

# 基于 Hough 与改进局部 Radon 变换的 多目标姿态提取

陆陶<sup>1,2</sup>, 苏秀琴<sup>1,†</sup>, 杨露<sup>1,2</sup>, 梁金峰<sup>1,2</sup>, 董亚洲<sup>3</sup>

(1 中国科学院西安光学精密机械研究所, 西安 710119)

(2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3 东南大学 毫米波国家重点实验室, 南京 210096)

**摘 要:**针对大视场、小目标、多目标特点下基于数字图像的飞行目标姿态判读任务, 选用顶帽运算抑制背景. 提取目标骨骼, 利用改进 Radon 坐标系计算极限角分辨率. 通过传统 Hough 变换后加上一次改进局部 Radon 变换的方法提取多目标姿态参量, 解决了线段位置检测问题, 同时消除了小目标、多目标情况下, 单纯使用 Hough 变换处理时产生的误判现象. 提出一种变步长快速游标尺度逼近算法, 在目标尺度提取上获取了较高的判读准确度.

**关键词:**图像处理; 姿态判读; 自适应准确度; Radon 变换; 多目标; 小目标

**中图分类号:** TP753

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-4213(2009)10-2722-6

## 0 引言

飞行目标在空中的三维姿态是反映飞行目标状态的重要运动参量. 目前在靶场测量中对空间目标的姿态测量主要分两类: 一类是利用目标内部的陀螺及电路组成的测量系统将测量的飞行数据传回地面, 即遥测法; 另一类则是通过光学摄影方式拍摄目标的序列图像, 再利用图像处理的方法求解目标飞行姿态, 即姿态外测法. 在 20 世纪 90 年代, 基于 GPS 的姿态遥测设备已经商用化, 但其在小目标高速机动情况下的应用受到很大限制. 在小目标的外测法应用中, 通过中轴线法提取目标姿态的方法已经被广泛地讨论<sup>[1-4]</sup>, 并已拓展到单站数据姿态提取的领域<sup>[2-3]</sup>. 随着计算机性能和 CCD 器件的发展, 基于数字电视的外测法得到更广泛地应用, 同时基于多站数据的姿态提取由于其较高的准确度和较好的稳定性成为应用主流. 单站姿态提取可以作为多站姿态提取在极端恶劣情况下的补救措施. 在多站数据姿态外测法中, 对单站数据图像进行处理获取目标二维姿态是进行交会的计算的基础, 其正确性和准确度直接决定三维姿态参量的计算. 传统方法使用 Hough 变换对含有目标影像的数字图像进行处理, 对目标直线边缘检测有良好的效果, 但其处理结果无法体现线段在图像中的位置<sup>[5]</sup>. 同时, 在大视场、小目标、多目标情况下, 使用 Hough 变换可能检出大量伪峰, 失去其实用性. 针对此类图像特点, 本文

在顶帽运算抑制背景后提取目标骨骼, 并通过在传统 Hough 变换后加上一次改进的 Radon 变换的方法提取多目标姿态参量, 解决了线段位置检测问题, 同时消除了小目标、多目标情况下单纯使用 Hough 变换处理时产生的误判现象. 同时提出一种变步长快速游标尺度逼近算法. 在目标尺度提取上获取了较高的判读准确度, 为后续处理打下良好基础.

## 1 大视场、多目标、小目标特征分析

针对天空背景下可见光运动小目标、多目标的检测, 通过分析, 可以发现此类图像的单帧数据可以描述为

$$f(x, y) = t(x, y) + b(x, y) + n(x, y)$$

式中  $f(x, y)$  为获取的可见光场景图像,  $t(x, y)$ ,  $b(x, y)$ ,  $n(x, y)$  分别为目标图像、背景图像和噪声图像. 通过大量靶场测量试验可知, 目标  $t(x, y)$  往往呈现较短和线状目标的形态特征, 而背景  $b(x, y)$  呈现缓变特征.

