특집

임베디드 시스템 프로토타이핑 기술

정기훈* 채화영** 김정길** 이재신** 강순주***

목 차

1. 서 론

임베디드 시스템 소프트웨어 개발은 작은 컴퓨터에 탑재되는 소규모 소프트웨어를 작성하는 단순한 작업으로 여겨질 수 있으나 이는 잘못된 생각이다. 임베디드 소프트웨어 개발은 범용 소프트웨어 개발과 달리 저 전력, 저 메모리를 사용하여 제품 단가, 실시간성 등의 요구사항을 맞춰야 하는 매우 엄격한 제약 조건을 가진다. 뿐만 아니라 필수적으로 하드웨어와의 동시 설계 및 역할 분담 과정을 거쳐야 하며, 이로 인해 일반 소프트웨어 개발 방법론과는 차별화된 개발 절차를 요구한다. 크게는 요구 분석, 하드웨어/소프트웨어 역할 분담 및 동시 설계, 그리고 재통합의 과정을 필수적으로 포함해야 하며, 이 과정 속에서 하드웨어/소프트웨어에 대한 설계 및 구현, 그리고 그에 대한 검증이나 디버깅 작업 또한 거쳐야 하는데, 그렇게 쉽지가 않다. 이러한 개발과정은 개발 프로젝트에 대한 생명 주기 모델 선택, 응용 분야, 혹은 개발 환경에 따라 다양하게 달라질 수 있으며, 개발자들에게는 문제에 대한 정확한 이해와 기술 변화에 대한 직시, 그리고 엄정한 기술 분석에 의한 도구 및 개발 환경 선정 등 현명한 전문적 판단이 요구된다.

따라서 본 논문에서는 임베디드 실시간 시스템 소프트웨어의 차별성과 특수성을 반영한 효과적인 개발 방법론을 제안하고, 이를 기반으로 한 임베디드 시스템 개발과정 전체를 체험할 수 있는 실험 실습 교육 과정에 대해서도 논하고자 한다.

2. 임베디드 시스템의 특성

임베디드 시스템은 일반 데스크톱 컴퓨터 시스템과 달리 응용분야에 따라서 매우 다양한 설계 및 구현 상의 제약 조건들을 내포하고 있다. 따라서 임베디드 소프트웨어 개발 과정은 이러한 제약 조건을 충실히 반영하여야 성공적인 개발을 보장할 수 있다. 우선 임베디드 시스템 소프트웨어가 응용분야에 따라 얼마나 다양한 제약 조건들을 내포하고 있는가를 인지한 후에 적절한 개발 방법론을 제시하겠다.

임베디드 소프트웨어는 스프레드시트, 워드프로세서, 통계 프로그램 등의 일반 데스크톱 컴퓨터에서 운용되는 소프트웨어들과는 달라서, 센서나 액

* 경북대학교 전자공학과 박사과정
** 경북대학교 전자공학과 석사과정
*** 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 정보통신전공 부교수

츄에이터를 이용해 외부 환경과 입출력을 해야 한다. 이로 인해 센서 신호의 입력이나 엑츄에이터 제어를 위한 신호들은 당연히 유효한 허용 시간을 가지게 된다. 또한 임베디드 소프트웨어들은 제어 이론 혹은 신호처리 알고리즘, 유한 상태 변화 개념 등을 이용하여, 외부환경의 상태 변화를 정확히 인식해야 하며, 상태 변화에 따른 적절한 조치를 자율적으로 수행할 수 있어야 한다.

다음 〈표 1〉은 임베디드 시스템의 대표적인 응용분야 4가지를 선정하고 각각 응용분야에서 요구하는 제약 조건의 차별성을 분류한 표다[1]. 응용분야는 크게 레이다/소나 또는 비디오/오디오 신호 등을 처리하는 신호처리 분야, 유인/무인 항공기, 수화력 및 원자력 발전소 또는 인공위성 등 안전성(Safety)이 매우 중시되는 특수 목적용(Mission) 제어 응용분야, 엘리베이터, 지하철 제어, 공장 제어 혹은 백색 가전 등에 적용되는 분산 제어 응용분야, 그리고 최근에 활발한 개발 경쟁이 이뤄지고 있는 PDA, 셋탑박스, 게임기 등 소규모 정보가전 제품 응용분야로 나눌 수 있다.

〈표 1〉에서 보듯이 응용분야별로 매우 다양한 제약조건들을 가지고 있음을 알 수 있다. 사례별로 살펴보면, 신호처리 응용분야는 매우 빠른 컴퓨팅 스피드를 중요시 하는 반면, 특수 목적용 제어 시스템은 안정성을 확보하기 위한 중복 제어 구조와 이상신호에 대한 매우 예민한 반응을 중요시 한다. 또한 분산 제어 시스템에서도 안전성 확보가 중요한 요건이면서 분산 네트워크의 통신 품질(QoS) 확보를 중요한 요건으로 하며, 소규모 정보가전 응용 분야의 경우 데스크톱 컴퓨터 소프트웨어와 유사한 구조를 가지고 있으나, 제품 단가에 매우 민감하고 저전력 능력 등이 중요한 요건으로 작용한다.

이렇게 개발을 위한 제약 조건의 다양성 때문에 임베디드 시스템을 위한 소프트웨어를 개발하기 위해 일반화된 소프트웨어 공학 이론에 근거한 개발 방법론을 적용하는 것은 의미가 없으며 응용분야에 최적화된 개발 방법론을 제시하는 것이 보다 실용적이고 현실적인 방안이라고 판단된다.

위에서 언급한 바와 같이 임베디드 시스템 개발에서는 이 분야의 차별성과 다양성으로 인해 일반론적인 소프트웨어 공학을 기반으로 한 개발 방법론은 실용적이지 못하다. 따라서 보다 실용적이면서 생산적인 개발 방법론이 필요하며, 이를 위해서는 다음과 같은 요건들을 필수적으로 만족해야 한다.

