

DOI: 10.3901/JME.2023.11.300

生物原型驱动的手功能康复产品仿生设计*

王年文^{1,2} 张立杰^{3,4} 毕翼飞⁵ 李原慧² 李鑫⁵ 秦文静²

(1. 燕山大学机械工程学院 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学艺术与设计的学院 秦皇岛 066004;

3. 燕山大学先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 秦皇岛 066004;

4. 燕山大学河北省重型机械流体动力传输与控制实验室 秦皇岛 066004;

5. 河北科技师范学院艺术学院 秦皇岛 066004)

摘要: 面向手功能康复产品设计领域, 通过生物功能协同实现模式指导产品功能求解, 达到提高产品设计适用性与跨领域转化效率的目的。依据仿生设计螺旋路径和手部康复需求, 建立功能树模型, 将设计问题生物化, 借助 AskNature 知识库检索并筛选生物原型; 根据类比原理分析生物功能系统与技术功能系统, 进行相似度计算, 获得有效仿生对象并分析其生物效应; 通过生物-产品系统类比模型, 获得形态结构、行为原理、运动环境三个层面的映射关系; 通过产品功能求解模型, 实现生物原型在功能层面上的模仿和替换。基于功能相似性确定生物原型后抽取并应用其效应特征, 可完善手功能康复产品的功能结构, 指导手功能康复产品设计, 实现跨领域功能结合, 帮助设计人员快速实现仿生设计目标。

关键词: 生物效应; 手功能康复; 功能创新; 仿生设计

中图分类号: TB472

Research on Bionic Design of Hand Functional Rehabilitation Products Driven by Biological Prototype

WANG Nianwen^{1,2} ZHANG Lijie^{3,4} BI Yifei⁵ LI Yuanhui² LI Xin⁵ QIN Wenjing²

(1. School of Mechanical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

2. School of Arts and Design, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

3. Key Laboratory of Advanced Forging & Stamping Technology and Science (Yanshan University), Ministry of Education of China, Qinhuangdao 066004;

4. Hebei Provincial Key Laboratory of Heavy Machinery Fluid Power Transmission and Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;

5. College of Art, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao 066004)

Abstract: In the field of hand function rehabilitation product design, the collaborative realization mode of biological functions is used to guide the solution of product functions, so as to improve the applicability of product design and the efficiency of cross domain transformation. Based on the spiral path of bionic design and the need of hand rehabilitation, the functional tree model is established, and the problem is biologized. The Asknature knowledge base is used to search and screen biological prototypes. According to the analogy principle, the biological function system and the technical function system are analyzed, and the similarity calculation is carried out to obtain the effective bionic object, which biological effect is analyzed. Through the analogical model of bio-product system, the mapping relationships of morphology structure, behavior principle and movement environment are obtained. Through the product function solving model, the biological prototype can be imitated and copied on the functional realization level. After the biological prototype is determined based on the functional similarity, the biological effect features are extracted, which can improve the functional structure of hand function rehabilitation product and guide its design. The cross-domain functional combination is

* 2022 年度河北省社会科学基金资助项目(HB22YS038)。20221114 收到初稿, 20230427 收到修改稿

realized to help designers quickly realize the design goals in bionic design.

Key words: biological effect; hand function rehabilitation; function innovation; bionic design

0 前言

根据我国永久性功能障碍等级分类可知,人类上肢功能在身体功能中占比超过 50%,而手部功能又在上肢功能中占据重要地位^[1]。根据患者的康复需求,引导其积极主动参与手功能康复治疗十分关键。由于手部关节单元较多,受到损伤康复情况及心理状态的不同程度影响,手功能康复治疗较为困难。研究人员开始设计手部康复产品,实现安全舒适、方便适配的辅助康复治疗目的。JIANG 等^[2]对鱼骨结构进行仿生,设计了一款依靠节状结构实现长度变化与角度弯转的软体康复机械手。HU 等^[3]创新性地设计了仿生螺旋状软体驱动器并将其安装到机械手的夹持器中,实现各种高难度抓取任务。董虎等^[4]结合软体仿生舌对各类需要多向运动的驱动器开展设计应用研究。仿生设计的核心就是获取生物灵感的产品功能求解过程,即可利用从生物领域获取的知识来克服手功能康复设计中较难解决的问题,将生物效应信息转化成功能良好的产品,实现准确、安全、高效的康复目标。陈晨^[5]借用 AskNature 生物原型库,分析产品创新设计原理,提出了提取生物信息蕴含知识的方法;曹国忠等^[6]在 TRIZ 理论影响下,建立了以生物效应为基础的产品创新设计模式;刘伟等^[7]从生物耦合的角度出发,提出了多生物效应形式以改善设计的效率。分析总结出生物原型指导仿生设计是目前最系统、便利的实践探索。但多数设计流程都以某种生物特征为核心,进行技术转化最终形成产品,受设计者的能力等因素影响较大。由此看来将生物原型特征更好地为仿生设计所用,解决实际问题,实现与实践水平相适应的仿生设计方法势在必行。因此,将生物原型特征中蕴涵的设计知识与信息,通过生物螺旋仿生路径迁移到目标手功能康复产品设计中,从问题分析层、仿生确定层、功能求解层入手,完成从设计问题到生物问题再到产品设计的转化。主要通过问题分析、信息检索、效应分析、功能实现、概念方案设计五大步骤,以功能树模型、生物-产品系统类比模型和功能求解模型为核心,构建生物原型驱动的手功能康复产品设计方案,从而实现跨领域映射,以生物功能协同实现模式获得总功能的最优解,将生物知识系统化地转变为设计问题的方案解,提升康复效率,提高康复产品功能仿生设计准确性。

