

# 仿人机器人斜坡行走的步态规划

常琦, 张国良, 敬斌

(第二炮兵工程大学, 陕西 西安 710025)

**摘要:**为了解决双足机器人在复杂路面的行走问题,提出了一种具体的基于几何约束的机器人斜坡行走步态规划方法。通过对机器人行走的起步阶段,单脚支撑期中摆动腿对机器人身体稳定的影响,以及行走步态流程进行了详细的规划,以机器人 Nao 为研究对象,构建出了机器人的连杆模型,计算出机器人在前向和侧向运动中保证身体稳定的踝关节约束范围,分析了流程图中机器人各行走步态,并计算出各步态中关节角度变化,从而规划出了机器人 Nao 从起步到结束行走的过程。运用三次多项式插值的方法使得各关节运动平滑稳定,并根据规划中的各个步态运动利用 MATLAB 仿真,获得机器人在步行过程中 X、Y、Z 方向上的质心轨迹,并通过 X、Y 方向的轨迹可以看出机器人行走过程重心稳定,从而证明此方法用于机器人斜坡行走的可行性。

**关键词:**Nao 机器人;斜坡行走;几何法;步态规划;三次多项式插值

**中图分类号:**TP242

**文献标识码:**A

**文章编号:**1673-629X(2012)11-0048-05

## Gait Planning of Humanoid Robots Walking on Slope

CHANG Qi, ZHANG Guo-liang, JING Bin

(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

**Abstract:**In order to solve the walking robot gait programming problems, put forward a certain meaning robot slope gait programming method of walking. Plan in detail the walking robot in the beginning of walking, one foot swinging leg to support the robot body stabilized, and the influence of the walking gait process. Nao robot as the research object, construct the link model of robot, calculate the robot forward and lateral movement to ensure stable ankle range bound body, and analyze the flowchart of each gait of the walking robot, and calculate the gait of the joint angle changes, thus planning out the Nao robot from the start to end the process of walking. At the same time using 3rd polynomial interpolation method makes the motions of joint smooth stabilized, and according to each of the movement of the joints of gait use MATLAB simulation to gain a track of the center stabilized of walking robot in the process of the X, Y, Z direction. So as to reduce the movement process of joints to loss and the sole of the foot impact with ground, makes the robot can walk on the slope stabilized, proving this method is feasible.

**Key words:**Nao robot; slope walking; geometry method; gait planning; 3rd polynomial interpolation method

## 0 引言

在平面双足机器人运动领域中,机器人若要完成一项比较复杂的任务时,行走应当是运动的基础。能够稳定的行走是仿人机器人的技术关键,多年以来,人们的研究工作主要集中在了实现平整地面上的行走,并且取得了一定的成果。但在行走过程中路面的情况可能会是多种多样,斜坡应当是各种复杂路面中比较常见的一种,所以规划出一种稳定有效的斜坡行走方式至关重要。

为了实现在崎岖路面上稳定行走,多数研究者采

用离线轨迹规划与在线调整的方法实时修正期望的关节轨迹。在基于模型的步态规划中,针对双足机器人的多自由度运动特点,将机器人简化为 5 杆模型<sup>[1]</sup>或 7 杆模型,通过参数设定,完成前进方向上的规划<sup>[2,3]</sup>。Q. Huang 等人<sup>[4]</sup>通过对髋关节在单腿支撑期内的两个参数调整来保持稳定性。还有将双足机器人模型简化为一级、二级倒立摆模型<sup>[5]</sup>或通过三维倒立摆模型来分析<sup>[6]</sup>。S. Kajita 等人<sup>[7]</sup>进一步简化双足机器人的步行特点,运用桌子-小车模型更好地分析双足机器人的 ZMP 与 CPG 之间的关系,以便较好地实现步态控制。文中根据斜坡角度以及机器人各关节信息,计算出机器人在前向和侧向运动中保证身体稳定的踝关节约束范围,分析了机器人在行走中的各姿态,并根据机器人稳定性的几何约束条件计算出各姿态中关节角度变化,并运用三次多项式插值的方法规划关节运

收稿日期:2012-02-18;修回日期:2012-05-24

基金项目:第二炮兵“国家重点学科建设”专项(092D0307)

