

快速连续反应 – 避障作业环境下的七自由度灵巧臂轨迹规划

任子武¹ 朱秋国² 熊蓉²

摘要 人类经长期学习训练后能对高速物体(如棒球、乒乓球等)具有快速连续反应作业的运动技能,从深层次上揭示是由于人体在其训练过程中不断“学习优选”了相应手臂的动作轨迹,并储存了丰富的“经验”和“知识”.受人体手臂动作此行为机制启发,本文提出一种 7-DOF 灵巧臂快速连续反应–避障作业的轨迹规划方法.该方法将灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题转化为动作轨迹参数化优选问题,考虑作业过程中灵巧臂的机构物理约束和障碍约束条件,以灵巧臂“目标可作业度”指标构建适应度函数,采用粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)方法优选作业轨迹中的冗余参数;在此基础上利用灵巧臂动作轨迹参数化优选方法构建相应作业环境下的“知识”数据库,实现灵巧臂对高速物体目标的快速连续反应作业.以仿人机器人乒乓球对弈作业为例,将该方法应用于 7-DOF 灵巧臂乒乓球作业的轨迹规划中.数值实验及实际对弈试验结果表明,该方法不仅能使灵巧臂所规划的轨迹满足灵巧臂机构物理约束与障碍约束条件,同时能实现灵巧臂对乒乓球体的快速连续反应作业,验证了该方法的有效性.

关键词 七自由度灵巧臂,快速连续反应–避障作业,轨迹参数化,知识数据库,粒子群优化

引用格式 任子武,朱秋国,熊蓉.快速连续反应–避障作业环境下的七自由度灵巧臂轨迹规划.自动化学报,2015,41(6):1131–1144

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140676

Trajectory Planning of 7-DOF Humanoid Manipulator under Rapid and Continuous Reaction and Obstacle Avoidance Environment

REN Zi-Wu¹ ZHU Qiu-Guo² XIONG Rong²

Abstract Human being can master rapid and continuous reaction skill for high speed targets (e.g., baseball, ping-pong ball, etc.) after a long-term training process. Taking a deep sight into this phenomenon, it is due to the fact that human being select frequently optimal movement trajectories of the arm, and then store rich “knowledge” or “experience” in brain during the training process. Inspired by this mechanism of human being, a trajectory planning method of for a 7-DOF humanoid manipulator under rapid and continuous reaction and obstacle avoidance environment is presented. Through this method, the trajectory planning problem of the humanoid manipulator for high speed targets can be transformed into a trajectory parameterization optimum problem. Considering the physical constraint and obstacles constraint conditions of the humanoid manipulator in operation, a “target operation level” of the humanoid manipulator for high speed targets is defined to constitute the fitness function and optimization goal, then particle swarm optimization (PSO) is used to search the optimal combination of the redundant parameters of the movement trajectory. Based on these, a knowledge database of the corresponding operation environment is constructed through the trajectory parameterization optimum method, which can make the 7-DOF humanoid manipulator achieve rapid and continuous reaction operation for the high speed target. Finally, a humanoid robot for ping-pong playing is adopted as an example, and the method is employed to solve the trajectory planning problem of humanoid manipulator for ping-pong hitting. Both numerical simulation and actual humanoid robot testing results indicate that the proposed method can not only make the operation trajectory meet the physical constraint and obstacles constraint limitation of the 7-DOF humanoid manipulator, but also make the humanoid manipulator operate with rapid and continuous reaction, which demonstrates the effectiveness of this method for the trajectory planning problem studied.

Key words 7-DOF humanoid manipulator, rapid and continuous reaction and obstacle avoidance operation, trajectory parameterization, knowledge database, particle swarm optimization (PSO)

Citation Ren Zi-Wu, Zhu Qiu-Guo, Xiong Rong. Trajectory planning of 7-DOF humanoid manipulator under rapid and continuous reaction and obstacle avoidance environment. *Acta Automatica Sinica*, 2015, 41(6): 1131–1144

收稿日期 2014-09-22 录用日期 2015-02-09
Manuscript received September 22, 2014; accepted February 9, 2015

国家自然科学基金(61273340, 61473258)资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61273340, 61473258)
本文责任编辑 侯增广

Recommended by Associate Editor HOU Zeng-Guang

1. 苏州大学机器人与微系统研究中心 苏州 215021 2. 浙江大学智能系统与控制研究所 杭州 310027
1. Robotics and Microsystems Center, Soochow University, Suzhou 215021 2. Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027

仿人机器人上肢七自由度灵巧臂的轨迹规划问题是当前机器人领域的研究热点,其研究开发的目标是更好地服务于人类^[1],如仿人机器人 Domo 端起茶杯递送给顾客^[2],仿人机器人 HRP-2 打开冰箱取食物^[3]等,这些作业任务的执行对上肢灵巧臂动作要求并不很高;但要使仿人机器人能对高速物体要求具有一定快速连续反应复杂作业任务的执行,如仿人机器人对高速飞行目标的抓取、仿人机器人接打棒球/乒乓球作业等,其上肢灵巧臂的轨迹规划问题显得尤为关键,它能使仿人机器人更容易适应人类生活环境,满足辅助人类完成各种作业任务的需求;同时这些技术在工业过程中目标位置不确定情形下机械臂快速在线伺服作业、军用机械臂排雷及空间机械臂系统进行各种空间试验操作等领域中具有重要的应用价值;也对促进我国仿人机器人核心高性能单元技术和先进机器人技术发展具有重要意义^[4]。

仿人机器人 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业的任务要求是其末端灵巧手(手心)在作业要求时刻从静态初始点运动至目标作业点位置,并对物体目标能以要求的笛卡尔速度进行动作(灵巧臂手心的作业位置、速度及作业时刻信息由仿人机器人系统视觉单元在线提供)。分析快速连续反应作业任务中的目标信息及 7-DOF 灵巧臂机构特性体现有以下几个方面:1) 灵巧臂快速连续反应作业目标信息的不确定性:灵巧臂在对高速物体作业的复杂运动执行中,对目标的作业位置、速度及作业时刻都有要求,但这些任务参数无法事先预知,需通过外部视觉在高速物体运动过程中根据其飞行轨迹预测得到;由于高速目标物每次飞行轨迹不同,灵巧臂每次作业任务的目标要求也不同。2) 七自由度灵巧臂关节结构冗余:七自由度灵巧臂关节结构符合人体上肢的生理特点具有较大的工作空间^[1,5],但对同一末端位姿,七自由度灵巧臂将存有无穷多组逆运动学解满足其末端位姿要求;选取不同的逆运动学解其连杆构形也不同,对灵巧臂轨迹规划性能要求也会相差很大。3) 灵巧臂存有关节运动学物理约束:灵巧臂连杆机构及形状的设计使得其各关节只能在一定范围内转动;灵巧臂的快速作业对其各关节电机转速及角加速度要求也很高,但关节电机转速及角加速度等运动学物理约束的限制使灵巧臂能完成作业任务的能力也有限,因此在规划动作轨迹前需考虑该作业任务能否完成;若所规划轨迹在过程中有超出灵巧臂运动学物理约束范围的时刻,将无法完成其作业需求。

灵巧臂对高速物体作业要拥有快速连续反应作业的类人功能,除在其机构、质量与刚度等方面高要求外,对灵巧臂的动作轨迹规划与运动控制方面也

面临一些需解决的问题:1) 灵巧臂作业的高实时性:灵巧臂在快速连续作业任务中,目标物体高速运动(如棒球飞行速度达约 10 m/s)要求灵巧臂在获得外部视觉提供的任务参数信息后,需在短时间内完成逆运动学求解、正运动学计算、动作轨迹规划及关节伺服控制等一系列计算(如乒乓球机器人默认要求所有数值计算时间约在 1 ms 内完成^[6]),因此对灵巧臂作业实时性要求非常高;2) 灵巧臂的障碍约束:人体手臂在动作过程中为达到预期的操作作业速度,通常存有手臂后缩再往前加速运动的过程;仿人机器人上肢灵巧臂在空中快速运动时也如此,灵巧臂在加速过程很容易与仿人机器人本体(胸腔、腰部等)间发生干涉,造成机器人关键部件的损毁;同时若在灵巧臂作业空间中存有一些静态障碍物,也将对灵巧臂轨迹规划构成了障碍约束。

目前,对机械臂动作轨迹规划根据规划空间的不同可分为关节空间规划与任务空间规划两种方法。关节空间规划具有较好的实时性,计算量小;任务空间规划由于涉及大量逆运动学计算,计算量大^[7-8]。从实时性角度看,机械臂在关节空间内规划轨迹更易于实时控制。由于机械臂作业过程中除了机构物理约束外,通常还存有障碍约束、任务约束等限制^[7],因此很多学者在规划机械臂的动作轨迹时致力于这些约束问题的解决。Chan 和 Dubey 采用加权极小范数解避免冗余机械臂关节超限,与梯度投影法比较,该方法能避免关节超限^[9];Papadopoulos 等提出一种基于多项式空间变换的方法,利用具有连续光滑特性的多项式函数,将机械臂障碍约束由笛卡尔空间映射到多项式空间,然后通过改变多项式的阶数实现避障规划^[10];Xiang 等提出一种广义加权极小范数方法,与传统梯度投影法和定向梯度投影法比较,该方法在七自由度机械臂末端位置跟踪给定轨迹时即能保证避障又能不超越关节极限^[11];贾庆轩等简化空间机械臂模型和障碍模型,利用 A* 算法在机械臂自由工作空间进行无碰撞路径搜索,实现机械臂的避障路径规划^[12]。上述方法对机械臂轨迹规划存有的避障、避关节运动学限位等问题进行了研究,但对 7-DOF 灵巧臂在快速连续反应复杂作业任务情形下同时存有高实时性、避障、规避运动学物理约束等问题的研究还鲜有成果报道。

开展具有快速连续反应和快速运动能力的灵巧臂单元技术研究是一富有挑战性的课题。探究人体对高速物体快速连续反应作业行为机制,人类拥有快速连续反应的运动技能无不经过长期的学习和训练过程后获得。人经过几个星期、几个月甚至许多年的学习后才拥有抓取物体的运动技能^[13],而刚出生婴儿由于没有学习训练过程在动作手臂时会经常伤害到自己的脸部或身体;同样运动员对乒乓球、棒

球等高速物体需经过长期训练后, 才能进行眼疾手快地作业. 这些现象表明, 人类所具有的快速连续反应和快速运动技能需经过“学习和发育”过程才能获得. 从更深的层次上揭示是人在经过长期的“学习和发育”训练过程后储存积累了丰富的“经验”和“知识”, 才能达到快速连续动作间的协调, 并拥有快速连续动作的运动技能. 受人体作业行为机制启发, 灵巧臂在对高速物体作业时要拥有快速连续反应和快速运动的运动技能, 亦需经过学习训练并积累储存相应作业环境下的“知识”, 并在作业过程中根据“知识”库中相应信息, 解决灵巧臂动作过程中存在的问题.

