

套索驱动柔性细长机器人视觉运动系统建模与分析

郑李明^{1,2} 王兴松¹

(1. 东南大学机械工程学院, 南京, 210096;
2. 金陵科技学院机电工程学院, 南京, 211169)

摘要:运动和感官进程之间紧密的相互作用,是生物视觉系统进行目标距离估计和观察周围环境的重要特征。为了建立适合套索驱动柔性细长机器人视觉系统模型,分析了通过生物眼球运动策略,以获得准确距离估计和环境信息的机理。此外,探讨了在摄像机系统中通过模拟生物眼球运动策略进行距离估计和周围环境观察的可能性,以及通过纯机械方式,模拟基于Listing法则则眼球扫视运动的可能性。最后,提出Listing平面应是套索驱动机器人视觉测量和空间姿态控制结合点的观点。

关键词:眼球运动策略; 动眼视差; 生物视觉系统; 外眼肌肉; Listing法则; 模型

中图分类号: TP242.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2011)06-0799-06

Modelling and Analysis of Oculomotor Vision System of Wire Driven Flexible Slender Robot

Zheng Liming^{1,2}, Wang Xingsong¹

(1. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing, 210096, China;

2. College of Mechanical & Electrical Engineering, Jinling Institute of Technology, Nanjing, 211169, China)

Abstract: The close interaction between motor and sensory processes is a critical feature of biological vision systems evaluating object distance and observe surrounding environment. In order to establish a visual model suitable for the wire driven flexible slender robot, the mechanisms of obtaining the accurate distance estimation and the environmental information based on biological oculomotor strategies are analyzed. Besides, the possibility of evaluating object distance and observing surrounding environment by simulating biological oculomotor strategies in camera system and the possibility of emulating the actual saccadic motions based on the Listing's Law on the pure mechanical basis are investigated. Finally, it is proposed that the Listing's plane should be the critical combination point between vision measure and space attitude control in the wire driven flexible slender robot.

Key words: oculomotor strategies; oculomotor parallax; bionic vision system; extra ocular muscles; Listing's Law; models

无论在自然灾害废墟、矿井塌方还是大型设备的定期检查维护的狭小空间环境中,广泛需要头部具有运动可控的操作部、中间具有柔性细长输送部的套索驱动机器人。这些机器人要实现未知非整备环境的探索,必须要解决在非整备环境条件下,其

前进可能性判断以及对搜索目标空间定位等问题。

目前,有关套索驱动柔性细长机器人对非整备环境下的视觉测量,国内外未见有相关文献报道,目前针对套索驱动机器人研究主要集中于其动力学分析与仿真上^[1-6]。

基金项目:国家自然科学基金(50875044)资助项目。

收稿日期: 2010-09-16; **修订日期:** 2011-12-16

通讯作者: 郑李明,男,博士,副教授,1974年生, E-mail: zlmhost@jit.edu.cn。

1 套索驱动柔性细长机器人视觉系统的功能

为了使套索驱动柔性细长机器人在非整備环境下完成自身定位、立体空间构建、目标搜索等任务,必须要使机器人视觉系统能够具有两种基本功能,即获得图像深度信息以及进行周围环境图像匹配与融合。因为图像深度信息是套索驱动柔性细长机器人实现前进可能性判断以及对搜索目标进行定位的基础。而周围环境图像匹配与融合是套索驱动柔性细长机器人进行空间探查和目标搜索的必要条件。由于自身结构以及目前视觉成像设备性能的限制,不可能在套索驱动柔性细长机器人上采用双目摄像机成像系统来获得立体空间信息;而利用光学系统实现单目摄像机的立体视觉^[7],由于其结构和体积方面的原因,在套索驱动柔性细长机器人上进行应用,也变的并不那么可行。简化套索驱动柔性细长机器人视觉系统结构,并使视觉系统在只采用一个摄像机并且没有其他辅助光学系统的条件下,获得图像的深度信息并能进行周围环境图像的匹配与融合,正是本文需要建模并讨论的问题。

