

文章编号 1004-924X(2001)04-0324-06

# 机器视觉在工业测量中的应用与研究

张业鹏, 何涛, 文昌俊, 杨银才, 沈邦兴  
(湖北工学院机械工程系, 湖北武汉 430068)

**摘要:**基于普通双目视觉测量模型, 针对视觉测量系统的关键技术——标定、特征提取、特征匹配, 提出了一种实用的高精度摄像机标定方法, 基于“多对一”的思想, 讨论了一种改进的 Hough 变换方法; 由外极约束理论, 提出了一种基于角点的外极斜率特征匹配方法。实验证明, 该方法能成功的应用于复杂零件的测量。

**关键词:**机器视觉; 摄像机标定; Hough 变换; 特征匹配

**中图分类号:**TP242.62 **文献标识码:**A

## 1 引言

机器视觉是一个发展中的学科方向, 其理论体系还在不断完善<sup>[1]</sup>, 在工业测量中的应用与研究目前多限于正直摆放模型, 并且尚无一套完整的基本尺寸检测软件, 因此, 以普通视觉模型为对象的立体视觉检测系统在工业应用中的研究具有重要的意义。对于工业产品的检测而言, 立体视觉检测算法主要包括: 摄像机标定; 图像的预处理及特征提取; 特征匹配; 三维尺寸计算。

## 2 摄像机标定

摄像机标定就是计算摄像机的外部参数和内部参数, 外部参数表示摄像机的位置和方位相对于一个世界坐标系的坐标变换; 内部参数表示摄像机的光学本质特性, 视觉测量系统中的标定参数见表 1。

本文采用的是建立在摄像机畸变模型的基础上的线性与非线性相结合的一种求解方法, 先确定像面中心, 然后用线性方法(DLT)求得迭代初值, 再用非线性迭代法求解中间变量, 最后进行参数分离, 获得摄像机的各个参数。

Table 1 Camera calibration parameters

Parameter name	Parameter type	Parameter description
$R$	Outside parameters	$(r_{11}, r_{12}, \dots, r_{33})$ rotation matrix
$T$		$(t_1, t_2, t_3)$ Move matrix
$(u_0, v_0)$	Inside parameters	Center of image
$s_x$		Scale value of pixel
$f$		Valid focus
$v_p$		Pixel translation factor
$k_1, k_2, p_1, p_2$		Distortion coefficient

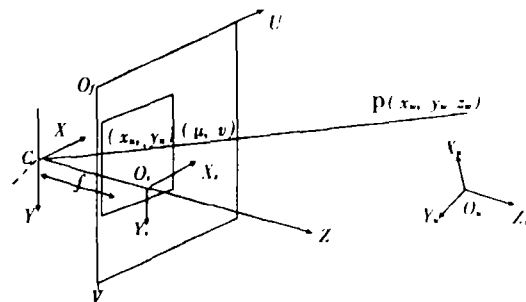


Fig. 1 Camera imaging model

收稿日期: 2000-12-20; 修订日期: 2001-02-26

基金项目: 武汉市科委重点科研课题

## 2.1 摄像机基本模型

根据几何光学原理摄像机成像模型如图 1 所示。由几何光学原理可以得出物点  $P$  的世界坐标系的坐标  $P_w = (x_w, y_w, z_w)$  和像面坐标系的坐标  $P_u = (x_u, y_u)$  之间的含畸变系数的转换关系:

$$\begin{cases} x_u = f \frac{r_{11}x_w + r_{12}y_w + r_{13}z_w + t_1}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_3} \\ \quad = x_d(1 + k_1 \cdot \rho^2 + k_2 \cdot \rho^4) + \\ \quad \quad p_1 \cdot (3x_d^2 + y_d^2) + 2p_2 \cdot x_d \cdot y_d \\ y_u = f \frac{r_{21}x_w + r_{22}y_w + r_{23}z_w + t_2}{r_{31}x_w + r_{32}y_w + r_{33}z_w + t_3} \\ \quad = y_d(1 + k_1 \cdot \rho^2 + k_2 \cdot \rho^4) + \\ \quad \quad 2p_1 \cdot x_d \cdot y_d + p_2 \cdot (x_d^2 + 3y_d^2) \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 坐标校正