基于此思想, 考虑对高速物体快速连续作业任务的特殊性及其复杂性, 本文提出一种 7-DOF 灵巧臂快速连续反应-避障作业的轨迹规划方法, 该方法在关节空间内规划灵巧臂的动作轨迹, 将 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题转化为动作轨迹的参数化优选问题, 采用粒子群优化 (Particle swarm optimization, PSO) 方法搜索对应目标信息作业轨迹中的冗余参数, 使所规划的轨迹满足灵巧臂运动学物理约束条件, 同时又确保动作轨迹与空间障碍物间满足避障要求; 在此基础上利用灵巧臂动作轨迹参数化优选方法构建相应作业环境下的“知识”数据库, 实现灵巧臂对高速物体目标的快速连续反应作业. 最后以仿人机器人乒乓球对弈作业为例, 将该方法应用于 7-DOF 灵巧臂乒乓球对弈作业的轨迹规划中, 构建相应作业环境下仿人机器人乒乓球对弈的“知识”数据库, 数值实验与实际对弈测试结果都表明, 采用该方法能实现灵巧臂快速、安全地完成乒乓球作业任务需求, 实验结果验证了本文方法的有效性.

1 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹规划流程

1.1 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹规划数学模型

仿人机器人 7-DOF 灵巧臂在对高速物体快速连续反应作业中, 灵巧臂根据外部视觉提供的目标信息 $(\mathbf{P}, \mathbf{V}, t_{f1})$, 末端灵巧手心从静态初始点开始动作, 在 t_{f1} 时刻运动至目标作业点位置 (\mathbf{P}) , 并以要求的笛卡尔速度 (\mathbf{V}) 对目标物体进行作业, 随后从目标作业点返回至静态初始点, 等待下一个目标信息.

由上述灵巧臂对高速物体快速连续反应作业任务要求可以看出, 灵巧臂对物体目标作业的动作轨迹可分为两部分: 1) 灵巧手心从静态初始点位置运动至目标作业点 (作业过程); 2) 灵巧手心从目标作业点位置返回至静态初始点 (返回过程). 由于作业

任务实时性要求高, 选择在关节空间内规划灵巧臂动作轨迹. 对于机器人系统而言, 可以采用关节位置向量 $\boldsymbol{\theta}$ 随时间的变化关系 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 描述机器人的动作轨迹, $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 与 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 分别反映机器人系统各关节运动的速度与角加速度轨迹, 因此 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划数学模型可以概括如下:

对于 7-DOF 仿人机器人灵巧臂系统 R , 系统工作空间中存有的障碍物区域为 S , 设灵巧臂静态初始点的关节位置状态为 $\boldsymbol{\theta}_0 = [\theta_{10}, \theta_{20}, \theta_{30}, \theta_{40}, \theta_{50}, \theta_{60}, \theta_{70}]$, 目标作业点位置状态为 $\boldsymbol{\theta}_f = [\theta_{1f}, \theta_{2f}, \theta_{3f}, \theta_{4f}, \theta_{5f}, \theta_{6f}, \theta_{7f}]$; 灵巧臂 t_{f1} 作业时刻在目标作业点关节角速度矢量为 $\dot{\boldsymbol{\theta}}_f = [\dot{\theta}_{1f}, \dot{\theta}_{2f}, \dot{\theta}_{3f}, \dot{\theta}_{4f}, \dot{\theta}_{5f}, \dot{\theta}_{6f}, \dot{\theta}_{7f}]$, 则灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题可描述为在机器人系统所有可能的轨迹中优选一条最优的作业轨迹, 使得:

$$\boldsymbol{\theta}^*(t) = \arg \min F(\boldsymbol{\theta}) \quad (1)$$

并满足如下的边界状态条件:

$$\begin{aligned} \text{作业过程: } \boldsymbol{\theta}^*(0) &= \boldsymbol{\theta}_0, & \boldsymbol{\theta}^*(t_{f1}) &= \boldsymbol{\theta}_f, \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}^*(0) &= \mathbf{0}, & \dot{\boldsymbol{\theta}}^*(t_{f1}) &= \dot{\boldsymbol{\theta}}_f \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{返回过程: } \boldsymbol{\theta}^*(t_{f1}) &= \boldsymbol{\theta}_f, & \boldsymbol{\theta}^*(t_{f1} + t_{f2}) &= \boldsymbol{\theta}_0, \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}^*(t_{f1}) &= \dot{\boldsymbol{\theta}}_f, & \dot{\boldsymbol{\theta}}^*(t_{f1} + t_{f2}) &= \mathbf{0} \end{aligned} \quad (3)$$

式 (1) 中, $F(\boldsymbol{\theta})$ 为反映灵巧臂作业轨迹优选的目标函数, $\boldsymbol{\theta}^*(t)$ 表示优选的最优规划轨迹; 式 (2) 和式 (3) 分别反映了灵巧臂作业过程与返回过程的关节边界条件, 式 (3) 中 t_{f2} 为灵巧臂返回过程时间. 除此之外, 灵巧臂对高速物体目标作业的规划轨迹还需考虑运动学物理约束, 即在运动过程中需满足下面运动学约束条件:

$$\begin{aligned} \theta_i^{\min} &\leq \theta_i^*(t) \leq \theta_i^{\max}, & \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}] \\ \dot{\theta}_i^{\min} &\leq \dot{\theta}_i^*(t) \leq \dot{\theta}_i^{\max}, & \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}] \\ \ddot{\theta}_i^{\min} &\leq \ddot{\theta}_i^*(t) \leq \ddot{\theta}_i^{\max}, & \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}] \end{aligned} \quad (4)$$

上式反映了灵巧臂在运动过程中各关节的位置、角速度与角加速度约束. 式中 $i = 1, 2, \dots, 6, 7$, θ_i^{\min} 与 θ_i^{\max} 分别表示关节 i 位置的下限与上限, $\dot{\theta}_i^{\min}$ 与 $\dot{\theta}_i^{\max}$ 分别表示关节 i 角速度的下限与上限, $\ddot{\theta}_i^{\min}$ 与 $\ddot{\theta}_i^{\max}$ 分别表示关节 i 角加速度的下限与上限.

仿人机器人灵巧臂在对高速物体目标作业运动过程中除需考虑上述运动学物理约束外, 还应考虑作业空间中的障碍约束. 灵巧臂在 t_{f1} 时刻为了达到要求的作业速度, 存有手臂后缩再往前加速现象, 这一过程很容易与作业空间中的仿人机器人本体 (胸腔、腰部等) 障碍物间发生干涉, 给机器人本体及灵巧臂电机、谐波等关键部件损坏带来极大风险,

对灵巧臂运动构成了障碍约束. 定义仿人机器人灵巧臂作业空间中障碍物区域为 S , 在灵巧臂杆件及末端灵巧手上设置 n 个标记点, 则所规划的灵巧臂轨迹需满足以下障碍约束条件:

$$G_j(\boldsymbol{\theta}^*(t)) \cap S = \emptyset, \quad \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}], \\ j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式 (5) 反映了灵巧臂运动过程中对空间障碍物的避让要求. 式中 $G_j(\boldsymbol{\theta}^*(t))$ 表示所优选的最优规划轨迹 $\boldsymbol{\theta}^*(t)$ 在 t 时刻下对应于灵巧臂标记点 j 在世界坐标系下的空间位置. 式 (1)~(5) 构成了仿人机器人灵巧臂对高速物体目标作业优选一条满足作业任务需求、同时又使目标函数值最小化的轨迹规划数学模型.

1.2 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹规划优选策略

按照上述灵巧臂对高速物体目标作业任务需求及相应作业轨迹规划数学模型描述, 借鉴人体对高速物体作业运动技能训练过程中“学习”优选动作轨迹的行为机制, 并考虑灵巧臂作业的运动学约束与障碍约束条件, 将其对高速物体目标作业的轨迹规划问题转化为动作轨迹的参数化优选问题, 轨迹优选策略具体按以下步骤实现:

步骤 1. 在世界坐标系 \sum_W 下给定仿人机器人本体的初始位姿 (\mathbf{p}_H, R_H) , 灵巧臂作业空间内障碍物 (如仿人机器人本体胸腔、腰部等) 在世界坐标系 \sum_W 下的区域描述为 S , 分析 7-DOF 灵巧臂正运动学^[6, 14], 并计算灵巧臂各连杆在世界坐标系下的位姿 (\mathbf{p}_j, R_j) :

$$\begin{cases} \mathbf{p}_j = \mathbf{p}_i + R_i \mathbf{b}_j \\ R_j = R_i R_{\mathbf{a}_j}(\theta_j) \end{cases} \quad (6)$$

式中, \mathbf{p}_i, R_i 分别表示母连杆在世界坐标系下的位置与姿态; $\mathbf{a}_j, \mathbf{b}_j$ 分别为母连杆坐标系中关节轴矢量与坐标原点位置; $R_{\mathbf{a}_j}(\theta_j)$ 为三维绕轴矢量 \mathbf{a}_j 转动 θ_j 时的旋转矩阵.

步骤 2. 设在 t_{f1} 作业时刻灵巧臂末端灵巧手笛卡尔速度方向与其手背面 (或手掌面) 垂直, 通过末端灵巧手速度方向矢量在其局部坐标系 \sum_R 与世界坐标系 \sum_W 间变换关系求取灵巧手姿态矩阵, 其中记姿态矩阵中冗余姿态角为 φ^r (假定已知); 另 7-DOF 灵巧臂关节结构冗余, 选其中一个关节作为冗余自由度, 并记其关节位置为 θ^r (假定已知), 根据灵巧手 (手心) 位姿 (\mathbf{P}, R) , 通过解析方式快速精确求取 7-DOF 灵巧臂逆运动学解; 利用 t_{f1} 作业时刻末端灵巧手的笛卡尔速度通过雅克比阵 J 求取各连杆的关节速度, 其关系表达式为

$$\dot{\boldsymbol{\theta}}_f = J^{-1} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_d \\ \boldsymbol{\omega}_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中, $(\mathbf{v}_d, \boldsymbol{\omega}_d)$ 为灵巧臂末端灵巧手 t_{f1} 作业时刻的笛卡尔速度 (若不考虑转动速度, 则 $\boldsymbol{\omega}_d = \mathbf{0}$).

步骤 3. 在关节空间内进行多项式插补规划灵巧臂作业过程与返回过程运动轨迹, 保证灵巧臂运动过程中关节位置轨迹的连续可导特性; 由此灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题将转化为用两个冗余变量 (φ^r, θ^r) 参数描述灵巧臂作业轨迹的优选问题. 关于灵巧臂作业轨迹中冗余参数的优选过程在后文中具体介绍.

