



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103389038 B

(45) 授权公告日 2016. 01. 13

(21) 申请号 201310297952. X

(22) 申请日 2013. 07. 16

(73) 专利权人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁西路 28 号

(72) 发明人 刘志刚 洪军 林正正 郭俊康

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任公司 61200

代理人 徐文权

(51) Int. Cl.

G01B 11/00(2006. 01)

(56) 对比文件

CN 102062575 A, 2011. 05. 18,

CN 102589430 A, 2012. 07. 18,

CN 102200429 A, 2011. 09. 28,

周维虎等. 光束平差在激光跟踪仪系统精度评定中的应用. 《光学精密工程》. 2012, 第 20 卷 (第 4 期),

邹峥嵘. 电子经纬仪工业测量系统的光束平差法数据处理. 《工程勘察》. 2000, (第 2 期),

洪军等. 基于状态空间模型的精密机床装配精度预测与调整工艺. 《机械工程学报》. 2013, 第 49 卷 (第 6 期),

高羨明等. 多准则数控机床模块谱系聚类的划分方法研究. 《西安交通大学学报》. 2011, 第 45 卷 (第 5 期),

Sergio Aguado et al. Identification strategy of error parameter in volumetric error compensation of machine tool based on laser tracker measurements.

《International Journal of Machine Tools & Manufacture》. 2011, 第 53 卷

审查员 秦婷婷

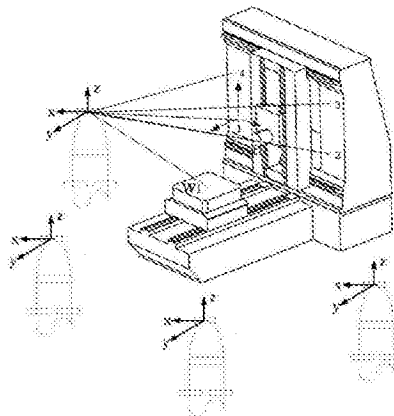
权利要求书2页 说明书8页 附图2页

(54) 发明名称

激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法

(57) 摘要

本发明公开了一种激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法,采用一台激光跟踪仪在对某一待测目标点及固定 4 个靶球座点进行 4 个不同基站位置处的测量,通过对测量数据处理能够分离出机床的各项误差。测量过程中取值包括位移量及角度的测量,计算中考虑位移量和角度的不确定度,因此具有较高的测量精度范围。由于采用变换基站位置测量,与目前多站测量原理相比,系统硬件成本大大降低。同时一次目标点的测量便能够分离出机床的各项误差,检测效率大大提高。该方法具有快速、精度高等优点,适合于中高档机床的几何精度检测。



1. 一种激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法,其特征在于,包括下述测量步骤:

(1) 定点多位置测量步骤

测量时,先在机床床身固定位置布置四个靶球座作为四个固定靶球座点,在机床主轴及工作台上布置靶球座作为待测目标点,控制机床主轴及工作台在三维空间运动,并在其运动轨迹上设置多个测量目标点,当机床主轴或工作台运动至某一测量目标点时,激光跟踪仪依次移动至四个不同基站位置,在每一基站位置处,激光跟踪仪对固定床身上四个固定靶球座点及待测目标点进行检测得到各极坐标值,重复上述过程,直至都完成所有待测目标点相应的测量;

(2) 测量数据处理及分析

A. 测量点坐标求解

采取每个待测目标点所得数据相互独立原则,以机床主轴上一点 t_1 为待测目标点,在完成该待测目标点的测量后,沿运动轨迹移动到下一测量目标点进行测量,依次完成运动轨迹中所有测量目标点的测量;设 P_1 基站为四个不同基站的任意一个,进行待测目标点测量,测量主轴刀尖上一待测目标点 t_1 ,则得数据为 $(r_{P_1,t_1}, \phi_{P_1,t_1}, \theta_{P_1,t_1})$;

r_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中极径;

ϕ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中水平角;

θ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中俯仰角;

根据不同基站位置处测量得到的数据,对这些数据应用光束平差的方法进行数据融合,从而计算得到考虑权重的均值和协方差矩阵;

根据上述所计算考虑权重的均值,与各测量目标点数控系统理论坐标值 $A_i(x_i, y_i, z_i)$ 进行比较,得到各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$;

