

双目视觉测量系统位姿解算方法研究

李勤文^{1,2}, 王志乾^{1*}, 杨文昌^{1,2}, 沈铨武^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 10049)

摘要: 在大部件自动对准系统中, 为了解决近距离观测无法获得被观测目标全部特征的问题, 使用双目视觉位姿测量解算方法, 设置其中一个相机为基准相机, 利用两相机之间已知的位姿关系, 将非基准相机拍摄的特征点信息转换到基准相机的相机坐标系下, 然后利用位姿解算的迭代算法思想求解两部件之间的位姿关系。当特征点数目较少时, 迭代算法的误差函数会陷入局部极小值, 针对上述问题, 设计了一种利用各坐标系之间的转换关系求解迭代初始值的方法, 并通过仿真证明了算法的有效性。

关键词: 自动对准; 双目视觉; 位姿解算; 迭代算法

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** B

Research on Pose Calculation Method of Binocular Vision Measurement System

LI Qin-wen^{1,2}, WANG Zhi-qian^{1*}, YANG Wen-chang^{1,2}, SHEN Cheng-wu^{1,2}

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences,

Changchun Jilin 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China)

ABSTRACT: In the automatic alignment system of large parts, the binocular vision pose measurement and calculation method is used to solve the problem that all the features of the observed object cannot be obtained by close observation. By utilizing the known pose relationship between the two cameras, the feature point information captured by one of the cameras can be converted to another camera coordinate system, which is set as the reference camera. Then, the iterative algorithm of pose calculation is used to solve the pose relationship between the two components. When the number of feature points is small, the error function of the iterative algorithm will fall into the local minimum. To solve this problem, a method was designed to solve the initial value of iteration by using the transformation relationship between coordinate systems, and the effectiveness of the algorithm was proved by simulation experiments.

KEYWORDS: Automatic alignment; Binocular vision; Pose calculation; Iterative algorithm

1 引言

工业发展自动化、数字化水平的提高促进了自动对准技术的发展^[1,2], 姿态测量技术作为自动对准系统的关键技术, 主要用于定位被对准部件或直接测量和定位各种工艺设备, 是自动调姿对准系统的重要组成部分^[3]。基于点特征的单目视觉测量方法是三维姿态测量的基本方法, 它通过 n 个满

足透视投影关系的三维特征点和它们的二维投影图像点来计算位姿, 又称为“透视 n 点问题”(PnP 问题)^[4,5]。目前针对单目视觉的位姿解算方法已比较成熟, 但在实际应用中直接采用单目相机往往会由于视场及拍摄角度的限制而导致获取的信息量少。近年来随着相机价格的降低和计算机性能的提高, 利用多个相机来扩大视场范围和提高测量精度的方法得到了广泛的研究应用, 如大型体育赛事, 自动生产装配和国防军事领域等^[6]。在利用多个相机拍摄的特征点信息对物体在空间中的位姿进行解算的过程中, 由于目标的三维特征点和其对应的图像点之间不再满足透视投影规则, 传统的 PnP 求解方法不再适用, 因此要考虑多个相机拍摄信息

基金项目: 吉林省重点科技攻关项目(20170204050GX); 吉林省科技发展计划项目(20190302086GX)

收稿日期: 2019-07-17 修回日期: 2019-09-15

的转换问题^[7-8] 将不同相机拍摄的信息转换到统一的坐标系下进行表示,然后利用位姿解算算法的思想进行求解。

本文针对大部件双目自动对准系统的位姿解算问题,利用单目视觉OI迭代算法^[9]思想最小化四个共面特征点的目标空间共线性误差求解旋转矩阵和平移矩阵,针对算法在特征点数目较少时迭代误差函数陷入局部极小值的问题,利用各坐标系之间的转换关系构造相机成像方程,求解迭代初始值进行迭代,并通过仿真验证了本文方法的有效性。

