

基于梯度自适应极值搜索算法的趋光控制研究

曹牧寒¹, 李长红^{1,2}, 曹凯¹, 陈超波¹

(1. 西安工业大学 电子信息工程学院, 西安 710021; 2. 西北机电工程研究所, 陕西 咸阳 712099)

摘要: 源定位已成为国内外研究的热点问题, 为了在实验室环境下研究移动机器人的趋光性, 对源定位理论方法进行了研究, 设计了地面移动机器人光源定位平台, 通过该平台来验证趋光理论的可行性; 首先, 利用对角线控制策略和梯度自适应极值搜索算法分别进行趋光实验, 完成移动机器人对光源的定位; 其次, 使用 MeanShift 目标跟踪算法跟踪移动机器人的运动轨迹; 最后, 绘制出光源强度分布等值线并分析了移动机器人的运动轨迹; 相比于对角线控制策略, 梯度自适应极值搜索算法根据当前区域梯度值自适应调整反馈增益参数, 提高了源定位效率, 并在光源定位平台验证了该算法的有效性和稳定性。

关键词: 源定位; 趋光性; 极值搜索; 梯度自适应; 等值线绘制

Research on Phototaxis Control Based on Gradient Adaptive Extremum Seeking Algorithm

Cao Muhan¹, Li Changhong^{1,2}, Cao Kai¹, Chen Chaobo¹

(1. Electronic Information Engineering School, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;

2. Northwest Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Xianyang 712099, China)

Abstract: Source seeking become a hot issue at home and abroad, in order to study the phototaxis of mobile robots in the laboratory, research on source seeking theory methods, design a mobile robot platform, verify the feasibility of the phototaxis theory by this platform. Firstly, using diagonal control strategy and gradient adaptive extremum search algorithm, the phototaxis experiments are carried out, respectively, to complete the light source seeking of mobile robot. Secondly, MeanShift target tracking algorithm is used to track the moving trajectory of mobile robot. Finally, draw the contours of light source intensity distribution and analyze the motion trajectory of the mobile robot. Compared with the diagonal control strategy, the gradient adaptive extremum seeking algorithm adjusts the feedback gain parameters according to the current regional gradient value, which improve the efficiency of source seeking, and verify the effectiveness and stability of the algorithm on the platform.

Keywords: source seeking; phototaxis; extremum seeking; gradient adaptive; contour mapping

0 引言

传统固定位置的传感器网络计算定位和移动机器人主动搜索定位是源定位的两种主要方式。基于传统固定位置传感器网络计算定位是通过实时采集的源浓度数据与源的扩散模型相结合, 进行参数迭代求解, 从而得到源参数的后验分布。移动机器人主动搜索定位的思路是利用移动机器人安装相应的传感器形成的具有嗅觉感知的个体, 机器人利用环境信息和源的浓度信息, 采用启发性搜索策略实现源定位。本文采用的源定位方法属于移动机器人主动搜索定位, 系统在开发中依旧存在鲁棒性差和精度低等问题, 使得难以应用到实际场景中。近年来, 对于危险源、气味源等发散性源的定位在国内外已成为研究的热点问题, 也一直是机器人学及智能控制等多种学科研究的热点问题。切尔诺贝利与福岛核泄露事故对生命、财产和环境造成了巨大的破坏, 同时考虑到事件的毒害性、扩散性及不确定

性, 使得在信息匮乏的条件下展开高效的搜索定位工作迫在眉睫。由于光源是常见的源中相对稳定、安全的一种源, 所以研究移动机器人的趋光控制理论对危险源的定位工作有着深刻的意义。

