

基于坐标测量机的轴向立体视觉测量方法研究^{*}

汪 玮, 卢科青, 王 文^{*}

(浙江大学 机械工程学系, 浙江 杭州 310027)

摘要:为了解决双目立体视觉测量过程中图像匹配计算量大、算法复杂、误匹配率高的问题,提出了一种轴向立体视觉测量方法。该方法由单个摄像机沿坐标测量机轴向先后捕捉被测物表面,利用同轴摄像机外极线相互平行的特性进行同源相点的逐个匹配,并根据视差原理反求三维坐标。着重论述了该方法的原理、同源点匹配及具体实现过程,并通过实验进行了验证,测量了一个塑料盘的边缘并进行了重建。研究结果表明该方法能提高匹配效率,减小误匹配几率,实现快速高效的非接触式测量。

关键词:轴向立体视觉;立体匹配;外极线约束;三坐标测量机

中图分类号:TH74;TP391.73

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2010)11-0017-04

Research on a measuring method of stereo vision along the optical axis based on coordinate measuring machines

WANG Wei, LU Ke-qing, WANG Wen

(Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to make it easy for stereo matching in the stereo vision measurement, a stereo vision method along the optical axis was proposed. Based on a coordinate measuring machine, pictures were captured by only one camera along an optical axis, matching was simplified by pairs of parallel Epipolar lines in this special structure and the 3D data was obtained by the stereo vision theory. Results of the experiment on measuring a plate prove that this method can finish the measurement swiftly and reduce the errors of matching.

Key words: stereo vision along an axis; stereo matching; epipolar line restriction; coordinate measuring machine

0 引 言

立体视觉模仿人类视觉的立体感知过程,从两个(或多个)视点观察同一景物,以获取在不同视角下的感知图象,再通过三角测量原理计算图像像素间的位置偏差(即视差)来获取景物的三维信息,它在逆向工程、工业测量、物体识别、机器人导航、虚拟现实、现场勘测等领域有着广阔的运用前景^[1-2]。

运用立体视觉方法对物体进行非接触式测量,具有原理清晰、设备简单、操作灵活和成本较低等优点,

适合测量各种不同质地的产品^[3]。该方法必须先从两幅或者两幅以上图像中找出属于同一个空间点的同源像对(即立体匹配)。由于受光照条件、摄像机特性、几何变形、噪声干扰等复杂因素影响,该过程十分困难。目前常用的图像匹配方法有基于灰度的匹配^[4]、基于特征的匹配^[5]、基于相位的匹配^[6]。这些方法通常计算量大,匹配精度不高,一般不单独使用,而是与极线几何关系结合,使同源点的搜索从一个像平面缩减为一条直线,使计算量大大减少。而一般的立体视觉测量系统中极线之间没有特殊的几何关系,极线计算过程复杂,匹配仍存在较大的奇异性。

收稿日期:2010-05-25

基金项目:浙江省自然科学基金重点资助项目(Z1090590)

作者简介:汪 玮(1984-),男,浙江湖州人,硕士研究生,主要从事逆向工程数字化测量方面的研究. E-mail: wangweizju@zju.edu.cn

通信联系人:王 文,男,副教授,博士,硕士生导师. E-mail: wangwn@zju.edu.cn

课题组在相关研究成果^[7]的基础上结合测量运用,提出一种基于坐标测量机 (Coordinate Measuring Machine, CMM) 的轴向立体视觉测量方法,它利用轴向立体视觉原理实现三维实体的测量,具有十分特殊的外极线特性,可以简化立体匹配过程。实验结果表明,该方法可以减小误匹配率,快速获取曲面边界。

