

基于改进 Marching Tetrahedra 算法的锥体气象数据三维重建

马俊成 蒋慕蓉 房素芹

云南大学信息学院 昆明 650500

(ma.jc@foxmail.com)

摘要 在气象领域中,多普勒雷达探测的气象数据采用空间极坐标的方式进行存储,探测到的气象目标具有分布不均匀、区域分散、形状不规则等特征。为了满足气象目标三维重建的需求,针对雷达数据特征对 Marching Tetrahedra 三维重建算法进行一定的改进。首先采用 Barnes 插值方法和傅里叶谱分析原理的插值方法分别在雷达锥体数据的垂直方向及径向之间进行回波强度值的加密,对加密后的回波极坐标数据构成的新的六面体进行基本四面体单元的剖分,并利用线性插值得到各顶点的具体位置,绘制时结合多层次面绘制技术渲染三维图,该算法避免了对高仰角以及距离远而没有回波数据区域的重建。实验表明,改进算法能更好更快地实现三维重建,并且能观测分析云层的内部细节信息,为气象的准确预报提供了一定的参考依据。

关键词: 气象雷达;多层次三维重建;雷达数据插值;Marching Tetrahedra 算法

中图法分类号 TP391

Three-dimensional Reconstruction of Cone Meteorological Data Based on Improved Marching Tetrahedra Algorithm

MA Jun-cheng,JIANG Mu-rong and FANG Su-qin

School of Information Science and Engineering,Yunnan University,Kunming 650500,China

Abstract In the field of meteorology,the meteorological data detected by Doppler radar is stored in the form of spatial polar coordinates,and the detected meteorological targets have the characteristics of uneven distribution,scattered regions,and irregular shapes.In order to meet the needs of 3D reconstruction of meteorological targets,the Marching Tetrahedra 3D reconstruction algorithm is improved according to the characteristics of radar data.First,the Barnes interpolation method and the interpolation method of the Fourier spectrum analysis principle are used in the vertical direction and radius of the radar cone data.This algorithm encrypts the echo intensity value between the two directions,divides the new hexahedron formed by the encrypted echo polar coordinate data into basic tetrahedral units,and uses linear interpolation to obtain the specific position of each vertex,and combines the multi-level surface when drawing.The rendering technology renders 3D images.The algorithm avoids the reconstruction of areas with high elevation angles and long distances without echo data.Experiments show that the improved algorithm can not only achieve better and faster three-dimensional reconstruction,but also observe and analyze the internal details of the cloud layer,which provides a certain reference basis for accurate weather forecasting.

Keywords Weather radar,Multi-level 3D reconstruction,Radar data interpolation,Marching Tetrahedra algorithm

1 引言

多普勒雷达采集到的回波强度数据是一种常用的观测数据,对强对流天气进行监测以减少财产损失起到了重要的作用。为了使人们对雷达回波细节、空间三维轮廓分布有着更加形象的理解,需要对回波数据进行三维可视化,以提高对气象状况的预测能力。

近年来,气象数据监测手段的日益发达,气象可视化技术研究逐渐被国内外学者关注。在国外,Dobashi 等^[1]利用一种不同尺度下的云建模方案,结合“稀疏八叉树”来加速模拟数据,有效提高了绘制效率。Lamperti 等^[2]对高速率生成的气象数据使用图形卡的并行处理,并对该方法进行了优化,进一步提高了数据的处理速度与显示质量。在国内,Liu 等^[3]对气象雷达数据三维可视化相关算法进行了相关研究,并在此基础上

优化了气象雷达数据插值方法,进一步精确了气象数据的三维显示。Xie 等^[4]提出了一种感兴趣区域自适应远场网格结构的云数据三维可视化方法,有效提高了绘制的真实感。

基于以上研究基础,本文对 Marching Tetrahedra 算法在雷达数据的等值面提取上进行优化,并利用优化后的算法生成阈值曲面,之后对生成的曲面使用多层次面绘制技术进行渲染。实验结果表明,在保证速度的前提下,用优化后的方法重建出来的三维图像质量更好,在观测云层的基本轮廓以及内部回波分布情况上更加形象直观,为把握强回波的演变分析提供了有力的参考依据。

