

基于自适应滤波的头部姿态跟踪方法研究

刘世良^{1,2}, 仇振安³, 丁全心², 张劲锋²

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000; 3. 陆航驻洛阳地区军事代表机构, 河南 洛阳 471000)

摘要: 针对视觉式头部定位系统存在着噪声统计特性掌握不充分的问题, 设计了一种新的基于自适应滤波的头部姿态跟踪方法, 其综合了视觉测量算法和自适应滤波算法。在获取 n 对 2D/3D(图像点/空间点) 匹配对的基础上, 先利用正交迭代算法(OI)解算头部姿态, 然后应用自适应滤波器估计精度更高的头部姿态, 最后针对带有时变噪声且噪声统计特性掌握不充分的测量值, 应用头部姿态跟踪方法进行了仿真测试, 结果显示该方法的测量精度有很大提高, 并且验证了所设计的头部姿态跟踪方法是合理且有效的。

关键词: 头部定位系统; 姿态跟踪; 正交迭代算法; 自适应滤波

中图分类号: V243.6 文献标志码: A 文章编号: 1671-637X(2016)04-0033-04

A Head Attitude Tracking Method Based on Adaptive Filtering

LIU Shi-liang^{1,2}, QIU Zhen-an³, DING Quan-xin², ZHANG Jin-feng²

(1. Science and Technology on Electro-Optical Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China;

3. Military Representative Organization of the Army Aviation in Luoyang District, Luoyang 471000, China)

Abstract: Aiming at the problem that the noise statistical properties of the visual head positioning system have not been fully mastered, a new method of head attitude tracking based on adaptive filtering is designed, which combines the vision measurement algorithm with adaptive filtering algorithm. On the basis of the n pairs in 2D/3D(image point / space point) matching, the head attitude is calculated out at first by using the Orthogonal Iteration(OI) algorithm, and the head attitude with higher accuracy is then obtained by using adaptive filter. Finally, to the measurement values with time varying noise and the statistics characteristic of the noise is unknown, we made some simulation tests with the head attitude tracking method. The results show that the measurement accuracy of the method is greatly improved, and it is demonstrated that the head attitude tracking method is reasonable and effective.

Key words: head positioning system; attitude tracking; orthogonal iterative algorithm; adaptive filtering

0 引言

头部姿态跟踪就是跟踪测量头部相对于世界坐标系的3个姿态角度。头部姿态跟踪是虚拟现实和增强现实的核心技术之一, 目前广泛应用的头部姿态跟踪方式有电磁式、光电式和计算机视觉式^[1-3]。与电磁式、光电式相比, 视觉式头部定位技术在解决头部姿态跟踪定位时, 干扰小、测量误差小、运算速度快、稳定可

靠, 因而得到了广泛的应用。基于视觉式的头部姿态定位技术根据传感器(摄像机)安装位置分为外置传感器视觉式和盔载传感器视觉式两大类。两者基本原理相似, 区别在于特征点的选取及其相应的图像处理部分不同。基于视觉式的头部姿态定位技术是根据空间中 n 个控制点的世界坐标与其在单幅图像中的坐标之间的对应关系, 通过求解 PnP^[4-7] 问题完成头部姿态的跟踪、定位。求解 PnP 问题的方法可分为线性算法和非线性迭代算法两大类。经典的线性算法有直接线性变换法^[4] (DLT) 和 EPnP^[5] 算法, 虽然两者计算速度很快, 但是易受噪声干扰且精度不高; 非线性迭代算

法通过对某种目标函数进行最优化迭代,可以获取相对精度很高的数值解。经典的非线性迭代算法有 Levenberg-Marquardt 提出的最大似然估计(LM)算法^[6]和正交迭代(OI)算法^[7]。OI算法精度略次于LM算法,但是速度却远快于LM算法。通过PNP问题的求解可以得到各个时刻头部相对于飞机坐标系的头部姿态角。

