



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104655063 B

(45)授权公告日 2017.03.29

(21)申请号 201310586914.6

(22)申请日 2013.11.20

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104655063 A

(43)申请公布日 2015.05.27

(73)专利权人 北京信息科技大学
地址 100085 北京市海淀区清河小营东路
12号北京信息科技大学光电学院

(72)发明人 祝连庆 潘志康 郭阳宽 陈青山
董明利 娄小平 李伟仙

(74)专利代理机构 北京律恒立业知识产权代理
事务所(特殊普通合伙)
11416
代理人 蔡艳园 顾珊

(51)Int.Cl.

G01B 21/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 101231749 A, 2008.07.30,
CN 103175485 A, 2013.06.26,
EP 1400783 A2, 2004.03.24,
EP 0615110 A1, 1994.09.14,

审查员 李想

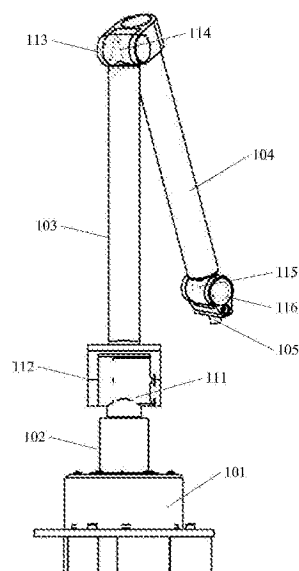
权利要求书2页 说明书8页 附图3页

(54)发明名称

关节式坐标测量机的高精度标定方法

(57)摘要

一种关节式坐标测量机的高精度标定方法,所述标定方法包括如下步骤:测量机对每个标定板上的多对锥孔以不同姿态各采集多次,每个姿态对应得到一组关节角度和一个测头坐标,如此获得多组关节角度向量与测头坐标;计算各个标定板上的每对锥孔之间的多组两点点距数值;得到每个测点x、y、z坐标的标准差公式;将每个测点的标准差求和;将各个标定板在测点i处的两点点距值 L_i 与点距真值 L_r 相减,求标准差并求和;最终将 δ_{xyz} 与 δ_L 相加作为二次非线性规划问题的目标函数,利用序列二次规划算法即可求出关节式坐标测量机的结构参数误差值。



1. 一种关节式坐标测量机的高精度标定方法,所述标定方法包括如下步骤:

以六自由度关节式坐标测量机作为待标定机,以测量机的基座为原点建立笛卡尔坐标系,以测量机的基座中心为圆心,将整圈圆周等分为多条等分线,多块标定板分别对应地摆放在所述多条等分线上;

测量机对每个标定板上的多对锥孔中的每一个以不同姿态各采集多次数据,每个姿态对应得到一组关节角度和一个测头坐标,如此获得多组关节角度向量和多个测头坐标;

根据测量得到的多个测头坐标值,分别计算各个标定板上的每对锥孔之间的两点点距数值;

所述测头坐标是对应姿态的角度向量值与待标定机的结构参数向量的函数,因此,用 $\theta_{i,j}$ 表征在测点 i 的第 j 次测量的角度向量,用 A 表征结构参数向量,则测点 i 在第 j 次测量的测头坐标表示为:

$$\begin{cases} I_{i,j}^x = f_x(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^y = f_y(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^z = f_z(\theta_{i,j}, A) \end{cases} \quad \dots (1);$$

根据以上测点坐标方程,可写出每个测点 x 、 y 、 z 坐标的标准差公式:

$$\sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_r)^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_r)^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_z = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_r)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad \dots (2);$$

其中 x_r, y_r, z_r 是测点 i 在 x 、 y 、 z 三坐标方向上的坐标真值,

将全部 m 个测点的标准差求和,即

$$\delta_{xyz} = \sum_{i=1}^m (\sigma_x^i + \sigma_y^i + \sigma_z^i) \quad \dots (3);$$

将各个标定板在测点 i 处的两点点距值 L_i 与点距真值 L_r 相减,求标准差并求和,公式如下:

$$\sigma_L = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L_r)^2}{n} \right]^{1/2}, \delta_L = \sum_{i=1}^m \sigma_L^i \quad \dots (4);$$

其中, n 为每一测点处测量得到的测头坐标数, m 为测点数量,

最终将 δ_{xyz} 与 δ_L 相加作为二次非线性规划问题的目标函数,即:

$$\begin{cases} \min \delta_{xyz}(A) + \delta_L(A) \\ A_{\min} \leq A \leq A_{\max} \end{cases} \quad \dots (5);$$

利用序列二次规划算法即可求出关节式坐标测量机的结构参数误差值,然后即可根据所得到的结构参数误差值,进行标定。

2. 如权利要求1所述的标定方法,其中对于每一标定板,在测点 i 处有多组测头坐标值,

对其求平均值,可得 $\overline{x_i}$, $\overline{y_i}$, $\overline{z_i}$,作为测点i的坐标真值 x_r, y_r, z_r 。

3.如权利要求1所述的标定方法,其中将待标定机置于高精度测量仪器的测量空间,通过高精度测量仪器来标定标定板上的锥孔位置坐标,作为测点i的坐标真值 x_r, y_r, z_r 。

