

doi: 10.3969/j.issn.0490-6756.2017.03.017

基于激光雷达的移动机器人避障策略研究

向亚军, 严 华

(四川大学电子信息学院, 成都 610065)

摘要: 激光雷达具有扫描精度高的优点, 因此采用激光雷达来获取机器人周围环境信息. 针对 VFH 算法中波谷宽度的计算以及纯转向问题, 提出了一种方法来计算波谷的宽度以及检测机器人在该波谷的可通行性, 在获得目标方向的基础上增加局部目标点作为 VFH 算法结果, 并在此基础上设计一种平滑转弯的控制策略, 使得机器人能够在复杂环境中以平滑路径逼近目标位置. 最后通过实验验证了本文平滑避障策略的有效性.

关键词: 激光雷达; 移动机器人; VFH; 直方图; 平滑避障

中图分类号: TP312 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)03-0529-06

Obstacle avoidance for mobile robots strategy based on laser radar

XIANG Ya-Jun, YAN Hua

(College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Laser radar has the advantages of high scanning precision. So it is used to obtain the information about the environment around the robot. In order to solve the problems about trough width calculation and pure steering in the VFH algorithm, a method to calculate the trough width and check the traversability of the robot in this trough is proposed. Based on the acquiring goal orientation, local target points are added as the result of the VFH algorithm. In addition, a control strategy of smooth turning is designed, which makes the robot to approach the target position with smooth way in a complex environment. Finally, effectiveness of the method is verified by experiments.

Keywords: Laser radar; Mobile robot; VFH; Histogram; Smooth obstacle avoidance

1 引言

自主避障在移动机器人系统中一直是一个热点研究问题, 同时也是机器人必须具备的一项基本功能. 在对避障问题的研究中, 形成了很多比较成熟的理论, 如人工势场法^[1]、栅格法^[2]、可视图法^[3]等, 其中, 比较著名的是向量场直方图方法 VFH (Vector Field Histogram)^[4].

向量场直方图方法 VFH 由 Johann Borenstein 和 Yoram Koren 提出并在实时避障策略中得

到了广泛应用. 该方法解决了虚拟势场法 VFF (Virtual Force Field)^[5] 容易陷入局部最小等问题. 但 VFH 也存在一个很明显的缺陷: VFH 方法未考虑机器人的尺寸以及动力学和运动学特性. 为了改进 VFH 算法缺点, 文献[6]提出 VFH+算法. 后来, 文献[7]再次对 VFH 进行了改进提出 VFH * 算法, 另外, 还有很多学者从 VFH 算法问题中阈值敏感问题^[8,9]、动态环境避障^[10,11]、直方图构建问题^[12]等提出了改进思想. 但无论是初始的 VFH 算法还是改进的 VFH 算法, 都是采用纯转

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61172181)

作者简介: 向亚军(1991-), 男, 湖北天门人, 硕士生, 研究方向为智能控制. E-mail: xiangyajun@vip.qq.com

通讯作者: 严华. E-mail: 4429175@qq.com

向的方式来控制机器人的转向,文献[13]在 VFH 算法的基础上采用圆弧运动转到所选方向上,该方式是采用固定的转向半径到达指定方向.

在 VFH 算法中,原有的波谷宽度的定义没有量化表示.本文提出一种新的波谷宽度计算方法,能够更加准确地计算出机器人前进的目标方向.另外,在获得目标方向基础上增加局部目标点作为 VFH 算法结果,同时设计一种平滑避障模型,使机器人能够以安全半径平滑转向并指向局部目标点.实验结果表明,在较复杂情况下,机器人能够采用圆弧和直线的轨迹以平滑的路径逼近全局目标位置.

2 避障算法设计

2.1 获得可通行扇区

激光雷达扫描数据是以移动机器人为中心 360° 范围内的障碍物距离值.本文采用的激光雷达为 SLAMTEC 公司制造的 RPLIDAR.在每个周期内获得 360° 范围内 500 个数据.然后对 500 个数据进行处理,并保留前方 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的数据用来表示前方环境信息.

(1) 将激光雷达前方 180° 扫描区域按每 1° 一个区间分成 180 个区间,并逆时针进行编号,第 i 个区间编号为 Z_i ,其中 $i=1,2,3,\dots,180$.

