

文章编号 1004-924X(2008)07-1330-05

基于序列图像特征配准的摄像机旋转补偿算法

王会峰,刘上乾,汪大宝,牛建军

(西安电子科技大学 技术物理学院,陕西 西安 710071)

摘要:提出了一种基于序列图像特征点配准和基于最小二乘估计的摄像机绕轴旋转运动精确估计算法。该算法利用序列图像帧间的强相关性,通过分析相邻两帧图像的运动,由 Harris 算子进行特征点检测。基于这些特征点用模板匹配方法对帧间图像进行配准,然后根据多个特征点的运动矢量用最小二乘估计获得摄像机的运动参数,并用获得的运动参数实现对摄像机绕轴旋转运动的精确补偿。实验结果表明,该方法在帧间旋转角度 $<10^\circ$ 时,摄像机绕轴旋转运动角度估计误差 $<5\%$,但是当旋转角度 $>14^\circ$ 时,相对估计误差 $>20\%$ 。从系统实际应用(帧间旋转 $<5^\circ$)来看,该方法克服了成像测量中摄像机旋转对图像处理和测量精度的影响,弥补了因像机旋转引起的测量误差大的缺陷,提高了测量精度,可满足使用要求。

关键词:图像测量;角点检测;图像配准;运动估计;最小二乘法

中图分类号:TP391 文献标识码:A

Video camera rotation compensation algorithm based on feature matching of sequence image frames

WANG Hui-feng, LIU Shang-qian, WANG Da-bao, NIU Jian-jun

(*Institute of Technological Physics, Xidian University, Xi'an 710071, China*)

Abstract: In order to eliminate the measurement error caused by video camera rotation during its moving along the axis, a high precision video camera moving estimation algorithm based on the feature point matching of sequence image frames and the least-square estimation is presented. In the algorithm, the strong correlation of sequence image frames is used to analyze the moving parameters of two continuous image frames. Then, the feature points of sequence image frames are detected by Harris operator and matched by template, and the moving parameters of the video camera are obtained with the least-square algorithm. Finally, the obtained moving parameters are used to compensate the video camera rotation precisely. The experimental results show that the rotation angle error of the video camera is less than 5% when the rotation angle of inter-frame is less than 10° , but more than 20% when it is more than 14° . Because the rotation angle of inter-frame is less than 5° in practical application, the algorithm eliminates the influence of video camera rotation on measurement precision, compensates its measurement error, and improves the measurement precision, which meets the requirement of practical application.

收稿日期:2007-09-25;修订日期:2008-01-18.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60377034)

Key words: image measurement; corner detection; image matching; moving estimation; least-square method

1 引 言

CCD 作为图像传感器常用于高精度图像测量系统中,当驱动设备沿着身管轴向推动摄像机行走并进行测量时像机会绕轴发生旋转运动,如果旋转角度超过一定值后,激光光斑在靶面的象限位置就会改变,因此影响了测量精度,甚至造成测量结果错误的严重后果。为了适应高精度测量的需要,可以采取一定的措施,实现间歇地对摄像机的旋转运动参数进行精确运动估计^[1],然后在测量结果中对摄像机的旋转运动进行补偿,从而消除摄像机旋转带来的影响。通过对测量过程中的序列图像的分析研究,本文提出了基于特征图像配准和最小二乘估计算法,从序列图像中获取摄像机旋转运动的精确参数,从而实现了对测量过程中由摄像机旋转所带来误差的自动补偿。试验和仿真结果表明该算法在实际应用中是有效可行的。

2 基于 CCD 成像的空间曲线测量原理

身管空间轴线测量系统由 CCD 摄像机、爬行器、光靶、图像处理软件等组成。测量原理如图 1 所示,测量前首先调整中心激光器,使光束射在光靶的靶心位置,这时激光光束便成了理论参考轴线;爬行装置推动光靶和 CCD 摄像机从管口沿实际轴线步进,并且间歇采集光靶图像,同时记录进深坐标信息。设激光束打在靶面上的 P 点,其中心坐标(X,Y)为管道的实际轴线相对于理论轴线在 x、y 两个方向上的偏移量,即实际轴线在靶面坐标系的两个分量,据此可以求出弯曲度的大小和方向。

