

大尺度三维几何尺寸立体视觉测量系统实现

张旭苹 汪家其 张益昕 王 顺 谢 飞

(南京大学光通信工程研究中心, 江苏 南京 210008)

摘要 基于立体视觉的大尺度三维几何尺寸测量技术是对外形不规则的大型物体进行几何量测量的有效方法。与传统的视觉测量技术不同,大尺度视觉测量的精度随测量距离的增加而迅速下降,同时大尺度空间下照明条件难以控制,也使得测量变得不稳定。因此如何在大测量尺度的前提下提高测量精度成为这一领域的研究难点。从立体视觉测量系统的原理出发,分析了影响系统精度的各种因素,将相位一致性变换与极线约束条件引入结构光光条中心提取之中,显著提高了图像分析的精度。研制了测量系统的样机并给出了实验结果,现场测试表明该系统可以有效地保证大尺度条件下的测量精度。

关键词 机器视觉;大尺度立体视觉测量;相位一致性变换;极线约束

中图分类号 TP391.41 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0315002

Large-Scale Three-Dimensional Stereo Vision Geometric Measurement System

Zhang Xuping Wang Jiaqi Zhang Yixin Wang Shun Xie Fei

(Institute of Optical Communication Engineering, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210008, China)

Abstract Large-scale three-dimensional vision measurement based on stereo vision is an effective and flexible method for precise space coordinates measurement when the object's shape is irregular and the size is relatively large. Different from traditional methods, the accuracy of large-scale vision measurement degrades with distance rapidly. Meanwhile, it is hard to control the illumination under large-scale condition, which also makes the measurement quite unsteadily. Thus how to maintain the accuracy under large-scale situation becomes the key technique problem to be solved. The principle of the vision measurement system is introduced. The factors which affect the measuring accuracy are analyzed. Structured light extraction method with phase congruency and epipolar constraint is proposed which can increase the image analysis accuracy obviously. A prototype is developed and the experimental results show that the proposed method is of high accuracy and large measuring range.

Key words machine vision; large-scale stereo vision measurement; phase congruency transformation; epipolar constraint

OCIS codes 150.0155; 150.1488; 150.4232

1 引 言

大尺度三维几何尺寸测量技术可以对外形不规则的大型物体进行几何量的精确测量,是现代测试技术的一个重要分支。该技术已被广泛地应用于国民经济的各个领域,例如制造工业的在线检测^[1,2]、虚拟现实^[3,4]、逆向工程^[5]和文物保护^[6]等。所谓大尺度,传统意义上是指被测对象的尺寸超过 500 mm^[7]。然而随着制造业工艺水平的不断提高以及

相关技术应用领域的不断扩展,许多情况下被测对象的尺寸远远大于 500 mm。例如汽车制造工业、重型机电设备制造与安装、古建筑与雕塑保护等,其被测对象的尺寸往往达到几米甚至几十米。由于这些被测对象尺寸大、移动困难,传统的测量手段及设备很难对其进行高效率的全尺寸测量,这就对大尺度三维几何尺寸测量提出了新的要求。一方面,测量系统的量程应具有较大的伸缩性以适应不同的应

收稿日期: 2011-07-14; **收到修改稿日期**: 2011-10-13

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK2009257)和江苏省普通高校研究生科研创新基金(CX10B_020Z)资助课题。

作者简介: 张旭苹(1962—),女,教授,博士生导师,主要从事光通信网络的监测与故障定位、分布式光纤传感技术、光通信系统关键器件与组件等方面的研究。E-mail: xpzhang@nju.edu.cn(中国光学学会会员号:S040420707S)

用背景,同时在全量程内又能够保证足够高的测量精度和测量效率。许多传统的测量方法往往无法同时兼顾量程、精度和测量效率,随着量程的增大,测量精度和测量效率会迅速下降^[8]。另一方面,由于大尺度测量的场地环境难以控制,测量结果的精度很容易受到外部环境的影响。因此测量系统应具有足够的稳健性。

目前国内国外的大尺度三维几何尺寸测量方法主要包括以下几个类别^[8]:三坐标测量机、经纬仪测量系统、全站仪测量系统、关节式坐标测量机、室内全球定位系统(GPS)、激光跟踪测量系统、声学测距系统、激光测距系统和计算机视觉测量系统。其中传统的三坐标测量机、全站仪、关节式坐标测量机和激光跟踪系统均属于接触式测量,需要对探针或标志物的尺寸进行补偿,且无法测量柔性材料。在测量精度方面,三坐标测量机的测量精度最高,可以达到微米量级;声学测距精度最低,通常为十几厘米;其余各种技术的测量精度往往与测量范围关系密切,通常为测量范围的0.001%~0.01%。从测量过程上看,仅有基于计算机视觉的测量系统可以实现非逐点测量,因此该方法的测量速度在所有方法中是最快的。特别是对于大尺寸被测物体,由于总测量点数巨大,逐点测量的工作强度大、效率低、耗时长,此时视觉测量技术的优势就变得十分明显。同时得益于数字图像处理相关硬件与算法的发展,视觉测量方法在稳健性和设备的便携化方面具有先天的优势。

