

编队密集目标精细航迹起始算法研究

戴 霄, 刘黎明, 于振华

(中国船舶重工集团公司第七二三研究所, 江苏 扬州 225001)

摘要: 提出了一种编队密集目标精细航迹起始算法, 该算法无需进行计算量较大的量测聚类处理。首先通过放宽航迹起始准则建立所有可能的初始相关序列; 然后通过比较不同序列间是否包含公共量测, 对所有序列进行聚类; 最后对同属一个聚类的初始相关序列采用最优化分配处理, 选取最优方案对编队中的每个目标进行精细航迹起始。经仿真数据验证, 该算法计算量小, 航迹起始正确率高。

关键词: 编队目标; 精细航迹起始; 修正逻辑法; 聚类

中图分类号: V243.2; TP953

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)09-0049-06

On Refined Track Initiation Algorithm for Dense Object Formation

DAI Xiao, LIU Li-ming, YU Zhen-hua

(No. 723 Institute of CSIC, Yangzhou 225001, China)

Abstract: A refined track initiation algorithm is proposed for the objects in dense formation. The measurement clustering algorithm, which needs significant amount of computation, is not needed in the method. First, all possible associate point sequences are built up by extending the track initiation conditions. Then, clustering is made to all the sequences by comparing the different sequences to see if they have the common measurements. At last, optimized distribution is taken to the initial relative sequences belong to the same cluster, and the optimum scheme is selected to each object in the formation for track initiation. Simulation results prove that the method has fine performance on formation track initiation, low computational burden and high accuracy rate on track initiation.

Key words: object formation; refined track initiation; modified logic; clustering

0 引言

编队目标是指聚集在一起具有相似运动状态(航速、航向基本相同)的多个目标, 编队成员之间的距离要远小于编队之间的距离^[1]。由于传感器探测精度的提高, 近年来编队目标跟踪受到很多研究人员的关注^[1-7], 而最常见的编队目标为飞机编队以及多发齐射导弹编队等。由于编队成员之间距离相距较近, 所以各目标的相关波门互相交叠, 且前后不同周期的量测数据之间具有很强的相关性, 因此仅使用传统的多目标航迹起始算法进行建航时, 起始正确率很低^[3]。

目前常用的解决办法是先对量测数据进行聚类处理, 计算编队质心, 使用质心来代替整个编队进行跟踪^[6-7]。但在实际作战指挥中, 准确知道编队中目标数量及各目标的精确运动状态还是非常有必要的, 这就是编队目标精细航迹起始问题^[3-4]。

1 编队密集目标描述

仅以飞机为例对编队密集目标进行描述。在现在空战中, 飞机编队按阵型可分为梯队、楔队、纵队、横队、箭队和菱形等, 其中, 最为常见的四机编队阵型如图1所示。当编队相邻目标间的距离与传感器测量误差的比值小于3时, 会给航迹起始的相关以及后续跟踪带来很大困难, 特别容易产生错误航迹、冗余航迹, 甚至是遗漏航迹, 此时可认为编队目标较为密集。

收稿日期: 2015-11-25

修回日期: 2016-06-25

作者简介: 戴 霄(1980—), 男, 江苏睢宁人, 硕士, 高工, 研究方向为多源数据融合、雷达数据处理技术。

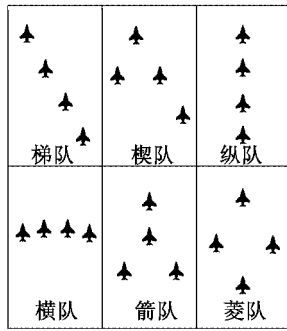


图1 典型的四机编队阵型

Fig. 1 Typical four-plane formation

2 采用修正逻辑法建立初始相关序列

修正逻辑法是目前较为常用的一种航迹起始算法,本文所有例子均采用3/4逻辑起始航迹^[1]。

$S_i (i=0,1,2,\dots,N-1)$ 表示 N 个扫描周期的自由量测组成的集合。设 $P_{0,j} \in S_0, P_{0,j}$ 的初始相关域 $\Omega_1, P_{1,j} \in S_1 \cap \Omega_1$,则 $P_{1,j}$ 称为 $P_{0,j}$ 的初始相关点。若 $P_{0,j}$ 的后续相关域为 Ω_i, Ω_i 的中心预测点为 $\hat{P}_{i,j}$,且有

$$\Omega'_i = \{x \in S_i \cap \Omega_i \mid d(\hat{P}_{i,j}, x) = \min_{y \in S_i \cap \Omega_i} d(\hat{P}_{i,j}, y)\} \quad (1)$$

