

基于 Kalman 滤波的头盔运动姿态的预测方法

孙超 张美君

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所中国科学院航空光学成像与测量重点实验室 长春 130033)

摘要: 针对头盔瞄准具单目视觉定位系统中,由于面阵 CCD 相机帧频的限制而导致对其定位速度慢的问题,提出了一种基于自适应 Unscented Kalman 滤波的头盔运动姿态固定超前预测方法。首先,分析了飞行员头部的运动特点,利用匀变速运动来描述头盔的实际运动,并建立了头盔姿态固定超前预测的状态空间模型;然后,基于自适应 Unscented Kalman 滤波理论分别对头盔在相机连续 2 次采样中间的非采样时刻和采样时刻的姿态进行固定超前预测,并利用采样时刻头盔姿态的测量值对其固定超前预测值进行实时的修正,以在间接提高头盔定位速度的同时,保证其定位精度;最后,搭建了单目视觉姿态测量与预测实验系统,对该方法的有效性和准确性进行了验证。实验结果表明,该方法能够对头盔瞄准具在相机连续 2 次采样中间的非采样时刻的运动姿态进行有效而准确的固定超前预测,在保证了对头盔定位精度的前提下,可以有效地将其定位速度提高 1 倍。

关键词: 头盔瞄准具;自适应 Unscented Kalman 滤波;姿态;定位;固定超前预测

中图分类号: TP242.6 TN911.71 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4020

Pose prediction method for moving helmet based on Kalman filtering

Sun Chao Zhang Meijun

(Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Chinese Academy of Sciences, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: Aiming at the problem of slow speed of Helmet-Mounted Sight's positioning, which is restricted by the area CCD camera's frame rate in monocular vision positioning system, a fixed-time prediction method for moving helmet pose based on adaptive Unscented Kalman filtering is proposed in this paper. Firstly, the moving characteristics of the pilot's head is analysed, and the helmet's actual movement is described by the uniformly variable motion, then the state-space model is established to describe the fixed-time prediction process for moving helmet pose; Secondly, the helmet poses are fixed-time predicted based on adaptive Unscented Kalman filtering, on both the camera's sampling time and the non-sampling time that is between two continuous sampling times, and then the predicted value on the sampling time is modified by the measuring one, so that the helmet's positioning speed can be improved indirectly, at the same time, its positioning accuracy would not decline; Finally, to verify the validity and veracity of the proposed method, the experimental monocular vision pose measurement and prediction system is built. The experimental results show that the pose of Helmet-Mounted Sight on CCD camera's non-sampling time can be predicted exactly by the proposed method, so the positioning speed of helmet can be effectively doubled, on the premise of ensuring its positioning accuracy.

Keywords: helmet-mounted sight; adaptive Unscented Kalman filtering; pose; positioning; fixed-time prediction

1 引言

20 世纪 60 年代初,处于越战状态的美国为了满足武装直升机火力控制的需要,首先提出了头盔瞄准具(hel-

met-mounted sight, HMS)的概念^[1]。头盔瞄准具将目视和驱动技术相结合,作为一种瞄准装置安装在飞行员的头盔上。飞行员通过头盔瞄准具可以自主快速地搜索、识别、定位并跟踪机舱外的机动目标,控制空对空格斗导弹

快速指向打击目标及离轴发射,并可引导机载雷达等目标探测设备对移动目标进行探测与跟踪等。飞行员通过头盔瞄准标线瞄准并跟踪机舱外的移动目标时,其头部的位置和姿态决定了瞄准线的位置,因此,对飞行员头盔的准确、快速定位,是充分发挥头盔瞄准具作用的一个重要前提。

近年来,基于计算机视觉的单目视觉姿态测量方法由于具有非接触、结构简单、标定步骤少等优点,以及可以避免立体视觉中视场小、立体匹配难、全局标定过程复杂等不足而备受关注^[2-4]。在头盔的姿态测量研究中,如何提高其测量速度是一个重要的研究方向^[5]。在单目视觉测量中,受面阵 CCD 帧频的影响,对头盔的定位速度受到了一定的限制,这不利于武器系统对移动目标的快速、实时打击。通过一定的方法,预测出头盔在非采样时刻 $k+1/2$ (前后连续两次采样的中间时刻) 的姿态,可以间接的提高对头盔的定位速度,从而为移动目标的精确打击提供快速、实时的导向支持。

