

# 视觉导航自主车方向控制系统性能仿真分析\*

陈向东 常文森 贺汉根

(国防科技大学自动控制系 长沙 410073)

**摘 要** 本文主要通过图形仿真的方法对基于视觉导航的自主车(ALV)方向控制系统进行性能分析,以大量仿真结果分析各组成子系统对整个系统性能的影响,为系统设计提供理论依据。

**关键词** 视觉导航,自主车,方向控制,图形仿真

**分类号** TP242.6, TP391.9

## The Performance Simulation and Analysis of Vision Navigation Direction Control System of ALV

Chen Xiangdong Chang Wensen He Hangen

(Department of Automatic Control, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** Using the method of graphic simulation, this paper has mainly analyzed the performance of the direction control system of ALV (Autonomous Land Vehicle) based on vision navigation. The effect of the composed sub-systems on the performance of the whole system has been analyzed based on a large number of simulation results. The theoretical foundation has been provided for the system design.

**Key words** vision navigation, ALV, direction control, graphic simulation

智能机器人的研究始于 60 年代末,后来发展成为机器人研究领域比较重要的研究方向。一种智能移动机器人——地面自主车辆(Autonomous Land Vehicle),简称自主车(ALV),是一个基于多传感器的移动机器人系统,它在行驶时首先要利用电子地图为完成指定任务进行全局路径规划,然后利用视觉、超声测障和惯导等系统感知周围环境,进行局部路径规划、运动规划和控制,使其能自主安全行驶。

目前国外对在结构化道路上行驶的自主车的研究已取得了较明显的进展。国内在这

\* 国防预研基金资助项目  
1996 年 11 月 7 日收稿

方面的研究还处于跟踪国外先进技术水平的阶段，本文就是主要针对在结构化道路环境中的基于视觉导航的自主车方向控制系统进行性能仿真分析。

## 1 系统组成及结构

基于视觉导航的自主车方向控制系统主要由视觉子系统、控制器、方向伺服控制子系统及采样器组成。系统通过采样摄像机摄取图像，进行图像处理，提取道路边缘，确定预瞄点在车体坐标系中的位置坐标，由控制器算出方向偏角，定时发送指令给方向伺服控制子系统来执行。因此可以看出整个系统是一个离散事件动态控制系统，其结构如图 1 所示。

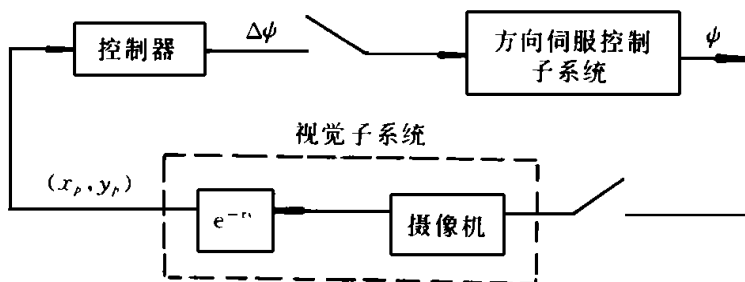


图 1

由于图像处理过程需要一定的时间，因而造成获取信息的时间延迟，上图用一个纯延迟环节来表示， $\tau$ 表示图像处理所需的时间； $(x_p, y_p)$ 是通过图像处理提取计算出的预瞄点在车体坐标系中的坐标； $\Delta\psi$ 表示车体行驶方向偏角， $\psi$ 表示车体行驶方向角。控制器是通过纯跟踪控制算法实现的，参见文献 [1]，即将预瞄点作为吸引点，由这些吸引点连成的路线为希望车体行驶的路线。

从整个系统结构可以看出视觉信息特别重要。当自主车行驶出道路，摄像机摄取不到道路时，自主车得不到所需信息，只能沿原来的方向行驶，如果不借助其它导航系统，自主车就失控了。

## 2 系统性能的图形仿真

基于视觉导航的自主车方向控制系统是一个离散事件动态控制系统，整个系统的模型不易描述，所以考虑用仿真分析的方法对其性能进行分析。为了模拟视觉导航，我们采用了图形仿真的方法，通过透视变换模型仿真摄像机摄取到的道路场景。透视变换模型可简化表示为：

$$\begin{cases} x_i = \frac{f}{y_0 + f}x_0 \\ y_i = 0 \\ z_i = \frac{f}{y_0 + f}z_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中： $(x_0, y_0, z_0)$ 表示物点坐标； $(x_i, y_i, z_i)$ 表示像点坐标，即物点投影到成像平面