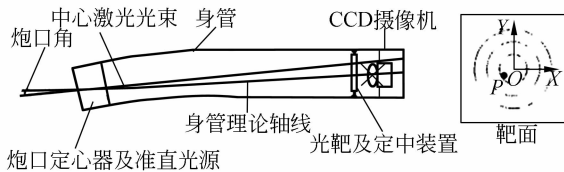


图 1 弯曲度测量原理

Fig. 1 Measurement principle of straightness

3 运动分析和旋转补偿

测量过程中靶面始终是铅垂向下的。图像处理时,在靶面中选择恰当的点(例如同心圆和坐标轴的交点)作为待配准的特征点,在摄像机移动过程中采集图像,可通过各帧间图像的配准找出待配准点的相对运动(旋转和平移),然后在靶面找到多个这样的配准点逐一配准得到其运动参数,再通过最小二乘法^[2]对整个靶面相对于摄像机的运动进行精确估计,最后分析运动参数。在计算激光斑相对坐标时,将摄像机旋转误差一并考虑并且进行补偿,从而消除旋转带来的影响。

3.1 运动模型

观察图 2 所示的相邻的两帧序列图像,在第 i-1 帧中的点 A,在 i 帧中运动到点 B。由于相邻

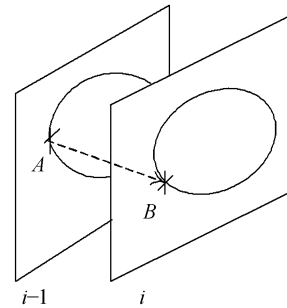


图 2 靶面运动分析示意图

Fig. 2 Analysis of target moving

两帧图像的时间间隔比较短,可认为 A、B 两点具有相同的辐照度即:

$$\Phi(A) = \Phi(B), f(x_A, y_A, t_{i-1}) = f(x_B, y_B, t_i),$$

并认为目标仅做旋转和平移运动,则此时的运动模型可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} = \mathbf{R} \left(\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} \right) + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中 (x_0, y_0) 为旋转轴, θ 为旋转轴旋转的角度(设逆时针旋转角度为正,顺时针旋转角度为负), \mathbf{R} 为旋转因子, (x_p, y_p) 为目标的平移量。

在这个运动模型中共 3 组运动参数,分别为

旋转角度 θ , 旋转轴 (x_0, y_0) 和目标的平移量 (x_p, y_p) , 为了求取这 3 组运动参数, 需要在靶面找到多对匹配点, 最后通过最小二乘估计得到运动参数。

3.2 运动补偿

补偿方法就是根据式(2)以摄像机坐标系的水平和垂直方向为基准, 估计每一帧相对旋转角度并计算累计旋转角度, 在计算光斑坐标位置时将摄像机旋转角度一并考虑, 从而补偿由像机旋转带来的误差。

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} x_B - x_p \\ y_B - y_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

4 运动参数估计

4.1 特征点检测

在一幅图像中选择什么样的特征点和怎样选择特征点, 目前为止仍是一个有待完善的问题, 虽然出现了许多算法, 但是都各有利弊。在一个场景中, 角点通常可以定义出不同物体之间的边界或者同一个物体的不同部分, 代表着物体的重要局部特征。所以在图像匹配、目标描述与识别以及运动估计、目标跟踪等领域, 角点提取具有十分重要的意义。本文采用 Harris 角点检测算子, 该算子不仅计算简单, 提取的点特征分布均匀合理, 而且稳定性好^[3]。下面用 Harris 角点检测算子来做角点提取:

$$\mathbf{M}(x, y) = \begin{bmatrix} \mathbf{A}(x, y) & \mathbf{C}(x, y) \\ \mathbf{C}(x, y) & \mathbf{B}(x, y) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ 是二阶方向微分的近似

$$\mathbf{A} = \mathbf{X}^2 \otimes \mathbf{h}(x, y), \mathbf{B} = \mathbf{Y}^2 \otimes \mathbf{h}(x, y),$$

$$\mathbf{C} = \mathbf{XY} \otimes \mathbf{h}(x, y),$$

$$\mathbf{X} = \mathbf{I} \otimes [1 \ 0 \ -1]^T \approx \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial x},$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{I} \otimes [1 \ 0 \ -1]^T \approx \frac{\partial \mathbf{I}}{\partial y},$$

