

# 仿生并联眼动机构多目标优化设计

程元皓, 王孙安, 于德弘

(西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 针对低空空域视觉监控系统需同时保证大范围搜索和对目标持续平滑跟踪的要求, 依据仿生原理, 设计了一种模拟人类眼外肌功能的仿生并联眼动机构构型. 为克服当前并联眼动机构多采用单目标优化方法而无法保障动平台倾角及运动精度、机构灵巧度、运动传递性能等运动性能同时取优的问题, 在安装空间、驱动件尺寸、铰链偏角等约束条件下, 采用改进非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 优化机构的结构参数. 根据优化得到的结构参数搭建了实验样机. 实际测量结果表明, 所设计的机构能够在动平台最大倾角、综合运动性能方面取得较为理想的效果, 动平台倾角可达  $55.94^\circ$ , 精度可达  $0.01^\circ$ , 优于人类视觉系统及相关研究, 满足低空空域监控需求.

**关键词:** 仿生原理; 眼外肌; 并联眼动机构; 多目标优化; 改进非支配排序遗传算法

中图分类号: TP242.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-02-0176-06

## Multi-objective Optimization Design of a Bionic Parallel Oculogyric Mechanism

CHENG Yuanhao, WANG Sun'an, YU Dehong

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** To ensure requirements of wide search range and smooth and continuous target-tracking in the low-altitude airspace visual monitoring system, a bionic parallel oculogyric mechanism is designed to simulate the function of human extraocular muscles according to the bionic principle. Most of the existing parallel oculogyric mechanisms adopt the single-objective optimization, which can't simultaneously optimize the dip angle of the moving platform and the motion performances including the motion precision, the mechanism dexterity and the motion transmission performance. In order to overcome the problem, non-dominated sorting-based genetic algorithm-II (NSGA-II) is used to optimize the structural parameters of the mechanism under the constraints of the installation, driver size and hinge angle. An experimental prototype is developed according to the optimized structural parameters. The actual measurement results show that the mechanism designed can achieve satisfactory results in terms of the maximum dip angle and the integrated motion performance of the moving platform, and the dip angle of  $55.94^\circ$  and the precision of  $0.01^\circ$  are realized by the moving platform, which are better than the human vision system as well as related research, and also meet the needs of low-altitude airspace monitoring.

**Keywords:** bionic principle; extraocular muscle; parallel oculogyric mechanism; multi-objective optimization; NSGA-II (non-dominated sorting-based genetic algorithm-II)

## 1 引言 (Introduction)

低空空域的开放对低空空域安全监管提出了更高的要求. 视觉监控因抗电磁干扰和地形影响能力强、成本低、目标识别能力强、测角精度高, 成为雷达在低空空域监控的有效补充. 为适应低空空域监控范围大、目标相对较远 (几百甚至上千米) 等特点, 视觉监控系统应同时具备较大的视野和较高的运动控制精度, 同时为便于运输、安装, 系统整体尺寸也不宜太大. 视觉监控系统在利用机器视觉感知外部环境信息的过程中, 较大的视野有利于获

取更多的信息. 机器视觉系统中的摄像机是通过模仿脊椎动物视觉成像系统设计的, 而脊椎动物眼球在眼外肌驱动下可扩大眼球视野并平滑改变视觉注意点. 因此, 利用仿生原理, 通过模拟脊椎动物眼外肌功能设计眼动机构, 以实现监控摄像机的大范围、高精度转动, 从而满足低空空域视觉监控系统需要成为首要选择.