的坐标;  $f$  表示投影中心到成像平面的距离。由于是对系统性能进行仿真分析, 在仿真过程中暂不引入图像处理模块, 直接通过计算得到预瞄点的位置, 然后采用纯跟踪控制算法得到车体将要行驶的方向偏角, 再经过一个延迟环节后, 以一定的控制周期输出给方向伺服控制子系统执行。具体算法如下, 以图 2 所示情形为例。

图中:  $AD$  代表预瞄距离, 这是已知可选定的,  $A$  点是预瞄点;  $o$  点代表自主车的几何中心当前在道路上的位置; 坐标系  $oxy$  代表车体坐标系,  $y$  轴方向代表自主车当前行驶方向; 直线  $AD$  是道路的中线;  $oD$  代表自主车行驶位置与道路中线的侧向偏差距离。通过计算  $oD$  可以求得  $DAo$ , 然后求得道路与自主车当前行驶方向的夹角  $\alpha$ , 这样就可以根据纯跟踪算法的思想得到自主车将要行驶的方向偏角为:

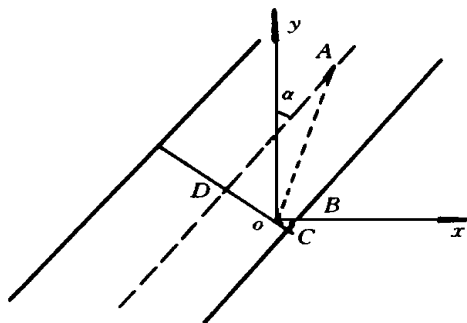


图 2

$$\Delta\Psi = -2(\alpha - DAo)$$

其它情形依此类推。如果道路出了裁剪显示窗口, 则认为没有了视觉信息, 这时  $\Delta\Psi = 0$ , 即自主车保持原有方向行驶。

方向伺服控制子系统由于受路面粗糙程度、轮胎的受力等诸多因素的影响, 没法用精确模型来描述, 因此在仿真中分别用一阶惯性环节和二阶欠阻尼振荡环节来等效近似。

一阶惯性环节等效模型表示为:

$$\frac{\Delta\Psi_r(s)}{\Delta\Psi(s)} = \frac{1}{T^\psi s + 1} \quad (2)$$

式中:  $\Delta\Psi_r$  是方向伺服控制系统实际输出的方向偏角;  $\Delta\Psi$  是希望方向伺服控制系统输出的方向偏角;  $T^\psi$  是时间常数。

$T^\psi$  由调节时间决定。根据调节时间等效原理,  $T^\psi = t_s/3$ , 系统经过  $t_s$  时间后, 实际输出与期望值相差  $\pm 5\%$ 。

二阶振荡环节等效模型表示为:

$$\frac{\Delta\Psi_r(s)}{\Delta\Psi(s)} = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (3)$$

式中:  $\omega_n$  是自然频率;  $\xi$  是阻尼比。

对于欠阻尼二阶振荡环节  $0 < \xi < 1$ 。根据其调节时间的经验公式, 当  $\xi$  确定后,

$$\omega_n = \frac{3.5}{\xi t_s} \quad (4)$$

式中:  $t_s$  是调节时间。

这样, 经过方向伺服控制子系统后得到的系统响应为:

$$\Psi(k) = \Psi(k-1) + \Delta\Psi \quad (5)$$

式中:  $\Psi(k)$  是当前控制周期的车体在惯性坐标系中的行驶方向角;  $\Psi(k-1)$  是前一个控制周期的车体在惯性坐标系中的行驶方向角。

### 3 仿真分析及结果

这里利用仿真进行分析主要是分析各组成子系统同整个系统的相互间影响关系，从中得到系统性能分析结果。

#### 3.1 方向伺服控制子系统对系统性能的影响

方向伺服控制子系统是通过接受方向偏角控制指令来控制车体前轮的转角。如果考虑用一阶惯性环节模型近似表示，在直道上，伺服控制子系统的调节时间  $t_s$  为  $2s$ ，图像处理时间为  $0.2s$ ，控制周期为  $0.1s$  的情况下，车速保持在  $20m/s$  行驶时，系统能对  $1m$  的初始侧向位置偏差很快校正，并达到稳态，系统响应的方向角偏差曲线如图 3 所示；但如果用二阶欠阻尼振荡环节模型来近似，阻尼比为  $0.8$ ，车速仍是保持在  $20m/s$ ，其它条件同上，则系统响应的方向角偏差曲线如图 4 所示。从图 4 中看出自主车行驶出了道路，视觉系统丢失道路信息。由此可以得出结论：方向伺服控制子系统的性能对整个系统影响较大，如果方向伺服控制子系统的性能不好，会导致系统不稳定。

