

# 基于差分进化的球面并联机构仿生眼参数优化\*

李树平<sup>1,2</sup> 谢少荣<sup>1</sup> 程军<sup>2</sup> 李恒宇<sup>1</sup> 李超<sup>1</sup> 罗均<sup>1</sup>

(1. 上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072; 2. 河南理工大学机械与动力工程学院, 焦作 454000)

**【摘要】** 确定了仿生眼的目标工作空间,并以雅可比矩阵条件数最大值定义了最差灵巧度。利用差分进化的全局寻优能力对最差灵巧度的最大值进行优化,采用动态缩放因子解决优化过程中的早熟问题,增强了全局搜索能力。在满足仿生眼特殊结构要求并使目标工作空间内任意姿态都具有较好灵巧度的情况下,确定了合理的结构参数。最后实验表明参数优化后的仿生眼实物很好地满足了设计要求。

**关键词:** 球面并联机构 仿生眼 参数优化 灵巧度 差分进化

**中图分类号:** TH112; TB17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)11-0189-06

## Parameter Optimization for Spherical Parallel Mechanism Bionic Eye Based on Differential Evolution

Li Shuping<sup>1,2</sup> Xie Shaorong<sup>1</sup> Cheng Jun<sup>2</sup> Li Hengyu<sup>1</sup> Li Chao<sup>1</sup> Luo Jun<sup>1</sup>

(1. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China

2. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

### Abstract

The target working space of bionic eye was firstly determined. The worst dexterity for bionic eye with the maximum condition number of Jacobian matrix was defined. Then, a differential evolution (DE) algorithm was used to optimize the maximum of the worst dexterity index. Dynamic scaling factor was determined according to the overcome premature evolution and enhance the probability of finding global optimum. Reasonable structural parameters were chosen in the case of satisfying the special requirements of bionic eye structure and making arbitrary posture dexterity of target working space better. Finally, the experimental results show that bionic eye with the optimized parameters are good coinciding with the design requirements.

**Key words** Spherical parallel mechanism, Bionic eye, Parameter optimization, Dexterity, Differential evolution

### 引言

到目前为止,大多数仿生眼只能实现一维或二维的转动,缺少绕视轴的自旋<sup>[1-4]</sup>。球面并联机构可实现球面3自由度转动<sup>[5]</sup>,该运动特点恰好与眼球运动特点相同,且它们的结构和驱动形式都十分相似;另外球面并联机构具有结构紧凑、运动部分质量轻、动态性能好、速度快和精度高等优点,这也正

好与仿生眼要求的特点相吻合。以往球面并联机构设计多采用尺度综合法通过一系列假设或约束对全域性能指标进行优化得到设计参数<sup>[5-10]</sup>,而应用差分进化<sup>[11]</sup>算法对球面并联机构结构参数进行优化设计尚未见报道。

本文在目标工作空间(设计要求的工作空间)内,对1范数、2范数、F范数和无穷范数下雅可比矩阵条件数的最大值进行对比分析,定义最差灵巧

收稿日期: 2010-12-28 修回日期: 2011-05-18

\* 国家自然科学基金资助项目(50975168, 60975068)、高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20093108110007)、上海市教育委员会和上海市教育发展基金会“曙光计划”项目(09SG37)

作者简介: 李树平, 博士生, 河南理工大学讲师, 主要从事机器人视觉与仿生眼技术研究, E-mail: lishu\_ping888@163.com

通讯作者: 谢少荣, 教授, 博士生导师, 主要从事机器人视觉与仿生眼技术研究, E-mail: srxie@shu.edu.cn

度为性能指标目标函数。并应用自适应差分进化 (adaptive differential evolution, 简称 ADE) 算法对目标函数的最大值进行优化, 以确定仿生眼的结构参数。

### 1 眼球运动特点及球面并联机构

#### 1.1 眼球运动特点及 Fick 坐标系

眼球运动是一种机械运动, 遵守机械运动的规律。由于眼球基本上是一个球体, 它可以近似地看作是眼球绕其几何中心的三自由度球面运动<sup>[12]</sup>。每眼各有 6 条眼外肌, 包括上直肌、下直肌、内直肌、外直肌和上斜肌、下斜肌, 如图 1 所示。眼外肌是附着于眼球外部的肌肉, 它们的伸缩能使眼球向各个方向转动。