2 自动对准测量系统概述

本文主要针对如图1所示的自动对准系统布置双目相机进行位姿测量,利用位姿解算方法计算固定部件在空间中的位姿,测量对准偏差,调整移动部件直到完成对准。在固定部件和移动部件上分别布置两个合作靶标和两个光学测量相机 A_A 、 C_B ,两个靶标共面且平行于固定部件对接面,每个靶标上设置两个合作特征点,为保证在最终对接阶段两相机依然能观测到每个靶标上的全部特征点,两个靶标安装在固定部件对接面后方100mm处。两个光学相机的位置关系及内参数已标定。开始时人工粗对准至光学可测范围内,然后切换至自动控制。因为要讨论近距离测量对准的情况,所以设定固定部件和移动部件之间仅有小范围的对准偏差,即两部件之间的旋转角 α' 、 β' 、 $\gamma' \in [-5^\circ, 5^\circ]$,平移距离 $\Delta X' \in [-200\text{mm}, 200\text{mm}]$, $\Delta Y' \in [-200\text{mm}, 200\text{mm}]$, $\Delta Z' \in [0, 200\text{mm}]$ 。

由图1,移动部件与固定部件之间的位姿偏差可以通过对准坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 到目标坐标系 $O-XYZ$ 之间的转换关系进行表示,因此测量的主要目的便是求解两坐标系之间的转换矩阵。通过将两相机拍到的点转换到基准相机 C_A 坐标系进行位姿解算,可以求得 C_A 坐标系与目标坐标系 $O-XYZ$ 之间的转换关系,再利用已知的相机 C_A 坐标系到对准坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 之间的转换关系可得到两部件之间的位姿偏差。其中解算基准相机 C_A 坐标系与目标坐标系 $O-XYZ$ 之间的转换关系是求解的关键,所以本文主要研究如何求得相机 C_A 坐标系到目标坐标系 $O-XYZ$ 之间的转换关系,即两坐标系之间的旋转角 α 、 β 、 γ 和平移距离 ΔX 、 ΔY 、 ΔZ 。最后,利用相机 C_A 坐标系到对准坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 之间的转换关系便可得到两部件之间的旋转角偏差 α' 、 β' 、 γ' 和平移偏差 $\Delta X'$ 、 $\Delta Y'$ 、 $\Delta Z'$ 。

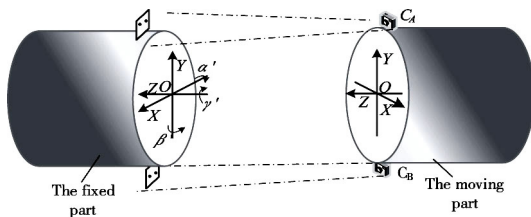


图1 自动对准双目位姿测量系统

3 双目位姿解算的迭代算法

为了便于分析,将双目视觉测量系统简化为图2形式,选取相机 C_A 为基准相机, $P_{1i} = (X_{1i}, Y_{1i}, Z_{1i})^T$, $P_{2i} = (X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i})^T$ ($i=1, 2$) 分别表示相机 C_A 、 C_B 视场范围内的点在目标坐标系下的坐标, ${}^A T_O$ 表示要求的从目标坐标系 $O-XYZ$ 到基准相机 C_A 坐标系的转换矩阵,它是由两坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 构成的四阶方阵。 ${}^A T_B$ 表示已标定的从相机 C_B 到相机 C_A 坐标系的转换矩阵,令 $p_{1i} = (u_{1i}, v_{1i}, 1)^T$, $p_{2i} = (u_{2i}, v_{2i}, 1)^T$ 表示点的齐次图像坐标,将两个相机上点的图像坐标转换到它们的归一化像平面上,得