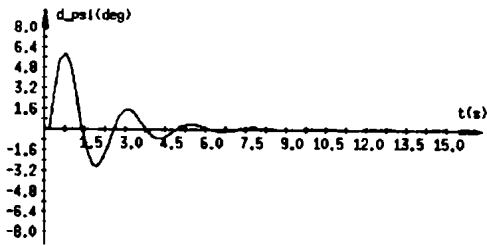


图 3

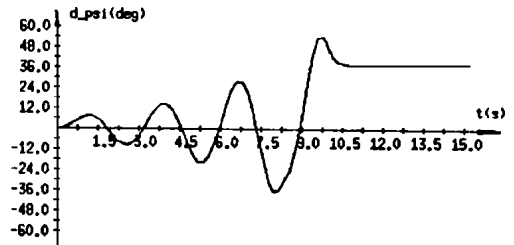


图 4

#### 3.2 视觉子系统对系统性能的影响

视觉子系统是整个系统获取道路跟踪信息的重要部分，这一部分对系统的影响主要是由图像处理需要时间而造成信息延迟带来的，也就是等效于系统中引入了纯延迟环节，因而系统在一定的条件下会不稳定。如果方向伺服控制子系统性能较好，可以用一阶惯性环节来近似，调节时间  $t_s$  为  $2s$ ，在直道上保持车速为  $30m/s$  行驶，则在图像处理时间（即信息延迟）为  $0.1s$  时，系统能对  $1m$  的初始侧向位置偏差很快校正，并达到稳态；但在图像处理时间为  $0.2s$  时不能很快达到稳态，振荡的时间较长，系统响应的方向偏差曲线如图 5 所示。其中粗线是图像处理时间为  $0.1s$  时系统响应的方向偏差曲线。当图像处理的时间为  $0.3s$  时系统不稳定，自主车行驶出道路，丢失了道路跟踪信息。系统响应的方向偏差曲线如图 6 所示。如果方向伺服控制子系统性能不是很好，用一个二阶欠阻尼振荡环节来近似，阻尼比为  $0.8$ ，调节时间  $t_s$  为  $2s$ ，在直道上保持车速为  $30m/s$  行驶，则即便图像处理的时间是  $0.03s$ ，系统响应的方向偏差曲线还是振荡的，如图 7 所示。其中粗线是图像处理时间为  $0.06s$  时系统响应的方向偏差曲线。当车速为  $20m/s$  行驶，在图像处理时间为  $0.06s$  时，系统响应的方向偏差曲线收敛，如图 8 所示。

