

融合 RFID 相位与激光的快速动态目标定位

付余路, 张 华, 刘 冉, 梁高丽, 何 静, 张红阳, 肖宇峰

(西南科技大学 信息工程学院, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 射频识别(RFID)技术利用无线射频信号对标签进行自动识别,在识别过程中无需目标在视野内,能够克服基于条形码或图像识别目标的局限性。为此,研究动态目标的快速定位,利用 RFID 获得的相位信息融合激光实现目标的快速定位。将 RFID 标签绑定在动态目标上,通过 RFID 信号获得的相位信息估算目标的速度。在此基础上,利用激光传感器获取目标的速度、角度以及距离等运动信息,并将通过 RFID 相位得到的目标速度与激光获取的目标速度进行匹配,选择两者速度最优匹配点,再根据对应的激光的角度和距离信息确定目标的位置。实验结果表明,该方法可有效提高定位精度。

关键词: 射频识别相位;激光;速度匹配;最优匹配点;动态目标定位

中文引用格式: 付余路,张 华,刘 冉,等. 融合 RFID 相位与激光的快速动态目标定位[J]. 计算机工程,2018,44(8):308-314.

英文引用格式: FU Yulu, ZHANG Hua, LIU Ran, et al. Fast dynamic object localization fusing with RFID phase and laser[J]. Computer Engineering, 2018, 44(8): 308-314.

Fast Dynamic Object Localization Fusing with RFID Phase and Laser

FU Yulu, ZHANG Hua, LIU Ran, LIANG Gaoli, HE Jing, ZHANG Hongyang, XIAO Yufeng

(School of Information Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

[Abstract] Radio Frequency Identification (RFID) technology uses radio signals to identify tags automatically. The recognition does not need objects to be in line of sight, which can overcome the limitation of the traditional bar-code or visual-based approaches. So this paper focuses on a fast approach for dynamic object localization based on the fusion of the RFID phase and the laser information. To be precise, it achieves the velocity estimation of an object attached with an RFID tag by the phase difference. On this basis, it uses a laser range finder to estimate speed, angle and distance of the obstacles. Then it selects the best match point between RFID velocity and laser velocity, which is used to determine the location of the object. Finally, it achieves the localization of dynamic objects based on the angle and distance information of laser. Experimental results show that the proposed method can effectively improve the accuracy of localization.

[Key words] Radio Frequency Identification (RFID) phase; laser; speed match; the best match point; dynamic object localization

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0047499

0 概述

随着物联网技术的发展,射频识别(Radio Frequency Identification, RFID)和激光作为物联网的关键技术也逐渐成为目前的研究热点之一。RFID 具有非接触、非视距等优点^[1],工作频段分为低频、高频、超高频,最长的识别距离可达到数米^[2]。相对于利用视觉进行目标的定位,RFID 具有唯一的 ID,并且不需要与目标接触,可直接通过信号强度估算出标

签的距离。此外,RFID 阅读器可通过检测 RFID 天线发射的多个载波信号所返回的相位测算距离^[3]。将传统测距与 RFID 相位结合,可推导出同一目标的 RFID 相位与其本身的运动速度存在着一定的关系。

目前关于 RFID 定位的研究主要是在已建好的信号传播模型内进行目标标签的定位。文献[2]通过构造 RFID 天线的传感器概率模型,实现了对被动式 RFID 标签的定位。文献[4-6]实现了基于 RFID

基金项目: 国家自然科学基金(61601381, 61471306, 61701421); 国家核能开发科研项目([2016]1295); 西南科技大学研究生创新基金(18ycx117)。

作者简介: 付余路(1991—),女,硕士研究生,主研方向为机器人定位、RFID 技术;张 华,教授、博士;刘 冉(通信作者),副研究员、博士后;梁高丽、何 静、张红阳,硕士研究生;肖宇峰,副研究员、博士。

收稿日期: 2017-06-07 **修回日期:** 2017-08-30 **E-mail:** ran.liu.86@hotmail.com

的室内定位系统 LANDMARC,其定位精度可达到厘米级别,但需要多个天线进行相位检测。在三维定位方面,文献[7]使用三维传感器模型和立体 RFID 标签进行定位,文献[8]利用旋转天线获取不同角度的信号强度,融合视觉和三维激光获取的图像进行标签定位。此外,文献[9]通过相控阵天线改变天线单元间的相位差得到标签与天线间的方向角,再通过信号强度得到待测标签的距离,从而定位标签。为进一步提高 RFID 定位精度,一些学者通过信息融合^[10]实现精确定位。

