

# 城市绿地节水灌溉双层最优控制模型研究\*

赵燕东<sup>1</sup> 刘圣波<sup>1</sup> 陶鑫<sup>2</sup> 赖小龙<sup>1</sup> 蔡祥<sup>3</sup>

(1. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 2. 中机美诺科技股份有限公司, 北京 100083;

3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 为了研究城市绿地灌溉的有效控制策略,建立了一种基于最优控制理论的灌溉控制模型,与传统的 Bang-Bang 控制器的灌溉控制模型做比较时,采用双层土壤水分传感器,同时获取草坪草 20 cm 和 40 cm 两层深度的土壤水分信息。经过 2011 年夏季 2 个月的对比实验,表明在同样天气、土壤及草坪草管理条件下,保证草坪草长势满足景观要求的最优控制策略与 Bang-Bang 控制策略相比,具有显著的节水效果,节约用水约 25%。

**关键词:** 节水灌溉 城市绿地 最优控制 Bang-Bang 控制

**中图分类号:** S3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0184-05

## 引言

简单而传统的灌溉控制方法是基于经验的模式,它结合了种植者的作物生产知识与当地的气候条件来指导灌溉<sup>[1-3]</sup>。按照控制理论来分类,这种控制方式是开环的,因为其中缺乏土壤、水变量的动态监测与节水灌溉决策目标。在过去的几十年里,随着高新技术的发展,各种运用传感器的反馈灌溉控制策略已经推广。在各种传感器技术中,土壤水分或土壤电导率传感器被大量使用<sup>[4-10]</sup>。Abraham 等提出了使用土壤电导率传感器的自动化滴灌系统<sup>[11]</sup>。另一方面,许多研究都应用了植物形态和生理的动态信息,如叶冠层温度,茎径变化和茎流速率<sup>[12-17]</sup>。而控制策略仍以简单、精度低的开关控制为主,将节水灌溉的最优控制同土壤的液压或植物生理变量结合起来的方法目前还很少。

对于一个给定的系统,在已知一定的最优性准则下可以使用最优控制理论来制定控制策略。一个控制问题包含性能指标和控制变量。换言之,性能指标、状态和控制变量是建立最优控制系统的 3 个条件。本文提出一种城市绿地节水灌溉的最优控制方法。

## 1 材料和方法

### 1.1 土壤水分传感器

用于测量 2 个深度的土壤体积含水率(VSWC)

的双层传感器结构如图 1 所示。在轴上,每一对环构成一个环状电容式传感器。在实验中,轴上嵌入有 2 个传感器组件。2 个传感器组件的垂直距离为 20 cm。该轴具有一个锥形尖,它可以通过一个矮小钻孔由螺旋推运器(直径 18 cm)插入到被测点以下,可最小化干扰。

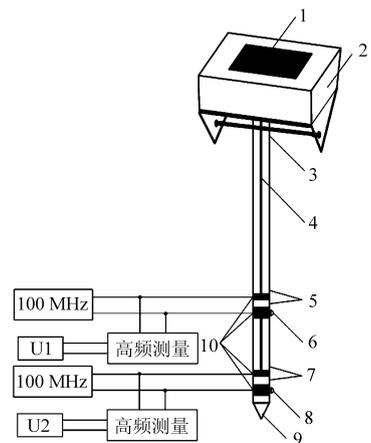


图 1 双层土壤水分传感器示意图

Fig. 1 Dual-layer soil water sensor

1. 太阳能板 2. 数据记录与传输模块 3. 支撑杆 4. 同轴线缆  
5、6. 土壤水分传感器 7、8. 土壤温度传感器 9. 绝缘环 10. 金属锥顶

测定土壤含水率的原理是频域法<sup>[18]</sup>。电容式传感器探测由土壤颗粒、液体和探针周围的气体形成的电介质混合物。其结果是,土壤中的含水率转换为每对电极之间的部分电容。一段同轴线缆从轴

中间穿出,连接到工作在 100 MHz 的高频振荡器的 2 个电极。因此,土壤电容或介电常数可以获得,并随后被转换成通过校准后的土壤体积含水率。在文献[18-20]中可以查阅用于测量土壤含水率介电传感器的其他细节。

