

文章编号 1004-924X(2009)05-1127-07

应用灭点标定的立体视觉自由曲面三维重建

潘淑杰,董守平,王红丽

(中国石油大学 机电工程学院,北京 102249)

摘要:为了实现对自由曲面的三维空间数据的测量与重建,建立了立体视觉自动测量系统,并对该系统的非线性标定及立体图的匹配方法进行了研究。基于灭点理论法进行了系统的非线性标定,采用投射光斑法增加自由曲面的图像特征;提出了一种基于方向和距离约束的分片排列编码方法,对投影光斑进行排列编码。分别在左右图像上根据彩色点的位置关系自动确定一个初始匹配点和 4 个匹配方向,然后对其余点按照分片排列法进行自动排列编码。对石膏像的面部进行了三维测量和重构实验,实验结果表明:像物尺度比为 0.08 mm/pixel 时,空间点三维坐标测量的均方差为 0.05 mm,可以达到亚像素级测量精度;基于方向和距离约束的分片排列编码法,可以准确地进行投影点的编码,并能够快速、有效地实现彩色图像特征点的全自动匹配。

关键词:灭点理论;标定;立体视觉;图像匹配;三维测量

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A

Three dimensional reconstruction of stereo vision free-form surface based on vanishing-point calibration

PAN Shu-jie, DONG Shou-ping, WANG Hong-li

(Faculty of Mechanical and Electronic Engineering, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: In order to realize the automatic 3D measurement and reconstruction for a free-form surface, an automatic measuring system for the stereo vision is established and its adopted algorithms such as the nonlinear calibration for the measuring system and the match algorithm for stereo images are investigated. A nonlinear calibration method based on vanishing-point theorem is applied to calibrate the system and the image features of a free-form surface are enhanced by projecting arrays of dots. Then, an array coded algorithm based on direction and distance restrictions is presented to code projecting dots. After setting an original matching point and four original matching directions automatically based on the positions of red points, all other white dots viewed both in two images can be coded by the proposed method and the images in two directions can be matched automatically. The experiments of 3D measurement and reconstruction for a plaster model are undertaken, and the experimental results show that when scale is 0.08 mm/pixel, the square error of 3D measurement for dots is 0.05 mm, which can reach a sub-pixel measurement precision. Moreover, the projective points on a picture can be

收稿日期:2008-07-09;修订日期:2008-08-22.

基金项目:北京市教育委员会重点学科资助项目(No. XK114140594)

coded precisely and the matching between two images can be performed effectively by the array code method based on direction and distance restrictions.

Key words: vanishing-point; calibration; stereo vision image matching; 3D measurement

1 引言

从不同角度对同一物体进行图像恢复获得其三维形体结构的立体视觉自由曲面三维重构技术已成为逆向工程中一种重要的三维重建方法,与其它方法相比,它具有非接触、测量速度快、自动化程度高,硬件成本低,高度计算机化等优点,非常适合现代先进制造业高度自动化的发展要求。它主要包括摄像机标定和图像对的匹配两方面的内容。

国内外学者对摄像机的标定做了大量的研究^[1-4],但是现有的方法大多需要多个精密测量的空间已知点,或者精密控制的移动台,标定过程较为复杂,本文采用的非线性灭点标定方法,只需要一个立体标定块,标定过程简单,并可实现较高的测量精度。

立体图像常用的匹配方法有基于灰度相关的匹配和基于图像特征的匹配两种。基于灰度相关的匹配往往难以获得理想的匹配精度和效果;对于有明显图像特征的物体,基于图像特征的匹配可以获得较为理想的效果,但是对于缺乏纹理特征的物体却显得无能为力。张可等采用对物体投射光斑图案的方法来增加物体的特征,但是,对于大光斑的匹配是要靠人机交互确定的,没有实现投影光斑的全自动匹配^[5]。本文在此基础上,提出了一种基于方向和距离约束的分片排列编码方法,对投影光斑进行排列编码,从而实现了投影图像特征点的全自动匹配。

实验证明,采用基于灭点理论标定方法和基于方向和距离约束的分片排列编码法的立体视觉三维测量和重构系统,具有标定过程简单、匹配准确速度快、自动化程度高和硬件成本低等特点。