步骤 4. 记灵巧臂对高速物体目标作业各关节位置、角速度与角加速度规划轨迹分别为 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 与 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}(t)$, 根据关节轨迹 $\boldsymbol{\theta}(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 与 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 和式 (4) 中灵巧臂运动学的物理约束条件, 判断

$$\begin{cases} \theta_i(t) \in [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}] \text{ or } \theta_i(t) \notin [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}] \\ \dot{\theta}_i(t) \in [\dot{\theta}_i^{\min}, \dot{\theta}_i^{\max}] \text{ or } \dot{\theta}_i(t) \notin [\dot{\theta}_i^{\min}, \dot{\theta}_i^{\max}] \\ \ddot{\theta}_i(t) \in [\ddot{\theta}_i^{\min}, \ddot{\theta}_i^{\max}] \text{ or } \ddot{\theta}_i(t) \notin [\ddot{\theta}_i^{\min}, \ddot{\theta}_i^{\max}] \end{cases}, \\ \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (8)$$

若对于 $\forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}]$ 都有 $\theta_i(t) \in [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}]$, $\dot{\theta}_i(t) \in [\dot{\theta}_i^{\min}, \dot{\theta}_i^{\max}]$ 和 $\ddot{\theta}_i(t) \in [\ddot{\theta}_i^{\min}, \ddot{\theta}_i^{\max}]$, 则说明灵巧臂运动过程中所规划的轨迹在运动学物理约束范围内动作; 否则, $\boldsymbol{\theta}(t)$ 、 $\dot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 和 $\ddot{\boldsymbol{\theta}}(t)$ 规划轨迹存有超出灵巧臂运动学物理约束条件的时刻, 该轨迹不可作业.

步骤 5. 根据灵巧臂对高速物体目标作业所规划轨迹 $\boldsymbol{\theta}(t)$, 通过其正运动学模型分析计算灵巧臂杆件及末端灵巧手上所设置的 n 个标记点在世界坐标系下的笛卡尔轨迹

$$G_j = \text{forwardkinematics}(\mathbf{s}_j, \boldsymbol{\theta}(t), \mathbf{p}_H, R_H), \\ j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中, \mathbf{s}_j 表示所设置标记点 j 在相应局部坐标系下的位置坐标. 在世界坐标系下根据各标记点的笛卡尔轨迹 G_j 与作业空间中障碍物区域描述 S , 判断

$$G_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \cap S = \emptyset \text{ or } G_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \cap S \neq \emptyset, \\ \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}], \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

若对于 $\forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}]$ 都有 $G_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \cap S = \emptyset$, 则说明所设置的灵巧臂 n 个标记点在运动过程中与障碍物间不发生干涉; 否则灵巧臂杆件或末端灵巧手与作业空间内障碍物 (如机器人本体胸腔、腰部等) 间出现碰撞可能, 该轨迹不可作业.

步骤 6. 综合步骤 4 和步骤 5 的约束条件, 采用粒子群优化方法和约束处理技术解决灵巧臂动作轨

迹冗余变量 (φ^r, θ^r) 参数的优选问题, 优化解作为冗余变量取值返回至规划轨迹中, 所优选的轨迹作为相应目标信息的灵巧臂作业轨迹规划结果。

综合以上灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划优选策略, 该方法的实质是将 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题转化为动作轨迹的参数化优选问题, 即优选确定作业轨迹中两个冗余变量 (φ^r, θ^r) 的参数取值, 使优选的轨迹满足灵巧臂运动学物理约束与障碍约束条件, 对应的轨迹将作为相应目标信息的灵巧臂轨迹规划结果。

2 灵巧臂作业轨迹基于粒子群算法的优选

2.1 轨迹规划策略

从上述灵巧臂对高速物体目标作业任务可以看出, 灵巧臂作业过程与返回过程的运动均是机器人点对点轨迹规划问题, 因此可在关节空间内规划灵巧臂对高速物体目标作业的动作轨迹。根据作业任务特点, 为确保灵巧臂运动过程中关节位置轨迹的连续可导特性, 根据作业过程与返回过程两端点的关节位置、角速度四个边界约束条件, 可分别采用三次多项式规划策略插补灵巧臂作业过程与返回过程的关节轨迹^[15]。

在作业过程阶段, 灵巧臂 7 个关节的位置边界条件满足 $\theta(0) = \theta_0$ 、 $\theta(t_{f1}) = \theta_f$, 关节速度条件满足 $\dot{\theta}(0) = \mathbf{0}$ 、 $\dot{\theta}(t_{f1}) = \dot{\theta}_f$, 由此满足此边界约束条件下唯一可确定的三次多项式关节轨迹为

$$\theta_i(t) = a_{i0} + a_{i1}t + a_{i2}t^2 + a_{i3}t^3, \quad t \in [0, t_{f1}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (11)$$

对应于该过程的关节速度和加速度轨迹显然有

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(t) = a_{i1} + 2a_{i2}t + 3a_{i3}t^2 \\ \ddot{\theta}_i(t) = 2a_{i2} + 6a_{i3}t \end{cases}, \quad t \in [0, t_{f1}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (12)$$

将作业过程的四个边界约束条件代入式 (11) 和式 (12) 中, 可以得到:

$$\begin{cases} a_{i0} = \theta_{i0} \\ a_{i1} = 0 \\ a_{i2} = \frac{3}{t_{f1}^2} (\theta_{if} - \theta_{i0}) - \frac{1}{t_{f1}} \dot{\theta}_{if} \\ a_{i3} = -\frac{2}{t_{f1}^3} (\theta_{if} - \theta_{i0}) + \frac{1}{t_{f1}^2} \dot{\theta}_{if} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (13)$$

应用式 (13) 可求出灵巧臂在作业过程阶段符合两端点关节位置、速度边界约束条件的三次多项式关节轨迹曲线。

同样在返回过程阶段, 灵巧臂将于 $t_{f1} + t_{f2}$ 时刻返回至静态初始点, 此时各关节速度值回归于零。由此, 灵巧臂 7 个关节位置的边界条件满足 $\theta(t_{f1}) = \theta_f$ 、 $\theta(t_{f1} + t_{f2}) = \theta_0$, 关节速度边界条件满足 $\dot{\theta}(t_{f1}) = \dot{\theta}_f$ 、 $\dot{\theta}(t_{f1} + t_{f2}) = \mathbf{0}$, 在此约束条件下灵巧臂返回过程唯一可确定的三次多项式关节轨迹为

$$\theta_i(t) = b_{i0} + b_{i1}(t - t_{f1}) + b_{i2}(t - t_{f1})^2 + b_{i3}(t - t_{f1})^3, \quad t \in [t_{f1}, t_{f1} + t_{f2}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (14)$$

对应于该过程的关节速度和加速度显然有

$$\begin{cases} \dot{\theta}_i(t) = b_{i1} + 2b_{i2}(t - t_{f1}) + 3b_{i3}(t - t_{f1})^2 \\ \ddot{\theta}_i(t) = 2b_{i2} + 6b_{i3}(t - t_{f1}) \end{cases}, \quad t \in [t_{f1}, t_{f1} + t_{f2}], \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (15)$$

将返回过程的四个边界约束条件代入式 (14) 和式 (15) 中, 可以得到:

$$\begin{cases} b_{i0} = \theta_{if} \\ b_{i1} = \dot{\theta}_{if} \\ b_{i2} = \frac{3}{t_{f2}^2} (\theta_{i0} - \theta_{if}) - \frac{2}{t_{f2}} \dot{\theta}_{if} \\ b_{i3} = -\frac{2}{t_{f2}^3} (\theta_{i0} - \theta_{if}) + \frac{1}{t_{f2}^2} \dot{\theta}_{if} \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, 7 \quad (16)$$

应用式 (16) 可求出灵巧臂在返回过程阶段符合两端点关节位置、速度边界约束条件的三次多项式关节轨迹曲线。

2.2 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹的参数化描述

综合上述可知, 仿人机器人 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹规划中存有冗余变量参数 φ^r 和 θ^r , 其中 φ^r 为 t_{f1} 作业时刻末端灵巧手设定的冗余姿态角, θ^r 为 t_{f1} 作业时刻 7-DOF 灵巧臂逆运动学求解中设定的冗余关节角变量, 即灵巧臂的作业轨迹可用两个冗余变量 (φ^r, θ^r) 参数进行描述。由此, 灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题可转化为作业轨迹的参数化优选问题, 在存有式 (4) 灵巧臂运动学物理约束和式 (5) 作业空间障碍约束条件下, 选取一组最优的冗余变量参数组合使定义的轨迹优选目标函数 $f(\mathbf{K})$ 值最小化, 即如下数学描述:

$$(\varphi^r, \theta^r)_{\text{opt}} = \arg \min f(\mathbf{K}) \quad (17)$$

并满足以下条件:

$$\begin{cases} \theta_i(t) \in [\theta_i^{\min}, \theta_i^{\max}] \\ \dot{\theta}_i(t) \in [\dot{\theta}_i^{\min}, \dot{\theta}_i^{\max}] \\ \ddot{\theta}_i(t) \in [\ddot{\theta}_i^{\min}, \ddot{\theta}_i^{\max}] \end{cases},$$

$$G_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \cap S = \emptyset,$$

$$\forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}],$$

$$i = 1, 2, \dots, 7, j = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

式 (17) 为所定义的轨迹优选目标函数, $\mathbf{K} = (\varphi^r, \theta^r)$ 为待优化的参数矢量, $(\varphi^r, \theta^r)_{\text{opt}}$ 为对应的最优变量参数组合, 式 (18) 为灵巧臂作业需满足运动学物理约束与障碍约束条件, 式中各变量含义参照前文描述.

2.3 灵巧臂作业轨迹基于粒子群算法优选方案

七自由度灵巧臂动作可视为人体上肢手臂动作的模仿. 人体手臂在对高速物体做快速连续反应作业时, 能够本能地选择一种自然的手臂构形姿态, 并能避开作业空间中的障碍物进行动作. 透过该表象看本质是由于人体手臂在其“学习和发育”过程中“优选”了相应的手臂动作轨迹. 由此灵巧臂在要求其具有快速连续反应能力的学习训练过程中, 对高速目标物体的快速动作亦应通过学习训练能全局优选一种自然的灵巧臂构形姿态.

