

晶圆传输机器人标定技术研究

刘延杰, 郑小飞, 吴明月

(哈尔滨工业大学 机器人技术与系统国家重点实验室, 哈尔滨 150080, yjliu@hit.edu.cn)

摘要: 为了提高高速高精度晶圆传输机器人的定位精度,建立了精度分析和运动学标定为一体的精度保障体系. 针对机器人的特点,建立了误差模型,分析了各结构几何参数误差源的灵敏度,提出了结合几何误差迭代法和基于运动学逆解的非线性参数辨识的分步标定方法,对其进行了标定,并对几何结构参数进行了误差补偿. 仿真分析以及实验证明:机器人定位误差达到 0.07 mm,有效地提高了机器人末端的定位精度.

关键词: 晶圆传输机器人;运动学标定;参数辨识;误差补偿

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0074-05

Calibration technique of wafer handling robot

LIU Yan-jie, ZHENG Xiao-fei, WU Ming-yue

(State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China, yjliu@hit.edu.cn)

Abstract: In order to improve the positioning precision, a system with precision design and kinematics calibration is established for the wafer handling robot with high speed and high precision. An error model of wafer handling robot is built in this article and the sensitivity of each error factor is analyzed. Combined the geometrical error iteration method with the parameter identification based on inverse kinematics equation, a multiple-step error calibration and identification method is proposed. The geometrical structure error can be identified and compensated through this method. Simulation and experimental results show that the positioning precision is largely improved after the calibration and compensation.

Key words: wafer handling robot; kinematic calibration; parameter identification; error compensation

集成电路已成为电子信息产业的核心, IC 制造装备技术在半导体行业占据重要地位^[1]. 晶圆传输机器人是 IC 制造装备中必不可少的组成部分, 它的定位精度直接影响到晶圆传输质量的好坏. 研究表明, 机器人末端的定位误差主要来自结构几何参数误差, 且该机器人多采用半闭环控制结构, 传统的伺服算法无法有效提高机器人的定位精度. 因此, 必须构建精度设计与运动学标定为一体的精度保障体系^[2].

运动学标定通常可分为 3 个步骤: 系统建模、位置误差测量、参数辨识和误差补偿. Zhuang and Meng^[3] 通过运用 CCD 实现了机器人的自标定;

Mike Tao Zhang^[4-5] 通过采用标准治具, 结合单点标定技术对晶圆传输机器人进行了自标定; Hollerbach^[6] 和 Newman 等^[7] 在“圆点技术”基础上分别采用标准治具和激光测量系统, 对工业机器人进行了运动学标定; Young and Chen^[8] 采用了带变量的 D-H 矩阵模型, 基于机器人运动空间上一系列点对机器人进行了标定; Jang 等^[9] 对机器人的运动空间进行区域标定, 取得了较好的精度. 运用在标定过程中的误差辨识方法有最小二乘法^[10]、非线性优化^[11]、神经网络^[12]、最小最大优化^[13]等方法.

本文分析影响晶圆传输机器人定位精度的主要因素, 简化误差模型, 提出适用于该机器人的简单、高效的运动学标定方法, 提高机器人的定位精度. 首先建立了机器人的误差模型, 分析了各个误差源对末端定位精度影响的灵敏度, 同时提出机

收稿日期: 2009-05-25.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(2009CB724206);

国家科技重大专项资助项目(2009ZX02012-02).

作者简介: 刘延杰(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师.

机器人位置精度补偿方法;基于误差模型,确定了结合几何误差迭代与基于运动学逆解的非线性参数辨识的分步标定方法,设计了自标定程序,对其进行计算机仿真;最后通过 CCD 视觉标定实验,验证了该分步标定法的正确性和实用性。

1 机器人误差模型建立

图1所示为一种典型的四自由度 SCARA 型晶圆传输机器人。该机器人主要由本体、法兰盘、套筒、大臂、小臂、末端手组成,能够实现绕肩关节、肘关节、腕关节的回转运动以及上下升降运动。

