

多自由度仿生扑翼飞行机器人结构设计与分析

王超, 屈方杰, 黄恒敬, 仲军

(河海大学机电工程学院, 南京 213000)

摘要: 旨在设计一种能够飞行的大型仿生扑翼飞行机器人, 以海鸥作为设计原型进行飞行方式和运动规律分析, 建立结构设计和数学模型, 实现多自由度仿生扑翼飞行。对设计结构进行运动学分析, 使仿生飞行结构更加合理且符合基本气动性能。通过建立三维模型, 将其运动学仿真结果与理论结果进行对照分析, 证明了理论分析的正确性和设计结构的合理性。

关键词: 仿生扑翼飞行机器人; 海鸥; 运动学; 三维建模; 计算机仿真

中图分类号: TH460.2010 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-4080 (2020) 01-0039-08

Design and Analysis of Multi-Degree of Freedom Bionic Flapping Wing Flight Robot Structure

WANG Chao, QU Fangjie, HUANG Hengjing, ZHONG Jun

(Hohai University, College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing 213000, China)

Abstract: The purpose of this paper is to design a large bionic flapping wing flying robot that can fly. The seagull was used as a design prototype to analyze the flight mode and motion laws. Through structural design and mathematical model establishment, multi-degree of freedom bionic flapping-wing flight was realized. The kinematic analysis of the design structure makes the bionic flight structure more reasonable and meets the basic aerodynamic performance. By establishing a three-dimensional model and comparing its kinematics simulation results with theoretical results, the correctness of the theoretical analysis and the rationality of the designed structure are proved.

Key words: Bionic flapping wing flying robot; Seagull; Kinematics; Three-dimensional modeling; Computer simulation

0 引言

在飞行机器人领域, 仿生飞行机器人拥有相较于普遍的四轴飞行器更加美观的外形, 并且能模拟鸟类飞行时的启动、悬停和降落时的动作。这类仿生飞行器因为外观与鸟类相似, 能更好地在军事、反恐及娱乐等众多领域, 发挥侦察、巡逻与教育等积极作用。

早在 1973 年, Weis-Fogh^[1] 就针对黄蜂的飞行特性, 提出了扑翼飞行的概念, 并详细地分析

计算了扑翼产生的升力, 为飞行领域开创了新的学科分支。

2015 年, Yang 等^[2] 在仿生扑翼飞行器原理的设计与研究中, 对扑翼机器人的具体设计步骤做了详细的介绍。在设计扑翼机构的主体时, 采用了被普遍使用的扑翼机构, 并且在该机构的基础上加了一个用于模拟鸟类内外部肌肉交替收缩的平行机构, 并对机构进行 UG 建模、ADAMS 和 Fluent 的仿真分析, 最后对机翼和尾部形状进行仿生设计。

收稿日期: 2019-09-03; 修订日期: 2019-12-04

基金项目: 装备预研教育部联合基金 (6141A02033616)

作者简介: 王超 (1997-), 男, 本科, 主要研究方向为机器人技术。E-mail: 1661010616@hhu.edu.cn

2015年,潘尔振^[3]结合海鸥的功能和性能指标,通过结构设计和样机选型等过程,设计出一个自由度的扑翼机器人,并开发了一套实验装置测试结构合理性等性能指标,最后基于数据对结构进行优化设计。

2016年,阮龙欢^[4]对扑翼飞行机器人的应用背景和技术做了深入的研究,并设计一种类似蜂鸟扑动的扑动-扭转两自由度耦合驱动机构,在ADAMS软件中建立了基于该机构的虚拟样机,并分析了虚拟样机的基本运动特性。

在仿生扑翼飞行器的研究上,国外的研究起步早,技术暂时还领先于国内。随着国内各大高校、实验室以及飞行器爱好者对于扑翼飞行的关注,已经有不少学者取得不错的成绩,但研制成功的飞行器大多数还是单自由度,无法达到真正模仿鸟类飞行和大范围普及推广的程度,距离世界领先技术还有不少的差距。归根结底是因为仿生飞行机器人相较于市面上的普通飞行器,存在设计复杂、控制复杂的问题,并且现有的研究仿生程度不高,运动学和动力学领域对于扑翼结构的建模分析还有待深入探讨和研究,智能控制系统还有待进一步开发和完善^[5-10]。大型扑翼飞行机器人结构研究对于开发多自由度仿生扑翼飞行器在理论和实际应用上都具有很强的研究价值^[11-14]。

本文旨在对大型的扑翼飞行机器人的结构进行研究。由于多自由度仿生扑翼飞行器在飞行时的频率较低,所以在每次扑动时要求的升力和推动力比螺旋式飞行器大,因此,精妙的扑翼传动是结构设计中的关键问题。在理论的结构设计后,还需要对设计出的结构进行动态构件计算分析、运动学计算分析、建模仿真等,以提高设计的准确性和可行性。

