

# 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配

叶海加, 陈 罡, 邢 渊

(上海交通大学 塑性成形工程系 国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

**摘要:** 在立体视觉中, 比较了几种常见立体匹配方法, 并针对存在的问题, 提出了多种方法融于一体的高效立体匹配方法。首先将计算机构造的用于解相的光栅由投影仪投射到物体上, 再将计算机构造的一系列黑白相间编码光栅也由投影仪投射到物体上; 然后将畸变栅线图像由摄像机采集到计算机中, 用解相光栅进行解相得到折叠在  $[-\pi, \pi]$  区间内的相主值, 用所述结构光编码方法进行相展开得到相位的周期, 二者相加得到真实相位值。利用插值算法将具有相同相位的点拟合成连续曲线, 从而实现了两幅 CCD 图像相同相位曲线的匹配, 再根据外极约束条件, 得到两幅图像点的匹配。在反向工程中, 用该方法对电话接线筒进行三维测量, 实验验证了该方法进行立体匹配的高效性和准确性。

**关键词:** 三维测量系统; 立体匹配; 编码光; 相展开; 外极约束

**中图分类号:** TB92 **文献标识码:** A

## Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light

YE Hai-jia, CHEN Gang, XING Yuan

(Department of Plasticity Forming Engineering, Shanghai Jiaotong University, National Die & Mould CAD Engineering Research Center, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The establishment of correspondence between two images is the precondition for 3D reconstruction in computer vision. By comparing several commonly used stereo matching methods, a highly effective stereo matching method, which is a combination of several matching methods, is proposed as a solution to the existing problem as detailed below: a series of gratings constructed by computer for phase demodulation is projected onto the object, and a series of black and white coded gratings constructed by computer is then projected onto the object, the distorted grating images are collected into the computer by CCD, the primary value of phase folded in zone  $[-\pi, \pi]$  is obtained through phase demodulation using the phase demodulation gratings, the period of phase is obtained through phase demodulation using structured light coding proposed, the true phase value is obtained by adding the two, the points with the same phase are fitted into a continuous curve by interpolation to realize the matching between two CCD images with the same curves, and the matching between the corresponding points in two images is obtained according to the epipolar constraint conditions. Experimental results proved the correctness and effectiveness of the method proposed.

**Key words:** 3D measuring system; stereo matching; binary code light; phase demodulation; epipolar constraint

## 1 引言

在反向工程中,准确、快速、完备地获取实物的三维几何数据,即对物体的三维几何形面进行三维离散数字化处理,是实现反求工程的重要步骤之一。常见的物体三维几何形状测量方法基本可分为接触式和非接触式 2 大类,双目 CCD (电荷耦合器件 Charge Coupled Devices) 结构光测量技术作为非接触式,是目前世界上光学测量的最先进技术之一,在反向工程中有着广泛的应用。

匹配是立体视觉中最复杂、最重要的环节,近年有许多文献提出恢复外极几何基础矩阵的算法,以实现两张未标定图像的匹配<sup>[1-2]</sup>。总结起来目前匹配方法可分为基于特征匹配、基于面积匹配和基于相位匹配。特征匹配主要以零交叉点和梯度为依据,受噪声影响较小,但仅能获得稀疏的视差;面积匹配可以获得稠密的视差,但主要依据为灰度连续性,受噪声影响较大,尤其是对交叉摆放的双目 CCD 立体视觉系统,左右图像灰度变化不一致,核线互不平行,误匹配几率增大;相位匹配一般是针对核线平行而言,虽然将空间域转化为时间域,可同样存在邻域奇异性。立体视觉用于物体三维测量时,为增大测量面积,减少遮挡,提高测量精度,常采用交叉摆放的双目 CCD 立体视觉系统<sup>[3]</sup>。在交叉 CCD 测量系统中,由于核线不平行,立体匹配更为困难。文中针对反向工程中三维测量的特点,对被测物体投射解相光栅和编码光栅,用解相光栅进行解相得到折叠在  $[-\pi, \pi]$  区间内的相主值,用结构光编码方法进行相展开得到相位的周期,二者相加得到真实相位值,从而实现相同相位曲线的匹配,再根据外极约束特性,实现交叉摆放的双目 CCD 立体视觉系统像素级的立体匹配。

## 2 结构光编码、解码及相位求解

本文将结构光编码引入相展开领域。用该方法进行相展开,使过程变得相对简单,不依赖于路径,不存在误差的传播,对噪声的抗干扰能力强,与解相过程有机结合能够得到准确的周期。

