

引用格式: HE Longdong, ZHAO Rujin, MA Yuebo, et al. Navigation Stars Correction Method of Rolling Shutter Exposure Star Tracker Based on Time Domain Constraint[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(3):0312002

何隆东, 赵汝进, 马跃博, 等. 基于时域约束的卷帘曝光星敏感器星点校正方法[J]. 光子学报, 2021, 50(3):0312002

基于时域约束的卷帘曝光星敏感器星点校正方法

何隆东^{1,2,3}, 赵汝进^{1,3}, 马跃博^{1,2,3}, 侯娅贤^{1,2,3}, 朱自发^{1,2,3}, 曾思康^{1,2,3}

(1 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

(3 中国科学院空间光电精密测量技术重点实验室, 成都 610209)

摘要: 针对卷帘曝光模式星敏感器动态星点成像形状畸变和成像位置误差导致的导航星点定位精度降低、测姿误差增大的问题, 提出了一种基于时域约束的导航星点校正方法。基于卷帘曝光的时间异步性特点, 结合基于卡尔曼滤波的导航星点位置和帧间速度最优估计, 将时域中不同时刻的导航星点校正到相同时刻, 从而有效地解决星点畸变与位置偏移问题。展开了不同条件下的仿真实验, 实验结果表明: 当星敏感器角速度在 $0\sim 3^\circ/\text{s}$ 动态范围内, 校正后星对距离精度高于 0.1 pixels, 姿态角精度高于 $10''$ 。

关键词: 星敏感器; 卷帘曝光; 时域约束; 星点校正; 卡尔曼滤波

中图分类号: V259.31

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20215003.0312002

Navigation Stars Correction Method of Rolling Shutter Exposure Star Tracker Based on Time Domain Constraint

HE Longdong^{1,2,3}, ZHAO Rujin^{1,3}, MA Yuebo^{1,2,3}, HOU Yaxian^{1,2,3}, ZHU Zifa^{1,2,3},
ZENG Sikang^{1,2,3}

(1 Institute of Optics and Electronics of the Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

(3 Key Laboratory of Science and Technology on Space Optoelectronic Precision Measurement, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Aiming at the problems of reduced navigation star points positioning accuracy and increased attitude error caused by dynamic star points imaging shape distortion and imaging position error of the star tracker in the rolling exposure mode, a navigation star points correction method based on time domain constraints is proposed. Based on the time asynchronous characteristics of rolling shutter exposure, combined with the optimal estimation of navigation star points positions and inter-frame velocity based on Kalman filter, the navigation star points at different moments in the time domain are corrected to the same time, thereby effectively solving the problem of star points distortion and position offset. The simulation experiments under different conditions were carried out. The experimental results show that when the angular velocity of the star sensor is within the dynamic range of $0\sim 3^\circ/\text{s}$, the distance accuracy of the star

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61501429), 中国科学院青年创新促进会资助项目 (No. 2016335), 国家重点研发计划 (No. 2019YFA0706001)

第一作者: 何隆东 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为星敏感器图像和姿态测量。Email: helongdong18@mailsucas.ac.cn

导师 (通讯作者): 赵汝进 (1982—), 男, 副研究员, 博士, 主要研究方向为空间目标视觉测量、星敏感器等。Email: zrzj0515@163.com

收稿日期: 2020-10-19; 录用日期: 2020-11-20

<http://www.photon.ac.cn>

pair after correction is higher than 0.1 pixels, attitude angle accuracy is higher than $10''$.

Key words: Star tracker; Rolling shutter; Time domain constraint; Navigation stars correction; Kalman filter

OCIS Codes: 120.6085; 110.4155; 110.3055

0 引言

姿态信息是航天器在轨运行必不可少的参考基准^[1]。姿态测量精度是衡量航天器水平和性能的重要技术指标之一^[2]。星敏感器作为航天器姿态测量精度最高的敏感器,最高精度可达角秒级,在高精度测绘、遥感等领域中发挥着重要作用。

传统的星敏感器采用全局曝光模式,先整帧星图曝光,再逐行读取,虽然图像传感器成像质量好,但由于制造工艺复杂,成本较高。卷帘曝光模式星敏感器采用逐行曝光,能够同时实现曝光和读取,相较于全局曝光,不仅成像速度快,还具有成本低、功耗低、填充因子高的优势^[3]。但在高动态条件下,卷帘曝光由于行间延迟,使得成像产生倾斜,即所谓的“果冻效应”^[4],其在星图中表现为:1)导航星点形状发生畸变;2)导航星点在探测器上的成像位置出现偏移。该效应严重影响导航星点的定位精度,极大制约了卷帘曝光星敏感器在高动态环境下的应用。

2012年加拿大瑞尔森大学的ENRIGHT J^[5]提出了针对星图特征的卷帘分析模型,解决了星点拖尾问题。2015年中科院长春光机所的伍雁雄^[6]分析了卷帘曝光模式下单星点质心定位精度的影响,基于星图中星点平均转速修正了卷帘曝光模式下的质心细分算法模型,但星图中每颗星点运动速度并不相同,且并未考虑噪声对星点位置的影响。2016年北京控制工程研究所的程会艳等^[7]提出了一种基于卷帘曝光星敏感器的动态补偿办法,基于角速度进行导航星点位置的补偿,缺点是校正后导航星位置角距误差采用几何模型近似估计,忽略了星点畸变和星图噪声的影响,并没有开展校正前、后姿态误差方面的研究。

在此基础上,本文针对卷帘曝光后的导航星点发生畸变和位置发生偏移的问题,提出了一种基于时域约束的星敏感器导航星点校正方法,基于卷帘曝光的时间异步性特点,通过构建基于卡尔曼滤波的导航星点位置和帧间速度最优估计方法,校正导航星点畸变质心误差,并将时域中不同时刻的导航星点校正至同时刻,消除导航星点因时间异步性导致的位置偏移。

