

基于简化三维线性倒立摆模型的模糊控制射门算法

范全玉¹, 谢志浩², 乔荔¹, 陶重犇², 孙云飞²

(1. 苏州科技大学 天平学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州科技大学 江苏省建筑智慧节能重点实验室, 江苏 苏州 215009)

摘要: 针对双足机器人传统射门算法存在仅适用于固定射门角度和射门姿态的问题, 提出了一种基于简化三维线性倒立摆模型的模糊控制射门算法, 用于实现多角度、多姿态的射门; 首先利用简化三维线性倒立摆模型规划出零力矩点(ZMP)轨迹和质心轨迹; 其次在双腿支撑相对双足机器人进行射门角度和姿态的调整, 同时利用贝塞尔曲线规划出游动腿的轨迹; 最后利用模糊控制算法精确地规划出双足机器人的射门轨迹; 实验部分利用 NAO 机器人仿真平台验证了文章提出射门算法的性能, 并与其它射门算法进行了比较; 最后将实物 NAO 机器人用于全过程与多角度的实际射门实验, 验证了本文提出射门的算法可行性与准确性。

关键词: 双足机器人射门; 简化三维线性倒立摆模型; 贝塞尔曲线; 模糊控制

Fuzzy Control Shooting Algorithm Based on a Simple Three-dimensional Linear Inverted Pendulum Model

Fan Tongyu¹, Xie Zhihao², Qiao Li¹, Tao Chongben², Sun Yunfei²

(1. Tianping College, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Intelligent Energy Saving in Building Industry, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract: For the problem that traditional shooting algorithms of biped robot only can be used in a certain fixed shooting angle in a fixed shooting posture, a fuzzy control shooting algorithm based on the a simple three-dimensional linear inverted pendulum is proposed. Firstly, the zero-moment (ZMP) trajectory and the center-of-mass trajectory are planned according to the simple three-dimensional linear inverted pendulum model. Secondly, a biped robot is used to adjust the direction and angle of the soccer robot in the support of the legs and plan the leg trajectory by Bezier curve simultaneously. Finally, a shot trajectory is planned based on a fuzzy control method. A simulation system is used to simulate the shooting motion of a NAO robot, and comparisons with other teams were made. Finally, a real NAO robot is used in the actual shooting experiment of the whole shooting process and multi angle shooting, and the experiment results have verified the feasibility and accuracy of the proposed algorithm.

Keywords: biped robot shooting; simple three-dimensional linear inverted pendulum model; Bezier curve; fuzzy control

0 引言

机器人足球比赛是一项带有类行为意识的竞技体育比赛。更为深层次的意义在于通过此类比赛形式, 以足球为载体, 促进包括人工智能、机器人学、传感器、自动控制 and 通讯等一系列领域的技术发展。Robocup 全球委员会提出未来将建立一支机器人足球队, 并将打败人类足球世界杯冠军队作为奋斗目标。国际机器人足球联盟制定的规则表明, 在规定比赛时间内进球最多的队伍获胜, 因此双足机器人射门成功率是比赛取胜的决定性因素。

目前, 研究人员针对射门策略开展了广泛的研究。张

彦铎等人在传统射门的基础上提出了一种射门区间模型。在为机器人规划最佳运动路径的同时寻找出最优射门点^[1]。但该方法忽略了当射门路径上存在其他机器人时, 对射门路径造成的干扰。韩家新等人提出了一种改进直冲射门方法, 相比较传统射门算法而言射门成功率有所提高^[2]。但是该算法代码的复杂度高、计算时间长, 无法保证机器人动作的实时性。宋大雷等人提出的动态椭圆射门方法从减少机器人射门运动距离入手, 提高了射门成功率^[3]。但是该方法对硬件有着苛刻的要求。梁家海、赵兵等人分别提出了利用机器学习和模糊算法这类人工智能方法来优化射门路径。虽然这类方法可以比较连贯地完成射门动作与避障^[4-5]。但是对机器人的硬件设备和计算能力要求较高, 从而容易对射门实时性造成影响。