基于计算机视觉的大尺度三维几何尺寸测量方法目前在国外的的发展已经比较成熟并已有种类众多的商用化产品^[9~12]。国内天津大学^[13]、燕山大学^[14]等许多院校和研究机构对这一领域进行了研究,并在许多领域得到了应用。但总体的研究水平尤其是实际应用水平与国外仍有很大差距,主要体现在其测量范围仍处于数百厘米至数米的量级,一旦超过这一范围,则测量精度难以保证。本文从视觉测量系统的原理出发,分析了影响系统精度的各种因素并指出了提高测量精度的途径。将相位一致性变换与极线约束条件引入了结构光光条中心提取中,从而有效地保证立体视觉测量系统在大尺度条件下的测量精度。

2 立体视觉测量原理与误差分析

双目立体视觉测量基于视差原理,由两台以上的摄像机获取被测物体的三维几何信息。其测量原

理如图1所示。设左右两侧的图像坐标系分别为 $O_1x_1y_1$ 和 $O_2x_2y_2$,三维空间中一点 P 通过镜头的聚焦在图像传感器上成像,其像点 P_1 、 P_2 在图像坐标系下的坐标分别为 (X_1, Y_1) 和 (X_2, Y_2) 。点 o_1 和 o_2 分别为左右两侧摄像机镜头的光学主点。为了简化分析过程,设双目摄像机水平摆放。以左侧摄像机镜头光学主点 o_1 为测量坐标系原点建立三维测量坐标系 xyz ,点 P 处于平面 oxz 上。线段 o_1o_2 称为双目立体视觉测量系统的基线,其长度为 B 。若摄像机的有效焦距分别为 f_1 、 f_2 ,光轴 O_1o_1 、 O_2o_2 与测量坐标系 x 轴的夹角分别为 α_1 、 α_2 ,空间点 P 与摄像机光学中心的连线与两摄像机光轴的夹角分别为 ω_1 、 ω_2 ,则由空间几何关系可以得到空间点 P 在测量坐标系下的三维坐标:

$$\begin{cases} x = \frac{B \cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \\ y = Y_1 \frac{z \sin \omega_1}{f_1 \sin(\omega_1 + \alpha_1)} = Y_2 \frac{z \sin \omega_2}{f_2 \sin(\omega_2 + \alpha_2)}, \\ z = \frac{B}{\cot(\omega_1 + \alpha_1) + \cot(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases} \quad (1)$$

其中夹角 ω_1 、 ω_2 可以由像点 P_1 、 P_2 在像平面上的 x 坐标 X_1 、 X_2 与焦距 f_1 、 f_2 比值的反正切函数得到:

$$\begin{cases} \omega_1 = \arctan(X_1/f_1) \\ \omega_2 = \arctan(X_2/f_2) \end{cases} \quad (2)$$

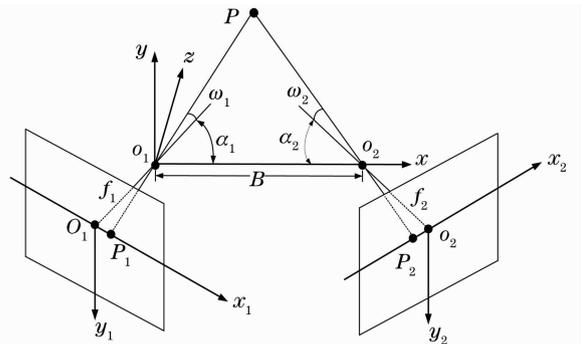


图1 双目立体视觉成像原理

Fig.1 Principle of binocular vision

对于双目立体视觉测量系统,测量误差主要来源于系统参数标定和实际测量两个方面^[15]。其中系统参数标定已经有许多成熟的解决方案,相对标定精度可以达到0.01%以上^[16,17],其对于测量的影响基本可以忽略^[18]。在精确标定系统参数的前提下,影响测量精度的主要因素是实际测量中产生的误差。 P 点在三维空间下总的测量误差由三个方向误差的均方和得到^[18]:

$$\Delta = \sqrt{(\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2}, \quad (3)$$

其中各个方向的误差可以通过对(1)式和(2)式求偏导得到：

$$\Delta x = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial X_1} \delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial X_2} \delta X_2\right)^2}, \quad (4)$$

$$\Delta y = \sqrt{\left(\frac{\partial y}{\partial X_1} \delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial X_2} \delta X_2\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_1} \delta Y_1\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial Y_2} \delta Y_2\right)^2}, \quad (5)$$

$$\Delta z = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial X_1} \delta X_1\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial X_2} \delta X_2\right)^2}. \quad (6)$$

各偏导系数为

$$\begin{cases} \frac{\partial x}{\partial X_1} = -\frac{z^2}{Bf_1} \frac{\cot(\omega_2 + \alpha_2)}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \cos^2 \omega_1 \\ \frac{\partial x}{\partial X_2} = -\frac{z^2}{Bf_2} \frac{\cot(\omega_1 + \alpha_1)}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \cos^2 \omega_2 \end{cases}, \quad (7)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial z}{\partial X_1} = \frac{z^2}{Bf_1} \frac{\cos^2 \omega_1}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial z}{\partial X_2} = \frac{z^2}{Bf_2} \frac{\cos^2 \omega_2}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \\ \frac{\partial y}{\partial X_1} = \frac{yz}{Bf_1} \frac{\cos^2 \omega_1}{\sin^2(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial y}{\partial X_2} = \frac{yz}{Bf_2} \frac{\cos^2 \omega_2}{\sin^2(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases}, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial Y_1} = \frac{z}{f_1} \frac{\sin \omega_1}{\sin(\omega_1 + \alpha_1)} \\ \frac{\partial y}{\partial Y_2} = \frac{z}{f_2} \frac{\sin \omega_2}{\sin(\omega_2 + \alpha_2)} \end{cases}. \quad (9)$$