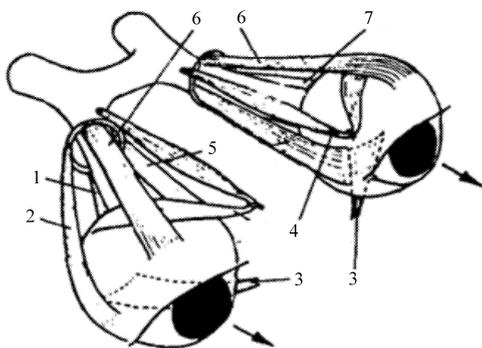


图 1 眼外肌结构简图

Fig. 1 Extraocular muscles

- 1. 下直肌 2. 7. 外直肌 3. 下斜肌 4. 上斜肌 5. 内直肌
- 6. 上直肌

为建立系统参考坐标, 眼球可被认为围绕一个固定点在转动。眼球旋转中心实际上为假想的位于眼球光轴上的一点。该点大约在角膜后 13.5 mm, 在几何学中心略偏鼻侧 1.6 mm 处。通过该点可设有 3 个假想的相互垂直的轴, 即 Fick 三轴, 此 3 个轴相互垂直构成 Fick 坐标, 如图 2 所示, 一切眼球旋转运动都围绕这三轴之一进行。X 轴: 通过两眼旋转中心的假想水平轴, 围绕此轴眼球可以作上下转动; Z 轴: 通过眼球旋转中心并与水平轴垂直的一根自上而下的假想垂直轴, 围绕此轴眼球可以作左右转动; Y 轴: 通过眼球旋转中心并与水平轴和垂直轴正交的一根假想前后轴, 围绕此轴眼球可以作内、外旋转; Listing 平面: 通过眼球旋转中心和水平轴以及垂直轴的假想平面<sup>[13]</sup>。

#### 1.2 系统描述

如图 3 所示, 球面并联机构由动角台、静角台和连于两者间的 3 个 RRR 运动链组成 (R 代表转动副)。9 个转动副轴线相交于 O 点, 该点称为机构的转动中心 (即球心)。各个杆件的运动都是以通过

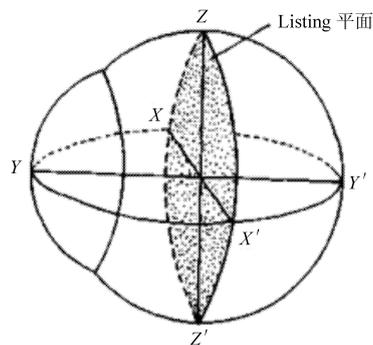


图 2 Fick 坐标系

Fig. 2 Coordinate systems of Fick

O 轴线为转轴的转动, 动角台相对静角台具有 3 个转动自由度<sup>[5]</sup>。过 O 点并与静角台平行的平面称为球心平面, 该平面看作是眼球的 Listing 平面。固定坐标系  $Ox_0y_0z_0$  看作是眼球的 Fick 坐标系。由于球面三自由度并联机构各分支的结构参数相同, 所以, 影响该机构的结构参数为:  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \eta_{1i}, \eta_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ )。其中  $\alpha_1, \alpha_2$  分别为  $u_i$  轴与  $w_i$  轴及  $w_i$  轴与  $v_i$  轴间的结构夹角 ( $i=1, 2, 3$ );  $\beta_1, \beta_2$  分别为静角台和动角台的半锥角;  $\eta_{1i}, \eta_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 分别表示静、动角台的位置角。

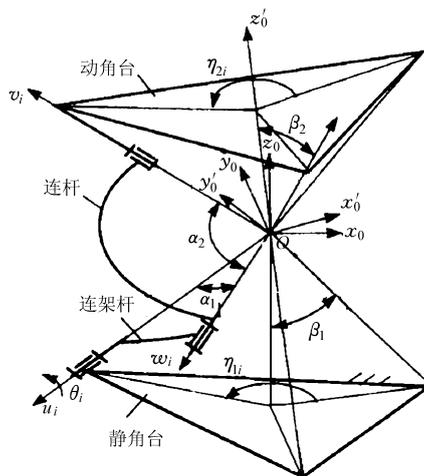


图 3 球面并联机构结构简图

Fig. 3 Structures of SPM

#### 1.3 雅可比矩阵及灵巧度性能指标

若球面三自由度并联机构末端执行器的输出角速度以矢量  $\omega$  表示, 输入角速度以矢量  $\theta$  表示时, 该机构的运动方程可写成<sup>[14]</sup>

