

6-8-2020

Control Strategy of Bionic Eyes Movement in Gaze Shifts

Xiaohui Wang

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;2. School of Applied technology, Qingdao University, Qingdao 266101, China;

Ma Xin

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

Bin Qin

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

Yibin Li

1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Control Strategy of Bionic Eyes Movement in Gaze Shifts

Abstract

Abstract: For the gaze shifts with asymmetrical depth in the horizontal plane of bionic eyes, a *piecewise control strategy of eye-head coordinative motion was proposed according to the amplitude of gaze shifts, and the motion model of bionic eyes was developed*. When the amplitude of gaze shifts is smaller than the head movement threshold, the eyes move only by saccade-vergence. When the amplitude is larger than the head movement threshold and smaller than the saturation threshold of eye movement with head at rest, gaze shifts are accomplished with eye-head coordinative movements. When the amplitude is larger than the saturation threshold, the head first moves to the saturation threshold of eye movement with head at rest, then eyes and head movement are controlled by eye-head coordinative control method. The simulation results show that control strategy proposed can accurately and effectively control gaze shifts in the horizontal plane of bionic eyes.

Keywords

bionic eye, gaze shifts, head-eye coordination, motion-control model

Recommended Citation

Wang Xiaohui, Ma Xin, Qin Bin, Li Yibin. Control Strategy of Bionic Eyes Movement in Gaze Shifts[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(6): 1380-1386.

仿生眼注视转移运动控制策略研究

王晓慧^{1,2}, 马昕¹, 秦斌¹, 李贻斌¹

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 济南 250061; 2. 青岛大学应用技术学院, 青岛 266101)

摘要: 对目标在双目水平平面上深度非对称的注视点转移任务, 提出了一种基于注视点水平方向转移幅度的分段式头眼协调控制策略, 并建立了注视转移运动控制模型。水平方向注视转移幅度小于头部运动阈值, 眼球做扫视-异向运动; 水平方向注视转移幅度大于头部运动阈值且小于眼球转动的饱和阈值时头眼协调运动; 当水平方向注视转移幅度大于眼球转动饱和阈值时, 头部先运动使目标处于眼球运动可达范围, 再进行头眼协调运动完成注视转移。仿真实验证实了方案可行性和有效性, 适用于仿生眼双目水平平面上视线切换。

关键词: 仿生眼; 注视点转移; 头眼协调; 运动控制模型

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 06-1380-07

Control Strategy of Bionic Eyes Movement in Gaze Shifts

Wang Xiaohui^{1,2}, Ma Xin¹, Qin Bin¹, Li Yibin¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of Applied technology, Qingdao University, Qingdao 266101, China)

Abstract: For the gaze shifts with asymmetrical depth in the horizontal plane of bionic eyes, a *piecewise control strategy of eye-head coordinative motion was proposed according to the amplitude of gaze shifts, and the motion model of bionic eyes was developed*. When the amplitude of gaze shifts is smaller than the head movement threshold, the eyes move only by saccade-vergence. When the amplitude is larger than the head movement threshold and smaller than the saturation threshold of eye movement with head at rest, gaze shifts are accomplished with eye-head coordinative movements. When the amplitude is larger than the saturation threshold, the head first moves to the saturation threshold of eye movement with head at rest, then eyes and head movement are controlled by eye-head coordinative control method. The simulation results show that control strategy proposed can accurately and effectively control gaze shifts in the horizontal plane of bionic eyes.

Keywords: bionic eye; gaze shifts; head-eye coordination; motion-control model

引言

人类视觉具有快速定位、准确跟踪、运动中稳定清晰成像的优异性能, 这些性能的实现都依赖于

双目水平平面的注视转移。生理机制的研究成果表明^[1-2], 水平面上较小幅度的注视转移, 由眼球扫视-异向复合运动即可完成; 当水平面上注视转移幅度超出一定视野范围, 就需要头眼相互配合协调运动完成视线转移。人类大脑能快速处理信息通过视觉神经支配眼球运动与头部运动, 完成视线切换获取视觉信息, 所以模拟人类视觉的神经机制, 研究头眼协调的控制策略, 建立双目协调、头眼协调的注视转移运动控制模型对仿生眼信息获取、图像



