

# Design and Motion Control of a Ping Pong Robot

Ping Yang<sup>1,2</sup>, Zhengtao Zhang<sup>1,2</sup>, Huawei Wang<sup>1,2</sup>, De Xu<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> Key Laboratory of Complex Systems and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China {xsyangping@163.com, de.xu@ia.ac.cn}

<sup>2)</sup> Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract**—A ping pong robot with 5 degree of freedoms is designed in this paper. It consists of a PC, a high speed stereovision system with two smart cameras, AC servo motors and step motors. The hitting task of the ping pong robot is divided into three stages: the measurement and prediction stage, the planning stage and the execution stage. In the planning stage, we propose series of methods to plan the paddle trajectory, paddle posture, hitting speed according to the hitting information. Experiments of the robot versus a person are well conducted. The experimental results verify the effectiveness of the designed ping pong robot and the proposed methods.

**Keywords**—motion control, trajectory planning, speed planning, control system, ping pong robot

## 乒乓球机器人的设计及其运动控制研究

杨平<sup>1,2</sup> 张正涛<sup>1,2</sup> 王华伟<sup>1,2</sup> 徐德<sup>1</sup>

<sup>1)</sup> 中国科学院自动化研究所复杂系统与智能控制重点实验室 北京 中国

<sup>2)</sup> 中国科学院研究生院 北京 中国

**摘 要** 本文设计了一个五自由度乒乓球机器人。该机器人的控制计算机采用 PC，其视觉系统由两台智能相机构成，其驱动元件由交流伺服电机和步进电机构成。根据乒乓球机器人的工作过程，本文将击球过程分为测量预测、规划、执行三个阶段。其中在规划阶段，根据击球点的位置，规划球拍的运动轨迹。根据期望的乒乓球回球速度计算击球速度。根据来球方向调整球拍击球姿态。本文所设计的乒乓球机器人实现了三到四回合人机连续打球。实验效果验证了本文所设计乒乓球机器人以及运动控制方法的有效性。

**关键词** 运动控制，轨迹规划，速度规划，控制系统，乒乓球机器人

### 1. 引言

国际上对乒乓球打球机器人的研究始于上世纪 80 年代<sup>[1][2]</sup>。随后美国，西班牙，日本，澳大利亚，泰国等国的研究者都对乒乓球机器人进行了相关的研究。其中美国的研究者首先将工业机械臂应用于乒乓球打球的研究。1988 年，美国 MIT & Bell 实验室的 Andersson<sup>[3,4,5,6]</sup>等人研制了基于机械臂的乒乓球机器人，通过四个摄像头采集乒乓球信息，并首次实现了人机对打。美国 Rocheste 研究所的研究人员<sup>[7]</sup>同样研制了基于工业机械臂（RV-2AJ）的乒乓球机器人。基于工业机械臂的乒乓球机器人在结构上紧凑，省去了机械设计过程，但乒乓球机器人的末端移动速度通常较慢。西班牙的 Acosta 等人<sup>[8]</sup>开发了基于 PC 的低成本乒乓球机器人，采用单摄像头并将球桌缩小了一半，使用自行设计的机构打球，实现了人机对打。日本宫崎实验

室设计的乒乓球机器人<sup>[9,10,11]</sup>具有四个自由度，能够调整球拍水平面的位置和球拍旋转俯仰姿态。机器人采用两个摄像头，并使用三维实时运动分析系统 Quick MAG<sup>[12]</sup>。该机器人是目前人机对打水平较高的乒乓球机器人。浙江大学于 2005 年开始关于乒乓球机器人方面的研究<sup>[13, 14]</sup>，设计了七自由度机器人，实现了人机对打。

本文综合上述乒乓球机器人的优点，使用直线导轨和偏转机构自行设计了一个五自由度的乒乓球机器人。其控制计算机采用普通 PC 机，视觉系统由两台智能相机和数据处理计算机构成，驱动元件采用交流伺服电机和步进电机。本文详细阐述了乒乓球机器人的击球过程。并基于所设计乒乓球机器人，提出了根据击球点的位置和速度信息对球拍的路径、击球速度及球拍的姿态进行规划的方法。人机对打实验验证了本文所设计的乒乓球机器人球拍路径规划、击球速度规划和姿态规划方法的有效性。

