

# 汽车防撞系统中的危险估计与超车决策

邓金城, 黄席樾, 邓小丽, 廖传锦

(重庆大学自动化学院导航制导实验室, 重庆 400044)

摘要: 在分析了汽车驾驶过程动态模型及制动距离模型基础之上, 该文提出了基于最小安全报警距离的危险估计算法。通过对超车过程中车辆行驶的运动学分析, 推导出超车所应满足的前后纵向车距求解算法。结合曲率限制, 得出了超车过程完成时间的取值范围, 从而实现了超车过程行使参数的决策。结合大量实验数据得到了超车安全性区域决策图, 准确快捷地实现了安全决策。实验表明, 本文所提出的算法实时性强, 准确性高。

关键词: 汽车防撞; 危险估计; 超车决策

中图分类号: TP 277 文献标识码: A

## Risk Estimation and Decision Making for Overtaking of Automotive Collision Avoidance System

DENG Jin—cheng, HUANG Xi—yue, DENG Xiao—li, LIAO Chuan—jin

(Navigation & Guidance Lab., Automation College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**ABSTRACT:** Based on the analysis of dynamic model of vehicle traveling and model of braking distance, a minimal—safety—distance—based algorithm of risk estimation is presented in this paper. Through analyzing the kinematics characteristic of the overtaking process, an algorithm for solving the minimal longitudinal distance satisfied with the overtaking is deduced. Combining to the limit of curvature, the time interval of overtaking is obtained. Thereby, the decision—making for traveling parameter of overtaking is realized. A Regional Decision Map, easily and exactly decision making for overtaking, is obtained through vast experiments.

**KEYWORDS:** Collision avoidance; Risk estimation; Decision—making for overtaking

### 1 引言

据统计, 2002 年, 我国交通事故死亡人数达到 11 万人, 占有因安全事故致死人数的 80.1%。对于公路交通事故的分析表明, 超过 23% 的车辆相撞属于追尾相撞<sup>[1]</sup>。因而以车辆防撞系统(Collision Avoidance System, 简称 CAS)为主的汽车主动安全系统有着重要的研究意义和应用空间。

汽车主动安全系统是近年来 ITS 领域研究的重点。目前, 比较典型的研究有: 德国慕尼黑联邦大学与奔驰汽车公司合作研制开发的 VaMP 实验车<sup>[2]</sup>; 美国 CMU 大学机器人研究所研制的 NabLab 系列实验车<sup>[3-5]</sup>; 意大利帕尔马大学研制的 ARGO 实验车<sup>[6-7]</sup>。

在行驶过程中, 超车是一种非常常见的驾驶行为, 由此也产生了大量的交通事故甚至人员伤亡。车距必须足够大以确保在任何可能的操作下都不发生碰撞。为此, 充分利用

各类传感器信息, 为驾驶员提供超车安全性判断和决策支持信息是车辆防撞系统的重要研究内容。

### 2 危险估计

#### 2.1 汽车驾驶过程模型

驾驶行为对汽车运行状态的影响表现为驾驶员的不同动作。因此, 依据对人行为的刺激—机体—反应经典模式的拓展, 驾驶汽车的行为可分为三个阶段, 即感知、判断决策和操作。驾驶员依据判断决策所做出的实际反应和行动, 具体指手、脚对汽车实施的控制, 如加速、制动、转向等。如图 1 所示。这样, 驾驶不仅是信息感知、判断决策和动作三阶段不间断的多次串联组合, 而且也是三者连锁反应的综合。

从图 1 中, 我们可以得到以下结论: 驾驶员对行驶环境感知时间  $T_P$ , 对安全状况作出判断和决策时间  $T_D$ , 驾驶员的操作时间  $T_O$ 。在驾驶员操纵后汽车的电气机械部分所作出的响应时间  $T_r$ , 这 4 个时间安全要素都是对于同一运动体。那么, 在相同的当前速度  $V$  下, 作用于同一个运动体的时

