

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

以 GIDS 求解大規模旅行推銷員問題之研究 Application of Generic Intensification and Diversification Search (GIDS) to the Large Scale Traveling Salesman Problem

計畫編號：NSC - 89 - 2211 - E - 009 - 078

執行期限：89年 8月 1日至 90年 7月31日

計畫主持人：韓復華 國立交通大學運輸工程與管理學系 教授

一、中文摘要

本研究探討以 GIDS(Generic Intensification and Diversification Search, GIDS)求解1,000點以上的大規模旅行推銷員問題(Large scale Traveling Salesman Problem, LTSP)。研究方法結合鄰域搜尋法(Local Search)與新近發展之巨集啟發式解法建立GIDS執行架構，包括門檻接受法(Threshold Accepting, TA)、大洪水法(The Great Deluge Algorithm, GDA)及兩極跳躍法(Flip Flop, FF)等。求解概念為：先產生起始解後進行鄰域搜尋，再以TA與GDA進行深度化搜尋改善，然後使用FF對解空間進行擾動，增加搜尋之廣度。

本研究選擇22題1,002至4,461點之國際標竿例題進行測試，測試結果發現：GIDS架構對單獨執行TA或GDA之改善績效介於9%至22%，但由於多進行一階段的運算，時間增加幅度介於原時間之1.17至2.02倍，最小成本誤差平均更降至1.4%，突破以往使用傳統交換法之屏障(3%至5%)，表示結合深度化與廣度化之GIDS求解架構有相當之應用潛力。

關鍵詞：旅行推銷員問題、巨集啟發式解法、包容性搜尋、深度化、廣度化

Abstract

This research is an extension of a series of studies conducted by the author on subjects related to vehicle routing and scheduling problems. We applied the GIDS (Generic Intensification and Diversification Search) concept to design two-stage meta-heuristics for solving the Large-scale Traveling Salesman Problem (LTSP). We used flip-flop algorithm for diversification search in addition to the TA and GDA generic search engines. Considering different strategies, we developed six implementation procedures for TA-FF-TA, TA-FF-GDA(I), GDA(I)-FF-TA, GDA(II)-FF-TA, GDA(I)-FF-GDA(I), and GDA(II)-FF-GDA(I).

A bank of 22 benchmark TSP instances from the TSPLIB is selected to evaluate the performance of different solution methods. The problem size of the test problems ranges from 1,002 to 4,461. Among different two-stage solution methods, TA-FF-TA seems to yield better average performance than others. Results show that the average accuracy deviations of the 22 tested problems are all lower than 2.2%, and the best is merely 1.4%. This also implies that these GIDS meta-heuristics methods are robust.

Keywords: TSP, Meta-heuristics, Generic Search, Intensification, Diversification.

二、緣由與目的

本計畫係主持人在「車輛路線與人員排班 (Vehicle Routing and Crew Scheduling)」領域之長期性研究的延續。本研究群自八十四年度國科會研究計畫開始，針對近年來新發展的多種巨集啟發式解法(Meta-heuristics)，如：門檻接受法(Threshold Accepting, TA)[2]、大洪水法(Great Deluge Algorithm, GDA)及記錄更新法(Record-to-Record Travel, RRT)[3]等進行探索，並發展出一套「包容性深廣搜尋(Generic Intensification and Diversification Search, GIDS)」的巨集啟發式解法與執行架構，並成功應用於求解車輛路線相關問題中較為複雜的「多車種車輛路線問題(Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem, FSMVRP)」[4, 5, 12]與週期性輛路線問題(Periodic Vehicle Routing Problem, PVRP)[9]，研究成果顯示GIDS法確實可做為求解車輛路線相關問題之有效工具。

「旅行推銷員問題 (Traveling Salesman Problem, TSP)」是組合最佳化之車輛路線問題中最基本的一種問題型態。TSP問題的基本定義為：「給定一路網 $G=(N, A)$ ，其中 N 為節點(nodes)之集合， A 為節線(links)之集合；希望在此路網上求得一條以最小成本，自一點出發並經過 N 中所有節點恰一次，再回到起始點的路線(tour)」。