物体运动位姿的预测主要有 3 类方法,即最小二乘法、Wiener 滤波理论方法和 Kalman 滤波理论方法。Wiener 滤波适用范围有限,它要求被处理信号是一维平稳的;最小二乘法是一种经典的参数估计方法,在许多估计算法中起主导作用;然而近年来以 Kalman 滤波理论为基础的 Kalman 滤波^[6]、扩展 Kalman 滤波 (EKF)^[7]、Unscented Kalman 滤波 (UKF)^[8]、自适应扩展 Kalman 滤波 (AEKF)^[9-10] 等方法被广泛的应用在运动参数的预测和估计领域,但这些方法都是针对采样时刻的位置和姿态信息进行的研究,这实际上相当于运动位姿的测量。

Unscented Kalman 滤波以无迹变换为基础,采用 Kalman 线性滤波框架,通过采样策略逼近系统状态模型的非线性分布^[11],是一种较为常用的非线性滤波方法。自适应滤波是一种能够有效抑制滤波器发散的滤波方法。基于自适应 Unscented Kalman 滤波 (AUKF) 理论,提出了一种对头盔瞄准具姿态进行固定超前预测的方法,以达到在保证头盔定位精度的前提下,有效提高其定位速度的目的。

2 头盔姿态的单目视觉测量原理

头盔姿态的单目视觉测量原理如图 1 所示,坐标系统主要包括世界坐标系、摄像机坐标系、像面坐标系和计算机坐标系。世界坐标系固结于头盔上,其相对于 CCD 相机坐标系的姿态用平移向量 (x, y, z) 和旋转角度 (α, β, γ) 共 6 个参数来描述。

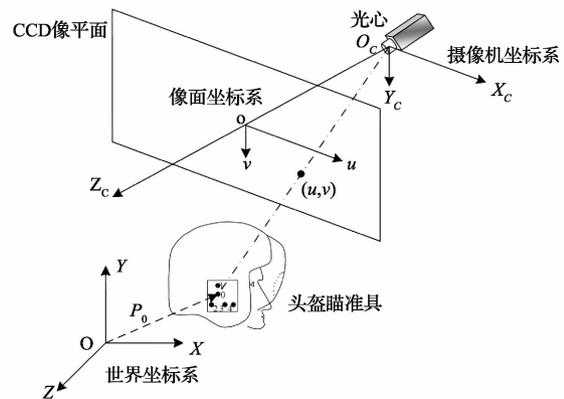


图 1 头盔姿态的测量原理

飞行员头部带动头盔做机动运动,固定于机舱内的 CCD 相机连续拍摄头盔的运动图像,已知头盔上各个定位特征点之间的空间几何约束关系,通过基于点特征定位的单目视觉姿态测量方法^[2]可以实现对头盔姿态 $(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)$ 的实时测量。

由于 CCD 相机帧频的限制,头盔的定位速度不可能太快,这将限制对机舱外目标的快速捕获和实时跟踪,从而不利于武器系统对机动目标的快速、实时打击。利用基于 AUKF 理论的预测方法,通过对头盔运动姿态进行固定超前预测,可以较为有效的解决此问题。

3 头盔姿态的固定超前预测原理

3.1 姿态固定超前预测的状态空间模型

飞行员在观察机舱外移动目标的同时,还要观察飞机内的仪表控制面板以对飞机的飞行状态进行控制,再加上外界诸多其他因素的影响,使得头盔的运动表现为机动运动,其运动情况较为复杂。

设在 CCD 相机采样时刻 k 的头盔姿态测量值为 $S_k = (x, y, z, \alpha, \beta, \gamma)_k$ 。为了能够较为准确的描述头盔的运动过程,选择描述头盔姿态的 3 个平移量和 3 个旋转角以及它们的速度、加速度作为系统状态变量 X_k , 即 $X_k = [x, x', x'', y, y', y'', z, z', z'', \alpha, \alpha', \alpha'', \beta, \beta', \beta'', \gamma, \gamma', \gamma'']^T$ 。由于 CCD 相机采样周期很小,通常飞行员的头部在一个采样周期内不会发生太过剧烈的运动变化,考虑到匀速运动模型存在着较大的模型误差,这里采用匀变速运动模型来描述头盔的实际运动,引入的模型误差用系统噪声 W_k 来补偿,由此近似认为在一个采样周期内描述头盔姿态的平移量和旋转角的加速度 $(x'', y'', z'', \alpha'', \beta'', \gamma'')$ 保持不变。