1 设计问题生物化

1.1 生物螺旋仿生设计分析

生物效应模式是一种抽象化反映实现生物机能的途径、动作或原理的方法^[8]。在生物效应模式分析中,挖掘生物功能间的输入、输出关系,促使产品功能系统更有效地与生物功能系统进行模仿、替换。将其应用到仿生设计螺旋模型中,提出基于生物原型的仿生设计螺旋路径,建立生物领域和设计领域之间的基本联系。如图 1 所示,在“生物化”阶段进行产品功能定位与转化;在“发现”环节通过生物原型库进行功能分级检索并优选;在“抽象”环节将分析后的生物效应模型转化为产品功能模型;在“仿真”环节开展方案设计与操作评估。

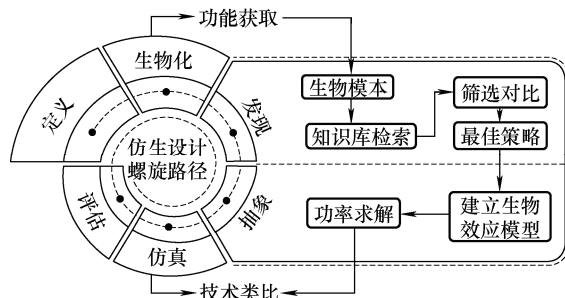


图 1 生物仿生设计螺旋路径

1.2 生物化问题求解模型

“生物化”环节是仿生设计螺旋路径的中心步骤,通过向自然界提问:“生物是如何实现特定功能?”的方式转化并实现生物问题求解,由此促生了将设计问题转化为功能关键词的求解模型,为从生物效应知识库检索,并匹配生物效应策略实现设计求解奠定基础。如图 2 所示,以手功能康复需求为例,针对设计问题,分析自然生物如何通过自身特性满足该环境功能需求,实现生物化问题求解。

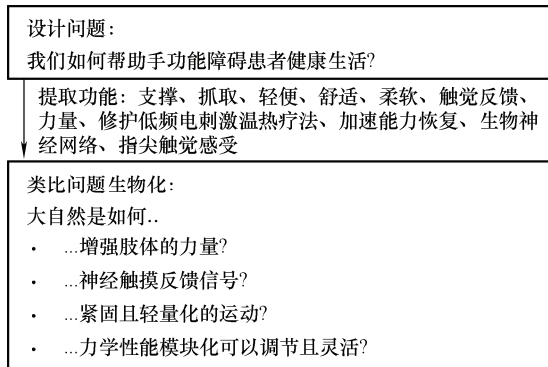


图 2 生物化问题求解模型

2 生物功能协同实现模式

2.1 类比推理与相似性分析

类比推理是对两种不同的事物间的相互关系进行探究和分析,并从其特性出发,推导出与其相似的其他事物的相应属性^[9]。生物效应在仿生设计中的应用,即代表将生物系统类比推理到技术系统的过程,技术系统则包括由总功能分解的各级子功能。

在设计问题的分析中可以“向大自然”寻求建议,采用类比推理的方法解决生物-产品之间的衔接和替换问题。通过模糊数学计算,得到生物系统与技术系统间的相似性,指导手功能康复产品功能设计,以提高生物原型在仿生设计中的利用率^[10]。

设生物功能系统为 A , 由 $\{a_1, a_2, a_3, \dots, a_M\}$ 构成; 技术功能系统为 B , 由 $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_N\}$ 构成, 即

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_M\}$$

$$B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_N\}$$

由上述可知, A 和 B 分别由 M 、 N 个要素组成, 设系统 A 与系统 B 之间共有 L 个相似要素, 并称其集合为相似元 U , $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_L\}$ 。可以通过相似度 $Q_{(A,B)}$ 代表两系统间的相似程度, 且 $0 < Q_{(A,B)} < 1$, 相似程度与取值成正比, 取值越大相似程度越高, 计算公式如下

$$\begin{aligned} Q_{(A,B)} &= \frac{L}{M+N-L} \sum_{i=1}^L (\beta_1 q(u_1) + \beta_2 q(u_2) + \dots + \beta_L q(u_L)) \\ &= \frac{L}{M+N-L} \sum_{i=1}^L (\beta_i q(u_i)) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, β 为权重系数, $0 \leq \beta_i \leq 1$, 且 $\sum_{i=1}^L \beta_i = 1$; $q(u_i)$ 为相似要素相似度。

