

基于眼球前庭动眼反射的机器人视觉误差主动补偿方法

李恒宇, 罗均, 李超, 李磊, 谢少荣

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 针对机器人在颠簸环境下作业过程中产生姿态变化从而导致的视觉不稳定性问题, 基于眼球前庭动眼反射的机理, 提出一种主动补偿视觉误差的方法。在生理学和解剖学的基础上, 根据眼球运动的神经回路, 建立了一个具有自适应性的前庭动眼反射控制模型。为了验证模型的性能, 在不同的环境中进行了仿真实验, 仿真结果表明该模型可以主动补偿机器人姿态变化所引起的视觉误差, 并且具有良好的自适应性。最后, 通过实体机器人实验验证了该控制模型的有效性与准确性。

关键词: 仿生眼; 前庭动眼反射; 眼球运动控制; 视觉补偿; 机器人视觉

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2011)-02-0191-07

Active Compensation Method of Robot Visual Error Based on Vestibulo-ocular Reflex

LI Hengyu, LUO Jun, LI Chao, LI Lei, XIE Shaorong

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

Abstract: To solve the problem of vision instability caused by attitude variation of the robot working under bumpy environment, a method of active compensation for robot visual error is proposed based on the principle of vestibulo-ocular reflex(VOR). According to oculomotor neural circuits, an adaptive control model of vestibulo-ocular reflex is established on the basis of physiology and anatomy. In order to verify the model's performance, some simulation experiments are performed in different environments. Simulation results show that the model can actively compensate the visual error caused by robot attitude variation and has better adaptability. Finally, physical robot experiments demonstrate the validity and accuracy of the control model.

Keywords: biomimetic eye; vestibulo-ocular reflex; oculomotor control; visual compensation; robot vision

1 引言 (Introduction)

机器人代替人类在地面、水下以及空中进行作业是科技服务人类的典型体现。近年来, 机器人应用领域不断扩大, 并且正在以惊人的速度从工业领域走向非工业领域、从结构环境走向非结构环境。人类感知客观世界绝大部分的信息是通过眼睛, 对机器人来说, “眼睛”也是一种重要的感知设备^[1-2]。为了扩大机器人视觉对跟踪或注视目标的范围, 大多机器人对视觉系统都装有2维或3维的转动伺服机械云台。在控制机械云台的过程中, 视觉系统对目标自动跟踪技术的研究焦点主要集中在图像处理方面, 主要是如何提取图像特征、检测目标并进行匹配、计算目标的空间位置等^[3]。然而在复杂的非结构化的室外环境下, 机器人受到来自外界干扰、自身姿态变化以及机体振动等的影响, 因此对单纯

通过图像处理方法来调节伺服机械云台, 补偿的范围小, 图像的稳定性也较差。

人眼具有特殊的自然功能, 当头部姿态发生变化时, 仍能清楚地注视目标。机器人在非结构环境中作业时, 姿态容易发生变化, 也迫切需要具有类似人眼的这种功能。在机器人共性技术的研究中, 仿生技术日益受到关注, 并随着眼球解剖学和生理神经学的发展, 为眼球运动建模提供了大量的数据和理论基础^[4]。因此仿生眼的建模及其在机电系统中的应用成为研究的热点问题。美国约翰·霍普金斯大学^[5-6]、华盛顿大学^[7-8]和加拿大麦吉尔大学^[9-10]等针对眼球的某些运动建立了眼球运动控制模型, 但是没有进一步应用到机电控制系统当中。日本东京工业大学^[11]、日本科技公司^[12]和国内的上海大学^[2,13]、华南理工大学^[14]等侧重于仿生眼建

基金项目: 国家863计划资助项目(2009AA04Z211); 国家自然科学基金资助项目(60975068, 50975168); 教育部科学技术研究重点项目(210071); 上海市教委创新项目(10ZZ60)。

通讯作者: 罗均, luojun@shu.edu.cn 收稿/录用/修回: 2010-06-04/2010-09-03/2010-11-21

模与工程应用研究，并将所建的模型应用到机器人视觉当中，用来提高机器人视觉的自适应性。

本文在眼球运动生理神经学和解剖学的基础上，提出了一个自适应的眼球前庭动眼反射模型，同时对模型进行了仿真分析，最后为验证该模型的性能进行了相关实验。仿真与实验结果表明，当机器人在颠簸环境下作业时，该系统可以有效地补偿由机器人姿态变化引起的误差。

