智慧計算學門

人工智慧與仿生計算領域規劃

智慧計算學門

人工智慧領域規劃

參與規劃教授(按姓氏筆劃序排列):

李育杰教授

林智仁教授

林守德教授

林軒回教授

吳毅成教授

陳昇瑋教授

領域概述

「人工智慧」自 1950 年代至今，已是 Computer Science 的一個重要領域早期的研究方向有 Reasoning，Natural Language Processing，Expert Systems 等。人工智慧在開始發展時有遠大的理想希望 computer 能達到與人相當的智慧，這也衍生了著名的 Turing Test 來判斷人與電腦是否可達到某種程度的不可分辨性。然而這目標過於遠大而至 今無法達成，也因此人工智慧在過去數十年經歷了相當程度的起伏在某些時刻人工智慧甚至被認為已是過時的領域。但在 90 年代後卻有不少新技術誕生並造就了人工智慧領域的澎勃發展。一個主要的改變在於善用今日電腦的高速計算能力與大量記 憶體等優勢，來解決原本需要人類智慧的困難問題。這個觀念的開展，使得研究者不再侷限於讓電腦以人腦的思考模式來解決問題，而是對電腦量身訂做一套適合它的方法，因此造就了機器學習(Machine Learning)，資料探勘(Data Mining)，以及智慧型代 理人(Intelligent Agents)等子領域的成功，更提供許多可能性與研究課題，來豐富人工智慧的技術與其應用性。IBM 的 Watson 在 2011 年擊敗孟智問答的世界冠軍便是一個最佳的例子。

以下將針對整個人工智慧領域中的幾大子領域:Machine Learning and Data Mining，Cloud Computing and Big Data，Social Network and Graph Mining，Aritificial Intelligence and Computer Games，分別就各項子領域之主題概述，國內外發展現況與世界發展之趨勢力以闡述，並將羅列各項子領域之關鍵熱門研究課題與一般性研究課題，俾利國內從事人工智慧研究之同仁們得以掌握人工智慧領域之研究趨勢與世界主流研究團隊及其主要研究課題。此外，也羅列一些已發展較完整或較成熟的研究課題讓同仁們同時參考，由於已發展成熟的研究議題，近幾年來在各主流國際會議與期刊中已較無發表之空間，原則上是較不鼓勵鑽研之研究課題。希望透過這樣的一個規劃，讓同仁們在做研究時能夠有個方向，儘量從事主流議題之研究，並進而開創新的研究領域與方法，讓台灣也能與世界一流的研究單位有一較高下的機會。

重點子領域一、機器學習與資料探勘

(Machine Learning and Data Mining)

主題概述

機器學習與資料探勘在近年極為熱門，該領域旨在透過電腦大量的運算能力，從資料中學習，以找出資料中重要的訊息，或以得到的知識增進未來預測的表現。因為文、法、理、工、商、醫、農等許多不同領域中，均有對資料分析與處理的強烈需求，機器學習與資料探勘已成為重要的基本工具，並在近幾年發表出許多重要技術，如ActiveLearning，OnlineLearning，StructuredPrediction，CollaborativeFiltering，KernelMethods，StreamandTimeSeriesMining，SoftComputing 等。目前在機器學習方面，朝向互動化(interactive)、個人化(personalized)、大量化(large-scale)、快速化(efficient)、深入化(deep)等方向發展，在許多重要的國際研討會，如 ICML、NIPS、COLT、UAI、KDD、ECML/PKDD、SDM、ICDM 等，均吸引了眾多的國際學者參與，競爭非常激烈。在過去幾年，台大資工林智仁教授團隊所研發的 LIBSVM 及 LIBLINEAR 廣被國際間使用;台大資工團隊從 2010 年至 2013 年都在世界級的 KDDCUP 競賽中榮獲第一名的成績，顯示台灣研究團隊在機器學習與資料探勘的表現，已獲得國際肯定。各位同仁若對此領域有興趣，可以妥善利用現成的軟體及研究成果，以減低進入的門檻。

國內外發展現況

國內對於機器學習與資料探勘相關的研究團隊相當多，包含台灣大學、中央研究院、台灣科技大學、交通大學、成功大學、中央大學、清華大學、中正大學、高雄大學等。其中包含線性與非線性支撐向量機(Linear and Non-linear Support Vector Machine)、機器學習軟體設計(Machine Learning Software Design)、機器學習的理論與演算法(Theoretical and Algorithmic Machine Learning)、知識發現與資料探勘(Knowledge Discovery and Data Mining)、社群網路分析(Social Network Analysis)等。國外著名的機器學習與資料探勘的團隊包括美國卡內基美隆大學研究長期學習(Never Ending Learning)、教育資料探勘(Educational Data Mining)等議題的機器學習研究所;美國柏克萊大學從事統計機器學習的統計機器學習實驗室(Statistical Machine Learning Group);美國麻省理工學院從事人工智慧應用研究的資訊科學及人工智慧實驗室(Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory); 美國史丹佛大學從事人工智慧技術與應用的人工智慧實驗室(AI Laboratory); 加拿大多倫多大學從事深入學習(Deep Learning)的 機器學習實驗室(Machine Learning Laboratory);德國普朗克研究院從事核函數學習(Kernel Learning)與因果分析(Causal Analysis) 的 實 驗 推 論 部 門 (Empirical Inference Department) 等 。

Google/Microsoft/Facebook/Amazon/Yahoo! 等大型網路公司也都有許多機器學習與資料探勘的重要研究或應用團隊，研究主題涵蓋人工智慧與資料探勘(Artificial Intelligence and Data Mining)、巨量資料(Big Data)、自然語言處理(Natural Language Processing)、機器人學(Robotics)、推薦系統(Recommender System)等。

世界發展之趨勢

機器學期與資料探勘近年有非常豐富的各式研究方向，在解決超高維度的資料上，有輸出入的降維法(Dimension Reduction for Input and Output Spaces)與矩陣分解(Matrix Factorization)的發展; 在面對大量使用者的線上應用上，有互動式學習(Interactive Learning)的發展; 在巨量資料中自動的特徵萃取上，有深度學習(Deep Learning)的發展 ; 在面對超多類別與資料量的應用上，有極限分類(Extreme Classification)、巨量資料學習(Big Data Learning)、半監督式學習(Semi- supervised Learning)與轉移學習(Transfer Learning)的發展。除了商業上關心的廣告、推薦、排序等議題外，並往教育(如大型線上教育的實現)、環保等議題發展。在一流的 ICML， NIPS， KDD 等會議及工作坊中可見這些議題被廣泛的討論。這些趨勢往往與現實的應用需求有很強的結果，同仁在思考研究課題時，不妨由實用端的創意發想切入。

關鍵研究課題

機器學習方面:

- 超巨量、超高維度、超多類別時之快速機器學習演算法(High Performance Machine Learning Algorithms for Large Data Size， Very High Dimensional and Very Large Number of Classes)
- 深度學習演算法 (Deep Learning Algorithms)
- 互動學習演算法 (Interactive Learning Algorithms)
- 半監督式及轉移學習演算法 (Semi-supervised and Transfer Learning Algorithms)
- 集成學習演算法 (Ensemble Learning Algorithms)

資料探勘方面:

- 社群網路的資料探勘 (Social Network Mining)
- 大型推薦系統 (Large-scale Recommender System)

理論發展方面:

- 巨量資料之新理論探討
- 深度學習之新理論探討

- 各式學習問題之抽象化及連結歸約 (Reduction)

一般性研究課題

- 監督式學習 (Supervised Learning)
- 類神經網路 (Neural Networks)
- 知識表示法 (Knowledge Representation)
- 模糊系統 (Fuzzy Systems)

已發展成熟之研究議題

- 規則學習與專家系統 (Rule Learning and Expert Systems)
- 中等大小資料集之分類或迴歸分析 (Moderate-Sized Classification or Regression Problems)
- 古典模糊系統之應用 (Applications of Classical Fuzzy Systems)
- 古典基因演算法之應用 (Applications of Classical Genetic Algorithms

重點子領域二、雲端運算與巨量資料

(Cloud Computing and Big Data)

主題概述

雲端運算與服務近年來以相當成熟。透過完臻的網路基礎建設與虛擬化技術，實 現 IaaS (Infrastructure as a Service) 、PaaS (Platform as a Service)、SaaS (Software as a Service)，讓使用者可其依照需求能夠有效地存取網路上所提供的運算資源，包括 網路、伺服器、儲存空間、應用程式、以及服務等。雲端運算服務的成功，讓電腦 資源的使用更有效率，使用者可依其動態所使用的電腦資源，支付使用費用。大幅降低在軟、硬體上與系統管理的成本。雲端運算的環境，讓處理大量運算與存取巨量資料。

巨量資料分析被視為可改變人們思考模式乃至於生活方式。透過分析、探勘隱藏於巨量資料中的資料特性、特徵模式與訊息甚至知識，可提供未來資訊的預測模式，結合不同來源的異質資料，可提供更精確、或更進一層的預測模型，成為決策者最佳利器。一般而言，處理巨量資料，包含硬體、系統與分析模型三大部分。硬體部分可利用雲端運算提供的叢集電腦，力上 Hadoop 提供的分散式檔案系統(HDFS)，在 MapReduce 平行計算架構下，執行 Large scale Machine Learning 或 Data Mining 演算法。利用巨量資料分析成功的例子，從商業上，透過消費者行為模式的分析預測，設計行銷策略;大量影像分析資料分析與社群網路媒體，協助辦 案，乃至於有效防止恐怖攻擊的發生，維護國土安全;分析 Tiwtter 與 Facebook 這些 社群媒體的訊息，也可以預測許多重要選舉的結果;協助分析巨量科學資料，上至天文，小至分子間的撞擊實驗的數據分析;也有不少健康醫療上的應用，包括: DNA 的分析比對，新藥開發的應用、個人化的用藥技術、巨量健康醫療資料分析，提供輔助診斷、藥品推薦與追蹤診療等等。近來更有將巨量資料分析應用在運動競賽上策略的使用。在巨量資料分析下，我們可建立各種不同的預測模型，也可透過人工智慧的方法對這些預測結果進行組合、應用，提供更精準或更具前瞻性的決策支援系統。而這些成功的應用多數均奠基於雲端運算技術的成熟。