$$q_{1i} = K_A^{-1} p_{1i} \quad q_{2i} = K_B^{-1} p_{2i} \quad (1)$$

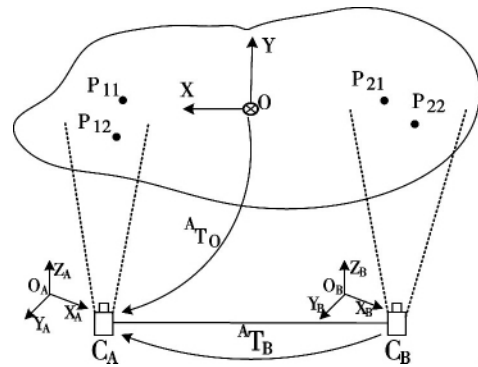


图2 自动对准双目位姿测量系统示意图

由于本文采用的是双目相机,点的图像坐标与目标坐标系下的坐标不再满足单相机透视投影规则,因此不能直接采用单目视觉位姿解算的OI迭代算法,需要将相机坐标系下的点通过向量坐标变换转换到基准相机坐标系下,如图3所示,然后再套用OI算法进行解算。

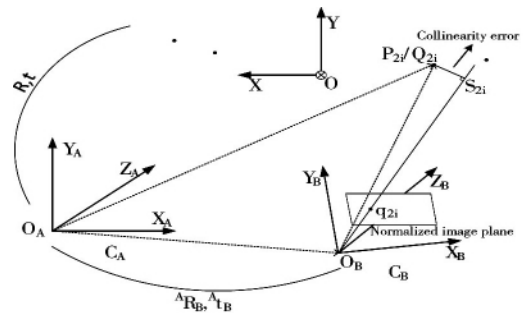


图3 相机 C_B 到基准相机 C_A 坐标变换示意图

已知目标坐标系下的点 P_{2i} ,将其转换到相机 C_A 坐标系下表示,得

$$Q_{2i} = R P_{2i} + t \quad (2)$$

故向量 $\overrightarrow{O_B Q_{2i}}$ 在相机 C_A 坐标系下的表示为

$$\begin{aligned}\overrightarrow{O_B Q_{2i}} &= RP_{2i} + t - ({}^A R_B [0 \ 0 \ 0]^T + {}^A t_B) \\ &= RP_{2i} + t - {}^A t_B\end{aligned}\quad (3)$$

向量 $\overrightarrow{O_B Q_{2i}}$ 在相机 C_A 坐标系下的表示为

$$\overrightarrow{O_B Q_{2i}} = {}^A R_B q_{2i} + {}^A t_B - ({}^A R_B [0 \ 0 \ 0]^T + {}^A t_B) = {}^A R_B q_{2i}\quad (4)$$

因此沿 $\overrightarrow{O_B Q_{2i}}$ 的视线投影矩阵为

$$V_{2i} = \frac{({}^A R_B q_{2i}) ({}^A R_B q_{2i})^T}{({}^A R_B q_{2i})^T ({}^A R_B q_{2i})}\quad (5)$$

这里的视线表示经过相机光心 O_B 和归一化图像点 q_{2i} 的射线,由于空间点 Q_{2i} 经视线投影矩阵作用后应与其投影点 S_{2i} 重合,也即向量 $\overrightarrow{O_B Q_{2i}}$ 应与向量 $\overrightarrow{O_B S_{2i}}$ 重合,代数形式为:

$$RP_{2i} + t - {}^A t_B = V_{2i} (RP_{2i} + t - {}^A t_B)\quad (6)$$

故对相机 C_B 来说,目标空间共线性误差为:

$$e_B = (I - V_{2i}) (RP_{2i} + t - {}^A t_B)\quad (7)$$

由于选择相机 C_A 为基准相机,相机 C_A 视场范围内的点满足透视投影规则,可直接套用 OI 算法,为了与相机 C_B 的相应计算公式保持一致,将相机 C_A 视场范围内点的视线投影矩阵及目标空间共线性误差重写为:

$$V_{1i} = \frac{(q_{1i}) (q_{1i})^T}{(q_{1i})^T (q_{1i})}\quad (8)$$

$$e_A = (I - V_{1i}) (RP_{1i} + t - {}^A t_A)\quad (9)$$

因此,算法的目标函数为:

$$\min_R E(R, t) = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \|(I - V_{ji}) (RP_{ji} + t - t_j)\|^2\quad (10)$$

