

邹建文, 黄明泉, 李学成, 等. 增强现实技术在水下定位测量中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2023, 39(11): 86-93.

ZOU Jianwen, HUANG Mingquan, LI Xuecheng, et al. Application of AR technology for underwater positioning and survey[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(11): 86-93.

增强现实技术在水下定位测量中的应用

邹建文^{1,2}, 黄明泉^{1,2}, 李学成^{1,2}, 王尚^{1,2}

(1 中海辉固地质服务(深圳)有限公司, 深圳 518067; 2 广东省海上油气设施检测工程技术研究中心, 深圳 518067)

摘要:增强现实(AR)技术是应用领域非常广泛的新技术,涉及社会生活的多个领域,如医学、军事、交通、教育、娱乐、工业机械、景观规划、文物保护等,目前也已应用到水下工程中。本研究中AR技术首次成功应用到国内海洋工程水下定位测量作业中,以遥控水下机器人(ROV)为载体,搭载3D水下摄像机并配备相关水下传感器,通过专用AR软件将结构物三维模型、虚拟标识物、虚拟测量工具叠加到从水上传到水面的视频画面中,实现了水面操作人员与水下真实环境的实时交互,从而实时监测水下结构物的位置和姿态。将AR技术应用于水下定位测量,突破了传统的作业模式,具有高精度、高效率、低成本、无接触式和实时测量的优势特点,ROV不用紧贴结构物,软件操作便捷、测量数据精度可靠且实时显示,有效降低ROV的作业风险,提高作业时效。

关键词:增强现实;水下定位测量;3D水下摄像机;虚实融合;实时交互

中图分类号:P736;P756

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2022.330

0 引言

在海洋油气勘探、开发、生产、弃置的各个阶段,尤其在水下结构物安装、水下设施检测/维修/维护(Inspection, Repair & Maintenance, IRM)等复杂作业中,如何确保水下结构物精准安装到设计位置,遥控水下机器人(Remotely Operated Vehicle, ROV)如何快速准确找到水下结构目标,是亟需解决的关键问题。水下定位测量技术可以为水下目标提供位置、距离、姿态等即时多维度数据信息,在海洋工程领域发挥着十分重要的作用^[1]。

由于声信号在海水传播中的独特优势,目前水下定位测量主要采用的是声学定位技术,通过在水面支持母船布放声学定位设备或者在海底布放信标阵列,可以满足各类海洋工程项目对水下目标的定位需求。根据基线的长度,水下声学定位系统大致分为3类^[2]:长基线(Long Base Line, LBL)、短基

线(Short Base Line, SBL)和超短基线(Ultra Short Base Line, USBL)。其中,LBL精度最高,但其基线布设需花费大量的时间和成本;SBL和USBL相对简单,但其工作距离和精度都要比LBL小的多。目前,在海洋工程领域最为成熟和广泛应用的是USBL和LBL^[3-6]。

为获取水下结构物的位置和姿态,通常需要在结构物上安装USBL/LBL声学信标和姿态传感器来进行测量,但往往越是高精度的定位设备越是笨重、昂贵并依赖于电池供电。作业前一般需要设计专门的工装用于设备安装并进行严格的校准,作业结束后定位设备的回收,尤其是深水作业相当耗时,存在较大的风险。如何让水下定位测量既易于操作,风险性更低,同时经济性更佳,一直成为该技术发展的瓶颈。

随着新技术的快速发展,增强现实(Augmented Reality, AR)作为一项新颖前沿技术,在水下定位测量领域也得到了成功的应用^[7-8]。AR技术是以ROV为载体搭载水下摄像机并配备相关水下传感器,通过专门开发的AR软件将结构物三维模型、虚拟标识物、虚拟的辅助测量工具叠加到从水上传到水面的视频画面中进行现实增强,实现水面操作

收稿日期:2022-12-20

资助项目:深圳市科技计划(JSJG20211029095205007)

作者简介:邹建文(1988-),男,工程师,主要从事ROV水下工程技术和施工设计方面的研究工作。E-mail:zoujw@cosl-fugro.com

人员与水下真实环境的实时交互, 达到高精度、无接触式、实时测量的效果。

1 AR 技术概述

典型的 AR 系统主要由现实输出模块、跟踪注册模块、虚拟生成模块、虚实融合模块、人机交互模块组成, 系统结构及工作原理示意图见图 1。系统工作时, 首先, 由摄像机对真实场景进行识别, 同时捕捉视频画面, 通过搭载配备的传感器实现精确空间定位与三维交互跟踪; 然后, 虚拟场景生成单元利用传感器获取的相关数据结合三维定位对真实画面进行虚拟场景渲染, 从而实现虚拟融合、现实增强; 最后, 通过显示设备显示输出, 将经计算机处理过的数据投射到真实场景中, 使用户得到更多的信息。

