

基于视觉伺服技术的工业机器人高动态物体跟踪系统

毛翊超, 陆麒

(ABB 中国研究院 机电系统与机器人自动化部, 上海 201319)

摘要: 视觉伺服技术在诸多工业场景中都有相当大的应用前景。传统的视觉伺服方法, 通常要求使用高帧率的相机来实现高精度的视觉伺服。高帧率相机的成本之高, 使得一般工业用户望而却步。提出了一种新的视觉伺服控制方法, 该方法将机器人的运动反馈与视觉传感信号进行了融合, 用来产生机器人的运动控制信号。与传统的仅基于视觉反馈伺服的控制方法相比, 新方法的运动控制频率与视觉反馈频率(即相机帧率)无关, 因此能在低相机帧率条件下, 实现高精度的动态视觉伺服。概述了新视觉伺服方法的控制架构, 通过动态物体跟踪实验证明了新方法的可行性, 并通过性能测试实验说明了新方法在低帧率条件下仍能实现较高精度的视觉伺服。

关键词: 视觉伺服; 工业机器人; 动态物体跟踪

中图分类号: TP242.2

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-6652.201903

A dynamic object tracking system of industrial robots based on visual servoing technology

MAO Yichao, LU Qi

ABB Corporate Research China, Mechatronics, Shanghai 201319, China

Abstract: Visual servoing technology has high potential in many industrial applications. Conventionally, precise servoing is often achieved by using high-resolution cameras which are usually costly and unaffordable in many of industrial scenarios. A novel visual servoing control scheme which generates robot control signal based on the fusion of visual feedback and robot motion feedback was presented in the paper. By doing so, the robot control loop runs at a frequency independent to the visual feedback frequency (i.e. the frame rate of a camera). Therefore, it becomes feasible to achieve precise and dynamic servoing even with a low frame rate and low-cost camera. The new visual servoing scheme was introduced briefly. The feasibility of the scheme as well as its performances in low frame rate conditions was also illustrated experimentally.

Key words: visual servoing, industry robot, dynamic object tracking

1 引言

国际机器人联合会(international federation of robotics, IFR)的研究报告^[1]指出, 自动化生产在全球范围内高速增长, 且日益呈现出小批量、多批次、混合生产的特点。这就要求工业机器人的自动化解决方案具有更高的生产柔性, 以适应更复杂的产品多样性, 且能在更短的时间内完成生产调试,

从而快速实现产品切换。基于传感信息的机器人伺服控制技术, 特别是视觉伺服技术, 即是提升生产柔性的重要手段。一般来说, 视觉伺服技术可以分为两大类^[2], 即基于位置的视觉伺服(PBVS)^[3]和基于图像的视觉伺服(IPVS)^[4-5]。两者的伺服控制的参考目标都可以由示教^[3-5]或预定义^[6-7]的方式获得。参考文献[8]详细阐述了基于位置和基于图像的两大类视觉伺服技术, 该文献还对由示教和预

定义方式获取参考目标的方法做了详尽的比较分析。综合各类文献可以发现,当前视觉伺服的研究关注点集中在系统的稳定性^[9-10]、系统对于标定误差的顽健性^[11-12],以及系统的动态性能^[13]等方面。除此之外,当视觉伺服系统应用于实际生产过程中时,系统的响应时间也是评估技术可行性的重要指标。

近年来,很多研究将视觉伺服技术用于抓取快速移动的物体,系统的响应速度之快,甚至可以用于抓取飞行中的物体^[14-15]。一般整个控制系统包括一套多相机运动捕捉系统、一个即时运动观测器,以及一个即时运动重规划控制器。然而,在实际工业场景中,一方面工业机器人很少需要处理极端快速的运动物体,而另一方面,由于系统采用了多台高速相机,其成本之高也是一般工业用户难以接受的。受成本的控制,一般工业用户更青睐帧率和分辨率较低、成本也相对较低的相机。在这种条件下,如何利用低成本相机实现快速精准地跟踪抓取移动中的物体,以便将视觉伺服技术用于一般工业场景,自然成为需要解决的现实问题。

针对这一问题,本文提出了一种新的视觉伺服控制方法,使得工业机器人只需搭配较低帧率相机,即能完成高动态物体的跟踪。该方法的特点在于视觉伺服所需的反馈信号不仅仅来自相机采集的图像信息,而且还融合了机器人的实时运动信息。借助 ABB EGM (external guided motion) 模块,将新的伺服控制方法部署在一台 ABB IRB 1200 工业机器人上。通过动态物体跟踪实验,基本验证了该方法的可行性,进一步的测试表明,该方法可以使机器人在各种相机帧率下都能实现较高精度的实时追踪。

