

文章编号: 1002-0446(2002)04-0352-06

微操作机器人系统的大范围三维标定方法*

黄大刚 卢桂章 赵新 张建勋

(南开大学信息技术科学学院机器人与信息自动化研究所 天津 300071)

摘要: 本文针对面向生物工程微操作机器人需同时满足高定位精度和大的工作空间的特点, 给出在毫米级空间对微操作机器人系统实现微米级三维标定的方法: 用运动部件拖动三维标定块及三套显微摄像装置读取三维坐标的方法, 解决了大范围高精度读数的问题; 用四块直角棱镜组成的分光装置和三块二维标尺构成读数范围为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 8\text{mm}$, 读数精度为 $1\mu\text{m}$ 的三维标定块, 解决了标定基准问题; 最后, 给出了标定结果。

关键词: 微操作机器人; 三维标定; 三维标定块

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

METHOD OF THREE DIMENSIONAL CALIBRATION FOR MICRO-MANIPULATOR SYSTEM IN LARGE SPACE

HUANG Da-gang LU Gui-zhang ZHAO Xin ZHANG Jian-xun

(Institute of Robotics & Information Automatic System, College of Information Technique & Science, Nankai University, Tianjin, 300071)

Abstract The approach to implementing calibration with precision of micron in millimeter-scale work volume is put forward in this paper: the method for driving 3D sample block through motion part and reading 3D coordinates through 3 sets of microscopic camera system is adopted to implement calibration with precision of micron in millimeter scale work volume; Light distribution device consisting of four pieces of right angle prism and 3D sample block consisting of three pieces of 2D rulers of $8\text{mm} \times 8\text{mm}$ with precision of micron are taken as sample standard; The calibration results are given finally.

Keywords: micro-manipulator, 3-D calibration, 3-D sample block

1 引言(Introduction)

随着现代科学技术的发展, 微操作机器人已经发展成为机器人领域的一个重要分支, 得到越来越广泛的应用. 例如在生物医学领域, 对染色体的切割, 对细胞的注射; 在 MEMS 技术中对微部件的装配; 在通信领域进行光纤的对接等都有非常重要的实用价值. 微操作机器人是一种特型机器人, 由其操作对象决定了它需要比普通机器人更精密的三维重复定位和三维位置反馈, 因此, 研究大范围高精度的三维标定方法已成为研究和生产微操作机器人工作中必不可少的课题.

对于任何机器人, 都存在加工误差, 例如导轨的

直线度误差、丝杠加工的误差等, 装配过程中各坐标系以及同一坐标系中各坐标轴之间的角度误差等, 这些都是无法避免的. 通过标定工作确定各坐标系之间的变换关系, 在控制过程中对这些误差进行补偿, 是机器人系统中各部件协调工作的必要条件之一.

对于要完成细胞级作业的微操作机器人, 如图 1 所示, 系统的整体标定精度必须达到微米级, 标定工作需要得到四个坐标系之间的变换矩阵: 机器人左手坐标系、机器人右手坐标系、载物台坐标系、摄像机坐标系^[1].

* 基金项目: 国家自然科学基金(69985006, 60173061); 973 计划“集成微光机电系统”项目, 教育部高等学校骨干教师资助计划; 天津市自然科学基金共同资助.

收稿日期: 2002-02-23

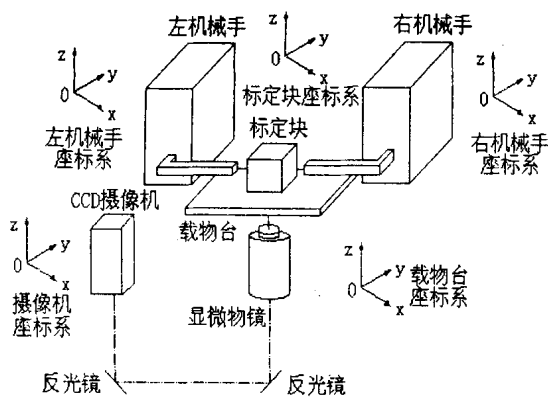


图 1 微操作机器人

Fig. 1 Micro-manipulator

标定结果(变换矩阵)的用途: 1) 向运动部件发出位移指令后, 可计算出运动部件应到达的位置; 2) 在摄像机坐标系中给出位移量, 能计算出应向运动部件的各机械轴发出的步进脉冲数。

