

文章编号 1004-924X(2015)08-2134-09

飞行器仿真测试中合作目标投影光斑的跟踪识别

霍 炬¹, 杨 宁², 杨 明^{2*}

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工业大学 控制与仿真中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘要:针对飞行器仿真测试中合作目标投影光斑的跟踪识别问题,提出了一种投影光斑跟踪识别新方法,该方法主要由预测、识别及修正 3 个阶段组成。预测阶段主要结合投影光斑运动特点对传统卡尔曼滤波进行改进,提高投影光斑的位置预测精度。识别阶段则根据投影光斑位置的预测值,分两种情况对光斑进行处理:如果下一时刻投影光斑在视场内,则根据相应的判别准则和匹配策略在下一时刻图像中快速搜索投影光斑的最优匹配光斑;如果下一时刻投影光斑在视场外,则根据测量系统相关信息,对视场外投影光斑在图像平面上的位置进行求解,并将求解结果加入相应的运动轨迹,实现对视场外投影光斑的跟踪识别。在完成投影光斑的跟踪识别后,根据跟踪识别结果对投影光斑相关参数进行修正。仿真实验和实际实验结果表明,本文方法能够有效跟踪识别飞行器仿真测试中合作目标的投影光斑,其最大跟踪识别误差不超过 2.5 pixel,即使跟踪识别过程中存在投影光斑进出视场的情况也不受影响。

关键词:飞行器;仿真测试;视觉测量;运动参数;合作目标;投影光斑;跟踪识别

中图分类号:V448.2;V557 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152308.2134

Tracking and recognition of projective spots for cooperation targets in vehicle simulation test

HUO Ju¹, YANG Ning², YANG Ming^{2*}

(1. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Control and Simulation Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

* Corresponding author, E-mail: myang-csc@outlook.com

Abstract: To track and recognize the projective spots of a cooperation target in the vehicle simulation test, a tracking and recognition method is proposed by combining the advantages of statistical methods and heuristic methods. This method tracks and recognizes the projective spots in a "prediction-recognition-modification" loop. In the prediction phase, the traditional Kalman filter is improved based on the movement characteristics of projective spots so as to precisely predict the projective spot positions. According to the predicted positions, the recognition of the projective spots in the recognition phase is divided into two parts. If a projective spot is in the field-of-view at next time instance, its optimal matching spot in the image will be rapidly searched with the gain function and matching strategy. If the projective spot is out of the field-of-view at next time instance, its position on the image plane will

收稿日期:2015-01-20;修订日期:2015-03-20.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61473100)

be calculated with the measuring system information, and the calculated position will be added into the corresponding trajectory. Once the recognition of the projective spots is completed, the parameters related to projective spots are modified with the recognition results. Simulation and real experimental results indicate that the proposed method can effectively track and recognize the projective spots, whose maximum error is no more than 2.5 pixel, even if the projective spots exit and enter the scene during the measurement.

Key words: vehicle; simulation test; vision measurement; motion parameter; cooperation target; projective spot; tracking and recognition

1 引言

在飞行器仿真测试中,试验飞行器的实际运行轨迹和姿态变化等参数是非常重要的试验数据,可用于飞行器控制精度的考核和模型验证等^[1-2]。为了实现试验飞行器运动参数的高精度、大范围测量,人们通常采用一种基于光束向量的运动参数测量方法^[3]。该方法在试验飞行器上安装直线光束作为合作目标,测量时通过两侧平面接收光束投影光斑,并利用高速摄像机记录下投影光斑在接收平面上的位置。根据投影光斑位置计算合作目标光束的方向向量,进而分析光束方向向量即可得到试验飞行器的运动参数。采用基于光束向量的运动参数测量方法时,需要辨识测量过程中每条光束对应的投影光斑,才能获得合作目标光束的方向向量。然而,摄像机获取的每幅图像中会同时存在属于不同光束的多个投影光斑及噪声干扰,为了解决这些问题,需要对图像中合作目标光束的投影光斑进行跟踪识别。

在合作目标光束投影光斑的跟踪识别过程中,投影光斑可被当作特征点处理,即跟踪识别时仅采用光斑在图像平面上的位置信息。许多学者对此类跟踪问题进行了研究并提出了相应的解决方法,这些方法主要分为统计方法和启发式方法两类^[4-5]。统计方法在进行特征点位置预测时引入了观测值和模型的不确定性,比较有代表性的两种方法为JPDAF(Joint Probabilistic Data-Association Filter)法^[6]和MHT(Multiple Hypothesis Tracker)法^[7]。但统计方法存在求解参数过多,方法中提出的概率分布假设并不一定能满足等问题。启发式方法通常在考虑一定约束条件下定义特征点的运动模型,然后根据运动模型给出相应的目标函数并进行优化^[8]。Veenman等对特征点运动模型进行了分类总结,并提出了一种

基于匈牙利搜索的贪婪优化算法^[9]来实现特征点的跟踪识别。Shafique和Shah利用滑动窗口通过一次匹配多幅图像实现了特征点的跟踪识别^[10]。这些方法在跟踪识别过程中通常假设特征点不会进出视场,如果特征点出视场,则不再对它进行处理。然而,在飞行器仿真测试中,为了满足试验飞行器运动参数的测量范围要求,合作目标光束的投影光斑必然会进出视场,并且要求出视场投影光斑再次进入视场后仍能被准确的识别,这就要求投影光斑在视场外时也能被有效的处理。因此,现有方法很难实现飞行器仿真测试中合作目标投影光斑的跟踪识别。