國內外發展現況

國內在學術界對於雲端運算與巨量資料相關的優秀研究人才當多，但相較於國外大學，似乎較缺乏有組織性的研究中心。較具規模的學界研究中心，應屬 Intel-台大創新研究中心(Intel-NTU Connected， Context， Computing Center)，著重於 M2M/IoT 物聯網時代的應用，與其產生之巨量資料分析，進一步結合情境感知訊息，預測使用者需求，自

動提供使用者所需的服務。而法人單位如:工研院設有雲端運算行動應用科技中心與巨量資訊科技中心;資策會也設雲端系統軟體研究所，資策會前瞻所也將巨量資料分析列為發展重點，另外，智慧網通系統研究所也有智慧型電表的大型研究計畫，是巨量資料分析重要的應用。也是未來產學合作很好的來源與機會。目前國內雖然在各大學、研究所普遍開設『雲端運算』、『資料探勘』與『機器學習』等課程。但以巨量資料分析的課程不多，就所知，僅有臺灣大學的『資料探勘與巨量資料』與『巨量資料系統』。

世界發展之趨勢

雲端運算在國外已經有相當成熟發展，許多雲端運算的服務模式，都有很完備的商品化產品。當然許多知名大學仍有雲端運算的研究中心。而巨量資料研究中心則是以極快速的速度發展中。哥倫比亞大學成立 Institute for Data Science and Engineering 由 Cybersecurity， Financial Analytics， Foundations of Data Science， Health Analytics，New Media，Smart Cities 六個中心組成，應涵蓋了大部分巨量資料分析的範疇;紐約大學也推動 University-wide Initiative in Data Science，希望居 Data Science 教育與研究的世界領導地位;Intel 也在麻省理工學院設立 Big Data Center;華盛頓大學資訊科學系也在 Amazon 資助於 2012 大舉延攬三位 Machine Learning 專家，而 Big Data 也成了發展的重點。柏克萊大學是另一個重鎮。設在該校的 Simons Institute for the Theory of Computing 於 2013 年 8 月至 12 月，網羅了世界一流的研究學者舉行一連串的 workshop，著重於 Big Data 的相關理論與運算技術。這些主題應是 Big Data 關鍵 研究議題。另外，柏克萊大學資訊科學系的 AMPLab 所開發的 Spark 為專為 Big Data Analytic 所開發的自由軟體。

Google/Microsoft/Facebook/Amazon/Yahoo! 等大型網路公司都有對 Big Data 投入很大的研究資源；IBM 運用 Watson 的開發技術與成功經驗，也提供了 Big Data Analytic 的產品與服務。

關鍵研究課題

- Compress sensing and Dimensional reduction
- Rare events detection in Big Data
- Model validation and Data Integration for Big Data
- 在 MapReduce 架構下，AI 演算法應如何避免送代式的演算法，或有效執行送代式演算法
- 開發串流型態資料(Stream data)的學習演算法。如何在 single pass of data 的限制下，仍可學習到資料中所隱藏的資訊與知識。
- 利用 AI/Machine Learning 技術，提供雲端運算平台的安全機制
- 動態、分散式建立 normal profiles 與異常偵測演算法
- 分散式、平行化的學習演算法

- 情境感知運算 (Context Aware Computing)

理論發展方面

- 巨量資料之新理論探討

重點子領域三、社群網路與圓形上的探勘

(Social Network and Graph Mining)

主題概述

社群網路研究(Social Network Analysis)為近年來新興的領域，結合社會科學對於 人類社群行為的觀察，進而以數學或計算模型解釋、甚至預測人類社群現象。目前已有許多知名國內外學者相繼深入探究，除了資訊科學家之外，其中成員更不乏統計學家，社會學家、甚至物理學家的參與。自早期提出的六度分隔理論(Six Degree of Separation)以及長尾理論(Long Tail Theory)當中，科學家已經能夠發掘人類社群所具有的普遍特徵與現象。近年，隨著電腦網絡的發達與普及使得我們能便利地、詳細地蒐集大規模的社交行為。科學家開始熱衷於探討與分析:如何於大規模的個體中找到子部落或社群(Community Detection)，病毒或資訊如 何於人群中傳遞(Cascade Behavior in Networks)以及哪些個體扮演著關鍵的角色 (Centrality Theory)，甚至個體間互動連結的推測與學習(Link Prediction)。而圓形學習與探勘(Graph Learning and Mining)則是在研究能夠在圓形上面作智慧型資訊處理的方法，常被應用在社群網路以及網際網路上。

體認到此一趨勢,近幾年 ACM 與 IEEE 相關重要會議,如 SIGKDD，SIGIR，ICML，ICDM 接受社群網路探勘以及圓形學習之論文比例大增，在 2013 年 SIGKDD 更有約二分之一的會議論文與社群網路以及圓形探勘相關，並且接受論文的前兩大主題都就是 Social Network 及 Twitter。同時 ACM 與 IEEE 兩大計算機學會所舉辦的幾個和社群網路直接相關的會議,如 Advances in Social Network Analysis and Mining(ASONAM)與 IEEE Social Computing(Social-Com)等會議，也愈發壯大成熟。另一方面，IEEE 和 ACM 的一些期刊如 IEEE ToM 於 2012 年的 special issue“Social Media as Sensors”，ACM TIST 於 2012 年的 special issue: “Linking Social Granularity and Functions”，都可見近年來社群網路研究之重要性。

國內外發展現況

國內近年來已經有不少團隊開始積極投入，在網路社群，異常個體偵測，圓形學習演算法及應用分析等研究課題都已有不錯的成果，而許多圓形學習的方法如 HMM，CRF 都已經被應用在許多其他領域如自然語言，生物資訊等。

於國內外已有眾多研究團隊開始投身研究於社群網路探勘領域中，社群網路與圓形學習相關的論文陸續發表在 SIGKDD，SIGIR，ICDM，ICML 等一流國際會議上。同時許多相對應的介紹課程(Tutorial)也現身於許多知名國際會議中，自其中我們可理解到該

領域的理論，技術與應用的發展。以下便舉數個近三年內所舉辦的介紹課程為例。

史丹佛大學 Jure Leskovec 教授於 KDD 2011 Tutorial 中講授 Social Media Analytics: Tracking， Modeling and Predicting the Flow of Information through Networks”主題，主要想追社群網媒體的脈動，以讓公司可以取得回饋，及了解如何改善其產品。同時，對消費者來說，可以藉由了解這些脈動，得孟於群體智慧，以協助進行更有利之消費等行為。其內容包含了解社群網路上之資訊流動(Information flow in social media)及深入了解使用者行為動向(Rich user interactions)兩大部份。

此外，Qatar Computing Research Institute 的 Carlos Castillo 博士，Microsoft Research Asia 的 Wei Chen 博士，及 University of British Columbia 的 Laks V. S. Lakshmanan 教授，也在 KDD 2012 Tutorial 中講授“Information and Influence Spread in Social Net- works”主題，內容包含了關於社群網路中資訊流通的數個面向，例如 mathematical sociology，technology and availability of large real data sets，tools (both mathematical and software) for purposes of analysis，algorithms for analyzing information propagation 等。而此課程主要討論演算法的部份。

最後，Microsoft Research Asia 的 Yu Zheng 博士，在 WWW 2012 所講授的“Tutorial on Location-Based Social Networks”，以及台灣大學的 ShouDeLin 教授，在 PAKDD 2009 所講授的“Mining HeterogeneousSocialNetworks”等課程，亦都顯示社群網路及圓形探勘領域更趨熱門之方向。

世界發展之趨勢

由於早期社群網絡探勘資料取得不易，網絡探勘研究多著重於靜態同質性網絡上，而未考量兩個重要的因子:時間與多樣化的關係。然而隨著社交服務平台 (Social Network Services)的普及運用，現今能取得資料之豐富性與多樣性遠超過以往研究資料，整合多樣觀點於研究之中是目前重要課題之一。過去數年社群 網路探勘研究領域主要在針對各種常見問題的設計演算法:如個體重要度評估 (如 Centrality Theory)、社群偵測(Community Detection)、影響力傳播模型建 置(Social Influence Model)等議題。一旦將時間、多樣化的關係等因子納入考量 後，動態異質性的社群網絡將主全新樣貌，使得原先討論的議題成為全新的挑戰。而圓形相關之學習探勘的演算法，因為電腦計算能力的提升，很多過去無法實現的 技術在現在都變得容易，未來的發展趨勢包括如何能夠更準確的抓住不同節點之間 的相關性力以應用在自動學習上，以及如何能夠快速有效率、甚至結合雲端技術提 升圓形學習與探勘演算法的效能，將會是研究者注重的議題。

此外，社交網站服務(Social Networking Service)成為了一種使用者產生資訊(User-Generated Data)的平台，因此，除了使用者提供的人際關係資訊外，這些社交服務的資訊內容(Content)自然而然成為一種社交情境資訊(Contextual Information)，一些議題如特定社群偵測(Special Community Detection)、人際關係預測(Link Prediction)、個人化推薦服務(Personalized Recommendation)、社群團隊建立(Social Team Formation)、社群角色偵測(Social Role Detection)、社 群網路意向分析(Opinion Analysis in Social Networks)均可因內容資訊的引進而獲得效果上的提升，因此，如何設計方法來有效整合連結(Link)與內容(Content)來輔助網路探勘，也將是接下來該領域的主要課題之一。

最後，事件發現及連結(Event Discovery and Connection)將社群網路上的資訊與真實世界的事件相關連，以及地理社群網路(Location-Based Social Networks) 巴真實世界的位置資訊帶入社群網路資訊進行分析等，亦都是可預見之熱門主題。

關鍵研究課題

- 社群網路上的分類學習(Classification for Social Networks)
- 社群網路上的資訊擴散與傳播(Information Propagation on Social Networks)
- 圓形為本之監督學習(Supervised Learning on Graphs)
- 圓形為本之非監督學習(Unsupervised Learning on Graphs)
- 資訊傳播模型與分析(Information Diffusion Model and Analysis)
- 社群網路之影響力最大化(Influence Maximization on Social Networks)

一般性研究課題

- 利用賽局理論(Game Theory)方法解決社群網路分析問題
- 社交關係預測(Link Prediction in Social Networks)
- 線上動態社群網路之分析(Analysis on Online Dynamic Social Networks)
- 串連樣式分析(Social Cascade Analysis)
- 半指導氏圓形學習(Semi-supervised Graph Learning)
- 圓形模型(Graphical Models)
- 雲端運算在圓形學習上之應用(Cloud Computing on Graph Learning)