其中, \mathbf{I} 代表图像的灰度值。

图像中某一点的灰度自相关函数的极值曲率可以由矩阵 \mathbf{M} 的特征值近似表示。如果矩阵 \mathbf{M} 的两个特征值都比较大, 说明该点的图像灰度自相关函数两个正交方向上的极值曲率均较大, 即

可认为该点为角点。实际的评估函数为:

$$\mathbf{R}(x, y) = \det[\mathbf{M}(x, y)] - k \cdot \text{trace}^2[\mathbf{M}(x, y)]. \quad (4)$$

只要在某一点 $\mathbf{R}(x, y)$ 超过某一阈值, 即认为该点为角点。根据 Harris 建议, k 取 0.04 能够获得比较好的效果。图 3 为用 Harris 算子进行角点检测的结果。

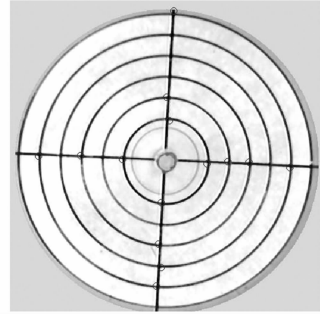


图 3 Harris 算子特征点检测

Fig. 3 Feature point detection based on Harris operator

4.2 图像配准

为了加快参数估计速度, 采用了基于特征点的块匹配方法^[1] (Block-Matching Method), 其实现方法是: 根据已知的目标模板在当前帧和下一帧中进行包含模板的块 $N_1 \times N_2$ 搜索, 搜索窗的范围限于 $(N_1 + 2M_2) \times (N_2 + 2M_2)$ 内, 如图 4 所示。常用的匹配准则^[4-9] 有均方误差函数

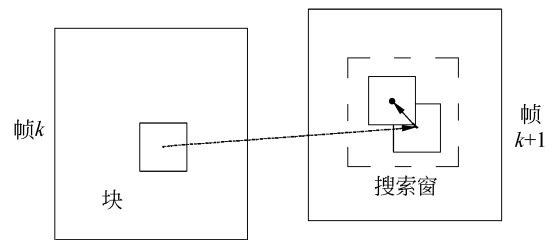


图 4 块匹配搜索

Fig. 4 Block-matching search

(MSE)、绝对平方函数(MAD)、最大误差最小函数(MME)、最大配准像素数(MPC)等。在这里采用了最小均方误差准则, 它的精度较高。该准则中 $s(k, l)$ 表示参考图像搜索窗中坐标为 (k, l) 的亮度值, 定义为:

$$\text{MSE}(\mathbf{d}) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{(n_1, n_2) \in B} [s(n, k) - s(n + \mathbf{d}, k + 1)]^2$$

$$\mathbf{d} = (d_1, d_2), (n + \mathbf{d}) = (n_1 + d_1, n_2 + d_2), \quad (5)$$

式中, B 表示块 $N_1 \times N_2$, 为候选运动矢量 d 的集合。运动矢量估计为 $MSE(d)$ 最小时的 d , 即:

$$(\tilde{d}_1, \tilde{d}_2) = \arg. \min_{(d_1, d_2)} MSE(d_1, d_2). \quad (6)$$

4.3 运动参数估计

假设在相邻的两帧图像中找到 m 对配准的特征点, 即存在 m 对点满足:

$$\begin{bmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \end{bmatrix} = \mathbf{R} \times \begin{bmatrix} x_{Ai} - x_0 \\ y_{Ai} - y_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

即:

$$\begin{bmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta \cdot x_{Ai} - \cos \theta \cdot x_0 - \sin \theta \cdot y_{Ai} + \sin \theta \cdot y_0 + x_p \\ \sin \theta \cdot x_{Ai} - \sin \theta \cdot x_0 - \cos \theta \cdot y_{Ai} - \cos \theta \cdot y_0 + y_p \end{bmatrix},$$

