

# 基于多传感器信息融合的六自由度运动记录方法\*

倪涛 马兆建 张红彦 许鹏 李骁鹏

(吉林大学机械科学与工程学院, 长春 130025)

**摘要:** 以六自由度运动作为研究对象,提出了一种基于多传感器信息融合的运动记录方法。通过加速度模块获得加速度,解耦计算出六自由度运动的转角信息。通过融合转角信息和摄像头记录的图像信息,计算出六自由度运动的位移信息。通过实验验证了该方法的可行性。

**关键词:** 六自由度运动 信息融合 摄像头 运动记录

**中图分类号:** TP242.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0258-05

## 6-DOF Motion Recording Method Based on Multi-sensor Information Fusion

Ni Tao Ma Zhaojian Zhang Hongyan Xu Peng Li Xiaopeng

(Institute of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

**Abstract:** Taking 6-DOF motion as research objective, a motion recording method based on the multi-sensor information fusion was proposed. According to the accelerations getting from the acceleration module, the angular information of the motion was calculated by using a decoupling method. It can obtain the displacement information of 6-DOF motion by correcting the image matrix with angle information and recalculating image translation. Experimental results demonstrated that this motion recording method was feasible.

**Key words:** 6-DOF motion Information fusion Camera Motion recording

### 引言

运动记录与再现就是通过运动记录系统把所需的运动数据采集并记录下来,之后通过运动再现系统将记录下来的整个运动过程再现出来<sup>[1]</sup>。六自由度运动<sup>[2-3]</sup>比较复杂,是旋转运动与平移运动的复合运动,由于运动再现要求一致性、同步性等,对运动姿态记录的精确性要求很高。

采用单个相机可以对六自由度机构的位姿进行测量,通过摄像机标定可以获得被测平面相对于摄像机坐标系的外参数,进而获得六自由度机构的位姿<sup>[4-8]</sup>。但通过摄像机标定<sup>[9-11]</sup>获得的摄像机内参数存在误差,内参数标定误差对被测平面外参数的标定精度影响较大,将导致获得的平面外参数存在较大误差。因此,采用单个相机对六自由度机构

的位姿进行测量,无法满足运动再现的精度要求。本文提出一种基于多传感器信息融合的运动记录技术,通过融合加速度传感器与摄像头记录的信息来获取六自由度运动位姿。

### 1 系统构成

如图1所示,运动记录系统主要由加速度传感器模块、高速工业 CCD 相机、标定板、图像采集卡、定时器卡和计算机等组成。加速度传感器模块由5个加速度传感器及其相关电路组合而成,固定在动平台上平面的中心处。标定板固定在动平台下平面上,标定板的中心与动平台的中心相重合。高速工业 CCD 相机固定在动平台下方适当位置,确保运动过程中标定板整体处于摄像头视野内,其通过1394图像采集卡采集处理图像。定时器卡为信息

收稿日期: 2012-11-29 修回日期: 2013-02-21

\* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20110061120033)和吉林省科技发展计划资助项目(201101027)

作者简介: 倪涛,副教授,主要从事机器人技术及应用研究,E-mail: nitao@jlu.edu.cn

通讯作者: 张红彦,副教授,主要从事智能车辆研究,E-mail: zhanghy@jlu.edu.cn

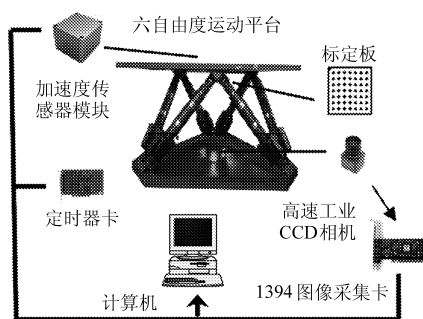


图 1 运动记录系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of motion recording system

