

文章编号: 1000-8152(2008)02-0233-04

转弯机动目标的两层交互多模型跟踪算法

孙福明, 吴秀清, 王鹏伟

(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系, 安徽 合肥 230027)

摘要: 针对转弯机动目标跟踪, 提出了一种两层交互多模型(IMM)跟踪算法。算法的内层多模型由当前统计模型和恒速模型构成, 针对目标的速度方向角进行滤波, 将获得的角速度估计值作为外层的中心角速度; 外层多模型由转弯模型构成, 其角速度集合由中心角速度和对称角速度(交互输出的加速度与速度的比值)组成。由于既准确估计了目标的角速度, 又设计了合理的角速度集合, 算法显著提高了转弯机动目标的跟踪精度。仿真实验验证了算法的有效性。

关键词: 机动目标跟踪; 交互多模型; 当前统计模型; 转弯模型

中图分类号: TN953 文献标识码: A

Two-layer IMM tracking algorithm for turn maneuver

SUN Fu-ming, WU Xiu-qing, WANG Peng-wei

(Department of Electronic Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China,
Hefei Anhui 230027, China)

Abstract: A novel two-layer interactive multiple model (IMM) tracking algorithm for turn maneuver is proposed. It contains the inner layer and the outer layer. The inner layer is composed of current statistical model and constant velocity model. The central angular velocity for outer layer can be attained by filtering the heading angle of target. The outer counterpart is composed by constant turn models, in which the angular velocity set includes the central angular velocity and symmetric angular velocity. The latter is computed by the ratio of the target acceleration and velocity. Because of the reasonable design of the angular velocity set, the tracking precision for turn maneuver is improved significantly. Experiment demonstrates the efficiency of the proposed algorithm.

Key words: maneuvering target tracking; interactive multiple model; current statistical model; turn model

1 引言(Introduction)

在机动目标跟踪过程中, 目标机动往往引起跟踪模型与目标实际模式之间失配, 导致基于单个模型的跟踪方法难以获取令人满意的结果。次优的交互多模型(IMM)算法使用多个描述目标不同机动模式的模型进行交互来跟踪目标, 由于其结构简单, 费效比高因而倍受青睐^[1]。在使用IMM算法进行目标转弯运动跟踪时, 经常使用的模型集合是恒速率转弯(CT)模型^[2]和恒速(CV)模型, 例如空中交通管制中采用两个标准CT模型和一个CV模型。基于恒速率转弯模型, 文献[3,4]等提出使用变结构模型集的依据马尔可夫转移概率进行模型或模型集切换来跟踪转弯机动目标; 文献[5,6]介绍通过引入加速度维来估算转弯速率的交互多模型跟踪算法。此外, 也有文献提出基于切向加速度模型集的曲线模型跟踪算法^[7,8]。基于转弯模型跟踪转弯机动目标, 如果能够

准确地估计目标的角速度, 并设计合理的角速度集合包含目标可能的机动, 则既能够使用较少的模型适应目标运动参数的变化, 又能够获得较高的跟踪精度。

为此, 本文提出基于转弯模型的两层交互多模型跟踪算法。外层交互多模型采用3个转弯模型, 一个中心滤波器和两个对称分布的子滤波器。中心滤波器的角速度参数称为中心角速度, 是通过针对目标的速度方向角, 利用基于方向角的“当前”统计(CS)模型^[9,10]和恒速(CV)模型构成的内层多模型进行滤波而获得。两个对称分布的子滤波器的角速度参数, 一个为外层多模型交互输出的目标的加速度与速度的比值, 另一个则与前者以中心角速度为中心对称分布。由参数为中心角速度的中心滤波器和参数为对称角速度的两个子滤波器构成了外层的交互多模型。这样, 既准确地估计出目标的角速度,

又设计了合理的角速度集合,使得本文提出的算法显著地提高了目标的跟踪精度.

2 目标转弯模型(Turn model of maneuver)

2.1 转弯运动(Turn motion)

设目标在某一时刻转弯,如图1所示. 目标的状态变量包括位置 x 与 y ,速度 v ,速度 v 的方向角度 ϕ ,向心加速度 α_n ,切向加速度 α_t .

