

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.015

全方位移动式网球机器人的研究与设计

肖 华, 黄 河, 谢模焱

(武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对普通网球发球机只能发球而不能将球击回模拟与网球运动员完成对练的问题,初步设计了一种全方位移动式的网球机器人。机器人底盘采用了三轮式全向轮系结构,可实现在场地上任意方向的移动以及零半径转弯;设计了击球机构、收球机构与发球机构,击球机构由一个三自由度的机械手组成,每个自由度用一个单独的伺服电机驱动,以实现不同角度与不同力度的发球与击球,从而达到模拟人的发球与击球动作的设计目标;采用了DSP为主控芯片,以双摄像机组建网球跟踪系统,将底盘运动控制与击球动作控制作为一个整体的六轴系统进行控制,从而适应网球运动中场上方位与球拍姿位的协调性要求。采用三维软件Solidworks对机器人的击球动作进行了仿真分析。仿真结果表明,该机器人能够实现对来自不同角度的网球进行回击。

关键词: 全方位;网球;机器人

中图分类号: TH39; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)04-0509-07

Design and research of omnidirectional tennis robot

XIAO Hua, HUANG He, XIE Mo-yan

(School of Power & Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at realizing the high interactive performance between athlete and the tennis machine. A prototype of an omnidirectional tennis robot was designed. Three omnidirectional wheels driven by high performance DC servo motors were installed in its chassis so that this robot can move in any direction in the playground and turning in radius of zero. Ball-hitting mechanism, ball-collecting mechanism and ball-serving mechanism were equipped in this robot. The ball-hitting mechanism was consisting of a tennis bat and a 3-DOF robotic arm. A bi-camera tracking system was introduced in order to track the tennis ball and realize the interaction between athlete and the robot. The robot with its movements realized by a 6-axis system was controlled by a high performance DSP processing unit. A simulation process was conducted in Solidworks 2012 to check the movements of this robot. The simulation results indicate that the tennis from any angle can be hit back by this robot successfully.

Key words: omnidirectional; tennis; robot

0 引 言

全方位移动机器人具有灵活、高速高效的特点,国内外很多研究机构在从事全方位移动机器人的研究与应用。其中一个重要领域在于研究机器人如何与周围环境进行互动,让机器人参与体育运动是种很好的与周围环境互动的方式,例如黄强教授^[1]所带领的团队研究仿人机器人时采用机器人打乒乓球的方式,瑞士分布控制自治系统实验室研制样方器

人(Quadrators)在空中击打网球^[2],瑞士科学机研制羽毛球机器人^[3]。另外也有研究人员专门针对网球运动研制辅助训练设备,但都只限于发球与捡球功能^[4-6]。

本研究论述全方向移动式网球机器人的初步设计,该机器人配合场上两个跟踪摄像头在上位机上预测球的轨迹并计算出机器人的位置与姿态,完成类似于人发球和击球的动作。其研究的难点在于与人对练的时候如何综合利用球和对手的位置信息快速反应,并将球击到合适的位置。

收稿日期: 2014-11-18

通信联系人: 肖 华(1960-),男,湖南衡阳人,副教授,主要从事机械制造自动化方面的研究。E-mail:hxiao2000@sina.com

1 机器人的总体结构设计

本研究设计的全方位移动式网球陪练机器人整体结构的装配模型如图1所示。该机器人主要由全方位移动底盘、收球机构、发球机构、击球机构以及电控系统组成。为了减轻重量,机器人许多板状构件采用碳纤维板来制作,包括控制系统和电池整个机器人总重约20 kg。

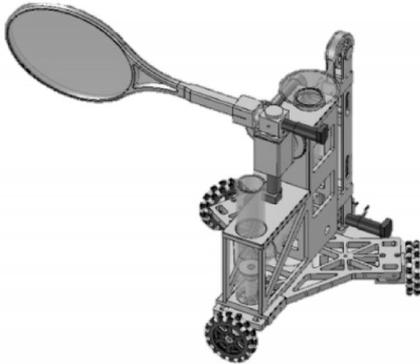


图1 全方位移动式网球机器人

1.1 全方位移动底盘

该机器人的全方位移动底盘由3个全向轮驱动模块均布在一个三角形铝制底板上。全向轮驱动方式的机器人具有全向运动的关键在于全向轮系结构。

1.2 收球机构

收球机构由电机带动一组同步带轮机构来完成。在同步带轮上安装有收球叉,收球叉将网球从地面上收起后便将其升至1/4环形储球筒的入球口。

1.3 发球机构

发球机构由发球直筒和弹簧蓄力装置组成。发球直筒与1/4环形储球筒直联,1/4环形储球筒依靠重力来实现进球动作。弹簧蓄力装置由电机带动,将球抛出后,再由击球机构将网球发出。

