

文章编号 1004-924X(2016)05-1168-08

基于共面直线迭代加权最小二乘的相机位姿估计

张振杰*, 郝向阳, 程传奇, 黄忠义

(信息工程大学 导航与空天目标工程学院, 河南 郑州 450000)

摘要: 针对相机内参数已标定和未标定情况下的相机位姿求解, 提出了基于共面直线迭代加权最小二乘的相机位姿估计算法。推导了关于相机焦距和位姿参数的线性方程, 通过 4 条以上共面直线实现了相机位姿参数的线性解算; 对参数线性解进行迭代加权最小二乘优化, 得到更高精度的参数估计值和直线权值; 最后, 利用直线权值和欧式变换的保距性实现相机焦距的解算, 得到了相机焦距和位姿参数的估计值。仿真实验表明: 提出的算法在相机已标定, 直线数为 20, 像点噪声方差为 5 pixel 的情况下, 角度误差小于 0.2° , 相对平移向量误差小于 0.5%, 耗时大约为 1 ms。真实数据实验表明, 提出的算法可以获得与棋盘标定结果相近的精度。与现有算法相比, 提出的算法抗噪性更好, 精度更高, 能够实现基于单幅图像的未标定相机的位姿估计。

关键词: 空间相机; 内参数标定; 位姿估计; 对应直线; 迭代加权最小二乘

中图分类号: V448.22; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162405.1168

Iteratively reweighted least squares method for camera pose estimation based on coplanar line correspondences

ZHANG Zhen-jie*, HAO Xiang-yang, CHENG Chuan-qi, HUANG Zhong-yi

(School of Navigation and Aerospace Engineering,
Information Engineering University, Zhengzhou 450000, China)

* Corresponding author, E-mail: zzhxiaodao@126.com

Abstract: To estimate the camera poses for calibrated or uncalibrated cameras, a novel pose estimation algorithm was proposed based on coplanar line correspondences and iteratively reweighted least squares. Firstly, a linear equation for the focus length and pose of the camera was established. The pose parameter was solved by more than four coplanar line correspondences. Then, the iteratively reweighted least square method was applied to optimizing the parameter, and the higher accurate estimated parameter and line weight were obtained. Finally, the focus length and pose parameters of the camera were obtained by calculation of line weight and the invariant distance of Euclidean transformation. Experimental results with simulative data indicate that the precision of angle is better than 0.2° , the precision of relative position is better than 0.5%, and consuming time is about 1 ms, when the focus length is known, and number of lines and noise level are 20 and 5, respectively. Moreover, the experimental results with real data indicate that the precision of proposed algorithm is close to chessboard calibration. As compared with the existing algorithm, the proposed algorithm is

收稿日期: 2015-12-22; 修订日期: 2016-03-03.

基金项目: 天基监视空间目标光学成像模拟及识别研究(No. 2015AA7034057A)

more accurate, robust, and is capable of estimating the pose of uncalibrated cameras based on a single image.

Key words: space camera; internal parameter calibration; pose estimation; line correspondences; iteratively reweighted least squares

1 引言

相机位姿估计问题是计算机视觉等学科的经典问题,其在视觉测量系统标定^[1-2]、航天器对接^[3,5]以及视觉导航等领域均有广泛应用。位姿估计问题按照特征的特性主要可分为 n 点透视问题(PnP)^[5-8]和 n 线透视问题(PnL)。由于直线提取更容易、更精确、更可靠,且受噪声和遮挡的影响较少,因此 PnL 问题在近些年得到了广泛的关注和研究。

求解 PnL 问题的算法可分为线性算法和非线性迭代算法。线性算法主要有 P3L^[9]、RPnL^[10]、Ansar^[11]、Mirzaei^[12]、直接最小二乘^[13]等。RPnL、Ansar 等算法计算速度快,但精度较低,且对噪声敏感。Mirzaei、直接最小二乘等算法具有明确的目标函数,使用了代数多元方程组求解技术,能达到全局最优。

非线性迭代算法位姿估计精度较高,但计算量较大。张小虎^[14-15]等提出了一种直线对应的正交迭代的位姿估计算法。该算法迭代次数少、计算精度高且全局收敛。张跃强^[3,16]等提出了一种基于多直线对应的加权最小二乘的位姿估计。

