

无人水空联合飞行器的建模与仿真

摘要: 这篇文章介绍一种叫做无人驾驶水下飞行器(HUAUV)既能在水下又能在空中航行的无人飞行器的完整的建模和仿真。基于典型的空中和水中平台的适应性对这类飞行器进行了最优结构的评估, 以实现两种不同环境下的航行。所选的模型是基于一个类似四旋翼的空中平台, 使其能够潜水和在水下移动。这里提出了一种小尺寸样机的运动学和动力学模型, 并对其参数进行了评估和仿真。最后, 控制器被用于飞行器上并且通过实际仿真验证了控制器, 包括空中和水中的航行, 以及两种环境的切换问题。具我们所知, 这是第一个能在两种不同介质航行并且不需要在介质过渡期间进行机械调整的航行器。

一、简介

目前, 无人驾驶汽车已经成为许多研发工作的重点, 具有非常广泛的应用。大量的研发资源提高了该领域的研发能力, 尤其是军事领域。例如远程操控无人飞行器最近已经在世界各地被用于军事行动中[1]。但是也被用于非军事领域, 例如农业[2]和监视[3]。另一种非常重要的机器平台是无人水下航行器(UUVs), 其中最出名的是远程操作水下航行器(ROVs)。这类航行器还可以用于一些商业现场作业[4], 如超深水下石油和天然气的开采[5]。

这两种航行器都能很好的适应它们各自环境(分别是空气和水中), 但是在某些情况下需要一种在两种环境中都能工作的机器。当需要对部分或者全部浸于水中的建筑(船或者立管)进行维护时通常会出现这样的要求。一种典型的方法是使用辅助船舶去运输 ROVs 到目标区域进行检查。在部分淹没的建筑中这个问题变得更加困难。在这种情形下使用辅助船舶是非常困难和昂贵的, 通常是建议使用带有轮子或者轨道的水下机器人。

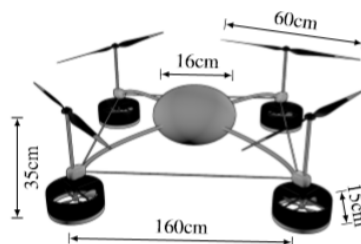


Fig. 1. A proposal design for our Hybrid Unmanned Aerial Underwater Vehicle (HUAUV).

在这里, 我们打算提出一种高效的、廉价的具有在水中和空中航行能力的机

机器人。图 1 提供了一幅我们在这篇论文中讨论的航行器的概念图。它叫做无人水空联合航行器(HUAUV), 和本论文中的另一种航行器相比它具有几个优点。据我们所知, 这是第一个能在两种不同介质航行并且不需要在介质过渡期间进行机械调整的航行器。它能够快速的运动并且对模型大小的限制较小。我们提出的这个航行器具有非常广的应用, 但是作为一个例子, 我们引用一个偏远地区的问题, 比如南极大陆或者是亚马逊雨林。同时进行空中和水中测绘是一个非常典型的挑战。在如此荒凉的地区使用船只进行测绘是非常不经济和困难的, 但是需要运输水下航行器去进行探索和测绘。然而, 我们的 HUAUV 可以从指挥站的地面或者船上进行发射, 然后飞行到目标区域潜入水下完成任务。

二、相关工作

对于 UUVs[6],[7],[8]和 UAVs[9],[10],[11]的建模和仿真有许多不同的工作。然而, 对于水空联合航行器的特性的研究却很少。历史上, 一些具有飞行能力或者具有潜水特征飞行器被提出。第一次世界大战和第二次世界大战期间, 美国现代技术杂志上发表过一篇由丹麦海军开发和测试的一种关于水空联合航行器[12]的文章。事实上, 实际的航行器从来没有出现过, 都仅仅是概念上项目。1934 年, 一名俄罗斯海军学员提出了一种叫做水下飞行船的航行器, 能够搭载三个人和重达 15 吨的货物[13]。但是也没有被制造出来。

在 19 世纪 60 年代, 工程师 Bruce Reid 建造了第一艘水空联合航行器, 叫做 Reid Flying Submarine (RFS-1)。它是一艘单座的水空两用航行器。驾驶员需要使用水肺在水中呼吸。在第一次测试中, 该航行器飞行高度为 10 米, 潜水升读为 2 米[14]。

