

低空无人机航空摄影高度自动测量方法研究

李 枫, 陈育林

(青海省柴达木综合地质矿产勘查院, 青海 格尔木 816099)

摘要: 为控制低空无人机摄影高度, 获得更加清晰的地理信息图像, 需要对低空无人机摄影高度自动测量方法进行优化研究; 当前方法主要利用射影几何知识的自动化标定方法实现低空无人机航空摄影高度的自动测量; 该方法存在噪声影响严重, 且测量误差较大的问题; 为此, 提出一种基于多传感器与卡尔曼滤波相结合的低空无人机航空摄影高度自动测量方法; 该方法首先通过分析气压测量法计算各种气压因素对低空无人机航空摄影高度的影响, 然后推导出大气对流层内气压随低空无人机航空摄影高度的变化; 然后采用双 GPS 系统同时工作, 对 GPS、气压高度计和 IMU 测量获得的低空无人机航空摄影高度信号进行冗余备份; 采用基于二阶多项式的修正方法对低空无人机航空摄影传感器输出值进行补偿和修正; 根据动力学方程建立低空无人机航空摄影的动力学方程获得高度测量状态方程; 最后采用卡尔曼滤波的线性最小方差估计准则对低空无人机航空摄影高度进行均方差估计计算, 实现低空高度自动测量与校正。实验结果表明, 所提方法具有精度高、收敛性好且滤波效果理想的优点。

关键词: 低空无人机; 航空摄影高度; 自动测量方法; 多传感器; 卡尔曼滤波

Research on Automatic Measurement Method of Aerial Photogrammetry in Low Altitude UAV

Li Feng, Chen Youlin

(Qinghai Institute of Comprehensive Geological mine Prospecting, Golmud 816099, China)

Abstract: In order to control the altitude of low altitude unmanned aerial vehicle (UAV) and obtain clearer geographical information image, it is necessary to optimize the height measurement method of low altitude unmanned aerial vehicle (UAV). The current method mainly uses the automatic calibration method of projective geometry knowledge to realize automatic aerial photogrammetry height measurement of low altitude unmanned aerial vehicle (UAV). The method has the problems of serious noise influence and large measurement error. Therefore, a highly automatic aerial photogrammetry method for low altitude unmanned aerial vehicle (UAV) based on multisensor and Kalman filtering is proposed. Firstly, through the analysis of aerial photography has no effect on the height of the low pressure air pressure measurement method for calculation of various factors, and then push the troposphere with low pressure induced no change in aerial photography height; and then the double GPS system work at the same time, for the low altitude GPS, altimeter and IMU measurements obtained the UAV aerial photography altitude signal redundant backup; using two order polynomial correction method based on low altitude UAV aerial photography sensor output value compensation and correction; according to the kinetic equations of dynamics equation of low altitude UAV aerial photography obtained by measuring the height of the state equation; linear minimum variance estimation criterion Kalman filtering of low altitude UAV aerial photography were highly variance estimation and realization of low altitude automatic measurement and calibration. Experimental results show that the proposed method has the advantages of high precision, good convergence and ideal filtering effect.

Keywords: low altitude unmanned aerial vehicle; aerial photography height; automatic measurement method; multi-sensor; Kalman filter

0 引言

为了满足我国经济建设和社会的可持续发展, 需要科学、准确地获取空间地理位置信息, 构建数字化中国和数字化地球框架^[1]。而相关数据的获取方式一直是学术界研究的重点课题。航空摄影测量是地理位置信息获取的主要方式之一, 且我国现在航空摄影测量技术的发展已经成为现代测绘及与之相关行业高效作业且不可或缺的一项技术手段, 并且不断向智能化和高效化发展^[2]。通常应用在地理信息的基础测绘、国土资源勘察与管理、地质勘探等众多领域。我国现在使用的各种比例尺的地形图测绘工作都是通过航空摄影测量实现的^[3]。从摄影测量这门学科问世以来, 摄影测量技术的发展已经有了多次突

