文章编号　1004-924X(2016)01-0203-07

飞行器姿态对 CMOS 航空相机成像的影响

万　磊[1,2]，贾　平[1*]，张　叶[1]，修吉宏[1]

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春，130033；
2. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要：为了消除 CMOS 航空相机高速成像时存在的卷帘快门(RS)效应对成像质量的影响，建立了在任意姿态角下计算 CMOS 相机 RS 效应的数学模型。通过分析 CMOS 成像原理，利用坐标变换法求得像面上任意像素点的速度。在分析卷帘快门原理的基础上推导出了 RS 效应的解析式。利用蒙特卡洛统计方法分析模型精度，对模型关键参数进行了仿真实验，并讨论了帧间延迟和姿态角对 RS 效应的影响。实验结果显示：在高度测量误差小于 0.09 km，速度测量误差小于 0.3 km/h，姿态角测量误差小于 0.02°时，该模型的精度在 1/3 个像元以内。得到的结果证明了本文模型的有效性。该模型可作为定量分析大面阵 CMOS 相机 RS 效应的理论依据，对 CMOS 传感器在航空相机领域的应用有指导作用。

关　键　词：CMOS 航空相机；成像系统；卷帘快门(RS)效应；误差分析；飞行器姿态；姿态角

中图分类号：V448.22；V447.3　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162401.0203

Effect of aircraft attitude on imaging of CMOS aerial cameras

WAN Lei[1,2], JIA Ping[1*], ZHANG Ye[1], XIU Ji-hong[1]

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: jiap@ciomp.ac.cn*

Abstract: To eliminate the influence of Rolling Shutter (RS) on imaging quality in higher speed imaging by a CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) aerial camera, a mathematical model to calculate the RS effect at arbitrary gesture angles was built. The CMOS imaging principle was analyzed, and each pixel velocity of CMOS array was derived from coordinate transformations. After analysis of the working principle of the RS, the analytical equation of the RS effect was deduced. The Monte Carlo statistical method was used to analyze the model accuracy, the key parameters of the model was simulated and the influence of key parameters including interframe delay and gesture angles on the RS distortion were discussed. The experimental results indicate that when the measuring errors of height, speed and the gesture angles are less than 0.09 km, 0.3 km, and 0.02°, respectively, the calculation error of this model is less than 1/3 pixel. These results demonstrate the effectiveness of the model. It concludes that this model can be the theoretical foundation of quantitatively analyzing RS effect of large frame CMOS aerial cameras and can offer

收稿日期：2015-02-02；**修订日期**：2015-04-03.
基金项目：吉林省重大科技攻关项目(No. 11ZDGG001).

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

some theoretic guidances for applying CMOS in the field of aerial cameras.

Key words: CMOS aerial camera; imaging system; Rolling Shutter(RS) effect; error analysis; aircraft attitude; gesture angle

1 引 言

互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide Semiconductor,CMOS)由于具有成本低、速度快、可片上集成图像处理单元等优点,近些年在民用相机,如手机、高清摄像机等领域,已取代CCD(Charge Coupled Device),成为主流的成像传感器[1]。然而大面阵的CMOS传感器在航空相机领域的发展仍然非常缓慢,主要原因在于与CCD全局快门的曝光方式不同,CMOS传感器大多采用电子卷帘式快门(Rolling Shutter,RS),每行像素在不同的时间区间内曝光,因而当相机与被照景物发生快速的相对运动时,所成图像就会发生畸变,这种畸变被称为RS效应。在CMOS航空相机高速成像时,RS效应会严重影响所成图像质量,特别是当相机发生姿态角(俯仰、横滚、偏航)变化后,CMOS像面上像素点的畸变与各点位置密切相关,整个像面的畸变分布十分复杂。

传统的基于视觉的RS畸变校正方法有很多。Liang等[2]在二维平面运动假设的基础上提出了一种处理连续运动的方法。该方法通过全局运动估计得到准确的运动向量后,再进行曲线插值得到校正图像。Cho等[3]通过建立相邻图像帧间的全局仿射关系来表示图像间的运动,其可以处理较为复杂的畸变。而Forssen和Ringaby则提出了更加复杂的三维旋转运动模型,该模型同样是通过帧间运动估计来确定三维模型参数的[5]。上述方法均是基于相邻图像的帧间运动估计,在不同模型下得到运动向量后再对图像进行校正。而运动估计算法计算复杂度高、速度慢,在整个校正算法中占据绝大部分计算量,并且估计精度难以保证,无法满足航空成像实时性和准确性的要求。

