

基于小波变换的复合材料预制件花节长度测试研究

万振凯¹⁾ 杨晓光²⁾ 刘其电³⁾

¹⁾(天津工业大学计算机与自动化学院, 天津 300160)

²⁾(天津工业大学信息与通信学院, 天津 300160)

³⁾(国务院发展研究中心国际技术经济研究所, 北京 100091)

摘要 讨论了小波变换在复合材料预制件花节长度测量中的应用技术,建立了花节长度自动测量系统.该系统基于小波变换的多尺度分析,通过合理选择小波基,对预制件表面图象进行处理,可以得到理想图象的边缘信息.选用纹理模板,对处理后图象利用相关算法计算图象匹配点输出,再通过匹配点的距离可以测量预制件的花节长度.该方法与其他滤波方法的比较,证实了小波变换可以保持预制件图象的边缘特征.实验结果说明,该系统的测试结果与手工测量结果相吻合,从而还证实了小波变换用于复合材料预制件花节长度测量是可行的.

关键词 复合材料 图象分析 小波变换 边缘检测

中图分类号: TP391.41, TS05 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2001)12-1204-05

Research on Stitch of Composite Preform Measured Based on the Wavelet Transform

WAN Zhen-kai¹⁾, YANG Xiao-guang²⁾, LIU Qi-dian³⁾

¹⁾(College of Computer and Automation, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

²⁾(Department of Information, College of Communication, Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300160)

³⁾(International Institute of Technology Economic, Development and Research Center of the State Council, Beijing 100091)

Abstract The paper discussed application technology about composite material preform stitch measured using wavelet transform. The system is rested on the multi-scale analysis of wavelet transform. By selecting appropriate wavelet basis, the surface image of composite material preform may be processed and show ideal information of image edge. When a texture template selected, match point about iamge will be make out by revolution algorithm. Through measuring distance of match point, the stitch of preform may be brought out. When compared with other filtering mode, it proves that wavelet transform can reduce noise while preserving image edge features. The experiments show that tested results are consisted with handwork. This system proved that it is possible for stitch of composite material preform will be analyzed using wavelet transform.

Keywords Composite material, Image analysis, Wavelet transform, Edges detection

0 引言

三维编织复合材料是由三维编织预制件增强的一种新型复合材料.复合材料三维整体编织技术是20世纪80年代发展起来的高新纺织技术,它具有

异型件一次编织成型、结构不分层、强度高、耐烧蚀、整体性能好和结构设计灵活等特点^[1],因而这种复合材料结构形式倍受关注.在国外,三维整体编织技术已经在航天、航空、交通、化工、体育、医疗等领域得到了广泛的应用,为航天、航空事业的发展做出了贡献.

基金项目: 国家重点工程课题(纺科[1993]11号);天津市自然科学基金(013601211)

收稿日期: 2000-11-06; **改回日期**: 2001-03-23

三维编织复合材料的力学性能与它的预制件质量有着重要的关系,而预制件的花节长度是预制件主要性能参数之一,它与增强后所形成的复合材料性能有着密切关系^[1]。目前,预制件的花节长度仍采用手工方法进行测量,因此提供一种花节长度自动测量系统,分析三维编织复合材料预制件图象局部特征,对于研究复合材料的微观结构具有一定的理论意义和实用价值,同时也将填补我国在该领域的空白。理想矩形截面的三维编织预制件表面状态如图 1 所示,图中的 h 即为预制件的花节长度,图 2 为实际预制件的表面图。由图 2 可以看出,三维编织复合材料预制件表面图象含有大量的噪声信号,因此自动测量预制件的花节长度就必须对预制件图象边缘进行处理^[2]。

