

BEMS 개발용 가상 실시간 건물 시뮬레이터 개발 현황

BEMS 제어로직 개발과 제어성능 검증에 필요한 가상 테스트 베드인 건물 시뮬레이터 개발의 현황과 기술개발 방향을 소개한다.

건물 에너지 절약의 필요성이 증대함에 따라 건물의 실제 성능을 평가하기 위해 시뮬레이션 결과를 활용하고자 하는 관심이 높아지고 있다. 본고에서는 미국 Lawrence Berkeley 국립연구소의 Xiufeng Pang 등¹⁾이 작년에 발표한 미국 DOE의 EnergyPlus 기반 실시간 응용 사례를 중심으로 서술하고자 한다. 이러한 응용은 향후 시뮬레이션 기반 건물 에너지 성능 평가기법을 개발하고 보급하기 위한 초석이 되고 할 수 있다.

실시간 건물 모사란 시뮬레이션 시간이 컴퓨터 클럭의 실제 시간과 동기화된 건물 시뮬레이션을 의미한다. 입력 변수값은 매시간 간격마다 갱신된다. 건물 에너지 관리 및 제어시스템 (EMCS; Energy Management and Control Systems) 및 BACnet과 같은 개방형 프로토콜의 보급으로 건물 내 다양한 설비로부터의 센서 및 제어 신호의 획득이 용이해졌다. 따라서 EnergyPlus 프로그램의 실시간 구동에 필요한 데이터를 기존의 기후 데이터, 운전 스케줄과 제어 설정값뿐만 아니라 EMCS로부터 직접 획득할 수 있게 되었다. 그러나 EMCS가 실시간 시뮬레이션에 필요한 모든 데이터를 제공하는 것은 아니다. 가령 일사량, 풍속, 풍향 등을 얻으려면 추가적인 계기들을 설치해야 한다.

미국 Lawrence Berkeley 국립연구소 (LBNL)가 최근에 개발한 건물 제어 가상 테스트베드 (BCVTB; Building Controls Virtual Test Bed)는 EnergyPlus를 실시간으로 구동하고 EMCS와 데이터를 실시간으로 교환하게 하는 플랫폼을 제공한다. 이는 Ptolemy II의 확장 버전이다. Ptolemy II는 이종 프로그램 간의 모델링과 시뮬레이션을 가능하

신영기

세종대학교 기계공학과
ygshin@sejong.ac.kr

게 하는 소프트웨어 환경으로서 UC Berkeley가 제공하는 무료 공개소스 소프트웨어이다.

본고에서는 통합된 실시간 시뮬레이션 환경 뿐 아니라 실시간 시뮬레이션에 필요한 추가적인 설정에 관해 서술한다. 그 다음에 그러한 개념 증명(proof-of-concept)을 실제 시뮬레이션 결과로 예시하고자 한다.

실시간 시뮬레이션 구조

그림 1은 실시간 시뮬레이션 구조를 나타낸다. 이는 2개의 하부 시스템으로 구성된다: (1) 데이터 획득장치인 EMCS와 (2) EnergyPlus 시뮬레이션, 데이터베이스 및 데이터 획득을 통합하고 시뮬레이션을 실시간에 동기화시키는 실시간 시뮬레이션 구현환경. 이 2개의 하부 시스템은 두 개의 별개 컴퓨터에서 운용되며 LAN으로 연결되어 있다. 다음은 이 2개의 하부 시스템에 대하여 상세히 서술한다.