趋光性是一种生物对光靠近或远离的特性, 利用光源模拟危险源, 实现移动机器人的趋光性是一套具有实际意义的源定位理论方法, 而且这种特性也作为探索未知环境的过程得到广泛重视。移动机器人对光源的定位可以被认为是简单的源定位, 将传感器技术与机器人技术相结合, 成为目前研究源定位问题的主要方法。按照时间维度来区分, 可将源划分为时变源和时不变源。时变源主要是源的特性随时间发生变化的源, 比如辐射源、气味源等, 它们的形状、浓度等会随着时间变化而变化。时不变源为特性不随时间变化的源, 比如光源就是一种稳定的时不变源, 它的扩散模型稳定, 并且随着时间的推移光源强度不会发生变化。研究人员对时不变的光源进行定位开发出了不同的方法, 文献 [1-2] 针对移动机器人的自主趋光行为问题, 提出基于神经网络的趋光控制方法, 分别采用 Boltzmann 神经网络和模糊神经网络构建模型, 克服了局部最小, 在提高机器人学习的控制精度的同时, 使机器人在未

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-06。

基金项目: 陕西省国际科技合作基地项目(2017GHJD-009)。

作者简介: 曹牧寒(1995-), 男, 陕西榆林人, 硕士研究生, 主要从事无人系统与智能控制方向的研究。

知环境下通过自主的学习和训练逐渐形成、发展和完善趋光行为技能。文献 [3-4] 利用一组小型移动机器人实现对光源的定位。S. Rounds 等人设计出一个经济且稳定的群体智能系统，以实现移动机器人的趋光性能。该系统将群体智能和重心 Voronoi 镶嵌 (CVT) 法相结合，对动态运动光源进行定位和追踪。在移动机器人根据 CVT 方法运动时，使用一组固定的传感器网络对环境进行监测，同时还提出一种光估计法，用来减少 CVT 收敛所需的传感器数量，使整个系统架构鲁棒性更强。AL Christensen 等人对进化神经网络控制器进行软件仿真，将软件模拟器中进化出来的控制器成功地转移到真正的机器人上，利用一组携带该控制器的 s-bots 移动机器人实现趋光性能与避障行为。文献 [5] 中设计了一种利用四旋翼进行光源追踪的实验装置，对基于非模型的实时优化方法 (极值寻优控制理论) 在四旋翼上得到了实现，结果表明非模型的实时优化方法可以快速地响应信号映射并跟踪光源。

对于一些随时间变化的源，比如气味源、化学源和辐射源等，研究人员也进行了大量的研究工作，按照研究方法可将源定位的研究分为两类：基于概率统计理论方法以及基于最优化理论方法。利用概率方法进行源参数确定主要集中在利用贝叶斯推理进行研究，文献 [6] 通过对大量的采样数据进行气象色谱-质谱仪 (GC/MS) 分析，利用统计归纳方法进行源参数的辨识。然而统计归纳方法需要大量的数据来进行分析，在紧急应对中，由于数据的有限性，使得该方法应用性不高。文献 [7] 将最小相对熵应用到三维空间释放烟羽的重构，该方法考虑模型参数的先验概率密度函数，通过先验估计和测量浓度值得到参数的二次估计，这种方法的优势在于提供了可行的不确定性分析方法。而优化方法只需要提供浓度值即可求解，适用于数据有限的情形，克服了概率统计方法数据有限的缺点。文献 [8] 充分利用了模拟退火法的稳健性，通过质量流量来描述泄漏源。文献 [9] 利用模拟退火算法结合高斯烟羽模型来估计沙漠地区的气源位置和浓度，以找到新的石油和天然气储备。同时他们对不同目标函数进行分析，检验模型的性能，并对观测浓度数据引入噪声，以测试模型的敏感性^[10-13]。

本文利用地面移动机器人对室内光源的定位理论进行研究，为危险源的定位提供理论基础，并建立了一套光源定位平台，包括移动机器人和光源定位系统两部分。移动机器人配备光敏传感器组成具有嗅觉的个体，将梯度自适应极值搜索算法应用于地面移动机器人定位策略中，最后通过绘制等值线及轨迹追踪验证了该算法在光源定位平台的适用性，从而实现在室内环境下光源的准确定位^[14-16]。