目前, 随着现代医学及解剖技术的发展, 人类视觉系统的解剖结构已非常明晰, 国内外学者已对模仿人类眼外肌功能的眼动机构进行了不少研究. 在并联眼动机构构型设计方面: 拉瓦尔大学

Gosselin 等<sup>[1]</sup>研制了一种灵敏的 3 自由度正交球面并联眼动机构. 慕尼黑工业大学 Villgrattner 等分别搭建了利用航模电机通过连杆驱动摄像机转动的 2 自由度<sup>[2]</sup>及 3 自由度<sup>[3]</sup>并联眼动机构. 首尔国立大学 Bang 等<sup>[4]</sup>为使眼动模拟器能够安装在人形机器人的头部, 采用弯折杆件设计了一种改进的 3 自由度眼动并联机构. 阿尔伯塔大学 Wolfe 等<sup>[5]</sup>利用记忆合金设计了 2 自由度并联眼动机构. 上海大学罗均、谢少荣团队分别研制了改进 3 自由度球面并联眼动机构<sup>[6-7]</sup>、超声波电机驱动的 3 自由度并联眼动机构<sup>[8]</sup>以及 3 自由度混合驱动柔索并联眼动机构<sup>[9]</sup>. 浙江大学王宣银等<sup>[10]</sup>利用 6 根气动肌肉模拟人类的 6 根眼外肌, 实现摄像机的 3 自由度转动. 台湾成功大学李毅超等<sup>[11]</sup>提出了一种利用 2 个电机通过柔性杆件驱动动平台动作的 2 自由度并联眼动机构. 在并联眼动机构结构参数优化方面: Gosselin 等<sup>[1]</sup>根据其提出的全局灵巧度指标, 利用解析法优化了该机构的结构参数, 以使得机构能够获得最好的全局精度. Villgrattner 等<sup>[3]</sup>以最大工作空间体积比为优化目标, 利用隐式滤波约束优化算法对并联眼动机构的结构参数进行优化. 罗均、谢少荣团队<sup>[12-13]</sup>以雅可比矩阵最大条件数取值最小为优化目标, 利用步长法对并联眼动机构的结构参数进行优化, 以期机构的最差灵巧度及动态性能能够满足设计要求.

综上可知, 国内外学者虽在并联眼动机构的构型设计及结构参数优化方面做出了许多卓有成效的工作, 但这些研究往往是针对某一特定的应用背景开展的, 其眼动范围与精度不能满足低空空域大范围搜索和对目标高精度平滑跟踪的要求, 部分机构结构较为复杂, 对加工及装配要求较高. 此外, 这些研究基本是针对某一性能指标进行单目标优化. 而并联运动机构的动平台倾角、运动精度、机构灵巧度、运动传递性能等指标均是与机构结构参数及当前位形相关, 且难以同时取优<sup>[14]</sup>, 单目标优化算法不能解决本文设计的仿生并联眼动机构需要在这些方面同时取优的问题. 本文将设计一种结构简单、适用于低空空域监控的仿生并联眼动机构构型, 并采用多目标优化方法确定机构的结构参数.

## 2 仿生原理及并联眼动机构构型设计 (Bionic principle and configuration design of the parallel oculoeryic mechanism)

### 2.1 人类眼外肌结构功能及设计目标分析

人类眼外肌由上、下、内、外 4 条直肌以及上、下 2 条斜肌组成, 6 根眼外肌呈并联结构形式, 如

图 1 所示. 这 6 根眼外肌构成 3 组对抗肌可驱动眼球以眼球球心位置为中心, 绕水平、竖直、视轴 3 个轴线转动, 其中绕水平、竖直轴的旋转角度可达  $\pm 38^\circ$ <sup>[15]</sup>, 眼动精度约为  $0.02^\circ$ <sup>[16]</sup>. 眼外肌的并联结构形式在扩大眼睛视野的同时, 能够提高眼球转动的精度、稳定性和快速性. 因此, 高精度的眼动机构多采用并联结构.