1 轴向立体视觉测量原理

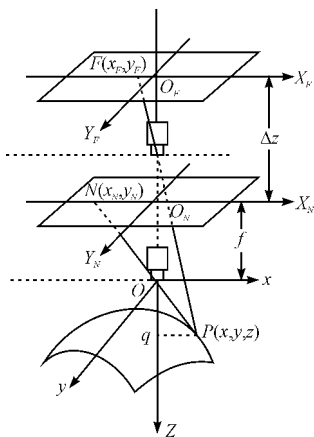


图1 轴向立体视觉测量原理示意图

采用轴向立体视觉方法获取物体表面三维信息的原理如图1所示,以 \$Oxyz\$ 坐标系为参考坐标系,其中 \$Oxy\$ 面水平, \$z\$ 轴垂直向下。远近两处摄像机光轴都与 \$z\$ 轴重合,镜头焦距都为 \$f\$,沿 \$z\$ 轴方向的间距 (也称基线距) 为 \$\Delta z\$。近端摄像机光心与参考坐标系中心 \$O\$ 点重合。\$O_N X_N Y_N\$ 面和 \$O_F X_F Y_F\$ 面分别是近、远端摄像机的成像平面,它们都与光轴垂直,其中 \$O_N\$ 和 \$O_F\$ 分别是光轴与成像面的交点,也是两个像平面的中心点 (主点)。在 \$O_N X_N Y_N\$ 和 \$O_F X_F Y_F\$ 面上分别建立与 \$x, y\$ 轴同向的坐标轴,形成二维的图像坐标系。根据透视投影原理,被测面上一点 \$P(x, y, z)\$ 必通过近端摄像机的光心投影到像平面 \$O_N X_N Y_N\$ 上,设该像点的图像坐标为 \$N(x_N, y_N)\$, \$q\$ 是 \$p\$ 点在 \$z\$ 轴上的投影点,由图易得 \$\triangle OO_N N \sim \triangle OPD\$, 则 \$P(x, y, z)\$ 和 \$N(x_N, y_N)\$ 的坐标关系满足:

$$\begin{cases} x_N = \frac{f}{z}x \\ y_N = \frac{f}{z}y \end{cases} \quad (1)$$

同理 \$P(x, y, z)\$ 通过远端摄像机光心投影到像平面 \$O_F X_F Y_F\$ 上,它与投影点图像坐标 \$F(x_F, y_F)\$ 的关系为:

$$\begin{cases} x_F = \frac{f}{z + \Delta z}x \\ y_F = \frac{f}{z + \Delta z}y \end{cases} \quad (2)$$

联立式(1)、式(2)可得:

$$\begin{cases} x = \frac{x_N x_F \Delta z}{f(x_N - x_F)} \\ y = \frac{y_N y_F \Delta z}{f(y_N - y_F)} \\ z = \frac{x_F \Delta z}{(x_N - x_F)} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,根据被测点在远近图像平面上产生的两个像点 (也称为同源像点) 的二维图像坐标、基线距 \$\Delta z\$、焦距 \$f\$ 就可以反求出被测点的三维坐标值。

由于使用两个摄像机会出现远端摄像机视线被近端摄像机遮挡的情况,而且受摄像机参数和安装条件的限制,很难保证两个摄像机严格同轴、参数一致。通过用一个摄像机沿轴向分别拍摄可以避免上述问题。

2 轴向立体视觉同源点匹配

2.1 极线几何关系

从前后两幅图像中找到同源点 (也称立体图像匹配) 是轴向立体视觉测量的关键。由于受照明条件、被测物表面的反射特性、透镜畸变、环境噪声等诸多因素的影响,直接对前后两幅图像提取特征信息进行无歧义匹配是十分困难的^[8]。引入外极线 (Epipolar line) 约束方法则可以简化匹配^[9]。

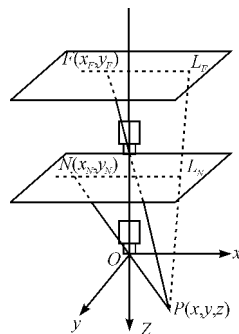


图2 外极线约束

极线几何关系如图2所示,空间点 \$P\$ 在远近端成像面上的投影点分别为 \$F\$ 和 \$N\$,它与远近端摄像机光心的连线一起决定一个平面,称为外极平面,该平面与远端成像面相交于直线 \$L_F\$,它被称为远端成像面上对应于 \$N\$ 点的外极线。而外极面与近端成像面相交所

得直线 L_N 则是近端成像面上对应于 F 点的外极线。 L_F 和 L_N 互为共轭极线对。如果已知 N 点的位置,则它在远端成像面上同源像点必然在外极线 L_F ,反之亦然。由于轴向立体视觉方法中成像平面间存在特殊的平行关系,共轭极线对也必然相互平行,并且由于像平面中心都落在光轴上,所有的外极线必然都经过各自成像面的中心点。这样同源点的匹配搜索就可以从整幅图像压缩到一条与之具有特殊几何关系的外极线上。

