

文章编号:1004-4213(2011)05-0679-5

航空相机动态调制传递函数分析与研究

廖靖宇^{1,2},高晓东¹,梁伟¹

(1 中国科学院光电技术研究所,成都 610209)

(2 中国科学院研究生院,北京 100049)

摘 要:利用调制传递函数对动态成像质量做出评价,确立合理的稳定系统性能指标,是航空相机设计过程中需要解决的重要问题.基于线性光学系统的传递函数理论,针对匀速运动、加速运动和正弦运动等几种动态成像条件进行了定量分析,建立了像移量和动态成像质量之间的联系.针对低频正弦运动,提出了一种基于离散相位区间的动态调制传递函数计算方法.分析结果表明,在像模糊斑大小均为 0.5 个像元的情况下,高频正弦运动、直线运动和低频正弦运动的动态调制传递函数分别可以达到 0.85、0.9 和 0.998,此时可以获得较理想的动态图像.据此得出了高频振动对像质的破坏最严重,直线运动次之,低频正弦运动最轻的结论.根据分析,可以针对特定的动态成像条件计算相应的调制传递函数,为航空相机系统的综合像质评价和视轴稳定系统设计提供了准确的定量参考.

关键词:航空相机;影像位移;动态调制传递函数;像质评价

中图分类号:TH761.6;O439

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20114005.0679

0 引言

调制传递函数(Modulation Transfer Function, MTF)描述了光信号经过一个系统后对比度的降低,客观地反映了该系统对成像质量的影响,因此被广泛接受为成像质量的判据.通过分析建立影像位移和动态 MTF 之间的联系,对于航空相机视轴稳定系统的设计和图像恢复具有重要意义. O. Hadar 和 J. Hilker 等人对影像位移作用下的动态 MTF 进行了相关研究^[1-4],文献[5-8]对像点运动造成的像质下降进行了分析和讨论.但目前讨论大多限于像点做匀速运动和高频正弦运动的 MTF,对于低频正弦运动的 MTF,相关文献则很少涉及.因为低频正弦运动曝光点相位的随机性使其动态成像过程具有不确定性,很难进行准确评价.为解决这一问题,文献[2]和[5]中采用像移量可能出现的最大值或最小值作为像质评价的参考.文献[3]中则通过假定曝光时间中点的相位不变,获得了贝塞尔级数形式的 MTF.根据航空相机实际的工作环境,低频振动对成像的影响是主要的,因此需要用更全面和准确的方式评价低频正弦运动动态成像过程.本文通过对

以上几种像点运动状态对应的动态 MTF 做逐一分析来解决航空相机的动态像质评价问题.

1 光学系统的动态 MTF

假设曝光时间 t_e 内,物点发射到像面的能量为 1.当 t_e 内像点在像面不发生移动时,所有目标光能汇聚于一点.此时光学系统脉冲响应函数为 δ 函数,其动态 MTF 恒为 1.

如果目标在像面上运动,光能就会沿着它的运动轨迹分布,该分布对应的概率密度函数等价于系统的线扩散函数(Line Spread Function, LSF)^[5].假设 t_e 内目标的光能输入不发生改变,则像点运动轨迹上某一微元的光能与像点在该微元的停留时间成正比,即与像点在此微元的速度成反比.沿某一运动轨迹 $s(t)$ 运动的动态光学系统,其 LSF 可表示为 $s(t)$ 的函数

$$\text{LSF}(s) = \frac{1}{t_e} \frac{1}{|ds/dt|} \quad (1)$$

对于任意的影像位移形态,都可以找到与之对应的动态光学系统 LSF.利用 LSF 的傅氏变换就可以获得其光学传递函数(Optical Transfer

基金项目:中国科学院前沿课题基金(No. ck0308)资助

第一作者:廖靖宇(1984-),男,博士研究生,主要研究方向为航空相机像质评价和视轴稳定技术. Email: sing_callingher@sina.com

导师(通讯作者):高晓东(1964-),男,研究员,主要研究方向为光电探测技术. Email: xdkao@126.com

收稿日期:2010-11-12;修回日期:2011-01-21

Function, OTF), 进而求出相应的动态 MTF

$$\text{MTF}(f) = \left| \int_{s_0}^{s_1} \left[\frac{1}{t_e} \frac{\exp(-i2\pi fs)}{|ds/dt|} \right] ds \right| \quad (2)$$

式中, f 是空间频率, s_0, s_1 分别为曝光器件像点的初末位置. 可见, 动态 MTF 是关于线扩散函数 LSF 的路径积分.