1 结构设计

1.1 海鸥飞行方式与运动规律分析

翅膀是海鸥能够飞行的主要身体部分,轻质且坚韧的羽毛和骨骼在扑动的过程中产生飞行所需要的升力。海鸥的羽毛大致分为覆羽和飞羽两类,如图1所示。覆羽排列密且短,飞羽排列稀疏但长。海鸥的飞行主要由起飞阶段、巡航阶段、转向、降落阶段组成。

海鸥在巡航过程中,翅部有4个基本的扑动动作:下行程、折叠过程、上行程、伸展阶段。这4

个动作可以大致看做一个完整的拍打过程。翅膀在下行程前的伸展阶段需要尽可能大地展开,这样翼展和升力面积才能达到最大值,并在下行程阶段产生所需的大部分升力。上行阶段是被动回复的过程,并且行程需要的时间很短。在这个阶段之前,翅膀折叠,目的是缩短翼展和减少阻力。在上行程中,空气阻力会急剧增大。如果鸟类能在这个时候折叠翅膀,可以减少有效的作用风区,从而大大减少空气阻力^[15]。

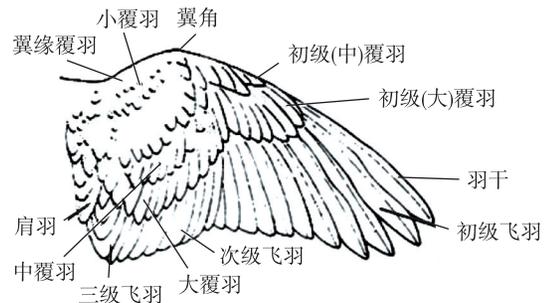


图1 鸟类翅膀示意图

Fig. 1 Schematic diagram of bird wings

海鸥一类的大型鸟类主要扑动飞行的频率比较低。在巡航过程中,因为翼展大小决定了扑动频率,海鸥的扑动频率大约为5Hz,最低的时候只有1Hz~2Hz^[16]。

根据观察发现,在海鸥的一个拍打过程中,不仅翅部上下扑动,而且根据上下形成的空气阻力不同,翅膀还会有小幅度的接近线性扭转,翅尖部分扭转幅度最大,越靠近身体方向扭转幅度越低。

海鸥在巡航飞行过程时,一对翅膀的运动是完全左右对称的,这样的运动有利于海鸥在大型的风浪面前保持身体的平衡和对抗气流飞行,例如Festo公司研制的一款Smartbird^[17]仿生海鸥机器人,其运动典型动作如图2所示。



图2 Festo公司Smartbird仿生海鸥

Fig. 2 Festo's Smartbird bionic seagull

1.2 仿海鸥扑翼飞行机器人结构设计

1.2.1 整体结构设计

设计的要求是需要满足仿海鸥飞行特点和产生足够的升力维持飞行，以及在外形上与海鸥相似。使用 SolidWorks 软件设计结构，生成三维模型可以更加直观地修改和完善结构设计。

在模型建立时，需要考虑到建立扑动模型和传动构件和配合问题，如轴心位置对齐、大小尺寸匹配、零件相互无干涉、模型过于实际化等。针对以上设计要求，对各部分零件进行统筹建模，并根据实际装配要求，在转动部件的轴端增加了轴承，为了避免轴向滑动还设计了轴端挡圈和卡簧，如图 3 所示。头部和尾部与中轴通过球形链接相连。为了增强扑动部件固定端的稳定性，设计一个名为前骨支架的零件，如图 4 所示。为了固定中心轴的部分零件的轴向位置，采用了螺栓紧力矩的固定方法，方便拆解和安装，如图 5 所示。通过零件的装配，最终装配效果与海鸥姿态对比，如图 6 所示。