### 1.2 最优灌溉控制的基本分析

不饱和条件下的三维空间的土壤水分动态满足

$$\frac{\partial \theta(x, y, z)}{\partial t} = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + S(x, y, z, t) \quad (1)$$

式中  $\theta$ ——在三维坐标  $(x, y, z)$  处的土壤含水率  
 $q_x, q_y, q_z$ ——同一点土壤  $x, y, z$  方向的水流量  
 $S$ ——根区蒸散水量

双层传感器按照图 2 安装在不同的深度,  $z_1$  为 20 cm 深度,  $z_2$  为 40 cm 深度, 可以提出 2 个假设: 首先, 由于传感器的灵敏度在三维空间的限制, 式(1)可以简化成一维空间下的表达式; 其次, 处于  $z_2$  深度的传感器远离根区, 其  $S$  的效果在本例中可以略去, 因此可得

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta_{z_1}}{\partial t} = - \frac{\partial q_{z_1}}{\partial z} + S(z_1, t) \\ \frac{\partial \theta_{z_2}}{\partial t} = - \frac{\partial q_{z_2}}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

式中  $\theta_{z_1}, \theta_{z_2}$ —— $z_1, z_2$  深度的土壤含水率

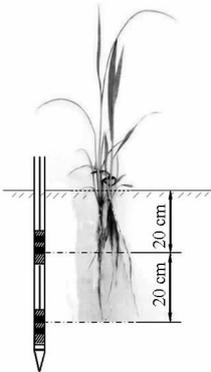


图2 传感器布置图

Fig. 2 Sensor management

为最小化水分损失, 性能指标(代价泛函)可以考虑为

$$J = \int_{t_0}^{t_1} \Delta q_{z_2}(t) dt \quad (3)$$

显然, 方程(3)表示在根区域中, 土壤中的水应尽可能地由植物根系吸收或在  $(t_1 - t_0)$  的时间内由土壤表面蒸发。分析得出, 有 2 个阈值的最优控制变量  $u$  可以表述为

$$u(\theta_{z_1}, \theta_{z_2}) = \begin{cases} 1 & (\theta_{z_1} < V_{threshold} - 1) \\ 0 & (\theta_{z_2} \geq V_{threshold} - 2) \end{cases} \quad (4)$$

其中各阈值参数根据植物、土壤条件的实际情况, 参考相关专家的意见设定。此外, 为了评估式(2)、(3)、(4)的最优解, 使用水管出口的流量计测量计算灌溉水消耗

$$C = \int_{t_0}^{t_1} Q(t) dt \quad (5)$$

式中  $Q$ ——水管的水流速,  $m^3/min$

### 1.3 实验环境与过程

实验在北京的一处城市绿地进行, 主要植被是高羊茅(*Testuca arundinacea*), 一种丛生禾草, 根可以穿透到土壤以下 40 cm。在该区域 ( $116^{\circ}26'39'' E$ ,  $40^{\circ}10'43'' N$ ), 长期平均年降水量为 600 mm, 年平均气温为  $11.7^{\circ}C$ 。为确定容积密度和田间持水量, 使用环刀(直径 57 mm, 高 40 mm)取了深度为 20 cm、40 cm 的土壤样本各 6 个。表 1 列出了在 20 cm 和 40 cm 深处土壤质地组成。

表 1 20 cm 与 40 cm 深度土壤质地与物理性质

Tab. 1 Soil texture and physical properties in depth of 20 cm and 40 cm

深度 / cm	泥 / %	粘土 / %	砂 / %	有机质 / %	容积密度 / $(g \cdot cm^{-3})$	田间持水量 / $(cm^3 \cdot cm^{-3})$
20	63.2	13.8	23.0	2.25	1.28	30.7
40	64.8	20.2	15.0	1.02	1.39	32.5

