模型获得较强的鲁棒性,更多或者更少会使实验流程繁琐或者模型不够稳定。由于其建模对象都是位置,因此避免了传统方法的量纲不一致问题。但是,这也导致了在测量时要在运动机构的同一位形上测量4点位置的问题。为了获得大范围高精度的末端测量值,大多采用激光跟踪仪进行测量。激光跟踪仪根据反射头类型可以测量三自由度信息或六自由度信息,由于只用获取末端的位置信息,可以将三自由度的反射头装在末端,再用激光跟踪仪进行测量即可。若有4个反射头,则需让光线在反射头之间来回切换进行测量;若只有1个反射头,则需让运动机构进行4轮运动,每轮运动下将反射头放置在4个固定位置进行测量;若只有1个反射头并且只想让运动机构进行1轮运动时,那么还可以在每一个位形下将反射头依次放在4个地方进行测量。然而,第一种方法引入了激光跟踪仪的断光续接误差,以常用的激光跟踪仪Leica AT960为例,其测量误差为 $\pm 15\mu\text{m} + 6\mu\text{m}/\text{m}$,而断光续接的误差就有 $\pm 10\mu\text{m}$,若测量距离为3m,那么引入的误差就占据总误差的 $2/5$ 。第二种方法则引入了运动机构本身的重复定位误差,对于常见的工业机器人,该误差就有 $20\mu\text{m}$,而且进行4轮运动也会使实验时间更长。第三种方法则引入了二次装夹误差。另外,这三种方法都会引入4点之间的装夹误差,也需将其考虑到标定模型一起优化,导致了标定过程更加复杂。因此,如何在利用无量纲模型进行运动学标定的情况下,准确且有效得获得末端上4点位置就显得十分重要。

[0060] 为了改善上述问题,本申请提出一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,通过设置理论的虚拟点位,能够在运动机构进行无量纲运动学标定时,只通过一轮运动与一个六自由度反射头获得运动机构末端上的4点位置。由于设置的虚拟点位是理论点,不存在额外的装夹误差,且只需在一轮运动下测量一个六自由度反射头,因此避免了在传统方法中引入的断光续接误差与二次装夹误差,以及进行4轮运动的繁琐流程。

[0061] 本申请通过一个激光跟踪仪与一个反射头,获得运动机构末端上1个虚拟点位的

位置信息,再利用刚体运动相关理论,得到末端上其它虚拟点的位置信息,进而配合无量纲模型进行运动学标定。本申请中运动学标定的流程为先建模后测量,下述流程将以此顺序叙述。为了便于理解,请参阅图1,本申请实施例提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法,包括:

[0062] 步骤101、建立运动机构的运动学模型,运动机构的末端装夹有反射头。

[0063] 可以采用DH(Denavit-Hartenberg)、POE(Product of Exponentials Formula)、CPC等方法建立运动机构的运动学模型,该过程属于现有技术,在此不再进行赘述。本申请实施例中的运动机构的末端装夹有反射头,优选为六自由度反射头(T-Mac),运动机构以五轴机床为例,请参考图2,从左往右看,分别是激光跟踪仪、五轴机床、回转平台、夹具与T-Mac。其中, $O_M-x_M y_M z_M$ 为激光跟踪仪坐标系,是静止的,其位于激光跟踪仪主机内,测量的点均默认在此坐标系下表示。 $O-xyz$ 为机床坐标系,是静止的,其原点位于初始状态下Z轴与B轴的交点。 $O_C-x_C y_C z_C$ 为回转平台坐标系,是运动的,会随着机床的运动不断改变位置与方向。 $O_T-x_T y_T z_T$ 为反射头坐标系,其固定于T-Mac,也会随着机床的运动而运动。另外,由于安装T-Mac的时候无法保证其方向,因此当作一个无摆放规则的坐标系处理。 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 为设置的虚拟点位,都位于反射头坐标系的 $O_T-x_T y_T z_T$ 平面, p_1 为反射头坐标系的原点。在五轴机床各个电机建立一个随动坐标系,并以 $H_{ij} \in i^{4 \times 4}$ 表示*i*坐标系到*j*坐标系的运动,那么运动学模型的结果可以表示如下:

$$[0064] \quad H_{OT} = H_{OY} H_{YX} H_{XZ} H_{ZB} H_{BC} H_{CT} = \begin{bmatrix} R_{OT} & T_{OT} \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix};$$

