

直线特征的交互矩阵求取

徐德¹ 卢金燕¹

摘 要 直线特征在视觉跟踪、视觉伺服中具有重要作用,但目前的直线交互矩阵的求取受到制约,需要已知含有直线的平面在摄像机坐标系中的方程参数.为摆脱含有直线的平面参数的约束,本文利用两点的极坐标推导出直线的交互矩阵,并给出直线交互矩阵求取方法.经分析得知,对于与摄像机光轴接近垂直的直线,其在成像平面上的角度变化主要受摄像机姿态变化的影响,对摄像机的位置变化不敏感.对于与摄像机光轴平行的直线,其在成像平面上的角度变化受摄像机旋转以及垂直于光轴平移的影响较大.实验结果验证了本文方法的有效性.

关键词 交互矩阵, 直线特征, 视觉伺服, 视觉跟踪, 视觉控制

引用格式 徐德, 卢金燕. 直线特征的交互矩阵求取. 自动化学报, 2015, 41(10): 1762–1771

DOI 10.16383/j.aas.2015.c150097

Determination for Interactive Matrix of Line Feature

XU De¹ LU Jin-Yan¹

Abstract Line features are very important for visual tracking and visual servoing. However, determination of the interactive matrix of line feature is possible only if the parameters of the plane containing the line are known in the camera's coordinates. In this paper, the interactive matrix of line feature is derived with two points' polar coordinates in order to avoid the parameters requirement for the plane containing the line. Then determination for interactive matrix of line feature is presented. Analysis of the interactive matrix shows that the angle's variation of line feature is mainly influenced by the orientation's variation of the camera and insensitive to translations of camera if the line is almost perpendicular to the camera's optical axis. The angle's variation of line feature for the line parallel to the optical axis is apparently influenced by the camera's translations vertical to the optical axis and rotations. Experimental results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words Interactive matrix, line feature, visual servoing, visual tracking, visual control

Citation Xu De, Lu Jin-Yan. Determination for interactive matrix of line feature. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(10): 1762–1771

点、边缘、直线特征是机器人视觉跟踪、视觉伺服中的常用特征^[1–2]. 文献 [3] 和文献 [4] 分别采用 Eye-in-hand 和 Eye-to-hand 视觉系统, 利用点特征及其交互矩阵, 在对点特征的深度进行估计的基础上, 在机器人的关节空间进行视觉伺服控制. 与点特征相比, 边缘特征具有形状约束, 在特征提取时可以有更好的鲁棒性, 在增强现实和视觉伺服等应用中受到重视^[5–9]. 例如, 文献 [5] 提出了一种基于目标模型的位姿估计方法, 利用图像中目标的纹理和边缘的点特征, 结合点的交互矩阵估计目标的位姿变化, 实现视觉跟踪. 文献 [6] 利用航母上的边缘特征, 通过与航母模型匹配估计航母与飞机之间的姿

态. 文献 [7] 跟踪目标边缘点的法向量, 利用目标的 CAD 模型中的可见边缘与图像中的目标边缘进行匹配, 将运动估计问题转化为几何问题, 使得视觉跟踪问题成为优化问题. 文献 [8] 将几何信息和颜色信息相结合, 对基于几何信息和基于颜色边缘的特征分别赋以不同的权重, 利用交互矩阵将基于几何信息和基于颜色边缘的估计结合在一起. 基于几何信息部分, 结合目标的 CAD 模型, 利用边缘点到模型可见边缘投影直线的距离估计位姿偏差. 基于颜色边缘部分, 利用目标与背景的颜色分界曲线上的点沿法线方向到模型边缘的距离估计位姿偏差. 文献 [9] 利用点特征和点到边缘的距离特征, 估计摄像机的位姿, 实现目标跟踪. 上述基于模型的方法需要已知目标的模型, 其应用受到较大的限制. 与边缘相比, 直线具有更强的约束, 直线的提取更加鲁棒和准确. 因此, 基于直线特征的视觉伺服方法对于提高伺服控制的鲁棒性具有很大的潜力, 许多研究人员致力于基于直线的视觉跟踪或视觉伺服^[10–17]. Espiau 等对点、直线、椭圆等分别推导了交互矩阵, 其中直

收稿日期 2015-03-02 录用日期 2015-07-07
Manuscript received March 2, 2015; accepted July 7, 2015
国家自然科学基金 (61227804, 61421004) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61227804, 61421004)
本文责任编辑 徐昕
Recommended by Associate Editor XU Xin
1. 中国科学院自动化研究所精密感知与控制研究中心 北京 100190
1. Research Center of Precision Sensing and Control, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

线的交互矩阵需要用到含有直线的平面在摄像机坐标系中的方程参数^[10]. Comport 等基于文献 [10] 的直线交互矩阵, 推导了点到直线距离特征的交互矩阵, 用于在增强现实中对目标进行跟踪^[11-12]. Mills 等假设电力线为一组平行线, 利用直线的交互矩阵与直线特征, 估计固定翼无人机与平行线之间的位姿, 用于实现固定翼无人机的电力线巡线^[13]. 由于含有直线的平面在摄像机坐标系中的方程不易获得, 所以上述直线交互矩阵的应用受到很大制约. 为了避免受到上述直线交互矩阵求取的制约, 研究人员提出了一些利用直线特征的新方法. 例如, Xie 等提出了平行直线的矩特征并给出了其交互矩阵, 用于实现旋翼直升机对电力线的巡线^[14]. Coutard 等利用平行直线的消失点坐标与角度作为特征, 推导出了平行线的角度交互矩阵, 利用上述特征和交互矩阵估计飞机与航母飞行甲板之间的相对位姿^[15]. 上述基于平行线的方法是基于直线特征视觉跟踪的特例, 不具有普遍性. 文献 [16] 采用立体视觉, 利用直线特征实现了姿态与位置的解耦控制. Liu 等采用 Eye-in-hand 视觉系统, 利用两点之间的距离、两条直线的角度、区域中心、面积作为特征, 在进行深度估计的基础上, 在机器人的关节空间实现视觉伺服控制^[17-19]. 从这些利用直线特征的新方法可以发现, 这些方法增加了对直线的新约束, 其普适性受到影响.

本文脱离含有直线的平面在摄像机坐标系中的方程参数的约束, 利用两个点的极坐标推导直线的交互矩阵, 并给出直线交互矩阵的求取方法.

