doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.10.051

仿人机器人头部设计与目标跟踪运动控制

宛敏红[1,2]　周维佳[1]　刘玉旺[1]

(1.中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室,沈阳 110016;2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:针对仿人机器人视觉目标跟踪任务需求,设计了一种高精度、灵巧型仿人机器人头部系统,构建了视觉感知模块与3自由度机械臂运动机构。利用虚拟连杆方法对仿人机器人头部进行运动学建模,将目标跟踪问题转换为机械臂的运动学逆解问题,通过计算机构可操作度与条件数,显示机器人头部对目标跟踪任务具有良好的运动学灵活性。在此基础上,基于梯度投影法建立了目标跟踪运动学逆解与规避关节极限位置的同步优化算式,并针对视觉测量系统带宽较窄、容易造成较大跟踪误差的问题,提出了在两次视觉测量间隔内用轨迹预测的方法获得目标位置的估计值,以提高跟踪精度。仿真与实验结果表明,在测量盲区内采用轨迹预测方法,可将跟踪精度提高约80%,实现高精度目标跟踪。所提出的仿人机器人头部及控制方法,对动态目标具有良好的跟踪性能。

关键词:仿人机器人;头部;目标跟踪;虚拟连杆;梯度投影法;轨迹预测

中图分类号:TP242　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2017)10-0401-07

Design of Humanoid Robot Head and Motion Control for Object Tracking

WAN Minhong[1,2]　ZHOU Weijia[1]　LIU Yuwang[1]

(1. *The State Key Laboratory of Robotics*, *Shenyang Institute of Automation*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*)

Abstract: According to the need for visual target tracking task of the humanoid robot, a new kind of humanoid robot head with high precision and good dexterity was put forward, and the visual perception module and the three degree of freedom robot mechanism were constructed. In order to evaluate the motion ability of humanoid robot head for the target tracking task, the kinematics model of the robot head was established by using the virtual link method, which made the problem of object tracking transform to the problem of inverse kinematics. And the kinematics characteristics was studied by the calculation of condition number and manipulability, which showed that the dexterity of the humanoid robot head was good for the tracking task. Based on this, by using gradient projection method, the synchronization optimization solution was obtained for the inverse kinematics and the avoidance of joint limits. Because of the complexity of image processing, the speed of the visual measurement system was generally slow, and the bandwidth was usually only about 10 Hz. Therefore, the target position can not be updated in the measurement blind area between the two measuring points, which led to great tracking error. According to this problem, a prediction method of trajectory in the two visual measurement interval to estimate the target position was proposed. The simulation and experimental results showed that the tracking accuracy can be improved by about 80% by using the trajectory prediction method in the blind area of vision measurement, and the high precision target tracking can be realized. The humanoid robot head and motion control method proposed had good tracking performance for dynamic target.

Key words: humanoid robot; head; object tracking; virtual link; gradient projection method; trajectory prediction

引言

仿人机器人是当前机器人领域的研究热点之一,国内外科研机构与企业都对其开展了大量的研究工作,开发出了一系列仿人机器人[1-8]。仿人机器人头部是仿人机器人的重要组成部分,其主要功

收稿日期:2017-07-05　修回日期:2017-08-09

基金项目:国家自然科学基金项目(51605474)

作者简介:宛敏红(1982—),男,副研究员,博士生,主要从事机器人学研究,E-mail:wanminhong@sia.cn

能是实现与外界的交互,机器人头部一般会根据任务需求集成视觉、听觉、嗅觉、表情表达等功能模块中的一种或几种。麻省理工学院开发的机器人头部 Kismet,共有 21 个自由度,可通过面部表情、声音以及动作实现与外界的交互,并通过宽视场角低精度相机与窄视场角高精度相机的组合使用提高视觉测量的效率[9]。Wroclaw 大学开发的情感表达头部机器人 EMYS 能够通过头部、眼睛以及眼睑的动作表达一系列情感,如高兴、悲伤、惊讶等,EMYS 头部机器人共有 11 个自由度,利用面部动作编码系统(FACS)描述机器人的面部表情[10]。NASA 开发的航天员机器人 Robonaut2,其头部由 3 自由度机构与感知系统组成,使用伺服电机与谐波传动系统实现高精度伺服控制[11]。儿童机器人 iCub 的头部具有 6 个自由度,集成视觉、听觉及惯性传感器,能实现视觉目标跟踪、身体平衡以及声定位功能[12]。文献[13]提出一种机器人头部模块,利用 3 个力传感器的组合,可同时测出外界施加于头部的力与位置。

通过视线控制仿人机器人可以实现对动态目标的跟踪,在控制方法上与光电跟踪系统类似[14]。文献[15]通过采用虚拟连杆建模方法,将视线跟踪控制问题等效转化为机械臂末端轨迹跟踪问题,基于梯度投影法求解出了视线跟踪的最优解。文献[16]将阻尼最小二乘法用于具有冗余特性的机器人头部视线控制中,以规避奇异点与关节极限位置。文献[17]针对目标轨迹的不确定性,运用卡尔曼滤波技术对目标位置进行预测。文献[18]通过机器人头颈与眼睛部位联合运动,实现了目标跟踪控制。

