

CPS 体系结构设计

陈丽娜 王小乐 邓 苏

(国防科学技术大学 C4ISR 国防科技重点实验室 长沙 410073)

摘要 Cyber-Physical System(CPS)是基于网络和嵌入式系统等技术而发展起来的下一代智能系统。体系结构是 CPS 的骨架和灵魂。分析了 CPS 概念和特性,构建了 CPS 三层体系结构框架,分别为包含实体的物理层、将资源互联互通的网络层和为用户提供服务的应用层。并对各层进行了深入分析,给出了各层相关概念描述。通过智能交通系统体系结构实例证明了 CPS 三层体系结构框架符合 CPS 概念,能够反映 CPS 特性,能够指导未来 CPS 研究和系统开发。

关键词 Cyber-Physical System(CPS),体系结构

中图分类号 TP30 文献标识码 A

Cyber-physical System Architecture Design

CHEN Li-na WANG Xiao-le DENG Su

(Key Lab of Defense Technology for C4ISR, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Cyber-Physical System(CPS) is a next generation intelligence system based on the technology of network and embedded system. Architecture frame is the key technology of CPS. We analyzed the concept and features of CPS, proposed a three-layers architecture frame. They are physical layer, network layer and application layer. We discussed each layer, introduced the description of layers. The three-layers architecture frame was proved to be congruent to concept and features of CPS by the experiment in intelligent traffic system. The three-layers architecture frame can be the direction of research in CPS in the future.

Keywords Cyber-Physical System(CPS), Architecture

1 引言

随着传感器网络和嵌入式系统技术的发展,智能系统深入到人们生活的各个方面,而且系统具备了自主获取和实时处理信息的能力。Cyber-Physical System(简称 CPS)是最近几年出现的一个新概念,是指计算和物理要素之间紧密结合与协作的系统^[1]。文献[2]中 Edward Lee 将 CPS 定义为计算和物理过程的集成。S. Shanker Sastry 认为一个 CPS 系统是将计算和通讯能力集成到物理实体中,以满足可信、安全、可靠、有效、实时的控制和监测。Insup Lee 等将 CPS 定义为监测、控制和协作地运行,集成了计算和通讯核心的物理和工程系统。总之,CPS 强调计算(computing)、通信(communication)、控制(control)与物理系统(physical systems)的集成。它具有应对环境不确定性变化的自适应性,动态自组织重构功能及基于网络的大规模系统集成控制。CPS 在物理设备和程序控制下,无缝集地成了传感器、网络、计算器和控制单元,它作为计算过程和物理过程的统一体,是集成计算、通信与控制于一体的下一代智能系统。CPS 的出现是传感器技术、嵌入式计算、普适计算、人机交互技术、通信和网络技术不断发展的必然结果,这些领域的技术相互影响和集成,构成了解决人类面临的两大危机即能源危机和人口危机^[3]的有效方案。

CPS 自出现就得到了重视,2006 年 2 月发布的《美国竞争力计划》则将 CPS 列为重要的研究项目。到了 2007 年 7 月,美国总统科学技术顾问委员会(PCAST)在题为《挑战下的领先——竞争世界中的信息技术研发》的报告中列出了 8 大关键的信息技术,其中 CPS 位列首位^[4]。之后,CPS 的研究得到了美国多个机构的支持包括:NSF, DOD/DARPA, DOE, NASA, HSARPA, NIST, NSA, NIH。除美国外,欧洲、日本和韩国等也在从事类似研究^[5]。CPS 也得到了国内众多专家学者的重视,最近,中科院多位院士在各种学术报告中多次提到 CPS 相关研究。

CPS 将改变人与物理世界的交互方式,其应用领域非常广泛,包括智能电网系统、智能交通系统、航空航天电子系统、智能医疗系统、信息家电系统、环境监测、智能建筑、工业控制、国防系统、武器系统等^[2],它将成为推动新技术革命的重要动力。CPS 结合了感知、决策、执行、计算、网络和物理过程等多种技术,它是新世纪科技和经济发展的关键领域。

虽然 CPS 概念出现,甚至 CPS 相关项目开发也已经启动,但是到目前还没有通用完整的 CPS 体系结构。文献[7]从嵌入式系统网络化的角度提出了一种 CPS 体系结构原型,该体系结构原型满足 CPS 的几个本质特征要求如:及时性、分布性、可靠性、容错性、安全性、可扩展性和自治性。文献

[8]中给出了一种类似于计算机总线结构的 CPS 体系结构,该体系非常简单,没有对各个功能模块进行描述。文献[6]中提出了 CPI(Cyber-Physical Internet)的概念,并在原来计算机网络五层体系结构的基础上增加了 CPS 层。总之,国内外对 CPS 体系结构的研究还处在起步阶段,目前为止并没有一种能够完全反映 CPS 特征的 CPS 体系结构。体系结构是系统研究和开发的基础,CPS 也一样,如果有一个合理的体系结构,无论从 CPS 研究还是系统开发上讲都会有极大的飞跃。

