

谨以此论文献给我敬爱的导师和家人

-----朱治丞

AUV 前视声纳成像与扫描匹配方法研究

学位论文答辩日期: _____

指导教师签字: _____

答辩委员会成员签字: _____

独 创 声 明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的
研究成果。据我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其
他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含未获得（注：如没有其他需要特别
声明的，本栏可空）或其他教育机构的学位或证书使用过的材料。与我一同工作
的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：

签字日期：

年 月 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，并同意以下
事项：

1、学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘，允许
论文被查阅和借阅。

2、学校可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以
采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编学位论文。同时授权清华大学“中
国学术期刊(光盘版)电子杂志社”用于出版和编入 CNKI《中国知识资源总库》，
授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》。
（保密的学位论文在解密后适用本授权书）

学位论文作者签名：

导师签字：

签字日期： 年 月 日

签字日期： 年 月 日

AUV 前视声纳成像与扫描匹配方法研究

摘 要

对水下机器人技术的研究程度和应用水平是衡量一个国家在海洋开发利用方面综合实力的重要依据。在复杂的水下环境中，自主式水下机器人（AUV）要实现高层次的自治，首先必须具备独立的视觉系统与自定位系统。声纳传感器在水下与其他设备相比有无可比拟的优越性，因此成为构建 AUV “声视觉”系统的重要组成部分。

本文首先针对所使用的 852 型前视成像声纳重点介绍其工作原理和回波信息，包括具体参数和数据格式等。在充分了解这些信息后介绍回波数据从采集、解析到可视化的详细流程。

其次，在对原始声学图像处理方面，首先分析图像存在的主要问题，即包含噪声较多和会因漂移产生畸变。针对高噪声的特点本文采取直接处理单个波束数据的方法最大限度保留信息完整，然后通过二值化等图像增强手段降低背景噪声，结合边缘检测技术对满足阈值要求的数据点进行筛选，最后得到清晰准确的轮廓图像。

然后，为了减小图像畸变对后续扫描匹配的影响，本文尝试在声纳成像过程中引入航位推算技术。利用卡尔曼滤波不断更新 DVL 和 AHRS 等设备提供的位姿变换估值，以提高对 AUV 航迹估测的准确性，并在传统声纳成像方法中将机器人位移纳入考虑，最终得到畸变较低的扫描图像方便后续配准。

最后详细介绍了扫描匹配中应用最广泛的 ICP 算法原理及特性，本文使用的概率迭代最近点算法也是 ICP 算法在统计学上的扩展。讨论算法在 AUV 领域适用性后论述算法流程与迭代步骤，并对标准数据集进行仿真，从时间耗费和误差等方面验证算法可行性。

关键词：AUV；前视声纳；数字图像处理；扫描匹配；概率迭代最近点算法

Research On Image Building and Scan Matching Technique of AUV Forward-looking Sonar

Abstract

The study of underwater robot technology and level of application is a measure of a country in the aspect of Marine exploitation and utilization of the important basis of comprehensive strength. In the complex underwater environment, the autonomous underwater vehicle (AUV) to achieve a high level of autonomy, first of all must have independent vision system and the self-positioning system. Underwater sonar sensor has incomparable superiority compared with other devices, so as to becoming an important part of AUV's "Sound Visual" system. Since the location problem is refers to the robot on the basis of sense their surroundings to estimate its displacement path and positioning .

Firstly, for the 852-type forward-looking imaging sonar used by its working principle and echo information, including specific parameters and data formats. After fully understand the information introduced echo from data acquisition, analysis to the visualization of the process in detail.

Secondly, in terms of acoustic image processing to the original, the first analysis of the major problems with the images, which contains more noise and distortion due to drift. In this paper, taking the characteristics of high noise directly with a single beam data integrity methods to maximize the retention of information, and then enhanced by means of reducing background noise and other image binarization, edge detection technique combined with the data points that meet the threshold requirements for screening, and finally get a clear the exact contours of the image.

Then, in order to reduce the image distortion effect on the subsequent Scan matching, this paper tries to introduce in the process of sonar imaging navigation prediction technology. Using kalman filter update DVL and AHRS devices pose transformation valuation, in order to improve the track is the accuracy of the estimates for AUV, and displacement of the robot in the conventional sonar imaging method into account, the resulting distortion lower easy to Scan images subsequent

registration.

Finally, a detailed description of the Scan matching algorithm is the most widely used ICP principles and characteristics, as used herein, the probability of an iterative closest point ICP algorithm is extended in a statistical algorithm, the algorithm is given after the process and iterative steps, and through the analysis of simulation data validation feasibility of the algorithm.

Key Words: AUV; forward-looking sonar; digital image processing; Scan matching; pIC

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 水下机器人研究现状	1
1.3 AUV 导航定位研究	5
1.4 论文研究内容和组织结构	7
2 声纳成像研究	9
2.1 声纳的工作原理	9
2.1.1 主动声纳	10
2.1.2 被动声纳	11
2.2 水声信道特点	12
2.3 852 型扫描成像声纳	13
2.3.1 声纳回波数据的采集与解析	14
2.3.2 利用回波数据成像	16
2.4 本章小结	18
3 改进的原始声学图像成像及处理方法	19
3.1 原始声学图像存在的主要问题	19
3.2 回波数据预处理	21
3.2.1 图像二值化	22
3.2.2 边缘检测	23
3.3 AUV 位姿估算	24
3.3.1 对位姿变化的预测	25
3.3.2 使用卡尔曼滤波更新位姿预测	26
3.4 低畸变成像	26
3.5 本章小结	27
4 基于声纳图像的扫描匹配算法	29
4.1 扫描匹配算法	29
4.2 迭代最近点算法 (ICP)	32

4.2.1 原始 ICP 算法原理	32
4.2.2 ICP 算法变种比较	33
4.2.3 ICP 算法特性分析	34
4.3 概率迭代最近点算法 (pIC)	35
4.3.1 pIC 算法原理	36
4.3.2 仿真实验数据分析	36
4.4 本章小结	39
5 总结与展望	41
5.1 工作总结	41
5.2 未来展望	42
参考文献	43
致谢	47
个人简历	49

1 绪论

1.1 研究背景

随着人类社会的不断发展与进步，能源问题日益凸显。尤其在如今陆地资源濒临枯竭的 21 世纪，海洋这座蕴藏着蓝色星球上数量最多的资源和能源的宝库，正逐渐受到所有强国的高度关注。美国、俄罗斯、中国、日本、英国、加拿大等国家都分别设立研究所^[1]，探索开发、利用、保护海洋的技术以及工具。水下机器人也在此大背景下应运而生，作为目前人类在海洋未知深处进行水下作业的标志性设备，对其的研究不但具有长远的社会价值和经济价值，在军事领域乃至国家综合实力等问题上都具有重大的战略意义。

我国幅员辽阔，在海洋方面也毫不逊色，1.8 万公里海岸线之外是约合陆地面积三分之一的领海范围，合理利用丰富的海洋资源必将对祖国建设海洋强国、实现伟大复兴起到重大推动作用。因此，早在 80 年代中期我国开始以“863 计划”为依托大力开展水下机器人相关研究^[2]，为了提高机器人自治能力同时进行的还有水下声学 and 声视觉研究，都取得了一定成果。

目前水下机器人导航常使用的方法有长基线 (Long Baseline)、短基线 (Short Baseline) 和超短基线 (Ultra Short Baseline) 等^[3-5]，都需要借助母船实现布置好水声基阵以实现定位，不仅造价高昂而且对母船的依赖很大程度上局限了机器人的自治能力。水下机器人的自治即不依赖过多非天然物体的辅助或人的主观辨析能力，就能独立自主地完成既定任务。为实现这个目标，必须设法利用水下机器人自身搭载的传感器主动感知环境，好比多了一双眼睛；再结合适当的导航方法，即机器人的大脑，就能在完全未知的环境下以低廉的成本作业。

本论文正是基于上述思路，研究以前视扫描成像声纳为声视觉基础、结合扫描匹配方法的水下机器人自主导航技术。

1.2 水下机器人研究现状

目前水下机器人常见以下两种：遥控机器人 (Remote Operating Vehicle, 简

称 ROV)和自主式水下机器人(Autonomous Underwater Vehicle, 简称 AUV)^[6-9]。前者依赖线缆提供动力并将水下画面传回,由水面母船上控制人员下达操作指令;AUV 则作业完全自主而不受线缆制约,灵活性强、隐蔽性高,是如今最受关注的新一代水下潜器。

国外众多海洋强国都早早开始了对水下机器人的研究,并在各领域取得较好的研究成果。

美国于二十世纪七十年代最先开始对 AUV 的研究,华盛顿大学与军方合作先后建成“SPURV”和“UARS”两部自主水下机器人^[10]。

麻省理工大学的 Sea Grant’s 水下机器人实验室研发了“Odyssey”系列机器人^[11],对简单的侧扫声纳系统乃至复杂的多 AUV 协同控制进行了一连串研究,其中 Odyssey IIX 型(如图 1-1 所示)是前视声纳导航 AUV 的典范。



图 1-1 麻省理工大学研发的 OdysseyIIX 型 AUV

鉴于 AUV 在现代军事中的重要作用,美国海军在此领域开展了众多科研项目。海军研究生院(Naval Postgraduate School, NPS)先后研发了三部 AUV: NPS AUVI、凤凰号(Phoenix)和白羊座号^[12](ARIES)。BPAUV(Battlespace Preparation Autonomous Underwear Vehicle)项目旨在开发大范围勘察 AUV 实现对敌对舰只的预警。如图 1-2 所示。



图 1-2 美国海军的 BPAUV

加拿大 ISE 公司采用超短基线导航技术开发了能够工作在水下 5000 米深度的探测 AUV（如图 1-3 所示）。



图 1-3 ISE 公司的 USBL 系统 AUV

澳大利亚悉尼大学研发的“Oberon”水下机器人，是使用声纳导航定位的典型。如图 1-4 所示。



图 1-4 悉尼大学的 Oberon 型 AUV

日本在 AUV 领域也取得了诸多成绩^[13-15], 东京大学建造了 Twin-Burger1&2、Tri-Dog1、Tantan 等海洋调查机器人, 还准备研发能够探索世界最深海沟—马里亚纳海沟的深海 AUV。

我国在上世纪 80 年代初, 在有着“中国机器人之父”之称的蒋新松院士倡导下开始水下机器人的科研工作, 并在 1987 年将水下机器人开发计划正式纳入国家自动化领域研究课题^[16]。主要研究机构中最具代表性的莫过于中科院沈阳自动化研究所, 其研制开发的“探索者”号 AUV (如图 1-5 所示) 能够在 1000 米深度实现大范围制导; 1995 年研制的工作深度达 6000 米深的 CR-01 型水下机器人 (如图 1-6 所示), 采用长、段基线相结合的水声系统能够按预设航线高效完成海底资源、水文勘测任务, 标志着我国 AUV 技术水平已经跻身世界先进前列; 完成于 2002 年的 CR-02 型 AUV 在船体上安装了八个避碰声纳^[17], 提高了作业可靠性。



图 1-5 沈阳自动化研究所的“探索者”号 AUV



图 1-6 沈阳自动化研究所的 CR-02 型 AUV

哈尔滨工程大学联合 702 所、709 所、华中理工大学等研发了“智水”系列军用 AUV，其中“智水—III”（如图 1-7 所示）采用基于神经网络的光视觉识别目标系统，并于 2000 年圆满完成在葫芦岛海域的海试，标志我国军用 AUV 在实用化道路上又迈出坚实的一步。



图 1-7 哈尔滨工程大学的“智水—III”型 AUV

总的来说，由于起步较晚和经费投入不足等原因，我国深海探测设备整体实力和发达国家相比还有差距。但不能忽视国内在水下机器人领域研究的发展速度，我国已经成为少数拥有潜深 6000 米 AUV 的国家之一，并在众多高校和研究所的共同努力下朝着海洋强国的方向稳步前进。

1.3 AUV 导航定位研究

ROV 在很多应用场合有它的优点，比如不用担心续航，能源可以通过线缆源源不断地补给；在海底勘察或者打捞沉船等需要精细作业时，人工控制更加有效与精确。但其依赖母船的缺点大大限制了水下机器人在军事领域等的发挥，因此 AUV 现在更受研究者关注。

但要实现 AUV 的自主导航是一件极其困难的事，它需要机器人依靠自身感知环境，提取环境中有用的特征信息，从而判断行进路线。归纳起来共分以下四步：

- (1) 感知。AUV 首先要理解传感器传来的数据，提取有效信息。
- (2) 定位。根据环境信息机器人必须明确自己所处的方位。
- (3) 认知。控制中心依据任务与所处方位，决定下一步如何行动。

(4) 运动控制。该如何调整自身位姿和运动轨迹，以到达既定目标。

就目前发展来看，导航问题仍是自主水下机器人面临的一个主要技术难题，考虑到潜器重量、尺寸、能源供给、隐蔽性及水声信道特点等因素的影响，AUV 的导航系统如何提供长时间、远距离、大范围的位姿信息仍是艰巨的任务，关系到机器人能否高效利用和安全回收。

