

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.09.020

Matlab 与 VC++ 混合编程及其在交通信号 两级模糊控制中的应用

杨文臣¹, 张 轮¹, 何兆成², 杨曦临¹, 董德存¹

(1. 同济大学 交通运输工程学院, 上海 200092; 2. 中山大学 工程学院 广东省智能交通重点实验室, 广东 广州 510006)

摘要: 针对采用 VC++ 等编程语言实现交通信号智能控制算法的项目开发强度高及仿真开发周期长等问题, 提出了一种基于 Matlab 与 VC++ 混合编程的交通信号智能控制策略的仿真评价方法。该方法分析 Matlab 与 VC++ 混合编程的 6 种实现方法, 具体研究基于 COM 组件的 Matlab 混合编程技术及其实现流程; 同时, 以城市单交叉口交通信号 2 级模糊控制为例, 依托交通仿真软件 Paramics 的二次开发插件, 采用 COM 组件的混合编程技术构建了交通信号 2 级模糊控制的 Paramics 仿真平台; 最后, 以典型城市单交叉口进行试验, 设计面向路口不同交通条件的多种仿真场景, 在 4 种控制策略下对提出的方法进行效用评价。研究结果表明所提出的方法开发周期短, 能模拟道路的实际交通状况, 在路口处于中高饱和的交通状态下, 2 级模糊控制具有良好控制效果。

关键词: 交通工程; 交通信号; Matlab 混合编程; Paramics; 模糊控制

中图分类号: U491.5⁺1; TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 09-0123-06

Matlab & VC++ Hybrid Programming and Its Application in Two-stage Fuzzy Control for Urban Traffic Signals

YANG Wenchen¹, ZHANG Lun¹, HE Zhaocheng², YANG Xilin¹, DONG Decun¹

(1. School of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China;

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Transport Systems, School of Engineering,
Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510006, China)

Abstract: To cope with the heavy workload and long development time in achieving traffic signal intelligent control algorithms by VC++ and other programmings, a simulation evaluation approach of intelligent control strategies for urban traffic signals based on Matlab & VC++ hybrid programming was presented. Six approaches for achieving hybrid programming with Matlab & VC++ were analyzed. Then, the com-based hybrid programming with Matlab & VC++ and its development process were represented in detail. Simultaneously, taken traffic signal two-stage fuzzy control (TSTFC) at an isolated intersection for example, the com-based hybrid programming was employed to develop a Paramics-based simulation platform of TSTFC based on the API addin of the micro-traffic simulator Paramics. Finally, the experiments on a typical urban isolated intersection were carried out, and in designed various simulation scenarios for different traffic conditions at isolated intersections, the performance of the presented approach was validated under four signal control strategies. The results demonstrate the potential of the developed evaluation approach in time efficiency and simulating real traffic conditions, and the TSTFC is more effective when traffic status at intersections is above low saturation.

Key words: traffic engineering; traffic signal; Matlab hybrid programming; Paramics; fuzzy control

收稿日期: 2012-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50408034); 上海市创新基金项目 (11ZZ27)

作者简介: 杨文臣 (1985-), 男, 云南昌宁人, 博士研究生. (tongjiywc@163.com)

0 引言

基于统计模型的单点交通信号自适应控制综合考虑交通效益和损失,广泛应用于现在的信号控制系统,但此方法的控制效果取决于模型与现实相符度,且不能根据控制效果调整控制策略^[1]。基于智能计算的单点交通信号控制无须精确的数学模型,通过模拟人的推理和学习能力,利用专家知识或在控制对象与环境交互过程中自主学习优化的控制策略,具有好的非线性逼近能力。

