

文章编号 1004-924X(2012)12-2796-08

## 基于自适应算法的单目视觉系统的姿态解算

周 婧<sup>1,2</sup>, 高印寒<sup>3</sup>, 刘长英<sup>1\*</sup>, 张也弛<sup>4</sup>

- (1. 吉林大学 仪器科学与电气工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 吉林农业大学 信息技术学院, 吉林 长春 130118;  
3. 吉林大学 汽车仿真与控制国家重点实验室, 吉林 长春 130022;  
4. 中国电信有限公司吉林省分公司 公众客户部, 吉林 长春 130033)

**摘要:**提出了自适应总体最小二乘算法,以进一步提高单摄像机视觉测量系统光学特征点的姿态解算精度,研究并对比了常用的总体最小二乘算法及自适应总体最小二乘算法在测量系统中的应用。首先,根据空间几何位置关系构建光学特征点、像点及摄像机位置的坐标系及三维空间模型,并建立关于光学特征点及像点的矩阵方程。然后,应用常用的总体最小二乘法及自适应总体最小二乘法进行优化求解。最后,基于优化的总体最小二乘解确定光学特征点相对世界坐标系的姿态。应用三坐标测量机进行仿真对比实验,结果表明:常用的总体最小二乘算法得出的姿态坐标的标准差为 0.055 7 mm,自适应总体最小二乘算法得出的姿态坐标的标准差为 0.041 4 mm。相比之下,自适应总体最小二乘算法有更高的收敛速度及收敛精度,且解算速度优于常用总体最小二乘算法,满足单目视觉测量系统的稳定、可靠和精度高等要求。

**关键词:**视觉测量;单目视觉系统;光学特征点;总体最小二乘法;姿态解算;自适应算法

**中图分类号:**TP246;TP391 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122012.2796

## Attitude calculation of single camera visual system based on adaptive algorithm

ZHOU Jing<sup>1,2</sup>, GAO Yin-han<sup>3</sup>, LIU Chang-ying<sup>1\*</sup>, ZHANG Ye-chi<sup>4</sup>

- (1. College of Instrumentation and Electrical Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;  
2. College of Information Technology, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;  
3. State Key Laboratory of Automotive Simulation and Control, Jilin University, Changchun 130022, China;  
4. Department of Public Customer, Jilin Branch, China Telecom Corporation, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: Liuchangy@jlu.edu.cn

**Abstract:** An adaptive total least square algorithm was proposed to further improve the attitude calculation accuracy of optical characteristic points, and the total least square algorithm and adaptive total least square algorithm were researched and compared. Firstly, the coordinate system and 3D model among optical characteristic points, image points and the position of camera were established according to the space position relationship, and the matrix equation between optical characteristic points and image points was created. Then, the two algorithms mentioned above were used to get an optimization

收稿日期:2012-08-25;修订日期:2012-09-17.

基金项目:高等学校博士学科点科研基金资助项目(No. 20110061110059);吉林省科技发展计划资助项目(No. 20070535)

solution. Finally, the attitude of optical characteristic points relative to the world coordinate system was obtained based on the optimization solution. The simulation comparison experiment was performed in a coordinate measuring machine, and the experimental result indicates that the standard tolerance of attitude coordinate calculated by total least squares is 0.055 7 mm, and that by adaptive total least squares is 0.041 4 mm. The compared results show that the adaptive total least square algorithm has higher convergence rate and precision, and its calculation speed is better than that of total least square algorithm. It satisfies the system requirements for stabilization, reliability and high precision.

**Key words:** visual measurement; single camera visual system; optical characteristic point; total least squares; attitude calculation; adaptive algorithm

## 1 引 言

视觉测量技术<sup>[1]</sup>是基于计算机坐标测量和视觉技术的一门新的测量技术,其任务是从获取的二维图像信息出发,计算出三维世界信息,重点研究物体的几何尺寸及物体的位置测量。在现代化生产中,视觉测量技术广泛应用于工业检测、逆向工程、机器人视觉、虚拟现实等主动、实时测量过程。其中,单目视觉测量系统在系统测量精度、测量方法及测量速度等方面已达到三坐标测量机(CMM)的测量精度,具有携带方便、测量速度快、测量精度高、可以实现现场测量等优点。在其应用的领域中,国内外的科研工作者进行了大量深入的研究分析,Pancewicz T. 等提出了一种基于条纹投影的三维模型建立的方法<sup>[2]</sup>; Sansoni G. 等提出了应用主动立体视觉和结构光束快速获取被测物体的表面三维点云数据<sup>[3]</sup>; Reich C. 等则提出一种融合视觉测量与编码结构光技术的曲面三维测量方法<sup>[4]</sup>。

