

# 一种移动机器人对运动目标的检测跟踪方法

刘伟<sup>1,2</sup>, 王建平<sup>1</sup>, 张崇巍<sup>1</sup>

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009;

2. 合肥学院 机器视觉与智能控制重点实验室, 安徽 合肥 230106)

**摘要:**从序列图像中有效地自动提取运动目标区域和跟踪运动目标是自主机器人运动控制的研究热点之一。给出了连续图像帧差分法和二次帧差分改进的图像 HIS 差分模型,采用自适应运动目标区域检测、自适应阴影部分分割和噪声消除算法,对无背景图像条件下自动提取运动目标区域。定义了一些运动目标的特征分析和计算,通过特征匹配识别所需跟踪目标的区域。采用 Kalman 预报器对运动目标状态的一步预测估计和两步增量式跟踪算法,能快速平滑地实现移动机器人对运动目标的跟踪驱动控制。实验结果表明该方法有效。

**关键词:**改进的 HIS 差分模型; Kalman 滤波器; 增量式跟踪控制策略

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2009)04-0105-04

## A Method of Moving Object Detection and Tracking of Mobile Robot

LIU Wei<sup>1,2</sup>, WANG Jian-ping<sup>1</sup>, ZHANG Chong-wei<sup>1</sup>

(1. School of Electric and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Key Lab. of Machine Vision and Intelligent Control, Hefei University, Hefei 230106, China)

**Abstract:** Extracting moving objects from in video sequences adaptively without background image has been focused in robot research fields. An improved HSI image difference model based on sequences image difference and second image difference is presented. Moreover, a self-adaptive division method to extract the moving objects without background knowledge is adopted. The feature of moving objects are defined and the area of objects can be recognized through the feature marching. To track the moving objects quickly and smoothly, the forecast of moving objects state and two-steps-increment tracking algorithm based on Kalman filter are adopted. Experimental results show that the proposed approach is effective.

**Key words:** HSI image difference model; Kalman filter; increment control tracking strategy

## 0 引言

运动目标检测和跟踪是机器人研究应用及智能视频监控中的重要关键技术,一直是备受关注的研究热点之一。在运动目标检测算法中常用方法有光流场法和图像差分法。由于光流场法的计算量大,不适合于实时性的要求。对背景图像的帧间差分法对环境变化有较强的适应性和运算简单方便的特点,但帧间差分不能提出完整的运动目标,且场景中会出现大量噪声,如光线的强弱、运动目标的阴影等<sup>[1~3]</sup>。

为此文中对移动机器人的运动目标检测和跟踪中

的一些关键技术进行了研究,通过对传统帧间差分的改进,引入 HSI 差值模型、图像序列的连续差分运算、自适应分割算法、自适应阴影部分分割算法和图像形态学方法消除噪声斑点,在无背景图像条件下自动提取运动目标区域。采用 Kalman 滤波器对跟踪目标的运动轨迹进行预测,建立移动机器人跟踪运动目标的两步增量式跟踪控制策略,实现对目标的准确检测和平滑跟踪控制。实验结果表明该算法有效。

## 1 运动目标检测方法

接近人眼对颜色感知的色调、饱和度和亮度属性( $H, S, I$ )模型更适合于图像识别处理。因此,文中引入改进型 HSI 帧差模型。

### 1.1 运动目标图像 HSI 差值模型

设移动机器人在某一位置采得的连续三帧图像序列  $f_{k-1}(x, y), f_k(x, y), f_{k+1}(x, y)$ , 根据仿人眼对色度的敏感系数比亮度要低<sup>[4]</sup>, 通过对图像色调  $H$ 、饱

收稿日期: 2008-07-13

基金项目: 安徽省自然科学基金(KJ2008B121); 合肥学院自然科学基金(08KY006ZR)

作者简介: 刘伟(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为机器视觉与图像处理; 王建平, 博士, 教授, 研究方向为智能控制、模式识别; 张崇巍, 教授, 博导, 研究方向为智能控制技术。