粒子群优化方法 (PSO)^[16-17] 是一种基于群体智能理论的演化方法. 算法将求解问题表示为“粒子”, 并生成“粒子”种群, 通过粒子间的竞争与协作, 实现算法对多维空间中最优解的搜索. 由于 PSO 算法具有易实现、计算量小和计算效率高等优点受到众多研究者的青睐. 采用 PSO 方法优选仿人机器人 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业的动作轨迹, 就是要优选确定灵巧臂动作轨迹中的一组冗余变量 (φ^r, θ^r) 参数组合, 使灵巧臂的作业轨迹在其运动学物理约束与障碍约束条件下进行, 并在满足作业目标需求的同时, 又能使所定义的目标函数最小化. 对

于由外部视觉提供的一组灵巧臂高速物体目标的作业信息 $(\mathbf{P}, \mathbf{V}, t_{f1})$, PSO 算法的优化变量参数为 φ^r 和 θ^r , 基于粒子群算法优选 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹冗余变量参数的基本流程如图 1 所示.

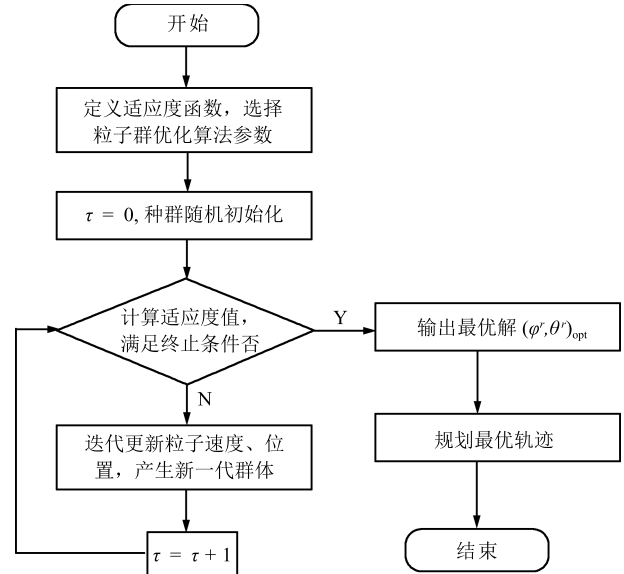


图 1 基于 PSO 算法优选 7-DOF 灵巧臂的作业轨迹

Fig. 1 Motion trajectory selection of 7-DOF humanoid manipulator based on PSO

为优选基于粒子群优化算法的 7-DOF 灵巧臂对高速物体目标作业轨迹, 需定义 PSO 算法的适应度函数. 根据灵巧臂机构设计中关节位置、速度和加速度运动学物理约束范围, 在规划轨迹优选过程中定义式 (19) 所示的“目标可作业度”指标 μ (表示灵巧臂对目标信息的可作业程度, 因灵巧臂性能有限, 对有些高速物体目标, 灵巧臂无法实现其作业需求, 而对另外一些物体目标, 灵巧臂可以实现其作业需求), 使其最小化以确定一条最优的作业轨迹. 式

$$\mu = \max \left[\left| \frac{\min(\theta_1(t)) - \theta_1^{\text{mid}}}{\frac{\theta_1^{\max} - \theta_1^{\min}}{2}} \right|, \left| \frac{\max(\theta_1(t)) - \theta_1^{\text{mid}}}{\frac{\theta_1^{\max} - \theta_1^{\min}}{2}} \right|, \dots, \left| \frac{\min(\theta_i(t)) - \theta_i^{\text{mid}}}{\frac{\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}}{2}} \right|, \left| \frac{\max(\theta_i(t)) - \theta_i^{\text{mid}}}{\frac{\theta_i^{\max} - \theta_i^{\min}}{2}} \right|, \right.$$

$$\dots, \left| \frac{\min(\theta_7(t)) - \theta_7^{\text{mid}}}{\frac{\theta_7^{\max} - \theta_7^{\min}}{2}} \right|, \left| \frac{\max(\theta_7(t)) - \theta_7^{\text{mid}}}{\frac{\theta_7^{\max} - \theta_7^{\min}}{2}} \right|, \left| \frac{\max(\dot{\theta}_1(t))}{\dot{\theta}_1^{\max}} \right|, \dots, \left| \frac{\max(\dot{\theta}_i(t))}{\dot{\theta}_i^{\max}} \right|, \dots,$$

$$\left. \left| \frac{\max(\dot{\theta}_7(t))}{\dot{\theta}_7^{\max}} \right|, \left| \frac{\max(\ddot{\theta}_1(t))}{\ddot{\theta}_1^{\max}} \right|, \dots, \left| \frac{\max(\ddot{\theta}_i(t))}{\ddot{\theta}_i^{\max}} \right|, \dots, \left| \frac{\max(\ddot{\theta}_7(t))}{\ddot{\theta}_7^{\max}} \right| \right],$$

$$i = 1, 2, \dots, 7, t \in [0, t_{f1} + t_{f2}] \quad (19)$$

(19) 中, $\theta_i(t)$, $\dot{\theta}_i(t)$ 和 $\ddot{\theta}_i(t)$ 分别为关节 i 的位置、速度与加速度随时间 t 的轨迹, θ_i^{mid} 为关节 i 位置范围的中值. 当作业过程中灵巧臂杆件及灵巧手上所设置的 n 个标记点在世界坐标系下的笛卡尔轨迹与障碍物间存有干涉时, 即当

$$G_j(\boldsymbol{\theta}(t)) \cap S \neq \emptyset, \quad \forall t \in [0, t_{f1} + t_{f2}], \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

时, 采用约束处理技术对“目标可作业度”按如式(21)的方式对 μ 赋值进行惩罚, 其中参数 C 为较大正常数值.

$$\mu = C, \quad C > 0 \quad (21)$$

根据上述 7-DOF 灵巧臂“目标可作业度”优化指标最小化要求, PSO 算法适应度函数定义为

$$\min f(\mathbf{K}) = \mu \quad (22)$$

式中, $\mathbf{K} = (\varphi^r, \theta^r)$ 表示 PSO 算法的粒子, 即轨迹冗余变量 φ^r 与 θ^r 参数组合, “目标可作业度” μ 定义如式(19)~(21)所示. 由适应度函数定义式可以看出, 适应度函数值 $\mu = C$ 时表示所优选的灵巧臂作业轨迹将与空间障碍物间存有干涉现象, $\mu > 1$ ($\mu \neq C$) 时表示所优选的作业轨迹存有超出关节位置、速度或加速度运动学物理约束限位问题; $\mu < 1$ 时表示所优选的作业轨迹满足灵巧臂运动学物理约束条件, 且该轨迹与空间障碍物间不存在干涉问题, μ 值越小表示所优选的作业轨迹远离关节运动学物理约束限位的程度越大.

在定义粒子群优化算法的适应度函数后, 对待优化变量参数 φ^r 与 θ^r 进行实数编码, 并进行算法种群的随机初始化. 关于 PSO 算法的机理、基本定义和算法实现可参考文献[16]. 为减少在优化过程中粒子飞离搜索空间的可能性, 通常粒子的飞行速度限制在 $[-v_d^{\text{max}}, v_d^{\text{max}}]$ 之间, v_d^{max} 决定了粒子飞行的最大距离, 其中

$$v_d^{\text{max}} = k \times x_d^{\text{max}}, \quad 0.1 \leq k \leq 1.0 \quad (23)$$

式中, x_d^{max} 表示搜索空间第 d 维位置的上界.

3 基于“知识”库构建的灵巧臂对高速物体目标的快速连续反应作业

如上所述, 人类对高速物体目标具有快速连续反应的运动技能, 从深层次揭示是由于人在学习与训练过程中积累储存了丰富的“经验”和“知识”. 受此行为机制启发, 灵巧臂亦需经过长期的学习训练过程, 并存储相应作业环境下的“知识”数据, 才能实现对高速物体目标的快速连续反应作业.

3.1 “知识”库的构建

借鉴人体对高速物体作业需通过学习训练并积累丰富“经验知识”才能拥有快速连续反应作业的运动技能的思想, 构建灵巧臂在相应作业环境下快速连续反应作业的“知识”数据库.

在灵巧臂作业空间范围内, 对目标作业点位置 (P_x, P_y, P_z) 、要求的笛卡尔速度 (V_x, V_y, V_z) 及作业时刻 t_{f1} 七个变量在其各自区间范围内微小等间隔划分, 即对变量 P_x 在其区间划分, 形成如下长度为 h 的等差序列:

$$P_x^{\text{min}} = P_{x1} < P_{x2} < \dots < P_{x(h-1)} < P_{xh} = P_x^{\text{max}} \quad (24)$$

式中, P_x^{min} 与 P_x^{max} 分别表示变量 P_x 的下限与上限. 同样, 对其他变量 $P_y, P_z, V_x, V_y, V_z, t_{f1}$ 在各自区间内进行类似划分, 分别形成长度为 k, l, m, n, r, t 的等差序列. 由此七维作业目标空间

$$\begin{aligned} P &= \{(P_x, P_y, P_z) \mid P_x^{\text{min}} \leq P_x \leq P_x^{\text{max}}, \\ &\quad P_y^{\text{min}} \leq P_y \leq P_y^{\text{max}}, P_z^{\text{min}} \leq P_z \leq P_z^{\text{max}}\} \\ V &= \{(V_x, V_y, V_z) \mid V_x^{\text{min}} \leq V_x \leq V_x^{\text{max}}, \\ &\quad V_y^{\text{min}} \leq V_y \leq V_y^{\text{max}}, V_z^{\text{min}} \leq V_z \leq V_z^{\text{max}}\} \\ t_{f1} &= \{t_{f1} \mid t_{f1}^{\text{min}} \leq t_{f1} \leq t_{f1}^{\text{max}}\} \end{aligned} \quad (25)$$

可划分成 $h \times k \times l \times m \times n \times r \times t$ 个微小“空间表格”, 并近似认为“表格”内的高速物体目标信息用相应的作业任务点信息描述. 对每一个作业任务点采用第 2 节描述的灵巧臂轨迹参数化基于粒子群算法的优选方案进行学习, 获得一组最优的冗余变量 $(\varphi^r, \theta^r)_{\text{opt}}$ 参数组合及相应的“目标可作业度” μ 值, 以此作为灵巧臂快速连续反应作业“知识”的描述形式, 从而得到 $h \times k \times l \times m \times n \times r \times t$ 组代表整个作业空间范围内目标信息点的灵巧臂轨迹规划“知识”数据, “知识”数据按目标作业点变量分割顺序存储, 完成灵巧臂快速连续作业的“知识”数据库构建(数据库包含 $(\varphi^r, \theta^r)_{\text{opt}}$ 与 μ 值信息, 并按分割顺序存储为 $h \times k \times l \times m \times n \times r \times t$ 行、3 列结构).

根据机器人系统外部视觉单元提供的目标作业信息, 获得与实际目标作业信息点欧氏距离最小的“空间表格”, 计算该“表格”在数据库中的排序位置, 提取相应的“知识”数据, 从而实现灵巧臂对高速物体目标的快速连续反应作业.

