

文章编号: 1001-3806(2003)05-0584-04

一种基于极线约束的激光条纹匹配算法

陈厚道 周 钢 王从军 黄树槐

(华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉, 430074)

摘要: 提出了一种基于极线约束的激光条纹匹配算法。先通过双 CCD 摄像机摄取左右两幅图像, 然后对图像进行预处理。处理之后的两幅图像是在不同视角下摄取的两条单像素宽的激光条纹, 在极线约束和连续性约束的理论基础上, 提出了一种直线和曲线求交的匹配方法, 从而实现了激光条纹的快速精确匹配和激光扫描线的三维重建。

关键词: 极线约束; 摄像机标定; 计算机视觉; 激光条纹匹配

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

An algorithm for laser stripe matching based on the epipolar constraint

Chen Houdao, Zhou Gang, Wang Congjun, Huang Shuhuai

(School of Material Science & Engineering, HUST, Wuhan, 430074)

Abstract: An algorithm for laser stripe matching based on the epipolar constraint is presented. First, the left and right image are taken by CCD camera, then the two images are pre processed. After being processed the two images that are taken at different angle of view are two pieces of laser stripe of single pixel. A method to solve the point of curve and line matching is proposed based on epipolar and continuity constraint, which ensures that fast precise matching of laser stripe and 3D reconstruction of laser scanning line can be realized.

Key words: epipolar constraint; camera calibration; computer vision; laser stripe matching

引 言

一套典型的基于计算机视觉的激光扫描测量系统的软件主要完成下面 4 个部分的功能: (1) 摄像机数学模型的建立和摄像机内外参数的标定; (2) 图像的预处理及激光条纹的细化; (3) 激光条纹的匹配; (4) 基于空间点的三维重建。如何快速准确地完成激光条纹的匹配是整套激光扫描测量系统的最为关键的一环, 为此, 笔者提出了一种用于激光扫描测量的高精度的激光条纹匹配算法。

1 摄像机数学模型的建立

小孔透视模型 (pin hole model) 是一种理想的状态模型, 由于摄像机光学系统不是理想的小孔透视模型, 此外, 还存在装配误差和加工误差, 使得物体点在摄像机图像平面上实际所成的像与理想成像之间存在光学畸变, 为了提高由二维图像信息计算三

维信息的准确性, 必须对理想小孔透视模型进行修正, 一般是在原模型中引入反映畸变影响的修正参数。

目前, 考虑镜头畸变的摄像机标定算法大致分为两类, 一种采用直接非线性优化的技术, 这类方法模型复杂, 计算量大, 需要选取适当的迭代初值进行非线性搜索。另一类是在线性摄像机模型中引入畸变模型, 利用成像几何性质将需要标定的参数分解, 然后分别计算, 不使用优化技术, 只求解线性方程组。Tsal^[1] 提出的两步法是这类方法的一个典型, 给出了假定只存在径向畸变时的标定算法。

基于带有一阶径向畸变的摄像机模型, 采用了一种逐步分解的摄像机线性标定方法, 将标定参数逐步分解, 每步均求解线性方程, 不必进行非线性搜索, 因此, 避免了非线性求解时的诸多问题, 使算法更快捷, 而且一次不去求解较多的未知数, 使算法更实用。

根据投影和透视变换理论以及矩阵转换知识, 可以把从三维世界坐标系到计算机图像坐标系的完整变换分为 4 步。

(1) 三维空间坐标系到摄像机坐标系的变换(从

作者简介: 陈厚道, 男, 1978 年 11 月出生。硕士。从事激光扫描测量系统的软件研究和开发。

收稿日期: 2002 08 30; 收到修改稿日期: 2003 09 30

(x, y, z) 到 (x_v, y_v, z_v) :

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \\ z_v \end{bmatrix} + \mathbf{T} \quad (1)$$

式中, \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 分别为从世界坐标系到摄像机坐标系的旋转和平移变换, \mathbf{R} 是一个 3×3 的正交矩阵, \mathbf{T} 是一个 3×1 的平移向量, 独立变量共 6 个。