[0065] 式中, H_{OT} 为机床坐标系到反射头坐标系的运动矩阵, H_{OY} 为机床坐标系到Y轴电机坐标系的运动矩阵, H_{YX} 为Y轴电机坐标系到X轴电机坐标系的运动矩阵, H_{XZ} 为X轴电机坐标系到Z轴电机坐标系的运动矩阵, H_{ZB} 为Z轴电机坐标系到B轴电机坐标系的运动矩阵, H_{BC} 为B轴电机坐标系到C轴电机坐标系的运动矩阵, H_{OY} 、 H_{YX} 、 H_{XZ} 、 H_{ZB} 、 H_{BC} 通过运动机构本身可以获得,为已知量, H_{CT} 为C轴电机坐标系到反射头坐标系的运动矩阵,需要后续通过测量得到,为未知量; $T_{OT} \in i^{3 \times 1}$ 为测量点的平移矩阵, $R_{OT} \in i^{3 \times 3}$ 为测量点的旋转矩阵, $0_{1 \times 3}$ 为1行3列的零矩阵。

[0066] 步骤102、在运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于虚拟点位和运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型。

[0067] 无量纲模型包括无量纲运动学模型与无量纲误差模型,无量纲运动学模型表示电机参数对末端的影响,无量纲运动学模型表示误差参数对末端的影响。可以参考图2在运动机构的末端设置4个虚拟点位,在建立运动学模型后,根据齐次变换矩阵的用途, p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 4个虚拟点位的运动可被表示如下:

$$[0068] \quad \begin{cases} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad b \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_4 = [\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad b \quad 0]^T \end{cases};$$

[0069] 得到无量纲运动学模型 P 为:

$$[0070] \quad \mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_4]^T;$$

[0071] 式中, \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 、 \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标, a 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_2 在反射头坐标系的 x 轴上的距离, b 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_3 在反射头坐标系的 y 轴上的距离。需要注意的是, 在建立运动学模型时, H_{CT} 参数是未知的, H_{OY} 、 H_{YX} 、 H_{XZ} 、 H_{ZB} 、 H_{BC} 为已知的, 因此 T_{OT} 、 R_{OT} 为关于 H_{CT} 的参数, 也就意味着, 无量纲运动学模型 P 的理论值需要测量出 H_{CT} 才能计算得到。

[0072] 当测量的位姿数量为1, m 为误差参数的数量时, 那么 $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{12 \times 1}$ 为运动机构的末端误差, $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{12 \times m}$ 表示雅可比矩阵, $\Delta \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$ 表示误差参数, 当运动机构为五轴机床时, $\Delta \mathbf{x}$ 具体表示五轴机床的结构误差与垂直度误差, 无量纲误差模型可以表示为:

$$[0073] \quad \mathbf{E} = \mathbf{J} \Delta \mathbf{x};$$

[0074] \mathbf{E} 可以通过测量设备(如激光跟踪仪)测量得到, $\Delta \mathbf{x}$ 为待优化量, \mathbf{J} 为雅可比矩阵, 可以通过下式求得:

$$[0075] \quad J = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \\ J_4 \\ \vdots \\ J_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial p_{1x}}{\partial \Delta x_1} & \frac{\partial p_{1x}}{\partial \Delta x_2} & \dots & \frac{\partial p_{1x}}{\partial \Delta x_m} \\ \frac{\partial p_{1y}}{\partial \Delta x_1} & \frac{\partial p_{1y}}{\partial \Delta x_2} & \dots & \frac{\partial p_{1y}}{\partial \Delta x_m} \\ \frac{\partial p_{1z}}{\partial \Delta x_1} & \frac{\partial p_{1z}}{\partial \Delta x_2} & \dots & \frac{\partial p_{1z}}{\partial \Delta x_m} \\ \frac{\partial p_{2x}}{\partial \Delta x_1} & \frac{\partial p_{2x}}{\partial \Delta x_2} & \dots & \frac{\partial p_{2x}}{\partial \Delta x_m} \\ \frac{\partial p_{4z}}{\partial \Delta x_1} & \frac{\partial p_{4z}}{\partial \Delta x_2} & \dots & \frac{\partial p_{4z}}{\partial \Delta x_m} \end{bmatrix};$$

[0076] 式中， ∂ 为偏微分符号。当测量的位姿数量不为1时，只需对 E 和 J 在行数上进行叠加即可，需要注意的是， $\Delta \mathbf{x}$ 的规模始终是不变的。

[0077] 步骤103、根据测量设备与运动机构的末端的空间关系将测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系，得到新的测量坐标系。

[0078] 通过上述过程可以建立得到无量纲模型，在建立得到无量纲模型后，需要求解出运动机构的末端误差 E ，末端误差 E 通过实际值（即测量值）减去理论值得到，理论值可以通过无量纲运动学模型得到，实际值需要通过测量设备测量得到。可以采用激光跟踪仪进行测量，激光跟踪仪的测量值默认在其内置的测量坐标系下表示，因此，需要先将测量坐标系转换为运动机构坐标系。激光跟踪仪通过上位机软件 (Spatial Analyzer, SA) 实现测量，下面步骤需要用到该软件的点位测量、跟踪测量、直线拟合、圆拟合、设置测量坐标系的功能。