则 $P_{i,j} \in \Omega'_i$ 为 $P_{0,j}$ 的第 i 个相关点。所有可能的形如

$$\{P_{0,j}, P_{1,j}, P_{2,j} \in \Omega'_2, \dots, P_{N-1,j} \in \Omega'_{N-1}\} \quad (2)$$

的 $P_{0,j}$ 的相关点序列就称为量测 $P_{0,j}$ 的一个初始相关序列^[8],而 $P_{0,j}$ 称为序列的初始量测。

从式(1)可以看出,在套取后续相关点时仅选取位置距离预测点最近的相关点,而对于编队密集目标来说,这种处理方式很有可能会使得真正的目标航迹起始失败,而建立由相邻目标量测构成的虚假/错误航迹。因此,为了建立所有可能的初始相关序列,需在修正逻辑法的基础上,保留所有落入后续相关波门的量测。因此,现将式(1)修改为

$$\Omega'_i = \{x \in S_i \cap \Omega_i\} \quad (3)$$

3 初始相关序列的聚类处理

初始相关序列的聚类处理无需像量测聚类那样频繁地计算、比较2个量测间的距离,只需判断不同的初始相关序列是否有公共量测即可。显然,初始量测相同的不同序列属于同一个聚类。

假设集合 S_0 中有 n 个量测,为 $S_0 = \{P_{0,1}, \dots, P_{0,n}\}$;而令 $S' = S_1 \cup S_2 \cup S_3$,假设集合 S' 中有 m 个量测,为 $S' = \{P'_1, \dots, P'_m\}$ 。则任何一个初始相关序列均是由集合 S_0 中1个量测和集合 S' 中2个或3个量测构成的。将 S_0 中的 n 个量测和 S' 中的 m 个量测的关系定义为

$$H = [\omega_{ij}] = \begin{pmatrix} \omega_{11} & \cdots & \omega_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \omega_{m1} & \cdots & \omega_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

式中, ω_{ij} 为二进制变量。 $\omega_{ij}=0$,表示由集合 S_0 中第 i 个量测建立的所有初始相关序列中均不包含集合 S' 中第 j 个量测;而 $\omega_{ij}=1$,表示由集合 S_0 中第 i 个量测建立的某一初始相关序列中包含有集合 S' 中第 j 个量测。

对于与 $P_{0,j}$ 同属一个序列的所有量测 P'_i ,定义

$$\begin{cases} M_{P_{0,j}} = \bigoplus R_{P'_i} \\ M = \bigotimes M_{P_{0,j}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $R_{P'_i}$ 为矩阵 H 中量测 P'_i 所在的行向量; \bigoplus 表示不同的行向量中对应各个元素的或运算; \bigotimes 表示如果行向量 $M_{P_{0,j_1}}$ 与 $M_{P_{0,j_2}}$ 相等,则 $M = M_{P_{0,j_1}}$,否则 $M = [M_{P_{0,j_1}}, M_{P_{0,j_2}}]^T$; $M_{P_{0,j}}$ 表示由量测 $P_{0,j}$ 建立的初始相关序列与其他量测建立的初始相关序列间的关系,而矩阵 M 表明了初始相关序列的聚类情况。如果 M 中的某一行存在非零元素,则通过这些非零元素可确定与之所在的列对应的量测。如果该行中存在不止一个非零元素,则表明由这些量测建立的初始相关序列属于同一个聚类;如果该行中仅有一个非零元素,则由量测建立的初始相关序列单独一个聚类。

现举例说明上述初始相关序列的聚类方法。图2所示为四机横队阵型4个扫描周期的量测数据(图中数字为量测编号),编队目标航向为 220° ,速度为200 m/s。

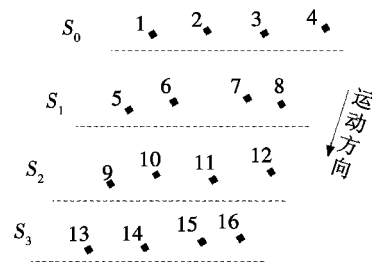


图2 四机横队阵型4个周期的量测数据

Fig. 2 Four scan cycle measure of four-plane rank formation

如图2所示,集合 $S_0 = \{1, 2, 3, 4\}$,集合 $S' = \{5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16\}$ 。采用2节所述的修正逻辑法对量测进行航迹起始,建立初始相关序列如表1所示。

