

文章编号: 1002-0446(2008)03-0231-07

仿人机器人足迹规划建模及算法实现

夏泽洋, 陈 愚

(清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

摘 要: 足迹规划是仿人机器人运动规划领域的一个新思想. 本文建立了仿人机器人足迹规划的模型, 并通过构建启发式成本函数, 利用 A^* 算法予以实现. 针对复杂多障碍物环境, 特别提出了基于可变落地足迹数量的复合足迹转换模型的方法. 仿真实验证明了规划模型和算法的有效性和完备性, 规划效果达到仿人机器人在线运动规划的要求. 同时, 数值实验也证明了在复杂多障碍物环境下复合足迹转换模型的必要性和优越性.

关键词: 仿人机器人; 运动规划; 足迹规划; 启发式搜索; 足迹转换

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Modeling and Algorithm Realization of Footstep
Planning for Humanoid Robots

XIA Ze-yang CHEN Ken

(Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Footstep planning is a new idea of motion planning for humanoid robots. The model of humanoid footstep planning is presented in this paper and it is implemented by A^* search algorithm based on the heuristic cost function. Specifically for planning in complex multi-obstacle environments, a compound footstep transition model based on alterable potential footstep placements is proposed. Simulation experiments verify the validity and completeness of the model and the planning algorithm, and the planning results satisfy the requirements of online humanoid motion planning. Also, numerical experiments verify the good performance of the compound footstep transition model implemented in planning in complex multi-obstacle environments.

Keywords: humanoid robot; motion planning; footstep planning; heuristic search; footstep transition

1 引言 (Introduction)

仿人机器人的运动规划主要包含三个层面的内容: 路径规划、步态规划和作业规划^[1,2]. 步态规划是仿人机器人的底层运动规划任务, 其结果表征为机器人各自由度的运动轨迹^[3], 其目的是在已经规划的足迹系列基础上实现机器人的最终移动任务. 由于整体研究水平的局限, 仿人机器人的任务作业目前仅限于一些简单的运动, 如上肢的目标抓取及移动、简单的与人协作作业等, 它是仿人机器人的终端运动规划内容^[4].

路径规划在传统轮式移动机器人领域已经得到了较为深入的研究和应用^[5]. 但是由于仿人机器人具有高自由度的本体结构和复杂的运动学及动力学模

型, 因此将轮式移动机器人的路径规划方法应用于仿人机器人并不能体现出仿人机器人对于复杂非结构化地形的适应能力和运动的灵活性^[2], 例如: 仿人机器人能够跨越一定高度的障碍物, 甚至在某些障碍物上步行.

仿人机器人的路径规划是全局环境下的运动规划. 目前已有的规划方法大部分是基于传感信息融合技术, 主要面向于解决动态环境中的避障问题. 它用有效感知空间内的局部最优解映射全局最优解, 大大降低了规划空间的复杂度, 在很多动态环境下得到了很好的应用^[6-8]. 但是这种方法不考虑全局环境信息, 其规划容易陷入局部死区, 完备性很差^[9], 并不是一种严格意义上的全局路径规划方法; 同时, 规划出来的路径使得对应的底层步态的规划计算量很大, 使

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2006AA04Z253); 国家自然科学基金资助项目 (50575119).

收稿日期: 2007-09-09

得机器人整体的实时运动规划受到了很大限制^[10]。

足迹规划是一种基于全局环境信息的、用于仿人机器人的路径规划方法,其思想来源于计算机虚拟现实中有腿动物的运动规划^[11-13],近年来由 Kuffner 等^[11-13]将其引入到仿人机器人领域。这种规划方法以全局环境信息为着眼点,同时它以有限组预规划好的轨迹代替底层的在线步态规划,因此它有效地解决了基于传感信息融合的运动规划方法面临的完备性问题和对底层步态在线规划的依赖性问题。

Kuffner 等提出了足迹规划方法的概念模型,但仅仅在一些简单环境中予以实现。Kuffner 等在研究中通常使用多边形来描述障碍物,由于“多边形—多边形”交集检测的计算复杂度非常高^[14],规划过程效率很低,同时在搜索算法设计上面还有大量的改进空间,因此目前的理论结果并不十分良好。例如:在一个有 20 个障碍物的房间里面,获得一个 18 步的足迹,需要搜索 8.3×10^5 个节点,耗时 4 s^[1]。

