

## 利用序列图像解算目标视线角速率的方法

王向军<sup>1,2</sup>, 乐兵<sup>1,2</sup>, 邢峰<sup>1,2</sup>, 刘峰<sup>1,2</sup>, 王继方<sup>3</sup>

- (1. 天津大学精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072;
2. 天津大学微光机电系统技术教育部重点实验室, 天津 300072;
3. 中国石油天然气管道工程有限公司, 河北廊坊 065000)

**摘要:** 针对目标跟踪处理系统中的视线角速率提取问题, 提出一种利用单成像探测器所得序列图像求导视线角速率的方法。利用序列图像中的运动目标图像坐标解算得到体视线角, 通过图像匹配得到弹体姿态角, 进而求解得到视线角速率。实验结果表明: 结合图像跟踪算法可实时得到体视线角, 使用图像匹配可以较好地解算得到弹体姿态角, 解算结果误差小于 $\pm 5\%$ ; 在体视线角和弹体姿态角均包含噪声的前提下, 使用卡尔曼滤波可以较好地还原视线角速率。该方法适用于微小型飞行器制导探测, 可以省去陀螺仪等惯性元件, 实现探测装置的轻量化、小型化, 具有实际的应用价值。

**关键词:** 视线角速率; 体视线角; 弹体姿态角; 序列图像

中图分类号: TJ765 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0828001

## Method of measuring target LOS angular rate with sequence images

Wang Xiangjun<sup>1,2</sup>, Le Bing<sup>1,2</sup>, Xing Feng<sup>1,2</sup>, Liu Feng<sup>1,2</sup>, Wang Jifang<sup>3</sup>

- (1. State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
2. Key Laboratory of MOEMS of the Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;
3. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang 065000, China)

**Abstract:** To get line-of-sight angular rate in a target tracking system, a method of measuring LOS angular rate based on image sequences, obtained by a single imaging detector, was introduced in this paper. With the sequence images, body LOS angles were obtained by the moving target image coordinates, missile attitude angles were got by images matching, and the LOS angular rate was calculated with these two variables. Experimental results show the idea is practical. Combining with the image tracking algorithm, the body LOS angle can be obtained in real time. Missile attitude angles are obtained well by the images matching, with the attitude transform error less than  $\pm 5\%$ . And the LOS angular rate can be better restored using Kalman filter, with body LOS angle and missile attitude angle containing noise. The method has a practical value, for being applicable to micro-aircraft's guidance and detection, eliminating gyro inertial elements, and reducing the weight of detecting devices.

**Key words:** LOS angular rate; body LOS angle; missile attitude angle; sequence image

收稿日期: 2016-12-10; 修订日期: 2017-01-20

基金项目: 总装/教育部重点支撑计划项目(625010110)

作者简介: 王向军(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光电探测技术、视觉测量、图像处理等方面的研究。

Email: xdocuxjw@vip.163.com

## 0 引言

视线角速率即目标与导弹的连线在惯性空间变化所成角度的变化率。视线角速率是导航系统、目标制导中的一个重要参数<sup>[1]</sup>,对于系统中制导规律实现非常重要。自寻的制导规律中,只涉及导弹与目标相对运动,对导弹速度矢量或者目标视线有特定要求<sup>[2]</sup>。而在一个目标跟踪处理系统中,目标的视线角速率同样对于系统提取信息以及后续信息处理是一个非常重要的参数。在精确末制导系统中,末制导导引头提供的主要制导信息是视线角速率,拦截弹与目标间的视线角速率是拦截制导的重要参数<sup>[3]</sup>。目标视线角速率测量严重影响其命中问题,故视线角速率的测量精确以及快速与否将直接关系到制导系统的脱靶量等重要信息<sup>[4]</sup>。