所述的光束平差方法,其计算过程如下公式所示:

主轴刀尖上靶球待测目标点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵为:

$${}^P U_{P_1,t_1} = \begin{bmatrix} (u_{r_{\min}} + r_{P_1,t_1} \cdot u_{r,j})^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\phi,j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\theta,j}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式子已知参数为:

$$u_{r_{\min},j} = 2 \mu m$$

$$u_{r,j} = 2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$u_{\phi,j} = u_{\theta,j} = 10^{-5}$$

其中 ${}^P U_{P_1,t_1}$ 为点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵;

该基站位置的极坐标系向笛卡尔坐标系转换的旋转矩阵为:

$${}^P R_{P_1,t_1} = [\hat{x}_r \quad \hat{x}_\phi \quad \hat{x}_\theta] \quad (3)$$

设定由 p_1 基站位置坐标系向固定坐标系 1 原点的角度转换矩阵为： ${}_{p_1}^1R$ ，其次变换矩阵为： ${}_{p_1}^1T$ ；

则待测目标点的协方差转换到固定坐标系为：

$${}^1U_{p_1,t_1} = {}^1R_{p_1} \cdot {}^pU_{p_1,t_1} \cdot ({}^1R)^T = {}^1T_{p_1} \cdot {}^pR_{t_1} \cdot {}^pU_{p_1,t_1} \cdot ({}^pR_{t_1})^T \cdot ({}^1R)^T \quad (4)$$

${}^1U_{p_1,t_1}$ —— P_1 基站所测点 t_1 在固定坐标系 1 中的协方差矩阵；

由齐次变换可知：

$${}^1x_{p_1,t_1} = {}^1T_{p_1} \cdot x_{p_1,t_1} \quad (5)$$

${}^1x_{p_1,t_1}$ —— P_1 基站所测待测目标点在固定坐标系中坐标值；

${}^p x_{p_1,t_1}$ —— P_1 基站所测待测目标点坐标值；

则考虑权重值的均值和协方差为：

$$\mu_k = U_{\mu_k} \cdot \sum_{j=1}^4 \left[({}^1U_{p_j,t_k})^{-1} \cdot {}^1x_{p_j,t_k} \right] \quad (6)$$

$$U_{\mu_k} = \left(\sum_{j=1}^4 ({}^1U_{p_j,t_k})^{-1} \right)^{-1} \quad (7)$$

μ_k —— 由不同基站数据计算得第 k 点的加权均值；

U_{μ_k} —— 由不同基站数据计算得第 k 点的协方差；

B、机床误差分离

利用测量得到的各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ，采用九线法进行误差分离，从而获得对应位置处机床的各项几何误差。

激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法

技术领域

[0001] 本发明属于激光精密检测技术,涉及一种激光跟踪仪定目标多站的数控机床几何精度检测方法。

背景技术

[0002] 随着基础制造业和精密加工技术的不断发展,人们对于数控机床的加工精度提出了更高的要求,因此,如何快速准确的检测出机床各项误差并进行相关项误差的补偿,对于提高数控机床的加工精度起到了非常重要的作用。数控机床的几何误差受外部环境因素影响较小,重复性好,且易于实现数控补偿,所以是数控机床误差补偿的重要研究方向。

[0003] 目前,国内外用于检测数控机床几何误差的方法有很多,常见的有:球杆仪法,正交光栅测量法,激光干涉仪测量法等,但这些方法在检测效率以及检测通用性上存在着一定的不足之处,不能够满足机床快速、高精度的检测要求。

[0004] 激光跟踪测量系统随着机器人在制造业中的逐步应用从而得到了迅速广泛的发展。激光跟踪系统具有快速、动态、高精度的特点,满足了现代工业的大范围、现场测量、无导轨测量、动态测量等新的测量要求,已逐步成为检测领域中不可替代的测量工具。国内虽也有采用激光跟踪仪检测数控机床的应用,但多为单站式直接测量法,对于中高档机床进行误差检测时,精度有待进一步提高,也有多站式分时测量,但未考虑精密机床在多次测量中虽然进行同一路线运动,但目标测量点存在定位误差,影响实际测量机床精度。