本文第 2 节进行方法描述和实验操作;第 3 节在性能上对实验进行分析并结合多层次面绘制技术进行渲染;最后对提出的方法进行总结,说明本文方法的在三维雷达数据重建上的应用优势。

2 方法描述

在气象数据领域,多普勒雷达探测角度一般只在 $0.5^\circ \sim 19.5^\circ$ 之间,如图 1 的气象雷达体扫描示意图所示。本文根据雷达数据的特点,提出一种改进的气象雷达数据三维重建算法,该算法分为如下几个步骤:1)根据雷达锥体空间数据特点对雷达数据场进行加密,在垂直方向利用自适应 Barnes 插值,在单层锥面两径向之间利用傅里叶插值;2)利用改进的 Marching Tetrahedra 三维重建算法,对气象雷达数据进行等值面的构建;3)使用多层次面绘制技术,对不同强度的回波数值实现具有透视效果的三维重建。

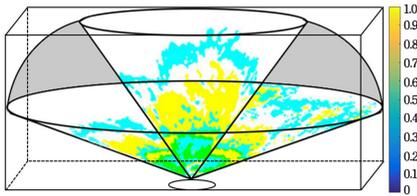


图 1 气象雷达体扫描示意图

Fig. 1 Schematic diagram of meteorological radar body scanning

2.1 构建三维锥体数据场

多普勒气象雷达以体扫描的方式不断向天空发送脉冲式电磁波,雷达一个时次的体扫描数据包括多个不同仰角的 PPI(Plan Position Indicator),将这些不同仰角的圆锥面数据排列在一起,构成了气象雷达的体扫描数据。

构造气象三维锥体数据场时,需要对体扫数据在垂直方向以及横向相邻径向之间进行数据加密。首先考虑到体数据在垂直方向上较少,在最底部的两层径向距离末端,垂直方向上两点间实际距离达到了 2610 m,为了让该方向的数据更加丰富,本文在空间上选取相邻两仰角、三方位角、两径向距离的 10 个顶点进行自适应 Barnes 插值,如图 2 所示。该方法将数据点插值到极坐标系中,计算过程为:根据式(1)计算出雷达数据采样点的权重系数,根据式(2)计算出最终插值的反射率因子。式(1)中 R_g, θ_g, φ_g 为数据点在球坐标系下的坐标, R_o, θ_o, φ_o 为插值采样点的坐标, k_r, k_θ, k_φ 为球坐标下径向距离、方位角以及仰角方向的平滑因子^[5]。自适应 Barnes 插值可以在网格大小不等的情况进行数据的加密,正好适用于雷达数据在垂直方向上的数据插值,得到 27 层锥面数据。

$$W = \exp \left[- \left(\frac{(R_g - R_o)^2}{k_r} \right) - \left(\frac{(\theta_g - \theta_o)^2}{k_\theta} \right) - \left(\frac{(\varphi_g - \varphi_o)^2}{k_\varphi} \right) \right] \quad (1)$$

$$f_g = \left(\sum_{k=1}^N w_k f_o(k) \right) / \left(\sum_{k=1}^N w_k \right) \quad (2)$$

同时雷达观测时存在收发脉冲间隙,导致横向相邻两径向之间没有数据,为了让三维重建图更加准确,在单层的锥面数据之间采用基于傅里叶谱分析原理的插值方法,分析出流性降水的积状云回波强度时空变化谱特征,并对回波数据离散点拟合、重采样^[6]。傅里叶插值的示意图如图 3 所示,具体过程是:将每层间相同的 512 个径向距离 r 的回波数据组成一个序列,表示为式(3)。雷达回波序列周期为序列长度 ($T=512$),按照傅里叶谱分析,此序列可表示为式(4),其中 A_o 为序列的算术平均值, $p = N/2 = 256$ 为谐波分量个数,

A_i, φ_i 和 ω_i 分别为各谐波的振幅、相角以及频率。式(4)可由傅里叶变换展开为式(5)。

$$X_i = \{X_1, X_2, \dots, X_N\} \quad (3)$$

$$X_i = A_o + \sum_{i=1}^p A_i \cos(\omega_i + \varphi_i) \quad (4)$$

$$X_i = A_o + \sum_{i=1}^p [a_i \cos(2\pi i t / N) + b_i \sin(2\pi i t / N)] \quad (5)$$