1.4 击球机械臂

击球机械臂由三自由度机械手所组成,三自由度击球机构如图2所示。配合机器人全方位底盘可以实现机器人在任意位置的击球动作。

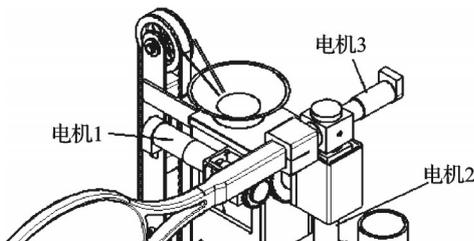


图2 三自由度击球机构

电机1—球拍方向;电机2—击球电机;电机3—球拍角度电机

2 机器人运动分析与动力学建模

2.1 全向轮底盘的移动方式

2.1.1 三轮全向底盘的运动学建模

机器人的三轮全向移动底盘^[7]由3个全向轮组成,径向对称安装,各轮互成120°角。3个全向轮的大小质量相同,且由性能相同的电机驱动。本研究建立的坐标系 xoy 和机器人坐标系 XOY 如图3所示。

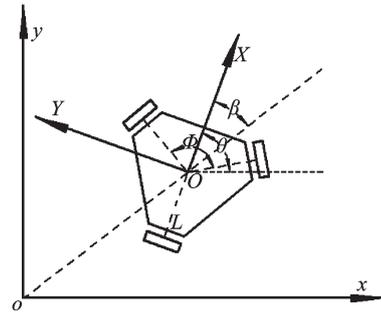


图3 三轮全向底盘示意图

θ —机器人坐标系与世界坐标系之间的夹角; φ —驱动轮间的夹角, $\varphi=120^\circ$; L —机器人转动中心到轮子中心的水平距离。

设: v_1, v_2, v_3 —全向轮线速度; v_x, v_y —机器人坐标在 XOY 坐标第 X 轴和 Y 轴的速度分量; ω —机器人自转的角速度。

则 $(v_1 v_2 v_3)^T$ 与 $(v_x v_y \omega)^T$ 之间的关系可表示如下:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\varphi/2) & \cos(\varphi/2) & L \\ -\sin(\varphi/2) & \cos(\varphi/2) & L \\ 0 & -1 & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad (1)$$

本研究以三轮全向式机器人的中心 O 为参考点,广义坐标为 $q=(x y \theta)^T$,其中, $(x y)$ 为机器人中心 O 在世界坐标系 xoy 中的坐标, θ 为机器人坐标系与世界坐标系之间的夹角。根据坐标系统的建立情况,可知世界坐标与机器人坐标系之间的变换关系如下:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{pmatrix} \quad (2)$$

由式(1,2)可以看出:

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin(\varphi/2 - \theta) & \cos(\varphi/2 - \theta) & L \\ -\sin(\varphi/2 + \theta) & \cos(\varphi/2 + \theta) & L \\ \sin \theta & -\cos \theta & L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} \quad (3)$$

由式(3)方程求逆解,可以根据所选电机的参数和减速机求出机器人沿 X, Y 方向的最大线速度 $V_{x \max}, V_{y \max}$ 和以及绕自身旋转中心转动的最大角速度 ω_{\max} 。

所选电机为 MAXON 公司 RE40 有刷直流电机,其参数如表 1 所示。

表1 MAXON RE40直流电机参数

参数名	参数值
额定电压/V	24
空载转速/(r·min ⁻¹)	7 580
空载电流/mA	137
额定转速/(r·min ⁻¹)	6 930
额定转矩/mNm	170
额写电流/A	5.77
堵转转矩/mNm	2 280
堵转电流/A	75.7
最大效率/(%)	91