由于装针是由手工操作完成的, 每次安装后, 针尖的空间位置和角度都是随机的, 摆放被操作细胞也存在同样的问题。所以, 根据微操作机器人的实际工作空间, 标定的每个方向都应在毫米级, 甚至更大。这一标定空间对于 1 微米的精度来讲是非常大的。

因为微操作机器人的视觉图像是通过一台倒置显微镜由 CCD 摄像机获取的, 用常规的方法在垂直光轴的平面(xy 平面)内的标定精度很容易达到 1 微米, 但是受显微镜视场的限制, 套用常规方法, 标定范围远远小于 1 毫米。例如用 40 倍物镜成像于 1/3 英寸 CCD 的情况下, 标定范围大约为 $80\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ 。在光轴方向(z 方向)的标定由于受到显微镜景深的限制, 不论在标定精度还是标定范围上, 都与实际需要存在很大差距^[2-5]。因此, 标定工作的技术关键归结为: 1) 大范围的三维高精度读数方法; 2) 三维标定块的设计与加工技术。

目前已经有很多方法对普通机器人进行标定, 而且人们还在不断发明新的三维标定方法^[6]。由于微操作机器人的特殊结构, 决定了不能直接将普通机器人的标定方法移植到微操作机器人。

南开大学机器人与信息自动化研究所为解决微操作机器人三维标定问题做了大量的研究工作^[7-10], 对于 z 方向标定问题, 曾使用二维 Fourier 变换的方法获取纵向信息, 用 40 倍物镜像于 1/3 英寸 CCD 的情况下, 纵向定位精度为 2.5 微米, 纵向标定范围为几百微米^[11], 横向观测范围仅限于显微镜

视场内。

北京航空航天大学机器人研究所提出“手眼标定方法”^[12], z 方向的测量精度达到 1 微米, 仍然存在标定范围小的问题。

S. Gonda 等设计了高分辨率三轴激光干涉仪, 用于原子力显微镜的测量, 精度达 0.04nm ^[12]。这种方法适用于对单一运动部件的测量和标定, 对微操作机器人系统中多运动部件相互关系的标定无能为力。

本文提出用机械手等部件拖动专用标定块标定微操作机器人的方法, 解决了读数精度与标定范围的矛盾, 用三套相互正交的显微摄像系统解决了大范围、高精度三维标定问题。给出左右机械手、显微镜载物台和摄像机四个坐标系之间关系(坐标系之间的变换矩阵)的标定方法。标定块的读数精度达到 1 微米, 标定范围达到毫米级(标定块的有效读数范围为 $8\text{mm} \times 8\text{mm} \times 8\text{mm}$)。

2 标定原理(The principle of calibration)

对微操作机器人做三维标定, 必须首先确定一个坐标系作为基准。考虑到标定范围远远大于显微镜视场范围, 所有的测量值均与标定块有关, 所以, 最适合作为标定基准的就是标定块坐标系。

为实现三维标定, 必须有一块读数精度达到 1 微米, 有效读数范围不小于规定标定范围的三维标定块。

要达到 1 微米的读数精度, 需要用显微镜对图像放大后, 再用 CCD 摄像机获取位移信息, 为提高读数精度减小标定误差, 一般选用 40 倍显微镜。显微镜属于小视场大孔径的成像系统, 用 40 倍显微镜成像于 1/3 英寸 CCD 靶面上时, 视场约为 $82.5\text{mm} \times 110\text{mm}$, 为解决显微镜视场小, 标定范围大的矛盾, 将标定块固定在被标定的运动部件(如机械手、显微镜载物台)上, 当运动部件分别沿机械轴运动时, 通过三维标定块测出在标定块坐标系中运动部件末端的运动轨迹, 就可以得到由该部件的机械轴所确定的坐标系与标定块坐标系之间变换矩阵。

