

文章编号:1004-9037(2014)04-0648-06

基于毫米波雷达和 CCD 摄像机信息的 D-S 融合方法

骆云志 雷雨能 王 钤

(中国兵器工业第五八研究所军品部,绵阳,621000)

摘要:研究了毫米波雷达和 CCD 摄像机两种传感器信息的 D-S 融合方法,论述了毫米波雷达信息采集、滤波、计算障碍物的距离和方位及判别障碍物是否在无人地面平台 ROI(Region of interested)内;CCD 摄像机的信息处理、分割和障碍物的宽度、高度和方位角的计算。通过建立坐标系和坐标系间的齐次变换实现其空间配准。按 D-S 融合方法首先建立障碍物鉴别框架,通过实验确定它们对应于鉴别框架中障碍物指数的基本概率分配值,再根据 D-S 证据方法的组合规则计算所有证据联合作用下的融合结果,得到障碍物在无人地面平台 ROI 内的距离、方位和大小。在无人地面平台 ROI 内进行验证,本文的研究成果可行,并且具有较好的鲁棒性。

关键词:毫米波雷达;CCD 摄像机;空时匹配;D-S 融合;无人地面平台;障碍物识别

中图分类号:TP242.6

文献标志码:A

D-S Fusion Method of Millimeter Wave Radar and CCD Camera

Luo Yunzhi, Lei Yuneng, Wang Qian

(Department of Armament Product, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang, 621000, China)

Abstract: The sensor information D-S fusion method of millimeter wave radar and CCD camera is researched. This paper discusses information collection and segmentation of millimeter wave radar, computing the distance and orientation of the obstacle, judging whether the obstacle is in region of interested(ROI) of unmanned ground platform or not, information collection and segmentation of CCD camera, and calculation of width, height and azimuths of obstacle. Space matching is realized through establishing coordinate system and homogeneous transformation among coordinate systems. According to D-S fusion method, obstacle recognition frame is established at first, and its basic probability distribution value of obstacle index is ascertained by test. Then fusion results under evidence associative action are calculated according to combination rule of D-S evidence method, and distance, orientation and size of the obstacle in unmanned ground platform ROI are acquired. At last, the method is verified in unmanned ground platform ROI, and result shows that the method is validate and more robust.

Key words: millimeter wave radar; CCD camera; space-time matching; D-S fusion; unmanned ground platform; obstacle recognition

引 言

由于毫米波雷达具有距离检测精度高以及环境适应性好的特点,因此国外大量应用于汽车的自动驾驶辅助防撞安全系统。国内很多学者也进行了相关技术的研究^[1-8]。但毫米波雷达存在方位分

辨率低,不能精确定位障碍物的问题。为解决这个问题,文献[2,4,9,10]论述了采用毫米波雷达和 CCD 摄像机信息融合的方法,利用 CCD 摄像机的高空间分辨率解决毫米波雷达的低方位分辨率问题,形成毫米波雷达和 CCD 摄像机的优势信息融合互补。

国内外学者对多传感器信息融合进行了研究,

取得了不少研究成果^[1-4,9-17]。D-S 证据推理能很好地表示未知信息的程度及“无知”等认知概念和推理简单,其证据推理法研究问题的方式和内容特别适合处理多传感器的信息融合问题,因此该证据理论已成为信息融合的一个重要理论基础,所以适合应用于多传感器信息融合。文献[10]提出采用毫米波雷达扫描平面和摄像机图像平面间的几何齐次变换进行标定,能获得毫米波雷达在图像平面上的目标信息,但未对毫米波雷达和 CCD 摄像机的信息融合进行论述。文献[15]提出了使用 Manhattan 距离和最大关联系数构造 D-S 证据中的基本概率赋值函数的方法,但缺乏验证。

本文首先论述了毫米波雷达和 CCD 摄像机的信息处理流程和空间配准,在此基础上进行了 D-S 信息融合,最后将无人地面平台在普通道路上给以验证。

1 毫米波雷达和 CCD 摄像机信息处理流程

为了能正确地检测到平台前方 ROI(Region of interested)内的障碍物,将毫米波雷达和 CCD 摄像机安装在平台前端保险杠中央,如图 1 所示。毫米波雷达和 CCD 摄像机的检测面平行且与地面垂直,离地 300 mm。CCD 摄像机安装在毫米波雷达上面。

