

# 模型集和 IMM 自适应的目标跟踪算法<sup>\*</sup>)

李 涛 王宝树 乔向东

(西安电子科技大学计算机学院 西安710071)

**摘 要** 本文在仿真试验和理论分析基础上,首先给出了一种自适应 IMM 算法。再根据变结构 IMM 思想,把该算法与具体的运动模型相结合,提出了模型集和 IMM 算法都是自适应的机动目标跟踪方法。该方法在模式空间连续的情况下,模型集合逐步收敛到给定的范围内。文中给出了两种方法的具体实现步骤,并对文[6]中的 AGIMM 方法作了修正。仿真试验中把两种方法分别与传统的 IMM 算法和文[6]的方法进行了比较,结果表明在目标机动情况下,两种方法在性能上均有不同程度的提高,从而证明了本文所提算法的有效性。

**关键词** 自适应模型集,变结构,目标跟踪,模型集,IMM 算法

## Target Tracking Algorithm that Both Model Set and IMM are Adaptive

LI Tao WANG Bao-Shu QIAO Xiang-Dong

(School of Computer Science and Technology, Xidian Univ., Xi'an 710071)

**Abstract** On the basis of simulation and theoretical analysis, a self-adaptive IMM algorithm is firstly presented in the paper. And then by combining the algorithm with concrete motion model according to the idea of variable structure IMM, it is proposed that both model set and IMM algorithm are self-adaptive tracking algorithm for maneuvering target. In the algorithm if mode space is continual, model set converges gradually to the given range. The paper gives the concrete procedures for the two algorithms' realization and revises the AGIMM algorithm in literature (6). In the simulation test, the two algorithms are compared respectively with traditional IMM algorithm and that in literature (6). The result shows that, when the target is maneuvering, the performance of the two algorithms is improved to a certain extent. So it is proven that the algorithms proposed in this paper are effective.

**Keywords** Adaptive model set, Variable structure, Target tracking, Model set, IMM algorithm

## 1 引言

在机动目标跟踪中存在两大难题:(1)目标机动的开始和结束的准确预测问题;(2)对给定的目标轨迹使用哪种(几种)运动学模型进行机动目标跟踪。在目标跟踪中所使用的探测器质量和预测目标开始(和结束)机动的准确程度是影响单模型算法精度的主要因素。与 SM 算法相比,在 MM 算法中,由于多个运动模型并行使用,在运动模型之间不需要硬开关进行模型切换,因此这种算法也就不需要进行机动检测和滤波器初始化。但是,在 MM 算法中由于历史数据会成指数增加,过大的计算负载制约了它的实用性。

交互多模型(IMM)算法的提出是 MM 算法发展的一个里程碑,它是一种次优混合估计算法<sup>[1]</sup>。IMM 估计器是复合系统中具有较好效费比且结构相对简单的一种估计器,它适合于 MTMST 问题<sup>[2]</sup>。但 IMM 方法存在模型转移矩阵<sup>[3]</sup>和模型集的确定问题。在具体应用中当目标机动性很高时,可能需要用一个较大的模型集进行描述,而来自过多模型的不必要竞争会使跟踪性能下降。为此,有研究者提出了变结构 IMM 算法<sup>[4]</sup>。本文通过对 IMM 算法的分析,首先给出了一种参数自适应 IMM 算法,再根据变结构与参数自适应 IMM 算法相结合又提出了一种模型集和 IMM 算法都自适应的机动目标跟踪算法。

## 2 模型分析和自适应 IMM 算法

### 2.1 模型分析

设目标在二维坐标平面内运动,使用下面的模型集合<sup>[5]</sup>:

$$X(k+1) = F(w)X(k) + GW(k) \quad (2.1)$$

$$Z(k+1) = HX(k) + V(k) \quad (2.2)$$

其中,  $W(k)$  和  $V(k)$  为相互独立的过程噪声和观测噪声。当  $w$  趋近于 0 时,该模型表示目标做近似直线运动;  $w > 0$  时,表示目标左转弯;  $w < 0$  时,表示目标右转弯,根据实际情况可限定  $w \in [w_{\min}, w_{\max}]$ 。

$$F(w) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin wT}{w} & 0 & -\frac{1-\cos wT}{w} \\ 0 & \cos wT & 0 & -\sin wT \\ 0 & \frac{1-\cos wT}{w} & 1 & \frac{\sin wT}{w} \\ 0 & \sin wT & 0 & \cos wT \end{bmatrix} \quad w \neq 0 \quad (2.3)$$

$$X(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ \dot{x}(k) \\ y(k) \\ \dot{y}(k) \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} T^2/2 & 0 \\ T & 0 \\ 0 & T^2/2 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

