

一种仿生机械臂空间位置反馈方法的研究

贺巧玲, 张进华, 李婷, 洪军

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了解决仿生机械臂空间位置反馈的问题,将眼电图作为神经反馈,应用于仿生机械臂空间位置反馈系统,通过多角度目标点重复扫视实验,分析眼球转动角度与对应眼电信号特征之间的映射规律,建立了人眼双目视觉定位模型.采用四元数法构建人眼、仿生机械臂坐标转换模型,并通过自行设计的物理实验平台进行坐标转换参数标定、计算旋转矩阵和平移向量,根据参数化定位模型将提取到的目标点转换为机械臂坐标系位置信息,从而实现了空间定位.研究表明,人眼双目视觉的定位模型可以有效地提取目标点坐标,为仿生机械臂提供空间位置反馈,同时也为仿生机械臂空间位置反馈提供了新思路.

关键词: 定位模型;眼电图;仿生机械臂;位置反馈

中图分类号: TB92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2012)01-0053-07

Position Feedback of Bionic Manipulator Following Electrooculography Signals

HE Qiaoling, ZHANG Jinhua, LI Ting, HONG Jun

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To solve bionic manipulator space position feedback, electrooculography (EOG) is used as the neurofeedback in the system. The mapping rules between the eye rotation angle and the corresponding EOG are analyzed by the experiment, in which the subjects repeatedly scan the multi-angle targets, and then the location model based on binocular vision of human eye is established; then the targets location information extracted from the parametric location model is converted to the manipulator coordinates via the quaternion coordinate transformation model between human eye and manipulator on the physics experiment platform to guide the positioning. The results show that the location model following binocular vision of human eye enables to effectively extract targets coordinates to provide space position feedback for bionic manipulator; simultaneously it provides a new idea for bionic manipulator space position feedback.

Keywords: location model; electrooculography; bionic manipulator; position feedback

由于生物信号源仿生控制的智能假肢能够广泛应用于助残平台,因此已成为世界各国科学家们研究的热点^[1],如肌电式(EMG)和脑电式(EEG)智能假肢^[2-3].目前,假肢的仿生控制更多地集中在信号特征提取和控制模式分类的研究上^[4-5],在仿生机械臂位置信息获取方面,主要采用在控制关节处安装

码盘来测量各关节转角,从而得出末端执行器位姿的半闭环控制方式,或依赖于测距传感器和摄像机的图像处理技术来完成空间闭环定位^[6-7].仿生机械臂位置信息的获取,从本质上仍是依赖于传感器物理硬件设备来实现传统双目视觉的定位功能,并未实现人机协同及充分发挥人的主观能动

性,从而缺乏基于神经反馈的仿生机械臂闭环运动控制.

人眼双目视觉定位的关键技术之一是通过分析采集到的眼电图(EOG)信号,实现对眼球转动角度的准确获取.张霖等人^[8-9]通过分析眼球运动的特征,构造了由正弦函数及其高频分量叠加而成的理想 EOG 曲线模型,应用简单的贝叶斯分类算法初步验证了 EOG 扫视信号和眼球偏转角之间存在的对应关系,但却缺少参数化定位模型. Oster 等人^[10]在综合早期的研究结论中提出,当偏转角在 30°以内时,EOG 信号峰值与偏转角成比例关系,而在 30°以上时则成正弦关系.文献^[11]指出在实际中,扫视对象更倾向于小角度扫视,较大范围的扫视则可以通过头部重定位来实现,且最自然的人类扫视集中在 15°左右.