本文结合统计方法和启发式方法提出了一种投影光斑跟踪识别法。该方法在一个“预测—识别—修正”环中完成对合作目标光束投影光斑的跟踪识别。在预测阶段,根据投影光斑的运动特点改进传统的卡尔曼滤波,以提高投影光斑的位置预测精度;在识别阶段,根据投影光斑位置的预测值,对投影光斑在视场内和在视场外两种情况分别进行处理,以保证投影光斑在视场内和在视场外都能被准确的跟踪和识别;在完成投影光斑的跟踪识别后,根据跟踪识别结果对投影光斑的相关参数进行了修正。

2 合作目标投影光斑的跟踪识别原理

2.1 跟踪识别问题阐述

定义包含 n 幅图像 F_i 的图像序列 S 对 n 个采样时刻 $t_i (1 \leq i \leq n)$, 其中每幅图像大小为 $S_x \times S_y$; $\mathbf{X}_i = \{x_1^i, x_2^i, \dots, x_r^i\}$ 为图像 F_i 中检测到的 r 个合作目标投影光斑的集合(每幅图像中检测到的投影光斑数目不一定相同)。定义包含 m 个投影光斑元素的运动轨迹 \mathbf{T} 为 $\langle x_{a_1}^{i_1}, x_{a_2}^{i_2}, \dots, x_{a_m}^{i_m} \rangle$, 其中 $1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_m \leq n, 1 \leq a_j \leq |\mathbf{X}_{i_j}|, 1 \leq j \leq m$; 轨迹 \mathbf{T} 的长度用 $|\mathbf{T}|$ 来表示。运动轨迹 \mathbf{T} 中投影

光斑 x_{ij}^k 的前向匹配光斑定义为 x_{ij+1}^k , 后向匹配光斑定义为 x_{ij-1}^k 。合作目标投影光斑的跟踪识别问题可以定义为寻找运动轨迹集合 $\mathbf{A} = \{\mathbf{T}_1, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_p\}$, $\forall \mathbf{T}_i \in \mathbf{A}$, 当且仅当 $\exists x_j^k \in \mathbf{T}_j$ (其中 x_j^k 为世界坐标系中合作目标投影光斑 Z_i 在图像平面上成的像) 时, 运动轨迹 \mathbf{T}_i 中每个元素均是投影光斑 Z_i 在图像平面上成的像, 并且任意其他运动轨迹 \mathbf{T}_r 中不包含投影光斑 Z_i 在图像平面上成的像。

2.2 投影光斑跟踪识别方法

本文中合作目标投影光斑的跟踪识别是在一个“预测—识别—修正”环中实现的, 如图 1 所示。在时刻 t_{i-1} , 对合作目标投影光斑 x_{ij-1}^k 在 t_i 时刻的位置进行预测, 并根据预测值 x^k 判断 t_i 时刻投影光斑 x_{ij-1}^k 是否在视场内。如果 t_i 时刻投影光斑 x_{ij-1}^k 在视场内, 则根据相应判别准则及匹配策略, 在 t_i 时刻图像检测到的投影光斑中寻找 x_{ij-1}^k 的最优匹配光斑 x_{ij}^k , 并将它加入相应的运动轨迹; 如果 t_i 时刻投影光斑 x_{ij-1}^k 在视场外, 则根据测量系统相关信息对 t_i 时刻投影光斑 x_{ij-1}^k 在图像平面中的位置 x_{ij}^k 进行求解, 从而实现对投影光斑 x_{ij-1}^k 的跟踪识别。在跟踪识别完成后, 根据跟踪识别结果修正投影光斑的相关参数。

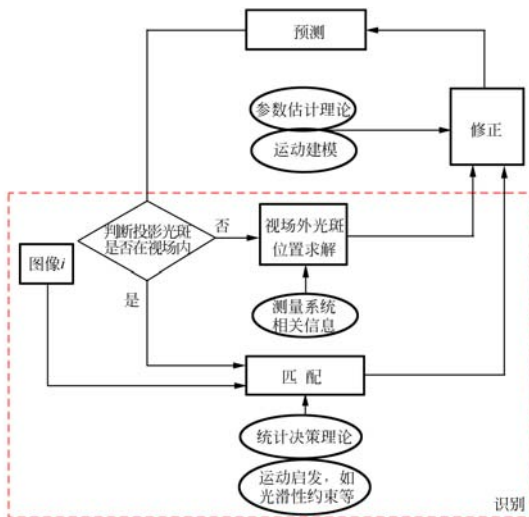


图 1 投影光斑跟踪识别示意图

Fig. 1 Tracking and recognition of projective spots

3 合作目标投影光斑的位置预测

通过卡尔曼滤波预测合作目标的投影光斑位置。传统的卡尔曼滤波方程如下^[11-12]:

(1) 状态向量预测方程

$$\hat{\mathbf{s}}_{i|i-1} = \mathbf{H}\hat{\mathbf{s}}_{i-1}; \quad (1)$$

(2) 状态向量协方差矩阵的预测方程

$$\mathbf{P}_{i|i-1} = \mathbf{H}\mathbf{P}_{i-1}\mathbf{H}^T + \mathbf{Q}_{i-1}; \quad (2)$$

(3) 卡尔曼加权矩阵

$$\mathbf{K}_i = \mathbf{P}_{i|i-1}\mathbf{F}^T(\mathbf{F}\mathbf{P}_{i|i-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{A}_i)^{-1}; \quad (3)$$

