

基于图象差的平面大范围视觉伺服控制*

林 靖 徐强华 陈辉堂 蒋 平 王月娟
(同济大学电气工程系 上海 200092)

摘 要 为解决大范围偏差的控制问题,将期望图象按给定的角度间隔旋转,离线生成一系列子期望图象。比较实时采集图象与期望子图象间的差异程度可获得目标绕重心的旋转运动参数。结合图象求重心方法给出的平动参数,实现了在大范围偏差时迅速将摄像机调整到期望位姿。在期望位姿附近结合直接图象反馈方式,实现了基于图象差的平面大范围视觉伺服控制。

关键词 机器人视觉,视觉伺服控制,图象差

分类号 TP 13

Image-error-based Planar Global Visual Servoing

Lin Jing, Xu Qianghua, Chen Huitang, Jiang Ping, Wang Yuejuan
(Tongji University)

Abstract A scheme for large-scale deviation control in a vision-guided grasping task is presented. The desired image is rotated with a specific interval to generate a series of desired sub-images off-line. The rotational control parameter could be obtained by comparing the desired sub-images with the real-time sampled image. Combining the rotational parameters with the translational parameters obtained from image centroid, the camera could be rapidly regulated to the desired pose. Round the desired pose, the method is combined with the direct image feedback control scheme to realize the image-error-based planar global visual servoing.

Key words robot vision, visual servoing, image error

1 引 言

由视觉引导机器人运动控制的广泛应用体现在物体的准确跟踪与抓取上。但多数具有实验结果的应用只进行了位置跟踪,而未考虑物体方位,这是由于图象的方位测量远比位置测量困难得多。然而,多数工业应用都对机械手末端操作器的抓取方向有严格的要求,如装配作业等。文献[1]利用计算图象主轴的方法获取目标方位;[2,3]利用计算傅立叶描述子矩或复数矩获取目标方位,这些图象特征抽取方法的测量精度受物体形状影响较大。[4]利用图象上的3个特征点来间接获取角度信息,然而,基于特征点的特征抽取很难在低灰度图象或噪声图象中实现

高精度特征匹配,而且匹配算法运算量大,需高速图象处理系统才能达到实时控制的要求。[5]提出基于二维图象差的直接图象反馈控制方法,该方法以实时采样图象与离线学习期望图象是否一致为控制目标,因此控制精度与待跟踪物体的外形及模式关系较小,而且对图象系统的标定误差不敏感,但该方案仅能保证局部收敛,因而局限了其应用范围。

针对大范围偏差控制问题,本文利用期望图象离线生成一系列子期望图象,通过比较实时采集图象与期望子图象间的差异程度来获取目标绕重心的旋转运动参数。结合图象求重心方法给出的平动参数,可控制摄像机迅速调整到期望位姿。为进一步提高控制精度,结合图象直接反馈法进行小偏差时的高精度控制。

2 大范围偏差控制

考虑到生产线上的机器人往往对同一种类部件进行重复操作,我们设想采用如下工作方式:先将一待加工物体置于工作台上,手动控制机械手到达理想的加工位置,此时手部摄象机摄取待加工物体的图象,这幅图象可以完全反映待加工物体与机械手末端操作器间的期望位置与姿态关系。这一过程为学习过程,以获取期望图象 I_d 。在实际加工或抓取过程中,以传送带或其它方式输送到工作区的待加工物体可能具有任意的位置及方向。机械手利用手部摄象机摄取实时采集的图象 I_r ,通过比较 I_r 与 I_d 之间的图象差异来驱动机械手运动,直至消除这一差异。此时机械手与待加工或抓取的物体成期望位姿,可进行加工或抓取。

设经学习后获得的期望图象为 $I_d = f_d(x, y)$,实时采集图象为 $I_r = f_r(x, y)$,其中 $f_d(x, y)$ 和 $f_r(x, y)$ 为图象平面 (x, y) 处象素点灰度。为量化 I_d 与 I_r 之间的差异,定义如下图象差运算符 \ominus

$$I_e = I_r \ominus I_d = \left\{ \frac{1}{2} (f_d(x, y) - f_r(x, y))^2 \right\} \quad (1)$$

