

基于细胞分裂的粒子图像运动分析

李木国², 杜 海^{1,2}

(1. 大连理工大学电子与信息工程学院, 辽宁大连 116024; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要: 针对粒子追踪技术中的粒子误对应问题与粒子相关法对粒子区域平均化处理所带来的误差问题, 制定了用于粒子图像测速的细胞分裂准则, 并提出了基于细胞分裂的粒子追踪匹配算法模型: 将兴趣区域作为细胞体并以细胞体内单点匹配相关程度与粒子的近邻程度作为判断准则对分析窗口内的点进行分裂; 分裂形成的子团之间进行竞争并将优胜团代表本分析区域参与其他区域优胜团的竞争; 根据优胜团先后位置变化得到矢量位移场。最后, 使用人工合成的粒子图进行了算法验证及误差分析。结果表明: 所提算法在分析精度方面有了较大的提高。

关键词: 粒子图像测速; 粒子追踪测速; 粒子相关测速; 细胞; 细胞分裂

中图分类号: O353 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112(2008)04-0767-05

A New Method Based on Cell Segmentation Theory for Particle Image Velocimetry

LI Murguo², DU Hai^{1,2}

(1. School of Electronic and Information Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: False matching in particle tracking velocimetry (PTV) and low-pass feature of particle correlation velocimetry (PCV) can make the processing error improve. However, the two problems can be reduced by application of cell segmentation theory (CST) presented in this paper. Furthermore, the CST processing model is described as: Firstly, the interrogation fields are divided into different local spaces named as cells, and these cells continue to segment into sub cells according to correlation degree and close degree. Secondly, these sub cells compete against each other and the final victorious one attends competition in other fields. Thirdly, the velocity vector field is gotten according to the positional alteration of the victorious cell. At last, the standard particle images were tested and the errors were analyzed. The experimental results demonstrate the effectiveness and practicability of the proposed method.

Key words: particle image velocimetry; particle tracking velocimetry; particle correlation velocimetry; cell; cell segmentation

1 引言

若对烟、雾、水、空气等物体进行直接接触性测量, 主要存在着三方面的困难: 其一, 难以操作; 其二, 由于加入了传感器破坏流场本身的自由运动; 其三, 只能对有限的区域进行测量。而粒子测速技术 (Particle Image Velocimetry, PIV) 可以很好的解决以上问题。该技术可以非接触地获得瞬间、全场流动信息, 对于流动结构研究极为有益, 现已成为现代流场测试技术之一^[1] 并且得到了广泛的应用^[2]。发展至今, 分为粒子追踪技术 (Particle Tracking Velocimetry, PTV)^[3,4] 与粒子相关技术 (Particle Correlation Velocimetry, PCV)^[5,6]。PTV 是针对场中的某一个粒子进行追踪, 然后使用最近邻法进行寻找, 进而得到该粒子点的运动轨迹。但是追踪过程需要先识别出粒

子, 然后对粒子进行中心计算。由于粒子的示踪性, 一个粒子同时出现在相邻的两帧也存在一定的概率, 并且粒子的光学分布并不规则。因而, 得到准确的追踪轨迹也就很不容易。而 PCV 是对粒子图像进行网格划分后进行相关匹配, 但是该方法不能得到某一粒子所在位置的移动情况, 而是得到某一个分析区域内粒子的平均位移, 这种经过相当于低通滤波的处理过程影响了分析的准确性。现今, 为了提高 PIV 处理精度, 国内外的专家学者对处理过程进行改进, 采用了窗口移动法^[7], 窗口变形法^[8] 以及先进行 PCV 分析, 然后再进行 PTV 处理的 Super-PIV 法^[9] 等。尽管这些算法部分程度上改善了 PIV 在某一条件下的处理精度, 但是没有从根本上消除 PCV 的平均效应。因而就无法减小由平均效应所带来的误差。本文在原有粒子相关技术与粒子追踪技术的基础

上提出了一种新的粒子测速算法——细胞分裂法(Cell Segmentation Particle Image Velocimetry, CSPIV): 根据匹配点之间的位置关系以及匹配程度(贡献率)对相关技术中的相关区域进行分解; 然后将追踪技术对点操作升级为小聚团追踪, 其中追踪过程通过细胞之间的竞争表达; 最后选择优胜细胞位置变化代表所在场的运动. 结果表明这种分裂算法不仅增强了测速算法的鲁棒性与分析的合理性而且准确性也有很大的提高.

