

文章编号: 1001-0920(2005)08-0951-04

## 局部地形变化检测与移动机器人的行为决策

许宏岩, 付宜利, 王树国

(哈尔滨工业大学 机器人研究所, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对非结构化、未知工作环境下机器人避障/越障等运动需求, 提出一种基于红外传感器的局部地形变化检测方法。分析了局部地形变化的 21 种基本情况, 提出并比较了基于机构和基于传感器的两种检测方法, 推导了地形坡度变化的计算公式, 给出了实际地形组合变化时机器人的具体行为策略。在此基础上进行基于红外传感器的局部地形变化实验, 为机器人在未知环境下安全可靠的运动提供了前提和保障。

**关键词:** 移动机器人; 未知环境; 局部地形变化; 红外传感器

**中图分类号:** TP24      **文献标识码:** A

## On Local Terrain Changes Detection and Reactive Behavior of Mobile Robot

XU Hong-yan, FU Yi-li, WANG Shu-guo

(Robotics Institute, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China Correspondent: XU Hong-yan, Email: xhychina@hit.edu.cn)

**Abstract:** A local terrain detection method based on infrared sensor is provided to meet the mobile robot's requirements in unstructured and unknown environments. Twenty-one kinds of basic instances of local terrain are analyzed and one mechanical detection method and another based on sensor are put up and compared. The terrain grade calculation formula is deducted and the behaviors of mobile robot are given which are also relative to corresponding terrain changes. The experiments based on Infrared sensor prove the validity of the proposed detection method, which offers the mobile robot a proper guide and solid insurance to move in unknown environments.

**Key words:** Mobile robot; Unknown environment; Local terrain changes; Infrared sensor

### 1 引 言

运动是机器人的基础, 定位是导航的核心。对于自主机器人导航而言, 面临着 3 个基本问题<sup>[1]</sup>: 1) 我现在哪里? 2) 我要去哪里? 3) 如何去那里? 围绕这 3 个问题, 移动机器人研究人员展开了大量的研究。从整体情况看, 绝大部分研究侧重于办公室<sup>[2]</sup>、加工车间<sup>[3]</sup>或比赛场地等预先设定好的结构化环境和二维空间<sup>[4]</sup>。

随着机器人应用环境的不断扩展和工作任务的日益复杂<sup>[2]</sup>, 迫切要求移动机器人能准确感知三维环境, 实时检测动态的复杂的障碍物。于是可在复杂

地形运动的移动机器人被研制出来<sup>[5, 6]</sup>, 并在其上采用了可测量俯仰角、横滚角等姿态传感器。然而, 这种检测只是测量机器人的当前状态, 而不能预先检测出即将到来的地面和地形的变化, 因此无法作出指导后续运动的正确决策。

为了实现局部地形的预先检测, 本文研究了地形变化的基本情况, 在此基础上提出一种基于红外传感器的非接触的地形检测方法, 并进行了实验验证。该方法可以事先检测运动前方的局部环境变化, 从而为机器人的局部路径规划和定位导航提供了可靠的支持。

收稿日期: 2004-09-17; 修回日期: 2004-12-14

基金项目: 国家 863 计划项目(2002AA 4222400)。

作者简介: 许宏岩(1976—), 男(满族), 辽宁锦州人, 博士生, 从事机器人体系结构、定位/导航的研究; 付宜利(1966—), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士生导师, 从事移动机器人、柔性制造技术等研究。

