

文章编号: 2095-4980(2021)06-1008-06

基于强跟踪五阶容积卡尔曼滤波的眼睛跟踪算法

殷晓春^{1a}, 蔡晨晓², 李建林^{1b}

(1.南京信息职业技术学院 a.人工智能学院; b.网络与通信学院, 江苏 南京 210023; 2.南京理工大学 自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 非侵入式眼睛跟踪在许多基于视觉的人机交互应用中扮演十分重要的角色, 但由于眼睛运动的强非线性, 如何确保眼睛跟踪过程中对外界干扰的鲁棒性以及跟踪精确度是其应用的关键问题。为提高眼睛跟踪的鲁棒性和精确度, 提出强跟踪五阶容积卡尔曼滤波算法(ST-5thCKF), 将强跟踪滤波(STF)次优渐消因子引入具有接近最少容积采样点且保持五阶滤波精确度的五阶容积卡尔曼滤波(5thCKF), 获取5thCKF对强非线性良好滤波精确度同时具备STF对外界干扰的鲁棒性。真实条件下的实验结果验证了所提算法在眼睛跟踪中的有效性。

关键词: 眼睛跟踪; 强跟踪滤波; 五阶容积卡尔曼滤波; 强跟踪五阶容积卡尔曼滤波

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2020427

Eye tracking algorithm based on strong tracking fifth-degree cubature Kalman filter

YIN Xiaochun^{1a}, CAI Chenxiao², LI Jianlin^{1b}

(1a.Institute of Artificial Intelligence; 1b.School of Network and Communication, Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing Jiangsu 210023, China;

2.School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing Jiangsu 210094, China)

Abstract: Non-intrusive eye tracking plays an important role in many vision-based human computer interaction applications. How to ensure the robustness of external interference and tracking precision during eye tracking is the key problem to its applications owing to the strong nonlinearity of eye motion. To improve the robustness and precision of eye tracking, the Strong Tracking fifth-degree Cubature Kalman Filter(ST-5thCKF) algorithm is proposed. The algorithm introduces the suboptimal fading factor of Strong Tracking Filter(STF) into fifth-degree Cubature Kalman Filter(5thCKF) which almost has the least cubature sampling points while maintaining the fifth-degree filtering accuracy. The proposed algorithm bears the high filtering precision to strong nonlinearity of 5thCKF, as well as the robustness to external interference of STF. The experimental results under practical conditions show the validity of the proposed algorithm in eye tracking.

Keywords: eye tracking; Strong Tracking Filter(STF); fifth-degree Cubature Kalman Filter(5thCKF); Strong Tracking fifth-degree Cubature Kalman Filter(ST-5thCKF)

眼睛跟踪对于提高日常人机交互的质量具有重要作用, 在司机疲劳驾驶检测^[1-4]、虚拟现实系统(Virtual Reality System, VR)的图像扫描、飞行人员行为检测^[5]、眼睛与电脑交互^[6]等领域得到广泛应用。针对眼睛跟踪许多学者开展了研究, 文献[2]利用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)确定眼睛的位置, 提出基于Kalman滤波和Mean Shift算法相结合的眼睛跟踪算法, 提高跟踪的精确度和鲁棒性。文献[3]通过AdBoost算法检测到眼睛, 然后基于Kalman滤波和Mean Shift算法进行眼睛跟踪, 能够在眼睛部分遮挡或者闭合情况下, 在疲劳预警系统中实时跟踪驾驶员眼睛。文献[4]将Kalman滤波和Cam Shift算法相结合, 以提高眼睛跟踪的效果。但以上研究采用Kalman算法对于眼睛跟踪的强非线性跟踪效果有一定局限性。对强非线性系统, 基于容积规则的容积卡尔曼滤波(Cubature Kalman Filter, CKF)^[7]及其高阶算法比扩展卡尔曼滤波(Extended Kalman Filter, EKF)^[8]和不敏卡尔曼滤波(Unscented Kalman Filter, UKF)^[9]具有更好的性能, 文献[10]提出新的五阶容积卡尔曼滤波(5thCKF)能够在接近最少采样容积点的条件下获取五阶滤波精确度。眼睛跟踪需要克服的另一个问题是对外界干扰的鲁棒

