

AIOPro: 안드로이드 스마트폰을 위한 통합된 스토리지 I/O 분석도구

한상욱^o, 이인혁, 류동욱*, 김지홍

서울대학교 컴퓨터공학부, 삼성전자*

{shanehahn, ihye, jihong}@davinci.snu.ac.kr, du.ryu@samsung.com*

AIOPro: A Fully-Integrated Storage I/O Profiler for Android Smartphones

Sangwook Shane Hahn^o, Inhyuk Lee, Donguk Ryu*, Jihong Kim

Department of Computer Science and Engineering, Seoul National University
Samsung Electronics*

요 약

사용자 경험이 중요한 스마트폰에서는 사용자의 입력에 대한 응용 프로그램의 반응 시간에 대한 분석이 필요하며 특히 사용자 반응 시간에 큰 영향을 주는 스토리지 I/O 성능의 분석은 사용자 경험 최적화를 위한 중요한 요건이다. 사용자가 경험하는 반응 시간의 분석을 위해서는 입력을 받아들이는 최상위 계층에서 최하위 저장장치 계층을 수직적으로 아우르는 통합된 분석도구가 필요한데 기존의 도구들은 제한된 범위의 계층들에 맞추어 있어서 효과적인 사용자 경험 분석이 어려운 상황이다. 본 논문에서는 안드로이드 스마트폰을 대상으로 최상위 안드로이드 프레임워크, 리눅스 커널을 포함하는 전체 스토리지 I/O 계층의 I/O 동작을 측정하고, 이를 바탕으로 계층 통합적 분석을 통하여 각 계층간 I/O 동작을 연결하여 사용자 입력에 따른 스토리지 I/O가 미치는 영향의 분석이 가능한 도구인 Android Storage I/O Profiler(AIOPro)를 소개한다. 벤치마크 프로그램들을 사용한 검증 실험을 통하여 AIOPro가 다양한 상황에서 0.1% 미만의 동작부하를 가지면서도 유용한 정보들을 정확히 분석할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

안드로이드 스마트폰에서는 사용자가 응용 프로그램을 사용하면서 느끼는 사용자 입력에 대한 응용 프로그램의 반응 시간이 사용자 경험에 큰 영향을 끼친다. 즉, 사용자 경험이 안드로이드 스마트폰의 성능에 가장 큰 영향을 주는 요소이기 때문에, 사용자 중심의 응용 프로그램 반응 시간을 결정하는 요소들에 대한 분석이 중요하다[1]. 응용 프로그램 반응 시간을 결정하는 요소 중 스토리지 I/O의 부하의 비중이 증가하고 있기 때문에[2], 안드로이드 스마트폰에서의 스토리지 I/O 부하를 분석하는 도구를 개발하는 다양한 연구가 진행되었다[3].

사용자 경험에 영향을 주는 응용 프로그램 반응 시간을 분석하기 위해서는 사용자가 상호작용을 하는 응용 프로그램 수준의 최상위 계층에서부터 데이터를 저장하는 저장장치를 관리하는 최하위 저장장치 계층까지 스토리지 I/O에 관여하는 모든 스토리지 I/O 계층을 수직적으로 아우르는 통합된 분석도구가 필수적이다. 하지만 기존의 스토리지 I/O 분석 도구들은 커널의 일부 계층들에 집중되어 있기 때문에[4,5], 안드로이드 프레임워크와 커널을 거쳐가는 스토리지 I/O에 대한 통합된 분석에는 한계가 있다.

본 논문에서는 사용자 중심 반응 시간 분석을 위해 사용자와 응용 프로그램의 상호작용에서 시작되는 스토리지 I/O를 최상위 안드로이드 프레임워크부터 리눅스 커널의 저장장치 드라이버까지 스토리지 I/O에 관여하는 모든