4.如权利要求1所述的标定方法,其中待标定机为第1、2级关节可固定的变臂式坐标测量机,其第1、2级关节具有锁定装置,用于固定前两级测量臂的位置。

5.如权利要求1所述的标定方法,其中各个标定板处于测量空间内的不同高度和不同半径圆周。

6.如权利要求1所述的标定方法,其中所述标定板用铸铁制成,其正面具有多个不同尺寸的锥孔,各个锥孔在整个标定板平面上均匀分布,所述锥孔构造成能够使测头稳定座放其中。

关节式坐标测量机的高精度标定方法

技术领域

[0001] 本发明涉及坐标测量技术领域,具体涉及六自由度关节式坐标测量机的高精度标定方法。

背景技术

[0002] 关节式坐标测量机是一种多自由度非正交坐标式的三坐标测量机,通常具有6个自由度。它仿照人体关节结构,由三个测量臂和一个测头通过六个(旋转)关节串联连接构成空间开链结构,从而以角度测量基准取代了长度测量基准。在使用测量机进行测量时,测头坐标是测量机运动学参数与其六个关节角度的函数。与传统的正交坐标系式三坐标测量机相比,它具有测量范围大、方便灵活、精度较高、机械结构简单、环境适应性好等优点。但是另一方面其结构是一种串联结构,误差因素多,且误差传递系数大、误差控制复杂,从而其精度难以得到保证。目前,关节式坐标测量机大多应用于产品反求设计等精度较低的领域,使其推广应用受到较大限制。为提高测量机的测量精度,必须在使用之前对其进行标定校准,以确保其测量精度在设计的精度范围之内。关节式坐标测量机的误差源有多个,其中最主要误差是由加工和装配引起几何误差,即测量机基于测量方程的结构参数误差。标定就是通过对测量机测量模型参数进行辨识以获得其精确结构参数,校准则是利用所获得参数修正测量机结构以获得更精确坐标。

[0003] 目前,用于关节式坐标测量机结构参数标定的方法有很多种,比如基于三坐标测量机的标定方法、光学标定方法、基于平面和距离的标定方法。这些已有方法,通常都是将待标定测量机放置在更高精度坐标测量仪器(如正交三坐标测量机、全站仪等)的测量空间中。在此测量空间中有两个坐标系,一个是由高精度坐标测量仪器提供的标准坐标系,另一个是待标定机坐标系。测量时需由高精度坐标测量仪器建立两种坐标系的变换关系,即确定待标定机的原点位置;通过辅助设备固定或改变待标定机的关节角度,从而获得待标定机各种空间姿态,对于每一个姿态,除了测头在待标定坐标系中的测头坐标,还有测头在标准坐标系中的坐标值;通过测头在两种坐标系下的坐标值,可获得各个姿态下的误差数据,采用相应计算方法获得待标定机的误差参数。上述方法能够实现结构参数的辨识,但它们的实现都依赖于标定时的高精度测量设备,无法做到现场标定;同时这些方法大多使用传统数值分析方法(如最小二乘法,奇异值分解法)获得解析解,这就需要经过数倍于求解参数个数的反复测量,操作繁琐,并且这类方法对初值要求高,在初值选取不合适的情况下,经常只能获得局部解,影响测量机的测量精度。

[0004] 除此以外,最近几年陆续发表一些文献提出了不同的标定方法,但仍存在一些不足。《多关节柔性三坐标测量系统标定技术研究》(哈尔滨工业大学学报,2008)采用标定球测量十个球心利用最小二乘法进行标定,这种方法仍然需要三坐标测量机提供“真值”,并且测量、拟合球心时引入误差大,影响精度,同时其提供的采样方法无法满足关节式坐标测量机空间误差分布规律,较难得到最优非劣解。《基于激光跟踪仪的关节式坐标测量机参数标定》(中国科学技术大学学报,2009)利用激光跟踪仪进行标定,标定时采用专用夹具固定

测量机的姿态,测量30个点,采用高斯-牛顿法求最小二乘解;由于涉及坐标转换,需标定31个参数,这为求解带来一定困难;同时,由于姿态固定,所使用即使测量点数较多,但仍不满足误差分布规律。《防人关节式坐标测量机的数学建模及标定方法》(华中科技大学学报,2007)标定时仍需用到高精度三坐标机建立世界坐标系及求取误差,仍然涉及球心拟合及坐标变换;同时,虽然采集30个点,但标定只在部分测量空间进行,对其它区域未测量。《关节臂式坐标测量机标定系统的设计》(计算机测量与控制,2009)采用反转法对测量机的各个结构参数进行间接测量,但实验过程复杂,需要复杂装夹工具和高精度正交式坐标测量机。《六自由度关节式柔性坐标测量机高精度标定方法》(专利,2007)同样采用高精度仪器及专用夹具来完成标定,标定姿态固定,未考虑对单点的重复测量。《柔性坐标测量机参数辨识方法》(农业机械学报,2007)采用了单点锥窝的标定方法,将一个锥窝固定在测量空间的一个位置,使用关节式柔性坐标测量机对锥窝顶点连续采样200点,这种方法不需其它精密仪器,但标定时只考虑了单点重复性,而没有考虑测长精度;同时,测量区域固定也影响了标定结果。《一种便携关节式坐标测量机结构参数标定的优化采样策略》采用两端带有锥窝的石英棒进行标定,将石英棒置于测量机为圆心的六个圆周位置上,在每个位置上按一定分度、不同平面旋转石英棒测量500组数据,共计3000组数据;这样的采样策略虽然能满足整个测量空间,但实施过程复杂,同时在进行标定时没有考虑单点重复性这一精度指标。

