

文章编号 1004-924X(2008)07-1309-06

# 多视点大空间三维坐标数据归一化方法

陈 刚<sup>1</sup>,姚英学<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 自动化测试与控制系,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**提出了一种在一个编码区内利用立体视觉传感器两次单元测量重叠区域内的公共光学编码点来完成多视点三维数据拼接的方法。通过奇异值分解法求取立体视觉传感器位姿变换的  $R$  和  $T$  矩阵,将后一次单元测量结果转换到前一次单元测量的坐标系下,完成坐标系的归一化。实验证明,该方法在使用 12 个编码点求解时,坐标归一化后在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向上  $1.2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 0.4\text{ m}$  范围内的平均误差分别为  $0.08\text{ mm}$ 、 $-0.07\text{ mm}$  和  $-0.02\text{ mm}$ ,达到了较高的拼接精度,同时该方法无需在被测目标上粘贴任何特征点,真正实现了非接触测量。

**关键词:**立体视觉;光学编码;三维坐标;数据拼接

**中图分类号:**TP391 **文献标识码:**A

## 3D datum mosaic method of multi-view and large scale based on optical coding

CHEN Gang<sup>1</sup>, YAO Ying-xue<sup>2</sup>

(1. *Department of Automatic Measurement and Control, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;*

2. *School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China*)

**Abstract:** A multi-view 3D datum mosaic method is presented by measuring optical coded points in an overlapped area in two partial measurement units with a stereo vision sensor. The method obtains the stereo vision sensor's location and attitude transform matrixes  $R$  and  $T$  by minimizing the linear least square criterion, and achieves the mosaic of measurement results through transforming the latter measurement results into the coordinate system of the former measurement process. When 12 coded points is adopted, the average errors in  $1.2\text{ m}\times 1\text{ m}\times 0.4\text{ m}$  range at  $X$ ,  $Y$  and  $Z$  directions are  $0.08\text{ mm}$ ,  $-0.07\text{ mm}$  and  $-0.02\text{ mm}$  respectively. The experimental results show that is a higher mosaic precision. Moreover, this method doesn't need to stick any target points on the object, which makes no-contact measurement come true.

**Key words:** stereo vision; optical coding; 3D coordinate; datum mosaic

## 1 引 言

在工程实际中,大型目标表面三维数据一般用于物体的形貌测量或者其数字模型的三维重

构,故要求实际测量数据必须是坐标归一化和完整的<sup>[1]</sup>。由于被测目标表面曲率的影响,或者由于装卡及定位的影响,单元测量每次只能完成一个编码区内一部分区域的测量,当需要对大型工件的自由曲面测量时,立体视觉传感器必须改变

收稿日期:2007-12-24;修订日期:2008-03-05.

基金项目:黑龙江省博士后研究基金资助项目(No. LBH-Z06095);黑龙江省科技攻关资助项目(No. GC05A520)

视点,此时每一幅单元测量三维坐标数据都是由视觉传感器在不同的观察位置从不同的视点观测所得到的,传感器获得的是相对于各自世界坐标系的三维数据,因此必须通过对单元测量结果进行拼接来完成大空间测量<sup>[2-3]</sup>。