以上的研究分析结果表明,视觉测量系统的姿态解算是直接影响测量系统的关键因素。优化光学特征点与摄像机的相对姿态转换,可以进一步提高测量精度。近几年,针对优化姿态解算问题,国内的科研工作者取得很多成果。哈尔滨工业大学的李晶等提出一种基于 Rodrigues 参数建立姿态解算模型<sup>[5]</sup>,在保证测量精度的同时,提高了测量速度;北京邮电大学的杨剑等提出一种应用加权最小二乘算法进行三维模型重构的方法<sup>[6]</sup>,在噪声较大的情况下,提高了测量的精度;冯大政等提出了一种基于近似逆功率迭代的总体最小二乘算法<sup>[7]</sup>,其算法结构相对复杂,并且需要较多的初始参数设置,针对实现快速现场测量的

要求,应用并不方便。本文综合以上的研究成果,结合单目视觉测量系统模型的结构特点,提出一种自适应总体最小二乘算法,对光学特征点的姿态进行解算。

## 2 测量系统模型的建立

测量系统包括由光学特征点组成的测棒、光强控制及通信模块、摄像机、图像采集及处理模块、工业计算机等<sup>[8-9]</sup>。其中,光学测棒上设置 5 个光学特征点(红外发光二极管),光学特征点之间的相对位置及光学测头与光学特征点之间的位置关系是已知的。

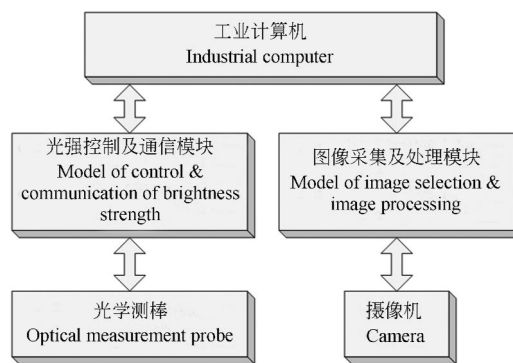


图 1 测量系统结构框图

Fig. 1 Architecture diagram of measurement system

建立测量系统模型,首先通过空间几何关系建立系统坐标系;利用光学特征点间的约束条件及摄像机成像原理,建立光学特征点、像点及摄像机之间的空间位置关系;通过系统坐标系间的变换实现光学特征点的姿态转换,进而得到被测物体的坐标,达到测量的目的。

### 2.1 坐标系的建立

光学特征点的姿态问题,即空间位置关系的

确立,需要引入摄像机成像坐标系、世界坐标系及光学特征点坐标系。摄像机成像坐标系的坐标原点  $O$  建立在在摄像机光轴与成像平面的交点,轴  $X_0$  与轴  $Y_0$  分别平行于摄像机成像平面的横轴和纵轴;摄像机的透视投影中心作为世界坐标系的坐标原点,即摄像机的世界坐标系下的坐标:  $O_w(0,0,0)$ ,轴  $Z_w$  沿光轴方向,轴  $X_w$  及轴  $Y_w$  分别平行于成像坐标系的轴  $X_0$  与轴  $Y_0$ 。

在空间定位问题方面,  $P_nP$  理论是计算机视觉、摄影测量学乃至数学领域的一个经典问题。根据  $P4P$  问题结论:4 个控制点共面时,且任意 3 个控制点不共线,则问题有唯一解;由此,推广至  $P5P$  问题也必有唯一解<sup>[10-11]</sup>。依据  $P_nP$  问题的

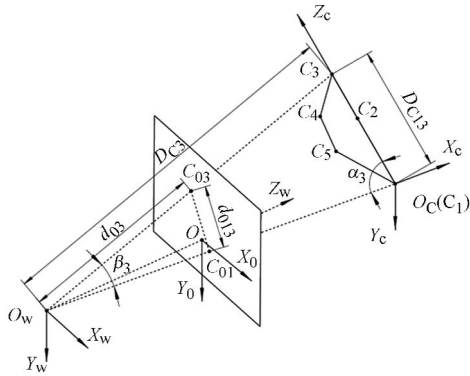


图 2 测量系统坐标系

Fig. 2 Coordinate system of measurement system

研究结论,简化光学测头上的 5 个光学特征点的分布位置,如图 2 所示。

### 2.2 系统坐标模型的建立

设光学特征点  $C_i(1 \leq i \leq 5)$  在成像平面的像点为  $C_{0i}$ ,光学特征点  $C_j(1 \leq j \leq 5, i \neq j)$  在成像平面的像点为  $C_{0j}$ ;在世界坐标系下,坐标原点  $O_w$  到光学特征点  $C_i$  的距离为  $D_{Ci}$ ,到像点  $C_{0i}$  的距离为  $d_{Ci}$ ;坐标原点  $O_w$  到光学特征点  $C_j$  的距离为  $D_{Cj}$ ,到像点  $C_{0j}$  的距离为  $d_{Cj}$ ;像点  $C_{0i}$  与  $C_{0j}$  的距离为  $d_{0ij}$ ;光学特征点  $C_i$  与  $C_j$  的距离为  $D_{Cij}$ ;  $D_{Cj}$  与  $D_{Cij}$  之间夹角为  $\alpha_i$ ;  $D_{Ci}$  与  $D_{Cj}$  之间夹角为  $\beta_i$ 。