在现有的仿人机器人头部跟踪运动控制研究中,鲜少有提及针对特定跟踪任务的运动学性能评估,特别是仿人机器人头部大量采用冗余机构,控制上比较复杂,如果能得到运动学性能比较优良的构型,有利于提高跟踪的实时性与精度。另一方面,受限于视觉测量计算的复杂性,视觉测量的频宽一般只有 10 Hz 左右,而位置伺服的控制频宽可以达到 100 Hz 左右,视觉测量的响应滞后往往造成跟踪误差较大,在运动目标速度较快时更是如此,如何提高在视觉测量频宽较窄时的跟踪精度,也是需要解决的问题。为实现对动态目标的视觉跟踪,仿人机器人头部应具有灵活运动、高精度跟踪的能力。本文针对仿人机器人视觉跟踪任务需求,提出一种具有视觉跟踪能力的头部系统,基于虚拟连杆建模的方法,将视觉跟踪任务转换成机械臂轨迹跟踪任务,利用可操作度与条件数评估其运动学性能,验证其设计的合理性,并基于轨迹预测的方法提高视觉测量速度滞后下的跟踪精度。

1 仿人机器人头部系统设计

本文提出的仿人机器人头部实物如图 1 所示,主要由视觉感知模块与机械臂本体组成,其任务是实现对运动小球的视觉跟踪。机器人头部整体上实现了紧凑型设计,质量为 5.8 kg,包络尺寸为 400 mm×230 mm×230 mm,体积与成年人的头颈相当。选择类似人类头颈的串联机构作为机械臂构型,包含下俯仰(关节 1)、回转(关节 2)、上俯仰(关节 3)3 个关节。

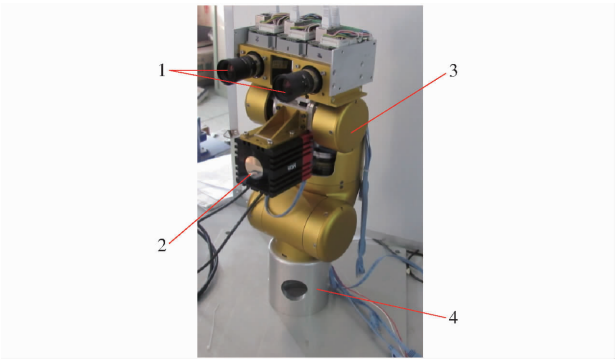


图 1 仿人机器人头部系统组成

Fig. 1 Humanoid robot head system configuration

1. CCD 相机 2. TOF 相机 3. 机械臂 4. 基座

视觉感知模块负责对小球进行识别与定位,并将位置信息发送给机械臂控制器,驱动机械臂运动,以使机器人头部视线始终对准目标。视觉感知模块包括 2 个 CCD 相机与 1 个激光测距(TOF)相机,CCD 相机的分辨率为 2 448 像素×2 050 像素,TOF 相机的分辨率为 176 像素×144 像素,利用两种相机进行信息融合以得到小球的位置。小球定位方法是首先利用 TOF 相机进行粗定位,获得小球在 CCD 相机上大致位置并计算感兴趣区域,最后在感兴趣区域内利用双目视觉进行精确定位计算,这样可以同时保证处理速度和测量精度[19]。

机械臂关节采用模块化设计方法,驱动元件使用无刷直流电动机与谐波减速机以实现高精度位置伺服,图 2 为模块化关节设计原理。

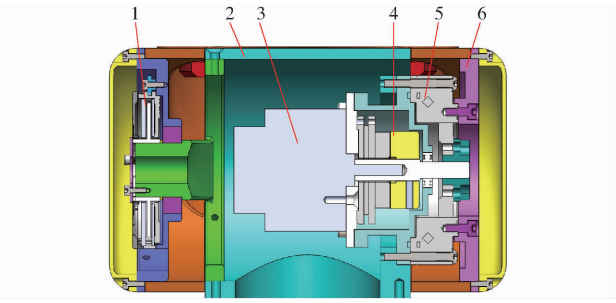


图 2 模块化关节结构设计原理图

Fig. 2 Schematic diagram of modular robot joint design

1. 关节编码器 2. 基座 3. 电动机组件 4. 制动器 5. 谐波减速机 6. 关节输出端

仿人机器人头部控制系统采用基于 EtherCAT 总线的分布式控制方式，以倍福四核嵌入式计算机为控制器平台，实时性高，易于模块化设计，各关节之间通过总线连接实现主从关系或平行关系。主控制器作 EtherCAT 主站，完成图像处理与运动规划任务，各关节控制器作为 EtherCAT 从站，通过 EtherCAT 总线与主控制器进行通信，完成关节层控制。CCD 相机、TOF 相机与主控制器之间通过千兆以太网进行通信，控制系统组成框图如图 3 所示。

