

# 基于计算机视觉的板类零件曲面测量系统

张爱武<sup>1)</sup> 李明哲<sup>1)</sup> 胡少兴<sup>2)</sup> 陈庆敏<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(吉林大学机械研究所, 长春 130025) <sup>2)</sup>(吉林大学机械工程学院, 长春 130025)

**摘要** 利用计算机视觉原理,建立了板类零件曲面测量系统。该系统首先根据人眼感知事物的原理,采用神经网络来拟合图象坐标与空间坐标的映射关系;然后以光栅投影条纹为特征,用小波变换提取条纹边缘,在此基础上,提出搜索式无监督聚类方法,使带状离散边缘点按边缘实际分布情况分为不同组群,并将各组边缘点分别拟合成连续B样条曲线,同时结合视觉几何不变性,实现了亚像素级的立体精匹配;接着,运用小波分解来拼接图象,融合数据,并由图象坐标与空间坐标的映射关系,求解曲面上点的空间坐标,测量精度可控制在0.5mm/m以内。

**关键词** 计算机视觉 立体匹配 几何不变性 神经网络 小波变换 聚类

**中图分类号**: TP391.76 **TG832-39** **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2002)02-0190-06

## Surface Measurement System of Sheet Metal Parts Based on Computer Vision

ZHANG Ai-wu<sup>1)</sup>, LI Ming-zhe<sup>1)</sup>, HU Shao-xing<sup>2)</sup>, CHEN Qing-min<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>(Roll forging Institute, Jilin University of Technology, Changchun 130025)

<sup>2)</sup>(Department of Machinery Science and Engineering, Jilin University of Technology, Changchun 130025)

**Abstract** On the basic of computer vision principle, a surface measurement system of sheet metal parts is proposed in this paper. Using neural network, the mapping relation between image points and special points is established. Some distorted stripes are obtained on surface, and the points of stripe edges are detected by wavelet edge detection. A searching non-supervisor clustering algorithm is discussed, so all of edge points are divided into different groups according to stripe edge situation, the edge points of every group are fitted into a B-spline curve. The curves are recognized and marked based on geometric invariance to search corresponding points at sub-pixel level. Furthermore, the multi-scale and multi-resolution attributes of wavelet are applied to image mosaic and data integration, so a large-scale surface can be measured. At last the coordinates of points on surface are calculated with the mapping relation between image points and special points, and the measuring precision is less than 0.5mm/m. The system avoid emending optical system distortion of cameras, achieve stereo matching at sub-pixel level, and integrate surface data, so the large surface can be able to measure.

**Keywords** Computer vision, Stereo matching, Geometric invariance, Neural network, Wavelet transform, Clustering

## 0 引言<sup>[1,2]</sup>

在板类零件,尤其是汽车、飞机和轮船等壳体加工制造中,自由曲面的测量对控制板类零件的加工精度和加工质量尤为重要。目前工业上三维测量仍以三

坐标测量机为主,它是接触式,而且体积大,结构复杂,对测量条件要求苛刻,近几年随着计算机视觉、图象技术和光学技术的发展,相继出现了激光扫描法、结构光法、相位法和立体视觉法等非接触测量技术,但这些技术都不能同时满足测量精度、测量效率、自动化和智能化以及设备简单成本较低等要求。

基金项目:国家“863”CIMS主题资助项目(863-511-820-018)

收稿日期:2000-10-30;改回日期:2001-03-29

激光扫描法利用激光扫描物体表面,通过出射点、投影点和成像点的三角关系确定物体的三维坐标,其测量速度较快,精度较高,但工件材质和表面特性以及光学系统的成像误差对测量结果影响较大,且激光扫描系统的价格十分昂贵;结构光法是将一定模式的结构光投影于物体表面,在表面上形成由被测物体表面形状所调制的光栅光条三维图象,由处于另一位置的摄像机获得光栅光条二维畸变图象,对二维畸变图象进行傅里叶分析、滤波和逆傅里叶分析,从中提取三维图形信息,其不足之处在于,当测量斜率大的物体时,需要分辨率非常高的图象设备和运算能力大的计算机;相位测量法采用正弦光栅投影和相移技术,投影在物体上的光栅,根据物体的高度而产生变形,通过对变形条纹的处理,解调出代表物体高度的相位信息,这种方法处理简单,精度较高,但却不能消除条纹中高频噪声引起的误差,在梯度变化较大处,栅线密集解相困难;立体视觉法是用两个摄像机从不同位置抓拍同一物体,在两个摄像机的图象平面上提取和匹配需要测量的特征点,求出特征点在两个图象平面的坐标,再利用成像公式计算出测量点的三维坐标,此法原理直观,但寻找对应点比较困难,若能实现立体精匹配和数据拼合,在工业视觉和医学图象处理上将有较大潜力。

