

國立政治大學資訊科學系  
Department of Computer Science  
National Chengchi University

碩士論文  
Master's Thesis

在 All-IP 核心網路上的品質預算之配置及路徑規劃  
QoS Budget Allocation and Path Planning  
in All-IP Core Network

研究生：林岳生

指導教授：連耀南

# 在 All-IP 核心網路上的品質預算之配置及路徑規劃

## 摘要

現有大多數的 QoS 繞徑演算法，均假設鏈結上的參數是固定的，而依據固定鏈結參數的條件，尋求最佳的繞徑。實際上鏈結上能保證的服務品質與鏈結實際的負載有關。如果鏈結的所承諾提供的服務品質及所承諾之負載，在最大容量維持不變的條件下，可以由繞徑程式自由選擇的話，繞徑程式可能可以做更好的路徑規劃。

本研究在 BBQ(Budget-Based QoS)的架構下，期望藉由事先規劃鏈結上的參數設定，以提供較具彈性的路由規劃，提升整體網路的效能，幫助營運者靈活可擴展的管理網路，以到達營運者的營運目標。由於加入參數的調變，使得繞徑問題變的更為複雜，在本文中，我們設計了兩套不同的爬山式搜尋演算法，經反覆的模擬測試，發現本研究的方式的確能提供較佳的網路規劃。

# **QoS Budget Allocation and Path Planning in All-IP Core Network**

## **Abstract**

Most of current QoS routing algorithms assume fixed network parameters, such as guaranteed service quality and bandwidth capacity. In fact, guaranteed quality of links is load dependent. Assuming that the maximum capacity of each link is limited, if the guaranteed quality and bandwidth capacity can be chosen by a routing algorithm, then the routing algorithm may find better paths. For example, guaranteed quality could be improved by using lower capacity on the link or by using the maximum capacity with poor guarantee quality.

Our research is based on BBQ (Budget-Based QoS) management architecture. We preplan the parameters on each link before routing. This method provides flexible routing options thereby increasing the total profit. We tested two different approaches of allocating parameters on each link. After several simulations, we found that these approaches that we developed could result in better network resource utilization and increase profit for the operator.

## 內容目錄

第一章.....	1
1.1 電信與電腦網路整合的趨勢.....	1
1.2 封包網路上乘載具時效性應用之問題.....	2
1.3 網路服務品質管理方法.....	2
1.4 BBQ 架構中的繞徑問題.....	4
1.5 研究動機與目的.....	4
第二章.....	6
2.1 以預算為基礎之服務品質保證(Budget-Based QoS Management).....	6
2.1.1 BBQ 的設計理念.....	6
2.1.1.1 以預算為基礎之管理(Budget Based QoS Management).....	6
2.1.1.2 預先資源管理與即時資源分配(Pre-Planning vs. On-Demand Managements).....	6
2.1.1.3 端對端服務品質保證(End-to-End QoS Management).....	7
2.1.2 承載服務架構(Bearer Service Hierarchy).....	8
2.1.3 服務品質保證的層級架構(QoS Management Hierarchy).....	9
2.1.4 以 Class 區別的服務策略(Class Based Service Policies)..	10
2.2 核心網路的服務品質管理(QoS Management for Core Networks)...	10
2.2.1 核心網路內路徑規劃運作流程.....	11
2.2.2 路徑規劃最佳化.....	11
2.2.3 Greedy Algorithm for Path Planning(GPPA).....	11
2.2.4 演算法複雜度分析.....	11
2.3 繞徑問題相關研究.....	13
2.3.1 傳統繞徑方法.....	13
2.3.1.1 廣播式繞徑方法 (Flooding).....	13
2.3.1.2 最短路徑演算法 (Shortest Path Routing).....	13

2.3.1.3 訊務基礎路徑演算法 (Flow-based Routing) .....	13
2.3.1.4 距離向量繞徑演算法 (Distance Vector Routing) .....	14
2.3.1.5 鏈結狀態繞徑方法 (Link State Routing) .....	14
2.3.2 具服務品質保證之繞徑方法 (Multi-Constrained Path) .....	14
2.3.3 繞徑方法之評論 .....	15
第三章 .....	16
3.1 品質定義 .....	17
3.2 Capacity-Quality Pair .....	18
3.3 最佳化模型 .....	18
3.4 解決方法 .....	21
第四章 .....	22
4.1 Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Capacity-First .....	23
4.1.1 以最大容量開始規劃 .....	23
4.1.2 CQ pair Selection .....	24
4.1.3 獲利下降 .....	26
4.1.4 HPPA-CF 流程 .....	27
4.2 Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Capacity-First .....	30
4.2.1 由選擇最大 Quality 開始規劃 .....	30
4.2.2 CQ pair Selection .....	31
4.2.3 獲利下降 .....	32
4.2.4 HPPA-QF .....	32
4.3 複雜度分析 .....	35
4.4 小結 .....	35
第五章 .....	36
5.1 效能評估指標 .....	36
5.2 實驗設計 .....	37
5.2.1 實驗工具 .....	37

5.2.2 實驗測試組產生方式.....	37
5.2.3 訊務產生方式.....	37
5.3 實驗一：GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 的獲利比較.....	38
5.3.1 實驗目標.....	38
5.3.2 實驗流程.....	38
5.3.3 實驗結果分析.....	41
5.4 實驗二：預測誤差對於獲利之影響.....	51
5.4.1 實驗目標.....	51
5.4.2 實驗流程.....	51
5.4.3 實驗結果分析.....	53
第六章.....	56
參考文獻(References).....	57

## 圖目錄

圖 2.1：端對端承載服務.....	9
圖 3.1：鏈結使用率與服務品質的特性曲線.....	16
圖 3.2：鏈結使用率與 delay 保證的特性曲線.....	17
圖 3.3：網路參數之例.....	18
圖 4.1：優先選擇最大頻寬容量的規劃.....	23
圖 4.2：降低頻寬容量以提高服務規格.....	24
圖 4.3：容量逐步降低，品質規格逐步提高.....	24
圖 4.4：剩餘頻寬相同.....	25
圖 4.5：頻寬使用率相同.....	26
圖 4.6：HPPA-CF.....	29
圖 4.7：優先選擇最佳服務品質規格的規劃.....	30
圖 4.8：降低服務規格以增加頻寬容量.....	31

圖 4.9：品質規格逐步降低，容量逐步提高 .....	31
圖 4.10：HPPA-QF.....	34
圖 5.1：HPPA-CF 與 HPPA-QF 的實驗流程圖 .....	39
圖 5.2：GPPA 的實驗流程圖 .....	40
圖 5.3：不同節點鏈結率在 10 個節點數的獲利比較 .....	42
圖 5.4：不同節點鏈結率在 20 個節點數的獲利比較 .....	42
圖 5.5：不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較 .....	43
圖 5.6：不同節點鏈結率在 40 個節點數的獲利比較 .....	43
圖 5.7：不同節點鏈結率在 50 個節點數的獲利比較 .....	44
圖 5.8：不同節點鏈結率在 10 個節點數的獲利差異比較 .....	44
圖 5.9：不同節點鏈結率在 20 個節點數的獲利差異比較 .....	45
圖 5.10：不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較 .....	45
圖 5.11：不同節點鏈結率在 40 個節點數的獲利差異比較 .....	46
圖 5.12：不同節點鏈結率在 50 個節點數的獲利差異比較 .....	46
圖 5.13：使用獲利函數 $M_2$ 在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較.....	47
圖 5.14：使用獲利函數 $M_2$ 在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較.....	47
圖 5.15：使用獲利函數 $M_3$ 在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較.....	48
圖 5.16：使用獲利函數 $M_3$ 在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較.....	48
圖 5.17：在 30 個節點數的頻寬使用率分析 .....	49
圖 5.18：在 30 個節點數的頻寬使用率之標準差 .....	49
圖 5.19：在 30 個節點數的允入率比較 .....	50
圖 5.21：預測誤差對於獲利影響(20%節點鏈結率) .....	53
圖 5.22：預測誤差對於獲利影響(40%節點鏈結率) .....	54
圖 5.23：預測誤差對於獲利影響(60%節點鏈結率) .....	54
圖 5.24：預測誤差對於獲利影響(80%節點鏈結率) .....	55
圖 5.25：預測誤差對於獲利影響(100%節點鏈結率) .....	55

## 表目錄

表 2.1：BBQ 中分層分工架構 .....	10
表 3.1：鏈結使用率與 delay 保證對應 .....	17
表 3.2：路經規劃之相關符號表 .....	19
表 5.1：實驗環境參數 .....	38

# 第一章

## 簡介

在 All-IP 整合的核心網路上，語音與多媒體應用皆在同一個封包交換網路上傳送[1]，這些服務對於網路頻寬與服務品質各有不同的要求，為了在有限資源下盡力提供不同服務品質的保證，某些網路管理架構採用預先規劃方式，依照歷史訊務的資訊規劃路由，以建構能保證服務品質的路徑。在規劃路由的過程中，QoS 繞徑演算法透過鏈結上可使用的頻寬以及相對可以提供的服務品質這兩個參數，計算可允入的訊務，提供一定程度的服務保證。在多數繞徑演算法計算過程中，在多數的繞徑演算法計算過程中，鏈結可使用的頻寬以及相對可提供的服務品質這兩個參數都是固定不變的，但是鏈結實際提供的服務品質，卻是與鏈結上的實際負載有關，當負載較高時，服務品質較差，反之，當鏈結的負載較低時，服務品質則較佳。如果路徑規劃可以選擇將部分的鏈結做較輕的負載規劃，該鏈結便能提供較佳的服務品質，整體繞徑的規劃，就能提供較多不同的繞徑規劃，供網路維運者不同規劃需求之用。

### 1.1 電信與電腦網路整合的趨勢

現今的通訊環境正在進行大幅度變革，企圖將原本電路交換網路與封包交換網路，整合成為一個單一網路，用以支援固定網路與行動網路的各種網路服務應用，包含語音通訊，多媒體應用服務，資料通訊等服務[2-5]。

為了打破以往不同製造商設備無法完全互通的問題，這個整合性網路將採用全球統一開放標準，而 IP 通訊協定正因為網際網路以全球使用率最高而成為唯一的選擇。此種革命性的整合型 All-IP 網路不但可以降低建置成本、營運管理成本，更重要者，還可提供一個新的服務平台，使得跨網路的應用可望實

現。

## 1.2 封包網路上乘載具時效性應用之問題

要在未來的整合型 All-IP 網路上承載所有服務時，受限於封包交換網路的天生特性，將會面臨以下三大品質問題[6,7]：

### 封包傳送延遲時間過長 (Long Delay)

在 IP 網路中，資料是以封包的形式傳送，經過每一個 hop 時的處理時間將導致傳送時間較電路交換網路為長，且較難預測。

### 封包傳送時間抖動 (Jitter)

封包是在一個一個的 Hop 中交遞傳送，在每一個 Hop 中容易受到其他的因素影響，如過多的封包在同一時間傳送、每一個封包的傳輸路徑不同，而造成在接收端收到封包的時間間隔不定，不利於串流服務之傳輸，例如傳遞影像服務時，影像會抖動。

### 封包遺失問題 (Packet Loss)

封包在傳送過程中，易因網路阻塞的等問題，使得封包在傳送中被丟棄 (Drop)，對於需要可靠資料傳送的應用如 E-mail 和 FTP 而言，必須重新傳送所遺失之封包，導致網路負擔增加。

## 1.3 網路服務品質管理方法

針對以上在封包網路上容易發生的傳送品質問題，網路標準機構 IETF 制定了 Intserv (integrated service)[8]與 DiffServ (differentiated service)[9]兩種機制，對於異質性網路提供服務品質保證的環境。

## **Integrated Service**

IntServ 使用 RSVP(Resource Reservation Protocol)針對各個訊務建立一保留頻寬的 virtual circuit 來滿足 QoS 上的需求。這樣的架構有其相當的好處，首先，它對使用者提供了絕對的端對端品質保證，再者，每個使用者的資料流都可以輕易的監控管理，並且可以運用現有的 routing protocols。但因 overhead 過多，使得網路在擴充性(scalability)上受到極大的限制。

## **Differentiated Service**

DiffServ 則是採用與 IntServ 不同的策略來提供服務品質保證。DiffServ 是將具有相似 QoS 需求的訊務合併一起處理，對同一類型的資料提供一致性的服務與相對性的保證，而非針對各別的訊務提供保證。每一類型的資料會有其相對應的 Per-Hop Behavior 在 DiffServ domain 上傳送。這樣的方法雖然無法達到如 IntServ 般絕對的服務品質保證，但卻可以解決 IntServ 在擴充性和實作上的問題，因此 DiffServ 的架構漸漸取得其主流地位，但如何在 DiffServ 的架構上，提供各個的訊務的 End-to-End QoS 保證正是亟待解決的主要問題。

在 Yao-Nan Lien, Hung-Ching Jang, Tsu-Chieh Tsai 與 Hsing Luh 發表的論文「Budget Based QoS Management Infrastructure for All-IP Networks」[10]，提出了一套整體的管理機制，名為 Budget Based QoS Management Infrastructure，使得 All-IP 網路可以實現提供服務保證。

## **Budget-Based QoS Management(BBQ)**

該論文所提出的 BBQ 架構下，路徑的選擇與資源的配置是採取事先規劃的方式，為每一段時間內可能進入的訊務事先規劃路徑並將資源分配予 Edge Router。

事先規劃的方式雖然可以彌補即時決策機制的缺點，但也有其困難必須克服，此即預測誤差問題。在資源配置的方法上，必需設法減少預測誤差，或建

置彌補預測誤差之機制以降低資源錯置之機會，提高資源使用之效率。

## 1.4 BBQ 架構中的繞徑問題

在 BBQ 管理架構採取預先規劃的方式，核心網路需要適當的預先規劃繞徑演算法，此問題是一個 bandwidth-delay constrained routing problem，在 BBQ 為了達到繞徑問題的規劃，一篇由 Yao-Nan Lien 與 Tsung-Hsung Li 提出的論文「Path Planning in Budget-Based QoS Management for All-IP Core Networks」[11]，其提出了一個名為 GPPA (Greedy Path Planning Algorithm) 的演算法，以 request 要求的單位獲益高低作為主要的繞徑規劃策略。其提供 BBQ 管理架構短路徑的規劃。

## 1.5 研究動機與目的

GPPA 繞徑規劃演算法依據網路拓樸的參數以及歷史訊務資訊進行規劃。網路拓樸的鏈結上有固定的參數，包含該鏈結可以提供的承載的最大頻寬，以及該鏈結可以提供的服務品質，如同在大多數的繞徑演算法中，拓樸鏈結上的參數皆固定不變。

但實際上網路鏈結能提供的服務品質，與該鏈結的負載相關，當一個鏈結的負載較高時，其提供的服務品質較差，反之，其服務品質則較好，因此一個鏈結可保證的服務品質，是與鏈結上的負載有關。

因此本研究考量在各鏈結資源之容量維持不變下，事先規劃調整鏈結可提供的頻寬及相對應的服務品質。而如何規劃適當的鏈結負載，即為本論文的研究議題。

此問題被 model 為一個類似 bandwidth-delay constrained problem，這類的問題被證明為 NP Complete[12,13]。另在拓樸上的參數設定上，依據每個鏈結的能力，鏈結上有數個可以選擇的頻寬與對應能提供服務品質，如何挑選鏈結參數的設定，更增加了繞徑問題的複雜度。

本研究提出兩個綜合 Hill climbing 與 Heuristic 的演算法，並使用 GPPA 作為

bandwidth-delay routing 的路徑規劃，提供一個可行的路徑鏈結參數的調整方式，期望藉由路徑鏈結參數的調整，以提供更多的路徑規劃選擇，網路營運者則得以運用之，提供具端對端品質保證的各種網路服務。

本研究能協助網路營運者追求網路資源的有效利用，在所擁有的資源中，盡力提高服務滿足度以獲取最大利益，使得系統營運者可以允許更多的訊務進入，或提高較高服務品質的服務，以增加利潤。

本論文將在第二章介紹繞徑相關的研究，以及 BBQ 的基本架構，第三章提出最佳化模型，第四章則提出兩個演算法來解此問題，為了測試本文所提出之鏈結資源參數規劃演算法的所造成的影響，將以訊務通過網路所獲得的利益作為評估指標，將路徑規劃的方法，和 BBQ 的中未使用鏈結資源參數規劃的 GPPA，藉由實驗模擬的方式做比較，其模擬的實驗成果將展示於第五章。

## 第二章 相關研究

本研究基於 BBQ 的架構而設計，因此在此簡要介紹說明 BBQ 的相關架構，BBQ 在核心網路中使用的 Path Planning(GPPA)以及繞徑的相關研究。

### 2.1 以預算為基礎之服務品質保證(Budget-Based QoS Management)

#### 2.1.1 BBQ 的設計理念

##### 2.1.1.1 以預算為基礎之管理(Budget Based QoS Management)

為了提供端對端網路服務，網路必須提供端對端服務品質保證。在實際的通訊中，一個封包可能必須穿越數個不同營運者的網路，並非侷限於同一網路當中。BBQ 將一個封包所經過的路程，稱為一條端對端路徑（End-to-End path），端對端路徑包含了許多網路元件，例如接取網路和核心網路。

以預算為基礎之概念就是，品質管理者可以依據網路元件的能力，將使用者所要求之頻寬、服務品質以預算方式分配在這些網路元件上面，而由各網路元件各自負責提供分段的品質保證。

雖然以預算為基礎之管理架構無法達到最佳的整體資源運用效率，但是卻能大幅減低管理複雜度。所以，BBQ 架構將全面使用預算的方式，將管理權責以最佳方式分配到各個網路元件。

##### 2.1.1.2 預先資源管理與即時資源分配(Pre-Planning vs. On-Demand Managements)

資源之管理概可分為預先分配法或即時管理法。即時管理用於 QoS 中較著

名的協定為 RSVP。在即時管理的方式之下，允入控制元件(Admission Controller)對於可用資源的掌握較少，只在訊務要進入網域時才臨時去向資源配置元件提出資源配置要求並選擇路徑，以此做允入控制。這樣方式之好處是不会有資源配置過量造成浪費，且進入網域的訊務都可以得到一定的品質保證，但是當網路上的流量逐漸增大，繞徑及資源管理訊息會隨著成長，漸漸成為管理上的一大負擔，並且尋找路徑的 overhead 會對網路造成相當的影響。在尋找路徑之時，必須耗費相當的運算時間才能求得好的路徑，因此對於時間敏感度高的訊務並不適用即時的繞徑運算。綜合以上，即時管理在實際執行上易受到較多限制，不適合大型網路。相較於即時管理，預先分配可容忍較高的計算時間，故可使用較好的演算法提高效率，但受限於預測不準確而不易與現實情況結合。但如果訊務可預測，可以設計一套好的預測方式以求預先分配最佳化。