## 2 Hough 变换与改进的局部 Radon 变换

### 2.1 Hough 变换

在直线检测领域, Hough 变换因为其基于统计的特性, 具有相当高的精确度. 变换通过空间映射概念, 将原始图片 (F 空间) 中的点信息, 映射为 Hough 空间 (H 空间) 中的线信息, 即  $F: (x, y) \xrightarrow{\mathcal{R}} H: (\rho, \theta)$ . 其中规定映射关系为  $\mathcal{R}: x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$ . 通过在 Hough 空间中进行检峰操作就能找到 F 空间中的直线信息. 传统 Hough 变换运算量较大,

<sup>†</sup> Tel: 029-88887680

Email: xqsu@opt.ac.cn

收稿日期: 2007-12-24

修回日期: 2008-02-26

在实际应用中,采用一些特殊方法,如基于假设检验策略的方法<sup>[7]</sup>等对降低其运算复杂度做出了尝试。

## 2.2 改进的局部 Radon 变换

为解决 Hough 变换无法确定线段位置的问题,提出了改进的 Radon 变换<sup>[5]</sup>。改进的 Radon 变换通过更改变换域坐标体系使线段的检测成为可能,同时由于以图像边沿像素为直线坐标起点,可以自然达到数字图像直线分辨率极限,具有自适应准确度的特点。改进的 Radon 变换使用一条直线经过图像两条边界的截矩值确定一条直线,通过 4 条图像边的两两组合遍历图像分辨率所能支持的所有直线。

局部化 Radon 变换将全局 Radon 变换基于沿图像边界端点间的全线段积分变为沿图像边界端点间的部分线段积分(如图 1)。 $\lambda'$  为需要检测的直线段的长度, $\lambda'$  的选择需要考虑所检测目标的长度和图像分辨率的综合效应。

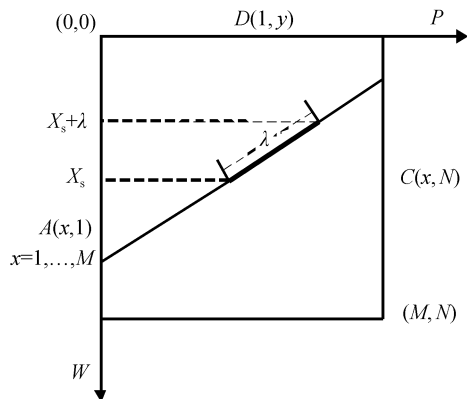


图 1 局部化 Radon 变换示意(a<sub>1</sub>)

Fig. 1 Sketch map of part radon transform (a<sub>1</sub>)

## 3 基于联合 Hough 与改进的局部 Radon 变换多目标姿态提取

Hough 变换在多目标、小目标情况下有致命缺陷。当积分路径垂直于目标中轴经过多个目标时,虽然每个目标仅给予累加器较小的增益,但是累加器的最终结果很可能超过积分路径通过单个目标产生的增益,造成不可接受的错峰检测。另外由于坐标系的选取,Hough 变换不能确定线段的精确位置,所得结果不能直接应用于空间多目标姿态交汇。最后,单纯使用 Hough 变换无法针对不同尺寸的数字图像自适应地获取合理的角度分辨率。

对本文提到的改进 Radon 变换而言,如果对原始图像直接使用,则因为引入线段位置信息,对变换域的数据处理成为三维数据空间密度凝聚点搜索问题,检峰操作的运算复杂度大大增加。同时,由于变换域分散在 6 个不可拼接的数据空间中,而处于分区边界附近的线段会在对应的若干个数据空间中有峰值体现,所以在 6 个数据空间中进行的检峰操作

也会带来大量伪峰问题,使算法失去实用性。

针对 Hough 变换方便检峰和改进 Radon 局部变换的线段检测能力,提出结合二者优势的二次筛选算法,如图 2。先利用改进的 Radon 坐标体系计算出图片最佳角度分辨率,依据此值通过 Hough 变换检测出一组疑似线段所在直线方程参量,再将疑似线段所在直线方程参量从  $(\rho, \theta)$  映射到  $(x, y)$ ,将直线经过路径上的图像数据取出,放置在一维数组 A 中,然后指定长度与目标可比拟的增益为 1 的游标,与数组中数据相乘,得到以游标偏移量为横坐标,相乘累加结果为纵坐标的判别数组 B。对 B 数组做高度约等于游标尺度,峰尖张角接近 45° 金字塔样峰值检测,检出则为真实峰值,塔尖横坐标对应游标偏移量,与直线方程复合计算可以得到质心在原图中的坐标。若对 B 数组无法检出金字塔样峰值,则判定该组直线坐标为 Hough 变换缺陷造成的伪峰,可以丢弃。该算法在保证检测正确性和准确度的前提下尽可能地降低了运算复杂度。最后,对检测出的峰值两两进行距离计算,小于某个预设阈值的可认为是同一目标,给予合并。因为去伪过程可能损失一些结果,所以需要反复进行全部操作直到得到所需数量的目标为止。