随着现在导弹小型化、轻量化、智能化的要求,现有制导导弹需要替换为无控或简易制导弹药,实现精准打击<sup>[5]</sup>。目前捷联式惯性导航技术是目前广泛采用的新一代惯性导航技术,相对于平台式惯性导航系统,捷联系统具有可靠性高、负载能力强、启动快等优点<sup>[2]</sup>,但由于捷联系统把传感器直接固连在载体上,导致惯性敏感元件的工作环境恶化,降低了系统的精度,且视线角速率不能直接提取<sup>[6]</sup>。因此,对视线角速率的估计是当今捷联图像制导技术及其工程应用的关键技术。为了解决此问题,参考文献[7]利用 $\alpha$ - $\beta$ 滤波器估计视线角速率,参考文献[8]提出基于导弹目标角跟踪模型和卡尔曼滤波来间接提取半捷联稳定平台的视线角速率信息,参考文献[9]采用无损卡尔曼滤波的方法来重构视线角速率信息。参考文献[10]则重新定义一种新的弹目视线角,来实现有效跟踪。

文中提出使用序列图像来计算得到视线角速率的一种方法。其中提取计算目标体视线角和弹体姿态角是其中两个主要的步骤。通过目标跟踪实时获得序列图像的像素坐标,结合相机模型得到体视线角,利用图像的特征点匹配来间接得到弹体姿态角。在提出基本原理的基础上,通过实验验证体视线角和弹体姿态角的获取并进行误差分析,通过体视线角和弹体姿态角仿真计算视线角速率。该方法对于实现制导系统轻量级、小型化有一定的前景应用价值。

## 1 使用坐标系定义

文中选用的坐标系定义如图 1 所示。 $O-XYZ$  为大地坐标系, $O-X_bY_bZ_b$  为以导弹弹体为参考系的弹体坐标系,其原点取在导弹质心  $O$  上, $OX_b$  轴平行于弹身对称轴,指向导弹头部为正, $OY_b$  轴在包含  $OX_b$  轴的导弹左右对称平面内,通过原点垂直于  $OX_b$  轴,向上为正, $OZ_b$  轴按右手法则确定。

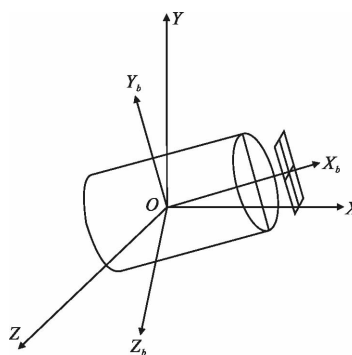


图 1 坐标系定义

Fig.1 Coordinate system definition

惯性坐标系  $O-XYZ$  和弹体坐标系  $O-X_bY_bZ_b$  之间的关系可用 3 个姿态角<sup>[2]</sup>俯仰角  $\theta$ 、偏航角  $\psi$ 、横滚角  $\gamma$  来进行描述。

## 2 视线角速率提取计算

### 2.1 体视线角提取

体视线角表示目标与弹体之间的关系,可用两个方位角(如图 2 所示)表示。

体视线方位角  $q_\beta$ : 导弹与目标连线与弹体坐标系  $OX_bY_b$  平面的夹角。

体视线高低角  $q_\alpha$ : 导弹与目标连线在弹体坐标系  $OX_bY_b$  平面上的投影与  $OX_b$  轴之间的夹角。

体视线角可通过目标在相机的成像来获得。如图 2 所示,弹体坐标系与相机成像坐标系的 3 个坐标轴对应相互平行。通过相机内参将图像像素坐标系转化到图像物理坐标系,再结合几何关系,可得到体视线角  $[q_\beta \ q_\alpha]^T$ 。

图 2 中, $u_0, v_0$  是物理坐标系原点在图像坐标系的坐标,即  $O(u_0, v_0)$ ,目标在图像坐标系坐标为  $T(u, v)$ ,相机物理坐标系中,对应原点坐标为  $O(x_0, y_0)$ ,目标坐标为  $T(x, y)$ , $f$  为相机焦距。 $dx, dy$  为像面上每

一个像素在  $x, y$  轴的物理尺寸。则：

$$\begin{cases} q_\beta = \arctan\left(\frac{(u-u_0) \times dx}{f}\right) \\ q_\alpha = \arctan\left(\frac{(v-v_0) \times dy}{f}\right) \end{cases} \quad (1)$$

