航空相机像旋动态调制传递函数分析与研究

刘 超[1,2], 丁亚林[1,3], 田大鹏[1,3], 杜言鲁[1,2], 孙崇尚[1,2]

[1]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空成像与测量重点实验室, 吉林 长春 130033;

[2]中国科学院大学, 北京 100049;

[3]中国科学院长春光学精密机械与物理研究所航空成像与测量创新实验室, 吉林 长春 130033

摘要 航空相机在采用旋转扫描反射镜成像过程中存在像面旋转,会导致图像模糊,成像质量下降,必须采用像旋补偿机构进行补偿。目前,通过人眼观察图像模糊程度和电机同步控制精度评价像旋补偿精度,都不能客观准确评价系统成像质量。为建立航空相机成像质量与像旋补偿系统其他指标之间的直接关系,提出基于极坐标系的动态调制传递函数(MTF),并提出基于倾斜刃边法与模糊路径法相结合的方法测量航空相机旋转像移动态 MTF。设计扇形靶标旋转动态成像实验,利用旋转动态 MTF 和倾斜刃边法得到图像动态 MTF 计算值,并基于图像模糊路径测量转台转动时图像动态 MTF 测量值。实验结果表明,转台以 20～300(°)/s 匀速转动时,空间频率在旋转动态 MTF 到达第一个零点频率前,动态 MTF 计算值和测量值曲线近似重合,验证了旋转动态 MTF 的正确性;空间频率在小于 0.7 零点频率范围内,两动态 MTF 曲线相对误差最大值和均值分别小于 6%,2%,进而证明了测量方法的准确性。

关键词 成像系统; 航空相机; 调制传递函数; 像面旋转; 旋转像移

中图分类号 V245.6 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0211001

Dynamic Modulation Transfer Function Analysis and Research of Image Rotation for Aerial Camera

Liu Chao[1,2], Din Yalin[1,3], Tian Dapeng[1,3], Du Yanlu[1,2], Sun Chongshang[1,2]

[1] *Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*;

[2] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*;

[3] *Innovation Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin* 130033, *China*

Abstract Aerial camera causes image rotation problem in the process of rotating scanning reflector imaging, which leads to image blur and degradation of image quality, so image rotation compensation system is essential for aerial camera. At present, the distinguishing image blur by human eyes and synchronization control accuracy by electrical machine are used to evaluate compensation performance of image rotation, but the image quality could not be evaluated objectively and accurately. In order to establish the direct relationship between imaging quality of aerial camera and other index of rotating compensation system, the dynamic modulation transfer function (MTF) based on polar coordinate is proposed. A new method combined with the slanted-edge method and blur path method is proposed to measure the dynamic MTF of rotation image motion of the aerial camera. The rotating dynamic imaging experiments are designed with sector target, and the image dynamic MTF calculated values are obtained using the rotating dynamic MTF and slanted-edge method. The image dynamic measured MTF values are obtained based on image fuzzy path. Experimental results show that, when rotate table with variable angular velocities from 20 (°)/s

收稿日期: 2016-08-17; **收到修改稿日期**: 2016-09-21

基金项目: 国家自然科学基金(61304032)

作者简介: 刘 超(1990—),男,硕士研究生,主要从事航空相机像旋补偿方面的研究。E-mail: liuchao2064@163.com

导师简介: 丁亚林(1964—),男,研究员,博士生导师,主要从事航空相机总体设计方面的研究。

E-mail: dingyl_1964@126.com

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

to 300 (°)/s, the spatial frequency is less than first zero frequency of rotating dynamic MTF, and the two dynamic MTF curves are approximately coincide. Thus the correctness of the rotating dynamic MTF is demonstrated. When the spatial frequency is less than 0.7 of zero frequency, the maximum values and mean values of dynamic MTF relative errors are less than 6%, 2% respectively, thus the accuracy of the measurement method is proved.

Key words imaging systems; aerial camera; modulation transfer function; image rotation; rotating image motion

OCIS codes 110.2960; 110.4100; 110.3000; 120.0280

1 引　言

随着资源普查、地形测绘、军事侦察等领域对遥感成像系统在宽收容、高分辨性能方面的迫切需求，航空相机逐渐采用摆扫成像方式提高成像覆盖范围[1]，通过设计长焦距、大口径光学系统获得高分辨率图像，从而增大了成像系统的尺寸和旋转惯量[2]。因此，采用转动成像系统整机扫描的方式实现摆扫需要更多能量且难以提高扫描速度和效率。在光学镜头前加一个与光轴成 45°的扫描反射镜，通过旋转扫描反射镜实现扫描成像则可以解决这一问题[3]。但在旋转扫描反射镜成像过程中，像会随着摆扫指示角的变化而绕光轴旋转从而产生像面旋转[4]，必须予以补偿。

航空相机在扫描反射镜旋转成像过程中存在的像面旋转问题，可以分解为沿扫描方向直线运动的扫描像移和绕光轴旋转运动的旋转像移，分别进行补偿。通过使用快速反射镜、移动成像探测器或者采用时间延迟积分光电器件(TDICCD)成像等方式[5]均可实现对扫描像移的补偿，相关研究已实现较高补偿精度[6-7]。对于成像系统中存在的旋转像移，普遍称之为像旋，目前常用的像旋补偿方法有三种，分别为道威棱镜消旋法、K 镜消旋法和探测器旋转消旋法[8]。三种方法实现像旋补偿的原理虽各不同，但本质上均以机械联动或电机驱动方式实现补偿机构(或消旋机构)与扫描机构同步转动[9]，二者的同步精度是导致像旋的重要原因。机械联动方式存在空回、打滑、松动等非线性问题，限制了像旋补偿性能提升，伺服电机驱动方式无机械联动缺陷，但存在系统非线性、摩擦力、振动、外界扰动力等扰动因素，降低了系统稳定性能和电机同步性能。田大鹏等[10-11]提出将遥操作领域双向控制引入消旋补偿的思想，并采用四通道控制结构实现了高精度像旋补偿。李昕阳等[1]在航空相机摆扫成像系统中进行了应用。像旋补偿方法虽提高了补偿精度，但仍然存在补偿误差。系统存在的补偿误差必然导致图像模糊，降低图像分辨率，从而影响系统成像性能。动态调制传递函数(MTF)客观反映了成像系统对目标不同空间频率的频谱调制特性，广泛应用于评价系统的动态成像能力。

关于航空相机动态 MTF 的研究，国内外学者主要关注于匀速运动和振动所产生的像移，特别是限制航空相机高分辨成像的正弦振动所产生的影响。为求解正弦振动动态 MTF，Hadar 等[12-13]提出了基于频域上的和基于空域上的分析方法。在此基础上，国内外学者基于振动频率与曝光时间关系展开了大量研究[14-18]。对于像旋所产生的影响，相关论文则很少涉及，普遍通过人眼观察图像模糊程度和分析电机同步控制精度来评价像旋补偿精度。由于像旋的存在，将导致成像图像清晰度随像点与旋转中心距离的增加而逐渐降低，使得图像中不同点的退化程度不再满足空间不变性[19]，从而增加了利用动态 MTF 评价像旋补偿系统动态成像性能的难度。

