



(21) 申请号 202311330263.4

(22) 申请日 2023.10.16

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 117067221 A

(43) 申请公布日 2023.11.17

(73) 专利权人 北京科技大学  
地址 100083 北京市海淀区学院路30号  
专利权人 北京科技大学顺德创新学院

(72) 发明人 劳达宝 全永彬 王方 刘雨坤  
王浩宇

(74) 专利代理机构 北京市广友专利事务所有限  
责任公司 11237

专利代理师 张仲波

(51) Int. Cl.

B25J 9/16 (2006.01)

(56) 对比文件

CN 110815204 A, 2020.02.21

CN 111055273 A, 2020.04.24

CN 113119130 A, 2021.07.16

CN 114029959 A, 2022.02.11

CN 114147726 A, 2022.03.08

CN 114714348 A, 2022.07.08

CN 114833834 A, 2022.08.02

CN 114952861 A, 2022.08.30

JP 2019168775 A, 2019.10.03

杨聚庆;王大勇;董登峰;程智;劳达宝;周维虎.机械臂全工作空间域非参数约束位姿误差估算.光学精密工程.2018,(第10期),2430-2437.

审查员 梁磊

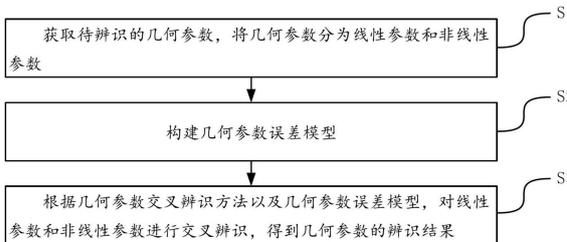
权利要求书3页 说明书15页 附图5页

(54) 发明名称

基于六自由度工业机器人误差模型和交叉  
辨识方法及装置

(57) 摘要

本发明公开了一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法及装置,涉及工业机器人校准技术领域。包括:获取待辨识的几何参数,将几何参数分为线性参数和非线性参数;构建几何参数误差模型;根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,对线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果。本发明通过引入工具坐标相对于法兰坐标系、基坐标系相对于测量坐标系的标定误差,建立了更完善的工业机器人几何参数误差模型。同时,设计了基Levenberg Marquardt算法的交叉辨识策略,能准确标定工业机器人的实际连杆结构参数,从而提高工业机器人末端位置精度和姿态精度。



1. 一种基于六自由度工业机器人误差模型的交叉辨识方法,其特征在于,所述方法包括:

S1、获取待辨识的几何参数,将所述几何参数分为线性参数和非线性参数;

S2、构建几何参数误差模型;

S3、根据几何参数交叉辨识方法以及所述几何参数误差模型,对所述线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果;

所述S2中的几何参数误差模型的构建过程,包括:

S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系;定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数;其中,所述坐标系包括:测量坐标系MCF、基坐标系BCF、关节坐标系JCF、法兰坐标系FCF和工具坐标系TCF;

S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程;

S23、根据所述坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差;

S24、根据所述旋转参数和平移参数,计算法兰坐标系相对基坐标系的第一微分变换矩阵、基坐标系相对测量坐标系的第二微分变换矩阵以及工具坐标系相对于法兰坐标系的第三微分变换矩阵,根据所述第一微分变换矩阵、第二微分变换矩阵、第三微分变换矩阵以及所述工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

2. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述S21中的坐标系间的变换关系包括:BCF相对于MCF的变换 ${}^0_mT$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^n_tT$ 、FCF相对于BCF的变换 ${}^0_nT$ 以及TCF相对于MCF的变换 ${}^t_mT$ 。

3. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述S21中的旋转参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的旋转参数 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的旋转参数 $[\alpha', \beta', \gamma']$ ;

平移参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的平移参数 $[x, y, z]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的平移参数 $[x', y', z']$ 。

4. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述S22中的连杆结构参数包括:连杆长度 $a_i$ 、连杆偏距 $d_i$ 、关节转角 $\theta_i$ 、关节组角 $\alpha_i$ 和绕y轴旋转角 $\beta_i$ 。

5. 根据权利要求1所述的方法,其特征在于,所述S24中的法兰坐标系相对基坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^0T$ ,如下式(1)所示:

$$\begin{aligned} \delta_n^0T &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \\ &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot (D_{\theta_i} \Delta \theta_i + D_{\alpha_i} \Delta \alpha_i + D_{\beta_i} \Delta \beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} {}^{i-1}_0T \cdot D_{w_i} \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \cdot \Delta w_i, \quad w_i \in \{\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i\} \end{aligned}$$

其中, $n$ 表示机器人自由度, ${}^{i-1}_i T$ 表示相邻两关节坐标系的变换关系, $\delta_{i-1}^i T$ 表示相邻

关节坐标系的微分变换矩阵,  $\Delta\theta_i$ 表示工业机器人关节*i*的关节转角偏差、 $\Delta\alpha_i$ 表示工业机器人关节*i*的关节组角偏差、 $\Delta\beta_i$ 表示工业机器人关节*i*的绕*y*轴旋转角偏差、 $\Delta\alpha_i$ 表示工业机器人关节*i*的连杆长度偏差、 $\Delta d_i$ 表示工业机器人关节*i*的连杆偏距偏差,  $D_{\theta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节转角矩阵、 $D_{\alpha_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节组角矩阵、 $D_{\beta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的绕*y*轴旋转角矩阵、 $D_{a_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的连杆长度矩阵、 $D_{d_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的连杆偏距矩阵、 $D_{w_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的矩阵,  $\Delta w_i$ 表示*w<sub>i</sub>*偏差,  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ 表示连杆结构参数。

6. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述S24中的基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵 $\delta_m^0T$ , 如下式(2)所示:

$$\delta_m^0T = \sum_u C_u \Delta u, \quad u \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (2)$$

其中,  $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$ 表示基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_u$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x, y, z$ 表示平移参数,  $\alpha, \beta, \gamma$ 表示旋转参数。

7. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述S24中的工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^tT$ , 如下式(3)所示:

$$\delta_n^tT = \sum_v C_v \Delta v, \quad v \in \{x', y', z', \alpha', \beta', \gamma'\} \quad (3)$$

其中,  $\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$ 表示工业机器人工具坐标系相对于法兰坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_v$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x', y', z'$ 表示平移参数,  $\alpha', \beta', \gamma'$ 表示旋转参数。

8. 根据权利要求1所述的方法, 其特征在于, 所述S3中的根据几何参数交叉辨识方法以及所述几何参数误差模型, 对所述线性参数和非线性参数进行交叉辨识, 得到几何参数的辨识结果, 包括:

S31、基于微分旋转参数 $\delta$ , 获取所述几何参数误差模型中与非线性参数相关的等式, 构建线性方程组, 利用列文伯格-马夸尔特Levenberg Marquardt算法对所述线性方程组进行求解, 得到辨识到的非线性参数;

S32、基于位置误差 $\Delta p$ 和微分旋转参数 $\delta$ , 将所述辨识到的非线性参数作为初始值, 根据几何参数交叉辨识方法以及所述几何参数误差模型, 得到辨识到的线性参数和非线性参数;

S33、重复步骤S31和步骤S32, 直到满足预设的迭代停止条件, 得到几何参数的辨识结果。

9. 一种基于六自由度工业机器人误差模型的交叉辨识装置, 其特征在于, 所述装置包括:

获取模块, 用于获取待辨识的几何参数, 将所述几何参数分为线性参数和非线性参数;

构建模块,用于构建几何参数误差模型;

输出模块,用于根据几何参数交叉辨识方法以及所述几何参数误差模型,对所述线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果;

所述几何参数误差模型的构建过程,包括:

S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系;定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数;其中,所述坐标系包括:测量坐标系MCF、基坐标系BCF、关节坐标系JCF、法兰坐标系FCF和工具坐标系TCF;

S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程;

S23、根据所述坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差;

