

文章编号 1004-924X(2008)12-2473-06

# 全景式航空相机的扫描角研究

周 刚<sup>1,2</sup>, 翟林培<sup>1</sup>, 王德江<sup>1</sup>, 匡海鹏<sup>1</sup>, 陈志超<sup>1</sup>

(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 研究生院, 北京 100039)

**摘要:**全景式航空相机成像时,需要合理确定扫描起始角和扫描角以便覆盖指定目标、增大覆盖区域,同时满足重叠率要求。研究了扫描角、扫描起始角和目标倾斜角之间的关系以及扫描角的计算方法。提出正好满足图像重叠率要求的扫描角的理论计算方法,由于该方法计算困难,难以用于工程。因此,又提出了一种根据目标倾斜角计算扫描起始角和扫描角的算法,并分别给出了目标倾斜角与扫描起始角和扫描角之间的关系图。结果表明:这种方法确定的扫描起始角和扫描角能使所成图像满足重叠率的要求;给定目标大多处于条带覆盖区域的中间;覆盖区域也尽可能宽。算法计算简单,适合在实际工程设计中使用。

**关键词:**全景式航空相机;扫描角;重叠率

**中图分类号:**V475.3 **文献标识码:**A

## Research of scanning angle of panoramic aerial camera

ZHOU Gang<sup>1,2</sup>, ZHAI Lin-pei<sup>1</sup>, WANG De-jiang<sup>1</sup>, KUANG Hai-peng<sup>1</sup>, CHEN Zhi-chao<sup>1</sup>

(1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China*; 2. *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China*)

**Abstract:** In order to cover designated targets, increase covering area, and meet the requirement for overlap rate, the Scanning Angle (SA) and the Scanning Start Angle (SSA) of the panoramic aerial camera should be determined in reasonable a method. In this paper, the relationships among the Target Slope Angle (TSA), SSA and SA, and the calculation of SA were studied. The theoretical calculation method of SA for the requirement for overlap rate was presented exactly. Because this method was very complex and difficult to be applied to engineering, a method for calculating SSA and SA according to TSA was proposed. The curve diagrams of the relationships among TSA, SSA and SA were presented. The results indicate that this method for calculating SSA and SA meets the requirement for overlap rate; most of the designated targets are in the middle of the coverage strip; the coverage is as wide as possible. Also, the method is very simple and easy to be applied to engineering.

**Key words:** panoramic aerial camera; scanning angle; overlap rate

收稿日期:2008-09-02;修订日期:2008-10-22.

基金项目:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所创新工程资助项目(No. ZJ99130B)

## 1 引言

全景式航空相机是沿垂直于飞行方向摆扫成像的。相机朝指定方向每摆扫一次,地面上垂直于飞行方向上的一个条带区域就成像一次,回程时不成像。航空相机扫描角越大,地面覆盖宽度就越宽,拍摄周期也越长,相邻两条图像之间就有可能出现拉缝。

虽然全景式航空相机的摆扫范围通常很大,但是为了使拍出的图像连续无缝,就要求在飞机飞行方向相邻两次成像的条带区域之间保持一定的最小重叠率,这样,相机扫描角就会受到限制。因此,在执行任务时,会给出一些感兴趣目标位置,希望目标处于图像中间。在满足重叠率指标前提下,希望相机的地面覆盖宽度尽可能宽。因此需要根据重叠率指标和目标倾斜角等信息,合理确定相机的扫描起始角和扫描角。

本文分析扫描起始角、扫描角和目标倾斜角之间的关系,给出了一种根据目标倾斜角来确定扫描起始角和扫描角参数的计算方法,并利用 Matlab 工具分别给出目标倾斜角与扫描起始角和扫描角之间的关系图。

## 2 全景式航空相机的工作方式

相机摆扫的角度为扫描角,由于受飞机窗口的限制,相机仅在窗口范围内摆扫时成像。相机成像时的摆扫角度为有效扫描角,扫描起始角为相机摆扫开始时的倾角。如图 1 所示。图中  $\theta_t$  为目标倾斜角,  $\theta_s$  为扫描起始角,  $\theta_e$  为扫描终止角,  $2\beta$  为扫描角,  $\theta_r$  为相机的有效视场角。

