

Research and Latest Development of Ping-Pong Robot Player

Zhengtao Zhang^{1,2}, De Xu¹, Junzhi Yu¹

¹⁾ Key Laboratory of Complex Systems and Intelligent Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Science, Beijing 100080

(E-mail: zhengtaook1@163.com xude@compsys.ia.ac.cn junzhi_yu@hotmail.com)

²⁾ Graduate School of Chinese Academy of Science, Beijing, 100049

Abstract—Following a brief introduction of the state of arts as well as new progress on Ping-Pong robot player, this paper compares and analyzes the Ping-Pong robot players developed by several countries in vision system, control system and executive mechanisms in detail. Aiming at some existing problems during the development of Ping-Pong robot player, this paper provides some solutions to them and outlines a prospect of the future development of Ping-Pong Robot in my view.

Keywords—Ping-Pong robot player, control system, vision system, executive mechanisms, overview.

乒乓球机器人的研究与最新进展

张正涛^{1,2} 徐德¹ 喻俊志¹

¹⁾ 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 100080

²⁾ 中国科学院研究生院 北京 100049

摘 要 本文介绍了乒乓球机器人的相关研究工作与国际最新的发展现状,并就当前各国研制的乒乓球机器人从视觉系统、控制系统、执行机构等方面进行了详细而深入的比较、分析,总结当今乒乓球机器人发展过程中面临的主要问题,在此基础上提出了自己对一些问题的见解和对未来乒乓球机器人发展的展望。

关键词 乒乓球机器人,视觉系统,控制系统,执行机构,综述

1. 引言

乒乓球运动以其独特的趣味性、快节奏和简单的规则深深的吸引着大家的参与。但当机器人打乒乓的时候却不简单。如何解决追踪快速移动的乒乓球以及如何控制机器人准确的击打球等问题都是非常困难的,这些问题不仅是其它机器人研究领域中的的一些共性问题,在工业领域也有重要的应用。机器人乒乓球运动最初是由 John Billiney^[1]于 1983 年在一次关于举行机器人乒乓球赛的倡议中提出来的。随后世界上许多国家都开始了乒乓球机器人的研究工作。今天像日本、西班牙、美国等的乒乓球机器人都已经发展到了一定水平,当然也还存在很多的不足和可以改进的地方,比如对高速球和旋转球的处理上目前还没有很好的解决。

中国作为一个乒乓球运动大国,在乒乓运动的领域里战绩辉煌,但是在乒乓机器人方面却很少涉足。目前,浙江大学开始了一些前期的研究工作,并取得了一些初步成

果^[2]。

2. 发展现状

国外早在 1987 年就开始了乒乓球机器人的研究和开发。目前,日本、西班牙、美国等开展了很好的工作,远远走在了中国的前面。

文献[3]开发了基于双目视觉的四自由度乒乓球机器人。他们利用状态反馈来控制球拍击球的速度和角度进而控制乒乓球的运动轨迹,并利用实验的方法来获得反馈增益。从文献[17]可以看到,该机器人在完成对墙打球的功能上,取得了比较好的效果。而且从多次打击来看,其动作的重复程度很高,轨迹的重复度也很高,也就是乒乓球运动轨迹基本一致。日本的乒乓球机器人研究工作起步较早,目前其研究水平也走在了世界的前列,日本大阪大学的宫崎实验室提出了一种控制乒乓球机器人的方法,能将击来的球在指定的时间内将球击到球桌上指定的位置上^[6,8]。从文献[17]中我们也可以看到大阪大学的乒乓球机器

人与真人对打的视频,它在完成乒乓球简单的推挡动作中,成功率是非常高的。

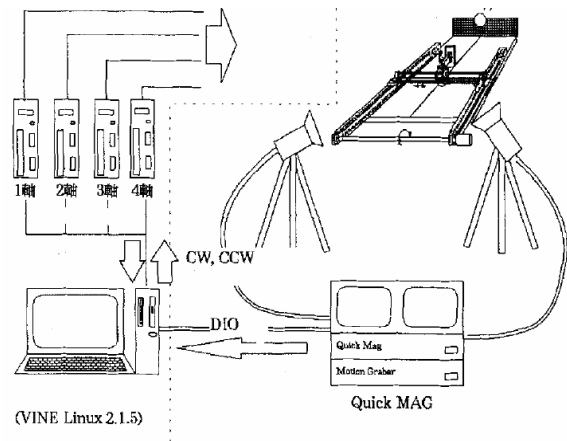


图 1 日本的乒乓球机器人系统^[8]