1 趋光性方法理论

由于在未知环境中移动机器人相关性能的限制以及传感器技术发展缓慢，导致源定位的方法较为单一，将先进的机器人轨迹规划技术与传感器检测技术结合在一起是目

前源定位的主要策略，主要步骤如图 1。机器人技术和传感器检测技术是源定位中两个重要的部分，其中，传感器作为信息采集系统的基本单元，可以使整个系统具有检测和识别等能力。移动机器人相对于源定位系统来说，传感器将被测量信号的微小变化转化为电信号，与机器人的位置信息一同作为机器人运动控制的输入，使得机器人可以通过环境数据做出决策。另一方面，传感器的数据可作为移动机器人等值线绘制和轨迹追踪的基础，通过算法仿真划分源所在的区域，绘制出源浓度分布，最终实现源定位。

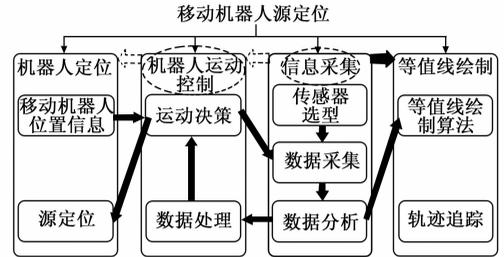


图 1 移动机器人源定位框图

1.1 梯度自适应极值搜索算法

光源模型的建立首先需要确定其目标函数，由传感器网络实时采集光照强度信息和移动机器人位置信息建立，可以预测光源的位置，以及光源处光照强度 I ，因此光源的定位也可以认为是系统辨识问题。机器人模型可描述为：

$$\begin{cases} \dot{x} = v\cos\theta \\ \dot{y} = v\sin\theta \\ \theta = \omega_0 \end{cases} \quad (1)$$

$$c = P/G(\nabla) \quad (2)$$

式中， (x, y) 为机器人的位置， θ 为方向角， ω_0 为机器人的角速度。 P 为常数项， c 为估计反馈增益参数， ∇ 为估计的梯度，梯度通过机器人的历史位置与当前位置的坐标信息进行估计，参数 c 随着估计的梯度自动调整，本文中取 $c = 4$ 。

$$\begin{cases} X = \frac{y_1 i_2 - y_2 i_1}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \\ Y = \frac{x_2 i_1 - x_1 i_2}{x_1 y_2 - x_2 y_1} \end{cases} \quad (3)$$

(x, y) 为机器人通过的历史位置相对于当前的坐标，假设经过两个点的坐标 (x_1, y_1) 、 (x_2, y_2) ， i 为光照强度值，得到向量 (x_1, y_1, i_1) 和 (x_2, y_2, i_2) ，则可确定梯度的大小：

$$\nabla = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad (4)$$

某时间段内移动机器人获取的光照强度为 $I_c(X_1, t_1)$ ， $I_c(X_2, t_2), \dots, I_c(X_n, t_n)$ ，假设目标函数为：

$$\min_{j \in \Delta} q(j) = \min_{j \in \Delta} \sum_{i=1}^n [I_j(X_i, t_i) - I_c(X_i, t_i)]^2 \quad (5)$$

式中， $I_j(X_i, t_i)$ 为机器人在 t_i 时刻的理论光照强度，移动机器人的坐标为 (x, y) ， $I_c(X_i, t_i)$ 为 t_i 时刻 (x, y) 位置处的光照强度， Δ 为 θ 组成的解空间，移动机器人在 n 个位置进行测量。光源的定位问题也可以理解为在解空间 Δ 中找到一个合适

的向量, 来使目标函数的误差变小, 使移动机器人能够快速收敛至光源附近。本文通过安装在移动机器人上的光照度传感器来检测不同位置的光照强度, 计算其梯度大小, 使机器人按照光照强度上升梯度最大的方向搜索光源, 达到无积累误差的效果。这种梯度自适应极值搜索算法对先验信息要求低, 仅需要位置信息及光照强度, 保证了源定位时的效率, 而且在梯度较小时收敛速度加快, 在梯度较大时也可运动到光源处。

