

doi: 10.7690/bgzd.2016.09.011

基于 Simulink 主平台的 AMESim/Flowmaster 联合仿真技术

张鑫彬^{1,2}, 鲜亚平^{1,2}, 周文璋^{3,4}, 陈勇^{3,4}

(1. 上海航天控制技术研究所, 上海 201109; 2. 上海伺服系统工程技术研究中心, 上海 201109; 3. 电子科技大学能源科学与工程学院, 成都 611731; 4. 电子科技大学电动汽车动力系统与安全技术研究所, 成都 611731)

摘要: 为了提高航天系统的整体性能, 需要更加精确的控制算法, 而联合仿真利用各自平台的优势, 提供了更加精确的系统模型, 也使得研究的算法更具有真实性和实用性。通过对 Simulink、AMESim 和 Flowmaster 3 个软件进行大量研究, 提出基于 Simulink 主平台的 AMESim/Flowmaster 联合仿真方案。这种联合仿真技术是利用 Simulink 和 AMESim/flowmaster 的接口来调用 AMESim/Flowmaster 的系统模块, 并给出 Simulink 和 AMESim/Flowmaster 每个接口的详细实现步骤, 同时也实现了一个联合仿真案例。研究表明, 该研究解决了仿真接口模型兼容性和扩展性问题。

关键词: AMESim; Simulink; Flowmaster; 接口; 控制算法; 联合仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Co-simulation System of AMESim/Flowmaster on Simulink Main Platform

Zhang Xinbin^{1,2}, Xian Yaping^{1,2}, Zhou Wenzhang^{3,4}, Chen Yong^{3,4}

(1. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 201109, China;

2. Shanghai Servo System Engineering & Technological R&D Center, Shanghai 201109, China;

3. School of Energy Science & Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China;

4. Institute of Electric Vehicle Driving System & Safety Technology, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: For improving performance of aerospace system, more accurate control method is need, the co-simulation use advantages of each platform to supply more accurate system model and make algorithm more real and useful. By many rearches on Simulink, AMESim and Flowmaster, co-simulation system of AMESim/Flowmaster on Simulink main platform is proposed in this paper. The co-simulation technology use interfaces of Simulink and AMESim/ flowmaster to call AMESim/Flowmaster system module, then introduce implementation steps of every interface of Simulink and AMESim/Flowmaster. And realize a co-simulation example at the same time. The research results show that the research can solves problem of simulation interface model compatibility and expansibility.

Keywords: AMESim; Simulink; Flowmaster; interface; control method; co-simulation

0 引言

当代航天系统逐渐发展为智能化、系统化和网络化系统, 包含的子系统模块数目越来越多, 类型也越来越丰富, 比如液压、电子、控制、多体等。与这些复杂的系统相比, 较简单的系统存在更多的波动, 子系统协同方面也会有更多的误差, 对外界的扰动也更敏感; 因此, 除了改变系统结构之外, 采用更加优秀的控制算法来提高系统的性能也是行之有效的途径。

控制算法在近代有了很大的发展, 国内外学者们先后将最优控制、 H_∞ 控制^[1-2]、动态逆、反步控制和模糊逻辑以及变结构控制等控制方法应用到航天系统中^[3]。比如文献[4]中利用最优控制来控制调节航天器的运动; 文献[5]中提出一种结合模糊逻辑

和遗传算法的混合模糊控制器来增强系统的稳定性; 文献[6]中通过外界扰动的上下限和惯量阵的不确定性来确定滑模变结构控制器的变量和参数。

当前对复杂系统的控制策略的研究更多是建立数学模型, 并运用 Simulink 进行仿真验证。这样, 研究者将花更多的精力在系统的建模上, 增加了研究人员的工作量; 另外, 如果系统所建立的数学模型与实际系统存在很大的差异, 则将直接影响研究结果真实性。当前, 可以利用成熟的仿真工具进行集成, 例如 Flowmaster 和 AMESim 中就有比较完善、精确的系统模型元件, 可以用于建立系统或子系统模型, 然后再通过与 Flowmaster 和 AMESim 进行联合仿真, 不仅大量减少研究人员的工作量, 而且还可提高仿真的准确性。