为了消除RS效应的影响,拓展CMOS探测器在航空相机领域的应用范围,本文通过分析CMOS的成像原理,利用坐标变换法求得像面上任意像素点的速度,进而推导出了CMOS航空相机RS效应的计算模型;随后基于蒙特卡洛统计方法对模型精度进行了分析;最后在所建模型的基础上讨论了帧间延迟、姿态角对RS效应的影响,分析结果证明了本文模型的有效性。

2 航空成像RS效应分析

与手持便携式CMOS相机不同,航空相机成像时可精确获得其运动信息,包括飞行速度、高度、姿态角等,因此可对整个探测器像面上各像素点的RS畸变进行定量分析,为后续航空相机RS效应的消除提供理论依据。

2.1 像面速度计算模型

在分析CMOS航空相机成像RS效应之前,需要首先求得任意姿态角下CMOS像面上各像素点的速度。设飞机的飞行速度为 v_s,飞行高度为 H,相机焦距为 f,飞机发生姿态变化时其俯仰、横滚、偏航角分别为 α、β、γ。在摄影测量中,像面上任意一点与其对应的物点以及投影中心成一条直线,像点与物点间通过一系列坐标变换可转换为同一坐标系下[6-9]。由于像面速度只与像点本身的坐标变化有关,而不是相对地心点的绝对坐标值,因此计算时只考虑3个坐标系:地物坐标系,飞机坐标系,以及探测器坐标系[10-12]。3个坐标系均服从右手定则,如图1所示。

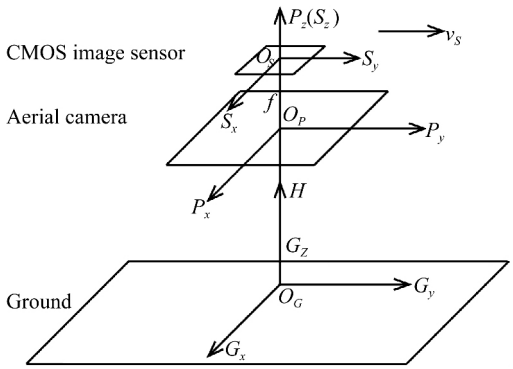


图1 初始时刻坐标系定义

Fig. 1 Definitions of coordinate systems at initial time

3个坐标的定义如下:

(1)地物坐标系 G:其原点 O_G 定义为初始时刻飞机光轴与地面的交点,G_y 轴与飞机飞行方向相同,G_z 轴与地面垂直,指向天空。

(2)飞机坐标系 P:其原点 O_P 为航空相机的投影中心,未改变姿态角之前,飞机坐标系三轴分

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

别与地物坐标系相应轴平行。此时，P_x 轴为俯仰轴，P_y 轴为滚动轴，而 P_z 轴为偏流轴。

(3)探测器坐标系 S：原点 O_S 定义为光轴与探测器的交点，同样地，初始时刻 S 与飞机坐标系平行，且 S_x 轴与 CMOS 读出方向平行，而 S_y 轴垂直于 CMOS 读出方向，与卷帘快门的扫描方向平行。

由于相机固定在飞机上，因而探测器坐标系 S 也会随着飞机姿态角的变化而发生变化。由此可知从地面物点到探测器上像点的坐标变换过程[13]如图 2 所示。

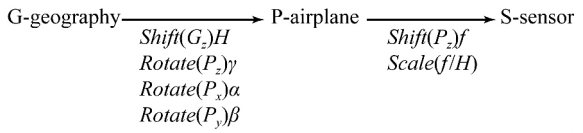


图 2　坐标变换过程示意图

Fig. 2　Diagram of coordinate transformation

为了便于计算，文中均使用齐次坐标系。根据上述定义，在飞机坐标系下探测器上任一点的坐标为$(x,y,f,1)$，则有

$$\boldsymbol{X}=\begin{pmatrix}x\\y\\f\\1\end{pmatrix}=\lambda\boldsymbol{S}_1\boldsymbol{R}\boldsymbol{S}_2\begin{pmatrix}X\\Y\\0\\1\end{pmatrix}. \tag{1}$$

