

基于显微镜聚焦的微装配视觉伺服研究*

席文明¹ 王磊¹ 姚斌¹ 朱剑英²

¹(厦门大学机电系 厦门 361005)

²(南京航空航天大学机电学院 南京 210016)

摘要 利用显微镜聚焦理论,沿显微镜光轴方向移动物体,不断计算图像的灰度变化之和,可判断出物体沿光轴的坐标,将这一坐标集成在伺服控制方程中,可完成立体视觉跟踪。这样,采用单目视觉系统就可以获得物体的三维坐标,避免了双目立体视觉系统的复杂结构。为了提高系统图像处理速度,利用卡尔曼滤波器对跟踪的特征点进行预测,并用窗口处理技术减小图像处理区域。实验和仿真结果表明,上述方法可完成复杂微装配的视觉跟踪,系统有好的实时性。

关键词 聚焦 卡尔曼滤波器 视觉跟踪 预测

中图分类号 TP24 **文献标识码** B **国家标准学科分类代码** 510.405

Study of Visual Servoing for Microassembly Based on Focus of Microscope

Xi Wenming¹ Wang Lei¹ Yao Bin¹ Zhu Jianying²

¹(Department of Mechanical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

²(College of Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract When the object is moved along optical axis of microscope and the variational gray-level of the image is added at the same time, using focus theory, the coordinate of object is obtained along optical axis of microscope, the coordinate of object can be used in servo control equation to finish three dimension vision tracking of microassembly. In this way, when single vision system is used, the three dimension coordinate of object can be obtained and complicated stereo vision system can be avoided. In order to improve the speed of image processing, the Kalman filter is used to predict the next place of tracked point. The results on experimentation and simulation show that complex microassembly task can be finished and the speed of image processing can be improved.

Key words Focus Kalman filter Visual tracking Prediction

1 引言

为了克服微装配中器件小的问题,在交互式装配中普遍使用光学显微镜。光学显微镜虽然可以对器件进行放大,但它存在视场和景深小的问题,同时物体的深度信息被丢失。为了克服这一问题,文献[1~2]中利用变放大倍数来扩大微装配空间,同时利用立体成像技术来获取物体深度信息。变放大倍数能够扩大微装配的空间,但要求对显微镜精确标定,利用立体成像技术,只是操作人员观察到了深度变化,不利于视觉跟踪

的完成。文献[3~4]中利用全局-局部视觉系统来扩大微装配空间,并利用聚焦技术产生深度信息,但在视觉跟踪的过程中,只是利用查找表格的形式来控制深度方向运动。文献[5~6]中利用扫描电子显微镜、光学显微镜综合控制移动机器人的运动,它利用位置传感器和对微装配环境进行结构化,获得三维空间信息。

利用显微镜聚焦理论获得微装配的深度信息,并将该信息应用于视觉跟踪中,从而完成微装配的立体视觉跟踪。与现有研究相比,算法、显微镜标定、交互简单。文中还利用卡尔曼滤波器的预测特性对跟踪的特征点位置进行预测,然后以预测点为中心,设置图像处

* 本文于2004年3月收到,系国家自然科学基金(50275078)资助项目。

理的窗口大小,从而减小图像处理的区域,提高跟踪系统的实时性。实验和仿真结果表明,利用上述方法,可以完成微装配中的立体视觉跟踪,提高系统的实时性。

2 深度信息的获取

设显微镜的成像平面是不变的,当空间一点的像正好处于成像平面时,这时点的像是最清晰的,称该点是聚焦的;而当点处于聚焦平面的两边时,点的像是模糊的,称该点是失焦的,点离聚焦平面越远则图像越模糊,可用下式表示点的像光强分布:

$$I_D(u, v) = H(u, v) \cdot I_F(u, v) \tag{1}$$

$$H(u, v) = e^{-\frac{u^2 + v^2}{2} \sigma_h^2} \tag{2}$$

其中: $I_D(u, v)$ —— 失焦时点的像光强分布傅立叶变换

$H(u, v)$ —— 显微镜的点扩散函数傅立叶变换

$I_F(u, v)$ —— 聚焦时点的像光强分布傅立叶变换

要判别点是否处于聚焦平面上,就是设计一估计器,计算图像的灰度变化之和 F 。移动该点,利用估计器不断计算对应图像的 F 值,当 F 值达到最大 F_{max} 时,该点就处于焦平面上,用拉普拉斯算子作为估计器可实现这一目的:

$$\nabla^2 I = \left| \frac{\partial I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial I}{\partial y^2} \right| \tag{3}$$

