

文章编号: 1671-9352(2006)04-0116-05

集成 CAD 模型的虚拟微装配系统 伺服控制方法

李春梅¹, 席文明², 葛连升³, 冯虎田¹

(1. 南京理工大学 机械学院, 江苏 南京 210094; 2. 厦门大学 机电系, 福建 厦门 361005;
3. 山东大学 网络中心, 山东 济南 250100)

摘要: 虚拟技术可克服微装配中显微视觉系统小景深、小视场的问题, 但构造虚拟场景时, 数据量大、效率低。利用微器件设计时的 CAD 数据, 可减小构造虚拟环境的数据量、提高效率, 能够使构造出的场景更精确。利用显微镜聚焦——失焦理论并借助于器件 CAD 模型构造虚拟环境; 将获得的深度信息集成在伺服控制方程中, 通过这些方法, 可进行复杂路径的规划, 完成三维微装配任务, 仿真和实验结果均表明上述方法是可行的。

关键词: 虚拟微装配; CAD 模型; 聚焦——失焦; 视觉伺服

中图分类号: TP24 文献标识码: A

The servo control method of a virtual microassemble system integrated CAD model

LI Chun-mei¹, XI Wen-ming², GE Lian-sheng³ and FENG Hu-tian¹

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China;
2. Mechanical and Electronic Department, Xiamen Univ., Xiamen 361005, Fujian, China;
3. Network Center, Shandong Univ., Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: Virtual microassembly technology can avoid the problem that the focal depth and the viewing field of microscope are too small. But when building virtual scene there are too many assembly environment data and the efficiency is lower. Using the CAD data produced by the micro-parts can reduce the amount of the environment data and improve efficiency. The virtual environment is constructed using the focus-defocus theory of microscope and the CAD model, and the depth information of microscope is integrated in the servo control equation. By these methods the complex path can be programmed and the complicated micro-assemble task can be completed. The simulation and the experimentation indicate that these methods are feasible.

Key words: virtual microassembly; CAD model; focus-defocus; visual servoing

0 引言

微器件的装配存在许多的困难, 这主要是因为器件的尺寸减小后, 物理学特性发生了很大变化, 所以装配时一般采用视觉和力觉传感器^[1,2], 视觉传感器一般采用显微镜, 它的特点是: 高放大倍数时, 景

深和视场非常小, 机器人末端执行器不能方便操作; 操作时缺少全局观察能力。同时如果采用体视显微镜, 利用双目视觉原理可以获得深度信息, 但在图像处理时存在点的匹配问题, 如果采用单筒显微镜则丢失深度信息, 只能获得二维信息。为了克服显微镜存在的问题, 学者们提出多种解决方法, 文献[3, 4]利用全局——局部视觉系统来扩大微装配空间,

收稿日期: 2006-04-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50275078)

作者简介: 李春梅(1974-), 女, 讲师, 博士, 主要研究方向机器人控制, 微装配。

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]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,文中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.文献[7,8]利用聚焦理论构造出操作对象和操作工具的虚拟模型,但并没有将虚拟模型和实际环境联系起来,从而完成实际对象的视觉控制.

虚拟微装配概念来源于虚拟—现实技术,该技术提取操作空间的数据,利用CAD技术在计算机中构造虚拟场景,从而在虚拟环境中对受限制的工作空间进行扩展,并在扩展后的场景中进行装配,为了使虚拟环境中的装配更加真实,虚拟微装配系统一般配有数据头盔产生三维场景,同时配有数据手套,控制装配时产生的接触力.虚拟微装配中需解决的两个重要问题是装配环境的数据获取和实际环境与虚拟场景映射关系的建立.本文利用显微镜聚焦技术获得实际环境数据,并结合设计微器件时的CAD数据,在虚拟环境中重新构造操作环境,这样就可以在虚拟环境中进行运动规划和运动控制,通过虚拟环境与实际环境的映射关系,将虚拟环境中的运动控制映射到实际环境中,完成微装配的视觉控制.

1 深度信息的获取

假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,该点处于显微镜的聚焦平面上,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,可以用式(1)和式(2)表示点的像光强度分布.

$$I_D(u, v) = H(u, v) \cdot I_F(u, v), \quad (1)$$

$$H(u, v) = \exp\left(-\frac{u^2 + v^2}{2} \sigma^2\right), \quad (2)$$

其中,

$I_D(u, v)$ —失焦(Defocus)时点的像光强度分布傅立叶变换,单位为灰度;

$H(u, v)$ —显微镜的点扩散函数傅立叶变换,它是一高斯分布函数,无量纲;

u, v —高斯函数的坐标轴;

σ —高斯函数的方差,函数形状与显微镜系统有关;

$I_F(u, v)$ —聚焦(Focus)时点的像光强度分布傅立叶变换,单位为灰度.