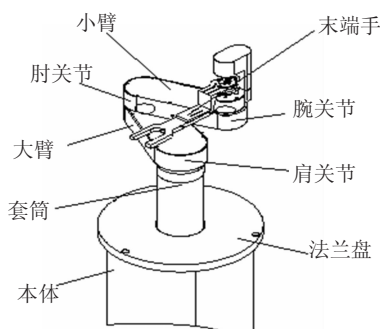


图1 SCARA 型晶圆传输机器人

通过对机构中可能存在的几何参数误差进行分析,得到含有误差的结构构型如图2所示。 $o-XY$ 坐标系为固定参考坐标系,固定在机座上;坐标系 $o-X_0Y_0$ 为机器人实际坐标系,坐标系

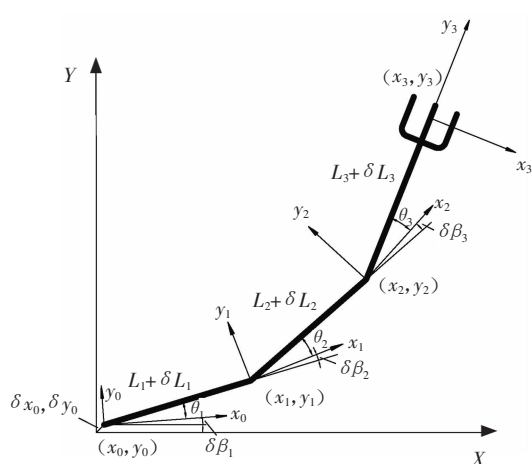


图2 含有误差的机器人构型图

$o-X_1Y_1$ 与坐标系 $o-X_2Y_2$ 为关节实际坐标系,分别与理想坐标系成 $\delta\beta_1$ 、 $\delta\beta_2$ 、 $\delta\beta_3$ 的角度。理想情况下机器人实际坐标系与固定参考系重合。

各参数的物理意义如下: θ_1 、 θ_2 、 θ_3 为各关节的角位移; L_i 、 δL_i 为各关节臂的理想长度及其误差值, $i=1,2,3$; $\delta\beta_1$ 、 $\delta\beta_2$ 、 $\delta\beta_3$ 为各关节坐标的角度误差; δx_0 、 δy_0 为机器人坐标原点误差; (x_i, y_i) 为各关节的原点坐标。

在不考虑机器人几何参数误差的情况下,机器人末端点的运动学正解模型如下:

$$\begin{cases} x = x_3 = L_1 \cos \theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + \\ L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3), \\ y = y_3 = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + \\ L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3). \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)两端取微分可得

$$\delta r = J_r \varepsilon_r, \quad (2)$$

式中: δr 为末端的位置误差, $\delta r = (\delta x \ \delta y)^T$; ε_r 为位置误差源, $\varepsilon_r = (\delta \theta \ \delta L \ \delta \theta)^T$; J_r 为末端误差与位置误差源之间的映射矩阵,且

$$J_r = (J_{ro} \ J_{rL} \ J_{r\theta}),$$

$$J_{ro} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$J_{rL} = \begin{pmatrix} c_1 & c_{12} & c_{123} \\ s_1 & s_{12} & s_{123} \end{pmatrix},$$

$$J_{r\theta} = L \cdot \begin{pmatrix} -s_1 & -s_{12} & -s_{123} & -s_{12} & -s_{123} & -s_{123} \\ c_1 + c_{12} + c_{123} & c_{12} + c_{123} & c_{123} \end{pmatrix}.$$

式中: $\delta\theta_i$ 由两部分组成,一部分为各关节角度误差,另一部分为各坐标系角度误差 $\delta\beta_i$; s_{ijk} 、 c_{ijk} 分别为 $\sin(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 、 $\cos(\theta_i + \theta_j + \theta_k)$ 的简化表达式。

对于实际的机器人,其误差源的误差大小是已定的,为了对其进行数值仿真,根据设计精度,取机器人的各个误差源的误差值大小如表1所示。仿真结果(如图5(a)所示)表明:机器人末端的定位误差大小与其距离中心点的远近有关,距离中心点越远,误差越大,机器人末端的定位误差最大可达1.6 mm,需要对机器人进行误差补偿。

