

电动式助力转向(EPS)的MODLE BASE模型开发

仿真模型的概要

近年来，环境问题越来越受到重视，以汽车产业为例，现在的热门正在从引擎，液压等部件的执行器的开发改为高效率电机的研究开发。电动助力转向(以下简称EPS)就是其中之一。作为EPS的力矩助力电机，希望使用不需要电刷维护直流无刷电机。但是跟有刷电机相比较，它要求更加复杂的控制系统。另外，EPS需要配合常人驾驶时对方向盘很微妙的感觉，给出适当的力矩助力。作为对这种大规模，复杂的控制器开发提供高效化的解决方案，以Simulink®模型为基础的开发正在受到人们的重视。本文介绍的演示，是用一个EPS控制器开发实例来介绍以模型为基础的开发流程。

关键词：矢量控制，自适应力矩，HILS，PILS，直接模型设计

1 范例说明

1.1 EPS 系统概要

助力转向是汽车方向盘的辅助装置。有了助力转向，驾驶员就可以用较小的力来操纵方向盘。根据操纵时助力力矩的产生方式，可以分为油压式和电动式两大类。油压式的场合，是使用引擎的动力，因为要提高油的压力，所以对燃费有影响。相比之下，EPS只在必要的时候用电力提供力矩帮助，在燃费方面，比起油压式助力有很大优势。

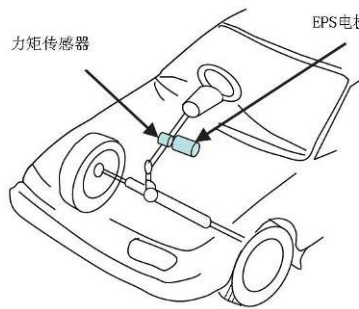


图1-1 EPS系统

1.2 模型系统概要

图 1-2 是模型的系统构成图。

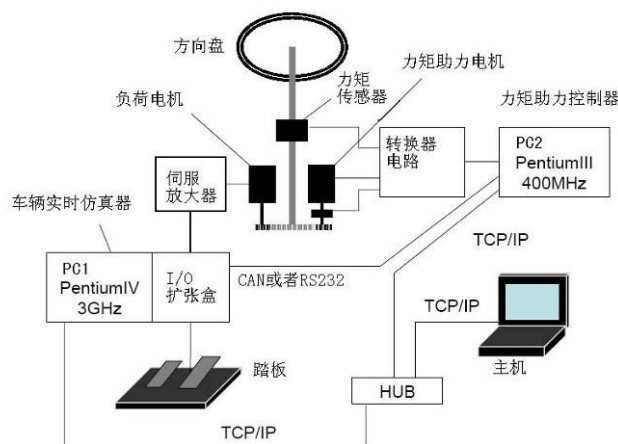


图 1-2 模型的系统构成图

通过齿轮，在方向盘的左右两边各安装一个电机。一个用来模拟由车辆向方向盘传递的立即，另外一个用来产生操纵时的助力力矩。

本文的演示以下两部分同时进行实时仿真的：包括模拟方向盘负载力矩输出在内的车辆全体模型，力矩助力控制模型。

主PC机上基于MATLAB®搭建的模型编译，连接之后，经由TCP/IP网络下载到对应的电脑(PC1, PC2)之后执行。

PC1，可以实现包括引擎以及机械装置的动力系统在内的汽车模型的实时动作，根据方向盘信号的操作，根据油门，刹车信号的加减速等机能。轮胎产生并且向方向盘传送的力矩经由伺服运放，输出到负载电机。