(4) 状态向量更新方程

$$\hat{\mathbf{s}}_i = \hat{\mathbf{s}}_{i|i-1} + \mathbf{K}_i(\mathbf{x}_i - \mathbf{F}\hat{\mathbf{s}}_{i|i-1}); \quad (4)$$

(5) 状态向量协方差矩阵的更新方程

$$\mathbf{P}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i\mathbf{F})\mathbf{P}_{i|i-1}. \quad (5)$$

传统的卡尔曼滤波均以匀速或匀加速运动作为目标的运动模型, 在目标做直线运动时能很好地预测目标下一时刻的位置。然而, 当目标做曲线运动时, 卡尔曼滤波的预测效果会明显变差^[13]。本文中合作目标投影光斑的运动可分为微观和宏观两个层次。在微观上, 由于采样周期较短, 投影光斑的运动可近似为匀速运动; 在宏观上, 投影光斑的运动轨迹会随着试验飞行器的运动而发生弯曲。综合考虑合作目标投影光斑的运动特点, 以匀速运动作为投影光斑的运动模型, 并通过 4.1.2 节中的匹配策略在投影光斑运动轨迹发生弯曲时对匀速运动模型进行补偿。在此条件下, 为了有效预测合作目标的投影光斑位置, 需改进传统的卡尔曼滤波。

传统的卡尔曼滤波在预测目标做曲线运动时的预测效果会变差, 这是因为目标运动轨迹发生弯曲后状态向量的更新方程不能准确地更新状态向量, 从而使得预测值与实际值的偏离越来越大。因此, 本文在跟踪识别合作目标的投影光斑时修正了卡尔曼滤波的状态向量更新方程, 得到:

$$\hat{\mathbf{s}}_i = \begin{cases} \hat{\mathbf{s}}_{i|i-1} + \mathbf{K}_i(\mathbf{x}_i - \mathbf{F}\hat{\mathbf{s}}_{i|i-1}), & \text{光斑轨迹近似直线时} \\ \begin{bmatrix} \mathbf{x}_i \\ \dot{\mathbf{x}}_i \end{bmatrix}, & \text{光斑轨迹发生弯曲时} \end{cases} \quad (6)$$

其中, 投影光斑运动轨迹是否发生弯曲可根据 4.1.2 节的匹配策略进行判别。

4 合作目标投影光斑的跟踪识别

根据合作目标投影光斑位置的预测值, 投影光斑的跟踪识别分为视场内投影光斑的跟踪识别与视场外投影光斑的位置求解两部分。

4.1 视场内投影光斑的跟踪识别

4.1.1 判别准则的定义

为了寻找 t_k 时刻图像 F_k 中与运动轨迹 \mathbf{T}_i 匹配的投影光斑 x_j^k , 需要首先定义投影光斑匹配的判别准则, 即需要首先解决在给定运动轨迹 $\mathbf{T}_i = \langle x_{a_1}^i, x_{a_2}^i, \dots, x_{a_r}^i \rangle, 1 \leq i_1 < i_2 < \dots < i_r, x_j^k (k > i_r)$ 为图像 F_k 中的量时(即投影光斑的位置), 如何定义判别函数 $g(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 以有效判断 x_j^k 是否为 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑。假设 x^k 为通过改进的卡尔曼滤波得到的 t_k 时刻投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的预测值, $x_{a_r}^i x^k$ 为相应的预测向量。判别函数 $g(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 是基于预测向量 $x_{a_r}^i x^k$ 与候选观测向量 $x_{a_r}^i x_j^k$ 之间的匹配测度定义的。最简单的判别函数是通过预测向量与观测向量之间的距离定义的, 如式(7)所示:

$$g_1(x_{a_r}^i, x_j^k) = 1 - \frac{\|x_{a_r}^i x^k - x_{a_r}^i x_j^k\|_p}{\sqrt{S_x^p + S_y^p}}, \quad (7)$$

其中: $\|\cdot\|_p$ 表示 p -范数, S_x, S_y 分别为图像 x 方向和 y 方向的尺寸。

根据 $g_1(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 定义的判别准则更加倾向于选择距离预测值 x^k 最近的候选投影光斑作为 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑, 这其中不包含任何的运动信息。因此, 采用由 $g_1(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 定义的判别准则对投影光斑进行跟踪识别可能会获得非常不光滑的投影光斑运动轨迹。

Sethi 和 Jain 将光滑性约束引入判别准则的定义^[14], 他们认为在运动过程中运动速度大小和方向的变化都是连续的, 由此定义的判别函数 $g_2(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 如式(8)所示:

$$g_2(x_{a_r}^i, x_j^k) = \alpha \left[\frac{1}{2} + \frac{x_{a_r}^i x^k \cdot x_{a_r}^i x_j^k}{2 \|x_{a_r}^i x^k\| \|x_{a_r}^i x_j^k\|} \right] + (1 - \alpha) \left[2 \frac{\sqrt{\|x_{a_r}^i x^k\| \|x_{a_r}^i x_j^k\|}}{\|x_{a_r}^i x^k\| + \|x_{a_r}^i x_j^k\|} \right], \alpha \in [0, 1]. \quad (8)$$

判别函数 $g_2(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 包含了运动方向连续和速率大小连续两部分。其中, 运动方向连续将会在投影光斑匹配时排除那些偏离运动方向较大的候选投影光斑; 速率大小连续则会在匹配过程中更加倾向于选择那些速率变化较小的投影光斑。但判别函数 $g_2(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 也存在不足, 主要表现为在判别投影光斑匹配时, 完全依赖于运动信息, 忽略了匹配时投影光斑可能的位置信息, 因而容易造成

