

文章编号: 0253-2239(2009)11-3129-07

基于点和直线段对应的扩展正交迭代位姿估计算法

许允喜¹ 蒋云良^{1,2} 陈方³

(¹湖州师范学院信息工程学院, 浙江 湖州 313000; ²浙江大学计算机学院, 浙江 杭州 310027)

³南京航空航天大学自动化学院, 江苏 南京 210016

摘要 正交迭代算法是基于点特征, 全局且快速收敛的位姿估计算法, 是目前性能最优的实时位姿估计算法之一。对摄像机观测到的直线段提出了其不确定性描述的新方法: 目标空间直线段误差, 并把该误差融入到正交迭代算法的位姿计算过程中, 形成扩展正交迭代算法。该算法可以同时利用点和直线段特征。算法先把点共面性方程表达为与正交迭代算法中点共线性方程一致的数学形式, 再根据目标空间点共面性误差定义了目标空间直线段共面性误差。接着把目标空间点共线性误差和直线段共面性误差二者之和作为误差函数。最后推导出使该函数最小化的迭代求解过程。实验结果表明, 本文算法是有效的, 精确的。与正交迭代算法的计算结果对比, 由于可以同时利用直线段特征, 扩展正交迭代算法的位姿估计误差更低, 抗噪声性能更强, 算法更稳定。

关键词 机器视觉; 正交迭代算法; 位姿估计; 扩展正交迭代算法; 交会对接

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092911.3129

An Extended Orthogonal Iteration Algorithm for Pose Estimation from Point and Line Segment Correspondences

Xu Yunxi¹ Jiang Yunliang^{1,2} Chen Fang³

¹ Institute of Information Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou, Zhejiang 31300, China
² College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China
³ College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract The orthogonal iteration algorithm is fast and globally convergent pose estimation based on points. And it is a one of the state-of-art real-time pose estimation algorithms. A new method that we express the uncertainty of sensed line segment using object-space line segment error is introduced. An extended orthogonal iteration algorithm is proposed. And it can use point and line segment feature simultaneously. Firstly we formulate coplanarity equation of point data into the same mathematics format with collinearity equation of point data and translate object-space coplanarity error of line segment into coplanarity error of point. Then the sum of object-space collinearity error of point and coplanarity error of line segment is used as error function. Finally, an iterative algorithm is developed to minimize the error function. The experiment results show that extended orthogonal iteration algorithm is effective and accurate. The algorithm can give more accurate, stable result and increase the noise resistance performance compared with the orthogonal iteration algorithm.

Key words machine vision; orthogonal iteration algorithm; pose estimation; extended orthogonal iteration algorithm; rendezvous and docking

1 引 言

位姿估计就是计算两参考坐标之间的相对旋转和平移。位姿估计问题是摄影测量学、计算机图形

学及机器人导航等领域的一个重要的基本理论问题, 是航天器交会对接视觉测量系统^[1,2]、自主航天器入港、无人机着陆等许多工程实践所要解决的核

收稿日期: 2008-11-13; 收到修改稿日期: 2009-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(60803053, 60872057)和浙江省自然科学基金(Y107759, Y1080212)资助项目。

作者简介: 许允喜(1978—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事机器视觉、视觉导航方面的研究。E-mail: xuyunxi@tom.com

心问题。

本文对目前被广泛应用的基于点对应的正交迭代实时位姿估计算法进行了研究,在正交迭代算法基础上推导出能同时处理点和直线段对应的扩展正交迭代算法。对摄像机观测到的直线段提出了其不确定性描述的新方法:目标空间直线段误差,该误差能够处理直线段端点的不稳定性,并把该误差融入到正交迭代算法的位姿计算过程中,形成扩展正交迭代算法,克服了正交迭代算法只能处理点对应的局限,成为通用的基于点和直线段对应的位姿估计算法。算法把目标空间点共线性误差和直线段共面性误差二者之和作为误差函数,推导出使该函数最小的迭代求解过程。实验结果验证了算法推导的正确性和算法的优越性,与正交迭代算法相比,扩展正交迭代算法的位姿估计误差更低,抗噪声性能更强,算法更稳定。