1 特征的交互矩阵

1.1 特征点的交互矩阵

点的交互矩阵描述笛卡儿空间位姿变化与图像空间特征点变化的关系. 假设摄像机镜头畸变很小, 可以忽略不计, 摄像机的内参数采用小孔模型. 对于摄像机坐标系中的点 (x_c, y_c, z_c) , 焦距归一化成像平面上的成像点坐标为 $(x_{1c}, y_{1c}, 1)$.

$$\begin{cases} x_{1c} = \frac{x_c}{z_c} \\ y_{1c} = \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (1)$$

将式 (1) 对时间求导数, 改写为矩阵形式

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1c} \\ \dot{y}_{1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{z_c} & 0 & \frac{-x_{1c}}{z_c} \\ 0 & \frac{1}{z_c} & \frac{-y_{1c}}{z_c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{z}_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式 (2) 为特征点在笛卡儿空间的平移运动速度与投影到成像平面空间的运动速度之间的关系. 摄

像机的运动会导致 3-D 点在摄像机坐标系中的运动. 3-D 点在摄像机坐标系中的运动速度与摄像机在笛卡儿空间运动速度之间的关系为

$$\begin{cases} \dot{x}_c = -v_{cax} - \omega_{cay}z_c + \omega_{caz}y_c \\ \dot{y}_c = -v_{cay} - \omega_{caz}x_c + \omega_{cax}z_c \\ \dot{z}_c = -v_{caz} - \omega_{cax}y_c + \omega_{cay}x_c \end{cases} \quad (3)$$

式中, $X_c = [x_c, y_c, z_c]^T$ 是 3-D 点的位置向量, $v_{ca} = [v_{cax}, v_{cay}, v_{caz}]^T$ 是摄像机的线速度向量, $\omega_{ca} = [\omega_{cax}, \omega_{cay}, \omega_{caz}]^T$ 是摄像机的角速度向量.

将式 (3) 代入式 (2), 并应用式 (1), 有

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{1c} \\ \dot{y}_{1c} \end{bmatrix} = L_p \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, L_p 为点特征的交互矩阵

$$L_p = \begin{bmatrix} -\frac{1}{z_c} & 0 & \frac{x_{1c}}{z_c} & x_{1c}y_{1c} & -(1+x_{1c}^2) & y_{1c} \\ 0 & -\frac{1}{z_c} & \frac{y_{1c}}{z_c} & (1+y_{1c}^2) & -x_{1c}y_{1c} & -x_{1c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

在矩阵 L_p 中, 计算 x_{1c} 和 y_{1c} 时, 涉及摄像机的内参数. z_c 的值是该点相对于摄像机坐标系的深度. 因此, 采用如上形式交互矩阵的任何控制方案必须估计或近似给出 z_c 的值.

1.2 特征直线的交互矩阵

文献 [10] 和文献 [11] 给出的特征直线交互矩阵见式 (6):

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_\rho \cos \theta & \lambda_\rho \sin \theta & -\lambda_\rho \rho & (1+\rho^2) \sin \theta \\ \lambda_\theta \cos \theta & \lambda_\theta \sin \theta & -\lambda_\theta \rho & -\rho \cos \theta \\ & & -(1+\rho^2) \cos \theta & 0 \\ & & -\rho \sin \theta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, θ 和 ρ 为直线在成像平面内的极坐标参数, 见图 1; λ_θ 和 λ_ρ 为系数:

$$\begin{aligned} \lambda_\theta &= \frac{a_2 \sin \theta - b_2 \cos \theta}{d_2} \\ \lambda_\rho &= \frac{a_2 \rho \cos \theta + b_2 \rho \sin \theta + c_2}{d_2} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, a_2, b_2, c_2 和 d_2 是含有直线的平面在摄像机坐标系中的方程参数, 满足 $a_2x_c + b_2y_c + c_2z_c + d_2 = 0$, 不易获得.

为了摆脱需要已知平面方程参数的制约, 下面基于点特征推导直线的交互矩阵. 在焦距归一化成像平面的直线可表达为极坐标参数方程形式, 即

$$x_{1c} \cos \theta + y_{1c} \sin \theta = \rho \quad (8)$$

式中, θ 和 ρ 为直线在成像平面内的极坐标参数, 见图 1.

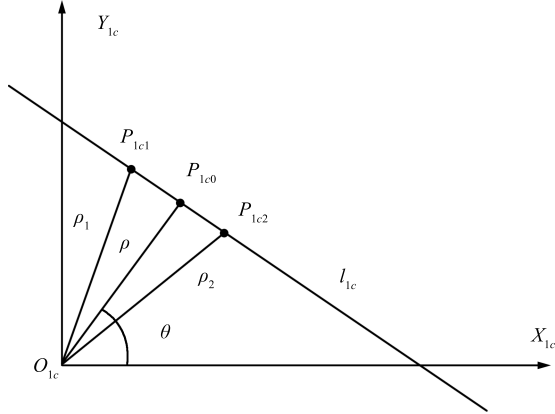


图 1 直线在焦距归一化成像平面的投影

Fig. 1 The projection of a line on the imaging plane with normalized focal length

如图 1 所示, 成像平面坐标系建立在焦距归一化成像平面上, 其原点 O_{1c} 为摄像机坐标系的 Z_c 轴与焦距归一化成像平面的交点, 其 X_{1c} 轴与摄像机坐标系的 X_c 轴平行, 其 Y_{1c} 轴与摄像机坐标系的 Y_c 轴平行. 对于与 Z_{1c} 轴不平行的特征直线, 其在焦距归一化成像平面的投影为 l_{1c} , 原点 O_{1c} 到直线 l_{1c} 的垂线为 $O_{1c}P_{1c0}$. $O_{1c}P_{1c0}$ 的长度为直线 l_{1c} 的参数 ρ , $O_{1c}P_{1c0}$ 与 x_{1c} 轴的夹角为直线 l_{1c} 的参数 θ . O_{1c} 为 Z_{1c} 轴的投影, P_{1c0} 为特征直线上点 P_0 的投影. 因此, 对于与 Z_{1c} 轴不平行的直线, 根据特征直线上点 P_0 以及附近点的变化, 可以得到特征直线参数的变化.