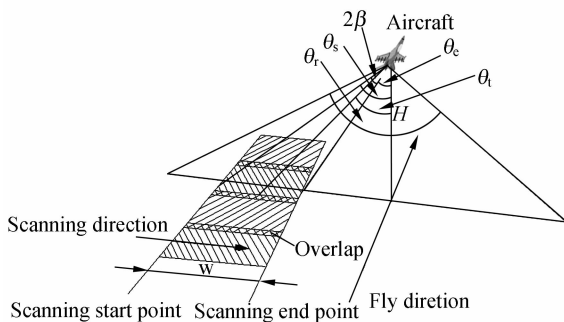


图 1 全景相机的工作方式

Fig. 1 Working of panoramic camera

目标倾斜角是指相机对准给定目标时的倾角。相机的扫描起始角和扫描角是根据给定的目标倾斜角、重叠率、速高比和相机窗口等因素来确定的。

相机工作时,由外部指定重叠率,给定目标倾斜角,相机控制器再结合当前的速高比,计算扫描的起始角和扫描角,根据这些参数,相机所拍摄的相邻两条图像应满足最小重叠率的要求。

相邻两条图像在离飞机最近的地方,重叠率最小,离飞机最远的地方,重叠率最大,如图 2 所示。

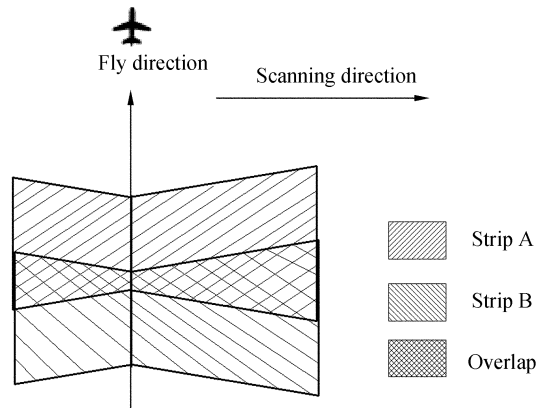


图 2 条带重叠

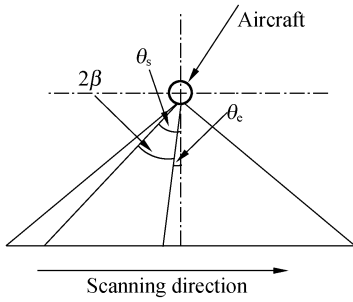
Fig. 2 Overlap of strips

## 3 理论算法

为了提高拍照效率,通常希望有效扫描角尽可能大,达到相机视场角大小。然而,为了满足重叠率的要求,扫描角有时必须小于或者大于相机视场角,因此,合理确定扫描起始角和扫描角是非常重要的。

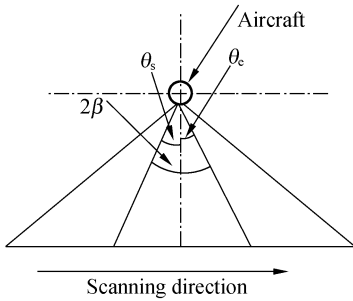
从图 2 可以看出,相邻两次成像区域的最小重叠率出现在离飞机最近的地方。为了满足重叠率,根据目标的位置,相机的扫描角有 3 种可能,如图 3 所示。图 3(a)表示目标在飞机的左下侧,图 3(b)表示目标在飞机的正下方,图 3(c)表示扫描在飞机的右下侧。