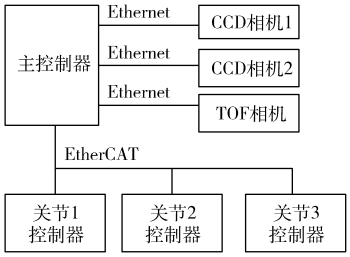


图 3　机器人头部控制系统框图

Fig. 3　Robot head control block diagram

2　运动学建模与分析

2.1　基于虚拟连杆的运动学建模

采用虚拟连杆方法可以将视线跟踪问题等效转换为运动机构末端轨迹跟踪问题[15-16]。仿人机器人头部视觉跟踪的虚拟连杆建模方法如图 4 所示，在视觉坐标系原点与目标之间建立一个虚拟的连杆，虚拟连杆在运动学上等效于一个移动关节，即虚拟连杆在长度方向上可伸缩，使得在目标跟踪运动过程中，连杆的末端始终与目标连接在一起。如此，视觉目标跟踪问题，就等价于包含虚拟连杆在内的 4 自由度机械臂的动态轨迹跟踪问题。

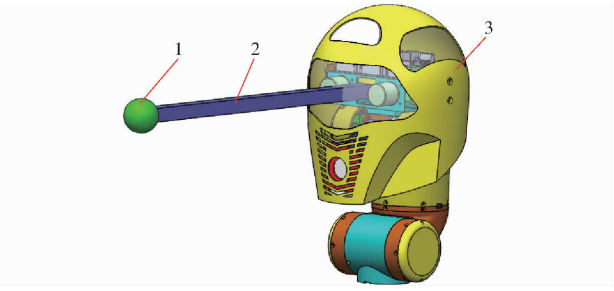


图 4　仿人机器人头部虚拟连杆建模示意图

Fig. 4　Modeling principle of humanoid robot head based on visual link method

1. 跟踪目标　2. 虚拟连杆　3. 仿人机器人头部

仿人机器人头部连杆坐标系如图 5 所示，DH 参数如表 1 所示。设连杆末端位置点为 O_4，目标位置点为 O_{4T}，跟踪运动控制方法是：由视觉感知模块测量得到两点位置差，即笛卡尔空间中的跟踪误差，再经过逆运动学计算得到驱动信号，驱动机械臂向目标位置点运动。

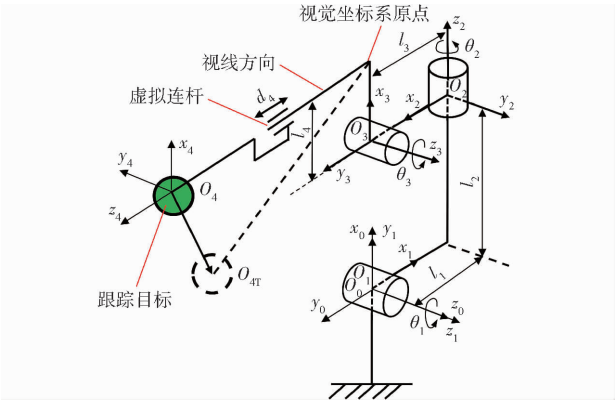


图 5　仿人机器人头部连杆坐标系

Fig. 5　Humanoid robot head link coordinates

表 1　仿人机器人头部 DH 参数

Tab. 1　Humanoid robot head DH parameters

i	a_{i-1}	$\alpha_{i-1}/(°)$	d_i	θ_i
1	0	0	0	θ_1
2	l_1	-90	l_2	θ_2
3	l_3	-90	0	θ_3
4	l_4	-90	d_4	0

类似于人类头颈的运动机理与运动范围，3 个关节运动范围分别设定为[-95°，-20°]、[90°，270°]与[-104°，-55°]，3 个关节的最大运动速度均为 360(°)/s。机器人头部的几何参数为 $l_1 = l_3 = 0.055$ m，$l_2 = 0.163$ m，$l_4 = 0.064$ m。

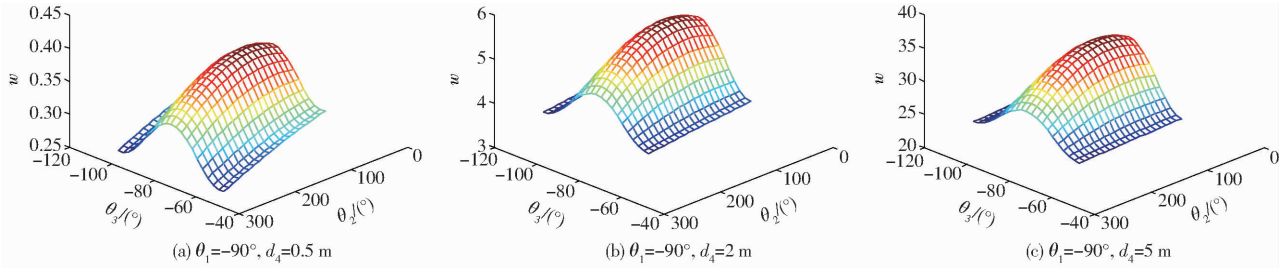
2.2　运动学特性分析

通过可操作度与条件数指标评估机器人头部的运动性能，以验证机构设计的合理性。可操作度表征机构离奇异位形的远近，Yoshikawa 提出的可操作度定义为

$$w = \sqrt{\det(\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}})} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{J}$——雅可比矩阵

