

基于雅可比矩阵的仿生视觉运动模型研究

樊凡¹, 娄小平^{1,2}, 祝连庆^{1,2}, 董明利^{1,2}

¹北京信息科技大学先进光电子技术国际合作联合实验室;

²北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室

摘要: 针对仿生视觉系统在目标跟踪过程中眼、颈角度分解对精度的影响问题,提出了以速度作为参变量的雅可比矩阵角度分解最优化方法。首先,分析人的眼、颈运动规律,建立眼、颈 2 级 4 自由度系统模型;其次,构建雅可比矩阵,得到关于转动速度的眼、颈协调运动的角度分解数学模型;最后,通过仿真和物理试验分析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。试验结果表明,本文所述仿生视觉运动控制平台的目标定位精度在 70% 以上。

关键词: 仿生人眼视觉系统;雅可比矩阵;运动控制

中图分类号: TG87;TH741

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2019.04.025

Research on Motion Model of Humanoid Vision System Based on Jacobi Matrix

Fan Fan, Lou Xiaoping, Zhu Lianqing, Dong Mingli

Abstract: An optimized angle decomposition method based on Jacobi matrix with velocity as the parameter is put forward to decrease the angle decomposition effect on system accuracy. Firstly, by analyzing the motion rule of human eye and neck, the two-stage four-degree' coordinate is established. Secondly, based on Jacobi matrix, the mathematical model of tracking angle decomposition of eye and neck is built. Lastly, by simulation and experiments, the influence caused by different rotation angular velocity on angle decomposition is studied under the condition of optimization, resulting in the optimized angle decomposition method. The experimental results show that the target tracking accuracy of system mentioned in this paper is above 70%.

Keywords: humanoid vision system; Jacobi matrix; motion control

1 引言

人眼视觉系统在追踪目标时具有快速、精确、稳定的特点。根据人类眼、颈协调运动的生理学机理,如果眼、颈的协调运动出现紊乱,在动态注视过程中将会出现图像不稳定的情况^[1,2],这就要求对眼、颈协调运动分段进行处理控制^[3,4]。

国内外学者对人类的仿生眼颈机构进行了很多研究。加拿大麦吉尔大学的 Boulanger M. 等^[5]研究了神经机制在眼、颈协调目标跟踪过程中的作用,发现 VO 细胞通过控制眼球快速转动的速度来限制其转动幅度,从而可以减少目标跟踪误差,提高跟踪精度;纽约大学的 Saglam M. 等^[6]同时考虑了趋异运动和同向运动,并将颈部初始角度作为一个参变量,通过优化算法得到了一种眼、颈协调运动控制模型,实现了双目水平面上注视转移,并通过协调运动

将运动目标定位在仿生视网膜上;德黑兰大学的 Danaei B. 等^[7]使用螺旋理论进行仿生运动学研究,分析了转动速度和加速度在不同结构、位置上的传递关系;哥伦比亚大学的 Fels S. 等^[8]通过模拟人体眼睛运动,采用微型 CMOS 彩色摄像机的中空球体(眼球)连接一对铰链,搭建了一套 4 自由度眼睛摄像机定位系统来模拟人眼的视觉运动;慕尼黑大学的 Villgratner T. 等^[9,10]设计了 2 自由度和 3 自由度的并联眼动机构,使用连杆驱动的方式,以航模电机为载体,实现了较为稳定的追踪效果。

目前,学者们在仿生视觉平台的机械设计及运动控制方面进行了很多研究,但对于眼、颈协调运动的角度分配模型并未做深入研究。本文提出一种基于雅可比矩阵的仿生视觉运动模型,以眼、颈的转动角速度为参变量构建雅可比矩阵,通过优化矩阵条件得到仿生视觉平台实时跟踪补偿角的计算方法,并通过试验验证了模型的可行性。

2 仿生 2 级 4 自由度运动平台

本文针对仿生服务类机器人,通过研究目标跟

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA042308);国家自然科学基金(51475047);教育部长江学者和创新团队发展计划(CSIRT, IRT_16R07);北京信息科技大学校基金(1725004)
收稿日期: 2018 年 8 月

令 $J_D = J_1 + J_2$, 为了引入眼、颈转动角速度变量, 进行如下变换

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial J_{D1}}{\partial \theta_N} & \frac{\partial J_{D2}}{\partial \theta_E} & \frac{\partial J_{D3}}{\partial \beta} \end{bmatrix} \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