1 卷帘曝光星敏感器工作原理

星敏感器作为航天器在轨运行姿态确定的关键设备,成像原理如图1所示,通过对天球坐标系下的恒星成像,经过导航星点质心提取、星图识别,最终实现姿态估计。天球坐标系下的坐标用赤经 α 和赤纬 δ 表示,则导航星 $i(\alpha_i, \delta_i)$ 在天球直角坐标系下的方向矢量 v_i 表示为

$$v_i = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i \cos\delta_i \\ \cos\alpha_i \sin\delta_i \\ \sin\delta_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据星敏感器的成像原理,导航星在星敏感器坐标系下的方向矢量为 w_i 表示为

$$w_i = \frac{1}{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + f^2}} \begin{bmatrix} -(x_i - x_0) \\ -(y_i - y_0) \\ f \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, (x_0, y_0) 为星敏感器镜头光轴与探测器平面相交点的位置, (x_i, y_i) 为导航星在探测器上的成像位置, f 为星敏感器的焦距。

v_i 和 w_i 满足

$$w_i = Av_i \quad (3)$$

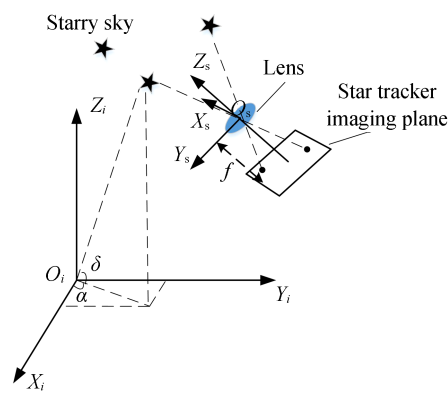


图1 星敏感器成像原理

Fig. 1 Star tracker imaging principle

式中, A 为星敏感器的姿态矩阵。

为了提高星敏感器姿态的准确性,通常参与计算星敏感器姿态的导航星为 5~10 颗,采用 QUEST^[8]、TRIAD^[9]、FORM^[10]、ESOQ^[11] 等算法获取姿态 A_q 的最优估计,即求目标函数 $J(A)$ 的最小值^[12]

$$J(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i \|\mathbf{w}_i - A\mathbf{v}_i\|^2 \quad (4)$$

式中, a_i 表示导航星点权重系数。

星敏感器采用卷帘曝光模式,对图像逐行曝光、逐行读取,每一行的曝光时长相同,但起始曝光时刻不同,存在时间延迟 Δt ^[13],原理如图 2 所示。当在轨运行的星敏感器正常工作时,由于航天器运动的动态范围较大,导致导航星的成像星点形状发生畸变,同时成像导航星点位置会发生偏移,如图 3 所示。

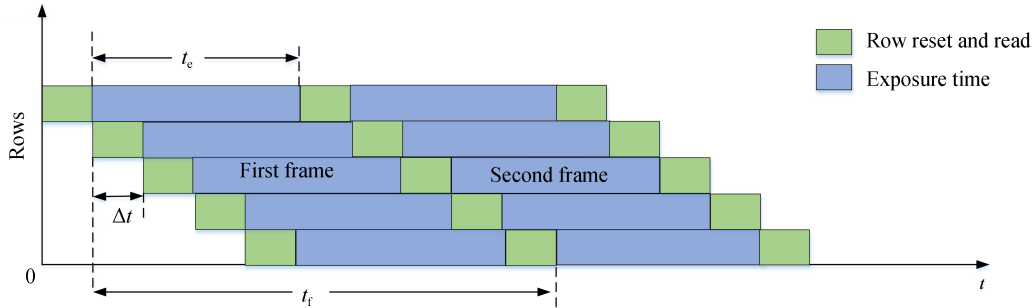


图 2 卷帘曝光原理

Fig. 2 Schematic diagram of rolling shutter exposure

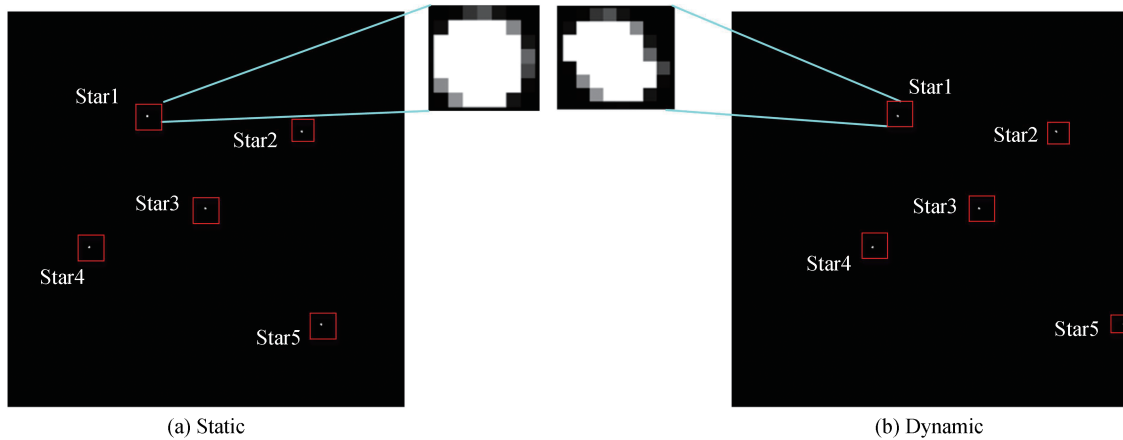


图 3 静态与动态导航星点成像对比

Fig. 3 Comparison of static and dynamic navigation star point imaging.

2 基于时域约束的星点校正方法

针对卷帘曝光时间异步特性导致的导航星点形状发生畸变和位置偏移的问题,提出了一种基于时域约束的导航星点校正方法,流程如图 4 所示。帧间差分获取星点运动速度,基于卡尔曼滤波的导航星点最优位

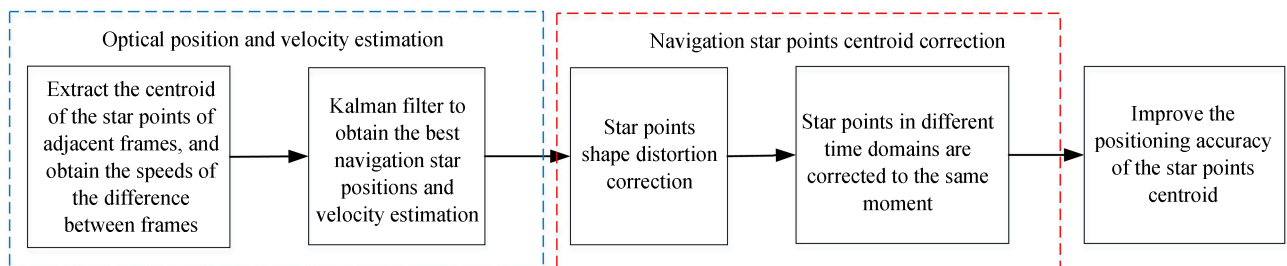


图 4 基于时域约束的星点校正方法

Fig. 4 Star points correction method based on time domain constraints

置与速度估计,将不同时域的星点位置校正到同一时刻,提高星点质心定位精度。

2.1 最优位置与速度估计

由于星图中存在大量的随机噪声,严重影响导航星点的质心提取精度和帧间速度估计。然而星敏感器的帧间时间是毫秒级,在短时间内可将星点在帧间的运动近似为匀速运动。因此,为了减少随机噪声的干扰,通过卡尔曼滤波获取导航星点最优位置和速度估计。基于质心法^[14]在第 q 帧星图中提取 n 个导航星点的质心坐标集 $B^q = \{(x_i^q, y_i^q)\}$, $i = 1, 2, \dots, n$,同时,在第 $q+1$ 帧星图中提取对应的 n 个导航星点质心坐标集 $B^{q+1} = \{(x_i^{q+1}, y_i^{q+1})\}$, $i = 1, 2, \dots, n$,相邻帧帧间间隔时间为

$$t_f = t_e + N\Delta t \quad (5)$$

式中, N 表示星图的行数, t_e 表示曝光时间。

导航星点 i 沿星图 X, Y 方向的速度分别为

$$\begin{cases} v_{xi} = \frac{x_i^{q+1} - x_i^q}{t_f} \\ v_{yi} = \frac{y_i^{q+1} - y_i^q}{t_f} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