作者简介:常琦(1990-),男,硕士研究生,主要研究方向为仿人机器人;张国良,博士,教授,主要从事先进控制理论、机器人技术与组合导航研究。

动<sup>[8]</sup>,使其稳定过渡,获得了机器人质心的平稳轨迹,从而保证了机器人身体运动中的稳定性,同时减少与地面的碰撞<sup>[9]</sup>。

### 1 Nao 介绍及行走过程分析

Nao,是一个 58 公分的机器人,AldebaranRoboticsTM 公司花费了三年时间的研究成果。它是各种硬件和软件以独特的方式组装成的一种产品,并有着讨人喜欢的外形设计<sup>[10]</sup>。Nao 拥有 25 个自由度,动作灵活,躯干部分还装有一个惯性陀螺仪。

对于双足机器人来说,行走过程平稳是关键,重心以及重心在两脚之间的转移是保证稳定行走的重点。文中机器人行走过程中右脚先迈出,行走流程控制如图 1 所示:

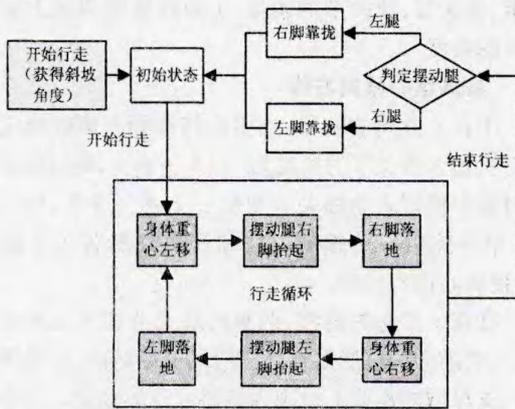


图 1 行走步态流程图

### 2 机器人身体稳定域的计算

为了使机器人身体在行走过程中能够在前后、左右方向上保持稳定的姿态,需要计算出四个方向上机器人身体倾斜时稳定的约束角度<sup>[11]</sup>。

首先根据机器人各部分的质量和高度,通过比例的方法计算出机器人质心的位置  $P$  点,其高度为  $H$ ,与踝关节的距离为  $L$ (左右相等)。机器人单个脚掌的有效宽度为  $d$ ,两脚掌之间的距离为  $c$ 。

左右稳定的角度:

从正面来看机器人如图 2(a) 所示,机器人的中心在两脚之间,  $N$  为质心的投影,  $\theta$  为  $L$  与地面的夹角,  $\theta_1$  为质心转动到其投影到达脚掌边缘的角度,  $\theta_2$  为质心的投影由脚掌边缘转动到踝关节  $D$  点上方的角度,  $p', p''$  分别为转动后质心的位置。

$$\tan \theta = \frac{2H}{d+s}, \theta = \arctan \theta \quad (1)$$

$$L = \frac{H}{\sin \theta}, \cos \angle P'DN = \frac{d}{2L} \quad (2)$$

$$\theta_1 = \arccos \angle P'DN - \theta \quad (3)$$

$$\theta_2 = 90^\circ - (\theta_1 + \theta) \quad (4)$$

当机器人身体重心移至一只脚即单脚支持阶段的时候其身体的稳定范围在  $2\theta_2$ 。

前后方向稳定:从机器人的左侧来看机器人如图 2(b) 所示,初始状态机器人小腿与脚掌的夹角  $\beta$  为已知。  $A$  为脚尖,  $B$  为脚跟,  $N$  为侧面看时质心投影的位置脚掌前段长度。

前向稳定的角度

$$\beta_1 = \angle NDP - \angle ADP_1 \quad (5)$$

同理,后向的稳定角度

$$\cos \angle BDP_2 = \frac{DB}{L} \quad (6)$$

$$\beta_2 = 90^\circ - \arccos \angle BDP_2 + \beta$$

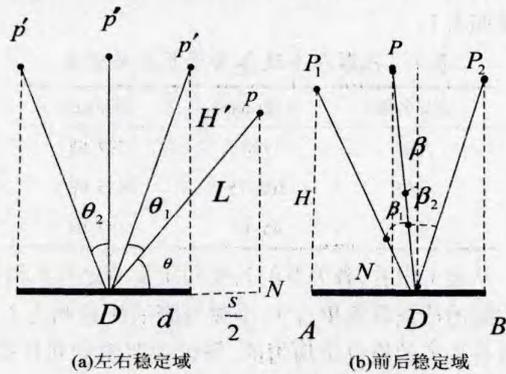


图 2 Nao 机器人稳定域左脚几何图

### 3 机器人斜坡行走规划

#### 3.1 自主获得斜坡角度

设初始状态下,机器人 Nao 站在平地上通过躯干中陀螺仪测得机器人前倾的角度为  $\theta_{cx}$ 。当人为地将机器人扶稳站在斜坡上时,陀螺仪的角度为  $\theta_{cx}'$ ,那么斜坡的角度  $\alpha$  为  $\alpha = \theta_{cx}' - \theta_{cx}$ 。脚掌的有效长度  $AB' = AB \cos \alpha$ 。