为评价航空相机在扫描镜旋转成像过程中双向控制的像旋补偿精度，本文提出了基于极坐标系的动态 MTF，并提出了基于倾斜刃边法与模糊路径法相结合的旋转像移动态 MTF 测量方法，具有重要的工程应用价值。

2 光学系统调制传递函数

2.1 光学传递函数极坐标系分析

在光学系统理想成像条件下，点物成点像，但实际中存在衍射效应，限制了成像分辨率。在笛卡尔直角坐标系下，点光源成像后的二维点扩展函数(PSF)为狄拉克函数 $\delta[X,Y]$。当点光源相对移动时，影像会相对于焦平面发生运动，假设像点在 X、Y 轴方向上的位移量分别为 $x(t)$、$y(t)$，则相应时刻下 PSF 为 $\delta[X-x(t),Y-y(t)]$。实际成像结果为曝光时间内各个时刻能量的叠加，PSF 应为归一化的能量分布[16]，则光

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

学系统成像结果为

$$F_{\mathrm{PS}}(X,Y)=\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{e}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\delta[X-x(t),Y-y(t)]\mathrm{d}t,\tag{1}$$

式中 t_{s} 为初始曝光时刻，t_{e} 为曝光时间。对 PSF 做傅里叶变换为动态光学传递函数(OTF)，即

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\int\int_{-\infty}^{\infty}F_{\mathrm{PS}}(X,Y)\exp[-2\mathrm{j}\pi(f_xX+f_yY)]\mathrm{d}X\mathrm{d}Y,\tag{2}$$

式中 f_x，f_y 为空间频率，将(1)式代入(2)式得

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{e}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\{-2\mathrm{j}\pi[f_xx(t)+f_yy(t)]\}\mathrm{d}t。\tag{3}$$

将直角坐标系参数 X、Y、$x(t)$、$y(t)$ 分别替换为极坐标参数 R、Θ、$r(t)$、$\theta(t)$，由(1)式可得极坐标系下的 PSF 为

$$F_{\mathrm{PS}}(R,\Theta)=\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{e}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\frac{\delta[R-r(t),\Theta-\theta(t)]}{R}\mathrm{d}t。\tag{4}$$

在极坐标系下对(4)式进行二维傅里叶变换，$\rho=\sqrt{f_x^2+f_y^2}$，$\varphi=\arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)$，得到对应的动态 OTF 为

$$\begin{aligned}F_{\mathrm{OT}}(\rho,\varphi)=&\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}R\cdot F_{\mathrm{PS}}(R,\Theta)\cdot\exp[-2\mathrm{j}\pi\rho R\cos(\Theta-\varphi)]\mathrm{d}R\mathrm{d}\Theta=\\&\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\left\{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}\delta[R-r(t),\Theta-\theta(t)]\cdot\exp[-2\mathrm{j}\pi\rho R\cos(\Theta-\varphi)]\mathrm{d}R\mathrm{d}\Theta\right\}\mathrm{d}t。\end{aligned}\tag{5}$$

交换(5)式积分顺序后计算得极坐标系动态 OTF 为

$$\begin{aligned}&F_{\mathrm{OT}}(\rho,\varphi)=\\&\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\left\{\int_0^{\infty}\int_0^{2\pi}\delta[R-r(t),\Theta-\theta(t)]\cdot\exp[-2\mathrm{j}\pi\rho R\cos(\Theta-\varphi)]\mathrm{d}R\mathrm{d}\Theta\right\}\mathrm{d}t=\\&\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\{-2\mathrm{j}\pi\rho r(t)\cos[\theta(t)-\varphi]\}\mathrm{d}t。\end{aligned}\tag{6}$$

对应的直角坐标系动态 OTF 为

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\left\{-2\mathrm{j}\pi\sqrt{f_x^2+f_y^2}\,r(t)\cos\left[\theta(t)-\arctan\left(\frac{f_y}{f_x}\right)\right]\right\}\mathrm{d}t。\tag{7}$$

基于三角函数变换公式，极坐标系动态 OTF 为

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\{-2\mathrm{j}\pi r(t)[\rho\cos\varphi\cos\theta(t)+\rho\sin\varphi\sin\theta(t)]\}\mathrm{d}t,\tag{8}$$

式中积分核内的 $\rho\cos\varphi\cos\theta(t)+\rho\sin\varphi\sin\theta(t)$ 在时刻 $t_{\mathrm{m}}\in[t_{\mathrm{s}},t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}]$ 的泰勒级数展开式为

$$\begin{aligned}&\rho\cos\varphi\cos\theta(t)+\rho\sin\varphi\sin\theta(t)=\\&[\rho\cos\varphi\cos\theta(t_{\mathrm{m}})+\rho\sin\varphi\sin\theta(t_{\mathrm{m}})]\sum_{k-1}^{-1+m}(-1)^{k-1}\frac{[\theta(t)-\theta(t_{\mathrm{m}})]^{2k-2}}{(2k-2)!}+\\&[\rho\sin\varphi\cos\theta(t_{\mathrm{m}})-\rho\cos\varphi\sin\theta(t_{\mathrm{m}})]\sum_{k-1}^{-1+m}(-1)^{k-1}\frac{[\theta(t)-\theta(t_{\mathrm{m}})]^{2k-1}}{(2k-1)!}。\end{aligned}\tag{9}$$

定义曝光时间内极坐标系下的空间频率，平均法向空间频率 f_{n}，平均切向空间频率 f_{r}，表达式分别为

$$\begin{cases}f_{\mathrm{n}}=\rho\cos\varphi\cos\theta(t_{\mathrm{m}})+\rho\sin\varphi\sin\theta(t_{\mathrm{m}})\\f_{\mathrm{r}}=\rho\sin\varphi\cos\theta(t_{\mathrm{m}})-\rho\cos\varphi\sin\theta(t_{\mathrm{m}})\end{cases}。\tag{10}$$

两空间频率与曝光时间关系如图 1 所示。

当 $t_{\mathrm{m}}\to t$ 时，(10)式可表示为

$$\begin{cases}f_{\mathrm{n}}=\rho\cos\varphi\cos\theta(t)+\rho\sin\varphi\sin\theta(t)\\f_{\mathrm{r}}=\rho\sin\varphi\cos\theta(t)-\rho\cos\varphi\sin\theta(t)\end{cases}。\tag{11}$$

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

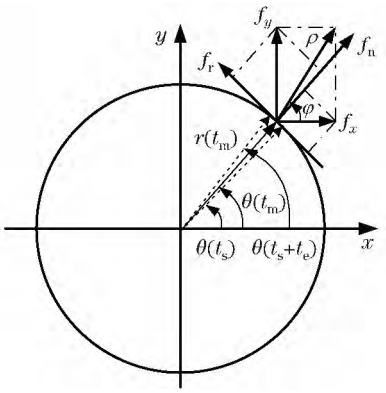

图 1　极坐标系空间频率

Fig. 1　Spatial frequency in polar coordinate

将(9)、(10)式代入(8)式中，极坐标系动态 OTF 的泰勒级数展开式可表示为

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=$$
$$\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\left\{-2\mathrm{j}\pi r(t)\left\{f_n\sum_{k=1}^{-1+m}(-1)^{k-1}\frac{[\theta(t)-\theta(t_m)]^{2k-2}}{(2k-2)!}+f_r\sum_{k=1}^{-1+m}(-1)^{k-1}\frac{[\theta(t)-\theta(t_m)]^{2k-1}}{(2k-1)!}\right\}\right\}\mathrm{d}t。\tag{12}$$