国家自然科学基金项目支持（资助号：60672039 和 60725309）

## 2. 乒乓球机器人设计

乒乓球机器人要完成击球任务，需要快速定位来球，并对来球的轨迹进行预测，得到击球点的位置和球速信息。在击球剩余时间内，将球拍从等待位置移动到击球点，以一定的击球速度和击球姿态进行击球。在击球动作完成之后，需要快速返回到等待位置。因此，乒乓球机器人需要具备高速的视觉能力，快速计算能力及其末端的快速移动能力。基于上述任务要求，本文设计了五自由度乒乓球机器人。其机械结构设计、控制系统的构成及击球流程设计如下文所述。

### 2.1 机械结构设计

本文设计的乒乓球机器人由一个横向 X 轴直线导轨，两个平行 Y 轴直线导轨，一个竖直 Z 轴直线导轨，一个左右偏转轴 S 及一个上下俯仰轴 P 组成。其结构示意图如图 1 所示。Y 轴直线导轨固定在基座上方。其滑块通过同步带传动，同步带通过同步轴相连。X 轴直线导轨固定在 Y 轴导轨的两个滑块之上。在 X 轴的平行方向安装有导向杆，以便对 X 轴方向的滑块移动进行导向，减少 X 轴导轨在高速运动过程中的形变。其滑块通过同步带传动。在 X 轴滑块上安装 Z 轴直线导轨。与 X 轴类似，Z 轴安装有竖直导向杆，对 Z 轴滑块在竖直方向的移动进行导向。偏转轴 S 固定于 Z 轴滑块之上。俯仰轴 P 安装在偏转轴的末端。球拍安装在俯仰轴的末端。这样，球拍能够在三维空间中移动，并能够左右偏转和上下俯仰。

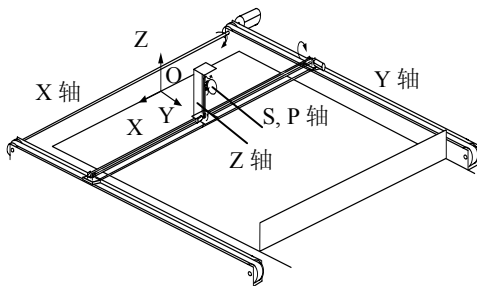


图 1 乒乓球机器人的机械结构

### 2.2 控制系统设计

乒乓球机器人的控制系统由控制计算机，高速立体视觉系统，驱动电机，运动控制卡，单片机控制器等组成，如图 2 所示。

控制计算机是机器人的主控制器，接收来自高速立体视觉系统的击球信息，根据击球策略完成球拍的击球轨迹和速度规划，并控制机器人完成各轴动作。

高速立体视觉系统由两台支持 TCP/IP 协议的高速智能相机及数据处理计算机构成<sup>[15]</sup>。视觉系统内部以及视觉系统与控制计算机之间通过局域网进行通信。

驱动电机包括三套交流伺服电机和两套步进电机。交流伺服电机分别驱动机器人的 X、Y、Z 轴。两套步进电机分别驱动 S 轴和 P 轴。其中，X、Y 轴电机的伺服驱动器工作于速度模式，通过运动控制卡进行控制。Z 轴伺服驱动器及 S、P 轴步进电机驱动器采用位置控制模式，通过单片机控制器发送脉冲进行控制。其中单片机控制器作为主控制器的下位机，接收主控制器的位置命令，产生指定频率和数量的脉冲，实现位置控制。

### 2.3 乒乓球机器人的击球过程

乒乓球机器人的击球过程模仿人的击球过程，即先“感知”，再“规划”，最后“动作”。乒乓球机器人的工作过程描述如下。

在乒乓球机器人完成初始化后，球拍处于击球等待位置。其位置位于机器人侧球桌的后边缘中心。见图 1 中的原点 O。球拍的拍面正对手。击球过程设计为三个阶段。即测量预测阶段，规划阶段和执行阶段。高速立体视觉系统在测量预测阶段完成测量预测的功能。具体包括乒乓球的图像采集处理，三维坐标计算，乒乓球飞行轨迹和反弹轨迹预测，击球点和击球剩余时间计算，数据发送等。在规划阶段，控制计算机根据指定的击球策略对球拍的击球速度，击球轨迹及姿态进行规划。在执行阶段，机器人完成实际的击球动作。执行阶段分为迎球、击球和返回三个子阶段。在迎球阶段，球拍的速度从静止加速到击球速度，并在到达击球点前保持该速度。在击球阶段，球拍在指定的时间到达击球点，并以恒定的击球速度完成击球。在返回阶段，球拍快速返回到等待位置。当球拍返回到等待位置，一个击球过程结束。

