

文章编号:1004-4213(2010)10-1881-8

基于点线对应的多摄像机全局位姿估计迭代算法*

许允喜¹, 蒋云良¹, 陈方², 刘勇³

(1 湖州师范学院 信息与工程学院, 浙江 湖州 313000)

(2 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 210016)

(3 浙江大学 工业控制国家重点实验室, 杭州 310027)

摘 要:为了解决工业视觉场景中点和直线段共存情况下的多摄像机位姿估计问题,提出了基于点线特征对应的多摄像机全局位姿估计算法.以正交迭代算法为基础,使用多个固定在平台上的已标定摄像机间的几何约束,以全局方式处理多摄像机的重叠和非重叠视图的点和直线段特征,获得更加稳定精确的位姿估计.该算法先把所有摄像机数据进行统一表达,再把摄像机观测到的全部点特征的目标空间共线性误差和直线段特征的目标空间共面性误差之和作为误差函数,最后经数学推导得到使该误差函数最小化的迭代求解过程.实验结果验证了该算法的有效性以及优越性.

关键词:机器视觉;正交迭代算法;位姿估计;多摄像机系统;交会对接

中图分类号:TP391.41

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20103910.1881

0 引言

位姿估计是航天器交会对接视觉测量系统^[1-2]、移动机器人导航与定位、自主航天器入港、机器人手眼定标等许多工程实践和理论研究所要解决的核心问题.

目前,位姿估计算法研究主要有二类:基于点对应的位姿估计算法^[3-6]和基于直线对应的位姿估计算法^[7-9].绝大多数算法都把基于点和直线对应作为不同的情况进行研究,算法只能处理点对应或者只能处理直线对应的情况.

直线段是机器人和视觉领域中一类很重要的几何基元,尤其在室内环境和工业应用中.一般情况下,被投影的目标物体直线段只能与图像的部分直线段匹配,图像直线段端点的精确位置未知(或者由于遮挡被替代了),不能得到匹配的端点特征.对于这种情况,几乎所有的算法都把直线段的端点忽略掉,而考虑无限长直线,即把其归为基于无限长直线对应的位姿估计问题.这种处理方法有局限性,因为直线的不确定性并不能精确反映所观测到的直线段的不确定性.鉴于直线段不同于无限长直线,所以本文对其区别讨论.

近年来多摄像机视图几何及其计算方法在计算

机视觉中受到很多关注,多摄像机视频监控、多摄像机运动分析、多摄像机定标等领域成为研究热点^[10-13].在视觉系统中使用更多的摄像机,既可以利用多视角得到物体的完整信息,也可以利用冗余的信息,以换取系统对噪音的鲁棒性.在位姿估计中,多摄像机之间的信息关联和融合的研究也逐渐被重视起来.使用多个固定在平台上的已标定摄像机有附加的几何约束,可以获得更加稳定鲁棒的位姿估计.

直线段有二种情况: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,这时直线段匹配可以直接转化为点匹配;2)直线段只能与图像的部分直线段匹配,不能获得端点的匹配,这时直线段匹配不能转化为点匹配.本文针对情况2)利用直线段共面性误差,把多摄像机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,优化目标函数使其误差达到全局最小.本文推导出基于点线对应的多摄像机全局位姿估计迭代算法.该算法是统一的、通用的多摄像机位姿估计算法.算法以全局方式同时处理的点线特征,所有摄像机观测到的点和直线段同时参与迭代计算,使误差达到全局最小.算法仿真实验表明,该算法是有效的、精确的、优越的.

1 基于点对应的实时位姿估计算法

基于点对应的位姿估计算法一般分为二类:线性(闭环)解法和非线性解法.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

*国家自然科学基金(60872057、60803053)、浙江省自然科学基金(Y1101237、R1090244、Y1080212)和浙江省科技计划项目(2008C21083)资助

Tel:0572-2321106

Email:xuyunxi@hutc.zj.cn

收稿日期:2010-03-29

修回日期:2010-07-05

解^[4-6], 由于在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^[14-16]; 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(高斯-牛顿方法的变形)是解决该非线性优化问题的经典方法^[15-16], 但算法受迭代初始值影响较大。

文献[3]提出了一种位姿估计算法: 正交迭代(Orthogonal Iteration, OI)算法, 采用迭代求解方法, 具有迭代次数少、计算准确度高、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, 且计算效率更高, 受初始值影响很小, 对错误数据的鲁棒性更高^[3]。文献[17]给出了不要求初始化的线性位姿估计算法。文中将其与正交迭代算法作了对比, 计算准确度和实时性方面都不及正交迭代算法。文献[18]利用正交迭代算法提出了共面目标的鲁棒位姿估计算法, 但运行时间太长, 也不能用于实时计算。

