

doi: 10.7690/bgzdh.2019.05.009

基于海天线的舰船姿态算法

冯鸿奎¹, 傅敏辉^{1,2}, 钟德安^{1,2}, 包飞¹, 马颖亮¹

(1. 中国卫星海上测控部, 江苏 江阴 214431; 2. 飞行器海上测量与控制联合实验室, 江苏 江阴 214431)

摘要: 为提高船舶姿态测量的精度, 提出一种基于海天线进行姿态测量的新方法。依据海洋环境的特殊性, 在确定海天线区域的基础上, 对图像的处理、目标的提取进行分析, 构建测姿算法模型, 获取海基平台的水平姿态, 利用海天线信息解算出船舶姿态, 并进行实船测量及效果分析。仿真结果表明: 该算法可以有效地解算出船体的姿态信息, 精度较高。

关键词: 海天线; 图像分割; Hough 变换; 最小二乘法; 海基平台; 姿态

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A

Algorithm of Ship Attitude Based on Sea-sky-line

Feng Hongkui¹, Fu Minhui^{1,2}, Zhong Dean^{1,2}, Bao Fei¹, Mao Yingliang¹

(1. China Satellite Marine Tracking & Control Department, Jiangyin 214431, China;

2. Joint Laboratory of Ocean-based Flight Vehicle Measurement & Control, Jiangyin 214431, China)

Abstract: In order to improve the precision of ship attitude, a new method for attitude measurement was proposed based on sea-sky-line. Making use of the characteristic of ocean environment, based on horizontal attitude of sea-base platform, image processing and target extraction method were analyzed, model for measuring attitude was built. Then, ship attitude can be detected from the sea-sky-line area. Simulation and the experimental result analysis were analyzed. The simulation result showed that attitude of ships can be calculated by using this method with high precision.

Keywords: sea-sky-line; image segmentation; Hough transform; least squares; sea base platform; attitude

0 引言

与陆基测控设备相比, 测量船误差影响因素多, 系统稳定性相对较差。通过仿真分析测量船四矢量误差(测量设备误差矢量、船摇误差矢量、变形误差矢量和船位误差矢量)对卫星定位结果的影响, 发现船摇误差约占总误差的 36.1%^[1], 即船舶姿态测量的精度将直接影响测量船的整体测量精度。

在海面远距离平视状态下, 通过摄像一般可以获得天空图像、海面图像及海天交界的图像, 利用该图像一方面有助于目标的识别与定位^[2]; 另一方面还可以获取船体本身姿态信息。区别以往的以惯导为主, GPS、光电经纬仪等为辅的组合导航系统^[3]获取姿态方法, 笔者提出了通过另外一种技术途径进行船舶姿态的测量方法, 对其算法进行研究, 在准确获取海天线的基础上, 对船舶姿态进行测量。仿真及实船测量结果表明: 该方法能够较为准确地确定船舶姿态, 并有效去除外界噪声。

1 海天线测姿模型

1.1 海天线检测与提取

无论是目标的识别还是基于海天线进行其他用

途都必须进行海天线区域的确定, 在此基础上进行海天线的检测与提取^[4-5]。考虑今后工程应用的可能性及具备一定较高的精度需求, 总体要求检测并提取的方法具备鲁棒性^[6]、快速性。如图 1 所示, 海天线提取采用的方法较多, 一般包括预处理(平滑、滤波)、边缘检测、二值化、细化、最小二乘法或 HOUGH 变换等。

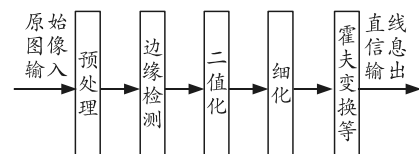


图 1 图像处理流程

1.2 测姿装置布设

考虑船舶姿态主要包括横摇及纵摇角, 一般需要采用 2 台以上配置成正交模式。如其中一台平行于艏艉线, 另一台垂直于艏艉线; 如考虑视角遮挡, 也可以采用一定角度的配置方式、通过如图 2 所示非正交、解耦模型实现。

1.3 姿态角定义

首先建立大地坐标系 $O_d X_d Y_d Z_d$ 与测量平台甲板

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-17

作者简介: 冯鸿奎(1971—), 男, 江苏人, 高级工程师, 从事惯性导航技术、海洋调查等研究。

坐标系 $O_j X_j Y_j Z_j$ 。其中： O_d 为海天线上任一点， $O_d X_d$ 与海天线重合， $O_d Y_d$ 轴垂直地面向上， $O_d Z_d$ 轴垂直于 $X_d O_d Y_d$ 平面； O_j 取在测量平台三轴中心处， $O_j X_j$ 处于船舶对称平面内，与船舶轴线一致，指向船艏， $O_j Y_j$ 也处于对称平面内垂直于 $O_j X_j$ 轴指向天， $O_j Z_j$ 轴垂直 $X_j O_j Y_j$ 指向右。均满足右手系定则。