我们知道 IMM 算法具有模型自适应性,但存在模型集确定问题,解决这一问题的常用方法是使用变结构 IMM (VIMM)方法和自适应 IMM (AIMM)方法。这里首先给出一种参数自适应 IMM 方法。

### 2.2 参数自适应的 IMM 算法

对模型集(2.1)中的模型进行改进,设给定模型的过程噪声  $W(t)$  是由速度误差引起的,并且是均值为  $\bar{a}$  的时间相关的有色噪声,令  $W(t) = \bar{a} + \tilde{W}(t)$ , 其中  $\bar{a} = [\bar{a}_x, \bar{a}_y]^T$ ,  $\tilde{W}(t)$  是均值

<sup>\*</sup> 基金项目:国防科技重点实验室基金项目(OOJS93.5.2 DZ0123),李涛 博士生。

为0方差为  $\delta_w^2 Q$  的 Gauss 白噪声,于是把(2.1)式改写为:

$$X(k+1) = F(w)X(k) + B(w)\bar{a} + G\bar{W}(k) \quad (2.4)$$

其中,  $B(w) = \begin{bmatrix} T - \frac{\sin wT}{w} & \frac{1 - \cos wT}{w} \\ T - \cos wT & \sin wT \\ -\frac{1 - \cos wT}{w} & T - \frac{\sin wT}{w} \\ -\sin wT & T - \cos wT \end{bmatrix}$ ,

$$Q(k) \cong \begin{bmatrix} \frac{T^4}{3} & \frac{T^3}{2} \\ \frac{T^3}{2} & T^2 \end{bmatrix}$$

$$\delta_w^2 = \beta(a_{\max} - |\bar{a}|)^2 \quad (2.5)$$

其中,  $a_{\max}$  是  $x$  和  $y$  方向上的速度极值,  $\beta$  是常系数。

在 Kalman 滤波过程中,取  $\bar{a}$  等于上一滤波周期的速度估计,这样就得到自适应 Kalman 滤波算法<sup>[7]</sup>。假设模型之间的转移服从 Markov 过程,转移矩阵为  $[P_{ij}]$ ,下面给出从  $k$  到  $k+1$  时刻一个采样周期的自适应 IMM 算法的主要步骤:

(1)由模型概率  $u^i(k)$  和模型转移矩阵  $[P_{ij}]$ ,计算混合输入  $\hat{X}^{oj}(k/k)$  和  $p^{oj}(k/k)$ 。

(2)自适应 Kalman 滤波

$$\hat{X}^i(k+1/k) = F(w_j)\hat{X}^{oj}(k/k) + B(w_j)\bar{a} \quad (2.6)$$

$$P^i(k+1/k) = F(w_j)P^{oj}(k/k)F(w_j)^T + Q^i(k) \quad (2.7)$$

$$\hat{Z}^i(k+1/k) = H^i(k+1)\hat{X}^i(k+1/k) \quad (2.8)$$

$$S^i(k+1) = H^i(k+1)P^i(k+1/k)H^i(k+1)^T + R^i(k+1) \quad (2.9)$$

$$K^i(k+1) = P^i(k+1/k)H^i(k+1)^T S^i(k+1)^{-1} \quad (2.10)$$

$$\hat{X}^i(k+1/k+1) = \hat{X}^i(k+1/k) + K^i(k+1)[Z^i(k+1) - \hat{Z}^i(k+1/k)] \quad (2.11)$$

$$P^i(k+1/k+1) = P^i(k+1/k) + K^i(k+1)S^i(k+1)K^i(k+1)^T \quad (2.12)$$

(3)计算模型校正概率  $u^i(k+1)$ ,模型混合输出  $\hat{X}(k+1/k+1)P(k+1/k+1)$ 。

在试验部分对同一模型下的 Kalman 滤波和自适应 Kalman 滤波进行了比较(图2~图4),差别是非常明显的。因为自适应 Kalman 滤波最大限度地减少了模型误差,提高了估计精度,这正是我们要把自适应 Kalman 滤波和 IMM 算法相结合提出本节的参数自适应 IMM 算法的原因。