设 CCD 相机采样周期为 T , 根据上面的分析建立系统的状态方程为:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{1}{2}T^2 & & & \\ 0 & 1 & T & & & \\ 0 & 0 & 1 & & & \\ & & & \ddots & & \\ & & & & 1 & T & \frac{1}{2}T^2 \\ & & & & 0 & 1 & T \\ & & & & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}_{18 \times 18} \quad (1)$$

式(1)中状态转移矩阵 Φ 给出了从时刻 $k-1$ 到 k 系统状态变量从 X_{k-1} 到 X_k 的一步转移关系。 W_k 为系统噪声,反映了匀变速运动模型与头盔实际运动之间的偏差,设它为零均值的高斯噪声,其方差阵为 $con(W_k) = Q_k$ 。

将头盔在相机采样时刻 k 的姿态测量值 S_k 作为观测量,即 $Z_k = S_k = [x, y, z, \alpha, \beta, \gamma]^T$,则系统的观测方程为:

$$H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & & & \\ & 1 & 0 & 0 & & \\ & & \ddots & & & \\ & & & 1 & 0 & 0 \\ & & & & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}_{6 \times 18} \quad (2)$$

式(2)中测量矩阵 H 给出了在采样时刻 k 描述头盔姿态的系统状态变量 X_k 与观测量 Z_k 之间的变换关系。 V_k 为观测噪声,反映了头盔姿态的测量值与真实值之间的偏差,同样设为零均值的高斯噪声,其方差阵为 $con(V_k) = R_k$ 。

式(1)~(2)在状态空间中描述了头盔运动的动力学特性,构成了头盔姿态 AUKF 固定超前预测的状态空间模型。

3.2 姿态的固定超前预测原理

设相机采样时刻 $k-1$ 的头盔姿态估计值为 X_{k-1} ,估计均方误差为 P_{k-1} ,采样时刻 k 头盔姿态的测量值为 Z_k 。

1) 非采样时刻 $k-1/2$ 的姿态固定超前预测

首先构造采样时刻 $k-1$ 的 Sigma 点集:

$$X_{k-1}^i = \begin{cases} X_{k-1} & (i = 0) \\ X_{k-1} + (\sqrt{(n+m)P_{k-1}})_i & (i = 1, 2, \dots, n) \\ X_{k-1} - (\sqrt{(n+m)P_{k-1}})_{i-n} & (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (3)$$

$$W_{k-1}^i = \begin{cases} \frac{m}{n+m} & (i = 0) \\ \frac{1}{2(n+m)} & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{1}{2(n+m)} & (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)~(4)中, $\{X_{k-1}^i\}$ 和 $\{W_{k-1}^i\}$ 分别为所构造的 Sigma 点集和对应的加权系数, n 为状态向量 X_k 的维数, m

为可调尺度参数。

根据 Unscented Kalman 滤波理论^[11],非采样时刻 $k-1/2$ 的头盔姿态可以由下面的一步预测过程得到:

$$X_{k-1/2, k-1} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1}^i \cdot \Phi \cdot X_{k-1}^i \quad (5)$$

在非采样时刻 $k-1/2$ 不存在头盔姿态的测量值,这里直接将预测值 $X_{k-1/2, k-1}$ 作为该时刻头盔姿态的估计值 $X_{k-1/2}$,并更新估计均方误差矩阵:

$$P_{k-1/2} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1}^i \cdot (\Phi \cdot X_{k-1}^i - X_{k-1/2}) \cdot (\Phi \cdot X_{k-1}^i - X_{k-1/2})^T + Q_{k-1} \quad (6)$$

2) 采样时刻 k 的姿态估计

再构造非采样时刻 $k-1/2$ 的 Sigma 点集 $\{X_{k-1/2}^i\}$ 和权重 $\{W_{k-1/2}^i\}$:

$$X_{k-1/2}^i = \begin{cases} X_{k-1/2} & (i = 0) \\ X_{k-1/2} + (\sqrt{(n+m)P_{k-1/2}})_i & (i = 1, 2, \dots, n) \\ X_{k-1/2} - (\sqrt{(n+m)P_{k-1/2}})_{i-n} & (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (7)$$

$$W_{k-1/2}^i = \begin{cases} \frac{m}{n+m} & (i = 0) \\ \frac{1}{2(n+m)} & (i = 1, 2, \dots, n) \\ \frac{1}{2(n+m)} & (i = n+1, n+2, \dots, 2n) \end{cases} \quad (8)$$

