2015年10月

Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology

文章编号: 2095-4980(2015)05-0769-06

面向光电图像目标检测跟踪的距离信息处理

冉欢欢^{1a,1b,2},游安清^{1a,1b},霍义华²,黄自力²

(1.中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所; b.高功率微波技术国防科技重点实验室,四川 绵阳 621999; 2.西南技术物理研究所 控制与信息技术部,四川 成都 610041)

摘 要: 针对复杂背景下,光电图像目标检测跟踪的难题,分析了基于光电图像目标检测跟踪的基本模型。依据距离信息的空间维度和包含的信息量,提出将距离信息划分为标量距离信息、 矢量距离信息以及阵列距离信息的分类方法;系统地研究了面向光电图像目标检测跟踪的距离信息处理方法。通过分析研究得出光电图像目标尺寸与标量距离信息的关系;提出将图像高层特征 匹配模型从平面扩展到三维立体空间的图像匹配方法;总结了阵列距离信息在目标检测识别中的 应用价值。通过面向光电目标检测跟踪的距离信息处理方法的分析研究,为融合距离信息的光电 图像目标尺度分析、图像匹配以及目标种类辨识提供了理论依据。

Distance information processing method oriented target detection and tracking in photoelectric image

RAN Huanhuan^{1a,1b,2}, YOU Anqing^{1a,1b}, HUO Yihua², HUANG Zili²

(1a.Institute of Applied Electronics; 1b.National Key Laboratory of Science and Technology on HPM Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China; 2.Department of Control and Information Technology, Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu Sichuan 610041, China)

Abstract: A basic model of target detection and tracking of photoelectric image has been analyzed to solve the problems existed in target detection and tracking of photoelectric image in complex background. The distance information is divided into three categories including scalar distance information, vector distance information and array distance information according to spatial dimensions and the amount of contained information. The distance information processing method oriented target detection and tracking in optical information has been researched systematically. The relationship between the target scale in photoelectric image and the scalar distance information is obtained. The image matching method using the high-level feature matching model in photoelectric image is expanded from 2D to 3D space. The applications of array distance information in target detection and recognition are summarized. This work can provide a theoretical basis for target scale analysis, image matching and identification of target species in photoelectric images.

Key words: photoelectric image; distance; information fusion; target tracking; target detection

近年来,针对光电图像中目标检测跟踪的问题,国内外学者已经在图像特征提取以及目标特征学习方面做了 大量的研究工作^[1-2]。光电图像是三维空间内的点在成像平面上的投影,存在一个空间维度的信息丢失。光电图 像每一点仅代表了该点对于特定波段的光的反射能力,受自然环境变化的影响较大,抗干扰能力弱。光电图像中 目标特征提取、学习以及识别的算法越来越复杂,对实现这些算法的平台不断提出新的要求。基于光电图像的目 标检测跟踪方法与单一变量的方法(如惯性制导)相比,可以认为是将目标的特征空间从点/线(一维空间)扩展到了 面(二维空间),在过去的 30 年内充分体现了其优势。随着信息技术的发展,信息化战争对光电图像目标检测跟 踪的要求进一步提高,基于光电图像的目标检测、识别以及跟踪在复杂多变的图像制导武器的应用环境面前越来 越力不从心。如何进一步发展基于光电图像的目标检测跟踪技术成为摆在科研人员面前的难题。