S24、根据所述旋转参数和平移参数,计算法兰坐标系相对基坐标系的第一微分变换矩阵、基坐标系相对测量坐标系的第二微分变换矩阵以及工具坐标系相对于法兰坐标系的第三微分变换矩阵,根据所述第一微分变换矩阵、第二微分变换矩阵、第三微分变换矩阵以及所述工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

## 基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法及装置

### 技术领域

[0001] 本发明涉及工业机器人校准技术领域,尤其涉及一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法及装置。

### 背景技术

[0002] 机器人在自动化生产中扮演着重要角色,能够代替人类从事重复性强的工作。然而,机器人的绝对定位精度通常较低,并且随运行时间的增加会衰减,这对产品质量产生不利影响。为了提高机器人的位姿精度,需要进行误差建模和参数标定。

[0003] 现有的工业机器人误差建模和参数标定方法主要基于MDH(Modified Denavit-Hartenberg,改进的DH参数)模型和LM(Levenberg Marquardt,列文伯格-马夸尔特)算法,其中MDH模型通过定义连杆长度、连杆偏距、连杆扭角和关节转角等参数来描述相邻关节之间的空间坐标变换关系。然而,现有方法存在一些问题:首先,这些方法主要关注位置误差,忽略了姿态精度对于一些精密任务的影响,这在需要精确姿态控制的操作中是不可忽视的;其次,当工具坐标系和测量坐标系的标定不够准确时,基于MDH模型法的辨识结果通常与工业机器人实际连杆结构参数差异较大,导致校准后机器人末端位姿精度提升有限;此外,受工具坐标系、测量坐标系标定误差和其他随机噪声的影响,工业机器人参数辨识容易陷入局部最优,从而导致校准的准确性和鲁棒性不足。

### 发明内容

[0004] 本发明针对如何建立一种全面考虑位姿精度和坐标系标定误差在内的工业机器人几何误差模型,并进行准确的参数辨识的问题,提出了本发明。

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供如下技术方案:

[0006] 一方面,本发明提供了一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法,该方法由电子设备实现,该方法包括:

[0007] S1、获取待辨识的几何参数,将几何参数分为线性参数和非线性参数。

[0008] S2、构建几何参数误差模型。

[0009] S3、根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,对线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果。

[0010] 可选地,S2中的几何参数误差模型的构建过程,包括:

[0011] S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系;定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数;其中,坐标系包括:测量坐标系MCF、基坐标系BCF、关节坐标系JCF、法兰坐标系FCF和工具坐标系TCF。

[0012] S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程。

[0013] S23、根据坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差。

[0014] S24、根据旋转参数和平移参数,计算法兰坐标系相对基坐标系的第一微分变换矩阵、基坐标系相对测量坐标系的第二微分变换矩阵以及工具坐标系相对于法兰坐标系的第三微分变换矩阵,根据第一微分变换矩阵、第二微分变换矩阵、第三微分变换矩阵以及工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

[0015] 可选地,S21中的坐标系间的变换关系包括:BCF相对于MCF的变换 ${}^0_mT$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^t_nT$ 、FCF相对于BCF的变换 ${}^n_0T$ 以及TCF相对于MCF的变换 ${}^t_mT$ 。

[0016] 可选地,S21中的旋转参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的旋转参数 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的旋转参数 $[\alpha', \beta', \gamma']$ 。

[0017] 平移参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的平移参数 $[x, y, z]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的平移参数 $[x', y', z']$ 。

[0018] 可选地,S22中的连杆结构参数包括:连杆长度 $a_i$ 、连杆偏距 $d_i$ 、关节转角 $\theta_i$ 、关节组角 $\alpha_i$ 和绕 $y$ 轴旋转角 $\beta_i$ 。

[0019] 可选地,S24中的法兰坐标系相对基坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^0T$ ,如下式(1)所示:

$$\begin{aligned} \delta_n^0T &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \\ [0020] \quad &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot (D_{\theta_i} \Delta\theta_i + D_{\alpha_i} \Delta\alpha_i + D_{\beta_i} \Delta\beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} {}^{i-1}_0T \cdot D_{w_i} \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \cdot \Delta w_i, \quad w_i \in \{\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i\} \end{aligned}$$

[0021] 其中, $n$ 表示机器人自由度, ${}^{i-1}_0T$ 表示相邻两关节坐标系的变换关系, $\delta_{i-1}^i T$ 表示相邻关节坐标系的微分变换矩阵, $\Delta\theta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节转角偏差、 $\Delta\alpha_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节组角偏差、 $\Delta\beta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的绕 $y$ 轴旋转角偏差、 $\Delta a_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节组角偏差、 $\Delta d_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的连杆偏距偏差, $D_{\theta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节转角矩阵、 $D_{\alpha_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节组角矩阵、 $D_{\beta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的绕 $y$ 轴旋转角矩阵、 $D_{a_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节组角矩阵、 $D_{d_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的连杆偏距矩阵、 $D_{w_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的矩阵, $\Delta w_i$ 表示 $w_i$ 偏差, $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ 表示连杆结构参数。

[0022] 可选地, S24中的基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵 $\delta_m^0 T$ , 如下式(2)所示:

$$[0023] \quad \delta_m^0 T = \sum_u C_u \Delta u, \quad u \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (2)$$

[0024] 其中,  $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$  表示基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_u$  表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x, y, z$  表示平移参数,  $\alpha, \beta, \gamma$  表示旋转参数。

[0025] 可选地, S24中的工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^t T$ , 如下式(3)所示:

$$[0026] \quad \delta_n^t T = \sum_v C_v \Delta v, \quad v \in \{x', y', z', \alpha', \beta', \gamma'\} \quad (3)$$

[0027] 其中,  $\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$  表示工业机器人工具坐标系相对于法兰坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_v$  表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x', y', z'$  表示平移参数,  $\alpha', \beta', \gamma'$  表示旋转参数。

[0028] 可选地, S3中的根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型, 对线性参数和非线性参数进行交叉辨识, 得到几何参数的辨识结果, 包括:

[0029] S31、基于微分旋转参数 $\delta$ , 获取几何参数误差模型中与非线性参数相关的等式, 构建线性方程组, 利用列文伯格-马夸尔特Levenberg Marquardt算法对线性方程组进行求解, 得到辨识到的非线性参数。

[0030] S32、基于位置误差 $\Delta p$ 和微分旋转参数 $\delta$ , 将辨识到的非线性参数作为初始值, 根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型, 得到辨识到的线性参数和非线性参数。

[0031] S33、重复步骤S31和步骤S32, 直到满足预设的迭代停止条件, 得到几何参数的辨识结果。

[0032] 另一方面, 本发明提供了一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识装置, 该装置应用于实现基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法, 该装置包括:

[0033] 获取模块, 用于获取待辨识的几何参数, 将几何参数分为线性参数和非线性参数。

[0034] 构建模块, 用于构建几何参数误差模型。

[0035] 输出模块, 用于根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型, 对线性参数和非线性参数进行交叉辨识, 得到几何参数的辨识结果。

[0036] 可选地, 构建模块, 进一步用于:

[0037] S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系; 定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数; 其中, 坐标系包括: 测量坐标系MCF、基坐标系BCF、关节坐标系JCF、法兰坐标系FCF和工具坐标系TCF。

[0038] S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程。

[0039] S23、根据坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差。

[0040] S24、根据旋转参数和平移参数,计算法兰坐标系相对基坐标系的第一微分变换矩阵、基坐标系相对测量坐标系的第二微分变换矩阵以及工具坐标系相对于法兰坐标系的第三微分变换矩阵,根据第一微分变换矩阵、第二微分变换矩阵、第三微分变换矩阵以及工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

[0041] 可选地,坐标系间的变换关系包括:BCF相对于MCF的变换 ${}^0_mT$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^t_nT$ 、FCF相对于BCF的变换 ${}^n_0T$ 以及TCF相对于MCF的变换 ${}^t_mT$ 。

[0042] 可选地,旋转参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的旋转参数 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的旋转参数 $[\alpha', \beta', \gamma']$ 。

