

基于任务函数方法的机器人视觉伺服特性研究

张国亮, 谢宗武, 王捷, 刘宏

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要: 为实现在统一的理论框架下对机器人视觉伺服基础特性进行细致深入的研究, 本文基于任务函数方法, 建立了广义的视觉伺服系统模型. 在此模型基础之上, 重点研究了基于位置的视觉伺服(PBVS)与基于图像的视觉伺服(IBVS)方法在笛卡尔空间和图像空间的动态特性. 仿真结果表明, 在相同的比较框架结构下, PBVS方法同样对摄像机标定误差具有鲁棒性. 二者虽然在动态系统的稳定性、收敛性方面相类似, 但是在笛卡尔空间和图像空间的动态性能上却有很大的差别. 对于PBVS方法, 笛卡尔轨迹可以保证最短路径, 但是对应的图像轨迹是不可控的, 可能会发生逃离视线的问题; 对于IBVS方法, 图像空间虽然能保证最短路径, 但是由于缺乏笛卡尔空间的直接控制, 在处理大范围旋转伺服的情况时, 会发生诸如摄像机退化的笛卡尔轨迹偏移现象.

关键词: 视觉伺服; 任务雅克比; 轨迹规划; 摄像机退化

中图分类号: TP242.6 **文献标识码:** A

Study of visual servo-performance of robots based on task function

ZHANG Guo-liang, XIE Zhong-wu, WANG Jie, LIU Hong

(School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150080, China)

Abstract: To study the visual servo-performance of a robot on a common theoretical basis, a generalized visual servo-system model is proposed based on the task function method. The dynamic performance of the position-based visual servoing(PBVS) and the image-based visual servoing(IBVS) in the Cartesian space and the image spaces are investigated respectively based on this model. Simulation results show that both the PBVS method and the IBVS method are robust to the camera calibration errors; and are comparable in stability and convergence. However, their dynamic performances are greatly different. For the PBVS method, the shortest Cartesian trajectory can be achieved, but the camera field of view may be lost because the corresponding image trajectories are not controlled. On the other hand, for the IBVS method, the shortest image trajectory can be achieved, but the Cartesian trajectory will deviate from the shortest one due to the lack of direct control in Cartesian space. Especially, when the servo system performs a large rotation with respect to the camera frame, even the camera retreat may occur.

Key words: visual servoing; task Jacobian; trajectory planning; camera retreat

1 引言(Introduction)

依据误差控制信号的不同, 机器人视觉伺服可分为基于位置的视觉伺服(PBVS)和基于图像的视觉伺服(IBVS). 目前, 对于二种方法的理论与应用研究得虽然很多, 但是, 多数研究只是针对特定视觉伺服方法的相关特性, 对于二者进行综合系统的比较却鲜有论及, 尤其是在系统的动态特性的研究方面. 如Espiau^[1]通过试验研究了摄像机模型误差对于IBVS方法的动态稳定性的影响, 然而对于PBVS方法的影响没有做出比较. Chaumette^[2]研究了两种方法的稳定性和收敛性问题, 主要对IBVS方法的渐进稳定性做出了研究, 但是对于

PBVS方法却未得出结论. 因此, 为了在统一的理论框架之内系统完整地比较两种视觉伺服方法, 本文建立了一种广义的视觉伺服模型, 重点分析了视觉伺服方法的空间动态特性, 并通过仿真试验验证了所提出理论的正确性.

2 广义视觉伺服模型(Generalized visual servoing model)

采用基于任务函数^[3]的方法, 机器人末端的视觉伺服控制可以定义为: 在 m 维传感-任务空间对 n 关节机器人进行控制, 传感任务变量 $S \in \mathbb{R}^m$ 与机器人关节变量 $q \in \mathbb{R}^n$ 之间的关系可表示为: $S = h(q)$. 其中, 映射 $h(q) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ 为机器人空间到传感-任务

空间的连续可微函数. 控制的目标是使当前特征任务变量 S 与期望特征任务变量 S_d 之差趋近于零, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \tilde{S} = S_d - S = 0. \quad (1)$$

由于传感-任务空间与机器人关节空间是一一映射的关系, 所以当传感-任务空间中的任务函数 \tilde{S} 等于零时, 关节任务函数 \tilde{q} 也等于零. 从以上分析可以看出, 在不同的空间将两种控制相关联十分重要. 为了在不同的工作空间建立两种控制的联系, 引入广义的任务雅可比矩阵:

$$J_S = \frac{\partial h(q)}{\partial q} \in \mathbb{R}^{m \times n}. \quad (2)$$

这样, 通过 J_S 就建立起广义的传感任务空间变量与关节空间变量之间的联系.

$$\dot{S} = J_S \dot{q}. \quad (3)$$

为实现公式(1)的控制目标, 设计任务函数 $e = C(S - S_d)$, 当取控制权矩阵 C 为任务雅可比的广义逆矩阵时^[4], $\dot{e} = -\lambda e$, 可以充分保证 $\|e\|$ 呈指数衰减.