针对上述足迹规划研究中的问题,本文建立了机器人足迹规划模型,并构建了启发式成本函数,通过 A* 搜索算法予以实现,在各类典型规划环境下取得了良好的规划效果。特别是在复杂多障碍物环境中,使用可变落地足迹数量的复合足迹转换模型实现了该类环境下的高效搜索。

2 仿人机器人足迹规划模型 (Model of footstep planning for humanoid robots)

仿人机器人足迹规划的核心思想是:在一组“支撑足迹—落地足迹”序列(即足迹转换模型)的基础上,构造以初始位姿为根节点的搜索树;通过环境地图和机器人模型及位姿信息完成碰撞检测;然后构建节点成本函数,使用启发式搜索(heuristic search)算法规划出从原始足迹位置到目标区域的一个离散足迹序列;最后以预规划好的姿态转换轨迹来实现机器人在上述足迹序列上的姿态转换,完成机器人的运动规划任务^[4]。足迹规划器的模型如图 1 所示。

本文中模型及算法的物理参数均参照清华大学仿人机器人样机 THB P-II^[5]。

机器人模型 机器人使用质量块力学模型进行描述(见图 2),其姿态描述向量定义为:

$$q = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{12})^T \in R^2 \quad (1)$$

其中 $\alpha_i = (i=1, 2, \dots, 12)$ 为质量块所在连体坐标系轴相对于质量块 $i-1$ 所在连体坐标系的转角,支撑足底定义为质量块 0 (这里不考虑机器人上肢运动,关于仿人机器人质量块力学模型的详细描述可见

文[16-17])。在运动规划空间中,机器人支撑足迹可表示为:

$$F = (x \ y \ \theta \ \zeta)^T \in R^2 \times N \quad (2)$$

其中, $(x \ y \ \theta)$ 为机器人支撑足迹的位置及方位角,离散变量 $\zeta \in \{L, R\}$ 表征机器人的支撑足为左足或右足。因此,机器人的状态向量为:

$$R = (F^T, q^T, q^T) \in R^{27} \times N \quad (3)$$

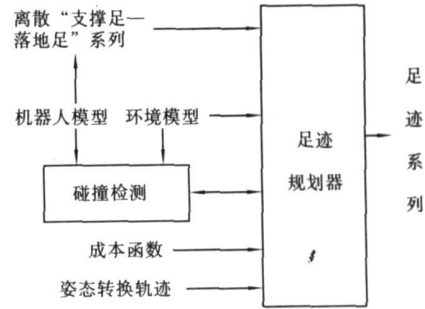


图 1 足迹规划器
Fig 1 Footstep Planner

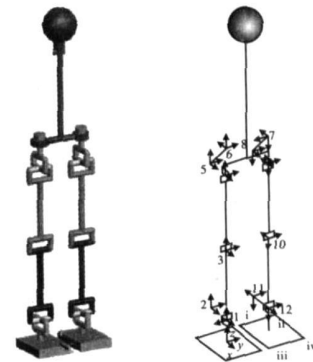


图 2 仿人机器人 THB P-II 物理模型
Fig 2 Physical model of THB P-II humanoid robot

环境模型 规划环境通过网格地图 M 来表示,每个网格点定义为:

$$G = (x \ y \ h \ info)^T \quad (4)$$

其中变量 h 和 $info$ 为网格点的高度值和其它信息。

足迹转换模型 同工业机器人工作空间分析一样,当仿人机器人由其中一足支撑时,摆动足落地时足迹中心的可达位置会形成一个特定区域(如图 3 中阴影区域)。影响该区域形状的因素有机器人物理参数(如几何尺度、质量分布)、运动学和动力学参数(如关节运动范围、关节驱动能力)和运动稳定性约束条件(如 ZMP 稳定约束准则等)。

在这个可达区域内选取若干个落地足迹,形成一个“支撑足迹—落地足迹”序列,对应于搜索树的“父节点—子节点”。可行落地足迹的数量决定了最终搜

索树的分支因子 (branching factor), 在部分确定性运动规划算法中, 是指数阶影响搜索算法复杂度的重要参数^[18].