假设特征直线上点 P_0 在摄像机坐标系中的坐标为 (x_{c0}, y_{c0}, z_{c0}) , P_{1c0} 在摄像机坐标系中的坐标为 $(x_{1c0}, y_{1c0}, 1)$. P_{1c0} 点的极坐标参数 ρ_0, θ_0 与 x_{1c0}, y_{1c0} 的关系为

$$\rho_0 = \sqrt{x_{1c0}^2 + y_{1c0}^2}, \theta_0 = \arctan \frac{y_{1c0}}{x_{1c0}} \quad (9)$$

将式 (9) 对时间求导, 有

$$\begin{aligned} \dot{\rho}_0 &= \frac{x_{1c0}\dot{x}_{1c0} + y_{1c0}\dot{y}_{1c0}}{\rho_0} \\ \dot{\theta}_0 &= \frac{x_{1c0}\dot{y}_{1c0} - y_{1c0}\dot{x}_{1c0}}{\rho_0^2} \end{aligned} \quad (10)$$

将式 (4) 代入式 (10), 并利用 $\rho_0 \cos \theta$ 代替 x_{1c0} , 利用 $\rho_0 \sin \theta$ 代替 y_{1c0} , 得到式 (11).

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho}_0 \\ \dot{\theta}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \theta_0}{z_{c0}} & -\frac{\sin \theta_0}{z_{c0}} & \frac{\rho_0}{z_{c0}} & (1 + \rho_0^2) \sin \theta_0 \\ \frac{\sin \theta_0}{\rho_0 z_{c0}} & -\frac{\cos \theta_0}{\rho_0 z_{c0}} & 0 & \frac{\cos \theta_0}{\rho_0} \\ -(1 + \rho_0^2) \cos \theta_0 & 0 & \frac{\sin \theta_0}{\rho_0} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (11)$$

在 P_{1c0} 点附近沿投影直线 l_{1c} 对称设定两个点 P_{1c1} 和 P_{1c2} , 其对应的极坐标参数为 ρ_1, θ_1 和 ρ_2, θ_2 , 使之满足如下关系:

$$\begin{cases} \theta_1 = \theta + \Delta\theta \\ \theta_2 = \theta - \Delta\theta \\ \rho_1 = \rho_2 \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\Delta\theta$ 是角度增量, 是一个接近于 0 的正数.

由图 1 可以发现, 当摄像机运动时, 如果 $\Delta\theta$ 接近于 0, 则 ρ_0, ρ_1 和 ρ_2 的变化量比较接近. 因此, 可以采用 ρ_0 的变化率近似表示直线参数 ρ 的变化率. 即使 θ_0 不变, 但 ρ_1 和 ρ_2 的变化可以导致直线方向的变化, 即导致参数 θ 的变化. 例如, 当 θ_0 不变而 ρ_1 增加 ρ_2 减小时, θ 变小. 因此, 不能采用 θ_0 的变化率代替直线参数 θ 的变化率. 将用极坐标表示的 P_{1c1} 和 P_{1c2} 代入式 (8) 直线方程, 则

$$\begin{cases} \rho_1 \cos \theta_1 \cos \theta + \rho_1 \sin \theta_1 \sin \theta = \rho \\ \rho_2 \cos \theta_2 \cos \theta + \rho_2 \sin \theta_2 \sin \theta = \rho \end{cases} \quad (13)$$

由式 (13), 推导出利用 P_{1c1} 和 P_{1c2} 的极坐标表示的直线参数 θ :

$$\theta = \arctan \frac{\rho_1 \cos \theta_1 - \rho_2 \cos \theta_2}{\rho_2 \sin \theta_2 - \rho_1 \sin \theta_1} \quad (14)$$

将式 (14) 对时间求导数, 然后将式 (12) 代入求导后的表达式化简, 得:

$$\dot{\theta} = \frac{1}{2\rho_1}(\dot{\rho}_2 - \dot{\rho}_1) \cot \Delta\theta + \frac{1}{2}(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \quad (15)$$

将式 (11) 对应于 P_{1c1} 和 P_{1c2} 的极坐标参数变化率代入式 (15), 得到式 (16).

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} L_{\theta vx} & L_{\theta vy} & \frac{1}{2z_{c2}} - \frac{1}{2z_{c1}} & -\rho_1 \cos \theta \\ -\rho_1 \sin \theta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (16)$$

式中, z_{c1} 和 z_{c2} 是对应于 P_{1c1} 和 P_{1c2} 的 z_c 坐标.

$$\begin{cases} L_{\theta vx} = \frac{1}{2\rho_1} \left(\frac{\cos \theta_1}{z_{c1}} - \frac{\cos \theta_2}{z_{c2}} \right) \cot \Delta\theta + \\ \quad \frac{1}{2\rho_1} \left(\frac{\sin \theta_2}{z_{c2}} + \frac{\sin \theta_1}{z_{c1}} \right) \\ L_{\theta vy} = \frac{1}{2\rho_1} \left(\frac{\sin \theta_1}{z_{c1}} - \frac{\sin \theta_2}{z_{c2}} \right) \cot \Delta\theta - \\ \quad \frac{1}{2\rho_1} \left(\frac{\cos \theta_1}{z_{c1}} + \frac{\cos \theta_2}{z_{c2}} \right) \end{cases} \quad (17)$$

结合式 (11) 和式 (16), 得到直线的交互矩阵, 见式 (18). 对于垂直于摄像机光轴的直线, $z_{c1} = z_{c2}$. 将 $z_{c1} = z_{c2}$ 代入式 (17), 得到 $L_{\theta vx} = 0$, $L_{\theta vy} = 0$. 此时, 式 (16) 改写为式 (19).

$$\begin{bmatrix} \dot{\rho} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\cos \theta}{z_{c0}} & -\frac{\sin \theta}{z_{c0}} & \frac{\rho}{z_{c0}} & (1 + \rho^2) \sin \theta \\ L_{\theta vx} & L_{\theta vy} & \frac{1}{2z_{c2}} - \frac{1}{2z_{c1}} & -\rho_1 \cos \theta \\ & & -(1 + \rho^2) \cos \theta & 0 \\ & & -\rho_1 \sin \theta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (18)$$

式 (18) 交互矩阵求取涉及的 z_{c0} , z_{c1} 和 z_{c2} , 可以随着摄像机的运动进行在线估计. 但式 (19) 交互矩阵与深度无关, 而且与平移无关. 利用图像中直线参数 ρ 和 θ 计算出式 (19) 交互矩阵后, 可以用于姿态控制.

$$\dot{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -\rho \cos \theta & -\rho \sin \theta & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (19)$$

对于平行于摄像机光轴的直线, 其在焦距归一化平面上的投影为过原点 O_{1c} 的直线, 如图 2 中的 l_{1c} 所示. 此时, 直线上任意一点 P_{1ci} 的极坐标的 θ_i 都与直线的参数 θ 相等, 即 $\theta = \theta_i$. 因直线过原点, 故 $\rho = 0$.