<표 1> 임베디드 시스템 개발 요건에 대한 응용 분야별 분류

An example of	Signal Processing	Mission Critical	Distributed	Small
Computing speed	1 GFLOPS	10 - 100 MIPS	1-10 MIPS	100,000 IPS
I/O Transfer Rates	1 Gb/sec	10 Mb/sec	100 Kb/sec	1 Kb/sec
Memory Size	32 - 128 MB	16 - 32 MB	1 - 16 MB	1 KB
Units Sold	10 - 500	100 - 1000	100 - 10,000	1,000,000+
Development Cost	$20M - $100M	$10M - $50M	$1M - $10M	$100K - $1M
Lifetime	15 - 30 years	20 - 30 years	25 - 50 years	10 - 15 years
Environment	Vibration, Heat	Heat, Vibration, Lightning	Dirt, Fire	Over-voltage, Heat, Vibration
Cost Sensitivity	$1000	$100	$10	$0 05
Other Constraints	Size, weight, power	Size, weight	Size	Size, weight, power
Safety	–	Redundancy	Mechanical Safety	–
Maintenance	Frequent repairs	Aggressive fault detection/ maintenance	Scheduled maintenance	"Never" breaks
Digital content	Digital except for signal I/O	~½ Digital	~½ Digital	Single digital chip, rest is analog/power
Certification authorities	Customer	Federal Government	Development team	Customer, Federal Government
Repair time goal	1-12 hours	30 minutes	4 min - 12 hours	1-4 hours
Initial cycle time	3-5 years	4-10 years	2-4 years	0 1-4 years
Product variants	1-5	5-20	10-10,000	3-10
Engineering allocation method	Per-product budget	Per-product budget	Allocation from large pool	Demand-driven daily from small pool
Other possible examples in this category	Radar/Sonar Video Medical imaging	Jet engines Manned spacecraft Nuclear power	High-rise elevators Trains/trams/subways Air conditioning	Automotive auxilliaries Consumer electronics "Smart" I/O

2.1 사용자 기호 및 개발 내용에 대한 조기 성능 예측 및 이해 과정 요구

모든 소프트웨어 개발은 사용자의 요구에서 시작되며, 사용자의 요구를 면밀히 분석하여 개발 제품의 외형, 주요 기능 및 성능을 결정하게 된다. 특히, 임베디드 시스템은 제품이 성패가 전적으로 이 단계에 의존한다고 해도 과언이 아니다. 이 단계에서 가장 큰 문제는 사용자들이 원하는 내용을 어떻게 효과적으로 도출하고, 그 내용을 구체화 하느냐이다. 하지만 사용자들 입장에서 개발자들이 사용하는 개발 문서는 거부감이 들 뿐만 아니라, 개발자 기준의 문서 혹은 요구 수집 과정은 너무 경직될 수가 있어서, 일반 사용자들이 자유로운 요구 표현을 받아들이기 어려운 문제가 상존한다. 더욱 어려운 문제는 일반적으로 사용자들은 자신이 원하는 내용이 기술적으로 어떤 것인지 확실하게 알고 있지 못하며, 구체적으로 표현하지도 못한다. 이러한 환경임에도 불구하고 사용자의 요구를 정확히 추출하기 위한 많은 연구들이 수행되고 있으며 대표적인 사례 중의 하나가 건축 등에서 일반화되어 활용되고 있는 개념인 가상 프로토타이핑 기법이다.

2.2 철저한 응용분야 적응형 개발 방법론 요구

제 2절에서도 언급한 바와 같이 임베디드 시스템은 그 응용분야에 따라 매우 다양한 제약조건을 가지고 있다. 따라서 일반적인 소프트웨어 공학적 접근법으로는 제품 개발의 성공을 결코 보장할 수 없다. 따라서 응용분야의 특수성이 잘 반영되고, 응용분야의 소프트웨어 특성에 맞게 최적화된 개발 방법을 적용해야 한다. 이러한 접근 방법을 응용분야 적응형(Domain-Specific) 개발 방법론이라고 하며, 임베디드 시스템 소프트웨어 개발 분야에서 최근에 활발히 도입되고 있다.

2.3 재사용 가능하고 Time-to-Market을 최소화 할 수 있는 환경 요구

임베디드 시스템은 주로 상품화에 시급을 요하는 첨단 신제품들이다. 따라서 안정성이 매우 중요하고 개발 난이도가 높음에도 불구하고, 상품 개발 기간을 최소화 해야만 그 제품이 시장을 선도하는 첨단 신제품의 자격을 얻을 수 있게 된다. 따라서 임베디드 시스템을 위한 소프트웨어는 가능한 한 공통 소프트웨어 구조에 대한 재사용 가능한 컴포넌트 형태로 개발해야 하며, 이들 컴포넌트 또한 응용분야에 최적화된 재구성 기능을 지원해야 한다. 최근 연구 결과에 의하면 많은 임베디드 소프트웨어가 적어도 60% 이상의 공통적인 소프트웨어 플랫폼을 가지고 있으며, 응용분야 최적화를 할 경우 신제품을 위한 소프트웨어 개발에서도 최대 90% 이상이 기존 개발 소프트웨어를 재사용할 수 있음이 보고되고 있다[2].

2.4 개발 초기 혹은 개발 중간에서 개발 결과의 성능에 대한 예측 가능 모델 요구

초기 명세 단계에서의 개발 제품에 대한 성능 예측뿐만 아니라 개발 과정 중의 수시적 성능 예측 및 개선 작업도 임베디드 실시간 시스템 개발에는 매우 중요한 요소다.

2.5 전공이 서로 다른 개발자들 간에 하드웨어/소프트웨어 동시 설계를 위한 이해 과정 요구

임베디드 시스템 소프트웨어는 공통적으로 하드웨어 개발자(제어 전문가, 기계공학 전문가, 회로 설계 전문가 등)와 소프트웨어 개발자가 공동 작업을 한다. 실제 소프트웨어는 소프트웨어 전문가가 작성하지만, 핵심 기능은 하드웨어 및 시스템 설계자가 제시한 이론적 알고리즘(예: 제어 알고리즘, 신호처리 알고리즘 등)에 대한 구현일 뿐이다. 따라서 소프트웨어 개발자는 기본 이론에 대한 이해

가 부족하고, 비 소프트웨어 엔지니어는 소프트웨어 플랫폼(운영체제, 디바이스 드라이버, 통신 프로토콜 특성 등)에 대한 이해 부족으로 서로 다른 생각을 할 수가 있다. 이로 인해 매우 쉽게 해결 할 수 있는 문제도 개발자 간의 이해 부족으로 어렵고 복잡한 방법을 택하게 되어 프로젝트를 실패하는 사례도 빈번하게 발생한다.

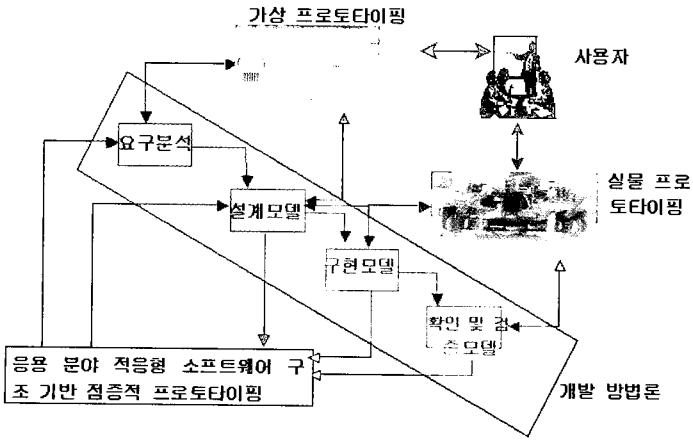
2.6 하드웨어/소프트웨어 동시 설계 및 구현 시 병행 개발 환경 요구

많은 임베디드 시스템은 하드웨어 및 소프트웨어를 동시에 개발해야 한다. 하지만, 기술 특성상 하드웨어가 개발되어야만 그 하드웨어를 기반으로 한 소프트웨어 개발이 진행될 수 있기 때문에 인력 운영상의 많은 낭비가 초래되고 있다. 이러한 문제 해결을 위해서 최근에 선진국을 중심으로 개발 하드웨어의 주요 기능을 충실히 수행할 수 있으면서도 쉽게 제작이 가능한 실물 프로토타이핑[3] 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내외적으로 개발 도구에 대한 연구도 진행되고 있다.