以提取的星点质心坐标 (x_i^{q+1}, y_i^{q+1}) 和式(6)的星点运动速度作为卡尔曼滤波的初始值,同时将星点运动模型扩展到四维,状态值 $X(k)$ 表示为

$$X(k) = [x(k) \quad v_x(k) \quad y(k) \quad v_y(k)]^T \quad (7)$$

式中, $x(k)$ 表示 k 时刻的 X 方向的坐标, $v_x(k)$ 表示 k 时刻的 X 方向的速度, $y(k)$ 表示 k 时刻 Y 方向的坐标, $v_y(k)$ 表示 k 时刻的 Y 方向的速度。

状态方程为

$$\begin{bmatrix} x(k) \\ v_x(k) \\ y(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & t_f & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k-1) \\ v_x(k-1) \\ y(k-1) \\ v_y(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.5t_f^2 & 0 \\ t_f & 0 \\ 0 & 0.5t_f^2 \\ 0 & t_f \end{bmatrix} W_{2 \times 1}(k) \quad (8)$$

式中, $W_{2 \times 1}(k)$ 表示由星图噪声等引起的随机加速度,假设它是均值为0、方差为 Q 的高斯白噪声。

测量方程为

$$Z(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ v_x(k) \\ y(k) \\ v_y(k) \end{bmatrix} + V_{2 \times 1}(k) \quad (9)$$

式中, $Z(k)$ 是测量值, $V_{2 \times 1}(k)$ 是测量噪声,假设它是均值为0、方差为 R 的白噪声,且独立于 $W_{2 \times 1}(k)$ 。

令

$$\begin{cases} F = \begin{bmatrix} 1 & t_f & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & t_f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ H = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

卡尔曼滤波方程为

$$\begin{cases} \hat{X}(k|k-1) = F \times \hat{X}(k-1|k-1) \\ P(k|k-1) = F \times P(k-1|k-1) \times F^T + Q(k-1) \\ K(k) = P(k|k-1) \times H^T (H \times P(k|k-1) \times H^T + R(k))^{-1} \\ \hat{X}(k|k) = \hat{X}(k|k-1) + K(k) \times [Z(k) - H \times \hat{X}(k|k-1)] \\ P(k|k) = (I - K(k) \times H) \times P(k|k-1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $P(k|k-1)$ 表示向前一步递推状态估计方差, $P(k|k)$ 表示当前步的状态估计方差, $K(k)$ 表示估计增益, $\hat{X}(k|k-1)$ 表示向前一步预测状态值, $\hat{X}(k|k)$ 表示当前步的估计状态值。

2.2 导航星点质心校正

星敏传感器在轨运行时, 卷帘曝光后星图中导航星点分布在不同的位置, 导航星点的坐标可通过星点的曝光延迟时间计算。基于卡尔曼滤波获取的最优位置和速度估计, 将不同时域的星点校正到同一起始曝光时刻, 如图5所示, star1~star5曝光后分别处于第 $k_1 \sim k_5$ 行, 同第一行的起始曝光时刻分别存在着 $k_1 \Delta t \sim k_5 \Delta t$ 的曝光时间延迟, 以第 k_s 行起始曝光时刻为基准, 将不同时域的导航星点校正至同一时刻。

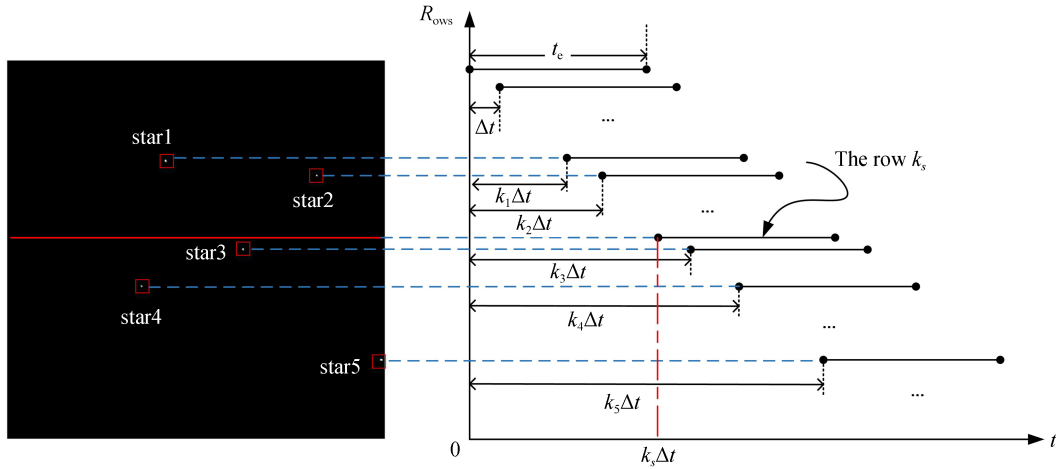


图5 卷帘曝光星图及成像时序图

Fig. 5 Rolling shutter exposure star diagram and imaging timing diagram

导航星点 i 的曝光时间为

$$t_i = (h_i - 1) \Delta t + t_e \quad (12)$$

式中, h_i 为导航星点 i 竖直方向所占行数。

导航星点在曝光期间的竖直方向偏移量为

$$\delta y_i = \hat{v}_{yi} t_i \quad (13)$$

式中, \hat{v}_{yi} 是 Y 方向滤波后的星点速度。

可得导航星点的沿 Y 方向的质心位移为

$$\delta Y_i = \frac{1}{2} \delta y_i = \frac{1}{2} \hat{v}_{yi} t_i \quad (14)$$

同理可得导航星点的沿 X 方向的质心位移为

$$\delta X_i = \frac{1}{2} \delta x_i = \frac{1}{2} \hat{v}_{xi} t_i \quad (15)$$

