

相关噪声情况下航迹的关联及融合算法

左东广¹, 韩崇昭¹, 魏瑞轩², 郑 林¹

(1. 西安交通大学综合自动化研究所, 陕西西安 710049; 2. 空军工程大学工程学院, 陕西西安 710038)

摘 要: 本文研究了量测噪声与系统噪声相关情况下同步多传感跟踪系统的航迹关联及融合技术. 考虑线性连续时间系统中过程噪声及量测噪声相互独立的情况, 通过线性系统的离散化表明了, 在多传感跟踪系统中, 由于公共噪声的影响而使离散化的量测噪声及过程噪声之间存在一定的相关性. 根据假设检验的理论, 本文推导了噪声相关情况下的多传感器跟踪系统航迹关联及融合的算法, Monte Carlo 仿真结果表明了该算法的有效性.

关键词: 相关噪声; 目标跟踪; 航迹关联

中图分类号: TP274 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2002) 08-1117-04

Tracks Association and Fusion in Case of Correlated Noises

ZUO Dong-guang¹, HAN Chong-zhao¹, WEI Rui-xuan², ZHENG Lin¹

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; 2. College of Engineering, Airforce Engineering university, xi'an, Shaanxi 710038)

Abstract: The track association and fusion technique of synchronized multi-sensor tracking system in case of correlated noises is developed. The discretization to linear continuous time system expresses that there exists a correlation among common process noise and measurement noise, although they are independent of in linear continuous time system. And then in the light of hypothesis testing theory, the synchronized multi-sensor track association and fusion algorithm is presented. The simulation results express its validity.

Key words: correlated noise; target tracking; association fusion

1 引言

由于多传感器跟踪系统具有可视范围广、相互之间量测信息的互补性强等特点, 采用多传感器的目标跟踪系统比采用单传感器的目标跟踪系统能提供更好目标跟踪性能, 因而多传感器目标跟踪问题引起了广泛的注意, 基于多传感器目标航迹融合的研究已有许多文献可以参考([2~7]). 但原来对多传感器跟踪融合算法的研究多是建立在多传感器的量测噪声互不相关基础上, 或只研究了传感器之间量测相关问题, 过程噪声及测量噪声相关情况的研究文献很少见到. 本文对多传感器的同步离散化研究表明在离散多传感器跟踪系统中, 不仅在量测噪声之间, 在量测噪声与过程噪声之间的也是相关的, 并在此基础上推导了两个传感器之间目标航迹的关联及融合公式, Monte Carlo 仿真结果表明了它的有效性.

2 相关噪声问题的出现

考虑如下具有维纳过程噪声的线性连续时间系统^[8]

$$dx(t) = A(t)x(t)dt + (t)d(t), \forall t \geq 0 \quad (1)$$

其中 $A(t)$, (t) 为适当维数的系数矩阵, $x(t) \in R^n$ 为系统的状态矢量, (t) 为具有零均值和单位增量协方差的维纳过程, 系统的初始状态 $x(0)$ 是均值为 \bar{x}_0 , 协方差为 P_0 的随机

矢量.

设有多个传感器对上述的连续时间系统进行观测, 量测方程为:

$$dy^{(i)}(t) = C^{(i)}(t)x(t)dt + (t)d^{(i)}(t), \quad i = 1, 2, \dots, \forall t \geq 0 \quad (2)$$

式中 $y^{(i)}(t)$ 第 i 传感器的测量矢量, (t) 为具有零均值和单位增量协方差的维纳过程, $C^{(i)}(t)$, (t) 是具有适当维数的系数矩阵, 且 $x(0)$, (t) , (t) 互不相关.

设 (t, s) 是 $A(t)$ 对应的转移阵, T 为采样间隔, 上述线性连续时间方程(1), (2)进行离散化得:

$$x(k+1) \triangleq x((k+1)T) = F(k)x(k) + v(k) \quad (3)$$

$$z^{(i)}(k+1) \triangleq y^{(i)}((k+1)T) - y^{(i)}(kT) = H^{(i)}(k+1)x(k+1) + w^{(i)}(k+1) \quad (4)$$

其中:

$$F(k) = ((k+1)T, kT)v(k) = \int_{kT}^{(k+1)T} A(t)dt \quad (5)$$

$$H^{(i)}(k+1) = h^{(i)}(k+1)F^{-1}(k)$$

$$h^{(i)}(k+1) = \int_{kT}^{(k+1)T} C^{(i)}(t) \quad (t, kT)dt$$

$$w^{(i)}(k+1) = (t)(k+1) - H^{(i)}(k+1)v(k)$$

$$\begin{aligned} {}^{(i)}(k+1) &= \frac{(k+1)^T}{kT} {}^{(i)}((k+1)T, s) d(s) \\ &+ \frac{(k+1)^T}{kT} {}^{(i)}(k) d^{(i)}(k) \\ {}^{(i)}(k+1) &= \frac{(k+1)^T}{kT} C^{(i)}(k) (z^{(i)}(k), s) d \end{aligned}$$