表1 机器人参数误差值

误差源	$\delta\theta_1/\text{rad}$	$\delta\theta_2/\text{rad}$	$\delta\theta_3/\text{rad}$	$\delta L_1/\text{mm}$	$\delta L_2/\text{mm}$	$\delta L_3/\text{mm}$	$\delta x_0/\text{mm}$	$\delta y_0/\text{mm}$
误差数值	0.001 0	0.001 0	0.001 0	0.014 5	0.014 5	0.020 0	0.100 0	0.100 0

2 机器人误差灵敏度分析

由于各个误差源对末端位姿误差的影响程度不同,需要对机器人的误差源进行灵敏度分析,进

而简化误差补偿过程。参照误差理论中误差灵敏度的概念,结合机器人具体误差模型,对式(2)两端取模,并定义 δ_r 为位置误差的模,则有

$$\delta_r = |\delta r| = \sqrt{\delta r^T \delta r} = \sqrt{\varepsilon_r^T J_r^T J_r \varepsilon_r}. \quad (3)$$

假设各个误差源为服从零均值的正态分布的相互独立的随机变量,则有

$$D(\delta_r) = E(\delta_r^2) = E\left(\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i \varepsilon_j J_{ij})\right) = \sum_{i=1}^n J_{ii} \cdot E(\varepsilon_i^2) = \sum_{i=1}^n (J_{ii} \cdot D(\varepsilon_i)) \quad (4)$$

由式(4)可以看出,末端位置误差的方差由各个误差源的方差加权求和后组成,定义各个误差源的权值为相应误差源的误差灵敏度系数,同时考虑误差灵敏度与机器人末端所在位置有关,用其在整个工作空间上的均值作为相应误差源灵敏度的评价指标,表示为

$$\bar{\mu}_i = \int_{\Phi} J_{ii} d\Phi / \int_{\Phi} d\Phi \quad (5)$$

式中: Φ 为机器人的工作空间。

图3给出了各个误差源全局误差灵敏度系数值,可以看出,通过闭环控制的误差源对末端定位精度的影响较小,结构几何误差为主要误差源。零点误差与杆长误差对末端位置误差的灵敏度最大,关节角的敏感系数相对较小,所以在设计中要合理分配不同环节的精度,加工与装配中对灵敏度较大的误差源要尽量减小,以提高机器人的定位精度。

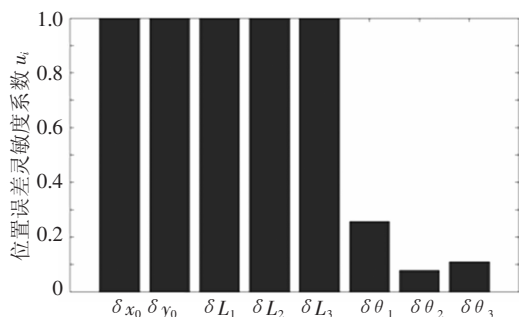


图3 位置误差的灵敏度系数

3 机器人分布标定法及误差补偿

由于无法通过闭环控制来减小结构几何误差源,受到加工手段和成本的限制,仅靠提高加工精度和装配调整消除或减小位姿误差是不经济的,也是不可能的,所以必须对机器人进行运动学标定和误差补偿。

目前,主要的运动学标定方法中,几何误差迭代法不依赖于误差模型,在标定过的点上定位精度高;基于运动学逆解的辨识方法结果准确,但是受限于误差模型^[14]。基于这点,本文采用结合几何迭代法和基于运动学逆解的非线性参数辨识的“分步标定法”对机器人进行标定。

设 r_d 为给定末端位矢, q_d 为名义关节变量, p_d 为名义系统几何参数, Δp 为其误差。为使末端定

位到位置 r_d , 在不考虑 Δp 和考虑 Δp 的情况下,系统的逆向映射分别为

$$\begin{aligned} q_d &= f^{-1}(r_d, p_d), \\ q_a &= f^{-1}(r_d, p_d + \Delta p). \end{aligned} \quad (6)$$