系统 A 、 B 之间的相似要素集合为 $U = \{u_1, u_2, u_3, \dots, u_L\}$ 。假设 u_{ij} 表示相似要素 u_i 和 u_j 相比的重要程度, 故判断矩阵 P 可表示为

$$P = \begin{bmatrix} u_{11} & u_{12} & \dots & u_{1j} & \dots & u_{1l} \\ u_{21} & u_{22} & \dots & u_{2j} & \dots & u_{2l} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{i1} & u_{i2} & \dots & u_{ij} & \dots & u_{il} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ u_{l1} & u_{l2} & \dots & u_{lj} & \dots & u_{ll} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在矩阵 P 中 $u_{ii} = 1$, $u_{ij} = u_{ji}^{-1}$, $u_{ij} = (1, 2, \dots, 10)$, 其取值越小说明 u_i 相对于 u_j 越不重要。求解矩阵 P

的最大值特征 λ_{\max} 及其所对应的特征向量 $G = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 将 G 归一化处理得到代表相似元权重值的向量 $\beta_i = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_i\}$ 。

在功能系统 A 、 B 之间的每个相似要素都由多个相似特征构成, 任一特征的相似都可以形成两系统之间的相似^[11]。系统 A 、 B 中的相似要素分别为 a_i 、 b_i 。设 a_i 的 m 个特征构成集合 a , b_i 的 n 个特征构成集合 b 。 a_i 、 b_i 之间有 l 个相似特征构成集合 a 、 b 的交集 u 。由相似特征理论及选定方法可知, 将第 i 个相似要素中 l 个相似特征的相似度记为 $r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{il}$, 选定规则如表 1 所示。由于不同的相似特征对整个系统的相似程度的重要程度不同, 对不同特征的权重分别赋值, 表示为 d_1, d_2, \dots, d_l 。

表 1 r_{ij} 的取值

r_{ij}	含义
0~0.2	两个特征相似程度极低
0.2~0.4	两个特征相似程度较低
0.4~0.6	两个特征相似程度适中
0.6~0.8	两个特征相似程度较高
0.8~1.0	两个特征相似程度极高

相似性要素的计算公式为

$$q(u_i) = \frac{l}{m+n-l} \sum_{j=1}^l d_j r_{ij} \quad (3)$$

式中, d_j 为权重系数, $0 \leq d_j \leq 1$, 且 $\sum_{j=1}^l d_j = 1$, m 、 n 为相似要素 a_i 和 b_i 的特征数量, l 为相似特征的数量, r_{ij} 代表相似特征的相似值。

在公式(1)中, $L/(N+M-L)$ 为系统 A 、 B 之间相似要素的数量 L 对相似度的影响程度, $\beta_i q(u_i)$ 为功能系统 A 、 B 的相似要素被赋予的权重值对相似程度的影响^[12]。因此, 当两系统 A 、 B 中要素数量一定时, 相似要素数量越多, 系统间的特征相似程度越大, 两系统越相似。

2.2 生物-产品功能系统类比模型

生物效应与产品功能之间的转换是解决问题的核心。可以利用相似性分析确定仿生原型及其生物效应, 通过对生物效应的模仿和替换实现产品的技术功能, 从而实现螺旋仿生设计过程中“抽象”与“仿真”的目的, 解决实际设计问题。行为可以代表产品系统内联系和变化的过程, 更是结构与功能的桥梁^[13]。如图 3 所示, 以解决方案源与设计目标源之间的相似性为媒介, 通过归纳可以得到, 从形态结构、行为原理、运动环境三个层面的映射关系,

明确生物原型与手功能康复目标产品功能的转换，进而保障仿生设计的有效性，提高手功能康复效率。

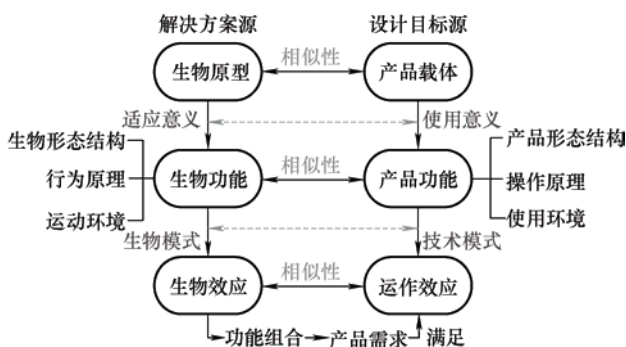


图3 生物-产品功能系统类比模型

2.3 基于多生物效应的功能求解模型

选取最优生物原型以及可用的功能技术，建立功能求解模型，帮助实现手部康复产品的不同功能^[14]。如图4所示，以生物效应为功能转化媒介，提取生物原型中存在的新功能，符合的进行置换，