2 粒子测速原理概要

测速系统是在流动显示的基础上结合光学图像处理技术对目标流场进行非接触的高精度测量. 测速系统对加入示踪粒子的流场进行快速拍照, 通过测量示踪粒子在已知时间间隔内的位移实现对流体运动速度的测量^[1, 10~12]. 定义 $x(t)$ 、 $y(t)$ 为某个粒子点在 t 时刻的位置, 经过 Δt 时间粒子点的位置为 $x(t + \Delta t)$ 与 $y(t + \Delta t)$, 那么该粒子 x 、 y 方向的速度 v_x 、 v_y 分别为:

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx(t)}{dt} \approx \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} \\ v_y = \frac{dy(t)}{dt} \approx \frac{y(t + \Delta t) - y(t)}{\Delta t} \end{cases} \quad (1)$$

根据分析对象不同, PIV 技术分为 PTV(如图 1 所示)与 PCV(如图 2 所示).

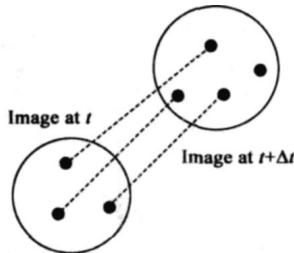


图 1 粒子追踪技术

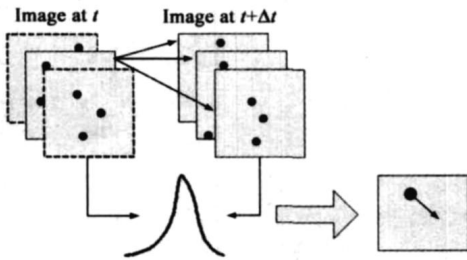


图 2 粒子相关技术

如图 1 所示, PTV 以单个粒子作为对象, 并且处理时要求满足邻近粒子运动变化不大的假设^[13]. 该技术常用于测量场中粒子稀疏分布的情况. 而图 2 所示的 PCV 由于采用统计平均的方法, 所以较适用于浓度较高的情况. 现今, 常用的是互相关粒子图像测速技术(Cross-Correlation Particle Image Velocimetry, CCPIV). 但是由于处理过程的不同, 使得粒子追踪技术处理能力较低, 而粒子相关技术定位精度不高. 为了弥补两者的缺

点, 可以采用对小粒子团进行追踪处理的方法.

3 细胞分裂算法描述

为了对小粒子团进行追踪处理, 本文将由匹配点组成的兴趣区域视为细胞体. 当进行细胞分裂分析时, 定义粒子测速的细胞生存原理: 细胞具有区域独占性, 即在一个区域只能有一个细胞生存下来. 细胞的生存取决于繁殖竞争能力. 因而在一个拥有众多细胞的区域, 细胞之间互相进行竞争. 竞争过程中, 实力相当的细胞暂时停止竞争, 当位置环境适宜时, 细胞便进行分裂繁殖. 由于只能有一个细胞生存下来, 为了具有竞争优势, 每个细胞在进行分裂时需要进行内部竞争, 这使得分裂出的细胞具有较母体更强的竞争力. 这样经过竞争、分裂、再次竞争的循环模式, 最后在这个区域生存的细胞更具有竞争生存能力.

