



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 108050960 B

(45)授权公告日 2020.06.02

(21)申请号 201711380705.0

(22)申请日 2017.12.20

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 108050960 A

(43)申请公布日 2018.05.18

(73)专利权人 中国科学院紫金山天文台  
地址 210008 江苏省南京市鼓楼区北京西路2号

(72)发明人 娄铮 左营喜 王珏 钱元

(74)专利代理机构 南京钟山专利代理有限公司  
32252

代理人 戴朝荣

(51)Int.Cl.

G01B 11/26(2006.01)

(56)对比文件

CN 101427155 A,2009.05.06,

CN 101387501 A,2009.03.18,

CN 101226057 A,2008.07.23,

EP 1597539 A1,2005.11.23,

US 2007150194 A1,2007.06.28,

蔡名飞.基于高频电压注入法的永磁同步电机转子初始位置检测.《电力电子》.2011,21-24页.

审查员 刘云

权利要求书2页 说明书6页

(54)发明名称

一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法

(57)摘要

本发明提供了一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法,并包括如下步骤:一、在转动机架的转子和定子上分别粘贴反光靶标,并将定子和转子上的反光靶标数量分别为 $N_s$ 和 $N_r$ ,其中, $N_s$ 和 $N_r$ 均为正整数;二、在初始未发生转动的条件下,对转动机架上的反光靶标进行拍照,并在拍摄完毕后,根据拍摄的照片对各个反光靶标进行解算三维坐标;三、将转动机架的转子转动到 $N_a$ 组待测量角度上,分别进行拍摄并解算三维坐标,得到每一待测量角度下各个反光靶标的三维坐标;四、根据步骤二和步骤三得到的各个反光靶标的三维坐标 $\vec{P}_i^0$ 和 $\vec{P}_i^j$ ,拟合计算在给定转动指令的条件下,转子相对于定子的相对转动角度。

1. 一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法,其特征在于:包括如下步骤:

一、在转动机架的转子和定子上分别粘贴反光靶标,并将定子和转子上的反光靶标数量分别为 $N_s$ 和 $N_r$ ,其中, $N_s$ 和 $N_r$ 均为正整数;

二、在初始未发生转动的条件下,对转动机架上的反光靶标进行拍照,并在拍摄完毕后,根据拍摄的照片对各个反光靶标进行解算三维坐标,记作: $\vec{P}_i^0$ ,其中, $i=1,2,\dots,N_r$ ;

三、将转动机架的转子转动到 $N_a$ 组待测量角度上,分别进行拍摄并解算三维坐标,得到每一待测量角度下各个反光靶标的三维坐标,并记作:

$$\vec{P}_i^j = \begin{pmatrix} x_i^j \\ y_i^j \\ z_i^j \end{pmatrix},$$

其中, $i=1,2,\dots,N_r$ , $j=1,2,\dots,N_a$ , $N_a$ 为正整数, $x_i^j$ 、 $y_i^j$ 、 $z_i^j$ 分别为反光靶标的坐标数值;

四、根据步骤二和步骤三得到的各个反光靶标的三维坐标 $\vec{P}_i^0$ 和 $\vec{P}_i^j$ ,拟合计算在给定转动指令的条件下,转子相对于定子的相对转动角度;

所述拟合计算的步骤中,利用最小二乘法找到使得拟合函数达到极小值的转动角 $\theta_j$ ,拟合函数为:

$$f_j(\theta_j) = \sum_{i=1}^{N_r} \left\| R(\theta_j) \cdot (\vec{P}_i^0 - \vec{O}_i) + \vec{O}_i - \vec{P}_i^j \right\|^2,$$

其中, $i=1,2,\dots,N_r$ , $j=1,2,\dots,N_a$ , $\| \quad \|$ 为求模运算, $R(\theta_j)$ 为坐标旋转矩阵, $\vec{O}_i$ 为每一个反光靶标的旋转中心位置矢量。

2. 根据权利要求1所述的一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法,其特征在于:在步骤四中反光靶标的旋转中心位置矢量 $\vec{O}_i$ 的拟合包括如下步骤:

拟合每一个反光靶标所在的旋转平面 $A_i x + B_i y + C_i z = 1$ ,

$$\begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{N_a} x_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{N_a} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{N_a} x_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{N_a} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{N_a} y_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{N_a} y_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{N_a} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{N_a} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{N_a} z_i^j{}^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{N_a} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{N_a} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{N_a} z_i^j \end{bmatrix};$$