从式(2)可以看出 $H(u, v)$ 是高斯函数,它允许低频成份通过,而削弱高频成份.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以实现这一目的,拉普拉斯算子为

$$\nabla^2 I = \frac{\partial^2 I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 I}{\partial y^2}. \quad (3)$$

由于在 x, y 方向上,算子可能有相反的符号,从而部分抵消,减小了算子值.为了克服这一问题,取每一项的绝对值

$$\nabla^2 I_M = \left| \frac{\partial I}{\partial x^2} \right| + \left| \frac{\partial I}{\partial y^2} \right|. \quad (4)$$

在实际的计算中一般采用 3×3 的模板,所以式(4)又可以写成离散的形式

$$\nabla^2 I_M = |2I(x, y) - I(x-1, y) - I(x+1, y)| + |2I(x, y) - I(x, y-1) - I(x, y+1)|. \quad (5)$$

如果图像点的大小为 $N \times N$, 则灰度变化之和为

$$F = \sum_{x=1}^{N-1} \sum_{y=1}^{N-1} \nabla^2 I_M. \quad (6)$$

要得到高的测量精度,点每次移动的距离必须很小,这样就会增加图像处理的数量,一般来说,式(6)中的 F 与点移动距离 d 是正态分布的关系,这样可以写出 F 的分布

$$F = F_{\max} \exp\left\{-\frac{1}{2} \left[\frac{d-\bar{d}}{\sigma}\right]^2\right\}, \quad (7)$$

式中,

F_{\max} —正态分布的灰度最大值,

σ —正态分布的方差,

\bar{d} —正态分布的坐标均值,表示的是距离大小,是与 F_{\max} 对应的平台移动距离.

式(7)也可写成如下的形式

$$\ln F = \ln F_{\max} - \frac{1}{2} \left[\frac{d-\bar{d}}{\sigma}\right]^2. \quad (8)$$

设有3个位置 d_{m-1}, d_m, d_{m+1} 的 F 测量值,分别为 F_{m-1}, F_m, F_{m+1} , 且 $F_m > F_{m-1}, F_m > F_{m+1}$, 代入式(8)得到3个方程,解出

$$\bar{d} = \frac{(\ln F_m - \ln F_{m+1})(d_m^2 - d_{m-1}^2) - (\ln F_m - \ln F_{m-1})(d_m^2 - d_{m+1}^2)}{2\Delta d \{(\ln F_m - \ln F_{m-1}) + (\ln F_m - \ln F_{m+1})\}} - \frac{(\ln F_m - \ln F_{m-1})(d_m^2 - d_{m+1}^2)}{2\Delta d \{(\ln F_m - \ln F_{m-1}) + (\ln F_m - \ln F_{m+1})\}}, \quad (9)$$

式中, $\Delta d = d_m - d_{m-1} = d_{m+1} - d_m$.

这样,测得3个位置的 F 就可得到物体上某一区域处于焦平面的位置.

2 虚—实环境映射与伺服控制方程建立

2.1 显微镜视觉雅可比矩阵

图1为摄像机的成像模型, V 为虚拟环境坐标系,它与视觉空间坐标系重合, C 为视觉空间坐标系,它们之间的关系为

$$T_V = \alpha T_C, \quad (10)$$

其中, α —放大倍数.

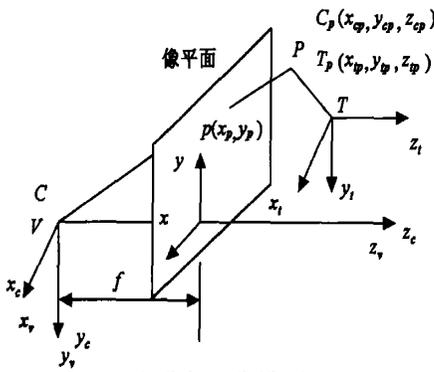


图1 摄像机成像模型
Fig. 1 Geometry model of camera

T 为任务坐标系,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 $T_p(x_p, y_p, z_p)$,它在像平面上的坐标为 $p(x_p, y_p)$. CCD安装在显微镜的后部.设显微镜的放大倍数为 m ,则

$$x_p = \frac{m}{d_x} x_{cp}, \quad (11)$$

$$y_p = \frac{m}{d_y} y_{cp}, \quad (12)$$

式中, d_x, d_y —像平面像素点在 x, y 向的大小.