由于任何形式的影像位移, 都可以用傅里叶级数展开成线性运动和若干正弦运动的叠加, 所以讨论像点轨迹做直线运动和正弦运动的动态 MTF 具有重要的意义.

2 直线运动的动态 MTF

2.1 匀速直线运动动态 MTF 分析

匀速直线运动是最基本的一种运动方式, 同时飞机在拍摄过程中前向飞行造成的像移就近似认为是匀速直线运动. 曝光时间 t_e 内, 匀速直线运动的像点轨迹可以描述为

$$x(t) = x_0 + v_0 t, \quad t \in [0, t_e] \quad (3)$$

根据式(1)和(2), 可得匀速直线运动对应的 LSF

$$\text{LSF}_{\text{UNI}} = \frac{1}{t_e} \times \frac{1}{v_0} = \frac{1}{v_0 t_e} = \frac{1}{d}, \quad x \in [0, d] \quad (4)$$

式中, v_0 是像移的速度, d 是曝光期间的像移量. 利用式(4)的傅氏变换, 可得匀速直线运动的动态 MTF

$$\text{MTF}_{\text{UNI}}(f) = \left| \frac{1}{d} \int_{x_0}^{x_0+d} [\exp(-i2\pi fx)] dx \right| = |\text{sinc}(fd)| \quad (5)$$

2.2 变速直线运动动态 MTF 分析

像点沿某一方向做直线运动时, 其速度并不一定保持恒定, 还可能做变速运动. 变速运动同时也是研究复杂像点运动的基础, 对其进行分析对于动态像质评价工作具有重要意义. 下面以匀加速运动为例进行分析. 加速度为 a 的直线运动曝光时间内的像点轨迹可以描述为

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{2} at^2, \quad t \in [0, t_e] \quad (6)$$

为便于比较, 假设曝光时间像点的轨迹长度仍为 d , 即 $d = at_e^2/2$, 将式(6)代入式(1), 可得匀加速运动的 LSF

$$\text{LSF}(x) = \frac{a}{\sqrt{2d}\sqrt{2a(x-x_0)}} = \frac{1\sqrt{a}}{2\sqrt{d}\sqrt{x-x_0}} \quad (7)$$

注意到 LSF 也是像点出现在某处的概率密度函数, 同时目标的光能总量为 1, 根据概率密度函数的定义和能量守恒, 应有 LSF 沿像点轨迹积分为 1, 即

$$\int_{x_0}^{x_0+d} \left[\frac{1\sqrt{a}}{2\sqrt{d}\sqrt{x-x_0}} \right] dx = \sqrt{a} = 1 \quad (8)$$

将式(8)代入式(7), 得匀加速直线运动的归一化 LSF

$$\text{LSF}_{\text{ACC}}(x) = \frac{1}{2\sqrt{d}} \frac{1}{\sqrt{x-x_0}} \quad (9)$$

由此得到匀加速运动对应的动态 MTF

$$\text{MTF}_{\text{ACC}}(f) = \left| \int_{x_0}^{x_0+d} \left[\frac{1}{2\sqrt{d}} \frac{1}{\sqrt{x-x_0}} \exp(-i2\pi fx) \right] dx \right| = \frac{\sqrt{2\pi}}{4} \left| \frac{\text{erf}(\sqrt{i2\pi fd})}{\sqrt{i\pi fd}} \right| \quad (10)$$

分析发现, 直线运动的动态 MTF 只和像点的运动形式和像移量 d 相关, 而与像点初始位置 x_0 无关. 另外, 虽然加速运动动态 MTF 呈现 erf 函数型, 没有简洁的显式解, 但通过数值方法仍可获得不同的像点轨迹长度对应的 MTF.

假设航空相机的像元尺寸为 $10 \mu\text{m}$, 则其奈奎斯特频率为 50 lp/mm . 根据式(5)和(10), 图 1 列出了曝光时间内像点位移量 d 分别为 5 个像元, 1 个像元和 0.5 个像元时, 匀速直线运动和加速运动的 MTF 曲线.