2 建模 (Modelling)

仿生眼就是模拟生物眼睛系统的原理来建造人工视觉系统，使其具有类似于人类眼睛的特征或功能。人类在 20 世纪 60 年代初期就开始用控制系统理论来理解和研究眼球运动系统。经典的眼球运动控制理论已经创建了许多眼球控制数学模型，然而这些数学控制模型主要集中于输入—输出 (input-output) 的关系。由于缺少生理学和解剖学的数据，这些模型很少或没有注意生理学和解剖学，因此，也制约了所建模型的性能。随着科技的进步，眼球运动的神经营路以及影响眼球运动神经元的功能都逐渐得到发现与证明，这为眼球运动的建模提供了理论依据，眼球建模从早期宏观的输入—输出型的“黑箱”式建模发展到现在微观的使用神经元触发率进行建模^[4,9]。

2.1 前庭动眼反射的神经营路

人的眼球基本上是一个球体，眼球的运动是几条眼外肌协作的共同效应。人体中与视觉有关的器官主要有眼球、脑干、小脑和前庭器官。高等动物的前庭器官包括椭圆囊、球囊及 3 个半规管。半规管能测定旋转加速度运动，而椭圆囊及球囊则能感受包括重力（地心吸引力）的直线加速度运动。这些在解剖学上造型独特的前庭器官具有精密的结构，能准确地测定头部任何时候的空间位置及运动方向。当头部运动时，旋转及直线加速的改变使前庭器官直接受到刺激，因为中枢神经系统最先接收到的是加速度形式的信号，它必须做出数学上相当于积分的运算以求出头部当时的运行速度及位置变化。根据眼睛的解剖学和生理学研究^[2,11]，眼球运动的神经营路如图 1 所示。从视网膜的颞侧开始的神经营路经过视交叉与另一只眼的鼻侧视网膜开始的神经营路融合，视网膜神经节细胞的轴突形成了视神经，两侧视神经在颅底形成视交叉至对侧，另一半仍留在同侧，与另一侧神经交叉的纤维形成视束，然后沿着两条不同的路径向前。半规管感知的头部姿态信息传输的神经营路是：前庭神经核 (VN，

vestibular nucleus) → 外展神经核 (AN, abducent nucleus) → 外直肌 (LR, lateral rectus) 和前庭神经核 → 动眼神经核 (OMN, oculomotor nucleus) → 内直肌 (MR, medial rectus)。视网膜的信息是通过两条回路传入前庭神经核，一条是外侧膝状神经核 (LGN, lateral geniculate nucleus) → 视皮层 (VC, visual cortex) → 颞中及内侧颞 (MT&MST, middle temporal & medial superior temporal) → 背外侧脑桥神经核 (DLPN, dorsolateral pontine nucleus) → 前庭神经核，另一条是视束神经核 (NOT, nucleus of the optic tract) → 桥被盖网状核 (NRTP, nucleus reticularis tegmenti pontis) → 前庭神经核。另外，视网膜的滑动误差信息通过苔藓纤维 (mossy fiber, mf) 传入小脑绒毛 (flocculus)，研究发现小脑绒毛对视网膜滑动误差信息具有记忆预测和补偿的功能^[15-16]。

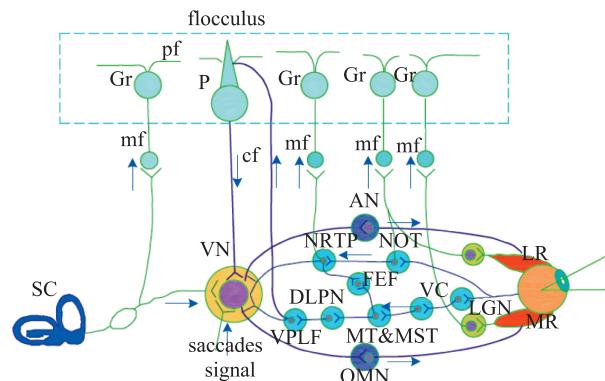


图 1 眼球运动的神经营路

Fig.1 Oculomotor neural circuits

2.2 前庭动眼反射的建模

前庭器官中半规管感受头部的运动信息，其输入信号是头部旋转的角加速度。半规管所具有的线性与非线性的动态特性一直是很多学者研究的问题，假如不考虑半规管的非线性因素，大多数研究者认为半规管的数学模型是头部角加速度的一个高通滤波器^[2,9,11]，半规管的线性动态传递函数可以表示为

$$\frac{C(s)}{\dot{H}(s)} = \frac{T_c}{sT_c + 1} \quad (1)$$

式 (1) 中 $C(s)$ 是半规管主要纤维的调制发射率的拉氏变换， $\dot{H}(s)$ 是头部旋转角加速度的拉氏变换， T_c 是半规管时间常数，根据生理学实验， $T_c = 16$ s。