2 视觉系统的标定

2.1 视觉几何原理

图 1 为视觉成像也是照相机成像的几何光学原理,图中视点 C 相当于照相机透镜组的光学中

心,视像平面 A 经光学中心 C 在相机胶片上形成像平面 A' 。视像平面 A 与距离它为景深 h 的平行平面 B 之间的任意物点 m 也都可经光学中心 C 在胶片上形成像 M' ,同时物点 m 与光学中心 C 的连线 mC ,也将在视像平面 A 上留下交点 M 。显然,在背景平面 B 与视像平面 A 之间的所有物点都可以通过视点和物点的连线(即视线)在视像平面 A 上得到它们相应的视觉像点,从而可以把胶片上的像 A' 按像物比例放大而得到视像平面 A 上的像。

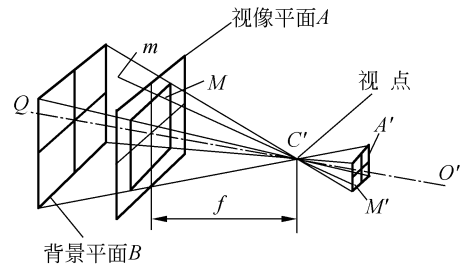


图 1 视觉成像原理

Fig. 1 Principle of perspective

如果找到视像平面 A 与视点 C 在空间的位置,在视点与视像平面上像点确定的视线上就可找到物点可能的位置。若从两个不同的视点得到该物点在相应的视像平面上的两个视觉像点,那么它的实际位置就可以由过相应视觉像点的两条视线的交点求得,如图 2 所示。

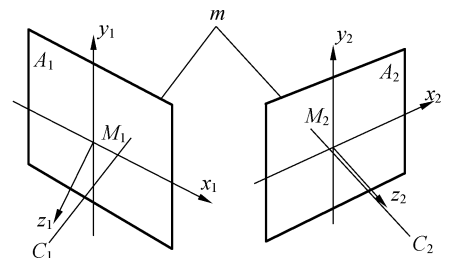


图 2 两视点立体视觉

Fig. 2 Stereo vision of two view points

2.2 灭点标定法

2.2.1 灭点标定的基本算法^[6]

灭点理论的基本内容是:与视像平面相交的

平行直线族在视像平面上的头视像汇交于一点,该点即为平行直线族中过视点的直线与视像平面的交点。

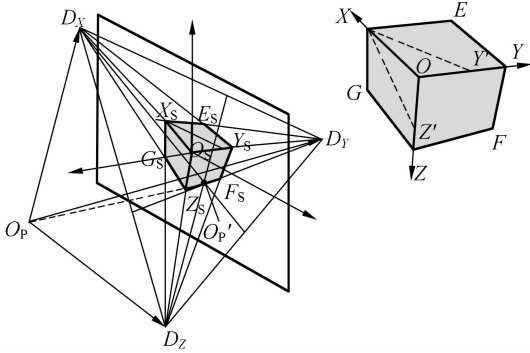


图 3 灭点求解法

Fig. 3 Positioning based on vanishing-point

如图 3 所示,立方体 $OXYZFEG$ 在视像平面上的像为 $O_s X_s Y_s Z_s E_s F_s G_s$ 。容易证明:视点 O_p 在视像平面上的投影就是三灭点 D_x 、 D_y 和 D_z 所构成的三角形的垂心 O_p' ,可以推得透视像距:

$$f = O_p O_p' = \frac{1}{2\sqrt{\frac{(S - D_y D_z)^2 (S - D_z D_x)^2 (S - D_x D_y)^2}{s(s - D_y D_z)(s - D_z D_x)(s - D_x D_y)}}}, \quad (1)$$

