

基于座舱结构特征的瞄准线测量方法研究

刘世良^{1,2}, 丁全心², 张劲锋²

(1. 光电控制技术重点实验室,河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所,河南 洛阳 471000)

摘要: 针对座舱内的多功能显示器和平视显示器(HUD)的结构特征,设计了一个结构简单的瞄准线测量系统,它由装在头盔上的摄像机、座舱结构特征和处理器组成。首次提出了利用可以高精度提取的 HUD 和多功能显示器的结构特征配合正交迭代算法(OI)解算相机位姿,最后转化为瞄准线的测量方法。根据座舱特点,进行了一系列的仿真实验。仿真结果显示该系统的测量精度很高,并且验证了所设计的基于座舱结构特征的瞄准线测量方法是合理的和有效的。

关键词: 瞄准线; 平视显示器; 多功能显示器; 座舱结构特征; 正交迭代算法

中图分类号: V243.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)01-0085-04

A LOS Measurement Method Based on Cockpit Structural Features

LIU Shi-liang^{1,2}, DING Quan-xin², ZHANG Jin-feng²

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: Taking the structural features of Multi-Function Displays (MFDs) and the Head-Up Display (HUD) in the cockpit into consideration, we designed a Line of Sight (LOS) measurement system with simple structure, which was composed of a camera fixed on the helmet, a processor, and cockpit structural features. A new method was proposed which used the accurate structural features of MFDs and HUD together with Orthogonal Iterative (OI) algorithm to obtain the camera pose, which was then translated into LOS. A series of simulation experiments were made according to the cockpit structural features. The simulation results showed that: 1) the system has a high measurement accuracy; and 2) the method based on cockpit structural features is rational and effective.

Key words: line of sight; head-up display; multi-function display; cockpit structural feature; orthogonal iterative algorithm

0 引言

瞄准线测量即测量飞行员的头部或头盔相对于飞机坐标系的位置,包括3个姿态角度和3个位置移动。目前广泛应用的瞄准线测量方式有基于电磁场感应原理的电磁式(电磁场法)^[1-2],基于光电扫描探测原理的光电式(光电法)^[1,3],以及基于计算机视觉测量原理的计算机视觉式(计算机视觉法)^[1,4-5]3种。其中:电磁场法是利用头部安装的电磁感应器随头部运动引起的电磁场变化来解算头部位姿,其优点是体积小、测

量范围大和易于安装等,缺点是易受电磁干扰和精度不高;光电法是由安装在头部的红外发射器发出红外信号并由外部接收器接收来解算头部位姿,其优点是原理清晰、成熟度高,缺点是装置较大、安装受限、测量范围小和易受到日照的干扰等;计算机视觉法是由安装在座舱中的摄像机拍摄头部图像来估计头部位姿,其优点是造价低、测量精度高和抗干扰性强,缺点是由于系统配置复杂和标志点安装受限导致测量受限等。

本文提出的基于座舱结构特征的瞄准线测量方法能够克服传统计算机视觉法的系统配置复杂和测量受限等缺点。该方法是由安装在头部的摄像机拍摄座舱图像,然后进行图像处理获取座舱结构特征点在图像中的二维坐标与在飞机坐标系中的三维坐标的对应关

系,最后应用位姿估计算法^[6-8]来估计摄像机姿态并转化为瞄准线。

1 问题描述

现代战机的座舱主要由多功能显示器和平视显示器(HUD)组成,因此装在头盔上的摄像机拍摄的座舱结构特征点主要是 HUD 和多功能显示器的结构特征点。并且,HUD 显示的固定内容特征点及多功能显示器的轮廓特征点都具有布局规整、简单识别和易于提取等特性。本文根据座舱结构特征的以上特点,假设并模拟座舱结构特征点布局,如图 1 所示。根据座舱中的座舱结构特征点分布情况进行理论研究和仿真实验。