破式进展, 从目标物体的模拟摄影测量、目标物体的解析摄影测量到现如今的数字摄影测量。随着摄影测量技术的不断更新发展, 其作业方式也不断提升, 对获取的数据信息处理方式也逐渐向自动化模式发展^[4]。当时对地理信息的摄影测量整体作业流程并没有质的改变, 仍然是先对地理信息进行航空摄影, 然后在需要摄影的相关区域部署大量的地面控制点, 再进行空中三角测量的加密运算工作, 最后才能获得并制作出数字化地理地图。整个过程极其复杂繁琐, 其作业周期也比较漫长, 且需要花费较多的人力、物力和财力^[5-6]。当前我国经济发展如此之快, 这样的地理信息获取和更新效率已经无法满足正常生产需要。并且对于在摄影测量区域部署地面控制点, 经常会遇到一些人们难以到达甚至是无法到达的地区和地面控制点难以选取的地区, 例如荒漠、大片草原、戈壁等地区, 传统的摄影测量方式都无法正常进行, 从而导致了我国西部地区地理信息测绘以及更新的过于滞后, 低空无人机航空摄影测量的出现使得这些问题的解决成为可能^[7]。为了控制低空无人机摄影高

收稿日期: 2017-07-21; 修回日期: 2017-08-21。

作者简介: 李 枫(1982-), 女, 宁夏平罗人, 工程师, 主要从事矿山测量方向的研究。

度, 获得更加清晰的地理信息图像, 需要对低空无人机摄影高度自动测量方法进行研究。对低空无人机航空摄影高度进行高精度自动测量成为该领域的进一步发展亟待解决的重要问题之一。

文献 [8] 提出了一种基于 LADRC 的低空无人机航空摄影高度自动测量方法, 利用 LADRC 确定低空无人机航空摄影高度总体控制框架, 设计低扩展状态观测器观测估计低空无人机航空摄影纵向高度通道和纵向速度通道中存在的总扰动; 然后在控制中引入扰动补偿, 对低空无人机在航空摄影飞行过程中存在的大气紊流扰动或大气离散突风等风干扰信息分析其功率谱密度, 计算风扰动对低空无人机航空摄影高度的影响、风扰动对低空无人机航空摄影时域响应特性和稳定裕度的综合目标函数; 最后通过粒子群寻优算法获得低空无人机航空摄影控制器参数, 实现其高度自动测量。文献 [9] 提出了一种基于液压支架倾角的低空无人机航空摄影高度自动测量方法, 该方法在分析影响低空无人机航空摄影高度测量精度因素的基础上, 通过改变低空无人机航空摄影液压支架倾角传感器安装位置, 并运用卡尔曼滤波法消除大气噪声扰动等其他因素影响, 从而实现高度自动测量。存在测量效率较低的问题。文献 [10] 提出一种基于单目视觉的低空无人机航空摄影高度自动测量方法, 该方法主要利用了结合射影几何知识的自动化标定方法实现低空无人机航空摄影高度的自动测量。该方法存在复杂气流扰动影响严重的问题。

低空无人机航空摄影高度信息通常由气压式传感器获取, 但其测量误差会因低空无人机航空摄影高度的降低而增大, 为此提出一种基于多传感器与卡尔曼滤波的低空无人机航空摄影高度自动测量方法, 并通过实验结果验证, 所提方法具有较好的收敛性, 且测量误差较小, 很好地抑制了各种噪声影响。本文以“低空无人机航空摄影高度自动测量方法”为研究课题, 对实现无人机航空摄影高度自动测量提出了一些比较新颖的方式方法。将传统的气压测量法与卡尔曼滤波法相结合, 实现高度自动测量数据处理与滤波, 并将其应用到低空无人机实际航空摄影中去。

1 低空无人机航空摄影高度自动测量技术

低空无人机航空摄影高度的自动测量, 主要通过分析气压测量法计算各种气压因素对低空无人机航空摄影高度的影响, 然后推导出大气对流层内气压随低空无人机航空摄影高度的变化, 以及重力加速度与低空无人机航空摄影高度之间的关系; 最后计算得到低空无人机航空摄影高度为标准气压高度。

