一种自由曲面视觉测量三维数据拼接方法

谢光辉 孙军华 杨 珍 张广军

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘 要: 提出一种利用标志点构建全局测量控制点的视觉测量三维数据拼接方法. 在被测自由曲面上粘贴标志点,并在被测区域放置基线尺,采用1台数码相机在不同视点拍摄标记点和基线尺图像,由此求解数码相机在不同视点的坐标系变换关系. 在此基础上,根据立体视觉模型确定标志点三维坐标,转换到全局坐标系下,形成全局测量控制点. 视觉传感器在不同位置对各局部区域进行三维扫描,获得局部区域内标志点在局部测量坐标系下的坐标,通过至少3个非共线标志点解算局部坐标系到全局坐标系的变换,从而将实现局部三维数据的拼接. 该方法操作简便,适合现场使用. 实验结果表明, x, y, z坐标的拼接误差分别为0.03 mm, 0.02 mm, 0.07 mm.

关 键 词: 视觉测量; 三维拼接; 标志点; 基线尺; 数码相机

中图分类号: TP 391

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)07-0877-05

3D data registration method for vision measurement

Xie Guanghui Sun Junhua Yang Zhen Zhang Guangjun

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A 3D data registration method was proposed for vision measurement using mark points as global measurement control points. Mark points were attached to the measured objects and one or more baseline rulers were put in the measured area. The images of mark points and the baseline rulers were captured by a digital camera from different viewpoints, by which the coordinate frame transformations between viewpoints were estimated. Using the stereo vision model, the local coordinates of the mark points were determined, and then converted at the global coordinate frame, forming the global measurement control points. Scanning different parts of the object at different positions, the vision sensor obtained the coordinates of some mark points in the local coordinate frame of the sensor. The transformation from the local to the global coordinate frame was computed using at least three non-collinear mark points, thus the 3D data acquired by the sensor at different positions were integrated into the global coordinate frame. The proposed method is convenient and applicable in field measurements. Experimental results show that the registration error in x, y, z axis are 0.03 mm, 0.02 mm, 0.07 mm respectively.

Key words: vision measurement; 3D registration; mark points; baseline ruler; digital camera

近年来从计算机视觉理论中发展起来的三维视觉检测技术已应用于精密测量领域,具有非接触、测量速度快、自动化程度和精度较高等优点,适合现代化先进制造业自动化程度的发展要求.

在三维视觉测量过程中,许多因素决定了单个视觉传感器无法一次测量完成整个物体的测量,如复杂物体存在视觉死区,或者对于大型被测物,受测量范围限制,必须分块多次测量[1],然后将局部三维数据拼接起来. 常用的拼接方法一般利用相邻视场公共区域进行拼接,典型的如 Itera-

收稿日期: 2008-06-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50727502); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(200800061003); 教育部创新团队发展计划资助项目(IRT0705)

作者简介: 谢光辉(1962-),男,河南漯河人,博士生, xiegh612@126.com.

tive Closest Point(ICP)算法及其改进算法[2-3],参照物法[4],这两类方法均存在累积误差.虽然文献[5-6]方法在ICP算法基础上对所有参数进行了全局优化,降低了累积误差,但所有基于ICP算法的拼接方法均只适合曲率变化大、不规则的物体.对于规则物体,如球、圆柱体、平面等,ICP算法将失效.此外还可以借助外部设备,如精密旋转台或移动平台[7],将各个局部三维数据拼接起来.这种方法可以达到很高的拼接精度,但大型精密旋转台或移动平台价格昂贵,不适合现场使用.

本文针对三维形貌视觉测量中的数据拼接问题,采用1台数码相机在多个视点拍摄在物体表面粘贴的标记点和摆放的基线尺图像,构建全局测量坐标系,再将局部数据统一到全局测量坐标系下,从而完成物体整体测量.