则:

$$D_{Ci}^2 + D_{Cj}^2 - D_{Cij}^2 - 2D_{Ci}D_{Cj} \cos \beta_i = 0, \quad (1)$$

$$d_{Ci}^2 + d_{Cj}^2 - d_{0ij}^2 - 2d_{Ci}d_{Cj} \cos \beta_i = 0, \quad (2)$$

$$\text{设: } \eta_r = \frac{D_{Cij}}{\sin \beta_j};$$

式(1)整理得:

$$[D_{Cj}^2 + k_r \cdot D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2]^2 = [k_r \cdot D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2]^2 - (D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2)^2, \quad (3)$$

$$\text{其中: } k_r = \frac{2 \cdot D_{Cij}^2}{\eta_r^2} - 1;$$

式(3)的函数形式为:

$$f(D_{Ci}, D_{Cj}) = [D_{Cj}^2 + k_r \cdot D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2]^2 - [k_r \cdot D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2]^2 + (D_{Ci}^2 - D_{Cij}^2)^2. \quad (4)$$

光学特征点  $C_1$  分别与其他 4 个特征点列函数方程,并建立方程组,得:

$$\begin{cases} f(D_{C1}, D_{C2}) = [D_{C2}^2 + k_1 \cdot D_{C1}^2 - D_{C12}^2]^2 - [k_1 \cdot D_{C1}^2 - D_{C12}^2]^2 + (D_{C1}^2 - D_{C12}^2)^2 \\ \vdots \\ f(D_{C1}, D_{C5}) = [D_{C5}^2 + k_4 \cdot D_{C1}^2 - D_{C15}^2]^2 - [k_4 \cdot D_{C1}^2 - D_{C15}^2]^2 + (D_{C1}^2 - D_{C15}^2)^2 \end{cases} \quad (5)$$

同理,光学特征点  $C_r(2 \leq r \leq 5)$  分别与  $C_k(3 \leq k \leq 5, k \neq r)$  列出函数方程,联立式(5),即可得出  $(C_4^2 + C_3^2 + C_2^2) = 10$  个只含有关于  $D_{C1}$  的等式。

设  $d = D_{C1}$ , 10 个等式进行消元变换,联立组成只含  $d$  的方程组。即:

$$\begin{cases} k_{11}d^8 + k_{12}d^7 + k_{13}d^6 + k_{14}d^5 + k_{15}d^4 + k_{16}d^3 + k_{17}d^2 + k_{18}d = k_{19} \\ \vdots \\ k_{i1}d^8 + k_{i2}d^7 + k_{i3}d^6 + k_{i4}d^5 + k_{i5}d^4 + k_{i6}d^3 + k_{i7}d^2 + k_{i8}d = k_{i9} \\ \vdots \\ k_{91}d^8 + k_{92}d^7 + k_{93}d^6 + k_{94}d^5 + k_{95}d^4 + k_{96}d^3 + k_{97}d^2 + k_{98}d = k_{99} \\ k'_{11}d^8 + k'_{12}d^7 + k'_{13}d^6 + k'_{14}d^5 + k'_{15}d^4 + k'_{16}d^3 + k'_{17}d^2 + k'_{18}d = k'_{19} \end{cases}, \quad (6)$$

式(6)转化为矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} k_{11} & \cdots & \cdots & k_{18} \\ \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ k_{91} & \cdots & \cdots & k_{98} \\ k'_{11} & \cdots & \cdots & k'_{18} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d^8 \\ \vdots \\ \vdots \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{19} \\ \vdots \\ \vdots \\ k_{99} \\ k'_{19} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

即:  $\mathbf{K}_{10 \times 8} \cdot \mathbf{d}_{8 \times 1} = \mathbf{b}_{10 \times 1}$ ,

求解式(7)即为典型的矩阵  $\mathbf{Ax} = \mathbf{b}$  的求解问题。

### 3 矩阵方程的求解算法

由于矩阵  $\mathbf{K}$  及  $\mathbf{b}$  皆为实测数据计算所得,均存在噪声干扰误差,最小二乘估计从统计学观点就不再是最优的,其偏差的协方差将受噪声干扰误差的影响而增加。本文应用一般的总体最小二乘法<sup>[12-13]</sup>与自适应总体最小二乘算法分别进行解算。