3. 임베디드 시스템 프로토타이핑 기술

앞에서 언급한 바와 같이 임베디드 시스템 개발 프로젝트는 단순 범용 소프트웨어 개발 프로젝트에 비해 고난도의 기술을 연구할 뿐만 아니라, 개발 팀원들 또한 하드웨어와 소프트웨어에 대한 동시 이해 능력을 보유해야만 성공적인 프로젝트 수행이 가능하다. 특히, 범용 소프트웨어 개발 프로젝트에서는 필요에 따라 쉽게 단계적 개선 및 전 과정으로의 피드백(feed back)이 가능하나, 임베디드 시스템에서는 하드웨어와 소프트웨어의 동시 설계 및 동시 진행으로 인해, 전 과정으로 피드백이 불가능하거나 많은 위험요소를 내포할 수 있다. 이러한 위험 요소를 최소화 하기 위해서 본 연구팀에서는 다양한 임베디드 시스템 소프트웨어 개발 경험을 바탕으로 하여 (그림 1)과 같은 개발 방법론이 필요하다.

이 방법론의 큰 특징은 하드웨어 및 소프트웨어의 동시 설계 과정에서의 위험성을 최소화 하기 위하여, 모형 주택과 같은 의미의 폐기형 가상 프로토타이핑(Throw-Away Style Virtual Prototyping) 기법을 적용한 점이다. 이 기법으로 하드웨어와 소프트웨어 간의 역할 분담 등을 개발 초기 단계에서 명확히 하고, 응용분야 적응형 소프트웨어 구조를 중심으로 한 점증적 프로토타이핑 기법을 개발의 전체 과정에 적용하였다. 이로 인해 소프트웨어는 반복적으로 그 기능을 점진적으로 확장시켜 가면서 완성할 수 있다. 또한, 개발 중간 단계에서부터



(그림 1) 임베디드 소프트웨어 개발 방법론

개념 실물 프로토타이핑(Physical Prototyping) 방법론을 도입하여 하드웨어/소프트웨어 동시 개발 환경을 빠르게 구축하고, 개발 소프트웨어의 성능을 수시로 확인하여 다양한 전공의 개발자들 간에 이해 증진을 높일 수 있도록 하였다. 이는 최종 개발 제품의 성능을 개발 중간 단계에서도 예측할 수 있는 환경을 마련한 셈이다. 각각 단계별 개발 절차를 자세히 설명하면 다음과 같다:

3.1 가상 프로토타이핑

가상 프로토타이핑은 임베디드 소프트웨어 개발 초기 단계에서 사용자 혹은 개발 의뢰자의 정확한 요구, 선호 및 취향 등 기능적, 비 기능적 요구들을 효과적으로 추출할 수 있도록 고안된 시스템 요구 및 제약조건 추출 방법론이다. 이 방법론은 마치 아파트 건설회사에서 모형 아파트(모델 하우스)를 통하여 고객들의 선호도를 조사하는 방식과 유사하다. 컴퓨터 화면에 3차원으로 실물과 동일한 모형을 표시하고, 마우스 또는 키보드를 통한 사용자의 입력에 실제 시스템과 유사하게 반응할 수 있는 동적 처리 기능도 포함하고 있다. 컴퓨터 프로그램으로 프로토타입 모델을 작성하고 시연하기 때문에 사용자의 선호에 따라 가상 모형의 모양을 변경하거나 기능을 새로이 추가하는 등의 변화를 손쉽게 반영할 수 있다. 따라서, 개발 초기에 사용자의 요구를 효과적으로 수용할 수 있는 개발 방법론으로 평가받고 있다. 요구 추출 과정이 완료되면 개발된 프로토타입 모형은 모형 주택처럼 폐기되기 때문에 폐기형 프로토타입 모델이라고도 하며, 소프트웨어 분야뿐만 아니라 실물 생산이 필요한 많은 산업분야에서 급속히 채택되고 있는 개발 방법론이다. 가상 프로토타이핑을 지원하는 대표적인 임베디드 시스템 개발 도구로는 Rapid PLUS, MSC-sim, RT-LAB 등이 있으며, 최근에는 UML 등 통합 개발 방법론과 결합된 형태의 Computer-Aided Software Engineering (CASE) 형태로 발전하고 있다. i-Logix사의 Rapsody도 대표적인 통합 개발 환경이다.

3.2 응용분야 적응형 점증적 프로토타이핑과 결합된 개발 방법론

점증적 프로토타이핑 방법론은 나선형 소프트웨어 생명주기 모델에 근거한 대표적인 개발 방법론으로 소프트웨어 개발에서의 위험요소(Risk)를 최소화 하기 위해서, 개발하려는 시스템의 주요 기능을 한 번에 동시 개발하지 않고, 주요 기능에 우선순위를 설정하여 우선순위대로 소규모로 핵심 기능들을 구현하고 기능 및 성능에 대한 정확한 평가 후에 추가 기능을 점차적으로 구현하는 개발 방법론이다. 이런 개념적 토대 하에 응용분야 적응형(Domain-Specific) 소프트웨어 구조(rchitecture)라는 보다 실용적인 이론을 첨가하면, 다양한 요구조건과 제약 요건을 가진 임베디드 시스템 개발에 적합한 소프트웨어 개발 구조로 활용할 수 있다. 이 소프트웨어 개발 기법은 많은 이들에 의해 연구개발 및 실용화가 진전되고 있다. 정보가전 응용분야를 위한 개발환경인 Philips의 Koala, Arcticus사에서 개발한 Time-Triggered 프로토콜을 기반으로 한 경성 실시간 시스템 개발을 위한 Rubus, 유럽의 GN&C에서 개발 중인 DSSA 프로젝트 등이 잘 알려진 사례들이다[4].