可以看出,差图象是两幅图象对应点灰度值的某种操作,其运算结果仍为一幅图象,图象中各点的强度反映了两幅图象对应点之间的差异大小。当 $I_e = \{0\}$ 时,表明期望图象 I_d 与实时采样图象 I_r 完全一致。

假定图象在 X, Y 轴方向上的放大率相等,取差图象的象素面积 S_e 作为特征,并设实时采集图象 I_r 与期望图象 I_d 之间所成的角度为 θ ,则 S_e 是关于 θ 的周期为 2π 的非线性函数 $S_e(\theta)$ 。由于 S_e 仅与 θ 有关,而与 I_d 的初始方位无关,所以 S_e 具有平移性。即若将 I_d 绕物体重心旋转 α 角而得到另一期望图象 $I_{d_{\alpha}}$,并设 I_r 与 $I_{d_{\alpha}}$ 所成的差图象面积为 $S_{e_{\alpha}}(\theta)$,且 θ 仍表示 I_r 与 I_d 间的夹角,则 $S_{e_{\alpha}}(\theta) = S_e(\theta - \alpha)$ 。假定在 $\theta \in [0, 2\pi)$ 的整个取值范围内,仅当 $\theta = 0$ 时 I_r 与 I_d 一致,则 I_r 与 I_d 所成的 $\theta \sim S_e$ 关系曲线,在 $\theta \in [0, 2\pi)$ 的整个取值范围内表现为具有唯一的零误差最小,但可能有若干个局部最小。

定理1 如果在 $\theta \in [0, 2\pi)$ 的整个取值范围内,有 n 个 θ 值使得 $S_e(\theta) = 0$,则 θ 的这 n 个值为 $\alpha = 2k\pi/n$,且 $S_e(\theta) = S_e(\theta + \alpha_k)$, $k = 0, 1, \dots, n-1$ 。

证明略。

由定理1知,当 $S_e(\theta)$ 在 2π 周期内,有 n 个 θ 取值使得 $S_e(\theta) = 0$,则 $S_e(\theta)$ 的最小周期为 $2\pi/n$ 。

$S_e(\theta)$ 在 $(-\pi/n, \pi/n)$ 范围内表现为具有唯一的零误差最小,但可能有若干个局部最小。

对于后面所示的物体有 $n = 1$,在区间 $(-\pi, \pi)$ 上的 $\theta \sim S_e$ 曲线如图1所示。其中, d 为 $S_e(\theta)$ 在区间上除零以外的最小极小值, φ_l 为沿着 $0 \sim \pi/n$ 方向使得 $S_e(\theta) = d$ 的最小角度值, φ_r 为沿着 $0 \sim -\pi/n$ 方向使得 $S_e(\theta) = d$ 的绝对值最小的角度值。以 $\delta < \min(|\varphi_l|, |\varphi_r|)$ 作为角度间隔,在 $(-\pi, \pi)$ 范围内将 I_d 绕物体重心旋转 $\theta_k = k\delta$ ($k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m$)得到一系列期望子图象 I_{dk} , m 取值满足 $m\delta < \pi/n < (m+1)\delta$ 。计算实时采集图象 I_r 与 I_{dk} 所成差图象 I_{ek} 的面积 S_{ek} ,仅当 $|\theta - k\delta| < \delta$,即 $\theta \in [k\delta, (k+1)\delta)$ 或 $\theta \in [(k-1)\delta, \delta)$ 时,有 $S_{ek}(\theta) < S_e(\delta)$ 及 $S_{e(k+1)}(\theta) < S_e(\delta)$ 或 $S_{e(k-1)}(\theta) < S_e(\delta)$ 。所以只要找出最小的 S_{ek} 及次最小的 $S_{e(k-1)}$ 或 $S_{e(k+1)}$,就可知 I_r 与 I_d 所成的角度落在区间 (θ_k, θ_{k+1}) 或 (θ_{k-1}, θ_k) 上。根据 $\theta \sim S_e$ 曲线,给出近似插补算法,可得出 I_r 与 I_d 所成的角度 θ 。

