

基于运动估计和图像匹配的视觉控制算法

肖献强¹, 李欣欣², 杨志刚², 程光明²

(1. 合肥工业大学 机械与汽车学院, 合肥 230009; 2. 吉林大学 机械科学与工程学院, 长春 130022)

摘要:针对微操作的作业空间小、路径可估计、位移及定位精度要求高等特点,提出了一种基于运动估计和图像匹配的视觉伺服控制算法,该算法将运动估计引入到视觉伺服中,利用运动估计出末端执行器下一次可能出现的位置,进行小区域的匹配搜索,而不进行整个视频区域的匹配搜索,大大减少了图像匹配时间,提高了实时性和实用性,并增强了鲁棒性。将该算法应用于解决细胞注射微操作过程中的位移以及精密定位等问题,研究了此算法的可行性以及理想运动轨迹的计算和实际运行的轨迹,给出了实现视觉伺服控制算法的数学推导模型及公式。实验结果表明:此算法实现了实时跟踪和识别定位,且鲁棒性好,可应用于大多数的微操作中的移动定位。

关键词:自动控制技术;视觉控制算法;运动估计;图像匹配;轨迹

中图分类号:TP242.62 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2007)03-0655-05

Vision control algorithm based on motion estimation and image match

Xiao Xian-qiang¹, Li Xin-xin², Yang Zhi-gang², Cheng Guang-ming²

(1. Mechanism and Motorcar Academy, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In the light of the features of the micro-manipulations, i. e., the operation space is infinitesimal, the track is estimable, and both the required precisions of the motion and positioning are high, a vision servo control algorithm was proposed based on the motion estimation and the image match. The algorithm introduces the motion estimation into the vision servo system to perform the regional search instead of the match search in the whole video space by estimating the next possible location of the end actuator. Therefore, the time needed for image match is reduced significantly, the real-time feature of the algorithm is enhanced, and its practicability and robustness are improved. The proposed algorithm was used to solve the problems associated with the precise displacement and positioning in the cell injection micro-manipulation, and the real-time tracking and motion positioning were realized with good precision and robustness.

Key words: automatic control technology; vision control algorithm; motion estimation; image match; track

收稿日期:2006-04-17.

基金项目:“863”国家高技术研究发展规划项目(2002AA423150).

作者简介:肖献强(1978-),男,硕士研究生. 研究方向:机械设计及自动化、机器视觉.

E-mail: bluesprint1978@yahoo.com.cn

通讯联系人:程光明(1957-),男,教授,博士生导师. 研究方向:精密驱动器. E-mail:cgm@jlu.edu.cn

近年来,视觉伺服控制在理论上和实际应用方面都取得了较大进展^[1-4]。微操作机器人系统及微操作控制已成为人们探索微观世界不可缺少的重要工具,而机器人的视觉伺服是机器人控制系统能否成功的关键^[5,6]。对微小物体进行夹持、吸附、传输、连接和装配等操作在生物工程领域和微系统研究领域应用广泛。基于视觉伺服的反馈控制应用到微操作定位控制上有很大的优势^[7]。Barnea 提出的块匹配算法即序列相似性检测算法(SSDA)能很快丢弃不匹配的点,减少在不匹配点上的计算量,从而提高匹配速度,但基本的 SSDA 算法主要采用全局搜索匹配跟踪,所以运算量仍然特别大。限制了它在视觉伺服控制的微操作平台中的应用^[8-11]。目前机器人视觉控制算法的研究一直处于相对比较落后的状态,如何开发通用化和实用化的视觉控制算法是当前机器人应用于微操作领域亟待解决的问题。

作者针对微操作的作业空间小、路径可估计、位移及定位精度要求高等特点,提出了基于运动估计和图像匹配的视觉伺服控制算法,该算法将运动估计引入到视觉伺服中,利用运动估计出末端执行器下一次可能出现的位置,进行小区域的匹配搜索,而不进行整个视频区域的匹配搜索,这样可大大减少图像匹配时间,提高实时性和实用性,增强鲁棒性。现已将该算法成功应用于解决细胞注射微操作过程中的位移以及精密定位等问题。

