

人工嗅覺與電子鼻技術

本文旨在介紹人工嗅覺與電子鼻技術之最新發展，乃是延續前期文章所介紹之氣體微感測器技術的進一步應用。人工嗅覺技術的主要目的即在於模仿，甚至超越人類的嗅覺系統，並結合生醫、化學、半導體電子、訊號處理與人工智慧等專業技術，建立具體化的電子鼻儀器系統，改善傳統的化學分析與人類感知評估的辨識方法，並相互配合，以有效地辨識氣味的分類，並將人工嗅覺技術積極地擴展到與人類福祉息息相關的生活環境與民生產業等應用領域。

呂志誠譯

一、前言

在上期 (科儀新知第二十二卷第五期) 的 SOI MOSFET 氣體微感測器設計與發展一文中，對於偵測特定氣體之微感測器的概念及發展已經做了基礎性的介紹。接著在本期的文章裡，將繼續介紹氣體感測器應用於人工嗅覺儀器 - 電子鼻的設計與發展。人工嗅覺技術 (artificial olfaction) 的發展為時尚短，可說是一初展面貌的科技新生兒，其崛起約始於 1990 年代初期。本文中所探討的電子鼻為一包含了化學 (氣體) 感測器陣列之電子元件與適當的圖樣辨識 (pattern recognition) 能力的儀器系統，可以辨別及分類簡單或複雜之氣味，亦即電子鼻具有模擬人類 (或生物) 嗅覺的能力。近十年來，隨著商業化電子鼻產品的問世，目前已逐漸應用於食品飲料品質控制、農漁產原料氣味偵測、製程線上氣味監測與河川環境污染監控等多種民生工業與環保領域中。其需求量從 1993 年至 2000 年，每年均

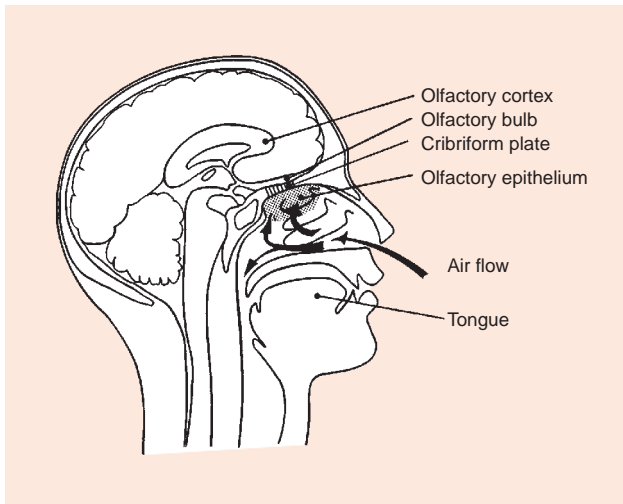
呂志誠先生現為英國劍橋大學工程系電子工程組博士候選人。

以 5 至 10 倍的速度成長，可謂是一新開發之科技應用市場，而其領域也不斷地在擴大之中。本文將論及人工嗅覺定義、生物嗅覺特性、嗅覺分析技術、嗅覺感測器的考量、氣味辨識技術及電子鼻技術的展望，希望給予讀者一基本而清晰的概念。並期望藉由本文的介紹，能對國內有志發展此種儀器技術的研發個人與團體，產生一些啟發性的助益。

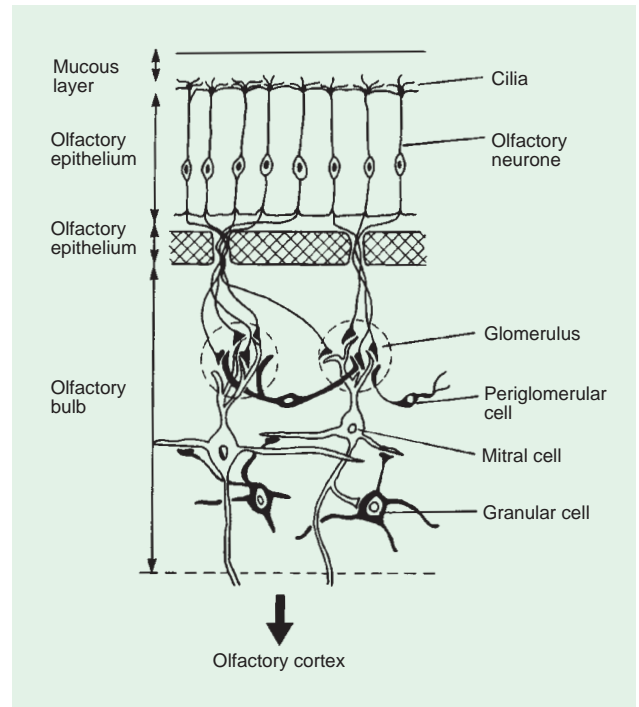
二、簡介

1. 人工嗅覺

遠在 1920 年代，科學家就提出量測電荷可偵測氣味 (odour) 的可能性，惟在當時限於氣體感測器技術尚未發展，故僅止於空中樓閣階段。自 1950 年代以後氣體感測器陸續地開發成功，才終於正式推動了氣味偵測儀器的發展。Wilkins 與 Hartman 等人於 1964 年提出了第一篇有關偵測氣味的儀器實驗與報告，可視為此一新領域的濫觴⁽¹⁾。其實驗儀器包括了八個不同的電化學 (electrochemical) 氣體感測器，可用以感測不同的氣味樣品並獲得相對應之反應。但是當時他們並無