$$\dot{\theta} = J\omega \tag{1}$$

其中  $\dot{\theta} = (\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, \dot{\theta}_3)$   $\omega = (\omega_x, \omega_y, \omega_z)$   $J$  为雅可比矩阵, 由机构的结构参数  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, \eta_{1i}, \eta_{2i}$  ( $i=1, 2, 3$ ) 和眼球姿态  $\phi_x, \phi_y, \phi_z$  决定。

若输入角速度有一定的偏差  $\delta\theta$ , 那么操作器也会有一定的偏差  $\delta\omega$ , 则  $\omega$  和  $\theta$  的相对偏差有以下关系

$$\frac{\|\delta \dot{\omega}\|}{\|\dot{\omega}\|} \leq \|J\| \|J^{-1}\| \frac{\|\delta \dot{\theta}\|}{\|\dot{\theta}\|} \quad (2)$$

式中  $\|\cdot\|$  表示矩阵或向量范数; 因子  $\|J\| \|J^{-1}\|$  就是雅可比矩阵的条件数, 用  $k$  表示。它是衡量雅可比矩阵之逆矩阵精确度的一个度量, 是一个大于等于 1 的数。 $k$  值较大时, 会使输入和输出速度之间的传递关系严重失真, 驱动器输入速度的微小偏差将会导致操作器输出速度的较大偏差。所以在进行机器人的机构设计时, 应使  $k$  值在其取值范围内尽量小, 当  $k=1$  时, 机构处于最佳的运动传递性能。

雅可比矩阵的条件数更确切地定义为: 当  $J$  为方阵时

$$k = \|J\| \|J^{-1}\| \quad (3)$$

$\|\cdot\|$  表示矩阵的任意范数, 通常取矩阵的  $F$  范数或  $P$  范数。考虑到  $k$  的变化范围太大, 定义雅可比矩阵的条件数的倒数为角速度精度传递性能评价指标。雅可比矩阵  $J$  随运动平台姿态的变化在不断变化, 一般来说, 不同的姿态对应不同的  $\zeta$  值, 表达为

$$\zeta = \frac{1}{k} = \frac{1}{\|J\| \|J^{-1}\|} \quad (4)$$

式中  $\zeta$  为机器人的灵巧度指标,  $0 < \zeta \leq 1$ 。 $\zeta$  的值越大, 机器人的灵巧度和控制精度越高。

## 2 目标工作空间及结构参数初步优化

### 2.1 目标工作空间

眼球运动可近似看作是眼球绕其几何中心的 3 自由度球面运动(上下转动、左右转动和绕视轴的自旋), 通常人眼上下和左右转动最大可达  $\pm 38^\circ$ 、自旋可达  $\pm 15^\circ$ <sup>[15]</sup>。因此将仿生眼的目标工作空间设计成半锥角  $\phi_x = \phi_y = 38^\circ$  的圆锥面, 自旋角  $\phi_z = 15^\circ$  (在  $\pm 38^\circ$  锥面的任意位置都能实现至少  $\pm 15^\circ$  的自旋角)。最后实验证明  $\phi_x$ 、 $\phi_y$  均达到  $40^\circ$  左右。

### 2.2 结构参数

根据仿生眼的特殊结构要求, 在进行结构参数优化前, 先对相关参数进行初步优化。

静角台与动角台的位置角  $\eta_{1i}$  和  $\eta_{2i}$ : 本设计采用 3 个分支均匀分布的球面三自由度并联机构, 所以  $\eta_{1i} = \eta_{2i} = (i-1)2\pi/3$  ( $i=1, 2, 3$ )。

连架杆和连杆的结构夹角  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ : 理论上  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  的取值范围为  $[0^\circ, 180^\circ]$ 。取值过大会造成仿生眼机构整体尺寸太大, 增加发生干涉的可能性, 另一方面还可能使连杆在运动过程中位于球心平面上方, 导致遮挡摄像头视线并与机器人脸部发生干涉; 但取值过小将会使工作空间太小, 不满足设计要求, 还会给装配带来困难。综合考虑, 选取  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$

