

文章编号: 1002-0446(2005)01-0078-04

足球机器人系统仿真中的碰撞研究*

薛方正, 冯挺, 徐心和

(东北大学人工智能与机器人研究所, 辽宁 沈阳 110004)

摘要: 总结了近年来足球机器人碰撞的研究成果, 指出当前一些碰撞模型的不足, 进而指出了数字仿真系统的离散特性对足球机器人的碰撞性质的影响. 详细地分析了足球机器人的运动碰撞情况. 最后提出了足球机器人的碰撞模型并给出了具体的算法. 实践证明该算法是有效的.

关键词: 足球机器人; 碰撞; 仿真系统; 冲量模型

中图分类号: TP24 文献标识码: B

Research on Collisions in Soccer Robot System Simulation

XUE Fang-zheng, FENG Ting, XU Xin-he

(Institute of AI & Robotics, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: This paper summarizes the recent research results on soccer robot collision, and points out some disadvantages and errors caused by the discrete characteristics of digital simulation system. The moving and collision states of soccer robots are analyzed in detail and a collision model for soccer robots as well as the detailed algorithm to solve the collision problem are given. Practice proves the effectiveness of the algorithm.

Key words: soccer robot; collision; simulation system; impulse model

1 引言 (Introduction)

在建立足球机器人仿真系统的过程中, 运动物体的运动模型尤其是碰撞模型的建立是核心所在. 目前有关这方面的工作有很多是给出了实体的运动学模型和近似的求解方法^[1, 2], 有些研究将碰撞模型简化为对心弹性碰撞, 或进行随机处理^[3, 4], 或者是将机器人简化为圆形^[5]. 文献[6]使用刚体偏心碰撞模型来解决足球机器人系统中物体的两两碰撞问题. 但是, 很多碰撞模型的设计者都没有注意到这样的事实: 数字仿真系统的离散特性在很大程度上改变了碰撞模型的性质. 因此这些模型与实际情况有很大的出入, 不能很好地模仿实际系统, 因而也很难达到利用仿真系统研究实际系统的目的.

本文将等效弹簧模型和冲量模型相结合, 应用状态分析方法成功地解决了足球机器人仿真系统中的实体碰撞问题.

2 实体的运动学模型以及碰撞模型 (Kinematics and collision models of objects)

2.1 球的模型

假设小球的位置为 $M(x, y)$, 质心速度为 v_{bc} , 运动方向与 x 轴的夹角为 α , 小球在场地上做匀减速滚动, 其运动模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = v_{bc} \cos \alpha \\ \dot{y} = v_{bc} \sin \alpha \\ \dot{v}_{bc} = -\delta C \end{cases} \quad (1)$$

其中, v_{bc} 为球心速度; $C = mgr/J_b$ 为常数; m 、 r 、 J_b 分别为小球的质量、球半径和对球心的转动惯量; δ 为球的滚动摩擦系数; g 为重力加速度.

2.2 机器人运动学模型

足球机器人通常采用固定轮子的双轮驱动结构. 假定轮子在地面沿直线作纯滚动运动, 即每瞬时与地面接触点的速度等于零, 则机器人的运动模型为:

* 基金项目: 国家 863 计划项目(2001 AA422270).

