

基于仿生机理的头眼协调系统

李树平¹, 程 军¹, 李恒宇²

(1. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000;

2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘 要: 针对多数头眼系统易受环境因素或复杂坐标变换影响的问题, 基于人类眼球生理学和解剖学原理, 根据眼球运动的神经回路, 通过对重要神经核功能以及视觉信息传递处理机制的研究, 建立一个具有眼球自适应前庭动眼反射与平滑追踪运动控制模型。结合人类行为特征, 提出一种头眼协调控制方法, 并运用 Matlab 进行控制系统仿真模拟。仿真结果表明, 该头眼协调运动控制方法不仅可以应用于机器人仿生视觉系统中, 而且具有良好的鲁棒性。

关键词: 仿生眼; 头眼协调; 前庭动眼反射; 平滑追踪; 视觉仿生; 建模仿真

中文引用格式: 李树平, 程 军, 李恒宇. 等. 基于仿生机理的头眼协调系统[J]. 计算机工程, 2016, 42(9): 273-278.

英文引用格式: Li Shuping, Cheng Jun, Li Hengyu. Head-eye Coordination System Based on Bionic Principle[J]. Computer Engineering, 2016, 42(9): 273-278.

Head-eye Coordination System Based on Bionic Principle

LI Shuping¹, CHENG Jun¹, LI Hengyu²

(1. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China;

2. School of Mechatronics Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

[Abstract] Aiming at the effect of the environmental factors and complex coordinate transformation for most head-eye systems, on the basis of the anatomical and physiological research of human eyes and the oculomotor neural circuits, an adaptive control system model of Vestibulo-ocular Reflex (VOR) and smooth pursuit is established through the research on the mechanism of the crucial nerve nuclear functions and the visual information transmission and processing. Combined with humans' behavior characteristics, a control method for the head-eye coordination is proposed and is simulated with Matlab. Simulation results show that this motion control method not only can be applied to bionic robot vision system, but also has good robustness.

[Key words] bionic eye; head-eye coordination; Vestibulo-ocular Reflex (VOR); smooth pursuit; vision bionics; modeling simulation

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2016.09.048

1 概述

仿生技术在机器人的共性技术研究中日益受到关注。仿人机器人不仅要具有类人的外貌特征, 更要具有类人的智能行为, 而获得智能最重要的途径是与环境和人类进行交互^[1]。人类感知客观世界绝大多数的信息通过眼睛, “眼睛”对机器人来说也是一种重要的感知设备^[2]。因此, 为扩大机器人的视

觉范围, 需大范围地跟踪或注视目标; 为获得更加稳定、清晰的图像, 需减少人眼观察和计算机处理图像的难度; 为增强人机交互的自然性(例如与机器人谈话过程中的视线接触), 使机器人进入家庭、服务机构, 只能是头眼共同协作快速而精准地完成。

文献[3]运用光流法提出了一种实时视觉行为, 该方法通过光通量浓淡及距离图像信息计算被注视对象的光通量能量函数等来控制头眼协调运动, 但

基金项目: 国家自然科学基金资助重点项目(61233010); 国家自然科学基金资助项目(61305106); 博士学科点基金资助项目(72103/001/008)。

作者简介: 李树平(1976-), 男, 讲师、博士, 主研方向为机器人视觉、仿生眼技术; 程 军(通讯作者), 讲师、硕士; 李恒宇, 讲师、博士。

收稿日期: 2015-06-15 **修回日期:** 2015-11-05 **E-mail:** chengjun@hpu.edu.cn

是,这类方法极易受到来自环境的干扰,并且光通量能量函数的计算算法十分复杂,很难在动态环境下实时应用^[4]。文献[5-8]从人类视觉的观点出发,追踪捕捉空间对象的三维位姿,然而,头眼运动控制需要完成从立体视觉空间到三维作业空间极其复杂的坐标变换^[4],并且每次作业前需要完成十分繁琐的头眼校正。只有少数模型是基于神经生理学和解剖学构造的^[9]。

