基于相位匹配的大视场视觉检测系统

赵慧洁 吉 相

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对三维测量大量程和高精度测量问题,提出一种新型双目视觉检测系统. 该系统通过向被测物投射间距可变的光栅条纹,将不同曲率的被测表面进行相位编码,由相位匹配得到被测物稠密的立体匹配点云;再由标定出的摄像机内外参数计算出被测物的精确三维坐标. 为了解决传感器单元测量区域较小的问题,系统通过步进电机控制传感器移动,获取大型物体的全场三维数据点云;最后利用四元素法,实现大型物体的三维数据拼接. 该系统长度测量标准差为 36 μm,角度测量与坐标测量机(CMM)测量结果的相对误差 0.2%. 给出了某 V 型面三维实测的数据重建结果. 对某大型特件(360 mm×300 mm)经过三维拼接正确复现了其三维形貌. 该系统对于解决大型构件三维形貌的在线高精度检测问题具有较高工程应用价值.

关 键 词: 计算机视觉; 标定; 相移; 重建; 拼接

中图分类号: TH 741

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)06-0700-04

Novel vision system for large field inspection based on phase matching

Zhao Huijie Ji Xiang

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To solve the problem of large scale three-dimensional (3D) measurement with high accuracy, a new binocular stereo vision inspection system was presented. By projecting variable period fringes, the surface with different curvature was coded with phase. The stereo matching points were determined using phase matching technique, so that dense 3D coordinate points could be calculated by the intrinsic and extrinsic parameters of the calibrated cameras. In order to solve the problem of small measurement field of sensor unit, the vision sensor scanned the whole surface of a large object under a step motor's control, then quaternion was used to realize 3D registration. The sensor's standard deviation in length measurement is 36 μm, and the relative error of angular measurement is 0.2% compared with the CMM(coordinate measuring machine). The 3D integration of a large object (360 mm×360 mm) is given correctly. The vision system is of great engineering value in large 3D non-contact online measurement with high accuracy.

Key words: computer vision; calibration; phase shift; reconstruction; registration

目前,适合于工业在线检测的视觉检测技术分为主动和被动两种. 以结构光法、莫尔条纹法及投射光栅法为代表的主动视觉三维形貌测量系统是当前实现三维形貌测量的主要方法. 其中,投射光栅技术被认为是实现在线高精度三维测量最有前途的方法之一. 基于投影栅相位匹配的单目视觉检测系统要求投射光源镜头和摄像机镜头的光心位置的连线与参考面平行. 如何判断两光学元件光心是否与参考面平行是一个难题[1]. 这使得基于投影栅相位匹配的单目传感器测量精度较低. 同时,由于单目传感器只能得到被测物与参考面的高度差,因而严格意义上来说,只实现了 2.5

收稿日期: 2005-06-14

基金项目: 航空科学基金资助项目(02I51017);教育部优秀人才支持计划资助项目;高等学校博士点专项科研基金资助项目

作者简介: 赵慧洁(1966-), 女, 辽宁省沈阳人, 教授, hjzhao@buaa.edu.cn.

维测量,不是真正的 3 维测量. 双目立体视觉具有精度高、非接触等优点,其测量原理是建立在对应点的视差基础上的,因此左右图象中各点的匹配关系成为双目视觉技术中的一个极其重要的问题[2]. 实际测量中,特别是对于一些无明显特征点的物体,例如平面、光滑曲面等,寻找匹配点非常困难. 基于相位匹配的投射光栅技术可以很好的解决此问题. 由于和相位测量技术相结合,利用投射光栅技术得到的匹配点云非常密集,具有较高的空间分辨率,得到了国内外的普遍重视.

目前,能够实现大视场三维形貌测量的主要手段是三坐标测量机和光电经纬仪. 它们都具有较高的测量精度,测量范围大. 但由于是单点测量,测量速度很慢,无法满足在线快速测量的需要. 其中坐标测量机还属接触式测量,容易划伤被测表面. 采用视觉传感器利用三维拼接进行大视场三维形貌检测,既可以避免与被测物的接触又能够得到较高的精度. 本文所介绍的双目视觉传感器在相位匹配的基础上,利用步进电机控制传感器运动,将多个视场检测到的局部数据整合到一个统一的坐标系内,实现了非接触、高精度、大视场三维检测.

