

基于动态目标结构特征的姿态实时定位方法

王 坤, 游安清, 贺 喜, 王 磊

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 针对动态目标的三维姿态不断变化, 研究了在单站跟踪模式下, 如何利用光测手段快速准确地对飞行目标的姿态进行实时定位的问题。在对目标结构有一定先验知识的前提下, 提出了一种基于动态目标结构特征的姿态实时定位方法。方法在跟踪闭环的基础上, 对光电摄像机实时采集的目标图像进行二维特征提取, 并将此二维特征与目标自身的三维结构特征相对应, 通过解算对应的数学关系模型, 实现对动态目标姿态的实时定位。通过 3 dmax 建立场景, 模拟飞机的动态飞行过程, 开展了仿真实验。方法对动态飞机目标姿态定位准确, 且每帧定位所需时间不大于 0.02 s, 处理频率达到 50 Hz, 满足了实时性需求。结果表明, 该方法对动态目标的姿态实时定位上具有一定的有效性。

关键词: 动态目标; 结构特征; 姿态定位; 实时性

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)11-3029-06

Method of real-time pose location based on structural feature of dynamic target

Wang Kun, You Anqing, He Xi, Wang Lei

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: As to the change of 3D pose of dynamic target without tags, how to locate the target's pose on single camera mode rapidly and accurately was researched. On the premise of the knowledge of target's structure, the method of real-time pose location based on structural feature was proposed. On the basis of tracking steadily, the 2D feature of target in image which was captured by optical camera was extracted. Corresponding the 3D features of the target with its 2D features in image, the mathematics mode could be concluded, and then the pose of dynamic target was located. The simulated experiment was developed with the imitation of airplane's flight. Applying this method on the imitation flight, the average time of processing was less than 0.02 s and the frequency of location was upper than 50 Hz. The experiment results show that this method is effective for pose real-time location of dynamic target.

Key words: dynamic target; structural feature; pose location; real-time

0 引言

相对于传统的雷达传感器,光学传感器有其自身优势。它的空间分辨率高,中程、近程(目标距我方数公里)是可见光传感器的有效作用范围^[1]。在此阶段,光电摄像机通过捕获、跟踪目标,通过图像对目标进行分析,得到目标的运动参数,实时确定目标不断变化的姿态。

对空间动态目标的光学观测,我国现在仍处于理论研究阶段,是尚未完全解决的难题。根据需求,在掌握非轴对称目标(飞机等结构复杂目标)自身结构的先验分析的基础上,文中专门针对一种结构已知的飞机目标提出了基于目标结构特征的姿态实时定位方法。方法在跟踪闭环的基础上,对光电摄像机实时采集的目标图像进行二维特征提取,并将此二维特征与目标自身的三维结构特征相对应,通过解算对应的数学关系模型,实现动态目标姿态的实时定位。

1 目标姿态及坐标系的设定

在具体讲述姿态定位方法之前,有必要先介绍目标姿态的定义以及相关的坐标系。

飞机坐标系和飞机三姿态角的定义主要参照西安飞机试验研究院院标准(Q/FY.J01.200)进行设计和定义。利用光电摄像机进行飞机姿态测量涉及到机体固连坐标系、机体地平坐标系、机体类地心坐标系、光电摄像机处地平坐标系,光电摄像机处的类地心坐标系,光电摄像机的摄像系统坐标系以及投影平面坐标系等七大坐标系,这样飞机姿态测量就需要处理七个坐标系的关系,即存在七次坐标变换。下面分别介绍一下这七个坐标系。

(1) 机体固连坐标系 $O_{1x_p y_p z_p}$: 固定在飞机上的坐标轴系,原点通常位于飞机的重心(也可以是特征较明显的控制点,如机体头部), x_p 轴位于飞机对称面内,平行于机身轴线(飞机纵轴),指向机头方向; y_p 轴垂直于飞机对称面,指向右方向(飞机横轴); z_p 轴在飞机对称面内,垂直于 x_p 轴指向下方(飞机竖轴),与 x_p, y_p 轴构成右手坐标系,如图 1 所示。



