

微管与微球装配中的姿态检测与姿态对准^①李福东^② 徐 德^③ 史亚莉 张正涛

(中国科学院自动化研究所 北京 100190)

摘 要 研究了微装配中的微管与微球的姿态检测与对准,以精确获取其姿态,使微管高精度对准微球上的微孔,然后插入微孔,保证微管与微球的高质量装配。针对显微相机的景深小、视野小,传统的基于立体视觉的姿态测量方法不能实现微管与微孔的姿态测量,提出了一种基于运动的微孔与微管的姿态测量方法。该方法采用双目显微视觉,通过显微相机的聚焦运动,在每个显微相机中分别单独测量出微孔、微管的投影线,然后根据两条投影线与显微相机光轴信息分别计算出微孔、微管在微管操作手坐标系中的姿态向量。以微管姿态向量为基准,通过微球姿态调整平台分别绕 x 、 y 旋转调整微球上微孔的姿态向量,实现了微管与微球的对准。实验结果表明了所提姿态测量与对准方法的有效性。

关键词 显微视觉,微装配,姿态检测,姿态对准

0 引 言

三维位姿估计,即从图像中获取物体的三维位置和三维姿态,一直是计算机视觉研究的一个难点。摄像机所获取的图像是三维物体或者场景的一个二维投影,所以,由投影图像的信息测量物体的三维姿态,会使测量精度受到一定的限制。三维位姿估计对物体识别、定位、抓取以及创建地图等应用有着非常重要的意义。三维姿态测量在卫星对接和导弹位姿测量中已有一些研究。Zhou 等利用战机的三维模型进行投影,生成战机三维姿态所对应的二维模板,然后将 CCD 获取的战机图像与二维动态模板库进行匹配获取战机三维姿态^[1]。Xu 等提出一种通过立体视觉求解卫星姿态的方法,测量方法的仿真结果精度在 57mm 和 6.5° ^[2]。Assa 等通过使用一种基于卡尔曼算法的技术来对多摄像机信息进行融合,提高姿态测量的精度和稳定性^[3]。Kyriakoulis 和 Gasterators 通过在一个机器人上进行颜色标记,开发了一种根据颜色标记的状态确定机器人姿态的方法^[4]。同样借助在被测物体上加入容易检测的标记来测量物体姿态的还有日本的 Katsuki 等^[5]。以上研究都是针对宏观物体的姿态测量进行的,与

微观操作有很大不同。微观操作所使用的高倍率显微摄像机的景深非常小,无法使待测量物体整体清晰成像,这对微装配中物体的姿态测量造成很大的限制。目前,已有大量对微操作中微小物体识别、定位、抓取等方面的研究,而且有不少很成功的应用^[6-10],但是对于微操作中微小物体的姿态测量与调整的研究却非常少。从国内外已有的文献来看,Zhang 等提出一种测量柱腔位姿的三相机信息融合方法^[11],并获得了小于 $1\mu\text{m}$ 的位置精度。但是,对于柱腔的姿态测量,他们只是提出了一种限制条件很多的理论方法,并没有相关实验结果。Wang 等在微小的旋转光电开关安装过程中加入了对安装的微小镜片的姿态调整^[12],但是他们的姿态测量与调整是绕单轴的一维姿态调整,并没有对微小镜片进行三维姿态测量。本文提出了一种基于双目显微视觉的姿态测量方法,且用此方法对微管微球装配中的微孔和微管的三维姿态进行了有效测量,并通过实验对该方法进行了验证。

1 系统设置

微管微球姿态对准系统(图 1)由一个视觉单

① 国家自然科学基金(61227804,61105036)资助项目。

② 男,1985 年生,博士;研究方向:显微视觉图像处理与微装配自动化;E-mail:fudong_li@yahoo.com

③ 通讯作者,E-mail:de.xu@ia.ac.cn

(收稿日期:2013-10-23)