3.1 细胞位置的选择

在处理时, 细胞所在区域选为第一帧图像与第二帧图像进行相关的区域. 定义为 $\sigma_{motherSpace}$ 该区域的尺寸半径: $\sigma_{motherSpace} = \max(\sigma_f(t), \sigma_f(t + \Delta t))$, 这里 $\sigma_f(t)$ 与 $\sigma_f(t + \Delta t)$ 分别为前一帧图像与后一帧图像的分析半径. 为了提高匹配的精度, 本文采用标准化协方差进行互相关操作^[14]式(2). 互相关处理后可以得到相关矩阵

Corr Val:

$$r(K, l) = \frac{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [f(i, j) - f_m] [g(i + k, j + l) - g_m]}{\sqrt{\sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [f(i, j) - f_m]^2 \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [g(i, j) - g_m]^2}} \quad (2)$$

$$\text{Corr Val}(\text{MotherSpace}(\Delta t)) = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1c} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2c} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{3c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{l1} & r_{l2} & \cdots & r_{lc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)中 f 与 g 分别表示前后两帧图像, f_m 、 g_m 分别表示在各区域内的平均灰度. 分析窗口的尺寸为 $M \times N$. 式(3)中 l 与 c 分别为细胞所在的母区域的行与列的尺寸. 每个相关点的位置都存在一个细胞, 细胞的大小为 $\min(\sigma_f(t), \sigma_f(t + \Delta t))$.

3.2 竞争准则

细胞进行竞争时, 根据分裂的不同阶段采用不同的竞争模式:

(1) 初期竞争. 这个阶段竞争能力通过所在位置的归一化的相关系数表达. 本文中通过设定相关阈值 $T_{threshold}$, 对初始时细胞所在的母区域 MotherSpace 进行筛选, 式(3)中 r_{ij} 不小于 $T_{threshold}$ 位置的细胞进行保留, 即竞争获胜成为母细胞 MotherCell_i , $i = 1, 2, \dots, N$, N 为母

细胞的个数, 而其他位置的细胞在竞争中淘汰。

(2) 细胞内竞争. 在细胞进行分裂的时候, 内部会产生子细胞 $SubCell$. 子细胞进行竞争时采用累积贡献率式(4)进行处理。

$$AccumContriRatio(X) = \sum_{i=1}^n ContriRatio(x_i) \quad (4)$$

其中, n 为此细胞内粒子的个数, $x_i \in X$, $i = 1, 2, \dots, n$ 为该粒子点的位置. $ContriRatio(\cdot)$ 为单点匹配时的贡献率, 表示两个点进行灰度匹配时的相关程度, 定义为:

$$ContriRatio(x) = \frac{2 \cdot f_x \cdot g_x}{f_x^2 + g_x^2} \quad (5)$$

(3) 细胞间竞争. 分裂后代表母代的子代再次进行竞争选择时, 采用平均贡献率进行竞争操作. 这里对按式(4)计算的累积贡献率进行平均, 体现了竞争的公平性. 平均贡献率表示为:

$$AverContriRatio(X) = \frac{\sum_{i=1}^n ContriRatio(x(i))}{n} \quad (6)$$

其中, n 为此细胞内粒子的个数, $x_i \in X$, $i = 1, 2, \dots, n$ 为该粒子点的位置。

3.3 细胞分裂及优代替换

在相关的各处均存在着细胞 $Cell_i$, $i = 1, 2, 3, \dots, M_c, M_c$ 细胞总数. 初期时以相关的阈值进行首次竞争, 产生母细胞 $MotherCell \subseteq Cell$, 有

$$CorrVal(MotherCell_i) \geq T_{threshold}, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (7)$$

竞争结束后, 各个位置上的母细胞达到均衡状态, 暂时停止竞争, 开始分裂操作. 在母细胞内部按式(5)分别计算各个匹配处的贡献率, 并将贡献率与母细胞的归一化相关值进行对比, 并分裂成两个子细胞:

$$MotherCell_i = \{SubCell_{1i}, SubCell_{2i}\}, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (8)$$

其中, $SubCell_{1i}, SubCell_{2i}$ 表示分裂后第 i 个母细胞分裂后的两个子细胞. 定义:

$$SubCell_{1i} = \{x_1^i, x_2^i, x_3^i, \dots, x_n^i\} = A^i, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (9)$$

$$SubCell_{2i} = \{y_1^i, y_2^i, y_3^i, \dots, y_m^i\} = B^i, i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \frac{ContriRatio(x_j^i)}{CorrVal(MotherCell_i)} \geq 1, j = 1, 2, 3, \dots, n \\ \frac{ContriRatio(y_j^i)}{CorrVal(MotherCell_i)} < 1, j = 1, 2, 3, \dots, m \end{cases} \quad (11)$$