[0043] 平移参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的平移参数 $[x, y, z]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的平移参数 $[x', y', z']$ 。

[0044] 可选地,连杆结构参数包括:连杆长度 $a_i$ 、连杆偏距 $d_i$ 、关节转角 $\theta_i$ 、关节组角 $\alpha_i$ 和绕 $y$ 轴旋转角 $\beta_i$ 。

[0045] 可选地,法兰坐标系相对基坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^0T$ ,如下式(1)所示:

$$\begin{aligned} \delta_n^0T &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \\ [0046] \quad &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0T \cdot (D_{\theta_i} \Delta \theta_i + D_{\alpha_i} \Delta \alpha_i + D_{\beta_i} \Delta \beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} {}^{i-1}_0T \cdot D_{w_i} \cdot {}^{i-1}_0T^{-1} \cdot \Delta w_i, \quad w_i \in \{\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i\} \end{aligned}$$

[0047] 其中, $n$ 表示机器人自由度, ${}^{i-1}_0T$ 表示相邻两关节坐标系的变换关系, $\delta_{i-1}^i T$ 表示相邻关节坐标系的微分变换矩阵, $\Delta \theta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节转角偏差、 $\Delta \alpha_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节组角偏差、 $\Delta \beta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的绕 $y$ 轴旋转角偏差、 $\Delta a_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节组角偏差、 $\Delta d_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的连杆偏距偏差、 $D_{\theta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节转角矩阵、 $D_{\alpha_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节组角矩阵、 $D_{\beta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的绕 $y$ 轴旋转角矩阵、

$D_{a_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节扭角矩阵、 $D_{d_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的连杆偏距矩阵、 $D_{w_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的矩阵,  $\Delta w_i$ 表示 $w_i$ 偏差,  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ 表示连杆结构参数。

[0048] 可选地,基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵 $\delta_m^0 T$ ,如下式(2)所示:

$$[0049] \quad \delta_m^0 T = \sum_u C_u \Delta u, \quad u \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (2)$$

[0050] 其中,  $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$  表示基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_u$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x, y, z$ 表示平移参数,  $\alpha, \beta, \gamma$ 表示旋转参数。

[0051] 可选地,工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^t T$ ,如下式(3)所示:

$$[0052] \quad \delta_n^t T = \sum_v C_v \Delta v, \quad v \in \{x', y', z', \alpha', \beta', \gamma'\} \quad (3)$$

[0053] 其中,  $\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$  表示工业机器人工具坐标系相对于法兰坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_v$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x', y', z'$ 表示平移参数,  $\alpha', \beta', \gamma'$ 表示旋转参数。

[0054] 可选地,输出模块,进一步用于:

[0055] S31、基于微分旋转参数 $\delta$ ,获取几何参数误差模型中与非线性参数相关的等式,构建线性方程组,利用列文伯格-马夸尔特Levenberg Marquardt算法对线性方程组进行求解,得到辨识到的非线性参数。

[0056] S32、基于位置误差 $\Delta p$ 和微分旋转参数 $\delta$ ,将辨识到的非线性参数作为初始值,根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,得到辨识到的线性参数和非线性参数。

[0057] S33、重复步骤S31和步骤S32,直到满足预设的迭代停止条件,得到几何参数的辨识结果。

[0058] 一方面,提供了一种电子设备,所述电子设备包括处理器和存储器,所述存储器中存储有至少一条指令,所述至少一条指令由所述处理器加载并执行以实现上述基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法。

[0059] 一方面,提供了一种计算机可读存储介质,所述存储介质中存储有至少一条指令,所述至少一条指令由处理器加载并执行以实现上述基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法。

[0060] 上述技术方案,与现有技术相比至少具有如下有益效果:

[0061] 上述方案,提出一种基于六自由度位姿的工业机器人误差模型和交叉辨识方法。

所提出的基于六自由度位姿的工业机器人几何参数误差模型考虑了工具坐标系和测量坐标系标定误差,可以解决由于坐标系标定精度不高引起的工业机器人连杆结构参数辨识精度不高的问题。而且,该几何参数误差模型综合考虑位置误差和姿态误差,不仅可用于提高工业机器人位置精度,还可以用于提高姿态精度。所提出的基于Levenberg Marquardt算法的几何参数交叉辨识方法根据微分旋转 $\delta$ 先辨识与角度相关的非线性参数,再以其为初值辨识所有待求几何参数,解决了同时辨识几何参数时由于线性参数、非线性参数相互干扰导致的局部最优问题。因此,和同时辨识所有参数策略相比,本发明提出的交叉辨识方案更容易逃出局部极值,收敛域更广,辨识结果的精度更高。

## 附图说明

[0062] 为了更清楚地说明本发明实施例中的技术方案,下面将对实施例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发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0063] 图1是本发明实施例提供的基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法流程示意图;

[0064] 图2是本发明实施例提供的工业机器人校准过程中所涉及的坐标系及其变换定义;

[0065] 图3是本发明实施例提供的 $D_{\theta_i}$ 、 $D_{\alpha_i}$ 、 $D_{\beta_i}$ 、 $D_{a_i}$ 和 $D_{d_i}$ 的计算方式;

[0066] 图4是本发明实施例提供的 $C_x$ 、 $C_y$ 、 $C_z$ 、 $C_\alpha$ 、 $C_\beta$ 和 $C_\gamma$ 的计算方式;

[0067] 图5是本发明实施例提供的基于Levenberg Marquardt算法的几何参数交叉辨识方法流程图;

[0068] 图6是本发明实施例提供的基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识装置框图;

[0069] 图7是本发明实施例提供的一种电子设备的结构示意图。

## 具体实施方式

[0070] 为使本发明实施例的目的、技术方案和优点更加清楚,下面将结合本发明实施例的附图,对本发明实施例的技术方案进行清楚、完整地描述。显然,所描述的实施例是本发明的一部分实施例,而不是全部的实施例。基于所描述的本发明的实施例,本领域普通技术人员在无需创造性劳动的前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0071] 如图1所示,本发明实施例提供了一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法,该方法可以由电子设备实现。如图1所示的基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法流程图,该方法的处理流程可以包括如下的步骤:

[0072] S1、获取待辨识的几何参数,将几何参数分为线性参数和非线性参数。

[0073] 其中,几何参数可以包括BCF相对于MCF的变换 ${}^0_mT$ 的6个参数 $[x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^t_nT$ 的6个参数 $[x', y', z', \alpha', \beta', \gamma']$ 以

及连杆结构参数 $[\Delta\theta_i, \Delta\alpha_i, \Delta\beta_i, \Delta a_i, \Delta d_i]$ 。

[0074] 线性参数可以包括 $[d_1 \ \cdots \ d_n]^T$ 、 $[a_1 \ \cdots \ a_n]^T$ 、 $[x, y, z]$ 和 $[x', y', z']$ ,非线性参数则指与角度相关的参数,可以包括 $[\Delta\theta_1 \ \cdots \ \Delta\theta_n]^T$ 、 $[\Delta\alpha_1 \ \cdots \ \Delta\alpha_n]^T$ 、 $[\Delta\beta_1 \ \cdots \ \Delta\beta_n]^T$ 、 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 和 $[\alpha', \beta', \gamma']$ 。

[0075] 进一步地,姿态误差仅与非线性参数相关,位置误差则和线性参数及非线性参数都相关。

[0076] S2、构建几何参数误差模型。

[0077] 一种可行的实施方式中,基于MDH模型,考虑位置精度和姿态精度,并引入测量坐标系和工具坐标系的标定误差,建立了新的工业机器人几何参数误差模型。

[0078] 可选地,S2中的几何参数误差模型的构建过程可以包括S21- S24:

[0079] S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系;定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数。

[0080] 其中,如图2所示,坐标系包括:测量坐标系(Measure Coordinate Frame, MCF)、基坐标系(Base Coordinate Frame, BCF)、关节坐标系(Joint Coordinate Frame, JCF)、法兰坐标系(Flange Coordinate Frame, FCF)和工具坐标系(Tool Coordinate Frame, TCF)。