然后进行预测更新,通过非采样时刻 $k-1/2$ 的头盔姿态固定超前预测值 $X_{k-1/2}$ 得到采样时刻 k 头盔姿态的一步预测值 $X_{k, k-1/2}$,如式(9)~(11):

$$X_{k, k-1/2} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1/2}^i \cdot \Phi \cdot X_{k-1/2}^i \quad (9)$$

$$P_{k, k-1/2} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1/2}^i \cdot (\Phi \cdot X_{k-1/2}^i - X_{k, k-1/2}) \cdot (\Phi \cdot X_{k-1/2}^i - X_{k, k-1/2})^T + Q_{k-1} \quad (10)$$

$$Y_{k, k-1/2} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1/2}^i \cdot H \cdot \Phi \cdot X_{k-1/2}^i \quad (11)$$

再进行测量更新,利用头盔在采样时刻 k 的姿态测量值 Z_k 对其预测值 $X_{k, k-1/2}$ 进行修正,如式(12)~(16):

$$P_{k, k-1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1/2}^i \cdot (H \cdot \Phi \cdot X_{k-1/2}^i - Y_{k, k-1/2}) \cdot (H \cdot \Phi \cdot X_{k-1/2}^i - Y_{k, k-1/2})^T + R_{k-1} \quad (12)$$

$$P_{k, k-1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2n} W_{k-1/2}^i \cdot (\Phi \cdot X_{k-1/2}^i - X_{k, k-1/2}) \cdot (H \cdot \Phi \cdot X_{k-1/2}^i - Y_{k, k-1/2})^T \quad (13)$$

$$K_k = P_{k, k-1}^{xy} \cdot (P_{k, k-1}^{xy})^{-1} \quad (14)$$

$$X_k = X_{k, k-1/2} + K_k \cdot (Z_k - Y_{k, k-1/2}) \quad (15)$$

$$P_k = P_{k, k-1/2} - K_k \cdot P_{k, k-1}^{xy} \cdot K_k^T \quad (16)$$

通过式(3)~(16)的两次一步预测和对增益计算回路的两次更新实现了对头盔在非采样时刻 $k-1/2$ 的姿态

$X_{k-1/2}$ 的固定超前预测和采样时刻 k 的姿态估计,估计的过程通过测量值对预测值的修正实现。

3) 自适应滤波更新 Q_k 和 R_k

状态空间模型的建立过程中,用匀变速运动来近似头盔的实际运动,将不可避免地引入模型误差;在式(3)~(16)的迭代过程中, Q_k 和 R_k 对姿态的预测和估计精度影响很大, Q_k 和 R_k 选取不当会降低系统精度,严重的还会导致滤波器不稳定甚至发散,由于对系统特性很难掌握充分,因此很难选取到能够很好描述系统噪声和观测噪声等统计特性的 Q_k 和 R_k 的初始值。

自适应滤波是一种能够有效抑制滤波器发散的滤波方法,可以对未知的或者不确切掌握的系统模型参数和噪声统计参数进行在线的估计和修正。引入基于估计残差的噪声统计估值器对递推过程中的 Q_k 和 R_k 进行实时、在线修正,使其能够真实的反应头盔实际运动过程,如式(17)~(20)^[12]:

$$\epsilon_k = Z_k - H \cdot X_k \quad (17)$$

$$C_k = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \epsilon_i \cdot \epsilon_i^T \quad (18)$$

$$R_{k+1} = C_k - H \cdot P_k \cdot H^T \quad (19)$$

$$Q_{k+1} = K_k \cdot C_k \cdot K_k^T \quad (20)$$

式(3)~(20)的计算过程给出了基于 AUKF 的头盔姿态固定超前预测的原理,通过该预测与估计过程,可以在保证头盔瞄准具定位精度的前提下,有效的提高单目视觉定位系统对其的定位速度。