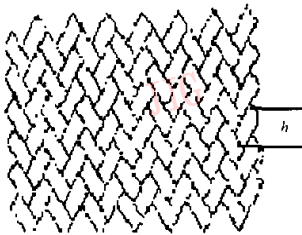


图 1 理想三维编织复合材料表面图



图 2 三维编织复合材料表面图

根据有限差分的类型,边缘检测方法可分为过零点检测和局部极值检测。过零检测的代表有 Mall 检测方法 (LOG 算子);局部极值检测的代表为 Canny 最优算子和样条小波边缘检测方法。边缘提取已有梯度算子、拉普拉斯算子、Sobel 算子、Marr 算子等方法,但这些算子都没有自动变焦的功能。经典的边缘检测方法由于引入了各种形式的微分运算,从而必然引起对噪声的极度敏感,边缘检测的结果常常是把噪声当作边缘点检测出来,而真正的边缘也由于受到噪声干扰,而没有被检测出来。对于有噪图象来说,一种好的边缘检测方法应具有良好的各种噪声抑制能力,同时又有完备的边缘保持特性。

小波变换在不同尺度下具有不同的尺度变换,对噪声具有抑制作用,同时,小波变换可根据不同的图象特点采用不同的处理方式进行边缘提取,得到理想的图象边缘信息,从而有利于对处理后的图象进行花节长度测量。本文从小波理论入手,讨论了利用小波变换极大值对三维编织复合材料预制件表面图象进行边缘检测与参数测量的方法,实验证明此方法是可行的。

1 小波变换理论的图象边缘检测原理

小波变换为图象的边缘分析提供了新的手段,它把图象信号分解为具有不同尺度的多个分量。尺度 S 描述了通过小波变换所提取的图象信号特征^[1]。在不同尺度下,离散信号的全面描述取决于在尺度 2^j 时,整数 j 下的小波变换的局部极大值。通过增加两个局部极大值点间的“尺寸”,即可增加信号的信息分量。小波变换的局部极大值点确定了图象信号突变点的位置(图象边缘位置)。通过选择适当的小波函数,可以使小波分解的细节分量真实地反映出图象的局部灰度突变点。

一维二进小波函数表示为^[4-6]。

$$\psi_{2^j} = \frac{1}{2^j} \psi \left[\frac{x}{2^j} \right] \quad (1)$$

函数 $f(x)$ 在尺度 2^j 和位置 x 的小波变换由以下卷积得到

$$W_{2^j} f(x) = f * \psi_{2^j}(x) \quad (2)$$

对于某些特殊的小波函数 $\psi(x)$,小波变换的极大值对应于信号的突变点,即小波变换的极大值检测对应于图象的边缘检测。

将二维小波变换引入到图象边缘检测中,它由水平小波变换 $\psi^1(x, y)$ 和垂直小波变换 $\psi^2(x, y)$ 构成。在尺度 2^j 时图象沿水平方向和垂直方向的小波变换由下式给出^[1]

$$\begin{aligned} W_{2^j}^1 f(x, y) &= f * \psi_{2^j}^1(x, y) \\ W_{2^j}^2 f(x, y) &= f * \psi_{2^j}^2(x, y) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $W_{2^j}^1 f(x, y)$ 和 $W_{2^j}^2 f(x, y)$ 分别是原图象水平和垂直方向的边缘信息。在尺度 $S=2^j$ 时,图象的模和幅角定义为^[1]

$$M_{2^j} f(x, y) = \sqrt{|W_{2^j}^1 f(x, y)|^2 + |W_{2^j}^2 f(x, y)|^2} \quad (4)$$

$$A_{2^j} f(x, y) = \arg \tan \left| \frac{W_{2^j}^2 f(x, y)}{W_{2^j}^1 f(x, y)} \right| \quad (5)$$

若图象 $f(x, y)$ 在点 (x, y) 处二进小波变换有局部极大值, 则 $M_{2^j} f(x, y)$ 在沿由 $A_{2^j} f(x, y)$ 给定的梯度方向上为局部极大值. 在尺度 2^j 时, 所平滑图象 $f(x, y)$ 的灰度突变点对应于沿梯度方向 $M_{2^j} f(x, y)$ 的局部极大值, 极大值点的位置就给出了图象的一个多尺度边缘^[2].