元、一个姿态调整单元和一台工控机组成。

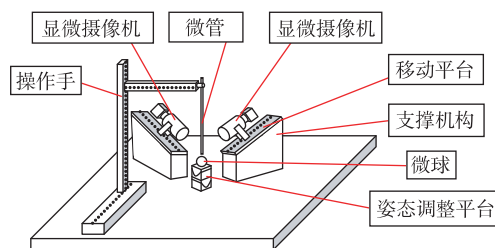


图 1 系统设置示意图

视觉单元由两个显微摄像机组成,每个显微摄像机有一个沿其光轴平移的运动平台。显微摄像机与其运动平台均安装于 30° 倾斜支撑架上,以便微孔与微管末端能在显微摄像机中同时成像。姿态调整平台有绕微管操作手坐标系 x 轴和 y 轴的两个旋转自由度。微管的运动由一个三轴操作平台控制。显微摄像机运动平台的位置调整、获取图像的处理、微管操作手的运动控制以及姿态调整平台的调整控制,均由工控机进行协调控制。

2 微孔姿态测量

微孔姿态测量原理如图 2 所示。图 2 中,聚焦平面 1 为微球最外侧边缘在显微摄像机中清晰成像时所对应的聚焦平面。聚焦平面 2 为微孔中心部分在显微摄像机中清晰成像所对应的聚焦平面。 O_1 为微球球心,位于聚焦平面 1 上。 O_2 为 O_1 在聚焦平面 2 上的投影点。 A 为微孔的中心点。

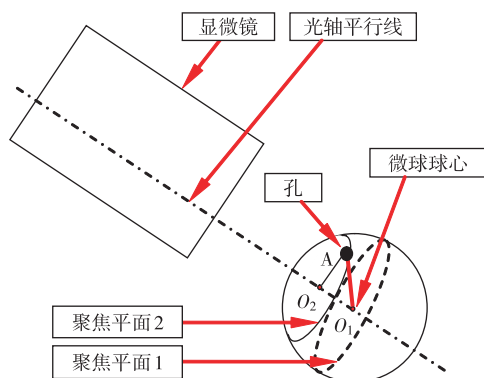


图 2 微孔姿态测量原理示意图

微孔的姿态测量分为以下 3 个步骤:

第一步:沿着显微摄像机光轴移动显微摄像机,使微球的清晰边缘区域最大。此时,球心位于显微

摄像机的聚焦平面 1 上,微球的清晰部分为其外边缘,清晰图像为一个圆。位于聚焦平面 1 上的圆心,即为微球球心 O_1 。

第二步:沿着显微摄像机光轴移动显微摄像机,使其聚焦在微孔上。微孔所在的聚焦平面为聚焦平面 2。 O_2 和微孔中心 A 的连线为 O_1 和 A 的连线在聚焦平面 2 上的投影。

第三步:计算微孔方向向量。

向量 $\mathbf{AO}_2$ 在微管操作手坐标系中的表示可以从图像信息结合显微摄像机的标定参数计算得到,如下式:

$$\begin{cases} \Delta x_m = n_x k_x \Delta u + o_x k_y \Delta v \\ \Delta y_m = n_y k_x \Delta u + o_y k_y \Delta v \\ \Delta z_m = n_z k_x \Delta u + o_z k_y \Delta v \end{cases} \quad (1)$$

其中, $[\Delta x_m, \Delta y_m, \Delta z_m]^T$ 是向量 $\mathbf{AO}_2$ 在微管操作手坐标系中的表示, $n_x, n_y, n_z, o_x, o_y, o_z$ 是相机坐标系和微管操作手坐标系之间的旋转矩阵的元素, k_x, k_y 是相机的像素比例系数, $\Delta u, \Delta v$ 是 A 点和 O_2 点的图像坐标偏差。旋转矩阵和像素比例系数是预先标定的。

根据 A 点和 O_2 点的图像坐标偏差 Δu 和 Δv ,利用式(1)可以计算向量 $\mathbf{AO}_2$ 。此外,沿着显微摄像机光轴的向量由标定得到。于是,平面 $O_1 A O_2$ 的法向量 $\mathbf{n}_{HL}$ 可以计算为

$$\mathbf{n}_{HL} = \mathbf{AO}_2 \times \mathbf{V}_z \quad (2)$$

其中, $\mathbf{V}_z$ 是沿着显微摄像机光轴的向量在微管操作手坐标系中的表示。

同理,根据右边显微摄像机的图像信息可以得到含有 $\mathbf{AO}_1$ 的平面的法向量 $\mathbf{n}_{HR}$ 。向量 $\mathbf{n}_{HL}$ 和 $\mathbf{n}_{HR}$ 同时垂直于向量 $\mathbf{AO}_1$,于是有:

$$\mathbf{AO}_1 = \mathbf{n}_{HL} \times \mathbf{n}_{HR} \quad (3)$$

3 微管姿态测量

微管姿态测量原理如图 3 所示。

微管姿态测量同样分为 3 个步骤:

第一步:沿着显微摄像机光轴移动显微摄像机,使其聚焦于微管的任一部位。标记微管聚焦清晰部分的中心点为 A_1 。

第二步:沿着显微摄像机光轴移动显微摄像机,使其聚焦于微管另外一部位。微管上第一个标记的点在聚焦平面 2 上有一个投影点 A_2 。这时,微管聚焦清晰部分的中点记为 B 。点 A_2 和点 B 之间的连

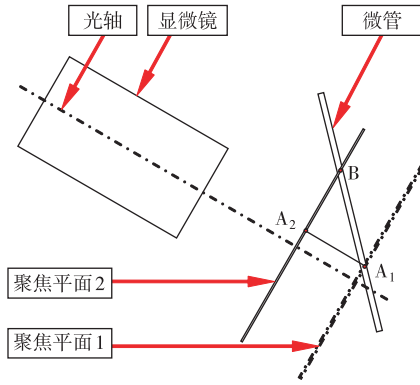


图3 微管姿态测量原理示意图

线即为点 A_1 和点 B 之间的连线在聚焦平面 2 上的投影。

第三步:计算微管方向向量。

向量 BA_2 在微管操作手坐标系中的表示可以从图像信息结合显微摄像机的标定参数计算得到,参见公式(1)。结合显微摄像机光轴的向量 V_z ,得到平面 A_1BA_2 的法向量:

$$n_{TL} = BA_2 \times V_z \quad (4)$$

同理,根据右边显微摄像机的图像信息可以得到含有微管的平面的法向量 n_{TR} 。利用向量 n_{TL} 和 n_{TR} 同时垂直于向量 BA_1 ,通过叉乘计算出 BA_1 :

$$BA_1 = n_{TL} \times n_{TR} \quad (5)$$

4 微孔姿态调整

微孔的姿态调整是将微孔的姿态向量 AO_1 调整到与微管的姿态向量 BA_1 一致。微孔的姿态调整是通过姿态调整平台绕微管操作手坐标系 x 轴、 y 轴的旋转进行调整的。向量 AO_1 绕 y 轴旋转 θ_y , 绕 x 轴旋转 θ_x 之后得到向量 AO'_1 。向量 AO'_1 计算如式:

$$AO'_1 = Rot(x, \theta_x) Rot(y, \theta_y) AO_1 \quad (6)$$

其中, $Rot(x, \theta_x)$ 为绕 x 轴旋转 θ_x 的旋转变换矩阵, $Rot(y, \theta_y)$ 为绕 y 轴旋转 θ_y 的旋转变换矩阵。

以 0.2° 为步长, $\theta_x \in (-10, 10)^\circ$, $\theta_y \in (-5, 5)^\circ$, 计算 AO'_1 与 BA_1 的夹角 $\theta(\theta_x, \theta_y)$ 。取 $\theta(\theta_x, \theta_y)$ 的最小值对应的 θ_x 与 θ_y 的值为调整值,对微孔的姿态进行调整。 θ_x 与 θ_y 的调节范围取值是由旋转轴的实际旋转范围决定的。虽然微孔的姿态调整范围有限,但是在实际装配中,由于微管是垂直向下安装,微球安装时微孔为竖直朝上,所以二者的夹角不大。微孔的调节范围能够满足将二者进行对准的要求。

5 实验与结果

5.1 实验系统

图4为根据第2部分的系统原理所搭建的实验系统。在此实验系统中,有两个120倍显微摄像机和一个体视显微镜(Zeiss 2000-C)。体视显微镜用来为姿态测量任务进行初始化,即将微管末端移动到微孔的附近。三自由度的微管操作手的分辨率为 $0.04\mu\text{m}$,行程 25.4mm 。姿态调整平台有两个自由度,一个为绕微管操作手坐标系的 x 轴,一个为绕微管操作手坐标系的 y 轴,均由步进电机控制。