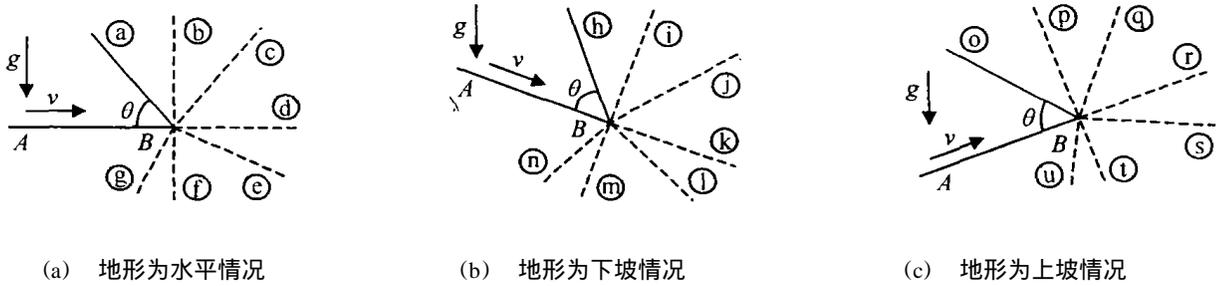


图1 移动机器人和局部地形变化示意

2 局部地形变化的分析

如图1所示, 设轮式移动机器人当前所处位置为AB段, 如果路面在B点发生改变, 则机器人所面临的地形变化有a~u共21种情况。图中v表示机器人运动方向, g表示重力加速度,  $\theta$ 表示地形变化角度

3 局部地形变化的检测

3.1 局部地形变化的检测方式

从整体上说, 用于检测和感知上述局部地形变化的手段和技术主要有两类: 一类是机械方式, 即在移动机器人的前方安装一个末端装有随动轮的探测手臂, 该手臂可以随着随动轮沿地面前进, 如图2(a)所示。通过角度传感器得到 $\alpha$ 角的变化, 即可计算确定地形的变化。这种方法不仅增加了机构的复杂性, 而且无法适应所有地形变化的情况。例如在图1的f, g, m, n, t, u, 由于重力原因而使探测手臂与拐点B发生接触产生滑动摩擦; 在a, c, h, i, j, o, p, q等情况下卡住。如果单纯从检测的角度考虑, 此机械装置可装在机器人本体的中后部等位置, 但这却失去了预先感知和引导的意义。

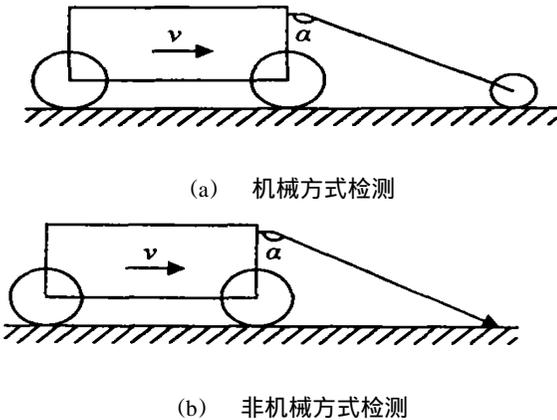


图2 两种地形变化检测方式

另一类方法是通过传感器采用非接触方式完成局部地形变化的测量。即保证某些传感器一定的安转角度, 利用超声/红外/激光等作为检测手段, 代替机械臂来感知地面的变化。其原理如图2(b)所示, 根据时差或三角原理计算距离。它可避免前述机械式检测的缺点, 但易受到反射表面粗糙度、颜色等

影响

3.2 局部地形变化的检测计算

首先以当前地段为水平地段来研究地形变化。如图3(a)所示, 设传感器安装的距地高度为h, 与水平方向的夹角为 $\alpha$ , 地面坡度角 $\gamma$ 符合如下规定:

$$\begin{cases} \alpha, & 0 < \alpha < \pi/2; \\ \gamma, & -\pi < \gamma < \pi \end{cases} \quad (1)$$

在地面不发生变化时, 测量距离 $l_i$ 将保持不变, 即机器人在水平距离S-T<sub>i</sub>范围内没有障碍物, 则有 $l_i = h/\sin\alpha$

