

## 基于雅可比矩阵的仿人视觉系统运动角度分解

樊凡<sup>1</sup>, 潘志康<sup>1</sup>, 娄小平<sup>1,2</sup>, 董明利<sup>1,2</sup>, 祝连庆<sup>1,2</sup>

- (1. 北京信息科技大学 先进光电电子技术国际合作联合实验室, 北京 100192;
2. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192)

**摘要:** 针对仿人视觉系统目标跟踪过程中眼、颈的转动速度对跟踪精度的影响, 提出了一种基于雅可比矩阵的角度分解最优化方法。首先, 建立眼、颈 2 级四自由度空间坐标系, 搭建系统模型; 其次, 构建与眼、颈转动角度相关的雅可比矩阵, 综合考虑眼、颈转动角速度, 得到关注不同转动轴角速度变量的目标跟踪角度分解数学模型; 最后, 通过仿真和物理实验分析了各自由度转动角速度在最优化条件下对角度分解的影响, 得到了基于所述系统的目标跟踪角度分解最优化方案。实验结果表明: 在给定范围内, 眼、颈的转动角度分配比与眼、颈转动角速度的比值相同, 且与均分法相比较, 文中所述方法在时间效率上具有明显优势。

**关键词:** 雅可比矩阵; 多目标优化; 运动控制

**中图分类号:** TP13 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0817006

## Motion angle decomposition of humanoid vision system based on Jacobi matrix

Fan Fan<sup>2</sup>, Pan Zhikang<sup>2</sup>, Lou Xiaoping<sup>1,2</sup>, Dong Mingli<sup>1,2</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2</sup>

- (1. Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China;
2. Joint International Research Laboratory of Advanced Photonics and Electronics, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China)

**Abstract:** An optimized angle decomposition method based on Jacobi matrix was analyzed, considering the effect of rotational angular velocity for humanoid vision system. Firstly, the two-stages four-degrees' coordinate was established, and the system model based on this coordinate was built. Secondly, considering the rotational angular velocity of eyes and neck, a target tracking mathematical model of angle decomposition, considering various rotation angular velocities, was built based on Jacobi matrix. Lastly, through experiments, the influence of rotation angular velocity in each degrees of freedom on rotation angle decomposition under the condition of optimization was studied. After that the optimized angle decomposition model based on the system mentioned above has been settled. By experimental data, within a given range, the ratio of decomposed eyes and neck rotation angle is equal to the ratio of

收稿日期: 2018-03-05; 修订日期: 2018-04-03

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA042308); 教育部长江学者和创新团队发展计划(PCSIRT, IRT\_16R07)

作者简介: 樊凡(1987-), 男, 讲师, 博士, 主要从事光电精密测试技术方面的研究。Email: fan\_fan@bistu.edu.cn

rotational angular velocity of eyes and neck. And compared with split method, the method described in this article has remarkable advantages on time efficiency.

**Key words:** Jacobi matrix; multi-objective optimization; motion control

## 0 引言

人眼视觉系统在目标追踪时具有快速、精确、稳定的特性,为了保证追踪过程中成像清晰,需要实时控制眼、颈的协调运动,不断改变视线方向、切换注视点,从而保证图像的稳定<sup>[1-3]</sup>。随着现代医学的快速发展,人眼视觉系统的生理结构已经非常明晰,国内外学者对模仿人眼的仿生眼、颈机构进行了很多研究。加拿大多伦多约克大学的 Dan Zhang<sup>[4]</sup>等人采用 Monte Carlo 技术对四自由度混合机器的眼、颈运动规则和条件进行建模和优化。丹麦奥尔堡大学的 X.R. Li<sup>[5]</sup>等提出了一种三自由度旋转运动模型,可应用在电磁驱动眼球的转动控制中。德黑兰大学的 Behzad Danaei<sup>[6]</sup>使用螺旋理论分析仿生视觉机械结构的运动模式,得到机械结构不同部位之间的位置、速度和加速度关系。德黑兰阿米卡比尔技术大学的 Milad Eyvazi Hesar<sup>[7]</sup>针对单目二自由度仿生视觉机构,通过引入 PID 控制方法,开发了基于图像的运动控制架构。慕尼黑大学的 Villgratner<sup>[8-9]</sup>等分别设计了二自由度及三自由度并联联动机构,该机构利用航模电机通过连杆驱动摄像机转动,有较好地跟踪效果。韩国首尔国立大学的 Bang<sup>[10]</sup>等采用弯折杆件设计了一种三自由度眼动并联机构,能够固定于机器人头部并有较好运动范围。