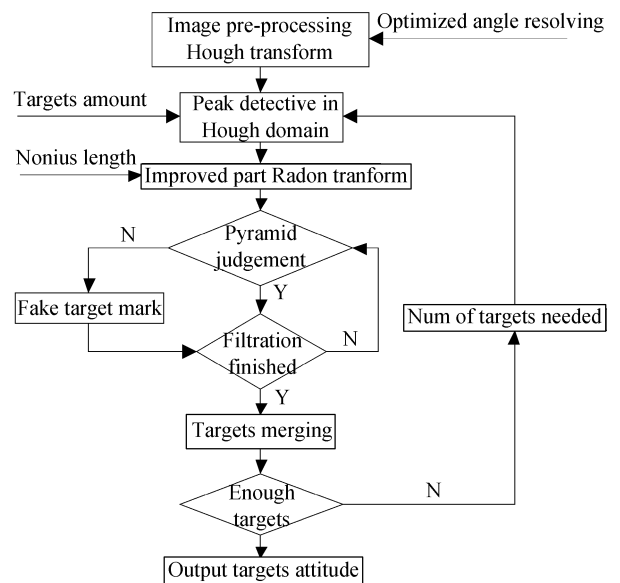


图 2 算法流程

Fig. 2 Arithmetic flow chart

### 3.1 图像预处理

为了进行 Hough 运算,针对图像缓变背景、小目标的特征,使用顶帽运算和提取骨骼操作。顶帽运算通过先进行腐蚀操作抑制小目标得到图像背景,再使用原图(图 3)减去背景图的方法,对抑制图像中的缓变不均匀背景取得良好的效果<sup>[8]</sup>(图 4)。针对目标窄而短的特点,在抑制背景后直接提取其骨架目标成为线目标,可以认为骨骼形态非常接近于

目标的中轴线,同时因为提取骨架后残留的毛刺可以在后续的变化中得到良好的抑制,不影响后续变化的精确度,所以无需再进行常规提取骨架处理后附加的修剪操作.

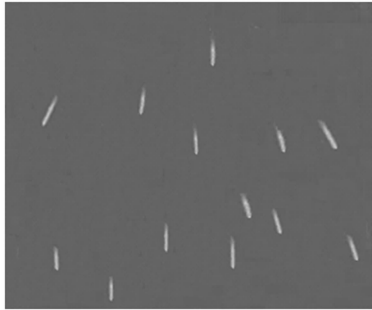


图3 原始图像(c<sub>1</sub>)  
Fig.3 Original image(c<sub>1</sub>)



图4 顶帽变换后(c<sub>2</sub>)  
Fig.4 Preprocessed image(c<sub>2</sub>)

### 3.2 Hough 变换初次筛选

根据基于改进 Radon 变换坐标系计算出的角度分辨率极限,对经过提取骨架已经二值化的图像

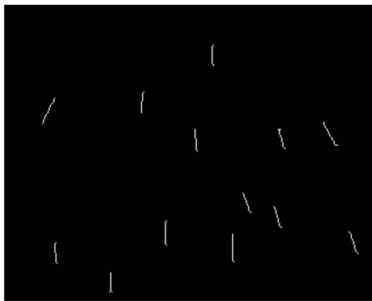


图5 提取骨骼(c<sub>3</sub>)  
Fig.5 Skeleton image(c<sub>3</sub>)

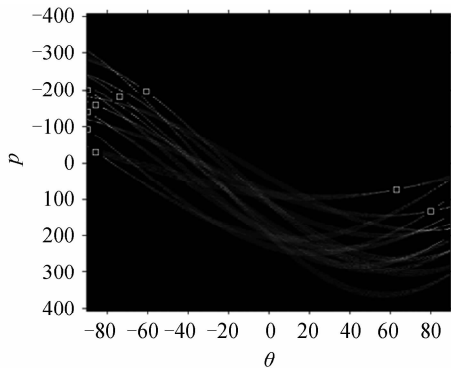


图6 Hough 变换域检峰(d<sub>1</sub>)  
Fig.6 Hough image with peaks(d<sub>1</sub>)