式中 λ 表示比例系数，有

$$\boldsymbol{S}_1=\begin{pmatrix}-\frac{f}{H}&0&0&0\\0&-\frac{f}{H}&0&0\\0&0&-\frac{f}{H}&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}, \tag{2}$$

$$\boldsymbol{S}_2=\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&-v_St\\0&0&1&-H\\0&0&0&1\end{pmatrix}, \tag{3}$$

$$\boldsymbol{R}=\begin{pmatrix}\cos\beta&0&-\sin\beta&0\\0&1&0&0\\\sin\beta&0&\cos\beta&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&\cos\alpha&\sin\alpha&0\\0&-\sin\alpha&\cos\alpha&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\cos\gamma&\sin\gamma&0&0\\-\sin\gamma&\cos\gamma&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}. \tag{4}$$

将式(1)两边对 t 求微分，求出 $t=0$ 时的值，即为像面上各像素点速度解析式：

$$\begin{cases}v_x=\frac{\lambda V_s}{H}[f(\cos\beta\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma)+x(\sin\beta\sin\gamma-\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma)]\\v_y=\frac{\lambda V_s}{H}(f\cos\alpha\cos\gamma+y\sin\beta\sin\gamma-y\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma)\end{cases}. \tag{5}$$

式中 $\lambda=-\frac{1}{f}(x\cos\alpha\sin\beta-y\sin\alpha-f\cos\alpha\cos\beta)$。

当飞机姿态的变化顺序以及对应坐标系的定义与本文不一致时，像面速度的表达式的表现形式也会不同，但同样可以由上述分析求得，这里就不再赘述。

2.2　任意姿态角下 RS 效应的计算过程

RS 效应产生的图像畸变形式与像素点的速度方向有关，其可分为两种：一种是运动速度平行于 CMOS 读出方向，即沿水平方向的运动；另一是运动速度垂直于 CMOS 读出方向，即沿垂直方向的运动。水平和垂直方向的运动互不影响，因此可以单独进行分析[11]。

由于每行像素的读出时间很短，故可以认为在此期间像素点的速度没有发生变化，因此成像过程中运动模糊造成的影响可以忽略。下面就分别针对两个方向的运动讨论任意姿态角变化时航空相机 RS 效应的大小，其中假设探测器的大小为 $M\times N$，像元尺寸为 d。

2.2.1　水平方向运动

当像素点沿探测器的读出方向运动时，其速度为 v_x，则单位时间内像素点运动的像元数可写为 v_x/d。CMOS 传感器的各行像素按顺序读出，每一行相比前一行都有一定的延迟，因此 CMOS 相机与被照景物间发生快速的相对运动时，每行像素都会发生一定的位移，且位移距离逐渐增大，这使得矩形变成了平行四边形，如图 3 所示。

设 CMOS 每行像素的读出时间为 t_r，则探测器第 k 行的读出时间应为$(k-1)t_r$。探测器上任一点的坐标为(x,y)(忽略 S_z 轴分量，只考虑探测器平面)。根据第 2.1 节中所建坐标系可得其位于探测器上第$\left(\frac{N}{2}-y\right)$行，由此可得其畸变大小为：

$$d_x=v_xt_r(N/2-y-1)/d. \tag{6}$$

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

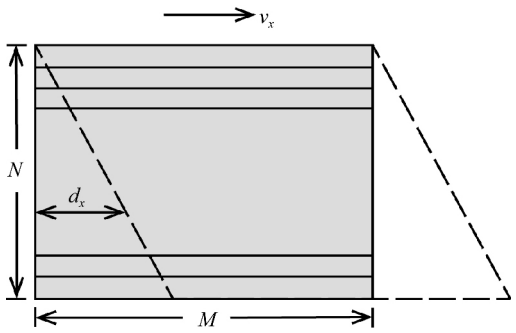


图3 水平方向RS畸变示意图

Fig. 3 Diagram of horizontal rolling shutter distortion

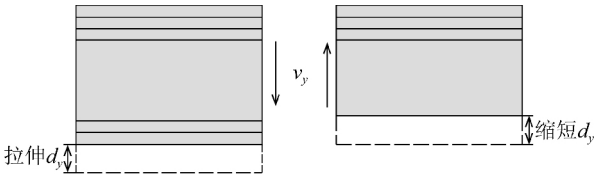


图4 垂直方向RS畸变示意图

Fig. 4 Diagram of vertical rolling shutter distortion

2.2.2 垂直方向运动

当像素点沿垂直于探测器的读出方向运动时，其速度为 v_y。此时图像的畸变形式有两种，第一种是当航空飞机飞行方向与卷帘快门曝光方向一致时，图像会拉伸；第二种是当航空飞机飞行方向与卷帘快门曝光方向相反时，对应的图像会缩短。