在过去的十年中, 美国高级研究计划局(DARPA)资助了 Lockheed Martin 公司的一个名为 Cormorant MPUAV[15]的项目。顾名思义, 它是一种有效载荷为 450Kg 的多用途飞行器。想法是制造出一种能从潜艇发射, 并能够使用火箭进行推进的飞行器。它能在 ROVs 的帮助下返航。该项目开始于 2006 年, 但在原型机制造出来前的 2008 年合同就被取消了。

2008 年, DARPA 的一个官方委员发布会[16]中对水下飞机指定了一个典型的任务[17], 并且提出了一个理论上满足所有要求的概念设计。这个飞行器需要 8 个操作人员, 有效载荷达到 2000 磅。在这个工程中提出了两种不同的设备, 一台涡扇引擎和两台电动机分别用于空中和水中航行。为了在水中航行, 压载水舱阀门打开, 让水注入压载水舱使之沉入水里。与我们提出的航行器不同, 这种航行器很难被小型化, 而且由于在空中和水中需要两种不同的驱动设备所以在改变环境时切换会很慢。

最近，MIT 的 Lincoln 实验室设计了一种能够在空中飞行又能通过折叠水翼快速潜入水中航行的无人混合动力航行器[18]。和我们的对比起来，这种的设计和控制的难度都非常大。它不能再水中起飞并需要改变它的机械结构才能再水中航行。和这个项目类似的，[19]、[20]也提出了一种利用气囊的能够从水中起飞的混合航行器，但是一些限制依旧存在，比如仍需要非常复杂的机械结构，而且这些机器结构还需去适应两种换进的变换。

可以看出所有这些水空航行器的机械结构都非常复杂，这些复杂的机械让它们存在显得不实际。但是这类平台的主要的问题涉及到环境过度的过程，也就是为使航行器能够从空中到水中或者从水中到空中就必须对其结构进行改变。这些和其它的特点在我们设计航行器时都有所考虑。在下一个部分，我们讨论几种经典的机器人平台，并从中找出最适合于水中和空中环境的平台。

三、模型选择

为了找到一个建造水空联合航行器合适的方法，我们学习现在可用的结构，考虑到了其中不同参数的问题，如负载和参数修正等。项目的另一个非常重要的方面是平台的选择。我们将这个问题建立在对现有的空中平台的改进使之能够做到在空中和水中巡航的可能性上。

3.1 平台的选择:

正如文献[21]所介绍，我们从定义一些架构开始。下面给出了两个可能的可行方案列表。从表 I 中我们从 1 到 5 进行了打分(1 分最差，5 分最好)，以找到最佳候选方案。这些分数是基于我们的研究和对这些架构的一些特性的了解以及些经验并且反复斟酌后选择的。

飞行器

- 固定翼飞机 — 它的主要特征是通过机翼和一定的气流来提供升力。它还需要一个很大的区域进行起飞和降落，这对我们的应用有着很大的限制。固定翼飞机不能在小区域内低空盘旋和稳定控制，但它在高海拔高速巡航时有着非常高的气动效率。
- 尾桨直升机式飞行器 — 相对于普通飞机来说直升机具有非常复杂的机械结构。其优点是机动性好，能在小范围内进行近地和悬停飞行，但它的价格高昂，维护成本高，自主性和有效载荷都比较低。直升机还能垂直起飞和降落，这是能够在崎岖的地方执行任务的一个非常重要的优势。
- 同轴转子直升机式飞机 — 这是一种优缺点和上面提及的几种飞行器基本