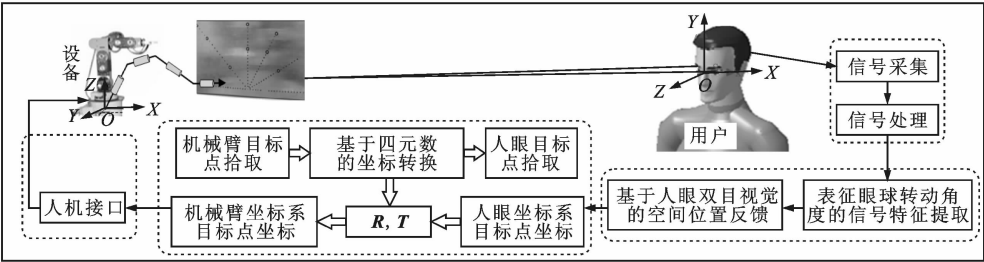
采用由 Horn^[12]提出的四元数算法求解人眼、仿生机械臂的坐标转换矩阵,解决了由实际测量误差和矩阵直接求逆、未经正交化处理所带来的坐标转换误差大的问题.为了实现人眼指导仿生机械臂末端执行器获取空间位置信息,本文以 EOG 信号作为研究对象,通过实验研究建立了人眼双目视觉空间定位模型,采用四元数法构建了人眼与仿生机械臂坐标转换模型,并最终搭建了

人眼双目视觉定位的仿生机械臂空间位置反馈系统,从而实现了眼电信号对仿生机械臂的定位与控制.

1 人眼系统模型的建立

人眼双目视觉空间位置反馈系统包括 EOG 信号采集及处理、人眼双目视觉空间定位模型建立、人眼仿生机械臂坐标系转换和仿生机械臂运动控制 4 个模块,原理框图见图 1. 经信号采集及预处理提取表征眼球转动角度的眼电信号特征,建立人眼双目视觉空间定位模型,采用四元数调姿算法实现了人眼仿生机械臂坐标系的统一.最后,将人眼获取的目标点位置信息转换到机械臂坐标系,指导仿生机械臂末端定位.

如图 2 所示,以人体双眼瞳距中央为坐标原点,过坐标原点垂直于人脸所在平面直线为 Z 轴,且与视线同方向为正向,两眼球连线为 X 轴,过坐标原点垂直于 XOZ 平面为 Y 轴,且垂直向上为正向. 本文采用 RBT-6T/S01S 型六自由度串联关节式机械臂作为研究对象,该机械臂的 D-H (Denavit-Hartenberg) 参数模型的建立如图 3 所示,它以基座为坐标原点,根据杆长、扭矩等参数建立机械臂末端点和基座的位姿矩阵.



R : 旋转矩阵; T : 平移向量

图 1 系统原理框图

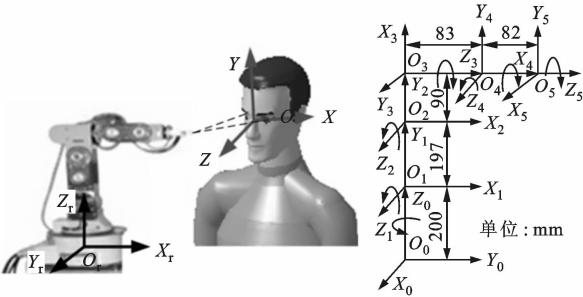


图 2 人眼坐标系的建立

图 3 仿生机械臂坐标系的建立

2 人眼双目视觉的空间定位模型

2.1 人眼双目视觉定位原理

人眼对空间目标点定位的物理模型如图 4a 所示,瞳距中央与基准点连线垂直于扫视平面,以基准点为中心扫视不同目标点时,左右眼的眼球转动角度不同,定义瞳距中央与水平目标点连线形成的夹角 θ_h 为水平扫视偏转角,同理,垂直方向为垂直扫视偏转角 θ_v . 利用 θ_h 、 θ_v 与对应 EOG 信号特征的函数关系,来构建人眼双目视觉定位模型.

