

doi:10.3788/gzxb20154405.0512002

单目图像中姿态角估计的坦克目标测距方法

徐超¹,高敏¹,曹欢²

(1 军械工程学院 导弹工程系, 河北 石家庄 050003)

(2 北京航天嘉诚精密科技发展有限公司, 北京 102600)

摘 要:为了克服经典成像测距对相机姿态和视差信息依赖的问题,以观瞄发控装置的电荷耦合器件获取的单目图像为研究对象,提出了基于姿态角估计的坦克目标测距方法.该方法首先利用多级尺度不变特征变换匹配算法实现目标姿态角的快速估计,获取与当前目标姿态偏差最小的模板;然后利用该模板和目标图像模拟立体视觉,建立不依赖于相机姿态和视差的单目测距模型.该模型在远距离测距和小角度偏差的前提下,将模板中的匹配特征点投影到等效平面世界坐标系中,建立被测坦克图像点及其空间点的映射关系,将测距问题转化为对相机外参量的标定,从而求解出相机中心到坦克中心的距离.采用 200 m 到 2 500 m 范围内的坦克验证测距方法的性能,对测量误差随距离的变化规律进行分析,并将其与不同射程时导弹末制导交班的最大容许误差进行对比.结果表明,该方法适用于观瞄发控装置获取的任意姿态图像,实现了野战条件下单兵反坦克武器系统的远距离、快速测距;测量结果中相对误差小于 4.9%,绝对误差小于 87.7 m,满足导弹各个射程的最大容许误差的要求.

关键词:几何光学;被动测距;姿态角估计;单目图像;反坦克导弹观瞄发控装置;小孔成像;相机标定;尺度不变特征变换

中图分类号:TP391.4

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2015)05-0512002-8

The Attitude Angle Estimation-based Distance Measurement of Tank Target in Monocular Image

XU Chao¹,GAO Min¹,CAO Huan²

(1 Department of Missile Engineering, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

(2 Beijing Aerospace Jiacheng Precision Technology Development Co., Ltd, Beijing 102600, China)

Abstract: To overcome the traditional image ranging algorithm dependent on camera attitude and parallax, an attitude angle estimation-based ranging method of tank target, in monocular image cathched by observe control and launch system charge coupled device, is proposed. Firstly, multistage scale invariant feature transform matching method is applied to obtain the template with minor error comparing with current target by fast attitude angle estimation. Secondly, the template and current target are used to form a novel monocular range model, without camera attitude and parallax between two images. In such a model, the features points matching the tank target image of the template are projected to the approximated 2D world coordinate with the assumption of far distance and tiny error of the attitude. Thus we set up the mapping relationship between the image points and target points, and then external parameters of camera are achieved by monocular camera calibration to calculate the distance of the camera center from target center. Series of targets range from 200 m to 2 500 m are adopted to verify the effectiveness of the proposed algorithm. Sequentially, the alteration of error along with distance increasing is analyzed, and the comparison between measurement error and the maximal tolerance of

基金项目:军内科技创新项目(No. 2013562)和军械工程学院科研基金项目(No. YJMJ11018)资助

第一作者:徐超(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为计算机视觉和图像末制导技术. Email:475084845@qq.com

导师(通讯作者):高敏(1963-),男,教授,博士,主要研究方向为计算机视觉和图像末制导技术. Email:gaomin1103@gmail.com

收稿日期:2014-11-17;录用日期:2015-01-05

<http://www.photon.ac.cn>

middle-to-terminal guidance under various ranges is executed. The results indicates that the proposed algorithm do not need to capture the accurate position and angle of camera, resulting in fast and far distance measurement of individual anti-tank missile system in field. Meanwhile, the maximal relative error is 4.9% and the maximal absolute error is 87.7 m, which satisfy the demand of the biggest tolerance errors in the whole range of missile.

Key words: Geometric optics; Passive range; Attitude angle estimation; Monocular image; Observe control and launch system of anti-tank missile; Pinhole imaging; Camera calibration; Scale invariant feature transform

OCIS Codes: 080.2740;110.2960;120.2830;150.1488

0 引言

发射点到坦克目标的距离是计算反坦克导弹基本弹道的重要参量.单目和双目成像测距是目前广泛应用的机器视觉测距方法,其中双目成像测距设备复杂、视场小,并且在测量远距离目标时,要求左右相机具有足够的基线距离,给观瞄发控装置的结构设计带来极大困难^[1].而单目成像测距具有结构简单、操作方便和成本低等优点,符合单兵反坦克导弹武器系统的要求.

单目成像测距从测量原理上可分为未知目标信息和已知目标信息的测距.未知目标信息的测距不需要借助辅助工具,对目标没有特殊要求.黄凤山^[2]、姜广文^[3]等通过对单个相机进行可控的平移或旋转实现了单目立体视觉,但单兵使用的观瞄发控装置无法精确测量视差.张法全^[4]等通过对图像的模糊度检测,得到图像边缘宽度,由样条插值计算出目标距离,其主要针对近距离目标测量,随着目标距离增大图像会变得清晰,测量准确度随之降低.王剑^[5]等通过改变相机焦距对物体两次成像,研究了相同物距下目标图像尺寸与焦距的定量关系,由于该系统需要对相机在线标定,对于实时性要求较高的系统不可行^[6].

