

TWAREN 可程式化實驗網路平台預約系統前端建置

周大源 黃文源 胡乃元 曾惠敏 劉德隆

財團法人國家實驗研究院國家高速網路與計算中心

E-mail: {1203053, wunyuan, 2103081, n00hmt00, tlliu}@narlabs.org.tw

摘要

本文介紹本中心於今年度(2023年)在 TWAREN 學研網路上所建置的 P4 可程式化實驗網路平台之資源預約系統前端部份。P4 可程式化交換器可以針對網路封包格式,以及處理網路封包的相關程序均能以撰寫程式碼的方式來定義,具有高度客製化特性。在開放網路社群中,有許多學研單位陸續投入 P4 可程式化網路的研究。然而,一般實驗室因為經費因素,往往只能針對軟體版本 BMv2 Model 進行研究。因此,本中心已在 TWAREN 學研網路上擇取數個節點建置佈建數部 Tofino Model 之實體 P4 可程式化網路交換器,並透過 TWAREN 提供的 VPLS 串接,建置大型遠距之 P4 可程式化實驗平台。由於該平台為獨佔式資源,我們也建置預約系統提供學研界申請以安排時段使用。透過這樣的平台進行實驗,可以讓 P4 可程式化網路的技術在大型實體網路上得到實際的驗證。

關鍵詞: 可程式化網路, TWAREN, P4, LAMP

Abstract

This paper introduces the front-end of the reservation system of P4 programmable network experimental platform constructed by NCHC in this year (2023). With the features of highly customized, P4 programmable switches can define the formats and ways to deal with packets using P4 program codes. In open network societies and communities, more and more academic and research units start to join the study of P4 programming. Due to the limit of budget, however, general laboratories can only study the software version of BMv2 model. Therefore, we have deployed several P4 programmable switches of Tofino models on selected nodes on TWAREN. We also made the P4 switches connected using TWAREN VPLS service to form a large-scale physical P4 programmable experimental platform. Furthermore, we developed a reservation system so that the academic and research units can apply time periods to use, since the resource of the platform is monopolistic, we Via the proposed platform, the technologies of P4 programs can be realized and verified over a large-scale physical network.

Keywords: Programmable Protocol-Independent Packet Processors, P4, TWAREN, LAMP

1. 前言

近年來,新一代的資訊技術蓬勃發展,包含人工智慧(Artificial Intelligence)、區塊鏈(Block Chain)、雲端運算(Cloud Computing),以及大數據(Big Data)等等相關領域與應用與日遽增。在這些先進資訊技術,至關重要的是高速而穩定的

網路建設。為了要能夠強化內部資訊傳遞能量與速率,並與國際介接,各國紛紛建置高速骨幹網路以串接各大學研界與業界組織。然而,為了要能夠管理規模日漸複雜的各類網路架構,網路的通訊協定與管理技術是相當重要的。

現行網路多數以 TCP/IP 通訊協定為基礎,將協定實作在硬體晶片中,並嵌入各類網路裝置(路由器、交換器、...等等)。為了要能夠與現存網路裝置溝通,並達到相容效果,許多功能都要遵循現有的通訊協定,能夠客製化的部份相當有限。對於網路維運或管理人員而言,一旦網路發生問題,若要進行除錯與故障排除,將會是非常困難又耗時的程序。

為了要讓網路架構能夠更加開放,讓工程師能夠高度參與網路裝置之運作,達成客製化的目的,軟體定義網路(Software Defined Network, SDN)的技術應運而生。這項技術主要源自於 Stanford 大學的一項計畫[1]。該項計畫提出新的網路設備溝通協定,稱為 OpenFlow。如圖 1 所示,SDN 的技術主要是將網路中的控制平面(control plane)與資料平面(data plane)分開。前者與後者分別為 SDN 網路控制器與 SDN 交換器。