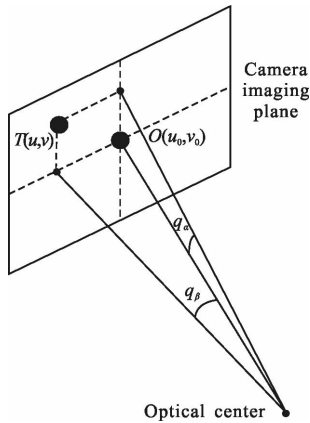


图 2 相机成像平面

Fig.2 Camera imaging plane

### 2.2 弹体姿态角提取

导弹制导过程中弹体相对于惯性空间运动, 要获得两者之间的相对位置关系, 文中通过序列图像间接获得弹体姿态角变化, 进一步解算得到视线角速率。

鉴于计算视线角速率的实时性问题, 文中选用复杂度较低的 Harris 角点检测算法<sup>[11]</sup>提取角点, 通过附加多层约束关系结合互相关算法进行特征点匹配。然后使用 RANSAC 算法来进一步去除错误匹配点, 提高算法鲁棒性。约束关系如下。

绝对视差约束: 相邻两帧图像, 相机的相对位移和旋转角度均不大, 同一场景在两幅图像中投影位置也相差不大, 据此设置视差阈值, 若两幅图像中的

两个特征点之间距离在阈值内, 则进行后续互相关匹配, 否则认为不是匹配点。

邻域相对视差约束: 两幅图像中, 两个或者多个特征点之间的相对位置具有相似性。

双向最大相关性和唯一性约束: 两幅图像匹配时, 对应点的匹配具有唯一性, 选取匹配度相似性最高的一对匹配点对作为匹配点对。

在得到匹配的特征点对基础上利用对极几何求解弹体姿态角变化。对极几何是表示两幅图像中同一场景之间的几何关系, 同一点  $X$  在两个像素平面中成像的像素坐标  $(x, x')$  满足约束条件公式(2)。其中,  $F$  为  $3 \times 3$  的基础矩阵。

$$x'^T F x = 0 \quad (2)$$

基础矩阵包含相机的内、外参, 令  $\hat{x} = K^{-1}x$ ,  $K$  为相机的内参, 可将公式(2)转化为本质矩阵表示:

$$\hat{x}'^T K'^T F K \hat{x} = \hat{x}'^T (K'^T F K) \hat{x} = \hat{x}'^T E \hat{x} = 0 \quad (3)$$

$$\text{其中, } K = \begin{bmatrix} \frac{f}{dx} & 0 & u_0 \\ 0 & \frac{f}{dy} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

使用奇异值分解  $E = U \text{diag}(k, k, 0) V^T$ ,  $R = U W V^T$  或者  $R = U W^T V^T$ , 得到空间点坐标和像素坐标转换过程中的旋转矩阵  $R$ 。其中

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

结合欧拉角变换关系可得公式(5), 由公式(5)求解得到相机的各个姿态角的变化情况。通过序列图像关系可以求得相机相对于大地的姿态角。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \theta \sin \psi & \cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \sin \theta \cos \psi & -\sin \gamma \cos \theta \\ -\cos \theta \sin \psi & \cos \theta \cos \psi & \sin \theta \\ \sin \gamma + \cos \gamma \sin \theta \sin \psi & \sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \sin \theta \cos \psi & \cos \gamma \cos \theta \end{bmatrix} \quad (5)$$

### 2.3 视线角速率提取

目标视线角用来描述目标与大地坐标系之间的关系, 可以用以下两个角度表示:

视线方位角  $q_\alpha$ —导弹与目标连线与惯性坐标系  $OXY$  平面的夹角。

视线高低角  $q_\beta$ —导弹与目标连线在惯性坐标系  $OXY$  平面上的投影与  $OX$  轴的夹角。

视线角速率即这两个角的角速率。视线角速率是相对于惯性空间而言, 而体视线角是以弹体为基准, 弹体运动过程中弹体姿态角的变化会对视线角速率造成很大影响。

公式(6)是同一点在弹体坐标系和惯性坐标下的不同表示, 公式(7)为将体视线角带入公式(6)化简后的表示形式, 公式(8)为两个坐标系之间的关系矩阵。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = L(\psi, \theta, \gamma) \begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} \cos q_\gamma \cos q_\lambda \\ \sin q_\gamma \\ -\cos q_\gamma \sin q_\lambda \end{bmatrix} = L(\psi, \theta, \gamma) \begin{bmatrix} \cos q_\alpha \cos q_\beta \\ \sin q_\alpha \\ -\cos q_\alpha \cos q_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L(\psi, \theta, \gamma) = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\sin\gamma - \cos\psi\cos\gamma\sin\theta & \cos\gamma\sin\psi + \cos\psi\sin\theta\sin\gamma \\ \sin\theta & \cos\theta\cos\gamma & -\cos\theta\sin\gamma \\ -\cos\theta\sin\psi & \cos\psi\sin\gamma + \cos\gamma\sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\gamma - \sin\psi\sin\theta\sin\gamma \end{bmatrix} \quad (8)$$

通过公式(6)进行化解得到公式(9)、(10),求解得到视线角  $q_\lambda, q_\gamma$ , 进一步得到视线角速率。

$$q_\lambda = \arctan\left(-\frac{M}{N}\right) \quad (9)$$

$$q_\gamma = \arcsin(\sin\theta\cos q_\alpha\cos q_\beta + \sin q_\alpha\cos\theta\cos\gamma + \cos q_\alpha\sin q_\beta\cos\theta\sin\gamma) \quad (10)$$

其中

$$M = -\cos\theta\sin\psi\cos q_\beta + \tan(\sin\theta\sin\psi\cos\gamma + \sin\gamma\cos\psi) - \sin q_\beta(\cos\psi\cos\gamma - \sin\theta\sin\psi\sin\gamma) \quad (11)$$

$$N = \cos\theta\cos\psi\cos q_\beta + \tan q_\alpha(\sin\psi\sin\gamma - \sin\theta\cos\psi\cos\gamma) - \sin q_\beta(\sin\theta\sin\gamma\cos\psi + \cos\gamma\sin\psi) \quad (12)$$

### 3 实验结果验证

由前面分析可知,视线角速率的提取主要取决于目标体视线角、弹体姿态角的获得。目标体视线角通过像素坐标和相机内参提取得到,弹体姿态角的获得主要通过序列图像匹配得到。这里主要是进行了 3 个方面的实验验证:(1) 体视线角的获取及误差分析;(2) 弹体姿态角的提取解算及误差分析;(3) 目标视线角速率的解算及分析。

#### 3.1 体视线角的获取及分析

文中通过 meanshift 跟踪算法<sup>[12]</sup>实时跟踪目标,质心坐标为目标中心<sup>[13]</sup>,如图 3 所示。

图 3 为笔者实地拍摄的野外环境下的视频图

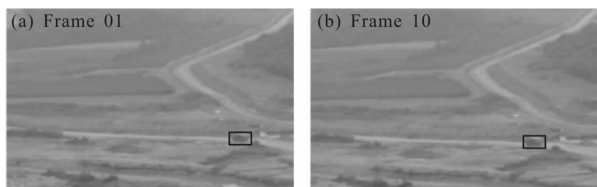


图 3 meanshift 目标跟踪结果

Fig.3 Target tracking results with meanshift algorithm

像,并使用 meanshift 算法进行目标跟踪的结果图。源图像分辨率为 960×540,这里只截取跟踪部分图像(图片中只对跟踪的部分进行放大显示)。

使用“张氏标定”法标定得到的相机内参为:

$$K = \begin{bmatrix} 1050.231 & 0 & 482.50 \\ 0 & 1051.057 & 271.50 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$dx=dy=16.25 \mu\text{m}, f=17.05 \text{ mm}$ ,由公式(1)解算得到体视线角。

体视线角的误差值与目标大小、meanshift 的跟踪性能有关。实验中,meanshift 跟踪时最大像素误差为 10 个像素,最大角度误差为  $0.5^\circ$ ,多数图像像素误差在 2~4 个像素,角度误差为  $0.1^\circ \sim 0.2^\circ$ 。体视线方位角和高低角的误差对最终视线角的影响与弹体姿态角有关,通常情况下,当体视线角误差为  $0.5^\circ$  时,体视线角方向角和高低角的误差均在  $0.5^\circ$  以内。

#### 3.2 基于图像序列角度验证

为了验证利用序列图像解算姿态角变化的方法,这里通过三轴转台偏转对算法进行验证。首先通过标定得到相机内参,然后使用特征点检测获得图像特征点,最后进行相机姿态角解算。