[0079] 首先，通过测量设备跟踪测量运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹；分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心，并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径；

[0080] 其次，将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值，得到运动机构原点；在将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值后，得到一个新的点，该点视为运动机构原点；

[0081] 然后，通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点，并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线；

[0082] 最后，基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系，得到新的测量坐标系；具体可以通过设置测量坐标系的功能，选择运动机构原点与拟合得到的两条直线，得到新的测量坐标系，该新的测量坐标系即为运动机构坐标系。

[0083] 步骤104、获取测量设备在新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵，并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐

标,得到无量纲运动学模型的测量值。

[0084] 在经过步骤103设置测量坐标系得到新的测量坐标系后,获取测量设备在新的测量坐标系下测量得到的测量点的旋转矩阵和平移矩阵,即图1中所示 p_1 点(即目标虚拟点位)的旋转矩阵与平移矩阵,根据 p_1 点的旋转矩阵与平移矩阵可以计算得到所有虚拟点位的实际坐标。但需要注意的是,上位机软件SA的平移矩阵是反射头坐标系相对于测量坐标系的,但是旋转矩阵是测量坐标系相对于反射头坐标系的,所以需要对旋转矩阵进行转置,改变相对关系之后再用于计算。假设测量得到的 p_1 点的旋转矩阵和平移矩阵 T_M 后,对其旋转矩阵进行转置,得到改变相对位置后的旋转矩阵为 R_M ,根据 p_1 点的平移矩阵 T_M 和转置后的旋转矩阵 R_M 可以计算得到4个虚拟点位的测量坐标为:

$$[0085] \quad \begin{cases} p_{1M} = [p_{1Mx} \quad p_{1My} \quad p_{1Mz}]^T = T_M + R_M [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ p_{2M} = [p_{2Mx} \quad p_{2My} \quad p_{2Mz}]^T = T_M + R_M [a \quad 0 \quad 0]^T \\ p_{3M} = [p_{3Mx} \quad p_{3My} \quad p_{3Mz}]^T = T_M + R_M [0 \quad b \quad 0]^T \\ p_{4M} = [p_{4Mx} \quad p_{4My} \quad p_{4Mz}]^T = T_M + R_M [a \quad b \quad 0]^T \end{cases};$$

[0086] $p_{1M} = [p_{1Mx} \quad p_{1My} \quad p_{1Mz}]^T$ 表示第一虚拟点位的测量坐标,

$p_{2M} = [p_{2Mx} \quad p_{2My} \quad p_{2Mz}]^T$ 表示第二虚拟点位的测量坐标,

$p_{3M} = [p_{3Mx} \quad p_{3My} \quad p_{3Mz}]^T$ 表示第三虚拟点位的测量坐标,

$p_{4M} = [p_{4Mx} \quad p_{4My} \quad p_{4Mz}]^T$ 表示第四虚拟点位的测量坐标。通过上述公式可以

计算得到4个虚拟点位的测量坐标,即4个虚拟点位的实际坐标,将4个虚拟点位的实际坐标代入无量纲运动学模型 P 即可得到无量纲运动学模型的测量值。

[0087] 步骤105、获取反射头与运动机构的末端的空间关系,并根据反射头与运动机构的末端的空间关系计算无量纲运动学模型的理论值。

[0088] 在经过步骤103设置测量坐标系得到新的测量坐标系后,此时可以直接测量得到 p_1 点的旋转矩阵与平移矩阵。但需要注意的是,上位机软件SA的平移矩阵是反射头坐标系相对于测量坐标系的,但是旋转矩阵是测量坐标系相对于反射头坐标系的,所以需要对旋转矩阵进行转置,改变相对关系之后再用于计算。为了获取 H_{CT} ,需要将运动机构复位,通过测量设备测量第一虚拟点位 p_1 当前的旋转矩阵和平移矩阵,然后对旋转矩阵进行转置

以改变相对关系。当运动机构为五轴机床时,由五轴机床结构可知,第一虚拟点位 p_1 当前转置后的旋转矩阵就是 H_{CT} 的旋转矩阵;至于 H_{CT} 的平移矩阵,需第一虚拟点位 p_1 当前的平移矩阵在 z 轴方向减去回零时的 $|OO_C|$ 才能得到, $|OO_C|$ 为此时点 O (即机床坐标系原点) 与点 O_C (即 C 轴电机坐标系原点) 之间的距离,此为已知的结构参数。