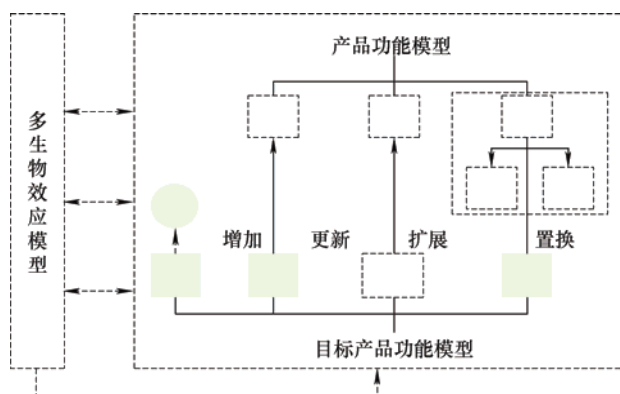


图4 基于多生物效应的功能求解模型

一般符合的可以增加、更新或扩展进行优化，实现手功能康复产品功能构建。完成了生物-产品系统之间的衔接和替换，将多生物功能特征进行多层次重构，提高手功能康复产品设计中功能实现效率，将生物原型与实际功能更好的结合，启发创新思维，从而引导具体方案设计。

3 手功能康复产品仿生设计流程

以多生物效应为实现途径，通过相似性计算与类比推理实现功能求解，获得生物原型驱动的手功能康复产品设计模式^[15]，其主要流程，如图5所示。问题分析层以生物化待解决的手功能康复问题为起点，进行问题分析与信息检索，将设计领域问题转入生物领域。针对不同康复阶段的不同需求程度，利用功能方法树规划设计路径，通过 AskNature 生物库工具，检索与目标产品相匹配的功能元；仿生确定层包括多效应信息的分析和提取，面对一定数量的相同功能的不同生物，通过生物功能与设计对象替代可行性原则、生物组织结构复杂性筛选原则、生物形态匹配可行性原则、生物功能优化性与连贯性原则，提取出面向设计问题的最佳效应模型；功能求解层则从生物领域重新返回设计领域，包括多生物效应转化、功能求解实现、概念设计，目的是将生物功能系统转换成可用的产品功能，启发仿生设计方案产生。

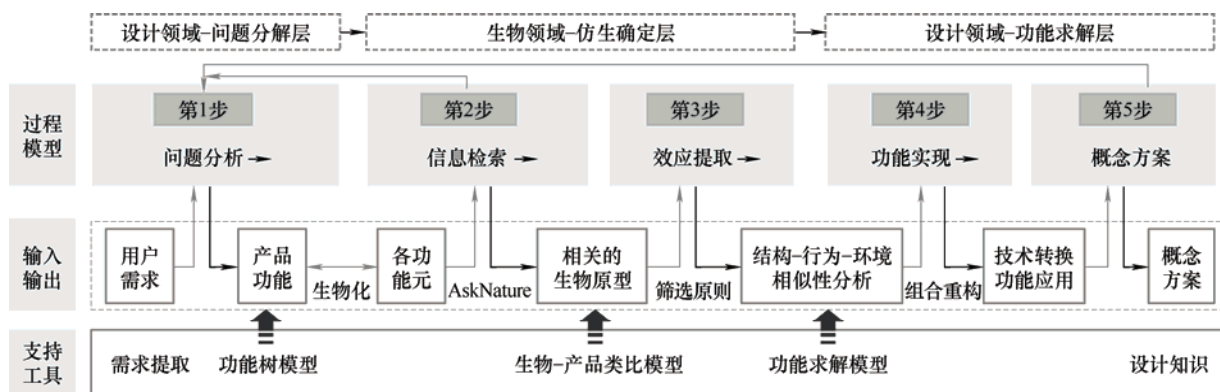


图5 生物原型驱动的手功能康复产品设计模式

4 实例流程构建

4.1 手部康复功能需求

手功能障碍主要特征体现为手关节僵硬、手

指不能正常收展弯曲、持握能力减弱等。结合手部生理结构功能与连续被动运动理论^[16]，分析可得出，影响有效抓握功能的因素包括：关节的灵活性、指关节的位置关系、手部的感觉输入等。通过对康复的目标、原则、途径对手功能康复周