图像处理环节引入的图像噪声最终会带入PNP算法解算的头部姿态角误差中,而且头部姿态角误差会随着测量角度和测量环境的变化而变化。目前对这些综合误差因素造成的头部姿态角测量值的噪声统计特性掌握还不充分。而且目前视觉式头部定位技术只能求解当前时刻的头部姿态角,不能预测和跟踪下一时刻的头部姿态,对于拍摄死角引起的头部姿态测量丢失问题无能为力。针对视觉测量中存在的非线性和离散化等特点,文献[8-9]通过建立合适的运动模型,应用扩展卡尔曼滤波(EKF)对头部运动的姿态进行估计,而对于测量噪声和系统噪声统计特性掌握不充分和时变性,EKF就不再适用了,滤波效果明显下降。本文在EKF的基础上引入自适应滤波进行最优化估计,获取了更高精度的头部姿态角。

1 方法描述

本文跳过相机标定、特征识别和特征匹配等前期图像处理工作,直接利用前期图像处理的结果,即在获取 n 对2D/3D(图像点/空间点)坐标点匹配对——目标特征点在二维图像坐标系和三维世界坐标系中的坐标点对的基础上进行算法研究。图1所示为2D/3D坐标点匹配对在相机坐标系的示意图。

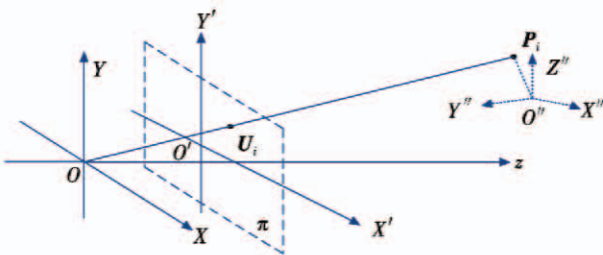


图1 摄像机透视投影图

Fig.1 Camera perspective projection

令 $\{P_{oi}(x, y, z) | i=1, 2, \dots, n\}$ 为目标特征点 P_i 在世界坐标系 $O''X''Y''Z''$ 中的三维坐标点集, $\{P_{ci}(x, y, z) | i=1, 2, \dots, n\}$ 为目标特征点 P_i 在相机坐标系 $OXYZ$ 中相对应的三维坐标点集,目标特征点 P_i 在图像坐标系 $O'X'Y'$ 中的二维坐标点集为 $\{U_i(u, v) | i=1, 2, \dots, n\}$ 。2D/3D的透视投影关系式为

$$Z_i U_i = K(RP_{oi} + T) \quad (1)$$

式中: Z_i 为目标特征点在摄像机坐标系中的深度值; K

为摄像机内参数; R 为摄像机相对于世界坐标系的旋转矩阵; T 为平移向量。如图2所示,在获取2D/3D点对后,把匹配点对代入OI算法中解算出3个头部姿态角:方位角、俯仰角和横滚角,最后由自适应滤波算法估计出最优头部姿态。

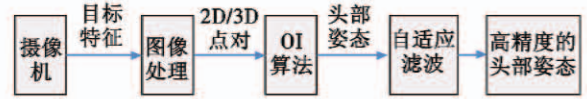


图2 基于自适应滤波的头部姿态跟踪算法示意图

Fig.2 Schematic diagram of head attitude tracking algorithm based on adaptive filtering

2 头部姿态求解算法

1998年LU提出的全局收敛的OI算法以目标空间共线性误差为目标函数,利用最小二乘原理进行迭代优化,可以得到高精度的数值解且具有抗噪性强和实时性好等优点。把图1中的点 U_i 换算在归一化图像平面中,其坐标点集为 $\{V_i = (u_i, v_i, 1)^T | i=1, 2, \dots, n\}$ 。3D点对 $\{(P_{ci}, P_{oi}) | i=1, 2, \dots, n\}$ 的变换关系式为 $P_{ci} = RP_{oi} + T$ 。设 F_i 是沿着向量 V_i 视线的投影矩阵,则其表达式为 $F_i = V_i V_i^T / V_i^T V_i$ 。那么目标空间中的共线性方程可表述为 $P_{ci} = RP_{oi} + T = P'_{ci} = F_i(RP_{oi} + T)$ 。目标空间共线性误差关于 R 和 T 的误差方程为

$$E(R, T) = \min_{R, T} \sum_{i=1}^n \|(I - F_i)(RP_{oi} + T)\|^2 \quad (2)$$

1) 当旋转矩阵初始值 R^{*k} 给定时,对式(2)进行最小二乘优化求解 T^{*k} 关于 R^{*k} 关系式为

$$T^{*k}(R^{*k}) = \frac{1}{n}(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i)^{-1} \sum_{i=1}^n (F_i - I)R^{*k}P_{oi} \quad (3)$$