#### 3.2 起步

前面已经算出机器人在前后及左右方向上的稳定区域,在初始状态下,身体倾斜范围在  $(\theta_1, \theta_1 + 2\theta_2)$  机器人身体便能够维持稳定,但最稳定的状态为:质心位置处于  $p''$  时。

设机器人身体倾斜后质心高度为  $H'$ ,大腿长度为  $l_1$ ,小腿长度为  $l_2$ ,  $p$  为初始状态下右腿髋关节位置,  $p'$  为重心转移后右腿髋关节位置。当机器人质心处于  $p''$  如图 2 所示。

质心升高的高度

$$\Delta H = H' - H \quad (7)$$

$$H' = p'D = L \quad (8)$$

为髋关节的垂直高度,  $b$  为小腿与大腿的夹角。

$$p'D = \sqrt{p'D^2 + DD'^2} \quad (9)$$

$$\cos \angle p B' D' = \frac{l_1^2 + l_2^2 - O'D'^2}{2l_1 l_2} \quad (10)$$

$\angle p B' D'$  为机器人稳定后右腿膝关节所达到的角度。

### 3.3 右腿抬起

在行走规划的过程中,摆动腿抬起的高度与机器人身体的平衡有着很大的关系。摆动腿的抬起使得机器人的重心前移,甚至会导致机器人摔倒。所以,在静态规划中机器人大腿抬起后整体质心投影的位置落在机器人的脚掌支撑的范围内机器人才能够保持站立稳定。

可通过腿部各关节的长度和质量之间比例计算出大腿抬起后机器人的质心位置。腿部各关节的长度与质量如表 1。

表 1 机器人下肢各关节长度质量表

关节名称	长度(mm)	质量(g)
大腿	100	397.98
小腿	102.75	435.98
脚	45.11	163.04

从表 1 中看,各关节的长度和质量的比基本相似。将大腿的质量看成单位 1,小腿与脚的质量和为 1.5。假设各关节的质量是均匀的,所以关节质量和长度成正比,当机器人右腿抬至最高时,小腿与地面垂直,脚掌与斜坡平行,质心的位置为  $s$  如图 3 所示。

$$s^2 = [(1-s) + 1.5] \times (1-s) \quad (11)$$

$$s \approx 0.7143$$

腿部质心的位置处于大腿上 71.43mm 处,在斜坡上的有效长度为  $s'$ 。机器人此时的质心位置应当在原质心位置与抬起大腿质心之间即为  $\frac{s'}{2}$ 。所以,当

$\frac{s'}{2} \leq AN \cos \alpha$  时,机器人在单脚支撑的阶段便能够稳定站立,  $\lambda = \arcsin \frac{s'}{s}$ 。此时,膝关节角度为  $180^\circ - \lambda$ 。

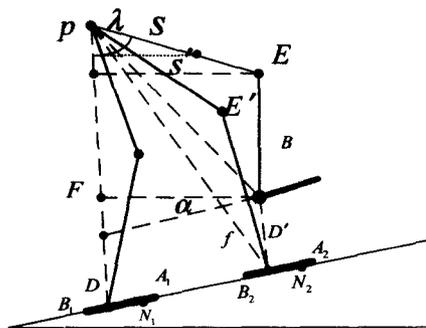


图 3 机器人右脚落地示意图

### 3.4 右脚落地

当摆动腿达到最高点时,脚掌与斜坡的垂直距离设为  $f$  如图 3,落地的方式为摆动腿脚掌始终与斜坡保

持平行垂直下落。

$$f = \{H' - [\cos \theta \times l_1 + l_2 + \tan \alpha (\sin \theta \times l_1)]\} \times \cos \alpha \times H' \quad (12)$$