本文对 CPS 体系结构进行了较为深入的研究,针对 CPS 系统特性构建了 CPS 三层体系结构框架。本文第 1 节介绍了 CPS 的基本概念、发展历程和应用领域;第 2 节是本文的核心,设计了一种 CPS 体系结构框架;第 3 节通过智能交通的例子对本文所提体系结构进行了实例化分析;第 4 节对全文进行了总结。

2 CPS 体系结构设计

CPS 体系结构是 CPS 最核心的技术,是 CPS 的骨架和灵魂。CPS 结合计算和物理进程于一体,体现出一系列特定的系统特性,本节在分析 CPS 系统特性的基础上构建 CPS 体系结构。

2.1 CPS 系统特性

CPS 是在嵌入式系统、传感器技术和网络技术的基础上发展起来的,尤其是前两者的发展直接导致了 CPS 概念的提出。嵌入式系统使设备具有智能性,传感器网络使设备具有感知能力,这两者的结合就产生了“计算深深嵌入物理过程中”的效果,使得物理系统能力得到扩展,并且计算与物理过程相互影响,这就是 CPS 的系统目标。从 CPS 的需求出发,对比现有系统分析 CPS 具有以下性能需求:

(1)计算/信息过程与物理过程紧密结合,以至于对系统的行为特征无法判断究竟是物理定律还是计算过程甚至两者共同影响的结果^[5]。

(2)可靠性(reliability)^[10]。物理世界的变化是不可预测的,CPS 并非工作在可控的物理环境中,因此,CPS 必须能够应对意外情况和子系统故障。可靠性是系统的一项重要指标,特别是 CPS 对可靠性提出更高的要求,只有高可靠的交通 CPS 系统、汽车 CPS 和医疗 CPS 才敢被人们使用。文献[11]中提出了提高可靠性的两种方法:1)避免错误的发生,2)提高系统的容错能力。

(3)实时性(real-time)^[10]。实时性就是要求物理世界发生的事件能够几乎同时地反应到信息世界中,CPS 是计算与物理过程不断交互的系统,需要实时地感知物理过程并对物理过程进行干预,这就要求系统具有较高的实时性。

(4)适时性(timing)^[2]。适时性是不同于实时性的另一个概念,适时性指的是 CPS 中任务的完成具有最终期限(deadline),如果错过了这个最终期限,那么该任务就不需要再执行了,也就是所谓的过期了,过期的任务是没有意义的。

(5)并发性(concurrency)^[10]。并发是物理环境中事件发生的基本特征,目前存在的计算模式基本是顺序的,而且人们似乎已经完全适应了这种计算模式,但是 CPS 是计算和物理过程紧密结合的系统,必须开发新的并发计算软件系统以适应 CPS 的需求。

(6)异质性(heterogeneity)^[12]。CPS 网络将异质部件进

行互联,这些异质单元可能包括不同功能的设备,不同公司生产的设备,软件系统不同的设备,甚至编码系统不同的设备,CPS 要实现这些异质设备之间无障碍的互操作,需要采取一些“翻译”措施。

(7)自治性(autonomous)^[13]。CPS 最大的特点就是系统的自治性,系统能够通过传感器感知环境并做出相应的反应,人在整个系统中可以干预,但是在没有人的情况下系统同样能够正常运行。

(8)分布性(distribution)^[14]。CPS 系统中存在大量网络化的嵌入式计算,这些嵌入式计算组成了分布是计算的,每个节点的能力有限,是一种典型的分布式计算系统。

(9)安全性(security)和隐私性(privacy)^[13]。CPS 不但具有信息处理能力还具有影响物理环境的能力,因此它比互联网提出了更高的安全和隐私保护需求。

(10)动态重组(recompose)和重配置(reconfigure)^[3]。CPS 的目标是完成各种任务,那么各种资源要能够根据任务的情况,动态地进行重组和重配置。当某些资源失效,如感知设备电池耗尽了,要能够自动地组织其它资源来做补充。

CPS 体系结构是 CPS 研究和开发的基础,必须体现 CPS 的定义满足以上 CPS 的特性。CPS 强调计算和物理的紧密结合,同时也强调了网络化,分析可知在整个 CPS 中最核心任务的实际上是信息处理,感知物理世界获取信息,然后对信息进行处理做出决策,给控制单元发送指令,这些都是信息处理。