期系统进行需求分析,如图 6 所示,提出具体设计

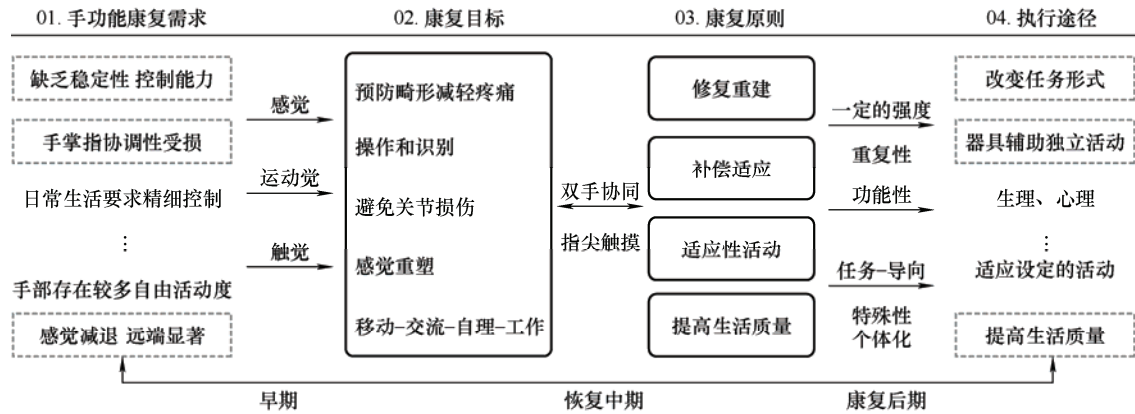


图 6 手功能康复周期系统需求整理

结合生物化问题转化与康复需求,确定手功能康复的总功能,并分层细化,完成功能元的分解并建立功能树,如图 7 所示,将总功能分解并提取功能关键词。

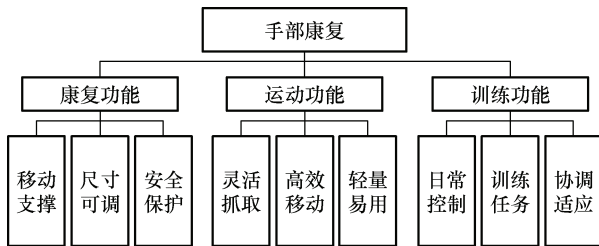


图 7 手部康复功能树分解

4.2 仿生目标确定

手功能康复的主要目的是重建保护支撑功能、恢复手部有效运动。可从关节的灵活性、手部的输入感觉等进行考虑,结合生物化过程,锁定功能关键词: <保护> + <支撑>、<变形> + <移动>等,将主要检索条件和次要检索条件分别输入,通过 Asknature 进行检索,得到海葵、象鼻等生物满足对应功能,如表 2 所示。

以象鼻的肌肉收缩效应为例分析可得:形态结构方面,象鼻由万条肌肉组成没有骨骼结构,从而能够灵活扭转或撑起重物,同时末端的敏感的神经也使象鼻具有手指般的触觉;行为原理方面,“静水压骨骼肌”是象鼻中负责运动的重要组织结构,主要是对不同的主动肌肉组织进行自主控制的差异性驱动,进而促成多样的行为模态,例如缩短、伸长、弯曲及扭转等,具有无与伦比的灵巧性;运动环境方面,象鼻不仅是用来了解身边环境的好工具,更能感知较远距离的环境。因此,基于原型筛选原则,可以匹配象鼻为优选原型。

表 2 生物效应平台分功能检索结果分析

所属层级	功能检索关键词	生物效应	生物属性	生物功能
I. 形态结构材质层	安全保护	穿山甲保护性啄木鸟海绵结构	缓冲外力避免损伤	抵御冲击控制形变
	提供支撑	仙人掌架提供结构稳固性	稳固性	增强稳固性
	保持连接	植物条状加固增强组织强度	系统协调	防止结构弯曲
	尺寸贴合	水母浮囊调整作用	减轻质量	调整适应
II. 生物行为原理层	变形弯曲	象鼻肌肉群收缩效应	力量控制	作用力
	轻量易用	乌龟壳由互锁鳞甲承受压力	稳固性透气吸收	拉紧/张力
	灵活抓取	海葵圆锥状触手灵活捕捉	防止触碰	运动协作
	高效移动	章鱼腕足独立运动精确控制	触觉感知	精准运动
III. 运动环境方式层	灵活控制	鱼尾鳍自动分开准确闭合	缓冲外力	灵敏感知
	感受反馈	蝎子触毛感受器高灵敏捕捉信号	适应行为	知觉信号交流
	平衡反应	双翼昆虫成对翅膀协同工作	自组织	身体意识
	协调适应	甲壳动物多个关节圆周运动	协调活动	平衡感方向感

4.3 多生物效应信息整合

象鼻作为大象行为表达的核心器官,在大象探索环境、社交、繁殖、游戏等多种活动中不同的动作和姿态表达着不同的内容。依靠象鼻内关节的结构和肌肉的收缩和舒张可以进行灵活的卷曲、旋转等动作。虽然象鼻整体较大,但是灵活的肌肉可以使象鼻前端实现聚拢、抓握等动作,从而拾起物体。