2 生物体视觉系统及人眼模型

2.1 生物体的动眼视差

自然界中,许多带有可活动眼睛的生物体(比如:变色龙及沙蚕鱼)都可以通过单只眼睛的运动而产生单目视差,从而形成对深度的感知。究其原因,它们都是通过最大化角膜和透镜节点与眼睛回转中心距离,从而形成目标在视网膜上投影位置偏移这个线索来判断目标距离的^[8]。类似的现象也表现在人类以及灵长类动物之中(见图1),通过对视觉场景扫视而产生在视网膜上目标投影的位移,正好被包含在人类视觉感受区范围之内^[9]。在自然条件下,人类倾向于通过动眼视差来获得深度信息^[10],这也正是当人类在一只眼睛因某种原因而无法工作时,通过另外一只眼睛的代偿性工作也能获得必要深度信息的原因,这正是本文进行套索驱动柔性细长机器人仿生视觉系统动眼视差建模和分析的出发点。

如图1所示,当眼睛的回转中心C与节点N的位置不重合时。通过一个目标重新定位的扫视动作,物体在视网膜上投影位置偏移量是由眼睛的回转幅度以及物体到观测者距离所决定的。图1(a, b)演示了扫视前后A和B点在视网膜上的投影。放大图显示,原先两个在视网膜上重合的投影,在眼球旋转后将不再重合。为了表达清晰,图中仅画了眼球光学系统一个节点的位置。

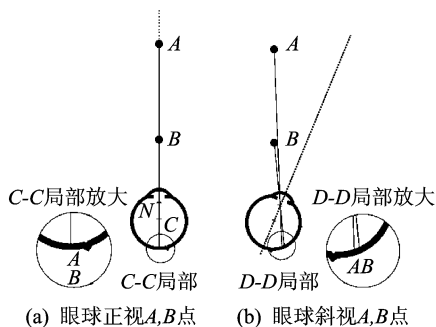
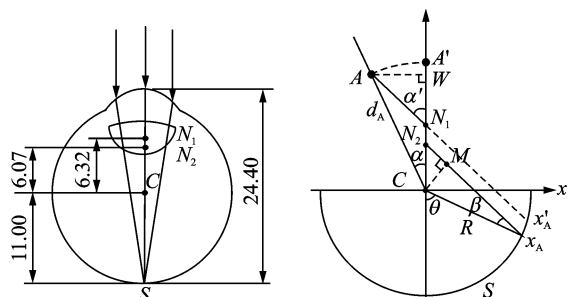


图1 动眼视差产生的距离信息

2.2 人眼的动眼视差模型

人类的动眼视差研究可以通过Gullstrand的示意图来分析^[11](图2(a)),为了确保平行光线进入眼睛后完全集中在视网膜上,这种模型假设球形视网膜的半径R为11 mm,一个平均折射率等于1.413的镜头以及角膜到视网膜轴向距离为24.40 mm。图2(a)是Gullstrand简化的三表面人眼模型。C为旋转中心,S为视网膜表面, N_1 和 N_2 分别表示光学系统物节点 N_1 和像节点 N_2 ,这两个节点位于距旋转中心6.32 mm和6.07 mm处。图2(b)是人眼视差投影的几何模型。 θ 是偏转角为 α ,距旋转中心距离为 d_A 的点光源在视网膜上投影的位置。



(a) Gullstrand简化三表面人眼模型 (b) 人眼视差投影几何模型

图2 人眼的动眼视差模型

为了简便起见,本文的分析采用了1个在视网膜上仅生产1个投影点的极小点光源。如图2(b)所示,假设这个点光源位于视觉传感器的前方位置A,即 $A = (x, z) = (-d_A \sin \alpha, d_A \cos \alpha)$ 。在1个具有2个节点Gullstrand眼睛模型中,一束光线以 α 角度通过物节点 N_1 ,经像节点 N_2 以同样角度 α 射出,因此,在视网膜上的投影点 X_A 是通过 N_2 点且平行于 AN_1 的直线与视网膜表面的交点。