已發展成熟之研究議題

- 線上網路社群之偵測(Community Detection in Online Social Networks)
- 偵測詭異個體與行為(Outlier and Anomaly Detection for Social Networks)
- 同質性網路上的連結偵測(Link Prediction on Homogeneous Social Networks)
- 馬可夫隨機場(Markov Random Field)
- 機率關係模型(Probability Relational Mode)

重點子領域四、人工智慧與電腦遊戲

(Artificial Intelligence and Computer Games)

主題概述

電腦遊戲(Computer Games) 在人工智慧一直扮演非常重要的角色，除了教育、娛樂等目的外，更重要的是從這裡可以探索人工智慧的奧祕，並將所發展出的新技術應 用到其他應用領域。在 2002 年，Jonathan Schaeffer & H. J. van den Herik 提及「西洋棋之於人工智慧，如同果蠅之於基因」。自從深藍打敗西洋棋世界棋王卡斯帕洛夫之後，鼓舞了研究學者對人工智慧的信心;近年來蒙地卡羅樹狀搜尋演算法(Monte Carlo Tree Search; MCTS)更成功地將圍棋程式棋力從十年前的七八級提升到業餘六七段(約相當於可讓過去程式 13 子)，這些成功的發展，造就了今日對局遊戲蓬勃發展，同時一些新的技術，也被運用到其他許多重要的應用領域，例如多目標彈性零工式工廠排程問題(Flexible Job-Shop Scheduling Problem; FJSP)、電廠常用的 Unit Committment Problem (UCP)等數學最佳化問題等。

此領域主要探討的遊戲可依參與人數分為單人遊戲、兩人遊戲、多人遊戲；其他分類包括完整資訊(Perfect Information)、統計因素、角色扮演等。單人遊戲 有 15-puzzle、數獨(Sudoku)、Nonogram、Light-up 等孟智遊戲。兩人遊戲部分，具完整資訊的通常是棋盤遊戲或統稱對局遊戲;非完整資訊的，如暗棋、幽靈圍棋(Phantom Go)等；完整資訊但具有統計因素的有 Backgammon 等;非完整資訊且具統計因素的有德州撲克等。多人遊戲包括橋牌、麻將、線上角色扮演遊戲。

自從深藍打敗西洋棋世界棋王、法國 MoGo 團隊成功地運用 MCTS 演算法將 圍棋提升到段位程度之後，鼓舞了研究學者對電腦遊戲的發展，許多國家的學者紛紛投入各種棋類的研究，如西洋棋、象棋、圍棋、六子棋、將棋、德州撲克、幽靈圍棋、橋牌、麻將、孟智遊戲等。在國際知名組織 ICGA (International Computer Games Association) 每年所舉辦的比賽除了西洋棋以外，電腦奧林匹亞競賽(Computer Olympiad) 中包含超過 20 種遊戲。深藍的成功並不代表電腦的智慧已超越人腦，事實上，目前西洋棋的人腦對電腦大賽中，電腦與西洋棋世界棋王 的棋力大約相當，在困難度最高的 19 路圍棋方面，電腦的棋力已達六七段但與職業高段棋士仍有距離，在許多對局遊戲中仍需新的方法與技術來提升電腦強度。在研究方法上，每種棋類可視為一個設計好的問題(Problem)，針對不同問題 提出不同的策略或演算法。例如西洋棋與象棋適合以 α-β 切捨搜尋法(α-β Pruning Search)、NegaScout 等搜尋演算法來處理、圍棋的蒙地卡羅樹狀搜尋演算法、

協助解出遊戲(如西洋跳棋、六子棋開局)的證明數搜尋(Proof Number Search)、暗棋、麻將、幽靈圍棋的部分可觀察 Markov 決策程序(Partial Observable Markov Decision Process; POMDP)、德州撲克的遊戲理論(Game Theory)、骨牌遊戲(Domineering) 的組合對局理論(Combinatorial Game Theory)、一般化遊戲(General Game Playing);其他如何在搜尋中有效使用平行處理的技術、如何有效增力遊戲棋類知識、如何善用有限時間思考等，也是主要的研究課題。

此外，近來有一個新興的領域是娛樂遊戲方面人工智慧設計，它的目標是對許多電玩遊戲如賽車、瑪莉歐、小精靈等遊戲，設計具有智慧的玩家，主要目的在協助電玩遊戲發展人工智慧玩家，以便預先了解電玩遊戲問題。此類研究問題，不完全像對局遊戲一樣，在追求達到或超越世界頂尖玩家，所研究的亦包括使玩家在進行遊戲時，覺得遊戲中電腦所扮演的角色可以與之有互動，不至於每次皆用相同策略即可輕鬆破關，但又不能太過聰明，看穿玩家所有策略，降低玩家的興致。在研究方法上，機器學習與資料探勘、智慧型代理人等相關技術皆可使用。另外，有些玩家會在遊戲中作弊以獲取高分或其它利孟，人工智慧也可以用來偵測此類行為，避免因為作弊而造成其他使用者不滿或遊戲世界中的平衡度失調。

國內外發展現況

國內從事對局遊戲研究的團隊在長榮大學有長期鑽研棋類遊戲的許舜欽教授團隊、交通大學有六子棋發明人吳毅成教授及其團隊、中央研究院有從事電腦象棋研究的徐讚昇教授團隊、台南大學從事 Fuzzy、圍棋等研究的李健興教授團隊、 師範大學從事圍棋、六子棋、POMDP 等研究的林順喜教授團隊、東華大學從事圍棋、POMDP 研究的顏士淨教授團隊、中原大學從事電腦象棋研究的陳志昌教授團隊、世新大學從事遊戲製作的鄭武堯教授團隊、澎湖科技大學從事組合對局遊戲及 UCP 電力最佳化問題的高國元教授團隊等。

從事娛樂遊戲研究的研究團隊也不少，包含中央研究院陳昇瑋教授團隊、交通大學孫春在教授團隊及王才沛教授團隊、東華大學戴文凱教授團隊、嘉義大學盧天麒教授團隊，以及在台灣科技大學、台北教育大學、台南大學、世新大學、新竹 教育大學等學校的研究團隊，研究主題包含遊戲設計(Game Design)、遊戲角色拉制(NPC Control)、場景生成(Scene Generation)、遊戲式學習(Learning in Games)、遊戲作弊防治等等項目。

國外著名的對局遊戲的研究團隊如下:有從事各種遊戲及相關搜尋技術(Game Search)的荷蘭提堡大學之 van den Herik (ICGA 期刊的主編) 教授團隊、力拿大阿爾伯塔大學之 Schaeffer 教授團隊及從事 Hex 遊戲的 Ryan B. Hayward 教授團隊、從事圍棋 Monte Carlo Search 研究之法國 Oliver Teytaud 教授團隊、冰島大學從事西洋棋研究的 Yngvi

Bjornsson 團隊;從事電腦將棋研究的日本北陸尖端科技大學、飯回弘之教授團隊及東京農工大學小谷善行教授團隊等。娛樂遊戲研究團隊則有英國艾瑟克斯大學的 Simon Lucas (也是 IEEE Transactions on Computational Intelligence and AI Games 期刊的主編) 團隊研究小精靈遊戲等之人工智慧、荷蘭提堡大學的 Pieter Spronck 教授團隊研究遊戲行為分析等。

另外值得注意的發展是利用平行處理來研發解決許多遊戲問題。例如許多圍棋程式、象棋程式發展者,運用平行處理來提高棋力;力拿大阿爾伯塔大學之 Schaeffer 教授團隊，運用多台電腦來解掉西洋跳棋(Checkers)問題(發表於科學期刊)；交通大學吳毅成教授發展志願型運算及工作層級運算來利用平行計算解出許多六子棋開局，並同時與許舜欽教授、林順喜教授、東華大學顏士淨教授、中原大學陳志昌教授、澎湖科技大學高國元教授等共組團隊，研發解決新的遊戲問題。

世界發展之趨勢

近年來對局遊戲領域中較熱門的研究主題為圍棋與蒙地卡羅樹狀搜尋演算法(MCTS in Go)、證明數搜尋演算法(Proof Number Search)、增強式學習(Reinforcement Learn- ing)、監督式演算法 Minorization-Maximization (M&M)、模擬平衡化(Simulation Bal- ancing)、平行演算法等，然而實際上並不限於這些，在 ICGA 兩年間隔舉辦 Computer Game Conference 及 Conference on Advances in Computer Games 中大多數的主題皆相當獨特，例如 Bruno Bouzy 提出的 Voronoi 遊戲，此遊戲每一步可以有無限多種走法。可見對局遊戲領域中，有各式各樣的遊戲，且因其規則不同，研究的焦點也各異。當中也不乏未解問題，例如西洋棋與象棋殘局問題(Endgame Problems in Chess and Chinese Chess)、 圓形歷史交互作用問題(Graph History In- teraction)等。同時也有許多值得開發的問題，例如自動化知識取得(Automatic Knowledge Abstraction)、機器學習與對局遊戲(Machine Learning in Games)、智慧型教學系統(Intelligent Tutoring System)，這些問題對於對局遊戲的發展，也具有相當關鍵的角色。

在娛樂遊戲方面，處理追逐、閃躲、成群結隊以及避開障礙物、解決路徑尋找問題、AI 描述機制、規則 AI 系統、不確定狀態處理等，皆為重要的主題。如何讓遊戲中的角色相相如生是遊戲人工智慧研究者的重要議題，這包含如何讓遊戲角色與玩家對話、合作、戰鬥、交易等各種互動行為。例如，有研究指出，若能讓遊戲中的商店所售的商品能夠因為商品滯銷或短缺而自動調整售價，可讓遊戲中的交易變得更「人性化」，因此試著將現實生活中商人的邏輯引入遊戲中；戰鬥中的戰術使用也是非常需要人工智慧技術的部分，如何讓玩家感覺電腦所扮演的敵手是聰明而非作弊，也是很具挑戰性的研究方