(a)



(b)

圖 1. (a) 人類的嗅覺系統圖，(b) 哺乳動物之嗅覺系統的細部聯結圖。

進一步地處理與分析其反應樣本。而約在同一時期，Moncrieff 亦使用鍍覆不同材料的熱量型感測器 (thermistor) 來進行研究⁽²⁾。他假設如果使用鍍覆相異材料的六個熱量型感測器陣列，應可用於區分多種不同的味道。之後，後續的研究持續地進行，直到 1980 年代中期，利用感測器陣列整合技術來模擬生物嗅覺的新概念漸漸形成，在英國與日本均有類似之研究被發表^(3,4)。而電子鼻這個新名詞則是於 1988 年由本文原作者之一的 Gardner 博士首次提出⁽⁵⁾，其後逐漸獲得認同與採用。目前，在歐洲每年均有召開專門的人工嗅覺與電子鼻技術研討會，以促進此新興技術領域之研發與推展。自 1993 年以後，人工嗅覺的產品已開始逐漸問世，已有多家公司開始生產桌上型及手提式 (portable) 電子鼻儀器，搭配 PC 電腦與氣味辨識軟體，這些發展將在後段章節再行介紹。

2. 生物嗅覺 (Biological Olfaction)

在人類的五種生理感覺能力中，味覺 (gustation) 與嗅覺 (olfaction) 均主要與化學作用有密切關係。

而根據研究結果，嗅覺作用又比味覺作用複雜。到目前為止，科學研究對哺乳動物嗅覺系統細部反應機制的瞭解並不完整，仍待進一步的探索。人類的嗅覺系統如圖 1 所示，主要由嗅覺上皮細胞 (epithelium)、篩狀板 (cribriform plate)、嗅覺球 (olfactory bulb) 及嗅覺皮質 (olfactory cortex) 四部分所組成。首先，氣味分子被吸入鼻內並傳送至上皮細胞區之嗅覺受器細胞 (olfactory receptor cell) 或神經元 (neuron)。在此處，氣味分子透過一層細黏膜與嗅覺神經元表面之蛋白質產生交互作用，這些交互作用接著產生電訊號並往下傳遞至神經元的軸索 (axon)，並進入腦部的嗅覺球區。神經訊號在這裡經由處理後，進一步被傳送到更高層之大腦皮質，以產生記憶搜尋與氣味辨認，以利人體產生下一步之行動。圖 2 為一人類鼻內構造之放大圖片。在這整個嗅覺反應的簡單過程中，仍然隱藏了許多現代科技無法完全理解的反應機制，例如交互作用如何產生、電訊號如何傳遞、如何處理轉換、大腦如何執行氣味之辨識等。這些疑問均有賴更多的分子生物、分子神經技術，甚至新興的基因工程技術來解