大阪大学的乒乓球机器人系统如图 1，可以看到该乒乓球机器人的执行机构是安装在球台上的，因此接长短球比较困难。

西班牙的 Acosta 等人^[4]开发的基于 PC 的低成本的乒乓球机器人，系统结构如图 2(a)所示，也能实现与人对打，与真人对打场面如图 3 所示。不过实验中用到的球桌只有实际的一半左右。在对乒乓球的回击上，如果球速不超过 10m/s，逐步形成球不旋转的话，该机器人接球的准确率在 90%以上。在和真人对打的实验中该机器人的接球率在 80%左右^[4]。但该机器人回击球的力度较小，从图 2(b)可以看到，该机器人的击打的力矩较小，所以击球距离不是很远，故而乒乓球桌也比实际的要小很多。

文献^[21]设计的乒乓球机器人在结构上看起来很灵活，系统如图 4 所示，但是其击球区域却很小只是标准乒乓球桌的一半左右，行动缓慢，实时性不好。该系统电机的选择比较困难，既要有比较大的力矩，又要使整个系统灵活。不过，澳大利亚的乒乓球机器人成本比较低廉，总造价只有 4260.52 美元。

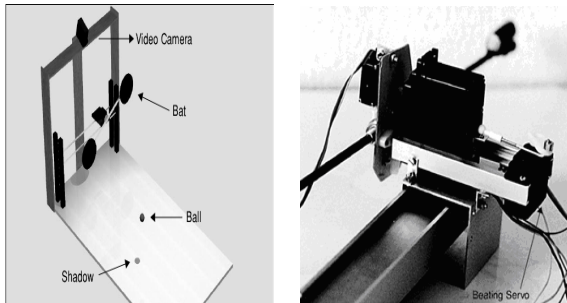


图 2 西班牙的乒乓球机器人系统^[4]

(a) 系统结构示意图 (b) 击打机构

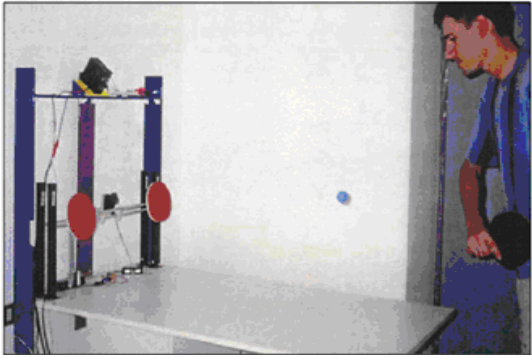


图 3 西班牙的乒乓球机器人与人对打^[16]

西班牙的乒乓球机器人系统有如下几个特点：

- 1) 采用单摄像头，只需处理一个摄像头的数据，实时性提高。
- 2) 成本低，只有上述机器人 1/10 的成本。采用的是标准的采集卡，PC 等。机械结构采用的非工业产品。
- 3) 采用低级语言和 MMX (Multimedia Extension System) 优化算法程序。

浙江大学自 2005 年 4 月开始设计与人对打的视觉伺服乒乓球机器人^[19]，已经可以完成简单的击球动作。

以上所有机器人都存在以下两个问题：

- 1) 球的速度很快，超过 10m/s 机器人就很难反应过来；
- 2) 无法判断球的旋转方向，不能对旋转球进行有效的回击确。

这两个问题是乒乓球机器人研究中的难点。如果能在机构设计上有所突破，使机械结构的响应能力有很大的提高，并且机器视觉方面有质的飞跃，能识别旋转球的旋转方向，那乒乓球机器人才真正能够做到像人与人一样对打。