向。人工智慧也可以用確保電腦遊戲的順利進行，例如說，偵測是否有玩家利用作弊程式來佔他人便宜，或是是否玩家的帳號被不肖駭客所盜用等等。

關鍵研究課題

- 各種遊戲之人工智慧代理人重要未解問題之解決，如 Othello、七路或九路圍棋等等
- 蒙地卡羅搜尋演算法(Monte Carlo Tree Search Algorithms)
- 證明數搜尋演算法(Proof Number Search)
- 增強式學習(Reinforcement Learning)
- 監督式演算法 Minorization-Maximization (M&M)
- 模擬平衡化(Simulation Balancing)
- 平行遊戲搜尋演算法(Parallel Search for Game Trees)
- 組合對局遊戲(Combinatorial Games)
- 自動化知識取得(Automatic Knowledge Abstraction)
- 遊戲安全(Game Security)
- 遊戲娛樂性評估(Assessment of Fun in Games)

一般性研究課題

- 啟發函數(Heuristic Function)
- 象棋棋規之處理(Handling Rules in Chinese Chess)
- 圓形歷史交互作用問題(Graph History Interaction)
- 搜尋走法排序(Move Ordering in Search)
- 具有智慧的電腦角色(Intelligent NPC)
- 自動場景生成(Procedural Scene Generation)
- 教育課程或一般任務的遊戲化(Gamification)

已發展成熟之研究議題

- 樹狀結構搜尋法，如 α-β Pruning、Nega Scout 等
- 傳統五子棋、日本棋規之連珠棋問題(已被證明先手方必勝)
- 西洋跳棋問題(已完整解出以及完整之資料庫)
- 西洋棋人工智慧程式
- 同形表(Transposition Table)、空著切捨(Null-move Pruning)、歷史路徑切捨(History Pruning)

結論

以上各節整理出人工智慧領域中幾大子領域的關鍵熱門、一般性、及較成熟共三 類的研究主題，提供給同仁們選擇研究課題時作為參考。希望同仁在選擇研究主題時，除了考慮論文的發表以及可獲得的補助外更應考慮所做的研究是否在學術或產業有重要的貢獻(significant impact)。

回顧人工智慧在過去數十年的發展，在某一方面我們可說它已達成相當之成果。舉例來說，無人駕駛車已達接近可實際使用之階段，IBM 的 Watson 在孟智問答競賽已擊敗世界冠軍並將在醫療產業有具體應用。但另一方面我們距離了解智慧的本質還有很長的路要走。我們身信同仁們仍能在未來對此領域有實質與巨大的突破。

智慧計算學門

仿生計算領域規劃

參與規劃教授(按姓氏筆劃序排列):

丁川康教授

李健興教授

李錫智教授

吳志宏教授

林道通教授

洪宗貝教授

張傳育教授

陳穎平教授

梁勝富教授

蔣宗哲教授

領域概述

這個世界的萬物生存進化過程中總存在著非常奧妙，既看似複雜但原理又相當簡單的自然現象，而這些現象在解問題時又常放諸四海皆可適用，似乎冥冥之中自然界自有一定的行為規律，因此電腦學家便希望能夠應用這些自然界的各種行為定律於解決電腦資訊問題上，再加上近幾年電腦軟硬體進步神速，大量且快速計算已不成為問題，更促使此類的研究近幾年來如雨後春筍般地蓬勃發展。此外，由於此類研究常與其他領域應用相結合，作為其解題之另一種選擇，更增加其研究之重要性。

正式而言，仿生學(Bionics)這個名詞在維基百科的解釋乃指仿效生物的自然法則，例如覓食、繁衍、聚集或運動等現象，應用於系統工程或現代科技的設計與改善的一門科學。而仿生計算(Bio-inspired Computing)則是模仿生物行為來增進電腦解問題的效能或是利用電腦來幫助對生命現象建模及分析。在電腦科學領域中像是類神經網路(Artificial Neural Networks)、群體智慧(Swarm Intelligence)或演化計算(Evolutionary Computation)都是基於某類生物的特殊自然法則，經過統整、歸納及簡化後，轉化為一般的數學邏輯與演算法，並應用於解決特定的問題。此外像是模糊邏輯則是仿效最高階生物-人類-語意溝通的模式，將傳統二元邏輯加以泛化而成。另外最近腦波訊號與資訊系統結合之研究亦相當熱門，而模擬實際生物體之人工生命近年來也非常受到重視。上述這些主題均提供許多可能性與研究課題，也更豐富仿生計算的技術與其應用性。

因此此仿生計算規劃以演化計算、類神經網路、模糊邏輯與系統、腦波分析與應用、及人工生命為五大次子領域，分別就其主題概述、國內外發展現況與世界發展之趨勢加以闡述，並將羅列各項次子領域之關鍵熱門研究課題與一般性研究課題，俾利國內從事仿生計算研究之同仁們得以掌握此領域之研究趨勢與世界主流研究團隊及其主要研究課題。此外，此規劃也列出一些已發展較完整或較成熟的研究課題讓同仁們同時參考，由於已發展成熟的研究議題，近幾年來在各主流國際會議與期刊中已較無發表之空間，原則上是較不鼓勵鑽研之研究課題。希望透過這樣的一個規劃，讓同仁們在做研究時能夠有個方向，儘量從事主流議題之研究，並進而開創新的研究領域與方法，讓台灣也能與世界一流的研究單位有一較高下的機會。

重點子領域一、演化計算

(Evolutionary Computation)

主題概述

在過去的二、三十年間，許多基於同時操作多個解的搜尋演算法 (population-based search algorithms) 被提出，並因為其高效率且可得到不錯的解，因此逐漸成為現今熱門常用的技術。而演化計算以達爾文物競天擇為主要概念，搭配不同之編碼方式與運算子設計，加上其同時考慮區域搜尋及全域搜尋，因此在求解時的表現相當優異，也成為這個領域的主流方法之一。演化計算主要以模仿自然界的各種生物之演化行為為手段，包含了繁殖、競爭、合作等關係，以設計出具有最佳化能力的計算方法。演化計算的實務應用相當廣泛，在資訊領域中包含影像、網路、圖學、軟體工程、硬體設計、雲端運算等等，其它如航太、金融、製造、環保、交通、生物等等領域也都可見到相關研究成果。

國內外發展現況

早期研究大多發展單一目標、單一方法及單一應用，現在發展則朝向整合多目標及多種方法為主。多目標最佳化，顧名思義，表示求解最佳化問題時需同時考慮兩個以上的目標，如同時考慮要最小化時間與成本。當目標互相衝突時，在以前我們常可在求解問題前事先定義一特定的合併評估函數 (如線性加權) 或優先次序 (依序最佳化)，將多目標問題轉為單目標問題，以求取單一最佳解，然而要作出這些事前的決定並不容易。而多目標演化最佳化則以柏拉圖最佳化 (Pareto optimality) 觀點求解多目標問題，不需事先定義合併評估函數或優先次序，以簡化決策者所需的工作，而演化演算法的群體搜尋模式也恰好吻合其求解一組 (非單一個) 柏拉圖最佳解的訴求。九〇年代中期是多目標演化計算的第一個萌芽時期，知名的演算法如 NSGA、SPEA、PESA 等等相繼被提出，也吸引更多研究學者的投入。二十世紀初，多目標演化計算進入新的階段，NSGAII、SPEA2、PESA2 問世，也由於為數眾多的研究學者投入，2001 年在瑞士召開了第一屆專門以 EMO (International Conference on Evolutionary Multi-Criterion Optimization)為主題的國際會議，其後每兩年召開一次。EMO 的研究蓬勃發展，2006 年在 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI) 會議中，被列為當時發展最快速的子領域之一[tc0]。2013 年的 IEEE CEC 中，EMO 共有七個場次，而且是唯一一個超過四個場次的議題，可見本主題的發展性和研究機會仍相當大。

此外一般搜尋與最佳化問題常假設問題環境為確定與靜止的，然而在現實世界中，這項假設往往無法成立，許多實際的工程與物流問題的環境常具有不確定與動態等特性。

近年來，學者們嘗試利用演化計算解決這類具有動態與不確定性的最佳化問題，其相關研究依問題特性可分為以下四種類型[ck0-1]：1) 目標具雜訊的最佳化；2) 以強健性 (robustness) 為目標之最佳化；3) 逼近型 (approximate) 目標函數；4) 時變型 (time-varying) 目標函數。在解決這些問題時，雖然可以針對每一瞬時重新執行演算法獲得新解，但倍增的計算量與較長的反應時間，導致無法處理較複雜或大型的動態問題。在解決動態與不確定性的最佳化問題上，演化計算具有多點搜尋與疊代演化等優點，而一些初步的研究成果也顯示演化計算特別適於解決此類問題，此研究領域已獲得高度重視，並成為演化計算最具潛力的研究方向之一。

在演化計算中，為了發展效能更好或更具一般性及使用範圍更廣的最佳化技術，結合不同種類的演算法並且以社會學中提出之仿基因 (gene) 的文化與觀念傳遞單元「彌因 (meme)」做為思考框架所提出之演算法，即稱為彌因演算法 (memetic algorithms) [yp0]。彌因演算法的基本架構，以運作機制而言，主要可包含代表解之個體的原基礎結構 (genome)及個體之後天接受教育、文化傳遞、自我學習等機制。原基礎結構主要由自然生物機制決定，例如基因演算法 (genetic algorithms)；而後天機制，例如各種區域搜尋演算子 (local search operators)，可幫助形成最終的解個體 (原基礎結構或有改變) 及造就其適應值。由於彌因演算法之設計組成通常包括數種能互相截長補短的最佳化技術，故其效能常較純粹之基因演算法或粒子群演算法 (particle swarm optimization) 為佳，且彌因演算法強調的混成 (hybrid) 結構與個體學習機制，亦被廣泛地用於各類應用問題，因此其為現今演化計算領域中相當熱門的分支之一。

國內研究演化計算的團隊相當多，如國立高雄大學洪宗貝教授、國立中正大學丁川康教授、元智大學張百棧教授、國立交通大學的陳穎平教授、國立臺灣師範大學蔣宗哲教授、及其他教授都有其研究團隊於解決各式演化計算問題上。而在國外方面，日本 Osaka Prefecture University 的 Prof. Hisao Ishibuchi、西班牙 University of Granada 的 Prof. Francisco Herrera 及英國 University of Birmingham 的 Prof. Xin Yao 均有團隊對演化計算有大量成果發表；而英國 De Montfort University 的 Prof. Ferrante Neri 及新加坡 Nanyang Technological University 的 Prof. Yew-Soon Ong 則對彌因計算的創新思考與理論發展有其獨到之處[yp10]；美國 Michigan State University 的 Kalyanmoy Deb 教授，其 NSGA-II 演算法[tc1]引領本領域逾十年的時間；美國 Oklahoma State University 的 Gary Yen 教授針對多目標演化最佳化提出各式新穎設計與探討其效能指標[tc5]；英國 University of Essex 大學的 Qingfu Zhang 教授以 MOEA/D 演算法[tc8]獲得頂尖期刊最佳論文，為本領域帶來新觀念；還有很多其它學者，在此就不一一列舉。