本文基于人眼神经回路建立前庭动眼反射和平滑追踪的数学模型,结合人类行为特征,提出一种头

眼协调控制策略,并将该方法用于仿生头眼运动系统控制原理。

2 眼球运动神经回路与控制系统模型

2.1 眼球运动的神经回路

根据生理学和解剖学的研究,眼球运动神经回路如图1所示。在图1中,神经回路②经过颅底视交叉与神经回路③融合^[10-11]。然后分成两支分别传送:一支为LNG→VC→DLPN→VPFL→VN;另一支为NOT→NRTP→VN。

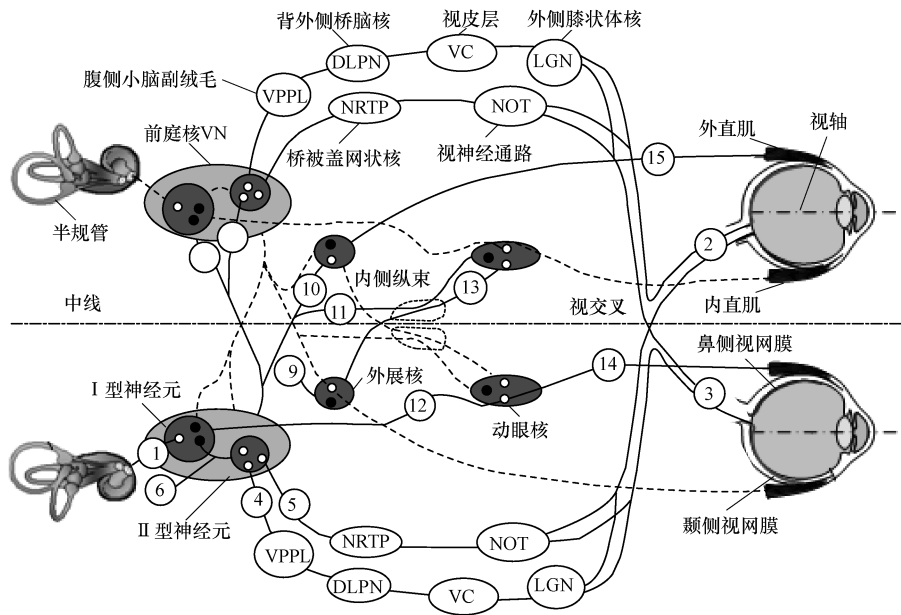


图1 眼球运动神经网络

前庭核到眼球肌群的兴奋神经回路为前庭核的I型神经元兴奋神经轴突:(1)经⑩→左眼外展核→⑮→左眼外直肌;(2)经⑫→动眼核→⑭→右眼内直肌。抑制神经回路为前庭核的I型神经元抑制神经轴突:(1)经⑪→左眼动眼核→左眼内直肌:(2)经⑨→右眼外展核→右眼外直肌。

2.2 眼球运动控制系统模型

由于眼球运动是一个非线形的、复杂的系统,考虑到建模方便,做如下假设^[12-14]:(1)所有的传递函数都被认为是线性的;(2)不考虑时间延迟。

前庭系统的传递函数 $G_1(s)$ 如式1所示。头部的角加速度为输入信号,输出信号是具有不同频率、波幅特性的神经刺激^[15]: T_v 是前庭神经的时间常数,根据生理学实验 $T_v = 16\text{ s}^{[15]}$ 。

$$G_1(s) = \frac{T_v}{sT_v + 1} \tag{1}$$

从前庭神经核到内直肌或外直肌的神经路径传递函数 $G_2(s)$ 表示为一个不完全积分器和一个直接通路的增益,其中, T_n 是积分器的时间常数; g_e 是直接通路的增益^[16]。根据生理学实验, $T_n = 25\text{ s}$, $g_e = 0.24^{[16]}$ 。

$$G_2(s) = \frac{T_n}{sT_n + 1} + g_e \tag{2}$$

根据生理学研究,眼球运动装置的传递函数 $G_3(s)$ 可以表示为^[17]:

$$G_3(s) = \frac{1}{sT_e + 1} \tag{3}$$

其中, T_e 是眼球运动装置的时间常数,根据生理学实验 $T_e = 0.24\text{ s}^{[17]}$ 。

基于眼球运动的神经回路,建立了可以实现眼球前庭动眼反射运动、眼球平滑追踪运动的控制系统模型,如图2所示。

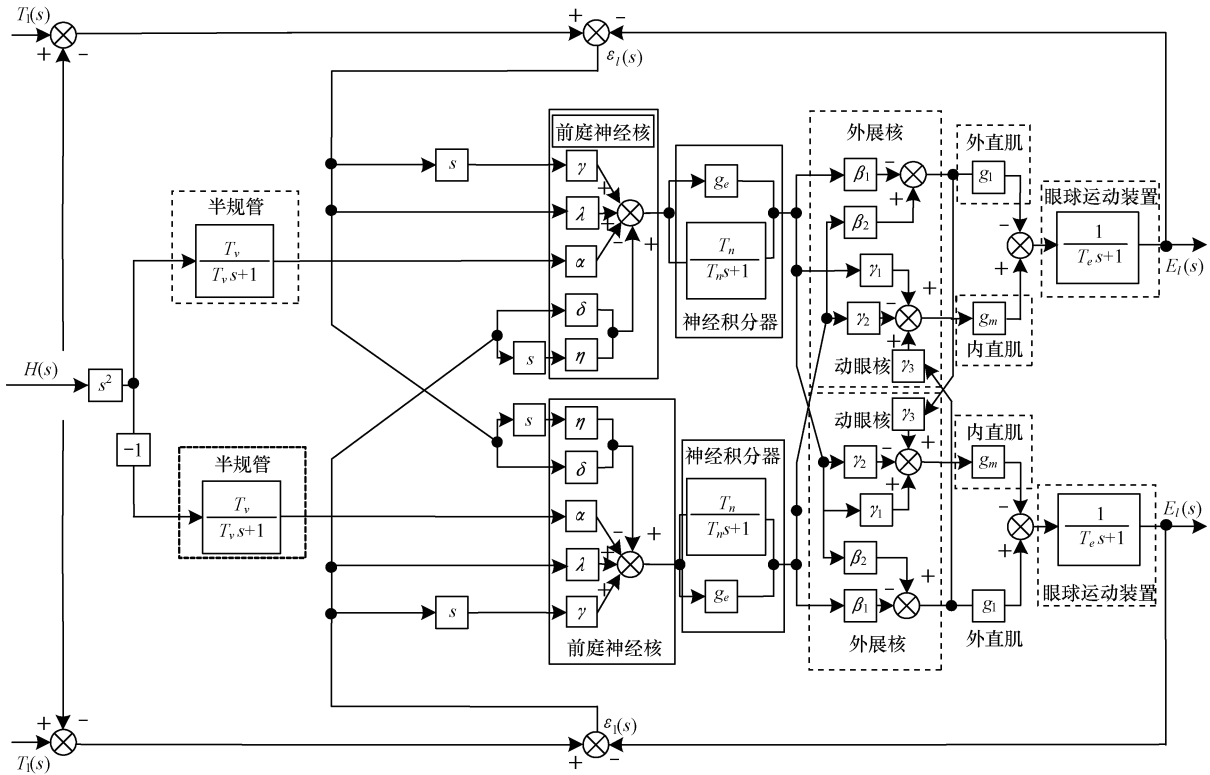


图 2 眼球运动控制系统结构

$$\mathbf{T}(s) = \begin{bmatrix} T_x(s) \\ T_y(s) \\ T_z(s) \end{bmatrix}, \mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} H_x(s) \\ H_y(s) \\ H_z(s) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E}(s) = \begin{bmatrix} E_x(s) \\ E_y(s) \\ E_z(s) \end{bmatrix}, \boldsymbol{\varepsilon}(s) = \begin{bmatrix} \varepsilon_x(s) \\ \varepsilon_y(s) \\ \varepsilon_z(s) \end{bmatrix}$$