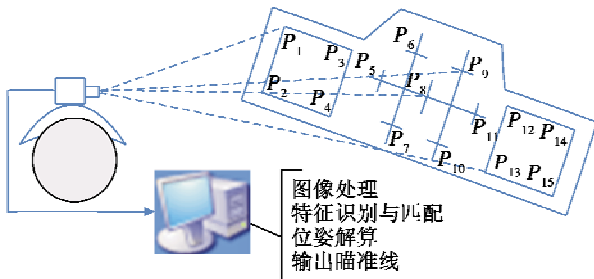


图1 基于座舱特征的瞄准线测量系统示意图

Fig. 1 LOS measurement system based on cockpit structural features

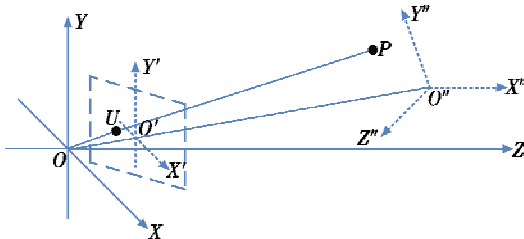


图2 摄像机透视投影图

Fig. 2 Camera perspective projection

摄像机透视投影如图 2 所示。令 $\{P_{\alpha}(x, y, z) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为座舱结构特征点 P 在飞机坐标系 $O''X''Y''Z''$ 中的三维欧式坐标点集, $\{P_{\alpha}(x, y, z) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 为座舱结构特征点 P 在相机坐标系 $OXYZ$ 中相对应的三维欧式坐标点集,座舱结构特征点 P 在图像坐标系 $O'X'Y'$ 中的二维坐标点集为 $\{U_i(u, v) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。在经过摄像机标定内参数、图像畸变恢复、特征检测和特征匹配等一系列处理后可以获取 n 组二维图像坐标 U_i 及三维坐标 P_{α} 点对。2D/3D 点对的投影成像关系为

$$U_i = (1/Z_i)K(RP_{\alpha} + T) \quad (1)$$

式中: Z_i 为座舱空间结构特征点 P_{α} 在摄像机坐标系中的深度值; K 为摄像机内参数。本文所讨论的内容就是在已建立座舱结构特征点资料库和摄像机已标定内参数的情况下,如何根据式(1),以座舱结构特征点在图像中的二维坐标与在飞机坐标系中的三维坐标的约

束关系为条件,估计旋转矩阵 R 和平移向量 T ,最后转化为头盔瞄准线。

2 瞄准线测量方法

2.1 瞄准线测量流程

基于座舱结构特征的瞄准线测量方法的系统工作流程如图 3 所示。步骤 1) 在离线情况下建立座舱结构特征点的离线数据库。数据库中的每个座舱结构特征点都具有一个身份信息类 C_i : ① 座舱结构特征点的描述子向量 V_i ; ② 座舱结构特征点的三维世界坐标 P_i 。步骤 2) 在运行阶段,利用座舱结构特征点的特征描述子 V_i 与拍摄的图像特征描述子进行匹配;步骤 3) 把匹配获得的 n 对 2D/3D 坐标点对(二维坐标点 U_i 和三维坐标点 P_i),代入相机姿态估计算法中估计摄像机位姿参数 R 和 T ;步骤 4) 由旋转矩阵解算出瞄准线姿态角。