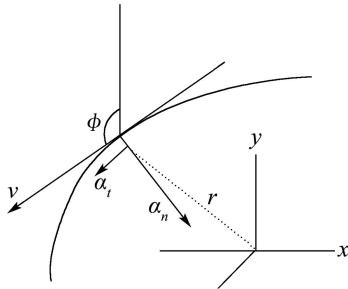


图1 目标运动模型

Fig. 1 Model of target motion

质点作圆周运动的线量与角量的关系满足下式:

$$v(t) = r\omega(t), \quad (1)$$

$$a_t = \frac{dv(t)}{dt} = r\beta, \quad (2)$$

$$a_n = r\omega(t)^2 = v(t)\omega(t). \quad (3)$$

其中: r 为转弯半径, ω 为角速度, β 为角加速度.

目标在直角坐标系中各速度分量为

$$\dot{x}(t) = v(t) \sin \phi(t), \quad (4)$$

$$\dot{y}(t) = v(t) \cos \phi(t). \quad (5)$$

2.2 转弯模型(Turn model)

目标机动模型一般可以表示为

$$X(k+1) = F(k)X(k) + G(k)W(k). \quad (6)$$

其中: $X(k)$ 是状态矢量; $F(k)$ 是状态转移矩阵; $G(k)$ 是扰动传输矩阵; $W(k)$ 是未知的系统噪声.

当采用恒速转弯模型(CT)时, 目标的状态矢量 $X(k) = [x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T$, 则状态转移矩阵 $F(k)$ 表示为

$$F_1(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} & 0 & \frac{\cos(\omega_k T) - 1}{\omega_k} \\ 0 & \cos(\omega_k T) & 0 & -\frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} \\ 0 & \frac{1 - \cos(\omega_k T)}{\omega_k} & 0 & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} \\ 0 & \sin(\omega_k T) & 0 & \cos(\omega_k T) \end{bmatrix}. \quad (7)$$

其中 T 为采样时间.

如果在状态矢量 $X(k)$ 中, 增加加速度维 \ddot{x} 和 \ddot{y} , 则状态矢量 $X(k) = [x, \dot{x}, \ddot{x}, y, \dot{y}, \ddot{y}]^T$, 那么 $F(k)$ 表示为

$$F_2(k) = \begin{bmatrix} A(k) & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & A(k) \end{bmatrix}. \quad (8)$$

其中

$$A(k) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} & \frac{1 - \cos(\omega_k T)}{\omega_k^2} \\ 0 & \cos(\omega_k T) & \frac{\sin(\omega_k T)}{\omega_k} \\ 0 & -\omega_k \sin(\omega_k T) & \cos(\omega_k T) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

由于上述状态矢量 $X(k)$ 中包含有加速度维, 因而基于 F_2 的状态方程能够提供更多的目标机动信息.

3 两层交互多模型跟踪算法(Two-layer IMM tracking algorithm)

当目标在二维平面内作恒速圆周运动时, 有

$$a_t \approx 0, \quad (10)$$

$$\vec{a} = \vec{a}_t + \vec{a}_n \approx \vec{a}_n. \quad (11)$$

依据式(3)和式(11), 目标的加速度与速度的比值即为目标的转弯速率:

$$\varpi = \sqrt{[\ddot{x}^2 + \ddot{y}^2]/[\dot{x}^2 + \dot{y}^2]}. \quad (12)$$

ϖ 的正负性, 亦即顺时针或逆时针方向, 可由相邻时刻的 \dot{x} 和 \dot{y} 的正负关系确定. 本文把由式(12)获得的角速度作为一子滤波器的转弯速率参数, 记为 ϖ_1 .