在众多交通信号智能控制算法中,模糊逻辑、神经网络和增强学习占据主导地位,仿真结果表明交通信号智能控制方法能减小延误,增加通行能力^[2-4]。然而,面对众多的交通信号智能控制方法,采用C/VC++、C#等程序语言开发的项目工作量大,仿真开发周期长,且受限于开发者对算法结构与机理的理解,自主开发的算法可能存在冗余性高,精度及准确度低等不足^[5]。Matlab提供较全面的智能控制算法工具箱,例如模糊控制、神经网络、遗传算法等,且提供规范的应用程序接口,支持Matlab与VC++等外部程序混合编程,即可以在VC++等程序语言中打开Matlab引擎,调用Matlab的工具箱函数,也可以在Matlab中调用VC++代码生成的动态链接库文件加快执行速度,解决计算瓶颈问题^[6]。通过Matlab与VC++的混合编程,可实现2个平台间的取长补短,缩短开发周期,保障算法的精度和准度,从而取得更好的应用研究成果。因而,Matlab成为面向城市交通信号智能控制应用研究的重要平台。

目前,Matlab混合编程技术在图像处理、金融计算和控制系统优化设计等多个领域具有成熟应用,但是在城市交通信号控制中的应用研究仍处于起步阶段^[7-8]。赵晓华等提出了基于C语言的Matlab混合编程及其在交通控制算法中应用的原理和特点,但对混合编程及其应用在交通控制算法中所涉及的关键技术缺乏具体的研究^[9]。

本文分析Matlab与VC++混合编程的6种实现方法和城市交通信号2级模糊控制模型,研究基于COM组件的Matlab混合编程技术及其实现流程,并立足基于交通需求强度的单点交通信号2级模糊控制,采用Paramics提供的API接口技术和基于COM组件的混合编程技术,构建城市交通信号多级模糊控制的Paramics在线仿真平台,设计多种仿真场景和试验,进行交通信号智能控制策略仿真评价。

1 Matlab混合编程

Matlab与VC++混合编程的基本方法是利用VC++作为前端开发工具,通过Matlab提供的接口函数,将VC++中用户定义的初始数据传递到Matlab中进行较复杂的数学运算或调用对应的工具箱函数,并将输出结果数据返回至VC++的调用函数,供用户自定义的二次开发使用。目前,2种语言的混合编程方法包括6种:Matlab Engine、Matlab的C/C++数学函数库、Matlab Compiler技术、Matcom技术、Combuilder技术和MATLAB的Add-in插件^[10-11]。

Matlab Engine和Matlab C/C++数学库的2种混合编程方法必须在安装MATLAB的系统上运行,在很多情况下并没有实用价值。Matlab的Compiler技术在将m程序转换成C/C++代码时存在不能转换脚本m文件等6大限制。Matcom对Struct和Class等数据类型的支持存在缺陷。MATLAB的Add-in组件可实现MATLAB和VC++的直接集成,但运行时必须安装MATLAB。Matlab的combuilder可把Matlab编写的m程序编译成COM组件或.NET组件,以供VB、C/C++、C#等程序语言调用(Matlab 6.5之前可脱离Matlab运行);该方法编程实现简单,通用性强,几乎可以使用Matlab的任何函数(脚本文件使用时需要改为函数文件),在程序规模大,调用工具箱函数或调用m文件函数数量多时推荐使用。

COM是一种通用的对象接口,任何语言遵照这种接口标准,均可直接调用。相比其他5种方法较苛刻的应用条件,基于COM的混合编程通用性高,可实现所有m函数和工具箱函数的调用,且支持多种语言,研究采用COM组件技术实现Matlab与VC++混合编程。

2 交通信号2级模糊控制模型

交通信号模糊控制器的控制规则随状态变量数目的增加成指数级增长,且各状态变量间相互干扰。为使模糊控制器快速响应,本文引入交通强度,采用基于交通强度的单点交通信号2级模糊控制模型,将红灯和绿灯相位的交通强度按其作用分别命名为红灯紧迫度和绿信繁忙度,通过分层处理来减少控制规则,避免绿灯相位和红灯相位状态变量间的相互干扰。交通信号2级模糊控制器的结构如图1所示。