## 2 同一编码区内相邻测量单元坐标归一化原理

在对大目标进行测量过程中,由计算机控制 LCD 投影仪对测量空间进行编码,测量空间编码原理与编码点三维坐标计算可见参考文献[4-6],

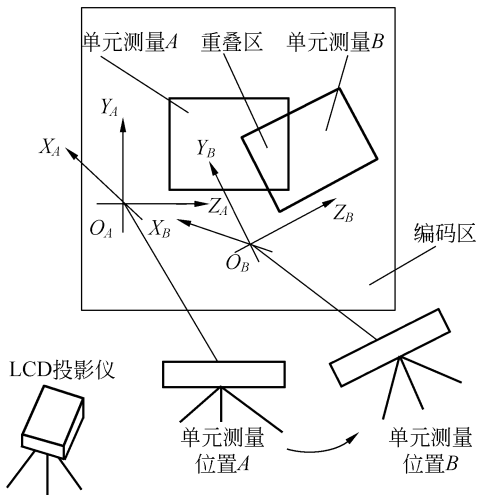


图 1 两次单元测量与重叠区

Fig. 1 Overlapped area of two measurement units

在此不再详述。传感器先在位置 A 测量目标表面一部分(设其为单元测量 A),然后移动传感器到位置 B,测量另一部分(设其为单元测量 B),两区域之间有部分重叠区域。图 1 为视觉传感器获得相邻图像块的示意图。传感器在位置 A 时取得的单元测量结果  $\{P(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})\}$  为坐标系  $O_A X_A Y_A Z_A$  下的坐标,当传感器移动到位置 B 时取得的单元测量结果  $\{P(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})\}$  为坐标系  $O_B X_B Y_B Z_B$  下的坐标。在传感器移动过程中,不可避免地会出现平移、倾斜、旋转,因此要实现单元测量结果的拼接,必须求解两次测量过程之间两个坐标系坐标轴之间的旋转参数和坐标原点的平移参数。将第一次单元测量的坐标系作为世界坐标系,  $(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai})$  和  $(x_{Bi}, y_{Bi}, z_{Bi})$  为重叠区内第  $i$  点分别在两个坐标系下的坐标,则前后两次测量的坐标变换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_{Ai} \\ y_{Ai} \\ z_{Ai} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{BA} \begin{bmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \\ z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{R}_{BA} \begin{bmatrix} x_{Bi} \\ y_{Bi} \\ z_{Bi} \\ 1 \end{bmatrix} + \mathbf{T}_{BA}, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{M}_{BA}$  为位置 A 处传感器坐标系  $O_A X_A Y_A Z_A$  到位置 B 处传感器坐标系  $O_B X_B Y_B Z_B$  之间的坐标转换矩阵,它确定了两个坐标系之间 3 个坐标轴  $X, Y, Z$  的旋转欧拉角  $\alpha, \beta, \gamma$  和坐标原点  $O_A$  到  $O_B$  的平移  $T_x, T_y, T_z$ 。其中:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \cos \gamma & -\sin \alpha \cdot \cos \gamma & \sin \gamma \\ \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \gamma & \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \sin \beta & -\cos \gamma \cdot \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \beta - \cos \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta & \cos \alpha \cdot \sin \beta + \sin \alpha \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta & \cos \gamma \cdot \cos \beta \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\mathbf{T}_{BA}' = [T_x \quad T_y \quad T_z]. \quad (3)$$

确定了该转换矩阵后,即可将第二次单元测量结果转换到第一次单元测量坐标系下,也就是将两相邻图像块在各自坐标系下的数据转换统一到同一个世界坐标系下。

若要取得被测目标完整的三维数据需要  $n$  次单元测量,即需要依次求解  $n-1$  个坐标变换矩阵,最终通过式(4)将测量结果统一到测量初始坐标系  $O_A X_A Y_A Z_A$  下。

$$\begin{bmatrix} x_{i-1} \\ y_{i-1} \\ z_{i-1} \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{ij-1} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \\ 1 \end{bmatrix}, \quad i=1, \dots, n. \quad (4)$$

这样就可以将被测目标上所有的坐标数据统一到参考坐标系  $O_A X_A Y_A Z_A$  下进行描述,从而完成物体的三维重构。

当立体视觉传感器在同一个编码区内进行单元测量时, LCD 投影仪与被测目标之间的相对位置固定不变,因此在该编码区内编码完成后的编码点在被测目标上的位置也是不变的。立体视觉传感器单元测量图像块之间有重叠区域时,重叠区内的编码点在两个单元测量区域内同时存在,则这些编码点就是两次单元测量时的公共点,可以作为两次单元测量时坐标归一化的参考点。

### 3 基于重叠区编码点的转换矩阵求解

设测量单元  $A$  的坐标系为  $O_A X_A Y_A Z_A$ , 测量单元  $B$  的坐标系为  $O_B X_B Y_B Z_B$ , 且两者具有的坐标变换的关系为:

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{BA} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{T} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