1 视觉伺服系统的设计

1.1 运动估计的设计思路

运动估计一直被用于视频压缩以及视频信号的处理,它是减少视频处理中运算量的有效方法之一。作者针对目前微操作的作业空间小、轨迹可估计等特点,将运动估计的思想引入到基于图像匹配的视觉控制算法中来,用于微操作中的末端执行器的跟踪和识别定位,提出建立基于运动估计的图像匹配方法进行运动检测与跟踪。基于运动估计的图像匹配处理的假设条件是:将图像或视频中的目标分成许多小块,而这些小块完全属于目标或者背景,按此种假设可以检测出足够精确的目标。

假设在运动背景下进行目标检测与跟踪时,第 i 帧图像或者视频中含有目标字母 A 的块,其位置如图 1(a)所示。经过运动后,在下一帧视频

中这个含有目标字母 A 的块出现在图 1(b)所示的相应位置,设 A 的大小为 $N \times N$,那么理论上

$$F_i = F_{i+1}(x + d(x), y + d(y)) (x, y) \in A \quad (1)$$

如图 1 所示,如果程序通过前次程序运行获得的信息能够判断出含有目标字母 A 块的下一个时刻的运动轨迹,在进行下一次的跟踪与识别定位的时候就没有必要进行全局的匹配搜索,而是根据前提判断出的轨迹在一个很小的范围内进行匹配识别就可以了,这样大大加快了匹配识别的速度。

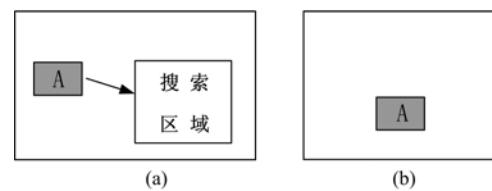


图 1 目标块的搜索匹配过程示意图

Fig. 1 Search match of aim block

如图 2 所示,假设某一时刻视觉控制程序识别出含有字母 A 的块在 (i, j) 处,而含有字母 A 的块指定的定位目标点为 (x, y) ,那么块的理想运动轨迹是以此时块的位置为坐标原点与目标位置的连线,此直线的斜率 k 和直线方程可以通过式(2)计算出:

$$Y = kX, k = y/x \quad (2)$$

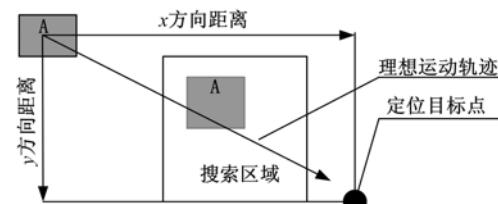


图 2 搜索的轨迹跟踪示意图

Fig. 2 Search and contrail track sketch map

用上式计算出的只是理想的运动轨迹,实际上末端执行器所附着的微动台或者机器人的运动不可能在这条理想的轨迹上运动。在实际运用中,可以在一个识别周期 t 内分别在 x 轴和 y 轴交替运动,且按这条理想运动轨迹的直线斜率 k 的比例交替运动。也就是说在一个识别周期 t 内,如果 x 方向运动 d 的距离,则在 y 方向相应运动 k_d 的距离,经过一个识别周期的运动后,含有字母 A 的块又会回到理想的轨迹上。虽然实际运动可能有一定的偏差,但经过视觉控制算法的误差调解,基本上可以沿着这条理想轨迹为参

考线进行运动,如图3所示。

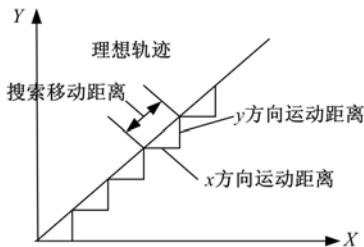


图3 实际运动轨迹

Fig. 3 Practicality motion track

利用此设计思路在进行下一次的匹配识别含有字母A的时候,只要在这个含有字母A的块上次所在的初始位置且沿着这条理想轨迹上移动一定距离 s , $s=\sqrt{d^2+(nd)^2}$,且比含有字母A块稍微大一点的范围进行搜索匹配含有字母A的块就可以了,大大减少了图像匹配识别的运算量。