电机所能达到的最大额定转速为 6 930 r/min,再经减速比为 12:1 的 GP42 减速器减速,全向轮的直径为 152 mm,因此可得轮子的最大速度为 $V_{1\max} = V_{2\max} = V_{3\max} = 4\ 596\text{ mm/s}$ 。则:

$$V_{x\max} = \sqrt{3}V_{1\max} = 7\ 960\text{ mm/s},$$

$$V_{y\max} = 2V_{1\max} = 9\ 192\text{ mm/s},$$

$$\omega_{\max} = 3V_{1\max}/L = 23\text{ rad/s}。$$

以上速度是在机器人加速完成后达到匀速状态时能达到的最大速度。

2.1.2 三轮全向底盘的动力学建模

设 f_i 为第 i 个驱动电机提供给机器人的驱动力,在世界坐标系 xoy 下,绕机器人中心的转动惯量为 I ,由牛顿第二运动定律有:

$$F_{xa} = m\ddot{x}_a, F_{ya} = m\ddot{y}_a, M_i = I\ddot{\theta} \quad (4)$$

根据各驱动力方向及机器人的姿态,可写出具体的动力学方程如下:

$$m\ddot{x}_a = f_1 \sin(\phi + \theta) - f_2 \sin(\phi - \theta) + f_3 \cos \theta \quad (5)$$

$$m\ddot{y}_a = f_1 \sin(\phi + \theta) - f_2 \cos(\phi + \theta) + f_3 \sin \theta \quad (6)$$

$$I\ddot{\theta} = L \sum_{i=1}^3 f_i \quad (7)$$

式中: ϕ — f_i 与驱动轮线速度的夹角,由机器人全向轮结构可知 $\phi = 30^\circ$ 。

第 i 个轮子的动力学模型^[8]可描述为:

$$I_w \ddot{\theta}_i = L \sum_{i=1}^3 f_i k u_i - l \dot{\Psi}_i = I_w \ddot{\Psi}_i + f_i r \quad (8)$$

式中: k, l — 常数; I_w — 轮子绕其轴线的转动惯量; r — 轮子半径; $\dot{\Psi}_i, \ddot{\Psi}_i$ — 第 i 个轮子的角速度和角加速度; u_i — 第 i 个驱动电机的驱动电压。

轮子转动惯量 I_w 很小, $I_w \ddot{\Psi}_i$ 相对于 $f_i r$ 所消耗的转矩很小,在实验问题采用简化计算形式,式(8)可近似写为:

$$k u_i - l \dot{\Psi}_i = f_i r \quad (9)$$

则三轮全向底盘动力学模型方程如下式所示:

$$\begin{bmatrix} m\ddot{y}_a \\ m\ddot{x}_a \\ I\ddot{\theta} \end{bmatrix} = \frac{k}{r} \begin{bmatrix} -\sin(\theta + 30^\circ) & -\sin(30^\circ - \theta) & \theta \\ \cos(\theta + 30^\circ) & -\cos(30^\circ - \theta) & \sin \theta \end{bmatrix} \times \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} u^1 \\ u^2 \\ u^3 \end{bmatrix} = \frac{3l}{2r} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{y}_a \\ 2L^2 \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

2.2 击球动作分析

机器人想要获得较好的击球效果,就要根据网球的运动姿态和击球练习所选用的策略来确定球拍的位姿。发球时,球垂直弹起,根据发球的方向与落点要求确定对应的球拍位姿;回球时,球有不同的运动状态,根据来球的角度及回球的方向与落点要求确定对应的球拍位姿。

球拍的最佳位姿包括击球点与球拍角度两个方面。

2.2.1 网球拍的最佳击球点

在持拍球类运动中,往往有球拍甜区的说法,当运动员用甜区击球时,能够获得最佳的击球效果和击球感受。甜区的理论依据是根据人体附加到球拍有效质量上所求得的最佳击球区域,其在球拍自身撞击中心附近^[9]。本研究所设计的陪练机器人采用的是固定旋转中心击球,因而可以忽略附加质量的影响,着重于研究球拍绕定轴运动的撞击中心。

这里将网球拍考虑为刚体,即忽略网线的弹力,以网球拍的一端为转动轴,对网球拍施以短暂的撞击,则网球拍上存在一点,使网球拍受到打击时,在其转动轴约束处不产生碰撞约束力,该撞击点即为网球拍的撞击中心。当击球点的位置恰好是网球拍的撞击中心时,能够减小击球电机的能耗及转动轴处轴承等结构的冲击,且能使球获得更大的初速度。

本研究设球拍初始状态为静止,以 P_A 的冲量撞击拍面 A 点,球拍以 B 点为转动轴转动,角速度为 W ,转动轴处产生反撞击冲量为 P_x, P_y 。 C 点为球拍的质心,各点距转轴距离如图4所示。