(2) 求取每个扇区的障碍物强度值 H_i ,并根据各个扇区障碍强度值的大小来构建向量场直方图,如图 1 所示.

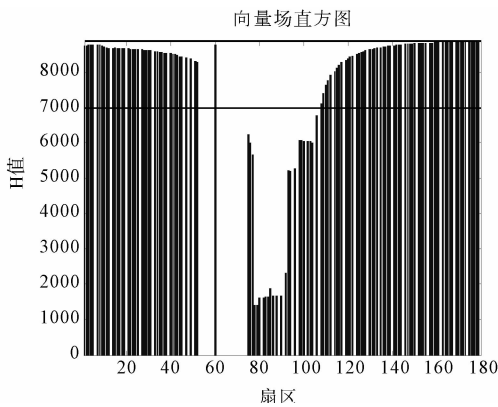


图 1 向量场直方图

Fig. 1 Vector Field Histogram

(3) 设阈值为 M (阈值为图 1 中黑线),合并相邻 $H_i < M$ 的扇区,则可得到一共得到 N_2 个可通行扇区,如图 2 所示.

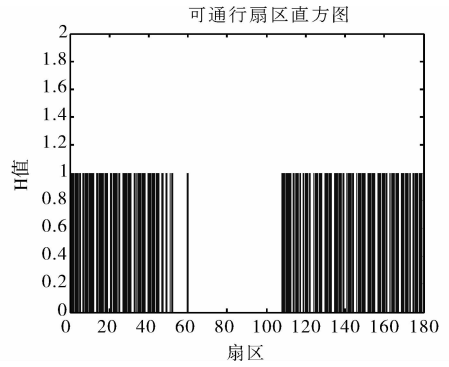


图 2 可通行扇区直方图

Fig. 2 The histogram of accessible sector

2.2 谷底宽度及可通行方向计算

在 VFH 算法中对波谷宽度没有进行量化定义,因此提出一种新的谷底宽度计算方法,对谷底的宽度和可通行性进行了量化处理.

对 N_2 个可通行区间逐个求取可通行方向.若某个可通行区间为 $N_{2_i} = [Z_1, Z_2]$,机器人所在位置及周围环境如图 3 所示. R 为障碍物强度阈值 M 对应的距离阈值; d_{z_1} 为扇区 Z_1 内障碍物离中心最小距离. d_{z_2} 为扇区 Z_2 内障碍物离中心最小距离.

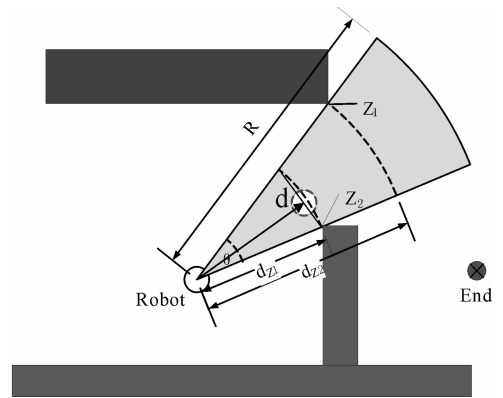


图 3 位置环境示意图

Fig. 3 Robot's location and surroundings

可计算出可通行区域内离中心的最小距离及角度,如下式.

$$d_{z_{\min}} = \min(d_{z_1}, d_{z_2}) \quad (1)$$

$$\theta = \frac{\pi}{180} (z_1 - z_2) \alpha \quad (2)$$

其中, $d_{z_{\min}}$ 为区间 N_{2_i} 边界上的障碍物点到中心的最小距离; θ 为可通行区间 N_{2_i} 的通行角度; α 为扇区角度分辨率(本文取值为 1°).

根据式(1)和式(2)的结果可以得到

$$d \approx d_{z_{\min}} \theta \quad (3)$$

其中, d 为机器人在 N_{2_i} 区域中的可通行距离指

标; 若 $d \geq D_{safe}$ 则表示机器人在该区域内可通行, 否则在该区域内不可通行. D_{safe} 为机器人底座的宽度(在实际中需略大于实际宽度).