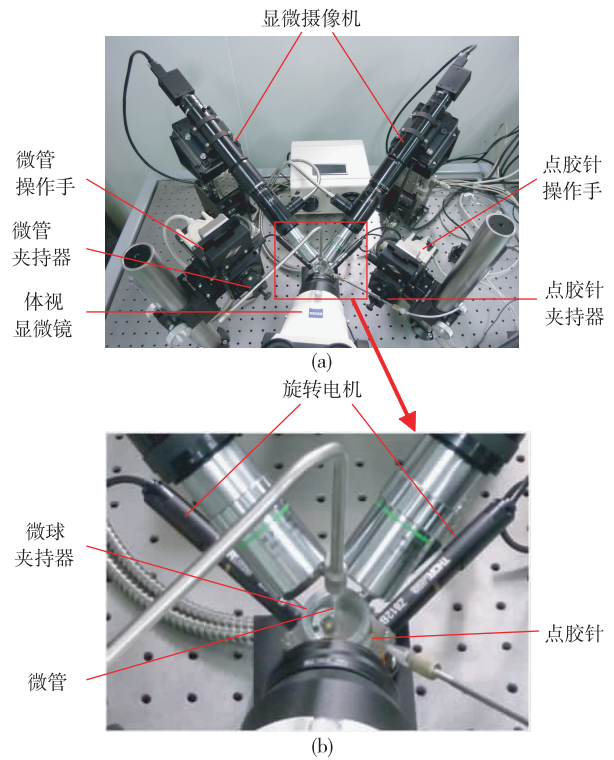


图4 实验系统

5.2 微孔姿态测量实验

为得到微球的球心,当显微摄像机聚焦在微球外径上时,对清晰的外边缘进行最小二乘圆拟合。手动选择进行圆拟合所需的边缘点。然后,移动显微摄像机使其聚焦到微孔中心,在图像上手动选择微孔的中心点。进行完这两步操作,位于微球上的微孔的姿态便可计算。

实验所用的微球直径 $500\mu\text{m}$,其上的微孔直径 $20\mu\text{m}$ 。重复进行10次测量得到的微孔姿态测量结果如图5所示。测量出的10组微孔姿态向量之间的最大偏差为 0.59° 。可见,利用本文方法的微孔

姿态测量结果比较稳定。

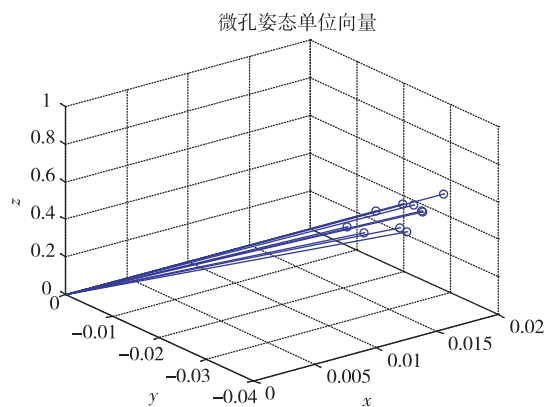


图 5 微孔姿态测量结果

为了说明所提姿态测量方法的正确性,进行了一组测量值与实际值的对比实验。实验中,假设原始姿态的测量值与实际值一致,分别绕 x 轴进行 $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5$ 旋转,测量旋转之后的姿态,与实际值进行对比,对比结果见图 6。其中,带“*”的向量为测量值,带“o”的向量为实际值。微孔姿态向量的测量值与实际值的最大误差为 0.78° 。实验结果表明,所提出的微孔姿态测量方法具有较高的准确性。