采集提供精确定时。

## 2 摄像机标定

对于摄像机标定,只需求出投影矩阵即可,不必再分解求出摄像机内、外参数。

如图 2 所示,摄像机的透射投影模型中包含摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$ 、世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$ 、图像物理坐标系  $o_0 xy$  (单位为 mm) 和图像像素坐标系  $ouv$  (单位为像素)。摄像机坐标系  $O_c X_c Y_c Z_c$  的坐标原点为摄像机的光心,  $X_c$  轴和  $Y_c$  轴分别平行于图像像素坐标系  $ouv$  的  $u$  轴和  $v$  轴且方向相同,  $Z_c$  轴为摄像机光轴,其方向满足右手法则。世界坐标系  $O_w X_w Y_w Z_w$  是以标定板中心为原点,标定板平面位于世界坐标系  $Z = 0$  的平面内,  $Z_w$  方向满足右手法则。

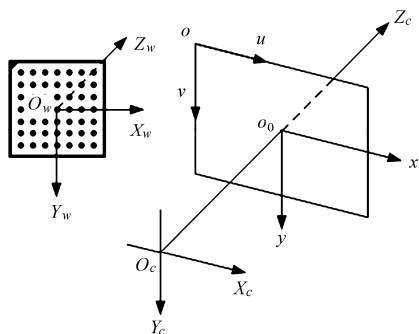


图 2 摄像机透射投影模型

Fig. 2 Camera transmissive projection model

根据摄像机透射投影模型,通过各种坐标系的变换,最终可以得到世界坐标系与图像像素坐标系之间的关系为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} & h_{14} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} & h_{24} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} & h_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $u, v$ ——图像像素坐标系中的坐标

$X_w, Y_w, Z_w$ ——世界坐标系中的坐标

$H$ ——投影矩阵,为  $3 \times 4$  矩阵

对式(1)进行分解,消去  $Z_c$ ,可以得到关于  $h_{ij}$  的线性方程为

$$\begin{cases} X_w h_{11} + Y_w h_{12} + Z_w h_{13} + h_{14} - u X_w h_{31} - u Y_w h_{32} - u Z_w h_{33} = u h_{34} \\ X_w h_{21} + Y_w h_{22} + Z_w h_{23} + h_{24} - v X_w h_{31} - v Y_w h_{32} - v Z_w h_{33} = v h_{34} \end{cases} \quad (2)$$

一般可取  $h_{34} = 1$ ,如果标定板上有  $n$  个已知点,并且已知它们的空间坐标与它们的图像点坐标,则有  $2n$  个关于  $H$  矩阵元素的线性方程。由此可见,由 6 个以上标定板点就可以求出投影矩阵  $H$ 。实际操作时一般采用数十个标定板点进行标定,使方程的个数远远超过未知数的个数,用最小二乘法进行求解,将误差降至最小<sup>[12-14]</sup>。

## 3 基于多传感器信息融合的数据信息处理过程

### 3.1 旋转矩阵求解

加速度传感器模块的内部传感器布局如图 3 所示。建立图示坐标系,加速度传感器中的  $A, B, C$  并放于三角形的顶点上,  $AC$  连线的方向平行于  $X$  轴,三角形的中心与坐标原点  $O$  重合。  $E, D$  分别置于  $X$  轴的正、负半轴上,线段  $DO$  与  $EO$  距离相等。各传感器的测量方向如图中箭头所示,加速度传感器  $A, B, C$  的测量方向沿  $Z$  轴正方向,加速度传感器  $E, D$  的测量方向分别沿  $Y$  轴正、负方向。

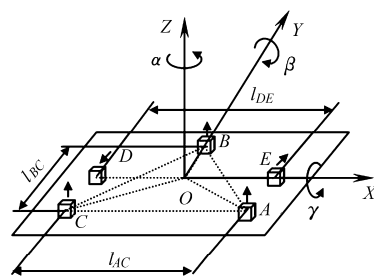


图 3 加速度传感器模块原理图

Fig. 3 Schematic of acceleration sensor module

设加速度传感器  $A \sim E$  测得的加速度分别为  $a_A \sim a_E$ ,三角形的中心处滚动、俯仰、转动方向的角加速度分别为

$$\begin{aligned} \varepsilon_{roll} &= \frac{a_E + a_D}{l_{DE}} \\ \varepsilon_{pitch} &= \frac{a_C - a_A}{l_{AC}} \\ \varepsilon_{yaw} &= \left( a_B - \frac{a_A + a_C}{2} \right) / l_{BC} \end{aligned}$$

