

## 分布式多传感器融合多目标跟踪方法

韩红<sup>1,2</sup>, 韩崇昭<sup>2</sup>, 朱洪艳<sup>2</sup>, 刘允才<sup>1</sup><sup>(1)</sup>上海交通大学自动化系, 上海 200030; <sup>(2)</sup>西安交通大学综合自动化研究所, 西安 710049

**摘要:** 为实现杂波干扰环境中对密集多目标的精确跟踪, 对于分布式多传感器融合多目标跟踪系统, 提出一种序贯处理的航迹关联算法。其中航迹关联采用了粗、精关联相结合的方法, 航迹融合采用了序贯的融合方法。本文算法在保证航迹关联正确的同时, 大大降低了计算量。仿真实验结果说明了本文方法的有效性。

**关键词:** 分布式; 目标跟踪; 航迹关联; 航迹融合

**文章编号:** 1004-731X (2004) 08-1818-04

**中图分类号:** TP13

**文献标识码:** A

## Distributed Multi-sensor Fusion Multi-target Tracking Approach

HAN Hong<sup>1,2</sup>, HAN Chong-zhao<sup>2</sup>, ZHU Hong-yan<sup>2</sup>, LIU Yun-cai<sup>1</sup><sup>(1)</sup> Department of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China;<sup>(2)</sup> School of Electronic & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In order to realize accurate tracking in heavily clutter environment, for distributed multi-sensor fusion multi-target tracking system, an efficient sequential track-to-track association algorithm is proposed. The association algorithm includes two parts: coarse and precision correlation, and a sequential fuser is used to fuse the tracks generated by the trackers. The algorithm can reduce the calculate burden with proper data association. The simulation results indicate that the proposed method is very efficient.

**Keywords:** distributed; target tracking; track association; track fusion

## 引言

在分布式多传感器系统中, 每个传感器都有自己的信息处理系统, 并且各系统中都收集了大量的目标航迹信息。那么, 一个重要的问题是如何判断来自于不同系统的两条航迹是否代表同一个目标, 这就是航迹与航迹关联的问题。航迹关联是分布式多传感器多目标跟踪融合过程中最关键和最困难的部分, 它是把来自多传感器的观测与传感器各自的观察对象联系起来, 各传感器观察对象解决数据关联的方法很多, 但首先必须根据外推航迹和传感器误差计算确认门, 并用于减少可能的互联数目, 然后使用多种可能的方法之一完成关联。数据关联后就可以进行目标的状态估计, 估计每个航迹目标的真实位置、速度等。

本文中的数据关联分成两个过程, 粗关联和精关联。粗关联采用假设检验的方法, 精关联是在此基础上进一步处理, 避免在交叉和目标密集的情况下出现漏关联或错关联的现象。另外, 采用了序贯的处理算法, 即边进行数据关联边进行航迹融合。过程如下: 从传感器 1 得到的状态估计量和从传感器 2 得到的状态估计量进行关联, 对于关联成功的状态估计, 进行数据融合处理后, 再和传感器 3 的送出的状态估计量进行关联, 依次类推。如果没有关联上, 则保持原有

的状态估计。这种处理方式简单明了, 有效地降低了计算量, 具有一定的工程应用前景。其系统结构如图 1 所示。

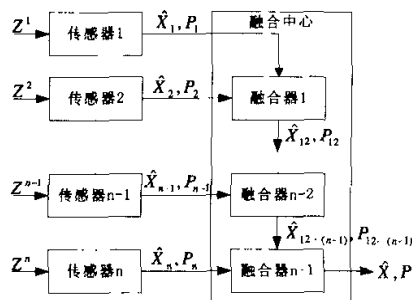


图 1 序贯式多传感器融合多目标跟踪系统结构图

## 1 航迹关联

设每个传感器形成的航迹文件的初始状态及协方差为  $\hat{x}^i(0|0), P^i(0|0), i=1, 2, \dots, n$ , 不同的局部跟踪滤波器互不相关。

## 1.1 基于假设检验的航迹粗关联

文献[1]给出了一种确定不同传感器的两条航迹估计来自同一个目标的假设检验方法。该方法首先求得两条航迹估计的协方差, 并利用此结果通过一个简单子优化的  $\chi^2$  检验确定两条航迹估计是否来自于同一个目标。在本章中, 粗关联就采用了上述的方法。