研究发现眼球运动装置作为简单的一阶系统，它可以精确地表示在眼的角度位置和动眼核触发率之间的关系。通过对猴子做实验发现外展核的触发率 $\Delta M(t)$ 与眼球轨迹角度位置和速度相关^[6,9]，可表

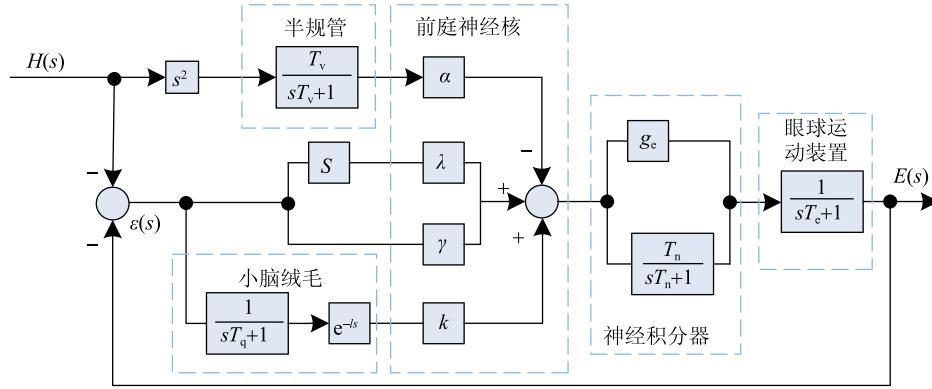


图2 眼球前庭动眼反射控制系统结构图

Fig.2 Diagram of VOR control system

示为

$$\Delta M(t) = k e(t) + r \dot{e}(t) \quad (2)$$

根据式(2), 可以用下面的一阶传递函数近似表达眼球在慢速运动情况下的模型:

$$P(s) = \frac{E(s)}{\Delta M(t)} = \frac{1/k}{(r/k)s + 1} = \frac{K_e}{T_e s + 1} \quad (3)$$

其中 $E(s)$ 表示眼球位置输出的拉氏变换, $K_e = 1 \text{deg/spikess}^{-1}$, $T_e = 0.24 \text{s}$.

在前庭神经核与动眼核或外展神经核之间的是一个不完全神经积分器^[11], 因此神经回路从前庭神经核到内直肌和外直肌间的传递函数表示为一个不完全神经积分器和一个直接通路的和, 如式(3)所示, 式中 T_n 是积分器的时间常数, g_e 是直接通路的增益^[2,11]. 正常状态下, 根据生理学实验, $T_n = 25 \text{s}$, $g_e = 0.24$.

$$NI(s) = \frac{T_n}{sT_n + 1} + g_e \quad (4)$$

早期的眼球建模对小脑绒毛的功能考虑的较少, 生理和解剖学研究表明小脑绒毛在前庭动眼反射中起到重要的作用, Shibata^[12] 等人采用误差反馈学习来模拟小脑绒毛的功能, 其实质是采用最小二乘法结合神经网络来实现的. 东京工业大学 Zhang^[11] 等人采用神经网络 ANN 来模拟小脑绒毛的功能, 都取得较好的效果, 然而采用神经网络算法相对比较繁琐. 我们应用的这个模型处于一个复杂非结构环境中, 对算法的实时性要求较高, 因此采用高精度重复误差控制器来补偿, 其本质是通过过去的控制误差与现在的偏差叠加, 即用过去的误差来补偿现在的误差, 从控制角度来讲该控制器更能体现小脑绒毛预测补偿的功能. 在重复控制中, 一般期望重复控制作用在高频段的增益减小, 为此,

在重复控制中加入一个低通滤波器进行优化. 小脑绒毛的功能可用 $Q(s)$ 近似模拟, 其中 $T_q = 0.2 \text{s}$, 为滤波器的时间常数. 根据眼球生理学与系统硬件特点, $l = 0.012 \text{s}$, 为两个误差重叠的时间间隔.