角度定义同常规定义^[7]。若将相机光轴指向船舶右舷，即与 $O_j Z_j$ 轴平行，则 $O_d X_d$ 与 $O_j X_j$ 的夹角为船舶纵摇角，同理，若将相机光轴指向船舶艏向，即与 $O_j X_j$ 轴平行，则 $O_d Z_d$ 与 $O_j Z_j$ 的夹角为船舶横摇角。

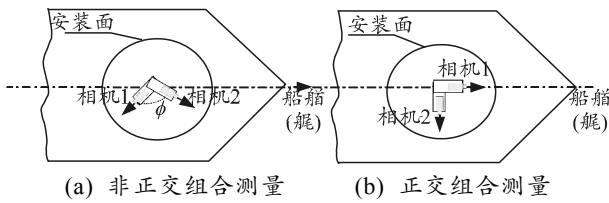


图 2 设备安装方式俯视图

1.4 姿态角算法模型

假设在某一时刻，根据相机安装情况，在某一光轴指向方向 A_i 对应地测量获取解算的角度为 β_i ，则可以规定安装方位为 A_i 方向相机 1 测量获取的角度为 β_1 ，实际测量的是 $A_1 + 270^\circ$ 方向的摇摆角；安装方位为 A_2 方向相机 2 测量获取的摇摆角为 β_2 ，实际测量的是 $A_2 + 270^\circ$ 方向的摇摆角，依次类推。并规定某个时刻某位置船舶实际摇摆方向为 A_m ，对应的摇摆角为 β_m 。

按以下公式进行计算：

$$\beta_i = \beta_m \cos(A_i + 270 - A_m) \quad (1)$$

由此建立矩阵方程：

$$X = A^{-1} Y; \quad (2)$$

$$X = [M_0 \quad a \quad b]^T; \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} n & \sum_{i=1}^n \cos A_i & \sum_{i=1}^n \sin A_i \\ \sum_{i=1}^n \cos A_i & \sum_{i=1}^n \cos^2 A_i & \sum_{i=1}^n \sin A_i \cos A_i \\ \sum_{i=1}^n \sin A_i & \sum_{i=1}^n \sin A_i \cos A_i & \sum_{i=1}^n \sin^2 A_i \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$Y = [\sum_{i=1}^n M_i \quad \sum_{i=1}^n M_i \cos A_i \quad \sum_{i=1}^n M_i \sin A_i]^T; \quad (5)$$

$$a = \beta_m \cos A'_m; \quad (6)$$

$$b = \beta_m \sin A'_m; \quad (7)$$

$$\beta_m = \sqrt{a^2 + b^2}; \quad (8)$$

$$A'_m = \begin{cases} \text{tg}^{-1}(b/a) & (a \geq 0) \\ 180^\circ + \text{tg}^{-1}(b/a) & (a < 0) \end{cases}; \quad (9)$$

$$A_m = A + A'_m. \quad (10)$$

式中： X 为未知矢量； A 为系数矩阵； Y 为测量值矢量； M_0 为相机零值； M_i 为获取的第 i 个测量点摇摆角； A_i 为第 i 个测量点相机安装的方位角； β_m 为船最大摇摆角； A_m 为船最大摇摆角的方位角； A 为相机视准轴与安装方位的夹角。

由此可以计算横摇角和纵摇角，一般规定获取横摇角为在方位角为 0° 时的摇摆角，纵摇角为在方位角为 90° 时的摇摆角。其中图 2(b) 的测量方式也可以直接测量出 2 个姿态角。考虑测量效果以及船体变形等其他因素的影响，也可采用多台相机成一安装体进行测量，相机间经过精确测量与标定^[8]，获取相互间的安装视角 ϕ 及与船舶艏线的夹角。

2 算法精度仿真

按照以上检测方法获取海天线，并通过建立的测姿模型获取海基平台的水平姿态，在此基础上对海基平台其他姿态测量设备的精度进行检验，为海基平台各类测量试验提供有效技术支撑，就有必要对其测量精度水平进行评测。

在海天背景图像直线检测^[9]中，以 Hough 变换为例，Hough 变换检测直线的位置精度主要在于 θ 的分辨率。若要求直线的检测精度能达到 $10''$ ，等同于参数空间 θ 的检测误差应该小于 0.003° ，那么 θ 的量化步长就应该不大于 0.003° 。

综上所述，Hough 变换检测直线的精度与参数空间 θ 的量化步长有关，若量化步长小，精度就高，但是所需的内存空间和计算量偏大；若量化步长大，则精度偏低。因此是实际应用中需要折衷考虑，或者通过金字塔算法进行 2 次变换，先利用大步长进行粗匹配，然后在匹配区域附近利用小步长进行精确匹配。