对于平行于摄像机光轴的直线, 假设直线与光轴之间的距离为 d . 对于直线上任意一点 P_{1ci} , $\rho_i = d/z_{ci}$ 成立, z_{ci} 是 P_{1ci} 的 Z_c 轴坐标. 将其代入式 (11), 得到直线参数 θ 的交互矩阵:

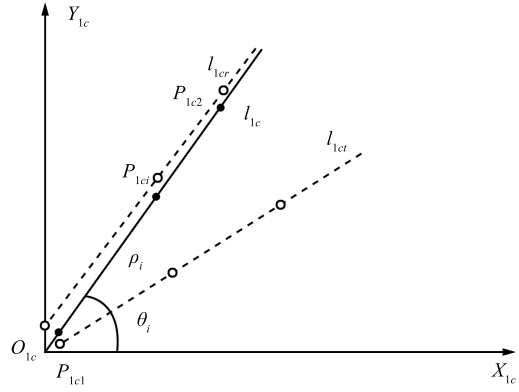


图 2 平行于 Z_{1c} 轴的直线在焦距归一化成像平面的投影 (P_{1c1} 是远离摄像机的点, P_{1c2} 是靠近摄像机的点)

Fig. 2 The projection of the line parallel with Z_{1c} axis on the imaging plane with normalized focal length (P_{1c1} is a point away from the camera, P_{1c2} is a point near to the camera.)

$\dot{\theta} =$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sin \theta_i}{d} & -\frac{\cos \theta_i}{d} & 0 & \frac{\cos \theta_i}{\rho_i} & \frac{\sin \theta_i}{\rho_i} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ca} \\ \omega_{ca} \end{bmatrix} \quad (20)$$

式中, θ_i , ρ_i 为点 P_{1ci} 的极坐标.

由式 (20) 可知, 当摄像机只沿 X_c , Y_c 轴平移运动时, 投影直线 l_{1c} 上所有点的 θ 会发生相同变化, 表现为 l_{1c} 绕 Z_{1c} 轴旋转. 例如, 当摄像机沿 Y_c 轴正向平移运动时, 图 2 中的投影直线 l_{1c} 变为投影直线 l_{1ct} , 点 P_{1ci} 的极坐标 ρ_i 变小, 角度 θ_i 变小. 当摄像机只沿 Z_c 轴平移运动时, 投影直线参数 θ 不变. 当摄像机只绕 X_c 或 Y_c 轴旋转运动时, 因投影直线上不同点的 ρ_i 不同, 其对应的 θ_i 以不同的速度发生变化. 如图 2 所示, 当摄像机只绕 X_c 轴正向旋转运动时, 直线上靠近摄像机的点 P_{1c2} 的 ρ_2 较大, 其参数 θ_2 以较低的速度变大; 直线上远离摄像机的点 P_{1c1} 的 ρ_1 较小, 其参数 θ_1 以较高的速度变大, 投影直线 l_{1c} 变为投影直线 l_{1cr} . 当摄像机只绕 Z_c 轴旋转运动时, 投影直线 l_{1c} 绕 Z_{1c} 轴旋转, 其旋转方向与摄像机的旋转方向相反, 其旋转速度与摄像机的旋转速度相同.

平行于摄像机光轴的直线, 一旦摄像机绕 X_c 或 Y_c 轴旋转运动, 将变成不平行于摄像机光轴的直线. 然后, 其交互矩阵符合式 (18). 在直线与摄像机光轴接近垂直时, $z_{c1} \approx z_{c2} \approx z_{c0}$, 此时式 (16) 可用式 (19) 近似, 可以近似认为直线参数 θ 的变化只由摄像机的旋转运动产生, 从而实现旋转运动独立于平移运动的测量. 因此, 合理选择目标上的直线特征, 有望在基于图像的视觉伺服中实现姿态调整的分

在应用中,应充分利用先验知识,对直线特征是否垂直光轴或平行光轴做出判断.此外,如图2所示,平行于光轴的直线,其一个端点处于成像坐标系原点.

2 实验与结果

基于 Motoman 机器人实验平台,针对直线与摄像机光轴接近垂直和不垂直的情况,进行了式(19)所示直线角度交互矩阵的验证实验.一方面,利用机器人的运动量和角度交互矩阵计算直线的角度变化量,与视觉检测出的直线角度变化量进行对比.另一方面,利用视觉检测出的直线角度变化量和角度交互矩阵计算摄像机的旋转运动量,与摄像机的实际旋转运动量进行对比.

实验用 Motoman 机器人的重复定位精度为 0.07 mm,平移运动精度为 0.1 mm,旋转运动精度为 0.01°.

首先,对摄像机的内外参数进行了预先标定,结果如下:内参数矩阵:

$$\begin{bmatrix} 1898.20 & 0 & 799.65 \\ 0 & 1908.09 & 627.19 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

外参数矩阵(位置单位 mm):

$$\begin{bmatrix} -0.8707 & -0.4836 & -0.0325 & 189.7469 \\ 0.4922 & -0.8699 & -0.0093 & 345.3072 \\ -0.0264 & -0.0350 & 0.9991 & 30.8856 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

畸变系数:

$$\begin{bmatrix} -0.095107 & 0.190043 & 0.001094 & 0.001151 \end{bmatrix}$$

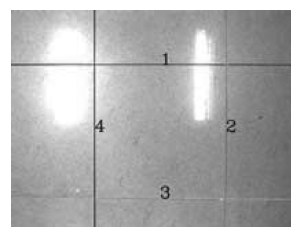
2.1 实验 1

实验 1 为直线近似垂直于摄像机光轴时的验证实验.调整摄像机姿态使摄像机光轴与地板近似垂直,采集目标图像.以此时的摄像机位姿作为基准位姿,控制摄像机分别沿 X_c , Y_c , Z_c 轴做 50 mm 平移运动和绕 X_c , Y_c , Z_c 轴做 3° 旋转运动,采集相应的图像.利用 Canny 算子提取出地板砖的边缘点,再利用 Hough 变换提取出特征直线.共采集了 13 幅图像,图 3 给出了获得的部分图像以及提取出的直线特征.