[0005] 激光跟踪测量系统按照原理可主要分为:基于球坐标法、三角法、多边形法三种原理,按跟踪系统的数量还可将其分为单站式、多站式两种配置。

[0006] 采用单站法测量机床几何精度时,由于转角的测量精度有限,而且角度测量不确定度会随着距离的增大而增大,与激光干涉仪的测距精度相差甚远,影响了空间坐标整体精度。因此,采用单站式对中高档数控机床进行测量时,测量精度难以得到保证。多站式测量时应用多边形法定位原理,测量过程中只利用激光跟踪仪的测距信息,而不用测角信息,因此具有较高的测量精度,但需要多台激光跟踪仪同时对目标点进行测量,成本较高,工程应用较为困难。多站分时测量能够较好的解决测量成本问题,只需一台激光跟踪仪,然而没有考虑测量过程中的定位误差对测量结果产生较大的影响,难以满足高精度机床的测量要求。

[0007] 综上所述,针对目前数控机床精度检测方法存在的不足,有必要提出一种新的数控机床精度检测方法,以实现数控机床几何误差的快速和高精度检测。

发明内容

[0008] 为了克服目前数控机床几何误差检测方法不能够满足机床的快速、高精度检测要求,本发明的目的是提供一种激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床精度检测方法,该方法具有快速、精度高、考虑测量不确定度等优点,适合中高档数控机床的精度检测。

[0009] 为达到以上目的,本发明是采取如下技术方案予以实现的:

[0010] 一种激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法,包括下述测量步骤:

[0011] (1) 定点多位置测量步骤

[0012] 测量时,先在机床床身固定位置布置四个靶球座,在机床主轴及工作台上布置靶球座作为待测目标点。控制机床主轴及工作台在三维空间运动,并在其运动轨迹上设置多个测量目标点,当机床主轴或工作台运动至某一目标测量点时,激光跟踪仪依次移动至四个不同基站位置,在每一基站位置处,激光跟踪仪对固定床身上四个固定靶球座点及待测目标点进行检测得到各极坐标值。重复上述过程,直至都完成所有待测目标点相应的测量。

[0013] (2) 测量数据处理及分析

[0014] A. 测量点坐标求解

[0015] 采取每个测量点所得数据相互独立原则,以机床主轴上一点 t_1 为机床待测量点,在完成该点的测量后,沿运动轨迹移动到下一待测点进行测量,依次完成运动轨迹中所有待测点的测量;设 P_1 基站为四个不同基站的任意一个,进行待测点测量,测量主轴刀尖上一点 t_1 ,则得数据为 $(r_{P_1,t_1}, \phi_{P_1,t_1}, \theta_{P_1,t_1})$;

[0016] r_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中极径;

[0017] ϕ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中水平角;

[0018] θ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中俯仰角;

[0019] 根据不同基站位置处测量得到的数据,对这些数据应用光束平差的方法进行数据融合,从而计算得到考虑权重的均值和协方差矩阵;

[0020] 根据上述所计算考虑权重的均值,与各测量点数控系统理论坐标值 $A_i (x_i, y_i, z_i)$ 进行比较,得到各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$;

[0021] B、机床误差分离

[0022] 利用测量得到的各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$,采用九线法进行误差分离,从而获得对应位置处机床的各项几何误差。

[0023] 进一步的,上述步骤 A 中,所述的光束平差方法,其计算过程如下公式所示:

[0024] 主轴刀尖上靶球点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵为:

$$[0025] \quad {}^P U_{P_1,t_1} = \begin{bmatrix} (u_{r_{min,j}} + r_{P_1,t_1} \cdot u_{r,j})^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\phi,j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\theta,j}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0026] 式子已知参数为:

$$u_{r_{min,j}} = 2 \mu m$$

$$[0027] \quad u_{r,j} = 2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$u_{\phi,j} = u_{\theta,j} = 10^{-5}$$

[0028] 其中 ${}^P U_{P_1,t_1}$ 为点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵;

[0029] 该基站位置的极坐标系向笛卡尔坐标系转换的旋转矩阵为:

[0030]

$${}_{P_1}^P R_{t_1} = [\hat{x}_t \quad \hat{x}_\phi \quad \hat{x}_\theta] \quad (3)$$

[0031] 设定由 P_1 基站位置坐标系向固定坐标系 1 原点的角度转换矩阵为： ${}_{P_1}^1 R$ ，其次变换矩阵为： ${}_{P_1}^1 T$