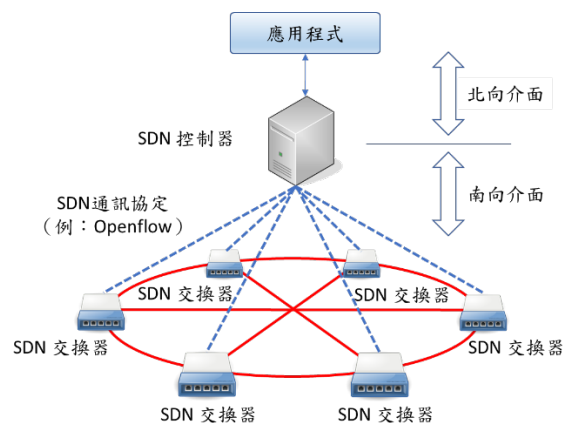


圖 1 軟體定義網路架構圖

在 SDN 網路中,SDN 控制器通常是在另一部伺服器上,以軟體方式實作應用,透過獨立通道(一般為 TCP 或 SSL 連線)來控制多部 SDN 交換器,又稱為南向介面。在 SDN 控制器的部份,可以讓網路管理者透過 policy 或是 rule 設定,來控制資料傳輸的方式。而 SDN 交換器則是專注於資料的轉送(forwarding)。在每部 SDN 交換器會透過許多資料路徑互相連接,當收到用戶 host 傳來的資料封包時,會先查閱交換器本身內部的 flow table,檢測是否有 match 的部份。若有 match 的 flow,則會直接套用該 flow 進行轉送。相反地,若是沒有 match 的 flow,就會透過獨立通道向控制器詢問資料處理的方法。因此,在 SDN 的網路中,只要控制器與交換器均遵循同樣的 SDN 通訊協定

(例如 OpenFlow)，便可以讓控制器順利對交換器進行管控。如此一來，SDN 控制器與 SDN 交換器並不限制一定要同一種廠牌。再者，使用者可以透過北向介面的各種應用來針對 SDN 進行控制，達成控制面的客製化功能。

雖然網路管理者能夠針對控制平面的部份進行客製化管控，並能夠實作各類型的第三方應用 (3rd-party Application) 與控制器溝通，但對於資料平面，亦即 SDN 交換器的客製化程度卻不足。為了要進一步針對資料傳輸的部份進行客製化與可程式化，可程式化交換器 (簡稱 P4) 的技術便應運而生。

P4可程式化網路交換器[2][3] (Programmable Protocol- Independent Packet Processors, P4) 是一種與協定無關的可程式化交換器。藉由撰寫 P4 程式語言，使用者可以進一步針對 P4 的行為定義相對應的處理程序，讓 P4交換器達成更高度客製化的特性。換句話說，程式開發者可以藉由程式語言的撰寫，打造更加符合需求的交換器。有關於 P4 程式語言相關工具，可以參考 P4 Language 的網站 [2]，在網站上有詳細的安裝過程。一般使用者可以依照該資訊逐步安裝。另外，如果想要省略這個部份，也可以下載 P4官方網站所提供的虛擬機器版本 tutorial 來進行測試。此部份之 P4交換器為軟體版本之 BMv2 Model。

P4交換器亦有開發硬體版本。在2017年，Barefoot Networks 公司開發出支援 P4 可程式化的交換器特殊應用晶片 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC) Tofino[4]，並於2018年改良為 Tofino 2[5]，亦可稱之為 Tofino Model 與 Tofino 2 Model。目前已有多家網路硬體公司推出商用的可程式化交換器，並採用 Tofino/Tofino 2 ASIC，讓網路開發者可以直接撰寫 P4 可程式化網路程式，讓網路功能具有高度客製化的特性。在2019年 Barefoot Networks 加入 Intel，成為 Intel 的可程式化網路技術團隊[5]。

事實上，若針對軟體版本 P4可程式化實驗網路進行實驗，最基礎的方式是利用 Mininet 搭配軟體版本的 P4 交換器來進行模擬實驗。利用同一部電腦即可模擬出具有多部 P4 可程式化交換器與多部客戶端的完整模擬網路。然而，這樣的環境無法完整反映出實際網路的情況。特別是在進行網路效能量測、帶內遙測 (In-band Network Telemetry) 等等技術時，時沒辦法反映出與傳輸時間相關的真實數據。

然而，一般硬體版本的 P4可程式化交換器價格較為昂貴，對於一般大專院校實驗室的經費而言往往較無法購買。因此，一般國內大專院校多以軟體版本的 BMv2 model 為主要研究目標。再者，基於這樣的動機，本中心擬以台灣先進學術研究網路為基礎，搭配硬體版本之 P4可程式化交換器以建構 P4可程式化交換器實驗網路。