目前的研究虽然在仿生视觉运动机构的机械设计 & 运动控制方面做出了许多卓有成效地工作,但这些研究多是针对特定的应用背景和需求开展的,对于眼、颈协调运动的角度分配模型的研究,更多的是从生物医学和神经学角度出发提出一些仿真模型。随着仿生机器人在人类的工业生产和生活中应用越来越广泛,建立一套高效稳定的眼、颈角度分配数学模型具有十分重要的现实意义。基于此,文中提出一种基于雅可比矩阵的运动角度分解方法,通过引入眼、颈关节的转动速度作为参变量,优化雅可比矩阵条件数,最终得到眼、颈协调运动过程中眼、颈角度分解的数学模型,完成人眼、颈协

调运动的数学模拟。

## 1 仿人眼、颈运动机构自由度分配

根据灵长类动物头眼协调运动的生理学机理<sup>[11-12]</sup>,眼颈协调运动需要分段进行处理控制<sup>[13]</sup>:在跟踪运动的目标过程中,当单位时间内的转动角度较小时,优先转动颈部;随着单位时间转动角度的增大,眼、颈转动的角度分配对跟踪效果会有不同的影响<sup>[14]</sup>。

文中研究内容的主要应用于仿人服务类机器人,主要实现目标的跟踪定位和抓取、移动等功能。因此,其对目标跟踪、定位精度要求较高。综合分析,运动控制需要考虑的因素有视轴转动角度  $\theta_G$ ,颈部运动阈值  $\varphi$ ,眼部运动阈值  $\Phi$ 。为此,文中制定了 3 种不同的眼颈协调控制策略,来实现精确跟踪目标。

考虑实际应用情况,垂直方向不进行角度分解建模,采用均分法分配眼、颈电机进行补偿。由于开关电流、齿轮空程等因素,在小角度转动时电机抖动相对比较严重,影响转动精度;而单位时间转动角度超过一定数值之后,齿轮转动平稳性变差,也会影响电机转动精度。据此,可根据电机选型,得到眼、颈转动机构的转动阈值,文中不做详细描述。

(1)  $0 < \theta_G < \varphi$ , 此时由带动颈部运动的高精度步进电机完成注视点转移任务,不需要眼球参与运动,转动角度  $\theta_N = \theta_G$ ;

(2)  $\varphi \leq \theta_G < \Phi$ , 此时需要眼部和颈部同时运动来完成目标跟踪任务,颈部转动角度  $\theta_N$ ,眼球转动角度  $\theta_E$ ,  $\theta_G = \theta_N + \theta_E$ ;

(3)  $\Phi \leq \theta_G$ , 此时需要眼部和颈部同时运动来完成注视点转移任务,眼球转动角度  $E = \Phi$ , 颈部转动角度  $\theta_N = \theta_G - \Phi$ 。

根据需求,设计了 2 级四自由度云台模仿人的眼颈结构,用下级水平和俯仰两个自由度模拟人脖子的运动,再用两组上级水平和俯仰两个自由度分别模拟人的两只眼睛。运动平台由 3 组电机构成,能够实现水平方向二自由度的大范围、高精度转动,以及竖直方向二自由度的俯仰运动,其结构如图 1 所示。