在离散方程(3), (4)中 $v(k), w^{(i)}(k+1)$ 可分别看作离散后系统的过程噪声及量测噪声. 根据随机积分的性质有: $E(v(k))=0, E(w^{(i)}(k))=0$, 即线性方程离散化后, 系统的过程噪声及量测噪声的均值依然保持为零, 而相应的方差项变为:

$$\begin{aligned} Q(k) &= \text{cov}(v(k), v(k)) \\ &= \frac{(k+1)^T}{kT} ((k+1)T,) () () ((k+1)T,) d \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R^{ij}(k) &= \text{cov}(w^{(i)}(k), w^{(j)}(k)) = \frac{(k+1)^T}{kT} I^{(i)}((k+1)T,) \\ &\cdot ({}^{(j)}((k+1)T,)) + \frac{(k+1)^T}{kT} I^{(j)}(k) ({}^{(i)}(k)) J d \\ &+ H^{(i)}(k+1) Q(k) (H^{(j)}(k+1)) - H^{(i)}(k+1) \\ &\cdot r^{(j)}(k+1) - (H^{(j)}(k+1) r^{(i)}(k+1)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中 δ^{ij} 为 Kronecker delta 函数

$$\delta^{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$$

$$\begin{aligned} r^{(i)}(k+1) &= \text{cov}(v(k), {}^{(i)}(k+1)) = \frac{(k+1)^T}{kT} ((k+1)T,) \\ &\cdot () ({}^{(i)}((k+1)T,)) d \end{aligned} \quad (7)$$

从式(6), (7)可以看出在连续时间系统情况下原本不相关的传感器之间量测噪声由于公共过程噪声的影响而变得相关了, 这与实际情况是相符合的. 我们再看系统离散化后过程噪声与传感器的测量噪声的相关情况:

$$\begin{aligned} B^i(k+1) &= \text{cov}(v(k), w^{(i)}(k+1)) \\ &= r^{(i)}(k+1) - Q(k) (H^{(i)}(k+1)) \end{aligned} \quad (8)$$

因而在离散化后过程噪声与传感器的测量噪声也是相关的. 通过上述的分析可以得出这样的结论: 将线性连续时间系统离散化, 由于公共过程噪声的影响而使得传感器测量噪声之间, 以及过程噪声与测量噪声之间由不相关而变得相关了. 所以在进行多传感器信息的融合时不仅需要考虑到测量噪声之间的相关情况, 而且也需要考虑到过程噪声与测量噪声的相关情况, 使之得到的结果更加符合实际情况.

3 同步传感器的航迹关联及融合

为简单起见, 我们考虑如图 1 所示的航迹融合结构. 假定各传感器的量测时间严格同步, 基于两个传感器的目标航迹估计需要在处理中心进行航迹关联及融合, 以提高关于目标状态估计的确定性. 两个航迹文件的初始状态及协方差分别为 $x^i(0|0), P^i(0|0), i=1, 2$, 在初始条件下, 它们互不相关.

目标的动态模型为:

$$x(k+1) = F(k)x(k) + v(k) \quad (9)$$

式中过程噪声 $v(k)$ 是具有零均值的白噪声, 协方差为 $Q(k)$. 从两个传感器得到关于目标的量测为:

$$z^i(k) = H^i(k)x(k) + w^i(k), i=1, 2 \quad (10)$$

其中量测噪声 $w^i(k)$ 是均值为零, 协方差为 $R^i(k)$ 的白噪声序列.

设两个传感器量测噪声之间的互协方差为 $R^{12}(k) = \text{cov}(w^1(k), w^2(k))$, 过程噪声与量测噪声的协方差分别为: $B^1(k) = \text{cov}(v(k-1), w^1(k)), B^2(k) = \text{cov}(v(k-1), w^2(k))$.