3 视觉伺服模型的推广 (Extension of generalized visual servoing model)

在以上广义视觉伺服模型基础之上, 依据选择的任务变量 S 不同, 可将视觉伺服系统推广为IBVS, PBVS及HVS(复合视觉伺服控制)^[1]等.

如果任务变量采用直接由视觉系统获取的特征, 即构成IBVS系统. 此时传感-任务空间定义的任务变量为图像特征向量 $S: S \triangleq [x_1^i, y_1^i, \dots, x_p^i, y_p^i]^T$ (pixel). 不失一般性, 利用小孔透射模型, 对单点特征进行建模. 设物体特征在摄像机坐标系下的坐标为 $[X^C, Y^C, Z^C]^T$, 它的图像平面的投影为 $[x_i, y_i]^T$, 忽略镜头畸变, 取摄像机内参数为 (f, p_x, p_y) , 则对于物体上第 i 个特征点,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{p_x} & 0 \\ 0 & -\frac{f}{p_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z^C} & 0 & \frac{X^C}{(Z^C)^2} \\ 0 & -\frac{1}{Z^C} & \frac{Y^C}{(Z^C)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}^C \\ \dot{Y}^C \\ \dot{Z}^C \end{bmatrix} = J_{\text{img}} \begin{bmatrix} v_C^C \\ \omega_C^C \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: J_{img} 为图像雅可比矩阵, 因此, 在手眼构型模式下, 根据手速和眼速之间的常量雅可比阵 J_{cst} , J_{img} 以及机器人雅可比阵 J_{rob} , 得到图像特征速度与机器人关节速度之间的关系:

$$\dot{s} = J_{\text{img}} \begin{bmatrix} v_C^C \\ \omega_C^C \end{bmatrix} = J_{\text{img}} J_{\text{cst}} \begin{bmatrix} v_E^E \\ \omega_E^E \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{p_x} & 0 \\ 0 & -\frac{f}{p_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{Z^C} & 0 & -\frac{X^C}{(Z^C)^2} \\ 0 & \frac{1}{Z^C} & -\frac{Y^C}{(Z^C)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}^C \\ \dot{Y}^C \\ \dot{Z}^C \end{bmatrix} \quad (4)$$

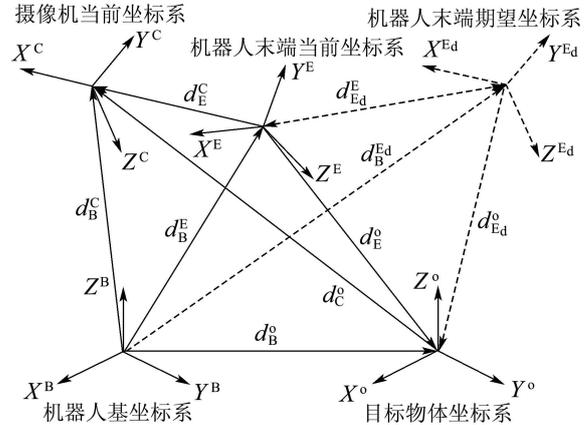


图1 坐标系空间关系

Fig. 1 Relation of coordinate frame

由图1, 基坐标系相对于摄像机的姿态、物体相对于基坐标系的距离、摄像机相对于基坐标系的距离分别为 R_C^B, d_B^O, d_B^C , 则物体相对于摄像机的距离 d_C^O 为

$$d_C^O = R_C^B (d_B^O - d_B^C). \quad (5)$$

对公式(5)取导, 并写成矩阵的形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{X}^C \\ \dot{Y}^C \\ \dot{Z}^C \end{bmatrix} = [-I_3 \quad S(d_C^O)] \begin{bmatrix} R_C^B v_B^C \\ R_C^B \omega_B^C \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $S(\cdot)$ 表示反对称阵算子. 结合公式(4)(6), 得