在二维平面内作转弯运动的目标, 由于人为机动或其他因素的存在使得目标的切向加速度常常不为零, 因而由式(12)求得的转弯速率 ϖ_1 会偏离真实的值. 考虑到转弯运动目标的速度方向角 ϕ 、角速度 ω 和角加速度 β 近似满足如下关系:

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \omega_k T + T^2 \beta_k / 2, \quad (13)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \beta_k T. \quad (14)$$

并且, 据目标的 X 轴速度 \dot{x} 和 Y 轴速度 \dot{y} 可获得目标的速度方向角度 ϕ_k :

$$\phi_k = \arctan(\dot{x}/\dot{y}). \quad (15)$$

假定目标的方向角度 ϕ_k 在 $0 \sim 2\pi$ 范围内连续, 设计如下的取值规则:

$$\phi_k = -\arctan(\dot{x}/\dot{y}), \quad \dot{x} < 0, \dot{y} > 0, \quad (16)$$

$$\phi_k = -\arctan(\dot{x}/\dot{y}) + \pi, \quad \dot{x} < 0, \dot{y} < 0, \quad (17)$$

$$\phi_k = -\arctan(\dot{x}/\dot{y}) + \pi, \quad \dot{x} > 0, \dot{y} < 0, \quad (18)$$

$$\phi_k = -\arctan(\dot{x}/\dot{y}) + 2\pi, \quad \dot{x} > 0, \dot{y} > 0. \quad (19)$$

这样, 由式(13)和(14)可以建立基于方向角的状态方程, 由式(15)的目标方向角作为量测值可以建立量测方程. 采用多模型对目标的方向角进行交互滤波, 可以获得较准确的目标角速度估值.

3.1 内层交互多模型(Inner layer IMM)

由于目标转弯经常采取恒速运动, 这可以使用匀角速度模型(CV)来描述目标的模式, 则目标的方向角度与角速度满足下式:

$$\phi_{k+1} = \phi_k + \omega_k T, \quad (20)$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k. \quad (21)$$

而当目标的角加速度 β 不为零, 亦即转弯发生机动时, 采用“当前”统计模型(CS)来描述目标的模式更加符合实际. 即认为当目标作某一角加速度机动时, 下一时刻的角加速度取值是有限的, 且只能在“当前”角加速度的邻域内, 其机动角加速度的“当前”概率密度用修正的瑞利分布描述, 均值为“当前”角加速度的预测值, 随机机动角加速度在时间轴上符合1阶时间相关过程.

基于方向角建立如下状态方程:

$$\Phi(k+1) = B(k)\Phi(k) + C(k)\beta(k) + D(k). \quad (22)$$

上式中: 状态向量 $\Phi(k) = [\phi_k, \omega_k, \beta_k]^T$, $\beta(k)$ 是前一时刻角加速度的估计值. 其中, 状态转移矩阵

$$B(k) = \begin{bmatrix} 1 & T & (-1+\alpha T + e^{-\alpha T})/\alpha^2 \\ 0 & 1 & (1-e^{-\alpha T})/\alpha \\ 0 & 0 & e^{-\alpha T} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

上述公式中, α 为机动频率, T 为采样时间. $D(k)$ 是均值为零方差自适应的高斯白噪声^[10].

因而, 针对状态向量 $\Phi(k)$ 通过交互滤波, 可同时估计出较准确的目标角速度 ω_k , 并将其作为外层中心角速度 ω .

3.2 外层交互多模型(Outer layer IMM)

由内层交互多模型, 通过对目标的方向角度进行滤波, 可以获得目标较准确的角速度估计值 ω . 但由于人为机动或噪声的影响, 目标真实的角速度一般在估值 ω 的邻域范围内. 因而需要设计一个合理的角速度集合覆盖目标真实的模式. 一种方法是通过预先设定一个固定的角度间隔得到两个对称的角速度, 但固定角度间距限制了目标的转弯速率变化范围. 考虑到由加速度与速度计算得到的角速度 ϖ_1 受人为机动或噪声影响较大, 意味着 ϖ_1 包含着并与中心角速度 ω 及以 ω 为中心获得的对称角速度 ϖ_2 , 组成外层多模型的角速度集合. 中心滤波器使用中心角速度 ω , 两个对称的子滤波器使用角速度 ϖ_1 和对称的角速度 ϖ_2 .