其中 $t_1 = {}^A t_A = [0 \ 0 \ 0]^T$, $t_2 = {}^A t_B$ 。

对于给定的 R , 平移矩阵 t 关于 R 的函数可以表示为

$$t(R) = \frac{1}{4} (I - \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 V_{ji})^{-1} (\sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (V_{ji} - I) (RP_{ji} - t_j))\quad (11)$$

将式(11)代入式(10)并化简,得

$$\begin{aligned}\min_R E(R) &= \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \|RP_{ji} + t(R) - t_j - V_{ji} (RP_{ji} + t(R) - t_j)\|^2 \\ &= \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \|RP_{ji} + t(R) - H_{ji}(R)\|^2\end{aligned}\quad (12)$$

这是一个一元函数的最小化问题,给定旋转矩阵 R 的初值 R_0 ,假设 R 的第 k 次估计值为 R^k ,则 R 的下一估计值 R^{k+1} 为

$$R^{k+1} = \arg \min_R \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 \|RP_{ji} + t^k(R) - H_{ji}^k(R)\|^2\quad (13)$$

式(13)可以看作是从点集 $\{P_{ji}\}$ 到点集 $\{H_{ji}^k\}$ 的绝对定向问题,可以用 SVD 方法求解,定义

$$P = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 P_{ji}, H^k = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 H_{ji}^k(R)\quad (14)$$

$$M^k = \sum_{j=1}^2 \sum_{i=1}^2 (H_{ji}^k(R) - \bar{H}^k) (P_{ji} - \bar{P})^T\quad (15)$$

M^k 的 SVD 分解为 (U^k, Σ^k, V^k) ,为了保证求得的旋转矩阵 R 不会出现 $\det(R^{k+1}) = -1$ 的情况,需要对传统的 SVD 求解方法进行校正,校正后的解为^[10]

$$R^{k+1} = V^k \text{diag}(1, 1, \det(V^k (U^k)^T)) (U^k)^T\quad (16)$$

得到 R^{k+1} 后,平移向量 t 的下一估计值 t^{k+1} 可以由式(11)求得,然后继续进行迭代直至误差 E 收敛,可以得到目标坐标系 $O-XYZ$ 和相机 C_A 坐标系之间的旋转矩阵 R 和平移矩阵 t ,进而利用已知的相机 C_A 坐标系和对准坐标系 $O'-X'Y'Z'$ 之间的转换关系求得固定部件与移动部件之间的对准偏差。

一般情况下,非线性优化算法都不能保证误差函数 E 一定收敛,取决于初值的选取。优化算法有可能最终收敛到局部极小值,或者在有限的时间内根本不收敛。本文介绍的 OI 迭代算法虽然在单目视觉解算时可保证全局收敛性,但应用于双目视觉解算时,在特征点数目较少时会出现迭代误差 E 收敛到局部极小值的情况。为了解决这个问题,要考虑迭代初始值的选取问题,通过数值解算方法求出初始旋转矩阵作为迭代初值进行迭代,保证解的准确性。

4 迭代初始值的求解

令 $P = (X \ Y \ Z \ 1)^T$ 表示目标坐标系下点的齐次坐标, $Q = (x \ y \ z \ 1)^T$ 表示点在各自相机坐标系下的齐次坐标, $p = (u \ v \ 1)^T$ 表示点的齐次图像坐标。各坐标之间的联系可以表示为一系列的几何变换,如图4所示,其中 K_A, K_B 为已知的两相机内参数矩阵, ${}^B T_A$ 表示从相机 C_A 到相机 C_B 坐标系的转换矩阵,且 ${}^B T_A = ({}^A T_B)^{-1}$ 。