机器人处于奇异位形时，雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 行不满秩，$\det(\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}) = 0$，$w = 0$。$w$ 越大，机器人的灵活性就越好。可操作度指标受机器人关节参数影响，第一个关节为旋转关节，其取值不影响可操作度数值，为便于分析，设 $\theta_1 = -90°$，分别考察虚拟连杆长度 d_4 为 0.5、2、5 m 时，可操作度与 θ_2、θ_3 之间的关系，如图 6 所示。可见，在整个运动范围内，可操作度均大于零并且变化平缓，即不存在奇异位形以及运动性能的突变位置。可操作度指标是指机器人各个方向上运动能力的综合度量，随着虚拟连杆长度 d_4 的增加，机器人末端点距基坐标系原点的距离增大，因此 θ_2、θ_3 的变化，能产生更大的末端位移，运动能力增加，这从图 6 的可操作度变化趋势可以看出，可操作度在逐渐增加。



(a) θ_1=−90°, d_4=0.5 m (b) θ_1=−90°, d_4=2 m (c) θ_1=−90°, d_4=5 m

图 6 机器人头部可操作度

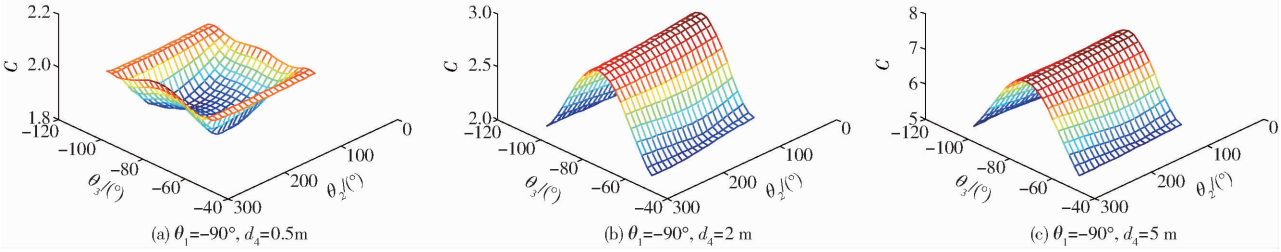
Fig. 6 Manipulability of robot head

机构条件数定义为

$$C(\boldsymbol{J}) = \|\boldsymbol{J}\|\|\boldsymbol{J}^+\| \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{J}^+$——雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}$ 的广义逆矩阵

条件数的范围为[1,∞),当 $C=1$ 时表明机构具有最佳的运动传递性能。令 $\theta_1=-90°$,当虚拟连杆长度 d_4 分别为 0.5、2、5 m 时,条件数与 θ_2、θ_3 之间的关系如图 7 所示。可见在整个运动范围内,条件数均大于 1,取值合理,并且变化比较均匀,不存在不可控点,运动性能变化均匀。条件数指标是机器人各个方向上运动能力的均一性度量,图 7 中随着虚拟连杆长度 d_4 的增加,条件数逐渐增大,表征运动能力均一性变差,这是因为旋转关节在末端点产生运动的能力逐渐增加,而移动关节的运动能力未变。



(a) θ_1=−90°, d_4=0.5m (b) θ_1=−90°, d_4=2 m (c) θ_1=−90°, d_4=5 m

图 7 机器人头部条件数

Fig. 7 Condition number of robot head

3 目标跟踪运动控制

3.1 运动学逆解算法

对于冗余机构,运动学逆解有无穷多个,需要通过合理的优化准则选择最优解。设机器人头部关节位置为 $\boldsymbol{q}=(q_1,q_2,q_3,q_4)^{\mathrm{T}}=(\theta_1,\theta_2,\theta_3,d_4)^{\mathrm{T}}$,末端点在笛卡尔空间坐标为 $\boldsymbol{x}=(x,y,z)^{\mathrm{T}}$,则可得到

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{J}\dot{\boldsymbol{q}} \tag{3}$$

其中,$\boldsymbol{J}$ 为 3×4 阶雅可比矩阵。式(3)基于广义逆的解为

$$\dot{\boldsymbol{q}}=\boldsymbol{J}^+\dot{\boldsymbol{x}}+k(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\nabla\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q}) \tag{4}$$