PC2，接受PC1通过CAN或者RS232输出的车速信号，并据此输出力矩助力。力矩输出应用的是（电机）实时的电流矢量控制模型。

1.3 模型开发

下面说明用Simulink模型开发中，本文介绍的演示实例所处的位置。图1-3所示是模型开发得流程。

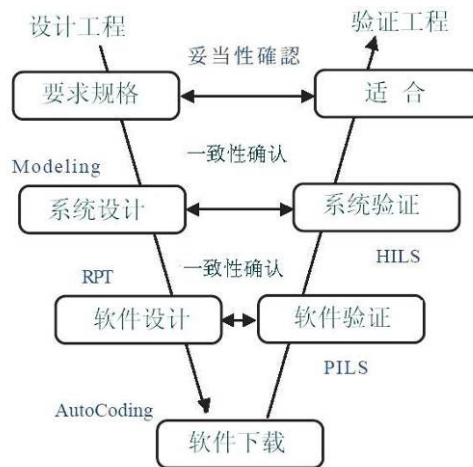


图 1-3 模型开发流程

• Modeling （系统级建模）

系统设计工程是包括控制器和控制对象在内的系统全体的Simulink模型设计。这个系统级的模型可以作为可实现的模型规格，有效地利用。

EPS系统包括控制对象，车辆构成的机械部分，引擎，轮胎，逆变器，电机等。机械部分和马达驱动部分根据时间常数的不同，仿真采样的时间会有很大的差异。为了能够观察现实的仿真速度的演示，本演示把，①车辆全体结构模型（非实时）和、②电机控制模型（非实时）分别建模。这个阶段，是在Windows操作系统上实现的非实时仿真。

• RPT (Rapid Proto Typing)

从系统设计到软件设计的工程，控制器模型更加详细，并且需要调整控制参数。在控制对象模型控制不够详细（实际的应答和仿真结果在高精度时不一致）的阶段，Simulink的控制器模型和实际控制对象连接，可以进行实时仿真，简单地调整控制参数。本文介绍的演示，③速度控制器模型（实时）和实际直流无刷电机连接，进行实时仿真，和②电机控制模型（非实时）的结果相比较，验证。之后，追加变更，作为④力矩控制器模型（实时），对图 1-2 所构成的系统进行实时仿真，调整控制参数。

• AutoCoding, PILS (Processor - In - the - Loop -Simulation)

使用选购的工具，Simulink的控制器模型可以自动生成同等功能的ANSI标准C代码。这样，相比起手写代码，软件开发的工时就可以大大减少了。但是，依赖对象target的部分仍然需要手工编写代码。

PILS可以将Simulink模型的控制器部分自动生成的代码在对象处理器，或者仿真器上执行，是使用Simulink模型仿真，调试的方法。

由②电机控制模型的矢量控制器自动生成的代码，可以实行⑤PILS模型(非实时)的仿真。

• HILS (Hardware-In-the-Loop-Simulation)

自动生成的代码，再系上以依赖Target的手写代码，周边I/O的驱动，然后下载到单片机或者DSP之后，就可以进行实际的，包括控制器和控制对象在内的试做品的系统验证了。

HILS 是让 Simulink 模型可以对虚拟运行环境中的设备进行非常逼真的模拟，在没有试做品的情况下也可以进行验证。

本文的演示，对②车辆全体模型和硬件I/O驱动模块连接后的⑥车辆全体结构模型(实时)进行实时仿真，对试做品的模拟。利用这个车辆的模拟，自动生成的代码将下载到评价板上进行验证。

本演示介绍了以图1-2所示构成的RPT演示为中心的模型，另外，以下内容的仿真也供参考。

- ①车辆全体模型(非实时)
- ②电机控制系模型(非实时)
- ③速度控制器模型(实时)
- ⑤PILS模型(非实时)

2 范例详细

2.1 系统级仿真

2.1.1 车辆全体结构模型

EPS仿真所必要的方向盘重量，主要受到路面对于轮胎的摩擦力影响。轮胎受到的摩擦力又依赖于车辆的运动，所以根据车辆全体结构模型，对车辆的运动进行仿真，计算出轮胎运转需要的力。