已知目标信息的测距方法又分为已知目标运动和已知目标参量.已知目标运动指利用目标的移动和获取的图像测距,石春琴^[7]等结合运动信息和前后两幅图像比例的变化对不同纹理下的目标进行测量,但坦克的运动规律无法提前预知.已知目标参量指利用当前目标图像与先验知识进行比较,从而得到深度信息.吴刚^[8]等提出一种建立在B对偶空间几何学上的单目测距方法,通过对相机内参量的准确计算提高了测距的总体准确度.文献[9-10]应用几何约束条件结合奇异值分解的整体最小二乘法计算位姿初值,代入改进的两段式迭代算法进行景深信息的优化.该类方法需要精确测定相机的位置和角度,不适用于野外条件下的单兵武器系统,并且都是对平面进行测量,没有考虑姿态不断变化的三维目标的测距^[11].

为了满足野外条件下对坦克目标快速精确测距的需求,本文提出基于单目图像中姿态角估计的坦克目标测距方法.该方法利用多级尺度不变特征变换(Scale

Invariant Feature Transform, SIFT)特征匹配算法在模板库中进行由粗到精的搜索,实现对当前目标最优匹配模板的快速定位,并将目标和模板图像结合起来,建立不依赖于姿态及视差的单目测距模型,避免了现有被动测距方法对该信息的依赖,对任意姿态的坦克目标均能快速地进行测距,提高了野战条件下单兵反坦克导弹武器系统的环境适应性.文中以某型反坦克导弹为例,对其射程内的坦克进行测距,并给出了相应的结果及分析.

1 三维坦克目标姿态角估计

在观瞄发控装置(如图1所示)的电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)坐标系中,用俯视角 φ 、方向角 γ 和旋转角 θ 描述三维坦克目标的相对姿态变化.由于绕光轴的旋转运动对目标图像点的相对位置没有影响,将模板库中目标的旋转角设为 0° ,以减少模板数量和匹配时间. SIFT特征具有旋转不变性^[12],可以实现任意旋转角度下的目标匹配,并且通过提取匹配特征点的坐标,建立目标与其图像的几何关系.与加速鲁棒特征(Speed UP Robust Feature, SURF)特征点提取方法相比, SIFT能更好地适应尺度及旋转变化^[13],因此在实时性满足工程需求的前提下,选取 SIFT对特征点进行提取,尽可能提高测距准确度.文献[14]使用 SIFT进行基于聚类的视点空间划分,并将其应用于目标识别.本文借鉴其聚类思想建立多级目标模板库,利用多级 SIFT特征匹配逆向搜索最优匹配模板,实现姿态角的快速估计,其详细流程如图2所示.

首先在高斯球面上等间隔划分视点空间,采集固定距离下目标在各个视点的投影视图,描述旋转角为

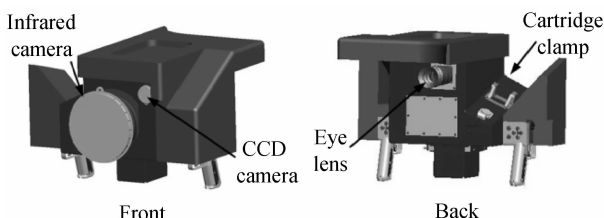


图1 观瞄发控装置结构图

Fig. 1 The configuration of OCLS

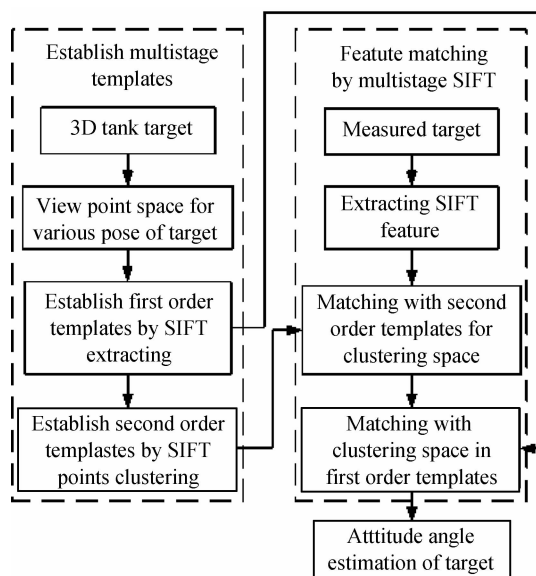


图2 坦克目标姿态角估计详细流程

Fig. 2 The detail of attitude angle estimation of tank 0° 时坦克姿态的变化,如图3所示.视点空间划分间隔的大小对姿态角估计的准确度有重要影响,其间隔越小,准确度越高.但由于存储空间和姿态估计实时性的限制,划分间隔不能过于精细.通过反复的坦克测距实验,得到间隔为 6° 时既满足实时性要求,又具有较高的估计准确度.图4给出了右半球面坦克目标投影视图 T_1^r ,包含496个模板;左半球面投影视图 T_1^l 与右半球面基本对称,包含480个模板.

