

# 基于牛顿迭代法的显微视觉控制方法研究

姚胜强, 许群, 席文明

(厦门大学 机电系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 在建立显微立体视觉模型的基础上, 提出一种仿牛顿迭代法的视觉控制方法, 通过迭代逼近的方法控制机械手运动到指定位置, 同时还对迭代逼近的收敛条件及近似线性显微视觉系统的迭代误差上限进行分析推导。实验证明, 本方法避免了系统的精确标定和高频率采样, 具有精确度高、收敛速度快、鲁棒性好等特点, 平均迭代 3.5 次就可以以一个像素的精度逼近目标位置。

**关键词:** 摄像机标定; 牛顿迭代法; 视觉伺服; 显微操作

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1672-545X(2009)11-0001-03

微操作和微装配在过去的几十年中, 得到了迅速的发展和广泛的应用。在生物工程领域, 例如转基因技术、人工受精, 经常需要利用微操作技术把外源基因或者微量物质导入到直径约为 10~100  $\mu\text{m}$  的目的细胞中<sup>[1]</sup>。工业上, MEMS 技术迅速发展, 越来越需要微装配技术把各个微米、纳米级别的部件装配成复杂结构<sup>[2-3]</sup>。

微操作和微装配系统, 一般由高精度机械手、高放大倍数的显微视觉系统以及用于视觉图像处理、运动控制的个人计算机组成。其中, 机械手完成目标物体的抓取, 并进行精确定位或执行例如细胞穿刺等动作; 显微视觉系统实时监视操作状态, 并提供反馈信息给机械手形成闭环控制。操作对象通常都是微米、纳米级别的微小物体, 而且在微小空间环境下进行, 任何震动、热膨胀、尺度效应, 都有可能对控制造成巨大误差。传统的基于位置的控制方法, 必须对摄像机和系统进行精确的标定<sup>[4]</sup>, 这在显微视觉中, 是很难实现或者过程过于繁琐<sup>[5-6]</sup>。即使得到精确的标定结果, 在操作过程中产生的震动、机械手误差积累, 都会使标定结果失效<sup>[7]</sup>。基于图像的视觉控制方法, 并不要求对系统进行精确的标定, 因为该方法利用视觉系统拍摄的实时图像, 运用模板匹配等图像处理技术, 识别计算特征点当前位置与目标位置的坐标差, 驱动机械手运动, 在每个采样周期中, 不断对机械手的运动方向进行调整。为了保证跟踪轨迹精度, 必须采用小的采样间隔, 这会影响到系统的实时性。

本文仿效数值计算中线性和非线性方程牛顿迭代解法<sup>[8]</sup>, 构造视觉控制迭代方程, 通过迭代逼近, 控制机械手到达目标位置。同时对迭代的收敛条件和近似线性系统的迭代误差进行了推导估计。该方法避免了系统的精确标定, 同时也不需要高频率的采样, 具有较好的实时性和精确性。

## 1 机械手和视觉系统映射关系建立

现代显微镜一般都采用像距无限远物镜, 具有放大倍数

大、景深小等特点。对于同一物镜, 每次聚焦后放大倍数  $m = f_1 / f_2$  始终不变<sup>[9]</sup>, 这使得该显微视觉模型有别于通常的相机小孔成像模型<sup>[4]</sup>。为此建立双视觉系统模型如图 1 所示。

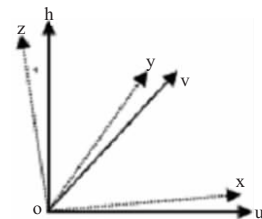


图 1 机械手坐标系与视觉坐标系

图 1 中  $U(u, v, h, \rho)$  为合成的双目立体图像视觉坐标系,  $X(x, y, z, \rho)$  为机械手坐标系。假设原点重合且在图像中心, 两者关系如式(1)、式(2)。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \\ h \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1+k_u r^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+k_v r^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1+k_h r^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_u \\ v_u \\ h_u \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} u_u \\ v_u \\ h_u \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m}{d_x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{m}{d_y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{m_h}{d_h} \end{bmatrix} R \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中  $(u_u, v_u, h_u)^T$  为理想无畸变图像坐标;  $k_u, k_v, k_h$  为两镜头(侧视觉取一维)的径向畸变常数  $r = \sqrt{u_u^2 + v_u^2}$ ,  $r_h \approx h_u$  为图像点到图像中心的距离<sup>[4]</sup>;  $R$  为姿态转换矩阵;  $m, m_h$  分别为显微镜的放大倍数;  $d_x, d_y$  为一个 CCD 感光单元二维尺寸;  $d_h$  是另一 CCD 感光单元一维尺寸。