然而,上述对于 PnL 的研究多集中在对已标定相机的位姿解算,而在很多实际问题中,相机内参数经常变化,因此对未标定相机的位姿估计技术的研究同样具有重要意义。未标定相机位姿估计算法多是基于点特征提出的,主要有直接线性变换^[17](DLT)和 AFUFPnP^[18](accurate and fast algorithm for unknow focal length PnP problem)等。对基于直线特征的未标定相机的位姿估计算法研究较少,于起峰^[17]等提出了由单幅图像上的 4 条或 4 条以上共面控制直线标定相机的等效焦距和外参数的方法。

本文在现有 PnP 问题和 PnL 问题的算法基础上,提出了利用共面直线特征通过迭代加权最小二乘法实现已标定和未标定情况下的相机位姿

估计的方法(IRLSPnL),并进行了实验验证。

2 问题描述

如图 1 所示,直角坐标系 $O_w-X_wY_wZ_w$ 是世界坐标系。 L 为空间直线,其在水坐标系下的参数已知, P_s, P_e 是 L 的两个端点。直角坐标系 $O_c-X_cY_cZ_c$ 是相机坐标系,其原点建立在相机光心, Z_c 轴沿光轴指向相机前方, \mathbf{R}, \mathbf{t} 为相机坐标系相对于世界坐标系的旋转矩阵和平移向量。 L 在图像平面的投影成像直线为 l , l 在相机坐标系下的直线参数可通过直线提取到。 p_s, p_e 是 l 的两个端点。 π 表示相机光心 O_c 与直线 l 确定的平面。

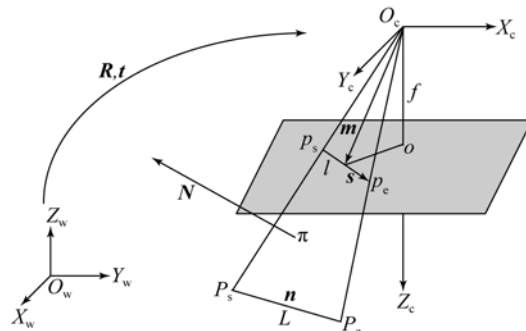


图 1 相机透视投影模型

Fig. 1 Perspective projection model of camera

本文所讨论的问题是在相机焦距已知和未知两种情况下,如何由多条已知空间直线以及相应的图像投影来估计相机焦距 f ,以及旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 。

3 算法实现

3.1 基于直线特征的位姿估计方程

如图 1 所示,由相机的投影模型可得到空间直线 L 上任意一点 P 的投影方程:

$$\begin{cases} x = \frac{f(r_{11}X + r_{12}Y + t_x)}{r_{31}X + r_{32}Y + t_z} \\ y = \frac{f(r_{21}X + r_{22}Y + t_y)}{r_{31}X + r_{32}Y + t_z} \end{cases}, \quad (1)$$

其中: $\mathbf{P} = [X, Y, 0]^T$, $\mathbf{p} = [x, y]^T$ 是空间点 P 在图像上的投影点, $\mathbf{R} = [\mathbf{r}_1 \ \mathbf{r}_2 \ \mathbf{r}_3] =$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}, \mathbf{t} = [t_x \ t_y \ t_z].$$

空间直线 L 在像平面的投影直线 l 可用方程(2)表示:

$$\begin{bmatrix} X \cos \theta^c & X \sin \theta^c & -X \rho^c & Y \cos \theta^c & Y \sin \theta^c & -Y \rho^c & \cos \theta^c & \sin \theta^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f r_{11} / t_z \\ f r_{21} / t_z \\ r_{31} / t_z \\ f r_{12} / t_z \\ f r_{22} / t_z \\ r_{32} / t_z \\ f t_x / t_z \\ f t_y / t_z \end{bmatrix} = \rho^c, \quad (4)$$

由于两点确定一条直线,因此直线的两个点构成式(4),即为直线投影方程。取直线的两个端

$$\begin{bmatrix} X_s \cos \theta^c & X_s \sin \theta^c & -X_s \rho^c & Y_s \cos \theta^c & Y_s \sin \theta^c & -Y_s \rho^c & \cos \theta^c & \sin \theta^c \\ X_e \cos \theta^c & X_e \sin \theta^c & -X_e \rho^c & Y_e \cos \theta^c & Y_e \sin \theta^c & -Y_e \rho^c & \cos \theta^c & \sin \theta^c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f r_{11} / t_z \\ f r_{21} / t_z \\ r_{31} / t_z \\ f r_{12} / t_z \\ f r_{22} / t_z \\ r_{32} / t_z \\ f t_x / t_z \\ f t_y / t_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho^c \\ \rho^c \end{bmatrix}, \quad (5)$$