其中:

$$S = \frac{1}{2}(D_x D_y^2 + D_y D_z^2 + D_z D_x^2),$$

$$s = \frac{1}{2}(D_x D_y + D_y D_z + D_z D_x).$$

把视像平面置于过坐标系 $OXYZ$ 的原点并使 O_s 与 O 重合,若给出立方体的实际棱长则可以求出实际尺度与图像尺度的比例:

$$\lambda = (fXY' - d_x X_s Y_s') / fX_s Y_s', \quad (2)$$

其中, $d_x = fOX/O_p D_x$ 。

设图像坐标系 $O_s X' Y' Z'$ 到世界坐标系 $OXYZ$ 的变换矩阵为 A ,则有

$$A = \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ \alpha_{31} & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中,

$$\alpha_{11} = \delta[\gamma_y(y_1 - y_3) - \gamma_z(y_1 - y_2)] \times OX,$$

$$\alpha_{12} = -\delta\gamma_y(y_1 - y_3) \times OY',$$

$$\alpha_{13} = \delta\gamma_z(y_1 - y_2) \times OZ',$$

$$\alpha_{21} = \delta[\gamma_z(x_1 - x_2) - \gamma_y(x_1 - x_3)] \times OX,$$

$$\alpha_{22} = \delta\gamma_y(x_1 - x_3) \times OY',$$

$$\alpha_{23} = -\delta\gamma_z(x_1 - x_2) \times OZ',$$

$$\alpha_{31} = -\frac{f}{O_p D_x},$$

$$\alpha_{32} = -\frac{f}{O_p D_y}, \quad \alpha_{33} = -\frac{f}{O_p D_z},$$

其中,

$$\gamma_y = D_x D_y / \sqrt{OX^2 + OY^2},$$

$$\gamma_z = D_x D_z / \sqrt{OX^2 + OZ^2},$$

$$\delta = 1 / [(x_1 - x_2)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_1 - y_2)].$$

确定了视点、视像平面位置、实际尺度与图像尺度的比例及空间坐标系与图像坐标系的变换关系,就可实现系统的标定。

2.2.2 摄像机标定的非线性因素

摄像机镜头的非线性畸变包括径向畸变、离心畸变和薄棱镜畸变。研究表明^[2]:在一般情况下,非线性摄像机模型只需考虑径向畸变就足够描述非线性畸变因素的影响。如果考虑更多的非线性畸变参数(如离心畸变和薄棱镜畸变),会使摄像机标定问题的求解需要使用复杂的非线性优化算法。过多的非线性参数的引入不但不能提高精度,反而会引起求解过程的不稳定。

考虑摄像机透镜的径向畸变因素,将实际图像坐标 (x_d, y_d) 转换成理想图像坐标 (x_u, y_u)

$$\begin{cases} x_u = x_d + \delta_x = x_d + k(x_d - x_c)r^2 \\ y_u = y_d + \delta_y = y_d + k(y_d - y_c)r^2 \end{cases}, \quad (4)$$

式中, (x_c, y_c) 为视点在视像平面上的投影, $r^2 = (x_d - x_c)^2 + (y_d - y_c)^2$, k 为透镜径向畸变系数。

2.2.3 基于灭点的非线性标定

由于畸变等因素的影响,空间平行线族在视像平面上的像的交点不能完全重合在一个点上,3 条空间平行线在视平面上交于 3 个点,设这 3 个灭点组成的三角形边长之和为 D ,采用式(1)~(3)进行系统的初标定作为标定初值,设定 k 的迭代步长,代入式(4),重新标定,通过最优化方法迭代求解可以求得 D 达到最小时的系统标定值。

3 图像匹配

文献[5]对图 4 所示投影光斑的图像匹配作

了研究,并提出基于大小点的匹配方法,大点完全要通过人工点取来确定,在各个大点形成的四边形区域内实现小点的自动匹配。为消除人工的干预,实现图像的完全自动化匹配,本文提出了基于方向约束和距离约束的排列编码方法,实现图像对之间对应特征点的匹配。投射的彩色点阵列光斑如图 5 所示,点的密度可根据实际测量需要设定,通常情况下,点越密越能真实地还原物体的曲面特征。其中中间灰色的点为初始匹配点,上下左右的 4 个灰色点分别和初始点确定上下左右的初始方向,按照这些初始方向找点可以将整个图像区域划分为 4 片,然后对每一片的点进行行列编码。