[0081] 进一步地,BCF建立在工业机器人底座上,其相对于MCF的变换被定义为 ${}^0_mT$ ,需事先标定且存在标定误差;TCF固定在工具末端上,其相对FCF的变换被定义为 ${}^t_nT$ ,也需事先标定且存在标误差;FCF相对于BCF的变换被定义为 ${}^n_0T$ ,其等于相邻关节坐标系(JCF)变换的顺序相乘;TCF相对于MCF的变换被定义为 ${}^t_mT$ ,其表示TCF在MCF的位姿。

[0082] 坐标系间的变换关系包括:BCF相对于MCF的变换 ${}^0_mT$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^t_nT$ 、FCF相对于BCF的变换 ${}^n_0T$ 以及TCF相对于MCF的变换 ${}^t_mT$ 。

[0083] 进一步度,相对于测量坐标系的变换 ${}^0_mT$ 需事先标定且存在标定误差;所述的工具坐标系固定在工具末端上,其相对于法兰坐标系的变换 ${}^t_nT$ 也需事先标定且同样存在标定误差。

[0084] 旋转参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的旋转参数 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的旋转参数 $[\alpha', \beta', \gamma']$ 。

[0085] 平移参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的平移参数 $[x, y, z]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的平移参数 $[x', y', z']$ 。

[0086] S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程。

[0087] 其中,连杆结构参数包括:连杆长度 $a_i$ 、连杆偏距 $d_i$ 、关节转角 $\theta_i$ 、关节组角 $\alpha_i$ 和绕 $y$ 轴旋转角 $\beta_i$ 。绕 $y$ 轴旋转角 $\beta_i$ ,仅在相邻两关节轴线平行时或近似平行时才存在,并且理论值为0。

[0088] 进一步地,基于MDH模型的相邻两关节坐标系的变换关系为:

$$\begin{aligned}
 [0089] \quad {}_{i-1}^i T &= Rot(z, \theta_i) \cdot tran(z, d_i) \cdot tran(x, a_i) \cdot Rot(x, \alpha_i) \cdot Rot(y, \beta_i) \\
 &= \begin{bmatrix} c\theta_i c\beta_i - s\alpha_i s\theta_i s\beta_i & -c\alpha_i s\theta_i & c\theta_i s\beta_i + s\alpha_i s\theta_i c\beta_i & a_i c\theta_i \\ s\theta_i c\beta_i + s\alpha_i c\theta_i s\beta_i & c\alpha_i c\theta_i & s\theta_i s\beta_i - s\alpha_i c\theta_i c\beta_i & a_i s\theta_i \\ -c\alpha_i s\beta_i & s\alpha_i & c\alpha_i c\beta_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)
 \end{aligned}$$

[0090] 对于 $n$ 自由度工业机器人,其正向运动学方程为:

$$[0091] \quad {}_0^n T = {}_0^1 T {}_1^2 T \cdots {}_{n-1}^n T \quad (2)$$

[0092] 本发明提出了一种基于六自由度位姿的工业机器人几何参数误差模型。该误差模型综合考虑了位置误差和姿态误差,并针对工具坐标系和测量坐标系的标定误差进行建模。具体而言,该几何参数误差模型以MDH模型为基础,考虑了工具坐标系和测量坐标系的标定误差,能够更全面地描述测量坐标系下工具末端位姿误差和工业机器人几何参数偏差的关系。

[0093] S23、根据坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差。

[0094] 一种可行的实施方式中, $\alpha$ 表示绕 $Z$ 轴旋转的航向角, $\beta$ 表示绕 $y$ 轴旋转的俯仰角, $\gamma$ 表示绕 $X$ 轴旋转的滚转角,包含旋转和平移的变换矩阵一般表示法如下:

$$[0095] \quad T(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & cas\beta s\gamma - sac\gamma & cas\beta c\gamma + sas\gamma & x \\ sac\beta & sas\beta s\gamma + cac\gamma & sas\beta c\gamma - cas\gamma & y \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

[0096] 记 ${}_m^0 T$ 为 $T(\alpha, \beta, \gamma, x, y, z)$ 、 ${}_n^t T$ 为 $T(\alpha', \beta', \gamma', x', y', z')$ ,则工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿为:

$$[0097] \quad {}_m^t T = {}_m^0 T \cdot {}_0^n T \cdot {}_n^t T \quad (4)$$

[0098] S24、通过求偏导数以及忽略高阶项获得法兰坐标系相对工业机器人基坐标系的微分变换阵、工业机器人基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵、工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵以及工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系微分变矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

[0099] 可选地,设工业机器人关节 $i$ 的连杆参数偏差为 $[\Delta\theta_i, \Delta\alpha_i, \Delta\beta_i, \Delta a_i, \Delta d_i]$ ,推导法兰坐标系相对工业机器人基坐标系的微分变换阵为 $\delta {}_0^n T$ 。

[0100] 则相邻关节变换矩阵的实际值与名义值的偏差为:

$$\begin{aligned}
[0101] \quad d_{i-1}^i T &= (D_{\theta_i} \Delta \theta_i + D_{\alpha_i} \Delta \alpha_i + D_{\beta_i} \Delta \beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}_{i-1}^i T \quad (5) \\
&= \delta_{i-1}^i T \cdot {}_{i-1}^i T
\end{aligned}$$

[0102] 对于  $n$  自由度机器人,当连杆参数存在偏差时,工业机器人法兰末端相对于基坐标系的位姿为:

$$\begin{aligned}
[0103] \quad {}_0^n T + d_0^n T &= \prod_{i=1}^n ({}_{i-1}^i T + d_{i-1}^i T) \approx {}_0^n T + \sum_{i=1}^n {}_{i-1}^0 T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot \\
&{}_{i-1}^0 T^{-1} \cdot {}_0^n T \quad (6)
\end{aligned}$$

[0104] 于是,工业机器人法兰坐标系相对基坐标系的微分变换阵为:

$$\begin{aligned}
[0105] \quad \delta_n^0 T &= \sum_{i=1}^n {}_{i-1}^0 T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot {}_{i-1}^0 T^{-1} \\
&= \sum_{i=1}^n {}_{i-1}^0 T \cdot (D_{\theta_i} \Delta \theta_i + D_{\alpha_i} \Delta \alpha_i + D_{\beta_i} \Delta \beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}_{i-1}^0 T^{-1} \quad (7) \\
&= \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} {}_{i-1}^0 T \cdot D_{w_i} \cdot {}_{i-1}^0 T^{-1} \cdot \Delta w_i, \quad w_i \in \{\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i\}
\end{aligned}$$

[0106] 其中,  $n$  表示机器人自由度,  ${}_{i-1}^i T$  表示相邻两关节坐标系的变换关系,  $\delta_{i-1}^i T$  表示相邻关节坐标系的微分变换矩阵,  $\Delta \theta_i, \Delta \alpha_i, \Delta \beta_i, \Delta a_i, \Delta d_i$  表示工业机器人关节  $i$  的连杆参数偏差,  $D_{\theta_i}, D_{\alpha_i}, D_{\beta_i}, D_{a_i}, D_{d_i}, D_{w_i}$  表示基于连杆参数偏差计算得到的矩阵, 计算方式如图3所示,  $\Delta w_i$  表示  $w_i$  偏差,  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$  表示连杆结构参数。

[0107] 可选地,设工业机器人基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差为  $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$ , 推导工业机器人基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵  $\delta_m^0 T$ 。

[0108] 如图4是  $C_x, C_y, C_z, C_\alpha, C_\beta$  和  $C_\gamma$  的计算方式, 则工业机器人基坐标系相对于测量坐标系的变换矩阵的实际值和名义值的偏差为:

$$\begin{aligned}
[0109] \quad d_m^0 T &= (C_x \Delta x + C_y \Delta y + C_z \Delta z + C_\alpha \Delta \alpha + C_\beta \Delta \beta + C_\gamma \Delta \gamma) \cdot {}_m^0 T \quad (8) \\
&= \delta_m^0 T \cdot {}_m^0 T
\end{aligned}$$

