

基于双目立体视觉的偏转线圈测量方法研究

管业鹏^{1,2}, 童林夙¹, 陈 娜¹

(1. 东南大学电子工程系, 江苏南京 210096; 2. 浙江大学信息与电子工程学系, 浙江杭州 310027)

摘 要: 立体匹配过程中, 由于视差搜索范围不易确定, 使匹配极易出现错误. 文中提出了一种灰度相关多峰值视差绝对值极小化立体匹配新方法. 通过对最大灰度相关匹配法的分析, 指出最大灰度相关系数所对应的点并不完全对应于正确匹配, 由此提出了灰度相关匹配多峰值法, 以获得初始匹配集. 结合视差梯度约束, 对所得初始匹配集进行部分优化, 采用视差绝对值极小化确定唯一匹配点. 通过对一形状复杂且不规则物体(偏转线圈)及已知三维坐标的标准件的三维重建, 证实了文中所提方法的有效性, 可满足三维不规则物体(偏转线圈)三维空间坐标的非接触精密测量要求.

关键词: 立体匹配; 视差; 灰度; 测量; 搜索范围

中图分类号: TN141

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2003) 09-1382-04

A Study of Measurement on Deflection Yoke Based on Binocular Stereo Vision

GUAN Ye2peng^{1,2}, TONG Lin2su¹, CHEN Na¹

(1. Dept. of Electronics Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China;

2. Dept. of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China)

Abstract: The matching result is very easy to be wrong due to the uncertainty of searching scope on disparity during stereo matching. A novel stereo matching algorithm is developed, whose criterion is the minimum of absolute disparity combined with gray correlation multipeak value method. It is pointed out that the corresponding point with maximum of gray normalized correlation coefficient is not the correct matching point completely by analyzing maximum of gray normalized correlation coefficient matching approach, so gray correlation multipeak value matching method is mentioned to obtain initial matching aggregation in the paper. Disparity gradient restriction is used to optimize the initial matching aggregation partially. The method, whose criterion is the minimum of absolute disparity, is used to ascertain the only matching point. It is proved that the algorithm proposed in the paper is feasible by 3D reconstruction on an object (deflection yoke, DY) with complex and irregular surface, and a standard piece with given 3D coordinates, which can meet the demands for measuring in non-contact the 3D coordinates of object, such as DY, with irregular surface precisely.

Key words: stereo matching; disparity; gray; measurement; searching scope

1 引言

偏转线圈作为彩色显像管的重要组成部分, 其几何形状决定着显像管中偏转磁场的分布, 从而直接影响彩色显像管的图像质量. 随着高清晰度彩色显像管、显示管及电子束曝光系统的发展, 对偏转系统的性能要求及偏转线圈的绕制精度越来越高, 磁偏转线圈的三维磁场模拟已成为一个很重要的研究课题. 为了较准确模拟三维磁场, 必须准确了解作为磁场边界条件的线圈三维坐标. 这就要求对偏转线圈的三维坐标进行精密测量. 由于被测物体形状复杂且不规则, 给测量工作带来了一定的困难. 目前, 国内外主要采用三坐标测量机对其进行三维测量, 但因探头无法实现对偏转线圈特征点的精确瞄准, 因而会出现测量误差.

利用摄像机作为图像传感器来识别偏转线圈特征点位置, 避免了接触式方法难以精确瞄准的困难. 通过多个或单个摄像机从不同方向拍摄两幅或两幅以上二维图像, 利用立体视觉方法可获取偏转线圈的三维几何信息. 该技术结构简单, 成本低廉, 数据采集快速, 且便于移动. 本方法不仅可用于测量偏转线圈的三维坐标, 且可适用于任何需要获得复杂形状的表面三维坐标的测量, 如模具表面三维坐标的测量等.

为实现三维立体再现, 最重要也最困难的工作是图像匹配. 在立体匹配过程中, 由于视差搜索范围不易确定, 使匹配极易出现错误. 通过对目前单一判断中公认最强壮的经典区域匹配法) 灰度最大相关法的分析, 指出正确匹配的特征点间的灰度相关值不一定出现在峰值极大处, 有可能出现在其他峰值处. 为此, 文中提出了一种灰度相关多峰值视差绝对

值极小化立体匹配新方法. 通过对不规则物体(偏转线圈)及具有已知三维坐标标准件的三维重建, 证实了该方法的有效性和可靠性.

