

# 彩色大面阵 CCD 相机的像移补偿技术

IMC Technology of the Area Scan color CCD Camera

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所)李清军 陈希惠 陈志超

LI Qing-jun Chen Xi-hui Chen Zhi-chao

**摘要:** 航空相机在拍照瞬间由于飞机飞行运动和姿态变化而产生像移,要提高照相分辨率需通过像移补偿实现;在分析像移产生原因,再结合彩色大面阵 CCD 相机的特点,确定采用三轴陀螺稳定平台结合摆扫扫描镜头的方法补偿像移,并分析计算了补偿后的像移残差,结果满足残差小于 1/3 像元的指标要求,证明本文论述的像移补偿技术正确可行。

**关键词:** 彩色面阵 CCD 相机; 像移补偿; 像移残差

中图分类号: TP273

文献标识码: A

**Abstracts:** Because that the image motion is brought out in aeroplane's continuing flight and the change of airplane's gesture angles which includes roll, pitch and yaw, it is necessary to enhance the image resolution of the camera in photographing by image motion compensation (IMC). Based on the analysis of image motion reasons, recombined with characters of area scan color CCD, a IMC method that three-axis gyro body stabilized platform in conjunction with the circumvolving pitch is used. According to the analysis, the remain image motion with IMC is less than 1/3 pixel size, and this meets the desire to image quality. So the IMC method is right and efficient.

**Key words:** area scan colour CCD camera; IMC; remain image motion

## 1 引言

航空侦察是获取地面信息的主要手段之一,彩色 CCD 相机以其丰富的图像细节信息在航空遥感领域应用前景广阔。航空相机与一般地面照相的主要区别在于相机在工作过程中,始终处于运动状态。当相机在曝光时间内成像时,被拍照的景物的影像与 CCD 探测器之间的相对运动,将这种运动简称为像移。像移使拍照分辨率降低,彩色图像变模糊,影响成像质量。为提高照相质量,需对因飞机的运动和姿态变化引起的像移进行补偿。

不同工作原理、安装方式的相机,其像移的产生大小及补偿方式亦不同。分析知道,航空相机在照相过程中产生的像移综合起来有三种:飞机向前飞行产生的像移;飞机的飞行姿态(俯仰、偏航和横滚)产生的像移;飞机的振动及气流波动引起的振动而产生的像移。

本文用分析垂直画幅式彩色大面阵 CCD 相机的像移产生原因,探讨了彩色大面阵 CCD 相机的像移补偿方法,计算了采用该补偿技术后的像移残差。证明应用该方法,能够实时地补偿在拍照时产生的像移,且满足指标要求。

## 2 像依产生原因的分析

计算像移的方法主要分为四种:正交投影分解法,动态光学理论法,光线追踪法及坐标变化法。其中前三种方法复杂不易在工程上实现,坐标变换是涉及空间位置关系转换的数学处理方法,在航空相机领域用到的坐标变换是将坐标系旋转等同相机的姿态变换,实质是空间点的坐标在不同参考坐标系的表示之间的转换关系,用地面上同一点在姿态变换前后像面不同坐标

值之间的矩阵关系求出像移量,所以该方法直观、运算简洁、简单易行。从地物到像面的变换共有三个坐标系(坐标系采用右手坐标系):

(1) 地物坐标系  $G(G_1, G_2, G_3)$

$G_2$  轴的指向与飞机航向平行,  $G_3$  轴指向天顶,  $G_1$  轴在地平面内与  $G_2$  轴垂直。

(2) 飞机坐标系  $C(C_1, C_2, C_3)$

$G$  系沿  $G_1$  轴平移  $(-m_1)$ , 沿  $G_3$  轴平移  $H$ , 沿  $G_2$  轴平移  $(-m_2)$ , 就得到相机坐标系  $C$ 。飞机的三轴姿态角为偏航角  $Y$ , 俯仰角  $\rho$  和横滚角  $\varphi$ 。  $Y$  绕  $C_3$  轴的转角;  $\rho$  绕  $C_1$  轴的转角;  $\varphi$  绕  $C_2$  轴的转角。为分析简便,这里忽略了飞机震动产生的影响。

(3) 像面坐标系  $P(P_1, P_2, P_3)$

因飞机与相机一体,飞机姿态发生变化后,相机也随着变化,所以认为飞机坐标系与相机坐标系重合。飞机坐标系沿  $C_3$  轴平移  $-f$ , 各轴同时缩小  $-f/L$  倍得像面坐标系  $P$ 。