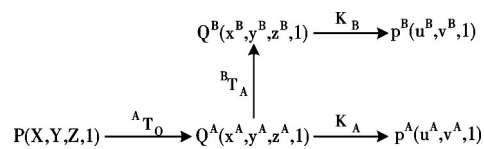


图4 坐标变换过程

基准相机 C_A 视场范围内的点 P_{11}, P_{12} 在目标坐标系下的坐标与它们的图像坐标满足单相机透视成像规则,即

$$z_{1i} P_{1i} = K_A [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 1}]^A T_0 P_{1i}\quad (17)$$

其中 z_{1i} 为标量系数, $i=1, 2$ 。为了建立两相机成像之间的联系,将相机 C_B 视场范围内的点 P_{21}, P_{22} 先转换到基准相机 C_A 坐标系下,再利用已标定的两相机之间的坐标转换关系在 C_B 坐标系下进行成像,最后利用已知的相机 C_B 的内参数矩阵 K_B 建立点在相机坐标系下的坐标与图像坐标之间的转换,代数表达式为

$$z_{2i} P_{2i} = K_B [I_{3 \times 3} \ 0_{3 \times 1}]^B T_A T_0 P_{2i}\quad (18)$$

要求的变换矩阵

$${}^A T_O = \begin{bmatrix} R & t \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\alpha\beta & \cos\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & \cos\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & \Delta X \\ s\alpha\cos\beta & s\alpha\cos\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha\cos\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & \Delta Y \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{cases} z_{11} \begin{bmatrix} u_{11} \\ v_{11} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^A & 0 & u_0^A & 0 \\ 0 & f_v^A & v_0^A & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha\beta & \cos\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & \cos\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & \Delta X \\ s\alpha\cos\beta & s\alpha\cos\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha\cos\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & \Delta Y \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{11} \\ Y_{11} \\ Z_{11} \\ 1 \end{bmatrix} \\ z_{12} \begin{bmatrix} u_{12} \\ v_{12} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^A & 0 & u_0^A & 0 \\ 0 & f_v^A & v_0^A & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha\beta & \cos\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & \cos\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & \Delta X \\ s\alpha\cos\beta & s\alpha\cos\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha\cos\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & \Delta Y \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{12} \\ Y_{12} \\ Z_{12} \\ 1 \end{bmatrix} \\ z_{21} \begin{bmatrix} u_{21} \\ v_{21} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u^B & 0 & u_0^B & 0 \\ 0 & f_v^B & v_0^B & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^B R_A & {}^B t_A \\ \vec{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\alpha\beta & \cos\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & \cos\beta c\gamma + s\alpha s\gamma & \Delta X \\ s\alpha\cos\beta & s\alpha\cos\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha\cos\beta c\gamma - c\alpha s\gamma & \Delta Y \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma & \Delta Z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{21} \\ Y_{21} \\ Z_{21} \\ 1 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (20)$$

其中 ${}^B R_A, {}^B t_A$ 表示已标定的相机 C_A 坐标系到相机 C_B 坐标系的旋转矩阵和平移矩阵。将式(20)展开可得由九个未知数($\alpha, \beta, \gamma, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z, z_{11}, z_{12}, z_{21}$)表示的九个方程,利用 MATLAB 求解方程,并利用测量范围约束去掉不符合条件的值,可以求得旋转矩阵 R 和平移矩阵 t 。由于三点位姿解算的解不唯一,可能出现1、2、3或4个解^[11],若在测量范围内出现多个解,选取令迭代误差函数 E 最小的 R, t 作为迭代初值进行迭代,求得相机 C_A 坐标系和目标坐标系之间的转换关系 ${}^A T_O$ 。进而利用已知的相机 C_A 坐标系和对准坐标系之间的转换关系 ${}^{O'} T_A$ 求得固定部件与移动部件之间的对准偏差 ${}^{O'} T_O, {}^{O'} T_O$ 可转换为两部件之间的旋转角 α', β', γ' 和平移距离 $\Delta X', \Delta Y', \Delta Z'$ 。