其中, a_i 和 b_i 为傅里叶系数,可由傅里叶变换求得:

$$a_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_i \cos(2\pi i t / N) \quad (6)$$

$$b_i = \frac{2}{N} \sum_{t=1}^N X_i \sin(2\pi i t / N)$$

其中, $i = 1, 2, 3, \dots, p$ 。

由傅里叶系数计算出谐波振幅与相位:

$$A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$$

$$\varphi_i = \arctan \left(\frac{b_i}{a_i} \right), i = 1, 2, 3, \dots, p \quad (7)$$

其中,根据式(6)和式(7)计算第一个切向上的 $N=512$ 个数据对应的 $2/N$ 个谐波振幅和相位,并将得到 A_i, φ_i 代入式(4),其中 $t = \alpha$,计算出第 1 个切向上、方位 α 处的 X_i 值,依次重复,得到方位角为 α 时 500 个切点上的回波值,接着将得到的 500 个回波值作为一组径向数据,仿照最开始的步骤,可得到最终的插值回波值。

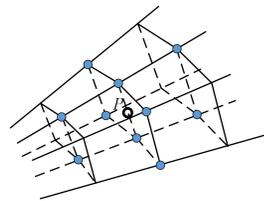


图 2 Barnes 插值示意图

Fig. 2 Illustration for Barnes interpolation

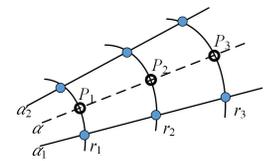


图 3 傅里叶插值示意图

Fig. 3 Illustration for Fourier interpolation

经过上述插值过程形成的雷达数据场如图 4 所示,可以看出插值后形成的空间数据在分布尺度上更加精密,方便等值面构建的准确性。

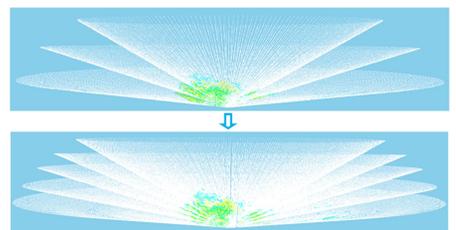


图 4 插值结果示意图

Fig. 4 Schematic diagram after interpolation

2.2 Marching Tetrahedra 算法及其改进

(1) Marching Tetrahedra 算法原理

Marching Tetrahedra 算法(简称 MT)是三维重建中等值

面生成算法,是 Marching Cubes 等值面提取算法的一种改进^[7],该算法在四面体中进行阈值判断,然后根据一定的拓扑关系生成阈值曲面进而提取出物体的表面信息。重建算法的前提为:通过判断四面体的顶点数值与给定阈值,将每个顶点与二进制数位相对应,等值面内部的元素用 1 表示,而外部的值与二进制数 0 相关联,三角网的拓扑结构取决于这个二进制数,三角片顶点的具体位置信息利用线性插值或高阶逼近方法得到^[8]。获得三维图像的所有三角面片后,通过几何拼接连接起来拟合出物体表面。这种重建方式不存在二义性^[9],但在气象数据中会有许多不必要的遍历操作,造成绘制速度降低,浪费更多的存储空间,而且在构建数据场时会增加一次额外的坐标转换,导致图像精度降低^[10]。

(2)改进 Marching Tetrahedra 算法

针对上述问题,在雷达回波数据自身特点的基础上对 MT 算法进行改进(简称 MMT),主要是将 MT 算法中正交笛卡尔坐标系下的正方体改变为球坐标下相邻两方位角 θ 、两仰角 φ 以及两径向距离 r 的 8 个顶点组成的新的梯形六面体,然后对新的六面体进行四面体基本单元的剖分,如图 5 所示,该剖分方式有着良好的几何适应性,逼近等值面的质量更高,更加符合雷达的数据特征。

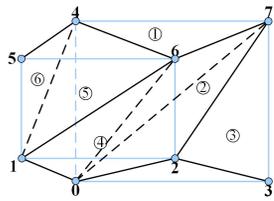


图 5 体素剖分方式

Fig. 5 Voxel division method

剖分后的四面体确定等值面分布时,通过顶点及边建立索引表,每个四面体依据顶点的状态划分为 $2^4 = 16$ 种类型,在考虑旋转、反向对称时会出现相同的拓扑结构,可将关系简化到 3 种基本模式,如图 6 所示。当每个体素的各顶点数值已知时,根据索引表检索出等值面的分布,从而生成相应的阈值曲面,并利用相应两点的回波值权重对顶点的具体位置进行计算,提高生成网格的质量。