由图2(b)中的三角几何关系,可知

$$\theta = \alpha' + \beta \quad (1)$$

由于 $\triangle AWN_1 \cong \triangle CMN_2$,则得

$$\frac{CM}{AW} = \frac{CN_2}{AN_1} \quad (2)$$

根据三角几何原理,得到

$$AN_1 = \sqrt{CN_1^2 + d_A^2 - 2CN_1d_A\cos\alpha} \quad (3)$$

$$\sin\alpha' = \frac{AW}{AN_1} = \frac{d_A\sin\alpha}{AN_1} \quad (4)$$

$$\cos\alpha' = \frac{N_1W}{AN_1} = \frac{d_A\cos\alpha - CN_1}{AN_1} \quad (5)$$

$$AW = d_A\sin\alpha, N_1W = d_A\cos\alpha - CN_1 \quad (6)$$

在 $\triangle CMX_A$ 中,有

$$CM = R\sin\beta = R\sin(\theta - \alpha') = R\sin\theta\cos\alpha' - R\cos\theta\sin\alpha' \quad (7)$$

由公式(2)得到

$$CM = \frac{AW \times CN_2}{AN_1} \quad (8)$$

由公式(7)和(8)得到

$$R\sin\theta\cos\alpha' - R\cos\theta\sin\alpha' = \frac{AW \times CN_2}{AN_1} \quad (9)$$

将公式(3)中各线段值代入式(9)中,即可得出

$$d_A = \frac{R\sin\theta \cdot CN_1}{[R\sin(\theta - \alpha) - CN_2\sin\alpha]} \quad (10)$$

由公式(10)可知, d_A 是由 θ 和 α 所决定的函数,即 $d_A=f(\theta, \alpha)$ 。当 θ 确定时 d_A 与 α 的函数关系如图3所示,图中的曲线1和2分别是 $\theta=55^\circ$ 和 $\theta=60^\circ$ 时 d_A 与 α 的函数图线,它们只有1个公共的交点即当 $\alpha=0$ 时 $d_A=CN_1=6.32$ mm。

由以上的函数关系可以看出点光源投影在视网膜上的1个 θ 角的位置,对应于一系列无穷多个由 d_A 与 α 所决定的点光源的位置。也就是说,无法仅仅通过检测在视网膜上点光源投影位置而得到点光源实际的空间位置。

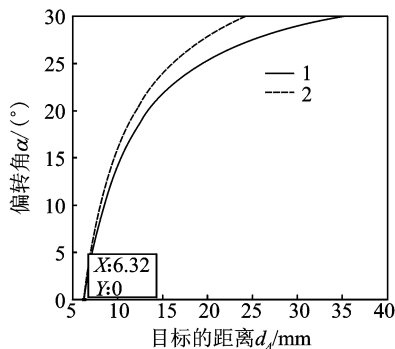


图3 d_A, θ 和 α 的函数关系图

2.3 动眼视差对点光源位置的估计

以下本文将采用动眼视差方法来消除点光源在空间位置上的歧义性,该方法是使眼球以 C 点为旋转中心水平旋转一定的角度 $\Delta\alpha$ 并检测出目标点光源投影点变化的角度 θ' ,由于眼球以 C 点为中心的旋转并没有改变中心 C 到点光源的距离 d_A ,则有

$$d_A = \frac{R\sin\theta \cdot CN_1}{[R\sin(\theta - \alpha) - CN_2\sin\alpha]} = \frac{R\sin\theta' \cdot CN_1}{[R\sin(\theta' - \alpha - \Delta\alpha) - CN_2\sin(\alpha + \Delta\alpha)]} \quad (11)$$

有充分的证据显示人类主要是通过水平方向的动眼视差来估计目标距离的^[12],所以本文主要研究绕 C 点水平旋转的情况,然而,由于这种模型基点定位于光轴 Z 上,这种方法同样可以被应用垂直或倾斜旋转的动眼视差上。如图4所示,当 $\Delta\alpha=2.5^\circ, \theta=55^\circ, \theta'=60^\circ$ 时,两条曲线1和2的交点就是点光源的位置。