[0110] 于是,工业机器人基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵为:

$$[0111] \quad \delta_m^0 T = \sum_u C_u \Delta u, \quad u \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (9)$$

[0112] 其中,  $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$  表示工业机器人基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_u$  表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x, y, z$  表示平移参数,  $\alpha, \beta, \gamma$  表示旋转参数。

[0113] 可选地,设工具坐标系相对于工业机器人法兰坐标系的平移误差和旋转误差为

$\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$ , 推导工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵  $\delta_n^t T$ 。

[0114] 工具坐标系相对于工业机器人法兰坐标系的微分变换矩阵  $\delta_n^t T$  与  $\delta_m^0 T$  相似, 如下式 (10) 所示:

$$[0115] \quad \delta_n^t T = \sum_v C_v \Delta v, \quad v \in \{x', y', z', \alpha', \beta', \gamma'\} \quad (10)$$

[0116] 其中,  $\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$  表示工业机器人工具坐标系相对于法兰坐标系的平移误差和旋转误差,  $C_v$  表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵,  $x', y', z'$  表示平移参数,  $\alpha', \beta', \gamma'$  表示旋转参数。

[0117] 进一步地, 结合微分变换矩阵, 推导出工具坐标系相对于测量坐标系微分变换阵  $\delta_m^t T$ , 然后利用微分变换阵  $\delta_m^t T$  建立工业机器人几何参数误差模型。

[0118] 考虑基坐标系相对于测量坐标系、工具坐标系相对于法兰坐标系的变换矩阵存在标定误差, 则工具坐标系在测量坐标系下的位姿为:

$$[0119] \quad \begin{aligned} {}_m^t T + d_m^t T &= ({}^0_m T + d_m^0 T)({}_0^n T + d_0^n T)({}_n^t T + d_n^t T) \\ &\approx {}_m^t T + d_m^0 T \cdot {}_0^t T + {}^0_m T \cdot d_0^n T \cdot {}_n^t T + {}_m^n T \cdot d_n^t T \\ &= {}_m^t T + (\delta_m^0 T + {}^0_m T \cdot \delta_0^n T \cdot {}_m^0 T^{-1} + {}_m^n T \cdot \delta_n^t T \cdot {}_m^n T^{-1}) \cdot {}_m^t T \quad (11) \\ &= {}_m^t T + \delta_m^t T \cdot {}_m^t T \end{aligned}$$

[0120] 于是, 工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换阵为:

$$[0121] \quad \begin{aligned} \delta_m^t T &= \delta_m^0 T + {}_m^n T \cdot \delta_n^t T \cdot {}_m^n T^{-1} + {}^0_m T \cdot \delta_0^n T \cdot {}^0_m T^{-1} \\ &= \sum_u C_u \Delta u + \sum_v C'_v \Delta v + \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} D'_{w_i} \Delta w_i \quad (12) \end{aligned}$$

[0122]  $C'_v$  和  $D'_{w_i}$  取值如下:

$$[0123] \quad C'_v = {}_m^n T \cdot C_v \cdot {}_m^n T^{-1} \quad (13)$$

$$[0124] \quad D'_{w_i} = {}^0_m T \cdot D_{w_i} \cdot {}^0_m T^{-1} \quad (14)$$

[0125] 进一步地, 记工具坐标系相对于测量坐标系的微分平移为

${}_m^t d = [{}_m^t d_x, {}_m^t d_y, {}_m^t d_z]^T$ , 记工具坐标系相对于测量坐标系的微分旋转为

${}_m^t \delta = [{}_m^t \delta_z, {}_m^t \delta_y, {}_m^t \delta_x]^T$ , 则  $\delta_m^t T$  服从以下形式:

$$[0126] \quad \delta_m^t T = \begin{bmatrix} 0 & -{}^t_m\delta_x & {}^t_m\delta_y & {}^t_m d_x \\ {}^t_m\delta_x & 0 & -{}^t_m\delta_z & {}^t_m d_y \\ -{}^t_m\delta_y & {}^t_m\delta_z & 0 & {}^t_m d_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

[0127] 记工业机器人的连杆结构参数误差为  $\Delta\theta = [\Delta\theta_1 \quad \cdots \quad \Delta\theta_n]^T$ ,  $\Delta d = [d_1 \quad \cdots \quad d_n]^T$ ,  $\Delta a = [a_1 \quad \cdots \quad a_n]^T$ ,  $\Delta\alpha = [\alpha_1 \quad \cdots \quad \alpha_n]^T$ ,  $\Delta\beta = [\beta_1 \quad \cdots \quad \beta_n]^T$ 。根据等式 (15), 可建立工业机器人几何参数误差模型如下:

$$[0128] \quad \begin{bmatrix} {}^t_m d \\ {}^t_m \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_\theta & M_d & M_a & M_\alpha & M_\beta & E_u & F_v \\ M'_\theta & M'_d & M'_a & M'_\alpha & M'_\beta & E'_u & F'_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta d \\ \Delta a \\ \Delta\alpha \\ \Delta\beta \\ \Delta u \\ \Delta v \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0129] 其中,

$$[0130] \quad \begin{aligned} M_w &= [D'_{w_1}(t), \cdots, D'_{w_n}(t)] \\ M'_w &= [D'_{w_1}(r), \cdots, D'_{w_n}(r)] \\ E_u &= [C_x(t), C_y(t), C_z(t), C_\alpha(t), C_\beta(t), C_\gamma(t)] \\ E'_u &= [C_x(r), C_y(r), C_z(r), C_\alpha(r), C_\beta(r), C_\gamma(r)] \\ F_v &= [C'_{x'}(t), C'_{y'}(t), C'_{z'}(t), C'_{\alpha'}(t), C'_{\beta'}(t), C'_{\gamma'}(t)] \\ F'_v &= [C'_{x'}(r), C'_{y'}(r), C'_{z'}(r), C'_{\alpha'}(r), C'_{\beta'}(r), C'_{\gamma'}(r)] \end{aligned} \quad (17)$$

[0131] 等式 (17) 中,  $w \in \{\theta, d, a, \alpha, \beta\}$ ;  $\mathbf{t}$  表示取对应矩阵的第 (1,4), (2,4), (3,4) 个元素组成列向量;  $\mathbf{r}$  表示取对应矩阵的第 (1,2), (1,3), (2,3) 个元素组成的列向量;  $M_w$  和  $M'_w$  为  $3 \times n$  矩阵;  $E_u$ 、 $E'_u$ 、 $F_v$  和  $F'_v$  为  $3 \times 6$  矩阵。

[0132] S3、根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型, 对线性参数和非线性参数进行交叉辨识, 得到几何参数的辨识结果。

[0133] 一种可行的实施方式中, 针对几何参数同时辨识易陷入局部最优的缺点, 提出了一种基于 LM (Levenberg Marquardt,) 算法的几何参数交叉辨识方法。

[0134] 本发明所涉及基于 Levenberg Marquardt 算法的几何参数交叉辨识方法流程如图 5 所示。观察到, 等式 (17) 中,  $M_\theta$  矩阵的第一列为 0, 当以仅以微分平移  ${}^t_m d$  为优化目标时, 关节角  $\theta_1$  无法辨识;  $M'_d$  和  $M'_a$  矩阵都为 0,  $E'_u$  和  $F'_v$  的前三列也为 0, 当以仅以微分旋转  ${}^t_m \delta$  为优化目标时, 连杆长度  $a$ 、连杆偏距  $d$ 、基坐标系相对测量坐标系的平移  $[x, y, z]$  和工具坐标系相对法兰坐标系的平移  $[x', y', z']$  无法辨识。综合考虑上述特征, 为克服同时辨识

所有几何参数时易陷入局部最优的问题,提出了基于Levenberg Marquardt算法的几何参数交叉辨识方法,可以包括如下步骤S31- S33:

[0135] S31、仅考虑微分旋转 $\delta$ ,获取几何参数误差模型中与非线性参数相关的等式(即等式(16)的后三列),构建线性方程组,利用列文伯格-马夸尔特Levenberg Marquardt算法对线性方程组进行求解,以初步辨识与角度相关的非线性参数。

[0136] S32、考虑位置误差 $\Delta p$ 和微分旋转 $\delta$ ,将辨识到的非线性参数作为初始值,根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,辨识所有待估的线性参数和非线性参数。其中,位置误差 $\Delta p$ 为工具坐标系在测量坐标系下的位置偏差,和微分平移 $d$ 有所区别,两者相差一个雅可比矩阵,当仅位置误差为优化目标时,关节角 $\theta_1$ 是可以辨识的。

[0137] S33、重复步骤S31和步骤S32,直到满足预设的迭代停止条件,得到几何参数的辨识结果。

[0138] 本发明线性参数和非线性参数的辨识结果能够在较短时间内获得,并且具有更高的精度和更广的收敛域,相比于同时辨识所有参数的方法,能够更容易避免陷入局部最优解的问题。

[0139] 本发明实施例中,提出一种基于六自由度位姿的工业机器人误差模型和交叉辨识方法。所提出的基于六自由度位姿的工业机器人几何参数误差模型考虑了工具坐标系和测量坐标系标定误差,可以解决由于坐标系标定精度不高引起的工业机器人连杆结构参数辨识精度不高的问题。而且,该几何参数误差模型综合考虑位置误差和姿态误差,不仅可用于提高工业机器人位置精度,还可以用于提高姿态精度。所提出的基于Levenberg Marquardt算法的几何参数交叉辨识方法根据微分旋转 $\delta$ 先辨识与角度相关的非线性参数,再以其为初始值辨识所有待求几何参数,解决了同时辨识几何参数时由于线性参数、非线性参数相互干扰导致的局部最优问题。因此,和同时辨识所有参数策略相比,本发明提出的交叉辨识方案更容易逃出局部极值,收敛域更广,辨识结果的精度更高。

[0140] 如图6所示,本发明实施例提供了一种基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识装置600,该装置600应用于实现基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法,该装置600包括:

[0141] 获取模块610,用于获取待辨识的几何参数,将几何参数分为线性参数和非线性参数。

[0142] 构建模块620,用于构建几何参数误差模型。

[0143] 输出模块630,用于根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,对线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果。

[0144] 可选地,构建模块620,进一步用于:

[0145] S21、定义工业机器人校准过程中的坐标系及坐标系间的变换关系;定义用于表示坐标系间的变换关系的旋转参数和平移参数;其中,坐标系包括:测量坐标系MCF、基坐标系BCF、关节坐标系JCF、法兰坐标系FCF和工具坐标系TCF。

[0146] S22、利用改进的DH参数MDH模型描述工业机器人的连杆结构参数,建立相邻两关节的坐标系间的变换关系,并通过顺序相乘计算工业机器人的正向运动学方程。

[0147] S23、根据坐标系间的变换关系以及正向运动学方程,计算工具坐标系在测量坐标系下的名义位姿,并与实际测量到的位姿进行比较,得到工具末端的位姿误差。

[0148] S24、根据旋转参数和平移参数,计算法兰坐标系相对基坐标系的第一微分变换矩阵、基坐标系相对测量坐标系的第二微分变换矩阵以及工具坐标系相对于法兰坐标系的第三微分变换矩阵,根据第一微分变换矩阵、第二微分变换矩阵、第三微分变换矩阵以及工具末端的位姿误差,得到工具坐标系相对于测量坐标系的微分变换矩阵,进而建立工业机器人的几何参数误差模型。

[0149] 可选地,坐标系间的变换关系包括:BCF相对于MCF的变换 ${}^0_m T$ 、TCF相对于FCF的变换 ${}^t_n T$ 、FCF相对于BCF的变换 ${}^n_0 T$ 以及TCF相对于MCF的变换 ${}^t_m T$ 。

[0150] 可选地,旋转参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的旋转参数 $[\alpha, \beta, \gamma]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的旋转参数 $[\alpha', \beta', \gamma']$ 。

[0151] 平移参数包括:基坐标系相对于测量坐标系的平移参数 $[x, y, z]$ 以及工具坐标系相对于法兰坐标系的平移参数 $[x', y', z']$ 。

[0152] 可选地,连杆结构参数包括:连杆长度 $a_i$ 、连杆偏距 $d_i$ 、关节转角 $\theta_i$ 、关节扭角 $\alpha_i$ 和绕 $y$ 轴旋转角 $\beta_i$ 。

[0153] 可选地,法兰坐标系相对基坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^0 T$ ,如下式(1)所示:

$$\begin{aligned} \delta_n^0 T &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0 T \cdot \delta_{i-1}^i T \cdot {}^{i-1}_0 T^{-1} \\ [0154] \quad &= \sum_{i=1}^n {}^{i-1}_0 T \cdot (D_{\theta_i} \Delta \theta_i + D_{\alpha_i} \Delta \alpha_i + D_{\beta_i} \Delta \beta_i + D_{a_i} \Delta a_i + D_{d_i} \Delta d_i) \cdot {}^{i-1}_0 T^{-1} \quad (1) \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{w_i} {}^{i-1}_0 T \cdot D_{w_i} \cdot {}^{i-1}_0 T^{-1} \cdot \Delta w_i, \quad w_i \in \{\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i\} \end{aligned}$$

[0155] 其中, $n$ 表示机器人自由度, ${}^{i-1}_i T$ 表示相邻两关节坐标系的变换关系, $\delta_{i-1}^i T$ 表示相邻关节坐标系的微分变换矩阵, $\Delta \theta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节转角偏差、 $\Delta \alpha_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节扭角偏差、 $\Delta \beta_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的绕 $y$ 轴旋转角偏差、 $\Delta a_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的关节扭角偏差、 $\Delta d_i$ 表示工业机器人关节 $i$ 的连杆偏距偏差、 $D_{\theta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节转角矩阵、 $D_{\alpha_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节扭角矩阵、 $D_{\beta_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的绕 $y$ 轴旋转角矩阵、 $D_{a_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的关节扭角矩阵、 $D_{d_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的连杆

偏距矩阵、 $D_{w_i}$ 表示基于连杆参数偏差计算得到的矩阵， $\Delta w_i$ 表示 $w_i$ 偏差， $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i, \beta_i$ 表示连杆结构参数。

[0156] 可选地，基坐标系相对测量坐标系的微分变换矩阵 $\delta_m^0 T$ ，如下式(2)所示：

$$[0157] \quad \delta_m^0 T = \sum_u C_u \Delta u, \quad u \in \{x, y, z, \alpha, \beta, \gamma\} \quad (2)$$

[0158] 其中， $\Delta u = [\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \gamma]$ 表示基坐标系相对于测量坐标系的平移误差和旋转误差， $C_u$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵， $x, y, z$ 表示平移参数， $\alpha, \beta, \gamma$ 表示旋转参数。

[0159] 可选地，工具坐标系相对于法兰坐标系的微分变换矩阵 $\delta_n^t T$ ，如下式(3)所示：

$$[0160] \quad \delta_n^t T = \sum_v C_v \Delta v, \quad v \in \{x', y', z', \alpha', \beta', \gamma'\} \quad (3)$$

[0161] 其中， $\Delta v = [\Delta x', \Delta y', \Delta z', \Delta \alpha', \Delta \beta', \Delta \gamma']$ 表示工业机器人工具坐标系相对于法兰坐标系的平移误差和旋转误差， $C_v$ 表示基于平移误差和旋转误差计算得到的矩阵， $x', y', z'$ 表示平移参数， $\alpha', \beta', \gamma'$ 表示旋转参数。