误匹配。综合考虑, 充分结合判别函数 $g_1(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 和 $g_2(x_j^k)$ 的优点, 本文采用如下判别准则:

$$g_3(x_{a_r}^i, x_j^k) = \omega_1 \left[1 - \frac{\|x_{a_r}^i x^k - x_{a_r}^i x_j^k\|_p}{\sqrt{S_x^p + S_y^p}} \right] + \omega_2 \left[\frac{1}{2} + \frac{x_{a_r}^i x^k \cdot x_{a_r}^i x_j^k}{2 \|x_{a_r}^i x^k\| \|x_{a_r}^i x_j^k\|} \right] + \omega_3 \left[2 \frac{\sqrt{\|x_{a_r}^i x^k\| \|x_{a_r}^i x_j^k\|}}{\|x_{a_r}^i x^k\| + \|x_{a_r}^i x_j^k\|} \right], \quad (9)$$

式中 $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ 。

4.1.2 跟踪识别匹配策略

在定义了匹配的判别准则后, 为了快速寻找投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑, 实现投影光斑的跟踪识别, 还需制定相应的匹配策略。本文的匹配策略步骤如下:

(1) 首先, 在图像 F_k 中以改进的卡尔曼滤波的预测值 x^k 为中心、 r_1 为半径, 建立投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑的搜索空间 Ω_1 。然后以判别准则 $g_3(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 为目标函数, 在搜索空间 Ω_1 中寻找投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的最优匹配光斑 $x_{j_{\text{best}}}^k$ 。判断最优匹配光斑 $x_{j_{\text{best}}}^k$ 的目标函数值是否大于给定阈值 ϵ_1 , 如果大于 ϵ_1 , 则将 $x_{j_{\text{best}}}^k$ 加入轨迹 \mathbf{T}_i ; 否则, 转步骤(2);

(2) 若在步骤(1)中没有找到投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑, 则判断此时投影光斑的运动轨迹发生弯曲。在图像 F_k 中, 以 $x_{a_r}^i$ 为中心、 r_2 为半径, 建立投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑的搜索空间 Ω_2 。然后以判别准则 $g_3(x_{a_r}^i, x_j^k)$ 为目标函数, 在搜索空间 Ω_2 中寻找投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的最优匹配光斑 $x_{j_{\text{best}}}^k$, 此时判别准则中 ω_1 置 0。判断最优匹配光斑 $x_{j_{\text{best}}}^k$ 的目标函数值是否大于给定阈值 ϵ_2 , 如果大于 ϵ_2 , 则将 $x_{j_{\text{best}}}^k$ 加入轨迹 \mathbf{T}_i ; 否则, 转步骤(3);

(3) 如果在步骤(1)与步骤(2)中均没有找到投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑, 则判断 t_k 时刻 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑发生了遮挡。在这种情况下, 以改进的卡尔曼滤波的预测值 x^k 作为投影光斑 $x_{a_r}^i$ 的前向匹配光斑, 并将 x^k 加入轨迹 \mathbf{T}_i 。

采取步骤(2)进行投影光斑匹配的主要原因是在改进的卡尔曼滤波中投影光斑采用匀速运动模型。然而, 当试验飞行器的运动方向发生改变时, 图像平面中合作目标的投影光斑运动轨迹也会发生弯曲, 此时在图像中前向匹配光斑的位置会比较偏近于投影光斑而远离改进的卡尔曼滤波

的预测值,如图 2 所示。因此,采取步骤(2)可以有效地补偿卡尔曼滤波中投影光斑的匀速运动模型。

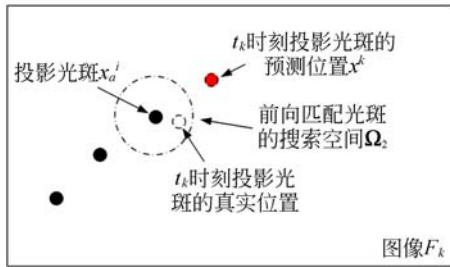


图 2 运动轨迹发生弯曲时投影光斑匹配策略示意图
Fig. 2 Matching strategy for bending trajectory of projective spot

4.2 视场外投影光斑的位置求解

在合作目标投影光斑的跟踪识别过程中,如果在某一时刻投影光斑出了视场,为了在该投影光斑再次进入视场时能够准确地对它跟踪识别,需要在光斑出视场的这段时间内利用测量系统的相关信息求解光斑在图像平面上的位置。根据基于光束方向向量的运动参数测量原理,为了解算试验飞行器的运动参数,应始终保持两条光束在摄像机视场内。因此,本文假设在合作目标上安装 3 条光束,在试验飞行器的运动过程中,2 条光束始终在摄像机视场内,另外 1 条光束随着试验飞行器的运动进出视场,如图 3 所示。在图 3 中,1 号、2 号、4 号、5 号投影光斑始终在视场内,3 号、6 号投影光斑在运动过程中进出视场。在基于光束方向向量的运动参数测量系统中,为求解视场外投影光斑在图像平面上的位置,需要的信息主要有:(1) 在世界坐标系中,各投影光斑以及光束交点共面,同时同一接收平面上的投影光斑共线;(2) 各光束间的夹角相同且已知。