对于车辆全体结构模型，力矩的传动装置的大部分由SimDriveline建模。图 2-1 所示是从引擎到变速箱的模型的一部分。

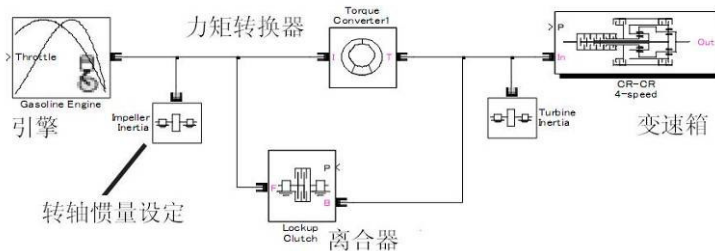


图 2-1 力矩传动部分模型

引擎，力矩转换器，变速箱，离合器等重要模块都由 SimDriveline 提供。连接和传动轴结合的各个机械部件的模块，建模。

可以提供的模块除此以外还有车辆动力部分，轮胎等，只使用 SimDriveline 也可以对车辆全体建模。但是，为了不仅仅对应直线前进的情况，本演示是追加了车体结构部分，轮胎部分的车辆全体模型的建模。

对车辆只在水平面运动 (3 自由度)时的底盘刚体上2个节点搭载了避震弹簧的构造进行建模。图 2-2 是由 SimMechanics 建模的车辆机构部分的模型。轮胎 Subsystem 的内部，是依据实验公式 Magic Formula，计算出加在轮胎上的力。Magic Formula 根据轮胎的速度矢量决定的打滑角度和车重，输出轮胎上的侧向力，自恢复力矩（方向盘旋转时，恢复轮胎前进方向的恢复力矩）。

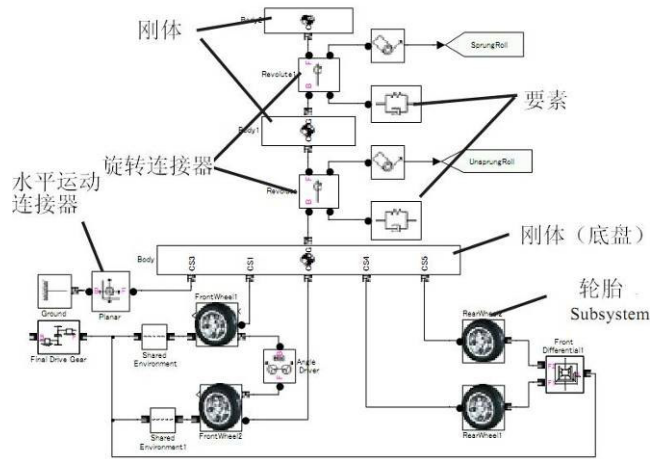
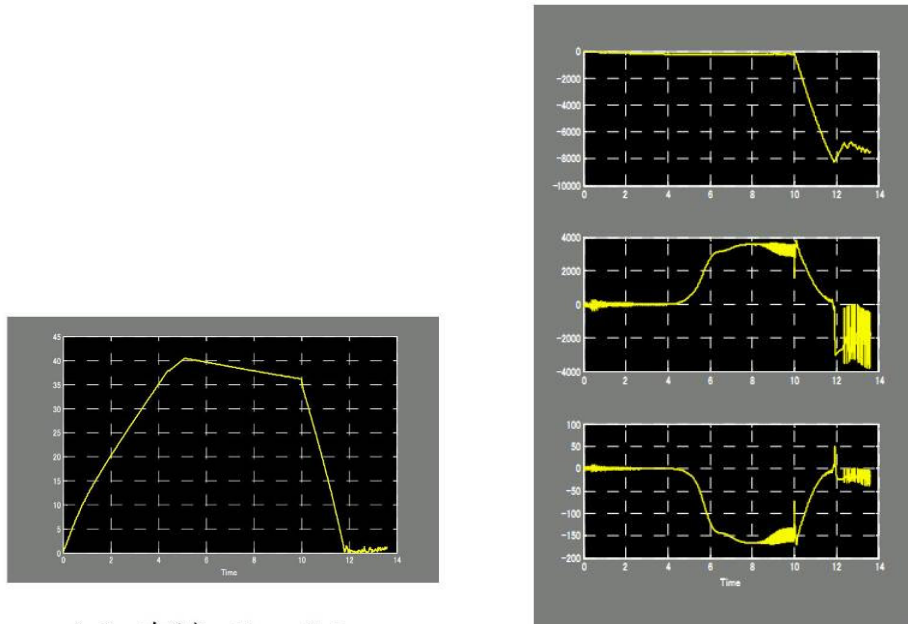