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[19, 20]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[21]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鲁棒性。文献[22]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, 和常用的多摄像机位姿估计算法进行了对比, 获得了更高的准确度和鲁棒性。文献[23]在正交迭代算法基础上推导出了基于点和直线段对应的扩展正交迭代位姿估计算法。本文在此基础上推导出基于点线对应的多摄像机全局位姿估计迭代算法, 算法对多摄像机观测到的全部点和直线段特征进行全局计算, 获得更加稳定精确的位姿估计, 是通用的基于点线对应的多目视觉位姿估计算法。

2 正交迭代算法的目标空间点共线性误差

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

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

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

如图 1, 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^[3]为

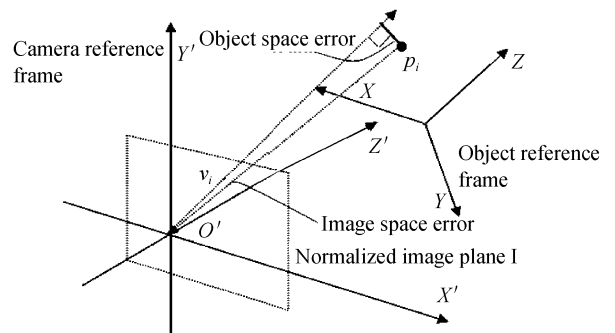


图 1 位姿估计的目标空间共线性误差

Fig. 1 Object-space collinearity errors for pose estimation

$$R p_i + t = \hat{V}_i (R p_i + t) \quad (2)$$

则目标空间共线性误差^[3]为

$$e_i = (I - \hat{V}_i) (R p_i + t) \quad (3)$$

式中, $\hat{V}_i = \frac{v_i v_i^T}{v_i^T v_i}$ 是沿视线方向的投影矩阵。

3 单摄像机模型的目标空间直线段共面性误差

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单摄像机模型。图中, 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 。图 2 说明了任意直线段与其成像在同一个过光心的平面上。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

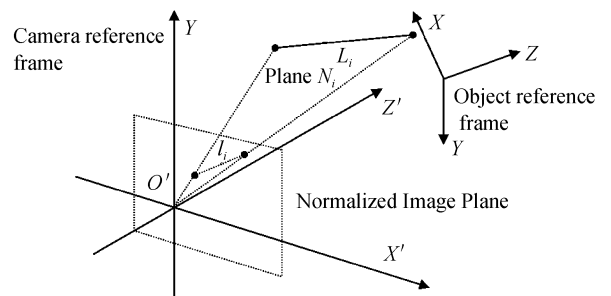


图 2 直线段对应的位姿估计单摄像机模型

Fig. 2 Single camera model for pose estimation for line segment

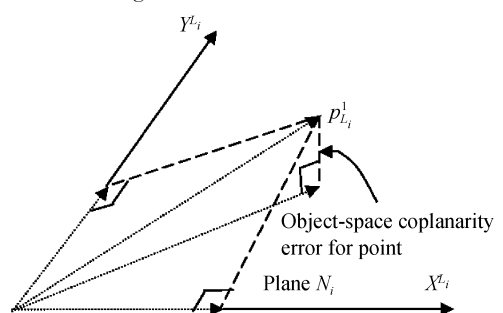


图 3 目标空间点共面性误差

Fig. 3 Object-space coplanarity error for point

$O'X^{L_i}$ (其单位向量坐标在摄像机坐标系下表示为 h_i) 和 $O'Y^{L_i}$ (其单位向量坐标在摄像机坐标系下表示为 g_i),

向量在 $O'p_i$ 在向量 $O'X^{L_i}$ 上的投影坐标为

$$\hat{G}_i(Rp_i+t)$$

其中投影矩阵 $\hat{G}_i = g_i g_i^T$

向量在 $O'p_i$ 在向量 $O'Y^{L_i}$ 上的投影坐标为

$$\hat{H}_i(Rp_i+t)$$

其中投影矩阵 $\hat{H}_i = h_i h_i^T$

则向量 $O'p_i$ 在平面 N_i 上的投影坐标为

$$(\hat{G}_i + \hat{H}_i)(Rp_i+t)$$

令 $U_i = \hat{G}_i + \hat{H}_i$, 则目标空间中的点共面性方程为^[8,23]

$$Rp_i+t = \hat{U}_i(Rp_i+t) \tag{4}$$

对于无限长直线 (其单位向量为 D_i), 其共面性方程^[8]为

$$D_i = \hat{U}_i D_i \tag{5}$$

式中投影矩阵 $\hat{U}_i = h_i h_i^T + g_i g_i^T$

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 $p_{L_i}^1$ 和 $p_{L_i}^2$. 如果 $p_{L_i}^1$ 和 $p_{L_i}^2$ 与平面 N_i 共面, 则直线段 L_i 与平面 N_i 共面. 因此, 可以把直线段 L_i 与平面 N_i 共面性方程转化为 $p_{L_i}^1$ 和 $p_{L_i}^2$ 点与平面 N_i 共面性方程, 如式 (4), 则目标空间 $p_{L_i}^1$ 点共面性误差为

$$e_{L_i}^1 = (I - \hat{U}_i)(Rp_{L_i}^1+t)$$

目标空间 $p_{L_i}^2$ 点共面性误差为

$$e_{L_i}^2 = (I - \hat{U}_i)(Rp_{L_i}^2+t)$$

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. 则直线段 L_i 目标空间共面性平方误差为目标空间 $p_{L_i}^1$ 和 $p_{L_i}^2$ 点共面性误差平方和^[18]

$$e_{L_i}^2 = e_{L_i}^{1^2} + e_{L_i}^{2^2} = \sum_{d=1}^2 (I - \hat{U}_i)(Rp_{L_i}^d+t)^2 \tag{6}$$