在摄像机参数标定过程中,所用的靶标为一金属孔板,事先用三坐标机测出靶标各孔中心点的二维坐标,然后将标定块固定在一个可移动的工作台上,通过精确移动工作台产生标定点的另一维坐标。在整个标定过程中,要求移动方向始终保证与标定块的坐标平面互相垂直,实际操作中,存在不可避免的垂直度误差,为此必须采取有效的方法进行校正。

取工作台移动方向为世界坐标系的  $z_w$  轴,  $y_w$  轴与孔靶板面孔心二维坐标的  $y'_w$  轴同在  $y'_w o z_w$  平面内,  $x_w$  轴按右手定则产生,然后对孔板面孔心不垂直的三维坐标  $(x'_w, y'_w, z'_w)$  进行校正,使之成为垂直的  $(x_w, y_w, z_w)$  坐标,如图 2 所示。

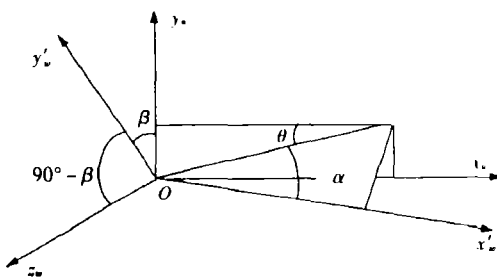


Fig. 2 Coordinate system rotation

由平面几何知识可知,新的正交的世界坐标

系  $(x_{wi}, y_{wi}, z_{wi})$  与原来世界坐标系  $(x'_{wi}, y'_{wi}, z'_{wi})$  之间的转换关系如下:

$$\begin{bmatrix} x_{wi} \\ y_{wi} \\ z_{wi} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \cos\alpha \cdot \cos\theta & 0 & 0 \\ \cos\alpha \cdot \sin\theta & \cos\beta & 0 \\ \sin\alpha & \sin\beta & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x'_{wi} \\ y'_{wi} \\ z'_{wi} \end{bmatrix}$$

建立目标函数,由牛顿-高斯迭代法经过参数分离即可求出畸变参数  $k_1, k_2, p_1$  和  $p_2$ , 及摄像机的其它参数。

## 3 一般二次曲线的检测方法

一般二次曲线的数学模型为:  $ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + 1 = 0$

显然,其参数空间为五维空间,设为  $I(a, b, c, d, e)$ 。图像中每一个点将对应参数空间的五维曲面,这是一对多的变换。给定平面上四点  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), p_3(x_3, y_3), p_4(x_4, y_4)$ , 其中任意三点不共线(如图 3 所示),则过这四点的二次曲线簇可表示为:

$$C: l_{31}(x, y) \times l_{42}(x, y) + \lambda \times l_{32}(x, y) \times l_{41}(x, y) = 0 \quad (2)$$

其中  $l_{ij}(x, y): (y - y_i)(x_j - x_i) - (x - x_i)(y_j - y_i) = 0$  为过点  $p_i(x_i, y_i)$  和  $p_j(x_j, y_j)$  的直线方程 ( $i = 3, 4; j = 1, 2$ )。

令:

$$\Delta x_{ij} = x_i - x_j (i = 3, 4; j = 1, 2)$$

$$\Delta y_{ij} = y_i - y_j (i = 3, 4; j = 1, 2)$$

$$a = (\Delta x_{32} \times \Delta y_{41} - \Delta x_{41} \times \Delta y_{32})^2$$

$$b = \Delta x_{31} \times \Delta x_{41} \times \Delta y_{32} \times \Delta y_{42} +$$

$$\Delta x_{41} \times \Delta x_{42} \times \Delta y_{31} \times \Delta y_{32} -$$

$$\Delta x_{31} \times \Delta x_{42} \times \Delta y_{32} \times \Delta y_{41} -$$

$$\Delta x_{32} \times \Delta x_{41} \times \Delta y_{31} \times \Delta y_{42}$$

$$C = (\Delta x_{31} \times \Delta x_{42} - \Delta y_{42} \times \Delta y_{31})^2$$

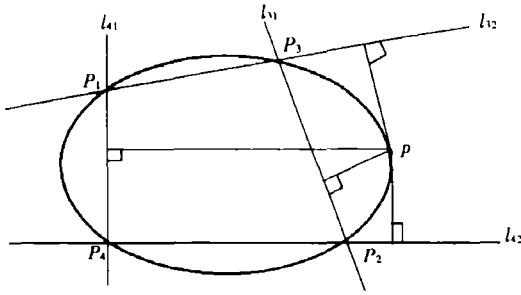


Fig. 3 Cluster of quadratic curve

则根据解析几何学知识可得如下结论:

**结论 1** 对于给定的  $\lambda$ , 过平面上四点  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), p_3(x_3, y_3), p_4(x_4, y_4)$  (其中任意三点不共线) 的二次曲线如式(2)所示。显然有:

- (1) 当  $\lambda = k_1$  或  $\lambda = k_2$  时, 为抛物线;
- (2) 当  $k_1 < \lambda < k_2$  时, 为椭圆;
- (3) 当  $\lambda < k_1$  或  $\lambda > k_2$  时, 为双曲线。

其中:

$$k_1 = \min \left[ \frac{-b + \sqrt{b^2 - ac}}{a}, \frac{-b - \sqrt{b^2 - ac}}{a} \right],$$

$$k_2 = \max \left[ \frac{-b + \sqrt{b^2 - ac}}{a}, \frac{-b - \sqrt{b^2 - ac}}{a} \right];$$

假设选定一点  $p_0(x_0, y_0)$ , 代入式(2), 可得:

$$\lambda_0 = \frac{l_{31}(x_0, y_0) \times l_{42}(x_0, y_0)}{l_{32}(x_0, y_0) \times l_{41}(x_0, y_0)} \quad (3)$$

由式(2)可得过上述五点  $p_1(x_1, y_1), p_2(x_2, y_2), p_3(x_3, y_3), p_4(x_4, y_4), p_0(x_0, y_0)$  的二次曲线方程为:  $l_{31}(x, y) \times l_{42}(x, y) + \lambda_0 \times l_{32}(x, y) \times l_{41}(x, y) = 0$

**结论 2** 假设过平面上四点的二次曲线簇方程如式(2)所示, 平面上任一点  $p_0(x_0, y_0)$  所得的  $\lambda_0$  如式(3)所示, 则所有具有相同的  $\lambda$  值的点必在同一条二次曲线上, 反之亦然。

因此, 对于一幅二值图像, 可以通过求  $\lambda$  的极大值的方法来检测二次曲线。如一幅图像中有多个结构参数完全相同的二次曲线, 则可加入辅助性参数进行判别。

### 4 特征匹配方法

在立体视觉算法中匹配约束条件和法则的使用要根据具体情况而定, 约束条件和匹配法则使用恰当不仅可以提高匹配正确性和精度, 而且可

以大大降低匹配的复杂程度。立体视觉测量系统中常用的匹配约束有表面唯一性约束、表面连续性约束、顺序一致性约束、外极线约束等。

#### 4.1 外极斜率匹配

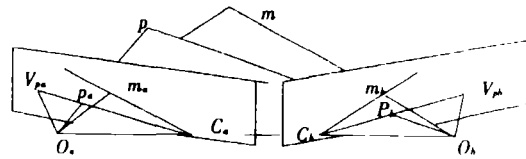


Fig. 4 Epipolar and plane of across binocular vision model

如图 4 所示为交向摆放的双目视觉模型, 空间点  $p$  和  $m$  在两摄像机像面上的像点分别为  $p_a, p_b, m_a, m_b$ ;  $p_a$  与  $p_b$  及  $m_a$  与  $m_b$  称为摄像机对中的同名点, 对于以点为基元的特征匹配的主要任务为在图像对中寻找同名点。空间点  $p$  或  $m$  分别与左、右透视中心  $o_a, o_b$  构成的平面, 称为外极平面。外极平面与左、右像面相交的左、右两条直线称为外极线, 每一像面上的外极线都相交于基线上的某一点, 即外极中心。(如  $C_a, C_b$ )。

左右摄像机坐标系变换关系可表示为:

$$\begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ba1} & r_{ba2} & r_{ba3} \\ r_{ba4} & r_{ba5} & r_{ba6} \\ r_{ba7} & r_{ba8} & r_{ba9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{bax} \\ l_{bay} \\ l_{bax} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ab1} & r_{ab2} & r_{ab3} \\ r_{ab4} & r_{ab5} & r_{ab6} \\ r_{ab7} & r_{ab8} & r_{ab9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} l_{abx} \\ l_{aby} \\ l_{abz} \end{bmatrix}$$