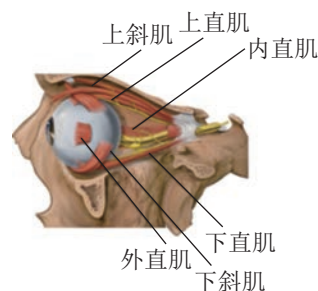


图 1 人类眼外肌解剖结构示意图

Fig.1 Anatomical structure of human extraocular muscle

低空空域监控要求视觉监控系统能够实现监控点上空低空空域的全方位无死角监控, 并且在发现目标时能够实现对目标的持续平滑跟踪. 采用鱼镜头虽能显著扩大摄像机视野、降低对眼动机构眼动范围的要求, 但图像畸变严重, 增加了图像处理的难度, 降低了系统的实时性. 鉴于本研究所采用监控摄像机的视角为  $75^\circ$ , 所设计的仿生眼动机构须保证摄像机光轴能绕任意水平轴在单方向有至少  $52.5^\circ$  的偏角. 因监控目标距离较远、飞行速度相对较慢, 为对目标的持续平滑跟踪且保证目标所成的像始终位于图像中心位置附近以减小畸变、提高测量精度, 视觉监控系统应具有  $0.05^\circ$  以上的运动精度.

### 2.2 机构构型确定及分析

通过对人类眼外肌结构功能及实际需求的分析, 本文所需的眼动机构应采用类似眼外肌的并联形式, 且至少应保证动平台能够实现绕动平台径向 2 条垂直轴的大范围、高精度转动. 因眼外肌只能提供拉力, 而电动缸既可以提供拉力, 又可以提供推力, 故可以采用少于 6 个电动缸模仿眼外肌的结构和功能. 电动缸作为执行器在保证机构运动控制精度的基础上, 能够可靠自锁以保证图像稳定. 此外, 电动缸的直线运动与由电动机通过摆杆、推杆驱动动平台的运动方式相比, 具有行程体积比大、速度/加速度平稳等优点. 因此, 本文采用少于 6 个电动缸并联的形式设计仿生并联眼动机构构型. 机床领域中应用较多的 tricept 机构<sup>[17]</sup>能够实现动平台绕任意水平轴的大范围、高精度转动, 但在转

动过程中动平台会随之发生摆动, 不利于对目标的持续平滑跟踪. 为利用其优点, 克服动平台摆动的缺点, 设计了如图 2 所示的“反 tricept”仿生并联眼动机构构型.

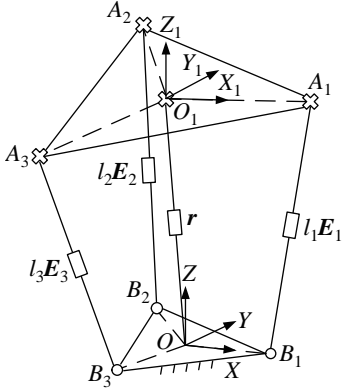


图 2 并联眼动机构构型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the parallel oculogyric mechanism

该构型主要由定平台 ( $B_1B_2B_3$ )、动平台 ( $A_1A_2A_3$ )、主动链  $l_iE_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 和从动链  $r$  组成. 3 根主动链通过球铰在  $B_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 处与定平台连接, 通过虎克铰在  $A_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 处与定平台连接. 从动链在正三角形  $B_1B_2B_3$  中心  $O$  处与定平台固定连接, 在正三角形  $A_1A_2A_3$  中心  $O_1$  处与动平台通过虎克铰连接. 主动链为直线运动, 由电动缸驱动, 从动链为花键副, 初始时刻应保证  $A_1A_2 // B_1B_2$ 、 $A_2A_3 // B_2B_3$ , 此时动、静平台平行. 如图 2 所示, 分别以  $O$ 、 $O_1$  为原点,  $OB_1$ 、 $O_1A_1$  为  $X$ 、 $X_1$  方向, 以平行于  $B_2B_3$ 、 $A_2A_3$  的方向为  $Y$ 、 $Y_1$  方向, 按照右手螺旋定则建立直角坐标系  $OXYZ$  和  $O_1X_1Y_1Z_1$ . 则调节主动链的长度可以使动平台绕  $O_1X_1$  和  $O_1Y_1$  方向转动, 通过合成 2 个方向的转动可以实现摄像机绕任意水平轴的转动, 以实现监控摄像机视野的大范围、高精度调节.

