

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.033

轮式移动机器人的最优变道路径规划*

安凯 李向阳
(山东航天电子技术研究所,烟台 264003)

【摘要】 针对轮式移动除草机器人移动路线向导航线的变道问题,建立了导航测量坐标系,并给出了相关的导航与测量算法。根据导航线与机器人移动路线的平行与相交,考虑到机器人转向受最小转弯半径的约束,分别提出不同的路径规划,并证明了两种路径都是最优路径。给出了最优路径中一些关键数据和特征点的测量与计算公式,以及沿最优路径移动的控制程序。两种最优变道路径规划方法可用于依靠前轮转向的任何车辆或机器人。

关键词: 轮式机器人 最优路径 变道 最小转弯半径
中图分类号: TP242; S451.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2012)07-0179-06

Optimal Path Planning for Lane Changing of Wheeled Mobile Robot

An Kai Li Xiangyang
(Shandong Aerospace Electro-technology Institute, Yantai 264003, China)

Abstract

In order to change the lane of a weeding robot to the navigation line, a visual navigation system and two reference frames were established, some relative navigation and measure algorithms were put forward. According to the condition whether robot's moving direction were parallel with the navigation line or not, two different paths for lane changing were put forward and proved to be the optimal lane changing paths after the minimal turning radius was restricted. The corresponding control process and some calculation formulae about pivotal points and indispensable data related to the optimal paths were given. The two optimal paths planning methods for lane changing can be applied to any vehicle and robot with front wheel steering.

Key words Wheeled robot, Optimal path, Lane changing, Minimal turning radius

引言

移动机器人技术是近年来的研究热点。路径规划技术是移动机器人研究中的一个重要领域,它解决移动机器人如何在环境中行走的问题。路径规划涉及机器人的探测、导航和通信,是一门综合性的研究课题。作为一种自动化和智能化的农业机械,轮式除草机器人可以代替人类进行除草活动,减轻农民的劳动强度,减少农业从业人口数量,其研究与开发一直备受关注。美国伊利诺依大学农业与生物工程系研究了应用机器视觉系统采集的图像,分析杂草分布特性,进行施用量决策并控制喷头工作的智能喷雾机。澳大利亚科研人员研发出一种智能化农田施药机械,它在田间移动时,能借助专门的电子传

感器来区分庄稼和杂草,一旦发现杂草便喷洒除草剂^[1]。在国内,侯学贵等^[2]提出利用图像处理技术提取农作物行中心线作为导航线的方法,并给出了偏航角和机器人坐标系原点与导航线之间距离的计算公式。周俊等^[3]利用视觉导航技术给出了上述2个导航参数的计算公式,并提出了利用卡尔曼滤波降低导航误差的方法。然而,对于仅靠前轮转向的机器人而言,其移动路径受到转弯半径的严格限制,既不能沿直线与导航线接轨,也不能原地转向使偏航角归零。控制系统只有依据机器人的转弯规律为其设计合理的路径,并具备路径关键点的测距功能,才能对机器人实施有效控制。

若机器人的移动方向与导航线不一致,可能有2种情形:平行和相交。无论哪一种情形,机器人都

收稿日期: 2012-02-27 修回日期: 2012-04-04
* 国防科工局“十二五”项目(k0201210)
作者简介: 安凯,研究员,博士后,主要从事光学工程、智能控制和机器人研究,E-mail: ankai2007@163.com

需要通过转弯达到二者的一致。研究这种“变道”问题的最优路径规划,需要定义摄像头焦平面坐标系和机器人本体坐标系,并确定二者之间的转换算法,以解决机器人和导航线相对位置的测量。最小转弯半径决定机器人路径的最大曲率,本文将利用最小转弯半径设计机器人的路径并证明路径规划的最优性。

1 导航坐标系与导航线参数的确定

前轮转向的轮式机器人如图 1 所示,为实现对转弯的精确控制,导航摄像头安装在前轴中部。摄像头焦距为 f ,光轴与水平面的夹角为 φ ,与地面的垂直距离为 h 。为保证对前方目标点的测距功能,过光心的铅垂线与地面的交点必须出现在摄像头的视场之内。定义如下坐标系^[4~5]:机器人本体坐标系 $Oxyz$,原点 O 为过光心的铅垂线与地面的交点, x 轴指向右方, y 轴指向前方, z 轴与铅垂线重合。摄像头焦平面坐标系 $O'XY$,原点 O' 与光心重合, X 轴与 x 轴平行, Y 轴在焦平面内并与 X 轴构成右手系,坐标系中的单位为像素。