## 3. 乒乓球机器人的运动控制

根据乒乓球机器人的击球过程，在规划阶段，控制计算机根据一定的击球策略对球拍轨迹、击球速度、球拍姿态进行规划。在本文中，击球策略为实现期望的乒乓球出球速度，使乒乓球回到对方球台某一区域。出球速度指乒乓球在与球拍碰撞后的瞬时速度。与之相对应，乒乓球在与球拍碰撞前的瞬时速度称为来球速度。如果机器人以一定的球拍姿态和期望的出球速度击球，能够使乒乓球落到对方球桌某一特定区域，其落点的位置和速度变化较小。

假定在击球时，球拍的高度固定，球拍的俯仰角度固定，并设定击球时球拍速度沿着 Y 轴正方向。

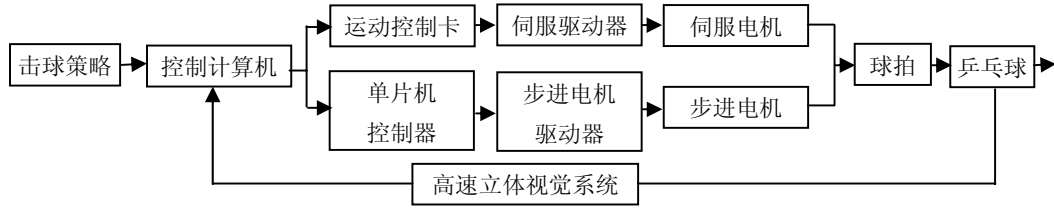
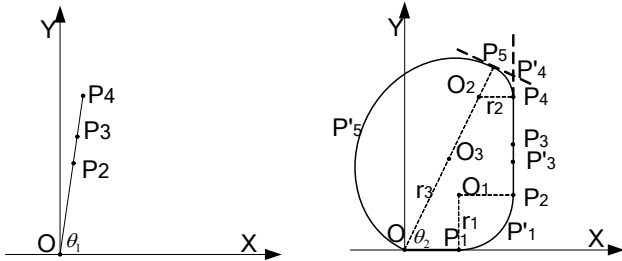


图2 乒乓球机器人的控制系统框图

### 3.1 球拍的轨迹规划

根据击球点的位置, 本文设计了两种不同的击球方式。即直线击球和曲线击球方式。其轨迹分别如图 3(a), 3(b)所示。图中点  $O$  表示球拍的等待位置。  $P_3$  为击球点位置。当  $P_3$  靠近  $Y$  轴时, 采用直线击球方式。否则采用曲线击球方式。在直线击球方式下, 直线段  $OP_2$  为迎球阶段轨迹, 直线段  $P_2P_4$  为击球阶段轨迹, 直线段  $P_4O$  为返回阶段轨迹。在曲线击球方式下, 直线段  $OP_1$  和圆弧段  $P_1P'_1P_2$  为迎球阶段轨迹, 直线段  $P_2P_4$  为击球阶段轨迹, 圆弧段  $P_4P'_4P_5$  和圆弧段  $P_5P'_5O$  为返回阶段轨迹。其中圆弧段  $P_1P'_1P_2$  分别与  $X$  轴和直线段  $P_2P_4$  相切, 圆弧段  $P_4P'_4P_5$  与直线段  $P_2P_4$  相切, 两个圆弧段  $P_4P'_4P_5$  与  $P_5P'_5O$  所在圆内切, 以保证球拍速度在不同阶段的平滑过渡。