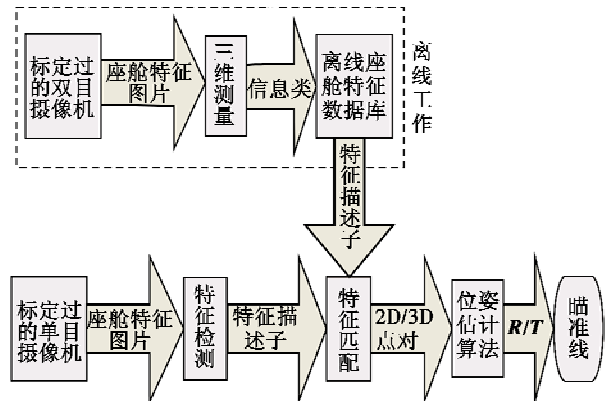


图3 系统工作流程图

Fig. 3 Work flow of the system

2.2 头部位姿估计算法

位姿估计是指摄像机内参数 K 已知,利用 n 个三维目标特征点及其二维图像坐标点对来估计摄像机的外参数——旋转矩阵 R 和平移向量 T ,也即 PnP 问题(Perspective-n-Point Problem)。PnP 问题的测量方法可以分为两大类:一类是线性算法^[6-7],经典算法有忽略旋转矩阵正交性的 DLT 算法和利用虚拟控制点的 EPnP 算法,其共同的特点是速度非常快,缺点是对噪声很敏感,精度不高;另一类是非线性迭代法^[8],文献[8]提出的全局收敛的正交迭代算法(OI)以目标空间共线性误差为目标函数,利用最小二乘原理进行迭代优化,可以得到精度非常高的数值解并且具有较强的抗噪能力,计算速度也可以达到实时性要求。本文采用位姿估计精度更高的 OI 算法,以下给出正交迭代算法的基本流程。

当把二维图像点 U_i 换算在归一化图像平面中时,其坐标点集为 $\{V_i = (u_i, v_i, 1)^T | i = 1, 2, \dots, n\}$ 。三维点对 $\{(P_{\alpha}, P_{\alpha}) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 的变换关系式为 $P_{\alpha} =$

$RP_{oi} + T$ 。设 F_i 是沿着向量 V_i 视线的投影矩阵,其表达式为 $F_i = \frac{V_i V_i^T}{V_i^T V_i}$,那么目标空间中的共线性方程可表述为 $RP_{oi} + T = F_i(RP_{oi} + T)$ 。则目标空间共线性误差向量为 $e_i(R, T) = P_{oi} - F_i P_{oi} = (I - F_i)(RP_{oi} + T)$ 。目标空间共线性误差关于 R 和 T 的误差方程为

$$E(R, T) = \min_{R, T} \sum_{i=1}^n \|e_i\|^2 = \min_{R, T} \sum_{i=1}^n \|(I - F_i)(RP_{oi} + T)\|^2 \quad (2)$$

定义

$$P'_{oi} = F_i P_{oi} = F_i(RP_{oi} + T) \quad (3)$$

1) 当旋转矩阵初始值 R^{*k} 给定时,对式(2)进行最小二乘优化求解 T^{*k} 关于 R^{*k} 的关系式为

$$T^{*k}(R^{*k}) = \frac{1}{n} \left(I - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \right)^{-1} \sum_{i=1}^n (F_i - I) R^{*k} P_{oi} \quad (4)$$

2) 当获得 T^{*k} 后,利用线性最小二乘优化法求解最优化的 $R^{*(k+1)}$ 时,一般多采用考虑了旋转矩阵 R 正交性和行列式为 1 约束的奇异值分解法(SVD)。

定义

$$\begin{cases} \hat{P}_{oi} = P_{oi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{oi} \\ \hat{P}'_{oi} = P'_{oi} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P'_{oi} \\ Q = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \hat{P}_{oi} \hat{P}'_{oi} \\ Q = UDV^T \end{cases} \quad (5)$$

式中, (U, D, V) 是对 Q 的奇异值分解。有

$$R^{*(k+1)} = VU^T \quad (6)$$

3) 重复1)和2),直到 $\sum_{i=1}^n \|P_{oi(i+1)} - P_{oi}\|^2$ 小于给定的阈值后结束,便可以获得最优化的旋转矩阵 R 和平移向量 T 。

2.3 飞行员瞄准线

由于安装在头盔上的摄像机随飞行员头部一起运动,在飞行员瞄准目标时,头部相对于座舱姿态也就是飞行员瞄准线。飞行员头部姿态的旋转运动还可以用 3 个欧拉角表示,即头部姿态角:方位角 α 、俯仰角 θ 和横滚角 β 。假设旋转矩阵 R 表示为

$$R = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{pmatrix} \quad (7)$$

则有

$$\begin{cases} \alpha = 180 \cdot \arcsin \frac{R_{32}/(R_{11}^2 + R_{21}^2)}{\pi} \\ \theta = 180 \cdot \arcsin \frac{-R_{31}}{\pi} \\ \beta = 180 \cdot \arcsin \frac{R_{21}/(R_{11}^2 + R_{21}^2)}{\pi} \end{cases} \quad (8)$$