2) 当获得 T^{*k} 后,利用线性最小二乘优化法求解最优化的 $R^{*(k+1)}$ 时,一般多采用考虑了旋转矩阵 R 正交性和行列式为1约束的奇异值分解法(SVD)。

$$\begin{cases} \hat{P}_{oi} = P_{oi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{oi} \\ \hat{P}_{ci} = P'_{ci} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P'_{ci} \\ Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{P}_{ci} \hat{P}_{oi}^T \\ Q = UDV^T \end{cases} \quad (4)$$

其中, (U, D, V) 是对 Q 的奇异值分解。有

$$R^{*(k+1)} = VU^T \quad (5)$$

3) 重复1)和2),直到 $\sum_{i=1}^n \|P_{ci(i+1)} - P_{ci}\|^2$ 小于给定的阈值后结束迭代,便可得到最优化的旋转矩阵 R 和平移向量 T 。头部姿态的旋转矩阵也可以用3个欧拉角表示,即头部姿态角:方位角 θ_1 、俯仰角 θ_2 和横滚角 θ_3 。假设旋转矩阵 R 表示为

$$R = [r_{11}, r_{12}, r_{13}; r_{21}, r_{22}, r_{23}; r_{31}, r_{32}, r_{33}] \quad (6)$$

则有

$$\begin{cases} \theta_1 = 180\arcsin(r_{32}/(r_{11}^2 + r_{21}^2))/\pi \\ \theta_2 = 180\arcsin(-r_{31})/\pi \\ \theta_3 = 180\arcsin(r_{21}/(r_{11}^2 + r_{21}^2))/\pi \end{cases} \quad (7)$$

3 基于自适应滤波的头部姿态估计

头部运动一般是非线性的,其运动轨迹很难用具体的运动函数来表达。由于头部运动具有惯性和连续性,所以头部当前运动状态和过去运动状态是密切相关的。假设头部运动可以模拟为匀速转动的运动模型来逼近实际的头部机动运动过程,并且引入系统状态噪声 W_k 来补偿匀速运动模型与头部实际机动运动中带有的无规则加速度的误差,它为零均值的高斯噪声,且其方差阵为 $con(W_k) = Q_k$ 。假设 V_k 为观测噪声,其反映了图像处理误差和正交迭代算法误差等综合误差因素造成的观测值的偏差。设它为零均值的高斯噪声,且其方差阵为 $con(V_k) = R_k$ 。系统状态方程和测量方程为

$$\begin{cases} X(k) = \Phi X(k-1) + W_{k-1} \\ Z(k) = HX(k) + V_k \end{cases} \quad (8)$$

式中: Φ 为状态转移矩阵; H 为测量变换矩阵; $X(k)$ 为头部姿态的状态向量; $Z(k)$ 是利用2节中的OI算法解算得到的头部姿态角测量值。使用欧拉角 $\theta_k = [\theta_{1k}, \theta_{2k}, \theta_{3k}]^T$ 表示头部姿态测量值 $Z(k) = \theta_k$; 用 $\dot{\theta}_k = [\dot{\theta}_{1k}, \dot{\theta}_{2k}, \dot{\theta}_{3k}]^T$ 表示头部运动的旋转角速度,则头部姿态的状态向量为 $X(k) = [\theta_k, \dot{\theta}_k]^T$ 。

$$\Phi = \begin{bmatrix} I_3 & I_3 T \\ 0 & I_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = [I_3 \quad 0_3] \quad (10)$$