[0089] H_{CT} 由三个平移参数与三个转动参数组成,即一个 xyz 平移矩阵与一个 xyz 欧拉角相乘。即在获取到 H_{CT} 的旋转矩阵和平移矩阵后,将 H_{CT} 的旋转矩阵转为 xyz 欧拉角三个参数,再结合平移矩阵即可计算得到 H_{CT} ,也就获取到了反射头与运动机构的末端的空间关系。在计算得到 H_{CT} 后,即可以确定参数 T_{OT} 、 R_{OT} ,代入步骤102中 p_1 、 p_2 、 p_3 、 p_4 4个虚拟点位的运动表示,可以得到4个虚拟点位的理论坐标,将4个虚拟点位的理论坐标代入无量纲运动学模型 P 即可得到无量纲运动学模型的理论值。

[0090] 步骤106、根据无量纲运动学模型的测量值、理论值对无量纲误差模型进行模型优化,得到运动机构的无量纲运动学标定结果。

[0091] 在获取到无量纲运动学模型的测量值和理论值后, $E = J\Delta x$ 这个无量纲误差模型的必要信息建立完毕,接下来可以通过高斯牛顿、LM (Levenberg -Marquard) 算法、信赖域算法等对无量纲误差模型进行优化,通过不断地修改 Δx 的数值使得末端误差越来越小,直到末端误差收敛。由于这些优化算法属于现有技术,在此不再对其具体优化过程进行赘述。本申请实施例通过在运动机构末端设置理论的虚拟点位,建立无量纲运动学模型与无量纲误差模型,能够在优化模型时,避免传统方法的量纲不一致问题,使得优化更具真实性;通过1个实际测量点的平移矩阵与旋转矩阵,获得所设虚拟点位的空间坐标,用于无量纲模型的优化,避免了安装其它反馈装置时引入的装夹误差。

[0092] 采用本申请实施例中的标定方法实现运动机构的无量纲运动学标定,以一五轴串联运动学平台为例,进行无量纲运动学标定的结果如图3所示,其中,位置误差以空间误差表示,即欧式距离;姿态误差以理论旋转轴与实际旋转轴的角度误差表示,而旋转轴则是通过李群到李代的映射得到。通过图3可以看出,经过本申请实施例中的标定方法后,位置误差与姿态误差均得到明显降低。

[0093] 与现有技术相比,本申请优点在于:

[0094] 1、本申请方法通过引入的虚拟点位,将运动学模型与误差模型的对象设为多个点的位置,而不是传统方法中一个点的位置与姿态,使得建模过程更加快速,同时也保证在优化模型时的量纲一致,避免了传统方法在优化时的偏向性;

[0095] 2、本申请方法只需测量1个六自由度反馈装置,而不像传统方法需要测量多个三自由度反馈装置,从而避免了测量设备在反馈装置之间切换时引入的精度损失问题;

[0096] 3、本申请方法只需让运动机构进行一轮运动即可完成测量,若进行多轮运动配合三自由度反馈装置进行测量,则会引入机构本身的重复定位误差,也使得实验流程更加复杂;

[0097] 4、本申请方法设置的虚拟点位为理论点,而不是传统方法的实际点,因此不需要

考虑多个点之间的装夹误差,使得标定模型和标定过程更加简化。

[0098] 以上为本申请提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法的一个实施例,以下为本申请提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置的一个实施例。

[0099] 请参考图4,本申请实施例提供的一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定装置,包括:

[0100] 第一建立单元,用于建立运动机构的运动学模型,运动机构的末端装夹有反射头;

[0101] 第二建立单元,用于在运动机构的末端设置若干虚拟点位,并基于虚拟点位和运动学模型建立无量纲运动学模型以及建立无量纲误差模型;

[0102] 转换单元,用于根据测量设备与运动机构的末端的空间关系将测量设备的测量坐标系转换为运动机构坐标系,得到新的测量坐标系;

[0103] 测量单元,用于获取测量设备在新的测量坐标系下测量得到的目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵,并根据该目标虚拟点位的旋转矩阵和平移矩阵计算所有虚拟点位的实际坐标,得到无量纲运动学模型的测量值,目标虚拟点位为反射头坐标系的原点;

[0104] 计算单元,用于获取反射头与运动机构的末端的空间关系,并根据反射头与运动机构的末端的空间关系计算无量纲运动学模型的理论值;

[0105] 优化单元,用于根据无量纲运动学模型的测量值、理论值对无量纲误差模型进行模型优化,得到运动机构的无量纲运动学标定结果。

[0106] 作为进一步地改进,无量纲运动学模型为:

$$[0107] \quad \mathbf{P} = [\mathbf{p}_1 \quad \mathbf{p}_2 \quad \mathbf{p}_3 \quad \mathbf{p}_4]^T;$$

$$[0108] \quad \begin{cases} \mathbf{p}_1 = [\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_2 = [\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad 0 \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_3 = [\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [0 \quad b \quad 0]^T \\ \mathbf{p}_4 = [\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]^T = \mathbf{T}_{OT} + \mathbf{R}_{OT} [a \quad b \quad 0]^T \end{cases};$$

