

# 智能化水下机械手的研究

张广斌<sup>1,2,3</sup>, 沈庆伟<sup>1</sup>

(1.安徽建筑工业学院 计算机工程系,合肥 230601;2.中国科学技术大学 自动化系,合肥 230026;3.中国科学院 合肥智能机械研究所,合肥 230031)

**摘要:**水下机械手的研究和设计对水下机器人的应用和发展具有重要的影响,而智能化水下机械手要具有自主路径规划和目标类型判断的功能。文中首先简要叙述了水下机械手的发展现状和存在问题,然后通过分析抓取任务及环境信息的获取,设计了系统的硬件结构和软件组成。接着通过对水下机械手进行数学建模,阐述了抓取操作的工作原理,并给出了一个抓取过程的实例曲线。

**关键词:**水下机械手;力信息;抓取

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A

## Research for an Intelligent Underwater Manipulator

ZHANG Guang-bin<sup>1,2,3</sup>, SHEN Qing-wei<sup>1</sup>

(1.Department of Computer Engineering, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China; 2.Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China; 3.Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The study of underwater manipulators research and design was very important for the application and development of underwater robot. Moreover, an intelligent underwater manipulator has the functions of autonomous motion planning and objects types judging. Firstly, the development status and existing problems of underwater manipulator was describes simply, and architecture of hardware and structure of software were designed through analyzing grasp task and acquisition of environment information. Then the working principles of grasping operation were elaborated based on establishment of mathematical model for underwater manipulator. At last, a curve instance of grasping operation was presented.

**Key words:** underwater manipulator; information of force; grasp

目前的水下技术装备的发展趋势是研制适合多种水下作业的自治型水下机器人 AUV (autonomous marine vehicle), 而末端执行器或手爪是 AUV 多项关键技术的核心。国内外对水下机械手的研究普遍采用液压驱动的夹持器, 感知环境的能力与智能化水平比较低, 无法满足水下复杂环境的作业要求<sup>[1]</sup>。项目研究的智能化水下机械手, 是在目标任务给定的前提下, 考虑水下的复杂环境, 同时在执行抓取物体时, 能够对物体的大小、类别做出

定的判断, 采取对应的抓取方式, 并实时改变抓取力的大小。该机械手系统目前完成了 863 项目的计划要求, 可独立执行任务, 或装备到水下机器人上作为末端执行器, 具有广泛的应用前景<sup>[1]</sup>。

## 1 系统分析

### 1.1 任务分析

鉴于机械手水下操作的多样性和复杂性, 在此仅对要研制的水下机械手的抓取任务进行分析规

收稿日期:2011-05-12; 修订日期:2011-06-01

基金项目:国家高技术研究发展计划 863 资助项目(2006AA04Z244);安徽省教育厅自然科学基金项目(KJ2011z054)。

作者简介:张广斌(1977-),男,博士生,讲师,研究方向为智能系统、计算机网络应用;沈庆伟(1967-),女,硕士,教授,研究方向为智能控制、云计算。

划。抓取操作主要是完成机械手载体或者水下自主机器人发出的抓取目标的任务，目标多为 10 公斤以下的形状规则或不规则的中小物体。抓取操作前要对目标进行自主判断，抓取过程中要对力进行实时分析，整个操作过程中要考虑海底洋流对机械手到达预定位置的影响，同时还要考虑避开海底动物的移动以及水草等的摇摆，海底固定物体如岩石等则在机械手移动之前的静态路径规划中进行考虑。水下机械手的运动主要是机械手在海底的三维运动，但是运动范围限于机械臂的操作半径，因此运动的行程是有限的。

### 1.2 环境信息的获取

水下作业环境信息感知比较复杂，需要配置的传感器种类、数量比较多。根据环境信息的获取要求，在机械手的前端配置三个测距超声传感器和一个视觉传感器，在机械手的腕部配置一个测距超声传感器。前端超声传感器用来探测机械手到目标点之间的距离，同时前端超声传感器还可以和腕部的配合用来探测不同范围内障碍物和机械手的距离。视觉传感器则用来获取待识别和抓取物体的二维图像，获取的物体图像经处理后，可提取对象的某些特征，如物体的形心坐标、面积、曲率、边缘及短轴方向等。但因为只有二维图像还不能判定物体的深度信息，同时水下物体成像还要考虑折射等造成的误差，所以需要视觉传感器引导前端超声波传感器获取深度信息，进而确认目标和引导规划<sup>[2-3]</sup>。