圖 2 TWAREN 100G 網路架構圖

台灣先進學術研究網路 (Taiwan Advanced Research and Education Network) 是串接國內外多個學研單位的寬頻網路。TWAREN 本身是由國網中心維運管理，提供多種7x24小時服務。不但肩負起各大學研單位間的大資料高速傳輸，本身亦能夠架設許多網路相關的實驗測試平台。在105年度，本中心進行 TWAREN 100G 骨幹升級作業[7]。圖2為 TWAREN 100G 線路架構，包含5個骨幹(Core)節點與12個區域網路(GigaPop)節點。在5個主節點之間線路頻寬均為100G，而區域網路節點之間則為50G。更多 TWAREN 相關資訊可以參閱 TWAREN 網站[8]。為了更進一步地研究軟體定義網路技術，本團隊持續在 TWAREN 上建置國內大型的 SDN 實驗場域，亦即在4個骨幹節點與12個區網節點佈建 SDN 交換器。其間之資料路徑由 TWAREN 骨幹的 VPLS 線路達成。TWAREN SDN 網路架構如圖3所示。透過開放使用實驗性質服務方式，以實際使用案例的方式驗證 SDN 應用，例如：

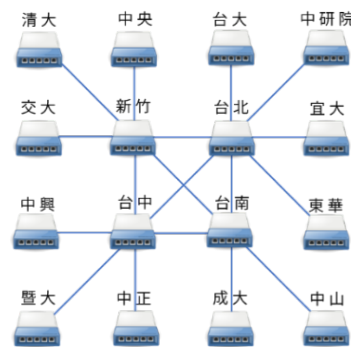


圖 3 TWAREN 虛擬專用連線 topology

■ 本中心台中分部與美國西北大學 iCAIR 實驗室之間的 DTN 實驗線路。

- 與國立交通大學共同進行 SDN-IP 網路介接，並與日本、韓國等多個學研單位進行連線。
- 106年8月，本中心提供 TWAREN SDN 虛擬專用連線，與使用與中華電信研究院、工研院、資策會等單位一同進行世大運影音轉播[9][10]。本團隊亦開發一套 Web UI 版本的虛擬網路供裝系統[11]，並進行高速傳輸測試[12]。

基於上述經驗，本中心據以建立未來將進一步地於 TWAREN 之骨幹節點與區網節點擇取數個節點來進行硬體可程式化交換器佈建工作，提供國內大型遠距線路實驗場域。

本論文的主要內容如下：第2.節介紹可程式化交換器與帶內遙測技術。第3.節會針對我們今年建置的 TWAREN 可程式化實驗網路的整體架構進行進行解說。由於這個平台的資源是獨佔式資源，我們也開發一套資源預約系統，提供國內學研單位申請使用，並在第4.節中展示。而最後一節則是結論與未來展望。

2. 可程式化網路交換器與帶內遙測技術簡介

2.1 BMv2

可程式化交換器[2][3] (Programming protocol-independent packet processors, P4) 是一種與協定無關的可程式化交換器。藉由撰寫 P4 程式語言，使用者可以進一步針對 P4 的行為定義相對應的處理程序，讓 P4 交換器達成更高度客製化的特性。

圖4是 P4 程式語言的 Pipeline。程式設計者可以使用 P4 語言定義處理資料封包的方式，並編譯產生一個 JSON 檔案以針對交換器晶片進行組態設定。程式設計者也可以使用 P4 語言定義各種交換器、防火牆，或者負載平衡器、...等等裝置。

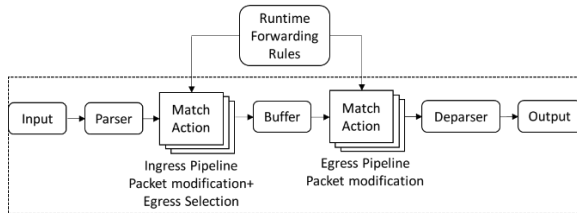


圖 4 P4 Pipeline

交換器在收到資料封包後，會經由 Parser 做剖析，得出偵測指令與需偵測的對象。資料封包稍後則進入 match + action 階段進行處理。此階段會進行 Ingress Pipeline 處理，得出相對應的 Egress，並修改資料封包。基於 Runtime Forwarding Rules，封包轉送至 Egress 進行 match + action，並再修改資料封包後輸出。

基礎的 P4 交換器 Simple switch 的基礎程序如下：

```

V1Switch(
  MyParser(),
  MyVerifyChecksum(),
  MyIngress(),

```

```

  MyEgress(),
  MyComputeChecksum(),
  MyDeparser()
) main;