如果能已知末端定位到给定位矢 r_d 的关节位置 q_m , 那么通过式(6)可以构造如下几何参数辨识方程

$$\delta q = q_m - q_a = q_m - f^{-1}(r_d, p_d + \Delta p) \quad (7)$$

式(7)求解 Δp 只需通过 Matlab 优化设计工具箱中非线性优化函数 $\text{lsqnon}()$, 使得

$$\Delta = \sum \delta q^2 \rightarrow \min.$$

图4为分布标定法原理流程图, 该方法是几何误差迭代法标定与基于运动学逆解参数辨识方法的组合。

1) 几何误差迭代法标定: 通过检测末端位置偏差对命令位置进行修正, 迭代到末端位置误差满足需求时, 记录此时的命令位置和电机端实际位置;

2) 基于运动学逆解的参数辨识: 结合运动学逆解参数辨识, 对含有误差的几何参数进行最小二乘非线性优化, 以得出实际的几何参数误差值。这样, 在进行运动学逆解时引入误差补偿, 代入含误差的几何参数, 从而提高机器人末端的定位精度。

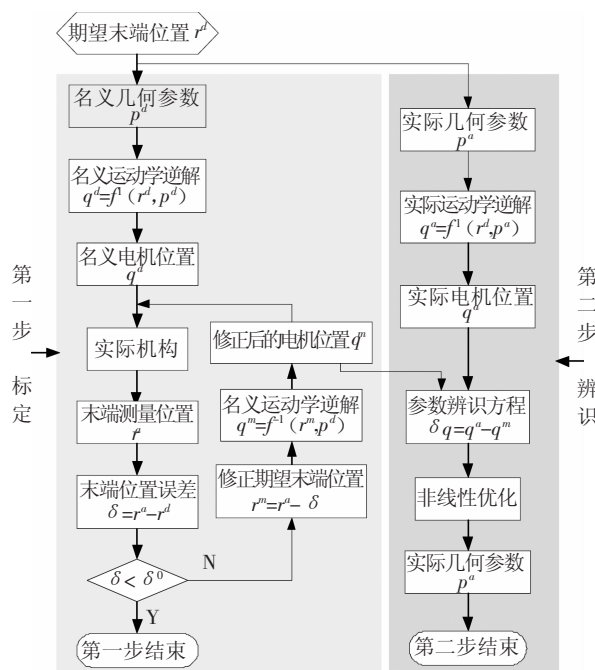


图4 分步标定法流程图

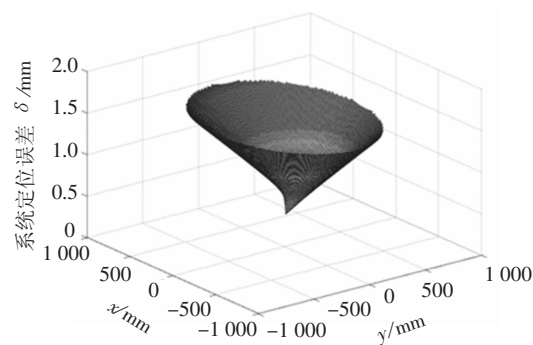
基于分步标定法, 本文对机器人进行了标定仿真。首先假定要标定的机器人的各误差源参数具体值, 此时机器人几何参数的实际值为理论值与误差值之和, 当给定各个电机位置时, 利用运动

学正解模型计算出的末端位置来代替实际检测出来的末端位置,在此基础上结合运动学逆解进行参数辨识,所得结果如表2所示.由辨识结果可知,辨识结果与假设值很接近,进一步的仿真表明,迭代的次数越多,辨识的结果越准确,标定后系统的精度也越高.