[0109] 式中, \mathbf{P} 表示无量纲运动学模型, \mathbf{p}_1 、 \mathbf{p}_2 、 \mathbf{p}_3 、 \mathbf{p}_4 分别为第一虚拟点位、第二虚拟点位、第三虚拟点位、第四虚拟点位; $[\mathbf{p}_{1x} \quad \mathbf{p}_{1y} \quad \mathbf{p}_{1z}]$ 表示第一虚拟点位的坐标,

$[\mathbf{p}_{2x} \quad \mathbf{p}_{2y} \quad \mathbf{p}_{2z}]$ 表示第二虚拟点位的坐标, $[\mathbf{p}_{3x} \quad \mathbf{p}_{3y} \quad \mathbf{p}_{3z}]$ 表示第三虚拟点位的坐标,

$[\mathbf{p}_{4x} \quad \mathbf{p}_{4y} \quad \mathbf{p}_{4z}]$ 表示第四虚拟点位的坐标; \mathbf{T}_{OT} 为测量点的平移矩阵, \mathbf{R}_{OT} 为测量点的

旋转矩阵, a 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_2 在反射头坐标系的 x 轴上的距离, b 为点 \mathbf{p}_1 和点 \mathbf{p}_3 在反射头坐标系的 y 轴上的距离。

- [0110] 作为进一步地改进,转换单元,具体用于:
- [0111] 通过测量设备跟踪测量运动机构得到B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹;
- [0112] 分别根据B轴转动的反射头轨迹、C轴转动的反射头轨迹获取B轴圆心、C轴圆心,并基于B轴转动的反射头轨迹和B轴圆心进行圆拟合得到B轴半径;
- [0113] 将C轴圆心向下移动B轴半径对应的数值,得到运动机构原点;
- [0114] 通过点位测量获取X轴与Y轴上的若干点,并通过直线拟合得到X轴和Y轴所在的直线;
- [0115] 基于运动机构原点以及X轴和Y轴所在的直线构建坐标系,得到新的测量坐标系。
- [0116] 作为进一步地改进,计算单元,具体用于:
- [0117] 将运动机构复位,通过测量设备测量第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵,第一虚拟点位为反射头坐标系的原点;
- [0118] 根据第一虚拟点位当前的旋转矩阵和平移矩阵获取反射头与运动机构的末端的空间关系;
- [0119] 根据反射头与运动机构的末端的空间关系计算无量纲运动学模型的理论值。
- [0120] 本申请实施例中,通过设置理论的虚拟点位,能够在运动机构进行无量纲运动学标定时,只通过一轮运动与一个反射头获得运动机构末端上的点的位置。由于设置的虚拟点位是理论点,不存在额外的装夹误差,且只需在一轮运动下测量一个反射头,因此避免了在传统方法中引入的断光续接误差与二次装夹误差,以及进行4轮运动的繁琐流程,改善了现有技术在进行运动学标定时,存在的引入过多的装夹误差、断光续接误差,以及标定过程繁琐的技术问题。
- [0121] 本申请实施例还提供了一种基于虚拟点位的无量纲运动学标定设备,设备包括处理器以及存储器;
- [0122] 存储器用于存储程序代码,并将程序代码传输给处理器;
- [0123] 处理器用于根据程序代码中的指令执行前述方法实施例中的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法。
- [0124] 本申请实施例还提供了一种计算机可读存储介质,计算机可读存储介质用于存储程序代码,程序代码被处理器执行时实现前述方法实施例中的基于虚拟点位的无量纲运动学标定方法。
- [0125] 所属领域的技术人员可以清楚地了解到,为描述的方便和简洁,上述描述的装置和单元的具体工作过程,可以参考前述方法实施例中的对应过程,在此不再赘述。
- [0126] 本申请的说明书及上述附图中的术语“第一”、“第二”、“第三”、“第四”等(如果存在)是用于区别类似的对象,而不必用于描述特定的顺序或先后次序。应该理解这样使用的数据在适当情况下可以互换,以便这里描述的本申请的实施例例如能够以除了在这里图示或描述的那些以外的顺序实施。此外,术语“包括”和“具有”以及他们的任何变形,意图在于覆盖不排他的包含,例如,包含了一系列步骤或单元的过程、方法、系统、产品或设备不必限于清楚地列出的那些步骤或单元,而是可包括没有清楚地列出的或对于这些过程、方法、产品或设备固有的其它步骤或单元。
- [0127] 应当理解,在本申请中,“至少一个(项)”是指一个或者多个,“多个”是指两个或两