在曝光时间 t_s 足够小时，$\theta(t)-\theta(t_m)$ 为小量，可忽略泰勒级数展开式中的二次及以上高次项，极坐标系动态 OTF 可简化为

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\{-2\mathrm{j}\pi r(t)\{f_n+f_r[\theta(t)-\theta(t_m)]\}\}\mathrm{d}t=$$
$$\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp[-2\mathrm{j}\pi r(t)f_n]\cdot\exp\{-2\mathrm{j}\pi r(t)[\theta(t)-\theta(t_m)]f_r\}\mathrm{d}t。\tag{13}$$

由(13)式可知，极坐标系下动态 OTF 是关于像点径向运动轨迹 $r(t)$、切向运动轨迹 $\theta(t)$、曝光时间 t_s 以及泰勒级数展开时刻 t_m 的函数，像点的运动方式决定了系统动态 OTF 的复杂程度。可以看出，当像点只存在径向或切向方向的运动时，动态 OTF 便简化为仅与该运动方向有关的函数，因此(13)式可用于分析存在旋转运动和相对运动时光学系统的成像质量。

2.2　旋转动态调制传递函数

针对航空相机存在的像面旋转问题，在补偿沿扫描方向直线运动的扫描像移基础上，成像系统可近似认为只存在绕光轴旋转运动的旋转像移。需要采用补偿机构进行补偿，即实现补偿机构与扫描机构的同步转动，使成像图像相对于探测器保持相对静止。当两机构存在同步误差时，必然导致成像图像相对于探测器发生旋转，产生旋转像移。因此，研究旋转运动对系统成像质量的影响对实现航空相机像旋补偿精度的客观评价具有非常重要的理论意义。

同样基于像点运动对成像系统进行分析，当像点只存在旋转运动，不存在径向运动时，即 $r(t)=r$。利用动态 OTF 的结论，即(13)式，可以得到旋转运动的极坐标系动态 OTF 为

$$F_{\mathrm{OT}}(f_x,f_y)=\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\{-2\mathrm{j}\pi r\{f_n+f_r[\theta(t)-\theta(t_m)]\}\}\mathrm{d}t=$$
$$\exp(-2\mathrm{j}\pi rf_n)\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\{-2\mathrm{j}\pi rf_r[\theta(t)-\theta(t_m)]\}\mathrm{d}t,\tag{14}$$

对(14)式动态 OTF 做模运算，得到旋转运动下的动态 MTF 为

$$F_{\mathrm{MT}}(f_x,f_y)=\left|\exp(-2\mathrm{j}\pi rf_n)\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\{-2\mathrm{j}\pi rf_r[\theta(t)-\theta(t_m)]\}\mathrm{d}t\right|=$$
$$\left|\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\{-2\mathrm{j}\pi rf_r[\theta(t)-\theta(t_m)]\}\mathrm{d}t\right|。\tag{15}$$

由(15)式可知，当光学系统只存在旋转运动时，动态 MTF 中只含有平均切向空间频率 f_r，没有平均法向空间频率 f_n，意味着旋转运动所对应的动态 MTF 只存在沿切向方向的变化，而在法线方向上保持

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

不变。从而可以将上述二维动态 MTF 简写为(16)式表示的一维动态 MTF，称之为旋转动态 MTF，表达式为

$$F_{\mathrm{MT}}(f_{\mathrm{r}})=\left|\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\{-2\mathrm{j}\pi r f_{\mathrm{r}}[\theta(t)-\theta(t_{\mathrm{m}})]\}\mathrm{d}t\right|。\tag{16}$$

从光学系统成像质量的角度进行分析，旋转运动与图像成像结果的直接关系是，旋转运动导致图像沿运动轨迹方向产生模糊，从而降低了系统成像质量，这与旋转运动模糊图像相关研究结论一致，即旋转运动模糊图像是一种空间可变模糊图像，离旋转中心越远，模糊越厉害；空间可变模糊是沿模糊路径分布的，同一模糊路径的模糊具有空间不变性，即位于同一圆环上的模糊效果相同[19-20]。

3　旋转运动动态 MTF 分析

在航空相机双向控制像旋补偿系统中，采用补偿电机与扫描电机的同步转动实现旋转像移的补偿[11]，两电机角度误差为 $\theta=\theta_{\mathrm{c}}-\theta_{\mathrm{s}}$，$\theta_{\mathrm{c}}$ 和 θ_{s} 分别为补偿电机和扫描电机的转动角度。当补偿电机与扫描电机的角度误差 θ 非常接近于非零恒定值时，即 $\theta(t)\approx\theta(t_{\mathrm{m}})\approx\theta_0$，旋转动态 MTF 近似为 $F_{\mathrm{MT}}(f_{\mathrm{r}})=1$。该情况虽不会对光学系统成像质量产生影响，但会导致地面目标有效信息丢失，可以通过增加扫描次数，扩大扫描范围解决。当补偿电机与扫描电机存在非恒定角度误差 $\theta(t)$ 时，由(16)式可知，光学系统成像质量将受到角度误差影响而降低，导致成像图像退化。研究旋转运动对动态 MTF 的影响，从而建立像旋补偿机构控制指标(角度误差 θ)与成像质量的直接关系，并为航空相机双向控制像旋补偿设计提供理论指导。

3.1　匀速旋转下动态 MTF 分析

补偿电机与扫描电机存在恒定的角速度误差时，意味着像点绕旋转中心在探测器上匀速旋转运动，即 $\theta(t)=\omega t+\theta_0$，$\theta(t_{\mathrm{m}})=\omega t_{\mathrm{m}}+\theta_0$，$\omega$ 为角速度，θ_0 为初始误差。旋转动态 MTF 为

$$F_{\mathrm{MT}}(f_{\mathrm{r}})=\left|\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp\{-2\mathrm{j}\pi r f_{\mathrm{r}}[\theta(t)-\theta(t_{\mathrm{m}})]\}\mathrm{d}t\right|=$$
$$\left|\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp(-2\mathrm{j}\pi r f_{\mathrm{r}}\omega t)\mathrm{d}t\right|。\tag{17}$$

由(17)式可知，旋转动态 MTF 与时间 t_{m} 无关，因而系统成像质量不受 t_{m} 影响。(17)式化简为

$$F_{\mathrm{MT}}(f_{\mathrm{r}})=\left|\frac{1}{t_{\mathrm{s}}}\int_{t_{\mathrm{s}}}^{t_{\mathrm{s}}+t_{\mathrm{e}}}\exp(-2\mathrm{j}\pi r f_{\mathrm{r}}\omega t)\mathrm{d}t\right|=\left|\frac{\sin(\pi r f_{\mathrm{r}}\omega t_{\mathrm{e}})}{\pi r f_{\mathrm{r}}\omega t_{\mathrm{e}}}\right|=|\mathrm{sinc}(\pi r f_{\mathrm{r}}\omega t_{\mathrm{e}})|。\tag{18}$$