3.3 自适应跟踪算法(Adaptive tracking algorithm)

假定目标初始作匀速直线运动, 根据连续3点可获得目标的速度 v 、速度方向角 ϕ 和角速度 ω . 把角速度估值 ω 作为3个滤波器的角速度初值, 依据状态转移矩阵 F_1 和 F_2 及相应的系统噪声运行外层多模型

进行状态估计, 可以获得目标的位置、速度及加速度估计值. 然后, 针对由式(15)计算得到的目标方向角度运行内层多模型进行交互滤波, 将获得的目标的角速度作为外层多模型的中心滤波器的转弯速率, 把由式(12)计算获得的角速度以及以中心角速度为中心获得的对称角速度作为两个对称子滤波器的转弯速率, 再运行外层多模型进行状态估计, 最后通过递推实现转弯目标的自适应跟踪.

4 仿真结果(Simulation results)

本文算法是针对目标的方向角通过滤波自适应地获取目标的角速度, 称此算法为AVA-IMM(angular velocity adaptive-IMM). 文献[5,6]中提出的利用 ϖ_1 作为中心角速度及使用固定的角度间隔组成角速度集合的多模型方法, 称其算法为TR-IMM(turn rate-IMM). 本节给出一个仿真场景, 就上述两种算法进行跟踪性能比较.

设 $[3000 \text{ m}, -172 \text{ m/s}, 3000 \text{ m}, -246 \text{ m/s}]^T$ 为目标状态 $[x, \dot{x}, y, \dot{y}]^T$ 的初始值; 目标在 $1 \text{ s} \sim 29 \text{ s}$, $90 \text{ s} \sim 119 \text{ s}$, $180 \text{ s} \sim 200 \text{ s}$ 内作直线运动; $30 \text{ s} \sim 89 \text{ s}$ 目标作右转弯, 角速度为 -2.5 deg/s ; $120 \text{ s} \sim 179 \text{ s}$ 目标作左转弯, 角速度为 1.5 deg/s , 位置测量误差为 20 m . 目标运动轨迹如图2所示.

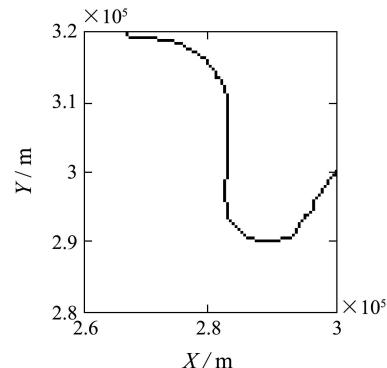


图2 目标运动轨迹

Fig. 2 Motion trajectory

设外层多模型初始概率为 $1/3$, 模型间Markov转移概率矩阵设为 $\{p_{ij} = 0.9, i=j; p_{ij} = 0.05, i \neq j\}$; 内层多模型为 $\{\text{CV,CS}\}$, 其初始概率分别为 $\{0.9, 0.1\}$ 转移概率为 $\{p_{11} = p_{22} = 0.9; p_{12} = p_{21} = 0.1\}$, 两种算法使用相同的初始状态、过程噪声和量测噪声. TR-IMM方法中转弯率模型间隔取为 $\pm 1 \text{ deg/s}$. 仿真次数设为50次.

图3是实验获得的目标角速度的估计值, TR-IMM算法中为由交互输出的目标的加速度与速度计算得到的角速度, AVA-IMM算法中为由通过方向角滤波获得的角速度. 图4是目标X轴和Y轴的位置均方根误差(root mean square error, 简称RMSE), 图5是目标X轴和Y轴的速度均方根误差. 图中 t 为扫描时间.