和度  $S$  和亮度  $I$  属性的敏感系数调整<sup>[5]</sup>, 将所得序列每一帧图像转换为更能突出移动目标的改进型 HSI 图像  $f_i(x, y)$ , 如下式:

$$f_i(x, y) = \{W_H H_i(x, y), W_S S_i(X, Y), W_I I_i(X, Y)\} \\ = \{H'(x, y), S'(x, y), I'(x, y)\} \quad (i = k-1, k, k+1) \quad (1)$$

其中:  $W_H, W_S, W_I$  分别为设定的色调、饱和度和亮度的敏感系数。

将通过公式(1)转化后的第  $k$  与第  $k-1$  帧图像差分, 第  $k+1$  与第  $k$  帧图像差分。

定义 1 帧差分图像计算模型如下:

$$f_{d1}(x, y) = \{|H'_k(x, y) - H'_{k-1}(x, y)|, \\ |S'_k(x, y) - S'_{k-1}(x, y)|, |I'_k(x, y) - I'_{k-1}(x, y)|\} \quad (2)$$

$$f_{d2}(x, y) = \{|H'_{k+1}(x, y) - H'_k(x, y)|, \\ |S'_{k+1}(x, y) - S'_k(x, y)|, |I'_{k+1}(x, y) - I'_k(x, y)|\} \quad (3)$$

其中:  $f_{d1}(x, y), f_{d2}(x, y)$  为连续三帧图像序列的帧差分后的结果。

## 1.2 运动目标的自适应分割与提取

定义 2 二次帧差分图像运算为:

$$Y(x, y) = f_{d2}(x, y) \odot f_{d1}(x, y) = \{Y_H(x, y) Y_S(x, y) Y_I(x, y)\} \quad (4)$$

运算规则定义为:

$$Y_H(x, y) = \min\{|H'_k(x, y) - H'_{k-1}(x, y)|, \\ |H'_{k+1}(x, y) - H'_k(x, y)|\}$$

$$Y_S(x, y) = \min\{|S'_k(x, y) - S'_{k-1}(x, y)|, \\ |S'_{k+1}(x, y) - S'_k(x, y)|\}$$

$$Y_I(x, y) = \min\{|I'_k(x, y) - I'_{k-1}(x, y)|, \\ |I'_{k+1}(x, y) - I'_k(x, y)|\}$$

其中:  $Y(x, y)$  为相与运算所得结果, 相与运算为对  $f_{d1}(x, y), f_{d2}(x, y)$  两个帧差分图像的色度  $H$ 、饱和度  $S$  和亮度  $I$  值取极小运算。

为了确定出两个帧差分图像结果  $f_{d1}(x, y), f_{d2}(x, y)$  做相与运算结果所得区域, 利用类间距与类内距之比作为最佳分割的目标函数<sup>[6]</sup>。确定出图像序列中的运动目标移动部分区域  $Y_m(x, y)$  和背景区域。

## 2 运动目标的预测跟踪控制

### 2.1 运动目标的定位

① 计算跟踪运动目标区域的重心点的横坐标、纵坐标为:

$$m_x = \frac{\sum_{(x,y) \in O_R} x O_R(x, y)}{\sum_{(x,y) \in O_R} O_R(x, y)}$$

$$m_y = \frac{\sum_{(x,y) \in O_R} y O_R(x, y)}{\sum_{(x,y) \in O_R} O_R(x, y)} \quad (5)$$

其中:  $O_R$  为二值化图像中的确定要跟踪的运动目标区域。

② 计算跟踪运动目标区域的重心点的深度坐标值。

文中采用单摄像机近似小孔成像原理的测距方法, 较精确地计算出深度距离  $m_z$  值。

实际中机器人摄像机采用的是正对前方的放置方式, 高度已经测定为  $H$ , 焦距已经测定为  $f$ 。如图 1 所示。

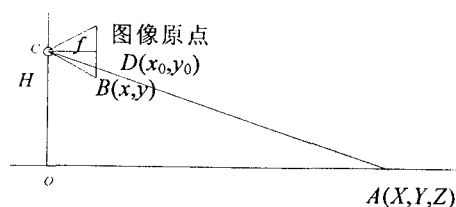


图 1 小孔成像原理的测距示意图

由图 1 可得,  $C$  是摄像机,  $O$  是摄像机在地面上的投影, 图像成像面中心点坐标为  $D(x_0, y_0)$ , 运动目标重心点正下方的边缘点的三维立体坐标为  $A(X_A, Y_A, Z_A)$ , 该点在图像上的投影点坐标为  $B(X_B, Y_B)$ 。