设探测器上任一点的坐标为 (x,y)，同上节类似，其位于探测器第 $\left(\frac{N}{2}-y\right)$ 行，设该点运动畸变的大小为 d_y。当探测器开始曝光时，卷帘式快门以速度 $1/t_r$ 读出数据，则第 $\left(\frac{N}{2}-y\right)$ 行开始曝光的时间可以表示为 $(d_y+N/2-y-1)/(1/t_r)$ 或者 $d_y/(v_y/d)$，由此有：

$$d_y=\frac{v_y t_r(N/2-y-1)}{d-v_y t_r}. \tag{7}$$

综上可得，对于CMOS探测器上的任一点 (x,y)，当航空飞机以任意姿态角向前飞行时，其所成图像沿水平、垂直方向的畸变大小分别为：

$$\begin{cases} d_x=\dfrac{\lambda v_s t_r(N/2-y-1)}{\mathrm{d}H}\left[f(\cos\beta\sin\gamma+\sin\alpha\sin\beta\cos\gamma)+x(\sin\beta\sin\gamma-\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma)\right] \\ d_y=\dfrac{v_y t_r(N/2-y-1)}{d-v_y t_r},\ v_y=\dfrac{\lambda v_s}{H}(f\cos\alpha\cos\gamma+y\sin\beta\sin\gamma-y\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma) \end{cases}. \tag{8}$$

由上式可知，航空飞机经过复杂的位姿调整之后，探测器上各点由RS效应带来的畸变大小均不相同，与其在探测器上的位置密切相关，由此带来的RS效应校正问题就变得十分复杂，目前，还没有一种机构可以准确地进行校正，因此需要结合计算模型，在理论分析的基础上有针对性地寻求解决方案。

3 仿真实验与分析

在成像过程中焦距、速高比、CMOS靶面大小和像素点尺寸都是固定值，由式(8)可知读出时间和姿态角为影响畸变分布的关键参数。本文中航空相机的主要参数如表1所示。

3.1 模型精度分析

影响模型计算精度的因素有很多，本文主要讨论航空飞机飞行参数的测量误差：包括飞机的姿态测量误差、飞行高度和速度测量误差。式(8)中相机焦距和探测器读出时间均可以在地面实验室中标定，精度非常高，对整个模型的影响很小，在此可以不予考虑。

表1 航空相机主要参数

Tab. 1 Main parameters of aerial camera

Parameter	Value
v_s/H	0.03
Focal length/mm	390
Size of CMOS/pixel	2 000×2 000
Pixel size/μm	5.5
Readout time/μs	<40

本文采用蒙特卡洛(Monte-Carlo)统计方法来对误差进行分析[14]。MC方法的基本思路是通过构造一定的随机抽样来估算数学函数，随着抽样样本的增加，其结果会越来越精确。

根据航空相机的设计要求，允许的速度测量误差为0.3 km/h，允许的高度测量误差为0.09 km，允许的姿态角测量误差为0.02°。其中飞机各参数的误差均服从正态分布，而3个姿态角则服从均匀分布。MC误差分析方法的步骤如下：

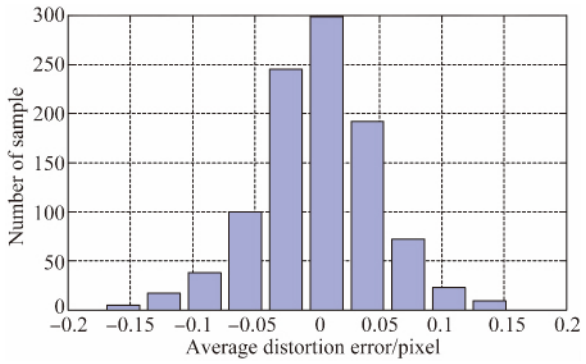
?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(1)根据各参数的分布以及由其误差生成的一系列随机参数值和对应的误差值；

