

基于三线阵 CCD 空间目标的高精度位姿解算

王艳¹, 袁峰¹, 姜宏², 陈伟³

¹哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

²战略支援部队兴城疗养院, 辽宁 兴城 125105;

³北京航天自动控制研究所三室, 北京 100854

摘要 为了解决三线阵 CCD 空间目标位姿测量的精度问题, 提出一种高精度位姿解算方法。该算法将所有线阵 CCD 相机的坐标系进行统一化处理。通过建立一个新的误差评价函数, 运用改进的正交迭代算法求解位姿参数, 并进行非线性优化。仿真和实际测量结果表明, 该算法有效避免了因数据恶化或初值选取等因素造成的不收敛或收敛差的问题。与传统算法相比, 该算法测量精度和抗噪特性均得到有效改善, 计算效率提高了 4.6 倍, 实际测量的 6 个自由度的最大相对误差为 0.71%。该测量系统可实现对空间目标的高精度实时测量, 且具有安装方便、应用范围广等优点。

关键词 机器视觉; 正交迭代算法; 位姿解算; 线阵 CCD; 空间目标

中图分类号 TP391.4; TH741

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0515004

High Precision Pose Calculation of Space Target Based on Three Linear Array CCD

Wang Yan¹, Yuan Feng¹, Jiang Hong², Chen Wei³

¹ School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China;

² Xingcheng Sanatorium of Strategic Support Force, Xingcheng, Liaoning 125105, China;

³ The Third Section of Beijing Aerospace Automatic Control Institute, Beijing 100854, China

Abstract In order to solve the accuracy problem of pose measurement of space target based on three linear array CCD, we propose a high precision pose calculation method. This algorithm integrates all linear array CCD camera coordinate systems. The improved orthogonal iterative algorithm is used to solve the pose parameters by establishing a new error evaluation function, and the nonlinear optimization is performed subsequently. Simulation and measurement results show that the proposed algorithm effectively avoids the problem of no-convergence or poor convergence caused by data deterioration or initial value selection. Compared with the traditional algorithm, both the measurement accuracy and noise immunity of the proposed algorithm are effectively improved and the computational efficiency is improved by 4.6 times. The maximum relative error of six degree of freedom is 0.71% in actual measurement. The proposed system can realize high precision and real-time measurement of spatial target, which has the advantages of convenient installation and wide applications.

Key words machine vision; orthogonal iteration algorithm; pose calculation; linear array CCD; space target

OCIS codes 150.0155; 120.4570; 150.1135; 330.5000

1 引 言

空间目标的位姿测量一直是各领域的研究热点

之一。随着机器视觉的快速发展, 其在工程领域的应用愈加广泛, 成为工程控制、航空航天及军事等领域的研究热点^[1]。基于视觉的位姿估计问题也称为

收稿日期: 2017-09-26; **收到修改稿日期:** 2017-12-29

基金项目: 国家自然科学基金(61473100, 51075095)

作者简介: 王艳(1987—), 女, 博士研究生, 主要从事光电检测、机器视觉、姿态测量等方面的研究。

E-mail: yanzi2354715@126.com

导师简介: 袁峰(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电检测技术及精密几何参数测量技术方面的研究。

E-mail: yuanf@hit.edu.cn

PnP 问题,是目前广泛应用的位姿测量技术,其原理是利用空间目标的图像信息获取目标的三维空间位置和姿态。CCD 作为光测相机,因具有非接触、精度高、速度快等特点而被许多研究机构和科研人员用于姿态测量研究。基于线阵 CCD 的测量系统可同时满足高精度和大视场的检测需求,其各项关键技术指标均优于面阵 CCD,适用于空间飞行器的交会对接任务及在轨航天任务等^[2-4]。

很多学者从不同角度对空间目标的位姿估计问题进行了深入的研究,并针对位姿的解算精度问题提出了许多的算法。现有的位姿估计算法可分为非迭代算法和迭代算法两类。非迭代算法的原理是应用线性方法获得解析解^[5-6]。对不多于 4 个非共面的控制点,可以线性求得闭环解^[7-9]。Philip 等^[10]提出一种基于相位控制和相对四元数反馈方案的位姿估计算法。Lepetit 等^[11]提出 EPnP 算法,中心思想是将 n 个三维点表示为 4 个虚拟控制点的加权和,通过求解一个小常数的二次方程来选择合适的权值。该算法比其他非迭代算法计算速度快、精度高,但与迭代算法相比,易受图像噪声影响且精度较低。

对于迭代算法,比较经典的是将位姿估计问题转化为最小二乘问题,利用非线性优化算法求解旋转矩阵。国内外学者针对位姿测量的非线性问题进行了深入的研究,并提出了很多迭代算法^[12-13]。Haralick 等^[14]在 1989 年提出了一种计算目标位姿和景深的迭代算法,通过引入景深变量消除非线性,将非线性估计过程分成两个步骤——景深计算和绝对定向问题。该算法的不足之处在于局部收敛速度较慢,通常需要数百次迭代。受该算法启发,Lu 等^[15]提出了正交迭代算法,通过优化新的目标函数最小化空间共线误差,利用 Horn 等^[16]方法求解绝对定向问题,因此该算法迭代次数少、精度高且速度快,但是由于采用弱透视投影初始化参数,迭代过程中极易陷入局部最小值。Pan 等^[17]提出一种基于单目视觉的相对位姿估计算法,运用 LM (Levenberg-Marquardt) 算法进行全局优化,算法的位姿估计精度达到预期,但计算速率不理想。李鑫等^[18]提出一种正交迭代加速算法,中心思想是对每一次迭代过程进行规整化,将每一次迭代的重复计算改在迭代