收稿日期: 2015-01-16 修回日期: 2015-03-30;
基金项目: 国家 863 计划(2015AA042307), 山东省科技发展计划(2014GGX103038), 山东省自主创新及成果转化专项资金(2014ZZCX04302);
作者简介: 王晓慧(1978-), 女, 内蒙古, 博士, 讲师, 研究方向为机器视觉, 故障诊断; 马昕(1970-), 女, 博导, 教授, 研究方向为机器视觉, 惯性导航。

<http://www.china-simulation.com>

• 1380 •

稳定具有重要作用。

目前注视转移控制主要从头眼协调的控制策略和注视转移的运动控制模型两个方面研究。Zee^[1]用非线性函数模拟扫视爆发神经元和异向运动神经元, Hung^[3]以一阶的惯性环节作为扫视运动和异向运动控制器, 实现头部静止状态下的双目水平平面上小幅度注视转移。为了扩大注视转移幅度, 头部参与到注视转移过程中。文献[4-5]研究一维水平方向上的仿生眼运动控制模型, 这些模型能分别实现单眼运动和头部运动。文献[6]提出的头眼协调运动注视控制模型考虑了头部初始方向对水平方向注视转移的影响。异向运动不但可以实现双目水平面上注视转移, 而且在左右眼固视相同目标时, 还可以协调眼肌使目标落在小凹上^[7]。而目前对水平方向上注视转移控制研究较多, 头部自由, 目标在双目水平平面上深度非对称的注视点转移运动控制模型有待研究。

在注视转移过程中只有部分前庭神经被抑制^[8], 每隔几毫秒进行一次的前庭反射眼运动, 可以不断反馈头部信号, 修正头部和眼球的运动命令。文献[9]通过前庭传感器反馈信号使系统快速适应环境变化。文献[10]提出在头眼协调注视转移运动中, 前庭神经核利用 VO 细胞检测头部速度偏差修正注视转移轨迹, 限制眼球转动幅度可以减少注视轨迹的不变性。前庭反射和限制眼球转动幅度对于自主眼运动的优化起关键作用。

文献[11]针对大幅度注视转移的情况提出了一种头眼协调控制算法, 双眼聚焦目标后, 头部再朝向目标运动。注视完成后, 头部正对目标, 眼轴回归眼窝中心, 即初始眼位为零, 眼球不能单独运动。文献[12-13]研究了具有一定初始眼位情况下, 水平方向上注视转移过程中的头眼协调运动。注视转移过程分为快相和慢相两个阶段, 快相阶段由扫视运动和缓慢的头部运动切换注视点到目标点, 慢相阶段眼球做与头部运动反向的前庭动眼反射运动维持目标稳定, 头部朝向目标运动。文献[12-13]只研究了一维水平方向双目运动完全相同的情况,

双目不能协调运动。当初始眼位处于眼球转动的饱和位置, 目标点与眼球转动的饱和位置同侧且转移幅度大于眼球转动的饱和位置时, 眼球不能完成头眼协调运动。

针对上述问题, 在考虑初始眼位的情况下, 本文提出了一种分段式头眼协调运动策略。根据水平方向注视转移幅度的大小选择眼球运动、头眼协调运动、头先运动的头眼协调运动三种运动形式中的一种运动形式, 使仿生型机器人眼球具有类似于人眼的灵活运动特性。在分析人类视神经机理和结构的基础上, 根据头眼协调的控制策略, 建立了一种头部运动、眼球扫视运动和异向运动相结合的线性注视转移运动控制模型。仿真实验验证了所提控制策略和运动控制模型的有效性。

1 注视转移的神经机理

目标在双目水平平面上深度非对称的注视点转移是平面上的二维运动, 如图 1 所示, 目标由 G 点移到 T 点, 左右眼球同时做共轭的扫视运动和非共轭的异向运动使视线由 G 点切换到 T 点, 左右眼球协调运动且运动幅度不同。扫视-异向运动分别由两路并行的神经控制, 一路神经通过扫视爆发神经元控制眼球的左右(共轭)运动, 一路神经通过异向爆发神经元控制眼球的内外(异向)运动^[2]。共轭运动误差(CME)和异向运动误差(VME)在运动神经元汇合后支配眼外肌驱动眼球运动。