[0005] 以上这些方法在标定时仍存在不足,如多数方法没有考虑测量机误差空间分布规律,在采样上存在测量机姿态单一、测量区域窄的现象,标定结果只在局部最优;在标定时对于衡量测量机精度的重复性精度和测长精度指标,只考虑了其一,使得标定结果在评价测量机精度时不甚理想;而且标定实现依赖于其它高精度测量仪器,不能现场标定。

[0006] 综上,针对上述标定技术中存在的问题,需要一种简便、易于操作的标定方法,既兼顾测量机的单点重复性精度及测长精度,又可获得全局解,有效提高参数识别精度,进而提高测量机的整体精度。

发明内容

[0007] 本发明的目的在于提供一种关节式坐标测量机标定方法,该方法标定时可同时测量机的单点重复性精度及测长精度进行标定,符合关节臂测量机性能评价方法(美国ASME B89.4.22),又可获得全局解,有效提高参数识别精度,进而提高测量机的整体精度。

[0008] 本发明提供一种关节式坐标测量机的高精度标定方法,所述标定方法包括如下步骤:

[0009] 以六自由度关节式坐标测量机作为待标定机,以测量机的基座为原点建立笛卡尔坐标系,以测量机的基座中心为圆心,将整圈圆周等分为多条等分线,多块标定板分别对应地摆放在所述等分线上;

[0010] 测量机对每个标定板上的多对锥孔以不同姿态各采集多次,每个姿态对应得到一组关节角度和一个测头坐标,如此获得多组关节角度向量与测头坐标;

[0011] 根据测量得到的测头坐标值,计算各个标定板上的每对锥孔之间的多组两点间距离数值;

[0012] 所述测头坐标是对应姿态的角度向量值与待标定机的结构参数向量的函数,因此,用 $\theta_{i,j}$ 表征在测点*i*的第*j*次测量的角度向量,*A*表征结构参数向量,则测点*i*在第*j*次测量

的测头坐标表示为:

$$[0013] \quad \begin{cases} I_{i,j}^x = f_x(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^y = f_y(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^z = f_z(\theta_{i,j}, A) \end{cases} \quad \dots (1)$$

[0014] 根据以上测点坐标方程,可写出每个测点在x、y、z坐标的标准差公式:

$$[0015] \quad \sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_r)^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - y_r)^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_z = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - z_r)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad \dots (2);$$

[0016] 其中 x_r, y_r, z_r 是测点i在x、y、z三坐标方向上的坐标真值,

[0017] 将全部m个测点的标准差求和,即

$$[0018] \quad \delta_{xyz} = \sum_{i=1}^m (\sigma_x^i + \sigma_y^i + \sigma_z^i) \quad \dots (3);$$

[0019] 将各个标定板在测点i处的两点间距值 L_i 与点距真值 L_r 相减,求标准差并求和,公式如下:

$$[0020] \quad \sigma_L = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L_r)^2}{n} \right]^{1/2}, \delta_L = \sum_{i=1}^m \sigma_L^i \quad \dots (4);$$

[0021] 其中,n为每一测点处测量得到的测头坐标数,m为测点数量, δ_{xyz} 和 δ_L 是结构参数向量A的函数,最终将 δ_{xyz} 与 δ_L 相加作为二次非线性规划问题的目标函数,即:

$$[0022] \quad \begin{cases} \min \delta_{xyz}(A) + \delta_L(A) \\ A_{\min} \leq A \leq A_{\max} \end{cases} \quad \dots (5);$$

[0023] 利用序列二次规划算法即可求出关节式坐标测量机的结构参数误差值。

[0024] 优选的,对于每一标定板,在测点i处有多组测头坐标值,对其求平均值,可得 $\overline{x_i}$, $\overline{y_i}$, $\overline{z_i}$,作为测点i的坐标真值;

[0025] 优选的,将待标定机置于高精度测量仪器的测量空间,通过高精度测量仪器来标定标定板上的锥孔位置坐标,作为测点i的坐标真值。

[0026] 优选的,待标定机为第1、2级关节可固定的变臂式坐标测量机,其第1、2级关节具有锁定装置,用于固定前两级测量臂的位置。

[0027] 优选的,各个标定板处于测量空间内的不同高度和不同半径圆周。

[0028] 优选的,所述标定板用铸铁制成,其正面具有多个不同尺寸的锥孔,各个锥孔在整个标定板平面上均匀分布,所述锥孔构造成能够使测头稳定座放其中。

[0029] 应当理解,前述大体的描述和后续详尽的描述均为示例性说明和解释,并不应当用作对本发明所要求保护内容的限制。

附图说明

[0030] 参考随附的附图,本发明更多的目的、功能和优点将通过本发明实施方式的如下描述得以阐明,其中:

[0031] 图1为本发明具体实施方式中所采用的待标定机示意图。

[0032] 图2为本发明具体实施方式中所采用的专用标定板示意图。

[0033] 图3为本发明具体实施方式中待标定机与专用标定板之间的标定位置关系示意图。

具体实施方式

[0034] 在下文中,将参考附图描述本发明的实施例。在附图中,相同的附图标记代表相同或类似的部件,或者相同或类似的步骤。

[0035] 通过参考示范性实施例,本发明的目的和功能以及用于实现这些目的和功能的方法将得以阐明。然而,本发明并不受限于以下所公开的示范性实施例;可以通过不同形式来对其加以实现。说明书的实质仅仅是帮助相关领域技术人员综合理解本发明的具体细节。

[0036] 针对本发明结合示意图进行详细描述,在详述本发明实施例时,为便于说明,表示器件结构的剖面图会不依一般比例作局部放大,而且所述示意图只是示例,其在此不应限制本发明保护的范围。此外,在实际制作中应包含长度、宽度及深度的三维空间尺寸。

[0037] 下面参考附图,对本发明的具体实施方式进行说明。

[0038] 本发明的标定方法以一般的六自由度关节式坐标测量机,作为待标定机。

[0039] 图1所示的待标定机为关节式柔性坐标测量机,具有六自由度。待标定机包括:基座101,三段测量臂102、103、104,关节111、112、113、114、115、116,以及测头105。

[0040] 在基座101上,由三段测量臂101、102、103串联的六个可旋转的关节111、112、113、114、115、116构成空间开链结构,该开链结构的末端是测量机的测头105。各关节111、112、113、114、115、116可以绕其自身的轴线进行转动,关节转动的角度由其上安装的高精度圆光栅角度传感器控制获得。由于机械结构限制,其中关节111、113、115可在 $0\sim 2\pi$ 角度范围内旋转,而关节112、114、116可在 $-\pi\sim 0$ 角度范围内旋转。

[0041] 优选的,待标定机为关节可固定的变臂式坐标测量机,其关节111、112具有锁定装置,通过其可使测量臂111、112位置固定。变臂式坐标测量机在关节固定时的测量结果比用任意姿态测量获得的测量结果精度要高,同时变臂测量机由于关节可固定,相应测量时应用不同位姿要容易一些,不需要辅助支撑器件。

[0042] 关节式坐标测量机类似仿人手机械臂,但对测量位姿没有要求,因此对同一个测量点,可以采用任意姿态进行测量,这样就可以得到任意组测头坐标,由于误差的存在,使得这些测头坐标并不能完全相同,这被称之为测量机的重复性误差。目前,衡量关节式坐标测量机的精度标准即采用重复性精度和测长精度。本实施方案充分考虑了关节式坐标测量机这一特点,对同一测量点采用不同姿态多次测量,同时为了满足空间误差分布规律,对不同位置的多个点进行测量,并将同一标定板上的测量点之间的点距作为测长精度的计算依据。如此,本发明同时考虑了关节式坐标测量机的重复性精度和测长精度。

[0043] 另外,关节式坐标测量机作为一种采用球坐标系的串联机构,其测量空间可以是具有不同半径的球面,并且在整个测量空间其误差分布是非线性的,在较小区域其误差较小,但随着测量空间的延展,其误差逐渐增大。因此在进行标定时,数据采样要从小到大的

区间,以保证数据包含了全场误差信息,对这些数据采用高精度参数辨识方法,获得测量机不确定度的最小区域解,从而实现测量机的标定。

[0044] 根据上述考虑,本发明提供一种示例性标定方法,如下所述。

[0045] 如图3所示,以测量机的基座101为原点建立笛卡尔坐标系,以测量机的基座中心为圆心,将整圈圆周按60度等分为6条等分线,6块标定板301、302、303、304、305、306分别摆放在6条等分线上。另外,采样中,在标定时所采样点的坐标范围应尽量覆盖坐标机所能测量的范围,六个位置如果各自在不同半径,并具有各自高度,标定结果最优,但这样相应也增加了放置标定板的难度。因此,在本实施例中,采取了相邻标定板的位置有高度差、半径差的布局方式,也就是有三个标定板301、303和305处于同一高度和同一半径圆周311,另三个标定板302、304和306处于与前一高度以及半径圆周不同的另一高度和另一半径圆周312。至于高度差,只要满足在z轴方向也尽量能够多地覆盖测量范围的其他布局方式也可采用。

[0046] 本发明中使用的标定板为关节式坐标测量机专用标定板,用铸铁制成,如图2所示,其正面具有5个6锥孔201、6个20锥孔203和8个10锥孔202,各个锥孔在整个标定板平面上均匀分布,可供测头稳定座放于其中以便测量。

[0047] 这里,标定板的作用主要是能够提供提供一个标准距离,在标定前标定板上各个孔之间的距离都通过更高精度的测量仪器进行标定。而且由于标定板是铸铁制造,性能稳定,所以在标定现场使用时,其上各孔距离不变,因此标定得到的标定板上的真实锥孔可用于重复性精度标定与测长精度标定。标定板的另一个作用是能够较容易进行采样布局,在一个标定板所处位置上,提供多个可作为被测对象的锥孔。另外由于锥孔的形状设计成适于测头在同一位置稳定测量,使得坐标机在一个测点进行多位姿采样,很好地满足了标定算法的目标函数对测量数据量的要求。