3.3 실물 프로토타이핑

임베디드 시스템에 공통적으로 활용되는 표준 센서와 엑츄에이터, 그리고 쉽게 조립할 수 있고 재사용 가능한 부품 및 블록들을 활용하여 실제 개발하고자 하는 실물과 유사한 모양과 기능을 가진 실물 프로토타입을 개발하여 소프트웨어 개발과정에 접목하면 다음과 같은 이득을 얻을 수 있다. 우선, 임베디드 시스템 특성상 공동 작업을 하게 되는 다양한 전공분야의 개발자들이 서로 간에 이해

증진을 위한 도구로 활용할 수 있으며, 보다 효과적인 문제 해결 방법을 새로이 고안해 내기 위한 도구로써도 활용이 가능하다. 다음으로, 임베디드 시스템은 하드웨어 개발과 소프트웨어 개발이 함께 되어야 하나 종래의 개발 방법론에서는 하드웨어 개발이 완료된 후에야 소프트웨어 개발이 진행되므로 개발인력에 대해 효과적인 활용이 불가능하고, 개발 기간이 길어지며, 소프트웨어 개발 시 발견되는 하드웨어적 결함에 대한 대처 능력이 떨어지는 문제점이 상존하고 있다. 실물 프로토타입을 이용하면 개발 중간에서부터 하드웨어 개발자와 소프트웨어 개발자가 동시작업을 진행하면서, 소프트웨어 적용 시 발생하는 문제점들을 바로 하드웨어 개발자에게 전달함으로써 최종 제품에 대한 품질을 개발 단계에서부터 보장할 수 있게 된다. 최근에 이러한 실물 프로토타이핑 개념의 중요성이 강조되면서 많은 개발 도구들이 연구 개발되고 있다. 대표적으로 UC Berkeley의 MICA&TinyOS, EU "Disapearing Computer" 연구팀의 smart-Its, Physical Prototyping Research Consortium, 그리고 본 연구팀에서 개발한 Embedded System Prototyping Suite (ESPS)[5] 등이 있다.

4. 가상프로토타이핑

최근 엔지니어들은 컴퓨터 기술이 발달함에 따라, 복잡한 시스템 개발 시 컴퓨터를 이용하고 있으며, 컴퓨터 기술의 발달 및 응용분야의 확대로 프로토타이핑의 장점을 극대화 할수 있게 된 것으로 가상 프로토타이핑(Virtual Prototyping)이 있다. 가상 프로토타입은 컴퓨터 상에서 가상으로 만들어진 프로토타입으로 현실과 비슷한 제품의 외형을 제공하고 제품 외형에 붙어 있는 각종 장치 및 기능이 실제와 비슷하게 시뮬레이션 된다. 그럼으로써 실물 프로토타입과 같은 효과를 내면서도 시스템 요구사항이 복잡한 하드웨어 시뮬레이션을 소프트웨어로 가능하게 한다.

기존의 실물 프로토타입은 제품의 외형 변경 및 기능 추가 시 새로운 프로토타입을 만들어야 하지만, 가상 프로토타입은 컴퓨터에 데이터 형태로 존재하면서 GUI 방식의 모델링 방법을 이용함으로써 변경된 디자인을 손쉽게 확인할 수 있으며, 기능이 정형명세로 표현되어 외형과 연결되어 새로운 기능의 첨가가 쉽다. 이는 새로운 제품 생산 및 기존제품의 성능 추가 및 향상 시 가상 프로토타입을 제작하여 시뮬레이션을 통하여 설계상의 오류 및 성능 보완책을 개발자들에게 즉시 제공하며, 디버깅 및 오류수정을 함으로써 시제품을 만들어 성능평가의 과정을 거치는 실물 프로토타이핑에 비하여 시간적, 경제적 손실을 최소화 함으로써, 제품의 리사이클 시간을 단축시켜 제품 개발 시 효과가 크다. 가상 프로토타이핑은 현재 가장 활발히 연구가 진행되고 있는 분야로 하드웨어와 소프트웨어라는 이질적인 시스템의 통합개발 및 통합 시뮬레이션과 통합 디버깅을 제공한다.

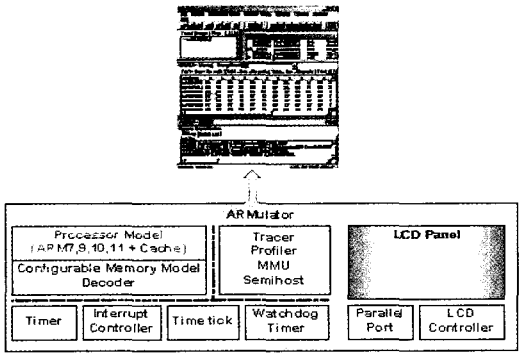
이러한 가상 프로토타이핑은 제품 출시 전 하드웨어나 소프트웨어 분야의 완벽한 시뮬레이션을 위하여 컴퓨터에 데이터의 형태로 존재하면서, 실물 프로토타입을 대체할 수 있는 기술이다. 또한 가전 제품 개발이나 카 오디오 설계, 가상 공장 구축 시스템, 공항 관제 시스템의 설계와 검증 분야에 이용되고 있으며 추후 대부분의 생산 분야에서 가상프로토타이핑을 통한 제품개발로 생산성 향상을 기대할 수 있다.

4.1 ARMulator 기반의 가상 프로토타이핑

앞서 살펴본 바와 같이 가상 프로토타이핑(Virtual Prototyping)은 시뮬레이션 과정을 하드웨어 없이 신속하게 수행함으로써 제품의 실물 프로토타입을 제작하는데 소모되는 시간을 단축시키고 빠른 시간 내에 하드웨어와 소프트웨어를 가상

으로 검증할 수 있는 시스템 구축이 가능하다. 이러한 환경 구축을 위하여 ARM 프로세서 코어 기반의 제품 프로토타입을 손쉽게 제작 가능한 가상 프로토타이핑 환경을 구축한다. 이를 위하여, ARM 사의 ADS(Application Develop Suit)1.2에 포함되어 있는 ARM 코어 명령어 집합 시뮬레이터인 ARMulator를 사용한다. 또한 ARMulator에서 제공하는 기본 메모리와 타이머 환경에서 특정 IP들을 구현하고 이를 위한 OS로 초경량의 RTOS인 uC/OS-II를 포팅한다. 따라서 개발 환경에 적합한 개발 보드 없이 휴대형 단말 장치를 개발하기 위한 프로토타이핑 환경을 구축한다.

(그림 2)는 이러한 개발환경을 도식화 하였다.



(그림 2) 확장된 ARMulator 환경

4.2 ARMulator

ARM 프로세스는 영국 Cambridge의 Acron Computers Limited에서 개발되었으며, ARM RISC Machine을 의미하였다.

RISC계열의 마이크로프로세서인 ARM코어는 ARM사에서 설계하는 코어로써 전세계 32-bit 임베디드 마이크로프로세서 시장의 75%를 차지하고 있다. 그러나 ARM은 주로 임베디드 제어기 용으로 사용되기 때문에 타겟 하드웨어는 소프트웨어 개발에 적합하지 않다.