### 3 模型集和 IMM 均自适应的目标跟踪算法

考虑式(2.5)中的状态转移矩阵  $F(w)$  和控制矩阵  $B(w)$  都是  $w$  的函数,当限定  $w$  的取值范围  $w \in [w_{\min}, w_{\max}]$  后,模型变化是连续的( $w$  趋近0时,用匀速模型表示)。对上一节提出的自适应 IMM 算法,设  $k$  时刻使用的三个模型为  $M(k) = \{w_L(k), w_C(k), w_R(k)\}$ ,模型概率和模型转移矩阵为:  $u(k) = \{u_L(k), u_C(k), u_R(k)\}$ ,  $P_{LCR} = \begin{bmatrix} p_{LL} & p_{LC} & p_{LR} \\ p_{LC} & p_{CC} & p_{CR} \\ p_{LR} & p_{RC} & p_{RR} \end{bmatrix}$ 。从  $k$  到  $k+1$  时刻的一个采样周期内模型集和 IMM 都是自适应的目标跟踪算法步骤如下:

1. 计算当前模型集合

(1)计算中心模型  $w_C(k)$

$$w_C(k) = u_L(k)w_L(k) + u_C(k)w_C(k) + u_R(k)w_R(k) \quad (3.1)$$

(2)计算左模型和右模型

$$\text{令 } \lambda_L = \max\{\bar{w}, w_C(k-1) - w_L(k-1)\}, \lambda_R = \max\{\bar{w}, w_R(k-1) - w_C(k-1)\}, \bar{w} \text{ 为给定的常数, } 0 < \alpha < 1.$$

当  $u_C(k) = \max\{u_L(k), u_C(k), u_R(k)\}$  时

$$\begin{cases} w_L(k) = \max\{w_{\max}, w_C(k) - \alpha\lambda_L\} \\ w_R(k) = \min\{w_{\max}, w_C(k) - \alpha\lambda_R\} \end{cases} \quad (3.2)$$

当  $u_L(k) = \max\{u_L(k), u_C(k), u_R(k)\}$  时

$$\begin{cases} w_L(k) = \max\{w_{\max}, w_C(k) - 2\lambda_L\} \\ w_R(k) = \min\{w_{\max}, w_C(k) + \lambda_R\} \end{cases} \quad (3.3)$$

当  $u_R(k) = \max\{u_L(k), u_C(k), u_R(k)\}$  时

$$\begin{cases} w_L(k) = \max\{w_{\max}, w_C(k) - \lambda_L\} \\ w_R(k) = \min\{w_{\max}, w_C(k) + 2\lambda_R\} \end{cases} \quad (3.4)$$

2. 以  $M(k)$  为当前模型集进行第2节中的(1)~(3)步,计算模型校正概率和状态估计。

说明:当目标以某一确定的模型运动(或  $w$  在小范围内波动)时,(3.2)式构造了一个收敛的闭区间序列,控制当前模型在误差允许的范围(由  $\bar{w}$  决定),收敛速度由  $\alpha$  控制。(3.3)和(3.4)式反映了当目标机动时,模型发生转移,而模型集的转移是一个以当前模型集为基础的渐变过程,这符合变结构思想和实际应用。方程(3.1)~(3.4)修正了文[6]的 AGIMM 算法。

### 4 仿真试验

为说明本文提出算法的有效性,进行以下试验。设目标在平面内运动,35秒的直线运动后开始右转弯,时间是65秒;然后是35秒的直线运动再做左转弯,时间是45秒,然后是20秒的直线运动结束,图1给出了目标的运动轨迹。

