

文章编号: 1001-2486 (2000) 01-0060-05

基于活动轮廓的机器人视觉伺服控制*

夏利民, 谷士文, 罗大庸, 樊晓平
(长沙铁道学院电子工程系, 湖南长沙 410075)

摘要: 提出了基于活动轮廓的视觉伺服控制方法。将活动轮廓和光流模型相结合用于运动物体图像的实时跟踪, 以抽取物体图像的边缘信息, 并以此信息控制摄像机的运动, 达到机器人定位、跟踪等目的。该方法跟踪精度高, 鲁棒性好, 且满足实时跟踪的要求。实验结果表明了该方法的正确性和有效性。

关键词: 视觉伺服控制; 活动轮廓; 光流模型; 图像分割; 物体跟踪

中图分类号: TP242.6⁺2 文献标识码: A

Robotic Visual Servo Control Based on Active contour

XIA Li-min, GU Shi-wen, LUO Da-yong, FAN Xiao-ping

(Department of Electronic Engineering, Changsha Railway University, Changsha 410075, China)

Abstract: A robotic visual servo control based on active contour is presented, which combines the active contour with the image optical flow for tracking image contours related to the object of interest. The active contour provides the position information of the object to control movement of the camera. For accomplishing the robotics tasks such as positioning and tracking, by using the proposed method the real-time constraints as well as the requirements of accuracy and robustness are fulfilled. To verify the potential of our approach, we carried out several experiments.

Key words: visual servo control; active contour; optical flow; image segmentation; object tracking

视觉伺服是利用视觉信息来实现机器人闭环控制, 是机器人学的一个重要研究课题, 目前已广泛地用于各种机器人任务中。视觉伺服分为基于位置的视觉伺服^[1, 2]和基于图像的视觉伺服^[3~6]。其中基于位置的视觉伺服需要物体的确切三维坐标、摄影机准确标定, 因此计算复杂, 不便于机器人的实时控制; 而基于图像的视觉伺服是利用物体的二维图像特征作为反馈信息, 来引导机器人运动, 较前者简单, 然而, 这种方法所需的图像信息必须是准确的、鲁棒的。

活动轮廓模型^[7]是一种有效的图像分割、物体跟踪方法^[8, 9]。这种方法已成功地用于物体识别、计算机视觉等领域。基于活动轮廓的图像分割、物体跟踪的过程就是活动轮廓在模拟的外力(外部能量)和内力(内能)作用下向物体边缘靠近的过程, 外力推动活动轮廓向着物体边缘运动, 而内力保持活动轮廓的光滑性和拓扑性; 到达平衡位置时(对应于能量最小)的活动轮廓收敛到所要检测的物体边缘。

在本文我们提出了一种基于活动轮廓的运动物体图像分割与跟踪方法, 利用活动轮廓和光流模型来获取物体的位置信息和运动信息, 并以此作为机器人视觉伺服系统的反馈信息来控制摄像机(或机器人)的运动, 达到机器人定位、跟踪等目的。

1 基于活动轮廓的机器人视觉伺服系统

本文采用图 1 所示的机器人视觉伺服系统, 基本思想是利用活动轮廓和光流模型获取物体实时图像边缘, 并以此信息控制摄像机的运动, 以实现物体的跟踪。我们将摄像机安置在机器人的末端操纵器

* 收稿日期: 1999-10-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69975003); 湖南省自然科学基金资助项目(98JJY2044)

作者简介: 夏利民(1963), 男, 讲师, 博士生。

上, 此时摄像机获取的物体图像直接反映物体与机器人末端操纵器之间的相对位置和姿态关系。在跟踪某一类物体前, 先进行离线学习, 即物体置于工作台上, 将机器人手控制到正确位置, 以获取物体的期望图像, 然后利用活动轮廓得到期望的物体边缘 $v^* = \{(x_j^*, y_j^*), j = 1, 2, \dots, n\}$, 在线工作时, 当物体送到工作区, 摄像机实时采集图像, 通过活动轮廓和光流模型我们可以得到物体的边缘轮廓 $v(t) = \{(x_j, y_j), j = 1, 2, \dots, n\}$, 由这两个边缘轮廓的差值实时控制摄像机(或机器人手)的运动, 直到消除(或最小)该差值, 此时机器人手已到达正确位置。

