

支持无线传感器网络多目标跟踪的最邻近 数据关联算法研究

朱晓钢¹ 杨兵² 许华杰³

(湖北大学数学与计算机学院 武汉 430062)¹ (湖北大学教育学院 武汉 430062)²
(上海第二工业大学计算机与信息学院 上海 201209)³

摘要 多源数据关联问题是无线传感器网络中多传感器数据融合的关键技术之一。联合概率数据关联算法是一种跟踪多目标的数据关联算法,它不需要任何关于目标和杂波的先验信息,但与其他有关数据关联算法相比,计算机开销大。在构造有效矩阵的过程中基于最邻近方法的联合概率数据关联算法,结合最邻近数据关联算法的思想,选取统计距离最小的3个有效量测构成有效矩阵,从而简化了有效矩阵,减少了原有算法的计算量。

关键词 传感器网络,多目标跟踪,联合概率数据关联,最邻近

中图分类号 TP311 **文献标识码** A

Nearest Neighbor Method Data Association Algorithm to Support Multi-target Tracking in WSN

ZHU Xiao-gang¹ YANG Bing² XU Hua-jie³

(School of Mathematics & Computer Science, Hubei University, Wuhan 430062, China)¹

(School of Education, Hubei University, Wuhan 430062, China)²

(School of Computer and Information, Shanghai Second Polytechnic University, Shanghai 201209, China)³

Abstract Multi-source data association is one of the key technologies of multi-sensor data fusion in wireless sensor network. The joint probability data association algorithm is a data association algorithm of Multi-target tracking, it doesn't need any priori information about targets and clutters, but its computer expense is very large compared with the other related data association algorithms. The joint probability data association algorithm based on the nearest neighbor method integrates the ideology of nearest neighbor data association in the process of the construction of effective matrix, then selects three valid measurements which have the least statistical distance to construct the effective matrix. This method simplifies the effective matrix, thus reduces the computation of original algorithm.

Keywords Wireless sensor network, Multi-target tracking, Joint probability data association, Nearest neighbor

1 引言

数据关联是多目标跟踪的关键问题,也是多目标跟踪的前提。没有数据关联,就无法对目标进行跟踪与识别。目前,数据关联算法有很多种,其中以联合概率数据关联算法^[1](Joint Probability Data Association, JPDA)最为著名,应用最广泛,它是在概率数据关联^[2]的基础上推广而来的。JPDA算法适用于多目标跟踪,填补了多目标跟踪方面的空白,且跟踪性能优良。但是它在目标和传感器数量多、环境干扰多的情况下,计算复杂度会急剧增加,计算所带来的时延有时候无法承受。因此,一般实际应用中采用的都是改进的JPDA算法。简易联合概率数据关联(CJPDA)^[3]是JPDA的一种简化形式,考虑了落入跟踪门内的所有有效回波对目标状态估计的影响,但是它没有用聚矩阵的分解来计算每个有效回波的关联概率,而是用高斯似然函数来表示观测与航迹的关联程

度。准最佳联合概率数据关联(SJPDA)^[4]在计算关联概率的时候没有考虑所有的联合事件,而是考虑同时有两条航迹存在的局部联合事件。最邻近联合概率数据关联(NNJPDA)^[5]与JPDA不同的地方也是关联概率的计算,该方法的思想是将关联概率最大的有效回波用于目标状态估计。还有其他一些改进算法,如J. A. Roecker, G. L. Phillis提出的次优联合概率数据关联算法^[6],秦卫华、胡飞等提出的一种简化的联合概率数据关联算法^[7],邓未央、王宝树提出的一种近似的联合概率数据关联算法^[8],B. Zhou, N. K. Bose提出的快速联合概率数据关联算法^[9]等。近年来,神经网络^[10]的思想与方法也广泛地应用于目标跟踪与数据关联,获得了许多的研究成果^[11-12],其中以神经网络与联合概率数据关联算法相结合的算法^[13]最为突出。敬忠良^[14]对基于神经网络的目标跟踪和数据关联作了详细的论述。上述这些改进的JPDA算法在减少JPDA算法计算量的同时,也降低了算法的跟踪性能和可