则导航星点形状畸变校正后的质心为

$$\begin{cases} x_i' = \hat{x}_i - \delta X_i \\ y_i' = \hat{y}_i - \delta Y_i \end{cases} \quad (16)$$

式中, (\hat{x}_i, \hat{y}_i) 为卷帘曝光模式滤波后获取的星点坐标。

将校正后得到的第 $q+1$ 帧导航星点坐标集 $B^{(q+1)} = \{(x_i^{(q+1)}, y_i^{(q+1)})\}, i=1, 2, \dots, n$, 以第 $q+1$ 帧图像第 k_s 行起始曝光时刻为基准进行导航星点位置的校正, 则各导航星点沿 X, Y 方向的校正量分别是

$$\begin{cases} \Delta x_i = \hat{v}_{xi} \times (y_i^{(q+1)} - k_s) \Delta t \\ \Delta y_i = \hat{v}_{yi} \times (y_i^{(q+1)} - k_s) \Delta t \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (17)$$

因此, 导航星点 i 在第 k_s 行起始曝光时刻的真实质心坐标为

$$\begin{cases} x_{Ci} = x_i^{(q+1)} - \Delta x_i \\ y_{Ci} = y_i^{(q+1)} - \Delta y_i \end{cases} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (18)$$

星图中校正到相同时刻后的导航星点坐标, 减少了卷帘曝光模式对星敏传感器成像的影响, 从而提升导航星点坐标的定位精度。

3 实验

3.1 仿真实验与分析

真实星图中存在复杂的干扰和噪声, 为模拟实际情况, 需将误差加入模拟星图中。星点定位误差主要是系统误差和探测器噪声。系统误差包括星敏传感器安装误差、焦距偏差等, 探测器噪声包括散粒噪声、本底噪声^[1]等, 探测器噪声可当作随机噪声处理。在仿真环境中, 系统误差认定已校正且已被消除, 探测器噪声可被视为高斯分布的噪声加入模拟星图中。根据全局曝光星点所在行、星点运动速度以及行间曝光延迟时间模拟卷帘曝光星图。星敏传感器的主要参数如表 1 所示。将从四方面进行仿真实验分析: 1) 星图不同噪声等级时, 经卡尔曼滤波后导航星点最优位置和速度估计; 2) 在角速度为 $0 \sim 3^\circ/\text{s}$ 时, 结合卡尔曼滤波位置与速度最优估计, 分析导航星点畸变质心校正前、后的误差; 3) 基于卡尔曼滤波位置与速度最优估计, 将不同时刻的畸变质心校正后的导航星点校正到同一时刻, 分析校正前、后星对距离误差(空间星对在探测器上的位置偏离误差); 4) 导航星点校正前、后对星敏传感器姿态精度的影响。

表 1 星敏传感器参数

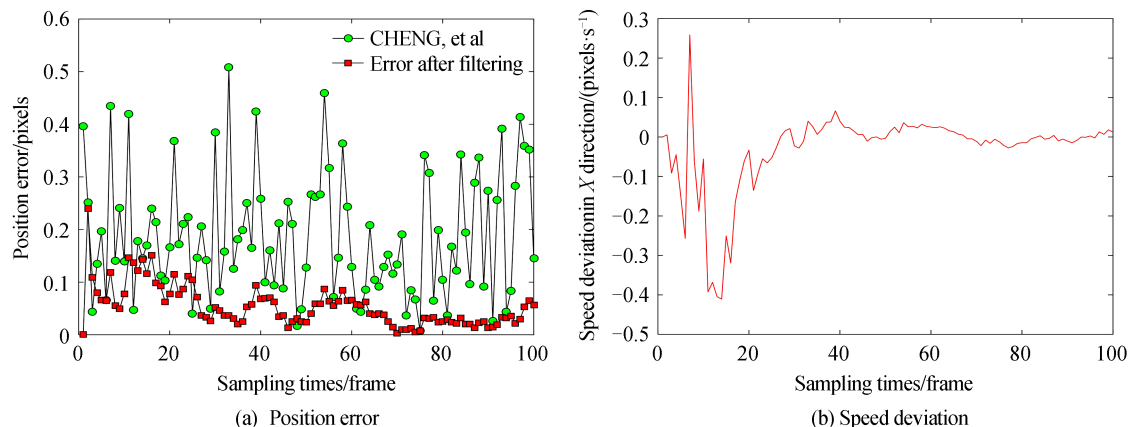
Table 1 Star tracker parameters

f/mm	Pixel size/mm	Field of view/ $^\circ$	Image size/pixels	Time interval between lines/ μs	Line exposure time/ms
24.09	0.005 5	10×10	$1\ 024 \times 1\ 024$	43.9	44.9

星敏传感器角速度沿图像水平、竖直方向的分量 ω_x 和 ω_y 与线速度关系由瞬时视场角 (Instantaneous Field Of View, IFOV)^[15] 获取, 即

$$\begin{cases} V_x = \omega_x \times 3600/\text{IFOV} \\ V_y = \omega_y \times 3600/\text{IFOV} \end{cases} \quad (19)$$

设过程噪声是均值为 0、方差 Q 为 10^{-4} 高斯白噪声; 星图中测量噪声是均值为 0、方差 R 为 0.05 的高斯白噪声, X、Y 方向角速度分别为 $1^\circ/\text{s}$ 时, 由于导航星点在视场范围内运动时间有限, 采样 100 帧后, 卡尔曼滤波效果如图 6~7 所示。在采样 50 帧后, 位置误差和速度偏差开始收敛, 滤波后星点位置精度提高到 0.1 pixels



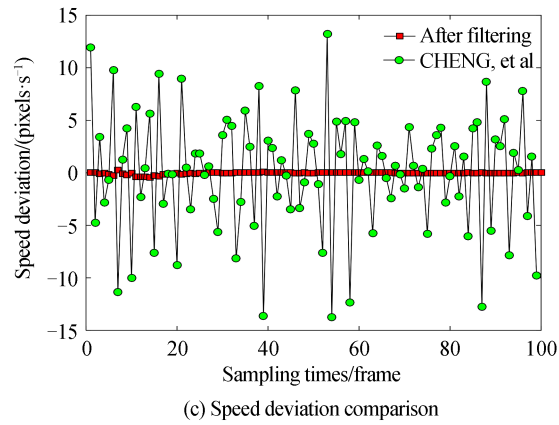


图6 X方向角速度 $1^\circ/\text{s}$ 时,滤波后位置误差、速度偏差和速度偏差对比

Fig. 6 When the X direction angular velocity is $1^\circ/\text{s}$, the position error, speed deviation and speed deviation after filtering are compared