设  $U = (u, v, h)^T$ ,  $X = (x, y, z)^T$ , 并将式(2)代入式(1), 则  $U$  与  $X$  的关系可表示成

$$U = A(X)X \quad (3)$$

收稿日期: 2009-08-15

基金项目: 国家自然科学基金(50875222)资助; 福建省自然科学基金(2009J01265)资助。

作者简介: 姚胜强(1983—)男, 浙江台州人, 硕士研究生, 主要研究方向为微操作、计算机视觉及嵌入式系统; 席文明(1965—)男, 江苏江阴人, 副教授, 博士, 主要研究方向为机器人视觉、机器人运动学和微装配。

## 2 建立牛顿迭代公式及误差分析

牛顿迭代法及其变型广泛地应用于线性、非线性方程数值计算中,具有迭代公式简单,收敛速度快,精度高,收敛条件容易满足等特点<sup>[8]</sup>。

### 2.1 建立牛顿迭代公式

对于图像中任意目标位置  $U^*$ ,由式(3)可设图像中显示的位置误差为

$$F(X) = U^* - A(X)X \quad (4)$$

当  $F(X^*) = 0$  时,  $X^*$  为  $U^*$  对应的机械手坐标。

此时为求  $X^*$ ,建立简化牛顿迭代公式:

$$X_{k+1} = X_k - (F'(X_k))^{-1} F(X_k) = X_k + A(X_k) + A'(X_k)X_k^{-1} F(X_k) \quad (5)$$

式中  $X_k, F(X_k)$  分别为迭代  $k$  次后,机械手所运动的位置和图像中显示的机械手位置误差(由图像处理得到)。

由于  $2\times \sim 40\times$  镜头的  $k_u, k_v, k_h$  在  $10^{-16} \sim 10^{-8} \mu\text{m}^2$  之间<sup>[6]</sup>,机械手的操作范围为  $0 \sim 3000 \mu\text{m}$ ,此时  $A'(X_k)X \approx 0$ ,简化式(5)得

$$X_{k+1} = \varphi(X_k) = X_k + A^{-1} F(X_k) \quad (6)$$

其中  $A^*$  为  $A(X)$  的近似值。因此当  $A^* \approx A(X)$ ,即  $|I - A^{-1}A(X)| < 1$ ,且  $|I - A(X)A^{-1}| < 1$  时,

$$|\varphi'(X_k)| = |I - A^{-1}(A(X) + A'(X)X)| = |I - A^{-1}A(X)| < 1 \quad (7)$$

满足牛顿迭代法收敛条件<sup>[8]</sup>,迭代公式(6)收敛。基于牛顿迭代法的视觉控制流程如图 2 所示。

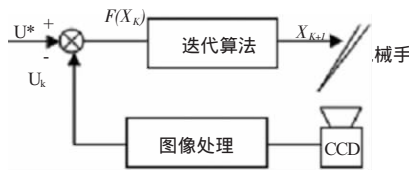


图 2 牛顿迭代法视觉控制流程

### 2.2 误差分析

在近似线性或局部线性化的系统中,可设  $A(X_k)$  为定值  $A$ ,重写式(4)为  $F(X_k) = U^* - AX_k$ ,当考虑图像处理误差  $\omega$  和机械手精度  $\varepsilon(40 \text{ nm})$ ,并设  $X_0=0$ ,系数  $-1 \leq a_k \leq 1, -1 \leq b_k \leq 1 (k=0, 1, \dots)$ ,则迭代公式(6)误差推导如下:

$$X_{k+1} = X_k + A^{-1}F(X_k) \Rightarrow X_{k+1} = X_k + A^{-1}(F(X_k) + a_k \omega) + b_k \varepsilon \quad (8)$$

$$\begin{aligned} & F(X_{k+1}) \\ &= U^* - AX_{k+1} \\ &= U^* - A \{ X_k + A^{-1}(F(X_k) + a_k \omega) + b_k \varepsilon \} \\ &= (U^* - AX_k) - AA^{-1}(F(X_k) + a_k \omega) + b_k A \varepsilon \\ &= (I - AA^{-1})F(X_k) + AA^{-1}a_k \omega + A b_k \varepsilon \\ &= (I - AA^{-1})^{k+1} U^* + (I - AA^{-1})^k a_0 \\ &+ (I - AA^{-1})^{k-1} a_1 + \dots + I a_k AA^{-1} \omega + (I - AA^{-1})^k b_0 \\ &+ (I - AA^{-1})^{k-1} b_1 + \dots + I b_k A \varepsilon \end{aligned} \quad (9)$$