因此，从这些仿真结果可以得出：系统的稳定性受到视觉子系统的图像处理时间的影响，在图像处理时间一定的情况下，要想提高系统的稳定性，必须降低自主车的行驶

速度；如果方向伺服控制子系统的性能较好，在自主车行驶速度一定的情况下，对图像处理时间的要求可以放宽。

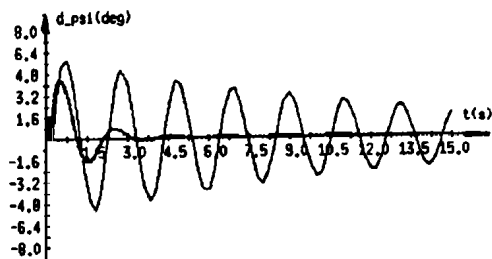


图 5

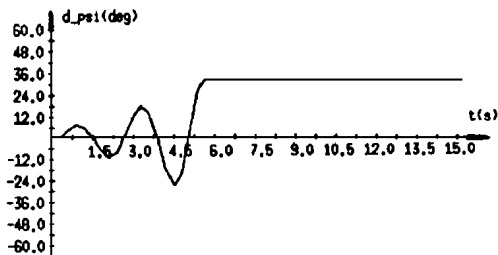


图 6

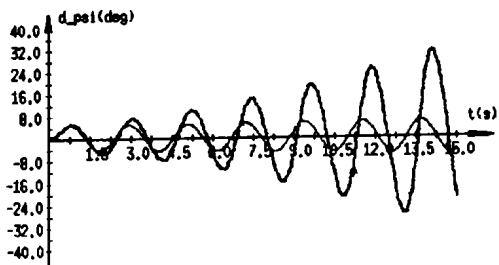


图 7

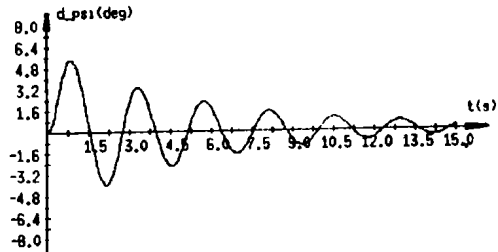


图 8

### 3.3 系统在不同道路类型下的性能分析

基于视觉导航的自主车在不同道路类型行驶时其系统性能差别比较明显，这一点可以通过仿真结果得到证实。仿真中不考虑车体与道路路面的动力学特性。在图像处理时间为  $0.1s$ ，控制周期也为  $0.1s$ ，方向伺服控制子系统用二阶振荡环节模型近似，阻尼比为  $0.8$ ，调节时间  $t_s$  为  $2s$  的条件下，自主车以  $20m/s$  的速度分别在直道和转弯半径为  $100m$  的弯道上行驶，得到的系统响应方向偏差曲线如图 9 所示。其中粗线是自主车行驶在直道上的系统响应方向偏差曲线，可以看出曲线振荡幅度较在弯道上行驶时小。如果在弯道行驶时自主车降低车速到  $10m/s$ ，则系统对  $1m$  的初始侧向位置偏差校正较快，系统能较快进入稳态，如图 10 所示。

## 4 小结

由于整个仿真是采用图形仿真来实现的，因此比较符合基于视觉导航的自主车实际系统，基本反映了系统的性能，为今后系统设计提供了理论依据。但这种仿真还只是初步的，因为仿真中没有全面考虑车体的动力学特性和速度控制系统对其的影响。

从上述仿真结果可以看出整个系统是比较复杂的，影响系统性能的因素很多，而且各因素之间具有耦合性，在系统设计时要充分考虑和权衡，以使得系统具有较强的稳定性和鲁棒性。

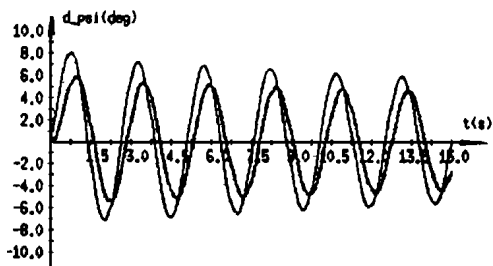


图 9

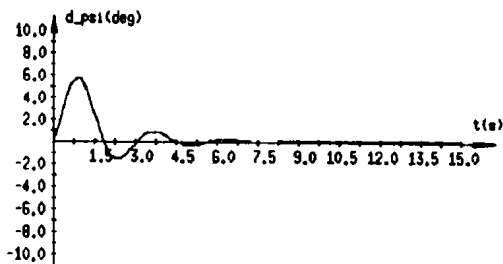


图 10

## 参 考 文 献

- 1 Jubert M, Raviv D. Vision- Based M obility Control for AVCS, 1993
- 2 Sandor Szabo Hany etc. High- Level Mobility Controller for a Remotely Operated Unmanned Land Vehicle. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 1992, (5): 63 ~ 77
- 3 朱华勇. 自主式移动机器人运动规划及集成技术: [学位论文]. 长沙: 国防科技大学自动控制系统, 1996

(责任编辑 张 静)

(上接第 19 页)

缓解了问题的难点过于集中, 很难起步的状况。通过过程模式化处理, 可先逐个进行子模块的研制, 进行积木式组合, 而最终达到对各类污染进行潜势预报的目的。

## 参 考 文 献

- 1 Lumpkin F, LeBeau G, Stuart P. A CFD/DSMC Analysis of Plumes and Plume Impingement During Shuttle/Mir Docking. AIAA 95- 2034, 1995
- 2 Wang F C. A Molecular Scattering Model for Spacecraft Self- Contamination studies. AIAA 86- 1620, 1987
- 3 Wang F C. A BGK Model Study of Spacecraft Self- Contamination. LM SC- HREC TR- D697965, 1980
- 4 张莉. 高空羽流流场计算与算法研究: [学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 1996

(责任编辑 石少平)