4 基于点线对应的多摄像机全局位姿估计迭代算法

4.1 多摄像机目标空间点共线性误差和直线段共面性误差

设多摄像机系统有 M 个摄像机 (如图 4 和 5), $X-Y-Z$ 为目标参考坐标系, $X_j-Y_j-Z_j$ ($j=1, 2, \dots, M$) 为各摄像机的参考坐标系, o_j 为摄像机 j 的光心. 选定某摄像机 k 的坐标系为整个多摄像机系统的参考坐标系, 摄像机 k 坐标系与目标参考坐标系之间的旋转矩阵、平移向量为待估计参量 R 和 t . 由于多摄像机系统中各个摄像机坐标都已标定, 各个摄像机之间的相对位置和方向都是已知的, 设其他的摄像机 j 坐标系与摄像机 k 坐标系之间的旋转矩阵为 R_c^j , 平移向量为 t_c^j . 设 $R_c^j = \begin{cases} R_c^j, j \neq k \\ I, j = k \end{cases}$, I 为

3×3 的单位矩阵, $t_c^j = \begin{cases} t_c^j, j \neq k \\ 0, j = k \end{cases}$.

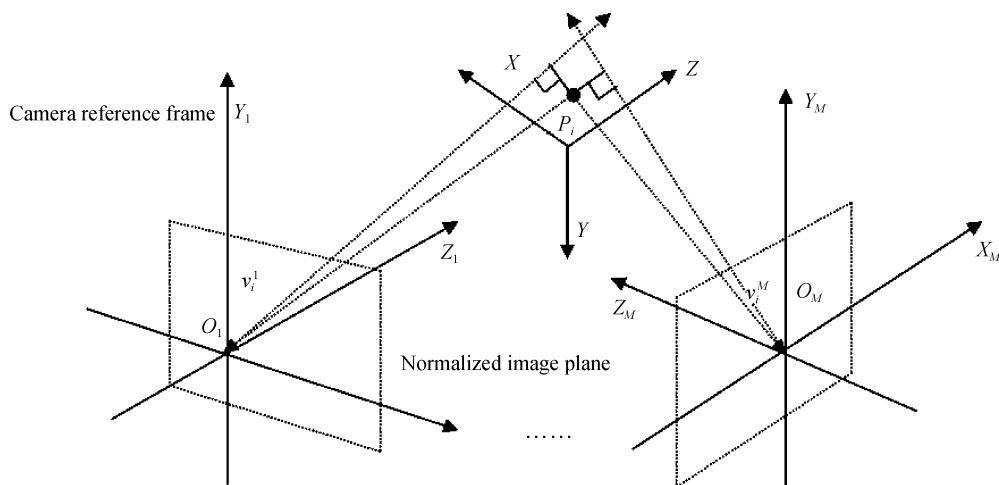


图 4 多摄像机系统位姿估计的目标空间误差
Fig. 4 Object-space errors of MCS for pose estimation

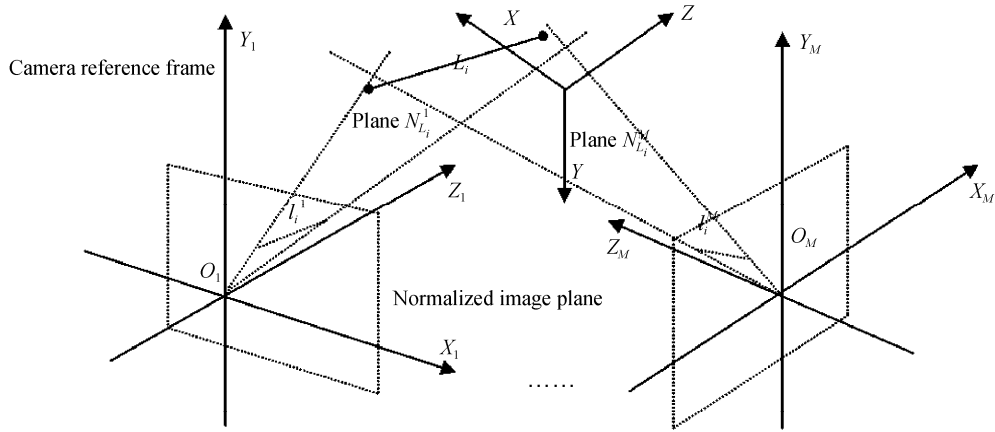


图5 直线段对应的多摄像机位姿估计

Fig. 5 Camera model for pose estimation for line segment

4.1.1 多摄像机目标空间点共线性误差

特征点在该目标参考坐标系下坐标设为 p_i , 特征点 p_i 相对于摄像机 j 坐标系设为 $q_i^j, j=1, 2 \dots M$. p_i 投影在摄像机 j 归一化图像平面得到的像点坐标为 $v_i^j = (u_i^j, v_i^j, 1)^T, j=1, 2 \dots M$. 多摄像机系统的空间目标共线性误差如图 4. 把其他摄像机数据都转化在摄像机 k 坐标系下, 以下数据均相对于摄像机 k 坐标系.

目标物体的特征点 p_i 的坐标 $q_i^k = R p_i + t$;

$o_j q_i^j$ 向量坐标

$$q_i^j = q_i^k - [R_c^j * (0, 0, 0)^T + t_c^j] = R p_i + t - t_c^j \quad (7)$$

$o_j v_i^j$ 向量坐标为

$$v_i^j = (R_c^j v_i^j + t_c^j) - [R_c^j (0, 0, 0)^T + t_c^j] = R_c^j v_i^j;$$

沿 $o_j v_i^j$ 视线方向的投影矩阵

$$\hat{V}_i^j = \frac{v_i^j v_i^{jT}}{v_i^{jT} v_i^j} = \frac{R_c^j v_i^j v_i^{jT} R_c^{jT}}{v_i^{jT} R_c^{jT} R_c^j v_i^j};$$