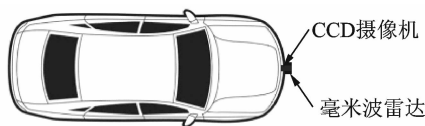


图 1 毫米波雷达和 CCD 摄像机安装示意图
Fig. 1 Fix millimeter radar and CCD camera

本文所选用的毫米波雷达为 Delphi 公司的 ESR(Electronically scanning radar)雷达,其主要技术参数:更新率,50 ms;检测距离,50 m;距离分辨率,±0.25 m;方位分辨率,±1°和识别 64 个目标。CCD 摄像机为数字式。毫米波雷达和 CCD 摄像机的信息处理及 D-S 融合共用一台计算机。

在同一时钟下,在 50 ms 时间内完成:毫米波雷达信息采集和处理(目标的距离、方位和宽度),CCD 摄像机信息处理(目标的宽、高和方位)和 D-S 信息融合得到确认的目标(目标的距离、方位、宽度和高度)。

基于 D-S 信息融合的信息处理流程如图 2 所示。

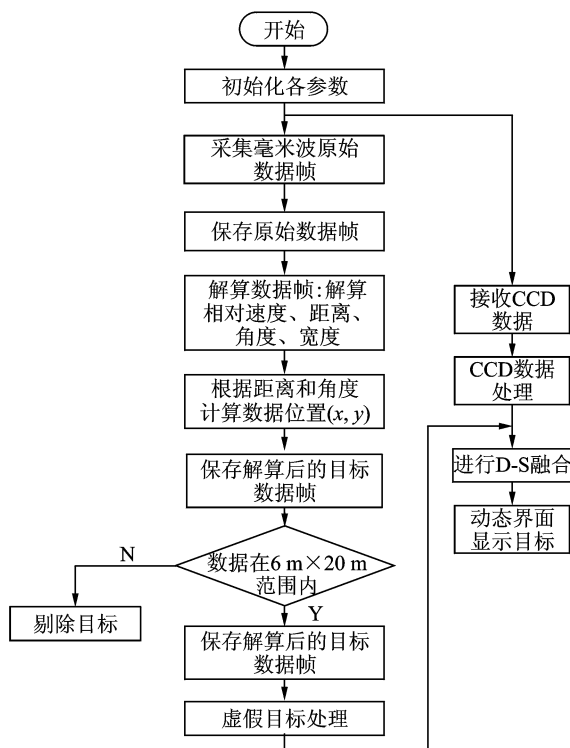


图 2 毫米波雷达和 CCD 摄像机信息处理流程

Fig. 2 Information process flow chart of millimeter radar and CCD camera

由图 2 可知,毫米波雷达和 CCD 摄像机是并行工作的,并在 50 ms 内完成相应的数据采集、滤波和信息处理。

毫米波雷达在每个更新周期采集 64 个原始数据帧,每个数据包含有目标的位置、方向角、相对速度、距离和宽度信息。经过解算,可求取在毫米波雷达坐标系内的坐标值。

当方位角度为负(即在第二象限)时, x/y 轴坐标的计算方法为

$$\begin{aligned} x &= d * \sin\varphi_i \\ y &= d * \cos\varphi_i \end{aligned} \tag{1}$$

式中: d 表示毫米波雷达中心原点到目标的距离; φ_i 即 θ , θ 为毫米波雷达检测到的方位角;当方位角度为正(即在第一象限)时,式中 $\varphi_i = 53.2^\circ - \theta$ 。

然后,根据目标的坐标值是否在平台 ROI 范围内来进行判别有效障碍物。目标的宽度和相对速度直接从原始数据中提取。由于毫米波雷达的检测数据中存在虚假目标,故采用卡尔曼滤波进行滤除。

通过毫米波雷达坐标系和 CCD 摄像机坐标系之间的齐次变换,可以将毫米波雷达检测到目标的位置信息转换至 CCD 摄像机的成像平面上,从而

可以在图像上找出目标的大致位置。将原本对整幅图像进行目标分割的任务变为对某一小区域进行目标分割,从而在很大程度上减小了目标分割的难度。利用目标与背景的灰度存在一定的差别这一特征可以将目标从背景分割出来。