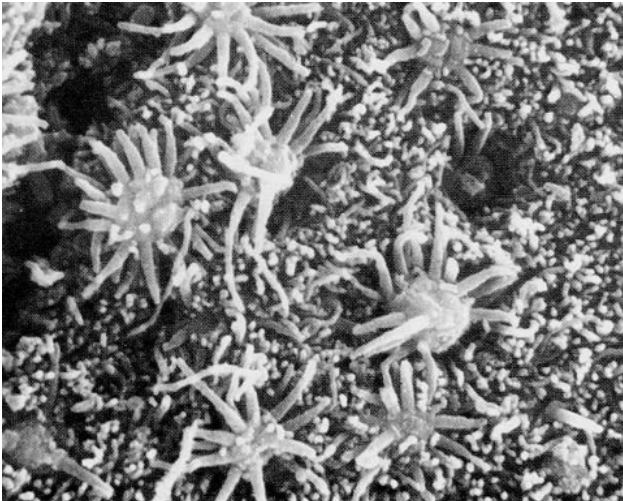


圖 2. 人類鼻腔內部放大圖 (所示為黏膜層之纖毛構造)。

開謎團，而這些謎底將有助於引導人工嗅覺技術的未來發展。

對於人類或生物而言，嗅覺的敏感度是一個主觀而複雜的課題，它隨著散發氣味的主體本性與個人而多所變化。根據一個以一百五十萬人樣本的研究顯示，最好的嗅覺敏感度出現在人類的青春期後，直到七十歲後便開始衰退。對任何年齡族群來說，女性的嗅覺敏感度優於男性；另一方面，個人的嗅覺敏感度又與其健康與內分泌狀態息息相關。例如，感冒的人與某些在懷孕期中女性會有暫時的嗅覺減弱或喪失現象。吸煙則是影響嗅覺敏感度的另一個重要因素。對於某些丁香酸與硫醇氣味，它會導致敏感度降低；然而卻會提高對麝香與香蕉氣味的感受度。另一個統計的結果顯示，約有 1.2% 比例的人口患有嗅覺喪失症 (anosmia)，他們無法有任何的嗅覺感知。而有更高比例的人們則對某些特定氣味無法感受與辨認。

與人類其他的知覺類似，嗅覺的感知強度並未與氣味濃度成線性比例關係，而是猶如圖 3 所示的 S 形曲線型態，氣味分子濃度必須在一門檻值以上才可被察覺，而在升高至某一濃度時氣味感知強度將漸趨平緩、飽和，此門檻濃度值因人與氣味而異。另一個人們熟悉的現象，若是長期處於某一氣味環境中，對於氣味強度的感知強度反而隨著時間

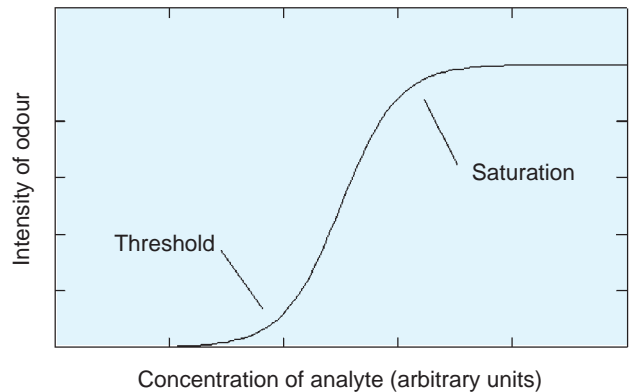


圖 3. 嗅覺的感知強度與氣味濃度之飽和曲線。

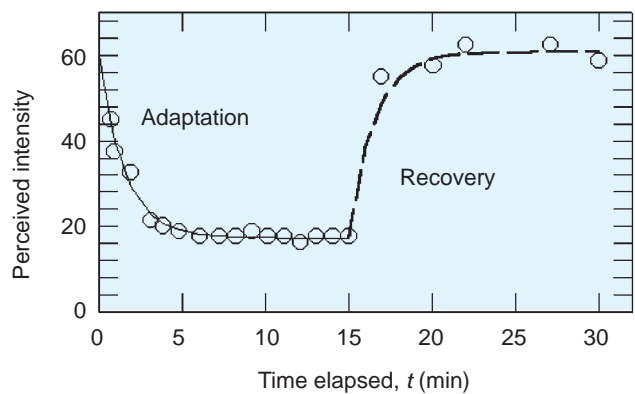


圖 4. 人類的嗅覺疲勞現象說明圖。

不升反降，此種稱為嗅覺適應或嗅覺疲勞的現象，可以古文裡的「入芝蘭之室久而不聞其香，入鮑魚之肆久而不聞其臭」適切地形容說明。一旦除去此種氣味，則嗅覺能力又可恢復，如圖 4 的適應 - 恢復曲線所示。此外，不同的分子化學結構亦會對氣味強度產生不同程度的影響，就如同圖 5 中所列化學物質呈現出的指數效應一樣。對一些自然界中的強烈氣味而言，人類對其測知的門檻濃度相當的低，但是這些物質並無明顯的相同化學結構特徵，而為何人類嗅覺系統對這些化學成分相對地具有高敏感度也仍是一未解之謎。由以上的簡介，可以大略窺見人類 (或生物) 嗅覺的主觀性與複雜性。