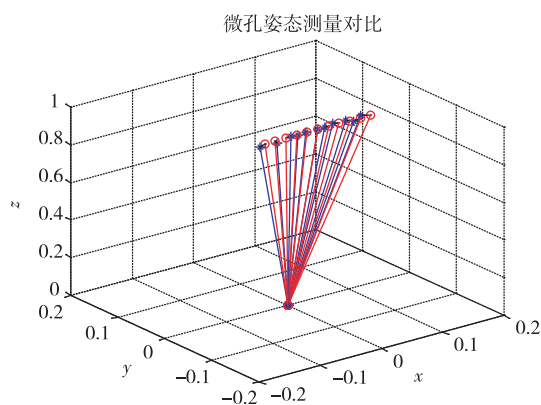


图 6 姿态测量值与实际值对比

5.3 微管姿态测量实验

首先显微摄像机将聚焦到微管的偏下部分,选择并在图像中记录清晰聚焦部分的中点。接着,显微摄像机后移,聚焦到微管的偏上部分,选择并在图像中记录清晰聚焦部分的中点。根据选取的两个清晰聚焦点可以计算微管的姿态。实验所用微管末端直径 $17\mu\text{m}$ 。重复进行 10 次测量得到的微管姿态测量结果如图 7。测量出的 10 组微管姿态向量之间

的最大偏差为 0.47° 。可见,利用本文方法的微管姿态测量结果比较稳定。

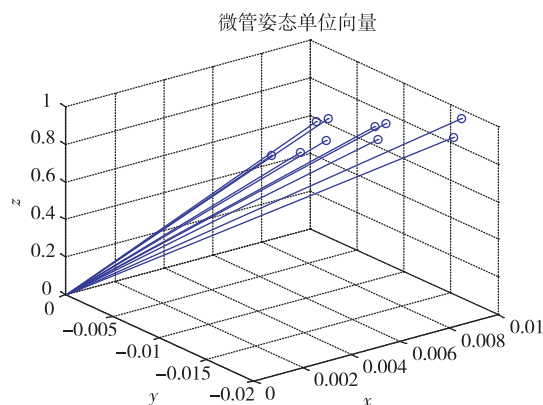


图 7 微管姿态测量结果

5.4 微管-微孔姿态对准实验

微管-微孔的姿态检测过程部分图片如图 8。

其中,图 8(a)为微管-微孔姿态检测的初始状态,此时微孔与微球外边缘均不清晰;图 8(b)为先后对左右相机中的微球外边缘进行聚焦后的状态,在此状态下在边缘上取点进行了最小二乘圆拟合,得到了微球最大尺寸图像的边缘的圆方程;图 8(c)为先后对左右相机中的微孔进行聚焦后的图像;图 8(d)为左右相机先后聚焦到各自视野中微管上的合适部位时的状态,此时分别取聚焦位置的中点作为微管姿态测量的第 1 点;图 8(e)为左右相机分别移动一定距离 ($100\mu\text{m}$),聚焦于微管的另一部位的状态,此时分别取聚焦部位的中点作为微管姿态测量的第 2 点。

按照第 2 节方法对微管和微孔的姿态进行了检测。微孔与微球球心连线的单位空间向量为 $[-0.0415, -0.0883, 0.9952]^T$,微管姿态单位空间向量为 $[0.0061, -0.0155, 0.9999]^T$,微管与微孔方向的夹角为 4.99° 。

根据微孔姿态调整的计算方法可得, x 轴电机调节角度为 4.2° , y 轴电机调节角度为 -2.8° 。按照上述角度对 x 、 y 轴姿态进行了调整。调整之后测量结果如下:微孔与微球球心连线的单位空间向量为 $[0.0039, -0.0170, 0.9998]^T$,微管姿态单位空间向量为 $[0.0061, -0.0155, 0.9999]^T$,微管与微孔方向的夹角为 0.15° 。

由此可见,微管与微孔方向的夹角已经小于 0.5° ,满足了高精度装配的需求。



(a) 姿态检测的初始状态



(b) 微球外边缘聚焦与圆拟合



(c) 微孔聚焦



(d) 微管第一点聚焦



(e) 微管第二点聚焦

图 8 微管与微孔姿态测量过程中部分图片

6 结 论

本文针对显微视觉下微管与微孔装配中的姿态测量与对准问题提出了一种有效的方法,克服了显微视觉由于景深小、视野小而带来的姿态测量困难。该方法通过显微相机聚焦到微管的不同部位,在显微相机中测量微管的投影线。然后根据投影线与显微相机光轴信息计算显微相机光轴与微管轴线构成的平面。双目显微视觉中,所得两个平面的交线为微管轴线姿态向量。微孔的姿态向量测量方法类似。以微管的态度向量为对准目标,通过两个旋转