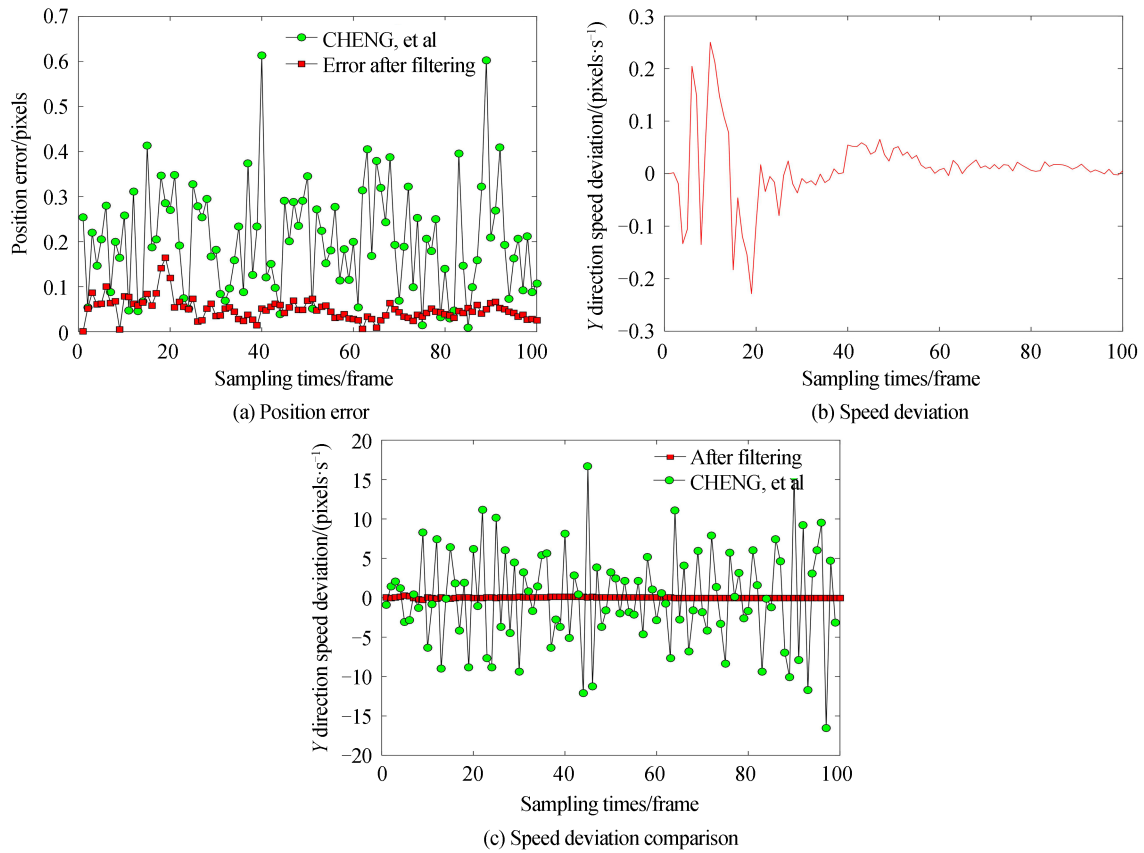


图7 Y方向角速度 $1^\circ/\text{s}$ 时,滤波后位置误差、速度偏差和速度偏差对比

Fig. 7 When the angular velocity in the Y direction is $1^\circ/\text{s}$, the position error, speed deviation and speed deviation after filtering are compared

以内,速度偏差小于 0.02 pixels/s 。相比程会艳等^[7]提出的方法,星点位置精度提高了约 0.1 pixels ,速度偏差减小了约 5 pixels/s 。

角速度为 $0\sim 3^\circ/\text{s}$ 时,分别采样100帧后,卡尔曼滤波后单颗星点位置的平均位置误差和速度偏差如图8~9所示。角速度不同,星图测量噪声方差 R 为 0.05 和 0.1 时,卡尔曼滤波后X、Y方向均能实现位置精度提高到 0.1 pixels 以内,和程会艳等^[7]所提方法相比,提高了约 0.1 pixels ,滤波后速度偏差主要在 0.05 pixels/s 以内。可见,卡尔曼滤波能够有效抑制星图中噪声,提高导航星的定位精度。

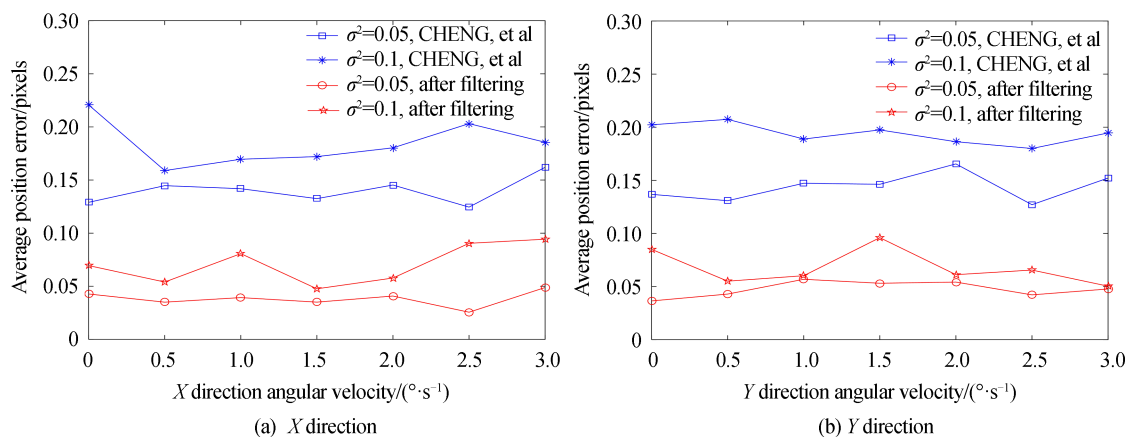


图8 滤波前后导航星点平均位置误差

Fig. 8 Average position error of navigation star point before and after filtering