实验中采用 θ 的量化步长为 0.001° ， ρ 量化步长为 0.5 pixel。

利用 Hough 变换检测直线，对不同图像处理结果如下：

如图 3 所示，对原始图像进行直线提取，其结果为 $\theta = -90^\circ$ ， $\rho = 284$ 。



(a) 原始图像



(b) 海天线提取结果

图 3 原始图像及海天线提取结果

将图像逆时针旋转 90° 后再进行直线提取，其结果为 $\theta=-0.013^\circ$ ， $\rho=284$ 。

将图像在垂直方向的基础上再旋转 5° 后进行直线提取，其结果为 $\theta=5.024^\circ$ ， $\rho=329$ 。

以此类推，按以上处理方法及过程，分别对竖直图像进行固定角度的旋转，对旋转后的图像进行直线提取，其结果如表 1。

表 1 不同旋转角度海天线提取结果

提取检测项	旋转角度 $\theta_0/(^\circ)$						
	-5	-1	-0.5	0	0.5	1	5
直线检测角 $\theta/(^\circ)$	-4.968	-0.95	-0.472	-0.013	0.552	1.009	5.024
直线检测 ρ/pixel	236.5	275	279.5	284	289	293	329
直线倾角误差 $\Delta\theta/(^\circ)$	-0.032	-0.05	-0.028	-0.013	-0.052	-0.009	-0.024

仿真试算结果表明：在采用 θ 的量化步长为 0.001° ， ρ 量化步长为 0.5 pixel 情况下，倾角误差最小约为 0.009° 。

3 海天线测姿效果与分析

为了验证测姿效果，笔者进行了实船测量，主要结合测量船某次远航执行飞行器测量任务进行搭载测量试验，进行处理效果分析。

采用的相机型号为 CANAN 5D2，有效像素 2110 万，传感器尺寸 $36 \text{ mm} \times 24 \text{ mm}$ ，最大分辨率 $5616 \times$

3744 ，视频分辨率 640×480 、 1920×1080 ，传感器类型 CMOS，处理系统 DIGIC4。采用一台相机测量，视频获取时间 120 s 以上，文件类型为 *.VOB，采用 FLV Player 对视频进行帧 (25 Hz) 提取，生成 *.avi，采用 mmreader 进行读取，并采用前面设计的方法进行处理，应用 Matlab 进行分析。测量相机设备布置如图 4 所示。

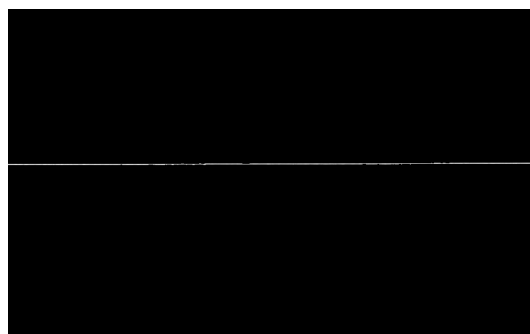


图 4 测量设备布置

将三脚架调节至接近最低，在船舶上层甲板居中，指向右舷进行测量，相机调整为小视场。其中提取的一帧及处理后图像数据如图 5 所示。



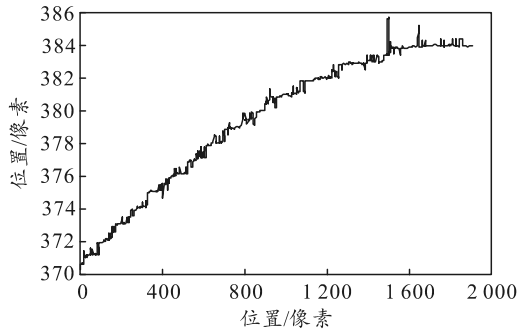
(a) 原始图像帧



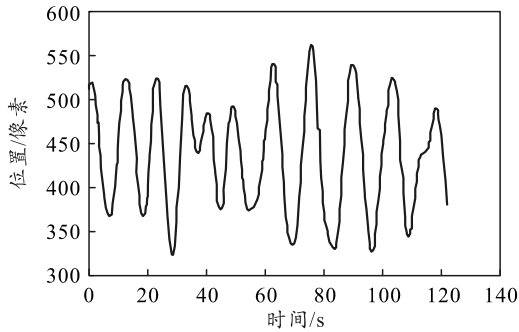
(b) 海天线提取结果

图 5 海天线提取前后结果

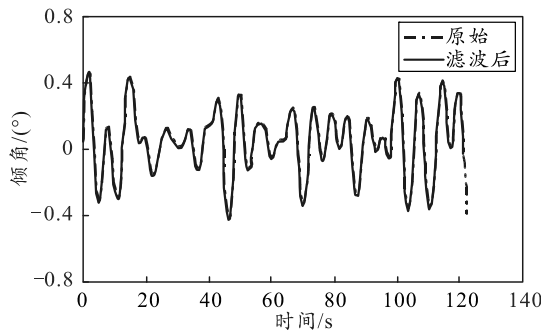
对获取约 130 s 图像进行处理，其中图 6(a)为部分海天线形状、图 6(b)为海天线在相机中的像素位置变化分布、图 6(c)、(d)分别为滤波前后船舶倾斜角测量值、图 6(e)、(f)分别为船舶倾斜角测量内符合误差。