2.2 同源点匹配方法

利用上述的极线几何特性进行同源点匹配的方法如图 3 所示。由于摄像机在近端时的视场比在远端时小,近端像平面中的内容必然包含在远端像平面中,反之则不然。所以匹配时,以近端像平面中的边缘特征为基准。首先在近端像面图 3(a)上过中心点 O_N 作与 $O_N X_N$ 轴夹角为 α_i 的射线,它与边界特征交于点 $P_N(x_i, y_i)$ 。根据轴向立体视觉共轭极线相互平行且过中心点的特性,在图 3(b)过中心点 O_F 作与水平轴成 $O_F X_F \alpha_i$ 角的射线 $O_F P_F$, $O_F P_F$ 即为 $P_N(x_i, y_i)$ 在远端成像面的外极线,它与边界特征交点 P_F , P_F 即为 P_N 的匹配点。通过给 α_i 一个增量 $\Delta\alpha$,继续上述的匹配过程,直到整个圆周上的点都完成匹配。

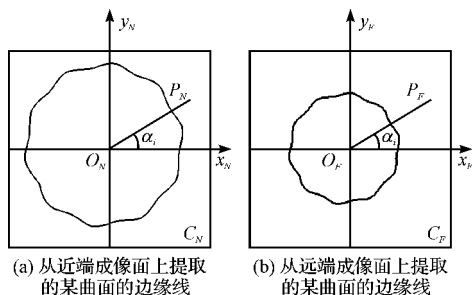


图 3 轴向立体视觉同源点匹配方法

3 单摄像机轴向立体视觉实现方法

基于 CMM 的单摄像机轴向立体视觉测量方法如图 4 所示,将摄像机安装在 CMM 的 Z 轴上,并保持镜头水平。先用摄像机在离被测曲面较近的位置摄取图像,然后利用 CMM 保持 X 、 Y 轴坐标值不变,驱动 Z 轴向上移动一个基线距 Δz 后,在远端位置再摄取一次图像,利用这两幅图像的视差来计算被测面的三维坐标。

使用该方法进行测量的具体流程可以大致分为以下几个步骤:

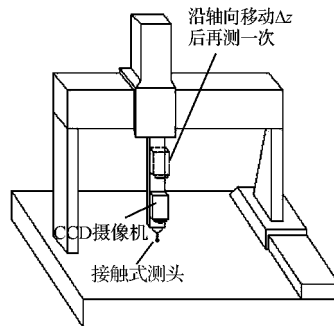


图 4 轴向立体视觉方法

(1) 摄像机标定。摄像机图像中心、焦距、像素物理尺寸等摄像机成像模型中的一些参数,需要通过实验和计算确定,该过程称为摄像机标定。利用文献[10-11]提出的方法,使用二次曲线(椭圆)作为标靶,对摄像机的内外部参数进行标定。

(2) 图像获取。保持 CMM 的 X 、 Y 轴坐标值不变,分别在 Z 轴的不同位置拍摄同一被测物,并记录沿轴向移动的距离 Δz 。

(3) 边缘提取。利用文献[12-13]的改进 Steger 图像边缘检测算法,提取图像中的边界特征用于匹配,对由该方法获得的不封闭边缘线段,通过插值等方法将其连接,形成一个完整的边缘。

(4) 立体匹配与深度计算。对获取的边缘特征,按外极线约束方法进行匹配。并按式(3)反求三维坐标值。由于在匹配时对边缘进行了离散采样,计算所得结果也是空间中一些离散点。通过最小二乘法等对这些点进行插值或逼近,拟合出连续变化的三维边界线,就能获得边界的粗测模型。

将粗测边界模型输入 CMM 中的自动测量规划软件中,可以据此生成定位信息和检测规划,帮助 CMM 实现对产品的自动定位,指导 CMM 使用接触式测头进行精确测量,提高测量的效率和精度。

4 实验研究

本研究以课题组自主研发的 BQC654 型测量机为测量平台,配置 PENTAX C2514-M 型长焦镜头,通过 JAI CV-A50 型摄像机采集图像信号存入计算机,并进行处理和分析,以实现轴向立体视觉测量。