1.2 MeanShift 目标跟踪算法

参数密度估计中需要一个已知的概率密度函数, 但在实际问题中并不能确定该特征空间服从哪个概率密度函数, 所以采用无参数密度估计可以更好地解决问题。MeanShift 算法属于无参数密度估计中的一种, 基本原理是利用概率密度梯度爬升寻找样本点密度最大的区域。首先标定目标区域并计算该区域的特征值概率, 然后利用相似函数度量第一帧图片的特征描述, 比较当前帧的与第一帧特征描述的相似性, 最后选取使得相似函数最大的终点区域并得到 MeanShift 向量, 经过不断迭代计算 MeanShift 向量, 算法将收敛到终点区域, 实现了目标跟踪。

首先对目标模型进行描述, 通过人工标注第一帧图片中跟踪的目标区域建立目标模型概率分布, C 为归一化系数, z_i^* 为归一化像素位置, (x_0, y_0) 为选取的目标区域中心点坐标, 本文中核函数 K 用 Epanechnikov 函数:

$$\begin{cases} m_u = C \sum_{i=1}^p K(\|z_i^*\|^2) \delta[b(z_i) - u] \\ z_i^* = \left(\frac{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}{x_0^2 + y_0^2} \right)^{0.5} \\ C = \left(\sum_{i=1}^n K(\|z_i^*\|^2) \right)^{-1} \end{cases} \quad (6)$$

然后对候选模型进行描述, 在第 t 帧时刻根据上一帧中心坐标得到候选目标的中心坐标 O , 则其概率密度分布为:

$$n_u(O) = C \sum_{i=1}^p K\left(\left\|\frac{O - z_i}{h}\right\|^2\right) \delta[b(z_i) - u] \quad (7)$$

h 为核函数窗口大小, 此时, 定义相似性函数 $\rho(m, n)$ 来度量式 (6) 和式 (7) 间的相似度, 本文选用巴氏 (Bhattacharyya) 系数作为目标模型和候选模型的相似性度量, 并泰勒展开后得到巴氏系数表达式:

$$\rho(m, n) = \sum_{u=1}^q \sqrt{m_u(O)n_u} \quad (8)$$

$$\rho(m, n) = \frac{1}{2} \sum_{u=1}^q \sqrt{m_u(O)n_u} + \frac{C}{2} \sum_{i=1}^p \omega_i K\left(\left\|\frac{O - z_i}{h}\right\|^2\right) \quad (9)$$

其中, 特征权重为:

$$\omega_i = \sum_{u=1}^q \sqrt{\frac{n_u}{m_u(O)}} \delta[b(z_i - u)] \quad (10)$$

最后通过中心坐标 O 的迭代直至移动最后两次的距离小于阈值, 即完成向终点区域的移动:

$$O_{k+1} = O_k + \frac{\sum_{i=1}^p \omega_i (O_k - z_i) Z\left(\left\|\frac{O_k - z_i}{h}\right\|^2\right)}{\sum_{i=1}^p \omega_i Z\left(\left\|\frac{O_k - z_i}{h}\right\|^2\right)} \quad (11)$$

2 光源定位平台设计

2.1 硬件系统设计

本文设计了一套自主实验平台, 用于研究在未知环境下移动机器人光源定位的问题, 如图 2 所示。整个实验对光照要求比较高, 要求在仅有实验光源的环境下进行。在实验室中放置一块边长为 1.2 m 的正方形黑色平台, 一方面为了减少实验过程中人为活动对结果造成的误差, 比如眼睛反光等问题。另一方面, 理想情况下光源的呈圆环状分布, 平台搭建为正方形可使得光源分布大致为四分之一圆环状, 便于数据的采集及等值线的绘制。伪 GPS 相机用来监视移动机器人的运动状态和位置, 并将整个实验过程以视频的形式存储在基站中, 作为跟踪移动机器人轨迹的基础。实验中光源采用 12 V LED 可调节光源, 放置在黑色平台右上角空白区域, 在 LED 光源外边增加一个灯罩, 使得光源分布得更加均匀。