其中,矩阵 $\mathbf{T}(s)$ 是目标绕脖子的旋转角度;矩阵 $\mathbf{H}(s)$ 是头部旋转角度;矩阵 $\mathbf{E}(s)$ 是眼球的旋转角度;矩阵 $\boldsymbol{\varepsilon}(s)$ 是视网膜滑动位移, $\boldsymbol{\varepsilon}(s) = \mathbf{T}(s) - \mathbf{H}(s) - \mathbf{E}(s)$;下标 l 和 r 分别代表左右。

由于 $T_n = 25$ s 远远大于 $g_e = 0.24$, 因此可得:

$$\frac{T_n}{sT_n + 1} + g_e \approx \frac{T_n(sg_e + 1)}{sT_n + 1} \quad (4)$$

又由于 $T_e = g_e = 0.24$, 因此图 2 可以简化为图 3。

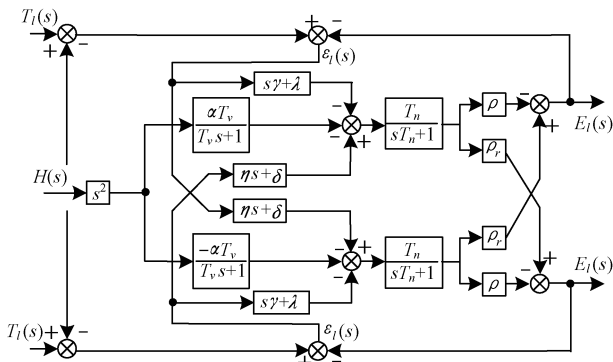


图 3 眼球运动控制系统简化示意图

最终输出为:

$$E_l(s) = \frac{\alpha T_n T_v s^2 (\rho + \rho_r)}{(T_n s + 1)(T_v s + 1)} H(s) + \frac{T_n \varepsilon_l(s)}{T_n s + 1} [(\delta \rho_r + \lambda \rho) + (\gamma \rho + \eta \rho_r)] - \frac{T_n \varepsilon_r(s)}{T_n s + 1} [(\rho \delta + \lambda \rho_r) + (\eta \rho + \gamma \rho_r)] \quad (5)$$

$$E_r(s) = \frac{-\alpha T_n T_v s^2 (\rho + \rho_r)}{(T_n s + 1)(T_v s + 1)} H(s) + \frac{T_n \varepsilon_r(s)}{T_n s + 1} [(\delta \rho_r + \lambda \rho) + (\gamma \rho + \eta \rho_r)] - \frac{T_n \varepsilon_l(s)}{T_n s + 1} [(\rho \delta + \lambda \rho_r) + (\eta \rho + \gamma \rho_r)] \quad (6)$$

其中, $E_l(s)$ 与 $E_r(s)$ 分别表示左右眼球的旋转角度。根据生理学实验, $\alpha = 1, \gamma = 1, \lambda = 1, \eta = 0.5, \delta = 0.25, \rho = 1.5, \rho_r = 0.5$ [17-18]。

3 头眼协调运动控制系统

在医学上,关节活动范围称为关节活动度,通常用量角器进行测定。测量时颈部自然伸直,下颌内收。在一般情况下,颈椎的前屈后伸(俯仰)各为 45° ;左右侧屈(横滚)各为 45° ;左右旋转(偏航)各为 75° [19]。

当自由地看周围环境时,视线很快地从一个注视点移向另一个注视点(扫视运动) [20], 捕捉感兴趣的目标。目标缓慢移动(小于 $50^\circ/\text{s}$)时,眼球跟随目标作一定速度的缓慢运动(平滑追踪) [20], 大范围跟踪目标时就需要伴随头部运动,当头位突然改变时,前

庭刺激引起反射性眼球运动,产生与头转方向相反的眼动,使眼的位置在头和身体的姿势改变时保持不变,以维持视网膜成像的稳定(前庭动眼反射)^[20],此时,头位转动角与视线偏转角成线性关系^[21]。如图4所示,图4(a)、图4(b)分别表示初始位置和头部水平旋转时的头位转动角向量 H_x 与视线偏转角向量 V_x 。