本文根据板类零件曲面特点,采用交向摆放的双目传感摄像机,通过图象抓拍、图象预处理、立体匹配、图象拼接和数据融合等,建立板类零件三维曲面测量系统,并将多种方法融于曲面测量中,提出一种新的曲面测量算法。该技术现已用于无模多点成形压力机的板类零件曲面测量系统中,并取得了满意的测量效果。

## 1 测量原理与总体设计<sup>[3,4]</sup>

板类零件曲面测量系统是以计算机视觉为基础,结合小波变换和神经网络等技术,采用交向摆放的双目传感摄像机,从两幅图对中整合三维信息。针对板类零件曲面光滑的特点,测量系统由双 CCD 摄像机和一个自制小型投影装置构成的柔性测量头与控制装置组成(如图 1 所示)。

事实上,在摄像机的不同视野内会产生不同的测量误差,其主要原因在于摄像效果与被测物体的大小、被测物体的细节尺寸、物距、焦距、CCD 摄像机像敏面的尺寸、镜头及摄像系统的分辨率等因素

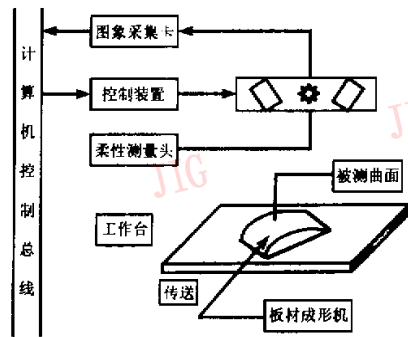


图 1 测量系统结构原理简图

有关。设镜头焦距为  $f$ , 被摄物体的长度为  $L$ , 被摄物体的宽度为  $W$ , 被摄物体与镜头之间的距离为  $D$ , 像敏面尺寸为  $2T_x \times 2T_y$ , 则有如下关系式

$$L = \frac{2T_x \times D}{f} \quad W = \frac{2T_y \times D}{f} \quad (1)$$

从上述公式可以看出,物体离摄像机近时,能充分利用像敏面有效像素,摄像效果好,图象清晰,但有可能漏拍;而物体离摄像机较远时,较大物体能进入视场,可图象不清晰,得不到被测物体的细节。考虑到本文是将计算机视觉原理用于三维测量,故需突出被测曲面的细节尺寸,充分利用摄像机分辨率和像敏面有效像素,确定一次测量面积为  $150 \times 150 \text{mm}^2$ , 两摄像机之间的基线距离约为  $300 \text{mm}$ , 测量头距曲面约为  $600 \text{mm}$ 。选用两台 MTV1881CB 黑白 CCD 摄像机,  $12 \text{mm}$  TV 镜头和 METEOR 图象采集卡。

## 2 确立图象坐标与空间坐标的映射关系<sup>[5,6]</sup>

摄像机标定过程,实际上就是建立图象坐标与空间三维坐标的对应映射关系。从图象坐标到空间坐标存在许多非线性复杂因素,如摄像机的径向畸变和横向畸变,而目前尚无一种方法可完全拟合这种非线性映射关系。本文把从图象坐标到空间坐标的中间转换环节作为一黑箱,引入 BP 网,通过简单非线性处理单元的复杂映射获得图象坐标与空间坐标的对应映射关系。以左图象坐标  $(x_l, y_l)$  和右图象坐标  $(x_r, y_r)$  作为输入节点,以空间  $(x, y, z)$  坐标作为输出节点构造 4-6-3 的 BP 网,从而避开了光学系统多种畸变的非线性校正。

利用神经网络处理图象获取三维信息的关键在于网络训练样本的选择。样本的选择原则是使样本处于可测范围内,并反映测量系统的量程。当采用双目摄像机测量物体时,只有进入两摄像机形成的空间交汇视场中的物体或物体的某一部分可测,故镜头焦距、测量精度、一次测量面积的大小和物体到摄像机的距离是确定测量系统三维测量范围的主要因素。