图 2-2 结构系统模型

图 2-3 是驾驶员踩油门，刹车的任意组合时的模式，输入转动加速度，转动速度，转动角度的任意组合时，仿真的结果。

图 2-3(a)是车速，图(b)由上到下分别是轮胎直线前进的驱动力，侧向力，自恢复力矩。



(a) 车速 [km/h]

(b) 轮胎作用力

图 2-3 仿真结果

2.1.1.2 电机控制模型

力矩助力是根据力矩传感器检测出施加在方向盘上的力，反馈给单片机，通过直流无刷电机的电流控制矢量控制方式来实现力矩输出的。为了验证矢量控制系统是否正确动作，首先对容易实现的转子角速度控制进行仿真。速度控制的建模·验证实现之后，仅作少量变更，就可以完成矢量控制的模型。目前，电机的轴上没有安装任何装置，是假想的无负荷运行模式。这个时候，电机控制系统由控制器，各种传感器，电源，MOSFET 桥电路的逆变器，直流无刷电机构成。直流无刷电机，MOSFET 桥电路，电流检测用电阻，可以用电路系统的工具 SimPowerSystems 来实现。图 2-4 电机控制模型，图 2-5 式控制器 Subsystem 内部矢量控制模型。

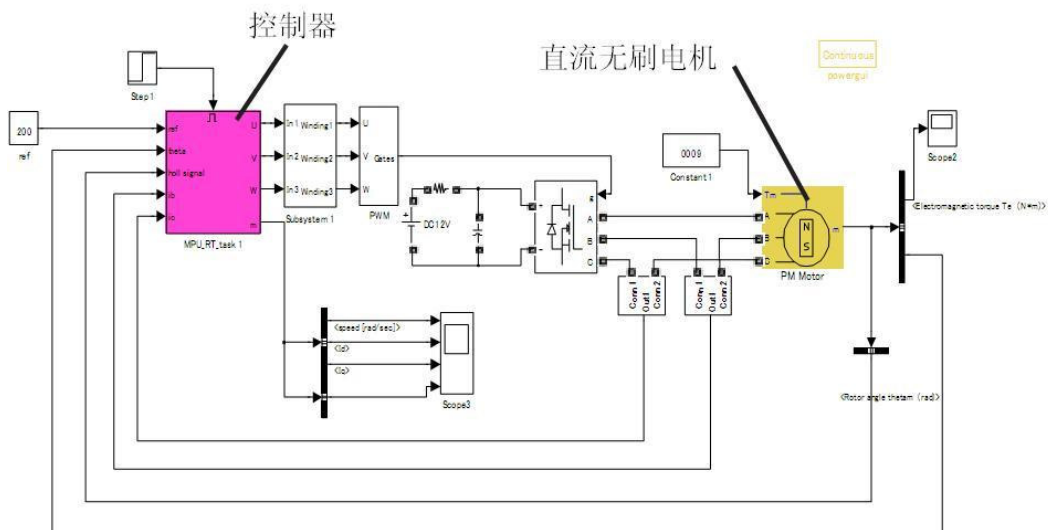


图 2-4 电机控制系统模型

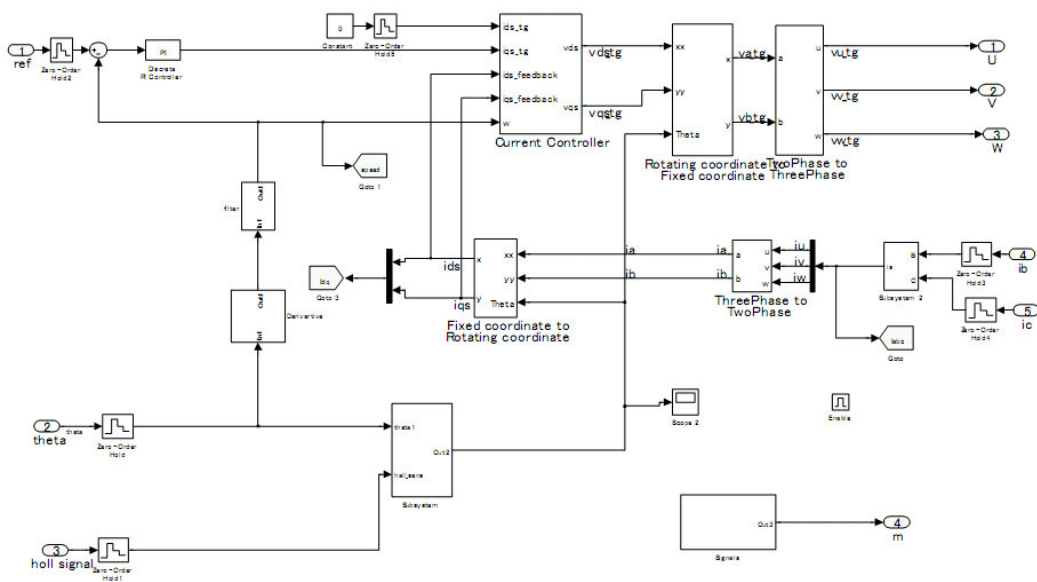


