

文章编号: 1672-2892(2010)05-0598-05

基于图像的移动机器人视觉伺服

杨少平, 孔庆生, 陈 雄

(复旦大学 电子工程系, 上海 200433)

摘 要: 为了更简便地将基于图像的视觉伺服运用于移动机器人, 避免采用近似线性输入输出反馈控制模型中近似与假设的情况, 提出了 3 种使用极线几何与三角几何相结合的方法, 此类方法不需要预先知道三维场景的结构知识。实验仿真结果证明了该方法的有效性。

关键词: 基于图像的视觉伺服; 移动机器人; 极线几何

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

Image-based visual servoing for mobile robots

YANG Shao-ping, KONG Qing-sheng, CHEN Xiong

(Department of Electronics, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: To achieve Image-Based Visual Servoing (IBVS) for mobile robots more easily, and avoid using an approximate input-output linear feedback which has many assumptions, three methods combining epipolar geometry with triangle geometry were proposed. The proposed approaches did not need any knowledge of 3-D scene geometry. Simulation results validate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: Image-Based Visual Servoing; mobile robot; epipolar geometry

20 世纪 60 年代, 由于机器人和计算机技术的发展, 人们开始研究具有视觉功能的机器人。在过去几年, 视觉技术因用于控制移动机器人而被广泛研究。基于视觉的伺服策略是采用相机所观察的特征来控制机器人移动的一种灵活有效的方法。视觉伺服主要分为 3 种: 基于位置的视觉伺服(Position-Based Visual Servo, PBVS)^[1-2]、基于图像的视觉伺服(IBVS)^[3-4]和混合控制视觉伺服^[5-6]。早期的研究主要是基于位置的视觉伺服研究, 近年来主要是 IBVS 研究。以往的研究多采用近似线性输入输出反馈控制模型^[4], 但此模型需要多处近似处理, 为此本文提出了运用极线几何与三角几何相结合的方法, 有效克服了过多近似的情况, 更简便地实现了机器人由初始位置到达理想位置的目标。本文提出了 IBVS 方法使移动机器人到达目标位置, 这是通过针孔相机预先获得 1 幅目标图像来实现的。不同于 PBVS, 在 IBVS 中, 控制目标与控制法都是直接在图像特征参数空间表示^[7]。1 幅图像特征参数是 1 个实值量, 它能够由 1 个或多个图像特征(点、线、运动等)求得。因此, IBVS 不需要预先获得被观察场景的三维结构知识。此外, IBVS 对机器人模型的不确定性和干扰比基于位置的视觉伺服的鲁棒性更强^[7-8]。

1 针孔摄像机极线几何知识

双目立体视觉是基于视差原理, 由多幅图像获取物体三维几何信息的方法。在机器视觉系统中, 双目立体视觉一般由双摄像机从不同角度同时获取周围景物的两幅数字图像, 或由单摄像机在不同时刻从不同角度获取周围景物的 2 幅数字图像, 并基于视差原理即可恢复出物体三维几何信息, 重建周围景物的三维形状与位置^[9]。

极线几何讨论的是 2 个相机图像平面的关系, 它不仅在双目立体视觉中 2 幅图像的对应点匹配有着重要作用, 而且在三维重建和运动分析中也具有广泛的应用。

在基于图像的视觉伺服中将利用单相机在不同时刻从不同角度所获取的图像, 并由这些图像所形成的极线几何的特征来引导机器人运动。以下将介绍相机模型与多视角几何的基础知识, 具体细节可参考文献[10-11]。