则三角形  $ACO$  与三角形  $CDB$  相似, 经过计算可以得出物体地面上的点与摄像机的水平距离  $m_z$ 。

$$m_z = f \times H / (Y_B - y_0) \quad (6)$$

其中:  $dy$  是摄像机成像像素的纵向物理尺寸,  $H$  为摄像机与地面高度。

### 2.2 运动目标的运动轨迹估计

文中采用 Kalman 滤波器(EKF)预估运动目标位置, 建立移动机器人跟踪运动目标的控制策略。

运动目标的前/后/左/右移动可以通过其重心在图像上的左右平移和运动目标成像的深度来反映, 构造 Klamann 滤波器时, 设状态向量  $X(t)$  为:

$$X(t) = [m_x(t) \ m_y(t) \ \Delta x'(t) \ \Delta y'(t)]^T$$

其中:

$m_x(t), m_y(t)$  分别为  $t$  时刻运动目标重心点  $A$  在图像上  $x$  方向和  $y$  方向的位置;

$\Delta x'(t), \Delta y'(t)$  分别为  $t$  时刻运动目标  $A$  点在  $x$  方向和  $y$  方向上的运动速率;

$\Delta t$  为两个状态之间的采样时间间隔<sup>[7]</sup>。

① 系统的状态方程:

运动目标的跟踪过程可以用下面的时间线性状态方程描述:

$$X(t) = \Phi(t)X(t - \Delta t) + \omega(t - \Delta t), \text{ 即:}$$

$$\begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ \Delta x'(t) \\ \Delta y'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x(t-\Delta t) \\ m_y(t-\Delta t) \\ \Delta x'(t-\Delta t) \\ \Delta y'(t-\Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{mx}(t-\Delta t) \\ \omega_{my}(t-\Delta t) \\ \omega_{\Delta x}(t-\Delta t) \\ \omega_{\Delta y}(t-\Delta t) \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中:  $\omega(t)$  是状态误差, 假定为零均值高斯噪声, 取为  $\omega(t) = [\omega_{mx}(t) \ \omega_{my}(t) \ \omega_{\Delta x}(t) \ \omega_{\Delta y}(t)]^T$ , 其方差分别为:

$$\sigma_{\omega}(t) = [\sigma_{\omega_1}^2(t) \ \sigma_{\omega_2}^2(t) \ \sigma_{\omega_3}^2(t) \ \sigma_{\omega_4}^2(t) \ \sigma_{\omega_5}^2(t) \ \sigma_{\omega_6}^2(t)]^T$$

② 量测方程为:

$Y(t) = H(t)X(t) + v(t)$ , 即:

$$\begin{bmatrix} m_x(t) \\ m_y(t) \\ \Delta x'(t) \\ \Delta y'(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta t & 0 \\ 0 & 1 & 0 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_x(t-\Delta t) \\ m_y(t-\Delta t) \\ \Delta x'(t-\Delta t) \\ \Delta y'(t-\Delta t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega_{mx}(t-\Delta t) \\ \omega_{my}(t-\Delta t) \\ \omega_{\Delta x}(t-\Delta t) \\ \omega_{\Delta y}(t-\Delta t) \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中:  $v(t)$  为观测误差, 假定为零均值高斯噪声, 取为  $v(t) = [v_{mx}(t) \ v_{my}(t)]^T$ , 其方差分别为:  $\sigma_v = [\sigma_{v_1}^2(t) \ \sigma_{v_2}^2(t)]^T$ .