为了求解视场外投影光斑在图像平面上的位置,首先要根据上述信息求得视场外投影光斑在世界坐标系中的坐标,然后再根据相应的摄像机标定参数求得光斑在图像平面上的位置坐标。本文以 3 号投影光斑为例推导视场外投影光斑的世界坐标。视场外投影光斑的世界坐标的求解可转化为如下数学问题:已知空间三点 O, A, B , 其中,点 A, B 位于世界坐标系 XY 平面上,已知 O, A, B 3 点的世界坐标,且 OA 与 OB 的夹角为 α ; 寻求点 A, B 之外的空间点 C , 使得 A, B, C 3 点共线,

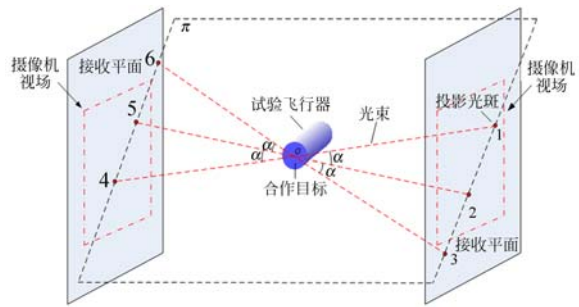


图 3 视场外投影光斑示意图
Fig. 3 Projective spots of cooperation target

且 OB 与 OC 之间的夹角也为 α , 如图 4 所示。

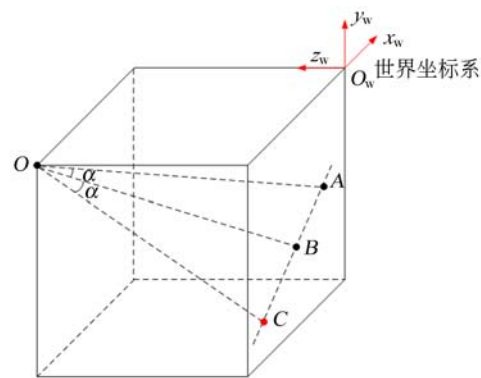


图 4 视场外投影光斑空间坐标求解问题的数学描述
Fig. 4 Mathematical description of calculation on projective spot out of field-of-view

设空间三点 O, A, B 坐标分别为 $(X_O, Y_O, Z_O), (X_A, Y_A, 0), (X_B, Y_B, 0)$, 空间待求点 C 的坐标为 (X_C, Y_C, Z_C) 。因为 A, B 两点均位于世界坐标系 XY 平面上, 且 A, B, C 3 点共线, 由图 4 可知, 空间点 C 必定位于 XY 平面上, 因此可得:

$$Z_c = 0. \tag{10}$$

同时, 由于 AB 与 BC 共线, 所以存在非零常数 k 使得:

$$BC = k \cdot AB. \tag{11}$$

将式(11)转换为坐标形式可得:

$$\begin{cases} X_C = k \cdot (X_B - X_A) + X_A \\ Y_C = k \cdot (Y_B - Y_A) + Y_A \end{cases}, \tag{12}$$

由式(12)可知, 只要求得非零常数 k 即可得到空间点 C 的坐标。

为了求解非零常数 k , 已知 OB 与 OC 之间的夹角为 α , 由此可得:

$$\cos \alpha = \frac{OB \cdot OC}{|OB| |OC|}. \tag{13}$$

将式(12)代入式(13)并进行化简,可得一元二次方程:

$$ak^2 + bk + c = 0, \quad (14)$$

式中: $a = m_1 - m^2$, $b = m_2 - 2ml$, $c = m_3 - l^2$, $l = (X_B - Y_O)^2 + (Y_B - Y_O)^2 + Z_O^2$, $m = (X_B - X_O)(X_B - X_A) + (Y_B - Y_O)(Y_B - Y_A)$, $m_1 = l \cdot [(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2] \cdot \cos^2 \alpha$, $m_2 = 2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot l \cdot [(X_B - X_A)(X_B - X_O) + (Y_B - Y_A)(Y_B - Y_O)]$, $m_3 = \cos^2 \alpha \cdot l^2$.

根据空间几何关系可知,式(14)中方程系数必然满足 $b^2 - 4ac > 0$,即非常数 k 必然存在两个解 k_1, k_2 。根据 k_1, k_2 分别求解空间点 C 的坐标 $(X_{C1}, Y_{C1}), (X_{C2}, Y_{C2})$,然后判断使得 OA 与 OC 间夹角为 2α 的空间点 C 的坐标即为所求的坐标值。

如果合作目标中用于运动参数解算的光束多于 3 条,视场外投影光斑在图像平面上位置的求解方法可以此类推。

在完成合作目标投影光斑的跟踪识别后,根据跟踪识别结果修正投影光斑的相关参数。

5 实验结果与分析

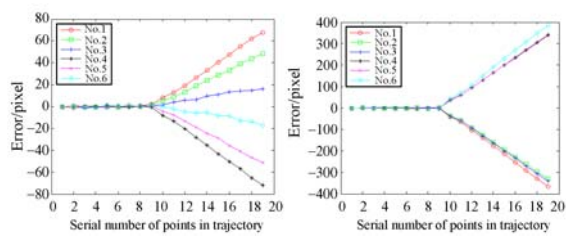
5.1 仿真实验

通过仿真实验验证本文所提的合作目标投影光斑跟踪识别方法的性能。在仿真实验中,试验飞行器的合作目标上安装 3 条光束,试验飞行器运动的位置为 $[-1 \text{ m}, +1 \text{ m}]$,运动姿态为 $[-30^\circ, +30^\circ]$ 。随着试验飞行器的运动,合作目标投影光斑在图像中做相应的曲线运动,可根据试验飞行器的运动信息与摄像机的透视投影模型获得投影光斑的图像位置坐标。在试验飞行器的运动过程中,合作目标上的 2 条光束始终在摄像机视场内,另 1 条光束在实验过程中进出视场,如图 3 所示。同时,在跟踪识别过程中以 20% 的概率在投影光斑的匹配搜索区域内添加噪声干扰。仿真实验中摄像机的分辨率为 1280×1024 ,图像采样间隔为 10 ms。

