基于平面靶标的多视点云对齐方法

孙军华 张广军 魏振忠

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在大型物体三维视觉测量中,多视点云的对齐是其关键技术之一. 设计了一种带有多个间距已知的角点作为特征点的平面靶标. 靶标置于视觉传感器在 2 个不同位置测量的公共区域,2 次测得特征点三维坐标. 用靶标上任意 3 个非共线特征点的三维坐标建立单位正交基,从而求得多视点云坐标系初始变换矩阵. 以初始对齐后的对应特征点之间距离平方和建立目标函数,并引入距离控制来增加约束条件,以 3 点求得的坐标变换矩阵为初值,采用 Levenberg-Marquardt 优化方法解出最优的坐标变换矩阵. 采用双目视觉传感器对一石膏像在 2 个位置进行了测量,实验结果表明该对齐方法简单可靠,优化后的对齐精度比优化前提高了约 31%.

关 键 词: 多视点云; 对齐; 平面靶标; 优化

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)10-1231-04

Multi-view point clouds registration method based on planar target

Sun Junhua Zhang Guangjun Wei Zhenzhong

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Multi-view point clouds registration is one of the key techniques in 3D vision measurement for large object. A planar target with some corners as feature points was designed. The distances between those feature points were accurately known. The target was placed at the common region which was measured by a vision sensor at two different view-points, and the vision sensor measured the 3D coordinates of the feature points twice. By establishing unit orthogonal basis using 3 arbitrary non-colinear points on the target, the original coordinate frame transformation matrix for multi-view point clouds was found. An objective function for the sum of distances′ squares between the correspondent feature points was established after original registration, and the distances control was introduced to increase constraint. The optimal results were finally estimated by Levenberg-Marquardt optimization algorithm taking original coordinate frame transformation matrix as the initial value. A plaster model was measured by a binocular vision sensor at two positions. The experimental results show that the proposed registration method is simple and reliable, and the registration accuracy after optimizing is improved by about 31%.

Key words: multi-view point cloud; registration; planar target; optimization

视觉检测技术作为当今高新技术之一,在物体表面三维形貌测量中应用越来越广[1]. 在三维视觉测量过程中,许多因素决定了无法通过单个视觉传感器一次测量完成整个物体的测量过程. 通常把物体表面分成多个局部相互重叠的子区域,从多个角度分别获取它们的表面信息,从而得到多个独立的三维点云,称为多视(multi-view)点云. 在测量不同的子区域时,所得三维点云在各自测量位置对应的局部坐标系下,而多次测量所对应的局部坐标系不一致. 把各次测量对应的局部

收稿日期: 2005-12-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375012)

作者简介: 孙军华(1975-),男,湖北荆门人,博士生, junhuasun@ sina. com.

坐标系统一到一个全局坐标系下即为多视点云的对齐(registration).

目前有多种方法实现多视点云的对齐. 利用运动平台,直接记录工件或视觉传感器在测量过程中的移动量和转动角[2-3],即可得出局部坐标系之间的变换关系. 由于运动平台价格昂贵,而且运动范围有限,因此这种方法适用于中小型构件的测量. 三点法[4-5]也是一种常用的对齐方法,利用相邻子区域重叠部分3个标记点即可实现拼接. 标记点大多为人工设定的标记,以便能够在测量数据点集中准确识别和匹配. 德国GOM公司研制的ATOS测量系统,也采用贴标记点方法. 该方法存在以下缺点:①对于某些被测物比较柔软,贴标记容易变形,或者某些特殊被测物(如文物)不允许在其上贴标记,因而被测对象受到限制;②标记存在一定厚度,所测标记点的坐标并不是被测物上点的坐标. Besl提出的ICP(Iterative Closed Point)[6]算法及其各种改进算法[7-8]是目前解决多视定位问题的一种基本算法. 该算法对起始状态要求很严格,否则很容易产生误匹配而陷入局部极小值,它只适用于表面特征很明显的物体,此外,由于每次迭代都需要计算目标点集中每个点在参考点集中的对应点,因此计算量很大.

针对上述多视点云对齐方法的不足,本文提出一种利用平面靶标上多个角点作为特征点来计算多视点云变换矩阵的方法.

1 测量原理

设计如图1所示平面靶标,靶标上边长已知的黑白正方形的角点作为特征点. 该靶标具有以下优点:加工容易,不容易产生遮挡,特征点容易提取. 立体靶标虽然包含更多的空间信息,经三坐标测量机校准后精度可以保证,但难以获得较好的图像,其图像特征点提取精度要比平面靶低很多.