水下机器人导航技术发展到现在，产生了多种制导方法，现主要介绍其中应用较成熟的几种：

(1) 航位推算和惯性导航系统 (INS)

航位推算法是应用最早的 AUV 导航方法，原理是通过测量船体速度来对时间求积分得到运动距离。这种方法所需设备简单，仅需要速度传感器和航向传感器分别提供航速与航向即可，不受外界条件影响的同时也不对环境产生任何影响，隐蔽性强。不足之处在于当 AUV 运动时会受海流影响发生漂移，这种漂移无法靠自身设备测量^[18]，因此长时间工作时误差会逐渐累积影响导航结果。

经过多年的发展，航位推算技术目前惯用的配置是使用多普勒测速仪 (DVL) 测量 AUV 相对于海底表面的速度，这样做可以大大减小受海流的影响；使用高精度的电子罗经提供位姿信息。并且在实际应用中做了一定改良，比如把航位推算与 GPS 导航或者罗兰—C 等无线电导航相结合，让 AUV 工作一段时间后自动浮出水面，通过无线电辅助定位修正位置以消除累积误差，实验证明可以有效提高导航精度。

(2) 地球物理导航

在某些场合下我们可以事先获得探测区域的环境地图，此时可以选择地球物理导航法。它是通过对重力、磁场、深度等物理参数的测量，然后与环境地图进行匹配实现定位，是一种完全自主导航而无需外部设备的辅助。根据匹配的物理参数不同，可分为：①基于重力场的导航；②基于地磁的导航；③基于等深线的导航^[19]。

地球物理导航法的关键是如何取得环境测绘图，此时就有两个难题，一是在多维相关参数空间中，进行匹配的复杂度随维数增加而以指数级增加，二是获得环境地图的成本不低，有些时候甚至根本无法获得先验地图，因此限制了其适用性。

考虑到在实际应用中事先获得高质量的环境地图十分困难,地球物理导航法的发展主要围绕如何剪断对先验地图的依赖展开,目前可行的方法是在 AUV 航行过程中建立环境测绘地图,同时也用它完成导航。

(3) 声学导航

相比于前两种,声学导航既不会累积误差也不依赖于先验地图,再加上声波在水下传播时的低衰减,使之成为现今应用最广的导航方法。

传统声学导航主要是长基线 (LBL)、短基线 (SBL) 和超短基线 (USBL) 三种,是通过预先在不同位置安装接收器称为基元,基元间的连线称为基线,当水下机器人由换能器发出声信号并被不同基元接收时,根据不同基元接收距离和接收角度的不同换算出 AUV 的位置。

随着声纳技术的进步,高分辨率成像声纳被越来越多的使用在 AUV 导航当中,通过对声纳图像中环境特征进行提取从而构建特征地图,为机器人实时导航、避碰、目标追踪等任务提供基础。目前新兴的方法是 CML (Concurrent MapPing and Location 同时进行测绘与定位),也称为 SLAM (Simultaneous Localization and MapPing, 即时定位与地图创建)^[20],即 AUV 凭借自身搭载的传感器构建增量式环境地图,同时利用地图确定自身位置。

1.4 论文研究内容和组织结构

本文首先在参考大量文献的基础上介绍了水下机器人以及导航技术的研究现状,概括描述了航位推算、地球物理导航、声学导航等当前主流 AUV 导航方法。

第二章首先分析了常用于水下作业的不同种类声纳的原理与特点,介绍了水声信道的传播特点,重点结合本文所用的 852 型前视扫描成像声纳分析了其工作参数以及回波数据格式等。然后论述了扫描声纳成像的基本原理,介绍回波数据从采集、解析到成像的一整套流程,最终得到原始声学图像,为后续图像处理和扫描匹配打好基础。

第三章对声纳图像的生成进行进一步探讨,主要分为两部分:先在了解原始回波数据显示法的缺点的基础上,针对声学图像高噪声、高畸变的特点,从图像增强、边缘检测等角度对声学图像进行处理。采取直接处理单个波束信息的方法

避免信息的损失，并利用图像二值化去除大部分背景噪声，其后的边缘检测对符合阈值要求的点进行筛选，突出目标物体轮廓。

然后结合航位推算技术尝试消除原始声学图像存在的畸变。通过 DVL 和 AHRS 等设备采集 AUV 位移初始数据，再利用卡尔曼滤波不断更新数据以获得更精确的位移估计。最后在原始的声纳成像方法中加入对位移的考量，得到畸变较低的扫描图像方便后续配准。

在从声纳传感器获得有效数据后，扫描匹配是本文要实现的最终目标。第四章一开始先简要论述扫描匹配的原理，然后着重介绍应用最广泛的扫描匹配算法——ICP 算法，通过分析其优点与不足回顾 ICP 从提出至今的发展与各种改良算法的演化。本文使用的概率迭代最近点算法严格来说也属于 ICP 的变种，思想同样是不依赖提取特征而直接进行点对点的匹配，算法流程和迭代步骤将在文中给出并通过仿真实验验证算法是可行且有效的。

第五章是对全文的总结，并对水下机器人基于声纳导航的前景和扫描匹配今后的发展作出展望。

2 声纳成像研究

声波是信息在水下进行传输时最佳的远距离媒体，在水下勘探、交流通信以及武器制导领域中扮演着极其重要的角色，但是到目前为止，由于海洋环境下的种种不确定因素存在，水声技术还有巨大的潜力没有得到开发。在水声领域的科技程度，直接决定了一个国家在 AUV 水下导航和水下作业的能力高低，水下机器人想精确、高效地完成任务必须依靠完善的导航与通信系统，在这当中扫描声纳常常会成为数据传感器的首选，负责探测机器人周边目标并提供地理信息作为导航数据基础。

2.1 声纳的工作原理

“声纳”一词来源于英文“Sonar”，是一种通过发射与接收声波从而探测周边环境的设备。尽管在陆上机器人中激光传感器优势明显，但在水下环境里激光的传播距离非常有限；另一个在陆上被广泛使用的是电磁波技术，同激光一样其在水下衰减剧烈，且频率越高衰减的越快。反观声波的衰减就小得多，如果波长够长甚至能传播达到数千米远，能够带来丰富而又准确的环境信息，因此在 AUV 传感器的选择问题上倍受青睐。安装在 AUV 本体上的扫描声纳一般可分为两大类：主动声纳与被动声纳^[21]。

主被动声纳系统如图 2-1 所示：

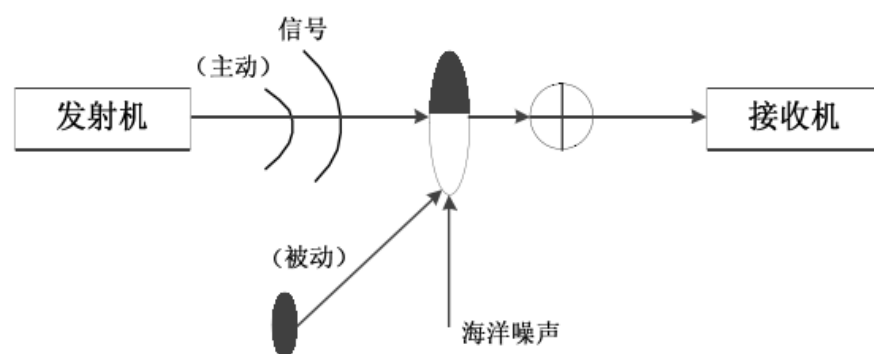


图 2-1 声纳的原理模型

2.1.1 主动声纳

主动声纳的定义是能够主动的发射声波，并依靠收集被障碍物发射的声波实现感知物体位置的功能，其前身来自于回声探测仪，已经被广泛应用于船只、舰艇及水下潜器探测沉船、冰山、鱼群等。较原始的主动声纳一般只收集如距离、角度等数据，如今随着技术的不断创新以及需求的不断提升，声纳传感器不仅仅可以提供简单的数值，还可以利用这些数据生成直观的环境图像，因此被称为扫描成像声纳。

目前 AUV 领域使用较多的扫描成像声纳按工作原理可以分为两种类型：对 AUV 前方物体进行探测的前视声纳（Forward-looking Sonar）和对潜器下方连同两侧成像的侧扫声纳（Side-Scan Sonar）。

前视声纳又叫扇扫声纳，包括以下两种：

(1) 单波束机械扫描声纳：此类声纳包含一个机械控制可以水平旋转的声纳头，探测时沿声纳头朝向发射一道扇形波束，每进行一次收发只能采集到当前方位角上的回波数据，当需要扫描某一范围区域时声纳头则按预设步进角不断旋转，采集多条回波数据以实现整体区域的覆盖^[22]。回波数据一般以十六进制形式包含声纳头工作状态、回波信号强度等信息，并最终以灰度图的形式呈现最原始的声学图像，其中灰度值越高的地方代表该地回波信号越强。如图 2-2 所示：

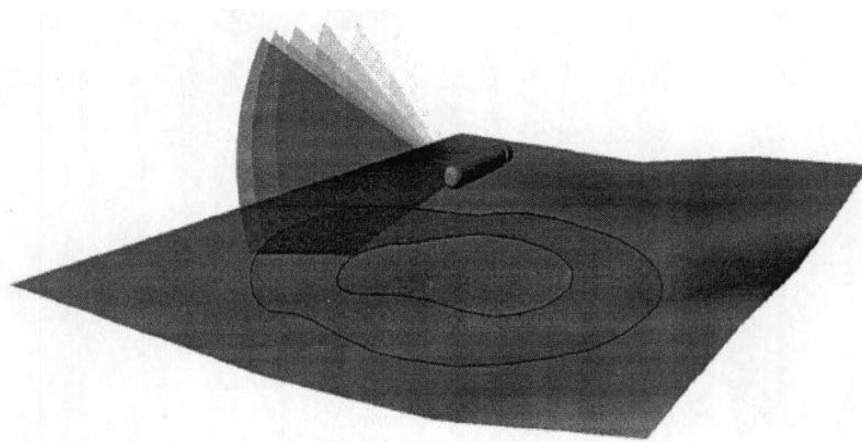


图 2-2 单波束扫描成像声纳

(2) 多波束电子扫描声纳：多波束扫描声纳，顾名思义即拥有多个水听器，可在一个方向上同时发射多道声波。相比于单波束扫描声纳步进一次只能得到一

个角度上的数据，多波束声纳在扫描效率和成像速度上有了巨大提升，但该类仪器普遍造价高昂，普及程度一般，并且由于海洋旁瓣效应的存在使得成像分辨率不及单波束扫描声纳^[23]。如图 2-3 所示：

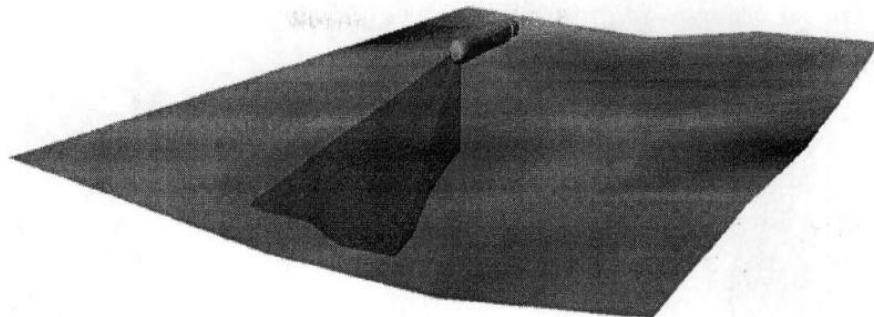


图 2-3 多波束扫描成像声纳

侧扫声纳通常由母船拖拽工作，常常用来扫描生成大范围的海底图像。其发射的声波方法与母船前进方向垂直，如果海底平面较为粗糙、坚硬则回波信号强；海底平滑或凹陷则信号强度弱，此外距离的远近也会影响信号强度。侧扫声纳在工作时分为高频和低频，低频状态下扫描距离较远且成像范围较大，但是在精度上存在不足，高频则正好相反，还有一种双频侧扫声纳具备高低频两组换能器，能够兼顾扫描范围与精准度。如图 2-4 所示：

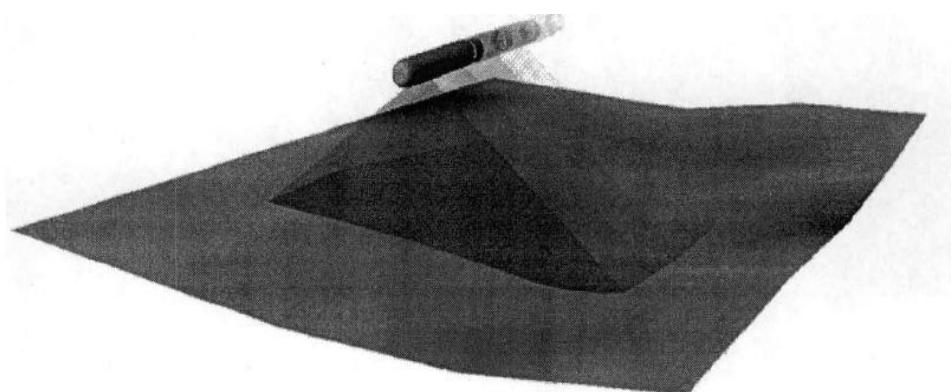


图 2-4 侧扫声纳

2.1.2 被动声纳

被动声纳的前身是水听器，其本身不向外主动发射声波，而是依靠被动接收

诸如鱼群、舰艇等发出的噪声或其他声纳发出的声波来感知目标位置，因此也叫噪声声纳^[24-25]。

虽然原理不同，但两种类型声纳都在军事领域发挥着重要的作用。主动声纳是舰只侦查暗礁、水雷及敌方潜艇的主要武器，优点是不论目标静止或移动都可进行探测，但是自主发射的声波在侦查敌方的同时也会暴露自己的位置，不利于发现隐蔽性。相反被动声纳在隐蔽性上表现良好，特别适合于潜艇搭载，在侦测敌舰的同时不会暴露目标。