[0032] 则测量点的协方差转换到固定坐标系为：

$${}^1 U_{P_1, t_1} = {}_{P_1}^1 R \cdot {}_{P_1}^P U_{P_1, t_1} \cdot ({}_{P_1}^1 R)^T = {}_{P_1}^1 T \cdot {}_{P_1}^P R_{t_1} \cdot {}_{P_1}^P U_{P_1, t_1} \cdot ({}_{P_1}^P R_{t_1})^T \cdot ({}_{P_1}^1 T)^T \quad (4)$$

[0034] ${}^1 U_{P_1, t_1}$ —— P_1 基站所测点 t_1 在固定坐标系 1 中的协方差矩阵；

[0035] 由齐次变换可知：

[0036]

$${}^1 X_{P_1, t_1} = {}_{P_1}^1 T \cdot X_{P_1, t_1} \quad (5)$$

[0037] ${}^1 X_{P_1, t_1}$ —— P_1 基站所测目标点在固定坐标系中坐标值；[0038] ${}_{P_1} X_{P_1, t_1}$ —— P_1 基站所测目标点坐标值；

[0039] 则考虑权重值的均值和协方差为：

$${}^1 \mu_k = U_{\mu_k} \cdot \sum_{j=1}^4 \left[({}^1 U_{P_j, t_k}) \cdot {}^1 X_{P_j, t_k} \right] \quad (6)$$

$${}^1 U_{\mu_k} = \left(\sum_{j=1}^4 ({}^1 U_{P_j, t_k}) \right)^{-1} \quad (7)$$

[0042] μ_k ——由不同基站数据计算得第 k 点的加权均值；[0043] U_{μ_k} ——由不同基站数据计算得第 k 点的协方差。

[0044] 与现有技术相比，本发明具有以下有益效果：

[0045] 本发明提出的激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法，测量过程中涉及位移及角度量的不确定度对测量结果的影响，结果更准确、更符合实际情况。本发明与多站测量原理相比，测量系统硬件成本大为降低，只需要一台激光跟踪仪。与多站分时测量相比较，多站分时测量基站移动时假定测量目标点在运动轨迹中不变，即定位误差为零，本发明没有此假设，应该测量计算值更加准确，精度更高。通过一次所有目标点的测量便可以分离出机床的各项误差，检测效率较高，满足了快速、高精度的检测要求，适合中高档数控机床的几何精度检测。

附图说明

[0046] 图 1 是本发明定目标点四站测量数控机床精度的原理图；

[0047] 图 2 是本发明定目标多站式测量数控机床几何精度的数学模型结构示意图；

[0048] 图 3 是本发明中由某一基站坐标系向固定坐标系转换关系示意图。

具体实施方式

[0049] 下面结合附图对本发明做进一步详细描述：

[0050] 如图 1、图 2 所示：一种基于激光跟踪仪定目标多站测量的数控机床几何精度检测方法，其特征在于，包括下述步骤：

[0051] (1) 定点多位置测量步骤

[0052] 测量时，先在机床床身固定位置布置四个靶球座，在机床主轴及工作台上布置靶球座作为待测点。控制机床主轴及工作台在三维空间运动，并在其运动轨迹中设置多个测量点，当机床运动至某一测量目标点时，激光跟踪仪移动四个基站位置，在每一基站位置处，激光跟踪仪对固定床身上四个靶球座点及待测量点进行检测得到极坐标值。重复上述过程，直至所有测量目标点都完成了相应的测量。

[0053] 图 2 的机床运动区域按正方体给出，同时在正方体的每条边上分布着若干个测量点，测量点的数目可以根据测量的精度以及导轨长度等实际情况进行相应的设置。

[0054] (2) 测量所得数据处理

[0055] A. 测量点坐标求解

[0056] 采取每个测量点所得数据相互独立原则，以机床主轴上一点 t_1 为机床待测量点，在进行该点的测量后，沿坐标轴方向移动到下一待测量点，进行相类似的测量，依次测完运动轨迹中所有待测点。设 P_1 基站为四个不同基站的任意一个，进行待测点测量，测量主轴刀尖上一点 t_1 ，则可得数据为 $(r_{P_1,t_1}, \phi_{P_1,t_1}, \theta_{P_1,t_1})$ ：