1 构建全局坐标系

数码相机多视点几何关系如图1所示,数码相机从视点 k 移动到视点 $k+1$,空间点 P 是两次拍摄公共视场内的同一标志点,在两幅图像内对应的像点分别为 p_1 和 p_2.位于视点 k 和 $k+1$ 时数码相机坐标系分别为 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 和 $O_{c2}x_{c2}y_{c2}z_{c2}$,像平面坐标系分别为 $O_1u_1v_1$ 和 $O_2u_2v_2$,像点齐次坐标分别为 $\tilde{p}_1=[u_1,v_1,1]^{\mathrm{T}}$ 和 $\tilde{p}_2=[u_2,v_2,1]^{\mathrm{T}}$,规一化齐次坐标为 $\tilde{p}_{n1}=[u_{n1},v_{n1},1]^{\mathrm{T}}$ 和 $\tilde{p}_{n2}=[u_{n2},v_{n2},1]^{\mathrm{T}}$,$P$ 在数码相机坐标系下齐次坐标分别为 $\tilde{P}_{c1}=[x_{c1},y_{c1},z_{c1},1]^{\mathrm{T}}$ 和 $\tilde{P}_{c2}=[x_{c2},y_{c2},z_{c2},1]^{\mathrm{T}}$.

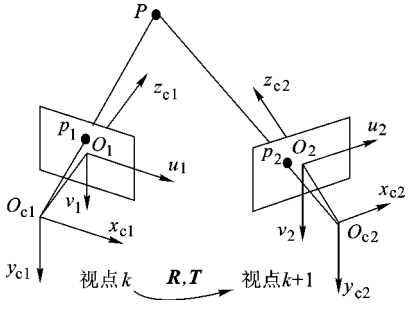


图1 数码相机多视点几何关系

根据透视投影关系有

$$\left.\begin{aligned}\rho_1\tilde{p}_1&=A[I\quad 0]\tilde{P}_{c1}\\ \rho_2\tilde{p}_2&=A[I\quad 0]\tilde{P}_{c2}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中,ρ_1,ρ_2 分别为某一不为零的常数;$A=\begin{bmatrix}\alpha&0&u_0\\0&\beta&v_0\\0&0&1\end{bmatrix}$ 为数码相机内部参数矩阵,采用文献[8]的方法进行标定;I 为3×3单位矩阵.

建立 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 和 $O_{c2}x_{c2}y_{c2}z_{c2}$ 两直角坐标系间的坐标转换关系:

$$\tilde{P}_{c2}=\begin{bmatrix}R&T\\\mathbf{0}&1\end{bmatrix}\tilde{P}_{c1}\tag{2}$$

式中,$R=\begin{bmatrix}r_1&r_2&r_3\\r_4&r_5&r_6\\r_7&r_8&r_9\end{bmatrix}$ 为旋转矩阵;$T=[T_x,T_y,T_z]^{\mathrm{T}}$ 为平移矢量.

图像坐标 $\tilde{p}$ 与规一化坐标 $\tilde{p}_n$ 之间存在如下关系:

$$\tilde{p}_n=A^{-1}\tilde{p}\tag{3}$$

由式(1)、式(2)和式(3)可得如下关系:

$$\begin{bmatrix}z_{c2}\tilde{p}_{n2}\\1\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R&T\\\mathbf{0}&1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}z_{c1}\tilde{p}_{n1}\\1\end{bmatrix}\tag{4}$$

于是可得

$$\left.\begin{aligned}x_{c1}&=z_{c1}u_{n1}\\y_{c1}&=z_{c1}v_{n1}\\z_{c1}&=\\&\frac{T_x-u_{n2}T_z}{u_{n2}(r_7u_{n1}+r_8v_{n1}+r_9)-(r_1u_{n1}+r_2v_{n1}+r_3)}=\\&\frac{T_y-v_{n2}T_z}{v_{n2}(r_7u_{n1}+r_8v_{n1}+r_9)-(r_4u_{n1}+r_5v_{n1}+r_6)}\end{aligned}\right\}\tag{5}$$

从式(5)可得

$$\begin{aligned}&(T_x-u_{n2}T_z)[v_{n2}(r_7u_{n1}+r_8u_{n1}+r_9)-\\&\quad(r_4u_{n1}+r_5v_{n1}+r_6)]-\\&(T_y-v_{n2}T_z)[u_{n2}(r_7u_{n1}+r_8v_{n1}+r_9)-\\&\quad(r_1u_{n1}+r_2v_{n1}+r_3)]=0\end{aligned}\tag{6}$$

式(6)是一个含有12个未知数 T_x,T_y,T_z,r_1,r_2,r_3,r_4,r_5,r_6,r_7,r_8 和 r_9 的非线性方程.对 T_x,T_y,T_z 而言该方程是齐次的.由多个标志点对应的图像坐标,可以求得R和含有比例因子的T.