2.2 水声信道特点

不论主动声纳还是被动声纳，都是借助于海水作为媒介进行扫描探测的。最理想的传播媒介是由均匀且无损耗的介质组成，这样信号在传播时不会发生衰减或畸变。但是海洋环境中的水声信道复杂多变，干扰强、噪声高，还具有水面和海底两种不同的表面情况，对声波传播影响巨大^[26]。此外海水对声波的吸收率是随着频率的增大而以几何倍数增长，这一点严重制约了高频声波的使用从而影响最终成像的分辨率。最后，声音在海洋中传播还受多途效应、旁瓣效应、混响及各种环境噪声干扰，加上声波本身具有的散射性，导致声学图像的分辨率普遍比不上光学图像，甚至呈现目标发生位移、畸变甚至残缺不全。

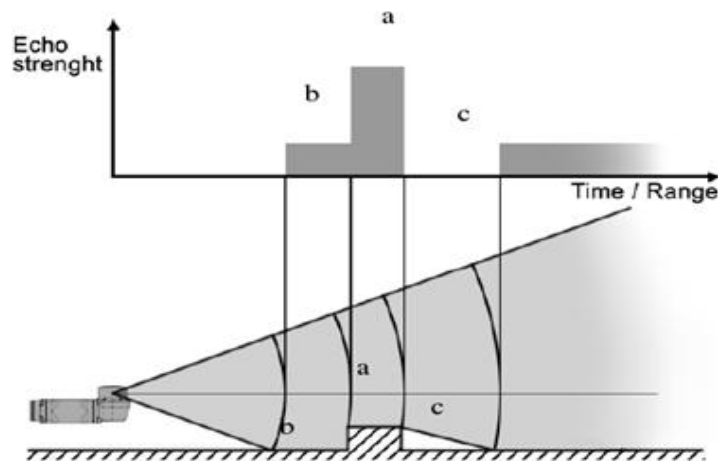


图 2-5 声纳信号区域性

抛开海水中各种干扰不谈，水声信号的传播与反射本身也是一个极其复杂的过程^[27]。当声波在传播过程中接触到目标物体并反射，在回波数据中会包含三块强弱不同的区域：目标区 a，背景区 b 以及阴影区 c（如图 2-5 所示）。目标区

a 信号强度最高，背景区 b 回波强度稍弱，而由于障碍物阻碍了声波传播到阴影区 c 的路径，因此 c 区无声波信号返回即强度为 0。

2.3 852 型扫描成像声纳

本文使用 Imagenex 公司最新的超小型机械扫描前视成像声纳，型号为 852，如图 2-6 所示：



图 2-6 852 型扫描成像声纳

该声纳具备数字变频技术，可在 675kHz 和 850kHz 两种频率下工作，最远可探测 50 米范围内的目标物体，并给出分辨率较高的图像。852 型扫描成像声纳的工作参数如表 2-1 所示：

表 2-1 852 型声纳的工作参数

工作频率 (kHz):	675/850
最小探测距离 (mm):	150
最大探测距离 (m):	50
最大工作深度 (m):	300
换能器波束宽度 (°): 水平:	2.5
垂直:	22
距离分辨率 (mm):	20
步长 (°):	3-6
重量 (g): 空气中:	270
水中:	少于 200

852 型声纳的声纳头以步进（Step）的形式不断旋转，每收到一个步进指示就开始顺时针旋转一个步进角度，步进角度的大小由预先设置的步长（Step Size）决定，在此角度上换能器以固定的水平和垂直开角向欲探测区发出一道探测波束（Shot），并短暂停留直到完成回波信息的收集后再转向下一个角度，其中每一道探测波束反射后的回波数据我们称为一个 Ping。

重复以上步骤，从 852 型声纳扫描开始的角度一直到预设的扫描区域全部被覆盖，完成一个扫描周期，称为一个 Scan。然后声纳头回到初始位置开始下一个扫描周期，周而复始以实现连续成像。

2.3.1 声纳回波数据的采集与解析

852 型声纳与主控芯片间通过 RS-232 串口线连接，其连线方式如图 2-7 所示：

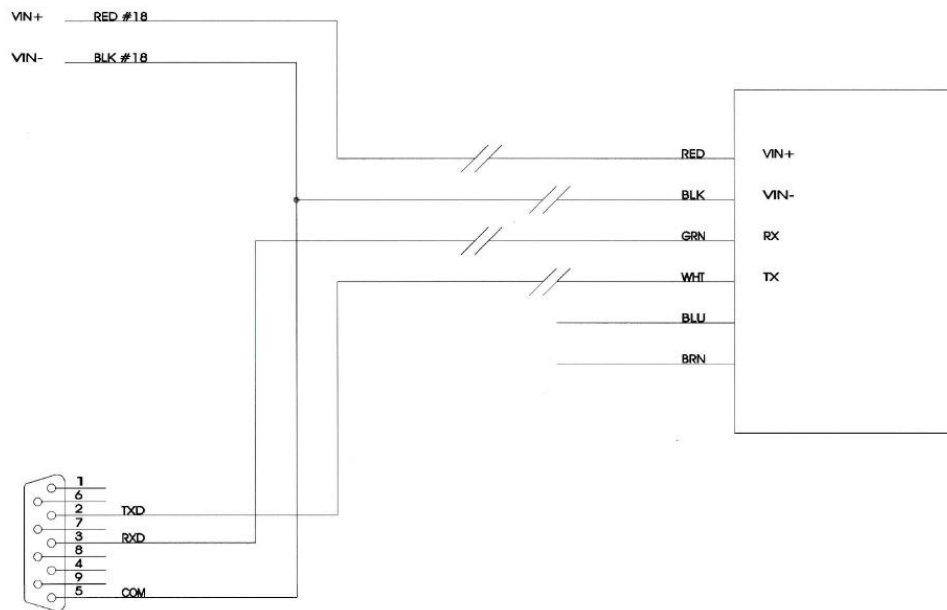


图 2-7 852 型声纳接线图

其中声纳正极引脚与正向 24 伏电压通过红色线连接，黑色线连接 0 伏电压，白色线和绿色线分别接 RS-232 的发射端与接收端。声纳头探测到的环境信息就以十六进制信号的形式经 RS-232 连线传给控制台。

声纳头连接完毕以后，等待控制主机发送“Switch Data Command”命令对声纳头进行步进长度、探测距离、探测波束宽度、波长等参数配置，当终止符

“0xFD”被接收时代表各项参数均顺利读取，声纳头旋转到下一个步进位置开始新一轮发射、采集探测波束的扫描。

Switch Data Command 命令格式如下：

表 2-2 852 型声纳 Switch Data Command 命令格式

Byte#	Description							
0-7	0xFE	0x44	Head ID	Range	Reserved 0	Rev	Reserved 0	Reserved 0
8-15	Start Gain	Reserved 0	Absorption	Train Angle	Sector Width	Step Size	Pulse Length	Reserved 0
16-23	Reserved 0	Reserved 0	Reserved 0	Data Points	Reserved 0	Reserved 0	Reserved 0	Reserved 0
24-26	Switch Delay	Freq- uency	Term. 0xFD					

Switch Data Command 命令中还有一项很关键的参数“Data Points”，可设置为“25”或“50”，代表在一道探测波束上返回 252 个采样点或 500 个采样点，分别对应声纳工作模式代码“IMX”和“IGX”。

当 852 型扫描成像声纳成功接收到反射的探测波束时，回波数据会以如下结构储存在一个 Ping 中。

表 2-3 852 型声纳回波数据包格式

Byte#	Description
0 to 99	File Header (100 Bytes)
100 to 111	Sonar Return Data Header (12 Bytes)
112 to xxxx	Sonar Return Echo Data (252 or 500 Bytes) xxxx =112 + above number Byte xxxx always = 0xFC (Termination Byte)
Xxxx + 1 Toyyyy	Zero Fill yyyy = 383 or 639

Ping 数据包由三部分组成：100 个字节长度的头信息，包含声纳获取当前 Ping 时刻的大部分状态信息和工作参数；264 或 512 个字节的回波数据集；剩余部分补零至结束。

回波数据集是探测波束采集数据的核心也是成像的关键，它由 12 个字节的回波头信息和与采样点数量相同的回波数据组成，当读到终止字符“0xFC”意味着回波数据结束。格式见下表：

表 2-4 852 型声纳回波数据格式

Byte#	Description					
0 to 5	ASC II I	ASC II M or G	ASC II X	HEAD ID	Serial Status	Head Pos (LO)
6 to 11	Head Pos(HI)	Range	Reserved 0	Reserved 0	Data Bytes (LO)	Data Bytes (HI)
12 to (N-2)	Echo Data 252,500 Data Bytes					
N-1	Term 0xFC					

0 到 11 字节包含当前探测波束的发射方向，用 200 到 2600 之间的数值表示 -180° 到 $+180^{\circ}$ 方位角信息；12 到 (N-2) 字节代表各个采样点的回波强度值。当声纳工作在 675kHz 频率下对应生成 252 个采样点，而探测距离是固定的 50 米，因此在探测距离上划分出 252 段，每一小段抽象成一个采样点，在回波数据中有一个相应的字节或称一个 Bin 代表该采样点的回波强弱。252 个 Bin 值依次有自己的序号（“Bin1”，“Bin2”，“Bin3”，……），分析其数值并转换成灰度值即可获得一个 Ping 的扫描图像。当声纳工作频率提到到 850kHz 时，一个 Ping 将包含多达 500 个 Bin，对目标特征的描述精度更高，扫描图像的分辨率也更高。但是采样点的增加或步进角的减小在提高扫描精度的同时也会增加时间花费，实际中应该根据任务需求平衡成像精度与扫描速度。

2.3.2 利用回波数据成像

声纳头步进到某个方位角后发射探测波束，如果声波在探测区域中遇到障碍物，经过物体反射后的回波信号一般呈现出强烈波动，体现为扫描图像中的亮色区域。相反若探测区域不含有阻碍声波传播的阻挡物体，其回波基本没有波动

甚至根本不产生回波，形成暗色区域。介于二者之间的依照数据强度分别对应不同的灰度值。但由于海洋中复杂的噪声干扰以及混响，即使扫描区域内没有障碍物声纳也会收集到一些讯号，这些讯号没有实际意义并且会影响导航的进行。声纳正是依据以上原理，通过收集、提取回波数据中距离—方向—强度等完成原始声学图像的生成。

在每个方位角上发射的扇形放射状探测波束都保持相同的水平角度和垂直角度，解析十六进制的回波数据可以得到该方位角上的扫描图像（如图 2-8）。

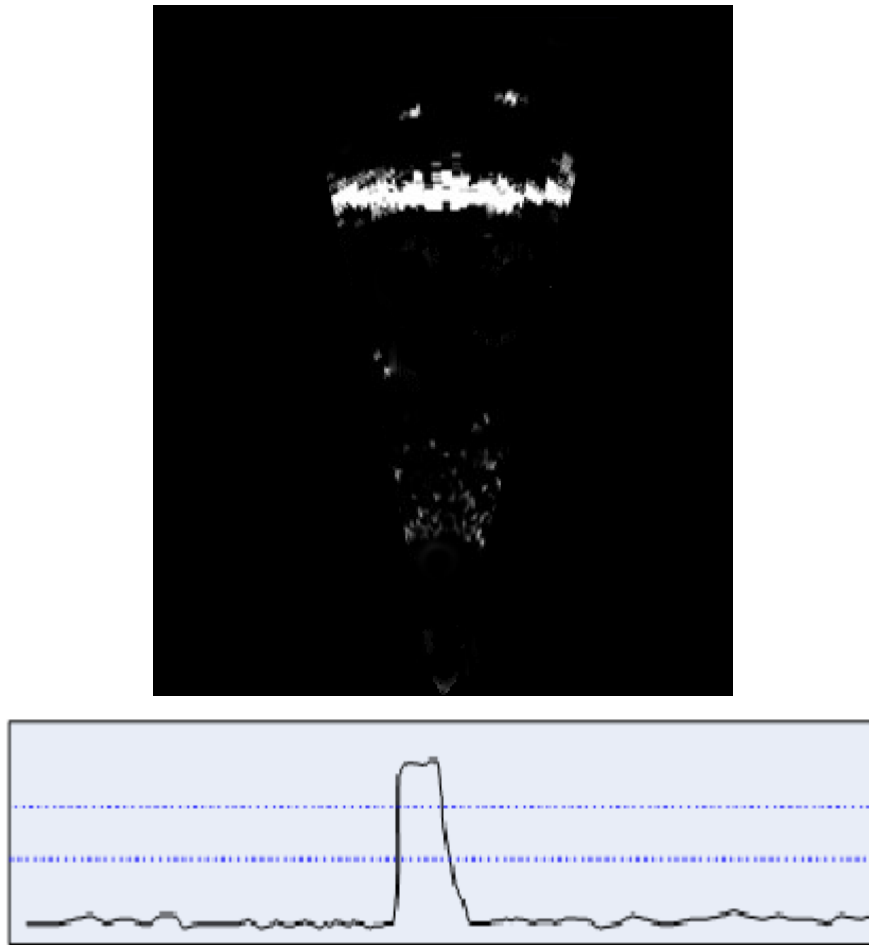


图 2-8 单个 Ping 的原始图像

连续绘制一个扫描周期中所有 Ping 的图像，依据以下公式则可以对整个扫描区域进行成像。

$$\text{arc}_i^{(x,y)} = [X, Y]_{k,i}^R = f(\phi, \rho_i^R) (i = 1, 2, \dots, N) \quad \text{式}(2-1)$$

$$I(\text{arc}_i^{(x,y)})^R = \text{Bins}(i) (i = 1, 2, \dots, N) \quad \text{式}(2-2)$$