拟合每一个反光靶标的旋转轴方向矢量 $\hat{v}_i$ :

$$\hat{v}_i = g_i \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix},$$

$$g_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}};$$

拟合转动机架的旋转轴 $\hat{v}$ ：

$$\hat{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \frac{1}{Nr} \sum_{i=1}^{Nr} \hat{v}_i;$$

拟合每一个反射靶标的旋转中心位置矢量 $\vec{O}_i$ ：

$$\vec{O}_i = \vec{S}_i + \left( 1 - \frac{\hat{v} \cdot \vec{S}_i}{g_i} \right) \hat{v},$$

$$\vec{S}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j \\ -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j & Na+1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ -\sum_{j=0}^{Na} (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \end{bmatrix}.$$

3. 根据权利要求2所述的一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法,其特征  
在于:在步骤四中, $R(\theta_j)$ 为坐标旋转矩阵,其定义为:

$$R(\theta_j) = \begin{bmatrix} \cos \theta_j + v_x^2 (1 - \cos \theta_j) & v_x v_y (1 - \cos \theta_j) - v_z \sin \theta_j & v_x v_z (1 - \cos \theta_j) + v_y \sin \theta_j \\ v_y v_x (1 - \cos \theta_j) + v_z \sin \theta_j & \cos \theta_j + v_y^2 (1 - \cos \theta_j) & v_y v_z (1 - \cos \theta_j) - v_x \sin \theta_j \\ v_z v_x (1 - \cos \theta_j) - v_y \sin \theta_j & v_z v_y (1 - \cos \theta_j) + v_x \sin \theta_j & \cos \theta_j + v_z^2 (1 - \cos \theta_j) \end{bmatrix}.$$

## 一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于图像信息技术处理领域,具体地涉及一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法。

### 背景技术

[0002] 现代天文望远镜对指向精度的要求日益提高。在射电领域,大型射电天文望远镜(如FAST望远镜、德令哈13.7米口径毫米波望远镜等)的主波束宽度的典型值为10-50角秒,为了保证观测效率,通常要求望远镜指向精度达到 $\times 1$ 角秒量级。

[0003] 望远镜指向误差通常包含系统偏差部分和随机误差部分,其中系统偏差部分可以通过指向模型得以修正,修正后的残余误差则主要为随机指向误差,这部分误差主要由望远镜机架的重复定位精度决定。为了能够对望远镜机架的重复定位能力进行评估,需要对望远镜各轴系在给定转动指令条件下的实际转动角度进行精确的测量,测量精度往往需要达到1-2角秒甚至是亚角秒量级( $\times 0.1$ 角秒)。

[0004] 在天文领域,用于高精度转动测量的设备和方法包括经纬仪、全站仪、激光跟踪仪、角摆仪等。

[0005] 经纬仪和全站仪是直接的测角设备,其缺点是需要人为对准读数,引起的读数误差通常就达到了角秒量级,无法满足高精度转动测量的要求。此外,这类设备需要通过工装架设在机架上,随机架一起转动,这对小型机架的测量会造成不便。经纬仪正常工作时要求水平姿态,因此也会限制其在空间三维转动测量中的应用。

[0006] 激光跟踪仪通常有较高的测距精度,但测角精度较差,极限精度通常在 $\times 1$ 角秒量级。在使用激光跟踪仪测量转动角度时,通常将反射靶标置于待测的机架的转子上,通过测量靶标相对于激光跟踪仪的转动角度来推算机架的转动角度。由于激光跟踪仪并不位于机架的转动中心,在计算过程中有可能会将角度测量误差放大。

[0007] 角摆仪的测量精度较高,可以达到1角秒甚至更高的角分辨率,但其缺点是需要配合激光干涉仪使用。此外,角摆仪只能测量平面内的转动角,无法实现空间三维任意方向轴上的转动角测量。

### 发明内容

[0008] 本发明的目的在于针对现有技术的缺陷,提供一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法。