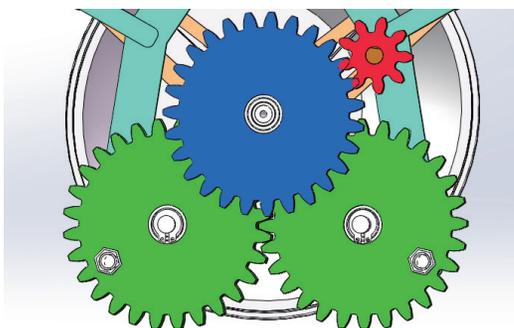


图 3 传动部件局部图

Fig. 3 Partial view of transmission components

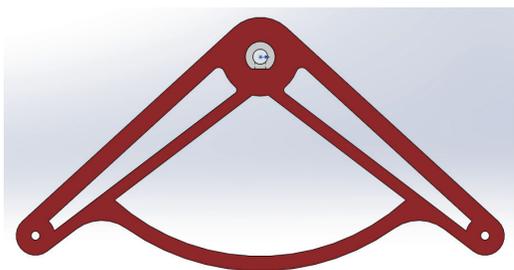


图 4 前骨支架零件图

Fig. 4 Front support skeleton parts

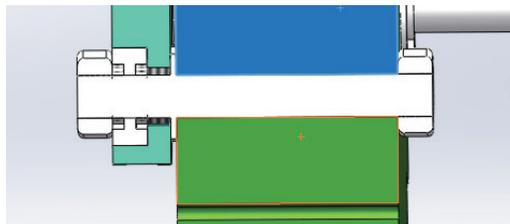


图 5 螺栓连接剖视图

Fig. 5 Sectional view of bolted connections



图 6 最终装配效果和海鸥对比图

Fig. 6 Comparison of final assembly effect and seagull

1.2.2 扑翼结构设计

翅膀翼型骨架的设计上，参考美国 NACA 系列翼形，选择了具有较好气动特性的弧形机翼，再根据前文所确定的翼展投影面积，设计出的翅膀翼型骨架如图 7 所示。镂空的设计既保证飞行时所需要维持形状的强度，也减轻了零件的质量，同时根据仿生学和流体力学的研究成果，一边翅膀有 8 个翼型骨架，从机身向外到最后一个翼型骨架，每个骨架的形状和尺寸都略有差异，翼型骨架的前沿的小孔和后沿都将与钢丝串接在一起，这样在末端翼型骨架被施加扭力时，其他骨架也会随之扭动。这样的设计模拟了海鸥在不同空气阻力时，翅膀会有小幅度的接近线性扭转，翅尖部分扭转幅度最大，向身体方向扭转幅度递减。

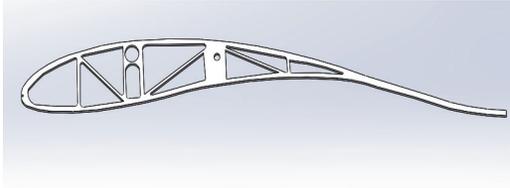


图7 翅膀翼型骨架

Fig. 7 Skeleton of wing airfoil

机尾部还加装了微型舵机和控制器用于飞行过程中为获得最佳飞行效率而将翅膀轴向扭动。

扑翼结构采用的是两段式的翅型，即拍打过程中带有折叠过程。靠近仿生海鸥身体的一段翅膀称为主翼，远离身体的一段翅膀称为副翼。鸟翼的结构十分精巧，想要完全真实的模仿对于现在的技术而言是十分困难的。所以主、副翼结构的设计主要需要满足：1) 翅膀的上下拍打运动；2) 翅膀下行程时主翼和副翼向外舒展；3) 翅膀上行程时主、副翼折叠。根据上述设计需求，提出了传动效率高且结构简单可靠的机构设计，机构简图如图8所示。

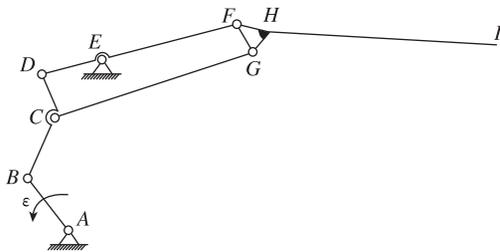


图8 主翼和副翼机构简图

Fig. 8 Schematic diagram of main wing and aileron mechanisms

从图8中可以看出，杆件AB是一个曲柄，与杆件BCD铰接一起，带动主翼杆件DF和CG，在杆件加入固定件E，使机构固定位置的同时达到上下扑动的设计要求；连接件FHG加入一段连接主翼杆件DF和CG，另一端采用固定连接副翼杆件HI，连接件FHG的另一个设计作用使主翼在下行程中副翼杆件向外舒展，主翼在上行程中副翼相对向相反方向运动，达到相对主翼折叠的效果，这样能最大效率地减小空气阻力，实现功率的最大化； $\angle BCD$ 的大小和CD的长度都经过试验确定，以确保其在运动时满足下行程时主翼和副翼向外舒展、上行程时主翼和副翼折叠的设计要求。

1.2.3 传动结构设计

因为要使两端的翅膀完全对称运动，所以传

动设计选择了精准度较高、需要在频繁且重复的工况下有较为优异的稳定性的、运用较为广泛的直齿轮传动。在传动装置中还设计了二级减速装置，使最终输出装置的转速大幅减小。根据以上目标所得设计方案，如图9所示。

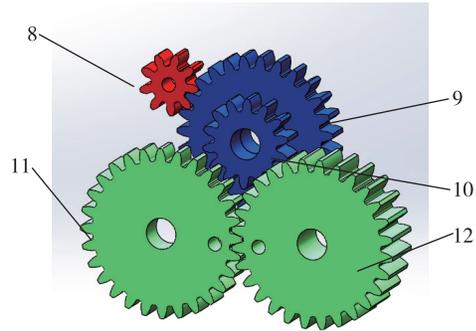


图9 传动齿轮设计

Fig. 9 Transmission gear design

传动装置中设计了二级减速装置如图9所示，其中所有齿轮的模数都为 $m=2$ ，齿轮8为主动齿轮，齿数为9，通过与电机连接带动整个齿轮副转动。齿轮9（齿数为27）与主动齿轮8外啮合，与齿轮10（齿数为14）同轴固定，目的是使齿轮9和齿轮10以同一角速度旋转，同时小齿轮8为主动齿轮啮合齿数较大的齿轮9可以达到减速增扭矩的效果。齿轮8、9、10组成了一个二级减速传动齿轮副，达到降低转速、增加扭矩的目的。齿轮11和齿轮12在其上打孔并在后期加装在扑动机构上，目的是充当扑动主、副翼的两个曲柄。齿轮11和齿轮12模数和齿数都相同，外啮合达到两侧翅膀完全对称运动的目的，齿轮12较厚，后部与齿轮10啮合。整个齿轮副依据机械装配的原理，通过机身的杆件和轴承与机身进行轴向和径向的固定。