设目标的动态模型为:

$$x(k+1) = F(k)x(k) + v(k) \quad (1)$$

收稿日期: 2003-06-23

修回日期: 2003-08-15

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2001CB309403); 863

计划项目(20002AA135210); 自然科学基金(60172019)。

作者简介: 韩红(1974-), 女, 陕西省人, 博士, 研究方向为雷达信号处理、目标识别和多传感器数据融合。

其中  $x(k)=[x \ y]^T$ , 过程噪声  $v(k)$  是具有零均值的白噪声, 协方差为  $Q(k)$ 。从多个传感器得到关于目标的量测为:

$$z^i(k) = H^i(k)x(k) + w^i(k) \quad i=1,2,\dots,n \quad (2)$$

量测噪声  $w^i(k)$  是均值为零, 协方差为  $R^i(k)$  的白噪声。假设过程噪声和量测噪声互不相关。

对于传感器  $i, j$ , 基于传感器的状态估计误差为:

$$\tilde{x}^i(k) = x^i(k) - \hat{x}^i(k) \quad (3)$$

$$\tilde{x}^j(k) = x^j(k) - \hat{x}^j(k) \quad (4)$$

其中  $x^i(k), x^j(k)$  为对应目标的真实状态, 假定状态估计误差为高斯型的随机矢量。状态估计的差分记为:

$$\hat{\Delta}(k) = \hat{x}^i(k) - \hat{x}^j(k) \quad (5)$$

显然, 上式是对应的真实目标状态差分的估计, 即

$$\Delta(k) = x^i(k) - x^j(k) \quad (6)$$

如果  $\hat{x}^i(k), \hat{x}^j(k)$  为同一目标的两个估计, 则应有如下假设成立:

$$H_0: \Delta(k)=0 \quad (7)$$

如果  $\hat{x}^i(k), \hat{x}^j(k)$  为不同目标的航迹, 则有假设:

$$H_1: \Delta(k) \neq 0 \quad (8)$$

为验证上述假设成立, 设:

$$\tilde{\Delta}(k) = \Delta(k) - \hat{\Delta}(k) \quad (9)$$

显然  $\tilde{\Delta}(k)$  的均值为零, 协方差为:

$$\begin{aligned} T(k) &= E(\tilde{\Delta}(k)\tilde{\Delta}^T(k)) \\ &= E((\tilde{x}^i(k) - \tilde{x}^j(k))(\tilde{x}^i(k) - \tilde{x}^j(k))^T) \\ &= P^i(k|k) + P^j(k|k) \end{aligned} \quad (10)$$

定义估计误差之间的距离:

$$D_{ij} = \tilde{\Delta}^T(k)T^{-1}(k)\tilde{\Delta}(k) \quad (11)$$

从前面的假设可知, 距离  $D_{ij}$  服从自由度为  $n_x$  (状态矢量的维数) chi-square 分布, 从而假设检验  $H_0$  vs  $H_1$  可表述为接受  $H_0$ :

$$\text{if } D \leq D_\alpha \quad P\{D \leq D_\alpha | H_0\} = 1 - \alpha \quad (12)$$

给定  $\alpha$  值, 阈值  $D_\alpha$  的确定可通过下式得到:

$$D_\alpha = \chi_{n_x}^2(1-\alpha) \quad (13)$$

若传感器  $i, j$  分别形成  $M, N$  条航迹, 则有  $M \times N$  个假设检验, 其距离  $D_{ij}$  则构成一个矩阵  $\Omega^D(D_{mn})$ , 其中  $m=1,2,\dots,M, n=1,2,\dots,N$ 。

## 1.2 精关联

精关联的目的是避免在目标比较密集, 即目标之间的距离比较近情况下, 出现漏关联, 错关联的现象。

精关联分为以下几个步骤:

保留所有满足上述假设检验的状态对, 并按照对应的顺序构成一个矩阵  $\hat{\Omega}(D_{mn})$ :

$$\hat{\Omega}(D_{mn}) = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & \dots & 0 \\ D_{12} & D_{22} & D_{23} & \dots & D_{2n} \\ 0 & D_{32} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & D_{n2} & 0 & \dots & D_{nn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$\hat{\Omega}(D_{mn})$  对应的确认矩阵  $\Omega$  为:

$$\Omega = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 1 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

以每个量测都有唯一的源与之对应, 每个目标最多有一个量测以其为源的原则对确认矩阵  $\Omega$  进行拆分, 获得多个互联矩阵。假设可以获得  $L$  个互联矩阵。