计算出的三角形中心处 3 个角加速度,经过低通滤波和 2 次数字积分后可以求得三角形中心处的角位移旋转角  $\alpha$ 、俯仰角  $\beta$  和偏航角  $\gamma$ ,进而可以求

得旋转矩阵

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\alpha)\mathbf{R}_y(\beta)\mathbf{R}_x(\gamma) = \begin{bmatrix} c\alpha c\beta & c\alpha s\beta s\gamma - s\alpha c\gamma & c\alpha s\beta c\gamma + s\alpha s\gamma \\ s\alpha c\beta & s\alpha s\beta s\gamma + c\alpha c\gamma & s\alpha s\beta c\gamma - c\alpha s\gamma \\ -s\beta & c\beta s\gamma & c\beta c\gamma \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中,  $c$  为  $\cos$ ,  $s$  为  $\sin$ 。

### 3.2 光心在世界坐标系中的坐标

由针孔模型可知,一个空间点只能映射为一个图像点,而一个图像点映射为一条通过光心的空间直线,且所有图像点映射的空间直线都通过光心。因此,任取两个图像点即可映射得到两条空间直线,这两条空间直线的交点即为所求光心在世界坐标系中的坐标<sup>[15]</sup>。

任取两个图像点  $p_1(u_1, v_1)$ 、 $p_2(u_2, v_2)$ , 根据式(2),可以映射得到两条通过光心的直线方程组为

$$\begin{cases} X_w h_{11} + Y_w h_{12} + Z_w h_{13} + h_{14} - u_1 X_w h_{31} - \\ u_1 Y_w h_{32} - u_1 Z_w h_{33} = u_1 h_{34} \\ X_w h_{21} + Y_w h_{22} + Z_w h_{23} + h_{24} - v_1 X_w h_{31} - \\ v_1 Y_w h_{32} - v_1 Z_w h_{33} = v_1 h_{34} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} X_w h_{11} + Y_w h_{12} + Z_w h_{13} + h_{14} - u_2 X_w h_{31} - \\ u_2 Y_w h_{32} - u_2 Z_w h_{33} = u_2 h_{34} \\ X_w h_{21} + Y_w h_{22} + Z_w h_{23} + h_{24} - v_2 X_w h_{31} - \\ v_2 Y_w h_{32} - v_2 Z_w h_{33} = v_2 h_{34} \end{cases} \quad (5)$$

联立式(4)、(5),并代入求得的投影矩阵  $\mathbf{H}$ ,即可得到光心在世界坐标系中的坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 。

### 3.3 平移向量求解

摄像机坐标系和世界坐标系的关系为

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{3 \times 3} & \mathbf{t}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中  $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ ——摄像机的外参数旋转矩阵

$\mathbf{t}_{3 \times 1}$ ——摄像机的外参数平移向量

已知摄像机光心  $(0, 0, 0)$  在世界坐标系中的坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$  以及式(3)中旋转矩阵  $\mathbf{R}$ , 根据式(6)可得平移向量

$$\mathbf{t} = -\mathbf{R} \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.4 位移求解

由式(6)可知,平移向量  $\mathbf{t}$  为世界坐标系原点(即标定板中心)在摄像机坐标系中的坐标。由于标定板中心的位移即为动平台的位移,因此,动平台的位移为平移向量  $\mathbf{t}$  与初始位置平移向量  $\mathbf{t}_0$  之差:

$$[\mathbf{dx} \ \mathbf{dy} \ \mathbf{dz}]^T = \mathbf{t} - \mathbf{t}_0。$$

## 4 实验

以六自由度电动伺服运动平台为对象,进行运动记录实验,平台的主要技术参数如表1所示。采用的标定板如图4中所示,外围带边框和一个斜角,  $7 \times 7$  圆点矩形阵列,外围尺寸为  $200 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 。相机选用 MV-VS 系列 1394 高速工业 CCD 相机,最高分辨率为  $640 \text{ 像素} \times 480 \text{ 像素}$ ,帧速为  $60 \text{ 帧/s}$ 。利用研华 PCI-1751 型定时器的定时中断功能,定时周期设为  $20 \text{ ms}$ 。

