

文章编号: 1001-0920(2001)05-0561-04

基于空间交点强度的被动式多传感器数据关联

冯子亮¹, 游志胜¹, 王明辉², 张建州¹, 范勇¹

(1. 四川大学 图像图形研究所, 四川 成都 610064; 2. 西北工业大学 计算机科学系, 陕西 西安 710072)

摘要: 将基于空间交点强度的被动式传感器快速数据关联算法推广到多传感器情况, 讨论整个算法的实现原理, 并给出算法的具体实现过程。在无漏检和无虚警的情况下做了仿真实验, 同时对存在漏检和虚警的情况进行分析, 结果表明算法在实时性方面具有良好的表现。

关键词: 被动式多传感器; 数据关联; 视线; 空间交点强度

中图分类号: TP 274

文献标识码: A

Data Association Algorithm of Passive Multisensor Based on the Intensity of Space Intersection

FENG Zi-liang¹, YOU Zhi-sheng¹, WANG Ming-hui², ZHANG Jian-zhou¹, FAN Yong¹

(1. Institute of Image and Graphics, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Department of Computer Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The data association algorithm of passive sensor based on the intensity of space intersection is extended to the multisensor. The principal of the algorithm is discussed and the algorithm flow is given. Simulation tests are made in the case of no missed detection and no false alarm, and the analysis of the scenario with missed detection and false alarm is given. The result shows that the algorithm has good performance in real time.

Key words: passive multisensor; data association; line of sight; intensity of space intersection

1 引言

在被动式多传感器数据关联问题中, 只能获取关于目标的角度信息, 目标的位置只能依靠各传感器在各个角度的视线交点来确定^[1]。随着传感器和目标数量的增加, 视线交点数呈级数增长, 这时的数据关联具有 NP 难度^[2,3]。已有人运用图论、运筹学、组合数学等工具来求解该问题^[4-6], 但在传感器和目标数量较多时, 均无法在给定时间内获得一个满意解。

文献[1]提出的基于空间交点强度的快速数据关联算法, 采用分层求解并依概率强度搜索的方法, 使其在实时性方面得到很大改进。本文则针对多传感器的情况做了进一步的分析和讨论。实验结果表明, 本文算法在多传感器多目标情况下仍有良好的表现。

2 基于空间交点强度的数据关联算法

2.1 问题描述

考虑 m 个被动式传感器的情况, 并假定目标为

收稿日期: 2000-07-24; 修回日期: 2000-10-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(69732010)

作者简介: 冯子亮(1970—), 男, 四川南充人, 博士生, 从事智能系统与神经网络、数据融合等研究; 游志胜(1945—), 男, 四

川成都人, 教授, 博士生导师, 从事图像处理与模式识别、多雷达数据处理与数据融合等研究。http://www.cnki.net

静态。

设传感器编号 $s = 1, 2, \dots, m$, 传感器 s 接收到的观测数为 n_s , 各传感器接收到的观测可能不相等, 观测的顺序分别为 $i_s = 0, 1, \dots, n_s$. 其中 0 表示漏检, 这是为讨论方便而人为加入的. 某一可能的空间位置由 m 个传感器的观测 (视线) 构成, 表示为 $Z_{i_1 i_2 \dots i_m}$, 此时又称为 m 元观测. 如果传感器数目为 4, 则空间位置 Z_{1023} 表示该位置由传感器 1 的观测 1、传感器 2 漏检、传感器 3 的观测 2 以及传感器 4 的观测 3 构成. 这样, 总的候选目标集合便由所有的视线交点构成, 即

$$Z = \{ Z_{i_1 i_2 \dots i_m}, i_s = 0, 1, \dots, n_s, s = 1, 2, \dots, m \} \quad (1)$$

一个 m 元观测分配给空间位置 (x_j, y_j) 的似然函数为^[4]

$$\Lambda(Z_{i_1 i_2 \dots i_m} | x_j, y_j) = \prod_{s=1}^m [P_{D_s} f(z_{s i_s} | x_j, y_j)]^{u(i_s)} [1 - P_{D_s}]^{1 - u(i_s)} \quad (2)$$

其中 $u(i_s)$ 为一指示函数, 且

$$u(i_s) = \begin{cases} 1, & i_s = 0 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$f(z_{s i_s} | x_j, y_j) = N(\theta, \delta_s)$ 为概率密度函数, θ_s 表示位置 (x_j, y_j) 与传感器 s 的夹角, P_{D_s} 为传感器 s 的检测概率. 此时目标位置由最大化该似然函数决定, 即

$$(x_j, y_j) = \arg \max \Lambda(Z_{i_1 i_2 \dots i_m} | x_j, y_j)$$

2.2 基于空间交点强度的分级求解

单纯从全局最大似然函数来求解问题存在一定的缺陷, 表现在候选集合规模过大, 而且该似然函数并不能完全反映空间位置是否为真实目标. 因此, 即使获得了全局最大值也并不意味着获得了理想的关联结果, 何况要获得这个结果是相当困难的.