而大規模(Large-scale)問題之範圍，文獻上係依照當時的電腦技術背景與反應之求解能力而界定。最早於文獻中出現之大規模旅行推銷員問題(Large-scale TSP, LTSP)為1954年Dantzig, Fulkerson及Johnson [1]利用線性規劃方法求解49-city之TSP問題。隨著電腦技術之演進，TSP可求解之規模也逐漸擴大；近年來，大規模旅行推銷員問題亦受到重視，屢見於文獻中，其求解規模亦急遽增加，目前國際標竿測試例題中最大之對稱TSP問題之節點數即為85,900。文獻中對於大規模範圍界定並無明確定義，本研究參考相關研究與考量現有技術後，界定大規模旅行推銷員問題為節點數大於1,000之例題。

目前文獻上對於應用啟發式解法求解TSP，已有不少研究成果，並發展出許多不同之演算法，本研究之目的擬針對較大規模之旅行推銷員問題(LTSP)，嘗試應用近年來本研究群所發展之GIDS巨集啟發式方法進行求解，並深入探討數種更有效率的鄰域搜尋法，以提升整體的解題績效；此外，為驗證巨集啟發式方法之效率，本研究自國際網路上之國際TSP標竿題庫中選擇了22題大規模的例題，以進行參數測試與績效分析，期能在可容忍時間內求出精確度高之近似解。

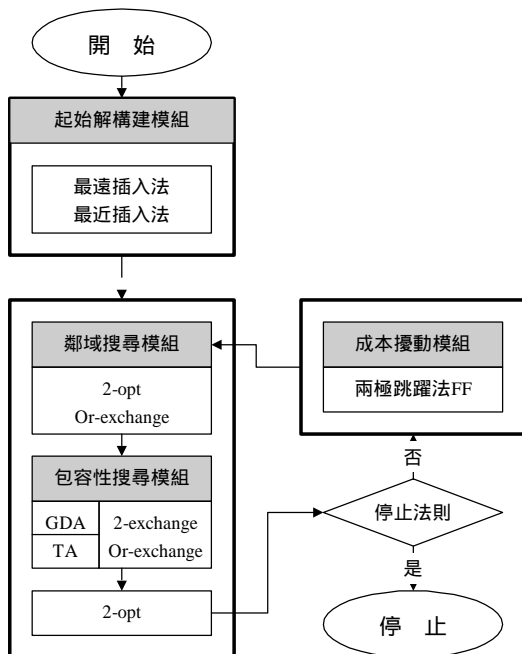
三、研究方法及成果

3.1 執行架構與流程概述

「包容性深廣搜尋(GIDS)」係整合包容性搜尋、成本擾動，以及禁制搜尋法(TS)之深度與廣度搜尋的精神，所成的一套巨集啟發式解法，可用以求解複雜的組合最佳化問題。整套GIDS方法共分成MIC、GSI與PSD三個策略群組：MIC (Multiple Initialization Constructor)為多起始解構建群組，GSI (Generic Search for Intensification)為深度化之包容性搜尋群組，PSD (Perturbation Search for Diversification)則是廣度化之擾動性搜尋群組，方法係以傳統鄰域搜尋為實際執行求解之工具，以深度搜尋之GSI群組為核心，再搭配廣度搜尋之PSD與MIC群組，詳細內容請參考文獻[4, 5, 9, 12]。

根據GIDS之概念，本研究著手建立求解LTSP之執行架構，首先說明搜尋之基本概念。主要部分是以鄰域搜尋為基礎的包容性搜尋，交替的運用搜尋策略，在一區域內進行深度搜尋過後，再慢慢地移動到附近進行深度搜尋，然後利用成本擾動的機制，有系統的跳至另一區域再進行包容性搜尋，逐漸擴展其途徑與範圍，希望能尋得較佳的解。