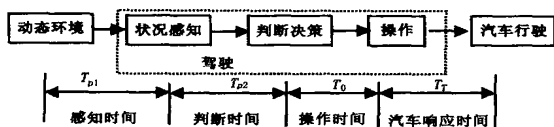


图1 安全驾驶过程的时间关系框图

间,显然会产生距离和:

$$d_{\Sigma} = (T_{P1} + T_{P2} + T_O + T_T) \cdot V \quad (1)$$

在防撞系统中,系统的感知、决策代替了驾驶员的感知、决策,式(1)可以写为:

$$d_{\Sigma} = (T_P + T_B) \cdot V = d_P + d_B \quad (2)$$

其中:  $T_P = T_{P1} + T_{P2}$ ,  $T_B = T_O + T_T$ ,  $d_P$ 、 $d_B$  分别为时间段  $T_P$ 、 $T_B$  所产生的距离。称  $d_B$  为制动距离。汽车制动距离受初始速度、操作时间、路面粗糙程度、路面湿度、坡度等因素的影响。目前尚无一个统一的理论模型。

## 2.2 基于最小报警距离的危险估计

制动距离,常常也用作报警距离。但实际情况下,驾驶员跟车行驶所保持的车距要比小得多。主要是因为:即便前面的车辆紧急刹车,它仍然有一个与之对应的制动距离。定义最小报警距离(Required Minimum Warning Distance, RMWD)为:在前面车辆紧急制动的情况下,后面的车恰能安全停下时两车的初始距离。最小报警距离(RMWD)可以表达为:

$$RMWD = [V_f^2 / (2 \cdot a_f) - V_l^2 / (2 \cdot a_l)] + WT_d \cdot V_f + CI \quad (3)$$

其中:  $V_f$ 、 $V_l$ 、 $a_f$ 、 $a_l$ 、 $WT_d$ 、 $CI$  分别表示后车速度、前车速度、后车加速度、前车加速度、系统报警延时、两车停稳后间隔裕量。在实际应用中,因为系统的报警延时不超过 200ms,因而两车速度、两车加速度对 RMWD 起着决定性的作用。

后车在保持相对稳定的距离跟随前车行驶的过程中,二者的速度几乎一致。那么,以重力加速度  $g$  为单位,式(3)可以改写为:

$$RMWD = \frac{V^2(a_l - a_f)}{25.9 \cdot g \cdot a_f \cdot a_l} + (V/3.6) \cdot WT_d + CI \quad (4)$$

通过对大量实验的研究,有如下结论<sup>[8]</sup>:一般情况下,后车在前车紧急制动后采取制动措施时,汽车的减速度要比前车的小。图2示在 100km/h 的时速下,后车的减速度分别为前车的 90%、70%、50% 时, RMWD 的变化情况。

显然,如果当前距离小于 RMWD,则后面的车辆处于不安全状态,需要调整行驶速度或者超车。如果采取调整车速,那么只要调整后,两车距离大于或等于 RMWD 即可。

## 3 超车防撞分析

在行驶过程中,车距必须足够大以确保在任何可能的操

作下都不发生碰撞。下面,将通过对车辆行驶的运动学分析,对常见的一种超车过程提出一个判断即将采取的超车是否安全的算法(其它超车过程分析与此类似)。

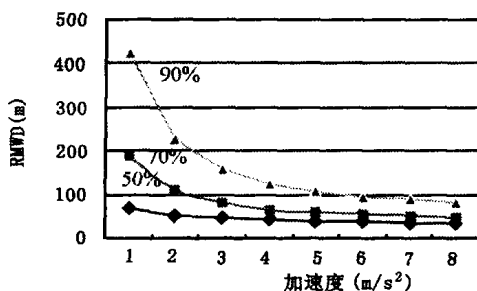


图2 MWD随减速度的变换情况

### 3.1 超车过程动力学分析<sup>[9]</sup>

不失一般性,假设车辆在  $t = 0$  时刻开始超车。在  $0 \sim t_c$  时间段中应用横向加速度完成超车过程。

如图3所示,以汽车  $M$  的右上角为参照点,横向移动距离为  $H$ ,那么在  $H/2$  处,汽车的横向速度达到最大值。假设超车过程平稳,那么,  $V_{cy}$  符合正弦波特性,那么汽车的横向加速度符合  $a_{cy}$  余弦波特性。设

$$a_{cy}(t) = A \cdot \sin(\omega t + \pi/2) \quad (0 \leq t \leq t_c) \quad (5)$$