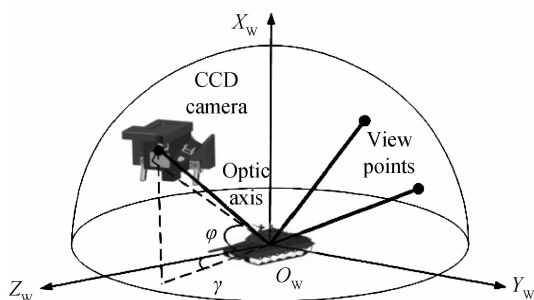


图3 高斯球面投影示意图

Fig. 3 Diagrammatic sketch of Gaussian sphere projection

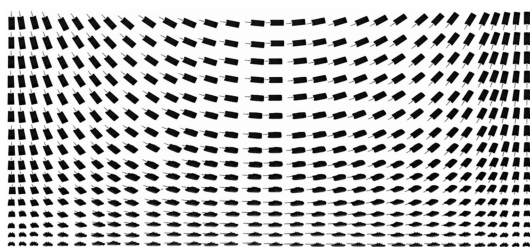


图4 三维坦克目标投影视图(右半球面)

Fig. 4 Projection templates of 3D tank target by the view of right semi-sphere

利用SIFT对目标的投影视图进行特征提取,生成SIFT特征描述子,并对特征点进行亚像素定位^[15],建立一级目标模板库 T_1 .模板库只需存储各个视点投影

图特征点的亚像素坐标和特征向量,不需要存储图像,节约了存储空间,并且将大量提取特征点的运算转移到线下,提高了特征匹配的实时性.

将一级模板库中所有视图与其周围视图进行两两匹配,记录匹配点的个数,以此作为聚类的依据.两组坦克图像的匹配特征点数量越多,其相似度越高,即彼此之间的距离越近.记两视图之间的匹配点个数为 N_{ij} ,则相应的距离定义为

$$D\{i,j\} = \frac{1}{N_{ij}} \quad (1)$$

式中, i,j 是视图的编号, $i \neq j$.由于特征匹配都是在视图与其周围图像之间进行,匹配点数 N_{ij} 不为0,无需在分母上引入常量防止距离出现无穷大.

采用自下而上的层次聚类法^[16],先计算模板与类的距离,将距离小于设定阈值的模板合并到类,然后计算类间距,将距离小于设定阈值的类合并.定义模板到类的距离 $D\{i,A\}$ 为模板 i 与类 A 中所有模板 m 的最大距离,类间距 $D\{B,A\}$ 为类 B 中所有模板 n 到另一个类 A 距离的最大值.

$$D\{i,A\} = \max_{m \in A} D\{i,m\} \quad (2)$$

$$D\{B,A\} = \max_{n \in B} D\{n,A\} \quad (3)$$

通过聚类分析,将一级模板库中的模板划分到一组聚类空间,并利用类内中心矩在每个聚类空间中选取有代表性的模板构成二级模板库 T_2 .如图5所示,一级模板库中模板被聚成了32类,分别对应一级模板库中的聚类空间 $\{T_1^1, T_1^2, \dots, T_1^{32}\}$.



图5 二级模板库

Fig. 5 The second-order template datasets

对被测目标的图像 I_t 进行SIFT特征提取,经过特征点检测、亚像素定位、边缘点删除和特征向量生成等步骤,获得一系列特征点的坐标 $P'_{j=1, \dots, N}$ 及其特征向量 $F'_{j=1, \dots, N}$, N 为目标图像特征点的数量.将其与二级模板库 T_2 中的图像进行匹配,利用目标特征向量与各个模板的特征向量求解匹配点的数目 $N_{i, n_i=1, \dots, 32}$.则目标在二级模板库中最优匹配模板为匹配点数最多图像 $T_{i, n_i}^n |_{\max(N_{i, n_i})}$,由此得到目标在一级模板库中对应的聚类空间 $T_1^n |_{\max(N_{i, n_i})} \Leftrightarrow I_t$.对目标和该聚类空间进行特征匹配,计算各个模板与目标匹配点数目 $N_{i, n_i=1, \dots, n_{\max}}$, n_{\max} 为各个聚类空间的模板数目,不同的聚类空间模板数目也不同.目标与聚类空间中的最优匹配模板即为 $T_{i, n_i}^n |_{\max(N_{i, n_i})}$,该模板的姿态角即为当前目标在旋转角

为 0° 时的最优近似姿态角. 由于模板库建立时俯视角和方向角的采样间距为 6° , 当前目标姿态角的估计误差不超过 3° . 选择部分匹配点, 建立目标图像 I_t 与最优模板 $T_i^{n_i} |_{\max(N_{n_i})}$ 之间的数据对, 即 $P'_{j=1, \dots, n_i} \Leftrightarrow P''_{j=1, \dots, n_i}$ (n_i 为选取的匹配点数目), 用于模拟立体视觉.