其中 $\mathbf{P}_s = [X_s \ Y_s \ 0]^T$, $\mathbf{P}_e = [X_e \ Y_e \ 0]^T$ 是直线 L 的两个端点。

对于 n 条直线,可以得到形如 $A_{2n \times 8} h = B_{2n \times 1}$ 的方程式。对于 4 条以上的直线,可通过最小二乘法由式(6)得到 h 的线性解:

$$\hat{\mathbf{h}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{B},$$

其中:

$$\hat{\mathbf{h}} = [\hat{h}_1 \ \hat{h}_2 \ \hat{h}_3 \ \hat{h}_4 \ \hat{h}_5 \ \hat{h}_6 \ \hat{h}_7 \ \hat{h}_8]^T. \quad (6)$$

3.2 迭代加权最小二乘优化

由于图像噪声的存在,图像直线的提取精度也会受到影响,而图像直线的提取精度又直接影响了利用直线特征进行的位姿估计的精度。由于不同直线的提取精度不同,因此采用加权最小二

$$x \cos \theta^c + y \sin \theta^c - \rho^c = 0, \quad (2)$$

式中: ρ^c 表示相机坐标系 Z_c 轴和图像平面的交点到直线 l 的垂线距离, θ^c 表示垂线与 X_c 轴的夹角。 $(\rho^c, \theta^c)^T$ 表示平面直线的坐标。

由式(1)和式(2)可以得到式(3):

$$\frac{f(r_{11}X + r_{12}Y + t_x)}{r_{31}X + r_{32}Y + t_z} \cos \theta^c + \frac{f(r_{21}X + r_{22}Y + t_y)}{r_{31}X + r_{32}Y + t_z} \sin \theta^c - \rho^c = 0, \quad (3)$$

将式(3)进一步变换可得到:

点作为已知点,则直线投影方程可用式(5)表示:

乘估计方法来提高位姿的估计精度。

3.2.1 权值 w 的计算

图像噪声服从高斯分布,因此可以认为图像的直线定位误差也满足高斯分布。假设残差 $\Delta = \mathbf{W}(\mathbf{A}\hat{\mathbf{h}} - \mathbf{B})$ 的分布服从均值为 0, 标准差为 σ 的高斯噪声。 \mathbf{W} 是对角线为权值 w 的 $n \times n$ 方阵。

标准差 σ 的估计通过残差 Δ 计算。

$$\sigma^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i^2, \quad (7)$$

权值 w 取高斯分布的概率密度,如式(8):

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{\Delta_i^2}{2\sigma^2}}, i=1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

3.2.2 迭代加权最小二乘估计

迭代加权就是通过更新权值,解算待估参数,

寻找目标函数 $\sum_{i=1}^n |\omega_i \Delta_i|$ 最小的过程。具体步骤如下:

step1: 设置初始权值 $\omega_i(k) = 1, k=1, k$ 为迭代次数;

step2: 估计参数 $\hat{\mathbf{h}}(k) = (\mathbf{A}^T (\mathbf{w}(k) + \mathbf{w}(k)^T) \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{w}(k) + \mathbf{w}(k)^T) \mathbf{B}$, 得到残差 $\Delta(k) = \mathbf{w}(k) (\mathbf{A} \hat{\mathbf{h}}(k) - \mathbf{B})$;

step3: 由式(7)和式(8)进行权值更新 $\mathbf{w}(k)$;

step4: 计算目标函数, 判断其是否满足迭代停止条件, 若不满足, 则转到 step2, 否则, 继续;

step5: 输出估计参数 $\hat{\mathbf{h}}$ 和对应直线的权值 ω 。

迭代停止条件为目标函数小到一定程度, 或者目标函数的相对变化量小到一定程度, 或者达到预设的迭代次数上限。

3.3 相机参数的线性估计

在相机焦距已知或者未知的情况下, 可根据旋转矩阵 \mathbf{R} 的单位正交性或者欧式变换的保距性分别求解得到相机参数。

(1) 根据旋转矩阵 \mathbf{R} 的单位正交性求解

若焦距未标定, 则首先由估计参数 $\hat{\mathbf{h}}$ 和 \mathbf{R} 的单位正交性推导得到式(9), 解算式(9)即可得到

$$\left[(\hat{h}_1(X_e - X_s) + \hat{h}_2(Y_e - Y_s))^2 + (\hat{h}_3(X_e - X_s) + \hat{h}_4(Y_e - Y_s))^2 - (\hat{h}_5(X_e - X_s) + \hat{h}_6(Y_e - Y_s))^2 \right] \left[\begin{array}{c} \left(\frac{t_z}{f} \right)^2 \\ t_z^2 \end{array} \right] = (X_e - X_s)^2 + (Y_e - Y_s)^2. \quad (14)$$