$$Q(s) = \frac{e^{-ls}}{sT_q + 1} \quad (5)$$

根据前庭动眼反射的神经回路建立可以实现前庭动眼反射的控制系统, 如图3所示. 由于 T_n 的值远大于 g_e , 可得到:

$$\frac{T_n}{sT_n + 1} + g_e = \frac{T_n + g_e(sT_n + 1)}{sT_n + 1} \approx \frac{T_n(sg_e + 1)}{sT_n + 1} \quad (6)$$

因为 $g_e = T_e$, 所以神经积分器与眼球运动装置进行约分, 图2简化为图3, 图3是眼球前庭动眼反射的控制系统数学模型.

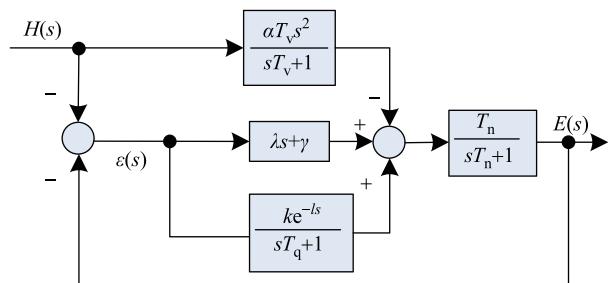


图3 眼球前庭动眼反射控制系统简化结构图

Fig.3 Simplified diagram of VOR control system

系统的输出是:

$$E(s) = H(s) \frac{-\alpha T_v T_n s^2}{(sT_v + 1)(sT_n + 1)} + e(s)[(\lambda s + \gamma) + \frac{k e^{-ls}}{sT_q + 1}] \frac{T_n}{sT_n + 1} \quad (7)$$

其中, $e(s) = -(H(s) + E(s))$, $e(s)$ 是视网膜滑动偏差, $H(s)$ 是头部旋转姿态的角度, $E(s)$ 是眼球旋转的角度, α 、 λ 和 γ 分别代表头部旋转速度信号、视

网膜滑动速度信号和视网膜滑动位移信号的神经纤维的突出增益。在正常情况下, α 、 λ 和 γ 是 $0 \sim 1$ 之间的常数增益, 不同动物的增益可能不同, 对人来说 $\alpha = 1$, $\lambda = 1$, $\gamma = 1$. k 为小脑绒毛对视网膜误差信号补偿的权值, 通过对系统进行辨识选取 $k = 2.5$.

3 实验分析 (Experiments and analysis)

上述建立的前庭动眼反射数学模型, 可以根据机器人姿态变化的信息主动地进行补偿, 以达到机器人在颠簸环境中的补偿效果。为了验证模型的性能, 下面分别对模型进行仿真实验以及机器人颠簸环境下的测试实验。

3.1 仿真实验

生理学前庭动眼反射实验表明, 当头部姿态发生高速旋转的时候, 眼睛运动控制系统的视网膜的偏差信号对整个系统几乎没有影响, 眼睛运动仅由半规管的头部运动信号控制, 即反馈误差为 $\varepsilon(s) = 0$, 此种情况数学模型可以用式(8)表示^[2].