即

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & T_x \\ R_4 & R_5 & R_6 & T_y \\ R_7 & R_8 & R_9 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ z_B \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中, 矩阵  $\mathbf{M}_{BA}$  共有 12 个未知量, 而旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 \\ R_4 & R_5 & R_6 \\ R_7 & R_8 & R_9 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

满足正交的条件:

$$\begin{cases} R_1^2 + R_4^2 + R_7^2 = 1 \\ R_2^2 + R_5^2 + R_8^2 = 1 \\ R_3^2 + R_6^2 + R_9^2 = 1 \\ R_1 R_2 + R_4 R_5 + R_7 R_8 = 0 \\ R_1 R_3 + R_4 R_6 + R_7 R_9 = 0 \\ R_2 R_3 + R_5 R_6 + R_8 R_9 = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

所以独立的变量只有 6 个。因此, 最少已知不共线 3 个点在两个坐标系下的坐标, 就可以计算出两者的转换矩阵, 进而实现三维数据的融合。

若采用三点在两坐标系下的坐标值来计算, 则要充分利用正交条件, 但这样需要求解非线性方程组, 计算量较大, 计算的误差也较大。本文使用重叠区内多个编码点的齐次坐标, 利用最小二乘法进行求解, 把式(1)写成:

$$\mathbf{X}_A = \mathbf{M}_{BA} \mathbf{X}_B,$$

式中,  $\mathbf{X}_A$  和  $\mathbf{X}_B$  为重叠区内两个坐标系下 4 个或者 4 个以上点的齐次坐标, 通过三维空间中的多个点求得转换矩阵, 计算方法简单并可提高拼接精度。

式(6)中, 需要求解的是系数矩阵, 已知的是解向量和常向量。因此, 要对方程组进行变化, 将系数矩阵变成需要求解的向量, 转换方法如下:

设重叠区内  $n$  对公共点的坐标分别为:

$$\begin{aligned} &(x_{A1}, y_{A1}, z_{A1}), (x_{B1}, y_{B1}, z_{B1}) \\ &(x_{A2}, y_{A2}, z_{A2}), (x_{B2}, y_{B2}, z_{B2}) \\ &\vdots \\ &(x_{An}, y_{An}, z_{An}), (x_{Bn}, y_{Bn}, z_{Bn}) \end{aligned}$$

那么它们所构成的方程组为:

$$\begin{bmatrix} x_{A1} \\ y_{A1} \\ z_{A1} \\ x_{A2} \\ y_{A2} \\ z_{A2} \\ \vdots \\ x_{An} \\ y_{An} \\ z_{An} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{B1} & y_{B1} & z_{B1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{B1} & y_{B1} & z_{B1} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{B1} & y_{B1} & z_{B1} & 1 \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & & & \\ x_{Bn} & y_{Bn} & z_{Bn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_{Bn} & y_{Bn} & z_{Bn} & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{Bn} & y_{Bn} & z_{Bn} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ T_x \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ T_y \\ R_7 \\ R_8 \\ R_9 \\ T_z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

该方程组为形如  $\mathbf{AX}=\mathbf{b}$  的线性方程组, 通过求解式(9)这十二阶稀疏系数矩阵线性方程组可得到转换矩阵的各个参数。

在测量过程中, 系数矩阵  $\mathbf{A}$  有可能接近奇异, 此时若用主元消去法求解正规方程, 可能产生零主元而导致无法求解, 也可能因为主元很小, 得

到的解误差很大。为了克服这个问题,可采用矩阵的奇异值分解法求解该方程的最小二乘解。

记  $\mathbf{A}$  为  $n \times m$  矩阵,求正交矩阵  $\mathbf{U}$  和  $\mathbf{V}$ ,使  $\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^T$ ,其中:

$\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_1, \dots, \omega_n), \omega_1 \geq \omega_2 \geq \dots \geq \omega_n \geq 0$  是矩阵  $\mathbf{A}^T\mathbf{A}$  的  $n$  个特征值的非负平方根,  $\mathbf{U} = (\mathbf{U}_1, \dots, \mathbf{U}_m)$  是列正交的  $n \times m$  矩阵。则  $\mathbf{A}$  的奇异值分解为:

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{W}\mathbf{V}^T. \quad (10)$$

线性方程组  $\mathbf{A}\mathbf{X} = \mathbf{b}$  的最小二乘解为:

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^+ \mathbf{b} = \mathbf{V}\mathbf{W}^+ \mathbf{U}^T \mathbf{b}, \quad (11)$$

其中  $\mathbf{A}^+ = \mathbf{V}\mathbf{W}^+ \mathbf{U}^T$ ,

$\mathbf{W} = \text{diag}(\omega_1, \dots, \omega_n), \omega_1 \geq \omega_2 \geq \dots \geq \omega_n \geq 0$

$$\mathbf{W}_i^* = \begin{cases} 0, & \omega_i = 0 \\ 1/\omega_i, & \omega_i \neq 0 \end{cases}, i = 1, 2, \dots, n. \quad (12)$$

该最小二乘解就是所求的两次单元测量中世界坐标系的转换矩阵:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} R_1 & R_2 & R_3 & T_x \\ R_4 & R_5 & R_6 & T_y \\ R_7 & R_8 & R_9 & T_z \end{bmatrix}. \quad (13)$$

在求出单元测量  $B$  中编码点的三维坐标后,可以利用该转化矩阵将其统一到单元测量  $A$  的世界坐标系下,从而完成两次单元测量结果的归一化。

#### 4 坐标归一化实验验证

如图 1 所示,首先将标定完成的双目视觉传感器放置在位置  $A$ ,然后利用 LCD 投影仪在物体表面进行编码<sup>[4]</sup>,同时由标定完成的立体视觉传感器完成编码点的提取和当前传感器位置的编码点三维坐标计算<sup>[5-6]</sup>。

取得单元测量中编码点坐标后,LCD 投影仪位置不变,立体视觉传感器移动到位置  $B$ ,求取此时的编码点在传感器位置  $B$  时的三维坐标。由于 LCD 投影仪位置不变,所以物体表面编码点在两次测量过程中的编码相同且位置不变。两次测量过程中的单元测量区域有部分重叠,则重叠区内的编码点就是在两次单元测量中同时存在的公共点。实验中计算机自动在重叠区内随机选取了不共线且均匀分布的 12 个公共点,利用其求取两次单元测量中两个世界坐标系的相互位置关系,其  $\mathbf{R}$  和  $\mathbf{T}$  矩阵如式(14)和(15)所示。

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0.871\ 95 & -0.495\ 872 & -0.010\ 304 \\ 0.487\ 828 & 0.870\ 602 & -0.014\ 481 \\ 0.003\ 655 & 0.010\ 437 & 0.999\ 419 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{T} = [26.064\ 445 \quad -26.631\ 128 \quad -0.295\ 426]. \quad (15)$$

利用该转换矩阵将 10 个重叠区内编码点在传感器位置  $B$  中的坐标转换到传感器位置  $A$  的世界坐标系下,并考察其转换误差,结果如表 1 所示。

表 1 坐标归一化结果与误差(12 组公共点)(单位:毫米)  
Tab.1 Result of coordinate transform and errors  
(12 groups of common points) (unit:mm)

