

논문 2013-08-04

ARM 및 FPGA를 이용한 고속 레이저 삼각측량 시스템

(Fast Laser Triangular Measurement System using ARM and FPGA)

이 상 문*

(Sang-Moon Lee)

Abstract : Recently ARM processor's processing power has been increasing rapidly as it has been applied to consumer electronics products. Because of its computing power and low power consumption, it is used to various embedded systems.(including vision processing systems.) Embedded linux that provides well-made platform and GUI is also a powerful tool for ARM based embedded systems. So short period to develop is one of major advantages to the ARM based embedded system. However, for real-time data processing applications such as an image processing system, ARM needs additional equipments such as FPGA that is suitable to parallel processing applications. In this paper, we developed an embedded system using ARM processor and FPGA. FPGA takes time consuming image preprocessing and numerical algorithms needs floating point arithmetic and user interface are implemented using the ARM processor. Overall processing speed of the system is 60 frames/sec of VGA images.

Keywords : FPGA, ARM, Laser triangular system

1. 서론

최근 스마트폰 등의 임베디드 프로세서를 이용한 전자제품의 시장규모가 확대됨에 따라 시장의 대부분을 차지하고 있는 ARM 아키텍처 기반의 프로세서들의 성능이 급속하게 향상되고 있으며 최근에는 1.4GHz의 quad-core 프로세서까지 출시되어 사용되고 있다. 이러한 프로세서 성능의 향상에 맞추어 프로세서의 저전력, 고성능 특성을 이용한 다양한 임베디드 시스템이 기존의 DSP 나 FPGA 기반의 제품에서 ARM 프로세서 기반의 시스템으로 개발되는 추세이다. ARM 기반의 임베디드 시스템 개발의 또 다른 장점은 프로세서가 갖는 저전력 고성능 특성 외에 최근 활발히 개발되고 있는 임베디드 리눅스를 활용한 개발의 유연성 및 기간 단축이

용이하다는 점이다 [1].

이러한 장점 때문에 영상처리 시스템에도 ARM 기반의 임베디드 시스템이 적용되고 있는 추세이다. 그러나 고속의 영상처리가 필요한 경우는 현재의 ARM 프로세서로는 대응이 어렵다. FPGA의 경우 기존의 고속 영상처리가 필요한 시스템에서 많이 활용하였으나 개발기간이 상대적으로 길고 변경사항 발생시 유연성이 떨어지는 단점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해서 최근에는 모델 및 IP 기반의 rapid prototyping을 지원하는 개발툴(예를들어 Matlab HDL coder, Synopsys ...)들이 출시되고 있으며 이를 활용하여 개발기간을 단축하는 사례가 많이 보고되고 있다 [2].

본 논문에서는 ARM 및 FPGA를 이용하여 고속 영상처리가 필요한 삼각측량기반의 레이저 센서 시스템에 필요한 영상처리 시스템을 개발하였다. 삼각측량기반의 레이저 센서 시스템은 측정대상 표면에 표시된 레이저를 카메라로부터 획득한 영상에 대한 영상처리 알고리즘을 통해서 추출하고 추출된 레이저 위치를 삼각측량 방법을 통해서 거리로 환산함으로써 대상 물체 표면의 형태를 측정하는 시스템으로서 반도체 및 회로기판의 표면 검사에서부터

* Corresponding Author (moony@daegu.ac.kr)

Received: 03 Nov. 2012, Revised: 01 Dec. 2012,

Accepted: 23 Dec. 2012.

S.M. Lee: Daegu University

※ 이 논문은 2010학년도 대구대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구되었음

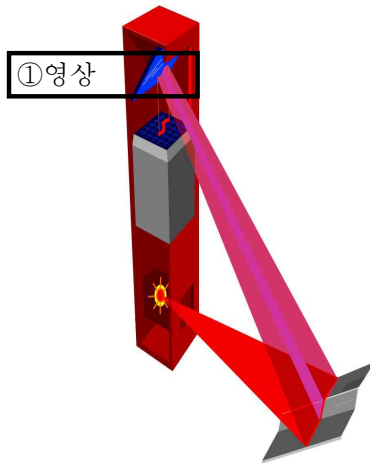


그림 1. 삼각측량기반 레이저 센서

Fig. 1 Laser sensor based on a triangular system

용접용 로봇의 센서에까지 널리 이용되고 있는 시스템이다 (그림 1). 그러나, 대부분의 센서 시스템은 단순히 대상 표면의 3차원 프로파일만을 측정하여 전송하기 때문에 시스템을 다양한 검사 장비 또는 대상에 활용하기 위해서는 측정값을 바탕으로 한 다양한 측정 알고리즘에 의한 후처리 과정이 필수적이며 대부분 PC기반의 시스템으로 구현되어 있다 [3-4].