本文针对辉固集团(Fugro)开发的 AR 水下定位测量系统 Quick Vision(QV), 结合实际工程案例, 介绍目前 AR 技术在水下定位测量中的应用情况,

并对测量结果进行对比和分析。结果表明, 这种方式突破了传统水下声学定位系统的作业模式, 提升了作业效率, 丰富了现有的水下定位测量手段。

2 QV 系统组成及原理

2.1 QV 系统组成

QV 系统主要包括水下摄像机、水下传感器、QR 码(Quick Response Code)以及 AR 软件。水下传感器包括高精度光纤罗经、多普勒计程仪(Doppler Velocity Log, DVL)、深度计、高度计、信标等。水下摄像机为 Fugro 公司专利 3D 机器视觉摄像机(图 2), 具有精确的触发和时间同步功能, 内置惯性测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)可实现一体化校准, 采用广角球形镜面, 材质为钛和蓝宝石玻璃外壳, 作业水深可达 6 000 m, 其指标参数见表 1。

3D 摄像机必须牢固安装在 ROV 主框架结构

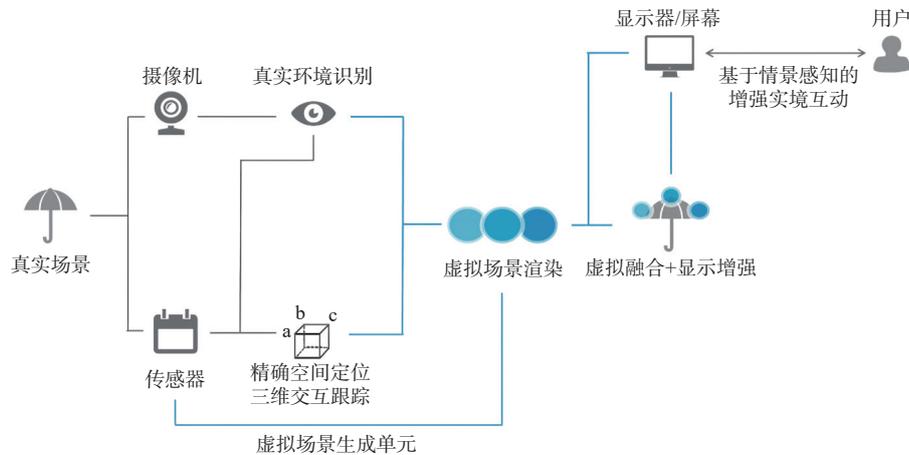


图 1 AR 系统结构及工作原理

Fig.1 Schematic of AR system structure and working principle

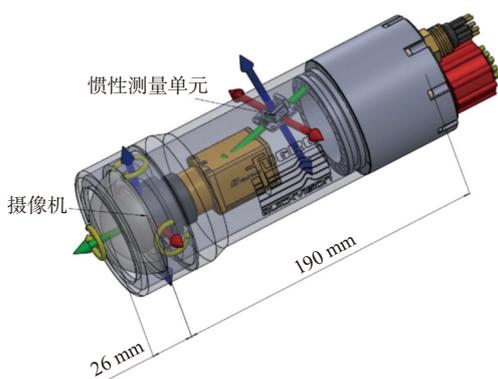


图 2 Fugro 机器视觉 3D 摄像机

Fig.2 The 3D camera of the Fugro machine vision

表 1 3D 摄像机指标参数
Table 1 Specification of the 3D camera

性能参数		机械/电子参数	
色彩	彩色显示	重量	4.1 kg(空气中), 2.1 kg(水中)
焦距	6 mm或8 mm	功率(3D摄像机)	8-30V DC @ <5 W
传感器尺寸	8.45 mm × 7.05 mm (2/3")	功率(IMU)	8-30V DC @ <2 W
分辨率	2 464 × 2 056 像素	数据传输(3D摄像机)	以太网1 000BaseT全双工自动MDIX
帧率	23 Hz(最大)	数据传输(IMU)	RS422全双工9 600 bps
视角	71°× 61°或56°× 47°(水平×垂直)	工作深度	最深6 000 m

上, 确保其安装姿态(包括横摇、纵摇以及艏向方位)在 ROV 水下运动过程中不发生变化, 初次安装或者安装位置发生变化时, 需对其进行安装位置偏离测量及姿态校准, 以保证水下定位精度。