根据式(6)的收敛条件和式(9)得:

$$\begin{aligned} \lim_{k \rightarrow \infty} \|F(X_{k+1})\| &\leq \lim_{k \rightarrow \infty} \|I - AA^{-1}\|^{k+1} \|U^*\| \\ &+ \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1 - \|I - AA^{-1}\|^{k+1}}{1 - \|I - AA^{-1}\|} \|AA^{-1}\omega\| \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + \lim_{k \rightarrow \infty} \frac{1 - \|I - AA^{-1}\|^{k+1}}{1 - \|I - AA^{-1}\|} \|A \varepsilon\| \\ &= \frac{1}{1 - \|I - AA^{-1}\|} \|AA^{-1}\| \|\omega\| \\ &+ \frac{1}{1 - \|I - AA^{-1}\|} \|A\| \|\varepsilon\| \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)说明迭代足够多次后,图像处理误差和机械手精度对迭代控制法造成的最大误差,如果不考虑图像处理误差和机械手运动精度误差,则迭代误差趋向于零,收敛速度为  $\|I - AA^{-1}\|$ 。

## 3 实验结果

显微操作实验系统见图 3 所示,由高精度生物操作机械手(MP-285,步长 40nm)、顶视觉(AE31 UC-930CL,10×物镜)、侧视觉(Navitar UI-1540-M)、光源等组成。软件程序由

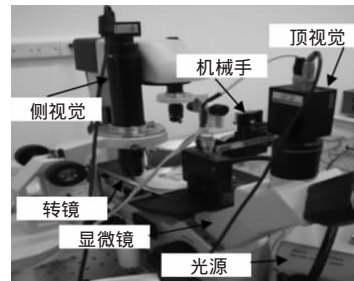


图 3 显微操作实验系统

VC++ 和 OpenCV 编写,界面如图 4,主要功能为:通过两个摄像头实时采集图像,接着采用 NSSD(归一化差值平方和)模板匹配算法,计算图像中机械手当前位置,然后通过调用 Matlab 函数动态库完成迭代运算,根据运算结果输出机械手指令,控制其不断逼近目标位置。

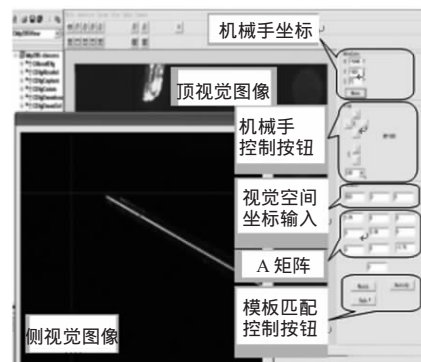


图 4 软件界面

### 3.1 求解 $A(X)$ 近似值

由以上立体视觉成像模型可知,假如机械手走 3 个线性无关的点  $X_1, X_2, X_3$ ,其分别所对应的在图像上的 3 个坐标记为  $U_1, U_2, U_3$ ,则

$$A^* = [U_1 \ U_2 \ U_3] [U_1 \ U_2 \ U_3]^{-1} \quad (11)$$

实验中求得

$$A^{-1} = \begin{bmatrix} 0.573\ 322 & 1.134\ 640 & -0.034\ 486 \\ -1.186\ 644 & 0.558\ 536 & 0.071\ 377 \\ 0.168\ 251 & 0.114\ 409 & -3.769\ 519 \end{bmatrix}$$

设  $K_1 = \|I - A^{-1}A(X)\|$ ,  $K_2 = \|I - A(X)A^{-1}\|$ , 为估计  $K_1$ ,  $K_2$  大小, 根据式(1)、式(2)、式(3),  $A(X)$  随特征图像点到图像中心的距离半径  $r$  变化而变化, 同时考虑到机械手在运动一定时间后  $u, v$  会有 0~30 像素  $h$  有 0~5 像素的漂移, 为此在机械手运动数次后, 在不同距离时取点, 由式(11)计算  $A(X)$ , 结果如表 1 所示。