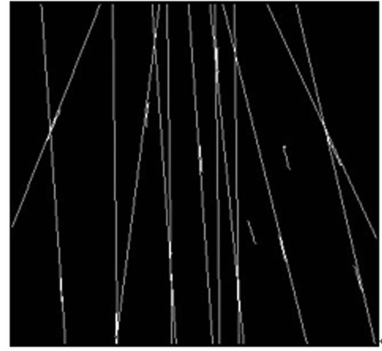


图7 骨骼图与 Hough 峰值反变换叠加(c<sub>4</sub>)  
Fig.7 Skeleton image with fake lines(c<sub>4</sub>)

(图5)使用 Hough 变换, Hough 域峰值检测如图6,还原到图像域(图7)明显出现错检.

### 3.3 改进的局部 Radon 变换去除伪峰

对 Hough 初筛得到的疑似直线方程参量逐一进行改进的局部 Radon 变换算法进行验证.因为目标尺度精确度直接影响交会精确度,所以需要游标尺度  $\lambda$  尽量接近目标尺度.常规的尺度逼近算法需要游标尺度遍历整个目标长度可能的分布区间,直到与目标匹配为止,效率较低,为此,本文提出一种变步长快速游标尺度逼近算法.

游标尺度  $\lambda$  直接决定乘加后得到金字塔峰尖的形态.当  $\lambda$  大于目标尺度,金字塔峰尖成为具有和目标尺度相关高度的高台;当  $\lambda$  等于目标尺度,高台维持高度变窄至产生特征金字塔;当  $\lambda$  小于目标尺度,金字塔高度开始发生衰减;当  $\lambda$  退化为 1,则金字塔退化为未经乘加的原始数据.基于上述判决准

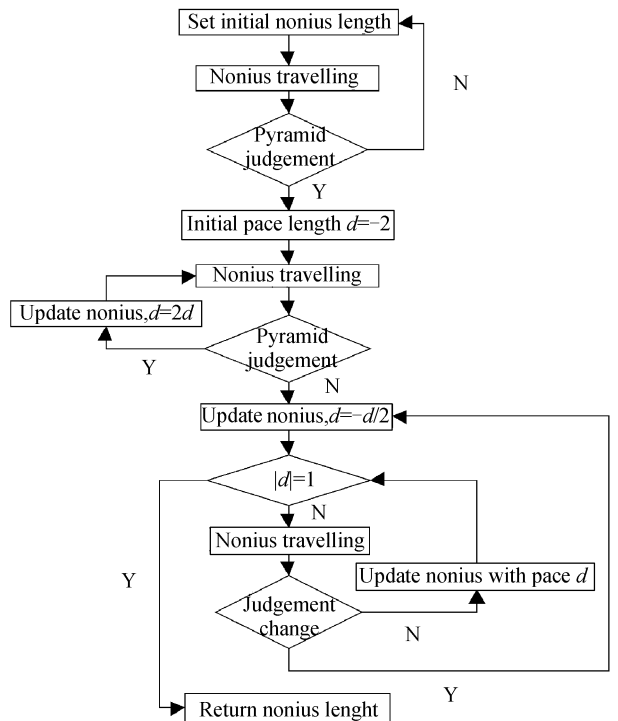


图8 变步长快速游标尺度逼近算法流程  
Fig.8 Arithmetic flow chart

则,指定一个略大于目标尺度的游标,记录金字塔高台特征高度,此后逐步减小  $\lambda$  值,初始步长为  $d = -2$ ;若金字塔未发生高度退化则继续减小  $\lambda$ ,  $d = 2d$ ,重复此步骤直到判决结果发生变化;判决结果发生变化以及此后每次变化取  $d = -d/2$ ,不变则保持步长为  $d$ ,直到  $|d| = 1$ ,此时  $\lambda$  即为目标尺度投影长度.算法基于大步逼近目标值所在区间,区间内再通过多次回头小步逼近的思想,大大提高了目标值搜索的效率,如图 8.在逼近游标最佳匹配值的同时返回到达峰尖值时的游标偏移量  $\Delta$ ,  $\Delta + \lambda/2$  为目标质心在坐标轴投影相对原点的偏移量.

在工程中,为了达到算法的简便高效,对图像中直线上原始数据的提取,使用其在坐标轴上的投影.其中倾角在  $(-\pi/2, -\pi/4) \cup (\pi/4, \pi/2)$  区间的投影到纵坐标,在  $(-\pi/4, \pi/4)$  区间的投影到横坐标以降低误差.倾角定义为目标与水平轴的夹角.