由(3)~(9)式可知,若对双目图像中像点坐标的分析精度相同,即 $\delta X_1 = \delta X_2 = \delta Y_1 = \delta Y_2 = \delta x$,则取 $\alpha_1 = \alpha_2 = 45^\circ$ 时,总体测量误差最小。同时由于被测物体通常位于图像的中心区域,为了进一步简化分析,不妨设 $y = 0$, $\omega_1 = \omega_2 = 0^\circ$ 。在此基础上令 $f_1 = f_2 = f$,则(3)式可简化为

$$\Delta = \frac{4z^2}{Bf} \delta x. \quad (10)$$

由(10)式可知,立体视觉测量的误差 Δ 与测量距离 z 的平方成正比。对于大尺度测量这意味着精度随距离增加而迅速下降。因此必须通过专门的设计保证测量系统在大尺度条件下的测量精度。根据(10)式可以归纳出以下几个影响测量精度的关键因素。

1) 系统机械结构。基线长度 B 由测量系统的结构设计决定。由于 B 处于误差表达式的分母上,因此基线长度 B 越大则总测量误差越小。通常希望基线长度 B 尽可能大,然而过长的基线将带来机械固定上的困难,从而使系统固有参数不再恒定,这将给系统引入额外的误差。

2) 镜头。镜头影响系统测量精度的途径包括三个方面:①镜头的焦距 f 。与基线长度 B 一样,镜头的焦距 f 处在误差表达式的分母上,因此使用长焦镜头可以获得较低的测量误差,但是过长的焦距也会带来镜头景深过短的问题。②镜头的分辨率,来自物体的光线通过镜头会聚在图像传感器上。实际镜头的像点总是形成具有一定直径的弥散斑,从而引起成像的模糊。当弥散斑直径大于图像传感器像素尺寸时会降低图像分析的精度,从而增加测量误差。③镜头畸变。实际的镜头总存在光学畸变,理想像点与实际像点之间存在差异。主要的畸变类型有三种:偏心畸变、薄棱镜畸变和径向畸变^[18]。由于目前光学系统的设计、加工以及安装都可以达到相当高的精度,所以对于专业相机通常仅考虑径向畸变即可。其数学表达式为

$$\begin{cases} X' = X(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \\ Y' = Y(k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 + \dots) \end{cases}, \quad (11)$$

式中 (X, Y) 为图像坐标系下的理想像点坐标, (X', Y') 为实际观测得到的像点坐标, r 为像点到图像坐标系原点的极径, k_1, k_2, k_3, \dots 为径向畸变系数。通过参数校准,可以对畸变图像进行矫正^[16]。

3) 图像传感器。图像传感器将拍摄到的图像转换成电信号供显示和处理,是成像装置中最重要的组成部件。图像传感器的参数与像点的定位精度 δx 直接相关:

$$\delta x = s \frac{w}{n}, \quad (12)$$

式中 w 为图像传感器在某一方向上的尺寸,分辨率 n 表示图像传感器在该方向上的像素数, s 为一比例系数,由图像处理算法决定。由于过小的尺寸 w 将造成图像传感器感光能力下降,通常情况下希望图像传感器具有尽可能高的分辨率以提高视觉测量的精度。

4) 图像处理算法。一方面图像处理算法必须具有足够的稳健性。由于大尺度条件下照明条件难以控制,背景光的变化很容易干扰图像处理的结果,

所以特征点的提取容易失败。另一方面由(12)式可知,图像处理算法决定了比例系数 s 的大小。在图像传感器参数已定的情况下,通过将图像处理算法的精度提高到亚像素级,从而令比例系数 s 小于 1,可以显著提高特征点在图像上的定位精度。

由于机械结构、镜头以及图像传感器参数的调整范围有限,所以图像处理算法成为提高测量系统精度的主要途径。为了提高算法的稳健性,许多文献在双目立体视觉的基础上引入了线结构光作为辅助,可以显著提高算法在强背景光干扰下的稳定性^[19,20],然而这些文献在光条的处理上仅达到了像素级精度。文献[21]将基于斜率的差值算法引入了光栅边缘的匹配中,但该算法的应用场景仅针对小尺寸条件下的光栅投影测量,并不适合大尺度条件下的应用。考虑到常见的成像系统焦距与图像传感器尺寸在同一数量级,若图像处理精度为像素量级,则对于百万像素分辨率的图像传感器取 $f/\delta x = 1000$ 是比较合理的。根据(10)式可以得到图 2 所示的立体视觉测量精度随基线长度 B 以及被测物体距离 z 的变化曲线。可以看到即使基线长度达到 2 m,当测量距离达到 10 m 以上时,测量误差也已经超过了 0.2 m,难以满足应用的需求。要解决这个问题,就必须实现对线结构光光条的亚像素级精度的提取与匹配。