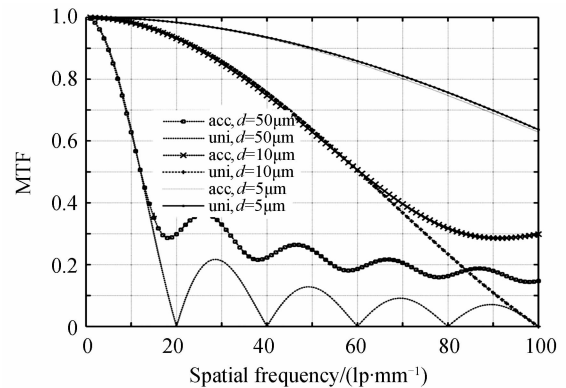


图 1 加速运动和匀速运动动态 MTF

Fig. 1 MTF of accelerated and uniform image motion

由图 1 可以得出:

1) 像移量较大时, 加速运动的 MTF 总体上要优于匀速运动, 这是因为加速运动的像点光能集中度要高于匀速运动. 像移量为 5 个像元时, 匀速 MTF 出现了若干零点, 像质已不能满足高分辨成像要求.

2) 像移量较小时, 匀速运动和变速运动的 MTF 曲线基本重合, 这是因为很短的像点运动轨迹使目标的光能保持得相当集中, 运动形态的对能量分布的影响也就不那么显著. 只要能将线性的影像位移控制在 0.5 个像元以下, MTF 在奈奎斯特频率的值将大于 0.9, 此时动态像质接近静态水平, 可满足动态成像要求.

3 正弦运动的动态 MTF

正弦运动是影像位移的另外一种主要形式, 实

实际上也是降低航空相机动态像质的主要因素.因发动机、电机等引起的振动以及飞机的低频姿态运动都可视为正弦运动.正弦运动按曝光时间 t_e 与振动周期 T_0 的比,可分为高频 ($t_e > T_0$) 和低频 ($t_e < T_0$) 两类.

3.1 高频正弦振动动态 MTF 分析

对于像点的高频正弦振动 $x(t) = D\cos(2\pi f_0 t)$, 曝光时间覆盖了至少一个振动周期,此时最大的影像位移量对应着正弦振动的峰峰值 $2D$.若认为一个曝光时间包括 N 个振动周期,即 $t_e = NT_0$,则可得高频正弦运动对应的线扩散函数^[2]

$$LSF_{HF} = \frac{1}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}}, |x| \leq D \quad (11)$$

对式(11)进行傅氏变换,得到高频正弦振动的动态 MTF

$$MTF_{HF}(f) = \left| \int_{-D}^D \left[\frac{\exp(-j2\pi fx)}{\pi \sqrt{D^2 - x^2}} \right] dx \right| = J_0(2\pi fD) \quad (12)$$

式中, J_0 表示零阶贝塞尔函数.图 2 是不同高频正弦运动峰峰值对应的 MTF 曲线.

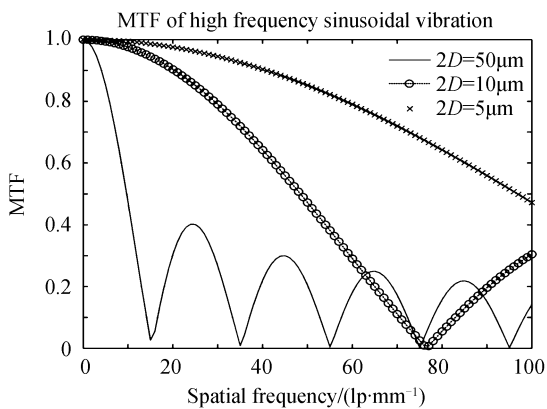


图 2 高频正弦振动的 MTF 曲线

Fig. 2 MTF of high frequency sinusoidal vibration

可见,决定高频正弦运动动态 MTF 的不是曝光时间内像点路径的长度,而是像移的峰峰值.与图 1 对比发现,像移峰峰值与线性位移像模糊大小相等时,高频正弦 MTF 要低于直线运动 MTF.例如当像移造成的模糊斑大小均为 $5 \mu\text{m}$ 即 0.5 个像元时,高频运动的 MTF 值为 0.85,低于直线运动对应的 0.9,这说明高频振动对像质的破坏程度要大于直线运动.