表1 六自由度运动平台的主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of 6-DOF motion platform

参数	数值	精度
偏航角/ $^\circ$	$[-20, 20]$	$\pm 1.29$
俯仰角/ $^\circ$	$[-20, 20]$	$\pm 1.37$
旋转角/ $^\circ$	$[-28, 28]$	$\pm 1.79$
X 方向位移/mm	$[-295, 295]$	$\pm 3.8$
Y 方向位移/mm	$[-272, 272]$	$\pm 4.3$
Z 方向位移/mm	$[-230, 230]$	$\pm 2.9$

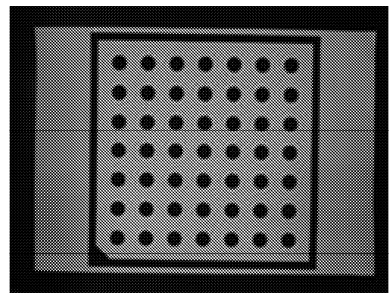


图4 标定板

Fig.4 Calibration plate

标定过程中,相机固定不动,六自由度电动伺服运动平台在其行程范围中变换数个位姿,同时拍摄数组含标定板的图像。每幅图像选取标定板上49个点作为标定点,进行摄像机标定,求得投影矩阵  $\mathbf{H}$ 。

由于平台自身的转角误差比较大,故采用 VG440CA-200 型垂直陀螺系统的角度测量值作为转角基准,其精度为  $\pm 0.75^\circ$ 。然而垂直陀螺系统的位移测量误差较大,故采用平台的控制指令数据作为位移基准。实验中平台运动时,通过控制软件一方面定时读取并存盘加速度传感器的数据;另一方面,定时采集并存盘标定板的运动图像。

时间的长短对实验结果没有影响,实验选取记录了大约  $140 \text{ s}$  的运动数据,由记录的加速度信息和图像信息,根据上文算法可以求得转角与位移的数据曲线,如图5、6所示。图7、图8分别给出了各转角、各位移的误差曲线。