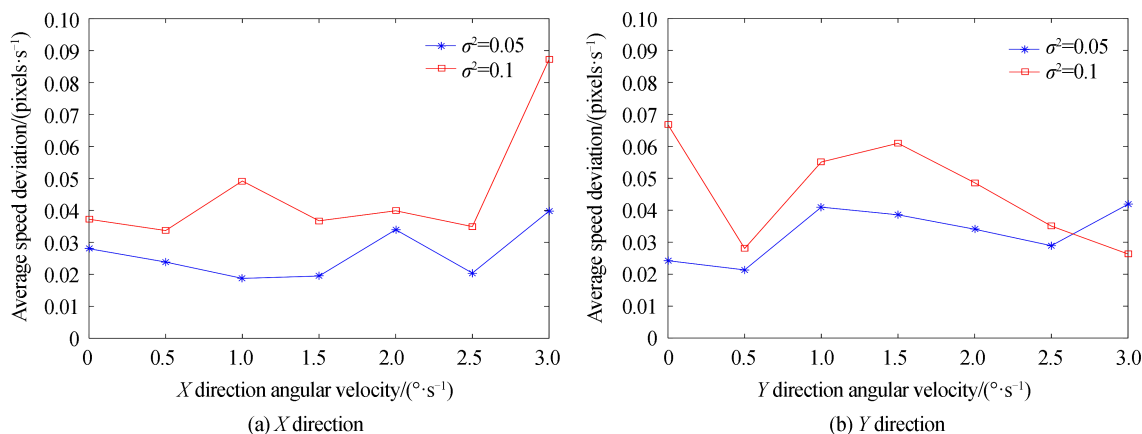


图9 滤波后速度偏差

Fig. 9 Speed deviation after filtering

忽略像差的影响,星像光斑能量呈正态分布,使用点扩散函数表示成像星点^[1]。设置星点为大小为 5×5 的高斯光斑,根据不同的角速度模拟成卷帘星点,在不同角速度和不同噪声等级条件下,导航星点畸变校正前、后的质心误差分析如图10所示。校正前畸变质心误差随角速度的增大而增大,最大超过0.1 pixels,不同角速度情况下校正后导航星畸变质心误差小于0.06 pixels。

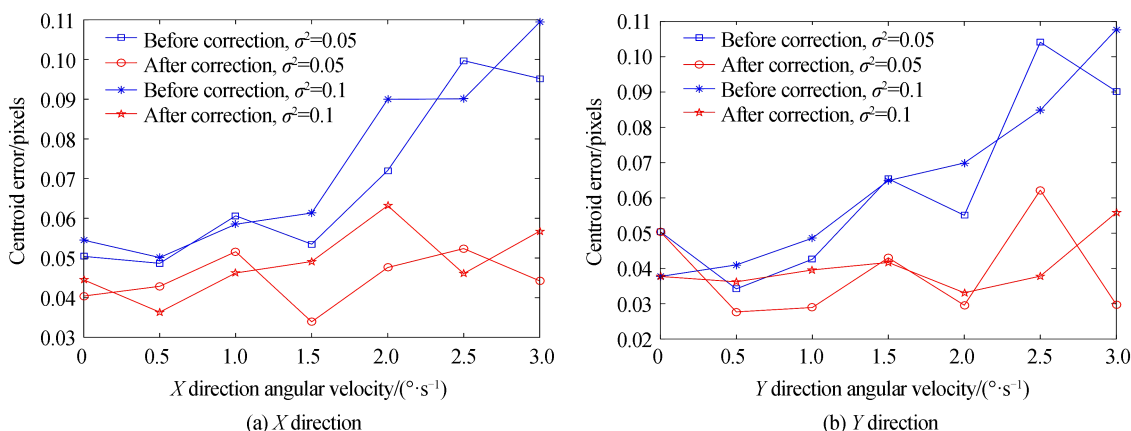


图10 星点畸变校正前、后质心误差分析

Fig. 10 Centroid error analysis before and after star point distortion correction

基于滤波后的导航星点坐标与速度,将不同时域的星点校正到同一时刻,在单帧图像选择不同行的起始曝光时刻作为校正的参考时刻,仿真结果如图11所示。可见,校正后星对距离精度均能高于0.1 pixels,因卷帘曝光行间延迟时间 Δt 恒定,所选不同行作为校正的参考时刻,对星点校正效果几乎没有影响。因此,可选择探测器曝光一半的时刻作为每帧图像的校正参考时刻,即图像中间行起始曝光时刻。分析不同角速度下导航星对校正前、后的距离误差,结果如图12所示。可见,校正前星对距离误差与角速度成线性关系,角速度越大,星对距离误差越大。在测量噪声方差 R 为0.05和0.1时,校正到同一时刻后,星对距离误差均明显减小,星对距离精度高于0.1 pixels。

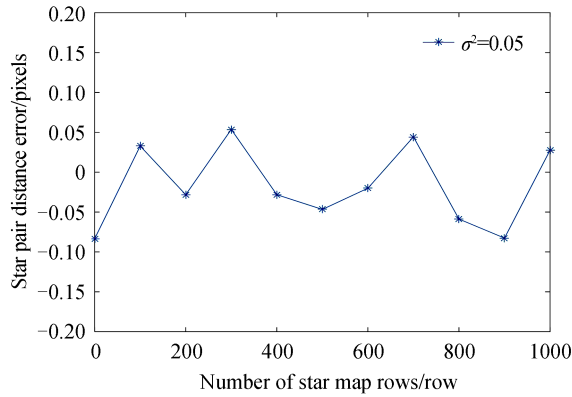


图11 以星图不同行曝光时刻校正后的星对距离误差

Fig. 11 Star pair distance error corrected by different row exposure time of star map

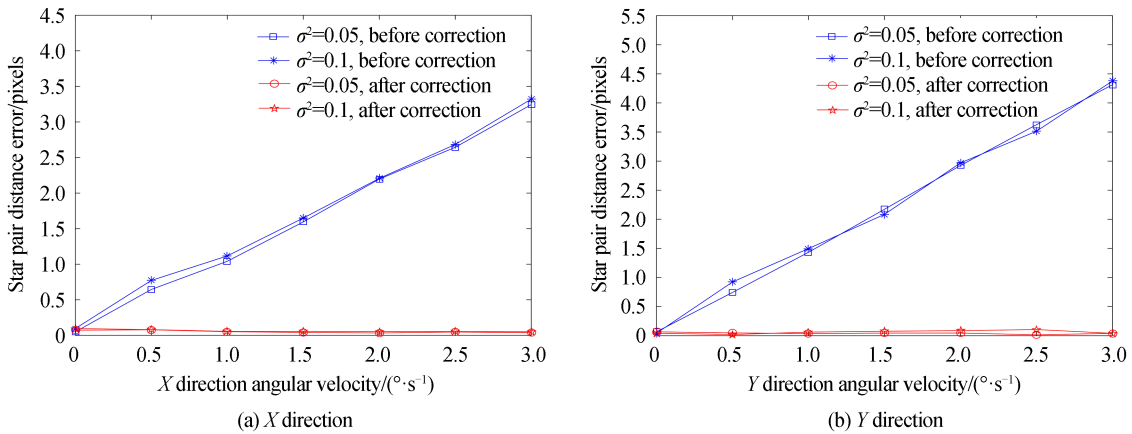


图12 校正前、后星对距离误差

Fig. 12 The distance error of the star pair before and after the correction

与程会艳等^[7]提出的校正方法效果对比如图13所示,该校正方法在角速度为 $3^\circ/\text{s}$ 时,X方向星对位置误差超过1 pixels,Y方向星对位置误差为0.8 pixels,不能满足星敏感器的精度要求。该方法中星对距离误差由几何关系近似得到,且与角速度相关,角速度越大,距离误差越大,尤其是X方向,该星对距离误差的近似估计无法适应高动态时的情况,同时忽略了星点畸变和星图噪声引起的质心误差。而本文所提方法基于星点运动速度对星点畸变和位置进行校正,在角速度 $0\sim 3^\circ/\text{s}$ 内,校正后精度均能高于0.1 pixels,校正后的星对距离精度提高了一个数量级。