开始前进行,从而减少计算量,但控制点较多时,该算法无法保证精度。

国内外众多学者和研究人员已对位姿估计算法做了大量的研究,但存在两个问题:1) 所提出的算法都是基于单目视觉;2) 位姿测量所使用的量测相机都是面阵相机,即利用二维成像获取目标的位姿信息。现阶段,还缺乏利用三线阵 CCD 进行高精度、快速位姿测量的系统方法。本文在改进正交迭代算法的基础上,结合线阵 CCD 姿态测量的特点,提出基于多个线阵 CCD 相机进行位姿测量的改进的位姿估计算法,通过理论证明该算法的精度,并结合仿真和实际测量验证算法的有效性。

2 线阵 CCD 测量原理

与面阵 CCD 不同的是,线阵 CCD 只具备一个方向的像素成像,因其具有在一个测量方向上的高分辨率与快速测量等优点,而被广泛地应用在高精度测量系统中。线阵 CCD 的成像原理如图 1 所示。

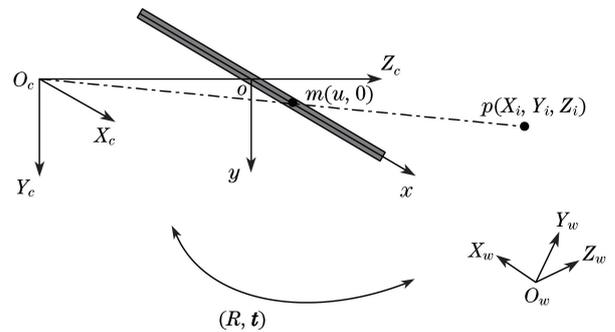


图 1 线阵 CCD 成像模型

Fig. 1 Imaging model of linear CCD

理想情况下,摄像机可简化为针孔模型。空间任一物点 p_i 在世界坐标系下的坐标为 $(X_i, Y_i, Z_i)^T$,相应地,在摄像机坐标系下的坐标为 $q_i = (x_i, y_i, z_i)^T$,可得理想的摄像机模型:

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

式中 R 和 t 分别是世界坐标系到摄像机坐标系的旋转矩阵和平移向量, $t = [t_x, t_y, t_z]^T$, $R = [r_1, r_2, r_3]^T$ 是一个 3×3 的正交矩阵,其元素是关于欧拉角(俯仰角 θ 、航向角 τ 、滚动角 ϕ)的三角函数,形式如下:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \tau \cos \phi - \sin \tau \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \sin \tau & \sin \tau \cos \phi + \cos \tau \sin \theta \sin \phi \\ -\cos \tau \sin \phi - \sin \tau \sin \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi & -\sin \tau \sin \phi + \cos \tau \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \tau \cos \theta & -\sin \theta & \cos \tau \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

三线阵 CCD 姿态测量系统由三个线阵 CCD 和三个柱面镜头构成的三个一维相机组成,三个光学平面在物空间中交于一点,确定了被测目标

的空间位置。中间相机与水平放置的两个一维相机均垂直,且与两侧光轴夹角为 30° ,原理如图 2 所示。

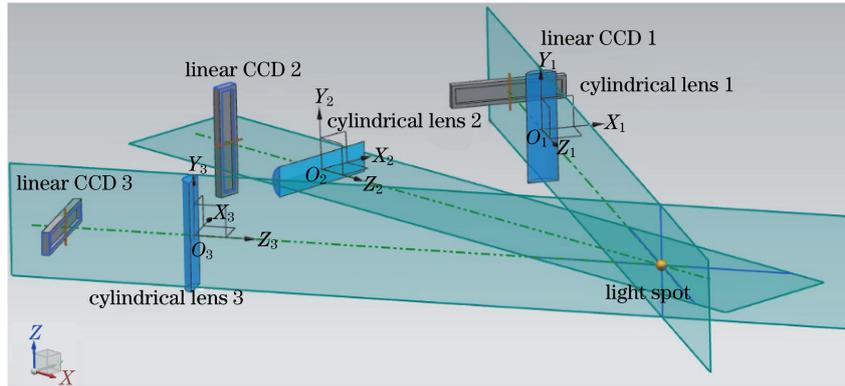


图 2 线阵 CCD 位姿测量系统

Fig. 2 Pose measurement system of linear CCD

基于透视投影原理, p_i 在第 j ($j=1, 2, 3$) 个线阵摄像机坐标系下的坐标为 (x_i^j, y_i^j, z_i^j) , 像平面上的像点 m_i^j 坐标为 $(u_i^j, 0)$, 根据像平面坐标系和相机坐标系之间的关系, 可以推导出:

$$u_i^j = f \frac{x_i^j}{z_i^j}, \quad i=1, 2, \dots, n, \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式, 可得:

$$u_i^j = f \frac{r_{11} p_i + t_x}{r_{31} p_i + t_z} = f \frac{r_{11} X_i + r_{12} Y_i + r_{13} Z_i + t_x}{r_{31} X_i + r_{32} Y_i + r_{33} Z_i + t_z}. \quad (4)$$