2 不依赖姿态和视差的单目测距模型

本文分别建立了世界坐标系、相机坐标系、以物理单位表示的图像坐标系和以像素表示的数字图像坐标系. 小孔成像模型即描述了通过相机坐标系和图像坐标系的变换, 将目标从世界坐标系中的三维空间点向数字图像坐标系中成像平面的投影过程, 如图 6 所示.

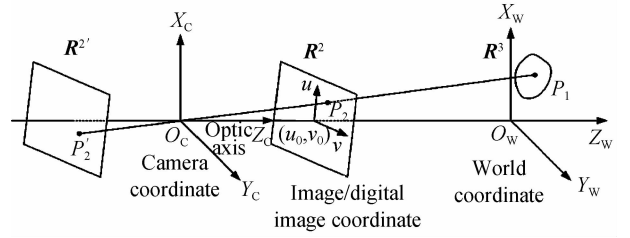


图 6 小孔成像模型

Fig. 6 Pinhole imaging model

该模型在齐次坐标系下表示为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [Rt] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$R = \begin{bmatrix} \cos A_Y \cos A_Z & \cos A_Y \sin A_Z & -\sin A_Y \\ \sin A_X \sin A_Y \cos A_Z - \cos A_X \sin A_Z & \sin A_X \sin A_Y \sin A_Z + \cos A_X \cos A_Z & \sin A_X \cos A_Y \\ \cos A_X \sin A_Y \cos A_Z + \sin A_X \sin A_Z & \cos A_X \sin A_Y \sin A_Z - \sin A_X \cos A_Z & \cos A_X \cos A_Y \end{bmatrix} t = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, X_w, Y_w, Z_w 为空间点在世界坐标系下的坐标, u, v 为对应的像素坐标, Z_c 为该点在相机坐标系 Z 轴的坐标. M_1 为相机内参量矩阵, u_0, v_0 为以像素表示的图像中心点坐标, α, β 分别为图像在 u 轴, v 轴的焦距参量, γ 为图像扭曲参量. M_2 为相机外参量矩阵, R 表示从世界坐标系到相机坐标系的旋转矩阵, A_X, A_Y, A_Z 分别为 X, Y, Z 轴对应的旋转角度; t 表示从世界坐标系到相机坐标系的平移矩阵, t_x, t_y, t_z 为相应的平移距离.

在此基础上, 利用观瞄发控装置获取的坦克图像和模板库的匹配图像模拟双目立体视觉, 建立不依赖姿态和视差的单目测距模型(如图 7 所示). 在匹配模板视角下, 相机内参量矩阵 M_1 已知, 由于坦克尺寸相对测量距离可忽略不计, 将三维坦克目标等效为垂直于光轴的平面目标, 假定世界坐标系位于如图 7 中的位置, 则 $R = I, t = [0 \ 0 \ d]^T$, 式(4)变为

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 & u_0 d \\ 0 & \beta & v_0 & v_0 d \\ 0 & 0 & 1 & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha X_w + \gamma Y_w + u_0 Z_w + u_0 d \\ \beta Y_w + v_0 Z_w + v_0 d \\ Z_w + d \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 d 为目标中心到光心的距离. 在目标的等效平面内, 空间点的坐标为 $(X_w, Y_w, 0)$, 于是式(6)可改写为

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{d} \begin{bmatrix} \alpha X_w + \gamma Y_w + u_0 d \\ \beta Y_w + v_0 d \\ d \end{bmatrix} \Rightarrow \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\alpha}{d} & \frac{\gamma}{d} & u_0 \\ 0 & \frac{\beta}{d} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在相机内参量和目标距离已知的条件下, 由匹配图像特征点坐标 (u, v) 可以求解出该特征点对应的以目标中心为原点、垂直于光轴的平面 R_1^2 中的坐标 $(X_w, Y_w, 0)$.

观瞄发控装置获取的图像与匹配图像的俯视角和方向角误差不超过 3° , 而旋转角又不影响目标图像点之间的相对关系, 因此在观瞄发控装置的视角下同样能够将三维坦克目标等效为世界坐标系中的 R_1^2 平面. 那么观瞄发控装置获取图像的特征点 (u', v') 所对应的世界坐标系坐标即为匹配图像中相应特征点对应的世界坐标系坐标 $(X_w, Y_w, 0)$, 由此建立了目标图像特征点及其空间点的映射关系, 记为

$$(u', v') \Leftrightarrow (X_w, Y_w, 0) \quad (9)$$

由图 7 可以看出, 目标平面与世界坐标系中的 $X_w - O_w - Y_w$ 平面重合, 且目标中心即为世界坐标系原点, 则观瞄发控装置的光心 O_C 到目标平面中心 O_w 的距离可由该视角下相机外参量 $t = [t_x \ t_y \ t_z]^T$ 求得, 将坦克目标的测距问题转化为对相机参量的标定.