表 1 是用单成像探测器采集图像,在三轴转台

表 1 相机运动所引起的姿态角变化解算结果(单位:°)

Tab.1 Calculated result of attitude angle changes caused by camera motion(Unit:°)

| Classification    | Uniaxial rotation |          |          | Biaxial rotation |         |          | Three-axis rotation |         |          |
|-------------------|-------------------|----------|----------|------------------|---------|----------|---------------------|---------|----------|
|                   | $\theta$          | $\psi$   | $\gamma$ | $\theta$         | $\psi$  | $\gamma$ | $\theta$            | $\psi$  | $\gamma$ |
| Theoretical value | 5                 | 0        | 0        | 5                | 5       | 0        | 5                   | 5       | 5        |
| Calculated value  | 5.161 7           | -0.192 6 | 0.159 3  | 4.971 1          | 5.210 5 | 0.059 7  | 5.183 5             | 4.946 2 | 4.865 8  |
| Value difference  | 3.3%              | -3.8%    | 3.1%     | -0.5%            | 4.2%    | 1.2%     | 3.6%                | -1.1%   | -2.6%    |

上按照姿态角定义,在各个方向按照单轴、双轴、三轴进行转动的部分实验结果。图 4 是 3 个轴同时转动

时 3 个姿态角的解算结果,转台的转动角度 5°,实际实验中对 0~30°均进行了测试。

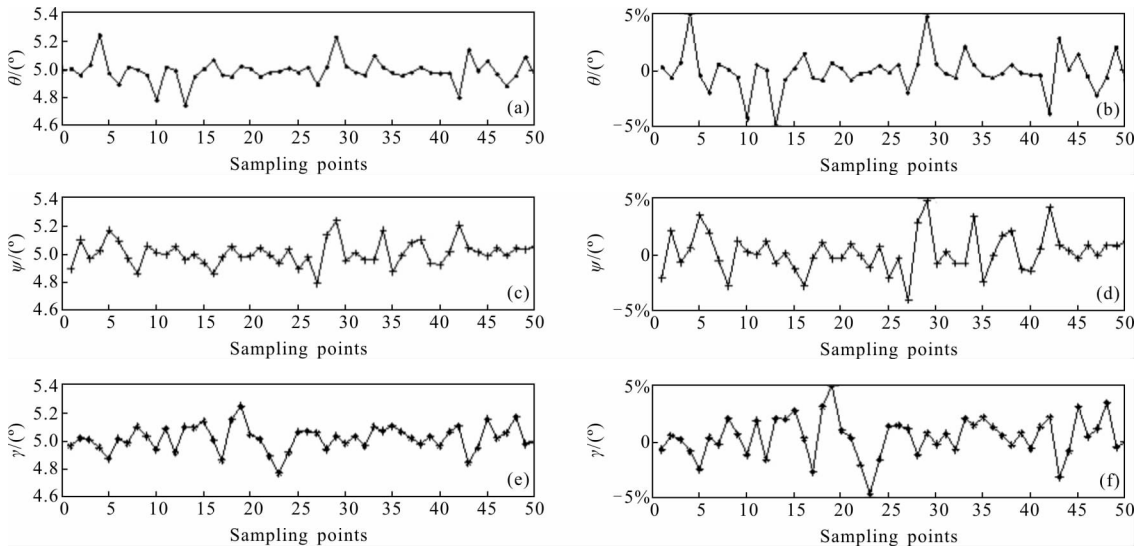


图 4 三轴转动时的各个方向的角度解算结果(实际转动均为 5°)

Fig.4 Angle solving results with three-axis rotation in all directions (actual rotation is 5°)

通过实验结果可看出:使用 Harris 角点检测、多层约束结合互相关算法可相对较好地实现姿态角解算。匹配的准确度可以达到 90%以上,实验中最少检测得到的匹配点对为 36 对,正确的匹配点对为 33 对,正确率为 92%。通过鲁棒性分析,至少需要 30 对匹配点以达到 90%的准确度,文中通过改进的八点法来求解对极几何的基础矩阵。该方法解算得到的数据和理论值差值均小于±5%,这些误差可通过后续滤波来进行优化。