如果检测距离 $l_k$ 不等于 $l_i$ , 则有 $l_k < h/\sin\alpha$ 。由正弦定理可得

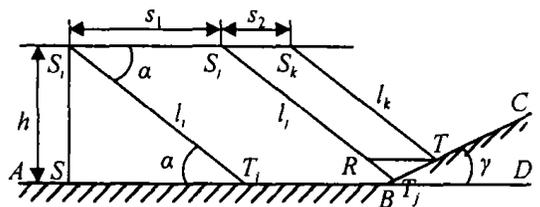
$$\frac{l_i - l_k}{\sin\gamma} = \frac{s_2}{\sin(\pi - \alpha - \gamma)} \quad (2)$$

由此可得感知距离的递推公式

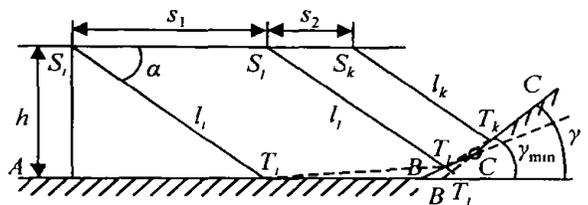
$$l_{n+1} = l_n - s \frac{\sin\gamma}{\sin(\pi - \alpha - \gamma)} \quad (3)$$

其中s为在第n次测距 $l_n$ 与第n+1次测距 $l_{n+1}$ 的时间间隔 $\Delta T$ 内, 当前运动平面A-T<sub>j</sub>上的移动距离, 即 $s = v\Delta T$ 。

由式(2)可算出地形的变化夹角 $\angle AT_jC$ , 即 $(l_n - l_{n+1})\cos\alpha$ 有



(a)  $l_i$  和  $l_k$  在同一地段平面上



(b)  $l_i$  和  $l_k$  不在同一地段平面上

图3 局部地形变化计算

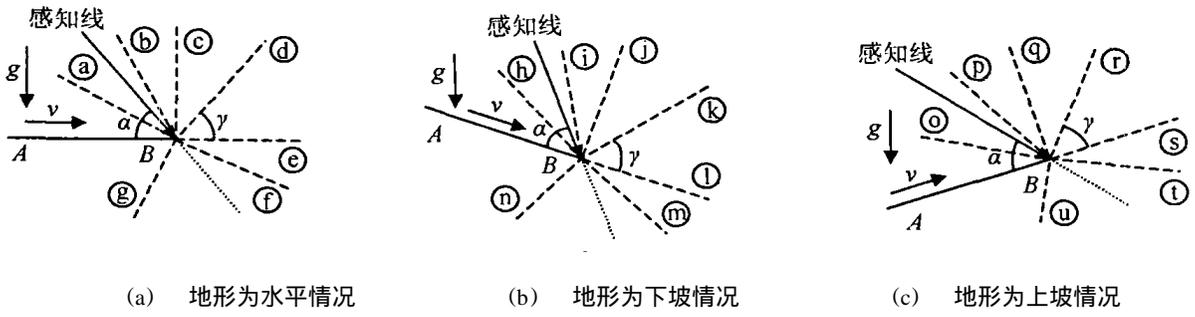


图 4 地形变化示意

$$Y = \arctg \frac{(l_n - l_{n+1}) \sin \alpha}{s - (l_n - l_{n+1}) \cos \alpha} \quad (4)$$

如果  $s < (l_n - l_{n+1}) \cos \alpha$ , 则

$$Y = \begin{cases} \pi - \alpha & Y < \pi, l_n, l_{n+1} \text{ 不存在, 无法算出 } Y; \\ \pi/2 < Y < \pi - \alpha, l_n - l_{n+1} = s / \cos \alpha \\ \pi/2, l_n - l_{n+1} = s / \cos \alpha \\ 0 < Y < \pi/2, 0 < l_n - l_{n+1} < s / \cos \alpha \\ 0, l_n = l_{n+1} = h / \sin \alpha \\ -\alpha < Y < 0, l_n < l_{n+1}; \\ -\pi < Y - \alpha, l_{n+1} = \dots, \text{ 无法算出 } Y \end{cases} \quad (5)$$