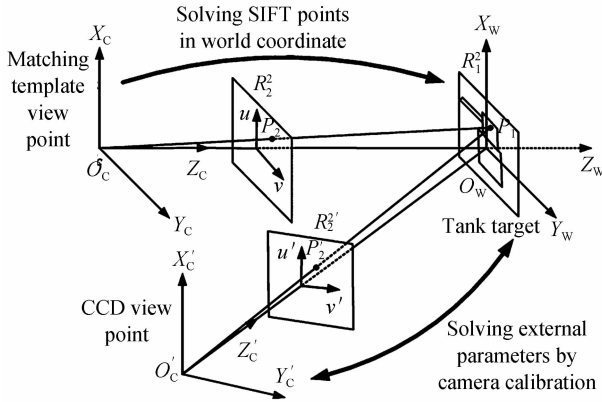


图7 单目测距模型

Fig. 7 Distance measurement model in monocular image

ZHANG^[17]的方法利用不同角度的平面模板图像进行参量标定,简单易行,准确度较高.本文引入其分析过程,但由于相机内参量已知,只要一幅图像即能完成外参量求解.由式(4)和(9)可得

$$s \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} r'_1 & r'_2 & r'_3 & t' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} r'_1 & r'_2 & t' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, s 为未知常量, r'_1, r'_2, r'_3 为世界坐标系到观瞄发控装置相机坐标系的旋转矩阵 \mathbf{R}' 的列向量.令

$$\mathbf{H} = \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} r'_1 & r'_2 & t' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (11)$$

\mathbf{H} 为单应矩阵,描述了世界坐标系平面上的点到对应像点的映射.将式(11)带入式(10)

$$\begin{cases} su' = h_{11}X_w + h_{12}Y_w + h_{13} \\ s'v' = h_{21}X_w + h_{22}Y_w + h_{23} \\ s = h_{31}X_w + h_{32}Y_w + h_{33} \end{cases} \quad (12)$$

式(12)经过变形得到

$$\begin{cases} X_w h_{11} + Y_w h_{12} + h_{13} - u' X_w h_{31} - u' Y_w h_{32} - u' = 0 \\ X_w h_{21} + Y_w h_{22} + h_{23} - v' X_w h_{31} - v' Y_w h_{32} - v' = 0 \end{cases} \quad (13)$$

令

$$\mathbf{H}' = [h_{11} \quad h_{12} \quad h_{13} \quad h_{21} \quad h_{22} \quad h_{23} \quad h_{31} \quad h_{32} \quad h_{33}]^T \quad (14)$$

则式(13)变为

$$\begin{bmatrix} X_w & Y_w & 1 & 0 & 0 & 0 & -u'X_w & -u'Y_w & -u' \\ 0 & 0 & 0 & X_w & Y_w & 1 & -v'X_w & -v'Y_w & -v' \end{bmatrix} \cdot \mathbf{H}' = 0 \quad (15)$$

多个对应点的方程叠加成 $\mathbf{S}\mathbf{H}'=0$,由该方程的最小二乘解可得到 \mathbf{H}' ,进而得到单应矩阵 \mathbf{H} .为了提高求解准确度,构造评价函数,利用LM(Levenberg-Marquardt)算法^[18]对单应矩阵进行优化.

由此得到的 \mathbf{H} 与真正的单应矩阵相差一个系数

λ ,即

$$\mathbf{H} = [h_1 \quad h_2 \quad h_3] = \lambda \mathbf{M}_1 \begin{bmatrix} r'_1 & r'_2 & t' \end{bmatrix} \quad (16)$$

可以推出

$$\begin{cases} r'_1 = \lambda \mathbf{M}_1^{-1} h_1, r'_2 = \lambda \mathbf{M}_1^{-1} h_2, r'_3 = r'_1 \times r'_2 \\ t' = \lambda \mathbf{M}_1^{-1} h_3, \lambda = \frac{1}{\|\mathbf{M}_1^{-1} h_1\|} = \frac{1}{\|\mathbf{M}_1^{-1} h_2\|} \end{cases} \quad (17)$$

则目标中心到观瞄发控装置相机光心的距离为

$$D = \sqrt{(t'_x)^2 + (t'_y)^2 + (t'_z)^2} \quad (18)$$

3 坦克目标测距结果与分析

本文以半实物仿真系统中目标模拟器生成的坦克图像作为被测对象,利用某型反坦克导弹配备的CCD相机对仿真目标进行测距,如图8所示.在相机与目标模拟器之间的安装距离和相对角度固定的条件下,通过图形工作站的建模调整目标大小和姿态变化,模拟不同距离和视角的坦克,为单目成像测距提供模板库和测试库.其中,模板库的目标距离设定为1 000 m,测试库的目标距离为200 m到2 500 m,涵盖了该型反坦克导弹的所有射程.CCD相机传感器的尺寸为1/3 inch,像元数为752×582,像元尺寸为6.5 μm×6.25 μm;光学镜头焦距为135 mm.由于相机焦距固定,其内部参量 \mathbf{M}_1 只需进行一次线下标定,并作为已知条件,按照ZHANG^[14]的方法标定结果如下: $\alpha = 20\ 743.615\ 4, \beta = 21\ 327.052\ 2, \gamma = 0.098\ 5, u_0 = 381.7837, v_0 = 278.6715$.整个试验程序的硬件运行平台为Intel 2.5 GHz CPU+4G内存,软件运行平台为Windows XP+Matlab2011b.