将毫米波雷达检测到的目标位置通过齐次变换映射到 CCD 的像素坐标系上,在该点附近选择一个 $N \times N$ 的像素阵对其灰度值求平均,按照此灰度均值对目标进行分割从而得到分割出的目标。

将分割出的目标用矩形框标出,并计算矩形框的长和高所占的像素数,再利用毫米波测出的目标距离和 CCD 摄像机的参数按式(2)计算出目标实际的高度和宽度。

$$\begin{cases} \text{width} = W \cdot d_x \cdot f^{-1} \cdot d \\ \text{height} = H \cdot d_z \cdot f^{-1} \cdot d \end{cases} \quad (2)$$

式中:width 为障碍物的宽度,height 为障碍物的高度; W 为图像中障碍物宽度的像素数; H 为障碍物高度的像素数; d_x 为单位像元的宽度; d_z 为单位像元的高度; f 为 CCD 的焦距; d 为 CCD 到障碍物的距离。

通过在图像上分割出目标后计算其中心位置在 CCD 摄像机成像平面坐标系上的坐标,并将该坐标点通过 CCD 摄像机的参数按式(3)计算出目标真实中心点与 CCD 摄像机光轴在水平方向上的夹角,该夹角即为目标的方位角。由于毫米波雷达测量的方位角存在精度不高的问题,通过使用 CCD 摄像机与毫米波雷达的这种融合可以实现测量精度的提高。

$$\theta_i = \frac{u_i}{M} \times \varphi - \frac{\varphi_c}{2} \quad (3)$$

式中: θ_i 为目标的方位角; u_i 为目标在图像平面 u 向对应的像素值; M 为图向平面上 u 向总像素值; φ_c 为摄像机镜头的视角。

得到目标的中心位置后,利用不同目标中心位置之间的距离 d 和一个距离阈值 Threshold 来确定目标是否存在重叠。按照式(4)判断规则来判断目标是否存在重叠。

$$\Delta\theta = |\theta_i - \theta_j| \quad (4)$$

$$d = \sqrt{d_i^2 + d_j^2 - 2 \cdot d_i \cdot d_j \cdot \cos\Delta\theta}$$

如果 $d \leq \text{Threshold}$,则目标存在重叠,可将这些目标视为一个目标;其他则目标不存在重叠,可将这些目标视为各自独立。式(4)中目标 i 和目标 j 为相邻目标, d_i, θ_i 为目标 i 在毫米波雷达坐标系

下的距离和方位角, d_j, θ_j 为目标 j 在毫米波雷达坐标系下的距离和方位角。

2 毫米波雷达和 CCD 摄像机信息的空间配准

按右手规则建立平台坐标系。设平台两后轮连线的中心点为坐标原点,两后轮连线且指向右的方向为 X_w 轴,小车前进方向为 Y_w 轴,垂直于 X_w-Y_w 平面且指向上的方向为 Z_w 轴。

为了便于建立坐标系和转换矩阵的简化计算,故将毫米波雷达坐标系和 CCD 摄像机坐标系的原点都建立在平台坐标系的 Y 轴上,且这两个传感器的坐标系的各轴均与平台坐标系的相应各轴保持平行。两传感器坐标系与平台坐标系的位置关系如图 3 所示。

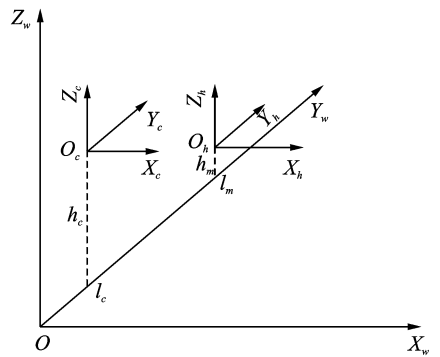


图 3 平台、毫米波雷达和 CCD 摄像机坐标系

Fig. 3 Coordinate of platform, millimeter radar and CCD camera

CCD 摄像机坐标系到平台坐标系 ($X_w-Y_w-Z_w$) 齐次变换如式(5)所示。毫米波雷达坐标系到 CCD 摄像机坐标系的齐次变换如式(6)所示。

这样就完成了毫米波雷达坐标系和 CCD 摄像机坐标系的建立和在平台的空间配准。

$$\begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_c \\ 0 & 0 & 1 & h_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$Y_c \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & f \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & l_m - l_c \\ 0 & 0 & 1 & h_m - h_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_h \\ Y_h \\ Z_h \\ 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