3.2 低频正弦运动动态 MTF 分析

低频正弦运动的动态 MTF 是本文的重点,因为:1)飞机低频角运动造成的影像位移的本身幅值足以降低分辨率,是影响成像质量的最主要原因;2)由于曝光时间小于振动周期,像点的运动状态带有随机性质,MTF 将随曝光点 t_s 对应的相位以及曝

光时间 t_e 与振动周期 T_0 的比改变而改变,因而不能用某一确定的函数进行描述^[5];3)航空相机的随机振动特性表明,100 Hz 以下的低频正弦运动占主导地位.通过对航空相机进行模拟飞行振动试验,得到随机振动响应频谱结果如图 3,图中粗实线即为随机振动响应,可见 100 Hz 以下的低频响应要明显高于高频部分.

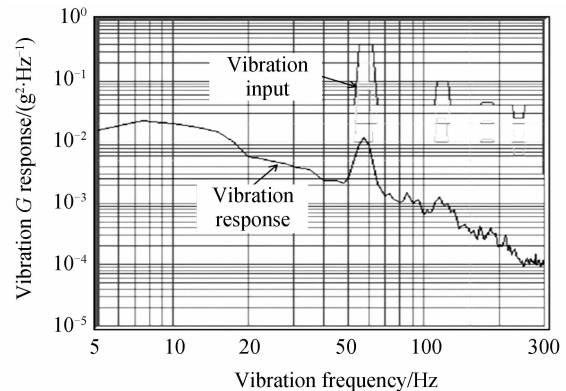


图 3 航空相机随机振动响应曲线

Fig. 3 Random vibration response of aerial camera

像点运动轨迹长度 d 随曝光点相位变化而改变,同时动态 MTF 值也随曝光点所在相位不同而波动,如图 4.

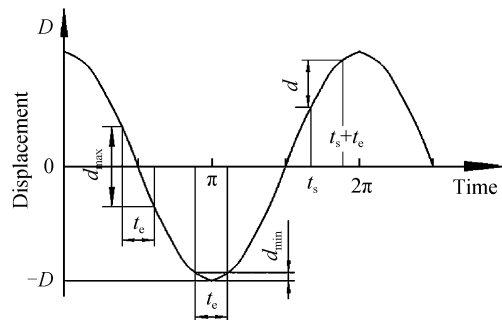


图 4 不同曝光点相位对应的影像位移

Fig. 4 Image motion of different exposure phase

为解决这一问题,D. Wulich 和 N. S. Kopeika 等人提出了用对应某一 MTF 阈值的分辨概率评价动态成像质量的方法,并进一步计算出了获得清晰图像需要的拍摄次数^[9].但如果要保证一次拍摄就能获取清晰的图像,就必须给出定量的低频运动动态 MTF 计算方法.在曝光时间内任意时刻,仍有

$$|x'(t)| = |2\pi f_0 D \sin(2\pi f_0 t)| = \omega_0 \sqrt{D^2 - x^2} \quad (13)$$

但低频正弦运动可能存在的非单向性,使得无法预知像点经过轨迹上哪些位置 2 次,哪些位置 1 次,MTF 也就无法确定.考虑到对像点位移的单调性分几种情况^[10]进行分别讨论相当繁杂,本文提出了一种新的方法来计算低频正弦运动的动态 MTF.

给定幅值的正弦运动位移可以表示为相位 φ 的函数 $x(\varphi) = D\cos \varphi$,将其代入式(13)和(1),可得

相位为自变量的低频正弦运动 LSF

$$LSF_{LS}(\varphi) = \frac{T_0}{t_e} \frac{1}{2\pi D |\sin \varphi|} \quad (14)$$

将式(14)进行傅氏变换,并作积分变量代换,可得

$$MTF_{LS}(f) = \left| \int_{\varphi_s}^{\varphi_s + \varphi_e} \left[\frac{T_0 \exp(-i2\pi f D \cos \varphi)}{t_e} \right] d\varphi \right| \quad (15)$$

式中, φ_s 为曝光点对应的相位, $\varphi_e = 2\pi t_e / T_0$ 为曝光时间覆盖的相位范围. 可见 MTF 与曝光点所在的相位有关.