(2)选取第 1 个参数序列代入式(8)，得到相应的水平和垂直方向畸变 d_{x1}、d_{y1}；

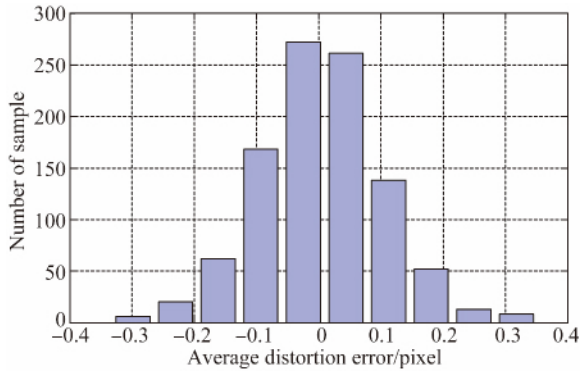
(3)将第 1 个参数序列加上其对应误差再代入式(8)，得到 d_{x2}、d_{y2}，则合成误差为 $\Delta d_x = d_{x2} - d_{x1}$，$\Delta d_y = d_{y2} - d_{y1}$。最后对合成误差在整个像面上求平均。

(4)依次选择参数序列，不断重复第(2)(3)步，直至得到充足的合成误差样本，由此就可以分析其统计特性。



(a)水平方向畸变误差分布

(a) Error distribution of horizontal distortion



(b)垂直方向畸变误差分布

(b) Error distribution of vertical distortion

图 5　像面上平均畸变误差的统计结果

Fig. 5　Statistical results of average distortion error

文中共产生了 1 000 幅图像样本来进行分析，统计结果如图 5 所示。从图中可以看出，所有图像样本在水平和垂直方向的平均误差均小于 1/3 pixel，水平方向 RS 畸变平均误差甚至达到 1/10 pixel 左右，由此证明本文所建模型精度完全符合航空成像 RS 效应分析的要求。

3.2　帧间延迟的影响

可以通过对固定频率的闪光灯成像来标定 CMOS 成像传感器的读出时间。而读出时间 t_r 和帧间延迟 t_d 的关系可以表示为：$1/F_m = t_r + t_d$（F_m 表示帧频）。文献[4]认为帧间延迟对畸变校正的影响非常小，从而直接设定帧间延迟为零。本文结合所建立的数学模型计算帧间延迟造成的校正误差，从而可以更直观地分析其造成的影响。

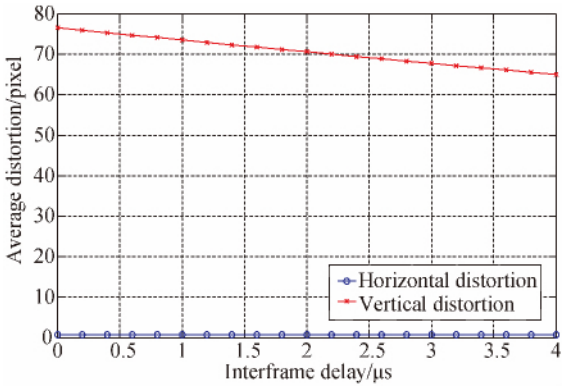


图 6　帧间延迟对像面平均畸变的影响

Fig. 6　Effect of interframe delay on average distortion

一般而言，t_d 远远小于 t_r，根据经验设定 t_d 为 0～4 μs。求得当姿态角一定，t_d 增大时，各像素点的水平和垂直方向的 RS 畸变，并在整个像面上进行平均，其变化曲线如图 6 所示。从图中可以看出，随着 t_d 的增大，像面垂直方向畸变的变化远远大于 1 pixel，这说明帧间延迟的影响无法忽视，必须在成像前对探测器的读出时间进行精确标定。此外，垂直方向畸变 $d_{y,a}$ 与帧间延迟 t_d 几乎成线性关系，故式(8)中 $v_y t_r \ll d$，则式(8)可以简化为：