#### 3.1 总体最小二乘算法

引入扰动向量  $\mathbf{e}$  及扰动矩阵  $\mathbf{E}$ , 来校正矩阵  $\mathbf{K}_{10 \times 8}$  及  $\mathbf{b}_{10 \times 1}$  存在的扰动误差,则式(7)转化为如下矩阵方程:

$$(\mathbf{K}_{10 \times 8} + \mathbf{E}) \cdot \mathbf{d}_{8 \times 1} = (\mathbf{b}_{10 \times 1} + \mathbf{e}), \quad (8)$$

即:

$$([\mathbf{-b}_{10 \times 1}, \mathbf{K}_{10 \times 8}] + [\mathbf{-e}, \mathbf{E}]) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ \mathbf{d}_{8 \times 1} \end{bmatrix} = 0, \quad (9)$$

设:  $\mathbf{K}' = [\mathbf{-b}_{10 \times 1}, \mathbf{K}_{10 \times 8}]$ ,  $\mathbf{E}' = [\mathbf{-e}, \mathbf{E}]$ , 则式(9)转化为齐次方程  $(\mathbf{K}' + \mathbf{E}')\mathbf{x} = 0$  的求解问题。

约束最小二乘解  $\mathbf{x}$  是一个单位范数的向量。设:  $\mathbf{K}'\mathbf{x} = -\mathbf{E}'\mathbf{x}$ , 则  $(-\mathbf{E}'\mathbf{x})$  可以视为方程  $\mathbf{K}'\mathbf{x} = 0$  的最小二乘解的误差向量。总体最小二乘解  $\mathbf{x}$  是使得误差平方和为最小的最小二乘解。

定义 Lagrange 乘数的目标函数:

$$\begin{aligned} J = & \| \mathbf{K}'_{10 \times 9} \cdot \mathbf{x}_{9 \times 1} \|^2_{\frac{1}{2}} + \boldsymbol{\lambda} \cdot (1 - \mathbf{x}_{9 \times 1}^T \cdot \mathbf{x}_{9 \times 1}) = \\ & \mathbf{x}_{9 \times 1}^T \cdot (\mathbf{K}'_{10 \times 9})^T \cdot \mathbf{K}'_{10 \times 9} \cdot \mathbf{x}_{9 \times 1} + \\ & \boldsymbol{\lambda} \cdot (1 - \mathbf{x}_{9 \times 1}^T \cdot \mathbf{x}_{9 \times 1}), \end{aligned} \quad (10)$$

式中:  $\boldsymbol{\lambda}$  为 Lagrange 乘数;

由  $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{x}} = 0$ , 得:

$$\boldsymbol{\lambda} = (\mathbf{K}'_{10 \times 9})^T \cdot \mathbf{K}'_{10 \times 9}, \quad (11)$$

则由式(11)可得,  $\boldsymbol{\lambda}$  是  $(\mathbf{K}'_{10 \times 9})^T \cdot \mathbf{K}'_{10 \times 9}$  的最小特征值。

设增广矩阵  $\mathbf{K}'$  的奇异值分解为:

$$\mathbf{K}' = \mathbf{U} \cdot \text{Diag}(d_1, \dots, d_9) \cdot \mathbf{V}^H, \quad (12)$$

式中: 对角元素  $d_1 \geq d_2 \geq \dots \geq d_9 \geq 0$ ; 与其对应的奇异值向量为  $\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_9$ 。

$\mathbf{K}'\mathbf{x} = 0$  的最小二乘解就是最小奇异值  $d_9$  对应的右奇异向量  $\mathbf{x} = \mathbf{V}_9 = [\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_i, \dots, \mathbf{v}_9]^T$ 。

则  $\mathbf{K}_{10 \times 8} \cdot \mathbf{d}_{8 \times 1} = \mathbf{b}_{10 \times 1}$  的最小二乘解应满足:

$$\mathbf{d}_{\text{TLS}} = \frac{1}{v_1} [\mathbf{v}_2 \cdots \mathbf{v}_9]^T = [\mathbf{v}'_1, \dots, \mathbf{v}'_i, \dots, \mathbf{v}'_8],$$

$$\text{则: } d = \frac{\sum_{i=1}^7 \frac{v'_i}{v'_{i+1}}}{7}. \quad (13)$$

#### 3.2 自适应总体最小二乘算法

一般的总体最小二乘算法都是需要对数据矩阵进行奇异值分解,运算复杂,在数据矢量维数较大的情况难以在线实现。本文提出基于瑞利商(RQ)作为代价函数,并在步长相对于代价函数梯度的基础上推导出一种自适应总体最小二乘算法。