收稿日期: 2020-09-03; 修回日期: 2020-10-12

基金项目: 江苏省第五期“333工程”高层次人才培养项目资助(BRA2019303)

性, 当传统滤波算法(如Kalman,EKF,UKF,CKF)在滤波稳定后, 对干扰的跟踪效果变差, 强跟踪滤波(STF)^[11-13]是提高算法鲁棒性的有效途径, 文献[14]提出基于强跟踪扩展卡尔曼滤波(Strong Tracking Extended Kalman Filter, ST-EKF)的眼睛跟踪算法, 解决眼睛跟踪中非线性和鲁棒性的问题。为进一步提高对非线性的滤波效果, 文献[15]提出基于强跟踪不敏卡尔曼滤波(Strong Tracking Unscented Kalman Filter, ST-UKF)的眼睛跟踪算法, 取得了良好效果。针对眼睛跟踪过程中强非线性和鲁棒性问题, 提出基于强跟踪五阶容积卡尔曼滤波(ST-5thCKF)的眼睛跟踪算法, 将STF的次优渐消因子引入5thCKF, 提高滤波算法对外界干扰鲁棒性, 同时具备5thCKF对强非线性系统的滤波效果, 提高眼睛跟踪的精确度。真实条件下实验验证算法的有效性。

1 强跟踪五阶容积卡尔曼滤波

考虑非线性系统:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = F(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{v}_k \\ \mathbf{y}_k = H(\mathbf{x}_k) + \mathbf{n}_k \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_k 为系统状态矢量; \mathbf{u}_k 为输入向量; \mathbf{y}_k 为量测矢量; \mathbf{v}_k 和 \mathbf{n}_k 为统计特性已知的过程噪声和量测噪声; F 和 H 分别为状态转移和量测转移函数。

1.1 5thCKF 算法

非线性系统贝叶斯滤波的核心是计算高斯加权积分, 在 CKF 框架下, 文献[10]提出新的 5thCKF, 采用更多采样点拟合函数积分 $I(g)$, 取得比 CKF 更高的滤波精确度。5thCKF 的准则为:

$$\begin{aligned} \int G(x)N(x; \bar{x}, \mathbf{P}_x)dx &= \frac{2}{n+2}G(\bar{x}) + \frac{(7-n)n^2}{2(n+1)^2(n+2)^2} \sum_{i=1}^{n+1} [G(\sqrt{(n+2)\mathbf{P}_x}a_i + \bar{x}) + G(-\sqrt{(n+2)\mathbf{P}_x}a_i + \bar{x})] + \\ &\frac{2(n-1)^2}{(n+1)^2(n+2)^2} \sum_{i=1}^{n(n+1)/2} [G(\sqrt{(n+2)\mathbf{P}_x}b_i + \bar{x}) + G(-\sqrt{(n+2)\mathbf{P}_x}b_i + \bar{x})] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \bar{x} 为状态矢量 \mathbf{x} 的估计值; \mathbf{P}_x 为状态协方差矩阵; n 为状态矢量 \mathbf{x} 的维数; $G(x)$ 为状态矢量 \mathbf{x} 的函数。此外有:

$$\mathbf{a}_i = [a_{i,1}, a_{i,2}, a_{i,3}, \dots, a_{i,n}]^T \quad (3)$$

$$b_i = \left\{ \begin{aligned} &\sqrt{\frac{n}{2(n-1)}}(a_j + a_l) \quad j < l, l=1, 2, \dots, n+1 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots, n+1$ 。 \mathbf{a}_i 向量元素定义为:

$$a_{i,j} = \begin{cases} -\sqrt{\frac{n+1}{n(n-j+2)(n-j+1)}}, & j < i \\ 0, & j > i \\ \sqrt{\frac{(n+1)(n-i+1)}{n(n-i+2)}}, & j = i \end{cases} \quad (5)$$