## 2 系统设计

### 2.1 硬件结构

整个机械手系统分为手爪驱动液压部分和控制系统两部分。如果机械手配合自主机器人使用时，控制系统可以整合到自主机器人的控制系统中。机械手单独使用时，控制系统的结构如图 1 所示。根据硬件连接和功能可以分为 5 个模块。

**主控模块** 手爪控制系统的核心部分，主要功能：

- (1) 采集、处理和融合多种传感器数据；
- (2) 根据多种传感器信息和控制算法，规划手爪运动路径；
- (3) 发出控制指令，通过驱动卡控制伺服阀和开关阀运动，实现手爪的抓取、移动和释放等系列动作。

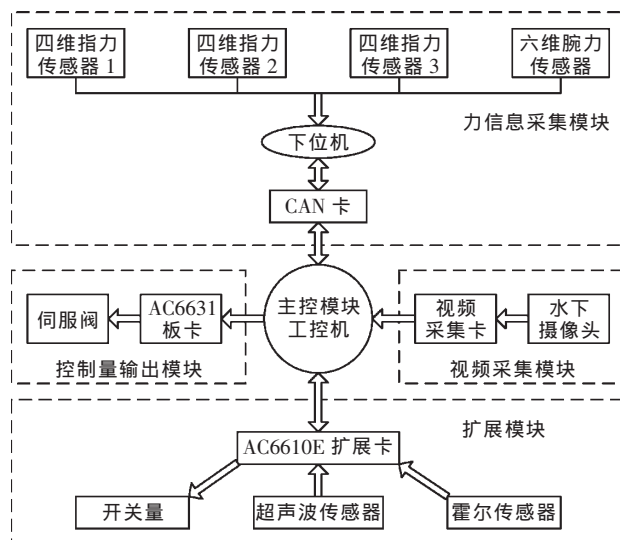


图 1 系统结构

Fig.1 System structure

**力信息采集模块** 由下位机、三个四维指力传感器和一个六维腕力传感器组成，其中下位机采集传感器力信息，通过 CAN 总线传送给主控机，它是选择抓取策略最重要的要素。

**控制量输出模块** 手指与目标间接触力控制是指关节控制的核心问题，其原理是通过电磁比例阀调节指关节液压缸的压力实现接触力控制。控制电路一方面接收来自计算机的指令信号（压力设定）；一方面接收伺服阀芯位置信号。两信号相比较后送入控制器，控制器输出信号经功率放大后，驱动电磁比例伺服阀线圈。伺服放大器借助 AC6631 型 D/A 卡提供的外设端口，实现与工业控制计算机的硬件连接<sup>[4]</sup>。

**视频采集模块** 由通过视频采集卡将摄像头拍摄到的视频信号实时传送到工控机上，根据需要进行图像显示和目标特征提取，以此来帮助操作人员或者控制器选择抓取策略。

**扩展模块** 其他一些输入输出信号，如换向电磁阀，霍尔行程开关，超声波测距传感器等，控制系统配置了一块 AC6610E 多功能通用扩展卡，为扩展设备提供端口。

### 2.2 软件组成

软件系统的功能包括“控制模块”和“监测模块”两部分，其组成如图 2 所示。

#### 2.2.1 控制模块

控制模块的工作方式包括自主模式、遥控模式以及启动停止三部分，是控制系统软件的核心。主

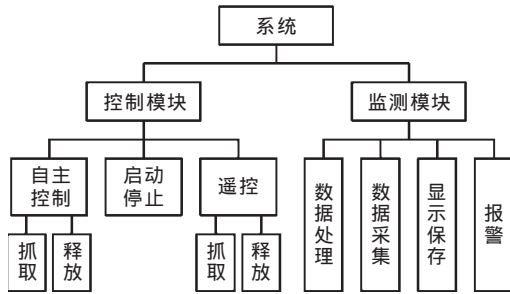


图2 系统软件组成

Fig.2 Constitution of system software

主要功能是结合多传感器信息,实现机械手爪对目标物体的抓取和移动操作,包括作业任务分解、动作过程规划、多传感器信息融合等具体任务,而且自主控制和遥控可以相互结合操作。