目前,利用 RFID 标签进行定位的研究主要面向静态 RFID 标签,对动态标签的定位研究较少,且 RFID 不能直接提供目标的距离信息。激光传感器是利用激光测量距离的传感器,其具有非接触、远距离测量、速度快、精度高等优点^[11],可直接获得目标的距离以及相对于激光的角度信息,但不能直接识别目标。本文根据 RFID 相位差信息估算目标的运动速度,结合激光获取到的目标运动信息对两者的速度进行匹配,并选择最优匹配点确定运动目标的位置,从而实现快速精确定位。

1 系统描述

传统的 RFID 定位主要利用获得的信号强度信息进行定位,但是由于信号强度易受环境的影响以及射频信号在传播过程中存在多径效应等原因,致使定位精度不高。另外,传统的 RFID 标签定位主要用于静态目标,较少针对动态目标的跟踪和定位。为提高定位精度和效率,本文利用 RFID 阅读器获得的相位差信息估算运动目标的速度,再结合激光获取目标的运动信息,对两者的速度信息进行匹配,选择速度匹配最优的点,获得激光对应的距离和角度,通过激光传感器建立一个坐标系,从而实现动态目标的快速精确定位。本文方法的基本过程如图 1 所示。

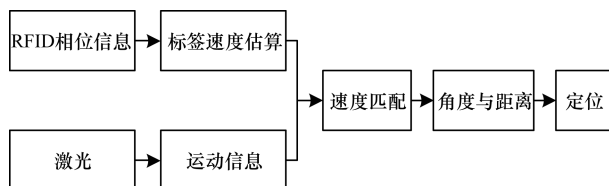


图1 RFID 相位差融合激光定位过程

2 基于速度匹配的快速目标定位

2.1 RFID 工作原理

RFID 通过无线电射频信号传输数据,从而进行非接触式自动识别。RFID 基本工作系统包括阅读

器、标签、天线、计算机。其中:阅读器是控制天线与 RFID 标签进行通信的设备;RFID 标签是存储需要识别的目标 ID 和其他相关信息的芯片,其内部具有发送和接收信号的电路;RFID 天线是发送和接收射频载波信号的设备;计算机主要作用是管理和传输阅读器获得的标签信息^[12]。

RFID 系统工作过程为:终端运行相关的程序启动阅读器,利用阅读器设定阅读器的功率和效率,RFID 天线磁场内的无源 RFID 标签接收到信号,从中获取能量并激活将自身信息发射出去,天线接收到标签返回的信息同时将此信息传给阅读器,阅读器将获得的 RFID 信息反馈给终端,便于终端进行数据处理。

在理想情况下,阅读器向标签发送的载波信号,其时间波形表达式为:

$$S(t) = A \cos(2\pi ft + \theta) \quad (1)$$

其中, A 为载波信号的振幅, θ 为载波信号的相位, f 为射频载波的频率,频率和波长之间的关系式为 $\lambda = c/f$, c 在空气中等于光速(3×10^8 m/s)。

射频信号的相位是一个周期为 2π 的周期函数^[13],通常测量相位的计算公式为:

$$\theta = 2\pi(d/\lambda) \bmod(2\pi) \quad (2)$$

其中, d 为天线到标签的距离。

在 RFID 工作系统中,标签通过反向散射的方式返回信息,如图 2 所示。其中,阅读器和标签之间的信号传输的总距离为 $2d$ 。

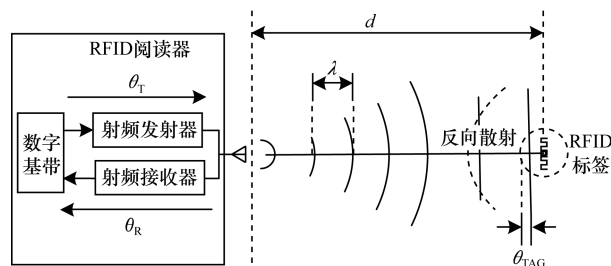


图2 RFID 阅读器与标签无线电波传播示意图

除了距离引起的射频信号相位旋转之外,阅读器发射端、接收端以及标签的发射特性都存在一定的相位旋转^[14],分别记为 θ_T 、 θ_R 、 θ_{Tag} 。因此,总相位可表示为:

$$\theta = 2\pi(2d/\lambda) + \theta_T + \theta_R + \theta_{Tag} \quad (3)$$

2.2 激光传感器

激光传感器由激光发射器、激光反射探测器以及内部测量电路构成。本文利用激光的3个特性,即高方向性、高单色性和高亮度等特点实现无接触远距离测量^[15],其工作原理为:由激光器向目标发射一束激光,发射出的激光经目标反射后向各个方