3.2 在线轨迹规划快速性分析

灵巧臂对高速物体目标作业的实时性要求很高, 在线轨迹规划过程中如果涉及到迭代搜索的数值计算求解过程, 一方面不一定能搜索到满意的优化解, 另一方面也将无法满足作业的高实时性要求. 在相

应作业环境下通过学习训练构建出代表整个作业空间内所有目标信息点的灵巧臂作业“知识”库, 在线规划轨迹时根据外部视觉单元提供的高速物体目标信息, 从数据库中提取相应的“知识”数据, 即轨迹冗余变量 φ^r 和 θ^r 参数值, 在关节空间内规划灵巧臂的动作轨迹, 规划过程中所有的数值计算, 如灵巧臂逆运动学求解 (解析法)、正运动学计算、通过雅克比逆阵求取击球时刻关节速度、关节轨迹的插补等步骤将都是基于解析的计算过程, 不涉及数值迭代搜索, 因此计算耗费时间短且求解速度快, 将满足对高速物体目标作业快速连续反应的高实时性要求.

4 仿人机器人乒乓球对弈作业试验

机器人乒乓球对弈是展现机器人具有快速连续反应-避障作业运动技能、具有一定显示度的综合平台. 当前研制的乒乓球机器人有采用固定在球桌上水平导轨运动执行机构进行乒乓球体对弈作业^[18-20], 其有效验证了机器人高速视觉单元的性能, 但固定导轨的执行机构在一定程度上限制了其动作性能且仿人程度稍欠缺; 北京理工大学研制的“汇童”BHR 仿机器人在试验中连续对打乒乓球最高可达 110 回合, 其研制的多自由度灵巧臂乒乓球对弈作业具有更高的运动性能和友好的人机交互体验^[21-22]; 另外, 机器人制造商 Kuka (库卡) 进行了 Agilus 单臂机器人与乒乓名将 Timo Boll 之间的乒乓球人机“对决”, 也展现出其机械臂动作的快速性及敏捷性^[23]. 目前不论是科研机构还是机器人制造商, 许多专家与学者都以机器人乒乓球对弈作业作为展示平台, 开展机器人相应核心单元与功能部件技术的相关研究.

图 2 是用于乒乓球作业的仿人机器人示意图, 其灵巧臂实物模型如图 3 所示, 图 4 为灵巧臂仿真模型及所对应的关节结构模型. 仿人机器人灵巧臂乒乓球作业中设定击球时刻末端球拍的笛卡尔速度方向与其球拍背面 (或球拍正面) 垂直, 如图 5 所示. 当球体目标信息要求击球时刻球拍速度方向垂直正前时, 对同一目标作业点位置, 7-DOF 灵巧臂将存有无穷多种连杆构形满足其任务需求. 由于灵巧臂轨迹规划中存有运动学物理约束及空间障碍约束条件, 其中一些作业连杆构形无法实现, 由此灵巧臂对乒乓球体快速作业的轨迹规划问题可转变为在其约束条件内规划一条能满足其任务需求的作业轨迹优选问题.

考虑图 4 (b) 中的灵巧臂关节结构模型, 图中 \sum_w 为世界坐标系, 灵巧臂肩宽 $D = 0.14\text{ m}$, 上臂肩至肘部长度 $L1 = 0.26\text{ m}$, 下臂肘至腕部距离 $L2 = 0.26\text{ m}$, 腕部至球拍中心距离 $L3 = 0.14\text{ m}$; 设仿人机器人静态时的灵巧臂肩心 (虚点) 为世界坐标系

的原点, 仿人机器人本体 (颈部) 的位姿分别为 $p_H = (0.00, 0.14, 0.00)^T\text{ m}$, $R_H = E$ (单位阵), 根据图 2 所设计仿人机器人本体结构, 灵巧臂作业工作空间中仿人机器人本体障碍物区域可分为上、下两部分,

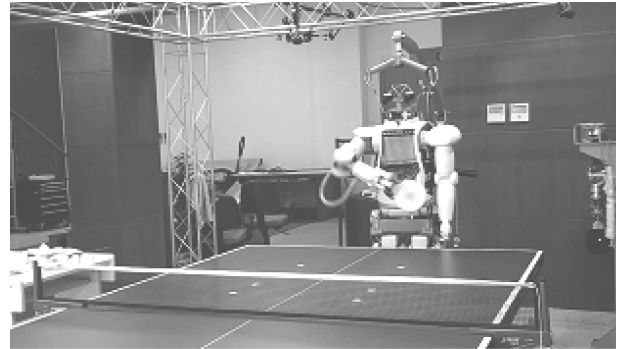


图 2 仿人机器人示意图

Fig. 2 Diagram of humanoid robot

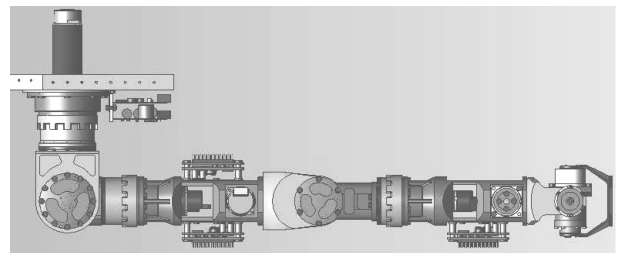
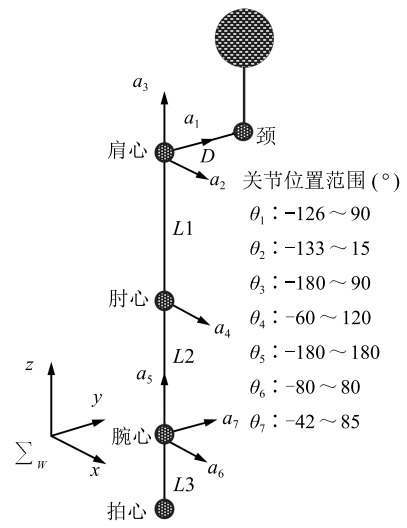


图 3 7-DOF 灵巧臂实物模型图

Fig. 3 Physical model of 7-DOF humanoid manipulator



(a) 仿真模型
(a) Simulation model



(b) 关节结构模型
(b) Joint model

图 4 7-DOF 灵巧臂仿真模型与关节结构模型

Fig. 4 Simulation model and joint model of 7-DOF humanoid manipulator

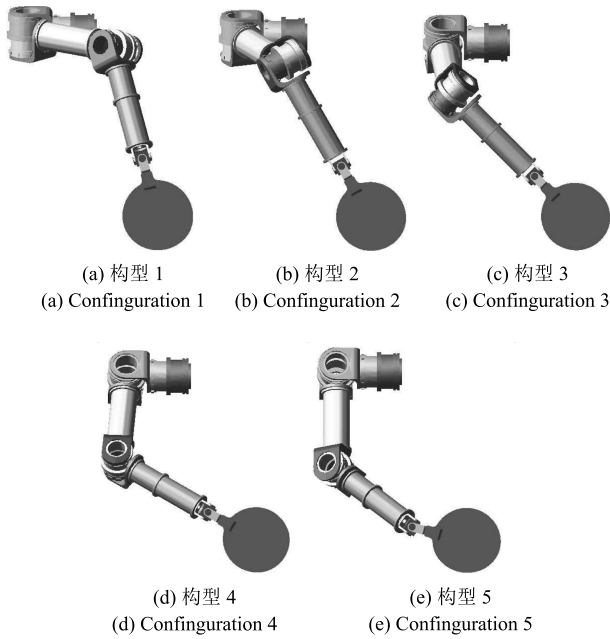


图 5 同一击球目标点 7-DOF 灵巧臂不同连杆位姿构型比较图

Fig. 5 Different configurations of 7-DOF humanoid manipulator for the same hitting target

即上身躯体部分 S_1 和腰间电池部分 S_2 , 其在以肩为原点的世界坐标系下的区域描述分别为

$$S_1 = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 0.105, 0.055 \leq y \leq 0.39, -0.4 \leq z \leq 0\} \text{ (m)} \quad (26)$$

$$S_2 = \{(x, y, z) | 0 \leq x \leq 0.12, 0.04 \leq y \leq 0.39, -0.48 \leq z \leq -0.4\} \text{ (m)} \quad (27)$$

为避免灵巧臂杆件及末端球拍在运动过程中与本体障碍物间发生干涉, 在臂杆件及球拍上共设置 9 个检测标记点, 其中球拍 5 个, 分别为球拍上沿边缘点 2 个、中间边缘点 2 个和最低边缘点, 它们在腕局部坐标系下的位置坐标分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_1 &= [-0.03, 0, -0.08] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_2 &= [0.03, 0, -0.08] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_3 &= [-0.075, 0, -0.14] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_4 &= [0.075, 0, -0.14] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_5 &= [0, 0, -0.23] \text{ (m)} \end{aligned} \quad (28)$$

腕部杆件上设置 2 个标记点, 在腕局部坐标系下位置坐标分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_6 &= [0, 0.034, -0.021] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_7 &= [-0.011, 0.031, -0.042] \text{ (m)} \end{aligned} \quad (29)$$

下臂杆件设置 2 个标记点, 在肘局部坐标系下位置坐标分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{s}_8 &= [0, 0.04, -0.20] \text{ (m)} \\ \mathbf{s}_9 &= [0, 0.04, -0.232] \text{ (m)} \end{aligned} \quad (30)$$

根据图 3 所设计的灵巧臂实际机构模型, 表 1~3 分别为 7-DOF 灵巧臂各关节角度转动范围、关节最大转速及能承受最大角加速度的极限值, 表中 $\theta_1 \sim \theta_7$ 顺序按照图 4 关节结构模型中关节轴向 $a_1 \sim a_7$ 顺序排列。

表 1 7 自由度冗余灵巧臂各关节角度范围 ($^\circ$)
Table 1 Joint range of 7-DOF humanoid manipulator ($^\circ$)

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
下限	-126	-133	-180	-60	-180	-80	-42
上限	90	15	90	120	180	80	85

表 2 7 自由度冗余灵巧臂各关节最大速度值 (rad/s)

Table 2 Maximum joint velocity of 7-DOF humanoid manipulator (rad/s)

$\dot{\theta}_1$	$\dot{\theta}_2$	$\dot{\theta}_3$	$\dot{\theta}_4$	$\dot{\theta}_5$	$\dot{\theta}_6$	$\dot{\theta}_7$
13	18	12	20	11	10	4.5

表 3 7 自由度冗余灵巧臂各关节最大加速度值 (rad/s 2)

Table 3 Maximum joint acceleration of 7-DOF humanoid manipulator (rad/s 2)