1.2 视觉控制算法的数学推导模型及控制策略

在图像匹配中涉及到3个坐标系统,即计算机屏幕坐标系统、模板匹配区域坐标系统和模板本身的坐标系统。如图4所示,M所在的矩形区域代表模板;R所在区域为实际系统所用的模板匹配区域;S所在的矩形区域为摄像头所采集的图像区域; $F_x(k)$, $F_y(k)$ 是模板相对于整个图像的左下角的x,y方向距离; $S_x(k)$, $S_y(k)$ 是R区域相对于图像的左上角的距离; $x(k)$, $y(k)$ 是系统要求的末端执行器相对于图像左上角的距离; $C_x(k)$, $C_y(k)$ 为模板匹配后模板左下角相对于R区域左下角的x,y方向的距离; $d_x(k)$, $d_y(k)$ 为末端执行器与目标点在x,y方向上的距离; $d(k)$ 为末端执行器与目标点间的直线距离。以上的各个量均为计算中的变量。

图4中: N_x , N_y 分别为模板中末端执行器相对于模板左、上两边的距离; M_x , M_y 分别为M区域的宽和高; R_x , R_y 分别为R区域的宽和高; Δx , Δy 分别为模板匹配后,所确认的下一次匹配 $S_x(k+1)$, $S_y(k+1)$ 与模板左下角的距离;width,height分别为摄像机所采集的图像的宽和高; x_0 , y_0 分别为目标点与整幅图像左上角点的x,y方向上的距离。

在系统启动后的第一帧图像中,在整个图像范围内利用模板匹配搜索末端执行器位置,即此时没有R区域参与到匹配中,模板匹配时:

$$S_x(1)=0, S_y(1)=0$$

匹配完毕后,得到2个数值 $F_x(1)$, $F_y(1)$,其

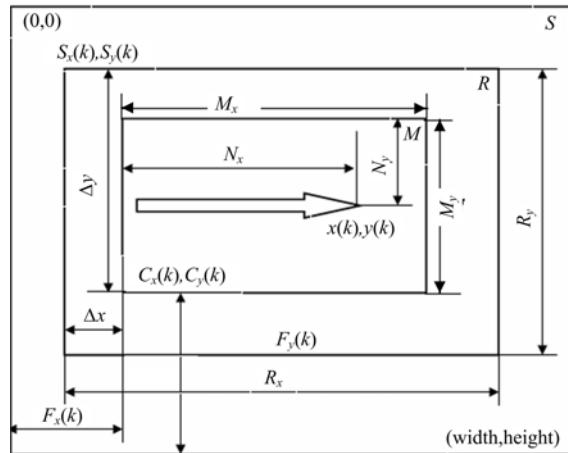


图4 基于运动估计的匹配识别算法示意图

Fig. 4 Match and recognising algorithm based on motion estimation

中: $F_x(1)$ 为模板相对于S区域左下角的x向距离; $F_y(1)$ 为模板相对于S区域左下角的y向距离。

由于模板匹配中进行了大量的数值运算,如果每次都在整幅图像中通过模板匹配搜索末端执行器的位置,匹配的速度会非常慢,因此在第一帧的图像中找到末端执行器的位置 $F_x(1)$ 和 $F_y(1)$ 后,根据微操作的实际运行情况可知,在两次模板匹配周期 t 时间内,微操作系统在某个方向上的最大位移 $x_d(k)$ 或 $y_d(k)$ 不会超过数值 σ ,即:

$$x_d(k) < \sigma, y_d(k) < \sigma$$

这样可以根据当前末端执行器所在的位置参数、模板的宽高和 σ 值来确定下一次模板匹配中的被匹配区域的大小和位置,即图中的R区域,此时R区域的大小比整幅图像要小得多,从而可以缩短模板匹配的运算时间,此时R区域的位置可以通过上面介绍的设计思路中的方法进行计算。

根据前面的介绍可知第二次模板匹配的开始点坐标:

$$S_x(2)=F_x(1)-\Delta x$$

$$S_y(2)=height-F_y(1)-\Delta y$$

第二次匹配后可得:

$$F_x(2)=C_x(2)+S_x(2)$$

$$F_y(2)=height-[S_y(2)+R_y-C_y(2)]$$

$$x(2)=F_x(2)+N_x$$

$$y(2)=height-F_y(2)-N_y$$

$$d_x(2)=x(2)-x_0$$

$$d_y(2)=y(2)-y_0$$

综合以上各式可得：

$$\begin{aligned} d_x(2) &= C_x(2) + F_x(1) - \Delta x + N_x - x_0 \\ d_y(2) &= \text{height} - F_y(1) - \Delta y + R_y - C_y(2) - \\ &\quad N_y - y_0 \\ d(2) &= \sqrt{d_x(2)^2 + d_y(2)^2} \end{aligned}$$