这样便得到了针对机器人感知系统的地形变化情况

在实际工作过程中, 由于机器人运动速度或实际地形的变化, 很有可能出现如图 3(b) 所示的情形, 即所检测到的距离  $l_j$  和  $l_k$  在不同的地段上, 利用前面公式计算会出现一定的误差 此时可采用以下两种处理方案:

- 1) 根据式(3) 进行滤波, 直接把  $l_j$  滤掉, 即忽略掉 BC 段的存在, 用 CC 的延长线 BC 代替;
- 2) 利用式(4) 进行计算, 此时相当于利用  $T_i T_j$  和  $T_j T_k$  代替  $T B, B C, C T_k$

这两种方法在 BC 较短且  $B B C$  小于机器人的可攀爬角度时, 没有大的区别, 如图 3(b) 所示

#### 4 局部地形变化时机器人的行为

设机器人的可攀爬角度为  $\theta$ , 向下的坡角为  $\theta_d$ . 在图 4(a) 中, 即当前地形为水平情况时, 需要保证如下条件:

$$\begin{cases} \theta, Y, 0 & Y < \pi - \alpha \\ \theta, |Y|, -\alpha & Y < 0 \end{cases} \quad (6)$$

机器人才可继续前进, 否则必须避开.

在以下两种情况下:

$$\begin{cases} \theta, Y, \pi - \alpha & Y < \theta < \pi \\ \theta, |Y|, -\theta & Y - \alpha < 0 \end{cases} \quad (7)$$

即使机器人向前运动没有问题, 但由于无法感知环境的局部变化, 此时机器人的行为决策结果也应避开.

类似地, 在图 4(b) 中, 即当前地形为下坡情况时, 下坡角  $\gamma_0$  满足  $0 < \gamma_0 < \theta$ , 此时需要保证如下条件:

$$\begin{cases} \theta, Y - \gamma_0, 0 & Y < \pi - \alpha \\ \theta, |Y| + \gamma_0, -\alpha & Y < 0 \end{cases} \quad (8)$$

机器人才可继续前进, 否则必须避开.

在以下两种情况下:

$$\begin{cases} \theta + \gamma_0 & Y, \pi - \alpha & Y < (\theta + \gamma_0) < \pi \\ \theta - \gamma_0 & |Y|, -\theta + \gamma_0 & Y - \alpha < 0 \end{cases} \quad (9)$$

即使机器人向前运动没有问题, 机器人的行为决策结果也应避开.

对于图 4(c), 即当前地形为上坡情况时, 上坡角  $\gamma_0$  满足  $0 < \gamma_0 < \theta$ , 此时需要保证如下条件:

$$\begin{cases} \theta, Y + \gamma_0, 0 & Y < \pi - \alpha \\ \theta, |Y| - \gamma_0, -\alpha & Y < 0 \end{cases} \quad (10)$$

机器人才可继续前进, 否则必须避开.

在以下两种情况下:

$$\begin{cases} \theta - \gamma_0 & Y, \pi - \alpha & Y < (\theta - \gamma_0) < \pi \\ \theta + \gamma_0 & |Y|, -\theta - \gamma_0 & Y - \alpha < 0 \end{cases} \quad (11)$$

即使机器人向前运动没有问题, 机器人的行为决策结果也应避开.