相同，但由于它的结构紧凑，机械简单，更得我们所青睐。然而它的气动性能更加复杂，机动能力也有限。

- 四旋翼型飞行器 — 由四个攻角固定的螺旋桨提供推力的空中平台。四旋翼的运动控制是通过调节四个电机的转速来提供升力和转矩的，这使得四旋翼具有稳定性和可操作性。其主要优点是具有高载荷并具有直升机一样的低空悬停和巡航能力。但由于螺旋桨的数量多，它的耗能也高，且易受风的干扰。
- 飞艇和高空气球式飞行器 — 这类飞行器(也被称作比空气轻的飞机)是由充满如氦气等比空气轻的气体的巨大空腔支撑的平台所构成的。它的主要优点是低能耗和低噪音。然而它具有一个致命的缺点就是无法在水中航行。由于体积巨大，充满了比水轻的多的元素导致了它在水中航行几乎是不可能的。
- 仿生鸟类飞行器 — 这是一类相对新颖的平台，是受到像鸟类，昆虫类的自然生物运动的启发而发明的。其主要优点是能够将体积做的很小且耗能低和噪声小。但同时也表现出低载荷能力和复杂的动力学，它的执行系统的设计和制造都非常困难。而且，尽管仿生鱼能在种水下航行，但翅膀在密集流体中不是很有效。

3.2 水下航行器

- 鱼雷型系统 — 这类水下航行器的特点是具有封闭的结构，如潜艇和鱼形导弹。由于它的流体力学设计，使得其具有良好的载荷能力并能在水中高速行驶。然而，由于它们的附加质量很大(我们之后讨论)，使得其需要强大的执行机构，因此，在巡航时呈现出很大的能量消耗。
- 远程操作航行器系统(ROVs) — 不同于鱼雷型系统，ROVs 是开放型结构的水下航行器。正因为这个特性，环境中的流体(空气或水)能够通过其内部，使其据哦于较低的附加质量和阻力。然而，它的空气动力和流体动力剖面较差，通常比一般的空中和水中航行器重，载荷比不理想。
- 就这些平台而言，我们根据能够最大优化我们项目的特性精心制作了表 I，由于我们之前提到的原因，我们派出了飞艇和 ROVs，主要是由于它们的水动力或者是空气动力效率不理想。

TABLE I
PLATFORM CLASSIFICATION.

Features / Platforms	Airplane	Helicopter	Quadrotor	Coaxial	Bird-like	Torpedo
Aerial controllability	4	2	3	2	2	2
Underwater controllability	2	2	3	1	1	3
Payload/Vehicle volume	2	3	5	4	2	2
Energy consumption	3	2	1	2	3	2
Mechanical simplicity	4	2	3	2	1	4
Hovering	1	5	5	5	3	1
Low speed navigation	1	3	4	4	2	1
Environment switch-over	3	3	4	4	5	5
Modeling simplicity	3	2	3	2	1	3
Env. (noise) interference	2	1	1	1	2	2
Weight (added mass)	3	3	4	3	3	3
Aerodynamic modeling	3	2	4	2	2	3
Hydrodynamic modeling	3	1	3	2	1	4
Structure modification	2	2	3	3	3	1
Miniaturization	3	3	3	4	2	3
Final score	39	36	49	41	33	39

定性分析表明，四旋翼最适合做水空联合飞行器。它具有机械结构和数学模型简单，机动性和可控性好，有效载荷大并且允许悬停。然而，这种结构具有很低的效率和显著的速度限制。

3.3 螺旋桨设计:

对于水空联合系统项目来说螺旋桨设计是至关重要的一点(尤其是对于螺旋桨航行器来说)，因为它是推力的主要来源。即使是固定翼飞行器和飞艇式飞行器螺旋桨也是提供加速度的结构，而且必须根据每个飞行器的气动性能设计。水下航行器螺旋桨的设计也同等重要，因为螺旋桨为水下航行器提供推力，使其能在水下运动。

空中使用的螺旋桨和水下使用的螺旋桨有很大的不同，由于它们的工作环境差异大，比如流体密度和粘度等，造成了器形状和大小的差别。在我们的研究中，我们使用一个名叫 javaProp 的螺旋桨设计软件来设计混合四旋翼的两种螺旋桨。该软件基于[22]文献中提出的螺旋桨最优设计方法。