配合LTSP問題之求解，本研究設計GIDS-LTSP之執行架構如圖一所示：架構主要包含四大部分：起始點構建、鄰域搜尋、包容性搜尋與成本擾動等。其中，在起始解構建部分，主要目的在迅速地產生起始解，以供後續運算，本研究選擇採用「最遠插入法(Farthest Insertion)」、「最近插入法(Nearest Insertion)」為構建之方法；鄰域搜尋模組部分，目的在尋找局部最佳解，本研究選擇以2-opt、Or-exchange為鄰域搜尋模組之原件；包容性搜尋模組部分，則將TA、GDA與前述之鄰域搜尋模組2-exchange及Or-exchange結合起來，以接受暫劣解的方式跳脫局部最佳解的束縛。此外亦可組合首先改善、最佳改善與放鬆接受條件等執行方式；成本擾動模組藉由擾動搜尋成本的方式來變化與擴大搜尋的空間，本研究選擇FF來對成本進行擾動。



圖一 GIDS-LTSP之執行架構

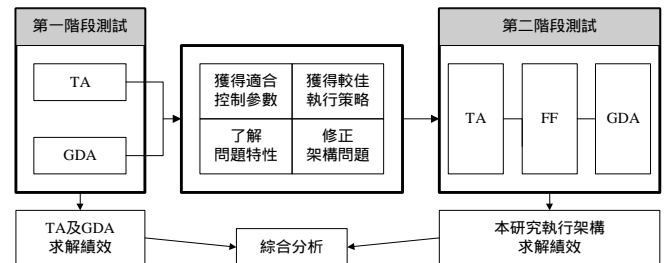
GIDS-LTSP架構之演算流程如下：

- 步驟0：起始解構建，將所蒐集之標竿例題，利用起始解構建模組迅速地產生起始解。
- 步驟1：鄰域搜尋，獲得起始解之後，利用鄰域搜尋模組搜尋局部最佳解。
- 步驟2：包容性搜尋，在陷入局部最佳解後，應用包容接受策略，脫離並尋找更佳的解。若符合停止法則，則停止演算；否則執行步驟3。
- 步驟3：成本擾動，當包容性搜尋無法有所突破時，擾動搜尋成本後，回到步驟1。

3.2 實驗設計

本研究實驗採用如圖二之分階段執行方式。第一階段針對包容性搜尋模組進行測試，對本研究採用之TA與GDA兩種巨集啟發式方法進行全面性的測試，尋找出適合之參數與執行策略，並修正可能產生的問題，確保包容性搜尋模組之正確性與架構完整性，此外，希望能對測試例題特性有所了解。

第二階段則將成本擾動模組與包容性模組結合，使用第一階段所獲得之最適參數與執行策略，將TA與GDA結合成本擾動模組之FF交換法，分別以六種組合狀況實際測試本研究執行架構可行性與求解績效。



圖二 本研究實驗進行方式

3.3 LTSP測試例題之蒐集與整理

隨著網際網路的發達，國際上專門研究組合最佳化問題的研究群，亦將其彙整之不同型態的相關問題於網際網路上建立標竿(Benchmark)測試例題及最新的最佳結果之題庫，提供全世界從事此類研究的人員一個共同比較的基準與切磋討論的園地。在眾多網站中TSPLIB包含了許多TSP相關之測試例題，是一個免費提供學術性研究使用的資料庫，並且定期由作者Gerhard Reinelt等人予以更新[6]。目前最新版本的日期為June, 2000。網址為<http://www.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/comopt/software/TSPLIB95/> [7]。

本研究中所測試之TSP例題來源，即由TSPLIB所取得[6, 7]，選擇22個1,002至4,461點範圍之大型例題，資料結構均屬於「平面(x, y)座標」，其例題名稱、題目規模及目前全世界文獻報導之已知最佳解成本如表一所示。

