

# 具备被动关节的巡检机器人越障性能研究

宋屹峰<sup>1,2</sup>, 王洪光<sup>2</sup>, 姜勇<sup>2</sup>, 凌烈<sup>2</sup>

(1.中国科学院 研究生院 北京 100049 ;

2.沈阳自动化研究所 机器人学国家重点实验室 辽宁 沈阳 110016)

**摘要** 输电线路巡检机器人的越障能力是其性能评价的一项重要指标。基于准静态分析,对比研究了大轮径机器人与被动关节的机器人的越障过程,分别计算出机器人可跨越的最大越障高度、越障瞬时功率需求等参数。分析结果显示被动关节的机器人构型与大轮径机器人构型相比,具有更好的越障性能与更合理的越障能耗需求,被动关节的设计增强了机器人越障的安全性及稳定性。通过仿真与现场实验,验证了具备被动关节机器人具有更高的越障性能,为机器人的原理方案确定与设计提供了依据。

**关键词** 巡检机器人 越障性能 准静态分析

**中图分类号** :TH16 ;TP242 **文献标识码** :A **文章编号** :1001-3997(2013)12-0083-04

## Research on Obstacle Performance of an Inspection Robot with Passive Joints

SONG Yi-feng<sup>1,2</sup>, WANG Hong-guang<sup>2</sup>, JIANG Yong<sup>2</sup>, LING Lie<sup>2</sup>

(1.Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China ;

2.State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, Liaoning Shenyang 110016, China)

**Abstract** Obstacle-crossing capability is an important index to evaluate the performance of power transmission line inspection robots. Based on the quasi-static analysis, it compared the obstacle-crossing process of the inspection robot with large-diameter wheels and the inspection robot with passive joints, and calculated the maximum height that the robots can cross and the power consuming during the obstacle-crossing. The comparison results indicate that the inspection robot with passive joints has a better obstacle-crossing performance and power consuming requirement, which means the design of passive joints promotes the safety and stability during obstacle-crossing. The obstacle-crossing performance of the inspection robot with passive joints has been demonstrated by both simulation and field experiment. The research provides the theoretic reference for the inspection robot scheme and mechanical design.

**Key Words** Inspection Robot ;Obstacle Crossing ;Quasi-Static Analysis

## 1 引言

超高压输电线路巡检是为了掌握线路的运行状况,及时发现电力设施的缺陷和沿线通道情况,为输电线路检修提供资料。较传统的人工巡检,输电线路巡检机器人具有巡检费用低、安全可靠、可近距离精细巡检以及易于操作等优点,逐渐成为线路巡检的一个新的研究方向。越障性能是机器人研究的一项关键技术<sup>[1]</sup>,由于输电线路通常安装有多种金具,因此巡检机器人需要具备安全稳定跨越线路障碍的能力。

对于巡检机器人的研制始于上个世纪八十年代,日本某电力公司的巡检机器人采用自身携带辅助导轨进行越障<sup>[2]</sup>。此后,东京科技大学等单位均研制四分导线巡检机器人 Expliner<sup>[3]</sup>,以后的研究工作也一直没有停止过<sup>[4-6]</sup>。但以上所提到的机器人在跨越防振锤与压接管障碍时均需要多关节协调运动,越障时间长、效率低。以加拿大魁北克某研究院研制的 LineScout<sup>[7-8]</sup>为代表的—

类巡检机器人采用大轮径驱动轮直接跨越防振锤、压接管等相似结构障碍。但是该机器人在爬坡线路上的越障性能并不理想,此外越障时夹紧轮必须打开也无法保障机器人的越障安全性。在分析驱动轮越障的基础上,讨论了在手臂加装关节的机器人改进构型可能性,通过理论推导与仿真分析,选取有利于越障的构型作为改进构型,最终通过仿真实验与在实际环境中进行的行走爬坡越障实验验证了被动关节机器人越障性能的优越性。

## 2 大轮径机器人越障分析

防振锤和压接管是两种典型上方不封闭的输电线路障碍。防振锤安装在线路上用于减小风载振动所造成的危害,一般每档内需要安装 4~6 个。压接管主要用于接续线路、补修断股等。机器人在架空地线行走时必须能够快速安全的跨越它们。