设 U_h 为水平扫视所对应的 EOG 信号特征, U_v 为垂直扫视所对应的 EOG 信号特征, 设 θ_h 、 θ_v 与 U_h 、 U_v 之间存在着函数关系, 且函数关系为

$$U_h = f(\theta_h); U_v = g(\theta_v) \quad (1)$$

空间目标点 A 的坐标为 (x, y, z) , 其在扫视平面的坐标点 $A(x, y)$ 可以分解为水平投影点 $(x, 0)$ 和垂直投影点 $(0, y)$, 见图 4b. 人眼的瞳距中央距待扫视平面的垂直距离 z 为目标点的深度信息, 则几何关系为

$$x = z \tan \theta_h; y = z \tan \theta_v \quad (2)$$

将式(2)带入式(1)可得

$$\begin{cases} x = z \tan(f^{-1}(U_h)) \\ y = z \tan(g^{-1}(U_v)) \end{cases} \quad (3)$$

当人眼扫视空间某个目标点时, 左右眼水平视角并不相同, 由图 4c 可知, 在已知人眼被试瞳距参数 L 后, 可以将 θ_h 转换为左、右眼水平视角 θ_{hr} 、 θ_{hl} , 即

$$\begin{cases} \tan \theta_{hr} = \frac{z \tan \theta_h - L/2}{z} \\ \tan \theta_{hl} = \frac{z \tan \theta_h + L/2}{z} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得

$$z = \frac{L}{\tan \theta_{hl} - \tan \theta_{hr}} \quad (5)$$

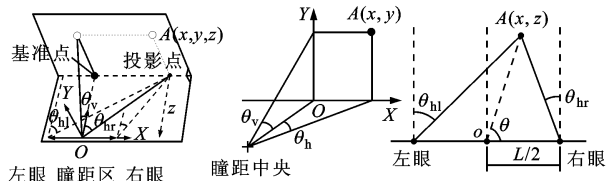
设 θ_{hr} 、 θ_{hl} 与对应 EOG 信号特征 U_{hl} 、 U_{hr} 存在函数关系, 且函数关系为

$$U_{hl} = f_1(\theta_{hl}); U_{hr} = g_1(\theta_{hr}) \quad (6)$$

将式(6)带入式(5)得

$$z = \frac{L}{\tan f_1^{-1}(U_{hl}) - \tan g_1^{-1}(U_{hr})} \quad (7)$$

综合式(7)和式(3), 建立了目标点坐标 (x, y, z) 和 EOG 信号特征之间的对应关系, 以及人眼双目视觉的定位模型.



(a) 物理模型 (b) 扫视平面坐标分解 (c) 水平视角转换

图 4 人眼扫视物理模型及对应的几何关系

2.2 四元数的人眼、仿生机械臂坐标系转换

采用四元数调姿算法实现了人眼坐标系和仿生机械臂坐标系的统一, 根据坐标系转换原理可得人眼和仿生机械臂的坐标转换关系为

$$P = \begin{bmatrix} R & T \\ 0 & 1 \end{bmatrix} Q \quad (8)$$

$$Q = (X' \ Y' \ Z' \ 1)^T$$

$$P = (X \ Y \ Z \ 1)^T$$

式中: Q 为人眼坐标系下基于 EOG 扫视信号获取的向量目标点位置信息; P 为在机械手坐标系下对应的向量目标点. 将 T 从坐标转换关系式中分离出去, 对 2 个坐标系下所测得的待标定点坐标进行重心化计算, 将 2 个坐标系的公共点坐标换算为以重心为原点的重心化坐标, 并分别记为

$$\bar{P} = (\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}); \bar{Q} = (\bar{x}', \bar{y}', \bar{z}')$$

2 个坐标系的重心坐标分别为

$$\begin{cases} P_R = (x_R, y_R, z_R) \\ Q_R = (x'_R, y'_R, z'_R) \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} x_R = \sum_{i=1}^n x_i / n; y_R = \sum_{i=1}^n y_i / n; z_R = \sum_{i=1}^n z_i / n \\ x'_R = \sum_{i=1}^n x'_i / n; y'_R = \sum_{i=1}^n y'_i / n; z'_R = \sum_{i=1}^n z'_i / n \\ \bar{x}_i = x_i - x_R; \bar{y}_i = y_i - y_R; \bar{z}_i = z_i - z_R \\ \bar{x}'_i = x'_i - x'_R; \bar{y}'_i = y'_i - y'_R; \bar{z}'_i = z'_i - z'_R \end{cases} \quad (9)$$

$$\bar{P} = P - P_R; \bar{Q} = Q - Q_R; P_R = R Q_R$$

为了提高坐标转换的精度, 待标定点经过坐标重心化之后, 构建最小化目标函数

$$\sum \|\bar{P} - R\bar{Q}\|^2 =$$

$$\sum (\bar{P}^T \bar{P} + \bar{Q}^T \bar{Q} - 2\bar{P}^T R\bar{Q}) = \min \quad (10)$$