개발된 시스템은 앞서 언급한 ARM 기반의 임베디드 시스템 및 FPGA의 장점을 활용함으로써 고속 영상처리 성능을 구현하면서도 특성상 소형화가 가능해 기존에 상용화되거나 발표된 연구결과와는 달리 전체 시스템을 임베디드화 하여 로봇 등에 장착할 수 있어 활용도 및 설치에 필요한 가격을 대폭 낮출 수 있다. 상대적으로 반복 계산이 많고 필수적인 영상처리 루틴(예를 들어 gaussian blur, morphology 연산)은 전처리 과정으로 분리하여 FPGA상에서 고속 처리하고 측정 알고리즘 부분은 ARM에 탑재된 임베디드 리눅스를 활용함으로써 향후 알고리즘의 변경에 유연하게 대응할 수 있으며 기존에 리눅스에서 개발된 많은 영상처리 알고리즘을 구현한 라이브러리를 손쉽게 활용하여 기존에 구현된 PC 기반의 시스템의 장점 및 소형화로 인한 장점을 함께 구현할 수 있다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. II.에서는 레이저 삼각측량 시스템에 대해서 설명한다. III.에서는 FPGA 로직 IP 및 ARM에 구현된 알고리즘 부분에 대해서 설명하며 IV.는 본 논문의 결론이다.

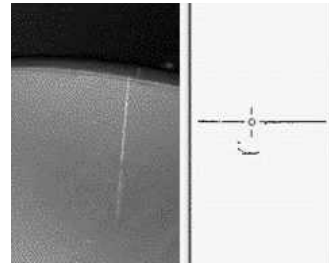


그림 2. 삼각측량기반 레이저 센서를 이용한 추적 시스템

Fig. 2 Tracking system using the laser sensor

II. 레이저 센서 시스템

서론에서 언급한 레이저 센서 시스템은 카메라로부터 얻어진 영상에서 정확한 레이저 라인 또는 포인트의 위치를 얻어내기 위해서 영상처리 알고리즘을 활용한다. 영상처리 알고리즘을 이용하여 레이저 라인은 예를 들어 그림 1에 표시된 ①과 같이 추출될 수 있다. 카메라 영상에 대한 영상처리 필요성은 그림 2에서도 확인할 수 있다. 그림 2의 왼쪽은 카메라 영상이고 오른쪽은 추출된 레이저라인을 이용하여 단차가 생기는 부분의 중간을 측정 포인트로 표시된 영상이다.

그림 2의 경우 센서의 측정값은 그림 2의 왼쪽 영상과 같이 단차가 생기는 부분의 중간값이 되지만 센서의 활용 목적에 따라서 다양한 측정 알고리즘의 적용이 필요하다. 특히, 레이저 센서의 경우 레이저와 카메라로 구성된 광학부는 동일하지만 전혀 다른 측정 포인트를 센서의 출력으로 해야 할 경우도 발생하기 때문에 측정 알고리즘의 적용 부분은 여러 알고리즘이 손쉽게 적용될 수 있어야 한다.

1. 영상처리 알고리즘

영상처리는 크게 영상의 노이즈를 제거하기 위한 전처리 부분과 레이저 라인을 추출하기 위한 부분으로 구분할 수 있다 [5]. 전처리 부분은 uniform filter, Gaussian filter, Morphology operator 등으로 구성된다. 레이저 라인을 추출하기 위해서는 적용처의 특성에 따라서 column이나 row 방향을 갖는 mask를 이용한 2D 필터를 이용하여 레이저 센터의 위치를 찾는다. 따라서 영상처리 알고리즘 부분은 센서의 적용처와 관계없이 기본적인

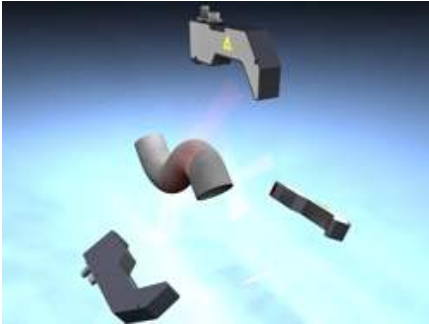


그림 3. 레이저 센서의 활용에
Fig. 3 An example using the laser sensor

영상 필터링을 수행하게 되며 전체 영상에 대해 연산을 수행해야 하므로 FPGA를 적용하는 것이 유리하다. mask의 크기별로 별도의 필터 IP를 생성하여 사용하였다.

