

行政院國家科學委員會專題研究計畫 成果報告

免疫式基因演算法於橋基沖刷潛勢評估知識規則掘取之研究

計畫類別：個別型計畫

計畫編號：NSC93-2211-E-040-001-

執行期間：93年08月01日至94年07月31日

執行單位：中山醫學大學資訊管理學系

計畫主持人：曾明性

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 94 年 10 月 26 日

## 中文摘要

近年來由於資料庫技術與資料收集技術的進步，如何在原本資料庫中找出隱藏的一些未知的規則或知識，使得資料挖掘（data mining）或稱知識發現（knowledge discovery）成為一個熱門的新興研究領域。為了突破以往建置專家系統知識庫僅能擷取自領域專家之經驗規則的瓶頸問題，本研究利用橋梁資料庫之現地調查資料，配合免疫式基因演算法(immune genetic algorithm)，從資料的角度，採掘出橋基沖刷災害潛勢評估的知識規則，可供未來改良橋基沖刷災害潛勢評估專家系統之需，達到防微杜漸的先期防災目的。

研究結果所獲得的橋基沖刷災害潛勢知識規則為：IF[(裸露深度 $\geq 7.66\%$ 貫入深度)且(主河寬 $< 46.00\%$ 全河寬)且(阻水面積比 $\geq 7.59\%$ )且(側向侵蝕或水躍沖刷潛勢的嚴重程度 $\geq 0.36$ )] THEN(橋基具嚴重性沖刷潛勢) ELSE(橋基沖刷潛勢不具嚴重性)。此知識規則能將 17 筆案例資料全部正確分類，規則誤判率為 0，經與橋基沖刷領域專家知識相驗證可得知此知識規則的知識效度相當良好。

關鍵詞：資料挖掘、知識發現、橋梁資料庫、免疫式基因演算法、知識規則

## ABSTRACT

Advances in database technologies and data collection techniques have led to a promising emerging field, call data mining or knowledge discovery in database (KDD). To solve the bottleneck problem of knowledge acquisition for building experts system, this study employs the immune genetic algorithm to extract the knowledge rules of potential bridge scour from bridge investigation database. These mining rules will be useful to improve the evaluating system of potential bridge scour for pre-warning and disaster mitigation purposes.

The results show that generated knowledge rule for potential bridge scour modeling is IF [ (Scour-Depth Ratio  $\geq 7.66\%$ ) and (Main-Channel-Width Ratio  $< 46.00\%$ ) and (Blockage Ratio  $\geq 7.59\%$ ) and (Erosion Risk of Landside or Hydraulic Jump  $\geq 0.36$ ) ] THEN (bridge is dangerous) ELSE (bridge is not dangerous). This knowledge rule can classify the potential risk for all the seventeen cases of bridge scour, and its knowledge effectiveness is very well by compared with the domain expert's knowledge.

Keywords: data mining, knowledge discovery, bridge database, immune genetic algorithm, knowledge rules

## 一、緣由與目的

台灣地區因為中央山脈縱列，河川多呈東西流向，所以南北交通系統都必須跨越眾多的河川，全國橋梁也隨著不斷增加，在可預見的將來，橋梁在公路系統中所扮演的角色將日趨吃重。交通部民國八十六年估算台灣地區大約有二萬零一百八十四座橋梁；另交通部路政司統計的公路橋梁則有一萬零五百四十二座（曾明性等 1999）。橋梁為公路系統中不可或缺的主要環節，一旦遭受損害而出現問題，對交通運輸、社會經濟、以致於人民生命財產都會造成極大的影響。而影響台灣橋梁使用年限的三大主因為地震、腐蝕與洪水災害。近年來橋梁災害所佔之發生比率及嚴重受損之程度，均以洪水之沖刷災害為最高（王仲宇等 1999）。由於本省砂石供應體系始終以開採河川砂石為主要來源，其年平均生產量約佔砂石總生產量 90% 以上，河床砂石經歷長期以來之過度使用，已然造成本省西部各大流域中下流之主河道的河床高程嚴重下降，更加上本省河川坡陡流急，每逢暴雨洪水迅速漲落且水勢洶湧，劇烈淘刷橋墩及橋台之基礎處河床，導致原本已裸露之橋基更形惡化，甚至橋梁傾斜、倒塌，造成交通中斷，對人民生命財產造成莫大的傷害（林呈 1998；曾明性等 1999）。如民國八十七年六月七日因豪雨沖刷，台二十一線牛眠橋倒塌造成數起人車傷毀；民國八十九年八月二十七日碧荊絲颱風發生台一線高屏大橋斷橋事件造成多起車毀人傷；民國九十年七月三十一日桃芝颱風造成台二十一線沿路多座橋梁的破壞或流失，更是震驚國內外（林呈等 2001）；在彰顯橋基沖刷災害之嚴重性與建置橋基沖刷災害潛勢評估專家系統之迫切性。