5thCKF 包含时间更新和量测更新这 2 个过程, 除其采样点计算方式与 CKF 有区别外, 其他步骤基本相同, 具体详见文献[10]。

1.2 STF 算法

文献[11-13]提出强跟踪滤波算法以解决传统非线性系统状态跟踪问题, STF 具有以下几个优点: a) 对于模型不确定性具有较好的鲁棒性; b) 无论系统是否达到稳定状态, 对于状态突变都能获取较好的实时跟踪能力。STF 通过引入随时间变化的次优渐消因子来调整状态预测协方差矩阵, 进而调整增益矩阵, 达到对模型不确定或者状态突变的跟踪。其中次优渐消因子 $\lambda(k)$ 计算方式如下:

$$\lambda(k) = \begin{cases} \lambda_0, & \lambda_0 \geq 1 \\ 1, & \lambda_0 < 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中有:

$$\lambda_0 = \frac{\text{tr}[N(k+1)]}{\text{tr}[M(k+1)]} \quad (7)$$

式中 $\text{tr}[*]$ 为对矩阵求迹, 且有:

$$N(k+1) = V_0(k+1) - H_x(k)F_x(k)F_x^T(k) - H_x(k)R_kH_x^T(k) \quad (8)$$

$$M(k+1) = H_x(k)F_x(k)\hat{P}_x F_x^T(k)H_x^T(k) \quad (9)$$

式中: $H_x(k)$ 为 k 时刻量测转移矩阵; $F_x(k)$ 为 k 时刻状态转移矩阵; R_k 为 k 时刻量测协方差矩阵; \hat{P}_x 为状态估计协方差矩阵。同时有:

$$V_0(k+1) = \begin{cases} H_x(0)\hat{P}_0H_x(0) + H_x^T(0), & k=0 \\ \frac{\rho V_0(k) + \gamma_k \gamma_k^T}{1+\rho}, & k \geq 1 \end{cases} \quad (10)$$

式中 γ_k 为残差向量, 有:

$$\gamma_k = z_k - \hat{z}_{k|k-1} \quad (11)$$

此外, $0 \leq \rho \leq 1$ 代表遗忘因子, 可根据实际处理过程确定其值, 对于变化较快的系统 ρ 值应取小, 反之则取值较大, 同时 $\lambda(k)$ 对于 ρ 的取值并不敏感。

1.3 ST-5thCKF

将次优渐消因子引入 5thCKF 的时间更新方程和量测更新方程, 以提高算法的鲁棒性, 进而提出 ST-5thCKF 算法。新算法过程为:

1) 初始化:

$$\begin{cases} \hat{x}_0 = E[x_0] \\ P_0 = E[(x_0 - \hat{x}_0)(x_0 - \hat{x}_0)^T] \end{cases} \quad (12)$$

式中: \hat{x}_0 为状态估计初始值; P_0 为初始协方差。

2) 根据式(2)的规则产生容积分点 x_{k-1}^i :

$$x_{k-1}^i = \begin{cases} \hat{x}_{k-1}, & i=1 \\ \hat{x}_{k-1} + \sqrt{(n+2)P_{k-1}} [a_i \quad -a_i], & i=2,3,\dots,2n+3 \\ \hat{x}_{k-1} + \sqrt{(n+2)P_{k-1}} [b_i \quad -b_i], & i=2n+4,\dots,n^2+3n+3 \end{cases} \quad (13)$$