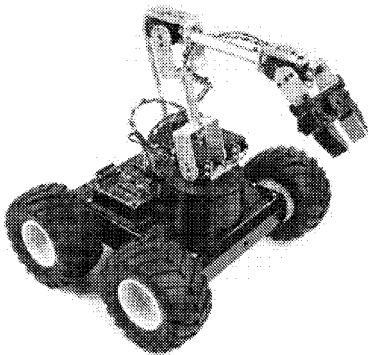


图 1 轮式移动机器人
Fig. 1 Wheeled mobile robot

记 X 轴和 Y 轴的长度(像素)分别为 d_x 和 d_y ,前轴中心的铅垂线与地面的交点(下文中以此表示机器人的位置)和 O' 点的距离为 d 。

对于出现在视场中的任何一点,若在机器人本体坐标系 $Oxyz$ 中的坐标为 $(x, y, 0)$,且 $y > \frac{h}{\tan \varphi}$,则 $(x, y, 0)$ 的像点出现在焦平面上半部分,如图 2 所示,过这一点作平面垂直于光轴,由摄像机成像的几何原理知^[6~8]

$$\begin{cases} \frac{Xd_x}{f} = \frac{x}{\frac{h}{\sin \varphi} + b} = \frac{x}{\frac{h}{\sin \varphi} + c \cos \varphi} \\ \frac{Yd_y}{f} = \frac{a}{b + \frac{h}{\sin \varphi}} = \frac{c \sin \varphi}{c \cos \varphi + \frac{h}{\sin \varphi}} \end{cases}$$

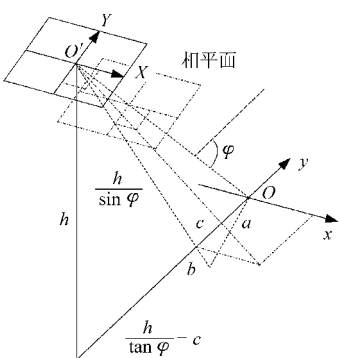


图 2 $Oxyz$ 和 $O'XY$ 间的坐标变换示意图
Fig. 2 Coordinate transformation between $Oxyz$ and $O'XY$

利用 $c = y - \frac{h}{\tan \varphi}$ 得

$$\begin{cases} \frac{Xd_x}{f} = \frac{x}{\frac{h}{\sin \varphi} + \left(y - \frac{h}{\tan \varphi}\right) \cos \varphi} = \frac{x}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \\ \frac{Yd_y}{f} = \frac{c \sin \varphi}{\left(y - \frac{h}{\tan \varphi}\right) \cos \varphi + \frac{h}{\sin \varphi}} = \frac{y \sin \varphi - h \cos \varphi}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} X = \frac{f}{d_x} \frac{x}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \\ Y = \frac{f}{d_y} \frac{y \sin \varphi - h \cos \varphi}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \end{cases} \tag{1}$$

当 $y < \frac{h}{\tan \varphi}$ 时, $(x, y, 0)$ 的像点出现在焦平面的下半部分,可以验证式(1)仍成立。于是

$$\begin{cases} \frac{dY}{dX} = \frac{d_x \frac{d}{dx} \left(\frac{y \sin \varphi - h \cos \varphi}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \right)}{d_y \frac{d}{dx} \left(\frac{x}{h \sin \varphi + y \cos \varphi} \right)} = \\ \frac{d_x \frac{h \frac{dy}{dx}}{d_y h \sin \varphi + y \cos \varphi - x \cos \varphi \frac{dy}{dx}}}{\frac{dy}{dx} = \frac{(h \sin \varphi + y \cos \varphi) \frac{dY}{dX}}{h \frac{d_x}{d_y} + x \cos \varphi \frac{dY}{dX}}} \end{cases} \tag{2}$$