1　标　定

1.1　系统组成

视觉传感器系统主要由两台 CCD、一部投影仪组成,如图 1 所示. 投影仪用于投射正弦光栅,从而获得左右摄像机的匹配点. 通过标定两台摄像机的结构参数和它们之间的方位关系,进而由最小二乘法确定被测物体表面的三维坐标. 传感器固定在一个 5 自由度的步进电机上,可实现 x, y,z 轴的平移以及绕 x 轴,z 轴方向的旋转.

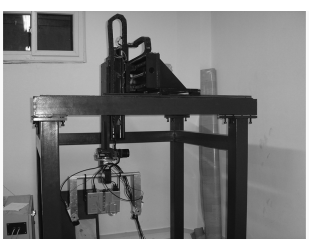


图 1　传感器平台实物图

1.2　标定

摄像机标定是视觉检测技术中非常重要的一个环节. 目前,摄像机的标定法主要分为 3 种:传统摄像机标定方法、主动视觉摄像机标定方法和摄像机自标定方法. 本文采用 Zhang[3] 标定法,该方法介于传统标定法和自标定法之间.

以线性摄像机模型(针孔模型)为例,空间任意一点 $P(X,\ Y,\ Z,\ 1)$ 与图像坐标系中一点 $p(u,v,1)$ 的关系如下:

$$s\begin{pmatrix}u\\v\\1\end{pmatrix}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}_1\quad\boldsymbol{r}_2\quad\boldsymbol{r}_3\quad\boldsymbol{t})\begin{pmatrix}X\\Y\\Z\\1\end{pmatrix}=\boldsymbol{M}\begin{pmatrix}X\\Y\\Z\\1\end{pmatrix}\tag{1}$$

其中,$(X,\ Y,\ Z,\ 1)^{\mathrm{T}}$ 是标定块上某点的齐次坐标;$(u,\ v,\ 1)^{\mathrm{T}}$ 为标定块中的点投影到图像坐标系中对应点的齐次坐标;$\boldsymbol{A}$ 为摄像机内参数模型矩阵;$(\boldsymbol{r}_1,\ \boldsymbol{r}_2,\ \boldsymbol{r}_3)$ 和 $\boldsymbol{t}$ 分别是旋转矩阵和平移矩阵;s 为比例系数. 假设标定块平面在世界坐标系 $Z=0$ 的平面上,由式(1)可得

$$s\begin{pmatrix}u\\v\\1\end{pmatrix}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}_1\quad\boldsymbol{r}_2\quad\boldsymbol{t})\begin{pmatrix}X\\Y\\1\end{pmatrix}\tag{2}$$

令

$$\boldsymbol{H}=(h_1\quad h_2\quad h_3)=\lambda\boldsymbol{A}(\boldsymbol{r}_1\quad\boldsymbol{r}_2\quad\boldsymbol{t})\tag{3}$$

得

$$\left.\begin{aligned}\boldsymbol{r}_1&=\frac{1}{\lambda}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_1\\\boldsymbol{r}_2&=\frac{1}{\lambda}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_2\end{aligned}\right\}\tag{4}$$

由旋转矩阵的性质 $\boldsymbol{r}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_2=0$,$\|\boldsymbol{r}_1\|=\|\boldsymbol{r}_2\|=1$,得到如下两个约束方程:

$$\left.\begin{aligned}&\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_2=0\\&\boldsymbol{h}_1^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_1=\boldsymbol{h}_2^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-\mathrm{T}}\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{h}_2\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

$\boldsymbol{H}$ 的求解过程是使实际图像坐标与由式(1)计算出的图像坐标之间参差最小的过程. 求解出 $\boldsymbol{H}$ 后,用 3 幅以上的图像,可由式(5)线性唯一求解出 $\boldsymbol{A}$,进而求解出外参数$(\boldsymbol{r}_1,\ \boldsymbol{r}_2,\ \boldsymbol{r}_3)$和 $\boldsymbol{t}$.