假设 a 表示参考海平面 (低空无人机的航空摄影高度为 0) 的参数值; 参考海平面的大气压强分布标准值表示为 $T_a = 288.15$ K; 参考海平面的密度分布标准值表示为 $P_a = 101\ 325$ Pa; 参考海平面的温度分布标准值表示为 $\rho_a = 1.225$ kg/m³, 在大气对流层中, 温度随着低空无人机航空摄影高度递减, 即每无人机上升 100 m 温度下降 0.65 °C, 其关系表达式如下:

$$T = 288.15 - 0.0065H_1 \quad (1)$$

其中: H_1 表示低空无人机距离参考海平面的高度。

在大气平流层中, 当无人机航空飞行高度为 11 000 ~ 20 000 m 之间时, 大气温度保持为常数, 则大气压强表示为 $T = 216.65$ K; 而无人机高度飞行在 20 000 ~ 30 000 m 之间, 无

人机高度每上升 1 000 m, 温度上升 1 °C, 其关系表达式如下:

$$T = 216.65 + 0.001(H_1 - 20\ 000) \quad (2)$$

随着大气压强和大气密度随无人机航空摄影高度的变化, 在对流层内无人机进行航空摄影时的大气压强和大气密度计算公式分别如下:

$$\frac{P}{P_a} = \left(\frac{T}{T_a}\right)^{5.25588} \quad (3)$$

$$\frac{\rho}{\rho_a} = \left(\frac{T}{T_a}\right)^{4.25588} \quad (4)$$

在大气平流层内, 当无人机航空飞行到 20 000 m 高度为止, 大气温度为常数, 则无人机在航空摄影时的大气压强和大气密度的计算表达式分别为:

$$\frac{P}{P_{11}} = \frac{e^{-(H-11\ 000)}}{6\ 341.62} \quad (5)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{11}} = \frac{e^{-(H-11\ 000)}}{6\ 341.62} \quad (6)$$

其中: $P_{11} = 22\ 631.8$ Pa; $\rho_{11} = 0.36\ 392$ kg/m³。

在 20 000 ~ 32 000 m, 无人机在航空摄影时的大气压强和大气密度的计算表达式分别为:

$$\frac{P}{P_{20}} = \left(\frac{T}{216.65}\right)^{-34.1632} \quad (7)$$

$$\frac{\rho}{\rho_{20}} = \left(\frac{T}{216.65}\right)^{-35.1632} \quad (8)$$

其中: $P_{20} = 5\ 474.86$ Pa; $\rho_{20} = 0.088\ 035$ kg/m³。

对于低空无人机来说, 由于其动力限制和功用不同的原因, 飞行高度一般在大气对流层。利用上述公式 (7)、(8), 推导出大气对流层内气压随低空无人机航空摄影高度的变化计算表达式如下:

$$P = P_a \left(\frac{1 - 0.0065H_1}{T_a}\right)^{5.5588} \quad (9)$$

根据《国际标准 ISO2533——标准大气》可知, 低空无人机在航空摄影时的大气气压高度 H_p 与大气压强 P_H 之间的关系表达式如下:

$$H_p = \frac{T_b}{\beta} \left[\left(\frac{P_H}{P_b}\right)^{\frac{-R}{g_n}} - 1 \right] + H_b \quad (10)$$

其中: T_b 表示低空无人机航空摄影时参考基准平面的温度; P_b 表示低空无人机航空摄影时参考基准平面的高度; P_H 表示低空无人机航空摄影时的测点气压; β 表示低空无人机航空摄影时本层大气温度垂直梯度, 在大气对流层内取值为 -6.5 K/km; R 表示空气专用气体常数; g_n 表示重力加速度。

如果忽略地球本身自转的影响, 可得重力加速度与低空无人机航空摄影高度之间的关系表达式为:

$$g_n = \frac{GM}{(R' + h)^2} \quad (11)$$

其中: G 表示地球引力常量; M 表示地球本身质量; R' 表示地球半径长度; h 表示低空无人机航空摄影高度。

根据上述公式 (11) 可知, 随着低空无人机航空摄影高度的不断增加, 重力加速度不断减小, 已知地球的平均半径约为 6 371.393 km, 则有 $h \ll R$, 重力加速度随着低空无人机航空摄影高度的变化可以忽略不计, 即重力加速度取正常标准值为 $g_n = 9.80\ 665$ m/s²。