$$\cos \angle E' = \frac{l_1^2 + l_2^2 - pD'^2}{2l_1 l_2} \quad (13)$$

$$\cos \angle DpD' = \frac{pD'^2 + pD'^2 - DD'^2}{2pD' \times pD'} \quad (14)$$

$$\cos \angle E' pD' = \frac{l_1^2 + pD'^2 - l_2^2}{2l_1 \times pD'} \quad (15)$$

$$\angle DpE' = \angle DpD' + \angle E' pD' \quad (16)$$

$$\cos \angle pD'D = \frac{pD'^2 + l_2^2 - l_1^2}{2pD' \times l_2} \quad (17)$$

$$\angle D' = 180^\circ - \angle pD'D - \angle pD'E' \quad (18)$$

其中,  $\angle E'$ ,  $\angle DpE'$ ,  $\angle D'$  分别为右脚落地后的膝关节、髌关节、踝关节的角度。 $f$  为脚掌在斜坡上垂直落下的高度。

### 3.5 身体重心移向右脚

①在  $y$  方向的右移:当重心转移到右脚时稳定状态下机器人踝关节的角度为  $-(\theta_1 + \theta_2)$ ,所以重心转移过程中机器人的踝关节变化了  $2(\theta_1 + \theta_2)$ ,可根据 3.2 中身体重心转移的方法计算出左腿各关节的变化,使质心向右移动。

②在  $x$  方向的前移:两脚的踝关节在  $x$  方向上增大,只要质心的投影落在任意脚的支撑域内,以及两脚之间支撑域的连线上可视为机器人身体稳定。文中为了使机器人保持原有的稳定状态,在  $x$  方向上重心维持在  $N$  点的域内,即在  $N_1 N_2$  这条线上。

可以求出:

$$A_1 N = A_1 D - c = A_1 D - \sqrt{L^2 - H^2} \quad (19)$$

$$N_1 N_2 = DD'$$

在这里在计算中可以将  $D, D'$  视为  $N_1, N_2$  如图 4 所示。

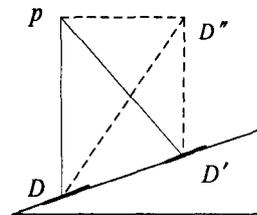


图 4 机器人重心在  $x$  方向移动简化图

重心的移动视为平移,在  $x$  方向上水平由左脚移向右脚如图 4 所示。

$$pD' = FB \quad (20)$$

$$\tan \angle pDD' = \frac{pD'}{pD} \quad (21)$$

$\angle ADD'$  便为机器人两脚踝关节变化的角度。

$DD' = \frac{pD'}{\cos \alpha}$  为机器人在斜坡上行走一步的步长。

### 3.6 判定行走

#### (1)继续行走:

如果机器人继续行走,那么按照流程图所示,机器人摆动腿为左腿继续运动,其各运动方式与前面右腿运动方式相同。在下一步摆动腿摆动和落地的过程中支撑腿的踝关节、膝关节和髋关节恢复到初始状态,此步骤使机器人在  $z$  方向上前进。

#### (2)结束行走:

如果要结束行走,以摆动脚右脚为例。首先:右腿  $x$  方向膝关节、踝关节、髋关节恢复到初始角度(为质心升高阶段)。其次:左腿  $x$  方向髋关节、膝关节恢复到初始角度。最后:左脚右脚的  $y$  方向踝关节恢复到初始角度,此时机器人的状态便完全恢复到了初始状态。

## 4 实验仿真

在规划的过程中,已经将机器人各状态中运动关节的转动角度计算了出来。利用三次多项式插值的方法对每个状态下运动角度进行规划。

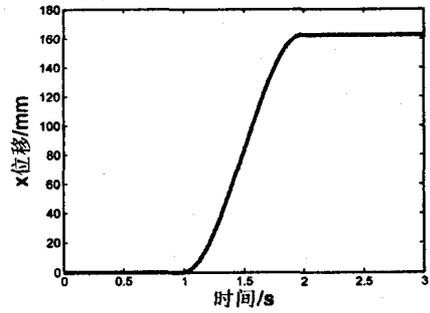
选取斜坡角度  $\alpha = 30^\circ$ , 设机器人初始状态下质心投影的位置  $N$  为零点,左方向为正方向。固定机器人步行的时间,一步的时间为  $T$ ,各过程所经历时间为:

{	重心左移	$t = \frac{T}{6}$
	右脚抬起、落地	$t = \frac{T}{3}$
	重心右移	$t = \frac{2T}{3}$
	左脚靠拢	$t = \frac{5T}{6}$
	恢复初始状态	$t = T$