[0048] 在本实施例中,采用了6个标定板,测量机对每个标定板上任意两个锥孔以不同姿态各采集50次,每个位姿对应一组角度向量和一个测头坐标,则6个标定板位置则可获得600组关节角度向量与600个测头坐标,以及300组距离值。

[0049] 具体采样过程如下:

[0050] 1、在使用标定板之前,标定板上任意点距已通过高精度测量仪器(正交式三坐标测量机、比长仪等)测量获得。

[0051] 2、将待标定机平稳安放在平台或方箱上。以待标定机基座中心为原点,以关节111的光栅编码器零位指向为x轴,建立笛卡尔坐标系,其后所测坐标均在此坐标系下。

[0052] 3、如图3所示放置6个标定板。标定板放置时近似放置在等分线上即可。三个标定板301、303和305处于同一高度和同一半径圆周311,另三个标定板302、304和306处于与前述高度以及半径圆周不同的另一高度和另一半径圆周312。

[0053] 4、按照图3所示,在标定板301上任选一个锥孔,将测头探入锥孔,使测头球与锥孔壁完全接触,在关节活动范围内任意旋转6个关节,使测量机能够以不同姿态测量锥孔50次,同时记录测头坐标及其六个关节角度构成的角度向量。需要注意的是,研究表明,测量机的6个关节中,关节1、2对测量机最终精度影响最大,因此应尽可能在关节111、112最大活动范围内均匀旋转,以获得较完备关节组合。对于变臂型坐标测量机,可通过关节1、2的锁定装置辅助完成。

[0054] 5、完成一个锥孔的测量后,再在标定板301上任选另一个锥孔,重复步骤4。

[0055] 6、当对标定板301完成采样,依次对标定板302-306重复步骤4、5,直至完成全部600次采样,获得600组关节角度向量、600个测头坐标。

[0056] 采样后,对数据进行处理。

[0057] 具体数据处理过程为:

[0058] 1、根据测量得到的600个测头坐标值,计算各个标定板上的两点点距 L_i ,一共可获得300个点距值。

[0059] 2、对于每一测点 i 处有50组测头坐标值,对其求平均值,可得 $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i$ 。由于关节式坐标测量机通常用于相对测量,对位置精度要求不高,而重复测量也消除了随机误差,因此可以将平均坐标值近似认为是测点 i 的坐标真值,这样既可进行自标定,无需高精度测量仪器的现场辅助。

[0060] 3、根据关节式坐标测量机的数学模型,测头在关节式坐标测量机中的测头坐标是对应姿态的角度向量值与待标定机的结构参数向量的函数,因此,用 $\theta_{i,j}$ 表征在测点 i 的第 j 次测量的角度向量, A 表征结构参数向量,则测点 i 在第 j 次测量的测头坐标表示为:

$$[0061] \begin{cases} I_{i,j}^x = f_x(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^y = f_y(\theta_{i,j}, A) \\ I_{i,j}^z = f_z(\theta_{i,j}, A) \end{cases} \dots (1),$$

[0062] 4、求解被标定的待标定机的结构参数误差向量 A 。根据上述测头坐标公式(1),600个测头坐标可以获得1800个方程:

$$I_{1,1}^x = f_x(\theta_{1,1}, A) \quad (1)$$

$$I_{1,1}^y = f_y(\theta_{1,1}, A) \quad (2)$$

$$I_{1,1}^z = f_z(\theta_{1,1}, A) \quad (3)$$

$$[0063] \quad I_{1,2}^x = f_x(\theta_{1,2}, A) \quad (4) \quad \dots (2),$$

...

$$I_{12,50}^z = f_z(\theta_{12,50}, A) \quad (1800)$$

[0064] 在这个由1800个方程构成的方程组中,唯有待标定机的结构参数向量 A 是不确定的,也是唯一的待标定参数。关节式坐标测量机根据DH方程建立运动学模型,因此其结构参数有27个,由于测量臂1的长度对测量机精度无影响,因此本发明只对其它26个结构参数进行标定。

[0065] 对这个方程组求解可得出 A 。这里,为避免传统算法都易陷入局部解的问题,本发明将问题求解由多目标搜索优化问题转换为二次非线性规划问题。

[0066] 根据以上测点坐标方程,可写出每个测点 x, y, z 坐标的标准差公式

$$[0067] \quad \sigma_x = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_y = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n-1} \right]^{1/2}, \sigma_z = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad \dots (3),$$

[0068] 这个标准差公式反映了测量机单点测量的重复度误差。将标定所测12点的标准差

求和,即

$$[0069] \quad \delta_{xyz} = \sum_{i=1}^{12} (\sigma_x^i + \sigma_y^i + \sigma_z^i) \quad \dots (4),$$