序号	坐标轴	位置 A	位置 B	归一化后	误差
1	X	46.41	8.11	46.19	$\Delta X = 0.22$
	Y	-44.52	-25.66	-44.53	$\Delta Y = 0.02$
	Z	-33.51	-33.05	-33.56	$\Delta Z = 0.06$
2	X	13.22	-11.25	13.39	$\Delta X = -0.17$
	Y	-25.18	7.12	-25.03	$\Delta Y = -0.15$
	Z	-62.10	-61.91	-62.13	$\Delta Z = 0.03$
3	X	67.18	60.04	67.12	$\Delta X = 0.07$
	Y	23.86	23.59	23.89	$\Delta Y = -0.04$
	Z	-48.23	-48.40	-48.20	$\Delta Z = -0.03$
4	X	41.39	60.24	41.51	$\Delta X = -0.12$
	Y	70.66	76.52	70.73	$\Delta Y = -0.07$
	Z	-93.32	-93.78	-93.00	$\Delta Z = -0.32$
5	X	126.48	66.06	126.68	$\Delta X = -0.20$
	Y	-67.79	-85.42	-67.69	$\Delta Y = -0.10$
	Z	-75.84	-75.09	-75.99	$\Delta Z = 0.15$
6	X	-19.16	-34.24	-19.12	$\Delta X = -0.04$
	Y	-13.86	32.78	-13.45	$\Delta Y = -0.41$
	Z	-87.48	-87.43	-87.46	$\Delta Z = -0.03$
7	X	13.83	-27.95	13.84	$\Delta X = -0.01$
	Y	-60.12	-23.40	-59.95	$\Delta Y = -0.17$
	Z	-47.88	-47.39	-48.01	$\Delta Z = 0.13$
8	X	42.19	14.99	41.60	$\Delta X = 0.59$
	Y	-23.77	-5.71	-23.92	$\Delta Y = 0.16$
	Z	6.85	7.19	6.89	$\Delta Z = -0.04$
9	X	85.34	92.26	84.83	$\Delta X = 0.51$
	Y	57.28	44.10	57.27	$\Delta Y = 0.01$
	Z	-33.72	-34.61	-33.57	$\Delta Z = -0.15$
10	X	147.74	108.41	147.72	$\Delta X = 0.01$
	Y	-20.94	-54.36	-20.98	$\Delta Y = 0.04$
	Z	-22.93	-22.47	-22.93	$\Delta Z = -0.00$
		$ \Delta X_{\max}  = 0.59$	$ \Delta Y_{\max}  = 0.41$	$ \Delta Z_{\max}  = 0.32$	
		$ \Delta X_{\min}  = 0.01$	$ \Delta Y_{\min}  = 0.01$	$ \Delta Z_{\min}  = 0.00$	
		$\overline{\Delta X} = 0.08$	$\overline{\Delta Y} = -0.07$	$\overline{\Delta Z} = -0.02$	

为了考察归一化时采用的公共点数量对于转换精度的影响,还进行了在重叠区内通过选取5个公共编码点求取坐标转换矩阵,然后对以上10个编码点进行坐标转换的实验,实验结果如表2所示。

表2 坐标归一化后误差(5组公共点)(单位:毫米)  
Tab. 2 Errors of coordinate transform  
(5 groups of common points) (unit:mm)

X轴方向误差	Y轴方向误差	Z轴方向误差
$ \Delta X_{\max} =1.86$	$ \Delta Y_{\max} =0.93$	$ \Delta Z_{\max} =1.30$
$ \Delta X_{\min} =0.04$	$ \Delta Y_{\min} =0.07$	$ \Delta Z_{\min} =0.04$
$\overline{\Delta X}=-0.40$	$\overline{\Delta Y}=-0.45$	$\overline{\Delta Z}=-0.33$

从结果可以看出,采用较多的公共点进行坐标转换矩阵的求解显著提高了求解和坐标转换精度。以误差平均值计算,在X轴方向提高了4.8倍,Y轴方向提高了6.3倍,Z轴方向提高了16.2倍。但是公共点的数量并非越多越好,本文也进行了采用25个公共点进行转换的实验,发现转换精度并没有明显提高,反而导致程序运算量大幅增加,处理时间延长。说明过密的参考点对于提高转换精度意义不大。因此,在实际测量中,合理利用重叠区内编码作为单元测量结果拼接参考点,通过奇异值分解法进行求解坐标归一化转换矩阵,对于提高坐标系转换精度,减小精度损失非常有利。

采用本文提出的多视点三维数据拼接方法对依维柯车的左前叶子板进行了多视点三维测量和重构。如图2所示,该工件面积较大,LCD投影仪对其进行光学编码,形成编码区,覆盖测量目标。



图2 对工件进行测量

Fig. 2 Part measurement

用立体视觉传感器在编码区内进行多次单元测量,并用单元测量重叠区内的编码点进行了测量结果的拼接,将各个视点取得的单元测量数据统一到同一个世界坐标系中,完成了车身覆盖件的测量。如图3所示,将取得的点数据输入到三维重构软件中,可以获得被测目标的三维形貌,并可任意旋转、缩放。