QV 采用基于标识的跟踪注册技术^[9-12], 选取的标识图像需形状规则、图形简单, 能够被摄像机清晰准确地采集到, 并且易于识别和辨认。在实施准备阶段需预先在水下结构物上牢固贴附独特的 QR 码(图 3), 可以是 A2/A3/A4 纸大小, 取决于结构物的大小和水下应用类型。QR 码类似于生活中常见的二维码, 但它是浅色背景上的一些圆点, 在正常观察模式下呈黑色(图 4a), 搜索模式下 3D 摄像机对 QR 码进行捕捉辨认呈亮橙色(图 4b), 以便于 ROV 寻找目标, 每个圆点之间的距离经过精确地设计测量形成独特的图案文件。

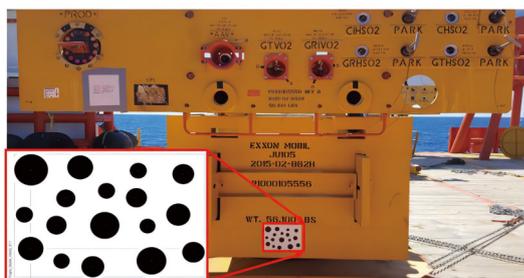


图 3 水下结构物上贴附 QR 码
Fig.3 The QR code stuck onto the underwater structure



图 4 QR 码工作模式
Fig.4 The working pattern of the QR code

QR 码贴附在结构物上之后, 需对其相对于结构物的贴附位置进行精确地偏离测量, 得到贴附中心点相对于结构物参考中心的相对位置, 然后将

QR 码参考系的每个坐标轴按照实际的贴附姿态在结构物参考系中做相应的修正并录入到 AR 软件中(图 5)。

2.2 QV 系统工作原理

AR 水下定位测量基于机器视觉建立水下视频与水上屏幕之间的映射关系^[13]。通过确定现实场景中的一个依附平面将 3D 场景映射到 2D 屏幕上, 然后在 2D 屏幕上绘制用于辅助测量的图形和 3D 模型, 叠加传感器数据等使其如同依附在水下结构物上一般展现在屏幕上, 从而实现与水下视频的实时交互。

QR 码相当于海底场景中在结构物上确定的一个平面, 水下作业时 ROV 自身的位置、姿态数据由携带的定位信标、姿态传感器实时获取, 搭载的 3D 水下摄像机对结构物上贴附的 QR 码进行识别解码和姿态评估, 通过 QR 码独特的图案文件计算 QR 码与 ROV 之间的相对位置关系, 从而得到 QR 码的位置和姿态信息, 再由 QR 码相对结构物参考中心的偏离量反推得到结构物的位置、姿态。

在整个三维注册的过程中, 需要实现标识坐标系到摄像机坐标系以及摄像机坐标系到实际屏幕坐标系的转换, 坐标系之间的转换关系见图 6, 标识坐标系通过旋转平移转换为摄像机坐标系, 称之为外部参数矩阵, 记为 M ; 摄像机坐标系变换到实际屏幕坐标系主要涉及摄像机的中心投影和摄像机内部成像原件的物理畸变问题(摄像机坐标系采用 3D 映射转换为理想屏幕坐标系, 然后消除硬件误差、进行图像畸变修正处理, 将理想屏幕坐标系转换到实际屏幕坐标系), 称之为内部参数矩阵, 记为 K 。