### 2.1 基本原理

编码结构光如图 1 所示,此处仅以 3 幅编码结构光图像为例。



图 1 编码光栅  
Fig. 1 Code grating

编码结构光是具有不同节距的一系列二值光栅,将这 3 幅光栅投射在物体上,被测空间被划分为 8 个区域。如果是  $n$  幅光栅,则被测空间划分为  $2^n$  个区域。根据各个点在不同图像中的亮度进行编码,每个区域由一个 3 位二进制编码表示,有光栅的部分记为“0”,无光栅的部分记为“1”。这个编码是与该点所处的周期相联系的,因此可以由编码与周期的对应关系得到被测物体上栅线的周期分布,从而基本完成相展开过程。编码与周期的对应关系见图 2。根据被测空间的大小以及对精度的要求,可以灵活调整投射编码结构光的数目,也即调整周期的数目。

0	1	2	3	4	5	6	7	周期
0	1	3	2	6	7	5	4	编码

图 2 编码与周期对应图  
Fig. 2 Correspondence between code and cycle

编码结构光是满足一定条件的结构光,它满足以下 3 个条件:

(1) 在被测空间内编码必须是无二义性的,这样才能保证没有相同的相值出现。

(2) 相邻两个编码间的 Hamming 距离为 1。相邻两个编码之间不同位的数目称为 Hamming 距离。如果 Hamming 距离不为 1,则在相邻两个编码交界处容易产生较大的误差。

(3) 编码光栅系列中最小光栅节距要与用于解相的光栅节距相同。节距指的是一个周期所包含的像素点数,这样才能将结构光编码的方法有效地应用于相位展开,并与解相结果有机地结合在一起,保证最后得到相值的无重复性。

### 2.2 相位求解

相位求解是为了得到图像上的所有点的相位,然后利用插值算法获得相同相位点的曲线并进行标号。首先投射用于解相的光栅,经摄像机

采集回计算机中进行解相, 得到折叠在  $[-\pi, \pi]$  区间内的相主值。再投射一系列编码光栅, 这些二值光栅的黑白条纹在被测物体上形成明暗相间的灰度条纹, 将这些灰度图像分别拍摄下来进行二值化处理, 得到一系列经物体高度调制后畸变的编码光栅图像。由这些图像进行相位展开的计算, 得到栅线的初步周期分布, 再经过一些调整即可得到准确的周期分布。

干涉长的光强分布可表示为:

$$I(x, y, t) = I_d(x, y) + I_a(x, y) \cos[\phi(x, y) - \omega t]$$

式中  $I_d(x, y)$ : 干涉场直流光强分布

$I_a(x, y)$ : 干涉场交流光强分布

$\phi(x, y)$ : 被测波面相位

$\omega t$ : 两干涉光路中的可变相位

固定  $\omega t = 0$ , 读干涉图中的条纹序号  $N(x, y)$ , 由此获得被测波面的相位信息  $\phi(x, y) = 2\pi N(x, y)$ 。其中条纹序号的测量不确定度只能做到 0.1, 相位被测面的面形不确定度在 0.1 ~ 0.05。对于给定的干涉场  $(x, y)$  处,  $I_d, I_a$ , 均未知, 所以至少需要  $(t_1), (t_2), (t_3)$  三幅干涉图才能求解出  $\phi(x, y)$ <sup>[4]</sup>。为了减小干涉测量不确定度, 设法采集多幅相位变化干涉图, 然后利用数值算法解出精确的  $\phi(x, y)$ 。

### 3 基于外极约束的对应点求解

图 3 是双目 CCD 空间示意图, 称为外极几何 (Epipolar Geometry)<sup>[5]</sup>。空间任意一点  $P$  与左右透视中心  $O_l, O_r$  构成一个平面, 称为外极平面 (Epipolar Plane), 外极平面与左右像面相交形成两条外极线 (Epipolar Line), 也互称共外极线。对于交叉摆放的双目 CCD, 每一像面上的外极线都相交于一点  $e_l, e_r$ , 即外极中心 (Epipole)。由立体视觉理论可知, 左右像面上任意一对对应点必然在它们相应的外极线上。

设左右摄像机坐标系分别为  $(x_l, y_l, z_l)$  和  $(x_r, y_r, z_r)$ , 其中  $O_l, O_r$  为左右摄像机的透视中心。左右摄像机坐标系变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{l1} & r_{l2} & r_{l3} \\ r_{l4} & r_{l5} & r_{l6} \\ r_{l7} & r_{l8} & r_{l9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{lx} \\ t_{ly} \\ t_{lz} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_r \\ y_r \\ z_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{r1} & r_{r2} & r_{r3} \\ r_{r4} & r_{r5} & r_{r6} \\ r_{r7} & r_{r8} & r_{r9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_{rx} \\ t_{ry} \\ t_{rz} \end{bmatrix}$$