收稿日期: 2004-08-15

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

其中 v_c 、 ω 为机器人质心的瞬时线速度和角速度； x_c 与 y_c 分别是机器人质心的横坐标和纵坐标； θ 为机器人的正面朝向角(图 1)。

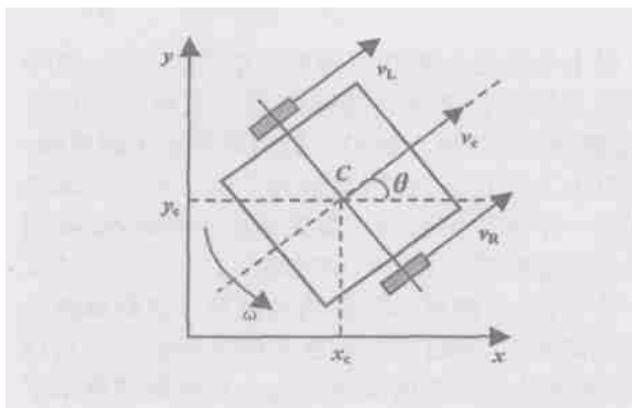


图 1 机器人运动学模型
Fig.1 Kinematics model of robot

2.3 碰撞模型

文献[6]认为,足球机器人系统中的实体之间的碰撞问题可以用刚体偏心碰撞模型来解决.根据该模型,有 3 个公式可以使用。

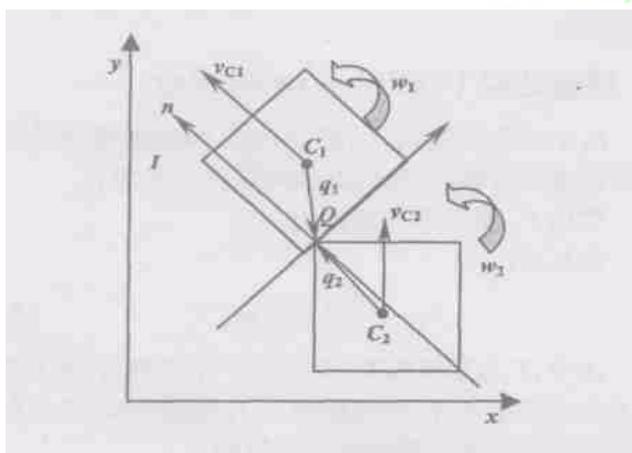


图 2 两机器人碰撞
Fig.2 Collision of two robots

以机器人与机器人碰撞为例(图 2),第一个公式由动量定理得到:

$$m(v'_c - v_c) = I \quad (3)$$

其中 m 为机器人质量； v_c 和 v'_c 分别是碰撞前后机器人质心速度； I 为机器人的冲量。

第二个公式由动量矩定理得到:

$$J(\omega' - \omega) = q_1 \times I \quad (4)$$

其中 J 为机器人的转动惯量； ω 和 ω' 分别是碰撞前后机器人的角速度； q_1 为机器人质心指向碰撞点的矢量.第三个公式由刚体碰撞的恢复系数得到.该系数只与刚体材质有关,通过实验得到。

第三个公式为:

$$(v'_{Q2} - v'_{Q1})n_0 = k(v_{Q2} - v_{Q1})n_0 \quad (5)$$

其中 v_{Q1} 和 v'_{Q1} 分别表示碰撞前后机器人 1 上的碰撞点 Q 的运动速度在冲量 I 方向上的分量； v_{Q2} 和 v'_{Q2} 分别表示碰撞前后机器人 2 上的碰撞点 Q 的运动速度在冲量 I 方向上的分量； n_0 表示冲量 I 方向上的单位向量； k 为恢复系数。

机器人与墙的碰撞被认为是两个机器人碰撞中一个机器人固定不动的特例.机器人与球的碰撞也被认为是两机器人碰撞的一个特例.碰撞发生时,冲量通过球心,对球的冲量矩为 0,碰撞前后球的角速度不变。

3 足球机器人碰撞分析 (Collision analysis on soccer robots)

对碰撞问题的研究方法目前主要有两大类^[7],一类是动量平衡法,另一类是等效弹簧阻尼模型.前者认为碰撞是在瞬间完成的,后者则认为碰撞经历了一个过程.当前足球机器人碰撞模型的研究都是按照第一类方法进行的.但是在分析阶段,我们需要精细研究碰撞过程,所以我们采用第二类方法.在足球机器人仿真系统中,碰撞的检测和处理都是离散的.也就是说,系统只能每隔 T 时间来做一次处理.以赛场上的两机器人的运行状态为例,在这个 T 时间段里,可能出现的状态有很多,大致可表述如下:

状态 1: 无碰撞状态.此时,各机器人下一时刻的位姿可以通过机器人运动模型(2)来获得。

状态 2: 碰撞打滑状态.此时机器人受力如图 3 所示.图中横坐标为时间 t ,纵坐标为机器人受力 f .图中直线 L 为机器人因为打滑受到的滑动摩擦力.滑动摩擦力的产生有两个原因:一个是轮子的驱动,另一个是碰撞.曲线 S 为受到另外一个机器人碰撞所得的碰撞力,该力的大小与机器人所受的冲量大小有关.在碰撞打滑状态,碰撞力比较大,使得在 $0 \sim T$ 时间段内机器人一直处于打滑状态.图 3 中摩擦力曲线为示意曲线,只能近似地(并不确切的)反映摩擦力的大小和变化,文中以下各状态如无特殊说明摩擦力曲线都是示意曲线。

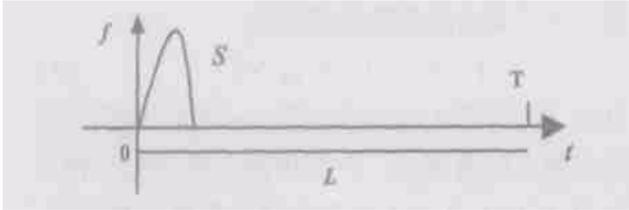


图 3 碰撞打滑状态受力示意图

Fig.3 Force analysis in the skid state

状态 3 : 打滑停止状态. 该状态下机器人受力如图 4 所示. 图中直线 L_1 和 L_2 分别为机器人受到的滑动摩擦力和静摩擦力, 曲线 S 为受到另外一个机器人碰撞所得的碰撞力. 该状态下碰撞力使得机器人发生了滑动, 但是在 T 时刻内滑动停止了. 此后滑动摩擦力变成了静摩擦力. 静摩擦力是由轮子的驱动产生的. 该状态比较复杂, 需要考虑滑动摩擦力、碰撞力和静摩擦力等多种力的作用.

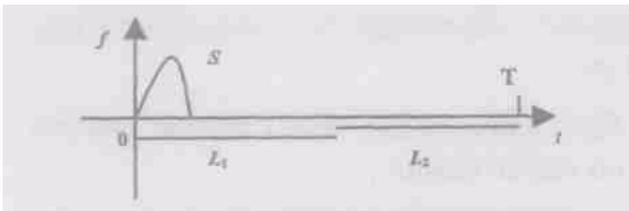


图 4 打滑停止状态受力示意图

Fig.4 Force analysis in the skid and stop state

状态 4 : 多次碰撞状态. 该状态下机器人受力如图 5 所示. 图中曲线 S_i 为碰撞力曲线, L_i 为摩擦力曲线. 该状态下碰撞力较小, 摩擦力对机器人的影响很大. 机器人在一次碰撞后位姿改变量很小, 在摩擦力的作用下, 机器人又会发生二次碰撞甚至多次碰撞.

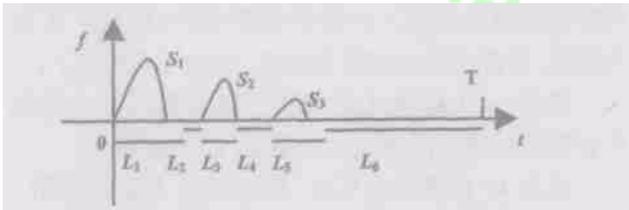


图 5 多次碰撞状态受力示意图

Fig.5 Force analysis in the multi-collision state

状态 5 : 粘连状态. 该状态下机器人受力如图 6 所示. 图中曲线 S 为碰撞力曲线, L 为摩擦力曲线. 该状态下, 碰撞力很小而且作用时间很长. 该状态有两个子状态: 一个状态是机器人推着另一个机器人移动, 这时机器人受到的摩擦力为静摩擦力; 还有一个状态是机器人被另一个机器人推动, 此时机器人受到的摩擦力为滑动摩擦力.