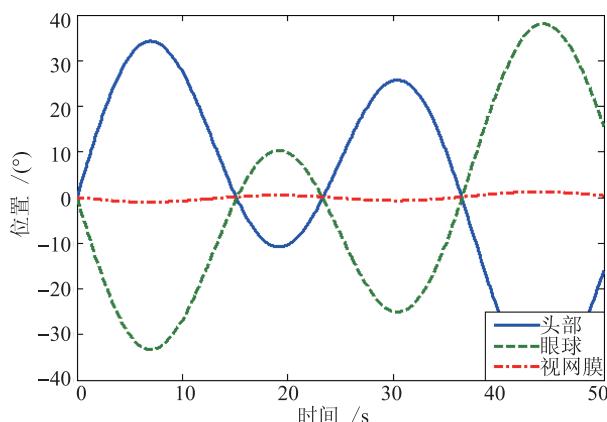


图 4 理想环境下的仿真结果

Fig.4 The simulation results under ideal environment

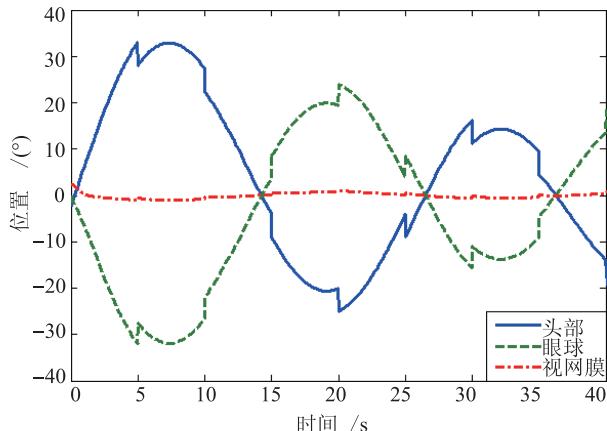


图 6 颠簸环境下 (低频) 的仿真结果

Fig.6 The simulation results under bumpy environment (low frequency)

$$E(s) = \frac{-\alpha T_v T_n s^2}{(sT_v + 1)(sT_n + 1)} H(s) \quad (8)$$

然而不论是人类眼球还是机器人, 在颠簸环境中这种情况是很少发生的, 更多的是 $\varepsilon(s) \neq 0$ 的情况。这种情况的数学模型可以用式(7)表示。在 Matlab7.0 环境下模拟现实环境对所建模型进行仿真。图 4 是在理想环境中机器人发生相对比较平稳的姿态变化的情况, 仿真结果表明当头部产生姿态变化时, 眼球会产生相反的运动以补偿由头部姿态变化引起的视网膜误差。图 5 是机器人处于恶劣的环境时的仿真结果, 结果表明该系统仅在位置发生突变 (加速度很高) 的情况下具有较好的动态性能, 能在较短的时间内达到稳定状态。图 6 是在低频颠簸环境中的仿真结果, 视网膜 (偏差) 曲线的输出平滑, 表明系统具有抗颠簸性。图 7 是在高频大幅度颠簸环境中的仿真结果, 仿真结果示出, 在头部姿态位置发生突变的情况下视网膜存在较大偏差, 但是系统很快能达到稳态, 这也表明该系统具有鲁棒

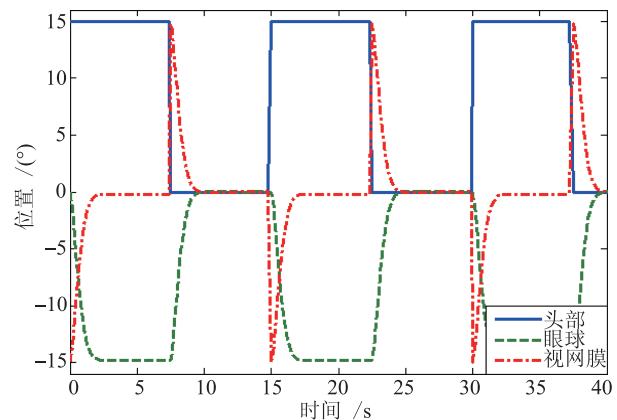


图 5 恶劣环境下的仿真结果

Fig.5 Simulation results under harsh environment

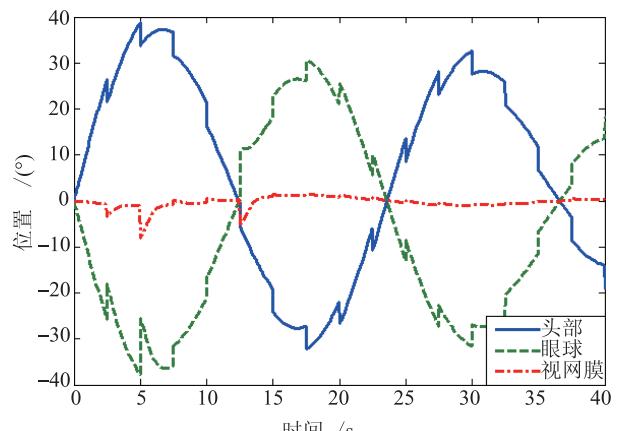


图 7 颠簸环境下 (高频) 的仿真结果

Fig.7 The simulation results under bumpy environment (high frequency)