[0070] 将标定板在6个位置处的点距值与点距真值相减求标准差并求和,公式如下:

$$[0071] \quad \sigma_L = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (L_i - L_r)^2}{n} \right]^{1/2}, \quad \delta_L = \sum_{i=1}^6 \sigma_L^i \quad \dots (5),$$

[0072] 其中, $n=50$, L_r 为真实点距值。 δ_{xyz} 和 δ_L 是结构参数向量 A 的函数, 最终将 δ_{xyz} 与 δ_L 相加作为二次非线性规划问题的目标函数, 即:

$$[0073] \quad \begin{cases} \min \delta_{xyz}(A) + \delta_L(A) \\ A_{\min} \leq A \leq A_{\max} \end{cases} \quad \dots (6),$$

[0074] 这个目标函数将1800个方程构成的方程组转化为单目标非线性规划问题, 再利用序列二次规划算法即可求出关节式坐标测量机的结构参数误差值。然后即可根据所得到的结构参数误差值, 进行标定。

[0075] 这里优选采用序列二次规划算法, 其结果稳定, 同时精度提高幅度大, 标定成功率为100%。具体的, 仿真标定后, 单点重复性精度提高了88.9%, 长度测量精度提高了92.7%。

[0076] 上述实施例中, 以摆放6个标定板, 每个标定板各测量2个点为例, 本发明还可以采取其他采样策略, 例如:

[0077] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意两个锥孔以不同姿态各采集50次, 6个位置可获得600组关节角度、测头坐标和300组距离值。

[0078] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意两个锥孔以不同姿态各采集100次, 6个位置可获得1200组关节角度、测头坐标和600组距离值。

[0079] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度分近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意四个锥孔以不同姿态各采集50次, 6个位置可获得1200组关节角度、测头坐标和1800组距离值。

[0080] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度分两次近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意两个锥孔以不同姿态各采集50次, 12个位置可获得1200组关节角度、测头坐标和600组距离值。

[0081] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度分两次近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意两个锥孔以不同姿态各采集100次, 12个位置可获得2400组关节角度、测头坐标和1200组距离值。

[0082] 以测量机基座中心为圆心, 将标定板以不同高度分两次近似摆放在圆的六等分线上, 测量机对标定板上任意4个锥孔以不同姿态各采集50次, 12个位置可获得2400组关节角度、测头坐标和3600组距离值。

[0083] 以上实施例所描述的方案仅为一种最低精度要求采样方案,在具体实施中,可根据精度要求对标定板摆放位置数、采样点数、重复测量次数相应增加。但以上操作必须满足标定板摆放要求,即相邻位置处于不同测量半径并存在高度差。因为坐标机的测量空间是一个球形,因此在标定采样上尽量使标定点分布成球形,这样在测量空间上较为均匀,覆盖范围也大,避免因为类似以往的标定在测量时所测标定点只分布在测量空间的一小部分所导致的标定失败。

[0084] 与已有技术相比,本发明提高了标定的成功率和精度,其有益效果具体体现在:

[0085] 1、在本发明中,使用的自设计的标定板上的锥孔孔距提供了标定用的标准距离,也就是说在标定前标定板上各个孔之间的距离都通过更高精度的测量仪器进行了标定,由于多了标准距离的约束(也就是所测某几个标定点的距离),使得标定稳定、成功率高。相比,如果没有标准距离约束,也会出现结果是局部优化结果(即只对当前一些测量点精度提高,但如果新增加一些测量验证点,则对这些新点出现精度劣化)或标定失败。

[0086] 2、本发明采样点可根据需要自行增加,由于数据处理方法用到了距离值,因此随着采样点增加,距离值相应增加,并且数据量超出了采样点坐标值,大量的采样数据为高精度标定提供了基础。

[0087] 3、本发明也可在不增加采样点的情况下,通过增加采样位姿获得更多的采样数据,由于采用锥孔进行测量,因此很容易实现各种位姿数据的获取,在测量工作量增加不大的基础上有效保证了待标定机的整体精度。

[0088] 4、本发明采样点近似均匀分布整个测量空间,能充分提取关节测量机在有效测量空间内的误差信息,使待标定机的整体精度得到保证。

[0089] 5、在本发明的标定方法中用平均值代替了真值,使得在标定时可不引入高精度测量仪器,使得现场标定成为可能,充分发挥了关节式坐标测量机的灵活性,同时标定成本得到了节约。

[0090] 6、本发明在不需现场标定时,可将待标定机置于高精度测量仪器的测量空间,通过高精度测量仪器来标定标定板上的锥孔位置坐标作为所测点的真值,利用该值与测量值求取误差值进行处理,可有效提高待标定机的整体精度。

[0091] 结合这里披露的本发明的说明和实践,本发明的其他实施例对于本领域技术人员都是易于想到和理解的。说明和实施例仅被认为是示例性的,本发明的真正范围和主旨均由权利要求所限定。