3 AR 技术在 QV 水下定位测量中的应用

QV 是一种基于视觉的遥测技术, 当 ROV 作为载体在水下移动时可对结构物实现多样化的定位

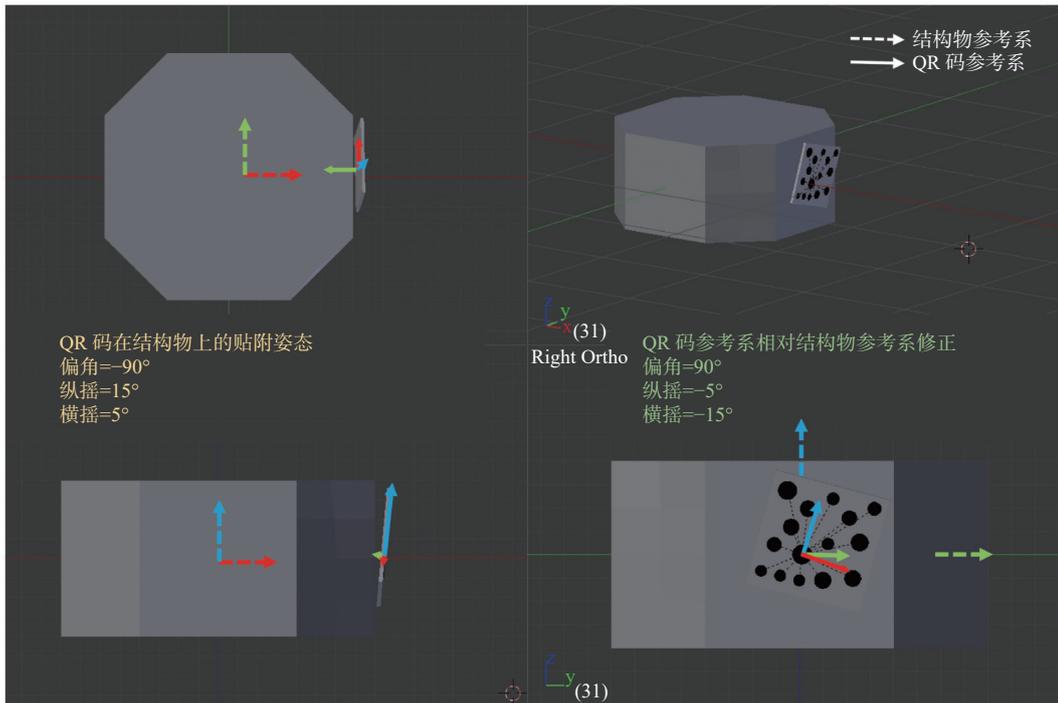


图 5 QR 码参考系相对结构物参考系修正示例

Fig.5 Example of axis correction from QR pattern to structure reference frame

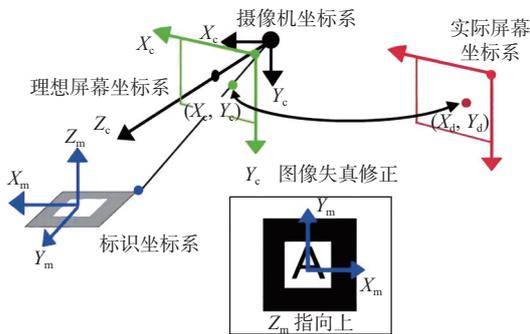


图 6 坐标系转换示意图^[14]

Fig.6 Schematic of coordinate system transformation^[14]

测量目的, 应用场景较为广泛。

3.1 水下辅助定位

传统水下结构物安装作业通常需要在结构物上固定较笨重、电池依赖型的水下定位和姿态测量设备, 这种方式较耗时, 且高精度的定位设备价值昂贵存在一定的风险性。AR 水下辅助定位可以在实时的视频画面中叠加结构物 3D 模型或结构边框(图 7), 使之与实物对齐, QV 软件则可实

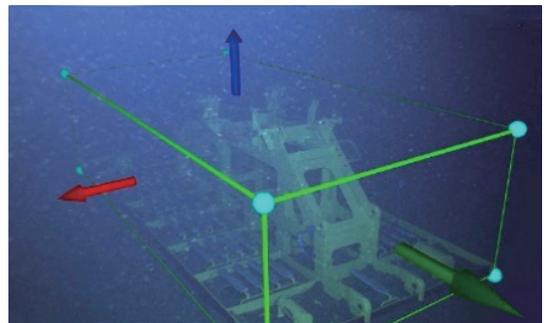


图 7 虚拟结构模型用于水下辅助定位

Fig.7 Virtual structure model used for underwater positioning

时输出显示结构物的位置、水深、方位、横摇、纵摇等信息。

3.2 水下虚拟标识

QV 增强现实技术(AR)的功能可以在水下视频画面中嵌入虚拟的标识物, 使其如同真实依附于海底场景中一般, 可为水下作业提供位置标识及方位参考。比如半潜式钻井平台钻井作业, 通常需要在井场海底预调查期间由 ROV 呈对角布放 3~4 个标识浮球, 用于引导钻头准确触底井口的设计位置开钻, 在 QV 软件中可以通过输入坐标位置、距离海床高度快速设定虚拟浮球(图 8a)来代替传统的物理浮球用于标识井口位。对于结构物安装作业, 当结构物下放至近海底时, 也可以设置虚拟标