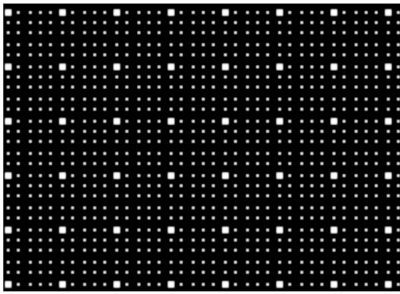


图 4 大小点投影图

Fig. 4 Projection of big and small points

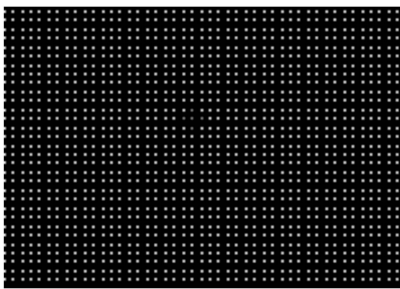


图 5 彩色点投影图

Fig. 5 Projection of color points

3.1 基于方向约束和距离约束的分片排列编码法

分片行列编码法的基本思想是通过 5 个灰色点的位置关系确定初始点和上下左右 4 个初始方向,沿着初始方向开始分别对图像的右下、左下、左上、右上 4 个区域中的所有光斑点按照方向约束和距离约束条件进行排列编码。

具体行列编码方法和步骤如下:

(1)按照彩色图像的颜色阈值,自动查找图像中所有的白色点和灰色点并算出其形心坐标,根据 5 个灰色点的位置关系,确定中间的点为初始匹配点,上下左右 4 个灰点为初始方向点,分别和初始点确定 4 个初始匹配方向。

(2)沿着这 4 个初始方向将图像分成 4 片,即右下、左下、左上、右上 4 个区域。对各个区域中的点进行行列编码,记录下每个点的行列位置作为其编码值。以右下区域为例:

首先,按照方向约束依次排列此区域的第一行第一列。如图 6 所示,初始点 P_{11} 的行码和列码都是 1,右侧初始方向点的行码为 1,列码为 2,记为 P_{12} ;下侧初始方向点的行码为 2,列码为 1,记为 P_{21} 。 P_{11} 与 P_{12} 确定向右的初始方向, P_{11} 与 P_{21} 确定向下的初始方向,按照初始方向起依次向右,向下找点。如果此时向右排列编码第一行的点,设 P_{11} 与 P_{12} 确定的直线为 L_{12} ,方向约束可以描述为:沿着 P_{11} 和 P_{12} 确定的方向的一个邻域,即 P_{12} 右侧的一个邻域内,找到所有满足到直线 L_{12} 的距离小于一个阈值的点(也就是使得找到的点与前 2 个点确定的方向相近),取距离 P_{12} 距离最近的点作为排列的下一点 P_{13} ,同理,在 P_{13} 右侧的一个邻域内,按照方向约束,找满足到直线 L_{13} 的距离小于一个阈值的点,取距离 P_{13} 距离最近的点作为排列编码的下一点 P_{14} ,依次向右找 $P_{15}, P_{16} \dots$,由此找到第一行所有的点并进行编码,按照同样的方法向下可对第一列的所有点编码。