3. 氣味之分析與成分

氣味的組成可以簡單至單一化學成分，亦可複雜到由數十甚或數百種成分組成，這與視覺及聽覺

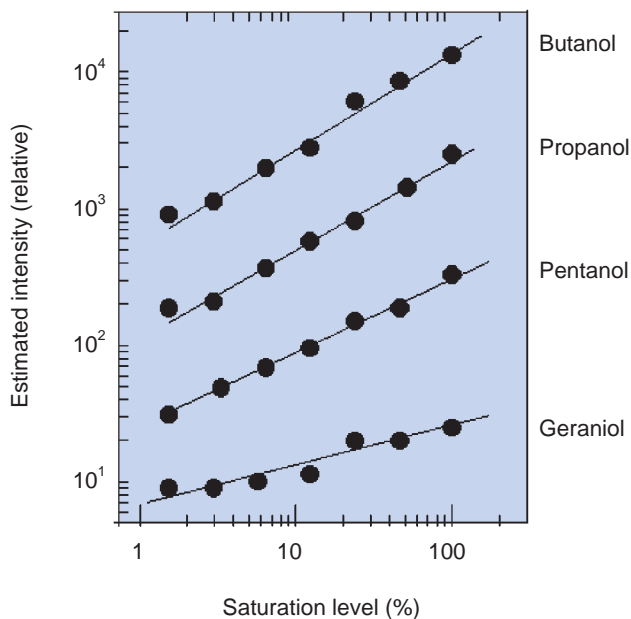


圖 5. 不同氣體分子結構與所呈現的氣味強度範例。

擁有單一明顯之刺激成分的情形恰好相反。人類的嗅覺有其極限。根據研究指出，人類可正確辨認的氣味分類並不超過 100 種。從早期 1977 年 Amoore 的七大分類⁽⁶⁾ 至近期美國測試與材料協會 (American Society of Testing and Materials, ASTM) 所整理的一套完整的氣味說明資訊，總共詳述了 830 種的氣味。此外，在香料或香水產業中亦有特別關於香味的詳細分類。

首先，吾人討論簡單氣味 (simple odour)。所謂的簡單氣味，所指的是單一而可清楚定義的化合物，但它亦可用來指氣味組成中的主要成分。從研究中發現，化學分子的構造與氣味存有某些關聯，但是目前仍無法精確地由化學結構來預測氣味。例如 $-CHO$ 、 $-NO_2$ 、 $-CN$ 與 $-N_3$ 這些負電荷原子團與雙價碳原子間的結合均會產生苦杏仁味。其次，相似的分子空間配置與形狀亦會導致基本的相同氣味。有趣的是，若改變分子中某些原子團的位置，將會連帶地改變其氣味，同樣的情形亦可從 *cis*- 與 *trans*- 等非飽和化合物的同分異構物，或是 *ortho*-、*meta*- 與 *para*- 等同分異構物 氣味的明顯變化觀察而得，如圖 6 中所示。此外，相互對應或鏡射的分子對則會呈現非常不同的味道；而含有龍涎香氣味之分子，通常均具有龍涎香三角 (ambergris

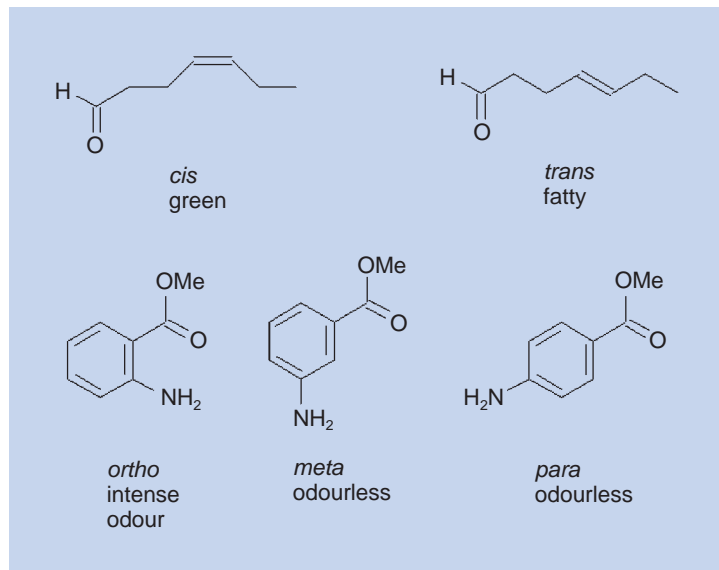


圖 6. 同分異構物與氣味的變化。

triangle) 與三軸律 (triaxial rule) 的正確配置與空間組合。綜合以上的說明及範例，確實驗證了分子結構對氣味的決定性與影響程度。但是仍有不少的例外無法支持這個關聯性

從食物、飲料與植物自然產生的氣味，其實大半不是簡單氣味，而是來自混合的複雜氣味 (complex odours)。它可能是數十或數百抑或上千種簡單氣味所組成。人類所察覺的氣味其實是這些混合物相互作用、衝擊所產生的結果，而這些結果亦隨著時間、揮發與擴散性質而變化。在香水界中，人們通常以 top、middle 與 base notes 來界定一種香水的揮發性與持久性。Top notes 指的是較具揮發性與快速作用的氣味；而相對地，base notes 指的是較具低揮發性與持久香味的特質。許多香水使用了自然香料或香油，而它們本身的氣味即是一種非常複雜的成份組合。同樣的，在食品業與飲料釀酒業，我們所嗅出的鮮美味道也是多種氣味造成的最佳組合，成份的多寡與比例自然成為各公司產品暢銷與否的產業機密與秘方。舉例來說，表 1 羅列出咖啡中所含之主要成份分類，總共含有約 670 種的成分，而烘製的技術直接影響了其不同的香味與口感。由此可知，人工嗅覺與電子鼻的發展，將是一門看似基本其實卻是交錯複雜的跨領域技術。