由于求解目标函数最小化也就等于求解 $\bar{P}^T R\bar{Q}$ 最大化, 因此令

$$J = \sum \bar{Q} P^T$$

将 J 进行奇异值分解

$$J = U \Lambda V^T$$

于是得出旋转矩阵

$$R = V U^T; T = \bar{P} - R\bar{Q} \quad (11)$$

根据式(11)可以建立人眼、仿生机械臂之间的坐标关系. 根据人眼双目视觉定位原理, 设计了用于坐标系标定的物理实验平台 (见图 5), 在人眼瞳距中央与物理标定平台基准点的垂直距离为 50 cm 时, 取 121 个 LED (Light Emitting Diode) 灯以 1° 为间隔分布在扫视平台水平、垂直、第 1 象限 45° 的轴线上, 以及第 2 象限 30° 、 60° 的轴线上. 通过程序编码的方式控制 LED 灯闪烁, 将实验平台作为人眼、仿生机械臂坐标系标定的中转平台, 同时提供多种扫视实验模式. 尽管选取 3 个空间独立标定点即可满足坐标系参数求解的要求, 但为了提高坐标转换

精度且不影响标定效率,本文选取了6个公共点(见图6).

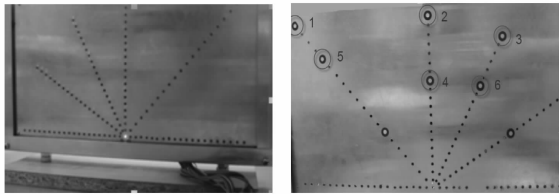
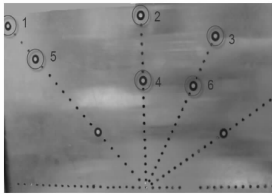


图5 物理标定平台



1~6:公共点
图6 公共点的标定

3 基于 EOG 的人眼扫视角度计算

3.1 信号采集与预处理

根据眼电信号产生机理,采用被试者眼周围贴放5个电极的方式来采集眼电信号(见图7).由电极A、B采集到的信号差分,得到了水平通道的眼电信号 U_h ,并分别置于人脸的左右外眼角2.5 cm处.由电极C、D采集到的信号差分得到垂直眼电信号 U_v ,并分别置于人脸的被试右眉上2 cm和右下眼睑2 cm处.将水平电极用于检测水平扫视时的眼动信号,垂直电极用于检测垂直扫视的眼动信号,E为参考电极,贴放在乳突位置.实际 EOG 信号的采集实验所用设备为 NT9200 生物信号放大器,采样频率为 1 kHz.

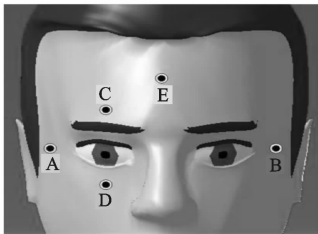


图7 电极分布示意图

如图8所示,采集被试者在水平、垂直方向不同角度扫视对应的水平眼电和垂直眼电时,EOG 信号呈现出不同的峰值特性,且当扫视角度较小时对应的信号峰值也较小,反之,当扫视角度较大时,对应的信号峰值也较大,即 EOG 信号峰值 U 可以作为表征眼球转动角度的特征量.因此,可将水平、垂直

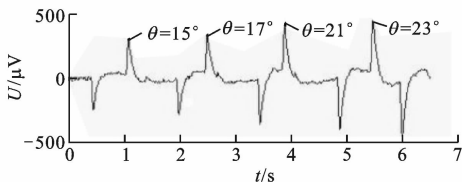


图8 不同扫视角度对应的 EOG 信号

方向双导 EOG 信号的峰值差 U_h 、 U_v ,以及水平方向单导信号的峰值 U_{hl} 、 U_{hr} 作为人眼的定位特征.