3.1 EKF

针对头部运动的非线性和OI算法获取的观测值离散化的特点,应用方法比较成熟的EKF来估计头部姿态,其滤波方程为

$$X_{k|k-1} = \Phi X_{k-1} \quad (11)$$

$$P_{k|k-1} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q_{k-1} \quad (12)$$

$$K_k = P_{k|k-1} H^T (HP_{k|k-1} H^T + R_k)^{-1} \quad (13)$$

$$X_k = X_{k|k-1} + K_k (Z_k - HX_{k|k-1}) \quad (14)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{k|k-1} \quad (15)$$

3.2 自适应滤波算法

目前对于系统噪声 W_k 和姿态观测噪声 V_k 的统计特性掌握不充分,而且随着环境变化,观测噪声是时变噪声。对于文献[8-9]使用传统的EKF进行头部姿态估计和预测,因为不能合适选取 Q_k 和 R_k ,将导致

估计精度的下降。对于这种情况,引入自适应滤波对系统状态噪声和测量噪声进行统计更新,从而进一步提高头部位姿的估计和预测精度。在 k 时刻,利用测量值对预测值进行修正后,前 k 个头部姿态状态信息可以对系统状态噪声和测量噪声统计信息进行更新。引入状态估计差值

$$\tilde{Z}_k = Z_k - HX_k \quad (16)$$

计算其前 k 时刻的协方差 Ω_k ,其算式为

$$\Omega_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \tilde{Z}_i \tilde{Z}_i^T \quad (17)$$

但是,由于式(17)对新信息的利用率只有 $\frac{1}{k} \tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T$,随着 k 值的增大,新信息利用率会越来越小。为了使自适应滤波更有效地利用新信息,需要固定新信息的利用效率,更改式(17)为式(18)可使新信息的利用率不随着时间的积累而衰弱,同时过去很久的信息会随时间的更新而衰弱。

$$\Omega_k = (1-b)\Omega_{k-1} + b\tilde{Z}_k \tilde{Z}_k^T \quad (18)$$

式中, b 为遗忘因子,取值 $(0, 1)$ 。为了使跟踪器能够真实准确地反映头部或者头部的实际运动过程,需要对 Q_k 和 R_k 进行实时更新,算式为

$$R_k = (1-b)R_{k-1} + b(\Omega_k - HP_k H^T) \quad (19)$$

$$Q_k = (1-b)Q_{k-1} + bK_k \Omega_k K_k^T \quad (20)$$

自适应滤波利用估计残差来对统计不充分且时变的系统状态噪声和测量噪声统计参数 Q_k 和 R_k 进行实时修正更新,以提高头部姿态的估计精度。自适应滤波只需在EKF的基础上加入噪声估计器:式(16)、式(18)、式(19)和式(20)即可。

4 仿真及分析

系统的仿真流程如图3所示。

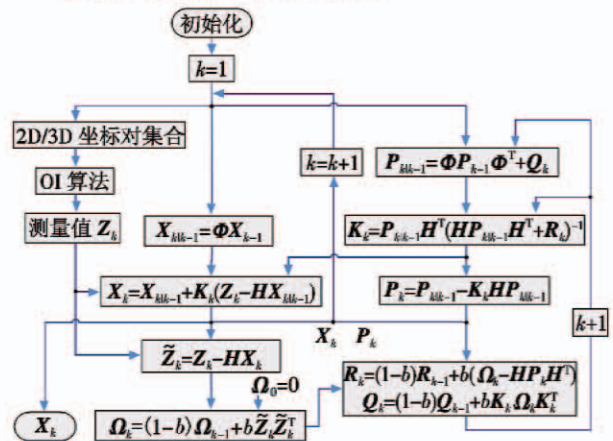


图3 自适应滤波仿真过程

Fig.3 Adaptive filter simulation process

利用 Matlab2012a 对上述算法进行仿真验证。在给出摄像机内参数 K 、目标特征点在世界坐标系中的坐标和运动模型的前提下,先根据运动模型推算出头部姿态角并转化成头部姿态参数 R 和 T ,然后由式(1)计算出目标特征点在图像坐标系中理论的 2D 坐标,最后在 2D 坐标中添加相应的干扰噪声进行仿真实验。