分析误差产生的原因有以下几个:

(1) 误匹配点引起误差。在自动匹配特征点时,不可避免地会引入误匹配点,误匹配点的引入会对最后的角度解算精度有影响。正确的匹配点越多,分布越广泛,算法越可靠,姿态角的求解准确度越高。

(2) 由于图像中包含运动目标,运动目标的匹配对于角度的解算会造成误差。在解算过程中,主要是通过像素位置的约束条件来去除目标运动对解算结果的影响,当目标运动变换与相机运动比较一致,较难区分目标运动,会造成一定影响。因此后续还需利用更多的约束条件来去除运动目标的匹配点,将目标自身运动和背景运动分开,从而优化角度的计算。

(3) 部分图像的背景图像中细节信息过少导致解算得到的数据偏差较大。由于图像的背景中细节

信息过少,用于姿态角信息解算的特征点数目较少,使得解算得到的数据偏差较大。

因此,要实现更加精确的解算,在系统实时性要求可满足时,尽量多次进行匹配点筛选,并通过附加多层约束条件去除错误匹配点,同时要在解算得到运动目标运动信息基础上去除由于目标运动所引起的图像变化,另外将系统应用于识别度相对比较大的背景视场内。

### 3.3 视线角速率仿真

在该次仿真过程中,仿真所用的数据是由视线角速率反推得到的。体视线角的构建方法:由设定的目标视线角速率得到目标视线角,然后根据公式(7)进行推导得到。图 5 为视线角速率仿真图。图 6 为视线角速率仿真的部分结果。

LOS angular rate 为理想的视线角速率:

$$\begin{cases} q_\gamma = 10\sin(2\pi \times 2t) \\ q_\lambda = 10\cos(2\pi \times 2t) \end{cases}$$

Atti\_angular\_ideal 是理想的姿态角:

$$\begin{cases} \gamma = 70\sin(2\pi \times 2t) \\ \psi = 70\cos(2\pi \times 2t) \\ \theta = 70\sin(2\pi \times 2t + \pi) \end{cases}$$