스토리지 I/O 계층에서 실시간으로 스토리지 I/O 동작을 관찰 및 분석하는 통합된 스토리지 I/O 분석 도구인 AIOPro를 소개한다. AIOPro는 기존 안드로이드 프레임워크와 커널의 동작을 수정하지 않고 스토리지 I/O 각 계층에서 수집된 정보만을 바탕으로 계층 간 연결고리를 이용하여 각 계층의 스토리지 I/O를 이어서 계층 통합 분석을 가능하게 한다. 또한 AIOPro는 사용자 중심 반응 시간에 영향을 주지 않도록 고안되어 다양한 실험 환경에서 0.1%미만의 무시할만한 동작 부하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 안드로이드 스마트폰의 스토리지 I/O에 대해 프레임워크와 커널의 스토리지 I/O 계층을 소개하고, 3장에서는 제안한 통합된 스토리지 I/O 분석도구인 AIOPro의 구조와 동작 원리에 대하여 설명한다. 4장에서는 제안한 도구를 사용하여 다양한 시나리오에서 각 스토리지 I/O 계층의 부하를 측정하고, 도구 자체의 동작 부하를 평가한다. 5장에서 기존에 연구된 스토리지 I/O 분석도구들을 소개하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 안드로이드 스마트폰의 스토리지 I/O

안드로이드 스마트폰의 스토리지 I/O의 부하를 분석하기 위해서는 프레임워크부터 저장장치까지 스토리지 I/O 동작에 관여하는 계층을 분석해야 한다. 그림1은 안드로이드 스마트폰의 스토리지 I/O 계층 전체를 나타내는 그림이다.

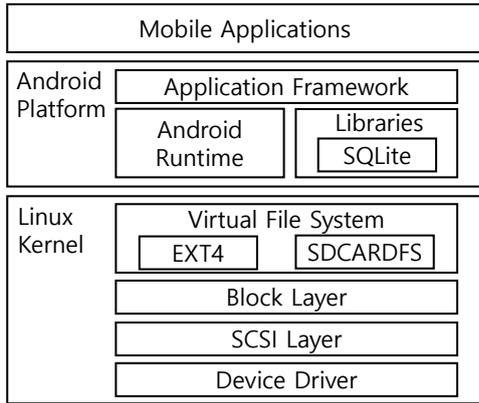


그림 1. 안드로이드 스마트폰의 스토리지 I/O 계층

안드로이드 플랫폼에서의 스토리지 I/O 계층은 프레임워크, Android Runtime (ART)와 여러 종류의 Library들로 구성된다. Library들중에서도 SQLite DBMS가 스토리지 I/O에 직접 관여하기 때문에, 스토리지 I/O 계층에 포함되어 있다.

리눅스 커널의 스토리지 I/O 계층은 Virtual File System과 파일 시스템들, Block Layer, SCSI Layer, 저장장치 드라이버로 구성되어 있다. 저장장치 드라이버는 저장장치 종류에 따라 MMC, UFS 드라이버들로 구성된다. 리눅스 커널의 스토리지 I/O 계층 중 파일 시스템 계층에서만 파일에 대한 정보를 얻을 수 있고, 하위 계층부터는 파일에 대한 정보 대신 저장장치의 저장 단위인 블록에 대한 정보만 얻을 수 있다.

3. AIOPro 설계 및 구현

그림2는 본 논문에서 제안한 안드로이드 스마트폰을 위한 통합된 스토리지 I/O 분석 도구인 AIOPro의 전체 구조를 나타낸 그림이다. 안드로이드 플랫폼과 리눅스 커널에 구현된 I/O Profiler가 각 계층의 스토리지 I/O 동작에 대한 정보를 수집한 뒤, 이를 메인메모리에 순환 버퍼에 저장하여 AIOPro Manager에게 전달한다. AIOPro Manager는 각 계층의 스토리지 I/O 정보를 연결하여 사용자와 응용 프로그램간의 상호작용으로 발생한 스토리지 I/O를 계층 통합적 분석이 가능하게 한다. 또한, AIOPro Manager는 사용자가 스토리지 I/O에 대한 정보를 다각도에서 분석할 수 있게끔 DB에 입력이 가능한 CSV 파일형식이나 wave viewer를 사용 가능한 waveform 파일형식으로 출력해주는 기능도 제공한다.