向散射,部分激光被传感器的检测器接收到,并记录和处理激光发射和接收所用的往返时间,即可计算出目标距离,也可利用激光传感器对移动目标进行测速。首先,对被测目标进行 2 次有特定时间间隔的激光测距,取得在该时间间隔内被测目标的移动距离^[16-17],从而得到被测目标的移动速度。

在使用激光进行定位时,由于激光可以提供精确的距离信息,因此再根据接收激光的角度,可以确定物体相对于激光发射器的位置。但激光无法直接对目标进行识别,往往需要事先控制激光获取周围的环境信息进行建模型。之后使用复杂的算法进行识别,需要一定的准备和运算时间。

2.3 速度估算

2.3.1 RFID 相位估算速度

若一个标签以速度 V_r 径向移动到阅读器天线,阅读器反复地通过接收到的 EPC 包识别标签。假设阅读器在相邻时间连续接收到 2 个 EPC 包,令阅读器检测到标签的时间和相位分别为 (t_i, θ_i) 和 (t_{i+1}, θ_{i+1}) 。因此,可根据时间差估算出标签径向移动的距离:

$$d = V_r \cdot (t_{i+1} - t_i) \quad (4)$$

同时,利用相位差估算出标签径向移动的距离:

$$d = (1/4\pi) \cdot (\theta_{i+1} - \theta_i) \cdot \lambda \quad (5)$$

由于标签是反向散射信号同时传播下行链路和上行链路,使得传输距离应为 $2d$ 。由式(4)和式(5)转换为:

$$2V_r \cdot (t_{i+1} - t_i) = (1/2\pi) \cdot (\theta_{i+1} - \theta_i) \cdot \lambda \quad (6)$$

因此可推导出速度的表达式为:

$$V_r = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{t_{i+1} - t_i} \cdot \lambda = \frac{c}{4\pi f} \cdot \frac{\theta_{i+1} - \theta_i}{t_{i+1} - t_i} \quad (7)$$

值得注意的是,标签的移动距离 d 应小于波长的一半,即 $d < \frac{1}{2}\lambda$ 。

2.3.2 基于激光的速度估算

激光传感器工作时发射出非常短的光脉冲,同时启动“电子秒表”,当光线接触到物体时,光线会反射回来并被激光传感器接收,同时停止计时,利用发射到接收的时间间隔便可计算出物体到激光传感器的距离^[14]。

假设激光传感器发射出 2 帧激光束,一帧激光束开始进行扫描,扫描期间记录下激光相应角度 φ 下的物体距离 S_i^φ 和时间 t_i 。上一帧激光束扫描完后,下一帧激光束开始扫描,并记录同一物体在相同角度 φ 下的距离 S_{i+1}^φ 和时间 t_{i+1} 。由此可估算出物体的速度为:

$$V_i^\varphi = \frac{S_{i+1}^\varphi - S_i^\varphi}{t_{i+1} - t_i} \quad (8)$$

此外,可根据激光相应的扫描角度,大致估算出物体相对于激光传感器的方位。

激光传感器扫描物体的速度很快,在进行扫描测速时会存在许多的毛刺点,使获取到的数据不准确。为提高激光测速的精确性,采用指数平滑的方法,平滑激光传感器测试到的速度。指数平滑法通过引入一个加权因子 α ,利用加权因子逐渐减弱影响程度。将激光传感器实时测到的速度 V_i^φ 进行平滑,则平滑后的速度为:

$$V_i^\varphi = \alpha V_i^\varphi + (1 - \alpha) V_{i-1}^\varphi \quad (9)$$

其中, α 为平滑指数, $0 < \alpha < 1$ 。

2.4 速度匹配

因为 RFID 相位是一个周期为 2π 的周期函数,容易出现相位模糊的问题,所以会使所测得相位差存在较大的误差,进而使 RFID 相位差估算的速度不准确。为使阅读器相位差测速更加精确,在利用 RFID 相位差测速之前,需要对 RFID 相位差进行简单的处理。在实验测试时,发现有时 RFID 前后时刻的相位差值会猛然变大,而对于同一目标在前后时刻相位差值是不会超过 $\pm 90^\circ$ 的。因此,为克服相位模糊,当相位差值在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 之间时,利用该相位差进行速度的估算得到 V_r ,否则将速度设为 0。

