

文章编号: 0253-2239(2010)07-2006-06

基于手持相位标靶技术的光学三维坐标测量

毛先富 苏显渝 向立群 刘元坤

(四川大学光电科学技术系, 四川 成都 610064)

摘要 将相位技术及条纹分析技术引入到光学三维坐标测量中, 制作了手持相位标靶。采用这种标靶, 利用视觉测量技术可以对待测物体上的任意一个可接触点进行直接测量。利用相位技术及条纹分析技术的全场分析方法, 计算出了测头在标靶坐标系下的坐标, 提出了标靶特征点到测头距离的计算公式; 采用手持相位标靶进行测量时, 提出了对测量点的三维坐标获取的计算公式; 并对测量点的三维坐标值以及对测量点偏移的距离进行了误差分析。实验得到了比较准确的测量结果, 证明了分析方法的正确性。

关键词 光学三维坐标测量; 手持相位标靶; 相位; 条纹分析

中图分类号 TN247; TB82 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103007.2006

Optical 3-D Coordinate Measurement Based on Handheld Phase Target

Mao Xianfu Su Xianyu Xiang Liqun Liu Yuankun

(Department of Opto-Electronics, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610064, China)

Abstract By introducing phase and fringe technique to optical 3-D object measurement, handheld phase target is proposed. With vision measurement technology, any contacted point of measure object can be measured directly by the target. In addition, the distance between control points of handheld phase target and measurement point, and the coordinates of the probe of target coordinate system can be obtained by adopting phase technique and the full optical field fringes analysis. In the same way, 3-D coordinate of measurement point on the object can be calculated accurately. Error analysis about 3-D coordinate of measured points is done and the corresponding distance excursion is also obtained. The accurate measurement result can be obtained in the experiments so that the analysis is proved to be right.

Key words optical 3-D coordinate measurement; handheld phase target; phase; fringe analysis

1 引 言

光学三维传感在机器视觉、工业化自动加工、工业检测、实物仿型和生物医学等很多领域都有着广泛的应用^[1~6]。其中基于标靶技术的三维视觉测量以其测量精度较高、适用于工业现场测量以及便于精密测量被遮挡的点而得到了较为普遍的运用^[7~10]。

传统的视觉测量技术中(以单相机测量系统为例), 采用一个校准后的摄像机和一个辅助标靶进行三维光学的测量^[7,8]。辅助标靶上有3个以上的标

记点和一个与被测物体接触的测点, 标记点和测点在辅助标靶坐标系中的坐标可预先精密测定。视觉测量系统只要测出标记点的坐标就可计算出测点坐标, 进而得到物体表面被测点的三维空间坐标。

本文基于相位技术及条纹处理技术^[11~14], 提出一种新的测量靶——手持相位标靶。由显示屏上的二维正弦条纹所形成的特征点代替辅助标靶上的几个标记点, 并采用条纹分析方法进行特征点的识别及定位。该方法中测点数量的最大值理论上等于相位标靶在摄像机成像区域中的像素点数, 测点的识

收稿日期: 2009-08-11; 收到修改稿日期: 2009-09-29

基金项目: 国家自然科学基金(60838002)资助课题。

作者简介: 毛先富(1969—), 男, 博士研究生, 主要从事光学三维传感及机器视觉等方面的研究。

E-mail: mx9971f@163.com

导师简介: 苏显渝(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事信息光学、三维传感与机器视觉领域的教学与科研等方面的研究。E-mail: xysu@email.scu.edu.cn

别由相位值自动识别,测点的定位精度由相位测量精度保证。由于特征点的大量增多,同时采用相位技术进行特征点的提取,因此具有较高的测量精度。

2 测量算法分析

2.1 手持相位标靶的结构及工作原理

考虑到传统的辅助标靶(如图 1 所示)上的标记点 A 个数较少以及标记点的定位精度问题,提出手持相位标靶,如图 2 所示。该标靶是在测棒上端刚性联接显示屏,下端接测头构成,显示屏上的特征图像由计算机生成,一般采用二维正弦条纹,也可采用其他周期性条纹,将这些条纹图像由移动存储设备输入到显示屏上;或用不易反光的像纸打印出来,贴在平面屏上。测量时,手握测棒,使测头接触待测量点,由摄像机拍摄下显示屏上的条纹图像。每拍摄一张图片,是待测物上一个被测点的图像采集。然后移动标靶,使其与待测物体的另一个点接触,再次完成的图像采集。如此循环,可以完成对所有待测点的图像采集。