3. 乒乓球机器人系统的结构与工作原理

3.1 乒乓球机器人的机械结构

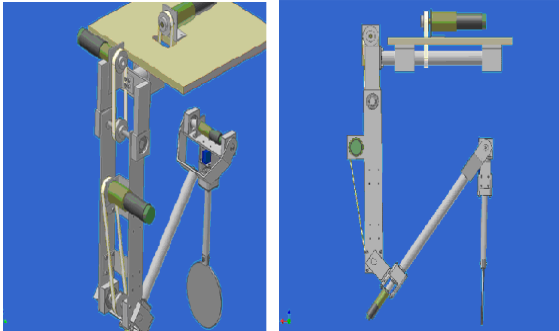


图4 澳大利亚的乒乓球机器人^[21]

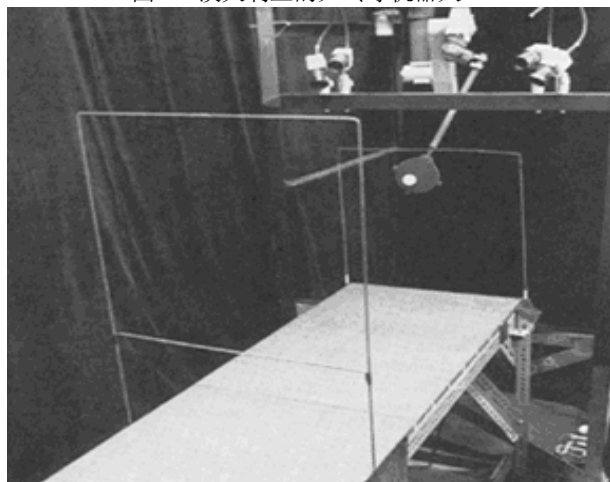


图5 Andersson 设计的机器人^[10]

3.1.1 基于工业机械臂

1988 年, 美国 MIT&Bell 公司实验室 Andersson^[10]研制的乒乓球机器人首次实现了人机对打, 其系统如图 5 所示。这在乒乓球机器人的研究领域, 是一个里程碑式的成就。它采用的是工业用的 PUMA 260 机械臂。将 PUMA 倒挂在天花板上, 并通过四个摄像头来获得球位置信息。

2005 年, 美国的 Rochester^[14]研究所使用 Mitsubishi 生产的工业机械臂 (RV-2AJ) 设计了一个打乒乓球的机器人, 它是五自由度的机械臂, 移动速度约 0.64m/s。与 Andersson 不同的是它没有采取倒挂的形式。

工业机械臂的采用, 虽然省去了自己设计执行机构的麻烦, 但是大多数工业机械臂转动惯量较大, 移动速度较慢, 难以适应如打乒乓球这类实时性要求较高的任务, 而且造价也比较昂贵。

由于乒乓球机器人在击球时需要极高的速度, 这就要求其腕部结构轻巧, 转动惯量小, 动力传递系统简单。因此, 除美国外, 大多数国家的设计者基本放弃了采用工业机械臂的方案。

3.1.2 平移和旋转关节相结合的机械臂

苏黎世高等工业学院 (ETH) 机器人研究^[1]所研制的可以打乒乓球的机器人获得了 1992 年在香港举行的第一届机器人乒乓球赛的冠军。它的腕部是由两个转动自由度和一个直线自由度组成的 (如图 6 所示), 即球拍的运动轨迹是一条直线, 但球的飞行轨迹是一条曲线, 影响了击球效果 (见图 7)。文献[3]提出了对该机器人的腕部结构的改进方案。

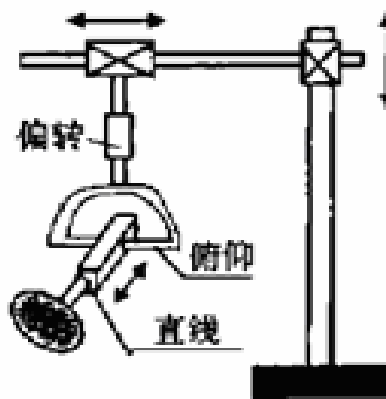


图6 ETH 设计的机器人^[1]

日本的机器人如图 8, 有四个自由度, 两个是水平直线运动, 另外两个决定球拍的姿态。控制球拍的姿势的两个电机在球拍附近, 而控制球拍位置的两个电机动车辆带动皮带使执行机构做直线运动。