若 $D_{safe} \leq d \leq 2D_{safe}$, 则机器人在该区域中的可行方向为

$$\theta_i = \frac{(Z_1 + Z_2)}{2} \alpha \times \frac{\pi}{180} \quad (4)$$

若 $d > 2D_{safe}$, 则机器人在该区域可产生两个可行方向, 如下式.

$$\theta_{i1} = \frac{\pi}{180} Z_1 \alpha - \arcsin\left(\frac{D_{safe}}{d_{z1}}\right) \quad (5)$$

$$\theta_{i2} = \frac{\pi}{180} Z_2 \alpha + \arcsin\left(\frac{D_{safe}}{d_{z2}}\right) \quad (6)$$

2.3 可通行方向分析

上述在计算可通行方向的过程中, 若可通行距离指标 $d < D_{safe}$, 表示机器人在该波谷不可通行. 该算法存在一种局限情况, 如图 4 所示.

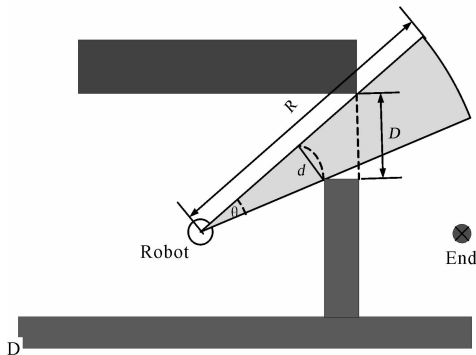


图 4 可通行方向极端情况分析

Fig. 4 Extreme case analysis for possible pass direction

图 4 中, R 为距离阈值, 可通行距离指标 $d < D_{safe}$, 但上下两障碍物之间的距离 $D > D_{safe}$. 此时, 该算法将无法求出可通行方向, 并认为前方无法通行. 但在实际地图中只要将机器人的位置向上移动即可找到一条可通过该障碍物的路径. 此种情况为该算法的极端情况, 解决该方法只需要将距离阈值 R 适当变小即可找到合适的路径.

2.4 机器人行驶方向选择

经过上述计算后, 机器人的可行方向可能有多个, 采用代价函数^[4]来从中选择一个最佳的方向作为机器人行驶方向, 代价函数为

$$g(c) = \mu_1 \Delta(c, k_t) + \mu_2 \Delta(c, k_g) + \mu_3 \Delta(c, k_{t_pre})$$

其中, $\Delta(c, k_t)$ 为可选方向与目标方向的夹角; $\Delta(c, k_g)$ 为可选方向与机器人当前运动方向的夹角; $\Delta(c, k_{t_pre})$ 表示可选方向与上一次运动方向的夹

角. c 为可选方向, k_g 为机器人运动方向, k_{t_pre} 为机器人上一次运动方向. μ_1, μ_2, μ_3 均为常数. 如果期望机器人朝着目标方向移动, 应该使 $\mu_1 > \mu_2 + \mu_3$. (本文中 $\mu_1 = 7, \mu_2 = 3, \mu_3 = 2$).

2.5 行驶方向的目标点确定

VFH 算法的结果为当前状态下的行驶方向, 为了能够达到平滑转弯的效果, 针对行驶方向进行优化, 在确定机器人的行驶方向 θ 后, 使用一个局部目标点来代替行驶方向. 该目标点根据每次的行驶方向的不同在不断更新和调整, 直到到达目的地为止.

2.5.1 机器人视角下目标点确定 若机器人在阈值为 R 下的行驶方向为 θ , 则机器人视角下的局部目标点的坐标为

$$\begin{cases} x_{fp} = R \cos(\theta) \\ y_{fp} = R \sin(\theta) \end{cases} \quad (7)$$

2.5.2 世界坐标下的局部目标点确定 将机器人视角下的临时坐标点 (x_{fp}, y_{fp}) 转化为世界坐标下的局部坐标点. 坐标转换图如图 5 所示.