$x_j^i, j = 1, 2, \dots, n$ 为子细胞 $SubCell_{1i}$ 中第 j 个点的坐标; $y_j^i, j = 1, 2, \dots, m$ 为子细胞 $SubCell_{2i}$ 中第 j 个点的坐标. 由于相关算法的点匹配特性, 这两个子细胞可能是空间层叠的, 将 $SubCell_{1i}$ 作为此次分裂后的优胜体与母

体, 继续进行分裂操作. 选取粒子之间的近邻程度作为分裂准则, 按平均粒子所属区域半径对细胞中的点进行聚类, 分裂后生成 M 个孙细胞 $A_j^i, A_j^i \subseteq A^i$. 其中 $j \in \{1, 2, \dots, M\}$, 表示第 j 个孙细胞. 这细胞以 2.2 节中第二种竞争方式进行操作, 对各个细胞按式(4)计算后得到累积贡献率. 定义 $Coor(\cdot)$ 为取地址操作, 即对具有最大累积贡献率的细胞内部进行各个点位置记录. 可以得到:

$$X'_i = \{Coor(\max\{AccumContriRatio(A_j^i) | A_j^i \subseteq A^i\}) | i \in \{1, 2, 3, \dots, N\}\} \quad (12)$$

由式(12)可以推得 $X'_i \subseteq A^i$, 将由 X'_i 组成的细胞 $GenCell(X'_i)$ 代替母细胞 $MotherCell_i$ 与其他的母细胞的后代进行竞争, 竞争比较时采用式(6). 对最后的胜出者进行重心计算. 即:

$$C_x = CentrCoor(\max(AverContriRatio(X'_i))), i \in \{1, 2, 3, \dots, N\} \quad (13)$$

这里为 $CentrCoor(\cdot)$ 取重心操作, C_x 记录胜出者的重心位置. 计算完成后可根据移动前对应的原细胞重心 C_y , 得到该点的位移 $dc = C_x - C_y$.

4 实验结果与讨论

为了说明 CSPIV 法的有效性, 本文采用了描述粘性牛顿流体的 Navier Stokes 方程对基于细胞分裂的粒子图像测量法进行验证. 根据 Navier-Stokes 方程生成的粒子流在不同的位置会出现涡旋, 具有一定的复杂性, 因而能够较好的分析算法的有效性. 验证过程中假设流体为层流状态, 雷诺系数设为 1000. 考虑成像误差影响, 粒子的坐标误差设为 $\pm 1\%$. 图像中粒子的光学分布按式(14)进行计算. 结果分析时采用累积的根均方偏差百分比 (Percent Root mean square Difference, PRD) 与分析点数的比值 Pe 来衡量计算值与真实值之间的误差. PRD 定义如式(15).

$$I(X) = I_0 \exp\left[-\frac{\|X - X_c\|}{2\sigma}\right] \quad (14)$$

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (d_{org}(i) - d_{rec}(i))^2}{d_{org}^2(i)}} \times 100\% \quad (15)$$

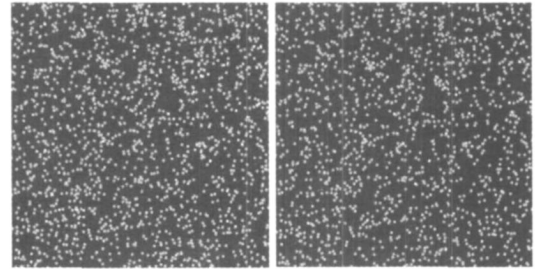
$$Pe = \frac{PRD}{N} \quad (16)$$

这里 X_c 表示为粒子的灰度中心, I_0 为灰度峰值, σ 为高斯分布的方差, $d_{org}(i)$ 为原始信号, $d_{rec}(i)$ 为相应的计算值, N 为分析点数.