实验区域如图 3 所示, 将其  $(15 m \times 30 m)$  等分为两部分(各  $15 m \times 15 m$ ), 一部分(区域 1)用于最优控制(式(1)~(4)), 另一部分(区域 2)使用传统 Bang-Bang 控制器(又被称为迟滞控制器)按照式(6)切换灌溉状态

$$u(\theta_{z_1}) = \begin{cases} 1 & (\theta_{z_1} < \theta_0) \\ 0 & (\theta_{z_1} \geq \theta_0 + \Delta\theta) \end{cases} \quad (6)$$

其中  $\theta_0 = (\theta_{FC} + \theta_{wilt}) / 2$

式中  $\theta_0$ ——控制器的开关阈值, 期望的根区土壤含水率

$\theta_{FC}$ ——田间持水量

$\theta_{wilt}$ ——萎蔫临界含水率

$\Delta\theta$  是一个差值, 用以防止控制器在 2 个状态(开-关)之间的振荡。两片区域都由自转喷头灌溉(5000 Series 4" Rotor Part Circle 4 Pack, RainBrid Corp)(喷射半径: 25 ft)。每个圆形灌溉区域以  $120^{\circ}$  间隔安装 3 个双层传感器, 每个区域的 6 套土壤体积含水率数据分层取平均, 为最优控制和 Bang-Bang 控制决策提供支持。另外, 安装了一台 RYQ-2 型气象站用以记录降雨、风速和气温。实验在 2011 年的 6~8 月之间进行。该区域温度和风速的整体变化如图 4 所示。

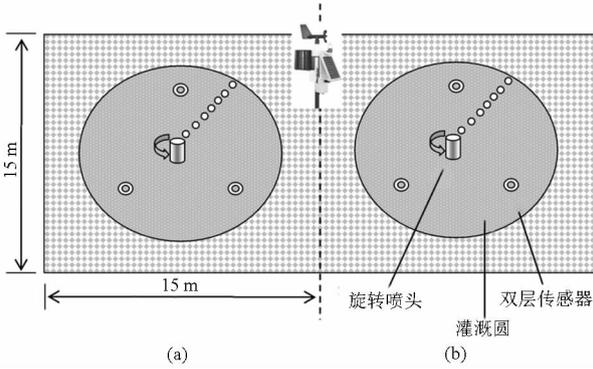


图3 实验区域设计示意图

Fig. 3 Experimental area design

(a) 最优控制区域 (b) Bang-Bang控制区域

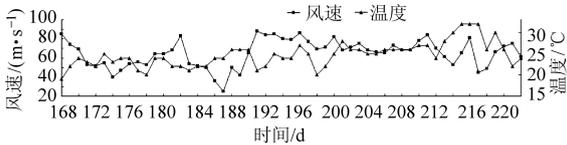


图4 实验期间的风速与温度

Fig. 4 Wind speed and temperature during experiment

## 2 结果与讨论

### 2.1 Bang-Bang控制与最优控制的比较

图5为2种控制模式下2个深度的动态土壤体积含水率。

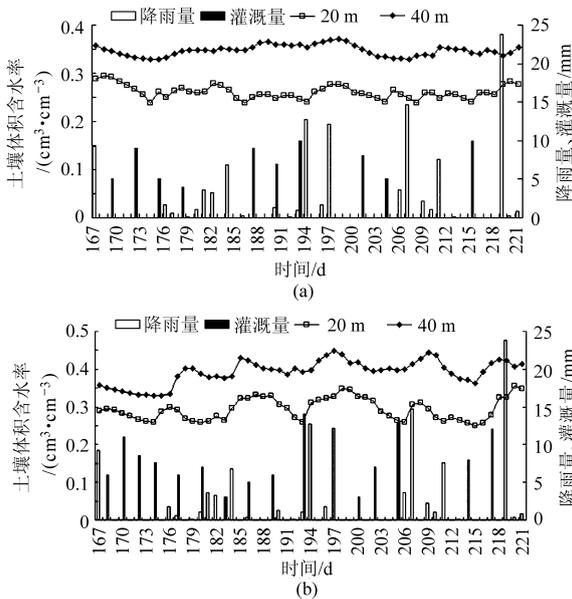


图5 2个深度的动态土壤体积含水率

Fig. 5 Dynamic of soil volumetric water content in two depths

(a) 最优控制 (b) Bang-Bang控制

2种控制策略的耗水量对比如图6所示。

根据2001—2010年历年对应月份的平均降雨量(175 mm),实验期间的降雨量偏低(110 mm)。但这为实验提供了理想的自然条件。一般来看,在相同条件下进行灌溉实验,比较最优控制(区域1)