设输入与输出数据分别为  $X_1(k)$  和  $Y_0(k)$ , 则:

$$X_1(k) = x(k) + u_1(k), \quad (14)$$

$$Y_0(k) = y(k) + u_0(k), \quad (15)$$

其中:  $k = 1, 2, \dots, n$ ;  $x(k)$  和  $y(k)$  是有效数据,  $u_1(k)$  和  $u_0(k)$  是输入和输出数据上的扰动误差。设系统的权向量为:

$$\mathbf{H}(k) = [h_1(k), h_2(k), \dots, h_n(k)]^T, \quad (16)$$

设增广输入向量和增广权向量分别为:

$$\mathbf{Z}(k) = [\mathbf{X}^T(k), \mathbf{Y}^T(k)]^T, \quad (17)$$

$$\mathbf{W}(k) = [\mathbf{H}^T(k), -1]^T, \quad (18)$$

则,输出误差为:

$$e(k) = \mathbf{Z}^T(k) \mathbf{W}(k). \quad (19)$$

设代价函数为增广权向量的瑞利商与增广权向量最后元素约束项的和:

$$\begin{aligned} f(\mathbf{W}(k), \eta) = & \frac{\mathbf{W}(k)^T \mathbf{R}(k) \mathbf{W}(k)}{\| \mathbf{W}(k) \|^2_{\frac{1}{2}}} + \\ & \eta(1 - \mathbf{W}(k)^T \mathbf{e}_{n+1}), \end{aligned} \quad (20)$$

其中:  $\mathbf{R}(k) = E\{\mathbf{Z}(k) \mathbf{Z}(k)^T\}$  是增广输入向量的自相关矩阵。对式(20)相对于  $\mathbf{W}(k)$  取偏导数,并应用最速下降法得:

$$\mathbf{W}(k+1) = \mathbf{W}(k) - \sigma(k) \frac{\|\mathbf{W}(k)\|_2^2 \mathbf{R}(k) \mathbf{W}(k) - \mathbf{W}(k)^T \mathbf{R}(k) \mathbf{W}(k) \mathbf{W}(k)}{(\|\mathbf{W}(k)\|_2^2)^2}, \quad (21)$$

其中:  $\sigma(k)$  是迭代步长。假设  $\mathbf{W}(k)$  收敛, 由 RQ 的性质即可知, 其解是  $\mathbf{R}(k)$  的最小特征值对应的规范化特征向量, 即求得总体最小二乘解。

通常情况下, 设  $\mathbf{Z}(k) \mathbf{Z}(k)^T$  为  $\mathbf{R}(k)$  的瞬时估计, 并应用步长与瞬时估计误差的非线性函数关系来实现步长的迭代更新。但实际上, 其只对特定的信号运行环境有效, 收敛精度并不理想。本文应用新的估计形式:

$$\alpha \mathbf{R}(k-1) + \mathbf{Z}(k) \mathbf{Z}(k)^T.$$

目前, 很多关于步长迭代的自适应算法是应用步长与瞬时估计误差的非线性函数关系以达到步长的迭代<sup>[14-15]</sup>, 但这种迭代方式往往只针对特定信号的运行环境有效, 算法具有局限性。基于以上的分析, 本文应用一种基于代价函数梯度的步长迭代规则, 相对于非线性函数迭代具有更广泛的适应性。设步长迭代式为:

$$\sigma(k) = \sigma(k-1) - \sigma \nabla f(k), \quad (22)$$

则:

$$\nabla f(k) |_{\sigma(k-1)} = \left\{ \frac{\partial f(k)}{\partial \mathbf{W}(k)}, \frac{\partial \mathbf{W}(k)}{\partial \sigma(k-1)} \right\};$$

其中:

$$\frac{\partial f(k)}{\partial \mathbf{W}(k)} = \frac{\|\mathbf{W}(k)\|_2^2 \mathbf{R}(k) \mathbf{W}(k) - \mathbf{W}(k)^T \mathbf{R}(k) \mathbf{W}(k) \mathbf{W}(k)}{(\|\mathbf{W}(k)\|_2^2)^2};$$

$$\frac{\partial \mathbf{W}(k)}{\partial \sigma(k-1)} = - \frac{\partial f(k-1)}{\partial \mathbf{W}(k-1)}.$$

### 3.3 光学特征点姿态解算

基于上面的分析计算, 通过一般的总体最小二乘算法和本文提出的自适应总体最小二乘算法均可以得出最优解; 至此, 只要得出世界坐标系与特征点坐标系间的转化关系, 即可得出光学特征点的姿态。则问题转化为求坐标系间转化的旋转矩阵与平移矩阵。

设光学特征点  $C_i (1 < i < 5)$  在特征点坐标系下的坐标矩阵  $\mathbf{P}_{C_i} = [x_{C_i}, y_{C_i}, z_{C_i}]$ ; 其世界坐标系下的坐标矩阵  $\mathbf{P}_{W_i} = [x_{W_i}, y_{W_i}, z_{W_i}]$ ;

定义坐标矩阵:

$$\mathbf{P}_W = [\mathbf{P}_{W_1}^T \cdots \mathbf{P}_{W_i}^T \cdots \mathbf{P}_{W_5}^T], \quad (23)$$

$$\mathbf{Q}_C = [\mathbf{P}_{C_1}^T \cdots \mathbf{P}_{C_i}^T \cdots \mathbf{P}_{C_5}^T]. \quad (24)$$