图 2-5 矢量控制逻辑
(控制器Subsystem的内部模型)

图 2-6 是转动角速度目标值为 200[rad/s]时的仿真结果。

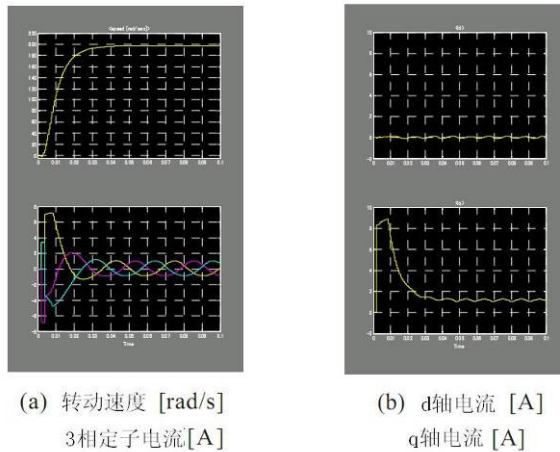


图 2-6 仿真结果

2.2 RPT

把图 2-4 所示电机控制系统模型的控制器的 **Subsystem** 原封不动地作为实际控制器使用，来进行实际的直流无刷电机的转动速度控制。

硬件构成如图 1-2 的演示系统构成图所示，包括方向盘轴输出除去齿轮的无负荷状态，力矩助力电机，逆变器，PC2，主机。硬件 I/O 包括，作为逆变器门极开关的 3 相 PWM 波形发生器，转子角度检测用的计数器，霍尔信号输入用的 **Digital-Input**，3 相电流检测用的 AD 转换器等。

实时的仿真系统使用 **Real-Time Workshop@xPC Target**。**xPC Target** 提供了一个可以使用 **x86** 系列通用 PC 和通用 I/O 口的 **Simulink** 模型的实时仿真环境。合适的各个 I/O 的设备驱动模块跟控制器模块连接，编译链接之后，就可以进行实时仿真了。**Simulink** 模型成为 **front-end processor**，模型参数会实时变化，通过示波器可以观测到实时信号。