下面给出正好满足最小重叠率要求的理论计算算法,假设给定目标倾斜角为  $\theta_t$ ,根据几何关系,分别计算出上述 3 种情况下的扫描角和扫描起始角。



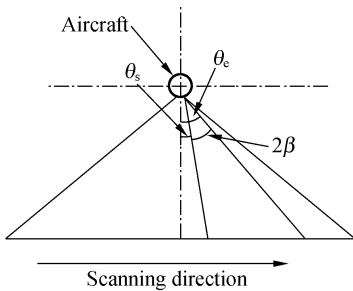
(a) 飞机的左方

(a) In the left lower of the aircraft



(b) 飞机的正下方

(b) Underneath the aircraft



(c) 飞机的右下方

(c) In the right lower of the aircraft

图 3 扫描角的三种情况

Fig. 3 Three possibilities of scanning angle

### 3.1 目标在飞机的左下侧

如图 3(a) 所示, 相机向飞机的左侧扫描时, 扫描角的计算公式为:

$$2\beta = \frac{v_s \times K \times B \times (1 - \rho)}{\eta \times \cos(\theta_e)} \quad (1)$$

其中:  $2\beta$  为相机的扫描角( $^\circ$ );

$v_s$  为相机的扫描速度( $^\circ/s$ );

$K$  为相机系数( $m^{-1}$ );

$B$  为单次摆扫宽度(m);

$\rho$  为重叠率;

$\eta$  为速高比( $s^{-1}$ );

$\theta_e$  为扫描终止角( $^\circ$ ).

通常  $v_s$  和  $B$  为常数,  $\rho$  也可假定为常数。令  $K_c$  ( $^\circ/s$ ) 为:

$$K_c = v_s \times K \times B \times (1 - \rho) \quad (2)$$

则可简化公式为:

$$2\beta = \frac{K_c}{\eta \times \cos(\theta_e)} \quad (3)$$

其中  $\theta_e$  不是已知参数, 其计算公式为

$$\theta_e = \theta_s + 2\beta \quad (4)$$

式中  $\theta_s$  为扫描起始角。

$\theta_s$  虽然也不是已知参数, 但是可根据  $\theta_t$  来确定。设  $\psi$  为某已知的角度,  $\theta_s$  可定为:

$$\theta_s = \theta_t - \psi \quad (5)$$

所以公式(3)变为:

$$2\beta = \frac{K_c}{\eta \times \cos(\theta_t - \psi + 2\beta)} \quad (6)$$

式(6)为超越方程, 超越方程是没有一般解法的, 在计算机上利用数学软件可以获取近似值, 但在工程应用中, 扫描角需要通过相机控制器来计算, 对于采用单片机, 甚至 DSP 等处理器的相机控制器而言, 很难计算出准确结果来。

### 3.2 目标在飞机的正下方

在飞机的下方扫描时, 如图 3(b) 所示。此时相机扫描角的计算公式为:

$$2\beta = \frac{K_c}{\eta} \quad (7)$$

此时扫描角只与速高比相关。

### 3.3 目标在飞机的右下侧

在飞机的右侧扫描时, 如图 3(c) 所示。此时相机扫描角的计算公式为:

$$2\beta = \frac{K_c}{\eta \times \cos(\theta_s)} \quad (8)$$

根据公式(5), 可得:

$$2\beta = \frac{K_c}{\eta \times \cos(\theta_t - \psi)} \quad (9)$$

### 3.4 分析

根据上述分析可知, 相机在左侧扫描照相时, 计算扫描起始角和扫描角最困难。在飞机下方扫描时, 计算最简单, 扫描角最小。右侧扫描照相时, 计算也不费事。

上述算法的特点是, 相机扫描起始角与目标倾斜角成固定关系, 相邻两幅图像的最小重叠率

也正好是给定值,但是当目标处于相机视场边缘附近时,扫描角虽然很大,但有效扫描角却很小。

## 4 工程中的解决办法

上述算法从理论上给出了正好满足最小重叠率要求时的扫描角的计算方法,若能计算出结果,则获得的扫描角应该最大,相机的拍照效率能得到最大发挥,但是超越方程的计算难度太大,难于在工程中应用。因为扫描起始角与目标倾斜角保持固定角度,当给定目标处于相机视场边缘附近时,根据上述算法得到的有效扫描角十分小。因此,针对这种情况,结合理论算法,本文提出了一种尽量使有效扫描角最大化且容易计算的方法。