实践证明, 仅用一路显微摄像装置不可能在纵向标定时达到毫米级的范围。用三套显微摄像装置在 xy、yz、zx 平面读取三维坐标的变化量, 可以克服显微镜景深对纵向标定范围的限制。标定装置如图 2。运动部件沿 ox 轴运动时, 由 CCD₃ 和 CCD₁ 读数, CCD₂ 因图像离焦而无法读数; 运动部件沿 oy 轴运动

时,由 CCD₁ 和 CCD₂ 读数,CCD₃ 因图像离焦而无法读数;运动部件沿 *oz* 轴运动时,由 CCD₂ 和 CCD₃ 读数,CCD₁ 因图像离焦而无法读数。

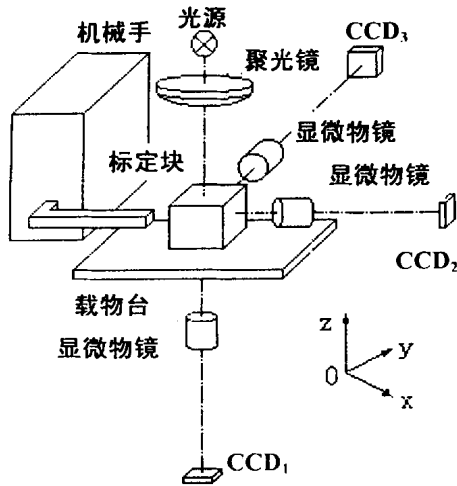


图2 标定原理图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration

标定两个机械手时,机械手应由某一点(设为坐标原点)出发,分别沿机械手坐标系的 *x*、*y*、*z* 轴运动,由三套显微摄像装置读取机械手末端在标定块坐标系中的三维位移,得到坐标变化的 9 个分量,从而确定变换矩阵中的 9 个元素,由机械手只有平移没有转动的条件确定矩阵中的其它元素。

标定载物台与标定机械手的方法基本相同。由于载物台 *z* 方向的运动,可以设定载物台 *z* 轴与 *xy* 平面垂直。令载物台自坐标原点出发,分别沿载物台坐标系的 *x*、*y* 轴移动,由三套显微摄像装置读取载物台在标定块坐标系中的三维位移,2 个三维坐标确定变换矩阵中的 6 个元素,由约束条件确定矩阵中的其它元素。

摄像机坐标系与标定块坐标系的关系可直接将标定块上的二维标尺由 CCD₁ 得到的显微图像进行标定,可以设定摄像机坐标系 *z* 轴与载物台 *z* 轴平行,摄像机坐标系 *xy* 平面与 *z* 轴垂直。

为标定四个坐标系的关系,在整个标定过程中必须保证标定块的姿态不变,先标出左右机械手坐标系、载物台坐标系、摄像机坐标系与标定块坐标系的变换矩阵,再通过矩阵运算得到左右机械手坐标系、载物台坐标系与摄像机坐标系之间的变换矩阵。

标定块初始姿态与标定结果的关系:理论上标定块初始姿态不影响标定结果;实际上当位移量达到毫米级后,若运动方向与标定块上相应的二维标

尺存在微小的角度,当位移量达到毫米级后,也会使图像离焦,由于照明光相对于光轴不对称等原因,就可能造成读数误差,甚至使标定范围达不到预定的要求。

考虑到机械手、载物台存在加工误差(如直线度误差),每个轴只取两点标定显然有可能产生很大的误差,为减小误差,在线性标定时,有必要增加采样点,将沿同一机械轴运动得到的坐标值用最小二乘法拟合成直线作为该机械轴对应的坐标轴。

设机械手坐标系 $(x, y, z, 1)_{hand}^T$ 到标定块坐标系 $(x, y, z, 1)_b^T$ 的变换矩阵为 A_{hand} ,即

$$(x, y, z, 1)_{hand}^T = A_{hand} (x, y, z, 1)_b^T$$

因机械手只有平移,没有转动,变换矩阵可写为下面形式:

$$A_{hand} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

定义机械手 *x* 轴在标定块坐标系 *xy* 面的投影与标定块 *x* 轴的夹角为 α_x ,在标定块坐标系 *yz* 面的投影与标定块 *y* 轴的夹角为 β_x ,在标定块坐标系 *zx* 面的投影与标定块 *z* 轴的夹角为 γ_x 。