1.2.4 头部和尾部结构设计

通过对海鸥的仿生学和运动学研究了解其飞行特点，在海鸥转向、起飞和降落的过程中，头部和尾部都有参与运动，并且头尾的作用在这些动作的过程中举足轻重。以海鸥飞行过程中转弯为例，首先海鸥会调整双翼的扑动幅度和频率，同时摆头和甩尾控制身体平衡，这样通过翅膀两侧不同的推力和升力差来达到转向的目的。

由于头部在飞行中只起到转向的作用，所以在设计时只考虑流线型线条形状，设计模型如图

10 所示。有一定弧度的尾部可以在飞行时提供部分一定的升力和推力，所以为了弥补不能做到双翼不同频率扑动所带来的部分飞行灵活性缺失，将尾部的形状设计符合空气动力学原理，如图 11 所示。头部和尾部中心位于同一根轴线上，通过中心杆件两端与头尾部的操纵圈的球铰链铰接，可以各个方向运动并灵活承受来自各翼面的压力。

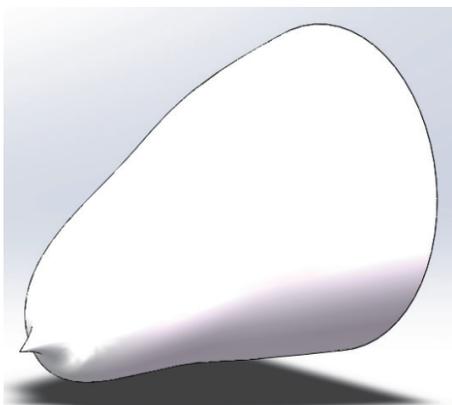


图 10 头部机构设计
Fig. 10 Head mechanism design

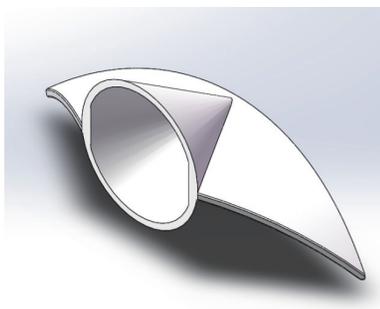


图 11 尾部机构设计
Fig. 11 Tail mechanism design

头部和尾部分别通过两根钢丝与机身较靠后的两个控制器相连，这个控制首尾部的控制器又称为舵机，如图 12 所示。舵机通过与控制器相连输出扭力带动操作杆，操纵杆连接钢丝控制头部和尾部，钢丝一侧张紧一侧放松，连接钢丝张紧的一侧就会向内回缩；两侧的钢丝都放松时，该侧零件就会相对身体向下；两侧钢丝都张紧，该侧零件就会相对身体向上。仿生学在观察海鸥运动时发现，海鸥的头部和尾部的朝向总是相反的，所以在设计时需用到两个舵机，每一个舵机都有两个控制杆，分别控制来自头部和尾部的钢丝的松紧，有效地保持整个身躯的平衡。

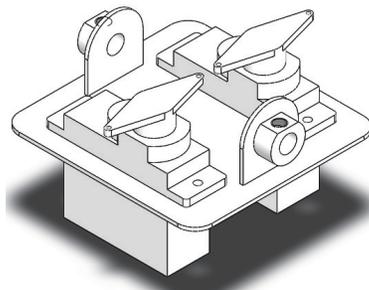


图 12 舵机机构设计
Fig. 12 Design of steering gear mechanism

2 运动学及仿真

2.1 运动学建模

扑翼机构采用双曲柄双摇杆机构，产生两侧为完全对称的运动，故在运动学建模时，仅分析单侧扑翼机构的扑动情况，之后可以由此结论推导出双翼的运动规律。

根据设计的结构，用 Visio 软件将扑动机构的右半部分的机构简图画出，如图 13 所示。对该结构进行运动学建模需要运用坐标法和矢量法，所以在这里将 A 点作为整个扑动结构笛卡尔坐标系中的原点，即坐标点 $A(0, 0)$ 。各杆件的长度以及固定点 E 点坐标皆为已知量。 $l_{AB}=20, l_{BC}=65, l_{CD}=16.55, l_{DE}=55, l_{DF}=355, l_{CG}=343.39, l_{GF}=22, l_{FH}=23.26, l_{GH}=30.84, l_{HI}=384, l_{BD}=80.30, \angle BCD=155^\circ, \angle FHI=154.54^\circ$ ，坐标点 $E(47.55, 95.57)$ 。设定杆 AB 为主动旋转部件，转动角速度为 ω (单位为 rad/s)，假设杆件 AB 与 x 轴正方向所成的角度为 θ_1 ，故由角位移方程可以易知 $\theta_1 = \omega t$ ，所以点 B 的坐标是一个有关于时间的关系式，即 $B(l_{AB} \cos \omega t, l_{AB} \sin \omega t)$ 。