[0162] 可选地，输出模块630，进一步用于：

[0163] S31、基于微分旋转参数 $\delta$ ，获取几何参数误差模型中与非线性参数相关的等式，构建线性方程组，利用列文伯格-马夸尔特Levenberg Marquardt算法对线性方程组进行求解，得到辨识到的非线性参数。

[0164] S32、基于位置误差 $\Delta p$ 和微分旋转参数 $\delta$ ，将辨识到的非线性参数作为初始值，根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型，得到辨识到的线性参数和非线性参数。

[0165] S33、重复步骤S31和步骤S32，直到满足预设的迭代停止条件，得到几何参数的辨识结果。

[0166] 本发明实施例中，提出一种基于六自由度位姿的工业机器人误差模型和交叉辨识方法。所提出的基于六自由度位姿的工业机器人几何参数误差模型考虑了工具坐标系和测量坐标系发标定误差，可以解决由于坐标系标定精度不高引起的工业机器人连杆结构参数辨识精度不高的问题。而且，该几何参数误差模型综合考虑位置误差和姿态误差，不仅可用于提高工业机器人位置精度，还可以用于提高姿态精度。所提出的基于Levenberg Marquardt算法的几何参数交叉辨识方法根据微分旋转 $\delta$ 先辨识与角度相关的非线性参数，再以其为初始值辨识所有待求几何参数，解决了同时辨识几何参数时由于线性参数、非线性参数相互干扰导致的局部最优问题。因此，和同时辨识所有参数策略相比，本发明提出的交叉辨识方案更容易逃出局部极值，收敛域更广，辨识结果的精度更高。

[0167] 图7是本发明实施例提供的一种电子设备700的结构示意图，该电子设备700可因

配置或性能不同而产生比较大的差异,可以包括一个或一个以上处理器(central processing units,CPU)701和一个或一个以上的存储器702,其中,存储器702中存储有至少一条指令,至少一条指令由处理器701加载并执行以实现下述基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法:

[0168] S1、获取待辨识的几何参数,将几何参数分为线性参数和非线性参数。

[0169] S2、构建几何参数误差模型。

[0170] S3、根据几何参数交叉辨识方法以及几何参数误差模型,对线性参数和非线性参数进行交叉辨识,得到几何参数的辨识结果。

[0171] 在示例性实施例中,还提供了一种计算机可读存储介质,例如包括指令的存储器,上述指令可由终端中的处理器执行以完成上述基于六自由度工业机器人误差模型和交叉辨识方法。例如,计算机可读存储介质可以是ROM、随机存取存储器(RAM)、CD-ROM、磁带、软盘和光数据存储设备等。

[0172] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例的全部或部分步骤可以通过硬件来完成,也可以通过程序来指令相关的硬件完成,所述的程序可以存储于一种计算机可读存储介质中,上述提到的存储介质可以是只读存储器,磁盘或光盘等。

[0173] 以上所述仅为本发明的较佳实施例,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所作的任何修改、等同替换、改进等,均应包含在本发明的保护范围之内。

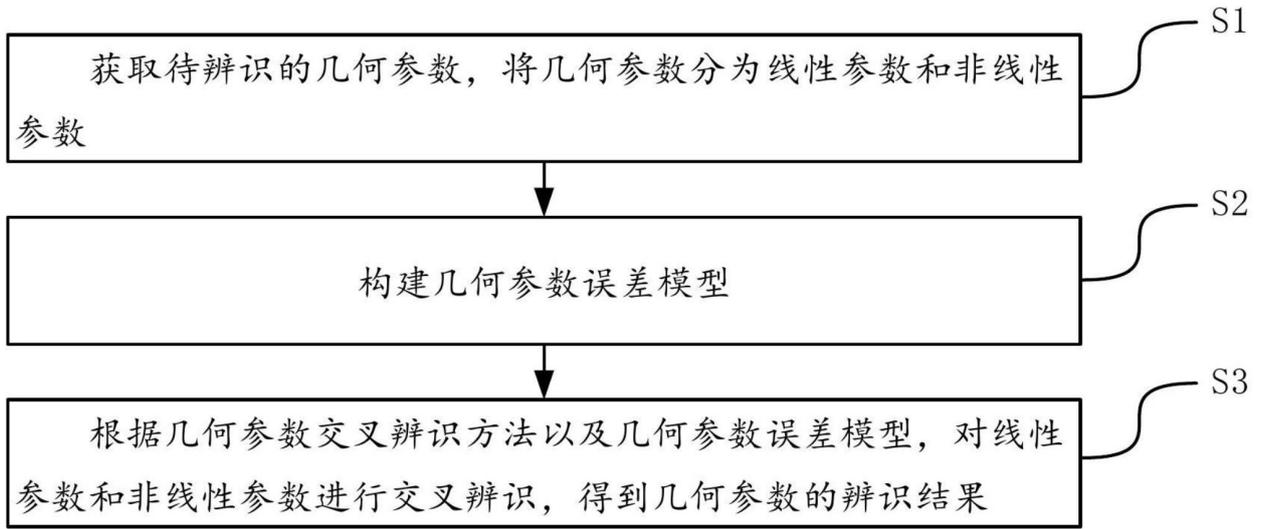


图1

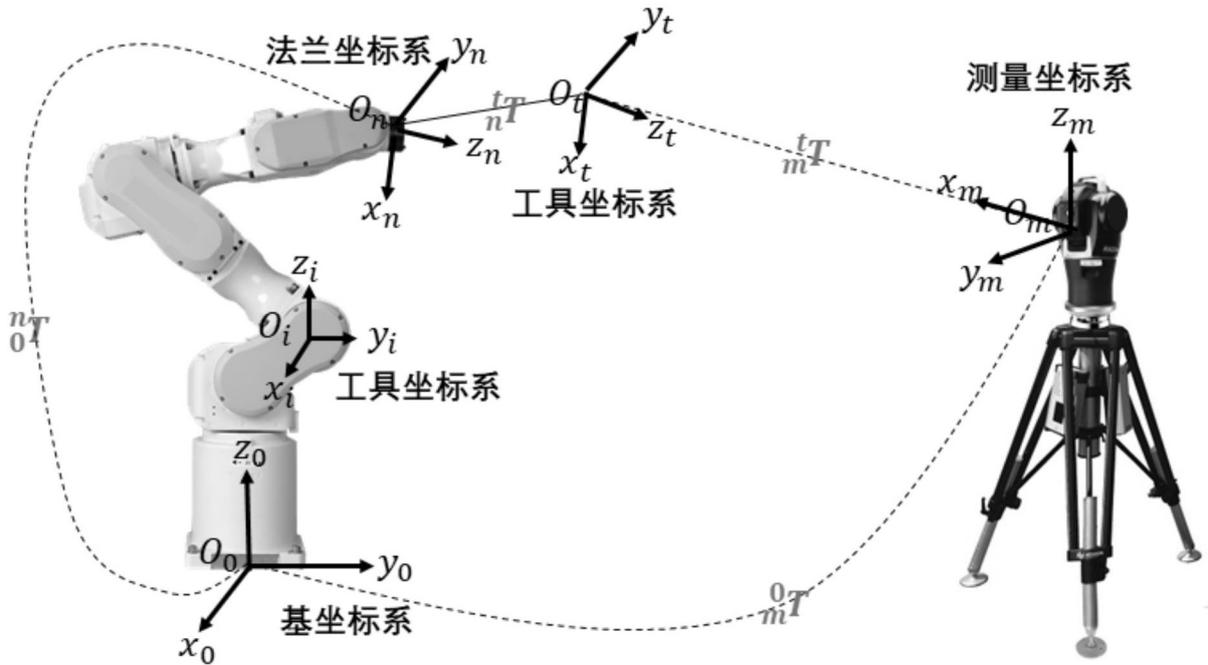


图2

$D_{\theta_i}$	$D_{\alpha_i}$	$D_{\alpha_i}$	$D_{\alpha_i}$	$D_{\beta_i}$
$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & c\theta_i \\ 0 & 0 & 0 & s\theta_i \\ -s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & s\theta_i & -d_i s\theta_i & -d_i s\theta_i \\ 0 & -c\theta_i & d_i c\theta_i & d_i c\theta_i \\ -s\theta_i & c\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -s\alpha_i & c\theta_i c\alpha_i & a_i s\theta_i s\alpha_i - d_i c\theta_i c\alpha_i \\ s\alpha_i & 0 & s\theta_i c\alpha_i & -a_i c\theta_i s\alpha_i - d_i s\theta_i c\alpha_i \\ -c\theta_i c\alpha_i & -s\theta_i c\alpha_i & 0 & a_i c\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