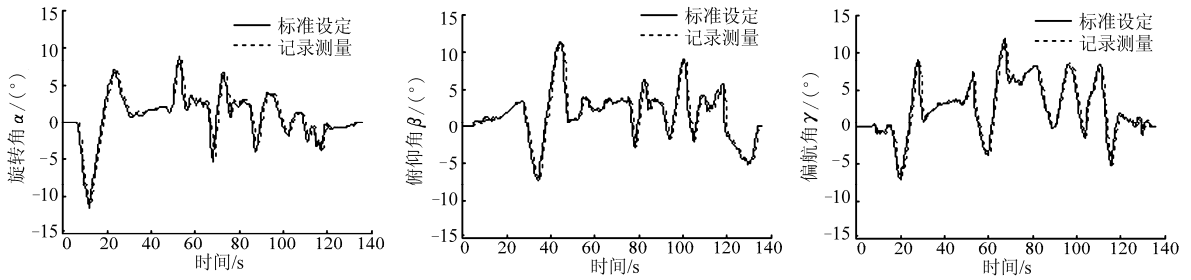


图 5 设定转角与记录转角对比

Fig. 5 Comparison between setting angle and recorded angle

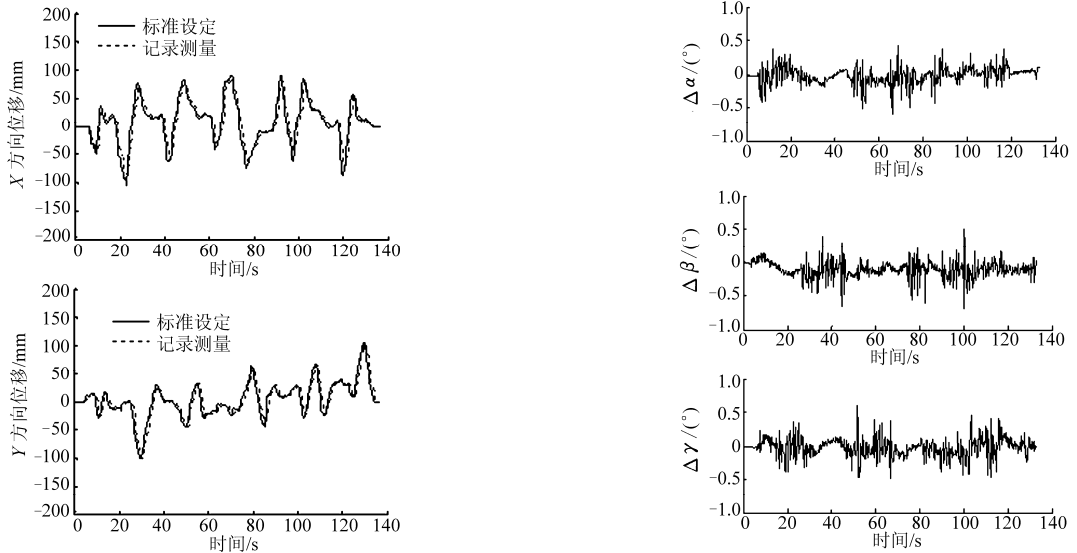


图 7 转角误差曲线

Fig. 7 Angle error curves

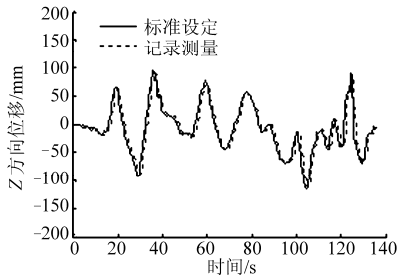


图 6 设定位移与记录位移对比

Fig. 6 Comparison between setting displacement and recorded displacement

从误差曲线分析可得：①转角误差在  $\pm 0.65^\circ$  之间，位移误差在  $\pm 8\text{ mm}$  之间。②位移误差相对转角误差较大。③整个运动过程中，各个运动方向的运动幅度较大时，误差较大。

误差产生的主要原因初步分析为：①平台或测量基准自身的误差。②位移是由转角求得的旋转矩阵与光心的世界坐标相乘而得，受转角测量误差累

积的影响，位移误差相对较大。③运动幅度较大时，图像中的标定板处于边缘位置，受相机畸变的影响导致像素匹配的误差。④自制的标定板，定位精度为  $0.05\text{ mm}$ ，因其加工制造精度较低会产生一定的误差，以后可以选用维视数字图像技术有限公司的 AFT-MCT-HC 高精度标定板，其由光学玻璃制造而成，定位精度高达  $0.001\text{ mm}$ 。

从误差分析结果来看，本方法能够满足 4-D 动感影院的运动信号采集要求，以及车辆路面谱激励实验中运动记录的精度要求，解决了复杂机构空间位姿难以实时、在线检测的难题。