本文采用两台结构和性能完全相同的 CCD 摄像机,像敏面尺寸均为  $2 \times 2$ ,且对称姿态摆放(见图 2)。

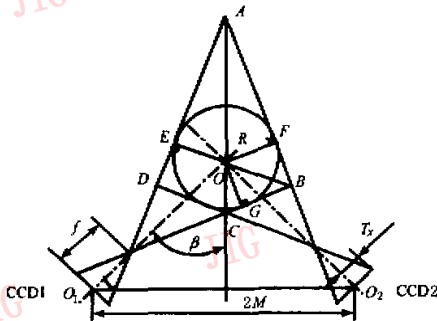


图 2 双 CCD 视觉传感器的空间交汇视场

成像镜头的焦距为  $f$ ,两成像面中心连线  $O_1O_2$  垂直于  $AC$ 。双 CCD 摄像机视场的公共重叠部分  $ABCD$  所围成的多边形(即两台摄像机均能同时观察到的区域)为其空间交汇视场,而位于此区域之外的其他部分则被成为“盲点”。根据成像关系,可得

$$\varphi = \arctan\left[\frac{T_z}{f}\right] \quad (2)$$

式中: $2\varphi$  为 CCD 摄像机的有效视场角。

在双 CCD 视觉传感器的有效视场内作一内切圆,可求得半径为

$$R = (M \csc\beta - f) \sin\varphi \\ = \frac{(M \csc\beta - f) T_z}{\sqrt{T_z^2 + f^2}} \quad (3)$$

式中: $\beta$  为双 CCD 光轴夹角的均值( $0 < \beta < 90^\circ$ );  $2M$  为两成像面中心之间间隔的距离。

制造一块  $2R \times 2R$  的样本模板,上边有规律的印上  $8 \times 8$  的网格,然后将样本模板放在工作台上,在 3 个高度(0,  $R$ ,  $2R$ ) 拍摄 3 幅图象,形成空间三维模拟标定场,并将 3 组立体图象对作为网络训练样本,输入图象坐标与空间坐标的映射关系 BP 网,用以训练网络。

### 3 搜索式无监督聚类拟合亚像素级立体精匹配算法

立体匹配是立体视觉中最为复杂的环节。目前匹配方法有基于特征匹配、基于面积匹配和基于相位匹配等。基于特征匹配主要以零交叉点和梯度为依据,受噪声影响较小,仅能获得稀疏的视差;基于面积匹配虽可以获得稠密的视差,但因其主要是以灰度连续性为依据,故受噪声影响较大;基于相位匹配一般是针对核线平行而言,虽然将空间域转化为时间域,但同样存在邻域奇异性。考虑到立体视觉用于曲面测量的实际情况,本文提出一种搜索式无监督聚类拟合匹配算法。先以光栅在曲面上的投影条纹为特征,从小波分析入手,检出边缘点;后将离散边缘点按边缘实际分部情况分为不同的组群,并由 B 样条将边缘点拟合为连续曲线;再结合视觉几何不变性,达到亚像素级立体精匹配。

#### 3.1 搜索式无监督聚类条纹边缘拟合<sup>[7-11]</sup>

由于各种原因,图象常常受到随机噪声的干扰,而小波变换具有很强的抑制噪声和检测图象边缘的能力,并在进行边缘检测、定位的同时,利用在各个分辨率下的信号信息和分辨率之间的信号传播信息,对图象不同结构边界的性质提供定量的描述。因为根据图象特征进行立体匹配最重要的前提是保持平移不变性,故这里选用二次 B 样条函数作为多尺度生成元,检测出光条边缘离散点。

事实上,这些点仍然带有噪声,并且不连续,因此需采用曲线拟合方法,在将离散点拟合成连续曲线的同时有效地去除噪声。然而,在曲线拟合之前,将这些带状离散点按边缘实际分部情况分类已成为关键一步。以往的分类方法是以高聚类中心的海明距离为约束条件,即判断点  $X$  属于哪一类(或者最可能属于哪一类)就看它离哪一个聚类中心距离最近,但这种假设不符合带状点集的实际情况。在进行曲线拟合前,不仅要知道点集类别数,而且要知道点集的明确归属,且类别数恰为条纹边缘数,为此提出了搜索式无监督聚类方法。

设  $n$  是点集  $D$  的数目(属性值向量数),预把点集  $D$  分割成  $m$  类,具体的方法如下:

(1) 点  $i$  得到的属性值向量  $X_i, i \in N_n \triangleq \{1, 2, 3, \dots, n\}$  作为初期类别  $\omega_i$ ,即  $\omega_i \triangleq X_i$ ,也就是类别数  $m$  和  $n$  相等。

(2) 若  $m = \bar{m}$ , 分类结束.