### 4.1 计算方法

假设已知条件为:相机的窗口范围  $\theta_r$  为  $(-\alpha \sim +\alpha)$ , 速高比  $\eta$  为  $(0.01 \sim 0.1)$ , 重叠率为  $\rho$ , 相机参数为  $K_c$ 。目标倾斜角  $\theta_t$  可以是相机窗口范围中的任意点,即  $-\alpha < \theta_t \leq \alpha$ 。则可根据  $\theta_t$ , 求出  $\theta_s$  和  $2\beta$ , 并分析有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ 。

为了方便用 Matlab 工具绘出目标倾斜角与扫描角和扫描起始角的关系,假设  $\alpha = 60^\circ$ ;  $\eta_1 = 0.01$ ;  $\eta_2 = 0.05$ ;  $\eta_3 = 0.09$ ;  $\rho = 0.1$ ;  $K_c = 2.0$ , 算法步骤如下:

第一步,根据速高比  $\eta$  求出在飞机正下方扫描的最小扫描角  $2\beta_{\text{min}}$ :

$$2\beta_{\text{min}} = \frac{2.0}{\eta}. \quad (10)$$

第二步,如果最小扫描角  $2\beta_{\text{min}}$  比相机有效的视场角  $\theta_r$  大,即当  $2\beta_{\text{min}} \geq 120^\circ$  时,令相机扫描起始角  $\theta_s$  为:

$$\theta_s = -60^\circ, \quad (11)$$

则相机扫描角  $2\beta$  和有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$  分别为:

$$2\beta = 2\beta_{\text{min}}, \quad (12)$$

$$2\beta_{\text{valid}} = 120^\circ. \quad (13)$$

第三步,如果最小扫描角  $2\beta_{\text{min}}$  比视场角  $\theta_r$  小,却大于半个视场角,令扫描起始角  $\theta_s$  为:

$$\theta_s = \theta_t - \beta_{\text{min}}. \quad (14)$$

相机扫描角  $2\beta$  按公式(12)计算。如果计算结果使得扫描终止角超出视场角范围,即满足:

$$\theta_s + 2\beta > 60^\circ. \quad (15)$$

此时为了增加有效扫描角,减小扫描起始角

$\theta_s$ , 而相机扫描角  $2\beta$  不变,则最小重叠率大于给定值。令扫描起始角  $\theta_s$  为:

$$\theta_s = 60^\circ - 2\beta_{\text{min}}, \quad (16)$$

则相机的有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$  为:

$$2\beta_{\text{valid}} = 2\beta. \quad (17)$$

第四步,如果最小扫描角  $2\beta_{\text{min}}$  比半个视场角小,则根据目标倾斜角  $\theta_t$  的位置,分 5 种情况讨论。

(a)  $\theta_t > 60^\circ - \beta_{\text{min}}$  时,根据公式(16)确定扫描起始角  $\theta_s$ , 扫描角  $2\beta$  为:

$$2\beta = \frac{2\beta_{\text{min}}}{\cos(\theta_s)}, \quad (18)$$

然后按公式(17)计算有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ 。

(b) 当  $\beta_{\text{min}} < \theta_t \leq 60^\circ - \beta_{\text{min}}$  时,根据公式(14)确定扫描起始角  $\theta_s$ , 按公式(18)计算扫描角  $2\beta$ 。然后按公式(17)计算有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ 。

(c) 当  $-\beta_{\text{min}} < \theta_t \leq \beta_{\text{min}}$  时,根据公式(14)确定扫描起始角  $\theta_s$ , 按公式(12)计算扫描角  $2\beta$ 。然后按公式(17)计算有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ 。