③ 初始条件确定:

系统初始状态的确定, 运动目标初始位置 A 点为  $(x(0), y(0))$ , 可实时检测计算得到第五帧时刻运动目标的重心点位置作为初始 A 点位置  $(x(0), y(0))$  状态值; 运动目标初始移动速率为  $(\Delta x'(0), \Delta y'(0))$ , 可以通过实时检测第二帧与第五帧的重心点位置变化和采样时间间隔  $\Delta t$  之比计算得到, 即初始  $X(0) = [x(0), y(0), \Delta x'(0), \Delta y'(0)]^T$ . 量测方程中的噪声协方差矩阵  $R(t) = E\{v(t)v(t)^T\}$ , 模型噪声的协方差矩阵  $Q(t) = E\{\omega(t)\omega(t)^T\}$ , 估计误差协方差矩阵  $P(t)$ , 初始状态值  $Q$ ,  $R$  和  $P(0)$  只需取不为零的矩阵。

④ 一步预测估计推导:

根据 Kalman 滤波理论的预测模型递推公式, 进行一步预测估计推导如下:

$$P(1/0) = \Phi(\Delta t) * P(0) * \Phi(\Delta t)^T + Q(t) \quad (9)$$

$$K(1) = P(1/0) * H^T * (H * P(1/0) * H^T + R)^{-1} \quad (10)$$

$$P(1) = (I - K(1) * H) * P(1/0) \quad (11)$$

得到  $K(1)$  后可以根据下式计算出系统的下一步状态预测值:

$$X(1) = X(0) + K(1) * (Y(1) - H * X(0)) \quad (12)$$

可依此类推得:  $X(2), X(3), \dots, X(k), X(k+1), \dots$ .

### 2.3 移动机器人运动控制策略

使移动机器人检测出的运动目标的重心始终位于图像的中心位置  $(x_0, y_0)$ , 则跟踪问题可表示为机器人的两步运动: 首先驱动机器人左右移动  $\Delta X$  使运动目标的重心点出现在图像的中心位置  $y_0$  轴上, 再驱动机器人前后移动  $\Delta Z$  保持图像大小不变。

①  $\Delta X$  的计算:

目标水平移动的实际距离可以通过摄像机的小孔成像模型近似算出, 推导如下:

$$\Delta X(t) = \frac{(m_x(t) - x_0) dx m_x(t)}{f} = \frac{(m_x(t) - x_0) dx H}{(m_y(t) - y_0) dy} \quad (13)$$

其中:  $dx$  是摄像机成像像素的横向物理尺寸。

②  $\Delta Z$  的计算:

实际跟踪过程中需要保持运动目标的成像面积与图像总面积的比值不变, 由公式(9) 运动目标成像面积与运动目标物体自身表面积的关系可推导出  $\Delta Z$  的计算公式。

设保持运动目标的成像面积与图像总面积的比值为常值  $k_1$ , 实际状态下运动目标在图像中所占的比值为  $k_2$ , 计算得到此时物体重心距离机器人的近似距离为  $m_z$ , 为了达到运动目标成像面积为保持的比值  $k_1$ , 机器人需要移动的距离表示为  $\Delta Z$ , 则:

$$\Delta Z(t) = (\sqrt{\frac{k_2}{k_1}} - 1) m_z = (\sqrt{\frac{k_2}{k_1}} - 1) \frac{f * H}{(Y_B(t) - y_0) dy} \quad (14)$$

其中:  $Y_B(t)$  为运动目标重心点正下方的运动目标区域边缘点在图像中的坐标, 可由重心点坐标得出, 由公式(19) 和(21) 看出可以通过 Kalman 滤波预测出来的  $m_x(t)$ ,  $m_y(t)$  和确定保持运动目标图像大小比值  $k_1$ , 可分别计算得出移动机器人的两步运动  $\Delta X$  和  $\Delta Z$ 。