2.2 CPS 体系结构

CPS 概念的核心是计算和物理过程的紧密结合,松耦合的分布式计算系统和物理系统通过下一代互联网连接形成 CPS 的资源基础^[7],在此基础上建立直接为人服务的应用软件、智能设备。CPS 体系结构是 CPS 的核心技术,是 CPS 的骨架和灵魂。只有建立科学合理的体系结构,才能充分体现 CPS 的特性,才能开发满足需要的 CPS。

2.2.1 CPS 体系结构

本文在进行大量研究的基础上充分理解 CPS 的概念和性能需求,并根据理解和需求提出了一种层次化的 CPS 体系结构,该体系结构包括物理层(PL)、网络层(NL)和应用层(AL)。物理层是指 CPS 中与物理环境紧密结合的感知设备、执行设备以及它们组成的具有特定功能或存在于特定区域的无线/有线网络单元。网络层是指跨区域的网络,类似于计算机网络中的国际互联网,是实现超大区域中 CPS 节点互联、互操作的,该层的网络称为下一代网络,是国际互联网的发展方向。CPS 中传感或执行节点设备之间互联组成具有特定功能的局域网类似于 WSNs(Wireless Sensor Networks),这种网络的连接方式、通信技术和传输协议与互联网都有很大的区别;CPS 的目标是将所有的物理设备都实现网络化,由于网络技术和地址空间的限制,不可能直接将所有设备都连接到下一代网络上,而且从效率和必要性上来说也是不科学的;基于以上考虑,本文将节点之间互联组成具有特定功能的局部连接归结到物理层。网络层实现设备的互联和互操作,主要功能是数据传输和资源共享,下一代网络的特性是数据在传输过程中能够进行有效融合,后文将有详细介绍。应用层是 CPS 为人服务的接口,该层主要功能是为用户提供各种 CPS 服务,使得用户能够在不需要详细了解下面两层的

情况下与系统进行交互。本文所提的 CPS 三层体系结构如图 1 所示。

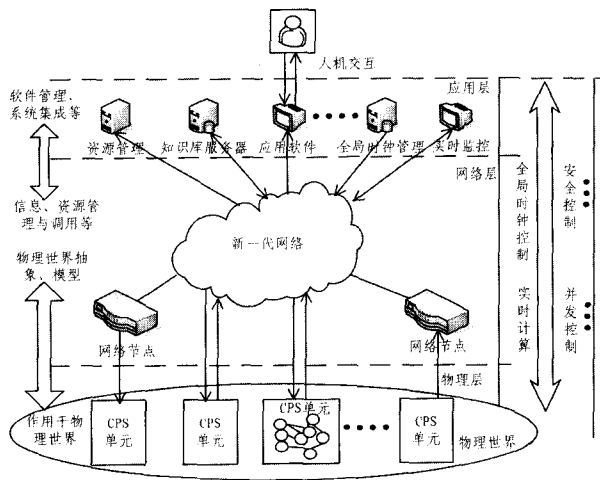


图 1 CPS 三层体系结构

体系结构是 CPS 的最基本内容,只有建立起科学合理的体系结构,才能够开发满足需要的 CPS 系统,根据不同的功能将 CPS 的体系划分为上述三个层次。CPS 的这种体系结构中充分体现了其性能需求。物理层的节点深入到物理环境中,并实时感知和环境变化,对特定情况做出反应,不仅从空间上而且从时间上充分体现了计算与物理过程紧密结合。系统的安全控制将对可靠性、安全性和保护隐私性三个特征进行控制;通过全局时钟给整个系统统一的时间标识,从而正确描述事件顺序,确定任务的最终期限,反映系统的适时性要求;并发控制将对并发时间进行处理,满足系统并发性要求;通过计算控制感知、执行和通信体现了系统的自治性;分布式存在的各种终端设备能够根据应用层的应用需求自动重组和重配置。在下面的小节中对三个层次分布进行详细描述。

2.2.2 物理层

CPS 物理层是将计算深深嵌入到物理过程的系统节点层,本文将直接与环境进行交互的物理设备及其构成的集合统称为物理层。关于物理层给出如下定义。

定义 1 CPS 节点(CPSN)是指具有感知或执行能力的终端设备,一般指传感器、执行器或兼有两种功能的设备等。一个 CPS 节点可以通过如下五元组进行描述:

$$CPSN ::= \langle ID, Func, Power, Position, State \rangle$$

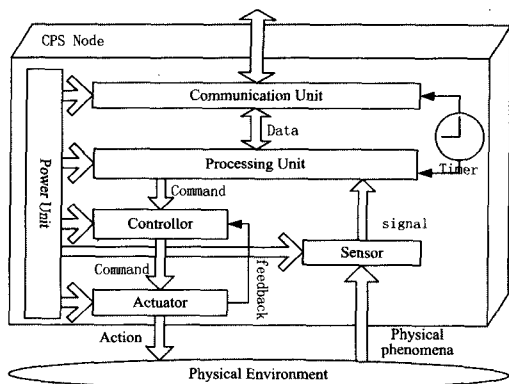


图 2 CPS 节点体系结构

其中 ID 是指局域网中设备的唯一标识,Func 是对设备功能的一种形式化描述,Power 是设备能量状态的描述,Position

指设备当前所处的位置,State 指设备目前的状态。一个 CPS 节点的体系结构如图 2 所示,CPS 的节点包括对环境进行感知的传感设备,影响环境的执行设备,对节点进行能量供给的能量单元,对数据进行处理的计算单元,实现节点之间通信的通信单元和控制时间的时钟单元。根据实际需求某些 CPS 节点可能只包含感知或执行中的一种功能模块。

CPS 节点分为一般节点与超级节点。

定义 2 一般节点(CPSGN; General Node)是指通讯能力、计算能力和电能有限的受资源约束的节点,如传感器。

定义 3 超级节点(CPSSN; Super Node)是指存储、计算和电力足够大的资源无限制的节点,如个人电脑。

在每个 CPS 单元中还存在着一个接入互联网的接入点,将其定义如下。

定义 4 信标节点(CPSBN; Beacon Node)负责将 CPS 节点网络连接到新一代网络上的节点,如基站。

定义 5 CPS 单元(CPSU)是指为了完成特定任务,或者在特定区域内可以通过无线、有限短距离通讯多跳连接的节点的集合。一个 CPS 单元就相当于一个 WSNs。

$$CPSU = \{CPSN_1, CPSN_2, \dots, CPSN_n\}$$

其中, $n \geq 1$ 。

当 $n=1$ 是一个 CPS 单元指的是一个单独的 CPS 节点,例如一台手持终端 PDA 或移动手机就是一个 CPS 单元。另外,一个 CPS 单元也可以是一组 CPS 节点集合(当 $n > 1$ 时)。一组探测房间温度的传感器集合通过一个超级传感器节点接入新一代网络与其他 CPS 单元交互,这一组传感器网络被认为是一个 CPS 单元,其中每个传感器是一个 CPS 节点,如图 3 所示。

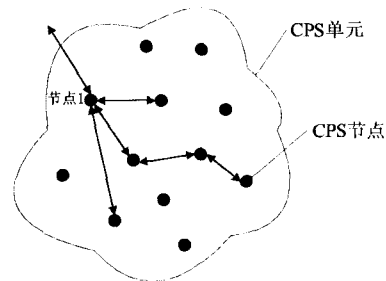


图 3 CPS 单元示意图

CPS 体系结构中物理层包括地理上分布的各种 CPS 单元,物理层是直接与环境交互的部分,CPS 通过物理层感知环境,反之又是通过物理层作用于环境改变环境。例如随处分布的传感器网络、未来 CPS 汽车单元以及 CPS 医疗网络都属于物理层。

定义 6 CPS 物理层(PL)是指在整个 CPS 中与环境紧密集合的所有节点设备综合的抽象,这些节点直接与物理环境相互作用,通过感知能力感知环境,通过执行能力作用于环境。

$$PL = \{CPSU_1, CPSU_2, \dots, CPSU_n\}$$

其中, $n \geq 1$ 。

CPS 物理层由 CPS 单元(CPSU)组成,CPS 单元可以是单一的 CPS 节点(CPSN)也可以是独立完成某个功能的若干个 CPS 节点组合。

物理层的节点单元可以是嵌套结构,一个房间的环境监控系统组成一个 CPSU,那么该房间所在的大楼中所有的

CPSU 又构成一个大的 CPSU。物理层 CPS 节点向着体积不断减小,能力不断增强,实时性不断增加的方向发展。CPSU 内部网络的连接和通信方式与 CPSU 之间的互联网完全不同,因此我们将其归结到物理层,而网络层主要考虑的是 CPSU 互联问题。

2.2.3 网络层

网络层将物理层的大量异构 CPS 单元实现互联互通,并支持 CPS 单元之间的互操作。网络层是 CPS 实现资源共享的基础。CPS 网络需要屏蔽掉物理层 CPS 单元的异构性,实现无缝连接,为应用层提供资源共享的基础网络,以透明的方式为用户提供即插即用式服务。因此,CPS 网络层不仅仅需要传统计算机网络中许多技术,如接入控制、网络连接、路由、数据传输、发布/订阅模式的数据共享模式,而且需要很多不同于传统计算机网络的新技术,这些新技术包括:异构节点产生的异构数据的描述和语义解析,由于节点移动性导致的节点定位问题,感知能力的覆盖问题,大量数据传输带来的网络拥堵等。