根据目标尺度确定其投影值分布区间;对某特定目标尺度可能产生的所有投影值分别进行算法仿真;将各个投影值所需的算法调用次数求取数学期望,从而得到某特定目标尺度所需调用局部 Radon 变换次数的数学期望.其中,当使用常规逼近算法时长度为  $L$  的目标,其投影长度将分布在  $(L/\sqrt{2}, L)$  区间内.当算法进入点取游标长度为  $3L/2$  时,调用局部 Radon 变换的次数的数学期望为  $0.65L$  次.变步长快速游标尺度算法的稳定性仿真结果如图 9.

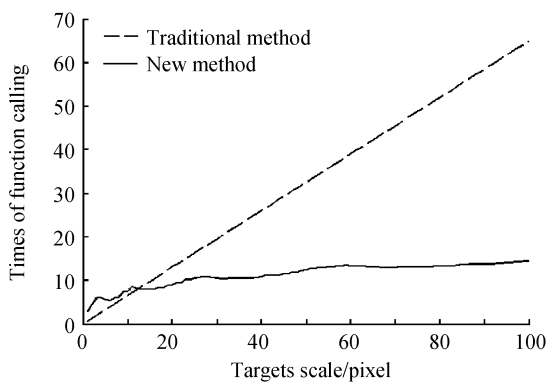


图 9 变步长快速游标尺度算法稳定性仿真  
Fig. 9 Simulation of the arithmetic

图 9 中横轴代表目标长度,纵轴代表局部 Radon 变换被调用的次数.其中实线代表变步长快速游标尺度逼近算法性能,虚线代表常规算法性能.在目标长度低于 10 像素时,该算法效率等同或稍落后于常规算法,然而当目标尺度逐渐增大时,该算法则表现出良好的稳定性,对局部 Radon 变换进行调用的次数以非常缓慢的速度上升,而常规逼近算法的调用次数则随目标尺度的变大快速上升导致计算量剧增.该算法的有效性将在整套计算流程的最终结果中得到验证.并可得出结论,算法的基本思想在

于通过倍增步长快速逼近目标值,所以在针对较大目标(20 像素以上)时,会具有更显著的优势,当目标长度小于 10 个像素时算法优势不明显.

图 10 为变步长快速游标尺度算法进行过程中对目标特征金字塔的判决仿真.图 10(a)两图代表包含目标直线上的图片亮度增益和经过游标乘加后得到的特征金字塔样峰尖.图 10(b)两图代表不包含目标的直线上的亮度增益,明显经过游标乘加后无法形成特征金字塔,可以认定该组直线方程坐标为错检,算法将停止迭代并标记错点.

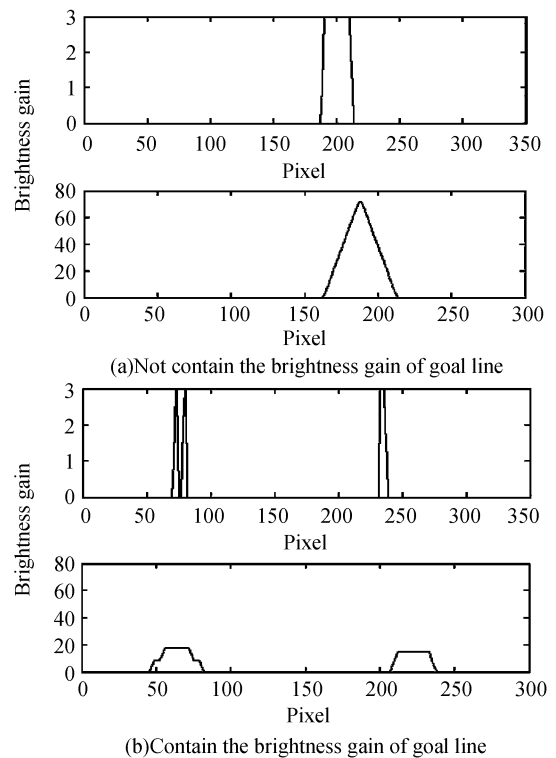


图 10 两个疑似峰值点的验证计算仿真结果( $d_2$ )  
Fig. 10 Comparison between true and fake peaks( $d_2$ )

对测试数据初检得到的 13 个疑似峰值数据如表 1,对其进行验证筛选算法.通过以上操作,成功去除了编号为 3 的伪峰.