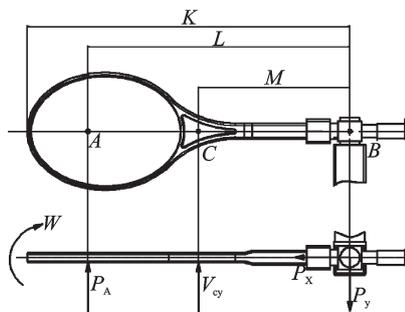


图4 球拍撞击分析实验示意

分析撞击过程,由冲量定理及冲量矩定理得下式:

$$\begin{cases} P_A - P_y = m \cdot V_{cy} \\ J_B \cdot W = P_A \cdot L \\ V_{cy} = M \cdot W \end{cases} \quad (11)$$

当 A 点为撞击中心时, $P_y = 0$, 这样可以根据上式求得 $L = J_B / m \cdot M$ 。其中, 质心距离 M 可以用悬吊法实验求得; 转动惯量 J_B 可以使用动力法实验求得, 即用击球电机给球拍提供固定力矩 M , 测出角加速度 a , 再由 $M = J_B \cdot a$ 求出 J_B 。

2.2.2 网球拍的击球角度

网球拍的击球角度指的是球拍击球时相对球的俯仰及偏转状态, 正确的击球角度可以获得高质量的击球, 避免出界、下网等失误动作, 达到更好的训练效果。本研究论述的机器人主要是使用球拍方向电机和球拍角度电机对球拍的状态进行调整。笔者选取回球这一更为复杂的击球动作分析球拍的击球角度。

陪练对象击过来的球在空中的运行姿态如图 5 所示。

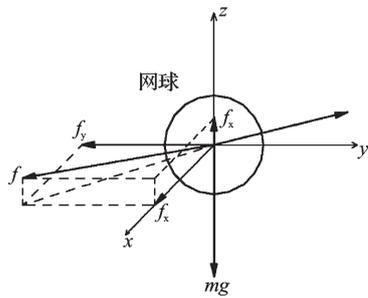


图5 网球受力分析

为简化分析, 本研究暂不考虑球自身的旋转, 即球在 x 、 y 、 z 3 个方向上运动独立; 网球只受到重力 mg 和空气阻力 f , 且阻力与速度成正比, 系数为 k 。

受力分析如下式所示:

$$\begin{cases} F_x = f_x = -kV_x \\ F_y = f_y = -kV_y \\ F_z = -f_z - mg = -kV_z - mg \end{cases} \quad (12)$$

根据牛顿定律及运动基本方程, 可以得出各方向加速度, 并最终求得速度与位移方程^[10]如式(13, 14)所示, 为后文摄像头视觉处理建立模型基础。

$$\begin{cases} V_x = V_{x0} e^{-\frac{k}{m}t} \\ V_y = V_{y0} e^{-\frac{k}{m}t} \\ V_z = (V_{z0} - \frac{mg}{k}) e^{-\frac{k}{m}t} + \frac{mg}{k} \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{cases} S_x(t) = \frac{V_{x0}}{k} (1 - e^{-kt}) \\ S_y(t) = \frac{V_{y0}}{k} (1 - e^{-kt}) \\ S_z(t) = \frac{V_{z0} - \frac{g}{k}}{k} (1 - e^{-kt}) + \frac{gt}{k} \end{cases} \quad (14)$$

下面再以 YZ 平面为例分析球的入射角度、反射角度与球拍角度之间的关系, 为调节球拍角度建立基本模型。网球与球拍关系如图 6 所示。

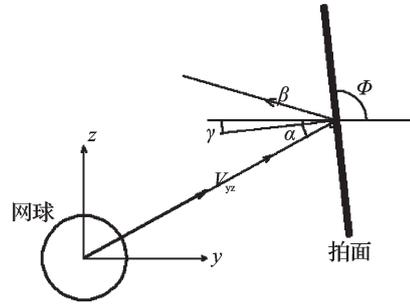


图6 网球与球拍关系

根据拍面与水平面角度 ϕ (图示为钝角) 的变化, α 与 β 的大小关系相应的变化, 但由几何关系分析得存在: $\gamma = |\alpha - \beta|/2$, 则 $\phi = \pi/2 + \gamma = (\pi + |\alpha - \beta|)/2$; 当 ϕ 为锐角时, 同理有 $\phi = \pi/2 - \gamma = (\pi - |\alpha - \beta|)/2$ 。