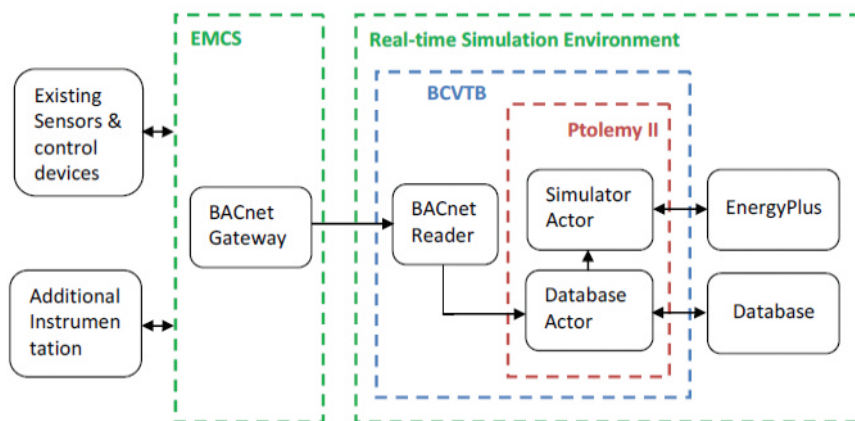
면, 재료, 창문 타입 등), 용도, HVAC 시스템 등의 서술로 구성된다. 기후는 일반 입력파일과는 별도의 파일로 규정된다. 모든 입력 데이터는 계수(parameter)와 변수(variable)로 대별된다. 계수는 건물 도면, HVAC 설비 공칭용량 등과 같이 시뮬레이션 중 시간에 무관한 상수값이다. 변수는 기후 조건, 제어 설정값 등과 같이 시뮬레이션 중 변할 수 있다. 변수 중 일부는 운전 스케줄을 이용하여 EnergyPlus 입력파일에서 규정할 수 있는 반면 (가령 HVAC 설비 운전 및 제어 설정 값), 다른 변수들은 매시간 간격마다 외부 데이터 소스로부터 얻어진다. 예컨대, 외기 건구온도 및 상대 습도, 풍속 및 풍향 그리고 직달 및 산란 일사 등의 기후조건이 있다. 실시간 응용을 위해 외부 변수들은 매 시간 간격마다 갱신되어야 한다. 현대식 건물들은 EMCS가 구비되어 있어 이러한 변수들을 많이 제공받을 수 있지만, 외기온도나 습도를 제외하면 EMCS가 아닌 특수한 계측장비가 있어야만 획득이 가능하다.

데이터 계측

EnergyPlus 모델 입력은 건물 상세 (위치, 도

EMCS 통합

EnergyPlus가 필요로 하는 모든 변수를 제공



[그림 1] 건물 실시간 시뮬레이션 구조

하려면 추가적인 센서를 설치해야 한다. EMCS 측정 데이터를 EnergyPlus에 전달하려면 적절한 통신 프로토콜이 필요하다. 건물에서 표준적으로 사용하는 BACnet 프로토콜을 사용하려면 BACnet 게이트웨이가 필요하다. BCVTB에는 BACnet 장치에 데이터를 쓰고 읽어올 수 있는 두 개의 액터 (actor)라는 개념이 있다. 읽는 기능은 적절한 모델 입력변수를 획득하는 반면 쓰는 기능은 hardware-in-the-loop (HILS) 제어능력을 제공한다. 두 액터는 모두 구성파일 (configuration file)을 이용하여 BACnet 장비, 객체 유형 및 속성 구분자를 규정한다.

EnergyPlus 통합

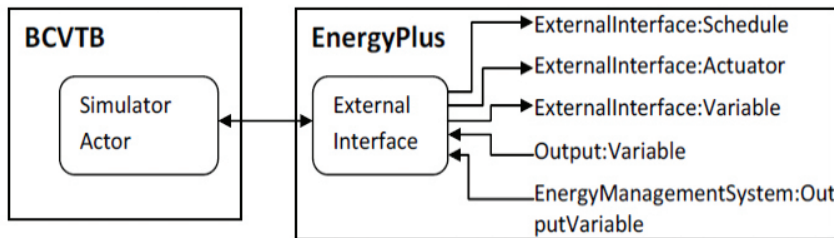
그림 2는 EnergyPlus와 BCVTB 간의 연결을 나타낸다. BCVTB의 시뮬레이터 액터는 EnergyPlus의 외부 인터페이스에 연결된다. 이 외부 인터페이스에서 BCVTB와 EnergyPlus 간에 교환되는 입출력 신호는 EnergyPlus 객체에 맵핑된다.