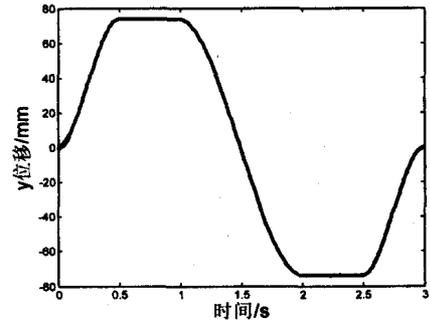
重心右移过程及从  $N_1$  点到  $N_2$  经过  $N$  点,所以时间为  $\frac{2T}{3}$ 。

设  $T = 3S$ ,则根据各过程的规划得到质心位置和踝关节角度、角速度、角加速度的变化如图 5 所示。

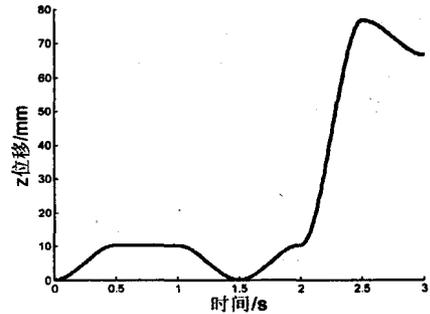
由图(a),(b),(c)可以看出在(0~0.5)的时候机器人身体质心左移在  $x$  方向上的速度和位移为 0,  $y$  方向上机器人质心左移,  $z$  方向升高了  $\Delta H \approx 10\text{mm}$ , 质心移动到了踝关节  $N_1$ , 其位移约为 78mm, 与实际结果基本符合。在(0.5~1)秒时机器人正处于摆动腿抬起、落地的阶段,各方向的位移为 0。在(1~2)秒时为机器人重心移到右脚,从规划来看分为在  $x$  方向的移动和  $y$  方向的移动,图(a)反映出机器人在斜坡上前进约 162mm,图(b)反映了机器人的质心由  $N_1$  转移到了  $N_2$ , 经过零点变为负值。 $z$  方向上也随着  $y$  方向的运动由  $\Delta H$  变为 0 再变为  $\Delta H$ 。在(2~2.5)秒时若



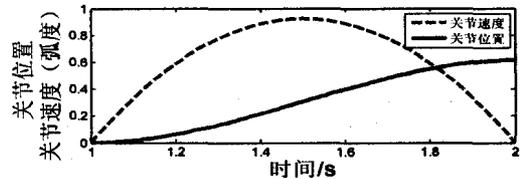
(a) X 方向机器人质心轨迹



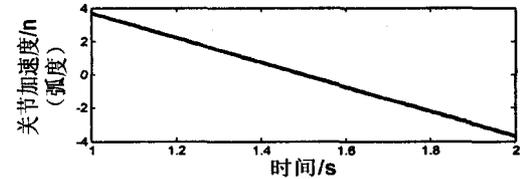
(b) Y 方向质心轨迹



(c) Z 方向质心轨迹



(d) 踝关节 x 方向的变化



(e) 踝关节 y 方向上的变化

图 5 质心轨迹及踝关节角度、角速度以及角加速度

机器人结束行走,根据规划,此时的支撑腿  $x$  方向上恢复到初始位置,使得质心在  $z$  方向上升高,在  $x$  和  $y$  方向质心没有位移。在 (2.5 ~ 3) 秒时为结束行走的最后阶段,机器人各关节均恢复到了初始状态,机器人的质心在  $y$  方向恢复都零点,  $z$  降低  $\Delta H$ 。由图 (d), (e) 利用三次多项式插值的方法使机器人各关节平滑,克服了关节数据突变的问题,保证了机器人运动过程的稳定<sup>[12]</sup>,并使得机器人在步行过程中其质心过渡平稳,实现一种静态的斜坡行走。

## 5 结束语

文章以机器人 Nao 为研究模型,将机器人行走过程划分为若干行走状态,刻画了一种机器人的步行流程图,用几何法对机器人斜坡行走的各关键状态进行了规划,克服了机器人行走中由于身体模型的改变给机器人稳定带来的影响,使机器人在行走过程中使得每个状态都能够保持机器人的静态稳定。最后利用三次多项式插值的方法对机器人关节的具体运动进行规划,得到平滑的关节运动轨迹,再对这些运动进行积分,获得平稳的质心运动轨迹,从而可以断定,此规划方法能够实现机器人在斜坡上的平稳行走。