矩阵 J 为仿生视觉运动模型的雅可比矩阵, 可表示为

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

$$j_1 = (-2b_1 \cos 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N + 2b_1 \sin 2\alpha \sin \beta \sin \theta_N - b_1 \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \cos \alpha \sin \beta \cos \beta - h_c \cos \alpha \sin \beta) \omega_N$$

$$j_2 = (-2b_1 \cos 2\alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \cos \alpha \sin \beta \cos \beta + h_c \cos \alpha \sin \beta) \omega_E$$

$$j_3 = (-b_1 \cos^2 \alpha \sin \beta \cos \theta_N - h_c \cos \alpha \sin \beta - 2h_c \cos \alpha \sin 2\beta) \omega_\beta$$

$$j_4 = \left(-\frac{5}{2} b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N - 2\cos 2\alpha \cos \theta_N - \frac{5}{2} \sin 2\alpha \sin \theta_N - \frac{\sin 2\alpha}{2} \cos \theta_N - 2h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta + h_c \sin \alpha \right) \omega_N$$

$$j_5 = (-2b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N + 2\sin 2\alpha \sin \theta_N + 2h_c \sin 2\alpha \cos^2 \beta + h_c \sin \alpha) \omega_E$$

$$j_6 = [(b_1 \cos \theta_N + h_c) \sin 2\alpha \cos 2\beta] \omega_\beta$$

$$j_7 = (2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2b_1 \sin 2\alpha \sin^2 \beta \sin \theta_N + b_1 \cos^2 \alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2\cos 2\alpha \sin \theta_N - 2\sin 2\alpha \cos \theta_N + \sin^2 \alpha \sin \theta_N - 2h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_N$$

$$j_8 = (2b_1 \cos 2\alpha \sin^2 \beta \cos \theta_N - 2\cos 2\alpha \sin \theta_N - 2h_c \cos 2\alpha \cos^2 \beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_E$$

$$j_9 = (-2(b_1 \cos \theta_N - h_c) \cos^2 \alpha \cos 2\beta - h_c \cos \alpha \cos \beta) \omega_\beta \quad (9)$$

式中, ω_N 、 ω_E 分别为颈部和眼部的水平转动角速度。

由数学分析可知, 上述雅可比矩阵的平均条件数越小, 仿生视觉运动系统的整体性能越优秀。因此, 为了得到最小平均条件数, 定义雅可比矩阵的平均条件数 f 为

$$f = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (10)$$

式中, σ_{\max} 、 σ_{\min} 分别为 J 的最大和最小奇异值。

对 f 取最优化的过程就是最优化 ω_N 和 ω_E 的过程, 即求解目标跟踪角分解为颈部转动角度 θ_N 和眼部转动角度 θ_E 的过程。

4 试验及分析

由重复试验结果可知, 当系统整体转动补偿角在 $8^\circ - 120^\circ$ 之间时, 需要眼颈同时运动。以跟踪运动行人为例, 将各自由度转动角速度限制在 $30^\circ/s - 120^\circ/s$ 范围内。由上文分析可知, 电机在 $[10^\circ, 24^\circ]$ 区间内运行较为平稳, 故可选取眼部转动起始

阈值 $\phi = 10^\circ$, 眼部转动饱和阈值 $\phi = 24^\circ$ 。当旋转角度小于 10° 时, 由颈部高精度电机完成角度转动任务; 当转动角度在 $[10^\circ, 24^\circ]$ 区间内时, 由颈部电机和眼部电机共同完成角度转动; 当转动角度大于 24° 时, 眼部电机转动 24° , 余下角度由颈部电机完成。

以固定的转动角速度 ω_N ($40^\circ/s$ 、 $60^\circ/s$ 、 $80^\circ/s$)、 ω_E ($60^\circ/s$ 、 $90^\circ/s$ 、 $120^\circ/s$) 为例, 得到分配后眼、颈转动角度见图 3。图 3 中, 横坐标为颈部分解的角度值, 纵坐标为眼部分解的角度值。由图 3 可以看到, 针对不同的眼、颈转动角速度, 角度分解结果近似呈线性关系。