由表1中的初始相关序列可得矩阵 H 为

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

由式(5)可得

$$M_1 = R_5 \oplus R_6 \oplus R_9 \oplus R_{11} \oplus R_{13} \oplus R_{16} = [1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (7)$$

表1 初始相关序列表

Table 1 Initial correlation sequence table

序号	初始相关序列中量测编号	航向/(°)	航速/(m·s ⁻¹)
1	1,5,9,13	225.7	202.3
2	1,6,11,16	168.2	246.7
3	2,6,10,14	216.6	197.5
4	2,6,9,13	224.8	218.4
5	3,7,11,15	218.1	203.1
6	3,7,12,16	213.4	220.4
7	4,7,10,13	251.3	257.2
8	4,8,12,16	216.4	198.3

由此可得,表1中的8个初始相关序列同属一个聚类。

4 聚类最优化处理

当聚类产生后,如果该聚类中都是由同一个量测建立的初始相关序列,则挑选最优序列(残差最小^[8])进行航迹起始;否则,需要最优化分配处理。

在进行最优化分配之前,需定义如下两个概念。

1) 互斥:是指两个初始相关序列完全不同。在本文中,互斥分为两种情况:

- ① 初始量测相同的两个序列互斥;
- ② 由不同初始量测建立的任意两个序列中,如果具有相同量测的个数不大于1,则两个序列互斥。

2) 分配方案:从聚类所有初始相关序列中挑选一组序列,该组序列满足以下两个条件:

- ① 组中任意两个序列两两互斥;
- ② 无法再向该组添加任何序列。任何满足上述条件的一组序列均称为分配方案。

如引言中所述,编队目标各成员的速度、航向基本相同,因此,可选取速度或航向的方差作为最优化目标函数。本文以航向为例,建立如下形式的优化问题

$$D_k = \min_D \{ \text{Var}(C) \} \quad (8)$$

式中: C 为分配方案中所有初始相关序列航向构成的集合; D 为所有方案的集合。

聚类最优化处理流程如下:

- 1) 遍历所有初始相关序列,建立所有可能的分配方案;
- 2) 对每个分配方案计算其航向值的方差(注意航向过正北现象);
- 3) 选取航向方差最小的方案为最优分配方案,并起始航迹。

由表1中初始相关序列可得分配方案,并计算各方案的航向方差,具体如表2所示,由表2可知,方案1为最优方案。

表2 所有方案及方差值

Table 2 All schemes and variance values

序号	分配方案	航向方差	序号	分配方案	航向方差
1	1,5,9,13	14.5	6	1,6,11,16	447.6
	2,6,10,14				
	3,7,11,15				
	4,8,12,16				
2	1,5,9,13	194.0	7	1,6,11,16	903.0
	2,6,10,14				
	3,7,11,15				
	4,7,10,13				
3	1,5,9,13	221.3	8	1,6,11,16	508.4
	2,6,10,14				
	3,7,12,16				
	4,7,10,13				
4	1,6,11,16	871.4	9	1,6,11,16	901.3
	2,6,10,14				
	3,7,12,16				
	4,7,10,13				
5	1,6,11,16	877.9			
	2,6,10,14				
	3,7,11,15				
	4,7,10,13				

5 仿真验证

为了检验本算法(简称为新算法)的性能,在杂波环境下进行仿真验证并和修正逻辑法(简称为旧算法)进行比较。仿真环境如下:距离误差 $\sigma_r = 30$ m,角度误差 $\sigma_\theta = 0.0045$ rad,扫描周期 $T = 1$ s,按照泊松分布确定每周期的杂波数量,且 $\lambda = 40$,量测按周期发送,共仿真时长40个周期。在该环境下分别对上述6种四机编队目标进行仿真处理,编队中每个目标的初始状态如表3所示,编队间相邻目标的距离与传感器测量误差之比均小于3。

表3 编队目标初始状态表

Table 3 Initial state of formation targets

编队号	初始距离/m	初始方位/(°)	航速/(m·s ⁻¹)	航向/(°)	阵型
1	15000	318.0	200	139	梯队
	14500	318.7	200	139	
	14000	319.4	200	139	
	13500	320.1	200	139	
2	14000	318.0	200	139	楔队
	14500	318.7	200	139	
	14000	319.4	200	139	
	13500	320.1	200	139	
3	15000	318.0	200	139	纵队
	14500	318.0	200	139	
	14000	318.0	200	139	
	13500	318.0	200	139	