当参考基准平面为标准大气气压平面时, 有:

$$T_b = 288.15 \text{ K} \quad (12)$$

$$P_b = 101\ 325\ Pa \quad (13)$$

$$H_b = 0\ m \quad (14)$$

则上述公式 (10) 可以转换为以下公式 (15), 从而计算得到低空无人机航空摄影高度为标准气压高度。

$$H_P \approx 44\ 330.76\ 923 \left[1 - \left(\frac{P_H}{P_b} \right)^{0.19\ 026} \right] \quad (15)$$

当低空无人机航空摄影高度测量的参考基准平面为某一特定平面时, 如低空无人机起飞点, T_b 、 P_b 和 H_b 为该特定平面的气温、气压和高度值。

目前, 利用气压传感器对低空无人机航空摄影高度进行自动测量时, 获得的高度为绝对高度, 并不是低空无人机航空摄影的真实飞行高度, 无法满足低空无人机在执行起飞、着陆、掠海等任务时所需的真实高度要求。

2 低空无人机航空摄影高度自动测量技术应用

2.1 低空无人机航空摄影高度的传感器测量模型

以第 1 节中计算的气压测量法为基础, 采用双 GPS 系统同时工作, 对 GPS、气压高度计和 IMU 测量获得的低空无人机航空摄影高度信号进行冗余备份。具体过程如下所述:

假设 h'_{GPS} 表示低空无人机航空摄影时的 GPS 测量高度; h' 表示低空无人机航空摄影的真实高度; ω_1 表示低空无人机航空摄影时 GPS 的测量噪声。则低空无人机航空摄影时的 GPS 测量方程如下:

$$h'_{GPS} = h' + \omega_1 \quad (16)$$

假设 $\lambda_{p'}$ 表示低空无人机航空摄影气压高度计的尺度因子偏差, 其方差表示为 σ_{λ}^2 ; $b_{p'}$ 表示低空无人机航空摄影的测量误差, 其方差表示为 σ_b^2 ; ω_2 表示低空无人机航空摄影气压高度计的测量噪声, 其方差表示为 σ_{ω}^2 。则低空无人机航空摄影气压高度计的测量方程为:

$$h'_{ap} = (1 + \lambda_{p'})h' + b_{p'} + \omega_2 \quad (17)$$

假设 $a'_{z'}$ 表示低空无人机航空摄影垂直方向的真实加速度值; ω_3 表示低空无人机航空摄影高度测量的白噪声, 其方差表示为 σ_{ω}^2 。

2.2 低空无人机航空摄影高度自动测量方法的实现

依据上述低空无人机航空摄影的传感器模型, 采用基于二阶多项式的修正方法对低空无人机航空摄影传感器输出值进行补偿和修正; 然后根据动力学方程建立低空无人机航空摄影的动力学方程获得高度测量状态方程; 最后采用卡尔曼滤波的线性最小方差估计准则对低空无人机航空摄影高度进行均方差估计计算, 实现低空高度自动测量与校正。

采用基于二阶多项式的修正方法对低空无人机航空摄影传感器输出值进行补偿和修正, 其计算表达式分别如下:

$$U_r = C_0 + C_1 U_s + C_2 U_s^2 \quad (18)$$

$$C_r = [C_0, C_1, C_2]^T \quad (19)$$

其中: U_r 表示低空无人机航空摄影高度自动测量传感器温度补偿后的电压值; U_s 表示低空无人机航空摄影高度自动测量传感器温度未经补偿的电压值; C_r 表示低空无人机航空摄影高度自动测量时的温度校正系数阵; T 表示低空无人机航空摄影高度测量的限定性阈值。采用二项式拟合法确定低空无人机航空摄影高度自动测量中的温度补偿, 其计算表达式如下:

$$C_r = C_t \circ U'_t \quad (20)$$

$$C_t = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$U'_t = [1, U_s, U_s^2]^T \quad (22)$$