在实际的计算中一般采用 3×3 的模板:

$$\nabla^2 I = |2I(x, y) - I(x-1, y) - I(x+1, y)| + |2I(x, y) - I(x, y-1) - I(x, y+1)| \tag{4}$$

最后,图像点的灰度变化之和为:

$$F = \sum_{x=1}^{N-1} \sum_{y=1}^{N-1} \nabla^2 I \tag{5}$$

N 为窗口大小,它应该包含点的像。

3 视觉伺服控制方程

3.1 显微系统的视觉雅可比矩阵

基于图像的视觉伺服要求将图像上点的运动映射到任务空间上,这一映射称为视觉雅可比矩阵。图1为

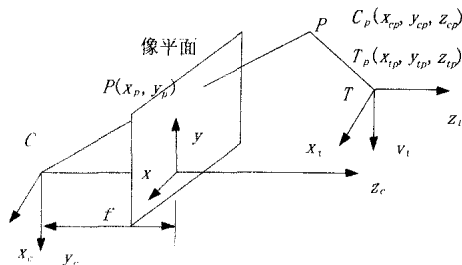


图1 摄像机成像模型

摄像机的成像模型, C 为视觉空间坐标系; T 为任务空间坐标系, 设空间有一点 P , 它在 C 中的坐标为 $C_p(x_{cp}, y_{cp}, z_{cp})$, 它在 T 中的坐标为 $T_p(x_{tp}, y_{tp}, z_{tp})$, 它在像平面上的坐标为 $p(x_p, y_p)$ 。设显微镜的放大倍数为 m , 则:

$$x_p = \frac{m}{d_x} x_{cp} \tag{6}$$

$$y_p = \frac{m}{d_y} y_{cp} \tag{7}$$

其中: d_x, d_y —— 像平面像素点在 x, y 向的大小

假设摄像机坐标经历了平移运动 $v = [\dot{x}_c \dot{y}_c \dot{z}_c]^T$ 和旋转运动 $\Omega = [\omega_c \omega_c \omega_c]^T$, 则点 P 的复合运动为 $\dot{C}_p = -{}^C v - {}^C \Omega \times C_p$, 展开后得:

$$\begin{cases} \dot{x}_{cp} = -\dot{x}_c - \omega_c z_{cp} + \omega_c y_{cp} \\ \dot{y}_{cp} = -\dot{y}_c - \omega_c x_{cp} + \omega_c z_{cp} \\ \dot{z}_{cp} = -\dot{z}_c - \omega_c y_{cp} + \omega_c x_{cp} \end{cases} \tag{8}$$

将(6)、(7)求导后代入(8)得:

$$\begin{cases} \dot{x}_p = -\frac{m}{d_x} \dot{x}_c - \frac{m z_{cp}}{d_x} \omega_c + \frac{d_y y_p}{d_x} \omega_c \\ \dot{y}_p = -\frac{m}{d_y} \dot{y}_c - \frac{d_x x_p}{d_y} \omega_c + \frac{m z_{cp}}{d_y} \omega_c \\ \dot{z}_{cp} = -\dot{z}_c - \frac{d_x y_p}{m} \omega_c + \frac{d_x x_p}{m} \omega_c \end{cases} \tag{9}$$

写成矩阵形式为:

$$\dot{x}_p = J_v [{}^C v \quad {}^C \Omega]^T \tag{10}$$

其中: $\dot{x}_p = [\dot{x}_p \quad \dot{y}_p \quad \dot{z}_{cp}]^T$

$$J_v = \begin{bmatrix} -\frac{m}{d_x} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{m}{d_y} & 0 & \frac{m z_{cp}}{d_y} \\ 0 & 0 & -1 & -\frac{d_x y_p}{m} \\ -\frac{m z_{cp}}{d_x} & \frac{d_y y_p}{d_x} \\ 0 & \frac{d_x x_p}{d_y} \\ \frac{d_x x_p}{m} & 0 \end{bmatrix} \tag{11}$$

J_v 与摄像机的内外参数有关, 但当摄像机和显微镜选择好后, 它随外参数的变化而变化。

3.2 伺服控制方程的建立

通过视觉雅可比矩阵(11), 可写出点在像平面和任务空间速度的映射关系:

$$\dot{x}_i = J_v \dot{x}_T \tag{12}$$

其中: \dot{x}_i —— 点在像平面的速度和点沿光轴方向速度

\dot{x}_T —— 点在任务空间的速度

由(12)式, 可写出如下的伺服控制方程:

$$x(k+1) = x(k) + J_v(k)u(k) \quad (13)$$

其中: t ——视觉系统的采样时间

$$u(k) = [x_i, y_i, z_i, \omega_i, \omega_i, \omega_i]^T$$

$J_v(k)$ 为随时间变化的视觉雅可比矩阵, 因为当空间点变化时, 虽然摄像机的内参数是不变化的, 而它的外参数是变化的。

为了优化(13)式中的参数, 建立以下的函数:

$$F(k+1) = [x(k+1) - x_D(k+1)]^T Q [x(k+1) - x_D(k+1)] + u^T(k) L u(k) \quad (14)$$