澳大利亚设计的机器人 (如图 4) 有两个球拍, 每个球拍都有两个关节的自由度, 而每个球拍又有三个自由度, 这三个自由度是用来球拍定位和击球用的。他们设计的机械手能在机器人的工作空间下到达所有需要的位置和姿态并避免缠绕运动。

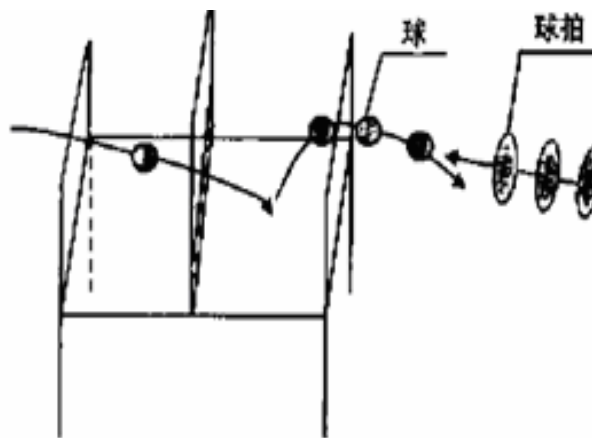


图7 乒乓球和球拍的运动^[1]

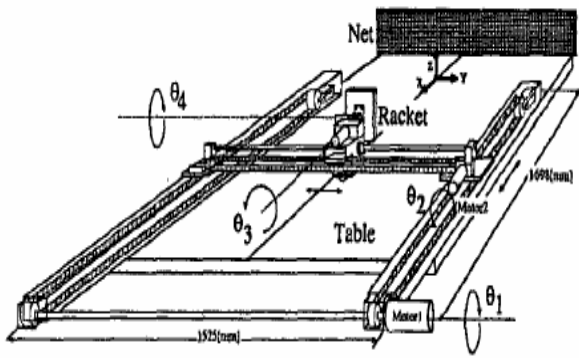


图 8 日本设计的乒乓球机器人^[13]

3.2 乒乓球机器人的视觉系统

1996 年到 2002 年间，乒乓球机器人的视觉系统发展情况如表 1 所示。

表 1：乒乓球机器人的视觉元件^[14]

开发者	视觉元件	分辨率	采样频率
Andersson, 1986 ^[10]	四个摄像头	756×242	60Hz
Hashimoto, Ozaki, Asano, Ouka, 1987 ^[5]	两个摄像头	2048×2048	100Hz
Fassler, Zurich 1990 ^[15]	两个摄像头	422×579	50Hz
Naghdy, Wyatt, Tran, 1993 ^[22]	双摄像头	1024×1024	60Hz
Miyazaki, Kusano, 2002 ^[8]	Quick MAG	640×416	60Hz

Andersson 设计的第一个可以与人对打的乒乓球机器人通过四个摄像头来获得球的位置信息，控制系统是在 Motorola MC68020 处理器上。因为采用多个摄像机，所以视觉系统涉及摄像机的标定问题。为了标定多个摄像机的内参数和外参数，往往需要复杂的数学运算。而乒乓球机器人对实时性的要求比较高，如果采用多摄像头，必须要处理多个摄像头在高采集频率下的同步问题，势必增加了处理时间。所以在 Andersson 之后到 2002 年之间的乒乓球机器人系统大多采用两个摄像头。

目前在世界上比较先进的是日本宫崎实验室设计的乒乓球机器人，也是采用双摄像头并使用三维实时运动分析系统 Quick MAG^[13]识别乒乓球的三维位置。Quick—MAG 可以同时 8 个被测对象的二维或三维的坐标进行每秒 60 次的并行测量，测量后的数据可以通过数字口实时的传送给上位计算机。还可以通过专用的应用软件的处理，在测