(d) 当  $-60^\circ + \beta_{\text{min}} < \theta_t < -\beta_{\text{min}}$  时,根据扫描终止角  $\theta_e$  计算  $2\beta$ 。令  $\theta_e$  为:

$$\theta_e = \theta_t + \beta_{\text{min}}, \quad (19)$$

则  $2\beta$  为:

$$2\beta = \frac{2\beta_{\text{min}}}{\cos(\theta_e)}, \quad (20)$$

扫描起始角  $\theta_s$  为:

$$\theta_s = \theta_e - 2\beta. \quad (21)$$

然后按公式(17)计算有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ 。

(e) 当  $\theta_t < -60^\circ + \beta_{\text{min}}$  时,令  $2\beta$  为:

$$2\beta = 60^\circ + \theta_t + \beta_{\text{min}}, \quad (22)$$

扫描角  $2\beta$  按公式(20)计算。扫描起始角  $\theta_s$  按公式(21)计算。当  $\theta_s > -60^\circ$  时,按公式(17)计算有效扫描角  $2\beta_{\text{valid}}$ ; 当  $\theta_s < -60^\circ$  时,有效扫描角  $2\beta$  为:

$$2\beta_{\text{valid}} = 60^\circ + \theta_e. \quad (23)$$

当速高比为  $\eta_1$  分别为 0.01, 0.05 和 0.09 时,按上述算法可以根据目标倾斜角得出扫描角、扫描起始角和有效扫描角。其中目标倾斜角与扫描角的关系见图 4, 目标倾斜角与有效扫描角的关系见图 5, 目标倾斜角与扫描起始角的关系见图 6。

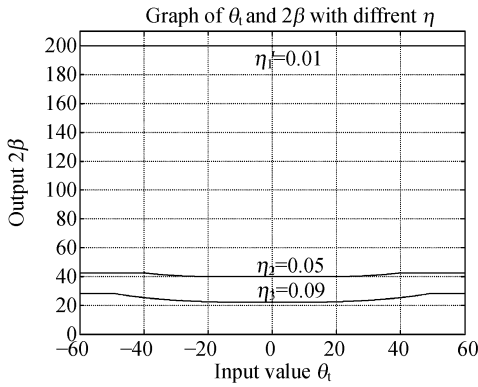


图 4 目标倾斜角与扫描角的关系图  
Fig. 4 Relationship between TSA and SA

### 4.2 分析

根据本方法的计算过程可以看出该方法计算简单,便于工程应用。通过目标倾斜角与扫描角和有效扫描角的关系图,可以看出当扫描角小于视场角时,有效扫描角与扫描角相差无几。

与理论算法相比,本方法的扫描起始角与目标倾斜角之间的角度差不固定,根据最小扫描角  $2\beta_{min}$ 、目标倾斜角  $\theta_t$  和视场角三者之间的关系,灵活确定扫描起始角,尽量使给定目标处于有效扫描角的中间,此时获得的有效扫描角大多比理论算法获得的角度大。

但是需要说明的是,本方法仍有不足之处。虽然针对扫描角和扫描起始角的计算做了改进,得到的扫描角比理论算法大,但当最小扫描角  $2\beta_{min}$  比半个视场角小且给定目标处于相机视场边缘附近时,即当  $\theta_t < -\beta_{min}$  时,扫描角  $2\beta$  没有理论算法大,相邻两幅图像的最小重叠率比给定值大,拍照效率没有得到最大提高。

### 5 结 论

由于全景式航空相机的扫描范围大,重叠率指标的提出,限制了相机的扫描角范围;同时,要使感兴趣的目标尽量处于成像条带的中间。这就需要合理确定扫描起始角和扫描角来满足重叠率指标并覆盖给定的目标,同时要避免目标出现在图像的边缘地带。

合理确定扫描起始角和扫描角是全景式航空相机控制系统的一个难点,尤为困难的是当扫描角范围不包括飞机下方,而扫描起始角远离飞机下方,且扫描终止角靠近飞机下方时,计算在此条件下正好满足最小重叠率指标的扫描角的计算公式属于超越方程,难以计算。

总之,本文给出了一种根据目标倾斜角确定扫描起始角和扫描角参数的计算方法。该方法能满足重叠率要求,且计算公式简单,易于在工程中实现。但是该方法并不是最优方案,局部地方重叠率大于指标,表明相机的覆盖宽度还能进一步增加,具体方法有待进一步研究。