第1级负责交通状态判定,包括3个功能:红

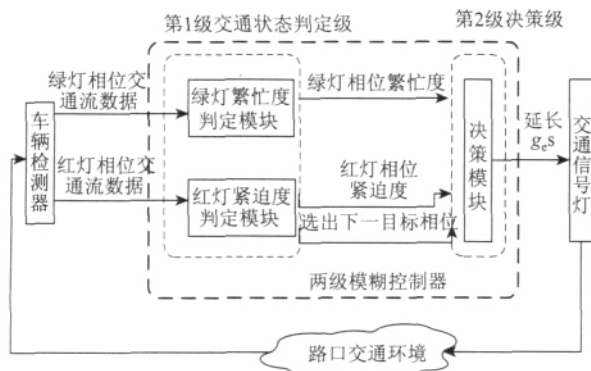


图1 交通信号2级模糊控制器结构

Fig.1 Structure of traffic signal two-stage fuzzy controller

灯紧迫度判定、绿信繁忙度判定和目标绿灯相位优选。其中,红灯紧迫度判定和绿信繁忙度判定是根据路口准实时采集的交通数据,评估相位的交通强度。假定驾驶员对路口相序的调整具有好的适应性,为适应路口交通流的不确定性和交通流到达的流向不均衡性,目标绿灯相位优选功能旨在选择红灯紧迫度最高的相位作为下一个目标绿灯相位,通过相序的优化实现不均匀车流的有效放行,整体上减小各流向车辆在路口的延误,保证路口通行能力的充分利用。

第2级负责绿灯延长时间判定,其根据路口当前绿信的繁忙度和红灯的紧迫度,综合决定当前绿灯相位的延长时间的取值。

路口交通流的到达具有不确定性,为制定符合现实的交通控制方案,建模时考虑右转等非关键车流,并选取相位所包含的各流向车流的平均排队长度、平均到达率等交通状态参数的均值作为控制器的输入。交通信号2级模糊控制模型的结构划分及设计详见文献[12]。

3 在交通信号模糊控制中的应用分析

3.1 基于混合编程的交通信号2级模糊控制 Paramics 仿真平台

选用 Paramics 仿真平台模拟现实交通流,作为交通信号智能控制策略的无偏评价工具,搭建基于 Paramics 的模糊控制仿真平台^[13]。首先,为缩短开发周期和保障计算精度,选用 Matlab 实现3类交通模糊控制器;接着,为实现 Paramics 仿真平台与模糊控制器的交互,采用 Matlab 混合编程方法,即通过 Paramics 提供的 API,编写 C/VC++ 语言与 Matlab 的接口程序,依托 Paramics 的二次开发接口调用 Matlab 生成的模糊控制器,进而加载模糊控制

算法,其中,VC++与 Matlab 的接口是3类模糊控制器功能函数,其以各相位的交通数据以及模糊控制器的参数集合作为输入参数,以模糊控制器的输出变量为输出参数;最后,在 Paramics 的 Modeler 模块中,建立典型城市交叉口的基础路网,加载交通信号模糊控制插件,设计不同交通场景,通过 Paramics 仿真验证交通信号2级模糊控制。

3.1.1 仿真流程

遵循交叉口信号控制的最大最小周期以及最大最小绿灯时间等基本原则,设计的模糊控制算法如下:对当前绿灯相位首先给予最小绿灯时间的控制,并实时检测各进口车道内车辆到达和离开的车辆数;接着,在绿灯时间结束前2s,根据检测线圈实时检测到的交通状态参数的数据,调用 Matlab 混合编程交通强度判别模块评估各相位的交通强度,并选择红灯相位中交通强度最大的相位作为下一个目标绿灯相位;接着,根据绿灯相位和被选择红灯相位的交通强度信息,由模糊决策控制器确定当前绿灯相位的绿灯延长时间 g_e ;最后,根据 g_e ,由系统控制逻辑判定当前绿灯相位是否切换(若 $g_e < 6$ s,相位切换)。

3.1.2 基于 COM 组件的 Matlab 与 VC++混合编程

基于 COM 组件的 Matlab 与 VC++混合编程的流程包括 Matlab 功能函数编写、Matlab 混编 COM 组件的生成、VC 设备编译环境的配置和 VC 混编调用 COM 组件。研究选取 Matlab 2008Rb 和 VS2005 C++ 为混合编程开发工具。使用 COM 技术实现 Matlab 与 C++混合编程的步骤如下^[14]。

(1) Matlab 功能函数编写

在 Matlab 中编写交通信号2级模糊控制的3类模糊控制器的 m 文件函数;