图 3 为一组合成的粒子图像, 在图 3 中有 7000 个粒子点, 时间间隔为 0.1 秒. 为了使得模拟计算更接近真实情况, 考虑到由于采集、遮挡以及脱离采光区等因素的影响, 将图 3(b) 中粒子的出现率设为 70%. 在处理过程中, CCPIV 法在区域尺寸为 16 时处理的结果较好,

具有较高的精度. 为了与本文所提算法形成对比, 在 CSPIV 处理过程中初始分析区域尺寸也定为 16. 另外, 在进行结果显示时本文进行了步长的选择优化, 选择步长为 16, 其处理结果如图 4(b) 与图 4(c) 所示. 对比原矢量场可以发现, 尽管 CCPV 进行了分析窗口的优化选择, 但使用 CCPV 处理后的错误矢量个数仍然多于同样条件下 CSPIV 分析的结果. 这是因为进行相关分析时采用统计平均的方法, 计算出的位移矢量是代表这个区域的一个平均化结果, 然而粒子测速算法所测量的实际为示踪粒子所在位置的水质点的位移, 这样分析点的位置便进行了平移, 所以分析点均固定为分析窗口的中心. 并且统计分析时相关系数大于一定阈值的点均对结果有影响, 而实际中由于各种噪声的存在以及粒子分布复杂等原因, 往往会造成误匹配. 因而图 4(c) 中错误矢量的个数相对于图 4(b) 明显减少, 且由于采用了小团的追踪, 所以定位分析得更加准确. 为了验证算法, 本文进行了大量的实验, 其中表 1 为使用归一化相关法与基于细胞分裂算法的处理结果对比.

由于采用窗格分析, 分析点与给定的已知点的位置有一定的偏差, 为了比对结果, 本文对分析点进行了插值操作. 从表 1 中可以看出, 粒子浓度较低时由于粒子团运动的信息较少, 导致处理精度均不高, 其中 CSPIV 法好于 CCPV 法. 随着浓度的提高, 粒子在统计范围内的运动信息增加, 两种方法的精度都有所提高, 错误矢量明显减少. 但是采用了分裂分析的 CSPIV 法比 CCPV 法具有更少的错误矢量且具有更高的处理精度.

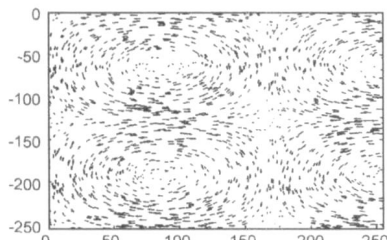


(a) t 时刻的图像 (b) $t+\Delta t$ 时刻的图像

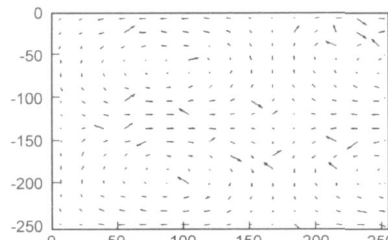
图 3 人工合成的粒子图像

表 1 计算结果

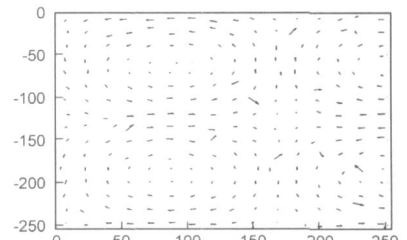
Num	Δt	r		R		Vectors Num		False Vector Num		Pe	
		CC	CS	CC	CS	CC	CS	CC	CS	CC	CS
700	0.1	16	16	16	16	256	256	91	80	0.225346	0.102103
1000	0.1	15	15	15	15	256	256	57	49	0.121274	0.091274
7000	0.1	8	8	8	8	256	256	28	12	0.051028	0.032405
7000	0.3	10	10	10	10	256	256	33	14	0.147925	0.039196



(a) 原粒子矢量场



(b) 使用归一化协方差相关的处理结果



(c) 基于细胞分裂的粒子测速算法处理结果

图 4 粒子矢量场处理结果

5 结论

粒子相关技术的定位与粒子追踪技术的匹配是粒子测速技术中难以解决的问题. 针对这个问题, 本文结合相关匹配与追踪定位的优势, 在相关技术中进行了小团追踪并制定了细胞竞争分裂准则, 提出了基于细胞分裂的粒子测速算法. 在该算法中, 首先使用相关法确定兴趣区域, 然后根据贡献率与近邻性进行区域的聚类分析, 最后以平均贡献率选择最优的聚类团来计算分析位置以及位移. 实验证明, 本文所提算法不仅提高了分析的精度, 而且还提高了流场分析的鲁棒性.