描述螺旋桨的主要参数有：(i) 推力系数 c_f , (ii) 功率系数 c_w . 它们都是基于工作环境的流体密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ ，转速 Ω (每分钟旋转圈数—rpm 和螺旋桨自身的直径 D (单位:米)。如方程 1 和 2 所示，分别为：

$$c_f = \frac{f}{\rho \Omega^2 D^4}, \quad (1)$$

和

$$c_w = \frac{w}{\rho \Omega^3 D^5}. \quad (2)$$

其中 f 为螺旋桨所提供的推力(单位为: N)， w 为螺旋桨所消耗的功率(单位为: W)。

1) **空中螺旋桨**: 最初, 人们的努力主要集中在空中螺旋桨的设计上, 从经验上认为它比水上螺旋桨大。在空气中, 飞行器飞行所需要的推力是由四个电机提供的。在没有其它力的情况下(如浮力, 空气的浮力可以忽略), 牵引力足以克服无人机所受的重力。螺旋桨的大小也决定了四旋翼飞行器的大小。因此, 我们研究设计一款能够为飞行器提供推力的最小螺旋桨, 这样就能减少飞行器的长度。

另一个非常重要的部分就是能源系统, 这也是限制螺旋桨产生推力大小的一个因素。当然推力大小也取决于其它的因素, 如电机的效率和电源模块所能提供的功率。我们设计的空中螺旋桨如图 2(a)所示, 我们选择双叶螺旋桨, 直径 $D=0.60\text{m}$, 在转速 $\Omega=2000\text{rpm}$, 功率 $W=50\text{w}$ 时能够提供 6.23N 的推力。此外, 四个螺旋桨所提供的推力足以维持重达 2.6kg 的飞行器。在设计中我们估计空气的密度 $\rho \approx 1.29\text{kg/m}^3$ 。



Fig. 2. JavaProp three-dimensional design of (a) the aerial (diameter of 0.60 m) and (b) the aquatic propeller (diameter of 0.15 m).

2) **水中螺旋桨**: 接下来我们研究设计水下螺旋桨。在水中浮力远大于在空气的浮力, 由于水和空气的密度(ρ)不同, 有关重力加速度的大小 $\|g\|$ 和飞行器的体积 V 。假设航行器所受浮力大于所受重力, 那么机器人在水下的推力将小于维持它在空中的推力。另一方面, 液体的阻力与其密度成正比, 水增加了航行器在水中运动时阻力。因此, 水下螺旋桨需要提供航行器在水下以预期速度运动的动力。

由于水的密度接近 1025kg/m^3 , 以低转速和小直径的螺旋桨就能提供较大的推力。因为水的密度大约是空气密度的 1000 倍, 参数 cf 和 cw 会与之前的差异非常大。图 2(b)展示了我们所设计的直径为 0.15 米的四叶水下螺旋桨。在和空中相同功率下转速为 500rpm 就能产生 7N 的力。

四、机器人建模

下一步就是对机器人进行数学建模。我们在 $W \equiv \mathbb{R}^3$ 空间用牛顿-欧拉法去建立模型。这种模型将航行器的位置和方向以及它们的微分看作是一个在李群 $SE(3)$ 中状态向量 $x = [p \ v \ \psi \ \omega]^T$, $x \in \mathbb{R}^{12}$ 。在这里, p 和 v 分别是航行器质心的

位置和速度向量,都属于世界坐标系 $\{W\} \in R^3$, ψ 是 $SO(3)$ 空间中角度向量,也属于 $\{W\}$ 参考系。 ω 是关于四旋翼飞行器质心的角速度向量,以 $\{B\}$ 为参考系。

航行器的输入向量 $u = \Omega \in R^4$ 由电机的角速度组成(单位为: rpm)。正 Ω_i 表示空中螺旋桨的推力,负 Ω_i 表示水下螺旋桨的推力。推力系统的详细描述在[23]²(待发表)。在 R^3 空间中建立水空交界面位置的控制 $P_{ref} = [x_{ref} \ y_{ref} \ z_{ref}]^T$ 是十分重要的。

1) **附加质量:** 当建立航行器水下运动模型时,附加质量的影响会很大。附加质量基本表现在克服等几何体积 V 流体加速航行器所需要的力上面,使得航行器在水下所受的惯性大于其实所受实际惯性。然而,由于航行器复杂的非对称的几何外形,估计随其运动的质量流就不是一项简单的任务。为了简化问题,我们假设航行器中心的半径为 0.8 米的球体是其移动时的主要体积(如图 1)。这样我们就能计算其附加质量(Eq.3)和其附加惯量矩阵:

$$m_a = \frac{4}{6} \pi \rho R^3, \quad (3)$$

$$I_a = m_a R^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{5} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{5} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{5} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