式中: \hat{x}_{k-1} 为 $k-1$ 时刻状态估计值; n 为系统状态维数; a_i 和 b_i 为式(3)和式(4)的值。

3) 时间更新: 对上述容积分点进行传递得到容积分点传递值 $x_{k|k-1}^i$:

$$x_{k|k-1}^i = F(x_{k-1}^i, u_{k-1}) \quad (14)$$

计算状态一步预测 \hat{x}_k^- :

$$\hat{x}_k^- = \sum_{i=1}^{2n^3+3n+3} W_i x_{k|k-1}^i \quad (15)$$

式中: W_i 为容积分规则中相应权重, 计算协方差一步预测 P_k^- :

$$P_k^- = \lambda(k) \sum_{i=1}^{2n^3+3n+3} W_i [x_{k|k-1}^i - \hat{x}_k^-][x_{k|k-1}^i - \hat{x}_k^-]^T \quad (16)$$

式中 $\lambda(k)$ 为公式(6)计算的次优渐消因子。

4) 量测更新: 以状态一步预测 \hat{x}_k^- 以及协方差一步预测 P_k^- 进行量测更新。容积分点 $x_{k|k-1}^{ii}$ 计算:

$$x_{k|k-1}^{ii} = \begin{cases} \hat{x}_k^-, & i=1 \\ \hat{x}_k^- + \sqrt{(n+2)P_k^-} [a_i \quad -a_i], & i=2,3,\dots,2n+3 \\ \hat{x}_k^- + \sqrt{(n+2)P_k^-} [b_i \quad -b_i], & i=2n+4,\dots,n^2+3n+3 \end{cases} \quad (17)$$

计算容积分点的传递 $y_{ii,k|k-1}$:

$$y_{ii,k|k-1} = H(x_{k|k-1}^{ii}) \quad (18)$$

计算量测预测 \hat{y}_k^- :

$$\hat{y}_k^- = \sum_{ii=1}^{2n^3+3n+3} W_{ii} y_{ii,k|k-1} \quad (19)$$

计算交叉协方差 $P_{x_k y_k}$ 和预测协方差 $P_{y_k y_k}$:

$$P_{x_k y_k} = \sum_{i=1}^{2n^2+3n+3} W_i x_{i,k|k-1}^j (y_{i,k|k-1})^T - \hat{x}_k^- (\hat{y}_k^-)^T \quad (20)$$

$$P_{y_k y_k} = \sum_{i'=1}^{2n^2+3n+3} W_i y_{i,k|k-1} (y_{i,k|k-1})^T - \hat{y}_k^- (\hat{y}_k^-)^T + R_k \quad (21)$$

计算增益矩阵 κ_k :

$$\kappa_k = P_{x_k y_k} (P_{y_k y_k})^{-1} \quad (22)$$

更新状态 \hat{x}_k 和协方差 P_k :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + \kappa_k (y_k - \hat{y}_k^-) \quad (23)$$

$$P_k = P_k^- - \kappa_k P_{y_k y_k} \kappa_k^T \quad (24)$$

2 实验分析

本节采用 ST-5thCKF 进行眼睛跟踪，以验证算法有效性。由于眼睛运动是一个高度非线性的模型，难以对人眼的运动进行动态建模，在此利用以下非线性方程对眼睛运动进行建模：

$$\begin{cases} x = x_0 + vt + \frac{1}{2}at^2 \\ \dot{x}_{k+1} = v_0 + A_k \sin \omega_k t \\ o_{k+1} = \ddot{x}_{k+1} = A_k \omega_k \cos \omega_k t \end{cases} \quad (25)$$

式中：初始值 x_0 和 v_0 都取值为 0；加速度 o 服从正弦分布，并视为过程噪声。根据多次实验结果，可以选定 $A_k=0.08 \text{ m/s}$ 且 $\omega_k=\pi \text{ rad/s}$ 。

状态和量测矩阵分别为：

$$F = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

式中 Δt 为时间间隔，取值 1。遗忘因子取值 0.9。

实验平台为 OpenCV，系统采用 VQ680 视频相机来捕获人像，实验硬件条件为奔腾 III, 1.7G CPU, 128 MB 内存。输入视频的格式为 352×288，采用 ST-5thCKF 进行眼睛跟踪部分结果，见图 1。