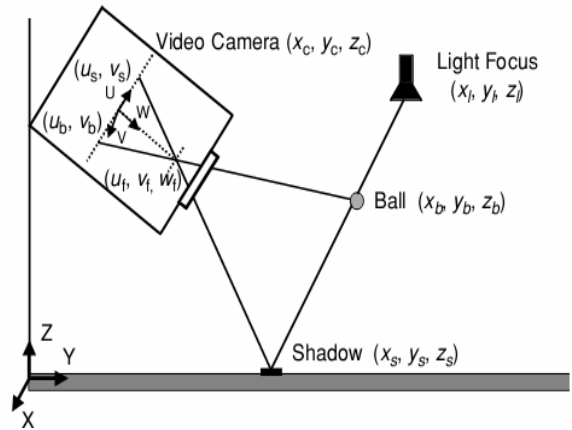


图 9 单目视觉系统模型^[4]

试结束后立即画出各测量对象的轨迹、位移、速度、加速度的曲线和任意视点的立体轨迹图。利用该系统可以对乒乓球的动作解析也可以获得球的位移。目前浙江大学也采用了该系统。

但 Quick MAG 主要是针对目标的颜色来进行识别的，如果采用白色乒乓球则无法识别定位。因此，日本和浙江大学的乒乓球机器人都使用黄色的乒乓球。

2003 年西班牙 Acosta^[4]等人开发了只有一个摄像头的基于 PC 的低成本的 5 自由度乒乓球机器人。由于一个摄像头是无法简单准确判断目标的三维位置，Acosta 提出了一种用单个摄像机和一个辅助灯获取乒乓球三维坐标的视觉系统，见图 9。该方法在以下四点假设的基础上再结合一些外在的辅助信息如球影、辅助灯和摄像头光心的位置来间接的获得乒乓球的三维世界坐标。

- 1) 辅助灯可以看成是一个点光源；
- 2) 摄像机成像的模型采用小孔模型；
- 3) 乒乓球桌的上表面为理想平面；
- 4) 摄像机的成像失真可以忽略不计。

另外，从日本的视频录相上可以看到，当对手抽球时，由于球速较快乒乓球机器人就无法反应过来了。因此，如何解决图像的快速处理是研究的一个重点和难点。

3.3 乒乓球机器人中的相关算法

3.3.1 镜像法则与聚类分析在球拍控制中的应用

乒乓球机器人算法研究中的一个核心问题是乒乓球击球点的确定，以及如何控制球拍的速度来完成一个期望的击打动作。

针对这个问题，Andersson 建立了描述球拍运动的函

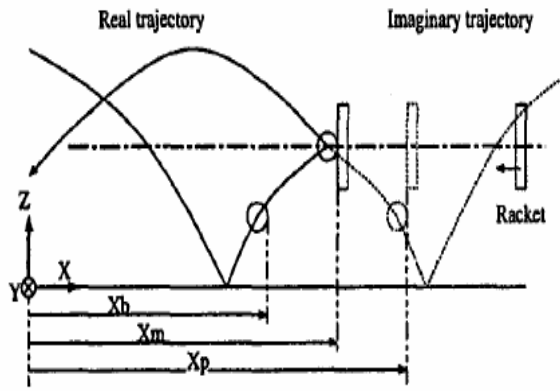


图 10 镜像关系示意图^[8]

数, 但该函数要求击球时间必须被明确的求出来, 而函数的估计误差会导致击球时间的偏差, 进一步导致了击球点的偏差。这一问题, Andersson 通过设计了一个专家控制器和一种异常处理机制, 实时的更新传感器的数据, 对偏差进行校正来加以解决。

宫崎实验室的做法是首先利用三维实时运动分析系统 Quick MAG 对乒乓球的运动轨迹进行每秒 60 次的采样, 采样的数据利用本地加权回归法 (LWR: Local Weighted Regression) 结合聚类分析 (K-D tree) 进行轨迹预测 (由于时间的限制只能对轨迹做部分预测) 然后利用 Koditchev 提出的镜像法则求得球拍的位置, 从而达到控制球拍运动的目的。LWR 简单来说就是利用过去存储的已知量来预测新的未知量。

宫崎实验室设计的乒乓球机器系统利用 LWR 方法主要基于以下三种映射关系:

- 1) 来球的状态向量作为输入, 球拍击球的时间及击球时球的位置和速度作为输出,
- 2) 击球前后球的速度变化作为一组映射关系,
- 3) 击球后球的速度与落球点及回球时间作为第三组映射。