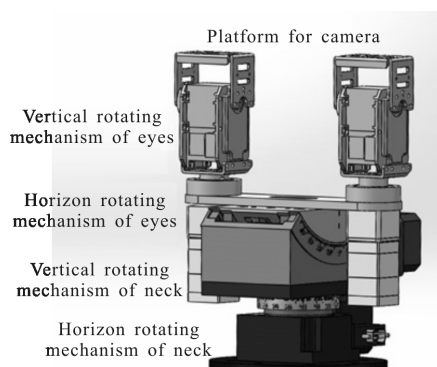


图 1 仿生眼、颈机构结构图

Fig.1 Bionic mechanical structure of eyes and neck

该结构主要由  $q_{M1}-q_{N2}$  颈部运动机构,  $q_{E1}-q_{E2}$  眼部运动机构, 以及代表仿生眼球的  $E_l, E_r$  组成。  $q_{M1}-q_{N2}$  颈部运动机构由水平转向的电机  $q_{M1}$  和垂直方向的电机  $q_{N2}$  组成, 通过控制  $q_{M1}, q_{N2}$  即可控制颈部水平和俯仰运动, 如图 2 所示。  $q_{E1}-q_{E2}$  眼部运动机构由水平转向的电机  $q_{E1}$  和垂直方向的电机  $q_{E2}$  组成, 通过控制  $q_{E1}, q_{E2}$  即可控制眼球水平和俯仰运动。  $E_l, E_r$  分别表示左右眼仿生机构, 模拟人眼的视觉功能, 采集图像信息, 并通过图像处理模块进行数据处理, 得到目标运动空间角, 进一步转换成四自由度云台的控制信息。  $O-XYZ$  为基坐标系, 为了简化运算, 文中将其建立在颈部运动结构的中心。  $O_1-X_1Y_1Z_1$  为眼部运动坐标系, 建立在双目的视轴中心, 表征双目运动的动坐标系。  $A_1A_2$  表示双目的水平线位置;  $B_1B_2$  为  $A_1A_2$  的初始位置在基坐标系下的投影;  $\theta_N$  为颈部旋转角;  $h_cE_c$  表示颈部旋转之后  $O_1$  在基坐标系下的位矢;  $h_1E_1, h_2E_2$  分别表示颈部旋转之后左右眼在基坐标系下的位矢。

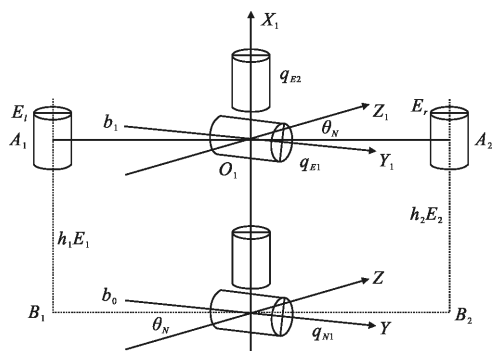


图 2 仿生眼、颈结构坐标系

Fig.2 Coordinate of bionic eyes and neck structure

## 2 眼、颈转动角度分解

### 2.1 运动学建模

与普通的视觉系统相比, 仿生视觉系统在结构和工作原理上与人眼相似, 为了得到跟踪目标时系统整体所需要运动的空间角度量, 需要计算目标运动后, 相对于原系统位置的偏移量。

在眼颈协调运动过程中, 眼部运动坐标原点  $O_1$  在基坐标系  $O-XYZ$  下的位矢  $r=(x, y, z)^T$  可表示为:

$$\begin{cases} r=OB_i+h_iE_i-R \cdot O_1A_i \\ OB_i=b_0 \cdot (\cos\theta_N, \sin\theta_N) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $OB_i$  为仿生眼球  $A_i$  点在基坐标系下的投影位矢;  $b_0$  为点  $A_i$  与眼部运动坐标原点  $O_1$  之间的距离在基坐标系下的投影长度;  $\theta_N$  为颈部绕  $X$  轴旋转的角度。  $h_i, E_i$  分别为仿生眼球机构  $A_i$  点与投影点  $B_i$  之间的长度和单位矢量。 其中:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\alpha & 0 & \sin\beta \\ \sin\alpha\sin\beta & \cos\alpha & -\cos\beta\sin\alpha \\ -\cos\alpha\sin\beta & \sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $R$  为仿生眼球在基坐标系下的旋转矩阵;  $\alpha, \beta$  分别为仿生眼球绕  $X, Y$  轴旋转的角度, 且  $\alpha=\theta_e+\theta_N$ ,  $\theta_e$  为眼部绕  $X$  轴旋转的角度。 可以得到:

$$\begin{cases} O_1A_1=(b_1\cos\alpha\cos\beta\cos\theta_N, -\sin\alpha\sin\theta_N, h_c\cos\alpha\cos\beta)^T \\ O_1A_2=(b_1\cos\alpha\cos\beta\cos\theta_N, \sin\alpha\sin\theta_N, h_c\cos\alpha\cos\beta)^T \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $b_1$  为点  $A_i$  与眼部运动坐标原点  $O_1$  之间的距离。 此外,  $O_1$  在  $O-XYZ$  坐标系中的位矢  $r$  还可表示为:

$$r=h_cE_c \quad (4)$$

式中:  $h_c$  为基坐标系和眼部运动坐标系之间原点的距离;  $E_c=(\cos\alpha\sin\beta, -\sin\alpha, \cos\alpha\cos\beta)^T$  为其单位方向矢量。 就此得到了目标偏移后为了持续跟踪目标系统需要进行的角度偏移量。

### 2.2 雅可比矩阵求解

根据仿生学理论, 相对颈部, 眼部转动机构对转动速度有更高要求。 为此, 引入转动速度变量, 构造系统整体的转动速度与眼、颈各自由度的转动速度关系。

$$E_i^T \cdot v=h_i' - E_i^T \cdot (R \cdot O_1A_i) \quad (5)$$

式中:  $v$  为  $O_1$  在初始  $OXY$  坐标系下的速度。

设  $\alpha=\theta_e+\theta_N$ ,  $\theta_e, \theta_N$  分别表示眼、颈绕  $X$  轴的旋转角度,  $\beta$  为系统垂直方向转动角度。 为了求得雅可比

矩阵,公式(5)中代表眼部运动位矢的部分可以等价于:

$$(R \cdot O_1 A_1)' = J_1 \cdot v_m \quad (6)$$

只考虑水平方向转动的情况,将  $\beta$  视为常量,可

以得到  $v_m = (\theta_N', \theta_E', \beta)'$ , 则  $J_1$  可表示为:

$$J_1 = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & j_3 \\ j_4 & j_5 & j_6 \\ j_7 & j_8 & j_9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} j_1 &= -b_1 \sin 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N - b_1 \cos^2 \alpha \sin \beta \sin \theta_N - h_c \sin \alpha \sin \beta \cos \beta \\ j_2 &= -b_1 \sin 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \sin \alpha \sin \beta \cos \beta \\ j_3 &= b_1 \cos^2 \alpha \cos \beta \cos \theta_N + h_c \cos \alpha \cos 2\beta \\ j_4 &= b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - \frac{b_1}{2} \sin 2\alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N - \cos 2\alpha \sin \theta_N - \frac{\sin 2\alpha}{2} \cos \theta_N - h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta \\ j_5 &= b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - \cos 2\alpha \sin \theta_N - h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta \\ j_6 &= \frac{1}{2} (b_1 \cos \theta_N + h_c) \sin 2\alpha \sin 2\beta \\ j_7 &= b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N + b_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N - \sin 2\alpha \sin \theta_N - \sin^2 \alpha \cos \theta_N - h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta \\ j_8 &= b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - \sin 2\alpha \sin \theta_N - h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta \\ j_9 &= -(b_1 \cos \theta_N - h_c) \cos^2 \alpha \sin 2\beta \end{aligned} \quad (7)$$

公式(4)两边对时间求导得到:

$$v = J_2 \cdot v_m \quad (8)$$

$$h_i' = E_i^T \cdot (J_1 + J_2) \cdot v_m \quad (10)$$

其中

$$J_2 = \begin{bmatrix} -h_c \sin \alpha \sin \beta & -h_c \sin \alpha \sin \beta & h_c \cos \alpha \cos \beta \\ -h_c \cos \alpha & -h_c \cos \alpha & 0 \\ -h_c \sin \alpha \cos \beta & -h_c \sin \alpha \cos \beta & -h_c \cos \alpha \sin \beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

令  $J_D = J_1 + J_2$ , 为了引入眼颈转动角速度, 对矩阵  $J_D$  作如下出处理:

$$J = [\partial J_{Di} / \partial \theta_N, \partial J_{Di} / \partial \theta_E, \partial J_{Di} / \partial \beta] (i=1, 2, 3) \quad (11)$$

矩阵  $J$  即为仿生眼颈结构雅可比矩阵。其具体表达式如下:

由公式(5)、(8)可以得到:

$$J_1 = \begin{bmatrix} j_1 & j_2 & j_3 \\ j_4 & j_5 & j_6 \\ j_7 & j_8 & j_9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} j_1 &= (-2b_1 \cos 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N + 2b_1 \sin 2\alpha \sin \beta \sin \theta_N - b_1 \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \sin \alpha \sin \beta \cos \beta - h_c \cos \alpha \sin \beta) \omega_N \\ j_2 &= (-2b_1 \cos 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \cos \alpha \sin \beta \cos \beta + h_c \cos \alpha \sin \beta) \omega_E \\ j_3 &= (-b_1 \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \cos \alpha \sin \beta - 2h_c \cos \alpha \sin 2\beta) \omega_\beta \\ j_4 &= \left( -\frac{5}{2} b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N - 2\cos 2\alpha \cos \theta_N - \frac{5}{2} \sin 2\alpha \sin \theta_N - \frac{\sin 2\alpha}{2} \cos \theta_N - 2h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta + h_c \sin \alpha \right) \omega_N \\ j_5 &= (-2b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N + 2\sin 2\alpha \sin \theta_N + 2h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta + h_c \sin \alpha) \omega_E \\ j_6 &= (b_1 \cos \theta_N + h_c) \sin 2\alpha \cos 2\beta \omega_\beta \\ j_7 &= (2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N + b_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2\cos 2\alpha \sin \theta_N - 2\sin 2\alpha \cos \theta_N + \sin^2 \alpha \sin \theta_N - 2h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_N \\ j_8 &= (2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2\cos 2\alpha \sin \theta_N - 2h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_E \\ j_9 &= (-2(b_1 \cos \theta_N - h_c) \cos^2 \alpha \cos 2\beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_\beta \end{aligned} \quad (12)$$

式中:  $\omega_N$  为颈部水平转动角速度;  $\omega_E$  为眼部水平转动角速度。由国内外现有研究分析可知, 当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、运动灵巧度以及力和运动的传递性能。因

此, 为了使所设计的仿生眼颈结构同时具备较大的倾角及良好的运动学性能, 文中将以雅可比矩阵平均条件数最小作为目标进行多目标优化, 其函数  $f$  表示如下:

$$f = \sigma_{\max} / \sigma_{\min} \quad (13)$$

式中： $f$ 为雅可比矩阵平均条件数； $\sigma_{\max}$ 、 $\sigma_{\min}$ 分别为雅可比矩阵  $J$  的最大和最小奇异值。由公式(9)、(11)可知， $f$ 为关于颈部水平转动角速度  $\omega_N$  和眼部水平转动角速度  $\omega_E$  等参数的函数，对  $f$ 取最优化的过程，就是最优化  $\omega_N$  和  $\omega_E$  的过程。进一步的，对转动角速度最优化的过程，就是求解目标跟踪过程中水平转动角度分解为颈部水平转动角度  $\theta_N$  和眼部水平转动角度  $\theta_E$  的过程。所以， $\omega_N$  和  $\omega_E$  直接决定水平转动角度的分解结果，对目标跟踪过程的眼颈协调运动有重要作用。

### 3 实验与分析

根据经验，系统整体转动角度在  $8^\circ \sim 120^\circ$  之间时需要眼颈同时运动，服务机器人主要以人为跟踪目标，根据人体的运动速度，各自由度转动角速度限制在  $30 \sim 120^\circ/\text{s}$  范围之内。根据上文所述关系，平均条件数  $f$  可表示成关于  $\omega_E$ 、 $\omega_N$ 、 $\theta_E$ 、 $\theta_N$  的函数，针对不同的眼颈水平转动角速度  $\omega_E$ 、 $\omega_N$  进行最优规划，求解雅可比矩阵平均条件数  $f$  的最小值，得到不同水平转动角速度下  $\theta_E$  与  $\theta_N$  的比值，选取系统整体转动  $60^\circ$  的结果为例，如图 3 所示。

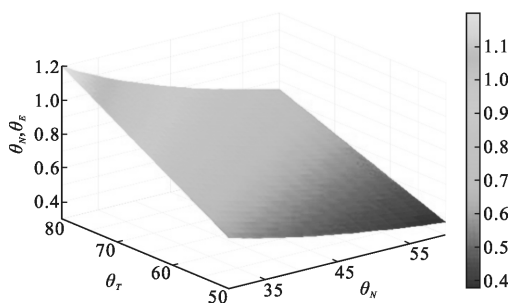


图 3 眼、颈转动角速度与角度分解的关系

Fig.3 Relationship between rotation angular velocity of eyes and neck and angle decomposition