标定完左右摄像机后,由最小二乘法即可解出物点的三维坐标.

2　相位匹配

投影栅相位法通过投射器将正弦光栅投射到被测物体表面,由于被测物体表面的高度分布不同,栅线产生了畸变,畸变的图像经过 CCD 摄像机采集,落在成像面上,通过解相就可以得到物体面形的一对相位分布. 设光栅移动 4 次,每次移动 1/4 周期, CCD 拍摄到的光栅图像中某点(x,y)处光强(用灰度表示)分别为 I_0,I_1,I_2,I_3,则可得到位于该点处的相位值:

$$\Phi_{\mathrm{c}}(x,y)=\arctan((I_3-I_1)/(I_0-I_2))\tag{6}$$

此处得到的相位值在$-\pi/2\sim\pi/2$,需要利用 I_0,I_1,I_2,I_3 的大小关系来判断 $\Phi_{\mathrm{c}}(x,y)$所在的象限,从而将 $\Phi_{\mathrm{c}}(x,y)$扩展到$-\pi\sim\pi$,得到该点的相位

主值.

三维成像要求相位不能出现阶跃跳变,因而需要进行相位图的全场相展开. 实验中采用基于被测象元的3×3邻域的二阶差分法[4]进行全场相展开. 该方法通过对相位阶跃变化的检测,自动在下一个周期加上2π,使处理后的相位连续变化. 若投射细条纹进行相展开,系统分辨率高,相位信息多,但相位展开复杂,而且当被测物表面曲率发生较大跳变时容易发生相位丢失;采用粗条纹,系统分辨率低,但解相容易,且不容易发生相位丢失. 因此结合粗细条纹的优点,采用粗细条纹相结合的方法进行精确的相展开[5]. 设 $\Phi_0(x,y)$ 为粗条纹全场相展开以后得到的相位值;$\Phi_1(x,y)$ 为细条纹的相位主值;N_0 为 $\Phi_0(x,y)$ 包含的周期数;N_1 为最终算得的精确的周期数. 则

$$N_0 = \Phi_0(x,y)/2\pi \tag{7}$$

$$N = \mathrm{round}(XN_0 - \Phi_1(x,y)/2\pi) \tag{8}$$

$$N_1 = \Phi_1(x,y)/2\pi + N \tag{9}$$

其中,X 为粗细条纹的周期比值;round 为取整运算符. 为了使左右两个像面的相位具有唯一性,投射水平与竖直方向的两种光栅,并通过投射特征点在左右像面上找到相展开的起始点. 设左像面上某点有一个相位对(Φ_x, Φ_y);在右像面上,若存在一点相位值为($\Phi_x+\Delta\Phi_x$, $\Phi_y+\Delta\Phi_y$),且 $|\Delta\Phi_x|$,$|\Delta\Phi_y|$ 均小于某一设定的误差阈值,则可以确定这两点为一对匹配点.

3 大视场三维拼接

对于较大尺寸的被测物,双目视觉传感器工作一次只能拍摄到物体的某一局部,要想获得整个物体的三维形貌,必须进行三维拼接. 如图2所示,当传感器在图示 $M1$ 位置时,根据图像坐标和世界坐标系的关系,得到物体上区域1中的点在世界坐标系 $O_1x_1y_1z_1$ 下的坐标(X_{1i}, Y_{1i}, Z_{1i}),当传感器移动到 $M2$ 位置时,可以得到物体区域2中的点在世界坐标系 $O_2x_2y_2z_2$ 下的坐标(X_{2i}, Y_{2i}, Z_{2i}). 以此类推,移动传感器,直到被测物的所有部分都被拍摄到. 将所有坐标系统移到一个公共坐标系内即可实现大视场三维拼接. 本实验中,通过步进电机控制传感器的运动及姿态,使其能够通过多次拍摄得到物体的全貌信息.