要得到式(15)的解析表达相当困难,但通过将相位离散化,用数值解法可得到曝光点位于不同相位时的 MTF 曲线. 根据相位,将低频正弦运动的周期划分为 3 600 等分,则每个区间的相位宽度为 0.1° , 此时可得 MTF 的离散表达形式

$$MTF(f, i) = \left| \sum_i^{i+i_e-1} \frac{T_0 \exp[-j2\pi f D \cos(0.1^\circ i - 0.05^\circ)]}{t_e} \right| \quad (16)$$

式中, $i \in [1, 3\ 600]$, 表示曝光点位于第 i 个曝光区间, $i_e = 3\ 600 t_e / T_0$, 为曝光时间覆盖的区间个数.

又注意到曝光点位于第 i 个区间的几率与该区间内像点的速度成反比,其值为

$$P(i) = \frac{1/\sin(0.1^\circ i - 0.05^\circ)}{\sum_{n=1}^{3\ 600} 1/|\sin(0.1n - 0.05^\circ)|}, i \in [1, 3\ 600] \quad (17)$$

曝光点处于各相位区间的分布律如图 5, 显然正弦运动峰值附近的曝光几率最大. 用式(16)和

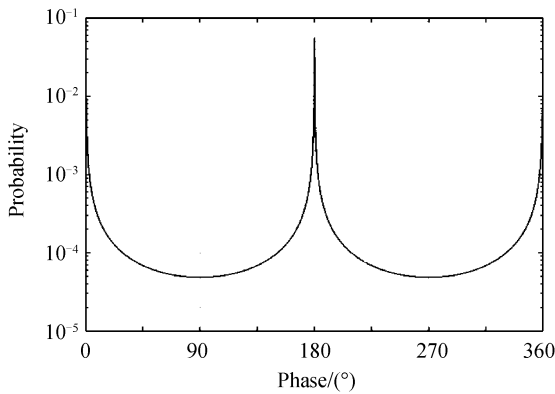


图 5 曝光点处于不同相位的分布律
Fig. 5 Histogram of exposure at different phases

(17)对不同曝光点对应的 3 600 条 MTF 曲线进行统计平均,可得低频振动的动态 MTF 期望值

$$MTF_{LF}(f) = \sum_{i=1}^{3\ 600} P(i) MTF(f, i) \quad (18)$$

根据式(18)可以计算出各种像移峰值和频率不同的低频正弦运动所对应的动态 MTF. 在此列出曝光时间内低频正弦运动峰峰值分别为 5 个像元, 1 个像元和 0.5 个像元, $t_e / T_0 = 0.1$ 和 0.5 时的 MTF 期望值曲线如图 6.

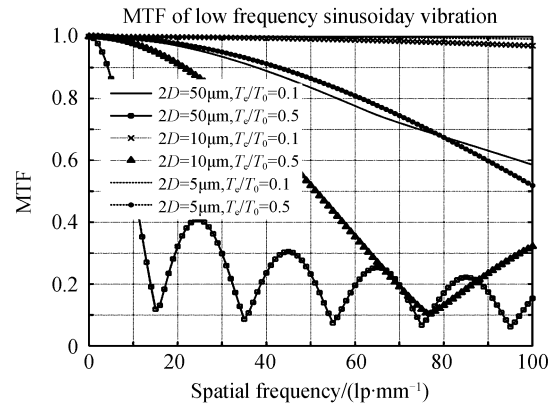


图 6 低频运动的动态 MTF
Fig. 6 MTF of low frequency vibration

根据图 6 可以发现: 1) 低频正弦动态 MTF 不仅与像移的峰峰值有关, 还与曝光时间覆盖的相位宽度相关; 2) 当 t_e / T_0 越小, 即正弦运动频率越低时, 动态 MTF 值越大, 这表明光学系统对像点低频运动的容忍能力要大于高频振动, 比如在像移量峰峰值为 0.5 个像元时, 10 Hz 的正弦振动对应的 MTF 可达到 0.998, 而 50 Hz 的正弦振动所对应的 MTF 则只能达到 0.865; 3) 结合图形可知在像点轨迹长度相同的情况下, 高频正弦运动对成像质量的破坏最大, 直线运动次之, 低频正弦运动对成像的破坏最小.