世界發展之趨勢

演化計算目前已廣泛應用於解決各類搜尋與最佳化問題，近年來，一些演化計算的新興研究領域受到重視並獲致優異成果。分析近年 IEEE CEC 國際會議的論文，演算法設計與應用導向的論文各約佔一半，一方面表示現有的演化演算法已有足夠成熟度可解決實際問題，另一方面也透露演算法設計層面仍有許多挑戰與議題尚待解決。在多目標最佳化方面，單純的雙目標演算法設計已相當成熟並漸趨飽和，多半轉向應用類型的研究，例如將各領域中原本單目標的問題轉向雙目標並套用或改善現有演算法以求解，而演算法設計類型的研究則專注在如何將新興演算法從單目標轉變成多目標。在雙目標研究飽和的情況下，現有的研究重心為雙目標最佳化的延伸，例如增加目標個數形成高目標最佳化問題、與限制 (constrained) 最佳化或動態/不確定性最佳化結合，成為複雜環境的多目標最佳化問題、以及與高計算量最佳化結合。高目標最佳化問題的研究內容包含目標空間的視覺化、使用者偏好的導入、目標數縮減、凌越 (dominance) 關係的改良、純量化 (scalarization) 函數的設計、效能評估指標 (indicator) 的設計與應用等等；複雜環境和高計算量多目標最佳化則考驗研究者如何將原有的最佳化技術與多目標演化演算法融合。

而演化計算的另一趨勢則在動態與不確定環境最佳化的研究上，例如目標具雜訊的最佳化，此類問題常出現於實際工程應用，如程序控制、物流排程與機器人控制上。另外許多工程最佳化以強健性為主要目標，亦即其結果必須能對抗變數或環境的小幅變動，目前也有學者視強健性為第二目標，將之規畫為多目標最佳化問題。而在利用演化演算法解決最佳化問題時，當適應函數不可得或其運算太複雜，建立目標函數的逼近模型 (meta-model 或 surrogate) 可解決這問題並有效提高演化演算法效率，但其誤差亦可能誤導搜尋方向而降低解的品質，此領域亦為目前演化計算的重要研究方向之一。另許多實際的工程與物流問題的環境常隨時間而變動，重新執行演算法獲得新解固然可解決問題，但計算量與反應時間也因而倍增，近年來亦有學者利用演化計算解決這類最佳化問題。而彌因計算之技術主要在於探究如何搭配與混合各式演算方法，以獲得更佳效能、以及將其應用於各類最佳化問題上，以發揮最佳化演算法的影響力，故其近年之發展趨勢亦持續攀高。

關鍵研究課題

- 高目標最佳化
- 互動式最佳化 (interactive optimization)
- 複雜環境下的多目標最佳化
- 高計算量多目標最佳化 (expensive MO)

- 不確定性之演化計算設計
- 動態最佳化 (dynamic optimization)
- 代理模型 (surrogate model)
- 複合型不確定性與動態最佳化問題
- 彌因計算特性探究
- 彌因計算架構創新
- 演化計算基礎與應用層次理論

一般性研究課題

- 高目標最佳化的資訊視覺化
- 基於使用者偏好的互動式選擇機制
- 目標縮減 (objective reduction)
- 具雜訊之最佳化
- 一般逼近函數設計
- 不確定性與動態環境最佳化測試問題
- 效能評估指標設計
- 彌因計算組成元件變化或置換
- 自動參數調整
- 進階軟式計算的應用

已發展成熟之研究課題

- 單目標之軟式計算
- 雙目標連續型函數最佳化
- 基本軟式計算方法之應用

重點子領域二、類神經網路

(Artificial Neural Networks)

主題概述

類神經網路乃仿照人類神經細胞資訊傳遞運行的基本原理加以轉化為利用電腦計算解決問題的研究，神經網路中的每一單位都只能做簡單的運算，然而透過單位間之合作及學習機制之設計，卻能完成重要之工作。近年來隨著巨量資料的時代來臨，利用學習機制進行資料歸納愈顯重要，因此傳統的 IEEE 類神經網路期刊自 2012 年起更名為 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems，可看出學習在類神經網路中所扮演之關鍵角色。類神經網路其實發展得很早，其研究源自 1943 年 McCulloch 及 Pitts，1949 年 Donald Hebb 發展之 Hebbian Learning 法則，及 1951 Marvin Minsky 提出之 Adaptive Machine。接續至 80 年代，各種類神經網路模型如雨後春筍般提出，許多著名的模型已被列入類神經網路教科書，直至 21 世紀仍然歷久不衰，例如 Werbos 的 Backpropagation Net，Kohonen 的 Self-organization Map，John Hopfield 的 Hopfield Net，Steven Grossberg 的 ART、最常使用的 Support Vector Machine (SVM)、及一些進階的如 Radial Basis Function Network 及 Recurrent Neural Networks 等均有很廣泛之使用。近年來類神經網路也與其他技術如模糊理論、演化計算、群體智慧(Swarm Intelligence)相結合，以增強其效能。

國內外發展現況

類神經網路之研究包含了硬體設計、工具設計、演算法設計、及實際應用。由於其應用面廣，國內外均有相當多之學者投入此一研究。例如國內有台灣大學劉長遠教授對類神經網路解空間之研究、林智仁教授為 SVM 之知名學者、交通大學林進燈教授及中山大學李錫智教授則結合類神經網路與模糊理論，成功大學詹寶珠教授、中央大學蘇木春教授、臺北大學林道通教授及雲林科技大學張傳育教授均將類神經網路應用於影像處理上，此外清華大學蘇豐文教授、成功大學蔣榮先教授及台灣科技大學李漢銘教授及蘇順豐教授亦都有團隊從事相關研究。

近幾年國外著名的研究則有美國 University of Illinois, Chicago 之 Professor Derong Liu 其團隊利用類神經網路於控制上有相當優異之表現，其亦為目前 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems 之主編；此外還有日本 RIKEN Brain Science Institute 的 Prof. Shunichi Amari 致力於腦科學與 machine intelligence 之研究議題；Okinawa Inst. of Science & Tech.之 Prof. Kenji Doya 結合從上而下之計算模式及從下而上之神經生物實驗，進一步探究人類思維行為；Kansai University 之 Prof. Kunihiko

Fukushima 為 Neocognitron 之發明者，該網路已被廣泛應用於手寫字型辨識及其他圖形識別之研究；美國 Ohio State University 之 Prof. DeLiang Wang 為類神經網路研究領域主要期刊之一 Neural Networks 的 Co-Editor-In-Chief 並擔任 Cognitive Computation、Cognitive Neurodynamics、Neural Computing and Applications 等期刊的 editorial/advisory board 成員； University of Texas at Arlington 之 Prof. Frank Lewis 專注於 feedback control systems、intelligent control with neural networks and fuzzy logic systems 等研究；Rice University 之 Prof. Lydia Kavraki 致力於機器人物理演算法及生物結構計算之研究；新加坡 Nanyang Technological University 之 Prof. Lipo Wang 擅長於 neural networks、evolutionary computation、fuzzy systems 及 chaos 等啟發於自然界的計算模式研究領域；澳洲 Australian National University 之 Prof. Tom Gedeon 藉由 neural network 及 fuzzy logic methods 進行資訊自動擷取與探勘之研究；Indiana University 之 Prof. Olaf Sporns 專注於 computational cognitive neuroscience 之研究；韓國 Brain Science Research Center 之 Prof. Soo-Young Lee 以生物學及細胞學的角度研究訊息的傳遞；及香港中文大學之 Prof. Jun Wang 應用類神經網路於 dynamic optimization、 intelligent control 、intelligent robotics、intelligent manufacturing ； Prof. Laiwan Chan 應用類神經網路於 pharmacology, emergency & critical care, oncology 等研究領域；及 Prof. Irwin King 擅長於 machine learning、social computing、web intelligence、data mining 等研究。還有很多其它學者，在此就不一一列舉。

世界發展之趨勢

由於類神經網路發展已有一段時間，一些傳統之技術均已純熟，目前發展之趨勢慢慢偏向高維度、及時、巨量、複雜型、隨機型、及時序型之資料、並且結合其他多種方法，並解決實際複雜問題，想辦法賦予其所學出之系統較能被人類所能了解之語意解釋。例如類神經網路也可與模糊建模技術相結合用來解決函數近似(function approximation)的問題，以建立一個模糊類神經網路模型，並能處理部分語意，而最佳化的方法可以採用最陡坡降法、群體智能演算法、迴歸法或多種方法的混和學習法(hybrid learning)。此外最近也有學者將其擴充至複數值類神經網路，其與傳統類神經網路不同的地方在於其架構中的神經元(neuron)採用的是複數值的神經元，比實數值類神經網路更具彈性。目前此子領域的研究比較偏向分類的應用。未來研究的方向包含如何融合其他技術，如模糊集合、基因演算法、群體智能等以增加其學習的效率；發展多層的複數值類神經網路架構，期望能夠擴大其應用與解決更為複雜的問題；以及調整其架構，俾能處理函數近似的問題。另外支援向量機(support vector machines)一直也是類神經網路的一個重要技術。支援向量機相關技術可以包含四個研究方向。第一是關於分類的問題，第二是關於分群的問

題，第三是關於核函數的參數選擇的問題，第四是關於多核心支援群聚(multi-kernel support vector clustering)技術。目前前兩項發展較成熟，而後兩項則還有一些研究空間。而最近 Evolving Connectionist Systems (ECoS)的研究亦相當熱門，其是一種模組化相連的系統，可藉由輸入的資訊以自我組織、即時、適應性的方式演化他們的結構及功能。ECoS 可採監督式或非監督式的學習方式，並已被成功地應用於生物資訊、語音及影像辨識、機器人控制、多模式訊號處理等。另外 Evolving Spiking Neural Network (eSNN)是從 ECoS 發展出來的神經網路，具有空間及時間(spatio-temporal)的資訊處理能力，並常應用於辨識問題上。