其中: U_t 代表低空无人机温度传感器的输出值; C_t 代表低空无人机温度补偿系数矩阵; U'_t 代表低空无人机的温度传感器输出矩阵。

根据动力学方程建立低空无人机航空摄影的动力学方程获得高度测量状态方程, 其表达式为:

$$\begin{aligned} \dot{H} = & C_r \cos\alpha \cos\beta \sin\theta - V \sin\alpha \sin\beta \cos\theta \\ & - V \cos\beta \sin\alpha \cos\varphi \cos\theta \end{aligned} \quad (23)$$

其中: V 代表低空无人机航空摄影速度; θ 代表低空无人机航空摄影俯仰角; φ 代表低空无人机航空摄影的迎角; β 代表低空无人机航空摄影的侧滑角。

假设 X 表示低空无人机航空摄影高度自动测量的 n 维随机状态向量; Z 表示低空无人机航空摄影高度自动测量的 m' 为随机测量信号向量; $\hat{X}(Z)$ 表示使用 Z 计算获得的 X 的最小方差估计值, 则采用卡尔曼滤波的线性最小方差估计准则对低空无人机航空摄影高度进行均方差估计计算, 其计算公式如下:

$$\begin{aligned} E\{[X - \hat{X}(Z)][X - \hat{X}(Z)]^T\} & \leq \\ E\{[X - Hr(Z)][X - Hr(Z)]^T\} & \end{aligned} \quad (24)$$

式中, $[X - \hat{X}(Z)]$ 表示低空无人机航空摄影高度测量的估计误差; $E\{[X - \hat{X}(Z)][X - \hat{X}(Z)]^T\}$ 表示低空无人机航空摄影高度测量的估计均方误差矩阵; $r(Z)$ 表示利用其他估计准则用 Z 计算得到的 X 的估计值。

根据式 (24) 可以看出, 低空无人机航空摄影高度测量的最小方差的均方误差小于或者等于利用其他估计准则计算得到的均方误差, 依据卡尔曼滤波的最小方差无偏性质可得:

$$E\{X - \hat{X}(Z)\} = E\{\hat{X}\} = 0 \quad (25)$$

则低空无人机航空摄影高度测量的估计均方差值即为估计误差的方差值, 其表达式为:

$$E\{XX^T\} = \{[X - \hat{X}(Z)][X - \hat{X}(Z)]^T\} \quad (26)$$

根据上述公式 (24) 和 (26) 来校正高度实际自动测量值。

3 实验结果与分析

3.1 实验环境与实验参数设定

为了检验本文所提方法的有效性与优越性, 进行低空无人机的全数字模拟试验, 假设 $\omega_1 \sim N(0, 100)$; ϵ_1 表示低空无人机的气压高度传感器 $\epsilon_1 \sim N(0, 255)$; ϵ_2 表示低空无人机 GPS 对航空摄影高度的自动测量误差, $\epsilon_2 \sim N(0, 100)$; ϵ_3 表示低空无人机航空摄影垂直加速度计的自动测量误差, $\epsilon_3 \sim N(0, 0.01)$ 。考虑到低空无人机在航空摄影中气压高度表由于大气气压的变化较大, 自动测量的高度误差的方程也较大, 在进行模拟实验中 ϵ_1 取值 255; 低空无人机 GPS 对航空摄影高度进行自动测量时也由于人为因素存在误差较大问题, 在实验中 ϵ_2 取值 100; 由于在低空无人机进行航空摄影时垂直加速度计的实际测量误差较小, ϵ_3 在实验中取值 0.01。 b_h 表示低空无人机航空摄影高度自动测量期望为零的平稳过程, 假设 $b_h = \omega_2$, 且 $\omega_2 \sim N(0, 25)$ 。

设定低空无人机航空摄影时的真实高度计算表达式为:

$$h' = 500 + 10\sin(0.1t) \quad (27)$$

低空无人机进行航海摄影时的真实垂向速度表示为:

$$v = \cos(0.1t) \quad (28)$$

低空无人机进行航海摄影时的真实垂向加速度表示为:

$$a = -0.1\sin(0.1t) \quad (29)$$

假设实验模拟时间 $t = 200$ s。则低空无人机航空摄影高度自动测量时的信号滤波初始状态表示为:

$$P'(0) = 10 \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$\hat{X}(0) = \begin{bmatrix} -2001 \\ 1 \\ 0.01 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