[0057] 其中：

[0058] r_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中极径；

[0059] ϕ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中水平角；

[0060] θ_{P_1,t_1} —— P_1 基站到 t_1 点极坐标系中俯仰角；

[0061] 根据不同基站位置处测量得到的数据，对这些数据应用光束平差的方法进行数据融合，从而计算得到考虑权重的均值和协方差矩阵；

[0062] 所述的光束平差方法，其计算过程如所示：

[0063] 主轴刀尖上靶球点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵为：

$$[0064] \quad {}^P U_{P_1,t_1} = \begin{bmatrix} (u_{r_{\min}} + r_{P_1,t_1} \cdot u_{r,j})^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\phi,j}^2 & 0 \\ 0 & 0 & r_{P_1,t_1}^2 \cdot u_{\theta,j}^2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

[0065] 式子已知参数为：

$$u_{r_{\min},j} = 2 \mu m$$

$$[0066] \quad u_{r,j} = 2 \times 10^{-6} \quad (2)$$

$$u_{\phi,j} = u_{\theta,j} = 10^{-5}$$

[0067] 其中 ${}^P U_{P_1,t_1}$ 为点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵；

[0068] 该基站位置的极坐标系向笛卡尔坐标系转换的旋转矩阵为：

[0069]

$${}^p R_{p_i} = \begin{bmatrix} \hat{x}_r \\ \hat{x}_\phi \\ \hat{x}_\theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0070] 设定由 p_1 基站位置坐标系向固定坐标系 1 原点的角度转换矩阵为： ${}^1 R_{p_1}$ ，其次变换矩阵为： ${}^1 T_{p_1}$

[0071] 则测量点的协方差转换到固定坐标系为：

$${}^1 U_{p_i, A_i} = {}^1 R_{p_i} \cdot {}^p U_{p_i, A_i} \cdot ({}^1 R_{p_i})^T = {}^1 T_{p_i} \cdot {}^p R_{p_i} \cdot {}^p U_{p_i, A_i} \cdot ({}^p R_{p_i})^T \cdot ({}^1 R_{p_i})^T \quad (4)$$

[0073] ${}^1 U_{p_i, A_i}$ —— P_1 基站所测点 t_1 在固定坐标系 1 中的协方差矩阵；

[0074] 由齐次变换可知：

[0075]

$${}^1 x_{p_i, A_i} = {}^1 T_{p_i} \cdot {}^p x_{p_i, A_i} \quad (5)$$

[0076] ${}^1 x_{p_i, A_i}$ —— P_1 基站所测目标点在固定坐标系中坐标值；

[0077] ${}^p x_{p_i, A_i}$ —— P_1 基站所测目标点坐标值；

[0078] 则考虑权重值的均值和协方差为：

$${}^1 \mu_k = U_{\mu_k} \cdot \sum_{j=1}^4 \left[({}^1 U_{p_j, A_k}) \cdot {}^1 x_{p_j, A_k} \right] \quad (6)$$

$${}^1 U_{\mu_k} = \left(\sum_{j=1}^4 ({}^1 U_{p_j, A_k}) \right)^{-1} \quad (7)$$

[0081] μ_k ——由不同基站数据计算得第 k 点的加权均值；

[0082] U_{μ_k} ——由不同基站数据计算得第 k 点的协方差。

[0083] 根据上述所计算考虑权重的均值，与各测量点数控系统理论坐标值 $A_i (x_i, y_i, z_i)$ 进行比较，得到各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ；

[0084] B、机床误差分离

[0085] 利用测量得到的各测量目标点的运动误差 $\Delta A_i = (\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i)$ ，采用使用较为广泛的九线法进行误差分离方法，从而可以获得对应位置处机床的各项几何误差。

[0086] 上述测量方法中，所述步骤(1)中每次测量某一待测点时，需要在 4 个不同基站对 4 个固定点及待测点进行测量，以用于待测点坐标值转换到固定坐标系下。每次待测点的测量，需激光跟踪仪移动 4 个基站位置，且基站位置不固定。

[0087] 以上步骤 A 中，具体推算为：

[0088] 以下公式(A1)、(A2)分别为激光跟踪仪测量点方差方程和已知参数，可知：

[0089]

$$\begin{aligned} u_r &= \hat{x}_r \cdot (u_{r_{\min},j} + r_{j,k} \cdot u_{r,j}) \\ u_\varphi &= \hat{x}_\varphi \cdot (r_{j,k} \cdot u_{\varphi,j}) \\ u_\theta &= \hat{x}_\theta \cdot (r_{j,k} \cdot u_{\theta,j}) \end{aligned} \quad (A1)$$