根据 $d_x(2), d_y(2)$ 的正负值, 可以判断出末端执行器与 (x_0, y_0) 点的方位关系, 根据 $d_x(2), d_y(2)$ 的大小可以判断出应该在哪个方向上运行, 采用 x 方向先运行 y 方向后运行的原则。

根据实际情况可知, 第 k 次的模板匹配及相关参数的取得只与第 $k-1$ 次的模板匹配结果有关, 而与以前的运算无关, 这样, 就可以得到如下的运算公式

$$\begin{aligned} d_x(k) &= C_x(k) + F_x(k-1) - \Delta x + N_x - x_0 \\ d_y(k) &= \text{height} - F_y(k-1) - \Delta y + R_y - \\ &\quad C_y(k) - N_y - y_0 \\ d(k) &= \sqrt{d_x(k)^2 + d_y(k)^2} \\ k &= 3, 4, 5, \dots \end{aligned}$$

当 $d(k)$ 的数值小于系统所确定的数值 δ 时, 即认为末端执行器已经到达目标点。

2 视觉控制算法的集成测试

本文用由上海联谊公司生产的微操作平台 ($10 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$) 测试, 它在 X、Y、Z 三个自由度上的移动精度为 $1 \mu\text{m}$, 且可以通过 RS-232 异步串口通信程序来控制电机, 进而控制每个自由度的移动定位; 利用 Visual C++ 开发平台编写出此视觉控制算法的源程序, 采用模拟生物工程中基因细胞注射中的抓取定位为背景, 测试了此视觉控制算法实际运行情况。图 5 为编写的视觉控制算法的控制界面。

分别进行了短距离、中短距离以及长距离三

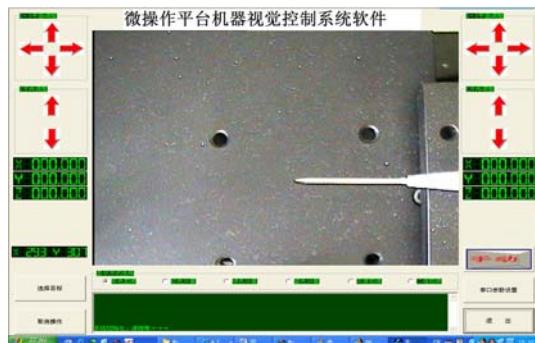


图 5 视觉控制算法的控制界面

Fig. 5 interface of vision control algorithm

种方式的测试, 图 6、7、8 分别为短、中、长距离的测试识别定位跟踪曲线。从曲线可以看出定位精度较理想, 定位速度快。

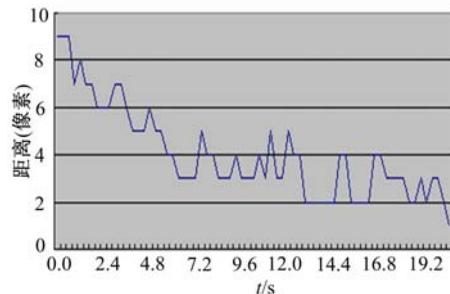


图 6 短距离的测试识别跟踪定位曲线

Fig. 6 Recognising and track positioning curve of shot distance

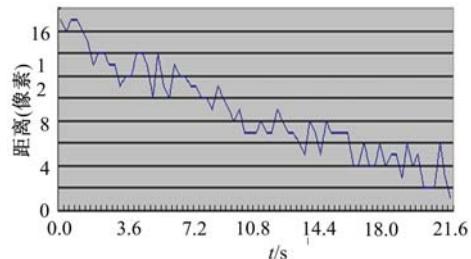


图 7 中短距离的测试识别定位跟踪曲线

Fig. 7 Recognising and track positioning curve of middle distance

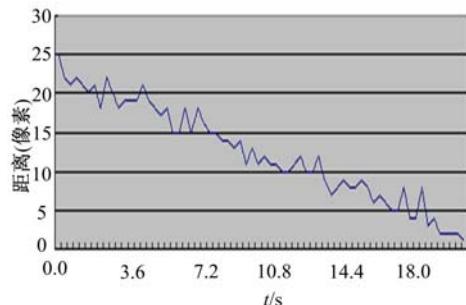


图 8 长距离的测试识别定位跟踪曲线

Fig. 8 Recognising and track positioning curve of large distance

目前此算法已经被用于基于机器视觉的连杆机构的轨迹、速度以及加速度测量系统中。经测试此算法运行稳定、有效, 能实时跟踪上连杆机构的运动, 并测量出连杆机构的轨迹、速度以及加速度。