到稿日期:2010-06-03 返修日期:2010-09-05 本文受国家高技术 863 计划(2007AA01Z309),国家自然科学基金(60873030),国防预研基金(9140A04010209JW0504,9140A15040208JW0501)和湖北省自然科学基金资助。

朱晓钢(1976-),男,讲师,主要研究领域为无线传感器网络,E-mail:yangbing@126.com;杨兵(1975-),男,博士后,主要研究领域为现代数据工程、实时数据库系统、无线传感器网络;许华杰(1974-),男,博士,主要研究领域为无线传感器网络。

靠性,并限制了算法的应用范围。

除了 PDA 算法和 JPDA 算法外,还有很多经典的数据关联算法。如最邻近数据关联算法^[15]、交互多模型法^[16]、多假设法^[17]、“全邻”最优滤波器^[18]、航迹分裂法^[19]、最大似然数据关联算法^[20]等,它们各有其适用范围和优缺点。甚至还出现了几种算法相结合的数据关联算法,如相互作用多模型-概率数据关联算法^[21],它是杂波环境中用于跟踪机动目标的经典算法。如今,以信息图和信息集为基础的数据关联算法^[22]也逐渐形成了理论,用于实际。无线传感器网络对复杂度的要求高,实时跟踪的时延也有一定的限制,同时受到传感器节点特殊性,如处理器和存储有限的局限,无线传感器网络中数据关联算法必须在时间复杂度和空间复杂度上符合要求,然后才考虑精度的提高。如何实现一个高效的无线传感器网络的数据关联算法,已经成为无线传感器应用中多目标跟踪的一个重要研究方面。

2 最邻近方法

在多目标跟踪中,每个目标都有一个关联门。传感器接收到的量测数据均分布在目标的周围,有的落入目标的关联门内,有的没有,视具体观测情况而定。最邻近方法为:在某个采样时刻 k ,获得传感器采集到的量测数据后,首先计算所有量测数据与该目标在 k 时刻的预测位置的统计距离,获得该目标对应的有效量测数据(门限过滤),然后选择最邻近(统计距离最小)的有效量测数据作为目标 k 时刻的关联点迹,最后按照某种赋值策略更新目标 k 时刻的状态。

统计距离^[23]的计算公式如下:

$$d_{ij}^2 = e_{ij}(k)S^{-1}(k)e_{ij}^T(k) \quad (1)$$

其中,

$$e_{ij}(k) = Z_j(k) - H\hat{X}_i(k/k-1) \quad (2)$$

式中, $S(k)$ 为 $e_{ij}(k)$ 的协方差矩阵; $Z_j(k)$ 为 k 时刻的有效回波; $\hat{X}_i(k/k-1)$ 为 k 时刻目标的状态预测值。

落入目标关联门内的点迹可能不只一个,获得了所有有效量测对应的统计距离后,就可以根据这些统计距离判断哪个有效量测是目标的最邻近点迹了。

我们知道,在多目标跟踪的复杂情况下,每个目标的关联门内都可能有很多传感器量测值,可能有该目标本身的回波和杂波,也可能有其他目标的回波或是杂波,甚至当目标作交叉运动时,目标本身的最邻近点迹可能会与其交叉运动的目标的最邻近点迹混淆。按照最邻近方法的思想,不管目标作何种运动,也不管目标和传感器的数目是多少,每一个跟踪时刻都是选择最邻近点迹来估计目标的状态。然而,如前所述,在密集杂波多目标环境中,最邻近点迹不一定是跟踪目标的延续点迹,而有可能是其他目标的延续点迹或是本身目标的干扰或噪声,这样的配对使得最邻近方法在密集杂波多目标环境下容易对目标产生误跟,因而该方法在多目标环境下不适用。而联合概率数据关联算法适用于多目标跟踪环境,它对落入目标跟踪门的回波并不进行筛选,而是考虑落入跟踪门内的所有回波对目标状态估计的影响。这样一来,跟踪性能确实是非常优良,但是在密集杂波多目标环境下,计算量将变得很大,根本不能用于实际。考虑到上述两种算法的优缺点,本文提出了 NNM-JPDA 算法。