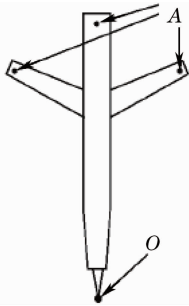


图 1 辅助标靶

Fig. 1 Aided target

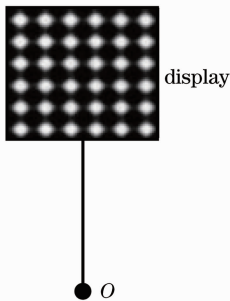


图 2 手持相位标靶

Fig. 2 Handheld phase target

2.2 测量原理和计算方法

图 3 是采用手持相位标靶进行光学三维坐标测量示意图,其中 R 为待测物体, O 为手持相位标靶的测头,它与待测点表面接触,接触处的坐标代表待测点的坐标。通过计算机产生周期性图像,并将该

图像显示在显示屏上,手握测棒,当测头 O 移动到与待测物体的待测点接触时,由摄像机拍摄下显示屏上的图像,然后移动标靶,使其与待测物体的另一个点接触,又一次完成图像采集。

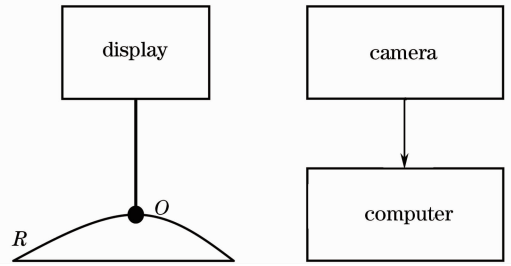


图 3 测量系统示意图

Fig. 3 Smeasuring system

如果特征图像采用二维正弦条纹,则其强度函数表示为^[11]

$$I(x, y) = a + b_1 \cos[2\pi x/p_x + \varphi_{x0}(x, y)] + b_2 \cos[2\pi y/p_y + \varphi_{y0}(x, y)], \quad (1)$$

式中 a, b_1, b_2 分别为正常数; p_x, p_y 分别为条纹周期; $\varphi_{x0}(x, y), \varphi_{y0}(x, y)$ 为对应的初始相位。

由摄像机获取的标定靶图像的强度函数为

$$I(u, v) = a(u, v) + b_1(u, v) \cos[\varphi_u(u, v)] + b_2(u, v) \cos[\varphi_v(u, v)]. \quad (2)$$

根据条纹图像的傅里叶变换分析方法^[3,15,16],通过傅里叶变换、滤波和逆傅里叶变换,提取出截断相位并进行相位展开,由(1),(2)式可得

$$\begin{cases} \phi_u(u, v) = 2\pi x/p_x + \varphi_{x0} + c_1, \\ \phi_v(u, v) = 2\pi y/p_y + \varphi_{y0} + c_2, \end{cases} \quad (3)$$

式中 c_1, c_2 均为常数,与相位展开初始点有关。

这样最终可以得到特征图像上的相位分布信息,然后再根据相位信息完成对特征点的准确提取^[11]。最后再采用 Tsai 等^[17~19]提出的二维共面参照物摄像机标定方法可以得到由摄像机拍得的某一张图片的外参数矩阵(旋转矩阵 R 及平移向量 t)及图片的每一个特征点在摄像机坐标系下的坐标。

2.2.1 测头在标靶坐标系中位置的标定

相位标靶制作后,应标定测头中心在标靶坐标系中位置。由三个相互垂直平面组成的内角锥来标定,将标靶球形测头放置在内角锥中,旋转手持相位标靶,保持球形测头中心不变,拍摄此时的图像。在显示屏上提取特征点时,注意让每张图像的特征点位置保持不变;并在显示屏上的图像面内建立标靶坐标系如图 4 所示,标靶坐标系上的 X 轴与特征点的竖直向下方向平行, Y 轴与特征点的水平方向平行, Z 轴则垂直特征点平面指向外侧,标靶坐标系的