2 立体视觉与三维重建

用立体视觉方法进行三维重建, 如图 1. 对于空间物体表面任意一点 P, 如果用 $\tilde{N}$ 与 $\tilde{O}$ 两个摄像机同时观察 P 点, 并能确定在 $\tilde{N}$ 摄像机图像上的点 p_1 与在 $\tilde{O}$ 摄像机图像上的点 p_2 是空间同一点 P 的图像点(称 p_1 与 p_2 为共轭对应点), 则 P 点的空间位置可由 O_1p_1 与 O_2p_2 (O_1, O_2 分别为 $\tilde{N}, \tilde{O}$ 摄像机的光心)两直线的交点唯一确定.

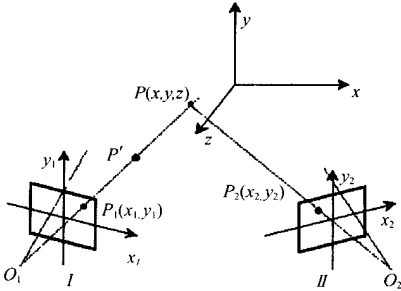


图 1 双摄像机观察空间点

设 $\tilde{N}$ 与 $\tilde{O}$ 摄像机的投影矩阵为 $A_i(i=1,2)$, 其中

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{11}^i & a_{12}^i & a_{13}^i & a_{14}^i \\ a_{21}^i & a_{22}^i & a_{23}^i & a_{24}^i \\ a_{31}^i & a_{32}^i & a_{33}^i & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

则有:

$$w_i \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} = A_i \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$i=1,2$, 其中 $(x_1, y_1, 1)$ 与 $(x_2, y_2, 1)$ 分别为 p_1 与 p_2 在各自图像中的齐次坐标; $(X, Y, Z, 1)$ 为 P 点在世界坐标系下的齐次坐标; w_i 为非零参数, $a_{nm}^i(k=1,2,m=1,+,3,n=1,+,4)$ 为投影矩阵 A_i 中的元素, 与摄像机的位置及成像系统参数有关, 可通过摄像机标定来确定.

摄像机标定后, 根据式(2)和被测点 P 在摄像机像面上的像点坐标 (x_1, y_1) 与 (x_2, y_2) , 可求出未知点 P 的三维空间坐标 (X, Y, Z)

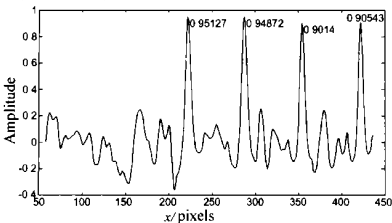


图 2 像素坐标为 447 的特征点
与右图像的灰度相关

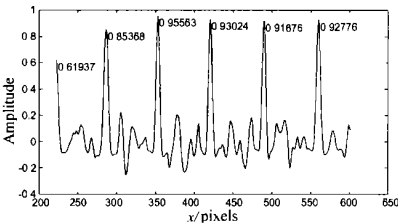


图 3 像素坐标为 612 的特征点
与右图像的灰度相关

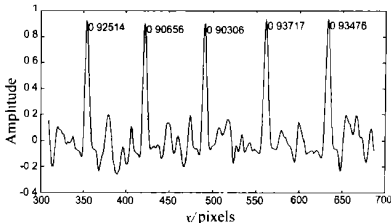


图 4 像素坐标为 698 的特征点
与右图像的灰度相关

如根据最大灰度相关评判标准, 从图 2~4 不难得知, 左图像中的三个特征点在右图像中的对应特征点水平像素坐标分别为 221、353、560. 而实际上, 它们在右图像中正确对应的

$$\begin{bmatrix} (a_{11}^i - a_{31}^i x_i) & (a_{12}^i - a_{32}^i x_i) & (a_{13}^i - a_{33}^i x_i) \\ (a_{21}^i - a_{31}^i y_i) & (a_{22}^i - a_{32}^i y_i) & (a_{23}^i - a_{33}^i y_i) \end{bmatrix} \# \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_i - a_{14}^i \\ y_i - a_{24}^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 特征点匹配

特征点匹配是指根据所选特征点的计算, 建立特征点间的对应关系, 将同一空间物理点在不同图像中的映像点对应起来.