(a) 直线击球方式轨迹规划 (b) 曲线击球方式轨迹规划  
图3 球拍的轨迹规划

根据击球点的不同坐标位置, 确定击球轨迹的形式。

- (1) 当  $|x_3| < R_1$  且  $y_3 > R_1$  时, 采用直线击球方式击球。
- (2) 当  $|x_3| \geq R_1$  且  $y_3 > R_1$  时, 采用曲线击球方式击球。
- (3) 当  $|y_3| < R_1$  时, 由于击球点靠近  $X$  轴, 放弃击球。

其中  $(x_3, y_3)$  为击球点  $P_3$  的  $X$ 、 $Y$  坐标,  $R_1$  为限制可击球范围的常数。

当采用直线击球方式时, 迎球阶段终点  $P_2$  的坐标通过式 (1) 计算。击球阶段终点  $P_4$  的坐标通过式 (2) 计算。

$$\begin{cases} x_2 = x_3 - L_1 \cos(\theta_1) \\ y_2 = y_3 - L_1 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_4 = x_3 + L_2 \cos(\theta_1) \\ y_4 = y_3 + L_2 \sin(\theta_1) \end{cases} \quad (2)$$

其中  $(x_2, y_2)$  为  $P_2$  的坐标。  $(x_4, y_4)$  为  $P_4$  的坐标。  $\theta_1$  为直线  $OP_3$  的倾角。  $L_1$  和  $L_2$  为决定击球阶段长度的常数。

当采用曲线方式击球时, 根据式 (3) 计算预击球点  $P'_3$ , 式 (4) 计算迎球阶段的圆弧  $P_1P'_1P_2$  半径  $r_1$ 。

$$\begin{cases} x'_3 = x_3 \\ y'_3 = \begin{cases} y_3 - L_1 & \text{if } y_3 - L_1 > R_1 \\ R_1 & \text{otherwise} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

$$r_1 = \min(|x'_3|, y'_3) \quad (4)$$

其中  $(x'_3, y'_3)$  为  $P'_3$  的坐标。  $r_1$  为圆  $O_1$  的半径。

根据  $r_1$  确定迎球直线段  $OP_1$  中  $P_1$  点的坐标。如式 (5) 所示。

$$\begin{cases} x_1 = x_3 - r_1 \frac{|x_3|}{x_3} & x_3 \neq 0 \\ y_1 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中  $(x_1, y_1)$  为  $P_1$  的坐标。

由式 (5) 可知, 当  $r_1 = |x'_3|$  时,  $x_1 = y_1 = 0$ , 即直线段  $OP_1$  的长度为零。在这种情况下, 迎球阶段轨迹只有圆弧段  $P_1P'_1P_2$ 。根据  $P_1$  的坐标通过式 (6) 计算出圆  $O_1$  的圆心位置。

$$\begin{cases} x_{o1} = x_1 \\ y_{o1} = r_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中  $(x_{o1}, y_{o1})$  为圆  $O_1$  的圆心坐标。

击球直线段  $P_2P_4$  的终点  $P_4$  坐标通过式 (7) 计算得出。圆弧段  $P_4P'_4P_5$  所在圆  $O_2$  的半径和圆心分别由式 (8) 和 (9) 计算得出。

$$\begin{cases} x_4 = x_3 \\ y_4 = y_3 + L_2 \end{cases} \quad (7)$$

$$r_2 = \begin{cases} R_2 & \text{if } |x_4| \geq R_2 \\ |x_4| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_{o2} = x_4 - r_2 \frac{|x_3|}{x_3} & x_3 \neq 0 \\ y_{o2} = y_4 \end{cases} \quad (9)$$

其中  $(x_4, y_4)$  为  $P_4$  的坐标,  $R_2$  为常数。  $r_2$  为圆  $O_2$  的半径,  $(x_{o2}, y_{o2})$  为圆  $O_2$  的圆心坐标。

圆弧段  $P_4P_5$  的终点  $P_5$  是直线  $OO_2$  与圆  $O_2$  的上方交点。由式 (10) 首先得到直线  $OO_2$  的倾角  $\theta_2$ , 然后根据式 (11) 计算得出  $P_5$  的坐标。

$$\theta_2 = \begin{cases} \arctan(\frac{y_{o2}}{x_{o2}}) & \text{if } x_{o2} > 0 \\ \pi + \arctan(\frac{y_{o2}}{x_{o2}}) & \text{if } x_{o2} < 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{if } x_{o2} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} x_5 = (r_2 + \sqrt{x_{o2}^2 + y_{o2}^2}) \cos \theta_2 \\ y_5 = (r_2 + \sqrt{x_{o2}^2 + y_{o2}^2}) \sin \theta_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中  $\theta_2$  为直线  $OO_2$  的倾角,  $(x_5, y_5)$  为  $P_5$  的坐标。