利用直线上任意两点可以计算其参数 ρ 和 θ .为方便计算,实验中利用 4 条直线的交点分别计算其在焦距归一化成像平面的坐标,如式(21)所示.

$$\begin{bmatrix} x_{1ci} \\ y_{1ci} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & u_0 \\ 0 & k_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中, (x_{1ci}, y_{1ci}) 是第 i 个交点在在焦距归一化成像平面上的坐标, (u_i, v_i) 是第 i 个交点的图像坐标, (u_0, v_0) 是主点的图像坐标, k_x 和 k_y 是成像平面到图像平面的放大系数.



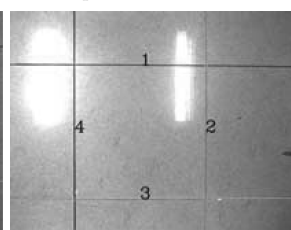
(a) 初始位姿

(a) Image at initial pose



(b) 绕 X_c 旋转

(b) Rotation around X_c



(c) 绕 Y_c 旋转

(c) Rotation around Y_c



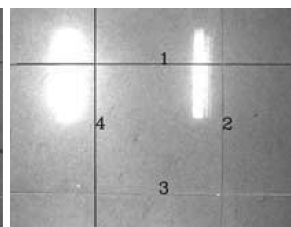
(d) 绕 Z_c 旋转

(d) Rotation around Z_c



(e) 沿 X_c 平移

(e) Translation along X_c



(f) 沿 Y_c 平移

(f) Translation along Y_c

图 3 摄像机运动后的图像与直线特征

Fig. 3 The images and line features after the camera moves

获得 4 个交点在焦距归一化成像平面的坐标后,分别利用相邻两个点求取一条直线的方程,得到在焦距归一化成像平面上的 4 条直线的方程.对于焦

距归一化成像平面上的第 j 条直线, 求取过成像坐标系原点的垂线方程, 得到第 j 条直线与其垂线的交点即垂点的坐标. 将垂点的坐标转化为极坐标, 得到第 j 条直线的参数 ρ_j 和 θ_j .

表 1 给出了在摄像机运动后 4 条直线在焦距归一化成像平面的直线的参数 ρ_j 和 θ_j . 摄像机运动后直线的参数 θ_{ji} 减去初始状态下直线的参数 ρ_{j0} , 得到参数 θ_j 的变化量作为实际值. 利用摄像机的运动量, 根据式 (19) 计算出的参数 θ_j 的变化量作为计算值. 表 2 和图 4 给出了 4 条直线的角度参数变化量.

由表 2 和图 4 可以发现, 式 (19) 计算出的结果与实际值吻合.

以直线角度的变化量作为已知量, 结合直线的角度交互矩阵, 可以估计出摄像机的旋转运动. 由式 (19), 得:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{1i} \\ \Delta\theta_{2i} \\ \Delta\theta_{3i} \\ \Delta\theta_{4i} \end{bmatrix} = L_\theta \begin{bmatrix} \Delta\theta_{xi} \\ \Delta\theta_{yi} \\ \Delta\theta_{zi} \end{bmatrix} \quad (22)$$

表 1 直线的参数 ρ 和 θ

Table 1 Lines' parameters ρ and θ

序号	直线 1		直线 2		直线 3		直线 4		运动
	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	
0	0.1735	-89.92	0.2145	0.54	0.2131	90.38	0.1754	-179.95	初始位置
1	0.1203	-90.02	0.2125	-0.19	0.2688	90.34	0.1773	-179.50	绕 X_c 旋转 3°
2	0.2295	-90.11	0.2128	1.03	0.1583	90.26	0.1759	179.33	绕 X_c 旋转 -3°
3	0.1744	-89.55	0.1575	0.40	0.2125	89.67	0.2326	179.99	绕 Y_c 旋转 3°
4	0.1740	-90.47	0.2687	0.52	0.2126	90.94	0.1229	179.98	绕 Y_c 旋转 -3°
5	0.1729	-93.01	0.2128	2.64	0.2142	87.32	0.1768	176.97	绕 Z_c 旋转 3°
6	0.1757	-87.02	0.2123	3.43	0.2117	93.22	0.1774	177.04	绕 Z_c 旋转 -3°
7	0.1745	-90.12	0.1799	0.35	0.2129	90.25	0.2088	179.96	沿 X_c 平移 50 mm
8	0.1744	-90.045	0.2455	0.54	0.2130	90.31	0.1450	-179.99	沿 X_c 平移 -50 mm
9	0.2069	-90.00	0.2124	0.44	0.1810	90.30	0.1772	179.99	沿 Y_c 平移 50 mm
10	0.1419	-89.98	0.2128	0.38	0.2451	90.30	0.1773	179.95	沿 Y_c 平移 -50 mm
11	0.1805	-90.04	0.2189	0.43	0.2200	90.34	0.1838	179.93	沿 Z_c 平移 50 mm
12	0.1691	-90.05	0.2067	0.44	0.2061	90.29	0.1708	-179.99	沿 Z_c 平移 -50 mm

表 2 直线参数 θ 的变化量 ($^\circ$)

Table 2 The variations of line parameter θ ($^\circ$)

序号	计算值				实际值				偏差				运动
	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	
1	-0.00	-0.64	0.00	0.53	-0.10	-0.72	-0.04	0.45	0.01	0.08	0.04	0.07	绕 X_c 旋转 3°
2	0.00	0.64	-0.00	-0.53	-0.19	0.49	-0.12	-0.72	0.19	0.15	0.11	0.19	绕 X_c 旋转 -3°
3	0.52	-0.01	-0.64	0.00	0.37	-0.14	-0.71	-0.06	0.15	0.13	0.07	0.06	绕 Y_c 旋转 3°
4	-0.52	0.01	0.64	-0.00	-0.54	-0.02	0.56	-0.06	0.02	0.03	0.08	0.06	绕 Y_c 旋转 -3°
5	-3.00	-3.00	-3.00	-3.00	-3.09	-3.17	-3.06	-3.08	0.09	0.17	0.06	0.08	绕 Z_c 旋转 3°
6	3.00	3.00	3.00	3.00	2.90	2.89	2.84	2.91	0.10	0.11	0.16	0.09	绕 Z_c 旋转 -3°
7	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.20	-0.19	-0.12	-0.09	0.20	0.19	0.12	0.09	沿 X_c 平移 50 mm
8	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.12	0.00	-0.07	-0.04	0.12	0.00	0.07	0.04	沿 X_c 平移 -50 mm
9	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.07	-0.10	-0.08	-0.06	0.07	0.10	0.08	0.06	沿 Y_c 平移 50 mm
10	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.06	-0.16	-0.08	-0.10	0.06	0.16	0.08	0.10	沿 Y_c 平移 -50 mm
11	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.11	-0.11	-0.04	-0.12	0.11	0.11	0.04	0.12	沿 Z_c 平移 50 mm
12	0.00	0.00	0.00	0.00	-0.13	-0.10	-0.09	-0.03	0.13	0.10	0.09	0.03	沿 Z_c 平移 -50 mm