对式(11),式(12)求导得

$$\dot{x}_p = \frac{m}{d_x} \dot{x}_{cp}, \quad (13)$$

$$\dot{y}_p = \frac{m}{d_y} \dot{y}_{cp}. \quad (14)$$

为了提高机器人的运动精度,在微装配中机器人一般为四个自由度,设摄像机坐标经历了平移运动 $V_C = [x_c \ y_c \ z_c]^T$ 和旋转运动 $\Omega_C = [0 \ 0 \ \omega_c]^T$,则点 P 的复合运动为 $P_C = -V_C - \Omega_C \times P_C$,展开后得

$$\begin{cases} \dot{x}_{cp} = -\dot{x}_c + \omega_c y_{cp} \\ \dot{y}_{cp} = -\dot{y}_c - \omega_c x_{cp} \\ \dot{z}_{cp} = -\dot{z}_c \end{cases} \quad (15)$$

将式(13),(14)代入式(15)得

$$\begin{cases} \dot{x}_p = -\frac{m}{d_x} \dot{x}_c + \frac{d_y y_{cp}}{d_x} \omega_c \\ \dot{y}_p = -\frac{m}{d_y} \dot{y}_c - \frac{d_x x_{cp}}{d_y} \omega_c \\ \dot{z}_{cp} = -\dot{z}_c \end{cases}, \quad (16)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_p = \mathbf{J}_V [\dot{x}_c \ \dot{y}_c \ \dot{z}_c \ \omega_c]^T, \quad (17)$$

式中,

$$\mathbf{J}_V = \begin{bmatrix} \dot{x}_p & \dot{y}_p & \dot{z}_{cp} \\ -\frac{m}{d_x} & 0 & 0 & \frac{d_y y_{cp}}{d_x} \\ 0 & -\frac{m}{d_y} & 0 & -\frac{d_x x_{cp}}{d_y} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}. \quad (18)$$

\mathbf{J}_V 为视觉雅可比矩阵,它与摄像机的内外参数有关,但当摄像机和显微镜选择好后,它只随外参数的变化而变化.

2.2 建立伺服控制方程

通过视觉雅可比矩阵(式(18)),可以写出点像平面和任务空间速度的映射关系

$$\dot{\mathbf{x}}_I = \mathbf{J}_I \dot{\mathbf{x}}_T, \quad (19)$$

式中, $\dot{\mathbf{x}}_I$ 一点在像平面的速度和点沿光轴方向的速度,为 3×1 矩阵, $\dot{\mathbf{x}}_T$ 一点在任务空间的速度.

由式(19),可写出如下的离散伺服控制方程

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{x}(k) + \mathbf{T} \mathbf{J}_V(k) \mathbf{u}(k), \quad (20)$$

式中, t —视觉系统的采样时间,

$$\mathbf{u}(k) = [\dot{x}_t \ \dot{y}_t \ \dot{z}_t \ \omega_t \ \omega_t \ \omega_t]^T,$$

$\mathbf{J}_V(k)$ —随时间变化的矩阵,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, k —采样间隔.

为了优化式(20)中的参数,建立以下的能量函数

$$\mathbf{Q}(k+1) = [\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}_D(k+1)]^T.$$

$$\mathbf{W}_e [\mathbf{x}(k+1) - \mathbf{x}_D(k+1)] + \mathbf{u}^T(k) \mathbf{W}_m \mathbf{u}(k), \quad (21)$$

求式(21)的最小值可得到以下的方程

$$\mathbf{u}(k) = -(\mathbf{t} \mathbf{J}_V^T(k) \mathbf{W}_e \mathbf{t} \mathbf{J}_V(k) + \mathbf{W}_m)^{-1} \mathbf{t}^{\circ}$$

$$\mathbf{J}_V^T(k) \mathbf{W}_e [\mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_D(k+1)], \quad (22)$$

上面两式中,

$\mathbf{x}_D(k+1)$ 一点的图像希望运动到的下一位置和点在深度方向希望运动的位置;

$\mathbf{W}_e, \mathbf{W}_m$ —跟踪的误差权重矩阵和控制输入的权重矩阵.