## 3 实验结果分析

### 3.1 实验条件

文中对提出的方法在户外场景运动目标检测进行了大量的实验验证。实验条件如下: 移动机器人摄像

机分辨率为  $320 \times 240$ , 高度  $H$  为 853mm, 焦距  $f$  为 36mm, 每秒钟 25 帧, 摄像机成像像素的横向、纵向物理尺寸可分别通过对摄像机的标定得到,  $dx = 0.12\text{mm}$ ,  $dy = 0.09\text{mm}$ , HSI 空间下的敏感系数取:  $W_H = 0.1$ ,  $W_S = 0.1$ ,  $W_I = 0.80$ ; 检测与跟踪的运动目标选择为汽车, 设定运动目标都归一化为距离摄像机为  $L = 500\text{cm}$  的位置得到成像面积, 该位置上所设成像面积阈值  $t_0 = 400$  像素, 每个目标点连通区域  $B = 50$ ,  $\theta = 8$ , 仿射不变矩与人头肩部分经验不变矩差的绝对值所设的容限值  $\delta_1 = 100$ , 移动机器人每间隔 1 秒调整一次跟踪位置, 每次采集 3 帧图像, 即采样间隔时间  $\Delta t = 1$  秒, 保持运动目标的成像面积与图像总面积的比值为  $k_1 = 0.1$ 。实验结果如图 2 所示。

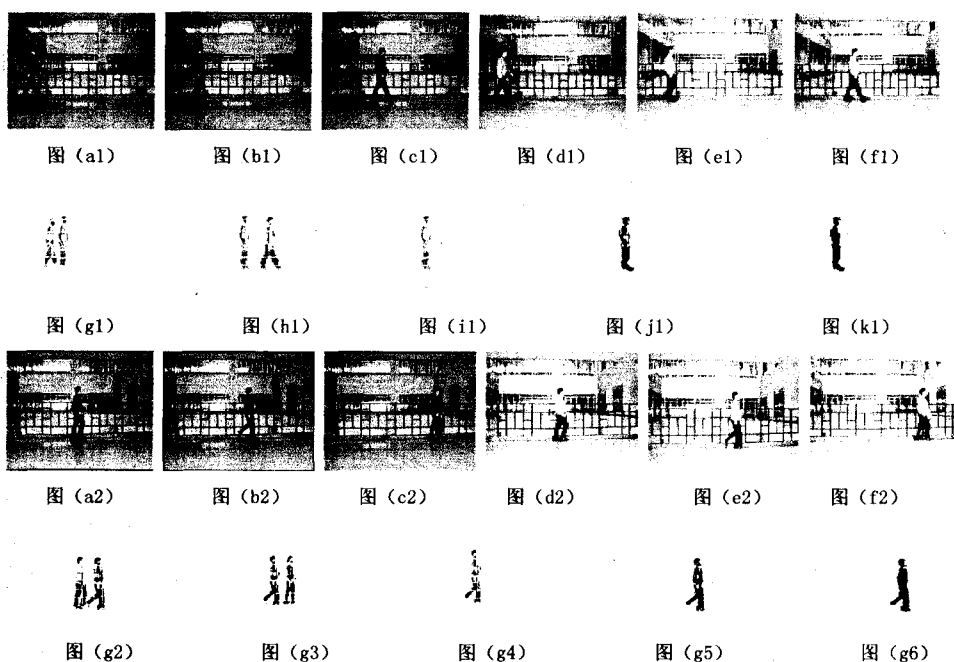


图 2 实验效果图

### 3.2 实验步骤

实验步骤如下:

①摄像机在  $t$  时刻捕捉的三帧原始图像为图(a1)、图(b1)和图(c1)。由公式(1)转化成的新的 HSI 空间下的图像为图(d1)至图(f1)。

②分别对图(e1)与图(d1)和图(f1)与图(e1)差分, 结果为图(g1)和图(h1); 由公式(4)对图(g1)和图(h1)做相与运算, 结果为图(i1); 求图(i1)的自适应二值化阈值得到二值化图像图(j1)。

③由图(j1)中的每个目标点连通区域代回图(e1)中, 由区域连通方法得到图(k1)。

④由公式(5)计算得出图(k)中目标的重心坐标为  $m_x(t) = 59$ ,  $m_y(t) = 170$ ,  $Y_B(t) = 229$ , 得到深度为  $m_z = 4874\text{mm}$ , 重心点沿  $x, y$  方向的移动速度  $\Delta x'(0)$