2. 센서 측정값 생성

센서 측정값 생성 방법은 센서의 측정 목적에 따라서 다양하다 [6]. 예를 들어 그림 3과 같은 파이프 측정의 경우 파이프의 곡률반경을 산출하여 제품의 불량여부를 판정하는데 센서를 사용하게 된다. 이 경우 영상으로부터 얻어진 레이저 라인의 위치값을 바탕으로 circle fitting등의 과정을 수행하여 파이프의 곡률반경을 계산하게 된다. 또한 직선을 기반으로 한 측정값 생성이 필요한 경우 Hough 변환을 이용할 수도 있다. Hough 변환은 정수연산이 많기 때문에 FPGA에서 IP를 통해서 결과값을 생성하는 것이 유리할 수도 있다.

이 과정에서는 다양한 최적화 알고리즘의 적용이 필요하며 부동소수점 계산의 필요성이 높다. 따라서 이부분은 FPGA가 아닌 ARM에서 구현하는 것이 유리하며 적용처에 따른 s/w변경을 통해서 대응할 수 있기 때문에 활용이 용이하다.

그러므로 레이저 센서의 레이저 추출을 위한 영상 전처리 과정은 FPGA를 활용하고 측정값 생성을 위한 다양한 최적화 및 계산 알고리즘은 ARM기반의 s/w를 통해서 구현하는 것이 개발기간 단축에 유리하다.

III. ARM 및 FPGA 시스템 구현

1. 시스템 H/W 구성

표 1. ARM/FPGA 구성품
Table 1. Parts for ARM and FPGA

ARM/FPGApart	Zynq-7000 evaluation board
Camera I/F	AD(ADV7120)
Video 출력	DA(AD9203)
카메라	Sony HCHR57 (Ext. trigger) 최대속도 60fps

본 논문에서 구현한 ARM 및 FPGA에 대한 하드웨어 구성은 표 1과 같다. ARM 및 FPGA 구성을 위해서 Xilinx의 Zynq 기반의 개발보드를 활용하였다 [7-9]. Zynq의 경우 칩내에 Hard-core ARM 프로세서와 FPGA로직 부분이 같이 구현되어 있어 ARM 및 FPGA로직 부분을 자유롭게 연결하여 구현할 수 있다. 또한 보드에 장착된 2개의 FMC버스를 통해서 카메라 입력 및 출력을 FPGA로직을 이용하여 구현할 수 있다. ARM 및 FPGA의 칩 내에서의 데이터 통신은 FPGA단에 dual-port RAM을 IP 블록으로 구성하고 이를 내부 버스(AMBA)에 연결하여 구현하였다.

카메라는 소니사의 산업용 아날로그 CCD 카메라를 활용하였으며 이 카메라는 외부 트리거 신호를 이용할 수 있기 때문에 FPGA의 로직을 통해서 수평 및 수직 동기신호를 카메라에 전달하고 카메라의 아날로그 신호를 AD 컨버터를 이용하여 FPGA에 전달하도록 하였다. 비디오 출력은 FPGA에서 영상 출력 IP를 구현하고 이 신호를 DA 컨버터를 통하여 모니터로 출력하도록 하였다. 카메라 입력 및 영상 출력에 필요한 AD/DA 컨버터는 별도의 보드를 제작하여 FPGA 개발보드의 I/O FMC 보드에 연결하였다.

2. FPGA Logic IP

FPGA IP중 카메라 입력 및 영상 출력에 해당하는 부분은 FPGA의 입출력 부분이므로 VHDL을 이용하여 코드를 작성하였다. 반면 영상처리 IP의 경우 앞서 언급한 것처럼 개발기간은 단축하고 디버깅을 쉽게 하기 위해 Rapid prototyping 툴(Matlab HDL Simulink HDL coder 및 Xilinx system generator)을 이용하였다.