(2) 小孔摄像机模型下的理想透视投影变换(从 (x, y, z) 到 (X_u, Y_u)):

$$X_u = fx/z \quad (2)$$

$$Y_u = fy/z \quad (3)$$

(3) 畸变模型: 描述图像坐标系中实际图像坐标 (X_d, Y_d) 和理想图像坐标 (X_u, Y_u) 间的关系。多数实验证明, 图像中心点处的畸变很小, 而在图像边缘处的畸变较大, 因此选择 kR_d^2 作为畸变因子, 建立如下的畸变模型:

$$X_d = (1 + kR_d^2)X_u \quad (4)$$

$$Y_d = (1 + kR_d^2)Y_u \quad (5)$$

式中, $R_d^2 = X_d^2 + Y_d^2$, R_d 为径向半径的平方, k 为径向畸变系数。

(4) 实际图像坐标到计算机图像坐标的变换(从 (X_d, Y_d) 到 (X_f, Y_f)):

$$X_f = C_x + S_x X_d \quad (6)$$

$$Y_f = C_y + S_y Y_d \quad (7)$$

式中, (C_x, C_y) 为计算机帧存图像中心的坐标, S_x, S_y 分别为图像平面中 x 和 y 方向单位距离上的像素数 (pixels/mm), 即比例系数。

可见, 需要标定的参数为:

外部参数: \mathbf{R} 和 \mathbf{T} 共有 6 个独立变量; 内部参数: f 为有效焦距, k 为径向畸变系数, S_x, S_y 分别为 x 和 y 方向的比例系数, (C_x, C_y) 为计算机帧存图像中心坐标。

其中, C_x, C_y, S_x, S_y 可以通过预标定得到, 需要标定的外部参数有 6 个, 即旋转矩阵 \mathbf{R} 和平移矩阵 \mathbf{T} , 基于上面采用的一阶径向畸变的摄像机模型, 采用一种新的逐步分解的摄像机标定方法^[2], 将各参数逐步分解, 通过求解线性方程组, 先计算旋转矩阵 \mathbf{R} , 再计算平移矩阵 \mathbf{T} , 最后求内部参数焦距 f 和径向畸变系数 k 。

2 激光条纹细化

由于激光照射在物体表面上的激光条纹宽度约为 1mm, 其经 CCD 摄像后在图像中所占的像素数目

不只有一个, 所以, 激光束图像必须做中心线搜寻处理。在激光束中心线搜寻的过程中, 光束的宽度愈小, 其误差愈低。

在激光条纹宽度的细化处理方面, 可采用线性偏光板使激光条纹宽度变细, 以免因条纹宽度变大, 影响图像的分辨力。此外, 也可使用激光光源功率控制 (power control) 的方法。控制激光光源的电路板置于探头内部, 采用“定电流回授控制”的方式控制半导体激光器, 以改善激光条纹的宽度和强度。这种用软件来控制激光光强度变化的方法, 可应用于不同材质与颜色的物体轮廓测试上, 以节省调整激光光强的时间及器件使用成本。

为了提高测量的精度, 必须提取一条单像素的激光中心线, 针对一幅 CCD 摄像机摄取的图像, 必须做如下处理。

(1) 滤波: 用激光进行扫描测量时, 由于受到周围环境光和物体颜色反射光的影响, 由 CCD 摄取的图像会存在一些孤立的噪声点。采用一种非线性平滑滤波器, 即中值滤波器滤波。这种滤波器既可以消除噪声又可以保持图像的细节。

(2) 阈值变换: 经过阈值变换, 可以将一幅灰度图像转换成黑白二值图像, 根据周围环境光和激光光强的不同, 可以设定一个阈值, 将激光照射的地方用黑色像素显示, 将背景用白色像素显示。

(3) 细化: 细化就是把一条较粗的激光束沿着其中心轴细化成一个像素的线条的处理过程。采用的是 Hidditch 的细化处理方法, Hidditch 细化处理方法就是用 一个 3×3 的模板沿着图像的扫描方向移动, 将图像境界的像素逐渐消除, 最后得到像宽为 1 的图像。