3 NNM-JPDA 算法

在密集多目标跟踪环境中,只考虑离目标预测位置最近的点迹即“最邻近”数据关联算法,容易产生误跟,而考虑关联门内所有的点迹,即联合概率数据关联算法,又会有很大的计算机开销,而且也没有必要,因为一个目标毕竟只有一个真实的量测。所以考虑到这两种算法的优缺点,NNM-JPDA 算法考虑落入目标关联门内的 3 个点迹。如果落入关联门内的点迹少于 3 个,则全部用于生成有效矩阵,否则计算关联门内所有有效量测与目标预测值之间的统计距离,选取统计距离最小的 3 个有效量测生成有效矩阵。这样一来,对于单目标或目标数较少的情况,NNM-JPDA 算法可以得到比“最邻近”数据关联算法更稳定的跟踪性能,因为它不仅仅只考虑了一个“最邻近”点迹;对于多目标的情况,NNM-JPDA 算法则可以得到和 JPDA 算法差不多的跟踪性能,而计算量又减小很多。

NNM-JPDA 算法与 JPDA 算法的不同之处在于有效矩阵的确立。JPDA 算法对应于传感器传来的所有数据确定有效矩阵,而 NNM-JPDA 算法只考虑统计距离最小的 3 个传感器观测数据。这样一来,有效矩阵就变得非常简单,对有效矩阵进行拆分后所得到的联合关联事件数目就会大大减少,从而降低了计算量。并且,因为所考虑的观测数据数目变化不大,所以无论有效量测数据的数目如何变化,在目标个数不变的情况下,计算量都基本保持不变。

NNM-JPDA 算法的具体步骤如下:

- (1)接收传感器传来的量测。
- (2)计算统计距离:选择一个目标,计算该目标预测位置与所有量测数据的统计距离。如果统计距离小于给定的关联门限,则该量测为对应目标的有效量测,并标记该量测为有效量测,同时记录该有效量测与目标预测位置的统计距离。
- (3)生成有效矩阵:计算完该目标与所有量测数据的统计距离后,可以知道该目标有效量测的数目。如果有效量测少于 3 个,则全部用于生成有效矩阵,否则,将所有有效量测对应的统计距离按从小到大的顺序排序,选择统计距离最小的 3 个有效回波生成有效矩阵。
- (4)若已考虑完所有目标,则进入第(5)步,否则转入第(2)步。
- (5)将标记为有效量测的数据加入有效量测列表中。
- (6)对新的有效矩阵进行联合概率数据关联。

4 算法仿真

为检验 NNM-JPDA 算法的性能,分别对机动和非机动目标的跟踪性能做了仿真研究。假设目标在二维平面内运动,采样周期 $T=2s$,跟踪步数 $n=60$ 。

表 1 仿真参数

参数	算法	σ_x^2/σ_y^2 (m)	q_x/q_y	P_d	P_g	g_sigma (m)	noise_num (个)
	JPDA	10	0.1	0.96	1.0	5.0	4
	NNM-JPDA						

仿真参数设置如表 1 所列。传感器的个数为 2, σ_x^2, σ_y^2 为传感器测距误差; q_x, q_y 为过程噪声; 杂波服从均匀分布, noise_num 为杂波的平均个数; P_d 为目标的探测概率, P_g 为正量测落入跟踪门限的概率, g_sigma 为跟踪关联门限。

本文对两种运动情况分别进行了 50 次仿真实验。图 1 至图 4 给出了其中进行一次独立仿真所产生的跟踪结果。表 2 和表 3 为数据关联的平均计算时间和相对位置误差的比较结果。