根据  $P_5$  的坐标, 计算圆弧段  $P_5P_5O$  所在圆  $O_3$  的圆心和半径。如式 (12), (13) 所示。

$$r_3 = \frac{\sqrt{x_5^2 + y_5^2}}{2} \quad (12)$$

$$\begin{cases} x_{o3} = x_5 / 2 \\ y_{o3} = y_5 / 2 \end{cases} \quad (13)$$

其中  $r_3$  为圆  $O_3$  的半径大小,  $(x_{o3}, y_{o3})$  为圆  $O_3$  圆心坐标。

### 3.2 球拍的速度规划

球拍的速度规划需根据击球点的速度和规划路径等分别对击球三阶段的速度进行规划。首先根据期望的乒乓球出球速度计算球拍的击球速度, 然后根据迎球阶段的轨迹长度、加速度设定值及乒乓球出球速度确定迎球阶段的迎球速度。返回阶段的速度由击球速度和返回速度要求确定。

#### (1) 击球速度的确定

乒乓球机器人击球时, 期望实现预定的乒乓球出球速度。因此球拍的击球速度需要根据期望的出球速度和乒乓球的来球速度确定。如式 (14) 所示。

$$v_{hit} = v_d - v_{in} k \quad (14)$$

其中  $v_{hit}$  为击球速度,  $v_d$  为期望的出球速度,  $v_{in}$  为乒乓球来球速度。  $k$  为能量损失系数。

根据高速立体视觉系统预测的击球点速度计算乒乓球

的来球速度  $v_{in}$ 。其计算方法如式 (15) 所示。

$$v_{in} = \begin{cases} V_{l1} & \text{if } \sqrt{v_{x3}^2 + v_{y3}^2 + v_{z3}^2} < V_{l2} \\ \frac{V_{h1} - V_{l1}}{V_{h2} - V_{l2}} (\sqrt{v_{x3}^2 + v_{y3}^2 + v_{z3}^2} - V_{l2}) & \text{if } V_{l2} \leq \sqrt{v_{x3}^2 + v_{y3}^2 + v_{z3}^2} \leq V_{h2} \\ V_{h1} & \text{if } \sqrt{v_{x3}^2 + v_{y3}^2 + v_{z3}^2} > V_{h2} \end{cases} \quad (15)$$

其中  $v_{x3}$ ,  $v_{y3}$ ,  $v_{z3}$  为乒乓球在击球点处 X、Y、Z 方向的预测速度。  $V_{l1}$ 、 $V_{h1}$  为  $v_{in}$  的上下限值,  $V_{l2}$ 、 $V_{h2}$  为预测速度  $\sqrt{v_{x3}^2 + v_{y3}^2 + v_{z3}^2}$  的上下限值。

#### (2) 迎球速度的确定

假定迎球阶段是匀加速过程, 其加速度为定值。忽略从迎球速度到击球速度的加速/减速时间。迎球阶段的时间  $t_{ap}$  可根据式 (16) 计算。迎球阶段的路径长度  $S$  可由式 (17) 表示。

$$t_{ap} = t_{hit} - \frac{|P_2P_3|}{v_{hit}} \quad (16)$$

$$S = \frac{a_{cc} t_1^2}{2} + a_{cc} t_1 (t_{ap} - t_1) \quad (17)$$

其中  $t_{ap}$  为迎球阶段的时间,  $t_{hit}$  为击球剩余时间。  $|P_2P_3|$  为点  $P_2$  与  $P_3$  之间的距离。  $S$  为迎球阶段的路径长度。  $a_{cc}$  为指定加速度。  $t_1$  为加速时间。