连接 BD 、 BE 已在图 13 上标出。在笛卡尔坐标系内，假设 BE 与 x 轴正方向之间的夹角为 $\beta, \beta \in (0, \pi)$ ， BD 与 x 轴正方向的夹角为 $\theta_2, \theta_2 \in (0, \pi)$ ，当 $0 < \theta_2 < \pi/2$ 时翅膀处于上行程，当 $\pi/2 < \theta_2 < \pi$ 时，翅膀处于下行程。因为点 E 也是一个关于坐标系固定的点，所以假设 EF 段与 x 轴正方向的夹角为 $\theta_3, \theta_3 \in (0, \pi/2)$ 。

关于坐标点 $D(x_D, y_D)$ ，根据其位置的三角函数关系，可得

$$\begin{cases} x_D = x_B + l_{BD} \cos \theta_2 = x_E - l_{DE} \cos \theta_3 \\ y_D = y_B + l_{BD} \sin \theta_2 = y_E - l_{DE} \sin \theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

角度 β 、 $\angle DBE$ 、 θ_2 和 θ_3 都可由各杆件的位

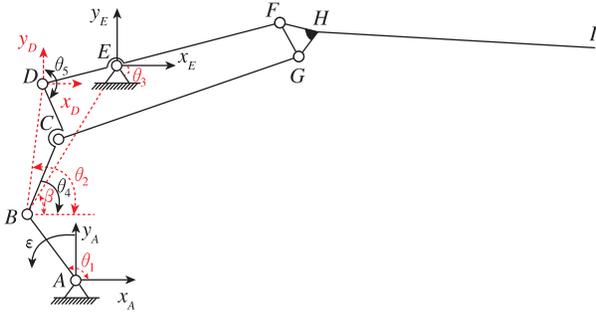


图 13 右侧扑翼机构简图

Fig. 13 Schematic of the flapping wing mechanism on the right

置和特征长度，经过三角函数的变换所得

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{y_E - y_B}{x_E - x_B} \right) \quad (2)$$

$$\angle DBE = \cos^{-1} \left(\frac{l_{BD}^2 + l_{BE}^2 - l_{DE}^2}{2 \times l_{BD} \times l_{BE}} \right) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \beta + \angle DBE \quad (4)$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{y_E - y_B - l_{BD} \sin \theta_2}{l_{DE}} \right) \quad (5)$$

关于坐标点 $F(x_F, y_F)$ ，可通过位置关系得

$$\begin{cases} x_F = x_D + l_{DE} \cos \theta_3 \\ y_F = y_D + l_{DE} \sin \theta_3 \end{cases} \quad (6)$$

坐标点 $C(x_C, y_C)$ 是杆件 BCD 上的点，根据杆组关系式易知

$$\vec{AE} = \vec{AB} + \vec{BC} + \vec{CD} + \vec{DE} \quad (7)$$

已知 B 、 D 点的坐标，将式 (7) 的矢量关系式分解成两个相关的坐标关系式

$$\begin{cases} x_C = x_B + l_{BC} \cos \theta_4 = x_D - l_{CD} \cos \theta_5 \\ y_C = y_B + l_{BC} \sin \theta_4 = y_D - l_{CD} \sin \theta_5 \end{cases} \quad (8)$$

式中， θ_4 是水平方向正方向与 BD 连线之间的夹角， θ_5 是 Y 轴正方向与杆件 DC 之间的较小的夹角。 θ_4 和 θ_5 之间存在的关系式如下

$$\angle BCD = \theta_4 + \theta_5 \quad (9)$$

根据式 (8) 和式 (9) 可容易求出 θ_4 和 θ_5 关于时间 t 的关联式，将关联式带入式 (8) 即可得到坐标点 C 的关联式。

关于坐标点 $G(x_G, y_G)$ ，已知 $|\vec{CG}| = l_{CG}$ 和 $|\vec{GF}| = l_{GF}$ ，故可得

$$\begin{cases} l_{CG} = \sqrt{(x_G - x_C)^2 + (y_G - y_C)^2} \\ l_{GF} = \sqrt{(x_G - x_F)^2 + (y_G - y_F)^2} \end{cases} \quad (10)$$

同理，可得 F 点坐标 (x_F, y_F)

$$\begin{cases} l_{FH} = \sqrt{(x_F - x_H)^2 + (y_F - y_H)^2} \\ l_{HG} = \sqrt{(x_H - x_G)^2 + (y_H - y_G)^2} \end{cases} \quad (11)$$