将物体分成多个子区域分别进行测量,各子区域之间存在公共部分如图2所示. 视觉传感器在第1个位置完成对第1子区域 $S_1(x,y,z)$ 的测

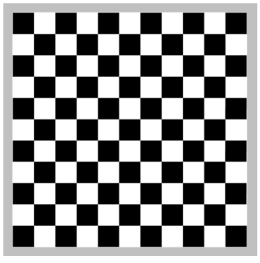


图1 平面靶标

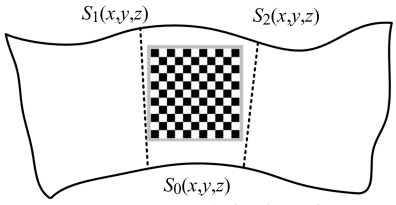


图2 基于平面靶标分区域测量

量后,在公共部分 $S_0(x,y,z)$ 附近放置平面靶标,对靶标上特征点进行测量. 然后移动视觉传感器到第2个位置,而平面靶标保持原来的位置不动,先对靶标上特征点再次进行测量,然后移开靶标,对第2个子区域 $S_2(x,y,z)$ 进行测量. 通过靶标上各个特征点的三维坐标来完成多视点云的对齐. 若被测物被分成 N 个子区域,则第 k 个子区域与 $k+1$ 个子区域之间均可重复上述过程完成多视点云的对齐,从而完成整个物体的统一测量.

2 三点对齐方法

选择平面靶标上非共线3点,设第1次测量所得三维坐标分别为 $\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{P}_2$ 和 $\boldsymbol{P}_3$,第2次测量所得三维坐标为 $\boldsymbol{Q}_1,\boldsymbol{Q}_2$ 和 $\boldsymbol{Q}_3$. 计算矢量 $\boldsymbol{P}_2-\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{P}_3-\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{Q}_2-\boldsymbol{Q}_1$ 和 $\boldsymbol{Q}_3-\boldsymbol{Q}_1$,令 $\boldsymbol{V}_1=\boldsymbol{P}_2-\boldsymbol{P}_1,\boldsymbol{W}_1=\boldsymbol{Q}_2-\boldsymbol{Q}_1$,作矢量 $\boldsymbol{V}_2$ 和 $\boldsymbol{W}_2$

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{V}_2&=\boldsymbol{V}_1\times(\boldsymbol{P}_3-\boldsymbol{P}_1)\\ \boldsymbol{W}_2&=\boldsymbol{W}_1\times(\boldsymbol{Q}_3-\boldsymbol{Q}_1)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

然后再作矢量 $\boldsymbol{V}_3$ 和 $\boldsymbol{W}_3$

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{V}_3&=\boldsymbol{V}_1\times\boldsymbol{V}_2\\ \boldsymbol{W}_3&=\boldsymbol{W}_1\times\boldsymbol{W}_2\end{aligned}\right\}\tag{2}$$

则 $\boldsymbol{V}_1,\boldsymbol{V}_2$ 和 $\boldsymbol{V}_3$ 及 $\boldsymbol{W}_1,\boldsymbol{W}_2$ 和 $\boldsymbol{W}_3$ 分别构成右手正交系. 将它们转化为单位矢量

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{v}_1&=\boldsymbol{V}_1/\|\boldsymbol{V}_1\|\\ \boldsymbol{v}_2&=\boldsymbol{V}_2/\|\boldsymbol{V}_2\|\\ \boldsymbol{v}_3&=\boldsymbol{V}_3/\|\boldsymbol{V}_3\|\\ \boldsymbol{w}_1&=\boldsymbol{W}_1/\|\boldsymbol{W}_1\|\\ \boldsymbol{w}_2&=\boldsymbol{W}_2/\|\boldsymbol{W}_2\|\\ \boldsymbol{w}_3&=\boldsymbol{W}_3/\|\boldsymbol{W}_3\|\end{aligned}\right\}\tag{3}$$

则 $(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_3)$ 和 $(\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3)$ 是各自正交系的一组单位正交基. 设第1次测量到第2次测量局部坐标系之间的坐标变换关系用3×3旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 和3×1平移向量 $\boldsymbol{T}$ 表示. 则 $(\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3)=\boldsymbol{R}(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_3)$,从而

$$\boldsymbol{R}=(\boldsymbol{w}_1,\boldsymbol{w}_2,\boldsymbol{w}_3)(\boldsymbol{v}_1,\boldsymbol{v}_2,\boldsymbol{v}_3)^{-1}\tag{4}$$

取对应点 $\boldsymbol{P}_1$ 和 $\boldsymbol{Q}_1$,有 $\boldsymbol{Q}_1=\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_1+\boldsymbol{T}$,则

$$\boldsymbol{T}=\boldsymbol{Q}_1-\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_1\tag{5}$$

3　优化对齐坐标变换参数

由上述三点对齐方法计算出的坐标变换参数 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 受噪声影响很大,将它们作为初始值,建立优化目标函数,对其进行优化,从而得到 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$ 的最优解.