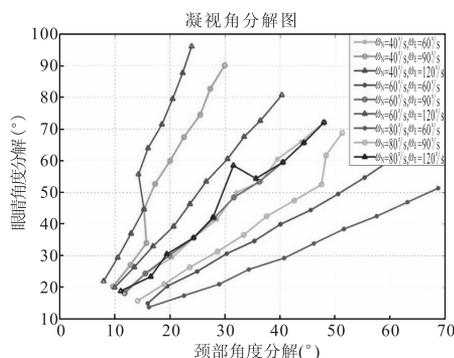


图 3 眼、颈角度分解

为了验证仿真结果, 进行目标跟踪试验。以小球为运动目标, 在其移动 3 种不同角度的情况下, 令仿生视觉运动控制平台进行伺服跟踪。分别在 $[1^\circ, 10^\circ]$ 、 $[11^\circ, 20^\circ]$ 、 $[26^\circ, 35^\circ]$ 区间内以 1° 为间隔各转动 10 个角度, 每种角度重复进行 30 组试验, 得到三种情况下 30 组试验的中心点重叠率均值结果, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 三种情况下目标定位重叠率均值都超过了 70%, 但随着转动角度的增大, 重叠率均值总体上呈增加趋势。重叠率表示为目标检测区域和目标实际区域的交集与并集的比值。当转动角度在 $[1^\circ, 10^\circ]$ 区间内时, 由颈部机构独立完成转动, 此时重叠率在 70% - 80% 之间; 当转动角度增大后, 眼部和颈部同时参与转动, 此时定位的重叠率上升了一部分; 当转动角度在 $[11^\circ, 20^\circ]$ 区间内时, 重叠率最小为 73%, 最大为 84%; 当转动角度在 $[26^\circ, 35^\circ]$ 区间内时, 重叠率最小为 76%, 最大为 88%。因为使用相同的跟踪算法, 所以上位机引入的误差基本相同。排除该因素的影响, 由于颈部机构相较于眼部机构转动精度高一些, 因此眼部和颈部同时转动时, 响应精度也在一定程度上下降。增大转动角度后, 中心点的偏离误差均值增大, 但定位精度同

时下降,对目标的定位跟踪重叠率均值反而增加。

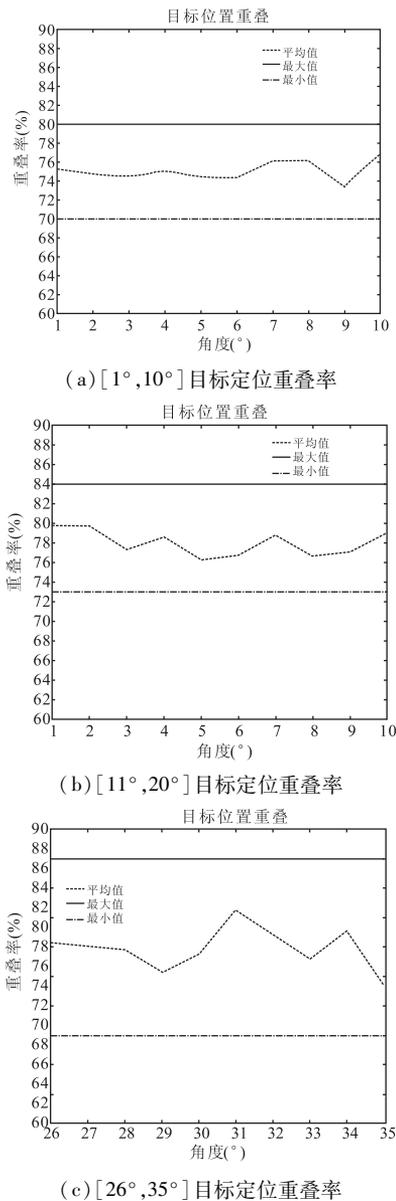


图4 中心点重叠率均值结果

5 结语

本文对仿生机器人的眼、颈协调运动提出了仿生视觉运动控制策略,引入眼、颈转动角速度作为参变量,基于雅克比矩阵条件数最优化方法建立了2级4自由度的仿生视觉运动模型。从试验结果可知,在给定范围内,眼、颈的转动角速度比值决定了转动补偿角的分配。仿生机器人在不同的应用场景中对眼、颈协调运动速度和精度有不同的要求。同时,根据目标跟踪试验结果可知,本文提出的眼、颈协调运动控制策略的中心点重叠率稳定在70%之上,满足仿生视觉眼、颈协调运动的技术要求,将对仿生视觉的研究发展起到一定的促进作用。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] Kang B, Zhu W P. Robust moving object detection using compressed sensing[J]. IET Image Processing, 2015, 9(9): 811 - 819.
- [5] 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, 2012, 108(1): 39 - 56.
- [6] Saglam M, Glasauer S, Lehnen N. Vestibular and cerebellar contribution to gaze optimality[J]. Brain, 2014, 137(4): 1080 - 1094.
- [7] 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.
- [8] Flores E, Fels S. A novel 4 DOF eye-camera positioning system for androids[C]. Robot and Human Interactive Communication (RO - MAN), 2015 24th IEEE International Symposium on, 2015.
- [9] Villgratner 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.
- [10] Villgratner T, Ulbrich H. Optimization and dynamic simulation of a parallel three degree-of-freedom camera orientation system[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2010.

第一作者:樊凡,博士,讲师,北京信息科技大学先进光电子技术国际合作联合实验室,100192北京市

First Author: Fan Fan, Doctor, Lecturer, Joint International Research Laboratory of Advanced Photonics and Electronics, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China

通信作者:娄小平,教授,北京信息科技大学先进光电子技术国际合作联合实验室,100192北京市

First Author: Lou Xiaoping, Professor, Joint International Research Laboratory of Advanced Photonics and Electronics, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China