### 3 机构运动学分析 (Kinematic analysis of the mechanism)

仿生并联眼动机构构型的确定能够保证机构实现监控摄像机绕任意水平轴的转动, 但机构的结构参数、动平台的最大偏转角度以及调节过程的运动学性能尚未确定. 为确定合适的结构参数, 使得动平台倾角范围、运动精度、机构灵巧度、运动传递性能满足低空空域监控需求, 须建立机构运动学模型, 根据驱动件行程、铰链偏角及安装尺寸等约束, 对动平台倾角及运动精度、机构灵巧度、运动传递性能等运动性能指标进行多目标优化. 运动学分析过程如下.

#### 3.1 运动学建模

在单闭链  $O-B_i-A_i-O_1-O$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 中,  $O_1$  在  $OXYZ$  坐标系中的位矢  $r = (x \ y \ z)^T$  可表示为

$$r = B \cdot b(i) + l_{ai} \cdot E_{ai} - R \cdot M \cdot m(i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

其中,  $B \cdot b(i) = R_b \cdot (\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0)^T$  为定平台铰点在定坐标系下的位矢;  $R_b$  为定平台的半径;  $\theta_i = \frac{2}{3}\pi \cdot (i-1)$  为点  $B \cdot b(i)$ 、 $M \cdot m(i)$  在定、动坐标系下的位置角,  $i = 1, 2, 3$ ;  $l_{ai}$ 、 $E_{ai}$  分别为主动支链  $i$  的杆长和单位矢量;

$$R = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ \sin \alpha \cdot \sin \beta & \cos \alpha & -\sin \alpha \cdot \cos \beta \\ -\cos \alpha \cdot \sin \beta & \sin \alpha & \cos \alpha \cdot \cos \beta \end{bmatrix}$$

为动平台相对于定平台的旋转矩阵;  $\alpha, \beta$  分别为动平台绕  $X_1$ 、 $Y_1$  轴旋转的角度;  $M \cdot m(i) = R_m \cdot (\cos \theta_i, \sin \theta_i, 0)^T$  为动平台铰点在动坐标系下的位矢;  $R_m$  为动平台的半径.

此外,  $O_1$  在  $OXYZ$  坐标系中的位矢  $r$  还可表示为

$$r = l_c \cdot E_c \quad (2)$$

其中,  $l_c$  为从动链杆长,  $E_c = (\cos \alpha \cdot \sin \beta, -\sin \alpha, \cos \alpha \cdot \cos \beta)^T$  为从动链单位矢量.

#### 3.2 雅可比矩阵求解

为评价仿生并联眼动机构的运动学性能, 须构造操作空间速度与机构驱动关节空间速度关系. 式 (1) 两边对时间求导得

$$v = \dot{l}_{ai} \cdot E_{ai} + l_{ai} \cdot (\omega_{ai} \times E_{ai}) - \dot{R} \cdot M \cdot m(i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (3)$$

其中,  $v$  为  $O_1$  在定坐标系下的速度,  $\omega_{ai}$  为主动链的旋转角速度矢量.

式 (3) 两边同乘以  $E_{ai}^T$  得

$$E_{ai}^T \cdot v = \dot{l}_{ai} - E_{ai}^T \cdot \dot{R} \cdot M \cdot m(i), \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式 (2) 两边对时间求导得

$$v = J_1 \cdot v_m \quad (5)$$

其中,

$$J_1 = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cdot \sin \beta & -l_c \cdot \sin \alpha \cdot \sin \beta & l_c \cdot \cos \alpha \cdot \cos \beta \\ -\sin \alpha & -l_c \cdot \cos \alpha & 0 \\ \cos \alpha \cdot \cos \beta & -l_c \cdot \sin \alpha \cdot \cos \beta & -l_c \cdot \cos \alpha \cdot \sin \beta \end{bmatrix}$$

$$v_m = (\dot{l}_c, \dot{\alpha}, \dot{\beta})^T$$

令

$$\dot{R} \cdot M \cdot m(i) = J_2 \cdot v_m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (6)$$