5 仿真研究

为了验证算法的正确性,建立 MATLAB 仿真对自动对准系统的双目姿态估计过程进行了仿真。仿真相机采用 Nikon D700 相机的相关参数,相机焦距为 35mm,分辨率为 4256 × 2832,传感器尺寸为 36 × 23.9mm。两相机之间的位置关系已知,选取相机 C_A 为基准相机,目标坐标系和基准相机坐标系之间的实际旋转角度和平移距离在各自的测量范围内随机产生。

为了验证算法的正确性,本文对比分析了理想情况下直接使用 OI 迭代算法思想对四个共面特征点进行位姿求解的结果和使用本文初始化后的算法进行位姿解算结果,如图 5、图 6 所示。其中图 5 为固定平移距离取值的情况下,在旋转角 α', β', γ' 的取值范围 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 内以 1° 为步长遍历所有点得到的平移距离解算误差;图 6 为固定旋转角取值的情况

共有六个未知数($\alpha, \beta, \gamma, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$),式(17)、式(18)可分别提供三个等式方程,方程中含有未知的标量系数 $z_j(j=1, 2)$,从 P_j 中任选三个点(如 P_{11}, P_{12}, P_{21})列写成像方程,得

下,在平移距离 $\Delta X', \Delta Y', \Delta Z'$ 的取值范围内以 50mm 为步长遍历所有点得到的平移距离解算误差。可以看出,直接使用迭代算法在某些点处会由于迭代误差函数陷入局部极小值而使得平移距离解算误差达到 10^3 mm,使用本文初始化后的算法求得的平移距离解算误差小于 10^{-9} mm,证明了本文方法的有效性。

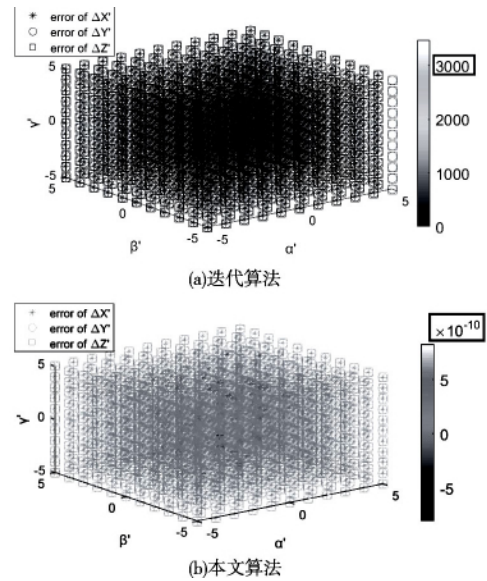


图 5 角度变化时的平移距离解算误差

6 结论

通过上述仿真证明,本文针对自动对准系统所采用的双目视觉位姿测量解算方法是有效的。该方法利用单目视觉

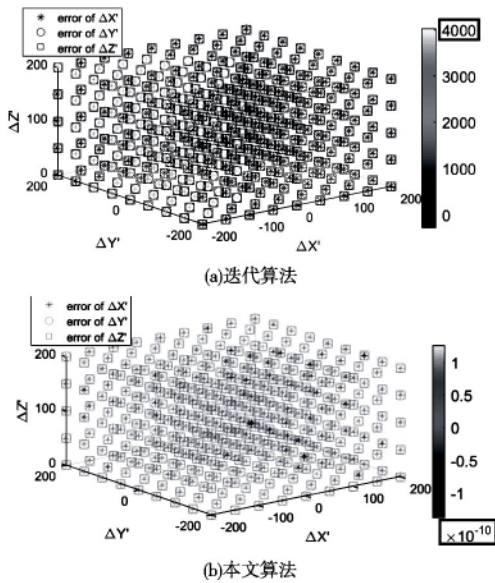


图6 位移变化时的平移距离解算误差

位姿解算的OI迭代算法思想进行位姿解算,针对算法在特征点数目较少时迭代误差陷入局部极小值的问题,利用各坐标系之间的转换关系求解迭代初值,保证解的正确性。总之,本文针对大部件自动对准系统近距离观测所采用的双目视觉位姿测量解算方法可以有效解决大部件的空间定位问题,具有很强的应用前景和实用价值。