通过提取象鼻的生物效应,如图 8 所示,分析可得象鼻的三种肌肉纤维协同工作模式,提供力量、支撑和阻力,实现敏捷地弯曲和扭转。从形态结构、行为原理、运动环境三个方面对象鼻收缩效应系统与康复机械手功能系统进行相似性分析。

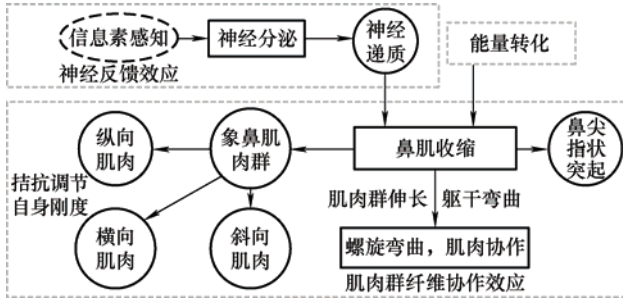


图8 象鼻生物效应

运用模糊数学中的相似性评价对其相似性进行数学量化。设象鼻和康复机械手的相似性为 Q ，相似元分别为形态结构、行为原理、运动环境，相似元 U 的集合为

$$U = \{u_1, u_2, u_3\} = \{\text{形态结构, 行为原理, 运动环境}\}$$

因此， M 、 N 、 L 的取值均为 3，由式(1)可知

$$Q = \frac{L}{M + N - L} \sum_{i=1}^L (\beta_1 q(u_1) + \beta_2 q(u_2) + \dots + \beta_L q(u_L))$$

$$= \frac{L}{M + N - L} \sum_{i=1}^3 (\beta_1 q(u_1))$$

取各相似元集合 $U = \{u_1, u_2, u_3\}$ 的权重值为 β ， $\beta = \{\beta_1, \beta_2, \beta_3\}$ ，根据式(2)判断矩阵，建立相对权重值判断矩阵

$$p = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 5 \\ 1/5 & 1 & 1 \\ 1/5 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

根据计算得出，最大特征值 $\lambda_{\max} = 3$ ，所对应的特征向量 $G = \{0.962\ 3, 0.192\ 5, 0.192\ 5\}$ ，进行归一化处理后的权重值 $\beta = \{0.714\ 2, 0.142\ 9, 0.142\ 9\}$ 。

对于相似要素形态结构、行为原理和运动环境的特征不再细分，故式(3)中 m 、 n 、 l 、 d_j 取值均为 1，根据式(3)对相似度进行计算，可以得出

$$q(u_i) = r_{ij}$$

根据象鼻与康复机械手两个系统间的相似要素进行判断，确定象鼻和康复机械手之间相似元的相似度为 $q = \{0.8, 0.8, 0.6\}$ 。联立上式得出象鼻和康复机械手之间的相似度表示为

$$Q = 0.714\ 2 \times 0.8 + 0.142\ 9 \times 0.8 + 0.142\ 9 \times 0.6 = 0.771\ 42$$

通过相同方法分别计算海葵圆锥状空中触手灵活捕捉效应、鱼尾鳍的自动卷缩效应、蝎子蛊毛感受器捕捉信号高灵敏效应的相似性分别为 0.77、0.72、0.69，如上表 3 所示。因此，选用相似度最高的象鼻收缩效应系统及其具体功能，开展设计。

表3 其他生物效应相似性计算结果

效应模式	海葵圆锥状触手灵活捕捉	鱼尾鳍自动卷缩	蝎子蛊毛感受器
功能层面	形态结构材质	生物行为机理	环境运动方式
相似度	0.77	0.72	0.69

4.4 功能求解

分析象鼻生物效应模型可以得出：象鼻的运动依靠的是其内部强大的肌肉群，其中轴向和横向的肌肉纤维可以调节象鼻的硬度，多种肌肉激活方式的组合使象鼻实现灵活的卷曲动作。周向与倾斜的肌肉纤维能弯曲和扭转。基于上述分析过程，获得手功能康复产品的功能模型，如图 9 所示。