图 1 机体固连坐标系 $O_{1x_p y_p z_p}$ 示意图

Fig.1 Coordinate of $O_{1x_p y_p z_p}$

(2) 机体地平坐标系 $O_{1x_{pg} y_{pg} z_{pg}}$: 原点和三坐标轴均对应于地平坐标系,原点和机体固连坐标系原点重合,三坐标轴均和地平坐标系平行。

这两个坐标系可以定义飞机的三个姿态角如下。

1) 航向角 ψ : 机体固连坐标系绕轴顺时针旋转 ψ ,使得 x_p 轴在 $x_{pg} y_{pg}$ 平面内的投影与 y_{pg} 轴重合(即正北方向),一般有 $0 < \psi < 2\pi$ 。

2) 俯仰角 θ : 旋转 ψ 之后,机体固连坐标系绕 y_p 轴顺时针旋转 θ ,使得 x_p 轴与 y_{pg} 轴重合(或者说是旋转后, x_p 轴与 y_{pg} 轴的夹角)。且认为 y_p 绕轴顺时针旋转时(拇指指向 y_p 轴负向,右手螺旋方向),也即是机头上仰时 $\theta > 0$ 。一般有 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ 。

3) 滚转角 ϕ : 旋转 ψ, θ 之后,机体固连坐标系绕 x_p 轴顺时针旋转 ϕ ,使得 y_p 轴与 x_{pg} 轴重合(或者说是旋转后 ψ, θ, y_p 轴与 x_{pg} 的夹角)。且认为绕 x_p 轴顺时针旋转时(拇指指向 x_p 轴负向,右手螺旋方向), $\phi > 0$,一般有 $-\pi/2 < \theta < \pi/2$ 。

(3) 机体类地心坐标系 $O_{1x_{gc} y_{gc} z_{gc}}$: 原点和机体固连坐标系原点重合,三坐标轴和地心坐标系三坐标轴重合。

(4) 光电摄像机处地平坐标系 $O_{x_{yz}}$: 原点和光电摄像机瞄准光学系统坐标系原点重合的地平坐标系。

(5) 光电摄像机处类地心坐标系 $O_{1x_{kc} y_{kc} z_{kc}}$: 原点和摄像机地平坐标系重合,三坐标轴和地心坐标系三坐标轴平行。

(6) 光电摄像机的摄像系统坐标系 $O_{x''y''z''}$: 原点和摄像机地平坐标系原点重合,原点与成像平面中心的连线即成像系统主光轴方向为 z'' 轴正向。

如图 2 所示, O 为摄像机处坐标原点, C 为飞机重心, H 为 C 在地平面投影, COH 平面内与 z'' 垂直的方向为 y'' 正向, x'' 与 y'' 、 z'' 构成右手螺旋坐标系。

(7) 投影平面坐标系 $O'_{x'y'}$: 如图 2 所示, 位于平面 Q 上。

定义了坐标系之后, 飞机姿态角的解算即是解算投影平面坐标系 $O'_{x'y'}$ 到机体固连坐标系 $O_{x_p y_p z_p}$ 转换关系, 下一节将对单个光电摄像机跟踪模式下的飞机姿态定位原理进行分析。

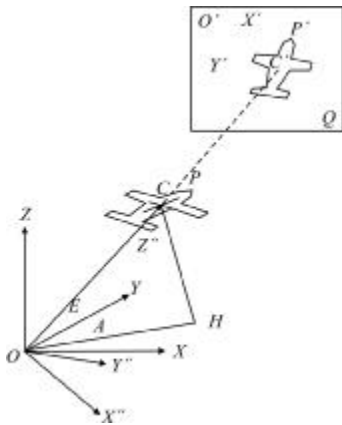


图 2 光电摄像机坐标系示意图
Fig.2 Coordinates of camera

2 单站模式的姿态定位原理分析

单个光电摄像机对动态目标进行闭环跟踪的前提下, 文中的姿态定位思想是通过将成像目标的特征和自身的结构特征进行对应, 并解算这一对应关系, 从而得到目标在某一时刻的姿态。这一算法的关键就在于目标特征的持续稳定提取和姿态解算模型的建立。