외부 인터페이스는 다음 3개의 객체를 통하여 BCVTB로부터 3가지 유형의 입력을 받아 들인다: 1) ExternalInterface:Schedule, 2) ExternalInterface:Actuator, 3) ExternalInterface:Variable. BCVTB가 ExternalInterface:Schedule 객체에 값을 넘기면 새로운 스케줄이 생성된다. 나머지 두 객체

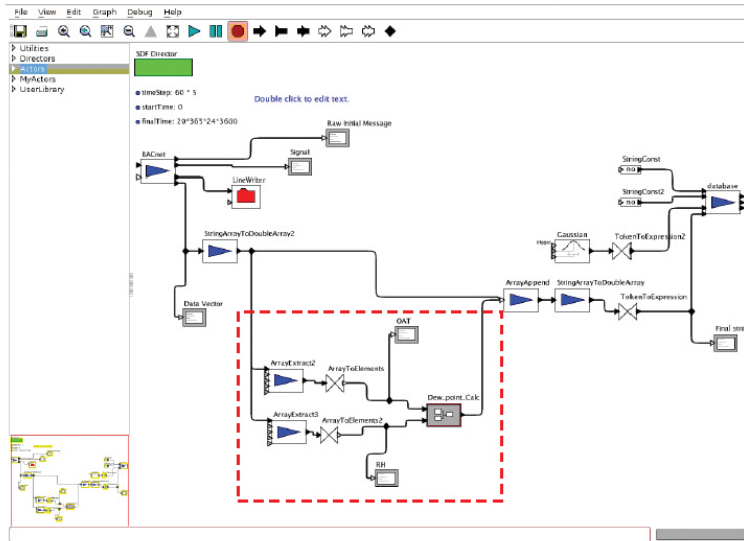
는 매 시간간격마다 새로운 값을 BCVTB로부터 넘겨받는다라는 점만 제외하면 EnergyPlus 내 EMS(Energy Management System)와 동일하게 사용된다. EMS는 프로그램 사용자가 감시 제어 (Supervisory control)를 직접 작성하도록 EnergyPlus에 새로 구비한 기능이다. EMS는 다양한 센서 데이터를 읽고 이 데이터를 이용하여 다양한 작동기 (actuator)를 직접 활용할 수 있다. 작동기 객체는 날씨, 제어 설정값 그리고 창문 개도율과 같은 내부 연산변수 등에 해당하는 다양한 입력 계수를 오버라이트 할 수 있다. Output:Variable 나 EnergyManagementSystem:OutputVariable과 같은 출력값은 매 시간 간격마다 BCVTB로 전달된다.

데이터베이스 통합

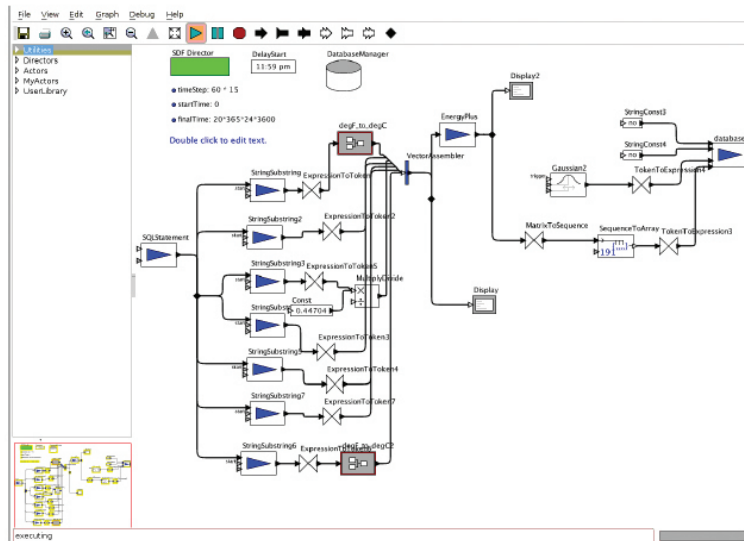
데이터베이스 프로그램으로 PostgreSQL을 사용한다. 이 데이터베이스와 원활한 데이터 통신을 위한 Java 기반 API를 개발하였다. 그림 3, 4의 맨 오른쪽 끝에는 각각 “데이터베이스”와 “데이터베이스2”라는 Ptolemy II 액터가 위치해 있다. 이 둘은 모두 Ptolemy II SystemCommand 액터로서 데이터베이스에 데이터를 보내기 위해 데이터베이스 API를 둘러싸는 래퍼 도구 (wrapper tool) 기능을 수행한다. 그림 4의 맨 왼쪽에는 데이터베이스에 데이터를 요청하는데 쓰이는 “SQL Statement”이라는 액터가 위치한다.