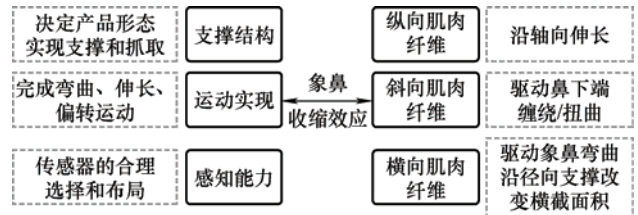


图9 功能实现及技术转化

基于产品功能技术的类比推理，在手功能康复产品功能设计层进行重构，如图 10 所示。由肌肉收缩实现转动弯曲，而弯曲程度也决定了产品的主要形态。所以，通过提供驱动力获得适应的抓握力，手功能康复产品在满足基本的移动支撑等功能的同时，要保证人机结构的匹配性、穿戴尺寸的调节性、操作范围的约束性、产品形态的安全性，避免关节损伤，引导康复；结合象鼻弯曲、伸长、偏转功能来引导手部运动功能的康复，协助实现抓取、握拳等基本操作并进行运动采集，从而达到手部康复的灵活性；通过带动手指精细运动训练逐步实现手部康复，将传感垫片合理布局，使手功能康复闭环系统实现成为可能。

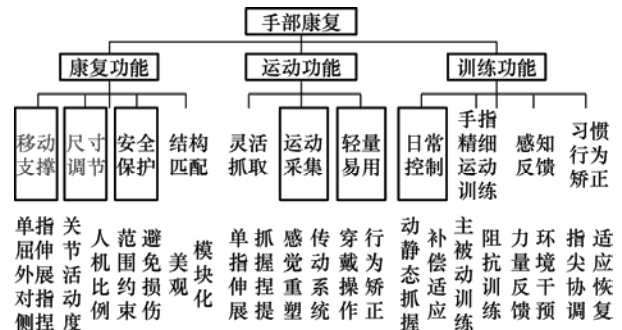


图10 手部康复功能重构

4.5 最终方案

在重构手部康复功能的基础上进行康复机械手仿生设计实践，从而实现生物原理的转化与应用。

以成年男性的手部特征作为参考并结合人机工程学理论进行设计方案构建,如图11、12所示,主要表现形式包括:形态结构方面,提取象鼻肌肉延伸形态及褶皱型组织结构,通过软体弹性空间进行尺寸调节,实现对于不同手部患者的产品适配,并提高操作自由度,从而使手指更加灵活;行为原理方面,提取象鼻的肌肉柔性及灵活控制性,采用气动驱动康复机械手,提供更好的力学性能,保证产品安全稳固,轻量舒适;运动原理方面,根据象鼻感官特征及重复抓取的运动环境特点,在康复系统中设计覆盖视觉、听觉、触觉的多通道感知模块,帮助患者顺利完成康复训练,增强日常生活中的活动能力与协调性,重拾生活信心。

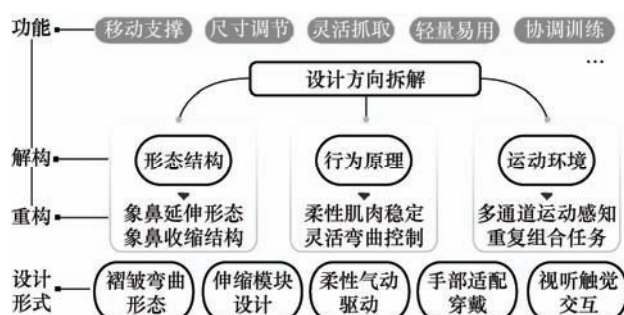


图11 手功能康复机械手设计方案构建

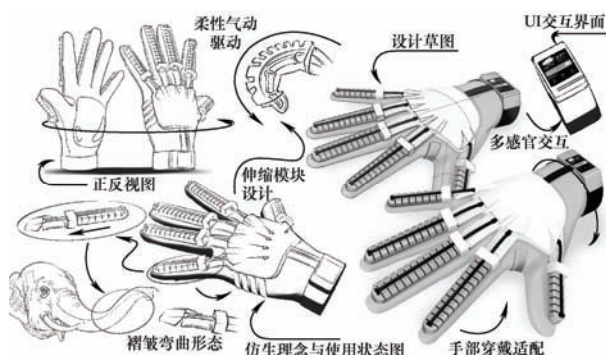


图12 手功能康复机械手设计草图及效果展示

5 结论

以生物原型分析和转化为核心思维,结合仿生设计螺旋路径,从问题分析层、仿生确定层、功能求解层三部分层层递进,得出生物原型驱动的手功能康复设计方法,为手功能康复产品设计提供崭新视角。通过挖掘用户不同阶段的手功能需求并将其转化到生物领域的过程,获取可应用于目标功能的最优生物原型,着重考虑了生物功能系统与技术功能系统之间的对应关系,从形态结构、行为原理、运动环境三个方面进行相似度计算分析,利用类比