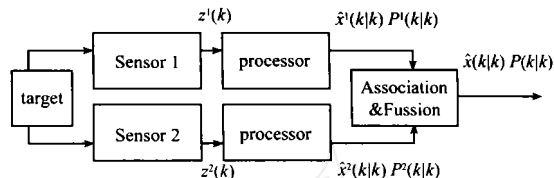


图 1 航迹融合结构图

3.1 航迹关联

基于传感器的状态估计误差:

$$\tilde{x}^1(k) = x^1(k) - \hat{x}^1(k) \quad (11)$$

$$\tilde{x}^2(k) = x^2(k) - \hat{x}^2(k) \quad (12)$$

其中 $x^1(k), x^2(k)$ 为对应目标的真实状态, 假定状态估计误差为高斯型随机矢量. 状态估计的差分记为:

$$\Delta(k) = \hat{x}^1(k) - \hat{x}^2(k) \quad (13)$$

显然, 式(13)是对应的真实目标状态差分的估计, 即

$$\Delta(k) = x^1(k) - x^2(k) \quad (14)$$

如果 $\hat{x}^1(k), \hat{x}^2(k)$ 为同一目标的两个估计, 则应有如下的假设成立:

$$H_0: \Delta(k) = 0 \quad (15)$$

如果 $\hat{x}^1(k), \hat{x}^2(k)$ 为不同目标的航迹, 则有假设:

$$H_1: \Delta(k) \neq 0 \quad (16)$$

为验证假设式(15)成立, 设:

$$\tilde{\Delta}(k) = \tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k) \quad (17)$$

显然 $\tilde{\Delta}(k)$ 的均值为零, 其协方差为:

$$\begin{aligned} T(k) &= E(\tilde{\Delta}(k) \tilde{\Delta}^T(k)) = E((\tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k)) (\tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k))^T) \\ &= P^1(k|k) + P^2(k|k) - P^{12}(k|k) - (P^{12}(k|k)) \end{aligned} \quad (18)$$

其中 $P^{12}(k|k)$ 为交差协方差项, 可通过下述过程得到:

$$P^{12}(k|k) = E(\tilde{x}^1(k) \tilde{x}^2(k)) \quad (19)$$

从传感器的量测得到的关于目标的状态估计可通过 Kalman 滤波得到:

$$\begin{aligned} \hat{x}^i(k|k) &= F(k-1) \hat{x}^i(k-1|k-1) + K^i(k) (z^i(k) \\ &- H^i(k) \hat{x}^i(k-1|k-1)) \end{aligned} \quad (20)$$

式中 $K^i(k)$ 为对应 Kalman 滤波器的增益, $i=1, 2$. 将式(20)代入状态估计误差方程:

$$\begin{aligned} \tilde{x}^i(k) &= x^i(k) - \hat{x}^i(k|k) = [I - K^i(k) H^i(k)] \{ F(k-1) \tilde{x}^i(k-1|k-1) \\ &+ v(k-1) \} - K^i(k) w^i(k) \end{aligned} \quad (21)$$

考虑过程噪声与量测噪声等因素的影响, 并将式(21)代入式(19)中有:

$$\begin{aligned} P^{12}(k|k) &= E(\tilde{x}^1(k) \tilde{x}^2(k)) = [I - K^1(k) H^1(k)] \{ F(k-1) P^{12}(k-1|k-1) F(k-1) + Q(k-1) \} [I - K^2(k) H^2(k)] \\ &+ K^1(k) R^{12}(k) (K^2(k)) - [I - K^1(k) H^1(k)] B^2(k) (K^2(k)) - K^1(k) (B^1(k)) [I - K^2(k) H^2(k)] \end{aligned} \quad (22)$$

式(22)的初始条件^[1]为: $P^{12}(0|0) = 0$. 再定义估计误差之间

的距离:

$$D \triangleq \tilde{x}^T(k) T^{-1}(k) \tilde{x}(k) \quad (23)$$

从前面的假设可知,距离 D 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 :

$$\text{if } D \leq D \quad P\{D \leq D | H_0\} = 1 - \quad (24)$$

给定值,阈值 D 的确定可通过式(25)得到:

$$D = \frac{2}{n_x} (1 -) \quad (25)$$

3.2 航迹融合

如果假设 H_0 成立,接下来的工作就是如何对两个航迹文件进行融合.考虑具有先验均值的静态线性估计方程:

$$\hat{x}(k) = \bar{x} + P_{xz} P_{zz}^{-1} (z - \bar{z}) \quad (26)$$

可将 $\hat{x}^1(k|k)$ 视作先验均值, $\hat{x}^2(k|k)$ 为量测值.则有:

$$P_{xz} = E\{ \tilde{x}^1(k) (\tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k)) \} = P^1(k|k) - P^{12}(k) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} P_{zz} &= E\{ (\tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k)) (\tilde{x}^1(k) - \tilde{x}^2(k)) \} \\ &= P^1(k|k) + P^2(k|k) - P^{12}(k|k) - (P^{12}(k|k)) \end{aligned} \quad (28)$$