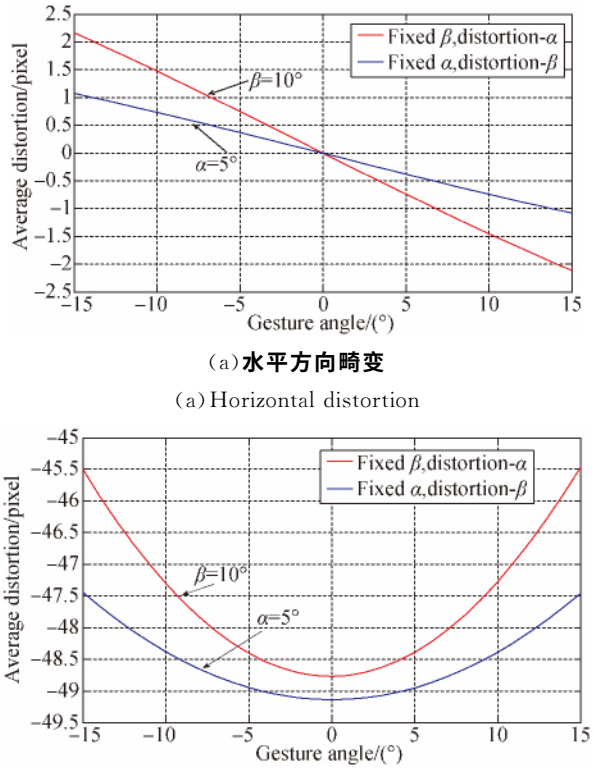
$$\begin{cases} d_{x,a} = \dfrac{\lambda v_s t_r (N/2 - y - 1)}{\mathrm{d}H}\left[f(\cos\beta\sin\gamma + \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma) + x(\sin\beta\sin\gamma - \sin\alpha\cos\beta\cos\gamma)\right] \\ d_{y,a} = \dfrac{\lambda v_s t_r (N/2 - y - 1)}{\mathrm{d}H}(f\cos\alpha\cos\gamma + y\sin\beta\sin\gamma - y\sin\alpha\cos\beta\cos\gamma) \end{cases}. \quad (9)$$

3.3　不同姿态角下像面 RS 效应分析

航空飞机在实际飞行时，偏航角通常都比较小，且变化不大，因此本节设定偏航角为 0，主要讨论俯仰角 α 和横滚角 β 对成像 RS 效应的影响。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

一般情况下飞机倾角都比较小，假设其在 30°以内，即姿态角的变化范围为 $-15°\leqslant\alpha\leqslant15°$，$-15°\leqslant\beta\leqslant15°$。分别固定 α/β，根据式(9)求得像面上平均畸变随 α/β 的变化曲线，如图 7 所示。



(a)水平方向畸变

(a) Horizontal distortion

(b)垂直方向畸变

(b) Vertical distortion

图 7 姿态角的变化对像面上平均畸变的影响

Fig. 7 Effect of gesture angles on average distortion

对比图 7(a)和(b)可以明显看出，水平方向畸变远远小于垂直方向畸变，由此可以知道当探测器读出方向与飞机飞行方向垂直时，不论姿态角如何变化，伸长或缩短畸变对成像质量的影响显著，而倾斜畸变的影响很小。因此在对 RS 畸变校正精度要求不是很高的应用中，可以忽略水平方向倾斜畸变，有针对性地对垂直方向伸长或缩短畸变进行补偿，这会显著降低复杂度。

4 结 论

由于采用电子卷帘式快门，CMOS 航空相机在高速成像时会引入几何畸变。针对这一问题，本文利用坐标变换法推导出了任意姿态角下 CMOS 航空成像 RS 效应的计算模型，并用 MC 统计方法对模型精度进行了分析，最后讨论了帧间延迟、姿态角对像面畸变分布的影响。结果表明在高度测量误差小于 0.09 km，速度测量误差小于 0.3 km/h，姿态角测量误差小于 0.02°时，该模型的精度优于 1/3 pixel。同时帧间延迟对 RS 畸变的校正影响很大，需要在地面进行精确的标定。而不同姿态角下的 RS 效应分析表明垂直方向畸变更为显著，远远大于水平方向畸变，故在校正时可以有针对性地加以考虑，以降低补偿的复杂度。

该模型为定量分析 CMOS 航空相机 RS 效应提供了理论依据，对 CMOS 探测器在航空领域的应用有一定的指导作用。

参考文献：

[1] ABBAS E G, HELMY E. CMOS image sensors [J]. *IEEE Circuits & Devices Magazine*, *May/June*, 2005: 6-20.