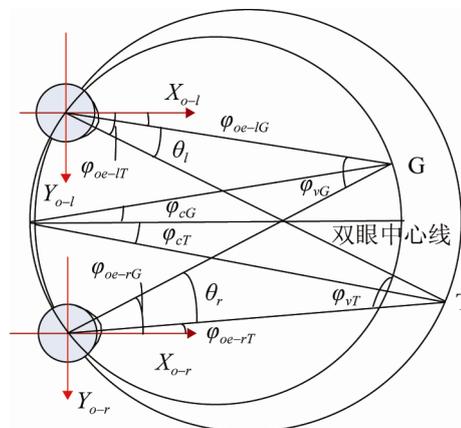


图 1 头部受约束时双眼视线转移示意图^[14]

2 头眼协调运动策略

2.1 注视转移中头部与眼部运动关系

图 1 为头部约束时双眼视线转移示意图, 左眼和右眼 2 个视轴的夹角称为异向角 φ_v , 表征眼球异向运动幅度。共轭角 φ_c 为同视点圆上双眼间距的中心点与目标点连线跟双眼中心线所夹的圆周角, 表征双眼共轭运动的幅度。双眼注视 G 点, φ_{oe-lG} 和 φ_{oe-rG} 分别是左右眼在 G 点相对于坐标轴 X_{o-l} 转动的角度, φ_{cG} 和 φ_{vG} 是当前眼位对应的共轭角和异向角。 φ_{oe-lT} , φ_{oe-rT} , φ_{cT} 和 φ_{vT} 是 T 点对应的各角度。共轭角的变化量 $\Delta\varphi_c = \varphi_{cT} - \varphi_{cG}$, 异向角的变化量 $\Delta\varphi_v = \varphi_{vT} - \varphi_{vG}$ 。由角度之间几何关系推导出左眼和右眼在注视点转移过程中视网膜的运动幅度 θ_l 和 θ_r 与共轭角的变化量和异向角变化量的关系式为:

$$\theta_l = \Delta\varphi_c + \frac{\Delta\varphi_v}{2} \quad (1)$$

$$\theta_r = \Delta\varphi_c - \frac{\Delta\varphi_v}{2} \quad (2)$$

注视点在双目水平平面上转移时, 头部运动能扩大水平方向上注视范围, 而对深度方向上眼球的异向运动没有影响。当头部参与视线转移时, 头部转动引起左右眼球做与头部运动方向相反幅度相同的补偿运动。 $\Delta\varphi_h$ 为头部转动角度, 头部无约束的平面注视点转移运动控制模型输入输出关系式为:

$$\theta_l = \Delta\varphi_c - \Delta\varphi_h + \frac{1}{2}\Delta\varphi_v \quad (3)$$

$$\theta_r = \Delta\varphi_c - \Delta\varphi_h - \frac{1}{2}\Delta\varphi_v \quad (4)$$

$$\theta_h = \Delta\varphi_h \quad (5)$$

在注视转移过程中, $\Delta\varphi_c > 0$ 表示视轴顺时针转动到达目标点, $\Delta\varphi_c < 0$ 表示视轴逆时针转动到达目标点。 $\Delta\varphi_v > 0$ 表示眼球做集合异向运动, $\Delta\varphi_v < 0$ 表示眼球做散开异向运动。

2.2 注视转移中头眼协调控制策略

注视幅度小于 35° 时, 头在注视转移中的贡献很小, 而在 35° 以后, 头的贡献有大幅度提高, 特

别是当眼球运动到饱和位置, 只能依靠头部运动进行注视转移, 因而头眼协调的注视转移需要分段处理。根据灵长类动物头眼协调运动的生理学机理^[13], 在文献[15]注视分解模型的基础上, 提出注视点转移头眼协调分段控制策略。设头部运动阈值为 α , 表示水平方向上目标相对于双眼中心线的注视转移幅度, 用于判断注视点转移时头部是否运动。眼球转动饱和阈值为 β , 表示眼球转动的最大幅度。 D 为最大的注视转移幅度。由灵长类动物的生理学数据可知^[15], $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 35^\circ$, $D = 80^\circ$ 。

p_l , p_r 分别为左右眼球的初始眼位, 注视转移中双眼的运动幅度不一定相等, 不能采用单眼眼位作为双眼的初始眼位, 本文提出用双眼初始眼位的共轭角 p_c 作为双目运动的初始位置, p_c 与单眼眼位 p_l 、 p_r 关系为:

$$p_c = \frac{p_l + p_r}{2} \quad (6)$$

初始眼位的共轭角与到达目标点共轭角的运动幅度之和 $p_c + \Delta\varphi_c$ 表示目标点所处的位置, 所以头眼协调控制策略使用 $p_c + \Delta\varphi_c$ 进行阈值判断。以此和阈值进行比较, 将注视点转移头眼协调运动分成如下 3 段。