乒乓球机器人将每次击球时按照 LWR 原则映射的数据利用 K-D 树对数据进行存储、分析。在些基础上预测球拍的位置。示意图如图 10 所示, 球拍的位置 (X 坐标) 按等式 (1) 不断更新。

$$X_p = X_m + K(X_m - X_b) \quad (1)$$

其中 X_m 是估计的击球点, X_b 是乒乓球实际的 X 坐标, X_p 是球拍的坐标。

等式 (1) 可以看作是 Koditchev 提出的镜像法则的一种应用。K 称为镜像增益。它是由本地加权回归法 (LWR)

^[7]所建立的输入—输出映射关系决定的。通过调整 K 的值可以达到控制在击球点处球拍的速度。

宫崎实验室方法的显著优点再于可以有效准确的控制球的运动模式而不需要对被控对象建立动力学模型, 也不需要求出击球时间。

文献[9]针对 LWR 做出了改进。将输入输出的映射参数由球的状态改为轨道方程的系数, 对于轨道方程的系数进行 LWR 学习, 预测接触反弹后球的轨道, 求出乒乓机器人打回球的位置点。这种方法在一定程度上提高了轨道预测精度, 降低了计算的矩阵阶数, 节省了计算时间。

3.3.2 建模法

如前所述, Andersson^[11,12,20]用一个表达式来表示球的运动轨迹, 并通过设计了一种专家控制器和异常处理机制来控制估计偏差。文献[18]针对乒乓球机器人项目中乒乓球击打点位置及球到达击打点速度的预测问题进行探讨, 分别建立了乒乓球飞行阶段的状态方程模型和乒乓球反弹过程的运动模型。基于这两个模型^[18], 提出了一种主要通过状态方程数值迭代求解而进行击球点预测的方法。同时又提出一种离线学习来确定模型中待定参数的方法, 以完成不同条件下的预测。

文献[4]基于反弹物理模型并考虑了由于空气阻力和反弹而带来的能量损失。他们设计了一个专家系统来控制能量损失和击球策略, 设乒乓球反弹后的初始能量损失为 30%, 然而这并不是固定不变的, 随后乒乓球机器人会根据击球情况由专家控制器来调整该参数。在目前的机器人乒乓球系统中, 这是在考虑了空气阻力和乒乓球反弹能量损失的基础上取得较好回球效果的较为成功的例子。

4. 总结与展望

机器人乒乓球运动在国外已开展了多年, 它的目的是设计出适合高速运动的机械结构、视觉系统和计算机控制系统。由于它需要大量的资金支持和技术积累, 这项研究在中国刚刚起步。虽然日本和西班牙的乒乓球机器人已经可以与真人对打, 然而在该领域还有很多工作要做。例如怎样克服一个机器人能同时对短球和长远球的回击, 怎么实现对旋转乒乓球的旋转方向的识别和轨迹预测等等。

关于乒乓球机器人未来的发展, 以下三个方面有待进一步的研究与拓展。首先, 在高速视觉方面, 对于追踪乒乓球这种高速运动的目标来说, 快速的图像采集与图像处理是至关重要的, 关系到轨迹预测、处理算法及击球动作的实时性等方方面面。而随着近几年来数字信号处理器及 IC 制造技术的发展, 利用 DSP 和 FPGA 提高图像处理速度, 制造高速视觉传感器成为大势所趋。其次, 在机构设

计方面, 如何使机械系统的响应能力有很大的提高, 腕部结构轻巧, 转动惯量小, 动力传递系统简单, 以满足高速运动与实时性的要求是急需解决的问题。最后, 在智能控制方面。如应用变结构控制、神经网络控制及模糊控制等智能控制方法。目前智能控制在乒乓球机器人的研究上应用极少, 有待结合机器人本体作进一步研究、探索。

本文的工作在于总结前人工作的基础上, 吸取其成功经验总结失败教训, 为乒乓球机器人的研究提供参考与建议。由于乒乓球机器人的研究还是一个较新的课题, 资料还比较缺乏, 希望本文的工作能促进乒乓机器人研究工作的蓬勃开展。