在 BBQ 架構下的核心網路及核心網路所組成的骨幹網路中，其資源分配採用事先規劃的策略進行分配，如前所述事先規劃可容許較複雜之計算程序以及耗費較多時間以達到資源分配最佳化。網域的資源現僅涵蓋附有品質保證之 link 頻寬。每個 Ingress Router 紀錄過去各時間點各種需求的統計資料，利用這些歷史資料來預測各不同時段所需頻寬，並且經過計算整理成可使用資源，接下來等到實際執行階段依照實際流量做適當分配。

網路上的流量需求並不一定非常規律，預測的頻寬需求可能與實際情況出現誤差。對於預測形成的誤差，除盡可能提高預測之準確度之外，可以採取適當方案以減少因估計誤差所導致的資源浪費。

### 2.1.1.3 端對端服務品質保證(End-to-End QoS Management)

端對端 QoS 管理最重要的工作，就是找到符合品質要求的 long-paths，BBQ 利用規劃具服務品質保證的路徑，以達到服務品質保證。BBQ 採用透過分層分權的方式，各層元件各自規劃該層級的資源成一路徑片段，提供給上層元件規劃成較長之路徑片段。Short Path 為一穿越某一個 Core Network 且提供服務品質

保證之路徑，由核心網路路徑規劃元件，PPA (Path Planning Agent)負責規劃；Long Path 為一穿越 Backbone 且可提供服務品質保證之路徑，由核心網路另一個路徑規劃元件，LPPA (Local Path Planning Agent)負責規劃。End- to-End Path 則為 end user 到 end user 且實際提供端對端服務品質保證之路徑，由接取網路元件 global ACA(Admission Control Agent)負責維護。如此，每一個核心網路負責兩個路徑規劃任務：一是負責將各自網路內鏈結(link)組成一條條附有品質保證的 short path。另一則是負責為連接到各自網路的接取網路所產生的訊務規劃 long path(規劃時需與其他核心網路協調)。

### **2.1.2 承載服務架構(Bearer Service Hierarchy)**

每當一個封包需要傳遞至目的地時，封包所行經的子網路均需要為該封包提供承載服務。一般來說，全 IP 網路需要三類基本的承載服務，分別為 Entrance Stub network，Exit Stub network，和 Backbone。一條 short path 由一個核心網路承載，一條 long path 由幾個核心網路共同承載，一條 End-to-End 則由以上這條子網路共同承載。如圖 2.1。

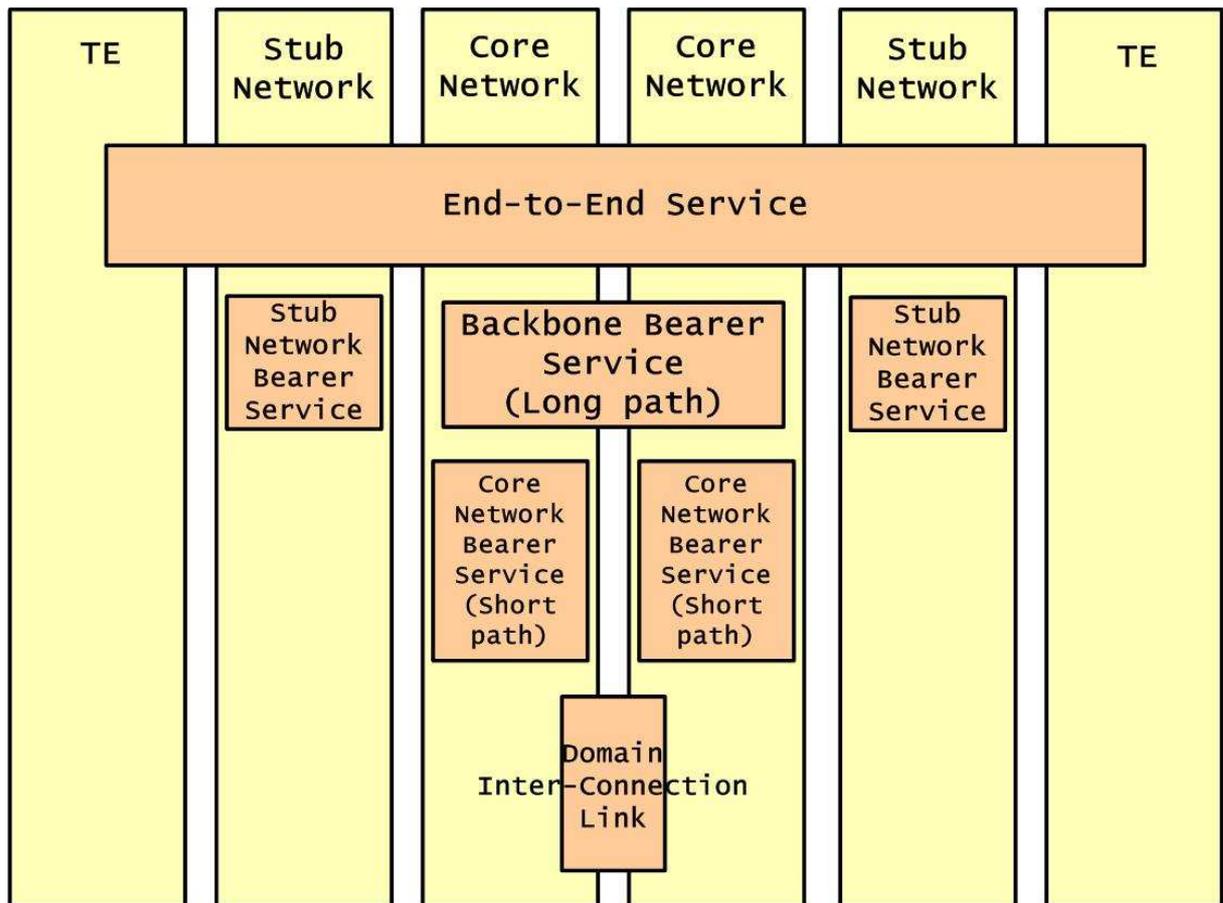


圖 2.1：端對端承載服務

### 2.1.3 服務品質保證的層級架構(QoS Management Hierarchy)

BBQ 將服務品質管理依照階層架構做分類。由上而下，端對端服務品質保證協調層（End-to-End Network QoS Coordination Layer）負責提供端對端服務品質保證，利用下層元件所提供之資源，規劃 long path 和 End-to-End Path；核心網路資源管理層（Core Network Resource Management Layer）負責核心網路之資源管理分配；核心網路資源控制層（Core Network QoS Control Layer）負責執行服務品質保證之策略以提供服務品質保證，例如允入控制等。DiffServ 或其他 IP 層網路則負責執行上層元件所規劃出來服務品質管理策略，屬於下層網路技術。BBQ 為具適用性之管理架構，可更換底層之網路技術，目前 BBQ 採用以 IETF 所制定的 DiffServ 為底層網路架構。如表 2.1.3。

表 2.1：BBQ 中分層分工架構

層級	作用
端對端服務品質保證協調層	端對端服務品質控制，包括資源和路徑規劃
核心網路資源管理 (Bandwidth Broker)	核心網路資源管理分配
核心網路資源控制 (在每個 Ingress 內)	執行核心網路服務品質策略
DiffServ	執行上層資源管理所設定策略

#### 2.1.4 以 Class 區別的服務策略(Class Based Service Policies)

對於 time-sensitive 和 connection-oriented(TSCO)的服務，像是 Conversational 和 Streaming 的 Class，BBQ 中的 admission control 會以一個快速的 call setup procedure 來處理，給予 request class 需求的路徑以及保留需求的資源，對於其他種類的服務，BBQ 不保留任何資源，其採用 best-effort 的政策提供給 time-insensitive 的服務，依據使用者要求的服務品質和願意支付的費用，對應到不同的服務等級，網路營運者可以依此決定服務等級的定價策略，來最佳化營運目標。

#### 2.2 核心網路的服務品質管理(QoS Management for Core Networks)

在核心網路中的路徑規劃，在 Yao-Nan Lien 與 Tsung-Hsung Li 提出的論文「Path Planning in Budget-Based QoS Management for All-IP Core Networks」[11] 中，設計了核心網路內元件負責即時或預先的資源規劃，request 允入的控制，路徑的路由規劃，以及實際承載封包的分級傳送，本研究的重點在於改進核心網路中的路由資源規劃，因此對該篇研究提出的路徑規劃演算法，GPPA (Greedy

Path Planning Algorithm)，簡要敘述其功能。

### 2.2.1 核心網路內路徑規劃運作流程

核心網路內的資源管理者共同參與為每一個時段的訊務需求做路徑規劃，規劃時所需資訊有二：一為過去的整個核心網路中某一參考時段的所出現的訊務流量與型態，此一資訊包含每一個 flow 的資訊，其中包含四個項目，起點、終點、要求的頻寬和要求的服務品質共四個參數(s, d, b, q)。第二個資訊是整個網域之中的拓樸結構和組成網域中每個鏈結上的資源資訊，包括其上可以使用的頻寬，以及所能保證的服務品質。GPPA 使用以上兩項參數做路徑規劃，為每一個未來的時段中可能出現的訊務規劃出一組路徑(Planned Path Set)。

### 2.2.2 路徑規劃最佳化

網路營運者對於資源之使用訂下價格，一般而言，價格與資源使用量及其品質成正比。路徑規劃最佳化目標，就是要盡量提高總獲利。

### 2.2.3 Greedy Algorithm for Path Planning(GPPA)

對於上述的問題，路徑規劃的主要目的是找出一組最符合利益的路徑，而且組成此路徑組中的每一條路徑皆需要符合頻寬和品質兩項限制式。在繞徑研究中，在一個網路拓樸中，找出一組符合一個以上限制式的問題，被稱為是 Multi-Constraints Path(MCP)的問題，而此為一個 NP-Complete 的問題。而對於 NP-Complete 的問題無法找到快速的最佳解，該研究提出一個 Heuristic 的演算法來解這個問題。此種方法是 greedy method，GPPA 演算法的細節可在[11]中獲得。

### 2.2.4 演算法複雜度分析

時間複雜度是指一個演算法執行所需要消耗的時間資源。對一組需有 M 個

預測訊務的輸入和  $N$  個節點之拓撲的路徑規劃而言，其時間的複雜度為  $O(M * N^2 \log N)$ 。而在處理每一個訊務的過程中，以 shortest path 演算法所找出的路徑不一定可以符合訊務的需求，因此在每一個尋找的過程之中，可能需要執行超過一次以上的 shortest path 演算法，假設一次的處理訊務過程最多需要額外執行  $s$  次的 shortest path，則時間複雜在最差的情形下，將會被限制在  $(M+s) * N^2 \log N$  之下。

## 2.3 繞徑問題相關研究

處理關於封包傳送的問題，稱之為繞徑方法，主要分為下列幾種：

### 2.3.1 傳統繞徑方法

#### 2.3.1.1 廣播式繞徑方法 (Flooding)

Flooding[14]是一種簡單的繞徑方式，即是將從接收端所收的封包，在每一個外送端傳送出去，此種方法會複製大量的重複的封包在網路上傳送，事實上若沒有一個明確的終止命令，此複製的過程會一直持續下去。此種在一般的應用上說來並不實用，但是在某些特定的應用上卻有其價值，如在某些軍事應用上，大量路由器可能因為任何原因隨時故障停擺，因此 flooding 將可以產生強固的可靠性。

#### 2.3.1.2 最短路徑演算法 (Shortest Path Routing)

最短路徑演算法[15,16]是以建立最短路徑樹來達成繞徑的一種方法，著名的 Dijkstra [17]演算法就是一個最短路徑演算法的例子，此演算法可以  $O(n \log n)$  的時間內找出某一個節點至網路拓樸中其他節點的路徑。因為此演算法在計算時具有網路拓樸中所有的資訊，因此是一種集中式演算法，也由於此種集中式的特性，此演算法擁有無迴圈的特性(loop-free)。

#### 2.3.1.3 訊務基礎路徑演算法 (Flow-based Routing)

Flow-based routing[10]與其他種類的繞徑演算法不同之處在於，Flow-based routing 同時考慮網路的拓樸和其上負載，其基本的假設如下，若一鏈結的傳輸能力和平均的流量已知的話，就可以根據以上資訊利用 Queueing 的理論來得知封包通過此鏈結所需的平均傳送延遲時間，依此可以很容易的計算出通過整個網路所需的時間，那麼就可以簡化繞徑的問題成為找出整個網路上最小傳送延遲。

#### 2.3.1.4 距離向量繞徑演算法 (Distance Vector Routing)

距離向量的繞徑演算法[18]利用某一些方法來估算從來源端到目的端的距離，一般稱距離向量方法為 Bell-Ford[19]的演算法，因為此方式是基於最短路徑計算方法，從早期 ARPANET 至今日的 Internet，距離向量的繞徑演算法就廣泛的被採用，如 hop count 就是一種常用的距離計算方式，RIP[20]繞徑方法就屬於此類，距離向量的演算法會定期的其鄰近的節點傳送資訊，每一個節點可以從其所經過的節點來計算至其節點的距離。若網路形狀固定，則可以得到一個收斂的結果，而繞徑的更新資訊只會傳送給鄰近的節點，此資訊並不會造成太大的網路負擔，距離向量的繞徑方法弱點在於其運算的收斂時間，其收斂的時間會被定期的繞徑更新資訊傳遞時間所影響，所以 RIP 的演算法限制所經過的節點最長不能超過 16 個，雖然如此，由於 RIP 的設定容易、管理成本低且易於實作的特性，使其在小型的網路還是廣泛的被運用。

#### 2.3.1.5 鏈結狀態繞徑方法 (Link State Routing)

Link State 繞徑方法與距離向量的不同在於其注重的是鏈結上的資訊，Link State 的方法將 Link 上的狀態透過一些數學的轉換，然後根據此資訊來選擇適當的路徑 Open Shortest Path First(OSPF) [21]就是一種被大量使用的 Link State 繞徑方法。

#### 2.3.2 具服務品質保證之繞徑方法 (Multi-Constrained Path)

在具有 QoS 保證的繞徑方法研究中，已經有學者提出不同的方法，但其中基本的構想都是在現有的繞徑協定中，如 Distant Vector 和 Link State，做適當的修改來符合 QoS 的要求，近年來有些研究將主題專注於此一方面，稱為 multi-constrained path(MCP)的問題，而 MCP 的問題的目標，主要在找出符合數個 Constraints 的路徑，如 Gang Feng, Kia Makki 等在「An Efficient Approximate Algorithm for Delay-Cost-Constrained QoS Routing」[22]中所提出的方法為，將 Delay 和 Cost 結合成為一個單一項，然後再以此 Vector 作為 Dijkstra's Algorithm

的參數來計算路徑，其所得到的路徑將會 Cost 和 Delay bound 的需求[23,24]。

### 2.3.3 繞徑方法之評論

繞徑的方法是達成服務品質的重要關鍵，可是在傳統的繞徑方法中，通常能對訊務以 Best Effort 的方式來送達，並無考慮其傳送服務品質的問題。而近年來對於提升服務品質保證的繞徑方法已經越來越受重視，許多相關的研究發別被提出，學者通常稱此類的問題為 Multi-Constrained Path Problem，許多學者也認為此為一個 NP-Complete 的問題，因此對於此也相繼提出不同的 Heuristic 的演算法來解決。

Yao-Nan Lien, Yu-Sheng Huang 在「Delay Sensitive Routing for High Speed Packet-Switching Networks」[10]提出了以 flow-based 為基礎的 QoS 繞徑算法演算法，該論文考慮鏈結拓樸上的服務品質，是受到網路節點負載影響，該研究該這個問題 model 成一個 flow-based 的繞境問題，並提出一個考慮節點負載的繞徑演算法，每個單一的 flow 對於拓樸的影響，目標是找到整體網路 delay 最小的繞徑規劃。在該論文的研究中，考量網路負載輕重對於網路能提供服務品質的影響，但是以 flow-base 的方式能將所有 flow 的影響列入考量，是比較不容易實現的繞徑規劃方式。

### 第三章

## 核心網路的品質預算之配置及路徑規劃

在不同鏈結頻寬使用率下，鏈結能提供的服務品質是不同的，如圖 3.1，這是一張鏈結頻寬使用率與服務品質的特性曲線，不同的鏈結，其特性曲線不同，實務上不容易將每個不同頻寬使用率所能提供服務品質列入計算，我們採用離散式(Discrete)方式表示鏈結之品質規格。

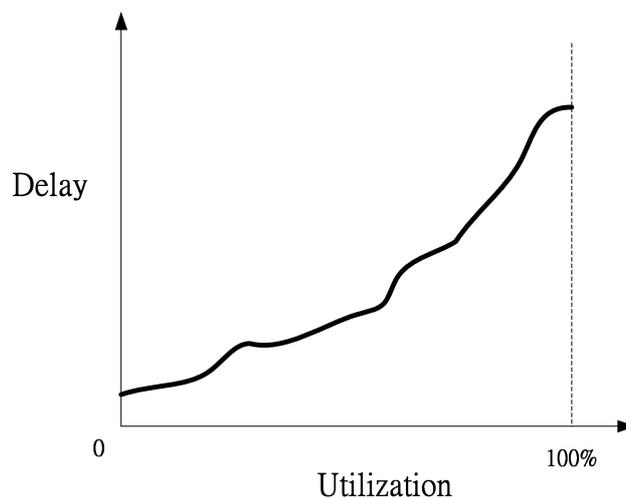


圖 3.1：鏈結使用率與服務品質的特性曲線

以圖 3.2 為例，網路營運者可針對每一鏈結，根據其特性曲線，取得適當數量的品質規格，假設品質之定義為 delay time，如表 3.1，我們則可以利用簡化的鏈結使用率與能提供 delay 保證的關係，作為繞徑規劃的依據。