表 1 不同距离半径的  $A(X)$  值及收敛速度

r(像素)	$A(X)$	$K_1$	$K_2$
121	$\begin{bmatrix} 0.335\ 953 & -0.686\ 40 & -0.008\ 000 \\ 0.708\ 385 & 0.336\ 855 & -0.006\ 000 \\ 0.037\ 542 & -0.017\ 113 & -0.266\ 000 \end{bmatrix}$	0.02	0.04
265	$\begin{bmatrix} 0.346\ 110 & -0.712\ 232 & -0.002\ 000 \\ 0.722\ 578 & 0.360\ 031 & -0.010\ 000 \\ 0.034\ 509 & -0.021\ 022 & -0.266\ 000 \end{bmatrix}$	0.05	0.08
358	$\begin{bmatrix} 0.348\ 806 & -0.697\ 513 & -0.001\ 026 \\ 0.723\ 134 & 0.339\ 303 & -0.031\ 249 \\ 0.031\ 791 & -0.020\ 398 & -0.266\ 229 \end{bmatrix}$	0.04	0.13
407	$\begin{bmatrix} 0.322\ 256 & -0.699\ 941 & 0.021\ 998 \\ 0.713\ 458 & 0.346\ 369 & -0.021\ 855 \\ 0.033\ 034 & -0.019\ 749 & -0.267\ 210 \end{bmatrix}$	0.06	0.17

由表 1 知  $r = 407$  时,  $\|I - A(X)A^{-1}\|_2 = 0.17$  为最大值, 远小于 1, 因此迭代公式(6)收敛, 同时根据式(10), 计算得最大误差约为 1.33 像素。

### 3.2 迭代误差统计分析

在  $(u, v)$  图像平面上, 从左到右选取不同的目标位置(共 99 个), 以图像中心为迭代初始位置, 通过迭代运算, 控制机械手逼近目标位置, 记录每次迭代误差, 绘制误差网格, 结果如图 5、图 6 所示。

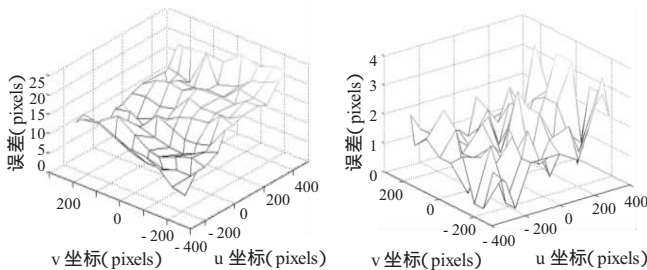


图 5 左右分别为各个目标位置的第一次和第二次迭代误差

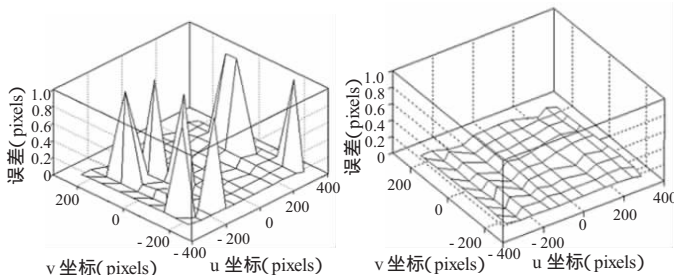


图 6 左右分别为各个目标位置的第四次和第五次迭代误差

通过实验和图 5、图 6 可以发现, 该迭代算法非常有效, 第一次迭代最大误差小于 20 个像素, 第二次减小到 4 个像素以

内, 第四次迭代后为 92% 误差, 小于一个像素, 第五次误差全部收敛到一个像素以内, 平均迭代 3.5 次就可以以一个像素的精度(NSSD 模板匹配精度为一个像素)逼近目标, 小于式(10)计算的最大误差。实验过程中发现(如图 5 中  $\mu$  坐标由 -300 到 300, 误差增大), 机械手运动一定次数后, 机械手会产生 0~30 个像素的漂移, 这可能是由操作平台、空气振动等引起的。在此种情况下, 迭代逼近方法也能有效地逼近目标位置, 说明其具有很好的鲁棒性。

## 4 结束语

本文首先分析了显微视觉成像原理, 并建立立体视觉模型, 在分析微操作环境复杂参数多变不稳定的特点基础上, 提出一种牛顿迭代视觉控制算法, 对其迭代收敛条件和迭代误差进行分析, 并通过实验证明, 迭代视觉控制方法在微操作中的有效性、简单性、鲁棒性和精确性。后期将采用金字塔模板匹配算法和插值运算, 减少匹配时间, 加快迭代速度, 提高控制精度。如何动态更新也是今后值得研究的课题。