则

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{R}_m \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & -s\beta \cdot c\theta_i \\ 0 & c\alpha \cdot s\beta \cdot c\theta_i - s\alpha \cdot s\theta_i & s\alpha \cdot c\beta \cdot c\theta_i \\ 0 & c\alpha \cdot s\theta_i + s\alpha \cdot s\beta \cdot c\theta_i & -c\alpha \cdot c\beta \cdot c\theta_i \end{bmatrix}$$

其中,  $c$  代表  $\cos$ ,  $s$  代表  $\sin$ .

由式 (4)、(6) 得

$$\mathbf{E}_{ai}^T \cdot \mathbf{v} = \dot{l}_{ai} - \mathbf{E}_{ai}^T \cdot \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{v}_m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

由式 (5)、(7) 得

$$\mathbf{E}_{ai}^T \cdot \mathbf{J}_1 \cdot \mathbf{v}_m = \dot{l}_{ai} - \mathbf{E}_{ai}^T \cdot \mathbf{J}_2 \cdot \mathbf{v}_m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

整理得

$$\dot{l}_{ai} = \mathbf{E}_{ai}^T \cdot (\mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2) \cdot \mathbf{v}_m, \quad i = 1, 2, 3 \quad (9)$$

则矩阵  $\mathbf{E}_{ai}^T \cdot (\mathbf{J}_1 + \mathbf{J}_2)$  即为雅可比矩阵  $\mathbf{J}$  的逆阵, 通过求逆可得到仿生并联眼动机构的雅可比矩阵  $\mathbf{J}$ .

#### 4 多目标优化 (Multi-objective optimization)

在运动学分析的基础上, 根据已有驱动电动缸的尺寸、铰链偏角及整体尺寸限制, 对仿生并联眼动机构动平台最大倾角及运动精度、机构灵巧度、运动传递性能等运动性能指标进行多目标优化, 即可确定动、定平台的半径及初始距离等结构参数, 进而完成仿生并联眼动机构的设计。

由文 [14] 的分析可知, 当并联运动机构的雅可比矩阵平均条件数越小时, 可以获得越好的运动精度、运动学灵巧度以及力和运动的传递性能。因此, 为了使所设计的并联眼动机构同时具备较大的倾角及良好的运动学性能, 本文将以雅可比矩阵平均条件数最小、动平台倾角最大作为目标进行多目标优化。为便于统一表述, 在列写目标函数时将取动平台倾角相反数的最小值。多目标优化的目标函数表示如下:

$$\min \mathbf{F} = \min \left[ \begin{array}{l} f_1 = \frac{\int_W \frac{\sigma_{J_{\max}}}{\sigma_{J_{\min}}} dW}{\int_W dW} \\ f_2 = -\theta \end{array} \right]$$

其中,  $f_1$  为机构雅可比矩阵平均条件数,  $W$  为仿生并联眼动机构的工作空间,  $\sigma_{J_{\max}}, \sigma_{J_{\min}}$  分别为雅可比矩阵  $\mathbf{J}$  的最大和最小奇异值,  $f_2$  为动平台倾角的相反数,  $\theta$  为动平台倾角。

仿生并联眼动机构动平台的运动主要受驱动件行程、铰链偏角及安装空间的约束。因花键副限制了动平台绕  $Z$  轴的转动, 故该机构在运动过程中不会发生内部干涉现象。由此得到优化问题的约束条件如下:

$$l_{a\min} \leq l_{ai} \leq l_{a\max}$$

$$\phi_{\min} \leq \phi_i \leq \phi_{\max}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$\varphi_{\min} \leq \varphi_i \leq \varphi_{\max}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$R_{b\min} \leq R_b \leq R_{b\max}$$