旋转动态 MTF 仅与离旋转中心距离 r、角速度 ω、曝光时间 t_{e} 有关，如图 2(a)～(c)所示的，在 r、ω 和 t_{e} 逐渐增大过程中，MTF 随之不断下降，意味着图像退化程度增大，系统成像质量变差。

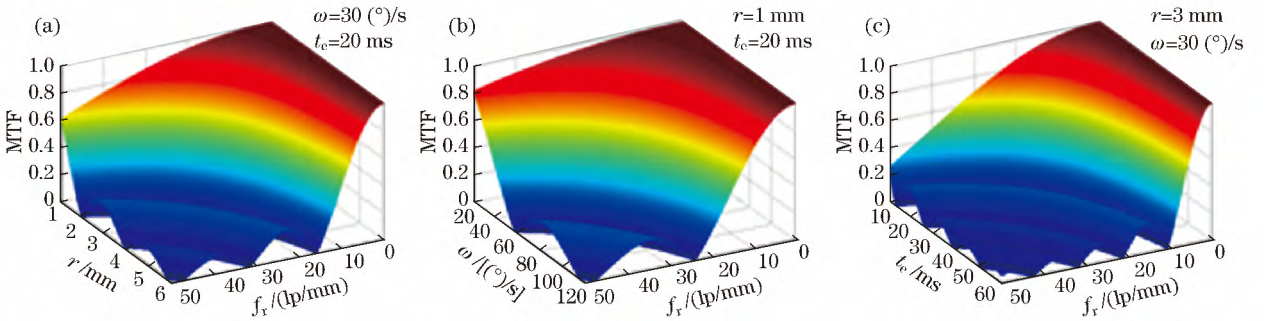

图 2　匀速旋转运动对成像影响的动态 MTF

Fig. 2　Dynamic MTF with uniform rotation motion effected on imaging

3.2　正弦旋转下动态 MTF 分析

补偿电机与扫描电机存在变化的角速度误差时，像点不再绕旋转中心匀速旋转，而是绕旋转中心在 θ 方向来回旋转运动，可视为沿 θ 方向的振动。关于振动对航空相机成像质量的影响，目前主要研究振动导致像点在探测器上同向一致运动所产生的振动像移，并对正弦振动进行大量研究，对 θ 方向振动产生旋转像移的研究还没有报道。考虑两者的相似性，借鉴正弦振动的相关研究，分析像点正弦旋转运动对光学系统成像质

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

量的影响。即补偿电机与扫描电机的补偿误差为 $\theta(t)=A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)+\theta_0$，$\theta(t_m)=A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t_m\right)+\theta_0$ 时，其中 A 为 θ 方向振动幅值，T 为振动周期，旋转动态 MTF 为

$$F_{MT}(f_r)=\left|\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\left\{-2j\pi r f_r\left[A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)-A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t_m\right)\right]\right\}dt\right|=$$
$$\left|\frac{1}{t_s}\int_{t_s}^{t_s+t_e}\exp\left[-2j\pi r f_r A\sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right)\right]dt\right|。\tag{19}$$

由(19)式可知，在正弦旋转运动下，光学系统成像质量取决于 4 个因素：离旋转中心距离 r，振动幅值 A，初始曝光时间 t_s，曝光时间 t_e。如图 3 所示，随着 r 的增大，MTF 随之逐渐下降，变化趋势与图 2 相似，但由于初始曝光时间 t_s 和曝光时间 t_e 的不同，MTF 结果存在较大差异。以周期 $T=40$ ms 的正弦旋转运动为例，曝光时间 $t_e=10$ ms 时，图 3(a)和(b)分别对应旋转运动在 θ 方向产生的最小模糊轨迹和最大模糊轨迹，对应的动态 MTF 如图 3(d)、(e)反映了最优和最差成像质量。由于初始曝光时间在正弦旋转运动中具有随机性，因而光学系统成像质量将是随机变化的过程。在初始曝光时间 t_s 相同时，如图 3(b)、(c)所示，增加曝光时间，由图 3(e)、(f)中的动态 MTF 可见，光学系统成像质量随之发生改变。此类问题基于航空相机振动像移对成像质量的影响，相关学者根据 t_e/T 的大小将正弦振动分为低频正弦振动和高频正弦振动展开了大量研究[14-18]。

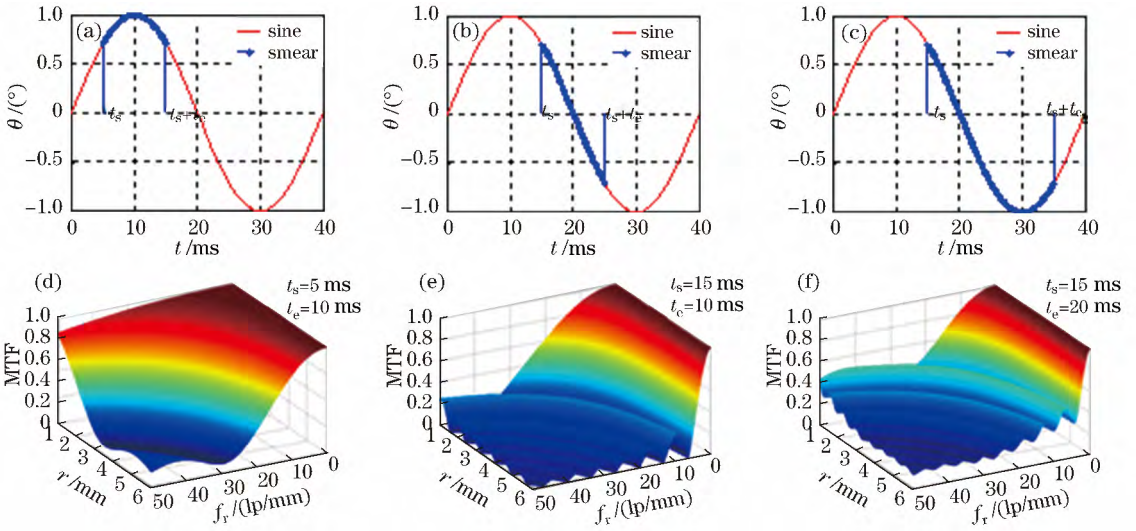

图 3　正弦旋转运动像点模糊轨迹以及对成像影响的动态 MTF

Fig. 3　Fuzzy trajectory of sinusoidal rotation motion image point and dynamic MTF effectd on imaging

根据(18)和(19)式，在离旋转中心距离 r、角速度 ω、初始曝光时间 t_s、曝光时间 t_e 确定的情况下，可以建立航空相机成像质量与像旋补偿系统其他指标(补偿电机与扫描电机角度误差的角速度 ω 或振动幅值 A)之间的直接关系。通过检测航空相机在像旋补偿系统下成像图像的动态 MTF，不仅可以评价光学系统成像质量，而且可以计算出补偿电机与扫描电机角度误差的角速度 ω 或振动幅值 A，为航空相机双向控制像旋补偿设计提供指导。