[0009] 本发明的技术方案如下:一种基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法包括如下步骤:一、在转动机架的转子和定子上分别粘贴反光靶标,并将定子和转子上的反光靶标数量分别为 $N_s$ 和 $N_r$ ,其中, $N_s$ 和 $N_r$ 均为正整数;二、在初始未发生转动的条件下,对转动机架上的反光靶标进行拍照,并在拍摄完毕后,根据拍摄的照片对各个反光靶标进行解算三维坐标,记作: $\vec{P}_i^0$ ,其中, $i=1,2,\dots,N_r$ ;三、将转动机架的转子转动到 $N_a$ 组待测量角度上,分别进行拍摄并解算三维坐标,得到每一待测量角度下各个反光靶标的三维坐标,并记作:

$$[0010] \quad \vec{P}_i^j = \begin{pmatrix} x_i^j \\ y_i^j \\ z_i^j \end{pmatrix} \text{ 其中, } i=1,2,\dots,Nr, j=1,2,\dots,Na, Na \text{ 为正整数, } x_i^j、y_i^j、z_i^j \text{ 分别}$$

为反光

[0011] 靶标的坐标数值;四、根据步骤二和步骤三得到的各个反光靶标的三维坐标  $\vec{P}_i^0$  和  $\vec{P}_i^j$ , 拟合计算在给定转动指令的条件下, 转子相对于定子的相对转动角度。

[0012] 优选地, 在步骤四中, 拟合计算在给定转动指令的条件下, 转子相对于定子的相对转动角度的步骤中, 利用最小二乘法找到使得拟合函数达到极小值的转动角  $\theta_j$ , 拟合函数为:

$$[0013] \quad f_j(\theta_j) = \sum_{i=1}^{Nr} \left\| R(\theta_j) \cdot (\vec{P}_i^0 - \vec{O}_i) + \vec{O}_i - \vec{P}_i^j \right\|^2,$$

[0014] 其中,  $i=1,2,\dots,Nr, j=1,2,\dots,Na$ ,  $\| \quad \|$  为求模运算,  $R(\theta_j)$  为坐标旋转矩阵,  $\vec{O}_i$  为每一个反光靶标的旋转中心位置矢量。

[0015] 优选地, 在步骤四中反光靶标的旋转中心位置矢量  $\vec{O}_i$  的拟合包括如下步骤:

[0016] 拟合每一个反光靶标所在的旋转平面  $A_i x + B_i y + C_i z = 1$ ,

$$[0017] \quad \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j{}^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j \end{bmatrix};$$

[0018] 拟合每一个反光靶标的旋转轴方向矢量  $\hat{v}_i$ :

$$[0019] \quad \hat{v}_i = g_i \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix},$$

$$[0020] \quad g_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}};$$

[0021] 拟合转动机架的旋转轴  $\hat{v}$ :

$$[0022] \quad \hat{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \frac{1}{Nr} \sum_{i=1}^{Nr} \hat{v}_i ;$$

[0023] 拟合每一个反射靶标的旋转中心位置矢量  $\vec{O}_i$  :

$$[0024] \quad \vec{O}_i = \vec{S}_i + \left( 1 - \frac{\hat{v} \cdot \vec{S}_i}{g_i} \right) \hat{v} ,$$

$$[0025] \quad \vec{S}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix} ,$$

$$[0026] \quad \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^{j^2} & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^{j^2} & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^{j^2} & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j \\ -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j & Na+1 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ -\sum_{j=0}^{Na} (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \end{bmatrix} .$$

[0027] 优选地,在步骤四中, $R(\theta_j)$  为坐标旋转矩阵,其定义为:

$$[0028] \quad R(\theta_j) = \begin{bmatrix} \cos\theta_j + v_x^2(1-\cos\theta_j) & v_x v_y(1-\cos\theta_j) - v_z \sin\theta_j & v_x v_z(1-\cos\theta_j) + v_y \sin\theta_j \\ v_y v_x(1-\cos\theta_j) + v_z \sin\theta_j & \cos\theta_j + v_y^2(1-\cos\theta_j) & v_y v_z(1-\cos\theta_j) - v_x \sin\theta_j \\ v_z v_x(1-\cos\theta_j) - v_y \sin\theta_j & v_z v_y(1-\cos\theta_j) + v_x \sin\theta_j & \cos\theta_j + v_z^2(1-\cos\theta_j) \end{bmatrix} .$$

[0029] 本发明提供的技术方案具有如下有益效果:

[0030] 1、需要的测量设备简单,如数字摄影相机,对测量场景没有特殊要求,适用性广;

[0031] 2、测量设备不需要架设在待测转动机构上,因此不需对待测转动机构做任何结构上的改造;

[0032] 3、可以方便地实现空间三维任意方向轴上的转动角测量;

[0033] 4、可以连续对多种转动姿态进行拍摄,拍摄完毕后通过数据处理可一次性获得多个转动姿态下的转动角;