由 (17) 式可得加速时间  $t_1$ , 如式 (18) 所示。根据式 (19) 计算得到迎球速度。

$$t_1 = t_{ap} - \sqrt{t_{ap}^2 - \frac{2S}{a_{cc}}} \quad (18)$$

$$v_{ap} = \begin{cases} v_{hit} - V_T & \text{if } a_{cc} t_1 < v_{hit} - V_T \\ a_{cc} t_1 & \text{if } v_{hit} - V_T \leq a_{cc} t_1 \leq v_{hit} + V_T \\ v_{hit} + V_T & \text{if } a_{cc} t_1 \geq v_{hit} + V_T \end{cases} \quad (19)$$

其中  $v_{ap}$  为迎球速度,  $V_T$  为限定  $v_{ap}$  范围的常量。

#### (3) 返回速度的确定

乒乓球机器人在击球之后, 应该使球拍尽快返回到等待位置。两个返回圆弧段的速度应分别进行指定。其中在圆弧段  $P_4P_5$  的速度由式 (20) 可得。

$$v_{rml} = (v_{hit} + v_{rm2}) / 2 \quad (20)$$

其中  $v_{rml}$  为圆弧段  $P_4P_5$  的规划速度。  $v_{rm2}$  为圆弧段  $P_5P_5O$  的速度, 设定为固定值。

### 3.3 球拍姿态规划

球拍的姿态由偏转角和俯仰角决定。本文中, 固定球

拍的俯仰角。根据乒乓球的来球角度和镜面反射原理确定球拍的偏转角度。其计算公式如式 (21) 所示。

$$\theta_s = (\theta_{xy} + \theta_d) / 2 \quad (21)$$

其中  $\theta_s$  为 S 轴的击球角度,  $\theta_{xy}$  为乒乓球来球速度在 X-Y 平面的投影角度, 通过 (22) 式计算得到。  $\theta_d$  为期望的出球方向。

$$\theta_d = a \tan \frac{v_{y3}}{v_{x3}} \quad (22)$$

#### 4. 实验与结果

本文设计的乒乓球机器人实体如图 4 所示。其 X、Y、Z 轴移动范围分别为 -0.6~0.6m, 0~1.6m, 0~0.28m。S 轴、P 轴的旋转角度范围均为 -60~60°。机器人的控制计算机和数据处理计算机采用普通台式 PC 机。智能相机采用德国 Vision Components 公司的 VCRT4458。该智能相机的理论图像处理速度为 250 帧/秒, 实际处理速度达到 80~100 帧/秒。运动控制卡采用固高科技的 GT200SV。



图 4 乒乓球机器人

根据本文提出的击球规划方法, 进行了多次人机对打实验。实验时, 令  $R_1=0.05\text{m}$ ,  $R_2=0.05\text{m}$ ,  $L_1=0.05\text{m}$ ,  $L_2=0.15\text{m}$ ,  $k=0.85$ ,  $V_d=2.4\text{m/s}$ ,  $V_{l1}=0\text{m/s}$ ,  $V_{h1}=1\text{m/s}$ ,  $V_{l2}=1.5\text{m/s}$ ,  $V_{h2}=5\text{m/s}$ ,  $V_T=0.2\text{m/s}$ ,  $a_{cc}=4.5\text{m/s}^2$ ,  $v_{rm2}=1.8\text{m/s}$ ,  $\theta_d=90^\circ$ , 且 Z 轴方向高度固定为 0.3m, P 轴角度固定为  $0^\circ$ 。

图 5 为乒乓球击球点位于球桌左方时, 机器人采用曲线击球方式逆时针运动击球的情况。击球点的 X, Y 坐标为 (0.073, 0.653) m。击球剩余时间为 0.411s。来球速度在 X、Y、Z 三个方向的大小分别为 0.087m/s, -2.660m/s, 1.692m/s。计算的击球速度为 1.928m/s。图 5 (a) 中 “\*” 表示击球点坐标。由图 5 (a) 可知, 在迎球和击球阶段, 球拍的规划路径与实际路径基本吻合, 能够保证球拍到达

击球点位置。在返回阶段, 允许球拍在高速运动下具有一定的位置偏差。图 5 (b) (c) 分别为乒乓球机器人的 X 轴及 Y 轴速度曲线。由图可知, 在击球时刻, X 轴的速度降到 0m/s, Y 轴的速度达到约 1.8m/s, 基本达到期望的击球速度。即, 球拍在期望的时刻, 以期望的速度到达了击球点, 实现了击球动作, 并且在击球之后, 球拍能够快速返回到等待位置。