$\ddot{\theta}_1$	$\ddot{\theta}_2$	$\ddot{\theta}_3$	$\ddot{\theta}_4$	$\ddot{\theta}_5$	$\ddot{\theta}_6$	$\ddot{\theta}_7$
200	150	300	200	120	200	100

若灵巧臂在乒乓球对弈作业中静态初始点的各关节位置状态矢量设置为 $\boldsymbol{\theta}_0 = [0.0200, -0.5909, -0.8551, 1.5930, 1.5708, 0.8441, -0.5763]$, 根据灵巧臂正运动学分析^[6, 14], 可得该关节位置矢量对应于球拍拍心在世界坐标系下的位姿分别为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}_0 &= [0.19, 0.14, -0.31] \text{ (m)} \\ \mathbf{R}_0 &= R_z(0) R_y\left(-\frac{\pi}{2}\right) R_x\left(\frac{\pi}{2}\right) \end{aligned} \quad (31)$$

式中, 旋转矩阵可通过以下 Rodrigues 式求取^[14]:

$$\begin{aligned} R_{\mathbf{a}_j}(q_j) &= e^{\hat{\mathbf{a}}_j q_j} = \mathbf{E} + \hat{\mathbf{a}}_j \sin q_j + \hat{\mathbf{a}}_j^2 (1 - \cos q_j) \\ \hat{\mathbf{a}} &= \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix}^\wedge = \begin{bmatrix} 0 & -a_z & a_y \\ a_z & 0 & -a_x \\ -a_y & a_x & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (32)$$

仿人机器人乒乓球对弈中由外部视觉预测乒乓球的飞行轨迹并提供灵巧臂作业的目标信息. 为描述灵巧臂对高速物体目标作业规划轨迹参数化优选方法, 设在世界坐标系下灵巧臂末端乒乓球拍中心的作业目标信息 (不考虑球拍旋转) 为

$$\begin{cases} \mathbf{P} = [0.30, 0.20, -0.25] \text{ (m)} \\ \mathbf{V} = [2.0, 0.0, 0.0] \text{ (m/s)} \\ t_{f1} = 0.30 \text{ (s)} \end{cases} \quad (33)$$

同时, 设定灵巧臂击完球后返回至静态初始点的返回时间 $t_{f2} = 0.50 \text{ s}$. 根据 t_{f1} 作业时刻的球拍速度 \mathbf{V} , 可确定球拍拍面 (背面) 与其速度方向垂直的球拍姿态矩阵 R

$$\begin{bmatrix} \frac{V_x}{\|\mathbf{V}\|} \\ \frac{V_y}{\|\mathbf{V}\|} \\ \frac{V_z}{\|\mathbf{V}\|} \end{bmatrix} = R_z(\varphi)R_y(\gamma)R_x(\phi) \times \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中, ϕ , γ 和 φ 分别为球拍绕 x , y 和 z 轴旋转运动的滚动、俯仰和偏摆角. 设其中绕 z 轴转动的偏摆角 φ 作为球拍姿态矩阵 R 的冗余姿态角, 并假定其已知, 在此基础上通过乒乓球拍中心位姿可求得灵巧臂连杆末端的位姿分别为

$$\begin{aligned} R_A &= R \\ \mathbf{p}_A &= \mathbf{P} - R_A \times \begin{pmatrix} 0 & 0 & -L3 \end{pmatrix}^T \end{aligned} \quad (35)$$

式中, (\mathbf{p}_A, R_A) 为灵巧臂连杆末端的位姿. 根据末端位姿 (\mathbf{p}_A, R_A) , 通过解析法求取 7-DOF 灵巧臂逆运动学解, 其中逆运动学解求取过程中, 设定其第 5 关节位置 θ_5 为冗余变量并假定其已知, 推导剩余关节角变量的解析表达式. 解析法推导 7-DOF 灵巧臂逆运动学解析式的思路可参考文献 [24] (文中将 θ_3 设为冗余关节). 根据式 (7) 通过雅克比阵 J 求取乒乓球作业时刻的灵巧臂各关节速度, 并按照第 2.1 节轨迹规划策略在关节空间内插补灵巧臂作业过程与返回过程的轨迹, 保证灵巧臂运动过程中关节位置轨迹的连续可导特性.

下面采用粒子群优化方法全局优选机器人乒乓球作业轨迹参数化中的冗余变量 φ 和 θ_5 , 其中变量 φ 的搜索区间为 $\varphi \in [-\pi/2, \pi/2]$, 变量 θ_5 的搜索区间根据表 1 灵巧臂关节角度范围为 $\theta_5 \in [-\pi, \pi]$; PSO 算法中群体规模数设为 $N = 30$, 适应度函数如式 (19)~(22) 所示, 其中适应度惩罚系数 $C = 10^4$; 算法中粒子速度更新式的惯性权系数

$w = 0.50$, v_d^{\max} 速度限定式 (23) 中系数 $k = 0.50$. 经过 $\tau = 30$ 代进化后, 得最佳冗余变量参数值为 $(\varphi, \theta_5)_{\text{opt}} = (-0.4166, 1.2382)$ 弧度, 最佳粒子对应的适应度函数值, 即“目标可作业度”值 $\mu = 0.8586$, 说明对应于式 (33) 的作业目标信息, 利用本文灵巧臂动作轨迹参数化方法所优选的灵巧臂作业轨迹在其各关节位置、角速度与角加速度的运动学约束限制范围内, 且距各自关节运动学限位还留有一定裕量, 同时该轨迹在整个动作过程中与机器人本体障碍物间不发生干涉, 规划轨迹可安全作业.

将所优选的冗余变量参数 $(\varphi, \theta_5)_{\text{opt}}$ 值代入到灵巧臂动作轨迹参数化规划方法中, 可求得在 t_{f1} 作业时刻 7-DOF 灵巧臂的关节位置矢量 (由解析法^[24] 求取灵巧臂的逆运动学) 与关节速度矢量 (通过雅克比阵 J 求取) 分别为

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\theta}_f &= [-0.3184, -0.2910, -0.9349, 1.4156, \\ &\quad 1.2382, 1.0236, -0.0996] \text{ (rad)} \\ \dot{\boldsymbol{\theta}}_f &= [-6.5452, 2.7019, -0.1395, -8.9837, \\ &\quad 1.2058, 2.8730, -2.8399] \text{ (rad/s)} \end{aligned} \quad (36)$$

图 6 为对式 (33) 作业目标信息灵巧臂所优选的动作轨迹各关节位置、速度与角加速度随时间变化的轨迹曲线图, 其中前 0.3 秒为灵巧臂击球作业过程的关节轨迹, 后 0.5 秒为灵巧臂击完球后返回过程的关节轨迹曲线. 由图中可以看出, 灵巧臂在整个动作过程中关节位置曲线满足连续可导特性; 且各关节位置、速度与角加速度轨迹都在运动学约束范围内进行, 满足运动学约束条件.

图 7 为灵巧臂所优选的作业轨迹通过 Adams 运动学仿真后每间隔 100 ms 所采截的连杆位姿构形仿真图. 图 7(i) 中 $t = 800 \text{ ms}$ 为灵巧臂击完球后返回至静态初始点的连杆构形图, 它同于图 7(a) 中 $t = 0 \text{ ms}$ 时的连杆构形, 其球拍拍心符合式 (31) 位姿要求; 图 7(d) 中 $t = 300 \text{ ms}$ 为灵巧臂击球作业时刻的连杆位姿构形图, 验证了球拍中心位置及球拍姿态满足式 (33) 的位姿要求, 即球拍拍面为一种正向前姿态, 此刻球拍速度方向垂直于球拍拍面.

由以上结果可以看出, 采用灵巧臂对高速物体目标作业轨迹参数化方法所优选的动作轨迹在能满足乒乓球体目标信息作业需求的同时, 又可保证所规划轨迹满足灵巧臂运动学的机构物理约束条件, 且灵巧臂在对乒乓球作业过程中与机器人本体障碍物间不发生干涉.

在实际的乒乓球对弈作业中, 为能使仿人机器人乒乓球对弈实现灵巧臂的快速连续反应作业, 需采用上述灵巧臂动作轨迹参数化优选方法对整个作业空间进行学习训练, 并构建相应作业环境下

的“知识”数据库。以图2所示的仿人机器人乒乓球对弈为例,具体实施过程中,对目标作业点位置 (P_x, P_y, P_z) 在各自变量区间范围内以每0.02米的微小间距等间隔划分,对笛卡尔速度 (V_x, V_y, V_z) 在各自变量区间范围内以每0.10米/秒的微小间距等间隔划分,对作业时刻 t_{f1} 变量在其区间内以100ms间距划分,即图4所示中以灵巧臂肩心为原点的世界坐标系下,对作业空间

$$P = \{(P_x, P_y, P_z) | 0.28 \leq P_x \leq 0.36,$$

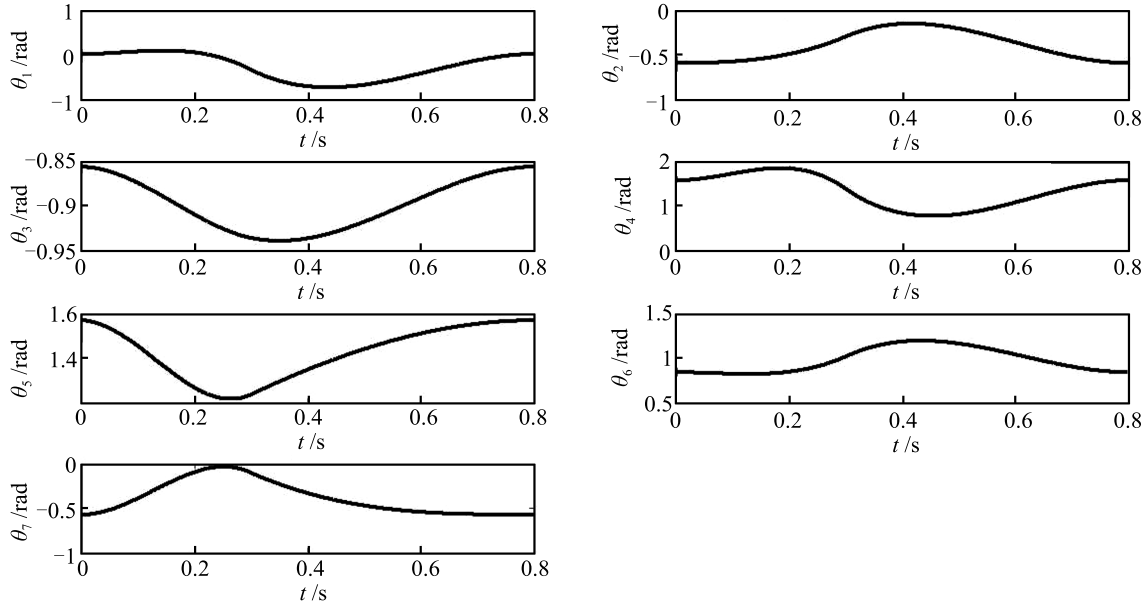
$$-0.43 \leq P_y \leq 0.43, -0.40 \leq P_z \leq -0.10\} (\text{m})$$