### 参考文献:

- [1] 许艳惠. 一种双足机器人的步态规划研究[J]. 核电子学与探测技术, 2010, 30(4): 542-545.
- [2] 姜山, 程君实, 陈佳品, 等. 基于遗传算法的两足步行机器人步态优化[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(10): 1280

(上接第 47 页)

到每个文本的概念向量模型,这样能够有效地提高聚类速度以及聚类精度。在研究中还存在一些不足,比如本体的构建过程是手工参与的,在概念的匹配方面还需要找到更加有效的量化方法,这些问题将是下一步研究的内容。

### 参考文献:

- [1] 杨笑清, 梅宏, 李克勤. 软件复用与软件构件技术[J]. 电子学报, 1999, 27(2): 68-74.
- [2] 王渊峰, 薛云皎, 张涌, 等. 剖面分类构件的匹配模型[J]. 软件学报, 2003, 14(3): 401-408.
- [3] Frakes W B, Pole T P. An Empirical Study of Representation Methods for Reusable Software Components[J]. IEEE Transactions on Software Engineering, 1994, 20(8): 617-630.
- [4] 常继传, 李克勤, 郭立峰. 青岛系统中可复用软件构件的表示与查询[J]. 电子学报, 2008, 28(8): 20-23.
- [5] Beckett D, McBride B. RDF/XML Syntax Specification[EB/OL]. 2004-02-10. <http://www.w3.org/tr/rdf-syntax->

-1283.

- [3] 付成龙, 陈恩. 五杆四驱动平面双足机器人动态步态规划与非线性控制[J]. 机器人, 2006, 28(2): 206-212.
- [4] Huang Q, Yokoi K, Kajita S, et al. Planning Walking Patterns for a Biped Robot[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001, 17(3): 280-289.
- [5] Napoleon S N, Sampei M. Balance Control Analysis of Humanoid Robot Based on ZMP Feedback Control[C]//Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland: [s. n.], 2002: 2437-2442.
- [6] 李龙澍, 王唯翔, 王凡. 基于三维线性倒立摆的双足机器人步态规划[J]. 计算机技术与发展, 2011, 21(6): 66-69.
- [7] Kajita S, Kanehiro F, Kaneko K, et al. Biped Walking Pattern Generation by Using Preview Control of Zero-Moment Point[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation. Taipei, Taiwan: [s. n.], 2003: 14-19.
- [8] 黄春林, 张祺, 杨宜民. 三次样条差值方法在 Nao 机器人步态规划中的应用[J]. 机电工程技术, 2011, 40(2): 62-64.
- [9] 肖乐, 常晋义. 仿人机器人下楼梯的自适应模糊控制方法[J]. 计算机工程, 2009, 35(13): 193-195.
- [10] 王凡, 王侠. RobotCup 仿真平台中 Nao 模型正运动学研究[J]. 合肥师范学院学报, 2011, 29(3): 49-51.
- [11] 张博, 杜志江, 孙立宁, 等. 双足步行机器人步态规划方法研究[J]. 机械与电子, 2008(4): 52-55.
- [12] 谭民, 徐德, 侯增广, 等. 先进机器人控制[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.

grammar/.

- [6] Brickley D, Guha R V. RDF Vocabulary Description Language 1.0: RDF Schema[EB/OL]. 2004-02-10. <http://www.w3.org/tr/rdf-schema/>.
- [7] Heflin J, Hendler J. Searching the web with SHOE[C]//Proc of AAAI Workshop on AI for Web Search. [s. l.]: [s. n.], 2000: 35-40.
- [8] Karp P D, Chaudhri V K, Thomerel J. XOL: An XML-based Ontology Exchange Language[EB/OL]. 1999. <http://www.oasis-open.org/cover/xol-03.html>.
- [9] Studer R. Knowledge Engineering, Principles and Methods[J]. Data and Knowledge Engineering, 1998, 25(12): 161-197.
- [10] 吴强. 语义 Web 中以描述逻辑为本体语言的推理[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(33): 30-32.
- [11] 谢红薇, 颜小林, 余雪丽. 基于本体的 Web 页面聚类研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(9): 153-155.
- [12] 上海构件库[DB/OL]. 2011-09-26. <http://www.sstc.org.cn/>.