求(14)式的最小值可得到以下的方程:

$$u(k) = - (J_v^T(k) Q J_v(k) + L)^{-1} J_v^T(k) \cdot Q [x(k) - x_D(k+1)] \quad (15)$$

在上面两式中, $x_D(k+1)$ 为点的图像希望运动到的下一位置和在深度方向希望运动的位置, Q, L 为跟踪的误差权重矩阵和控制输入的权重矩阵。

4 基于预测的立体显微视觉跟踪

图 2 为伺服控制框图, 预测器为卡尔曼滤波器, 系统输入为图像点在像平面上的目标位置 x_D 和在深度

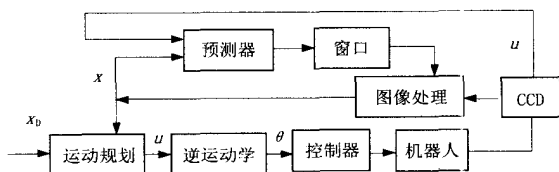


图 2 带预测器的显微立体视觉伺服控制框图

上希望运动到的位置, 由 CCD 获得现有跟踪点的位置 x , 利用(15)式计算机器人的运动速度, 由该速度控制机器人运动, 即控制跟踪点运动, 计算跟踪点在像平面上的速度, 由该速度和 x 的位置预测点的未来位置, 设置图像处理的窗口进行图像处理, 获得跟踪点的下一位置, 用 x 替换这一位置。重复这一过程, 直到跟踪点与目标点重合。深度方向的跟踪由式(5)计算的结果判断是否停止, 当 $F < F_{max}$ 时, 继续跟踪, 当 $F = F_{max}$ 时, 停止跟踪。

5 实验和仿真结果

实验用显微镜为 MOTIC 公司的 K-700L 体视显微镜, CCD 为美国 UNIQ 公司的 UN-201, 图像捕捉卡为加拿大 MATROX 公司的 M2, 图像处理软件由图像捕捉卡自带, 移动平台放置在显微镜载物平台上, 分辨率为 $10\mu m$, 平台上放置两个点, 分别表示跟踪点和目

标点, 这两点相距 7.4mm。表 1 是在不同放大倍数

表 1 不同放大倍数下各参数

放大倍数	两点距离	误差 Δ	F_{max}	误差率
m	d (mm)	d (mm)		
12	7.480	0.080	1532490	1.08%
			1555190	
18	7.408	0.008	1529779	0.11%
			1664667	
25	7.429	0.029	1495300	0.39%
			1541470	
30	7.357	-0.043	1374962	-0.58%
			1501973	

下, 测得的两点距离、误差、误差率以及利用公式(5)计算的 F_{max} , 利用(5)式计算的是包括点的 640×480 区域, 所以 F_{max} 值很大, 点的图像没有经过噪声处理。

从表中可看出, 当放大倍数小时测量的距离误差较大, 这和实际情况是吻合的, 因为放大倍数小时, 显微镜的景深较长, 灰度变化较慢, 估计器较难分辨出灰度的变化。当放大倍数大时, 测量的距离误差应该较小, 因为这时显微镜景深小, 灰度变化快, 估计器容易分辨出灰度的变化, 但从表 1 中不能得到这样的结果, 这是因为移动平台的分辨率较低。从表 1 还可看出, 在较大的显微镜放大倍数时, 测量的距离误差和移动平台的分辨率在一个数量级内, 说明利用聚焦理论测量物体在光轴方向的坐标是可行的。