3 仿真及分析

在模拟仿真实验中,假设座舱结构特征点 $P_{oi}(x, y, z)$ 在飞机坐标系中的分布为图 1 中的 $P_1 \sim P_{15}$ 。座舱结构特征点的仿真实验布局如图 4 所示。图中,头部旋转运动为方位角 α 、俯仰角 θ 和横滚角 β ,均在 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 范围内随机变化,平移运动在 X, Y, Z 3 个方向变化范围分别为 $[(-0.5 \sim 0.5 \text{ m}), (-0.2 \sim 0.2 \text{ m}), (0.5 \sim 1 \text{ m})]$ 。相机标定的内参数为:等效焦距 $f_u = f_v = 759.998$,中心点 $[u_0, v_0] = [319.998, 240.003]$ 。

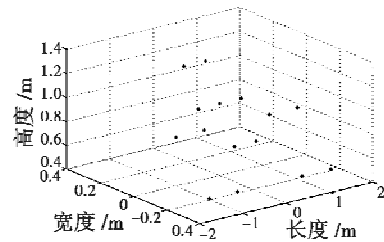


图 4 座舱结构特征点仿真布局图

Fig. 4 Layout simulation map about cockpit structural features

3.1 结构特征点测量误差对姿态角的影响

本实验的目的是观测座舱结构特征点在飞机坐标系中的测量误差对头部姿态角误差的影响。假定座舱结构特征点测量误差均值为 0,标准差以步长为 0.1 mm 在 0.1 ~ 2 mm 的变化范围内增长。随机给定旋转矩阵和平移向量,图像噪声加入均值为 0、标准差为 0.5 个像素级别的高斯噪声,每个步长进行 2000 次随机实验,结果如图 5 所示。

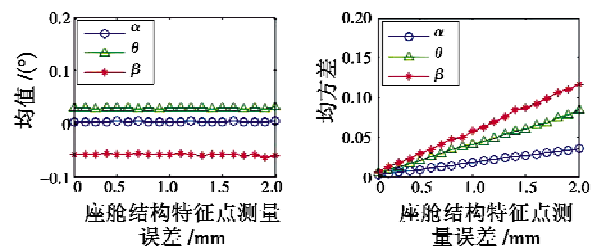


图 5 座舱结构特征点测量误差引起的姿态角误差

Fig. 5 The attitude angle error caused by cockpit structural feature measurement error

由图 5 可以看出,3 个姿态角误差的均方差均随着座舱结构特征点的测量误差增加而增大,均值基本维持在某一值上,幅度变化很小,说明 3 个姿态角误差的振荡变化随着结构特征点的测量误差增加而愈发剧烈,所以在后续的研究中应该控制结构特征点的测量误差。

3.2 图像噪声对姿态角的影响

本实验的目的是观测图像噪声对头部姿态角误差的影响。假定图像噪声均值为 0,标准差以步长为 0.1

像素在 $0.1 \sim 2$ 像素的范围内增长。随机给定旋转矩阵和平移向量,座舱结构特征点在飞机坐标系中的测量误差:均值为 0 ,标准差为 0.2 mm,每个步长进行 2000 次随机实验,结果如图 6 所示。

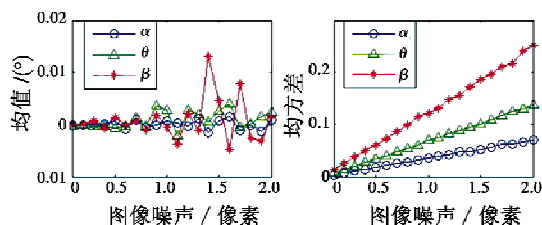


图 6 图像噪声引起的姿态角误差

Fig. 6 The attitude angle error caused by image noise

由图 6 可以看出,3 个姿态角误差的均方差都是随着图像噪声的增加而增大,均值在零值上小幅振荡,说明 3 个姿态角误差的振荡变化随着图像噪声增加而越来越剧烈,所以在后续的研究中应该提高图像中的座舱结构特征点坐标中心的提取精度。