隨著資訊科技的進步，原先由手書寫式的水利資料改由以電腦儲存，近年來隨著資訊系統的廣泛使用，使得水利相關資料庫中資料量的大量增加，而其中所蘊藏的資訊量也相對的提高。若是能夠從現有的橋梁資料庫，經由數據的分析找出橋梁沖刷災害與其破壞情形間之相關性，從而歸納出它們相互間的必然性，將有助於建置災害潛勢評估之防災支援系統。本研究將利用前人耗費大量經費才得以收集來的橋梁沖刷災害案例之現地調查資料，配合基因演算法( genetic algorithm)，從資料的角度，將相關調查資料善加利用，並轉化成有用的災害診斷知識，期能採掘出橋基沖刷災害潛勢評估的知識規則，以供改良橋基沖刷災害潛勢評估專家系統之需，達到防微杜漸的先期防災目的。

## 二、文獻回顧

1960 年左右，麻省理工學院的 Marvin Minsky 首創人工智慧 (AI) 這個名詞後，人工智慧的發源直到近十年才逐漸受到學術界與工商界的認同，而自成一領域。在台灣，人工智慧雖尚在啟蒙期，但其重要性已漸受產官學研各界的重視。專家系統乃人工智慧之一分支，但由於許多成功系統之開發完成，且其使用者給予高評價，故成為人工智慧最受重視的一門。專家系統是一種電腦化系統，具有邏輯推理能力，以蒐集歸納某特定領域之專家知識與經驗，並結合專家知識智慧系統，以解決現實問題。由於專家系統可儲存豐富的專業知識、不受環境影響可隨時隨地提供服務、反應迅速正確不像人類專家因主觀情緒等因素可能作出不同決定、及可提供合理邏輯的解釋說明等諸多優點，其應用之範圍日漸廣泛，尤以醫學診療、資源探測、化

學分析、及故障偵查等方面的成效較高。在傳統專家系統的建置過程中，推理時所需要的知識規則，通常藉由知識工程師和領域專家的討論來獲取知識(曾 2004)。但是以這種方法來獲取知識不僅相當辛苦，而且其獲得知識的完整性、一致性及正確性常頗受質疑。因為，領域專家容易受其經驗的影響，可能會忽略了資料中所蘊藏但不為專家所了解的規則。近年來由於資訊科技的快速發展，利用以機器學習相關技術來歸納挖掘出所需的知識規則，已成為建置專家系統知識庫之瓶頸問題的有效解決方法(陳等 2003, 曾 2004)。

1970 年代，Dr. John Holland 發展一種方法藉由操作人工染色體(Artificial Chromosome)，以達成基因選擇(Selection)、交配(Crossover)與突變(Mutation)的基因運算法(Genetic Algorithm)，這種基因演算法有堅固之字串操作模式(Schema Theorem)為基礎，得以推測出較佳基因族群之成長模式，不良之基因在演化過程中被淘汰。近年來各類基因演算法相當活躍於各領域之最佳化問題之求解上(Michalewicz 1996, Shin and Lee 2002, 蘇與張 2001, 陳等 2003)。