个以上。“和/或”，用于描述关联对象的关联关系，表示可以存在三种关系，例如，“A和/或B”可以表示：只存在A，只存在B以及同时存在A和B三种情况，其中A,B可以是单数或者复数。字符“/”一般表示前后关联对象是一种“或”的关系。“以下至少一项(个)”或其类似表达，是指这些项中的任意组合，包括单项(个)或复数项(个)的任意组合。例如，a,b或c中的至少一项(个)，可以表示：a,b,c，“a和b”，“a和c”，“b和c”，或“a和b和c”，其中a,b,c可以是单个，也可以是多个。

[0128] 在本申请所提供的几个实施例中，应该理解到，所揭露的装置和方法，可以通过其它的方式实现。例如，以上所描述的装置实施例仅仅是示意性的，例如，所述单元的划分，仅仅为一种逻辑功能划分，实际实现时可以有另外的划分方式，例如多个单元或组件可以结合或者可以集成到另一个系统，或一些特征可以忽略，或不执行。另一点，所显示或讨论的相互之间的耦合或直接耦合或通信连接可以是通过一些接口，装置或单元的间接耦合或通信连接，可以是电性，机械或其它的形式。

[0129] 所述作为分离部件说明的单元可以是或者也可以不是物理上分开的，作为单元显示的部件可以是或者也可以不是物理单元，即可以位于一个地方，或者也可以分布到多个网络单元上。可以根据实际的需要选择其中的部分或者全部单元来实现本实施例方案的目的。

[0130] 另外，在本申请各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理单元中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个单元中。上述集成的单元既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能单元的形式实现。

[0131] 所述集成的单元如果以软件功能单元的形式实现并作为独立的产品销售或使用，可以存储在一个计算机可读取存储介质中。基于这样的理解，本申请的技术方案本质上或者说对现有技术做出贡献的部分或者该技术方案的全部或部分可以以软件产品的形式体现出来，该计算机软件产品存储在一个存储介质中，包括若干指令用以通过一台计算机设备(可以是个人计算机，服务器，或者网络设备等)执行本申请各个实施例所述方法的全部或部分步骤。而前述的存储介质包括：U盘、移动硬盘、只读存储器(英文全称：Read-Only Memory, 英文缩写：ROM)、随机存取存储器(英文全称：Random Access Memory, 英文缩写：RAM)、磁碟或者光盘等各种可以存储程序代码的介质。

[0132] 以上所述，以上实施例仅用以说明本申请的技术方案，而非对其限制；尽管参照前述实施例对本申请进行了详细的说明，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申请各实施例技术方案的精神和范围。