ARM 코어는 37개의 레지스터와 6개의 모드를 가지고 있다. 31개의 범용 32-bit 레지스터가 있으며 이것은 외부에 16개의 레지스터로 보인다. 즉 모드에 따라 전용으로 가지고 있는 레지스터들이 존재하며 그것은 스택 사용을 최소하기 위해 설계되었다. 나머지 6개의 레지스터는 한 개의 CPSR와 나머지 5개의 모드에서 그 전의 PSR를 저장 하기 위한 용도의 SPSR로 사용된다.

ARM의 가장 큰 특징은 저전력 설계기술을 사용함으로써 전력소모량을 반드시 고려해야하는 휴대용 단말기에 많이 채택되고 있다.

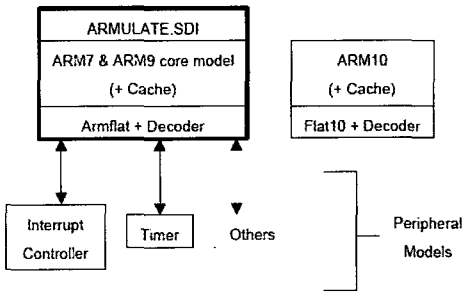
이러한 구조는 ARMulator에서도 동일하며, OS를 포팅 시 충분히 고려해야 할 사항이다.

4.2.1 ARMulator의 구조

ARMulator는 ARM 프로세서 코어와 캐쉬 모델 그리고, 어드레스 디코딩을 포함하는 기본 메모리 모델을 중심으로 네개의 콤포넌트로 구성되어 있다.

1) 캐시를 사용하는 ARM 프로세서 모델
2) 어드레스 디코딩과 기본 메모리(Armflat) 통합 모델
3) 파일 설정을 통하여 활성 또는 비활성되어 기본 메모리 모델과 통신하는 주변장치 모델
4) 실행환경을 제공하기 위한 OS 모델

제공되는 모델들을 편집 또는 새로운 모델을 작성하여 다른 주변장치를 손쉽게 추가 할 수 있다. (그림 3)은 네 개의 컴포넌트로 구성된 ARMulator의 구조를 보여준다.



(그림 3) ARMulator 구조

주변장치는 모델이 초기화 되는 동안 ARMulif _ReadBusRange() 와 bus_registerPerip Func() 로 호출되어 등록된다.

그림에서 ARMULATE.SDI는 ARMulator 컴포넌트의 핵심부분이다.

ARMulator는 Dynamic Link Library(.dll)와 Shared Object(.sdi)와 같은 모듈로 구성되어 있으며, 메인 모듈은 ARM 프로세서 코어모델과 프로세서에 의해 사용되는 메모리 모델이다. 이것은 각 부분을 위해 미리 정의되어 있으며, 메모리 모델과 프로세서 모델 사이에서 사용하고자 하는 것을 선택하는 것이 가능하다. 미리 정의된 메모리 모델은 Mapfile로 시뮬레이터된 메모리 시스템을 나타내주고 있으며, 부족한 메모리와 대기 상태를 명시한다. 미리 정의된 모듈의 다른 조합과 다른 메모리 맵을 적절히 사용함으로써 정의된 메모리 모델이 요구 사항에 맞지 않을 경우 새로운 모듈을 추가하거나 수정이 가능하다.

예를 들면, 다른 주변장치, 코프로세서 또는 OS 설계 및 다른 메모리 시스템 설계를 위한 추가적 디버깅이나 벤치 마킹 정보를 제공하기 위하여 모듈의 추가 및 수정을 할 수 있다.

Mapfile의 자세한 내용은 ARM의 document를 참조한다.

4.2.2 ARMulator extension kit

ARMulator는 모듈의 집합으롤 구성되어 있고, ARM 코어와 메모리에 관한 에뮬레이션을 할 수 있으며 추가적 주변장치에 관한 모듈을 삽입할 수 있다.

〈표 2〉는 두가지 모델 그룹의 소스코드로 지원되는 것을 보여주고 있다.

새로운 모델을 추가는 기존의 모델 중 하나를 카피한 뒤 수정하는 것이 가장 손쉽게 제작할 수 있는 방법으로 제시되고 있다.

〈표 2〉 ARM의 기본 메모리 모델

Basic models	Peripheral models
Tracer.c	Intc.c
Profier.c	Timer.c
Pagetab.c	Millisec.c
Stackuse.c	Watchdog.c
Nothing.c	Tube.c
Semihost.c	
dcc.c	
Mapfile.c	
Flatmem.c	

즉, .ami와 .dsc 설정 파일을 읽고 어떤 모델인지 파악하며, 새 모델을 사용하기 전 .dsc파일에 새 모델을 추가해야 하며, default.ami와 peripherals.ami 설정파일에 해당 모델의 소스를 추가하여 참조를 가능하게 설정해야 한다.

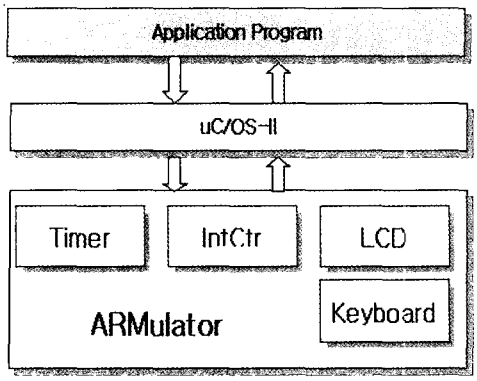
4.3 설계 및 구현

ARMulator는 armsd 혹은 AXD 상에서 실행가능하며 ARM 사에서 제공되는 ADS 1.2 버전에 포함되어 있는 디버거인 AXD로 실행하였다.

ARMulator는 기본적으로 인터럽터 컨트롤러와 2개의 타이머를 지원하며, 출력물을 별도의 화면으로 보여줄 수 있는 LCD 모듈을 추가하였으며, ARMulator를 지원하는 uC/OS-II를 포팅한 후 OS가 정상적으로 포팅되었는지 검증가능한 어플리케이션 프로그램을 추가하였다.

LCD 와 Keyboard는 ARM 기반의 시스템 개발 환경에서 입출력을 테스트 해 볼 수 있는 간단한 모듈로 ARM에서 제공되는 Application Note 92를 참조하여 테스트 하였다.

ARM에서 제공되는 간단한 소스파일은 C와 ARM 어셈블러로 구현되었으며, AXD 디버거로실행하며, ARMulator의 상세한 실행환경은 (그림 4)와 같다.