因此, 如何确定落地足数量是设计搜索算法的重要问题. 同其他研究中不变数量的足迹转换模型的设计不同的是, 这里使用的是可变落地足数量的复合足迹转换模型. 设计了 4组不同数量的以左足为支撑足的落地足迹序列 (见图 3 落地足迹如右边矩形所示, 数量分别为 5 (a)、10 (b)、13 (c)、25 (d), 各图中左边的斜纹矩形为支撑足迹). 其中, 每组是后一组的真子集, 记足迹转换模型为 T 有:

$$T_a \subset T_b \subset T_c \subset T_d \quad (5)$$

T_a 用于完成基本步行功能, 如直行、左转、右转、小步幅直行、停止; T_b 、 T_c 和 T_d 则可完成更多复杂步行功能, 如不同角度转向、后退等. 目前复合足迹转换模型中各组落地足迹的数量的确定还部分依赖于数值实验比较分析.

以左足支撑为例, 用上标 $\bar{\cdot}$ 和 $\bar{\cdot}$ 表征支撑足和摆动足, 记支撑足迹 $F^{\bar{i}} = (Q \ 0 \ 0 \ L)^T$, 则落地足迹为:

$$F_i^{\bar{i}} = (x_i^{\bar{i}}, y_i^{\bar{i}}, \theta_i^{\bar{i}}, R_i^{\bar{i}})^T, \quad i = 1, 2, \dots, N_{fp} \quad (6)$$

其中 N_{fp} 即为可行落地足迹数量. 因此有:

$$T_i = (F_1^{\bar{i}}, F_2^{\bar{i}}, \dots, F_i^{\bar{i}})^T \in R^{3N_{fp}} \times N, \quad i = 1, 2, \dots, N_{fp} \quad (7)$$

当支撑足为右足时, 落地足迹镜像分布, 因此有:

$$T = \{ T_q, T_r \}, \quad T_r = T_q^{sym} \quad (8)$$

足迹转换模型的算法实现是简单线性复杂度问题.

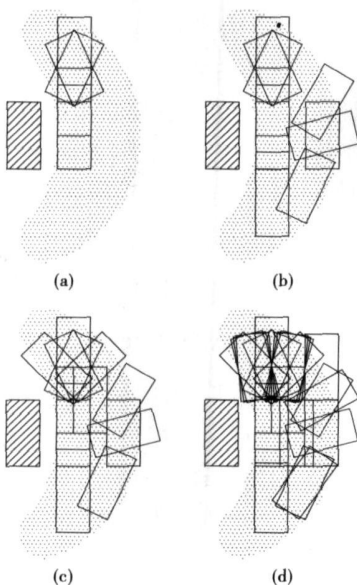


图 3 可行落地足迹设计

Fig 3 Design of Potential footprint placements

姿态转换轨迹 从上述足迹转换模型可以看出, 足迹规划的最大特点是机器人足迹的离散性, 因此其底层姿态轨迹规划也继承了这个特性.

定义姿态转换函数 Q 如下:

$$Q(q_i, q_j); \quad q_i \times Q \rightarrow q_j \quad (9)$$

如图 4 所示, 机器人沿足迹 $F_i \rightarrow F_j \rightarrow F_k$ 的路径运动. 机器人摆动足离开足迹 F_i 和接触足迹 F_k 的时间为 t_i, t_k . 机器人在 t_i, t_k 时刻对应的姿态为 q_{i, t_i}, q_{j, t_j} . 离线预规划机器人完全以右足迹 F_j 支撑时的一个过渡姿态 q_{inter} , 因此机器人沿足迹 $F_i \rightarrow F_j \rightarrow F_k$ 运动的轨迹规划分解为两部分: $Q(q_{i, t_i}, q_{inter})$ 和 $Q(q_{inter}, q_{k, t_k})$.

由于姿态 q_i 和 q_k 可根据 $\{F_i, F_j, F_k\}$ 离线预规划好, $Q(q_{i, t_i}, q_{inter})$ 和 $Q(q_{inter}, q_{k, t_k})$ 也可以离线预规划好, 因此沿以上三个足迹的姿态转换轨迹均可通过离线方式规划. 同理, 完全以左足迹支撑的对称过渡姿态 q_{inter} .

$$q_{inter} = q_{inter}^{sym} \quad (10)$$

至此, 机器人沿任意足迹运动的姿态转换轨迹均可通过离线规划—在线调用的方式完成. 不难得出, 对于有 N_{fp} 个可行落地足迹的足迹转换模型, 需要预规划的单腿支撑期轨迹为 $4N_{fp}^2$ 组, 双腿支撑期为 $2N_{fp}^2$ 组. 姿态转换的实现方法可参见文 [17]. 当然以后姿态转换轨迹方式在机器人关节轨迹的平滑性方面有很大改进空间.