CPS 网络层是负责将 CPS 单元相互连接,实现数据交换、资源共享和互操作。将 CPS 物理单元互联如同互联网将分布在各地的局域网络相连,互联网是关于网络的网络,那么 CPS 网络也是连接局部网络的互联网。由于 CPS 网络连接的 CPSU 是异质的,并且 CPS 系统要和物理过程实时交互,因此,对实时性要求较高。加之大量数据采集和处理设备相连,整个网络上的数据负载之大是以前的网络无法比拟的。由于不同于传统互联网,CPS 网络需要新的技术来支撑。文献[6]中根据这些需求提出了 CPI(Cyber-Physical Internet)的概念,就是要考虑全世界建立类似于现有互联网的计算机物理网络,将所有的设备互联,从而实现互操作。

节点单元接入控制,CPS 系统中节点异质性使得节点之间数据格式等都存在差异,就如不同语言的人需要一个翻译一样,节点接入子层就负责将异质信息转化为同质,使得节点之间能够无障碍地进行数据交换。目前的互联网连接的设备基本都是计算机,异质性并不强,但是将所有物理设备互联的 CPS 网络面临的一个最大挑战就是异质性问题。如何将不同公司生产的、功能各异的、甚至编码方式和硬件都不兼容的设备互联,并使其能够在分别不出彼此差异的情况下互操作是一件很具挑战的问题。CPS 网络对异质设备接入控制也是该领域一个重要的研究方向,未来 CPS 系统中很多设备是具有高度移动特性,要保证 CPS 单元能够随时随地的快速接入 CPS 网络,就需要考虑网络覆盖问题,这就如同今天的无线网络,保证手机能够随时随地接入网络。

目前的网络技术主要考虑数据传输,在传输的过程中并没有考虑实时性问题,CPS 系统中因为实时性要求较高,在网络传输的过程中一定会考虑实时性约束,假设数据包 p 一定要在特定的时间 t 内传到目的,否则数据将失效,对于这种考虑时间约束的数据传输问题是 CPS 网络技术的关键研究点之一。

总之,CPS 网络层将全球性分布的,具有扩展网络能力的 CPSU,如传感器网络、移动电话、车辆以及个人电脑等相互连接,以实现数据交换和资源共享。未来的网络架构那时社会信息基础设施的核心,是计算、通信、娱乐、新媒体、电子商务和智能控制等应用的共同平台。作为一个 CPSU 只是到有网

络,网络为其提供各种能力,而它并不关心其他 CPSU 的存在和状态,这些都有网络进行协调。因此,网络是 CPS 的基础平台,对它的研究将面临着许多挑战,如:(1)资源的发现、共享、调度,在异构与动态特性、协同分配机制中,提高资源利用率,提供安全、可信、低开销的可定制资源策略,支持广域资源环境的自适应资源调度;(2)保证传输效率和实时性的在线数据融合,使得能够在带宽有限的条件下减少网上数据传输量,提高传输效率。

2.2.4 应用层

应用层是面向用户的,主要负责将整个 CPS 系统友好地呈现给用户,该层将网络层和物理层的详细信息封装成为不同的应用模块,使用户不用关心低层细节而直接进行业务处理。应用层主要收集任务需求,将任务进行合理分解,然后根据这些子任务进程资源的查询和配置,定位和调度资源,完成具体任务。

2.3 基于三层体系结构的 CPS 工作流程

CPS 中各个 CPS 单元(CPSU)不仅仅是独立完成任务,而且 CPSU 和 CPSU 之间有信息交互往来。同类型 CPSU、不同类型 CPSU 之间,通过网络层实现感知系统的联网、计算系统的联网和控制系统之间的联网,不但形成了环境感知和共享的基本环境,还形成了控制意图、实际执行效果共享的基本环境。CPSU 之间存在信息交互,通过各个 CPSU 之间的整合,使得整个 CPS 体现出整体优势。CPSU 之间的信息交互关系是影响整个 CPS 效能的重要因素。而各个 CPSU 之间的信息关联错综复杂,具体 CPS 工作流程如图 4 所示^[15]。

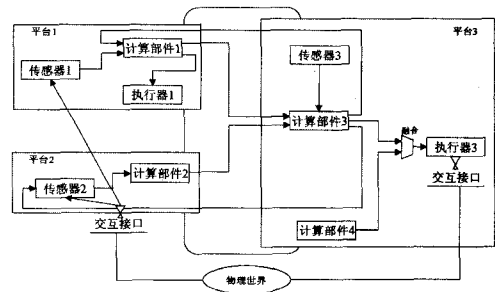


图 4 CPSU 工作流程

CPSU 通过传感器实时感知环境的变化,实现与物理世界的交互,将感知的信息交给计算单元,计算单元通过通讯单元与其它节点进行通讯完成数据交换,然后将获取的信息进行融合,产生对环境正确认识,根据这些认知和规则做出决策,并将结果传递给执行单元,实现对物理过程的影响。这一过程是实时并发的,并且感知、通讯、计算、控制和执行是封闭的,整个过程充满反馈,通过反馈达到正确决策和执行。