### 参考文献:

- [1] W.H Wang, X.Y. Liu, and Y. Sun. High-throughput automated injection of individual biological cells[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2009, 6(2): 209-219.
- [2] Martin Probst, Michael Flückiger, ect. Manufacturing of a Hybrid Acoustic Transmitter Using an Advanced Microassembly System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(7): 2657-2666.
- [3] Brahim Tamadazte, Soukalo Demb' el' e, Guillaume Fortier and Nadine Le Fort- Piat. Automatic Micromanipulation using Multiscale Visual Servoing[C]. 4th IEEE Internationale Conference on Automation Science and Engineering, Washington, USA, 2008, 977-982.
- [4] 徐德, 谭民, 李原. 机器人视觉测量与控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- [5] Yanliang Zhang, Mingli Han, Cheng Yap Shee and Wei Tech Ang. Calibration of Piezoelectric Actuator-based Vision Guided Cell Microinjection System[C]. Proceedings of the 2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Xi'an China: 2008, 808-812.
- [6] Mehdi Ammi, ect. Automatic Camera-Based Microscope Calibration for a Telemicromanipulation System Using a Virtual Pattern [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2009, 25(1): 184-191.
- [7] 赵玮, 宗光华, 毕树生. 微操作机器人的视觉伺服控制[J]. 机器人, 2001, 23(2): 146-151.
- [8] C.T. Kelley. Iterative methods for linear and nonlinear equations [M]. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1995.
- [9] Mortimer Abramowitz. MICROSCOPE: Basics and Beyond [G/OL]. Olympus America Inc, 2003 [2009.9.30]. <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/index.html>.

(下转第 11 页)

## 4 结束语

本文通过使用实体建模软件 UG 对发射器挡板进行三维建模,将得到的模型简化并导入到有限元分析软件 ANSYS 中进行瞬态动力学分析,找出了发射器挡板最大应力集中点。在此基础上,利用 ANSYS 疲劳分析模块实现对发射器挡板的疲劳特性分析,结果表明发射器在经过 1 000 次发射后,最终累计损伤系数  $k = 0.168 < 1$ ,因此,发射器挡板可靠。同时,本文的分析方法为结构的抗疲劳设计提供了可行的分析思路 and 依据。

## 参考文献:

- [1] 李舜酩. 机械疲劳与可靠性设计[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] Vassilopoulos Anastasios P, Georgopoulos Efstratios F, Dionysopoulos Vasileios. Artificial neural networks in spectrum fatigue life prediction of composite materials [J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(1): 20- 29.
- [3] Schon Joakim. Spectrum fatigue loading of composite bolted joints- Small cycle elimination [J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(1): 73- 78.
- [4] Gomatam Rajesh R, Sancaktar Erol. A comprehensive fatigue life predictive model for electronically conductive adhesive joints under constant- cycle loading [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2006, 20(1): 87- 104.
- [5] 牟 媛, 王 慧. 基于 ANSYS 的全封器上盖的疲劳分析[J/OL]. www.paper.edu.cn, 2008.11.14.
- [6] 徐 颢. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.

## Fatigue Analysis of Baffle of Launcher Based on ANSYS

MA Jian-wei, JIA Zhen-yuan, WEI Wei-li

(Key Laboratory for Precision and Non-traditional Machining Technology of the Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning 116024, China)

**Abstract** :The 3D solid mode of the baffle of launcher was built by UG software, and then it was imported into ANSYS software for transient dynamic analysis after simplified. On the basis of getting the maximum stress concentration point, fatigue analysis model in ANSYS was used to realize the fatigue property analysis for the baffle of launcher. The analysis result showed that the baffle of launcher could satisfy the request of fatigue property.

**Key words**:finite element; fatigue property analysis; baffle

(上接第 3 页)

## Micro Visual Control Method based on Newton Lterative Method

YAO Sheng-qiang ,XU Qun ,XI Wen-ming

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

**Abstract**: Because of the requirement of high precision ,narrow workplace and small objects ,the traditional control methods would not be directly used for micromanipulation. In this literature, based on the foundation of stereo vision of the microscopes, a visual iterative control method is proposed which simulates the Newton Iterative Method. By the iterations,we can control the micromanipulator to approach the objective positions. We also prove the conditions of the convergence of the iteration, and get the limit of the final iterative errors.From the experiments, we can make a conclude that the visual iterative control method have good peculiarities such as high precision,quick convergence and robustness without precise calibration of the vision system.As a result,the micromanipulator can approach the objective positions within one pixel range by 3.5 times of iteration on average.

**Key words**: camera calibration ,newton Iterative method ,visual serve ,micromanipulation