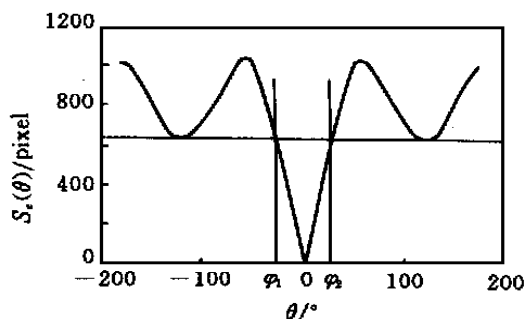


图1 $(-\pi, \pi)$ 区间的 $\theta \sim S_e$ 曲线

上述方法需存储 $2m+1$ 幅图象,而且在每个图象采样周期得到一幅实时采集图象后,要将 I_r 与 $2m+1$ 幅图象做比较。由于通常所用一幅图象为 256×256 ,因此上述方法需大量的存储空间及运算量。考虑到物体的边缘曲线能反映物体的形状,可利用抽取图象边缘的算法(如Sobel算子)对期望图象 I_d 求出其边缘 ρ_d 。设图象灰度值大于等于 T ($T > 0$)的象素为物体,小于 T 者为背景,可定义 I_r 相对于 I_d 的图象差为

$$V_r = \begin{cases} 1, & f_r(x, y) \geq T, (x, y) \in \rho_d \\ 0, & f_r(x, y) < T, (x, y) \in \rho_d \end{cases} \quad (2)$$

令 $I_r = I_d$ 表示 I_r 与 I_d 完全一致,可定义 $V_d = V_r|_{I_r=I_d}$ 。将 V_r 与 V_d 看成一个二值向量,显然 V_d 为一全1向量。以海明距离定义 V_r 与 V_d 间的差异程度,即

$$d_e = \sum_{i=1}^l ((V_r)_i - (V_d)_i)^2 \quad (3)$$

表示 I_r 与 I_d 之间的差异程度, 其中 l 为向量维数。当 $d_e = 0$ 时, I_r 与 I_d 一致, 而且非线性函数 $d_e(\theta)$ 与 $S_e(\theta)$ 类似。同样可以证明 $d_e(\theta)$ 在 $(-\pi/n, \pi/n)$ 范围内表现为具有唯一的零误差最小, 但可能有若干个局部最小。

类似于 $\theta \sim S_e$ 曲线, 可根据 $\theta \sim d_e$ 曲线给出 δ 。将 I_d 绕物体重心旋转 $\theta = k\delta (k = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm m)$ 得到一系列期望子图象 I_{dk} , 求出 I_{dk} 的边缘 ρ_{dk} , 并保存边界坐标值, 判断 I_r 图象上在 $(x, y) \in \rho_{dk}$ 处是否有物体, 可求得 V_{rk} 。为增强算法的抗干扰能力, 可在以 (x, y) 为中心的 3×3 模板内进行判断。由于 V_{dk} 为全 1 向量, 所以只需计算 V_{rk} 中 0 的个数即可求得 d_{ek} 。考虑到数字图象存在量化误差, 各 ρ_{dk} 的向量维数不可能一样, 但差别不会很大, 可对计算出的 d_{ek} 做归一化处理。根据 d_{ek} 的最小及次最小值来判断 I_r 与 I_d 所成的角度 θ 。

上述算法的在线运算量体现在 d_{ek} 的求取上。对总共 $(2m + 1)$ 幅期望子图象, 大约共需做 $(2m + 1) \times l$ 象素点判断。考虑到 $(2m + 1) \times l$ 个边缘点中有大量的点是重复的, 我们定义数据结构

```
struct EdgePoint{ Coordinate x, y;
/* Coordinate 为字节类型数据 */
Flag a[2m + 1];
/* Flag 为位类型数据 */ }
```

其中, x 和 y 为边缘点的图象平面坐标; $a[2m + 1]$ 为有 $2m + 1$ 个元素的一维数组, 其下标 $0 \sim 2m$ 分别对应第 $1 \sim (2m + 1)$ 个样本, 其值 1 表明该样本的边界坐标点中含有以 (x, y) 为坐标的点。