3 结束语

作者针对微操作的特点研究了基于运动估计和图像匹配的视觉伺服算法。该算法将运动估计引入到视觉伺服中, 减少了图像匹配过程中的运

算量,提高了图像匹配的实时性。利用 Visual C++ 开发平台开发出此视觉控制算法的源程序,并且在微操作平台上($10\text{ mm} \times 10\text{ mm} \times 8\text{ mm}$)进行实际测试。测试结果表明:此视觉算法实现了动态实时识别跟踪定位,定位精度为像素级、定位速度快,且算法的鲁棒性较好,能够满足常见的微精确定位的微操作要求。

参考文献:

- [1] 汪宏昇,熊飞,史铁林.高速高精度的机器视觉定位的算法[J].光电工程,2005,32(9):72-74.
Wang Hong-sheng, Xiong Fei, Shi Tie-lin. New algorithm for fast and precise localization of machine vision[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(9): 72-74.
- [2] 罗毅,刘宏建,刘允才.一种新的探针定位方法[J].光学精密工程,2004,12(6):638-642.
Luo Yi, Liu Hong-jian, Liu Yun-cai. New probe positioning method[J]. Optics and Precision Engineering, 2004, 12(6): 638-642.
- [3] 毕树生,宗光华.用于生物工程的微操作机器人系统的若干问题[J].仪器仪表学报,2000,21(6):560-563.
Bi Shu-sheng, Zong Guang-hua. Some issues on bio-micromanipulator system[J]. Instrument and Appearance Transaction, 2000, 21(6): 560-563.
- [4] 赵清杰,连广宇,孙增圻.机器人视觉伺服综述[J].控制与决策,2001,16(6):849-853.
Zhao Qing-jie, Lian Guang-yu, Sun Zeng-qi. Survey of robot visual servoing[J]. Control and Decision, 2001, 16(6): 849-853.
- [5] 孙立宁,董为,杜志江.宏/微双重驱动机器人系统的研究现状与关键技术[J].中国机械工程,2005,16(1):89-93.
Sun Li-ning, Dong Wei, Du Zhi-jiang. Macro-micro dual manipulator system[J]. Mechanism Engineering of China, 2005, 16(1): 89-93.
- [6] 李欣欣,卢全国,杨志刚,等.蠕动式精密直线驱动器[J].吉林大学学报:工学版,2003,33(4):20-24.
Lin Xin-xin, Lu Quan-guo, Yang Zhi-gang, et al. Precision linear actuator of piezoelectric based on wriggle principle[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2003, 33 (4): 20-24.
- [7] 徐征,刘冲,罗怡,等.基于视觉伺服的3D微定位控制[J].机械工程学报,2005,41(6):153-156.
Xu Zheng, Liu Chong, Luo Yi, et al. Control of 3D micropositioning based on visual servoing[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2005, 41 (6): 153-156.
- [8] 周海山,陈孝威,张健.基于运动空间相关性和时间连续性的运动估算快速算法[J].中国图象图形学报,2001,6(11):1125-1129.
Zhou Hai-shan, Chen Xiao-wei, Zhang Jian. A fast motion estimation algorithm based on the spatial correlation and the time continuity of the motion object[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11): 1125-1129.
- [9] 魏星,蒋建国,齐美彬.基于选择预测的自适应运动估计算法[J].中国图象图形学报,2005,10(7):873-877.
Wei Xing, Jiang Jian-guo, Qi Mei-bin. A new adaptive motion estimation algorithm based on selecting predictive initial search point[J]. Journal of Image and Graphics, 2005, 10(7): 873-877.
- [10] 王红梅,张科,李言俊.图像匹配研究进展[J].计算机工程与应用,2004(19):41-45.
Wang Hong-mei, Zhang Ke, Li Yan-jun. Research progress on image matching[J]. Computer Technology and Application, 2004(19):41-45.
- [11] 吴培景,陈光梦.一种改进的SSDA图像匹配算法[J].计算机工程与应用,2005(33):76-78.
Wu Pei-jing, Chen Guang-meng. An improved SSDA in image registration[J]. Computer Technology and Application, 2005(33):76-78.