轮式结构能够连续运动,轮线间摩擦为滚动摩擦,对线路的损伤程度较小,此外还具有驱动方式简单、传动链短等优势,因此

来稿日期 2013-02-05

基金项目 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z203) 国家自然科学基金(60905048)

作者简介 宋屹峰(1984-)男,青海西宁人,博士研究生,主要研究方向:机器人优化设计;

王洪光(1965-)男,内蒙古赤峰人,博士,研究员,主要研究方向:机器人机构学

目前研制的输电线巡检机器人多采用轮式结构。

机器人前轮的跨越过程可以大致分为以下步骤,机器人首先行驶至障碍物附近,而后机器人在牵引力作用下克服重力绕后轮轴抬起前轮,当驱动轮继续提供驱动力时,前轮持续抬高,直至前轮整体均高于障碍物,机器人继续前进,完成整个越障过程。值得注意的是,机器人此时夹紧轮必须处于打开状态,因为当前夹紧轮闭合时,很明显前轮无法举升越障。而当后夹紧轮闭合时,如图 2 所示。夹紧轮与线路接触,并通过闭合装置与后臂连接,机器人无法沿红色箭头完成越障所需要的转动,因此也无法完成越障。

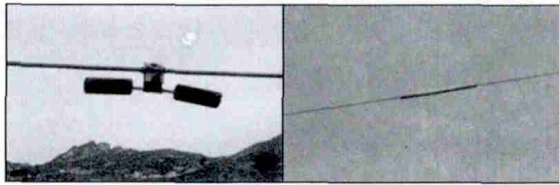


图 1 典型的线路障碍防振锤和压接管  
Fig.1 Typical Obstacles Counterweight and Splicing Sleeve

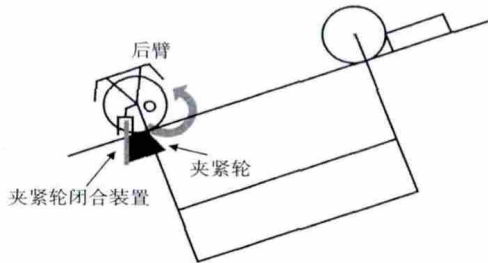


图 2 夹紧轮对越障的影响  
Fig.2 Influence of Gripper Wheel on Obstacle-Crossing

为了计算机器人可以跨越的最大障碍高度,可以首先建立机器人的准静态越障模型,从而得到沿线与垂直方向的力平衡方程与前轮轴心的力矩平衡方程(1)~(3),其中各参数意义可见附表。

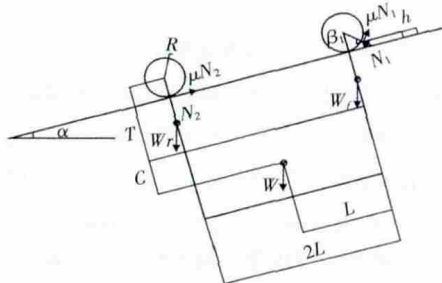


图 3 大轮径机器人前轮跨越障碍准静态模型  
Fig.3 Quasi-Statics Model of Fore Wheel Crossing Obstacle for the Robot with Large-Diameter Wheels

$$\mu N_2 + N_1(\mu \sin \beta_1 - \cos \beta_1) = \Sigma W \sin \alpha \quad (1)$$

$$N_1(\sin \beta_1 + \mu \cos \beta_1) + N_2 = \Sigma W \cos \alpha \quad (2)$$

$$\mu R(N_1 + N_2) + W(L \cos \alpha - T \sin \alpha - C \sin \alpha) + 2W_f L \cos \alpha = 2N_2 L + (W_f + W_c)(1 - \eta) T \sin \alpha \quad (3)$$

简化方程(1)~(2)可以得到  $N_1$  与  $N_2$ , 带入方程(3)化简得到形式如(4)的方程:

$$A_i \sin \beta_i + B_i \cos \beta_i + C_i = 0 \quad (4)$$

夹角  $\beta_i$  满足  $\sin \beta_i = 1 - \frac{h_i}{R}$ , 进而可以得到此时机器人可跨越最高障碍  $h_1$ :

$$\frac{h_i}{R} = \frac{B_i + A_i C_i + A_i^2 - B_i \sqrt{B_i^2 + A_i^2 - C_i^2}}{A_i^2 + B_i^2} \quad (5)$$