$$R_{m\min} \leq R_m \leq R_{m\max}$$

其中,  $l_{a\min}, l_{a\max}$  分别为主动链的最小和最大长度, 根据电动缸及铰链的尺寸参数确定这 2 个参数分别取 138 mm 和 188 mm;  $\phi_{\min}, \phi_{\max}$  分别为球铰的最小和最大偏角, 根据所选球铰此处分别取  $0^\circ$  和  $30^\circ$ ;  $\varphi_i$  为第  $i$  个球铰的偏角;  $\varphi_{\min}, \varphi_{\max}$  分别为虎克铰的最小和最大偏角, 根据所选虎克铰此处分别取  $0^\circ$  和  $60^\circ$ ;  $\phi_i$  为第  $i$  个虎克铰的偏角;  $R_{b\min}, R_{b\max}$  分别为定平台的最小和最大半径, 受安装位置限制, 此处分别取 20 mm 和 50 mm;  $R_{m\min}, R_{m\max}$  分别为动平台的最小和最大半径, 受安装位置限制, 此处分别取 20 mm 和 70 mm。

本文所进行的多目标优化主要是为了确定动、定平台半径及中心间距等结构参数, 故优化过程的决策变量为

$$\mathbf{X} = [R_b, R_m, h]$$

其中,  $h$  为动、定平台中心的距离。

在解决多目标优化问题方面, 不少学者是将多目标加权化为单目标优化问题求解, 虽求解过程比较简单, 但很难为各目标设定合适的权值。改进非支配排序遗传算法 (NSGA-II) [18] 由于采用改进的快速非支配排序及精英选择策略, 不需要任何参数调整, 根据拥挤距离确定比较算子, 所以能够高效地获取多目标优化的最优前沿。文 [18] 通过与其他多目标优化算法测试效果的对比, 证明了 NSGA-II 在多目标最优前沿搜索、解的多样性及解的均匀分布方面均具有非常好的特性, 且对于非约束及约束优化问题均有良好的寻优能力。此外, 文 [14] 中, NSGA-II 也成功运用于解决并联运动机构的结构参数优化问题, 且取得了良好的优化结果。因此, 本文将根据约束条件, 利用 NSGA-II 对目标函数进行多目标优化, 以求得合适的决策变量, 确定仿生并联眼动机构结构参数。

### 5 实验结果分析 (Analysis on experiment results)

本文采用 Matlab 进行优化运算, 在计算过程中, 种群个体取为 100 个, 交叉概率取 0.9, 变异概率取 0.1. 为保证算法能够计算得到最优前沿, 进化代数从 10 代起, 每隔 10 代取一次, 一直到 110 代. 为提高结果的可信度, 对每种进化代数均进行 10 次优化计算, 并根据前沿顺序与拥挤距离取出其中相对最优的前 100 个非支配解. 因每次运算得到的解基本上都存在差别, 为便于分析, 对不同进化代数的最终解分别进行多项式拟合. 为减小计算量, 提高效率, 降低拟合多项式的阶数, 将边缘明显不满足低空空域监控需求的解剔除, 进行五次多项式拟合, 拟合结果基本达到分析要求, 图 3 所示为进化代数为 60 代时的拟合效果.