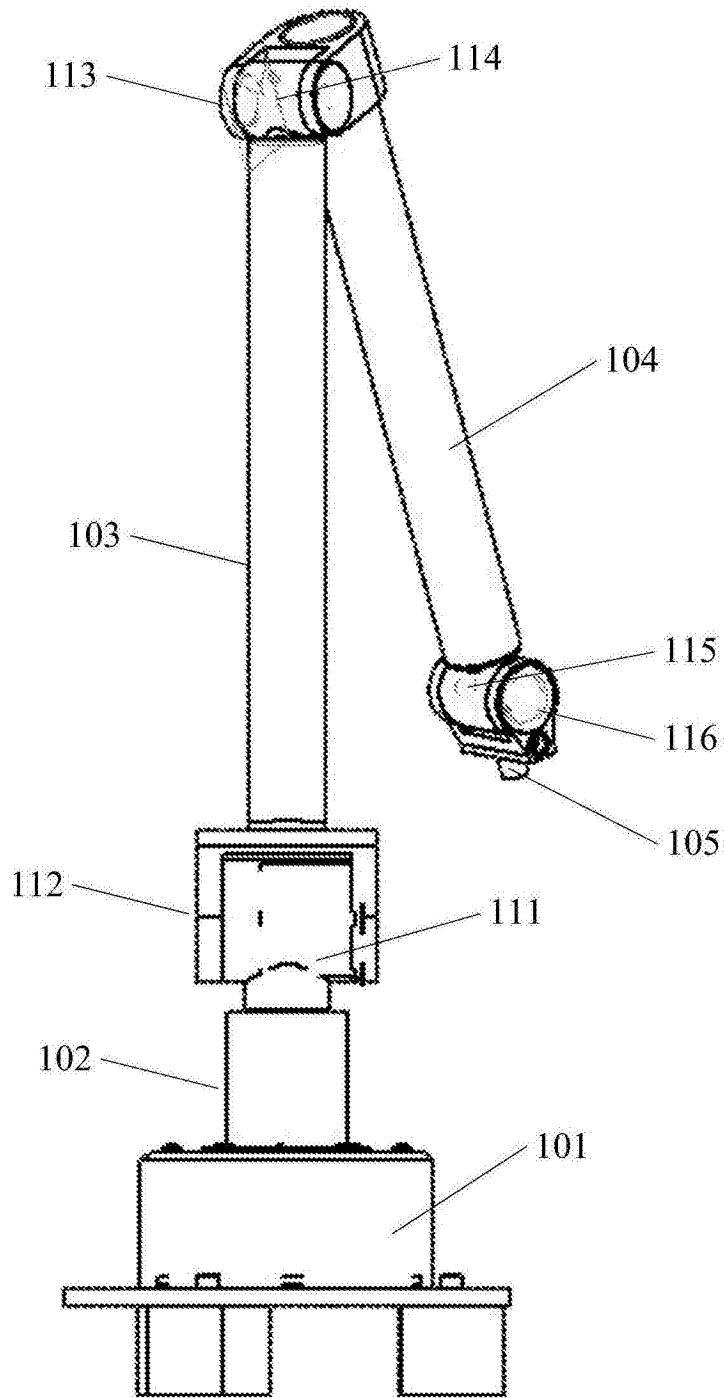


图1

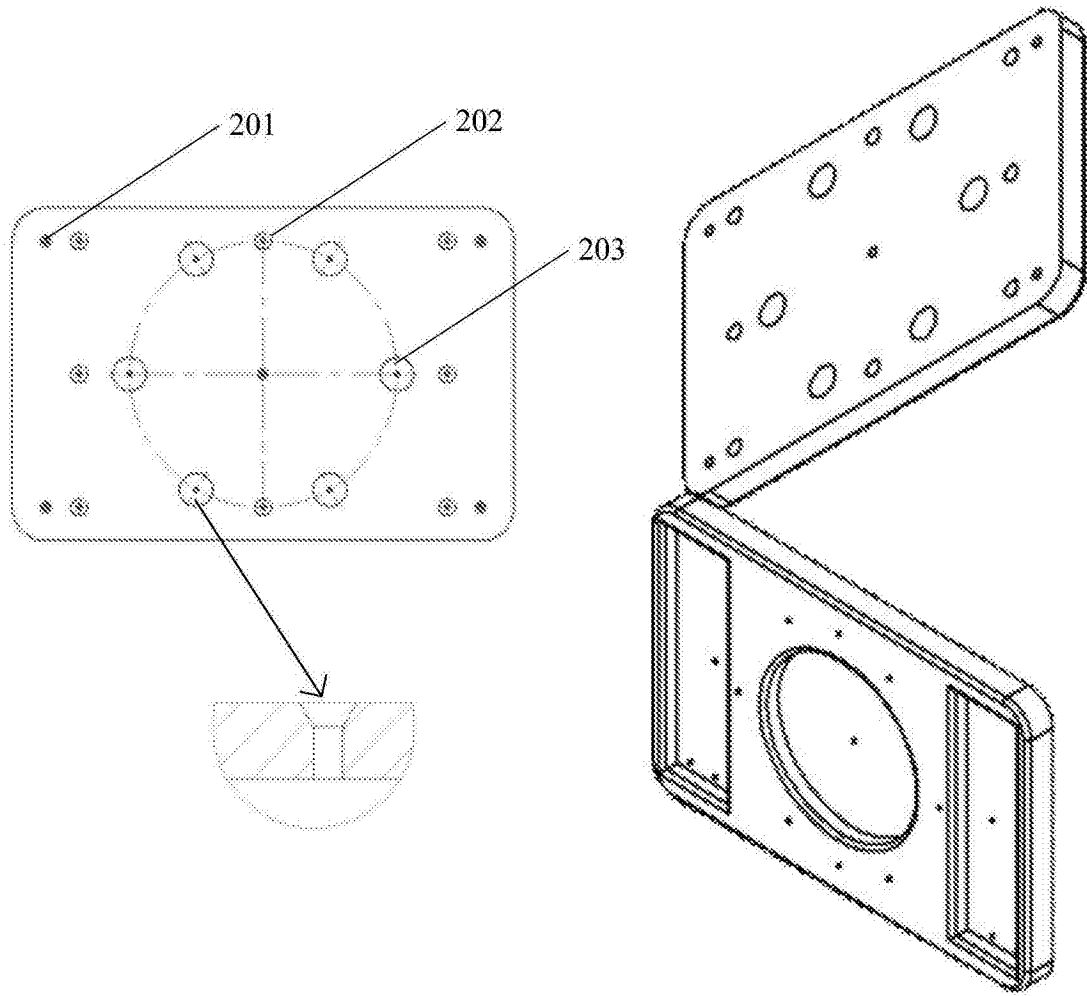