$o_j q_i^j$ 向量在直线 $o_j v_i^j$ 的投影向量为 $\hat{V}_i^j q_i^j$.

点 p_i 的目标空间共线性平方误差为

$$\|e_i^j\|^2 = \|q_i^j - \hat{V}_i^j q_i^j\|^2 = \|(I - \hat{V}_i^j)(R p_i + t - t_c^j)\|^2 \quad (8)$$

4.1.2 多摄像机目标空间直线段共面性误差

如图 5, 设直线段 L_i 在摄像机 j 上的投影直线段为 $l_i^j, O_j l_i^j$ 决定的平面为 $N_{l_i^j}$. 设在平面 $N_{l_i^j}$ 上建立的 2 个互相垂直的向量 $O_j X_{l_i^j}$ (其单位向量坐标在摄像机坐标系 j 下表示为 $h_{l_i^j}^j$) 和 $O_j Y_{l_i^j}$ (其单位向量坐标在摄像机坐标系 j 下表示为 $g_{l_i^j}^j$). 直线段 L_i 的 2 个端点为 $p_{l_i^j}^1$ 和 $p_{l_i^j}^2$. 把其他摄像机数据都转化在摄像机 k 坐标系下, 以下数据均相对于摄像机 k 坐标系.

$p_{l_i^j}^1$ 和 $p_{l_i^j}^2$ 的坐标分别为

$$q_{l_i^j}^1 = R p_{l_i^j}^1 + t, q_{l_i^j}^2 = R p_{l_i^j}^2 + t;$$

向量 $O_j X_{l_i^j}$ 的坐标 $h_{l_i^j}^j = R_c^j h_{l_i^j}^j$; 向量 $O_j Y_{l_i^j}$ 的坐标 $g_{l_i^j}^j = R_c^j g_{l_i^j}^j$.

点沿平面 $N_{l_i^j}$ 的投影矩阵

$$\hat{U}_i^j = \frac{h_{l_i^j}^j h_{l_i^j}^{jT}}{h_{l_i^j}^{jT} h_{l_i^j}^j} + \frac{g_{l_i^j}^j g_{l_i^j}^{jT}}{g_{l_i^j}^{jT} g_{l_i^j}^j} = \frac{R_c^j h_{l_i^j}^j h_{l_i^j}^{jT} R_c^{jT}}{h_{l_i^j}^{jT} R_c^{jT} R_c^j h_{l_i^j}^j} + \frac{R_c^j g_{l_i^j}^j g_{l_i^j}^{jT} R_c^{jT}}{g_{l_i^j}^{jT} R_c^{jT} R_c^j g_{l_i^j}^j}$$

$o_j q_{l_i^j}^1$ 向量坐标

$$q_{l_i^j}^1 = q_{l_i^j}^1 - [R_c^j * (0, 0, 0)^T + t_c^j] = R p_{l_i^j}^1 + t - t_c^j \quad (9)$$

$o_j q_{l_i^j}^2$ 向量坐标为

$$q_{l_i^j}^2 = q_{l_i^j}^2 - [R_c^j * (0, 0, 0)^T + t_c^j] = R p_{l_i^j}^2 + t - t_c^j \quad (10)$$