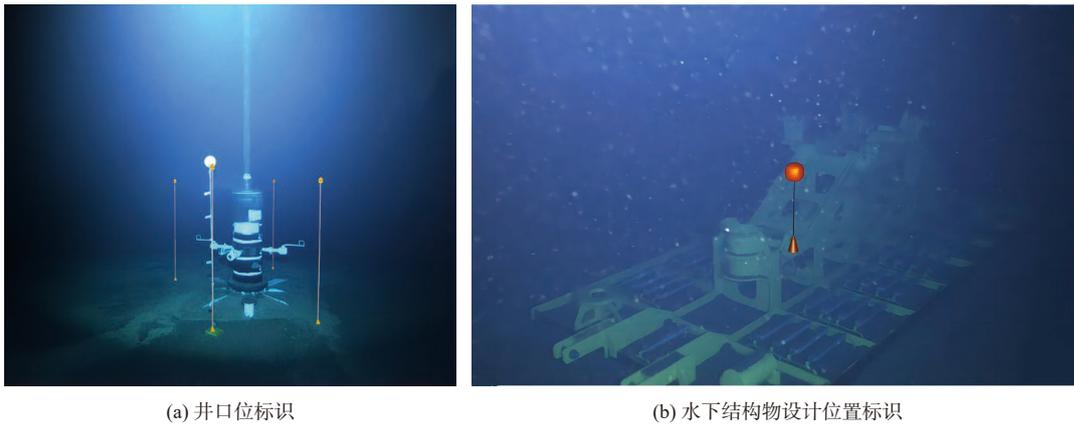


图 8 虚拟浮球用于水下标识

Fig.8 Virtual buoys used for underwater marking

识浮球(图 8b)引导施工船舶调整将结构物精准下放至设计位置。

相比于传统作业方式,采用 QV 技术无需由 ROV 专门携带物理浮球至海底布放,同时虚拟浮球通过坐标设定,当 ROV 在目标位置附近移动时,虚拟浮球就如同实际存在的物体始终保持在设定的位置,在海底能见度较差时依然可以提供明显的定位引导和位置参考。

此外,针对特殊的作业类型还可以制定一些专门的应用方案,比如在导管架平台倾斜导管安装过程中,嵌入叠加虚拟的圆柱体导管模型用于提供实时方位引导,ROV 保持相对静止调整圆柱体模型与导管白色标识线对齐(图 9),可监控锤击过程中导管是否出现偏离,以及对导管最终安装方位进行测量。

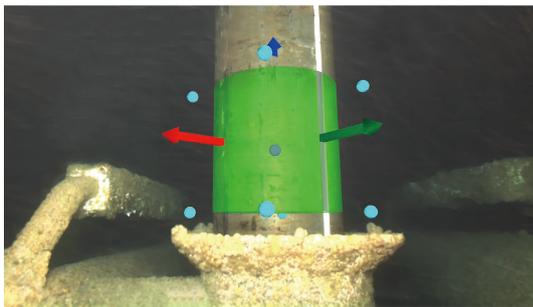


图 9 虚拟圆柱体引导导管下放

Fig.9 Virtual cylinder used for guiding conductor installation

3.3 水下定位测量

在水下工程中 QV 的另一突出应用是进行无接触式测量。ROV 飞行到结构物前方将水下目标稳定在视频画面中,通过 QV 软件在视频画面中叠加虚拟测量工具即可对水下结构物姿态进行实时测量,比如使用虚拟罗盘工具、量角器、高度计测量

结构的方位、局部横摇/纵摇、倾斜角、相对高度等(图 10)。

3.4 水下相对监控

QV 还具有跟踪监控模式,使结构之间的相对定位更容易实现,在静态结构和动态结构上各贴附一个 QR 码,可对结构物的对接过程进行实时的跟踪监控。比如监控钻井防喷器(Blow-out Preventer, BOP)与井口对接,在 BOP 喇叭口和井口头上各贴附一个 QR 码,BOP 下放至目标深度准备与井口对接时,ROV 搭载 3D 摄像机保持 2 个 QR 码同时位于摄像机视野范围内,QV 软件 2D 和 3D 视图功能可将对接目标之间的相对方位、相对位置偏差精确地可视化(图 11),直观的指导钻井平台移船以及钻井司钻精准控制 BOP 的起落距离,避免人为肉眼判断失误造成对接过程中的意外碰撞,从而更为安全高效地完成 BOP 与井口对接。

4 QV 定位测量精度验证

为验证 QV 定位测量的精度及可靠性,某水下结构物安装项目中,分别采用 USBL、LBL(所采用的 2 种定位系统对比见表 2)将定位系统获取的坐标、艏向方位数据与 QV 定位测量值进行了对比,详见表 3、4。