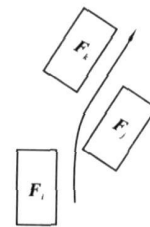


图 4 机器人沿足迹序列运动

Fig 4 Robot walking along the planned footprints

碰撞检测模型 碰撞检测是通过分析矩形足迹区域内的网格点信息来实现的. 足迹网格点集是通过“点—凸多边形”关系算法来确定的.

设足迹 F 的顶点为 $P_i = (x_i, y_i), \quad i = 1, 2, 3, 4, 5$
 $P_5 = P_1$ 第 i 条边对应函数为:

$$f(x, y) = (x_{i+1} - x_i)y - (y_{i+1} - y_i)x + x_i y_{i+1} - y_i x_{i+1} \quad (11)$$

对任意一个判别点 $P^* = (x^*, y^*)$, 如果满足:

$$f(x^*, y^*) \cdot f(x_{i+1}^*, y_{i+1}^*) > 0, \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad i \neq i+1 \quad (12)$$

则点 P^* 在足迹 F 内. 这个检测算法的时间复杂度是 $O(n)$.

3 规划算法实现 (Realization of planning algorithm)

3.1 搜索算法

搜索算法以机器人初始足迹 F_{start} 为根节点开始构建搜索树, 并将该节点加入到节点列表中; 再根据足迹转换模型中“支撑足迹—落地足迹”序列构建该节点的子节点; 其次进行碰撞干涉检测, 标识出引起碰撞的子节点; 然后按照构建的节点成本函数计算剩余各子节点的成本, 并将剩余子节点插入到节点列表中, 保证该列表从首节点开始成本依次变大; 最后以该列表中首节点为父节点重复以上步骤拓展搜索树, 直到树中某个足迹节点达到目标区域, 满足规划指标. 搜索算法的任务是完成足迹序列的规划.

其中足迹结构体非常重要, 其定义如下:

```

struct FootPrint // 足迹结构体
{
    int depth // 搜索树中的深度
    double x, y, theta // 足迹位置及方位角
    struct FP_Cost cost // 足迹成本
    bool left_supporting // 支撑足标记, true=L, false=R
    struct FootPrint * Parent * Child[ ]; // 父节点及子节点
    struct FootPrint * Next // 列表中邻节点
};

```

整个规划使用启发式 A^* 搜索算法来实现^[18]. 算法如下:

```

Algorithm 1——FootstepPlan( $F_{start}$ ,  $F_{goal}$ ,  $M$ ,  $T$ )
0 // initialization of  $F_{start}$ ,  $F_{goal}$ ,  $M$ ,  $T$ , PathList
1 FPList.insert( $F_{start}$ );
2 while (searchednode <= max_node && depth < max_depth) do
3   FR = FPList.head
4   if FR.left_supporting == true
5      $R = T_1$ 
6   else  $R = T_2$ ;
7   end
8   for ( $i=0$ ;  $i < N_{FR}$ ;  $i++$ )
9     FP.Child[  $j$  ] ← Step(FR,  $T$ );
10    if (Collision_check(FP.Child[  $j$  ]) == true)
11      delete FP.Child[  $j$  ];
12    else
13      if (Goal_reach(FP.Child[  $j$  ],  $F_{goal}$ )
14        PathFR = FP.Child[  $j$  ];

```

```

13 while (PathFR =  $F_{start}$ ) do
14   PathList.insert(PathFR);
15   PathFR = PathFR.Parent;
16   end
17   return PathList;
18 else
19   Cost.compute(FP.Child[  $j$  ],  $F_{start}$ ,  $F_{goal}$ );
20   FPList.insert(FP.Child[  $j$  ]);
21   end
22 end
23 end
24 end

```

3.2 成本函数构建

成本函数中启发式估值函数的设计是 A^* 算法最为核心的部分, 构建的成本函数如下:

$$C(F) = k_{dp} C_{dp}(F, F_{start}) + k_c C_s(F) + k_d C_d(F, F_{goal}) + k_a C_a(F, F_{goal}) \quad (9)$$

其中: (1) $C_{dp}(F, F_{start})$ 表征了被估值足迹 F 在搜索树中的深度值; (2) $C_s(F)$ 表征了 F 在足迹转换模型 T 中的优先度, 通常直行的足迹优先度高, 而导致机器人大幅度转向及后退的足迹优先度低; (3) $C_d(F, F_{goal})$ 表征了 F_{start} 与目标足迹 F_{goal} 的欧式距离值; (4) $C_a(F, F_{goal})$ 表征了 F 的方位角 θ 与 F_{goal} 的朝向关系. k_{dp} , k_c , k_d , k_a 为以上各子函数的权重系数. 前两项表征了从起始足迹 F_{start} 到当前足迹 F 的自身属性成本, 后面两项表征了从当前足迹 F 到目标足迹 F_{goal} 的估计成本, 即启发式估值.