2) **恢复和瞬间拖动力矩:** 恢复力(一种被动力)使物理系统在没有其它驱动的情况下保持平衡状态。航行器所受重力在空中和水中都只取决于其质量—都相同。相比之下,浮力则取决于介质的密度 ρ 。因此航行器所受浮力在水中是不可忽略的。这两个力的方向都是在空间上沿 z 轴的。水下机器人通常被设计成浮略大于重力[24]。这一点非常重要,因为这样机器人可以在故障的时候自动浮出水面。

另一个非常重要的问题是浮心和重心的位置。航行器的稳定性取决于这两个力的相对作用(如果这两个力不平衡就会产生俯仰或者翻滚力矩)。因此,浮心必须要正好在重心以上。在这种条件下,航行器被认为是自稳定的。我们所提出的航行器具有所有这些特点。

另一方面,瞬时阻力力阻碍这航行器的运动。航行器工程在水中和空中的相关性是流体动力学领域的一个重要课题。与附加质量和浮力相似,在水中很重要的参数,瞬时阻力也取决于介质密度。虽然航行器在介质中的恢复力提供了使其稳定的力,但阻力会使其运动困难。

3) **航行器动态建模:** 机器人的线性运动能够写成:

$$\dot{\mathbf{p}} = \mathbf{v}, \quad (5)$$

$$\overline{\mathbf{m}}\dot{\mathbf{v}} + C\rho\mathbf{v}|\mathbf{v}| + (m - \rho V)\mathbf{g} + (\mathbf{v} \times m\boldsymbol{\omega}) = \mathbf{R} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sum_{i=1}^4 \mathbf{f}_i \end{bmatrix}, \quad (6)$$

\mathbf{p} 定义为位置(m), \mathbf{v} 定义为速度(m/s)。 $\overline{\mathbf{m}} = (m + m_a)$, C 为矩阵的阻力因子, \mathbf{g} 为重力向量, V 为四旋翼的体积, \mathbf{R} 为航行器在 $SO(3)$ 中从三维空间 $\{\mathbf{B}\}$ 到 $\{\mathbf{W}\}$ 的旋转矩阵, \mathbf{f}_i 为第 i 个电机所提供的推力

$$\mathbf{f}_i = c_f \Omega_i^2, \quad \forall i = 1 \dots 4, \quad (7)$$

c_f 为螺旋桨有关的因子, 由 Eq.1 给出。

类似的, 航行器的旋转运动描述成

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = \mathbf{B}\boldsymbol{\omega}, \quad (8)$$

$$\overline{\mathbf{I}}\dot{\boldsymbol{\omega}} + C\rho\boldsymbol{\omega}|\boldsymbol{\omega}| + (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}\boldsymbol{\omega}) = \begin{bmatrix} l(\mathbf{f}_2 - \mathbf{f}_4) \\ l(\mathbf{f}_3 - \mathbf{f}_1) \\ \sum_{i=1}^4 (-1)^{i+1} \mathbf{m}_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

欧拉角向量 $\boldsymbol{\psi}$ 的单位为弧度(rad), 角速度向量 $\boldsymbol{\omega}$ 的单位为(rad/s)。我们使用 ZYX 欧拉角表示, ϕ, θ, ψ 分别是翻滚角、俯仰角和偏航角。 $\mathbf{I} = (\mathbf{I} + \mathbf{I}_a)$ 为机器人的惯量矩阵由于航行器中心对称, \mathbf{B} 是角速度从 $\{\mathbf{B}\}$ 到 $\{\mathbf{W}\}$ 的变换矩阵, L 是每个电机到航行器中心的距离, \mathbf{m}_i 是第 i 个电机提供的力矩, 表示为:

$$\mathbf{m}_i = c_f l \Omega_i^2, \quad \forall i = 1 \dots 4. \quad (10)$$

4) **控制规律:** 我们使用简单的 PD 控制和非线性控制去稳定和导航 HUAUV 去通过环境。在[25], [26]中我们使用类似的方案去控制电机。所有的控制器都是通过对方程 5、6、8 和 9 在悬停条件下适当线性化得到的。