图 1 是一幅 CCD 摄取的激光照射图像, 图 2 是经过图像预处理之后(包括滤波、阈值变换、细化)的激光条纹图像。

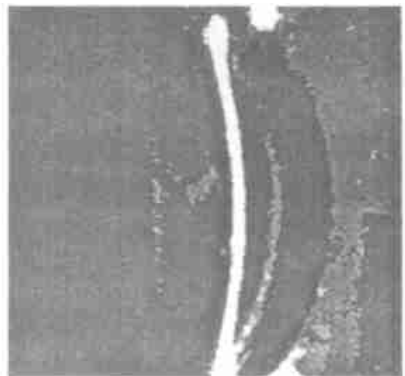


Fig. 1 The image of laser irradiation



Fig. 2 The laser stripe image after thinning

3 激光条纹匹配

激光条纹匹配就是寻找同一条激光扫描线在不同视点下投影图像中像素间的一一对应关系。在设计基于计算机视觉的立体匹配方法时,必须解决下面 3 个方面的问题:基元选择、匹配准则和算法结构。

针对激光扫描测量的激光条纹匹配是一条单像素宽的激光条纹,所选择的匹配基元是像素点。匹配准则就是将关于物理世界的某些固有特性表示为匹配所必须遵循的若干规则,使匹配结果能真实反映景物的本来面目。下面简单描述一下在激光扫描测量系统中常用的匹配准则。

唯一性约束: 一般情况下,一幅图像上的像素点最多只能与另一幅图像上的一个像素点对应。

连续性约束: 物体表面一般都是光滑的,因此物体表面上各点在图像上的投影是连续的,其视差也是连续的。

极线约束: 一幅图像上的任一点,在另一幅图像的对应点只可能位于一条特定的被称为极线的直线上。

3.1 极线约束

已知图像上的像素点在计算机帧存中的坐标 (X_f, Y) , 根据(4)式~(7)式可以计算出在图像坐标系下理想的图像坐标 (X_u, Y_u) 。如果将 $(X_u, Y_u, 1)^T$ 记做 u , 将 $(x_v, y_v, z_v, 1)^T$ 记做 x_p , 根据(1)式~(3)式,可以推出理想的图像坐标 (X_u, Y_u) 和三维世界坐标系下的坐标 (x_v, y_v, z_v) 的关系为:

$$Z_c \times u = M \times x_p \quad (8)$$

式中, Z_c 是一个常量, M 是一个 4×4 的矩阵,称 M 为摄像机的投影矩阵。

图 3 为基于计算机视觉的双目传感器模型, I_1 和 I_2 是两个摄像机获取的图像,对于空间物体表面

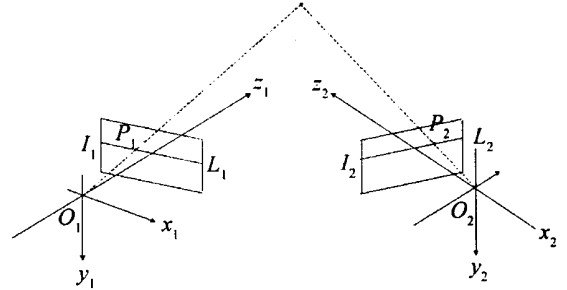


Fig. 3 The geometry relation of two cameras in computer vision

任意一点 P , P_1 和 P_2 是 P 点在两个图像上的投影点,称 P_2 为 P_1 的匹配点,反过来, P_1 是 P_2 的匹配点。根据极线约束理论, P_1 的对应点不需要在 I_2 整幅图像中搜索,它必然位于 I_2 上由 P_1 与两个摄像机的相对几何位置决定的直线 L_2 上,直线 L_2 就称为图像 I_2 上对应于 P_1 点的极线。同样, P_2 的对应点必然位于 I_1 上由 P_2 与两个摄像机的相对位置决定的直线 L_1 上,直线 L_1 就称为图像 I_1 上对应于 P_2 点的极线。下面给出求极线的方法^[3]。

将两个摄像机的投影方程写成如下形式:

$$Z_{c_1} u_1 = M_1 x_p = (M_{11}, m_1) x_p \quad (9)$$

$$Z_{c_2} u_2 = M_2 x_p = (M_{21}, m_2) x_p \quad (10)$$

式中, x_p 为空间某点 P 在世界坐标系下的齐次坐标; u_1, u_2 分别是 P_1 与 P_2 点的理想图像齐次坐标,将 M_1 与 M_2 矩阵左面的 3×3 部分记做 $M_{i1} (i = 1, 2)$, 右边的 3×1 部分记做 $m_i (i = 1, 2)$ 。