定义机械手 *y* 轴在标定块坐标系 *xy* 面的投影与标定块 *x* 轴的夹角为 α_y ,在标定块坐标系 *yz* 面的投影与标定块 *y* 轴的夹角为 β_y ,在标定块坐标系 *zx* 面的投影与标定块 *z* 轴的夹角为 γ_y 。

定义机械手 *z* 轴在标定块坐标系 *xy* 面的投影与标定块 *x* 轴的夹角为 α_z ,在标定块坐标系 *yz* 面的投影与标定块 *y* 轴的夹角为 β_z ,在标定块坐标系 *zx* 面的投影与标定块 *z* 轴的夹角为 γ_z 。

当机械手在自身坐标系中自原点分别沿 *x*、*y*、*z* 轴运动单位距离,得到标定块坐标系下的三组坐标值 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2), (x_3, y_3, z_3)$ 。

写为矩阵形式

$$\begin{pmatrix} x_1 & x_2 & x_3 \\ y_1 & y_2 & y_3 \\ z_1 & z_2 & z_3 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

其中

$$\begin{aligned} a_{11} &= \cos\alpha_x \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\gamma_x \sqrt{1 + \tan^2\alpha_x}))) \\ a_{21} &= \sin\alpha_x \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\gamma_x \sqrt{1 + \tan^2\alpha_x}))) \\ a_{31} &= \sin(\tan^{-1}(1/(\tan\gamma_x \sqrt{1 + \tan^2\alpha_x}))) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{12} &= \sin(\tan^{-1}(1/(\tan\alpha_y \sqrt{1 + \tan^2\beta_x}))) \\
 a_{22} &= \cos\beta_y \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\alpha_y \sqrt{1 + \tan^2\beta_y}))) \\
 a_{32} &= \sin\beta_y \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\alpha_y \sqrt{1 + \tan^2\beta_y}))) \\
 a_{13} &= \sin\gamma_z \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\beta_z \sqrt{1 + \tan^2\gamma_z}))) \\
 a_{23} &= \sin(\tan^{-1}(1/(\tan\beta_z \sqrt{1 + \tan^2\gamma_z}))) \\
 a_{33} &= \cos\gamma_z \cos(\tan^{-1}(1/(\tan\beta_z \sqrt{1 + \tan^2\gamma_z})))
 \end{aligned}$$

令载物台 z 轴与载物台 xy 面垂直, 用同样的方法计算载物台坐标系到标定块坐标系的变换矩阵

$$(x, y, z, 1)_{\text{标定块}}^T = B(x, y, z, 1)_{\text{载物台}}^T$$

因为载物台也只有平移没有转动, 并且载物台坐标系的 z 轴与 xy 面垂直, 变换矩阵可写为

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & 0 & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & 0 \\ b_{31} & b_{32} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

矩阵中 6 个元素的计算公式与前面相同.

摄像机坐标系到标定块坐标系的变换:

由于微操作机器人系统在实际使用时只提供一个摄像机, 观察到的图像是平面图像, 可以假设摄像机坐标系的 z 轴与载物台坐标系 z 轴平行, 摄像机坐标系的 xy 平面与 z 轴垂直, 且每次实验前可调整摄像机的角度, 使摄像机坐标系的 y 轴与载物台坐标系 y 轴平行. 此时对摄像机坐标系的标定工作只剩下确定 x 与 y 轴的夹角 α .

由摄像机坐标系到标定块坐标系的变换矩阵为

$$C = \begin{bmatrix} \cos\alpha_x & 0 & 0 & 0 \\ \sin\alpha_x & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

各坐标系之间的关系可写为

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{标定块}} &= A_{\text{左}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{左机械手}} = A_{\text{右}} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{右机械手}} \\
 &= B \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{载物台}} = C \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix}_{\text{摄像机}}
 \end{aligned}$$

从左机械手坐标系、右机械手坐标系、载物台坐标系到摄像机坐标系的变换矩阵分别为

$$T_1 = C^{-1}A_{\text{左}}, T_2 = C^{-1}A_{\text{右}}, T_3 = C^{-1}B$$

逆变换可通过矩阵运算得到.