(그림 4) 구현 시스템 구성도

4.3.1 Timer

ARMulator는 기본적으로 2개의 16bit down counter Timer형 타이머를 제공한다. 시스템 동작 주파수를 낮추기 위한 Prescale unit에 의해 1, 1/16, 1/256으로 클럭을 낮추고 로드 레지스터에 특정한 값을 설정하고 타이머를 동작시키면 타이머 클럭마다 설정된 값을 감소시키고, 값이 0이 되면 타이머 인터럽터를 발생시켜 인터럽터 제어기에게 전달한다.

4.3.2 Interrupt controller

ARMulator의 인터럽터 컨트롤러는 간단한 소프트웨어 인터페이스를 제공한다. FIQ(Fast Interrupt Request)와 IRQ(Interrupt Request)의 두 가지 레벨의 인터럽터가 있으며, 각 인터럽터 소스를 컨트롤하기 위한 32bit 사용이 가능하며 최대 32개의 인터럽터 소스를 처리할 수 있게 확장 가능하다.

- Enable Register : 읽기 전용으로 해당 인터럽트 입력 소스에 대한 마스킹으로 프로세서에 해당 인터럽트를 요청하게 하는 데 사용되어진다.
- Enable Set : 쓰기 전용으로 Enable register에 해당 bit 세팅을 위해 사용한다.
- Enable Clear : 쓰기 전용으로 Enable register에 해당 bit를 클리어하기 위하여 사용한다.
- Source Status : 읽기 전용으로 인터럽트 콘트롤러에 인터럽트 소스의 상태를 알려준다.
- Interrupt Request : 읽기 전용으로 마스킹 후에 인터럽트 소스의 상태를 제공한다.
- Programmed IRQ Interrupt : 읽기 전용으로 이 레지스터로 인터럽트를 set 혹은 clear한다.

기본적으로 software programmed interrupt 와 communication channel, timer 2개가 정의되어 있다. Bit 0은 IRQ 콘트롤러에서는 정의되어지지 않고 FIQ의 인터럽트 소스를 위해 사용되어진다.

Timer1을 셋팅 하는 타이머와 인터럽트 컨트롤러에 사용법을 보면

- Timer1의 Control과 Clear를 0으로 초기화 한 후
- Timer1Load에 값을 넣고 (최대값은 16bit , 0xffff)
- Timer1Control에 bit 7, 6, 3을 1로 셋팅 해주면 시스템 클럭의 1/256의 클럭으로 주기적으로 동작하게 된다.
- 여기서 IRQEnableClear를 초기화 해주고 IRQEnableSet에 Timer1에 해당하는 Bit 4를 1로 셋팅해 주면 Timer1에 의한 인터럽트가 허용이 된다.
- 그 전에 인터럽트 발생 시 인터럽트 핸들러에서 각 인터럽트에 해당 ISR를 벡터로 등록해 놓아야 그 인터럽트가 정상적으로 처리가 가능하다.

구현된 시스템의 동작 검사를 위하여 간단한 응용 프로그램을 작성하여 정상적인 이식을 확인하였다.

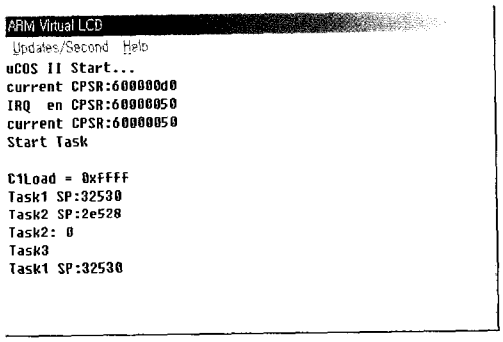
포팅이 성공적인지를 판단하기 위해 테스트 해야 할 것은 우선 Timer와 인터럽트 컨트롤의 동작을 관찰한다. 결과가 성공적이라면 OS의 핵심이라 할 수 있는 스케쥴링이 가능하다.

먼저 유저 모드에서 OS가 실행되기 위해 모드를

전환을 통하여 SWI나 Interrupt를 통해서만 PSR를 변경할 수 있고 context switching을 할 수 있다. 다음 단계로 OSTick에 사용할 Timer1을 초기화 시키고 가동시킨다.

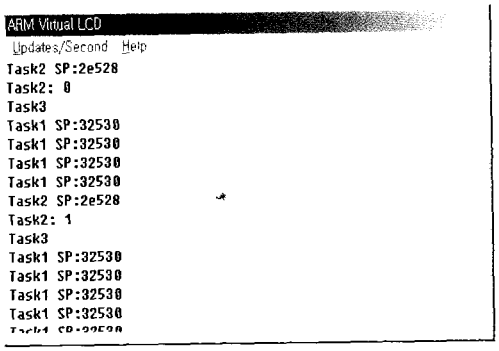
테스트는 먼저, TASK1에서 무한 루프를 돌면서 100Tick의 딜레이 갖는다. TASK2는 200Tick의 딜레이를 가지면서 세마포어 pend를 하게 하였고 TASK3에서 400Tick의 딜레이를 가지면서 세마포어 post를 하게 하였다.

(그림 5)는 실행 결과를 보여준다.



(그림 5) 실행결과 화면

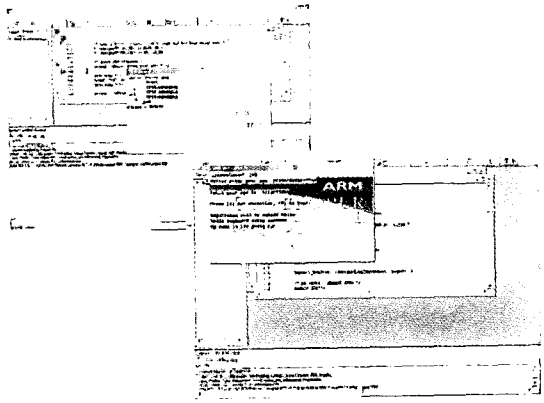
current는 현재의 PSR값이다. user모드로 변경되어 있고 인터럽터가 비활성 상태지만 SWI를 통해 인터럽트를 활성 상태로 변경하고, Timer1의 Load값에 최대값 0xffff를 설정했다.



(그림 6) context switching이 발생한 화면

(그림 6)은 실행 결과 TASK1이 실행되고 SP값을 보여주고 있다. TASK1이 OSTimeDly를 통해 100tick동안 waiting상태로 들어가고, TASK2가 실행되며, 같은 과정으로 OSTimeDly에 의해 200Tick동안의 waiting에 들어가게 된다. 그 후 TASK3가 실행된다.

타이머가 정상적으로 작동되고 또 그 타이머에 의한 인터럽트를 정상적으로 처리해야 OSTime Dly에 의한 waiting이 가능하다.