对于 XZ , XY 平面可以做同样的分析, 因此系统可以根据来球状态与回球策略所需的角度来确定球拍的角度, 从而达到根据指令完成训练以及调整训练模式的目的。

3 机器人控制系统的设计

全向移动网球机器人总共包含以下 8 台电机: ①全向移动底盘的 3 台驱动电机; ②三自由度击球机构的 3 台电机; ③发球机构电机与收球机构电机。其中, 发球机构和收球机构的电机控制相对简单, 全向移动底盘与三自由度击球机构虽然机构结构不同, 但从控制角度来说具有相同的结构, 因而可以将其并在一块。因此, 本研究所论述的全向移动机器人的控制系统主要是六轴联动的控制系统。

3.1 六轴联动控制系统的设计

六轴联动控制系统的所完成的主要任务包括: 接收并解析决策系统发送的命令、将整体速度根据要求解算成每个轮子的速度、击球机构每个轴动作的速度, 将解算的速度发送到对应的轮子电机驱动器、比较速度传感器与预设速度并实现调节实现移动机构整体闭环控制。

控制系统^[11-12]的结构图如图 7 所示。

该设计中的驱动模块采用第 2 部分所述的直流伺服电机与减速器。减速器与轮子直接通过弹性联轴器相连, 采用铭朗 MLDS3610 驱动器对电机进行准确的速度驱动器, 驱动器通过 RS232 串口与六轴联动的控制系统相连接, 控制系统以 NI 公司的 DSP2812 作为控制芯片, 负责速度解算以及与上位机通信, 同时将

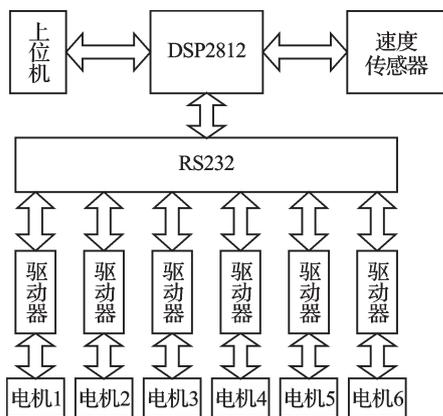


图7 控制系统结构图

采集到的移动机构速度与要求的速度进行比较并实时调节,以达到准确的速度控制。速度解算与实时速度调节主要依靠软件算法实现,需要采用的硬件接口为CAN接口、SPI接口以及RS232接口。主控芯片有一套完整的标准接口电路。

3.2 控制系统流程图

全向移动网球机器人启动后,开始系统自检。确定系统运行正常后,决定操作模式,默认采用自动模式。网球跟踪系统实时跟踪网球的轨迹,并计算出机器人最佳的击球位置。系统将其坐标和三轴击球机构的姿态数据无线传到机器人中,机器人移动到最佳击球位置完成击球动作。系统的控制流程图如图8所示。