4.1 PnP 算法仿真比较

由于系统在摄像机标定、图像畸变校正、特征中心坐标提取等图像处理环节会引入随机误差,根据 PnP 问题的特点,这些随机误差最终会累积在图像特征点的 2D 坐标中,因此在 2D 图像特征点坐标中添加均值为 0、均方差以步长 0.1 像素,在 0.1~2 像素的范围内增长的随机高斯图像噪声;随机给定旋转矩阵和平移向量,每个步长进行 2000 次随机实验。以 3 个头部姿态角均方差为例对 DLT 算法、EPnP 算法和 OI 算法进行仿真测试,仿真结果如图 4 所示。

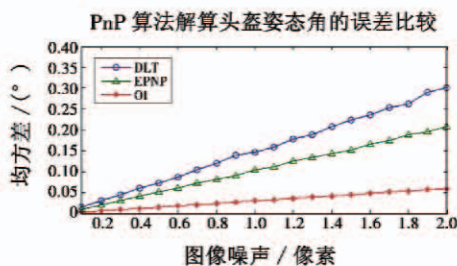


图4 图像噪声引起的姿态角误差

Fig. 4 The attitude angle error caused by image noise

从仿真结果来看,3种算法解算的头部姿态角误差均方差都随着图像特征点噪声的增加而线性增大。而且非线性的 OI 算法性能优于线性的 DLT 算法和 EPnP 算法。由此可以看出,非线性的 OI 算法对于解算头部姿态角来说,性能更好,可以为后面的自适应头部姿态估计提供更加精确的测量值。

4.2 滤波算法仿真比较

在 4.1 节的仿真基础上,利用 OI 算法解算得到每一时刻的头部姿态测量值。由于系统在图像处理环节和 OI 算法解算头部姿态环节中会引入误差,目前对这些综合误差的统计并不充分,而且随着环境因素的改变,还会引入时变的测量噪声,所以在仿真时应在图像坐标中加入适当的时变噪声。假设头部运动的初始位置为方位角 45° ,俯仰角 30° ,横滚角 5° ,初始角速度分别为 $0.015(^\circ)/s$, $0.01(^\circ)/s$, $0.009(^\circ)/s$,测量周期设为 $T=20\text{ ms}$,相关时间 30 min,分段添加时变噪声。仿真结果如图 5 所示。

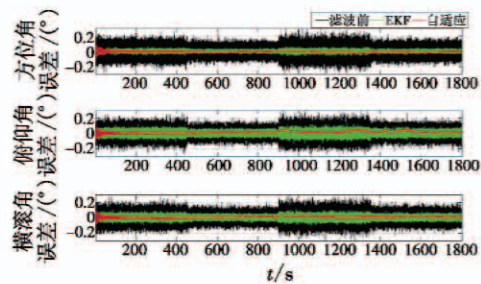


图5 头部姿态的滤波效果比较

Fig. 5 Comparison of the filtering effect of head attitude

从图 5 可以明显看出,经过 2 种滤波方法处理后,头部姿态角的精度都有所提高,3 个姿态角的误差范围与校正前相比明显减小。EKF 虽然能够改善头部姿态角的误差范围,但是对于未充分统计的噪声,其估计效果明显不如自适应滤波;对于加入时变噪声的头部姿态角测量值,EKF 的滤波精度随着测量精度的变差而降低,而自适应滤波却能很好地适应变化了的噪声。滤波初期的前 50 s 内,自适应滤波的滤波精度和 EKF 相当,随着对噪声方差阵 Q_k 和 R_k 的统计更新,自适应滤波开始优化,50 s 以后能够完全适应时变的噪声并进行更精确的滤波。自适应滤波的滤波精度可以达到 0.1° 以内,对于加入时变噪声的观测值能够快速稳定地跟踪。

5 结论

本文提出的基于自适应滤波的头部姿态跟踪方法,首次针对视觉式的头部姿态定位技术中带有时变且未充分统计噪声的测量值进行了自适应滤波估计研究。经仿真验证,该算法合理有效并且获得了比 EKF 更高的精度。本文对提高传统的计算机视觉头部姿态定位方法的精度,提供了一种可行、有效的理论方案依据。对于本文提出的自适应滤波算法需要较长时间才能达到稳态的不足,在未来的研究中将根据实际应用需要,逐步对自适应滤波算法进行改进,在保证实时性的前提下缩短达到稳态所需要的时间,并提高跟踪的精度。

参考文献

- [1] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 1-5. (WANG Y S. On dynamic performance of airborne helmet-mounted display and sight system[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8): 1-5.)