其中, $\phi \in [B_k^R - \text{Step}/2, B_k^R + \text{Step}/2]$

$$\Delta\phi = 0.1, n = \text{round}(\text{Step}/0.1)$$

B_k^R 代表当前 Ping 时刻声纳头的朝向, ρ^R 即探测距离, N 代表该 Ping 中所包含 Bins 的个数。成像时可以把整幅扫描图像看成由 N 个半径为 ρ_i^R , 角度为 ϕ 的圆弧组合而成, 第 i 个圆弧的强度即该 Ping 中第 i 个 Bin 所对应的灰度值, 将这些单独的 Ping 图像按角度依次排列后就生成了完整的扫描图像。如图 2-9 所示:



图 2-9 实验水池和相应扫描图像

2.4 本章小结

本章主要介绍了两方面内容, 首先分析了常用于水下作业的不同种类声纳的原理与特点, 并着重介绍了本文所用的 852 型前视扫描声纳的工作参数以及回波数据格式等。然后论述了扫描声纳成像的基本原理, 介绍回波数据从采集、解析到成像的一整套流程, 最终得到原始声学图像, 为后续图像处理和扫描匹配打好基础。

3 改进的原始声学图像成像及处理方法

噪声干扰少、分辨率高的扫描图像是扫描匹配的基础，其质量的高低将直接影响后续扫描匹配算法的准确性，进而决定 AUV 能否顺利实现导航并完成任务，因此有必要对原始声学图像进行适当的处理，提高图像清晰度。

图像处理的最终目标是尽可能的消除各种噪声干扰和畸变，还原扫描图像（Scan）的本来面貌。对噪声点较多的原始声学图像来说，惯用的处理方法是设定阈值进行采样，过滤掉一部分噪声干扰和背景影响^[28]。但是这些干扰往往无法完全消除，所以为了提高图像质量我们还要进行图像增强，用来提升扫描图像的对比度，突出主要目标。

3.1 原始声学图像存在的主要问题

现如今在移动机器人领域多使用激光扫描传感器进行数据采集，主要由于激光传感器具有以下几个重要优点：极高的测距精度、收集全部回波数据形成一个 Scan 所需的时间几乎忽略不计、易精确获得方位角等参数^[29]。相比于高精度的激光传感器，采用声纳等声学传感器则只能获得较少的读数，且扫描图像分辨率低，另外在时间花费、准确性上都相差甚远。但具体到水下机器人应用上，因为激光在水中的传播性较差，绝大多数研究者还是倾向于使用声学传感器代替激光原件完成数据采集。传统的单波束扫描成像声纳可以提供 360° 的扇扫区域并且技术较为成熟，因此多年来一直被广泛应用于水下机器人领域。不过以 852 型声纳为例，使用单波束声纳成像也存在很大的缺点，主要表现为以下两点：

- （1） 成像时原始声学图像包含较多噪声。
- （2） 受 AUV 运动影响图像发生畸变。

海洋环境中的水声信道具有复杂多变的特点，再加上声波本身具有的散射性，任何声学成像法都不可避免受到背景噪声的干扰。背景噪声可以分成三类：环境噪声、混响和自噪。自然环境下的海洋里包含大量无序噪声叠加而成的海洋噪声，也是环境噪声的源头。混响也是声学系统在水下工作时面对的主要干扰形式之一，海洋中不规则物体多，它们对探测声波产生各种散射声波，这些散射波在接收点重叠进而影响声纳判断目标位置^[30]，这种现象在探测距离较近的物体时表现尤

为明显。此外，AUV 内部零件及发动机工作时也会产生一定电噪声或者振动噪声等，也会影响成像清晰度。海洋中的一些悬浮物、鱼虾等如果出现在探测区域，最终图像上也会呈现为较高亮度的斑点，属于随机噪声的范畴。正是由于包含如此多的噪声干扰，必须先对原始声学图像进行滤波降噪，最大限度排除干扰。

再回头看单波束扫描声纳的工作方式，声纳头每步进到一个角度时，都要经过换能器发射声波以及声波碰到障碍物后反射这一过程，探测波束在水声信道中来回传播需要花费时间，并且要等到声纳头旋转一周，采集到覆盖全部探测区域的回波数据后才能生成 Scan，这个过程一般要花费十几秒到几十秒不等，具体时间取决于预先设定的图像精度，如果想获得分辨率更高的扫描图像就需要降低步进角的大小，也就需要花费更长的时间来获得一个 Scan。理想状态下，AUV 在完成一个扫描周期前保持静止并处于扫描图像坐标中心，可实际情况是工作中的 AUV 一直处于不断前进的状态，并且一直不断的受到水流影响而发生不确定性漂移，正是由于这些漂移的存在使得单波束扫描声纳采集的图像存在一定畸变，（如图 3-1 所示，a 是 AUV 在静止状态下的扫描图像，b 是运动中的 AUV 采集到的扫描图像）如不设法消除畸变必将影响后续一系列图像处理、扫描匹配等，因此应当充分把这些不确定性偏移纳入考虑并设法减小甚至最终消除。

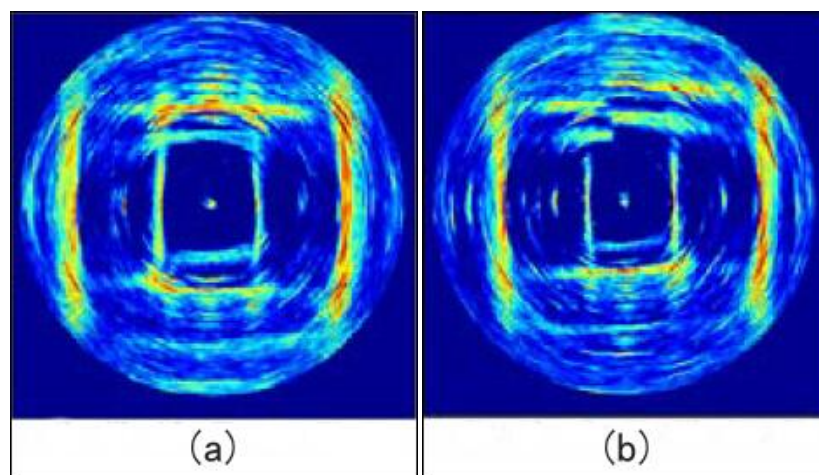


图 3-1 扫描图像因不确定性漂移产生的畸变

为此，本文使用了一种改进的扫描图像成像方法，其对原始数据分析、处理采用如图 3-2 所示的流程进行：

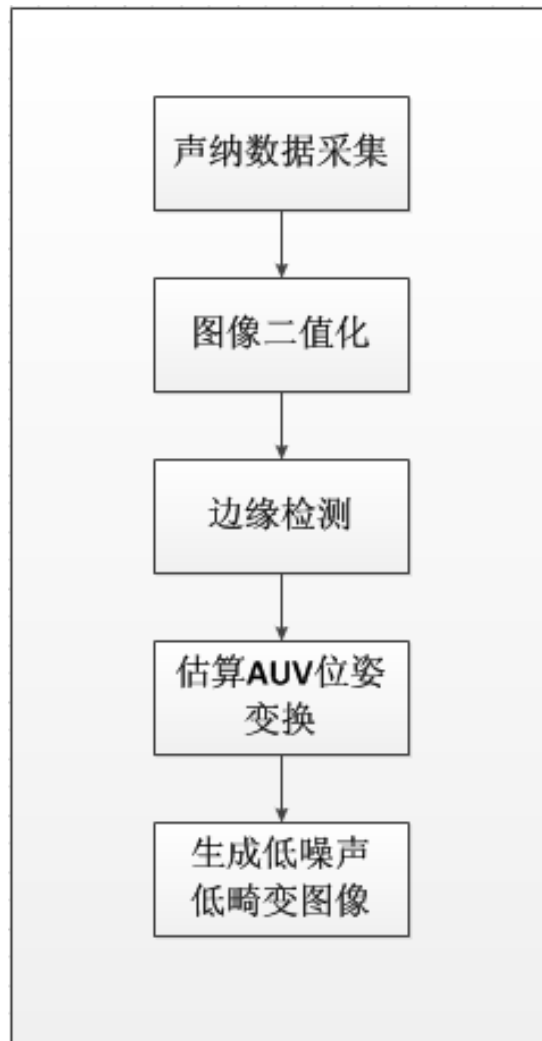


图 3-2 改进的声纳图像成像流程图

3.2 回波数据预处理

对回波数据进行预处理是后期成像和扫描匹配的前提准备,想获得清晰的图像最常用的方法是提高信息的信噪比,如平滑去噪、过滤干扰等。如果原始数据微弱甚至模糊,一般可通过灰度变换等图像增强手段减弱噪声等无关信息,保留和突出我们感兴趣的有效信息。如果数据受干扰达到失真的程度,还需要对其进行几何校正等^[31]。

预处理的对象也分两种,可以先利用回波数据生成原始图像,再使用图像处理技术滤除噪声和背景干扰;也可以直接在声纳返回的一个 Ping 基础上处理单个波束包含的回波数据。这种处理方法的优点在于:(1)先生成图像再进行处理,耗时间较长、时效性差,直接处理数据可以提高扫描图像的成像速度。(2)一

部分数据信息在原始图像生成过程中会有一定损失,对不完整的数据再进行图像处理会使误差继续增大,而直接处理每个波束单独的数据就可以避免这种现象发生。基于以上优点,本文在充分掌握声纳回波数据的特点和格式基础上,采用直接处理单个波束信息的图像预处理方法^[32]。

3.2.1 图像二值化

在水声信道特点一节曾经提到,探测波束在反射过程中可按强度大小分为目标区、背景区和阴影区,其中背景区在成像时灰度值介于其余二者之间,体现了目标物体周边的环境信息,是噪声干扰的主要发源地。噪声不仅降低了图像质量,也对后续的成像及扫描匹配带来诸多不便,因此必须通过二值化滤波、灰度变换、平滑等图像增强技术排除无用信息,保留和突出目标信息,从而提高声纳的“声视觉”能力。

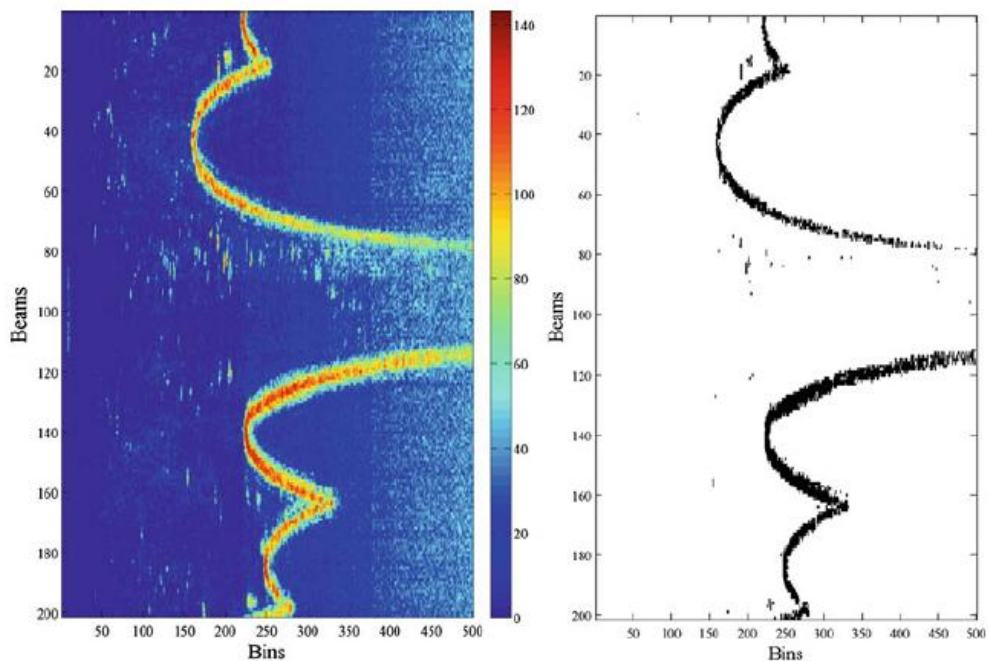


图 3-3 经过阈值滤波后的图像结果

二值化是一种计算简单且效果明显的滤波方法,它把原始灰度图通过设置阈值转换成只用 0 和 1 两种值表示的二值图像,很适合用来把目标物体从嘈杂的噪声背景中分离出来。经过二值化阈值滤波以后,回波数据中强度过低的 Bins 被统统舍弃,图像中只留下超过阈值的 Bins,图 3-3 (b) 展示了原始 Pings-Bins