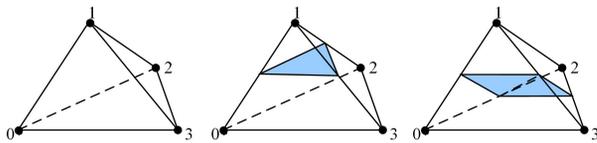


图 6 等值面在四面体单元中的 3 种模式

Fig. 6 Three modes of isosurface in tetrahedral element

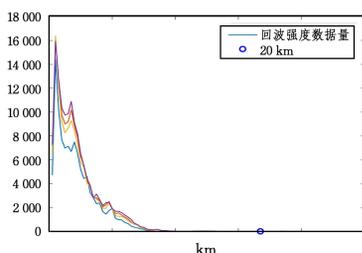


图 7 反射率因子分布图

Fig. 7 Reflectance factor distribution chart

考虑到在气象研究工作领域中,主要研究距离地面 20 km 范围内的气象雷达回波数据,高于 20 km 的区域回波数据变得非常弱小,可近似为无回波区,如图 7 为选取某些时刻在不同的高度下回波强度数据量的分布,可以看出高于 20 km 的区域对气象三维图的重建几乎没有贡献,由此可充分利用雷达回波这一特点,对遍历的体素进行限定,进一步减少六面体的个数以避免对盲区进行无意义的重建,提高等值面的重建速度。综上,MMT 算法步骤如算法 1 所示。

算法 1 MMT 算法

输入:经过 Barnes 和傅里叶插值后的三维离散数据集

输出:等值面三角片数据

- Step1 依次遍历相邻的锥面数据,每相邻的两仰角 φ_1, φ_2 ,两方位角 θ_1, θ_2 ,两径向距离 r_{1n}, r_{2n} 的 8 个顶点组成一个六面体,每层数据的最后一条扫描线和第一条扫描线按照邻近距离组成相应大小的六面体。
- Step2 将六面体按照顶点与边的关系剖分为 6 个四面体,在四面体中判断顶点与给定等值面阈值的大小关系,并将顶点状态与二进制索引相关联,便于获取三角面片的拓扑结构。
- Step3 按照其回波强度值的权重求得体素边上 (r_{1n}, r_{2n}) 的坐标点及颜色值,检查该坐标点是否存在,并为其建立坐标索引,接着读取下一个体素,执行步骤 1,直到所有体素读取完毕。
- Step4 点与索引的关系找出相邻的三角面片,并对没有形状特征贡献的三角网格进行删除操作,接着计算每个顶点的法向量完成数据的输出。

2.3 实验效果对比

为了说明改进算法的有效性,分别用原算法与改进算法进行网格图的对比,并用改进算法选取不同的数据进行气象雷达数据表面的绘制,便于验证改进算法在生成图像质量上的优势。

(1)三维网格图像的对比实验

图 8(a)为 MT 构建的三维网格图,图 8(b)为 MMT 算法构建的三维网格图,红色框选部分为局部细节的放大图。通过两个网格图观察比较,可以发现改进算法生成的图像细节信息更加丰富,网格数量更少,能更加形象直观地观察到不同高度层次上云层的厚度信息。



(a) MT 算法生成的网格图



(b) MMT 生成的网格图

图 8 雷达数据三维网格图(电子版为彩色)

Fig. 8 Three-dimensional grid map of radar data

(2)MMT 绘制雷达数据实验

生成三维图像时,为了让三维物体更加真实,需要结合三角面片各个顶点处的法向,并选择合适的光照模型进行光照计算。应用改进算法对实际数据进行三维重建,不同时刻不同回波强度的气象雷达数据表面重建的效果如图 9 所示,图 9(a)和图 9(b)分别为以 0dBZ 作为阈值绘制的不同时刻的俯视图,图 9(c)和图 9(d)分别为以 40dBZ 作为阈值在不同角度的三维图。可以发现渲染的雷达数据三维图像在保证能直观观察云层外部轮廓的基础上,图像也足够平滑,这对于把握云层强回波的演变分析有一定的参考价值。