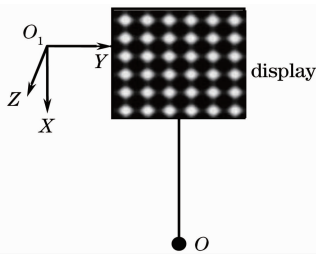


图 4 手持相位标靶及标靶坐标系

Fig. 4 Handheld phase target and the corresponding target coordinate system

坐标原点 O_1 对应所选特征点的起始位置点。根据下列的算法,可以得到显示屏上的点 O_1 到测头 O 的距离,进而可以算出测头 O 在标靶坐标系下的坐

标。由于是绕定点 O 旋转标靶,那么这样所拍得的每张图像上的 O_1 点与测头 O 点构成一个球面,点 O 为球心,每张图像上的 O_1 点则在以 $\overline{OO_1}$ 为半径的球面上,设共拍得 n 张图片 ($n \geq 3$),则记第一幅图像的特征点 O_1 在摄像机坐标系下的坐标为 (x_1, y_1, z_1) ,第二幅的为 (x_2, y_2, z_2) ,...第 n 幅下的为 (x_n, y_n, z_n) ;以上各组坐标值均可通过标定摄像机外参数得到,为已知量。设测头 O 点在摄像机坐标系下的坐标为 (x, y, z) 。注意到在旋转标靶前后,屏上的任一点到测头接触点的距离保持不变,当然,特征点 O_1 到 O 点的距离也始终相等。由此可以建立关于 (x, y, z) 的 $n-1$ 个方程,构成方程组

$$\begin{cases} (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2 = (x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2, \\ (x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2 = (x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2, \\ \dots\dots\dots \\ (x_n - x)^2 + (y_n - y)^2 + (z_n - z)^2 = (x_{n-1} - x)^2 + (y_{n-1} - y)^2 + (z_{n-1} - z)^2. \end{cases} \quad (4)$$

对(4)式化简,可得

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} & z_n - z_{n-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) - (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \\ \vdots \\ (x_n^2 + y_n^2 + z_n^2) - (x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 + z_{n-1}^2) \end{bmatrix}, \quad (5)$$

(5)式是关于 (x, y, z) 的 $n-1$ 个方程所构成的超定方程组。其中标记

$$\begin{bmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ x_3 - x_2 & y_3 - y_2 & z_3 - z_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n - x_{n-1} & y_n - y_{n-1} & z_n - z_{n-1} \end{bmatrix} = \mathbf{A}, \quad \frac{1}{2} \begin{bmatrix} (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) - (x_1^2 + y_1^2 + z_1^2) \\ (x_3^2 + y_3^2 + z_3^2) - (x_2^2 + y_2^2 + z_2^2) \\ \vdots \\ (x_n^2 + y_n^2 + z_n^2) - (x_{n-1}^2 + y_{n-1}^2 + z_{n-1}^2) \end{bmatrix} = \mathbf{B},$$

则(5)式可记为

$$\mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{B}. \quad (6)$$

对(6)式这样的超定方程组,可采用下面的算法算出其最小二乘意义下的解:

$$\mathbf{A}'\mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{A}'\mathbf{B}, \quad (7)$$

则

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (\mathbf{A}'\mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}'\mathbf{B}, \quad (8)$$

即此时测头 O 在摄像机坐标系下的坐标。

由于测量时,测头 O 将要随处移动,所以有必

要将(8)式的摄像机坐标系下的坐标换算到标靶坐标系下。在手持相位标靶上的任意特征点,它在相位标靶坐标系下的坐标与它在摄像机坐标系中的坐标关系可以表示为^[18,19]

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \mathbf{R} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} + \mathbf{t}, \quad (9)$$

式中 $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$ 为特征点在摄像机坐标系下的坐标,

$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$ 为对应点在标靶坐标系下的坐标。 \mathbf{R}, \mathbf{t} 分别为每张图像对应的旋转矩阵与平移向量,均可在标定好摄像机后,再通过标定外参数得到^[18,19]。

根据(9)式,可得

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} - \mathbf{t}, \quad (10)$$

将(8)式代入(10)式,对所拍得的 n 张图片,分别取对应的 \mathbf{R}, \mathbf{t} 也代入(10)式,即可求出测头 O 在每张图片的标靶坐标系下的坐标。对这 n 组坐标值取平均:

$$\begin{cases} X = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2} \\ Y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2} \\ Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \end{cases}, \quad (11)$$