其中:  $A$  为待定系数,  $\omega = 2\pi/t_c$ 。

从而有:

$$\int_0^{t_c} \int_0^t A \sin(\omega t - \pi/2) dt dt = H \quad (6)$$

得到:  $A = 2\pi H/t_c^2$  所以:

$$a_{cy}(t) = \frac{2\pi H}{t_c^2} \sin\left(\frac{2\pi}{t_c}t - \frac{\pi}{2}\right) \quad (0 \leq t \leq t_c) \quad (7)$$

$$V_{cy}(t) = \begin{cases} -\frac{H}{t_c} \times \cos\left(\frac{2\pi}{t_c}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{H}{t_c} & (0 \leq t \leq t_c) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (8)$$

$$y_c(t) = \begin{cases} H & (t \geq t_c) \\ -\frac{H}{2\pi} \times \sin\left(\frac{2\pi}{t_c}t - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{H}{t_c}t & (0 \leq t \leq t_c) \\ 0 & (\text{其它}) \end{cases} \quad (9)$$

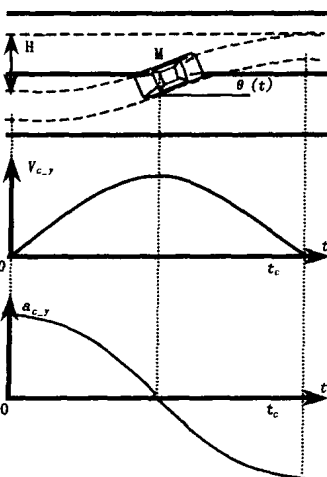


图3 超车过程动力学分析

另一方面, 汽车超车过程中, 横向加速度来自于行进方向加速度的横向分量。设  $t$  时刻汽车行进方向于道路纵向的夹角为  $\theta(t)$ , 有

$$\tan(\theta(t)) = \frac{\partial y_c(t)}{\partial x_M(t)} = \frac{\partial y_c(t)/\partial t}{\partial x_M(t)/\partial t} = \frac{V_{c_y}(t)}{V_{c_x}(t)} \quad (10)$$

其中:  $x_M(t)$ 、 $V_{c_x}(t)$  分别为  $t$  时刻汽车沿道路方向的纵向位移和纵向速度。

下面针对图 4 所示的大多数情况讨论超车应具备的条件和安全性。其中,  $M$  为主车,  $L$  为前方车辆,  $F$  为超车道上的后方车辆。

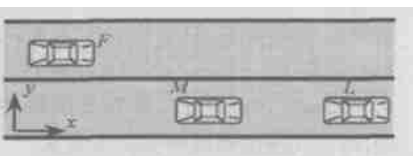


图 4 常见的超车情况即位置示意图

### 3.2 超车时最小安全距离

针对图 4 所示的情况, 保守的驾驶员可能认为, 后方超车道上有车则不应该超车, 而应

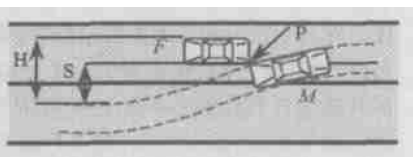


图 5  $F$  与  $M$  的碰撞分析示意图

该采取跟车( $L$ 车)行驶。其实不然, 只要  $F$  与  $M$ 、 $M$  与  $L$  之间有足够的纵向( $x$  方向)距离, 则可以超车。下面将讨论超车时  $F$  与  $M$ 、 $M$  与  $L$  之间最小纵向安全距离。如图 5 所示。