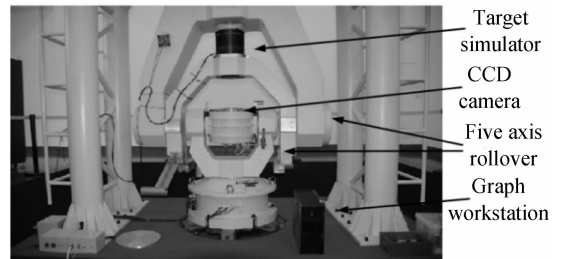


图8 坦克目标测距试验系统

Fig. 8 Experimental system of tank target distance measurement

3.1 姿态角估计

为了验证本文姿态角估计算法的性能,将其与传统的模型匹配方法^[19]进行对比,并以任意抽取的样本为例,描述其详细过程.首先提取目标图像的SIFT特征,得到表征该目标的一组向量;然后将其与图5的二级模板库进行匹配,得到32个模板中相似度最高的图像,图9即为该目标与二级模板库中最优模板的匹配结果.

二级模板库中的最优模板对应一级模板库的一个聚类空间,包含了姿态角相近的一组图像.对目标图像

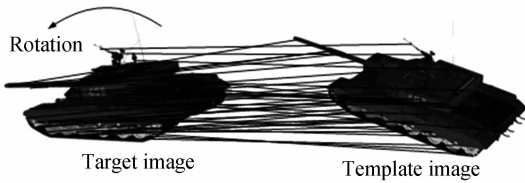


图9 目标与二级模板库最优模板的匹配结果

Fig. 9 SIFT matching result between target and optimal template in second-order datasets

与聚类空间进行特征匹配,得到相似度最高的模板,即为与目标姿态角最接近的图像,如图10所示。

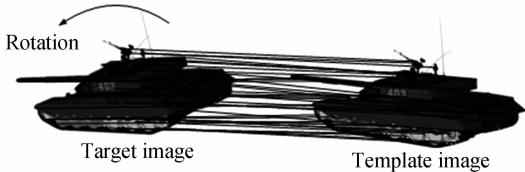


图10 目标与一级模板库最优模板的匹配结果

Fig. 10 SIFT matching result between target and optimal template in first-order datasets

本文算法与传统模型匹配方法的对比结果如表1所示,样本数目均为100.由于将模板特征点的提取转移到线下,本文算法仅需在线计算一幅目标图像,其最大运行时间约为0.75 s;而传统方法使用全局搜索策略,必须遍历整个模板库,最大估计时间达到了9.3 s左右,约为前者的12.4倍.表1中不同测试条件的匹配结果表明,姿态估计在噪音干扰条件下容易产生错误匹配点,导致部分匹配图像不是最优模板,其俯视角或方向角的估计误差超出了 3° .例如传统方法在2 500 m距离的匹配成功率即为87,而由于距离近的目标成像尺寸大,噪音干扰的影响较小,其在200 m距离

表1 传统模型匹配方法与本文算法的对比

Table 1 The comparison of traditional model matching method and the proposed algorithm

Template dataset and searching method	Distance /m	Success rate	Max error		Average time/s
			θ	φ	
Multistage template dataset & the proposed method	200	93	3.4°	1.2°	0.753
	500	94	3.8°	2.5°	0.714
	1 000	96	2.2°	3.7°	0.656
	1 500	93	3.1°	2.9°	0.611
	2 000	93	3.8°	1.3°	0.545
First order template dataset & traditional matching method	2 500	91	2.6	3.1	0.518
	200	90	3.7°	1.7°	9.282
	500	91	3.5°	3.4°	8.916
	1 000	93	1.8°	3.8°	8.444
	1 500	90	3.2°	1.4°	7.347
2 000	90	3.5°	2.2°	6.801	
2 500	87	3.7	1.9°	6.373	

的匹配成功率上升到90.模板库的目标距离为1 000 m,目标在该距离上的匹配准确度会高于其他距离,匹配成功率达到最大的93.本文方法相对应的匹配成功率分别为91、93和96,由此看出,该算法通过建立多级模板库,提高了模板搜索的方向性,相对于传统模板匹配方法降低了误匹配率。

3.2 坦克目标测距实验

为了进一步检验本文中测距方法的性能,对200 m到2 500 m范围内不同姿态的目标进行测试,并从中选取坦克左前方、左后方、右后方以及正面等四种典型姿态的测距结果进行分析,如表2所示.可以看出,在同一距离下,姿态变化时测距误差基本保持不变,而不