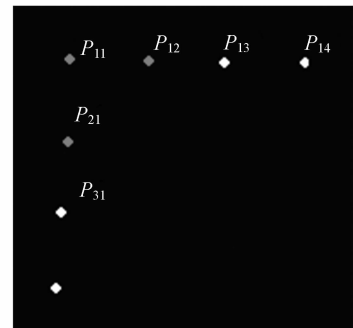


图 6 第一行第一列编码

Fig. 6 Codes for the first row and the first column

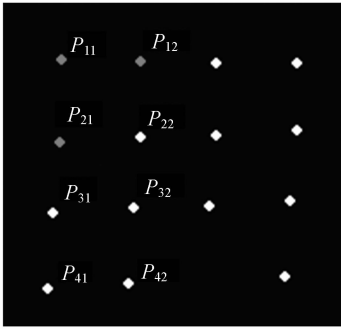


图7 其它行列编码

Fig. 7 Codes for the other rows and columns

其次,确定了第一行和第一列的点后,就可以按照距离约束条件对其他行列的点进行行列编码。设 P_{mn} (P_{mn} 代表 m 行 n 列的点) 为待确定点, 距离约束可以描述为: 在 $P_{(m-1)n}$ 下侧的一个邻域和 $P_{m(n-1)}$ 右侧的一个邻域内, 找点使之到 $P_{(m-1)n}$ 和到 $P_{m(n-1)}$ 的距离之和最小。如图 7 所示, 在 P_{21} 右侧和 P_{12} 下侧的一个邻域内, 找到 P_{21} 和 P_{12} 的距离之和最小的点, 由此确定 P_{22} 点。同理, 在 P_{31} 右侧与 P_{22} 下侧的一个区域内, 按照距离约束找点 P_{32} , 依次类推确定第二列各点, 同理, 其它各列都可按此方法进行排列编码。特别地, 如果第 n 列的点数比第 $n-1$ 列的点数多, 设第 $n-1$ 列有 i 个点, 则第 n 列可按上述方法找到第 i 个点, 余下的点按照第一列的方法继续找点编码。

与右下区域排列方法相同, 左下、左上、右上各个区域的点可以按照上述的距离约束和方向约束条件进行排列编码。

3.2 两图的对应点匹配

左右图像都按 2.1 所述的方法进行排列编码后, 各个对应区域对应的编码点即是对应的匹配点, 于是可以完成立体图像对中所有对应点的匹配。

4 实验

4.1 标定

采用 $100.54 \text{ mm} \times 100.54 \text{ mm} \times 100.54 \text{ mm}$ 的精密加工的立方体块作为标定块, 图 8 为从左右两个角度拍摄的照片, 采用亚像素方法提取立

方体顶点, 用非线性灭点标定方法进行系统的标定, 对空间 72 个已知点进行重复性实验。当求得的像物尺度比约为 0.08 mm/pixel 时, 三维点实际空间坐标测量结果的均方差约为 0.05 mm , 可以得到亚像素级的测量精度。