图 2 光源定位平台

实验中所设计的具备光源感知能力的移动机器人, 主要负责采集光源强度信息, 自主决策后向光源运动, 最终实现对光源的定位。如图 3 所示, 移动机器人是由微处理器模块、供电模块、光强采集模块、无线通信模块和电机驱动模块组成的差速驱动式运动小车。本研究采用 STM32F103RCT6 作为移动机器人的微处理器, 供电模块为 12 V 电池组, 一方面经过电压转换后为电机驱动模块供电, 另一方面经过降压后为 5 V 的微处理器模块供电。光强采集模块由 4 个光照度传感器构成, 分布在移动机器人上方 4 个顶点处, 负责光源数据的采集。无线通信模块选用 ESP8266 WIFI 模块, 将光源数据传送至基站, 作为绘制光源等值线的数据。电机驱动模块由步进电机驱动, 通过比例控制 PWM 脉冲频率, 实现对移动机器人的运动速度的控制, 通过两轮差速控制移动机器人的运动方向。

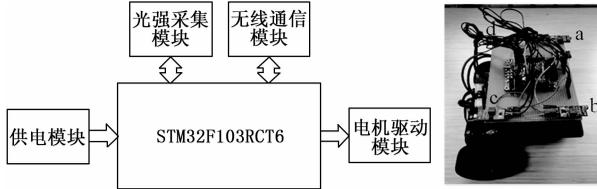


图 3 实验硬件系统结构图及移动机器人

2.2 软件系统设计

软件系统设计主要体现在光强信息采集模块，该模块由 4 个光照度传感器构成，以车头方向为正方向，左前方传感器的编号为 a，沿顺时针方向传感器的编号分别为 b，c，d，采用对角线控制策略，将移动机器人检测到环境中的光照信息进行运算并做出决策。本文提出的对角线控制策略如图 4 所示，该控制策略主要实现光强信息的采集，分析计算光照强度的变化，并引导移动机器人做出动作决策。计算光强采集模块中两条对角线光照强度的差值来判断光源大致的位置，从而调整移动机器人的位置及朝向，经过多次迭代计算得到光源所在的位置，并使移动机器人移动到光源附近。

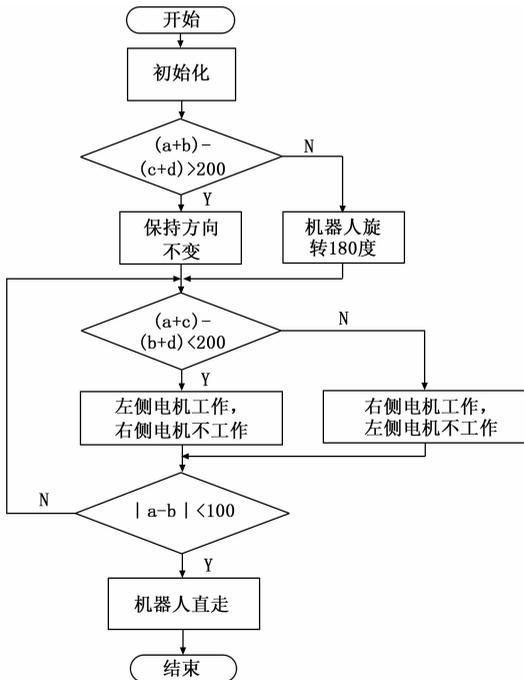


图 4 对角线控制策略程序流程图

3 趋光实验及仿真

3.1 移动机器人的趋光实验

在配备有伪 GPS 相机的实验室环境下，利用梯度自适应极值搜索算法进行移动机器人的趋光性实验。在黑色区域内建立 7×7 的正方形网格地图，光源固定在平台一角的空白区域，为更好地验证梯度自适应极值搜索算法在光源定位平台的有效性，将移动机器人放置在与光源相对的区域，随机给定机器人一个位置坐标，并设置机器人的初始