### 2.2.2 监测模块

监测模块的主要功能是向操作人员提供控制系统和手爪作业环境的实时信息,帮助操作人员及时了解系统的工作状态,正确评估系统的工作性能。按功能划分为数据采集、数据处理、数据显示和保存。操作的数据为:三个四维指力传感器各分力数据;六维腕力传感器各分力数据;超声波传感器提供的目标距离数据;视觉传感器提供作业现场的图像。此外监测模块可以实现异常状态下的报警并结合控制部分采取对应的应急措施。

## 3 手爪操作分析

### 3.1 水下机械手爪建模

水下机器人手爪在载体坐标系下的6自由度动力学方程可表示为

$$M\dot{v} + C(v)v + D(v)v + G(\eta) + F = u \quad (1)$$

$$\dot{\eta} = J(\eta)v \quad (2)$$

其中: $\eta \in R^n$  是广义关节位置及姿态向量; $v \in R^n$  是线速度和角速度向量; $M \in R^{n \times n}$  是对称、有界正定惯性矩阵,包括附加质量; $C(v) \in R^n$  表示向心力矩和哥氏力矩向量,包括附加质量产生的向心力和科氏力; $D(v) \in R^n$  是水动力阻力和升力矩阵; $G(q) \in R^n$  是重力和力矩向量,为一阶可微有界函数; $F$  是非结构化的动力学不确定性,包括摩擦和其他扰动; $u \in R^n$  是施加的关节矩向量; $J(\eta)$  为转换矩阵。载体坐标系下,水下机械手爪动力学模型具有如下特性: $M = M^T > 0, \dot{M} = 0; C(v) = -C^T(v); D(v) > 0$ 。

### 3.2 抓取操作

手爪的主要功能是抓取和操作目标。抓取是指

手指与目标接触,施加作用力,使目标受到约束,保持固定位置和姿态。操作是指目标在手指接触力的作用下,产生期望运动。项目研制的水下手爪可以提供“力度抓取”、“夹握”、“跨握”、“侧捏”四种基本形式。手爪抓取物体时,首先确定抓取形式,优化出物体上的手物接触点,确定各手指与物体的接触形式和接触点各手指力的分配,然后由手指的逆运动学计算出各手指关节的运动参数,通过优化参数矩阵,从而获得手爪对物体的最优抓取。图3是手爪抓取操作的流程图。

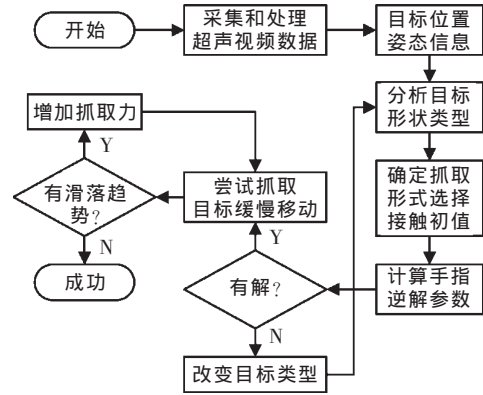


图3 抓取操作流程

Fig.3 Process of crawling operation

### 3.3 抓取力曲线

为了更好地获取最优抓取,抓取过程中可能会改变抓取形式,不同的抓取形式输出的抓取力的大小是不同的。图4为合抓取力曲线,前30s左右时间的曲线是对一目标物体先采用侧捏方式求解逆运动学方程,获得的抓取力曲线;后20s时间曲线是抓取失败后,采用夹握方式求解,并逐步尝试抓取目标直至成功,获得的合抓取力曲线。

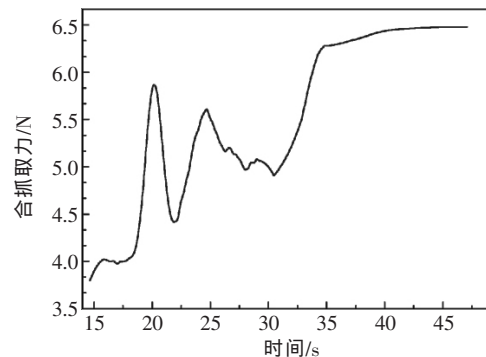


图4 抓取力曲线

Fig.4 Curve of grasping force

#### 4 结语

自主式水下机械手由于其系统构成的复杂性,目前尚处于实验室研制成功阶段,距离实际深水使用还有一些问题需要解决,如6km深水中设备的密封性问题。项目就智能化水下机械手的设计和开发进行了研究,通过任务和环境分析来设计机械手的硬件结构,根据系统的硬件和需要的操作设计了系统的软件组成。系统目前良好的运行状态说明设计是成功有效的,这对我国水下机器人的研究将会起