[그림 2] BCVTB와 EnergyPlus의 통합



[그림 3] Ptolemy II GUI를 이용한 BACnet 읽기 과정의 프로그래밍



[그림 4] Ptolemy II GUI를 이용한 EnergyPlus 시뮬레이션 프로그래밍

개념증명을 위한 시뮬레이션 사례

미국 시카고 시에 있는 2층 건물을 대상으로 개념의 타당성을 예측하고자 한다. 건물 연건평은 6,500이다. 건평의 약 80%는 직원 훈련과 행

사를 위한 무도장이다. 나머지는 행정 사무용이고 상주인원은 매우 적다. 2 대의 100 RT (351.7 kW) 공랭식 칠러가 있고 냉수 펌프를 통해 건물 전체를 냉방한다. 학교 전체에 걸쳐 공급되는 난방용 스팀을 온수로 변환하여 사용한다. 무도장

은 2개의 단일공조 변풍량 AHU에 의해 공조된다. 사무용 공간은 VAV 터미널 유닛이 있는 한 대의 VAV AHU로 공조된다. 건물에 있는 한 개의 교실은 단일 공조 VAV AHU로 공조된다.

데이터 계측

상업용 EMCS가 대상 건물에 설치되어 있으며 실시간 에너지 시뮬레이션을 위해 외기 건구 온도, 상대습도, 풍속 및 풍향 그리고 직달 및 산란 일사량을 측정하는 추가적인 센서들을 설치하였다. 날씨가 시뮬레이션 모델 출력 불확실성에 미치는 영향을 최소화하기 위해 고급 센서를 적용하였다. 시뮬레이션 결과를 조명, 소형 전기제품 부하, 칠러와 같은 건물 하부 시스템의 실제 성능과 비교하기 위하여 전용 전력량계를 부하별로 설치하여 측정하였다.

시스템 설치

건물 외피, 공조 시스템, 조명 시스템 및 제어 시스템의 성능을 모사하도록 건물 전체에 대하여 EnergyPlus 모델링을 수행하였다. 모델은 2010년 4월부터 7월까지 EMCS를 통해 수집된 데이터와 설계도면을 토대로 보정되었다. EMCS는 장치 고유의 통신 프로토콜을 사용하기 때문에 BCVTB에 포함된 BACnet 인터페이스가 EMCS와 통신할 수 있도록 EMCS의 최상위 계층에 BACnet 서버를 설치하였다. BCVTB는 EMCS가 작동하는 컴퓨터와는 별도의 컴퓨터에 설치되었다. 콘솔이나 GUI를 통해 BCVTB를 작동함으로써 실시간 시뮬레이션이 시작된다. 콘솔은 automated workflow나 window-less 시스템의 형태로 BCVTB의 작동을 허용한다.

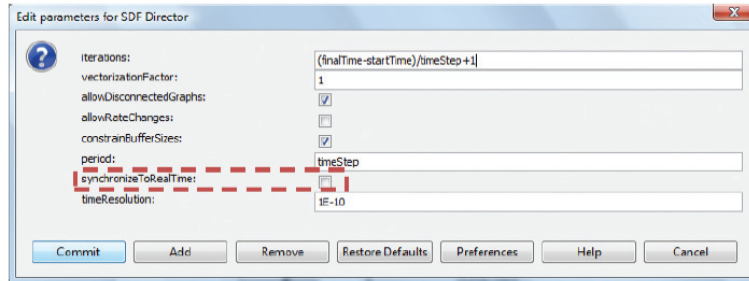
동시에 병행하여 작동하는 2개의 프로세스가 있다. Ptolemy II GUI를 이용하여 BACnet reader를 통합하는 과정은 **그림 3**에 예시되어 있다. 두

개의 핵심요소는 BACnet 액터와 데이터베이스 액터이다. BACnet 액터는 5분 간격으로 EMCS 데이터를 획득한다. StringArrayToDouble-Array 액터는 BACnet 액터 출력 데이터를 문자열에서 더블형 실수로 변환한다. 데이터베이스 액터는 더블형 실수 데이터를 받고 해당 데이터를 데이터베이스로 보낸다. 붉은색 점선으로 둘러싸인 액터들은 외기 건구온도와 상대습도로부터 외기 이슬점을 계산하는 데 사용된다.