表一 LTSP之國際標竿測試例題題庫

編號	例題名稱	規模	已知最佳解	例題來源
1	pr1002	1002	*259,045	Padberg/Rinaldi
2	u1060	1060	224,094	Reinelt
3	vm1084	1084	239,297	Reinelt
4	pcb1173	1173	56,892	Juenger/Reinelt
5	d1291	1291	50,801	Reinelt
6	rl1304	1304	252,948	Reinelt
7	rl1323	1323	270,199	Reinelt
8	nrw1379	1379	56,638	Bachem/Wottawa
9	fl1400	1400	20,127	Reinelt
10	u1432	1432	152,970	Reinelt
11	fl1577	1577	22,249	Reinelt
12	d1655	1655	62,128	Reinelt
13	vm1748	1748	336,556	Reinelt
14	u1817	1817	57,201	Reinelt
15	rl1889	1889	316,536	Reinelt
16	d2103	2103	*80,450	Reinelt
17	u2152	2152	64,253	Reinelt
18	u2319	2319	234,256	Reinelt
19	pr2392	2392	*378,032	Padberg/Rinaldi
20	pcb3038	3038	*137,694	Junger/Reinelt
21	fl3795	3795	28,772	Reinelt
22	fnl4461	4461	182,566	Bachem/Wottawa

*：確定為已知最佳解

3.4 測試結果之綜合分析

本研究以C語言撰寫GIDS法各模組之執行程式，並於Dual-PIII-550、512 Mb RAM之Win2000 Server環境下執行，相關控制參數如表二所示，詳細參數內容請參考文獻[8, 10, 11, 13]。

(一) 第一階段之測試

測試22題國際標竿例題後，結果顯示應用TA架構求解各題之最小成本誤差平均為2.176%，應用GDA架構求解各題之最小成本誤差平均為2.508%(消退速度I)與2.076%(消退速度II)。

(二) 第二階段之測試

第一階段測試完成後，使用本研究選定之擾動機制--兩極跳躍法(FF)對其進行擾動後，再度進行搜尋。TA與GDA分別搭配FF擾動機之組合共有六組狀況:TA-FF-TA, TA-FF-GDA(I), GDA(I)-FF-TA, GDA(II)-FF-TA, GDA(I)-FF-GDA(I),與 GDA(II)-FF-GDA(I)。在FF跳躍幅度為原成本之1.6倍時，測試結果之平均誤差平均在2.202%至2.543% 間，最小成本誤差平均在1.870%至2.042%間，改善績效介於9 %至22 %，但由於多進行一階段的運算，時間亦相對增加，幅度介於原時間之1.17至1.75倍。

將跳躍幅度由1.6倍降至1.3倍後，測試結果之平均誤差平均在2.20%至2.54% 間，最小成本誤差平均在1.720%至2.134% 間，改善績效介於14 %至21 %，時間增加幅度介於原時間之1.26至2.02倍。

比較後發現，以FF1.3與FF1.6之效果相近；此外，TA-FF-TA之組合無論在FF1.6與FF1.3均有不錯表現，此發現與以往運用相同策略運算可能會導致較差精度之經驗有所出入。

根據實驗證明本研究架構之可行性，確實能有效再次降低誤差值，求得更精確的解，也說明擾動機制在架構中扮演了重要的角色。

表二 本研究使用之控制參數與測試範圍

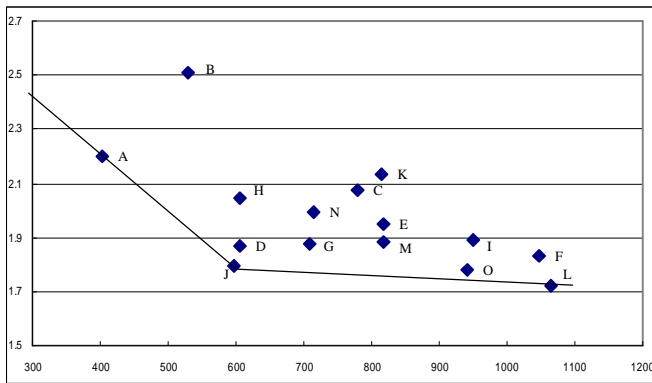
參數項目	測試範圍	
鄰域搜尋	(1)不進行(2)2-opt(3)Or-exchange	
核心交換策略	(1)2-exchange + Or-exchange (2)Or-exchange + 2-exchange	
T A	起始門檻值 T_0	$C(X_0)/N$
	門檻數列長度	30
	門檻數列型態	梯狀遞減型
	爬升限制	$C(X_0) + T_0$
G D A	起始水位 WL_0	$WL_0 = C(X_0) \times (1 + \frac{1}{N})$
	起始水位 WL_0	$WL_0 = C(X_{Ne}) \times (1 + \frac{1}{N})$
	消退速度DS	$DS = \frac{WL_0}{N \times \text{frek} \times k}$ frek=30, k = 3
	消退速度DS	$DS = \frac{WL_0}{N \times \text{frek} \times k}$ frek=30, k = 6
FF跳躍幅度	(1) 1.6 (2) 1.3	