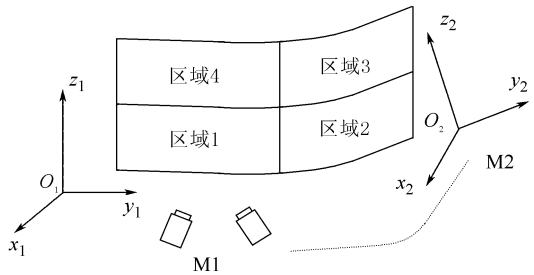


图2 拼接原理图

本文采用四元素法[6]进行三维拼接. 四元数是一个4元矢量 $\boldsymbol{q}=(q_1,q_2,q_3,q_4)$,用单位四元数表示刚体变换的旋转矩阵:

$$\boldsymbol{R}(\boldsymbol{q}) = \begin{bmatrix} q_0^2+q_1^2-q_2^2-q_3^2 & 2(q_1q_2-q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2+q_0q_3) & q_0^2+q_2^2-q_1^2-q_3^2 & 2(q_2q_3-q_0q_1) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & q_0^2+q_3^2-q_1^2-q_2^2 \end{bmatrix} \tag{10}$$

相邻区域内的公共特征点在不同坐标系下的表示:世界坐标系1中的点集 $\boldsymbol{p}_{w1}=\{\boldsymbol{p}_{w1,1},\boldsymbol{p}_{w1,2},\cdots\boldsymbol{p}_{w1,n}\}$ 和世界坐标系2中的点集 $\boldsymbol{p}_{w2}=\{\boldsymbol{p}_{w2,1},\boldsymbol{p}_{w2,2},\cdots\boldsymbol{p}_{w2,n}\}$. 两个点集的矩中心分别为

$$\overline{\boldsymbol{P}}_{w1} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{p}_{w1,i} \tag{11}$$

$$\overline{\boldsymbol{P}}_{w2} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{p}_{w2,i} \tag{12}$$

若已知旋转矩阵,则平移表达式可表示为

$$\boldsymbol{t}_c = \overline{\boldsymbol{P}}_{w2} - \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q})\overline{\boldsymbol{P}}_{w1} \tag{13}$$

世界坐标系1中的点按下式转换到世界坐标系2.

$$\boldsymbol{p}_{w2,i} = \boldsymbol{R}(\boldsymbol{q})\boldsymbol{p}_{w1,i} + \boldsymbol{t}_c \tag{14}$$

4 实验结果

实验系统采用12 mm焦距镜头、768×576图像卡,工作距离在距摄像机镜头约650 mm处. 标定块为棋盘状. 标定块上每一个正方形边长为8 mm,精度为±0.001 mm. 在标定完左右相机后,测量标定块上特征点的三维坐标,并计算相邻两点之间的距离,同实际值相比较,得标准差为36 μm,最大偏差-76 μm. 具有较高的测量精度,能够满足高精度测量的要求. 表1为双目传感器的测量结果,单位均为mm(共计算了64对,只列出了6对供参考).

表 1　双目传感器系统测量精度实验结果　mm

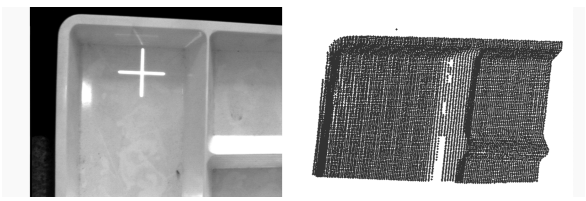
序号	实测的角点三维坐标			相邻距离	误差
	x	y	z		
1	7.910 15.899	7.963 7.932	0.125 0.263	7.990	−0.010
2	23.949 31.962	7.946 7.980	0.078 0.195	8.014	0.014
3	39.998 47.989	8.003 7.969	0.241 0.098	7.992	−0.008
4	55.900 63.908	7.975 7.998	0.052 0.034	8.008	0.008
5	−0.058 7.957	15.969 15.978	0.223 0.248	8.015	0.015
6	15.948 23.927	15.969 15.956	0.165 0.154	7.979	−0.021

为确定图像匹配的精度,在被测表面上投射矩形块. 对拍摄到的灰度图像进行处理,通过边缘检测和直线拟合,确定矩形块的顶点. 再通过解相和相展开的方法对图像进行处理,以灰度处理的方法得到的点作为基准点,在另外一幅图像上采用相位法寻找它的匹配点,比较两者的精度,现将实验的图形和数据列于表 2. 表中数据显示相位立体匹配达到亚像素级,且具有很高的匹配精度.