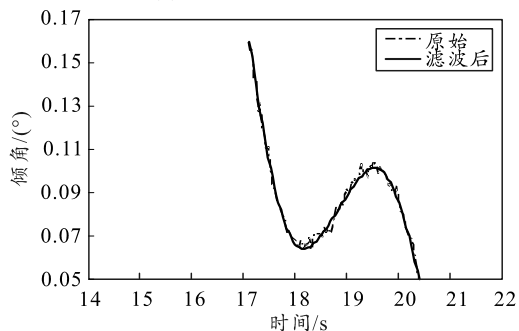
(a) 海天形状



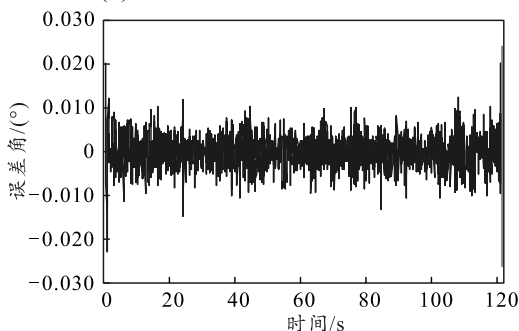
(b) 海天线位置



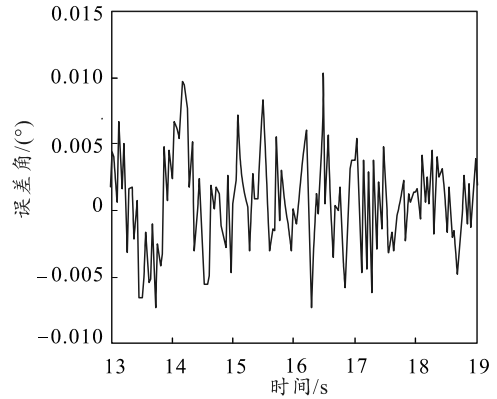
(c) 滤波前后姿态角



(d) 部分时段滤波前后姿态角



(e) 姿态角误差



(f) 部分时段姿态角误差

图 6 海天线解算结果

根据船舶倾斜角测量误差图，解算出该种设备配置下姿态内符合均方差为 11.50”。

4 结束语

笔者通过分析目前船舶姿态测量的方法，充分利用海洋环境的特殊性，提出了一种基于海天线进行姿态测量的新方法。重点对图像的处理、目标的提取方法进行了探讨，建立了测姿算法模型。仿真及试验结果表明，该算法能以较高精度解算出船体的姿态信息。下一步，笔者将重点对图像处理的精度，姿态处理的影响因素如大气折射、大气湍流^[10]等进行分析，为今后的应用奠定基础。

参考文献:

- [1] 傅敏辉, 杨磊, 王旭良. 船载站外测数据四矢量误差分析方法研究[J]. 电讯技术, 2013, 53(10): 1269-1273.
- [2] 杨明月, 杨卫平. 复杂海天背景下红外舰船目标的自动检测方法[J]. 红外与激光工程, 2008, 37(4): 638-641.
- [3] 冯鸿奎, 李晓勇, 张同双. 新一代航天测量船导航系统信息融合技术[J]. 电讯技术, 2007, 47(3): 71-74.
- [4] 刘士建, 蒋敏, 庄良. 一种快速有效的红外图像中海天线提取算法[J]. 红外技术, 2011(4): 230-232.
- [5] 李牧, 闫继红, 李戈, 等. 自适应 Canny 算子边缘检测技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(9): 1002-1007.
- [6] 刘松涛, 周晓东, 王成刚. 复杂海空背景下鲁棒的海天线检测算法研究[J]. 光电工程, 2006, 33(8): 5-10.
- [7] 江文达, 陈道桂. 航天测量船[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 35-51.
- [8] 郭敬明, 赵金宇, 何昕, 等. 船载高精度星敏感器安装角的标定[J]. 光学精密工程, 2016, 24(3): 609-615.
- [9] 安博文, 胡春暖, 刘杰, 等. 基于 Hough 变换的海天线检测算法研究[J]. 红外技术, 2015, 3(3): 197-199.
- [10] 张瑜, 赤娜, 胡笑君. 光学雷达大气折射误差修正方法研究[J]. 电光与控制, 2009, 16(5): 16-22.