5.1.1 改进卡尔曼滤波的预测性能分析

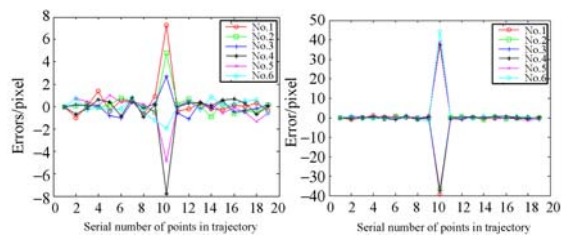
合作目标投影光斑的位置预测直接关系到投影光斑是否在视场内的判断以及视场内投影光斑的匹配识别。因此,本节分析了改进的卡尔曼滤波的预测性能。传统的卡尔曼滤波与改进的卡尔

曼滤波的投影光斑位置预测误差曲线分别如图 5 和图 6 所示。



(a) x 方向误差 (b) y 方向误差
(a) Errors in x direction (b) Errors in y direction

图 5 传统卡尔曼滤波对投影光斑位置预测的误差曲线
Fig. 5 Errors of positions predicted by traditional Kalman filter



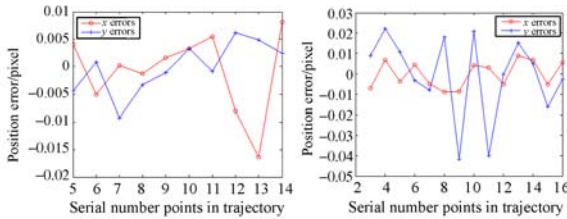
(a) x 方向误差 (b) y 方向误差
(a) Errors in x direction (b) Errors in y direction

图 6 改进的卡尔曼滤波对投影光斑位置预测的误差曲线
Fig. 6 Errors of positions predicted by improved Kalman filter

在实验过程中,合作目标投影光斑的运动轨迹在 t_{10} 时刻发生弯曲,此时的投影光斑靠近上一时刻的投影光斑位置而远离投影光斑的预测值,如图 2 所示,因此, t_{10} 时刻投影光斑的预测误差较大。从图 5 和图 6 可以发现,在投影光斑的运动轨迹没有发生弯曲前,传统卡尔曼滤波与改进的卡尔曼滤波均能很好地预测下一时刻的投影光斑位置;在投影光斑运动轨迹发生弯曲后,传统卡尔曼滤波对投影光斑位置的预测误差逐渐增大,呈发散状,而改进的卡尔曼滤波在发生弯曲后对投影光斑位置的预测误差能快速收敛,因而仍能准确地预测投影光斑位置。本文用投影光斑预测值与真实值的均方根误差(Root Mean Square, RMS)表示投影光斑的位置预测精度。除去 t_{10} 时刻,实验中 x 方向位置的预测精度 $RMS_x = 0.6762 \text{ pixel}$, y 方向位置的预测精度 $RMS_y = 0.6611 \text{ pixel}$ 。由此可见,本文方法能够实现投影光斑位置的高精度预测。

5.1.2 视场外投影光斑位置求解精度的分析

为了能够准确地跟踪识别再次进入视场的投影光斑,需要精确求解该投影光斑在视场外的这段时间内其在图像平面上的位置。在实验过程中,3号、6号投影光斑有一段时间不在视场内,利用本文算法求得它们在图像平面上的位置与它们在图像平面上的真实位置的误差曲线如图7所示。



(a) 3号投影光斑的求解误差 (b) 6号投影光斑的求解误差
(a) Errors of projective spot 3 (b) Errors of projective spot 6

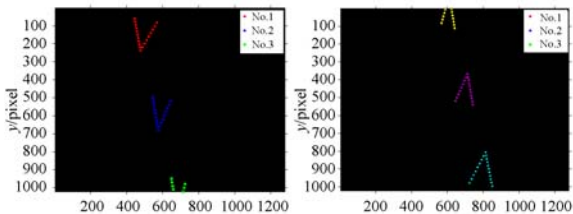
图7 视场外投影光斑图像平面位置求解的误差曲线
Fig. 7 Errors of position calculation for projective spots out of field-of-view

由图7可以看出,当投影光斑在视场外时,利用本文算法对光斑在图像平面上位置的求解精度较高(最大误差不超过0.05 pixel),能够实现对视场外投影光斑图像平面位置的高精度求解。图中6号光斑的解算误差大于3号光斑的解算误差,这是因为两个光斑的位置不同,在解算过程中引入的计算误差也不同。