定义点  $P$  为  $M$  车左上角与  $F$  车下边缘切线的交点。显然, 点  $P$  为两车发生碰撞的边界点。  $S$  为超车初始时刻  $F$  与  $M$  的横向距离,  $H$  为超车完成的目标位移。由于式(9)已经给出了  $M$  车左上角的位移, 则可以  $M$  其它角的位移如下:

$$\begin{cases} y_{upper-left}(t) = y_c(t) - l_M \times \sin(\theta(t)) \\ y_{lower-right}(t) = y_c(t) - w_M \times \cos(\theta(t)) \\ y_{lower-left}(t) = y_c(t) - (l_M \times \sin(\theta(t)) + w_M \times \cos(\theta(t))) \end{cases} \quad (11)$$

其中:  $l_M$ 、 $w_M$  分别为  $M$  车长度和宽度。

当  $M$  车左上角达到  $P$  点时应满足:

$$y_c - l_M \times \sin(\theta(t)) = S \quad (12)$$

由式(10)式有:

$$y_c(t) - l_M \times \frac{V_{c_y}(t)}{\sqrt{V_{c_y}^2(t) + V_{c_x}^2(t)}} = S \quad (13)$$

从而可以得出  $M$  车左上角达到  $P$  点的时间  $t_P$ 。

可以看出, 如果要避免  $F$  与  $M$  的碰撞, 必须满足如下条件:

$$x_F(t) < x_M(t) - l_M \times \cos(\theta(t)) \quad \forall t \in [t_P, \infty] \quad (14)$$

其中:  $x_F(t)$  为  $F$  车纵向位移。注意到在  $[t_P, \infty]$  时间段中, 当  $t \geq t_c$  时,  $\cos(\theta(t))$  取得最大值, 因此, 式(14)式可以简化

为:

$$x_F(t) < x_M(t) - l_M \quad \forall t \in [t_P, \infty] \quad (15)$$

$M$  车的尾部与  $F$  车的头部的纵向距离为:

$$D_{F-M}(t) = x_M(t) - l_M - x_F(t) \quad \forall t \in [t_P, \infty] \quad (16)$$

如果对所有  $t \geq t_P$ ,  $D_{F-M}(t) > 0$ , 则不会发生碰撞。所以有:

$$\begin{aligned} D_{F-M}(t) &= D_{F-M}(0) + \int_0^t \int_0^\tau (a_{c_x}(\lambda) - a_F(\lambda)) d\lambda d\tau \\ &\quad + (V_F(0) - V_M(0)) \cdot t \quad \forall t \in [t_P, \infty] \end{aligned} \quad (17)$$

其中:  $D_{F-M}(0)$  为二者初始纵向距离。  $a_{c_x}(t)$  为  $M$  车超车时的纵向加速度, 且统计研究表明: 一般情况下,  $a_{c_x}(t)$  不宜超过  $6m/s^2$ 。  $a_F(t)$  为  $F$  车超车时的纵向加速度。

令  $MD_{F-M}$  为最小纵向安全距离, 那么:

$$\begin{aligned} MD_{F-M} &= \max_t \left[ \int_0^t \int_0^\tau (a_F(\lambda) - a_{c_x}(\lambda)) d\lambda d\tau \right. \\ &\quad \left. + (V_M(0) - V_F(0)) \cdot t \right] \quad \forall t \in [t_P, \infty] \end{aligned} \quad (18)$$

同理, 令  $a_L(t)$  为  $L$  车超车时的纵向加速度可以得到  $M$  与  $L$  之间的最小安全距离:

$$\begin{aligned} MD_{M-L} &= \max_t \left[ \int_0^t \int_0^\tau (a_{c_x}(\lambda) - a_L(\lambda)) d\lambda d\tau \right. \\ &\quad \left. + (V_M(0) - V_L(0)) \cdot t \right] \quad \forall t \in [0, t_P] \end{aligned} \quad (19)$$

可见, 最小纵向安全距离依赖于相对速度、相对加速度以及时间  $t_P$ 。而这个时间又依赖于横向距离  $S$ 、横向超车时间  $t_c$ 。假设超车前后, 汽车处在车道的中央, 那么  $S$  为车道的宽度。从而,  $t_c$  是决策的关键参数。