2 控制器架构

2.1 整体架构

视觉伺服单元由相机、图像处理器、机器人控制器以及视觉伺服控制器构成,如图1所示。固定在机器人末端执行器上的相机用于捕捉工作空间内的视觉信息。图像处理器负责处理相机传来的图像流,从而计算得出目标物体相对于相机的位置。机器人控制器除负责机器人运动控制之外,还通过 EGM 接口,与视觉伺服控制器按 UDP (用户数据报协议) 进行通信。视觉伺服控制器一方面通过 EGM 接收机器人的运动信息,另一方面也接收图

像处理器得出的目标位置数据,并根据两者的融合,计算所需的机器人运动控制信号,通过 EGM 接口送给机器人控制器,由后者控制机器人完成运动指令。

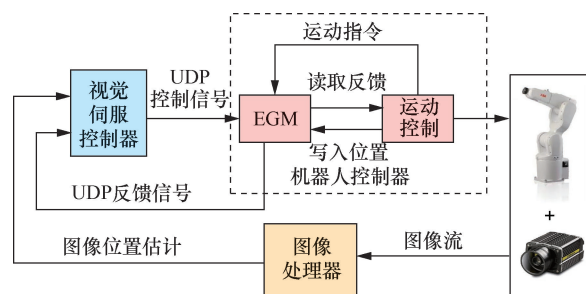


图1 控制系统整体架构

本文所提出的视觉伺服控制架构有别于文献[2-4]中的常规控制架构。在常规的控制架构中,伺服控制器通常仅仅基于视觉传感器的反馈信息来计算机器人的运动控制信号,所以机器人的运动控制频率不得受限于图像传感器的帧率。因此,使用低帧率相机进行视觉伺服就必然导致较大的时延,从而无法跟踪高动态的运动物体。而本文所提出的视觉伺服控制架构,在控制闭环中额外引入了机器人运动信息,与原有的视觉反馈得到的位置信息融合之后,再计算所需的机器人运动控制信号。这样,机器人的控制频率就仅受限于机器人运动信息的反馈频率。在本文中即等于 EGM 的反馈频率 (250 Hz),这远远高于一般低成本工业相机的帧率 (16~60 Hz)。由于机器人控制频率与相机帧率无关,那么低帧率相机也可以用来跟踪高动态的运动物体。

2.2 EGM 接口

EGM 接口用于由外部设备来产生机器人参考目标位置的场合,机器人会运动到由 EGM 接口输入的指定位置。EGM 接口旨在给高阶用户提供一个底层的机器人控制接口,从而可以绕开常规的机器人运动规划程序,实现高动态响应的机器人运动。EGM 接口可以高速读写机器人运动系统中的机器人位置信息,周期仅为 4 ms,根据机器人信号的不同,可能会有 10~20 ms 的控制时延。运动的参考目标可以由机器人的关节角度指定,也可以由定义在任何一个在 EGM 运动模式下保持静止的工件坐标系上的机器人末端位姿指定^[16]。

图1中也包含 EGM 的架构。在 ABB 机器人控制器中,运动控制模块每 4 ms 调用一次 EGM,触

发 EGM 中的两个任务。其中之一从运动控制模块中读取反馈数据，并通过 UDP 发送给外部控制器。另一个任务从 UDP 序列中查询外部控制器的信息。如果存在，那么 EGM 将会读取这条信息，并将位置和速度数据写入运动控制模块。如果 UDP 序列中不存在相关信息，那么运动控制模块继续使用上一周期中 EGM 写入的位置和速度数据。在视觉伺服控制中，位置和速度数据也是以 4 ms 为周期发送的，与运动控制模块调用 EGM 的周期相同。EGM 的输入数据可以是机器人的六关节数据，也可以是六自由度的姿态数据，即三自由度直角坐标位置 (x, y, z) 和三自由度欧拉角 (rx, ry, rz) 。

2.3 图像处理

在视觉伺服控制中，图像处理器将相机捕捉到的图像信息转换为相机坐标系中的位置信息。这个过程包含两个子过程：特征定位和坐标计算。前者在图像中搜寻目标物体的特征；后者根据该特征在图像中的尺寸和位置，计算目标物体在相机坐标系中的坐标。这两个过程都是相对成熟的技术，原理方法、应用实施等均已在诸多文献中论及，本文不再赘述。