为此, 我们引入了空间交点强度的概念^[1]: 空间交点强度等于各传感器通过该交点的视线 (观测) 数目, 其取值范围为 $0 \sim m$. 对于观测和目标的关联, 应有如下几个前提约束:

- 1) 一个观测只能来源于一个目标;
- 2) 一个目标只接受一个 m 元观测;
- 3) 一个目标应为大多数传感器检测到.

这样, 对于交点强度为 0 和 1 的情况, 实际上并不存在交点, 可以不予讨论. 本文仅讨论交点强度为 $2 \sim m$ 的情况.

通过引入空间交点强度, 可将候选目标集合划分为强度分别为 $m, m - 1, m - 2, \dots, 2$ 的子集, 即

$$Z = Z^m \quad Z^{m-1} \quad \dots \quad Z^2 \quad (3)$$

这样划分的原因在于: 虽然候选目标集合随传感器和目标的增加而呈级数增长, 但交点强度最强的集合中元素的增加却相对较缓; 由于一个真实目标应被大多数传感器检测到, 因此交点强度越大的交点是真实目标的可能性越大, 如果传感器检测概率为 $P_D = 0.95$, 对三传感器情况, 将有 85.7% 的目标被全部传感器检测到. 于是便可从交点强度最强的 Z^m 集合入手, 通过观测和目标的关联准则以及概率强度链搜索方法, 依次搜索交点强度为 $m - 1$ 和 $m - 2$ 等的集合, 最终找出全部真实目标. 其数学模型为依次求取空间交点强度为 m 和 $m - 1$ 等集合的似然函数的极大值, 从而求出全部目标的真实位置

$$\max L(Z^m) + \max L(Z^{m-1}) + \dots + \max L(Z^2) \quad (4)$$

具体表达式为

$$\begin{aligned} \max L(Z^m) = & \max_{\substack{n_1 \quad n_2 \quad n_m \\ \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^{i_1=1 \ i_2=1 \ \dots \ i_m=1}}} \dots \alpha_{i_1 i_2 \dots i_m}^m \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m \\ \text{s. t. } & \begin{cases} \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = 1 \\ i_1 = 0, 1, \dots, n_1 \\ \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = 1 \\ i_2 = 0, 1, \dots, n_2 \\ \vdots \\ \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = 1 \\ i_{m-1} = 0, 1, \dots, n_{m-1} \\ \rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = 1 \\ i_m = 0, 1, \dots, n_m \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\alpha_{i_1 i_2 \dots i_m}^m$ 表示仅针对 Z^m 集合, 且

$$\alpha_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = \begin{cases} 1, & Z_{i_1 i_2 \dots i_m} \in Z^m \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

$$\rho_{i_1 i_2 \dots i_m}^m = \begin{cases} 1, & Z_{i_1 i_2 \dots i_m} \in Z^m \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$$

约束条件表示一个观测只能来源于一个目标, 一个目标只接受一个 m 元观测. 利用该约束条件, 可通过一些具体方法削减 Z^m , 在 Z^m 中求解完成后, 再在 $Z^{m-1} \dots Z^2$ 集合中继续求解.

2.3 算法描述

- 1) 将传感器顺序编号为 $s = 1, 2, \dots, m$, 其观测编号顺序为 $i_s = 0, 1, \dots, n_s$;
- 2) 按式(1) 建立候选目标集合;

- 3) 对候选目标集合按式 (3) 进行划分;
- 4) 对 Z^m 集合中某一元素, 按约束条件削减各集合中元素的交点强度;
- 5) 对 Z^{m-1} 集合进行上述操作, 一直持续到 Z^1 ;
- 6) 算法结束, 确定的目标为式 (3)。

2.4 算法讨论

1) 考虑到实际中大多数情况目标为一个集群, 其空间分布相对集中; 另外对距离集群较远的目标可以忽略, 因而在处理之前预先定义一个有效空域是合理的, 这样可预先剔除一部分虚假目标。可能的目标位置 (x_a, y_a) 应满足

$$\arg \min_{j=1,2,\dots,M} [(x_a - x_j)^2 + (y_a - y_j)^2]^{1/2} \quad d \quad (6)$$