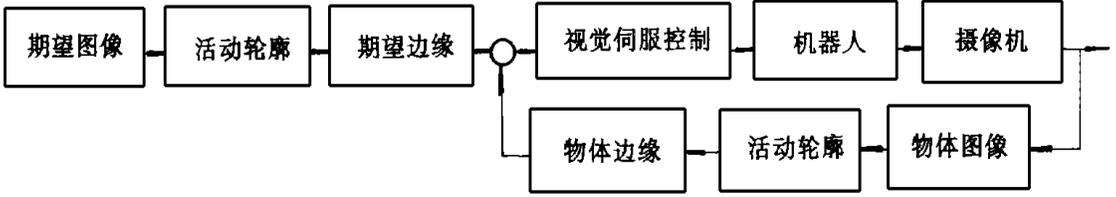


图1 机器人视觉伺服系统

Fig 1 Robot visual servoing system

为了确定控制律, 首先确定图像边缘的运动与摄像机运动之间的关系:

$$\dot{v} = L \tau_c \quad (1)$$

式中的 τ_c 是摄像机的运动速度: $\tau_c = (T_c, \omega_c)$, 其中 $T_c = (T_{cx}, T_{cy}, T_{cz})$ 是平动速度, $\omega_c = (\omega_{cx}, \omega_{cy}, \omega_{cz})$ 是转动速度, L 是反映物体三维坐标 (X_j, Y_j, Z_j) 与图像坐标中对应点的坐标 (x_j, y_j) 关系的 Jacobian 矩阵。考虑透视投影, $x_j = X_j/Z_j, y_j = Y_j/Z_j$, 则 L 由下式决定:

$$L = \begin{bmatrix} -1/Z_j & 0 & x_j/Z_j & x_j y_j & -1 - x_j^2 & y_j \\ 0 & -1/Z_j & y_j/Z_j & 1 + y_j^2 & -x_j y_j & -x_j \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (2)$$

为了计算简单, 在实际工作中式中 Z_j 可取 Z_j^* (即期望值)^[6], 因此 L 可离线计算而不占用实时控制时间。

我们定义边缘轮廓差为:

$$e = v - v^* \quad (3)$$

机器人视觉伺服控制的目的是通过控制摄像机的运动, 使误差 e 最小, 为了使 e 指数减小, 则 e 满足:

$$\dot{e} = -\lambda e \quad \lambda > 0 \quad (4)$$

由(1) ~ (4) 式得到摄像机的速度, 即控制律:

$$\tau_c = -L^+ e \quad (5)$$

上式中 L^+ 是 Jacobian 矩阵 L 的伪逆。

2 基于活动轮廓和光流模型的物体跟踪

2.1 活动轮廓

活动轮廓是一能量最小的样条曲线 $v(s) = (x(s), y(s)), s \in [0, 1]$, 可用来进行图像分割和运动跟踪, 在内力和外力作用下变形, 外力推动活动轮廓向着物体边缘运动, 而内力保持活动轮廓的光滑性, 达到平衡位置时(对应于能量最小)的活动轮廓收敛到所要检测的物体边缘。模型的能量定义为

$$E = E_{\text{int}} + E_{\text{ext}} \quad (6)$$

其中 E_{int} 是由于模型拉伸、弯曲而产生的内能, 提供平滑性约束, 通常定义为

$$E_{\text{int}} = \int_0^1 \frac{1}{2} \left(\alpha \left| \frac{\partial v}{\partial s} \right|^2 + \beta \left| \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} \right|^2 \right) ds \quad (7)$$