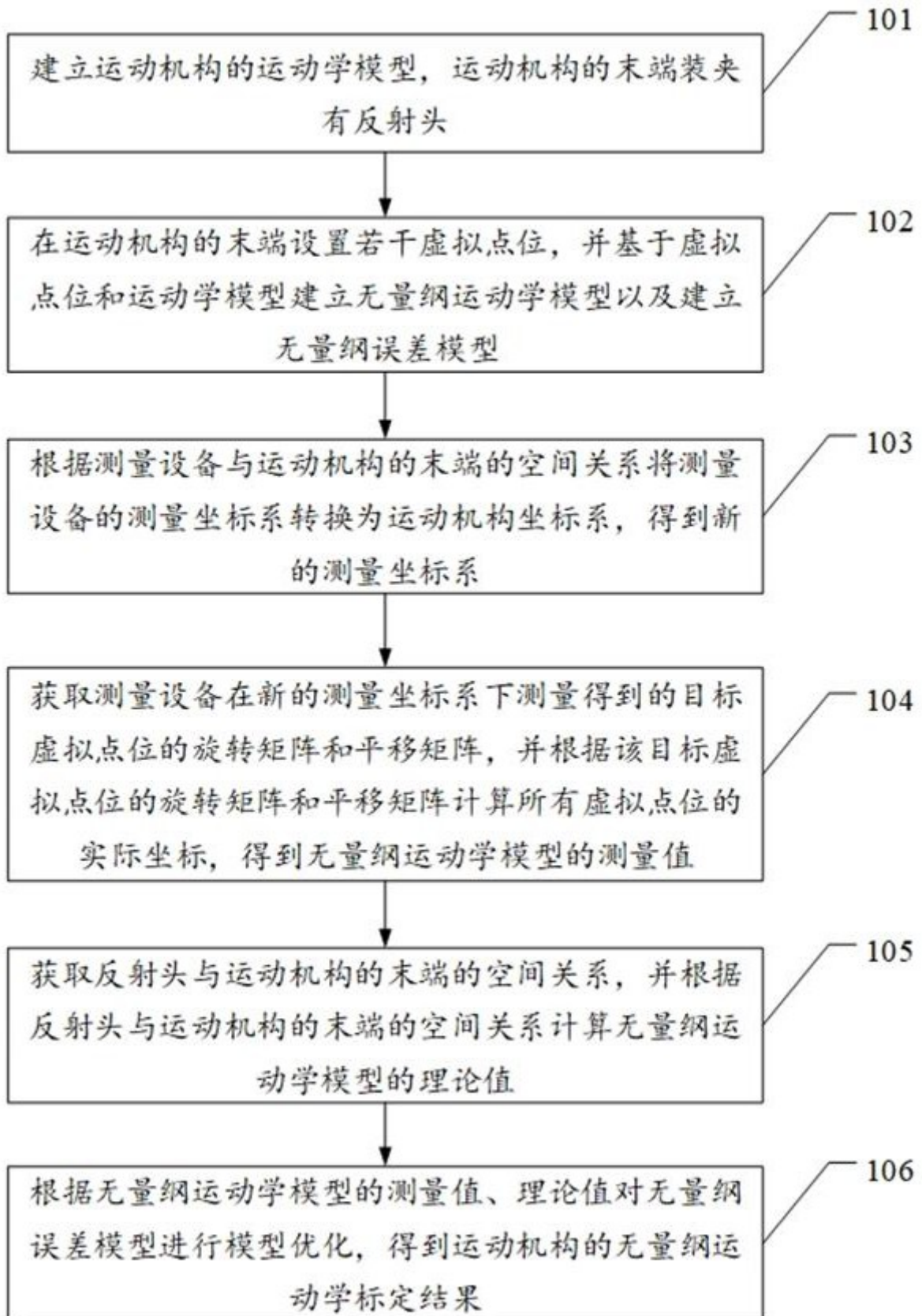


图 1

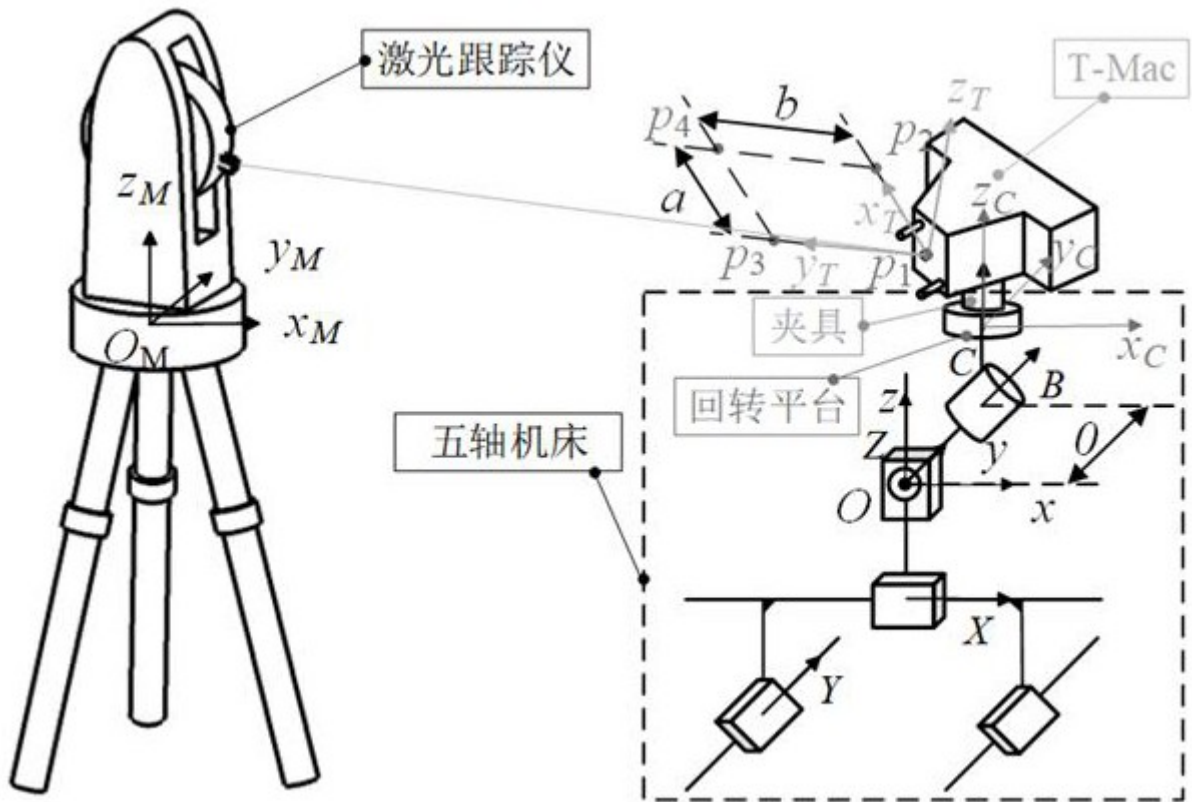


图 2