参考图 1, O_c 为相机中心, $\{O_c, x_c, y_c, z_c\}$ 为相应的相机坐标, $\{O_w, x_w, y_w, z_w\}$ 为世界坐标, $\{O_i, u, v\}$ 为相机的图像坐标。世界坐标下的空间点 P 与其在图像平面的投影 p 的关系可由式(1)表示:

$$p = K[R \ t]P \quad (1)$$

式中 R 和 t 为相机外部参数(分别为关于世界坐标与相机坐标之间的旋转矩阵与平移矩阵)。 K 为相机内部参数矩阵:

$$K = \begin{bmatrix} fk_u & fk_v \cot \phi & u_0 \\ 0 & \frac{fk_v}{\sin \phi} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: f 表示焦距; k_u 和 k_v 表示在图像坐标中单位距离的像素数量; ϕ 是图像轴 u 与 v 之间的夹角; (u_0, v_0) 为图像坐标中心点的位置(单位像素)。假设相机内部参数经过 1 个预校准阶段。不失一般性, 假设 $\phi = \pi/2, u_0 = v_0 = 0, k_u = k_v = 1$, 则矩阵 K 可表示为:

$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

考虑 2 个相异的相机结构 $\{O_{ca}, x_{ca}, y_{ca}, z_{ca}\}$ 与 $\{O_{cd}, x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}\}$ 分别为对同一三维点 P 的实际视角与目标视角。不失一般性, 假设目标视角与世界坐标一致 ($\{O_{cd}, x_{cd}, y_{cd}, z_{cd}\} \equiv \{O_w, x_w, y_w, z_w\}$)。

图 2 中, 线段 $O_{ca}O_{cd}$ (基线)与 2 幅图像平面的 2 个交点 $e_a = [e_{au} \ e_{av} \ 1]^T$ 和 $e_d = [e_{du} \ e_{dv} \ 1]^T$ 称作极点。极点由对应的图像平面的齐次坐标表示。显然, 极点与图像平面沿着基线的运动无关。2 个平面的相对方向能够由极点处得知。空间点 P 与两相机光心构成的平面为极平面。极平面与图像平面的交线称为极线, 即图像平面中经过 e_a, p_a 两点的直线和经过 e_d, p_d 两点的直线。

极点的值能够由目标视角与实际视角相比较直接计算而得到。一种通常的方法是使用基本矩阵, 它是极线几何中的一个重要工具。 $F = K^{-T}[t]_xRK^{-1}$, 其中 $[t]_x$ 为对应平移向量 t 的 3×3 斜对称矩阵。考虑至少 8 个一般对应点, F 能被计算出且只相差 1 个常数因子, 但不需要所观察环境的三维结构知识^[12]。极点 e_a, e_d 可由下式分别得出:

$$Fe_a = 0 \quad F^T e_d = 0 \quad (4)$$

2 视觉伺服问题

在基于图像的移动机器人视觉伺服问题中, 需要预先在目标位置获取一组图像数据, 然后与初始位置获取的图像进行匹配, 从而找出一组相关特征点, 在此假设图像已经匹配好, 特征点已找到, 本文提出的方法在于运用已找到的特征点, 使用极线几何与三角几何的知识控制机器人运动, 使之到达目标位置。

2.1 直线型视觉伺服

在直线形视觉伺服问题中, 采用 3 步可以实现, 图 3 即机器人运动示意图:

1) 在初始位置旋转机器人, 使机器人指向目标位置。由一组特征点在相机平面的投影即可求得基本矩阵^[5], 再由式(4)可求得相机在初始位置与目标位置的极点。

从图 2 极线几何模型中可知, 相机旋转角度 $\theta = \arctan \frac{|e_{au}|}{f}$ (f 为焦距, e_{au} 为相机在实际位置时极点在图像平面 u 轴上的值)。

2) 朝目标位置移动, 当极平面中角 $\angle O_{ca}PO_{cd}$ 为零时, 机器人移动到了目标位置。由图 2 极线几何模型可知:

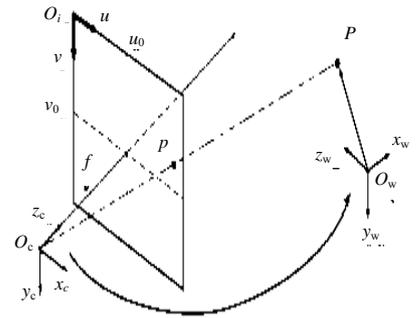


Fig.1 Pinhole camera projection model
图 1 三维点在针孔相机中的射影模型

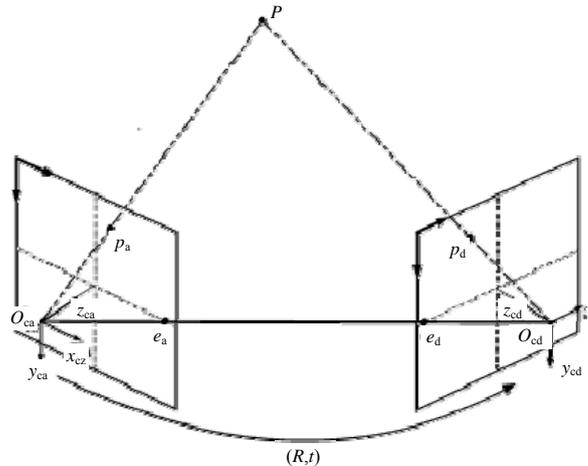


Fig.2 Basic epipolar geometry setup defined by two different views
图 2 相机两视角构成的极线几何模型

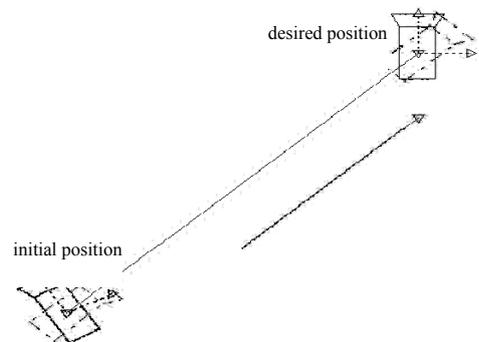


Fig.3 Visual servoing schematic diagram of linear motion
图 3 直线形视觉伺服示意图

$$p_a O_{ca} = \sqrt{f^2 + p_{au}^2 + p_{av}^2}$$

$$O_{ca} e_a = \sqrt{f^2 + e_{au}^2}$$

$$p_a e_a = \sqrt{p_{av}^2 + (|e_{au}| - |p_{au}|)^2}$$

$$\text{由此 } \angle p_a O_{ca} e_a = \arccos \frac{f^2 + |e_{au}| |p_{au}|}{\sqrt{f^2 + p_{au}^2 + p_{av}^2} \sqrt{f^2 + e_{au}^2}}$$

$$\text{同理 } \angle p_d O_{cd} e_d = \arccos \frac{f^2 + |e_{du}| |p_{du}|}{\sqrt{f^2 + p_{du}^2 + p_{dv}^2} \sqrt{f^2 + e_{du}^2}}$$

所以 $\angle O_{ca} P O_{cd} = \pi - \angle p_a O_{ca} e_a - \angle p_d O_{cd} e_d$, p_{au}, p_{av} 分别为空间点 P 的实际视角投影点 p_a 在图像平面 u 和 v 轴上的坐标, p_{du}, p_{dv} 分别为空间点 P 的目标视角投影点 p_d 在图像平面 u 和 v 轴上的坐标。

c) 机器人旋转角度 $\theta' = \arctan \frac{|e_{du}|}{f}$ (f 为焦距, e_{du} 为相机在目标位置时极点在图像平面 u 轴上的值), 完成任务。

2.2 下三角形视觉伺服

在下三角形视觉伺服问题中, 可以采用 3 步来解决, 图 4 即移动机器人在此情况下的运动示意图:

1) 旋转机器人, 使机器人在初始位置与目标位置的极点坐标相同, 此时机器人在初始位置与目标位置有相同的方向。

2) 首先使机器人旋转 90° , 然后移动机器人, 使机器人在实际位置的极点坐标为无穷大, 而目标位置的极点值为零。

3) 首先使机器人旋转 90° , 然后用直线形相同的方法移动机器人, 使 $\angle O_{ca} P O_{cd}$ 为零, 此时机器人到达目标位置。

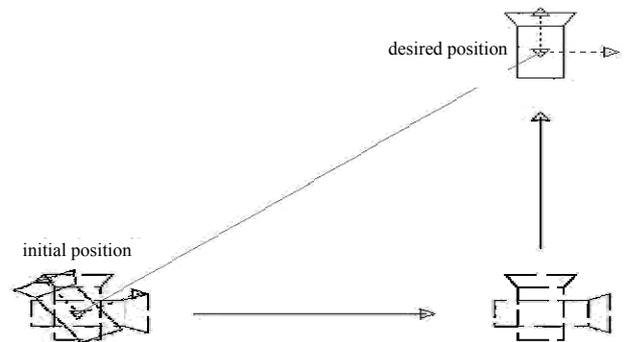


Fig.4 Visual servoing schematic diagram of lower-triangular motion

图 4 下三角形视觉伺服示意图

2.3 上三角形视觉伺服

在上三角视觉伺服问题中, 也同样采用三步法使移动机器人到达目标位置, 图 5 即为上三角视觉伺服移动机器人运动示意图:

1) 旋转机器人使机器人在初始位置与目标位置的极点相同, 此时机器人在初始位置与目标位置有相同方向。

2) 移动机器人使相机在实际位置与目标位置的极点均为无穷大, 并使机器人旋转 90° , 从而使机器人朝向目标位置。

3) 同直线形方法, 使角 $\angle O_{ca} P O_{cd}$ 为零, 并使机器人旋转 90° , 此时机器人到达目标位置。

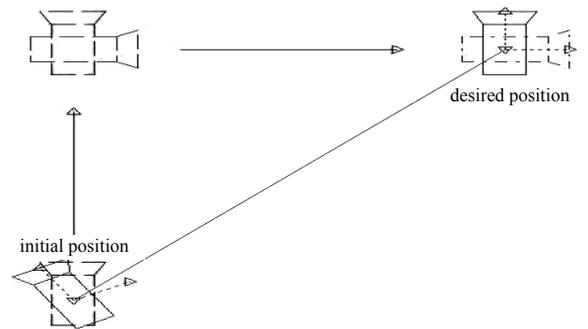


Fig.5 Visual servoing schematic diagram of upper-triangular motion

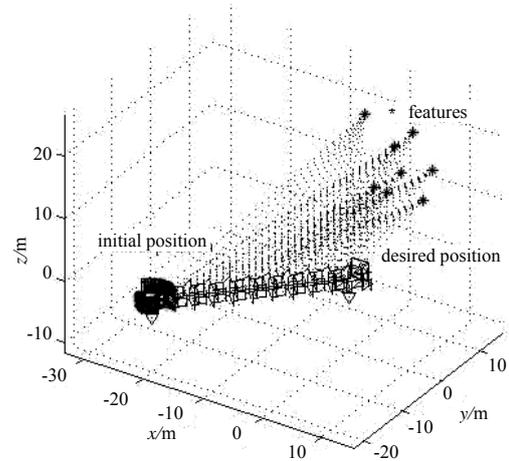
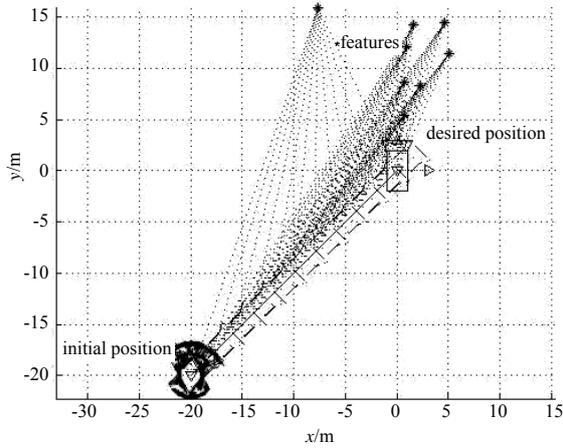
图 5 上三角形视觉伺服示意图