实验对一塑料盘的边缘进行了测量。摄像机在近端拍摄的结果如图 5(a) 所示,沿轴向移动 $\Delta z = 20$ cm 后拍摄的结果如图 5(b) 所示。

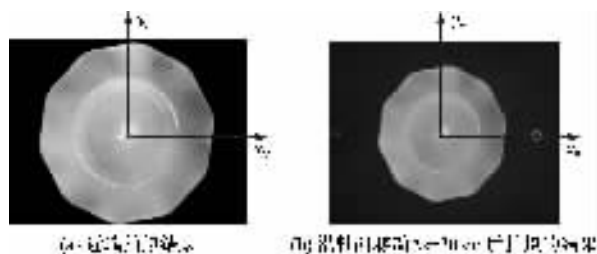


图 5 图像获取

对所获得图像采用 Steger 方法提取边缘,经过插值处理后的边缘特征如图 6 所示。通过匹配计算后所得的空间离散点,如图 7(a)所示。通过最小二乘法对这些点进行拟合,得到的被测自由曲面三维边界,如图 7(b)所示。

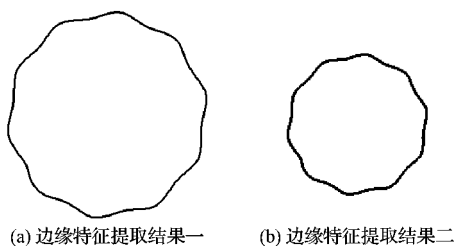


图 6 提取的边缘特征

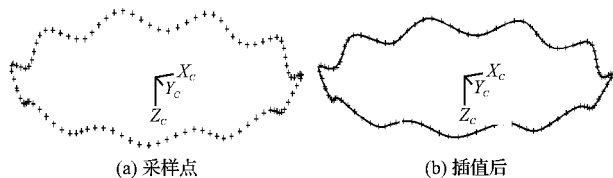


图 7 被测量曲面边缘线

5 结束语

本研究提出了一种基于 CMM 的轴向立体视觉测量方法,并进行了理论分析和实验验证,其结果如下:

(1) 将摄像机沿轴向排列获取视差图像,能实现空间点的非接触测量,原理简单。

(2) 轴向立体视觉系统中共轭极线对相互平行且分别过图像中心点,利用这一特性可以简化匹配过程,使误匹配几率减小,加快运算速度。但该方法目前只适用于较明显的边界特征匹配,曲面内部点的匹配仍存在奇异性,可以研究通过人工划线、增强特征的方法实现匹配。

(3) 利用 CMM 由单个摄像机沿 Z 轴拍摄,可以保证摄像机严格同轴,参数一致,并且避免遮挡,减少

标定工作。

(4) 由通过课题组搭建的轴向立体视觉测量系统对自由曲面边界进行测量的结果可知,该方法可以快速获取自由曲面边界,对后续的曲面重构具有重要意义。

参考文献 (References):

- [1] 游素亚,徐光佑. 立体视觉研究的现状与进展[J]. 中国图像图形学报,1997,2(1):16-22.
- [2] 周宏甫,张宗宝. 排爆机器人双目立体视觉系统设计[J]. 机电工程技术,2008,37(3):27-29.
- [3] 张国雄. 坐标测量技术发展方向[J]. 红外与激光工程,2008,37(S1):1-5.
- [4] LUIGI D S, MASSIMILIANO M, STEFANO M. A fast area-based stereo matching algorithm [J]. **Image and Vision Computing**,2004,22(12):983-1005.
- [5] GOULERMAS J Y, LIATISIS P. A new parallel feature-based stereo-matching algorithm with figural continuity preservation based on hybrid symbiotic genetic algorithms [J]. **Pattern Recognition**,2000,33(3):529-531.
- [6] ZHOU J, XU Y, YANG X K. Quaternion wavelet phase based stereo matching for uncalibrated images [J]. **Pattern Recognition Letters**,2007,28(12):1509-1522.
- [7] 王 文,卢科青,陈子辰. 一种基于轴向立体视觉的逆向测量方法与装置: 中国,发明专利,200710069978 [P]. 2008-01-23.
- [8] MOTAVALLI S. Review of reverse engineering approaches [J]. **Computers & Industrial Engineering**,1998,35(1-2):25-28.
- [9] 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,1997.
- [10] WEI G Q, MA S D. Implicit and explicit camera calibration: theory and experiments [J]. **IEEE Trans. PAMI**,16(5):1994-2001.
- [11] 杨长江,孙凤梅,胡占义. 基于平面二次曲线的摄像机标定[J]. 计算机学报,2000,23(5):541-547.
- [12] STEGER C. Unbiased Extraction of Curvilinear Structures from 2D and 3D Images [D]. Fakultät für Informatik, Technische Universität München,1998.
- [13] 胡 坤,周富强,张广军. 一种快速结构光条纹中心亚像素精度提取方法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(10):1326-1329.

[编辑:张 翔]