3 三维标定块(3D sample block)

三维标定块由金属支架、分光棱镜和三块二维标尺组成. 分光棱镜由四块直角棱镜胶合而成, 其中两块直角棱镜的斜面在胶合前镀分光膜. 光学结构见图 3. 照明光自标定块上方沿 -z 方向入射, 沿 +x、-y、-z 方向出射, 使三块二维标尺得到均匀照明.

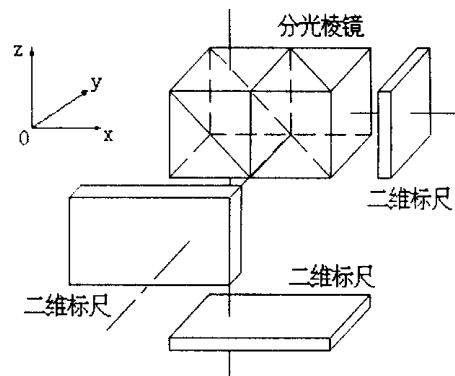


图 3 三维标定块光学结构图

Fig. 3 Optical sketch of 3D sample block

用 LEDIT 软件设计, 用微电子束扫描技术加工. 标尺有效读数范围为 $8\text{ mm} \times 8\text{ mm}$, 加工误差为 $0.25\mu\text{m}$.

考虑到标定周期比较长, 为了便于读数, 提高抗干扰能力, 将每块二维标尺分为 25600 个 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ 的子标尺, 每个子标尺内标注该子标尺左下角的二维坐标, 图 4 为二维标尺的局部放大图. 标尺采用 $1\mu\text{m}$ 线宽技术刻蚀, 为达到 $1\mu\text{m}$ 的读数精度, 采用双标尺结构.

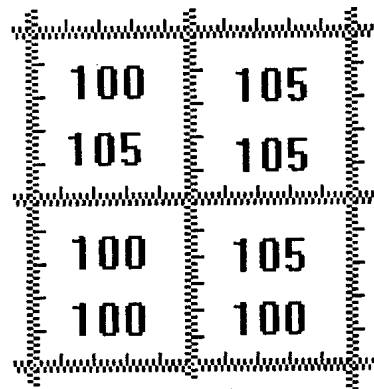


图 4 二维标尺局部放大图

Fig. 4 Part magnifying sketch of 2D ruler

安装标定块时, 标定块上的三个坐标轴应尽可能与运动部件上相应的机械轴平行, 以确保标定过程中

标尺的刻线始终位于显微镜的景深范围之内. 一般情况下可用载物台工作面和载物台的一个边定位作为标定块初始姿态的定位基准. 如果需要调整角度, 可在此基准上附加调整元件.

因标定过程中遇到多次标定块安装定位, 如果标定块的姿态在标定过程中发生变化, 就会直接影响标定精度. 对于多自由度微米级的调整, 很难安装机械结构, 宜采用热熔胶固定标定块. 要求热熔胶熔点低, 在常温下固化后产生的应力对标定块姿态的影响在 10 秒以内.

4 实验(Experiments)

(a) 标定块分别与运动部件刚性连接, 每次连接保持标定块的姿态不变

(b) 用三套显微摄像装置分别对准标定块上相互正交的三个二维标尺, 并将该点设为原点

(c) 分别自原点出发沿运动部件的各机械轴移动, 由其中两套显微摄像装置读取空间坐标(另一套装置因离焦而无法读数), 确定该部件坐标系与标定块坐标系之间的变换矩阵

(d) 如沿机械轴运动的轨迹不是直线, 则需用最小二乘法将坐标轴拟合为直线

(e) 保持标定块姿态不变, 确定其它运动部件坐标系与标定块坐标系的变换矩阵

(f) 由机器人各部件坐标系与标定块坐标系的变换矩阵换算为四个坐标系(左机械手坐标系、右机械手坐标系、载物台坐标系、摄像机坐标系)之间的变换矩阵

标定工作流程图见图 5.

在 2m m × 2m m × 2m m 空间对南开大学机器人与信息自动化研究所生产的 NKT Y-MR-04 型微操作机器人样机进行标定, 步长取 50μm, 即每个坐标轴取 40 个采样点, 将每组实测数据用最小二乘法拟合为直线后, 得到表 1 中的数据.