得出目标物体的坐标之后，图像处理器会将其作为视觉反馈信号传送给视觉伺服控制器。如前所述，本文所提出的视觉控制架构对生成和发送视觉反馈信号的速率没有过高的要求。图像处理器不必像 EGM 反馈一样每 4 ms 向视觉伺服控制器发送视觉反馈信号。得益于此，较低的图像处理速率（如 16~200 Hz），也是可接受的。甚至丢失图像流中的某些帧，也不会影响视觉伺服控制的效果。这样，就大大降低了对相机和图像处理器的要求；成本也相应地降低了。

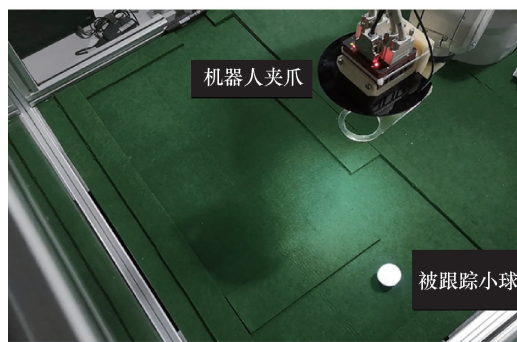
3 视觉伺服跟踪实验

为了验证所提出方法的有效性，本文实施了两组实验，分别是动态运动物体跟踪实验和低帧率条件下的伺服性能测试实验。两组实验均利用一台搭载 EGM 的 ABB IRB 1200 工业机器人进行。该机器人末端执行器上安装有一台帧率为 200 Hz 的高速相机。该相机可以通过设置采样频率主动降低帧率的方式，模拟低帧率相机的特性。机器人和高速相机均与一台普通计算机相连，本文所提出的视觉伺服控制方法即部署在这台计算机上。

3.1 动态物体跟踪实验

3.1.1 实验设置

该实验用以展示所提出的视觉伺服控制方法对于一个动态运动物体的跟踪能力。实验设置如图 2 所示，图 2（a）中白色圆球为跟踪的目标物体。它是一个由操作者通过手机或平板电脑遥控的球形机器人，能在平面上向任意方向滚动。实验中球形机器人的运动完全由操作者遥控，是 IRB 1200 无法预知的。在实验过程中，IRB 1200 机器人首先在距离目标运动平面 200 mm 的高度等待。当目标进入机器人视野后，机器人一边跟踪目标一边降低至距离运动平面 10 mm 高处，并伺机进行抓取。需要说明的是，为了验证所提出视觉伺服方法的可行性，该实验中相机的帧率仍为 200 Hz，并未设置为较低帧率。低帧率条件的性能测试将在下节进行。