E_{int} 的第一项是弹性势能, 反抗轮廓模型的拉伸, 第二项是弯曲势能, 抵抗轮廓的弯曲变形。 α 表示曲线

的弹性, β 表示曲线的硬度(或刚性)。

E_{ext} 是与图像特征有关的外部能量, 以便活动轮廓被吸引到图像某特征点处, 如边缘, 通常取:

$$E_{\text{ext}} = \int_0^1 P(v) ds \quad (8)$$

$$P(v) = - \|\dot{y} I(v)\|^2 \quad (9)$$

由上式可知, E 最小对应于灰度梯度最大, 此时的活动轮廓就是物体边缘。

利用拉格朗日动力学方程可导出活动轮廓模型的运动方程:

$$\mu \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} - \beta \frac{\partial^4 v}{\partial s^4} - \dot{y} P(v) - c \frac{\partial v}{\partial t} \quad (10)$$

式中 μ 是模型质点的质量, 右边的第一、二项是内力, 维持曲线的光滑性; 右边第三项为“外力”, 推动曲线向灰度梯度最大的地方移动; 右边最后一项表示阻尼力, 用以释放模型能量使其达到静止。

为了简单起见, 在(10)式中设 $\mu = 0$, 则(10)式变为

$$c \frac{\partial v}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 v}{\partial s^2} - \beta \frac{\partial^4 v}{\partial s^4} - \dot{y} P(v) \quad (11)$$

方程(11)表示一个没有惯性的活动轮廓模型的运动方程, 一旦“外力”和内力达到平衡, 模型就处于静止状态, 这时能量最小, 模型就是物体的边缘。

将方程(11)离散化, 得到活动轮廓模型更新的迭代方程:

$$\mathbf{V}^{k+1} = (\mathbf{I} + \tau \mathbf{A}) \mathbf{V}^k + \mathbf{F}(v^k) \quad (12)$$

上式中 \mathbf{V}^{k+1} 、 \mathbf{V}^k 分别表示第 $k+1$ 次, 第 k 次迭代模型各结点的位置矢量, \mathbf{F} 表示力矢量, \mathbf{A} 是一矩阵, 分别为:

$$\mathbf{V}^k = \begin{bmatrix} v^k(0) \\ v^k(1) \\ \vdots \\ v^k(M-1) \end{bmatrix} \quad \mathbf{V}^{k+1} = \begin{bmatrix} v^{k+1}(0) \\ v^{k+1}(1) \\ \vdots \\ v^{k+1}(M-1) \end{bmatrix} \quad \mathbf{F}(v^k) = \begin{bmatrix} F(v^k(0)) \\ F(v^k(1)) \\ \vdots \\ F(v^k(M-1)) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{A} = \{a_{ij}\} \quad a_{ij} = \begin{cases} -\frac{2\alpha}{h^2} - \frac{6\beta}{h^4} & i = j, i = 0, \dots, M-1 \\ \frac{\alpha}{h^2} + \frac{4\beta}{h^4} & i = 0, \dots, M-1, j = i \pm 1 \\ -\frac{\beta}{h^4} & i = 0, \dots, M-1, j = i \pm 2 \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

其中 $v(i)$, $F(v(i))$ 分别是模型第 i 个节点的位置矢量和外力, $F(v(i)) = -\dot{y} P$; h 是沿 s 的采样距离。 τ 是迭代的步长。

由于活动轮廓模型中引入内部能量(内力), 当模型陷于假边缘时, 内力可使其越过假边缘, 因此利用活动轮廓得到的物体边缘精确、可靠, 不受噪声影响。

2.2 基于活动轮廓和光流模型的物体跟踪

利用活动轮廓模型对运动物体的图像进行跟踪, 首先在第一幅图像中将活动轮廓放在物体图像区域内, 根据(12)式更新该活动轮廓使其收敛到物体的真实边缘; 当物体运动时, 其图像边缘也随着运动, 我们利用活动轮廓和光流模型对其进行跟踪。