当 $Y = 0$ 时, $X = X_0$, 对应的 (x, y) 满足

$$\begin{cases} \frac{X_0 d_x}{f} = \frac{x}{\frac{h}{\sin \varphi}} \\ \frac{d_y}{f} = \frac{y - \frac{h}{\tan \varphi}}{\left(y - \frac{h}{\tan \varphi}\right) \cos \varphi + \frac{h}{\sin \varphi}} \end{cases}$$

即

$$\begin{cases} x = \frac{X_0 d_x h}{f \sin \varphi} \\ y = \frac{h}{\tan \varphi} \end{cases} \tag{3}$$

代入式(2)中得

$$\frac{dy}{dx} = \frac{\frac{h}{\sin\varphi} \frac{dY}{dX}}{h \frac{d_x}{d_y} + \frac{X_0 d_x h}{f \sin\varphi} \cos\varphi \frac{dY}{dX}} = \frac{\frac{dY}{dX}}{\frac{a_y}{a_x} \sin\varphi + \frac{X_0}{a_x} \cos\varphi \frac{dY}{dX}}$$

其中 $a_x = \frac{f}{d_x}$ $a_y = \frac{f}{d_y}$ $\frac{dY}{dX} = \tan\theta$ $\frac{dy}{dx} = \tan\bar{\theta}$
式中 θ 和 $\bar{\theta}$ 分别为焦平面坐标系和机器人本体坐标系中导航线与横轴的夹角,于是

$$\cot\bar{\theta} = \frac{a_y}{a_x} \sin\varphi \cot\theta + \frac{X_0}{a_x} \cos\varphi$$
$$\bar{\theta} = \operatorname{arccot}\left(\frac{a_y}{a_x} \sin\varphi \cot\theta + \frac{X_0}{a_x} \cos\varphi\right)$$

由于导航线是经过式(3)表示的点且倾角为 $\bar{\theta}$ 的直线,因此其直线方程为

$$y - \frac{h}{\tan\varphi} = \left(x - \frac{X_0 d_x h}{f \sin\varphi}\right) \tan\bar{\theta}$$

即 $y \cos\bar{\theta} - x \sin\bar{\theta} + \frac{X_0 d_x h}{f \sin\varphi} \sin\bar{\theta} - \frac{h}{\tan\varphi} \cos\bar{\theta} = 0$

机器人前轴中心在机器人本体坐标系中的坐标为 $(0, -d, 0)$, 因此到导航线的距离为

$$\lambda_d = \left| \frac{X_0 d_x h}{f \sin\varphi} \sin\bar{\theta} - \left(d + \frac{h}{\tan\varphi}\right) \cos\bar{\theta} \right|$$

2 最优变道路径

变道路径是指机器人从离开当前移动路线到变道完成,即进入导航线所走过的轨迹。因此变道路径的长度可作为衡量变道效率的指标,变道路径的优化就是变道路径长度的最小化。

如图3所示,假定机器人前后轴之间的距离为 m ,同一轴上两轮之间的距离为 n ,转向中心到后内轮、前内轮、前外轮的距离分别为 s 、 i 和 u ,前内轮、前外轮的转向角分别为 α_1 和 α_2 ,则通过几何关系可获得转向半径以及前内轮、前外轮转向角的关系为

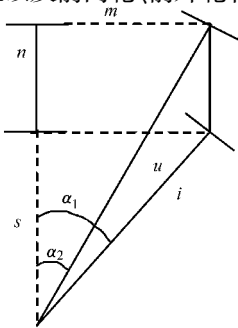


图3 转向半径确定示意图

Fig.3 Determination of turning radius

$$R = \frac{1}{2} \left[\frac{m}{\sin\alpha_1} + \sqrt{m^2 + (n + m \cot\alpha_1)^2} \right]$$
$$\cot\alpha_2 = \frac{n}{m} + \cot\alpha_1$$