3 毫米波雷达和 CCD 摄像机 D-S 信息融合

基于 D-S 证据方法的毫米波雷达和 CCD 摄像机信息融合框图如图 4 所示。首先建立识别框架,并对每个传感器获得的信息计算各个证据的基本概率分配函数,再根据 D-S 证据方法的组合规则计算所有证据联合作用下的基本概率分配函数,最后根据给定的判决准则选择置信度最大的假设作为融合结果。

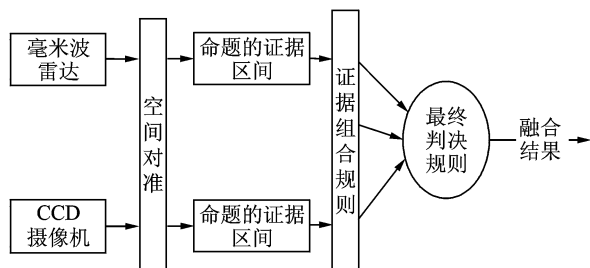


图 4 基于 D-S 证据方法的信息融合

Fig. 4 Information fusion based on D-S evidence method

给定毫米波雷达和 CCD 摄像机同一识别框架上基于不同证据的置信度函数,作为它们联合作用下产生的置信度函数。该函数为它们的置信度函数的直和。

设 $m_l(X_i)$ 和 $m_c(X_j)$ 函数分别为毫米波雷达和 CCD 摄像机同一识别框架上的置信度函数。根据 Dempster 法则得到毫米波雷达和 CCD 摄像机的融合结果。

3.1 鉴别框架中障碍目标指数

首先建立鉴别框架。其方法是根据平台 ROI 内障碍目标的特征抽象为 $\{O_1, O_2, O_3, \dots, O_{10}\}$, 组成目标鉴别标框架如表 1 所示,并满足式(7)要求。设定阈值,当检测到目标大于此阈值即判定为障碍物,即可实施避障措施。

$$P(O_1) + P(O_2) + P(O_3) + \dots + P(O_{10}) = 1 \quad (7)$$

表 1 鉴别框架中障碍目标指数

Table 1 Obstacle target index of discriminate frame

障碍指数	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
障碍物(高度、宽度、距离)	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j

表 1 中:(1) a, \dots, j 为障碍物的实际高度、宽度和距离,由底盘高度和实验确定;(2) -1 为不确定区;0 为可通行区;1—4 为负障碍区,数字越大,

负障碍越小;5—8 为正障碍区,数字越大,正障碍越大;目标鉴别框架为: $U = -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$ 。

一般通过实验获得鉴别框架中障碍指数所对应的阈值。

3.2 基本概率分配 BPA 值

通过实验获得与鉴别框中障碍目标指数对应的 CCD 摄像机和毫米波雷达的基本概率分配值(BPA),如表 2 所示。

表 2 对应障碍指数的基本概率分配值

Table 2 Base probability distribute according to obstacle index

目标鉴别框架	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$m_l(X_i)$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
$m_c(X_j)$	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}

3.3 基本概率分配值的转换值

通过实验确定毫米波雷达对应其基本概率分配值 BPA 的转换值,如表 3 所示。

表 3 毫米波雷达的概率分配值的转换值

Table 3 Conversion of probability distribute by millimeter radar

$m_l(X_i)$	r_1	r_2	r_3	r_4	r_5	r_6	r_7	r_8	r_9	r_{10}
$m_l(k_i)$	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	k_{10}

通过实验确定 CCD 摄像机对应其基本概率分配值 BPA 的转换值,如表 4 所示。

表 4 CCD 摄像机的概率分配值的转换值

Table 4 Conversion of probability distribute by CCD camera

$m_c(s_j)$	s_1	s_2	s_3	s_4	s_5	s_6	s_7	s_8	s_9	s_{10}
$m_c(t_i)$	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}

3.4 D-S 信息融合

将所取得的毫米波雷达的基本概率分配值和 CCD 摄像机的基本概率分配值代入 D-S 证据,由式(8)可求得融合值。

$$m(C) = \frac{\sum_{A_i \cap B_j = C} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \Phi} m_1(A_i)m_2(B_j)} \quad (8)$$