方向，记录该起始位置的坐标信息和光强度信息。同时为了避免外界光源及人为因素的干扰，实验需要在仅有 LED 光源的情况下进行。图 5 中分别为两种搜索方法的趋光性进展，相同地，在初始状态下，移动机器人未接通电源，处于静止状态。在运动中期，通过对光照强度的实时检测并做出决策，移动机器人开始向着梯度较大的方向移动，但是并未朝着光源作直线运动。在运动末期，由于在光源附近光照强度的波动较小，基本维持在一定的范围内，所以移动机器人按着近似于直线运动向光源移动。此时梯度减小，收敛速度相比于运动中期时的收敛速度慢，但是基本可以确定光源所在位置，使得移动机器人移动至光源附近。



(a) 对角线控制策略下趋光过程



(b) 梯度自适应极值搜索算法下趋光过程

图 5 移动机器人趋光性实验

3.2 运动轨迹及等值线的仿真

3.2.1 目标跟踪

本文在 Matlab 中利用 MeanShift 算法来跟踪移动机器人的轨迹，图中左上角为 LED 光源位置，移动机器人从右下角开始搜索。首先获取视频帧图像，通过人工标定的方法选取移动机器人作为目标区域，确定中心点的坐标 (x_0, y_0) 。若不是视频初始帧，则以上一帧图像中心位置为当前帧目标的迭代位置来构建候选模型。然后计算 Bhattacharyya 系数 $\rho(m, n)$ 来衡量两个模型的相似程度，若当前帧与上一帧中心坐标的距离小于阈值，则迭代结束，最后输出当前帧的坐标。

3.2.2 等值线绘制

以往的等值线绘制算法主要有 3 种，一种是基于传感器网络监测的方法，该算法事先预设好若干传感器，将监测到的数据发送回基站经算法处理后绘制出等值线。另一种是基于移动机器人搜索的算法，利用搭载特定传感器的移动机器人进行数据的采集，对数据分析后做出决策，使机器人按照某一轨迹运动。第 3 种是数据信息采集后，通过绘图软件直接进行等值线的绘制。本研究受第 2 种方法启发，采用一种简单高效的等值线绘制算法。在趋光实验平台中建立一组实用的网格地图，以光源位置相对一角为原点建立坐标系，控制移动机器人做直线运动。采集多组

数据并进行数据筛选, 舍去有数据缺失或是波动幅度过大的数据, 并记录光照强度相同的机器人的位置信息, 然后通过光照强度反算得到近似的函数, 最后绘制出的等值线如图 6 所示。

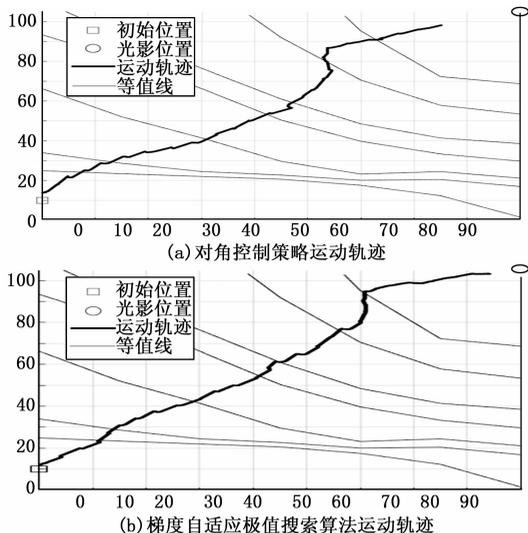


图 6 等值线绘制及机器人运动轨迹

实验中分别在黑色实验平台内部建立 4×4 、 7×7 的正方形网格, 保持机器人方向不变, 使得机器人沿着网格线运动, 按照直线运动采集光照信息。通过测量数据对比发现利用 7×7 网格绘制的等值线更接近于理想的等值线。如图 6 (a), 移动机器人根据本文设定的对角线控制策略进行搜索, 通过对采集到的光照强度进行对角做差, 使机器人在运动的过程中不断调整其运动方向, 最终收敛至光源附近。基于梯度自适应极值搜索算法的移动机器人运动轨迹如图 6 (b), 本研究中自适应参数 $c = 4$, 可以看出移动机器人在光照强度相对较小时可迅速做出判断, 能够更快速地定位光源, 并收敛在光源附近。