[0090]

$$\begin{aligned} u_{r_{\min},j} &= 2\mu m \\ u_{r,j} &= 2 \times 10^{-6} \\ u_{\varphi,j} &= u_{\theta,j} = 10^{-5} \end{aligned} \quad (A2)$$

[0091] 则可得主轴刀尖上靶球点 t_1 在该 P_1 基站建立的极坐标下的协方差矩阵为：

[0092]

$${}^P U_{P_1, t_1} = \begin{bmatrix} (u_{r_{\min}} + r_{P_1, t_1} \cdot u_r)^2 & 0 & 0 \\ 0 & r_{P_1, t_1}^2 \cdot u_\varphi^2 & 0 \\ 0 & 0 & r_{P_1, t_1}^2 \cdot u_\theta^2 \end{bmatrix} \quad (A3)$$

[0093] 式子已知参数为：

[0094]
$$u_{r_{\min},j} = 2\mu m$$

[0095]
$$u_{r,j} = 2 \times 10^{-6}$$

[0096]

$$u_{\varphi,j} = u_{\theta,j} = 10^{-5}$$

[0097] 其中 ${}^P U_{P_1, t_1}$ 为点 t_1 在 P_1 基站下的极坐标系中协方差矩阵；

[0098] 由极坐标转换为笛卡尔坐标系的转换关系可得该基站位置处极坐标系向笛卡尔坐标系转换的旋转矩阵为：

[0099]

$${}_{P_1} R_{t_1} = \begin{bmatrix} \sin(\theta_{P_1, t_1}) \cos(\varphi_{P_1, t_1}) & -\sin(\varphi_{P_1, t_1}) & -\cos(\theta_{P_1, t_1}) \cos(\varphi_{P_1, t_1}) \\ \sin(\theta_{P_1, t_1}) \sin(\varphi_{P_1, t_1}) & \cos(\varphi_{P_1, t_1}) & -\cos(\theta_{P_1, t_1}) \sin(\varphi_{P_1, t_1}) \\ \cos(\theta_{P_1, t_1}) & 0 & \sin(\theta_{P_1, t_1}) \end{bmatrix} \quad (A4)$$

[0100] 上式可以简写为：

[0101]

$${}_{P_1} R_{t_1} = [\hat{x}_r \quad \hat{x}_\varphi \quad \hat{x}_\theta] \quad (A5)$$

[0102] 则按以下式(A6)可将该点测量数据的方差矩阵转换到基站 1 处笛卡尔坐标系上为：

[0103]

$${}^P U_{P_1, t_1} = {}_{P_1} R_{t_1} \cdot {}^P U_{P_1, t_1} \cdot ({}_{P_1} R_{t_1})^T \quad (A6)$$

[0104] 基站 1 对固定坐标系原点 1 点, 进行测量, 可得 $(r_{p_1,1}, \phi_{p_1,1}, \theta_{p_1,1})$;

[0105] ${}_{j_1}^{j_2}T$ 为 j_1 坐标系转换至 j_2 坐标系的齐次变换矩阵, 其表示方法为:

[0106]

$${}_{j_1}^{j_2}T = \left[\begin{array}{ccc|c} {}_{j_1}^{j_2}R & & & {}_{j_1}^{j_2}\Delta x \\ \hline 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right] \quad (A7)$$

[0107] 其中, 角度变换矩阵与其俯仰、扭摆、滚转角度有关, 为:

[0108]

$${}_{j_1}^{j_2}R = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & [\cos \alpha \sin \beta \sin \gamma - \sin \alpha \cos \gamma] & [\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma + \sin \alpha \sin \gamma] \\ \sin \alpha \cos \beta & [\sin \alpha \sin \beta \sin \gamma + \cos \alpha \cos \gamma] & [\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma - \cos \alpha \sin \gamma] \\ -\sin \beta & \cos \beta \sin \gamma & \cos \beta \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (A8)$$