4　动态成像实验

由于不同旋转运动方式对航空相机成像的影响也不同，为简化分析，对匀速旋转运动进行动态成像实验，验证旋转动态 MTF 分析方法的正确性。实验装置原理如图 4 所示，扇形靶标经两个角位台和两个平移台安装在转台上，由无刷力矩电机提供旋转运动，靶标图案经透镜成像于探测器上。调节角位台和平移台，使转台中心、扇形靶标中心位于透镜光轴上，并结合扇形靶标成像图像进行微调，保证成像图以靶标中心旋转。成像过程中保持靶标、透镜、探测器轴向位置不变，使光学系统无径向运动。当转台静止时，扇形靶标在探测器上成清晰图像；转台转动时，扇形靶标绕旋转中心旋转成模糊图像。图 5 为实验装置实物图，无畸变

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

透镜(VM06012MP)手动调焦范围为 6～12 mm,探测器(BFLY-PGE-13E4C-CS)像元尺寸为 5.30 μm,无刷力矩电机采用稳健内环补偿器设计可实现转台旋转角度、角速度误差分别为 0.002°,0.05(°)/s,利用高分辨打印机(Epson-L300,最高分辨率为 5760×1440 dpi)制作扇形靶标,靶标直径 59 mm,转台静止时扇形靶标成像图像 8 邻域对比度为 20.3～21.6。

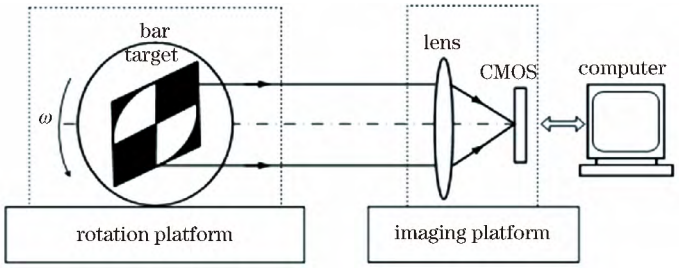

图 4　动态成像实验原理图

Fig. 4　Sketch of dynamic imaging experiment

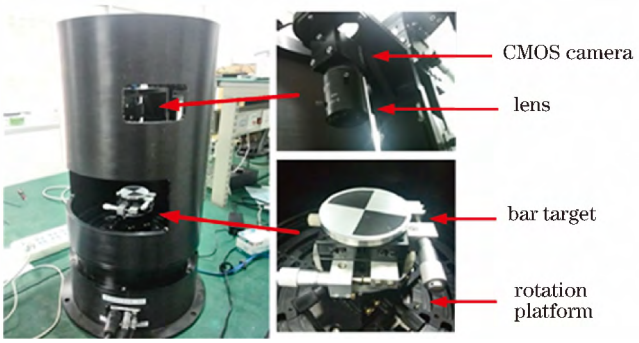

图 5　实验装置

Fig. 5　Experimental device

4.1　动态 MTF 测量方法

测量转台静止时图像的传递函数 $F_{\mathrm{MT,still}}$ 和转台旋转运动时图像的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$,根据(16)式旋转动态 MTF 的理论值 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$,可计算出转台旋转运动时图像传递函数 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$,关系式为

$$F_{\mathrm{MT,calculate}} = F_{\mathrm{MT,still}} \times F_{\mathrm{MT,rotate}}。\tag{20}$$

因此,实验中只需要对比测量传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$ 和通过(20)式计算得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 之间的拟合程度,即可验证动态 MTF 分析方法的正确性。

转台静止时图像满足空间不变性,采用倾斜刃边法[21-22]可精确测量出图像传递函数 $F_{\mathrm{MT,still}}$,测量结果如图 6 所示,但该方法却不适用于测量转台旋转时图像的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$。由旋转运动模糊图像的结论和(16)式的动态 MTF 可知,转台匀速旋转运动时图像的传递函数将随离旋转中心距离增大而减小,不再满

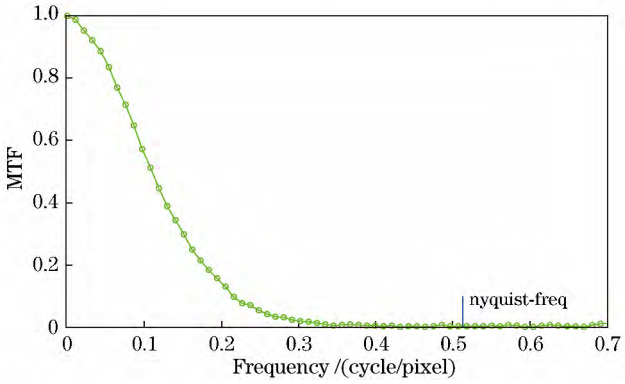

图 6　扇形靶标静止 MTF

Fig. 6　Stationary MTF of sector target

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

足空间不变性，而倾斜刃边法的使用前提条件是退化图像必须满足空间不变性，因此该方法不能测量出转台旋转运动时图像的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$。但旋转运动模糊图像同一模糊路径上的模糊是空间不变的，即相同半径下，动态 MTF 不变，因此可以采用模糊路径法测量图像的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$，即沿着图像模糊路径分别求解退化图像在不同旋转中心距离下的动态 MTF。

采用模糊路径法求解动态 MTF 步骤：

1）采用旋转运动模糊图像参数辨别的方法[23]辨识出扇形靶标成像图像旋转中心和靶标半径；

2）采用 Bresenham 算法[24]或像元创分方法[25]沿着圆形的模糊路径提取边缘扩散函数（ESF），基于扇形靶标所形成的多条边缘，利用同一模糊路径下的多组 ESF 进行拟合得到最优 ESF；

3）对 ESF 微分得到线扩散函数（LSF）；

4）对 LSF 做一维傅里叶变换得到动态 OTF，动态 OTF 取模运算便得到动态 MTF。

4.2　匀速旋转动态实验结果

为方便实验分析，CMOS 曝光时间设置为 50 ms，靶标半径辨识结果为（306±0.5）pixel。以最大中心距离 306 pixel 为例，旋转最小分辨角为 0.1879°，在 50 ms 曝光时间下，扇形靶标最小分辨角速度为 3.757(°)/s。考虑到沿模糊路径测量图像传递函数并未实现过采样，测量精度有限，分别在转台角速度 ω 为 20，50，100，150，200，300(°)/s 匀速转动下进行实验，相应的扇形靶标退化图像如图 7 所示。可见，随角速度和离旋转中心距离逐渐增大，靶标图像退化程度越明显。

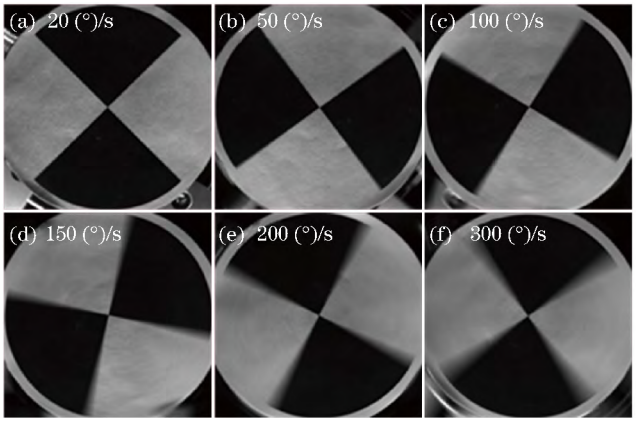

图 7　不同角速度转动时扇形靶标退化图像

Fig. 7　Degradation images of sector target with different angular velocities

采用模糊路径法沿着离旋转中心距离为 0.9 倍靶标半径的圆环提取 ESF，传递函数测试结果如图 8 所示。在空间频率到达 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$ 曲线的第一个零点附近，当转台转动角速度较小情况下，如图 8(a)～(c)所示，测量得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$ 与计算得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 两条曲线之间存在较大误差，这是由于倾斜刃边法和基于图像模糊路径测量图像传递函数方法本身容易受噪声影响所导致的。在转台转动角速度较大情况下，如图 8(e)～(f)所示，静止传递函数 $F_{\mathrm{MT,still}}$ 接近于 1，$F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 主要由 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$ 决定，测量得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$ 与计算得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 两条曲线几乎重合。考虑到像面旋转对成像质量影响的 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$ 曲线过零点后，图像属于伪分辨，在实际成像过程中没有意义。因此，零点频率之前两条几乎重合的 MTF 曲线证明了旋转动态 MTF 分析方法的正确性。