$= 87$  像素 /  $t$ ,  $\Delta y'(0) = 0$ , 确定不为零的  $Q, R$  和  $P(0)$  矩阵。

⑤由公式(9) ~ (12) Kalman 滤波器计算运动目标状态的一步预测。 $m_x(t+1) = 146$ ,  $m_y(t+1) = 168$ ,  $\Delta x'(t+1) = 76$  像素 /  $t$ ,  $\Delta y'(t+1) = 0$ 。

⑥由公式(13)和(14)计算出移动机器人对运动目标状态的一步预测增量式两步运动跟踪值  $\Delta X = 430\text{mm}$  和  $\Delta Z = 0$ 。

在机器人移动  $\Delta X$  和  $\Delta Z$  之后的位置上重新捕捉的三帧图像为图(a2)至图(c2)重复上述操作, 得到一步运动之后在  $t+2$  时刻下的系统预测状态  $X(t+2) = [132, 166, 72, 0]$ , 通过 Kalman 滤波器重新估计得到预测值, 驱动机器人跟踪移动目标。为了使移动机器人跟踪运动的驱动控制性能平滑, 对于运动目标图像面积比变化在  $(1/9, 1/11)$  范围之内时, 可不对机器人做前后移动的驱动控制。

## 4 结束语

文中对移动机器人的运动目标检测和跟踪中的一些关键技术进行了研究, 实验结果表明:

(1)给出了改进的图像 HSI 差分模型, 定义了连续图像帧差分 and 二次帧差分运算, 可有效地适应环境变化的影响, 能对无背景图像条

件下有效提取运动目标区域。

(2)引入了一些运动物体的特征分析, 定义了运动目标区域的特征值计算, 可对运动目标进行特征匹配, 能判别和提取所需跟踪的运动目标区域。

(3)采用了 Kalman 滤波器对运动目标状态的预测, 定义了移动机器人的增量式两步跟踪算法, 能快速平滑地实现移动机器人跟踪运动目标的驱动控制。

(4)文中方法对于运动物体的遮挡造成的目标消失或运动物体移动过快等问题需要进一步研究。

### 参考文献:

- [1] 李庆忠, 陈显华, 王立红. 一种视频运动目标的检测与识别方法[J]. 模式识别与人工智能, 2006, 19(2): 238-242.

(下转第 111 页)

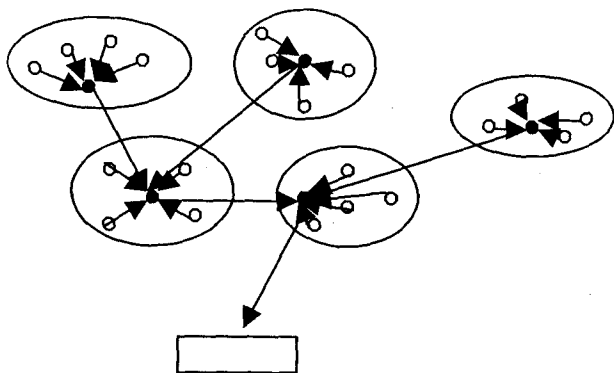


图1 改进后的路由拓扑图

假设网络中有  $M$  个簇头节点,生成路由树算法过程中,有两层循环,首先须对每个簇头节点进行遍历,其频度为  $M$ ;其次对每个簇头节点而言,需要对与之邻接的簇头节点进行分析,而最多有  $(M-1)$  个簇头节点与该簇头节点连接,因此,生成路由树算法的时间复杂度为  $O(M^2)$ ,因此算法的总体时间复杂度为  $O(M^2)$  [10]。

在大型的无线传感器网络中,改进后的 LEACH 路由算法比早期的 LEACH 路由算法和其它现有的改进的 LEACH 算法,在总体节能上更能有优势。当传感器的节点越多时,这种差别就越明显。在这里我们将利用最小生成树原理的 LEACH 路由算法与肖伟茂提出的基于固定区域聚类算法进行比较(见图2)。