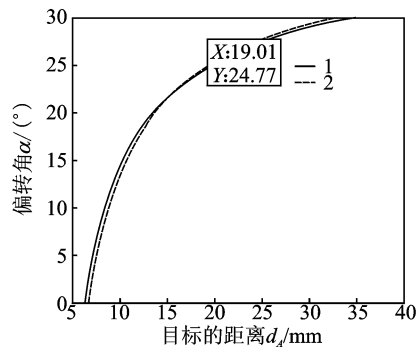


图4 动眼视差对点光源距离的估计

2.4 人眼对周围环境图像的匹配与融合

由人类眼球特性可知^[13],人类视场角度虽达到了 150° ,但只有眼球黄斑处能对物体进行清晰识别,而对其他部分只能进行模糊识别,要看清其他景物必须利用眼球的转动(图5),将眼球黄斑和眼睛光学系统像方节点 N_2 的连线对向该景物,这样才能在黄斑处形成目标 A_1B_1 清晰的图像 $A'_1B'_1$ 。进一步分析可以发现当眼球连续以像节点 N_2 为中心旋转时,根据节点的性质,像 $A'_1B'_1$ 的位置不会因光学系统的转动而发生偏移,因此整个圆弧 AB 上像都可以清晰地投影在黄斑上。通过人脑对一系列从黄斑上获得的图像进行合成处理,可以获得 AB 范围内清晰的全景信息,而这正是,套索驱动柔性细长机器人视觉系统进行空间探查和目标搜索,所需要的对周围环境图像匹配与融合功能。

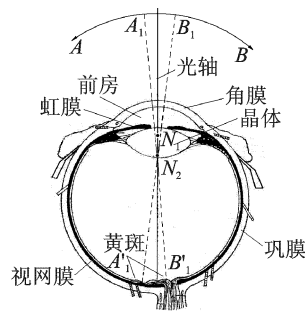


图5 人类眼球绕节点运动实现对周围环境观察

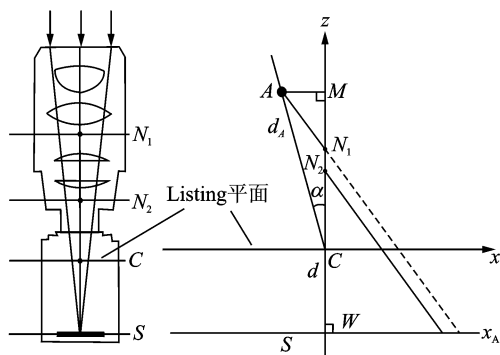
通过以上的分析可知,人类眼睛可以通过一些特定的运动来获得目标位置信息以及环境信息,而在由人造设备所组成的视觉系统中是否同样能实现这样功能,正是下面要讨论的问题。

3 摄像机视觉系统及其模型

人类以及灵长动物的眼睛与人造视觉系统(即摄像机)间的最大不同点,在于它们的图像感受器几何排布方式的不同。摄像机的传感器单元通常被组成一个平面阵列如CCD成像靶面,而人眼的视网膜感受器则是一块球面。以下内容分析了在平面图像传感器中如何通过动眼视差来获得目标距离信息方法,以及摄像机周围环境图像的匹配与融合。

3.1 摄像机动眼视差对点光源位置估计

图6显示了摄像机产生动眼视差的几何结构,视觉传感器平面定位在 $Z=-d$ 处,距离为 d_A 和偏转角 α 决定了点光源 A 的位置。与人眼情况类似,点光源落在视觉传感器阵列上的投影为 X_A ,它是1条过 N_2 点与 AN_1 平行的直线与视觉传感器平面的交点。此处,镜头焦距 $f=d+CN_2$ 。



(a) 简化摄像机光学模型 (b) 摄像机视差投影几何模型

图6 摄像机的动眼视差模型

由于 $\triangle N_1AM \cong \triangle N_2X_AW$,则有

$$\frac{X_AW}{N_2W} = \frac{AM}{N_1M}$$

得

$$x_A = \frac{d_A f \sin \alpha}{d_A \cos \alpha - CN_1} \quad (12)$$

则

$$d_A = \frac{x_A CN_1}{x_A \cos \alpha - f \sin \alpha} \quad (13)$$

公式(13)并没有惟一的确定点光源 A 点位置,因为在任何一个在直线 AN_1 上的点光源都可以在摄像机成像靶面上产生相同的投影点 X_A 。要获得确定点光源 A 点位置偏转角 α 和距离 d_A 可以采用类似前面所提到的方法。由于绕 C 点旋转并没有改变点光源到 C 点的距离 d_A ,因此,可以通过公式(13)前后两个旋转角度差 $\Delta\alpha$ 来获得点光源位置和距离估计

$$d_A = \frac{x_A CN_1}{x_A \cos \alpha - f \sin \alpha} =$$

$$\frac{x'_A CN_1}{x_A \cos(\alpha + \Delta\alpha) - f \sin(\alpha + \Delta\alpha)} \quad (14)$$