(2) Matlab 混编 COM 组件的生成

①配置 Matlab 的 C/C++ 编译器:在 Matlab 的 Command Window 中,输入 mbuild-setup 命令,根据提示选择 VS2005 C++ 为默认编译器;

②在 Command Window 里面直接输入 deploytool,新建一个 COM 工程并命名(如 FuzyTSC),按 MATLAB Builder NE-Generic COM 的向导,依次选择组件为 COM 类型;

③在 TSCFuzzy 工程中单击打开按钮,添加已编写好的3类模糊控制器的 m 文件;

④编译,编译结束后在 Matlab 工作目录的 distrib 目录下有编译好的 FuzyTSC.DLL 及编译日志,在 src 目录下有编译好的 .c 和 .h 等文件。结合具体

应用的要求,在编译前可对编译参数进行设置。

(3) VC 设备编译环境的配置

①在 VS2005 C++ 中新建 Paramics 两级模糊控制二次开发的插件工程(如 TSCFuzzy);

②将 Matlab 工作目录的 src 目录下的 FuzyTSC_idl.h 和 FuzyTSC_idl_i.c 文件拷贝到 VS2005 中 TSCFuzzy 工程的目录下;

③将上述 2 个头文件添加到 TSCFuzzy 工程的头文件 Header Files 中:工程 -> 添加工程 -> Files, 选择刚刚拷贝到目录下的 FuzyTSC_idl.h 和 FuzyTSC_idl_i.c 文件;

④重复步骤(2)和步骤(3),将 src 目录下的 mwcomtypes.h 文件拷贝到工程 VS2005 中 TSCFuzzy 工程目录下,并添加到工程头文件中;

⑤在要调用 3 类模糊控制器的应用程序文件(如 TwostageFuzzy.cpp)中依次添加头 3 个文件: FuzyTSC_idl.h、FuzyTSC_idl_i.c 和 mwcomtypes.h,否则,编译出错;

⑥选择工具 - 选项 - 项目解决方案,在 VS2005 C++ 中设置生成 COM 组件所需的头文件路径。在 include files 中加入: < Matlab root > \ extern \ include 和 < Matlab root > \ extern \ include \ win32, 并在 lib files 中添加目录 < Matlab root > \ extern \ lib \ win32 \ Microsoft;

⑦在 VS2005 的 C++ 中无需设置预编译头文件(自动使用预补偿页眉),否则编译出错。

(4) VC 混编调用 COM 组件

在 VC++ 应用程序文件中混编调用 COM 组件的步骤如下:①初始化 COM 库;②得到 COM 对象的 CLSID(可通过查看编译后生成的 .c 头文件得到);③创建一个 COM 对象的实例(指针类型);④使用 COM 对象;⑤退出 COM 库,释放资源。

VC++ 与 Matlab 混合编程的关键是传递参数的数据类型转换,通常使用 Variant 对象传递变量和 Marray 对象传递数组。参数类型转换包括 3 步:①在 C++ 中,将变量定义为数组类型;②使用安全数组(SafeArray)或 Marray 等数据接口将变量数组转为 Matlab 的矩阵数据类型;③将从 Matlab 返回的数据转换为 C++ 的数据类型。

研究采用基于 SafeArray 安全数组的数据类型转换,需要注意 SafeArrayPutElement 函数的第 2 个指针变量指向数组各维的索引向量时,最右边的一维(最低位)放在该向量的最前;最左边的一维(最低位)放在该向量的最后,而在 C++ 等语言中对多

维数组的访问正好与此相反。

3.2 Paramics 仿真

以典型的的城市道路正交十字路口作为研究对象,采用标准 4 相位控制,直行相位考虑右转车流的影响。为实时检测进口车道车辆到达和离开的交通流参数,如图 2(a) 示,在每个进口的每条车道上各布设战略和战术 2 组检测线圈。战术线圈位于停车线前,用于检测各进口道的通过量,包括离开车辆数和离开时间,战术线圈布设在距离战术线圈 150 m^[12] 的进口道上游位置,检测各进口车道上车流的到达需求,包括到达车辆数和到达时间。