推理来实现生物与产品之间的功能转化。进而打破了设计师对仿生设计的传统认知,借由生物原型驱动方案设计,一定程度上提高了手功能产品的康复效率与功能实现的创新性。

参考文献

- [1] 王年文,刘蕴华.基于FBS模型与可拓变换的手部康复产品设计方法[J].机械设计,2020,37(10):139-144.
WANG Nianwen, LIU Yunhua. Design method of hand rehabilitation products based on FBS model and extension transformation[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(10): 139-144.
- [2] JIANG Yongkang, CHEN Diansheng, LIU Pengyou, et al. Fishbone-inspired soft robotic glove for hand rehabilitation with multi-degrees-of-freedom [C] //2018 IEEE International Conference on Soft Robotics, April 24-28, 2018, Livorno: 2018 IEEE International Conference on Soft Robotics, 2018: 394-399.
- [3] HU Weiping, ALICI G. Bioinspired three-dimensional-printed helical soft pneumatic actuators and their characterization[J]. Soft Robotics, 2020, 7(3): 267-282.
- [4] 董虎,林苗,顾苏程,等.多向气动驱动器软体仿生舌弯曲状态的研究[J].北京航空航天大学学报,2019,45(9):1882-1893.
DONG Hu, LIN Miao, GU Sucheng, et al. Motion characteristics of soft bionic tongue based on multi-directional pneumatic actuator[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45(9): 1882-1893.
- [5] 陈晨.生物信息驱动的产品概念设计方法及关键技术研究[D].成都:四川大学,2021.
CHEN Chen. Research on conceptual design methods and key technologies of products driven by bioinformatics[D]. Chengdu: Sichuan University, 2021.
- [6] 曹国忠,张曙,解秋蕊.基于冲突解决理论的产品造型设计方法研究[J].包装工程,2018,39(14):1-7.
CAO Guozhong, ZHANG Shu, XIE Qiurui. Research on product modeling design method based on conflict resolution theory[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(14): 1-7.
- [7] 刘伟,曹国忠,檀润华,等.多生物效应技术实现方法研究[J].机械工程学报,2016,52(9):129-140.
LIU Wei, CAO Guozhong, TAN Runhua, et al. Research on implementation method of multi-biological effect technology[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(9): 129-140.

- [8] 刘晓敏, 王建辉, 李娇蓉, 等. 基于生物原型的产品创新设计[J]. 中国工程机械学报, 2017, 15(6): 504-512.
LIU Xiaomin, WANG Jianhui, LI Jiaorong, et al. Product innovative design based on biological prototype[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2017, 15(6): 504-512.
- [9] 罗仕鉴, 张宇飞, 边泽, 等. 产品外形仿生设计研究现状与进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(21): 138-155.
LUO Shijian, ZHANG Yufei, BIAN Ze, et al. Status and progress of product shape bionic design[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(21): 138-155.
- [10] 王年文, 陈明含, 谭晓萌, 等. 坐式下肢康复训练机器人人机舒适度设计[J]. 包装工程, 2021, 42(20): 125-131.
WANG Nianwen, CHEN Minghan, TAN Xiaomeng, et al. Man-machine comfort design of seated lower limb rehabilitation training robot[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(20): 125-131.
- [11] 刘成浩. 基于 TRIZ 与仿生学的创新设计方法研究[D]. 济南: 济南大学, 2019.
LIU Chenghao. Research on innovative design method based on TRIZ and bionics [D]. Jinan: Jinan University, 2019.
- [12] 贾丽臻, 于菲, 檀润华, 等. 基于改进 SBF 模型的类比设计过程研究[J]. 机械设计, 2018, 35(11): 22-30.
JIA Lizhen, YU Fei, TAN Runhua, et al. Analogy design process research based on improved SBF model[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(11): 22-30.
- [13] 徐悬, 刘键, 严扬, 等. 智能化设计方法的发展及其理论动向[J]. 包装工程, 2020, 41(4): 10-19.
XU Xuan, LIU Jian, YAN Yang, et al. Development and theoretical trend of intelligent design methods[J]. Packaging Engineering, 2020, 41 (4): 10-19.
- [14] 赵超凡, 曹国忠, 康欢, 等. 潜在需求驱动的产品创新设计方法[J]. 包装工程, 2018, 39(14): 34-38.
ZHAO Chaofan, CAO Guozhong, KANG Huan, et al. Product innovative design method driven by potential demand[J]. Packaging Engineering, 2018, 39(14): 34-38.
- [15] 梁尧尧. 生物效应驱动的防护辅具设计方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2020.
LIANG Yaoyao. Research on the design method of protective aids driven by biological effects[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2020.
- [16] 刘冬, 王明昊, 毕聪, 等. 刚软结合可穿戴手部康复装置设计[J]. 中国机械工程, 2021, 32(8): 930-937.
LIU Dong, WANG Minghao, BI Cong, et al. Design of wearable hand rehabilitation device combining rigid and soft[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(8): 930-937.

作者简介: 王年文, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为设计形态构型学、智能装备与康复辅具设计、产品视觉认知与信息图谱。

E-mail: wangnianw@ysu.edu.cn

张立杰(通信作者), 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机器人学、并联机构学、液压测控技术。

E-mail: ljzhang@ysu.edu.cn