将 $x_p = (x_v, y_v, z_v, 1)^T$ 记做 $x_p = (x^T \ 1)^T$, 其中 $x = (x_v, y_v, z_v)^T$, 则(9)式和(10)式可展开为:

$$Z_{c_1} u_1 = M_{11} x + m_1 \quad (11)$$

$$Z_{c_2} u_2 = M_{21} x + m_2 \quad (12)$$

将(11)式和(12)式消去 x 得:

$$Z_{c_2} u_2 - Z_{c_1} M_{21} M_{11}^{-1} u_1 = m_2 M_{21} M_{11}^{-1} m_1 \quad (13)$$

由于上式中两边是三维向量,包含了 3 个等式,利用这 3 个等式消去 Z_{c_1} 与 Z_{c_2} 后,就可以得到一个与 Z_{c_1} 与 Z_{c_2} 无关的 u_1 和 u_2 的关系,这就是极线约束。

3.2 激光条纹匹配

根据上述的 3 个匹配准则,对于一幅图像上的每一个像素点,它对应于另一幅图像上的像素点一定在一条特定的极线上,同时它又在这条激光条纹上,所以,这条极线直线和这条激光条纹的交点就是所要寻求的匹配点。

一方面,由于经过细化之后的激光条纹是单像素宽的,此外,由于被测物体表面可能存在弱反射区和“遮挡”等复杂情形,从而导致图像中的激光条纹

存在复杂的“断点”现象,必须进行自动补断处理。鉴于以上两个方面的原因,采用贝塞尔曲线对细化之后的激光条纹进行拟合。如果从一幅图像上检出 $n+1$ 个点 $b_i (i=0, 1, 2, \dots, n)$, 有贝塞尔曲线:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n b_i B_{i,n}(t) \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (14)$$

式中, $B_{i,n}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$, $C_n^i = \frac{n!}{[i! (n-i)!]} (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 。对于左边图像上的任意一个像点,根据(13)式得到该像点在右边图像平面上的极线约束(满足直线方程),根据(14)式可以求出右边图像上的激光条纹的曲线拟合方程,联立(13)式和(14)式,可以求出左边图像上的任意一个像点的匹配点坐标,从而完成了整条激光条纹的匹配。

4 实验结果

实验所用为 $795\text{pixel} \times 596\text{pixel}$ 面阵 MTV-1881Ex CCD 摄像机。对一鼠标进行了扫描,图 4 为



Fig. 4 The point cloud of a mouse

经过匹配和三维重建的鼠标点云图像。实验结果表明,本实验室开发的激光扫描系统已达到像素级精度,重构物体图像与被测物体图像没有任何差别。

5 结论

采用激光和立体视觉测量相结合的反求测量方法,即基于计算机视觉的激光扫描测量,以摄像机针孔基础建立摄像机数学模型,从而建立整个测量传感器的模型,实现了一种基于一阶畸变模型的高精度的摄像机标定方法,接着对图像采集卡采集的图像进行前期的处理,包括图像的分割、滤波、细化,然后作者提出了一种基于极线约束的激光条纹匹配算法,对两个 CCD 拍摄的激光条纹图像进行匹配,从而重建出了激光扫描线数据。

参 考 文 献

- [1] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision. Proc IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, 1986: 364~374.
- [2] 张艳珍. 微机视觉系统相关理论及技术研究. 大连理工大学博士学位论文, 2001: 50~53.
- [3] 马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础. 北京: 科学出版社, 1998: 61~63.

(上接第 583 页)

种分类中有确定的位置,即一定是复杂像散且部分相干的。此外,对于确定的光束无论采用何种分类方法和表示形式(光束参数矩阵 Q 、二阶矩阵 V 等等),光束独立参数的个数是确定的,可以根据实际需要来进行选择。最后,应当指出的是,本文中对光束的分类对任意空间分布和完全、部分空间相干光束都是成立的,但不涉及光束的时间分布和时间相干性(多色光),对此需另作研究。

衷心地感谢德国柏林技术大学 Weber 教授对文中有关论题进行的有益讨论。

参 考 文 献

- [1] 彭愿洁, 吕百达. 激光技术, 2003, 27(5): 463~465.
- [2] Simon R, Sudarshan E C G, Mukunda N. Phys Rev, 1984, A29(6): 3273~3279.
- [3] Simon R, Mukunda N. J O S A, 1993, 10(1): 95~109.
- [4] 吕百达. 激光光学——激光束的传输变换和光束质量控制. 2 版. 成都: 四川大学出版社, 1992: 326.