橋基沖刷相關研究大多著重在沖刷試驗、保護工法、數值模擬、與現地案例評析等，由於文獻甚多，因篇幅關係不一一列舉，目前國外收錄相關橋基災害之機制、案例與推估方法的重要參考文獻首推 Mellivell and Coleman (2000)合著之”Bridge Scour”一書最為完整，而國內方面則以林呈教授歷年來的橋基沖刷現地調查相關研究報告(1998~2002)為本土化資料收集與分析最為詳盡者。在橋梁地震災害預測方面，則有利用類神經網路進行橋梁震害預測系統(張等 2000)之研究文獻。曾(2004)以專家領域之經驗知識(林等 2001)為主，利用圖形使用介面開發程式語言(VB)結合資料庫管理系統、專家系統、及地理資訊系統元件建置一套橋梁沖刷潛勢評估專家系統。近年來由於資料庫技術與資料收集技術的進步，使得各類工程資料庫中的資料量大量增加。隨著資料量的逐日劇增，實已遠超過人類基本的分析能力。如何在原本資料庫中找出隱藏的一些未知的規則或知識，使得資料挖掘 (data mining) 或稱知識發現 (knowledge discovery) 成為一個熱門的新興研究領域。

### 三、研究方法

#### 1. 免疫式基因演算法

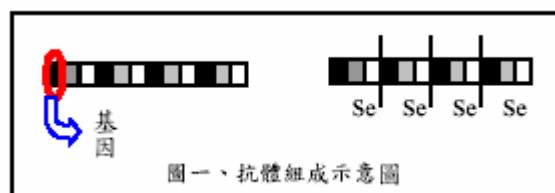
基因演算法 (Genetic Algorithm, GA)，為模擬生物進化程序所發展出來的一種最佳化演算法，是基於自然選擇過程的一種最佳化搜尋方法。其理論主要是參照達爾文進化論「物競天擇，適者生存」的概念，它能夠選擇物種中較好的特性的個體，並淘汰掉不適合的，在代代演化下達到個體最佳化的目標。其主要是根據生物界中基因抗體複製、交配、突變的原理以及「物競天擇，適者生存」的進化過程所發展出來的。基因演算法將母體中較優良的抗體保留下來，允許其複製並交配繁衍出下一代，在下一代中繼續擇優汰弱，因而進化出最適應環境的後代子孫出來。簡單的說，基因演算法是一種模仿自然界天擇與優勝劣敗法則及基因演化的搜尋方法，此方法藉由電腦模擬生態系統，其中所有問題的解答相互競爭、相互交配、繁衍下一代，總是朝著解決問題 (由程式所設定的問題) 最佳化的方向演化。

為何基因演算法在求解最佳化問題上往往要比傳統最佳化方法為佳，其中主要原因為基因演算法具有以下四個特性：

- (1) 參數重新編碼：針對參數進行編碼，利用所編碼的組合進行演化機制，並非直接利用參數本身求解，使得演化機制的特性更有效率地搜尋問題全域最佳解。
- (2) 群體的搜尋：基因演算法利用整個群體的解來搜尋，而非傳統演算法由單一起始點搜尋，由群體搜尋的優點在於可以避免落入局部最佳解的情形。
- (3) 輸入變數彈性大：基因演算法僅利用目標函數值的資訊即可進行計算，並不需要對目標函數作微分或其它轉換處理。並可適用於隨機環境。
- (4) 與其它最佳化方法結合的彈性大：基因演算法具有與其它最佳化方法結合的彈性，可以針對特定的問題提供更有效率的求解方式，例如結合基因演算法具較佳全域搜尋特性與梯度法可以快速收斂兩者之優點所形成的混合式方法。

本研究係應用仿生物之免疫系統作用之基因演算法作為探勘橋基沖刷潛勢評估知識規則的資料探勘技術，茲將免疫式基因演算法則(Immune Genetic Algorithm) (Jerne 1973, Michalewicz 1996, Shin & Lee 2002, 陳等 2003)的基本原理說明如下：

### 步驟一：抗體設計與編碼



抗體的編碼方式為基因演算法在最佳化過程中相當重要的關鍵，選擇適當的編碼方式，則可以大幅提高計算效率。故編碼的方式須視問題本身及變數的性質而定。本研究擬模仿真免疫系統之機制，將欲求解之規則以基因排列之形式予以設計編碼，如圖一所示。在圖一中，由不同色塊所代表的即為基因，由基因所組成的群體即為抗體，圖一中右半部所代表的即為一具有12個基因的抗體，而每3個基因組成一單位，表一個可能因子及其對應之臨界值(一條可行的規則)。而初世代之抗體是在可行解空間內以隨機的方式產生，其數目大小及臨界值基因之編碼長度，將會直接影響求解演算的效能。