(下转第 61 页)

- get detection with three-dimensional wide-to-exact search directional filtering[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2007, 28(2):246-253.
- [3] DAVEY S J, RUTTEN M G, CHEUNG B, et al. A comparison of detection performance for several track-before-detect algorithms[C]//The 11th International Conference on Information Fusion, 2008:1-8.
- [4] 王学伟,王春歆,张玉叶,等. 空间小目标动态规划检测[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(2):477-484. (WANG X W, WANG C X, ZHANG Y Y, et al. Detection of small space target by dynamic programming[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(2):477-484.)
- [5] DIANI M, CORSINI G, BALDACCI A. Space-time processing for the detection of airborne targets in IR image sequences[J]. *IEEE Proceedings of Vision, Image and Signal Processing*, 2001, 148(3):151-157.
- [6] 罗寰,王芳,陈中起,等. 基于对称差分 and 光流估计的红外弱小目标检测[J]. *光学学报*, 2010, 30(6):1715-1720. (LUO H, WANG F, CHEN Z Q, et al. Infrared target detecting based on symmetrical displaced frame difference and optical flow estimation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(6):1715-1720.)
- [7] 姜磊,张艳宁,孙瑾秋. 基于分块的非均匀 Hough 变换轨迹检测方法[J]. *中国体视学与图像分析*, 2009, 14(1):60-66. (JIANG L, ZHANG Y N, SUN J Q. Trajectory detection by non-uniform quantitative Hough transform in segmented blocks[J]. *Chinese Journal of Stereology and Mage Analysis*, 2009, 14(1):60-66.)
- [8] 郝志成,朱明. 基于多约束准则匹配算法的序列图像配准[J]. *光学学报*, 2010, 30(3):702-707. (HAO Z C, ZHU M. Serial image registration based on multiple restriction matching algorithm[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3):702-707.)
- [9] LEE J H, KIM Y S, LEE D, et al. Robust CCD and IR image registration using gradient-based statistical information[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(4):347-350.
- [10] 朱明早,罗大庸. 基于帧间差分背景模型的运动物体检测与跟踪[J]. *计算机测量与控制*, 2006, 14(8):1004-1006, 1009. (ZHU M H, LUO D Y. Moving objects detection and tracking based on two consecutive frames subtraction background model[J]. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(8):1004-1006, 1009.)
- [11] CHU P L. Efficient detection of small moving objects[R]. Lincoln Laboratory Technology, ADA213314. 1989, 6:71-77.
- (上接第36页)
- [2] CHEN Q, WU H Y, SHIOYAMA T, et al. Head pose estimation using both color and feature information[C]//Proceedings of the 15th International Conference on Pattern Recognition, Barcelona, Spain, USA:IEEE Computer Society, 2000, 2:842-845.
- [3] MURPHY-CHUTORIAN E, TRIVEDI M M. Head pose estimation in computer vision: a survey[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence*(S0162-8828), 2009, 31(4):607-626.
- [4] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry[J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2015, 81(1):103-107.
- [5] LEPETIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2008, 81(2):155-166.
- [6] HARTLEY R I, KAHN F. Global optimization through rotation space search[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2009, 82(1):64-79.
- [7] LU C P, GREGORY D H, MJOLSNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images[J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, 22(6):610-622.
- [8] 罗斌,王勇天,刘越. 高精度鲁棒的座舱头部姿态跟踪器研究[J]. *北京理工大学学报*, 2011, 31(3):367-372. (LUO B, WANG Y T, LIU Y. Study on high accurate and robust head pose tracker for cockpit environment[J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2011, 31(3):367-372.)
- [9] MA K, DING Q X, ZHANG Q Z, et al. Head attitude tracking based on EKF[C]//The 6th SPIE International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technology, SPIE, 2012, 8417:84171P1-84171P7.