(3) 根据下式对全部类别组  $(\omega_i, \omega_j)$  求类别间的距离  $d_{\min}(\omega_i, \omega_j)$ , 即

$$d_{\min}(\omega_i, \omega_j) = \min \{ \|X - X'\| \}$$

式中,  $X \in \omega_i, X' \in \omega_j$ ,

$$\|X - X'\| = \sqrt{(X - X')^T (X - X')}$$

选择最近的两个类别  $\omega_i, \omega_j$ .

(4) 合并类别  $\omega_i$  和  $\omega_j$ , 并改正由此而形成的新类别, 设为  $\omega_k$ , 即  $\omega_k \cup \omega_j \leftarrow \omega_i$ , 其结果类别组  $m$  减小 1.

(5) 返回第 2 步.

### 3.2 基于视觉几何不变性的对应点求解<sup>[12]</sup>

所谓不变性, 是指几何图形、变量在数学变换下保持不变的性质.

同一空间多边形, 在两个摄像机图象平面上可能得到形状不同的多边形, 同样, 同一组空间曲线, 在两个图象平面上会得到两组不同的平面曲线, 因此, 视觉几何不变性是以直线和曲线为基元进行整体匹配的重要途径.

在利用直线进行匹配时, 共面 5 点或 5 条共面直线的透视投影不变量, 是比较有代表性的. 设  $l_i (i=1, 2, 3, 4, 5)$  为空间平面上的任意 5 条直线, 它们的方程表示为:

$$f_i(x, y) = a_i x + b_i y + c_i = 0 \quad (4)$$

取这 5 条直线中的任意 3 条  $l_{k_1}, l_{k_2}$  和  $l_{k_3} (k_1, k_2, k_3 = 1, 2, 3, 4, 5; \text{且 } k_1 \neq k_2, k_1 \neq k_3, k_2 \neq k_3)$ , 这 3 条直线方程组有以下矩阵表示式

$$A_{k_1 k_2 k_3} X = 0 \quad (5)$$

这些直线经透视投影后, 得图象平面上的 3 条直线  $l'_1, l'_2$  和  $l'_3$ , 它们也有对应的直线方程系数, 用上标加一撇表示 (如  $a'_1$  等). 可以证明, 尽管 5 条直线经透视投影后形状可能变化较大, 但有以下不变量:

$$I_1 = \frac{M'_{134} M'_{125}}{M'_{124} M'_{135}}, I_2 = \frac{M'_{124} M'_{235}}{M'_{234} M'_{125}} \quad (6)$$

式中,  $M'$  是对应  $A'$  矩阵的行列式值.

利用这一不变量就可以有效地实现匹配. 类似地, 对于一组二次曲线, 也存在透视投影不变量.

设  $C$  为空间平面二次曲线, 其方程可表示为

$$Q(x, y) = ax^2 + bxy + cy^2 + dx + ey + f = 0 \quad (7)$$

其矩阵表达式为

$$X_L^T P X_L = 0 \quad (8)$$

其中,  $P$  由二次曲线的系数决定.

若有两条二次曲线  $C_1$  和  $C_2$ , 它们的系数矩阵分别为  $P_i (i=1, 2)$ , 则经透视投影后为  $C_3$  和  $C_4$ , 它们对应的系数矩阵为  $P_3$  和  $P_4$ . 可以证明, 无论经怎样的透视投影, 其  $C_3$  和  $C_4$  的系数均满足以下两个不变量:

$$I_1 = \text{tr}(P_3^{-1} P_4) = \text{tr}(P_1^{-1} P_2) \quad (9)$$

$$I_2 = \text{tr}(P_4^{-1} P_3) = \text{tr}(P_2^{-1} P_1) \quad (10)$$

式中,  $\text{tr}$  为矩阵的迹.

而利用二次曲线的不变量也能有效地实现匹配.

本文利用小波边缘检测和搜索式无监督聚类拟合匹配算法, 将条纹边缘拟合成二次曲线, 并根据视觉几何不变性, 整体匹配曲线, 再由外极几何特性沿曲线寻找对应点, 实现亚像素级的立体精匹配.