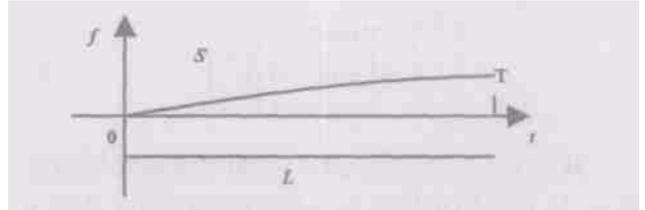


图 6 粘连状态受力示意图

Fig.6 Force analysis in the conglutination state

以上的状态分析并不是严格的受力分析, 实际上机器人的左右轮受到的摩擦力情况往往是相异的. 这些状态分析对于我们分析问题有很大的帮助. 通过以上五种状态, 我们大致地了解了两个足球机器人在一个采样周期内可能发生的种种情况. 我们可以清楚地看到, 文献[6]的处理方法只适合状态 2 的一个特例: 即碰撞力的影响大到可以忽略摩擦力的影响的程度. 通过对这些状态的分析我们还可以知道, 数字仿真系统的离散特性为碰撞模型带来了一些新的问题:

问题 1 : 虽然碰撞力也许很大, 大到在碰撞发生的时间内可以忽略对其它力的影响, 但是碰撞力的作用时间很短, 而摩擦力却充斥在整个采样周期 T 内. 这样, 含摩擦碰撞模型将代替无摩擦碰撞模型以满足系统的需要.

问题 2 : 只考虑一次碰撞往往不能很好地满足系统需要. 随着采样周期 T 的增大, 也许问题会越来越复杂.

4 碰撞处理 (Collision processing)

由于问题的复杂性, 想要面面俱到地考虑该碰撞问题是不可能的. 我们对该问题作一些简化.

简化 1 : 引入平均摩擦力.

定义为:

$$f = \left(\int_0^T f(t) dt \right) / T \quad (5)$$

式中, T 为采样周期, $f(t)$ 为实际摩擦力. 平均摩擦力分为两个部分: 轮向摩擦力 f_v 和轴向摩擦力 f_z , 且平均摩擦力的计算遵循以下原则:

(1) 轮向静摩擦力 $f_v = g(\omega_{command})$, $\omega_{command}$ 为速度指令. 近似认为在碰撞周期内机器人轮速减为 0, 如果机器人的速度闭环采用的是 P 算法, 则 g 为一个线性函数.

2) 若轮向摩擦力 $f_v > f_{max}$ (f_{max} 为最大静摩擦力), 则认为 $f_v = f_{max}$.

简化 2 : 机器人在一个采样周期内发生二次碰撞时, 机器人的相对速度和碰撞力往往会很小, 也就是

说两机器人的相对运动的趋势不明显,所以认为这时两机器人粘连.

简化 3:碰撞过程中机器人在轴向没有位移.

经过简化后,状态 2、3 符合含摩擦碰撞模型,状态 4、5 可作粘连状态处理.碰撞过程中机器人受力如图 7 所示.我们将无摩擦碰撞模型改为含摩擦碰撞模型,修正公式(3)、(4)为:

$$m(\dot{v}_c - v_c) = I + (f_l + f_r + f_z) T \quad (6)$$

$$J(\dot{\omega} - \omega) = q_l \times I + (q_l \times f_l + q_r \times f_r) T \quad (7)$$

其中, f_l 和 f_r 分别为左右轮上的摩擦力; T 为采样周期, q_l 和 q_r 分别表示机器人质心指向左轮和右轮的向量.

根据简化 3 得到一个新公式:

$$(I + (f_l + f_r + f_z) T) n_z = 0 \quad (8)$$

其中 n_z 为机器人轴向单位向量.该公式表示机器人在轴向的速度为 0.