$$V = \{(V_x, V_y, V_z) | 1.40 \leq V_x \leq 2.10,$$

$$-0.30 \leq V_y \leq 0.30, 0.20 \leq V_z \leq 0.80\} (\text{m/s})$$

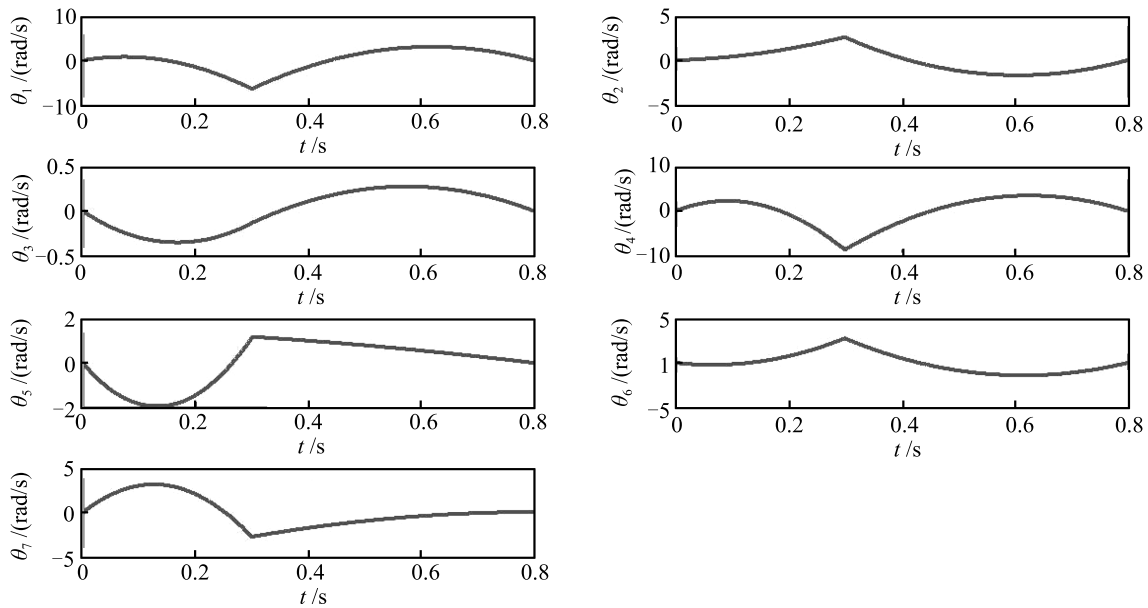
$$t_{f1} = \{t_{f1} | 300 \leq t_{f1} \leq 400\} (\text{ms}) \quad (37)$$

按上述方式等间隔划分,可将作业空间划分为 $5 \times 44 \times 16 \times 8 \times 7 \times 7 \times 2$ 共2759680个“空间表格”,实际对弈作业中近似认为“表格”内的乒乓球体任务目标用相应的作业目标信息点描述.采用本文灵巧



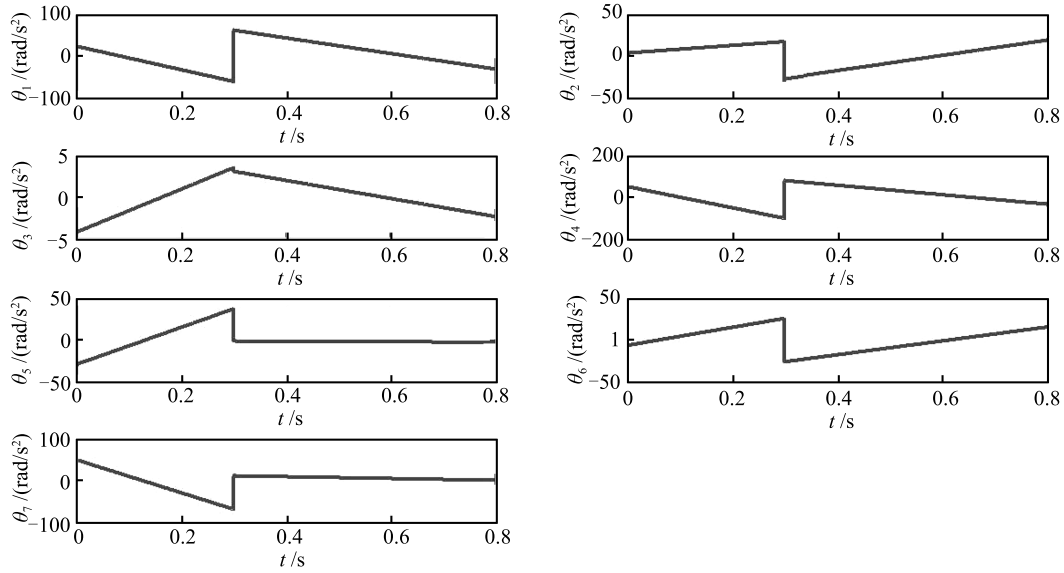
(a) 7-DOF 灵巧臂各关节位置轨迹曲线

(a) Angle versus time for each joint of 7-DOF manipulator



(b) 7-DOF 灵巧臂各关节角速度轨迹曲线

(b) Angle velocity versus time for each joint of 7-DOF manipulator



(c) 7-DOF 灵巧臂各关节角加速度轨迹曲线

(c) Angle acceleration versus time for each joint of 7-DOF manipulator

图 6 各关节角度、角速度与角加速度轨迹曲线

Fig. 6 Angle, velocity, and acceleration curve of each joint for the 7-DOF humanoid manipulator

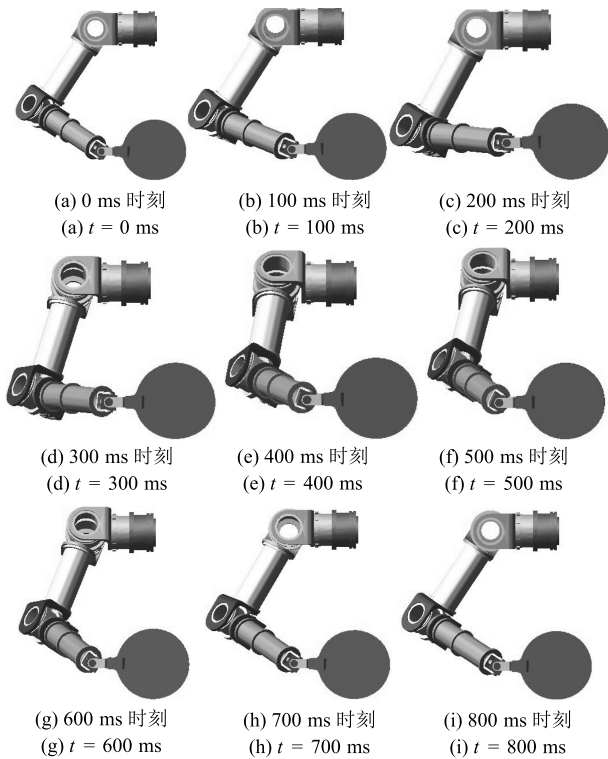


图 7 7-DOF 灵巧臂乒乓球动作轨迹连杆位姿构形图

Fig. 7 Rod configurations of certain motion trajectory of 7-DOF humanoid manipulator for ping-pong hitting

臂对高速物体目标作业轨迹参数化优选方法对此 2759680 个目标信息点进行学习, 从而得到 2759680 组代表整个作业空间所有目标信息点的灵巧臂乒乓球对弈轨迹规划的“知识”数据, 所有

“知识”数据按目标信息点变量分割顺序存储, 完成 7-DOF 灵巧臂对乒乓球快速连续反应作业的“知识”数据库的构建。

构建机器人乒乓球对弈作业的“知识”数据库完成后, 将其存储在机器人系统的“大脑”中. 在对弈过程中, 根据外部视觉提供的目标信息点从数据库中提取相应的“知识”信息, 完成灵巧臂对乒乓球体快速作业轨迹规划. 测试结果表明, 基于“知识”库构建的仿人机器人乒乓球对弈作业, 其灵巧臂轨迹规划所有数值计算在 CPU E 3400、1 GB 内存普通配置电脑下的耗时也仅为 1 ms 左右, 满足乒乓球快速连续反应作业的轨迹规划高实时性要求. 目前该 7-DOF 灵巧臂快速连续反应-避障环境下的轨迹规划方法的思想已应用到仿人机器人乒乓球对弈作业轨迹规划中, 在实际试验中灵巧臂系统关节电机采用瑞士 Maxon 电机, 驱动器采用的是 Copley 驱动器, 驱动器速度控制模式最高为 1 ms, 位置控制模式小于 2 ms, 而上位机轨迹控制的周期是 2 ms, 即关节位置控制不会影响关节运动的实时性. 乒乓球对弈试验结果获得仿人机器人与可连续对弈最高记录达 145 个回合的作业效果, 该成果已由新华网等媒体广泛报道^[25]. 图 8 给出了仿人机器人乒乓球作业时的示意图。

5 结论

人类经长期学习训练后对高速物体目标具有快速作业运动技能, 从深层次上揭示是其在长期训练过

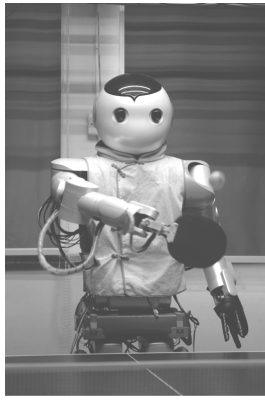


图 8 仿人机器人乒乓球作业示意图

Fig. 8 Diagram of humanoid robot for ping-pong playing

程中进行了动作轨迹的学习,并储存相应的“知识”或经验.受人体此作业行为机制启发,本文提出一种 7-DOF 灵巧臂快速连续反应-避障作业的轨迹规划方法,该方法将灵巧臂对高速物体目标作业的轨迹规划问题转化为动作轨迹的参数化优选问题,在关节空间内采用三次多项式规划灵巧臂作业过程和返回过程的关节轨迹,以“目标可作业度”指标构建适应度函数,通过粒子群方法优选作业轨迹中的两个冗余变量参数,即灵巧手冗余姿态角与灵巧臂冗余关节变量;在此基础上,采用灵巧臂对高速物体目标作业轨迹参数化优选方法对整个作业空间进行学习训练,构建相应作业环境下的“知识”数据库,实现基于“知识”库构建的灵巧臂快速连续反应作业.以乒乓球机器人试验结果表明,所规划的灵巧臂作业轨迹在能满足对乒乓球体目标作业需求的同时,又可保证灵巧臂在动作过程中满足其运动学物理约束与障碍约束条件;实际仿人机器人乒乓球作业测试也验证了本文方法的有效性.