其中, M 为 Z^m 集合中元素个数, d 为根据该集合所确定的一个阈值。

2) 考虑到一个目标应被大多数传感器检测到, 所以首先剔除交点强度小于 $m/2$ 的点是合理的。具体操作时可根据实际情况增大或降低这个门限。

3) 式 (5) 的约束条件是削减候选集合的依据, 可根据一些可能性最大的候选位置, 将另一些与其相排斥的候选位置降级, 从而减小各候选集合的规模。如将强度为 3 的点降为 2, 强度为 2 的点则取消。这种削减候选集合的过程, 实际上是依据概率强度进行搜索的过程。这里可以设定一个阈值, 若对于某点, 通过它的某一视线上交点强度大于该值的点仅有该点, 则认为该点为真实目标的可能性最大, 从而将构成该点的视线上的其它各点的交点强度降级。

4) 在确定可能性大的候选位置时, 由于各点在空间上具有很强的相关性, 因而从哪一点开始很重要。一般说, 从某些交点开始进行搜索可达到很好的效果, 从而确定另外那些与其排斥的点。如构成该交点的某一视线上同级别交点很少或其它级别交点很少的点, 或边上的点等。如果遇到同一视线上两个点具有相同的交点强度, 而通过上述方法无法区分时, 可将该视线去掉, 让这两个点都退化(交点强度减 1) 后, 再做判断。若这样仍不能达到削减各候选集合的目的, 则应考虑遍历各点分别作为起始点进行判断, 最终判决结果应是那些在多次判决中公认的真实点。

3 仿真结果及分析

考虑空间目标比较密集的情况, 假设检测概率 $P_D = 1$, 虚警概率 $P_{FA} = 0$ 。我们用一种理想情况来

说明算法的实现过程, 设有 4 个传感器 5 个目标, 如图 1 所示。

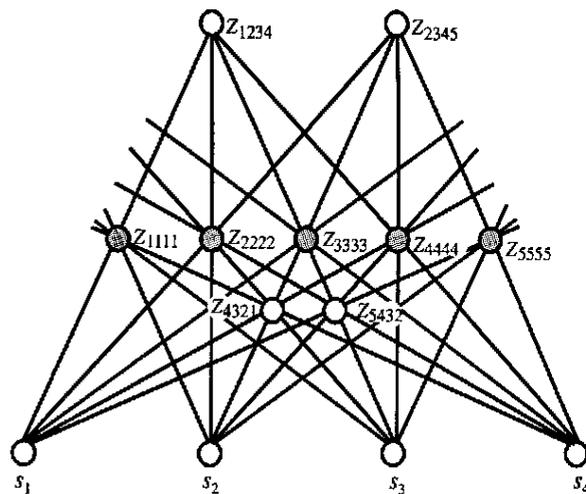


图 1 4 传感器 4 交点分布示意

传感器编号为 $s_1 \sim s_4$, 视线编号按顺时针方向编为 1 ~ 5, 这样候选集合 Z 中元素数目为 73。其中, 交点强度为 4 的交点数为 9, 交点强度为 3 的交点数为 6, 交点强度为 2 的交点数为 58。为简略起见, 我们仅说明 Z^4 集合的削减情况, 如表 1 所示。

表 1 传感器数为 4 目标数为 5 时 Z^4 集合削减情况

初 始 Z^3 集合	用 Z_{111} 削减后	用 Z_{222} 削减后	用 Z_{333} 削减后	用 Z_{444} 削减后
Z_{1111}	Z_{1111}	Z_{1111}	Z_{1111}	Z_{1111}
Z_{1234}	Z_{0234}	Z_{0034}		
Z_{2222}	Z_{2222}	Z_{2222}	Z_{2222}	Z_{2222}
Z_{2345}	Z_{2345}	Z_{0345}	Z_{0045}	
Z_{3333}	Z_{3333}	Z_{3333}	Z_{3333}	Z_{3333}
Z_{4321}	Z_{4320}	Z_{4300}		
Z_{4444}	Z_{4444}	Z_{4444}	Z_{4444}	Z_{4444}
Z_{5432}	Z_{5432}	Z_{5430}	Z_{5400}	
Z_{5555}	Z_{5555}	Z_{5555}	Z_{5555}	Z_{5555}

考虑构成 Z_{1111} 点的 S_2 传感器视线 1 上仅有该交点的交点强度为 4, 故初步考虑 Z_{1111} 点的可能性较大。将 S_1 传感器视线 1 上的另外 1 个交点强度为 4 的交点 Z_{1234} 降级成 Z_{0234} , 同时将构成该交点的 S_4 的视线 1 上的交点 Z_{4321} 降级为 Z_{4320} 。结果如表 1 第 2 列所示。

类似于上述分析, 分别考虑 Z_{2222}, Z_{3333} 和 Z_{4444} 点的情况, 结果如表 1 第 3, 4 和 5 列所示。这时 Z^4 集合还有 5 个交点, 而 Z^3 与 Z^2 集合中已没有点了(表中仅列出由 Z^4 集合中元素的削减情况, 其它集合中的元素未列出, 但此时已削减完毕)。关联结果为