在姿态角中加入[-0.5° 0.5°]均匀分布白噪声模拟实际的姿态角。los\_b\_found 为加入噪声的函数实现。

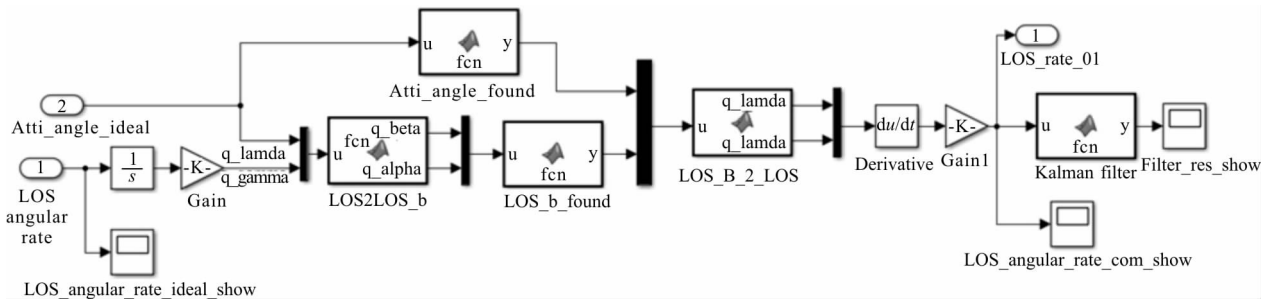


图 5 视线角速率 Simulink 仿真图

Fig.5 Simulink diagram of LOS angular rate

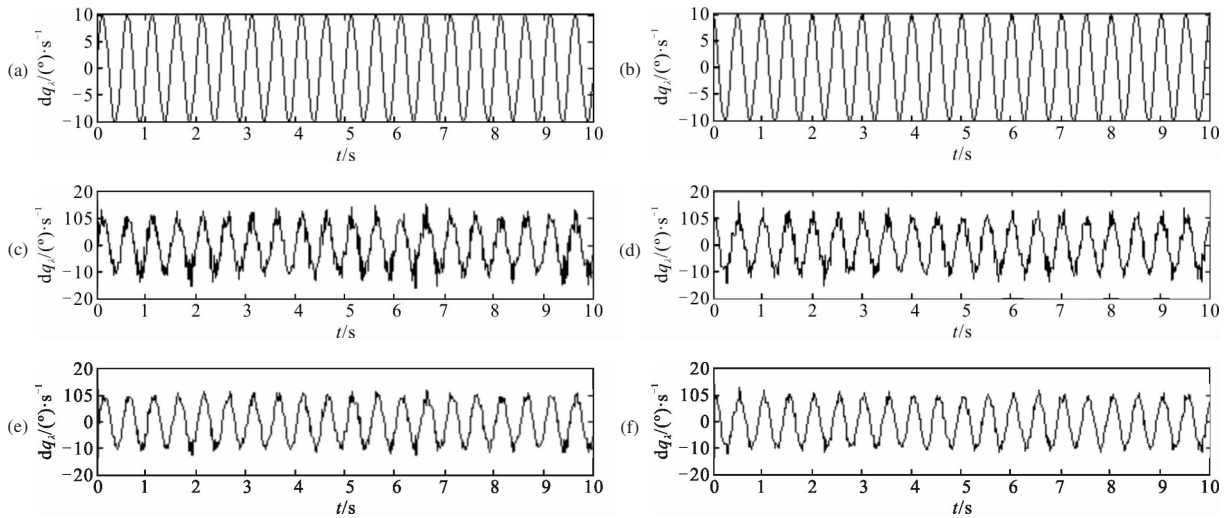


图 6 视线角速率 Simulink 仿真结果图

Fig.6 Simulation results diagram of LOS angular rate

由视线角速率反解得到弹体体视线角，并在此基础上加入 $[-0.5^\circ \ 0.5^\circ]$ 均匀分布白噪声。Attitude\_angle\_found 为加入噪声的函数实现。

LOS\_B\_2\_LOS 为视线角计算函数，然后微分求解得到视线角速率。Kalman Filter 为卡尔曼滤波函数，对所得到的视线角速率进行滤波处理。

由实验结果可以看出：

(1) 所使用的方法可以实现视线角速率还原。

(2) 此次仿真中体视线角、弹体姿态角误差的引入对视线角速率求解有较大影响。实验中，体视线角和弹体姿态角均引入了 $[-0.5^\circ \ 0.5^\circ]$ 的均匀白噪声，此时解算得到的视线方位角和高低角均有 $[-5^\circ \ 5^\circ]$ 的误差，误差均值为 $-0.0027^\circ$ ，方差为 148，视线角速率由于前后噪声叠加，误差为 $[-7^\circ/s \ 6.3^\circ/s]$ ，误差均值为 $-0.0076^\circ/s$ ，误差方差为 7.5677。

(3) 通过对所求解的视线角速率进行无迹

Kalman 滤波，可以相对较好地去除噪声对视线角速率的影响，得到较为理想的结果。通过滤波，视线角速率误差减小，误差均值为 $-0.0017$ ，误差方差为 3.96。

#### 4 结论

文中针对目标跟踪系统中的视线角速率提取问题，提出一种只使用序列图像求解目标视线角速率的方法。利用序列图像的像素坐标得到目标的体视线角，利用图像匹配的方法得到弹体姿态角。然后分别对体视线角、弹体姿态角的获得，视线角速率的计算进行了实验验证。实验证明：体视线角误差不超过 $0.5^\circ$ ；图像中正确匹配点的数量越多，分布越广泛，迭代次数越多，得到的姿态角准确度越高，算法越可靠，通过添加约束条件辅助判断可提高特征点匹配的准确性，姿态角的解算误差小于 $\pm 5\%$ ；目标视线角

速率的 Simulink 仿真结果表明：该方法可以较好地还原目标视线角速率，同时使用卡尔曼滤波可以滤除前两个角度获取对视线角速率的误差影响。

文中提出的算法为现有的目标制导探测系统提供了一种新的思路，可以省去之前的陀螺仪装置，使得系统更加小型化、轻量化。为了推进该算法的工程应用性，可根据实际的需要选取图像采集的帧率，以提高系统的适用性。