图进行阈值滤波后的结果。此时阈值的选择就显得尤为重要，设置过低则滤波效果不明显，图像中无关信息无法去除，信噪比低；阈值设置过高，可能导致丢失部分目标物体信息也被过滤；本文使用的方法是先计算该 Ping 中所有 Bins 中的最大值与最小值，再取二者的平均作为阈值，如公式（3-1）所示：

$$\text{Bin_Threshold} = (\text{Bin}_{\text{Max}} + \text{Bin}_{\text{Min}})/2 \quad \text{式(3-1)}$$

3.2.2 边缘检测

边缘是代表目标轮廓外形的一系列相邻的点的集合，包含了描述目标物体特征的众多有用信息，是研究者最关注的图像特征之一^[33]。

观察经过二值化处理后的 Pings-Bins 图，每一个 Ping 中探测到的目标信息都是由若干个紧密相连的 Bins 构成，而不论是对判定障碍物还是扫描匹配来说这都是多余的，因为表示目标边缘的最外层 Bins 最有可能准确代表目标的轮廓外形。这里我们采用“本地最小，相邻最小”原则搜集边缘信息，即筛选并保留满足在该 Ping 中编号最小且与相邻 Ping 中最小 Bin 的间距也最小的 Bins。经过二值化和边缘检测的波束原始数据图像如图 3-4（b）。

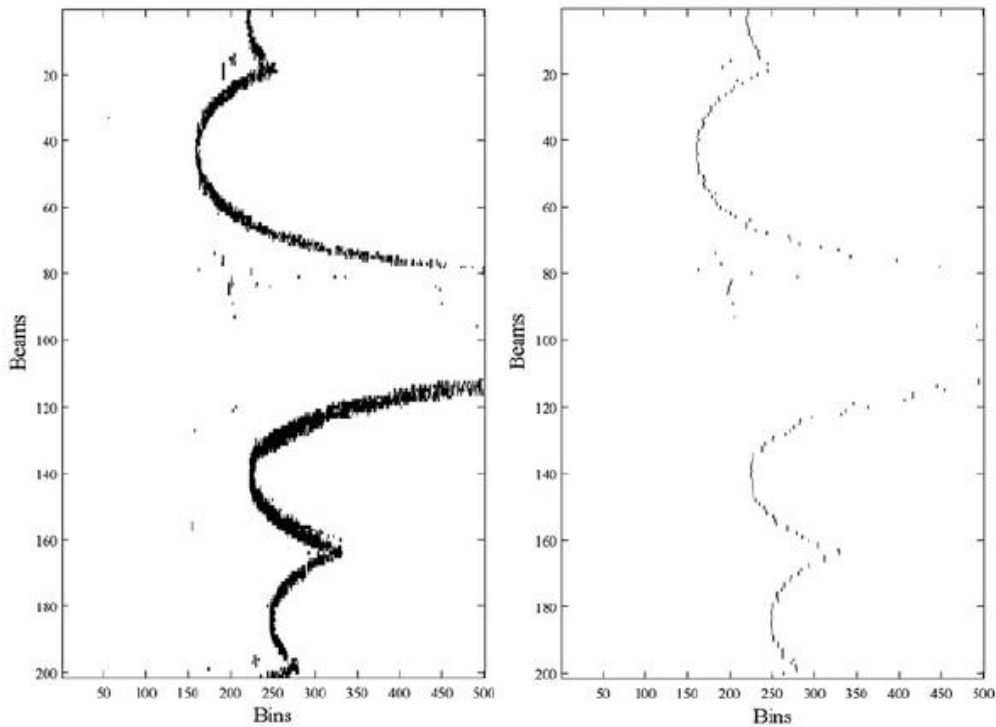


图 3-4 经过边缘检测后的图像结果

3.3 AUV 位姿估算

AUV 携带扫描成像声纳在水中工作时，声纳需要十几秒到几十秒的时间才能获取一个 Scan，在这段时间中 AUV 无法保持静止，这就意味着获得的声学图像上坐标原点也处于不断移动中。虽然一般 AUV 运行时航速不会太高，实际发生畸变的程度不高，但考虑到洋流的影响以及未来水下机器人的发展，这种不确定性偏移是值得加以关注和研究的^[34]。如果想消除这种现象引发的成像畸变，我们必须设法弄清机器人的位姿在 Scan 生成过程中是如何变化的。

首先，我们定义一个参考坐标系 I_c 来研究一个 Scan 过程中机器人的位移问题，把 AUV 此时的移动方向规定为 y 轴正方向，并且把声纳朝 y 轴正向射出的第一道探测波束被接收时刻作为当前 Scan 的开始，此时声纳所处的位置就是坐标系原点。

为了预测和确定水下机器人的位姿变化，AUV 还需要搭载位姿参考系统（AHRS）和多普勒速度测算仪（DVL）。AHRS 包含陀螺仪、加速度计及磁强计等，能够为水下机器人提供高精度的加速度数据以及偏移、旋转等姿态动作信息。DVL 也是 AUV 惯性导航和航位推算领域常用的传感器，能够提供位置、方位角和移动速度等。依赖上述传感器提供的 AUV 位姿参数，在扫描生成过程中当机器人以固定航速行进且不发生大幅偏转时，我们就可以用一个简单的四自由度运动模型来分析和预测 AUV 的位姿变化^[35-36]。不过众所周知，惯导测量仪器也存在误差并且误差会随时间累积逐渐放大，为了解决这个问题我们在每次 AHRS 和 DVL 的数据传来以后进行卡尔曼滤波，以不断更新对 AUV 位姿的预测。下面具体描述整个算法模型：

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \begin{bmatrix} \eta^B \\ \mathbf{u}^R \end{bmatrix}, P_k = E[(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)(\mathbf{x}_k - \hat{\mathbf{x}}_k)^T] \quad \text{式(3-2)}$$

其中：

$$\eta^B = [x, y, z, \psi]^T, \mathbf{u}^R = [u, v, w, r]^T$$

\mathbf{x}_k 是模型在第 K 步时储存 AUV 位姿信息的状态向量， $\hat{\mathbf{x}}_k$ 代表状态向量的平均估值， P_k 是其协方差。 η^B 包含的是机器人相对于背景坐标系 B 的三维位置信息(x, y, z)和表示角度参数的(ψ)。 \mathbf{u}^R 是代表相对于机器人坐标系 R 的线性速度(u, v, w)和角速度(r)。背景坐标系 B 的选取与 I_c 相同，唯一区别是背景坐标系 B

的 y 轴正向永远与地理磁的方向保持一致，如图 3-5 所示：

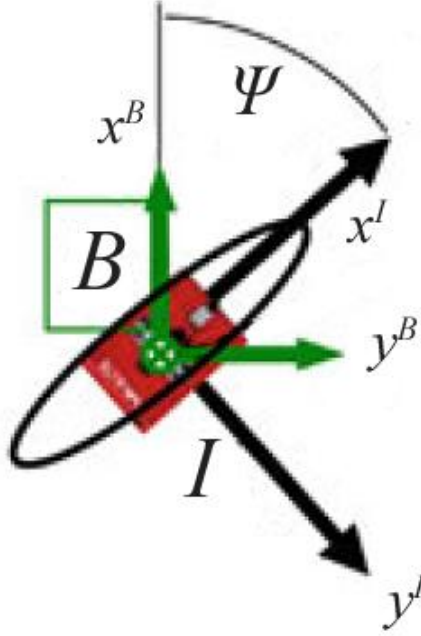


图 3-5 运动模型坐标系示意图

3.3.1 对位姿变化的预测

在四自由度运动模型下， k 时刻对 AUV 的运动预测如下：

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_k &= f(\mathbf{x}_{k-1}, \mathbf{n}_k) \rightarrow \\ \begin{bmatrix} \eta_k^B \\ v_k^R \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \eta_{k-1}^B + R(\eta_{k-1}^B) \left(v_{k-1}^R \Delta t + n_k \frac{\Delta t^2}{2} \right) \\ v_{k-1}^R + n_k \Delta t \end{bmatrix} \end{aligned} \quad \text{式(3-3)}$$

其中：

$$R(\eta) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

在此模型中，AUV 的移动被认为是在受到一个外界速度波动影响下，自身始终保持恒定速度行进，外界的速度影响以零均值高斯噪声 \mathbf{n}_k 的积分建模^[37]。该速度波动的协方差矩阵 \mathbf{Q}_k 假设为一对角线矩阵，并且与 AUV 在一个取样时间段内可获得的最大速度增量保持相同数量级。接下来，使用标准卡尔曼滤波更新

对位姿的估算。

3.3.2 使用卡尔曼滤波更新位姿预测

当 DVL 和 AHRS 提供一组新的速度及航向信息数据时，可以对之前的位姿估算应用卡尔曼滤波方程以提高位姿算法的准确性。

$$Z_{DVL,k} = [u_{b,w}, v_{b,w}, w_{b,w}, z_{depth}]^T, Z_{AHRS,k} = [\psi] \quad \text{式(3-4)}$$

其中 b 代表船底跟踪速度， w 则是水层跟踪速度。上式可变为：

$$Z_{DVL,k} = H_{DVL}x_k + \omega_k, Z_{AHRS,k} = H_{AHRS}x_k + \omega_k \quad \text{式(3-5)}$$

其中：

$$H_{DVL} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{AHRS} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

式中环境噪声 ω_k 为零均值高斯白噪声。

3.4 低畸变成像

凭借多普勒测速仪和位姿参考系统，使用航位推算技术能够在一定程度上估算 AUV 的位姿变化，但由于惯导系统天然存在误差无限累计的缺点，所以单纯依靠航位推算实现 AUV 导航是不可行的。这里我们把航位推算与成像声纳相结合，因为只需要关注在一个 Scan 内 AUV 相对 I_c 坐标系原点的位姿移动，就能回避惯导系统累积误差的问题。当前 Scan 结束以后，等到下一道新波束的回波数据被接收时，之前的位姿信息及对不确定性漂移的估算全部清零，同时滤波器开始新一阶段的运算并更新数据，每个 Scan 的数据彼此独立、不相关^[38]。

滤波器的初始入参数据是姿态传感器提供的航偏角(ψ)它代表 AUV 及声纳航向与磁北极方向间的夹角，即 AUV 运动坐标系 I_c 与背景坐标系 B 间的角度差距。已知两坐标系间夹角后，就能把航位推算的结果应用到 AUV 运动坐标系中，从而减小 Scan 生成时图像包含的畸变。

$$Z_i = \begin{cases} Z_i & i = c \\ \ominus r_{I_c}^{B_c} \oplus D_{I_c}^{B_c} \oplus r_{I_i}^{B_i} \oplus Z_i^{I_i} & i \neq c \end{cases} \quad \text{式(3-6)}$$

其中：

$$D_{I_c}^{B_c} = \sum_{j=c}^{i-1} \text{sign}(i - c) d_j^{B_j}$$

3.5 本章小结

由于现实中的水下环境在时间域、空间域以及频率域上复杂多变，声学图像受噪声和混响等多种影响难以做到清晰、准确，为了后续扫描匹配的顺利实施必须对其进行图像处理。

针对声学图像高噪声、高畸变的特点，本章首先论述了图像处理的方法。通过图像二值化，我们可以最大限度从背景噪声中提取有用信息，剔除干扰。之后利用边缘检测对符合阈值要求的点进行筛选，突出目标物体轮廓。其次是结合航位推算技术对消除扫描图像畸变进行探索。通过 DVL 和 AHRS 等设备采集 AUV 位移初始数据，再使用卡尔曼滤波不断更新数据以获得更精确的位移估计。最后在原始的声纳成像方法上加入对位移的考量，得到畸变较低的声学图像方便后续配准。

4 基于声纳图像的扫描匹配算法

水下机器人在完成深海探测、海底采集、水下维修等作业时，潜器的自定位问题是摆在面前的第一个难题，能否准确获取 AUV 在工作时相对于整个工作区域的位置坐标是其能否实现自主导航的重要决定因素。依靠前视扫描声纳、多普勒测速仪、位姿参考系统等传感器的辅助，我们在一定程度上了解了机器人周边的环境信息，并能够建立具备较高分辨率的环境地图。在移动机器人领域，建立环境地图与导航定位常常相辅相成、相互促进，SLAM 技术（Simultaneous Localization and MapPing，同时定位与建图）便是在二者基础上产生的一类新的导航定位方法^[39-41]，如图 4-1，本文中所用的扫描匹配技术就属于同时定位与建图的范畴，利用前后相邻时间不同的环境图像获知 AUV 自身位姿变化，实现定位与导航。