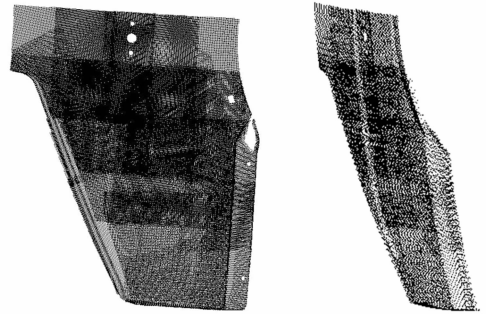


图3 被测工件点云图

Fig. 3 Point cloud photos of parts

## 5 结论

本文对大空间三维测量的关键——多视点单元测量三维坐标数据拼接问题进行了研究,提出了基于重叠区编码点的相邻单元测量结果拼接的方法。与以往的基于粘性目标或者压痕等重叠区内有限数量特征点完成拼接的3点法、5点法等方法相比,该方法具有更高的精度和稳定性,单元测量区域的选取也不会因为需要考虑重叠区必须覆盖有限数量的特征点而受到限制。由于不需要在被测目标表面粘贴或压制任何特征点,实现了真正的非接触测量,可以完整获取被测目标表面信息,适用于车身覆盖件等大尺寸工件的三维测量与重构。

## 参考文献:

- [1] 张舜德, 卢秉恒, 丁玉成. 光学三维形面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 533-536.  
ZHANG SH D, LU B H, DING Y CH. Study on data registration of subdivided shapes in optical 3-D profilometry [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(6): 533-536. (in Chinese)
- [2] HUNG Y Y, LIN L, SHANG H M, *et al.*. Practical three-dimensional computer vision techniques for full-field surface measurement[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 39(1): 143-149.
- [3] CHEN F, BROWN G M, SONG M. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2000, 39(1): 10-22.
- [4] CHEN G, YU ZH J, CHE R SH, *et al.*. A novel method of measurement for large space 3-D coordinate by binocular code matching[C]. *Proceedings of Photonics Asia'2002, Shanghai, Proceedings SPIE*, 2002, 4921: 20-27.
- [5] CHEN G, HUANG Q CH, CHE R SH, *et al.*. A novel 3-D coordinate measuring system base on binocular coded points matching[C]. *Proceedings of Third International Symposium on Instrumentation Science and Technology (ISIST'2003), Xi'an, 2004, Harbin Institute of Technology Press*, 2004, (1): 971-976.
- [6] 陈刚, 陈华, 车仁生. 空间点的立体视觉传感器标定方法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(9): 1439-1444.  
CHEN G, CHEN H, CHE R SH. Calibration method for stereo vision sensor based on spatial points[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(9): 1439-1444. (in Chinese)
- [7] 陈刚, 车仁生, 叶东, 等. 双目视觉坐标测量系统中网格点的分割与编码[J]. 光学 精密工程, 2004, 12(3): 204-207.  
CHEN G, CHE R SH, YE D, *et al.*. Target point's segmentation and coding in a binocular coordinate measurement system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(3): 204-207. (in Chinese)

作者简介: 陈刚(1971—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为大空间视觉测量和工业视觉检测技术。E-mail: chenganghit@hit.edu.cn

## ● 下期预告

## 基于多目标优化的空间直线度误差评定

岳武陵, 吴勇

(南通大学机械工程学院, 江苏南通 226007)

了实现对空间直线度误差的精确、快速评定, 研究了它的数学模型和 SQP 算法。根据最小区域定义及数学规划理论, 建立了空间直线度评定的非线性规划模型, 指出了这模型实质上是多目标优化的问题并将该优化问题转化成单目标优化问题。由于该非线性规划模型还是凸的、二次的, 因此提出了用逐次二次规划的解法(SQP法)来实施。SQP法在评定过程中保留了模型中的非线性信息, 对初始参数的要求低, 且稳定、可靠、效率高。几个算例的结果均满足凸规划全局最优判别准则, 精度达到  $10^{-3}$  mm 且耗时在 0.4 s 左右。这就有力的验证了上述结论。