因此转向过程中前内轮的转向角 α_1 大于前外轮的转向角 α_2 。

2.1 平行变道

如图4所示, l_1 表示机器人当前的移动路线, l_2

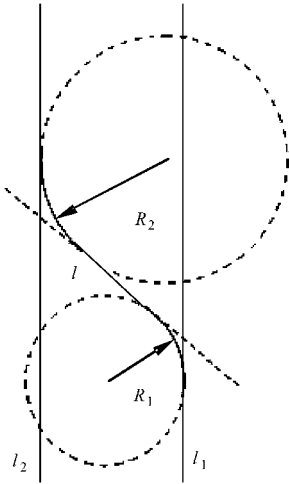


图4 路径规划示意图

Fig.4 Path planning

表示导航线, λ 表示两条直线的距离。要实现变道,首先需要向左转弯,最后需要向右转弯,无论中间走过何种路线。因此不妨先假定变道路径是由直线 l 以及与此相切的半径分别为 R_1 和 R_2 的2个圆弧组成的。假定向左转的角度为 α ,则向右转的角度也是 α ,变道过程的路径长度为

$$L = (R_1 + R_2) \alpha + \frac{\lambda - (R_1 + R_2)(1 - \cos\alpha)}{\sin\alpha}$$

于是 $\lambda - (R_1 + R_2)(1 - \cos\alpha) = 0$ (4)

由于机器人的转弯路径中直线段的长度为 $[\lambda - (R_1 + R_2)(1 - \cos\alpha)]/\sin\alpha$,因此式(4)意味着直线段的长度为零,即最优的转弯路径为首先左转 α 角,而后右转 α 角,其中 α 可由式(4)求得

$$\alpha = \arccos\left(1 - \frac{\lambda}{R_1 + R_2}\right)$$

因此变道路径的长度为

$$L = (R_1 + R_2) \alpha = (R_1 + R_2) \arccos\left(1 - \frac{\lambda}{R_1 + R_2}\right)$$
 (5)

通常,农作物的行距在 0.3 m 左右,而机器人的转向半径至少 1 m,即

$$\frac{\lambda}{R_1 + R_2} < 0.15$$

通过对式(5)求一、二阶导数可以判定在此范围内它是 $R_1 + R_2$ 的增函数,因此当 R_1 和 R_2 都取机器人的

最小转弯半径 $R_{\min}$ 时转弯路径达到最小,其长度为

$$L_{\min}=2R_{\min}\arccos\left(1-\frac{\lambda}{2R_{\min}}\right)$$

对于一般的变道路径有如下结论:在当前路径与导航线平行且距离为 λ 的情况下,机器人从 A 点出发,变道的最优路径是首先以最小转弯半径 $R_{\min}$ 向导航线转动 α 角

$$\alpha=\arccos\left(1-\frac{\lambda}{2R_{\min}}\right)$$

然后以同样的转弯半径反向转相同的角度。这样的路径记为 $u_0(A)$ 。

证明:如图 5 所示,假定 $u_1(A)$ 是一条异于 $u_0(A)$ 的路径, O_1 是以 $R_{\min}$ 为半径并与 l_1 在 A 点相切的圆。由于机器人的转弯半径最小为 $R_{\min}$, 因此路径 $u_1(A)$ 的曲率半径处处大于或等于 $R_{\min}$, 所以 $u_1(A)$ 只能出现在 O_1 上方(含圆周)介于 l_1 和 l_2 之间的区域内。

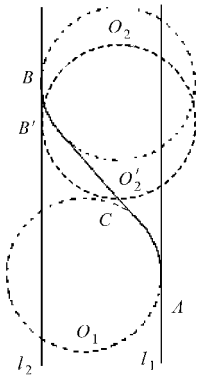


图 5 平行变道示意图

Fig. 5 Lane changing between two parallel lines

$u_1(A)$ 的终点分两种情形:

第 1 种情形:假定 $u_1(A)$ 的终点是 O_2' 与 l_2 的切点 B' , 其中 O_2' 是以 $R_{\min}$ 为半径并与 O_1 相切的圆, 同理, $u_1(A)$ 只能出现在 O_2' 下方(含圆周)介于 l_1 和 l_2 之间的区域内。此时 $u_1(A)$ 所在的区域只能介于 O_1 、 O_2' 、 l_1 和 l_2 之间, 因此必然经过两圆的公切点 C , 可见路径 $u_1(A)$ 依次经过 A 、 C 和 B' , 而在此区域中依次经过这 3 点的最短路径 $u_0(A)$, 而 $u_1(A)$ 异于 $u_0(A)$