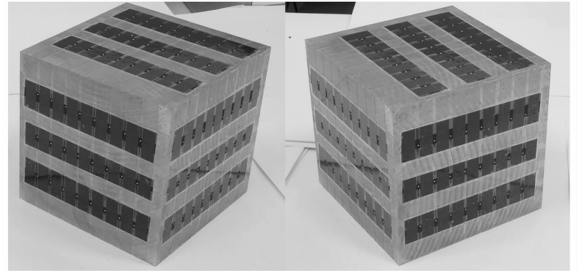


图8 立体标定块

Fig. 8 Calibration for cubes

4.2 石膏像面部图像匹配及三维重建

制作投影点阵列, 投射到石膏像上, 对点阵列进行适当的缩放, 保证在拍摄图像光斑点之间不连通的情况下, 点尽可能的密集。图 9 为左右两

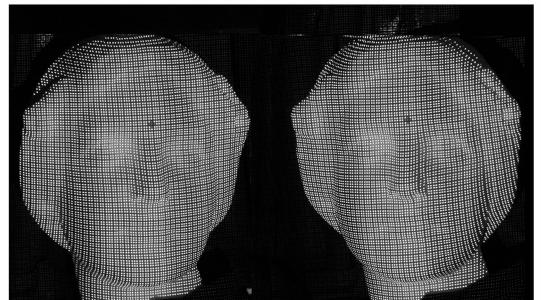


图9 投影的石膏面部图像

Fig. 9 Projection pictures of plaster heads

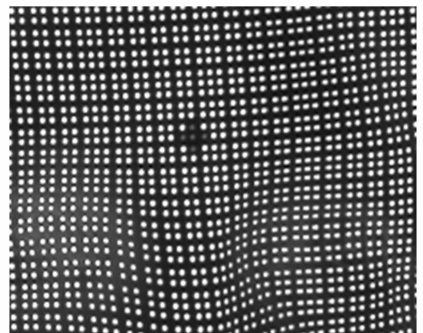


图10 局部图

Fig. 10 Part of the left projection picture

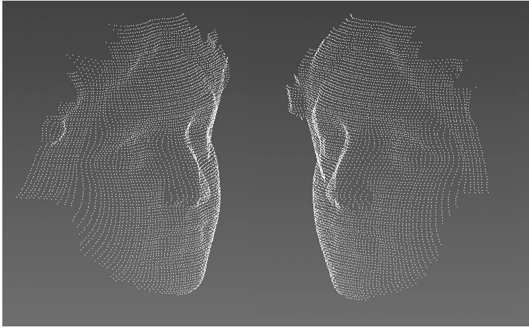


图 11 三维点云

Fig. 11 Three dimensional point cloud



图 12 重构模型

Fig. 11 Reconstructed model

幅投射光斑的石膏像面部图像,图 10 为左图的局部图,其中 5 个灰色点确定了初始匹配点和匹配方向。按照基于方向约束和距离约束的分片排列编码法,实现立体像对的对应点匹配,并对左右两幅图中共有的点列进行三维重建。图 11 为经一次性排列得到石膏像面部三维测量点云的两个侧面视图;图 12 为重建后的图像。

5 结 论

实验结果表明:基于灭点的非线性标定方法不仅标定过程简单易行,而且可以达到较高的测量精度。对于特征为阵列式彩色投影光斑的图像,基于方向约束和距离约束的分片排列编码方法能够快速、有效地实现图像间特征的全自动匹配。

参考文献:

- [1] TSAI R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]. *Proc of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington: IEEE Computer Society*, 1986;364-374.
- [2] TSAI R Y. A versatile camera calibration technique for higher accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE Journal of Automation*, 1987, 3(4):323-334.
- [3] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22 (11): 1330-1334.
- [4] 陈刚,车仁生. 一种基于立体模板的双目视觉传感器现场标定方法[J]. *光学 精密工程*, 2004, 12(6): 626-631.
- [5] CHEN G, CHE R SH. Stereo vision sensor field calibration method based on volume template [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6): 626-631.
- [5] 张可,许斌,唐立新,等. 基于立体视觉的自由曲面三维重构[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)* 2006, 34(4):76-78.
- ZHANG K, XU B, TANG L X, *et al.*. Reconstruction of 3D free-form surfaces based on stereo vision[J]. *Huazhong Univ. of Sci. &Tech. (Nature Science Edition)*, 2006, 34(4): 76-78. (in Chinese)
- [6] DONG S P. Determination of 3D position of particle perspective picture with vanishing-point theorem [J]. *SPIE*, 2002, 9:104-112.

作者简介:



潘淑杰(1978—),女,山东高密人,博士研究生,主要从事三维测量和逆向工程方面的研究。E-mail: panxiaoyu923@163.com



王红丽(1979—),女,山东巨野人,硕士,助工,主要研究方向为传感与测量技术。E-mail: was00163@yahoo.cn



董守平(1945—),男,福建闽侯人,教授,博士生导师,主要从事流动可视化、PIV技术、三维测量、多相流流型及计量、油水分离和流体力学等方面的研究。E-mail: dongshouping@163.com

● 下期预告

浮动电极型单向声表面波驱动器的设计与制造

张俊峰¹,李以贵¹,惠春²,高阳¹

- (1. 上海交通大学微纳米科学技术研究院,薄膜与微细加工技术教育部重点实验室,微米纳米加工技术国家级重点实验室,上海 200240;
2. 上海交大学生命科学技术研究院,上海 200240)

利用 MEMS 技术制作了一种声表面微驱动器,它是通过在 LiNbO₃ 基底上加工微型电极的方式来实现的。声表面波驱动器直接驱动工作物体,能量损失小,传动误差小,而且由于它的工作频率较高,表面波的波长短,所以也具有尺寸小,噪声低,抗电磁干扰等特点。为了更加有效地控制驱动的方向,提出了一种新型叉指结构,即浮动电极型单向换能器,然后利用 ANSYS 软件,对声表面波换能器进行了最优化设计和分析,并最终制作出孔径尺寸为 5 mm,电极厚度为 0.8 μm,指宽为 6.7 μm,周期为 80 μm 的浮动电极型单向换能器。该声表面波驱动器比以往的驱动器具有更高的谐振频率和更有效的方向可控性,为今后微光学控制系统向更加微型化和可控化发展打下了一定的基础。