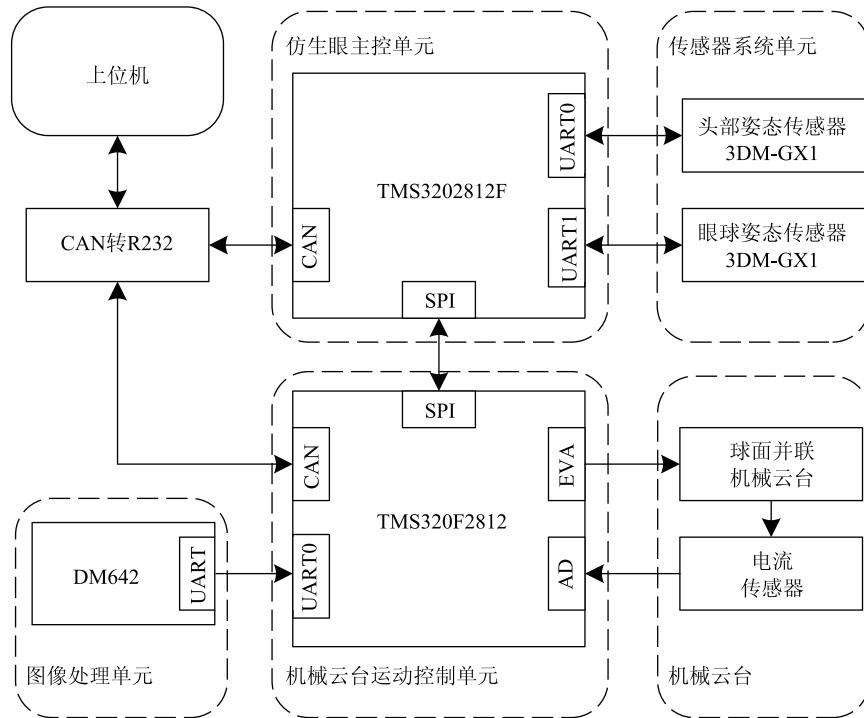


图 8 实验装置的硬件控制系统结构图

Fig.8 Whole hardware control system architecture of the experiment device

性与自适应性。

3.2 实体机器人实验

实验系统的硬件结构如图 8 所示, 主要由球面并联机构仿生机械云台及其运动控制单元、头部姿态传感器 (3DM-GX1)、眼球末端姿态传感器 (Land Mark10 AHRS)、图像处理单元、上位机以及主控单元组成。球面并联机构仿生眼睛负责采集外部图像, 其运动控制单元主要负责仿生眼睛的运动控制、运动路径规划、电流保护, 以及接收图像处理单元的图像信息和与主控单元的信息交流; 图像处理单元获取仿生眼睛内置摄像头的实时图像, 并对其进行处理, 并将结果通过 UART 发送给仿生眼睛运动控制单元, 仿生眼睛运动控制单元再将该信息通过 SPI 发送给主控单元; 主控单元分别通过 UART0 和 UART1 接收头部姿态传感器和眼球末端姿态传感器的信息, 主控单元综合上述信息, 输入到仿生眼数学控制模型, 解出眼球转动角度并发送给运动控制单元; 同时通过 CAN 转 R232 实现与上位机的通讯, 上位机对整个系统进行监控并对相关数据进行分析。

本系统的实验包括两个阶段: 第一阶段将仿生机械云台安装在 3 维转台上进行单轴姿态变化适应性试验, 实验平台如图 9 所示; 第二阶段将仿生机械云台安装在轮式机器人上并在实验室内搭建颠簸环境, 轮式机器人在颠簸环境下行驶进行抗颠簸试

验。图 10 是 3 维转台进行偏航旋转的实验结果, 偏航旋转的幅度在 $\pm 30^\circ$ 以上, 姿态变化 (偏航) 速度最高达到 $60^\circ/\text{s}$, 结果表明当机器人发生大幅度的偏航旋转时, 仿生机械云台可以有效地主动补偿。图 11 是 3 维转台进行横滚旋转的实验结果, 横滚的幅度在 $\pm 20^\circ$ 以上, 姿态变化 (横滚) 速度为 $40^\circ/\text{s}$ 。结果表明该仿生机械云台不仅能有效地补偿由 3 维转台姿态变化所产生的误差, 而且具有鲁棒性。同时, 为了进一步验证系统性能, 基于轮式机器人在颠簸环境中进行实验, 实验平台如图 12 所示。图 12(a) 是机器人控制与图像处理模块, 图 12(b) 是携带仿生机械云台的机器人移动平台。图 12(c) 是设计的一个并联结构眼球, 该眼球结构紧凑, 在目标工作