#### 参考文献：

- [1] Sun Tingting, Chu Hairong, Jia Hongguang, et al. Line-of-sight angular rate decoupling and estimation of strapdown optical seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1587–1593. (in Chinese)  
孙婷婷, 储海荣, 贾宏光, 等. 捷联式光学导引头视线角速率解耦与估计[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1587–1593.
- [2] Wu Tiejun, Ma Longhua, Li Zongtao. Analysis of practical strapdown inertial navigation system [D]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011: 1–15. (in Chinese)  
吴铁军, 马龙华, 李宗涛. 应用捷联惯导系统分析 [D]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 1–15.
- [3] Ren Gaofeng, Zhang Yongjun, Zhang Jinpeng. Estimation method of relative position between missile and target with bearing measurement by strapdown seeker [J]. *Aero Weaponry*, 2015(4): 8–11. (in Chinese)  
任高峰, 张拥军, 张金鹏. 基于捷联导引头测角信息的弹目相对位置估计方法[J]. 航空兵器, 2015(4): 8–11.
- [4] Waldmann J. Line-of-sight rate estimation and linearizing control of an imaging seeker in a tactical missile guided by proportional navigation [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2002, 10(4): 556–567.
- [5] Zhu Mingchao, Liu Hui, Zhang Xin, et al. Adaptive feed-forward control for inertially stabilized platform [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(1): 141–148. (in Chinese)  
朱明超, 刘慧, 张鑫, 等. 惯性稳定平台自适应前馈控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 141–148.
- [6] Yuan Yifang, Lin Defu, Qi Zaikang, et al. Techniques on estimating guidance information for strapdown image guided man portable munitions[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(1): 370–376. (in Chinese)  
袁亦方, 林德福, 祁载康, 等. 单兵全捷联图像制导弹药制导信息估计技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 370–376.
- [7] Li Fugui, Xia Qunli. Study on air-to-ground missile with strapdown imaging infrared seeker against moving target[C]// Proceedings of the 32nd Chinese Control Conference, 2013: 5149–5152. (in Chinese)  
李富贵, 夏群利. 全捷联红外成像空地导弹打击移动目标研究[C]//第三十二届中国控制会议论文集, 2013: 5149–5152.
- [8] Jia Xiaoyuan, Zhao Chao. New stabilization control and guidance information extract approach with a semi-strapdown structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(12): 2474–2479. (in Chinese)  
贾筱媛, 赵超. 半捷联稳定控制方案与制导信息提取方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(12): 2474–2479.
- [9] Song Jianmei, Kong Lixia, Fan Jianhua. The guidance information reconstruction of semi-strapdown imaging seeker guidance system [J]. *Acta Armamentarii*, 2010, 31(12): 1573–1579. (in Chinese)  
宋建梅, 孔丽霞, 范健华. 半捷联图像寻的制导系统导引信息构造方法[J]. 兵工学报, 2010, 31(12): 1573–1579.
- [10] Qiao Pengpeng, Li Xiaobing, Yang Yuzhe. One calculational methods for the target-missile LOS angle[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2012, 39(7): 75–80. (in Chinese)  
乔朋朋, 李小兵, 杨瑜哲. 一种弹目视线角的计算方法[J]. 光电工程, 2012, 39(7): 75–80.
- [11] Xu Jiajia. Fast image registration method based on Harris and SIFT algorithm[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 574–581. (in Chinese)  
许佳佳. 结合 Harris 与 SIFT 算子的图像快速配准算法[J]. 中国光学, 2015, 8(4): 574–581.
- [12] Wang Mingming, Chen Tao, Wang Jianli, et al. Mean-shift tracking algorithm and its application in optoelectronic tracking system[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 332–338. (in Chinese)  
王铭明, 陈涛, 王建立, 等. Mean-shift 跟踪算法及其在光电跟踪系统中的应用[J]. 中国光学, 2014, 7(2): 332–338.
- [13] Wang Wei, Wang Chunping, Li Jun, et al. Correlation filter tracking based on feature fusing and model adaptive updating [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(8): 2059–2066. (in Chinese)  
王隼, 王春平, 李军, 等. 特征融合和模型自适应更新相结合的相关滤波目标跟踪 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 2059–2066.