引入距离信息,即研究面向光电目标检测跟踪的距离信息处理方法。将距离信息和光电图像信息融合,是否 能够解决目前光电图像制导武器发展的问题?理想的距离信息具有唯一性,即目标在三维空间内的表面形状是目 标的本质特性,不随时间、气候、观测角度的变化而变化。距离信息的测量设备以及测量角度会影响目标可观测 的部分以及观测的结果,却不会影响目标的表面形状特性。从信息学的角度来说,距离信息与光电图像相互独立。 距离信息的引入有效地扩展了图像制导武器所处理信息的特征空间;提高图像制导技术所处理的信息量;为图像 制导武器目标检测、识别跟踪提供了更好的信息基础;目标与背景的特征识别与学习可以在更高的维度上进行。 因此在光电图像处理中引入距离信息,对于目标检测、识别以及跟踪技术发展具有重要意义。文献[3]对引入距 离信息光电图像目标检测方法进行了初步探索,证明了距离信息在光电图像目标检测跟踪中的重要意义。本文从 图像制导武器面临的复杂背景下的目标检测跟踪的难题出发,分析基于光电图像的目标检测跟踪模型,得出光电 图像过程中距离信息丢失的原因。分析了光电图像目标尺度与标量距离信息的关系;利用矢量距离信息将图像匹 配模型扩展到三维空间内的刚体变换模型;分析了距离图像在表征物体外形尺寸方面的作用,得出了面向光电目 标检测跟踪的距离信息处理方法的一般性结论。

1 目标检测跟踪模型

以光电图像传感器的光轴为 y_c 轴,以光电图像传感器的成像平面作为 x_c 和 z_c 轴,以图像传感器的中心作为 坐标原点,建立如图 1 所示的直角坐标系,其中 v-O-u为 成像平面。假设点 p_i 在坐标系中的坐标值为: (x_{ci}, y_{ci}, z_{ci}) , 用球坐标表示为 $(d \sin \varphi \cos \theta, d \cos \varphi, d \sin \varphi \sin \theta)$ 。其中 d为点 O_c 与点 p_i 的距离。利用小孔成像模型,点 p_i 在光电 图像中的位置可以通过下式计算得到:

$$\begin{bmatrix} u \\ 1 \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} fs_x & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -fs_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tan \varphi \cos \theta \\ 1 \\ \tan \varphi \sin \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_0 \\ 1 \\ v_0 \end{bmatrix}$$
(1)



Fig.1 Model of target detection or tracking in photoelectric image 图 1 光电图像目标检测跟踪模型

式中: f为光电图像传感器的焦距; s_x,s_z 表示成像平面上的单位距离的像素数; $(u_0,0,v_0)^T$ 为图像中心点在图像中的位置。从式(1)可以看出,基于光电图像的目标检测跟踪系统通过光电图像解算出的目标位置信息仅仅包含了目标与光轴的角度偏差信息,而不包含目标与光电传感器的距离信息。

2 距离信息分类

距离信息按照其空间维度以及所包含的信息量多少可以分为3个层次:

1)标量距离信息:目标中心点(或者感兴趣的点)与光电图像传感器坐标系原点的距离 D₀。

2) 矢量距离信息:二维光电图像中的高层特征(点特征、直线特征、面特征等)与光电图像传感器坐标原点间的距离 $D_{L}(d^{0}, d^{1}, \dots, d^{K}, K)$ 为二维光电图像中的特征数目)。

3) 阵列距离信息:二维图像的距离像信息 D_m(如式(2))。

$$\boldsymbol{D}_{m} = \begin{bmatrix} d^{0,0} & d^{0,1} & \cdots & d^{0,M-1} \\ d^{1,0} & d^{1,1} & \cdots & d^{1,M-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d^{N-1,0} & d^{N-1,1} & \cdots & d^{N-1,M-1} \end{bmatrix}$$
(2)

式中 *M*,*N* 分别为图像的列数和行数。本文所讨论的阵列距离信息即距离图像,距离图像与阵列距离信息具有相同的含义。

距离图像是一类特殊形式的图像,它的矩阵内的每一点代表目标上的点到成像中心的距离。其数学表达式为:

$$j = f(x, y, z) \tag{3}$$

式中: $z = \phi(x, y)$; *j*为距离图像; *f*(·)为距离投影函数。部分文献中将距离图像称为 2.5 维图像。距离是三维场景中空间位置的一种标定和表示。