(上接第3页)

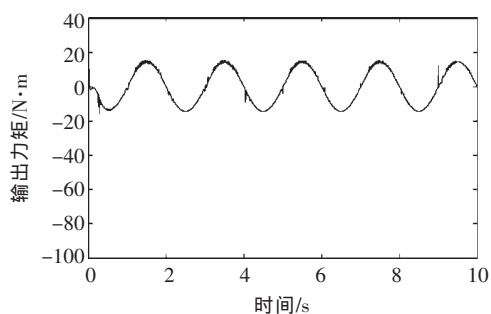


图5 滑模变结构控制器输出

Fig.5 output of sliding model variable structure controller

由图4中可以看出在大约1s内就能达到精确的张力跟踪,且初始误差不大,约为5N,占总重力的5%,其微重力模拟精度是较高的。在抓取50N物体后,其误差最大值约为50N,约占总重力的5%,支撑张力能够在极短时间内达到很好的重力抵消,并达到了理想的零重力控制效果。整个过程控制力矩并不大,仿真结果表明采用具有快速响应能力的滑模控制器,能够很好控制所设计的空间微重力模拟装置,滑模面采用积分型切换函数,降低了抖振,并达到了很好的零重力环境模拟效果。

#### 4 结语

本文针对三维微重力模拟的难点问题,提出了一种新型的模拟装置,该系统采用丝杆传动、轴承导向、电机驱动和气息浮的组合方式来实现复杂运动微重力环境的模拟,通过力反馈控制方式来实时抵消目标的重力。首先建立系统动力学模型,考虑到试验目标本体等非线性驱动及模型本身的不确定及摩擦干扰,该控制策略采用滑模变结构控制来补偿非线性因素的影响,滑模面采用积分型切换函

到很好的促进作用。

参考文献:

- [1] Lin J, Huang Z-Z. A novel PID control parameters tuning approach for robot manipulators mounted on oscillatory bases [J]. *Robotica*, 2007, 25(4): 467-477.
- [2] 安江波,张铭钧,孙昌将.水下机械手控制系统研究[J].*机械设计与制造*, 2009(5): 185-187.
- [3] 林江.水下电动机械手动力学分析及仿真[J].*四川兵工学报*, 2010, 31(6): 52-55.
- [4] 谭定忠,王启明.水下作业机械手运动学分析与仿真[J].*中国造船*, 2009, 50(1): 122-127.

数从而降低了抖振,且保证了系统的鲁棒性。实验结果表明了该地面试验装置对于三维空间微重力模拟能达到较高精度,且控制方法简单,易于实现,具有很高的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 徐文福,梁斌,李成,等.空间机器人微重力模拟实验系统研究综述[J].*机器人*, 2009, 31(1): 88-96.
- [2] 史士财,吴剑威,崔平远,等.空间机械臂全局反作用优化及地面试验研究[J].*机器人*, 2009, 31(3): 242-248.
- [3] 姚燕生.三维重力补偿方法与空间浮游目标模拟实验装置研究[D].合肥:中国科学技术大学, 2006.
- [4] Sawada H, Ui K, Mori M, et al. Micro-gravity experiment of a space robotic arm using parabolic flight[J]. *Advanced Robotics*, 2004, 18(3): 247-267.
- [5] White G C, Xu Y S. Active vertical-direction gravity compensation system[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1994, 43(6): 786-792.
- [6] Xu Y S, Brown H B, Friedman M J. Control system of the self-mobile space manipulator[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 1994, 2(3): 207-219.
- [7] Carignan C R, Akin D L. The reaction stabilization of on-orbit robots[J]. *IEEE Control Systems Magazine*, 2000, 20(6): 19-33.
- [8] Koningstein R, Cannon R H J. Experiments with model-simplified computed-torque manipulator controllers for free-flying robots[J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 1995, 18(6): 1387-1391.
- [9] Robertson A, Inalhan G, How J P. Space craft formation flying control design for the orion mission[C].//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 1999: 1562-1575.
- [10] 陈三风,梅涛,张涛,等.微重力环境地面模拟系统的控制器设计[J].*机器人*, 2008, 30(3): 201-204.
- [11] 邱志成,谈大龙.基于加速度反馈的柔性关节机械臂接触力控制[J].*机械工程学报*, 2002, 38(10): 37-41.