```

如上所示，基礎的 V1 model switch 就是經過上述的標準運作程序。在 MyParser() 中主要是要針對封包進行剖析。而 MyVerifyChecksum() 是用來驗證檢查碼是否正確。接下來 MyIngress() 用以處理封包進入的 port 的相關程序。而 MyEgress() 用以處理封包輸出 port 的相關程序。藉由 MyComputeChecksum() 程序，可以針對封包的檢查碼進行更新。在所有對應的處置動作完成後，MyDeparser() 會將最後結果包裝成對應的封包並傳到輸出的 port 中。

在 P4 可程式化交換器中，需要注意的是以下幾部份。

- Behavior Model(BMv2)：這個部份是用來描述硬體架構。
- P4 compiler：用來編譯 P4 程式碼的工具。
- P4 runtime：這個是 P4 程式碼的執行環境。

對於語法部份，P4 官方網站也有提供 P4 cheat sheet[13] 文件，讓程式開發者能夠針對重要的關鍵語法進行參考。

2.2 硬體版本之 P4 可程式化交換器

目前有許多供應商實作硬體版本之 P4 可程式化交換器，如 EdgeCore、Inventec、... 等等。由於交換器硬體本身有共通之 Tofino/Tofino2 Switch ASIC，並搭配相關的 Board Support Packages (BSP)，開發者可藉由 P4 程式碼開發並編譯出相對應的程式碼以針對硬體進行呼叫。

一般硬體版本的 Tofino/Tofino2 ASIC 交換器本身僅搭配基本的開放式網路安裝環境，如 Open Network Install Environment (ONIE)。有些供應商則會進一步提供交換器作業系統，如 Stratum、Sonic 等等開放網路社群軟體為基礎之作業系統。安裝作業系統後，交換器本身可具備基本網路交換功能。

然而，若要完整使用 P4 可程式化交換網路功能，可以安裝 Open Network Linux (ONL) 作業系統，並於作業系統中安裝 Intel Barefoot 之軟體開發環境 (Software Development Environment, SDE) 以進行開發。若要取得 Intel Barefoot 之 SDE 工具，則需要向 Intel 洽詢，並簽署 NDA 方能取得。

3. TWAREN 可程式化實驗網路平台架構

本節介紹 TWAREN 可程式化實驗網路平台之架構。如圖6所示，我們選定本中心新竹本部、台南分部、成功大學、陽明交通大學，以及中興大學等等節點各設置一部 P4 交換器與一部伺服器。在各大節點的 P4 交換器與伺服器間會有 Switch-Host Connection，伺服器得以藉由 P4 交換器進行傳送與接收資料，故可視為 P4 交換器之用戶端，如圖6. 中 P4 交換器與 Server 間之實心細線。

而在各大節點之間，我們利用 TWAREN 所提

供的 VPLS 連線進行介接，亦即為 P4 交換器之間的 Data Path，其 topology 如圖 6 之實心粗線所示。

為了減少來自外部 Internet 的網路攻擊流量，我們設置兩部實體 SSLVPN，藉以提供用戶進行身分驗證，並可在用戶端裝置取得 private IP 位址。

由圖 6 可知，我們的 TWAREN P4 可程式化實驗網路以國網中心新竹本部、台南分部為核心，與陽明交大、成大，還有中興均透過 TWAREN VPLS 直接進行介接。另一方面，陽明交大、成大、中興則與兩核心節點介接。

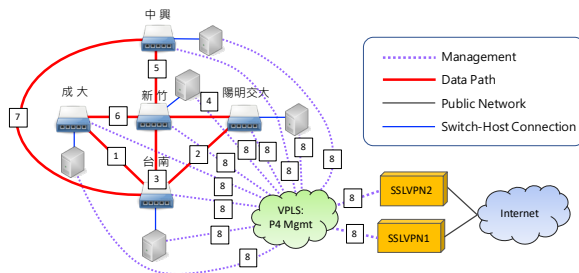


圖 6 P4 可程式化交換器實驗網路

如圖 6 所示，編號欄位代表所需要的 VPLS，起點與終點欄位則註明介接之兩端節點。介面類型有區分為 10G SR 與 1G RJ-45。編號 1~7 的部份是交換器間資料傳輸之路徑，故為 10GSR。編號 8 的部份是基於 SSLVPN 轉換 private IP 位址與 public IP 位址之用。由於 SSLVPN 部份僅供使用者登入管控使用，因此並不需要使用 10G 高頻寬的介面，故以 1G RJ-45 介面即可。