不难证明, 以上成本函数的构建满足 A^* 算法的可采纳性条件^[18]. 可以看出, 当前面两项相比后面两项无穷大时, 该算法类似广度优先算法 (BFS); 而无穷小时, 该算法类似深度优先算法 (DFS).

4 仿真实验结果及分析 (Results and analysis of simulation experiments)

足迹规划的最终目的还是要实现在线规划, 但是机载视觉系统由于视距和视角局限, 在复杂环境下的作用十分有限. 因此足迹规划的图像信息更多的将依赖非机载视觉系统 (external vision system), 如通过全局视觉、多机器人系统中其他机器人的视觉信息融合的方式来实现. Chesnut 等利用全局视觉对 Asim 机器人进行足迹规划^[13]. 通过全局视觉系统获取环境地图的具体实现并不复杂, 不是本文的研究内容.

仿真实验的主要目的是验证及改进规划模型设计及算法实现, 同时为复合足迹转换模型的设计和改进提供数值依据.

仿真实验所使用的网格地图分辨率 $RES=0.01\text{m}$

4.1 模型及算法的有效性

仿真实验首先对足迹规划的模型和算法的有效性及其完备性进行了验证. 针对不同运动环境, 规划中相关参数设置有相应调整. 图 5~9 为机器人在几类典型环境下的足迹规划结果. 数据显示: 规划算法在大部分非极端环境下能够规划出可行结果, 完备性良好; 同时, 在规划结果为多达 20 多个足迹序列的情况下, 总搜索节点数和总规划时间能够满足在线规划的规划周期 (Planning cycle) 要求, 体现了足迹规划模型和启发式成本函数设计的有效性和优越性.

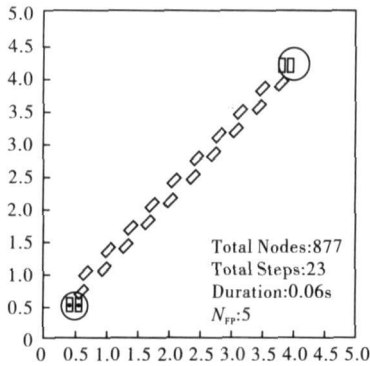


图 5 无障碍物区域机器人直线行走

Fig 5 Robot walking along a straight line in a clear area

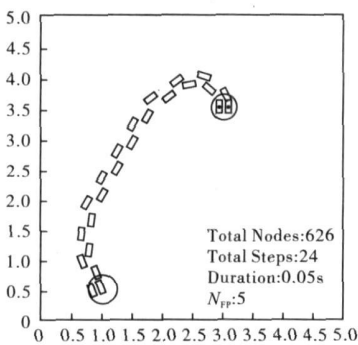


图 6 无障碍物区域机器人曲线行走

Fig 6 Robot walking along a curve in a clear area

4.2 复合足迹转换模型的应用

足迹转换模型的设计主要考虑可行落地足迹的分布及数量.

以图 8 所示环境为例, 在以 (a) 组足迹转换模型 (见图 3) 规划的时候, 无法返回一个可行的足迹序列, 规划失败. 以 (b)、(c) 组模型规划的结果如图 10、

图 11 所示, 但是其耗时过高、遍历的节点数过多, 虽然返回的足迹序列对机器人是运动可行的, 但是呈现病态. 以 (d) 组模型搜索的结果如图 8 所示, 结果较好.