其中 $i=1, 2, 3, \dots, m$ 。

采用最小二乘法得到运动参数, 将式(7)写成

$$\mathbf{X}_B = \mathbf{V}_A \times \boldsymbol{\beta}_x, \quad (8)$$

$$\mathbf{Y}_B = \mathbf{V}_A \times \boldsymbol{\beta}_y, \quad (9)$$

其中:

$$\mathbf{X}_B = [x_{B1} \quad x_{B2} \quad \dots \quad x_{Bm}]^T,$$

$$\mathbf{V}_A = \begin{bmatrix} x_{A1} & y_{A1} & 1 & 1 & 1 \\ x_{A2} & y_{A2} & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{Am} & y_{Am} & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{Y}_B = [y_{B1} \quad y_{B2} \quad \dots \quad y_{Bm}]^T,$$

$$\boldsymbol{\beta}_x = [\cos \theta \quad -\sin \theta \quad x_p \quad -\cos \theta \cdot x_0 \quad \sin \theta \cdot y_0]^T,$$

$$\boldsymbol{\beta}_y = [\sin \theta \quad \cos \theta \quad y_p \quad -\sin \theta \cdot x_0 \quad -\cos \theta \cdot y_0]^T.$$

采用最小二乘估计, 可由式(8)、(9)得到

$$\boldsymbol{\beta}_x = (\mathbf{V}_A^T \times \mathbf{V}_A)^{-1} \times \mathbf{V}_A^T \times \mathbf{X}_B, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{\beta}_y = (\mathbf{V}_A^T \times \mathbf{V}_A)^{-1} \times \mathbf{V}_A^T \times \mathbf{Y}_B, \quad (11)$$

然后由式(10)和(11)解算出运动参数。

事实上根据刚体变换的性质, 可认为目标靶面绕固定中心轴旋转角度 θ 后再平移到新的点, 而固定中心轴的坐标和平移量可以通过配准精确确定, 这样就可以确定三组参数中的两组, 只剩下旋转角度 θ 。将式(8)、(9)写成:

$$\mathbf{X}_{BZ} = \mathbf{V}_{AZ} \times \boldsymbol{\beta}_{zZ}, \quad (12)$$

$$\mathbf{Y}_{BZ} = \mathbf{V}_{AZ} \times \boldsymbol{\beta}_{yZ}, \quad (13)$$

其中:

$$\mathbf{X}_{BZ} = [x_{B1} - x_p \quad x_{B2} - x_p \quad \dots \quad x_{Bm} - x_p]^T$$

$$\mathbf{Y}_{BZ} = [y_{B1} - y_p \quad y_{B2} - y_p \quad \dots \quad y_{Bm} - y_p]^T$$

$$\mathbf{V}_{AZ} = \begin{bmatrix} x_{A1} - x_0 & y_{A1} - y_0 & 1 & 1 & 1 \\ x_{A2} - x_0 & y_{A2} - y_0 & 1 & 1 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{Am} - x_0 & y_{Am} - y_0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\beta}_{zZ} = [\cos \theta \quad -\sin \theta]^T$$

$$\boldsymbol{\beta}_{yZ} = [\sin \theta \quad \cos \theta]^T$$

结合式(10)、(11)有:

$$\boldsymbol{\beta}_{zN} = (\mathbf{V}_{AN}^T \times \mathbf{V}_{AN})^{-1} \times \mathbf{V}_{AN}^T \times \mathbf{X}_{BN}, \quad (14)$$

$$\boldsymbol{\beta}_{yN} = (\mathbf{V}_{AN}^T \times \mathbf{V}_{AN})^{-1} \times \mathbf{V}_{AN}^T \times \mathbf{Y}_{BN}, \quad (15)$$