理想情况下,经过对齐后,第 1 次测量靶标上的特征点 $\boldsymbol{P}_i$ 与第 2 次测量的对应点 $\boldsymbol{Q}_i$ 应该重合,即满足

$$\boldsymbol{Q}_i = \boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_i + \boldsymbol{T} \tag{6}$$

而实际情况中由于存在噪声以及测量系统本身的误差影响,式(6)并不严格满足. 以经过对齐后的对应点之间的距离平方和作为最小目标函数来优化对齐参数,目标函数为

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}) = \sum_{i=1}^{N} \| \boldsymbol{Q}_i - (\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_i + \boldsymbol{T}) \|^2 \tag{7}$$

其中 N 为特征点个数.

由于旋转矩阵 $\boldsymbol{R}$ 是正交的,因而具有 6 个正交约束条件:

$$\left.\begin{aligned} h_1(\boldsymbol{R}) &= r_1^2 + r_4^2 + r_7^2 - 1 = 0 \\ h_2(\boldsymbol{R}) &= r_2^2 + r_5^2 + r_8^2 - 1 = 0 \\ h_3(\boldsymbol{R}) &= r_3^2 + r_6^2 + r_9^2 - 1 = 0 \\ h_4(\boldsymbol{R}) &= r_1 r_2 + r_4 r_5 + r_7 r_8 = 0 \\ h_5(\boldsymbol{R}) &= r_1 r_3 + r_4 r_6 + r_7 r_9 = 0 \\ h_6(\boldsymbol{R}) &= r_2 r_3 + r_5 r_6 + r_8 r_9 = 0 \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其中 $r_1, r_2, \cdots, r_9$ 是旋转矩阵的各个元素.

由于特征点之间距离已知,则可在目标函数中引入距离控制. 设点 $\boldsymbol{Q}_m$ 与点 $\boldsymbol{Q}_{m+1}$ 之间实际距离为 l_m,计算所得距离为 $\| \boldsymbol{Q}_m - (\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_{m+1} + \boldsymbol{T}) \|$,记

$$\Delta l_m = \left| l_m - \| \boldsymbol{Q}_m - (\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_{m+1} + \boldsymbol{T}) \| \right| \tag{9}$$

从而得到无约束最优目标函数为

$$\boldsymbol{F}(\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}) = \sum_{i=1}^{N} \| \boldsymbol{Q}_i - (\boldsymbol{R}\boldsymbol{P}_i + \boldsymbol{T}) \|^2 + M \sum_{j=1}^{6} h_j(\boldsymbol{R}) + \sum_{m=1}^{N-1} \Delta l_m \tag{10}$$

其中 M 为罚因子. 利用靶标上多个特征点,采用 Levenberg-Marquardt[9] 优化方法解出最优的 $\boldsymbol{R}$ 和 $\boldsymbol{T}$.

4　实验结果

采用 2 个 Minton-368P 型号 CCD 摄像机,2 个 AVENIR12mm 镜头组成双目视觉传感器,并用 NEC-LT170+型数字投影仪投射多面结构光以增强约束来简化匹配. 传感器工作距离约 850 mm,基线距约 420 mm,视场范围约 400 mm×300 mm,图像大小为 768×576 像素,被测物为阿古力巴石膏像. 根据传感器的视场范围及工作距离设计平面靶标的尺寸大小为 110 mm×110 mm,黑白方块边长为 9 mm,加工精度为 0.005 mm.

双目视觉传感器在石膏像的 2 个位置进行测量,并在其共视区放置平面靶标进行多视点云对齐. 放置靶标时尽量保证靶标平面与摄像机像面夹角最小. 由平面靶标三点对齐方法得到的对齐坐标变换参数为

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} 0.926\,520 & 0.073\,732 & 0.368\,950 \\ -0.067\,653 & 0.997\,276 & -0.029\,404 \\ -0.370\,113 & 0.002\,282 & 0.928\,984 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} -308.925 \\ 31.172 \\ 99.351 \end{pmatrix}$$

采用靶标上 100 个(不含计算 $\boldsymbol{R},\boldsymbol{T}$ 的 3 点)特征点计算 x,y 和 z 坐标的对齐均方根误差分别为:0.074 mm,0.057 mm 和 0.173 mm.