그림 4는 Ptolemy II GUI를 이용하여 EnergyPlus 시뮬레이션을 통합하는 데 사용된다. EnergyPlus 시뮬레이터는 BCVTB와 보정된 EnergyPlus 모델 간의 통신을 설정한다. EnergyPlus 시뮬레이션 시간 간격은 15분이다. 각 시간 간격마다 EnergyPlus 시뮬레이터는 기상 데이터인 외기 건구온도, 상대습도, 이슬점, 풍속, 풍향, 직달 일사, 확산 일사를 SQL Statement 액터를 통해 동적 입력으로 받아들이고 EnergyPlus 모델보다 한 시간 간격 앞서 받아들인다.

EnergyPlus는 15분 간격인 반면에 BACnet read 과정은 5분 간격을 사용하므로 EnergyPlus 시뮬레이션에 대한 입력은 15분간에 걸친 측정 평균값이다. 매시간 간격마다 시뮬레이션이 종료되면 결과는 데이터베이스로 전송된다. BCVTB 시간 간격과 프로그램 실행시간은 프로그램 시작 전에 설정하고 EnergyPlus 시간 간격과 어긋나지 않아야 한다.

EnergyPlus는 시뮬레이션 시작 일과 월만 정할 수 있기 때문에 시뮬레이션이 날짜 경계선인 자정에 시작하지 않는다면 EnergyPlus 시뮬레이션을 일반 시계의 시간과 동기화하기 위해 지연된 시작을 해야 한다. Ptolemy II GUI에서 시뮬레이션 시간과 실제 시간의 동기화는 **그림 5**에서와 체크박스를 체크하여 수행된다. 그러면 EnergyPlus는 모델을 실행하고 요구되는 출력

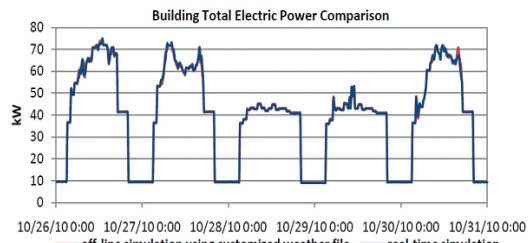


[그림 5] 실제 시간과 시뮬레이션을 동기화 하기위한 GUI 체크박스

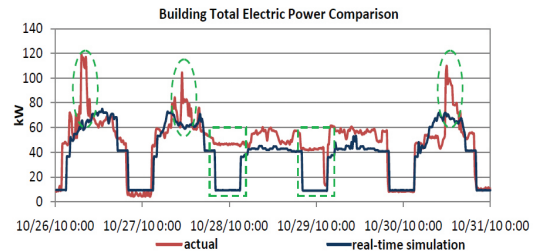
을 BCVTB로 보낸다. EnergyPlus 시뮬레이션과 BACnet read 과정이 동일한 시간 간격을 사용하는 경우에는 EnergyPlus 시뮬레이터가 입력변수를 데이터베이스 대신 BACnet 액터로부터 직접 취할 수 있다. 예시된 시뮬레이션에서는 BCVTB 버전 6.0이 사용되었고, 기후 데이터에 대한 작동기 구동을 위해 EnergyPlus 5.0이 사용되었다.

결과 및 토론

제안된 시뮬레이션 개념은 2010년 7월부터 시작되었다. 첫 테스트는 실시간 데이터 획득과정을 검증하는 것이었다. 기존 EMCS는 물리적 채널과 제어 설정값과 같은 가상 채널을 포함하여 약 1,200 제어점을 갖는다. 실증에 적용된 약 700개의 제어점은 BACnet 서버를 통해 브로드캐스트 되었다. BCVTB에 있는 BACnet reader는 이 데이터 포인트들을 읽어서 데이터베이스에 보낸다. 데이터베이스에 있는 데이터를 데이터시트로 보내어 한 달에 걸친 EMCS의 데이터와 비교하는 수동 체크과정을 거쳤다. 실시간 EnergyPlus 작동을 검증하기 위해 데이터베이스에 저장된 실제 기후데이터를 이용하여 별도의 EnergyPlus 기후데이터를 생성하였다. 데이터베이스에 저장된 실시간 EnergyPlus 시뮬레이션 결과는 별도의 기후데이터를 이용하여 만들어진 오프라인 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