[2] LING C K, CHANG L W, HOMER H C. Analysis and compensation of Rolling Shutter effect [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2008, 17 (8): 1323-1330.

[3] CHO W H, HONG K S. Affine motion based CMOS distortion analysis and CMOS digital image stabilization [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2007, 53 (3): 833-841.

[4] SUN Y F, LIU G. Rolling Shutter distortion removal based on curve interpolation [J]. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 2012, 58 (3): 1045-1050.

[5] RINGABY E, FORSSEN P E. Efficient video rectification and stabilisation for cell-phones [J]. *Int. J. Comput. Vision*, 2012, 96 (3): 335-352.

[6] SANJIB K G. Image motion compensation through augmented collinearity equations [J]. *Optical Engineering*, 1985, 24 (6): 1014-1017.

[7] 赵嘉鑫，张涛，杨永明，等. TDI-CCD 全景航空相机的像移速度场计算模型研究[J]. 光学学报，2014, 34 (7): 0728003.
ZHAO J X, ZHANG T, YANG Y M, *et al.*. Image motion velocity filed of TDI-CCD aerial panoramic camera [J]. *Acta Optica Sinca*, 2014, 34 (7): 0728003. (in Chinese)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[8] 张树青，李韬. 含扫描反射镜的星载相机异速像移分析[J]. 光学学报，2014，34 (2)：0228006.
ZHANG SH Q，LI T. Analysis on different rates image motion of space camera with a scanning mirror [J]. *Acta Optica Sinca*，2014，34 (2)：0228006. (in Chinese)

[9] 闫得杰，李伟雄，吴伟平，等. 空间相机像移补偿计算中飞行器大姿态角使用方法[J]. 红外与激光工程，2014，43(4)：1200-1205.
YAN D J，LI W X，WU W P，*et al*.. Aircraft's large attitude angles' usage in image motion compensation calculation of space camera [J]. *Infrared and Laser Engineering*，2014，43(4)：1200-1205. (in Chinese)

[10] 刘志明，朱明，陈黎，等. 长焦距全景式航空遥感器像拖影分析及补偿抑制方法[J]. 光学学报，2013，33 (7)：0711001.
LIU ZH M，ZHU M，CHEN L，*et al*.. Long range analysis and compensation of smear in sweep aerial remote sensing [J]. *Acta Optica Sinca*，2013，33 (7)：0711001. (in Chinese)

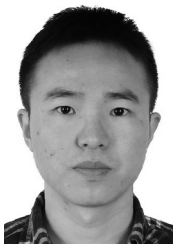
[11] YUN G L，GUO K. Fast-rolling shutter compensation based on piecewise quadratic approximation of a camera trajectory [J]. *Optical Engineering*，2014，53 (9)：093101.

[12] 远国勤，丁亚林，惠守文，等. 彩色大面阵航空测绘相机前向像移补偿分析及误差纠正 [J]. 光学学报，2013，33 (1)：0128001.
YUAN G Q，DING Y L，HUI SH W，*et al*.. Analysis of forward image displacement compensation and error correction for area scan color CCD airborne mapping camera [J]. *Acta Optica Sinca*，2013，33 (1)：0128001. (in Chinese)

[13] 胡燕，金光，常琳，等. 椭圆轨道 TDI CCD 相机像移匹配计算与成像验证[J]. 光学 精密工程，2014，22(8)：2274-2284.
HU Y，JIN G，CHANG L，*et al*.. Image motion matching calculation and imaging validation of TDI CCD camera on elliptical orbit [J]. *Opt. Precision Eng.*，2014，22(8)：2274-2284. (in Chinese)

[14] CHANSOO K，WOOSUK K. Estimation of the parameters of blur type Ⅲ distribution based on dual generalized order statistics [J]. *The Scientific World Journal*，2014：512039.

作者简介：



万　磊(1988－)，男，湖北天门人，博士研究生，2007 年于中国科技大学获得学士学位，主要从事航空 CMOS 成像方面的研究。E-mail：keshawanshi@163.com

导师简介：

贾　平(1964－)，男，吉林延吉人，博士，研究员，博士生导师，主要从事航空成像与测量仪器技术方面的研究。E-mail：jiap@ciomp.ac.cn

(版权所有　未经许可　不得转载)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net