### 步驟二：計算族群中的每一個抗體(可行規則)之適應度函數。

基因演算法是以適應度函數為唯一回饋的標準，只靠適應度函數值來判斷抗體的優劣，決定抗體保留到下一代的存活率。演算模型中並無傳統演算法之限制式(Constraints)，故適用性高。對本研究知識規則掘取的應用而言，在此步驟可採用「規則誤判率最小化」之目標予以函數化。

### 步驟三：依步驟二之結果，從族群中選擇最佳抗體，進行精英(elitism)保留機制。

### 步驟四：為避免抗體多樣性降低，提高最佳抗體子代繁衍，調整族群適應度函數值。

### 步驟五：由步驟四產生的新族群特性進行基因運算 (genetic operations)。

此步驟主要進行一般傳統基因演算法的基因選擇(selection)、交配(crossover)及

突變(mutation)等程序，經過此步驟之演算即產生新的族群抗體。此過程引入的交配率及突變率亦會直接影響求解演算的效能。

步驟六：將上一步驟所產生的新族群抗體重新計算其誤判率，並執行取代(replace)原記憶區中之舊群組抗體。

步驟七：檢查是否達到停止條件？若為否則跳至步驟二，若為是則跳至步驟八。

步驟八：輸出具最佳適應度值之抗體所代表之最佳規則，結束。

## 2. 知識規則結構

在知識庫中，專家知識表示法可以用產生式法則(Production Rules)、語法網路(Semantic Nets)、框架(Frames)、邏輯(Logics)等方法來組織知識，其中以產生式法則為最常用的知識表示法，有超過 70% 的專家系統都採用此法來建構知識庫(曾 2004)，曾(2004)亦採用產生式法則構築規則庫，進行橋梁沖刷專家知識數位化的工作。本研究將欲掘取之知識規則結構設計如下：

```
Rule: IF [      (因子 1)(=或≥或<)(臨界值 1)
               and (因子 2)(=或≥或<)(臨界值 2)
               . . . . .
               . . . . .
               and (因子 n)(=或≥或<)(臨界值 n)
           ]
      THEN 觸發某結果
      ELSE 某結果不發生
      ENDIF
```

## 3. 系統開發技術

本系統將採以 XML 架構描述檔來管理、存放屬性資料，並利用 VS.Net 快速應用系統開發(Rapid Application Development, RAD)工具，開發具備能夠提供使用者輸入屬性參數值之基因演算法。本系統採用 Microsoft .Net Framework 做為底層的服務，並使用 VB.Net 程式語言開發。開發之功能模組如下：

- (1) 資料編輯器：開發可新增更改資料錄介面並儲存為 XML 檔，如圖二。
- (2) 輸入介面設計：開發模式參數輸入介面，如圖三。
- (3) 輸出介面設計：開發執行結果展示介面，如圖四、圖五、圖六。