本演示观测了转动角速度，3 相电流，dq 轴电流信号，验证电机控制器逻辑的性能，并根据仿真结果对电机模型的妥当性进行验证。

通过这个工程，如果得到满足规格要求的控制器，就可以进行由控制器模型向 C 代码的自动生成，下载步骤了。这个时候，目标单片机的执行速度是否可以实现仿真结果，可以用图 2-7 所示的，执行模块任务执行时间记录来预测。

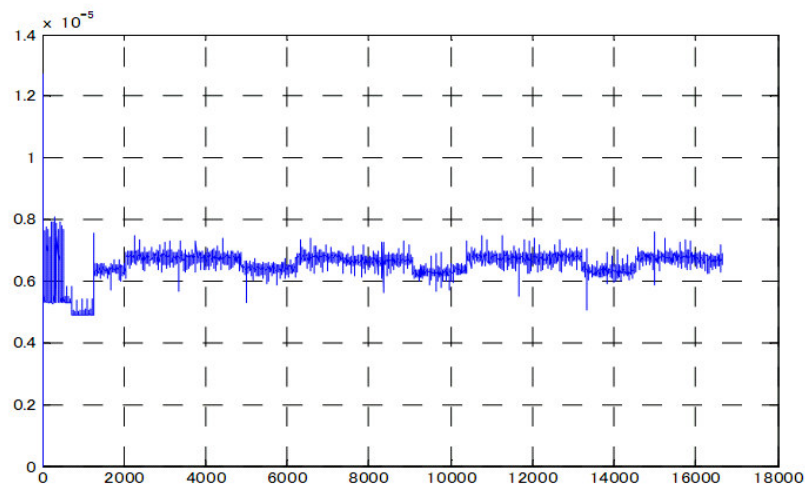


图 2-7 任务执行时间的记录

2.3 PILS

和单片机开发环境的协调,预先估算计算所需时间,目标单片机的精度的计算精度,堆栈溢出等的各项确认也要进行。这里使用的是富士通公司的单片机开发环境 **Softune**,来进行刚才所述的各项确认。

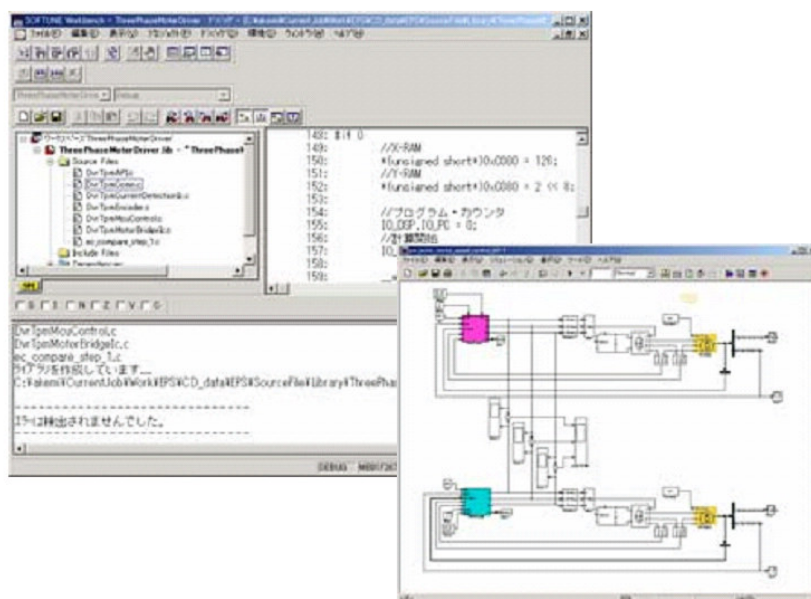


图 2-8 单片机开发环境(富士通株式会社 Softune)和 Simulink 的连接

2.4 HILS

图 1-2 的 PC2 用使用了富士通公司的「MB91F267」单片机的硬件平台来替换。

与①车辆全体模型(非实时)必要的设备 IO 模块连接,编译链接之后,下载到图 1-2 系统构成图中的 PC1 中,利用 xPC Target,进行实时仿真。根据实机的油门,刹车踏板动作,车辆进行前进,刹车的动作。另外,根据方向盘的操作,车辆模型的转弯功能也得以实现。实时仿真得到的车辆运动信号与 Virtual Realitytoolbox 相连接,还可以看到车辆运行的动画。