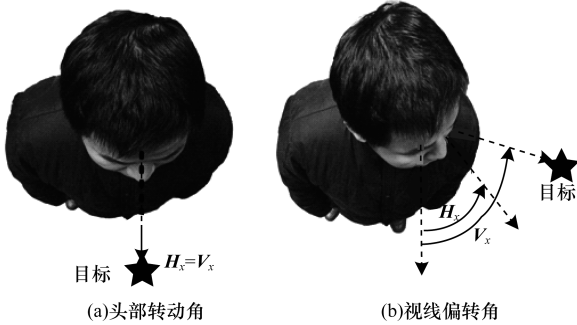


图4 头位转动角 H_x 与视线偏转角 V_x

到目前为止,很多文献对人类视线偏转角与头位转角之间的关系进行了研究。文献[22]发现在水平视线偏转角超过 20° 时,一半的实验对象出于习惯,会伴有头部转动;文献[6]提出水平视线偏转角超过 20° 或垂直视线偏转角超过 10° 时,目标与头部偏移较大,头部需转动正对目标;文献[23]以 20 岁左右的人群为实验对象,发现当视线偏转角超过 30° 时,头位转动角占视线偏转角的百分比几乎是一常数,在 $60\% \sim 70\%$ 之间,文献[24]提出,这一比率在 69% 左右。当然,由于性别、年龄和个人习惯的不同,比例大小可能有所不同。基于以上的研究,建立头部运动模型如下:

$$H_x = \begin{cases} 0 & |V_x| \leq 20 \\ \frac{7(|V_x| - 20)}{100} |V_x| & 20 < |V_x| < 30 \\ \frac{7}{10} |V_x| & 30 \leq |V_x| \end{cases} \quad (7)$$

$$H_y = \begin{cases} 0 & |V_y| \leq 10 \\ \frac{7(|V_y| - 10)}{100} |V_y| & 10 < |V_y| < 20 \\ \frac{7}{10} |V_y| & 20 \leq |V_y| \end{cases} \quad (8)$$

其中,向量 H_x, H_y, V_x, V_y 代表当头部垂直旋转时的头位转动角与视线偏转角。

头眼协调运动控制流程如图5所示,本文以球作为目标物,其质心点作为空间注视点,取图像平面上投影圆的圆心作为目标点。当目标点脱离图像平面中心位置时,眼睛快速扫视聚焦在注视点上,保证注视点成像在图像平面的中心位置。眼睛注视到目标物上时,如果水平视线偏转角小于 20° 或垂直视线偏转角小于 10° ,则进入眼球运动控制模型,此时,头部无转动,即 $H(s) = 0$,眼球作平滑追踪运动,实时对目标进行追踪,否则进入眼球与头部运动控制模型,头眼协调运动,头部转动,眼球作前庭动眼反射

运动,之后返回视线偏转角比较程序。

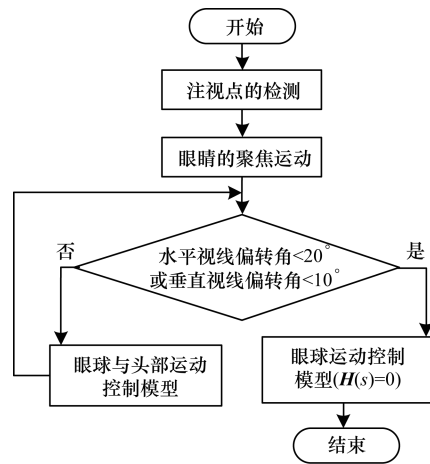


图5 头眼协调运动控制流程

4 仿真实验结果与分析

在 Matlab 环境下,本文对头眼协调系统模型进行了仿真。图6~图8分别表示水平视线偏转角小于等于 20° 、大于 20° 小于 30° 、大于等于 30° 时的平滑追踪结果。图9~图11分别表示垂直视线偏转角小于等于 10° 、大于 10° 小于 20° 、大于等于 20° 时的平滑追踪结果。其中,目标实线表示视线偏转角度,头部点线表示头位转动角度,左眼虚线和右眼点划线分别表示左右眼球的输出角度。视线偏转角 V_x, V_y 作为已知输入角度,头位转动角度 H_x, H_y 由式(7)、式(8)计算获得,左右眼输出角度 $E_l(s), E_r(s)$ 来自式(5)、式(6)。