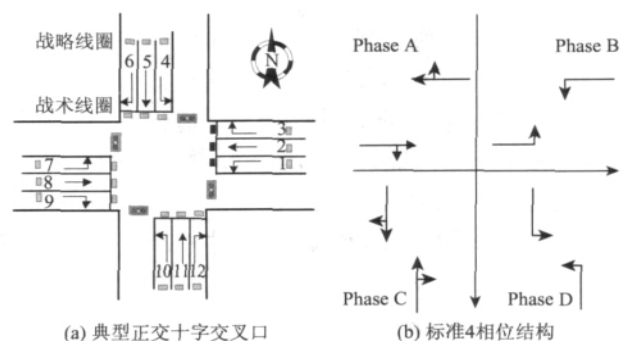


图2 单交叉口模型示意图

Fig.2 Model of isolated intersection

3.2.1 仿真场景

为验证研究提出的技术路线以及对交通信号 2 级模糊控制进行 Paramics 仿真验证,考查其在不同路口交通状态下及交通流到达波动情况下的控制效果,仿真试验场景设计如下: (1) 仿真时长为 13 h,进口道流量在 400 ~ 1 600 pcu/h 变化,每个小时为一仿真时段(period),且左-直-右车流的转向比例为: 0.25 - 0.60 - 0.15; (2) 为模拟路口短时车流到达的波动特性,在 Paramics 的 Profile 文件中设置 1 h 内 10 min 间隔车辆的发车比例为: 15 - 11 - 17 - 22 - 16 - 19; (3) 根据国内城市道路直行设计通行能力为 1 650 pcu/h、左转/右转设计通行能力为 1 550 pcu/h 的规范,车头时距 MDT、驾驶员反应时间 MHT 仿真参数校准为 1.8、1.5 s; (4) 由于仿真效果受随机种子影响,对每种控制方案批量仿真 10 次。

3.2.2 仿真试验

设计交通信号 2 级模糊控制的仿真试验,该试验对比定时、感应、标准模糊和 2 级模糊控制。其中,定时控制取路口平均流量(05:00—06:00)下的 Webster 控制方案^[15],感应控制(Actuated)的感应线圈距离停车线 30 m,取单位延长时间为 3 s^[12];

标准模糊控制 (NormalFuzzy) 采用改进的 Pappis 方法实现^[16], 2 级模糊控制 (TFIFuzzy) 采用基于交通强度的 2 级模糊控制^[12]。仿真控制参数设置如下: 4 个相位最小绿灯时间为 12 s; 直行相位 1 和相位 3 最大绿灯时间为 80 s, 而左转相位 2 和相位 4 为 50 s。

3.2.3 仿真结果

选取信控路段的平均延误 (Delay)、平均队长 (Queue) 和平均速度 (Speed) 和进口道平均通过量 (Count) 为控制效果评价指标, 取 30 min 为控制性能统计间隔。2 级模糊控制的仿真结果如图 3 所示。