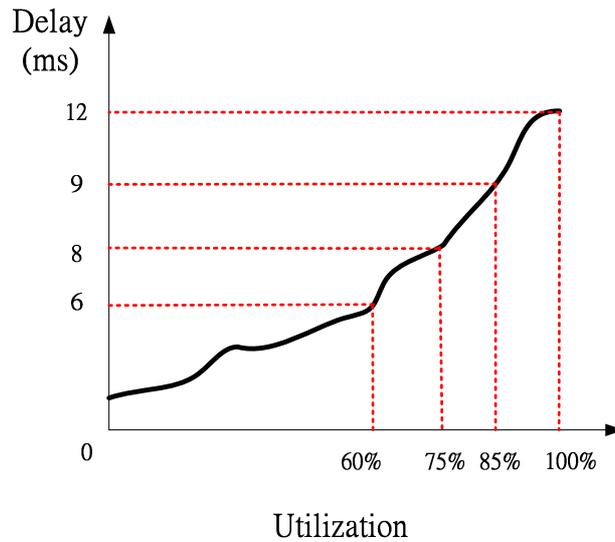


圖 3.2：鏈結使用率與 delay 保證的特性曲線

表 3.1：鏈結使用率與 delay 保證對應

Capacity Utilization	Traffic	Delay Bound
100%	100Mbps	12ms
85%	85 Mbps	9 ms
75%	75 Mbps	8 ms
60%	60 Mbps	6 ms

### 3.1 品質定義

本研究的最佳化模型只能考慮單值的品質參數，網路規劃者自行依照需求設計品質參數，例如服務品質為 delay 的倒數，或將 delay, jitter 與 packet loss 整合成一個單值參數( $a \cdot \text{delay} + b \cdot \text{jitter} + c \cdot \text{loss}$ )。

### 3.2 Capacity-Quality Pair

假設在一個給定網路中，每個鏈結上可能有多組可供選擇的參數，capacity-quality pair (CQ pair)參數，選擇較大的頻寬容量則可以獲提較差的服務品質保證，反之則得到較佳的服務品質保證，如圖 3.3。

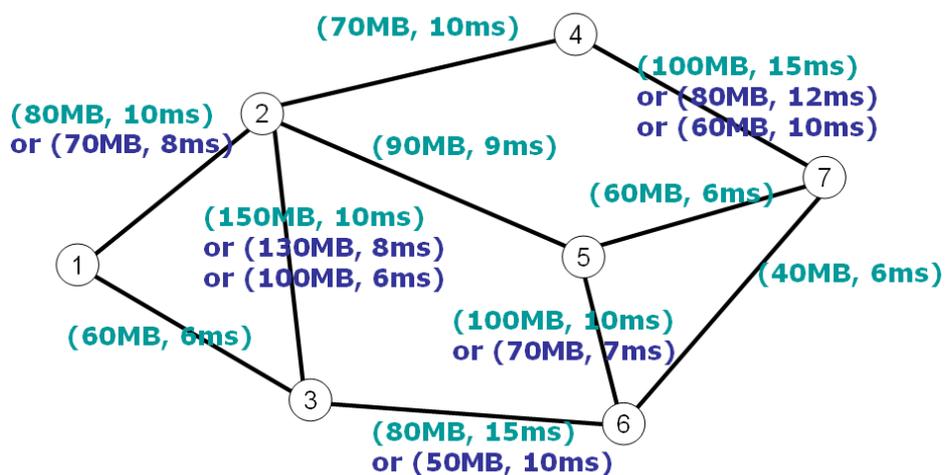


圖 3.3：網路參數之例

### 3.3 最佳化模型

表 3.2 為路徑規劃相關之符號說明。

表 3.2：路經規劃之相關符號表

Symbol	Definition
$G(V,E)$	a directed graph, $G$ , containing $ V $ nodes and $ E $ directed links; $V$ denotes the set of nodes, and $E$ denotes the set of links
$e$	a link; $e \in E$
$R$	set of incoming traffic request set
$r_i$	incoming traffic request $i$ , $r_i \in R$ , with parameters $s_i$ , $d_i$ , $b_i$ and $q_i$
$s_i$	source node of request $r_i$
$d_i$	destination node of request $r_i$
$b_i$	demanded bandwidth of request $r_i$
$q_i$	demanded quality of request $r_i$
$b_{uv}^k$	the $k$ -th bandwidth capacity of link $e_{uv}$
$q_{uv}^k$	the $k$ -th quality level offered by link $e_{uv}$
$m_i$	profit earned by admitting request $r_i$
$\Omega$	set of paths selected by the routing algorithm
$p_i$	selected path for request $i$ by the routing algorithm

問題描述如下：

如圖 3.4，給定一組網路拓樸  $G(V,E)$ ， $G$  為 direct graph，包含  $|V|$  個 node 和  $|E|$  個 directed link， $V$  是 node 的集合， $E$  是 link 的集合。在任一個 link  $e_{uv}$ ，有  $k$  組參數，每組參數有兩個屬性，一為此 link  $e_{uv}$  能提供的最大頻寬容量  $b_{uv}^k$ ，另一為此 link 在此頻寬容量  $b_{uv}^k$  所能提供的服務品質規格  $q_{uv}^k$ ， $q_{uv}^k$  具可加性(例如 delay)。輸入為 request set  $R$ ， $r_i$  代表第  $i$  個 request，其包含起點( $s_i$ )，終點( $d_i$ )，所需頻寬( $b_i$ )，和所需之服務品質規格( $q_i$ )四個參數。允許某一個 request  $r_i$  進入核心網路後所獲得的利益是  $m_i$ ，獲利是由獲利函數  $P()$  決定， $m_i = P(b_i, q_i)$ 。

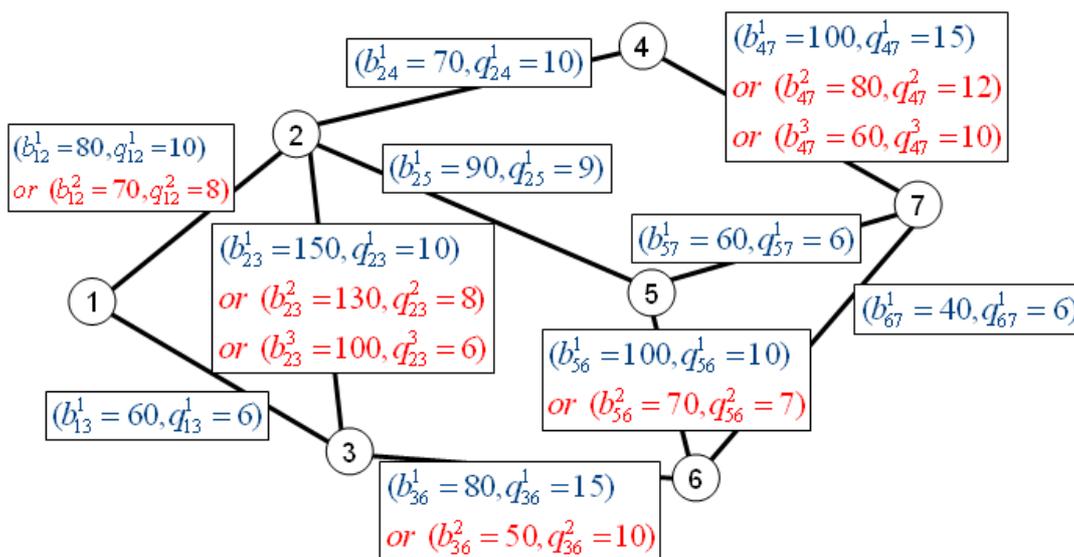


圖 3.4：網路參數之例

獲利函數  $P()$  由網路營運者定義，通常與品質高低及頻寬大小成正比。在此目標函數下，儘可能找出滿足 request set  $R$  所要求品質的路徑組  $\Omega$ ，使得目標函數的獲利最大。

Find  $\Omega$  for all request,  $r_i \in R$ , to maximize  $M$

$$M = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} m_i = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} P(b_i, q_i)$$

such that

$$\sum_{e \in p_i} q_e(p_i) \leq q_i, \text{ for all } p_i \in \Omega,$$

$$\sum_{p_i \in \Omega, e \in p_i} b_e(p_i) \leq b(e), \text{ for all } e \in E$$

此一最佳化函式的兩個限制不等式的意義如下：

1. 對於被滿足的 request  $r_i$ ，其選定的路徑組合  $p_i$ ，其路徑之品質限制必須要小於  $q_i$  (如品質限制為 delay time)。
2. 每一鏈結上所經過路徑之頻寬總合不能大於該鏈結所提供的頻寬。

### 3.4 解決方法

本問題可簡化為 GPPA 的問題，而 GPPA 已被證明為 NP-Complete [11,12, 13]，因此本問題亦為 NP-complete 問題，我們無法保證在有限的時間內，找到最佳解，故只能求此問題的次佳解。

其一可用一般的搜尋方式，例如使用 Genetic Algorithm，Tabu Search，Hill-Climbing, branch-and-bound 等。此法極為耗費時間，其二可用 heuristic search，較省時間，但是不易找到優良的 heuristic。

## 第四章

### 路徑規劃演算法

本問題已經被證明為 NP-complete，所以在有限時間內，可能只能找到次佳解，目前並沒有找到適合的 heuristic 來解此問題，因此嘗試使用搜尋的方式。在諸多搜尋法中，由於研究時間的因素，我們選擇使用爬山搜尋法(Hill-Climbing search)來解此問題，爬山搜尋法可能會造成搜尋過程陷進區域最佳解。

本研究的設計使用爬山搜尋法，演算法分為三個步驟，第一個步驟為鏈結參數的初始化設定，我們在所有鏈結皆優先選擇頻寬容量最大(小)的 CQ pair，使得頻寬容量最大(小)。第二個步驟是評估鏈結參數的選擇是否恰當，依據所選定的拓樸參數和歷史訊務資訊，使用 GPPA 做預先的路徑規劃。在第三個步驟中依據 GPPA 路徑規劃的結果，每次選擇一個鏈結，由起初選擇頻寬容量最大(小)的 CQ pair，逐步選擇頻寬容量較小(大)的 CQ pair，使得頻寬容量逐漸減少(增加)，但是可保證的服務品質則逐漸變佳(差)，然後再回到第二個步驟將選定的拓樸做路徑規劃，以如此的方式重複推演計算。推演的過程中，選擇某鏈結的 CQ pair，造成獲利下降，該選擇可能是較差的選擇，但是該 CQ pair 卻也可能是跳出區域最佳解的機會，由於現在並沒有找到較好的 backtracking 機制，因此我們的演算法在遇到這樣的狀況時，選擇避免繼續調整造成獲利下降的鏈結來減少頻寬增加服務品質。

本研究提出兩個以爬山搜尋法為基礎的演算法，稱為 HPPA-CF (Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Capacity-First)演算法與 HPPA-QF (Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Quality-First)演算法，在每個鏈結上可供選擇的 CQ pair 中，HPPA-CF 優先選擇頻寬容量最大的 CQ pair，使得頻寬容量最大，但是相對應得到可保證的服務品質則較差，然後逐次漸進的選擇頻寬次大

的 CQ pair。HPPA-QF 則相反，優先選擇服務品質最佳的 CQ pair，使得服務品質最佳，但是相對應可提供服務的頻寬則最少，然後逐次漸進的選擇服務品質最佳的 CQ pair。

HPPA-CF 與 HPPA-QF 分別詳細敘述如下。

## 4.1 Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Capacity-First

### 4.1.1 以最大容量開始規劃

在演算法第一次建構網路選擇 CQ pair 時，所有的鏈結都選擇最大頻寬容量與最差服務品質規格的設定，經過第一次 Path Planning(GPPA)的計算後，可以得到各個鏈結中的頻寬使用率，供後續的計算使用。

以圖 4.1 為例，該鏈結的最大頻寬容量為 100MB，提供的 delay 保證為 10ms，該鏈結實際使用的頻寬低於 100MB，而有閒置頻寬，若有 request class x 要求小於 8ms 的 delay 需求，則因為本段鏈結之 delay 無法達到要求，無法規劃此需求使用該鏈結，導致系統必須拒絕此要求。

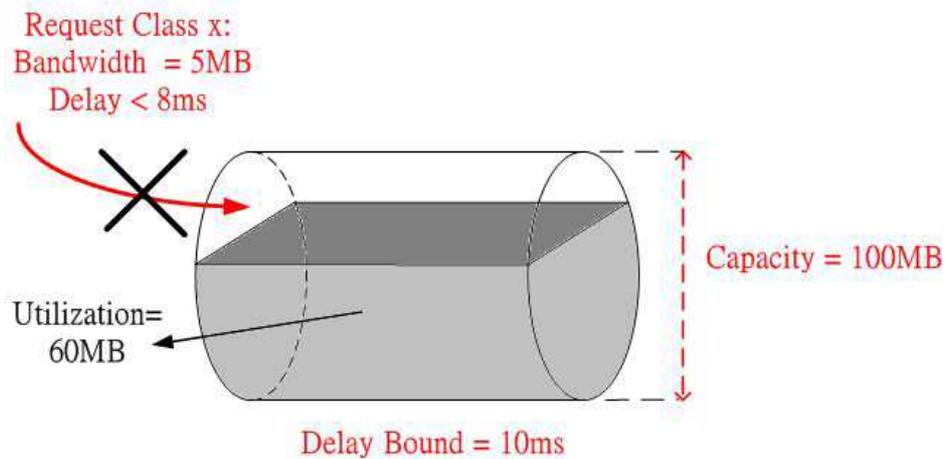


圖 4.1：優先選擇最大頻寬容量的規劃

由於有閒置的頻寬，演算法可以選擇調整此鏈結的 CQ pair，降低此鏈結規劃的最大使用率，提升其的服務品質，如圖 4.2，則此鏈結的剩餘容量與品質規格可以滿足 request class 的需求，便可以規劃允入 request class x 使用此鏈結。

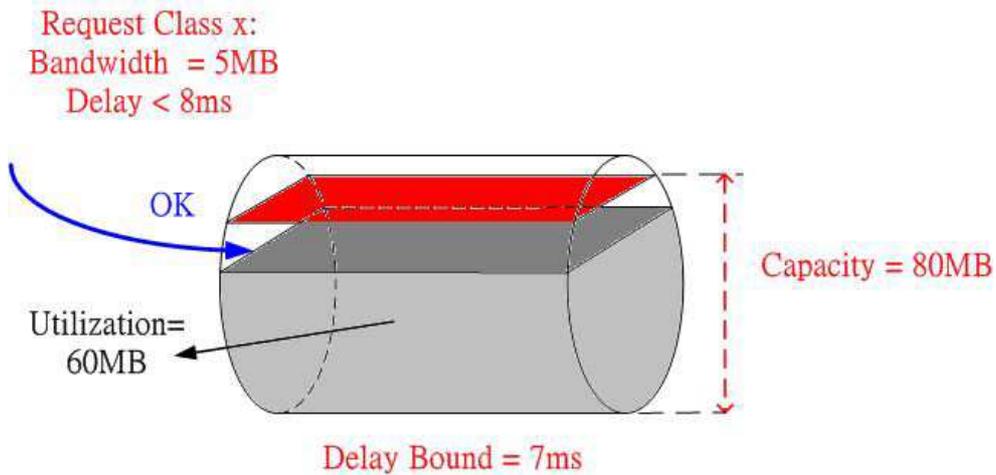


圖 4.2：降低頻寬容量以提高服務規格

第一次的規劃中，所有鏈結都先選擇最大的頻寬容量，然後逐步選擇頻寬容量較小的 CQ pair，使得品質規格逐步提高，如此所獲得的解將會使得獲利逐漸提高，如圖 4.3。

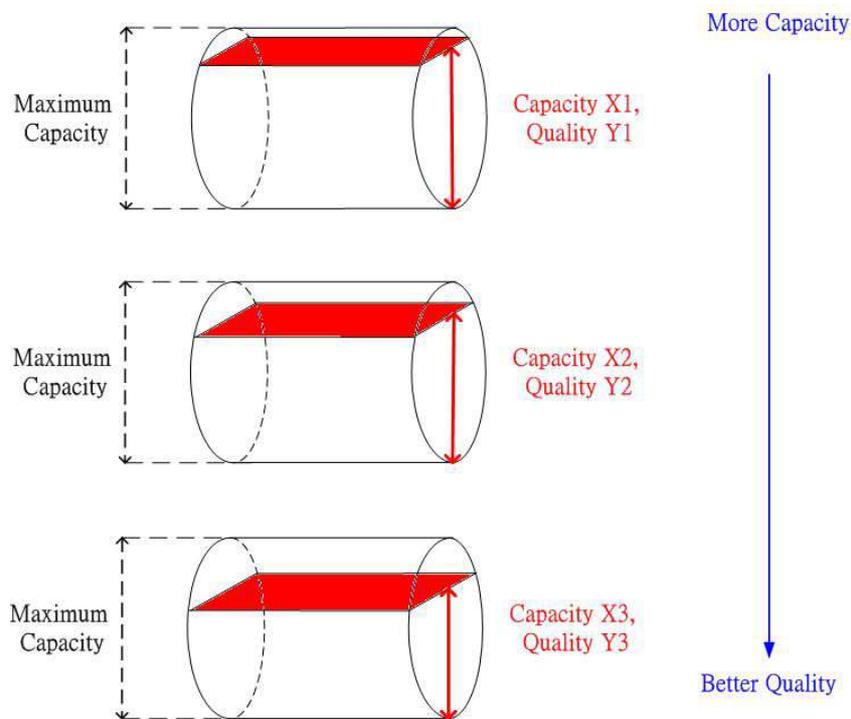


圖 4.3：容量逐步降低，品質規格逐步提高

#### 4.1.2 CQ pair Selection

HPPA-CF 由選擇頻寬容量最大逐步到小的方式，逐步增加鏈結上的服務品

質規格，在第一次 Path Planning(GPPA)計算之後，有許多鏈結之頻寬使用率未達 100%，如何選擇有剩餘頻寬的鏈結來調整 CQ pair，作為下一個計算回來的輸入參數，是一個關鍵問題。

本演算法優先選擇相對負載較低的鏈結，調整其 CQ pair 降低其使用頻寬，以增加服務品質。我們不以剩餘頻寬之絕對值作為選擇之標準，因為剩餘頻寬最多的鏈結，並不一定是負載較低的鏈結，如圖 4.4，兩個鏈結剩餘頻寬相同，但是頻寬的使用率不同，在這個情況，我們傾向選擇頻寬剩餘使用率較低的鏈結。我們也不單以頻寬使用率作為選擇之標準。假如優先選擇使用率低的鏈結，頻寬使用率低可以代表該鏈結負載比較低，但是無法得知該鏈結可以犧牲多少頻寬來增加服務品質，如圖 4.5，頻寬使用率相同的情況下，剩餘的頻寬較多的鏈結是相對負載較低的鏈結。