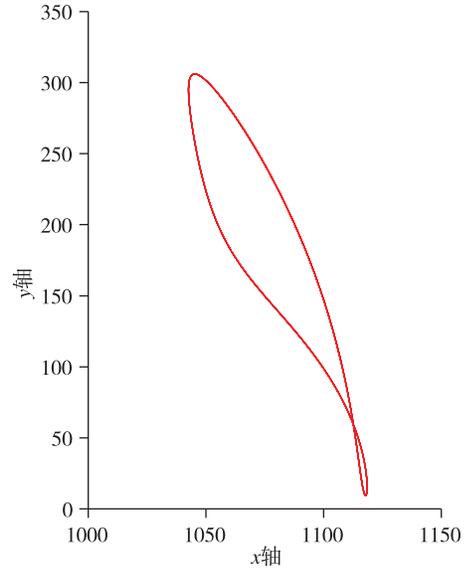
在得到坐标点 F 和坐标点 G 的关系式后，可以通过余弦定理可以计算出 l_{FI} 的长度

$$l_{FI} = \sqrt{l_{FH}^2 + l_{HI}^2 - 2 \times l_{FH} \times l_{HI} \cos \angle FHI} \quad (12)$$

由 $|\vec{FI}| = l_{FI}$ 和 $|\vec{HI}| = l_{HI}$ ，可得

$$\begin{cases} l_{FI} = \sqrt{(x_F - x_I)^2 + (y_F - y_I)^2} \\ l_{HI} = \sqrt{(x_H - x_I)^2 + (y_H - y_I)^2} \end{cases} \quad (13)$$

为了方便计算，将运动学建模所建立的所有公式导入 MATLAB 进行计算，最后通过式 (13) 推导出扑翼边缘，即坐标点 I 关于角速度 ω 和时间 t 的坐标表达式，暂时取角速度 $\omega = 8 \text{ rad/s}$ ，取坐标点 I 在运动一个周期内每间隔 0.01 s 时的坐标汇总，在 Excel 中导入并画出各点连线出副翼尾部在一个周期内的运动轨迹，所得的运动轨迹图像如图 14 所示。

图 14 坐标点 I 运动轨迹Fig. 14 Coordinate point I motion curve

2.2 模型仿真

在进行动力学电脑模型仿真之前，首先需要把在 SolidWorks 软件内建立的所有零件模型进行整合和装配。装配要求符合实际情况，并且需要设定固定数值的驱动力和运动限制，最后将模型的运动方式模拟出来，画出翅膀模型的边缘运动曲线，最后将曲线导出与理论分析结果进行对比。

扑翼飞行结构最主要的部分就是扑翼结构，为了避免其他零件对模拟产生的不可预计的影响以及减少计算量，将模型的其他零件进行压缩，仅留下主要的扑动零件，如图 15 所示。运用 SolidWorks 内部运动学仿真插件 Motion，对扑翼

构件的运动方式做一个设定。在运动算例中首先插入一个旋转马达，根据上文提到海鸥在巡航飞行时的扑动频率为 5Hz 左右，设置马达为逆时针旋转方向，等速 300r/m 旋转，马达带动最小的主动轮旋转，具体设置如图 16 所示。接着对该运动算例进行分析，插入一个翅膀边缘点，对该点进行路径分析。