I/O Profiler는 크게 3가지 종류의 스토리지 I/O 계층에 구현되었는데, 이는 각 계층에서 얻을 수 있는 스토리지 I/O 정보의 범위에 따라 결정되었다. Android I/O Profiler에서는 스토리지 I/O를 유발한 응용 프로그램의 Unique identifier, Process identifier, Thread identifier 정보와 파일 이름, 크기, 오프셋 정보를 저장한다. File I/O Profiler에서는 파일 이름, 크기, 오프셋 외에 파일 시스템의 정보를 활용하여 파일의 물리 주소 정보를 섹터 단위로 저장한다. Block I/O Profiler에서는 파일이 저장되는 블록 저장장치에 관련된 정보와 파일의 물리 주소 정보를 저장하게 된다. 또한, 각 계층에서 스토리지 I/O 동작에 소요되는 시간도 저장한다.

모든 I/O Profiler는 스토리지 I/O 동작에 관여하는 함수들의 파라미터와 파일과 블록 I/O 구조체로부터 스토리지 I/O 정보를 얻는 방식으로 구현되었기 때문에, AIOPro의 동작을 위해서 기존 함수들이나 구조체들의 수정이 필요하지 않다.

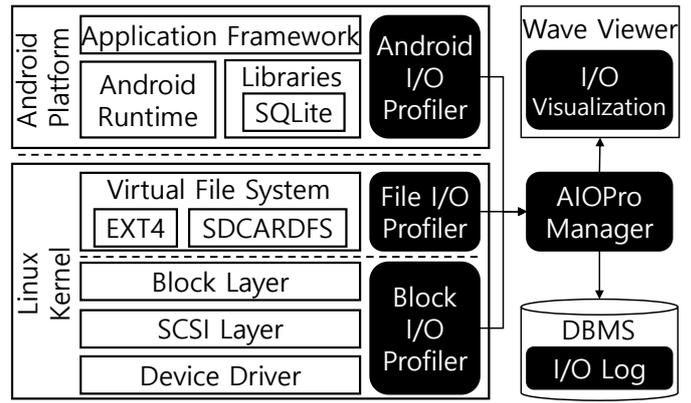


그림 2. AIOPro의 전체 구조

AIOPro Manager는 각 계층의 스토리지 I/O 정보를 연결하는 작업을 수행해야 하는데, 이는 각 계층에서 얻을 수 있는 스토리지 I/O 정보가 서로 다르기 때문이다. 안드로이드 플랫폼에서 수집된 스토리지 I/O 정보에는 파일의 이름, 크기 등의 정보는 존재하지만, 파일의 물리 주소 정보는 존재하지 않기 때문에 파일의 일반적인 정보를 연결고리 삼아 파일 시스템에서 수집된 스토리지 I/O 정보와 연결한다. 그리고 파일 시스템의 정보를 활용하여 해당 파일의 물리 주소 정보를 파악하여 파일 시스템보다 하위 계층들인 블록 계층에서 수집한 스토리지 I/O 정보들 중 물리 주소가 일치하는 정보들과 연결함으로써 프레임워크부터 저장장치 드라이버까지 각 계층에서 얻은 정보들 중 응용 프로그램에서 유발된 스토리지 I/O를 특정 지어 분석하는 것이 가능해진다.

이렇게 특정 I/O에 특정 변수를 추가하여 관련된 모든 함수 및 구조체를 수정하여 tagging하는 방식으로 연결하는 것이 아닌, 각 계층간의 연결고리를 이용하여 모든 스토리지 I/O 계층에서 수집된 정보들을 통합 및 연결하여 특정 I/O 정보를 분석하는 작업은 기존의 다른 분석도구들과 차별화된다.

AIOPro Manager는 AIOPro의 동작이 안드로이드 스마트폰 성능에 영향을 주지 않도록 각 Profiler로부터 전달받은 각 계층의 스토리지 I/O 정보를 모두 메인메모리에 순환 버퍼 형태로 저장하였다가, 사용자에게 의해 AIOPro 동작이 종료되면 사용자가 지정한 파일형식으로 분석된 스토리지 I/O 정보를 저장하게 된다. AIOPro Manager가 메인메모리에서 사용하는 공간은 최대 40 MB로 다른 응용 프로그램의 동작에 지장을 주지 않을 정도 크기의 순환 버퍼를 할당하고 있다.