角度是二维坐标系的几何量, 被测目标沿其纵轴方向的任意两点可确定目标的俯仰角和航向角。在此基础上, 垂直于被测目标纵轴的任意平面上的两点, 可以确定该物体的唯一滚动角。通常情况下, 当获取控制点 $n > 3$, 即可线性求解(4)式, 得旋转矩阵各元素的值。根据(2)式, 可得被测目标的姿态信息:

$$\begin{cases} \theta = \arcsin r_{32} \\ \tau = \arctan \frac{r_{12}}{r_{22}} \\ \phi = \arctan \left(-\frac{r_{31}}{r_{33}} \right) \end{cases}. \quad (5)$$

3 本文算法

3.1 正交迭代算法

在理想针孔成像模型下, 所有特征点都对应于由投影中心穿过像点到特征点的射线。射线方向与特征点的投影方向相反, 亦称反投影线, 如图 3 所示, 其归一化单位向量为

$$v_i = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{xi}^2 + \epsilon_{yi}^2 + 1}} \begin{bmatrix} \epsilon_{xi} \\ \epsilon_{yi} \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 $(\epsilon_{xi}, \epsilon_{yi})$ 为像点坐标。空间共线性指 q_i 在 v_i 上的正交投影是其本身, 可以表示为

$$R p_i + t = W_i (R p_i + t), \quad (7)$$

式中 $W_i = \frac{v_i v_i^T}{v_i^T v_i}$, 是沿视线方向的投影矩阵。(7)式表示物空间共线方程, 因此可以建立关于正交投影的物空间误差目标函数:

$$e(R, t) = \sum_{i=1}^n \| (R p_i + t) - W_i (R p_i + t) \|^2, \quad (8)$$

且满足约束 $R^T R = I$, 求解 R 和 t 使目标函数的误差最小。通过优化(8)式计算 R 和 t 。当给定矩阵 R 时, 可求得 t 唯一的最优解:

$$t(R) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n W_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (W_i - I) R p_i. \quad (9)$$

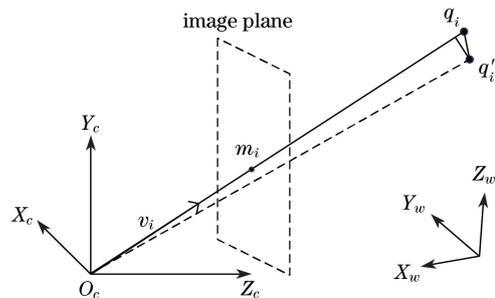


图 3 物空间共线原理

Fig. 3 Collinear principle of object space

假设旋转矩阵的第 k 次迭代结果为 $\mathbf{R}^{(k)}$, 则平移向量 $\mathbf{t}^{(k)} = \mathbf{t}[\mathbf{R}^{(k)}]$, (1)式可以写成 $\mathbf{q}_i^{(k)} = \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}^{(k)}$, 因此可以通过求解绝对定向问题计算 $\mathbf{R}^{(k+1)}$ 的值:

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{W}_i(\mathbf{R}^{(k)} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}^{(k)})\|^2. \quad (10)$$

利用 Umeyama 算法^[19] 求解(10)式的第 $(k+1)$ 次迭代解, 使得 $\mathbf{R}^{(k+1)} = \mathbf{R}^{(k)}$, 则基于正交迭代算法位姿测量的解为

$$\mathbf{R}^* = \arg \min_{\mathbf{R}} \sum_{i=1}^n \|\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{W}_i(\mathbf{R}^* \mathbf{p}_i + \mathbf{t}^*)\|^2. \quad (11)$$

3.2 基于三线阵相机的改进的正交迭代算法

传统的正交迭代算法是基于单目视觉, 无法从多相机系统统一正交投影向量坐标, 并且相机多以面阵为主。受文献^[15]的启发, 针对三线阵 CCD 位姿测量系统的特点, 本文着重建立关于多线阵相机的正交迭代算法。首先, 从空间几何的角度建立三线阵 CCD 相机的统一坐标系; 其次, 整合三线阵 CCD 的全部数据到单个相机坐标系下, 同时进行算法的改进和优化, 建立新的目标评价函数; 最后, 完成本文算法的推导。

令 $\mathbf{R}_c^j, \mathbf{t}_c^j$ ($j=1, 2, 3$) 是某一线阵 CCD 相机图像坐标系相对世界坐标系的旋转矩阵和平移向量, 规定相机 1 坐标系与被测目标世界坐标系之间的旋转矩阵为 \mathbf{R} 、平移向量为 \mathbf{t} 。将线阵 CCD-1 所获得的坐标转换到全局坐标原点 $(0, 0, 0)$, 将其他两个线阵 CCD 的外姿态参数转换为以 CCD-1 为原点的坐标系, 可得:

$$\mathbf{R}_c^j = (\mathbf{R}_i^j)^{-1} \mathbf{R}, \quad (12)$$

$$\mathbf{t}_c^j = (\mathbf{R}_i^j)^{-1} (\mathbf{t} - \mathbf{t}_i^j). \quad (13)$$

本文中相机 1 坐标系与被测目标世界坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 、平移向量 \mathbf{t} 为待估计参数。相机 j 的坐标系与相机 1 坐标系之间的旋转矩阵为 \mathbf{R}_i^j 、平移向量为 \mathbf{t}_i^j , 将其他 CCD 相机数据均转化在相机 1 坐标系下, 然后进行正交迭代算法的推导计算, 可得:

$$\mathbf{q}_i^j = \mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t}. \quad (14)$$