拍照目标从地物坐标系  $G$  中的位置到像面坐标系  $P$  的转换过程见图 1。

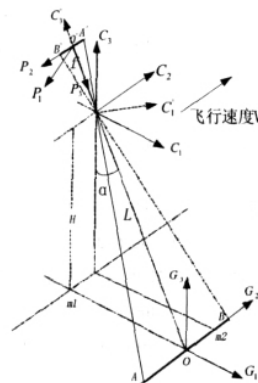


图 1 地物坐标系到像面坐标系的变换示意图

地面上一点 O 在飞机坐标系 C 上的坐标为  $O(m_1, m_2, -H)$ , 姿态变化后在坐标系  $C'$  的坐标为  $O'(0, 0, L)$ , 根据坐标变换原理, 则 O 点与  $O'$  点的关系如公式(1)

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos P & 0 & \sin P \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin P & 0 & \cos P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ H \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{解之得: } L = \frac{H}{\cos p \cdot \cos \phi} \quad (2)$$

当发生俯仰、偏流和横滚姿态变化时, 飞机速度在相机像面  $P_1, P_2, P_3$  上的分量分别为  $V_{p1}, V_{p2}, V_{p3}$ , 如公式(3)。

$$\begin{bmatrix} V_{p1} \\ V_{p2} \\ V_{p3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos p & 0 & \sin p \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin p & 0 & \cos p \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V \\ V \\ V \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} V_{p1} = V \cdot (\sin \phi \sin p \cos \theta + \cos \phi \sin \theta) \\ V_{p2} = V \cdot \cos p \cos \theta \\ V_{p3} = V \cdot (-\cos \phi \sin p \cos \theta + \sin \phi \sin \theta) \end{cases} \quad (3)$$

设相机像面  $P_1, P_2$  (飞行方向) 方向上的像移速度分别为  $\eta_{p1}, \eta_{p2}$ , 如公式(4)

$$\begin{cases} \eta_{p1} = \frac{V_{p1}}{L} = \frac{V}{H} (\sin \phi \cdot \sin p \cdot \cos \theta + \cos \phi \sin \theta) \cos p \cdot \cos \phi \\ \eta_{p2} = \frac{V_{p2}}{L} = \frac{V}{H} \cdot \cos \phi \cos^2 p \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (4)$$

则像移量

$$\begin{cases} l_{p1} = \eta_{p1} \cdot F \cdot t \\ l_{p2} = \eta_{p2} \cdot F \cdot t \end{cases} \quad (5)$$

t: 曝光时间

F: 焦距

公式(4)、(5)表明, 垂直拍照大面阵彩色 CCD 相机像移与无人机的姿态变化角度、飞行速度、高度等因素有关。

### 3 像移补偿方法

不同原因引起的像移有不同的补偿法, 各方法有各自的特点及应用范围。但所有像移补偿 (Image Motion Compensation, IMC) 系统都应满足以下几方面的要求:

1) 保证像面上各点的补偿精度即像移补偿残差都在允许范围内。

2) 补偿系统不能影响其他部分的工作。

3) 不降低成像质量。

考虑到相机垂直拍照、画幅式工作方式以及彩色面阵 CCD (FTF4052C) 没有 TDI 功能等因素, 采用加装三轴稳定平台隔离飞机姿态变化产生的像移, 利用旋转俯仰轴 (镜头安装在该轴上) 的方法补偿前向像移, 加装减震器隔离飞行器震动引起的震动像移, 其中关于震动像移部分本文不讨论。

#### 3.1 姿态像移补偿

飞机在飞行过程中受气流等因素影响姿态变化较大, 因此在相机曝光时间内, 地物的像点由于飞行姿态而改变, 为保持拍照时间内像点位置不变, 需要三轴转台旋转与姿态变化反方向的运动使像点保持位置不变。

三轴陀螺稳定平台进行像移补偿时其控制方法: 收到准备、停止拍照指令, 控制系统启动位置闭环控制, 其中航向轴、滚转轴稳定在修正偏流后的零位, 俯仰轴稳定在摆扫初始位置 (该位置需根据飞机速高比和飞机姿态综合计算); 收到拍照指令后, 控

制系统启动速度控制, 速度反馈量是安装在稳定平台三个轴系上的速率陀螺, 从而实现姿态补偿。

#### 3.2 前向像移补偿

采用摆动俯仰轴的方式补偿飞行产生的前向像移补偿。图 2 是飞行像移产生原因示意图, 地物点 A 成像在像点 a, 在曝光时间内飞机飞到 A', 成像在像点 a', 产生了像移; 为了补偿像移, 如果在拍照过程中旋转俯仰轴 (镜头), 使镜头始终对应地物点 A, 即可消除像移。其中, 俯仰轴旋转速度根据速高比进行设定, 并依据飞机俯仰方向变化速度进行调整。