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_i \\ \dot{y}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{f}{p_x} & 0 \\ 0 & -\frac{f}{p_y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\frac{1}{Z^C} & 0 & \frac{X^C}{(Z^C)^2} \\ 0 & -\frac{1}{Z^C} & \frac{Y^C}{(Z^C)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X}^C \\ \dot{Y}^C \\ \dot{Z}^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X^C Y^C}{(Z^C)^2} & -\frac{(Z^C)^2 + X^C^2}{(Z^C)^2} & \frac{Y^C}{Z^C} \\ \frac{(Z^C)^2 + X^C^2}{(Z^C)^2} & -\frac{X^C Y^C}{(Z^C)^2} & \frac{X^C}{Z^C} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_C^C \\ \omega_C^C \end{bmatrix} =$$

$$J_{\text{img}} J_{\text{cst}} \begin{bmatrix} R_E^B & 0 \\ 0 & R_E^B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_E^E \\ \omega_E^E \end{bmatrix} = J_{\text{img}} J_{\text{cst}} \begin{bmatrix} R_E^B & 0 \\ 0 & R_E^B \end{bmatrix} J_{\text{rob}} \dot{q}, \quad (8)$$

即 $\dot{s} = J_i \dot{q}$. 其中

$$J_i = J_{img} J_{cst} \begin{bmatrix} R_E^B & 0 \\ 0 & R_E^B \end{bmatrix} J_{rob},$$

即所建立的图像任务雅可比. 在以往的视觉伺服系统研究中, 使用任务函数法对PBVS系统建模的非常少, 这是由于在PBVS方法中视觉处理及机器人的运动控制是完全分离的两个过程, 所以研究的重点主要是放在如何从图像特征估计出3维位姿, 而系统的控制一般都是采用经典的控制理论方法, 如PID、极点配置、最优控制等^[5]. 本文为了综合比较两种视觉伺服方法的动态特性, 采用与IBVS建模类似的方法对PBVS系统建模.

此时, 选择的任务变量为物体相对于机器人末端的位姿 $W_E^O = [(d_E^O)^T \ (\theta_E^O)^T]^T$. 由图1, 定义物体相对于机器人末端当前坐标系距离为 d_E^O :

$$d_E^O = R_E^B(d_B^O - d_B^E). \quad (9)$$

采取与公式(5)的同样的取导计算方法对式(9)取导

$$\dot{d}_E^O = [-I_3 \ S(d_E^O)] \begin{bmatrix} R_E^O & 0 \\ 0 & R_E^O \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_B^E \\ \omega_B^E \end{bmatrix}, \quad (10)$$

当对静态物体视觉伺服时, $v_B^{Ea} = 0, \omega_B^{Ea} = 0$, 所以物体相对于机器人末端执坐标系的角速度为

$$\omega_E^O = -R_E^B \omega_B^E. \quad (11)$$

结合公式(10)(11), 就可以建立任务变量变化率 \dot{W} 与机器人关节变化率 \dot{q} 之间的联系:

$$\dot{W} = \begin{bmatrix} -I_{3 \times 3} & S(d_E^O) \\ 0 & -I_{3 \times 3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_E^B & 0 \\ 0 & R_E^B \end{bmatrix} J_{rob} \dot{q} = J_w \dot{q}, \quad (12)$$

其中 J_w 就是PBVS方法的任务雅可比矩阵.

4 机器人视觉伺服的动态性能分析(Analysis of dynamic performance of robot visual servoing)

为在建立的广义模型上比较视觉伺服方法的空间动态特性, 利用MATLAB机器人工具箱Robot Toolbox及Simulink进行机器人视觉伺服场景建模. 图2为根据六自由度机器人RX60建立的机器人视觉伺服模型, 表1为RX60的DH参数表.

物体模型为垂直于摄像机光轴方向边长50 mm 平面正方形. 定义摄像机内参数为(500,500,400, 400,800,800), 由于两种伺服方法的控制机理完全不同, 这里使用两种不同的方法获取任务函数参数. IBVS方法根据物体模型和摄像机内、外参数取得动态图像特征, PBVS方法以Dementhon提出

的快速位姿估计算法估计物体相对于相机的位姿^[6]. 由图2所示, 摄像机配置模型采用眼在手(eye-in-hand)构型, 手眼关系定义为(0.05, 0.06, 0.1; 0, 0, 0)(m; rad).