通过数据比对可以发现,QV 测量值与 USBL、LBL 定位的相对差值分别达到米级和厘米级,其定位测量精度可等同于相应采用的水下定位系统精度,从而验证了 QV 定位测量的准确性。但是对于结构物艏向数据,QV 测量结果与 LBL 测量结果的相对差值大于 USBL 测量结果,初步分析可能与结

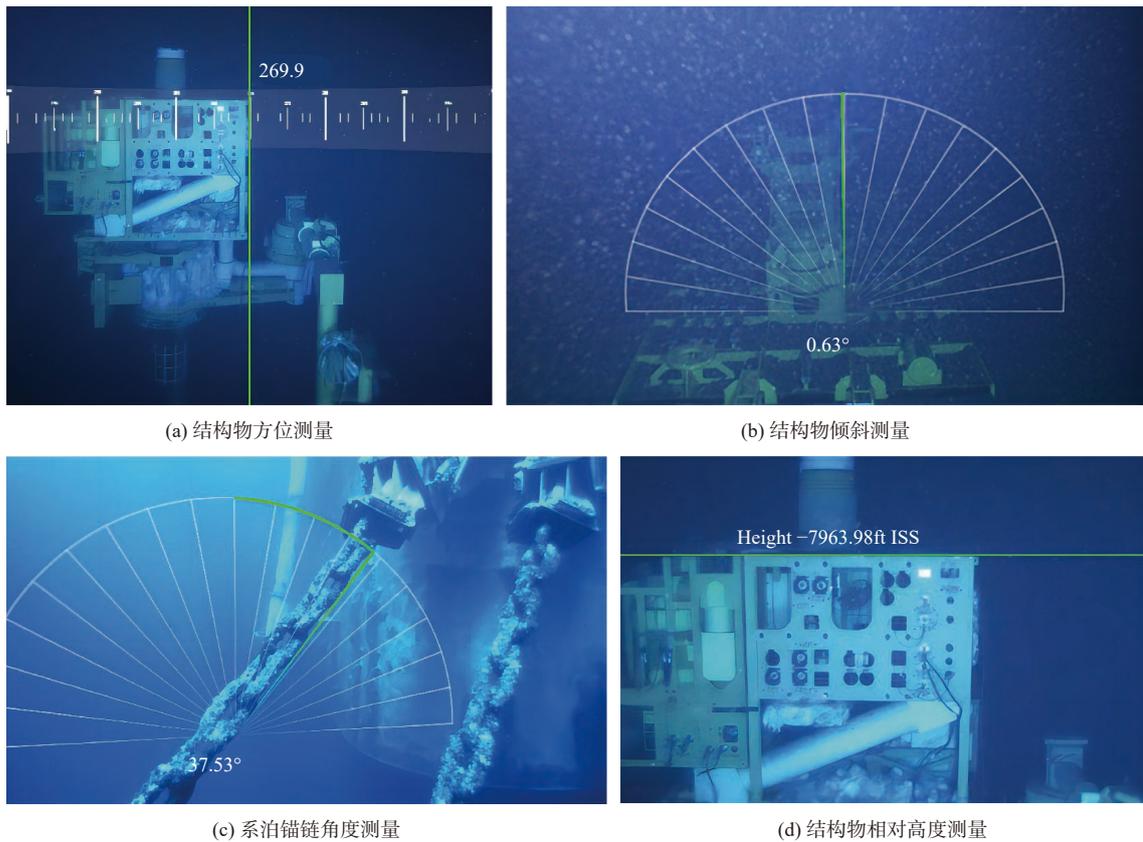


图 10 虚拟测量工具用于水下结构姿态测量

Fig.10 Virtual tool used for measuring underwater structure attitude

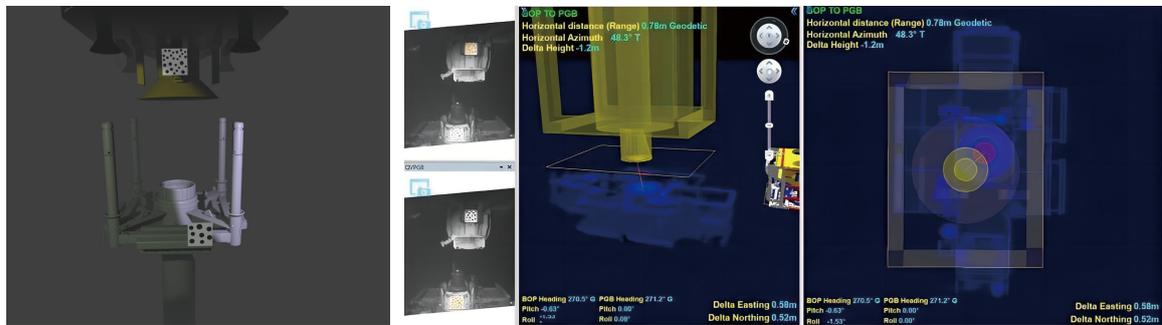


图 11 实时监控 BOP 与井口对接

Fig.11 Real-time monitoring of BOP landing on wellhead

表 2 采用的 USBL 与 LBL 定位系统对比

Table 2 Comparison between USBL and LBL positioning systems that used

系统型号	基线长度/m	设备构成	定位方式	定位精度	精度特点	校准方式
Sonardyne Ranger2USBL	<1	换能器、信标、姿态传感器、声速剖面仪、水面控制单元	采用测量水下目标与测量船之间的相对距离与方位的模式进行定位	斜距 $\times 0.27\%$ + 水面定位精度 (1 000 m 水深内 < 2.7 m)	定位精度随着水深增加而降低	静态校准和动态校准
Sonardyne Fusion 6GLBL	100~6 000	换能器、智能信标、信标浮体及支架、水面控制单元	通过布设在海底的基阵进行精确定位	<0.5 m + 水面定位精度	定位精度与水深无关	基阵校准

构物校准误差、ROV 飞行姿态偏差等因素有关。

5 结论

(1)AR 水下定位测量技术基于机器海底视觉,

突破了传统水下声学定位系统的作业模式,其定位测量精度等同于实际采用的水下定位系统精度,丰富了现有的水下定位测量手段,具有高精度、高效率、低成本、无接触式、实时测量的特点,还可将虚拟物体、信息叠加到实时的水下视频画面中用于辅

表3 采用 USBL 与 QV 定位测量比对

Table 3 Comparison of positioning data obtained by QV when using USBL

	水下结构物1			水下结构物2		
	东向/m	北向/m	艏向/(°)	东向/m	北向/m	艏向/(°)