另一方面,激光传感器扫描估算的速度是与激光扫描的角度一一对应的,即每一个速度对应一个角度。同时激光传感器会记录一个相应的扫描距离,便于观察物体。

综上所述,已知阅读器 RFID 相位进行估算运动目标的速度 V_r ,通过指数平滑法后的激光传感器估算速度 V_r^φ 。如果 RFID 和激光传感器检测到的物体是同一物体时,则两者在同一时刻检测的速度应该相等或者差值很小。因此,在进行匹配前可将两者测到的速度进行相减,其速度差可表示为:

$$V_d^\varphi = |V_r^\varphi - V_r| \quad (10)$$

因为 RFID 标签是具有唯一 ID 的,所以可直接通过 RFID 阅读器读取到标签的 ID 号,并利用相位差估算出该标签的运动速度,再与激光传感器检测到的速度进行匹配,而最优的匹配点对应的激光扫描角度和距离,就可确定该标签的位置,从而实现对动态目标快速精确的定位。

在进行速度匹配时,为选择出最优的速度匹配点,可将同一时刻平滑后的激光估算速度和 RFID 相位差估算的速度差进行比较,选择出其中的最小值

$\hat{V}_{\min}$,并记录下对应的扫描角度 $\hat{\varphi}$ 。相对应的激光扫描角度为:

$$\hat{\varphi} = \arg \min_{\varphi} V_d^{\varphi} \quad (11)$$

当 RFID 估算的速度与激光传感估算的速度匹配时,便可确定激光扫描和 RFID 检测到的移动物体为同一物体,并能通过 RFID 的 EPC 确定该目标的 ID 号,另外利用激光传感器的对应的扫描角度 $\hat{\varphi}$ 可确定相应的扫描距离 $\hat{d}$,便于确定目标的位置达到精确的定位。

本文通过 RFID 相位差估算速度,同时结合激光的角度和距离信息估算速度,将 2 个速度进行匹配,再根据匹配点对应的激光距离和角度信息来确定目标的位置,从而实现对动态目标的准确定位。若单独使用 RFID 定位,由于 RFID 无法直接提供目标的距离信息,为了获得目标的距离,通常需要对 RFID 的信号强度建立传输模型后再进行定位。若仅使用激光进行定位,激光可直接提供距离和角度信息,但无法直接识别目标,若要识别目标需先建模型,再使用复杂的算法识别目标。若将两者的信息进行融合,一方面利用 RFID 提供的唯一识别码,再结合激光直接获取的距离和角度信息,通过速度匹配后,确定动态目标的位置;另一方面,在实验过程中,既不需要对 RFID 建传播模型,也不需要利用激光获取周围的环境信息进行建图,且只需要激光的角度和距离信息而无需复杂的算法,处理过程简单快捷。

3 实验验证

3.1 实验环境

本文采用德国 Metralabs 公司的 SCITOS G5 服务机器人进行验证。该机器人已配置了一个激光传感器(SICK S300)和一个型号为 Impinj Speedway Revolution R420 的 RFID 超高频射频识别阅读器。此外,RFID 阅读器连接着一个 Lairs Technologies SS8688P 圆极化天线,此天线可提供最大识别范围为 7 m,阅读器最小的接收信号强度为 -80 dBm。使用的标签型号为 Alien Technology Squiggle,阅读器可读取到标签的信号强度和相位信息。在实验中,RFID 阅读器选用 Dense Reader Mode 8 (DRM8) 模式,阅读器发射功率为 32.5 dBm,通道采用 16 通道,即载波发射频率为 924.375 MHz。

在实验阶段,SCITOS G5 服务机器人固定不动,实验人员佩戴有 RFID 标签,并在 RFID 与激光扫描区域内移动。为方便验证实验的正确性,设定实验

人员在扫描范围内运动轨迹为一个 $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 的正方形,机器人距正方形起点 1.2 m 处,每次测试时实验人员携带标签在规定的路径上移动,图 3 显示了机器人与路径的位置关系。当激光传感器的速度平滑指数设置为 $\alpha = 0.2$ 时,实验人员沿着如图 3 所示的正方形路径移动 3 圈。



图 3 机器人与路径的位置关系

图 4 显示了人行走的真实路径与本文提出的速度匹配算法所估计的路径。从中可以看出,采用速度匹配后的运动路径与实验真实的运动路径基本吻合。由于实验人员在运动时存在背对 RFID 天线移动的情况,因此导致 RFID 阅读器检测到的信号较弱,从而使某一边上速度匹配的点较少。实验人员在天线附近运动时,因为 RFID 阅读器检测到的信号较强,使得速度匹配上的点更多,所以定位也更准确。