针对上述射门方法中存在的射门精度和实时性的问题, 本文主要借助于中国机器人大赛 3D 双足机器人 Robocup 11 vs 11 仿真平台^[4], 将真实的比赛场景进行高还原度的模拟。并通过分析本球队射门机器人与本球队成员、对方球队成员的位置、行为之间的关系, 提出了一种基于简化三维倒

收稿日期:2018-01-02; 修回日期:2018-01-23。

基金项目: 国家自然科学基金项目(61401297); 江苏省高等学校自然科学研究项目(17KJB120011); 苏州市科技项目(SYG201708); 江苏省建设系统科技项目(2017ZD066); 江苏省物联网移动互联网技术工程实验室资助项目(JSWLW-2017-016)。

作者简介: 范全玉(1995-), 男, 江苏宿迁人, 硕士研究生, 主要从事仿人型机器人步态控制方向的研究。

立摆模型的模糊控制算法来提高机器人射门精度和实时性。该方法利用模糊控制方法精确地修正机器人的射门姿态和角度, 并在射门时提供较大的冲量, 从而提高射门成功率。

1 简化三维线性倒立摆模型原理

1.1 简化三维线性倒立摆模型

在双足机器人运动过程中, 如果只考虑前后和上下方向的运动而忽略左右的运动, 那么容易造成机器人失去平衡而摔倒。因此, 需要将线性倒立摆拓展到三维环境, 并对机器人进行三维线性倒立摆建模。然而, 直接分析研究双足机器人多连杆结构的过程往往较为繁琐, 因此本文等价地简化机器人为合理的数学模型, 从而便于研究^[6]。将机器人的身体视为一个质点, 腿视为无质量的支撑杆, 可以建立起一个三维线性倒立摆模型。它不需要已知机器人的参数, 如质量、质心以及每个关节的惯性, 而是通过模型导出, 从而便于计算。

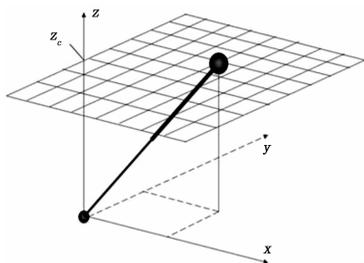


图 1 简化三维线性倒立摆模型

图 1 表示简化的三维线性倒立摆模型, 假定质心高度固定为 z_c , 重力加速度为 g , 根据三维线性倒立摆模型, 则 ZMP 轨迹 $(p_x(t), p_y(t))$ 与质心轨迹 $(x(t), y(t))$ 运动的方程为:

$$p_x(t) = x(t) - \frac{z_c}{g} \ddot{x}(t) \quad (1)$$

$$p_y(t) = y(t) - \frac{z_c}{g} \ddot{y}(t) \quad (2)$$

由公式 (1)、(2) 可以看出, 给定 ZMP 轨迹 $(p_x(t), p_y(t))$ 和质心轨迹 $(x(t), y(t))$ 就可以求得质心轨迹。再通过指定游动腿轨迹, 即能够让双足机器人进行步态行走。

1.2 双腿支撑相射门姿态调整

在实际比赛时, 射门成功率不单单取决于射门算法, 双足机器人射门前调整姿态所花费的时间也对成功率有一定影响。机器人到达目标射门点时需要调整其姿态后才能进行射门, 即将方向和速度调整到合理的数值。