## 4 图象拼合<sup>[13~15]</sup>

当测量大型曲面或景深较大的物体时, 需移动测量头或移动曲面, 以便在不同位置抓拍图象. 由于在移动测量头或移动曲面时, CCD 摄像机本身并没有平移或转动, 因而无需重新确定图象坐标与空间坐标的映射关系. 图象拼合的核心问题是图象整合, 即将图象间相重叠的部分对齐所需的变换. 其中涉及到的一个问题是寻找图象间的对应匹配. 图象拼合中的匹配与在左右图象中求解对应点不同, 前者待整合的两幅图象或是同视点, 或是视点仅沿一个基轴平移; 而后者待整合的两幅图象既有平移又有旋转, 因此与后者比较, 前者的对应匹配问题较容易些. 本文为了拼合容易, 在大的曲面上随机分散地贴上了几个小的黑色圆点贴片, 然后以圆点为特征整合相邻两幅图象, 并采用具有对称性、线性性和平移不变性的双正交小波分解待整合的两幅图象, 最后利用多分辨率分析实现由粗到精的图象匹配与整合, 找出重叠部分, 合成图象.

由于小波变换实际上是一个带通滤波器, 在不同尺度下的小波变换分量, 实际上代表了一定的频带宽度, 因此, 每个小波分量所具有的频宽是不等的, 首先将待拼合的两幅图象按 Mallat 算法<sup>[6,7]</sup>分解为不同频带的小波分量, 然后, 在不同的尺度下选择不同的拼接宽度, 按各自的方法先拼接起来, 再用合成算法恢复整个图象. 这样得到的拼接图象可以很好地兼顾清晰度和光滑度两方面的要求.

## 5 实验及分析

将该方法用于无模多点成形压力机的检测系统中,无模多点成形技术是将多点成形技术和计算机技术融为一体的先进制造技术.该技术利用一系列高度可调的基本体,通过对各基本体运动的实时控制,自由地构造出成形面,实现板材的三维曲面成形.三维测量系统是无模成形的检测系统,通过对成形曲面进行三维测量,并将结果反馈到无模成形压力机的CAD/CAE系统,计算出基本体的修正量,实现闭环控制.测量和处理过程如下:

- (1) 确立图象坐标与空间坐标的映射关系;
- (2) 板材成形后送于工作台上,首先打光不投影拍一组立体图象对,然后打光投影拍一组立体图象对;
- (3) 图象预处理,消除复杂背景和噪声;
- (4) 小波边缘检测;
- (5) 搜索式无监督聚类拟合匹配,求解对应点;
- (6) 利用图象坐标与空间坐标的映射关系,计算曲面上的三维坐标.

用上述方法对标定模板以及面积为  $150 \times 150 \text{mm}^2$  和  $250 \times 250 \text{mm}^2$  的板类零件曲面进行测量,曲面数字化图形如图3所示.

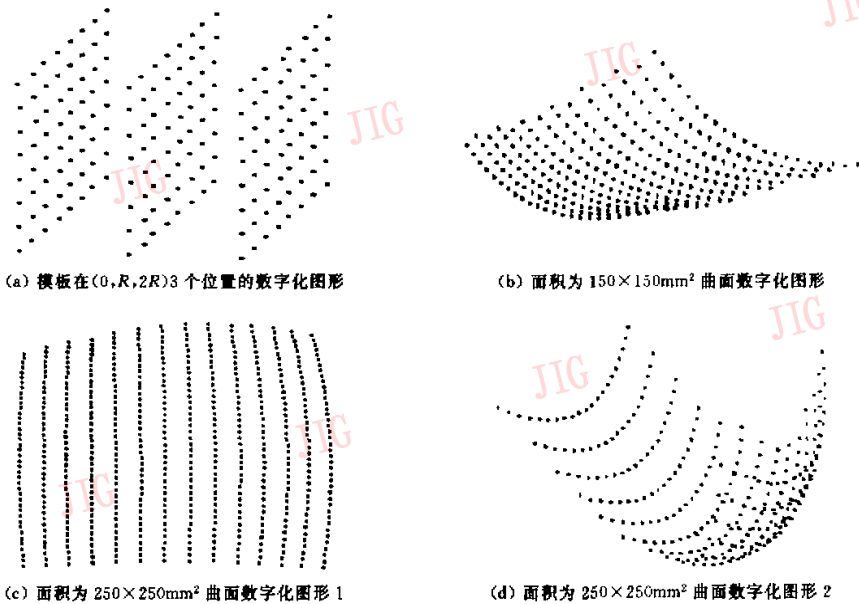


图3 曲面数字化图形

测量时间包括抓拍图象、图象预处理、对应匹配和求解三坐标共约 30s. 测量结果与三坐标测量机测得的结果比较,其最大绝对误差可控制在  $0.03 \text{mm}$ ,整体测量精度为  $0.5 \text{mm/m}$ ,即测量深度为  $1 \text{m}$  时的误差在  $0.5 \text{mm}$  以内.