### 3.3 $t_c$ 的确定

不同的  $t_c$  决定了不同的超车过程。  $t_c$  越小, 超车过程完成所需的纵向距离越短, 但是超车过程完成的平稳性越差; 相反  $t_c$  越大, 超车过程完成所需的纵向距离越长, 超车过程完成的平稳性越好, 但是容易发生碰撞事故。因而合理地选取  $t_c$  具有重要的意义。在初始距离  $D_{F-M}(0)$  下,  $t_c$  应该满足:

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_c} \int_0^\tau a_{c_x}(\lambda) d\lambda d\tau + V_M(0) \cdot t_c > \\ &\frac{1}{2} a_F(\lambda) t_c^2 + V_F(0) \cdot t_c - D_{F-M}(0) \end{aligned} \quad (20)$$

同理, 在初始距离  $D_{M-L}(0)$  下,  $t_c$  应该满足:

$$\begin{aligned} &\int_0^{t_c} \int_0^\tau a_{c_x}(\lambda) d\lambda d\tau + V_M(0) \cdot t_c < \\ &D_{M-L}(0) + \frac{1}{2} a_L(\lambda) t_c^2 + V_L(0) \cdot t_c \end{aligned} \quad (21)$$

另一方面, 平稳的超车过程对车辆的安全、驾驶员以及

乘客的安全以及舒适度至关重要。而超车过程所产的曲率半径直接决定了超车过程的平稳性。超车过程曲率半径如图6所示。图中,  $L_c$  表示完成超车过程所需的纵向距离, 则:

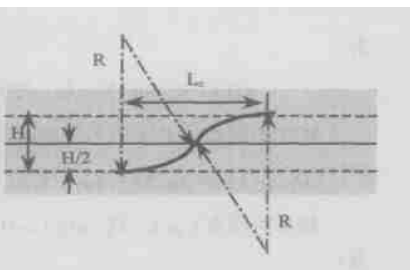


图6 超车过程曲率半径

$$L_c = \sqrt{4HR - H^2} \quad (22)$$

对道路设计而言, 各国对  $R$  都有相应的技术标准, 而这个标准正是为车辆安全行驶时所必须满足的转弯半径。根据我国《公路工程技术标准》, 在行车速度为 120km/h、100km/h、80km/h、60km/h 时, 极限最小半径分别为: 650m、400m、250m、125m。设  $R_{\min}$  为极限最小半径, 那么:

$$L_c > \sqrt{4HR_{\min} - H^2} \quad (23)$$

即:

$$\int_0^{t_c} \int_0^{\tau} a_{c,x}(\lambda) d\lambda d\tau + V_M(0) \cdot t_c > \sqrt{4HR_{\min} - H^2} \quad (24)$$

从而, 式(20)、(21)、(24) 共同决定了  $t_c$  的取值范围。

$t_c$  的取值确定后, 超车过程及其对应的参数也就确定了。一旦当前的行驶参数不满足超车条件, 系统将给出警示, 并提出对当前行驶参数调整的建议。

## 4 安全决策

### 4.1 超车安全性区域决策图

前面讨论了超车时的最小纵向距离与  $t_c$  的取值。结合大量的实验数据和经验分析, 得到了超车安全性区域决策图, 如图7所示。图中, 采用最小安全距离划分出了两部分: 由 I 构成的①区域和由 II、III、IV、V、VI、VII 以及 VIII 构成的②区域。在②区域中, 通过  $t_c$  的统计取值<sup>[11]</sup> 划分。

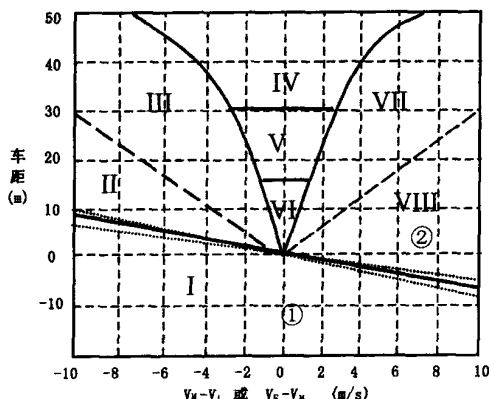


图7 超车安全性区域决策图

在 I 中, 相对距离很近, 存在极大的碰撞危险, 不能超车, 宜调整速度, 跟车或者制动; 区域 II、V、VII 为警戒区域, 在这个区域, 驾驶员的个性差异对事故发生与否将起到主导作用; 区域 III、IV 为安全区域; VI、VIII 为危险区域。