试验1:用 IMM 方法和自适应 IMM 对目标跟踪,所需要的主要参数有:采样周期为1秒,三个确定模型分别是  $F(-$

$$5.6)F(0)F(5.6), \text{模型转移矩阵 } P_{LCR} = \begin{bmatrix} 0.8 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.8 \end{bmatrix}, \text{初始}$$

模型概率  $u = [0.3 \ 0.4 \ 0.3]$ ,  $\beta = 0.2$ 。图2~图4是三个模型的 Kalman 滤波和使用第2节给出的自适应 Kalman 滤波的50次仿真的位置均方误差曲线(速度均方误差曲线图略)。从中我们可以看出 AKF 明显优于 KF,这正是我们要把 AKF 和 IMM 方法结合起来提出参数自适应 IMM 算法的理由。图5和图6是 IMM 算法和第2节给出的参数自适应 IMM 算法的50次仿真的位置和速度的均方误差曲线。从图5、6的仿真结果可以看出,在第2节提出的参数自适应 IMM 算法和我们预期的一样取得了较好的跟踪效果。

试验2:限定  $w \in [-5.6 \ 5.6]$  并令  $\bar{w} = 1.5$  增加噪声重复上面的试验。图7、图8分别给出了 AGIMM 算法<sup>[6]</sup>和第3节中提出的模型集和 IMM 均自适应算法的50次仿真的位置和速度均方误差曲线。这里我们可以看到,把参数和模型集都设置成自适应的 AGIMM 算法要优于只把模型集设置为自适应的 AGIMM 算法<sup>[6]</sup>,从而证明了本文第3节中提出的模型集和 IMM 均自适应算法的有效性。

结论 通过以上仿真试验可以看出,自适应 IMM 算法和修正后的 AGIMM 算法明显优于 IMM 算法。参数自适应 IMM 算法的性能好于 IMM 算法的原因是显然的,而 AGIMM 好于 IMM 算法是因为它使用了变结构的思想。在本实验中,参数自适应 IMM 算法的性能不如 AGIMM 算法,这是因为前者使用的仍然是固定的模型集,当模型相差较大时误差较大,但前者的计算负载明显小于后者。进一步分析可以得出参数自适应 IMM 算法的应用范围远大于 AGIMM 算