(a) 实验平台顶部视角



(b) 2018年上海国际工业博览会上演示

图2 随机运动物体跟踪实验设置及现场演示

3.1.2 实验结果

实验结果表明，所提出的视觉伺服方法能成功地实现机器人对于任意运动目标的跟踪。图 3 截取了跟踪过程中 3 种典型的目标运动轨迹下机器人的跟踪结果。

由于基于图像的目标速度估计具有较大的测量噪声，因此图 3 将机器人在跟踪过程中的速度作

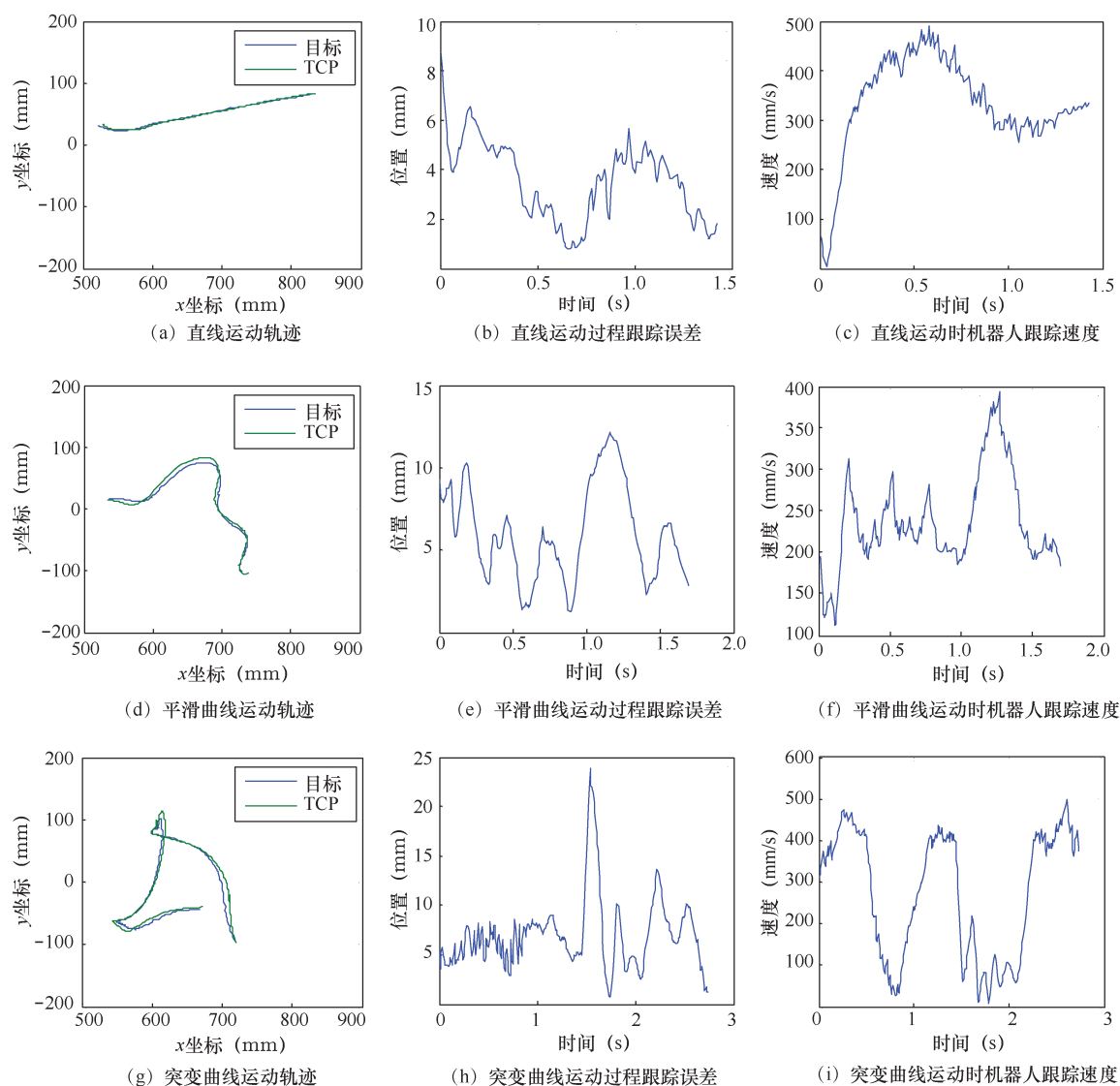


图3 随机运动物体跟踪实验结果

为目标运动速度的一个参考数据给出。第一条轨迹中物体沿着一条直线运动，最大运动速度为 483 mm/s，产生的跟踪误差均值为 3.1 mm。第二条物体运动轨迹为一条平滑曲线，具有 380 mm/s 的最大速度，产生的跟踪误差均值为 5.2 mm。第三条物体运动轨迹为一个带有速度突变的曲线，在该状态下，产生的跟踪误差均值为 6.5 mm。由实验结果可以看到，系统对随机运动的物体能够进行有效的跟踪，但是物体运动速度的突然变化，会产生较大的跟踪误差。当物体恢复平稳的运动以后，控制器才能够有效地跟踪物体并进行抓取。

3.2 低帧率条件下的伺服性能测试实验

3.2.1 实验装置

在该实验中，人为地将相机帧率降低至 16 Hz，

并定量测试了所提出的视觉伺服方法在高帧率和低帧率条件下的跟踪性能，实验设置如图 4 所示。机器人的配置与 3.1 节中一致，均为搭载 EGM 的 ABB IRB 1200，相机安装在其末端执行器上。机器人需要跟踪一个放置在二维运动平台上、以设定速度和轨迹运动的物体。由于本文不关注视觉算法的测试和验证，因此均选用具有简单特征的物体作为跟踪目标。在该部分实验中，目标物体是一个如图 3 左上角所示的正方形的物块，该物块上有 3 个圆形特征用以进行视觉定位。

该实验包括两组测试，一组是对静态物体的跟踪性能测试，另一组是对运动物体的跟踪性能测试。在静态物体跟踪测试中，机器人在距离物体 180 mm 高度的平面进行搜索，检测到目标物体以后，就迅速