式中: $m_1(A_i)$ 为毫米波雷达对应的目标鉴别框架中各分量概率值的转换值 $m_l(k_i)$, $m_2(B_j)$ 为 CCD 摄像机对应的目标鉴别框架中各分量概率值的转换值 $m_c(k_i)$, $m(C)$ 为融合后对应的鉴别框架中障

碍目标指数。这样就可按表 1 确定有无障碍物及障碍物参数(距离、方位、高和宽)。

4 实验验证

在白天,使无人地面平台以 20~40 km/h 速度行驶在普通道路上,对无人地面平台 ROI 内的毫米波雷达和 CCD 摄像机 D-S 信息融合进行验证。

设计毫米波雷达和 CCD 摄像机融合的人机界面如图 5。左图中的点为目标点,该人机界面可直观地显示其融合结果。将目标放置在平台 ROI 内的 10 个不同位置,其实际测量数据如表 5 所示。从人机界面所显示的融合结果,其数据如表 6 所示。从图 5 可知,不仅实现了毫米波雷达和 CCD 摄像机的空间配准,而且能精确地检测到目标的距离、方位、高度和宽度。距离精度≤0.25 m,高度误差≤1 cm,宽度误差≤1 cm,方位角误差≤0.25°。

从表 5 和表 6 可以看出融合后,在平台 ROI 内能正确识别有无障碍物及障碍物的距离、方位、宽度和高度。

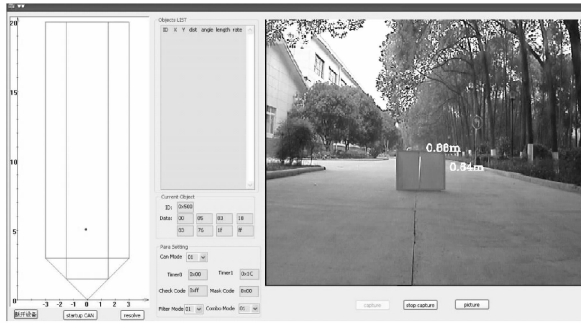


图 5 毫米波雷达和 CCD 摄像机融合人机界面

Fig. 5 Interface of data fusion by millimeter radar and CCD camera

表 5 实际测量数据

Table 5 Real data by measuring

实测次数	位置			长度 L/m	高度 H/m
	X/m	Y/m	θ/m		
1	-1.19	6.17	-10.9	0.95	0.75
2	-1.30	6.15	-13.4	1.03	0.80
3	-1.46	6.01	-20.9	0.85	0.41
4	-2.30	6.05	-26.4	0.84	0.80
5	-3.83	4.00	-44.0	1.04	0.66
6	0.00	6.00	0.0	0.67	0.39
7	1.00	6.10	9.3	0.69	0.48
8	1.46	6.00	13.7	0.71	0.62
9	2.30	6.00	21.0	0.82	0.82
10	3.00	6.00	26.6	1.04	0.83

表 6 融合结果数据

Table 6 Data of fusing result

实测次数	位置			长度 L'/m	高度 H'/m
	X'/m	Y'/m	θ'/m		
1	-0.92	6.23	-8.3	0.97	0.71
2	-1.54	6.42	-13.5	0.74	0.74
3	-2.33	6.17	-20.7	0.84	0.73
4	-2.80	6.31	-23.9	0.92	0.59
5	-3.35	3.70	-42.0	0.85	0.69
6	-0.02	6.10	0.2	0.88	0.64
7	0.23	6.20	42.9	0.91	0.57
8	0.80	6.15	37.5	0.81	0.72
9	1.59	6.51	31.2	0.85	0.68
10	2.30	6.50	25.5	0.73	0.73

5 结束语

本文在毫米波雷达和 CCD 摄像机空间配准的基础上,对它们的信息进行了 D-S 融合,其融合效果能正确识别障碍物及障碍物的距离、方位、宽度和高度,精度较高,且鲁棒性好。由于 CCD 摄像机信息会受光照和阴影影响,这是下一步的研究工作重点。

参考文献:

[1] 方菲菲,余稳. 基于 PCA-LDA-SVM 的多普勒雷达车型识别算法[J]. 数据采集与处理,2012,27(1):111-116
 Fang Feifei, Yu Wen. Vehicle recognition algorithm with Doppler radar based on PCA-LDA-SVM [J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012,27(1):111-116.