为了在线提取扫视信号的特征,结合采集到的 EOG 信号提出一种基于多参数的端点检测算法,并用于实时检测扫视信号的峰值、起始点和终止点.该算法在提取表征眼球转动角度信号特征的同时,能够去除眨眼伪迹的干扰,具体方式为:①背景噪声——令被试者闭目无眼部动作时,测出放大器的系统噪声阈值;②扫视角度较小时,EOG 信号与系统噪声混叠在一起无法识别,将眼球 2° 偏离角作为 EOG 信号的最小识别角度,将多次扫视对应的 EOG 信号峰值求平均即得到该阈值;③扫视信号最大阈值——受试者在自然扫视下,对应的 EOG 信号的最大峰值可作为扫视信号的最大阈值;④优化函数

$$f = E + D_d$$
$$e = \sum_{i=x_0}^{x_1} |x(i) - (k(i+b))|$$

式中 e 为数据段误差, D_d 为 x_1-x_2 数据段的偏离度;⑤峰谷比 R_{pv} 取左峰谷差/右峰谷差,以及右峰谷差/左峰谷差中的最大值,即

$$R_{pv} = \max\left(\left|\frac{x_0-x_1}{x_0-x_2}\right|, \left|\frac{x_0-x_2}{x_0-x_1}\right|\right) \quad (12)$$

基于多参数的端点检测算法流程如图9所示.为了验证该算法的性能,对4名被试者采用303个扫视信号进行端点检测,被试者1的漏检率为4.11%,误检率为39.65%,被试者2的漏检率为0%,误检率为17.47%,检被试者3的漏检率和误检率分别为9.26%、19.67%,被试者4的漏检率及误率分别为7.70%、18.44%.由分析结果可知,与短时

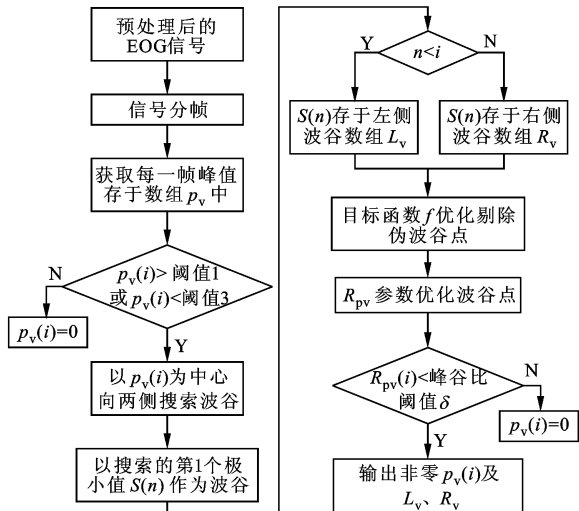


图9 多参数端点检测算法流程图

能量方法和谱熵法相比,本文提出的基于多参数的端点检测算法具有更高的识别率和更低的误检率。

3.2 人眼扫视角度与 EOG 信号特征数学模型

在提取出表征眼球转动角度的信号特征即 EOG 扫视信号峰值后,确定 θ_h 与 U_h 、 θ_v 与 U_v 的函数关系,以及 θ_{hr} 、 θ_{hl} 与 U_{hr} 、 U_{hl} 的函数关系。运用物理标定平台(见图 5)在为被试者提供多种扫视模式的条件下,设计多角度目标点重复扫视实验,其内容如下:①被试者在自然平视时双眼交汇于基准点;②瞳距中央与扫视实验台基准点的垂直距离为 50 cm;③水平扫视角度范围为 $\pm 40^\circ$,扫视间隔为 2° ;④垂直扫视角度的范围为 $\pm 30^\circ$,扫视间隔为 3° ;⑤每个角度目标点重复扫视 20 次;⑥实验过程中被试者保持头部不动(通过头部加持装置来保证这一实验条件)。