3.2 摄像机周围环境图像的匹配与融合

与人眼的情况相类似,在图7中,可以看出当摄像机连续以像节点 N_2 为中心旋转时,根据节点的性质,像 $A_1 B_1$ 位置不会随摄像机的转动而发生偏移,因此整个圆弧 AB 上的像都可以清晰地投影在摄像机成像靶面上。通过计算机图像合成处理,就可以得到 AB 范围内清晰的全景图像信息。

由此可见,人造设备即摄像机所组成的光学成像系统同样也可以进行目标位置测定和周围环境图像的匹配与融合,而这些信息的获取都离不开与之相对应的视觉运动。

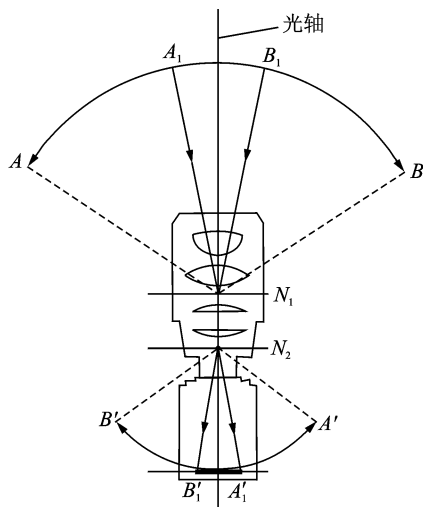


图7 摄像机绕节点运动实现对周围环境观察

4 动眼视觉系统运动模型

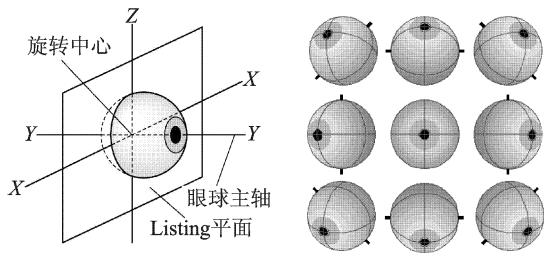
无论是对视觉目标距离和位置的测定还是对周围环境的观察,人眼都离不开相应的眼球运动,对于人造的视觉系统来说也是如此,因此,有必要研究一下人类眼球的运动规律。

4.1 人类眼球运动的Listing法则

眼球运动的Listing法则早在19世纪中叶就由德国数学家Johann Benedict Listing提出,但是在人类以及灵长动物身上进行实验性验证还是近20年的事^[14]。此外,也发现Listing法则在眼睛其他类型的眼球运动如平滑追踪(smooth pursuit)等方面也是有效的^[15]。

Listing法则可以这样描述:在Listing's法则中存在一个相对于头部的特定眼睛方向,叫做主位置。任何眼睛的生理扫视方向,都可以用1个单位四元数 $q(t) = \left(\cos \frac{\theta(t)}{2}, v(t) \sin \frac{\theta(t)}{2} \right)$ (其中: $v(t) \in L, |v(t)| = 1$ 且 $\theta(t)$ 是相对于主位置的旋转

角)来描述,其旋转轴 $v(t)$,总是属于人头部所确定的平面 L (即Listing 平面),如图8(a)所示。图8(b)显示的是在Listing 平面上眼球的不同方向的位置。



(a) 眼球主轴与Listing平面的空间位置 (b) 眼球的在不同方向

图8 Listing 法则

令坐标系 $\langle h \rangle = \{h_1, h_2, h_3\}$ 和坐标系 $\langle e \rangle = \{e_1, e_2, e_3\}$ 分别代表头部和眼球的固定参考坐标系。为了不失代表性,可以设 e_3 是眼球的主轴方向,则在位置上 $\langle h \rangle \equiv \langle e \rangle$,同时平面 $L = \text{span}\{h_1, h_2\}$,如图9所示。

正如文献[16]中所讨论的,为了保证在任何时候轴 $V \in$ 平面 L (即Listing 平面),眼睛的角速度 ω 必须属于通过 V 的平面 P_ω , P_ω 的法线与主位置的固定方向即 h_3 成 $\theta/2$ 角,如图10所示。这个性质直接暗含了 Listing's 法则,也就是通常所述的半角规则。