传感器  $i, j$  在  $k$  时刻满足上式假设检验的状态估计量分别有  $U, V$  个, 设  $d_k = \min(U, V)$ 。

需要说明的是, 互联矩阵和可行互联事件之间是一一对应的。

对应于不同的互联矩阵, 分别计算如下的似然函数:

$$g_{mn(s)} = \frac{\exp[-\frac{1}{2}(x_{ms}^i - x_{ms}^j)'T^{-1}(k)(x_{ms}^i - x_{ms}^j)]}{(2\pi)^{n_x/2} |T(k)|^{1/2}} \quad (16)$$

$$\text{令 } r_{mn} = \prod_{s=1}^{d_k} g_{mn(s)} \quad (17)$$

$$\text{有 } \beta_l = \frac{r_{mn}^l}{\sum_{i=1}^L r_{mn}^i} \quad (18)$$

将  $\beta_l (l=1,2,\dots,L)$  从大到小的顺序排列。

若最大值  $\max_{1 \leq l \leq L} \beta_l (l=1,2,\dots,L) > Ct$ , 则接受其对应的互联矩阵  $\Omega_{1st}$  所建立的假设。其中  $0 < Ct < 1$  为预先设定的门限, 其值应根据实际情况进行选取。并将第二大值  $\max_{2nd} \beta_l$  对应的互联矩阵  $\Omega_{2nd}$  保留, 作为下一步计算中的一个互联矩阵。

若  $\max_{1 \leq l \leq L} \beta_l (l=1,2,\dots,L) < Ct$ , 则拒绝前面建立的假设, 并将  $\Omega_{1st}$  保留, 删除其余的假设。

在序贯的处理过程中, 用传感器  $i, j$  中已经过关联和融合的状态估计与第三个传感器的状态输出, 再次重复上述步骤, 直至完成对所有传感器的关联融合计算。

对于密集的多目标环境, 目标间距比较近, 尤其是杂波也比较密集, 由于传感器  $i$  或  $j$  的估计误差较大, 如果仅仅采取假设检验, 就有可能产生漏关联或错关联的现象。针对这种情况, 在精关联中, 通过计算似然函数, 选择概率最大的互联矩阵对应的可行互联事件, 并保留第二可能的互联矩阵进入与第三个传感器的关联计算, 这样做可以避免漏、错关联的产生。

## 2 航迹融合

如果航迹关联成功, 接下来就是如何对相应的航迹文件进行融合。

一般来说, 有两种航迹融合算法, 独立航迹情况下的融合算法和误差相关情况下的融合算法。前者适用于各个传感器信息处理系统之间的过程噪声、量测噪声互不相关, 即航迹估计的误差互相独立的情况, 而后者则适用于传感器信息处理系统之间的量测噪声互不相关, 同时过程噪声和量测

噪声也相互独立的情况下,而传感器航迹估计误差相关的情况,该算法实质上是一种最小均方误差(MMSE)意义上的航迹融合算法。

假设各个传感器信息处理系统之间的过程噪声、量测噪声互不相关,即航迹估计的误差 $\hat{x}^{(i)}(k)$ , $\hat{x}^{(j)}(k)$ 互相独立,则有:

状态融合:

$$\hat{x}(k) = P^{(j)}(k)(P^{(j)}(k) + P^{(i)}(k))^{-1} \hat{x}^{(i)}(k) + P^{(i)}(k)(P^{(j)}(k) + P^{(i)}(k))^{-1} \hat{x}^{(j)}(k) \quad (19)$$

协方差融合:

$$P(k) = P^{(j)}(k)(P^{(j)}(k) + P^{(i)}(k))^{-1} P^{(j)}(k) \quad (20)$$

### 3 仿真结果

设在三个雷达的共同监视区域内有四个目标,均在水平面上运动,其场景如图2所示。不考虑传感器漏检现象,采样周期都是1s,传感器采样同步且都位于坐标原点。

对于3D雷达,量测输出为目标的距离、方位角和俯仰角。设目标反射中心与质心相重合,则雷达量测模型为:

$$\begin{cases} r_R(k) = r(k) + w_{rR}(k) \\ \theta_R(k) = \theta(k) + w_{\theta R}(k) \\ \varphi_R(k) = \varphi(k) + w_{\varphi R}(k) \end{cases} \quad (21)$$