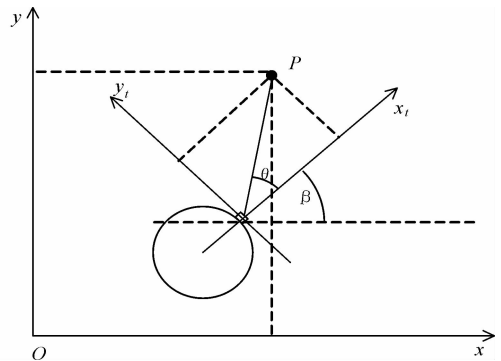


图 5 视角坐标转换图

Fig. 5 Illustration for coordinate transform

设机器人的世界坐标为 (x_1, y_1, β) , 则世界坐标下的局部目标点为

$$\begin{cases} x_{wp} = x_1 + R \cos(\theta + \beta) \\ y_{wp} = y_1 + R \sin(\theta + \beta) \end{cases} \quad (8)$$

其中, x_{wp} 为世界坐标下临时坐标点的横坐标; y_{wp} 为世界坐标下临时坐标点的纵坐标. β 为当前机器人的位姿方向.

3 平滑转弯控制设计

在传统的 VFH 算法以及改进 VFH 算法中, 驱动机器人达到目标方向均采用纯转向, 纯转向会导致机器人在行驶过程中动作不连贯; 并且对于三轮差速驱动机器人而言, 若采用纯转向, 则在方向

控制上会有较大误差. 因此针对 VFH 算法中的纯转向问题提出改进方案, 设计一种平滑转弯控制方案, 实现机器人能够在避障过程中以平滑的路径逼近目标点.

3.1 机器人轨迹控制

实验中机器人转弯轮子的速度控制采用差速的方式, 平滑转弯轨迹如图 6 所示.

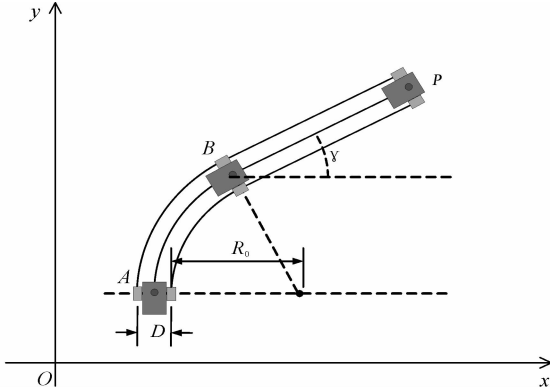


图 6 平滑转弯轨迹控制示意图

Fig. 6 Illustration for smooth turning trajectory control

采用圆弧和直线的方式到达临时目标点 P . 在 AB 段, 机器人以内轮半径为 R_0 作弧线运动. 设机器人的位置与临时目标点 P 的直线与世界坐标 X 轴的夹角为 γ . 当机器人的行驶角度与 γ 相等时, 机器人作直线运动.

3.2 机器人转弯半径控制

采用上述平滑转弯设计时, 若转弯内圆半径 R_0 设置过小, 会导致机器人在行驶过程中动作不连续; 若转弯内圆半径设置过大会导致在未转到直线行驶之前就会碰撞到障碍物. 因此合理的转弯半径选择对实验结果至关重要. 本文在设计转弯半径时, 在前方未检测到障碍物或不需要转向时以机器人的最大速度 V_{max} 行驶. 当机器人检测到障碍物并需要进行转向时, 如图 7 所示.

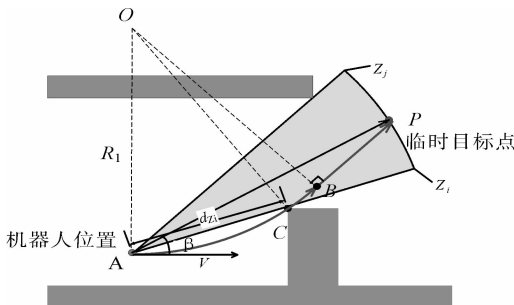


图 7 转弯半径控制示意图

Fig. 7 The control of turning radius

图 7 中, A 为机器人当前位置; V 表示机器人当前行驶速度方向; P 为式 (8) 中计算出来的局部目标点; B 为机器人作弧线运动转为直线运动的转点; C 为机器人活动窗口中可通行区间 $[Z_i, Z_j]$ 的右边界区间 Z_i 内障碍物到机器人的距离最近的点, 其中, $\overline{AC} = d_{z_i}$; O 点为机器人在弧线运动的圆心; R 为机器人作弧线运动的外轮半径.

$$\beta = \frac{\pi}{180}(Z_i - 90)\alpha \tag{9}$$

$$R = \frac{d_{z_i}}{2\sin(\beta)} \tag{10}$$

其中, β 为扇区 Z_i 对应的角度.