3 距离信息处理方法

3.1 标量距离信息

针对静止目标上的点 pi在光电图像传感器不同位置姿态下的成像点的关系由下式可以得到:

$$\boldsymbol{U}_{2} = \frac{y_{c1}}{y_{c2}} \boldsymbol{S} \boldsymbol{R}_{2}^{-1} \Big[\boldsymbol{R}_{1} \boldsymbol{S}^{-1} (\boldsymbol{U}_{1} - \boldsymbol{U}_{0}) + \boldsymbol{P}_{c1} - \boldsymbol{P}_{c2} \Big] + \boldsymbol{U}_{0}$$
(4)

式中: *U*₂,*U*₁ 为光电图像传感器不同位置姿态条件下点 *p*_i在光电图像中的位置向量; *R*₂,*R*₁ 为光电图像传感器不同 位置姿态条件下的转换矩阵; *P*_{c2},*P*_{c1} 为光电图像传感器不同位置姿态条件下的光电图像传感器在世界坐标系中的 位置向量; *y*_{c2},*y*_{c1} 为光电图像传感器不同位置姿态条件下点 *p*_i在光电图像传感器光轴上的投影; *S* 为投影矩阵。

若 $\boldsymbol{R}_{2}^{-1}\boldsymbol{R}_{1} \approx \boldsymbol{I}$ 且 $|\boldsymbol{P}_{c1} - \boldsymbol{P}_{c2}| \approx 0$ 则

$$U_2 - U_0 = \frac{y_{c1}}{y_{c2}} (U_1 - U_0)$$
(5)

在不考虑光照变化的情况下,光电图像传感器获得图像可以近似认为是图像中心点膨胀 $\frac{y_{c1}}{y_{c2}}$ 倍的结果,即本文所

研究的标量形式的距离信息。令 $d=y_c$,则相邻 2 帧之间目标尺度 h 具有如下关系:

$$h_{k+1} = h_k d_k / d_{k+1} \tag{6}$$

式中: h_k为第 k场的目标尺度; d_k为第 k场的距离信息。由式(6)可得到以下结论:

1) 当光电图像传感器的位置以及视角的变换较小时,图像中目标尺度之比等于标量形式距离信息的反比;

2) 随着目标与系统的距离减小,相同时间间隔内目标的尺度变化速率增大,同时目标的细节更新的速率也 在增大。

标量距离信息作为光电图像中目标尺度变化的参考,可以保证图像制导系统在接近目标的过程中完全包括或 者大部分包括目标;标量距离信息也可以作为目标模板更新速率的参考。图像之间目标尺度变化较小时,采用较 低的模板更新速率甚至不更新模板,保证光电图像目标检测算法在目标较小时具备一定的抗干扰能力。在目标尺 度变化较大(目标与光电图像制导武器之间距离较小时)时采用较高的模板更新速率,以适应系统接近目标的末端 时目标急剧膨胀的情况,减小光电图像目标检测的误差。

3.2 矢量距离信息

如果将图像高层特征中心点与成像中心的距离信息引入图像的几何变换模型中,可以将2幅图像之间的变换 模型从二维图像平面之间的转换关系拓展为三维空间坐标系间的转换关系。通过求取空间坐标系的变换参数来求 解目标在像平面之间的转换关系参数,解决射影变换的非线性问题,提高光电图像匹配的精确度。

假设模板图像某一特征点的位置为(*u_T*,*v_T*),该特征点到光电图像传感器成像中心点的距离为 *d_T*,则该特征 点在光电图像传感器坐标系中的位置为:

$$\begin{bmatrix} x_T \\ y_T \\ z_T \end{bmatrix} = d_T \begin{bmatrix} \sin\left(\frac{u_T - u_0}{M}\theta_x\right) \\ \sqrt{1 - \left[\sin\left(\frac{u_T - u_0}{M}\theta_x\right)\right]^2 - \left[\sin\left(\frac{v_0 - v_T}{N}\theta_z\right)\right]^2} \\ \sin\left(\frac{v_0 - v_T}{N}\theta_z\right) \end{bmatrix}$$
(7)