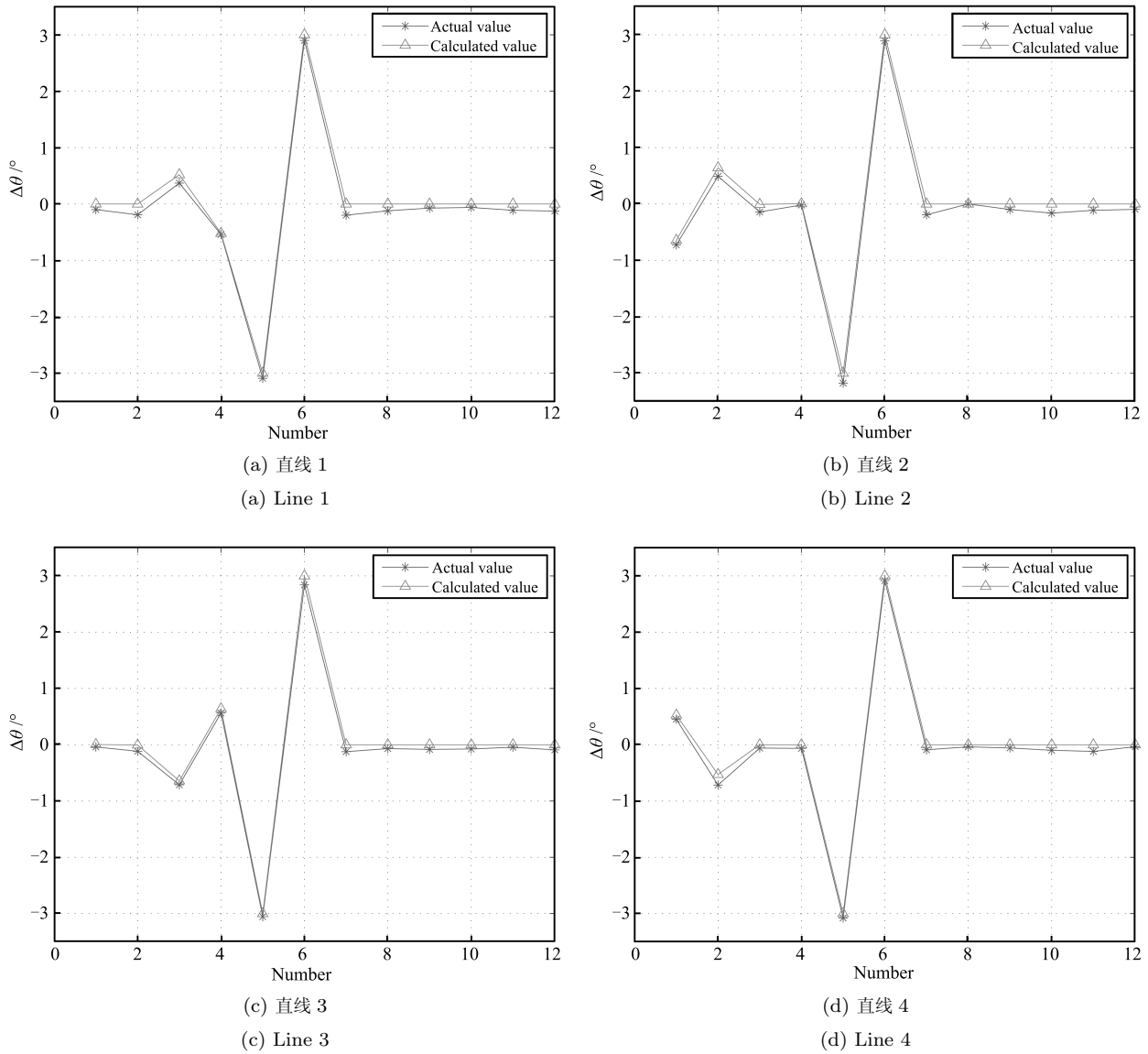


图 4 4 条直线的角度变化

Fig. 4 The angle variations of the four lines

其中,

$$L_{\theta} = - \begin{bmatrix} \rho_{1i} \cos \theta_{1i} & \rho_{1i} \sin \theta_{1i} & 1 \\ \rho_{2i} \cos \theta_{2i} & \rho_{2i} \sin \theta_{2i} & 1 \\ \rho_{3i} \cos \theta_{3i} & \rho_{3i} \sin \theta_{3i} & 1 \\ \rho_{4i} \cos \theta_{4i} & \rho_{4i} \sin \theta_{4i} & 1 \end{bmatrix}$$

式中, ρ_{ji} 和 θ_{ji} 是第 j 条直线第 i 次运动前的参数, $\Delta\theta_{ji}$ 是第 j 条直线第 i 次运动后的变化量, $\Delta\theta_{xi}$, $\Delta\theta_{yi}$, $\Delta\theta_{zi}$ 是摄像机的第 i 次旋转运动量, L_{θ} 是 4 条直线的角度交互矩阵.

对式 (22) 利用最小二乘法求解, 得到摄像机的旋转运动量:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_{xi} \\ \Delta\theta_{yi} \\ \Delta\theta_{zi} \end{bmatrix} = (L_{\theta}^T L_{\theta})^{-1} L_{\theta}^T \begin{bmatrix} \Delta\theta_{1i} \\ \Delta\theta_{2i} \\ \Delta\theta_{3i} \\ \Delta\theta_{4i} \end{bmatrix} \quad (23)$$

将表 1 中初始位置时的 ρ_{ji} 和 θ_{ji} 代入式 (22), 计算出 L_{θ} .

$$L_{\theta} = \begin{bmatrix} -0.0002 & 0.1735 & -1 \\ -0.2145 & -0.0020 & -1 \\ 0.0014 & -0.2131 & -1 \\ 0.1754 & 0.0002 & -1 \end{bmatrix}$$

将 L_{θ} 和表 2 中 $\theta_{1i} \sim \theta_{4i}$ 的实际值代入式 (23),

分别计算出摄像机 6 次旋转运动的运动量. 以式 (23) 计算出的摄像机的旋转运动量作为估计值, 以机器人带动摄像机的旋转运动量作为实际值, 得到表 3 所示的摄像机旋转运动量. 由表 3 可见, 摄像机旋转运动的估计值与实际值的最大误差为 0.26° , 估计值与实际值吻合.