根据前面的讨论, 线阵 CCD 1 测量的反投影单位向量为

$$\mathbf{v}_i^1 = \frac{1}{\sqrt{(\mu_i^1)^2 + 1}} \begin{bmatrix} \mu_i^1 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

则沿 $\mathbf{o}_1 \mathbf{v}_i^1$ 反投影方向的正交投影矩阵为

$$\mathbf{W}_i^1 = \frac{\mathbf{v}_i^1 \mathbf{v}_i^{1T}}{\mathbf{v}_i^{1T} \mathbf{v}_i^1}, \quad (16)$$

根据第 j 个 CCD 相机坐标系与参考原点坐标系之间的关系, 有:

$$\mathbf{q}_i^j = \mathbf{q}_i^1 - \{\mathbf{R}_c^j(0, 0, 0) + \mathbf{t}_c^j\} = \mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{t}_c^j, \quad (17)$$

$$\mathbf{v}_i^j = \mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1, \quad (18)$$

可推得:

$$\mathbf{W}_i^j = \frac{\mathbf{v}_i^j \mathbf{v}_i^{jT}}{\mathbf{v}_i^{jT} \mathbf{v}_i^j} = \frac{\mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1 (\mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1)^T}{(\mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1)^T \mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1} = \frac{\mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1 \mathbf{v}_i^{1T} \mathbf{R}_c^{jT}}{\mathbf{v}_i^{1T} \mathbf{R}_c^j \mathbf{R}_c^j \mathbf{v}_i^1}. \quad (19)$$

将 3 个线阵相机观测到的 n 个特征点的物空间共线性误差平方和作为三线阵姿态测量系统的目标误差函数, 有:

$$e'(\mathbf{R}, \mathbf{t}) = \sum_{j=1}^3 \|e_j\|^2 = \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \|(I - \mathbf{W}_i^j)(\mathbf{R} \mathbf{p}_i + \mathbf{t} - \mathbf{t}_c^j)\|^2, \quad (20)$$

令 $\bar{\mathbf{q}} = \sum_{j=1}^3 \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{q}_i^j \right)$, $\bar{\mathbf{p}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \mathbf{p}_i$, 则 $\mathbf{q}'_i^j = \mathbf{q}_i^j - \bar{\mathbf{q}}$, $\mathbf{p}'_i = \mathbf{p}_i - \bar{\mathbf{p}}$, 代入(20)式可得:

$$e' = \min \left(\sum_{i=1}^n \|\mathbf{q}'_i^j\|^2 + \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i^j \|\mathbf{p}'_i\| \right) - 2 \text{tr} \left[\mathbf{R}^T \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i^j \mathbf{q}'_i^j \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{p}'_i{}^T \right]. \quad (21)$$

迭代求解使得(21)式误差最小时的 \mathbf{R} 值为

$$\mathbf{R}^{(k+1)} = \arg \max \left\{ \text{tr} \left[\mathbf{R}^T \sum_{j=1}^3 \sum_{i=1}^n \mathbf{W}_i^j \mathbf{q}'_i^j \mathbf{R}^{(k)} \mathbf{p}'_i{}^T \right] \right\}. \quad (22)$$

综上, 满足所有相机的共线性误差平方和最小的值即所求 \mathbf{R} , 进而根据(9)式可以求得唯一 \mathbf{t} 。

3.3 算法分析

经典的正交迭代算法的初值通常由弱透视投影给出或由任意旋转矩阵初始化, 这使得算法收敛速度较慢, 或极易陷入局部最小值而导致算法收敛失败。例如, 通过弱透视投影进行初始化的操作, 初值越接近真值, 算法收敛越快, 反之, 算法仍可以达到同样的精度, 但需要更多的迭代步数。为克服正交迭代算法的缺陷, 本文选用文献^[11]的 EP n P 方法进行初始化, 优点是既给出了本文算法较接近真值的初值, 亦不会增加额外的计算时间, 算法过程如下: 1) 由 EP n P 方法求得的闭合解初始化 $\mathbf{R}_i^{(0)}$ ($j=1, 2, 3$), 相应地, 得到初始值 $\mathbf{R}^{(0)}$, 由(19)式计算 \mathbf{W}_i^j , 设置初始迭代步数 $k=0$, 终止迭代步数为 100;

2) 根据(17)、(18)式,将其他相机坐标系转换为参考相机坐标系,再根据(9)式计算第 k 次迭代 $t[\mathbf{R}^{(k)}]$ 的值;3) 根据(14)式更新 $q_i^{j(k)}$,由(10)式计算旋转矩阵 $k+1$ 次迭代值 $\mathbf{R}^{(k+1)}$;4) 由(21)式计算物空间共线性误差函数 $e^{(k+1)}$,若误差小于阈值,停止迭代并输出结果 \mathbf{R} 和 t ,否则 $k=k+1$;5) 确定是否全局收敛,若迭代步数小于最大值,则返回步骤2)继续执行,否则终止迭代,输出结果。