表 1 检测伪峰数据统计表

No.	$\theta$	$\rho$	$\lambda$	是否目标
1	-89	-199.5	27	TRUE
2	-89	-140.5	24	TRUE
3	81	132.5	N/A	FALSE
4	-85	-158.5	21	TRUE
5	-73	-180.5	21	TRUE
6	-60	-196.5	23	TRUE
7	64	74.5	25	TRUE
8	-89	-92.5	20	TRUE
9	-87	-29.5	21	TRUE
10	-83	-176.5	27	TRUE
11	-89	-182.5	18	TRUE
12	-85	-126.5	23	TRUE
13	-74	-243.5	20	TRUE

对提取出的参量两两按公式  $e = \sqrt{x^2 + y^2}$ ,  $x \cos \theta + y \sin \theta = \rho$  进行计算距离, 如果距离小于阈值  $T$ , 则识别该两组坐标参量描述的是同一目标, 给予合并. 根据表 1 中线段分布可得目标  $(x, y)$  参量. 经过计算, 对编号为 1 和 10 的两组数据, 计算出  $e = \sqrt{(200.5 - 200.5)^2 + (203.0 - 202.4)^2} = 0.6$ , 小于预设阈值  $T = 2$ , 给予合并. 同理, 编号为 2 和 12 的数据也给予合并.

经过两步验证算法共剔除 3 个伪峰, 本次操作

表 2 目标姿态判读结果与误差

No.	质心位置 计算值	质心位置 真值	质心位置 误差/pixel	目标倾角 /(°)	目标倾角 真值/(°)	倾角误差 /(°)	目标尺度 /pixel	目标尺度 真值/pixel	尺度误差 /pixel
1	(202, 200.5)	(202, 202)	1.5	-89	-90	1	27	27	0
2	(142, 188.0)	(142, 190)	2.0	-89	-90	1	24	24	0
4	(167, 110.5)	(167, 113)	2.5	-85	-87	2	21	21	0
5	(241, 174.5)	(240, 178)	3.6	-73	-74	1	21	20	1
6	(286, 105.5)	(284, 106)	2.1	-60	-58	-2	23	24	-1
7	(39, 86.5)	(38, 88)	1.8	64	62	2	25	25	0
8	(95, 229.0)	(94, 232)	3.2	-89	-90	1	20	20	0
9	(46, 204.5)	(46, 206)	1.5	-87	-90	3	21	20	1
11	(182, 40.0)	(183, 43)	3.2	-89	-90	1	18	20	-2
13	(308, 197.0)	(308, 198)	1.0	-74	-72	2	20	20	0

对分辨率为  $320 \times 256$  的区域数字图像进行实验, 图像包含 13 个轴向长度为  $20 \sim 27$  像素的线状目标并且未经亚像素插值提升. 经过若干次检测提取出全部目标的姿态信息. 选取有代表性的四组数据如表 2. 提取结果倾角误差均方值  $1.732^\circ$ , 质心位置误差均方值 2.21 像素, 基于变步长快速游标尺度逼近算法得到的尺度误差均方值 0.84 像素. 本算法的计算误差与目标象素点多寡成反比关系. 据估算理论角度分辨率极限约为  $\pi/4N$ , 其中  $N$  为目标长度. 因为本文处理的数据的小目标特征, 可供提取姿态的象素点相对较少, 图像目标象素长度约为  $20 \sim 27$  像素, 角度分辨率极限约为  $2.25^\circ$ , 与实验获得倾角误差相仿. 而目标尺度的提取结果较好, 均方误差小于 1 像素, 验证了变步长快速游标尺度逼近算法的有效性.

## 4 结论

针对天空缓变背景下, 多目标、小目标图像数据特征, 选用合适的预处理方法抑制背景, 提取目标骨骼. 通过改进 Radon 变换坐标系获取最优角度分辨率准确度. 结合 Hough 变换和改进 Radon 变换的优点提取目标姿态. 并利用一种新的变步长快速游标尺度逼近算法获取高准确度的目标尺度信息, 通过多种仿真验证了其稳定性和有效性, 获得了良好的效果.