2.1 目标特征点的提取

由于特征点具有抗干扰、旋转不变性等优良特点, 因此这里选择对光电摄像机采集的每帧飞机目标的进行特征点提取, 为了后续姿态的解算, 要求在飞机飞行过程中, 每帧提取的特征点的相对位置保持不变, 而飞机相对于摄像机成像系统的位置是不断变化的, 因此这是姿态定位的一个难点部分。

根据对当前经典的 Harris 算子的分析^[2-3], 在对应个人的需求的基础上, 提出了一种局部区域的特征点连续提取方法, 力求实现稳定性好、精度高的特征点提取, 具体步骤如下:

(1) 对第一帧图像, 利用全局 Harris 算子提取预设的 N 个特征点, 并运用局部非最大抑制操作, 使得特征点呈离散状分布, 并记下它们的位置;

(2) 对后续帧图像, 以(1)中得到特征点初始位置为中心, 提取 N 个 19×19 的兴趣区域, 分别对这 N 个兴趣区域使用局部 Harris 算子, 每个区域只提取一个特征点, 并优化到亚像素级别, 记下特征点的位置;

(3) 以上一帧得到的特征点的位置为中心, 重复(2), 直到特征点的提取结束。

应用这一特征点提取算法, 可以实现对连续视频帧中目标的特征点的持续稳定提取。

2.2 姿态解算模型

在对成像目标进行实时特征提取之后, 获取了目标每一时刻的特征点的位置, 通过建立特征对应关系模型, 即可获取目标的实时姿态^[4]。

假设飞机上有一特征点在机体固连坐标系下的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 其对应的图像坐标为 (u, v) , 则这一对应关系可以表示为:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = f\{(\psi, \theta, \phi), (\lambda_p, \phi_p), (\lambda_A, \phi_A), (A, E)\} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $f\{\}$ 为特征像点和三维特征点之间的对应关系; (ψ, θ, ϕ) 为飞机的三个姿态角; (λ_p, ϕ_p) 为飞机所在的经纬度; (λ_A, ϕ_A) 为光电摄像机所在的经纬度; (A, E) 为光电摄像机闭环跟踪的方位角和俯仰角。

在已知 n 点对应的情况下, (1) 式成为一个非线性方程组, 函数 $f\{\}$ 的形式非常复杂, 这给方程组的求解造成了很大困难^[5-7]。考虑实际需要要对目标进行姿态定位的情况中, 摄像机和目标之间的距离在几公里之内, 为了简化模型, 可以认为 $\lambda_A \approx \lambda_p, \phi_A \approx \phi_p$, 这意味着可近似认为机体地平坐标系 $O_{1x_p y_p z_p}$ 和光电摄像机处地平坐标系 O_{xyz} 相互平行, 则公式(1)可以表示为:

$$z''_p \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_p \\ y_p \\ z_p \end{bmatrix} + R_0 \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: R 为旋转矩阵; R_0 为摄像机和目标之间的距离, 即目标斜距。有:

$$R = R_x(E - \pi/2) R_z(-A) R_x(\pi) R_x(-\phi) R_y(-\theta) R_z(\pi/2 - \psi)$$

式中： $R_a(\alpha)$ 绕 a 轴逆时针旋转 α 。

令 $R = \begin{bmatrix} i \\ j \\ k \end{bmatrix}$, 其中 i, j, k 为三维行向量, 则根据公

式(2)可以得到:

$$x' = f \frac{iP}{kP + R_0} \quad y' = f \frac{jP}{kP + R_0} \quad (3)$$

上式描述了机体固连坐标系下 3D 点到投影平面坐标系下 2D 点的透视投影关系。

假设目标上 n 个三维特征点 $P_i (i=1, \dots, n)$, 其在投影平面上的对应像点坐标为:

$$\begin{aligned} x'_i &= f \frac{iP_i}{kP_i + R_0} \\ y'_i &= f \frac{jP_i}{kP_i + R_0} \end{aligned} \quad (4)$$

对上式进行变换, 分子、分母同除以 R_0 , 并令 $I = i/R_0, J = j/R_0, \varepsilon_i = kP_i/R_0$, 将其带入公式(4), 得到:

$$\begin{aligned} x'_i &= f \frac{IP_i}{1 + \varepsilon_i} \\ y'_i &= f \frac{JP_i}{1 + \varepsilon_i} \end{aligned} \quad (5)$$