## 四、實驗範例

為廣泛進行本文所研發之知識規則掘取系統的模式檢定、模式驗證與模式應用，茲以下述三個實驗範例進行系統應用及展示說明如下：

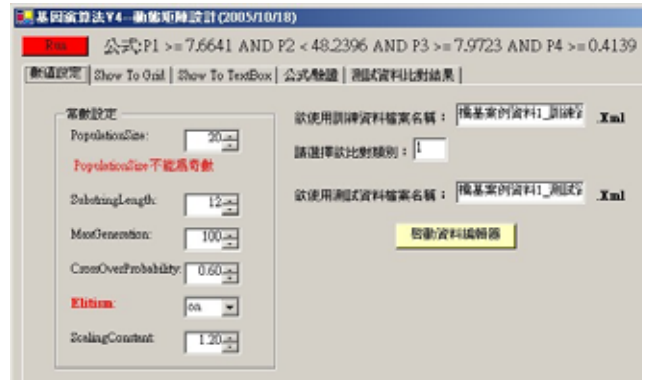
### 1. 函數極值求解

- (1) 資料來源

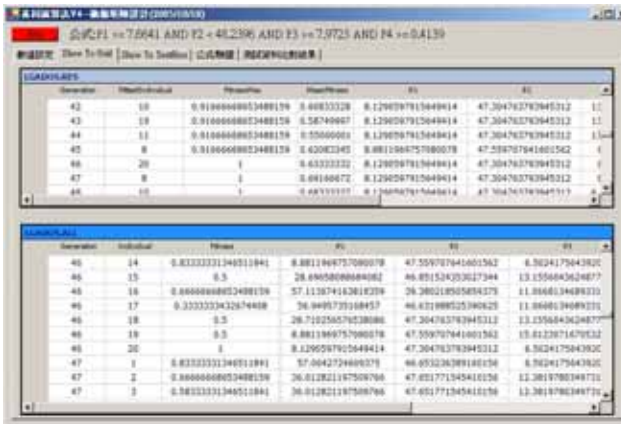
本應用範例求解 $f(x,y)=x^2+siny$  在 $x=? y=?$  時會發生極大值 $f_{max}=?$



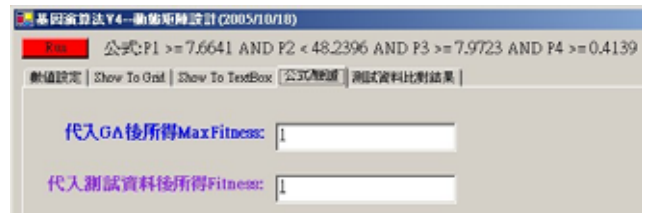
圖二 資料編輯器



圖三 設定參數及資料檔



圖四 基因演算歷程展示



圖五 規則掘取與適應度值展示



圖六 測試資料比對展示

(2) 影響因子

本應用範例選定因子 1 為  $x$ ，因子 2 為  $y$ ，其中  $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq \pi$

(3) 知識規則

本應用範例知識規則設計為

$$\text{Rule 1 : IF } [x = C1 \text{ and } y = C2] \text{ THEN } f(x,y) = f_{max}$$

(4) 目標函數

本應用範例目標函數設計為計算各基因代表之  $f(x,y)$  值為適合度 (fitness)，並比較每一代所有基因的適合度以求取其最大值為當代最佳目標函數值

(5) 規則驗證





Rule 2 : IF [  $SL < 7.13$  and  $SW < 4.77$  and  $PL \geq 1.97$  and  $PW < 1.63$  ] THEN Vsersicolor

Rule 3 : IF [  $SL < 7.78$  and  $SW < 4.98$  and  $PL \geq 3.47$  and  $PW < 1.62$  ] THEN Virginica

經與上述 75 筆資料進行比對可發現此知識規則的分類準確率高達 98.22%。與目前已存在的方法之平均分類準確率做比較(方與陳 2003)，如表一所示，結果顯示出本文之方法比目前已存在的方法具有更高的平均分類準確率。

表一 各種方法的平均分類準確率之比較

方法	平均分類準確率
方與陳(2003)的方法(訓練資料:75 筆；測試資料:75 筆；執行 200 次)	96.28%
本文所提的方法(訓練資料:75 筆；測試資料:75 筆；執行 200 次)	98.22%
方與陳(2003)的方法(訓練資料:150 筆；測試資料:150 筆；執行 200 次)	97.33%
本文所提的方法(訓練資料:150 筆；測試資料:150 筆；執行 200 次)	97.56%

### 3. 橋基沖刷潛勢規則掘取

#### (1) 資料來源

由於橋基沖刷相關資料屬性具有極端動態的時變性，資料取得真是非常困難，目前交通部橋梁管理系統之橋梁資料庫較偏重在非時變性之靜態屬性調查的量化資料如橋梁上部或下部結構的基本屬性上，並無法提供量化資料供本研究進行橋基沖刷潛勢知識規則掘取使用。經林呈教授熱心提供其近年來在橋基沖刷的調查案例資料(林呈 1998, 王仲宇等 1999, 林呈等 2001, 林呈等 2002) 供本研究使用。