關鍵研究課題

- 複數類神經網路技術
- 自主式機器學習
- 模組化相連系統
- 動態與混沌網路
- 神經網路之高階認知
- 線上即時巨量資料學習
- 類神經網路與其它技術之融合

一般性研究課題

- 支援向量機及 EM 演算法
- 時間序列預測
- 隨機式類神經網路
- 半監督式學習
- 新架構或新學習演算法
- 吸引因子網路(Attractor Neural Networks)
- 進階類神經網路的應用
- 類神經網路之硬體設計

已發展成熟之研究課題

- 前饋型類神經網路(Feedforward Neural Networks)
- 傳統之監督式學習及非監督式學習方法
- 自我組織圖(Self-organizing Maps)
- 基本類神經網路之應用

重點子領域三、模糊邏輯與系統

(Fuzzy Logic and Systems)

主題概述

模糊邏輯主要是仿照人類高階語意的溝通方式，希望讓電腦能以人類易懂的方式來進行表達、推論及應用。其最早是由美國加州柏克萊大學 Zadeh 教授於 1965 年提出模糊理論及模糊邏輯，利用模糊隸屬程度描述不確定性及不精確性，以處理人類的語義邏輯推論過程，並在科學與學術的研究上用來設計智慧型系統以解析語義或分析描述性的語言。過去數十年，許多專家學者致力於將模糊理論應用在真實世界充滿不確定性及不精確性之問題已有相當成效，例如應用於知識工程、智慧型資訊系統、決策支援系統、控制工程、環境智慧、管理與財經、電子能源、網路應用、健康照護及醫療等領域均有不少成果發表。而 Zadeh 教授於 1975 年即提出第二型模糊集合(Type-2 Fuzzy Logic System, T2FLS)的概念，然而，直到 1998 年才開始有學者專家致力於 T2FLS 之相關研究。T2FLS 較 T1FLS 有額外的自由度以更能處理真實世界的不確定性，但也變得更加複雜。由於 T1FLS 之技術已發展相當成熟，因此目前逐漸往 T2FLS 研究或結合其他方法以增進效率或功能，如結合類神經網路之研究即相當熱門。

國內外發展現況

國內有相當多的研究團隊透過模糊邏輯的概念實現其相關系統及其應用，包含清華大學的王小璠教授的柔性演算與模糊最佳化實驗室、交通大學林進燈教授的資訊媒體實驗室、臺灣科技大學蘇順豐教授系統與控制實驗室及陳錫明教授的模糊資訊系統實驗室、臺灣師範大學王偉彥教授的智慧型系統設計實驗室、中央大學李允中教授的軟體工程實驗室、成功大學郭耀煌教授的智慧型系統暨媒體處理實驗室、中山大學李錫智教授的資訊技術實驗室及高雄大學洪宗貝教授的知識工程實驗室等均從事與模糊理論及應用相關之研究，而台南大學李健興教授則結合模糊理論與本體知識並建立多項實際應用。另外臺灣大學、高雄第一科大、中正大學、中興大學等國內多所大學亦有相當多的研究團隊從事模糊系統與應用的相關研究。

在國外方面有關模糊邏輯與系統之研究亦非常多，例如英國 Hani Hagras 教授應用模糊邏輯技術於智慧型代理人及智慧環境方面研究；加拿大 Marek Reformat 教授從事模糊人工智慧於知識探索推理及知識表達方面研究；英國 Qiang Shen 教授及中國 Baoding Liu 教授從事模糊邏輯數學基礎概念方面研究； 日本 Kaoru Hirota 教授從事模糊邏輯硬體與

感知器及架構方面研究；加拿大 Witold Pedrycz 教授從事模糊資訊萃取及存取並擴至粒子計算(Granular Computing)；日本 Hideki Katagiri 教授從事模糊最佳化方面研究；英國 Robert John 從事 Computing with words 方面研究；新加坡 Woei Wan Tan 教授從事第二型模糊集合及系統方面研究；巴西 Fernando Gomide 教授從事工業財經及醫學應用與商業智慧方面研究;美國 Hamid Berenji 教授從事模糊強制式學習方面研究;英國 Trevor Martin 教授從事模糊系統及網際網路方面研究；法國 Didier Dubois 教授從事模糊決策支援及危機分析方面研究；日本 Hisao Ishibuchi 教授和西班牙 Francisco Herreraá教授從事基因模糊系統方面研究；西班牙 Oscar Cordon 教授從事模糊影像語音視覺訊號處理，均有不錯的研究成果。再如，美國 Jerry Mendel 教授、James C. Bezdek 教授、Jim Keller 教授、印度 Nikhil Pal 教授、法國巴黎第六大學 Bernadette Bouchon-Meunier 教授、義大利沙列諾大學的 Vincenzo Loia 教授等，均是國外致力於發展更貼近人類思考模式的模糊邏輯系統及應用著名的研究團隊。

世界發展之趨勢

由於 T2FLS 有較高之自由度且 T1FLS 之技術已發展相當成熟，因此 T2FLS 之研究在目前模糊邏輯領域中非常熱門。2013 年 IEEE Fuzzy Conference 以其為主題之特別議程即有三個，而 IEEE Transactions on Fuzzy Systems 近幾年亦收錄相當多這類文章。因為 T2FLS 具有一定複雜度及困難性，所以美國南加州大學洛杉磯分校 Jerry Mendel 教授為了推廣 T2FLS，提出了區間第二型模糊邏輯系統(Interval Type-2 Fuzzy Logic System, IT2FLS)，藉由 Karnik-Mendel 演算法來簡化繁雜的第二型模糊邏輯系統程序。而英國艾賽克斯大學 Hani Hagras 教授亦指出傳統的第一型模糊集合並無法完全妥善地處理自然環境中的大量不確定性，因此提出階層第二型模糊邏輯控制器(Type-2 Hierarchical Fuzzy Logic Controller, Type-2 HFLC)的概念，經實驗證實使用第二型模糊集合，可減少模糊規則的設計數量及模糊推論之計算複雜度。因此研究 T2FLS 之理論、特性、設計及應用在這幾年一定為一必然之趨勢。

由於模糊理論於學界及業界之蓬勃發展，義大利學者 Vincenzo Loia 教授和 Giovanni Acampora 博士提出模糊標記語言(Fuzzy Markup Language, FML)，簡化模糊推論系統建置程序，並使領域專家能透過模糊標記語言編輯器快速建置模糊推論系統之知識庫及規則庫，其以 XML 為基礎概念，可充分使用 XML 所帶來的彈性與便利性，可隨時於公開位置下載與利用，也適用於手機或其他平台，因此如何建立知識表達標準以有效將模糊邏輯結合語意及領域知識作延伸及應用也值得重視。

而模糊邏輯亦常結合其他方法以增進效率或功能，尤其要將其他方法或系統所得之結果做語意式陳述說明時更常需要之，例如可結合演化式計算或神經網路學習知識及隸

屬函數。此外如何有效處理一些大量高維度和複合型之資料以解決實際複雜問題，也是研究的重點。

關鍵研究課題

- 第二型模糊邏輯理論及特性
- 第二型模糊邏輯模式建立及應用
- 利用模糊邏輯於大量高維度和複合型資料之處理
- 混合模糊邏輯與其他方法以解決實際複雜問題
- 模糊標記語言及應用
- 模糊知識探索及學習

一般性研究課題

- 模糊最佳化
- 模糊系統設計
- 模糊資料分析、分群與分類
- 文字語意計算(Computing with words)
- 約略集合(Rough Set)
- 粒子計算(Granular Compting)
- 模糊資訊融合

已發展成熟之研究課題

- 傳統之模糊推論
- 第一型模糊邏輯應用
- 基本軟式計算方法之應用

重點子領域四、腦波分析與應用

(EEG Analysis and Applications)

主題概述

從大腦低階的神經元活化與連結，到高階的功能整合與決策，都是仿生計算發展的重要仿效對象；而反向將仿生計算研究所開發的技術應用於大腦的探索，則是將資訊科技由技術開發，擴展至以使用者為中心，並可以生理反應進行客觀評估的新思維。為了瞭解人類的認知功能、刺激反應、健康狀態、情緒好惡等，對大腦狀態進行分析成為逐漸受到重視的方向。就各種大腦狀態感測技術而言，腦電訊號相對於功能性或結構性大腦造影，具有不受空間限制、時間解析度高，易於使用的便利性。就腦波的分析與應用而言，利用各種訊號分析方法結合專家知識，來分析各種特定狀態的腦波，例如睡眠腦電波、閉眼 alpha-rhythm、運動 mu-rhythm、癲癇放電 spike-and-wave 等，已有許多相關研究。就資訊領域而言，大腦神經網路的建模、腦機介面的生活化應用、神經可塑性探討、工作記憶強化輔助、神經回饋、反應式刺激回饋等，都是結合腦波感測、訊號分析、特徵擷取、分群分類、辨識與決策等仿生計算技術的整合性示範應用，也是資訊科技應用於健康生活的潮流。

國內外發展現況

就國內相關研究而言，交通大學腦科學研究中心林進燈教授與柯立偉教授及團隊成員進行日常生活化腦波分析技術與腦波感測系統研發；陽明大學郭博昭教授、中山大學嚴成文教授則進行睡眠生理紀錄系統與睡眠生理訊號分析技術開發；陽明大學整合性腦功能研究小組謝仁俊教授與吳育德教授及團隊成員進行腦電波、功能性磁振造影、腦磁波等不同大腦活動感測與分析；中央大學徐國鎧教授和李柏磊教授開發視覺誘發腦波操控系統；成功大學梁勝富教授、張大緯教授、蕭富仁教授及團隊成員進行睡眠偵測、癲癇抑制與神經回饋技術與系統研發;在意念想像腦機介面開發則有台灣大學黃漢邦教授、交通大學陳永昇教授、成功大學孫永年教授、林宙晴教授與朱銘祥教授投入，並進行機械手臂控制等應用。

就國外研究團隊而言，由 Prof. Jonathan R. Wolpaw 領導的美國紐約 Wadsworth Center BCI 團隊，及 Prof. G. Pfurtscheller 帶領位於奧地利 Graz University of Technology 的 Graz BCI Lab，是腦機介面在歐洲與美洲的兩大研究重鎮，在德國則有 Prof. Klaus-Robert Müller and Dr. Benjamin Blankertz 帶領於 Berlin Institute of Technology 的 Berlin Brain-Computer Interface 團隊。而美國 University of California, San Diego (UCSD)由 Prof.