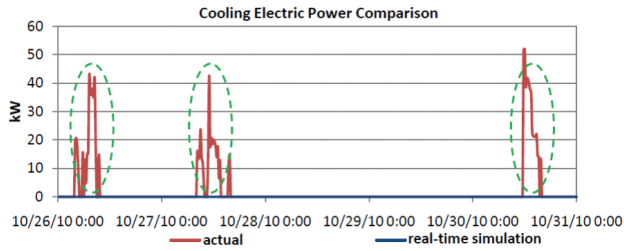


[그림 6] 실시간 시뮬레이션과 별도 기후파일을 이용한 오프라인 시뮬레이션 간의 건물 전체 전력소비 비교

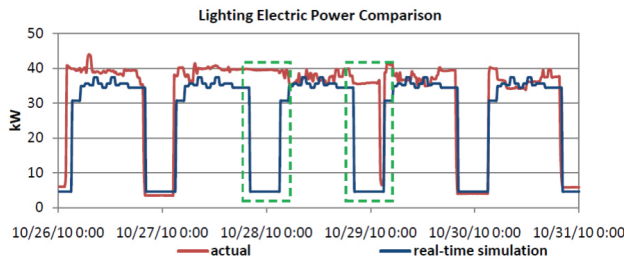


[그림 7] 실시간 시뮬레이션과 실제 계측된 건물 전체 전력소비 비교

그림 6에서 보는 바와 같이 건물 전체의 소비 전력 시뮬레이션 결과는 실험결과와 잘 맞는다. 그림 7은 실시간 건물 에너지 성능과 시뮬레이션 결과의 비교를 보여준다. 두 성능 간의 차이를 하이라이트로 표시하였다. 타원형 점선으로 둘러싸인 하이라이트 영역은 재실 기간중의 차이를 나타내는 반면에 사각형 심볼의 점선으로 둘러싸인 면적은 공실 기간 중의 성능차를 나타낸다. 전력 소비를 세밀히 분석한 결과 그림 8에서 보는 바와



[그림 8] 실시간 시뮬레이션과 실제 계측된 냉방 전력소비 비교



[그림 9] 실시간 시뮬레이션과 실제 계측된 조명 전력소비 비교

같이 칠러 운전 전략이 재실 기간 중 에너지 성능에 상당히 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. 칠러는 에너지플러스 모델에서 10월 15일 이후에 정지되도록 스케줄되어 있었으나, 실제에서는 칠러 기동과 정지가 외기 온도에 의해서만 제어되었다. 시뮬레이션 결과는 외기 도입 냉방이 건물 냉방부하를 처리하는 데 충분함을 보여준다. 한밤중에 켜져 있는 조명은 그림 9에서 보는 바와 같이 공실 기간 중의 에너지 소비 차이의 원인이 된다.

결론

EnergyPlus는 오프라인에서 건물 에너지 해석을 위해 전통적으로 사용되어 온 건물 전체 시

뮬레이션 프로그램이다. EnergyPlus 시뮬레이션을 실시간으로 구동하기 위한 개발환경을 개념 증명의 형태로 예증하였다. 이 결과는 실제 건물 성능을 설계 의도나 다른 벤치마크와 비교할 수 있는 수단을 제공한다. 예시 결과는 건물 전체의 성능평가용 수단으로서의 가능성을 제시한다.

향후에는 에너지 플러스 제어 실행부분을 개선하고 보다 많은 통신 프로토콜을 수용하여 더 짧은 시간 간격(예컨대, 1분)에 대한 실시간 실행 가능성을 시험할 예정이다. 개념증명 예증 시뮬레이션에서는 15분 시간 간격을 사용했는데 이는 공조설비의 short cycling, 소형 가전 on/off에 따른 동특

성을 나타내기에 적합하지 않다. 따라서 1분 시간 간격으로 실시간 실행 환경 성능을 검증하는 것은 매우 중요하다.

참고문헌

1. Xiufeng Pang¹, Prajesh Bhattacharya¹, Zheng O'Neill², Philip Haves¹, Michael Wetter, and Trevor Bailey, REAL-TIME BUILDING ENERGY SIMULATION USING ENERGYPLUS AND THE BUILDING CONTROLS VIRTUAL TEST BED, Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, 14-16 November. 