式(22)是在像平面进行的运动控制,要在虚拟空间进行运动控制,首先利用式(10)将坐标系 V 中的点变成坐标系 C 中的点,然后利用式(11),(12)求这些

点在像平面上的位置, 将像平面上的位置以及焦距测量时得到的 z_p 代入式 (22) 中的 $x(k)$, 就可将虚拟环境中的运动控制变成实际环境中的运动控制。

3 实验和仿真结果

实验所用的显微镜为 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 $10\mu\text{m}$, 平台上放置一 $\phi 1\text{mm} \times 21\text{mm}$ 圆柱轴, 图 2 是利用聚焦理论计算圆柱上表面坐标后, 结合圆柱 CAD 数据绘制的图形。计算灰度值时, 样本中使用 3×3 模板作为一点, 共计算了 83×83 个点。图 3 是圆柱上表面在不同相对坐标差时对应的 F_{max} 值, 零点表示上表面聚焦时相对坐标差, 正值表示上表面成像在焦平面的两边, 该图应该为对称图形, 但由于图像采集时光照的影响, 图形是不对称的。表 1 是不同放大倍数时上表面测量的位置误差, 从表中可看出, 放大倍数大时误差小, 这和实际情况相吻合, 当放大倍数小时, 显微镜的景深大, 灰度变化缓慢, 测量误差较大; 而当放大倍数大时, 显微镜的景深小, 灰度变化剧烈, 测量误差小。

表 1 不同放大倍数下各参数
Tab. 1 Parameters for different magnification

放大倍数 m	误差 $\Delta d(\text{mm})$	F_{max}
12	0.080	1 532 490
18	0.008	1 664 667
25	0.029	1 495 300
30	-0.043	1 374 962

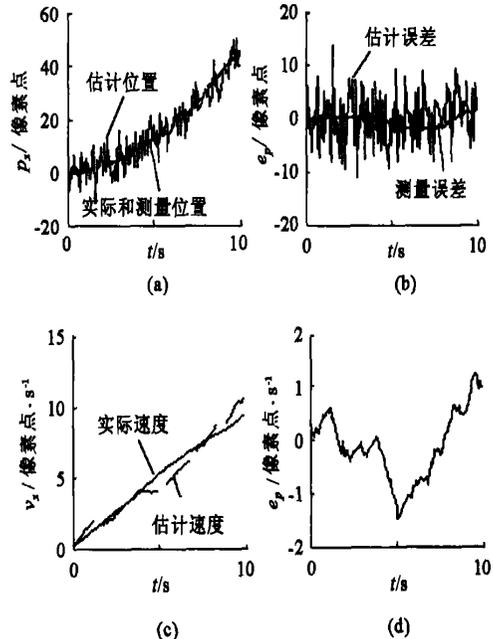


图 4 卡尔曼滤波器 x 轴向仿真
Fig. 4 x Axis simulation of Kalman filter

在视觉跟踪中, 一般采用窗口技术对特征点进行处理, 从而减小图像处理区域。窗口的确定有两种方法, 其一为预测的方法, 即利用卡尔曼滤波器对特征点进行预测, 然后设置处理窗口, 其二是利用光学流技术匹配窗口, 该技术认为在很短的距离内, 一个特征点的灰度变化是很小的, 该方法首先设置特征窗口, 然后在该窗口附近进行搜索, 将搜索的窗口灰度与特征窗口灰度相减, 当达到最小值时, 则下一个特征窗口就被搜索到。第一种方法精度较差, 但硬件要求低, 第二种正好相反。本文采用卡尔曼滤波器进行特征预测。图 4 为 x 向预测仿真, y 、 z 向的预测仿真与此相同。要说明的是在实际跟踪时, x 、 y 是像平面坐标, 而 z 轴坐标由显微镜聚焦技术获得。图 4(a) 中有 3 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下振荡。估计位置、测量位置与实际位置的误差可从图 4(b) 中看出, 图中估计误差平均约为 10 个像素点, 该误差主要是因为卡尔曼滤波器是建立在统计理论基础上的, 本身具有一定的误差, 如采用光学流方法, 则精度会提高。测量误差平均约为 2 个