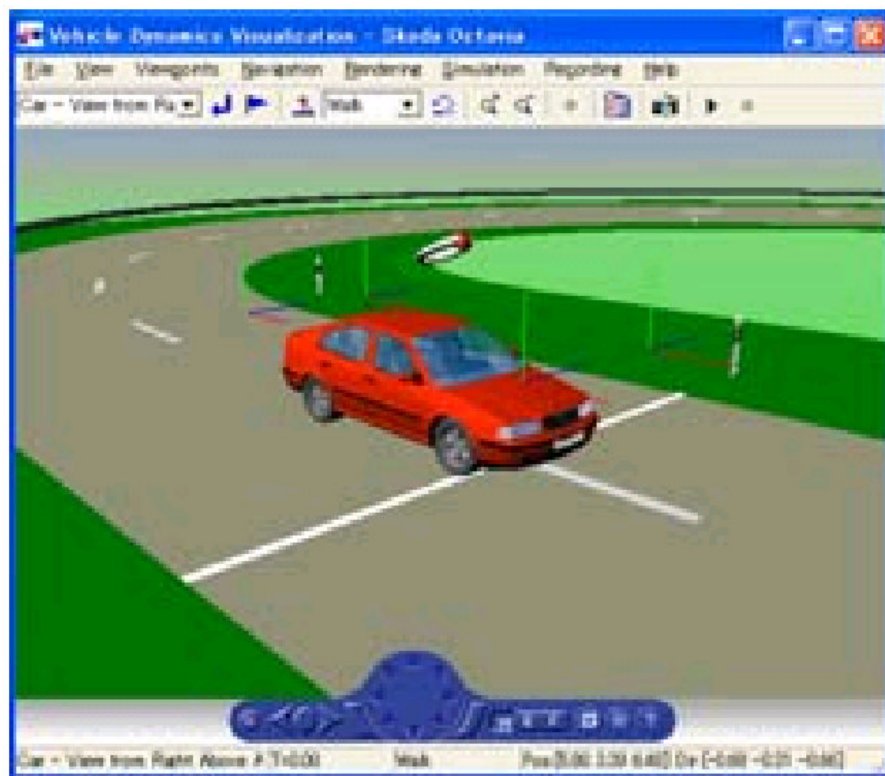


图 2-9 虚拟现实动画

根据模型计算出轮胎上需要的力，用负载电机将力矩传送到方向盘。低速时因为有静止力矩的影响，方向盘较重，高速时会变轻，但同时自恢复力矩的影响也会变大。

EPS 的力矩助力控制器一旦执行，低速时方向盘会变得容易操作，高速时也增加了操作安定性的力矩。

3 总结

本文介绍了以 EPS 为题材的控制器模型基础开发的流程，并作成了一个演示。对于系统设计工程，介绍了建模所应用的 Options 库。另外，也示范了有成本优势，以 PC 为基础的实时仿真演示，RPT，HILS 的概念，优点等。

如果本文的演示对采用模型基础开发有帮助的话，不胜荣幸。

4 使用工具

MATLAB, Simulink, Stateflow®, Stateflow® Coder
 Real-Time Workshop, xPC Target, Real-Time Workshop Embedded Coder, Gauges Blockset, SimDriveline, SimMechanics,
 SimPowerSystems, Virtual Reality Toolbox

※ 本演示的硬件由富士通株式会社开发。

CYBERNET 应用系统第一事业部

<http://www.cybernet.co.jp/MATLAB>

原文编号 TA058 《電動式パワーステアリング (EPS) のモデルベース開発》