3.2.3 结果分析

选取其中 10 组数据进行比较, 分别从趋光过程用时、移动机器人与光源的距离两个方面来比较。如图 7 (a) 所示, 应用对角线控制策略定位用时约为 25 s, 基于梯度自适应极值搜索算法定位约为 16 s。图 7 (b) 为移动机器人趋光停止时与光源之间的距离, 图 7 (c) 为移动机器人在整个搜索定位过程中到光源的距离随时间的变化曲线。在应用对角线控制策略时, 移动机器人到达光源的整个过程用时较长, 并且在距离光源约 16 cm 处停止。虽然完成了光源的定位, 但是并没能准确地到达光源, 存在一定的误差。而基于梯度自适应极值搜索算法在定位光源的过程中, 移动机器人的运行轨迹更加平稳, 而且可搜索至距离光源约 5 cm 处。

分析得出, 在进行移动机器人趋光性实验时, 对角线控制策略的鲁棒性较差, 定位效率及精度较低。而利用梯度自适应极值搜索算法不仅提高了源定位效率, 同时一定程度上提高了定位精度, 使得移动机器人的定位性能更好, 在实际应用中可以更好地完成源定位工作。

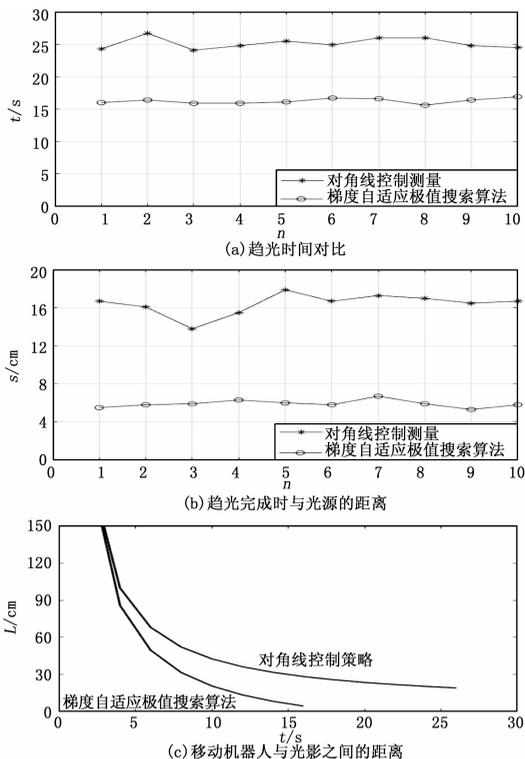


图 7 移动机器人趋光结果比较

4 结论

本文模拟危险源定位工作, 介绍了移动机器人光源定位研究的硬件平台搭建, 并设计实验验证了该平台的适用性, 将梯度自适应极值搜索算法与移动机器人的趋光性相结合, 通过 MeanShift 目标跟踪算法和等值线绘制对光照强度分布及移动机器人的运动轨迹进行分析, 结果表明光源梯度自适应极值搜索算法提高了移动机器人的光源定位的效率, 并且可提高定位精度, 验证了梯度自适应极值搜索算法在本实验平台的有效性。实验过程中由于移动机器人采集的位置信息和光照信息存在数据缺失, 导致绘制等值线时出现波动幅度较大, 如何提高梯度自适应极值搜索算法的稳定性并进行动态等值线绘制是下一步研究内容。

参考文献:

- [1] 阮晓钢, 庞涛, 于建均. 基于 Boltzmann 神经网络认知机制的机器人趋光控制 [J]. 控制与决策, 2014 (12): 2189-2194.
- [2] Xiaogang R, Pang T, Zhang X, et al. Research on the autonomous phototaxis behavior of a robot based on emotion intelligence [J]. Caa Transactions on Intelligent Systems, 2015.
- [3] Rounds S, Chen Y Q. Cooperative phototaxis using networked mobile sensors and centroidal voronoi tessellations [J]. 2009: 3274-3279.
- [4] Christensen A L, Dorigo M. Evolving an integrated phototaxis and hole-avoidance behavior for a swarm-bot [Z]. 2006: 248-254.