如以任意空间点  $p$  为例来进行讨论。左像面上任一像点  $p_a(X_a, Y_a)$  在过点  $p_a$  及左透视中心  $o_a$  的一条射线上, 该射线在左摄像机坐标系上的表达式为:

$$\begin{cases} x_a = X_a \cdot s \\ y_a = Y_a \cdot s \\ z_a = f_a \cdot s \end{cases}$$

式中的  $f_a$  为左摄像机的有效焦距, 将此射线转换到右摄像机坐标系, 可得:

$$\begin{cases} x_b = (r_{ab1} \cdot X_a + r_{ab2} \cdot Y_a + r_{ab3} \cdot f_a) \cdot s + l_{abx} \\ y_b = (r_{ab4} \cdot X_a + r_{ab5} \cdot Y_a + r_{ab6} \cdot f_a) \cdot s + l_{aby} \\ z_b = (r_{ab7} \cdot X_a + r_{ab8} \cdot Y_a + r_{ab9} \cdot f_a) \cdot s + l_{abz} \end{cases}$$

若右摄像机有效焦距为  $f_b$ , 则由上式可得:

$$\begin{cases} \frac{X_b}{f_b} = \frac{x_b}{z_b} = \frac{a}{c} + \frac{c \cdot t_{abx} - a \cdot t_{abz}}{c} \cdot \frac{1}{c \cdot s + t_{abz}} \\ \frac{Y_b}{f_b} = \frac{y_b}{z_b} = \frac{b}{c} + \frac{c \cdot t_{aby} - b \cdot t_{abz}}{c} \cdot \frac{1}{c \cdot s + t_{abz}} \end{cases} \quad (4)$$

显然,在式(4)中

当  $s = 0$  时,

$$(X_{b1}, Y_{b1}) = \left( \frac{t_{abx}}{t_{abz}} \cdot f_b, \frac{t_{aby}}{t_{abz}} \cdot f_b \right);$$

$$\text{当 } s = \infty \text{ 时, } (X_{b2}, Y_{b2}) = \left( \frac{a}{c} \cdot f_b, \frac{b}{c} \cdot f_b \right);$$

由此可知,式(4)表示右摄像机像面中的一条线段,此线段从点  $(X_{b1}, Y_{b1})$  到  $(X_{b2}, Y_{b2})$ 。而且左像面上任意一点与右像面上的一条线段相对应。其中,  $s = 0$  为左摄像机透视中心  $o_a$ ,  $\left( \frac{t_{abx}}{t_{abz}} \cdot f_b, \frac{t_{aby}}{t_{abz}} \cdot f_b \right)$  点是其在右像面上的投影点,即右外极中心  $C_b$ 。  $s = \infty$  的点称为消失点,  $V_{pb}$  点  $\left( \frac{a}{c} \cdot f_b, \frac{b}{c} \cdot f_b \right)$  则对应于射线式(4)的消失点。

同理,右摄像机像面上任一点与左摄像机像面上的一条线段相对应。右摄像机透视中心  $o_b$  在左像面上的投影点为  $\left( \frac{t_{bax}}{t_{baz}} \cdot f_a, \frac{t_{bay}}{t_{baz}} \cdot f_a \right)$  点,即左外极中心  $C_a$ 。

由外极约束理论可知,左像面上一条斜率为  $k_a$  并通过左极点  $C_a$  的直线同右像面上一条斜率为  $k_b$  并通过右极点  $C_b$  点的直线相匹配。

由此可见,如果将左、右像面像点坐标转化为以  $C_a$  和  $C_b$  为原点的坐标系,则通过斜率匹配可以容易地找到其匹配点,从而使匹配过程得以简化。

如定义  $k_a$  和  $k_b$  分别为同一外极平面内左、右外极线的斜率。

如图4所示,以  $C_a$  点为原点,左摄像机像面上任意过  $C_a$  点直线像面方程为:

$$\begin{cases} X_a = t \\ Y_a = k_a \cdot t \end{cases}$$

转换到右摄像机坐标系下的向量表达式为:

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ b_1 \\ c_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{ab1} & r_{ab2} & r_{ab3} \\ r_{ab4} & r_{ab5} & r_{ab6} \\ r_{ab7} & r_{ab8} & r_{ab9} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} t \\ k_a \cdot t \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