三、電子鼻與傳統方法之比較

如圖 7 的方塊圖所示，電子鼻的基本定義為一個包括了具備部分選擇性的 n 個化學感測器陣列 (array) 以及氣味辨識系統的儀器設備，並擁有辨認簡單或是複雜氣味的能力，稍後將會介紹這二個部分。若是進一步深入其儀器系統，它還包括了氣味傳送系統 (odour delivery system)、感測器電路設計與訊號微處理器。首先，針對氣味傳送系統來說，最常被採用的是空間採樣 (headspace sampling) 與氣流注入 (flow injection) 二種方法。空間採樣法是較簡單的一種，將良好儲存在常溫下的少量樣品 (如液態樣品 0.1 至 10 μL ，氣態樣品 1 至 25 mL)，利用針筒注射器注入含有氣體感測器的測試槽內，並安裝一風扇攪拌器協助樣品均勻擴散，此測試槽須維持在一常溫 30 $^{\circ}\text{C}$ ，並備有空氣或氮氣淨化氣體，可在感測器讀取訊息後通入槽內清除殘餘氣味之用。這種方法因為構造簡單成本低廉，易達平衡狀態而廣被採用。但是其缺點則是人工操作緩慢耗時，而且由於注入樣品被大量稀釋 (dilution)，對於氣味強度較低的高分子樣品偵測將影響其正確性。目前已有改良的自動式空間採樣系統問世，改善了操作緩慢費時的缺失。但是採樣速率最快大約仍在每小時 10 次左右，對於某些儲存壽命較短的氣味樣品來說，極有可能在數小時內樣品的氣味已

表 1. 咖啡所含之化合物成份一覽表。

Class	Number in class	Class	Number in class
Hydrocarbons	31	Phenols	44
Alcohols	19	Furans	108
Aldehydes	28	Thiophenes	26
Ketones	70	Pyroles	74
Acids	20	Oxazoles	28
Esters	30	Thiazoles	27
Lactones	8	Pyridines	13
Amines	21	Pyrazines	79
Thiols, sulfides	13	Others	31
TOTAL is 670			

減弱散盡，這是一個必須克服的實際問題。

氣流注入法則是另一種完全不同的傳送系統。傳統上，自動氣流注入系統被使用於混合氣體的分析，若經過適度改良，也可應用於氣味材料的輸送。此法乃是將三片樣品置於樣品室內，使用者可選擇潔淨空氣、二氧化碳或是氮氣來做為傳送氣體，使其流經樣品室內之樣品，並匯集於一質量流體控制器 (mass flow controller, MFC)，再統一輸出至氣味感測器進行感測。由於使用了精密的 MFC 裝置，樣品質量準確地被控制在 1% 左右，操作時間相對降低。而且樣品濃度值可以自動調校，也摒除了前一種方法所導致的稀釋效應。此外，它亦可