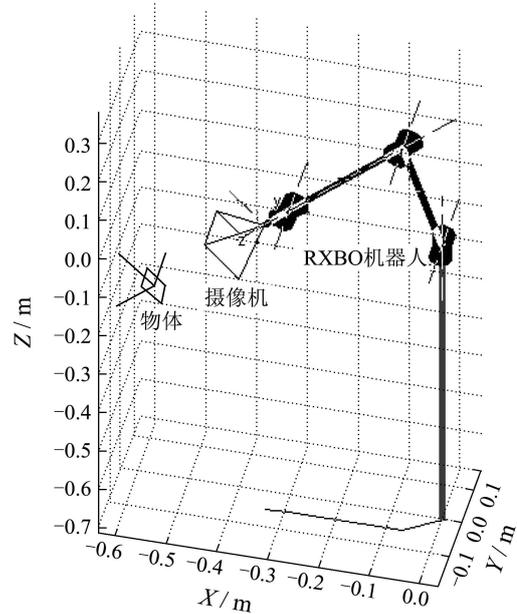


图 2 视觉伺服模型

Fig. 2 Model of visual servoing

表 1 RX60 DH参数

Table 1 RX60 DH parameter

关节	$\alpha/(^\circ)$	$\theta/(^\circ)$	d/mm	a/mm
1	-90	θ	0	0
2	0	-90	49	290
3	90	90	0	0
4	-90	θ	310	0
5	90	θ	0	0
6	0	θ	65	0

表 2 物体相对于相机的位姿

Table 2 Pose of object respect to camera frame

试验	初始位姿(m; rad)	期望位姿(m; rad)
1	(0, 0, 0.3; 0, 0, 0)	(0.01, 0.01, 0.3; 0, 0, 0)
2	(0.015, 0.015, 0.2; 0.001, 0.002, 0.0015)	(-0.185, 0.045, 0.18; 0.001, 0.002, -0.552)
3	(0.015, 0.015, 0.2; 0.001, 0.002, 0.0015)	(-0.385, 0.215, 0.18; 0.001, 0.002, -2.616)

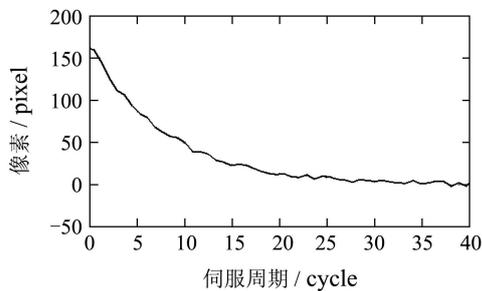
依据所建立视觉伺服模型, 分别进行3组视觉伺服任务测试. 试验1通过在平面视觉伺服任务中加入随机噪声研究各种误差对两种伺服方法的影响. 试验2和试验3分别研究两种方法在小幅度和

大幅度空间伺服运动时, 3D笛卡尔空间和2D图像空间的动态特性. 在这3个实验中, 物体相对于相机的初始和期望位姿如表2所示, 其中: 期望的图像特征用“+”表示, 增益为0.125.

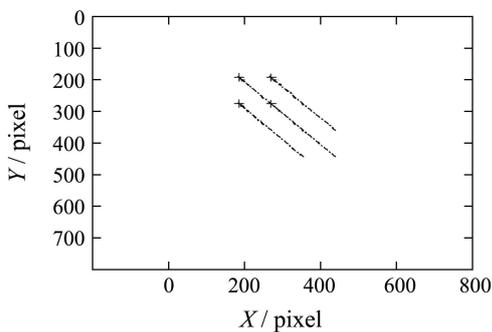
4.1 误差影响分析(Effect of error)

4.1.1 摄像机标定误差影响(Effect of camera calibration error)