收稿日期: 2016-06-25; 修回日期: 2016-07-28

基金项目: 上海航天科技创新基金项目(SAST2015080); 四川省科技支撑项目(2013GZ0054)资助

作者简介: 张鑫彬(1980—), 江苏人, 硕士, 高工, 从事运动控制、电液伺服控制、伺服阀方向研究。

为此，笔者充分利用 AMESim 和 Flowmaster 平台可简便快速建立精确系统模型的优点，提出了以 Simulink 作为主平台与 AMESim/Flowmaster 的联合仿真方案，即通过利用 Simulink 和 AMESim/Flowmaster 的接口来调用 AMESim/Flowmaster 的系统模块。另外，在研究基于 Simulink 的联合仿真技术中，由于仿真接口与模型兼容性和扩展性问题，如 Simulink&Flowmaster 接口对于 Flowmaster 中存在自定义元件时，会出现元件类型未定义的错误，只要在 Flowmaster 元件模型代码里设置好元件类型即可解决；又如 Simulink&AMESim 接口对于 AMESim 中存在显性变量时也会导致 SimuCosim 接口无法使用。笔者着重介绍联合仿真及其接口实现的方法。

1 联合仿真技术

1.1 联合仿真框架

笔者提出联合仿真方案如图 1 所示，在 Simulink 主平台上实现各种控制算法，再通过调用 AMESim 所生成的 S-Function 和 Flowmaster 提供的接口来进行联合。

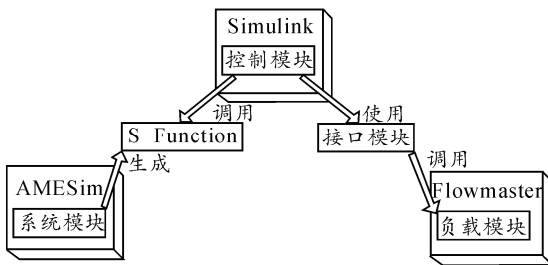


图 1 联合仿真框架

1.2 Simulink/ AMESim 联合技术研究

1.2.1 联合接口

在 AMESim 中创建 Simulink 接口模型，编译后系统自动生成 S-Function 可调用的 c 代码，最后在 Simulink 里完成对 S-Function 的调用，如图 2 所示。

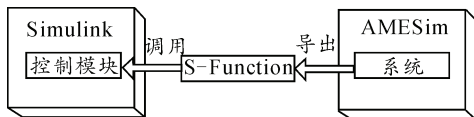


图 2 Simulink 调用 AMESim 模块框架

1.2.2 接口实现

选中 AMESim 的 Modeling->Create interface icon，弹出图 3 所示的对话框，设置相应的联合仿真类型和端口，图 4 是创建好的元件模型。

SimuCosim 和 Simulink 仿真类型最大区别是，前者仿真时采用各自的求解器，后者仿真时使用

Simulink 求解器，另外后者要求必须是显性的变量。

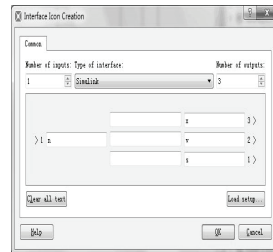


图 3 设置端口

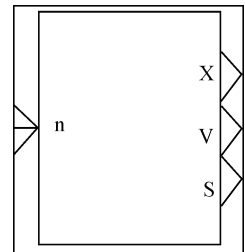


图 4 接口元件

接着在 Simulink 中调用自定义函数模块 S-Function，设置函数名为 AMESim 工程下 c 文件名，设置函数参数为 10.000 001。“1”代表生成 AMESim 模型仿真结果，第 2 个参数用于规定仿真结果文件的采集时间间隔，如图 5 所示。

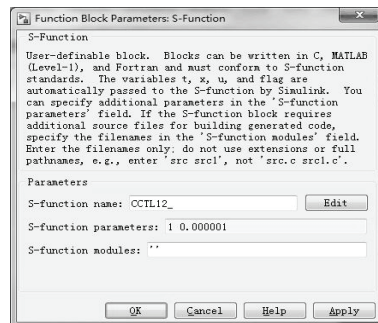


图 5 S-Function 参数设置

这样就完成了 Simulink/AMESim 的联合。需要注意 Simulink 的仿真类型，时间和步长等要和图 5 中的一致。

1.3 Simulink/Flowmaster 联合技术研究

1.3.1 联合接口

通过 Flowmaster 提供的 Simulink 模块库以及设置 Flowmaster 通信元件来实现 Simulink 对 Flowmaster 模块的调用，原理框如图 6 所示。