设 t 时刻图像中 (x, y) 点的灰度为 $I(x, y, t)$, 光流速度为 $u = (u_x, u_y)$, 则光流方程为

$$I_x u_x + I_y u_y + I_t = 0 \quad (14)$$

其中: $u_x = \frac{dx}{dt}$, $u_y = \frac{dy}{dt}$, $I_x = \frac{\partial I}{\partial x}$, $I_y = \frac{\partial I}{\partial y}$, $I_t = \frac{\partial I}{\partial t}$

由光流方程不能同时求出速度矢量的两个分量, 须加上附加约束条件, 我们通过极小化下列函数来求得 u_x, u_y [10]。

$$\int_D \left[\frac{1}{2} (I_x u_x + I_y u_y + I_t)^2 + \frac{k}{2} \left(\left(\frac{\partial u_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_y}{\partial y} \right)^2 \right) \right] dx \quad (15)$$

D 是图像区域, 在这里我们只关心物体的边缘, 因此 D 就表示活动轮廓。对于刚性物体其运动可由仿射变换表示, 即:

$$u = Av + d \quad (16)$$

式中 v 是轮廓上的点 $v = (x(s), y(s))$, A 是仿射变换矩阵, d 为平移:

$$A = \begin{pmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{pmatrix} \quad d = \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \end{pmatrix} \quad (17)$$

记:

$$\Theta = (a_{xx}, a_{xy}, a_{yx}, a_{yy}, b_x, b_y)^T \quad C = (xI_x, yI_x, xI_y, yI_y, I_x, I_y)^T$$

通过使(15)式最小^[8](取 $k = 0$), 得到:

$$\Theta = - \left[\int_0^1 CC^T ds \right]^{-1} \int_0^1 CI_t ds \quad (18)$$

由(16)、(18)式算出活动轮廓各点的速度 $u = (u_x, u_y)$, 根据该速度和第 t 幅图像中得出的活动轮廓模型 $v(t)$ 算出第 $(t+1)$ 幅图像中的初始轮廓模型, 再采用(12)式精炼该活动轮廓模型, 使其收敛到物体边缘, 再代入(5)式得到摄像机的运动速度。由(18)式可看出 A 、 d 的确定只需简单地计算模型各点的灰度的梯度及灰度的变化, 因此基于该方法的物体跟踪的优点是快速性好, 便于实时控制。

3 实验结果

我们采用文中方法进行实验。将一 CCD 摄像头安装在机器人末端操纵器上。实验包括下列几步:

(1) 离线情况下, 将摄像头控制到正确位置上, 抽取物体的期望边缘。

(2) 将摄像头指定到一初始位置, 采集第一幅图像, 把活动轮廓放于物体的图像区域内, 由(12)式更新活动轮廓, 使其收敛到物体边缘。

(3) 在序列图像中, 利用活动轮廓和光流模型, 实时获取物体的边缘, 然后由控制律(5)控制摄像机的运动。

我们对一螺帽进行跟踪, 图 2 是利用活动轮廓对螺帽序列图进行边缘跟踪结果。图 3 是边缘轮廓差 $e = v - v^*$ 变化图(图中 pixel 是像素)。图 4 是摄像机速度变化图。实验结果表明误差、摄像机速度均收敛到 0。