$F_{\mathrm{MT,measure}}$ 和 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 两条曲线之间的误差如图 9 所示，在零点频率之前，两条曲线的绝对误差小于 0.03。忽略零点频率附近的测试结果，MTF 绝对误差小于 0.02。以计算结果 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 为真值，$F_{\mathrm{MT,measure}}$ 与 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 的相对误差曲线如图 10 所示，在零点频率附近，图 10(a)～(c)中相对误差值大于 30%，这是因为 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$ 接近于零且测量方法易受噪声影响所导致的，因而不具有反映两 MTF 曲线拟合程度的特性。以不同旋转角速度下传递函数 $F_{\mathrm{MT,rotate}}$ 的 0.7 倍零点频率为最大空间频率，两 MTF 曲线相对误差最大值和均值如表 1 所示。相对误差是由 MTF 测量方法存在误差所导致的，包括两个方面：1）倾斜刃边法得到的传递函数 $F_{\mathrm{MT,calculate}}$ 与真值存在误差（拟合刃边边缘算法存在计算误差，倾斜刃边法本身容易受噪声影响）；2）模糊

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

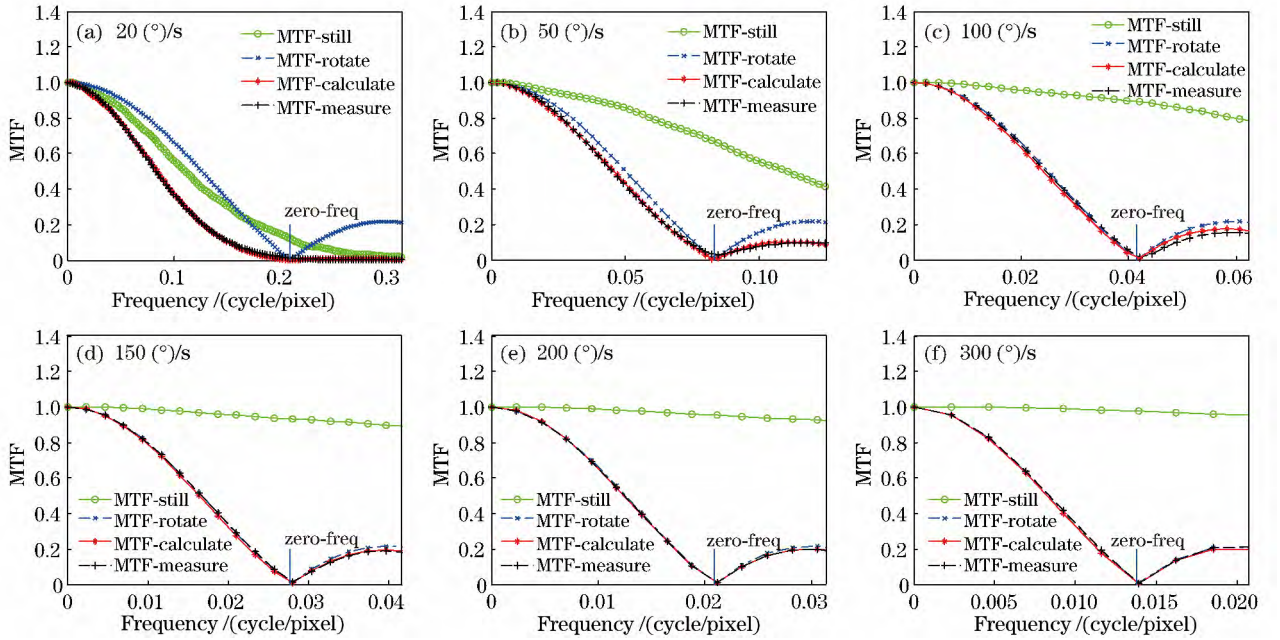

图 8　不同角速度转动时旋转像移的 MTF 曲线

Fig. 8　MTF curves of rotating image motion with different angular velocities

路径法求解传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$ 引入的计算误差(辨识扇形靶标成像图旋转中心位置存在的计算误差,利用多组 ESF 拟合出最优 ESF 过程中存在的几何误差、数值误差,ESF 微分结果 LSF 存在的噪声对 MTF 结果产生的误差,小旋转角速度下边缘信息缺失导致 MTF 产生较大误差)。由于相对误差最大值和均值分别小于 6%,2%,具有较小的误差值,说明采用模糊路径法,沿模糊路径测量图像传递函数具有较高的检测精度。