这里  $i=1$  对应的  $A_1, B_1, C_1$  分别为:

$$A_1 = (\mu R - 2L)(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \Sigma W \quad (6)$$

$$B_1 = (1 + \mu^2)(W(1 - \eta) T \sin \alpha - W(2L \cos \alpha - (1 - \eta) T \sin \alpha) - W(L \cos \alpha - T \sin \alpha - C \sin \alpha)) + (\mu R - 2L) \Sigma W(\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (7)$$

$$C_1 = -\mu R(\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \Sigma W \quad (8)$$

后轮越障过程与前轮类似,夹紧轮在该阶段也必须保持打开状态。用同样的方法可以计算出机器人的后轮最大越障高度  $h_2/R$  其表达形式与(5)相同。对应的参数  $A_2, B_2, C_2$  分别为:

$$A_2 = (\mu R + 2L)(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \Sigma W \quad (9)$$

$$B_2 = (1 + \mu^2)(W(1 - \eta) T \sin \alpha + W(L \cos \alpha + C \sin \alpha + T \sin \alpha) + W(2L \cos \alpha + (1 - \eta) T \sin \alpha)) - (\mu R + 2L) \Sigma W(\mu \sin \alpha - \cos \alpha) \quad (10)$$

$$C_2 = -\mu R(\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \Sigma W \quad (11)$$

对比较前后轮可跨越的最大障碍高度  $h_1$  与  $h_2$ , 可以发现同样构型下机器人在爬坡阶段后轮能够跨越更高的障碍物,因此着重提高机器人前轮的越障能力对于整机越障性能的改善有着更为重要的意义。

### 3 机器人改进构型的越障分析

#### 3.1 机器人改进构型介绍

如果在双臂各增加一个主动回转关节,可以使机器人存在四种构型可能,如图 4 所示。采用准静态方法对四种构型进行分析,建立方程(1)~(3),并导出各种构型可跨越最大高度,其中构型 1 与构型 4 可跨越的障碍高度小于无关节机器人前轮越障高度  $h_1/R$ , 而构型 2、3 更有利于前轮越障。如果将双臂的关节改为被动回转关节,在前轮越障时,机器人的构型将会与构型 3 基本一致,同时被动关节设计简单,不增加控制系统难度,更易实现。在被动关节两侧安装复位弹簧,机器人遇障时,关节发生一定的变形,同时机器人整体重心上移,弹性元件储存一定能量。而后弹性元件复位,释放弹性势能,使驱动轮完成障碍跨越。

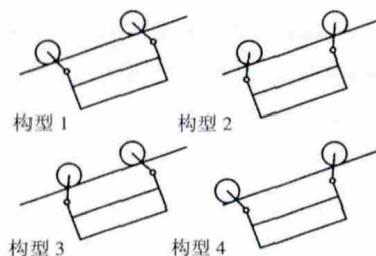


图 4 机器人构型分析  
Fig.4 The Analysis of Robot Configurations

#### 3.2 机器人越障分析

具备被动关节的机器人跨越障碍大致可以分为如下几个步骤:前轮接触障碍物后,在牵引力的作用下机器人前臂的被动关

节开始变形 随着变形量增加 关节处由弹簧提供的力矩不断增加 前臂关节停止变形。与此同时后臂转动关节也发生一定变形, 变形方向与前臂相反 机器人重心由于双臂的变形被抬高一定高度 值得注意的是 此时机器人前轮是绕后臂被动关节旋转抬起, 因此后轮夹紧轮可以保持闭合 如图 5 所示。后轮下黑色方块表示闭合的夹紧轮。而后机器人在牵引力作用下克服重力开始抬起前轮 双臂被动关节在此时开始恢复原状态 该过程与之前由变形引起的重心上移一同构成了有助于前轮跨越障碍物的有利因素。直至机器人前轮整体均高于障碍物 继续前进 完成整个前轮跨越过程。