的取值范围为:  $[50^\circ, 80^\circ]$ 。

静角台的半锥角  $\beta_1$ : 为避免运动时各构件之间发生干涉, 要求每个支链上的 3 个转动副参考中心分布在不同半径的同心球面上, 连接固定平台的 3 个转动副的参考中心所在的球面半径最大; 连接中间转轴的 3 个转动副的参考中心所在的球面半径次之; 连接运动平台的 3 个转动副的参考中心所在的球面半径最小。在这种情况下, 对仿生眼机构整体尺寸影响最大的是静角台半径, 并且静角台半径随着  $\beta_1$  的减小将成倍减小。另外, 为防止  $\beta_1$  过小时 3 个电动机之间发生干涉,  $\beta_1$  的取值范围为:  $[25^\circ, 35^\circ]$ 。

动角台的半锥角  $\beta_2$ : 文献[8~10]都提出  $\beta_2$  的取值范围为  $[0^\circ, 90^\circ]$ , 并且以此为依据进行设计。但这对仿生眼的设计并不合适, 一方面要保证眼球内置摄像机的成像焦点正好位于  $O$  点, 以便仿生眼观察图像时的偏转与眼球一致; 另一方面又要保证连架杆和连杆在运动时一直位于球心平面以下, 不遮挡摄像头的视线并且不与机器人脸部发生干涉。 $\beta_2$  的取值必须大于  $90^\circ$ , 也就是动角台的位置需位于球心平面以下, 如图 4 所示。考虑 3 个连杆与仿生眼连接时不致发生干涉, 取值范围为:  $[125^\circ, 135^\circ]$ 。

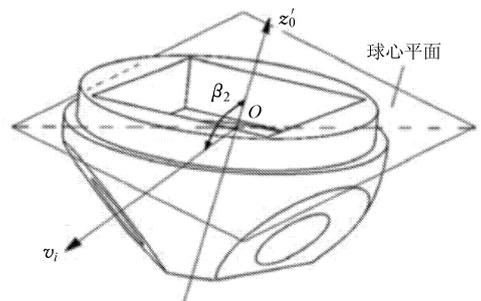


图 4 眼球下部(动角台)及  $\beta_2$  值

Fig.4 Underpart of eyeball (the movement platform) and  $\beta_2$

## 3 基于自适应差分进化算法的结构参数优化

### 3.1 差分进化算法的基本原理

差分进化是一种较新的全局搜索算法, 以控制参数少、收敛性好、寻优效率高等特点在解决复杂的优化问题方面被证明是一种有效的全局近似最优解的搜索算法<sup>[11]</sup>。其算法原理包含变异、交叉、选择 3 种操作。多数学者选用的是 DE/rand/l/bin, 这种形式中变异、交叉和选择操作如下:

变异操作: 随机从种群中选择一个个体作为基向量和另外两个不同的个体作为差分向量, 得到变异个体。

交叉操作: 交叉操作是在变异产生的第  $i$  个个

体和种群中的第  $i$  个个体之间进行,交叉操作得到试验个体。

选择操作:DE 的选择是一对一的选择方式,它是在实验向量与原种群的个体之间进行。选择的原理是适应度更优的个体进入下一代。

### 3.2 自适应差分进化算法

差分进化算法中缩放因子  $F$  用于控制差异向量的缩放程度,通常  $F \in [0, 2]$ ,标准 DE 算法通常采用固定的缩放因子,它的取值在很大程度上影响着演化过程的收敛性及收敛速度。 $F$  取值较小时,收敛速度较快,但过小则易使种群过早收敛于非最优解; $F$  取较大值时,一般能保证收敛到问题的最优解,但收敛速度较慢。为减少用户的参与程度,需要降低  $F$  的影响。因此,提出一种自适应调整缩放因子  $F$  的方案

$$F = 2^{e^{[1 - G_{\max} / (G_{\max} + 1 - G)]}} \quad (5)$$

式中  $F$ ——缩放因子

$G_{\max}$ ——最大进化代数

$G$ ——当前进化代数

### 3.3 优化目标

全域尺度综合法是以工作空间平均灵巧度性能

等指标作为优化对象来确定设计参数。采用该方法对仿生眼进行设计,尽管可以获得很好的平均性能指标,但并不能保证整个目标工作空间内每个位置都具有良好的灵巧度。而对最小性能指标进行优化,可使仿生眼在目标工作空间内任意姿态都具有良好的灵巧度。