由於目前本中心所購置之硬體版 P4 可程式化交換器僅有 100G/40G 之介面，因此需要使用一分四之分光器 (Breakout) 將 40G 訊號輸出為 4*10G 線路，即可與 TWAREN 設備之 10G 介面進行介接。相關 Data Path 部份均以 10G 線路進行介接。

由於本實驗平台有採用 SSLVPN 連線認證

4. 資源預約系統

本節展示我們針對 TWAREN 可程式化交換器實驗網路之預約系統。由於 P4 可程式化實驗網路的相關主機是單工且是獨佔式平台，因此若有國內學研單位需要使用 P4 可程式化實驗網路平台時，需要透過預約系統進行獨佔式預約。預約作業流程大致區分為以下幾個步驟。

- 由使用單位提出申請：填寫申請人姓名、所屬之使用單位名稱、聯絡電話、聯絡用的 E-mail、希望使用哪些主機、預期使用時段。除此之外，使用單位亦須提出計劃書，或者簽署 TWAREN 學術網路切結書，確保申請資源用於學術用途。
- 系統寄發通知：系統寄發 E-mail，一方面是讓使用者掌握一份申請紀錄。而另一方面則是寄發通知 E-mail 給本中心系統管理者，說明目前已有新申請之使用者，等待處理。這樣，本中心管理者便能透過聯絡資訊與使用單位聯絡。

■ 由本中心小組審核：確認並安排可用時間與可用主機，為使用者準備連線測試環境。

■ 寄發通知：SSLVPN 程式（或連線用金鑰）、使用者帳號密碼、相關 IP 位址、可使用時間等等。

本節針對我們即將對外提供的 P4 可程式化網路交換實驗平台的預約系統進行規劃。在先前的研究中，我們曾經開發過初版的預約系統 [14][15]。不過，在初版的預約系統僅只有以日期為單位進行預約，且預約後僅能以手動方式開通設定。在本研究中，我們進一步地將資源預約的作業細分至 3 小時為單位。而後端的系統以自動化方式進行排程與佈建。

我們將開放給使用者實驗用的 P4 實驗網路暨預約系統的實體架構如圖 7 所示。在這張圖中，遠端使用者透過 Internet 來連上我們提供的 SSLVPN 主機，並連入 P4 Management/Out-Of-Band (Mgmt/OOB) 網段，即可連上各地的 P4 switch 與 P4 server。

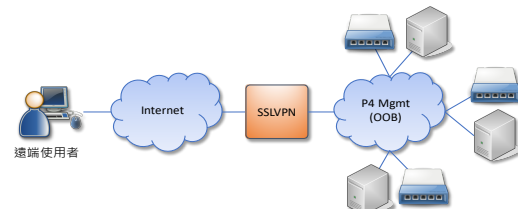


圖 7 P4 實驗網路實體架構

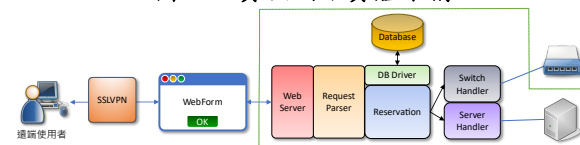


圖 8 預約平台架構

另外，比照圖 7 的實體架構，我們進一步分析我們欲開發的 P4 測試平台架構，如圖 8 所示。預約平台由 6 個元件所組成，各元件的職責如下所列：

- Web Server：負責接收使用者的需求與回應需求處理結果。這個部份即為先前章節所提及的 Apache Web Server。
- Request Parser：分析使用者端的需求類型。
- DB Driver：負責與資料庫溝通的元件。由於這邊我們將採用先前章節中所提及的 MySQL 資料庫，故為 MySQL DB Driver。
- Reservation：處理預約需求的元件，會將預約時間等資訊透過 DB Driver 存至 DB，並通知 Server Handler 與 SW Handler 處理後續設定。
- Server Handler：與 Server 溝通來執行所需設定。
- Switch Handler：與 P4 Switch 溝通來執行所需設定。

如圖 8 中的框線所示，上述 6 個元件與資料庫，都是安裝於 P4 節點的 Server 上。預約平台的需求，分為查詢需求與預約需求，查詢需求的流程為，由使用者送出查詢需求，Web Server 接獲需求並轉交至 Request Parser，Request Parser 分析需