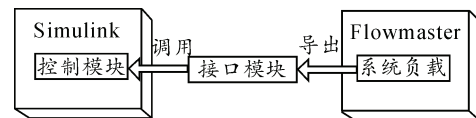


图 6 AMESim/Flowmaster 联合框架

1.3.2 接口实现

找到 FlowmasterSimulink 所在目录，将它添加到 Matlab 路径下。重启 Matlab，打开 Simulink Library 弹出 Simulink Library Browser 对话框，在对话框里会看到 Flowmaster 库，如图 7 所示，这个模块库就是用来调用 Flowmaster 模块的接口。

在 Simulink 中使用 Flowmaster 接口模块时，要求添加 Form 和 Goto 模块，如图 8 所示，分别对应图 9 中元件模块。Form 是 Flowmaster 模块输出端

口, Goto 是 Flowmaster 模块输入端口, 在设置名称时要求和 Flowmaster 平台中对应通信端口的名称保持一致, 并且 Goto 设置为 gobal。

图 9 中分别利用 Gauge 和 Controller Template 模块作为与 Simulink 进行连接的通信口。再设置他们作为外部通信元件, 要求 Controller Tempalte 参数设置为端口名称。

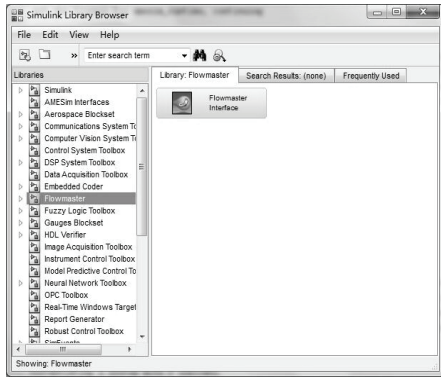
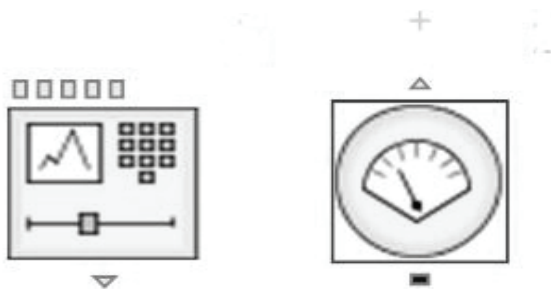


图 7 Simulink Library Browser 对话框



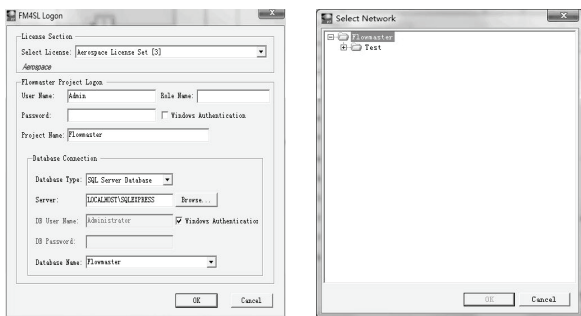
图 8 Simulink 中 Flowmaster 接口



(a) Controller 模块 (b) Gauge 模块

图 9 Flowmaster 通信接口

最后设置 Simulink 中 Flowmaster 蓝色元件参数, 会弹出图 10(a)的对话框, 单击 Ok, 在图 10(b)对话框中选择联合的网络, 进行端口连接和参数设置。



(a) FM4SL 登录界面 (b) 网络选择对话框

图 10 接口设置

选择了需要联合仿真的网络后, 进入图 11 中设置联合仿真信息设置。其中, 左边是连接 Flowmaster 和 Simulink 端口的设置, 在其左边的方框中打勾表示对应连接, 这里一般要求名称一致。右上方框是设置 Simulink、Flomaster 模型数据, 包含仿真时间。右下方是设置仿真方式, 这里选择 Compressible Transient 仿真类型, 仿真参数采用 Simulink 内部参数, 设置好参数后, 点击保存。这样就设计好了 Simulink 和 Flowmaster 的连接接口设置。