设矩阵  $\mathbf{R}_{PQ}$  为特征点坐标系相对世界坐标系的旋转矩阵, 则:

$$\mathbf{P}_W = \mathbf{R}_{PQ} \cdot \mathbf{Q}_C$$

$$\text{即: } \mathbf{R}_{PQ} = \mathbf{P}_W \cdot \mathbf{Q}_C^T \cdot (\mathbf{Q}_C \cdot \mathbf{Q}_C^T)^{-1}. \quad (25)$$

设光学特征点  $C_j (1 < j < 5)$  在特征点坐标系下的坐标矩阵  $\mathbf{P}_{C_j} = [x_{C_j}, y_{C_j}, z_{C_j}]$  则:

$$\mathbf{P}_{C_i} \times \mathbf{P}_{C_j} = [(y_{C_j} z_{C_i} - z_{C_i} y_{C_j}), (x_{C_j} z_{C_i} - x_{C_i} z_{C_j}), (x_{C_i} y_{C_j} - y_{C_i} x_{C_j})], \quad (26)$$

$i \neq j (i, j = 1, 2, \dots, 5)$  使得  $\mathbf{P}_{C_i} \times \mathbf{P}_{C_j} \neq 0$ , 矩阵  $\mathbf{Q}_C$  为满秩矩阵时,  $\mathbf{R}_{PQ}$  有解。

在世界坐标下, 平移矩阵为特征点坐标系原点  $O_C$  相对于世界坐标系的位置坐标为:

$$\mathbf{M} = [x_{W_1}, y_{W_1}, z_{W_1}]^T;$$

设光学触点  $\mathbf{P}_X$  在特征点坐标系下的坐标矩阵  $\mathbf{P}_X = [x_p, y_p, z_p]$ ; 则光学测头(被测点)在世界坐标下的坐标为:

$$\mathbf{P}_W = \mathbf{R}_{PQ} \cdot \mathbf{P}_X + \mathbf{M}. \quad (27)$$

由此, 基于光学特征点在世界坐标系及特征点坐标系下的空间坐标得到光学特征点的的姿态转换, 进而得出被测点的空间坐标。

## 4 仿真实验及分析

为了验证本文提出的自适应总体最小二乘算法的有效性, 应用三坐标测量机(CMM)模拟工作环境, 进行仿真对比实验。

定义 CMM 坐标系的坐标原点为摄像机的世界坐标系原点; 假设摄像机的焦距  $f = 12 \text{ mm}$ ; 将预先定义好的光学特征点固定在 CMM 上, 坐标值由 CMM 直接测得。而实际测量中, 光学特征点的发光强度的一致性与均匀性对测量结果具有很大的影响。所以在对比实验中, 对摄像机得到的同一组光学像点坐标分别应用两种算法进行解算, 即在发光强度的一致性与均匀性相同的条件下, 分别得到两种算法对光学特征点的姿态解算。由此, 对比实验可以忽略光学特征点的发光强度的一致性与均匀性对测量结果带来的影响。