以图4所示的情况为例, 其中设  $D_{F-M}(0) = 40m$ ;  $D_{M-L}(0) = 40m$ ;  $V_M = 35m/s$   $V_F = 30m/s$   $V_L = 30m/s$  则:  $V_F - V_M = -5m/s$  落点在 III, 属安全区域; 但  $V_M - V_L = 5m/s$ , 落点在 VII, 属警戒区域; 因而, 在以此参数超车时, 可能发生前向追尾或擦挂, 但危险程度不大; 如果 M 将速度调整为 32m/s, 则  $V_F - V_M = -3m/s$  落点在 IV, 属安全区域;  $V_M - V_L = 2m/s$  落点在 IV, 属安全区域; 因而可以超车。利用该图, 可以快捷准确地得到决策信息。

### 4.2 超车过程安全监控决策流程

在进入超车状态后, 系统将对超车过程的安全进行实时监控, 及时给出决策信息。图8为超车过程安全监控流程图。在获取进行超车的决策信息后, 驾驶员按照决策所得的行驶参数进行行驶状态调整。安全监控模块1将对调整后的状态结合当前动态环境信息(包括前后车辆的行驶参数)进行安全决策, 如果安全, 则进行超车控制, 开始超车; 如果不安全将重新对当前车距进行确认, 返回决策信息支持模块。在超车过程进行时, 仍然时刻对安全性进行监控; 如果不安全, 则转车距确认模块; 如果安全, 将根据需求分析(是否继续超车)进入决策信息支持模块或者超车安全监控模块。图9为系统运行界面。

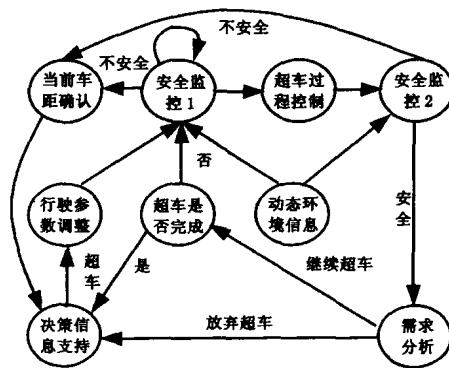


图8 超车过程安全监控决策流程



图9 系统运行界面 (下转第222页)

## 4 结论

本文给出了数控加工的 CNC 转换成刀位文件的主要方案,并在计算机上实现了翻译器设计。以槽型凸轮为例,给出了数控加工 CNC 代码及翻译后的刀位文件。该刀位文件已经成功地驱动虚拟三坐标加工中心,实现槽轮的虚拟加工,如图 4 所示,从而验证了该算法和所开发的翻译系统的正确性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 梁宏宝,钟诗胜,王知行.虚拟机械加工环境的建造[J].高技术通讯,2001,11(122):74-76.
- [2] 肖田元等.通用 CNC 代码翻译器[J].系统仿真学报,1998,10(5):1-7.
- [3] 梁宏宝,钟诗胜,王知行,闫继东,王庆娟.机械虚拟加工技术[J].大庆石油学院学报,2000,24(2):101-102.
- [4] C F Cheung, W B Lee. A framework of a virtual machining and inspection system for diamond turning of precision optics[C]. In:

(上接第 210 页)

## 5 结论

本文分析了结合汽车驾驶过程动态模型以及制动距离模型,提出了基于最小安全报警距离的危险估计。通过对超车过程中车辆行驶的运动学分析,推导出超车所应满足的前后纵向车距算法,并且结合超车曲率限制,得出了超车过程完成时间的取值范围,由此,判断即将采取的超车是否安全。