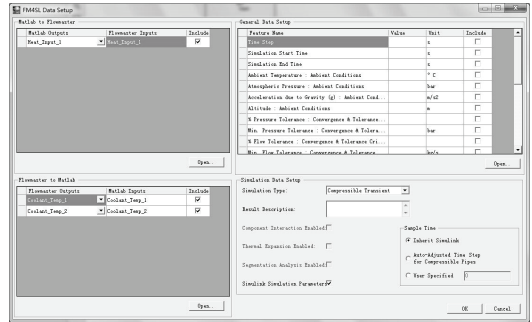


图 11 设置 Flowmaster 元件参数

1.4 运载火箭液压伺服控制系统实现

根据上面设置 Simulink 与 AMESim、Flowmaster 的联合接口, 最终可以实现以 Simulink 为主平台, 调用 AMESim 和 Flowmaster 模块的 3 个软件联合仿真的平台。

当所研究的系统侧重于控制策略, 那么该联合仿真方案就能利用 Simulink 强大的数学能力和高效的编程能力, 在 Simulink 中实现各种控制算法的仿真, 而无需关注于已提前设计好的系统本身。对于每次仿真, AMESim 和 Flowmaster 平台都将仿真结果保存起来; 因此, 不仅可以观察控制算法上的变量变化情况, 还可以观察系统内部的变化。

1.4.1 运载火箭伺服系统

针对航天上运载火箭液压伺服问题, 笔者对文献[7]的伺服系统进行简化, 建立了运载火箭液压伺服系统模型, 并利用联合仿真技术加以实现。

运载火箭液压伺服控制系统模型如图 12 所示。电液伺服阀是运载火箭液压伺服控制系统的核心元器件, 对整个系统的控制性能有决定性的作用。该系统是由液动力原件、负载机构和检测反馈装置等构成, 按照要求输入一个控制指令, 将它和反馈回来的位移信号进行比较, 把二者的偏差经过 PID 控制模块的调节, 得到的输出作为伺服阀的输入, 伺服阀的输入通过改变阀的油液流量和系统压力, 从而调节火箭喷头负载。

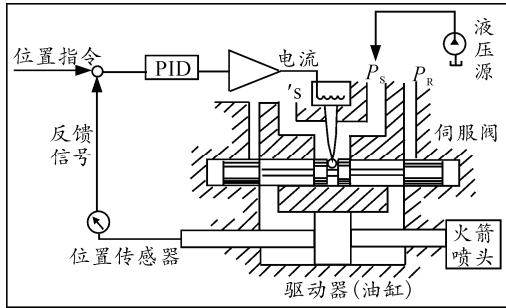


图 12 运载火箭液压伺服控制系统

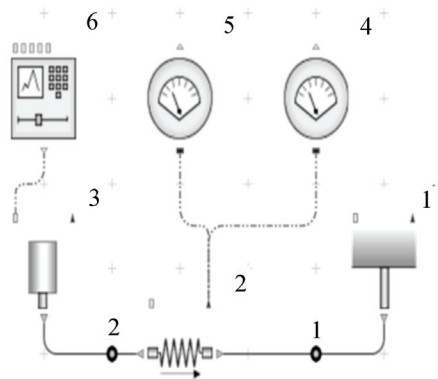


图 14 弹簧负载模块

1.4.2 模块设计

图 13 是在 AMESim 中设计的伺服系统，图 14 是在 Flowmaster 中设计的负载系统。图 15、16 是在 Simulink 调用设计好的伺服系统对不同的控制算法 (PID 控制和模糊控制) 进行仿真。