(1) 当 $|p_c + \Delta\varphi_c| < \alpha$ 时, 眼球做扫视-异向复合运动完成视线转移, 头部不参与运动。

(2) 当 $\alpha < |p_c + \Delta\varphi_c| < \beta$ 时, 头眼协调运动共同完成注视转移, 注视分解器分解得到头部的转动角度。头部的转动角度为^[15]:

$$H(G, p_c) = \frac{D - p_c - \beta}{D - p_c - \alpha} \cdot (G - (\alpha + p_c)) \quad (7)$$

式中: G 为水平方向上的注视转移幅度。

以往文献[12-13]由注视分解器按照一定的关系分别分解出眼球转动角度和头部转动角度, 注视点转移时眼球做扫视运动, 头部缓慢运动, 扫视运动完成后眼球做前庭动眼反射运动。当眼球扫视结束时, 头部对视线转移的贡献不一定恰好同时完成, 所以这种注视分解方法并不能保证前庭动眼反射前视线对准目标。本文将水平方向上的注视转移幅度 G 直接作为眼球转动的期望共轭角度, 视线

先切换到目标点, 头部缓慢转向目标。

(3) 当 $\beta < |p_c + \Delta\varphi_c| < D$ 时, 目标不在眼球运动幅度范围内, 头部先运动使得目标处于眼球运动可达范围, 再做头眼协调运动。头部的单独运动幅度为 $H(G) = G - \beta$ 。总的头部运动幅度为 $H(G)$ 和 $H(G, P)$ 之和。

当眼球初始眼位达到眼球转动的饱和阈值时, 目标出现在初始眼位共轭角 p_c 的同侧, 注视转移幅度超过眼球转动的饱和位置, 只能通过单独的头部运动实现注视转移, 使得目标处于眼球运动可达范围, 再做头眼协调运动。避免双眼运动幅度过大, 眼位偏离中心太远, 有利于保持注视转移轨迹的不变性。

由于扫视眼运动和异向眼运动潜伏期的存在, 当注视目标由一种运动形式阶跃变化到另外一种运动形式时, 在各段控制器的作用下, 眼球和头部可从当前位置平滑过渡到注视目标位置。

3 注视转移头眼协调运动控制模型

头眼协调运动的双目水平平面上大幅度注视点转移由头部运动、眼球扫视运动和眼球异向运动协调完成。如图 2 所示, 模型采用线性结构, 便于

系统分析和工程应用。视网膜感应视觉刺激传入大

脑皮层, 经过上丘进行注视分解和头眼协调控制, 将注视动作分解为眼部动作命令和头部动作命令。头部转动角度 $\Delta\varphi_h$ 送往头部控制器的同时, 也将整个注视转移的过程中期望的眼球扫视运动转动角度 $\Delta\varphi_c$ 送入扫视控制器, 异向运动转动角度 $\Delta\varphi_v$ 送入异向控制器, 使得在头部运动的初始阶段, 视线先转移到目标点。开关 S 控制反向旋转机制, 在单独头部运动时, 开关断开, 头眼协调运动时, 开关闭合^[16]。

3.1 扫视控制器

扫视控制器输入共轭角变化量 $\Delta\varphi_c$ 与实时反馈的眼球位置估计值做差产生共轭运动误差 (CME), 共轭运动误差延时后, 进行阈值判断, 阈值 $e_l = 0.25$ ^[17]。当共轭运动误差大于 e_l , 或者小于 $-e_l$ 时, 由全面停止神经元 OPN 控制抑制神经元, 即开关 M 闭合, 否则全面停止神经元 OPN 控制兴奋神经元, 即开关 M 断开, 每间隔 $0.2s$ 判断阈值一次^[17]。扫视爆发神经核 SBN(取值 K_1) 产生扫视速度信号 CVC 送入神经积分器^[17]。积分器的输出是实际眼球位置的内部估计, 该信号通过抑制性中间神经元形成的反馈通道。