由 n 条直线的端点通过最小二乘法得到 $\left[\frac{t_z}{f} \right]^2$ 和 t_z^2 的解, 所以可以得到焦距 f 和 t_z 值。由式(10)、(11)得到相机位姿参数的线性解。

由 3.2 节得到的权值 ω 表示了每条直线对相机参数计算精度的影响程度, 将直线权值 ω 代入式(14), 可得到参数 $\left[\frac{t_z}{f} \right]^2$ 和 t_z^2 的加权最小二乘解。

3.4 算法分析

3.4.1 位姿估计精度

对如式(5)所示的方程组进行解算相当于对目标函数(15)的最小化:

$$f(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{i=1}^n d(\hat{l}_i(\mathbf{R}, \mathbf{t}), l_i), \quad (15)$$

相机焦距信息。

$$f = \sqrt{-(\hat{h}_1 \hat{h}_2 + \hat{h}_3 \hat{h}_4) / (\hat{h}_5 \hat{h}_6)}, \quad (9)$$

然后可由式(10)、(11)进一步解算得到相机的位姿参数。

$$\begin{cases} t_x = \hat{h}_7 t_z / f \\ t_y = \hat{h}_8 t_z / f \\ t_z = \sqrt{(\hat{h}_1)^2 + (\hat{h}_2)^2 + (\hat{h}_3)^2} \end{cases}, \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = [\hat{h}_1 t_z / f \quad \hat{h}_3 t_z / f \quad \hat{h}_5 t_z] \\ \mathbf{r}_2 = [\hat{h}_2 t_z / f \quad \hat{h}_4 t_z / f \quad \hat{h}_6 t_z] \\ \mathbf{r}_3 = \mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2 \end{cases}. \quad (11)$$

(2) 根据欧式变换的保距性求解

相机焦距也可通过欧式变换的保距性求解得到。空间直线上的点 P 在相机坐标系的坐标 P^c 可由式(12)表示。

$$\begin{bmatrix} X^c \\ Y^c \\ Z^c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{t_z}{f} \hat{h}_1 X + \frac{t_z}{f} \hat{h}_2 Y + t_z \hat{h}_7 \\ \frac{t_z}{f} \hat{h}_3 X + \frac{t_z}{f} \hat{h}_4 Y + t_z \hat{h}_8 \\ t_z \hat{h}_5 X + t_z \hat{h}_6 Y + t_z \end{bmatrix}, \quad (12)$$

由欧式空间的保距性, 可得:

$$\|P_e^c - P_s^c\| = \|P_e - P_s\|. \quad (13)$$

将式(12)代入式(13)可得式(14):

其中: $\hat{l}_i(\mathbf{R}, \mathbf{t})$ 是空间直线 L_i 在相机估计位姿参数 $[\mathbf{R}, \mathbf{t}]$ 和内参数作用下的图像投影直线, $d(\cdot)$ 表示估计投影直线和提取直线的重合度。所以由式(15)可以获得直线投影最大重合度的线性参数值。获得直线最大重合度意义下的线性参数值, 再由迭代加权最小二乘方法, 最终得到更高精度的相机位姿参数。

3.4.2 焦距估计精度

焦距估计主要有两种方法: 一种是根据旋转矩阵的单位正交性解算; 一种是根据欧式变换的保距性解算。由于直线提取存在的误差, 线性参数估计的旋转矩阵通常不满足单位正交性, 所以利用旋转矩阵的单位正交性对焦距进行解算会存在较大的误差。因此根据欧式变换的保距性对焦距进行估计, 精度和稳定性会更好。本文算法中,

将迭代加权最小二乘线性参数估计中计算得到的直线权值代入焦距参数估计的方程式中,进一步提高了焦距估计的抗噪性和精度。

3.4.3 算法时间复杂度

算法主要分为 3 步:最小二乘线性解、迭代加权最小二乘优化和焦距估计。算法中主要耗时部分为迭代加权最小二乘优化,但是由于最小二乘线性解已得到较高精度的参数估计值,因此仅需少数几次迭代即可完成参数优化。每次迭代需要进行一次最小二乘估计,时间复杂度为 $O(n)$ 。最小二乘线性解和焦距估计的算法复杂度均为 $O(n)$ 。