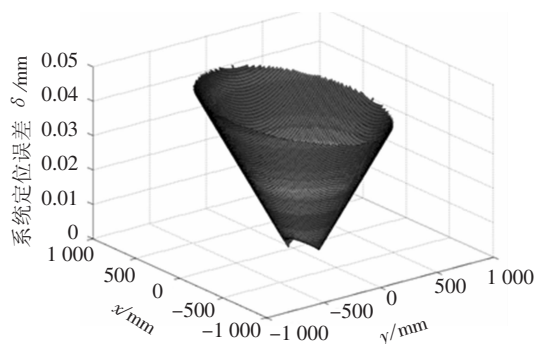
表2 仿真实验参数误差辨识结果

误差源	假设值	辨识结果
$\delta\theta_1$	0.001 0	0.001 1
$\delta\theta_2$	0.001 0	0.000 9
$\delta\theta_3$	0.001 0	0.001 0
δL_1	0.014 5	0.000 8
δL_2	0.014 5	0.002 2
δL_3	0.015 0	0.004 0
δx_0	0.100 0	0.096 7
δy_0	0.100 0	0.104 2

对于同样的末端期望位置,采用辨识出来的几何参数修正运动学模型,得出实际位置与期望位置之间的差值即为标定后机器人的定位误差值,仿真结果如图5(b)所示.对比标定前后的仿真结果可以看出,分步标定法标定后机器人末端的定位精度明显提高,最大定位误差为0.046 mm.



(a) 标定前机器人定位误差仿真

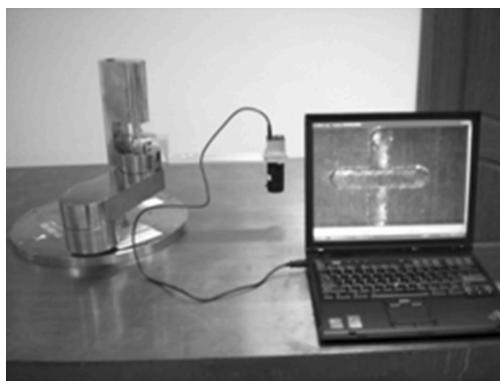


(b) 标定后机器人定位误差仿真

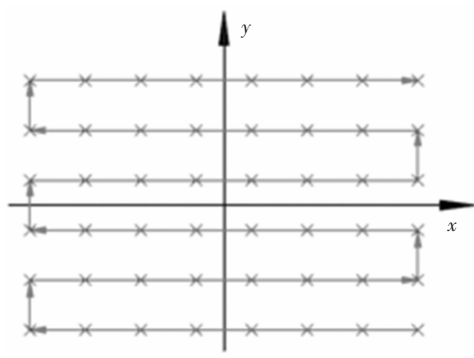
图5 分步标定仿真实验前后机器人的定位误差

4 机器人标定实验

该实验系统主要有以下几个部分组成:特制0级铸铁平台、晶圆传输机器人、上位计算机、视觉系统.其中,特制0级铸铁平台用来定位机器人,平台上布满定制的十字刻线用作机器人标定的末端期望点;视觉系统包括CCD和图像处理软件,用来检测机器人末端定位误差.CCD固定在机器人末端点处,机器人安装在刻有十字刻线的铸铁平台上,每一个十字刻线对应着机器人运动空间内的一个位置坐标.如图6所示.由于机器人运动空间较大,所以实验选取机器人运动空间中的一个区域内的一系列点作为标定点,其横向间距35 mm,纵向间距32 mm,实际的十字叉的大小为2 mm×2 mm,方向平行于坐标轴方向,线宽为0.2 mm.



(a) 标定实验装置

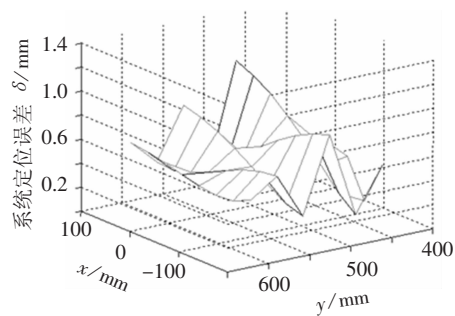


(b) 标定实验测试点

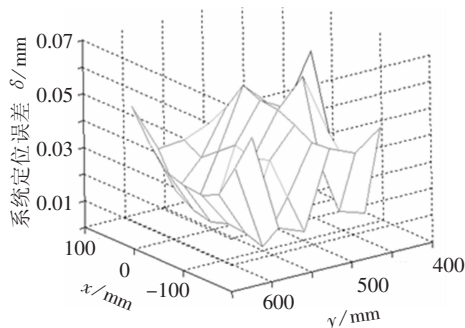
图6 标定实验系统

基于分步标定方法,采用上述的标定系统对机器人进行标定,得到标定前后的定位误差分别如图7所示.对比可以看出,机器人在标定前末端点的定位误差最大值约为1.4 mm,经过标定后的