(三) 各架構最小成本誤差比較

以下將針對各架構求解各題之最小成本誤差進行比較，比較之項目包括最小成本誤差與執行時間兩項指標，以兩項指標為縱軸與橫軸繪圖，並在兩指標之權衡下繪製各架構之非劣解曲線圖，曲線上之各點屬於同等級效果，表三與圖三分別表示之。圖中之非劣解有三點，分別為TA架構之A點，TA-FF1.3-TA架構之J點，與GDA(II)-FF1.3-GDA(I)之L點。

表三 本研究各架構最小成本誤差測試結果

執行架構	最小成本誤差(%)	執行時間(CPU sec)	代號
TA	2.197	401.960	A
GDA(I)	2.508	529.230	B
GDA(II)	2.076	778.516	C
TA-FF1.6-TA	1.870	606.770	D
GDA(I)-FF1.6-GDA(I)	1.949	816.950	E
GDA(II)-FF1.6-GDA(I)	1.832	1046.680	F
TA-FF1.6-GDA(I)	1.874	709.430	G
GDA(I)-FF1.6-TA	2.042	606.190	H
GDA(II)-FF1.6-TA	1.888	950.330	I
TA-FF1.3-TA	1.792	597.610	J
GDA(I)-FF1.3-GDA(I)	2.134	815.800	K
GDA(II)-FF1.3-GDA(I)	1.721	1063.370	L
TA-FF1.3-GDA(I)	1.880	817.890	M
GDA(I)-FF1.3-TA	1.993	714.150	N
GDA(II)-FF1.3-TA	1.779	941.830	O



圖三 本研究各架構非劣解曲線圖

(四) 本研究最佳測試結果

經測試所有架構後與運用不同求解策略後，彙整出最佳個案測試結果如表四所示，列出各題目之例題規模、已知最佳解、求解之成本誤差、執行時間與最佳測試組合。

由表四中可觀察出本研究之各題最佳成本誤差平均僅為1.409%，所需執行時間平均為878.67秒，最佳成本之各測試組合均為TA、GDA與FF結合之架構，第一階段採用TA架構者，22題中有10題，以GDA(I)架構則有4題，GDA(II)架構佔有8題，以TA及GDA(II)表現較好。

表四 本研究測試之最佳結果

編號	已知最佳解	成本誤差 (%)	時間 (CPU sec)	測試組合
1	*259,045	1.214	71.37	TA-FF1.3-TA
2	224,094	0.925	84.69	TA-FF1.3-TA
3	239,297	1.303	118.77	GDA(I)-FF1.3-TA
4	56,892	1.299	108.02	TA-FF1.3-TA
5	50,801	1.610	269.62	GDA(I)-FF1.6-GDA(I)
6	252,948	2.200	203.17	TA-FF1.3-GDA(I)
7	270,199	1.190	155.84	TA-FF1.6-TA
8	56,638	1.360	376.22	GDA(II)-FF1.3-GDA(I)
9	20,127	0.134	229.05	TA-FF1.6-TA
10	152,970	1.365	167.45	TA-FF1.6-TA
11	22,249	0.211	205.03	TA-FF1.6-TA
12	62,128	2.022	422.28	GDA(II)-FF1.3-TA
13	336,556	1.449	619.64	GDA(II)-FF1.3-GDA(I)
14	57,201	2.023	517.02	GDA(I)-FF1.6-GDA(I)
15	316,536	2.592	561.66	GDA(I)-FF1.6-GDA(I)
16	*80,450	0.677	1129.44	GDA(II)-FF1.6-GDA(I)
17	64,253	1.917	621.81	TA-FF1.3-GDA(I)
18	234,256	0.602	680.33	GDA(II)-FF1.6-TA
19	*378,032	1.786	1050.50	GDA(II)-FF1.3-TA
20	*137,694	1.779	2146.77	GDA(II)-FF1.6-TA
21	28,772	1.564	4163.71	GDA(II)-FF1.3-GDA(I)
22	182,566	1.769	5428.27	TA-FF1.6-GDA(I)
	Average	1.409	878.67	