由式(4)知,要使  $\zeta$  最小,就要使式(3)也就是雅可比矩阵条件数  $k$  最大。在目标工作空间确定的情况下,前文初步优化得到 4 个参数取值范围内,雅可比矩阵中各元素绝对值大部分位于 0 和 1 之间,比较 1 范数、2 范数、 $F$  范数和无穷范数下  $k$  值,通过大量实验数据表明: $k$  最大值总是在取 1 范数或无穷范数的情况下。表 1 中仅列了部分数据供参考。

所以本设计将目标工作空间内灵巧度最小值  $\zeta_{\min}$  定义为

$$\zeta_{\min} = \min \left( \frac{1}{\|J\| \|J^{-1}\|} \right) = \frac{1}{\|J\|_{\infty} \|J^{-1}\|_{\infty}} \cup \frac{1}{\|J\|_1 \|J^{-1}\|_1} \quad (6)$$

式(6)综合考虑了 1 范数和无穷范数下灵巧度情况,保证了灵巧度指标值的最小。

表 1  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$  取不同值时对应 4 种范数下  $k$  值

Tab.1 Values of  $k$  under four norm with different values of  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$

球面并联机构结构参数				1 范数下 $k$ 值	2 范数下 $k$ 值	$F$ 范数下 $k$ 值	无穷范数下 $k$ 值
$\alpha_1 / (^\circ)$	$\alpha_2 / (^\circ)$	$\beta_1 / (^\circ)$	$\beta_2 / (^\circ)$				
50	50	25	125	193.656 2	136.478 2	163.237 9	232.122 2
50	50	30	125	121.421 9	86.086 6	101.503 7	140.566 4
50	50	35	125	26.873 4	18.763 5	21.988 6	27.020 0
60	60	25	125	8.413 4	6.144 7	7.516 6	9.342 4
60	60	30	125	9.607 6	7.880 3	9.292 0	10.922 2
60	60	35	135	17.283 7	10.869 5	12.470 3	15.342 1
75	75	25	125	5.661 6	3.031 8	4.472 3	4.434 3
75	75	30	125	4.842 2	3.597 2	4.986 8	5.269 0
75	75	35	135	55.893 9	41.337 0	45.672 9	58.287 8

### 3.4 自适应差分进化算法对结构参数的优化

本设计的目的是在目标工作空间确定的情况下,根据仿生眼的特殊结构要求,确定 4 个设计参数  $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ ,使最差值  $\zeta_{\min}$  达到最大。

在前文确定设计变量、约束条件和目标函数的情况下,采用 ADE 算法,取种群规模  $N_p = 100$ ,交叉概率  $C_r = 0.9$ ,最大进化代数  $G_{\max} = 200$ ,缩放因子如式(5)。分别对无穷范数和 1 范数下最差灵巧度  $\zeta_{\min}$  的最大值进行优化,进化过程如图 5、6 所示。

无穷范数与 1 范数下最优计算结果分别为:

$X_{\infty} = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2] = [73.867 5, 73.867 5, 25.000 6, 125.010 2]$ ,目标函数  $\zeta_{\min}$  的最大值为 0.227 3; $X_1 = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2] = [79.932 2, 79.932 2, 31.088 3, 125.002 3]$ ,目标函数  $\zeta_{\min}$  的最大值为 0.212 8。

当采用 DE 算法,取固定缩放因子  $F = 1$ ,其他参数不变情况下,最优计算结果为: $X_{\infty} = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2] = [65.056 1, 65.056 1, 30.017 1, 130.017 1]$ ,目标函数  $\zeta_{\min}$  的最大值为 0.097 4; $X_1 = [\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2] = [62.386 5, 62.386 5, 29.128 5, 129.129 1]$ ,目标函数  $\zeta_{\min}$  的最大值为 0.083 8。