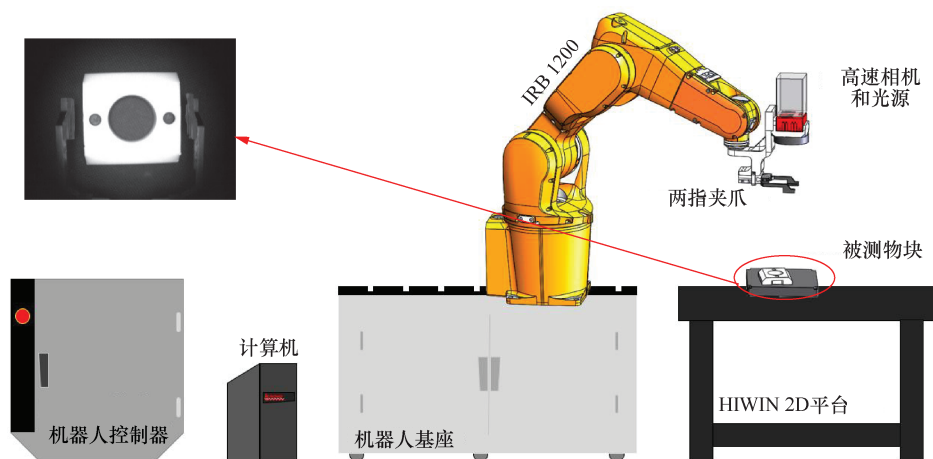


图 4 伺服性能测试实验平台

移动并靠近物体进行抓取。该测试比较了传统方法与本文所提出的方法在不同相机帧率下收敛速度以及收敛误差的大小。在动态物体跟踪测试中,目标物体沿着一条半径为 100 mm 的圆形轨迹,按照设定的线速度运动。机器人需要通过视觉伺服对该运动物体进行跟踪,跟踪性能通过比较不同相机帧率和不同速度下的误差大小来评估。需要再次指明的是,在测试中,高速相机始终用作感知模块,低

帧率条件是通过人为降低高速相机的帧率来实现的。这样可以避免频繁更换相机所引起的安装、标定等误差。

3.2.2 实验结果

(1) 静态跟踪结果

静态跟踪实验中,非 EGM 视觉伺服的结果如图 5 和图 6 所示。图像数据每秒钟采样 200 次,之后图像处理器将图像信息转换为位置偏差,以 200 Hz

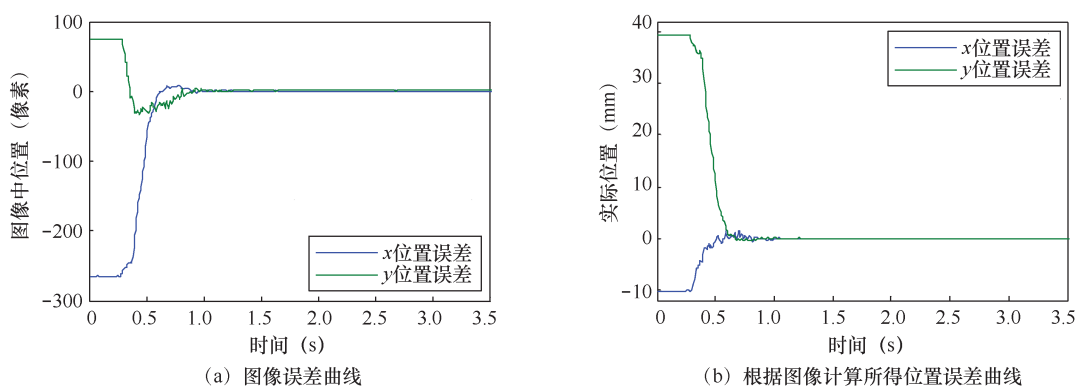


图 5 非 EGM 视觉伺服在 200 Hz 图像帧率下的控制结果

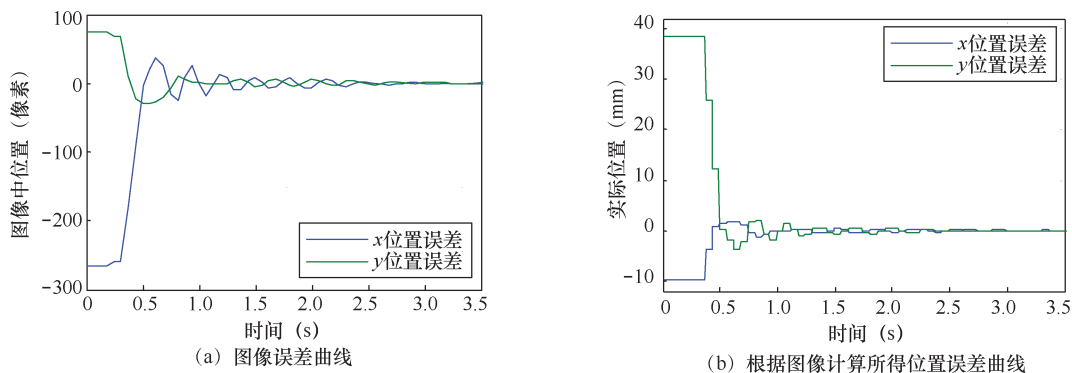


图 6 非 EGM 视觉伺服在 16 Hz 图像帧率下的控制结果

或者 16 Hz 的频率传递给视觉伺服控制器。由实验结果可以看到, 当图像帧率降低以后, 在跟踪过程中将产生更大的超调和震荡。最大超调为 4.1 mm, 并且在开始运动 2 s 后才停止震荡。