在成像平面上设置不同位置分布的5颗星,基于QUEST算法^[9]进行星敏感器姿态解算。同一角速度,各采样100帧星图,导航星点沿X和Y方向校正前、后对姿态精度的影响如图14~15所示。可见,在 $0\sim 3^\circ/\text{s}$ 角速度范围内,校正前俯仰角、滚动角、偏航角误差均随角速度增大而增大,X方向的角速度变化导致的星点位置偏移对姿态精度的影响较大。导航星校正到同一时刻后,俯仰角、滚动角、偏航角误差约在 $10''$ 以内,相比程会艳等^[7]所提方法提高了约 $5''$,有效地提高了星敏感器姿态的精度。

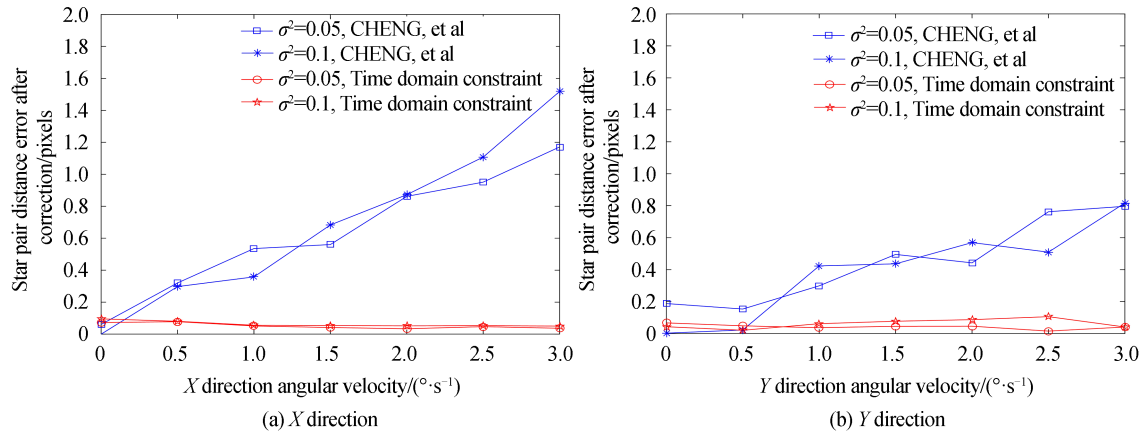


图 13 校正方法效果对比
Fig. 13 Comparison of effects of correction methods

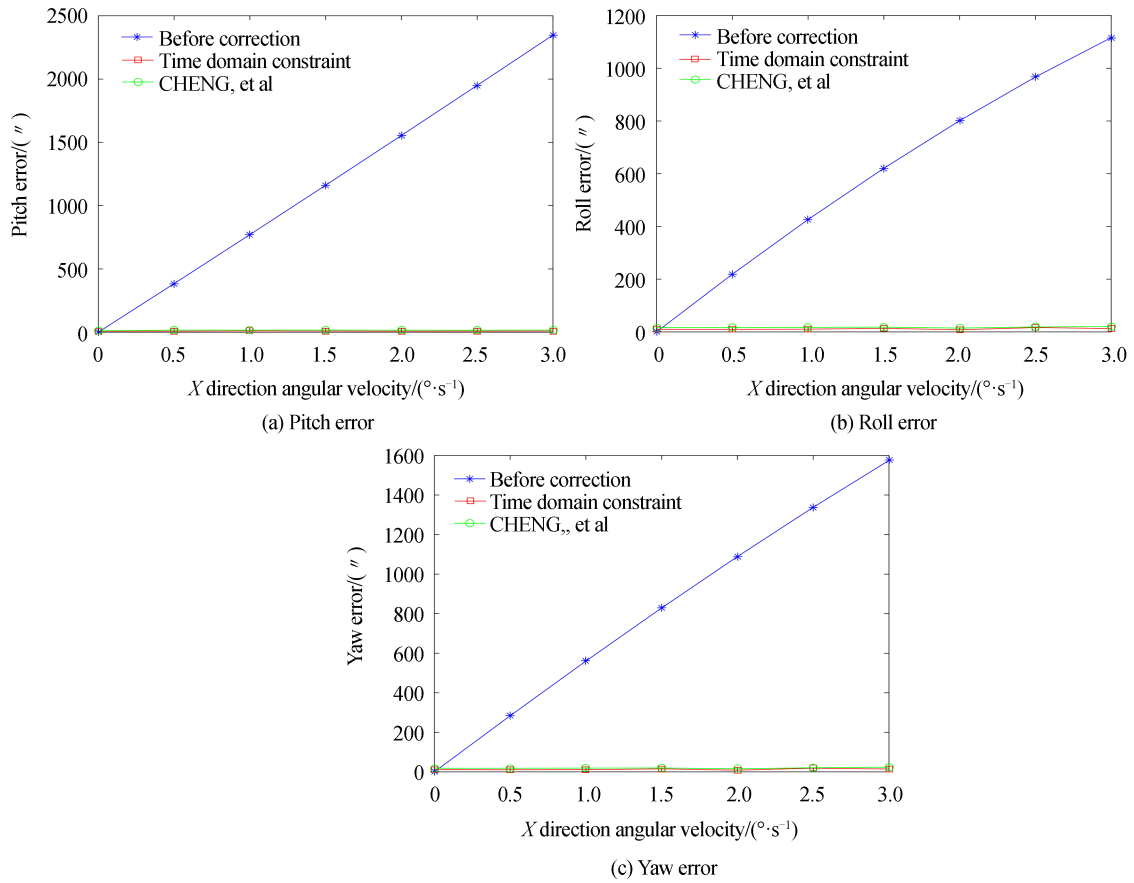


图 14 X 方向不同角速度, 姿态角平均误差
Fig. 14 Different angular velocity in X direction, average error of attitude angle