测头到标靶坐标系原点的距离 L 也可以算出

$$L = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}. \quad (12)$$

由(11)式得到的坐标值 (X, Y, Z) 即测头 O 点在标靶坐标系下的坐标。由于测头与标靶上的任意点的位置关系始终是固定的,所以无论如何摆放或者移动手持相位标靶,(11)式的 (X, Y, Z) 值将始终保持不变。换句话说,如果显示屏上的图像不变,所取的标靶坐标系的原点 O_1 的位置不变,那么这个坐标的值不会因为手持相位标靶的位置改变而改变。所以,它可以被视为系统参数而存贮起来,并直接用它参与下面进行的定点测量。

2.2.2 手持相位标靶用于光学三维坐标测量

对物体进行测量时,保持摄像机不动。手握测棒,使测头接触待测量点,稳定后,由摄像机拍摄下显示屏上的条纹图像,然后移动标靶,使其与待测物体的另一个点接触,进行数据采集如此重复设共摄得 N 张图像。

通过摄像机标定外参数,得到用于测量的每张图像对应的旋转矩阵 $\mathbf{R}_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 与平移向量 $\mathbf{t}_i (i=1, 2, 3, \dots, N)$ 。由(9)式可知拍摄到的每张图片的测头在摄像机坐标系下的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \mathbf{R}_i \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \mathbf{t}_i, \quad (13)$$

式中 $\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$ 即(11)式所求得值,它始终不会改变;

$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$ 则是每张图片中的测头在摄像机坐标系下的

坐标。由于摄像机不动,所以每次算出的 $\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix}$ 值其实代表了待测物体上的各个待测点的位置关系。

3 实 验

图 3 为实验示意图,保持摄像机不动。

3.1 平面镜的测量

首先,用本文提出的相位标靶,完成对摄像机内参数的标定。标定结果为:

焦距为 1886.419 ± 0.728 pixel; 1954.329 ± 0.732 pixel; 主点为 370.708 ± 0.576 pixel; 259.657 ± 0.443 pixel。

然后,用手握住手持相位标靶,使测头在同一个点旋转,先后拍下若干张显示屏上的图像。本实验对 7 张图片进行了分析,计算得到测头在标靶坐标系下的坐标为: $(286.459, 71.814, -55.547)$ (单位: mm)。

最后,用一块镜面作为待测物体,并视之为一个标准平面。用测头接触镜面上的不同点,设共拍得 N 张测量图片 ($N \geq 3$)。按本文的方法算出每个点的坐标后,将这些点的坐标值(在摄像机坐标系下)拟合成一个形如 $Ax + By + Cz - 1 = 0$ 的平面。然后按下式算出各测量点与拟合平面间的最短距离

$$D = \frac{Ax_i + By_i + Cz_i - 1}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (14)$$

式中 x_i, y_i, z_i 分别为第 i 张图片上测头在对应摄像机坐标系下的坐标值。(14)式反映了本测量方式的测量精度。

然后,找出每个测量点在拟合平面上的垂足点在摄像机坐标系下的坐标 (x'_i, y'_i, z'_i) 。则

$$\begin{cases} \Delta x = x_i - x'_i \\ \Delta y = y_i - y'_i \\ \Delta z = z_i - z'_i \end{cases}, \quad (15)$$

可以反映本文测量方式的坐标定位精度。

下面给出由 9 个点拟合的平面及相关测量数据:拟合的平面方程为 $-4.951 \times 10^{-5}x + 4.571 \times 10^{-3}y - 2.323 \times 10^{-5}z - 1 = 0$;各测点在相机坐标系下的坐标值如表 1 所示。按(15)式算出的各测量点的坐标定位偏差值如表 2 所示。按(14)式算得的测量偏差值如表 3 所示。适当移动并倾斜镜面后,再次实验,得到 9 张图片。拟合出来的对应平面方程为 $-2.938 \times 10^{-5}x + 3.028 \times 10^{-3}y + 1.780 \times$