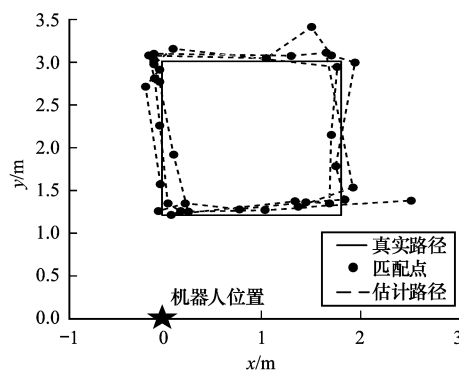


图 4 真实路径与速度匹配算法的估算路径 ($\alpha = 0.2$)

当激光定位失效时,无法获取到有用的激光测量信息,此时若激光估算出一个错误的速度,再与 RFID 估算的速度进行速度匹配,得到一个错误的匹配点,会导致实验中某些情况的定位误差较大。

若激光估算速度与 RFID 估算速度无法实现匹配时,可根据动态目标前一时刻的匹配点和下一时刻的匹配点估计动态目标的运动路径,实现对目标的准确定位。

3.2 平滑指数的影响

由于激光传感器估算的速度需要进行平滑,平滑指数的选取直接影响到平滑后的速度值。因此,合理

确定 α 的取值极为关键。为了确定 α 的取值,分别取 $\alpha = 0.05, \alpha = 0.20, \alpha = 0.40, \alpha = 0.60, \alpha = 1.00$, 观察在相似运动条件、不同平滑指数情况下的速度匹配点和运动轨迹,结果如图 5 所示,对应的匹配点数量和平均误差如表 1 所示。进行 3 组实验,每一组都是走相同的路径,走了同样的次数,对比每组实验在不同平滑指数下的定位误差,结果如图 6 所示。