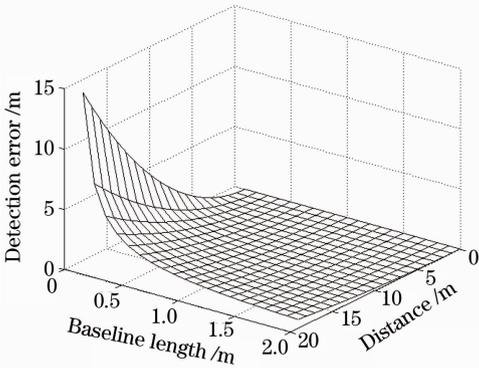


图 2 测量误差随基线长度及测量距离变化趋势
Fig. 2 Measurement error versus baseline length and detection distance

3 线结构光光条提取与匹配算法

3.1 基于相位一致性增强的光条中心提取算法

为了实现基于结构光的三维检测,必须准确提取出结构光光条的中心。传统的光条提取方法主要有灰度阈值法、极值法、梯度阈值法、可变方向模板法、局部曲线拟合法以及 Hessian 矩阵法等^[22~28]。

它们主用从图像的灰度值出发,分析光条图像灰度及其 1 阶、2 阶导数特性。因此这些算法结果均会受到图像灰度值变化的影响,例如照明强度的变化、观测视角的不同、被测物体表面特性的差异等均会造成光条灰度的不一致,同时由于在实际应用现场图像的信噪比较差,所以传统方法的提取精度很容易受到噪声的干扰。

与灰度特征不同,相位一致性是一种全新的图像特征评价方法,特别适合处理具有对称结构的图像特征且几乎不受图像亮度或对比度变化的影响。同时由于在计算过程中对噪声水平进行了估计和处理,该方法对噪声具有很强的稳健性^[27]。二维图像相位一致性计算公式为

$$P_{C_2}(x) = \frac{\sum W(x) \langle A_n(x) \Delta \Phi_n(x) - T \rangle}{\sum A_n(x) + \epsilon}, \quad (13)$$

式中 ϵ 是为避免除数为零引入的常量; $W(x)$ 为相位一致性加权系数,用于扩展滤波器频带; T 为经过计算估计出来的噪声干扰的阈值,用于消除噪声对相位一致性计算的影响; $A_n(x)$ 为第 n 阶尺度上的幅值; 运算符 $\langle \rangle$ 表示如果其中的值为正,则等于值本身,否则为 0; $\Delta \Phi_n(x)$ 表示相位偏离函数,其表达式为

$$\Delta \Phi_n(x) = \cos[\Phi_n(x) - \Delta \Phi_{\text{mean}}(x)] - |\sin[\Phi_n(x) - \Phi_{\text{mean}}(x)]|, \quad (14)$$

式中 $\Phi_{\text{mean}}(x)$ 为所有尺度下 $\Phi_n(x)$ 的平均值。 $A_n(x)$ 和 $\Phi_n(x)$ 分别为

$$\begin{cases} A_n(x) = \sqrt{[I(x) * M_n^c]^2 + [I(x) * M_n^o]^2} \\ \Phi_n(x) = \arctan[I(x) * M_n^c / I(x) * M_n^o] \end{cases}, \quad (15)$$

式中 $I(x)$ 为原始灰度图像, M_n^c 和 M_n^o 分别为第 n 个尺度上的奇、偶正交 Log-Gabor 滤波器函数^[27]。利用(13)式对原始灰度图像进行计算,得到对应像素在某一方向上的相位一致性。由于通常并不知道图像中特征的方向,所以需要在数个不同方向上对图像进行计算,其对应的相位一致性系数为

$$M = \frac{1}{2} [c + a + \sqrt{b^2 + (a - c)^2}], \quad (16)$$

$$\begin{cases} a = \sum [P_C(\theta) \cos \theta]^2 \\ b = 2 \sum [P_C(\theta) \cos \theta] [P_C(\theta) \sin \theta] \\ c = \sum [P_C(\theta) \sin \theta]^2 \end{cases}, \quad (17)$$

$P_C(\theta)$ 表示在 θ 方向上使用(13)式计算得到的相位一致值。(17)式中的求和项包含了各个方向上的相

位一致值。(16)式和(17)式所示的变换过程称为相位一致性变换,其输出为一幅新的灰度图像,各像素的灰度值表示了相位一致性的高低。由于考虑了原始图像在各个方向上的相位一致值,该算法可以实现与方向无关的相位一致性变换。

常见的基于相位一致性变换的图像特征提取算法往往通过相位一致性计算凸显图像的某一种特征,之后通过简单的阈值判断对变换后的图像进行分割,从而完成特征提取^[27]。本文所提出的基于相位一致性变换的光条提取算法与这些算法不同。利用相位一致性变换对原始光条图像进行增强,得到一幅突出了光条特征的新灰度图像,再采用基于灰度的算法对结构光光条的中心进行提取。设 r_x, r_y, r_{xx}, r_{xy} 和 r_{yy} 分别为二维高斯函数 $G(x, y)$ 的 1 阶偏导数、2 阶导数和 2 阶偏导数与二维图像 $f(x, y)$ 的卷积,则二维图像 $f(x, y)$ 的 Hessian 矩阵为^[28]

$$\mathbf{H}(x, y) = \begin{bmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