2 正交迭代算法

2.1 基于点对应的实时位姿估计算法研究概况

实时位姿估计方法是针对于那些需要实时控制而要求时间比较短的位姿估计情况。基于点对应的实时位姿估计算法一般分为二类:一类是线性(闭环)解法,一类是非线性解法。对于3个或4个非共线的特征点,可以采用线性算法得到位姿闭环解^[3~5]。由于受实际应用成像过程中的测量误差、量化误差、特征点提取误差或特征点匹配错误等因素影响,使用闭环解算法可能会产生很大的误差。

对4个以上的特征点,一般采用非线性优化算法^[6,7]。然而多数的非线性优化方法需要先由线性算法求出一个初始解,才能收敛到正确解,且计算过程较复杂。Levenberg-Marquardt方法是解决该非线性优化问题的经典方法^[7],其计算速度较快,但算法受迭代初始值影响较大。

文献[8]提出了正交迭代(OI)算法。算法采用迭代求解方法,具有迭代次数少,计算精度高,计算速度快且全局收敛的特点,可用于实时位姿估计。算法达到了与Levenberg-Marquardt方法相当的精确度,但计算效率更高,受初始值影响很小,对错误数据的稳健性更高^[8]。

目前,许多学者针对4点以上的特征提出了许多新算法,文献[9]给出了不要求初始化的线性位姿估计算法。文中把其与正交迭代算法作了对比,计算精度和实时性方面都不及正交迭代算法。文献[10]采用了遗传算法用于增强现实系统的位姿估计,文献

[11]提出了共面目标稳健位姿估计算法,两种算法稳健性较高,但计算时间太长,不能用于实时系统。

正交迭代算法已经成为目前性能最优的实时位姿估计算法之一,被广泛应用。文献[12]利用正交迭代算法建立了空间交会对接测量实验系统。文献[13]把高斯-牛顿方法和正交迭代算法分别用于基于视觉的无人机空中加油的位姿估计,对比了二种算法的各种性能,实验结果表明:两个算法的计算精确度相当,正交迭代算法在耗费更大的计算量下获得了更高的稳健性。文献[14]在正交迭代算法基础上推导出了多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法。本文在正交迭代算法基础上推导出能同时处理点和直线段对应的扩展正交迭代算法。

2.2 正交迭代算法的目标空间点共线性误差

正交迭代算法利用目标空间点共线性误差进行位姿估计,如图1所示。 $O'-X'Y'Z'$ 为摄像机坐标系,投影中心在原点,光轴为正 Z' 方向。 $O-XYZ$ 为目标坐标系。

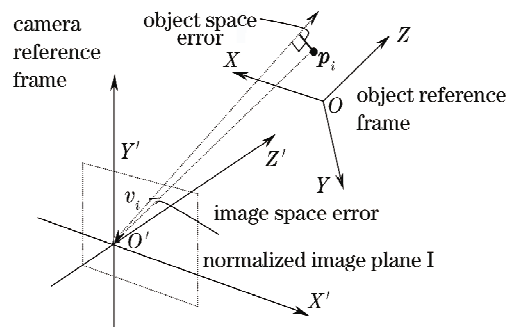


图1 位姿估计的目标空间共线性误差

Fig. 1 Object-space collinearity errors for pose estimation

给定目标3D特征点坐标 $p_i = [x_i, y_i, z_i]^T$,在摄像机坐标系下的对应点为 $q_i = [x'_i, y'_i, z'_i]^T$,二者变换关系为

$$q_i = R p_i + t, \quad (1)$$

其中 $R = [r'_1, r'_2, r'_3]^T$, $t = [t_x, t_y, t_z]^T$ 分别为旋转矩阵和平移向量。

如图1所示, p_i 投影在归一化图像平面得到的像点为 $v_i = [u_i, v_i, 1]^T$ 。目标空间中的共线性方程^[8]为

$$R p_i + t = V_i (R p_i + t), \quad (2)$$

则目标空间共线性误差(见图1)^[8]为

$$e_i = (I - V_i)(R p_i + t), \quad (3)$$

其中 $V_i = \frac{v_i v_i^T}{v_i^T v_i}$ 是沿视线方向的投影矩阵, I 为单位矩阵。

取目标函数：

$$E(\mathbf{R}, t) = \sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{I} - \mathbf{V}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t)\|^2, \quad (4)$$