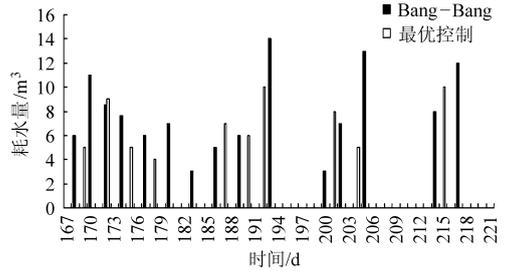


图6 最优控制与Bang-Bang控制耗水量对比

Fig. 6 Water consumption contrast of optimal control and Bang-Bang control

和Bang-Bang控制(区域2),可以发现3个区别。首先,Bang-Bang控制的开关频率要高于最优控制,例如,在第178天到188天之间,Bang-Bang控制有3次开关状态切换,而最优控制则只开启了1次灌溉阀。其次,对比2种控制的总用水量后可以发现,Bang-Bang控制对降雨的变化更为不敏感,因此,在区域2中, $\theta_2$ 的振幅显著高于区域1。这说明区域1的根区水分流失比区域2的要少。最后,分别计算了2个区域的总用水量,发现最优控制消耗了87 m<sup>3</sup>水,而Bang-Bang控制消耗了近117.1 m<sup>3</sup>的水。相比而言,最优控制消耗的水分只有Bang-Bang控制的74.2%。

### 2.2 最优控制和Bang-Bang控制在2个深度的土壤体积含水率相关性分析

2种控制方法在20 cm深度和40 cm深度的土壤体积含水率相关性如图7所示。

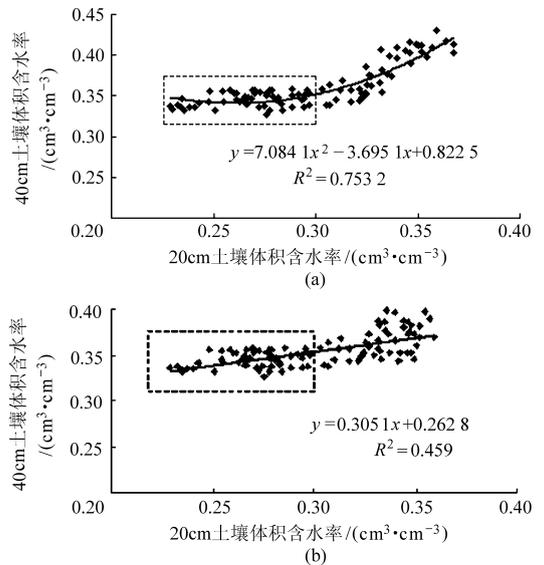


图7 20 cm与40 cm土壤体积含水率的相关性分析

Fig. 7 Soil volumetric water content correlation in depth of 20 cm and 40 cm

(a) Bang-Bang控制 (b) 最优控制

比较后可以得出3个结果,首先,图7a的线性回归方程的 $R^2 = 0.7532$ ,而图7b中,方程的 $R^2$ 为

0.459;其次,Bang - Bang控制在40 cm深度的土壤体积含水率变化范围为 $0.32 \sim 0.44 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ,而最优控制则是 $0.32 \sim 0.40 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ;此外,在图中由虚线包围的数据显示,在20 cm深度土壤体积含水率低于 $0.30 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 时,2个深度的土壤含水率没有明显的相关性。这意味着,这些地块的浅层处于不饱和状态,由于不饱和水力传导系数较低,灌溉用水需花比较长的时间才能从深度20 cm渗透到40 cm。当土壤含水率接近土壤保水量时( $32.5 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ),水力传导系数显著增加,因此2层土壤水分的相关系数也同时增加。这也证明,Bang - Bang控制的灌溉区根区水分流失的更多。另一方面,最优控制下40 cm处土壤体积含水率的波动总体来看要比Bang -