[0109] 考虑到其角度变化较小, 我们认为 $\sin \alpha = \alpha$, $\cos \alpha = 1$ 则上式为:

$${}_{j_1}^{j_2}R = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta \\ \alpha & 1 & -\gamma \\ -\beta & \gamma & 1 \end{bmatrix} \quad (A9)$$

[0111] 平移矩阵为:

$${}_{j_1}^{j_2}\Delta x = \left[\begin{array}{ccc|c} {}_{j_1}^{j_2}\Delta x_1 & {}_{j_1}^{j_2}\Delta x_2 & {}_{j_1}^{j_2}\Delta x_3 & 1 \end{array} \right]^T \quad (A10)$$

[0113] 设定由 p_1 位置坐标系向固定坐标系原点的转换矩阵为: ${}_{p_1}^1R$

[0114] 则测量点的协方差转换到固定坐标系为:

[0115]

$${}^1U_{p_1,1} = {}^1R \cdot {}^{p_1}U_{p_1,1} \cdot ({}^{p_1}R)^T = {}^1T \cdot {}^{p_1}R_{p_1} \cdot {}^{p_1}U_{p_1,1} \cdot ({}^{p_1}R_{p_1})^T \cdot ({}^1R)^T \quad (A11)$$

[0116] 式(A12)可知:

[0117]

$${}^1x_{j,k} = {}^1T \cdot {}^jx_{j,k} \quad (A12)$$

[0118]

$${}^1x_{p_1,1} = {}^1T \cdot {}^{p_1}x_{p_1,1} \quad (A13)$$

[0119] 由公式 ${}^1x = {}^1T \cdot {}^{p_1}x$ 可得建立固定坐标系方程为:

[0120]

$$p_1 \rightarrow 1: \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta & r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \\ \alpha & 1 & -\gamma & r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \\ -\beta & \gamma & 1 & r_1 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \\ r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \\ r_1 \cos \theta_1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0121]

$$p_1 \rightarrow 2: \begin{bmatrix} x \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta & r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \\ \alpha & 1 & -\gamma & r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \\ -\beta & \gamma & 1 & r_1 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_2 \sin \theta_2 \cos \varphi_2 \\ r_2 \sin \theta_2 \sin \varphi_2 \\ r_2 \cos \theta_2 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0122]

$$x = \sqrt{(r_2 \sin \theta_2 \cos \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1)^2 + (r_2 \sin \theta_2 \sin \varphi_2 - r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1)^2 + (r_2 \cos \theta_2 - r_1 \cos \theta_1)^2}$$

[0123]

$$p_1 \rightarrow 4: \begin{bmatrix} 0 \\ y \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\alpha & \beta & r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1 \\ \alpha & 1 & -\gamma & r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1 \\ -\beta & \gamma & 1 & r_1 \cos \theta_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_4 \sin \theta_4 \cos \varphi_4 \\ r_4 \sin \theta_4 \sin \varphi_4 \\ r_4 \cos \theta_4 \\ 1 \end{bmatrix}$$

[0124]

$$y = \sqrt{(r_4 \sin \theta_4 \cos \varphi_4 - r_1 \sin \theta_1 \cos \varphi_1)^2 + (r_4 \sin \theta_4 \sin \varphi_4 - r_1 \sin \theta_1 \sin \varphi_1)^2 + (r_4 \cos \theta_4 - r_1 \cos \theta_1)^2}$$

[0125] 可得 ${}^i_2 T$ 。

[0126] 则考虑权重值的均值和协方差为：

$$[0127] \quad \mu_k = U_{\mu_k} \cdot \sum_{j=1}^4 \left[\left({}^1 U_{p_j, t_k} \right)^{-1} \cdot {}^1 \mathbf{x}_{p_j, t_k} \right] \quad (A14)$$

$$[0128] \quad U_{\mu_k} = \left(\sum_{j=1}^4 \left({}^1 U_{p_j, t_k} \right)^{-1} \right)^{-1} \quad (A15)$$

[0129] 图3是本发明中由某一基站坐标系向固定坐标系转换关系示意图。其中，P1、P2、P3、P4是激光跟踪仪不同基站位置，1、2、3、4是机床上固定靶球座点以建立固定坐标系，t1是主轴刀尖上待测目标点，w1是工作台待测目标点。