对 4 名被试者(3 男 1 女,年龄 22~24 岁)进行实验,将整个实验以扫视角度范围为基准,人的眼球每扫视 10° 被试者休息 1 min。对实验数据进行统计学分析,采用最小二乘曲线拟合的方法来确定角度和对应的信号峰值之间的函数关系。 θ_h 和 U_h 之间的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} U_h &= a_h \theta_h + b_h & -20^\circ \leq \theta_h \leq 20^\circ \\ U_h &= A_h \sin 2\theta_h & \theta_h > 20^\circ; \theta_h < -20^\circ \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

θ_v 和 U_v 之间的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} U_v &= a_v \theta_v + b_v & -20^\circ \leq \theta_v \leq 20^\circ \\ U_v &= A_v \sin 2\theta_v & \theta_v > 20^\circ; \theta_v < -20^\circ \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

θ_{hr} 和 U_{hr} 之间的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} U_{hr} &= a_{hr} \theta_{hr} + b_{hr} & -20^\circ \leq \theta_{hr} \leq 20^\circ \\ U_{hr} &= A_{hr} \sin 2\theta_{hr} & \theta_{hr} > 20^\circ; \theta_{hr} < -20^\circ \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

θ_{hl} 和 U_{hl} 之间的函数关系为

$$\left. \begin{aligned} U_{hl} &= a_{hl} \theta_{hl} + b_{hl} & -20^\circ \leq \theta_{hl} \leq 20^\circ \\ U_{hl} &= A_{hl} \sin 2\theta_{hl} & \theta_{hl} > 20^\circ; \theta_{hl} < -20^\circ \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: a_h 、 a_v 、 a_{hr} 、 a_{hl} 分别表示各线性关系的斜率; b_h 、 b_v 、 b_{hr} 、 b_{hl} 分别表示各线性关系的截距; A_h 、 A_v 、 A_{hr} 、 A_{hl} 分别表示各正弦关系的幅值。

4 实验

4.1 定位模型实例化

选取单个被试者的实验数据,对扫视角度在 $\pm 20^\circ$ 内的实验数据进行线性拟合(更大范围的扫视定位可以通过头部重定位实现),拟合曲线如图 10 所示。

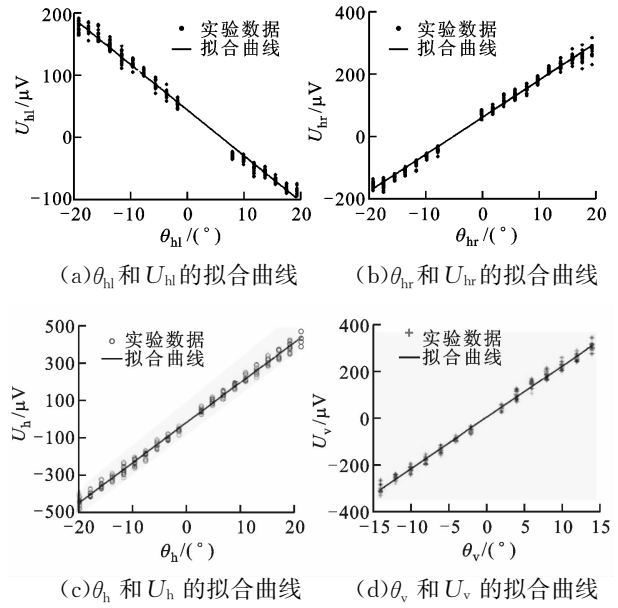


图 10 单个被试者的实验数据拟合曲线

对空间定位模型进行参数化赋值,具体函数关系如下

$$\left. \begin{aligned} U_{hr} &= 11.67\theta_{hr} + 55.43 & -20^\circ \leq \theta_{hr} \leq 20^\circ \\ U_{hl} &= -7.29\theta_{hl} + 54.98 & -20^\circ \leq \theta_{hl} \leq 20^\circ \\ U_h &= 18.38\theta_h + 0.45 & -20^\circ \leq \theta_h \leq 20^\circ \\ U_v &= 21.97\theta_v + 0.59 & -20^\circ \leq \theta_v \leq 20^\circ \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