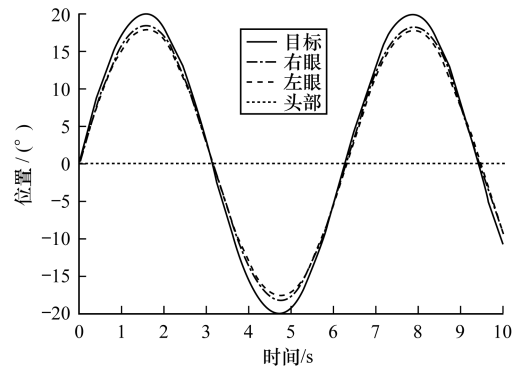


图6 $|V_x| \leq 20^\circ$ 时的平滑追踪结果

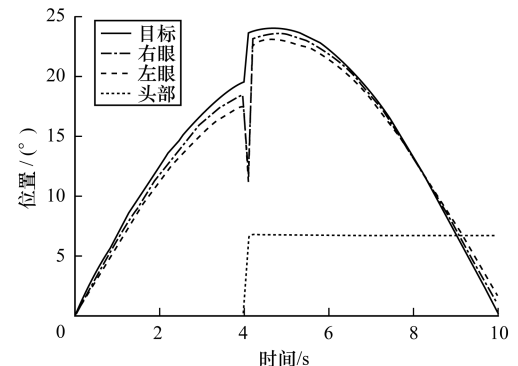


图7 $20^\circ < |V_x| < 30^\circ$ 时的平滑追踪结果

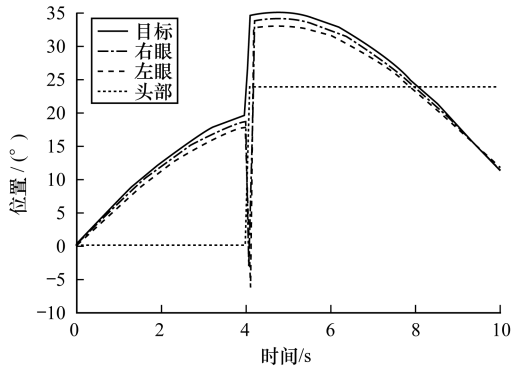


图 8 $|V_x| \geq 30^\circ$ 时的平滑追踪结果

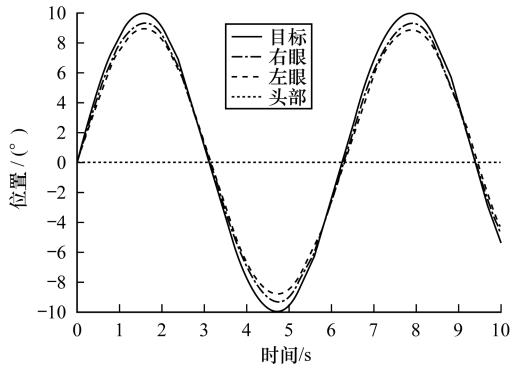


图 9 $|V_y| \leq 10^\circ$ 时的平滑追踪结果

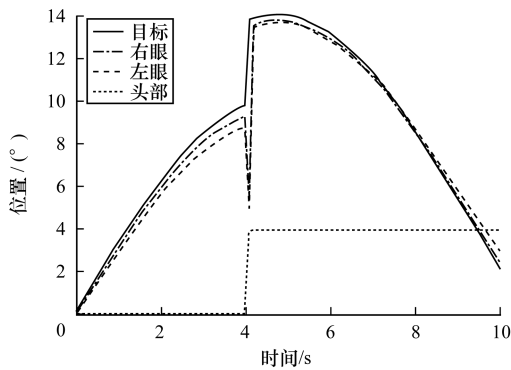


图 10 $10^\circ < |V_y| < 20^\circ$ 时的平滑追踪结果

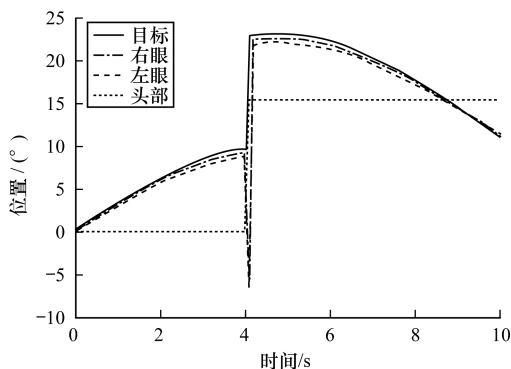


图 11 $|V_y| \geq 20^\circ$ 时的仿真结果

以图 6 为例对仿真过程进行说明,输入数据为水平视线偏转角 V_x (图 6 中目标实线为输入正弦曲线 $V_x = 20\sin(x)$), 因视线偏转角小于 20° , 由头部运

动模型即式(7)得到头部转动数据为 $H(s) = 0$ (图 6 中点线), 然后进入眼球运动控制模型 (图 5), 由 $\epsilon(s) = T(s) - H(s) - E(s) = V_x - E(s)$ 得到 $\epsilon_l(s) = V_x - E_l(s)$ 与 $\epsilon_r(s) = V_x - E_r(s)$, 分别带入式(5)、式(6)中, 即可得到左眼输出数据曲线 (图 6 中虚线) 与右眼输出数据曲线 (图 6 中点划线)。

图 6、图 9 结果表明, 当水平视线偏转角小于等于 20° 或垂直视线偏转角小于等于 10° 时, 头部无转动, 即 $H(s) = 0$, 视网膜滑动位移 (视线偏转角与左右眼输出角度之差) 很小, 眼球视线随目标运动而变化, 双眼能实时地对目标进行跟踪。图 7、图 8、图 10、图 11 结果显示, 当水平视线偏转角大于 20° 或垂直视线偏转角大于 10° 时, 头部开始转动, 并且头部姿态发生突然变化时, 视网膜存在较大偏差, 但眼球的前庭动眼反射功能会迅速产生相反的运动以补偿由头部姿态变化引起的追踪误差, 并使跟踪系统很快达到稳定状态, 继续快速而准确地对目标实时追踪。

通过以上仿真实验结果可以看出, 本文系统具有良好的动态性能和鲁棒性。

5 结束语

传统的光流法和三维位姿捕捉法由于受到环境因素和复杂坐标变换的影响, 使得头眼协调运动系统的运用受到限制。本文从人眼生理学和解剖学原理出发, 根据眼球神经回路建立了前庭动眼反射和平滑追踪模型, 并结合人类行为特征提出一种头眼协调控制方法。Matlab 仿真实验结果表明, 本文提出的数学模型和控制方法是正确有效的。制作加工机器人头眼协调仿生机械云台系统, 对眼球运动数学模型和控制方法再次验证, 是下一步的工作。

参考文献

- [1] Breazeal C. Social Interactions in HRI: The Robot View[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2004, 34(2): 181-186.
- [2] 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.
- [3] Batista J, Peixoto P, Araújo H. Visual Behaviors for Real-time Control of a Binocular Active Vision System[J]. Control Engineering Practice, 1997, 5(10): 1451-1461.
- [4] 黄素媚, 肖南峰. 仿人型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, 29(4): 2065-2069.
- [5] Masuko S, Hoshino J. Generating Head-eye Movement for Virtual Actor [J]. Systems and Computers in Japan, 2006, 37(12): 33-44.