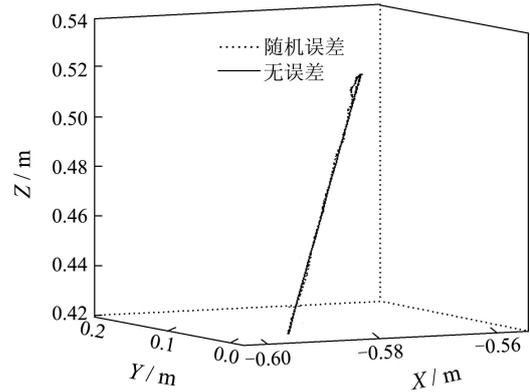
如表2所示, 此时的伺服运动为机器人末端在当前坐标系下沿着 x 和 y 方向各运动10 mm. 在图像平面 u 轴上归一化焦距 α_x , v 轴上归一化焦距 α_y 及主点坐标 (u_0, v_0) 分别加入随机噪声(-5, 5)(pixel), 用以模仿摄像机内参数标定误差. 图3和图4表示IBVS系统及PBVS系统的图像误差、图像空间运动轨迹和笛卡尔空间轨迹. 比较图3和图4可以看出, 在同一模型比较框架下, 两种方法即使在很大的标定噪声情况下, 系统仍具有良好的鲁棒性. 二者图像误差收敛趋势相同, 均呈指数收敛, 经过20次左右的迭代收敛到期望值附近. 由于标定误差的影响, 图像轨迹在图像空间并未准确到达期望位置, 但通过比较理想情况与加入误差的笛卡儿轨迹可以看出, 两种方法虽然在路径上有一些小幅偏移, 但最终都收敛到期望位置附近, 且定位精度可以控制在2 mm之内. 由于系统采用的是随机噪声, 所以收敛曲线在平衡点有小幅震荡.



(a) IBVS图像像素误差



(b) IBVS图像空间轨迹



(c) IBVS相机相对于基坐标系笛卡尔轨迹

图3 加入摄像机标定误差时IBVS视觉伺服

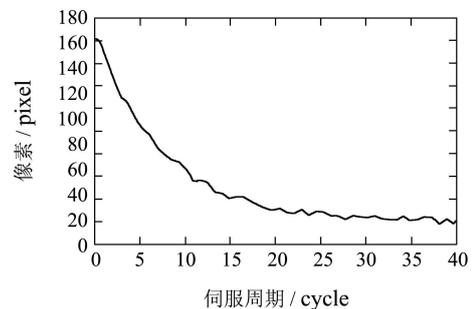
Fig. 3 IBVS Visual servoing with camera calibration error

4.1.2 物体模型误差影响(Effect of object model error)

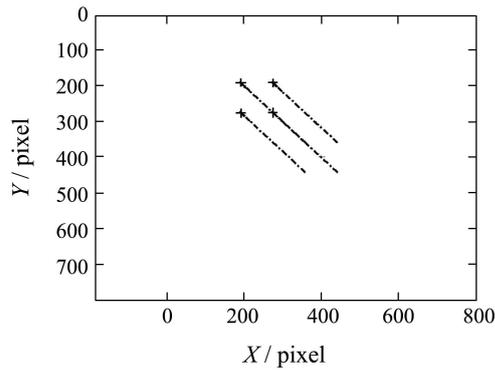
在物体模型估计不足的情况下, 两种伺服方法在笛卡尔空间的机器人末端轨迹如图5所示. “ Δ ”和实线分别表示物体模型误差 ± 1 mm时PBVS笛卡尔轨迹, 点划线表示同样误差作用在IBVS时笛卡尔轨迹, “*”表示理想的笛卡尔运动轨迹; 从图中可以看出, 由于IBVS方法完全是基于图像空间的伺服控制, 不存在物体模型估计的问题, 只要视觉处理系统能够较准确地提取当前和期望的图像特征, 就可以完成伺服任务, 所以IBVS轨迹与理想轨迹是重合在一起的, 而PBVS方法由于同时需要物体模型和图像坐标来估计物体相对于相机的位姿, 所以模型估计误差会对系统性能造成一定影响.

4.2 3维视觉伺服运动(3D visual servoing)

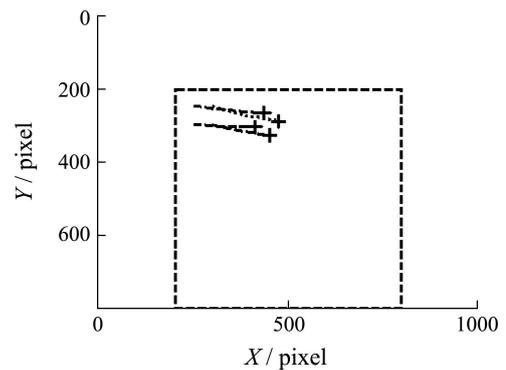
为测试物体特征在图像空间轨迹动态运动情况, 修改摄像机内参数, 使特征在图像空间的投影靠近视场边缘, 这样可以更好地研究图像特征脱离视线时的轨迹运动情况. 图6和图7中的虚线框表示修改摄像机内参数后的视场范围.