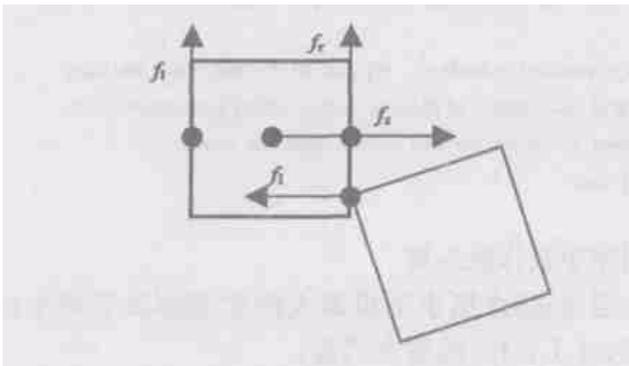


图 7 机器人受力分析

Fig.7 Force analysis of robots

我们的算法是:

算法 1:两两碰撞处理

1) 如果置粘连标志 ConnectedSymbol = TRUE, 转 4);

2) 由式(3)~(5)得出冲量和两碰撞物体的碰撞后各自速度;

3) 将计算好的速度代替原先的速度,使用碰撞检测算法看看是否会发生二次碰撞,如有,则将公式(5)的恢复系数 k 清零且置粘连标志 ConnectedSymbol = TRUE(粘连标志应在无碰撞时置 0);

4) 粘连处理:由公式(6)~(8)、(5)求解得到下周各机器人速度及其受到的碰撞冲量.

以上的分析和处理是针对两机器人的,至于机器人与球、机器人与墙的碰撞,我们采用文献[6]的

思路将其看成是两机器人碰撞的特例.在处理多机器人碰撞问题时,采用如下算法.

算法 2:多机器人碰撞处理

1) 由算法 1 得到物体受到的各个碰撞力冲量以及它们的轴向力;

2) 通过动量定理和动量矩定理计算速度:

$$(f_l T + f_r T + f_z T + \sum_i I_i) = m(\dot{v} - v) \quad (9)$$

$$(q_l \times f_l + q_r \times f_r) T + \sum_i (q_{li} \times I_i) = J(\dot{\omega} - \omega) \quad (10)$$

5 结论 (Conclusion)

本文分析了足球机器人碰撞的各种状态,总结了文献中的一些碰撞处理方法,指出仿真系统的采样周期对碰撞模型的影响,从而进一步指出足球机器人碰撞问题是一类含摩擦的碰撞问题,并提出了解决该问题的方法.上述方法在足球机器人仿真系统 NeuSim VI.0 得到应用,实践证明该方法能够比较好地解决足球机器人碰撞问题.

参考文献 (References)

- [1] Oller A, Garcia R. Cooperation among robots by means of multi-agent decision making framework under Matlab/simulink [A]. Proceedings of the Micro2 Robot World Cup Soccer Tournament [C]. Taejon: KAIST, 1997. 37 - 45.
- [2] 洪炳焰,薄喜柱.机器人足球比赛策略仿真系统的开发[J]. 计算机应用研究, 1999, 16(3): 65 - 68.
- [3] Coradaechi S, Malec J. How to make a challenging AI course enjoyable using the RoboCup soccer simulation system [A]. RoboCup298: Robot Soccer World Cup II [C]. Berlin: Springer Verlag, 1999. 123 - 128.
- [4] Andre D, Corten E, Dorer K, et al. RoboCup: soccer server manual [EB/OL]. <http://ci.etl.go.jp/~noda/soccer/server/Documents.html>, 2000-08-10.
- [5] Yang J, Kim J. Sliding mode motion control of nonholonomic mobile robots [J]. IEEE Control Systems Magazine, 1999, 19(2): 15 - 23.
- [6] 张春晖,侯祥林,徐心和.足球机器人系统仿真中的数学模型[J]. 东北大学学报,(自然科学版), 2001, 22(5): 493 - 496.
- [7] 刘才山,陈滨.多柔体系统碰撞动力学研究综述[J]. 力学进展, 2000, 30(1): 7 - 14.

作者简介:

薛方正 (1977-),男,博士研究生.研究领域:智能机器人.
冯挺 (1980-),男,硕士研究生.研究领域:智能机器人.
徐心和 (1940-),男,博士生导师.研究领域:智能机器人.