电机的输入矩阵能够写成:

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \delta\Omega_T - \delta\Omega_\theta + \delta\Omega_\psi \\ \delta\Omega_T + \delta\Omega_\phi - \delta\Omega_\psi \\ \delta\Omega_T + \delta\Omega_\theta + \delta\Omega_\psi \\ \delta\Omega_T - \delta\Omega_\phi - \delta\Omega_\psi \end{bmatrix}, \quad (11)$$

$\delta\Omega_T$ 是航行器升空的标称推力速度, $\Delta\boldsymbol{\Omega}_\psi = [\delta\Omega_\phi, \delta\Omega_\theta, \delta\Omega_\psi]$ 是导致翻滚角、俯仰角和偏航角的速度偏差向量。螺旋桨的速度偏差可以通过 PD 姿态控制规律得出:

$$\Delta\Omega_\psi = \Lambda_\psi (\psi_{\text{ref}} - \psi) - \Lambda_\omega \mathbf{B}\boldsymbol{\omega}, \quad (12)$$

ψ_{ref} 为参考方向向量(仅限于小角度)。这里 Λ_ψ 和 Λ_ω 为对角增益矩阵，正的定义为空中稳定，负的定义为水中稳定。

至于位置控制，具体的说就是高度控制，电机的推力速度 $\delta\Omega_T$ 可以根据理性高度通过非线性控制规律

$$\delta\Omega_T = \frac{\lambda_1 (z_{\text{ref}} - z) - \lambda_2 \dot{z} + \sqrt{\frac{(m - \rho V) \|\mathbf{g}\|}{4c_f}}}{\cos \phi \cos \theta}, \quad (13)$$

来获得。正 z_{ref} 表示空中飞行命令，负 z_{ref} 表示水下命令。此外， λ_1 和 λ_2 是比例部分和微分部分的控制增益。

在完成位置控制是，参考角度 ϕ_{ref} 和 $\theta_{\text{ref}} \in \psi_{\text{ref}}$ 分别由理想位置 \mathbf{x}_{ref} 和 $\mathbf{y}_{\text{ref}} \in \mathbf{p}_{\text{ref}}$ 所决定的

$$\begin{bmatrix} \phi_{\text{ref}} \\ \theta_{\text{ref}} \end{bmatrix} = \lambda_3 \begin{bmatrix} x_{\text{ref}} - x \\ y_{\text{ref}} - y \end{bmatrix} - \lambda_4 \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

为了简化模型，我们将 ψ_{ref} 设置为 0。和高度控制类似，正的 λ_3 和 λ_3 代表空中飞行控制增益，负的代表水下航行控制增益。

实验

在这个部分，我们给出一些 HUAUV 的位置控制仿真结果。表 II 总结了我们用于构建模型的参数。 $\text{diag}(\cdot)$ 表示对角矩阵。

TABLE II
PARAMETERS SPECIFICATION OF THE MODEL.

Parameters	Variable	Values
Mass	m (kg)	2.0
Volume	V (m ³)	2.1×10^{-3}
Wing span	l (m)	0.45
Inertial matrix	I (kg·m ²)	$\text{diag}(3.6, 3.6, 6.6) \times 10^{-2}$
Drag matrix	C	$\text{diag}(-3.3, -3.3, -3.3) \times 10^{-3}$
Control gains (air)	Λ_ψ	$\text{diag}(10, 10, 0.6)$
	Λ_ω	$\text{diag}(3, 3, 5) \times 10^{-1}$
	$\langle \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \rangle$	$\langle 10, 0.2, 0.05, 2 \rangle$
Control gains (water)	Λ_ψ	$\text{diag}(-5, -5, -0.1)$
	Λ_ω	$\text{diag}(-0.05, -0.05, -2)$
	$\langle \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4 \rangle$	$\langle -5, -0.1, -0.05, -2 \rangle$

图 3 给出了在 R^3 中任意轨迹向量 $\mathbf{p}_{\text{ref}}(\mathbf{t})$ 的控制输出。我们选择了让航行器从水面起飞到水平面 6 米高处，然后返回水面再潜入水里 6 米，最后返回水面。