$r(k)$ 、 $\theta(k)$ 和 $\varphi(k)$ 为真值, $w_{rR}(k)$ 、 $w_{\theta R}(k)$ 和 $w_{\varphi R}(k)$ 为量测噪声,均为期望为零,方差分别为 $\sigma_{rR}^2$ 、 $\sigma_{\theta R}^2$ 、 $\sigma_{\varphi R}^2$

的高斯白噪声。则有:

$$\begin{bmatrix} r_R(k) \\ \theta_R(k) \\ \varphi_R(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} \\ \arctan \frac{y(k)}{x(k)} \\ \arctan \frac{z(k)}{\sqrt{x^2(k) + y^2(k)}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{rR}(k) \\ w_{\theta R}(k) \\ w_{\varphi R}(k) \end{bmatrix} \quad (22)$$

设三个雷达的 $\sigma_{rR}^2$ 分别为 $50^2 m^2$ 、 $70^2 m^2$ 和 $80^2 m^2$ ,方位和俯仰角 $\sigma_{\theta R}^2$ 、 $\sigma_{\varphi R}^2$ 的量测方差相同,分别为: $10^2 mrad^2$ 、 $12^2 mrad^2$ 和 $15^2 mrad^2$ 。系统误差为 $0.01^2 I_{3 \times 3}$ 。

设杂波为一致性分布,对于每个采样点,有效回波有三个。局部跟踪器采用最近邻的原则实现点迹与航迹的关联,并通过滤波器给出目标位置与速度的估计值。

图3给出了雷达1的跟踪结果。从其跟踪结果可以看到,在目标航迹有交叉或比较密集时,最近邻方法(NN)并不能保证完全正确的关联。

图4给出了序贯处理方式下,只采用假设检验的方法进行航迹关联后的航迹融合结果。可以看到,在目标比较密集的情况下,并不能保证完全正确的关联。

图5给出了本文中提出的航迹关联和融合方法的跟踪结果。图6,图7中分别给出了目标1在单传感器跟踪,假设检验关联与本文算法等情况下的RMS位置误差和速度误差。可以看到,在目标航迹出现交叉且比较密集的情况下,