仿真实验结果表明，不同跟踪补偿角得到的关系曲面相同，说明眼颈角度分解比例  $\theta_N/\theta_E$  只与眼、颈转动角速度相关。并且，当眼部水平转动角速度  $\omega_E$  固定，随着颈部转动角速度  $\omega_N$  的增加，比值呈线性变化。同时，在给定得整体角度区间  $[8^\circ, 120^\circ]$  范围内，眼、颈转动角速度与角度分解关系的曲面图都与上图相同。因此，给定转动角速度后，眼、颈角度分配

符合线性关系。

进一步的，以固定的转动角速度  $\omega_N(30、50、70^\circ/\text{s})$ ， $\omega_E(60、90、120^\circ/\text{s})$  为例，得到分配后眼、颈转动角度如图 4 所示。对于不同的眼颈转动角速度，分解出的角度值不同。当颈部转动角速度大于眼部转动速度时，分解得到的  $\theta_N$  的值也大于  $\theta_E$  的值；当颈部转动角速度小于眼部转动角速度时，分解得到的  $\theta_N$  的值也小于  $\theta_E$  的值；当二者转动角速度相当时，得到的分解角度也相等，呈线性关系。由结果可知，在给定范围内，眼部转动角度与颈部转动角度按比例分配，且比值关系  $\theta_E = \theta_N(\omega_E/\omega_N)$ 。

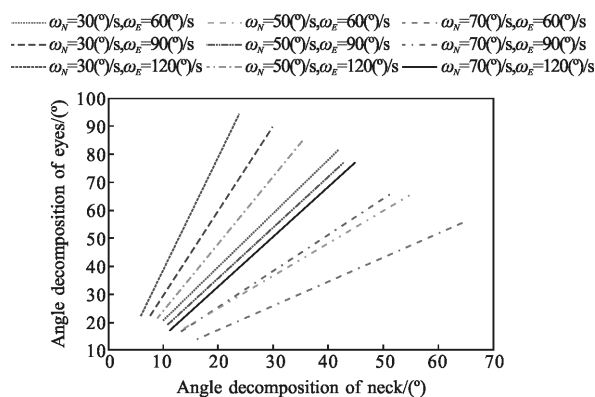
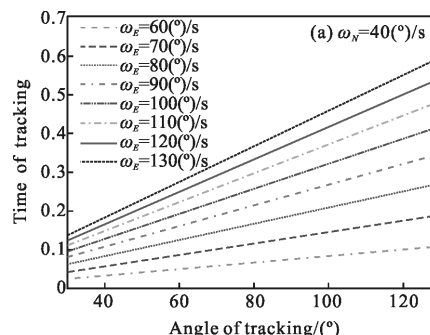


图 4 固定转动角速度后的角度分解结果

Fig.4 Angle decomposition result with fixed rotation angular velocity

为了验证仿真结果，进行了实验，文中研究内容的针对仿人服务机器人，重点考虑机器人眼颈协调运动的稳定性及精度，因此，在人眼的平滑追踪稳定调节速度  $(0 \sim 130^\circ/\text{s})$  范围内。

与常用的角度均分法进行比较，设定  $\omega_N$  取  $40^\circ/\text{s}$ ， $\omega_E$  分别取  $60、70、80、90、100、110、120、130^\circ/\text{s}$ ，得到两种方法的时间差如图 5(a) 的结果；设定  $\omega_E$  取  $120^\circ/\text{s}$ ， $\omega_N$  分别取  $40、50、60、70、80、90、100、110^\circ/\text{s}$ ，得到两种方法的时间差如图 5(b) 的结果。



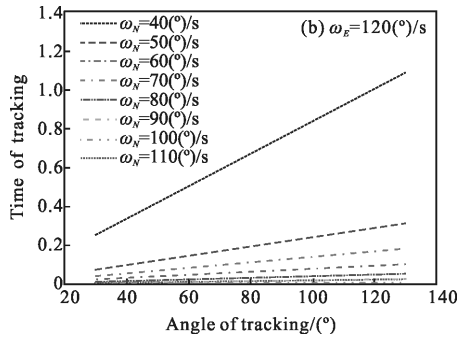


图 5 两种不同角度分解方案的耗时比较结果

Fig.5 Time consuming comparison results of two different angular decomposition schemes