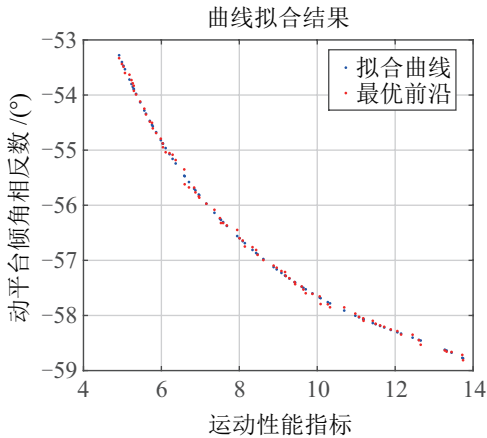


图 3 60 代最优前沿及拟合曲线对比图

Fig.3 Pareto front and fitting curve at the 60th generation

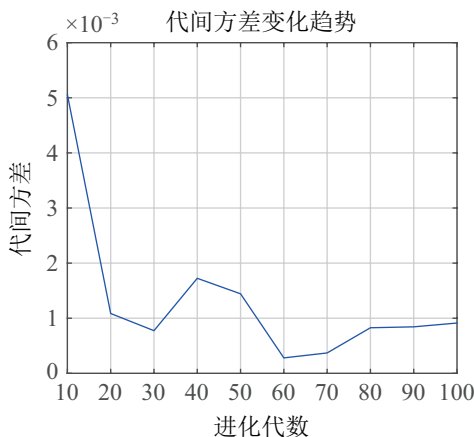


图 4 代间方差变化趋势图

Fig.4 Variance trend between the adjacent generations

为寻求优化的最优前沿, 取相邻 2 次迭代 (如 10 代与 20 代或 20 代与 30 代) 最终解的拟合曲线方差小于一定值作为搜索到最优前沿的依据, 代间

方差的变化趋势图如图 4 所示. 从图中可知, 从 20 代起相邻 2 次迭代的代间方差均小于 0.001 73, 甚至从 60 代起相邻 2 次迭代的代间方差均小于 0.001, 可以认为从 60 代起已经达到了最优前沿.

图 5 所示为 60 代与 100 代的最优前沿对比图, 从图中可以看出两者搜索到的最优前沿几乎重合, 更进一步验证了从 60 代起已经达到了最优前沿.

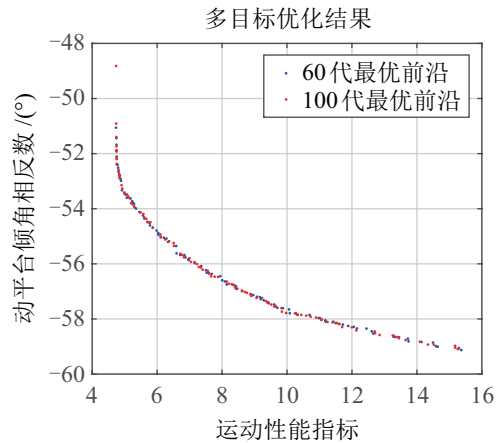


图 5 60 代与 100 代最优前沿对比图

Fig.5 Pareto front at the 60th and 100th generations

为满足低空空域监控需求, 根据图 5 所示的优化结果, 在动平台最大倾角与运动学性能指标之间折中取满意解, 确定仿生并联眼动机构动平台最大倾角为 56.11°, 此时机构的运动学性能指标为 7.28, 二者均优于文 [13] 中 48° 的动平台倾角及值为 10 的运动学性能指标. 在文 [12] 的优化结果中, 虽运动学性能指标达到了 7, 略优于本文结果, 但动平台最大倾角仅为 40°. 优化得到的结构参数为: 动平台半径为 36.1 mm, 定平台半径为 28.7 mm, 动、定平台中心间距为 174.3 mm.



图 6 实验样机

Fig.6 Experimental prototype

根据优化得到的结构参数搭建实验样机, 如图6所示, 利用陀螺仪进行实际测量的结果表明, 动平台最大偏角为 $55.94^\circ$ , 运动精度可达 $0.01^\circ$ . 分析原因可能是平台在加工、装配过程中存在误差引起的. 但此实测指标仍满足设计要求, 能够保证视觉监控系统对低空空域的大范围搜索及对目标的持续平稳跟踪的要求.

## 6 结论 (Conclusion)

依据仿生原理设计了一种结构简单的并联眼动机构构型, 在约束条件下利用NSGA-II对所设计的构型进行了运动范围、运动精度、机构灵巧度、运动传递性能的多目标优化, 确定了机构的动平台半径为 $36.1\text{ mm}$ , 定平台半径为 $28.7\text{ mm}$ , 动、定平台中心间距为 $174.3\text{ mm}$ . 实际测量结果表明动平台倾角可达 $55.94^\circ$ , 运动精度可达 $0.01^\circ$ , 均优于实际眼动指标及相关研究, 满足低空空域监控需求, 验证了所设计构型的合理性、运动学模型的准确性及多目标优化所确定结构参数的有效性.