表2 坦克目标测距

Table 2 Distance measurement of tank target

Distance/m	Average measurement error under different attitude/m				Max ranging error/m	Max error rate/%	Average running time/s
	$\gamma=60^\circ\varphi=45^\circ$	$\gamma=120^\circ\varphi=90^\circ$	$\gamma=-45^\circ\varphi=120^\circ$	$\gamma=0^\circ\varphi=0^\circ$			
	$\theta=0^\circ n=20$	$\theta=0^\circ n=20$	$\theta=0^\circ n=20$	$\theta=90^\circ n=20$			
200	9.2	9.4	9.1	9.2	9.8	4.9	0.312
400	13.9	14.5	14.2	14.2	14.7	3.68	0.283
500	17.9	18.4	18.5	18.2	19.0	3.8	0.309
600	20.6	19.8	20.9	20.3	21.3	2.55	0.327
800	21.0	21.4	20.3	21.3	22.5	2.81	0.293
1 000	21.8	22.5	23.4	22.6	23.7	2.37	0.322
1 200	25.2	24.8	24.9	25.4	25.9	2.16	0.289
1 400	31.3	32.4	32.1	32.4	33.6	2.40	0.296
1 500	39.1	38.5	38.5	38.9	39.4	2.63	0.318
1 600	43.5	44.7	44.3	45.0	45.5	2.84	0.301
1 800	49.5	49.6	48.4	49.0	50.6	2.81	0.287
2 000	57.2	56.4	57.5	57.4	58.5	2.93	0.298
2 200	65.1	64.5	65.1	65.3	65.9	3.00	0.315
2 400	72.1	71.7	71.6	72.8	73.8	3.08	0.303
2 500	86.5	86.6	86.9	87.2	87.7	3.51	0.299

同目标距离下的测距误差发生了显著变化. 测距误差产生的原因主要有:

(1) 三维物体等效为平面时目标的空间点发生了微小的位移;

(2) 姿态角估计时少量匹配模板的姿态角与目标真实姿态角误差大于 3° (如表 1 中的最大估计误差一栏所示);

(3) SIFT 亚像素定位误差无法完全消除, 并且随着距离的增大, 该误差对测距准确度影响变大, 只能通过减小像素尺寸来提高准确度.

(1) 是本文测距方法的固有误差, 在测距试验中基本不变, 而(2)和(3)在不同的距离上对测距准确度的影响会发生变化. 当目标距离由 200 m 增大到 1 000 m 时, 特征点定位准确度随之提高, 但定位误差在该过程中对测距误差的影响却随之增强, 因此 200 m 到 500 m 的测距误差增加缓慢, 而 500 m 到 1 000 m 的测距误差增加较快; 1 000 m 到 2 500 m 范围内图像定位准确度逐渐降低, 定位误差对测距误差的影响也在增大, 该阶段的测距误差增加很快.

3.3 测距方法适用性验证

在反坦克导弹观瞄发控装置测距时, 实时性与准确度是极其重要的两个因素. 由表 1 和表 2 可知, 姿态估计算法的最大运行时间约为 0.75 s, 单目测距的时间约为 0.3 s, 整个算法耗时最大为 1.05 s, 满足实时性要求. 在反坦克导弹射程内, 本文测距方法的最大误差率为 4.9%, 最大测距误差为 87.7 m. 表 3 给出了导弹各个射程最大容许误差与本文方法在该距离的测距误差的对比. 假定坦克最大运动速度为 17 m/s, 将测距算法运行期间坦克运动的距离与最大测距误差计入最大系统偏差. 可以看出, 最大容许误差远大于最大系统偏差, 即本文方法适用于坦克目标测距.

表 3 最大容许误差与最大测距误差对比

Table 3 The comparison of maximal tolerance error and maximal distance measurement error

Range of fire/m	Max velocity /m · s ⁻¹	Run time/s	Max ranging error/m	Max system error/m	Max tolerance error/m
200	17	1.05	9.8	27.65	32
500	17	1.02	19.0	36.34	53
1 000	17	0.98	23.7	40.36	114
1 500	17	0.93	39.4	55.21	195
2 000	17	0.84	58.5	72.78	270
2 500	17	0.82	87.7	101.64	351

4 结论

本文将姿态角估计用于三维坦克目标的距离测量, 提出了多级模板库和多级 SIFT 特征匹配算法, 快速获取目标的最优匹配图像. 利用该模板和目标图像

模拟单目立体视觉, 提出一种单目测距模型. 在远距离和小视角偏差的条件下, 把三维坦克目标近似为双视角下的平面目标, 以匹配图像为桥梁, 建立目标图像特征点和平面目标坐标点的映射关系, 从而利用对相机的标定获得目标中心到相机 CCD 光心的距离. 对本文的姿态角估计算法和传统的模型匹配算法进行了对比, 然后采用 200 m 到 2 500 m 范围内的坦克目标对单目测距方法的性能进行了验证和分析, 结果表明, 基于姿态角估计的单目成像测距方法不需要测量观瞄发控装置的位置和角度, 能够快速实现三维坦克的远距离测距, 满足野战条件下反坦克武器系统对算法实时性和准确度的要求.