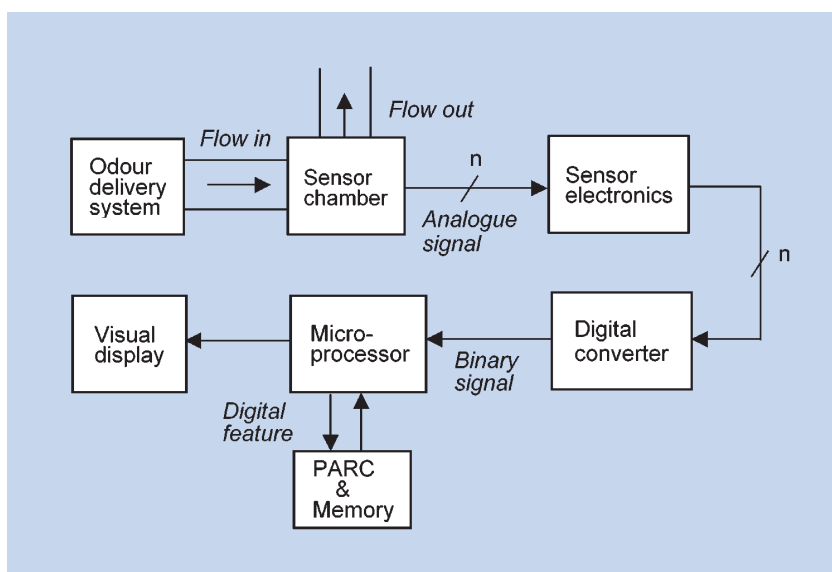


圖 7. 電子鼻儀器系統的基本方塊圖。

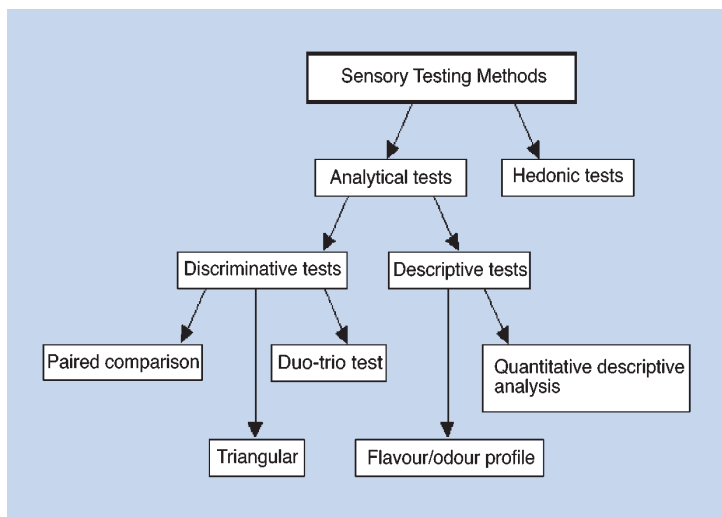


圖 8. 人類感知試驗方法的分類。

以提供各種不同的氣味濃度值以應實驗之需求，並可控制感測器測試槽的溫溼度於 2% 內。然而，這種系統相對地造價昂貴，由於傳送管線的長度，系統的反應時間也較長。其次，感測器的電路設計扮演了另一重要的角色。它不但負責將化學反應訊號轉變為電訊號，而且通常必須將電訊號予以放大 (amplify) 或調整 (condition)，以利於訊號處理，類比電子電路技術可處理這部分的問題。其輸出的電訊號規格一般在 0 - 5 V d.c. 與 4 - 20 mA d.c. 不等，最後經由 A/D 轉換器再將上述的類比訊號轉換成數位訊號，經由 RS-232 序列埠 (serial port) 或數位匯流排 GPIB 傳送至微處理器。在此，電腦進行一連串的數位處理，結合圖樣辨識軟體技術，將訓練學習過程中所獲得的重要技術參數貯存在記憶體裝置，最後再將氣味感測器感測結果與對氣味辨識的分類顯示出來。

相對於新近的電子鼻人工嗅覺技術，傳統的氣味分析技術大略可分為以下三種：氣體色層分析 (gas chromatography)、質譜分光技術 (mass spectrometry) 與人類感知小組評估 (human sensory evaluation)。氣體色層分析是一項廣泛應用於實驗室中的化學分析技術，藉由氣體分子對靜態與流態有不同相互作用力的原理，不同的氣體分子便會在不同的時間座標內，藉由化學偵測器的末端偵測而被分離出來。若氣體色層分析管 (GC column) 能擁

有極細的毛細管、大的表面積與不同的表面處理管壁，將會擁有更佳的解析率 (resolution)。常用的化學偵測器有離子火燄偵測器 (flame ionization detector, FID) 與熱傳偵測器 (thermal conductivity detector)。此外，亦有人使用「真人真鼻」加入 GC 系統，以協助加速分析某些人類足以判定的特殊或腐壞氣味。質譜分光技術則是非常重要而基本的物理與化學分子分析技術，而結合了氣體色層分析與質譜分光學的 GC-MS 技術，則是截至目前為止最常採用的主要技術，用以鑑定揮發性的氣味分子。因為經由 GC 的初步分離後，再輔以質譜分光儀，根據各類分子可能的破碎分子圖樣 (fragmentation patterns)，就可加以有效地鑑識出各種分子的種類。若讀者對於 GC-MS 的應用技術有所興趣，可參考 Mellon 與 Maarse 在這方面的文獻^(7,8)。雖然這種方法有非常優越的分析技術，但是高昂的成本、特殊的技術人力、儀器的高複雜性與完成分析的時間長卻是其主要的缺點。若做為一項強而有力的分析技術，GC-MS 在目前仍有其不可取代的地位。

人類感知小組評估法則是另一種與前述儀器分析技術完全不同的氣味辨識方法。它的嗅覺儀器就是人類主體，以問答方式來決定氣味，無需去製造昂貴複雜的設備。主要分為二大類別：愉悅測驗 (hedonic test) 以及分析測驗 (analytic test)，請參閱圖 8。愉悅測驗是藉由評估氣味會使人類產生喜好與否的效應，使用大量未經訓練的抽樣人數來決定人類對此氣味偏好程度的大小。這樣以人類生理與心理反應的決策模式並不適用於電子鼻。相反地，分析測驗使用少量經過適當選擇與訓練的小組成員來評估氣味，以減少生物體所產生的偏差，許多的分析測驗均以可解析之問答方式來進行，其中又可分為區分測試 (discriminative test) 以及描述測試 (descriptive test)。區分測試期望決定在樣品中是否存在可感知的差異性以及敏感性；描述測試則是希望建立含有預構描述符號的氣味定性描述。相較之下，後者是一種較為龐雜的方法。由於前者的測試方法較為簡單，是目前較為廣泛應用的一種方式。其中如 paired comparison 乃是詢問小組成員在二種樣品間是否有差異，若有，則可選擇其屬性或特性的差異大小。triangular test 則是在含有二者完全相