系统末端定位误差最大值小于0.07 mm,标定前后机器人末端点定位误差有了很大的提高,验证了分步标定法的正确性和适用性.



(a) 标定前机器人的定位误差



(b) 标定后机器人的定位误差

图7 标定实验前后机器人的定位误差

5 结 论

1) 影响晶圆传输机器人末端定位精度的主要因素是结构几何误差。

2) 本文充分发挥几何误差迭代法标定后系统精度高, 基于运动学逆解的非线性参数辨识结果准确的优点, 采用了分步标定法对机器人进行标定, 并对其进行误差补偿。

3) 计算机仿真以及实验证明, 结构参数辨识结果和真实值很接近, 对几何参数进行误差补偿后, 机器人定位误差能够达到 0.07 mm, 有效地提高了晶圆机器人末端点的定位精度。

参考文献:

- [1] 汪劲松, 朱煜. 我国“十五”期间 IC 制造装备的发展战略研究[J]. 机器人技术与应用, 2002 (2): 5-9.
- [2] 李亚. 3-HSS 并联机床精度射击与运动学标定方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2002.
- [3] ZHUANG H, MENG Y. Using a scale: self-calibration of a robot system with factor method [C]//Proceeding of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation. Korea: IEEE, 2001: 2797-2803.

- [4] ZHANG M T. Calibration of Wafer Handling Robots: A Fixturing Approach [C]//Proceedings of the 3rd Annual IEEE Conference on Automation Science and Engineering Scottsdale. AZ, USA: IEEE, 2007: 22-25.
- [5] ZHANG M T, GOLDBERG K. Fixture-based industrial robot calibration for silicon wafer handling [J]. Industrial Robot, 2005, 32(1): 43-48.
- [6] HOLLERBACH J. The calibration index and taxonomy for robot kinematic calibration methods [J]. The International Journal of Robotics Research, 1996, 15(12): 573-591.
- [7] NEWMAN W, BIRKHIMER C, HORNING R, et al. Calibration of a Motoman P8 robot based on laser tracking [C]//Proceeding of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation. San Francisco: IEEE, 2000: 3597-3602.
- [8] YOUNG K, CHEN J. Implementation of a variable D-H parameter model for robot calibration using an FCMAC learning algorithm [J]. Intelligent Robots System, 1999, 24: 313-346.
- [9] JANG J, KIM S, KWAK Y. Calibration of geometric and nongeometric errors of an industrial robot [J]. Robotics, 2001, 19: 311-321.
- [10] RENAUDA P, VIVAS A, ANDREFF N. Kinematic and dynamic identification of parallel mechanisms [J]. Control Engineer Practice, 2006, 14(9): 1099-1109.
- [11] OMODEL A, LEGNAI G, ADAMIN R. Three methodologies for the calibration of industrial manipulators: Experimental results on SCARA robot [J]. Journal of Robot Systems, 2000, 17(6): 291-307.
- [12] DING Q Y, JI J H, SUN L N. Calibration of 2-DOF Planar Parallel Robot: Home Position Identification and Experimental Verification [C]//Proceeding of the 2005 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Nigara Falls: [s. n.], 2005: 510-515.
- [13] YOUNG P M, MORRIS J C. Servo Control of a Dual-stage Avtrator for a high Performance Disk Drive Part 1: Modeling and Simulation [C]//Proceedings of the American Control Conference. Denver, Colorado: [s. n.], 2003: 2523-2528.
- [14] 李娟. 高加速度高精度平面并联机器人结构优化与标定技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.

(编辑 杨 波)