小波变换可以提供一种很好的去噪方法^[4], 对于平滑曲线上的任意点 $f(x, y)$, 它的梯度矢量方向垂直于这条曲线的切线方向. 将系数 $M_{2^j} f(x, y)$ 值最大的点及其邻域 (3×3 邻域) 的离散局部极大值点连成极大值曲线, 然后利用沿曲线方向梯度矢量的模变化平缓特点及不同尺度下梯度矢量幅角的信息, 将位置与幅度接近的点连在一起, 便构成了图象的边缘.

为实现预制件图象边缘提取, 利用自适应的阈值, 查找图象匹配点, 必须合理选择小波基.

2 小波基的选择

小波函数 $\psi(t)$ 的定义域是紧支撑的, 即在很小的范围之外, 函数值为零.

小波函数 $\psi(t)$ 定义域为零, 即

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0 \quad (6)$$

小波变换, 其重要理论是多尺度分析, 它是一种信号的空间分解方法. 在多尺度分析的基础上, 产生了 Mallat 算法^[9,10], Mallat 算法表示为

$$\begin{aligned} C_k^j &= f_k \\ \downarrow C_k^j &= \sum_n C_n^{j-1} h_{n-2k} \quad k=0, 1, \dots, N-1 \quad (7) \\ \downarrow d_k^j &= \sum_n C_n^{j-1} g_{n-2k} \end{aligned}$$

式中, $k < 0$ 时, $C_k^j = C_{-k}^j$; $k > 0$ 时, $C_k^j = C_{2N-k-1}^j$, f_k 为原始图象灰度信号采样序列, N 为采样点数, $h(i)$ 和 $g(i)$ 是一对镜像滤波器 H 和 G 的脉冲响应, i 表示滤波器的阶次值, j 表示分解的不同尺度, 选用不同小波时, 选择不同的系数 $h(i)$ 和 $g(i)$ 即可, 本系统选用 B 样条小波函数, 其滤波系数具有对称性^[4], 表 1 所示为系统中采用的滤波器系数.

表 1 样条小波滤波器系数

i	$h(i)$	$g(i)$
0	2.0	2.0
1	0.375	-0.375
2	0.125	-0.125
3	0.0547	-0.0547

3 实验方法与实验结果

三维编织复合材料预制件花节距的测量, 实际上是相邻两个编织单元的距离测量, 这个距离是相邻两个交织点间的距离. 在图象上直接寻找交织点是很困难的, 而通过小波边缘检测算法, 可获得纹理单元 (编织单元) 的边缘图, 边缘图中含有纤维交织点, 如果能够定位纹理单元, 交织点就可以确定下来. 在应用过程中, 纹理单元的定位可以用计算两幅图象近似度来表示, 从三维复合材料预制件图象中选取一个理想纹理单元作为模板图象, 把预制件图象各纹理单元图象与模板图象相比较, 来求它们的近似度, 近似度越好, 图象越匹配, 进而可定位纹理单元.

为使用模板匹配方法, 必须确定匹配的标准, 通常使用相似度进行度量. 对于复合材料预制件图象, 模板图象和三维编织复合材料预制件图象各纹理单元都可以表示为: $N_1 N_2 X_L$, 分别记作 y 和 $x_{a, \dots}$. 为实现图象相似度运算, 采用归一化积相关算法, 这里提出一种小波多分辨相关匹配方法来精确定位编织点.

定义归一化积相关输出为^[9,10]

$$R(u, v) = \frac{\sum_{j=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} x_{j, a, k-1} y_{j, k}}{\sqrt{\left[\sum_{j=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} x_{j, a, k-1}^2 \right]} * \sqrt{\left[\sum_{j=1}^{N_1} \sum_{k=1}^{N_2} y_{j, k}^2 \right]}} \quad (8)$$

当模板图象和三维编织复合材料预制件图象匹配时, $R(u, v)$ 值最大, 通过设定适当的阈值, 便可确定图象匹配点.