而左摄像机透视中心  $o_a$  在右摄像机坐标下的向量表达式为:

$$\begin{bmatrix} a_2 \\ b_2 \\ c_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_{abx} \\ t_{aby} \\ t_{abz} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于式(5)和式(6)两向量所构成的平面经过右摄像机坐标系的坐标原点,故该平面方程为

$$Ax_b + By_b + Cz_b = 0$$

其中

$$\begin{cases} A = t \cdot [t_{abx} \cdot (r_{ab4} + r_{ab5} \cdot k_a) - t_{aby} \cdot (r_{ab7} + r_{ab8} \cdot k_a)] \\ B = t \cdot [t_{abx} \cdot (r_{ab7} + r_{ab8} \cdot k_a) - t_{abz} \cdot (r_{ab1} + r_{ab2} \cdot k_a)] \\ C = t \cdot [t_{aby} \cdot (r_{ab1} + r_{ab2} \cdot k_a) - t_{abz} \cdot (r_{ab4} + r_{ab5} \cdot k_a)] \end{cases}$$

右摄像机像面在右摄像机坐标系下的方程为

$$z_b = f_b$$

则两平面交线斜率为  $-\frac{A}{B}$ , 即

$$k'_b = -\frac{A}{B} = -\frac{t_{abx} \cdot (r_{ba4} + r_{ba5} \cdot k_a) - t_{aby} \cdot (r_{ba7} + r_{ba8} \cdot k_a)}{t_{abx} \cdot (r_{ab7} + r_{ab8} \cdot k_a) - t_{abz} \cdot (r_{ab1} + r_{ab2} \cdot k_a)} \quad (7)$$

该斜率即为左摄像机像面上斜率  $k_a$  在右像面上的匹配斜率。

同理可得右摄像机像面上斜率  $k_b$  在左摄像机像面上的匹配斜率为:

$$k'_a = -\frac{t_{baz} \cdot (r_{ba4} + r_{ba5} \cdot k_b) - t_{bay} \cdot (r_{ba7} + r_{ba8} \cdot k_b)}{t_{baz} \cdot (r_{ba7} + r_{ba8} \cdot k_b) - t_{bax} \cdot (r_{ba1} + r_{ba2} \cdot k_b)} \quad (8)$$

利用式(7)或式(8)可以很容易地完成如下匹配过程:

- (1)算出左、右摄像机两像面上每一个特征点的  $k_{ai}$  值和  $k_{bi}$  值;
- (2)算出对应于  $k_{ai}$  的  $k'_{bi}$  和对应于  $k_{bi}$  的  $k'_{ai}$ ;
- (3)判断匹配点;在右像面上寻找与  $k'_{bi}$  最相近的  $k_{bi}$ , 该斜率所对应的点即是左摄像机像面斜率为  $k_{ai}$  的点在右摄像机像面的匹配点;
- (4)若同一条外极线上存在着两个或多个候选匹配特征点,则可以结合“顺序一致性约束”法则及“唯一性”法则进行特征点匹配判断。

#### 4.2 基于角点的快速匹配方法

一般而言,边缘上点的数量很多,直接利用边缘点进行匹配的计算量较大,而图像中的角点数

目大大小于边缘点的数目,并且含有图像中显著特征的信息,因而利用角点匹配不失为一种有效的方法。出于提高速度性能而不降低匹配精度的考虑,角点是一个很好的候选特征基元。

对于封闭区域的角点定位可以由 Hough 变换后的直线方程或曲线方程的交点计算求出。对于被测对象,可按下述步骤进行匹配运算:

(1) 由改进的 Hough 变换方法提取左、右摄像机像面直线段(曲线)的特征参数,对于椭圆,可仅提取椭圆中心作为其匹配基元;

(2) 计算出角点坐标;

(3) 按外极斜率匹配法对角点进行匹配;

(4) 列出匹配好的角点对。

## 5 实验结果与分析

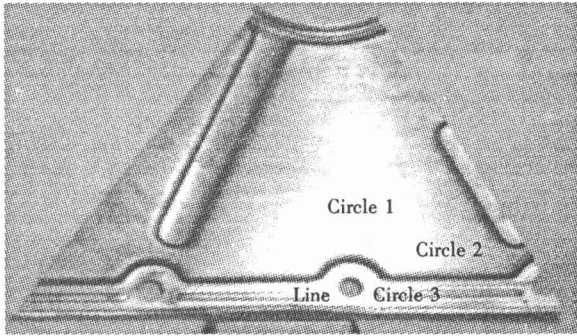


Fig.5 Parts figure of top of the gear room

图 5 所示为汽车门升降齿轮室盖的局部灰度

### 参考文献:

- [1] 郑南宁. 计算机视觉与模式识别[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [2] 封举富. 计算机视觉若干问题的研究[D]. 北京:北京大学,1997.
- [3] 祝世平,强锡富. 工作特征点三维坐标视觉测量方法综述[J]. 光学 精密工程,2000,8(2):192-197.
- [4] 张之江,车仁生. 视觉坐标测量中直接光学法透镜光学中心的标定[J]. 光学 精密工程,2000,8(5):487-490.