3 实验仿真

使用极线几何工具箱(Epipolar Geometry Toolbox)在 Matlab 中实现机器人视觉伺服控制算法的仿真。图 6 为直线形视觉伺服的仿真结果, 图 7 为下三角形视觉伺服仿真结果, 图 8 为上三角形视觉伺服仿真结果。

4 结论

文中提出 3 种方法均能解决基于图像的移动机器人视觉伺服问题, 这 3 种方法的优点在于无需像运用近似线性输入输出控制模型那样需要许多近似的假设^[6]。近似线性输入输出控制模型中, 当对初始位置与目标位置间距离的估计差别很大时将产生错误的运动轨迹, 而本文的方法因为不需要考虑距离的估计, 故没有此缺点。

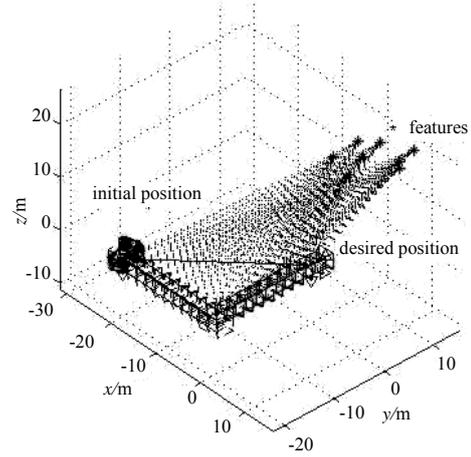
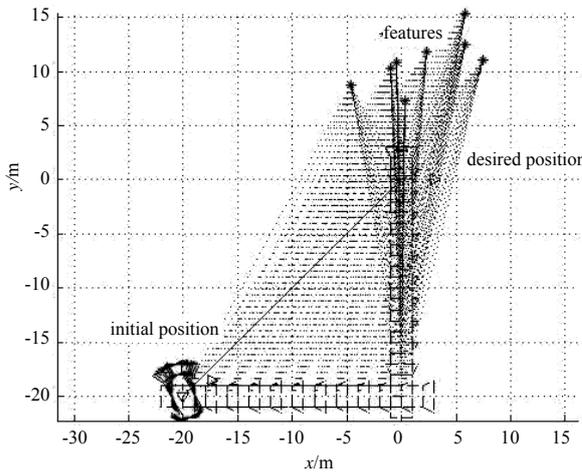


(a) plane trajectory of linear motion

(b) 3-D trajectory of linear motion

Fig.6 Visual servoing simulation of linear motion

图 6 直线形视觉伺服仿真结果

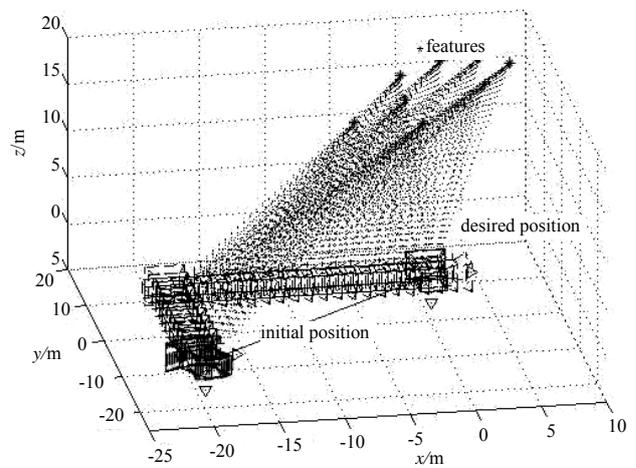
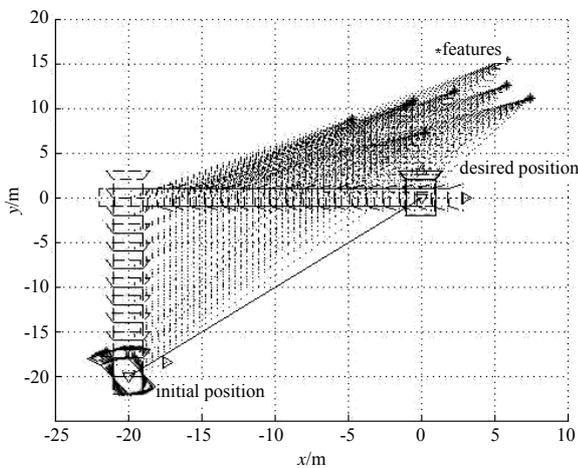