当目标尺寸远小于目标斜距 R_0 时, ε_i 即成为一个无穷小量, $\varepsilon_i \ll 1$ 。将 $1/(1 + \varepsilon_i)$ 做泰勒展开, 并取一阶近似, 得到:

$$\frac{1}{1 + \varepsilon_i} \approx 1 - \varepsilon_i, (i \in \{1, \dots, n\}) \quad (6)$$

将公式(6)代入公式(5), 并略去 $1/R_0^2$ 的二阶小量, 可以得到:

$$x_i^p = f(I \cdot P_i)(1 - \varepsilon_i) \approx fI \cdot P_i \quad (7)$$

因此可以得到:

$$\begin{aligned} x_i^p &= fI \cdot P_i \\ y_i^p &= fJ \cdot P_i \end{aligned} \quad (8)$$

比较公式(8)和公式(5), 得到:

$$\begin{aligned} x_i^p &= x'_i(1 + \varepsilon_i) \\ y_i^p &= y'_i(1 + \varepsilon_i) \end{aligned} \quad (9)$$

联立式公式(8)和公式(9), 可以得到:

$$\begin{cases} I \cdot P_i = x'_i(1 + \varepsilon_i)/f \\ J \cdot P_i = y'_i(1 + \varepsilon_i)/f \end{cases} \quad (10)$$

由公式(10)式可知, n 点对应可以产生 $2n$ 个约束方程, 写成矩阵形式即为:

$$G \begin{bmatrix} I^T \\ J^T \end{bmatrix} = Z \quad (11)$$

式中: G 为 $2n \times 6$ 的矩阵; Z 为 $2n$ 维的矢量, 其具体形式为:

$$G = \begin{bmatrix} P_1^T & 0^T \\ 0^T & P_1^T \\ \dots & \dots \\ P_n^T & 0^T \\ 0^T & P_n^T \end{bmatrix}, \quad Z = \begin{bmatrix} x'_1(1 + \varepsilon_1)/f \\ y'_1(1 + \varepsilon_1)/f \\ \dots \\ x'_n(1 + \varepsilon_n)/f \\ y'_n(1 + \varepsilon_n)/f \end{bmatrix}$$

求解公式(11), 可以得到矢量 I, J , 进而可以得到目标姿态参数。

为了提高姿态参数的估计精度, 可以在上述数学模型的基础上, 采用迭代方法获取更高精度的姿态, 具体步骤如下:

(1) 对任意的 $i, i \in \{1, \dots, n\}, n \geq 3$, 给定初值 $\varepsilon_i = 0$;

(2) 利用最小二乘法解方程(11), 得到矢量 I, J , 则有:

$$\begin{bmatrix} I^T \\ J^T \end{bmatrix} = (G^T G)^{-1} G^T Z \quad (12)$$

(3) 计算目标斜距 R_0 和旋转矩阵 R , 根据步骤(2)得到的 I, J , 可以得到:

$$\begin{aligned} R_0 &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{|I|} + \frac{1}{|J|} \right) \\ i &= \frac{I}{|I|} \quad j = \frac{J}{|J|} \quad k = i \times j \end{aligned} \quad (13)$$

(4) 对任意的 $i, i \in \{1, \dots, n\}$, 存在关系 $\varepsilon_i = k \cdot P_i / R_0$, 若相邻两次迭代的 ε_i 的变化量 $\Delta \varepsilon_i < t_0$, 其中 t_0 为一设定的小量, 则停止迭代;

(5) 根据步骤(3)中得到的 i, j 和 k 光电摄像机实时反馈的方位、俯仰 (A, E) , 可计算目标航向角 ψ , 俯仰角 θ 以及滚转角 ϕ 。

3 仿真实验结果与分析

为了验证算法的有效性和实时性, 在 VS 平台上开展了仿真实验。如图 3 所示, 为在 3dmax 中仿真的使用摄像机来定位运动飞机姿态的场景。

仿真场景中飞机的姿态变化设定为: 航向角为 $90^\circ \sim 80^\circ \sim 90^\circ \sim 100^\circ \sim 90^\circ$, 俯仰角为 $0^\circ \sim -5^\circ \sim 0^\circ \sim 5^\circ \sim 0^\circ$, 滚转角为 $0^\circ \sim 2.5^\circ \sim 0^\circ \sim -2.5^\circ \sim 0^\circ$ 。图中“十字”为世