[0034] 5、反光靶标在待测转动机构上粘贴的位置可以随机分布,但为了获得更高的测量精度,需将靶标尽量均匀地分布在转动圆周方向上,并且尽可能远离转动轴;增加靶标的数量可以有效地提高角度测量精度;而且,在实际应用中,可以根据最终所需的测角精度来确定靶标数目。

## 具体实施方式

[0035] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0036] 除非上下文另有特定清楚的描述,本发明中的元件和组件,数量既可以单个的形式存在,也可以多个的形式存在,本发明并不对此进行限定。本发明中的步骤虽然用标号进行了排列,但并不用于限定步骤的先后次序,除非明确说明了步骤的次序或者某步骤的执行需要其他步骤作为基础,否则步骤的相对次序是可以调整的。可以理解,本文中所使用的术语“和/或”涉及且涵盖相关联的所列项目中的一者或一者以上的任何和所有可能的组合。

[0037] 本发明实施例提供的基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法可以用于任意转动机架,例如望远镜机架、斜轴式太赫兹天线机架等天文领域需要精确调整角度的机架设备。

[0038] 需要说明的是,所述转动机架的包括定子和转子,所述定子为固定部分,所述转子为可转动部分,并且转子可以相对于定子进行转动,从而调节转动机架的角度调节。

[0039] 具体地,所述基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法包括如下步骤:

[0040] 一、在转动机架的转子和定子上分别粘贴反光靶标,并将定子和转子上的反光靶标数量分别为 $N_s$ 和 $N_r$ ,其中, $N_s$ 和 $N_r$ 均为正整数。

[0041] 在步骤一中,具体地,反光靶标的粘贴位置可以随机分布,但要求尽量均匀分布在转动圆周方向上,并且尽可能远离转动轴。

[0042] 二、在初始未发生转动的条件下,对转动机架上的反光靶标进行拍照,并在拍摄完毕后,根据拍摄的照片对各个反光靶标进行解算三维坐标,记作: $\vec{P}_i^0$ ,其中, $i=1,2,\dots,N_r$ 。

[0043] 在步骤二中,具体地,将得到的各个反光靶标的三维坐标作为后续转动测量的参照值。

[0044] 三、将转动机架的转子转动到 $N_a$ 组待测量角度上,分别进行拍摄并解算三维坐标,得到每一待测量角度下各个反光靶标的三维坐标,并记作:

$$[0045] \quad \vec{P}_i^j = \begin{pmatrix} x_i^j \\ y_i^j \\ z_i^j \end{pmatrix},$$

[0046] 其中, $i=1,2,\dots,N_r$ , $j=1,2,\dots,N_a$ , $N_a$ 为正整数, $x_i^j$ 、 $y_i^j$ 、 $z_i^j$ 分别为反光靶标的坐标数值。

[0047] 四、根据步骤二和步骤三得到的各个反光靶标的三维坐标 $\vec{P}_i^0$ 和 $\vec{P}_i^j$ ,拟合计算在给定转动指令的条件下,转子相对于定子的相对转动角度。

[0048] 具体地,在步骤四的拟合计算在给定转动指令的条件下,转子相对于定子的相对转动角度的步骤中,利用最小二乘法找到使得拟合函数达到极小值的转动角 $\theta_j$ ,拟合函数为:

$$[0049] \quad f_j(\theta_j) = \sum_{i=1}^{Nr} \left\| R(\theta_j) \cdot (\vec{P}_i^0 - \vec{O}_i) + \vec{O}_i - \vec{P}_i^j \right\|^2,$$

[0050] 其中,  $i=1, 2, \dots, Nr, j=1, 2, \dots, Na, || \quad ||$  为求模运算,  $R(\theta_j)$  为坐标旋转矩阵,  $\vec{O}_i$  为每一个反光靶标的旋转中心位置矢量。

[0051] 而且, 在步骤四中反光靶标的旋转中心位置矢量  $\vec{O}_i$  的拟合包括如下步骤:

[0052] 拟合每一个反光靶标所在的旋转平面  $A_i x + B_i y + C_i z = 1$ ,

$$[0053] \quad \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j{}^2 & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j z_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j{}^2 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j \end{bmatrix};$$