(a) plane trajectory of lower-triangular motion

(b) 3-D trajectory of lower-triangular motion

Fig.7 Visual servoing simulation of lower-triangular motion

图 7 下三角形视觉伺服仿真结果



(a) plane trajectory of upper-triangular motion

(b) 3-D trajectory of upper-triangular motion

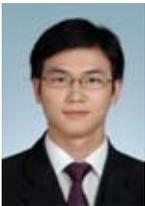
Fig.8 Visual servoing simulation of upper-triangular motion

图 8 上三角形视觉伺服仿真结果

参考文献:

- [1] Lippiello V, Siciliano B. Position-Based Visual Servoing in Industrial Multirobot Cells Using a Hybrid Camera Configuration[J]. IEEE Trans. Robot, 2007, 23(1):73-86.
- [2] Shademan A, Sharifi F J. Sensitivity Analysis of EKF and Iterated EKF Pose Estimation for Position-Based Visual Servoing[C]// Proc. IEEE Conf. on Control Applications. Toronto:[s.n.], 2005:755-760.
- [3] Mariottini G L, Alunno E, Piazzi J. Epipole-based Visual Servoing with Central Catadioptric Camera[C]// Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation. Barcelona:[s.n.], 2005:3515-3521.
- [4] Mariottini G L, Oriolo G, Prattichizzo D. Image-based visual servoing for nonholonomic mobile robots using epipolar geometry[J]. IEEE Trans. Robot, 2007, 23(1):87-100.
- [5] Malis E, Chaumette F. 2-1/2-D visual servoing with respect to unknown objects through a new estimation scheme of camera displacement[J]. Int. J. Comput. Vis., 2000, 37(1):79-87.
- [6] Abdelkader H H, Mezouar Y, Andreff N, et al. 2 1/2 D visual servoing with central catadioptric cameras[C]// IEEE/RSJ International Conference. LASMEA, Aubiere, France:[s.n.], 2005:3572-3577.
- [7] Hutchinson S A, Hager G D, Corke P I. A tutorial on visual servo control[J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 1996, 12(5):651-670.
- [8] Espiau B. Effect of camera calibration errors on visual servoing in robotics[C]// Proc. 3rd Int. Symp. Exp. Robot. London, UK:Springer-Verlag, 1993:182-192.
- [9] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2005.
- [10] Hartley R, Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision[M]. Cambridge, UK:Cambridge Univ. Press, 2000.
- [11] Ma Y, Soatto S, Kořecká J, et al. An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models[M]. New York:Springer, 2003.
- [12] Hartley R. In defence of the 8-point algorithm[C]// Proc. IEEE Int. Conf. Comput. Vis.. Cambridge, MA, USA:[s.n.], 1995:1064-1070.

作者简介:



杨少平(1984-), 男, 江西省丰城市人, 在读硕士研究生, 研究方向为基于图像的视觉伺服、机器人导航. email:plahaohao@yahoo.com.cn.

孔庆生(1961-), 男, 上海市人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电子系统设计、过程控制、机器人导航等.

陈雄(1964-), 男, 上海市人, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为智能控制理论与系统、多机器人系统、移动机器人控制与运动规划、传感器网络等.