$Z_{1111}, Z_{2222}, Z_{3333}, Z_{4444}$ 和 Z_{5555} , 关联结束。

表 2 给出了本文算法在检测概率为 1、没有虚警、仅给定目标方位时, 从计算视线交点开始到关联结束时的运算时间(计算机的 CPU 为 Celeron 300 A, 内存为 48 M, 操作系统为 Windows 98)。并且假定传感器探测范围为 $0 \sim 180^\circ$; 即仅考虑面向目标的交点。从结果看, 其计算量主要表现在计算交点以及集合划分上, 由于需计算的交点数与传感器数和目标数乘积的平方成正比, 因而计算交点的时间与交点数同步增长, 整个关联算法所耗时间也相应增加。同其它算法相比, 该关联算法在实时性方面有较优良的表现(在传感器数为 3, 目标数为 5 时, 分枝定界法耗时 16.6 s, 松弛算法耗时 0.4 s; 在目标数为 10 时, 松弛算法耗时 $2.3 \text{ s}^{[4]}$), 具有一定的应用价值。

表 2 数据关联所需要时间 s

传感器	目标数							
	5	7	10	15	20	30	40	50
3	< 0.01	< 0.01	0.01	0.03	0.06	0.15	0.28	0.45
5	0.01	0.02	0.05	0.11	0.20	0.49	0.92	1.5
7	0.04	0.06	0.11	0.24	0.43	1.1	2.1	3.6
10	0.09	0.13	0.25	0.59	1.2	3.1	7.4	11.6
15	0.13	0.29	0.60	1.7	2.9	8.8	26.3	67.7
20	0.23	0.46	1.0	2.6	5.5	30.3	96.7	285.1

下面考虑存在漏检和虚警(较小)的情况。漏检将导致交点数目较多的集合(如 Z^m 和 Z^{m-1}) 减小, 虚警将导致交点数目较少的集合(如 Z^1 和 Z^2) 增大。前者将 Z^m 减小可减少运算量, 提高性能; 另外, 因对 Z^m 集合削减后, 可能增加对诸如 Z^{m-1} 等集合进行判断, 不能很快得出结果, 从而影响了性能。而后的影响大部分可在预处理阶段剔除, 对整体性能不会

产生大的影响。例如在检测概率 $P_D = 0.95$, 虚警概率 $P_{FA} = 0.05$ 时, 系统的性能几乎未受影响。

4 结 语

本文将文献[1]提出的针对被动式传感器的快速数据关联算法推广到多传感器情况, 讨论了算法的实现原理, 给出了算法的具体实现过程。在检测概率为 1, 没有虚警的情况下做了仿真实验, 同时对存在较小漏检和虚警的情况进行了分析说明。实验结果表明, 尽管在目标和传感器比较多时, 视线交点数与目标和传感器乘积的平方成正比, 但本文算法仍表现出优良的性能, 在实时性方面存在优势, 具有一定的应用前景。

参考文献:

- [1] 王明辉, 游志胜, 赵荣椿, 等. 一个快速的被动式传感器数据关联算法[J], 电子学报, 2000, 28(12): 45-47.
- [2] M R Garey, D S Johnson. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness[M]. San Francisco: Freeman, 1979.
- [3] C H Papadimitriou, K Steiglitz. Combinatorial optimization: Algorithms and complexity[M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982.
- [4] K R Pattipati, S Deb, Y Bar-Shalom *et al.* A new relaxation algorithm and passive sensor data association [J]. IEEE Trans on Autom Contr, 1992, 37(2): 198-213.
- [5] S Deb, M Yeddanapudi, K Pattipati *et al.* A generalized S-D assignment algorithm for multisensor multitarget state estimation[J]. IEEE Trans on Aero and Elec Syst, 1997, 33(2): 523-536.
- [6] S S Blackman. Multi-target tracking with radar applications[M]. Dedham: Artech House Inc, 1986.

(上接第 560 页)

参考文献:

- [1] B Kouvaritakis, J A Rossiter, J Schuurmans. Efficient robust predictive control[A]. Proc Amer Contr Conf [C]. San Diego, 1999.
- [2] V K Mayuresh, B Venkataramanan, M Morari. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities[J]. Automatica, 1996, 32(10): 1361-1379.
- [3] J A Rossiter, B Kouvaritakis, M J Rice. A numerically robust state-space approach to stable-predictive control strategies[J]. Automatica, 1998, 34(1): 65-73.
- [4] M Cannon, B Kouvaritakis, Y I Lee *et al.* Efficient nonlinear model based predictive control[R]. University of Oxford, 1999.