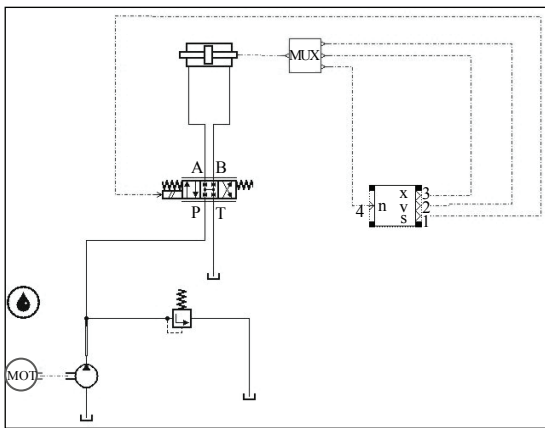


图 13 伺服模块

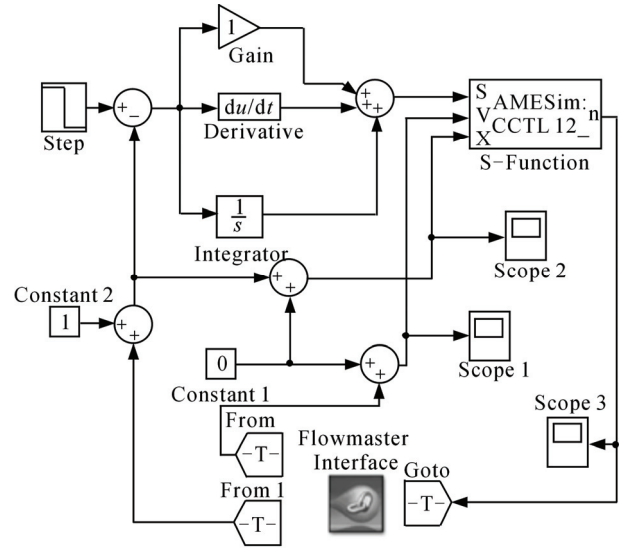


图 15 PID 控制模块

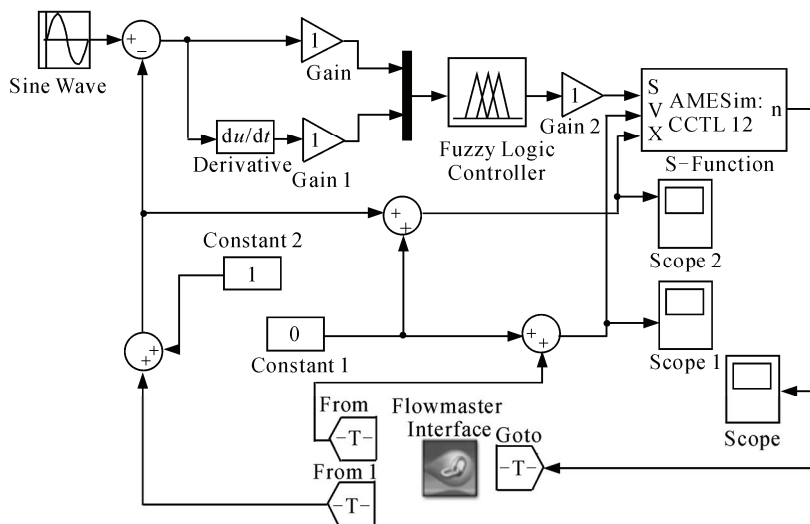


图 16 模糊控制模块

图 17 是核心元器件——电液伺服系统模块的有关参数。

为了避免多平台操作，进行修改参数，可以增

加联合的端口数量，进行参数传递。如图 18 所示，其中 Flowmaster 下面一个 Goto 端口就是用来改变 Flowmaster 模块中弹簧的刚度系数。

fraction spool position	1 mm
fractional spool velocity	1 1/s
index of hydraulic fluid	0
fluid properties for pressure drop measurement from hydraulic fluid at reference conditions	
ports P to A flow rate at maximum valve opening	38 l/min
ports P to A corresponding pressure drop	210 bar
ports P to A critical flow number (laminar -> turbulent)	1000 mm
ports B to T flow rate at maximum valve opening	1 l/min
ports B to T corresponding pressure drop	210 bar
ports B to T critical flow number (laminar -> turbulent)	1000 mm
ports P to B flow rate at maximum valve opening	38 l/min
ports P to B corresponding pressure drop	210 bar
ports P to B critical flow number (laminar -> turbulent)	1000 mm
ports A to T flow rate at maximum valve opening	1 l/min
ports A to T corresponding pressure drop	210 bar
ports A to T critical flow number (laminar -> turbulent)	1000 mm
valve rated current	40 mA
valve natural frequency	80 Hz
valve damping ratio	0.8 mm
deadband as fraction of spool travel	1 mm