向量 $o_j q_{l_i^j}^1$ 在平面上的投影向量为 $\hat{U}_i^j q_{l_i^j}^1$; 向量 $o_j q_{l_i^j}^2$ 在平面上的投影向量为 $\hat{U}_i^j q_{l_i^j}^2$, 直线段 L_i 目标空间共面性平方误差为

$$e_{l_i^j}^2 = e_{l_i^j}^{1^2} + e_{l_i^j}^{2^2} = (I - \hat{U}_i^j)(R p_{l_i^j}^1 + t - t_c^j)^2 + (I - \hat{U}_i^j)(R p_{l_i^j}^2 + t - t_c^j)^2 \quad (11)$$

4.2 算法

设目标物体共有 n 个点 (p_1, \dots, p_n) 和 m 条直线段 (L_1, \dots, L_m) 特征. A_j 表示摄像机 j 观测到的特征点集, $|A_j|$ 为集合 A_j 中元素的个数. B_j 表示摄像机 j 观测到的直线段特征集, $|B_j|$ 为集合 B_j 中元素的个数. 设多摄像系统观测到的特征点总数为 N_1 , 观测到的直线特征总数为 N_2 , 则 $N_1 = \sum_{j=1}^M |A_j|$, $N_2 = \sum_{j=1}^M |B_j|$. 建立算法的目标函数

$$E(R, t) = \sum_{j=1}^M \sum_{p_i \in A_j}^{|A_j|} \|e_i^j\|^2 + \sum_{j=1}^M \sum_{L_i \in B_j}^{|B_j|} \|e_{l_i^j}^j\|^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{p_i \in A_j}^{|A_j|} \|(I - \hat{V}_i^j)(R p_i + t - t_c^j)\|^2 + \sum_{j=1}^M \sum_{L_i \in B_j}^{|B_j|} \sum_{d=1}^2 \|(I - \hat{U}_i^j)(R p_{l_i^j}^d + t - t_c^j)\|^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j}^{|C_j|} \|(I - \hat{W}_i^j)(R p_i^{\text{unite}} + t - t^j)\|^2 \quad (12)$$

式中,约束条件为: $R'R=I$; C_j 为摄像机 j 观测到的特征点和直线段的集合.

$$p_i^{\text{unite}} = \begin{cases} p_i, & \text{点特征} \\ p_{L_i}^1, & \text{直线段特征的端 1} \\ p_{L_i}^2, & \text{直线段特征的端 2} \end{cases}$$

$$|C_j| = |A_j| + 2 \cdot |B_j|, \text{ 设 } N = \sum_{j=1}^M |C_j| = N_1 + 2 \cdot N_2$$

$$\hat{W}_i^j = \begin{cases} \hat{V}_i^j, & \text{摄像机 } j \text{ 观测到的点特征 } p_i \text{ 沿} \\ & \text{直线的投影矩阵} \\ \hat{U}_i^j, & \text{摄像机 } j \text{ 观测到的直线 } L_i \text{ 上的点} \\ & p_{L_i}^1 \text{ 或 } p_{L_i}^2 \text{ 沿平面的投影矩阵} \end{cases}$$

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 R 和 t 使该误差函数最小. 本文算法使多摄像机目标空间点共线性误差和直线段共面性误差最小. 算法步骤:

1) 给定 R 的值,式(12)的目标函数关于 t 是二次方程,经数学推导, t 可以由闭环形式计算

$$t^{(k)} = t(R^{(k)}) = \frac{1}{N} \left(I - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| \hat{W}_i^j \right)^{-1} \cdot \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| (\hat{W}_i^j - I) (R^{(k)} p_i^{\text{unite}} - t^j) \quad (13)$$

式中 k 表示第 k 次迭代.

2) 由式(7)、(9)和(10)得

$$q_i^{j(k)} = R^{(k)} p_i^{\text{unite}} + t^{(k)} - t^j, \text{ 计算出 } q_i^{j(k)}.$$

3) 根据误差函数,则

$$R^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_R \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| \| R p_i^{\text{unite}} + t - t^j - \hat{V}_i^j q_i^{j(k)} \|^2 \quad (14)$$

定义

$$Q_i^j(R^{(k)}) = (\hat{V}_i^j q_i^{j(k)} + t^j) \quad (15)$$

$Q_i^j(R^{(k)})$ 为点 p_i^{unite} 的在多摄像机系统参考坐标系下的 k 次迭代坐标,所以可以利用绝对最优定向解法.

$$R^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_R \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| \| R p_i^{\text{unite}} + t - Q_i^j(R^{(k)}) \|^2 \quad (16)$$

定义

$$\bar{p} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| p_i^{\text{unite}}$$

$$\bar{Q}_i^j(R^{(k)}) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| Q_i^j(R^{(k)}) \quad (17)$$

$$M(R^{(k)}) = \sum_{j=1}^M \sum_{p_i^{\text{unite}} \in C_j} |C_j| Q_i^j(R^{(k)}) p_i^{\text{unite}}$$

$$p_i' = p_i^{\text{unite}} - \bar{p}, Q_i^j(R^{(k)}) = \bar{Q}_i^j(R^{(k)}) - \bar{Q}_i^j(R^{(k)}) \quad (18)$$

所以

$$R^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_R \operatorname{tr}(R' M(R^{(k)})) \quad (19)$$

式(19)可以使用奇异值分解(SVD)或四元数法^[3]来求解.