4 实验与分析

4.1 数学仿真实验

相机的内参数设置:焦距 $f=800$,主点坐标 $u_0 = v_0 = 0$ 。相机外参数:旋转角 $[\varphi \ \omega \ \kappa]$ 分别在区域 $[-20^\circ, 20^\circ]$ 随机取值,平移向量 $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 分别在区域 $[10, 200]$ 随机取值。

空间共面直线参数仿真:空间点 P 在区域 $[10, 200]$ 随机取值,以点 P 为起始点,直线参数 θ^w 在区域 $[0, \pi]$ 随机取值,由起始点和 θ^w 可以确定直线参数 ρ^w 。通过起始点和直线参数生成 $m=50$ 个空间直线上的特征点。随机生成 $n=20$ 条直线。

图像平面直线数据:将空间直线上的特征点按照相机参数进行投影,得到像平面直线上特征点坐标 p ,在特征点坐标上添加均值为 0,标准差 σ 的高斯噪声。对直线特征点坐标进行最小二乘直线拟合,得到图像平面直线参数 (ρ^c, θ^c) 。

每一种配置进行 1 000 次独立实验,对计算时间和误差求取平均值。算法求得 $[\hat{\varphi} \ \hat{\omega} \ \hat{\kappa}]$, \hat{t}, \hat{f} 与真实 $[\varphi \ \omega \ \kappa], t, f$ 的误差分别表示为:

$$E_{\text{angle}} = \| [\hat{\varphi} \ \hat{\omega} \ \hat{\kappa}] - [\varphi \ \omega \ \kappa] \|$$

$$E_t = \| \hat{t} - t \| / \| t \|$$

$$E_f = | \hat{f} - f | / f. \quad (16)$$

选用以下 3 种算法进行对比实验:

Yu,文献[17]提出的从 4 条以上的共面直线单幅图像标定相机焦距和位姿参数的线性解算方法;

Yu+LOI,以 Yu 为初值,采用文献[15]的正交迭代算法进行位姿估计;

IRLSPnL,本文提出的基于直线特征的迭代加权最小二乘估计相机焦距和位姿参数的算法。

(1)相机焦距已知

图 2 为添加高斯噪声的实验结果,其中方差 σ 的变化范围为 $[0.0, 5.0]$,变化步长为 1.0。对于直线数目 n 的变化范围为 $[6, 96]$,变化步长为 10,高斯噪声标准差 $\sigma=2.0$ 的相机位姿估计误差统计结果如图 3 所示。从实验结果可以看出,IRLSPnL 算法比其它 2 种算法的精度都高,计算时间比线性算法略高。

图 3 中存在一个明显的尖峰,这是由于参与计算的直线中存在提取精度较差的直线。由图 3 可知,IRLSPnL 算法通过迭代加权过程有效地抑制了提取精度较差的直线对参数估计结果的影响,因此 IRLSPnL 算法具有更好的鲁棒性。