同的三個樣品中，要求小組成員選出不同的一個。在 duo-trio test 中，小組成員則被給予一標準樣品，並被要求分辨二個未知樣品中那一個與標準樣品相同。在進行這些測試的同時，必須注意測試環境的封閉性，不可受噪音或額外氣味的干擾，或令受測人分散注意力。樣品的複製與給予也須保持一致性，否則分析的結果都會產生偏差，因而使得準確性降低。這種以人為本的氣味分析，同樣地，必須耗費大量的人力、財力及時間，而且要考慮人類嗅覺疲勞特性的重大影響。最後，你能想像為了辨識氣味，必須隨時帶著數十個聞味專家的雜亂場面嗎？所以電子鼻儀器的出現，適足以彌補長期以來上述傳統方法的不便之處。

四、嗅覺感測器陣列 (Odour Sensor Array)

其實並無所謂的「嗅覺感測器」這個名詞，它只是用以形容應用於人工嗅覺系統的氣體感測器。詳細的氣體感測器介紹，請讀者回顧上期的氣體微感測器技術一文，本文中不擬贅述。基本上，在特定氣體監測與氣味辨識的相似領域中，仍然有許多的不同需求。例如氣體感測器必須具備較高的敏感性與重現性，以偵測從弱到強的特定氣體分子濃度，而且可以採用單一元件或是陣列元件方式，整個感測器系統較為簡單，訊號的處理也較容易。相

對地，對於感測器本身的體積大小與所消耗的電功率等，較不嚴格要求。而對於電子鼻系統來說，氣味的辨識不同於單一氣體濃度的感測，重點在於辨識成功的正確性，故對於單一感測器的敏感強度要求可比較低。為了因應多數氣味的複雜性，一般採用單一類型的感測器陣列，感測器數目從數個到數十個不等，氣敏材料須具備較低的選擇性，以廣泛地感測一般的氣味。某些電子鼻採用了包括 metal oxide、conducting polymer、MOSFETs 與 SAW 等不同感測原理的感測器陣列，以擴大對氣味的辨識範圍，但是也無可避免的使感測器的量測電路、溫度控制與反應時間的設計更形複雜。此外，電子鼻的尺寸大小也部分地決定於感測器的體積。因此微小化的氣體感測器較能符合其發展需求，特別是手提式電子鼻。而未來嗅覺感測器的發展，則是必須再附加低消耗功率及智慧型的訊號處理功能，這些都是電子鼻系統在設計發展上與特定的氣體感測器不同的一些考慮原則。

五、氣味辨識技術 (Odour Pattern Recognition Techniques)

典型的電子鼻架構可以圖 9 來清楚表示。一種簡單或是複雜的氣味輸入 $c_j(t)$ (分類為 class j)，經由電子鼻系統內的 n 個嗅覺感測器產生作用轉化成 $y_{ij}(t)$ 之後，再進入 sensor pre-processor 內，將類比

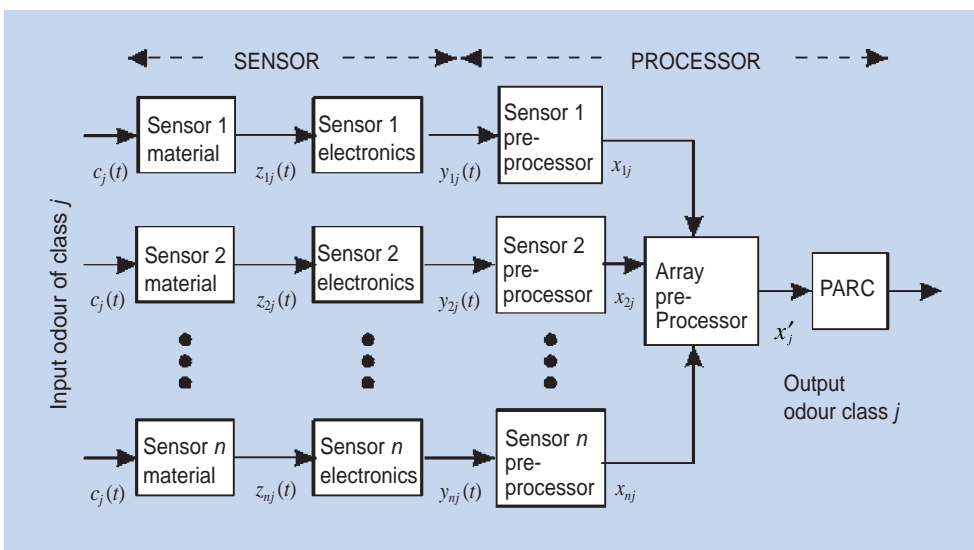


圖 9. 電子鼻系統的訊號處理架構。

表 2. 近期一些氣體感測器常用的訊號前處理方式 (本表摘自 Gardner and Bartlett, *Electronic Noses*, Oxford, 129 (1999))。