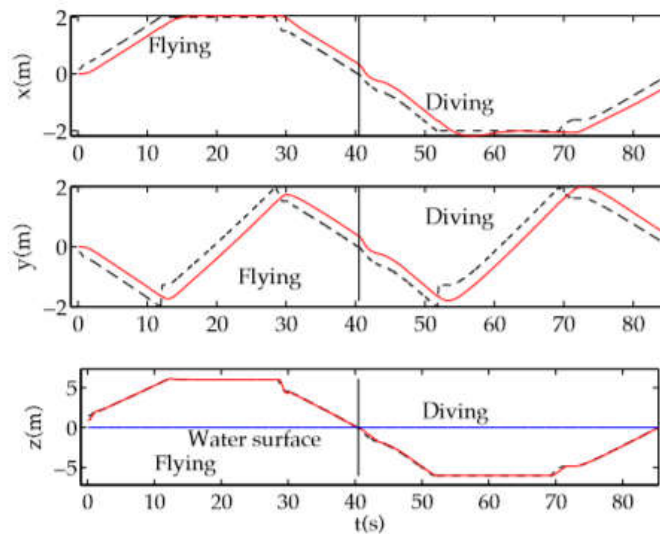


Fig. 3. Position control of the HUAUV along x , y and z axes. Dashed black lines represent the $\mathbf{p}_{\text{ref}}(t)$ trajectory, while red continuous lines are real robot positions (vertical black lines mark the point where the robot makes the transition of mediums).

可以看到黑色虚线表示命令轨迹 $\mathbf{p}_{\text{ref}}(t)$ ，红色连续实线表示由航行器自身所带传感器测量的真实位置。垂直黑实线标记出了航行器穿越不同环境的时间。可以看出航行器穿越不同环境十分迅速，这也是我们的主要目标。

图 4 出了在 R^3 空间中同样的实验。更多关于该项目的视频以及其它实验能够通过以下网址找到：<http://verlab.dcc.ufmg.br/projetos/huauv/index>。

五、结论及展望

这篇论文提出了一种基于四旋翼平台的无人水空联合飞行器的设计方法。据我们所知，这是首次在水下环境中使用四旋翼飞行器。使用这种结构的主要优点是能够以一种简单并且快速的控制方式使航行器在水下环境和空中环境切换。它的主要缺点就是航行器的质量限制以及其能耗高(尤其是在飞行过程中)。

关于使用水下四旋翼的另一个优点是其建模和仿真简单，采用开放式结构(低附加质量)，具有高载荷比等一些优点。其主要的缺点是其噪声大和其阻力限制了其速度。

之后我们打算建立一个实际的模型来测试和验证我们的概念以及一些关于水空环境切换的实际问题。

致谢

这个项目由 CNPq, CAPES, FAPEMIG 支持。

参考文献

- [1] D. Glade, “Unmanned aerial vehicles: Implications for military operations,” Air University - Maxwell Air Force Base, Tech. Rep., 2000.
- [2] F. Costa, J. Ueyama, T. Braun, G. Pessin, F. Osorio, and P. Vargas, “The use of unmanned aerial vehicles and wireless sensor network in agricultural applications,” in *IEEE Int. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2012.
- [3] Z. Sarris, “Survey of uav applications in civil markets,” in *IEEE Mediterranean Conf. on Control and Automation (MED’01)*, 2001.
- [4] L. Whitcomb, “Underwater robotics: out of the research laboratory and into the field,” in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2000, pp. 709–716.
- [5] T. P. Daigle, S. N. Hantz, B. Phillips, and R. Janjua, “Treating and releasing produced water at the ultra deepwater seabed,” in *Offshore Technology Conf.*, 2012.
- [6] P. Ridao, J. Batlle, and M. Carreras, “Model identification of a low-speed uuv with on-board sensors,” in *IFAC Conf. on Control Applications in Marine Systems*, Glasgow, Scotland, U.K, 2001.
- [7] S. C. P. Gomes, C. E. M. Moraes, P. L. J. Drews-Jr, T. G. Moreira, and A. M. Tavares, “Underwater vehicle dynamic modeling,” in *18th Int. Cong. of Mechanical Engineering - COBEM*, 2005.
- [8] B. Ferreira, A. Matos, N. Cruz, and M. Pinto, “Modeling and control of the MARES autonomous underwater vehicle,” *Marine Technology Society Journal*, vol. 44, no. 2, pp. 19–36, 2010.
- [9] A. Elfes, S. Siqueira Bueno, M. Bergerman, and J. Ramos, “A semiautonomous robotic airship for environmental monitoring missions,” in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 4, 1998, pp. 3449–3455.
- [10] K. P. Valavanis, *Advances in Unmanned Aerial Vehicles: State of the Art and the Road to Autonomy*. Springer, 2007.
- [11] P. Iscold, G. Pereira, and L. Torres, “Development of a hand-launched small uav for ground reconnaissance,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 1, pp. 335–348, 2010.
- [12] Unknown, “Denmark amazing submarine plane,” *Modern Mechanics and Inventions*, vol. 25, pp. 74–75, 1930. [Online]. Available: <http://blog.modernmechanix.com/2008/06/27/denmarks-amazing-submarine-plane/>