续表

编队号	初始距离/m	初始方位/(°)	航速/(m·s ⁻¹)	航向/(°)	阵型
4	15000	318.0	200	139	横队
	15000	318.7	200	139	
	15000	319.4	200	139	
	15000	320.1	200	139	
5	15000	318.7	200	139	箭队
	14500	318.7	200	139	
	14000	318.0	200	139	
6	15000	318.7	200	139	菱形
	14500	318.0	200	139	
	14500	319.4	200	139	
	14000	318.7	200	139	

1) 四机梯队仿真。

四机梯队仿真结果如图3所示。

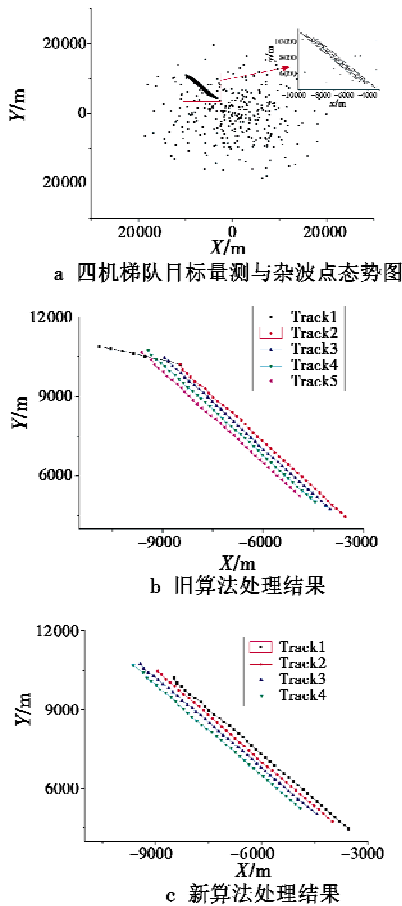


图3 四机梯队仿真结果

Fig. 3 Simulation result of four-plane trapezoidal formation

2) 四机楔队仿真。

四机楔队仿真结果如图4所示。

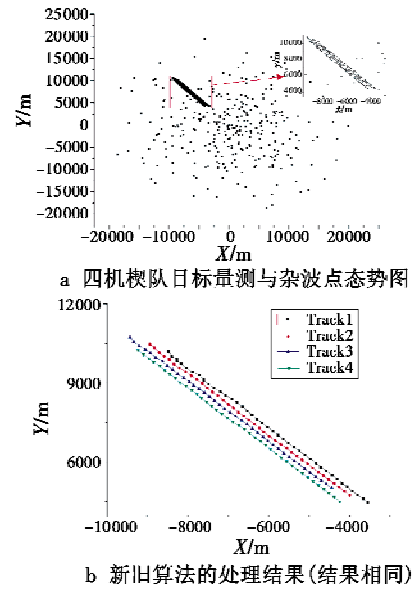


图4 四机楔队仿真结果

Fig. 4 Simulation result of four-plane wedge formation

3) 四机纵队仿真。

四机纵队仿真结果如图5所示。

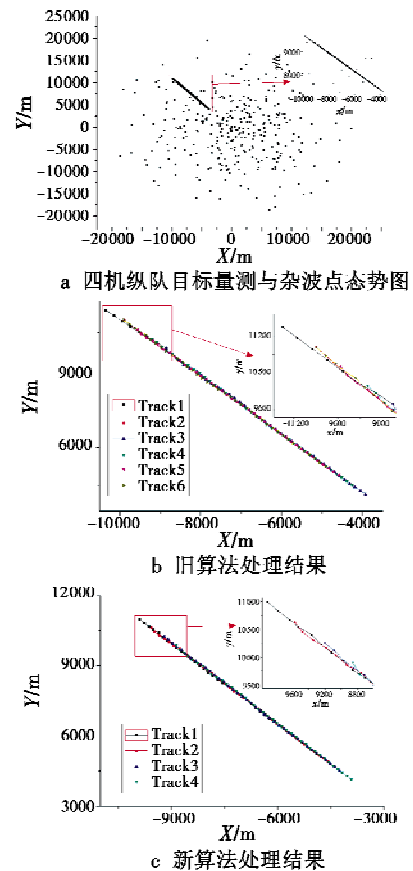


图5 四机纵队仿真结果

Fig. 5 Simulation result of four-plane column formation

4) 四机横队仿真。