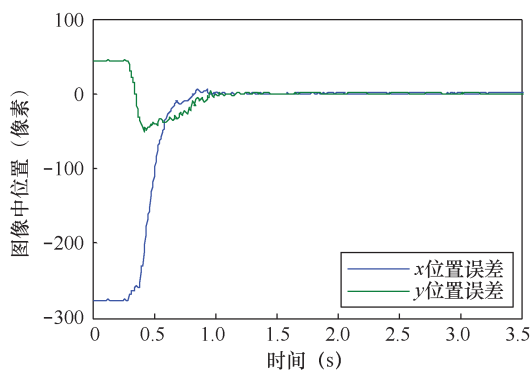
本文所提出的基于 EGM 的视觉伺服的结果如图 7 和图 8 所示。由实验结果可以看到, 在 200 Hz 的图像帧率下, 非 EGM 视觉伺服方法和基于 EGM 的方法的性能差异不大。而在低帧率下, 基于 EGM 的视觉伺服方法具有更好的性能。这是由于该方法通过 EGM 的反馈信号以及图像信息共同计算了目标的实际位置, 作为机器人的运动目标。这样, 即使相机的帧率降低, 机器人依然可以通过 EGM 的反馈信息保持运动控制的频率。这个特性大大降低了机器人末端的震荡, 超调也降低到了 0.91 mm。

(2) 动态跟踪结果

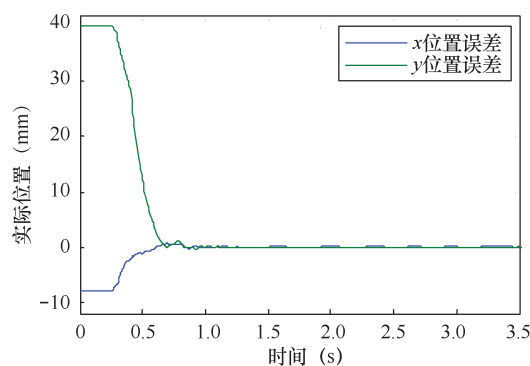
图 9 展示了两种视觉伺服方法在跟踪一个以 100 mm/s 的速度沿半径为 100 mm 的圆进行圆周运动的物体时的跟踪结果。从图中可以看到, 非 EGM 方法在高帧率时能够对物体进行跟踪, 但是会有一

定的跟踪误差波动。然而当帧率下降到 16 Hz 时, 非 EGM 方法会产生较大的跟踪误差从而导致剧烈的震荡。与之相比, 本文所提出的视觉伺服方法无论在高帧率还是低帧率情况下, 都能够实现更好的跟踪性能。这正是由于该方法不断根据 EGM 的反馈信息以及图像信息对物体运动进行了估计, 以此提高了对于动态物体跟踪的性能。

此外, 本文进一步测试了不同帧率不同物体运动速度的组合下, 所提出方法的跟踪性能, 并将结果记录在表 1 中。由于物体沿着一个半径为 100 mm 的圆进行圆周运动, 因此更高的运动速度意味着物体有更高的加速度。表 1 中记录了不同加速度下, 跟踪误差波动的峰峰值。通过表 1 可以看到, 更大的加速度会导致更大的误差波动, 但是本文所提出的视觉伺服方法对于相机帧率的变化依然有较好的适应能力, 在不同帧率下依然能够保持近似的跟踪性能。这表明, 在实际运用中, 可以使用低帧率的相机进行视觉伺服以降低相机成本。