图 4 中示出的 3 个 CPSU 分别拥有自身的传感器、计算部件或执行器。通过传感器获取环境信息,经过计算部件处理后指定决策控制执行器,完成自身工作流程。CPSU 之间存在通过网络实现的信息交互。图 4 中的 CPSU3 是通过融合自身获取信息和网络上其他 CPSU 信息而制定决策,控制执行器。这些信息分别来自于 CPSU1 和 CPSU2。同时 CPSU3 计算部件产生的信息又反馈给 CPSU1 和 CPSU2。

CPS 的工作流程充分体现出计算和物理紧密结合的过程,物体具有了智能性,并通过网络实现了信息资源共享。CPS 的网络使得信息流的容量、质量和实时性都得以大幅度

提高。CPSU 的感知能力、计算能力和控制能力,都能够通过网络共享环境感知,更好实现协作协同。

3 CPS 智能交通系统体系结构框架

目前,交通压力日益增大,众多路网已超负荷运行。严重的道路交通拥堵给人们的生活带来了诸多不便,更导致了生产力的下降和能源的浪费。交通问题越来越受到关注,投入大量人力物力用于提高道路交通的吞吐量。未来的交通系统需要协调不同粒度的有人和无人设备,构建合理的 CPS 交通体系结构是未来交通系统的基础性工作。未来交通 CPS 是典型的 CPS 系统,其特性具有 CPS 的典型特性,例如要求具有使用的高度灵活性、安全性、稳定性、可靠性、高效性以及无缝耦合等。基于当前交通系统结构,按照第 3 节设计的体系结构模式,未来交通 CPS 体系结构如图 5 所示。

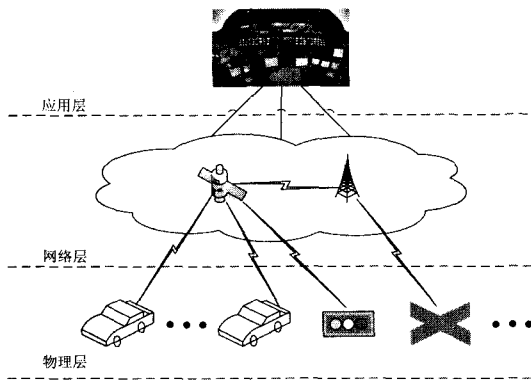


图 5 智能交通系统体系示意图

交通 CPS 体系结构包括三层,分别为物理层、网络层和应用层。

物理层:未来交通 CPS 中,汽车、道路设备不再仅仅是简单的机械设备,而将是嵌入了大量传感器、计算、控制部件的智能体。智能汽车、智能道路、智能桥梁等交通智能设备分布在环境中,直接与物理环境相互作用。这些具有感知、计算以及控制等功能的交通设备构成了交通 CPS 的物理层。

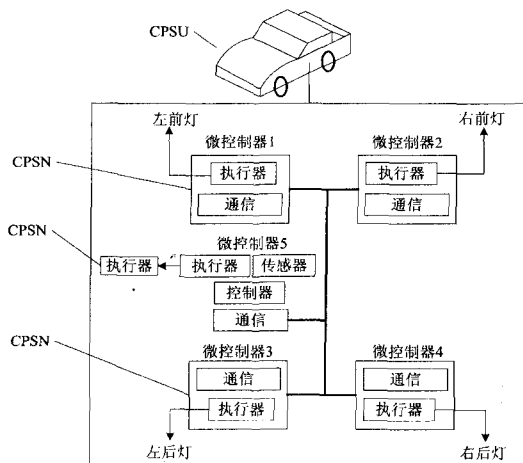


图 6 智能交通物理层(单个汽车)体系

交通 CPS 的物理层也是由 CPSU 组成的,CPSU 可以是单一的 CPSN,例如智能交通灯,其通过通信链路直接与其他 CPSU 通信;也可以是若干 CPSN 组成的集合,例如智能汽车作为一个 CPSU 就是由众多 CPSN 组成的,有动力 CPSN、制动 CPSN 等,图 6 展现的是一个智能汽车 CPSU 包含的照

明 CPSN。左右提示器作为一个 CPSN,具有感知、通信、计算和控制功能,与其他 CPSN 互联互通共同组成了一个汽车 CPSU。

网络层:单一的、孤立的智能汽车 CPSU 并不能构成交通 CPS 系统,只有各种交通 CPSU 互联互通才能实现交通 CPS。交通 CPS 体系结构中的网络层正是将大量异构 CPSU 连接起来,实现交通 CPSU 的互联互通,并支持 CPSU 的互操作。