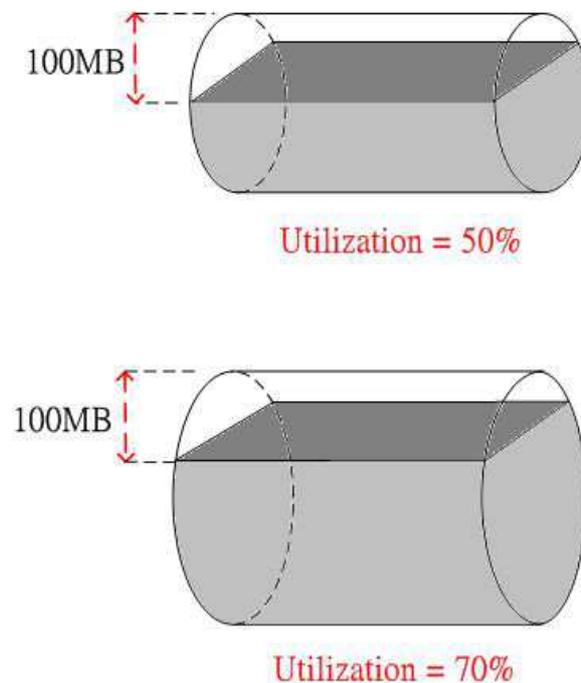


圖 4.4：剩餘頻寬相同

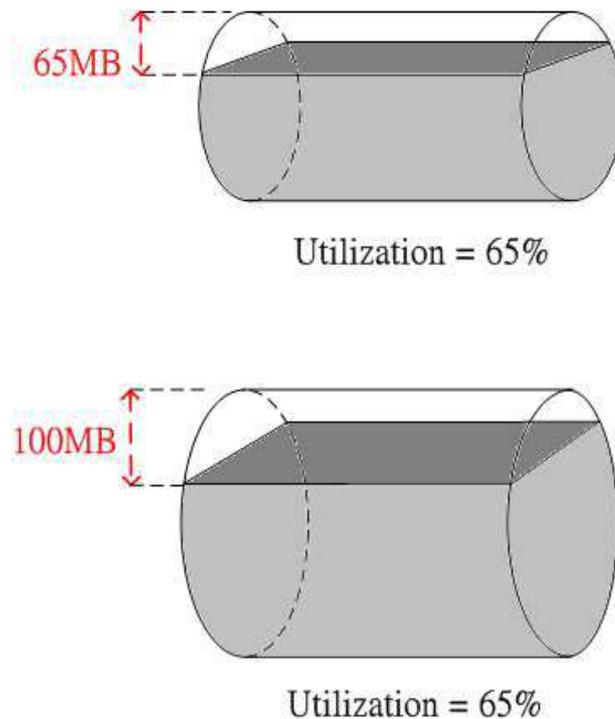


圖 4.5：頻寬使用率相同

綜合考量剩餘頻寬與頻寬使用率，希望能選擇剩餘頻寬多的鏈結，同時將頻寬使用率納入考量，因此我們使用一個綜合的指標  $P$  (Priority)，作為鏈結選取的優先順序參考，假設  $P$  為剩餘頻寬除以頻寬使用率，如下所示：

$$P = \frac{\text{Surplus Bandwidth}}{\text{Utilization}}$$

本演算法使用此綜合指標作為選取優先順序的依據。決定鏈結選擇的優先順序後，其次要考量的，是每次需要調整幾個鏈結的參數設定，每次改變一個拓樸參數設定，即需要將改變的拓樸藉由 Path Planning (GPPA) 來計算。假若一次選擇兩個或多個權重最高的鏈結，同時調整，似乎可以加快演算法的速度，但是在加快的過程，因為同時變動多個因素，不容易掌握控制造成獲利變化的變因，因此在未研究出較佳的控制機制前，目前採用的方式一次選擇調整一個鏈結的參數設定，以便確實掌控獲利變化的變因。

#### 4.1.3 獲利下降

隨著拓樸參數的不斷調整，藉由 Path Planning(GPPA)計算出來的路徑與獲

利，來判斷該拓樸的優劣，當獲利逐漸上升，代表找到的拓樸參數設定較之前的設定佳，但是當獲利逐漸下降，可能代表造成獲利下降的鏈結參數調整是錯誤的。在大多數情況下，規劃一個鏈結使用較低的頻寬以提供較佳的服務品質保證，但是假如該鏈結是路由必經之路，有較多的頻寬需求大且服務品質需求低的 request 需要經過該鏈結，則調整該鏈結減少頻寬規劃以提升服務，可能導致更差的獲利與路徑規劃。但是調整規劃所造成暫時的獲利下降，並不一定代表該鏈結為路由的瓶頸，有可能在該鏈結規劃使用最小的頻寬以提供最佳的服務品質時，此時因為可以滿足較高品質服務需求的要求，因此整體的獲利又大幅提升。

以搜尋演算法的角度來看，獲利逐漸降低的方向，可能可以找到跳出區域最佳解的情況，但是就大多數的情況，則是造成獲利繼續下降的方向。因此應該需要適當的 backtracking 機制，做適度的控制，由於目前並沒有研究出較佳的控制機制，所以本演算法當獲利一旦下降，則標記造成該獲利下降的 CQ pair，選擇獲利下降前一次拓樸選擇的 CQ pair 設定。

#### 4.1.4 HPPA-CF 流程

對於上述問題，其所需要的輸入：

一組網路拓樸  $G(V,E)$ ， $G$  為 direct graph，包含  $|V|$  個 node 和  $|E|$  個 directed link， $V$  是 node 的集合， $E$  是 link 的集合。在任一個 link  $e_{uv}$ ，有  $k$  組參數，每組參數有兩個屬性，一為此 link  $e_{uv}$  能提供的最大頻寬容量  $b_{uv}^k$ ，另一為此 link 在此頻寬容量  $b_{uv}^k$  所能提供的服務品質規格  $q_{uv}^k$ 。輸入為 request set  $R$ ， $r_i$  為第  $i$  個 request，其包含起點  $s_i$ ，終點  $d_i$ ，所需要頻寬  $b_i$ ，和服務品質參數  $q_i$  四個參數。

所產生的輸出：

符合最大利益的路徑組  $\Omega$ ，與拓樸設定參數。

以下為 HPPA-CF 的步驟，如圖 4.6：

##### 1.Capacity First

一個拓樸的鏈結上有多組可供選擇的 CQ pair，在每個鏈結上優先選擇頻寬容量最大，服務品質規格最差的 pair。

## **2.Path Planning (GPPA)**

(1)基於選定的網路參數，進行路徑規劃，所獲結果如滿足所有 request 需求，則結束。

(2)否則，則檢查是否有任一鏈結有剩餘的頻寬，並且有可供選擇的 CQ pair，假如沒有，則結束。

## **3.CQ pair Selection**

假如有，優先選擇 P 最大的鏈結，選擇該鏈結次大頻寬容量的 CQ pair，確定拓樸的參數設定後，回到步驟 2。

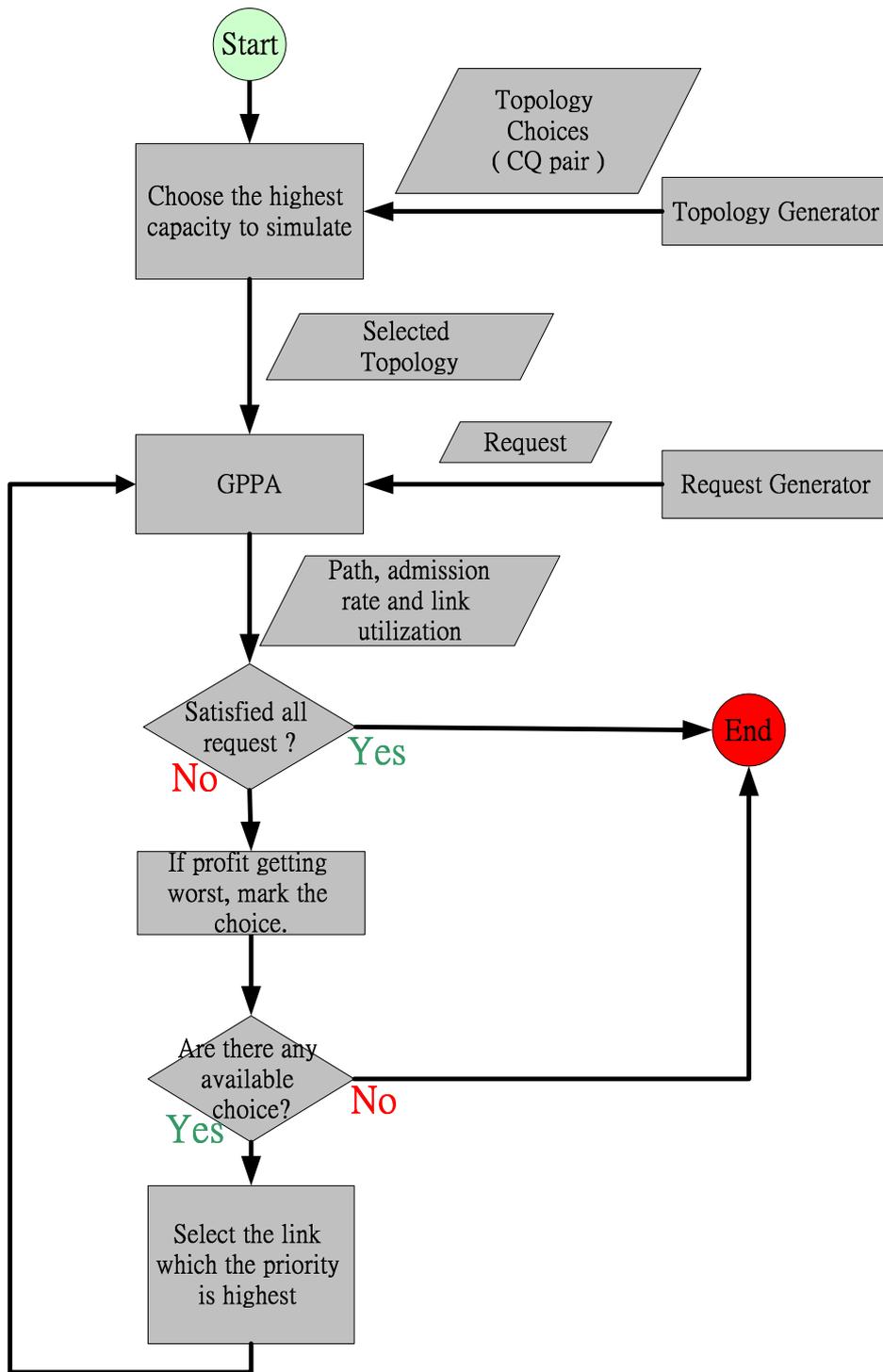


圖 4.6 : HPPA-CF

## 4.2 Hill-Climbing Path Planning Algorithm - Capacity-First

### 4.2.1 由選擇最大 Quality 開始規劃

相對於 HPPA-CF，HPPA-QF 則是在第一次鏈結上 CQ pair 的選擇，所有的鏈結都選擇最佳的服務品質規劃最佳與最小頻寬容量的設定，經過第一次 Path Planning(GPPA)計算後，可以得到各個鏈結中的頻寬使用率，供後續的規劃參考。

以圖 4.7 為例，該鏈結的所規劃的頻寬容量為 100MB，提供的 Delay 保證為 10ms，該鏈結的頻寬使用率近乎為 100%，若有 request class x 需要 10MB 的頻寬且要求小於 14ms 的 delay，則因為頻寬容量已經耗盡，無法規劃此需求使用該路徑，導致系統必須拒絕此要求。

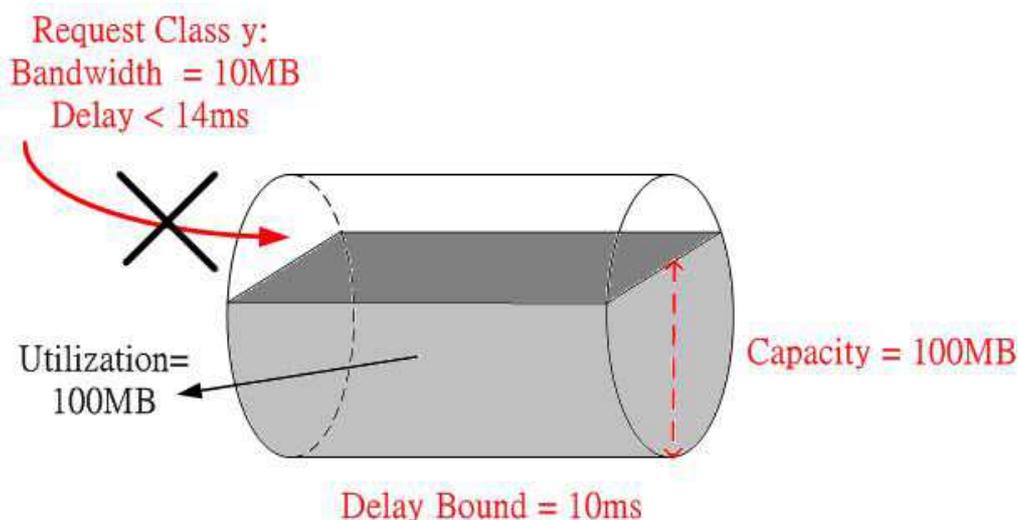


圖 4.7：優先選擇最佳服務品質規格的規劃

因此主動調整該鏈結的 CQ pair 的選擇，選擇服務品質規格次佳的 CQ pair，相對的缺點就是此鏈結的服務品質規格會降低，但是可以提供較大的頻寬容量。如圖 4.8，則此鏈結的頻寬容量與服務品質規格滿足 request class 的需求，便可以規劃允入 request class x 使用此路徑。

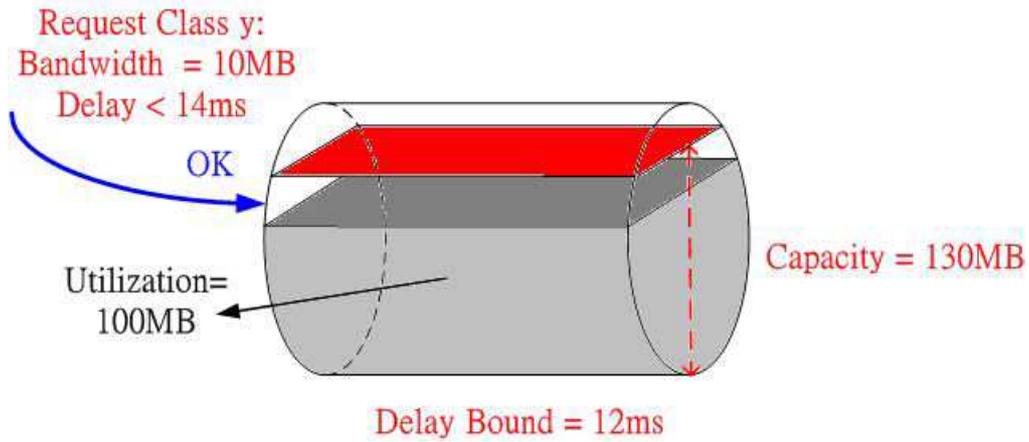


圖 4.8：降低服務規格以增加頻寬容量

第一次的規劃，先選擇最佳的服務品質規格，然後逐步選擇服務品質規格次佳的 CQ pair，使得頻寬容量逐步提高，如圖 4.9。

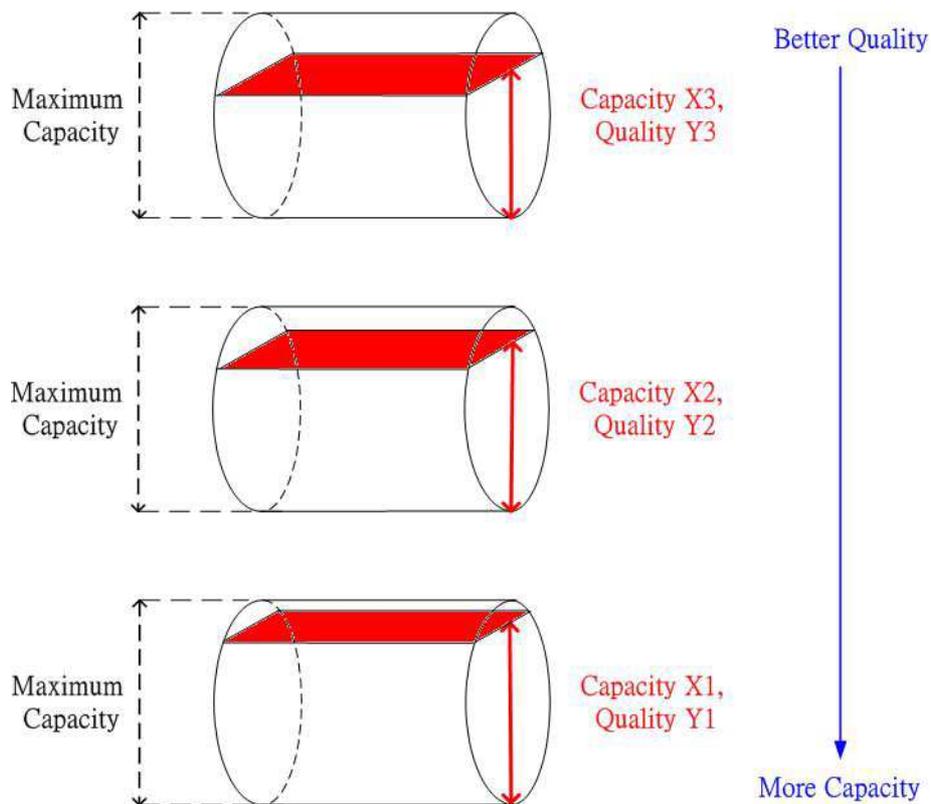


圖 4.9：品質規格逐步降低，容量逐步提高

#### 4.2.2 CQ pair Selection

與 Capacity-First 演算法相反，在 HPPA-QF 中，則是優先選擇權重最低

的鏈結，使用如同 4.1.2 節的公式，優先選擇 P 最小的鏈結，同時也是一次調整一個鏈結參數設定。

### 4.2.3 獲利下降

HPPA-QF 採取與 HPPA-CF 相同的策略，當獲利下降時，則標記造成該獲利下降的 CQ pair，選擇獲利下降前一次拓樸選擇的 CQ pair 設定。

### 4.2.4 HPPA-QF

對於上述問題，其所需要的輸入：

一組網路拓樸  $G(V,E)$ ，G 為 direct graph，包含  $|V|$  個 node 和  $|E|$  個 directed link，V 是 node 的集合，E 是 link 的集合。在任一個 link  $e_{uv}$ ，有 k 組參數，每組參數有兩個屬性，一為此 link  $e_{uv}$  能提供的最大 bandwidth 頻寬容量  $b_{uv}^k$ ，另一為此 link 在此頻寬容量  $b_{uv}^k$  所能提供的服務品質規格  $q_{uv}^k$ 。輸入為 request set R， $r_i$  為第 i 個 request，其包含起點  $s_i$ ，終點  $d_i$ ，所需要頻寬  $b_i$ ，和服務品質參數  $q_i$  四個參數。