图3

$C_x$	$C_y$	$C_z$	$C_\alpha$	$C_\beta$	$C_\gamma$
$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & 0 & c\alpha & -z\alpha \\ 0 & 0 & s\alpha & -z\alpha \\ -c\alpha & -s\alpha & 0 & y\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & s\beta & s\alpha c\beta & -y s\beta - z s\alpha c\beta \\ -s\beta & 0 & -c\alpha c\beta & x s\beta + z\alpha c\beta \\ -s\alpha c\beta & c\alpha c\beta & 0 & -c\beta(y\alpha - x s\alpha) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$

图4

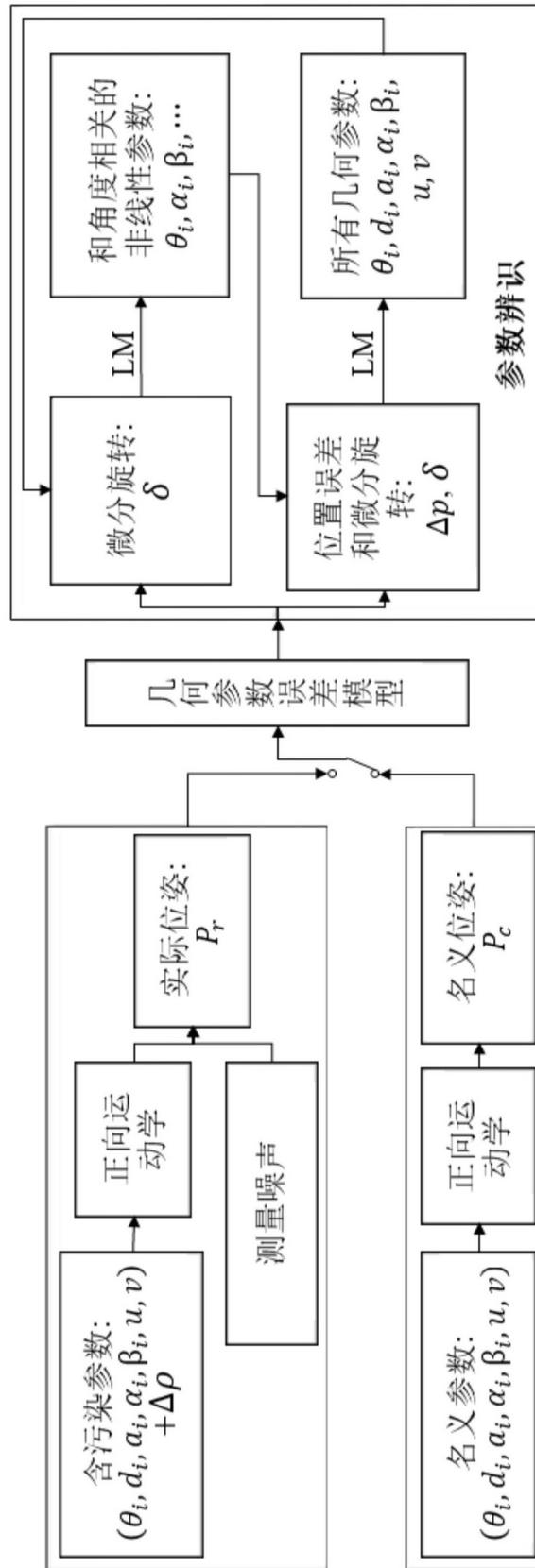


图5

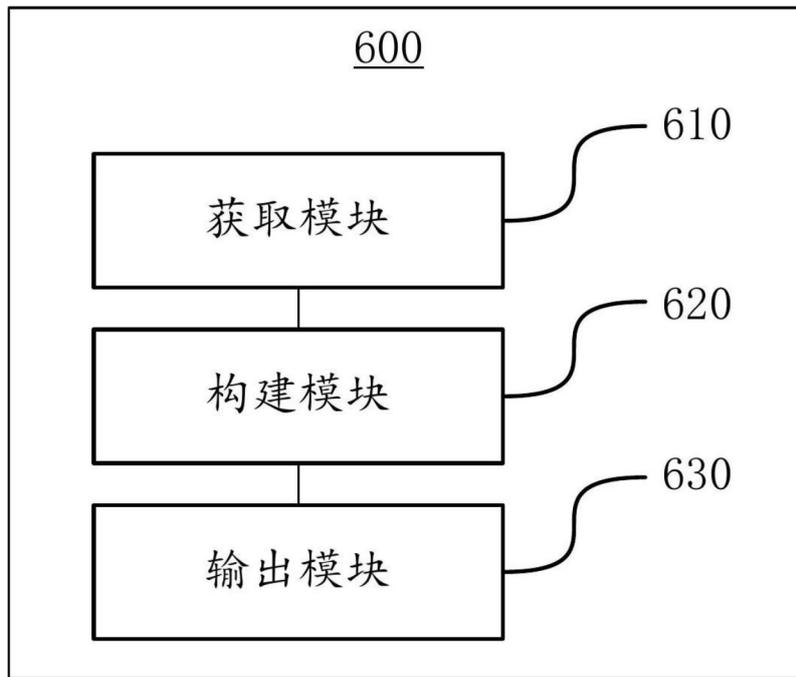


图6

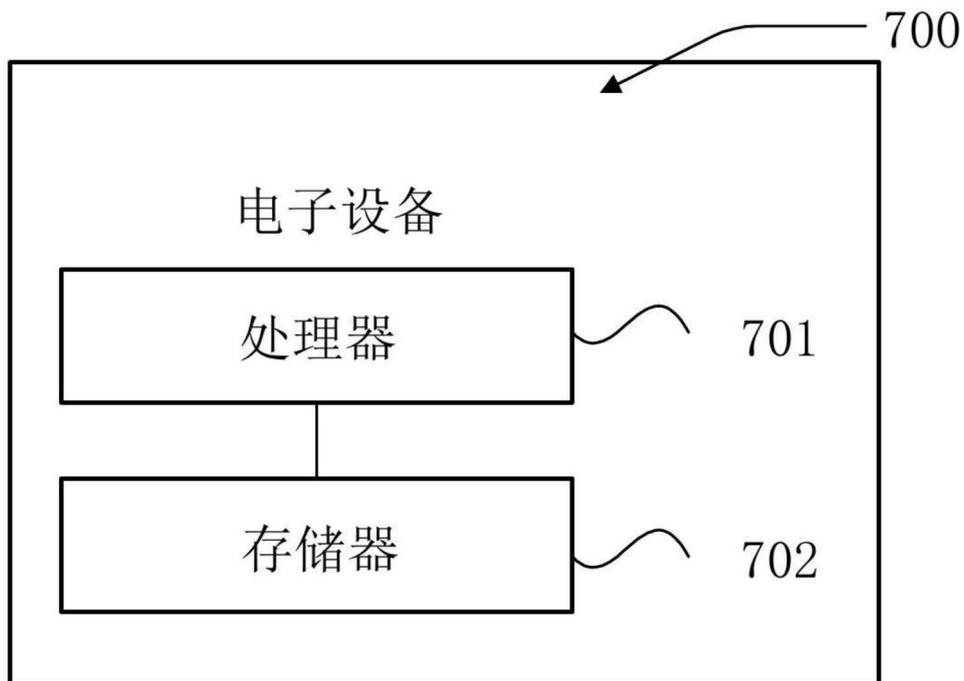


图7