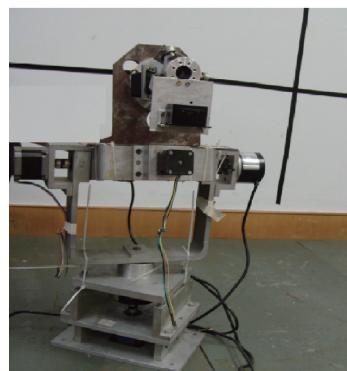


图 9 3 维实验转台

Fig.9 Three-dimensional experimental turntable

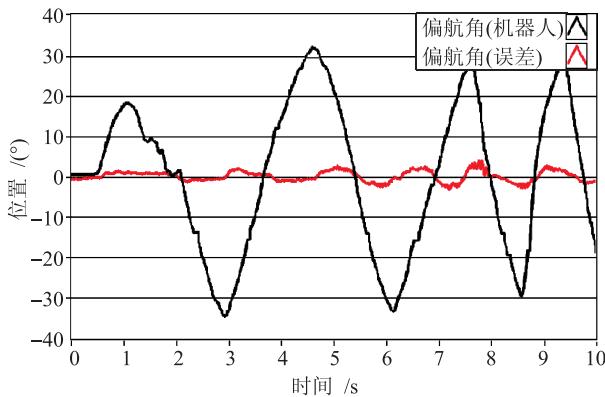


图 10 3 维转台实验测试结果 (偏航)

Fig.10 Experimental results (yaw) based on 3D turntable

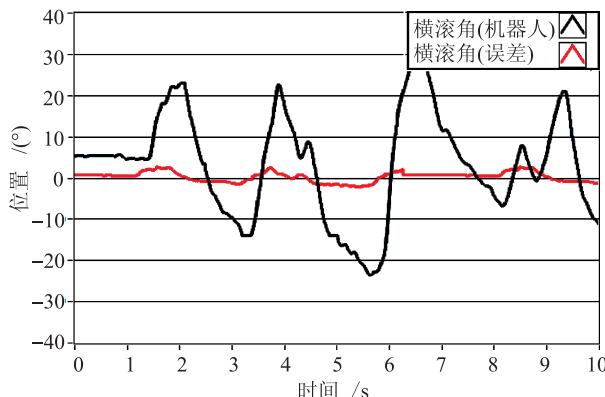


图 11 3 维实验转台实验测试结果 (横滚)

Fig.11 Experimental results (roll) based on 3D turntable



图 12 基于轮式移动机器人的实验系统平台

Fig.12 Experimental platform based on wheeled mobile robot

空间内的每个位置都具有良好的灵活度和力学性能，在仿生眼实物的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 $\pm 48^\circ$ 。图 13 是在机器人移动路径上设置各种路障的图像采集结果，图 13(a1)～(a3)是机器人在颠簸环境中作业，姿态发生变化时，采用仿生眼前庭动眼反射进行主动补偿采集到的实验结果；图 13(b1)～(b3)是采用传统实验方法采集到的实验结果。对

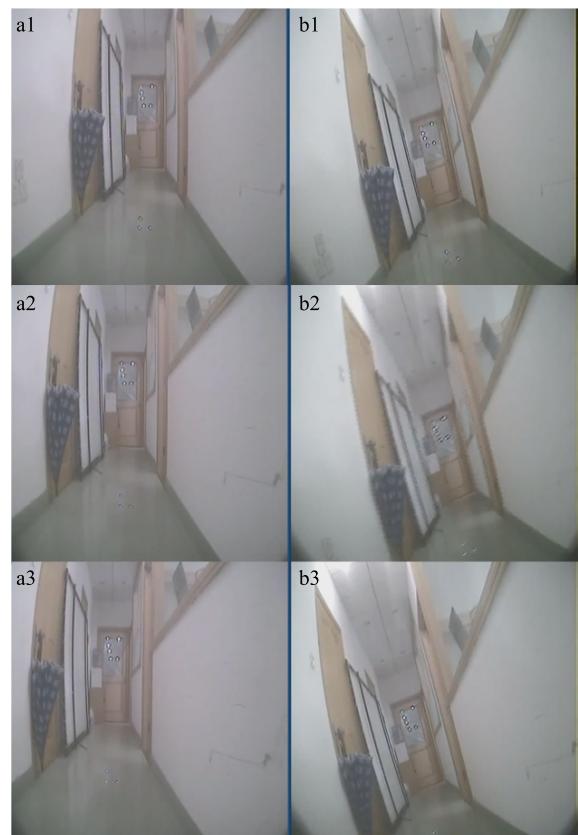


图 13 颠簸环境下的实验结果

Fig.13 Experimental results under bumpy environment

比两者实验结果表明当机器人姿态发生变化时，该模型可以有效地补偿由机器人本体姿态变化产生的视觉误差。

4 结论 (Conclusion)