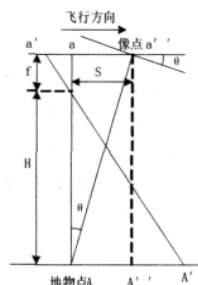


图2 前向像移产生原因示意图

#### 3.3 像移补偿控制时序

相机在拍照同步信号控制下, 首先进行位置姿态补偿, 平台稳定在到初始位置; 当收到拍照指令, 转速度控制模式, 俯仰轴根据速高比进行与飞行反方向旋转。俯仰轴边旋转边采集相机姿态数据, 当相机垂直地面时开始控制曝光并继续旋转, 直到曝光结束; 然后, 系统转位置控制模式, 如图3所示。通过以上控制模式实现前向像移补偿。

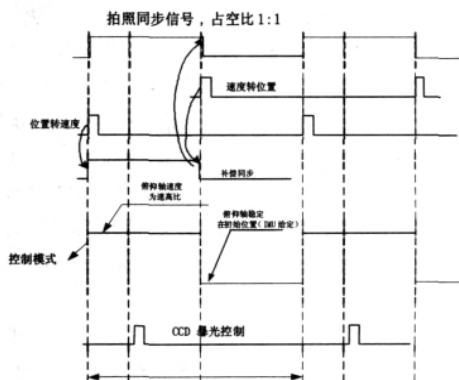


图3 像移补偿时序

### 4 像移补偿残差的分析

根据调制传递函数 MTF 与像移量的关系并结合经验, 确定像移补偿残差小于  $1/3$  像元满足成像质量要求。

#### 4.1 飞机姿态变化的像移补偿残差

垂直拍照时飞机姿态变化引起的像移经补偿后的残差主要取决于面阵 CCD 相机三轴陀螺稳定平台的控制精度、飞机速高比。

根据公式(5), 设飞机速高比  $V/H=0.017s$ , 三轴稳定平台的控制精度  $4'$ , 最大曝光时间  $100ms$ , 则平台控制误差在像面  $P_1$  方向的  $\Delta l_{p1}=0.55\mu m$ ; 在像面  $P_2$  方向的  $\Delta l_{p2}=0.05\mu m$ , 可以忽略不计。

#### 4.2 前向像移补偿残差

在光学镜头焦距和像元尺寸一定时, 前向像移补偿速度的误差由飞行速度、高度的精度以及俯仰轴速度误差决定。

(下转第 42 页)

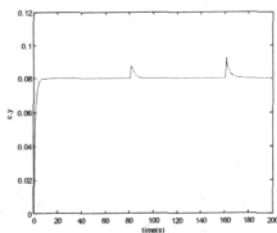
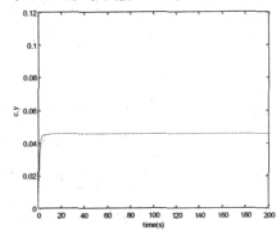


图3 系统输出响应曲线

图4 单模型G<sub>3</sub>输出响应曲线

仿真结果表明:单模型输出值与跟踪输入值误差较大,采用本文的多模型控制方法对于模型参数变化具有较强的适应性和鲁棒性。

## 4 结束语

针对传统预测控制算法中,所采用的受控对象存在严重非线性时,预测输出值与系统实际输出值会产生较大偏离。本文研究不拘泥于传统的预测控制方法,而将预测控制与多模型切换控制结合起来,所提出的算法保证了闭环系统的稳定性和输出跟踪误差的渐近收敛性,同时闭环系统的动态响应品质得到了明显的改善,计算机仿真结果表明了该算法的有效性。