将式(28),(29)代入式(27)可得的航迹融合公式:

$$\hat{x}(k|k) = \hat{x}^1(k|k) + P_{xz} P_{zz}^{-1} (\hat{x}^2(k|k) - \hat{x}^1(k|k)) \quad (29)$$

$$P(k|k) = P^1(k|k) - P_{xz} P_{zz}^{-1} (P_{xz}) \quad (30)$$

式中的 P_{xz} , P_{zz} , $P^{12}(k)$ 的计算分别按式(27),(28)及(22)进行.与文献[1]中的航迹融合算法相比,在交差相关协方差的计算上有较大的变化,这是因为文献[1]没有考虑过程噪声及量测噪声之间的相互关联的原因.

4 数字仿真

考虑如下常速度运动目标模型:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & T \\ 0 & T \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} \frac{1}{2} T^2 \\ T \end{bmatrix} v(k) \quad (31)$$

$x(k)$ 是由位移和速度组成的状态矢量, $T=5s$ 是系统的采样间隔, $v(k)$ 是均值为零,方差为 $Q=0.4^2$ 的白噪声.系统初始状态及协方差分别为: $x_0 = [1000, 100]$, $P_0 = \text{diag}(100^2, 10^2)$ 系统初始状态与过程噪声相互独立.设有两个独立的传感器对运动目标的位移进行检测,量测方程记为:

$$z^i(k) = [1 \ 0] x(k) + w^i(k), \quad i=1,2 \quad (32)$$

其中 $w^i(k)$ 为均值为零,方差分别为 $R^1(k) = 80^2$, $R^2(k) = 100^2$ 的白噪声.我们运用 Monte Carlo 仿真实验验证过程噪声、量测噪声在不同相关系数情况下本文算法的有效性,所有给出的结果都是均方根 (RMS) 误差: $e(k) =$

$$\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{j=1}^M [\tilde{x}_{kl}^k(j) \tilde{x}_{kl}^k(j)]}$$

式中: $\tilde{x}_{kl}^k(j)$ 表示第 j 次运行时 k

时刻的估计误差; $M=50$ 是运行次数.为了说明问题,本文同时给出了误差互不相关算法及状态误差相关两种算法^[1]同本文所提算法对同一问题的仿真结果加以比较.图 2 及图 3 给出了 $v(k)$, $w^1(k)$, $w^2(k)$ 互相关系数分别为 $w^1 = 0.1$, $w^2 = 0.1$, $w^1 w^2 = 0.9$ 情况下的仿真结果.图 4 及图 5 则给出了

$v(k)$, $w^1(k)$, $w^2(k)$ 互相关系数分别为 $w^1 = 0.01$, $w^2 = 0.02$, $w^1 w^2 = 0.05$ 情况下的仿真结果.