图 6 为乒乓球击球点位于 Y 轴右侧时, 机器人采用直线方式击球的情况。击球点的 X, Y 坐标为 (0.045, 0.535) m。击球剩余时间为 0.427s。来球速度在 X、Y、Z 三个方向的大小分别为 0.096m/s, -2.726m/s, 1.621m/s。计算的击球速度为 1.822m/s。图 6 (a) 中 “\*” 表示击球点坐标。由图 6 (a) 可知, 球拍在直线推球时, 其规划轨迹与实际轨迹重合, 球拍能够到达指定的击球点。图 6 (b) (c) 分别为乒乓球机器人的 X 轴及 Y 轴速度曲线。由图可知, 在击球时刻, X、Y 轴的速度约为 0m/s 和 1.5m/s。

在人机对打实验中, 乒乓球机器人能够将乒乓球回击到对方球台中间区域, 便于实验者回球, 实现多回合对打。乒乓球落球点的位置和速度控制在一定的变化范围内。大量的人机对打实验表明机器人击球具有较好的重复性, 能够实现三至四回合的连续人机对打。

#### 5. 结论

本文设计并实现了一个五自由度乒乓球机器人。机器人由三个直线导轨、一个旋转机构及一个俯仰机构构成。机器人末端安装球拍, 以实现球拍在三维空间的位置移动以及完成偏转和俯仰动作。机器人通过高速立体视觉系统完成乒乓球来球图像的处理、坐标计算、轨迹预测、击球点和击球剩余时间计算等功能。其控制计算机根据击球点的位置, 对机器人击球轨迹进行规划。然后根据击球点的来球速度大小和方向, 对球拍的击球速度和击球姿态进行规划。最后控制计算机通过运动控制卡和单片机控制器控制机器人相应各轴动作, 实现击球。实验结果表明本文设计的乒乓球机器人能够实现预定的功能。在人机对打实验中, 实现了人机多回合连续对打。

#### 参考文献

- [1] 张正涛, 徐德, 喻俊志, “乒乓球机器人的研究与最新进展,” *The 7th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, June, 2008.
- [2] 郑魁敬, 崔培, “乒乓球机器人的研究与发展,” *机床与液压*, vol. 37, no. 8, pp. 238-241, 2009.
- [3] R.L. Andersson, “A low latency 60 Hz Stereo Vision System for real-time visual control,” *Proceedings of 5th IEEE Int.*

*Symposium on Intelligent Control*, vol. 1, pp. 165-170, 1990.

- [4] R.L. Andersson, "Understanding and applying a robot ping-pong player's expert controller," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 3, pp: 1284-1289, 1989.
- [5] R.L. Andersson, "Aggressive trajectory generator for a robot ping-pong player," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 9, no. 2, pp. 15-21, 1989.
- [6] R.L. Andersson, *A Robot Ping-Pong Player: Experiments in Real Time Control*. Cambridge, MA: MIT Press, 1987.
- [7] K.P. Modi, F. Sahin, and E. Saber, "An application of human robot interaction: development of a ping-pong playing robotic arm," *IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 2, pp. 1831-1836, 2005.
- [8] L. Acosta, J. Rodrigo, J.A. Mendez, *et al.*, "Ping-pong player prototype," *IEEE Robotics & Automation Magazine*, vol. 10, no.4, pp. 44-52, 2003.
- [9] M. Takeuchi, F. Miyazaki, M. Matsushima, *et al.*, "Dynamic dexterity for the performance of 'wall-bouncing' tasks," *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, vol. 2, pp. 1559-1564, 2002.
- [10] H. Hashimoto, F. Ozaki, K. Asano, *et al.*, "Development of a ping pong robot system using 7 degrees of freedom direct drive arm," *Industrial applications of Robotics and machine vision*, pp. 608-615, 1987.
- [11] M. Matsushima, T. Hashimoto, M. Takeuchi, *et al.*, "A Learning Approach to Robotic Table Tennis Robotics," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 21, no. 4, pp. 767-771, 2005.
- [12] M. Matsushima, T. Hashimoto, F. Miyazaki, "Learning to the robot table tennis task-ball control & rally with a human," *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, vol. 3, pp. 2962-2969, 2003.
- [13] 彭博, 洪永潮, 韦巍等. "乒乓球机器人击打点的预测," *江南大学学报*, vol. 6, no.4, pp. 433-437, 2005.
- [14] 洪永潮, "七自由度乒乓球机器人伺服控制系统的研究," *浙江大学硕士学位论文*. 2005.
- [15] 张正涛, 徐 德, "基于智能摄像机的高速视觉系统及其目标跟踪算法研究," *机器人*, vol. 31, no. 3, 2009.