3.1 最大灰度相关匹配方法分析

寻求左(右)图像中特征点在右(左)图像中的匹配对应点, 可使用不同方法进行特征匹配, 如计算平方差和(sum of squared difference, SSD)^[1,2]、绝对值差和(sum of absolute difference, SAD)^[3,4]及计算灰度最大相关^[5~7]等. 其中, 灰度最大相关法为单一判断中公认最强壮的一种经典区域匹配方法^[8]. 由于这些匹配计算方法(如平方差和, 绝对值差和, 灰度相关等)只是从一个片面来描述左右图像特征点间的接近程度, 因此, 不能得到唯一确定的匹配对应点. 下面以最大灰度相关法为例, 讨论灰度相关匹配法的特点.

某一立体图像对中的左图像 8 个特征点的水平像素坐标与其在右图像中的对应像素坐标见表 1.

表 1 左图像特征点与右图像实际对应的水平像素坐标

365	447	529	612	698	782	871	994
221	287	353	421	490	560	632	763

由双目立体成像几何特性知, 在平行摄像系统中, 对于场景中的同一特征点, 其在左图像中的透视投影相对于右图像将水平方向移动距离 d.

$$d = bf/Z \quad (4)$$

式中, b, f 分别为两个摄像机间的基线长度和摄像机焦距, Z 为空间点深度坐标. 基于此方向特性知, 在寻求左(右)图像中特征点在右(左)图像中的对应点时, 只需在右(左)图像中其对应的外极线上向左(右)一定范围内搜索. 采用灰度相关匹配法, 对左图像中水平像素坐标为 447、612、698 的三个特征点, 分别与右图像进行特征匹配时, 设向左的偏移量为 400 (pixels), 即这些特征点在右图像中进行匹配搜索时, 分别在 $[(447-400) \sim 447]$ 、 $[(612-400) \sim 612]$ 、 $[(698-400) \sim 698]$ 的范围内寻求匹配点, 所得灰度相关分别见图 2~4.

特征点的水平像素坐标应分别为 287、421、490. 可见, 采用最大灰度相关(或最小平方差和、最小绝对值差和)匹配方法, 不足以得到唯一正确的匹配. 虽 Grimson^[9]提出了由粗到细的控

制策略,即先在较低分辨率进行匹配,然后利用其结果限定在较高分辨率的搜索范围内,进行较准确的视差匹配,但采用较低分辨率并不一定总可以消除误匹配,尤其在一个较大的场景范围有重复模式出现的情况。

3.1.2 灰度相关多峰值视差绝对值极小化立体匹配方法

由图 2~4 可以看出,采用最大灰度相关法进行匹配时,正确匹配的特征点间的灰度相关值不一定出现在峰值极大处,有可能会出现在其他峰值处。如图 2~3,正确对应的特征点分别位于/次峰0处;而图 4 中的正确对应特征点,却位于五个明显峰值中的极小峰值处。为此,本文提出了灰度相关多峰值视差绝对值极小化立体匹配新方法。该方法的基本思想是采用灰度相关匹配技术进行特征粗匹配,采用视差绝对值极小化方法,确定唯一的匹配。

由于视差的大小反映着空间点的深度,因此,相邻匹配点的视差梯度^[10]反映着空间相邻点的深度差。只有当视差梯度小于 2,人眼才能做到正确匹配,该点已为心理实验所证实。由于对应点序的一致性与视差梯度有限是基本上相同的两个匹配相容条件,因此,可利用视差梯度有限约束来消除/灰度相关匹配多峰法0所得的误匹配,即利用灰度相关匹配技术,确定左(右)图像特征点在右(左)图像中的灰度相关系数 C_{ij} ,并由此确定相关系数最大值 $\max C$,将灰度相关系数满足: $C_{ij} < \max C - E$, (其中, E 为一较小量)的多个/峰值0特征点作为匹配点集,即粗匹配后,结合视差梯度有限约束,优化初始匹配。

由式(4)知,如空间相邻点的深度相差不大,则其对应的视差值也应相差不大。

$$Z = \frac{bf}{d_{aac}} - \frac{bf}{d_{bbc}} = bf \frac{d}{d_{aac}d_{bbc}} \quad (5)$$