设计位置	XXX X83.41	X XXX 551.88	156.5	XXX X57.56	X XXX 276.51	231.1
USBL定位	XXX X83.82	X XXX 551.54	157.6	XXX X57.33	X XXX 276.79	234.4
QV定位	XXX X82.35	X XXX 553.07	157.2	XXX X55.19	X XXX 278.70	233.7
QV与USBL测量差值	1.47	1.53	0.4	2.14	1.91	0.7

注: XXX X代表东向坐标前4位数字, X XXX代表北向坐标前4位数字。

表4 采用 LBL 与 QV 定位测量比对

Table 4 Comparison of positioning data obtained by QV when using LBL

	水下结构物3			水下结构物4		
	东向/m	北向/m	艏向/(°)	东向/m	北向/m	艏向/(°)
设计位置	XXX X26.29	X XXX 043.35	291.1	XXX X17.21	X XXX 023.00	293.9
LBL定位	XXX X25.94	X XXX 043.61	289.5	XXX X17.39	X XXX 023.26	299.4
QV定位	XXX X25.76	X XXX 043.69	288.3	XXX X17.56	X XXX 022.95	298.0
QV与LBL测量差值	0.18	0.08	1.2	0.17	0.31	1.4

注: XXX X代表东向坐标前4位数字, X XXX代表北向坐标前4位数字。

助标识和相对位置监控,增强了 ROV 的操作性。但该技术也存在一定的局限性,一方面快速准确识别 QR 码需要良好的能见度和光照度;另一方面,受水下摄像机视角的限制只能对当前一个固定的画面进行视图增强,无法“俯瞰”整个水下设施环境形成直观的三维感知。

(2)未来 AR 技术应用于海洋工程水下作业应该是向多技术融合发展,以克服目前这些局限,发挥更为全面强大的应用效果。设想利用先进的 3D 引擎对海底设施进行精确建模,然后将模型导入地理信息系统(GIS)并使其与各海底设施实际坐标位置维持对准,从而构建整个油田设施的 3D 虚拟环境即虚拟现实(VR)。将 VR 与 AR 技术融合应用于水下作业,在能见度较低或者 ROV 视野受限的情况下,透过 VR 的 3D 虚拟视图依然可以对 ROV 的位置了如指掌,同时结合 AR 进行现实增强可为 ROV 操作员呈现直观形象的三维空间指引,比如通过叠加虚拟标识设定飞行禁区或高风险区,规划 ROV 飞行路径等。