4 实验结果及分析

4.1 合成数据实验

仿真环境建立在 3.2 GHz 主频、4 GB 内存的计算机上,利用 Matlab 2014a 开发程序,并进行数学仿真。仿真相机参数如下: $f_x = 7446$, $u_0 = 3723$, $k_1 = 0.00029$ 。在范围 $[-6, 6] \times [-6, 6] \times [-4, 4]$ (单位为 m) 内生成均匀分布的空间点的世界坐标,发生的欧拉角范围为 $[0, 90] \times [0, 90] \times [0, 180]$ 。将本文算法进行姿态解算的效率和精度与文献[15]的正交迭代(OI)算法进行对比。对空间内生成的任意分布的特征点,在不考虑图像噪声的情况下,分析本文算法和 OI 算法关于不同数量的特征点的位姿解算时间。随后,假设特征点数量 n 不变,即 $n = 24$,再分别验证两种算法的收敛情况,迭代终止条件为 $\mathbf{R}^{(k+1)} = \mathbf{R}^{(k)}$,结果如图 4 所示。

如图 4(a) 所示,随着被测特征点数量的增加,两种算法的运行时间均呈增大趋势,但对于同样数量的特征点本文算法较 OI 算法省时,当特征点数 $n = 24$ 时,本文算法运行时间为 0.037 s, OI 算法的运行时间为 0.170 s。实际上,两种算法均满足实时性的要求,但相比 OI 算法,本文算法计算效率更高,实用性更好。从图 4(b) 可以看出,在迭代步数达到 10 次时,本文算法已经收敛,而 OI 算法还需两倍的迭代步数才可收敛,但仍未收敛至最佳值,主要是因为其是由弱透视投影进行初始化,初值并未接近真值,导致迭代时间增加。本文算法不仅没有增加额外的计算量,而且初始化结果已很接近真值,因此算法效率优于 OI 算法。

为了验证本文算法的抗噪特性,考虑相机校准误差和特征点图像提取误差等因素,在每个投影点加入均值为 0、方差变化从 0.2~3 pixel 的高斯噪声,每个噪声水平下独立测试 100 次,得到在不同噪声水平下旋转矩阵和平移向量的误差变化曲线。定义旋转矩阵误差按 $E_{(\theta, \tau, \phi)} = \sum_{i=1}^n (|\theta_i - \theta_0| +$

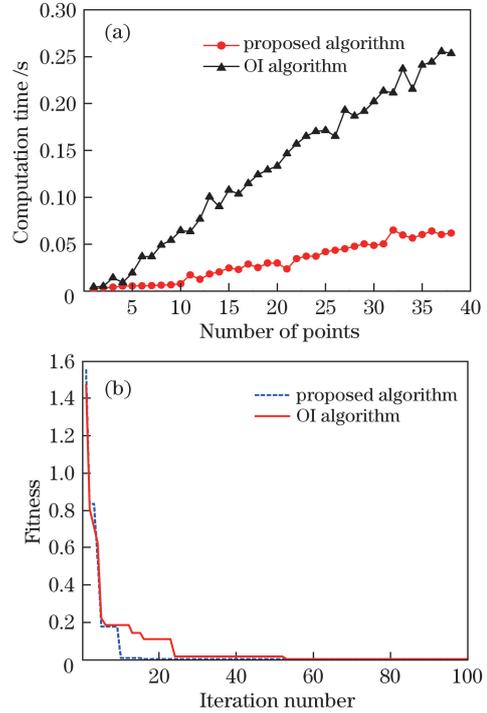


图 4 (a) 两种算法计算效率的对比;
(b) 特征点数为 24 时,两种算法迭代步数比较
Fig. 4 (a) Comparison of computational efficiency of two algorithms; (b) comparison of iterative step of two algorithms with 24 feature points

$|\tau_i - \tau_0| + |\phi_i - \phi_0|)$ 计算,平移向量的相对误差按 $E_{(t_{tru})} = \| (t_{tru} - t) / t_{tru} \|$ 计算,其中, t_{tru} 为真实值,将结果与 OI 算法进行比较。

图 5(a) 和 (b) 显示了在不同噪声水平下位姿估计误差。当噪声小于 1 pixel 时,两种算法的旋转和平移误差估计结果差别不大,本文算法略优于 OI 算法。随着误差的递增, OI 算法的误差变化范围更大,且精度低于本文方法。在相同的噪声水平下,本文算法位姿估计误差小,整体表现出更好的抗噪特性。

为了验证本文算法能满足大视场的测量需求,假设图像噪声一定,三轴相对平移向量 $t_x : t_y : t_z = 2.5 : 10 : 1$, 设 $\sigma = 1$, 研究不同测量距离下的位姿估计精度。

图 6(a) 和 (b) 显示了不同测量距离情况下的位姿估计结果。初始距离为 2 m 时,两种算法的估计误差均略大,主要原因是被测目标距离相机越近,受相机有效感光线长度及镜头测量景深的影响越大,计算精度也因此受到很大影响。在有效的视场范围内,随着测量距离增加,二者的估计精度均不断提高,距离等于 5 m 时,本文方法姿态角误差不超过 0.52° , 相对平移误差为 0.13%, 旋转和平移误差估计精度均高于 OI 算法。

