

我的研究工作主要是專注在演算法的研究，主要可分為【Minimum routing cost tree】、【Partition problems】、【Evolutionary tree construction】、【Path problems】、以及【Other Tree problems】，2008年起也開始研究一些【Social network analysis】的主題。絕大多數的論文著作始於大部分 1995 攻讀博士期間，到 2012 年為止，一共發表 SCI 期刊論文 31 篇、其它期刊論文 3 篇、會議論文 47 篇、英文專書一本，以及英文專書中的一個 chapter。其主要研究內容成果概述如下：

【Minimum routing cost tree】

minimum routing cost tree(MRCT)MRCT 問題是在一個圖上求一個 spanning tree，使得點對點的距離總和 (routing cost) 最低。這個問題在我們之前的最佳結果是一個 2-approximation 的演算法，從 1999 年開始即有一些成果陸續發表，在 [DAM00a] 中我們將近似率推進到 $(4/3+\epsilon)$ ，其中 ϵ 為任意小的正數；在 [SICOMP00] 中進一步設計出此問題的 PTAS (polynomial time approximation scheme)，PTAS 是近似演算法所能達到的最佳結果，這個演算法目前仍是這個問題上最佳的結果。在 MRCT 問題上，兩點之間的需求量是相同的，而此問題的最一般化結果為 OCT 問題其兩點之間的結果是任意的，試圖對中間問題進行研究，我們將焦點對準 PROCT，在此問題上兩點之間的需求量為兩點權重之乘積，以及 SROCT (兩點之間的需求量為兩點權重之和)，成功發展出常數倍數的近似演算法 [DAM00b]，接著我們又成功的運用 scaling and rounding 的技術，將 PROCT 做到了 PTAS [JOA00]。其後我們專注於 MRCT 在多起點 (multi-source) 的版本，首先我們證明了對兩個起點，此問題亦屬 NP-hard，同時提出兩個起點時此問題的 PTAS [JOA02]，其中也包括 weighted 版本時在 metric 上的 PTAS。接著我們證明對於任意固定起點數此問題皆屬 NP-hard，並且提出 metric graph 上固定起點數而任意需求量時之兩倍近似演算法以及 general graph 上兩個起點任意需求量之 3 倍近似演算法，其結果已發表於 [DAM04a]。另一個結果則是專注於 bottleneck 的版本，bottleneck 問題是要最小化任一點至所有起點總和距離的最大值，對於這個問題我們提出了一個 PTAS，與此問題相似的是要最小化任一起點至所有點總和距離的最大值，我們則提出了一個 $(2+\epsilon)$ 的近似演算法 [NET06]。

我們也進行了其它一些與 MRCT 問題相關的研究：

1. Light Graphs with Small Routing Cost：此問題在如何尋找一個圖的子圖使得其 routing cost 與 building cost 皆不太大，我們提出一些複

雜度的結果與近似演算法發表在[NET02]。

2. 在多起點的問題上我們也研究 maximum eccentricity 問題，兩點之間的距離是兩個點之間的最近路程，eccentricity 是一個圖上之最遠距離 (max-min)，在多起點問題上，是要求的一個 spanning tree 使得起點至其他點之最遠距離要最小，在這個問題上，改進了別人的結果得到一個更有效率的 polynomial time 演算法[DAM04b]。
3. Swap edge problem for minimum routing cost tree：對於一個 spanning tree，計算出每一個邊的替代邊，當一邊斷掉時，以此替代邊來取代可以最小化 routing cost (source 到其他點的總和距離)。此問題以往做在 shortest path tree 上，我們研究目標函數為 routing cost 時之演算法，對於兩個起點與多個起點個提出有效率的演算法[Alg08]。

【Partition problems】

1. Set partition problem：此問題在於將一個整數集合切割為指定個數的若干子集合，使得各子集合的元素總和盡可能平均。如何將一群數字平均的分割到若干個子集合是一個歷史悠久的問題，Graham 在 60 年代對此問題就已經做了精闢的分析，而且其結果可能是史上第一個 PTAS，當時著眼於多機器的排程問題，所以其目標函數為 min-max。但是平均分割的定義不只是 min-max，我們即針對兩個不同的目標函數來分析 LPT (longest processing time) 演算法的效能分析，我們證明了在 max-min 與 min-ratio (最大塊與最小塊的比值) 的目標函數下，LPT 的 performance ratio 分別是 $(4k-2)/(3k-1)$ 與 $7/5$ ，其中 k 是切割的個數[TCS05]。此外，對於集合分割的即時演算法 LS (List scheduling) 我們也進行不同目標函數下的效能分析，包括 max-min, max-k-min, min-k-max, 與 min-ratio，分別求出其 performance ratio 的 tight bound [JISE07]。
2. Path partitioning problem：此問題研究將一個點上帶有權重的路徑切割為若干段，使得各段之權重總和盡可能平均，此問題可應用於灰階降階之影像壓縮上。以往的研究包括 min-max, max-min, min-difference, L_0 -norm, 我們則提出 L_k -norm 的有效率演算法[ORL08]。
3. Tree edge partitioning problem：此問題在研究如何將一個樹狀圖的邊的