低空无人机控制系统主要包括无人机航空飞行计算机、无人机航空传感器、无人机航空摄影数据传输系统、无人机航空摄影伺服控制系统、无人机航空摄影地面监控系统。无人机航空飞行计算机采用 ATMEEL 公司生产的型号为 AT91SAM7SE (512)，无人机航空飞行的辅助计算机采用 ATMEEL 公司生产的 ATmega16L，无人机航空摄影传感器主要由 IMU、COMPASS、无人机专用高度气压计、无人机航空飞行 GPS 系统、无人机航空飞行声纳计等组成，无人机航空摄影数据传输系统主要包括无线路由装置、XTend 无线模块等，无人机航空摄影伺服控制系统主要由无人机遥控器、无人机 AVR 解码模块、无人机 4017 模块和无人机 5 个舵机构成。无人机航空摄影地面监控系统主要包括无人机地面监控程序和 PC 机程序。其硬件框架和实物分别如图 1、图 2 所示。

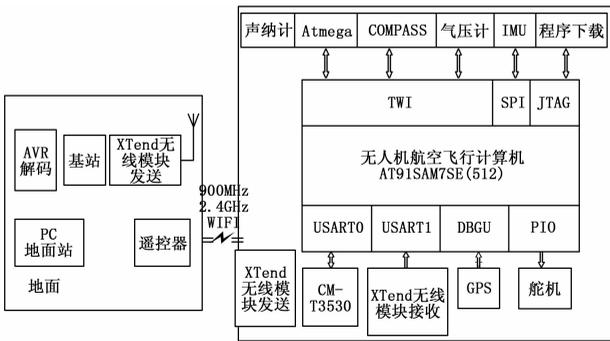


图 1 低空无人机系统架构

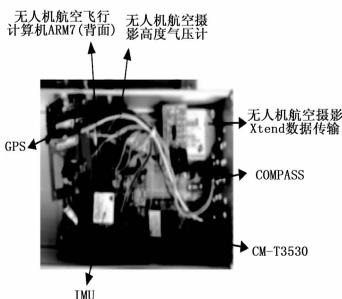


图 2 无人机航空飞行控制器实物图

3.2 实验测试与分析

实验结果如图 3~图 5 所示。通过图 3 可以看出，低空无人机航空摄影高层自动测量的滤波误差方差是收敛的，由此说明，采用本文所提方法对获取的高度信号进行卡尔曼滤波，过程是比较稳定的。根据图 4 的低空无人机航空摄影的真实高度和估计高度对比，以及图 5 低空无人机航空摄影高度估计误差曲线可知，本文所提方法对低空无人机航空摄影高度的自动测量精确度更高，可以用来测量低空无人机进行航空摄影时所处的真实高度。