图2

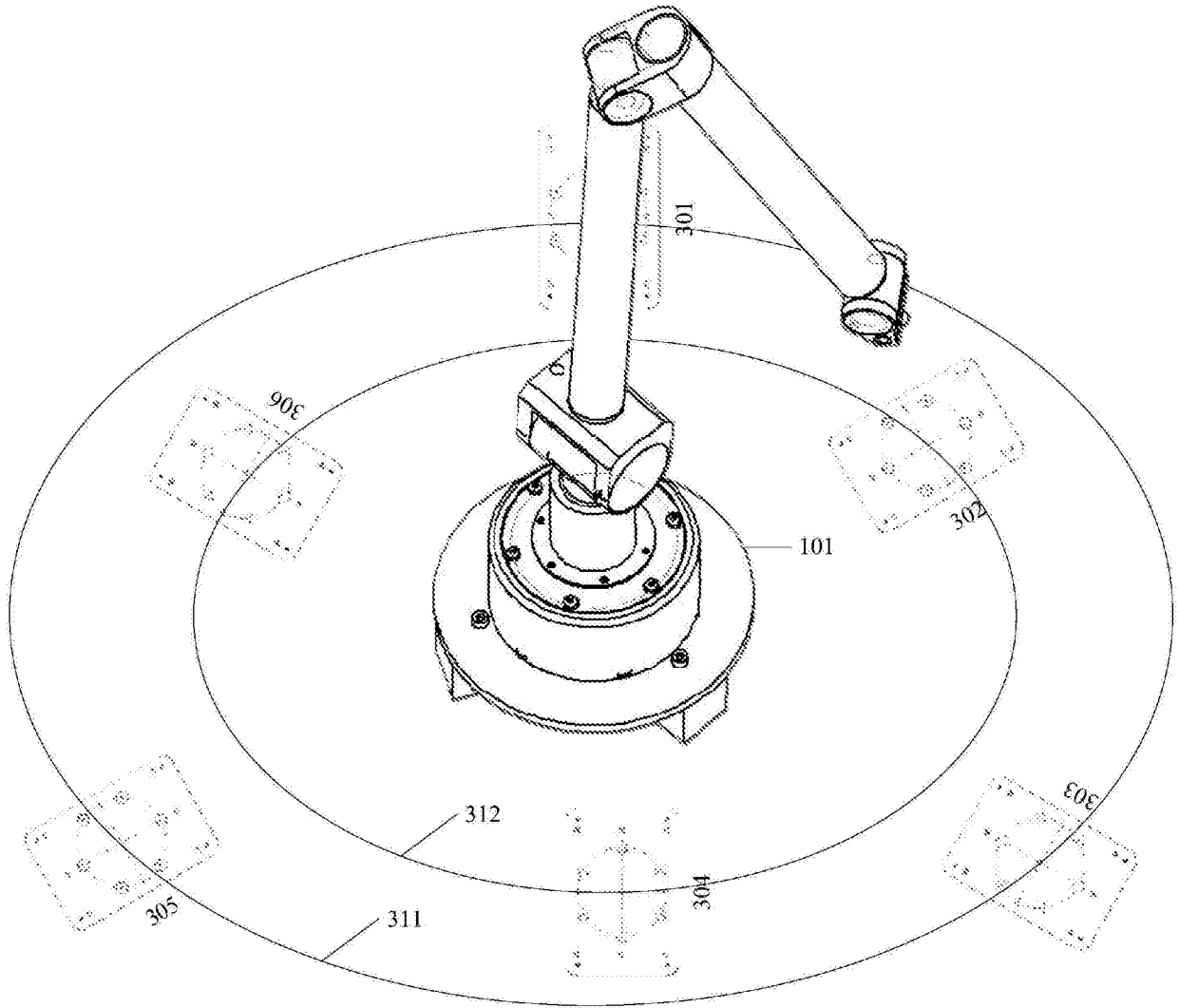


图3