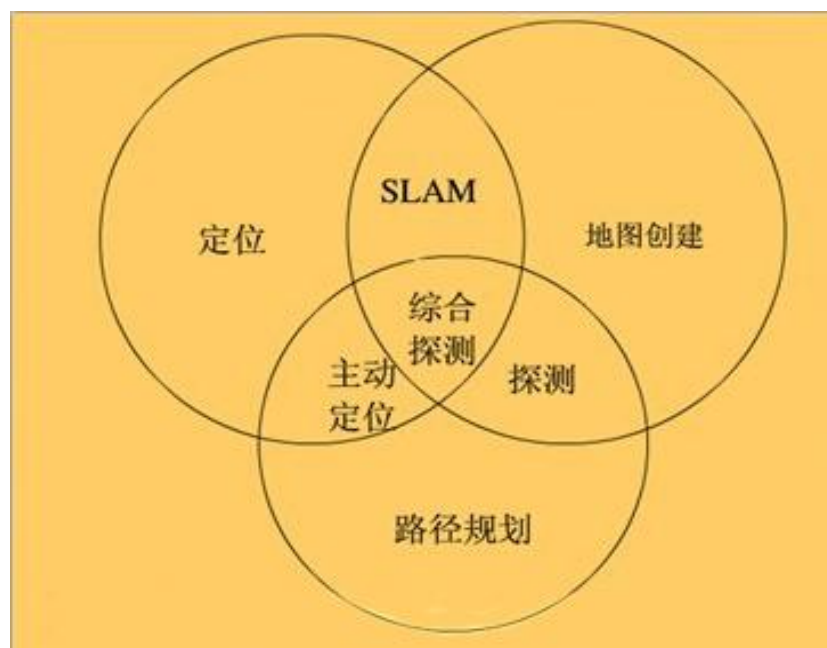


图 4-1 移动机器人领域中学科综合关系图

4.1 扫描匹配算法

扫描匹配（Scan Matching）也称为配准（Registration），是一种通过最大化前后两幅扫描图像的重叠部分，寻找位姿变化前后经由激光或声纳传感器传来的

环境数据间的对照关系，以估算机器人相对位移的导航定位技术，已被广泛应用于考古、军事、医疗等多种不同领域^[42]。

在扫描匹配算法中入参主要为两幅连续的扫描图像，时间上靠前的叫做参考扫描（Reference Scan），是由一个包含所有回波数据的点集组成，代表当前时刻探测到的环境信息。另一个是当前扫描（Current Scan），时间上与参考扫描相邻，表示 AUV 在运动到下一个位姿时周围环境的数据信息。本文中所涉及的配准均考虑在二维平面下，因为扫描声纳返回数据是二维的环境信息。

随着对扫描匹配的研究深入以及技术逐渐成熟，方法适用条件也逐渐从室内简单且结构化的环境向室外非结构化的复杂环境扩展，从小范围已知环境向大范围未知环境扩展，从孤立不变的环境向不断变化中的环境扩展，从平面下的二维配准发展为全方位立体匹配。当 AUV 的建图与定位能力能够适应大尺度且灵活多变的复杂环境，同时不失高效性和鲁棒性时，水下机器人的功能与应用前景就能得到更好的扩展。另外，由于不像在考古、医疗领域中那样对物体轮廓的还原度有极高的要求，在水下机器人导航研究中人们更关心处理的速度，即对算法高效性需求强烈，AUV 如何能够更快速精准的完成赋予的任务是扫描匹配方法应用中的一个关键问题^[43]。

使用扫描匹配技术实现 AUV 自主导航具备一些其他导航手段所不具有的优点：（1）不依赖于环境图像中提取的几何特征，为 AUV 在大范围非结构化的复杂环境中导航提供了可能性；（2）使用原始的回波数据即可进行配准，确保数据被完整利用；（3）以扫描图像作为匹配算法的基本单位，分析和储存时更能体现环境原貌，清晰明了。

对扫描匹配按工作原理分类可以分为两大类：全局扫描匹配和局部匹配。前者的主要思想是利用先验地图与随时获得的当前环境地图经行配准，从回波数据中提取点、线、面等特征，再通过匹配这些特征从而确定 AUV 位置。全局匹配的缺点在于易受到噪声干扰^[44]，并且对先验地图的依赖性限制其在探索非结构化环境时的表现。相反，以迭代最近点算法（Iterative Closest Point, ICP）为代表的局部匹配更适合应用于无法获得先验地图的场合，一般先用里程计等获取初始位姿的估算，然后算法不断迭代查找前后扫描图像间的对应点，一旦找到足够多的对应关系就可以使两幅图像彼此重叠，最终完成匹配。唯一不足的是当初始

位姿估算较为准确时，局部匹配能够取得理想的精度与时间花费，而一旦起始位姿估算误差过大则迭代不易收敛且无法获得全局最优解。

从使用的配准元素角度看，扫描匹配算法可以使用特征对特征进行匹配，也可以仅仅依赖点对点完成匹配^[45]。使用特征进行匹配时，原始扫描数据被视为由多边形、线段或者角点组成的整体。匹配的第一步就是先提取出前后扫描图像中各自的几何特征，接着寻找特征间存在的对应关系从而确定特征对，最后凭借特征对可计算出机器人的相对运动，当模型总体误差低于预设的阈值且最小时，我们认为此时得到的位姿变化准确有效（如图 4-2 所示）。

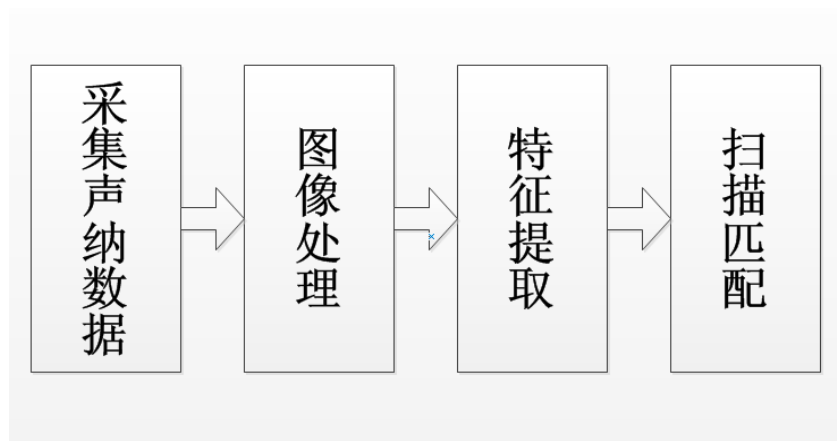


图 4-2 基于特征的扫描匹配算法流程

后来 Cox 在特征对特征匹配的基础上提出了一种点与特征的匹配方法^[46]，使用新获得的原始回波数据与参考扫描中提取的特征进行配准，并引入栅格图与概率论的方法提高算法准确度。这种方法是基于特征的匹配向点对点匹配的过渡，因此在保留了二者部分优点的同时也摒弃了各自的部分缺点，总的来说优缺点都不突出。

与提取特征再匹配的方法相比，点对点直接配准优势明显。以 ICP 算法为例，匹配的对象是相邻两次扫描的原始数据，目的是找到能代表两幅图像中点与点间对应关系的最优解。由于不依赖于结构化的环境进行特征提取而直接使用原始回波数据，ICP 算法在准确度与鲁棒性方面优于其他匹配特征的方法，并且更适合用于非结构化的海底复杂环境，本文使用的也是一种基于点与点的扫描匹配方法。但由于原始数据集中每一个点都要参与计算，计算量通常巨大使得迭代收敛缓慢^[47]，对看重时效性的水下机器人来说这一点需要尽量避免。

目前应用于 AUV 领域的绝大多数扫描匹配算法都是基于 ICP 的改良或延伸，因此有必要先简单介绍一下 ICP 算法。

4.2 迭代最近点算法（ICP）

4.2.1 原始 ICP 算法原理

迭代最近点算法最早是由 Besl 和 McKay 在 1992 年提出的^[48]，它是一种基于纯粹几何模型的三维点集配准方法，因为算法精确度高且适用广泛，很快便成为移动机器人领域最受关注的扫描匹配算法之一。

ICP 适用于以下七类几何表示：

- (1) 点集
- (2) 线段集
- (3) 隐式曲线： $\vec{g}(x, y, z) = 0$
- (4) 参数曲线： $(x(u), y(u), z(u))$
- (5) 三角集
- (6) 隐式曲面： $g(x, y, z) = 0$
- (7) 参数曲面： $(x(u, v), y(u, v), z(u, v))$

ICP 的核心思想是利用最小二乘法计算数据模型间的最优匹配，例如点集 S_{cur} 和点集 S_{ref} 是两个来自不同坐标系的三维数据集，算法不断重复“确定点集间对应点对的对应关系-计算最优刚体变换”的过程，直到计算得到的刚体变换使得下式目标函数最小时迭代终止，从旋转变换 R 和平移变换 T 即可推算两个模型间的位姿变换关系。

$$d(P) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|S_{\text{ref}} - R(P_R)S_{\text{cur}} - P_T\|^2 \quad \text{式(4-1)}$$

其中点集 S_{cur} 为 $\{P_i, i = 1, 2, \dots, p\}$ ，表示包含 p 个数据点的当前扫描模型，点集 S_{ref} 表示包含 q 个数据点的参考扫描模型，记为 $\{Q_i, i = 1, 2, \dots, q\}$ ，迭代最近点算法的前提是假设当前扫描模型必须为参考扫描模型的子集。所求的模型间位姿变化可用 $P = (p_0, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7)^T$ 表示，前四个向量 $P_R = (p_0, p_1, p_2, p_3)^T$ 是以四元组的形式代表旋转量，可转化为常见的旋转矩阵形式 $R(P_R)$ ，其余三个向

量 $P_T = (p_4, p_5, p_6)^T$ 用三维坐标形式代表平移量，因此 P 也可表示为 $P = (P_R \mid P_T)$ $T_P = (P_R \mid P_T)^T$ 。整个算法流程描述如下图：

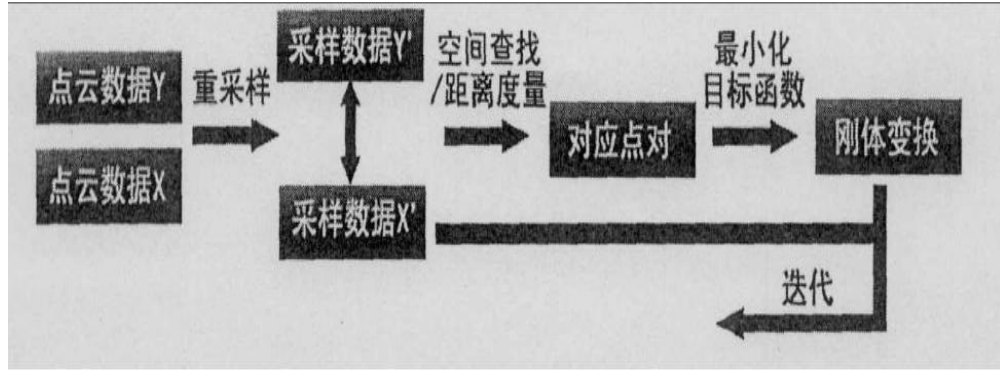


图 4-3 ICP 算法流程

首先将迭代初始化： $P_0 = (1, 0, 0, 0, 0, 0)^T$ ， $k = 0$ ，设置阈值 c 和提前结束迭代的最大次数 k_{\max} 。

然后重复执行下述迭代过程：

(1) 对当前扫描模型 S_{cur} 中的每个采样点分别按照欧式距离（Euclidean Metric，欧几里得度量）搜索，寻找其在参考扫描模型中的最近点，这些最近点构成当前扫描模型的最近点对集合 Y_k 。

(2) 由最近点对集合 Y_k 和参考扫描模型对比，计算模型间的位姿变化 P_k 和误差 d_k 。

(3) 将上步获得的变换矩阵 $P_k = (P_{Rk} \mid P_{Tk})^T$ 应用于 S_{cur} 中所有数据点。

(4) 计算变化后的 S_{cur} 与 S_{ref} 间对应点对的误差 d_{k+1} ，若 $|d_{k+1} - d_k|$ 小于阈值 c 或者迭代次数超过预设最大值，迭代停止。

在迭代过程中，均方差最小化的结果是 P_i 不断向 Q_i 靠近， P_i 又是参考扫描模型中的最近点，这就使得随着迭代不断进行两个扫描模型逐渐重叠至最大化，这也是迭代最近点算法收敛性的由来^[49]。

4.2.2 ICP 算法变种比较

(1) IMRP 算法

Feng 和 Milios 在 1994 年对标准 ICP 在搜索最近点策略上进行改良，提出了 IMRP（Iterative Matching Range Point）算法^[50]。IMRP 只允许在一定角度范围内