已知被试瞳距 $L=6.5$ cm,将式(17)带入式(7)、式(3),得到 EOG 扫视信号参数化定位模型

$$\left. \begin{aligned} z &= \frac{6.5}{\tan((U_{hl}-54.98)/(-7.29)) - \tan((U_{hr}-55.43)/11.67)} \\ x &= z \tan((U_h-0.45)/18.38) \\ y &= z \tan((U_v-0.59)/21.97) \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

对人眼进行定位误差分析,选取 6 个空间目标点来检验参数化定位模型的定位性能。被试者保持头部不动、眼球以基准点为参考扫视定位点,由贴在眼周围的皮肤电极检测 EOG 信号,并输入到端点检测算法中,得到了表征眼球转动角度的眼电信号特征,并代入到参数化模型中,得到的定位点实测坐标如表 1 所示。

4.2 仿生机械臂的定位与控制

本文研究了 RBT-6T/S01S 型 6DOF 串联关节式机械臂,它的 6 个关节均为转动关节,根据杆件几何参数建立的仿生机械臂运动方程为

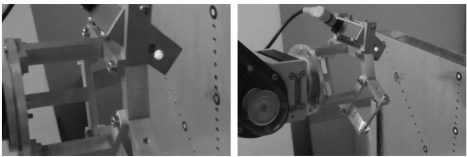
$$A_i = f(\theta_i), \quad i = 1, \dots, 6 \quad (19)$$

$$\theta_i (i = 1, \dots, 6) = f^{-1}(A_i) \quad (20)$$

表 1 参数化模型的定位性能分析 cm

定位点	实际位置			测量位置			平均误差
	x	y	z	x	y	z	
1	18.199	18.199	50.000	18.552	17.824	49.200	0.849
				17.772	18.306	50.602	
				17.790	17.689	50.545	
2	0.000	18.199	50.000	0.172	17.819	51.002	0.801
				-0.203	18.550	50.702	
				0.315	18.035	49.641	
3	-9.099	15.760	50.000	-8.841	15.387	48.900	0.977
				-9.374	16.020	50.741	
				-9.202	15.001	49.511	
4	0.000	11.543	50.000	0.074	11.639	50.060	0.558
				-0.302	11.051	50.626	
				0.221	11.872	50.562	
5	14.337	14.337	50.000	14.411	14.433	50.080	0.339
				14.155	14.185	49.702	
				14.215	14.103	50.414	
6	-6.233	10.796	50.000	-6.016	10.533	50.210	0.512
				-5.908	10.299	50.412	
				-6.530	11.001	49.802	

式中: A_i 为机械臂末端位姿; $\theta_i(i=1,\cdots,6)$ 为关节转角. 当被试者保持头部不动时,眼球从点 4 扫视到点 5,将人眼双目视觉空间定位模型提取的定位点坐标代入基于四元数的坐标配准程序中,并转换到仿生机械臂坐标系下,为仿生机械臂提供空间位置反馈. 当已知机械臂末端执行器位姿时,由式(21)可以指导机械臂由初始点运动到目标点. 人眼指导仿生机械臂的定位效果如图 11 所示. 由表 2 可以看出,反馈误差比人眼定位误差稍稍偏大,考虑到坐标转换误差,认为该误差是可以接受的,同时也验证了人眼指导仿生机械臂空间位置反馈的可行性.