对 $(2m + 1) \times l$ 个边界坐标点进行搜索, 找出所有不重复的点, 记点数为 q , 则有 $q \ll (2m + 1) \times l$ 。在实时控制中仅需 q 次象素点的判断, 并通过对

$a[2m + 1]$ 中元素进行简单的位判断来计算 d_{ek} 。由于位运算速度快, 所以可满足实时性要求。

3 全局控制

将上述大范围偏差控制方法与文献[5]给出的具有局部收敛特性的图象直接反馈控制律相结合, 可得基于图象差的全局视觉伺服控制律为

$$\begin{cases} T_x = K_{1x} \frac{1}{\rho} g_s(x, y) G_{dx}(x, y) + \\ \quad K_{2x}(x_d - x_s) \\ T_y = K_{1y} \frac{1}{\rho} g_s(x, y) G_{dy}(x, y) + \\ \quad K_{2y}(y_d - y_s) \\ w_z = K_{w1} \frac{1}{\rho} g_s(x, y) (G_{dy}(x, y)x - \\ \quad G_{dx}(x, y)y) + K_{w2}h(I_e) \end{cases} \quad (4)$$

其中, T_x 和 T_y 为摄像机平动部分控制量, w_z 为转动部分控制量; ρ 为期望图象边界, $G = [G_{dx}, G_{dy}]$ 为利用 Sobel 算子获得的 (x, y) 处的梯度; $K_x, K_y, K_w > 0$; $h(I_e)$ 为由差图象 I_e 求取目标的旋转运动参数; (x_d, y_d) 为期望图象重心坐标, 可离线求得; (x_s, y_s) 为采样图象重心坐标。

式(4)等号右边第 2 项为第 2 节提出的大范围偏差的摄像机粗定位控制, 它反映了图象低频成分偏差; 第 1 项为图象直接反馈控制律, 是由梯度决定的细节调整控制, 它反映了图象中高频成分偏差。

4 实验结果

在 scorbobot ER- 五关节机器人上对不规则且无明显长轴的物体进行跟踪, 并取处理的图象大小为 200×256 。实验过程首先引导机械手到达期望高度(90mm), 以期望位姿摄取图象 I_d , 经平滑滤波及二值化处理后如图 2(a) 所示, 图象中物体面积约为 3 800(pixel)。选取 $\delta = 5^\circ$; 离线生成 72 个子图象,