搜索最近点, (如图 4-4) 因为对应关系正确的对应点对之间应该拥有类似的角度关系, 这样改进的结果是在一定程度上加快了算法收敛速度, 尤其是角度匹配的收敛速率提高显著。

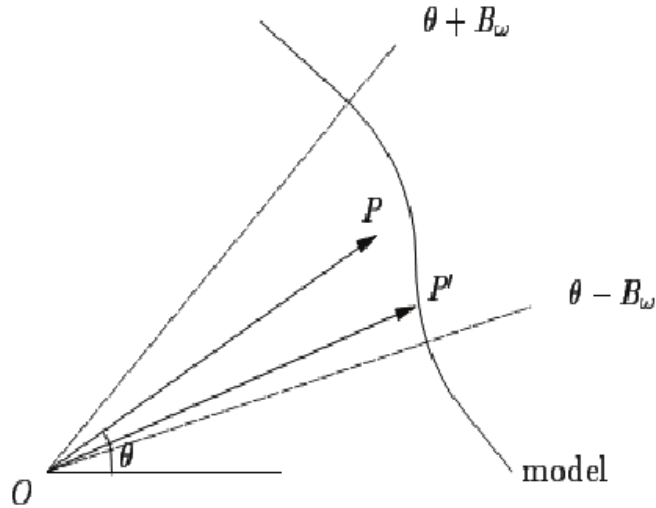


图 4-4 IMRP 算法模型

(2) IDC 算法

1997 年 Feng 和 Milios 在 IMRP 基础上又提出了 IDC (Iterative Dual Correspondence) 算法^[51], 鉴于 IMRP 在角度匹配方面的优势, 将其与 ICP 结合并分工, 一个计算旋转分量一个计算平移分量。这种优势互补产生的影响是 IDC 在准确性和收敛速度上明显优于结合前的两种算法。

(3) PSM 算法

Diosi 在 2005 年提出一种基于极坐标下的匹配方法 PSM (Polar Scan Matching), 这种方法依赖于激光传感器获取数据的便利, 直接在极坐标系相同方向上寻找不同扫描间的对应点, 匹配速度比标准 ICP 算法有明显提升^[52]。

4.2.3 ICP 算法特性分析

经过多年的研究 ICP 已经作为一种成熟的算法广泛应用于三维点集匹配领域, 其主要优点有:

(1) 配准精度高;

- (2) 适用性好，可在点集、曲线、曲面等多种几何表示下使用；
- (3) 可直接进行点对点匹配，无需提取几何特征；
- (4) 如果给予较准确的初始值，算法收敛快速、准确。

基于这些特点，ICP 逐渐成为曲面配准的首选，但并不代表在任何场合下都推荐使用 ICP 实现扫描匹配，尤其是对于原始 ICP 算法，存在的一些缺点大大限制了其广泛应用。

- (1) 算法的前提是当前扫描模型必须包含在参考扫描模型以内，是它的子集，这一点常常无法实现；
- (2) 算法在计算对应点时，运算带价巨大；
- (3) 最终结果的准确性依赖于较准确的初始值，不然会产生很大误差；
- (4) ICP 是基于几何模型的配准方法，默认使用欧氏距离，在复杂环境下容易产生错误的对应点。

4.3 概率迭代最近点算法 (pIC)

通过上一章节对声纳成像的研究，我们已经获得了低噪声高还原度的环境图像，为下一步扫描匹配做好了准备。扫描匹配的对象是激光或者声纳传感器在前后不同时间采集到的数据点集，图像化后依靠寻找数据点间的对应关系使两幅扫描最大化重叠，求解机器人在运行中的位姿变化从而实现导航。

在陆上移动机器人应用中，使用高精度的激光传感器配合迭代最近点算法普遍能获得较满意的结果，可一旦应用场景移至复杂的水下高噪声环境，不但激光仪器无法实现长距离精确测距，噪声的干扰还会暴露传统 ICP 算法的一些不足^[53]。

传统 ICP 算法使用几何模型表示扫描数据点集，用欧氏距离度量三维空间中对应对点之间的距离，对传感器自身的一些不确定因素却没有纳入考虑。Montesano 等在 2005 年提出^[54]，由于传感器天然具有的误差和不确定性会使当前扫描模型中距离原点较远的点，在用欧氏距离表达时会偏离它们正确的对应点位置，并且距离传感器越远的点产生的偏差会越大，这种现象将阻碍对应点对的匹配并影响到算法最终结果的准确性。

为了解决上述问题 Montesano 等提出了概率迭代最近点 (Probabilistic Iterative Correspondence, pIC) 算法，它是把相对位移和点集模型都用高斯随机

变量建模，是 ICP 算法在统计学上的扩展。

4.3.1 pIC 算法原理

pIC 算法入参有四个，分别是：参考扫描模型 S_{ref} ，模型中数据点表示为 r_i ($i = 1 \dots n$)；当前扫描模型 S_{cur} ，包含 m 个数据点表示为 c_i ($i = 1 \dots m$)；初始相对位移的估算 \hat{q} 和其协方差 P_q 。具体流程如下：

Step1: 初始化迭代。迭代次数 $k = 0$ ，相对位移 $\hat{q}_k = \hat{q}$ 。

Step2: 迭代步骤。

(1) $\hat{n}_i = \hat{q}_k \oplus c_i$ 。将当前扫描模型中的数据点 c_i 依据 \hat{q}_k 进行位移逆变换得到点集 $\{n_i\}$ ，相当于把当前扫描模型中的点投影到与参考扫描相同坐标系下。

(2) $A = \{r_i \in S_{ref} / D_M^2(r_i, n_i) \leq X_2^2, \alpha\}$ 。对于每一个 n_i 使用马氏距离 (Mahalanobis Distance) 和预设的可信度 α 计算其在统计学上对应点的集合 A 。

(3) $\hat{a}_i = \arg \min_{r_i \in A} \{D_M^2(r_i, n_i)\}$ 。在集合 A 中使用个体最近相邻 (Individual Compatibility Nearest Neighbor, ICNN) 算法选出 n_i 的对应点 a_i 。

(4) $\hat{q}_{min} = \arg \min_q \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (\hat{e}_i^T P_{e_i}^{-1} \hat{e}_i) \right\}$ 。最小化对应点间马氏距离误差的均方差，当变化量小于阈值或迭代次数 k 超过最大值时停止迭代，此时 \hat{q}_{min} 即 pIC 算法结果 \hat{q}_{pIC} 。

其中 e_i 为对应点对 (a_i, n_i) 间的匹配误差， $e_i = a_i - n_i = a_i - q_k \oplus c_i$ 。

4.3.2 仿真实验数据分析

为了检验算法的可行性，本文主要从误差估计、内存占用和时间花费三个方面对算法进行仿真并与传统 ICP 算法相比较。

仿真使用 C++语言编写仿真程序，借助 MRPT 模拟机器人的移动过程。MRPT(Mobile Robot Programming Toolkit, 移动机器人编程工具包)是一种应用广泛、跨平台、开源的 C++库，旨在帮助移动机器人领域研究者设计和实现算法，常用于 SLAM 算法、计算机视觉、路径规划等，重点关注算法的效率和代码可重用性。虽然使用人数无法与 OpenCV 相比，但 MRPT 提供很多移动机器人领

域常用算法，具有使用便利的特点。

由于实验水池场地有限，无法提供适合检验扫描匹配算法的数据集，本文使用 MRPT 网站上由国外研究者采集并提供免费下载的标准数据集进行仿真。仿真共使用两组不同的数据集，第一组来自西班牙的马拉加大学（University of Malaga），在长约 1.9 公里的通道上采集了共计 5000 个 Scan（如图 4-5 所示），每个 Scan 扫描范围为 180° ，分辨率为 0.5° 。第二组数据集是由澳大利亚的悉尼大学采集并提供的，路径长度约 327 米，共采集 3000 个 Scan（如图 4-6 所示）。



图 4-5 马拉加大学数据集

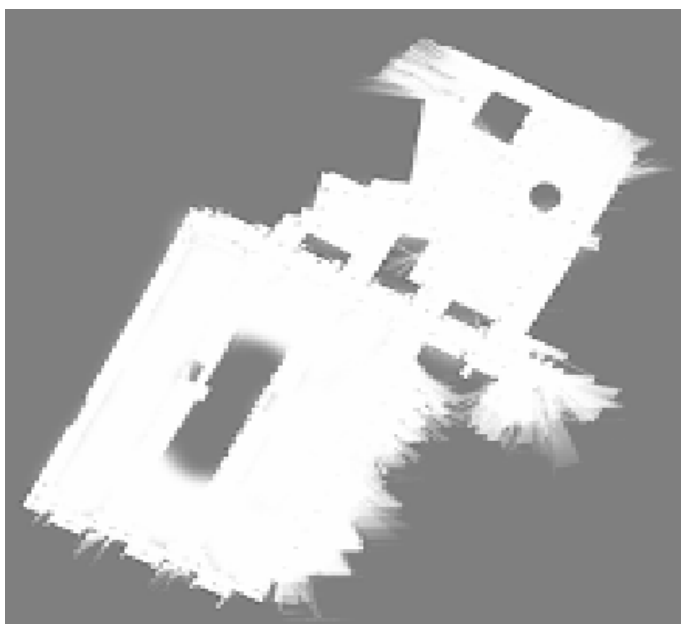


图 4-6 悉尼大学数据集

将本文所用的概率迭代最近点算法在两数据集中运行,并与 ICP 算法运行结果进行比较。此次仿真的硬件环境为 Windows XP Service Pack3, 使用一台 Intel Core Duo 1.80G、2GB 内存的笔记本电脑, 仿真结果见表 4-1 和图 4-7。

表 4-1 仿真结果

点集 \ 算法	内存占用		时间花费	
	ICP	pIC	ICP	pIC
马拉加大学	196.38Mb	36.44Mb	102min	24min
悉尼大学	84.22Mb	27.97Mb	39min	7min

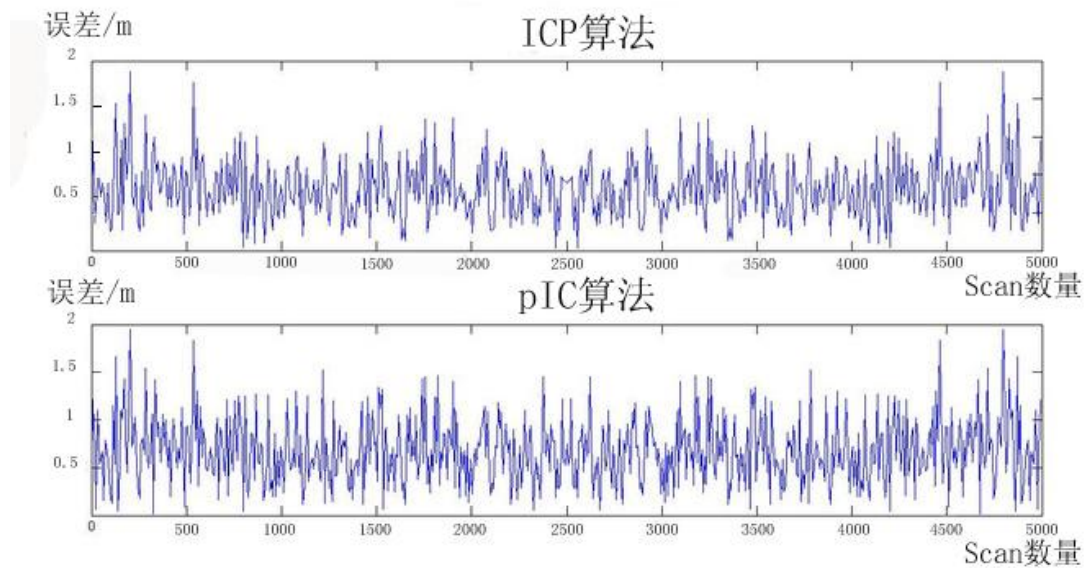


图 4-7 马拉加大学数据集误差分析

由仿真结果可见,两种算法的误差在相同数量级下,但由于 ICP 算法计算复杂度较高,占用大量内存空间,并且储存声纳图像本身也占用内存空间,导致程序运算较久、实时性差。综合来看,使用 pIC 算法能在保证结果准确性的同时大幅度简化运算,提高扫描匹配的实时性。

4.4 本章小结

从声纳传感器获得有效数据以后,扫描匹配是本文要实现的最终目标。一开始先简要论述扫描匹配的原理,然后着重介绍最常见的扫描匹配算法——ICP 算法,通过分析其优点与不足回顾 ICP 提出至今的发展与各种改良算法的诞生。

本文使用的概率迭代最近点算法严格来说也属于是对 ICP 的改良,思想同样是不依赖提取特征而直接进行点对点的匹配,算法流程和迭代步骤已经给出并通过仿真实验验证了算法是可行且有效的。

5 总结与展望

随着对水下机器人的研究深入,一方面人类在探索 and 开发广阔海洋的道路上获得了前所未有的助推力和实用工具,另一方面也对 AUV 的发展前景提出了更高要求和更大挑战。想实现 AUV 在更大程度上的自治与功能上的进一步提升离不开准确的导航定位技术做支撑,而不论使用何种导航方法都必须首先明确 AUV 所处的环境信息。