采用表 1 所示的小波变换滤波器系数, 对三维编织复合材料预制件表面图象进行边缘提取和归一化积相关运算, 图 3(a) 为玻璃纤维复合材料预制件表面原始图象, 材料来源于天津工业大学复合材料研究所, 图 3(b) 为 Sobel 算子提取的边缘图象, 图 3(c) 为正交算子提取的边缘图象, 图 3(d) 为样条小波提取的边缘图象. 表 2 为图 3(d) 计算得出的归一化积相关输出的局部结果 (输出的第 1 行至 20 行), 表 2 中图象的匹配阈值为 0.63, 大于 0.63 为匹配点. 由于在整幅图象的归一化积相关输出中得到系列的匹配点, 并通过相邻匹配点的位置可以计算出相对应花节长度, 因此由归一化积相关输出就可以计算出该预制件的整体花节长度. 部分花节长度测试结果如表 3 所示.

表 2 玻璃纤维复合材料预制件图象归一化积相关输出局部结果数据

1 行	0.068 7	0.153 1	0.037 4	0.255 3	0.006 5	0.188 4	0.058 7
	0.079 2	0.125	0.355	0.234 1	0.238	0.190 2	0.174 0
	0.054 2	0.089 9	0.102 7	0.112 8	0.096 2	0.072 8	0.259 1
	0.029 5	0.072 1	0.151 8	0.008 4	0.219 8	0.200 4	0.212 5
	0.005 1	0.075 5	0.192 7	0.161 9	0.365 4	0.590 2	0.096 1
	0.012 3	0.094 4	0.235 6	0.253 2	0.474 6	0.633 7	0.057 7
	0.019 5	0.121 0	0.275 0	0.254 8	0.517 6	0.701 5	0.159 7
	0.015 1	0.153 1	0.300 0	0.186 9	0.519 2	0.623 2	0.151 5
	0.054 4	0.188 1	0.295 3	0.087 5	0.490 3	0.439 3	0.061 3
	0.106 6	0.223 1	0.258 2	0.048 3	0.408 6	0.237 3	0.049 3
	0.134 3	0.256 0	0.203 0	0.117 3	0.271 3	0.095 2	0.122 6
	0.123 9	0.284 0	0.146 3	0.190 0	0.115 7	0.017 3	0.145 6
	0.071 3	0.297 4	0.089 8	0.211 4	0.011 9	0.025 9	0.133 3
	0.007 8	0.280 3	0.035 5	0.175 6	0.085 8	0.051 1	0.094 7
	0.025 1	0.212 7	0.004 7	0.104 1	0.114 2	0.066 5	0.041 1
	0.015 5	0.091 5	0.027 4	0.021 8	0.119 0	0.077 1	0.014 5
	0.016 2	0.037 5	0.047 3	0.051 3	0.118 9	0.081 3	0.053 7
	0.041 1	0.134 9	0.077 0	0.108 1	0.121 0	0.077 7	0.071 5
	0.017 3	0.178 4	0.108 4	0.132 9	0.122 7	0.076 3	0.086 5
20 行	0.038 9	0.179 2	0.122 2	0.121 2	0.116 5	0.087 7	0.085 5