5.1.3 投影光斑跟踪识别方法的总体性能分析

实验中,利用本文方法对投影光斑进行跟踪识别获得的投影光斑运动轨迹如图8所示,跟踪识别的误差曲线如图9所示。

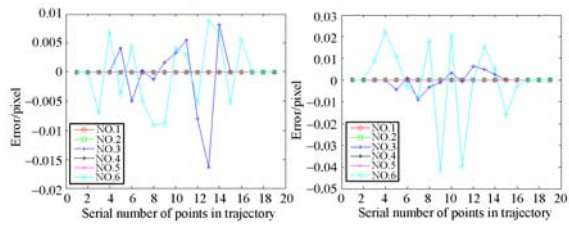
由图8和图9可以看出,本文方法能够准确



(a) 1~3号投影光斑 (b) 4~6号投影光斑
(a) No. 1-3 spots (b) No. 4-6 spots

图8 投影光斑跟踪轨迹示意图

Fig. 8 Tracking trajectories of projective spots



(a) x方向误差 (b) y方向误差
(a) Errors in x direction (b) Errors in y direction

图9 投影光斑跟踪识别误差曲线

Fig. 9 Errors of tracking and recognition for projective spots

地跟踪识别合作目标的投影光斑,即使跟踪过程中存在投影光斑进出视场的情况。在本文中,投影光斑的识别率计算公式为:

$$R_{\text{track}} = S_{\text{correct}} / S_{\text{total}}, \quad (15)$$

式中: S_{correct} 为正确跟踪识别的投影光斑数目, S_{total} 为需要跟踪识别的投影光斑总数。根据上式可得仿真实验中投影光斑的识别率为 65.97%, 其中绝大部分的错误识别光斑为视场外投影光斑,因为投影光斑在视场外时,利用本文方法对光斑在图像平面上的位置求解易造成解算误差,然而误差非常小,并不影响投影光斑的跟踪识别。

5.2 实验验证

在实验中,将合作目标安装于姿态给定的装置上,通过姿态给定装置模拟试验飞行器的运动,如图10(a)所示;利用两两共线的6个激光器构成合作目标上的3条光束,如图10(b)所示。在实验过程中,姿态给定装置的偏航轴和俯仰轴做往返运动,相应地,合作目标投影光斑在图像平面上做往返运动。初始时刻,合作目标投影光斑在图像中的位置如图11所示。在整个运动过程中,3号投影光斑进出视场,其余投影光斑一直在视场内。当3号投影光斑在视场外时,它在图像平面上位置的求解误差如图12所示。

从图12中可以发现,实验中视场外投影光斑在图像平面上位置的求解误差要大于仿真实验中视场外投影光斑在图像平面上位置的求解误差,这主要是因为实验中存在投影光斑坐标提取误差、摄像机标定误差以及合作目标光束直线度误差等因素。虽然实验中视场外投影光斑在图像平面上位置的求解误差偏大,但仍能控制在较小的范围内(最大误差不超过2.5 pixel)。

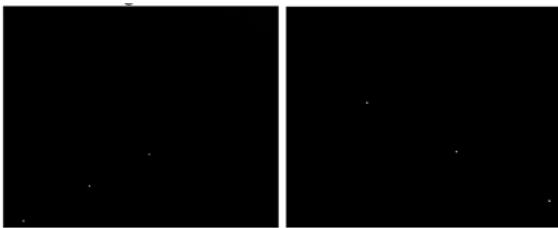


(a) 姿态给定装置 (b) 合作目标

(a) Attitude given apparatus (b) Cooperation target

图 10 试验飞行器模拟装置

Fig. 10 Simulation device for test vehicle

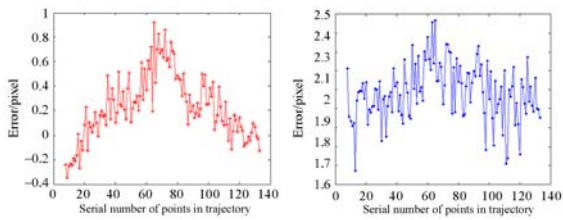


(a) 左侧光斑接收平面上的投影光斑 (b) 右侧光斑接收平面上的投影光斑

(a) Spots on left plane (b) Spots on right plane

图 11 初始时刻的投影光斑图像

Fig. 11 Images of projective spots at initial time



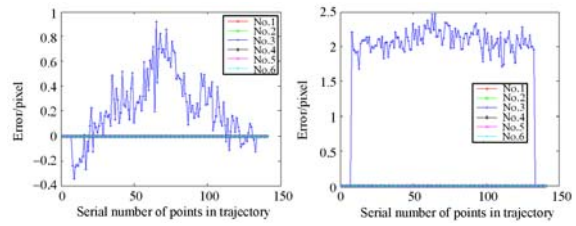
(a) x 方向误差 (b) y 方向误差

(a) Errors in x direction (b) Errors in y direction

图 12 视场外投影光斑图像平面位置求解的误差曲线

Fig. 12 Errors of position calculation for projective spots out of field-of-view

在实验中,合作目标投影光斑跟踪识别的误差曲线如图 13 所示。从图中可以看出,本文方法能够很好地实现合作目标投影光斑的跟踪识别,即使跟踪过程中存在投影光斑进出视场的情况。在投影光斑的跟踪识别过程中,跟踪误差主要来自视场外投影光斑在图像平面上位置的求解误差,但误差较小,对投影光斑的跟踪识别并无影响。实验结果与仿真结果保持一致。