- [13] G. Petrov, "Flying submarine," *Journal of fleet*, 1995. [Online]. Available: <http://www.airforce.ru/aircraft/miscellaneous/flyingn submarine/index.htm>
- [14] B. Reid, *The Flying Submarine: The Story of the Invention of the Reid Flying Submarine*, RFS-1. Heritage Books, Inc, 2004.
- [15] "MPUAV cormorant," <http://www.lockheedmartin.com/how/stories/cormorant.html>.
- [16] "Submersible aircraft," <http://www.darpa.mil/STO/solicitations/BAA09-06/index.html>.
- [17] G. L. Crouse-Jr, "Conceptual design of a submersible airplane," in *48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 2010.
- [18] A. Fabian, Y. Feng, E. Swartz, D. Thurmer, and R. Wang, "Hybrid aerial under water vehicle (mit lincoln lab)," SCOPE Projects Olin College of Engineering, Apr 2012.
- [19] X. Yang, J. Liang, T. Wang, G. Yao, W. Zhao, Y. Zhang, and C. Han, "Computational simulation of a submersible unmanned aerial vehicle impacting with water," in *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, Dec 2013, pp. 1138–1143.
- [20] J. Liang, G. Yao, T. Wang, X. Yang, W. Zhao, G. Song, and Y. Zhang, "Wing load investigation of the plunge-diving locomotion of a gannet morusinspired submersible aircraft," *Science China*, vol. 57, no. 2, pp. 390–402, Feb 2014.
- [21] S. Bouabdallah and R. Siegwart, *Advances in Unmanned Aerial Vehicles*. Springer Press, 2007, ch. 6 - Design and Control of a Miniature Quadrotor, pp. 171–210.
- [22] C. N. Adkins, "Design of Optimum Propellers," *Journal of Propulsion and Power*, vol. 10, no. 5, September-October 1994.
- [23] A. Alves Neto, P. L. J. Drews Junior, and M. F. M. Campos, "Dispositivo de propulsao a ~ ereo-aqu ´ atico para ve ´ ´ ıculos do tipo *n*-rotor anf ´ ıbio (in portuguese)," 2012, patent pending: BR 102012023897-7.
- [24] W. Wang, R. Engelaar, X. Chen, and J. Chase, *Mobile Robots: State of the Art in Land, Sea, Air, and Collaborative Missions*. InTech, 2009, ch. The State-of-Art of Underwater Vehicles: Theories and Applications.
- [25] D. Gurdan, J. Stumpf, M. Achtelik, K.-M. Doth, G. Hirzinger, and D. Rus, "Energy-efficient Autonomous Four-rotor Flying Robot Controlled at 1 kHz," in *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, 2007, pp. 361–366.
- [26] N. Michael, D. Mellinger, Q. Lindsey, and V. Kumar, "The GRASP Multiple Micro-UAV

Testbed,” *IEEE Robotics Automation Magazine*, vol. 17, no. 3, pp. 56–65, sept. 2010.