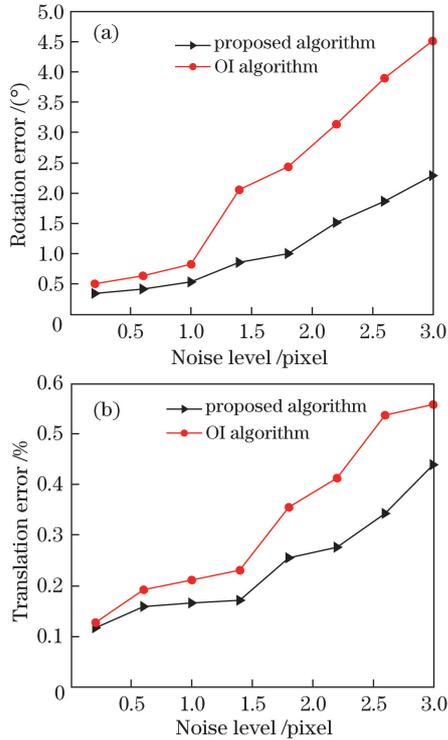


图 5 不同噪声水平下位姿估计误差。
(a) 旋转误差; (b) 平移误差

Fig. 5 Estimation error of pose at different noise levels.

(a) Rotation error; (b) translation error

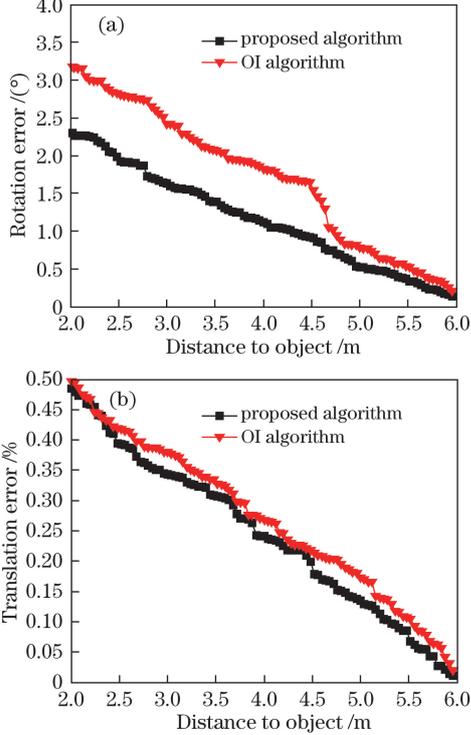


图 6 不同测量距离下位姿估计误差。
(a) 旋转误差; (b) 平移误差

Fig. 6 Estimation error of pose at different measurement distances. (a) Rotation error; (b) translation error

最后,讨论随着图像噪声的增加,物方空间误差对三维定位精度的影响。定义图像噪声方差在 0.2~3 pixel 之间变化,测量距离 $d=5\text{ m}$,在控制点加入给定的均方误差(RMS),比较本文算法和 OI 算法的定位精度,结果如图 7 所示。

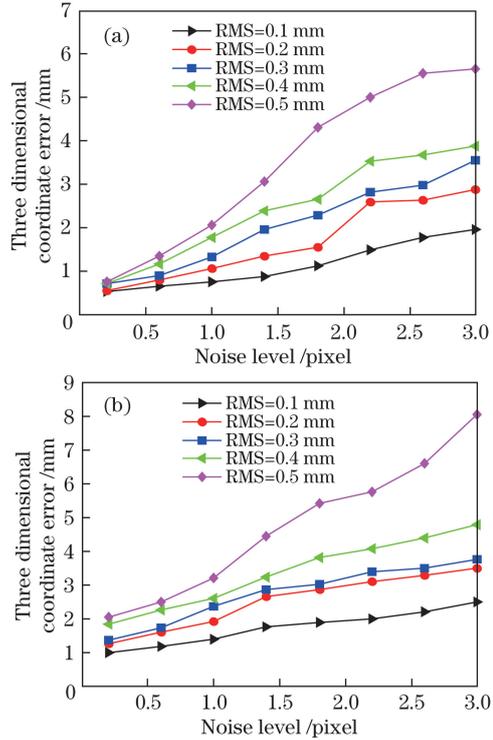


图 7 (a)本文算法与(b) OI算法的三维定位误差
Fig. 7 Three-dimensional positioning error of
(a) proposed algorithm and (b) OI algorithm

图 7 描述了两种算法的定位精度。控制点的均方误差越小,二者的定位精度越高。随着图像噪声的增加,各均方误差水平下的误差均逐渐增大。与 OI 算法相比,本文算法计算速度更快,精度更高,抗噪性能更好。

4.2 实际测量实验

线阵 CCD 相机分辨率为 7450 pixel,像元尺寸 $d_x = d_y = 4.7\ \mu\text{m}$,定制镜头焦距 $f = 35\ \text{mm}$,实验选用 SC300 转台(KSA211-200-S5N 卓立汉光仪器有限公司,北京)作为标准量输出,精度 0.005° 。实际测量中,三线阵位姿测量系统由 Tsai 标定算法校准^[20]。通过建立相机内参的几何约束方程组,进行最小二乘求解 (f, u_0, k_1) 。相机校准结果如表 1 所示。将 LED 被测目标安装在转台上,输出角度真值由转台给出。为了验证本文算法的有效性,被测目标在 $[0, 90] \times [0, 90] \times [0, 180]$ 的范围内随机运动,测量实验如图 8 所示。由本文设计的线阵 CCD 测量系统进行姿态测量,通过三轴转台对线阵 CCD 姿