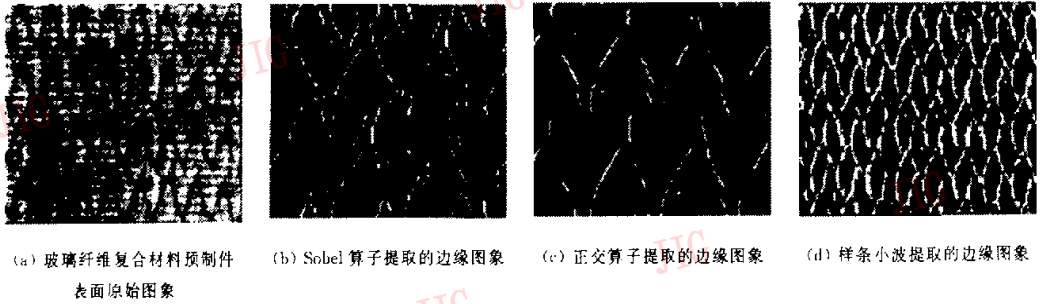


图 3 用不同算子提取的玻璃纤维复合材料预制件边缘图象

表 3 玻璃纤维复合材料预制件部分花节长度

单位:mm

测量方法	测量顺序									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
手工测量	6.3	6.10	6.38	6.12	6.20	6.19	5.24	6.11	5.90	6.24
系统测量	6.15	6.18	6.19	6.20	6.30	6.21	5.31	6.22	6.09	6.30

图 4(a)为碳纤维复合材料预制件表面原始图

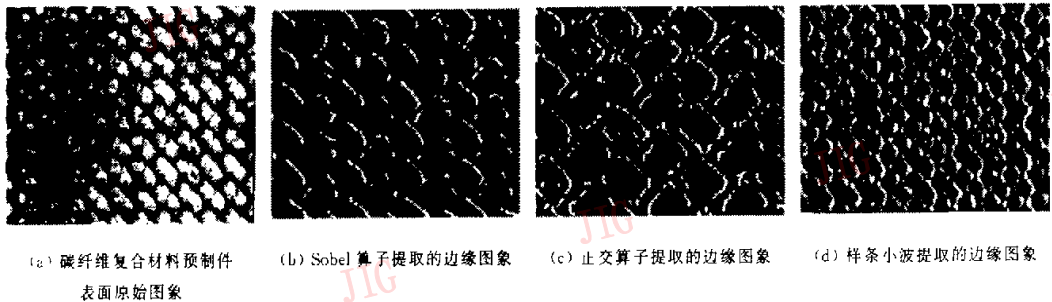


图 4 使用不同算子提取的碳纤维复合材料预制件边缘图象

象,材料来源于天津工业大学复合材料研究所,图 4 (b)为 Sobel 算子提取的边缘图象,图 4(c)为正交算子提取的边缘图象,图 4(d)为样条小波提取的边缘图象,表 4 为图 4(d)计算得出的归一化积相关输出的局部结果(输出的第 1 行至 20 行),表 4 中图象阈值为 0.62,大于 0.62 为匹配点,部分花节长度测试结果如表 5 所示.

表4 碳纤维复合材料预制件图象归一化积相关输出局部结果数据

1行	0.0567	0.0884	0.1102	0.0911	0.2315	0.0691	0.0511
	0.0467	0.0587	0.1091	0.1325	0.2115	0.1067	0.0215
	0.0638	0.1157	0.0438	0.2191	0.1052	0.1192	0.0221
	0.0916	0.1239	0.0891	0.2751	0.0390	0.1169	0.0180
	0.1838	0.0679	0.2410	0.1806	0.1553	0.0933	0.0687
	0.2328	0.1085	0.3294	0.0108	0.2688	0.0252	0.0585
	0.2174	0.3906	0.2684	0.1551	0.2041	0.0391	0.0748
	0.1780	0.6658	0.1348	0.2690	0.1686	0.0910	0.0685
	0.1757	0.7975	0.0212	0.3287	0.1290	0.0061	0.0252
	0.2181	0.1351	0.0020	0.3128	0.0953	0.0083	0.0053
	0.2867	0.5577	0.0386	0.3679	0.0752	0.0023	0.0273
	0.2613	0.3056	0.0838	0.2153	0.0721	0.0344	0.0524
	0.2914	0.1117	0.1011	0.0841	0.0818	0.0878	0.0566
	0.1655	0.0269	0.0938	0.0501	0.0954	0.1502	0.0296
	0.0126	0.1189	0.0753	0.1510	0.1618	0.2021	0.0171
	0.0578	0.1730	0.0542	0.2009	0.0954	0.2290	0.0634
	0.0987	0.1914	0.0296	0.1975	0.0748	0.2181	0.0950
	0.1219	0.1789	0.0028	0.1468	0.0174	0.1626	0.1161
	0.1432	0.1129	0.0266	0.0591	0.0224	0.0684	0.1368
20行	0.1532	0.0925	0.0563	0.0425	0.0053	0.0663	0.1535