$10^{-4}z-1=0$ 。按(14)式算得的对应的测量偏差如表4所示。

表1 各测点的对应坐标值

Table 1 Corresponding coordinate of measured points

Serial number	$x/10^3$ mm	$y/10^3$ mm	$z/10^3$ mm
1	-0.1116	0.2249	1.4364
2	-0.0952	0.2249	1.4097
3	-0.1199	0.2247	1.4214
4	-0.1173	0.2248	1.4235
5	-0.1186	0.2246	1.4062
6	-0.1095	0.2247	1.3949
7	-0.0998	0.2250	1.4321
8	-0.0867	0.2252	1.4431
9	-0.0950	0.2250	1.4164

表2 各测点的坐标定位偏差

Table 2 Corresponding coordinate excursion about measured points

Serial number	Δx /mm	Δy /mm	Δz /mm
1	0.181	-0.017	0.085
2	-0.227	0.021	-0.106
3	0.233	-0.022	0.110
4	-0.646	0.060	-0.303
5	0.058	-0.005	0.027
6	0.310	-0.029	0.146
7	0.140	-0.013	0.065
8	0.110	-0.010	0.052
9	-0.160	0.015	-0.075

表3 各测点的测量偏差值

Table 3 Corresponding distance excursion about measured points

Serial number	D /mm
1	-0.017
2	0.021
3	-0.022
4	0.060
5	-0.005
6	-0.029
7	-0.013
8	-0.010
9	0.015

表4 各测点的测量偏差值

Table 4 Corresponding distance excursion about measured points

Serial number	D /mm
1	0.028
2	-0.017
3	0.012
4	-0.014
5	-0.051
6	0.031
7	0.033
8	0.035
9	-0.057

3.2 台阶型物体的测量

本文还对如图5所示中心的一个台阶物体进行了定点测量。测量结果如下:

相机内参数的标定结果:焦距为 1623.728 ± 0.848 pixel; 1958.263 ± 0.977 pixel; 主点为 321.868 ± 0.766 pixel; 272.429 ± 0.602 pixel。重新制作了标靶,按本文方法算出的测头在该标靶坐标系下的坐标为: $(275.833, 37.875, 0.327)$ (单位:mm)。拟合的台阶型物体的底平面方程为

$$-4.126 \times 10^{-5}x + 6.053 \times 10^{-3}y + 1.181 \times 10^{-4}z - 1 = 0$$

顶平面与第二层平面到底平面的距离可按(14)式算出,对应真实距离及测量结果如表5所示。其中 h 表示台阶型物体各待测平面到底面的真实距离; h_1 表示测量出的台阶上各测量点到底平面的测量距离; Δh 则表示两者之差值。

表5 测量结果

Fig. 5 Measurement results

Serial number	h /mm	h_1 /mm	Δh /mm
1	10.000	10.075	0.075
2	10.000	10.023	0.023
3	10.000	9.965	-0.035
4	10.000	10.028	0.028
5	10.000	9.992	-0.008
6	15.000	14.976	-0.024
7	15.000	15.018	0.018
8	15.000	14.863	-0.137
9	15.000	14.978	-0.022
10	15.000	14.896	-0.104



图 5 被测物体

Fig. 5 Measured object

由实验结果可以看出所提算法能够较好地进行三维物体的定点测量。在测量过程中,误差主要来源于对测量系统标定的误差、尤其是计算测头在标靶坐标系下的坐标值带来的误差;另外,系统的微小扰动以及手持相位标靶的加工精度,还有 3.2 节中的标准台阶物体自身的精度,都在一定程度上给测量带来影响。

4 结 论

用手持相位标靶进行了光学三维坐标测量。提出手持相位标靶测头坐标的计算公式,找出了测头在标靶坐标系下的坐标,从而较准确地得到了测头与手持相位标靶上各特征点的位置关系;提出了采用手持相位标靶进行定点测量时,对测量点的坐标获取的计算公式;另外,对测量结果采用的数学方法进行了误差计算与分析。由于将相位技术及条纹处理技术引入到了标靶的制作当中,有效地将接触式测量与光学非接触式测量进行了结合。采用本文所提的标靶,可以直接对三维物体的任意可接触点进行测量。实验得到了较为理想的精度,证明了所提方法的正确性。