表 1 Tsai 标定算法校准的相机内参数

Table 1 Camera intrinsic parameters calibrated by Tsai's calibration algorithm

Item	CCD 1	CCD 2	CCD 3
Focal length f	$f_x^1 = 7446.6736$	$f_x^2 = 7446.1092$	$f_x^3 = 7449.6327$
Principle point u_0	$u_0^1 = 3703.5600$	$u_0^2 = 3711.6054$	$u_0^3 = 3714.0992$
Distortion coefficient k_1	$k_1^1 = 2.9330 \times 10^{-4}$	$k_1^2 = 2.9075 \times 10^{-4}$	$k_1^3 = 2.8996 \times 10^{-4}$

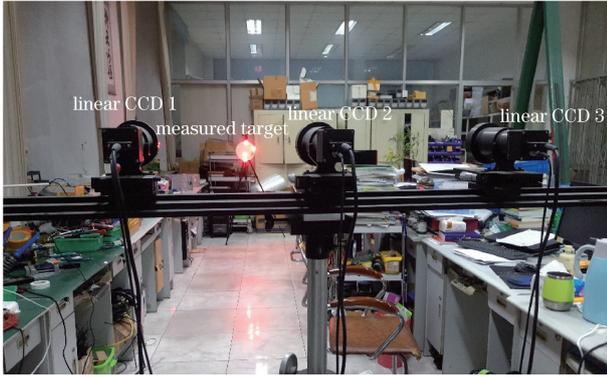


图 8 测量实验

Fig. 8 Measurement experiment

态测量系统的测量精度进行验证。

实际被测目标为 4 个点阵红外 LED, 波长范围为

655~660 nm, 其中, 目标板直径为 200 mm、厚度为 8 mm, 3 个 LED 分布在以直径为斜边长的直角三角形上, 两边夹角分别为 60° 和 30°, 第 4 个点定位在圆中心位置, LED 灯阵间距为 190 mm。这样布置等同于当目标产生位姿运动时, 在平面上模拟空间目标的位姿运动。三线阵相机距被测目标距离为 5 m。捕捉 6 个不同位置的图像, 获取共 24 个特征点的世界坐标, 对本文算法验证。基于标定过的相机内参数, 由本文算法输出的世界坐标系和各相机坐标系之间的旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移向量 \mathbf{t} 如表 2 所示。

根据 3 个线阵 CCD 与世界坐标系的关系, 应用提出的算法对被测目标进行位姿估计。将解算结果与转台输出的真值进行对比, 分析误差。结果如图 9 所示。误差具体分析如表 3 所示。

表 2 相机外参数

Table 2 Extrinsic parameters of camera

CCD	Rotation matrix	Translation vector
CCD 1	$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.9921 & 0.0523 & 0.1135 \\ 0.0055 & -0.0063 & -0.9997 \\ -0.1124 & 0.7708 & 0.6270 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t} = [1470.5313 \quad -71.256 \quad 1834.7828]^T$
CCD 2	$\mathbf{R}_i^2 = \begin{bmatrix} 0.9987 & 0.0493 & -0.0087 \\ -0.0092 & 0.0098 & 0.9999 \\ 0.0492 & -0.9887 & -0.0102 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t}_i^2 = [1280.7410 \quad -134.1148 \quad 1839.1314]^T$
CCD 3	$\mathbf{R}_i^3 = \begin{bmatrix} 0.9777 & 0.2096 & -0.0069 \\ 0.0020 & -0.0096 & 0.9917 \\ 0.0296 & -0.1708 & -0.9848 \end{bmatrix}$	$\mathbf{t}_i^3 = [1030.9604 \quad -146.8128 \quad 1843.6531]^T$

表 3 误差分析

Table 3 Error analysis

Item	$\theta / (^\circ)$	$\tau / (^\circ)$	$\phi / (^\circ)$	t_x / mm	t_y / mm	t_z / mm
Maximum error	0.4387	0.2039	1.2768	0.7079	0.5018	1.1360
Minimum error	0.0019	0.0028	0.0013	0.0131	0.0106	0.0417
Average error	0.1318	0.0714	0.4988	0.2395	0.1503	0.5028
RMS	0.1019	0.0559	0.3847	0.1944	0.1130	0.3585

图 9 绘制了本文算法位姿解算误差曲线。结合表 3 可知, 俯仰角、航向角和滚动角 RMS 值分别

为 0.1019°, 0.0559°, 0.3847°, 取上限系统的测角精度达 0.384° 水平。滚动角精度较俯仰和航向精度

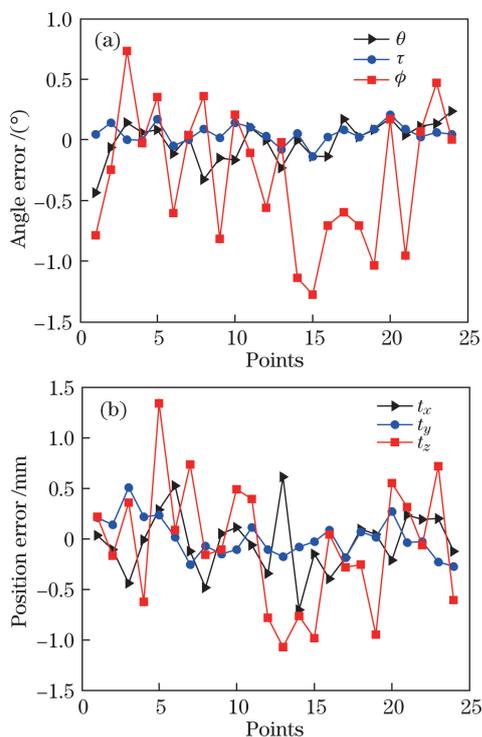


图9 姿态和位置误差。(a)角度误差;(b)位置误差

Fig. 9 Error of attitude and position.