3.3 综合影响因素的姿态角测量精度

在图像中加入均值为 0 、标准差为 0.5 像素级别的高斯噪声,座舱结构特征点的测量值中加入均值为 0 、标准差为 0.2 mm 级别的高斯噪声,3 个欧拉角 (α, θ, β) 在 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 范围内随机变化,平移向量 T 的变化范围为 $[(-0.5 \sim 0.5 \text{ m}), (-0.2 \sim 0.2 \text{ m}), (0.5 \sim 1 \text{ m})]$,并进行 5000 次随机实验,结果如图 7 所示。

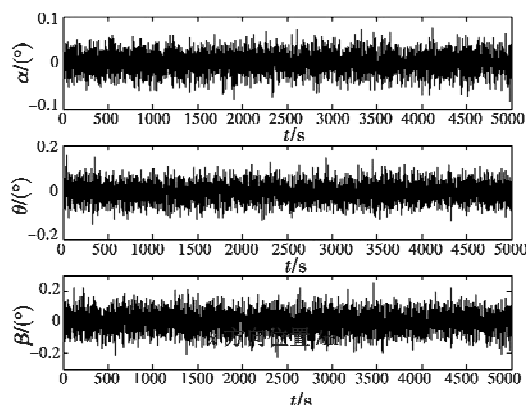


图 7 3 个姿态角误差图

Fig. 7 Error of the three attitude angles

从图 7 可以看出,在综合图像噪声、座舱结构特征点测量误差、姿态角变化、平移向量变化等因素的影响下进行仿真实验,本文方法测量的瞄准线的 3 个姿态角误差都在 0.2° 以内,精度较高,方位角 α 比俯仰角 θ 和横滚角 β 的精度高。

4 结论

本文提出的基于座舱结构特征的瞄准线测量方法,首次把座舱中的 HUD 和多功能显示器的结构特征点作

为特定特征点,利用 OI 代算法配合图像处理算法,在结合座舱布局特点和具有代表性的仿真数据的情况下,获得了较高的精度。本文对于改善传统的计算机视觉定位方法的瞄准线测量受限和系统配置复杂等问题,提供了一套合理有效的解决方案。由于是在模拟座舱环境下进行的仿真实验,所以本文方法具有很高的借鉴价值,可以为后续的瞄准线测量系统研究提供参考。

参考文献

- [1] 王永生. 机载头盔瞄准显示系统动态性能研究[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 1-5. (WANG Y S. On dynamic performance of airborne helmet-mounted display and sight system[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8): 1-5.)
- [2] 张求知, 王永年, 左明, 等. 电磁式时分制头盔显示器瞄准线算法的改进[J]. 电光与控制, 2002, 27(2): 59-62. (ZHANG Q Z, WANG Y N, ZUO M, et al. The improvement of a calculating method of LOS for electromagnetic time division HMD[J]. Electronics Optics & Control, 2002, 27(2): 59-62.)
- [3] 刘涛, 赵国荣, 李冀鑫. 头盔显示器的光电技术发展研究[J]. 光电技术应用, 2005, 20(3): 1-3. (LIU T, ZHAO G R, LI J X. Research on the development of electro-optic technology of HMD[J]. Electro-Optic Technology Application, 2005, 20(3): 1-3.)
- [4] MURPHY-CHUTORIAN E, TRIVEDI M M. Head pose estimation in computer vision; a survey [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (S0162-8828), 2009, 31(4): 607-609.
- [5] 王超, 魏生民, 周继红, 等. 视频图像技术在头部位置跟踪上的应用研究[J]. 现代制造工程, 2008(2): 111-115. (WANG C, WEI S M, ZHOU J H, et al. Research and application of video image method on helmet tracking [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(2): 111-115.)
- [6] ABDEL-AZIZ Y I, KARARA H M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry [C]//Proceedings of the ASP/UI Symposium on Close Range Photogrammetry, University of Illinois at Urbana Champaign, Urbana, Illinois, January, 1971: 1-18.
- [7] LEPEIT V, MORENO-NOGUER F, FUA P. EPnP: an accurate $O(n)$ solution to the PnP problem [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(2): 155-166.
- [8] LU C P, HAGER G D, MJOLESNESS E. Fast and globally convergent pose estimation from video images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(6): 610-622.