- [6] Jartuwat J, Dan O P. Robot Head Motion Control with an Emphasis on Realism of Neck-eye Coordination During Object Tracking [J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 2011, 63(2):163-190.
- [7] 顾立忠, 苏剑波. 仿人型机器人的头眼协调运动控制研究 [J]. *机器人*, 2008, 30(2):165-170.
- [8] 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.
- [9] Manfredi L, Maini E S, Dario P, et al. Implementation of a Neurophysiological Model of Saccadic Eye Movements on an Anthropomorphic Robotic Head [C] // *Proceedings of the 6th IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots. Humanoids, USA; IEEE Press*, 2006: 438-443.
- [10] Zhang Xiaolin, Hidetoshi W. A Unified Adaptive Oculomotor Control Model [J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2001, 15(7): 697-713.
- [11] Smith H L H, Galiana H L. The Role of Structural Symmetry in Linearizing Ocular Reflexes [J]. *Biological Cybernetics*, 1991, 65(1):12-22.
- [12] Robinson D A. The Mechanics of Human Smooth Pursuit Eye Movement [J]. *Journal of Physiology*, 1965, 39(5):569-591.
- [13] Robinson D A. Linear Addition of Optokinetic and Vestibular Signals in the Vestibular Nucleus [J]. *Experimental Brain Research*, 1977, 30:447-450.
- [14] Zhang X, Wakamatsu H. Mathematical Model for Binocular Movement Mechanism and Construction of Eye Axes Control System [J]. *Journal of the Robotics Society of Japan*, 2002, 20(1):89-97.
- [15] Chun K S, Robinson D A. A Model of Quick Phase Generation in the Vestibuloocular Reflex [J]. *Journal of Biological Cybernetics*, 1978, 28(1):209-221.
- [16] Cannon S C, Robinson D A. Loss of the Neural Integrator of the Oculomotor System from Brain Stem Lesions in Monkey [J]. *Journal of Neurophysiology*, 1987, 57(5):1383-1409.
- [17] Robinson D A. The Use of Control Systems Analysis in the Neurophysiology of Eye Movements [J]. *Annual Reviews Neuroscience*, 1981, 4:463-503.
- [18] 李恒宇, 罗均, 谢少荣, 等. 仿生双眼前庭动眼反射的控制模型研究 [J]. *系统仿真学报*, 2010, 22(3): 720-723.
- [19] 方中甲. 面向颈关节的3自由度球面并联机构的研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2004.
- [20] Zou Hairong. Modeling and Simulation of the Oculomotor Control System [C] // *Proceedings of the 2nd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Shanghai, China; [s. n.]*, 2008:853-856.
- [21] Zangemeister W, Stark L. Types of Gaze Movement: Variable Interaction of Eye and Head Movements [J]. *Experimental Neurology*, 1982, 77(1):563-577.
- [22] Afanador A, Aitsebaomo A. The Range of Eye Movements Through Progressive Multifocals [J]. *Optometry Monographs*, 1982, 73(1):82-89.
- [23] Yamada M. Analysis of Coordination Between Head and Eye Movements in Gazing at Target on 2D Plane [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 1992, 75:971-981.
- [24] Kim K H, Reed M P, Martin B J. A Model of Head Movement Contribution for Gaze Transitions [J]. *Ergonomics*, 2010, 53(4):447-457.

编辑 索书志

~~~~~  
(上接第272页)

- [ 13 ] Sam H, Amir S, Philip H S T. Struck: Structured Output Tracking with Kernels [ C ] // *Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision. Washington D. C., USA; IEEE Press*, 2011:263-270.
- [ 14 ] Yossi R, Carlo T, Leonidas J G. The Earth Mover's Distance as a Metric for Image Retrieval [ J ]. *International Journal of Computer Vision*, 2000, 40(2):99-121.
- [ 15 ] Amit A, Ehud R, Ilan S. Robust Fragments-based Tracking Using the Integral Histogram [ C ] // *Proceedings of 2006 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Washington D. C., USA; IEEE Press*, 2006: 798-805.
- [ 16 ] Grabner H, Grabner M, Bischof H. Real-time Tracking via On-line Boosting [ C ] // *Proceedings of British Machine Vision Conference. Bristol, UK; [s. n.]*, 2006:47-56.

编辑 金胡考