参考文献:

- [1] Adiran R J. Particle imaging techniques for experimental fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1991, 23 (2): 261-304.
- [2] Yasunori W, Yoshiyasu H, Takaaki S, et al. Application of three-dimensional hybrid stereoscopic particle image velocimetry to breaking waves[J]. Meas. Sci. Technol, 2006, 17 (6): 1456-1469.
- [3] Kazuo O, Hang Y L. Particle tracking velocimetry with new algorithms[J]. Meas. Sci. Technol, 2000, 11 (6): 603-616.
- [4] Kazuo O, Achyut S. Particle tracking velocimetry using cellular

- neural network[A]. In Proc. IEEE IJCNN '06[C]. Vancouver: IEEE, 2006. 16– 21.
- [5] Hart D P. PIV error correction[J]. Experiments in Fluids, 2000, 29(1): 13– 22.
- [6] Wereley S T, Gui L. A correlation based central difference image correction(CDIC) method and application in a four roll mill flow PIV measurement[J]. Experiments in Fluids, 2003, 34(1): 42– 51.
- [7] Gui L, Wereley S T. A correlation based continuous window shift technique to reduce the peak locking effect in digital PIV image evaluation[J]. Experiments in Fluids, 2002, 32(4): 506– 517.
- [8] Florio D Di, Felice F Di, Romano G P. Windowing, re shaping and re orientation interrogation windows in particle image velocimetry for the investigation of shear flows[J]. Meas. Sci. Technol, 2002, 13(7): 953– 962.
- [9] Stitou A, Riethmuller M L. Extension of PIV to super resolution using PTV[J]. Meas. Sci. Technol, 2001, 12(9): 1398– 1403.
- [10] 高殿荣, 王益群, 申功. DPIV 技术及其在流场测量中的应用[J]. 液压气动与密封, 2001, (5): 30– 33.
- Gao Dianrong, Wang Yiqun, Shen Gongxin. DPIV technique and its application in flow field measurement[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2001, (5): 30– 33. (in Chinese)
- [11] 高潮, 曹英, 郭永彩. PIV 血流场显示测速技术[J]. 光电工程, 2004, 31(8): 37– 40.
- Gao Chao, Cao Ying, Guo Yongcai. Particle image velocimetry techniques used in blood flow field analysis[J]. Optoelectronic Engineering, 2004, 31(8): 37– 40. (in Chinese)
- [12] 王灿星, 林建忠, 山本富士夫. 二维 PIV 图像处理算法[J]. 水动力学研究与进展, 2001, 16(4): 399– 404.
- Wang Canxing, Lin Jianzhong, YamamotoFujio. An algorithm for two dimensional PIV images[J]. Journal of Hydrodynamics, 2001, 16(4): 399– 404. (in Chinese)
- [13] Pereira F, Stür H, Gaff E C, et al. Two frame 3D particle tracking[J]. Meas. Sci. Technol., 2006, 17(7): 1680– 1692.
- [14] 朱永松, 国澄明. 基于相关系数的相关跟踪算法研究[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 963– 967.
- Zhu Yongsong, Guo Chengming. Research of correlation tracking algorithm based on correlation coefficient[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8): 963– 967. (in Chinese)

作者简介:



李木国 男, 教授、博士生导师, 1953 年出生于辽宁庄河. 1978 年毕业于大连理工大学, 现为大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室. 主要从事海洋工程模拟试验理论、图像测量、现代控制技术等方面的研究工作.



杜海 男, 1980 年 3 月出生于河北石家庄, 2003 年毕业于河北科技大学电信学院, 同年进入大连理工大学电子与信息工程学院攻读硕士, 2005 年直接攻读博士学位, 现为博士研究生. 从事计算智能视觉测量方面的有关研究.
E-mail: albertddd@hotmail.com