式中: (u_0, v_0) 为图像中心点的坐标; θ_x, θ_z 为光电图像传感器的方位和俯仰方向的视场角。实时图像中与 (u_r, v_r) 相对应的特征点的位置为 (u_p, v_p) ,距离值为 d_p ,同理可得到该特征点在实时的光电图像传感器坐标系中的位置

坐标为(x_p, y_p, z_p)^T。则实时图像中的特征点坐标与模板图像的特征点坐标可以用下式来表达:

$$\begin{bmatrix} x_{R} \\ y_{R} \\ z_{R} \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{R}} \begin{bmatrix} x_{T} \\ y_{T} \\ z_{T} \end{bmatrix} + \mathbf{K} = \begin{bmatrix} r_{00} & r_{01} & r_{02} \\ r_{10} & r_{11} & r_{12} \\ r_{20} & r_{21} & r_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{T} \\ y_{T} \\ z_{T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{0} \\ k_{1} \\ k_{2} \end{bmatrix}$$
(8)

式中: \hat{R} 为 3×3 的正交转换矩阵; K为 3×1 的平移向量。如果实时图像与模板图像之间的特征点的匹配对有: $(x_{T,l}, y_{T,l}, z_{T,l})^{T} \leftrightarrow (x_{R,l}, y_{R,l}, z_{R,l})^{T}, (l = 1, 2, \dots, L)$ (其中 L 为匹配的特征点对的数目),则 L 个点对构成的匹配对可以获得如下的线性方程:

$$AR_{\rm r} = b \tag{9}$$

式中:A是由模板图像中的特征点的坐标构成的稀疏矩阵,可由下式表达:

 R_x 是由待求解的变换参数构成的列向量,即 $R_x = (r_{00}, r_{01}, r_{02}, k_0, r_{10}, r_{11}, r_{12}, k_1, r_{20}, r_{21}, r_{22}, k_2)^{\mathrm{T}}; b$ 是由实时图像中的特征点坐标构成的列向量: $b = (x_{R,1}, y_{R,1}, z_{R,1}, \cdots, x_{R,L}, y_{R,L}, z_{R,L})^{\mathrm{T}}$ 。式(9)有唯一解或者无解的充分必要条件是:

rank(*A*) ≥ 3(*rank*(•)表示求矩阵的秩)。即构成矩阵 *A* 的特征点不能 全部共面。理论上获得 4 个及 4 个以上的不全在同一平面上的点就 可以获得实时图像与模板图像之间的投影变换的参数,从而实现对 静止目标的准确跟踪。

3.3 阵列距离信息

距离图像表达了目标在三维空间内的曲面特征和尺度特性,包含了丰富的目标信息。国内外学者针对距离图像的处理方法做了大量研究,并对融合距离图像和光电图像的目标检测识别做了深入的研究^[4-13]。距离图像的特征被作为新的特征变量加入了光电图像的特征空间。这些研究工作证明了距离图像的特征对于识别物体的种类有重要意义,光电图像特征对于某一种类内的具体物体的识别有重要作用。

4 仿真实验分析

本文将前一节分析的距离信息的处理方法应用到图像制导武器的开环仿真实验中。针对 3 个层次的距离信息分别做了实验: a) 融合标量距离信息的光电图像匹配(实验一); b) 融合矢量距离信息的 三维坐标系转换模型(实验二); c) 融合距离图像和光电图像的运动 目标检测(实验三)。实验一采用了某图像制导武器挂飞实验数据作为 仿真的数据源,实验二和实验三均采用视景仿真软件 VegaPrime, 3Dmax,MATLAB模拟产生光电图像数据和相应的距离信息。