所產生的輸出：

符合最大利益的路徑組  $\Omega$ ，與拓樸參數設定。

以下為 HPPA-QF 的步驟，如圖 4.10：

#### 1.Capacity First

一個拓樸的鏈結上有多組可供選擇的 CQ pair，在每個鏈結上優先選擇頻寬容量最大，服務品質規格最差的 pair。

#### 2.Path Planning (GPPA)

(1)基於選定的網路參數，進行路徑規劃，所獲結果如滿足所有 request 需求，則結束。

(2)否則，則檢查是否有任一鏈結有剩餘的頻寬，並且有可供選擇的 CQ pair，

假如沒有，則結束。

(3)假如 CQ pair 選擇的結果造成獲利下降，將造成獲利下降的 CQ pair 標記。

### **3.CQ pair Selection**

假如有，優先選擇 P 最大的鏈結，選擇該鏈結次大頻寬容量的 CQ pair，確定拓樸的參數設定後，回到步驟 2。

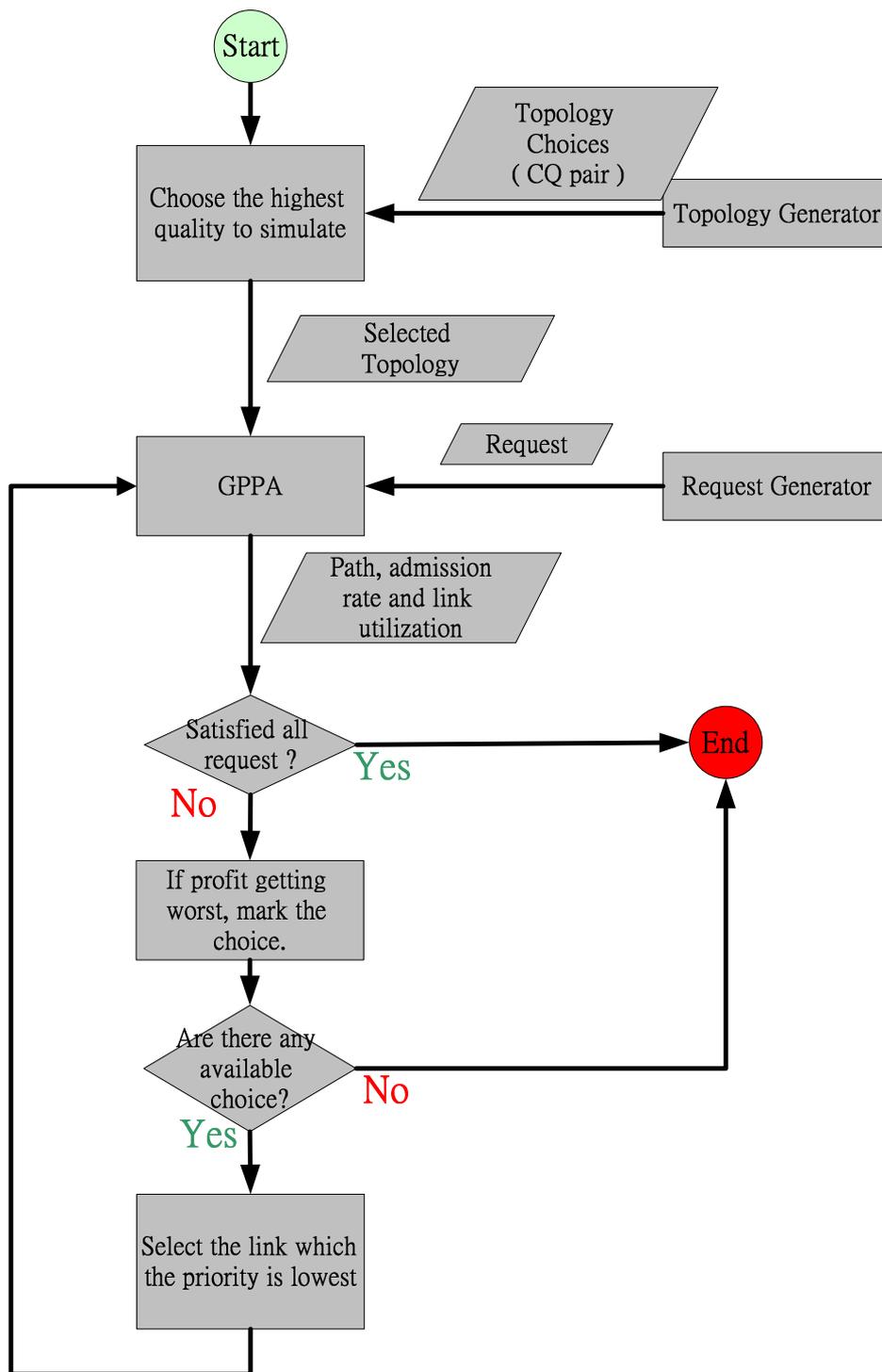


圖 4.10 : HPPA-QF

### 4.3 複雜度分析

由 2.2.4 節得知，使用 GPPA，時間複雜度在最差的情形下，將會被限制在  $O((M+s)*N^2 \log N)$ 。

假設有  $L$  個鏈結，每個鏈結有固定  $K$  組選擇，假設在 Exhaustive Search 的情況下，時間複雜為  $O(K^L(M+s)*N^2 \log N)$ 。

### 4.4 小結

本研究設計的演算法，將此問題用搜尋的方式來求解，目前並沒有研究找到較有效率的 backtracking 機制，所以找到的結果，有可能只是區域的最佳解。在演算法逐步搜尋的步驟中，當獲利逐漸下降時，其可能是跳出區域最佳解的機會，但是就大多數的情況下，是比較差的選擇，由於目前演算法在沒有找到更佳 backtracking 機制之前，當獲利逐漸下降，本演算法將會停止朝該方向繼續搜尋。若要在同樣架構改變本演算法的效率，則需要適當的 backtracking，以其能跳脫區域最佳解。

## 第五章

### 效能評估

本研究採用多組模擬來評估提出的路徑規劃方案，藉由觀察系統的獲利指標來了解演算法的效能，本研究基於 BBQ(Budget-Based QoS Management)的架構，因此將與 BBQ 架構中 GPPA[11]的演算法做比較。

#### 5.1 效能評估指標

為了實驗模擬的效能評估，我們定義以下幾個觀察指標：

- 獲利：依據第四章所提出的最佳化模型，獲利函數可依照營運者的需求自動，在此為了效能評估，我們定義服務品質為 delay time，定義其為  $\gamma$ ，所有允入訊務獲益的總合  $M_1$  為總收益。

$$M_1 = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} m_i = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} \frac{b_i}{\tau_i} \times U$$

由於獲利函數可能會影響 CQ pair 選擇的結果，因此除了考慮線性的獲利函數，也考慮非線性的獲利函數，將  $\tau_i$  以  $\tau_i$  的平方根代入，也將獲利函數中的  $\tau_i$  以  $\tau_i$  三次方根代入，分別測試獲利函數對於演算法的影響。

$$M_2 = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} m_i = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} \frac{b_i}{\sqrt{\tau_i}} \times U$$

$$M_3 = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} m_i = \sum_{i=1}^{|\mathcal{R}|} \frac{b_i}{\sqrt[3]{\tau_i}} \times U$$

- 鏈結使用率與鏈結使用率之標準差：將所有鏈結的使用率計算其平均值，並計算其標準差，可得知不同演算法對於鏈結使用率的影響。
- 訊務的允入率：比較不同演算法對於允入率造成的影響。

## 5.2 實驗設計

在實驗一中，使用不同的節點數與不同的鏈結率，觀察 GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 三者之基本獲利變化，也調整價格與品質之關係，使用不同定義的獲利函數，如 5.1 節的獲利函數  $M_1$ 、 $M_2$  與  $M_3$ ，觀察獲利函數對於演算法的影響。

在實驗二中，考慮預測誤差造成的影響，以不同的預測誤差為變因，比較 GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 三者對於預測誤差的獲利差異。

### 5.2.1 實驗工具

本實驗以在 Linux 為平台，使用 C++，以 GNU g++ 3.2 為編譯器，在 BBQ 的運作流程上，實作整合本研究的相關模擬程式。

### 5.2.2 實驗測試組產生方式

實驗拓樸產生方式:網路節點範圍由 10 到 50，節點由 Edge 與 Core 組成，訊務由 Edge Node 出發到 Edge Node 離開，Core Node 負責轉送封包，Edge 與 Core 的比例為一比一。而一個節點鏈結率的定義如下，假設一個拓樸內有  $N$  個節點，若一個節點與其他  $N-1$  個節點皆有鏈結連接，則此點的鏈結率定義為 100%，因此在  $N$  個節點的拓樸中，某個節點與  $L$  個節點連結，則連結率為  $L / (N-1)$ 。

拓樸上頻寬的鏈結頻寬由 5Gbps 到 10Gbps，網路延遲為 5~30ms，每個鏈結固定有 3 個 CQ pair 可以供選擇。

而實驗變因中之連結率，是將實驗網路拓樸中的每一個節點其鏈結率之平均值，設定的鏈結率從 20% 至 100%。

### 5.2.3 訊務產生方式

假設訊務從每個節點流到任一其他節點，所要求的頻寬為 Normal 分佈，分佈於 100Mbps 到 500Mbps 之間，要求的總頻寬為一個固定值。訊務要求的保證

服務品質，以 Normal 分佈在 30~100ms 之內。

表 5.1：實驗環境參數

參數	數值範圍
節點數目	10, 20, ... , 50
Edge 節點和 Core 節點之比	1:1
節點鏈結率	20%, 40%, 60%, 80%, 100%
鏈結頻寬	5~10G bps
鏈結延遲	5 ~ 30 ms
訊務所需頻寬	100~ 500 Mbps
訊務之傳送延遲限制	30 ~ 100 ms

### 5.3 實驗一：GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 的獲利比較

#### 5.3.1 實驗目標

在不同節點數與鏈結率，使用不同的獲利函數，如 5.1 節的獲利函數  $M_1$ 、 $M_2$  與  $M_3$ ，做 GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 三種情況的獲利分析，同時並以鏈結使用率與鏈結使用率的標準差，分析頻寬使用差異情況。

#### 5.3.2 實驗流程

本實驗的拓樸採用 10、20、30、40 和 50 個節點數，在這些節點數分別考慮以 20%、40%、60%、80% 和 100% 的連結率，總共有 20 個拓樸的可能。

由 Topology Generator 依據不同的節點數與鏈結率產生拓樸，每個鏈結上都有三個 CQ pair 的選擇。

在這些拓樸參數的設定環境下，分別模擬 GPPA、HPPA-CF 與 HPPA-QF 三種情況的獲利情形，流程圖如圖 5.1 與圖 5.2。

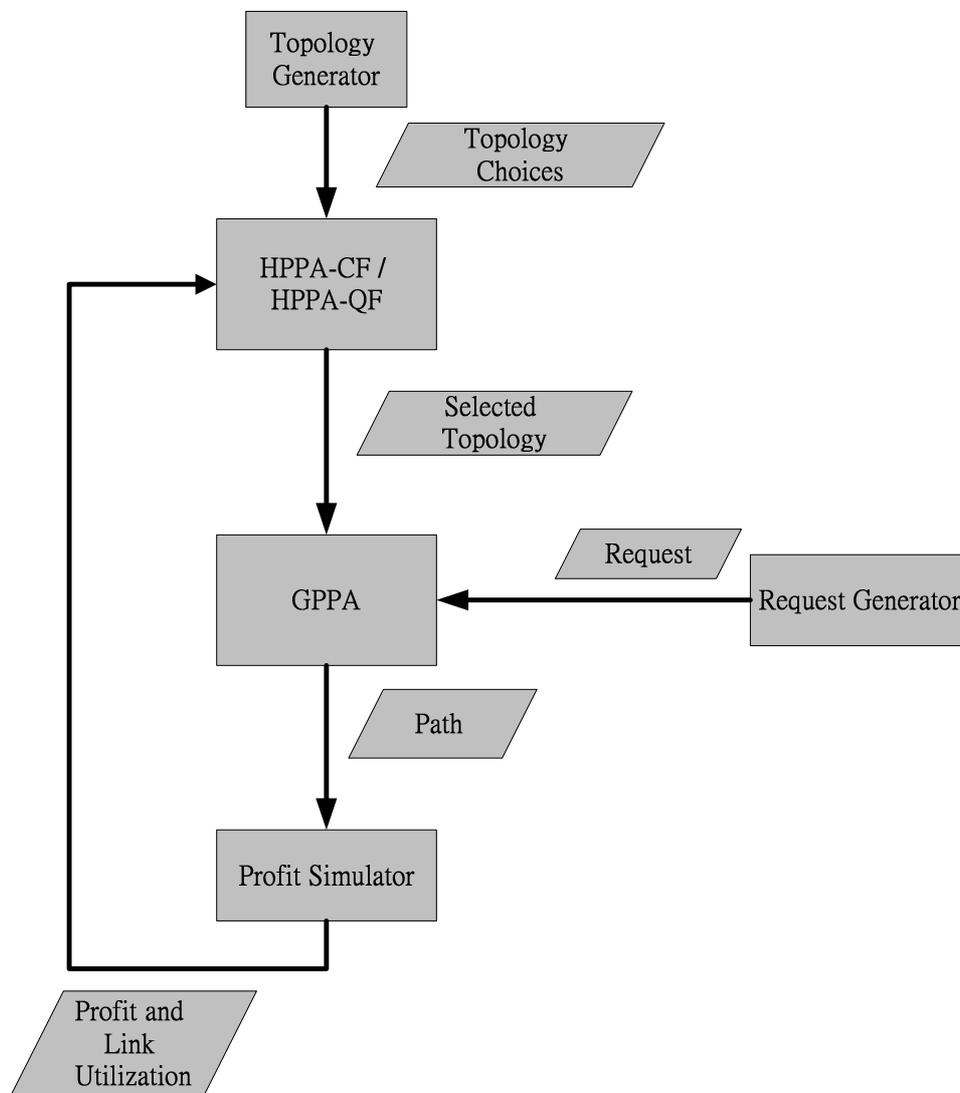


圖 5.1 : HPPA-CF 與 HPPA-QF 的實驗流程圖

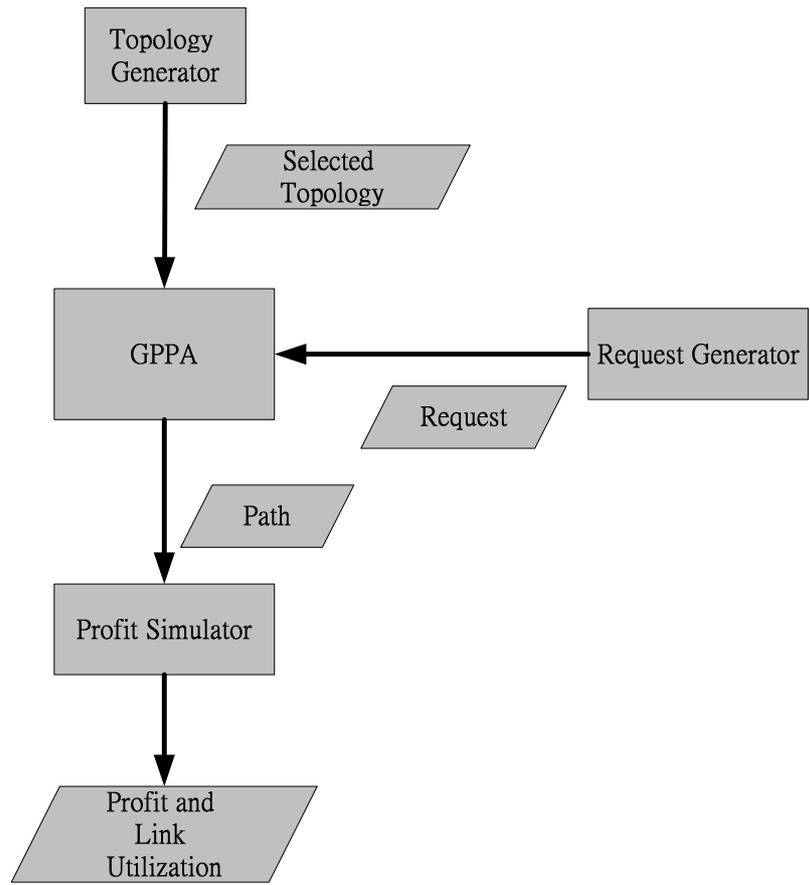


圖 5.2 : GPPA 的實驗流程圖

### 5.3.3 實驗結果分析

圖 5.3~5.7 為固定節點數(10,20,30,40,50)，在不同的節點鏈結率，獲利函數使用  $M_1 = \sum_{i=1}^{|R|} m_i = \sum_{i=1}^{|R|} \frac{b_i}{\tau_i} \times U$  的實驗結果，圖 5.8~5.12 為獲利差異的分析，分別以 HPPA-CF 與 GPPA、HPPA-QF 與 GPPA 以及 HPPA-CF 與 HPPA-QF 比較，隨著不同節點鏈結率的增加，可以允入更多的訊務，因此獲利隨著增加，但是獲利差異並無巨量的增加。

實驗結果顯示，隨著節點鏈結連接率或節點數的提昇，可以選擇的路徑增加，HPPA-CF 之獲利比 GPPA 高約 20%~30%，HPPA-QF 則高約 10~20%的獲利。HPPA-CF 約較 HPPA-QF 的獲利高約 10%，在此獲利函數的計算下，HPPA-CF 比 HPPA-QF 能提供較佳的網路拓樸參數設定。