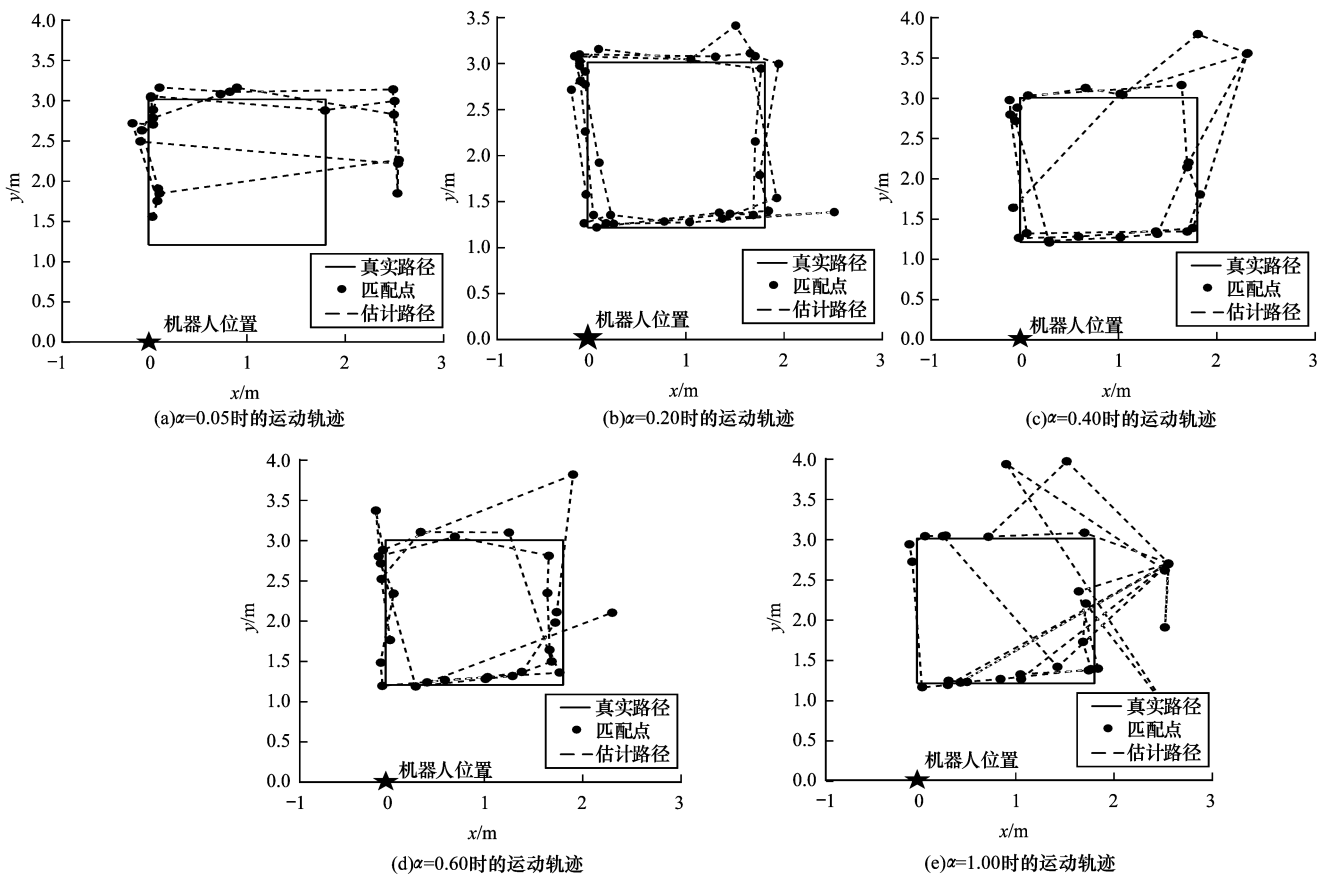


图 5 不同平滑指数的速度匹配点与运动轨迹

表 1 不同平滑指数的匹配点数量与定位误差

α	匹配点个数	平均定位误差/m
0.05	23	1.244
0.20	36	0.513
0.40	40	1.217
0.60	46	1.689
1.00	55	2.237

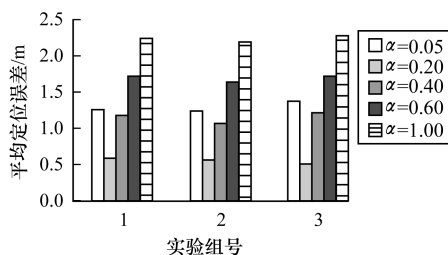


图 6 不同平滑指数情况下的平均定位误差

由图 5 可见,在相似的运动环境下,速度匹配点明显受到平滑指数影响。在相同的运动次数下, $\alpha = 0.20$ 时环境噪声明显少于 $\alpha = 0.40, \alpha = 0.60$ 以及 $\alpha = 1.00$ 。当 $\alpha = 1.00$ 时,实质上是未对激光测得的速度进行平滑,此时测得的运动路径与真实路径相差甚大。图 6 显示了不同平滑指数的平均误差,从中可知,在 $\alpha = 0.20$ 时误差为 0.5 m,在其余平滑指数下误差较大,而在平滑指数很小时,实验的误差又逐渐变大,所以选择合理的平滑指数是提高精确度必不可少的条件。结合表 1、图 5 以及图 6 可知:当平滑指数很小时,会对激光测得的速度过度平滑,使得匹配上的点数变少,且使匹配的准确度变低;当平滑指数较小时,噪声少但激光对速度的检测灵敏度较低;当平滑指数较大时,速度匹配点多但噪声大,致使定位精度较低。根据图 6 所示实验数据,在

本文中激光速度平滑的平滑指数选用 0.20 时达到最佳定位精度, 在其他应用环境中可根据实际情况选择平滑指数, 以达到最佳定位精度。

3.3 扰动对定位的影响

为了验证环境噪声对本文算法的影响, 在将 2 个

数据进行融合前, 在激光和 RFID 估算速度时分别加入一个期望为 0、方差为 1、幅度为 0.5 的高斯白噪声进行测试。加入噪声后不同的平滑指数情况下的速度匹配点和运动轨迹如图 7 所示, 对应的匹配点数量和平均误差如表 2 所示。