在如图 2 所示的双腿支撑相中, 可以得到机器人的质心位置和加速度关系方程:

$$x_d(t) - D = \frac{z_d}{g} \ddot{x}_d(t) \quad (3)$$

其中: $z_d < 0, t \in [0, T_d]$ 。 T_d 表示行走周期, D 表

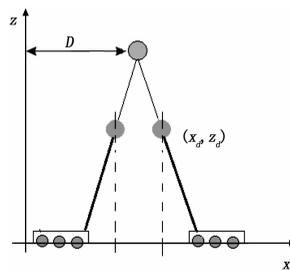


图 2 双足机器人双腿支撑相

示 x 轴上线性摆坐标。令 $\omega_d = \sqrt{\frac{-z_d}{g}}$, 由公式 (3) 得:

$$x_d(t) = (x_d(0) - D) \cos(t/\omega_d) + \dot{x}_d(0) \omega_d \sin(t/\omega_d) + D \quad (4)$$

$$\dot{x}_d(t) = \dot{x}_d(0) \cos(t/\omega_d) - \frac{x_d(0) - D}{\omega_d} \sin(t/\omega_d) \quad (5)$$

给出质点的初始方位、速度以及最终方位、速度, 即已知: $x_d(0), \dot{x}_d(0), x_d(T_d), \dot{x}_d(T_d)$, 则可得:

$$D = \frac{\dot{x}_d(0)^2 \omega_d^2 - \dot{x}_d(T_d)^2 \omega_d^2 + x_d(0)^2 - x_d(T_d)^2}{2(x_d(0) - x_d(T_d))} \quad (6)$$

$$T_d = \omega_d \arccos \frac{(x_d(T_d) - D)(x_d(0) - D) + \dot{x}_d(0) \dot{x}_d(T_d) \omega_d^2}{(x_d(0) - D)^2 + \dot{x}_d(0)^2 \omega_d^2} \quad (7)$$

根据公式 (4) ~ (7) 可知, 要想求得机器人在双腿支撑相的身体质点轨迹, 只需要知道机器人的初始方位和速度、最终方位和速度。因此根据上述方法可以实现双足机器人一步停止, 缩短了射门前的准备时间。

1.3 双足机器人单腿支撑相射门

当双足机器人开始进行踢球动作时, 就需要获得最佳的射门动作。在双足机器人抬起游动腿之前, 都需要实现将质心位置移动到该单腿支撑项的位置。本文将公式 (1) 和公式 (2) 进行变换, 从而得到公式 (8) 和公式 (9):

$$p_x = c_1 * e_4 + c_2 * e_3 + org \quad (8)$$

$$v_x = c_1 * e_4 / T_c - c_2 * e_3 / T_c \quad (9)$$

其中: $e_1 = \exp(-T_s/T_c)$, $e_2 = \exp(T_s/T_c)$, $e_3 = \exp(-t/T_c)$, $e_4 = \exp(t/T_c)$,

$$c_1 = ((x_0 - org) * e_1 - (c_1 - org)) / (e_1 - e_2),$$

$$c_2 = ((x_0 - org) * e_2 - (c - org)) / (e_2 - e_1)。$$

由于双足机器人要实现单腿支撑, 就需要对质心的运动轨迹进行规划, 同时提前规划其侧平面轨迹。从而使质心能够垂直投影于 ZMP 范围内。实际比赛时, 机器人只有通过迅速调整球与脚之间的距离, 在躲避对方拦截和避开干扰球员的同时, 实现起脚射门动作。因此, 处于单腿支撑相时, 本文将质心沿 y 轴移动的距离设置为一个变量。并通过动态地对机器人射门脚与球之间的距离进行调整, 完成快速起脚射门的动作。

2 动腿轨迹规划

本文规定射门的起始位置为 $p_s(x_s, y_s, z_s)$, 初始速

度 v_s , 初始角度为 (α_s, β_s) 。球的位置为 $p_o(x_o, y_o, z_o)$, 目标速度 v_o , 目标角度为 (α_o, β_o) , α 表示 y 轴方向上的角度, β 表示 x 轴方向上的角度。关系式如下:

$$\begin{cases} x_2 = x_s + v_s \sin \alpha_s \cos \beta_s, \\ y_2 = y_s + v_s \sin \alpha_s \cos \beta_s, \\ z_2 = z_s + v_s \sin \alpha_s, \end{cases} \quad (10)$$