对多次跟踪结果进行统计，其结果见表 1。其中正确率的计算公式为：

$$\text{正确率} = \frac{\text{总帧数} - \text{跟踪失败}}{\text{总帧数}} \quad (27)$$

为说明提出算法的有效性，与基于模型匹配的眼睛跟踪、基于 UKF 的眼睛跟踪以及基于 ST-UKF 的眼睛跟踪算法进行对比，主要对比正确率指标，结果见表 2。

从实验结果看，提出的 ST-5thCKF 对眼睛跟踪的结果优于 UKF 和 ST-UKF 算法，具有更好的眼睛跟踪效果。

此外，在计算复杂性和实时性方面，相比 ST-UKF 的 $2n+1$ 个采样点，ST-5thCKF 的容积点个数为 n^2+3n+3 ，本实验状态维数为 4 的条件下，ST-5thCKF 计算量是 ST-UKF 的 3 倍左右，在本实验硬件条件下，且取采样间隔为 1，ST-5thCKF 能够有效实现眼睛跟踪。



Fig.1 Eye tracking results of ST-5thCKF
图 1 ST-5thCKF 眼睛跟踪结果

表 1 ST-5thCKF 眼睛跟踪统计

Table1 Results of eye tracking using ST-5thCKF

	video1	video 2	video 3	video 4
total frames	5 900	8 965	7 639	14 632
tracking failed	6	9	6	12
accuracy/%	99.90	99.90	99.92	99.92
average accuracy/%	99.91			

表 2 多种算法性能对比

Table2 Comparison of performance

algorithm	accuracy/%
model matching	99.10
UKF	99.50
ST-UKF	99.85
ST-5thCKF	99.91

3 结论

针对眼睛跟踪过程中强非线性和鲁棒性问题, 提出基于ST-5thCKF的眼睛跟踪算法, 将STF的次优渐消因子引入5thCKF, 提高滤波算法对外界干扰鲁棒性, 同时具备5thCKF对强非线性系统的滤波效果, 提高眼睛跟踪的精确度。实验结果表明, ST-5thCKF能够较好处理眼睛跟踪问题。

参考文献:

- [1] LE A S,SUZUKI T,AOKI H. Evaluating driver cognitive distraction by eye tracking: from simulator to driving[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2020,4:TRIP-100087.
- [2] 周传利,张向东. 关于驾驶员眼睛检测与跟踪的研究[J]. 仪器仪表用户, 2008,15(2):4-6. (ZHOU Chuanli,ZHANG Xiangdong. Study on the eye location method and track algorithm for driver[J]. Instrument User, 2008,15(2):4-6.)
- [3] 唐炜,孟承烈. Kalman滤波和Mean Shift算法在疲劳预警系统中的应用[J]. 电脑编程技巧与维护, 2009(10):113-116. (TANG Wei,MENG Chenglie. Application of Kalman filtering and Mean Shift algorithm in fatigue early warning system[J]. Computer Programming Skills & Maintenance, 2009(10):113-116.)
- [4] 程文冬,魏庆媛. 非约束条件下驾驶人眼睛检测与跟踪方法研究[J]. 西安工业大学学报, 2019,39(2):203-210. (CHENG Wendong,WEI Qingyuan. Research on driver eye detection and tracking under non-restraint conditions[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2019,39(2):203-210.)
- [5] LI W C,BRAITHWAITE G,WANG T,et al. The benefits of integrated eye tracking with airborne image recorders in the flight deck:a rejected landing case study[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2020,78(7):102982.
- [6] CARTER B T,LUKE S G. Best practices in eye tracking research[J]. International Journal of Psychophysiology, 2020(155):49-62.
- [7] ARASARATNAM I,HAYKIN S. Cubature Kalman Filter[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009,54(6):1254-1269.
- [8] EHRMAN L M,LATERMAN A D. Extended Kalman Filter for estimating aircraft orientation from velocity measurement[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2008,2(1):12-16.
- [9] 石喜玲,孙运强,李静. 基于 UKF 信息融合的多旋翼飞行器姿态估计[J]. 测试技术学报, 2020,34(4):278-283. (SHI Xiling,SUN Yunqiang,LI Jing. Attitude estimation of multi-rotor aircraft based on UKF information fusion[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2020,34(4):278-283.)
- [10] JIA B,XIN M. Multiple sensors estimation using a new fifth-degree cubature information filter[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2015,37(1): 15-24.
- [11] 王林茜,胡晓曦,韩勋,等. 基于强跟踪滤波和模糊逻辑推理的有向图切换算法[J]. 空间电子技术, 2019(6):33-38. (WANG Linqian,HU Xiaoxi,HAN Xun,et al. Directed graph switching algorithm based on strong tracking filtering and fuzzy logic reasoning[J]. Space Electronic Technology, 2019(6):33-38.)
- [12] 吕东辉,王炯琦,熊凯,等. 适用处理非高斯观测噪声的强跟踪卡尔曼滤波器[J]. 控制理论与应用, 2019,36(12):1997-2004. (LYU Donghui,WANG Jiongqi,XIONG Kai,et al. Strong tracking Kalman filter for non-Gaussian observation[J]. Control Theory and Applications, 2019,36(12):1997-2004.)
- [13] 张佩,姚孟豪,彭辅明,等. 基于无迹变换强跟踪滤波的锂离子电池 SOC 估计[J]. 数字制造科学, 2019,17(4):260-265. (ZHANG Pei,YAO Menghao,PENG Fuming,et al. State of charge estimation of lithium-ion battery based on unscented transformation strong tracking filter[J]. Digital Manufacture Science, 2019,17(4):260-265.)
- [14] ZHANG Z T,ZHANG J S. A novel strong tracking finite-difference extended Kalman filter for nonlinear eye tracking[J]. Science in China Series F:Information Science, 2009,52(4):688-694.