交通 CPS 的网络层包括卫星通信、基站通信等多种通信方式,物理层 CPSU 通过网络层的各种通信方式实现信息共享,一辆智能汽车不仅仅可以通过自身传感器获取周围环境信息,还可以通过网络层获得其它车辆传感器感知的另一地域的环境信息,以利于路径预测规划;网络层屏蔽掉物理层 CPSU 的异构性,实现无缝连接,基于网络为应用层提供资源共享,以完全透明的方式为用户提供即插即用式服务。

应用层:应用层主要是指面向用户提供服务的应用软件。例如智能汽车的车载软件、交通管理部门的集中监控软件等。

智能不意味着把人排除在外,而是为了更好地为人服务。交通 CPS 的应用层正是与人直接交互的部分,它需要考虑面向人的设计、执行和确认问题,例如使用舒适度、可用度和操作正确性等。

未来交通 CPS 中一个微小但却典型的应用:交叉路口红灯变绿灯汽车起步,即现在交通系统中红灯变为绿灯时,通过驾驶员视觉观察,大脑反应,然后作出相应的动作使得汽车启动。由于驾驶员的反应时间、动作时间等存在一个延迟,使得交叉口绿灯时汽车不能够瞬时启动,一辆汽车的延迟虽小,但多辆汽车排队等候时,这种延迟就变得非常明显,减少这样延迟对于提高交叉路口的吞吐量有重要意义。

未来交通 CPS 中智能汽车与路口交通灯可以直接进行通信,汽车获得绿灯开始时间迅速自动作出反应,如此一来,由于驾驶员反应存在的延迟就被消除了。

结束语 本文讨论了 CPS 研究现状,依据其概念,总结和分析了 CPS 特性,基于此提出了一种 CPS 三层体系结构框架。该框架按照实体到抽象、物理到信息的思想将 CPS 划分为物理层、网络层和应用层三层结构。物理层是 CPS 主要实体层,将 CPS 物理部件和计算部件、通信部件嵌入为整体,并给出了物理层相关的概念定义;网络层将物理层各 CPS 单元(CPSU)连接组成一个整体,是 CPS 实现分布式计算和资源共享的基础;应用层基于以上两层,为用户提供服务。文章以智能交通系统体系结构为实例,对 CPS 三层体系结构进行了实例性说明分析。最后按照三层体系结构的划分对 CPS 面临的挑战进行了总结。总之,本文提出的 CPS 三层体系结构框架符合 CPS 概念,满足 CPS 特性,能够指导未来 CPS 研究和系统开发。

参考文献

- [1] Cyber-physical system[EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Cyber-physical_system,2010-03-08
- [2] Lee E A. Cyber-Physical Systems-Are Computing Foundations Adequate? [EB/OL]. <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/publications/papers/06/CPSPositionPaper>. 2006-10-16
- [3] Lui S, Gopalakrishnan S, Liu Xue, et al. Cyber-Physical Systems; A New Frontier[C]// 2008 IEEE International Confe-

rence on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing, 2008;1-9

- [4] 信息物理系统:从感知网到感控网[EB/OL]. http://sns.cio360.net/b/6_210330_3738.html, 2010-02-26
- [5] Cyber-Physical Systems Executive Summary[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS-Executive-Summary.pdf>, 2008-3-06
- [6] Koubaa A, Andersson B. A Vision of Cyber-Physical Internet [C]//Proceedings of the 8th International Workshop on Real-Time Networks(RTN'09). 2009
- [7] Ying Tan, Goddard S, Perez L C. A Prototype Architecture for Cyber-Physical Systems[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 26
- [8] Wang Yun-bo, Vuran Mehmet C, Goddard S. Cyber-Physical Systems in Industrial Process Control[J]. ACM SIGBED Review, 2008, 5(1): 12
- [9] Woochul K. Adaptive Real-Time Data Management for Cyber-Physical Systems[D]. Virginia: University of Virginia, 2009
- [10] Lee E A. Cyber Physical Systems; Design Challenges[C]//2008 11th IEEE International Symposium on Object Oriented Real-