其中, $d = d_{bbc} - d_{aac}$, d_{aac} , d_{bbc} 分别为相邻点(a , ac), (b , bc) 间的视差,且 ac , bc 分别为 a , b 的对应点。

$$d = \frac{d_{aac}d_{bbc}}{bf} Z \mu \frac{d_{aac}^2}{bf} Z \quad (6)$$

由式(6), $d \propto Z$ 。

定义视差绝对值支持函数为:

$$E(d) = \frac{D(d_{aac}, d_{bbc})}{|d_{aac}| + |d_{bbc}|} \quad (7)$$

其中, $D(d_{aac}, d_{bbc}) = ||d_{aac}| - |d_{bbc}||$ 为视差绝对值。

当 $E(d)$ 最小时, d 即为最佳匹配视差。

为降低计算复杂度,本文采用/种子扩散法0,即在左右立体图像对中,设置一个能使两摄像机同时观察的明显特征点作为/种子0对应点,以该种子为对象,寻求左(右)图像中与该种子点欧氏距离最近且小于某个给定值的特征点作为匹配起始点。与种子点欧氏距离最近且小于某一给定值,是为了保证该特征点与其对应的种子点在空间上的深度相差不大,且可不必使用三个摄像机方能利用视差梯度有限约束^[11],即便双目立体成像系统也能利用视差梯度约束条件。

根据视差梯度定义^[10]:

$$G_u = 2 \frac{+(a - ac) - (b - bc) +}{+(a - ac) + (b - bc) +} \quad (8)$$

式中, a , ac (或 b , bc) 为对应点的图像坐标向量; $+a +$ 为向

量 a 的模。

设 a , ac 为种子点坐标向量, b 为与相应种子点欧氏距离最近且小于某一给定值的特征点坐标向量,则在式(8)中,只有一个未知待求量 bc , 因此,即便使用双目立体成像系统,也能利用视差梯度约束条件,求出待匹配特征点向量 bc 的范围。

在采用视差绝对值极小化方法,确定最佳匹配向量 bc 后,将 b , bc 作为新的匹配种子点,不断/扩散0,直至左(右)图像中特征点全部匹配完毕。

具体方法如下: ① 确定种子匹配对; ② 确定特征点与对应的种子点的欧氏距离 D ; ③ 如果 D 小于某一给定值 T 。若匹配,并得到新的种子匹配对;否则,将剩余特征点集的某一点作为起始匹配点,并从对应的种子匹配集中寻求与该特征点距离最近的一个种子点作为进行相关匹配运算的/亲和种子点0,进行匹配运算,得新的种子匹配对。

重复②, ③, 直至左(右)图像中的特征点全部匹配完毕。

4 实验结果与分析

为能验证灰度相关多峰值视差绝对值极小化立体匹配方法的有效性,对一形状复杂且不规则的偏转线圈进行了三维重建。实验测量系统由 Nikon(Coolpix950) 数码相机(1600 @ 1200)、水平转动平台、已知三维坐标的标准件(作为摄像机标定参照物,大小: 50 @ 50 @ 50mm ? 10Lm,特征点坐标精度: 2Lm)、偏转线圈(被测物体)和计算机及相应图像处理软件组成。旋转转动平台,使用一台数码相机在不同位置进行两次拍摄,拍摄到的左右两幅图像如图 5, 6 所示。



图 5 偏转线圈左图像

图 6 偏转线圈右图像

三维重建的偏转线圈如图 7 所示。

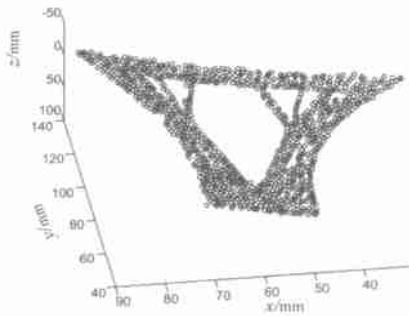


图 7 三维重建后的偏转线圈

三维重建的偏转线圈与实际偏转线圈外形十分吻合,从而证实了文中所提灰度相关多峰值视差绝对值极小化立体匹配方法的有效性。

此外,采用上述立体匹配方法,对已知三维坐标的标准件

进行了特征匹配. 其中, 标准件离数码相机的距离约为 280mm, 数码相机两次拍摄时光轴约为 10° 角. 利用匹配所得结果, 采用线性成像几何模型, 对该标准件进行了三维重建, 其结果与标准件的三维坐标绝对差, 如表 2.