(a) Angle error; (b) position error

差,这是因为,目标绕自身中轴线运动过程中特征点的隐藏现象导致系统对滚动角的解算精度变差。沿3个方向平移向量的RMS分别为0.1944,0.1130,0.3585 mm,系统的定位精度达0.358 mm水平。其中 z 方向的平移精度略差,主要是因为本测量系统的相机是由线阵CCD和柱面镜组合而成,沿垂直于柱面镜中轴线方向产生的运动更容易被线阵CCD精确测量,因此,沿 z 轴运动方向的分量在系统中的测量精度较其他两个平移向量差。当相对姿态偏差较小时,足以满足工程测量精度需求。

5 结 论

提出一种基于三线阵CCD的高精度位姿解算算法。将改进的正交迭代算法应用于线阵CCD位姿测量系统,建立一个新的目标空间共线性误差评价函数,经迭代求解,使得所有相机观测到的特征点的物空间共线性误差平方和最小。仿真结果表明,与传统的OI算法相比,本文算法计算效率提高了4.6倍。在较大噪声的情况下,仍能表现出很高的测量精度,说明本文算法的精度和抗噪特性均优于传统的OI算法,验证了本文算法具有快速解算和高精度的特性。实际测量结果中,测量系统的测角精度在 0.384° 水平,定位精度在0.358 mm水平。

该方法能够满足航天器交会对接、飞行器姿态测量等需求,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Ai L L, Yuan F, Ding Z L. An exterior attitude measurement system for spatial object based on linear CCD[J]. Optics and Precision Engineering, 2008, 16(1): 161-165.
艾莉莉,袁峰,丁振良.应用线阵CCD的空间目标外姿态测量系统[J].光学精密工程,2008,16(1): 161-165.
- [2] Tzschichholz T, Boge T, Schilling K. Relative pose estimation of satellites using PMD-/CCD-sensor data fusion[J]. Acta Astronautica, 2015, 109: 25-33.
- [3] Cui J S, Huo J, Yang M. The high precision positioning algorithm of circular landmark center in visual measurement[J]. Optik, 2014, 125(21): 6570-6575.
- [4] Du Y C, Song L, Wan Q H, *et al.* High Resolution absolute code disk based on linear array image sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(11): 1112001.
杜颖财,宋路,万秋华,等.基于线阵图像传感器的高分辨率单圈绝对式编码方法[J].光学学报,2016,36(11): 1112001.
- [5] Li L, Deng Z Q, Li B, *et al.* Fast vision-based pose estimation iterative algorithm[J]. Optik, 2013, 124(12): 1116-1121.
- [6] 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.
- [7] Hu Z Y, Lei C, Wu F C. A short note on P4P problem[J]. Acta Automatica Sinica, 2001, 27(6): 770-776.
胡占义,雷成,吴福朝.关于P4P问题的一点讨论[J].自动化学报,2001,27(6): 770-776.
- [8] Hmam H, Kim J. Optimal non-iterative pose estimation via convex relaxation[J]. Image and Vision Computing, 2010, 28(11): 1515-1523.
- [9] Wu F C, Hu Z Y. A linear method for the P n P problem[J]. Journal of Software, 2003, 14(3): 682-688.
吴福朝,胡占义.P n P问题的线性求解算法[J].软件学报,2003,14(3): 682-688.
- [10] Philip N, Ananthasayanam M. Relative position and attitude estimation and control schemes for the final phase of an autonomous docking mission of spacecraft[J]. Acta Astronautica, 2003, 52(7): 511-522.
- [11] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. EP n P: an

- accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [12] Zhang S J, Liu F H, Cao X B, *et al.* Monocular vision-based two-stage Iterative algorithm for relative position and attitude estimation of docking spacecraft[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23(2): 204-210.
- [13] Zhang Z, Zhang X H, Fu D. Accurate and robust iterative pose estimation from line correspondences[J]. Journal of Computer Applications, 2008, 28(2): 326-329, 354.
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, 354.
- [14] Haralick R M, Joo H, Lee C, *et al.* Pose estimation from corresponding point data[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(6): 1426-1446.
- [15] Lu C P, Hager G D, Mjolsness E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.
- [16] Horn B K P, Hilden H M, Negahdaripour S. Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices[J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics Image Science and Vision, 1988, 5(7): 1127-1135.
- [17] Pan H, Huang J Y, Qin S Y. High accurate estimation of relative pose of cooperative space targets based on measurement of monocular vision imaging[J]. Optik, 2014, 125(13): 3127-3133.
- [18] Li X, Long G C, Liu J B, *et al.* Accelerative orthogonal iteration algorithm for camera pose estimation[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(1): 0115004.
李鑫, 龙古灿, 刘进博, 等. 相机位姿估计的加速正交迭代算法[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0115004.
- [19] Umeyama S. Least-squares estimation of transformation parameters between two point patterns[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1991, 13(4): 376-380.
- [20] Tsai R Y. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, 3(4): 323-344.