考慮在 30 個節點數的情況下，固定鏈結率(20%, 40%, 60%, 80%, 100%)，獲利函數使用  $M_2 = \sum_{i=1}^{|R|} m_i = \sum_{i=1}^{|R|} \frac{b_i}{\sqrt{\tau_i}} \times U$  與  $M_3 = \sum_{i=1}^{|R|} m_i = \sum_{i=1}^{|R|} \frac{b_i}{\sqrt[3]{\tau_i}} \times U$ ，實驗結果如圖 5.13 與 5.16，由於改變獲利函數，使得服務品質對於獲利函數的影響比頻寬大，因此選擇較佳的服務品質的路徑設定能得到較佳的獲利，觀察實驗結果，發現優先選擇最佳服務品質設定的 HPPA-QF，在此獲利函數情況下，獲利較 HPPA-CF 佳，在設定為 q 的三次方情況的獲利函數，HPPA-QF 的獲利表現更較 HPPA-CF 突出，由此可以發現，獲利函數的設計，對於演算法的效能有很大的影響。對於頻寬需求較大的網營運業者，使用 HPPA-CF 能較快的規劃出適合其需求的網路設定，對於服務品質需求較高的規劃者，使用 HPPA-QF 能較快規劃出服務品質需求高的網路設定，目前無法斷定哪一個演算法比較好，應須選擇適當的獲利函數與演算法互相搭配才能突顯其效果。