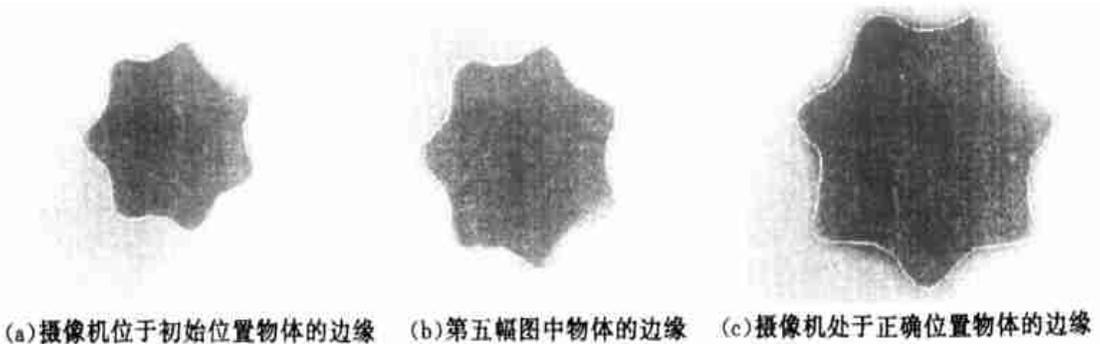


图 2 利用活动轮廓对螺帽序列图进行跟踪

Fig 2 Tracking of a nut using an active contour

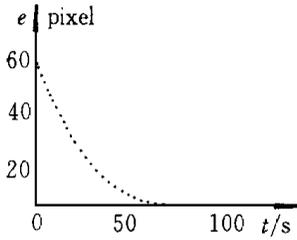


图3 边缘差值变化图

Fig 3 Temporal evolution
of error of boundary

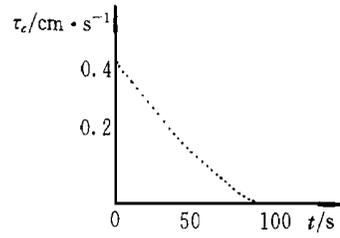


图4 摄像机速度变化图

Fig. 4 Temporal evolution
of Camera velocity

4 结论

本文提出了一种基于活动轮廓的机器人视觉伺服控制方法,利用活动轮廓和光流模型跟踪物体的图像边缘,提供物体的位置信息和运动信息,并以此信息来控制摄像机(或机器人)的运动,达到机器人定位、跟踪等目的。由于活动轮廓提取的物体边缘信息精确、可靠,不受噪声影响,使得该方法跟踪精度高、鲁棒性好;由于活动轮廓的仿射变换计算简单,且 Jacobian 矩阵可离线计算,使得该方法适合于实时跟踪。实验说明该方法的正确性和有效性。

参考文献:

- [1] Wilson W J, Williams C C, Bell G S. Relative end-effector control using cartesian position based visual servoing [J]. IEEE Trans Robotics and Automation, 1996, 12 (5): 684-696.
- [2] Bari R, Rivlin E, Shimshoni I. Visual homing: surfing on the epipoles [A]. ICCV'98. 1998, 863-869.
- [3] Sanderson A C, Weiss L E, Neumann C P. Dynamic sensor based control of robots with visual feedback [J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3: 404-417.
- [4] Espiau B, Chaumette F, Rives P. A new approach to visual servoing in robotics [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1992, 8 (3).
- [5] Papanikolopoulos N P, Khosla P K, Kanade T. Visual Tracking of a Moving Target by a camera mounted on a robot: a combination of control and vision [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 1 (9): 14-35.
- [6] Giordana N, et al. 2D model-based tracking of complex shape for visual servoing tasks [J]. IEEE Workshop on Robust vision for vision-based control of Motion, ICRA'98.
- [7] Kass M, Witkin A, Terzopoulos D. Snakes: Active contour models [J]. International Journal of Computer Vision, 1988, 1 (4): 321-331.
- [8] Leymanie F, Levine M D. Tracking deformable objects in the plane using an active contour model [J]. IEEE Trans on pattern analysis and machine intelligence, 1993, 15 (6): 617-634.
- [9] 夏利民, 谷士文, 沈新权. 基于活动轮廓的运动目标的动态分割 [J]. 中国图像图形学报, 1999, 4 (8): 631-634.
- [10] Horn B K P, Chunk B G. Determining optical flow [J]. Artificial Intell, 1981, 17: 185-204.