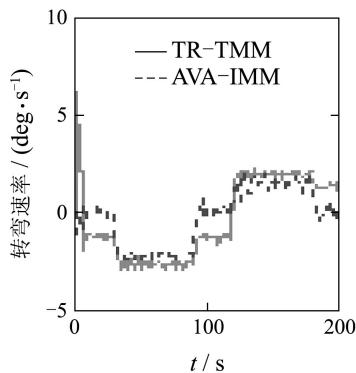


图3 目标角速度
Fig. 3 Angular velocity

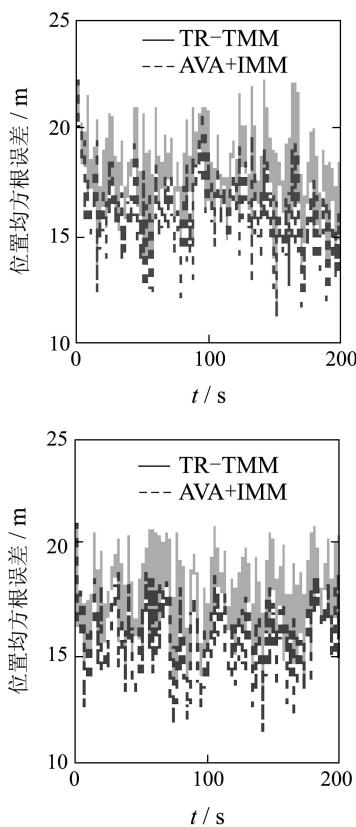


图4 X轴和Y轴位置均方根误差
Fig. 4 RMSE of position on X-axis and Y-axis

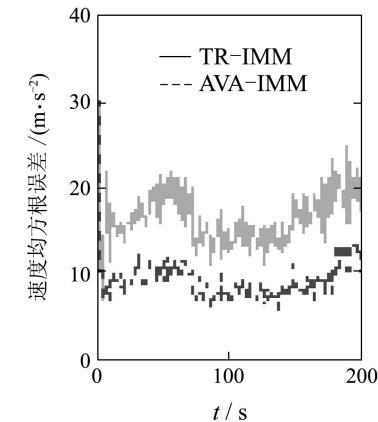
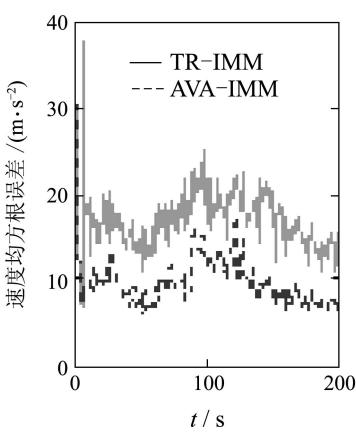


图5 X轴和Y轴速度均方根误差
Fig. 5 RMSE of velocity on X-axis and Y-axis

从实验结果可以看出,本文的算法对角速度的估计优于文献[5,6]中的方法,而位置误差和速度误差也明显小于文献中提到的方法。正是由于本文算法通过针对目标的方向角利用交互多模型进行滤波,获取到比较准确的角速度估值,并且角速度集合的设计也比文献[5,6]中的设计方法合理,因而本文算法能够显著地提高了转弯运动目标的跟踪精度。

5 结论(Conclusion)

在分析基于转弯模型的跟踪算法基础上,根据目标的速度方向角和角速度之间的物理关系,通过使用交互多模型方法对目标的方向角度进行滤波,获得了比使用加速度与速度的比值更准确的角速度估值,并与前者组成更合理的角速度集合。仿真实验表明,本文提出的两层交互多模型模型跟踪算法优于已存在的算法。

参考文献(References):

- [1] BAR-SHALOM YAakov, BLAIR W D. *Multitarget-Multisensor Tracking: Applications and Advances*[M]. Norwood, MA: Artech House, 2000.
- [2] JILKOV V P, ANGELOVA D S, SEMERDJIEV TZ A. Design and comparison of model-set adaptive IMM algorithms for maneuvering target tracking[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1999, 35(1): 343 – 350.
- [3] LI Xiaorong. Multiple-model estimation with variable structure-part II:model-set adaptation[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(11): 2047 – 2060.
- [4] LI Xiaorong, JILKOV V P, RU Jifeng. Multiple-model estimation with variable structure-part VI:expected-mode augmentation[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, 41(3): 853 – 867.
- [5] BLACKMAN S, POPOLI R. *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*[M]. Norwood, MA: Artech House, 1999.

(下转第241页)

- on Evolutionary Computation.* Washington, DC, USA: IEEE Press, 1999, 2: 1459 – 1464.
- [6] WANG Lei, WU Qidi. Ant system algorithm for optimization in continuous space[C]//*Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Control Applications*. Mexico City, Mexico: IEEE Press, 2001: 395 – 400.
- [7] JAYARAMAN V K, KULKARNI B D, SACHIN K, et al. Ant colony framework for optimal design and scheduling of batch plants[J]. *Computer and Chemical Engineering*, 2000, 24(8): 1901 – 1912.
- [8] GRIGORENKO I, GARCIA M E. Calculation of the partition function using quantum genetic algorithms[J]. *Physica A*, 2002, 313: 463 – 470.
- [9] RAMOS R V. Numerical algorithms for use in quantum information[J]. *Journal of Computational Physics*, 2003, 192(1): 95 – 104.
- [10] 李士勇, 李盼池. 基于实数编码和目标函数梯度的量子遗传算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1216 – 1218.