约束条件为： $\mathbf{R}\mathbf{R} = \mathbf{I}$

正交迭代算法就是求解 \mathbf{R} 和 t 使得共线性平方和误差最小。

3 扩展正交迭代算法

本文对摄像机观测到的直线段给出了其不确定性的描述新方法：目标空间直线段共面性误差，并把该误差融入到正交迭代算法的位姿计算过程中，把点共线性误差和直线段共面性误差之和作为优化的目标函数，形成扩展正交迭代算法。

3.1 目标空间直线段共面性误差

3.1.1 目标空间点共面性方程

为了说明目标空间直线段共面性方程，图 2 给出了直线段对应的位姿估计摄像机模型。在图 2 中，直线段 L_i 投影在归一化图像平面上得到图像直线段 l_i ，则 L_i, l_i, O' 处于同一平面 N_i 。该图说明了任意直线段与其成像在同一个过光心的平面上。文献 [15] 从欧式空间的角度推导出点共面性方程的新形式。在本文中，我们从几何角度更加清晰直观地推导了该方程，进而更好地理解直线段共面性误差的定义。如图 3，在图 2 中的平面 N_i 上建立任意 2 个互相垂直的向量 \mathbf{X}^{L_i} （其单位向量坐标在摄像机坐标系下表示为 \mathbf{h}_i ）和 \mathbf{Y}^{L_i} （其单位向量坐标在摄像机坐标系下表示为 \mathbf{g}_i ）。

向量 \mathbf{p}_i 在向量 \mathbf{X}^{L_i} 上的投影坐标为 $\mathbf{G}_i(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t)$

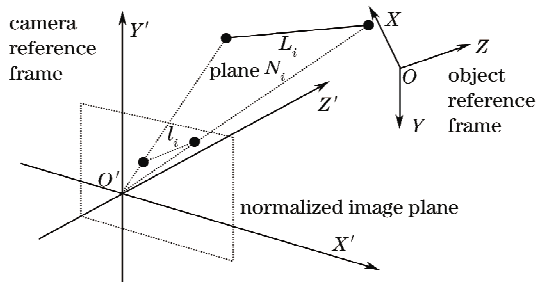


图 2 直线段对应的位姿估计摄像机模型

Fig. 2 Camera model for pose estimation for line segment

$t)$ ，其中投影矩阵 $\mathbf{G}_i = \mathbf{g}_i\mathbf{g}_i^T$

向量 \mathbf{p}_i 在向量 \mathbf{Y}^{L_i} 上的投影坐标为 $\mathbf{H}_i(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t)$ ，其中投影矩阵 $\mathbf{H}_i = \mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^T$

则由空间解析几何知识可得出：向量 \mathbf{p}_i 在平面 N_i 上的投影坐标为 $(\mathbf{G}_i + \mathbf{H}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t)$

令 $\mathbf{U}_i = \mathbf{G}_i + \mathbf{H}_i$ ，则目标空间中的点共面性方程为

$$\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t = \mathbf{U}_i(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + t), \quad (5)$$

其中投影矩阵 $\mathbf{U}_i = \mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^T + \mathbf{g}_i\mathbf{g}_i^T$

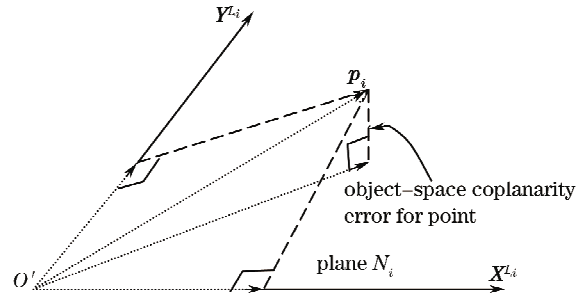


图 3 目标空间点共面性误差

Fig. 3 Object-space coplanarity error for point

3.1.2 目标空间直线段共面性误差

如图 2，直线段 L_i 在归一化图像平面 I 上成像为直线段 l_i 。 l_i, O' 决定一个平面 N_i ， L_i 也处于平面 N_i 上，表明了任意空间直线段与其成像在同一个过光心的平面上。直线段 L_i 上的 2 个端点 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 和 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 。如果 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 和 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 与平面 N_i 共面，则直线段 L_i 与平面 N_i 共面。因此，我们可以把直线段 L_i 与平面 N_i 共面性方程转化为 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 和 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 点与平面 N_i 共面性方程，形式如(5)式，则：