表 2　匹配精度验证实验结果　mm

序号	左侧图像坐标 (x,y)	右侧图像匹配点(灰度图像处理)	右侧图像匹配点(相位图像处理)
1	(206.665, 194.324)	(177.177, 181.121)	(176.392, 180.326)
2	(206.689, 304.805)	(175.910, 285.085)	(175.709, 284.639)
3	(294.829, 179.069)	(303.438, 163.643)	(303.000, 162.167)
4	(293.568, 288.774)	(303.915, 269.054)	(305.000, 269.197)
5	(478.502, 181.661)	(497.625, 159.637)	(497.000, 159.179)
6	(478.349, 285.334)	(497.701, 264.824)	(496.000, 263.875)
7	(623.096, 306.647)	(587.803, 287.136)	(588.000, 287.491)
8	(620.272, 201.753)	(585.662, 177.724)	(585.968, 177.181)

采用投影栅相位法得到左右两个摄像机中的匹配点,利用标定参数进行三维复现. 图 3b 为复现出的一个餐盘. 实验结果显示,餐盘的凸起和凹陷边缘都能够非常清晰的复现出来.



a　餐盘原件　　b　复现的餐盘

图 3　餐盘及其复现图

用三坐标测量机测量一个 V 型槽,得到两个平面的标准夹角为 89.946 4°,用本文测量系统得到的三维数据计算夹角为 90.145 6°,相对误差为 0.2%. 大尺寸弧面物件(360 mm×300 mm)见图 4.

双目视觉传感器移动 4 次后,可以完成物件全貌的拍摄. 图 5 显示拼接后的点云可以精确、清晰的反映物体的三维轮廓信息.

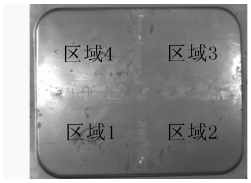


图 4　物件的全貌图

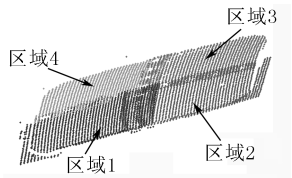


图 5　拼接得到的效果图

5　结 束 语

本文对基于相位立体匹配的大视场双目视觉检测系统进行了全面的分析. 该系统采用双目视觉检测结构,结合相位匹配算法,克服了单目传感器系统标定难、测量精度低的缺陷,同时利用三维拼接技术实现了大视场、非接触的高精度检测. 实验结果表明,该系统长度测量标准差为 36 μm,角度测量的相对误差为 0.2%.

参考文献(**References**)

[1] 高振艳. 曲面形体投影栅相位检测的二维抗噪解相和自动处理系统的研究[D]. 北京:清华大学机械工程系,1996
Gao Zhenyan. Study on 2D noise-immune phase detection of surface by projected grating and automatic processing system [D]. Beijing: Department of Mechanical Engineering Tsinghua University, 1996(in Chinese)

[2] 周富强. 双目视觉检测的关键技术研究[D]. 北京:北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,2002
Zhou Fuqiang. Study on key techniques for binocular stereo vision inspection[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002(in Chinese)

[3] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330-1334

[4] 谭华竹,赵慧洁. 抗噪声展开算法在投影栅法三维形貌测量中的应用[J]. 宇航计测技术,2002,22(2):14-19
Tan Huazhu, Zhao Huijie. Application of noise-immune phase unwrapping algorithm on projecting fringe method of measuring the 3D topography [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2002, 22(2):14-19(in Chinese)

[5] 殷雪冰. 基于声光调制条纹投射装置研究[D]. 北京:北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院,2004
Yin Xuebing. A research on acousto-optics interference fringe projector for three-dimensional imaging[D]. Beijing: School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004(in Chinese)

[6] 贾云得. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2000:181-186
Jia Yunde. Machine vision[M]. Beijing: Science Press, 2000: 181-186(in Chinese)

(责任编辑:张　婧)