界坐标系的 x, y 坐标轴,在世界坐标系下,仿真摄像机的位置,即光心坐标为(500, -350, -450),仿真摄像机焦距锁定设置为 $f=114\ 5.821\ \text{mm}$ 。飞机沿 x 轴正向飞行,从(0,0,0)到(1 000,0,0)。在飞机飞行过程中,摄像机始终对飞机头部顶点闭环跟踪。摄像机对飞行过程采集一个 100 帧的图像序列,飞机位置和姿态角均关于帧数成线性变化。

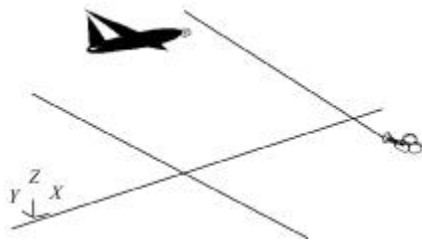


图 3 定位运动飞机姿态场景
Fig.3 Scene of locating airplane pose

以机头为机体固连坐标系原点,参照图 1,建立机体固连坐标系。使用 2.1 节中的目标特征点提取算法,稳定提取目标的四个特征点,其中一帧的检测结果如图 4 所示。

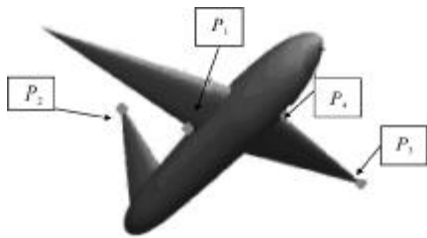


图 4 图像序列中某一帧的特征点检测结果
Fig.4 Tested results of feature points in some frame

而在机体固连坐标系下,其坐标为: $P_1=(-4.487, 0.589, -0.139)$, $P_2=(-8.542, 0.023, -3.5325)$, $P_3=(-4.949, -4.582, -1.273)$, $P_4=(-2.832, -0.738, -0.149)$ 。应用中姿态定位算法,姿态判定结果与设定值的比较如图 5 所示。

从图中可以看出,航向角和目标斜距的解算值和真实值基本吻合,而俯仰角和滚转角的误差则要大一些,但是二者变化趋势和真实变化趋势相一致。经过对定位结果进行分析比较,三姿态角和斜距的绝对误差均值为: $\delta\psi=0.84^\circ$, $\delta\theta=2.78^\circ$, $\delta\phi=1.92^\circ$, $\delta R=36.80\ \text{mm}$ 。虽然在算法中应用了迭代优化的过程,但实验发现迭代次数均小于 3,因此并没有因为