设 $T'=\theta T$,$T_x\neq 0$,选择 $\theta=1/T_x$,则 $T'=[1\quad T_y'\quad T_z']^{\mathrm{T}}$.式(6)成为一个含有11个未知数的非线性方程,用函数 $f(x)=0$ 描述,其中 $x=[T_y',T_z',r_1,r_2,r_3,r_4,r_5,r_6,r_7,r_8,r_9]^{\mathrm{T}}$.

另外,R满足正交条件,具有6个正交约束条件,从而得到无约束最优目标函数为

$$F(x)=\sum_{i=1}^{n}f_i^2(x)+M\cdot\sum_{i=1}^{6}h_i^2(x)=\min\tag{7}$$

式中,M 为罚因子;n 为靶标上特征点个数,且 $n\geq 5$;$h_i(x)$ 为正交约束条件.最后利用Levenberg-Marquardt优化算法解出x.

由于求出了 R和 T,由式 (5)不难求出基线尺端点 P_a和 P_b两点的坐标 $[x_{ac1}, y_{ac1}, z_{ac1}]$, $[x_{bc1}, y_{bc1}, z_{bc1}]$,因而可以求出标准尺的长度 D'_{ab},是真实长度的 θ倍.根据标准尺真实长度 D_{ab}可求得

$$\theta = \pm D'_{ab}/D_{ab} \tag{8}$$

比例因子 θ由坐标选择法来确定.则

$$T = T'/\theta \tag{9}$$

得到数码相机各相邻视点之间的坐标变换关系后,以数码相机在第 1个视点的坐标系为全局坐标系,将其余各坐标系统一到全局坐标系下.

2　三维拼接

数码相机在相邻两个视点构成双目系统,对视场内标志点进行三维重构,获得各标志点在全局坐标系下的坐标.将标志点作为全局测量控制点,视觉传感器在各局部区域进行三维扫描的同时,也获得局部区域内全局测量控制点在局部坐标系下的坐标.

选择局部区域内非共线 3个标志点,在局部坐标系下三维坐标分别为 P_1, P_2和 P_3,在全局坐标系下三维坐标为 Q_1, Q_2和 Q_3.计算矢量 $P_2 - P_1$, $P_3 - P_1$, $Q_2 - Q_1$和 $Q_3 - Q_1$,令 $V_1 = P_2 - P_1$, $W_1 = Q_2 - Q_1$,作矢量 V_2和 W_2:

$$\left.\begin{aligned} V_2 &= V_1 \times (P_3 - P_1) \\ W_2 &= W_1 \times (Q_3 - Q_1) \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

再作矢量 V_3和 W_3:

$$\left.\begin{aligned} V_3 &= V_1 \times V_2 \\ W_3 &= W_1 \times W_2 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

V_1, V_2和 V_3及 W_1, W_2和 W_3分别构成右手正交系.将它们转化为单位矢量:

$$\left.\begin{aligned} v_1 &= V_1 / \| V_1 \| \\ v_2 &= V_2 / \| V_2 \| \\ v_3 &= V_3 / \| V_3 \| \\ w_1 &= W_1 / \| W_1 \| \\ w_2 &= W_2 / \| W_2 \| \\ w_3 &= W_3 / \| W_3 \| \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

则 $[v_1, v_2, v_3]$和 $[w_1, w_2, w_3]$为各自正交系的一组单位正交基.设局部坐标系到全局坐标系的坐标变换关系用 3×3旋转矩阵 R和 3×1平移矢量 T表示. $[w_1, w_2, w_3] = R'[v_1, v_2, v_3]$,从而有

$$R' = [w_1, w_2, w_3][v_1, v_2, v_3]^{-1} \tag{13}$$

取对应点 P_1和 Q_1,有 $Q_1 = R'P_1 + T'$,则

$$T' = Q_1 - R'P_1 \tag{14}$$

理想情况下,由上述 3点计算出的坐标变换 R和 T对于视场内所有标志点满足

$$Q_i = R'P_i + T' \tag{15}$$

而实际情况中由于存在噪声以及测量系统本身的误差影响,式 (15)并不严格满足.以经过拼接后对应点之间距离平方和作为最小目标函数来优化 R和 T',目标函数如下:

$$F(R, T) = \sum_{i=1}^{N} \| Q_i - (R'P_i + T') \|^2 + M \sum_{j=1}^{6} h_j(R') \tag{16}$$

其中, $h_j(R')$为正交约束条件.利用视场内多个标志点,同样采用 Levenberg-Marquardt优化方法求解 R和 T.'