AIOPro Manager는 가공된 스토리지 I/O 정보를 DB 형식 혹은 Waveform 형식의 파일 출력을 지원함으로써 사용자의 분석의 용이성을 높이도록 구현되었다. 그림3은 AIOPro를 이용하여 분석한 스토리지 I/O 정보를 Waveform 파일로 출력하여 GTKWave[6]라는 프로그램을 통해 Visualization한 결과를 나타낸 화면이다. 리눅스 커널의 최상위 계층인 Virtual File System부터 최하위 계층인 저장장치 드라이버까지 시간에 따라 스토리지 I/O가 어떤 계층의 어떤 함수에서 얼마나 동작 부하가 발생하였는지 한눈에 파악이 가능하게 해준다. 이는 스토리지 I/O 분석을 통한 스토리지 I/O 성능 최적화 연구에 AIOPro가 유용하게 사용될 것으로 기대한다.

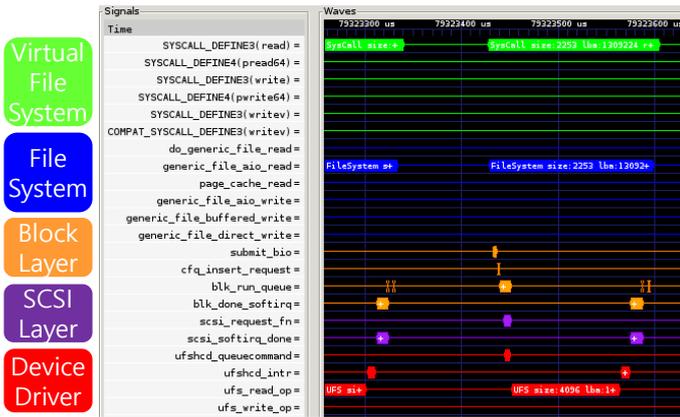


그림 3. AIOPro와 GTKWave를 이용한 I/O 동작 Visualization

4. 실험결과

제안한 분석 도구의 정확성을 판단하기 위해 본 논문에서는 안드로이드 프레임워크 버전 5.0과 리눅스 커널 버전 3.10.61에 AIOPro를 구현하여 해당 버전의 프레임워크와 커널을 지원하는 안드로이드 스마트폰 에뮬레이션 보드에서 AIOPro의 계층별 스토리지 I/O 동작 부하를 측정하고 AIOPro 자체 동작 부하를 검증하는 실험을 진행하였다.

안드로이드 스마트폰의 I/O 계층별 부하를 측정하기 위해 어플리케이션을 실행하는 시나리오, 카메라 연속촬영 시나리오, 외부에서 USB를 통해 스마트폰 저장장치로 파일을 복사하는 시나리오와 스마트폰 저장장치의 파일을 다른 디렉토리에 복사하는 시나리오를 수행하면서 AIOPro를 통해 계층별 스토리지 I/O 동작 부하를 측정하였다. 그림4는 계층별 스토리지 I/O 동작 부하를 측정한 결과이며, 대부분의 경우 파일 시스템과 Block Layer에서의 부하가 평균 50% 이상을 차지하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 어플리케이션 실행 시나리오에서는 어플리케이션이 최대 27%까지 동작 부하를 차지하는 것을 확인할 수 있었다.

AIOPro 자체의 동작 부하를 검증하기 위해 Androbench, Antutu, Storebench 벤치마크 프로그램들에 대해서 AIOPro를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우에 수행 시간을 측정하여 비교하는 실험을 진행하였다. 실험 결과, AIOPro를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우의 수행 시간 차이가 평균 0.1% 미만으로 매우 적은 동작 부하를 발생하는 것을 확인하였다.

5. 관련 연구

리눅스 커널의 스토리지 I/O를 분석하는 도구는 Virtual File System으로 인가되는 시스템 콜을 분석하는 strace[4], 그리고 Block Layer 내부의 스토리지 I/O를 분석하는 blktrace[5]가 존재한다. 그러나 이 두 도구를 모두 사용한다고 해도 사용자와 응용 프로그램의 상호작용에서 시작된 스토리지 I/O가 무엇인지 커널 수준의 정보로는 파악이 불가능한 한계가 존재한다. 또한, 두 도구의 정보를 바탕으로 스토리지 I/O를 연결하는 작업이 불가능한데, 시스템 콜의 정보에는 파일에 대한 정보가 있지만, Block Layer에는 파일에 대한 정보가 존재하지 않기 때문이다.