四机横队仿真结果如图6所示。

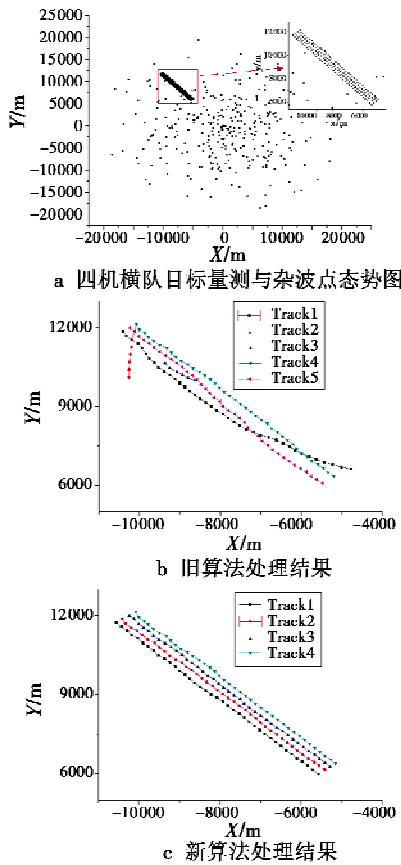


图6 四机横队仿真结果

Fig.6 Simulation result of four-plane rank formation

5) 四机箭队仿真。

四机箭队仿真结果如图7所示。

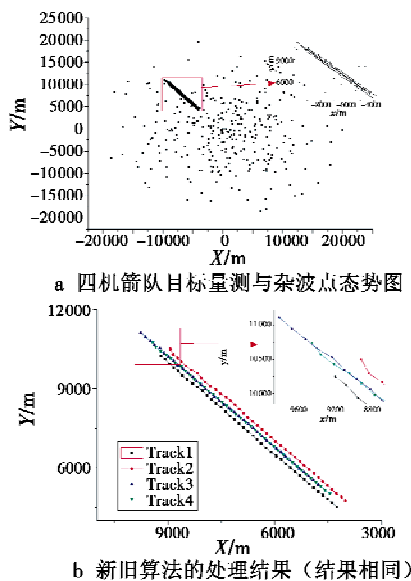


图7 四机箭队仿真结果

Fig.7 Simulation result of four-plane arrow formation

6) 四机菱队仿真。

四机菱队的仿真结果如图8所示。

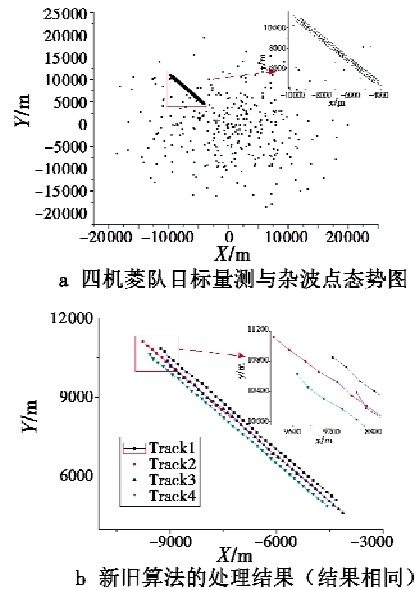


图8 四机菱队仿真结果

Fig.8 Simulation result of four-plane diamond formation

从图3~图8可以得出以下结论:

- 1) 对四机楔队、箭队和菱队编队目标,新/旧处理算法处理结果相同,均没有错误航迹产生,这是因为新/旧算法均采用4点起始准则,而依据这3种编队目标相邻4个周期量测并不能建立虚假的初始相关序列(在同一个方向上最多只有3个量测);
- 2) 对四机梯队来说,使用旧方法建立1条错误航迹,而使用新方法没有错误航迹,且建立的航迹数与真实目标个数一致;
- 3) 对四机纵队来说,使用旧方法建立2条错误航迹,而使用新方法(以航速的方差为最优化目标函数)没有错误航迹,且建立的航迹数与真实目标个数一致;
- 4) 对四机横队来说,采用旧方法建立3条错误航迹,而新方法没有错误航迹,且建立的航迹数与真实目标个数一致。