左、右机械手坐标系、载物台到摄像机坐标系的变换矩阵分别为

$$T_1 = \begin{vmatrix} 0.9997 & -0.0231 & -0.0085 & 0 \\ 0.0120 & 1.0000 & 0.0017 & 0 \\ 0.0139 & 0.0008 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_2 = \begin{vmatrix} 1.0000 & -0.0156 & 0.0006 & 0 \\ 0.0039 & 1.0000 & 0.0035 & 0 \\ 0.0000 & -0.0032 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

$$T_3 = \begin{vmatrix} 1.0000 & -0.0125 & 0 & 0 \\ 0.0007 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0.0037 & -0.0094 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}$$

表 1 机器人各轴与标定块坐标轴的夹角参数

Table 1 Data of angles

	载物台	左机械手	右机械手	摄像机
α_x	0.66140°	1.31220°	0.84798°	0.67357°
β_x				91.29591°
γ_x	89.78592°	89.20291°	89.99882°	
α_y	90.71793°	91.32122°	90.89274°	
β_y	-0.53913°	0.04671°	-0.18366°	
β_z		89.90874°	89.79711°	
γ_z		-0.48791°	0.03349°	

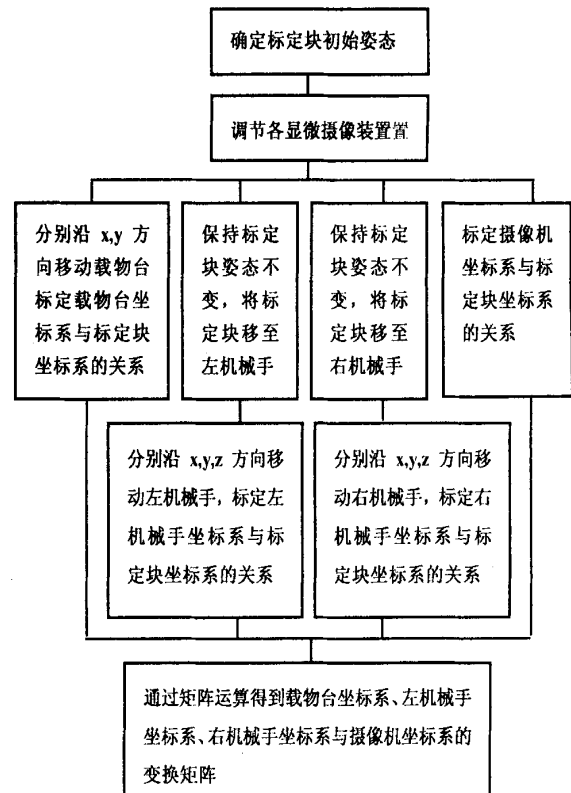


图 5 流程图

Fig. 5 Flow chart

5 结论(Conclusion)

标定中的读数精度达到 1 微米, 标定范围在三个方向都达到毫米级. 只要加工出尺寸合适的标定块, 标定范围很容易做到厘米级, 标定方法和精度都不变.

标定中的技术关键: i) 二维标尺的加工精度高, 标尺的有效面积大, 用微电子束逐点扫描的方法加

工, 数据量非常大, 按照加工设备的数据容量通常要将版图分为若干子图, 曝光时再拼接, 需要几十个小时连续曝光, 加工成本较高; ii) 三维标定块中对各坐标轴之间的角度要求较高, 需要用光学定位方法加工; iii) 标定过程中标定块安装到各部件上姿态的重复精度高, 需要借鉴光学加工中的定位方法。

参考文献 (References)