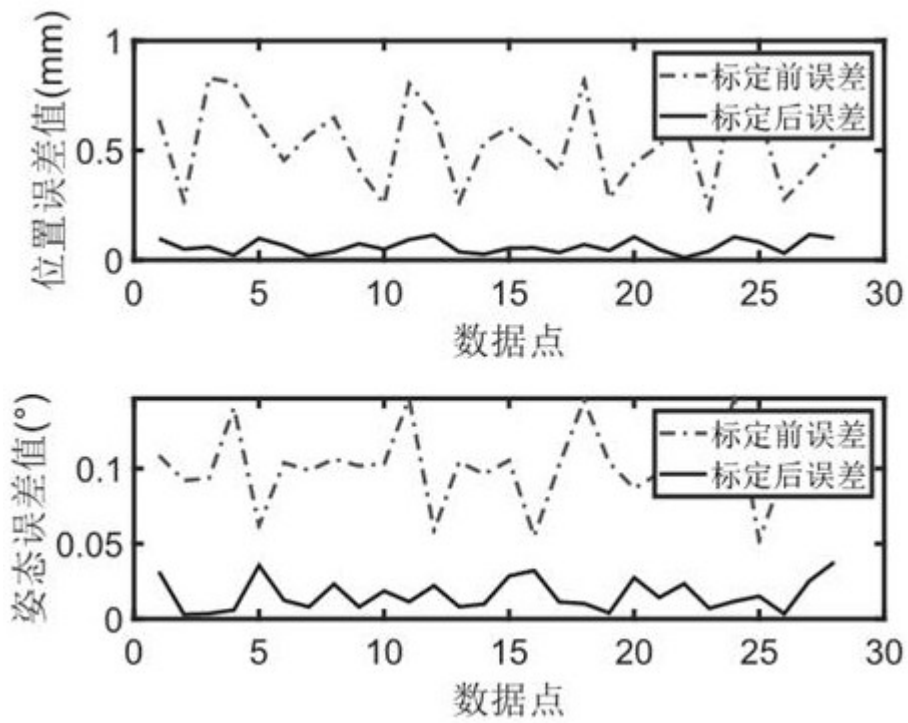


图 3

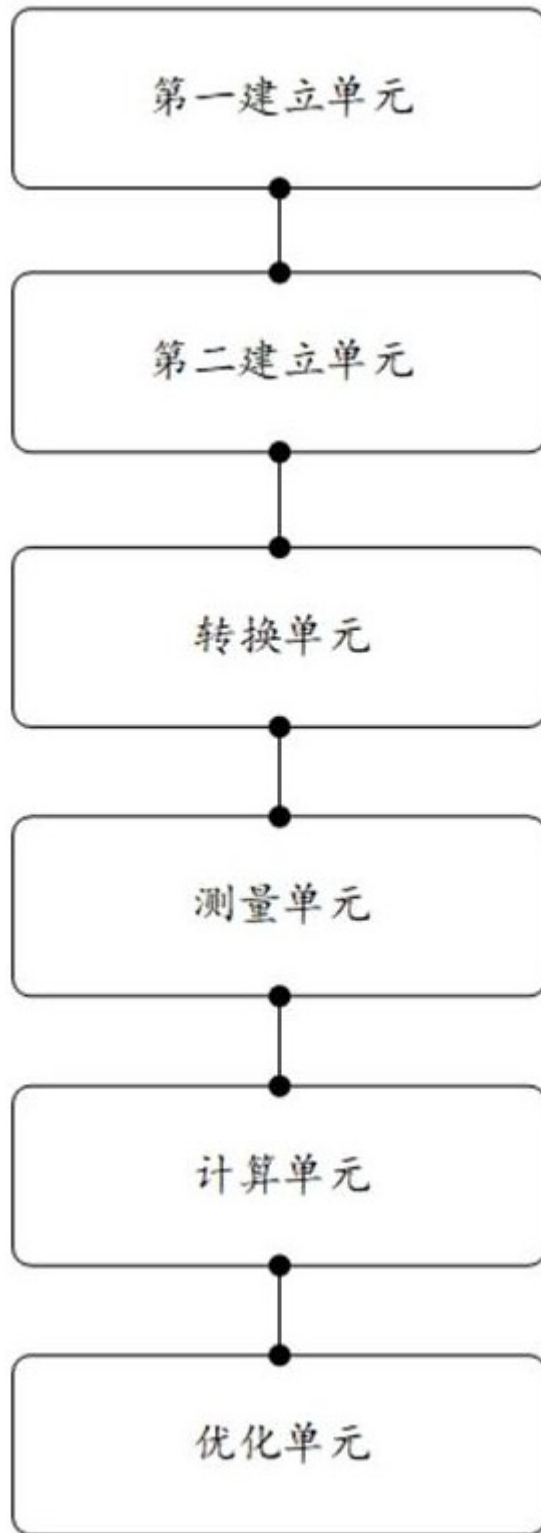


图 4