(上接第232页)

参考文献(References):

- [1] IOANNOU P A. Decentralized adaptive control of interconnected systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, 31(2): 291 – 298.
- [2] WU Z J, XIE X J, ZHANG S Y. Robust decentralized adaptive stabilization for a class of interconnected systems with unmodeled dynamics[J]. *International Journal of Systems Science*, 2004, 35(7): 389 – 404.
- [3] 田洁, 解学军. 具有未建模动态的时变关联系统的鲁棒分散自适应镇定[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 706 – 710.
(TIAN Jie, XIE Xuejun. Robust decentralized adaptive stabilization for time-varying interconnected systems with unmodeled dynamics[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(5): 706 – 710.)

(上接第236页)

- [6] 赵艳丽, 刘剑, 罗鹏飞. 自适应转弯模型的机动目标跟踪算法[J]. 现代雷达, 2003, 25(11): 14 – 16.
(ZHAO Yanli, LIU Jian, LUO Pengfei. Maneuvering target tracking algorithm for adaptive turn model[J]. *Modern Radar*, 2003, 2003, 25(11): 14 – 16.)
- [7] BEST R A, NORTON J P. A new model and efficient tracker for a target with curvilinear motion[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 1997, 33(3): 1030 – 1037.
- [8] 李涛. 曲线模型的半自适应交互多模型跟踪方法[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(4): 557 – 561.
(LI Tao. Half adaptive interactive multiple model tracking algorithm of curvilinear model[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(4): 557 – 561.)
- [9] ZHOU Hongren. *Tracking of maneuvering targets*[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 1984.

(LI Shiyong, LI Panchi. A quantum genetic algorithm based on real encoding and gradient information of object function[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006, 38(8): 1216 – 1218.)

- [11] 程志刚, 陈德钊, 吴晓华. 连续蚁群优化算法的研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(8): 1147 – 1151.
(CHENG Zhigang, CHEN Dezhao, WU Xiaohua. Study of continuous ant colony optimization algorithm[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2005, 39(8): 1147 – 1151.)

作者简介:

- 李盼池 (1969—), 男, 副教授, 博士研究生, 研究方向为量子优化算法, E-mail: lipanchi@vip.sina.com;
- 李士勇 (1943—), 男, 教授, 博士生导师, 研究领域为模糊控制、神经控制及智能控制理论, E-mail: lsy@hit.edu.cn.

- [4] MARINO R, TOMEI P. Adaptive control of linear time-varying systems[J]. *Automatica*, 2003, 39(4): 651 – 659.
- [5] KRASOWSKY N N. *Stability of Motion*[M]. Stanford: Stanford University Press, 1963.

作者简介:

- 田洁 (1979—), 女, 博士研究生, 研究方向是非线性系统的自适应控制理, E-mail: tjie9801@163.com;
- 解学军 (1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向是复杂系统的自适应控制理论及应用, E-mail: xxj@mail.qfnu.edu.cn.
- 刘海宽 (1962—), 男, 教授, 研究方向是计算机控制系统研究与应用、鲁棒控制等, E-mail: liuhaiquan1962@163.com.

- [10] 周宏仁, 敬忠良, 王培德. 机动目标跟踪[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
(ZHOU Hongren, JING Zhongliang, WANG Peide. *Maneuvering Target Tracking*[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1991.)

作者简介:

- 孙福明 (1972—), 男, 博士研究生, 研究方向为空间目标识别与跟踪, E-mail: sunfm@mail.ustc.edu.cn;
- 吴秀清 (1944—), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能信息处理, E-mail: wuxq@mail.ustc.edu.cn;
- 王鹏伟 (1978—), 男, 博士研究生, 研究方向为多尺度估计理论与应用, E-mail: wangpw@mail.ustc.edu.cn.