Hessian 矩阵最大特征值对应的特征向量指示了光条法线的方向,用 (n_x, n_y) 表示。以点 (X_0, Y_0) 为基准点,则对该点处光条图像特征的亚像素修正为

$$(\Delta X_0, \Delta Y_0) = (tn_x, tn_y), \quad (19)$$

式中 t 的表达式为

$$t = -\frac{r_x n_x + r_y n_y}{r_{xx} n_x^2 + 2r_{xy} n_x n_y + r_{yy} n_y^2}. \quad (20)$$

若 ΔX_0 和 ΔY_0 均处于正负 1/2 pixel 内,且 (n_x, n_y) 方向的 2 阶导数大于指定的阈值,则该点为光条中心,其修正后的坐标为 $(X_0 + \Delta X_0, Y_0 + \Delta Y_0)$ 。其中阈值的选取与光条整体灰度值相关,通常选取该阈值为光条整体灰度值的 5%~10%。高斯函数的引入使得这一方法具有很好的抗噪声特性,同时由于使用光条法线方向引导中心坐标的提取,其精度可以稳定地达到亚像素级。

3.2 光条图像的亚像素级匹配

提取出光条中心坐标后,还必须对双目图像中对应的光条像素进行匹配。使用极线约束条件简化光条匹配的过程。对于双目立体视觉,所谓的极线约束是指:对于左侧图像上一点 m_L ,若 m'_L 是该点在左侧图像坐标系下的齐次坐标,则其对应的匹配点必然在右侧图像中的直线 $l_{m_R} = \mathbf{F}m'_L$ 上,其中 \mathbf{F} 称为双目图像的基础矩阵,其系数可以通过标定得到^[28]。将双目摄像机水平摆放,且线结构光光平面近似垂直入射,则图像上的线结构光光条必然与极线不平行,在这一条件下获得的双目图像如图 3 所

示。对于左侧图像中的光条上的特征点 m_L ,其必然遵循如下的双目立体匹配准则:对于左侧光条上一点 m_L ,其在右侧图像中的匹配点 m_R 必为其对应极线 l_{m_R} 与右侧光条的交点。这样在引入线结构光光条约束后,立体匹配被转换为——对应的关系,从而基本上杜绝了误匹配的发生,有效提高了算法在背景光干扰下的稳定性。

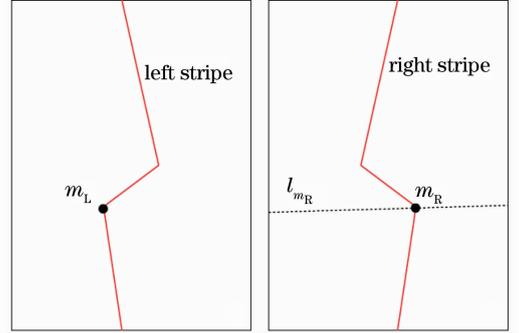


图 3 基于极线与光条约束的特征点匹配

Fig. 3 Match of characteristic points based on epipolar line and laser stripe constraints

由于数字图像的像素是离散的,通常极线并不会直接与某一坐标为整数值的像素点相交,而是会从两个像素点中间穿过。针对这种情况,需要计算光条上各点到极线的距离,若光条上某点的坐标为 $m=(u, v)$,极线 l 的方程为 $ax + by + c = 0$,则该点到极线的距离为

$$d(m, l) = \frac{au + bv + c}{\sqrt{a^2 + b^2}}. \quad (21)$$

(21)式表示的是包含方向信息的距离。如图 4 所示,选出距极线距离最短、符号互异的两个整数坐标像素点 A 和 B。通过在局部拟合直线 l_{AB} ,并求解极线与直线 l_{AB} 的交点,可以获得匹配点的亚像素精度坐标。

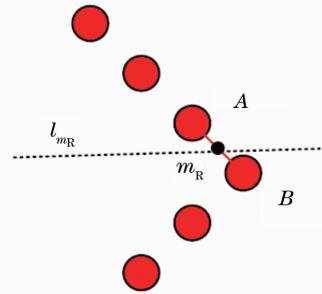


图 4 亚像素级交点坐标提取

Fig. 4 Sub-pixel level coordinate point extraction

4 实验与结果

设计的立体视觉测量系统的结构如图 5 所示。

系统包括由两台高分辨率摄像机组成的视觉传感器、线结构光激光器和搭载激光器进行扫描的电机平台。在计算机控制电机转台完成转动后,将发出触发信号控制图像传感器依次记录扫描过程中激光光线的变化,并将数据传给计算机供分析。计算机根据相应的数学模型,从匹配的二维图像中恢复出三维空间坐标从而实现对被测物体三维几何尺寸的非接触测量。