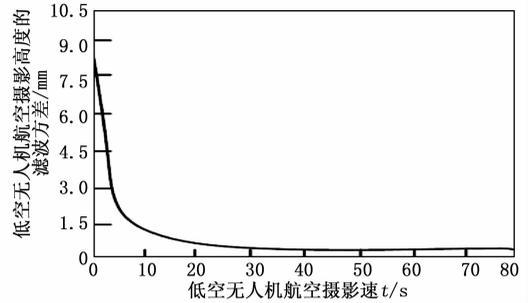


图 3 低空无人机航空摄影高度滤波误差方差曲线

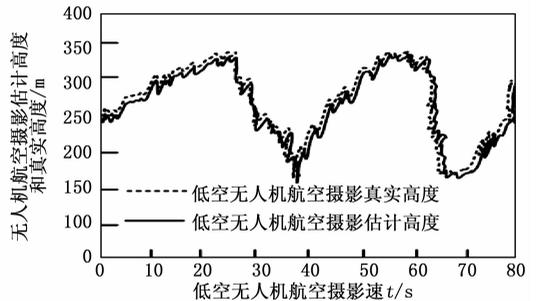


图 4 低空无人机航空摄影真实高度与估计高度对比

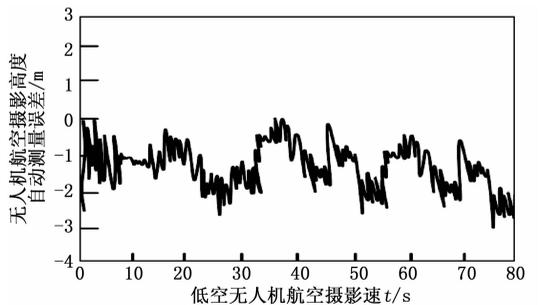


图 5 低空无人机航空摄影高度自动测量误差

由于低空无人机在航空飞行时有抖动、各种噪声的干扰，会使得拍摄获得的原始数据具有一定的波动，即毛刺和高度量测噪声。图 6 是经过卡尔曼滤波前后数据的变化曲线。

从图 6 中可以看出，经过卡尔曼滤波后，低空无人机航空摄影高度自动测量数据平缓很多，稳定性有所改善，在低空无人机实际航空摄影中，提高了飞行稳定性和精确性。

4 结束语

所提基于多传感器与卡尔曼滤波相结合的低空无人机航空摄影高度自动测量方法，由于利用多传感器组合，弥补了当前

高、体长、胸径、管径的测量数据。同时在数据测量界面，我们选用 edit 文本框显示体尺数据的运算结果，并将结果存储进 Excel 表格，随后进入线性回归分析阶段（如图 5 所示）。

根据图 5 可知，模型预测的指标为马体的胸围、管围。仿真中首先从 Excel 中提取体高、体长、胸径、管径数据，将其传递到线性回归方程中。在此之前，系统首先需要对其进行异常点的排除，并将残差图显示于界面上，以此确认数据的有效性，从而降低坐标定位引起的测量误差。即在图 5 的线性回归分析区，20 条样本值均在回归方程的有效计算范围内波动，残差分析图中均呈现绿色的正常点；如某一组测量值代入方程中呈现红色异常点，则需要剔除并重新测量。

总之，系统正常运行后，所有预测值均建立在马体尺线性回归模型的基础上，每测量一组平面指标（体长、体高、胸径、管径）即能预测两个 3D 指标（胸围、管围）。

5 结语

基于 matlab 开发平台，本系统初步实现了马体的体长、体高、胸围、管围的测量方法，对相关体测系统的开发具有借鉴意义；系统设计中应用线性相关及线性回归理论解决 2D 数据预测 3D 尺寸的问题，具备测量依据和理论创新；此外，鉴于胸径、管径与胸围、管围相关系数较高，定义胸径、管径作为线性回归方程的自变量，增强了胸围、管围预测的可靠性。值得注意的是，仿真中也存在很多不足之处。如线性相关分析和线性回归方程均取决于少量马体尺的样本数据，因此不可避免地造成体尺预测的准确度不足。较之马体尺的人工测量过程，基于机器视觉的体测系统对马的站姿要求更高，对于站姿不标准造成的测量误差，系统设计中尚无有效的修正方法。

目前，基于机器视觉的动物体尺测量技术已经全面展开。各种测量方案中，依据机器学习、线性拟合理论实现的平面测量方法具备成本经济、操作简便的优势，然而较之人工测量，计算过程中坐标定位引起的测量误差仍无法回避。

（上接第 8 页）

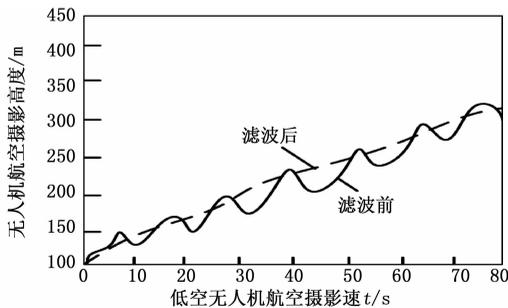


图 6 经过卡尔曼滤波前后数据的变化曲线

方法单个传感器测量误差较大的缺点，使得低空无人机航空摄影性能得到一定改善，为日后低空无人机在民用方面的普及奠定了基础。但是低空无人机航空摄影的自主飞行与控制仍然是该领域里的研究难点，而低空无人机航空摄影高度的自动测量与控制更是难点中的重点，所提方法也仍然存在一些有待提高的地方。例如在传感器性价比选择上，能够在保持传感器应用性能的基础上，选择一些精度更高的传感器。选取一些精度更理想的 GPS 高度传感器，将 GPS 测量获得的低空无人机航空摄影高度融合进去，使得测量获得的数据更加真实可靠。使得