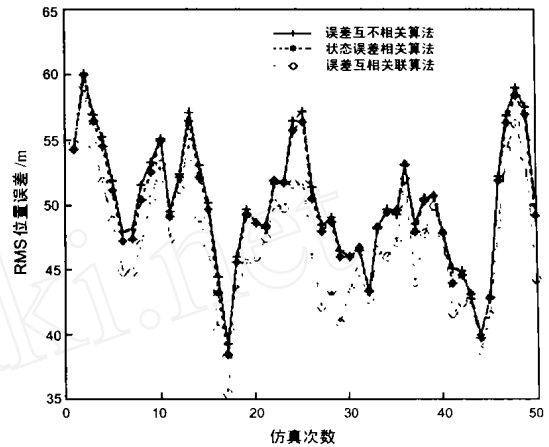


图 2 RMS 位置误差

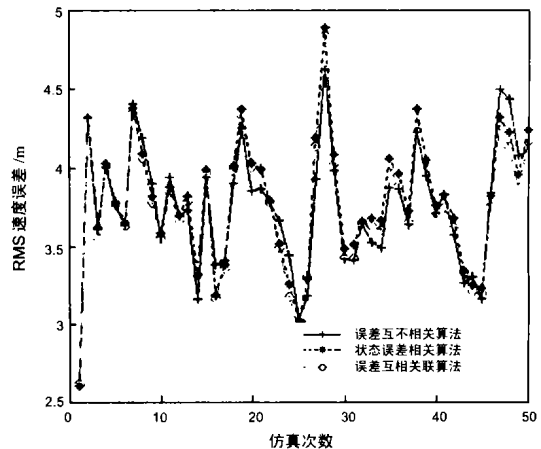


图 3 RMS 速度误差

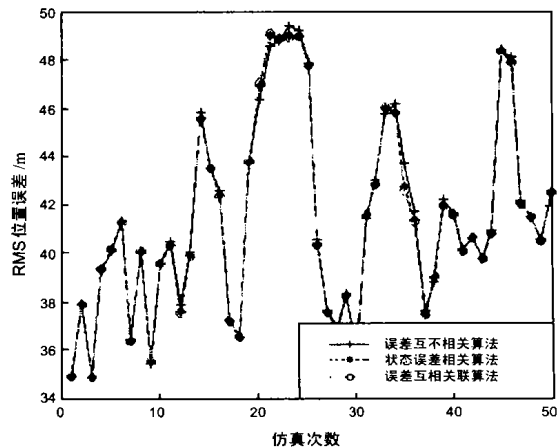


图 4 RMS 位置误差

从图 2~图 5 可以看出,过程噪声、量测噪声相关性越强,则本文算法的有效性要优于其它两种算法,而随着系统噪声、量测噪声相互之间相关性的减弱,这三种算法之间的差异也变得逐渐减小而基本处于拟合状态.

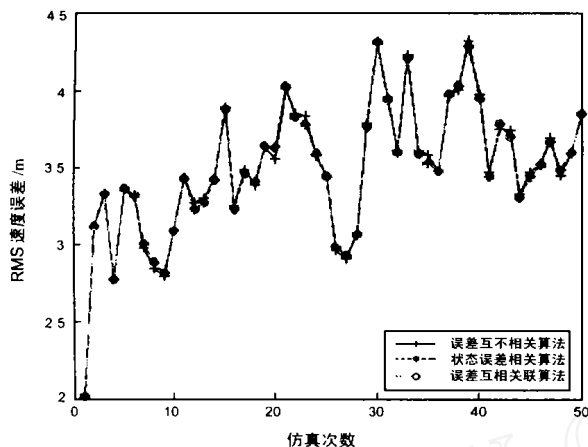


图5 RMS 速度误差

5 结论

本文给出了系统噪声及量测噪声互相关联情况下,基于局部航迹估计的目标航迹关联及融合的算法,同时通过 Monte Carlo 仿真实验同其它两种航迹融合算法进行了对比,仿真结果表明本文所提算法噪声之间关联系数较大情况下优于其它两种算法,在噪声关联比较弱的情况下,本文所提算法等效于其它两种算法。

参考文献:

- [1] Y Bar-Shalom, Xiao-Rong Li. Multitarget-Multisensor Tracking: Principles and Techniques [M]. Storrs: CTYBS Publishing, 1995: 429 - 468.
- [2] Carl G Looney, Yaakov L Varol, Sheng Tang. Multisensor multitarget tracking with central-to-local feedback [A]. Proc. 2000 International Conf. On Information Fusion [C]. Paris, France: 2000: Wed1 - 1.
- [3] Chee-Yee Chong, Shozo Mori. Architectures and Algorithms for Track Association and Fusion [A]. Proc. 1999 International Conf. On Information Fusion [C]. Sunnyvale, California: C-134.

- [4] Saha R K. Track-to-Track fusion with dissimilar sensors [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1996, 32(3): 1021 - 1029.
- [5] A T Alouani, T R Rice, R E Helmick. On sensor track fusion [A]. Proceedings of the American Control Conference [C]. Baltimore, USA: 1994: 1042 - 1046.
- [6] Y Bar-Shalom. On the track-to-track correlation problem [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, AC-26(2): 571 - 572.
- [7] Y Bar-Shalom. The effect of the common process noise on the two-sensor fused-track covariance [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. 1986, AES-22(6): 803 - 805.
- [8] 韩崇昭, 王月娟, 万百五. 随机系统理论 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987: 129 - 241.
- [9] 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: 156 - 178.

作者简介:



左东广 男, 1969年9月生, 河南省方城人, 西安交通大学博士研究生, 主要研究方向为估计融合技术的理论研究, 感兴趣的研究领域: 智能控制、信号处理。



韩崇昭 男, 1943年2月生于陕西乾县, 西安交通大学博士生导师, 主要研究领域是随机控制与自适应控制、工业过程控制与优化、非线性频谱分析, 以及决策理论与决策支持系统等, 近年来主要从事信息融合理论研究, 发表论文 80 多篇, 出版著作 6 本, 曾参与和主持多项重大科研项目, 有多项科研成果获省部级以上奖励。

魏瑞轩 男, 1968年8月生, 陕西岐山人, 空军工程大学工程学院副教授, 主要研究方向为非线性系统辨识与故障诊断、信息处理。