4) 判断是否收敛,不收敛则返回步骤 1), 否则结束,输出位姿估计结果 R 和 t .

算法初始值 R_0 可以用四种方法确定: 1) 采用单摄像机观测到的点特征采用弱透视成像模型得到初始值. 2) 采用单摄像机观测到的线特征用平行透视成像模型得到初始值. 3) 采用基于点或线特征的单目视觉线形或非线性位姿估计算法得到初始值. 4) 采用基于点特征的多摄像机绝对定向解法得到初始值.

算法系统地解决了点特征和直线段特征共存时多摄像机系统的位姿估计问题. 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、计算准确度高、快速且全局收敛.

4.3 无限长直线的讨论

前面算法讨论的线特征指直线段特征,没有讨论无限长直线情况. 而算法对于无限长直线同样适用,迭代计算过程相似,但需单独处理,不能与点和直线段同时处理,也就是说算法处理无限长直线时不能联合点特征. 对于这种情况,本文也给出了基于无限长直线的多摄像机全局位姿估计算法. 设第 i 条无限长直线的单位向量在多摄像机系统的参考坐标系下坐标为 D_i .

1) 由式(5)得到基于无限长直线对应的多摄像机位姿估计误差

$$E(R) = \sum_{j=1}^M \sum_{D_i \in A_j} |A_j| \| e_{D_i} \|^2 = \sum_{j=1}^M \sum_{D_i \in A_j} |A_j| \| (I - \hat{U}_i^j) (R D_i) \|^2 \quad (20)$$

\hat{U}_i^j 见 4.2 节.

2) 由式(5)得 $F_i^{(k)} = R^{(k)} D_i$, 计算出 $F_i^{(k)}$.

3) 根据误差函数,则

$$R^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_R \sum_{j=1}^M \sum_{D_i \in A_j} |A_j| \| R D_i - \hat{U}_i^j F_i^{(k)} \|^2 \quad (21)$$

定义

$$A_i^j(R^{(k)}) = \hat{U}_i^j F_i^{(k)} \quad (22)$$

$A_i^j(R^{(k)})$ 为向量 D_i 的在多摄像机系统参考坐标系下的 k 次迭代坐标. 所以可以利用绝对最优定向解法.

$$R^{(k+1)} = \operatorname{argmin}_R \sum_{j=1}^M \sum_{D_i \in A_j} |A_j| \| R D_i - A_i^j(R^{(k)}) \|^2 \quad (23)$$

4) 判断是否收敛,不收敛则返回步骤(2), 否则结束,得到位姿估计结果 R .

5)得到最优 R 后,由直线上任意点的共面性方程可以得到最优 t .

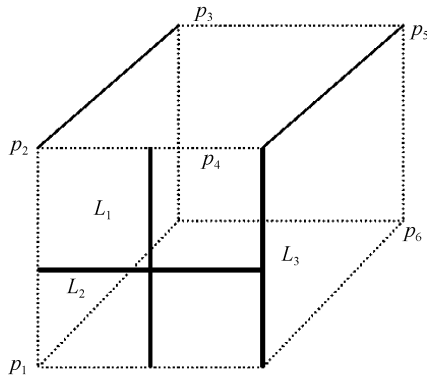


图 6 点和直线段特征
Fig. 6 Point and line segment feature

仿真实验 1(研究算法的抗噪音性能):固定平移向量 $t=[5,5,100]^T$, σ 从 0.5 像素到 4 像素变化.实验结果如图 7.当图像噪音从 0.5 像素到 4 像素变化时,图 7 分别给出了三个算法的相对平移误差和旋转误差.从图 7 的曲线可得,在各噪音水平下,本文算法的相对平移误差和旋转误差均小于其他二种算法.