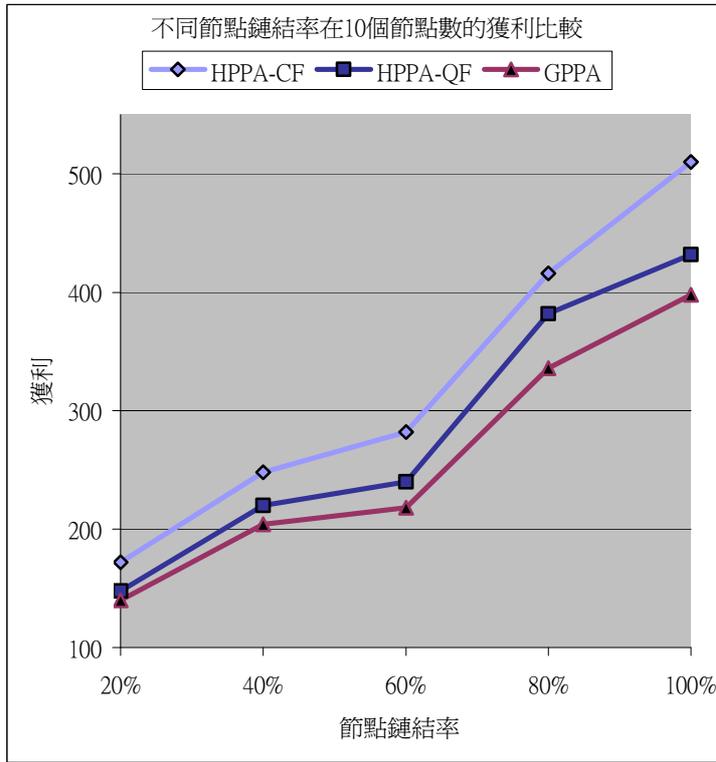


圖 5.3：不同節點鏈結率在 10 個節點數的獲利比較

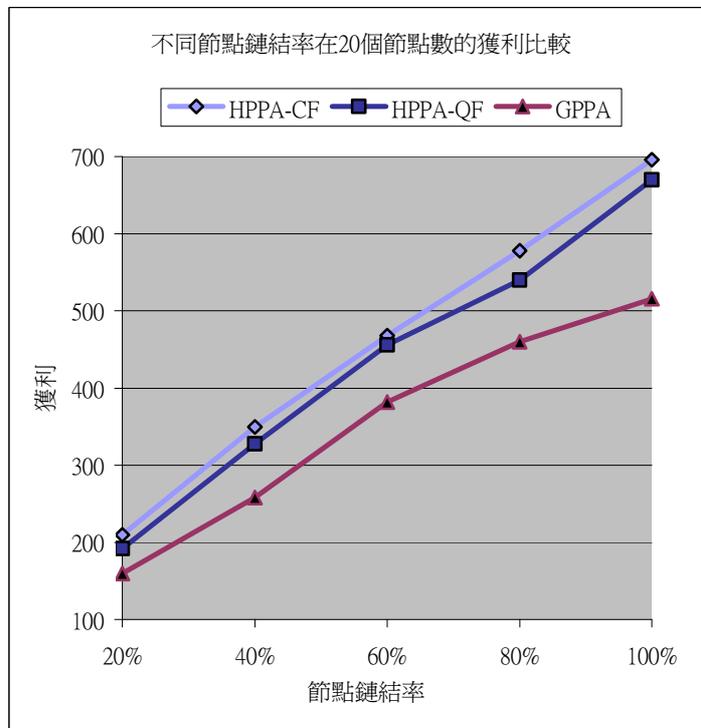


圖 5.4：不同節點鏈結率在 20 個節點數的獲利比較

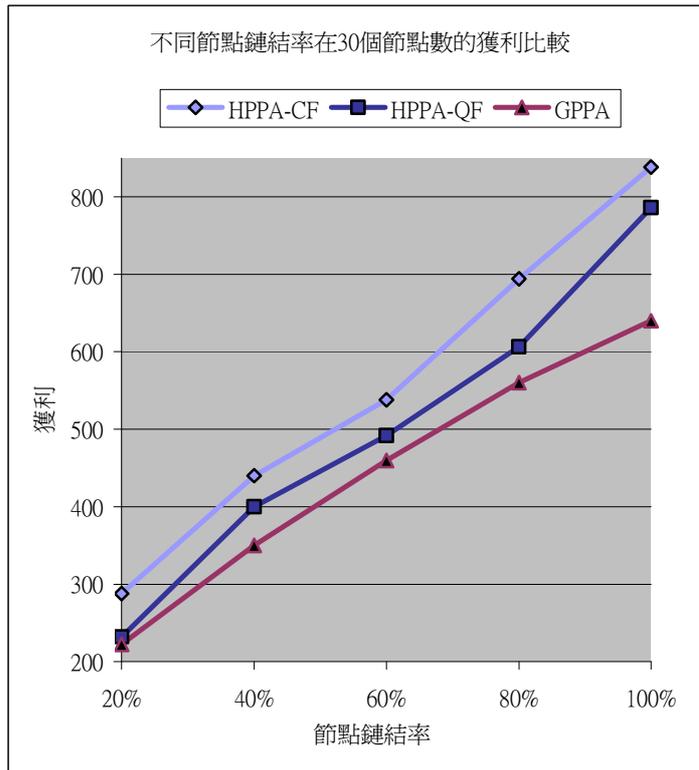


圖 5.5：不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較

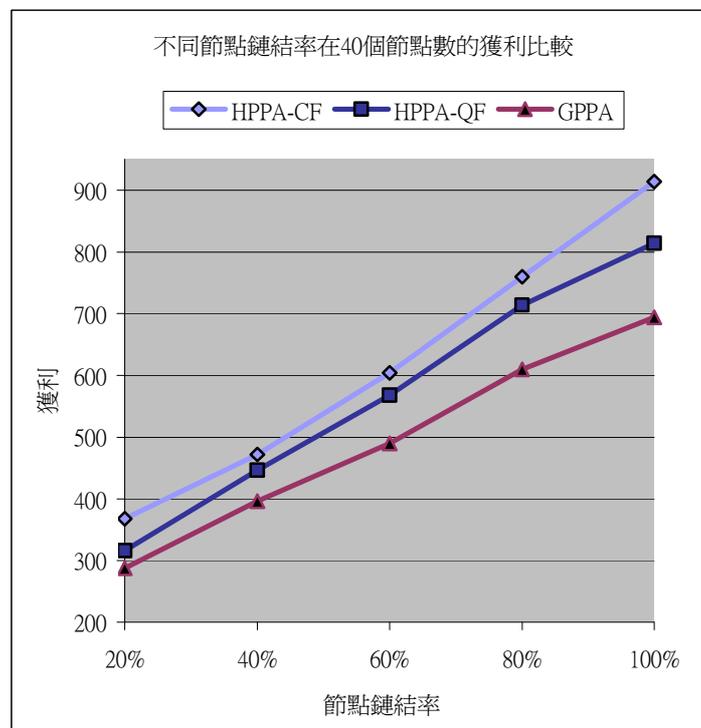


圖 5.6：不同節點鏈結率在 40 個節點數的獲利比較

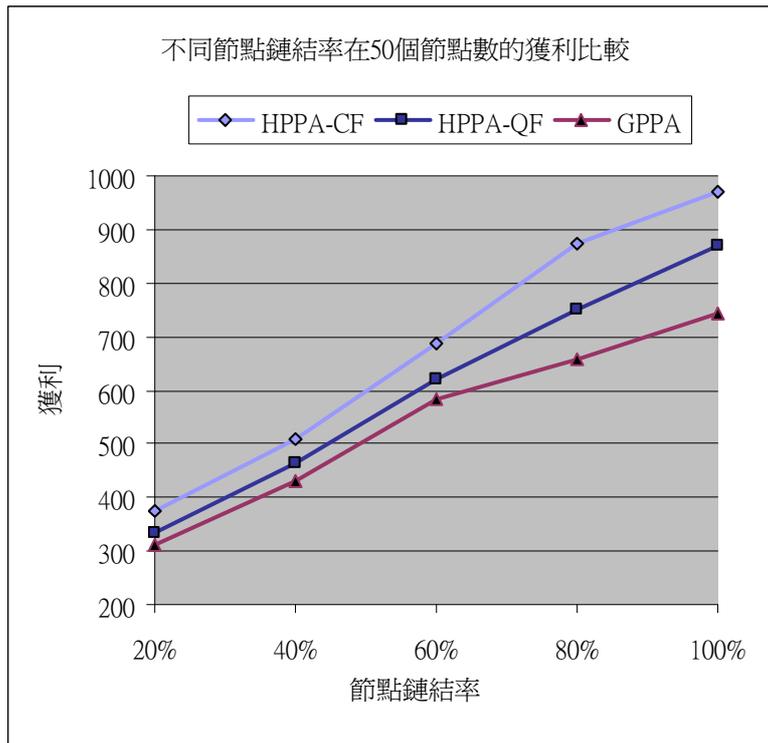


圖 5.7：不同節點鏈結率在 50 個節點數的獲利比較

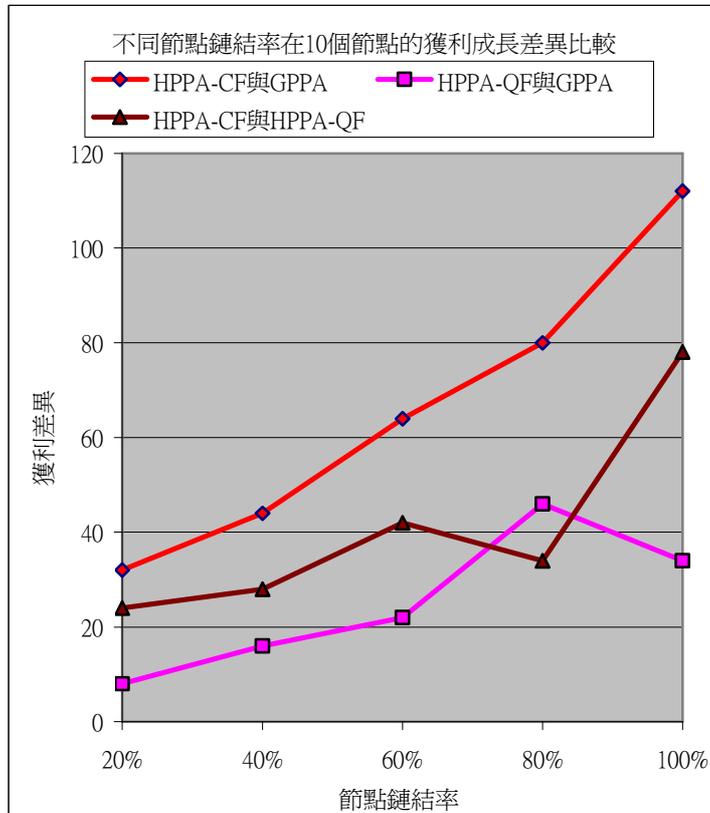


圖 5.8：不同節點鏈結率在 10 個節點數的獲利差異比較

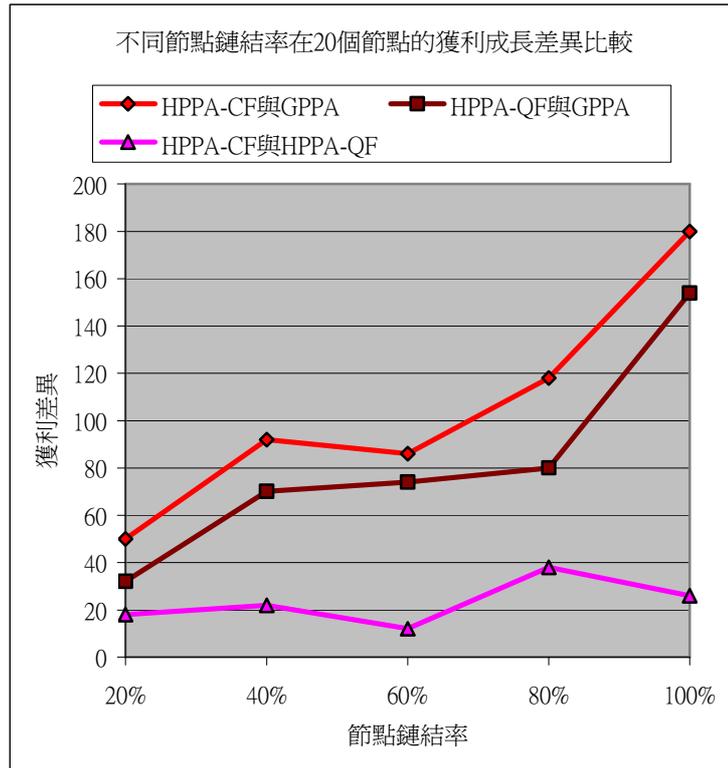


圖 5.9：不同節點鏈結率在 20 個節點數的獲利差異比較

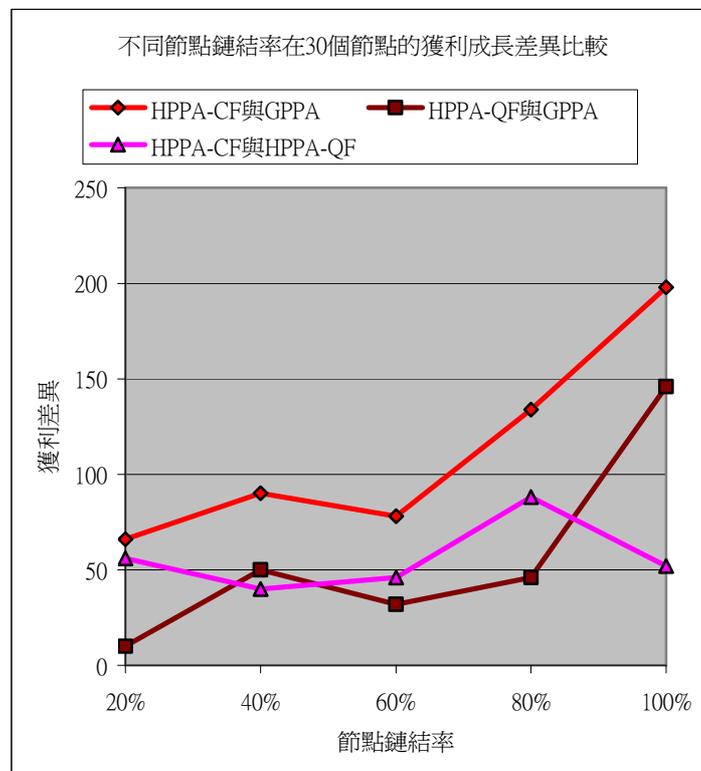


圖 5.10：不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較

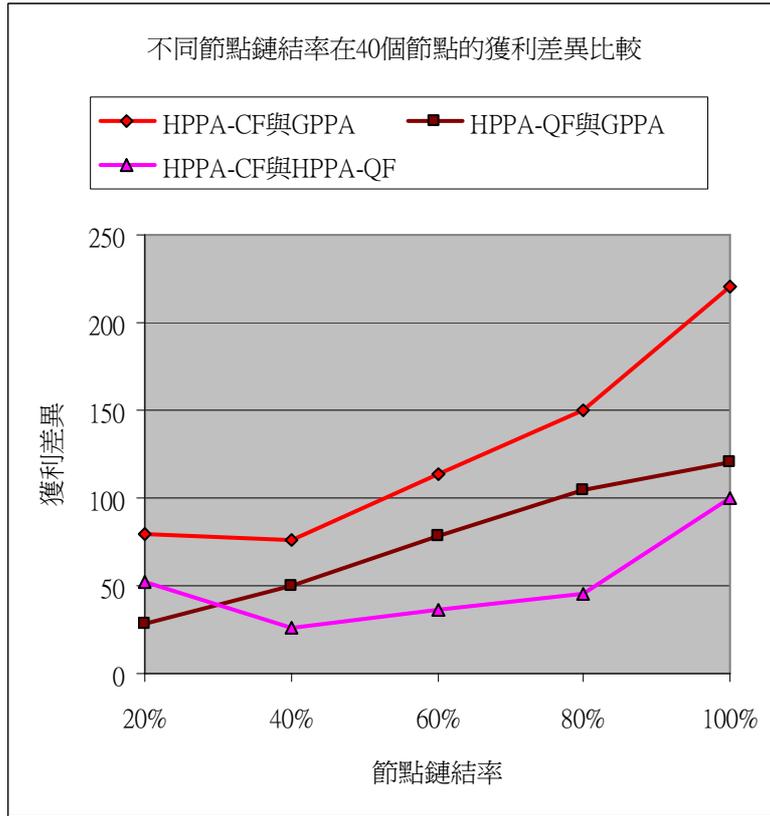


圖 5.11：不同節點鏈結率在 40 個節點數的獲利差異比較

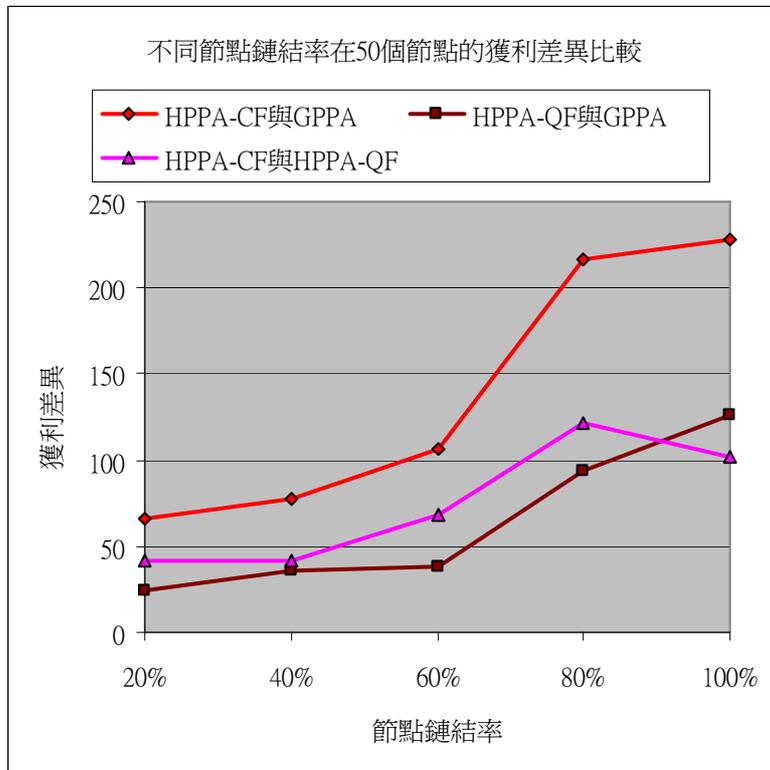


圖 5.12：不同節點鏈結率在 50 個節點數的獲利差異比較

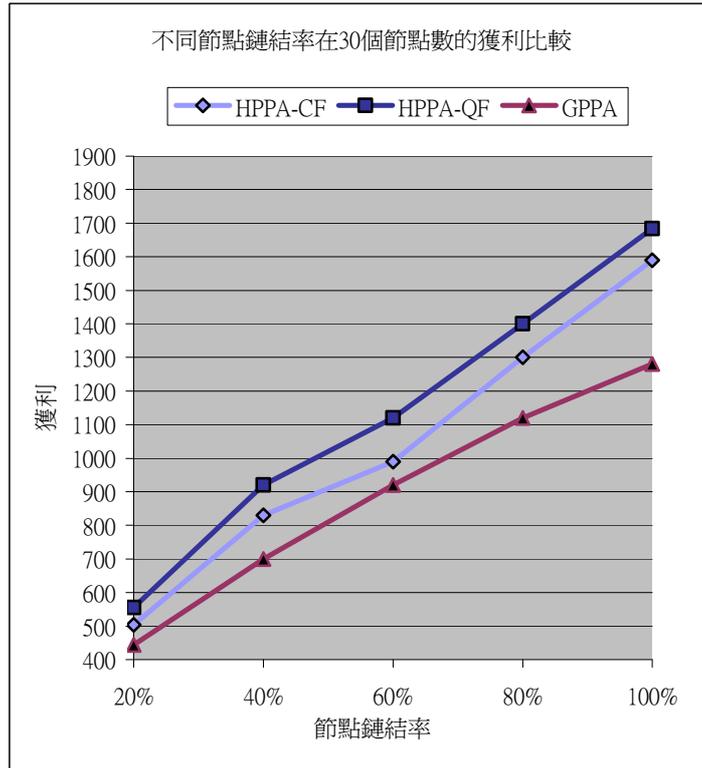


圖 5.13：使用獲利函數  $M_2$  在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較

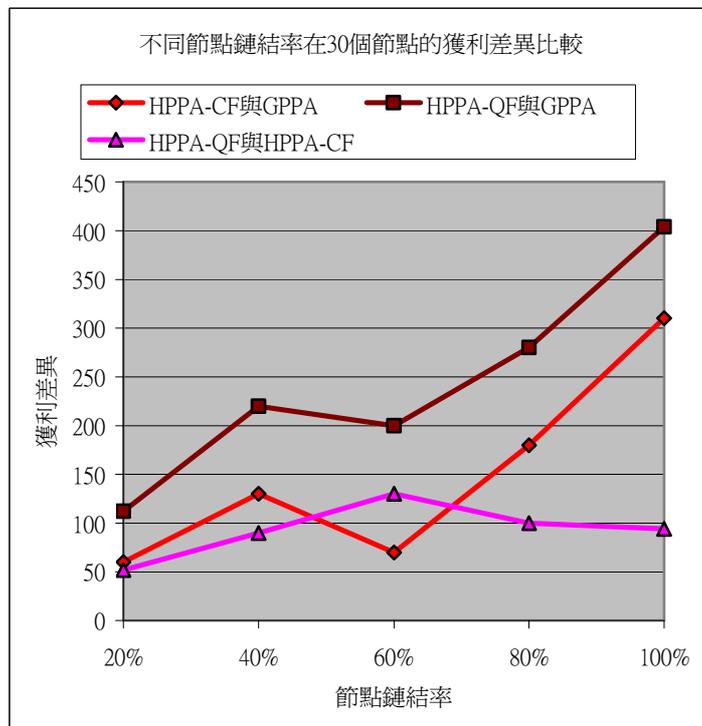


圖 5.14：使用獲利函數  $M_2$  在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較

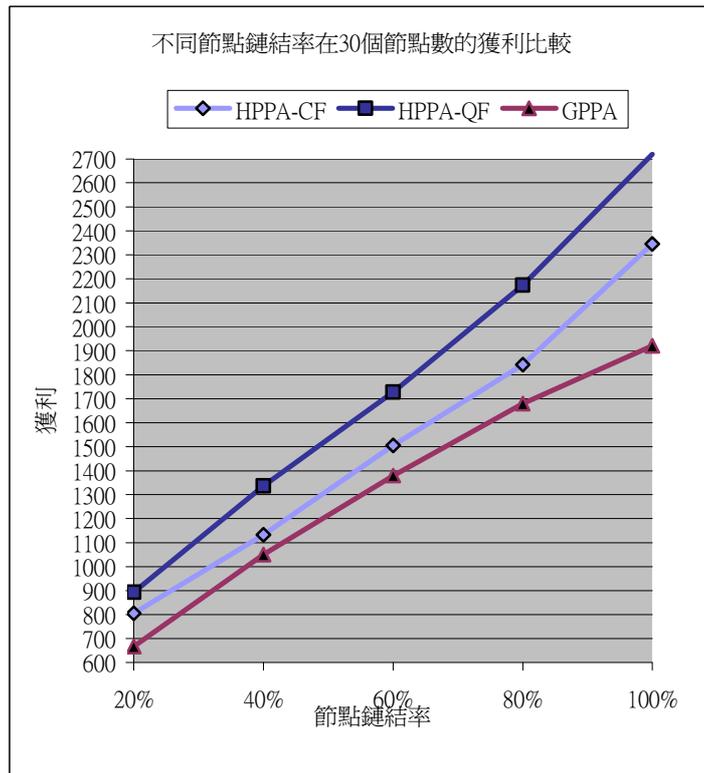


圖 5.15：使用獲利函數  $M_3$  在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利比較

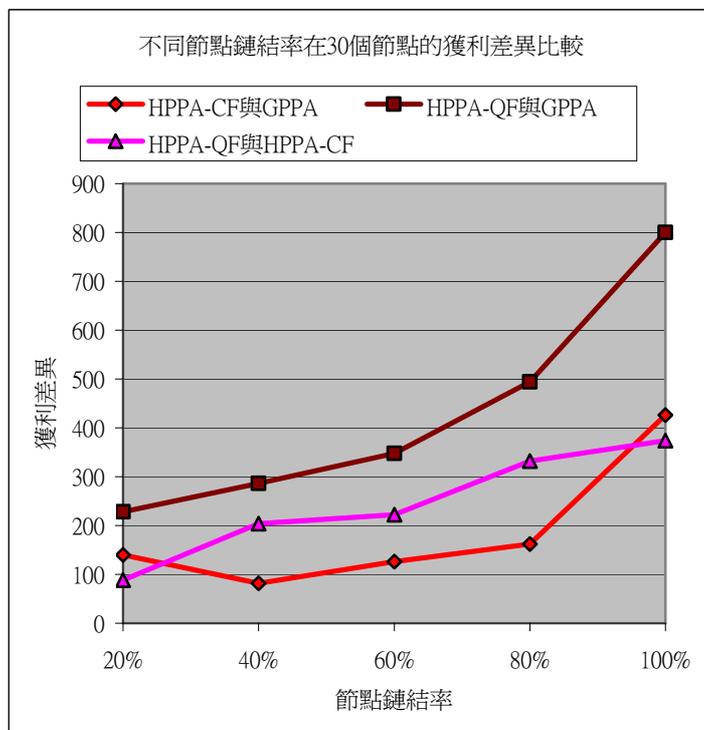


圖 5.16：使用獲利函數  $M_3$  在不同節點鏈結率在 30 個節點數的獲利差異比較

我們的演算法可以提升獲利，可能是因為演算法將鏈結使用率較低的鏈結調整，增加了可選擇的路徑，因此能提供較佳的路徑規劃，為了證實此推測，同時對於在 30 個節點數的情況下，以及獲利函數為  $M = \sum_{i=1}^{|R|} m_i = \sum_{i=1}^{|R|} b_i \times q_i \times U$  的情況下，分析頻寬使用率，標準差與允入率。由分析結果發現，如圖 5.17，HPPA-CF 與 HPPA-QF 能比 GPPA 提高頻寬的使用率約 10~15%，並由圖 5.18 得知，頻寬使用率的標準差較低，證實改良後的演算法，使得可選擇的路徑增加，提升鏈結的使用率，便能提供較佳的路徑規劃。

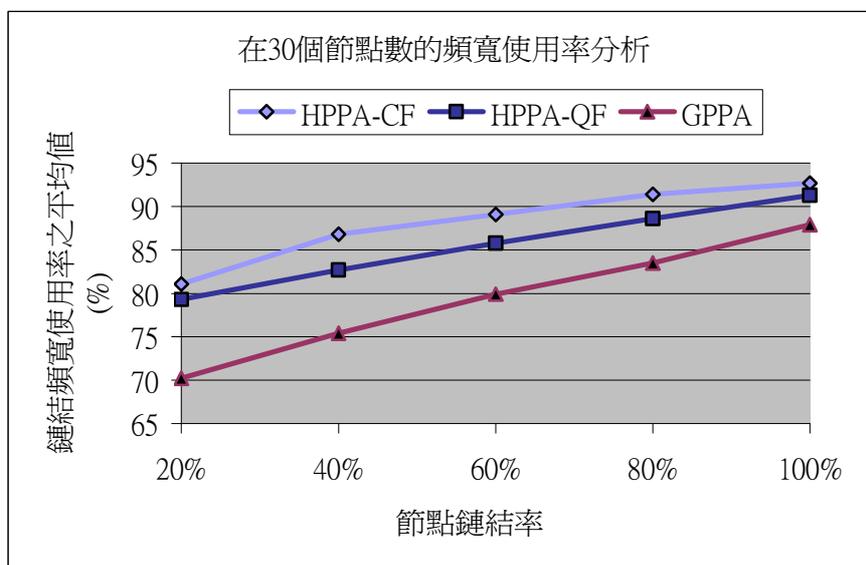


圖 5.17：在 30 個節點數的頻寬使用率分析

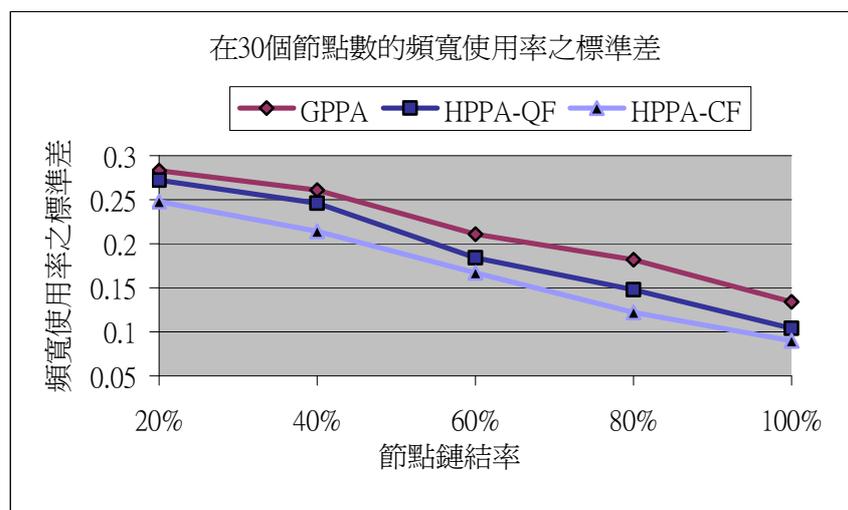


圖 5.18：在 30 個節點數的頻寬使用率之標準差

由圖 5.19 可看出，由於鏈結資源之有效規劃，使得 HPPA-CF 與 HPPA-QF 能比 GPPA 高約 10% 的允入率，因此能提升整體的獲利。

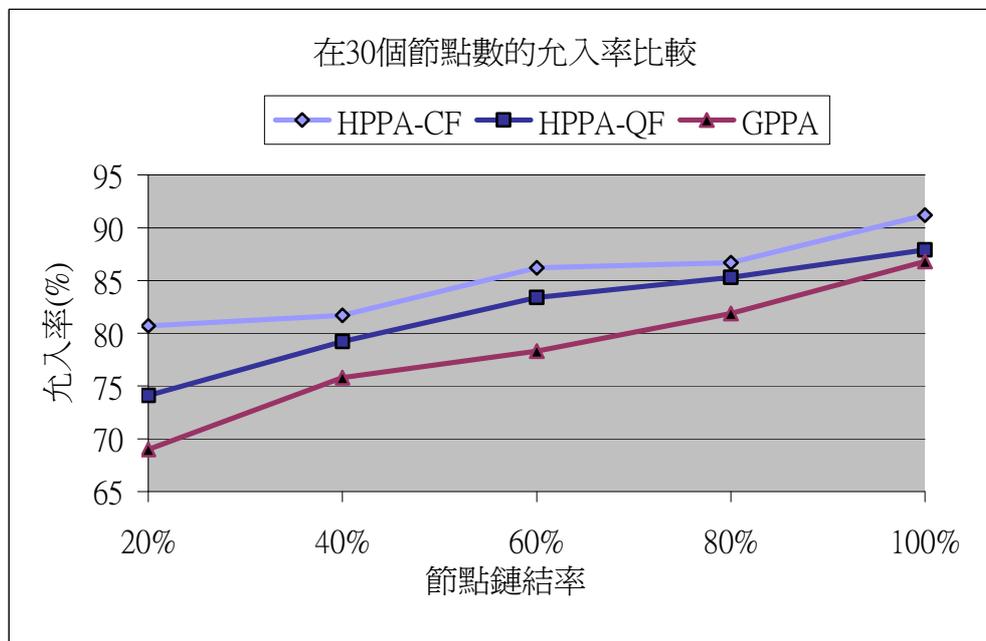


圖 5.19：在 30 個節點數的允入率比較

## 5.4 實驗二：預測誤差對於獲利之影響

### 5.4.1 實驗目標

由於在 BBQ 的路徑規劃方式，是以訊務過去歷史的資料為基礎，對未來可能出現的訊務作預先的路徑規劃，當系統實際在運行的時候，出現的訊務可能與歷史訊務有差異。本實驗的目標在測試誤差對於所造成的影響。

### 5.4.2 實驗流程

我們採取以下的方式定義預測誤差的產生，假設過去的歷史訊務資訊和系統實際運行時，進入網路中的訊務完全一樣的話，則預測誤差為零，若在實際運行時，進入網路之總訊務 request 數量中的 10% 統計資料，和歷史的資料不合，則定義預測誤差為 10%，在這些欲進入網路中的訊務所要求的頻寬總和則會維持在一定範圍。

網路鏈結連結率設定為 40%，網路節點數為 30 個節點，本實驗比較在不同的預測誤差環境下，對於獲利產生的影響。實驗流程如圖 5.13。

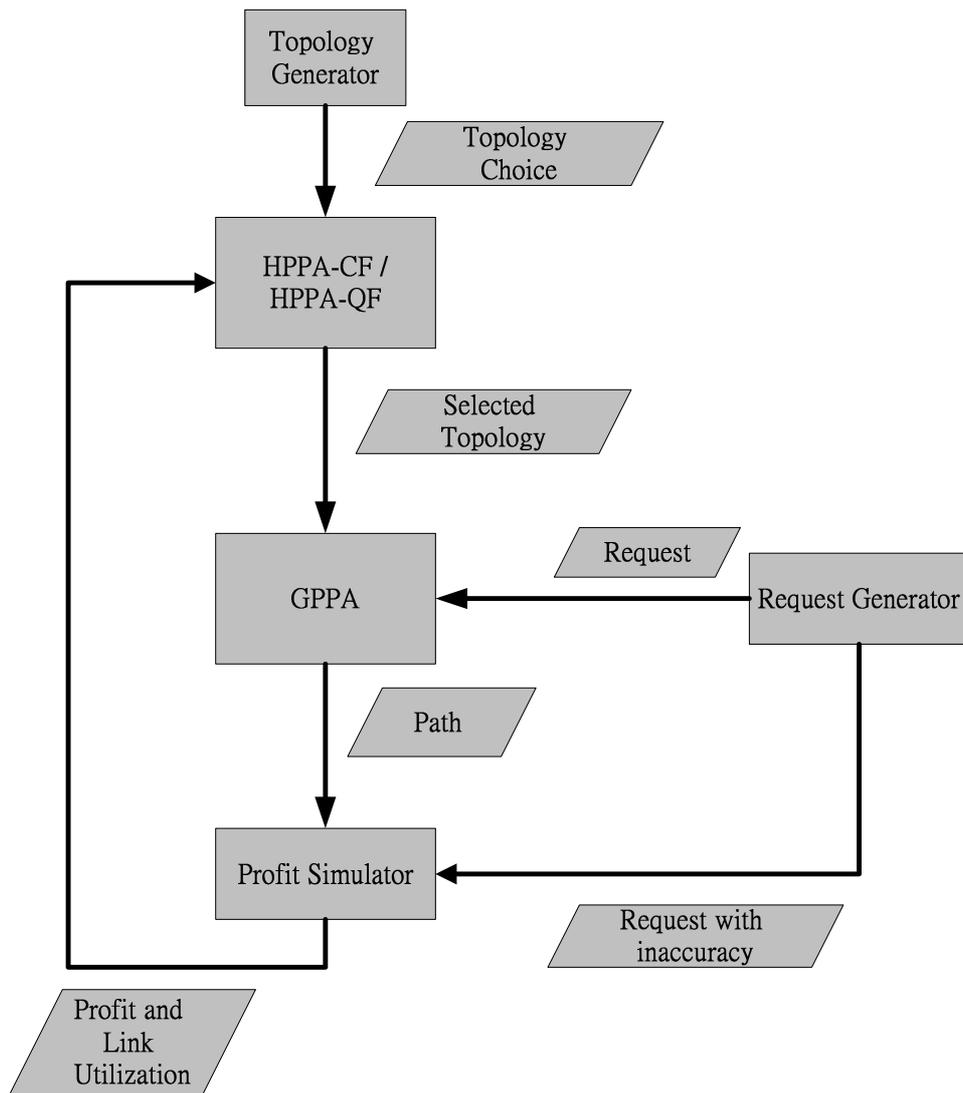


圖 5.20：預測誤差實驗流程

### 5.4.3 實驗結果分析

由圖 5.21~5.25 可以看出，當預測誤差在 40% 以下，HPPA-CF 及 HPPA-QF 依然可以維持不錯的獲利表現，但是在預測誤差 40% 以上，則獲利快速下降，40% 以上的預測誤差所得到的獲利與 GPPA 大致相當。