### 5 结束语

基于多传感器信息融合的六自由度运动记录方法具有简单、可靠、易于实现的特点。实验结果表

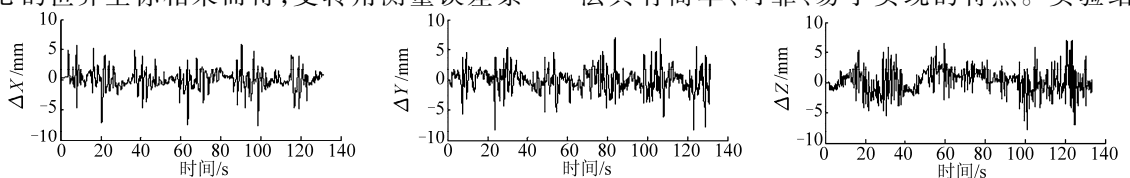


图 8 位移误差曲线

Fig. 8 Displacement error curves

明,本方法切实可行。总体上看,在目前条件下获得测量精度还有进一步提高的空间。了较满意的测量结果和精度。同时,误差分析表明,

### 参 考 文 献

- 1 肖英奎,赵丁选,叶忠军,等. 运动与视频的同步记录和同步再现技术[J]. 农业机械学报, 2004, 35(3):99~101.  
Xiao Yingkui, Zhao Dingxuan, Ye Zhongjun, et al. Techniques of synchro record and representation of motion and video[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(3):99~101. (in Chinese)
- 2 皮阳军,王宣银,胡玉梅. 基于关节力传感器的并联六自由度机构标定方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10):215~218.  
Pi Yangjun, Wang Xuanyin, Hu Yumei. Calibration of 6-DOF parallel mechanism using joint force sensors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(10):215~218. (in Chinese)
- 3 肖英奎,赵丁选,王芳荣,等. 基于6-DOF 并联平台远端运动在线模拟研究[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6):138~140.
- 4 Luhmann T. Precision potential of photogrammetric 6-DOF pose estimation with a single camera [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2009, 64(3):275~284.
- 5 李徽,杨德华,翟超. 六自由度机构位姿的单相机照相测量研究[J]. 光学技术, 2010, 36(3):344~349.  
Li Hui, Yang Dehua, Zhai Chao. Research on the pose measurement of a 6-DOF platform using a single camera[J]. Optical Technique, 2010, 36(3):344~349. (in Chinese)
- 6 田国伟,韩晓健,徐秀丽,等. 基于视频图像处理技术的振动台试验动态位移测量方法[J]. 世界地震工程, 2011, 27(3):174~179.  
Tian Guowei, Han Xiaojian, Xu Xiuli, et al. Measuring method of dynamic displacement in shaking table test based on the technology of video processing[J]. World Information on Earthquake Engineering, 2011,27(3):174~179. (in Chinese)
- 7 Zhang Z, Zhu D, Zhang J. An improved pose estimation algorithm for real-time vision applications[C]//2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings, 2006, 1:402~406.
- 8 陈杉,周涛,张效栋,等. 物体位姿单目视觉传感测量系统[J]. 传感技术学报, 2007, 20(9):2011~2015.  
Chen Shan, Zhou Tao, Zhang Xiaodong, et al. Monocular vision measurement system of the position and attitude of the object[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(9):2011~2015. (in Chinese)
- 9 Zhong Z, Yi J, Zhao D, et al. Effective pose estimation from point pairs image and vision computing[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(7):651~660.
- 10 Salvi J, Arnabgye X, Battle J. A comparative review of camera calibrating methods with accuracy evaluation[J]. Pattern Recognition, 2002, 35(7):1617~1635.
- 11 Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11):1330~1334.
- 12 马颂德,张正友. 计算机视觉——理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社,1998.
- 13 林慧英, 苏建, 刘玉梅,等. 基于图像畸变矫正的摄像机标定方法[J]. 吉林大学学报:工学版, 2007, 37(2):433~437.  
Lin Huiying, Su Jian, Liu Yumei, et al. Camera calibration technique based on rectification of image aberration[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2007,37(2):433~437. (in Chinese)
- 14 Wang F. A simple and analytical procedure for calibrating extrinsic camera parameters[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2004, 20(1):121~124.
- 15 朱枫,周静,郝颖明. 基于几何方法的摄像机内外参数求解[J]. 计算机工程与应用, 2005, 41(26):16~18.  
Zhu Feng, Zhou Jing, Hao Yingming. Solving camera intrinsic and extrinsic parameters based on geometric technique[J]. Computer Engineering and Applications, 2005, 41(26):16~18. (in Chinese)

(上接第 298 页)

- 6 Zhang Yongbin. A justification of the load-carrying capacity of elasto-hydrodynamic lubrication film based on the Newtonian fluid model[J]. Industrial Lubrication and Tribology, 2005,57(6):224~232.
- 7 Zhang Yongbin. Flow factor approach to molecularly thin hydrodynamic film lubrication[J]. Journal of Molecular Liquids, 2006, 128(1~3):60~64.
- 8 Zhang Yongbin. Study of an engineering mixed contact: part I—theoretical analysis[J]. Journal of Applied Sciences, 2007, 7(9):1249~1259.
- 9 Zhang Yongbin. Study of an engineering mixed contact: part II—results for isosceles triangle surface ridges[J]. Journal of Applied Sciences, 2007,7(10):1351~1361.
- 10 Zhang Yongbin. Study of an engineering mixed contact: part III—results for isosceles truncated triangle surface ridges[J]. Journal of Applied Sciences, 2007,7(11):1464~1474.