同理, 根据 p_o 点得到 p_3 关系式:

$$\begin{cases} x_3 = x_o + v_o \sin \alpha_o \cos \beta_o, \\ y_3 = y_o + v_o \sin \alpha_o \cos \beta_o, \\ z_3 = z_o + v_o \cos \alpha_o. \end{cases} \quad (11)$$

设射门周期为 T , $t \in [0, T]$, 得到以 p_s 、 p_o 为起始点的 3 次贝塞尔曲线方程为:

$$\begin{cases} x_s = x_1 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^3 + 3x_2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \frac{t}{T} + \\ \quad 3x_3 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 + x_4 \left(\frac{t}{T}\right)^3 \\ y_s = y_1 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^3 + 3y_2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \frac{t}{T} + \\ \quad 3y_3 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 + y_4 \left(\frac{t}{T}\right)^3 \\ z_s = z_1 \left(1 - \frac{t}{T}\right)^3 + 3z_2 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \frac{t}{T} + \\ \quad 3z_3 \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot \left(\frac{t}{T}\right)^2 + z_4 \left(\frac{t}{T}\right)^3 \end{cases} \quad (12)$$

其中: $0 \leq t \leq T$, $v_s \geq 0$, $v_o \geq 0$ 。

这样就可以根据双足机器人的初始位置和球的坐标位置为起点和终点做一条平滑的曲线, 作为双足机器人的游动腿轨迹。

3 模糊控制射门算法

3.1 模糊控制射门算法原理

传统曲线射门的思路是让双足机器人沿着一段圆弧的轨迹运动到足球所在的位置, 然后继续带球运动到目标射门点之后将球踢出^[7]。此类算法虽然优于传统直线射门算法, 但是当机器人离足球与目标射门点所成直线的距离较近时, 圆弧很大, 因此射门效果不够理想。基于上述原因, 本文提出了一种模糊控制射门算法。利用模糊规则让机器人用较短的时间走直线取球, 接着走一段圆弧轨迹, 把方向调整准确后踢球射门。具体实现步骤:

步骤 1: 以足球所在点 B 与目标射门点 G 所成的直线为切线, 以 r 为半径作圆。 r 为可以调整的常数且满足 $r > (D + \sqrt{2}L)/2$ 。其中, D 为足球的直径, L 为机器人模型的长度。通过计算可以发现满足条件的圆有两个, 本文选择圆心与机器人所成线段较短的圆;

步骤 2: 从机器人 R 到圆 O 的切线也有两条, 选择当机器人到达 B 点的方向与由 B 指向 G 相同的那条为切线。如图 5 中选择点切点 P 所在的切线, 此时切线方向角 $\theta = \beta - \alpha$ 。其中, β 为 RP 的方向角, $\alpha = \arcsin(r/d)$, d 为线段

OR 的长度。由此可以求出切线 RP 的方向角 θ ;

步骤 3: 让机器人沿直线 RP 运动到 P 点, 然后沿曲线轨迹射门。

3.2 射门方向修正

以上只解决了双足机器人运动时的路径规划与射门方向问题, 没有将机器人初始方向对射门成功率的影响纳入讨论。因为机器人的初始方向是任意的, 并不会默认与切线方向 θ 相同, 所以会产生误差。因此本文引入模糊控制方法来动态调整机器人的初始方向。

本文提出的模糊规则表述如下:

当左右腿中任意一个的速度达到设定值之后不再增加, 同时另一条腿的速度也增加到设定值不再改变。如果机器人当前的方向角与本文期望的切线方向角的误差到达一定的值, 则调整机器人腿的速度, 使它们产生速度差以调整角度。其控制函数 V_M 和 V_m 表达式如下:

$$V_M = a_1 d + a_2 \delta + V_c \quad (13)$$

$$V_m = a_1 d - a_2 \delta + V_c \quad (14)$$

V_M 表示游动腿的速度, V_m 表示支撑腿速度, V_c 为常数, a_1, a_2 为常数, 数值根据实际情况修改。

机器人走直线时伴随着周期性的方向调整, 当方向角与切线方向角一致时, 让机器人走直线运动到 P 点后, 最后让机器人沿曲线轨迹完成射门操作。在仿真与实际测试的时候, 可以只通过计算机器和圆心的距离来判定其是否运动到 P 点。

4 实验与分析

为了验证本文提出射门算法的性能, 先将 NAO 机器人为原型建立三维线性倒立摆模型, 然后再将算法写入 RoboCup 11vs11 仿真平台。在 RoboCup 3D 仿真平台中完全模拟真实比赛的场景, 对本文提出的模糊控制射门算法进行抬腿、射门、持球、持球射门等项目的测试, 如图 3 所示。同时要求机器人在持球行走和射门的过程中自我调整方向, 并实现快速地起脚射门。仿真实验表明, 本文的算法射门成功率高于其他射门算法。

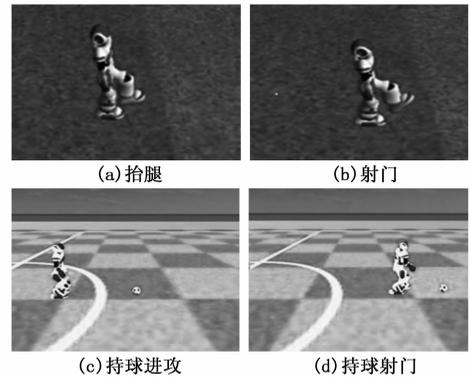


图 3 双足机器人仿真射门过程

传统射门方法通常采用直线方程生成 ZMP 轨迹^[8]。本

文为了在多角度和任意姿态下实现最优射门动作, 分别将直线方程、贝塞尔曲线生成的游动腿 ZMP 轨迹用于本文提出的基于模糊控制算法的双足机器人射门动作轨迹, 并分别优化获得如图 4 所示的适应度函数值。

从图 4 中不难发现直线方程的 ZMP 轨迹经过迭代 48 次后收敛, 而塞尔曲线的 ZMP 轨迹的适应度函数经过迭次 78 次后才趋于稳定。由此可见 ZMP 轨迹为直线方程时收敛过早, 并且其适应度函数值最终也大于 ZMP 轨迹为塞尔曲线的情况。最后将两种方法优化后的参数分别应用于仿真射门平台进行射门测试对比。测试结果也验证了本文游动腿采用 ZMP 轨迹是塞尔曲线时, 射门准确性更高、用时也更短。

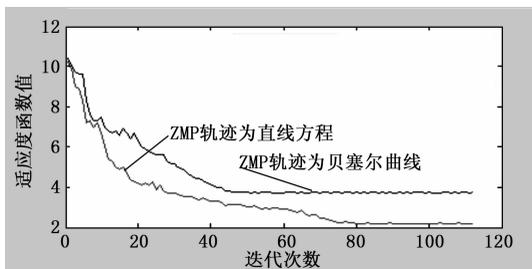


图 4 直线方程、贝塞尔曲线生成 ZMP 轨迹优化效果对比

图 5 为机器人射门全过程, 采用 Robocup 实际比赛所用的 NAO 机器人, 将程序输入开发接口进行真实环境测试。测试过程分为初始化的起步阶段, 比赛时的正常行走, 按照本文算法射门阶段以及最后的进球过程。