Scott Makeig 與 Prof. Tzyy-Ping Jung 帶領的 Swartz Center for Computational Neuroscience (SCCN)則致力於腦波運算技術開發，SCCN 所開發的 EEGLAB 軟體已廣泛應用於相關研究，至今已舉辦 17 屆 EEGLAB Workshop，培育許多腦波研究人才。而 Neural Information Processing Systems (NIPS) Conference 則是腦機介面研究相當重要的會議，著名的 BCI Competition 就是起始於 NIPS；而 Graz University of Technology 至今已舉辦五屆 International Brain-Computer Interface Conference，2014 年將舉辦第六屆，也是相當具有代表性的會議。

世界發展趨勢

腦機介面(Brain Computer Interface)的開發，試圖利用腦波及其他非肌肉通道，來協助人類傳遞所欲表達的訊息或控制命令，最成功的腦波研究主題分別是 EEG-Based HMI 跟 EEG-based brain-actuated control (Wolpaw, Birbaumer)，主要專注 mu-rhythm 以及 near-DC potential shifts 的分析應用。這兩種研究方法都針對未經訓練的運動反應現象，來觀察所涉及的腦波 EEG 訊號的時序。研究顯示結合這兩種腦波訊號的特徵，相較於使用單一種腦波特徵，可以提供更好的效能。此外，結合 mu-rhythm 與穩態視覺誘發電位 SSVEP，以提升腦機介面效能，亦是目前國際學界的研究趨勢。當使用者進行人機互動時，藉由即時收集到的腦電訊號與狀態反應，反過來也可以試圖對操作者進行探討，針對特定的行為與反應建立其腦活動的模型，進而了解其運作模式，並能進行神經訓練(Neuro-training)，而得到更好的表現。

神經可塑性(Neural Plasticity)代表大腦改變其結構與功能的能力，而經驗與訓練則為其改變的一個主要因素。從視覺判別，運動訓練，說話的聲音刺激感知，以及聽覺判斷訓練等，瞭解與善用神經可塑性，可以提升人類的生活品質與訓練學習成效。而資訊技術的介入，例如藉由分析腦波在不同學習訓練設計的改變差異，則可以讓神經可塑性更具方向性與效益。此研究在應用層面，可延伸應用於技能程度、學習效益的評估指標，引導出較有效率的學習方向，並瞭解其背後原因，亦可應用於大腦狀態的評估，例如腦傷復健成效評估及年長者工作記憶訓練前後能力增進的評估等。最後結合自動判別與人機介面系統，將可具有音樂、資訊、教育與醫學不同領域的相關產品應用價值。

神經反饋技術透過即時分析特定腦電波增加或減少的現象，回報給使用者，使其嘗試與歸納出有效的改變特定腦波強度的策略，以達成放鬆、專注等各種不同訓練目標。目前神經反饋技術在憂鬱症或精神分裂症患者的診斷治療上，可使患者減輕他們的不舒適感，對於慢性失眠者的睡眠品質改善，亦是藥物控制外的另一種改善方法。藉由結合微小化腦波感測器與可攜式即時腦波分析與回饋裝置將更能生活化與實用化，更能造福

更多患者與一般大眾。

關鍵研究課題

- 神經可塑性
- 腦機介面
- 神經反饋
- 連續大腦狀態監測
- 即時資訊有效回饋
- 神經退化與輔助科技
- 大腦病變輔助診斷

一般研究課題

- 睡眠品質評估與提升
- 腦波型態偵測與辨識
- 視聽覺刺激腦電分析
- 體感刺激腦電分析
- 腦波時頻分析
- 事件相關腦電位分析

重點子領域五、人工生命(Artificial Life)

主題概述

人工生命是一新的研究領域，主要研究如何呈現出具有生物行為特徵的人造系統。與傳統人工智慧研究不同之處，傳統 AI 偏重探討我們所認為的生命型態(life-as-we-know-it)，並以可行的工程技術設計接近生物行為的系統，多著重生命體單一的行為特徵；人工生命則擴大探討各種生命可能的型態(life-as-it-could- be)，探討人工生命體的可能型態與行為，並引進各種技術建立可能或接近具有生命的個體或群體的行為表現。此類型的人工生命系統可以在軟體、硬體或生物系統中模擬或合成。傳統 AI 技術如類神經網路、模糊邏輯、基因演算法、粒子群優演算法、人工免疫演算法、螞蟻演算法等技術均可視為人工生命的相關技術，但是人工生命更注重人工生命體此類行為的表現。人工生命的研究範圍涵蓋生物系統的所有組織階層，並包括各種工程技術與生化、生理與社會學等領域，研究主題包含人工器官、人工大腦、人造生物、人造心智研究、自我組織與成長、演化式硬體、演化與生態動力學、動物與機器人行為、社會組織、文化演變等，涵蓋了各種工程技術與生理與社會學研究，需高度整合各領域技術。若以資訊學門角度窺探人工生命的發展，則以電機、電子、資訊科學與工程等方式探討並實現人工生命，以資訊軟體或硬體方式建立具生物行為的人工生命系統，並觀察評估其行為與表現的合理性，藉此設計出可以協助人類解決問題的智慧型仿生系統。

國內外發展現況

國際上對於人工生命的研究團隊以美國 MIT media lab 為代表性團隊，其亦成立 The international society of artificial life 以研究人工生命相關技術為重點，並成立國際期刊 Artificial life，發表許多重要成果。另外 Santa Fe Institute 為一非營利性研究機構，對於人工生命研究亦投入相當心力；而 University of Pennsylvania 也成立人工生命研究中心。歐洲部分如德國漢堡大學實現在機器人上的人工生命也有相當很好的成果，University of Southern Denmark 也成立人造生命技術中心(Center for Fundamental Living Technology)。研究性組織如 European Center for Living Technology 是歐洲成立的跨國性組織，以研究人工生命相關技術為主題，辦理跨國性會議與研究計畫。每年以人工生命為主題的國際會議如 European Conference on Artificial Life 與 International Conference on the Synthesis and Simulation of Living Systems 均已辦理十屆以上。國內接近人工生命主題的研究團隊，包含台灣大學、中正大學、成功大學、高雄大學、高雄第一科技大學、淡江大學、朝陽大學等，但多以智慧型機器人、仿生型機器人研究為主體。在人工生命行為研究與複雜人工生命體系統建立則還在起步階段。

世界發展之趨勢

雖然人工生命部分技術與傳統 AI 與機器學習技術相同，但人工生命更注重整合各種技術的人工生命體此類行為的表現；同時，並不以發展單一技術為主，而是實際建立人工生命體的實體或模擬系統，探討單一人工生命體個體或群體的行為表現。目前熱門的兩個發展方向：其一為從生物觀察所發現的生物行為實現在軟硬體系統上，如 Bio-inspired Learning and Optimization (artificial Immune, neural and endocrine algorithm, ant colony 等)。另一發展方向則以建立具生物行為特徵的系統，並探討其行為，如 Bio-inspired Robotics 與 Biologically Inspired Engineering 等。

關鍵研究課題

- 人工生命體的建立
- 人工生命系統的計算模型與複雜度
- 人工生命生態動力學
- 適應性硬體系統
- 自我組織/修復系統
- 人工生命知識與智慧的表達

一般性研究課題

- 群體行為與群體智慧
- 大量神經元的系統計算
- 自我適應與演化式硬體設計
- 動物行為模擬
- 生態模擬
- 仿生型與互動型機器人
- 群體機器人

已發展成熟之研究議題

- 單一仿生演算法與其簡單應用，如古典 Fuzzy/EC/NN 之應用

結論

以上各節整理出仿生計算領域中之五大次子領域，包含演化計算、類神經網路、模糊邏輯與系統、腦波分析與應用、及人工生命的一些關鍵熱門、一般性、及較成熟的研究主題，提供給同仁們選擇研究課題時作為參考。關鍵熱門的研究主題通常是較新的題目，尚未被深入研究、困難的問題，因此研究者可發揮的空間較大，如能找到適合的解法，做出良好的實驗結果，將有機會發表在頂級會議或期刊。然而熱門的題目必須與全球研究團隊競爭，必須在時間上比其他人早發表、或者在方法上有獨到之處、實驗結果優於先發表者，才能被刊登出來。而一般性的研究主題，則仍有研究空間，由於入門門檻或重要性相對較低，因此對於大多數的同仁來說，研究這類主題較能有穩定的成果，也是不錯的選擇。而較成熟的研究主題，則因為大部分的可行方法幾乎已被研究過，比較難再有發展空間，除非同仁在方法上或應用上有重大突破，否則一般來說這個部分原則上不鼓勵同仁選擇。希望同仁在選擇研究主題時，除了考慮領域的熱門性、以及可獲得補助的多寡之外，也需要考慮台灣整體的競爭力、以及未來的發展趨勢，才不致於所選領域只是熱門一時，短短幾年便退潮了。本規劃所選的領域，包含當今流行的多/高目標演化式最佳化、動態與不確定環境之演化式計算、彌因計算、類神經網路、模糊邏輯與系統，並有極具發展潛力的腦波分析與應用、人工生命以及仿生計算在跨領域的應用等。本規劃提供大方向給對於仿生計算有興趣但尚未找到明確題目的同仁，可以有許多不錯的選擇，也避免選錯題目，導致浪費寶貴的時間，卻無法有滿意的成果。仿生計算領域在台灣有許多資深的學者專家，也有一些和其他主題一起結合的研討會，例如人工智慧學會每年所舉辦的 TAAI 研討會即有相當多仿生計算之論文，在國外也有許多相關研討會及期刊等，我們鼓勵同仁多與世界接軌，以了解仿生計算領域之全貌與趨勢，不但站在巨人的肩膀上，也走在時代的前端，實現美好的研究生涯，對學術界、國家、社會做出貢獻。

主題參考文獻

重要研討會與期刊

- IEEE Computational Intelligence Magazine
- IEEE Transactions on Evolutionary Computation
- IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)
- IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI)
- Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO)
- IEEE Transactions on Fuzzy Systems
- Fuzzy Sets and Systems

- International Journal of Fuzzy Systems
- Soft Computing
- Applied Soft Computing
- IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B: Cybernetics
- IEEE International Conference on Fuzzy Systems
- IEEE World Congress Computational Intelligence
- IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems
- Evolutionary Computation
- Applied Intelligence
- Journal of Intelligent and Fuzzy Systems
- International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based Systems
- International Journal of Approximate Reasoning
- Neurocomputing
- Neural Networks
- Swarm Intelligence
- Memetic Computing
- Conference on Artificial Intelligence (AAAI)
- Conference on Learning Theory (COLT)
- IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)
- IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)
- IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)
- IEEE International Conference on Granular Computing (GrC)
- International Conference on Machine Learning (ICML)
- International Joint Conferences on Artificial Intelligence (IJCAI)
- Neural Information Processing Systems (NIPS)
- Uncertaincy in Artificial Intelligence (UAI)
- ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology
- ICGA Journal
- Journal of Machine Learning Research (JMLR)
- Machine Learning Journal (MLJ)
- Theoretical Computer Science
- Information Sciences
- Journal of Neural Engineering
- Journal of Neuroscience Methods
- International Brain-Computer Interface Conference

概述論文(Survey paper)及教學文章(Tutorial)

- C. M. Bishop. Pattern Recognition and Machine Learning.
- C. J. C. Burges, “A Tutorial on Support Vector Machines for Pattern Recognition,” Data

Mining and Knowledge Discovery, Vol. 2, No. 2, pp. 121-167, June, 1998.