其中

$$\nabla\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})=\left[\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial q_1}\quad\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial q_2}\quad\cdots\quad\frac{\partial\boldsymbol{H}}{\partial q_n}\right]^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

式中 $\boldsymbol{I}$——单位矩阵 k——优化系数

$\nabla\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})$——拟优化目标函数 $\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})$ 的梯度

式(4)中右边第 1 项为最小范数解,第 2 项为关节自运动的优化解。

当 $\boldsymbol{J}$ 行满秩时,$\boldsymbol{J}^+=\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{J}\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}})^{-1}$。

为使机械臂规避关节极限位置,设优化函数为

$$\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})=\sum_{i=1}^{4}\frac{(q_{i\max}-q_{i\min})^2}{(q_{i\max}-q_i)(q_i-q_{i\min})} \tag{6}$$

式中 $q_{i\max}$、$q_{i\min}$——第 i 个关节的上、下极限位置

在跟踪运动控制过程中,机械臂关节位置 $\boldsymbol{q}$ 通过编码器实时测量,机械臂末端点位置 $\boldsymbol{x}$ 通过前向运动学计算得到,设动态目标位置为 $\boldsymbol{x}_d$,由视觉测量得到,可按如下步骤进行迭代计算:

(1)计算跟踪位置差 $\Delta\boldsymbol{x}=\boldsymbol{x}_d-\boldsymbol{x}$。

(2)计算关节空间位置增量 $\Delta\boldsymbol{q}=\boldsymbol{J}^+\Delta\boldsymbol{x}+k(\boldsymbol{I}-\boldsymbol{J}^+\boldsymbol{J})\nabla\boldsymbol{H}(\boldsymbol{q})$。

(3)计算关节空间位置更新值 $\boldsymbol{q}=\boldsymbol{q}+\Delta\boldsymbol{q}$,返回步骤(1)。

3.2 目标轨迹预测

如果目标速度较快,而视觉测量更新速度又较慢,则在 2 次测量点之间的测量盲区内目标已经运动到较远位置,导致产生较大的跟踪误差。对于高精度视觉测量系统,一般更新频率只能达到 10 Hz 左右,即更新间隔为 0.1 s,如果目标速度为 3 m/s,则在测量盲区内目标运动的距离为 0.3 m,这就是跟踪误差。

如果能利用已测的目标轨迹预测测量盲区内的未测轨迹,以得到更致密的目标位置,则能减小跟踪误差。在各种目标位置预测的方法中,如卡尔曼滤波、粒子滤波、$\alpha-\beta$ 滤波、最小二乘法滤波等,最小二乘法具有比较快的计算速度,更适合在实时目标

跟踪中应用[20]。

利用最小二乘法，对已测点进行多项式曲线拟合，即可用拟合曲线对测量盲区内目标轨迹进行预测。拟合曲线的次数越高，位置预测精度越高[20]，本文根据目标的运动特征，即大体上比较平缓，没有剧烈变化，选择二次多项式曲线进行位置拟合，兼顾精度与实时性要求。设最近 4 次视觉测量的时刻分别为 $(t_1, t_2, t_3, t_4) = (0, 0.1, 0.2, 0.3)$ s，位置为 $\boldsymbol{x}_{d1} = (x_1, y_1, z_1)^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{x}_{d2} = (x_2, y_2, z_2)^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{x}_{d3} = (x_3, y_3, z_3)^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{x}_{d4} = (x_4, y_4, z_4)^{\mathrm{T}}$，利用此 4 个点的时间与位置可拟合出一条二次曲线，如果视觉测量间隔为 0.1 s，利用此曲线在当前测量盲区内等时段预测 9 个点，即可有效提高测量带宽，预测原理如图 8 所示。

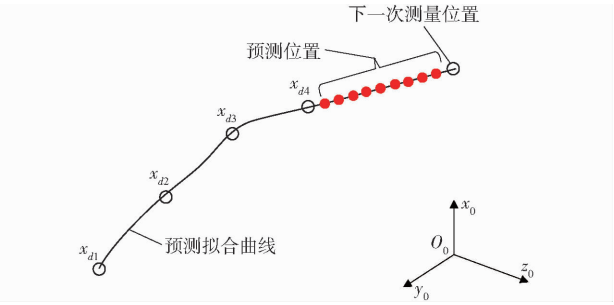


图 8　轨迹预测方法

Fig. 8　Trajectory prediction method

以 x 方向为例说明位置预测方法，y、z 方向与此类似。设拟合曲线为

$$\hat{x}_d(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \tag{7}$$

则根据最小二乘法原理，式(7)的解为

$$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{P})^{-1}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X} \tag{8}$$

其中 $\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}$　$\boldsymbol{P} = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1^2 \\ 1 & t_2 & t_2^2 \\ 1 & t_3 & t_3^2 \\ 1 & t_4 & t_4^2 \end{bmatrix}$　$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$