表5 碳纤维复合材料预制件部分花节长度

单位:mm

测量方法	测量顺序									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
手工测量	7.54	7.18	7.08	7.15	6.80	6.40	6.91	6.91	6.90	7.24
系统测量	7.15	7.18	7.19	7.20	6.69	6.41	6.81	6.92	7.09	7.30

由图3(b)、图3(c)、图4(b)、图4(c)可以看出,用常规算子对图象进行处理后,图象边缘不连续,并且图象信息丢失严重,而用小波变换对图象进行处理,则可以得到理想的图象边缘,如图3(d)、图4(d)所示。由此证明了复合材料预制件表面图象通过边缘提取后,可以计算出各种预制件的花节长度,由表3、表5可以看出,系统的测量结果与手工测量结果基本相符。

4 结束语

(1) 论文论述了小波变换在复合材料表面图象边缘检测中的应用,结论证明:在复合材料预制件图象边缘检测方面,小波变换比其他常规算子具有较强的抗噪性能,系统测量结果与实际测量结果吻合。论文所得结论对于复合材料的参数分析具有一定实用价值。

(2) 基于小波变换的复合材料预制件图象分析是今后继续研究的课题。

(3) 由于篇幅限制,花节长度与复合材料力学性能的关系未作分析。

(4) 由于复合材料测试方面的材料较少,文中

不详之处敬请指正。

参考文献

- 吴德龙等. 纺织结构复合材料的力学性能[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998:183~220.
- 李学明,万振凯. 三维编织复合材料预制件表面性能测试[J]. 产业与纺织品,1997,(4):32~37.
- 万振凯,李嘉祿. 三维编织复合材料预制件表面编织角检测与不均匀分析研究[J]. 纺织学报,1999,20(6):59~61.
- 解梅,马争,顾德仁. 小波变换在图象边缘检测中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(1):25~27.
- 杨炬,梁德群,杨万海. 边缘检测中Canny算子,二次样条小波算子性能分析[EB/OL]. <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/txb/txb99/txb9908-990809.htm>
- 秦前清. 实用小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,1994:120~300.
- 刘宏兵,杨万海,张群. 两类阈值对图象小波边缘提取的影响研究[J]. 系统工程与电子技术,2000,22(2):87~89.
- Canny J. A computational approach to edge detection[J]. IEEE Trans. PAMI,1986,8(6):679~697.
- Mallat S, Zhong S. Characterization of signal from multiscale edges[J]. IEEE Trans. PAMI,1992,14(9):711~728.
- 陈东,周大威. 用多尺度小波变换进行边缘检测算法的研究[J]. 计算机工程与应用,1998,19(2):35~37.



万振凯 1964年生,副教授,1987年毕业于天津纺织工学院自动化系,现任天津工业大学计算机与自动化学院副院长兼任天津工业大学网络中心主任。主要研究方向为图象处理与计算机网络。近年来发表论文10余篇,论著5部,主持或参加省部级项目5项。



杨晓光 1968 年生,讲师,在职硕士研究生,1988 年毕业于天津纺织工学院纺织系,现任天津工业大学信息与通信学院教师。主要研究方向为小波变换与图象处理。发表论文 3 篇,参加省部级项目 2 项。