上述实验结果说明, 当摄像机光轴与目标直线接近垂直时, 直线参数 θ 的变化只由摄像机的旋转运动产生, 摄像机的平移运动对直线参数 θ 基本不产生影响.

2.2 实验 2

实验 2 为直线与摄像机光轴不垂直时的验证实验. 在摄像机光轴与目标垂直的基础上, 绕摄像机 X_c 轴旋转 15° , 再绕 Y_c 轴旋转 -15° , 以此时的位

姿作为摄像机的初始位姿. 然后, 分别使得摄像机绕 X_c 轴旋转 5° , 绕 Y_c 轴旋转 -5° , 绕 Z_c 轴旋转 5° , 采集相应的地面图像. 利用 Canny 算子提取出地板砖的边缘点, 再利用 Hough 变换提取出特征直线. 采集的图像及提取出的直线特征见图 5.

表 4 给出了在摄像机运动后 4 条直线在焦距归一化成像平面的直线的参数 ρ_j 和 θ_j . 摄像机第 i 次运动后直线的参数 θ_{ji} 减去第 $i-1$ 次运动后的直线参数 $\theta_{j(i-1)}$, 得到参数 θ_j 的变化量作为实际值. 利用摄像机的运动量, 根据式 (19) 计算出的参数 θ_j 的变化量作为计算值. 参数 θ_j 的变化量见表 5. 由表 5 可以发现, 式 (19) 计算出的结果与实际值吻合.

将表 4 中第 i 次运动前的 ρ_{ji} 和 θ_{ji} 代入式 (22), 计算出 L_θ . 将 L_θ 和表 5 中 $\theta_{1i} \sim \theta_{4i}$ 的实际值代入式 (23), 计算出的摄像机的旋转运动量作为估计值,

表 3 摄像机旋转运动量
Table 3 The rotation angles of the camera

序号	估计值 ($^\circ$)			实际值 ($^\circ$)			偏差 ($^\circ$)		
	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$
1	3.02	-0.15	0.07	3.00	0.00	0.00	0.02	-0.15	0.08
2	-3.09	-0.21	0.16	-3.00	0.00	0.00	-0.09	-0.21	0.16
3	0.18	2.79	0.10	0.00	3.00	0.00	0.18	-0.21	0.10
4	-0.10	-2.85	0.05	0.00	-3.00	0.00	-0.10	0.15	0.05
5	0.26	-0.10	3.10	0.00	0.00	3.00	0.26	-0.10	0.10
6	0.06	0.16	-2.89	0.00	0.00	-3.00	0.06	0.16	0.11

表 4 旋转运动前后直线的参数 ρ 和 θ
Table 4 The lines' parameters ρ and θ before and after camera rotation

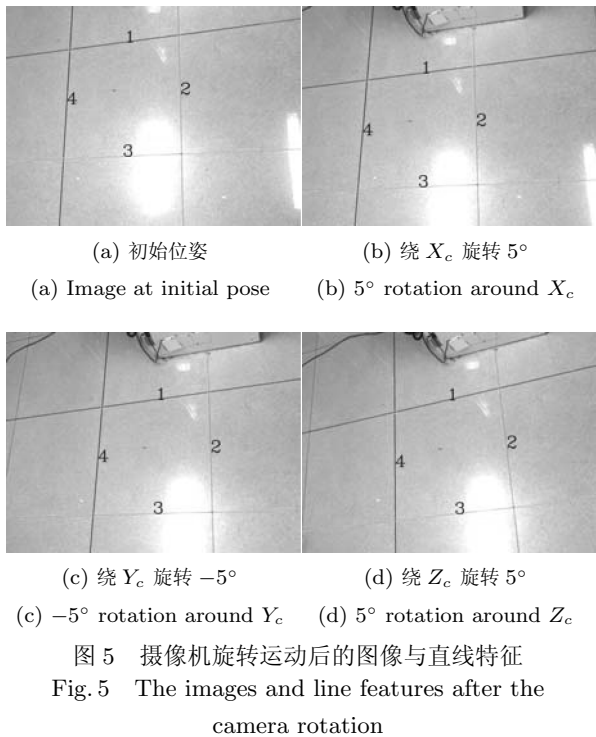
序号	直线 1		直线 2		直线 3		直线 4		运动
	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	ρ (mm)	θ ($^\circ$)	
0	0.2326	-97.65	0.0845	-1.34	0.1041	87.67	0.2477	-176.59	初始位置
1	0.1427	-97.36	0.0817	-1.69	0.1937	87.74	0.2417	-175.22	绕 X_c 旋转 5°
2	0.1305	-98.05	0.1702	-1.73	0.1967	88.66	0.1515	-175.28	绕 Y_c 旋转 -5°
3	0.1288	-103.04	0.1689	-6.79	0.1987	83.71	0.1525	179.70	绕 Z_c 旋转 5°

表 5 旋转运动后直线参数 θ 的变化量
Table 5 The variations of line parameter θ after camera rotation

序号	计算值 ($^\circ$)				实际值 ($^\circ$)				偏差 ($^\circ$)				运动
	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	$\Delta\theta_1$	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	$\Delta\theta_4$	
1	0.16	-0.42	-0.02	1.24	0.29	-0.35	0.07	1.37	-0.14	-0.07	-0.09	-0.13	绕 X_c 旋转 5°
2	-0.65	-0.03	0.98	-0.06	-0.69	-0.05	0.92	-0.06	0.05	0.02	0.06	0.00	绕 Y_c 旋转 -5°
3	-5.00	-5.00	-5.00	-5.00	-4.99	-5.06	-4.95	-5.02	0.01	0.06	-0.05	0.02	绕 Z_c 旋转 5°

表 6 实验 2 摄像机旋转运动量
Table 6 The rotation angles of the camera in Experiment 2

序号	估计值 (°)			实际值 (°)			偏差 (°)		
	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$	$\Delta\theta_x$	$\Delta\theta_y$	$\Delta\theta_z$
1	5.15	0.15	-0.09	5.00	0.00	0.00	0.15	0.15	-0.09
2	0.22	-4.83	0.01	0.00	-5.00	0.00	0.22	0.17	0.01
3	0.14	-0.17	5.00	0.00	0.00	5.00	0.14	-0.17	0.00



以机器人带动摄像机的旋转运动量作为实际值, 得到表 6 所示的摄像机旋转运动量. 由表 6 可以发现, 估计值与实际值的最大误差为 0.22° , 估计值和实际值相吻合.