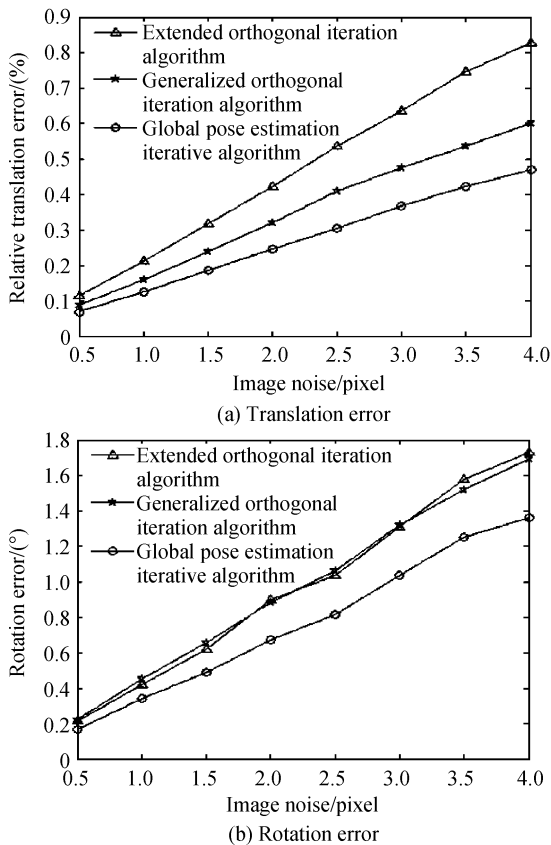


图 7 位姿估计误差与图像噪音的关系
Fig. 7 Error of pose estimation as a function of image noise

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 ,图像噪音固定为 1.5 像

素.实验结果如图 8.图 8 分别给出了当 $t_z/10$ 从 5 到 40 变化时三种算法的相对平移误差和旋转误差.从图 8 的曲线可得,在各摄像距离条件下,本文算法的相对平移误差和旋转误差均小于其他二种算法.

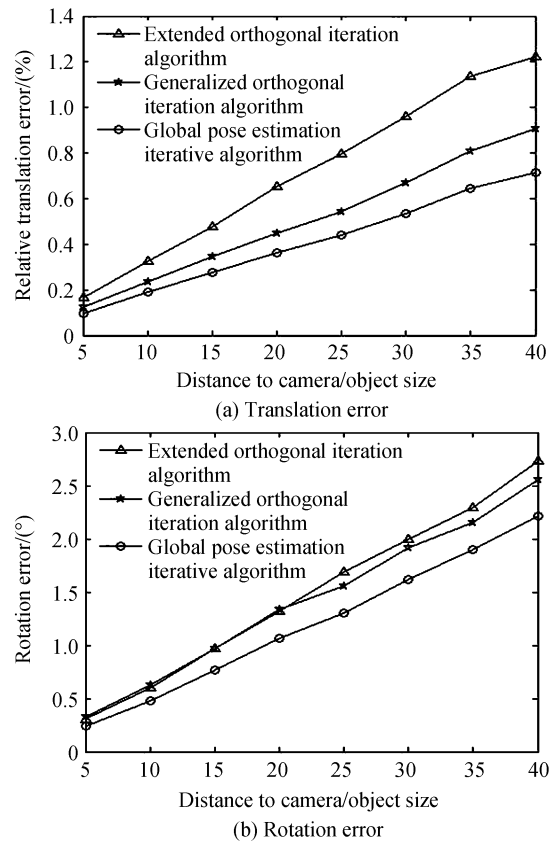


图 8 位姿估计误差与摄像距离的关系
Fig. 8 Error of pose estimation as a function of distance to camera

因为广义正交迭代算法利用多摄像机获取的全部点特征(本实验中 2 个摄像机共获取 8 个点特征),扩展正交迭代位姿估计算法利用单摄像机获取的点特征和直线段特征(摄像机 1 获取了 5 个点特征和 2 条直线段特征),而本文算法利用了摄像机观测到的全部点和直线段特征(共 8 个特征点和 3 条直线段),所以位姿估计算法更精确、更鲁棒.

5 结论

本文提出了基于点线特征对应的多摄像机全局位姿估计算法.对该算法进行了数学仿真,并与广义正交迭代算法和扩展正交迭代位姿估计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、优越的.同时,图像特征点提取误差对点和直线段位姿估计误差的定性及定量分析和算法在实际工业视觉场景中的性能评价还有待进一步研究.

参考文献

[1] ZHANG Qing-jun, HU Xiu-lin, YE Bin, et al. A binocular vision based relative position and attitude determination between spacecrafts[J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29