分割為若干個子樹而各子樹的邊的各數要盡可能平均。以往的研究多專注於點的分割，邊的分割研究較少。在[DAM07]中，我們證明了任何一棵樹，如果要分割為 2、3 或 4 棵樹，必然存在一種分割的方式使得最大棵與最小棵的邊數的比值不會大過兩倍，對於超過四以上，我們猜測也存在這樣的分割法，但是未能證明，我們另外提出了一個簡單的演算法，使得比值不會超過三倍，同時也進行了 random data 的實驗驗證。後來我們也成功的證明了這個猜測得正確性[DAM10]；在[U12a]中，我們發更進一步地發展了一個線性時間的演算法保證切割出來的邊數倍率在兩倍以內，且不只用於樹狀圖而可用於一般圖。

所謂 tree edge k-decomposition 是指不斷的將一棵樹分成 k 份直到剩下一根 edge 為止，在[JCO06]中我們證明對於任何一棵 n 個 edge 的樹，他的 2-與 3-decomposition 分別只需要 $1.44\log n$ 以及 $\log n$ 個 level，而且也證明了這兩個 bound 是緊密的。

4. Balanced connected partition：此問題在探討如何將一個點上有權重的圖均勻的切割成指定個數的連通子圖。在 [U10a]中我們首先對於此問題的基本性質與複雜度做了一些探討，並提出了利用 non-separating path 求取近似解的一般性策略；在[DMAA12]中我們提出了此問題在 Interval Graph 上的 PTAS；在[JCO12]中則探討此問題在 Grid Graph 上的結果，包含尋找 non-separating path 的演算法以及利用此法而找到 $5/4$ 近似率的方法；在[CGGA10]中我們更將近似率改進到 $7/6$ 。

【Evolutionary tree construction】

1. Distance-base method：所謂 Distance-base 的演化樹建構問題是給定一群物種之間的差異程度，要尋求一個以這群物種為 leaf 的樹狀結構而最佳化某個 objective function。我們先完成一個很簡單的作品「如何決定一個物種在一個已知演化樹上的位置」[IPL97]，接著，我們著眼在建構最佳演化樹的方法，對於這個 NP-hard 的問題，我們嘗試了以 branch-and-bound 的方式求 minimum ultrametric tree 的研究[JCO99]
2. triple method：triplet method 的問題是給定一些三者之間的關係 (triplet)，求出一個演化樹以滿足最多的 triplet。我們提出 dynamic

programming 的方法以及一些 heuristic 的方法，利用程式實驗進行效益的分析，同時也包括前人所提出之方法，其結果發表於[JCO04]，在這個問題上，我們又做了一些改進的方法，研究如果在 DP 的過程中不保留所有的結果，犧牲部分品質以加快執行時間的方法，其結果發表於[JISE04]。

【Social network analysis】

在[AINA08]中我們探討了 Blog 中 friend network 的一些特性；在[ICCCI10]中我們提出了找 cohesion group 的一個新的 model 以及相關演算法。另外還有一些發表於 local conference 的粗淺結果也是關於在一個 social network 中尋找 cohesion group 的議題。在[COCOA11, CPS11, UM12]中我們則對於如何在 Internet social network 中判斷真假邊的問題進行研究。目前多數此類研究係以 AI 領域的方法來進行，但內容的比對分析相當耗時，我們的研究則是從演算法的角度出來，著重在結構的分析。