从图中数据可知，文中所述方法用时优于均分法，并且随着跟踪补偿角的增大，优势约明显。当脖子的转动角速度  $\omega_n$  固定时，眼睛的转动角速度越大，相对节约的时间越多；而当眼睛的转动角速度  $\omega_e$  固定时，脖子的转动角速度越小，节约的时间越多。

#### 4 结论

文中针对仿生机器人的眼颈协调运动提出了一种基于雅可比矩阵的角度分解最优化方法，解决跟踪过程中视轴移动补偿角多自由度分配的问题。通过建立眼颈 2 级四自由度空间坐标系，综合考虑眼、颈转动角速度和精度，利用雅克比矩阵求得了目标追踪过程中眼、颈角度分配的数学模型。从实验结果可知，在给定范围内，眼、颈的转动角度分配比与眼、颈转动角速度的比值相同时取得最优解，即  $\theta_n = \theta_e(\omega_n/\omega_e)$ 。此外，在人眼的平滑追踪稳定调节速度 (0~130 (°)/s) 范围内，与角度均分法相比，文中所述方法具有时间效率上的优势，且跟踪补偿角越大，优势越明显。文中的研究内容，为仿人机器人在目标跟踪过程中的眼颈转动补偿角分解、速度和精度的分配上，提供了良好借鉴，对仿人机器人研究的发展起到了一定的促进作用。

#### 参考文献:

[1] Muhammad W, Spratling M W. A neural model of coordinated head and eye movement control [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 85(1): 107-126.  
 [2] Kolev O I, Reschke M F. Acquisition of predictable vertical visual targets: eye-head coordination and the triggering effect

[J]. *Journal of Motor Behavior*, 2016, 48(6): 552-561.  
 [3] Sun Q, Xia J, Nadarajah N, et al. Assessing drivers' visual-motor coordination using eye tracking, GNSS and GIS: a spatial turn in driving psychology [J]. *Journal of Spatial Science*, 2016, 61(2): 299-316.  
 [4] Zhang D, Wei B. Modelling and optimisation of a 4-DOF hybrid robotic manipulator [J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2017, 30(11): 1179-1189.  
 [5] Li X, Bai S, Chen W, et al. Integrated design and modelling of an electro-magnets driven spherical parallel manipulator [C]//Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2017 IEEE International Conference on, 2017: 1209-1214.  
 [6] Arian A, Danaei B, Masouleh M T. Kinematics and dynamics analysis of a 2-DOF spherical parallel robot [C]//Robotics and Mechatronics (ICROM), 2016 4th International Conference on, 2016: 154-159.  
 [7] Hesar M E, Masouleh M, Kalhor A, et al. Ball tracking with a 2-DOF spherical parallel robot based on visual servoing controllers [C]//Robotics and Mechatronics (ICRoM), 2014 Second RSI/ISM International Conference on, 2014: 292-297.  
 [8] 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.  
 [9] Villgrattner T, Ulbrich H. Optimization and dynamic simulation of a parallel three degree-of-freedom camera orientation system [C]//Intelligent Robots and Systems (IROS), 2010 IEEE/RSJ International Conference on, 2010: 2829-2836.  
 [10] 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.  
 [11] Freedman E G. Interactions between eye and head control signals can account for movement kinematics [J]. *Biological Cybernetics*, 2001, 84(6): 453-462.  
 [12] Muhammad W, Spratling M W. A neural model of coordinated head and eye movement control [J]. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 2017, 85(1): 107-126.  
 [13] Xiao Wenjian, Ma Dongxi, Chen Zhibin, et al. Pointing uncertainty evaluation of optical axis in large-scale spatial angle measuring system [J]. *Infrared and laser Engineering*, 2016, 45(11): 1118004. (in Chinese)  
 [14] Freedman E G. Interactions between eye and head control signals can account for movement kinematics [J]. *Biological Cybernetics*, 2001, 84(6): 453-462.