- [1] 卢桂章, 张建勋, 赵新. 面向生物工程实验的微操作机器人. 南开大学学报(自然科学), 1999, 9
- [2] 王守杰, 宗光华, 毕树生. 微操作机器人显微视觉系统的研究. 机器人, 1998, 3
- [3] 毕树生等. 用于生物工程的微操作机器人系统的若干问题. 仪器仪表学报, 2000, 12
- [4] 毕树生等. 微操作机器人系统的研究开发. 中国机械工程, 1999, 9
- [5] 赵玮等. 微操作机器人的视觉伺服控制. 机器人, 2001, 3
- [6] Yau Wei-Yun, Wang Han. Coordinating the eyes, head and arm of an autonomous robot. Engineering Application of Artificial Intelligence 11, 1998, 163- 174
- [7] 李庆诚. 微驱动机器人系统体系结构及其关键技术的研究. 南开大学博士学位论文, 1996, 5
- [8] 刘连臣. 微操作机器人及显微视觉伺服控制系统的研究. 南开大学博士学位论文, 1998, 5
- [9] 薛大庆. 微操作机器人视觉反馈技术与系统软件的实现. 南开大学硕士学位论文, 1999, 5
- [10] 涂宇澄. 微操作机器人运动控制与系统标定. 南开大学硕士学位论文, 1999, 5
- [11] 张建勋等. 通过显微图像特征抽取获得微操作目标纵向信息. 机器人, 2001, 1
- [12] S Gonda, T Doi, T Kurosawa, Y Tanimura, N Hisata, T Yamagishi, H Fujimoto, H Yukawa. Accurate topographic images using a measuring atomic force microscope. Applied Surface Science, 144- 145(1999)505- 509

作者简介:

- 黄大刚 (1962-), 男, 高级工程师. 研究领域: 微操作机器人, 光学.
- 卢桂章 (1938-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人学.
- 赵新 (1968-), 男, 博士, 副教授. 研究领域: 虚拟现实, 智能机器人.

(上接第 345 页)

从这两张图中均可以看出该调度的生产周期是 19.1, 这就是本调度问题的最佳生产周期. 本文寻求的是最短生产周期, 因而采用的分派规则是 SPT. 如果使用其它的分派规则, 可以求得其它的最优性能指标.

在本文中, 采用了一种新的调度算法, 解决了双资源作业车间的调度问题. 仿真结果研究表明, 不仅遗传算法以及分派规则结合起来是十分有效的, 而且说明该方法是可行的, 并且获得令人满意的结果. 同时, 我们坚信, 该算法还可以扩展到多资源的作业车间工作环境中去.

参考文献 (References)

- [1] Gargeva V B, Deane R H. Scheduling research in multiple resource constrained job shop: a review and critique. International Journal of Production Research, 1996, 34(8): 2077- 2097
- [2] Treleven M D, Elvers D A. An investigation of labor assignment rules in a dual resource constrained system research. The Journal of Operations Management, 1985, 6(1): 51- 58
- [3] Treleven M D. A review of the dual- resource constrained system research. IIE Transactions, 21: 279- 287
- [4] Miller J G, Berry W L. Heuristic methods for assignment men to machines: an experimental analysis. A IIE Transactions, 1974, 6: 97- 104
- [5] K K B Hon, H Chi. A new approach of group technology part families optimization. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 425
- [6] Jain A, K, Eim aragy H A. Single process plan scheduling with genetic algorithms. Journal of Production Planning & Control, 1997, 8(4): 363- 376
- [7] H P W iendahl, R Garlichs. Decentral production scheduling of assembly systems with genetic algorithm. Annals of the CIRP, 1994, 43(1): 389
- [8] N Wong, M C Leu. Adaptive genetic algorithm for optimal printed circuit board assembly planning. Annals of the CIRP, 1993, 42(1): 17
- [9] Eim aragy H A, Patel V, Ben A I. A genetic algorithm based approach for scheduling of dual- resources constrained manufacturing systems, Annals of the CIRP, 1999, 48(1)
- [10] Runwei Cheng, Mitsuo Gen, Yasuhiro Tsujimura. A tutorial survey of job- shop scheduling problems using genetic algorithm- 1. Computers Industry Engineering, 1996, 30(4): 983- 997
- [11] Guoyong Shi. A genetic algorithm applied to a class job- shop scheduling problem. International Journal of Systems Science, 1997, 28/1: 25- 32

作者简介:

- 孙志峻 (1970-), 男, 博士研究生. 研究领域: 智能制造.
- 朱剑英 (1937-), 男, 博士生导师. 研究领域: 智能机器人, 智能制造.