#### (2) 影響因子

根據林呈(1998~2002)對於本省西部各大流域橋梁沖刷災害成因調查分析指出可能原因包含近年內主河道河床下降的情形、近年內主河道變遷的情形、河川整治辦理情形、鄰近有無採砂、上游攔河堰、橋梁上游或下游側具束縮河道之其他構造物、基礎型式、基礎裸露程度、本河川附近其他橋梁有無沖刷問題、梁底高程、阻水比之效應、橋基方向與河川流向間之角度、河床軟岩之風化沖蝕、具側向侵蝕或水躍或跌水沖刷的潛在因素、其他會影響橋梁沖刷穩定之異常現象等。上述十四種橋梁沖刷肇災成因在案例現地調查中非常難以收集到完整數據並予以具體量化。因之，本文運用知識聚集與知識轉換方式，將之簡約轉置成易於量化的顯性資料屬性共四個影響因子，如  $P1 = \text{裸露深度} / \text{貫入深度}$ 、 $P2 = \text{主河寬} / \text{全河寬}$ 、 $P3 = \text{阻水面積比}$ 、 $P4 = \text{側向侵蝕或水躍沖刷潛勢}$ ，以便於採用產生式規則。經蒐集林呈教授近年來在橋基沖刷案例調查相關資料屬性彙整分析成 17 筆紀錄，如表二所示。

表二 橋基沖刷案例調查資料

案例編號	裸露深度/貫入深度	主河寬/全河寬	阻水面積比	側向侵蝕或水躍沖刷潛勢	嚴重性分類
1	63.5	42	14.5	2.5	1
2	27.8	41	17.5	2.5	1
3	33.3	42	19.1	2	1
4	48.3	23	13.5	3	1
5	17.5	29	9.6	3	1
6	14.8	32	19.7	2	1
7	8.0	32	10.2	0	0

8	27.4	32	14.2	3	1
9	49.7	30	15	0.5	1
10	8.3	43	10.6	0	0
11	7.5	25	11.5	2	0
12	31.0	45	5.4	1	0
13	8.2	30	21	3	1
14	17.1	30	8.7	2.5	1
15	27.1	41	10.3	3	1
16	36.1	30	19.5	2	1
17	17.6	52	5.6	0	0

(3) 知識規則

Rule : IF [ P1( $\geq$ 或 $<$ )C1 and P2( $\geq$ 或 $<$ )C2  
and P3( $\geq$ 或 $<$ )C3 and P4( $\geq$ 或 $<$ )C4 ] THEN 橋基具嚴重性沖刷潛勢

(4) 目標函數

本應用範例目標函數設計為計算各基因代表之可行規則的分類正確率，求取規則誤判率最小值為適合度(fitness)，並比較每一代所有基因的適合度以求取「規則誤判率最小化」為當代最佳目標函數。

(5) 規則驗證

本文首先採用 12 筆訓練資料(案例編號：1,3,4,7,8,9,11,12,13,14,16,17)，經 100 代的基因演化後，本系統掘取出之橋基沖刷災害潛勢知識規則為：

Rule : IF [ P1 $\geq$ 7.66% and P2 $<$ 48.24% and P3 $\geq$ 7.97% and P4 $\geq$ 0.41 ] THEN 橋基具嚴重性沖刷潛勢，經與 5 筆測試資料 (案例編號：2,5,6,10,15)進行比對可發現此知識規則的分類準確率高達 100%。由於案例資料取得實在困難，故最後將全部 17 筆資料皆當成訓練資料經 100 代的基因演化後，17 筆的資料全部皆能被正確分類，規則誤判率為 0，其掘取出之橋基沖刷災害潛勢知識規則為：

Rule : IF [ P1 $\geq$ 7.66% and P2 $<$ 46.00% and P3 $\geq$ 7.59% and P4 $\geq$ 0.36 ] THEN 橋基具嚴重性沖刷潛勢，此知識規則與上述經 12 筆訓練資料所掘取之知識規則相當一致。

由橋基沖刷專家知識可得知：當橋基裸露深度愈大者表橋基結構因摩擦力減少而危害度愈高，當主深槽河寬佔全河寬的比例愈低則束縮沖刷愈形嚴重，當橋基阻水面積比愈高則水位壅升愈高、局部沖刷愈嚴重，當側向侵蝕或水躍沖刷潛勢的嚴重程度愈大則橋基沖刷潛勢愈高。上述掘取出之橋基沖刷潛勢知識規則表當(裸露深度 $\geq$ 7.66%貫入深度)且(主河寬 $<$ 46.00%全河寬)且(阻水面積比 $\geq$ 7.59%)且(側向侵蝕或水躍沖刷潛勢的嚴重程度 $\geq$ 0.36)則(該橋基具嚴重性沖刷潛勢)，經與橋基沖刷專家知識相驗證可得知此知識規則與專家知識具邏輯一致性。