$$L(u_1(A))>L(u_0(A))$$

其中 $L(u)$ 表示路径 u 的长度。

第 2 种情形:假定 $u_1(A)$ 的终点是以 $R_{\min}$ 为半径的圆 O_2 与 l_2 的切点, 其中 O_2 与 O_1 相离, 同理, $u_1(A)$ 只能出现在介于 O_1 、 O_2 、 l_1 和 l_2 之间的区域(含圆周), 而在此区域中由 O_1 、 O_2 及其公切线组成的路径 $u_2(A)$ 最短(图 5 中以实线表示), 即

$$L(u_1(A))>L(u_2(A))$$

又根据式(6)及相关分析 $L(u_2(A))>L(u_0(A))$, 得 $L(u_1(A))>L(u_0(A))$ 。

可见无论 $u_1(A)$ 的终点属哪种情形, 总有

$$L(u_1(A))>L(u_0(A))。$$

由 $u_1(A)$ 的任意性即得定理的结论。

上述分析不仅给出了最优路径, 同时也给出了机器人变道的控制方法: 首先以最小转弯半径 $R_{\min}$ 向导航线转动, 同时机器人本体坐标系中导航线与横轴的夹角不断减小, 当达到

$$\alpha=\arccos\left(1-\frac{\lambda}{2R_{\min}}\right)$$

改为以同样转弯半径反转, 直到导航线与横轴平行。

2.2 转向变道

如图 6 所示, 导航线 l_2 的方程可写成

$$y\cos\bar{\theta}-x\sin\bar{\theta}+t=0$$

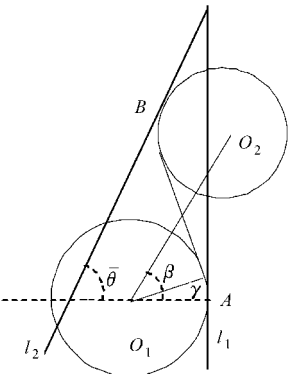


图 6 交叉变道示意图

Fig. 6 Lane changing between two intersecting lines

圆 O_2 的圆心可表示为 $((R_1 + R_2 + D)\cos\beta, (R_1 + R_2 + D)\sin\beta)$ 。其中 D 为两圆周之间的距离。由 O_2 到 l_2 的距离为 R_2 , 得

$$\beta=\arcsin\frac{R_1\sin\bar{\theta}-t}{R_1+R_2+D}+\bar{\theta}$$

$$\gamma=\beta-\arccos\frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+D}=$$

$$\arcsin\frac{R_1\sin\bar{\theta}-t}{R_1+R_2+D}+\bar{\theta}-\arccos\frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+D}$$

各圆上 2 个切点间的弧和公切线组成的路径长度为

$$L=\sqrt{\left[\frac{R_1(R_1+R_2+D)}{R_1+R_2}\right]^2-R_1^2}+\sqrt{\left[\frac{R_2(R_1+R_2+D)}{R_1+R_2}\right]^2-R_2^2}+(R_1+R_2)\gamma+R_2\left(\frac{\pi}{2}-\bar{\theta}\right)$$

即 $L=\sqrt{(2R_1+2R_2+D)D}+R_2\left(\frac{\pi}{2}-\bar{\theta}\right)+$

$$(R_1+R_2)\arcsin\frac{R_1\sin\bar{\theta}-t}{R_1+R_2+D}+\bar{\theta}(R_1+R_2)-(R_1+R_2)\arccos\frac{R_1+R_2}{R_1+R_2+D}$$

这是 D 的增函数, 因此令 $D=0$, 得

$$L=R_2\left(\frac{\pi}{2}-\bar{\theta}\right)+\bar{\theta}(R_1+R_2)+$$
$$(R_1+R_2)\arcsin\frac{R_1\sin\bar{\theta}-t}{R_1+R_2}\quad(6)$$