求後，立刻呼叫 DB Driver 與 DB 聯繫，DB 回傳資料後，便沿著原路回傳給使用者。

預約需求部分，同樣由使用者提出需求，Web Server 接收後轉送 Request Parser，經由 Request Parser 確認為預約需求，就會將預約需求的資料交給 Reservation 元件，Reservation 會根據預約資訊呼叫 Server Handler 與 Switch Handler 來設定 Server 上的 VM 與 P4 Switch，當設定成功且完成後，Reservation 便會將預約資訊交由 DB Driver 儲存至 DB 之中，然後將預約結果沿路回傳回使用者。

預約系統所使用到的資料庫配置如圖9所示。在使用者洽詢本中心小組後，本中心可為使用者建立一組帳號密碼。使用者即可進入預約系統中進行預約。其預約資料有：

- 流水號：系統自動產生之編號
- 主機字串：用以記載該預約所使用的主機名。若有多部主機，則以逗號分隔。
- 起始日期
- 起始時間
- 結束日期
- 結束時間
- 預約者帳號：與使用者資料表的使用者帳號對應。

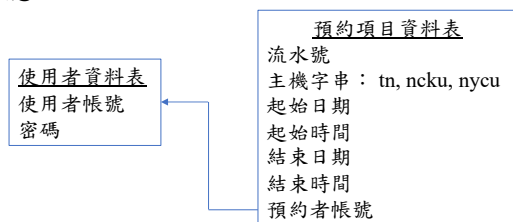


圖 9 預約系統的資料表配置

預約需求中所呼叫的 Server 與 Switch Handler 元件，是與 Server 和 P4 Switch 聯繫來執行預約需求的設定，前者是針對交換器設定，後者則與 Server 聯繫設定與建立 VM，兩個元件所執行的工作內容不相同。

Server Handler 請 Server 建立與設定 VM 的案例中，會分成兩種處理情形，第一種是由使用者提供設定好的映像檔，傳送至 Server 上，接著將映像檔匯入虛擬機器之中，完成後，便設定虛擬機器的網路等相關設定，最後啟動虛擬機器。第二種是採用事先建立的預設映像檔來建立新的虛擬機器並啟動，接著登入 VM 建立帳號提供新的使用者環境，最後將使用者提供的公鑰上傳至 VM。

另一方面，Switch Handler 的工作流程是，登入 P4 Switch 來建立使用者帳號，然後設定與新增所需工具，例如：P4 SDE，最後再上傳使用者提供的公鑰。

在開放使用者登入後，主要的考量在於預約時段如何規劃。由於在使用者使用實驗平台後，需要有1小時備份與緩衝的時間，以及2小時清理原有資料+重建新資料的時間，所以，我們將每天的時間以3小時為單位進行切割。



圖 10 每日時段配置方式

如圖10 所示，我們將每日的時間分割以3小時為單位。其中：

- 綠色的時端為可預約時段。
- 橘色的時段為 buffer 時段，讓預約者在實驗結束後，可以進行實驗資料備份。
- 粉色的預設為 delete 上一位預約者實驗環境、VM 之時間點。
- 紫色的為 create 建立下一位預約者實驗環境、VM 之時間點。

當前後兩個可預約時段，均為同一人預約時，中間buffer時段將不會進行delete與create的動作。

圖11至圖13是我們著手開發之預約系統。如圖11所示，學研單位在通過審核、接到本中心通之後，將得到一組使用者帳號與密碼，可登入本預約系統進行常態性預約。

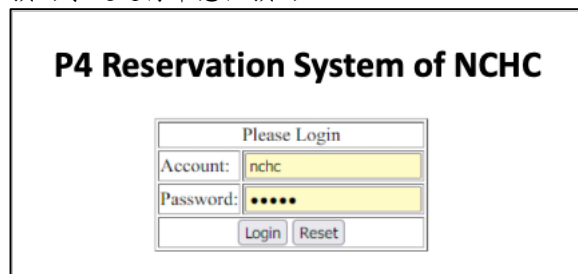


圖 11 帳號密碼驗證

圖 12 以月曆形式顯示目前使用狀況

如圖12 所示，在使用者成功登入系統後，會以月曆方式顯示日期與可用資源。使用者可以依據畫面上的指示，針對尚有資源的節點進行預約。

Reservation for 2023-09-12			
Time/Node	NCKU	NCHC-TN	NYCU
00:00-03:00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
03:00-06:00	Delete and Reset	Delete and Reset	Delete and Reset
06:00-09:00	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
09:00-12:00	Delete and Reset	Delete and Reset	Delete and Reset
12:00-15:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
15:00-18:00	Delete and Reset	Delete and Reset	Delete and Reset
18:00-21:00	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
21:00-24:00	Delete and Reset	Delete and Reset	Delete and Reset