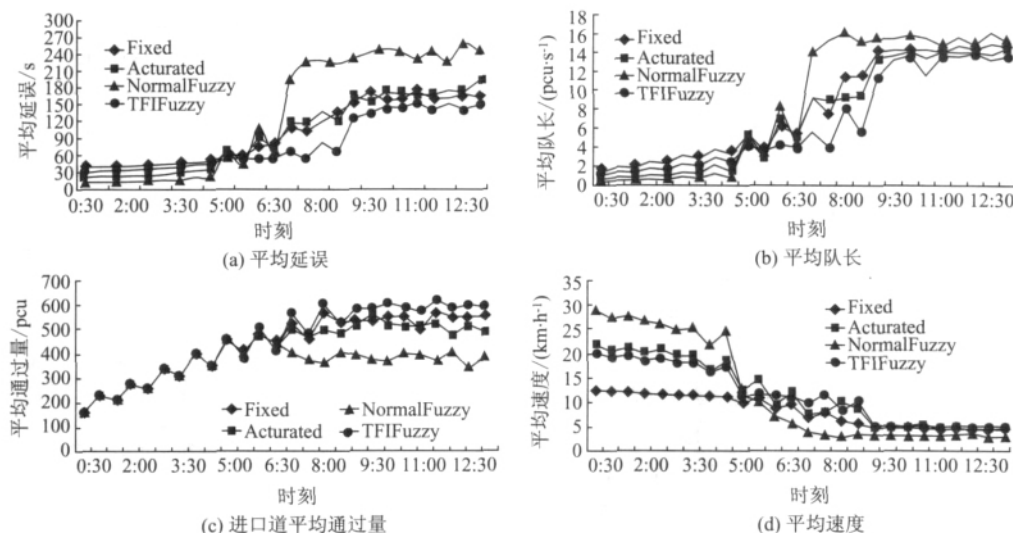


图3 交通信号 2 级模糊控制的各评价指标的仿真结果

Fig.3 Simulation result of evaluation indicators by TSTFC

定时控制在整个仿真过程中较稳定, 随车流量增加, 各性能指标均在负变化, 适用于中低饱和交通状态下各流向车流均衡到达的路口。感应控制在车流量小及车辆到达交叉口较随机的情况下, 控制好, 随着车流量增加, 其控制效果近乎等同于定时控制。标准模糊控制在车流小的情况下控制性能好, 随车流量增加, 仅凭队长难以准确描述路口状态, 模糊决策的绿灯相位延长时间大, 致使每个相位执行最大最小绿灯时间控制, 且固定相序, 忽略其他车流效益, 控制效果恶化。在整个仿真过程中, 2 级模糊控制稳定, 在路口处于中高饱和的交通状态下 (进口道流量 > 800 pcu), 延误和队长等性能指标在整体上均优于定时、感应和标准模糊控制, 其中延误改进幅度约为 32% ~ 8%, 队长减少约为 18% ~ 7%, 进口道通过量增加 22% ~ 4%, 速度提高 46% ~ 15%, 且随着流量增加, 控制效果的优势明显。

值得注意, 2 级模糊 Paramics 仿真在低饱和和交通状态下控制效果不如感应和标准模糊控制。这是因为与传统 Matlab 数值模拟仿真采取的车流即排队的路口车流运行建模方法相比, Paramics 仿真模拟了交叉口车辆到达和离开的整个离散微观行驶过程, 而在该状态下交通流为自由流, 路口排队车辆数小, 2 级模糊控制考虑相位时间弱化了路口交通状态, 致

使绿灯相位延长时间小, 导致相位频繁切换和目标绿灯相位无车浪费绿灯的现象较严重, 这在一定程度说明了 Paramics 精细化模拟路口车流运行的能力。

4 结语

本文提出了应用 Matlab 与 VC++ 混合编程和交通仿真软件 Paramics 进行交通信号智能控制策略仿真评价的研究思路, 分析了 Matlab 与 VC 混合编程的 6 种方法, 研究了基于 Com 组件的 Matlab 与 VC++ 混合编程的具体步骤。通过 Matlab 和 VC++ 进行有机结合, 一方面应用了 Matlab 强大的数据分析能力和丰富的工具箱函数, 大大缩短仿真开发周期, 一方面利用 Paramics 丰富的 API 函数, 研究者可根据自行设计的交通路网, 对相应的交通智能控制算法进行可视地微观仿真验证。研究以基于交通需求强度的单点交通信号 2 级模糊控制为例, 验证混合编程在智能交通控制算法仿真评价中的应用, 结果表明基于混合编程的交通信号控制算法的 Paramics 仿真开发周期短, 可有效地进行交通控制策略的仿真实验。

本文仅以交通信号模糊控制为例, 研究 Matlab 与 C/VC++ 混合编程技术及其在交通控制算法中的应用流程, 该方法同时适用于神经网络、遗传算法

等智能算法在智能交通及其他领域中的应用研究。

参考文献:

References:

- [1] BULLOCK D, URBANIK T. Traffic Signal Systems Addressing Diverse Technologies and Complex User Needs [R]. Washington, D. C.: Traffic Signal Systems Committee, 1999, Part A: 3-18.
- [2] MURAT Y S, GEDIZLIOGLU E. A Fuzzy Logic Multi-phased Signal Control Model for Isolated Junctions [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2005, 13 (1): 19-36.
- [3] 南天伟, 敖梦雅, 魏丽英. 基于模糊神经网络的城市干道信号协调控制 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (1): 145-149.
NAN Tianwei, AO Mengya, WEI Liying. Traffic Signal Coordination for Urban Arterial Roads Based on Fuzzy Neural Network [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (1): 145-149.
- [4] CHOY M C, SRINIVASAN D. Hybrid Cooperative Agents with Online Reinforcement Learning for Traffic Control [C] // Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Honolulu, HI: IEEE, 2002, 2: 1015-1020.
- [5] 李天昀, 葛临东. 综述 MATLAB 与 VC++ 的交互编程 [J]. 计算机仿真, 2004, 21 (9): 193-196.
LI Tianyun, GE Lindong. A Survey of Interactive Programming for MATLAB and VC++ [J]. Computer Simulation, 2004, 21 (9): 193-196.
- [6] 翟军红, 王红宣. 基于 VC 与 MATLAB 混合编程的研究 [J]. 微计算机信息, 2007, 23 (11): 226-228.
ZHAI Junhong, WANG Hongxuan. An Approach for Mixed Programming of VC and MATLAB [J]. Microcomputer Information, 2007, 23 (11): 226-228.
- [7] 王晓春, 曹鸣, 罗永新. 基于 COM 的 VC 与 Matlab 的混合编程技术 [J]. 现代电子技术, 2004, 27 (19): 16-17.
WANG Xiaochun, CAO Ming, LUO Yongxin. Mixed Programming Technique Using VC and Matlab Based on COM [J]. Modern Electronics Technique, 2004, 27 (19): 16-17.
- [8] 柴敬安, 廖克俭, 潘德辉. LabVIEW 和 MATLAB 混合编程方法的研究与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 737-739.
- CHAI Jing'an, LIAO Kejian, PAN Dehui. Study and Implementation on Program Method of LabVIEW Combined with MATLAB [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16 (5): 737-739.
- [9] 赵晓华, 陈阳舟, 石建军, 等. 交通控制算法在 Paramics 交通仿真软件中的实现 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (6): 136-139.
ZHAO Xiaohua, CHEN Yangzhou, SHI Jianjun, et al. Realization of Traffic Control Algorithm Using Traffic Simulation Software Paramics [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (6): 136-139.
- [10] 彭博栋, 魏福利. VC6.0 与 MATLAB7.x 混合编程方法研究 [J]. 计算机与数字工程, 2008, 36 (9): 174-178.
PENG Bodong, WEI Fuli. Research on the Combination Programming for MATLAB7.x and VC++6.0 [J]. Computer and Digital Engineering, 2008, 36 (9): 174-178.
- [11] 李芳, 徐丽. 基于 COM 组件的 Matlab7.x 与 VC++6.0 接口技术及实际应用 [J]. 计算机应用与软件, 2009, 26 (2): 131-134.
LI Fang, XU Li. On Technology of Interface between Matlab7.x and VC++6.0 Based on Com and Its Actual Application [J]. Computer Application and Software, 2009, 26 (2): 131-134.
- [12] YANG Z Y, HUANG X Y, XIANG C. Multi-phase Traffic Signal Control for Isolated Intersections Based on Genetic Fuzzy Logic [C] // Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian: IEEE, 2006: 3391-3395.
- [13] QUADSTONE. Paramics 6.6.1 User Manual [M]. Edinburgh, Scotland: Quadstone Ltd., 2008.
- [14] 刘维. 精通 Matlab 与 C/CVC++ 混合程序设计 [M]. 2 版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2008.
LIU Wei. Proficient in Hybrid Programming with Matlab & C/CVC++ [M]. 2nd ed. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2008.
- [15] WEBSTER F V, COBBE B M. Traffic Signals [R]. London: Road Research Laboratory, 1966.
- [16] 臧利林, 贾磊, 林忠琴. 基于模糊逻辑的交通信号控制与仿真研究 [J]. 公路交通科技, 2006, 23 (4): 124-127.
ZANG Lilin, JIA Lei, LIN Zhongqin. Research of Traffic Signal Control and Simulation Based on Fuzzy Logic [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2006, 23 (4): 124-127.