## 五、結論

本研究應用生物系統之免疫機制結合傳統基因演算法之搜尋優勢，在.net 平台上開發智慧型知識規則掘取系統。本系統分別針對兩變數函數極值求解、150 筆鳶尾花資料之分類規則掘取、及 17 筆調查案例之橋基沖刷潛勢規則掘取等三個實驗範例進行分析探討，應用結果皆顯示本系統以免疫式基因演算技術來歸納挖掘出所需的知識規則，不但與傳統專家知識可互相驗證顯示本方法具相當良好的知識效度，且比目前

已存在的分類方法具有更高的分類準確度，確可有效解決以往建置專家系統知識庫之瓶頸問題。研究結果所獲得的橋基沖刷災害潛勢知識規則為：IF[(裸露深度 $\geq$ 7.66%貫入深度)且(主河寬 $<$ 46.00%全河寬)且(阻水面積比 $\geq$ 7.59%)且(側向侵蝕或水躍沖刷潛勢的嚴重程度 $\geq$ 0.36)]則(橋基具嚴重性沖刷潛勢)，此知識規則能將 17 筆案例資料全部正確分類，經知識驗證可得知此知識規則與橋基沖刷專家知識具邏輯一致性。

## 六、參考文獻

- (1) Jerne, N.K.(1973), "The immune system," *Scientific America*, 229(1), 52-60.
- (2) Mellivell, B. and Coleman, S. (2000). *Bridge scour*, Water Resources Publications.
- (3) Michalewicz, Z. (1996), *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3<sup>rd</sup> Edition, Spinger-Verlag Berlin Herdelberg, NY.
- (4) Shin K.S. and Lee Y.J. (2002), "A Genetic Algorithm Application in Bankruptcy Prediction Modeling", *Expert Systems with Applications*, 23,321-328.
- (5) Fisher R., "The use of multiple measurements in taxonomic problem," *Ann. Eugenics*, 7, 179-188, 1936.
- (6) 王仲宇、唐治平、蔣偉寧、莊秋明、林呈、周憲德，1999，橋梁設計維修支援系統之建立-腐蝕、地震、河川沖蝕之潛勢分析及相關技術整合，台北：交通部科技顧問室成果報告。
- (7) 方耀德、陳錫明(2003)，"在模糊分類系統中利用調整歸屬函數來處理模糊分類問題的新方法"，第十四屆國際資訊管理研討會，中正大學。
- (8) 林呈(1998)，本省西部重要河川橋梁橋基災害分析與橋基保護工法資料庫系統之建立，交通部運輸研究所專題研究計畫成果報告。
- (9) 林呈、曾明性、許少華、施邦築、羅慶瑞、孫洪福、黃進坤、劉希羿 (2001)，"台灣河流之沖刷對橋梁基礎與道路邊坡之影響及因應對策研究(一)"，交通部公路局專案研究計畫成果報告。
- (10) 林呈、曾明性、羅慶瑞、劉希羿、施邦築、何宗浚 (2002)，"台灣河流之沖刷對橋梁基礎與道路邊坡之影響及因應對策研究(二)"，交通部公路局專案研究計畫成果報告。
- (11) 陳大正、陳怡睿、陳昭淵 (2003)，"仿生物免疫系統為基礎的基因演算法於土層液化規則掘取之研究"，第十四屆國際資訊管理研討會，中正大學。
- (12) 曾明性、林呈、周憲德、朱佳仁 (1999)，"橋台及橋墩沖刷防治工法之探討"，交通部科技顧問室研究報告。
- (13) 曾明性 (2004)，"橋梁沖刷潛勢專家評估系統的研究"，*資訊管理學報*，11(1)，91-111。
- (14) 張國鎮、張荻薇、宋裕祺、劉光晏、蔡孟豪、林子剛，(2001)，"公路橋梁編碼及類神經網路橋梁震害預測系統簡介"，*橋梁工程*，15-1~15-13。
- (15) 蘇木村、張孝德 (2001)，"機器學習:類神經網路、模糊系統以及基因演算法則"，二版，台北，全華圖書。

## 七、誌謝

本研究承蒙國科會專題研究計畫(編號 NSC93-2211-E-040-001)之經費補助，中興大學林呈教授熱心提供其近年來在橋基沖刷的調查案例資料，在此一併敬致謝忱。