【Path problems】

1. Path problem in a tree：在 tree 上尋找某些限制下的最佳 path 問題有多種變形的問題，在[IPL99]中我們設計出尋找 length-constrained heaviest path 的演算法；而後來在 [IPL09]則設計了 maximum-density path 的演算法並證明此演算法的時間複雜度為最佳。
2. Minimum latency problem：minimum latency 問題是一個類似於 TSP (traveling salesperson problem) 的問題，不同的在於其目標函數是最小化每一點等待時間之總合，而每一點的等待時間是在所找到的 routing 路徑上起點到達該點的路徑長度。在[IPL00]中我們提出了一個充分條件說明具有什麼性質的圖可以用 dynamic programming 來得到 polynomial time 的解，同時也探討了此問題的變形：如何決定起點。對於原始問題，我們提出一種整合了 branch-and-bound 以及 dynamic programming 兩種技巧的方法並且提出一系列的 lower bounds，使得可以在時間與解的品質上做取捨的演算法[IPL04]。
3. Next-to-shortest path problem：此問題在尋找兩點之間的第二短長度的路徑，在我們的結果之前，該問題已經過多次改進，在 Algorithmica 2010 的最佳結果二次函數時間的演算法，我們的結果[Alg12]則是將其改進到線

性時間（假設兩點到其餘點的距離已知），這個已是可能的最佳結果。一般的距離問題，邊的權重是 positive 或 non-negative 通常類似，但此問題在邊的權重允許為 0 時，困難度大大提高，我們在[U12b]的研究則提出了如何處理邊權重為 0 的情形，而其結果的時間複雜度仍然是線性的。

4. Disjoint paths problem：在 dag 中尋找 min-max disjoint paths 的問題已知有 pseudo-polynomial time 的演算法，在[JCSS11]中提出一相對應的 FPTAS 其時間複雜度較先前的結果為佳。我們在[DO12]中提出了一個相當有趣的 Disjoint paths 問題：假設在圖的邊是有顏色的條件下，如何尋找最多條 disjoint path，此處的 path 必須是由相同顏色的邊組成的。我們就其複雜度與可近似性提出了一些結果，也提出了 exact algorithm 和 approximation algorithm。

【Other Tree problems】

1. Inter-cluster distance of a tree metric：對於一個樹狀圖，任意將點分成兩個 clusters，我們證明了 intracluster 的平均距離必然不超過平均 intercluster 距離的兩倍，利用這性質也提出了一個 minimum average intercluster distance spanning tree 問題的兩倍近似演算法，此性質亦可擴展至兩個以上的 clusters [TCS06]。
2. Backup 2-Center and Backup 2-Median Problems on Trees：Backup 2-center/median 問題是傳統 center/median 問題的變形，考慮的是其中一個 facility 在某些機率會 fail 的情形下如何選擇 facility position，在[Net08]中我們對這兩個問題提出了有效率的演算法。

【專書撰寫】

除了研究工作之外，2004 年，我與趙坤茂教授合作，將近年來在 spanning tree 問題上的研究進展寫成了一本書 Spanning Trees and Optimization Problems，由 Chapman & Hall / CRC 於 2004 年出版[Book04]，雖然只是一本小書，我花了很多時間，對我而言，這是難得的經驗。此外，在 07 年又與唐傳義教授與趙坤茂教授合作，撰寫了一個名為 Optimum communication spanning trees 的 chapter 收錄在

Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics 這本書中，此書由 Teofilo F. Gonzalez 編輯，Chapman & Hall / CRC 於 2007 年出版，是針對近似演算法探討的一本重要參考書。