本文所描述的算法已经应用在我们的汽车主动安全系统中。从 2002 年初到 2003 年初的数十次近 5000 公里的实验记录来看,系统能准确、及时地给出报警信号与决策支持信息。

### 参考文献:

- [1] Jonas Jansson, Jonas Johansson. Decision Making for Collision Avoidance System[R]. 2002 Society of Automotive Engineers, Inc, 2002-01-0403.
- [2] M Maurer, R Behringer, F Thomanek, E D Dickmanns. A Compact Vision System For Road Vehicle Guidance[C]. In: Proceeding of the 13th International Conference on pattern Recognition, Vienna, 1996.
- [3] D Pomerleau, T Jochem. Image Processor Drives Across America[M]. Photonics Spectra, April, 1996, 80-85.
- [4] D Pomerleau, T Jochem. Rapidly Adapting Machine Vision For Automated Vehicle Steering[J]. IEEE Expert, April 1996, 11(2): 19-27.
- [5] Parag H Batavia. Driver-Adaptive Lane Departure Warning Systems[R]. Carnegie Mellon University PhD Dissertation, Sep. 1999.
- [6] M Bertozzi, A Broggi. GOLD: A Parallel Real-Time Stereo Vision System For Generic Obstacle and Land Detection[J]. IEEE Transaction on Image Processing, January 1998, 7(1): 82-81.

Proceedings of the International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, AMP' 99 and 16th Annual Conference of the Irish Manufacturing Committee, IMC16, Dublin, Ireland, 1999: 1675-1687.

- [5] Rade Tesic, Pa Banerjee. Exact collision detection using virtual object in virtual reality modeling of a manufacturing process[J]. Journal of Manufacturing System, 1999, 18(5): 367-376.



### [ 作者简介]

梁宏宝(1966.10-),男(汉族),黑龙江省兰西县人,博士,大庆石油学院现代教育技术中心副主任,副教授,主要研究方向为 CAD/CAM 技术;

杨胡坤(1975.10-),男(汉族),安徽省蚌埠人,硕士研究生(在读),学生,主要研究方向为数控加工技术;

刘丽娜(1976.3-),女(汉族),河北省玉田县人,学士,助理工程师,主要研究方向为计算机编程技术、网络技术;

曹喜承(1975.6-),女(汉族),辽宁省海城人,硕士研究生(在读),学生,主要研究方向为虚拟加工中数据结构及其转换。

- [7] M Bertozzi, A Broggi, A Fascioli. ARGO and the Milleniglia in automatic Tour[C]. In: Proceedings of the IEEE Intelligent System, Vol. 14 Issue 1, Jan-Feb. 1999, 14(1): 55-64.

- [8] Yong-Seok Kim, Effects of Driver, Vehicle, and Environment Characteristics on Collision Warning System Design[R]. Master's thesis of Department of Science and Technology, Jan. 2002.

- [9] H Juk, E Kosmatopoulos, P Ioannou. Collision Avoidance Analysis for Lane Change and Merging[R]. California Path Research Report, May 1999.

- [10] National Highway Traffic Safety Administration[R]. Assessment of IVHS Countemeasures for collision avoidance: Rear-End Crashes, Final Report, May 1993.

- [11] B Song, D Delomo, J VanderWerf. Cognitive and hybrid model of human drive[C]. Proceedings of the IEEE Intelligent Vehicles Symposium 2000, N J Piscataway, IEEE Service Center, 2000.



### [ 作者简介]

邓金城(1977-),男(汉族),广西北流人,重庆大学自动化学院控制理论与控制工程专业硕士研究生。研究方向:信息融合理论及其应用;

黄席樾(1943-),男(回族),博士,重庆人,重庆大学自动化学院教授,博导。研究方向:模式识别与人工

智能,知识工程与专家系统;

邓小丽(1980-),女(汉族),湖北随州人,重庆大学自动化学院控制理论与控制工程专业硕士研究生。研究方向:智能交通、信息融合理论及其应用;

廖传锦(1977-),男(汉族),四川简阳人,重庆大学自动化学院控制理论与控制工程专业博士研究生。研究方向:信息融合理论及其应用。