### 参考文献

- [1]L.W. Zhou, and L.F. Zhou, "Multi-model predictive control based on a new clustering modeling method", Lecture Notes in Control And Information Sciences (LNCIS 344), International Conference On Intelligent Computing, 2006:559-564.
- [2]F.D. Palma, and L. Magni, "A multi-model structure for model predictive control", Annual Review in Control, 2004(28): 47-52.
- [3]Peter-Jules van Overloop, Steven Weijs, Sjoerd Dijkstra. Multiple Model Predictive Control on a drainage canal system [J]. Control Engineering Practice, 2008 (16) :531-540
- [4]Ke Hu, Jingqi Yuan. Multi-model predictive control method for nuclear steam generator water level [J]. Energy Conversion and Management, 2008 (49): 1167-1174
- [5]Shenggang Xie, Lifang Zhou, Ailiang Ma, Luwen Zhou. A new switching scheme for multi-model predictive control using clustering modeling. Fifth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, 2008:484-488
- [6]王蓬,李少远. 一类非线性系统的多模型预测控制[J]. 控制与决策, 2007,22(10):1113-1118
- [7]张泉灵,王树青. 基于 ARMAX 模型自适应预测函数控制[J]. 信息与控制, 2000,29(5):431-436
- [8]韩璞,王东风,王国玉,董泽. 多模型预测函数控制及其应用研究[J]. 控制与决策, 2003,18(3):375-381
- [9]石阳春,周云飞,黄永红,李介明. 基于控制量补偿的多模型主汽温控制系统[J]. 微计算机信息, 2006,11-1:99-101

作者简介:周磊(1977-),女(汉族),江苏盐城人,硕士研究生,南京工程学院自动化学院讲师,主要研究方向为非线性控制。

**Biography:** ZHOU Lei (1977-), female (Han nationality), born in Yancheng city in Jiangsu Province, Master, Lecturer, Automation

School, Nanjing Institute of Technology, major in. non-linear control. (211167 南京 南京工程学院自动化学院先进数控技术江苏省高校重点建设实验室) 周磊 林健

(Jiangsu Key Laboratory of Advanced Numerical Control Technology, Automation College, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China) ZHOU Lei LIN Jian

通讯地址:(211167 南京 南京工程学院自动化学院) 周磊

(收稿日期:2010.03.11)(修稿日期:2010.06.11)

### (上接第13页)

像移补偿速度误差:

$$\Delta V_c = \Delta V_{IMC} + \frac{F}{H} \cdot \Delta V + \frac{V \cdot F}{H^2} \cdot \Delta H$$

设拍照高度 3km, 飞行速度 50m/s, 焦距 90mm, 飞行速度精度 0.2m/s, 飞行高度误差 5m, 最大曝光时间 100ms, 俯仰轴转动速度误差取 1%, 彩色面阵 CCD 的像元尺寸 9μm, 则前向像移补偿残差:

$$\Delta l = \Delta V \cdot T = \left( \frac{0.09}{3000} \times 0.1 + \frac{50 \times 0.09}{3000^2} \times 5 + \frac{50}{3000} \times 0.01 \times 90 \times 1000 \right) \times 0.1 = 1.825 \mu m$$

上文分析得到如下结论:经过补偿后在像面 PP 两个方向上的像移残差都小于 1/3 像元(3μm), 满足指标要求。

## 5 结束语

航空相机像移补偿方法较多,不同的拍照方式(全景、推扫)、不同的成像介质、不同的安装方式,其像移补偿方法亦不同,补偿效果也不同,本文只针对垂直拍照的大面阵彩色 CCD 航空相机的像移补偿技术进行了探讨。根据对像移残差的分析与计算,满足像移残差小于 1/3 像元的成像质量的要求,理论上证明该方法的正确性。

本文作者创新点:首先利用坐标变换方法分析了航空相机像移产生原因,进而提出了画幅式彩色面阵 CCD 相机的像移补偿方法,并分析了补偿后像移残差。

### 参考文献

- [1]刘明,等. 航空相机的像移补偿方法及应用[J]. 光学精密工程, 2004, (4):30-34
- [2]张影,等. 基于三轴稳定平台陀螺解耦方法[J]. 微计算机信息, 2009, [13]:48-49
- [3]王德江,等. TDI-CCD 全景航空相机前向像移补偿的数字实现方法[J]. 光学精密工程, 2008, [12]:2465-2471
- [4]周刚,等. 全景式航空相机的扫描角研究[J]. 光学精密工程, 2008, [12]:2473-2478
- [5]才睿,等. 飞行器角速度测试方法的研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, [12]:1907-1908

作者简介:李清军, (1966-), 男, 辽宁北票人, 博士, 副研究员。研究方向:航空相机稳定控制技术。

**Biography:** LI Qing-jun (1966 - ), man, Liaoning province, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy Of Sciences, vice research fellow, optical engineering, aerial camera servo control technology.

(130033 吉林 长春 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所) 李清军 陈浠惠 陈志超

通讯地址:(130033 长春市东南湖大路 3888 号长春光机所航测部) 李清军

(收稿日期:2010.01.25)(修稿日期:2010.04.25)