随机定义个待测位置, 分别应用一般的总体最小二乘算法(TLS)与本文提出的自适应总体最

小二乘算法(AVS-TLS)对光学特征点的姿态进行解算。各种算法得出的姿态坐标与 CMM 测得实际坐标进行对比。偏差曲线图如图 3~图 5 所示。

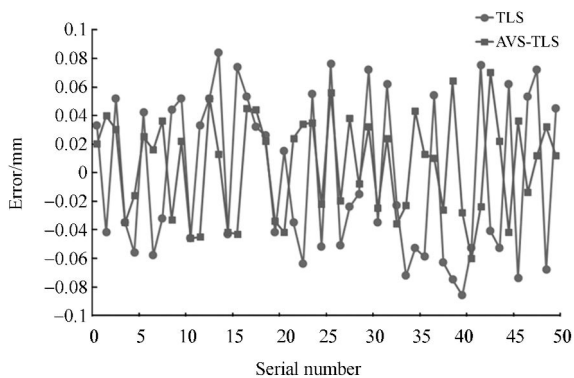


图 3 X 轴方向偏差曲线图

Fig. 3 Curves of tolerances along X axis

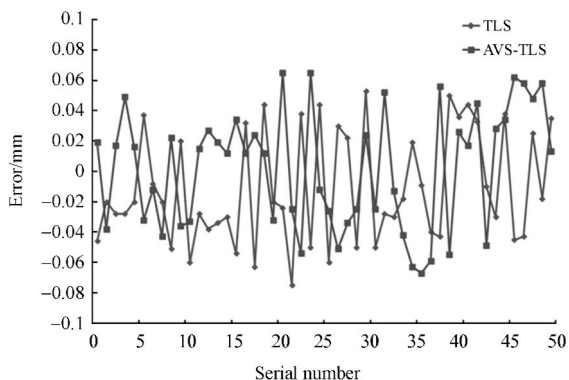


图 4 Y 轴方向偏差曲线图

Fig. 4 Curves of tolerances along Y axis

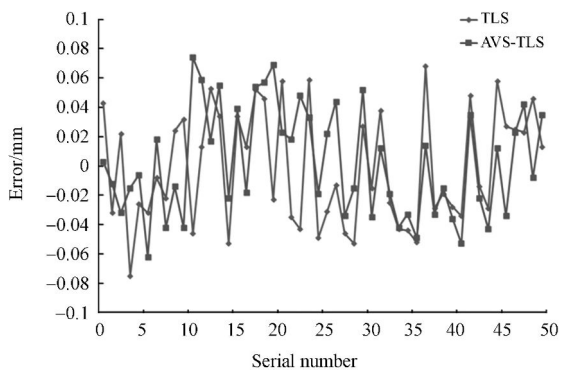


图 5 Z 轴方向偏差曲线图

Fig. 5 Curves of tolerances along Z axis

对比实验结果表明:一般的总体最小二乘算法的标准差为 0.055 7 mm,本文提出的自适应总

体最小二乘算法的标准差为 0.041 4 mm。相对于一般的总体最小二乘算法,自适应总体最小二乘算法的解算结果偏差更小。

曲线图 6 表明:自适应总体最小二乘算法有更快的收敛速度和更高的收敛精度。

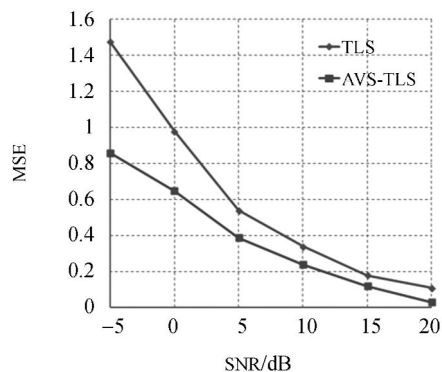


图 6 算法均方差曲线图

Fig. 6 Curves of mean-square deviation

进一步验证自适应总体最小二乘算法的解算速度,建立实验环境:“CPU: Intel 酷睿 i7 3770, 内存: 4G, 操作系统: Windows xp, Matlab7. 0。实验分别应用一般总体最小二乘算法与自适应总体最小二乘算法连续进行  $10^6$  次解算,分别记录两种算法 5 次测试中消耗的时间如表 1 所示。表 1 对比结果表明:自适应总体最小二乘算法的解算速度明显优于一般的总体最小二乘算法。

表 1 算法计算消耗时间的对比

Tab. 1 Comparison between time consumptions

TLS	t/s				
	1.33	1.62	1.23	1.35	1.29
AVS-TLS	0.94	0.87	0.79	0.82	0.88

### 5 结 论

为了优化光学特征点与摄像机的相对姿态转换,进一步提高测量精度,本文提出了自适应总体最小二乘的方法。首先建立单目视觉测量系统的结构和模型;然后,应用一般的总体最小二乘算法以及自适应总体最小二乘算法进行光学特征点的姿态解算;最后,在三坐标测量机上进行仿真对比实验。一般的总体最小二乘算法得出的解算标准

差为 0.055 7 mm;而自适应总体最小二乘算法得出的解算标准差为 0.041 4 mm。实验结果证明:

自适应总体最小二乘算法有更高的收敛速度及收敛精度,且解算速度优于一般总体最小二乘算法。

### 参考文献:

- [1] 马骊群,王立鼎,靳书元,等.工业大尺寸测量仪器的溯源现状及发展趋势[J].计测技术,2006,26(6):1-5.  
MA L Q,WANG L D,JIN SH Y, *et al.*. Traceability status and developing trend of industrial large-scale measuring instruments [J]. *Metrology and measurement Technology*, 2006, 26(6): 1-5. (in Chinese)
- [2] PANCEWICZ T, KUJAWINSKA M. CAD/CAM/CAE representation of 3D objects measured by fringe projection[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1):143-149.
- [3] SANSONI G, CAROCCI M, RODELLA R. Calibration and performance evaluation of a 3D imaging sensor based on the projection of structured light [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, 49(3): 628-636.
- [4] REICH C, RITTER R. 3D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projector[J]. *Optical Engineering*, 2000, 39(1):224-231.
- [5] 李晶,袁峰,丁振良.基于Rodrigues参数的多线阵CCD外姿态测量系统的姿态解算[J].光学精密工程,2012,20(4):858-863.  
LI J,YUAN F,DING ZH L. Attitude calculation of multi-linear CCD exterior attitude measurement system based on Rodrigues parameter [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(4): 858-863. (in Chinese)
- [6] 杨剑,吕乃光,董明利.加权最小二乘算法在机器视觉系统中的应用[J].光学精密工程,2009,17(8):1871-1877.  
YANG J, LV N G, DONG M L. Application of weighted least square method to machine vision system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(8): 1870-1877. (in Chinese)
- [7] FENG D ZH, ZHENG W X. Fast approximate inverse power iteration algorithm for adaptive total least squares FIR Filtering[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10):4032-4039.
- [8] 彭凯,刘丽冰,刘书桂.基于双相机的计算机视觉坐标测量系统[J].光电工程,2008,35(7):298-300.  
PENG K, LIU L B, LIU SH G. Computer vision coordinates measurement system with dual cameras [J]. *OPTO-Electronic Engineering*, 2008, 35(7): 298-300. (in Chinese)
- [9] 孙军华,吴子彦,刘谦哲,等.大视场双目视觉传感器的现场标定[J].光学精密工程,2009,17(3):633-640.  
SUN J H, WU Z Y, LIU Q ZH, *et al.*. Field calibration of stereo vision sensor with large FOV[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 633-640. (in Chinese)
- [10] 吴福朝,胡占义.关于P5P问题的研究[J].软件学报,2001,12(5):768-775.  
WU F CH, HU ZH Y. A study on the P5P problem[J]. *Journal of Software*, 2001, 12(5): 768-775. (in Chinese)
- [11] 汤建良.一个关于P5P问题的求解算法[J].广西师范大学学报:自然科学学报,2009,27(1):40-42.  
TANG J L. An algorithm to solve solutions of P5P problem[J]. *Journal of GUANGXI Normal University: Natural Science Edition*, 2009, 27(1): 40-42. (in Chinese)
- [12] GOLUB G H, VAN LOAN C F. An analysis of the total least squares problem[J]. *Society for Industrial and Applied Mathematics Journal on Numerical Analysis*, 1980, 17:883-893.
- [13] HORI Y. Future vehicle driven by electricity and control Research on four-wheel-motored "UOT Electric March II"[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2004, 51(5):954-962.
- [14] DOUGLAS S C, CICHOCKI A. On-line step-size selection for training of adaptive systems [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 1997(11): 45-46.
- [15] YUAN L X, WANG W W. Variable step-size sign natural gradient algorithm for sequential blind source separation [J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2005, 12(8): 589-592.

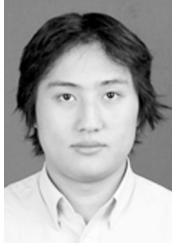
## 作者简介:



周 婧(1979—),女,吉林长春人,讲师,博士研究生,2002 年于长春工业大学获得学士学位,2007 年于吉林大学获得硕士学位,主要从事于视觉测量技术的研究。E-mail: orchid\_79@163.com



刘长英(1974—),男,黑龙江望奎人,副教授,博士,1998 年于吉林工业大学获得学士学位,2001 年于吉林大学获得硕士学位,2006 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事测控技术、视觉测量技术的研究。E-mail: liuchangy@jlu.edu.cn



张也弛(1982—),男,吉林长春人,工程师,硕士,2000 年于青岛大学获得学士学位,2011 年于吉林大学获得硕士学位,主要从事测控技术的研究。E-mail: 13351500355@189.cn

## 导师简介



高印寒(1951—),男,吉林长春人,教授,博士生导师,吉林省高级专家,主要从事车辆测试技术及仪器的研究。E-mail: yinhan@jlu.edu.cn

## ●下期预告

## 硅微陀螺仪正交耦合系数的计算及验证

姜劭栋,裘安萍,施 芹,苏 岩\*

(南京理工大学 机械工程学院,江苏 南京 210094)

硅微陀螺仪采用微机械加工工艺制作而成,其加工的相对精度较低,从而产生正交耦合误差,严重影响陀螺仪的输出。为了对硅微陀螺仪结构进行优化设计,提高其性能,建立陀螺仪正交耦合系数的理论分析模型。首先,利用能量方法推导陀螺仪驱动梁的面内刚度;然后,建立陀螺仪的刚度矩阵;最后,建立正交耦合系数的理论计算公式。针对本课题组研制的双质量振动式硅微陀螺仪,理论计算出直接耦合系数为  $4.74 \times 10^{-5}$ ,二次耦合系数为  $8.44 \times 10^{-7}$ 。得到陀螺仪的正交耦合系数为  $4.75 \times 10^{-5}$ ,与仿真值相差 8.7%。分析了陀螺仪正交耦合系数的最大值为  $2.18 \times 10^{-4}$ ,与仿真值相差 7.9%,并通过实验验证了计算结果的正确性。正交耦合系数理论分析模型的建立,对提高硅微陀螺仪的性能具有重大意义。