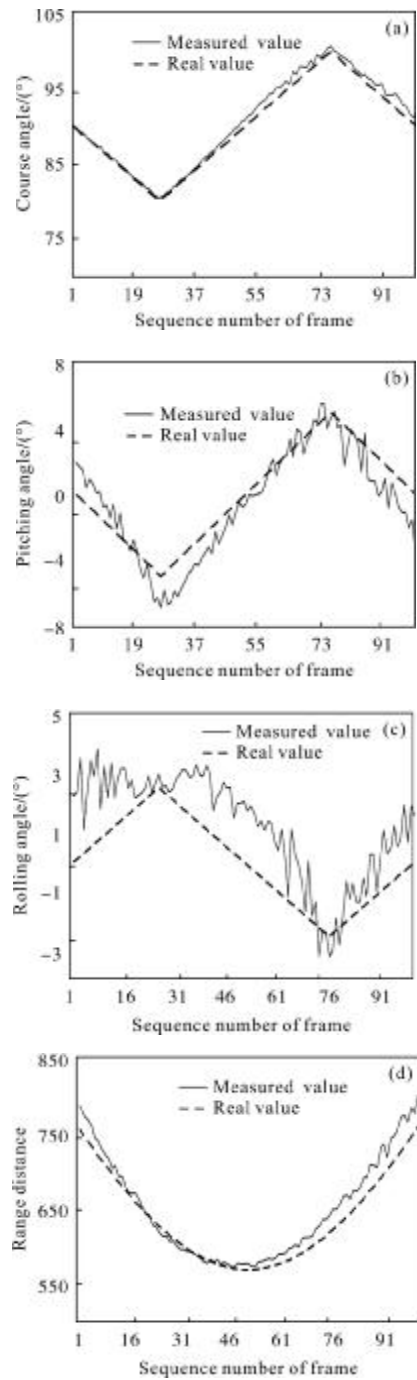


图 5 目标姿态定位结果与真实值比较
Fig.5 Compared result between target pose location and real value

优化而增加解算时间,每帧姿态定位所需时间如图 6 所示。

除第一帧的姿态判定时间为外,其它帧的计算时间均在 0.02 s 左右,即定位频率达到 50 Hz,这基本可以满足实时性的要求。仿真实验结果表明,文中算法在对动态飞行目标进行姿态定位上具有一定的有效性和实时性。

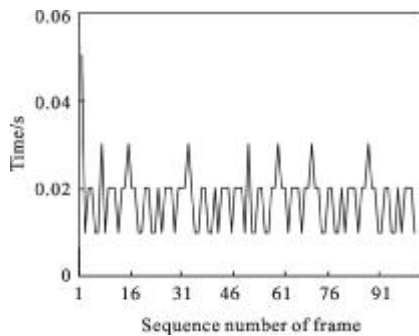


图 6 每帧姿态定位所需时间

Fig. 6 Time of pose location for every frame

4 结 论

针对姿态判定的一般过程和目标本身的结构特点,重点研究了在单站闭环跟踪模式下,如何快速有效地完成目标的姿态定位。首先建立了相关的七大坐标系,定义了目标姿态角,设计了一种成像目标特征点提取算法,建立了姿态解算模型,并结合了迭代优化算法提高了姿态解算精度,而且算法的处理频率达到 50 Hz。实验表明,算法在对动态飞行目标进行姿态实时定位上具有有效性。但是,姿态的解算仍然存在误差,特别表现在目标俯仰角和滚转角上,因此如何进一步优化算法,提高姿态解算精度是后续将要重点研究方向。

参考文献:

- [1] Yu Qifeng, Lu Hongwei, Liu Xiaolin. Image-based Precision Measurement and Motion Measurement[M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
于起峰, 陆宏伟, 刘肖琳. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [2] Zhang Dexin, Ma Guangfu, Shao Xiaowei. Image mosaic for one aerial reconnaissance CCD camera based on object straight edge nodes [J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(1): 515-519. (in Chinese).
张德新, 马广富, 邵晓巍. 利用目标直线边缘交点的某型航侦 CCD 相机图像拼接 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(1): 515-519.
- [3] Harris C, Stephens M. A combined corner and edge detector [C]//Proceeding of Alvey Vision Conference, 1988: 189-192.
- [4] Han Bin, Zhou Zengyu, Wang Shitong. Improved sub-pixel rapid corner detecting algorithm [J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology, 2009, 23 (2): 146-149. (in Chinese)
韩斌, 周增雨, 王士同. 改进的亚像素级快速角点检测算法[J]. 江苏科技大学学报, 2009, 23(2): 146-149.
- [5] Tang Zili, Ma Caiwen, Liu Bo, et al. An approach of determination of object's 3D pose from mono-view [J]. Acta Photonica Sinica, 2004, 33 (12): 1480-1485. (in Chinese)
唐自力, 马彩文, 刘波, 等. 单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. 光子学报, 2004, 33(12): 1480-1485.
- [6] Fadi Dornaika, Christophe Garcia. Pose estimation using point and line correspondences [J]. Journal of Real-Time Imaging, 1999, 5(3): 215-230.
- [7] Adnan Ansar, Kostas Daniilidis. Linear pose estimation from points or lines [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(4): 1-12.
- [8] Ma Songde, Zhang Zhengyou. Computer Vision-compute Theory and Algorithm Basis [M]. Beijing: Science Press, 1998. (in Chinese)
马颂德, 张正友. 计算机视觉——计算理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1998.