目前还没有别的传感器比声纳更适合在复杂的海洋环境中感知周围目标,在此背景下,本文以加拿大 IMAGENEX 公司生产的 852 型超小型前视扫描成像声纳为核心构建声视觉系统,基于改进后的声纳成像与图像处理方法,结合概率迭代最近点算法尝试研究 AUV 利用扫描匹配技术估测位移轨迹的方法。

5.1 工作总结

具体来说本文主要在以下方面开展了研究工作:

(1) 概述了声纳工作的基本原理,接着针对本文使用的 852 型前视成像声纳重点介绍其工作流程和接收到的回波信息,包括具体参数和数据格式等,在充分了解这些信息后介绍回波数据从数据采集、解析到显示的一整套详细流程。

(2) 在对原始声纳图像处理方面,首先分析图像存在的主要问题,即包含噪声较多和会因漂移产生畸变。针对高噪声的特点本文采取直接处理单个波束信息的方法最大限度保留信息完整,然后通过二值化等图像增强手段降低背景噪声,再利用边缘检测对符合阈值要求的数据点进行筛选,最后得到清晰准确的轮廓信息。

(3) 为了减小图像畸变对后续扫描匹配的影响,本文尝试将航位推算法与声纳成像相结合,利用卡尔曼滤波不断更新 DVL 和 AHRS 等设备提供的位姿变换估计值,以提高对 AUV 航迹估测的准确性。最后在成像时将机器人位移引入传统声纳成像方法,得到畸变较低的扫描图像方便后续配准。

(4) 高质量的环境图像是扫描匹配的基础,先给出扫描匹配的定义与常用方法,重点介绍了三维配准中最具影响力的算法——ICP 算法,通过分析其优缺点及算法后续发展讨论 AUV 领域应用中的配准方法选择。本文选用的是基于概率

论的迭代最近点算法,使用马氏距离寻找最近点可以回避传统 ICP 算法中使用欧氏距离的一些先天缺点。

(5) 详细阐述了概率迭代最近点算法的流程和迭代步骤,并通过对标准数据集进行仿真来验证算法可行性。

5.2 未来展望

本文主要研究了 AUV 前视声纳成像与扫描匹配方法,虽然在一定程度上对声纳成像、图像处理、扫描匹配三方面进行了研究并做了一定改进,使得算法时效性和鲁棒性有所提升,但由于扎根此领域时间尚浅,本文在以下方面还有不少可以改进和提高的地方:

(1) 本论文只关注探测波束对回波区内物体的成像,对于阴影区内情况基本不考虑而一概视为背景。虽然并不影响现阶段的图像处理与扫描匹配,但如果后续工作中加入对阴影区目标简单信息的考虑会有助于 AUV 后续进行路径规划与 SLAM。

(2) 本论文采用的 852 型前视成像声纳可以工作在不同频率下,为了获得最丰富的环境数据,在实验中默认使用高频模式,缺点是成像速度较慢。今后可以尝试让声纳自适应选择频率,在周边环境不太复杂的情况选择低频模式,加快运算速度从而提高 AUV 工作效率。

(3) 本论文算法目前主要针对静态环境,没有考虑移动中的物体对结果是否产生影响。在室外动态环境下需要识别移动中的物体并把相应数据点从扫描匹配模型中去除,对环境建模提出更高要求。

(4) 本论文实验均来自实验水池或仿真数据,面积小且水下环境较为单一,无法验证算法在大范围复杂水下环境时的有效性与鲁棒性,下一步希望可以进行浅海海试。

参考文献

- [1] 徐玉如,苏玉民.关于发展智能水下机器人技术的思考.舰船科学技术,2008.8,30(4):17-21.
- [2] L.B.Gary.The evolutionary development of the military autonomous underwater vehicle. In Proc.Fifth International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology.Vol.Chicago,I L,2000(5):3239-3243.
- [3] 蒋新松,封锡盛,王棣棠.水下机器人.沈阳:辽宁科学技术出版社,2000.
- [4] V.Kanakakis,K.P.Valavanis and N.C.Tsourvel-oudis.Fuzzy-logic based navigation of underwater vehicles.Journal of Intelligent and Robotic Systems,2004(40):45-88.
- [5] Richard B D.The Development of Autonomous Underwater Vehicles(AUV).A Brief Summary[A].IEEE International Conference on Robotics and Automation[C].Seoul,Korea,2001.
- [6] 李晔等.自治水下机器人的研发现状与展望.机器人技术与应用.2007,1:25-31.
- [7] 马伟峰,胡震.AUV的研究现状与发展趋势.火力与指挥控制,2008,33(6):10-13.
- [8] 彭学伦.水下机器人的研究现状与发展趋势[J].机器人技术与应用,2004,15(3):43-47.
- [9] A.Hanai,H.T.Choi,S.K.Choi,J.Yuh.Experimental study on fine motion control of underwater robots.Advanced Robotics,2003(18):963-978.
- [10] Gianluca,Antonelli.Underwater robots:motion and force control of vehicle-manipulator systems.Springer Tracts in Advanced Robotics,2003(2):55-134.
- [11] 殷波,孟庆春,庄晓东等.基于模糊逻辑的多机器人系统智能学习方法.中南大学学报,2005,36:142-146.
- [12] 孙传东等.水的光学特性及其对水下成像的影响[J].应用光学,2000,21(4):39-46.
- [13] 赵建虎.多波束深度及图像数据处理方法研究[D].武汉:武汉大学,2002.
- [14] Tamaki Ura.Development of autonomous underwater vehicles in Japan.Advanced Robotics,2002,16(1):3-15.
- [15] Yoji Kuroda,Tamaki Ura.Vehicle control architecture for operating multiple vehicles.in Proc.AUV94,Tokyo,1994,7:323-329.
- [16] 何炜.基于Daubechies小波的水下图像去噪方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2006.
- [17] G.Griffiths.Ocean science applications for autonomous underwater vehicles-the work plan for autosub-1 for 1997-2000 and Beyond.Unmanned Underwater Vehicle Showcase, 1997,9: 24-25.
- [18] 李一平,封锡盛.“CR—01”6000m自治水下机器人在太平洋锰结核调查中的应用.高技术通讯,2001,11(1):85-87.
- [19] 李一平,燕奎臣.“CR—02”自治水下机器人在定点调查中的应用.机器人,2003,25,(4):359-362.
- [20] 李霞.声视觉成像与信息处理技术研究.[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学.2001.
- [21] A.D.Waite,(王德石等译).实用声纳工程.北京:电子工业出版社.2004.
- [22] 田坦,刘国枝,孙大军.声纳技术.哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社.2000.
- [23] David Ribas Romagós.Underwater SLAM for Structured Environments Using an Imaging Sonar.[PhD Thesis].Girona:Universitat de Girona,May 2008.
- [24] 黄爱民,安向京,骆力等.数字图像处理与分析基础.北京:中国水利水电出版社.2005.
- [25] 丁凯.基于前视声纳的水下目标跟踪技术研究.[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学.2006.
- [26] Edward O.Belcher.Underwater Acoustic Imaging.IEEE Computer Graphics and Applicat

- ions.1992,12(4):11-13.
- [27] 孙小楠.水下机器人声视觉系统中的数字图像处理算法研究.[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学.2000.
- [28] 王彪.声纳图像的处理及目标识别技术研究.[硕士学位论文].西安:西北师范大学.2005.
- [29] 肖国有,屠庆平.声信号处理及其应用.西北工业大学出版社,1994:77-163.
- [30] Kenneth R.Castleman,(朱志刚等译).数字图像处理.电子工业出版社,2002:58-60.
- [31] Li Guan.Sensor-Based Cooperative Multi-Robot 3D Environment Reconstruction.USA. University of North Carolina-Chapel Hill, April 19th,2006.
- [32] Johnson D.Side Scan Sonar Imagery Analysis Techniques.Oceans'91,IEEE,Honolulu, US A,1991:935-941.
- [33] 卢迎春,桑恩方.基于主动声纳的水下目标特征提取技术综述.哈尔滨工程大学学报.1997,18(6):43-54.
- [34] Castellano A.R.,Gray B.C.Autonomous interpretation of side scan sonar returns. Autonomous Underwater Vehicle Technology,1990.AUV'90,Proceedings of the(1990) Symposium,1990,5(6):248-253.
- [35] 刘维.基于边缘的水下图像处理算法研究.[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2003.
- [36] 胡辉.水下机器人视觉算法的研究.[硕士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工程大学.1997.
- [37] 朱炜等.水下目标的特征提取及识别.系统工程与电子技术.2008,30(1):171-175.
- [38] Tsai D M.Boundary-Based corner detection using neural networks.Pattern Recognition, 1997,30(1):85-97.
- [39] Illingworth J,Kitter J.A survey of the Hough Transform.Computer Vision,Graphics, and Image Process.1998,44(1):87-116.
- [40] Ho C, Chen L.A fast ellipse/circle detector using geometric symmetry.Pattern Recognition, 1995, 28(1):117—124P.
- [41] Kalviainen H, Hirvonen P.An extension to the randomized Hough transform exploiting connectivity.Pattern Recognition Letters, 1997, 18:77—85.
- [42] 陈焕, 闵华清, 罗荣华, 等. 基于遗传迭代最近点算法的激光数据配准[J]. 计算机测量与控制, 2010 (1): 168-171.
- [43] Paul C.Etter,(蔡志明等译)水声建模与仿真.北京: 电子工业出版社,2005
- [44] 申罗杰夫,(何柞铺, 赵晋英译).水声学波动问题.北京: 国防工业出版社, 1983.
- [45] 桑恩方,庞永杰,卞红雨.水下机器人技术.机器人技术与应用.2003, 3:8-13.
- [46] 高鹏,桑恩方.数字图像声纳的数据采集与处理系统.数据采集与处理.2003,18(4):470-474.
- [47] Illingworth J,Kitter J.A survey of the Hough Transform.Computer Vision,Graphics, and Image Process.1998,44(1):87-116.
- [48] Mallios A, Ridao P, Ribas D, et al. Scan matching SLAM in underwater environments[J]. Autonomous Robots, 2014, 36(3): 181-198.
- [49] 王一童. 前视扫描声纳的成像与目标特征提取 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [50] Mallios A, Ridao P, Hernández E, et al. Pose-based SLAM with probabilistic scan matching algorithm using a mechanical scanned imaging sonar[C]//OCEANS 2009-EUROPE. IEEE, 2009: 1-6.
- [51] Mallios A, Ridao P, Ribas D, et al. Probabilistic sonar scan matching SLAM for underwater environment[C]//Oceans 2010 IEEE-Sydney. IEEE, 2010: 1-8.
- [52] 温安邦, 吴怀宇, 赵季. 基于扫描匹配预处理的即时定位与地图创建[J]. 计算机工程与应用, 2009, 45(33): 245-248.

- [53] 郭禾, 李寒, 王宇新, 等. 机器人三维定位系统中关键技术的研究[J]. 系统仿真学报, 2008 (z1): 99-102.
- [54] Montesano L, Minguez J, Montano L. Probabilistic scan matching for motion estimation in unstructured environments[C]//Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2005: 3499-3504.

致谢

时光飞逝,转眼两年的研究生生活即将结束,此刻我的心中充满无尽的感激。

首先感谢我的导师魏志强教授,在就读期间,我得到了导师的悉心指导和深切关怀。魏志强教授严谨的治学态度、高深的学术造诣、敏锐的科学洞察力、一丝不苟的工作作风深刻影响了我,使我终身受益。

感谢殷波老师提供项目研究与开发的平台,殷波老师始终注重学生的发展,不断引进各种技术、项目,向我们传授理论知识并与实践深层结合,使我在计算机理论上获得了很大的提高,并且实践能力逐步加强。

感谢实验室的管锴、颜青、张晓双、迟浩坤,感谢他们对我在学习上、生活上、工作上的帮助和指导。还要感谢杨永全师兄、李臻师兄、洪博为师姐、宫飞翔师兄以及众多师兄师姐在我研究生阶段给我的指导与建议,感谢实验室的所有人对我的支持和帮助。在论文写作过程中,也得到了各位老师的悉心指导,深表谢意。

感谢我的几个好室友:吴纪安、史大龙、汤辰飞、郑巨议,他们在研究生期间与我同吃同住,在学习、生活各方面提供了莫大的关心与帮助,有了他们的陪伴让我的生活变得丰富多彩。

感谢这一领域的学者,文中借鉴了他们的研究成果,感谢论文评审的专家所给与的建议与指导。

最后,感谢我的父母和家人,感谢他们的辛苦养育和培养,是他们的支持与鼓励,让我专心学业,顺利完成论文。他们对我无私的付出与关爱是我学习工作的最大动力,我一定再接再厉,争取创造更加璀璨的人生!

祝愿我的朋友们个个前程似锦,愿我们的友谊地久天长。

个人简历

1988 年 6 月 17 日出生于河南省濮阳市。

2007 年 9 月考入北京理工大学珠海学院交通工程专业，2011 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

2012 年 9 月考入中国海洋大学信息科学与工程学院软件工程专业，攻读硕士学位至今。