[2] 胡彬,赵春霞,刘家根. 基于毫米波雷达与图像融合的车辆检测[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2011,30(2):75-77.
 Hu Bin, Zhao Chunxia, Liu Jiagen. Vehicle detection based on millimeter wave radar and image fusion[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Natural Science Edition, 2011,30(2):75-77.

[3] 韩大伟. 基于毫米波雷达的汽车防撞控制系统的研究[D]. 沈阳:东北大学,2008.
 Han Dawei. The research of automobile anticollision controlling system based on millimeter wave radar [D]. Shenyang: Northeastern University,2008.

[4] 陈莹,韩崇昭. 基于雷达和图像融的 3D 车辆定位与识别[J]. 电子学报,2005,33(6):1105-1108.
 Chen Ying, Han Zongzhao. 3D vehicle location and recognition based on radar and image fusion[J]. Chinese Journal of Electronics,2005,33(6):1105-1108.

- [5] 曾宪文. 车辆智能主动型安全系统[D]. 重庆:重庆大学,2004.
Zeng Xianwen. Vehicle intelligent initiative safe system[D]. Chongqing: Chongqing University,2004.
- [6] 陆单. 基于毫米波雷达的雾天前方车辆信息获取技术[D]. 武汉:武汉理工大学,2009.
Lu Dan. The obtaining technology of front vehicle information in foggy weather based on millimeter-wave radar[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2009.
- [7] 杨凯和. 基于毫米波雷达的汽车主动防撞预警系统信号分析与处理[D]. 长春:吉林大学,2011.
Yang Kaihe. Signal process and analysis of active collision warning system based on millimeter-wave radar system[D]. Changchun: Jilin University,2011.
- [8] 朱珂. 汽车防撞系统与毫米波雷达[J]. 轻型汽车技术,2003,170(10):80-83.
Zhu Ke. Automobile anticollision system and millimeter-wave radar[J]. Light Vehicles Technology, 2003,170(10):80-83.
- [9] 郭明强. 基于 CCD 和声纳传感器信息融合的移动机器人避障[D]. 南京:南京理工大学,2007.
Guo Mingqiang. Mobile robot obstacle avoidance based on CCD and ultrasonic sensor information fusion[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology,2007.
- [10] Shigeki Sugimoto, Hayato Tateda, Hidekazu Takahashi, et al. Obstacle detection using millimeter-wave radar and its visualization on sequence[C]//Proceeding of the 17th International Conference on Pattern Recognition. [S. l.]:IEEE,2004:342-343.
- [11] 何友,王国宏,陆大. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京,电子工业出版社,2000.
He You, Wang Guohong, Lu Da. Information fusion and application of multisensor[M]. Beijing: Publish House of Electronics Industry,2000.
- [12] 孟伟. 基于 D-S 证据理论的月球探测机器人的信息融合[J]. 哈尔滨工业大学学报,2003,35(9):1040-1042.
Meng Wei. Lunar robot information fusion based on D-S evidence theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2003,35(9):1040-1042.
- [13] 原新. 智能机器人视觉信息处理及数据融合方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2004.
Yuan Xin. Study on vision information processing and data fusion of intelligent robot[D]. Harbin: Harbin Engineering University,2004.
- [14] 彭梦. 基于多传感器融合的移动机器人障碍物检测研究[D]. 长沙:中南大学,2007.
Peng Meng. Research on obstacle detection of mobile robots based on multi-sensor information fusion[D]. Changsha: Central South University,2007.
- [15] 刘振宇,苏丽颖,余跃进. D-S 证据理论在移动机器人中的应用[J]. 微计算机信息,2009,25(2):212-214.
Liu Zhenyu, Su Liying, Yu Yuejin. The application of evidential theory on mobile robots[J]. Microcomputer Information,2009,25(2):212-214.
- [16] Xu Lijia, Chen Yangzhou, Cui Pingguan. Improvement of D-S evidential theory in multisensory data fusion system[C]//Proceeding of 5th World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou: [s. n.],2004:3124-3128.
- [17] Denoeux T A. K-nearest neighbor classification rule based on D-S theory[J]. IEEE Trans on SMC,1995,25(5):804-813.

作者简介:骆云志(1971-),男,研究员,研究方向:卫星定位组合导航,E-mail:swailyz@163.com;雷雨能(1982-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位组合导航;王钤(1984-),男,硕士研究生,研究方向:卫星定位组合导航。