参考文献

- [1] 袁建畅. 乒乓球机器人腕部结构的研究. 西北纺织工学院学报. vol. 15, no. 1, pp: 44-49, 2001.
- [2] 杜森森. PC 的乒乓球机器人的机器视觉的程序设计. 浙江大学硕士学位论文. 2005.
- [3] M. Takeuchi, Miyazaki, F.; M. Matsushima, M. Kawatani; T. Hashimoto, "Dynamic dexterity for the performance of 'wall-bouncing' tasks" in *Robotics and Automation, Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on* vol. 2, pp: 1559-1564 2002.
- [4] L. Acosta, J.J. Rodrigo, J.A. Mendez, G.N. Marichal; M. Sigut; "Ping-pong player prototype" in *Robotics & Automation Magazine, IEEE*. vol. 10, no.4, pp: 44 – 52. Dec. 2003
- [5] H. Hashimoto, F. Ozaki, K. Asano and K. Osuka., "Development of a ping pong robot system using 7 degrees of freedom direct drive arm", *Industrial applications of Robotics and machine vision (IECON)*, pp: 608-615, 1987.
- [6] M. Matsushima, T. Hashimoto, M. Takeuchi, F. Miyazaki, "A Learning Approach to Robotic Table Tennis Robotics", *IEEE Transactions on* vol. 21, no.4, pp:767 – 771. Aug. 2005
- [7] 邓星桥, 王进戈, 肖鹏, 张华. 基于 LWR 方法的足球机器人应急策略研究. 西华大学学报: 自然科学版. vol. 25, no. 5, pp: 10-12. 2006.
- [8] F. Miyazaki, M. Takeuchi, M. Matsushima, T. Kusano, T. Hashimoto, "Realization of the table tennis task based on virtual targets" in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on* vol. 4, 11-15 pp: 3844-3849. May 2002.
- [9] 芮庆, 胡宗武. 用 LWR 学习进行乒乓球轨道预测的仿真研究. [J]. 机器人. vol. 20. no. 5 pp: 373-377. 1998.
- [10] R. L. Andersson, "A low latency 60 Hz Stereo Vision System for real-time visual control," *Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Intelligent Control*, vol.1, pp: 165-170, September 1990.
- [11] R.L. Andersson, "Understanding and applying a robot ping-pong player's expert controller", in *Robotics and Automation*, 1989. *Proceedings, IEEE International Conference* pp: 1284-1289 vol.3. 1989.
- [12] R.L. Andersson, "Aggressive trajectory generator for a robot ping-pong player", in *Control Systems Magazine, IEEE* vol. 9, Issue 2, pp: 15-21. Feb.1989.
- [13] M. Matsushima, T. Hashimoto, F. Miyazaki, "Learning to the robot table tennis task-ball control & rally with a human"; *Systems, Man and Cybernetics*, 2005 *IEEE International Conference* vol. 3, pp: 2962 – 2969. Oct. 2003.
- [14] K.P. Modi, F. Sahin, E. Saber, "An application of human robot interaction: development of a ping-pong playing robotic arm" *Systems, Man and Cybernetics*, 2005 *IEEE International Conference on* vol. 2, 10-12 pp:1831 – 1836. Oct. 2005.
- [15] H. Fassler, H.A. Vasteras, and J.W. Zurich, "A robot ping pong player: optimized mechanics, high performance 3D vision, and intelligent sensor control," *Roboter system* 6, pp: 161-170, Berlin: Springer-verlag, 1990.
- [16] <http://www.pingpong.cyc.ull.es/>
- [17] <http://robotics.me.es.osaka-u.ac.jp/MiyazakiLab/>
- [18] 彭博, 洪永潮, 杜森, 韦巍. 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.
- [19] 洪永潮, 7 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.
- [20] R.L. Andersson, "A Robot Ping-Pong Player: Experiments in Real Time Control". Cambridge, MA: MIT Press, 1987.
- [21] <http://www.mecheng.adelaide.edu.au/robotics/>
- [22] F. Naghdy, J. Wyatt and S. Tran, "A transputer-based architecture for control of a robot ping pong player", *Parallel computing and Transputers*, vol. 4 pp: 311-317, 1993.