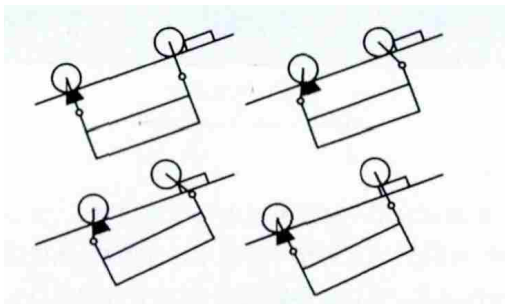


图 5 前轮跨越障碍流程  
Fig.5 The Process of Fore Wheel  
Obstacle-Crossing

对该状态下的机器人进行准静态分析 如图 6 所示 机器人在前轮越障瞬间 各被动关节变形量  $\gamma_f, \gamma_r$ , 箱体与导线夹角  $\theta$  分别满足如下边界条件:

$$K\gamma_f = \mu N_1(l \sin(\beta + \gamma_f) - R) - N_1 l \cos(\beta + \gamma_f) \quad (12)$$

$$K\gamma_r = \mu N_2(l \cos \gamma_r - R) - N_2 l \sin \gamma_r \quad (13)$$

$$\sin \theta = (l \cos \gamma_f - l \cos \gamma_r) / 2L \quad (14)$$

可以根据计算出的  $\gamma_f$  与  $\gamma_r$  来计算前臂与后臂的重心位置 ( $d_f, \eta' T$ ) ( $d_r, \eta'' T$ )。在此基础上, 计算出机器人前臂、后臂、箱体的重力及后轮支持力对于前轮轴心点的力臂分别为  $D_f, D_r, D$  及  $D_{N2}$ 。

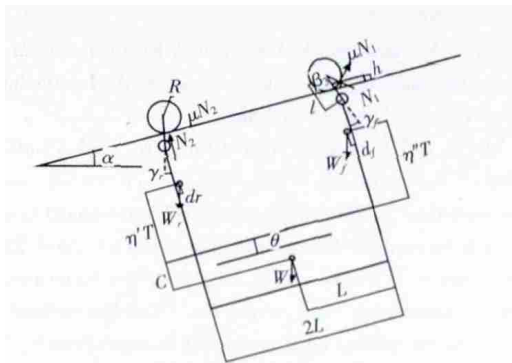


图 6 机器人前轮跨越障碍准静态受力分析  
Fig.6 Quasi-Statics Model of Fore Wheel Crossing  
Obstacle for the Robot with Passive Joints

分别列出机器人沿线与垂直方向的力平衡方程与前轮轴心的力矩平衡方程 如(15)~(17)所示。

$$\mu N_2 + N_1(\mu \sin \beta_3 - \cos \beta_3) = \Sigma W \sin \alpha \quad (15)$$

$$N_1(\sin \beta_3 + \mu \cos \beta_3) + N_2 = \Sigma W \cos \alpha \quad (16)$$

$$\mu R(N_1 + N_2) + W_f D_f + W D = N_2 D_{N2} + W_f D_f \quad (17)$$

通过对以上平衡方程进行处理 同样可以得到形式如的方程 (4)的方程 并求解出跨越障碍高度  $h_3/R$  这里  $A_3, B_3, C_3$  分别为:

$$A_3 = (\mu R + D_{N2})(\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \Sigma W \quad (18)$$

$$B_3 = (1 + \mu^2)(W_f D_f - W_r D_r - W D) + (\mu R - D_{N2}) \Sigma W (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \quad (19)$$

$$C_3 = -\mu l (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) \Sigma W \quad (20)$$

后轮越障时, 当机器人后轮行驶至障碍物附近时 后轮接触障碍物后 在牵引力的作用下后臂柔性关节开始变形 同时前臂柔性关节也发生一定变形 重心被抬高一定高度 而后机器人在牵引力作用下克服重力开始抬起前轮 直至后轮整体高于障碍, 机器人继续前进完成整个跨越过程 如图 7 所示。此过程期间机器人前轮夹紧轮的闭合不会妨碍到机器人的越障。采用相同的方法计算后轮的最大跨越障碍高度  $h_4/R$  这里  $A_4, B_4, C_4$  分别为:

$$A_4 = (\mu R + D_{N1})(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \Sigma W \quad (21)$$

$$B_4 = (1 + \mu^2)(W D + W_f D_f + W_r D_r) - (\mu R + D_{N1})(\mu \sin \alpha - \cos \alpha) \Sigma W \quad (22)$$

$$C_4 = -\mu R (\mu \cos \alpha - \sin \alpha) (W + W_f + W_r) \quad (23)$$

### 3.3 机器人越障瞬时功率比较

比较以上两类机器人在跨越过程中的能量消耗, 在不考虑摩擦滚阻的情况下 机器人从跨越开始到单轮完全处于障碍上方的瞬时功率可以表示为动能差  $\Delta KE$  与势能差  $\Delta PE$  的微分:

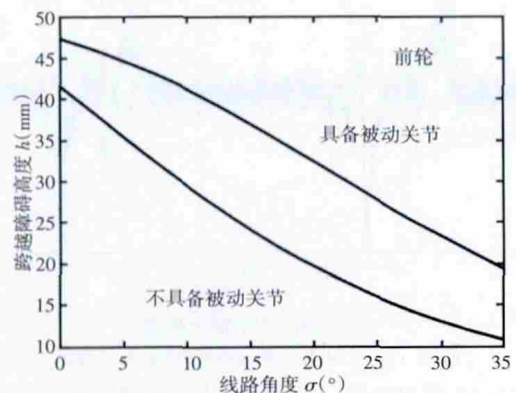
$$P(t) = \frac{d(\Delta PE + \Delta KE)}{dt} \quad (24)$$

$$\Delta PE = W \Delta H + W_f \Delta H_f + W_r \Delta H_r + \Delta TE \quad (25)$$

比较两类机器人的越障过程可以发现, 虽然两类机器人起始与终止的能量状态相同 但不具备被动关节的机器人需要在短时间内抬升机器人的重心高度以跨越障碍 而具备被动关节的机器人在遇到障碍后关节即开始变形 这个过程可以将部分能量转化为机器人的弹性势能 同时被动的提升了机器人的重心高度 当机器人的弹性势能储存到一定程度时 遇障的驱动轮将会被抬升以完成跨越过程。因此被动关节的设计使得机器人的越障能量需求分布更加合理 降低了最大输出功率需求 使整个越障过程更加稳定可靠。

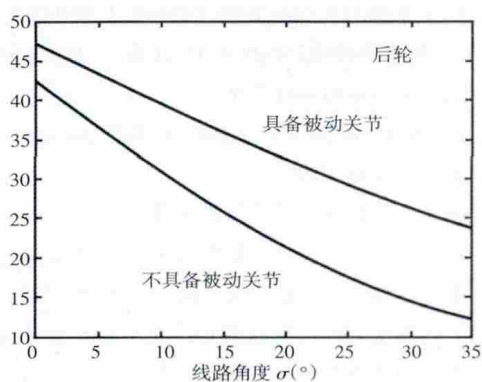
## 4 仿真分析

在确定机器人机构参数后 分别计算  $A_i, B_i, C_i (i=1\sim 4)$  而后按照(5)对双臂臂未安装转动关节与安装转动关节的两种机器人的前后轮越障能力分别进行仿真分析 两种机器人在不同线路角度下的前、后轮越障分析结果对比 如图 7 所示。



(a)





(b)  
图7 越障性能比较

Fig.7 Obstacle-Crossing Performance Contrast

通过仿真实验可以发现 随着线路角度增大 机器人双轮越障能力均会一定程度的下降 但是在双臂安装转动关节后 机器人前后轮的越障能力都较不安装时强。此外 由于爬坡阶段机器人后轮所受支持力小于前轮 而前轮越障时机器人一般由后轮牵引 因此机器人的前轮越障能力在同等线路环境下较后轮弱。在线路角度达到 25°时 未安装转动关节的机器人基本已经无法跨越高度为 15mm 的防振锤等障碍, 而在双臂安装转动关节后 在线路角度为 35°时 机器人仍可以跨越相应障碍。在以上分析的基础上 对机器人进行了参数化三维建模 并通过 ADAMS 平台进行了机器人越障的仿真分析。仿真实验中, 设定线路角度为 30°, 可以测得机器人被动关节角变化曲线与重心高度变化曲线, 如图 8 所示。通过方程(24)~(25)可以计算出两种构型机器人在越障时的瞬时功率 如图 9 所示。

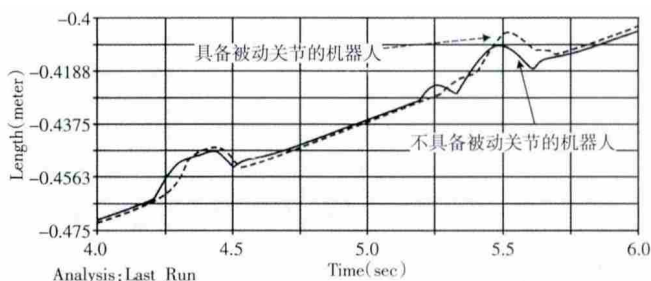


图8 仿真平台与重心变化曲线

Fig.8 Simulation Platform and Curves of Centroid Position.