- [15] ZHANG Z T,ZHANG J S. A strong tracking nonlinear robust filter for eye tracking[J]. Journal of Control Theory and Applications, 2010,8(4):503–508.

作者简介：

殷晓春(1973–)，男，江苏省南通市人，硕士，讲师，研究方向为人工智能技术及应用、大数据并行计算和处理、分布式数据库.email:zha565776@163.com.

蔡晨晓(1975–)，女，山东省聊城市人，博士，教授，研究方向为有限频段奇异摄动系统、无人机控制与导航、大数据并行计算和处理.

李建林(1974–)，男，湖南省洪江市人，硕士，教授，研究方向为自动控制、人工智能、数据挖掘.

(上接第 1007 页)

- [12] SOMASUNDARAM S D. Linearly constrained robust Capon beamforming[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012,60(11):5845–5856.
- [13] 李立欣,白童童,张会生. 改进的双约束稳健 Capon 波束形成算法[J]. 电子与信息学报, 2016,38(8):2014–2019. (LI Lixin,BAI Tongtong,ZHANG Huisheng. Improved robust Capon beamforming algorithm with double constraints[J]. Journal of Electronics and Information, 2016,38(8):2014–2019.
- [14] BAO Q,CHEN Z,WANG Y. Robust adaptive beamforming using IAA-based interference-plus-noise covariance matrix reconstruction[J]. Electronics Letters, 2016,52(13):1185–1186.
- [15] ZHANG M,ZHANG A,YANG Q. Robust adaptive beamforming based on conjugate gradient algorithms[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2016(99):6046–6057.
- [16] CHEN P,YANG Y,WANG Y,et al. Robust adaptive beamforming with sensor position errors using weighted subspace fitting-based covariance matrix reconstruction[J]. Sensors, 2018,18(5):1476–1484.

作者简介：

阳 辉(1969–)，男，教授级高级工程师，主要研究方向为水文自动化.email:1162501684@qq.com.

嵇海祥(1981–)，男，副教授级高级工程师，主要研究方向为水文自动化.

刘湘伟(1979–)，男，教授级高级工程师，主要研究方向为水文监测技术应用.

夏 翔(1994–)，男，硕士，主要研究方向为雷达信号处理.