参考文献:

- [1] J Luo, Z Wang, C Shen, et al. High precision robust automatic alignment method for rotating shaft [J]. MAPAN - Journal of Metrology Society of India, 2016, 31(3): 189 - 196.
- [2] 王皓, 陈根良, 黄顺舟, 等. 面向最优匹配位置的大部件自动对接装配综合评价指标 [J]. 机械工程学报, 2017, 53(23): 137 - 146.
- [3] 宋佳儒, 胡士强, 杨永胜. 基于滑动窗口滤波器的无误差累积位姿估计 [J]. 计算机仿真, 2019, 36(4): 209 - 213.

- [4] 王中宇, 李亚茹, 郝仁杰, 等. 基于点特征的单目视觉位姿测量算法 [J]. 红外与激光工程, 2019, 48(5): 1 - 8.
- [5] Yinqiang Zheng, Shigeki Sugimoto, Masatoshi Okutomi. ASPnP: An accurate and scalable solution to the perspective - n - point problem [J]. IEICE TRANS. INF. & SYST., 2013, 96(7): 1525 - 1535.
- [6] Gim Hee Lee, Bo Li, Marc Pollefeys and Friedrich Fraundorfer. Minimal solutions for pose estimation of a multi - camera system [J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(7): 521 - 538.
- [7] Laurent Kneip, Paul Furgale and Roland Siegwart. Using multi - camera systems in robotics: efficient solutions to the NPNP problem [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Switzerland, 2013.
- [8] John Kassebaum, Nirupama Bulusu and Wu - Chi Feng. 3D target - based distributed smart camera network localization [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2010, 19(10): 2530 - 2539.
- [9] Chien - Ping Lu, Gregory D. Hager, Eric Mjolsness. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1998, 18: 1 - 26.
- [10] 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.
- [11] 张彩霞, 胡占以. P3P 问题的多解现象的概率研究 [J]. 软件学报, 2007, 18(9): 2100 - 2104.



【作者简介】

李勤文(1993 -), 女(汉族), 山东省枣庄市人, 博士研究生, 主要研究领域为视觉测量。
王志乾(1969 -), 男(汉族), 吉林省吉林市人, 研究员, 博士研究生导师, 主要研究领域为光电测量, 数字信号处理。

杨文昌(1992 -), 男(汉族), 山东省滨州市人, 博士研究生, 主要研究领域为光电测量, 数据处理。

沈铨武(1978 -), 男(汉族), 吉林省松原市人, 助理研究员, 博士研究生, 主要从事惯性测量, 数据处理。

(上接第 145 页)

- [17] Chen L C, Papandreou G, Kokkinos I, et al. Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected crfs [J]. arXiv preprint arXiv: 1412.7062, 2014.
- [18] Chen Y, Fang H, Xu B, et al. Drop an octave: reducing spatial redundancy in convolutional neural networks with octave convolution [J]. arXiv preprint arXiv: 1904.05049, 2019.



【作者简介】

蒙 双(1995 -), 男(壮族), 广西马山县人, 硕士研究生, 主要研究领域为神经网络和图像处理。

陈乐庚(1963 -), 男(汉族), 湖南省湘乡市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究领域为工业智能控制与计算机控制。

肖晨晨(1996 -), 女(汉族), 河南周口市人, 硕士研究生, 主要研究领域为神经网络和图像处理。