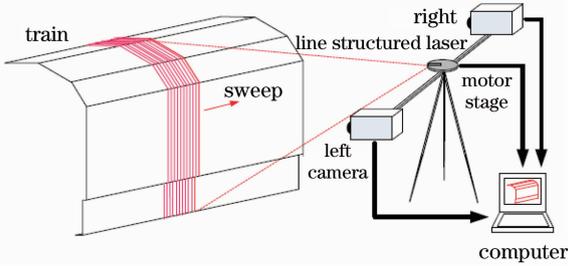


图 5 立体视觉测量系统结构

Fig. 5 System structure of stereo vision detection

搭建样机如图 6 所示。其中基线长度为 1400 mm。图像采集装置由两台 Image Source 公司 DMK41BG2. H 型工业相机构成,其分辨率达到 $1280 \text{ pixel} \times 960 \text{ pixel}$,单像素尺寸为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$ 。镜头为 Computar 公司的 M0814-MP2 百万像素镜头,焦距为 8 mm。通过标定得到了视觉测量系统的参数,如表 1 所示。

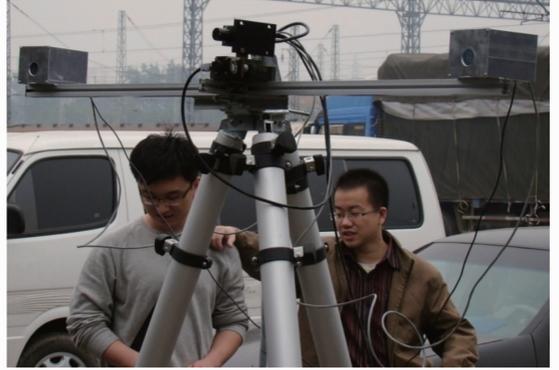


图 6 样机外观

Fig. 6 Image of prototype

表 1 视觉测量系统参数

Table 1 Parameters of vision measurement system

| Parameter | Value |
|--|----------|
| Focal length along the x direction of the left camera /mm | 8.208 |
| Focal length along the y direction of the left camera /mm | 8.188 |
| Center coordinate of the left camera along the x direction /pixel | 680.9 |
| Center coordinate of the left camera along the y direction /pixel | 465.6 |
| Distortion coefficient of the left camera k_1 | -0.9998 |
| Distortion coefficient of the left camera k_2 | 0.3849 |
| Focal length along the x direction of the right camera /mm | 8.225 |
| Focal length along the y direction of the right camera /mm | 8.224 |
| Center coordinate of the right camera along the x direction /pixel | 627.0 |
| Center coordinate of the right camera along the y direction /pixel | 453.8 |
| Distortion coefficient of the right camera k_1 | -0.0792 |
| Distortion coefficient of the right camera k_2 | 0.2425 |
| Angle between the optical axis of right camera and the baseline $\alpha_1 /(^{\circ})$ | 44.335 |
| Angle between the optical axis of right camera and the baseline $\alpha_2 /(^{\circ})$ | 43.733 |
| Length of baseline B /mm | 1395.995 |

设计的目标是使得测量系统在 10 m 的测量距离上达到 1 cm 的测量精度。由于镜头焦距为 8 mm,基线长为 1400 mm,为了达到设计要求,图像处理的误差不应超过 $0.28 \mu\text{m}$,即图像传感器像素尺寸的 6%。通过仿真考察光条中心提取算法在不同信噪比 R_{SN} 下所能达到的精度。图像的信噪比可以通过计算图像空间域中的局部区域的灰度方差最大值 $\max[\sigma_g^2(x, y)]$ 与最小值 $\min[\sigma_g^2(x, y)]$ 进行估计。图像是随空间变化而改变的,但在局部区域

可以认为是平稳的。因此对原始图像加窗后,选定图像中的一块局部区域(如 $25 \text{ pixel} \times 25 \text{ pixel}$)计算方差,则图像的信噪比

$$R_{\text{SN}} = \frac{\max[\sigma_g^2(x, y)]}{\min[\sigma_g^2(x, y)]}. \quad (22)$$

使用噪声强度不同的光条图像考察不同信噪比下使用文献[28]中所述基于灰度图像的算法与本文提出的算法在提取精度上的差异如图 7 所示。随着信噪比的降低,两种算法的误差均近似按照二次曲线增长。图中显示了对数据点进行二次曲线拟合的

结果。由图 7 可见,无论在高信噪比还是低信噪比情况下,基于相位一致性变换的结构光光条提取算法均比传统的基于灰度的算法具有精度上的优势。这种优势在信噪比较低时尤其明显。

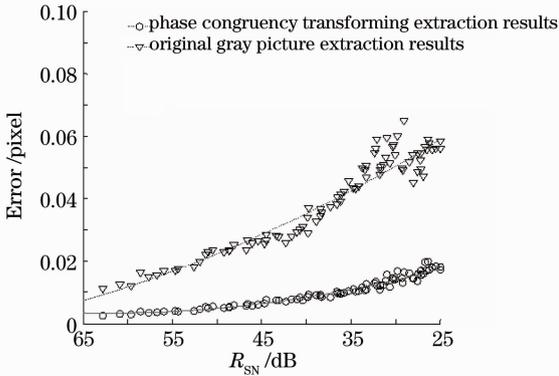


图 7 误差随信噪比变化的趋势对比

Fig. 7 Comparison of the error trend with the R_{SN} variance

为了评估测量系统的精度,在实验室环境下对组装完成的样机进行了测试。使用长度为 2000mm 的标准件作为测量标准。实验中将标准件置于测量装置视场之中,测定标准件长边的尺寸,将测量结果与标准件实际尺寸进行对比。对标准件进行了不同姿态、不同位置的测量,测量时标准件与测量系统相距 9~11 m。测量结果如表 2 所示。