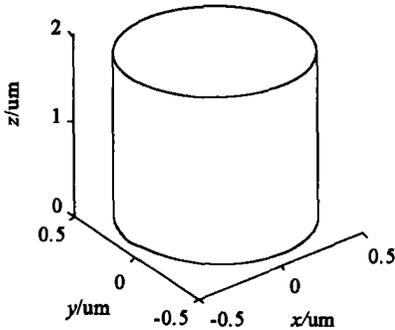


图 2 结合 CAD 数据的圆柱图形
Fig. 2 Cylinder to be constructed by CAD data

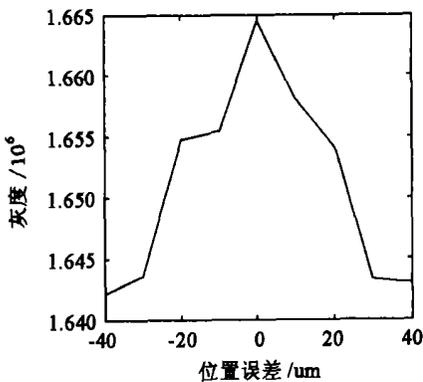


图 3 圆柱面不同坐标的灰度值

Fig. 3 Gray scale of cylinder surface in different positions

像素点,该误差主要由系统标定误差产生,要使得该误差减小必须提高系统标定精度.在高放大倍数时,如果显微镜视场为 $250\ \mu\text{m}$,CCD行像素点为680,2个像素点代表的空间尺寸为 $0.74\ \mu\text{m}$,所以该测量位置精度能够满足需要.图4(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4(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).

4 结论

微装配的一个重要问题是显微镜视觉系统在高放大倍数时视场和景深小,从而使得机械手操作困难,本文利用虚拟技术对该问题进行研究,研究的内容包括装配环境三维数据获取、虚拟环境和实际场景的映射以及微装配系统的视觉伺服控制.从仿真和实验结果来看,这些方法是可行的,今后的主要工作是在虚拟设备中完成实际的微装配任务,进一步验证此控制方法.

参考文献:

[1] Yu Z, Nelson B J, Vikramaditya B. Fusing force and vision feedback for micromanipulation[A]. Proceeds of the 1998 IEEE International Conference on Robotics & Automation[C]. Belgium: IEEE Press, 1998. 1 220~1 225.
[2] Lee W H, Kang B H, Oh Y S, Stephanou, et al. Micropeg manipulation with a compliant microgripper[A]. Proceeds of the

2003 IEEE International Conference on Robotics & Automation [C]. TaiWan: IEEE Press, 2003. 3 213~3 218.

- [3] Stepheb J R, Vikramaditya B, Nelson B J. Micropositioning of a weakly calibrated microassembly system using coarse-to-fine visual servoing strategies[J]. 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[A]. Proceedings of the 1997 IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. New Mexico: IEEE Press, 1997. 3 172~3 177.
[5] FatiKow S, Buerkle A, Seyfried J. Automatic control system of a microbot-based microassembly station using computer vision [A]. SPIE'S International Symposium on Intelligent System & Advanced Manufacturing Conference on Microbotics and Microassembly[C]. Boston, USA: SPIE Press, 1999. 11~22.
[6] Burkle A, Fatikow S. Computer vision based control system of a piezoelectric microbot[A]. Proc. of Int. Conf. on Computational Intelligence for Modelling, Control and Automation [C]. Vienna Austria: OBeta(FireToad), 1999. 104~109.
[7] Ohba K, Carlos J, Ortega P, et al. High-speed image processing system for tele-micro-operation[A]. Proceedings of the 2001 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Hawaii, USA: IEEE Press, 2001. 349~354.
[8] Ohba K, Carlos J, Ortega P, et al. Implementation of real time micro VR camera[J]. Trans IEE Japan, 2000. 120-E(6): 264~271.

(编辑: 孙培芹)

(上接第115页)

[4] 陈悦, 李金海, 朱维红. 基于现行相位 FIR 滤波器的 FMT 系统的实现方法[J]. 山东大学学报(理学版), 2004, 39(1): 93~97.
[5] N Benvenuto, S Tomasin, L Tomba. Receiver architectures for FMT broadband wireless systems [A]. Vehicular Technology

Conference[C]. Rhodes: IEEE Press, 2001. 643~647.

- [6] 陈悦, 朱维红, 高振明, 等. 一种 FMT 系统内的 MMSE-DFE 均衡方法及其性能研究[J]. 信号处理, 2005, 21(1): 31~34.
[7] J G Proakis. 数字通信(第4版)[M]. 张力军等译. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(编辑: 孙培芹)