6 结论

本文提出了一种编队密集目标精细航迹起始算法,用于杂波环境下编队密集目标的航迹起始。本文算法不采用计算量较大的量测聚类处理方法,而是适当放宽航迹起始准则,建立所有可能的初始相关序列,通过比较不同序列间是否包含公共量测,将所有序列划分为不同聚类,随后对同属一个聚类的初始相关序列采用最优化分配,选取最优方案,对编队目标精细航迹起始。本文算法思路清晰、计算量小,航迹起始正确率高。

参 考 文 献

- [1] 何友,修建娟,张晶炜,等. 雷达数据处理及应用[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2009:184-185. (HE Y, XIU J J, ZHANG J W, et al. Radar data processing with applications[M]. 2nd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009:184-185.)
- [2] SEPTIER F, PANG SK, GODSILL S, et al. Tracking of coordinated groups using marginalized MCMC-based particle algorithm[J]. IEEE Transactions on Auto Control, 2009, 31(2):1-11.
- [3] 何友,王海鹏,熊伟,等. 基于相对位置矢量的群目标灰色精细航迹起始算法[J]. 航空学报, 2012, 33(10):1850-1863. (HE Y, WANG H P, XIONG W, et al. Gray refined track initiation algorithm of group targets based on relative position vector[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(10):1850-1863.)
- [4] CLARK D, GODSILL S. Group target tracking with the Gaussian mixture probability hypothesis density filter [C]//The 3rd International Conference on Intelligent sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2007:149-154.
- [5] 耿文东. 编队目标跟踪综述[C]//第十届全国雷达学术年会,北京,2008:367-371. (GENG W D. Summarizing of group-target tracking[C]//The 10th China Radar Conference, Beijing, 2008:367-371.)
- [6] 邢凤勇,熊伟,王海鹏. 基于聚类 and Hough 变换的多编队航迹起始算法[J]. 海军航空工程学院学报, 2010, 25(6):624-628. (XING F Y, XIONG W, WANG H P. A formation target track initiation algorithm based on clustering and Hough transform [J]. Journal of Naval Aeronautical and Astronautical University, 2010, 25(6):624-628.)
- [7] 周大庆,耿文东,倪春雷. 基于编队目标重心的航迹起始方法研究[J]. 无线电工程, 2010, 40(2):32-34. (ZHOU D Q, GENG W D, NI C L. Study of track initiation method based on barycenter of formation target[J]. Radio Engineering of China, 2010, 40(2):32-34.)
- [8] 何佳洲,彭思鹏,敬忠良. 数据初始互联的自适应有限记忆法[J]. 光电工程, 2010, 37(9):1-7. (HE J Z, PENG S P, JING Z L. An adaptive limited memory approach to data initial association [J]. Opto-Electronic Engineering, 2010, 37(9):1-7.)
- (上接第 28 页)
- C, LU J, HUANG J. Algorithms research of simultaneous localization and tracking for AUVs [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2014, 28(5):556-562.)
- [11] 刘利枝,蔡自兴. 基于改进的粒子群优化的 FastSLAM 方法[J]. 高技术通讯, 2011, 21(4):422-427. (LIU L M, CAI Z X. An approach to FastSLAM based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. High Technology Letters, 2011, 21(4):422-427.)
- [12] 杜航原,郝燕玲,高忠强,等. 基于鲁棒非线性卡尔曼滤波的自适应 SLAM 算法[J]. 宇航学报, 2012, 33(5):620-627. (DU H Y, HAO Y L, GAO Z Q, et al. An adaptive SLAM algorithm based on robust unscented Kalman filter [J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(5):620-627.)
- [13] MONTEMERLO M, THRUN S, KOLLER D, et al. FastSLAM; a factored solution to the simultaneous localization and mapping problem [C]//The 8th National Conference on Artificial Intelligence, and 14th Conference on Innovative Applications of Artificial Intelligence, Edmonton: AAAI/IAAI, 2002:593-598.
- [14] LI X, AOUF N. Cooperative vSLAM based on UAV application [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Guangzhou:2012:914-919.
- [15] NEMRA A, AOUF N. Experimental airborne NH_{∞} vision-based simultaneous localization and mapping in unknown environments [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C; Journal of Aerospace Engineering, 2010, 224(12):1253-1270.
- [16] TITERTON D, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. 2nd ed. London: IET, 2004.
- [17] MONTEMERLO M, THRUN S. FastSLAM; a scalable method for the simultaneous localization and mapping problem in robotics [M]. London: Springer, 2007.