代表性作品清單

- [IPL97] B.Y. Wu and C.-Y. Tang* (1997/9), An $O(n)$ algorithm for finding an optimal position with relative distances in an evolutionary tree, *Information Processing Letters*, vol. 63, pp. 263-269. [SCIE, EI]
- [IPL99] B.Y. Wu, K.-M. Chao, C.-Y Tang* (1999/1), An efficient algorithm for the length-constrained heaviest path problem on a tree, *Information Processing Letters*, vol. 69, pp. 63-67. [SCIE, EI]
- [JCO99] B.Y. Wu, K.-M. Chao, C.-Y Tang* (1999), Approximation and exact algorithms for constructing minimum ultrametric trees from distance matrices, *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 3, pp. 199-211. [SCIE, EI]
- [DAM00a] B.Y. Wu, K.-M. Chao, C.-Y Tang* (2000/10), Approximation algorithms for the shortest total path length spanning tree problem, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 105, pp. 273-289. [SCI,EI]
- [SICOMP00] Wu, B.Y., Lancia, G., Bafna, V., Chao, K. M., Ravi, R., and Tang, C.Y.* (2000/6), A polynomial time approximation scheme for minimum routing cost spanning trees, *SIAM J. on Computing*, vol. 29, no. 3, pp. 761-778. [SCI,EI]
- [DAM00b] B.Y. Wu, K.-M. Chao, C.-Y Tang* (2000/6), Approximation algorithms for some optimum communication spanning tree problems, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 102(3), pp. 245-266. [SCI,EI]
- [JOA00] B.Y. Wu, K.-M. Chao, C.-Y Tang* (2000/8), A polynomial time approximation scheme for optimal product-requirement communication spanning trees, *Journal of Algorithms*, vol. 36, pp. 182-204. [SCI,EI]
- [IPL00] B.Y. Wu* (2000/10), Polynomial time algorithms for some minimum latency problems, *Information Processing Letters*, vol. 75(5), pp. 225-229. [SCIE, EI]
- [Net02] B.Y. Wu*, K.-M. Chao, C.-Y Tang (2002), Light graphs with small routing cost, *Networks*, vol. 39(3), pp. 130-138, [SCI,EI]. (NSC 90-2213-E-366-005)
- [JOA02] B.Y. Wu* (2002/8), A polynomial time approximation scheme for the two-source minimum routing cost spanning trees, *Journal of Algorithms*, vol. 44(2), pp. 359-378, [SCI,EI] (NSC 91-2213-E-366-004).
- [JISE04] B.Y. Wu* (2004), Constructing evolutionary trees from rooted triples, *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 20(1), pp. 181-190. [SCIE, EI] (NSC 89-2218-E-266-003)

- [JCO04] B.Y. Wu* (2004), Constructing the maximum consensus tree from rooted triples, *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 8(1), pp. 29-39,. [SCIE, EI] (NSC 90-2213-E-366-005)
- [DAM04a] B.Y. Wu*, Approximation algorithms for the optimal p-source communication spanning tree, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 143, pp. 31-42. [SCIE, EI] (NSC 92-2213-E-366-001)
- [DAM04b] B.Y. Wu*, An improved algorithm for the k-source maximum eccentricity spanning trees, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 143, pp. 342-350. [SCIE, EI]
- [Book04] B.Y. Wu and K.-M. Chao (2004), *Spanning Trees and Optimization Problems*, ISBN: 1584884363, Chapman & Hall / CRC
- [IPL04] Wu, B.Y., Z.-N. Huang and F.-J. Zhan (2004/12), Exact algorithms for the minimum latency problem, *Information Processing Letters*, vol. 92(6), pp. 303-309. [SCIE, EI]
- [TCS05] B.Y. Wu* (2005/12), An analysis of the LPT algorithm for the max-min and the min-ratio partition problems, *Theoretical Computer Science*, vol. 349(3), pp. 407--419. [SCIE, EI] (doi:10.1016/j.tcs.2005.08.032)
- [NET06] Y.-H. Chen, B.Y. Wu and C.-Y. Tang* (2006/5), Approximation algorithms for some k-source shortest paths spanning tree problems, *Networks*, vol. 47(3), pp. 147--156. [SCIE, EI] (NSC 93-2213-E-366-001)
- [JCO06] C.-M. Huang, B.Y. Wu* and C.-B. Yang (2006/11), Tree edge decomposition with an application to minimum ultrametric tree approximation, *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 12(3), pp. 217--230. [SCIE, EI]
- [TCS06] B.Y. Wu, (2006/12), On the intercluster distance of a tree metric, *Theoretical Computer Science*, vol. 369, pp. 136—141 [SCI, EI]
- [JISE07] B.Y. Wu* and H.-H. Ou (2007/3), Performances of list scheduling for set partition problems, *Journal of Information Science and Engineering*, vol. 23, no. 2, pp. 641-647. [SCIE, EI]
- [DAM07] B.Y. Wu, H.-L. Wang, S.T. Kuan and K.-M. Chao, (2007/5), On the uniform edge-partition of a tree, *Discrete Applied Mathematics*, vol. 155 (10), pp. 1213-1223. [SCI] (corresponding author) doi:10.1016/j.dam.2006.10.012
- [Alg08] B.Y. Wu, C.-Y. Hsiao, and K.-M. Chao (2008/2), The swap edges of a multiple-sources routing tree, *Algorithmica*, 50(3), pp. 299-311, [SCI, EI].
- [ORL08] P.-H. Ho, A. Tamir and B.Y. Wu*, (2008/1), Minimum Lk path partitioning—An illustration of the Monge property, *Operations Research Letters*, 36:43-45, [SCI, EI]
- [Book07] Wu, B.Y., Tang C.Y., and Chao, K.-M. (2007/5) "Optimum communication spanning trees," a chapter of the book "Handbook of Approximation Algorithms and Metaheuristics," edited by Teofilo F. Gonzalez (University of California, Santa Barbara), Chapman & Hall/CRC Press, USA. ISBN: 9781584885504