图 17 电液伺服模块参数

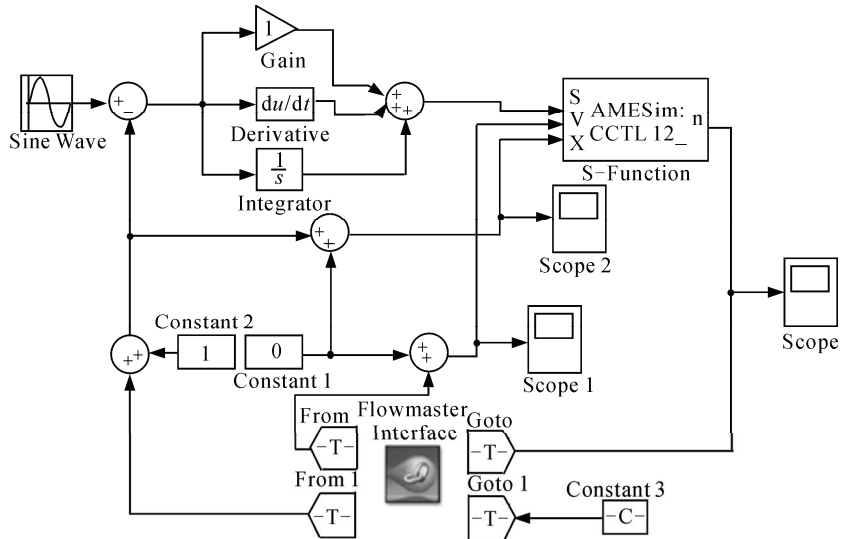
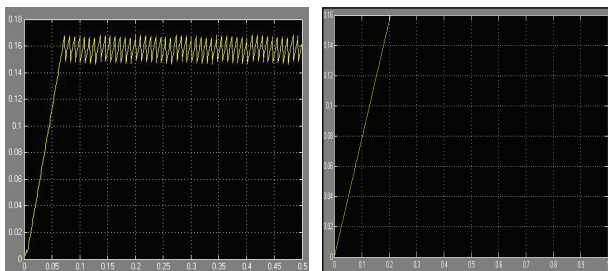


图 18 带参数修改的 PID 控制模块

1.4.3 仿真结果

图 19(a)、(b)分别是在 PID 控制和模糊控制算法下，运载火箭喷头位移曲线。从图中可以看出，采用模糊控制，火箭喷管位移达到稳定时具有更小的纹理波动（即更稳定），但是到达稳定时间却比 PID 控制稍长一些。



(a) PID 算法位移曲线 (b) 模糊控制算法位移曲线

图 19 运载火箭喷头位移

2 总结

针对航天领域大型复杂系统的控制算法研究问题，笔者提出了以 Simulink 为主平台，通过接口调用 AMESim 和 Flowmaster 模块的仿真技术，并给出了联合接口的具体实现步骤，解决了仿真接口模型兼容性和扩展性问题。

参考文献：

- [1] Kang W. Nonlinear H_{∞} control and its application to rigid spacecraft[J]. Automatic Control IEEE Transactions on, 1995, 40(7): 1281-1285.
- [2] Zhang Q, Wu F. Nonlinear H_{∞} control design with axisymmetric spacecraft control[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2009, 32(3): 850.
- [3] 李伟明, 申景诗, 康旭辉. 刚体航天器大角度姿态机动控制算法[J]. 空间控制技术与应用, 2015, 41(4): 14-19.
- [4] EI G A. Optimal control of a rigid spacecraft programmed motion without angular velocity measurements[J]. European Journal of Mechanics, 2006, 25: 854-866.
- [5] Krishnakumar K, Gonsalves P, Satyadas A, et al. Hybrid fuzzy logic flight controller synthesis via pilot modeling[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2015, 18(5): 1098-1105.
- [6] Ahmed J, Coppola V T, Bernstein D S. Adaptive Asymptotic Tracking of Spacecraft Attitude Motion with Inertia Matrix Identification[J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 1998, 21(5): 684-691.
- [7] Prockop D J, Juva K. Simulation and Optimization of Electro-Hydraulic Position Servo System Based on the AMESim/Matlab[C]// International Conference on Computational and Information Sciences. IEEE Computer Society, 2013: 1792-1795.