推測 HPPA-CF 及 HPPA-QF 未使用所有的可用頻寬，因此當預測有誤差時，依然有足夠的緩衝頻寬容量，能提供穩定的品質保證，但是當預測誤差逐漸增加時到 40% 以上，則與原本的路徑規劃差異較大，因此無法提供有效的路徑規劃。

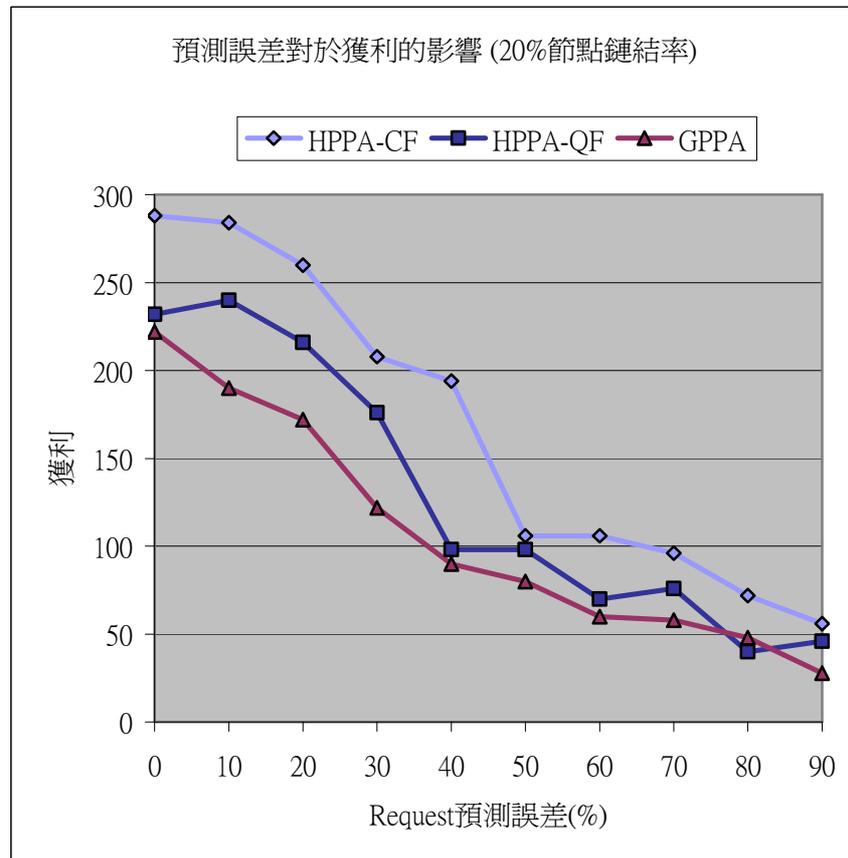


圖 5.21：預測誤差對於獲利影響(20%節點鏈結率)

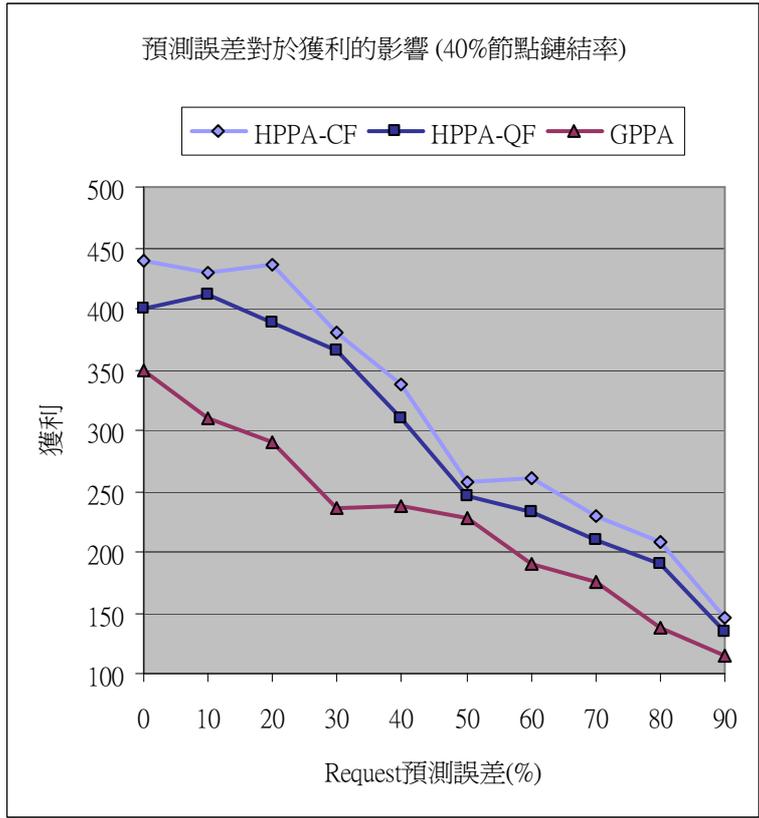


圖 5.22：預測誤差對於獲利影響(40%節點鏈結率)

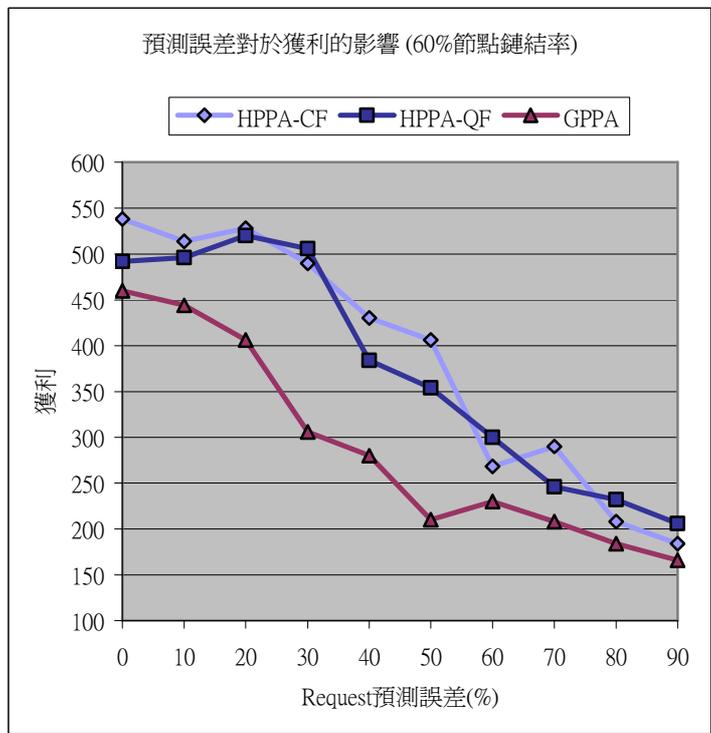


圖 5.23：預測誤差對於獲利影響(60%節點鏈結率)

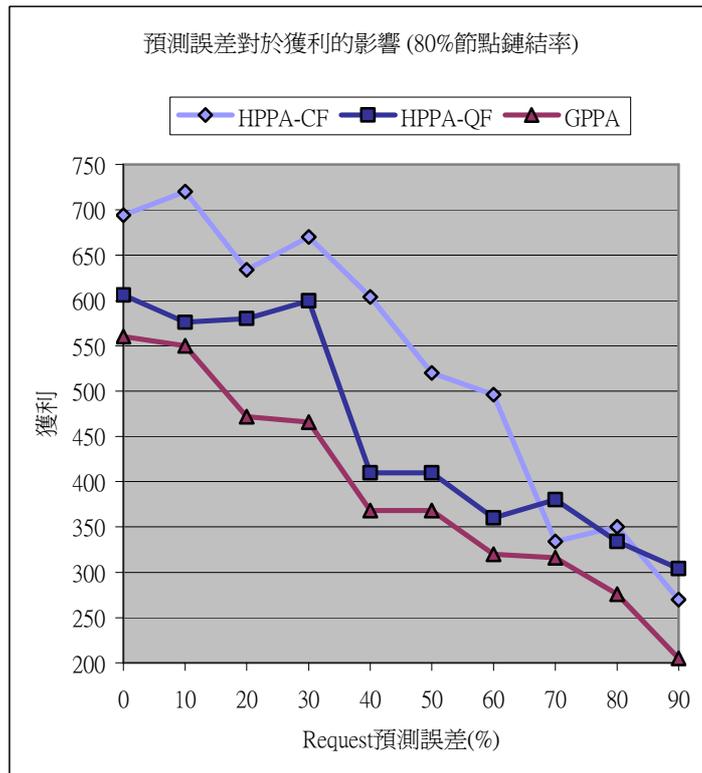


圖 5.24：預測誤差對於獲利影響(80%節點鏈結率)

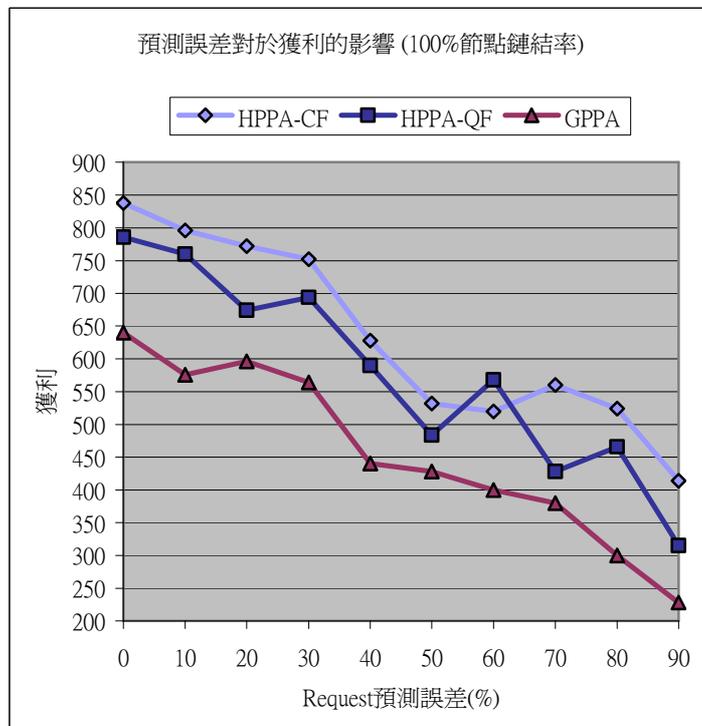


圖 5.25：預測誤差對於獲利影響(100%節點鏈結率)

## 第六章

### 總結

本研究提出以 Heuristic Search 的方式，提出 HPPA-CF 與 HPPA-QF，藉由此演算法來提升 BBQ 架構中的 GPPA 繞徑演算法的效能，透過實驗模擬的結果顯示，路徑規劃的結果的確較原本的 GPPA 佳，對於網路營運者，能藉由本研究的演算法以及歷史的訊務資訊，有效配置網路的資源，以達到最佳的使用效益。

在實驗的結果中也發現，調整獲利函數，例如服務品質與單位頻寬的獲利，或對演算法有很大的影響，選擇適當的獲利函數和適合的演算法，才能找到較佳的網路參數設定。

本研究提出的演算法仍有其不足之處，因為使在預先規劃的基礎上，所以當隨著預測誤差的增加，獲利就會大幅下降。另外本研究提出的演算法，也缺乏有效的 backtracking 機制，因此目前找到的解可能只是一個區域最佳解，需要有其他更佳的機制，才能找出更佳的拓樸參數設定。

## 參考文獻(References)

- [1] 3rd Generation Partnership Project, "Technical Specification Group Services and Systems Aspects: Architecture for an All IP network", 3GPP TR 23.922 version 1.0.0., Oct. 1999.
- [2] Xiao, X., L. -M. Ni, "Internet QoS: A Big Picture", *IEEE Network*, vol.13, pp.8-18, Mar.-Apr. 1999.
- [3] Miras, D., "Network QoS Needs of Advanced Internet Applications", *Internet2 - QoS Working Group*, Nov. 2002.
- [4] Pascal Lorenz, "Quality of service and new architectures for future telecommunications networks", *MILCOM 2000 - IEEE Military Communications Conference*, no.1, pp.695-698, Oct. 2000.
- [5] D. Goderis, S. Van den Bosch, Y. T'Joens, P. Georgatsos, D. Griffin, G. Pavlou, P. Trimintzios, G. Memenios, E. Mykoniati, C. Jacquenet, "A service-centric IP quality of service architecture for next generation networks", *NOMS 2002 - IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, no.1, pp.139-154, Apr. 2002.
- [6] Mahbulul Alam, Ramjee Prasad, John R. Farserotu, "Quality of service among IP-based heterogeneous networks", *IEEE Personal Communications*, no.6, pp.18-24, Dec. 2001.
- [7] Vijay K. Garg, Oliver T. W. Yu, "Integrated QoS support in 3G UMTS networks", *WCNC 2000 - IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, no.1, pp.1187-1192, Sep. 2000.
- [8] E. Crawley, Editor, L. Berger, S. Berson, "A Framework for Integrated Services and RSVP over ATM", *IETF RFC 2382*, Aug. 1998.
- [9] D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, "An Architecture for Differentiated Services", *IETF RFC 2475*, Dec. 1998.

- [10] Yao-Nan Lien, Hung-Ching Jang, Tsu-Chieh Tsai and Hsing Luh, 2005, "Budget Based QoS Management Infrastructure for All-IP Networks", *Proceedings of the IEEE 25th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT2005)*, NSC 92-2219-E-004-001, Feb. 21-23. 2005.
- [11] Yao-Nan Lien, Tsung-Hsung Li, "Path Planning in Budget-Based QoS Management for All-IP Core Networks", *NCCU-CS Tech. Report*, Sep. 2003.
- [12] Q. Ma and P. Steenkiste, "On path selection for traffic with bandwidth guarantees," *In Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols*, Atlanta, GA, Oct. 1997.
- [13] Z. Wang and J. Crowcroft, "Bandwidth-delay based routing algorithms," *Proceedings of IEEE GLOBECOM'95*, Nov. 1995.
- [14] A. S. Tanenbaum, "Computer Networks," 4th edition, Prentice Hall, 2002.
- [15] J. J. Garcia-Luna-Aceves, A minimum-hop routing algorithm bases on distributed information, *Computer Networks and ISDN Systems*, vol.16 no.5, pp.367-382, May 1989.
- [16] J.M. Jaffe and F.M. Moss, "A Responsive Routing Algorithm for Computer Networks", *IEEE Trans. Comm.*, vol. COM-30, no.7, pp. 1758-1762, July 1982.
- [17] Dijkstra, E. W. "A Note on Two Problems in Connection with Graphs." *Numerische Math*, vol. 1, pp.269-271, 1959.
- [18] J. J. Garcia-Luna-Aceves, "A Unified Approach to Loop-Free Routing Using Distance Vectors or Link States", *Symposium proceedings on Communications architectures & protocols*, pp.212-223, Sep. 25-27, 1989.
- [19] J. McQuillan and D.C Walden, "The ARPANET Design Decisions," *Computer Networks*, vol. 1, Aug. 1977.
- [20] C. Hedrick, "Routing Information Protocol", *IETF RFC 1058*, June 1988.
- [21] J. Moy, "OSPF Version 2", *IETF RFC 2328*, Apr. 1998

- [22] G. Feng, K. Makki, N. Pissinou, C. Douligeris, "An efficient heuristic for delay-cost-constrained QoS routing", *IEEE International Conference on Communications*, vol. 8, pp. 2603-2607, 2001.
- [23] Q. Ma and P. Steenkiste, "On path selection for traffic with bandwidth guarantees", *In Proceedings of IEEE International Conference on Network Protocols*, Atlanta, Oct. 1997.
- [24] Turgay Korkmaz, and Marwan Krunz, "Multi-Constrained Optimal Path Selection", *IEEE INFOCOM 2001*, pp. 834-843, 2001.
- [25] Yao-Nan Lien and Yu-Sheng Huang, 2004, "Delay Sensitive Routing for High Speed Packet-Switching Networks", *Proceedings of the IEEE International Conference Networking, Sensing, and Control*, Mar. 21-23. 2004.
- [26] Yao-Nan Lien, Chien-Tung Chen, "Budget-Based End-to-End QoS Management for All-IP Networks", *NCCU-CS Tech. Report*, Sep.2003.
- [27] Yao-Nan Lien, Ming-Chih Chen, "Distributed Resource Management and Admission Control in Budget-Based QoS Management for All-IP Core Networks", *NCCU-CS Tech. Report*, Sep. 2003.
- [28] Yao-Nan Lien, Yi-Ming Chen, "Forecasting Error Tolerable Resource Allocation in Budget-Based QoS Management for All-IP Core Networks", *NCCU-CS Tech. Report*, Sep. 2003.
- [29] Ossama Younis and Sonia Fahmy, Purdue University, "Constraint-Based Routing in the nternet: Basic Priciples and Recent Research", *IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS*, vol. 5, no. 1, Third Quarter 2003.
- [30] Y. Yang, J. Muppala, S. Chanson. "Quality of Service Routing Algorithms for Bandwidth-Delay Constrained Applications", icnp, pp. 62, *Ninth International Conference on Network Protocols (ICNP'01)*, 2001.
- [31] Turgay Korkmaz, and Marwan Krunz, "Bandwidth-Delay Constrained Path

Selection Under Inaccurate State Information", *IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING*, vol.11, no. 3, June 2003.