[0054] 拟合每一个反光靶标的旋转轴方向矢量  $\hat{v}_i$ :

$$[0055] \quad \hat{v}_i = g_i \begin{bmatrix} A_i \\ B_i \\ C_i \end{bmatrix},$$

$$[0056] \quad g_i = \frac{1}{\sqrt{A_i^2 + B_i^2 + C_i^2}};$$

[0057] 拟合转动机架的旋转轴  $\hat{v}$ :

$$[0058] \quad \hat{v} = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{pmatrix} = \frac{1}{Nr} \sum_{i=1}^{Nr} \hat{v}_i;$$

[0059] 拟合每一个反射靶标的旋转中心位置矢量  $\vec{O}_i$ :

$$[0060] \quad \vec{O}_i = \vec{S}_i + \left( 1 - \frac{\hat{v} \cdot \vec{S}_i}{g_i} \right) \hat{v},$$

$$[0061] \quad \vec{S}_i = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \end{bmatrix},$$

$$[0062] \quad \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \\ c_i \\ d_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^{j^2} & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} x_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} y_i^{j^2} & \sum_{j=0}^{Na} y_i^j z_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j x_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^j y_i^j & \sum_{j=0}^{Na} z_i^{j^2} & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j \\ -\sum_{j=0}^{Na} x_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} y_i^j & -\sum_{j=0}^{Na} z_i^j & Na+1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{j=0}^{Na} x_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} y_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ \sum_{j=0}^{Na} z_i^j (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \\ -\sum_{j=0}^{Na} (x_i^{j^2} + y_i^{j^2} + z_i^{j^2}) \end{bmatrix}.$$

[0063] 而且,  $R(\theta_j)$  为坐标旋转矩阵, 其定义为:

$$[0064] \quad R(\theta_j) = \begin{bmatrix} \cos\theta_j + v_x^2(1-\cos\theta_j) & v_x v_y(1-\cos\theta_j) - v_z \sin\theta_j & v_x v_z(1-\cos\theta_j) + v_y \sin\theta_j \\ v_y v_x(1-\cos\theta_j) + v_z \sin\theta_j & \cos\theta_j + v_y^2(1-\cos\theta_j) & v_y v_z(1-\cos\theta_j) - v_x \sin\theta_j \\ v_z v_x(1-\cos\theta_j) - v_y \sin\theta_j & v_z v_y(1-\cos\theta_j) + v_x \sin\theta_j & \cos\theta_j + v_z^2(1-\cos\theta_j) \end{bmatrix}.$$

[0065] 例如, 利用本发明实施例提供的基于数字摄影测量技术的高精度转动测量方法对斜轴式太赫兹天线机架进行了重复定位精度测量。

[0066] 斜轴式太赫兹天线机架高约1.8米, 底部直径约700毫米。机架轴系由一个方位轴和一个斜轴构成, 两轴之间成45度交角。在机架底部的三脚支架(定子)和顶部平台(转子)上分别粘贴了15个和36个反光靶标, 其他的外壁部分均匀粘贴了用于图像拼接的编码标志。待测姿态分别为: 方位轴 $0^\circ$ ,  $120^\circ$ 和 $240^\circ$ , 斜轴 $0^\circ$ ,  $90^\circ$ 和 $180^\circ$ 。

[0067] 首先在计算机上对测量过程进行了仿真, 仿真中假设靶标坐标测量的误差为随机误差, 并假设其均方根为 $3\mu\text{m}$ 。利用本专利提出的方法对测量流程进行模拟仿真, 最终得到角度测量误差的均方根为0.4角秒。

[0068] 接下来利用商用数字摄影测量系统对天线机架的重复定位精度进行了实测。通过测量得到方位轴和斜轴的重复定位精度分别为3.3角秒RMS和3.9角秒RMS。测量系统自身的坐标测量精度约为 $3\mu\text{m}$  RMS, 角度重复测量精度优于0.5角秒RMS, 与仿真结果相符。

[0069] 对于本领域技术人员而言, 显然本发明不限于上述示范性实施例的细节, 而且在不背离本发明的精神或基本特征的情况下, 能够以其他的具体形式实现本发明。因此, 无论从哪一点来看, 均应实施例看作是示范性的, 而且是非限制性的, 本发明的范围由所附权利要求而不是上述说明限定, 因此旨在将落在权利要求的等同要件的含义和范围内的所有变化囊括在本发明内。

[0070] 此外, 应当理解, 虽然本说明书按照实施方式加以描述, 但并非每个实施方式仅包含一个独立的技术方案, 说明书的这种叙述方式仅仅是为清楚起见, 本领域技术人员应当将说明书作为一个整体, 各实施例中的技术方案也可以经适当组合, 形成本领域技术人员可以理解的其他实施方式。