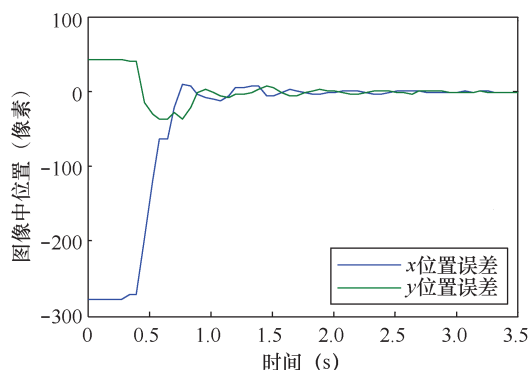


(a) 图像误差曲线

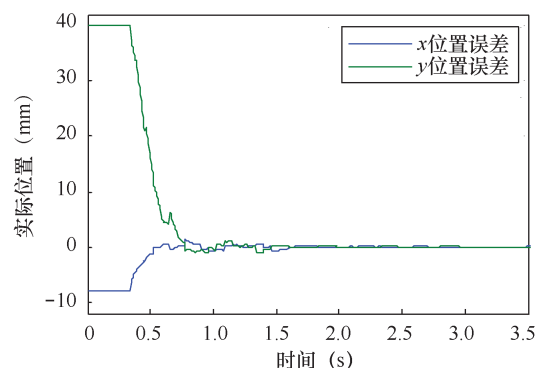


(b) 根据图像计算所得位置误差曲线

图 7 基于 EGM 视觉伺服在 200 Hz 图像帧率下的控制结果



(a) 图像误差曲线



(b) 根据图像计算所得位置误差曲线

图 8 基于 EGM 视觉伺服在 16 Hz 图像帧率下的控制结果

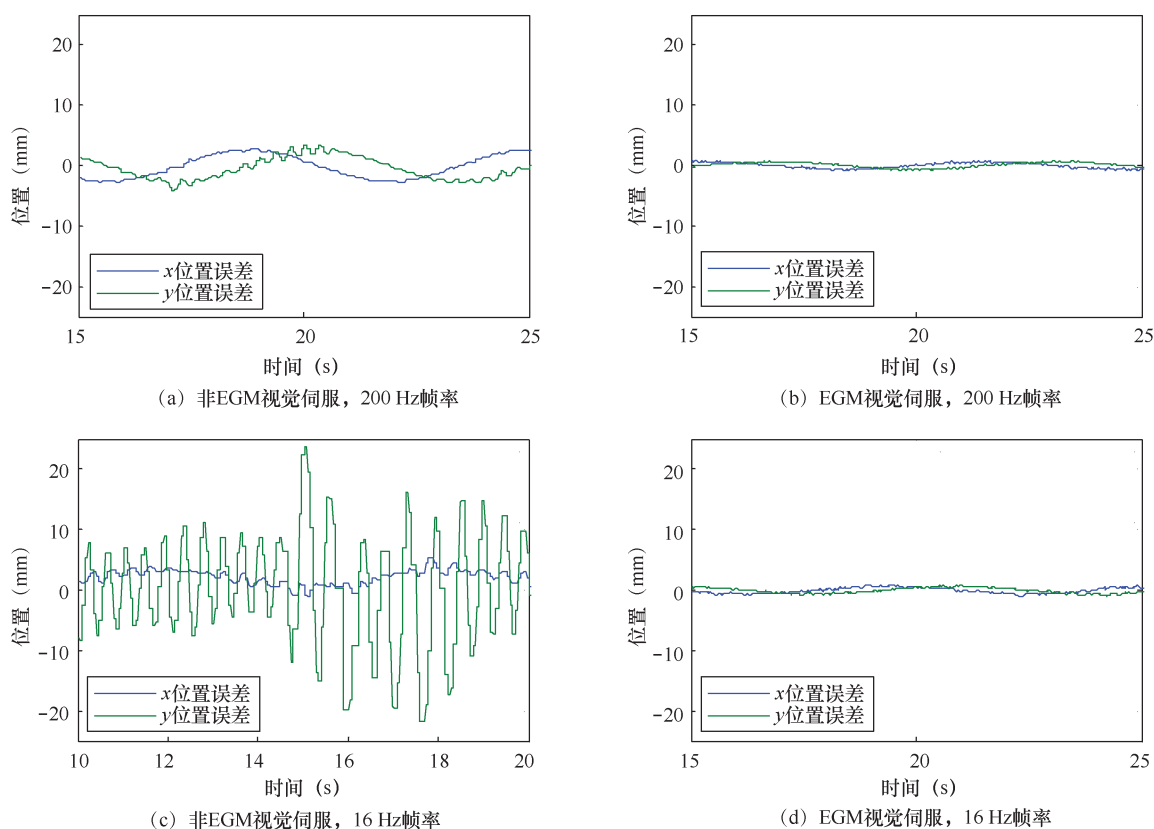


图9 对圆周运动物体稳定状态下的跟踪误差曲线

表1 对不同速度的运动物体的跟踪误差峰值 (mm)