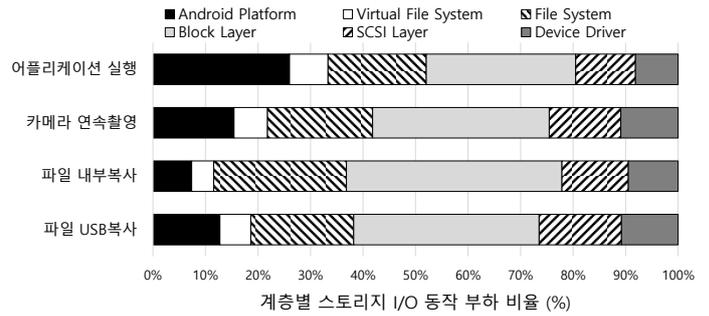


그림 4. AIOPro로 측정한 계층별 스토리지 I/O 동작 부하

안드로이드 스마트폰 환경에서 이러한 한계를 극복하기 위해 Androtrace[3]가 기존에 제안되었다. Androtrace는 파일의 이름을 바탕으로 커널 수준에서 SQLite의 스토리지 I/O를 파악하여 Block Layer까지 분석하는 도구이다. 이는 기존 strace와 blktrace의 한계를 넘어서는 발전된 스토리지 I/O 분석도구이지만, 여전히 사용자와 직접 상호작용하는 응용 프로그램 수준의 스토리지 I/O 정보를 파악하기 위해서는 안드로이드 프레임워크의 분석이 추가로 필요하다. 또한, 데이터의 입출력을 수행하는 저장장치까지 스토리지 I/O가 거치는 계층 중 SCSI Layer와 저장장치 드라이버를 분석하고 있지 않기 때문에, 해당 계층의 스토리지 I/O 분석은 불가능하다는 한계가 존재한다. 반면, AIOPro는 최상위 계층인 프레임워크부터 최하위 계층인 저장장치 드라이버까지 스토리지 I/O 정보를 분석함으로써 기존 분석 도구 대비 차별화되는 장점을 보인다.

6. 결론

본 논문에서는 안드로이드 스마트폰의 사용자 경험에 큰 영향을 주는 응용 프로그램의 반응 시간 중 스토리지 I/O의 부하를 정밀 분석하는 통합된 스토리지 I/O 분석 도구인 AIOPro를 제안하였다. 개발된 도구는 응용 프로그램으로부터 발생한 스토리지 I/O를 프레임워크부터 저장장치 드라이버까지 모든 소프트웨어 계층 별로 스토리지 I/O 정보를 수집 및 연결하여 각 계층별 부하에 대한 계층 통합적 분석을 가능하게 해준다. 본 도구를 활용하면 안드로이드 스마트폰에서의 스토리지 I/O 성능 최적화 연구에 많은 기여가 있을 것으로 예상된다.

감사의 글

이 연구를 위해 연구장비를 지원하고 공간을 제공한 서울대학교 컴퓨터 연구소에 감사드립니다. 이 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2013R1A2A2A01068260, NRF-2015M3C4A7065645).

참고 문헌

- [1] W. Song et al., "Reducing Energy Consumption of Smartphones Using User-Perceived Response Time Analysis," in *Proc. Int. Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, no. 20, 2014.
- [2] H. Kim et al., "Revisiting Storage for Smartphones," in *Proc. USENIX Conf. File and Storage Technologies*, no. 14, 2012.
- [3] E. Lim et al., "Androtrace: framework for tracing and analyzing IOs on Android," in *Proc. Workshop on Interactions of NVM/FLASH with Operating Systems and Workloads*, no. 3, 2015.
- [4] strace. <http://linux.die.net/man/1/strace>.
- [5] blktrace. <http://linux.die.net/man/8/blktrace>.
- [6] GTKWave. <http://gtkwave.sourceforge.net>.