### 5 实验与数据分析

#### 5.1 基于红外传感器的地形探测

红外线传感器由同一发射源发射红外线, 并用两个光检测器测量反射回来的光量. 其优点是: 不受周围可见光的影响, 可在昼夜进行测量; 待测对象自身发射出红外线, 不必设置电源; 大气对某些特定波长范围的红外线吸收甚少, 适用于遥感技术

距离计算公式为

$$\text{distance} = (\text{pulse} - a_0) / a_1 \quad (12)$$

式中: distance 为传感器与物体间的距离, pulse 为数字信号对应的脉冲数,  $a_0 = 260.07, a_1 = 35.258$

#### 5.2 数据处理

利用红外线传感器, 采用三角几何法进行斜面测量实验. 分别在 900, 800, ..., 400 mm 距离上安放

0~90°间隔10°变化的斜面进行测量实验,每段距离每个角度测量3次存入数据文件。利用Matlab对数据进行处理:1)取3次测量的平均值作为测量结果;2)通过两次测量结果、水平距离和传感器的安装参数,利用式(4)计算斜面倾角;3)进行三次样条拟合,绘制对应的三维地形变化如图5所示

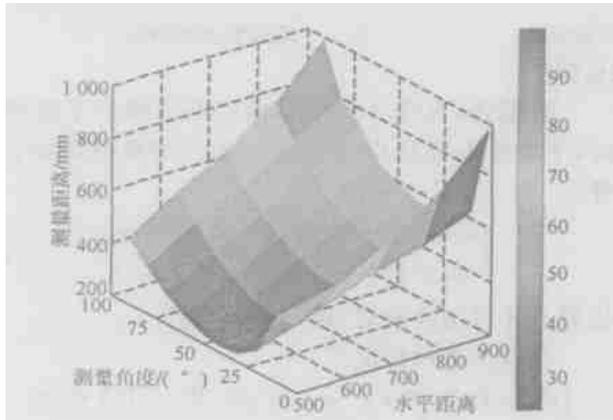


图5 局部地形变化数据处理

在机器人的行为决策实验中(与实际工作相同),通过距离递推式(3)算出预测值,根据式(6)~(11)进行行为决策。通过实验和图5可以得出:

1) 基于红外传感器的局部地形检测,基本符合实际地形变化情况;

2) 当机器人与障碍物的距离较大或超出传感器的测量时,由于采集程序将其作最大测距处理,将会产生一定的误差,但这不影响机器人的行为决策;

3) 根据所提出的基于红外传感器的局部地形判断,机器人基本可以作出正确的行为决策,躲避无法通过的沟壑和无法攀爬的上坡和下坡;

4) 利用红外测距,受到反射表面的粗糙度、颜色和反射率的影响,对机器人的行为判断会产生一定的影响,这是相对于机械式检测不利的一面

## 6 结 语

本文分析了未知环境下局部地形的变化,提出

了基于红外传感器的局部地形变化测量方法,并进行了实验验证。结果表明该方法能够检测出地形的变化,基本可以满足机器人对于越障/避障的运动要求

为了准确和可靠地检测出局部未知环境,需要把本文提出的基于红外传感器的检测方法与基于视频传感器的检测方法结合起来,从而为未知环境下机器人的运动规划提供有力的支持

## 参考文献(References)

- [1] Leonard J J, Durrant H F. *Directed Sonar Sensing for Mobile Robot Navigation* [M]. London: Kluwer Academic Publishers, 1992
- [2] Kanji Tanaka, Yoshihiko Kimuro. Motion Sequence Scheme for Detecting Mobile Robots in an Office Environment [A]. *Proc 2003 IEEE Int Symp on Computational Intelligence in Robotics and Automation* [C]. Kobe, 2003: 145-150
- [3] Hu H S, Brady M. Dynamic Global Path Planning with Uncertainty for Mobile Robots in Manufacturing [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1997, 13(5): 760-767.
- [4] Giovanni A dorni, Stefano Cagnoni, Stefan Enderle, et al. Vision-based Localization for Mobile Robots [J]. *Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 36(2): 103-119
- [5] Moez Cherif. Motion Planning for All-terrain Vehicles: A Physical Modeling Approach for Coping with Dynamic and Contact Interaction Constraints [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1999, 15(2): 202-218
- [6] Hayati S, Volpe R, Backes P, et al. The Rocky 7 Rover: A Mars Sciencecraft Prototype [A]. *Proc of the 1997 IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Albuquerque, 1997: 2458-2464