表 2 测量精度实验结果

Table 2 Results of detection accuracy experiment

| Measured length /mm | Error /mm | Measured length /mm | Error /mm |
|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
| 2005.1442 | 5.1442 | 1991.8067 | -8.1933 |
| 2007.2898 | 7.2898 | 1996.1996 | -3.8004 |
| 2000.2374 | 0.2374 | 1995.9060 | -4.0940 |
| 2008.7313 | 8.7313 | 1999.9524 | -0.0476 |
| 1993.8144 | -6.1856 | 1996.5509 | -3.4491 |
| 1989.0325 | -10.9675 | 1996.6665 | -3.3335 |
| 1998.3330 | -1.6670 | 2004.3207 | 4.3207 |
| 2003.5677 | 3.5677 | 2000.5671 | 0.5671 |
| 2001.5870 | 1.5870 | 2001.9918 | 1.9918 |
| 2002.0681 | 2.0681 | 2004.4198 | 4.4198 |
| 1997.1146 | -2.8854 | 2000.9013 | 0.9013 |
| 2000.7200 | 0.7200 | 2002.7543 | 2.7543 |
| 2003.4148 | 3.4148 | 2005.8503 | 5.8503 |
| 2002.5986 | 2.5986 | 1999.9292 | -0.0708 |
| 1994.2224 | -5.7776 | 1999.9524 | -0.0476 |

从表 2 可以看到,由于视角的不同,各个测量点得到的测量误差存在差异,其总标准差为 4.56 mm,关于测量距离的相对测量误差约为 0.03%,完全满足设计要求。

在应用环境中使用该样机对货运机车外形进行测量,获得了如图 8 所示的车体局部表面的三维点云数据。对列车车体的长、宽等主要几何尺寸参数进行测量,并将测量结果与机车标称值进行对比,当测量距离为 10 m 时,绝对测量误差均小于 6 mm。该样机已经在南京西站货运场针对不同的车型进行了多次测试,测试环境既包括低光照条件下的室内环境,也包括天气晴朗时阳光直射的室外环境。样机工作可靠,测量数据重复性和稳定性俱佳。在单个测量点的测量时间不超过 1 min,整列列车需要 6~8 个测量点实现全景式测量,总测量时间不超过 30 min。样机可拆卸并可折叠后收起,总重量不超过 40 kg,便于运输和搬动。与现有技术相比,该大尺度三维几何尺寸测量系统具有精度高、速度快、操作简便以及非接触式测量等优点。目前样机已经通过了上海铁路局科学技术研究所的技术鉴定。

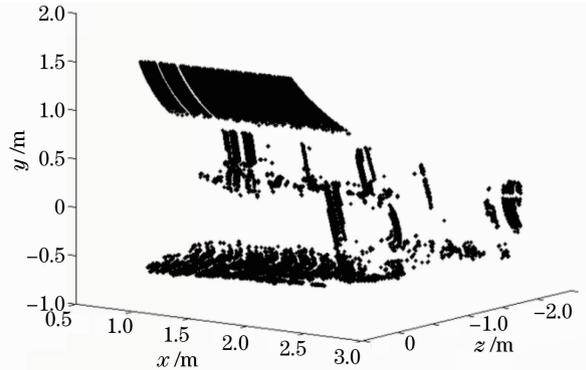


图 8 油罐车点云图

Fig. 8 Points cloud of oil tank train

5 结 论

从视觉测量系统的原理出发,分析了影响系统精度的各种因素并指出了提高测量精度的途径。通过相位一致性算法对光条图像进行特征增强从而提高了光条中心提取的精度;基于极线与结构光光条约束实现了亚像素精度的特征点匹配。通过这些算法可以显著提高图像分析的精度从而减小图像分析对系统测量精度的影响。搭建了基于立体视觉的大尺度三维几何尺寸测量系统并进行了现场测试,在测量距离为 10 m 的情况下,测量的绝对误差不超过 6 mm。实验结果显示该系统具有很好的稳健性,并且可以有效保证大尺度条件下的测量精度。

参 考 文 献

- Zhang Yixin, Wang Shun, Zhang Xuping. Defocused blur image restoration in large scale 3D vision measurement[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*. 2010, 31(12): 2748~2753