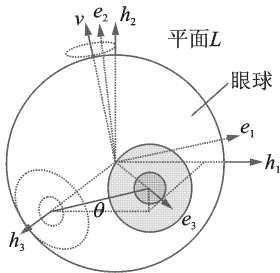


图9 符合Listing 法则的眼球旋转运动

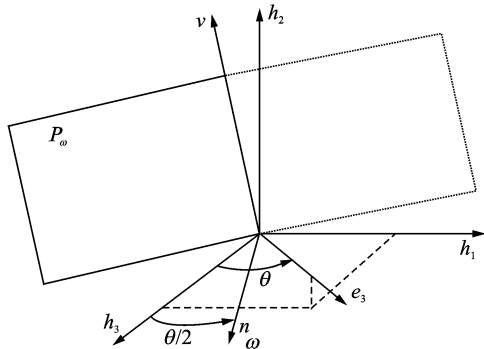


图10 半角规则

4.2 人眼的模型与 Listing's 法则的实现

人类眼睛实际上是1个带有6条外眼肌肉(EOMs)的球体^[17](图11)。每一个外眼肌肉在虹膜上都有一个直肌巩膜附着点并且和其底部轨道的另

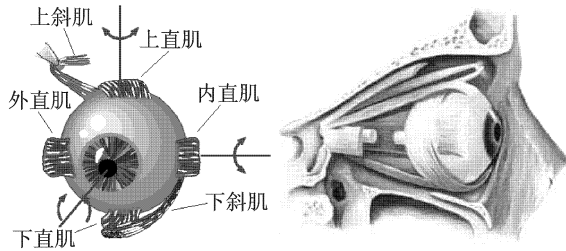


图11 眼球的眼外肌肉

一端相连。根据文献[18]的基本原理,仅有4条直肌在眼睛的扫视过程中扮演着重要角色。

G Cannata 和 M Maggiali 在文献[16,19]中提出一个直肌驱动眼球运动的简化模型(图12),该模型将软滑轮用固定点滑轮来替代进行建模,眼球被设计成为一个半径为 R 的均质球体,并且关于其中心有3个旋转自由度。外眼肌肉被无弹性的细索代替^[20],并被连接到产生拉力的电机上^[21]。外眼肌肉从眼球上的直肌巩膜附着点开始,经过头部的点滑轮,这个点滑轮(PPs)模拟了人眼的软组织滑轮,这些点滑轮被固定在眼球的后部,研究表明^[16-18],恰当的点滑轮与细索附着点位置,对于以索驱动方式(即以一种纯粹的机械方式)来实现 Listing's 法则运动,是具有决定性作用的。

以上的研究成果为,通过索驱动方式实现套索驱动柔性细长机器人视觉运动系统建模与设计提供了重要的理论基础和指导性准则。

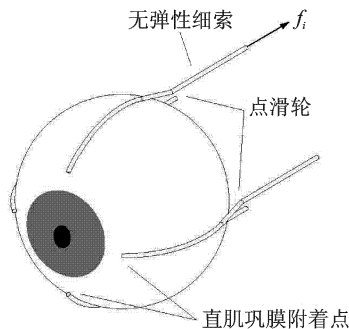


图12 直肌驱动眼球运动的简化模型

5 机器视觉运动系统模型和眼球运动模型的结合

如上所述,通过运动和感官进程之间紧密的相互作用,实现距离估计、空间探查和目标搜索是生物视觉系统的一个重要特点。人造设备即摄像机所组成的光学成像系统同样也可以进行目标位置估计和对环境空间的探查,而这些信息获取都离不开与之相对应的视觉运动,且可以通过纯机械的索驱动方

式来实现符合 Listing 法则的眼球运动, 这为套索驱动柔性细长机器人的视觉运动系统实现提供了重要的支撑, 其中 Listing 平面成为套索驱动柔性细长机器人视觉测量和其空间姿态控制的重要结合点。

如图 6 所示, 将回转中心 C 置于机器人的 Listing 平面上, 则 z 轴就是视觉系统的主位置方向, 这样就可以使视觉目标方位与机器人空间姿态之间建立联系, 从而为套索驱动柔性细长机器人的视觉伺服运动控制创造条件。