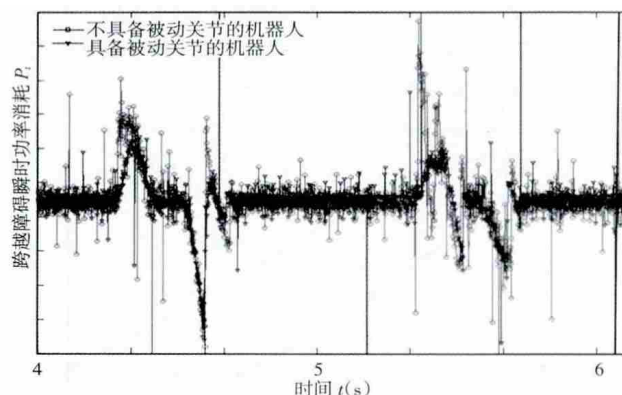


图9 瞬时功率输出曲线

Fig.9 Curve of Instantaneous Power Output

通过对比可以发现, 安装转动关节的机器人在越障时所需要的瞬时输出功率明显较小, 有效的减少越障过程中的振动 降

低机器人与障碍间的刚性碰撞 增强了机器人的越障性能。

### 5 实验

为了验证具备被动关节的输电线巡检机器人在线路上的越障性能, 首先在实验室内进行了相关实验, 而后进行了现场带电实验, 如图 10 所示。实验表明该机器人样机能够在超高压输电线路环境下正常工作, 在 30°线路上 机器人仍可以顺利跨越防振锤、压接管等障碍。



图10 现场实验  
Fig.10 Field Experiment

### 6 结论

(1)研制开发了一种新型输电线巡检机器人, 该机器人采用双臂结构, 每臂上均安装有一个被动转动关节, 该机器人完成沿线行走动作并可以直接跨越防振锤、压接管等障碍。(2)分别对大轮径机器人与被动关节机器人进行越障准静态分析, 通过分析仿真计算发现, 安装被动关节的机器人具有更强的越障能力, 越障时所需的瞬时功率分布更合理, 尤其在大角度线路的障碍跨越能力。(3)现场实验表明 机器人在大角度带电实际线路上行走平稳安全, 快速平稳的跨越防振锤等障碍, 行走期间, 各传感器工作正常, 机器人顺利在带电线路路上巡检作业。

### 参考文献

[1] 高英丽, 吴新跃, 吴镇伟. 六轮腿复合型移动机器人越障分析及机构设计[J]. 机械设计与制造, 2013(6): 178-180.  
(Gao Ying-Li, Wu Xin-yue, Wu Zhen-wei. Motion ability analysis and mechanism design for six-leg-wheel hybrid mobile robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(6): 178-180)

[2] S. Jun, K. Kazuyuki, M. Tadashi, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 309-315.

[3] P. Debenest, M. Guarnieri, K. Takita, et al. Expliner toward a practical robot for inspection of high-voltage lines [C]// The 7th International Conference on Field and Service Robots

[4] F.M.C. Mario, Q.B. Alexandre, A.S.P. Guilherme, et al. A mobile robot for installation and removal of air warning spheres on aerial power transmission lines[C]// Proceedings of IEEE International Conference on Robotics & Automation 2002, Washington DC, USA, 2004: 3559-3564.

[5] S.Peungsungwal, B. Pungsiri B, K. Chamnongthai. Autonomous robot for a power transmission line inspection [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, New South Wales, Sydney IEEE 2001 (6-9): 121-124.

[6] K. Iagnemma, F. Genot, S. Dubowski. Rapid physics-based rough terrain rover planning with sensor and control uncertainty [C]//IEEE Int. Robotics and Automation, 1999: 2286-2291.

[7] N. Pouliot, and S. Montambault. LineScout Technology: From inspection to robotic maintenance on live transmission power lines[C]// Robotics and Automation, 2009. ICRA '09. IEEE International Conference on, 2009: 1034-1040.

[8] K. Toussaint, N. Pouliot and S. Montambault. Transmission line maintenance robots capable of crossing obstacles: state of the art review and challenges ahead[J] Journal of Field Robotics, 2009, 26(5): 477-499.