左摄像机透视中心  $O_l$  在右像面的投影点为右外极中心  $e_r \left( \frac{t_{lx} f_r}{t_{lz} f_r}, \frac{t_{ly} f_r}{t_{lz} f_r} \right)$ , 同理右摄像机透视中心  $O_r$  在左像面的投影点为左外极中心  $e_l \left( \frac{t_{rx} f_l}{t_{rz} f_l}, \frac{t_{ry} f_l}{t_{rz} f_l} \right)$ 。左像面任意一点  $P_l$  在右像面

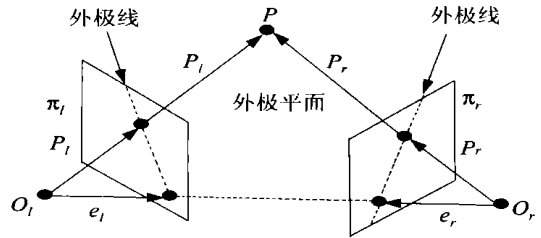


图 3 外极几何

Fig. 3 Epipolar geometry

的外极线为外极平面与左像面的交线, 同理右像面任意一点  $P_r$  在左像面的外极线为外极平面与右像面的交线, 并且所有的外极线过外极中心, 因此可根据左右摄像机坐标对应关系求解外极线方程。设左像面上斜率为  $k_l$ , 并过  $e_l$  点的直线, 在右像面上的外极线斜率为  $k_r$ , 并过  $e_r$  的直线, 推导出  $k_l$  到  $k_r$  的变换关系和  $k_r$  到  $k_l$  的变换关系<sup>[6]</sup>:

$$k_r = - \frac{t_{lr}(r_{l4} + r_{l5} k_l) - t_{lz}(r_{l7} + r_{l8} k_l)}{t_{lx}(r_{l7} + r_{l8} k_l) - t_{lz}(r_{l1} + r_{l2} k_l)}$$

$$k_l = - \frac{t_{lr}(r_{r4} + r_{r5} k_r) - t_{ry}(r_{r7} + r_{r8} k_r)}{t_{rx}(r_{r7} + r_{r8} k_r) - t_{rz}(r_{r1} + r_{r2} k_r)}$$

对于相位求解后的标号曲线图像, 可利用外极特性沿曲线寻找对应点。设左标号曲线图像为参考图像, 右图像为待匹配图像, 首先求出沿左图像某标号曲线的任一点  $P_l$  与左外极中心  $e_l$  连线的斜率  $k_l$ , 再求  $P_l$  右图像外极线的斜率  $k_r$ , 由斜率  $k_r$  和右外极中心  $e_r$  求出外极线, 并求出其与相应标号曲线的交点, 即  $P_l$  的对应点。

### 4 实验与结论

基于结构光编码、解码及相位求解的双目 CCD 三维测量系统不但在理论上是可行的, 而且在实际应用中已取得很好的效果。这种测量系统操作方便, 可以对不同大小尺寸的物件进行测量, 精度可以达到 0.03 mm, 而且测量速度也较快。使用这种测量系统进行测量主要有 3 个步骤: (1)

对系统进行标定, 获得摄像机内外参数, 建立摄像机坐标系与世界坐标系的关系; (2) 对物件进行结构光投影测量, 求解对应点, 得到物体点的三维坐标。对于大型物件, 要移动测量系统或物件, 对物件进行分区域拼接测量; (3) 数据处理, 对测量得到的点云数据进行处理, 最终得到物件的 3D 模型。

在反向工程中, 用本文所述方法对电话接线筒进行三维测量, 以构造出它的三维 CAD 模型。首先对测量系统进行标定, 求解摄像机内外参数, 如建立摄像机坐标系与世界坐标系的关系; 然后利用投影仪投射编码光栅和解相光栅于被测物体, 实验所用的是 6 幅编码光栅, 即 64 周期的栅