6 结束语

本文针对套索驱动柔性细长机器人的工作环境特点, 利用仿生学的分析方法建立了基于眼球运动的仿生视觉运动系统模型, 讨论了在只采用一个摄像机并且没有其他辅助光学系统的条件下, 获得图像深度信息并进行周围环境图像匹配与融合的方法, 同时, 论述了通过纯机械的索驱动方式来实现符合 Listing 法则眼球运动的可能性, 并进一步提出 Listing 平面可以成为套索驱动柔性细长机器人视觉测量和其空间姿态控制重要结合点的观点。以上分析所得的结论为套索驱动柔性细长机器人的视觉运动系统设计提供了必要的理论依据和指导性技术路线。

参考文献:

- [1] 陈泉柱, 陈伟海, 张建斌. 线驱动拟人臂机器人机构与前向运动学分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(8):988-991.
- [2] 隋春平, 张波, 赵明扬, 等. 一种 3 自由度并联柔索驱动柔性操作臂的建模与控制[J]. 机械工程学报, 2005, 41(6):60-65.
- [3] 隋春平, 赵明扬. 3 自由度并联柔索驱动变刚度操作臂的刚度控制[J]. 机械工程学报, 2006, 42(6):60-65.
- [4] Palli G, Melchiorri C. Model and control of tendon-sheath transmission systems[C]//IEEE ICRA 2006. Orlando, Florida: IEEE, 2006:988-993.
- [5] Kozak K, Zhou Qian, Wang Jinsong. Static analysis of cable-driven manipulators with non-negligible cable mass [J]. IEEE Transactions On Robotics, 2006, 22(3):425-433.
- [6] Hithoshi K, Toshiaki Y, Fumiaki T, et al. Robust PD control using adaptive compensation for completely restrained parallel-wire driven robots: Translational systems using the minimum number of wires under zero-gravity condition[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(4):803-812.
- [7] Lee D, Kweon I. A novel stereo camera system by a biprism[J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2000, 16(5):528-541.
- [8] Pettigrew J, Collin S, Ott M. Convergence of specialised behaviour, eye movements and visual optics in the sandlance (teleostei) and the chameleon (reptilia)[J]. Current Biology, 1999, 9(8):421-424.
- [9] Bingham G. Optical flow from eye movement with head immobilized: Ocular occlusion beyond the nose [J]. Vision Research, 1993, 33(5/6):777-789.
- [10] Fabrizio S, Michele R. Active estimation of distance in a robotic system that replicates human eye movement[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55:107-121.
- [11] Gullstrand A. Appendices to part 1: the optical system of the eye[M]. Voss, Hamburg, Germany: [s. n.], 1909:350-358.
- [12] Cumming B. An unexpected specialization for horizontal disparity in primate primary visual cortex[J]. Nature, 2002, 418:633-636.
- [13] 安连生. 应用光学[M]. 3 版. 北京:北京理工大学, 2008:49-50, 35-36.
- [14] Furman J M, Schor R H. Orientation of Listing's plane during static tilt in young and older human subjects[J]. Vision Res, 2003, 43:67-76.
- [15] Straumann D, Zee D S, Solomon D, et al. Validity of Listing's law during fixations, saccades, smooth pursuit eye movements, and blinks [J]. Exp Brain Res, 1996, 112:135-146.
- [16] Cannata G, Maggiali M. Implementation of Listing's law for a tendon driven robot eye[C]//Proc IEEE Conf on Intelligent Robots and Systems IROS 2006. Beijing, China: IEEE, 2006:9-15.
- [17] 孙春华. 不同种属哺乳动物眼外肌周围结缔组织结构及功能的初步研究[D]. 天津:天津医科大学研究生院, 2007.
- [18] Haslwanter T. Mechanics of eye movements: implications of the orbital revolution[J]. Ann N Y Acad Sci, 2002, 956:33-41.
- [19] Cannata G, Maggiali M. Models for the design of a tendon driven robot [C]//Proc IEEE International Conference on Robotics and Automation Roma. Italy: IEEE, 2007:10-14.
- [20] Koene A R, Erkelens C J. Properties of 3D rotations and their relation to eye movement control[J]. Biol Cybern, 2004, 90:410-417.
- [21] Polpitiya A D, Ghosh B K. Modelling and control of eyemovement with muscolotendon dynamics [C]//Proceedings of the American Control Conference. Anchorage: [s. n.], 2002:2313-2318.