若 P 点在以 O 点为圆心, OA 为半径的圆外, 则 R_1 为机器人在遇到障碍物作弧线运动的最大外轮半径, 其中, 在 AB 段为弧线运动, BP 段作直线运动.

若 P 点在以 O 点为圆心, OA 为半径的圆内, 如图 8 所示.

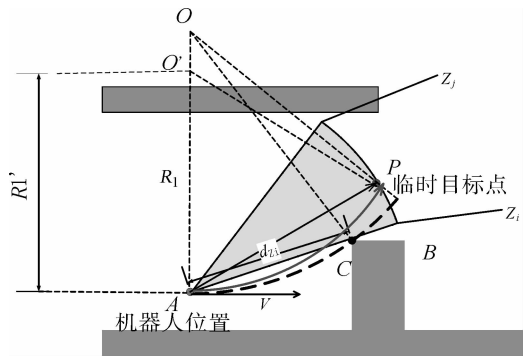


图 8 转弯半径计算示意图

Fig. 8 The turning radius computation

则机器人最大外轮转弯半径为 \overline{OA} 即 R_1' . 其中 A 点以弧线 AP 至局部目标点 P .

由于机器人在弧线行驶过程中内轮半径可为 0, 则其最小外轮转弯半径为 $\frac{D}{2}$. 其中 D 为两轮之间的轮距.

考虑实际的转弯条件, 为了达到平滑转弯效果, 将转弯半径设定为最大半径和最小半径的算术

平均值即 $R = \frac{R_1 + \frac{D}{2}}{2}$, 其中 R 为机器人的外轮转弯半径. 同时为了保证 R 不至于过大而影响机器人转向时间, 本文将转弯半径设定一个阈值即

$[\frac{D}{2}, 10]$. 若 $R \in [\frac{D}{2}, 10]$, 则机器人的转弯半径设定为 R , 若 $R > 10$ 则转弯半径设定为 10 m.

3.3 机器人速度调节

在 3.2 中求出了转弯半径后,则需要通过转弯半径来求取小车的速度. 当机器人不需要转向时以正常速度 V 行驶, 当需要转向时, 调节内轮速度为 V_{in} 使得内轮的速度 V_{in} 为

$$V_{in} = V \frac{R - D}{R} \tag{11}$$

其中, R 为机器人的外轮半径; V_{in} 为机器人内轮速度.

4 实验结果及分析

为了验证本文算法的可靠性, 在轮式机器人上做了多次避障测试, 轮式机器人以及避障地形实物图如图 9 所示. 该轮式机器人的前两轮为差动驱动轮, 后轮为一个万向支撑轮. 采用两片 STM32F407 开发板分别进行激光雷达数据读取和驱动控制. 激光雷达采用 SLAMTEC 公司的 RPLIDAR, 每隔 250 ms 扫描一次环境; 机器人的位置每 10 ms 更新并记录一次.