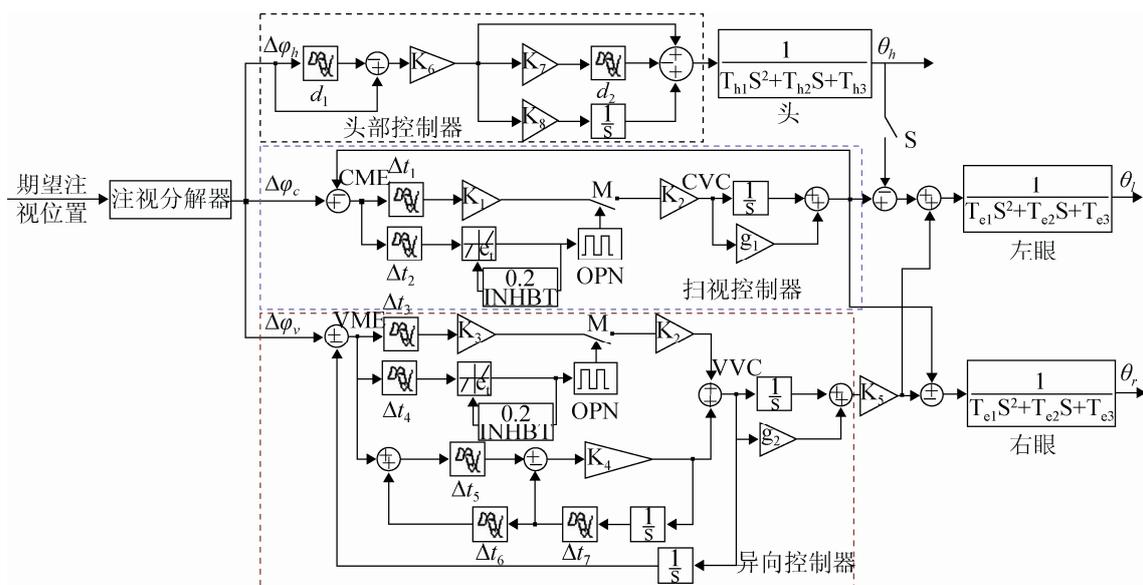


图 2 注视转移头眼协调运动控制模型

扫视运动的潜伏期为 200 ms，分解为延时时间 $\Delta t_1 = \Delta t_2 = 100$ ms。 $K_1 = 10$ ，脉冲幅值为 0.05，所以 $K_2 = 20$ ^[17]。神经积分器增益 $g_1 = 0.1$ 。根据文献[18]知双眼眼外肌模型的传递函数如图 3 所示，其中 $T_{e1} = 1$ ， $T_{e2} = 0.157$ ， $T_{e3} = 0.001$ 。

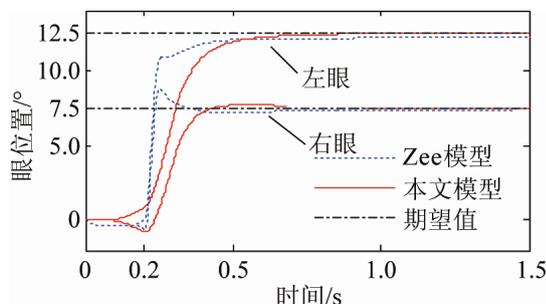


图 3 10°扫视结合 5°集合异向双目运动

3.2 异向控制器

在异向运动过程中伴随扫视运动，扫视运动对异向运动有促进作用^[1,18]。本文考虑了这种促进作用，异向运动误差信号 VME 分别通过慢扫视爆发神经核和异向运动神经核后，进行速度叠加，提高异向运动速度。异向运动的潜伏期为 160 ms 是大脑处理异向运动信号的时间，将其分解成 $\Delta t_5 = 85$ ms， $\Delta t_6 = 72$ ms， $\Delta t_7 = 3$ ms^[19]。为了提高系统的阻尼性，利用双局部反馈重新构建异向运动误差的估计值，动态实时反馈位置信号。当眼球异向运动位置角度 $< 34^\circ$ 时，异向运动的眼球转动角度和时间之间的关系为线性关系，速度为 $5^\circ/s$ ，所以异向运动神经核取值 $K_4 = 5$ ^[19]。一般慢扫视是快扫的速度的 1/10， $K_3 = 1$ ，由公式(3)，(4)可知 $K_5 = 0.05$ 。扫视控制器和异向控制器之间存在耦合，使得双目协调运动。