Time Distributed Computing(ISORC), 2008;363-369

- [11] Lui S, Meseguer J. Design of Complex Cyber Physical Systems with Formalized Architectural Patterns[J]. Software-Intensive Systems and New Computing Paradigms; Challenges and Visions, 2008, 5380:92-100
- [12] Richard W, Parmer G. A Software Architecture for Next-Generation Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/cps/Position-Papers/richard-west.pdf>, 2010-05
- [13] Tarbk A. Towards an Architecture for Distributed Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://varma.ece.cmu.edu/cps/Position-Papers/abdelzaher.pdf>, 2010-05
- [14] Clifford N. Challenges in Security for Cyber-Physical Systems[EB/OL]. <http://cimic.rutgers.edu/positionPapers/CPS-Neuman.pdf>, 2010-05
- [15] Eidson J C, Lee E A, Matic S, et al. Time-Centric Models for Designing Embedded Cyberphysical Systems[EB/OL]. <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2009/EECS-2009-135.pdf>, 2009-09
- [16] Report; Cyber-Physical Systems Summit[EB/OL]. http://varma.ece.cmu.edu/summit/CPS_Summit_Report.pdf, 2010-05

(上接第 274 页)

倾,两腿之间跨度变大,且右腿与地面距离更为接近,最终整个身体的背部、腿部形成的人物轮廓整体前移。

在视频对象分割时,人物上身的衣服颜色与背景中的墙壁较为接近,在人物的行进过程中,墙壁的告示板下方的白色纸张逐渐显现。人物的裤子、鞋子与地板上的人影存在着一定程度的相似,因此该测试图像能较好地检验视频分割算法的准确度。

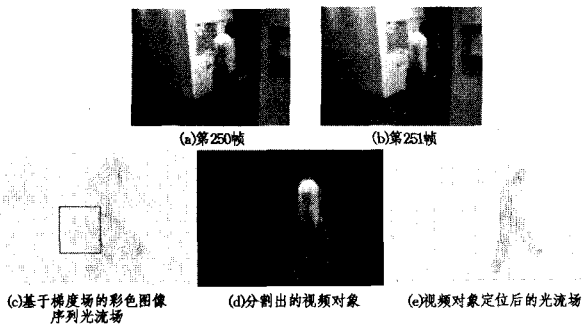


图 5 测试结果

在图 5(c)中红色框标出的部分,是相近背景与前景的相对运动而引起的明显的形变物体边界融合。由此可见,尽管光流场能够检测出形变物体的运动,但无法准确定位形变物体的边界。在使用自动生长分割视频对象后,能准确提取出运动物体的运动信息。图 5(e)显示了采用分割结果后准确定位的形变物体以及形变物体内部的光流矢量。通过实验证明,将梯度彩色光流法与视频分割相结合,能够成功解决形变物体光流场边界不准确的问题。

结束语 本文提出了基于自动生长分割的彩色光流场算法,通过自动选取沿物体闭合外轮廓的背景种子集与前景种子集,进行基于时空的生长分割,接着将此分割结果应用于采用梯度彩色光流法得到的光流场,进行形变物体的精确定位,从而能够得到形变物体的准确边界以及形变物体内部的光流矢量,提高了光流法对形变物体的计算准确度。通过实验证

明了本文算法的有效性。

然而在实验中也发现,生长分割法一旦将某像素划入一定的集合后,便不再对该像素的归属进行验证与调整,因此只要有极少量的错误种子就会引起较大范围的分割错误。对此,需要改进现有的生长分割法。同时,在完成了前景与背景的正确分离后,如果采用背景的光流场进行图像的全局运动校正,将此过程与光流场求解融合为一个迭代的过程,将能更精确地提取视频对象并获得视频对象的运动特性。对这些问题的分析将在后续的研究中进行。

参 考 文 献

- [1] Horn B, Schunck B. Determining optical flow [J]. Artificial Intelligence, 1981, 16(1-3): 185-203
- [2] Bimbo A D, Nesi P, Sanz J L C. Optical Flow Computation Using Extended Constraints [J]. IEEE Transactions on Image Processing, 1996, 5(5): 720-739
- [3] Golland P, Bruckstein A M. Motion from color [J]. Computer Vision and Image Understanding, 1997, 68(3): 346-362
- [4] Jamal A, Venkatesh K S. A New Color Based Optical Flow Algorithm for Environment Mapping Using a Mobile Robot[A]//22nd IEEE International Symposium on Intelligent Control Part of IEEE Multi-conference on Systems and Control[C]. Singapore, October 2007: 567-572
- [5] Negahdaripour S, Yu C H. A generalized brightness change model for computing optical flow[A]//Proceedings International Conference on Computer Vision[C]. Berlin, Germany, May 1993: 2-11
- [6] Thomas M. Segmentation for video object plane extraction and reduction of coding artifacts[R]. Dept. of Electrical and Electronic Engineering. The University of Western Australia, 1998
- [7] 雷震, 吴玲达, 李东. 基于局部微分光流的运动对象分割[J]. 计算机科学, 2009, 36(6): 276-278
- [8] Vezhnevets V, Konouchine V. 'GrowCut'-interactive multi-label n-d image segmentation by cellular automata[C]//Proceedings of the Graphicon'2005. 2005