- 张益昕, 王 顺, 张旭革. 大尺度三维视觉测量中的离焦模糊图像恢复[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(12): 2748~2753
- 2 Lü Naiguang, Deng Wenyi, Yan Bixi *et al.*. The study of coaxiality measurement of holes of large scale mechanical parts [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(7): 694~696
吕乃光, 邓文怡, 燕必希等. 大型机械零部件孔同轴度测量技术研究[J]. 光电子·激光, 2001, **12**(7): 694~696
- 3 R. Kurazume, Y. Tobata, Y. Iwashita *et al.*. 3D laser measurement system for large scale architectures using multiple mobile robots [C]. International Conference on 3-D Digital Imaging and Modeling, 2007. 91~98
- 4 H. Nakai, D. Iwai, K. Sato. 3D shape measurement using fixed camera and handheld laser scanner[C]. SICE Annual Conference, 2008. 1536~1539
- 5 M. A. Tehrani, A. Saghaeian, O. R. Mohajerani. A new approach to 3D modeling using structured light pattern [C]. International Conference on Information and Communication Technologies, 2008. 1~5
- 6 Liu Xiao, Wu Xunwei. Computer-rebuilding damaged cultural relics in three dimensions [J]. *J. Electronics & Information Technology*, 2001, **23**(7): 650~655
刘 晓, 吴训威. 破损古文物的计算机三维重构[J]. 电子与信息学报, 2001, **23**(7): 650~655
- 7 Z. Li, Y. Wang. Research on 3D reconstruction procedure of marked points for large workpiece measurement [C]. International Conference on Information Assurance and Security, 2009. 273~276
- 8 Zhang Yixin. Large-Scale 3D Geometrical Detection Method and Application Based on Machine Vision [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011
张益昕. 基于计算机视觉的大尺度三维几何尺寸测量方法及应用[D]. 南京: 南京大学, 2011
- 9 T. Pancewicz, M. Kujawinska. CAD/CAM/CAE representation of 3D objects measured by fringe projection [C]. *SPIE Laser Interferometry*, 1998, **3479**(7): 70~75
- 10 G. Sansoni, M. Carocci, R. Rodella. Calibration and performance evaluation of a 3D imaging sensor based on the projection of structured light [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2000, **49**(3): 628~636
- 11 C. Reich, R. Ritter, J. Thesing. 3D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projector [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 224~231
- 12 Y. Y. Hung, L. Lin, B. G. Park. Practical 3D computer vision techniques for full-field surface measurement [J]. *Opt. Engng.*, 2000, **39**(1): 143~149
- 13 Z. Y. Zhang. A flexible new technique for camera calibration [C]. Seventh International Conference on Computer Vision (ICCV99), 1999. 666~673
- 14 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV camera and lenses [J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 323~344
- 15 J. W. Weng, P. Cohen, M. Herniou. Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(10): 965~980
- 16 Ye Haijia, Chen Gang, Xing Yuan. Stereo matching in 3D measurement system using double CCD structured light [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2004, **12**(1): 72~75
叶海加, 陈 罡, 邢 渊. 双目 CCD 结构光三维测量系统中的立体匹配 [J]. 光学精密工程, 2004, **12**(1): 72~75
- 17 Tao Li, Sun Changku, He Li *et al.*. A color 3-D acquisition method based on structured-light scanning [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(1): 111~114
陶 立, 孙长库, 何 丽等. 基于结构光扫描的彩色三维信息测量技术 [J]. 光电子·激光, 2006, **17**(1): 111~114
- 18 Zhou Fuqiang, Chen Qiang, Zhang Guangjun. Composite image processing for center extraction of structured light stripe [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2008, **19**(11): 1534~1537
周富强, 陈 强, 张广军. 结构光光条提取的混合图像处理方法 [J]. 光电子·激光, 2008, **19**(11): 1534~1537
- 19 Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng. Research on light-knife propagated by reflection of Gaussian light beams at cylinder [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **28**(2): 133~136
张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 高斯光束柱面反射展成法生成光刀的研究 [J]. 中国激光, 2001, **28**(2): 133~136
- 20 C. Steger. An unbiased detector of curvilinear structures [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1998, **20**(1): 113~125
- 21 P. Kovesi. Symmetry and asymmetry from local phase [C]. Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, 1997. 185~190
- 22 Fu Sihua, Yu Qifeng, Wang Mingzhi *et al.*. Railway geometric parameters measurement system based on videometrics [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(11): 3203~3208
伏思华, 于起峰, 王明志等. 基于摄像测量原理的轨道几何参数测量系统 [J]. 光学学报, 2010, **30**(11): 3203~3208
- 23 Tian Zhen, Zhang Qi, Xiong Jiulong *et al.*. Large-scale camera calibration with neural network [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(4): 0415001
田 震, 张 玓, 熊九龙等. 基于神经网络的大范围空间标定技术 [J]. 光学学报, 2011, **31**(4): 0415001
- 24 He Bingwei, Lin Dongyi, Chen Zhipeng *et al.*. Research of eliminating occlusion in visual construction of three-dimensional objects [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(7): 0708001
何炳蔚, 林东艺, 陈志鹏等. 三维物体视觉测量重构中解决遮挡问题的方法研究 [J]. 中国激光, 2011, **38**(7): 0708001
- 25 Gao Gui, Yang Xichen, Zhang Haiming. Study of binocular vision system calibration in laser remanufacturing robot [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1868~1872
高 贵, 杨洗陈, 张海明. 激光再制造机器人双目视觉系统标定研究 [J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1868~1872
- 26 P. Kovesi. Phase congruency detects corners and edges [C]. The Australian Pattern Recognition Society Conference, 2003. 309~318
- 27 F. Xie, Y. Zhang, S. Wang *et al.*. A phase congruency based corner detector for images under different illuminations [C]. Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2011. 1~5
- 28 Z. Y. Zhang. Determining the epipolar geometry and its uncertainty: a review [J]. *Int. J. Computer Vision*, 1998, **27**(2): 161~198

栏目编辑: 何卓铭