3.3 头部控制器

注视分解后的头部转动的期望幅度 $\Delta\phi_h$ ，通过延时 d_1 和未延时信号相减，将头部的阶跃信号转化为脉冲信号。信号经过 K_6 转化为头部速度信号送入颈部控制系统，驱动头部运动装置。由反向延时元件 d_2 和积分元件模拟双向颈部肌肉。模型中

参数取值为^[13]： $d_1 = 75$ ms， $K_6 = 148$ ， $d_2 = 80$ ms， $K_7 = 0.4$ ， $K_8 = 0.05$ ， $T_{h1} = 1$ ， $T_{h2} = 6.5$ ， $T_{h3} = 0.65$ 。

4 仿真实验

设置初始眼位为 0，眼球与头部运动起始点是同向的，注视点转移的期望位置信号是静态的。使用 Matlab7.0 Simulink 对模型进行仿真。

Zee 模型^[1]扫视-异向运动仿真结果非常接近生理学数据，因而本文模型在头部固定时和 Zee 模型的仿真数据进行比较，如图 3 所示。通过表 1 的控制性能对比，本文模型比 Zee 模型稳态偏差更小，调节时间更短，超调量更小。Zee 模型的速度增益更大，所以仿真曲线上升时间比本文模型仿真曲线的上升时间短。头部无约束的平面注视点转移仿真曲线如图 4(a)所示，输入量分别为 $\Delta\phi_c = 30^\circ$ ， $\Delta\phi_v = -10^\circ$ ， $\Delta\phi_h = 4.1^\circ$ ，输出值为 $\theta_l = 20.9^\circ$ ， $\theta_r = 30.9^\circ$ ， $\theta_h = 4.1^\circ$ 。仿真结果表明，在小幅度注视转移过程中，扫视运动和缓慢的头部运动先切换注视点到目标点，然后头继续朝向目标运动，同时眼球做与头部运动方向相反运动幅度相同的运动，维持注视稳定。头部贡献比眼部贡献小，眼球完成注视点切换的速度比头转向注视点的速度快。

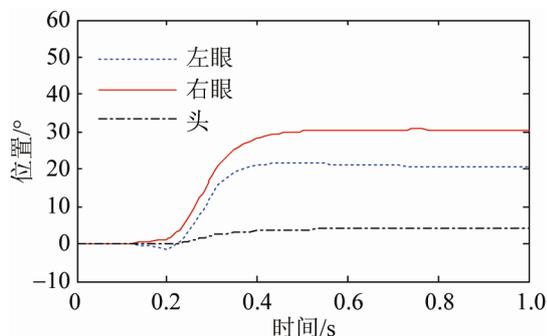
表 1 本文模型和 Zee 模型的控制性能对比

性能指标	本文模型		Zee 模型	
	左眼	右眼	左眼	右眼
e_{ss}	0	0	0.32	0.1
$\sigma/\%$	0	0	2	17.7
t_r/s	0.8	0.7	1	1.2

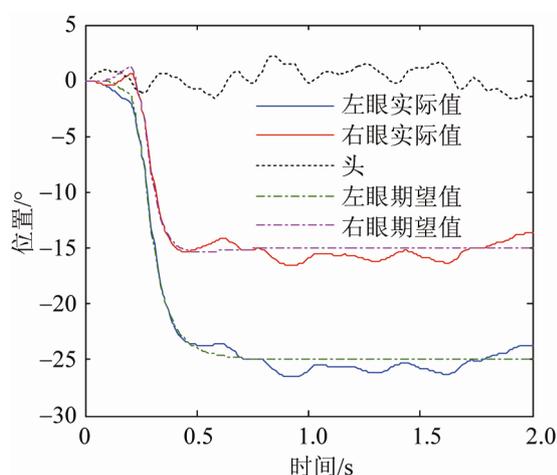
头部摄动曲线如图 4(b)黑色点划线所示，双眼视线能够跟随头部摄动变化，由头部摄动引起的眼部转动角度与因头部摄动而导致视线偏离的角度大小相等，方向相反，能补偿由头部摄动引起的视觉偏差，稳定注视点。