最终得到 10 个真值. 因为有可能剔除虚假目标, 所以最后得到的目标数量可能少于指定数量, 需要在抑制已确认目标的基础上反复调用本算法. 本实验中经过 2 次迭代, 13 个目标点被全部检测出. 根据筛选出真实峰值所代表的线段的倾角、线段所在直线相对图像原点距离、线段质心相对所在直线图像中部分的偏移量以及游标尺度就可以确定单帧图像中各个目标的倾角、位置、尺度. 从而完成单帧图像多目标姿态判读. 最终判读结果如表 2.

## 参考文献

- [1] YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, CHEN Guo-jun. A new method of measure the pitching and yaw of the axes symmetry object through the optical image[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2000, **22**(2): 15-19.  
于起峰, 孙祥一, 陈国军. 用光测图像确定空间目标俯仰角和偏航角的中轴线法[J]. *国防科技大学学报*, 2000, **22**(2): 15-19.
- [2] YU Qi-feng, SUN Xiang-yi, QIU Zhi-qiang. Approach of determination of object's 3D pose from mono-view[J]. *Optical Technique*, 2002, **28**(1): 77-82.  
于起峰, 孙祥一, 邱志强. 从单站光测图像确定空间目标三维姿态[J]. *光学技术*, 2002, **28**(1): 77-82.
- [3] TANG Zi-li, MA Cai-wen, LIU Bo, et al. A Approach of determination of object's 3D pose from mono-view[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(12): 1480-1485.  
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.
- [4] SU Guo-Zhong. Research on the method of aircraft pose surveying from image sequences obtained by photoelectric theodolite[D]. Wuhan: Wuhan University, 2006: 1-184.  
苏国中. 基于光电经纬仪影像的飞机姿态测量方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2006: 1-184.
- [5] ZHANG Jun, ZHOU Xi-yuan. Detective of line character based on proved part radon transform[J]. *Radio Engineering*, 2005, **35**(2): 4-6.  
张军, 周希元. 基于改进的局部化 Radon 变换线特征检测[J]. *无线电工程*, 2005, **35**(2): 4-6.
- [6] WANG Xiao-min. Simulation study for one kind of stereo computer vision scheme[J]. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(5): 1139-1142.

- 王小敏. 一种立体计算机视觉技术的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, **18**(5):1139-1142.
- [7] ZHAO Bo, SUN Jixiang, ZHANG Xueqing, *et al.* Fast multi-application on detective of linear target based on radon transform[J]. *Radio Engineering*, 2005, **35**(5):31-33.
- 赵波, 孙即祥, 张学庆, 等. 使用 Radon 变换快速检测直线目标的多应用方法[J]. 无线电工程, 2005, **35**(5):31-33.
- [8] GONZALEZ R C. Digital image processing [M]. 3rd ed. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003:460-479.
- [9] LI Zhe, SU Xiu-qin, YANG Xiao-jun, *et al.* Small moving infrared target detection[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(6):924-927.
- 李哲, 苏秀琴, 杨小君, 等. 红外运动小目标的检测[J]. 光子学报, 2006, **35**(6):924-927.

## Multi-Targets Attitude Recognize Based on Hough and Improved Radon Transform

LU Tao<sup>1,2</sup>, SU Xiu-qin<sup>1</sup>, YANG Lu<sup>1,2</sup>, LIANG Jin-feng<sup>1,2</sup>, DONG Ya-zhou<sup>3</sup>

(1 *Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710119, China*)

(2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*)

(3 *State Key Laboratory of Millimeter Waves, Southeast University, Nanjing 210096, China*)

**Abstract:** The background suppression cap calculations is chosen based on digital image interpretation of goal-attitude mission in the context of large field, small goals, multi-targets. The aim bone is extracted, and the limits of angular resolution are calculated by improving Radon coordinate system. The parameters of multi-targets attitude can be extracted by transforming the traditional Hough plus improvement of a local Radon transform, thus resolve the problem position detection segment. At the same time, it could eliminate the miscarriage of justice caused by simply using the Hough transform in the context of small goals and multi-targets. A variable step-size cursor Express-scale approximation algorithms is put forward in order to get a higher extraction of interpretation accuracy in the extraction of aim-scale

**Key words:** Image processing; Attitude recognize; Self-adaptive precision; Radon transform; Multi-targets; Small-targets



**LU Tao** is a candidate for the M. S. degree, and his research interests focus on digital image processing, moving target tracking.