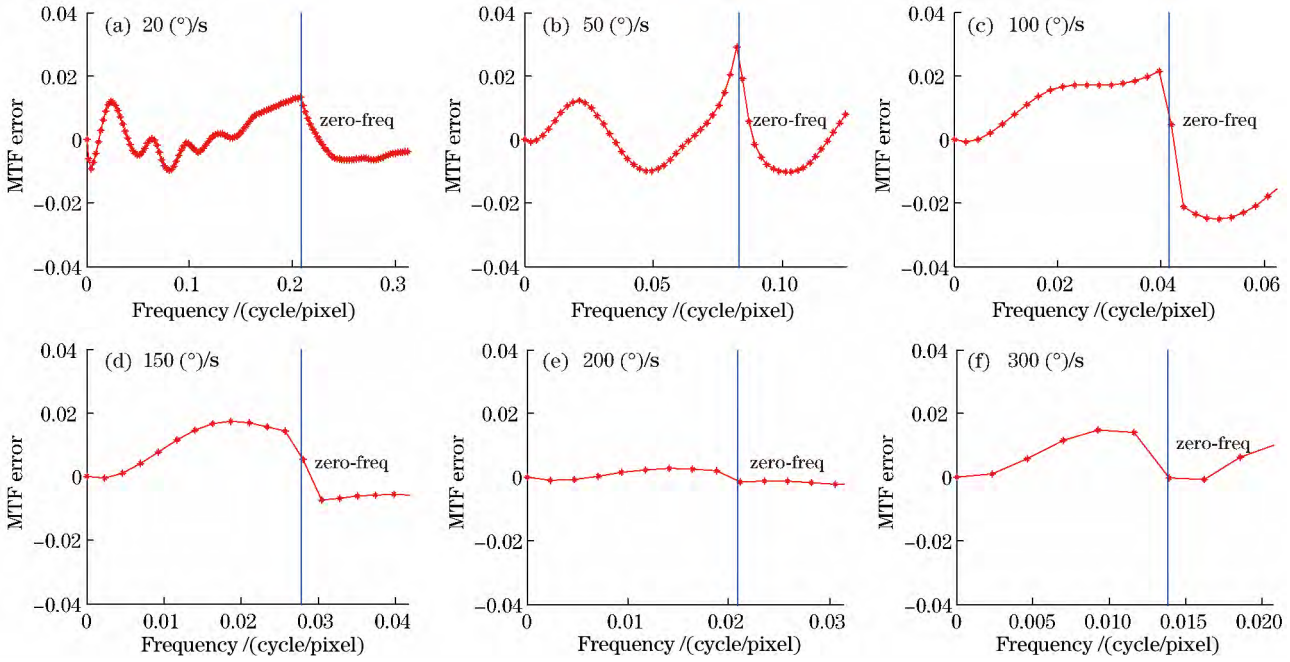

图 9　不同角速度转动时旋转像移 MTF 测量值与计算值的误差曲线

Fig. 9　Error curves of the measured and calculated MTF of rotating image motion with different angular velocities

实验结果显示,模糊路径法不仅可以评价航空相机像旋补偿性能,而且可以估计扫描电机与补偿电机的同步精度。实现步骤:1) 采用倾斜刃边法和模糊路径法分别测量出系统静止下的图像传递函数 $F_{\mathrm{MT,still}}$ 和系统成像下图像传递函数 $F_{\mathrm{MT,measure}}$;2) 根据(20)式计算出旋转动态 MTF $F_{\mathrm{MT,rotate}}$;3) 根据(18)、(19)式便可得出像旋补偿系统中补偿电机与扫描电机之间的同步精度。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

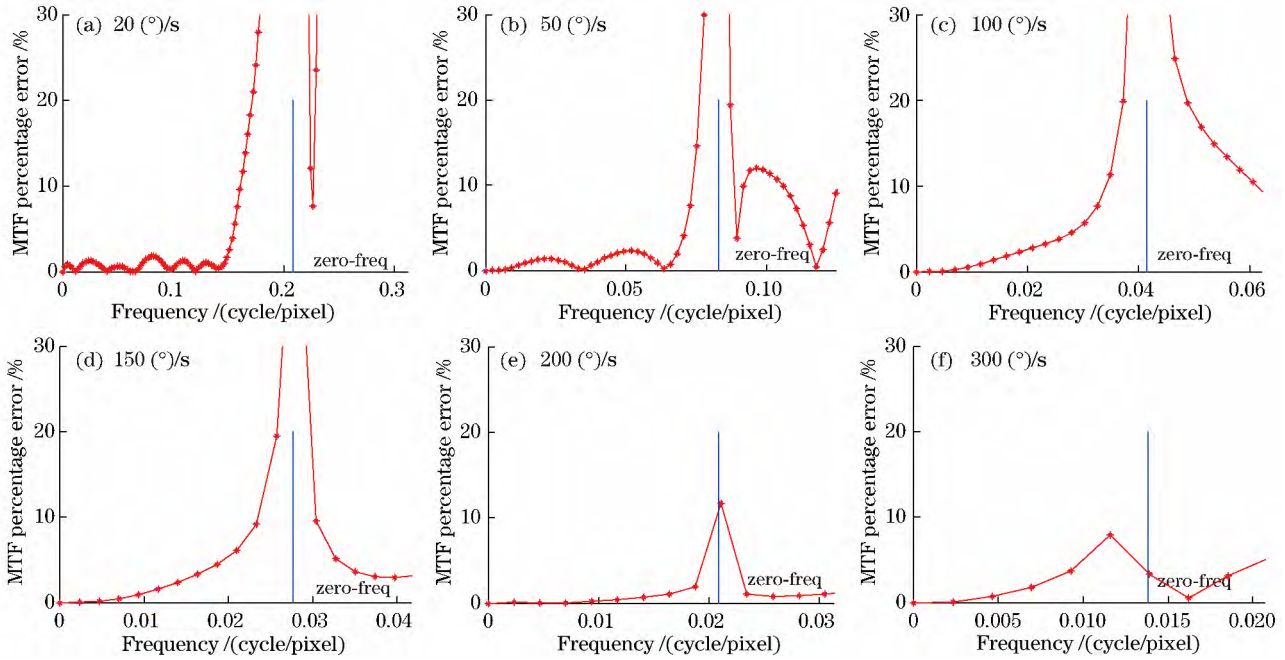

图 10　不同角速度转动时旋转像移 MTF 测量值与计算值相对误差曲线

Fig. 10　Relative error curves of the measured and calculated MTF of rotating image motion with different angular velocities

表 1　不同角速度旋转时像旋 MTF 测量值与计算值相对误差

Table 1　Relative error between the measured and calculated values of image rotation MTF with different angular velocities

Rotation speed /[(°)/s]	20	50	100	150	200	300
Max percentage error /%	1.8309	2.3086	5.0663	4.1963	0.7579	4.3671
Mean percentage error /%	0.7367	1.0801	1.7343	1.1620	0.2133	1.2300

5　结　　论

为解决航空相机采用旋转扫描反射镜成像所导致的像面旋转问题，相关研究提出了像旋补偿方法，评价系统补偿性能普遍基于人眼对比和同步控制精度，不能客观准确评价成像质量。基于极坐标体系，研究提出以法线方向和切线方向上的空间频率描述系统成像性能的动态 MTF；基于旋转运动研究分析像旋补偿误差对系统成像质量的影响，得出具有普遍意义的旋转动态 MTF 结论；并提出基于倾斜刃边法与模糊路径法相结合测量方法。通过旋转转台模拟航空相机旋转像移，采用旋转动态 MTF、倾斜刃边法和模糊路径法得到扇形靶标图像的动态 MTF 的测量值和理论计算值，并比较二者的拟合程度。实验结果证明，在小于零点频率的空间频率范围内，动态 MTF 测量曲线和计算曲线近乎重合，验证了动态 MTF 的正确性，建立了旋转运动系统成像质量与其他控制指标的直接关系；在小于 0.7 零点频率的空间频率范围内，二者的相对误差小于 6%，证明了模糊路径法的准确性。因此，像旋动态 MTF 可用于预估和评价像旋情况下成像质量的优劣，并对航空相机双向控制像旋补偿设计具有理论指导意义。

在测量图像动态 MTF 的实验中，沿图像模糊路径测量图像传递函数的方法容易受噪声影响，特别是转台以小角速度转动时，边缘扩散函数测量结果误差大，导致图像动态 MTF 测量结果与计算结果的误差增大，测量精度下降。此外，模糊路径法存在的旋转中心位置误差、提取 ESF 几何误差、插值误差、拟合数值误差等也将影响动态 MTF 测量结果。相关工作还有待进一步深入研究，提高模糊路径法的测量精度，进而为更加复杂的正弦旋转动态 MTF 的研究提供有效的测量工具和手段。

参　考　文　献

[1] Li Xinyang, Zhang Tao, Liu Zhiming, *et al*. High accuracy compensation for image surface rotation of panoramic TDICCD scanning aerial camera[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(6): 0611001.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

李昕阳，张　涛，刘志明，等. 全景式 TDICCD 摆扫航空相机像面旋转的高精度补偿[J]. 光学学报，2014，34(6)：0611001.