头部无约束的平面上大幅度注视点转移仿真曲线如图 5 所示，输入量分别为 $\Delta\phi_c = 50^\circ$ ， $\Delta\phi_v = -10^\circ$ 。当注视转移幅度大于阈值 35° 时，头部先于眼球开始运动，减小注视转移幅度，当注视

转移幅度减小到 35° , 即头部运动 15° 后, 开始进行头眼协调运动。随着注视转移幅度的增大, 头部的贡献逐渐增大。



(a) 注视转移中头眼协调运动



(b) 头部摄动下的眼球运动

图 4 小幅度注视点转移中头眼协调运动

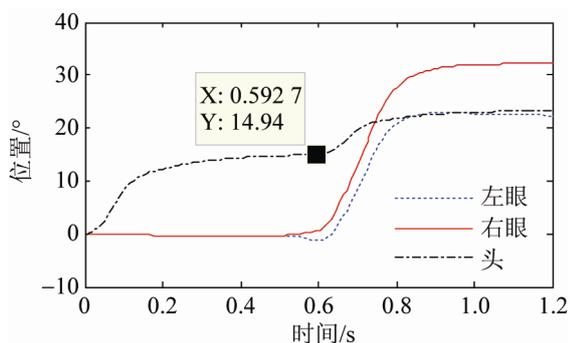


图 5 大幅度注视点转移中头眼协调运动

5 结论

仿真结果表明, 本文提出的仿生眼头眼协调控制策略及注视转移运动控制模型能通过头眼协调

运动、双目协调运动实现头部和眼球在双目水平平面的注视点转移, 此方法有效可行。在注视转移过程中, 能够通过眼球代偿运动补偿头部摄动, 稳定注视点。此方法使机器人头部和眼部更灵活地协调运动获取平面视觉信息, 维持注视稳定, 可以用于仿人型机器人视觉定位、目标跟踪, 实现机器人蔽障, 手眼协调等基于视觉的任务, 促进人机交互的进一步发展。基于视觉学习的注视分解算法是下一步研究的主要工作。

参考文献:

- [1] Zee D S, Fitzgibbon E J, Optican L M. Saccade-vergence interactions in humans [J]. *Journal of Neurophysiology* (S0022-3077), 1992, 68(5): 1624-1641.
- [2] Cullen K E, Van Horn M R. The neural control of fast vs. slow vergence eye movements [J]. *European Journal of Neuroscience* (S0953-816X), 2011, 33(11): 2147-2154.
- [3] Hung G K, Ciuffreda K J. *Models of the Visual System* [M]. New York, USA: Springer US, 2002: 431-462.
- [4] 黄素媚, 肖南峰. 仿人形机器人两眼的运动模型和控制方法研究 [J]. *系统仿真学报*, 2005, 17(9): 2065-2069.
- [5] 邹海荣, 龚振邦, 谢少荣. 仿生型机器人眼球运动控制系统建模 [J]. *机器人*, 2007, 29(4): 342-347.
- [6] Daemi M, Crawford D. Theoretical understanding of three-dimensional head-free gaze-shift [J]. *BMC Neuroscience* (S1471-2202), 2013, 15(S1): 1-2.
- [7] Nakagawa A, Sukigara M. Variable coordination of eye and head movements during the early development of attention: A longitudinal study of infants aged 12-36 months [J]. *Infant Behavior and Development* (S0163-6383), 2013, 36(4): 517-525.
- [8] Saglam M, Glasauer S, Lehnen N. Vestibular and cerebellar contribution to gaze optimality [J]. *Brain A Journal of Neurology* (S0006-8950), 2014, 137(4): 1080-1094.
- [9] Cullen K E, Brooks J X. Consulting the vestibular system is simply a must if you want to optimize gaze shifts [J]. *Brain* (S0006-8950), 2014, 137(4): 978-980.
- [10] Boulanger M, Galiana H L, Guitton D. Human eye-head gaze shifts preserve their accuracy and spatiotemporal trajectory profiles despite long-duration torque perturbations that assist or oppose head motion [J]. *Journal of Neurophysiology* (S0022-3077), 2012, 108(1): 39-56.

(下转第 1393 页)