(그림 7) LCD로 Timer 제어 실행 결과와 키보드로 문자입력 및 입력문자 출력 결과 화면

가상 프로토타이핑을 이용하여 개발보드의 IP의 일부를 구현하고 그 위에 RTOS인 uC/OS-II를 포팅하고 어플리케이션 프로그램을 실행해 보았다. 고가의 개발보드가 없어도 ARM 코어상의 OS 포팅 및 어플리케이션을 실행시켜 정상적인 동작을 테스트 하였다.

5. 레고 기반 실물 프로토타이핑

앞 장에서 살펴보았듯이 임베디드 시스템은 응용분야에 따른 다양한 제약조건들을 만족해야 함과 동시에 다양한 서비스를 제공할 수 있어야 하기 때문에 컴퓨터 구조 및 운영체제 탑재 등의 측면에서 범용 컴퓨터와 유사한 내부 구조를 가지고 있으

면서도 차별화된 시스템 개발 방법론과 개발 기법을 적용해야 한다. 이러한 임베디드 시스템 개발의 복잡성은 현장의 엔지니어들에게 하드웨어 소프트웨어 동시 설계 능력, 시스템 소프트웨어에 대한 폭 넓은 이해, 그리고 소프트웨어 공학론을 기반으로 한 완고한 시스템 설계 및 구현 능력 등 전문적이고 체계적인 기술을 요구한다.

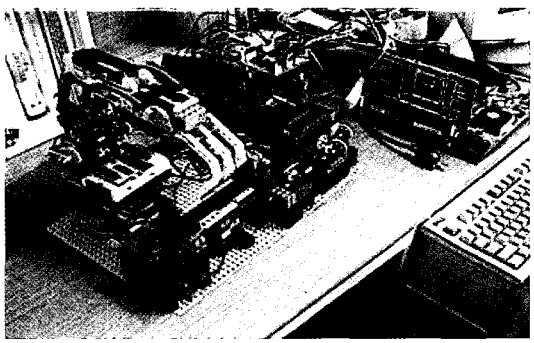
그러나 이러한 전문 인력 양성을 위한 체계적인 교육 과정을 구축하고 실용적인 교육을 하기에는 기술적 난관이 산재해 있다. 즉, 임베디드 시스템은 기본적으로 타겟 시스템(예: 항공기, 발전소, 자동차 등)에 내장되어 동작하는 시스템임에도 불구하고 그 타겟 시스템을 학교나 일반 교육장의 실험실에서 접근하기가 용이하지 않다. 또한, 모형이 있다 하여도 실용되는 타겟 시스템의 내부 동작 원리를 파악하는 것은 쉽지 않고, 다양한 종류를 구비하거나 재사용하기가 곤란하며, 하드웨어 소프트웨어 동시 설계, 실시간 운영체제 기반의 디바이스 드라이버 제작, 그리고 소프트웨어 공학적 설계 및 구현 방법론 등 관련 이론 및 기술들을 체계적으로 집약하여 교육하기가 쉽지 않다.

그러나 최근, 재구성 가능한 완구인 Lego Dacta 모형 혹은 Fischertechnik 사의 fischer 모형을 실물 프로토타이핑 전용 모델로 활용하고 관련 하드웨어와 소프트웨어를 추가하여 실물 프로토타이핑 개발도구가 출시 되었다. 다음 절에서는 이 도구를 이용하여 앞 장에서 제시한 임베디드 소프트웨어 개발 방법론을 기반으로 하여 개발 전 과정을 체험해볼 수 있는 실습 과정을 제시한다. 이를 통해 임베디드 시스템 교과 과정에 대한 보다 실용적인 교육을 위한 실험 도구와 그것을 이용한 실습 과정을 제안하고자 한다.

5.1 실물 프로토타입 모델 제작

이 교육과정에서는 ESPS 도구에서 제공되는 API와 레고 혹은 피셔 블록 및 관련 센서/엑츄에이터를 이용하여 임베디드 실시간 시스템 타켓 모델을 제작하게 된다. 어떤 시스템을 제작할 것인지는 학생들이 직접 창의적인 아이디어를 내어 결정하게 되며, 레고 혹은 피셔를 이용해 구체화하게 된다. (그림 8)은 실례로 제작된 폐기형 프로토타이핑 모델로 공장 자동화 시스템의 로봇 팔과 컨베이어 벨트 시스템을 레고로 재현한 것이다.

이 시스템은 컨베이어 벨트로 운반하는 블록이 합격인지 불합격인지를 파악하여, 불합격인 경우 로봇 팔로 집어서 버린다. 3개의 광 센서와 4개의 회전 센서, 4개의 모터를 사용하며, 3개의 광 센서는 작업의 시작과 끝을 확인하고, 운반하는 블록의 색을 감별해 합격, 불합격의 판정을 내리는데 이용되며, 4개의 모터는 컨베이어 벨트와 로봇 팔의 움직임을 위해 사용된다. 로봇 팔은 상하 좌우로 움직일 수 있으며, 손을 오므리고 펴는 것이 가능하다. 회전 센서는 모터의 회전 수를 기준으로 벨트 및 팔이 움직임을 파악하고 제어하기 위해 쓰인다.

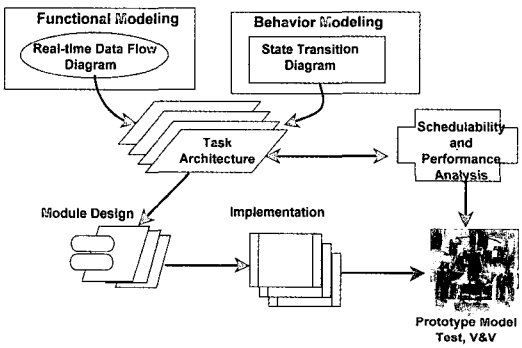


(그림 8) 로봇 팔과 컨베이어 벨트를 이용한 공장 자동화 시스템 프로토타입

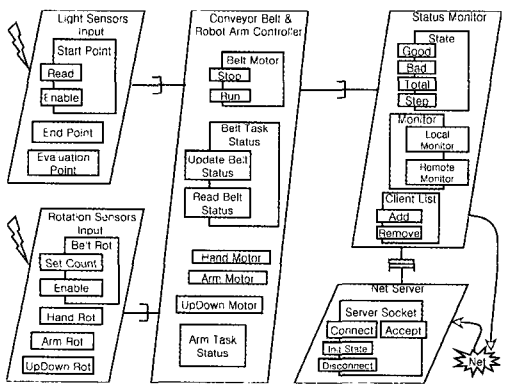
5.2 점증적 소프트웨어 프로토타이핑 절차

폐기형 모델을 제작한 후에는 본격적인 실시간 시스템 응용 프로그래밍을 위한 소프트웨어 공학론에 따르는 작업이 진행된다. 여기서는 CODARTS[6]방식에 따라 제작하였다. 이 방식에 의한

프로그램 개발 절차는 (그림 9)처럼 도시할 수 있다. 즉, 타켓 시스템의 요구 사항을 분석하고 그것을 해결하기 위한 프로그램 구조를 디자인하며, 설계된 프로그램의 구조에서 스케쥴링 가능성과 기타 문제점을 분석 및 보완하여, 최종적으로 (그림 10)과 같은 소프트웨어 아키텍쳐를 도출하고, 그에 따라 프로그램을 구현하는 과정을 거친다. CODARTS방식에 따른 개발과정에 대한 자세한 사례 소개는 이전에도 다른 논문[7]을 통해 소개한 적이 있으므로 참조하기 바란다.