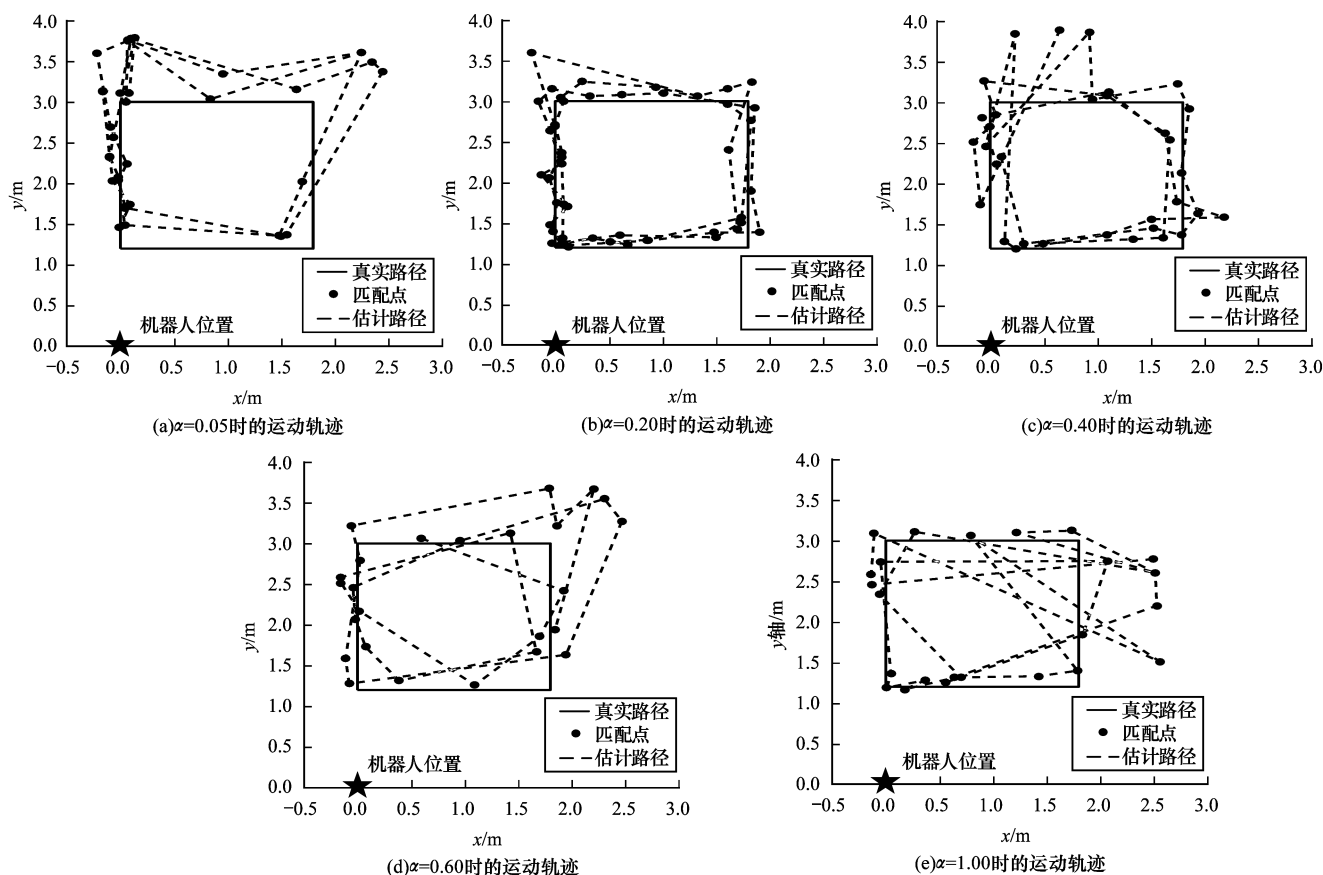


图 7 加入噪声后不同平滑指数的速度匹配点与运行轨迹

表 2 加入噪声后不同平滑指数的匹配点数量与定位误差

α	匹配点个数	平均定位误差/m
0.05	33	1.372
0.20	48	0.607
0.40	53	1.499
0.60	58	1.877
1.00	65	2.335

由图 7 可知, 加入噪声后采用速度匹配得到的估计路径与真实路径基本一致, 只是匹配点相对于未加入噪声时数量有所增加。结合表 2 和图 7 可知, 加入噪声后不同平滑指数对应的匹配点普遍增多, 由于加入了随机噪声其误差相对于未加入噪声时有所增大。当 $\alpha = 0.20$ 时, 加入随机噪声的平均定位误差为 0.6 m, 只比未加入噪声时的平均定位误差增大了 0.1 m, 由此可知整个系统具有较好的抗噪声性能。

4 结束语

本文提出一种快速动态目标定位方法, 通过融合 RFID 相位差信息和激光来实现动态目标的快速定位。该方法克服了 RFID 信号强度易受环境影响的问题, 利用 RFID 相位信息对动态目标进行速度估算, 并融合激光传感器获取动态目标的运动信息, 对 RFID 相位差估算的速度与激光获得的速度进行匹配, 根据最优匹配点对应的激光距离和角度确定目标的位置。实验结果表明, 本文方法能够实现对动态目标的准确定位。但在复杂的室内环境下, 激光传感器可能检测到多个与 RFID 相位差速度相似的移动物体, 直接影响定位效果。因此, 下一步将通过改进速度匹配算法或融合 RFID 信号强度等信息, 实现对多个动态目标的追踪和定位。