目标空间 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 点共面性误差为：

$$e_1^{L_i} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_1^{L_i} + t);$$

目标空间 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 点共面性误差为：

$$e_2^{L_i} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_2^{L_i} + t).$$

点共面性误差和正交迭代算法中的点共线性误差数学形式一致。从几何上看，点共线性误差是点向直线的正交投影误差，由图 3 可知点共面性误差为点到平面的正交投影误差。

我们把直线段 L_i 目标空间共面性平方误差定义为目标空间 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 和 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 点共面性误差平方和：

$$\|e_{L_i}\|^2 = \|e_1^{L_i}\|^2 + \|e_2^{L_i}\|^2 = \sum_{j=1}^2 \|(\mathbf{I} - \mathbf{U}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_j^{L_i} + t)\|^2, \quad (6)$$

3.2 算 法

设目标物体共有 n 个点 $(\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n)$ 和 m 条直线段 (L_1, \dots, L_m) 特征。直线段 L_i 的端点 $\mathbf{p}_1^{L_i}$ 设定为 \mathbf{p}_{n+2i-1} ，端点 $\mathbf{p}_2^{L_i}$ 设定为 \mathbf{p}_{n+2i} 。

建立扩展正交迭代算法的目标函数：

$$\begin{aligned}
 E(\mathbf{R}, \mathbf{t}) &= \sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 + \sum_{i=1}^m \|e_{L_i}\|^2 = \sum_{i=1}^n \|(\mathbf{I} - \mathbf{V}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_i + \mathbf{t})\|^2 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^2 \|(\mathbf{I} - \mathbf{U}_i)(\mathbf{R}\mathbf{p}_j^{L_i} + \mathbf{t})\|^2 \\
 &= \sum_{j=1}^N \|(\mathbf{I} - \mathbf{W}_j)(\mathbf{R}\mathbf{p}_j + \mathbf{t})\|^2, \text{约束条件为: } \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}
 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{W}_j = \begin{cases} \mathbf{V}_j, i = j, j = 1, \dots, n \\ \mathbf{U}_i, i = \text{INT}[(j - n + 1)/2], j = n + 1, n + 2 \times m \end{cases}$$

$N = n + 2 \times m$, $\text{INT}[\]$ 表示小数点四舍五入取整。

此目标误差函数为目标空间点共线性误差和直线段共面性误差总和,优化目标就是求解 \mathbf{R} 和 \mathbf{t} 使该误差函数最小。而正交迭代算法只能使目标空间点共线性误差最小,因此当目标物体存在直线段特征时,扩展正交迭代算法较正交迭代算法优越。误差函数(7)式与正交迭代算法的误差函数(4)式数学形式一致,因此可以采用和正交迭代算法相似的迭代求解过程。

当旋转矩阵 \mathbf{R} 给定时,可得到 \mathbf{t} 关于 \mathbf{R} 的最优解^[8]:

$$\mathbf{t}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} (\mathbf{I} - \frac{1}{n} \sum_i \mathbf{W}_i)^{-1} \sum_i (\mathbf{W}_i - \mathbf{I}) \mathbf{R} \mathbf{p}_i, \quad (8)$$

定义:

$$\mathbf{q}_i(\mathbf{R}) = \mathbf{W}_i [\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}(\mathbf{R})], \bar{\mathbf{p}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i, \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{R}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i(\mathbf{R}), \mathbf{M}(\mathbf{R}) = \sum_{i=1}^n \mathbf{q}'_i(\mathbf{R}) \mathbf{p}'_i, \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}, \mathbf{q}'_i(\mathbf{R}) = \mathbf{q}_i(\mathbf{R}) - \bar{\mathbf{q}}(\mathbf{R}), \quad (10)$$

迭代求解过程为:首先假设 \mathbf{R} 的第 k 次估计为 $\mathbf{R}^{(k)}$,则得 $\mathbf{t}^{(k)} = \mathbf{t}(\mathbf{R}^{(k)})$, $\mathbf{q}_i^{(k)} = \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}^{(k)}$ 。则:

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \underset{\mathbf{R}}{\text{argmin}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{W}_i \mathbf{q}_i^{(k)}\|^2 = \underset{\mathbf{R}}{\text{argmin}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{q}_i(\mathbf{R}^{(k)})\|^2, \quad (11)$$

$$= \underset{\mathbf{R}}{\text{argmax}} \text{tr}[\mathbf{R}^T \mathbf{M}(\mathbf{R}^{(k)})], \quad (12)$$

(12)式可以使用奇异值分解(SVD)^[8]来求解。重复上述过程,直至算法收敛或误差小于某个值。

3.3 算法的讨论

一般而言,在自然场景的物体位姿估计中,被投影的目标物体直线段只能与图像的部分直线段匹配,直线段的端点是极不稳定的,主要有二个方面的原因。第一:因为景象里的物体遮挡,一条直线段可能在一幅图像里较长,在另一幅里较短;同时被遮挡的部分也会随着时间而变化。第二:因为光照和物体表面的反射经常随着视点的变化和光源的变化而变化,线段的端点也会随着图像而变化。对于这种情况,我们不能获得匹配的端点特征,因为在正交迭代算法中只能利用匹配的点特征的共线性误差用于位姿估计,所以就不能利用该直线段特征。而在扩展正交迭代算法中,获取的部分直线段与摄像机原点决定了一个平面,这时,我们可以利用直线段共面性误差用于位姿估计的目标函数误差计算,因此可

以进一步提高位姿估计的计算精度。因此,这种情况下扩展正交迭代算法的优势很明显。

在少数情况(如合作目标的位姿估计)下,可以得到完全匹配的直线段端点。这时,正交迭代算法可以把匹配的直线段端点用于计算点共线性误差。而在扩展正交迭代算法中直线段的端点特征不仅可以作为点对应用于计算点共线性误差而且可以用于计算直线段共面性误差,比在正交迭代算法中可以利用的信息更多,因此位姿估计的精度更高,在这种情况下扩展正交迭代算法的位姿估计性能也优于正交迭代算法。

算法克服了正交迭代算法只能处理点对应的缺陷,系统地解决了点特征和直线段特征共存时的位姿估计问题,是通用的基于点和直线段对应的位姿估计算法。由于算法是在正交迭代算法基础上推导出的,所以也继承了正交迭代算法的一切优点:迭代次数少、计算精度高、快速且全局收敛。

4 实验结果与分析

为了验证算法推导的正确性,我们建立了 matlab 仿真实验。摄像机的等效焦距为 1600。 t 的相对误差为 $\frac{t' - t}{t}$, t' 为计算值, t 为真实值; R 的绝对误差为三个欧拉角的均方根误差 $\sqrt{(\theta' - \theta)^2 + (\varphi' - \varphi)^2 + (\gamma' - \gamma)^2}$, $\theta', \varphi', \gamma'$ 为计算值, θ, φ, γ 为真实值。目标的点特征和直线段特征投影到归一化图像平面产生图像点, 在图像点上加入零均值且标准方差为 σ 的高斯噪声, 然后采用最小二乘曲线拟合方法获得图像直线段。

如图 4, 由 $[-5, 5] \times [-5, 5] \times [-5, 5]$ 空间定义的立方体, 我们取如图 4 所示的 4 个特征点和 2 条直线段特征。在实验中, 3 个旋转角 θ, φ, γ 按平均分布随机产生得到旋转矩阵 R 。每个实验运行 1000 次, 平均旋转误差和平移误差通过 1000 个均匀分布的旋转矩阵计算得到。扩展正交迭代算法的

实验结果与正交迭代算法进行了对比。

实验分成二种情况:

情况 1: 空间直线段特征和图像直线段特征完全匹配, 能够获得端点的匹配;

情况 2: 直线段 L_1 和 L_2 只能与图像的部分直线段匹配, 不能获得端点的匹配;

仿真实验 1(研究算法的抗噪声性能): 固定平移向量 $t = [5, 5, 100]^T$, σ 从 0.5 像素到 4 像素变化。实验结果如表 1 和表 2。