轴调整微孔姿态,与微管姿态对准。微管、微孔的姿态测量结果与对准结果均稳定且精度较高。

由于微管的姿态调整只有两个旋转轴,并且两个转轴的调节范围有限,所以微孔的姿态调整范围有限。但是,微孔的姿态在初始时大致为竖直朝上,两个旋转轴能够满足微孔与微管的对准要求。另外,本文所提的微管与微孔的姿态测量方法人工参与较多,后续将提高自动化程度,减少人工参与。

参考文献

[1] Zhou Y F, Shan G L, Ji B. A dynamic-template-library based method to measure the pose of maneuvering target.

- In: Proceedings of the 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, Xi'an, China, 2009. 2080-2084
- [2] Xu W F, Xue Q, Liu H D, et al. A pose measurement method of a non-cooperative GEO spacecraft based on stereo vision. In: Proceedings of the 12th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Guangzhou, China, 2012. 966-971
- [3] Assa A, Sharifi F J. A robust vision-based sensor fusion approach for real-time pose estimation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2014, 44(2): 217-227
- [4] Kyriakoulis N, Gasteratos A. Color-based monocular visual 3-D pose estimation of a volant robot. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, 59(10): 2706-2715
- [5] Katsuki R, Ota J, Mizuta T, et al. Design of an artificial mark to determine 3D pose by monocular vision. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation, Taipei, China, 2003. 995-1000
- [6] Das A N, Zhang P, Lee W H, et al. μ^3 : multiscale, deterministic micro-nano assembly system for construction of on-wafer microrobots. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Roma, Italy, 2007. 10-14
- [7] Wang L D, Mills J K, Cleghorn W L. Automatic microassembly using visual servo control. *IEEE/ASME Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 2008, 31(2): 316-325
- [8] Wang L D, Ren L, Mills J K, et al. Automated 3-D micro-grasping tasks performed by vision-based control. *IEEE Trans. actions on Automation Science and Engineering*, 2010, 7(3): 417-426
- [9] Tamadazte B, Dembélé S, Fortier G, et al. Automatic micromanipulation using multiscale visual servoing. In: Proceedings of the 4th IEEE Conference on Automation Science and Engineering, Arlington, USA, 2008. 977-982
- [10] Zeng X J, Huang X H, Wang M. Micro-assembly of micro parts using uncalibrated microscopes visual servoing method. *Information Technology*, 2008, 7(3): 497-503
- [11] Zhang Y N, Chen X, Song W, et al. Visual measurement of micro-target pose in ICF experiment. In: Proceedings of 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering, Zhangjiajie, China, 2012. 102-106
- [12] Wang L D, Mills J K, Cleghorn W L. Assembly of three-dimensional micro-systems using a hybrid manipulation strategy. In: Proceedings of 2008 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Takamatsu, Japan, 2008. 545-550

Pose measuring and aligning of a microtube and a microsphere in their assembly

Li Fudong, Xu De, Shi Yali, Zhang Zhengtao

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract

The pose measurement and alignment of microtubes and microspheres in microassembly were studied with the aim of obtaining their correct poses to make a microtube align precisely with the hole on a microsphere before it is inserted into the hole to ensure the high quality assembly. Considering that traditional pose measuring technologies based on stereo vision are not capable of pose measuring of microtubes and the holes on micro spheres because a microscope has small depth of field and small field of view, a novel pose measuring method for a microtube and the hole on a microsphere was developed. This method uses two microscopes, and each one acquires a projection vector of the measured object through focusing movement along the optical axis. The real pose vector of the measured object in the microtube manipulator coordinates is calculated from the two projections acquired by the two microscopes and the optical axis information. In the pose aligning process, the pose vector of the microtube is the referenced vector, and the pose vector of the hole is adjusted by rotation around x axis and y axis using the pose adjusting platform. The experiments were conducted to prove the feasibility of the proposed pose measuring and pose aligning method, and the results validated it.

Key words: micro vision, microassembly, pose measurement, pose aligning