4 实验验证

4.1 实验系统组成

为验证本文提出的头盔姿态固定超前预测方法的有效性和准确性,搭建单目视觉姿态测量与预测实验系统,进行相应的实验研究。

实验系统组成如图2所示,主要包括平面定位靶标、面阵 CCD 相机、二维旋转平台及控制器、计算机等。

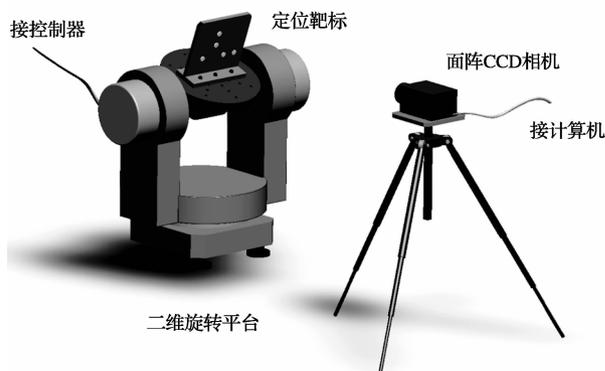


图2 实验系统组成

4.2 实验结果

二维旋转平台带动定位靶标做一维匀速转动。设置

转台的转速 $\omega = 10^\circ/\text{s}$,采集靶标在 $t = 0 \sim 9 \text{ s}$ 的运动图像,面阵 CCD 相机的帧频设置为 20 fps,则相机采样间隔 $\Delta T = 0.05 \text{ s}$,靶标图像旋转角度的采样间隔 $\Delta\theta = 0.5^\circ$ 。测量出定位靶标在相机每一个采样时刻 k 的偏转角度^[2],利用本文提出的姿态固定超前预测方法对平台转动过程中在非采样时刻 $k + 1/2\Delta T$ (连续两次采样中间时刻)靶标的偏转角度进行预测。

图3绘出了定位靶标在偏转运动过程中偏转角度的测量误差、预测与估计误差(测量值、预测与估计值和理论值之差)曲线,其中,“--- * ---”给出了偏转角度的测量误差,“--- · ---”给出了偏转角度的固定超前预测与估计误差。为了更清晰的反应实验中的误差,将第3~5 s 的误差曲线重新绘于图4所示。

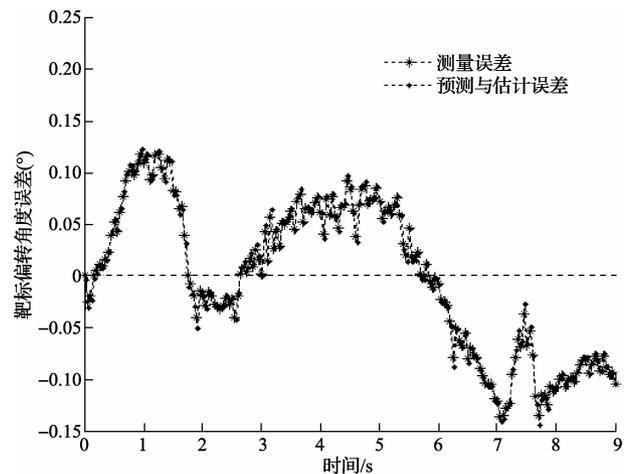


图3 靶标偏转角度的预测与估计误差

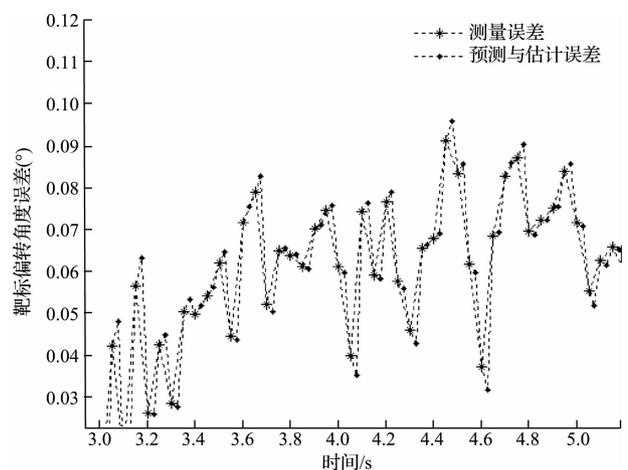


图4 靶标偏转角度的预测与估计误差(3~5 s)

从图3中可以看到,实验中滤波器不仅很快进入了稳态,而且对于靶标偏转角度的固定超前预测和估计精度都很高,可以达到与角度测量相当的水平。实验中,面阵 CCD 相机的帧频设置为 20 fps,从图4中可以看到,通过给出的固定超前预测过程,可以得到前后连续两次采样中