表 2 三维重建结果与标准件坐标差(mm)

	X	Y	Z
最大值	0.12952	0.11537	0.12219
最小值	-4.6220@10 ⁻⁴	-2.1821@10 ⁻⁴	-3.341@10 ⁻⁴
平均值	-1.1514@10 ⁻⁵	-1.1415@10 ⁻⁶	-2.632@10 ⁻⁵

重建结果与实际坐标十分接近, 进一步证实了本文所提出的立体匹配算法是切实有效的.

最大 0.12952mm 的标准件匹配误差, 如出现在偏转线圈的边缘, 则将对偏转线圈的磁场分布产生一定影响; 若出现在偏转线圈中部, 则对偏转线圈磁场分布影响不大. 由于该误差值与一般偏转线圈漆包线的线径(<)相当, 因此, 即使该误差值出现在偏转线圈边缘, 对磁场分布的影响也是可以接受的.

由于很多情况下线性模型不能准确描述摄像机成像的几何关系, 如在近距、广角时的情形, 因此还需考虑线性或非线性的畸变补偿, 利用校正后的模型进行三维重建, 可得到更高的精度.

实验中, 有很多因素影响着测量精度, 如标准件坐标的定位精度, 特征点像素坐标的提取准确性, 数码相机移动时的聚焦位置及标准件与数码相机的相对位置等. 因此, 为提高测量精度, 除需对数码相机标定、特征点坐标提取及立体匹配算法进行优化与改进外, 还需建立完善的误差修正与补偿模型.

5 结论

采用立体视觉方法对偏转线圈进行非接触三维测量, 由于被测物体形状较复杂且不规则, 使该工作极具挑战性. 虽立体视觉方法针对不同的问题背景, 基于不同的出发点和思路, 取得了一系列成果, 但应用于偏转线圈的三维测量, 尚属首次. 从对偏转线圈及已知三维坐标的标准件的三维重建结果可知, 文中所提方法是有效可行的.

参考文献:

[1] Okutomi M, Kanade T. A locally adaptive window for signal matching [A]. Proceedings of the Third International Conference on Computer Vision[C]. Osaka, Japan: PITCCV, 1990. 190- 199.

[2] Kanade T, Okutomi M. A stereo matching algorithm with an adaptive window. Theory and experiment[J]. IEEE Trans on PAMI, 1994, 16

(9): 920- 932.

[3] Atallah M J. Faster image template matching in the sum of the absolute value of differences measure[J]. IEEE Trans on Image Processing, 2001, 10(4): 659- 663.

[4] Brunig M, Niehsen W. Fast fullsearch block matching [J]. IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology, 2001, 11(2): 241- 247.

[5] Kweon J J, Kang K, Kim S D. A stereo matching algorithm using line segment features[A]. Fourth IEEE Region 10 International Conference, TENCON 89[C]. Bombay, India: IEEE IC, 1989. 589- 592.

[6] Bruyelle J L, Postaire J G. Disparity analysis for real time obstacle detection by linear stereovision[A]. Proceedings of the Intelligent Vehicle 92 Symposium[C]. Detroit, MI, USA: IVS, 1992. 51- 56.

[7] Pilu M. A Direct Method for Stereo Correspondence based on Singular Value Decomposition[A]. Proceedings of 1997 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition [C]. San Juan, Puerto Rico: IEEE, 1997. 261- 266.

[8] 杨俊, 柳健. 双目立体视觉系统中同名点的自动提取[J]. 中南民族学院学报(自然科学版), 2001, 20(2): 10- 13.

[9] Grimson W E L. Computational experiments with a feature based stereo algorithm[J]. IEEE Trans. on PAMI, 1985, 7(1): 17- 34.

[10] Burt P, Julesz. A disparity gradient limit for binocular fusion[J]. Science, 1980, 208. 615- 617.

[11] 吴立德. 计算机视觉[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1993. 132- 133.

作者简介:



管业鹏 男, 1967 年 6 月生于湖北孝感, 2000 年获中南大学工学博士学位, 同年 9 月入东南大学电子工程系做博士后研究, 2003 年入浙江大学电信系做第二站博士后研究, 发表论文数 10 篇. 主要感兴趣方向为: 数字图像处理与分析等.



童林凤 男, 1933 年 12 月生于辽宁, 1955 年北京大學物理系毕业, 现任东南大学电子工程系教授, 博士生导师, 中国电子学会士, IEEE 资深会员, 复旦大学物理系兼职教授, 上海交通大学兼职教授, 研究方向为显示科学与技术.