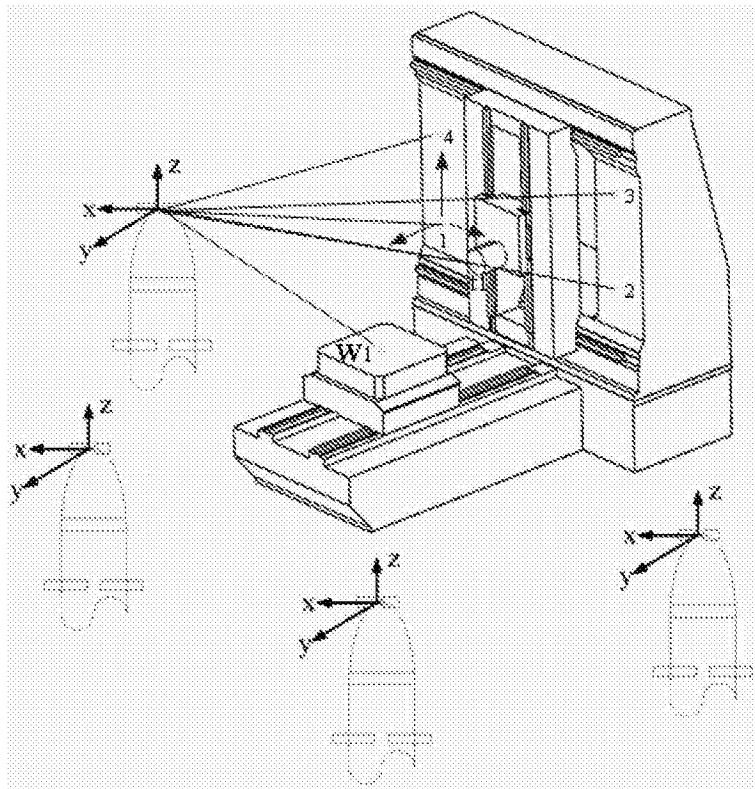


图 1

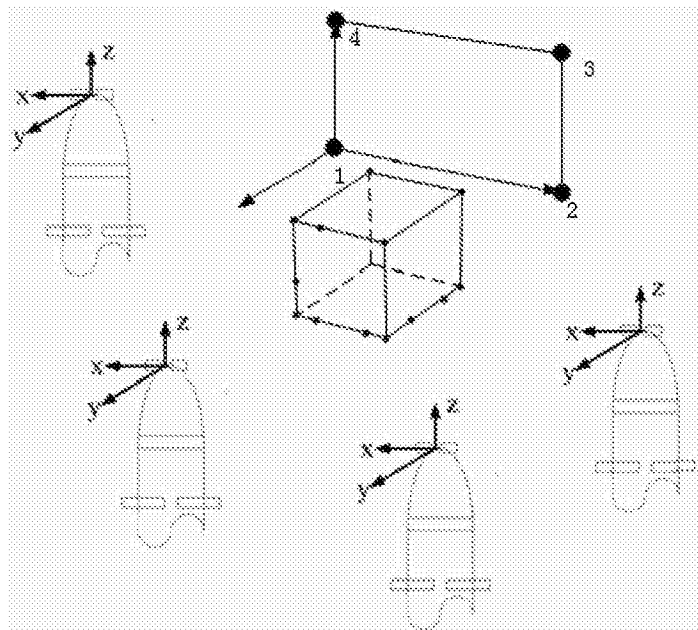


图 2

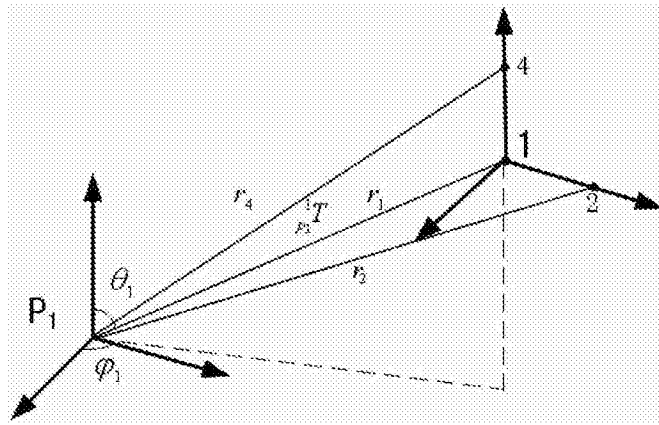


图 3