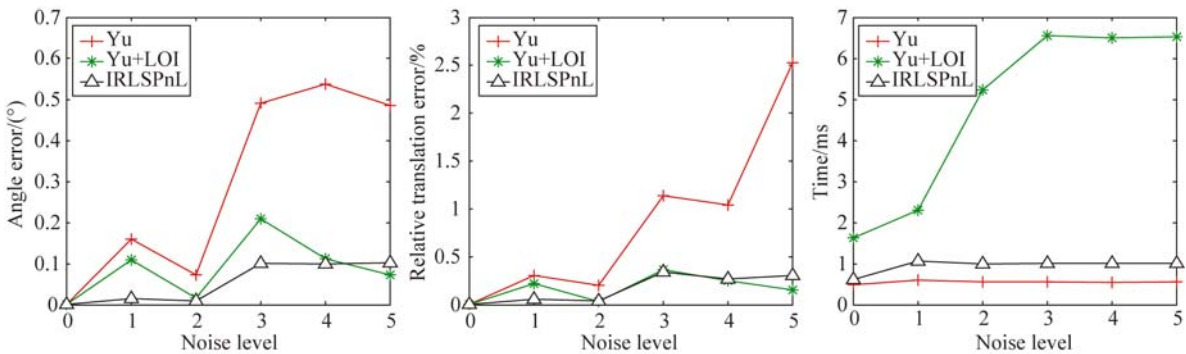


图 2 焦距已知的图像噪声实验结果

Fig. 2 Results of image noise experiment with known focal length

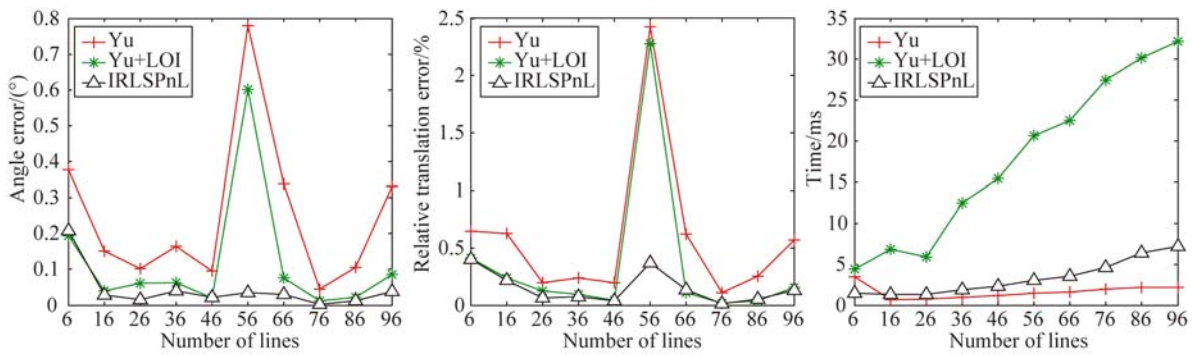


图 3 焦距已知的直线数目实验结果

Fig. 3 Experimental results of line numbers with known focal length

(2)相机焦距未知

图 4 为添加高斯噪声方差 σ 的变化范围为 $[0.0, 5.0]$, 变化步长为 1.0。图 5 为直线数目 n 的变化范围为 $[6, 30]$, 变化步长为 4, 高斯噪声标准差 $\sigma=2.0$ 的相机位姿估计误差统计结果。从