比较以上最优结果可以发现:DE 算法采用固定缩放因子使最优结果过早地收敛于局部最优解, ADE 算法采用动态缩放因子效果明显。

另外由图 5、6 中 ADE 迭代曲线可看出,无穷范数下  $\zeta_{\min}$  的最大值在 0.22 ~ 0.24 之间,而 1 范数下  $\zeta_{\min}$  的最大值在 0.20 ~ 0.22 之间。本设计最终选用  $\alpha_1 = 74^\circ$ 、 $\alpha_2 = 74^\circ$ 、 $\beta_1 = 25^\circ$ 、 $\beta_2 = 125^\circ$ 。

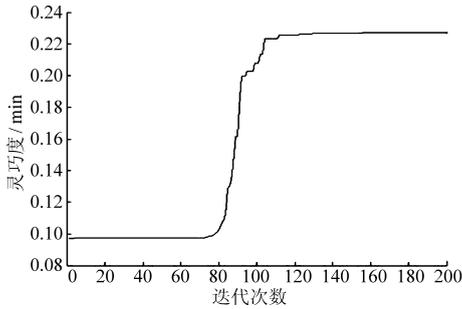


图 5 无穷范数下 ADE 迭代曲线

Fig. 5 ADE iterative curve under infinity-norm

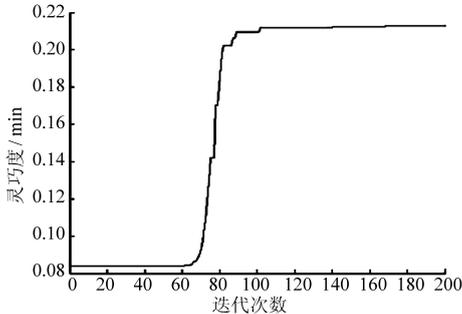


图 6 1 范数下 ADE 迭代曲线

Fig. 6 ADE iterative curve under 1-norm

### 4 机器人实体实验

将仿生眼安装在履带式机器人上并在室外搭建颠簸环境,履带式机器人在颠簸环境下行驶进行抗颠簸实验。实验平台如图 7 所示。

实验结果表明:仿生眼在目标工作空间内任意姿态都具有良好的灵巧度,运转灵活,无相互干涉现象。在实际操作过程中发现仿生眼的实际工作空间略大于目标工作空间,半锥角可达  $\pm 40^\circ$ 。仿生眼具有很好的自适应能力,可以主动补偿由机器人姿态本体变化引起的视觉误差,在颠簸环境下成像稳定。

图 8 是在机器人移动路径上设置各种路障的图像采集结果。

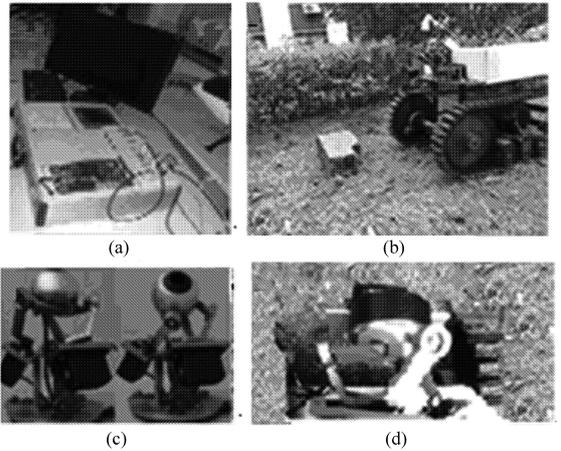


图 7 基于履带式移动机器人实验系统平台

Fig. 7 Experimental platform based on tracked robot

- (a) 机器人控制与图像处理模块
- (b) 携带仿生眼的机器人移动平台
- (c) 根据上述参数设计的仿生眼实物
- (d) 仿生眼实物在履带式机器人上的放大图