采用靶标上 100 个特征点优化后得到的坐标变换参数为

$$\boldsymbol{R} = \begin{pmatrix} 0.927\,101 & 0.073\,616 & 0.367\,109 \\ -0.068\,787 & 0.997\,397 & -0.027\,834 \\ -0.368\,098 & 0.000\,713 & 0.929\,648 \end{pmatrix}$$

$$\boldsymbol{T} = \begin{pmatrix} -307.645 \\ 30.141 \\ 98.703 \end{pmatrix}$$

此时,采用该 100 个特征点计算 x,y 和 z 坐标的对齐均方根误差分别为:0.048 mm,0.035 mm和 0.140 mm. 从上述实验数据可以看出,采用靶标上 100 个特征点优化后,x,y 和 z 坐标对齐精度较三点对齐方法平均提高了约 31%.

图 3 和图 4 分别是视觉传感器在 2 个位置测量石膏像所得到的 2 个子区域三维点云图. 图 5 显示了在同一坐标系下对齐前的 2 个子区域三维点云,图 6 则是从不同角度显示对齐后的三维点云. 可以看出,对齐后的三维点云数据立体图像平滑,多视点云得到了较好的对齐.

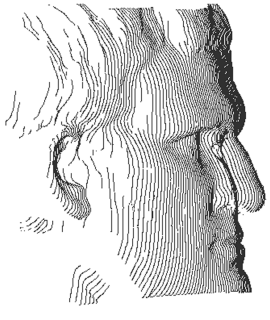


图 3　子区域 1 三维点云

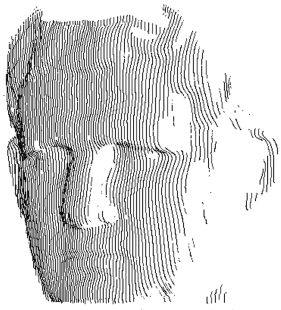


图 4 子区域 2 三维点云



图 5 对齐前的三维点云

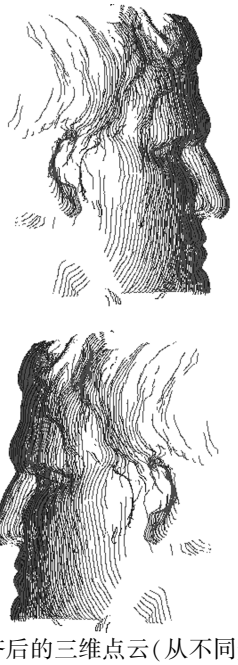


图 6 对齐后的三维点云(从不同角度显示)

5 结束语

所设计的平面靶标具有加工容易、不易产生遮挡和特征点容易提取等优点. 利用非共线三点建立正交基求坐标变换矩阵的算法简单可行. 为了减小噪声的影响,采用 Levenberg-Marquardt 方法对坐标变换参数进行了优化,并引入距离控制,增强了算法的鲁棒性. 实验验结果表明该拼接方法简单可靠,优化后的对齐精度比三点对齐法提高了约 31%.

参考文献 (References)

[1] 李鑫,张广军,魏振忠. 基于 RBF 神经网络的结构光三维视觉检测方法[J]. 北京航空航天大学学报,2002,28(3):265-268
Li Xin, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. Method for structured light based 3D vision inspection based on RBF neural network [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002, 28(3): 265-268(in Chinese)

[2] 韩耘,马利,何世平,等. 回转体形状检测的数据拼接法研究[J]. 中国科学技术大学学报,2003,33(6):282-286
Han Yun, Ma Li, He Shiping, et al. A study on data combination method in topography measurement of revolving objects[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2003, 33(6): 282-286(in Chinese)

[3] 龙玺,钟约先,李仁举,等. 结构光三维扫描测量的三维拼接技术[J]. 清华大学学报, 2002, 42(4):477-480
Long Xi, Zhong Yuexian, Li Renju, et al. 3-D surface integration in structured light 3-D scanning[J]. Journal of Tsinghua University, 2002,42(4):477-480(in Chinese)

[4] 张顺德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维型面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 533-536
Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(6): 533-536(in Chinese)

[5] 李晓星,康绍峥,周贤宾. 立体视觉与空间编码技术相结合的非接触三维曲面测量系统[J]. 中国机械工程, 2004,15(9): 806-809
Li Xiaoxing, Kang Shaozheng, Zhou Xianbin. Non-contact 3D surface measurement system based on binocular vision and spatial code[J]. China Mechanical Engineering, 2004, 15(9): 806-809(in Chinese)

[6] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2):239-256

[7] Bergevin R, Soucy M, Gagnon H, et al. Towards a general multi-view registration technique[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1996, 18(5): 540-547

[8] Fan K C, Tsai T H. Optimal shape error analysis of the matching image for a free-form surface[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2001,17:215-222

[9] 席少霖. 非线性最优化方法[M]. 北京:高等教育出版社, 1992
Xi Shaolin. Non-linear optimization method [M]. Beijing: Higher Education Press, 1992(in Chinese)