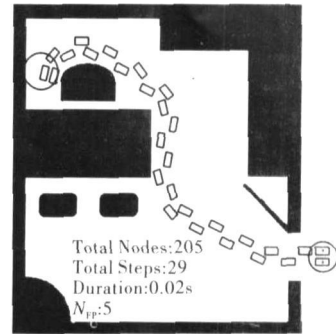


图 7 机器人在办公室区域行走

Fig 7 Robot walking in an office area

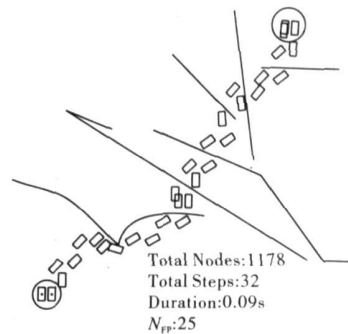


图 8 机器人跨越条状低障碍物行走

Fig 8 Robot stepping over low strip obstacles

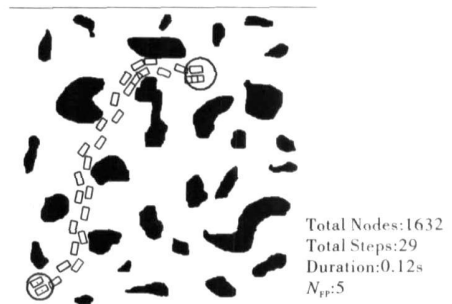


图 9 机器人在不规则障碍物环境中行走

Fig 9 Robot walking in an irregular obstacle environment

我们在更大面积的同类条状低障碍物区域使用 (d) 组模型进行多组仿真实验. 数值结果表明模型中各足迹被使用的次数近似呈正态分布 (见图 12). 也就是说: 使用 (d) 组 25 个可行足迹的时候, 属于其真子集 (a) 组的 5 个足迹被高概率调用, 但同时仅仅调用 (a) 组中的 5 个足迹却又无法完成规划. 这同时也解释了图 10、11 的规划结果.

因此, 这里在复杂障碍物区域采用可变落地足迹数量的办法, 即在规划的不同阶段调用不同的足迹转换模型 T_a 和 T_d 调用是在算法步骤 3、4 之间加入一个子函数完成的, 该子函数通过评估当前足迹周围区域的障碍物统计数据来决定其子节点足迹转换模型的调用. 该统计数据主要包括区域内平整度、倾斜度、潜在碰撞风险系数. 在同图 8、9 单模型一样的环境中使用复合足迹转换模型的规划结果如图 13 (a)、(b) 所示, 其搜索耗时及遍历节点数均大为降低.

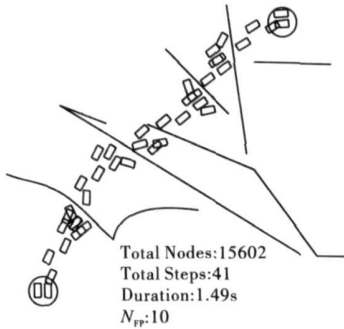


图 10 机器人以 (b) 组可行落地足迹行走

Fig 10 Robot walking with Potential footprint Placements (b)

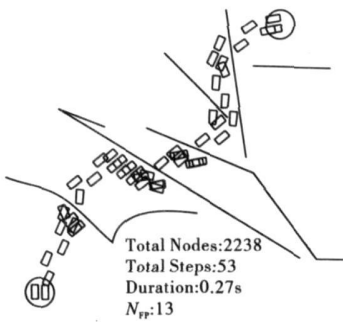


图 11 机器人以 (c) 组可行落地足迹行走

Fig 11 Robot walking with Potential footprint Placements (c)

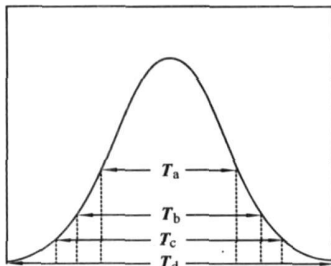


图 12 (d) 组可行落地足迹调用概率

Fig 12 Calling Probability of Potential footprint Placements (d)

5 结论与展望 (Conclusions and future work)

足迹规划是最近从计算机虚拟现实技术中有腿

动物的动画设计演变而来的一种仿人机器人全局运动规划新思想. 它能够解决目前仿人机器人运动规划所产生的运动规划局部死区问题, 是仿人机器人运动规划的一个新视点.