灵巧臂在对高速物体目标快速连续反应作业时,其轨迹规划采用三次多项式的插补策略,从图 6 关节加速度轨迹曲线可以看出,在 t_{f1} 作业时刻还存在有关节角加速度不连续情形,由此将可能产生惯性力扰动;另外灵巧臂的快速动作将对仿人机器人本体也产生较大的反作用,这些因素都将影响到仿人机器人本体的平衡及稳定,同时也使灵巧臂基点位姿产生扰动,影响末端的执行精度.人类在经过长期的进化过程及后天对环境的适应后,其上肢手臂快速作业时能本能地选择一种尽可能少给身体反作用的动作轨迹.模拟人体的此行为机制,在灵巧臂轨迹参数化优选过程中除了考虑“目标可作业度”因素外,还需从动力学角度分析考虑灵巧臂高速作业对本体的反作用优化,因此灵巧臂快速连续反应作业从多目标角度优选参数化轨迹以解决仿人机器人本体的平衡控制问题值得将来进一步研究探讨.

灵巧臂在对高速物体快速连续反应中,目标信息数据靠外部视觉根据其飞行轨迹预测得到.灵巧臂能否精确地对目标进行作业有赖于外部视觉提供的预测信息的可靠性,人们希望灵巧臂在规划动作轨迹时能根据外部视觉提供的预测信息数据的变化,实时更新灵巧臂规划轨迹以改善场景变化适应性.因此,如何依托现有存储的固定目标信息场景下构建的知识库,灵巧臂能自身生成新的知识使其在线规划轨迹中适应目标场景的改变,有待将来进一步研究.

为保证灵巧臂在运动过程中作业任务顺利执行,应保证灵巧臂轨迹跟踪控制具有较高精度.然而灵巧臂的轻型结构及其谐波减速器的使用使灵巧臂具有较强的柔性特征,灵巧臂的柔性特性成为制约其关节位置高性能控制的关键因素;同时灵巧臂关节模型中还存有一些不确定扰动、摩擦及建模误差等因素,这些因素都将影响着灵巧臂关节位置的控制效果.因此柔性灵巧臂高精度的轨迹跟踪控制问题也是下一步值得研究的内容之一.

致谢

感谢浙江大学智能系统与控制研究所吴俊、刘勇、章逸丰等在研究过程中给予的指导与帮助.

References

- 1 Tian Ye, Chen Xiao-Peng, Jia Dong-Yong, Meng Fei, Huang Qiang. Design and kinematic analysis of a light weight and high stiffness manipulator for humanoid robots. *Robot*, 2011, **33**(3): 332-339
(田野, 陈晓鹏, 贾东勇, 孟非, 黄强. 仿人机器人轻型高刚度手臂设计及运动学分析. *机器人*, 2011, **33**(3): 332-339)
- 2 Edsinger A, Kemp C C. Manipulation in human environments. In: *Proceedings of the 6th IEEE - RAS International Conference on Humanoid Robots*. Genova: IEEE, 2006. 102-109
- 3 Kemp C C, Edsinger A, Torres-Jara E. Challenges for robot manipulation in human environments. *IEEE Robot and Automation Magazine*, 2007, **14**(1): 20-29
- 4 Zhang Yi-Feng, Xong Rong. Real-time vision system for a Ping-Pong robot. *Scientia Sinica Informationis*, 2012, **42**(9): 1115-1129
(章逸丰, 熊蓉. 乒乓球机器人的视觉伺服系统. *中国科学: 信息科学*, 2012, **42**(9): 1115-1129)
- 5 Zhu Qiu-Guo. *Humanoid Robot Mechanical Design and Analysis* [Master dissertation], Zhejiang University, China, 2011.
(朱秋国. 仿人机器人结构设计与分析 [硕士学位论文], 浙江大学, 中国, 2011.)
- 6 Ren Zi-Wu, Wang Zhen-Hua, Sun Li-Ning. A global harmony search algorithm and its application to inverse kinematics problem for humanoid arm. *Control Theory & Applications*, 2012, **29**(7): 867-876
(任子武, 王振华, 孙立宁. 全局和声搜索方法及其在仿人灵巧臂逆运动学求解中的应用. *控制理论与应用*, 2012, **29**(7): 867-876)

- 7 Xie Wen-Long, Su Jian-Bo. Trajectory planning for robot manipulators based on state space. *Control and Decision*, 2009, **24**(1): 49–54
(谢文龙, 苏剑波. 基于状态空间的机械臂轨迹规划. 控制与决策, 2009, **24**(1): 49–54)
- 8 Gan Ya-Hui, Dai Xian-Zhong. Optimal trajectory-planning based on genetic algorithm for multi-robot system. *Control Theory and Applications*, 2010, **27**(9): 1245–1252
(甘亚辉, 戴先中. 基于遗传算法的多机器人系统最优轨迹规划. 控制理论与应用, 2010, **27**(9): 1245–1252)
- 9 Chan T F, Dubey R V. A weighted least-norm solution based scheme for avoiding joint limits for redundant joint manipulators. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1995, **11**(2): 286–292
- 10 Papadopoulos E, Poulakakis I, Papadimitriou I. On path planning and obstacle avoidance for nonholonomic platforms with manipulators: a polynomial approach. *The International Journal of Robotics Research*, 2002, **21**(4): 367–383
- 11 Xiang J, Zhong C W, Wei W. General-weighted least-norm control for redundant manipulators. *IEEE Transactions on Robotics*, 2010, **26**(4): 660–669
- 12 Jia Qing-Xuan, Chen Gang, Sun Han-Xu, Zheng Shuang-Qi. Path planning for space manipulator to avoid obstacle based on A* algorithm. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, **46**(13): 109–115
(贾庆轩, 陈钢, 孙汉旭, 郑双奇. 基于 A* 算法的空间机械臂避障路径规划. 机械工程学报, 2010, **46**(13): 109–115)
- 13 Rolf P, Josh B [Author], Yu Wen-Wei, Chen Wei-Dong, Yang Jian-Guo, Xu Min, Jin Dan [Translator]. *Body Intelligence*. Beijing: Science Press, 2009.
(罗尔夫, Josh B [著], 俞文伟, 陈卫东, 杨建国, 许敏, 金丹 [译]. 身体的智能: 智能科学新视角. 北京: 科学出版社, 2009.)
- 14 Kajita S J [Author], Guan Yi-Sheng [Translator]. *Humanoid Robots*. Beijing: Tsinghua University Press, 2007.
(梶田秀司 [著], 管贻生 [译]. 仿人机器人. 北京: 清华大学出版社, 2007.)
- 15 Craig J J [Author], Yun Chao [Translator]. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control (3rd edition)*. Beijing: China Machine Press, 2009.
(克来格 [著], 贇超 [译]. 机器人学导论 (第 3 版). 北京: 机械工业出版社, 2009.)
- 16 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization. In: Proceedings of the 1995 IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, WA: IEEE Press, 1995. 1942–1948
- 17 Shi Y H, Eberhart R. A modified particle swarm optimizer. In: Proceedings of the 1998 IEEE World Conference on Evolutionary Computation. Anchorage, AK: IEEE Press, 1998. 69–73
- 18 Matsushima M, Hashimoto T, Takeuchi M, Miyazaki F. A learning approach to robotic table tennis. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, **21**(4): 767–771
- 19 Zhang Y H, Wei W, Yu D, Zhong C W. A tracking and predicting scheme for ping pong robot. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2011, **12**(2): 110–115
- 20 Zhang Z T. Visual Measurement and Control for Table Tennis Robot [Ph.D. dissertation], Institute of Automation, Chinese Academic of Sciences, China, 2010.
(张正涛. 乒乓球机器人视觉测量与控制 [博士学位论文], 中国科学院研究生院 (自动化研究所), 中国, 2010.)
- 21 Wang Tian-Miao, Tao Yong, Chen Yang. Research status and development trends of the service robotic technology. *Science China Information Sciences*, 2012, **42**(9): 1049–1066
(王田苗, 陶永, 陈阳. 服务机器人技术研究现状与发展趋势. 中国科学: 信息科学, 2012, **42**(9): 1049–1066)
- 22 Wang Ying-Shi, Sun Lei, Zhou Lu, Liu Jing-Tai. Online minimum-acceleration trajectory planning with the kinematic constraints. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(7): 1328–1338
- 23 Kuka-robotics. Kuka Kr Agilus VS Timo Boll [Online], available: <http://www.kuka-timoboll.com>, March 11, 2014
- 24 Ren Zi-Wu, Zhu Qiu-Guo, Xiong Rong. A joint physical constraints avoidance method for inverse kinematics problem of redundant humanoid manipulator. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, **50**(19): 58–65
(任子武, 朱秋国, 熊蓉. 冗余仿人臂避关节物理约束的一种逆运动学问题求解方法. 机械工程学报, 2014, **50**(19): 58–65)
- 25 Xinhuanet. Chinese scientists successfully developed the world's first fast continuous reaction humanoid robot [Online], available: http://news.xinhuanet.com/tech/2011-10/09/c_122134144.htm, October 9, 2011



任子武 苏州大学机器人与微系统研究中心副教授. 2008 年获得哈尔滨工业大学博士学位. 主要研究方向为计算智能理论与应用, 机器人运动控制.

E-mail: zwren@suda.edu.cn

(REN Zi-Wu Associate professor at the Robotics and Microsystems Center, Soochow University. He received his

Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2008. His research interest covers computation intelligence theory and application, robot motion control.)

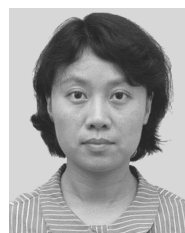


朱秋国 浙江大学智能系统与控制研究所助理研究员. 2011 年获得浙江大学硕士学位. 主要研究方向为仿人机器人, 单腿机器人.

E-mail: qgzhu@iipc.zju.edu.cn

(ZHU Qiu-Guo Research assistant at the Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University. He received his master degree from Zhejiang University in 2011.

His research interest covers humanoid robot and single-legged robot.)



熊蓉 浙江大学智能系统与控制研究所教授. 2009 年获得浙江大学博士学位. 主要研究方向为仿人机器人, 定位与地图构建. 本文通信作者.

E-mail: rxiong@iipc.zju.edu.cn

(XIONG Rong Professor at the Institute of Cyber-Systems and Control, Zhejiang University. She received her

Ph. D. degree from Zhejiang University in 2009. Her research interest covers humanoid robot, localization and mapping. Corresponding author of this paper.)