4 结论

本文基于光学系统的动态光学传递函数理论, 通过分析得到了匀速直线运动、变速运动和低频正弦运动等动态成像条件下的 MTF. 提出的基于离散相位区间的 MTF 计算方法, 解决了曝光时间内像点做低频运动这一随机成像过程的像质评价问题. 本文的方法对于评价不同像点运动状态下的航空相机动态像质都具有简单、直观、快速的优点, 为确定航空相机影像位移容限和视轴稳定准确度打下了重要的理论基础.

参考文献

[1] CRABTREE D L, BOWN M. A stabilization system for a large aperture reconnaissance camera[J]. *SPIE*, 1989, **266**: 266-271.

[2] HADAR O, DROR I, KOPEIKA N S. Numerical calculation of image motion and vibration modulation transfer functions-a new method[J]. *SPIE*, 1991, **1533**: 61-74.

[3] HILKERT J M, BOWEN M, WANG J. Specification for image stabilization system[J]. *SPIE*, 1991, **1498**: 24-38.

[4] VOLLMERHAUSEN R, FRIEDMAN M H, REYNOLDS J, et al. Modeling the blur associated with vibration and motion [C]. *SPIE*, 2007, **6543**: 0U1-0U9.

[5] QIAN Yi-xian, LIANG Wei, GAO Xiao-dong. Design of optoelectronic platform for stable image on airborne reconnaissance[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38** (8): 2108-2111.

- 钱义先,梁伟,高晓东. 航空稳像光电平台设计[J]. 光子学报, 2009, **38**(8):2108-2111.
- [6] FAN Chao, LI Ying-cai, YI Hong-wei. Influence analysis of buffeting on image quality of TDICCD camera [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(9): 1714-1717.
樊超,李英才,易宏伟. 颤振对 TDICCD 相机像质的影响分析[J]. 光子学报,2007,**36**(9):1717-1717.
- [7] ZHANG Yun. Modulation transfer function (MTF) Analysis for linear CCD reconnaissance camera system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 1993, **22**(11): 356-362.
张云. 线阵 CCD 侦查相机系统的调制传递函数分析[J]. 光子学报,1993, **22**(11):356-362.
- [8] HAO Qun, SONG Yong, WANG Yong-tian. Effect of CCD integration time on the quality of moving images[C]. *SPIE*, 2002, **4925**: 264-273.
- [9] HADAR O, DROR I, 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.
- [10] STERN A, KOPEIKA N S. Analytical method to calculate OTF for image motion using moments and its implementation in image restoration[J]. *SPIE*, 1991, **2827**: 191-202.
- [11] LV Peng, TANG Yuan-he, LIU Kai, *et al.* Study CCD image motion for remote sensing detection[C]. *SPIE*, 2007, **6279**: 5S1-5S7.

Dynamic MTF Analysis and Research for Aerial Camera

LIAO Jing-yu^{1,2}, GAO Xiao-dong¹, LIANG Wei¹

(1 *Institute of Optical and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China*)

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

Abstract: Using Modulation Transfer Function (MTF) method to evaluate image quality and establish reasonable stabilization system performance standard, is a serious problem during the design process. Based on transfer function theory of linear optical system, dynamic image process during uniform, accelerated and sinusoidal motions were studied and numerically analyzed. The relationship between image motion and dynamic image quality was established. And a new method based on discrete phase intervals was especially developed to evaluate low frequency sinusoid motion. The analysis and results indicate that with the same image blur of 0.5 pixel, MTFs of high frequency sinusoid motion, linear motion and low frequency motion can respectively reach 0.85, 0.9 and 0.998, to obtain good dynamic images. The conclusion was made that high frequency vibration damages the image quality most, linear motion less and low frequency does the least. According to analysis given, dynamic MTF can be solved for a certain image motion, to offer quantitative reference for the image evaluation of aerial camera.

Key words: Aerial camera; Image motion; Dynamic Modulation Transfer Function (MTF); Image quality evaluation