- M. Dorigo, "Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence," in Proceedings of the 5th International Workshop, ANTS 2006, Brussels, Belgium, September 4-7, 2006.
- M. Dorigo, V. Maniezzo, and A. Colorni, "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, Vol. 26, No. 1, pp. 29-41, 1996.
- H. Hagras and C. Wagner, "Towards the Wide Spread Use of Type-2 Fuzzy Logic Systems in Real World Applications,"IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 14-24, Aug. 2012.
- J. Hertz, A. Krogh, and R. Palmer, "Introduction to the Theory of Neural Computation," 1991, Basic Books.
- J. Kennedy, "Encyclopedia of Machine Learning," pp. 760-766, 2010.
- J. M. Mendel, "Type-2 Fuzzy Sets and Systems: An Overview," IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 2, No. 2, pp. 20-29, Feb. 2007.
- Wikipedia, http://en.wikipedia.org/wiki/Bionics
- J. R. Wolpaw, N. Birbaumer, D. J. McFarland, G. Pfurtscheller, and T. M. Vaughan, "Brain-computer Interfaces for Communication and Control," Clinical Neurophysiology, Vol. 113, pp. 767-791, 2002.
- L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, 1965.

參考文獻(Tutorial)

- G. Acampora and V. Loia, "A proposal of ubiquitous fuzzy computing for ambient intelligence," Information Sciences, Vol. 178, No. 3, pp. 631-646, 2008.
- G. Acampora and V. Loia, "Fuzzy control interoperability and scalability for adaptive domotic framework," IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 1, No. 2, pp. 97-111, 2005.
- G. Acampora and V. Loia, "Using FML and fuzzy technology in adaptive ambient intelligence environments," International Journal of Computational Intelligence Research, Vol. 1, No. 2, pp. 171-182, 2005.
- G. Acampora, V. Loia, C. S. Lee, and M. H. Wang, "On the Power of Fuzzy Markup Language," Springer-Verlag, Germany, 2013.
- Nicola Beume, Boris Naujoks, and Michael Emmerich, "SMS-EMOA: Multiobjective selection based on dominated hypervolume," European Journal of Operational Research, Vol. 181, No. 3, pp. 1653-1669, 2007.
- Jian-Hong Chen and Jian-Hung Chen, "Multi-objective memetic approach for flexible process sequencing problems," in Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference, pp. 2123-2128, 2008.
- Shih-Hsin Chen, Pei-Chann Chang, Qingfu Zhang, and Chin-Bin Wang, "A guided

Memetic algorithm with probabilistic models," International Journal of Innovational Computing Information and Control. 5(12(B)), pp. 4753-4764, 2009.

- Xianshun Chen, Yew-Soon Ong, Meng-Hiot Lim, and Kay Chen Tan, "A multi-facet survey on memetic computation," IEEE Transactions on Evolutionary Computation Vol. 15, No. 5, pp. 591-607, 2011.
- Tsung-Che Chiang, Hsueh-Chien Cheng, and Li-Chen Fu, "NNMA: An effective memetic algorithm for solving multiobjective permutation flow shop scheduling problems," Expert Systems with Applications, Vol. 38, No. 5, pp. 5986-5999, 2011.
- Carlos A. C. Coello, "Evolutionary multi-objective optimization: A historical view of the field," IEEE Computational Intelligence Magazine Vol. 1, No. 1, pp. 28-36, 2006.
- David Corne and Joshua Knowles, "Approximating the nondominated front using the Pareto archived evolution strategy," Evolutionary Computation, Vol. 8, No. 2, pp. 149-172, 2000.
- Carlos Cruz, Juan R. Gonzalez, and David A. Pelta, "Optimization in dynamic environments: A survey on problems, methods and measures," Soft Computing, Vol. 15, No. 7, pp. 1427-1448, 2001.
- Kalyanmoy Deb, "Introduction to evolutionary multiobjective optimization," Lecture Notes in Computer Science 5252, pp. 59-96, 2008.
- Kalyanmoy Deb, Amrit Pratap, Sameer Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 2, pp. 181-197, 2002.
- Chi Keong Goh, Dudy Lim, Learning Ma, Yew-Soon Ong, and Partha Dutta, "A surrogate-assisted memetic co-evolutionary algorithm for expensive constrained optimization problems," in Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 744-749, 2011.
- Chi-Keong Goh and Kay-Chen Tan, "Evolutionary multi-objective optimization in uncertain environments: issues and algorithms," Springer-Verlag, 2009.
- H. Hagras and C. Wagner, "Towards the wide spread use of type-2 fuzzy logic systems in real world applications," IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 7, No. 3, pp. 14-24, 2012.
- H. Hagras, "A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots," IEEE Transactions on Fuzzy System, Vol. 12, No. 4, pp. 524-539, 2004.
- IEEE CIS Task Force on Evolutionary Computation in Dynamic and Uncertain Environments (ECiDUE), http://www.tech.dmu.ac.uk/~syang/IEEE_ECiDUE.htmlStefan
- Hisao Ishibuchi, Noritaka Tsukamoto, and Yusuke Nojima, "Evolutionary many-objective optimization: A short review," in Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 2424-2431, 2008.
- Hisao Ishibuchi, Yasuhiro Hitotsuyanagi, Yoshihiko Wakamatsu, and Yusuke Nojima,

"How to choose solutions for local search in multiobjective combinatorial memetic algorithms," PPSN (1), pp. 516-525, 2010.

- Yaochu Jin and Juergen Branke, "Evolutionary Optimization in Uncertain Environments—A survey," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 9, No. 3, pp. 303-317, 2005.
- Yaochu Jin, "A comprehensive survey of fitness approximation in evolutionary computation," Soft Computing, Vol. 9, No. 1, pp. 3-12, 2005.
- Yaochu Jin, "Surrogate-assisted evolutionary computation: Recent advances and future challenges," Swarm and Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 2, pp. 61-70, 2011.
- Yaochu Jin, Markus Olhofer, and Bernhard Sendhoff, "A framework for evolutionary optimization with approximate fitness functions," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 6, No. 5, pp. 481-494, 2002.
- Kenneth A. De Jong, "Analysis of the behavior of a class of genetic adaptive systems," University of Michigan, 1975.
- Dudy Lim, Yaochu Jin, Yew-Soon Ong, and Bernhard Sendhoff, "Generalizing surrogate-assisted evolutionary computation," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 14, No. 3, pp. 329-355, 2010.
- Jih-Yiing Lin and Ying-Ping Chen, "Analysis on the collaboration between global search and local search in memetic computation," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 15, No. 5, pp. 608-623, 2011.
- Bo-Fu Liu, Hung-Ming Chen, Jian-Hung Chen, Shiow-Fen Hwang, and Shinn-Ying Ho, "MeSwarm: Memetic particle swarm optimization," in Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO), pp. 267-268, 2005.
- Yi Mei, Ke Tang, and Xin Yao, "Decomposition-based memetic algorithm for multiobjective capacitated arc routing problem," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 15, No. 2, pp. 151-165, 2011.
- J. M. Mendel, "Type-2 fuzzy sets and systems: An overview," IEEE Computational Intelligence Magazine, Vol. 2, No. 2, pp. 20-29, 2007.
- J. M. Mendel, "Uncertain Ruled-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions," Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2001.
- J. M. Mendel, R. I. John, and F. Liu, "Interval type-2 fuzzy logic systems made simple," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 14, No. 6, pp. 808-821, 2006.
- Ferrante Neri and Carlos Cotta, "Memetic algorithms and memetic computing optimization: A literature review," Swarm and Evolutionary Computation Vol. 2, pp. 1-14, 2012.
- Stefan Schliebs and Nikola Kasabov, "Evolving spiking neural network—A survey," Evolving Systems, Vol. 4, No. 2, pp. 87-98, 2013.
- Chuan-Kang Ting and Chien-Chih Liao, "A memetic algorithm for extending wireless

sensor network lifetime," Information Sciences Vol. 180, No. 24, pp. 4818-4833, 2010.

- Chuan-Kang Ting and Xin-Lan Liao, "The selective pickup and delivery problem: Formulation and a memetic algorithm," International Journal of Production Economics, Vol. 141, No. 1, pp. 199-211, 2013.
- Gary G. Yen and Zhenan He, "Performance metrics ensemble for multiobjective evolutionary algorithms," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 18, No. 1, pp. 131-144, 2013.
- L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," Information and Control, Vol. 8, No. 3, pp. 338-353, Jun. 1965.
- Qingfu Zhang and Hui Li, "MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 11, No. 6, pp. 712-731, 2007.
- Eckart Zitzler, Lothar Thiele, Marco Laumanns, Carlos M. Fonseca, and Viviane Grunert da Fonseca, "Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review," IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 7, No. 2, pp. 117-132, 2003.
- Eckart Zitzler, Marco Laumanns, and Lothar Thiele, "SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm for multiobjective optimization," In: Giannakoglou K. et al. (eds.) Evolutionary Methods for Design, Optimisation and Control with Application to Industrial Problems, pp. 95-100, 2001.