그림 4는 구현된 IP중의 하나인 Morphology filter IP에 대한 모델을 나타낸 것이다. 실제 필터의 동작 루틴은 Matlab Function 블록에 m-code

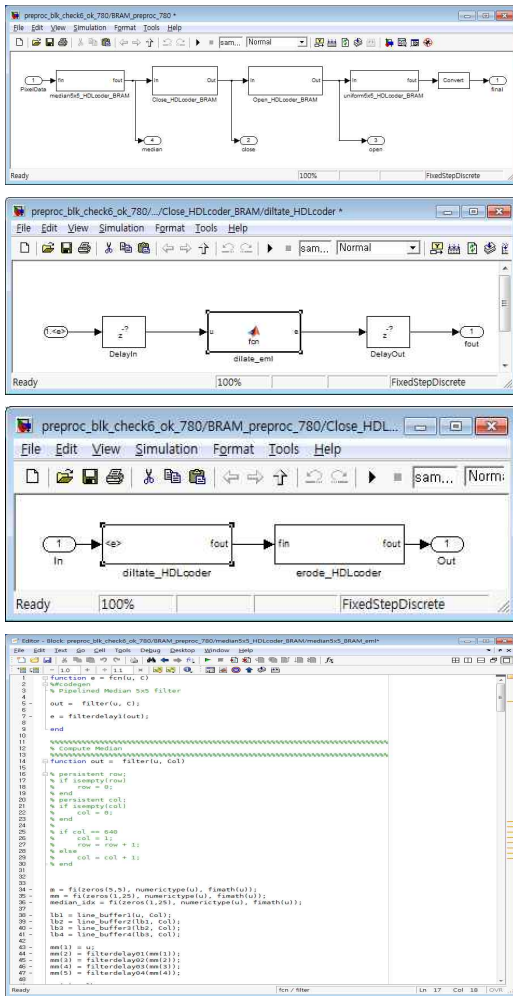


그림 4. Morphological 연산자 IP 구현
Fig. 4 Implementation of morphological operator IP using Simulink HDL coder toolbox

로 구현되어 있으며 나머지 입출력 부분은 HDL code 생성을 위해서 simulink에서 구현한 블록으로 구성되어 있다. 실제 VHDL코드 자동 생성은 그림 5에서와 같이 Xilinx system generator 창이나 Simulink configuration parameter 창을 통해서 생성할 수 있으며 생성된 코드는 import wizard를 통해서 xilinx의 FPGA 관련 s/w인 ISE로 불러들여 IP 구현이 가능하다 [10-11].

전체 시스템은 Simulink 또는 System generator를 통해서 생성한 IP를 ISE s/w상에서 서로 카메라 입력 로직 및 영상 출력 로직과 연결된다.

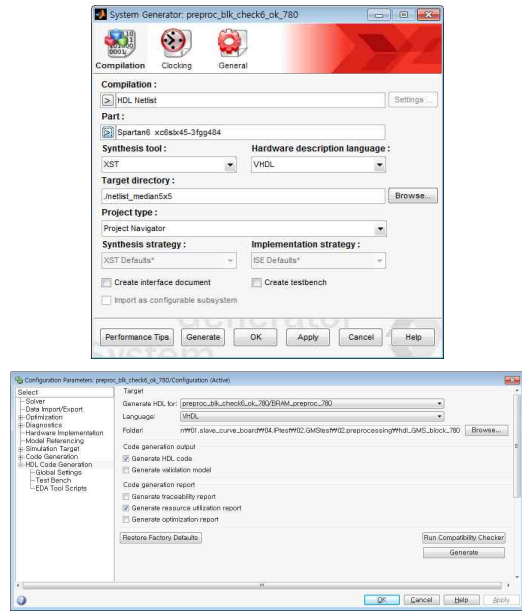


그림 5. System generator 및 HDL coder
VHDL코드 생성화면

Fig. 5 VHDL generation dialog (Xilinx system generator / Simulink HDL coder)

3. 시스템 S/W 구성

ARM 시스템의 임베디드 리눅스 커널을 포함한 운영체제는 Xilinx에서 개발보드와 함께 제공하는 것을 활용하였으며 Qt기반의 테스트용 s/w를 작성하여 전체 시스템의 성능을 확인하였다.