图。该工件所要求的检测项目之一为圆 1(Circle 1)与圆 2(Circle 2)的公切线与过圆 3(Circle 3)的中心并与直线(Line 1)相垂直的直线的夹角。

由于三坐标机的探头不能伸入所要求检测的圆弧根部,因此不宜用三坐标机进行检测。采用图像法重复 6 次的测量结果如表 2 所示。

Table 2 Top of the gear room measured results

Measure number	1	2	3	4	5	6
Measured result	45.801	46.187	46.276	46.113	45.603	46.073
Calculation item	Mean	Standard deviation $\sigma$		± 3 Standard deviation ± 3 $\sigma$		
Calculated result	46.009	0.233		± 0.699		

由实验结果可以看出:

(1) 图像处理算法应用于工业产品的测量中,对合适的灰度图像,测量重复性较好,抗干扰能力较强,这也正是 Hough 变换方法鲁棒性好的体现;

(2) 在摄取图像过程中,应注重辅助光源的选取与配置。

## 6 结束语

曲面测量是工业检测中的一个重要方面,采用被动视觉测量不能有效解决曲面检测问题,现有资料表明,采用结构光和立体视觉相结合的方法是一种相对合理的方案。

## Applications of machine vision in industry inspection and its research

ZHANG Ye-peng, HE Tao, WEN Chang-jun, YANG Yin-cai, SHEN Bang-xing

(Department of Mechanical Engineering, Hubei Polytechnic University, Wuhan, 430068, China)

**Abstract:** Based on a model of machine vision technique, the paper puts forward a method of high accuracy camera calibration for the system of machine vision inspection. Key techniques in this system include the camera calibration, curve inspection and feature matching, etc. According to thesis of "form much to one", the paper discusses an improved method of Hough transform. In light of the theory of constrain, it also gives a method of feature matching. These methods have been proved by corresponding experiments, and some of them have been successfully utilized in the inspection of complex industrial parts.

**Key words:** machine vision; camera calibration; Hough transform; feature matching

**作者简介:**张业鹏(1966-),男,湖北仙桃人,湖北工学院测控教研室讲师,武汉理工大学博士生。主要从事机械 CAD/CAM 及检测仪器及仪表等方面的研究,在国内相关期刊上发表论文 8 篇。本文原于沈邦兴教授武汉市科委立项的重点科研课题。

沈邦兴(1937-),男,湖北武汉人,湖北工学院测控教研室教授,主要从事光电子技术方面的研究,发表相关论文三十多篇。

---

## 欢迎您订阅《光机电信息》

《光机电信息》是由中国科学院长春光学精密机械与物理研究所主办的科技类信息刊物。主要报道国内外光机电领域的前沿与发展动态,内容包括光学、光电子学、激光、光通信、发光学、精密机械、医用光学、军用光学、航空航天技术、微机械、计算机与测量技术等高新技术的各个领域,涉及科技热点评述、趋势与动向、科学专题、研究综述、科学探索、市场动态、新产品开发和高新技术产业化等多方面内容。

为满足不同读者的不同需求,在传播和报道国内外最新信息的同时,我们努力将办刊和为科研生产服务有机地结合在一起,对《光机电信息》所报道的每一专题,乃至每一条信息,我们都可以利用长春光机所的丰富馆藏优势和先进的计算机检索系统,为读者展开深层次的文献跟踪服务,这是我们在新世纪对广大读者的又一庄重承诺!

本刊为月刊,国内外公开发行,每期定价 5.00 元,全年 60.00 元(含邮费)。个人订阅,通过邮局汇款。单位订阅,请填写好订购单位通信签、长春光机所财务科存根《记账凭证》,连同款项通过银行寄回。欢迎广大读者订阅并投稿。

地 址:长春市 1024 信箱《光机电信息》编辑部

开户行:中行吉林省分行营业部

账 户:04 单位 438 部

账 号:018211000889

国内邮发代号:12-171

《光机电信息》编辑部