参 考 文 献

- 1 Su Xianyu, Li Jitao. Information Optics[M]. Beijing: Science Press, 1999
苏显渝, 李继陶. 信息光学[M]. 北京: 科学出版社, 1999
- 2 Zhang Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing: Science Press, 2005
张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2005
- 3 Mitsuo Takeda, Kazuhiro Mutoh. Fourier transform profilometry for the automatic measurement 3-Object shapes[J]. *Appl. Opt.*, 1983, **22**(24): 3977~3982
- 4 Xu Qiaoyu, Che Rensheng. Study of stereo vision coordinate measurement system based on optical probe[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(11): 2181~2186
徐巧玉, 车仁生. 基于光学测棒的立体视觉坐标测量系统的研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(11): 2181~2186
- 5 Sun Wei, He Xiaoyuan, Quan Chenggen *et al.*. Three-dimensional rigid body displacement measurement based on digital image

- correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 894~901
孙 伟, 何小元, C. Quan 等. 基于数字图像相关的三维刚体位移测量方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 894~901
- 6 Yang Chuping, Weng Jiawen. Fourier transform profilometry by original grating reconstruction from deformed grating pattern[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(7): 1287~1290
杨初平, 翁嘉文. 基准光栅重构傅里叶变换轮廓术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(7): 1287~1290
- 7 Xu Qiaoyu, Ye Dong, Che Rensheng. On-line calibration of stereo vision measurement system based on optical reference bar[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(1): 81~86
徐巧玉, 叶 东, 车仁生. 基于光学参考棒的立体视觉测量系统现场标定技术[J]. *光学学报*, 2008, **28**(1): 81~86
- 8 Zhu Jigui, Zhang Guoquan, Tang Dalin *et al.*. Research on optical 3D coordinate measurement technology[J]. *J. China Jiliang University*, 2005, **16**(2): 100~102
郝继贵, 张国全, 唐大林 等. 光学 3D 坐标测量技术研究[J]. *中国计量学院学报*, 2005, **16**(2): 100~102
- 9 Zhu Jigui, Tang Dalin, Bai Yang *et al.*. The drone control of VCMM which is based on bluetooth technology[J]. *Modern Scientific Instruments*, 2005, **3**: 28~30
郝继贵, 唐大林, 白 洋 等. 基于蓝牙技术的光学测量机无线靶标控制[J]. *现代科学仪器*, 2005, **3**: 28~30
- 10 Feng Qiqiang, Li Guangyun, Huang Guiping. Single image space resection in digital industrial photogrammetry[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2008, **6**: 4~6
冯其强, 李广云, 黄桂平. 数字工业摄影测量中的单向空间后方交会[J]. *测绘通报*, 2008, **6**: 4~6
- 11 Liu Yuankun, Su Xianyu. A new camera calibration technique using FTP method[J]. *J. Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2007, **39**(6): 149~153
刘元坤, 苏显渝. 基于傅里叶条纹分析的摄像机标定[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2007, **39**(6): 149~153
- 12 Li Yong, Su Xianyu. New method for system calibration in phase measurement profilometry with large view field[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1162~1166
李 勇, 苏显渝. 一种大视场相位测量轮廓术系统标定方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1162~1166
- 13 Liu Yuankun, Su Xianyu, Wu Qingyang. Multi-camera calibration by FTP technique[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1734~1737
刘元坤, 苏显渝, 吴庆阳. 基于傅里叶条纹分析的多摄像机标定方法[J]. *光子学报*, 2007, **36**(9): 1734~1737
- 14 Liu Yuankun, Su Xianyu. New camera calibration technique based on phase measurement[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, **34**(11): 65~69
刘元坤, 苏显渝. 基于相位测量的摄像机标定方法[J]. *光电工程*, 2007, **34**(11): 65~69
- 15 Su Xianyu, Chen Wenjing. Fourier transform profilometry: review [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2001, **35**: 263~284
- 16 Mao Xianfu, Chen Wenjing, Su Xianyu *et al.*. Analysis of new phase and height algorithm in Fourier transform profilometry[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 225~229
毛先富, 陈文静, 苏显渝 等. 傅里叶变换轮廓术中新的相位及高度算法分析[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 225~229
- 17 Janne Heikkilä, Olli Silvén. A four-step camera calibration procedure with implicit image correction[C]. *IEEE CVPR'97 San Juan, Puerto Rico*, 1997, **1**: 1106~1112
- 18 R. Y. Tsai. A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. *IEEE J. Robotics and Automation*, 1987, **3**(4): 322~344
- 19 Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, **22**(11): 1330~1334