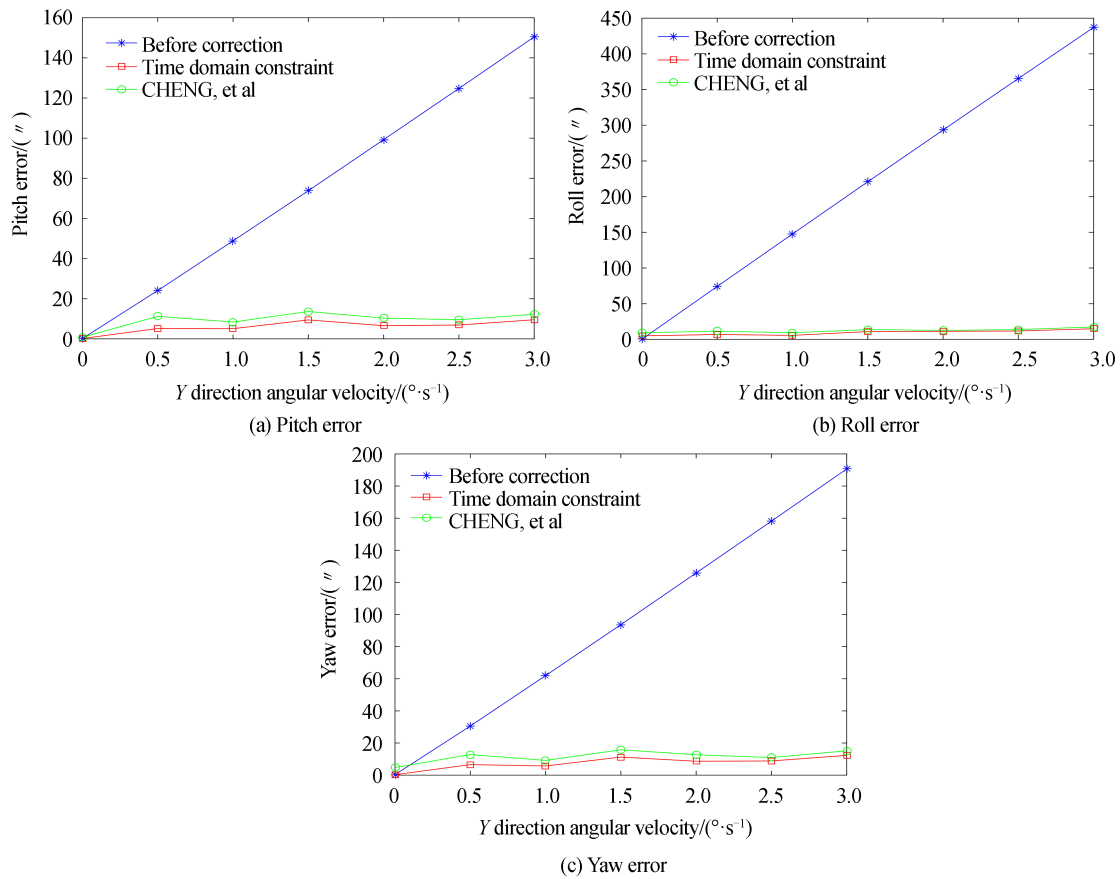


图 15 Y方向不同角速度,姿态角平均误差

Fig.15 Different angular velocity in Y direction, average error of attitude angle

4 结论

针对卷帘曝光时间异步性导致成像后星点畸变和位置偏移问题,提出了基于时域约束的星点校正方法,结合基于卡尔曼滤波的位置和速度最优估计,将不同时域的导航星点校正到同一时刻。在角速度小于 $3^{\circ}/s$ 时,校正后实现星对距离精度高于 0.1 pixels,姿态角精度高于 $10''$,有效地解决了卷帘成像导致的星点畸变和位置偏移问题,提高了星敏感器星点质心定位精度和姿态精度。

参考文献

- [1] XING Fei, YOU Zhen. Principle and implementation of APS CMOS star tracker[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
刑飞, 尤政. APS CMOS 星敏感器系统原理及实现方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
- [2] LI Jie. Research on the key technology of APS star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2005.
李杰. APS星敏感器关键技术的研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2005.
- [3] HE Z Y, WEI P. New method for 2D velocity measurement based on electronic rolling shutter[C]. SPIE, 2007, 6625: 66251W.
- [4] LAO Y, AIT-AIDER O, BARTOLI A. Solving rolling shutter 3D vision problems using analogies with non-rigidity[J]. International Journal of Computer Vision, 2020: 1-23.
- [5] ENRIGHT J, DZAMBA T. Rolling shutter compensation for star trackers [C]. Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation and Control Conference, 2012.
- [6] WU Yanxiong. Study on several key technologies for high-accuracy star sensor[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2015.
伍雁雄. 高精度星敏感器若干关键技术研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2015.
- [7] CHENG Huiyan, ZHENG Ran, WU Yanpeng, et al. A dynamic compensation method based on rolling shutter door

- exposure star sensor: CN106382928A [P]. 2017-02-08.
程会艳,郑然,武延鹏,等. 一种基于卷帘门曝光星传感器的动态补偿方法: CN106382928A [P]. 2017-02-08.
- [8] BAR-ITZHACK I Y, HARMAN R R. Optimized TRIAD algorithm for attitude determination[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1997, 20(1):208-211.
- [9] SHUSTER M D. Kalman filtering of spacecraft attitude and the QUEST model[J]. Journal of the Astronautical Sciences, 1990, 38(3):377-393.
- [10] PSIAKI M L. Extended QUEST attitude determination filtering [C]. Flight mechanics symposium. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center, 1999.
- [11] PSIAKI M L. Attitude-determination filtering via extended quaternion estimation [J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 2000, 23(2):206-214.
- [12] WAHBA G. A least squares estimate of satellite attitude[J]. SIAM Review, 1966, 8(3):384-368
- [13] ZHANG S, XING F, SUN T, et al. Novel approach to improve the attitude update rate of a star tracker [J]. Optics Express, 2018, 26(5): 5164-5181.
- [14] WEI Xinguo, ZHANG Guangjun, JIANG Jie. Subdivided locating method of star image for star sensor [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(9): 812-815.
魏新国,张广军,江洁. 星传感器中星图图像的星体细分定位方法研究 [J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(9): 812-815.
- [15] CURTI F, SPILLER D, ANSALONE L, et al. Determining high rate angular velocity from star tracker measurements [C]. International Astronautical Conference, 2015.