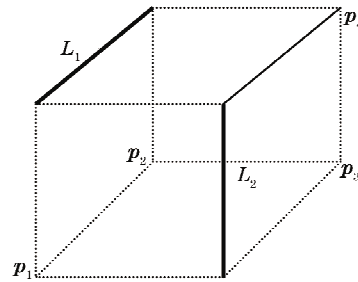


图 4 点和直线段特征

Fig. 4 Point and line segment feature

表 1 二种算法在情况 1 下位姿估计误差与图像噪声的关系

Table 1 Error of two algorithms for pose estimation as a function of image noise on the condition 1

algorithm		image noise pixels							
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.12	0.25	0.37	0.49	0.62	0.75	0.87	0.99
	rotation error /($^{\circ}$)	0.25	0.50	0.77	1.02	1.25	1.49	1.79	1.99
extended orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.11	0.23	0.34	0.44	0.56	0.68	0.79	0.89
	rotation error /($^{\circ}$)	0.22	0.44	0.71	0.92	1.16	1.40	1.65	1.89

表 2 二种算法在情况 2 下位姿估计误差与图像噪声的关系

Table 2 Error of two algorithms for pose estimation as a function of image noise on the condition 2

algorithm		image noise pixels							
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.20	0.41	0.61	0.82	1.02	1.22	1.39	1.60
	rotation error /($^{\circ}$)	0.49	0.97	1.47	1.94	2.47	2.87	3.35	3.83
extended orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.14	0.29	0.43	0.56	0.71	0.87	1.01	1.12
	rotation error /($^{\circ}$)	0.30	0.62	1.01	1.37	1.73	2.11	2.35	2.85

仿真实验 2(研究算法在不同摄像距离下的稳定性): 固定 $t_x = 5, t_y = 5$ 。使目标到相机距离与目标大小之比 $t_z/10$ 以步长为 5 在 5 ~ 40 内变化, 产生对应的一组 z 方向分量 t_z , 图像噪声固定为 1.5 pixel。实验结果如表 3 和表 4。

表 3 二种算法在情况 1 下位姿估计误差与摄像距离的关系

Table 3 Error of two algorithms for pose estimation as a function of distance to camera on the condition 1

algorithm		distance to camera / object size							
		5	10	15	20	25	30	35	40
orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.19	0.38	0.56	0.73	0.92	1.11	1.25	1.56
	rotation error /($^{\circ}$)	0.38	0.75	1.11	1.49	1.90	2.27	2.68	3.06
extended orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.17	0.34	0.51	0.65	0.84	1.00	1.13	1.42
	rotation error /($^{\circ}$)	0.34	0.66	1.05	1.37	1.74	2.12	2.47	2.94

表 4 二种算法在情况 2 下位姿估计误差与摄像距离的关系

Table 4 Error of two algorithms for pose estimation as a function of distance to camera on the condition 2

algorithm		distance to camera /object size							
		5	10	15	20	25	30	35	40
orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.31	0.62	0.89	1.17	1.52	1.84	2.13	2.46
	rotation error /($^{\circ}$)	0.69	1.43	2.15	2.99	3.70	4.59	5.26	6.00
extended orthogonal iteration algorithm	relative translation error /%	0.22	0.43	0.64	0.83	1.05	1.29	1.48	1.78
	rotation error /($^{\circ}$)	0.47	0.96	1.57	2.08	2.59	3.32	3.74	4.59

当图像噪声从 0.5 pixel 到 4 pixel 变化时,表 1 和表 2 分别给出了在情况 1 和情况 2 下正交迭代算法和扩展正交迭代算法的相对平移误差和旋转误差。从表 1 和表 2 数据可得,在情况 1 下和情况 2 下,在各噪声水平下,扩展正交迭代算法的相对平移误差和旋转误差均小于正交迭代算法。所以,随着图像噪声的加大,两种算法计算误差都随之增大,但显然扩展正交迭代算法的抗噪声性能更强,位姿估计误差更小。

表 3 和表 4 分别给出了在情况 1 和情况 2 下当 $t_z/10$ 从 5 到 40 变化时正交迭代算法和扩展正交迭代算法的相对平移误差和旋转误差。从表 3 和表 4 数据可得,在情况 1 和情况 2 下,在各摄像距离条件下,扩展正交迭代算法的相对平移误差和旋转误差均小于正交迭代算法。当摄像机逐渐远离目标物体时,两种算法的位姿估计误差也随之增大,但扩展正交迭代算法的增速更缓慢一些。所以,扩展正交迭代算法更稳定,位姿估计误差更小。