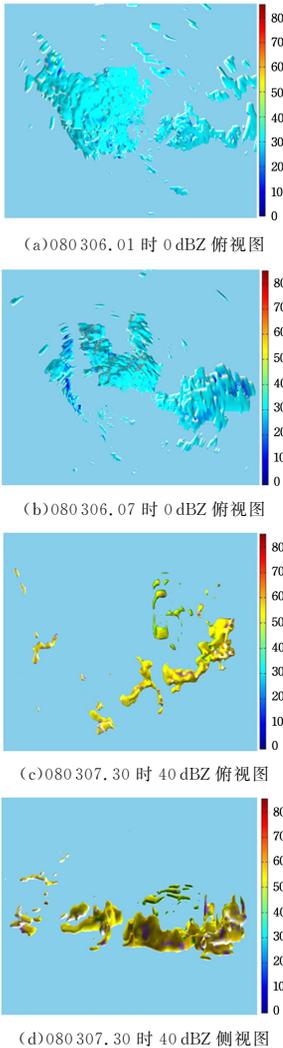


图 9 气象数据表面重建三维图

Fig. 9 Reconstruct the 3D map of the weather data surface

3 实验结果分析

改进算法在性能和图像生成质量上都有一定程度的提高,使用 MT 算法下,按照最小体素遍历计算需要遍历 25 948 026 个正方体,而采用改进 Marching Tetrahedra 算法则只需要遍历 6 642 688 个六面体,数量相比减少了 74.41%,对体素无回波区域进行限定后,遍历的体素数量能够进一步减少,缩短运算时间。

为了直观地说明改进算法在性能上的效果,实验选取了某一时刻的 3 组回波强度数值作为重建等值面的阈值,分别是 15 dBZ、25 dBZ 和 35 dBZ,经过插值后计算其性能比较结果如表 1 所列,由表 1 可以看出,改进 Marching Tetrahedra 算法

由于遍历的体素数量大大减少,所生成的三角面片个数以及重建时间都有一定程度的降低,改善了气象重建的交互需求。

表 1 重建算法性能对比

Table 1 Performance comparison of reconstruction algorithms

重建方法	当前阈值/dBZ	三角面片个数	重建时间/ms
MT 算法	15	915 016	7 661
	25	460 495	5 521
	35	62 019	4 620
MMT 算法	15	746 850	4 251
	25	377 304	2 897
	35	53 406	1 456

为了能观测到回波数据的内部结构,对雷达回波数据的特性进行一定的分析,将强度属性值进行多层次分级。反射率因子按照强度分成 3 种级别,分别是弱回波强度(10~20 dBZ)、中回波强度(20~30 dBZ)和强回波强度(大于 30 dBZ),根据这些强度级别,为重建云层设定相应的阈值来构建等值面,并利用不同的透明度,重建出具有透视效果的三维云层图。该三维图在后期动态变化演示中无需像体绘制一样重新更新采样点信息,避免了庞大的计算量,从而能更好地分析云层内部的物理信息。不同时刻重建的三维云层透视图如图 10 所示。

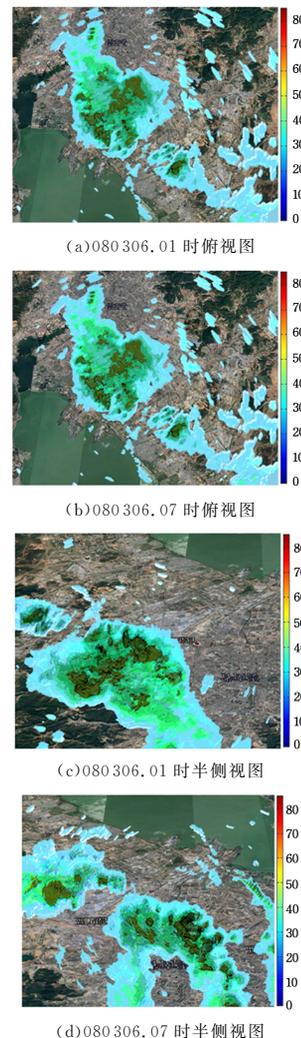


图 10 三维云层透视图

Fig. 10 Three-dimensional cloud perspective

2005,134(1):19-67.