四、結論

本研究將「包容性深廣搜尋 (GIDS)」巨集啟發式解法，應用在超過1000點以上的大規模旅行推銷員問題 (LTSP)上，經由對22個國際題庫例題之測試，採用兩階

段策略運算後，誤差平均值最後可降至1.409%、CPU時間平均為878.67秒。此結果已突破以往交換法求解之屏障，表示此種結合深度化與廣度化之GIDS法求解架構有相當之應用潛力。

參考文獻

- [1] Dantzig G., R. Fulkerson, and S. Johnson (1954), "Solution of A Large-Scale Traveling-Salesman Problem," *Operations Research*, Vol. 2, pp.393-410.
- [2] Dueck, G., & T. Scheuer (1990), "Threshold Accepting: A General Purpose Optimization Algorithm Appearing Superior to Simulated Annealing," *Journal of Computational Physics*, Vol.90, pp.161-175.
- [3] Dueck, G. (1993), "New Optimization Heuristics: The Great Deluge Algorithm and the Record-to-Record Travel," *Journal of Computational Physics*, Vol.104, pp.86-92.
- [4] Han, A.F. & Y.J. Cho (1999), "A New Meta-Heuristic Approach to the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*, Vol.3, No.3, pp.255-270.
- [5] Han, A. F. and Y. J. Cho (2001), "A GIDS Metaheuristic Approach to the Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem", in Celso Ribeiro and Pierre Hansen (eds.), *Essays and Surveys in Metaheuristics*, Chapter 18, pp. 399-414, Kluwer, 2001.
- [6] Reinelt, G. (1991), "TSPLIB : A Traveling Salesman Problem Library," *ORSA Journal on Computing*, Vol. 3, No. 4, pp.376-384.
- [7] TSPLIB, <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/comopt/software/TSPLIB95/>.
- [8] 王國琛 (2000), (指導教授：韓復華)，「巨集啟發式解法在求解大規模旅行推銷員問題之應用」，國立交通大學運輸工程與管理學系，八十九年度大專生參與專題研究計畫研究成果報告 (NSC89-2815-C009-014-E)。
- [9] 卓裕仁 (2001)，「包容性深廣度搜尋之巨集啟發式方法發展」，第九屆校際運輸學術聯誼研討會，國立交通大學，頁175-193。
- [10] 陳國清 (1996)，(指導教授：韓復華)，「成本擾動法(NM)與兩極跳躍法(FF)在TSP問題應用之研究」，國立交通大學運輸工程與管理學系畢業專題報告。
- [11] 韓復華、王國琛 (2000)，「巨集啟發式解法在求解大規模旅行推銷員問題之研究」，中華民國第五屆運輸網路研討會論文集，逢甲大學，頁195-204。
- [12] 韓復華、卓裕仁 (1998)，「混合型啟發式解法在多車種車輛路線問題之應用」，國立交通大學運輸工程與管理學系，八十七年度國科會專題研究計畫成果報告(NSC-87-2211-E-009-024)。
- [13] 韓復華、卓裕仁 (2000)，「巨集啟發式解法在TSP與VRP上之應用：參數設定與執行機制之探討」，中華民國第五屆運輸網路研討會論文集，逢甲大學，頁72-82。