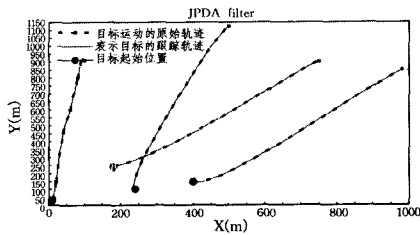


图 1 JPDA 算法: 非机动目标跟踪图

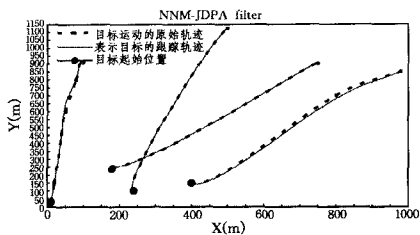


图 2 NNM-JPDA 算法: 非机动目标跟踪图

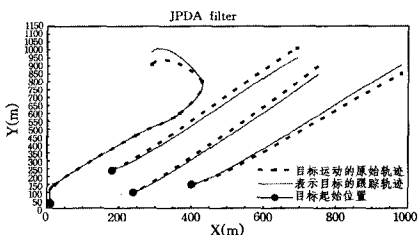


图 3 JPDA 算法: 机动目标跟踪图

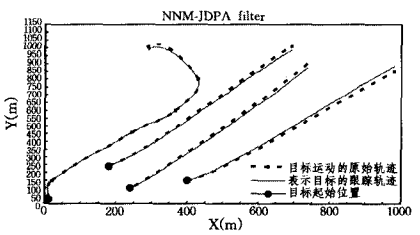


图 4 NNM-JPDA 算法: 机动目标跟踪图

表 2 相对位置误差 (m)

目标	非机动目标		机动目标	
	JPDA	NNM-JPDA	JPDA	NNM-JPDA
1	3.462	3.320	8.513	12.826
2	3.081	2.935	50.141	5.989
3	2.808	2.529	47.866	14.716
4	2.847	2.878	7.882	13.856

表 3 数据关联的平均计算时间 (s)

算法	非机动目标	机动目标
JPDA	1.32	9.23
NNM-JPDA	0.01	0.02

4.1 结果分析

从图 1 和图 2 可以看出, JPDA 算法和 NNM-JPDA 算法在对非机动目标的跟踪中, 两者的跟踪精度相当, 且对于大角度交叉运动的目标也有很好的跟踪性能。从图 3 和图 4 可以看出, JPDA 算法和 NNM-JPDA 算法在对机动目标的跟踪中, 有着很好的跟踪性能, 且跟踪性能相当。但是, NNM-JP-

DA 算法可以很好地对交叉目标进行跟踪, 而 JPDA 算法对于小角度交叉运动的目标容易产生误跟。从表 2 和表 3 可以看出, NNM-JPDA 算法大大减少了数据关联的平均计算, 无论是对非机动目标还是机动目标, NNM-JPDA 算法的数据关联的平均时间都大致相同, 因为在目标数目相同的情况下, 它总是取距离各个目标统计距离最近的 3 个点迹, 使得有效矩阵的分解复杂度是相当的, 从而数据关联的平均计算时间也相当。同时, NNM-JPDA 算法不需要聚类的额外时间。但是与 JPDA 算法相比, 对于非机动目标的跟踪, 其跟踪性能相当; 对于机动目标的跟踪, 其跟踪性能略有降低, 但是可以很好地进行交叉运动目标跟踪。考虑到跟踪精度和计算时间这两个方面, NNM-JPDA 算法还是一种性能较好的算法。

4.2 参数分析

4.2.1 传感器有效量测的选取数目

NNM-JPDA 算法中只选取了统计距离最小的 3 个有效量测, 假设 $M=3$ 。 M 也是可以随着实际情况的变化而变化的。如果传感器有效量测的数目不大, 则可以增大 M 的值, 以提高目标的跟踪精度; 如果传感器有效量测的数目很大, 则可以减小 M 的值, 以降低计算量。

显然, M 值的选取对于 NNM-JPDA 算法来说是至关重要的, 它直接影响算法的跟踪性能和计算复杂度。 M 值的选取可以在大量的仿真实验中选取一个合适的值, 既保证 NNM-JPDA 算法最大限度地保持 JPDA 算法的跟踪性能, 又降低原有算法的计算量。

4.2.2 其他参数

对 NNM-JPDA 算法有影响的其他参数包括传感器个数、传感器测量误差、目标个数和杂波平均个数。

4.3 时间复杂度分析

假设目标个数为 t , 平均杂波个数为 n , 则 NNM-JPDA 算法的时间复杂度为 $O(t^2(t+n)^2)$ 。可见, NNM-JPDA 算法的时间复杂度受目标个数和杂波个数的影响。其中目标个数对算法的时间复杂度影响较大, 当目标个数增多时, 算法的时间复杂度急剧增加。