Bang控制小,说明最优控制灌溉下水的损失相对更小。

### 3 结束语

建立了以不同深度土壤含水率为系统变量、以最少灌溉量为目标函数、以电磁阀开启状态为控制量的最优灌溉控制模型。根据模型的需要设计了双层土壤水分传感器。在北京林业大学绿地上,针对高羊茅草进行了实验测量与模型验证,最后对比了最优灌溉控制与Bang - Bang灌溉控制在城市绿地中的节水效果。在小块地的实验表明,同等情况下,最优控制比Bang - Bang控制节水近25%,最优控制的节水效果非常显著。

### 参 考 文 献

- 1 Wang D, Gartung J. Infrared canopy temperature of early-ripening peach trees under postharvest [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11):1787 - 1794.
- 2 Migliaccio K W, Schaffer B, Crane J H, et al. Plant response to evapotranspiration and soil water sensor irrigation scheduling methods for papaya production in south Florida [J]. *Agricultural Water Management*, 2009, 97(10):1452 - 1460.
- 3 匡秋明,赵燕东,白陈祥. 节水灌溉自动控制系统的研究 [J]. *农业工程学报*, 2007, 23(6):136 - 139.  
Kuang Qiuming, Zhao Yandong, Bai Chenxiang. Automatic monitor and control system of water saving irrigation [J]. *Transactions of the CSAE*, 2007, 23(6):136 - 139. (in Chinese)
- 4 Alharthi A, Lanje J. Soil water saturation: dielectric determination [J]. *Water Resources Research*, 1987, 23(4):591 - 595.
- 5 赵燕东,章军富,尹伟伦,等. 按植物需求精准节水灌溉自动调控系统的研究 [J]. *节水灌溉*, 2009(1):11 - 14.  
Zhao Yandong, Zhang Junfu, Yin Weilun, et al. Study on precision-irrigation control system in accordance with plants physiological water requirement [J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(1):11 - 14. (in Chinese)
- 6 赵燕东,马扬飞,王勇志. 绿地精准灌溉控制系统设计与最优灌溉量分析 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3):46 - 50.  
Zhao Yandong, Ma Yangfei, Wang Yongzhi. Green land precision irrigation control system and analysis of optimal irrigation amount [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3):46 - 50. (in Chinese)
- 7 Fernández J E, Green S R, Caspari H W, et al. The use of sap flow measurements for scheduling irrigation in olive, apple and Asian pear trees and in grapevines [J]. *Plant and Soil*, 2008, 305(1):91 - 104.
- 8 Gaskin G C, Miller J D. Measurement of soil water content using a simplified impedance measuring technique [J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1996, 63(2):153 - 160.
- 9 陶长生,王菊,徐方,等. 地下水埋深与土壤含水率对应关系和最优灌溉模式的试验研究 [J]. *灌溉排水*, 2000, 19(4):68 - 71.  
Tao Changsheng, Wang Ju, Xu Fang, et al. Experiment study on optimal irrigation regime in paddy rice [J]. *Irrigation and Drainage*, 2000, 19(4):68 - 71. (in Chinese)
- 10 赵燕东,白陈祥,匡秋明,等. 土壤水分传感器实用性能对比研究 [J]. *北京林业大学学报*, 2006, 28(3):158 - 160.  
Zhao Yandong, Bai Chenxiang, Kuang Qiuming, et al. Performance of three types of soil moisture sensors: SWR, TDR and FD [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2006, 28(3):158 - 160. (in Chinese)
- 11 Abraham N, Hema P S, Saritha E K, et al. Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature [J]. *Agricultural Water Management*, 2000, 45(2):145 - 157.
- 12 安巧霞,孙三民,叶含春. 考虑环境效益的塔里木灌区棉花最优灌溉量 [J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11):49 - 53.  
An Qiaoxia, Sun Sanmin, Ye Hanchun. Optimal irrigation amount for cotton field considering environmental benefits in Tarim irrigation area [J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(11):49 - 53. (in Chinese)
- 13 Goldhamer D A, Fereres E, Mata M, et al. Sensitivity of continuous and discrete plant and soil water status monitoring in peach trees subjected to deficit irrigation [J]. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 1999, 124(4):437 - 444.
- 14 Goldhamer D A, Fereres E. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements [J]. *Irrigation Science*, 2001, 20(3):115 - 125.
- 15 McCready M S, Dukes M D, Miller G L. Water conservation potential of smart irrigation controllers on St. Augustine grass. *Agric. [J]*. *Water Management*, 2009, 96(11):1623 - 1632.
- 16 Moriana A, Girón I F, Martín-Palomo M J, et al. New approach for olive trees irrigation scheduling using trunk diameter sensors [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(11):1822 - 1828.