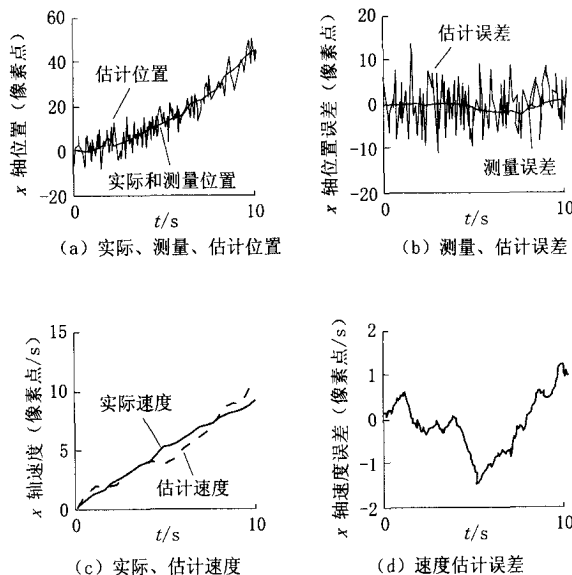


图 3 卡尔曼滤波器 x 轴向仿真

图 3 为像平面 x 轴向预测仿真, y 向的预测仿真与此相同, 图 3(a) 中有三条曲线, 分别是实际位置、测量位置和估计位置曲线, 其中实际位置曲线和测量位置曲线基本重合, 而估计位置曲线在实际位置曲线上

振荡。估计位置、测量位置与实际位置的误差可从图3(b)中看出,图中估计误差平均约为10个像素点,测量误差平均约为2个像素点。图3(c)为估计速度和实际速度曲线,估计速度与实际速度的误差可由图3(d)看出,平均误差约为1.8(像素点/s)。假设跟踪点的像大小为16个像素点,则要设置 32×32 的图像处理窗口(注意,窗口的大小必须为2的幂次)。

6 结 论

利用显微镜聚焦理论获得了微装配空间的深度信息,使得视觉伺服在三维空间进行,可完成复杂的微装配任务。为了克服系统的标定误差,利用图像的灰度变化之和 F 来判别跟踪点是否运动到和目标点处于同一平面内。实验结果证明,该方法的精度满足微装配的要求。为了减小图像处理的区域,文中给出了跟踪点预测的方法,通过仿真可以看出,利用预测方法可以大幅度地减小图像处理的区域,提高了系统的实时性。

参考文献

- 1 Lee S J, Kim K, Kim D H, Park J O. Multiple magnification images based micropositioning for 3D micro assembly. Seventh International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, Singapore, Dec 2002
- 2 Kim D H, Kim K Y, Kim K A micro manipulation

system based on teleoperation techniques Proceedings of the 32nd ISR, 19~ 21 April, 2001.

- 3 Stepheb J R, Vikramaditya B, Nelson B J. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies. IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, 2000, 23(2): 123~ 131.
- 4 Vikramaditya B, Nelson B J. Visually guided microassembly using optical microscopes and active vision techniques. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Albuquerque, New Mexico, April 1997, 3172~ 3177.
- 5 Fatikow S, Buerkle A, Seyfried J. Automatic control system of a microrobot-based microassembly station using computer vision. SPIE's International Symposium on Intelligent System & Advanced Manufacturing Conference on Microrobotics and Microassembly, Boston, Massachusetts, USA, 19~ 22 September, 1999.
- 6 Burkle A, Fatikow S. Computer vision based control system of a piezoelectric microrobot. Proc. CMCA, Vienna, 1999.

作者简介

席文明 1965年出生 副教授 工学博士 主要研究方向为生物操作 微系统集成 机器人学
E-mail: xwmfox@163.com

(上接第1183页)

通过试验可以得出以下结论:

(1)将实验的最终结果与采用传统TN方法获得的结果进行比较,曲面重建的精细程度高于TN方法,而且重建的速度较TN方法能节省30%左右时间。

(2)在构造MLP神经网络过程中,各隐层神经元的数目需要经过训练后才可以确定,为了便于方法的广泛应用最好注意经验值的积累。

参考文献

- 1 张光明,黄惠明.激光扫描多目标测距系统.激光与红外,1999,29(3):20~26
- 2 张远智,胡广洋,刘玉彤,等.基于工程应用的3维激光扫描系统.测绘通报,2002,33(1):42~48
- 3 陆祖康,臧侃,李培勇,等.激光雷达三维成像系统的研究.浙江大学学报,1999,34(4):12~19

4 Frank Chen, Gordon M. Brown, Mum in Song. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10~ 21.

- 5 Gu P, Yan X. Neural network approach to the reconstruction of free form surface for reverse engineering. Computer-Aided Design, 1995, 27(1): 59~ 64.
- 6 魏湘曙,石青云.一种基于特征的立体视觉方法.模式识别与人工智能,1999,4(1):43~47.

作者简介

杨贵军 1976年11月出生 主要研究方向为摄影测量与遥感及土地利用动态监测
E-mail: guijun_yang@163.com