图 15 运动仿真简化模型

Fig. 15 Simplified model of motion simulation

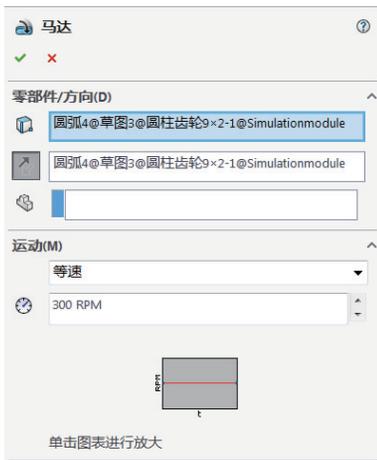


图 16 旋转马达设置

Fig. 16 Rotary motor settings

计算出的副翼末端的位移位置曲线为近似余弦曲线，如图 17 所示。同时还计算出了该点的线性速度和线性加速度随时间的变化，分别如图 18、图 19 所示。

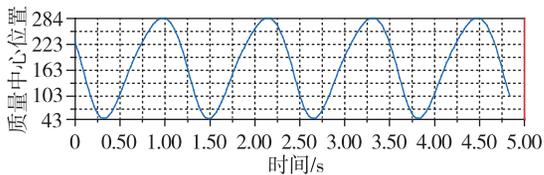


图 17 副翼位移曲线

Fig. 17 Aileron displacement curve

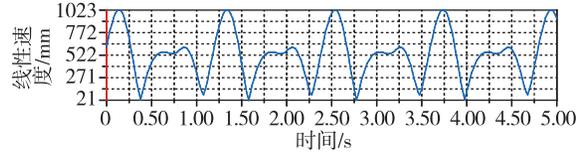


图 18 副翼线性速度曲线

Fig. 18 Aileron linear velocity curve

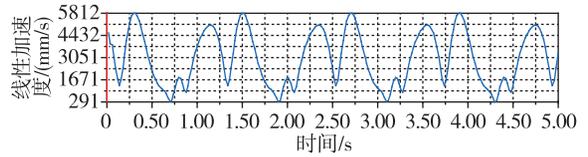


图 19 副翼加速度曲线

Fig. 19 Aileron acceleration curve

取副翼尾部最末端的点在运动时每间隔 0.01s 的坐标点，将所得的数据导入 Excel 并作图，生成扑动路径曲线，如图 20 所示。

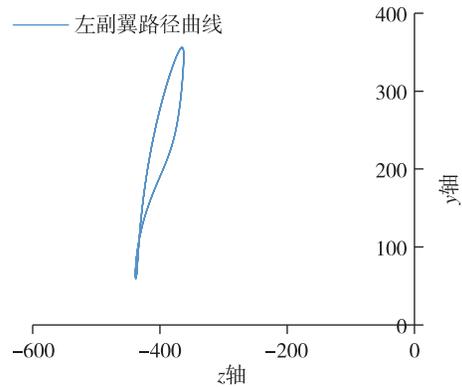


图 20 扑动路径

Fig. 20 Flap path curve

本文同时也对主翼杆件的位置、线性速度以及线性加速度进行了分析，分析所得曲线如图 21~图 23 所示。

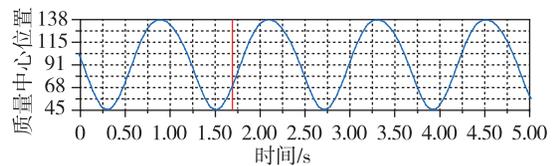


图 21 主翼位移曲线

Fig. 21 Main wing displacement curve

通过对模型进行建模分析和研究，可以清晰看出所设计的结构运动性能完全符合海鸥的运动特征。副翼翅膀在下行程时，由于空气阻力的作用，速度先快后慢，很好地将动能转化为飞行时

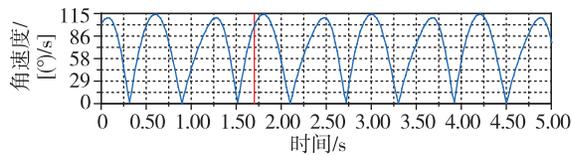


图 22 主翼线性速度曲线

Fig. 22 Linear velocity curve of main wing

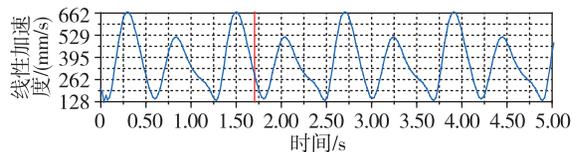


图 23 主翼线性加速度曲线

Fig. 23 Linear acceleration curve of main wing

所需的升力。而在上行程时由于设计的曲柄具有急回特性以及扑翼的折叠运动，翅膀在行程内虽然受到空气阻力，但是由于机构特性受力面较小，所以加速度有明显的上升。主翼翅膀的运动过程比副翼翅膀更为简单，位移曲线更趋近于正弦曲线，速度也十分平稳，只在运动方向改变时有速度的突变，加速度方面也是在翅膀下行程时较大，能更好地、更高效地为飞行提供足够的升力。从主翼和副翼的速度对比中可以看出，副翼最大速度约是主翼的 10 倍，设计效果优良。从扑动路径上可以看出，副翼在下行程时具有伸展动作，上下扑动的曲线接近“8”字型，成功模拟了海鸥翅膀的扑动路径规律，在辅以轴向副翼后，扭转时能很好地节省部分功率，十分符合理论计算的预期。

3 结论

本文对扑翼机器人结构进行了研究，通过对相关文献和科研成果进行整理和分析，对多自由度扑翼飞行机器人结构进行设计和分析，从结构设计、运动学分析、建模和仿真模拟等角度开展研究并取得了一些成果。

从仿生学角度出发，在分析了海鸥的飞行特征后，结合目前较为流行的扑翼结构设计，提出了一种具有折翼过程的扑动机构。在整体模型的基础上完善了扑翼机构、传动机构以及头部和尾部的的设计。将设计好的数学模型进行运动学的理论分析，证明了设计的机构具有急回特性，采用 SolidWorks 软件将建立的所有模型结构根据实际要求进行装配，实现了运动模拟。在软件内 Motion 的仿真结果与理论分析结果基本吻合，证