(그림 9) Software Engineering Process



(그림 10) 정보은닉모듈을 포함한 태스크구조도

이와 같은 요구사항 분석 및 설계 과정 자체는 이전에 흔히 시도되던 방식들과 크게 다르지가 않다. 그러나 여기서는 미리 폐기형 프로토타이핑 모델을 제작한 상태에서 작업을 진행한다는 점에서 차이를 가진다. 제작한 모델 덕분에 요구사항을 구체화할 수 있으며, 제어 및 감시해야 될 대상이 무엇인지 알 수 있고, 시스템의 물리적인 한계 사항을 구체적으로 이해한 상태로 프로그램 구조를 설계할 수 있는 것이다. 그리고 설계 과정에서 지속적으로 모델을 운영하는데 타당한 소프트웨어 구조를 모색하면서 점증적인 구체화가 가능하여 좀 더 최적화된 구조를 얻어낼 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 임베디드 실시간 시스템 소프트웨어 개발 분야의 고충과 문제점을 살펴보고, 이를 해결하기 위한 여러 연구들을 소개하였다. 그리고 최근에 임베디드 실시간 시스템 소프트웨어 개발 과정에서 각광받고 있는 실물 프로토타이핑 모델 방법을 이용한 임베디드 소프트웨어 개발 방법론을 소개하고, 본 연구진이 개발한 내장형 실시간 시스템 교육 및 실습을 위한 도구를 이용해 실제 구현하는 과정을 소개하였다. 이에 따르면, 가상 프로토타이핑 모델을 컴퓨터 상에서 먼저 실현하여 사용자들의 생생한 요구를 수렴하고 이를 이용하여 기본적인 요구 분석 및 설계 작업이 시행된다. 이 과정이 어느 정도 구체화 되면 실물 프로토타이핑 모델을 제작하여 개발 중간 단계에서 최종 제품에 대한 기능 및 성능을 보장할수 있는 검증을 할 수 있으며, 이러한 검증 단계를 지속적으로 거치면서 프로그램 구조를 설계하여 구현하는 과정을 점증적으로 반복하게 된다. 따라서 제시된 도구와 개발 방법론을 이용하면 응용 모델에 알맞은 점증적인 개발 과정을 거칠 수 있다. 이러한 내용을 임베디드 실시간 시스템 개발 현장뿐만 아니라 실험 교육에도 효과적으로 적용이 가능하며, 시스템 개발에 필요한 모든 단계를 망라해볼 수 있어서 교육 효과가 매우 높을 것으로 예상된다.

본 도구와 개발 방법론을 교육에 이용하면 학생들이 하드웨어와 소프트웨어를 동시에 설계 및 구현할 수 있는 기회를 가지게 되고, 재사용이 가능한 레고 블록을 이용하여 다양한 형태의 실물 임베디드 실시간 시스템 모형을 스스로 제작해볼 수 있으며, 추상적으로 배우던 최신의 임베디드 실시간 시스템 개발 방법론의 실체를 체득할 수 있다. 또한, 경우에 따라서는 산업체에서 실제 개발해야 하는 실시간 시스템의 프로토타입 모델 개발에도 이용할 수 있다.

이 도구는 현재 경북대학교 전자 전기 컴퓨터 학부에서 내장형 시스템 실험 과목과 대학원 전자공학과 실시간 시스템 설계 과목에서 실험 도구로 활용하고 있다.

참고문헌

[1] Philip Koopman, "Embedded System Design Issues (the Rest of the Story)," Proceedings of the 1996 International Conference on Computer Design (ICCD96), October, 1996.

[2] 재사용성에 대한 논문

[3] Anneke Vandevelde, Roland Van Dierdonck and Bert Clarysse, "The Role of Physical Prototyping in the Product Development Process."

[4] Anders Moller et al., "An Industrial Evaluation of Component Technologies for Embedded -Systems," MRTC Report ISSN 1404-3041 ISRN MDH-MRTC-155/2004-1-SE, Malardalen Real-Time Research Centre, Malardalen University, February 2004.

[5] ART System, http://www.art-system.co.kr/

[6] Hassan Gomaa, Software Design Methods for Concurrent and Real-Time Systems, Addison-Wesley, 1996.

[7] 정기훈, 김도훈, 박성호, 강순주, "임베디드 실시간 시스템 개발 교육 과정," 정보처리학회지, 제 9권, 제 1호, pp.103-111, 2002년 1월.

저자약력

정 기 훈

2001년 경북대학교 전자전기공학부 학사
2003년 경북대학교 전자공학과 석사
2003년 - 현재 경북대학교 디지털기술연구소 연구원
2004년 - 현재 경북대학교 전자공학과 박사과정
관심분야 : Real-Time System, System Software, Home Network, IEEE1394
이 메 일 : jghlof@palgong.knu.ac.kr

채 화 영

2004년 경북대학교 전자전기공학부 학사
2004년 - 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정
관심분야 : Real-Time System, Home Network, LonWork Network
이 메 일 : dragnfly@palgong.knu.ac.kr

김 정 길

2004년 경북대학교 전자전기공학부 학사
2004년 - 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정
관심분야 : Real-Time System, Home Network, USB, PCI Device Driver
이 메 일 : kim0828@palgong.knu.ac.kr

이 재 신

2004년 경북대학교 전자전기공학부 학사
2004년 - 현재 경북대학교 전자공학과 석사과정
관심분야 : Real-Time System, Control Area Network, Autonomous Flying System
이 메 일 : 2podong@netian.com

강 순 주

1983년 경북대학교 전자공학과 학사
1985년 한국과학기술원 전자계산학과 석사
1995년 한국과학기술원 전자계산학과 박사
1985년~1996년 한국원자력연구소 연구원, 핵인공지능연구실 선임 연구원, 전산정보실 실장
2000년 7월~2002년 8월, University of Pennsylvania, Dept. of Computer and Information Science, 객원 연구 교수
1996년 - 현재 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 정보통신전공 부교수
관심분야 : Real-Time System, Software Engineering, Knowledge-Based System
이 메 일 : sjkang@ee.knu.ac.kr