- [Net08] H.-L. Wang, B.Y. Wu and K.-M. Chao (2008), The Backup 2-Center and Backup 2-Median Problems on Trees, Networks, 53(1), pp.39-49.. [SCI, EI]
- [AINA08] S.-T. Kuan, B.Y. Wu, W.-J. Lee (2008/3), Finding Friend Groups in Blogosphere, in Proceedings of the IEEE 22nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA2008), Okinawa JAPAN, pp. 1046--1050, DOI 10.1109/WAINA.2008.156
- [IPL09] B.Y. Wu (2009/8), An optimal algorithm for the maximum-density path in a tree, Information Processing Letters, 109(17), 975-979. [SCI, EI] NSC97-2221-E-366-001-MY3
- [WN10] L.-H. Yen*, B. Y. Wu and C.-C. Yang (2010), Tree-based object tracking without mobility statistics in wireless sensor networks, Wireless Networks, 16(5): 1263-1276. [SCI] NSC 96-2221-E-366-003
- [DAM10] A.-C. Chua, B.Y. Wu, H.-L. Wang, K.-M. Chao*, (2010/7) A tight bound on the min-ratio edge-partitioning problem of a tree, Discrete Applied Mathematics, 158(14): 1471-1478. [SCI] 95-2221-E-366-003
- [ICCCI10] C.-P. Yang, C.-Y. Liu, B.Y. Wu (2010/11), Influence Clubs in Social Networks, Proceedings of the 2010 Computational Collective Intelligence. Technologies and Applications, Lecture Notes in AI Vol. 6422, Springer, pp. 1-10, Taiwan, 2010. [EI]
- [CGGA10] B.Y. Wu (2011), A 7/6-Approximation Algorithm for the Max-Min Connected Bipartition Problem on Grid Graphs. In proceeding of 9-th International Conference Computational Geometry, Graphs and Applications CGGA 2010, Jin Akiyama, Jiang Bo, Mikio Kano, Xuehou Tan (Eds.), Dalian, China, LNCS 7033, pp. 188-194. [EI]
- [U10a] B.Y. Wu, On the minimum non-separating connector and the maximum remaining component problems, manuscript.
- [COCOA11] B.Y. Wu (2011/8), On the maximum locally clustered subgraph and some related problems, COCOA 2011, LNCS 6831, pp. 234-246. [EI]
- [CPS11] B.Y. Wu, Y.-T. Huang and K.-H. Lin (2011/8), A structural approach for finding real-friend links in Internet social networks, IEEE International Conferences on Cyber, Physical and Social Computing (CPSCoM) 2011 [EI]
- [JCSS11] B.Y. Wu (2011/11), A note on approximating the min-max vertex disjoint paths on directed acyclic graphs. Journal of Computer and System Sciences, in press, [SCI] NSC 97-2221-E-366-001-MY3
- [DMAA12] B.Y. Wu, (2012/3) Fully polynomial-time approximation schemes for the max-min connected partition problem on interval graphs, Discrete Mathematics, Algorithms and Applications, 4(1). [EI]
- [DO12] B.Y. Wu, (2012/2) On the maximum disjoint paths problem on edge-colored graphs, Discrete Optimization, 9(1): 50 - 57 [SCI]
- [Alg12] B.Y. Wu, (2012/+) A simpler and more efficient algorithm for the next-to-shortest path

problem, *Algorithmica*, in press, [SCI]

- [JCO12] B.Y. Wu, (2012/+) Algorithms for the minimum non-separating path and the balanced connected bipartition problems on grid graphs, *Journal of Combinatorial Optimization* [SCI], in press
- [UM12] Y.-T. Huang, B.Y. Wu (2012/8), Extracting Strongly Connected Friend Networks, in *Proceedings of the 5th IET International Conference on Ubi-Media Computing (U-Media 2012)*, Xining China. [EI]
- [U12a] A-C. Chu, B.Y. Wu and K.-M. Chao*, A linear-time algorithm for finding an edge-partition with max-min ratio at most two, (under revision)
- [U12b] B.Y. Wu*, J.-L. Guo, Y.-L. Wang, A linear time algorithm for the next-to-shortest path problem on undirected graphs with nonnegative edge lengths, under review