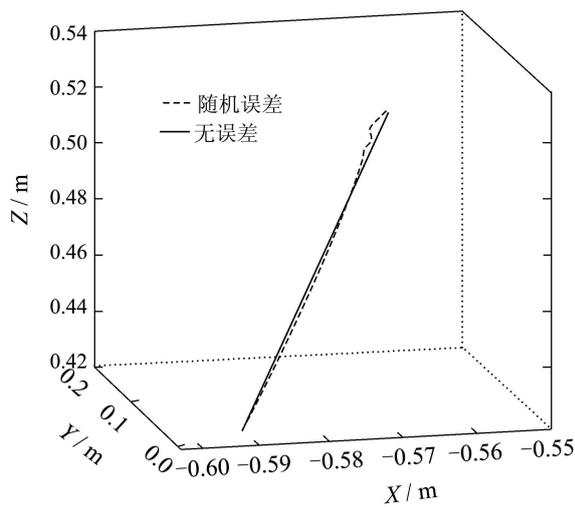
(a) PBVS图像像素误差



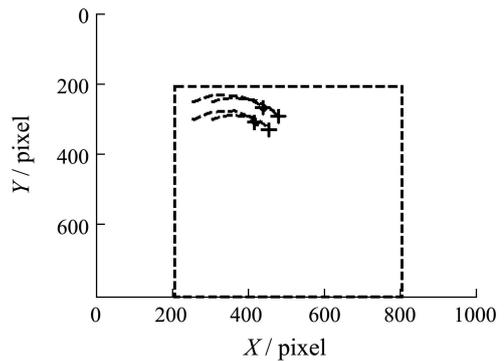
(b) PBVS图像空间轨迹



(a) IBVS



(c) PBVS相机相对于基坐标系笛卡尔轨迹



(b) PBVS

图 6 幅度3维空间视觉伺服图像空间轨迹

Fig. 6 Trajectory of 3D visual servoing in image space within short range

图 4 加入摄像机标定噪声时PBVS视觉伺服

Fig. 4 PBVS Visual servoing with camera calibration error

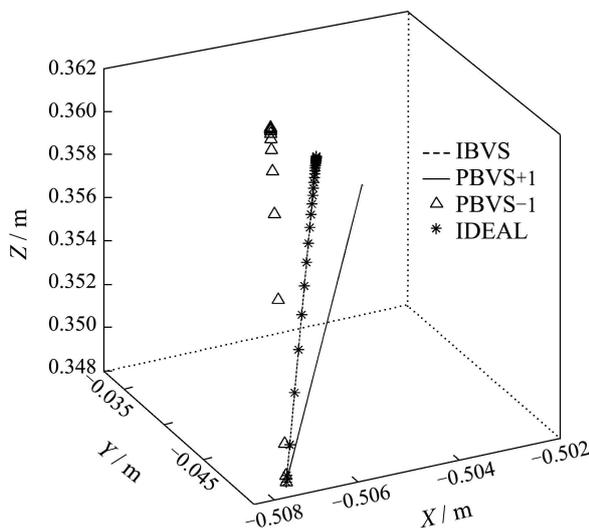


图 5 物体模型误差的影响

Fig. 5 Effect of object model error

4.2.1 小幅度3维视觉伺服运动(3D visual servoing in short range)

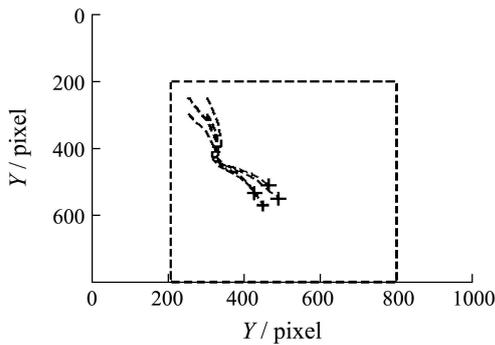
伺服任务如表2中试验2所示, PBVS和IBVS的图像空间轨迹如图6所示, 笛卡尔轨迹如图8(a)所示. 从这两幅图中可以看出, PBVS方法在笛卡尔空间的轨迹呈直线运动. 但是, 由于在图像空间没有直接控制, 特征在图像空间有一定的冗余运动, 但是由于伺服的运动范围较小, 图像轨迹仍然是在可控的范围之内, 与之相比, 由于IBVS方法的任务函数定义在图像空间, 所以特征在图像空间是完全呈直线运动的, 这样就保证了视线的充分可见性, 不会发生丢失特征的情况, 但是这种方法在笛卡尔空间却完全没有规划, 如果旋转伺服命令进一步扩大, 可能由于笛卡尔轨迹的不可控造成超出机器人限位的结果.