法的应用范围。在跟踪性能上,模型集和 IMM 均自适应的算法优于 AGIMM 算法,但两者都有较大的峰值误差。进一步

试验表明这两种方法的性能不仅与目标机动性有关还与常量有关。

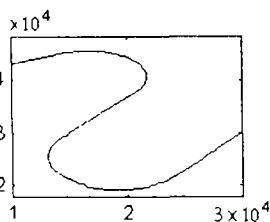


图1 目标运动轨迹

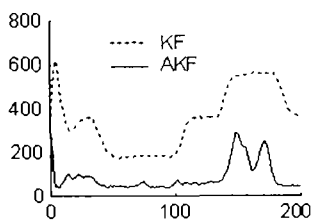


图2  $F(w=-5.6)$ 均方误差曲线

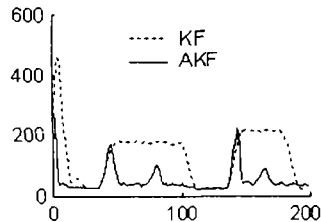


图3  $F(w=0)$ 均方误差曲线

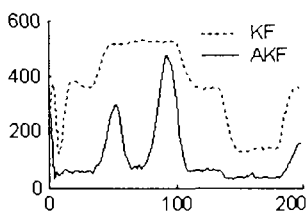


图4  $F(w=5.6)$ 均方误差曲线

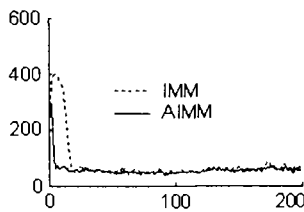


图5 位置均方误差曲线

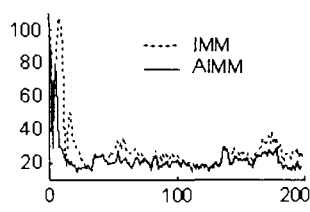


图6 速度均方误差曲线

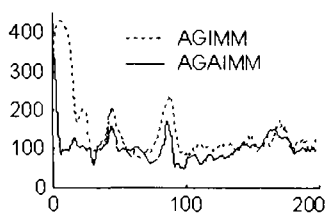


图7 位置均方误差曲线

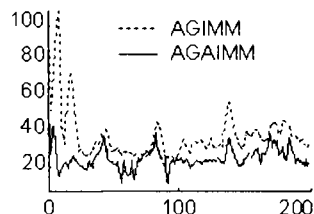


图8 速度均方误差曲线

### 参考文献

- 1 Mazor E, Averbuch A, Bar-Shalom Y. Interacting Multiple Model Methods in Target Tracking: A Survey. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1998, 34(1)
- 2 张安民, 杨世兴, 李志舜. 目标跟踪中的混合多模型方法: 综述. *系统工程与电子技术*, 2001, 23(4)
- 3 Campo L, Mookerjee P, Bar-Shalom Y. State Estimation for Systems with Sojourn-Time-Dependent Markov model Switching. *IEEE Trans. on Auto. Con.*, 1991, 36(4)

- 4 Li X R, Bar-Shalom Y. Multiple Model Estimation with Variable Structure. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1996, 41(4)
- 5 Efe M, Atherton D P. Maneuvering Target Tracking Using Adaptive Turn Rate Models in The Interacting Model Algorithm. In: *Proc. of the 35th Conf. on Decision & Control*, 1996. 3151~3156
- 6 Jilkov V P, Angelova D S. Design and Comparison of Mode-Set Adaptive IMM Algorithms for Maneuvering Target Tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1)
- 7 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪. 国防工业出版社, 1991

(上接第131页)

- 25 Atzeni P, Mecca G. Cut and Paste. In: *Proc. of the PODS'97*, 1997
- 26 Gupta A, Harinarayan V, Rajaraman A. Virtual database technology. *SIGMOD Record*, 1997, 26(4): 57~61
- 27 Hammer J, Garcia-Molina H, Cho J, Hranha R, Grespo. Extracting semistructured information from the web. In: *Proc. of the Workshop on Management of Semistructured Data*, May 1997
- 28 <http://www.dia.uniroma3.it/Araneus/>
- 29 <http://www.deg.byu.edu/>
- 30 <http://abrohos.lbd.dcc.ufmg.br/~debye/>
- 31 <http://www.delphi-jedi.org/>
- 32 Adelberg B. Nodose; A tool for semiautomatically extracting structured and semistructured data from text documents. In: *Proc. of ACM SIGMOD Conf. on Management of Data*, 1998
- 33 <http://www.rr.com/rdrun/>
- 34 <http://research.compaq.com/SRC/WebL/>
- 35 <http://www.cse.ogi.edu/sysl/projects/XWRAP/xwrap.html>
- 36 <http://www.atg.com/en/products/portalsuite/web-application-gear.jhtml>

- 37 <http://www.downlinx.com/proghtml/299/29907.htm>
- 38 <http://www.x-fetch.com/xhtml/wrapper.html>
- 39 <http://cheops.cis.upenn.edu/W4F/>
- 40 <http://www.wisosoftware.com/>
- 41 Laender A H F, Ribeiro-Neto B, da Silva A S, Teixeira J S. A Brief Survey of Web Data Extraction Tools. *ACM SIGMOD Record*, 2002, 31(2)
- 42 Kuhlins S, Tredwell R. Toolkits for Generating Wrappers - A Survey of Software Toolkits for Automated Data Extraction from Websites. <http://citeseer.nj.nec.com/539694.html>
- 43 BrightPlanet.com DeepWeb White Paper. <http://www.completeplanet.com/Tutorials/DeepWeb/index.asp>
- 44 Yau S T. Extracting Data Behind Web Forms, Technical Report, Brigham Young University, Provo, Feb. 2002. <http://blondie.cs.byu.edu/CS652/DataBehindForms.pdf>
- 45 <http://www.w3.org/People/Raggett/tidy/>
- 46 <http://www.republica.com/>
- 47 <http://www.w3.org/TR/2001/NOTE-data-extraction-20011031>
- 48 <http://www.w3.org/2001/sw/>