当 $R_1=R_2=R_{\min}$ 时,点 B 的纵坐标

$$b_2=2R_{\min}\sin\beta+R_{\min}\cos\bar{\theta}$$

由此可以判断 B 在 l_1 和 l_2 的交点上方还是下方。对于后一种情形有结论:在当前路径与导航线相交的情况下,机器人从 A 点出发,变道的最优路径是首先以最小转弯半径 $R_{\min}$ 向导航线转动角度

$$\beta=\arcsin\frac{R_{\min}\sin\bar{\theta}-t}{2R_{\min}}+\bar{\theta}$$

然后以同样的转弯半径反转向角度 $\beta+\frac{\pi}{2}-\bar{\theta}$ 。

证明方法与平行变道时类似。

对于第 1 种情形,只需要转一次弯就可以实现变道,变道开始点与交点距离 $R_{\min}\tan((\pi-2\bar{\theta})/4)$ 。

考虑到机器人位置的坐标,变道开始时交点在机器人本体坐标系中纵坐标 $R_{\min}\tan((\pi-2\bar{\theta})/4)-d$ 。

变道过程为向前移动,当发现交点的纵坐标为 $R_{\min}\tan((\pi-2\bar{\theta})/4)-d$ 时以半径 $R_{\min}$ 转弯, $\bar{\theta}>0$ 向右转,否则向左转,直到导航线与 y 轴平行。

3 仿真

采用前面的符号,并假定机器人前轴当前位置为 $(0.2,0)$,机身方向与直线 $x=0.3$ 平行,导航线为 $x=0$,且 $m=1.5\text{ m}$, $n=1\text{ m}$, $\alpha_1=\pi/6$,则

$$\alpha_2=\operatorname{arccot}\left(\frac{n}{m}+\cot\alpha_1\right)=0.395\,0\text{ rad}$$

$$i=\frac{m}{\sin\alpha_1}=3\text{ m}\quad u=\frac{m}{\sin\alpha_2}=3.898\text{ m}$$

$$R=3.449\text{ m}\quad s=2.598\,1\text{ m}$$

第 1 次转弯的中心为 $(-2.798\,1,-1.5)$,转弯

角度为 $\alpha=0.312\text{ rad}$,第 2 次转弯的中心为 $(3.099,0.402)$ 。图 7 是后轮及其中点的仿真轨迹。仿真结果表明路径规划的可行性。在实际操作中,只要准确测量机器人与导航线的相对位置与角度,并按照算法确定的程序转弯,就可以获得理想的变道效果。

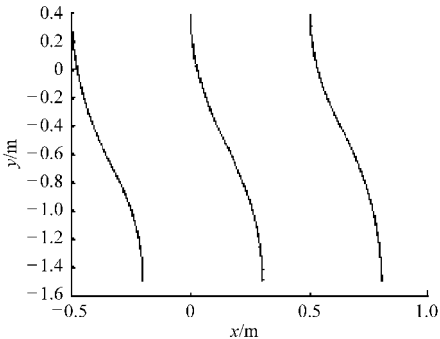


图 7 后轮及其中点的轨迹
Fig. 7 Tracks of rear wheels and their midpoint

4 结束语

根据机器人当前路径与导航线平行和相交给出了两种最优路径。对于平行情况,最优变道路径是首先以最小转弯半径 $R_{\min}$ 向导航线偏转,偏转角度可以通过导航系统测量导航线在机器人本体坐标系中倾角确定,即当倾角为 α 时停止转弯,然后以同样的转弯半径反向转,直到导航线与移动路线一致。同样,对于垂直情况,若 b_2 小于 l_1 和 l_2 交点的纵坐标,机器人首先以最小转弯半径 $R_{\min}$ 向导航线方向转动角度 β ,该角度以及之后以同样的转弯半径反向转的角度都可以通过导航系统测量导航线在机器人本体坐标系中倾角确定。若 b_2 大于 l_1 和 l_2 交点的纵坐标,此时只需要转弯一次,这种情形对转弯起点有要求,本文对摄像头安装以及坐标系选择所作的特殊要求正是考虑到这种情形的需要。

参 考 文 献

1 朱磊磊,陈军. 轮式移动机器人研究综述[J]. 机床与液压, 2009, 37(8): 242~247.
Zhu Leilei, Chen Jun. A review of wheeled mobile robots [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2009, 37(8): 242~247. (in Chinese)

2 侯学贵,陈勇,郭伟斌. 除草机器人田间机械视觉导航[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 106~112.
Hou Xuegui, Chen Yong, Guo Weibin. Machine vision-based navigation for a weeding robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(3): 106~112. (in Chinese)