通过 R和 T将局部点云数据转换到全局坐标系下,从而完成三维拼接.

3　实验及结果

数码相机采用 Canon Eos5D相机,图像分辨率为 4318像素 ×2912像素,镜头焦距为 50mm.被测对象为高约 500mm的维纳斯石膏像.基线尺为两端有高精度定位圆孔的金属棒,圆孔中心距离为 400mm,精度为 0.003mm.采用光栅式三维扫描仪对石膏像正面分 3次进行测量,单次测量范围约为 400mm ×300mm,测量精度为 0.05mm.

用于构造标志点的是直径约 3mm的黑色纸质圆形标记,以该圆的中心为标志点.在被测石膏像上粘贴 17个标志点,构成全局测量控制点.

表 1为计算所得标志点在全局坐标系下的坐标,表 2为三维扫描仪获得的标志点在局部坐标系下的坐标.其中扫描仪在第 1个测量位置观测到第 1至 5个标志点,扫描仪在第 2个测量位置观测到第 6至 11个标志点,扫描仪在第 3个测量位置观测到第 12至 17个标志点.

3个局部测量坐标系到全局坐标系的坐标转换如下:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.65931 & 0.20446 & 0.72353 \\ -0.18867 & 0.97651 & -0.10403 \\ -0.72781 & -0.06792 & 0.68241 \end{bmatrix}$$

$$T_1 = \begin{bmatrix} -641.169 \\ 91.674 \\ 176.811 \end{bmatrix}$$

$$R_2 = \begin{bmatrix} 0.94105 & 0.00425 & -0.33825 \\ -0.00390 & 0.99999 & 0.00169 \\ 0.33826 & -0.00027 & 0.94105 \end{bmatrix}$$

$$T_2 = \begin{bmatrix} 198.015 \\ 17.918 \\ 19.591 \end{bmatrix}$$

$$R_3 = \begin{bmatrix} 0.19740 & -0.11953 & -0.97301 \\ 0.14724 & 0.98490 & -0.09112 \\ 0.96920 & -0.12528 & 0.21202 \end{bmatrix}$$

$$T_3 = \begin{bmatrix} 652.598 \\ 93.095 \\ 595.892 \end{bmatrix}$$

利用上述坐标转换将表 2中三维坐标转换到全局坐标系下,见表 3.

表 1 标志点在全局坐标系下的坐标 mm

标志点编号	*x*	*y*	*z*
1	-211.68	46.38	822.68
2	-201.76	84.20	777.19
3	-201.63	24.57	747.87
4	-212.88	-62.02	678.73
5	-170.47	20.17	677.71
6	-98.33	-79.96	625.47
7	-122.53	-52.91	636.01
8	-55.94	12.67	633.14
9	-116.26	1.14	640.43
10	-77.63	-52.35	627.18
11	-109.40	62.30	656.68
12	-20.17	-52.16	667.52
13	-13.76	-40.60	701.34
14	-40.69	14.70	689.88
15	-44.85	35.66	731.47
16	-61.66	65.58	696.13
17	-64.51	91.32	792.54

表 2 标志点在局部坐标系下的坐标 mm

测量位置	标志点编号	*x*	*y*	*z*
1	1	-162.70	24.38	761.33
	2	-129.98	66.24	733.36
	3	-97.58	9.79	719.51
	4	-38.98	-72.76	673.10
	5	-25.31	16.20	694.43
2	6	-60.15	-79.87	655.10
	7	-79.26	-52.81	673.35
	8	-17.77	12.79	647.76
	9	-72.00	1.25	675.02
	10	-40.11	-52.28	649.71
	11	-60.02	62.46	687.74
3	12	-88.01	-53.57	661.53
	13	-52.36	-47.12	661.24
	14	-60.68	12.03	679.77
	15	-18.11	28.12	690.45
	16	-51.36	63.99	696.61
	17	45.33	77.96	716.98