结束语 基于最邻近方法的联合概率数据关联算法结合最邻近数据关联算法和联合概率数据关联算法的优点, 考虑统计距离最小的 3 个有效量测, 减小有效量测的数目。改进后的算法与原有的算法相比, 大大减小了原有算法的计算量, 而跟踪精度只是略有降低, 甚至在对机动目标进行跟踪时, 改进后的算法的跟踪性能也优于原有的算法。

但是考虑到多目标跟踪的实际情况, 可能随时都有新目标出现, 也可能随时都有某些目标消失 (目标被摧毁或是运动到监测范围之外), 这样仅仅有 JPDA 算法和 NNM-JPDA 算法是不能直接应用到多目标跟踪中的。因为这些算法均是面向目标的数据关联算法, 它们没有在算法的框架内考虑新目标检测和旧目标删除, 因而只能在目标个数和目标初始状态已知的情况下进行目标跟踪, 而目标个数和目标初始状态在实际应用中是不可能预知的。下一步, 我们将考虑集中式传感器网络环境下的多目标跟踪, 在 JPDA 算法和 NNM-JPDA 算法中加入“观测-观测”的数据关联算法, 以便进行新目标检测, 同时加入对旧目标进行删除的逻辑判断。

参考文献

[1] Bar-Shalom Y. Extension of the Probabilistic Data Association

- Filter in Multitarget Tracking[C]//Proceedings of the Fifth Symposium on Non-linear Estimation. 1974;16-21
- [2] Bar-Shalom Y, Tse E. Tracking in a cluttered environment with probabilistic data association[J]. Automatica, 1975, 11(9): 451-460
- [3] Turkmen I, Guney K. Cheap Joint Probabilistic Data Association with Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System State Filter for Tracking Multiple Targets in Cluttered Environment[J]. International Journal of Electronics and Communications, 2004; 349-357
- [4] Roecker J A, Phillis G L. Suboptimal Joint Probabilistic Data Association [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2): 510-517
- [5] Fitzgerald R J. Development of practical PDA logic for multitarget tracking by microprocessor [M]. Multitarget-Multisensor Tracking: Advanced Applications. 1990; 220-232
- [6] Roecker J A, Phillis G L. A Class of Near Optimal JPDA Algorithms[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1994, 30(2): 504-510
- [7] 秦卫华, 胡飞, 秦超英. 一种简化的联合概率数据关联算法[J]. 西北工业大学学报, 2005, 23(2): 276-279
- [8] 邓未央, 王宝树. 一种近似的联合概率数据互联算法[J]. 电光与控制, 2004, 11(2): 42-44
- [9] Zhou B, Bose N K. Multitarget Tracking in Clutter: Fast Algorithms for Data Association[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1993, 29(2): 352-363
- [10] 朱大奇, 史慧. 神经网络原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006; 107-110
- [11] 陈小惠, 王建华, 黄国建. 基于 Kohonen 神经网络的多传感器多目标跟踪方法[J]. 中国造船, 2000, 41(4): 66-70
- [12] 刘以安, 曹奇英, 刘同明, 等. 基于遗传模拟退火算法的机动多目标数据关联问题研究[J]. 华东船舶工业学院学报, 2000, 14(6): 32-37
- [13] 赵智勇. 机动目标跟踪理论的算法研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008
- [14] 敬忠良. 神经网络跟踪理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1995; 58-60
- [15] Singer R A, Stein J J. An optimal tracking filter for processing sensor data of imprecisely determined origin in surveillance systems[C]//Proceedings of the 1971 IEEE Conference on Decision and Control. Miami Beach, 1971; 171-175
- [16] Blom H A P. A Proceedings of the Efficient Filter for Abruptly Changing Systems[C]//Proceedings of the 13th IEEE Conference on Decision and Control. 1984; 656-658
- [17] Reid D B. An Algorithm for Tracking Multiple Targets[C]//Proceedings of the 17th IEEE Conference on Decision and Control. 1978; 1202-1211
- [18] Singer R A, Sea R G, Housewright K B. Derivation and evaluation of improved tracking filters for use in dense multi-target environments[J]. IEEE Trans. Information Theory, 1974, 20(7): 423-432
- [19] Sittler R W. An optimal data association problem in surveillance theory[J]. IEEE Trans. Military Electronics, 1964, 8(2): 125-139
- [20] Avitzour D. A maximum likelihood approach to data association [J]. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst, 1992, 28(2): 560-565
- [21] Blom H A P, Bar-Shalom Y. The interacting multiple model algorithm for systems with markovian coefficients [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(8): 780-783
- [22] Mori S, Chong C Y, Tse E, et al. Tracking and classifying multiple targets without a priori identification[J]. IEEE Trans. Automatic Control, 1986, 31(5): 401-409
- [23] 赵开斌. 关于统计距离的一点注记[J]. 安庆师范学院学报, 2002, 8(4): 1-2