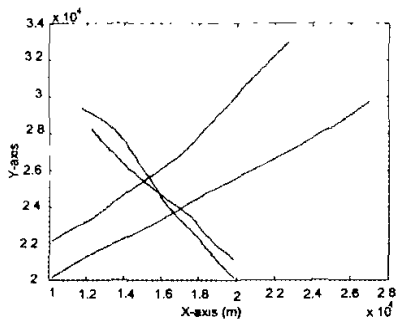


图2 仿真场景

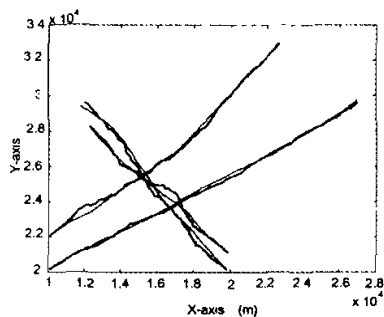


图3 雷达1的跟踪结果

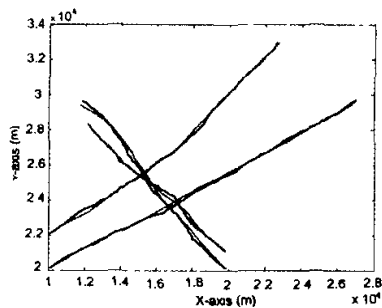


图4 假设检验关联(相关)的航迹融合输出

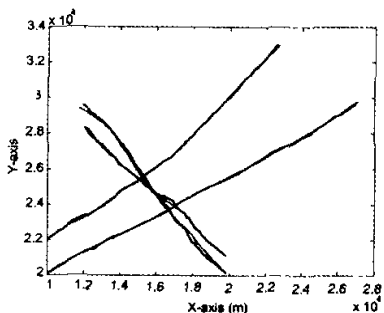


图5 航迹融合输出结果

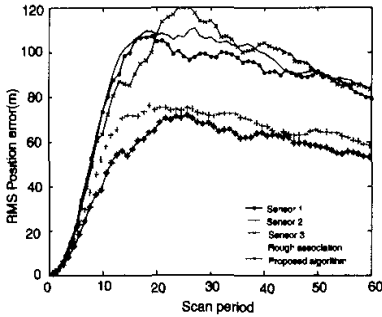


图6 目标1的RMS位置误差比较

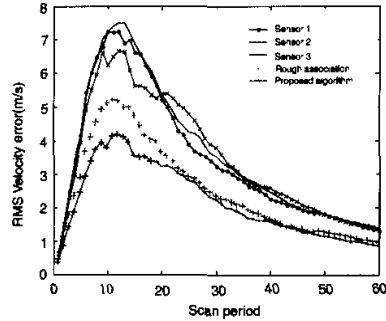


图7 目标1的RMS速度误差比较

本文算法的关联正确率要高,且融合后的精度比单个传感器的跟踪精度都高,这也是融合效果的体现。

## 4 结论

分布式多传感器信息融合系统具有结构简单、计算量小等优点,实际中采用分布式融合方法更为广泛。因此,在设计新系统时,分布结构已成为优先选择的方案。

本文中提出了一种序贯处理的分布式多传感器信息融合的多目标跟踪方法,这种方法采取了边进行航迹关联边做航迹融合的处理流程,在保证航迹关联正确的基础上,尽量避免了穷举搜索,也就避免了爆炸的计算要求。数据关联采用粗关联和精关联结合的方法。

从仿真结果可以看到,本文算法在解决杂波干扰环境下分布式多传感器融合密集多目标跟踪问题的有效性,且可以看到多传感器系统对目标状态估计精度的明显改善。

## 参考文献:

- [1] Chang K C, Saha R K, Bar-Shalom Y. On optimal track-to-track fusion [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1997, 33(4): 1271-1275.
- [2] Li X R, Bar-Shalom Y. Tracking in clutter with nearest neighbor filter: analysis and performance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1996, 32(3).
- [3] Shalom Y B. Tracking and data association [M]. Orlando: Academic Press, Inc., 1988.
- [4] Bar-Shalom Y, Li X R. Estimation and Tracking [M]. Artech House, 1993.
- [5] 何友, 王国宏, 陆大隆, 彭应宁. 多传感器信息融合及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000.
- [6] 康耀红. 数据融合理论与应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1997.

(上接第1817页)

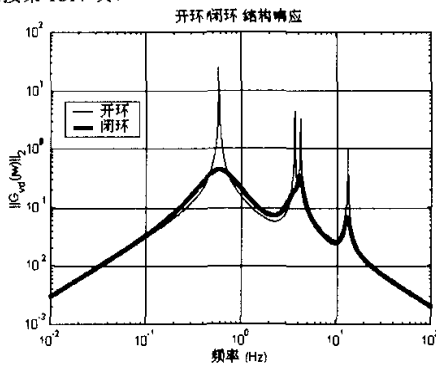


图4 开环及 $H_{\infty}$ 闭环控制响应曲线


态的广义扰动 $d(s)$ 到模态广义速度 $v(s)$ 输出的奇异值。控制加权为 $R=0.00005$ , 状态加权为 $Q=0.1$ , 传感噪声加权为 $V=0.001$ ; 过程扰动加权为 $W=0.1$ 。比较开环和闭环控制可知, 控制后的振幅被大大降低,  $H_{\infty}$ 控制后的最大幅值要比 $H_2$ 控制的低。这表明控制方法可以有效地抑制挠性板由于扰动力引起的振动。

## 4 结论

本文将 $H_2$ 控制和 $H_{\infty}$ 控制方法应用于挠性悬臂板的振动主动控制, 仿真结果表明, 系统存在外部扰动力的情况, 具有较强的鲁棒性, 并且有效地抑制系统的振动。

## 参考文献:

- [1] 黄文虎. 航天柔性结构振动控制的若干新进展[J]. 力学进展, 1997, 27(1): 5-16.
- [2] 李俊宝, 张景绘. 振动工程中智能结构的研究进展[J]. 力学进展, 1999, 29(2): 165-177.
- [3] Hyland D C, Junkins J L, Longman R W. Active Control Technology for Large Space Structures [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1993, 16(5): 801-821.
- [4] Robert L Clark, William R Saunders, Gary P. Gibbs. Adaptive Structures: Dynamics and Control [M]. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, INC 1998.
- [5] 吴敏, 桂卫华. 现代鲁棒控制[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1998.
- [6] Zhou Kemin with John C Doyle, Keith Glover. Robust and Optimal Control [M]. Prentice-Hall, Inc. 1996.
- [7] Doyle J C, K Glover, Khargonekar P P, Francis B A. State-Space Solutions to Standard  $H_2$  and  $H_{\infty}$  Control Problems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1989, 34(8): 831-847.
- [8] 邱志成. 挠性板振动抑制的敏感器与驱动器优化配置[J]. 宇航学报, 2002, (4): 30-36.