明了设计结构的合理性和可行性。

参考文献

- [1] Weis-Fogh T. Quick estimates of flight fitness in hovering animals, including novel mechanisms for lift production [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1973, 59 (1): 169-230.
- [2] Yang Y G, Xie Y Z, Huo L P. Design and research on mechanism of bionic flapping-wing air vehicle [J]. *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015, 8 (4): 299-306.
- [3] 潘尔振. 机器海鸥的仿生设计及其实验研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [4] 阮龙欢. 仿生扑翼飞行机器人结构设计及运动学研究 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
- [5] 李忠学, 郑耀. 智能飞行器柔性机翼结构与功能仿生(蜻蜓翅膀)研究 [C]. 中国宇航学会首届年会, 广西北海, 2005: 730-733.
- [6] 孙茂, 吴江浩. 昆虫飞行的高升力机理和能耗 [J]. *北京航空航天大学学报*, 2003, 29 (11): 970-977.
- [7] Attenborough D. *The Mastery of Flight* [M]. BBC Bristol, 2001: 58-62.
- [8] Sane S P. The Aerodynamics of Insect Flight [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2003, 206 (23): 4191-4208.
- [9] Tobalske B, Dial K. Flight kinematics of black-billed magpies and pigeons over a wide range of speeds [J]. *Journal of Experimental Biology*, 1996, 199 (2): 263-280.
- [10] 朱宝. 扑翼飞行机理和仿生扑翼结构的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
- [11] Sun M, Tang J. Unsteady aerodynamic force generation by a model fruit fly wing in flapping motion [J]. *Journal of Experimental Biology*, 2002, 205 (1): 55-70.
- [12] 李峙岳. 微型扑翼飞行器传动机构设计与分析 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [13] 周凯. 微扑翼飞行器动力学仿真及驱动机构优化设计 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- [14] McIntosh S H, Agrawal S K, Khan Z. Design of a mechanism for biaxial rotation of a wing for a hovering vehicle [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2006, 11 (2): 145-153.
- [15] 谢友增. 仿生驱鸟扑翼机结构设计及气动力分析 [D]. 天津: 中国民航大学, 2015.

(下转第 62 页)

时全方位的精度均有所下降。分析认为,输入图像过大会导致图像特征冗余,反而不利于神经网络的训练。而经过 512×256 变换的图像在 y 方向和 z 方向信息不均等,反而在旋转时为网络提供了更鲜明的信息,最终效果佳。最终选择将图像变换大小为 512×256 。

3 结论

1) 本文实现了利用卷积神经网络对带有标识物的航天器6个维度姿态的测量,通过仿真实验结果可知,态势分析系统可以较为精确地测量6个维度的位姿。

2) 对于姿态估计问题,通过仿真实验结果证明简单的9层卷积神经网络能更好地对航天器姿态进行估计。

3) 在学习速率合适的情况下,ReLU作为激活函数可以给网络增加更多的非线性特征,能够对姿态估计的非线性函数进行较好的拟合。

参考文献

- [1] 苏建东,齐晓慧,段修生.基于单目视觉和棋盘靶标的平面姿态测量方法[J].光学学报,2017(8):218-228.
- [2] 张浩鹏,姜志国.基于姿态加权核回归的航天器姿态估计[J].北京航空航天大学学报,2014,40(4):494-499.

- [3] 王松,刘复昌,黄骥,等.基于卷积神经网络的深度图姿态估计算法研究[J].系统仿真学报,2017(11):21-26.
- [4] 吴涛,白茹,朱礼尧,等.基于卡尔曼滤波的航姿参考系统设计[J].传感技术学报,2016,29(4):531-535.
- [5] 张力军,张士峰,杨华波,等.基于欧拉角观测模型的航天器姿态确定方法[J].国防科技大学学报,2012,34(6):84-88.
- [6] 刘转,刘兆昆,杨婧翌.导向轴姿态测量方法研究[J].信息记录材料,2018,19(5):56-58.
- [7] 周传德,王见,尹爱军.基于平面标靶的物体空间姿态精确测量[J].重庆大学学报,2011,34(8):66-70.
- [8] LéCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient-based learning applied to document recognition [J]. Proceedings of the IEEE, 1998, 86(11): 2278-2324.
- [9] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [J]. Computer Science, 2014.
- [10] Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions [C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2015: 1-9.
- [11] Pilzer A, Xu D, Puscas M, et al. Unsupervised adversarial depth estimation using cycled generative networks [C]. 2018 International Conference on 3D Vision (3DV), IEEE, 2018: 587-595.

引用格式:雷宇田,杨嘉琛,满家宝,等.自适应航天器态势分析系统[J].宇航总体技术,2020,4(1):56-62.

Citation: Lei Y T, Yang J C, Man J B, et al. Adaptive spacecraft situation analysis system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(1): 56-62.

(上接第46页)

- [16] 李喜喆.多段仿生扑翼机柔性翅翼及尾翼气动分析[D].天津:中国民航大学,2018.
- [17] Bionic Learning Network Festo. Smart Bird [EB/

OL]. 2017 01 01. <https://www.festo.com.cn/group/zh/cms/10238.html>.

引用格式:王超,屈方杰,黄恒敬,等.多自由度仿生扑翼飞行机器人结构设计与分析[J].宇航总体技术,2020,4(1):39-46.

Citation: Wang C, Qu F J, Huang H J, et al. Design and analysis of multi-degree of freedom bionic flapping wing flight robot structure [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2020, 4(1): 39-46.