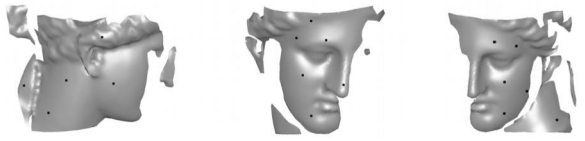
根据表 1和表 2,计算拼接后 *x*, *y*和 *z*坐标的均方根误差分别为 0.03mm, 0.02mm, 0.07mm.

分别计算基线尺两端点在局部坐标系下的坐标,经拼接后计算基线尺长度为 400.07mm,相对误差为 0.018%.

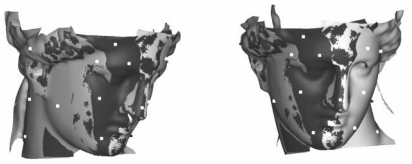
图 2为 3次测量所得三维曲面及拼接结果.

表 3 标志点从局部坐标系转换到全局坐标系后的坐标 mm

测量位置	标志点编号	*x*	*y*	*z*
1	1	-211.68	46.39	822.83
	2	-201.76	84.23	777.27
	3	-201.62	24.55	747.83
	4	-212.84	-62.05	678.73
	5	-170.52	20.19	677.79
2	6	-98.34	-79.95	625.39
	7	-122.54	-52.92	636.11
	8	-55.98	12.66	633.32
	9	-116.27	1.12	640.36
	10	-77.67	-52.38	627.27
	11	-109.34	62.27	656.64
3	12	-20.15	-52.11	667.60
	13	-13.76	-40.60	701.35
	14	-40.68	14.69	689.93
	15	-44.83	35.65	731.51
	16	-61.66	65.60	696.15
	17	-64.53	91.33	792.53



a 单次测量所得三维曲面



b 拼接结果

图 2 石膏像测量结果

4 结束语

以 1台高分辨率数码相机及基线尺获取标志点在全局坐标系下的坐标,操作方便、灵活,适合现场测量;经过一次变换即可将某局部测量数据转换到全局坐标系,消除了累积误差;由于需要在被测物上贴标记,该拼接方法受到一定限制,不适合软质被测物测量.

参考文献 (References)

[1] 张顺德,卢秉恒,丁玉成. 光学三维型面分区域测量数据的拼接研究[J]. 中国激光, 2001, 28(6): 533-536
Zhang Shunde, Lu Bingheng, Ding Yucheng Study on data registration of subdivided shaped in optical 3-D profilometry[J]. Chinese Journal of Lasers, 2001, 28(6): 533-536 (in Chinese)

[2] Besl P J, McKay N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256

[3] Zinsser T, Schnidt H, Niemann J. A refined ICP algorithm for

robust 3-d correspondences estimation [C] //Luis T. International Conference on Image Processing. Barcelona: IEEE, 2003: 695 - 698

[4] 孙军华,张广军,魏振忠. 基于平面靶标的多视点云对齐方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(10): 1231 - 1234
Sun Junhua, Zhang Guangjun, Wei Zhenzhong. Multi-view point clouds registration method based on planar target [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1231 - 1234 (in Chinese)

[5] Sharp G C, Lee S W, Wehe D K. Toward multiview registration in frame space[C] //Wook H K. In IEEE International Conference on Robotics and Automation. Seoul: IEEE, 2001: 3542 - 3547

[6] Pulli K. Multiview registration for large data sets[C] //Marc Rioux. In International Conference on 3D Digital Imaging and Modeling. Ottawa: IEEE Computer Society, 1999: 160 - 168

[7] Carbone V, Carocci M, Savio E, et al. Combination of a vision system and a coordinate measuring machine for the reverse engineering of freeform surfaces [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001, 17(4): 263 - 271

[8] Zhang Zhengyou. A flexible new technique for camera calibration [R]. NSR-TR-98-71, 1998

(责任编辑:刘登敏)

(上接第 827页)