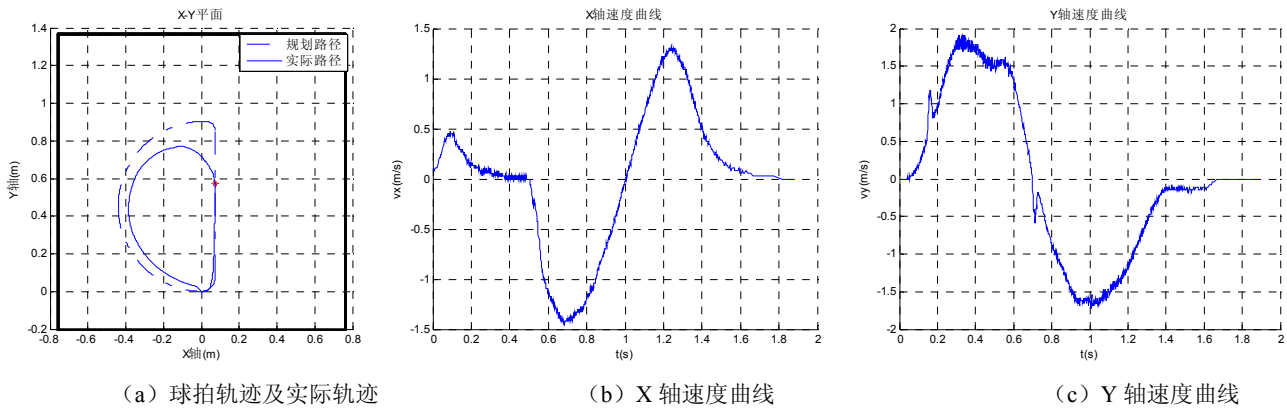


图5 曲线击球

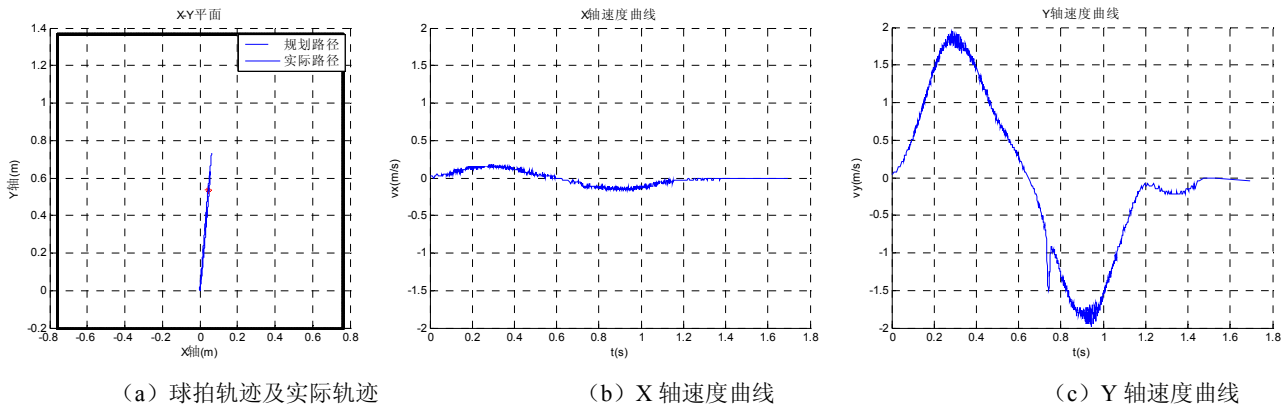


图6 直线击球