- 17 Paltineanu I C, Starr J L. Real-time soil water dynamics using multisensor capacitance probes: laboratory calibration[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(6):1576 – 1585.
- 18 Sun Y, Ma D, Lin J, et al. An improved frequency domain technique for determining soil water content[J]. Pedosphere, 2005, 15(6):805 – 812.
- 19 Sun Y, Ma D, Schulze Lammers P, et al. On-the-go measurement of soil water content and mechanical resistance by a combined horizontal penetrometer[J]. Soil Tillage Research, 2006, 86(1):209 – 217.
- 20 Shull H, Dylla A S. Irrigation automation with a soil moisture sensing system[J]. Transactions of the ASAE, 1980, 23(3):649 – 652.

## Optimal Model of Dual-layer Water-saving Irrigation on Urban Green Land

Zhao Yandong<sup>1</sup> Liu Shengbo<sup>1</sup> Tao Xin<sup>2</sup> Lai Xiaolong<sup>1</sup> Cai Xiang<sup>3</sup>

(1. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2. MENOBLE Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Precise irrigation of agro forestry is imminent with the shortage of water resources in the world and the development of modern agro forestry and information science. One of the effective means to realize precise irrigation is to improve the control method and control accuracy. In order to study the effective control strategy for the irrigation of urban green land, an irrigation control model with optimal control theory was built. To testify the model, a dual-layer sensor was used to obtain the soil moisture in depth of two layers (20 cm and 40 cm) simultaneously. The experiment was conducted in an urban green land of Beijing. With the same climatic environment, the traditional irrigation control model with Bang – Bang control method and the optimal irrigation control model were compared. After comparative study in two months of 2011, the experiment result indicated that, comparing with Bang – Bang control, the optimal control saved water remarkably (approx. 25%) in the same weather, soil and grass management conditions and ensured the lawn grass meeting the landscape requirements.

**Key words:** Water-saving irrigation Urban green land Optimal control Bang – Bang control

(上接第 293 页)

## Image Wavelet Transform on Low Memory Sensor Nodes of WMSN

Lu Mingzhou<sup>1</sup> Liu Zhiqiang<sup>1</sup> Shen Mingxia<sup>1</sup> Liu Longshen<sup>1</sup> Yang Xiaojing<sup>2</sup> Zhou Bo<sup>3</sup>

(1. Jiangsu Province Engineering Lab for Modern Facility Agriculture Technology and Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China

2. Key Laboratory of Animal Physiology and Biochemistry, Ministry of Agriculture, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China

3. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

**Abstract:** This paper adopts a line based wavelet transform method with the Le Gall 5/3 filter, in which the image lines are read to SRAM line by line from the SD card and write to the SD card after the multi-level transform operation. The wavelet transform method requires low SRAM memory and involves fixed point integer multiplication, addition, shift operation only. Applying the method to a 256 pixels × 256 pixels gray image of piglets. experimental results show that the SRAM cost of the method is 3.968 KB and the time cost is 8.718 s with a reasonable cost of the arithmetic operation. This study establishes the foundation for the wavelet transform image compression on the image sensor nodes, and makes it possible to transmit the images of agriculture over the low bandwidth WMSN efficiently.

**Key words:** Multimedia sensor network Image compression Low memory Line based wavelet transform Le Gall 5/3 filter