情况 1 下,在正交迭代算法中可以利用直线段 L_1 和 L_2 端点特征点共线性误差用于位姿估计,在扩展正交迭代算法中我们可以同时利用直线段 L_1 和 L_2 端点特征点共线性误差和共面性误差。情况 2 下,在正交迭代算法中完全不能利用直线段 L_1 和 L_2 特征点用于位姿估计,而在扩展正交迭代算法中我们可以利用直线段 L_1 和 L_2 的共面性误差。由表 1~表 4 可以看出,与正交迭代算法相比,扩展正交迭代算法的位姿估计误差在情况 2 下降低得更多,因此,情况 2 下扩展正交迭代算法的优势更明显。

5 结 论

对基于点特征的正交迭代算法进行了研究,推导了同时可以利用直线段特征的扩展正交迭代算法。该算法把目标空间直线段共面性误差转化为点共面性误差,把目标空间点共线性误差和直线段共面性误差二者之和作为误差函数,将其扩展成统一

求解形式,得出使该函数最小的迭代求解过程。对该算法进行了数学仿真,并与正交迭代算法的计算结果进行了对比。实验结果表明,该算法是有效的、精确的。另外,如何把一些高阶几何元素如曲线、圆等融入到正交迭代位姿估计算法中将是一个值得研究的方向。

参 考 文 献

- Zhu Renzhan, Lin Yan, Zhang Lei. New algorithm of solving for ranges during final approach of spacecraft rendezvous[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2006, 32(7): 764~768
- 朱仁璋,林彦,张磊. 航天器交会计算机视觉系统测距求解新算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2006, 32(7): 764~768
- Cao Xibin, Zhang Shijie. An iterative method for vision-based relative pose parameters of RVD spacecrafts [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(8): 691~694
- 曹喜滨,张世杰. 航天器交会对接位姿测量迭代算法[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2005, 37(8): 691~694
- R. Horaud, B. Canio, O. Le Boulleux. An analytic solution for the perspective 4-Point Problem [J]. *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, 1989, 47(1): 33~44
- D. DeMenthon, L. S. Davis. Exact and Approximate Solutions of the Perspective-Three-Point Problem [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, 14(11): 1100~1105
- M. Dhome, M. Richetin, J. Laprestre et al.. Determination of the attitude of 3D objects from a single perspective view [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(12): 1265~1278
- M. Fischler, R. C. Bolles. Random sample consensus: a paradigm for model fitting and automatic cartography[J]. *Comm. ACM*, 1981, 6(24): 381~395
- D. G. Lowe. Fitting parameterized three-dimensional models to images [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, 13(5): 441~450
- C. P. Lu, G. Hager, E. Mjølness. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2000, 22(5): 610~62
- Adnan Ansar, Kostas Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, 25(5): 578~589
- Ying Kin Yu, Kin Hong Wong, Michael Ming Yuen Chang. Pose estimation for augmented reality applications using genetic algorithm[J]. *IEEE Trans on System, Man, and Cybernetics*, 2005, 36(6): 1295~1301
- Gerald Schweighofer, Axel Pinz. Robust pose estimation from a planar target[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, 28(12): 2024~2030
- Zhang Zhiyong, Zhang Jing, Zhu Dayong. A fast convergent

- pose estimation algorithm and experiments based on vision images [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, **28**(4): 943~947
- 张志勇, 张靖, 朱大勇. 一种基于视觉成像的快速收敛的位姿测量算法及实验研究[J]. *航空学报*, 2007, **28**(4): 943~947
- 13 Mario L. Fravolini, Lorenzo Pollini, Brian Stolarik. A comparison of pose estimation algorithms for machine vision based aerial refueling for UAVs[C]. *Proc. of the 2006 Conference on Control and Automation, Mediterranean, June 2006*: 1~6
- 14 Xu Yunxi, Jiang Yunliang, Chen Fang. A generalized orthogonal iterative algorithm for pose estimation of multiple camera systems [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 72~77
- 许允喜, 蒋云良, 陈方. 多摄像机系统位姿估计的广义正交迭代算法[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 72~77
- 15 Zhang Zheng, Zhang Xiaohu, Fu Dan. Accurate and robust iterative pose estimation from line correspondences [J]. *J. Computer Applications*, 2008, **28**(2): 326~329
- 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