图 2 显示了实验一初始锁定点的位置,初始锁定点为位于靶标 上表面的中心点。图 3 显示了传统目标匹配方法和利用标量距离信 息的目标匹配方法在该段视频最后一帧(第 2 659 帧)的跟踪位置对



Fig.2 Initial locked frame of experiment 1 图 2 实验一的初始锁定帧位置



Fig.3 The last tracking point of experiment 1 (The 2 659th frame) 图 3 实验一的最后跟踪点(第 2 659 帧)

比。从图 3 可以看出,利用标量距离信息的目标匹配方法与初始锁定点的位置偏移较小,而传统相关匹配的跟踪

点已经漂移到了靶标的边沿。该实验验证了标量距离信息能够在图像制导系统接近目标的过程中,估计目标尺度 的变换,为光电图像匹配提供先验知识,提高光电图像目标匹配的精确度,减小跟踪漂移。

为了验证利用矢量距离信息扩展后的三维空间变换模型在光电图像制导系统中的应用价值,本文选取了传统 图像匹配中检测、跟踪难度最大的典型的立体目标:城市环境下大楼的检测跟踪。本文选用了具有平移、尺度和 旋转不变性的 SIFT 特征点作为光电图像的高层特征,仿射变换的参数和三维坐标变换的参数均采用 RANSAC 估 计算法。图 4 和图 5 显示了三维坐标变换和仿射变换的跟踪方法的结果,其中图 4 显示了 X 坐标,图 5 显示了 Y 坐标。从图中可以看出仿射变换模型在 750 帧左右时,Y 方向上的偏差已经接近 320 个像素,X 方向的偏差约为 60 个像素。三维坐标变换融合了特征点的距离信息,将光学图像二维平面的特征点变化,扩展到了三维空间内 坐标点的转换,与特征点的实际变化情况吻合,获得了较高的跟踪精确度,解决了光电图像中立体目标检测跟踪 的难题。





实验三通过对光电图像视频中相邻 2 帧的帧间差分方法 检测可能的运动区域;利用距离信息估计目标的面积,将与目 标面积接近的区域作为感兴趣区域,可以减少运动目标检测的 虚警;通过感兴趣区域的提取大大降低系统对距离图像采样点 数的要求;利用感兴趣区域的距离图像特征实现对运动目标的 检测。图 6 对比了融合距离图像和光电图像的目标检测方法和 基于光电图像的目标检测方法对某一典型目标的检测结果。图 中红色矩形框为融合距离图像和光电图像的目标检测结果,白 色矩形框为基于光电图像的目标检测结果。从光电图像中可以 看出,应用传统的光电图像的目标检测方法无法解决目标阴影 以及目标运动过程中的背景显露问题。利用感兴趣区域的距离 图像可以有效地提取目标,消除目标阴影、背景显露以及运动 空洞的影响。



Fig.5 Y axis of 3D coordinate transform and affine transform 图 5 两种匹配模型跟踪的 Y坐标



photoelectric image 图 6 融合距离图像和光电图像的运动目标检测结果

5 结论

本文针对光电图像复杂背景中目标检测跟踪的难题,提出融合距离信息和光电图像信息的复合制导方法;深 入研究了面向光电图像目标检测跟踪的距离信息处理方法;为融合距离信息的光电图像目标尺度分析、图像匹配 以及目标识别等方法提供理论依据。当前绝大部分图像制导武器平台上已具备了融合标量距离信息与光电图像信 息的目标检测跟踪方法的条件。激光雷达技术的发展已经在数据采集速度以及成本方面均能满足光电图像特征匹 配的要求,在未来 5~10 年内融合矢量距离信息与图像信息的目标检测跟踪方法可得到广泛应用。阵列距离信息 包含了丰富的目标三维信息,融合阵列距离信息和光电图像的目标检测跟踪方法无论在方法还是性能方面都会带 来巨大的变革,将是未来目标检测跟踪方法发展的重要方向。本文提出的利用距离信息扩展光电图像的特征空间 方法仅是扩展光电图像特征空间的方法中的一种,其分析研究思路可供其他扩展光电图像特征空间的方法借鉴。 774