参考文献

- [1] 刘天祎. 基于 RFID 的室内定位系统研究[J]. 智能计算机与应用, 2016, 6(2): 20-22.
- [2] HÄHNEL D, BURGARD W, FOX D, et al. Mapping and localization with RFID technology [C]//Proceedings of 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2004: 1015-1020.
- [3] LIU R, KOCH A, ZELL A. Path following with passive UHF RFID received signal strength in unknown environments [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 2250-2255.
- [4] NI L M, LIU Y, LAU Y C, et al. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID [J]. Wireless Networks, 2004, 10(6): 701-710.
- [5] LIU R, HUSKIC G, ZELL A. Dynamic objects tracking with a mobile robot using passive UHF RFID tags [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 4247-4252.
- [6] YANG L, GUO Y, LIU T, et al. Perceiving the slightest tag motion beyond localization [J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2015, 14(11): 2363-2375.
- [7] LIU R, KOCH A, ZELL A. Mapping UHF RFID tags with a mobile robot using a 3D sensor model [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2013: 1589-1594.
- [8] DEYLE T, REYNOLDS M S, KEMP C C. Finding and navigating to household objects with UHF RFID tags by optimizing RF signal strength [C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 2579-2586.
- [9] 鲍天翼. 基于旋转天线的 RFID 定位算法和仿真分析[J]. 电子世界, 2016, 38(6): 68-69.
- [10] HAN J, DING H, QIAN C, et al. CBID: a customer behavior identification system using passive tags [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols. Washington D. C., USA: IEEE Press, 2014: 47-58.
- [11] 任春明, 张建勋. 基于激光传感器的机器人地图构建方法[J]. 光电工程, 2008, 35(8): 83-87.
- [12] 谢磊, 殷亚凤, 陈曦, 等. RFID 数据管理: 算法、协议与性能评测[J]. 计算机学报, 2013, 36(3): 457-470.
- [13] LI X, ZHANG Y, MARSIC I, et al. Online people tracking and identification with RFID and Kinect [EB/OL]. [2017-05-10]. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1702/1702.03824.pdf>.
- [14] LIU R, HUSKIC G, ZELL A. On tracking dynamic objects with long range passive UHF RFID using a mobile robot [J]. International Journal of Distributed Sensor Networks, 2015, 2015: 1-12.
- [15] 周俊静. 基于激光雷达的智能车辆目标识别与跟踪关键技术研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2014.
- [16] 姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 234-240.
- [17] 王广奇. 基于 RFID 和激光传感器的语义地图更新及机器人定位方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- (上接第 307 页)
- [4] CAMPBELL S F. Steering control of an autonomous ground vehicle with application to the DARPA urban challenge [D]. Cambridge, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2005.
- [5] 姜岩, 赵熙俊, 龚建伟, 等. 简单城市环境下地面无人驾驶系统的设计研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 103-112.
- [6] 王本超. 电动汽车纵向速率跟踪控制的方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 何杰, 王家军. 基于 SVPWM 的永磁同步电机系统建模与仿真[J]. 机电工程, 2009, 26(7): 77-82.
- [8] 刘长建. 无离合器电动汽车 PMSM 速度模糊 PI 自适应控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- [9] 江庆坤. 智能汽车避障危险评估和轨迹规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [10] 姜岩, 王琦, 龚建伟, 等. 无人驾驶车辆局部路径规划的时间一致性与鲁棒性研究[J]. 自动化学报, 2015, 41(3): 518-527.
- [11] LIN C, RAD A B, CHAN B, et al. An intelligent longitudinal controller for application in semiautonomous vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 54(7): 1487-1497.
- [12] 兰韵, 刘万伟, 董威, 等. 无人驾驶汽车决策系统的规则描述与代码生成方法[J]. 计算机工程与科学, 2015, 37(8): 1510-1516.
- [13] CHEEWAPATTANANUWONG W, TANEERANANON P, NAKATSUJI T. Mitigating traffic congestion and accidents in thailand with intelligent transportation system technology [J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2011, 2239: 41-55.
- [14] 辛煜, 梁华为, 梅涛, 等. 基于激光传感器的无人驾驶汽车动态障碍物检测及表示方法[J]. 机器人, 2014, 36(6): 654-661.
- [15] 刘凯. 无人驾驶车辆体系结构与定位导航技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2010.
- [16] FAOUZI N E E, LEUNG H, KURIAN A. Data fusion in intelligent transportation systems: progress and challenges: a survey [J]. Information Fusion, 2011, 12(1): 4-10.

编辑 金胡考

编辑 金胡考