(上接第 53 页)

- [10] 成卫青, 龚俭, 丁伟. 基于流特性和真值程度的 VoIP 语音质量单端客观评价[J]. 通信学报, 2008, 29(4): 30-39
- [11] ITU-T, Recommendation G. 107-the E-model, a computational model for use in transmission planning[S]. International Telecommunication Union-Telecommunication Standardisation Sector. March 2005
- [12] Calyam P, Ekicio E, Lee C, et al. A gap-model based framework for online VVoIP QoE measurement[J]. Journal of Communications and Networks, 2007, 9(4): 446-56
- [13] ITU-T Recommendation G. 114-One-way transmission time[S]. International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Sector. May 2003
- [14] Markopoulou A P, Tobagi F A, Karam M J. Assessment of VoIP Quality over Internet Backbones[C]//IEEE INFOCOM 2002. New York, 2002; 150-159
- [15] 兰帆, 张尧弼. 基于 Gilbert 模型的网络丢包仿真[J]. 计算机工程, 2004, 30: 200-202
- [16] Haßlinger G, Hohlfield O. The Gilbert-Elliott model for packet loss in real time services on the Internet[A]//14. GI/ITG Konferenz Messung, Modellierung und Bewertung von Rechen- und Kommunikationssystemen (MMB) [C]. Dortmund, Germany, Mar. 2008; 269-283
- [17] ITU-T Recommendation G. 1010-End-user multimedia QoS categories[S]. International Telecommunication Union Telecommunication Standardisation Sector. October 2001
- [18] Uemura S, Fukumoto N, Yamada H, et al. QoS/QoE measurement system implemented on cellular phone for NGN [A]//Consumer Communications and Networking Conference, CCNC [C]. 2008; 117-121
- [19] Software tools for speech and audio coding standardization[EB/OL]. <http://www.itu.int/rec/T-REC-G.191-200509-I/en>
- [20] ITU-T Test signals for telecommunication systems [EB/OL]. <http://www.itu.int/net/itu-t/sigdb/genaudio/AudioForm-g.aspx?val=1000050>
- [21] Perlicki K. Simple analysis of the impact of packet loss and delay on voice transmission quality[J]. Journal of telecommunications and information technology, 2002; 53-56
- [22] Mohamed S, Rubino G, Varela M. A method for quantitative evaluation of audio quality over packet networks and its comparison with existing techniques[A]//Measurement of Speech and Audio Quality in Networks(MESAQIN)[C]. Prague, 2004
- [23] Cole R G, Rosenbluth J H. Voice over IP performance monitoring[J]. Computer Communication Review, 2001, 31(2): 9-24
- [24] ITU-T Recommendation G. 113(2002). Transmission impairments due to speech processing[S]. International Telecommunication Union-Telecommunication Standardisation Sector. May 2002
- [25] ITU-T Recommendation G. 113 Appendix I(2002). Provisional planning values for the equipment impairment factor I_e and packet-loss robustness factor B_{pl} [S]. International Telecommunication Union-Telecommunication Standardization Sector, May 2002
- [26] DataFit9.0 <http://www.oakdaleenr.com/>