图 9 避障地形实物图

Fig. 9 terrain map of obstacle avoidance

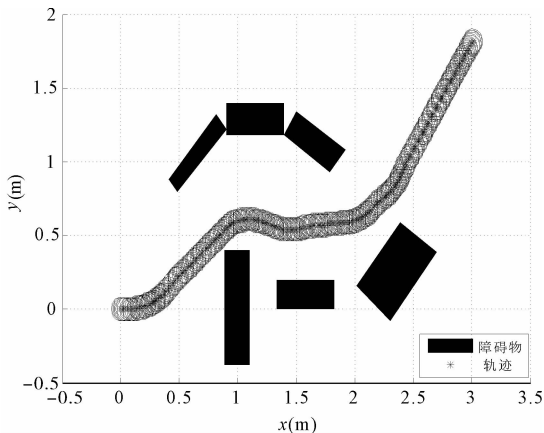


图 10 避障结果示意图

Fig. 10 Result of obstacle avoidance

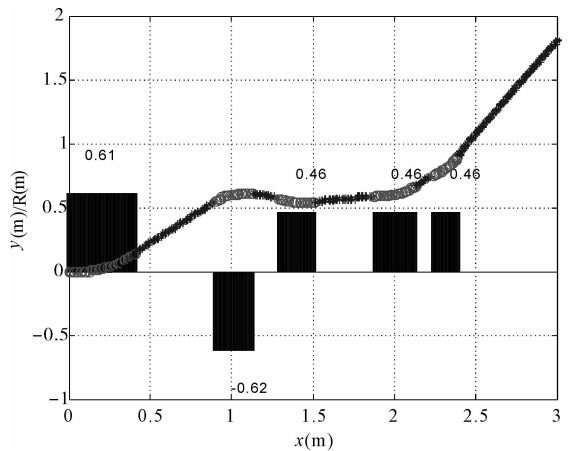


图 11 转向半径变化示意图

Fig. 11 Illustration for the change of turning radius

实验中采用航迹推算对机器人进行定位, 设定机器人起始点 $(0, 0)$ 以及终点坐标 $(3, 2)$. 扇区障碍强度值阈值设定为 1 m. 在到达终点途中有 6 个箱子作为障碍物. 其避障结果如图 10 所示. 实验中机器人一共进行了 5 次转向, 每次转向半径变化图如图 11 所示. 柱形图所对应的曲线部分表示机器人正在做弧形运动, 其余部分表示机器人处于直线行驶状态. 柱形图上面的大小表示机器人处于弧形转弯的时候对应的弧形半径. 转弯半径为正表示左转, 反之表示右转. 当机器人扫描到障碍物时会实时计算当前位置对应的临时目标点以及转向半径, 并调节左右两轮的速度, 使其能够平滑的通过障碍物区域. 结果可见本文算法在平滑避障应用上具有良好的性能.

5 结论

本文是基于激光雷达提出的一种机器人平滑避障方法, 对 VFH 算法进行了改进, 精确计算机器人可通行方向的波谷宽度, 确定机器人避障的局部目标点, 保证机器人能够安全无碰撞且平滑到达终点. 实验结果表明, 本文方法能够在较复杂环境下进行实时平滑避障, 且具有非常好的避障性能.

参考文献:

- [1] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. Int J Robot Res, 1986, 5(1): 90.
- [2] Micha S. Robot motion planning[J]. Commun Pur Appl Math, 1995, 18(9): 1173.
- [3] Hofner C, Schmidt G. Path planning and guidance techniques for an autonomous mobile cleaning robot

- [J]. Robot Automn Sys, 1995, 14(2): 199.
- [4] Borenstein J, Koren Y. The vector field histogram - Fast obstacle avoidance for mobile robots[J]. IEEE Trans Robot Automn, 1991, 7(3): 278.
- [5] Borenstein J, Koren Y. Real-time obstacle avoidance for fast mobile robots[J]. IEEE Trans Sys, Man, and Cybematics, 1989, 19(5): 1179.
- [6] Ulrich I, Borenshtein J. VFH+: reliable obstacle avoidance for fast mobile robots[J]. IEEE Int Conf Robot Automn, 1998, 2(2): 1572.
- [7] Ulrich I, Borenshtein J. VFH*: Local obstacle avoidance with look-ahead verification[C]//Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA: IEEE, 2000.
- [8] 徐玉华, 张崇魏, 徐海琴. 基于激光测距仪的机器人避障新方法[J]. 机器人, 2010, 32(2): 179.
- [9] 刘杰, 闫清东, 唐正华. 基于激光雷达的移动机器人避障规划仿真研究[J]. 计算机工程, 2015, (4): 306.
- [10] Babinec A, Duchon F. VFH* TDT(VFH* with time dependent tree:) a new laser rangefinder based obstacle avoidance method designed for environment with non-static obstacles[J]. Robot Autonomous Sys, 2014, 62(8): 1098.
- [11] 蔡琴. 全方位移动避障实时轨迹控制算法的研究[J]. 四川大学学报: 自然科学版, 2017, 54(1): 76.
- [12] 刘荣, 庄毅, 薛羽. 未知环境下的智能体避障算法研究[J]. 小型微型计算机系统, 2014, 3(3): 602.
- [13] 蔡自兴, 郑敏捷, 邹小兵. 基于激光雷达的移动机器人实时避障策略[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 324.