得到 $\hat{x}_d(t)$ 表达式后，即可预测目标在 x 方向的位置值，直到下一次视觉测量数值更新时，再用实测值作为目标位置，因此，反馈给控制系统的目标位置，是由实测值与预测值交替组成。

4　仿真

设目标运动轨迹为三维空间曲线，可以表示成二次多项式形式，参数方程为

$$\begin{cases} x_d(t) = 0.22 + 0.4t - 0.2t^2 \\ y_d(t) = 0.4 + 0.5t + 0.3t^2 \\ z_d(t) = -0.45 + 0.5t + 0.3t^2 \end{cases} \tag{9}$$

仿真时间为 0 ~ 1 s。设视觉测量更新周期为 0.1 s，跟踪控制周期为 0.01 s，关节最大速度为 360(°)/s，优化系数 $k = -0.000\,01$。机器人头部初始位形为(−90°，180°，−90°，0.4 m)，初始位形时末端点位置与目标初始位置有一定距离，这与实际情况中机械臂初始位形与目标的关系存在随意性比较相符，即总是存在一定的未知距离。在 0 ~ 1 s 内视觉测量更新 10 次，跟踪控制 100 次，采用轨迹预测方法的跟踪效果及机器人头部构型变化如图 9 所示。

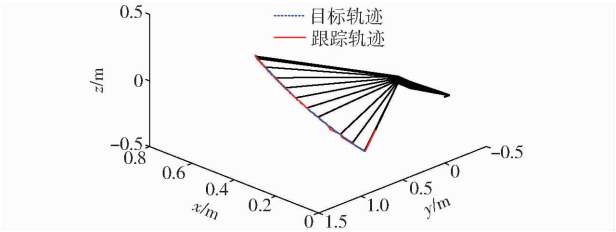


图 9　目标跟踪效果

Fig. 9　Target tracking effect

跟踪误差如图 10 所示，为便于比较，将采用非轨迹预测方法的跟踪误差也一并显示。可见，初始位形有较大跟踪误差，约 0.185 m，但机器人头部在 0.1 s 内就能跟上目标，但跟踪误差仍然明显，最大约为 0.09 m，这是因为在测量盲区内目标运动距离较远。直到视觉测量采集到 4 个点位置后，轨迹预测功能开始起作用，采用轨迹预测方法的跟踪误差显著减小到 0.018 m 左右，而采用非轨迹预测方法的跟踪误差在整个过程中有逐渐增大的趋势，这是因为目标一直处于加速状态，在测量盲区内运动的距离逐渐增大，表现出来的效果就是跟踪误差逐渐增大。可见，轨迹预测方法对提高跟踪精度作用明显，能将跟踪精度提高约 80%。

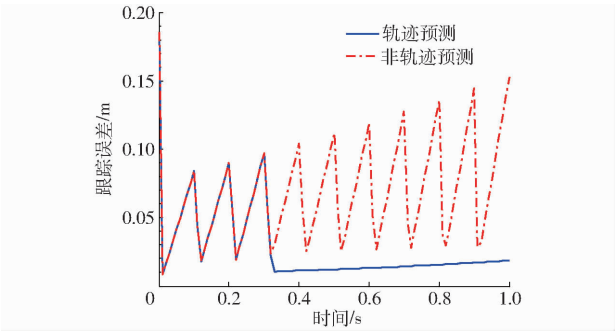


图 10　目标跟踪误差

Fig. 10　Target tracking error

关节位置变化如图 11 所示，关节 1、关节 2 均离极限位置较远，关节 3 的最小位置为 −102.5°，与下极限位置 −104° 仍有安全距离，可见在跟踪过程中，基于梯度投影的优化算法很好地保证了关节不超越极限位置。如果去除极限位置保护功能，即令 $k = 0$，则关节位置变化如图 12 所示，此时关节 3 的最小位置为 −104.5°，超越极限位置，这在实际中是

不允许的。可见,利用梯度投影法可以在得到运动学逆解的同时,获得次目标的优化解,这不仅是实际物理结构的需要,也是仿人功能的体现,人类头颈在进行视觉目标跟踪时,总是以最快、最省力的方式快速跟上目标,并且保证头颈都在舒服的区间内运动,这是人类天生的同步优化能力。