图中可以看出,相机参数的估计误差与焦距的估计误差成正相关。受焦距估计结果的影响,正交迭代算法已经失效。

从实验结果可以看出,IRLSPnL 算法的相机参数估计精度和鲁棒性是最高的。

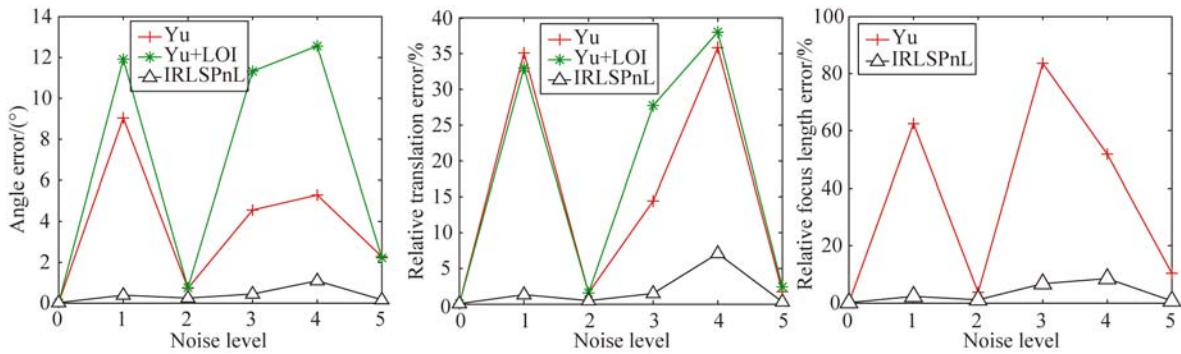


图 4 焦距未知的图像噪声实验结果

Fig. 4 Results of image noise experiment with unknown focal length

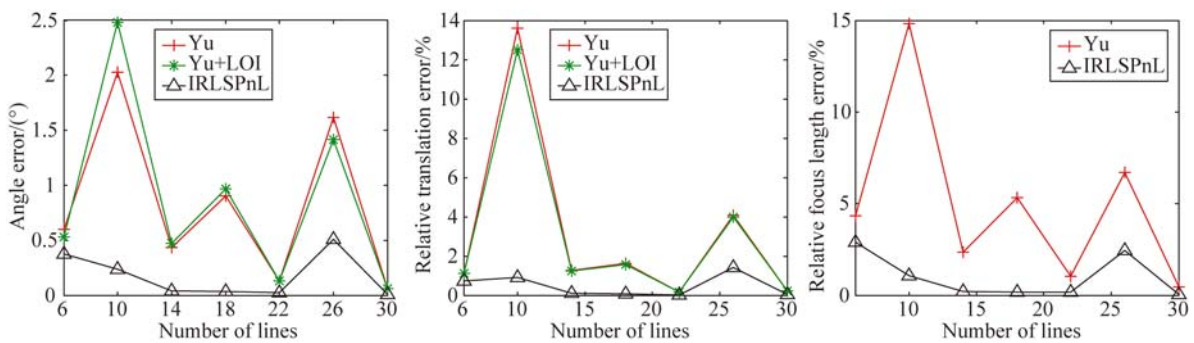


图 5 焦距未知的直线数目实验结果

Fig. 5 Experimental results of line numbers with unknown focal length

4.2 真实图像实验

为了进一步验证提出算法的正确性和有效性,对一组真实图像数据进行处理。实验中使用

尼康 D700 对棋盘标志进行多角度拍摄,利用多幅棋盘图像使用张正友棋盘标定法对相机进行内、外参数标定。对棋盘图像进行直线提取,得到

12 条直线。将在相机已标定和未标定情况下本文算法估计得到的相机参数估计结果与棋盘标定结果进行比较,结果如表 1 所示。相机标定焦距 $f=2\ 445$ pixel,主点坐标 $u_0=2\ 137$ pixel, $v_0=1\ 436$ pixel。

在相机未标定情况的 IRLSPnL 算法计算中,取主点坐标为图像大小的一半,即 $u_0=2\ 128$ pixel, $v_0=1\ 416$ pixel。

表 1 棋盘实验结果

Tab.1 Results of chessboard experiment

	焦距已标定		焦距未标定		
	旋转角度 误差/(°)	平移向量 相对误差/%	焦距相对 误差/%	旋转角度 误差/(°)	平移向量 相对误差/%
图 1	0.13	0.40	25.5	1.67	24.9
图 2	0.13	0.38	15.0	1.03	14.9
图 3	0.12	0.36	24.4	1.64	24.2

由表 1 可以看出,在相机标定的情况下,IRLSPnL 算法可达到和棋盘标定方法相近的精度。在相机未标定情况下,由于主点坐标误差和单

幅影像约束较少等原因,本文算法与棋盘标定结果相对误差较大,但 IRLSPnL 算法可以在相机内参数难以获取、位姿精度要求较低的情况下使用。

5 结 论

本文提出了一种基于多直线对应的迭代加权最小二乘的相机位姿估计算法。考虑到相较于点特征,直线特征的提取精度更高,受噪声影响较小,因此基于直线特征的位姿估计有着更可靠的估计结果。通过建立直线特征的投影方程和欧式变换的保距性特性,由多对应直线,利用迭代加权最小二乘算法进行解算,实现了对未标定和已标定相机的位姿精度高、快速的位姿估计。仿真数据实验表明:在相机已标定,直线数为 20、像点噪声方差为 5 个像素的情况下,本文方法解算的角度误差小于 0.2° ,相对平移向量误差小于 0.5% ,耗时大约为 1 ms。真实数据实验表明:本文方法在相机已标定的情况下,可获得与棋盘方法相近的精度;在相机未标定和精度要求不高的情况下,也可实现单幅影像的相机焦距和位姿同时估计。

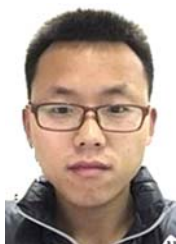
参考文献:

- [1] 李喆,丁振良,袁峰. 基于共面点的多视觉测量系统的全局标定[J]. 光学 精密工程, 2008, 16(3): 467-472.
LI ZH, DING ZH L, YUAN F. Global calibration method for multi-vision measurement system with coplanar targets [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(3):467-472. (in Chinese)
- [2] 杨博文,张丽艳,叶南. 机载设备安装姿态视觉校准中的靶板标定[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(9): 2312-2320.
YANG B W, ZHANG L Y, YE N. Target plate calibration for vision-based airborne equipment mounted attitude boresight [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2312-2320. (in Chinese)
- [3] 张跃强,苏昂,刘海波,等. 基于多直线对应和加权最小二乘的位姿估计[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(6):1722-1731.
ZHANG Y Q, SU A, LIU H B, et al.. Pose estimation based on multiple line hypothesis and iteratively reweighted least squares [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1722-1731. (in Chinese)