(a) x 方向误差

(b) y 方向误差

(a) Errors in x direction (b) Errors in y direction

图 13 实验中投影光斑跟踪识别的误差曲线

Fig. 13 Errors of tracking and recognition in real experiment

6 结 论

本文采用一种基于光束向量的试验飞行器的运动参数测量方法,以实现试验飞行器运动参数的高精度大范围测量。在该方法中,为了计算合作目标光束的方向向量,需要辨识每条光束对应的投影光斑。本文结合特征点跟踪中统计方法和启发式方法的优点,提出了一种合作目标投影光斑的跟踪识别方法,合作目标投影光斑的跟踪识别是在一个“预测—识别—修正”环中完成的。首先,根据投影光斑运动特点对传统卡尔曼滤波进行了改进,利用改进的卡尔曼滤波更加准确地预测投影光斑位置。然后,根据投影光斑位置的预测值,投影光斑的跟踪识别分两种情况:如果下一时刻投影光斑在视场内,则根据相应的判别准则和匹配策略在下一时刻图像中搜索投影光斑的最优匹配光斑。其中,判别准则的制定充分利用了投影光斑的位置预测信息和运动光滑性约束,匹配策略则与改进的卡尔曼滤波相结合,从而快速实现了投影光斑的最优匹配;如果下一时刻投影光斑在视场外,则根据测量系统的相关信息给出了视场外投影光斑在图像平面上位置的求解算法,并将求得的视场外投影光斑加入相应的运动轨迹,以实现对视场外投影光斑的跟踪识别。在完成投影光斑的跟踪识别后,根据跟踪识别结果修正了投影光斑的相关参数。实验结果表明,本文方法能很好地实现对合作目标投影光斑的跟踪识别,即使跟踪识别过程中存在投影光斑进出视场的情况。

在本文提出的合作目标投影光斑跟踪识别方法中,当投影光斑运动轨迹发生弯曲,投影光斑被遮挡时,可能会跟丢投影光斑,因此,如何更好地

处理运动轨迹发生弯曲时投影光斑的遮挡问题是

下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] 赵玉华, 袁峰, 丁振良, 等. 基于合作目标的姿态测量系统建模及精度的蒙特卡洛估计[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(8): 1873-1877.
ZHAO Y H, YUAN F, DING ZH L, *et al.*. Modeling of the attitude measurement system based on cooperation target and its accuracy estimation with Monte-Carlo simulation [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(8): 1873-1877. (in Chinese)
- [2] 李晶, 袁峰, 胡英辉. 基于多点合作目标的多线阵 CCD 空间物体姿态测量[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6): 1635-1641.
LI J, YUAN F, HU Y H. Attitude measurements of space objects based on multi-linear CCD and multi-point cooperation target[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(6): 1635-1641. (in Chinese)
- [3] 仲小清, 霍炬, 杨明. 基于直线的运动目标相对位置姿态光学测量方法[J]. 光学技术, 2008, 34(6): 862-869.
ZHONG X Q, HUO J, YANG M. Method for relative attitude and position measurement of moving target based on lines[J]. *Optical Technique*, 2008, 34(6): 862-869. (in Chinese)
- [4] 蒋良卫. 图像序列中目标跟踪技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
JIANG L W. *Research on Object Tracking Algorithms in Image Sequence*[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
- [5] 刘洁. 基于特征点的目标检测与跟踪方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
LIU J. *Study of Object Detection and Tracking Algorithms Based on Feature Points*[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008. (in Chinese)
- [6] FORTMANN T E, BAR-SHALOM Y, SCHEFFE M. Sonar tracking of multiple targets using joint probabilistic data association[J]. *IEEE J. Oceanic Eng.*, 1983, 8(3): 173-184.
- [7] REID D B. An algorithm for tracking multiple targets[J]. *IEEE Trans. Automatic Control*, 1979, 24(6): 843-854.
- [8] STALDER S, GRABNER H, VAN GOOL L. Cascaded confidence filtering for improved tracking-by-detection[C]. *Proceedings of European Conference on Computer Vision, Crete, Greece*, 2010: 369-382.
- [9] COR J V, MARCEL J R, ERIC B. Resolving motion correspondence for densely moving points[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001, 23(1): 54-72.
- [10] KHURRAM S, MUBARAK S. A noniterative greedy algorithm for multiframe point correspondence[J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(1): 51-65.
- [11] 赵其杰, 屠大维, 高健, 等. 基于 Kalman 滤波的视觉预测目标跟踪及其应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(5): 937-942.
ZHAO Q J, TU D W, GAO J, *et al.*. Kalman filter based vision predicting and object tracking method and its application [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 937-942. (in Chinese)
- [12] 孔军, 汤心溢, 蒋敏, 等. 基于多尺度特征提取的 Kalman 滤波跟踪[J]. 红外与毫米波学报, 2011, 30(5): 446-450.
KONG J, TANG X Y, JIANG M, *et al.*. Target tracking based on multi-scale feature extraction Kalman filter[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2011, 30(5): 446-450. (in Chinese)
- [13] 李红昕, 王帅, 刘钊. 卡尔曼跟踪滤波器的一种改进的运动模型[J]. 信号处理, 2004, 20(6): 559-562.
LI H X, WANG SH, LIU ZH. An improved motion model for Kalman trackers[J]. *Signal Processing*, 2004, 20(6): 559-562. (in Chinese)
- [14] SETHI I K, JAIN R. Finding trajectories of feature points in a monocular image sequence [J]. *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1987, 9(1): 56-73.

作者简介:



霍 炬(1977—),男,河北唐山人,教授,2001年,2007年于哈尔滨工业大学分别获得硕士、博士学位,主要从事视觉测量、半实物仿真等方面的研究。E-mail: huojuhit@163.com

通讯作者:



杨 明(1963—),男,吉林蛟河人,教授,博士生导师,1988年于哈尔滨工业大学获得硕士学位,1997年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事飞行器制导与控制、复杂系统仿真理论与方法等方面的研究。E-mail: myang-csc@outlook.com

(版权所有 未经许可 不得转载)