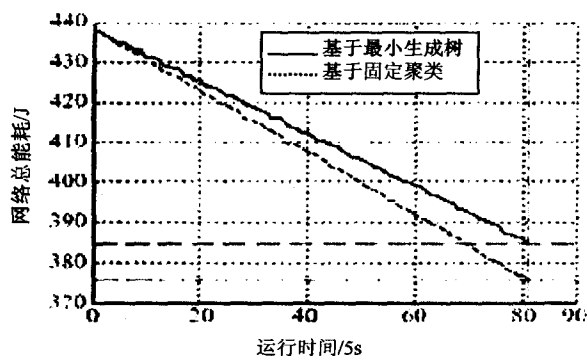


图2 网络节点能耗图

从图中可以看出,随着时间的增加,在相同的传感器环境下,相同的传感器数量,当它们进行数据传输时,所消耗的能量差别慢慢加大。但是,在传感器节点

相对较少时,两者的差别很小。

## 5 结束语

在综合分析了现有算法的基础上,提出了一种改进后的新的 LEACH 路由算法方案。考虑到将要死亡的个别簇头节点,该算法以满足 MRE 要求的簇头节点为中间节点,从而延长了无线传感器网络的寿命。同时,通过利用最小生成树原理,最后所形成的传输路径是一条最佳的传输路径,从总体上实现了无线传感器网络的节能。理论分析表明,该算法能够节约网络功耗,有效延长网络寿命。

## 参考文献:

- [1] 吴臻,金心宇.无线传感器网络的 LEACH 算法的改进[J].传感技术学报,2006,19(1):34-36.
- [2] 李建中,李金宝,石圣飞.传感器网络及其数据管理的概念、问题与进展[J].软件学报,2003,14(10):1717-1727.
- [3] 车宏安,顾基发.无标度网络及其系统科学意义[J].系统工程理论与实践,2004(4):11-16.
- [4] 张悦.无线传感器网络 LEACH 协议群首算法的改进[J].微计算机信息,2006,22(4):183-185.
- [5] Kompella K, Swallow G. Detecting MPLS Data Plane Failures[S]. RFC 4379, 2006.
- [6] Vargar A. OMNET++ Discrete Event Simulation System Version 3.2 User Manual [EB/OL]. 2006. <http://www.omnetpp.org/doc/manual/usman.html>.
- [7] Lee M, Jnig X P. Energy-efficient Routing Protocols in Wireless Ad hoc Networks[R]. [s.l.]:Spring,2001.
- [8] Reisfeld D, Wolfson H, Yeshurun Y. Context-free attentional operators: the generalized symmetry transform[J]. International Journal of Computer Vision, 1995, 14(2):119-130.
- [9] Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for Self-organization of a Wireless Sensor Network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5):16-27.
- [10] Stojmenovic I, Nayak A, Kuruvila J. Design Guidelines for Routing Protocols in Ad Hoc and Sensor Networks with a Realistic Physical Layer[J]. IEEE Communications Magazine, 2005, 43(3):101-106.

(上接第 108 页)

- [2] 杨威,张田文.复杂景物环境下运动目标检测的新方法[J].计算机研究与发展,1998,35(8):724-728.
- [3] 张辉,王强,徐光佑,等.运动目标的快速检测和识别[J].清华大学学报:自然科学版,2002,42(10):1401-1404.
- [4] 王建平,秦枫.灰度文本图像自适应二值化滤波算法设计及应用[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27

(5):509-512.

- [5] 王建平,钱波,姜滔.基于变换域分析的车牌分割研究[J].合肥工业大学学报:自然科学版,2004,27(3):251-255.
- [6] 李凌娟,贾振堂,贺贵明.一种鲁棒的视频分割算法[J].中国图像图形学报,2002,7(11):1128-1133.
- [7] 陈无畏,施文武,王启瑞,等.一种新的移动机器人跟踪控制方法[J].仪器仪表学报,2004,25(1):13-17.