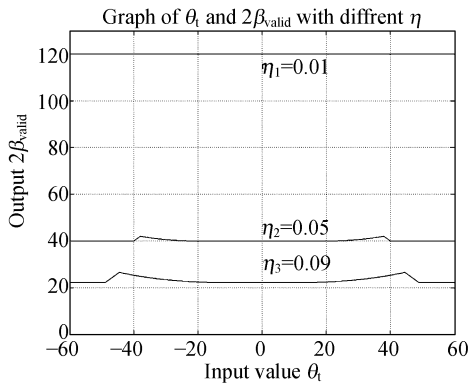


图 5 目标倾斜角与有效扫描角的关系图  
Fig. 4 Relationship between TSA and SA<sub>valid</sub>

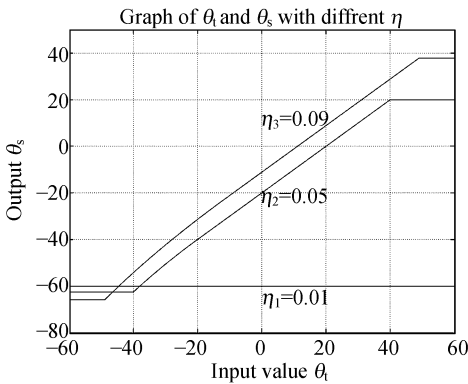


图 6 目标倾斜角与扫描起始角的关系图  
Fig. 6 Relationship between TSA and SSA

### 参考文献:

[1] 王光,王金堂. KS-146 长焦距航空照相机[M]. 北京:空军司令部情报部,1989.

- WANG G, WANG J T. *KS-146 Long Focal Length Aerial Camera* [M]. Beijing: Intelligence Department of Air Command, 1989. (in Chinese)
- [2] 耿立中, 安文化, 朱涛, 等. KA-112A 全景式航空相机[M]. 北京: 空军司令部情报部, 1988.  
GENG L ZH, AN W H, ZHU T. *The Panoramic Aerial Camera Including KA-112* [M]. Beijing: Intelligence Department of Air Command, 1988. (in Chinese)
- [3] 翟林培, 刘明, 修吉宏. 考虑飞机姿态角时倾斜航空相机像移速度计算[J]. 光学精密工程, 2006, 14(3): 490-494.  
ZHAI L P, LIU M, XIU J H. Calculation of image motion velocity considering airplane gesture angle in oblique aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(3): 490-494. (in Chinese)
- [4] 吴宏圣, 潘凝, 翟林培. TDI CCD 全景式航空相机的像移补偿误差分析[J]. 光学精密工程, 2003, 11(6): 545-549.  
WU H S, PAN N, ZHAI L P. Image motion compensation error analysis for TDI CCD panoramic aerial camera [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2003, 11(6): 545-549. (in Chinese)
- [5] 许永森, 丁亚林, 田海英, 等. 斜视状态下航空遥感器像移的计算与补偿[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1779-1783.  
XU Y S, DING Y L, TIAN H Y, *et al.*. Calculation and compensation for image motion of aerial remote sensor in oblique situation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1779-1783. (in Chinese)
- [6] 张树青, 丁亚林, 于春风. 凝视模式下的画幅相机两轴像移补偿[J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1789-1795.  
ZHANG SH Q, DING Y L, YU CH F. Attitude compensation of frame aerial camera based on spot mode [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(11): 1789-1795. (in Chinese)

**作者简介:**周刚(1976—),男,四川遂宁人,博士研究生,助理研究员,主要从事航空相机的研究和研制。E-mail: dragonsamzg@yahoo.com.cn

**导师简介:**翟林培(1945—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,主要从事航空航天相机的研究和研制。

王德江(1981—),男,黑龙江双鸭山人,工学硕士,研究实习员,主要研究方向为伺服控制系统、DSP 数字信号处理等。E-mail:wangdj04@live.cn

匡海鹏(1971—),男,吉林长春人,工学博士,副研究员,主要研究方向为航空成像技术的应用与研究。E-mail:Kanghp@163.com

陈志超(1979—),男,辽宁铁岭人,工学硕士,研究实习员,主要从事航空成像技术的应用与研究。E-mail:chenzcid@yahoo.com.cn