参考文献

- [1] WANG Di, WANG Jie, FU Xiao-ning. Ranging system and performance analysis based on monocular image and orientation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(7): 1112-1116.
王荻, 王洁, 付小宇. 基于单目图像和方向的测距系统及性能分析[J]. *光子学报*, 2011, **40**(7): 1112-1116.
- [2] HUANG Feng-shan, LIU En-fu, FANG Yi-xiang, et al. Single camera stereo vision recognition for parts' pose based on intelligent three coordinate measuring machine [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, **21**(5): 1326-1332.
黄凤山, 刘恩福, 方忆湘, 等. 基于智能三坐标测量机的零件位姿单目立体视觉识别[J]. *光学·精密工程*, 2013, **21**(5): 1326-1332.
- [3] JIANG Guang-wen, CHAO Zhi-chao, Fu Si-hua, et al. High-accurate camera calibration technique based on controllable rotation [J]. *Acta Optical Sinica*, 2010, **30**(5): 1308-1314.
姜广文, 晁志超, 伏思华, 等. 基于可控旋转的像机高精度标定技术[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1308-1314.
- [4] ZHANG Fa-quan, LU LI-ping, SHEN Man-de, et al. Measurement method to object distances by monocular vision [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 453-456.
张法全, 路立平, 沈满德, 等. 单目视觉目标距离测量方法研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 453-456.
- [5] WANG Jian, WANG Yuan-qing. A monocular stereo vision algorithm based on bifocal imaging [J]. *Robot*, 2007, **29**(1): 41-44.
王剑, 王元庆. 基于双焦成像的单眼立体视觉算法[J]. *机器人*, 2007, **29**(1): 41-44.
- [6] ZHANG Lai-xian, SUN Hua-yan, GUO Hui-chao, et al. Auto focusing algorithm based on largest gray gradient summation [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2013, **42**(5): 605-610.
张来线, 孙华燕, 郭惠超, 等. 基于图像灰度梯度最大值累加的自动调焦算法[J]. *光子学报*, 2013, **42**(5): 605-610.
- [7] SHI Chun-qin, ZHANG Li-yan, WEI Hu, et al. Monocular measurement in binocular measurement system with instantaneous random illumination [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, **18**(1): 257-265.
石春琴, 张丽艳, 韦虎, 等. 随机模式投影双目测量系统中的单目测量[J]. *光学·精密工程*, 2010, **18**(1): 257-265.
- [8] WU Gang, TANG Zhen-min. Distance measurement in visual navigation of monocular autonomous robots [J]. *Robot*, 2010, **32**(6): 828-832.
吴刚, 唐振民. 单目式自主机器人视觉导航中的测距研究[J]. *机器人*, 2010, **32**(6): 828-832.
- [9] HUO Ju, CUI Jia-shan, WANG Wei-xing. Error analysis of

- monocular visual position measurement based on coplanar feature points[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 650-657.
- 霍炬, 崔家山, 王伟兴. 基于共面特征点的单目视觉位姿测量误差分析[J]. *光子学报*, 2014, **43**(5): 650-657.
- [10] LI S, XU C, XIE M. A Robust $O(n)$ Solution to the perspective- n -point problem [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2012, **34**(7): 1444-1450.
- [11] HAN Yan-xiang, ZHANG Zhi-sheng, DAI Min. Monocular vision system for distance measurement based on feature points[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(5): 1110-1117.
- 韩延祥, 张志胜, 戴敏. 用于目标测距的单目视觉测量方法[J]. *光学·精密工程*, 2011, **19**(5): 1110-1117.
- [12] GONG J, FAN G, YU L, *et al.* Joint view-identity manifold for target tracking and recognition [C]. *Image Processing (ICIP)*, 2012, 19th IEEE International Conference on IEEE, 2012: 1357-1360.
- [13] GONG J, FAN G, YU L, *et al.* Joint target tracking, recognition and segmentation for infrared imagery using a shape manifold based level set[J]. *Sensors*, 2014, **14**(6): 10124-10145.
- [14] XIONG Ying, MA Hui-min. Extraction and application of 3D object SIFT feature[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2010, **15**(5): 814-819.
- 熊英, 马惠敏. 3维物体 SIFT 特征的提取与应用[J]. *中国图象图形学报*, 2010, **15**(5): 814-819.
- [15] LOWE D G. Distinctive image features from scale-invariant keypoints[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2004, **60**(2): 91-110.
- [16] GAN Wen-yan, LI De-yi, WANG Jian-min. An hierarchical clustering method based on data fields[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2006, **34**(2): 258-262.
- 淦文燕, 李德毅, 王建民. 一种基于数据场的层次聚类方法[J]. *电子学报*, 2006, **34**(2): 258-262.
- [17] ZHANG Z Y. A flexible new technique for camera calibration [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2000, **22**(11): 1330-1334.
- [18] LI Da, LI Shao-hong. New registration algorithm of sensor in each-centered earth-fixed (ECEF) coordinate system [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2007, **29**(1): 143-146.
- 李达, 李少洪. 一种新的地心地固坐标系传感器配准算法[J]. *系统工程与电子技术*, 2007, **29**(1): 143-146.
- [19] TERUI F, KAMIMURA H, NISHIDA S. Motion estimation to a failed satellite on orbit using stereo vision and 3D model matching [C]. *Proceedings of 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, Singapore, USA: IEEE, 2006: 1-8.