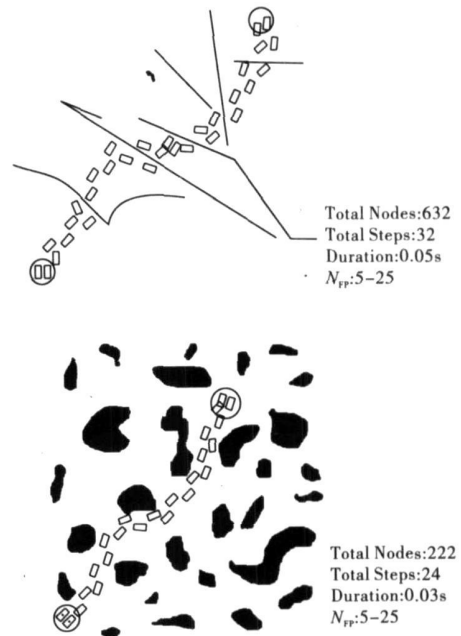


图 13 机器人以复合足迹转换模型行走

Fig 13 Robot walking with a compound footprint transition model

本文建立了仿人机器人的足迹规划模型, 包括全局运动规划环境下的机器人模型、足迹转换模型、姿态转换模型等; 然后构建启发式函数, 利用 A^* 算法予以实现; 最后通过仿真实验验证了模型及算法在各类典型规划环境下的有效性及完备性. 针对复杂障碍物区域这一特定环境, 采用可变落地足迹数量的复合足迹转换模型, 实现了该类环境下的高效搜索.

足迹规划这一新方法目前还有很多待完善的地方, 足迹转换模型的设计、启发式搜索算法的成本函数构建及在更复杂环境中的应用都有很大的改进空间.

参考文献 (References)

- [1] Kuffner JJ, Nishiwaki K, Kagami S, et al. Motion planning for humanoid robots [J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2005, 15: 365-374.
- [2] 夏泽洋, 陈恩, 熊璟, 等. 仿人机器人运动规划研究进展 [J]. 高技术通讯, 2007, 17(10): 1092-1099.
- [3] Nagasaka K, Inoue H, Inaba M. Dynamic walking pattern generation for a humanoid robot based on optimal gradient method [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics G. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999, 908-913.

- [4] Lin M S, Oh S R, Son J, et al. Human-like real-time grasp synthesis method for humanoid robot hands [J]. *Robotics and Autonomous Systems* 2000, 30(3): 261—271.
- [5] Latombe J C. *Robot Motion Planning* [M]. Boston, USA: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [6] Yagi M, Lumelsky V. Biped robot locomotion in scenes with unknown obstacles [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1999, 375—380.
- [7] Lorch Q, Denk J, Seama J F, et al. V-GWAM—An emulation environment for a vision-guided virtual walking machine [A]. *Proceedings of the IEEE/RAS International Conference on Humanoid Robotics* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000.
- [8] Cupec R, Schmidt G, Lorch Q. Experiments in vision-guided robot walking in a structured scenario [A]. *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005, 1581—1586.
- [9] Goldberg K. Completeness in robot motion planning [A]. *Proceedings of the Workshop on the Algorithmic Foundations of Robotics* [C]. Massachusetts, MA, USA: A K Peters Ltd, 1995, 419—429.
- [10] Nishiwaki K, Sugihara T, Kagami S, et al. Online mixture and connection of basic motions for humanoid walking control by footprint specification [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2001, 4110—4115.
- [11] Girard M. Interactive design of 3D computer-animated legged animal motion [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications* 1987, 7(6): 39—51.
- [12] Van de Panne M. From footprints to animation [J]. *Computer Graphics Forum* 1997, 16(4): 211—223.
- [13] Chesnutt J, Lau M, Cheung G, et al. Footstep planning for the Honda ASMO humanoid [A]. *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation* [C]. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2005, 629—634.
- [14] Mirtich B. V-Clip: Fast and robust polyhedral collision detection [J]. *ACM Transactions on Graphics* 1998, 17(3): 177—208.
- [15] Xia Z Y, Liu L, Xiong J, et al. Design aspects and development of humanoid robot THBIP-2 [J]. *Robotica* 2008, 26(1): 109—116.
- [16] 徐凯, 陈愚, 刘莉等. 基于主支撑腿运动优化的仿人机器人快速步态规划算法 [J]. *机器人*, 2005, 27(3): 203—209.
- [17] 徐凯. 仿人机器人步态规划算法及其实现研究 [D]. 北京: 清华大学, 2004.
- [18] 郑扣根, 庄越挺. *人工智能* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

作者简介:

夏泽洋 (1980-), 男, 博士生. 研究领域: 仿人机器人系统设计, 仿人机器人运动规划与控制.

陈愚 (1954-), 男, 教授, 博士生导师. 研究领域: 机器人与仿生学, 特种机器人及应用, 机电系统集成.