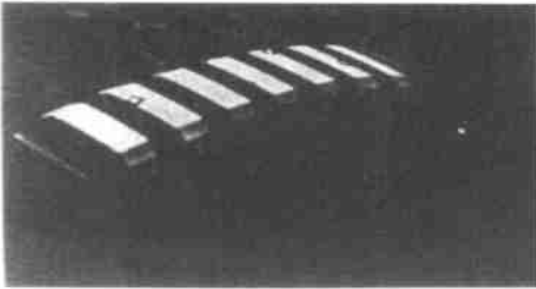


图 4 编码光栅  
Fig. 4 Code grating

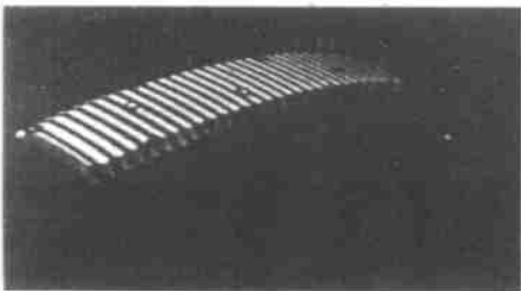


图 5 解相光栅  
Fig. 5 Grating for phase demodulation

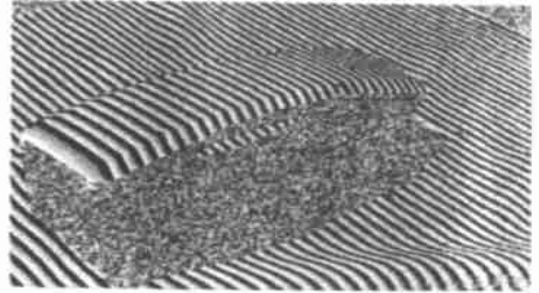


图 6 相位主值  
Fig. 6 Main phase

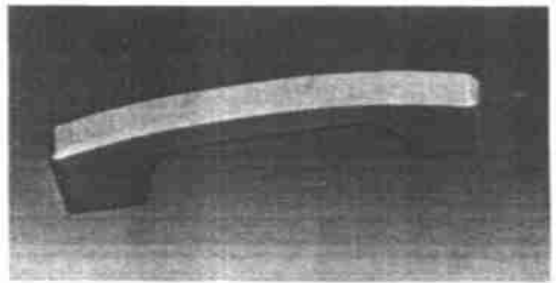


图 7 三维重构图  
Fig. 7 3D reconstruction

线。图 4 是编码光栅的第 1 幅, 图 5 是解相光栅, 图 6 是使用解相光栅得到的折叠在  $[-\pi, \pi]$  之间的相位主值。由相位主值和编码光栅得到的周期就可以求出真实相位值, 再利用外极约束, 即可实现左右 CCD 图像点的匹配。最后是数据的后处理工作, 利用测得的数据点在软件 Unigraphics18. 0 中进行三维 CAD 造型, 得到接线筒的三维重构图, 如图 7 所示。实验证明了该方法进行匹配的可行性和准确性。

总之, 这种基于结构光编码、解码、相位求解及外极约束相结合的方法实现了交叉摆放的双目 CCD 系统的立体精确匹配, 这种方法已用于反向工程中的物件测量, 实验证明该测量方法测量误差小, 测量时间短, 匹配算法具有鲁棒性。

## 参考文献:

- [1] YUAN M L, XIE M, YIN X M. *Robust cooperative strategy for contour matching using epipolar geometry* [M]. Asian Conference on Computer Vision, 2002.
- [2] ZHANG Z, DERICHE R, FAUGERAS O, *et al.* A robust technique for matching two uncalibrated images through the recovery of the unknown epipolar geometry [J]. *Artificial Intelligence J*, 1995, 78: 87-119.
- [3] 邓文怡. 提高工业视觉测量系统精度的途径 [J]. *工具技术*, 1999, 33 (5): 36-39.  
DENG W Y. Methods to improve accuracy of industrial vision measuring system [J]. *Tool Engineering*, 1999, 33 (5): 36-39 (in Chinese).
- [4] 金观昌. 计算机辅助光学测量 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
JIN G CH. *The computer aided optics measurement* [M]. The First Edition, Beijing: Tsinghua University Press, 1997. (in Chinese).
- [5] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1998.  
MA S D, ZHANG ZH Y. *The computer vision——computation theory and fundamental algorithm* [M]. The First Edition, Beijing: The Science Press, 1998. 53-87 (in Chinese).
- [6] 张爱武, 闫雪萍. 用于自由曲面视觉测量的立体精匹配方法 [J]. *红外与激光工程*, 2001, 30 (2): 87-90.  
ZHANG A W, YAN X P. New stereo precise matching method for free-form surface measurement with computer vision [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2001, 30 (2): 87-90 (in Chinese).

**作者简介:** 叶海加 (1979 - ), 男, 安徽池州人, 2001年毕业于合肥工业大学材料科学与工程学院, 现为上海交通大学塑性成形工程系硕士研究生, 主要研究方向为反向工程, E-mail: eversea3000@163.com;  
邢渊 (1962 - ), 男, 上海交通大学塑性成形工程系教授, 1998年7月在上海交通大学塑性成形工程系获得博士学位, 主要研究方向为金属塑性加工理论、模具 CAD/CAM/CAE、集成反向工程系统等, 参加过多项国家级和省部级科研项目。E-mail: yxing@shenmosi.com