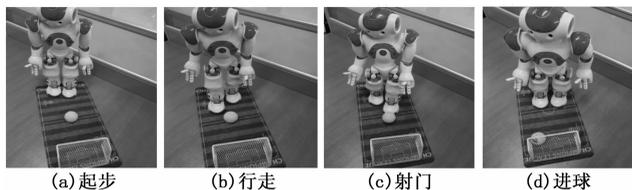


图 5 NAO 机器人全过程射门

如图 6 所示, 在 2000 次射门实验中, 随机算法失球 512 次, 被拦截 236 次, 被扑出 435 次; 基本算法失球 235 次, 被拦截 145 次; 切圆弧轨迹算法失球 156 次, 被拦截 81 次, 被扑出 167 次; 本文算法在 45° 射门时失球 133 次, 被拦截 67 次, 被扑出 136 次。从图中可以看出本文算法大幅优于另外几种算法, 而且采用本算法比赛的足球队所发生的失球、被拦截、被扑出的数量最少。

此外, 本文还从射门平均距离、平均调整时间、平均射门时间 3 个方面对比了 4 种算法, 如表 1 所示。统计结果表明, 本文提出的射门算法在平均调整时间和平均射门时间这两项性能上都优于其他 3 种算法。并且在射门距离上也接近切圆弧轨迹射门法, 满足了比赛中射门距离越远越好的需求。

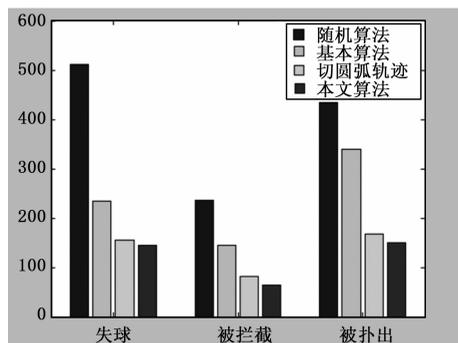


图 6 4 种算法射门实验比较结果

表 1 RoboCup3D 平台中的 4 种射门算法性能对比

射门方法	射门距离/m	调整时间/s	射门时间/s
基本射门法	6.18	1.26	1.73
随机射门法	8.65	1.23	1.15
切圆弧轨迹法	9.37	1.64	1.61
本文算法	9.12	1.17	1.09

5 结束语

本文提出的基于三维线性倒立摆的改进圆弧射门算法最大的亮点在于改善了机器人按照既定轨迹运动前初始方向调整的问题。在实现机器人运动路径的平滑过渡的同时提高了运动的冲量, 可以大大提高射门成功率, 体现了本算法的可行性和优越性。此外, 苏州科技大学 STU 机器人足球队采用本文算法后, 在 2017 年江苏省大学生机器人比赛足球仿真组取得了亚军一等奖的好成绩。

参考文献:

- [1] 张彦铎, 王朝亮, 闵 锋, 等. 仿真机器人足球比赛中的射门策略 [J]. 武汉工程大学学报, 2012, 34 (10): 62-65.
- [2] 韩家新, 刘彦伯, 张旭华, 等. 改进的双足机器人直冲射门算法 [J]. 计算机工程与设计, 2013, 34 (11): 4077-4081.
- [3] 宋大雷, 孟宪强, 宋朝晖, 等. 基于动态椭圆曲线的双足机器人射门路径规划算法 [J]. 计算机应用, 2009, 29 (6): 1544-1546.
- [4] 王险峰, 赵 杰. 模糊 CMAC 网络的双足机器人跑步轨迹规划 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38 (2): 253-257.
- [5] 刘成菊, 韩俊强, 安 康. 基于改进 RRT 算法的 RoboCup 机器人动态路径规划 [J]. 机器人, 2017, 39 (1): 56-63.
- [6] 李春光, 刘国栋. 基于三质心模型的类人机器人射门算法 [J]. 计算机应用, 2014, 34 (6) 1657-1660.
- [7] 张秋实, 张天航, 张雨泽, 等. 基于动态碰撞时间预测的机器人区域射门算法 [J]. 东北电力大学学报, 2012 (4): 20-24.
- [8] 柳在鑫, 王进戈, 王 强, 等. 利用渐开线的双足机器人射门算法研究 [J]. 西安交通大学学报, 2009, 43 (1): 95-98.