圖 13 資源預約介面

假設使用者針對2023-09-12進行預約，畫面如圖13所示。在這張圖中，每一欄代表不同節點。使用者可以針對 NCKU、NCHC-TN、NYCU 等等資源與相對的時段進行預約。如前所述，表格底色為淺綠色者，表示可預約時段。反之，若底色為黃色者，表示為刪除舊組態設定與重新安裝組態作業環境之時段，皆為3小時。當使用者選定其預約資源後，按下 Reserve 即可將預約資料送至資料庫，待後端進行自動化排程作業。

5. 結論與未來展望

本論文說明國網中心於今年度佈建於 TWAREN 上的實體可程式化實驗網路平台與資源預約系統之前端部份。現階段我們已經在國網中心台南分部、陽明交通大學、成功大學三大節點完成佈建。透過 TWAREN 所提供的 VPLS 服務，我們將各節點的可程式化網路交換器串接起來，打造實體之網路實驗平台。我們也利用 SSLVPN 設備控管存取權限，確保有註冊之使用者能在一個獨立又不受干擾的私有網路中進行實驗。現階段本平台已經開放給數個學研單位進行試用服務，並收集使用者體驗藉以動態調整。未來，我們將開放這個可程式化網路交換器平台供學研界申請

租用，期能藉由此平台為國內學研界增進可程式化實驗網路的研究能量。

參考文獻

- [1] N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, J. Turner, "OpenFlow: enabling innovation in campus networks," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 38, no. 2, pp. 69-74, April 2008.
- [2] P4 Language Consortium, <https://p4.org/>
- [3] A. Sivaraman, C. Kim, R. Krishnamoorthy, A. t Dixit, and M. Budiu, "DC.p4: Programming the Forwarding Plane of a Data-Center Switch," Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Symposium on Software Defined Networking Research, Article No. 2, 2015.
- [4] Barefoot Networks looks to redefine ASIC in network device design with its Tofino chip, <https://www.techrepublic.com/article/barefoot-networks-looks-to-redefine-asic-in-network-device-design-with-its-tofino-chip/>
- [5] Barefoot Networks Debuts Tofino 2, Using 7nm Technology, <https://www.sdxcentral.com/articles/news/barefoot-networks-debuts-tofino-2-using-7nm-technology/2018/12/>
- [6] 英特爾收購 SDN 及晶片新創業者 Barefoot Networks, <https://www.ithome.com.tw/news/131215>
- [7] 台灣 100G 教育學術研究網路正式啟用 <http://technews.tw/2016/10/06/taiwan-100g-education-network/>
- [8] 台灣先進學術研究網路(Taiwan Advanced Research and Education Network, TWAREN), <https://www.twaren.net/>
- [9] 無線轉播無限精彩 世大運賽事試驗轉播 精彩賽事不累格 打造未來直播新境界 <https://www.cna.com.tw/postwrite/Detail/219194.aspx>
- [10] 周大源, 胡仁維, 黃文源, 劉德隆, "TWAREN SDN 虛擬專用連線管理系統," TANet2017研討會, 台中, 2017年10月
- [11] 周大源, 胡仁維, 黃文源, 劉德隆, "WebGUI 版本虛擬網路供裝系統," 2016 年雲端與大數據研討會, 2016
- [12] 周大源, 楊哲男, 古立其, 劉德隆, "TWAREN SDN 虛擬專用連線之高速傳輸應用," TANet2016研討會, 花蓮, 2016年10月
- [13] P4 Language Cheat Sheet, https://p4.org/assets/P4WS_2018/p4-cheat-sheet.pdf
- [14] 周大源, 黃文源, 胡乃元, 曾惠敏, 劉德隆, "TWAREN 可程式化實驗網路平台建置," TANet2022研討會, 桃園, 2022 年12月
- [15] Wun-Yuan Huang , Ta-Yuan Chou ,Nai-Yuan Hu, Hui-Min Tseng, and Te-Lung Liu, Design and Building of P4 Programmable Network Testbed and Reservation System on TWAREN," 2023 International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-Taiwan 2023), Pingtung, Taiwan, July 2023