4.2.2 大幅度空间视觉伺服运动(3D visual servoing in long range)

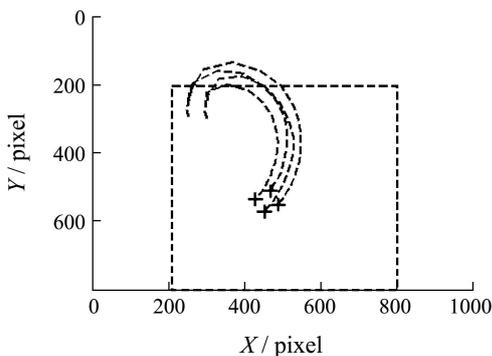
在上一个试验中, 在小幅度空间视觉伺服情况下, 两种方法都获得了期望的结果. 在下面的测试

中,研究了大幅度运动下两种伺服方法的性能(最大旋转140°).所有的仿真设置与前一个试验相同,只是将期望位姿更改为表2中试验3中的数据.

比较图7和图8(b),大范围运动时,从图像空间来看,IBVS方法只要初始图像特征和期望图像特征可见,则图像轨迹一直存在在图像空间,而PBVS方法在小范围运动时,虽然可以保证视线的存在性,但是当伺服运动范围加大后,尤其是旋转运动部分加大,图像轨迹就可能会发生脱离视线的情况,导致视觉伺服的失败.从笛卡尔空间来看,IBVS方法的笛卡尔轨迹发生了严重的偏移,这是由于伺服的运动涉及到了绕光轴的缘故,发生了摄像机退化问题^[7],即摄像机先是远离目标物体再回归,与之对应的图像空间轨迹如图7(b)图所示,此时图像的运动轨迹不再是近似直线,图像空间同样出现了扭曲,当相机远离物体时,4个图像特征点逐渐趋于一点,当相机逐渐靠近物体时,图像特征点再重新趋近期望点.虽然此时理论上仍然可以完成伺服任务,但由于3D空间偏移过大,机器人在伺服过程中,因为无法到达伺服位置最终导致视觉伺服的失败.



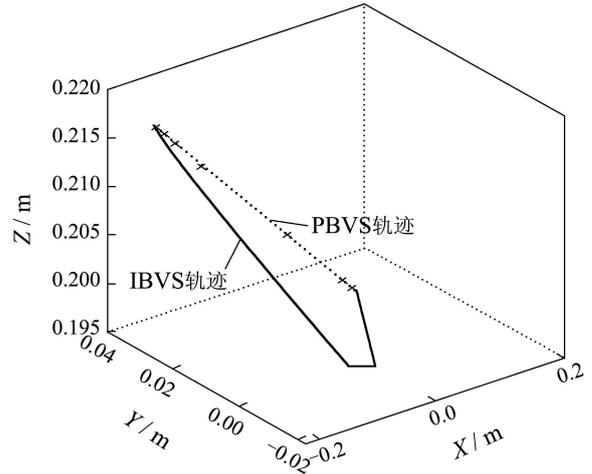
(a) IBVS



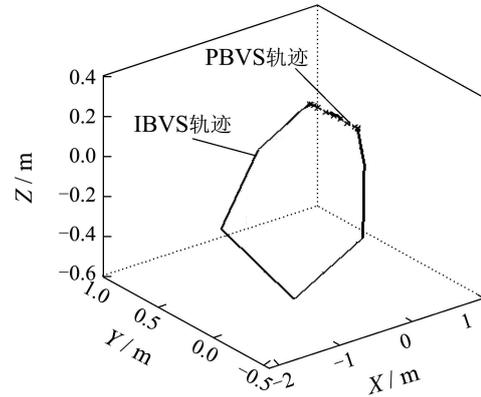
(b) PBVS

图7 幅度3维空间视觉伺服图像空间轨迹

Fig. 7 Trajectory of 3D visual servoing in image space within short range



(a) 小幅视觉伺服轨迹



(b) 大幅视觉伺服轨迹

图8 幅度3维空间视觉伺服图像空间轨迹

Fig. 8 Trajectory of 3D visual servoing in image space within short range

5 结论(Conclusion)

1) 利用传感-任务空间机器人控制方法,建立广义视觉伺服模型,为研究机器人视觉伺服系统提供了建模新方法.该模型具有灵活的可扩展性,视觉伺服建模方法不单适用于本文研究的IBVS和PBVS方法,对于其他方法,如HVS同样适用.