(a)定位点 4 (b)定位点 5

图 11 人眼指导仿生机械臂的定位效果图

表 2 人眼指导仿生机机械臂位置的反馈误差 cm

定位点	目标位置			实际位置			e
	x	y	z	x	y	z	
4	28.044	-0.443	35.680	28.239	0.000	36.139	0.667
5	27.655	7.498	37.105	27.980	7.537	37.449	0.475

5 结 论

(1)根据检测到的 EOG 信号特征,本文通过人眼双目视觉仿生机机械臂空间位置的反馈方法,建立了人眼双目视觉定位模型,以提取空间目标点的位置信息. 利用四元数空间坐标转换算法,将人眼坐标系的目标点坐标转换到仿生机械臂的坐标系中,为仿生机械臂空间位置的反馈提供了一种新方法.

(2)针对 EOG 扫视信号的波形特征,本文提出了多参数端点检测算法,该算法在降低扫视信号漏检率、剔除扫视信号中人眼眨眼伪迹的同时,实现了信号特征的在线提取.

参考文献:

[1] 张晓文,杨煜普,许晓鸣,等. 上肢假肢控制模式的信息源研究 [J]. 生物医学工程学杂志,2002,19(4):692-696.
ZHANG Xiaowen, YANG Yupu, XU Xiaomin, et al. Research on signal sources for prosthetic limb control [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2002,19(4): 692-696.

[2] 夏春明,杨正宜,曹炜,等. 基于肌音信号的虚拟假肢控制 [J]. 华东理工大学学报,2010,36(4):591-595.
XIA Chunming, YANG Zhengyi, CAO Wei, et al. Control of virtual prosthesis based on mechanomyogram signal [J]. Journal of East China University, 2010,36(4):591-595.

[3] JOSEDEL R, MILLAN F R, JOSEP M, et al. Non-invasive brain-actuated control of a mobile robot by human EEG [J]. Biomedical Engineering, 2004, 51(6):1026-1033.

[4] JOHNALAN K, EDWARD B, JAMES C. An electrooculogram-based binary saccade sequence classification(BSSC) technique for augmentative communication and control [C]// 31st Annual International Conference of the IEEE EMBS. Piscataway, NJ, USA: IEEE,2009:2604-2607.

[5] WIJESOMA W S, KANG S W, CHOON O W. EOG based control of mobile assistive platforms for the se-

- verely disabled. Robotics and Biomimetics (ROBIO) [C]//IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Piscataway, NJ, USA: IEEE,2005:490-494.
- [6] 王军南,丛爽. 基于视觉的机械臂末端执行器坐标获取 [C]//系统仿真技术及其应用学术会议. 北京:中国科学技术大学出版社,2007:860-864.
- [7] 王军南,丛爽. 基于视觉定位的二自由度机械臂控制系统 [J]. 机械与电子,2008(2):49-52.
- WANG Junnan, CONG Shuang. 2-DOF manipulator control system based on visual location [J]. Machinery & Electronics, 2008(2):49-52.
- [8] 张霖,王行愚,姚晓东,等. 眼球运动相关 EOG 信号的波形分析与特征提取 [J]. 上海生物医学工程,2003,24(3):19-22.
- ZHANG Lin, WANG Xingyu, YAO Xiaodong, et al. Analysis and extraction of eigenvalues based on eye movement related electrooculography [J]. Shanghai Journal of Biomedical Engineering, 2003,24(3):19-22.
- [9] 吴湛微,姚晓东,邹俊忠,等. 从 EOG 扫视信号中提取眼球位置信息 [J]. 华东理工大学学报,2005,31(2):212-214.
- WU Zhanwei, YAO Xiaodong, ZOU Junzhong, et al. Extraction of eye position information from EOG saccade signal [J]. Journal of East China University, 2005,31(2):212-214.
- [10] OSTER P J, STERN J A. Electro-oculography techniques in psychophysiology [M]. New York, USA: John Wiley & Sons,1980:25-53.
- [11] ILYA V, MALINOV A, EPELBOIM J B, et al. Characteristics of saccades and vergence in two kinds of sequential looking tasks [J]. Vision Research,2000,40(16):2083-2090.
- [12] HORN B K P. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions [J]. Optical Society of America,1987,4(4):629-642.

(编辑 管咏梅)