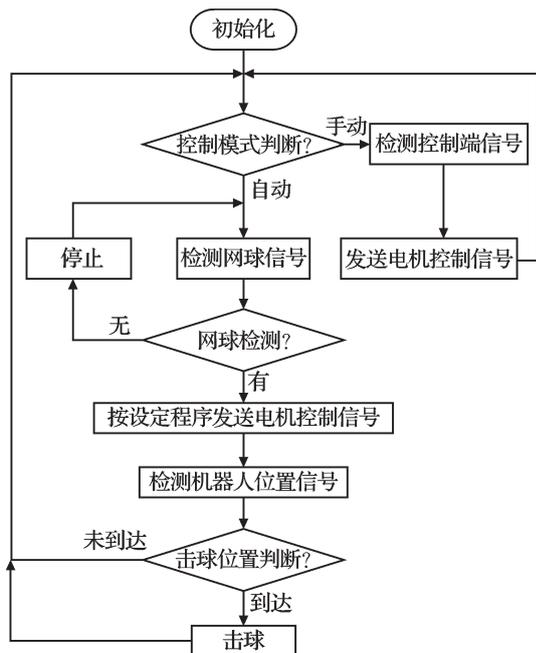


图8 全向移动机器人的控制流程图

3.3 网球跟踪系统的设计

网球跟踪系统采用的是双摄像机跟踪系统,双摄像机跟踪的基本原理如图9所示。

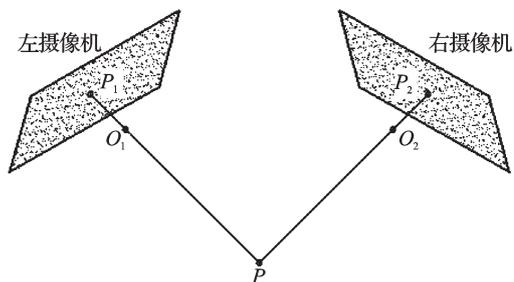


图9 双摄像机跟踪的基本原理

其基本原理如下:球场上两个角落装有两个二自由度云台摄像机。空间一点 P (即网球在空间的位置)和左摄像机的成像中心构成一条直线 L_1 ,和右摄像机的成像中心构成一条直线 L_2 , L_1 和左摄像机的成像平面的交点为 P_1 , L_2 和右摄像机的成像平面的交点为 P_2 ,也就是说,在双摄像机位置固定的前提下,空间一点 P 可以唯一确定它在两个摄像机成像平面上的像点。反之,如果知道 P_1, P_2 分别在某一空间点 P 在左、右摄像机平面上的像点,那么通过 P_1O_1 的空间直线和通过 P_2O_2 的空间直线必将于空间一点,该点必为 P 。

双摄像头跟踪系统^[13]是先对两个摄像头采集到的数据分别做二维目标检测,再利用双目视觉技术处理目标区,获取目标的深度信息,从而达到对目标三维检测与跟踪的目的。对于跟踪系统,最重要的两个元件分别是摄像头以及进行图像处理的DSP芯片。上位机在系统中只负责图像跟踪系统与机器人伺服系统之间的通讯工作。双摄像头网球跟踪系统的任务有两个,如下所述。

3.3.1 运动目标的检测

运动目标的检测是网球跟踪系统的前期处理部分,其目的是把运动目标(即网球)从背景图像中检测出来。本研究所涉及到的网球场是一个固定的环境,因此可以视为是静态背景下的目标检测。由于本研究只关注目标区域,将目标从静态背景中提取出来之后,其运算量相对于处理整个图像来说要小得多。这里目标提取采用帧间差分法,相邻帧之间进行差分运动,一般网球可达球速40 m/s,30 fps的摄像头每帧之间网球相差的跟踪大于1 m,这样容易将跟踪目标(即网球)从球场背景中单独提取出来。由于目标特征是个球形,它在图像中显示为一个圆形的图案,比较容易识别。

3.3.2 运动目标的跟踪

目标跟踪是网球跟踪系统的后继处理部分,其目的是通过分析摄像头采集到的视频序列,将检测到的目标建立帧间的联系,得到目标的运动轨迹,从而预

测出下一帧中目标的确切位置。

在两幅目标图像的一些特征点匹配之后,就可以跟踪视差公式求出特征点的深度信息。

$$Z = \frac{K_z}{(u_l - u_r)} \quad (15)$$

式中: K_z —摄像头参数; $u_l - u_r$ —匹配特征点的像素差。

在获取目标区域后,取其中心为质心(这里取圆的中心为质心),然后利用卡尔曼滤波算法基于前面建立的网球在空中的运行姿态的数学模型对质心的运动进行预测跟踪。卡尔曼滤波算法的基本思想是采用信号与噪声的状态空间模型,利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值来更新对状态变量的估计,求出当前时刻的估计值,该算法根据建立的系统方程和观测方程对需要处理的信号做出满足最小均方误差的估计^[14]。令第 i 帧检测到的质心的状态向量为:

$$\mathbf{x}(i) = [s_x(i), s_y(i), s_z(i), v_x(i), v_y(i), v_z(i)] \quad (16)$$

观测向量为:

$$\mathbf{y}(i) = [c_x(i), c_y(i), c_z(i)] \quad (17)$$

式中: $s_x(i), s_y(i), s_z(i)$ —目标质心点的三维坐标; $v_x(i), v_y(i), v_z(i)$ —目标质心在 x 、 y 、 z 坐标上的速率; $c_x(i), c_y(i), c_z(i)$ —观测点到目标质心的三维坐标。

摄像机采样频率为 30 Hz, 即 $\Delta T = 1/30$, 将前文式(13, 14)建立的网球速度模型与位移模型离散化, 如下式所示:

$$\begin{cases} v_x(i) = v_x(i-1)e^{-\frac{k}{30m}} \\ v_y(i) = v_y(i-1)e^{-\frac{k}{30m}} \\ v_z(i) = v_z(i-1)e^{-\frac{k}{30m}} + \frac{g}{k}(e^{-\frac{k}{30m}} - 1) \end{cases} \quad (18)$$

$$\begin{cases} s_x(i) = s_x(i-1) + v_x(i-1)/30 \\ s_y(i) = s_y(i-1) + v_y(i-1)/30 \\ s_z(i) = s_z(i-1) + v_z(i-1)/30 \end{cases} \quad (19)$$