- (1):156-161.
张庆君,胡修林,叶斌,等. 基于双目视觉的航天器间相对位置和姿态的测量方法[J]. 宇航学报, 2008, **29**(1):156-161.
- [2] XU Wen-fu, LIANG Bin, LI Cheng, *et al.* The approach and simulation study of the relative pose measurement between spacecrafts based on stereo vision [J]. *Journal of Astronautics*, 2009, **30**(4): 1421-1428.
徐文福,梁斌,李成,等. 基于立体视觉的航天器相对位姿测量方法与仿真研究[J]. 宇航学报, 2009, **30**(4):1421-1428.
- [3] LU C P, HAGER D G, MJOLSNES E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(5): 610-622.
- [4] NISTER D. An efficient solution to the five-point relative poses [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004, **26**(6): 756-770.
- [5] MORENO N F, LEPETIT V, FUA P. Accurate non-iterative $O(n)$ solution to the pnp problems [C]. *ICCV2007*, Rio de Janeiro, 2007.
- [6] BUJNAK M, KUKELOVA Z, PAJDLA T. A general solution to the P4P problem for camera with unknown focal length [C]. *CVPR2008*, Anchorage, 2008.
- [7] ZHANG Zheng, ZHANG Xiao-hu, FU Dan. Accurate and robust iterative pose estimation from line correspondences [J]. *Journal of Computer Application*, 2008, **28**(2): 326-329.
张政,张小虎,傅丹. 一种高准确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.
- [8] ZHANG Xiao-hu, WANG Kun-peng, ZHANG Zheng, *et al.* A new line-based orthogonal iteration pose estimation algorithm [C]. *In Proceeding of International Conference on Information Engineering and Computer Science*, Wuhan, 2009.
- [9] TAHRI O, LEROUX C, ALEXANDRE J M. Pose estimation from less than six non coplanar points [C]. *In Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Orlando Florida, 2006.
- [10] ARSIC D, LYUTSKANOV A, RIGOLL G, *et al.* Multi camera person tracking applying a graph-cuts based foreground segmentation in a homography framework [C]. *In Proceedings of twelfth IEEE International Workshop on Performance Evaluation of Tracking and Surveillance*, Snowbird, UT, 2009: 1-8.
- [11] ZHANG Chao, LI Dong-xiao, ZHANG Ming. Multi-camera calibration based on iterative factorization of measurement matrix [C]. *In Proceedings of Third International Conference on Multimedia and Ubiquitous Engineering*, Qingdao, 2009:3-8.
- [12] CLIPP B, JAEHAK K, FRAHM J M, *et al.* Robust 6DOF motion estimation for non-overlapping multi-camera systems [C]. *In Proceedings of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision*, Copper Mountain, CO, 2008, **7**(9):1-8.
- [13] JAEHAK K, HONGDONG L, HARTLEY R. Motion estimation for multi-camera systems using global optimization [C]. *In Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Anchorage, AK, 2008, **23**(28):1-8.
- [14] PEIYEAN L, JOHN B M. Gauss-Newton-on-manifold for pose estimation [J]. *Journal of Industrial and Management Optimization*, 2005, **4**(1):565-587.
- [15] LOWE D G. Fitting parameterized three-dimensional models to images [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1991, **13**(5):441-450.
- [16] CAO Xi-bin, ZHANG Shi-jie. 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.
- [17] ANSAR A, DANIILIDIS K. Linear pose estimation from points or lines [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2003, **25**(5): 578-589.
- [18] SCHWEIGHOFER G, PINZ A. Robust pose estimation from a planar target [J]. *IEEE Trans on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, **28**(12): 2024-2030.
- [19] ZHANG Zhi-yong, ZHANG Jing, ZHU Da-yong. 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.
- [20] ZHANG Zhi-yong, ZHU Da-yong, ZHANG Jing. An improved pose estimation algorithm for real-time vision applications [C]. *In Proceedings of 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems*, Guilin, 2006: 402 - 406.
- [21] MARIO L F, LORENZO P, BRIAN S. A comparison of pose estimation algorithms for machine vision based aerial refueling for UAVs [C]. *In Proceedings of the 2006 Conference on Control and Automation*, Mediterranean, 2006:1-6.
- [22] XU Yun-xi, JIANG Yun-liang, 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.
- [23] XU Yun-xi, JIANG Yun-liang, CHEN Fang. An extended orthogonal iteration algorithm for pose estimation from point and line segment correspondences [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(11): 3129-3135.
许允喜,蒋云良,陈方. 基于点和直线段对应的扩展正交迭代位姿估计算法[J]. 光学学报, 2009, **29**(11):3129-3135.

Global Pose Estimation Iterative Algorithm for Multi-camera from Point and Line Correspondences

XU Yun-xi¹, JIANG Yun-liang¹, CHEN Fang², LIU Yong³

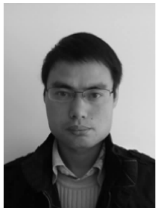
(1 *School of Information & Engineering, Huzhou Teachers College, Huzhou, Zhejiang 31300, China*)

(2 *College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China*)

(3 *State Key Laboratory of Industrial Control Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

Abstract: To solve multi-camera pose estimation problem with the coexistence of point and line segment under the industry visual scene, a new pose estimation algorithm for multi-camera from point and line correspondences is proposed. The method uses geometric restriction between multiple calibrated cameras, and globally processes point and line segment feature from overlapping and non-overlapping views of multi-camera rig, finally obtains more robust and accurate pose estimation. In the proposed method, the formulation of datum of multiple cameras is unfinied, and the sum of object-space collinearity error of point and coplanarity error of line segment all cameras are used as error function. Finally, an iterative algorithm is developed to minimize the error function. The experimental results prove the effectiveness and superiority of the algorithm for pose estimation.

Key words: Machine vision; Orthogonal Iteration(OI) algorithm; Pose estimation; Multi-camera system; Rendezvous and docking



XU Yun-xi was born in 1978. Now he is a Ph. D. degree candidate and works as a lecturer at Institute of Information & Engineering, Huzhou Teachers College. His research interests focus on computer vision, image processing, and artificial intelligence.