间时刻的靶标姿态信息,这样相当于将相机的帧频提高到了40 fps,也就是间接将靶标的定位速度提高了一倍。

将实验中滤波器进入稳态后靶标偏转角度的测量误差、预测误差和估计误差的最大值、最小值、平均值以及标准差进行比较,如表1所示。

表1 实验误差比较

	测量误差	预测误差	估计误差
最大值	0.117 7	0.121 4	0.117 7
最小值	-0.136 7	-0.144 7	-0.136 7
平均值	-0.001 8	-0.001 4	-0.001 6
标准差	0.072 4	0.073 6	0.073 2

从表1中可以看到,实验中靶标偏转角度的采样时刻测量误差及估计误差、非采样时刻预测误差,三者的最大值、最小值、平均值以及标准差基本相同,其统计特性处于同一水平。从图3和图4中也可以看到,实验中偏转角度的预测与估计误差曲线很好的跟随着测量误差曲线的变化,这表明该方法在间接提高头盔姿态测量速度的同时,并没有以降低姿态的测量精度为代价。因此,提出的头盔姿态固定超前预测方法对于在保证头盔定位精度的前提下,间接提高头盔的定位速度是行之有效的。

由于在状态空间模型的建立过程中,要求系统噪声和观测噪声都能够服从零均值的高斯分布,但基于点特征定位的姿态测量误差并不满足此要求,因而靶标偏转角度的预测与估计误差曲线跟随着测量误差曲线的变化,固定超前预测与估计过程并不能很好的抑制和消除姿态的测量误差,以致在提高头盔定位速度的同时,不能同时提高其定位精度,这也是该方法的不足之处。

5 结 论

在头盔瞄准具的单目视觉定位系统中,由于受面阵CCD相机帧频的影响,对头盔的定位速度受到了一定的限制,这不利于武器系统对移动目标的快速、实时打击。

针对如何在保证头盔定位精度的前提下,有效提高其定位速度的问题,提出了一种基于自适应Unscented Kalman滤波的姿态固定超前预测方法,并搭建了实验系统进行验证。实验中将面阵CCD相机的帧频设置为20 fps,通过对相机前后连续两次采样中间时刻靶标姿态进行固定超前预测,间接将CCD相机的帧频提高到了40 fps,且姿态的预测精度与测量精度保持同一水平,因此,该方法能够对头盔瞄准具的空间三维运动姿态进行有效而准确的固定超前预测,在保证了对头盔定位精度的前提下,可以有效地将其定位速度提高一倍。

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.
- [2] ZHANG Z M, SUN CH K, WANG P. Two-step pose estimation method based on five reference points [J]. Chinese Optics Letters, 2012, 10(7): 071501-1-071501-5.
- [3] 耿明超, 赵铁石, 边辉, 等. 基于并联理论的单目视觉姿态估计[J]. 光学精密工程, 2013, 21(10): 2617-2626.
- [4] 尹英杰, 徐德, 张正涛, 等. 基于单目视觉的平面测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(4): 347-352.
- [5] 陈芳. 电磁式头盔显示器瞄准线的算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2004: 6.
- [6] 张旭东, 李文龙, 胡良梅, 等. 基于PMD相机的特征跟踪姿态测量方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 640-646.
- [7] 李峥, 李宇, 黄勇, 等. 水下目标自主连续跟踪与定位算法研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3): 520-528.
- [8] 陈志明, 王惠南, 刘海颖. 基于四元数的UKF多传感器卫星姿态确定[J]. 上海航天, 2012, 29(2): 13-17.
- [9] LIPPIELLO V, SICILIANO B, VILLANI L. Adaptive extended Kalman filtering for visual motion estimation of 3D objects[J]. Control Engineering Practice, 2007, 15(1): 123-134.
- [10] JANABI-SHARIFI F, MAREY M. A Kalman-Filter-based method for pose estimation in visual servoing [J]. IEEE Transactions on Robotics, 2010, 26(5): 939-947.
- [11] JULIER S J, UHLMANN J K, DURRANT-WHYTE H F. A new approach for filtering nonlinear systems [C]. Proceedings of the American Control Conference, 1995: 1628-1632.
- [12] MOHAMED A H, SCHWARZ K P. Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS[J]. Journal of Geodesy, 1999(73): 193-203.

作 者 简 介

孙超, 1986年出生, 助理研究员, 2012年毕业于天津大学获得硕士学位, 主要研究方向为航空光学成像与测量技术。

E-mail: sunchao@ciomp.ac.cn

张美君, 1985年出生, 硕士研究生, 研究实习员, 主要研究方向为航空侦察与测量技术。