- [1] 张广军. 机器视觉[M]. 北京:科学出版社, 2008. (ZHANG Guangjun. Machine Vision[M]. Beijing:Science Press, 2008.)
- [2] 辛彦哲,冯辉,杨涛,等. 基于特征子空间的自适应多视角目标跟踪算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2012,10(3): 319-324. (XIN Yanzhe,FENG Hui,YANG Tao,et al. Adaptive subspace tracking algorithm on multi-view videos[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2012,10(3):319-324.)
- [3] 闫宇壮,黄新生,郑永斌,等. 惯导信息辅助的匹配模板校正方法[J]. 国防科技大学学报, 2011,33(4):128-133. (YAN Yuzhuang,HUANG Xinsheng,ZHENG Yongbin, et al. Inertial navigation information aided matching template calibration method[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2011,33(4):128-133.)
- [4] WEN Shu,ZHAO Gang,HE Bin. Rapid reconstruction of 3D building models from aerial images and LiDAR data[C]// 3rd International Conference on Advanced Computer Theory and Engineering(ICACTE). Chengdu, China:[s.n.], 2010:95-198.
- [5] Kusanagi M,Terabayashi K,Umeda K,et al. Construction of a 3D model of real-world object using range intensity images[C]// 2010 Canadian Conference on Computer and Robot Vision(CRV). Ottawa,Ontario,Canada:[s.n.], 2010:317-323.
- [6] Kovacs V, Tevesz G. Improving viewpoint invariance of image feature extraction methods using intensity and range images[C]// 13th International Carpathian Control Conference(ICCC). High Tatras, Slovakia:[s.n.], 2012:370-375.
- [7] ZHANG Chenyang, TIAN Yingli. RGB-D camera-based activity analysis[C]// Signal & Information Processing Association Annual Summit and Conference(APSIPA ASC). Hollywood, CA:[s.n.], 2012:1-6.
- [8] Kevin L,BO L F,REN X F,et al. A large-scale hierarchical multi-view RGB-D object dataset[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China:[s.n.], 2011:1817-1824.
- [9] Blun M,Springenberg J T,Wlfing J,et al. A learned feature descriptor for object recognition in RGB-D data[C]// ICRA 2012. Guangzhou,China:[s.n.], 2012:1298-1303.
- [10] TANG J,Miller S,Singh A,et al. A textured object recognition pipeline for color and depth image data[C]// ICRA 2012. Guangzhou,China:[s.n.], 2012.
- [11] Jorg S,Sven B. Combining depth and color cues for scale and viewpoint-invariant object segmentation and recognition using random forests[C]// IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System. Taipei, China:[s.n.], 2010: 4566-4571.
- [12] Aharon B H,Dmitri H,Dan L. Fusing visual and range imaging for object class recognition[C]// IEEE International Conference on Computer Vision. Barcelona,Spain:[s.n.], 2011:65-72.
- [13] Shahriar N, John A S. Kinsight: Localizing and tracking household objects using depth-camera sensors[C]// 8th IEEE International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems. Hangzhou, China: [s.n.], 2012:67-74.

作者简介:



冉欢欢(1987-),女,四川省雅安市人,博 士,助理研究员,主要研究方向为信号与信息处 理及三维目标自动识别.email:ranhuanhuan@ sina.com. 游安清(1975-),男,湖北省嘉鱼县人,博 士,副研究员,研究方向为图像处理与计算机视 觉技术.

霍义华(1979-), 女,山西省文水县人,硕 士,工程师,研究方向为图像跟踪、模式识别.

黄自力(1973-),男,重庆市万县人,研究员,研究方向为数字信号处理以及目标自动化识别与跟踪技术.