(3)随着 ROV 技术逐步向远程化、自主化、智能化、协同化发展^[15],以及水下常驻型 ROV 的诞生,由 AR 水下定位测量融合油田 3D 数字建模、GIS、VR、图像识别、大数据云端传输等技术,研发水下人工智能(AI)实现远程智能化水下作业、多系统协同作业将会是未来水下工程发展的一大趋势。尤其是针对水下设施巡检、水下生产系统轻型干预、

水下故障应急排查检修等,采用无人船或者水下常驻型 ROV 系统,无需动用工程船和海上作业人员就可以在陆地制定 AI 任务规划,实时获取水下视频数据进行远程自主智能化操控,从而大大节省设备、人员成本,提高响应时效以及降低作业风险。

参考文献:

- [1] 范刚,张亚,赵河明,等.水下机器人定位导航技术发展现状与分析[J].兵器装备工程学报,2022,43(3):22-29.
- [2] 石腾.水下机器人短基线定位系统设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2018.
- [3] 金博楠,徐晓苏,张涛,等.超短基线定位技术及在海洋工程中的应用[J].导航定位与授时,2018,5(4):8-20.
- [4] 狄冰,高辉,徐亚国.长基线定位系统在海洋油气开发中的应用[J].北京石油化学工业学报,2015,23(4):35-39.
- [5] 张同伟,秦升杰,唐嘉陵,等.深海长基线定位系统现状及展望[J].测绘通报,2018,10:75-78,106.
- [6] 李璇,解禹.水下定位导航系统展望[J].无人系统技术,2022,5(3):79-86.
- [7] PARENTE M, STEVENS M, FERREIRA J, et al. Subsea digitalization: from the virtual world into the real world—using Augmented Reality in offshore operations[C]//Houston:Offshore Technology Conference, 2019.
- [8] CHOI S, PARK J S. Development of Augmented Reality system for productivity enhancement in offshore plant construction[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(2): 209.
- [9] 邱博文.基于二维码标识的增强现实系统的设计与实现[D].西安:西安电子科技大学,2014.
- [10] BOONBRAHM S, BOONBRAHM P, KAEWRAT C. The use of marker-based Augmented Reality in space measurement[J].

- Procedia Manufacturing, 2020, 42: 337-343.
- [11] BRUNO F, BARBIERI L, MANGERUGA M, et al. Underwater Augmented Reality for improving the diving experience in submerged archaeological sites[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 190: 106487.
- [12] ISHIDA M, SHIMONOMURA K. Marker based camera pose estimation for underwater robots[C]//2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII). IEEE, 2012: 629-634.
- [13] HENRIKSEN E H, SCHJØLBERG I, GJERSVIK T B. Vision based localization for subsea intervention[C]//International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Trondheim: American Society of Mechanical Engineers, 2017, 7: V07AT06A023.
- [14] 刘佳, 郭斌, 张晶晶, 等. 视触觉融合的增强现实三维注册方法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(11): 70-76.
- [15] 黄明泉, 徐景平, 施林炜. ROV在海洋油气田开发中的应用及展望[J]. *海洋地质前沿*, 2021, 37(2): 77-84.

Application of AR technology for underwater positioning and survey

ZOU Jianwen^{1,2}, HUANG Mingquan^{1,2}, LI Xuecheng^{1,2}, WANG Shang^{1,2}

(1 China Offshore Fugro Geosolutions (Shenzhen) Co., Ltd., Shenzhen 518067, China;

2 Guangdong Offshore Oil and Gas Facility Inspection Engineering Technology Research Center, Shenzhen 518067, China)

Abstract: Augmented Reality (AR) is a new technology for a wide range of applications, which involves many areas of social life, such as medicine, military, transportation, education, entertainment, industrial machinery, landscape planning, cultural relic protection, etc., and has also been applied for underwater engineering at present. AR has been successfully applied for underwater positioning and survey in ocean engineering for the first time in China. An ROV (remotely operated vehicle) is equipped as a carrier with a 3D camera and relevant underwater sensors. Through the unique AR software, the structural 3D model, virtual markers, and virtual measurement tools could be superimposed onto the video images transmitted from underwater to the ground surface, with which the real-time communication between the operators on the ground and the real underwater environment and real-time monitoring on position and attitude of underwater structures could be realized. The application of AR in underwater positioning and survey breaks by traditional operation method showed high precision, high efficiency, low cost, non-contact, and real-time measurement. In addition, the ROV does not need to cling to the structure, the software is easy to operate, the measurement data are reliable and real-time display, which could effectively reduce the operation risk of ROV and improve the working efficiency.

Key words: Augmented Reality (AR); underwater positioning and survey; 3D camera; virtual-real fusion; real-time communication