구현된 IP와 시스템 s/w를 이용하여 시스템의 성능을 확인하였다. 단, 현재 Zynq의 내부 프로그램머를 로직용량의 한계(현재 저용량의 Zynq-7020이 개발보드용으로 판매되고 있으며 로직 용량이 큰 Zynq는 내년 상반기 이후 생산예정)로 인하여 전체 FPGA IP를 활용한 결과 확인은 하지 못하였으나 각각의 영상처리 IP와 ARM 임베디드 리눅스 s/w를 연결하여 ARM 및 FPGA 간의 데이터 교환에 대한 속도를 확인하였으며 약 3ms 이내에 처리가 완료되었다. FPGA IP 필터의 성능을 확인하기 위해서 별도로 Xilinx사의 spartan6 칩이 장착된 SP605 개발보드에 구현 후 최대 동작속도는 120MHz였으며 카메라를 연결하여 카메라 최대 속도인 60fps의 처리속도를 확인하였다. 따라서, 카메라 속도에 따라 최대 300fps의 속도로 영상처리가 가능하다. 따라서, [3]의 결과인 최대 197fps의 처

리속도에 비해 빠른 처리속도를 가지면서 소형화를 통한 대상장비의 임베디드화가 가능하다.

IV. 결 론

최근 ARM 기반의 임베디드 프로세서의 성능이 향상되면서 영상처리를 비롯한 다양한 분야에서 기존의 프로세서나 DSP 또는 FPGA등을 대체하고 있는 추세이다. 또한 최근 활발히 개발되고 있는 임베디드 리눅스를 개발에 활용할 경우 개발의 유연성 확보나 개발기간 단축에 유리하다. 그러나 영상처리 분야의 경우 데이터의 처리량이 많을 경우 ARM 기반의 프로세서만을 이용할 경우 처리속도에 한계가 있기 때문에 고속 영상처리가 필요한 시스템의 경우는 별도의 장비가 필요하다. FPGA는 상대적으로 반복 연산이 많은 영상처리에 적용하면 처리속도 향상에 효과적이거나 개발기간이 상대적으로 길고 상위레벨의 알고리즘 변경시 빠른 대응이 어려운 특징을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 FPGA 및 ARM을 결합하여 기존의 대부분의 PC 기반 레이저 비전 센서 시스템보다 향상된 고속성 및 유연성을 동시에 확보하는 소형화된 임베디드 시스템을 처음으로 제안하였다.

본 논문에서는 ARM 및 FPGA로 구성된 임베디드 시스템을 구현하기 위해서 최근 개발된 Zynq 기반의 개발보드를 활용하였다. Zynq의 경우 하나의 칩 안에 하드웨어로 구현된 Dual-core cortex-A9와 로직 구현이 가능한 프로그래머블 로직영역이 함께 있어서 칩간의 데이터 통신 안정성 및 속도를 확보할 수 있으므로 향후 처리속도의 추가적인 향상을 기대할 수 있으며 전체 영상 영역처리가 불필요할 경우 ROI를 이용하면 처리 속도를 300fps 이상으로 추가적으로 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] B. Boyd, A. John, V.H. Mellenkamp, *Handbook of Embedded Control Systems*, SIAM, Philadelphia, 2005.
- [2] P.P. Chu, *FPGA prototyping by VHDL examples*, John Wiley and Sons, 1998.
- [3] W. Huang, R. Kovacevic, "A laser-based vision system for weld quality inspection," *Sensors*, Vol. 11, pp.506-521, 2011.
- [4] Servo robot product catalogue and information,

Servo Robot. <http://www.servorobot.com/>

- [5] M. Sonka, V. Hlavac, R. Boyle, *Image processing, analysis and machine vision*, Chapman and Hall Computing, 1998.
- [6] K. Sung, H Lee, Y. S. Choi, S. Rhee, "Development of a multiline laser vision sensor for joint tracking in welding," *The welding journal*, Vol. 88, No. 4, pp.79-85, 2009.
- [7] Xilinx SP605 manual, Xilinx.
- [8] Xilinx Zynq7020 board manual, Xilinx.
- [9] <http://www.xilinx.com/board>
- [10] <http://www.mathworks.com>
- [11] <http://wiki.xilinx.com/zynq-linux>

저 자 소 개

이 상 문



1999년 경북대학교 전자공학과 학사.

2001년 포항공과대학교 전자공학과 석사.

2006년 포항공과대학교 전자공학과 박사.

현재 대구대학교 전자전기공학부 조교수.

관심분야: 임베디드시스템, 모델예측제어

Email: moony@daegu.ac.kr