3 结　论

1) 采用硅烷偶联剂改性的纳米 ZnO,可以有效的防止纳米颗粒的团聚,增加与有机硅的相容性,从而可以均匀的在有机硅中分散,由于纳米 ZnO的加入,消除了有机硅涂层中的微裂纹;

2) 没有保护涂层的聚酰亚胺薄膜对原子氧作用敏感,在原子氧作用下发生反应,导致质量损失严重,表面形貌发生明显变化;

3) 有机硅涂层能有效的抵抗原子氧的剥蚀,并且纳米 ZnO的加入可以进一步提高有机硅的抗原子氧性能,原因有两点: ZnO本身具有抗原子氧性能;纳米 ZnO可以消除有机硅的微裂纹,防止原子氧通过微裂纹对基材剥蚀. 随着纳米颗粒含量的增加,质量损失有所下降.

参考文献 (References)

[1] 都亨,叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册[M]. 北京:国防工业出版社, 1996: 1 - 6
Du Heng, Ye Zonghai. Handbook for spacecrafts traveling in low orbit[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1996: 1 - 6 (in Chinese)

[2] Silverman E M. Spacecraft environmental effects on spacecraft: LEO materials selection guide: part 1 [R]. NASA CR-4661, 1996

[3] 盛磊. 原子氧环境对聚合物及其复合材料性能的影响[J]. 中国空间科学技术, 1994, 10(5): 53 - 60
Sheng Lei. Effects on polymer and composites properties by atomic oxygen[J]. Chinese Space Science and Technology, 1994, 10(5): 53 - 60 (in Chinese)

[4] 湛永钟,张国定. 低地球轨道环境对材料的影响[J]. 宇航材料工艺, 2003, 33(1): 1 - 5
Zhan Yongzhong, Zhang Guoding. Low earth orbit environmental effects on materials[J]. Aerospace Materials and Technology, 2003, 33(1): 1 - 5 (in Chinese)

[5] Linton R C, Vaughn J A, Finckenor M M, et al. In orbital atomic oxygen effects on materials: an overview of MSFC experiments on the STS-46 EOM-3 [R]. AIAA-93-4102, 1993

[6] Kamenetzky R R, Linton R C, Finckenor M M, et al. Effects atomic oxygen on polymeric materials flown on EOM-3 [R]. AIAA-93-4103, 1993

[7] Banks B A, Mille S K, de Groh K K. Low earth atomic oxygen interactions with material[R]. AIAA 2004-5638, 2004

[8] 多树旺,李美拴,张亚明,等. 低空间轨道环境中的原子氧对空间材料的侵蚀与防护涂层[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2002, 14(3): 152 - 156
Duo Shuwang, Li Meishuan, Zhang Yaming, et al. Atomic oxygen attack on space materials in LEO environment and protective coatings [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2002, 14(3): 152 - 156 (in Chinese)

[9] Tan Ing H, Ueda M, Dallaqua R S, et al. Magnesium implantation by plasma immersion in polymers for oxidation protection in low earth orbit environment [J]. Plasma Processes and Polymers, 2007, 4: S1081 - S1085

[10] 张金柱,汪信,陆路德,等. 纳米无机粒子对塑料增强增韧的"裂缝与银纹相互转化"机理[J]. 工程塑料应用, 2003, 33(1): 20 - 22
Zhang Jinzhu, Wang Xin, Lu Lude, et al. Mutual transfer mechanism of crack and craze of toughening and reforceing of plastics modified by inorganic nanoparticles[J]. Engineering Plastics Application, 2003, 33(1): 20 - 22 (in Chinese)

[11] Lee J, Bhattacharyya D, Easteal A J, et al. Properties of nano-ZnO/poly(vinyl alcohol)/poly(ethylene oxide) composite thin films[J]. Current Applied Physics, 2008, 8(1): 42 - 47

[12] 方征平,徐钰珍,许承威. 纳米粒子对聚合物的改性机理[J]. 材料科学与工程学报, 2003, 21(2): 279 - 282
Fang Zhengping, Xu Yuzhen, Xu Chengwei. Modification mechanism of nanoparticles on polymers[J]. Materials Science and Engineering, 2003, 21(2): 279 - 282 (in Chinese)

(责任编辑:文丽芳)