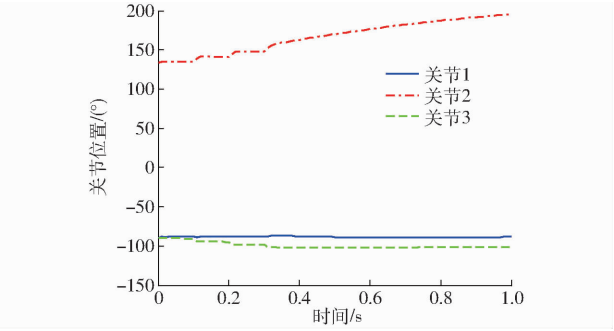


图 11 跟踪过程关节位置变化

Fig. 11 Joint position changes during tracking

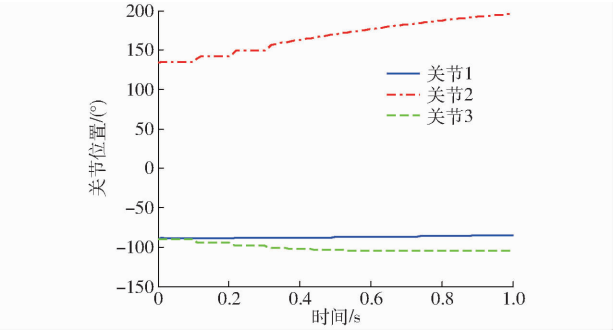


图 12 去除极限位置规避功能的关节位置变化

Fig. 12 Joint position changes under no limits avoidance

5 实验验证

在倍福控制器中,采用 VC + + 软件实现上述仿人机器人头部目标跟踪算法,视觉测量周期为 0.1 s,跟踪控制周期为 0.01 s,考察仿人机器人头部实际的目标跟踪能力。小球在机器人头部前面约 1 m 处作空间三维曲线运动,由人手控制小球运动,因此小球运动轨迹表现出一定的随意性。

图 13 为目标跟踪实验拍摄视频的连续截屏,持续时间为 18 s,共截取 8 个姿态,均处于稳定跟踪阶段,可见仿人机器人头部视线始终跟随目标运动,跟

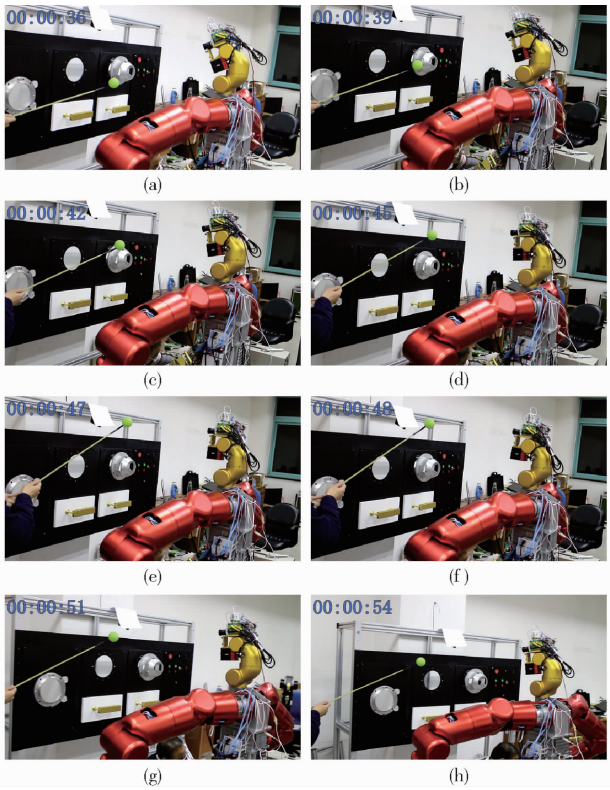


图 13 仿人机器人头部目标跟踪实验

Fig. 13 Target tracking experiment of humanoid robot head

踪误差较小,达到了高精度跟踪的效果。因此,前文中提到的仿人机器人头部控制方法,能对动态目标实现稳定、平滑的视觉跟踪。

6 结论

(1)对仿人机器人头部采用冗余机构方案,可以提高视觉跟踪的灵巧性,在进行目标跟踪的同时,可以实现次目标,如规避关节极限位置,相较于传统的双轴跟踪机构,冗余机器人头部更好地展示了“仿人”的功能。

(2)基于虚拟连杆方法对目标跟踪任务进行运动学建模,将跟踪问题转换成机械臂运动学逆解问题,即可以借助于机械臂运动学性能指标,有效地评估机构对跟踪任务的灵活性。

(3)在视觉测量的盲区内采用轨迹预测方法,可以有效提高跟踪精度。

参 考 文 献

1 吴伟国. 面向作业与人工智能的仿人机器人研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(7): 1 - 19.
WU Weiguo. Research progress of humanoid robots for mobile operation and artificial intelligence[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015,47(7): 1 - 19. (in Chinese)

2 于秀丽, 魏世民, 廖启征. 仿人机器人发展及其技术探索[J]. 机械工程学报, 2009,45(3): 71 - 75.
YU Xiuli, WEI Shimin, LIAO Qizheng. Development and technology research of humanoid robot[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2009,45(3): 71 - 75. (in Chinese)

3 LAW J, SHAW P, LEE M, et al. From saccades to grasping: a model of coordinated reaching through simulated development on a humanoid robot[J]. IEEE Transactions on Autonomous Mental Development, 2014, 6(2):93 - 109.

4 TAN K C, CHEN Y J, TAN K K, et al. Task-oriented developmental learning for humanoid robots[J]. IEEE Transactions on

Industrial Electronics, 2005, 52(3):906 – 914.