- [19] BOCK S, WEIß M. A proof of local convergence for the Adam optimizer [C]// 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). IEEE, 2019:1-8.
- [20] YU X H, CHEN G A, CHENG S X. Dynamic learning rate optimization of the backpropagation algorithm[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1995, 6(3):669-677.
- [21] LAURENS V D M, HINTON G. Visualizing Data using t-SNE [J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9 (2605): 2579-605.
- [22] PAULUZZI D R, BEAULIEU N C. A comparison of SNR estimation techniques for the AWGN channel[J]. IEEE Transactions on Communications, 2000, 48(10):1681-1691.



LIU Xin, born in 1995, postgraduate. His main research interests include deep learning and intelligent information processing.



HUANG Qin-yuan, born in 1984, Ph.D., associate professor. His main research interests include artificial intelligence, signal processing and evolutionary computation.

(上接第 647 页)

由图 9(a)和图 10(a)、图 9(b)和图 10(b)的对比可以看出,采用本文方法重建的云层图像在满足一定速度的前提下,能直观地分辨出雷达回波的强回波、中回波和弱回波各强度云层的基本轮廓,弱回波数据主要集中在整个轮廓的外部,表示该区域被降水云系笼罩,内部的强回波区域预示着有降雨现象。

当将其与相关地理位置信息相结合,在不同视角下观察云层时,可让人们对所关心区域的回波强度、位置有一个定性的认识,再根据观察到的层状云垂直厚度和空间分布来分析预报该地区的气象信息。

结束语 本文将三维可视化技术应用到天气雷达数据上,根据多普勒雷达数据特点,在空间上采用 Barnes 和傅里叶插值对数据进行加密,让三维重建结果细节信息更加丰富,接着对处理后的数据采用新的六面体作为剖分四面体的基本单元来进行等值面的构建,并利用多层次面绘制技术渲染三维图。重建的结果表明,采用优化后的方法实现的多个回波强度的气象雷达数据三维重建结果更加直观形象,所包含的细节信息更多,能更大程度地挖掘雷达回波数据的有效信息,对于分析把握强回波的演变状况有一定的意义。

参 考 文 献

- [1] DOBASHI Y, YAMAMOTO T, NISHITA T. An interactive rendering system using hierarchical data structure for earth-scale clouds[J]. Science China (Information Sciences), 2010, 53(5):920-931.
- [2] LAMPERTI E, DENHAM M, ARETA J. Weather radar data processing on graphic cards[J]. Journal of Supercomputing, 2018, 74(2):868-885.
- [3] LIU Z N, SHI Z Z, JIANG M R, et al. Using MC Algorithm to Implement 3D Image Reconstruction for Yunnan Weather Radar Data[J]. Journal of Computer and Communications, 2017, 5(5): 50-61.
- [4] XIE Y H, ZHU C F, ZHENG Y, et al. Three-Dimensional Visualization of Weather Forecast Cloud Data Based on Adaptive Grid Structure[J]. Computer Simulation, 2019, 36(7):203-207.
- [5] LU Y. Research on 3D Visualization Method of Weather Radar Base Data[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016.
- [6] JIAO P C, WANG Z H, CHU Z G, et al. Weather radar image interpolation method based on Fourier spectrum analysis[J]. Plateau Weather, 2016, 35(6):1683-1693.
- [7] ZHOU J. 3D-surface Reconstruction Algorithm for Medical Images Based on MITK[J]. Computer Science, 2016, 43(S1):194-197.
- [8] WANG M, FENG J Q, YANG B. Comparison and Evaluation of Marching Cubes and Marching Tetrahedra[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2014, 26(12):2099-2106.
- [9] LI C. Geological data rendering based on MT algorithm[J]. Digital Communication, 2014, 41(4):35-38.
- [10] PENG J. Research on Doppler Weather Radar echo Data Visualization Technology[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.



MA Jun-cheng, born in 1995, postgraduate. His main research interests include 3D visualization and so on.



JIANG Mu-rong, born in 1963, professor. Her main research interests include mathematical method of image processing and its intelligent calculation.