3 周俊,姬长英,刘成良. 农用轮式移动机器人视觉导航系统[J]. 农业机械学报, 2005, 36(3): 90~94.
Zhou Jun, Ji Changying, Liu Chengliang. Visual navigation system of agricultural wheeled-mobile robot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 90~94. (in Chinese)

4 陈勇,田磊,郑加强. 基于直接施药方法的除草机器人[J]. 农业机械学报, 2005, 36(10): 91~93.
Chen Yong, Tian Lei, Zheng Jiaqiang. Development of weeding robot based on direct herbicide application method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(10): 91~93. (in Chinese)

- 5 邱白晶,钱国宏,周宁. 割草机器人避障控制[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2005,26(4):285~288.
Qiu Baijing, Qian Guohong, Zhou Ning. A voiding barriers control moving robot[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2005,26(4):285~288. (in Chinese)
 - 6 安凯,马佳光. 机械臂刚体运动螺旋极小模方程的解系[J]. 光电工程,2010,37(7):8~11.
Aa Kai, Ma Jianguang. Solution system of minimum-magnitude equation about the screw of a rigid-body motion of manipulator [J]. Opto-electronic Engineering,2010,37(7):8~11. (in Chinese)
 - 7 安凯,韩爱丽,宋黎定. 一种新的自主导航技术——单相机视觉系统[J]. 激光与红外,2005,35(12):987~989.
An Kai, Han Aili, Song Liding. A new autonomous navigation technique—the vision system with single camera[J]. Laser & Infrared, 2005,35(12):987~989. (in Chinese)
 - 8 安凯,汪红嫒,任戈,等. 四象限探测仪测角新算法[J]. 激光与红外,2001,31(6):328~329.
An Kai, Wang Hongman, Ren Ge, et al. A new angle-measurement algorithm of the detector with four quadrants[J]. Laser & Infrared, 2001, 31(6):328~329. (in Chinese)
 - 9 安凯,马佳光. 基于空间飞行器的来袭激光方向探测[J]. 光电工程,2011,38(5):1~4.
An Kai, Ma Jianguang. Attack direction of laser based on the CCD detection[J]. Opto-electronic Engineering, 2011,38(5): 1~4. (in Chinese)
 - 10 安凯,马佳光. 一种用于交会对接的 CCD 快速测量方法[J]. 光电工程, 2011,38(6):1~6.
An Kai, Ma Jianguang. A fast CCD measurement method used in rendezvous and docking [J]. Opto-electronic Engineering, 2011,38(6):1~6. (in Chinese)
 - 11 陈玉,赵德安. 基于 LBM 的苹果采摘机器人视觉图像自动修复算法[J]. 农业机械学报,2010,41(11):153~157.
Chen Yu, Zhao Dean. Automatic image inpainting algorithm for apple harvesting robot's vision system based on LBM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):153~157. (in Chinese)
-

(上接第 189 页)

- 10 尹建媛. 农业机器人导航线提取算法的研究与实现[D]. 广州:中山大学,2008.
Yin Jianyuan. Research and implementation of route extraction algorithm of agricultural robot [D]. Guangzhou:Sun Yat-Sen University, 2008. (in Chinese)
- 11 张卫. 农业机器人视觉定位导航技术的研究[D]. 北京:中国农业大学,2006.
Zhang Wei. Study on vision position and navigation of agricultural robot [D]. Beijing:China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- 12 姜国权. 农田作业机械视觉导航定位技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2009.
Jiang Guoquan. Research on navigation and location of agricultural machinery based on machine vision [D]. Beijing:China Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- 13 曹倩,王库. 农田非结构特征视觉导航研究[J]. 农业机械学报,2009,40(增刊):187~189,104.
Cao Qian, Wang Ku. Vision navigation based on agricultural non-structural characteristic [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.):187~189,104. (in Chinese)
- 14 吴刚,谭戡,郑永军,等. 基于改进 Hough 变换的收获机器人行走目标直线检测[J]. 农业机械学报,2010,41(2):176~179.
Wu Gang, Tan Yu, Zheng Yongjun, et al. Walking goal line detection based on improved Hough transform on harvesting robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(2):176~179. (in Chinese)