这样可以通过式(14)、(15)快速求得旋转角度 θ , 从而可以明显提高算法的求解速度。

5 仿真试验及结果分析

从光靶沿轴行走的序列图像中任意抽取两帧标准的 $512 \text{ pixel} \times 512 \text{ pixel}$ 测试图像(如图5所示)进行旋转, 对本文的算法进行了验证。试验中取块大小为 16×16 , 仿真过程中发现, 当目标旋转角度很小 ($-10^\circ < \theta < 10^\circ$) 时, 图像的配准精度很高, 可以获得精确的运动参数(角度估计误差 $< 5\%$), 摄像机的旋转补偿效果很好。但是当旋转角度较大 ($> 14^\circ$) 时, 估计误差较大(角度估计误差超过 20%)。在实际应用过程中像机拍摄的序列图像的每次旋转角度很小 ($< 5^\circ$), 所以该方法可以对摄像机的旋转进行高精度的估计。

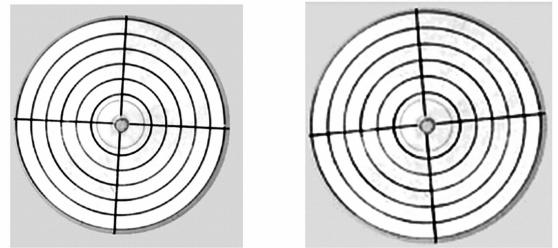


图5 靶面序列图像

Fig. 5 Target sequence frames

6 结论

仿真试验结果表明, 在基于图像的高精度空间曲线测量中, 依据图像帧间的强相关性特点, 采用本文提出的方法, 针对在帧间旋转角度一

般 $<10^\circ$ 的情况,可以获得对摄像机旋转运动角度 $<5\%$ 的精确估计,从而可以实现对摄像机旋转引起误差的精确补偿。但是该算法目前还没有达到实时处理的程度,有待进一步改进和提高。

参考文献:

- [1] 勒中鑫. 数字图像信息处理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
LE ZH X. *Digital Image Information Processing* [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 张贤达. 现代信号处理[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG X D. *Modern Signal Processing* [M]. 2nd ed. Beijing: Press of Tinghua Univ. , 2002. (in chinese)
- [3] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
ZHANG G J. *Machine Vision* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in chinese)
- [4] 梁燕, 刘文耀. 基于起点预测的自适应交叉—准菱形运动估计算法[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(2): 237-246.
LIANG Y, LIU W Y. Adaptive cross-quasi-diamond search algorithm based on initial search point estimation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(2): 237-246. (in Chinese)
- [5] DEIHL N. Object-oriented motion estimation and segmentation in image sequences[J]. *Signal Processing: Image Communication*, 1991, 3(1): 23-56.
- [6] 贾志科, 崔慧娟, 唐昆, 等. 用于运动位移估值的新匹配准则[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(1): 43-46.
JIA ZH K, CUI H J, TANG K, *et al.*. New matching criterion for motion displacement estimation[J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci. & Tech.)*, 1999, 39(1): 43-46. (in Chinese)
- [7] YEO H, HU Y. A motion estimation and image segmentation technique based on the variable block size[C]. *Proc. ICASSP'97, Munich, Germany*, 1997: 3137-3140.
- [8] 罗诗途, 王艳玲, 张玘, 等. 车载图像跟踪系统中电子稳像算法的研究[J]. 光学 精密工程, 2005, 13(1): 95-103.
LUO SH T, WANG Y L, ZHANG Q, *et al.*. Electronic image stabilizing algorithm for image tracking system on vehicle[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005, 13(1): 95-103. (in Chinese)
- [9] 丁雪梅, 王维雅, 黄向东. 基于差分和特征不变量的运动目标检测与跟踪[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(4): 570-576.
DING X M, WANG W Y, HUANG X D. New method for detecting and tracking of moving target based on difference and invariant[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 570-576. (in Chinese)

作者简介:王会峰(1976—),男,山西人,博士研究生,主要从事光电成像及图像处理,成像视觉及光电检测、红外图像处理等方面的研究。E-mail: conquest8888@126.com

刘上乾(1937—),男,江西人,教授,博士生导师,主要从事光电成像及图像处理、红外成像及探测跟踪、光电对抗等方面的研究。E-mail: sqliu@xidian.edu.cn