本文分析了眼球前庭动眼反射神经回路，在其基础上采用误差重复控制补偿对小脑绒毛在眼球前庭动眼反射中的功能进行模拟，建立一个具有自适应性的前庭动眼反射控制模型，该模型结构简单，便于控制器的设计。并且基于眼球前庭动眼反射的原理，主动补偿由机器人姿态本体变化引起的视觉误差。在不同环境中进行仿真实验，分析了所建控制模型的性能。仿真实验、3 维转台和实体机器人实验表明这种方法可以补偿机器人在非结构与颠簸环境下作业过程中导致的视觉不稳定。

参考文献 (References)

- [1] 邹海荣, 龚振邦, 罗均. 仿生眼的研究现状与发展趋势 [J]. 机器人, 2005, 27(5): 469-474.
Zou H R, Gong Z B, Luo J. State of the art and trend of biomimetic eye[J]. Robot, 2005, 27(5): 469-474.
- [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.

- Zou H R, Gong Z B, Xie S R. Modelling of the oculomotor control system for biomimetic robot eye[J]. Robot, 2007, 29(4): 342-347.
- [3] Sonka M, Hlavac V, Boyle R. 图像处理、分析与机器视觉 [M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- Sonka M, Hlavac V, Boyle R. Image processing, analysis, and machine vision[M]. 2nd ed. Beijing: Posts& Telecommunications Press, 2003.
- [4] Glasauer S. Current models of the ocular motor system[J]. Developments in Ophthalmology, 2007, 40: 158-174.
- [5] 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.
- [6] Arnold D B, Robinson D A. A learning network model of the neural integrator of the oculomotor system[J]. Biological Cybernetics, 1991, 64(6): 447-454.
- [7] Green A M, Meng H, Angelaki D E. A reevaluation of the inverse dynamic model for eye movements[J]. Journal of Neuroscience, 2007, 27(6): 1346-1355.
- [8] Meng H, Green A M, Dickman J D, et al. Pursuit-vestibular interactions in brain stem neurons during rotation and translation[J]. Journal of Neuroscience, 2005, 93(6): 3418-3433.
- [9] Cova A C, Galiana H L. A bilateral model integrating vergence and the vestibulo-ocular reflex[J]. Experimental Brain Research, 1996, 107(3): 435-452.
- [10] Khojasteh E, Galiana H L. Implications of gain modulation in brainstem circuits: VOR control system[J]. Journal of Computational Neuroscience, 2009, 27(3): 437-451.
- [11] Zhang X L, Wakamatsu H. A unified adaptive oculomotor control model[J]. International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, 2001, 15(7): 697-713.
- [12] Shibata T, Schaal S. Biomimetic gaze stabilization based on feedback-error-learning with nonparametric regression networks[J]. Neural Networks, 2001, 14(2): 201-216.
- [13] 李恒宇, 罗均, 谢少荣, 等. 基于仿生眼异向运动原理的超小型无人旋翼机定点着陆新方法 [J]. 高技术通讯, 2008, 18(10): 1047-1052.
- Li H Y, Luo J, Xie S R, et al. A novel landing method for subminiature robot helicopters based on binocular vergence eye movements[J]. Chinese High Technology Letters, 2008, 18(10): 1047-1052.
- [14] 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): 2065-2070.
- Huang S M, Xiao N F. Research on binocular motion model and its method for humanoid robot[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(9): 2065-2070.
- [15] Lisberger S G. Internal models of eye movement in the floccular complex of the monkey cerebellum[J]. Neuroscience, 2009, 162(3): 763-776.
- [16] Ito M. Cerebellar circuitry as a neuronal machine[J]. Progress in Neurobiology, 2006, 78(3-5): 272-303.

作者简介:

李恒宇 (1983-), 男, 博士生. 研究领域: 机器人智能控制技术与机器人仿生视觉.

罗 均 (1970-), 男, 博士, 博士后, 教授, 博士生导师. 研究领域: 特种机器人控制技术, 智能机器人感知技术, 微机电系统.