刘其电 1961 年出生,1985 年毕业于南京化工学院硅工系,现为国务院发展研究中心国际技术经济研究所助理研究员,从事国内外新材料领域技术研究。

“虚拟现实及其应用”高级研讨班报名通知

在“虚拟现实及其应用”国际会议之前(2002 年 4 月 8~9 日)将举办“虚拟现实及其应用”高级研讨班,将特邀著名国内外专家就虚拟现实及其应用的最新动态和热点问题作专题讲座,欢迎报名参加。

“虚拟现实及其应用”国际会议特邀报告人:

- Ruth Aylett(英国 Salford 大学虚拟环境研究中心主任,智能虚拟环境教授)
- Judy Brown(美国 IOWA 大学可视化教授,ACM SIGGRAPH 主席)
- James D. Foley(美国 Georgia 技术大学 GVC 中心主任,教授,ACM ToG 期刊前任主编)
- Martin Goebel(德国 GMD 虚拟环境研究部主任,C&G, Intern. Journal of Image and Graphics 期刊编委)
- Mark Green(加拿大 Alberta 大学计算机图形学教授,香港城市大学创新媒体学院教授)
- Soonhung Han(韩国高级科技研究院(KAIST)教授,International Journal of CAD/CAM 期刊主编)
- K. Ikeuchi(日本 Tokyo 大学机器人及人机交互研究所首席科学家,教授)
- Kunwoo Lee(韩国国立汉城大学 CAD 国家实验室主任,CAD 等期刊编委)
- Carl Machover(美国 MAC 公司总裁,IEEE CG&A, C&G, The Visual Computer 等期刊编委)
- Ryohel Nakatsu(日本虚拟现实学会(VRSJ)副主任,AIR 媒体集成和通讯实验室主任)
- Yunyhe Pan(中国工程院院上,中国图象图形学学会理事长,浙江大学校长)
- Dirk Reiners(德国 FhG-IGD 图形研究所 OpenSG 项目首席技术官)
- Harry Shum(微软中国研究院副院长,主任研究员)
- Yi Tan(美国 Princeton Video Image 技术公司,首席技术官)
- Nadia Thalmann(瑞士 Geneva 大学教授,The Visual Computer 期刊主编)
- Marcelo Zuffo(巴西 San Paulo 大学教授,2000 年 SIGGRAPH 国际委员会主席)

“虚拟现实及其应用”高级研讨班讲座内容

第一天(中文):

A 组

- 虚拟现实概论(石教英 教授)
- 人机接触交互接口和力觉临场感(原魁 研究员)
- 虚拟现实中的三维空间声生成技术(宋爱国 教授)
- 基于图象的构模和绘制(徐丹 教授)

B 组

- 虚拟设计和制造在汽车行业的应用(肖田元 教授)
- 虚拟现实在航空航人中的应用(王东木 总工)
- 分布式虚拟现实应用及开发(潘志庚 研究员)
- 基于虚拟现实的战场仿真(吴威 教授)

第二天(英文):

1. Virtual Reality and Virtual Environment(Dr. D. Zeltzer,CRUC Inc, USA)
2. Computer Vision in Virtual Reality(Prof. Hongbin Zha, Peking Univ.)
3. Approaches for Creating Digital Actors(Prof. Hyeong-Seok Ko SNU, Korea)
4. Animation Technique and its Applications(Prof. Nadia M-Thalmann/Prof. Dannel Thalmann(Switzerland)
5. VRML and its extension(Dr. Tae wan Kim Sejong Univ. ,Korea)
6. Perceptual Interaction Techniques in Virtual Environment(Dr. Weidong Geng GMD, Germany)

报名截止日期:2001 年 3 月 10 日

联系人:潘志庚 地 址:浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室(杭州 310027)

电 话:0571-87951043,87951780 传 真:0571-87951780 E-mail: pzg@cad.zju.edu.cn

相关会议网址和电子邮件地址: <http://www.cad.zju.edu.cn/VRAI2002> E-mail: vrai2002@cad.zju.edu.cn