## 参考文献 (References)

- [1] Gosselin C M, Hamel J F. The agile eye: A high-performance three-degree-of-freedom camera-orienting device[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 1994: 781-786.
- [2] Villgrattner T, Ulbrich H. Design and control of a compact high-dynamic camera-orientation system[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2011, 16(2): 221-231.
- [3] Villgrattner T, Ulbrich H. Optimization and dynamic simulation of a parallel three degree-of-freedom camera orientation system[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2010: 2829-2836.
- [4] Bang Y B, Paik J K, Shin B H, et al. A three-degree-of-freedom anthropomorphic oculomotor simulator[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2006, 4(2): 227-235.
- [5] Wolfe T B, Faulkner M G, Wolfaardt J. Development of a shape memory alloy actuator for a robotic eye prosthesis[J]. Smart Materials & Structures, 2005, 14(4): 759-768.
- [6] Li H Y, Luo J, Huang C J, et al. Design and control of 3-DoF spherical parallel mechanism robot eyes inspired by the binocular vestibule-ocular reflex[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2015, 78(3-4): 425-441.
- [7] Liu H L, Luo J, Wu P, et al. Symmetric Kullback-Leibler metric based tracking behaviors for bioinspired robotic eyes[J]. Applied Bionics and Biomechanics, 2015: No.714572.
- [8] Huang C J, Gu J, Luo J, et al. System design and study of bionic eye based on spherical ultrasonic motor using closed-loop control[C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 2685-2690.
- [9] 谢少荣, 刘思淼, 罗均, 等. 一种混合驱动柔索并联仿生眼的轨迹规划[J]. 机器人, 2015, 37(4): 395-402.  
Xie S R, Liu S M, Luo J, et al. Trajectory planning of a bionic eye using hybrid-driven cable parallel mechanism[J]. Robot, 2015, 37(4): 395-402.
- [10] Wang X Y, Zhang Y, Fu X J, et al. Design and kinematic analysis of a novel humanoid robot eye using pneumatic artificial muscles[J]. Journal of Bionic Engineering, 2008, 5(3): 264-270.
- [11] Lee Y C, Lan C C, Chu C Y, et al. A pan-tilt orienting mechanism with parallel axes of flexural actuation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(3): 1100-1112.
- [12] Xie S R, Li S P, Huang J J, et al. Structural parameter optimization for 3-DOF spherical parallel mechanism, binocular stereo[J]. Information Technology Journal, 2012, 11(7): 859-867.
- [13] 李超, 谢少荣, 李恒宇, 等. 基于参数优化的球面并联机构仿生眼设计[J]. 机器人, 2010, 32(6): 781-786.  
Li C, Xie S R, Li H Y, et al. Design of bionic eye based on spherical parallel mechanism with optimized parameters[J]. Robot, 2010, 32(6): 781-786.
- [14] Kelaiaia R, Company O, Zaatri A. Multiobjective optimization of parallel kinematic mechanisms by the genetic algorithms[J]. Robotica, 2012, 30(5): 783-797.
- [15] Laschi C, Patane F, Maini E S, et al. An anthropomorphic robotic head for investigating gaze control[J]. Advanced Robotics, 2008, 22(1): 57-89.
- [16] Brunstetter T J, Mitchell G L, Fogt N. Magnetic field coil measurements of the accuracy of extreme gaze ocular fixation[J]. Optometry and Vision Science, 2004, 81(8): 606-615.
- [17] Pond G, Carretero J A. Dexterity measures and their use in quantitative dexterity comparisons[J]. Meccanica, 2010, 46(1): 51-64.
- [18] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

## 作者简介:

程元皓 (1987-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人仿生技术, 机器人控制.

王孙安 (1957-), 男, 博士, 教授. 研究领域: 机器人仿生技术, 机器人控制.