因此状态转移矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1/30 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1/30 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1/30 \\ 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{k}{30m}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{k}{30m}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & e^{-\frac{k}{30m}} \end{bmatrix} \quad (20)$$

由于目标点在短时间内是匀速运动的, 观测向量与状态向量之间的关系可知, 观测矩阵为:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

通过目标检测与求解目标深度信息, 就可以对目标质心进行初始化, 这样就可运用卡尔曼滤波实现对目标质心的跟踪, 并预测出网球运行轨迹的向量与速度并将预测点的位置与速度实时传给机器人, 使机器人到达击球点, 调整球拍姿态对球进行拦截并击回。

4 仿真分析与结果

本研究采用 Solidworks2012 对回击来球这一典型过程进行仿真分析: 给予网球一定的初速度, 以及击球目标点数据, 根据前述数学关系, 通过 Matlab 编程计算出击球时网球拍的角度与位置, 进行仿真, 仿真过程如图 10 所示。仿真得到的击球状态达到了预想效果, 为具体的控制系统设计提供了参考。

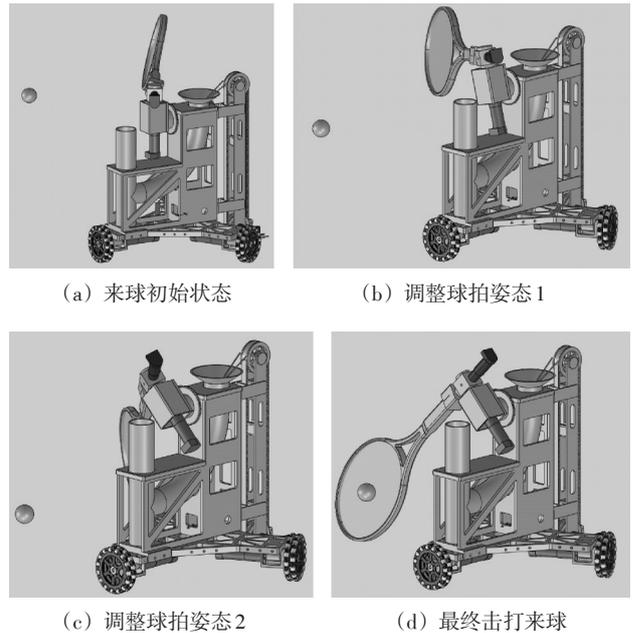


图 10 回击来球动作仿真

5 结束语

本研究提出了一种全方位移动网球陪练机器人, 并进行了初步的结构设计和控制系统设计, 设计各部分分析结果表明, 其能达到收球、发球、击球等任务一体化与自动化的目的, 设计过程中对网球拍的最佳击球点、击球角度和网球在空中运行状态以及网球轨迹预测跟踪等进行了分析, 并对回击来球典型动作进行了仿真, 为之后的深入研究打下了基础, 也为其他类似场合的机器人应用提供了参考。

下一阶段将依据网球训练的具体要求进行更深入的仿真分析与实验制造, 另外将网球的旋转因素加入分析范畴, 以保证陪练机器人能够更有效地服务于各个级别的网球爱好者。

参考文献(References):