## 6 结论

本文根据计算机视觉原理研制了板类零件曲面测量系统.首先以神经网络拟合图象坐标与空间坐标的映射关系,从而避免了光系统多种畸变的校正;再以光栅投影条纹为特征,用小波变换提取条纹边

缘,同时提出了搜索式无监督聚类方法,将带状离散边缘点按边缘实际分部情况分为不同组群;接着,将各组边缘点分别拟合成连续 B 样条曲线,并结合视觉几何不变性,实现了亚像素级的立体精匹配;然后,利用小波多分辨率多尺度的特性,拼接图象,融合数据;最后,由神经网络拟合图象坐标与空间坐标的映射关系求解三坐标.测量精度可控制在  $0.5 \text{mm/m}$  以内,算法具有良好的鲁棒性.本系统还可用于测量各种自由曲面,仅是当测量铝板等发光的板类零件曲面时,需在曲面上涂一薄层涂料.板类零件曲面测量系统的研制为工业无损检测和测量提供了可行方案,同时也为计算机视觉在工业中的进

一步应用提供了新的思路。

### 参考文献

- 1 李奇,冯华君,徐之海等. 计算机立体视觉综述[J]. 光学技术, 1999,25(5):71~73.
- 2 李明哲,中村敬一. 基本的な成形原理の检讨——板材多点成形法の研究[A]. 见:日本平成4年度塑性加工春讲会论文集[C],日本横浜,1992:519~522.
- 3 邓文怡,郭术义,董明利等. 提高工业视觉测量系统精度的途径[J]. 工具技术,1999,33(5):36~39.
- 4 马颂德,张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998,72~116.
- 5 颜树华,叶湘滨,王跃科等. CCD光靶交汇测量精度的理论研究[J]. 光电子·激光,1999,10(4):322~329.
- 6 焦李成. 神经网络系统理论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1996.
- 7 Eero P Simoncelli. Shiftable multiscale transforms[J]. IEEE Trans. on Information Theory, 1992,38(2):587~607.
- 8 Jean-Pierre Djamdj. Disparity analysis: A wavelet transform approach[J]. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, 1995,33(1):67~76.
- 9 解梅等. 一种改进的基于小波变换图像边缘检测算法[J]. 系统工程与电子技术, 1998,20(10):67~70.
- 10 解梅,马争,顾德仁. 小波变换在有噪声图像边缘检测中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2000,22(1):25~27,46.
- 11 王积分等. 计算机图像识别[M]. 北京:中国铁道出版社, 1998, 119~124,153~169.
- 12 Grace JH, Yung A: The algebra of invariants[M]. New York, Chelsea Publishing Company,1993.
- 13 Mallat S G. Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models [J]. IEEE Trans Acoust, Speech, Signal Processing, 1989,37(12):2091~2110.

14 Mallat S G, Zhang S. Characterization of signal from mutiscale edges[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992,14(7):710~732.

15 徐丹,鲍敏,石教英. 基于复值小波分解的图象拼合[J]. 软件学报,1998,9(9):656~660.



**张爱武** 1972年生,现为吉林大学锻压研究所博士研究生. 主要从事计算机视觉、三维测量、神经网络、小波分析及人工智能等研究工作. 已发表学术论文15篇.



**李明哲** 1952年生,吉林大学锻压研究所,教授,博士生导师. 主要从事多点成形设备设计与制造、控制系统研制、CAD/CAM软件开发、有限元数值模拟等研究工作.



**胡少兴** 1972年生,现为吉林大学机械科学与工程学院博士研究生. 主要研究领域为计算机视觉、智能控制与图象识别、工业物理量测量及其信号处理等. 已发表学术论文15篇.

**陈庆敏** 吉林大学锻压研究所讲师. 主要从事多点成形设备设计与制造等研究工作.