- [4] 冯春,吴洪涛,陈柏. 基于多传感器融合的航天器间位姿参数估计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1617-1622.
FENG CH, WU H T, CHEN B. Method for relative pose parameters between spacecrafts based on mixing of multi-sensor [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(5):1617-1622. (in Chinese)
- [5] 曾占魁,谷蔷薇,曹喜滨. 基于正交 Procrustes 分析的航天器单目视觉相对位姿确定方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(S):113-118.
ZENG ZH K, GU Q W, CAO X B. Relative pose monocular vision determination of spacecraft using orthogonal Procrustes analysis [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(S):113-118. (in Chinese)
- [6] LEPETIT V, NOGUER F M, FUA P. EPnP: An accurate O(n) solution to the PnP problem [J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 81(2):155-166.
- [7] HESCH J A, ROUMELIOTIS S I. A Direct Least-Squares (DLS) method for PnP [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2011: 383-390.
- [8] ZHENG Y, KUANG Y, SUGIMOTO S, et al..

- Revisiting the PnP problem: A fast, general and optimal solution [C]. *IEEE International Conference on Computer Vision*, 2013:2344-2351.
- [9] 刘昶,朱枫,欧锦军. 基于三条相互垂直直线的单目位姿估计[J]. *模式识别与人工智能*, 2012, 25(5): 737-744.
- LIU C, ZHU F, OU J J. Monocular pose determination from three perpendicular lines [J]. *PR&AI*, 2012, 25(5):737-744. (in Chinese)
- [10] LI S Q, XU C, XIE M. A robust O(n) solution to the perspective-n-point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, 34(7):1444-1450.
- [11] ANSAR A, DANILIDIS K. Linear pose estimation from points or lines [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5):578-589.
- [12] MIRAZEI F M, ROUMELIOTIS S I. Globally optimal pose estimation from line correspondences [C]. *IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA)*, 2011:5581-5588.
- [13] 李鑫,张跃强,刘进博,等. 基于直线段对应的相机位姿估计直接最小二乘法[J]. *光学学报*, 2015, 35(6):0615003.
- LI X, ZHANG Y Q, LIU J B, *et al.*. A direct least squares method for camera pose estimation based on straight line segment correspondences [J]. *ACTA OPTICAL SINICA*, 2015, 35(6): 0615003. (in Chinese)
- [14] 张政,张小虎,傅丹. 一种高精度鲁棒的基于直线对应的位姿估计迭代算法[J]. *计算机应用*, 2008, 28(2):326-329.
- ZHANG ZH, ZHANG X H, FU D. Accurate and robust iterative pose estimation from line correspondences [J]. *Computer Application*, 2008, 28(2): 326-329. (in Chinese)
- [15] ZHANG X H, ZHANG Z, LI Y, *et al.*. Robust camera pose estimation from unknown or known line correspondences [J]. *Appl Opt*. 2012, 51(7):936-948.
- [16] 张跃强,苏昂,刘海波,等. 基于多级直线表述和M-估计的三维目标位姿跟踪优化算法[J]. *光学学报*, 2015, 35(1):0115003.
- ZHANG Y Q, SU A, LIU H B, *et al.*. Three dimensional rigid objects pose tracking and optimization based on multilevel line representation and M-Estimation [J]. *ACTA OPTICAL SINICA*, 2015, 35(1):0115003. (in Chinese)
- [17] 于起峰,尚洋. 摄像测量学原理与应用研究[M]. 北京:科学出版社,2009.
- YU Q F, SHANG Y. *Videometrics: Principles and Researches* [M]. Beijing:Science Press, 2009. (in Chinese)
- [18] 李书杰,刘晓平. 摄像机位姿的高精度快速求解[J]. *中国图象图形学报*, 2014, 9(1):20-27.
- LI SH J, LIU X P. An accurate and fast algorithm for camera pose estimation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2014, 9(1):20-27. (in Chinese)

作者简介:



张振杰(1988—),男,河南林州人,博士研究生,2010年于兰州交通大学获得学士学位,2013年于信息工程大学获得硕士学位,主要从事计算机视觉,视觉导航等方面的研究。E-mail: zzxiaodao@126.com.

导师简介:



郝向阳(1966—),男,河南济源人,教授,博士生导师,1985年、1988年、1996年于解放军测绘学院分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事于视觉测量,视觉导航等方面的研究。E-mail: Xiangyanghao2004@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)