该实验说明, 即使直线不垂直于摄像机光轴, 但只要直线与垂直于摄像机光轴的平面之间的夹角不是很大, 例如, 本实验中夹角已达 15° , 利用式 (19) 仍然可以表示摄像机运动与直线参数 θ 变化之间的关系. 即在直线的特征点 P_0 以及附近点的深度变化不剧烈的情况下, 直线参数 θ 的变化只由摄像机的旋转运动产生, 摄像机的平移运动对直线参数 θ 基本不产生影响.

3 结论

对于与摄像机光轴不平行的直线, 利用成像平面内直线上靠近垂点的两个点的极坐标, 推导出了直线特征的交互矩阵, 给出了此类直线交互矩阵的一般表达式. 针对与摄像机光轴近似垂直的直线, 给

出了角度交互矩阵的近似表达式, 并指出此类直线在成像平面上投影的角度变化主要受摄像机姿态变化的影响. 对于与摄像机光轴平行的直线, 利用一个点的极坐标导出了此类直线的角度交互矩阵, 并指出此类直线在成像平面上投影的角度受摄像机旋转以及垂直于光轴平移的影响较大. 本文得到的直线特征的交互矩阵, 不受含有直线的平面参数的制约. 另外, 在交互矩阵中的深度信息可以随着摄像机的运动进行在线估计. 因此, 本文给出的直线特征的交互矩阵在使用上更加方便.

References

- 1 Lepetit V, Fua P. Monocular model-based 3D tracking of rigid objects: a survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2005, 1(1): 1–89
- 2 Mooser J, You S, Neumann U, Wang Q. Applying robust structure from motion to markerless augmented reality. In: *Proceedings of the 2009 IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*. Snowbird, Utah, USA: IEEE, 2009. 1–8
- 3 Liu Y H, Wang H S. An adaptive controller for image-based visual servoing of robot manipulators. In: *Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*. Jinan, China: IEEE, 2010. 988–993
- 4 Wang H S, Liu, Y H, Chen W D. Visual tracking of robots in uncalibrated environments. *Mechatronics*, 2012, 22(4): 390–397
- 5 Pressigout M, Marchand E. Real-time 3D model-based tracking: combining edge and texture information. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando, USA: IEEE, 2006. 2726–2731
- 6 Coutard L, Chaumette F. Visual detection and 3D model-based tracking for landing on an aircraft carrier. In: *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Shanghai, China: IEEE, 2011. 1746–1751
- 7 Drummond T, Cipolla R. Real-time visual tracking of complex structures. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(7): 932–946
- 8 Petit A, Marchand E, Kanani K. A robust model-based tracker combining geometrical and color edge information. In: *Proceedings of the 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Tokyo, Japan: IEEE, 2013. 3719–3724

- 9 Vacchetti L, Lepetit V, Fua P. Combining edge and texture information for real-time accurate 3D camera tracking. In: Proceedings of the 3rd IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. Arlington, USA: IEEE, 2004. 48–56
- 10 Espiau B, Chaumette F, Rives P. A new approach to visual servoing in robotics. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1992, **8**(3): 313–326
- 11 Comport A I, Marchand E, Pressigout M, Chaumette F. Real-time markerless tracking for augmented reality: the virtual visual servoing framework. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2006, **12**(4): 615–628
- 12 Wuest H, Stricker D. Tracking of industrial objects by using CAD models. *Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 2007, **4**(1): 1–9
- 13 Mills S, Aouf N, Mejias L. Image based visual servo control for fixed wing UAVs tracking linear infrastructure in wind. In: Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013. 5769–5774
- 14 Xie H, Lynch A, Jagersand M. IBVS of a rotary wing UAV using line features. In: Proceedings of the 27th IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Toronto, Canada: IEEE, 2014. 1–6
- 15 Coutard L, Chaumette F, Pflimlin J M. Automatic landing on aircraft carrier by visual servoing. In: Proceedings of the 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. San Francisco, USA: IEEE, 2011. 2843–2848
- 16 Alkhalil F, Doignon C. Stereo visual servoing with decoupling control. In: Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Algarve, Portugal: IEEE, 2012. 1671–1676
- 17 Liu Y H, Wang H S, Chen W D, Zhou D X. Adaptive visual servoing using common image features with unknown geometric parameters. *Automatica*, 2013, **49**(8): 2453–2460
- 18 Liu Y H, Wang H S, Wang C Y, Lam K K. Uncalibrated visual servoing of robots using a depth-independent interaction matrix. *IEEE Transactions on Robotics*, 2006, **22**(4): 804–817
- 19 Wang H S, Liu Y H, Zhou D X. Adaptive visual servoing using point and line features with an uncalibrated eye-in-hand camera. *IEEE Transactions on Robotics*, 2008, **24**(4): 843–857



徐 德 中国科学院自动化研究所研究员. 主要研究方向为机器人和自动化, 视觉测量, 视觉控制, 智能控制, 焊缝跟踪, 视觉定位, 显微视觉, 微装配. 本文通信作者. E-mail: de.xu@ia.ac.cn

(**XU De** Professor at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. His research interest covers

robotics and automation, visual measurement, visual control, intelligent control, welding seam tracking, visual positioning, microscopic vision, and micro-assembly. Corresponding author of this paper.)



卢金燕 中国科学院自动化研究所博士研究生. 2011 年获得北京航空航天大学计算机科学与技术专业硕士学位. 主要研究方向为位姿检测, 视觉测量, 机器人控制. E-mail: jinyan.lu@ia.ac.cn

(**LU Jin-Yan** Ph.D. candidate at the Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences. She received her

master degree from Beijing University of Aeronautics and Astronautics in 2011. Her research interest covers pose detection, visual measurement, and robot control.)