作者: 韩红, 韩崇昭, 朱洪艳, 刘允才  
作者单位: 韩红(上海交通大学自动化系, 上海, 200030; 西安交通大学综合自动化研究所, 西安, 710049), 韩崇昭, 朱洪艳(西安交通大学综合自动化研究所, 西安, 710049), 刘允才(上海交通大学自动化系, 上海, 200030)  
刊名: 系统仿真学报   
英文刊名: JOURNAL OF SYSTEM SIMULATION  
年, 卷(期): 2004, 16(8)  
被引用次数: 5次

参考文献(6条)

1. Chang K C; Saha R K; Bar-Shalom Y On optimal track-to-track fusion 1997(04)  
2. Li X R; Bar-Shalom Y Tracking in clutter with nearest neighbor filter: analysis and performance 1996(03)  
3. SHALOM Y B Tracking and data association 1988  
4. Bar-Shalom Y; Li X R Estimation and Tracking 1993  
5. 何友; 王国宏; 陆大喆; 彭应宁 多传感器信息融合及应用 2000  
6. 康耀红 数据融合理论与应用 1997

本文读者也读过(10条)

1. 刘航, 窦丽华, 董领逊, LIU Hang, DOU Li-hua, DONG Ling-xun 基于改进积累方式的Hough变换和最小方差航迹起始方法[期刊论文]-火力与指挥控制2009, 34(2)  
2. 韩红, 韩崇昭, 朱洪艳, 李辉 分布式多传感器融合数据关联算法[期刊论文]-信息与控制2003, 32(z1)  
3. 侯宏录, 周德云, Hou Honglu, Zhou Deyun 基于IMM的光电经纬仪机动目标跟踪优化算法[期刊论文]-西北工业大学学报2007, 25(4)  
4. 戴欣, 郝旭 雷达多目标跟踪算法[期刊论文]-中国新技术新产品2011(10)  
5. 艾琨 使用多传感器的融合数据进行数据互联[期刊论文]-情报指挥控制系统与仿真技术2001(6)  
6. 王海鹏, 董云龙, 何友, WANG Haipeng, DONG Yunlong, HE You 基于广义相关法的分布式多传感器多目标跟踪算法研究[期刊论文]-弹箭与制导学报2009, 29(6)  
7. 金术玲, 梁彦, 潘泉, 程咏梅, JIN Shu-ling, LIANG Yan, PAN Quan, CHENG Yong-mei 一种有效的Hough变换航迹起始积累方法[期刊论文]-系统仿真学报2007, 19(4)  
8. 许晓剑, 田康生, 范锦勇, 李鹏, XU Xiao-jian, TIAN Kang-sheng, FAN Jin-yong, LI Peng 基于极大似然估计的最优航迹关联算法[期刊论文]-空军雷达学院学报2010, 24(1)  
9. 叶西宁, 顾幸生, 常青, 潘泉, YE Xi-ning, GU Xing-sheng, CHANG Qing, PAN Quan 一种自适应多目标跟踪算法[期刊论文]-系统工程与电子技术2005, 27(11)  
10. 王宇, 魏永峰, WANG Yu, WEI Yong-feng 舰载雷达系统的分布式模拟目标相关性分析[期刊论文]-电子信息对抗技术2010, 25(3)

引证文献(4条)

1. 叶继坤, 雷虎民, 薛东风, 李炯, 邵雷 基于几何关系的多导弹协同跟踪算法[期刊论文]-系统工程理论与实践2012(10)  
2. 段同乐 地面多传感器数据融合算法分析与软件实现[学位论文]硕士 2008  
3. 戚国庆 近程防空反导中的有关目标估计理论与技术[学位论文]博士 2006

4. [徐本连](#) [双（多）基纯方位目标定位与跟踪算法研究](#)[学位论文]博士 2006

引用本文格式：[韩红](#). [韩崇昭](#). [朱洪艳](#). [刘允才](#) [分布式多传感器融合多目标跟踪方法](#)[期刊论文]-[系统仿真学报](#)  
2004(8)