参考文献：

- [1] 刘同海, 滕光辉, 付为森, 等. 基于机器视觉的猪体尺测点提取算法与应用 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (2): 161-168.
- [2] 江杰, 周丽娜, 李刚. 基于机器视觉的羊体尺测量 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (3): 846-850, 887.
- [3] 江杰, 岳伟, 曹孟珍. 基于机器视觉的羊体尺测量方法研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2015, (04): 322-327.
- [4] 刘波, 朱伟兴, 霍冠英. 生猪轮廓红外与光学图像的融合算法 [J]. 农业工程学报, 2013, 29 (17): 113-120.
- [5] 赵建敏, 许晓伟, 贾慧媛. 基于 Kinect 传感器的羊体尺测量系统 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34 (9): 100-103.
- [6] 赵建敏, 赵忠鑫, 李琦. 基于 Kinect 传感器的羊体尺测量方法 [J]. 江苏农业科学, 2015 (11): 495-499.
- [7] 郭浩, 张胜利, 马钦, 等. 基于点云采集设备的奶牛体尺指标测量 [J]. 农业工程学报, 2014 (05): 116-122.
- [8] Garlie T N, Obusek J P, Corner B D, et al. Comparison of body fat estimates using 3D digital laser scans, direct manual anthropometry, and DXA in men [J]. American Journal of Human Biology, 2010, 22 (5): 695-701.
- [9] Eder M, Brockmann G, Zimmermann A, et al. Evaluation of precision and accuracy assessment of different 3-D surface imaging systems for biomedical purposes [J]. Journal of Digital Imaging, 2013, 26 (2): 163-172.
- [10] 蒋福坤, 刘正春, 柴惠文. 多维随机变量的线性相关性 [J]. 数理统计与管理, 2008, 27 (1): 96-99.
- [11] 江笑婵, 万振凯, 陈利. 基于 matlab 边缘提取的几种方法的比较 [J]. 电脑知识与技术, 2006, 2: 138-141.
- [12] 魏宗舒. 概率论与数理统计教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [13] 戴金辉, 袁靖. 单因素方差分析与多元线性回归分析检验方法的比较 [J]. 统计与决策, 2016 (09): 23-26.
- [14] 虞晓胤, 杨小虎. 功能性回归测试工具分析 [J]. 计算机应用与软件, 2007, 24 (05): 175-177.

未来综合研究设计无人机的自主升降系统成为可能。

参考文献：

- [1] 贺海鹏, 阎妍, 马良, 等. 基于 IEKF 的四旋翼无人机姿态测量方法研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (4): 56-60.
- [2] 赵利芳, 荆丽丽. 大型无人机电子通讯信号抗干扰方法研究仿真 [J]. 科技通报, 2015, 31 (12): 218-219.
- [3] 曹毓, 张小虎, 冯莹. 视觉里程计中的相机姿态和高度实时测量方法 [J]. 传感技术学报, 2015, 28 (9): 1354-1360.
- [4] 武瑞娟, 左泽敏, 冀芳. 一种飞机结构变形测量的新方法 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15 (7): 265-269.
- [5] 王海洋, 江涛, 路平. 三倾转旋翼无人机直升机模式建模与控制研究 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (8): 2742-2744.
- [6] 刘盛刚, 陶天炯, 马鹤立, 等. 基于白光频域干涉的大台阶高度测量方法 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27 (9): 44-48.
- [7] 金纪东, 李思扬, 王国娟. 基于回旋磁场的智能液体高度测量仪 [J]. 电子设计工程, 2016, 24 (6): 174-177.
- [8] 齐鹏远, 王勇, 张代兵. 基于 LADRC 的无人机高精度定高控制 [J]. 北京航空航天大学学报, 2016, 42 (11): 2472-2480.
- [9] 陈冬方, 李首滨, CHENDong-fang, 等. 基于液压支架倾角的采煤高度测量方法 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (3): 788-793.
- [10] 钱鹰, 张梦. 基于单目视觉的目标物高度测量 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37 (3): 709-713.