5 KIM Y D, LEE B J, RYU J H, et al. Landing force control for humanoid robot by time-domain passivity approach[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2007, 23(6):1294 – 1301.

6 ZHAO Jing, LI Wei, MAO Xiaoqian, et al. Behavior-based SSVEP hierarchical architecture for telepresence control of humanoid robot to achieve full-body movement[J]. IEEE Transactions on Cognitive and Developmental Systems, 2017, 9(2):197 – 209.

7 LIU H Y, WANG W J, WANG R J, et al. Image recognition and force measurement application in the humanoid robot imitation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2012, 61(1):149 – 161.

8 LIU Zhi, XU Shuqiong, ZHANG Yun, et al. A multiple-feature and multiple-kernel scene segmentation algorithm for humanoid Robot[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(11):2232 – 2240.

9 BREAZEAL C, EDSINGER A, FITZPATRICK. P, et al. Active vision for sociable robots[J]. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. A, 2001,31:443 – 453.

10 KEDZIERSKI J, MUSZYŃSKI R, ZOLL C, et al. EMYS—emotive head of a social robot[J]. International Journal of Social Robotics, 2013, 5: 237 – 249.

11 DIFTLER M A, AHLSTROM T D, JOYCE C A, et al. Robonaut 2-initial activities on-board the ISS[C]//In Proc. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, 2012:1 – 12.

12 BEIRA R, LOPES M, PRAGA M, et al. Design of the robot-cub (iCub) head[C]//IEEE International Conference on Robotics & Automation, Orlando, Florida, 2006: 94 – 100.

13 KIM D K, KIM J H, KWON H J, et al. Fabrication of robot head module using contact-resistance force sensor for human-robot interaction and its evaluation[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(10):3269 – 3276.

14 官伯林，贾建援，朱应敏. 基于自适应差分进化算法的三轴光电跟踪策略[J]. 机械工程学报，2012，48(10)：14 – 21.
GUAN B L, JIA J Y, ZHU Y M. Tracking strategy of three-axis photoelectric tracking system based on adaptive differential evolution algorithm[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 14 – 21. (in Chinese)

15 OMRČEN D, UDE A. Redundant control of a humanoid robot head with foveated vision for object tracking [C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage, USA: RA, 2010: 4151 – 4156.

16 祁若龙，张伟，王铁军，等. 仿人头颈部机器人跟踪运动控制方法[J]. 吉林大学学报：工学版，2016，46(5)：1595 – 1601.
QI Ruolong, ZHANG Wei, WANG Tiejun, et al. Tracking motion control method of hunanoid head and neck robot[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2016, 46(5): 1595 – 1601. (in Chinese)

17 GIULIO M, LUCA V, ALESSANDRO D L. Adaptive predictive gaze control of a redundant humanoid robot head [C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, San Francisco, USA: CA, 2011: 3192 – 3198.

18 GU Lizhong, SU Jianbo. Gaze control on humanoid robot head[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China, 2006: 21 – 23.

19 范晓鹏，郝颖明，朱枫，等. 面向机器人航天员的球形目标识别与定位方法研究[J]. 载人航天，2016，22(3)：375 – 380.
FAN Xiaopeng, HAO Yingming, ZHU Feng, et al. Study on spherical target identification and localization method for robonaut [J]. Manned Spaceflight, 2016, 22(3): 375 – 380. (in Chinese)

20 钟建冬，苏剑波. 基于视觉预测的运动目标实时跟踪系统[J]. 机器人,2010, 32(4)：516 – 521.
ZHONG Jiandong, SU Jianbo. A real-time moving object tracking system based on virtual prediction[J]. Robot, 2010, 32(4): 516 – 521. (in Chinese)

(上接第 423 页)

18 阮晓钢，田重阳，李望博. 基于 Kinect 视觉功能的机器人控制方法[J]. 北京工业大学学报，2016，42(4)：487 – 491.
RUAN Xiaogang, TIAN Chongyang, LI Wangbo. Control method for robots based on the visual function of Kinect[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(4): 487 – 491. (in Chinese)

19 权龙哲，李成林，冯正阳，等. 体感操控多臂棚室机器人作业决策规划算法研究[J/OL]. 农业机械学报，2017,48(3)：14 – 23. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170302&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.002.
QUAN Longzhe, LI Chenglin, FENG Zhengyang, et al. Algorithm of works' decision for three arms robot in greenhouse based on control with motion sensing technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 14 – 23. (in Chinese)

20 LOUMPONIAS K, VRETOS N, DARAS P, et al. Using Kalman filter and tobit kalman filter in order to improve the motion recorded by kinect sensor II[C]//Proceedings of the 29th Panhellenic Statistics Conference, 2016.

21 PARK S, YU S, KIM J, et al. 3D hand tracking using Kalman filter in depth space[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2012: 36.