相机帧率 (Hz)	运动物体的速度 (mm/s)			
	20	50	100	150
16	0.44	0.73	1.47	1.70
21	0.45	0.92	1.20	1.73
33	0.64	0.53	1.05	1.73
62	0.32	0.58	0.81	1.55
85	0.22	0.41	0.88	1.24
100	0.31	0.43	0.72	1.21
210	0.28	0.35	0.69	1.16

4 结束语

本文提出了一种新的视觉伺服控制方法。相对于传统方法,本文所提出的方法通过融合机器人运动的反馈信息和图像信息,提高了视觉伺服的控制频率,使其与相机帧率无关,从而提高了低帧率条件下伺服控制系统的精度和稳定性。实验表明,该视觉伺服控制方法能使机器人对一个任意运动的球体进行有效跟踪。进一步的性能测试实验表明,在应用本文所提出的视觉伺服控制方法的情况下,

即使相机帧率低至 16 Hz, 机器人仍能对运动中的物体进行动态跟踪和抓取, 且跟踪误差与相机帧率为 200 Hz 时相当。

视觉伺服是一项能够提升生产柔性的重要技术, 但传统视觉伺服控制方法所需的高帧率相机成本普遍较高, 制约了视觉伺服在一般工业场景中的应用。本文所提出的视觉伺服控制方法, 只需使用一般低帧率相机, 即可实现与传统高帧率相机相当的伺服性能, 从而降低了视觉伺服的使用成本, 为视觉伺服在更多工业场景中的应用铺平了道路。

参考文献:

- [1] IFR Statistical Department. World Robotics 2018 Industrial Robots[R]. 2018.
- [2] WEISS L E, SANDERSON A C, NEUMAN C P. Dynamic sensor based control of robots with visual feedback[J]. IEEE J. Robot. Autom., 1987, RA-3(5): 404-417.
- [3] WILSON W J, W HULLS C C, BELL G S. Relative end-effector control using Cartesian position-based visual servoing[J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1996, 12(5): 684-696.
- [4] ESPIAU B, CHAUMETTE F, RIVES P. A new approach to visual servoing in robotics[J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1992, 8(3): 313-326.
- [5] HASHIMOTO K, KIMOTO T, EBINE T, et al. Manipulator control

- with image-based visual servo[C]//in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom. Sacramento, CA, 1991: 2267-2271.
- [6] DENG L, WILSON W J, JANABI-SHARIFI F. Characteristics of robot visual servoing methods and target model estimation[C]//in Proc. IEEE Int. Symp. Intell. Control, Vancouver, BC, Canada, 2002: 684-689.
- [7] DENG L, JANABI-SHARIFI F, WILSON W J. Stability and robustness of visual servoing methods[C]//in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Washington DC, 2002: 1604-1609.
- [8] KELLY R. Robust asymptotically stable visual servoing of planar robots[J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1996, 12(5): 759-766.
- [9] KELLY R, CARELLI R, NASISI O, et al. Stable visual servoing of camera-in-hand robotic systems[J]. IEEE/ASME Trans. Mechatronics, 2000, 5(1): 39-48.
- [10] ESPIAU B. Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics[C]//in Experimental Robotics III: The 3rd Int. Symp. on Experimental Robotics, YOSHIKAWA T and MIYAZAKI F, Eds. New York: Springer-Verlag, Lecture Notes in Control and Information Sciences, 1993.
- [11] MALIS E, MEZOUAR Y, RIVES P. Robustness of image-based visual servoing with a calibrated camera in the presence of uncertainties in the three-dimensional structure[J]. IEEE Trans. Robot., 2010, 26(1): 112-120.
- [12] MAREY M, CHAUMETTE F. Analysis of classical and new visual servoing control laws[C]//in Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom., Pasadena, CA, 2008: 3244-3249.
- [13] JANABI-SHARIFI F, DENG L, WILSON W J. Comparison of basic visual servoing methods[J]. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2011, 16(5): 967-983.
- [14] KIM S, SHUKLA A, BILLARD A. Catching objects in flight[J]. IEEE Trans. Robot., 2014, 30(5): 1049-1065.
- [15] SALEHIAN M, KHORAMSHAHI M, BILLARD A. A dynamical system approach for softly catching a flying object: theory and experiment[J]. IEEE Trans. Robot., 2016, 32(2): 462-471.
- [16] Application Manual Controller software IRC5[S]. 2005.

[作者简介]



毛翊超(1989—)，男，浙江杭州人，ABB中国研究院机电系统与机器人自动化部研究员，主要研究方向为机器人控制、视觉伺服控制、智能制造等。



陆麒(1981—)，男，上海人，博士，现任ABB中国研究院机电系统与机器人自动化部主任研究员，主要研究方向工业机器人建模与仿真、机器人应用、智能制造等。