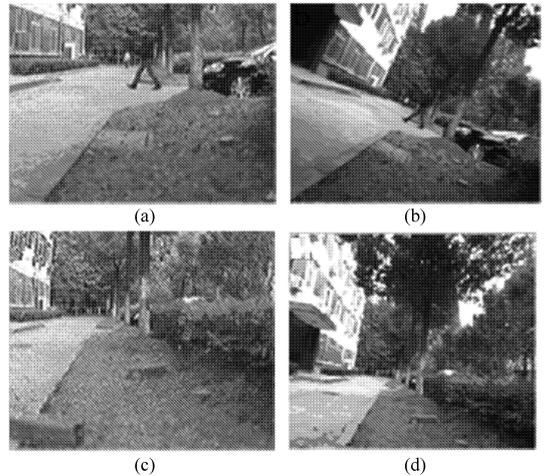


图 8 颠簸环境下的实验结果

Fig. 8 Experimental results under harsh environment

- (a) 侧倾时进行了姿态补偿 (b) 侧倾时没有进行姿态补偿
- (c) 上仰时进行了姿态补偿 (d) 上仰时没有进行姿态补偿

### 5 结束语

在确定目标工作空间的基础上,以雅可比矩阵条件数最大值定义了最差灵巧度性能指标,并在目标空间内根据仿生眼的特殊结构要求采用自适应差分进化算法对最差灵巧度性能指标的最大值进行了优化,确定了合理的结构参数。最终实验结果表明设计的仿生眼实物很好地满足了设计要求。

### 参 考 文 献

- 1 Itoh K, Miwa H, Zecca M, et al. Mechanical design of emotion expression humanoid robot WE-4RII [C] // Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators. Vienna, Austria: Springer-Verlag, 2006: 255 ~ 262.
- 2 Eliseo Stefano Maini, Luigi Manfredi, Cecilia Laschi, et al. Bio-inspired velocity control of fast gaze shifts on a robotic anthropomorphic head [J]. Autonomous Robot, 2008, 25(1 ~ 2): 37 ~ 58.

- 3 Batista J, Peixoto P, Araujo H. Binocular tracking and accommodation controlled by retinal motion flow [C] // Proceedings of 15th International Conference on Pattern Recognition, 2000, 1: 171 ~ 174.
  - 4 余洪山, 王耀南. 仿人多自由度立体双目视觉导航系统的研究与开发[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2004, 31(5): 62 ~ 65.  
Yu Hongshan, Wang Yaonan. Research and development of multi-freedom stereovision navigating system with biological vision mechanisms [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2004, 31(5): 62 ~ 65. (in Chinese)
  - 5 刘辛军. 并联机器人机构尺寸与性能关系分析及其设计理论研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 1999.  
Liu Xinjun. The relationships between the performance criteria and link lengths of the parallel manipulators and their design theory [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 1999. (in Chinese)
  - 6 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 Chao, Xie Shaorong, Li Hengyu, et al. Design of bionic eye based on spherical parallel mechanism with optimized parameters [J]. Robot, 2010, 32(6): 781 ~ 786. (in Chinese)
  - 7 Gosselin C M, St-Pierre E. Development and experimentation of a fast 3-DOF camera-orienting device [J]. International Journal of Robotics Research, 1997, 16(5): 619 ~ 630.
  - 8 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.
  - 9 黄田, 曾宪菁. 等顶锥角3自由度球面并联机构的全参数解析尺度综合[J]. 机械工程学报, 2000, 36(8): 15 ~ 19.  
Huang Tian, Zeng Xianjing. Analytical synthesis of 3-DOF spherical parallel mechanism having equal apex angles [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2000, 36(8): 15 ~ 19. (in Chinese)
  - 10 金振林, 曹舜, 高峰. 新型机器人肩关节及其运动学分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(14): 1639 ~ 1642.  
Jin Zhenlin, Cao Shun, Gao Feng. Design and kinematics analysis of a novel robot shoulder joint [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(14): 1639 ~ 1642. (in Chinese)
  - 11 Storn R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution [C] // Proceedings of IEEE International Conference of Evolution Computation, Japan, Nagoya, 1996: 842 ~ 844.
  - 12 李凤鸣. 眼科全书[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1996.
  - 13 阎洪禄, 于秀敏. 眼生理学[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2001.
  - 14 黄真, 孔令富, 方跃法. 并联机器人机构学理论及控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
  - 15 Cannata G, D'Andrea M, Monti F, et al. Implementation of listing's law for a robot eye [C] // 8th International IFAC Symposium on Robot Control, 2006.
- 

## 本刊声明

为了扩大学术交流,本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文,其著作权使用费与本刊稿酬一次性支付。作者向本刊提交论文发表的行为即视为同意本刊上述声明。