[2] Yoon Y，Yu G，Noh G，*et al*. Robust scanning scheme over large area for airborne EO/IR camera[C]. Proceeding of SPIE，2011，8185：81850X.

[3] Geng Wenbao，Zhai Linpei，Ding Yalin，*et al*. Characteristic analysis for image rotation of aerial camera[J]. Infrared and Laser Engineering，2008，37(6)：1053-1057.
耿文豹，翟林培，丁亚林，等. 航空相机的像面旋转特性分析[J]. 红外与激光工程，2008，37(6)：1053-1057.

[4] Zhang Jichao，Zhou Jiufei，Zhang Lei. Image spin compensation on scanning frame remote sensor[J]. Infrared and Laser Engineering，2012，41(9)：2396-2400.
张继超，周九飞，张　雷. 摆扫式航空遥感器像旋补偿方法[J]. 红外与激光工程，2012，41(9)：2396-2400.

[5] Liu Ming，Kuang Haipeng，Wu Hongsheng，*et al*. Survey on the image motion compensation technology[J]. Electronics Optics & Control，2004，11(4)：46-49.
刘　明，匡海鹏，吴宏圣，等. 像移补偿技术综述[J]. 电光与控制，2004，11(4)：46-49.

[6] Sun C，Ding Y，Wang D，*et al*. Backscanning step and stare imaging system with high frame rate and wide coverage [J]. Appl Opt，2015，54(16)：4960-4965.

[7] Kuang Haipeng，Wang Dejiang，Sun Chongshang. On-chip compensation technology for scanning image motion of integrated reconnaissance and attack aerial camera[J]. Laser & Infrared，2015，45(4)：415-421.
匡海鹏，王德江，孙崇尚. 航空相机扫描像移片上补偿技术[J]. 激光与红外，2015，45(4)：415-421.

[8] Wang Junshan，Zhai Linpei，Ding Yalin，*et al*. Characteristic analysis and correction technique about the image rotation of aerial camera[J]. Infrared and Laser Engineering，2008，37(3)：493-496.
王俊善，翟林培，丁亚林，等. 航空相机的像旋转特性分析及其补偿方法[J]. 红外与激光工程，2008，37(3)：493-496.

[9] Zheng Fei，Ding Yalin，Wu Xuefeng，*et al*. Analysis of image rotation for sweeping aerial camera with CCD area array [J]. Infrared and Laser Engineering，2009，38(5)：897-900.
郑　飞，丁亚林，吴雪峰，等. 摆扫式面阵 CCD 航空相机的像旋转分析[J]. 红外与激光工程，2009，38(5)：897-900.

[10] Tian Dapeng，Wang Dejiang. Bilateral control compesation method for image spin in scan imaging system：201310254033.4[P]. 2013-09-18.
田大鹏，王德江. 一种用于扫描成像系统消除像旋的双向控制方法：201310254033.4[P]. 2013-09-18.

[11] Tian D，Wang Y，Wang F，*et al*. Bilateral control-based compensation for rotation in imaging in scan imaging systems [J]. Optical Engineering，2015，54(12)：124104.

[12] Hadar O，Dror O，Kopeika N S. Image resolution limits resulting from mechanical vibrations. Part IV：real-time numerical calculation of optical transfer functions and experimental verification[J]. Optical Engineering，1994，33(2)：566-578.

[13] Stern A，Kopeika N S. Analytical method to calculate optical transfer functions for image motion and vibrations using moments[J]. J Opt Soc Am A，1997，14(2)：388-396.

[14] Qian Yixian，Liang Wei，Gao Xiaodong. Numerical analysis of dynamic modulation transfer function forhigh-resolution aerial camera[J]. Acta Optica Sinica，2009，29(1)：192-196.
钱义先，梁　伟，高晓东. 高分辨率航空相机动态调制传递函数数值分析[J]. 光学学报，2009，29(1)：192-196.

[15] Geng Wenbao，Zhai Linpei，Ding Yalin. Analysis of influence of vibration on transfer function in optics imaging system [J]. Optics and Precision Engineering，2009，17(2)：314-320.
耿文豹，翟林培，丁亚林. 振动对光学成像系统传递函数影响的分析[J]. 光学 精密工程，2009，17(2)：314-320.

[16] Wang Zhile，Zhuang Xuxia，Zhang Lanqing. Numerical calculation and analysis of dynamic MTF[J]. Acta Optica Sinica，2011，37(5)：590-596.
王治乐，庄绪霞，张兰庆. 动态 MTF 的数值计算与分析[J]. 光学技术，2011，37(5)：590-596.

[17] Sun Chongshang，Ding Yalin，Wang Dejiang，*et al*. Analysis and verification of influence of sinusoidal vibration on imaging of aerial camera[J]. Acta Optica Sinica，2014，34(7)：0711001.
孙崇尚，丁亚林，王德江，等. 正弦振动对航空相机成像影响的分析与验证[J]. 光学学报，2014，34(7)：0711001.

[18] Du Yanlu，Ding Yalin，Xu Yongsen，*et al*. Dynamic modulation transfer function analysis and research under sinusoidal vibration[J]. Acta Optica Sinica，2015，35(7)：0711001.
杜言鲁，丁亚林，许永森，等. 正弦振动下动态调制传递函数分析与研究[J]. 光学学报，2015，35(7)：0711001.

[19] Hong Hanyu，Zhang Tianxu. Algebraic restoration for space variant blurring image in rotation motion[J]. Infrared and

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Laser Engineering, 2003, 32(4): 394-397.

洪汉玉, 张天序. 旋转运动空间可变模糊图像的代数复原[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 394-397.

[20] Di Hui, Ding Xiaohua, Yu Qifeng. Restoration of uniform rotation motion blurred images based on Z transformation [J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(4): 89-92.

邸　慧, 丁晓华, 于起峰. 基于Z变换匀速旋转运动模糊图像的快速恢复[J]. 光电工程, 2006, 33(4): 89-92.

[21] Sun Chongshang, Wang Qi, Ding Yalin, *et al*. Modulation transfer function measurement of image motion of aerial camera based on slanted-edge method[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1212001.

孙崇尚, 王　琦, 丁亚林, 等. 基于倾斜刃边法航空相机像移的调制传递函数测量[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1212001.

[22] Li Hang, Yan Changxiang, Yu Ping, *et al*. Measurement of modulation transfer function for IR imaging system[J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24(4): 698-708.

李　航, 颜昌翔, 于　平, 等. 红外成像系统的调制传递函数测试[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(4): 698-708.

[23] Luo Yunchao. The research on the parameter identification and restoration of the rotation motion blurred image[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2015.

罗云超. 旋转运动模糊图像的参数辨别及其复原问题研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.

[24] Sun Jiaguang, Yang Changgui. Computer graphics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998: 165-176.

孙家广, 杨长贵. 计算机图形学[M]. 北京: 清华大学出版社, 1998: 165-176.

[25] Xin Y, Pawlak M, Liao S. Accurate computation of Zernike moments in polar coordinates[J]. IEEE Transactions on Image Processing, 2007, 16(2): 581-587.

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net