2) 对视觉伺服系统的动态过程进行了分析,重点研究了机器人视觉伺服控制中的空间动态特性.

3) 通过试验方法证明,只要两种方法的比较在同一前提下,PBVS方法同样具有对摄像机标定误差不敏感的特性.

参考文献(References):

[1] ESPIAU B. Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics[C] //Proceedings of the 3rd International Symposium on Experimental Robotics. Berlin: Springer-Verlag, 1994: 182 - 192.

- [2] CHAUMETTE F. Potential problems of stability and convergence in image-based and position-based visual servoing[C] // *Proceedings of the Confluence of Visual and Control*. New York: Springer-Verlag, 1998: 66 – 78.
- [3] SAMSON C, BORGNE M, ESPIAU B. *Robot Control: the Task Function Approach*[M]. Oxford, UK: Clarendon Press, 1991.
- [4] 林靖, 陈辉堂, 王月娟, 等. 机器人视觉伺服系统的研究[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(4): 476 – 481.
(LIN Jing, CHEN Huitang, WANG Yuejuan, et al. Research on robotic visual servoing system[J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(4): 476 – 481.)
- [5] CHAUMETTE F, HUTCHINSON S. A simple iterative learning controller for manipulators with flexible joints[J]. *IEEE Robotics and Automation*, 2007, 14(1): 109 – 118.
- [6] DEMENTHON D, DAVIS L. Model-based object pose in 25 lines of code[J]. *Journal of Computer Vision*, 1995, 15(1/2): 123 – 141.
- [7] MALIS E, CHAUMETTE F. Theoretical improvements in the stability analysis of a new class of model-free visual servoing methods[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2002, 18(2): 176 – 186.

作者简介:

张国亮 (1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为机器视觉、机器人视觉伺服控制, E-mail: zgl0227@sina.com;

谢宗武 (1973—), 男, 副教授, 研究方向为机器人控制, E-mail: xiezongwu@hit.edu.cn;

王捷 (1978—), 男, 博士生, 研究方向为机器人视觉应用、模式识别;

刘宏 (1966—), 男, 研究员, 长江学者, 主要研究方向为机器人灵巧手、空间机器人技术, E-mail: dlrhilab@yahoo.com.cn.

下 期 要 目

- 基于合作粒子群算法的PID神经网络非线性控制系统 朴海国, 王志新, 张华强
- 混合时滞区间递归神经网络的全局鲁棒稳定性 刘振伟, 张化光
- 具有Markovian延迟与丢包的离散系统的状态估计 郭戈, 王宝凤
- 结合小波消噪的捷联惯导系统传递对准性能改进 孙昌跃, 邓正隆
- 被动目标定位系统观测平台的最优机动轨迹 许志刚, 盛安冬, 陈黎, 谭飞
- 基于立体视觉的非穿戴指势识别 管业鹏
- 基于奇异摄动理论的输入有界机器人轨迹跟踪控制 刘华山, 朱世强, 吴剑波, 闫莎莎
- 含间隙机械系统的混杂模型预测控制器设计 董领逊, 窦丽华, 陈杰, 夏元清
- 伺服系统摩擦的支持向量回归建模与反步控制 周金柱, 段宝岩, 黄进, 刁玖胜
- 某型无人机的自动着陆控制 张剑锋, 刘秉华, 贾彩娟
- 自适应动态径向基函数网络死区补偿控制 李妍, 毛志忠, 王琰
- 基于2阶Renyi熵的自适应主动噪声控制 张兴华, 任雪梅
- 基于动态模型库的多模型切换控制 翟军勇, 费树岷
- 基于支持向量机碱度偏差估计的石灰加入量模型 王心哲, 韩敏, 杨溪林, 林东
- 炼焦生产过程综合生产指标的改进神经网络预测方法 吴敏, 王伟, 雷琪, 曹卫华