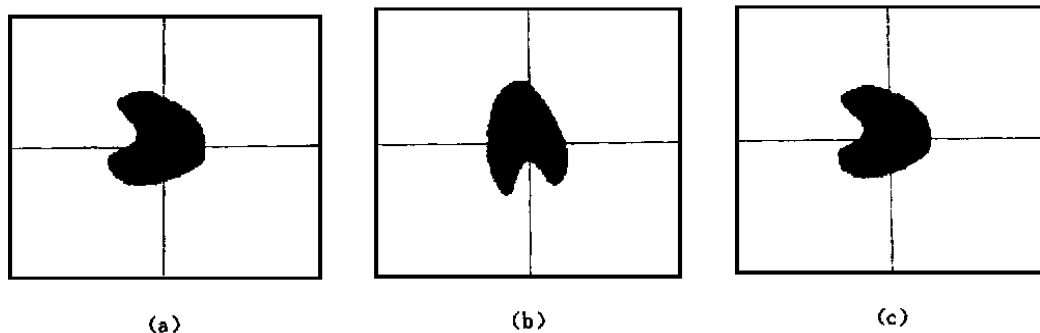


图 2 方位的开环控制实验结果

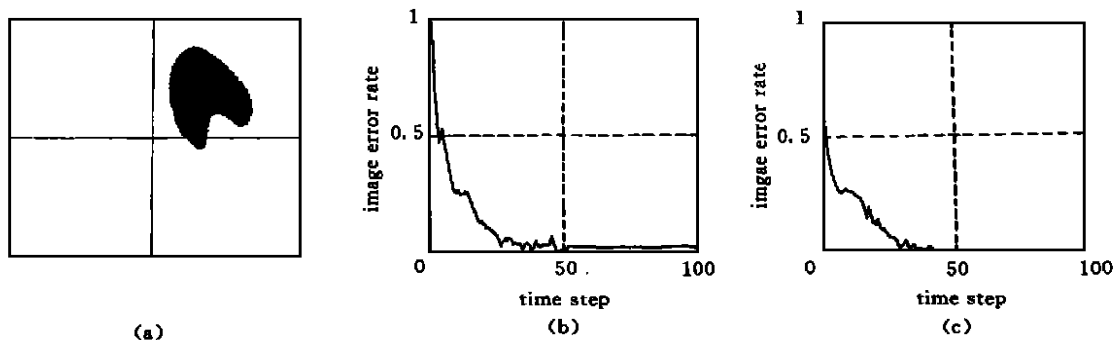


图3 闭环全局控制实验结果

(a) 初始位置 (b) 控制误差($K_{w2} = 0$) (c) 控制误差($K_{w2} = 0.000\ 01$)

覆盖 $[-\pi, \pi]$ 整个区间,并抽取各期望子图象边缘坐标 ρ 。随意放置物体如图2(b)所示。用本文方法算出角度为 107.4° ;控制机器人运动一次后获得的实时采集图象 I_t 如图2(c)所示,面积误差率为3.6%。可见已快速将机械手控制到期望位姿附近,结合图象直接反馈法可进行精确定位。

对图2(a)所示的期望图象,任意放置目标位置,其初始图象如图3(a)所示。图3(b)和图3(c)的平动部分控制参数取为 $K_{1x} = K_{1y} = 1.0, K_{2x} = K_{2y} = 0$;旋转部分控制参数:图3(b)取为 $K_{w1} = 0.1, K_{w2} = 0$;图3(c)取为 $K_{w1} = 0.1, K_{w2} = 0.000\ 01$ 。由图3(b)可见,利用大范围偏差控制方式可快速调整机器人至期望位姿附近,图象误差率小于3.2%。由图3(c)可见,结合文献[5]的具有局部收敛特性的图象差直接反馈法,可实现高精度控制,图象误差率小于1%。

5 结 语

针对二维图象差直接反馈法仅能保证局部收敛,为解决大范围偏差控制问题,本文提出了利用期望图象将其按一定的角度间隔旋转,离线生成一系列期望子图象,通过比较实时采集图象与期望子图象间的差异程度来获取目标绕重心的旋转运动参数。文中给出了角度间隔的选取方法,以保证方法的有效性。为提高实时性及节省存储空间,以图象边缘代替整幅图象进行处理,并给出了具体的实时实现方法。结合图象求重心方法给出的平动参数,可控制摄像机迅速调整到期望位姿。闭环全局控制实验结果表明了本文方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 B K P Horn. Robot vision. Massachusetts: The MIT Press, 1986
- 2 Gauthier J P, Bornard G, Silbermann M. Motions and pattern analysis: Harmonic analysis on motion groups and their homogeneous space. IEEE Trans on Syst, Man and Cybern, 1991, 21(1): 159 ~ 172
- 3 苏剑波,李耀通.一种用于机器人的物体运动参数快速识别方法.自动化学报,1994,20(3): 286 ~ 290
- 4 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 a vision. IEEE Trans on Robotics and Automation, 1993, 9(1): 14 ~ 35
- 5 蒋平,胡凤轩,陈辉堂,等.机器人手眼协调的图象直接反馈方法.控制理论与应用,1997,14(5): 648 ~ 653

作 者 简 介

林 靖 男,1973年生。1999年于同济大学获博士学位,现为 Philips 公司工程师。研究方向为机器人控制与智能机器人。

徐强华 男,1974年生。1997年毕业于同济大学,现为同济大学硕士研究生。研究方向为机器人控制。

陈辉堂 男,1933年生。1953年毕业于上海交通大学,现为同济大学教授,博士生导师。研究方向为机器人控制与智能机器人。

蒋 平 男,1963年生。1992年于西安交通大学获自动控制学科博士学位,现为同济大学教授。研究方向为机器人控制与智能机器人。

王月娟 女,1935年生。1958年毕业于西安交通大学电机系,现为同济大学教授,博士生导师。研究方向为机器人控制与智能机器人。