- [1] 赵晓军,黄 强,彭朝琴,等. 基于人体运动的仿人型机器人动作的运动学匹配[J]. 机器人,2005,27(4):358-361.
- [2] STOEJ J, BARTIC A, GILLIJNS S, et al. Badminton Playing Robot—a Multidisciplinary Test Case in Mechatronics [C]//Mechatronic Systems. 2010:725-731.
- [3] WIRTZ J. Protection for High-tech Badminton Robots [J]. **IEN Europe**, 2012, 38(10):28-29.
- [4] 裴若忠. 智能网球发球机[D]. 长春:长春理工大学机电工程学院,2006.
- [5] 韩 良,王德彬,龚 煥. 智能网球车的研制[J]. 机电技术,2011(1):49-54.
- [6] 何四平,于 勇. 网球自动发射器的研制[J]. 机械设计与制造,2007(3):105-106.
- [7] 海 丹. 全向移动平台的设计与控制[D]. 长沙:国防科学技术大学机电工程与自动化学院,2005.
- [8] 谢志诚. 三轮全向移动机器人运动控制研究[D]. 长沙:长沙理工大学电气与信息工程学院,2010.
- [9] 臧秋华,马南京. 网球拍甜区形成的生物力学机制及其实践意义[J]. 四川体育科学,2003(1):38-38,55.
- [10] 贾 芳. 乒乓球运动建模与机器人击球规划[D]. 杭州:浙江大学信息学院,2011.
- [11] 张 翻,熊 蓉,褚 健,等. 一种全方位移动机器人的运动分析与控制实现[J]. 浙江大学学报:工学版,2004,38(12):1650-1653,1672.
- [12] 晏祖根,王瑞泽,孙智慧,等. 四自由度并联机器人运动学分析[J]. 包装与食品机械,2014(2):34-36.
- [13] 朱宗磊. 基于Windows平台的双摄像头运动目标检测与跟踪系统[D]. 大连:大连理工大学电子与信息工程学院,2010.
- [14] 赵 晓,汪 明,李晓明. 改进扩展卡尔曼滤波算法在智能足球机器人比赛中的应用[J]. 机电工程,2012,29(3):334-338.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

- 肖 华,黄 河,谢模焱. 全方位移动式网球机器人的研究与设计[J]. 机电工程,2015,32(4):509-515.
- XIAO Hua, HUANG He, XIE Mo-yan. Design and research of omnidirectional tennis robot[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4):509-515.
- 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第508页)

应力为138.59 MPa,轮齿啮合过程不连续;圆弧短修形最大接触应力为104.64 MPa,修形后接触应力曲线仍有较大的突变值;而抛物线长修形最大接触应力为85.136 MPa,接触应力值最小,而且应力变化值不大,传动连续性比较好。

4 结束语

本研究考虑斜齿轮啮合稳定后时变负载的影响,通过对齿轮修形前后齿轮啮合的动力学分析,得到了齿轮啮合过程中接触应力的时变曲线。研究结果表明,圆弧短修形齿轮啮合过程载荷仍有突变;抛物线长修形齿轮使得从开始啮合到双齿啮合的负载变化平缓,传动性能要优于圆弧短修形。

在瞬态动力学分析中,修形后的接触应力小于未修形时的接触应力,抛物线长修形使得应力幅值变化恒定,提高了传动的连续性。本研究可以为进一步对齿轮动力学分析提供有利的依据和研究方法。

参考文献(References):

- [1] 李绍彬. 高速重载齿轮传动热弹变形及非线性耦合动力学研究[D]. 重庆:重庆大学机械工程学院,2004.
- [2] 李 昌,韩 兴,孙志礼. 基于Pro/E和ADAMS的齿轮啮合精确动力学仿真[J]. 机械与电子,2008(1):55-58.
- [3] 张立祥,詹少华,金 梅,等. 基于Pro/E和ANSYS的变速箱斜齿轮的参数化精确建模及模态分析[J]. 煤矿机械,2011,32(4):108-110.
- [4] SIGG N. Tooth Profile Modification of High Speed Duty Gear [C]//Proceedings of International Conference on Gear-ing. New York: McGraw-HillCo, 1958:313-316.
- [5] TAVAKOLI M S, HOUSER D R. Optimum Profile modification for the minimization of static transmission errors of spur gears [J]. **ASME Journal of Mechanisms, Transmissions and Automation in Design**, 1996, 108(3):86-89.
- [6] 李润方,王建军. 齿轮系统动力学[M]. 北京:科学出版社,1996.
- [7] 毕凤荣,崔新涛. 渐开线齿轮动态啮合力计算机仿真[J]. 天津大学学报,2005,38(11):991-995.
- [8] 张学亮. 齿轮箱模态分析和结构优化方法研究[D]. 太原:太原理工大学机械工程学院,2010.
- [9] 浦广益. ANSYS Workbench 12基础教程与实例详解[M]. 第一版. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [10] 陈一栋. 渐开线圆柱齿轮接触分析和修形设计[D]. 长沙:国防科技大学机电工程和自动化学院,2007.
- [11] 朱雪松,郝伟娜,高竹发. Halbach阵列型摆线永齿轮传动转矩的有限元分析[J]. 轻工机械,2013,31(2):24-28.
- [12] 尚振国,王 华. 风力发电增速器齿轮齿廓修形有限元分析[J]. 机械传动,2009,33(4):69-71.

[编辑:洪炜娜]