Method	Generalised formulae	Sensor type	Specific formulae	Reference
Difference	$x_{ij} = (y_s - y_0)$	SAW	$x_{ij} = (f_s - f_0)$	Ohnishi <i>et al.</i> 1992
Difference	$x_{ij} = (y_s - y_0)$	BAW	$x_{ij} = (f_s - f_0)$	Hierlemann <i>et al.</i> 1995
Difference	$x_{ij} = (y_s - y_0)$	Metal oxide resistor	$x_{ij} = (R_s - R_0)$	Hoffheins 1989
Difference	$x_{ij} = (y_s - y_0)$	Metal oxide resistor	$x_{ij} = (G_s - G_0)$	Jones 1987
Relative	$x_{ij} = y_s / y_0$	Metal oxide resistor	$x_{ij} = R_s / R_0$	Takahata 1988
Relative	$x_{ij} = y_s / y_0$	Polymer resistor	$x_{ij} = R_s / R_0$	Ihokura and Watson 1994
Fractional change	$x_{ij} = (y_s - y_0) / y_0$	Polymer resistor	$x_{ij} = (R_s - R_0) / R_0$	Persaud <i>et al.</i> 1990
Fractional change	$x_{ij} = (y_s - y_0) / y_0$	Metal oxide resistor	$x_{ij} = (G_s - G_0) / G_0$	Gardner 1991
Fractional change	$x_{ij} = \ln(y_s - y_0)$	Metal oxide resistor	$x_{ij} = \ln(R_s / R_0)$	Abe <i>et al.</i> 1987

訊號轉化成數位訊號，以加速運算及方便資料記錄，得到一反應陣列 x_{ij} 。接著再匯集於 array pre-processor 進行減低雜訊處理後，獲得一反應陣列 x'_j ，以便輸入嗅覺辨識系統內執行氣味辨認程序，最後獲得一已知之樣本分類矩陣 X_j 中之答案。

首先，吾人考慮時變 (time-dependent) 類比訊號如何經前處理 (pre-process) 成為數位訊號。最常被使用的是穩態反應而非暫態或動態訊息，配合相異的嗅覺感測器可產生不同的靜態前處理方式，表 2 中提供了近期的研究中所經常使用的嗅覺感測器種類與前處理方程式。其中， y_0 為空氣中 baseline output， y_s 為對應於 c_s 氣味濃度之靜態 output。但是，如果嗅覺感測器的反應時間相當緩慢，例如某些有機材料氣體感測器，其反應時間長達數分鐘之久，動態或暫態的反應曲線的初期斜率便可被加以利用，因為此類的感測器可從動態反應模式預估得到穩態的數值。通常吾人在獲得 A/D 陣列向量 x_{ij} 前，其為一個含有 n 個以時變訊號 $y_j(t)$ 為參數的單行矩陣。在完成前處理後，所有的 baseline shift 應已被消除，在單獨的感測器內會含有重現性的誤差，在此亦應一併考慮。辨識氣味的一個重要關鍵，乃在於減少任何來自於參考空氣、氣味本身以及感測器的氣敏材料的雜訊，以期降低系統的整體漂移。有時為了減低對氣味濃度 c_j 的變異，將矩陣向量化為單位化 (normalization) 是一種常見的手段。但是需要謹慎的是此舉亦會將微弱訊號之雜訊

提高，影響到系統的穩定性。

從電子鼻的前處理過程獲得的是一組多個獨立因變數與另一組自變數之間的關係。要解決這個問題，基本上必須應用多變數解析技術 (multivariate analysis technique)。在氣味辨識的領域中，所使用的多變數解析方法概略可分為監督學習 (supervised learning) 或非監督學習 (unsupervised learning) 兩種模式。監督學習模式乃是根據一組經過初始校正學習與訓練過的已知氣味資料，用來分析一組未知的氣味變數；非監督模式的目標則是藉由多變數空間向量的距離多寡，著重在辨別多種未知氣味間的差異性大小。從圖 10 所列出的多變數解析技術結構圖，吾人可選擇適當的技術運用於電子鼻儀器中，其中以黑體字母顯示的技術為使用於線性系統者，如 MLR 及 PCA 等，以斜體字母顯示者為參數型技術，如 *PLS* 與 *DFA* 等。大體而言，統計 (statistical) 類別的技術多屬於線性參數型之系統，而較晚發展的類神經網絡 (neural network) 則多是用以處理非線性與非參數型的問題。其中的 PCA (principal component analysis) 與 BP (back-propagation) 辨識技術，是目前應用於電子鼻最多的二種方法。PCA 技術先探討資料組間的線性關係，再決定特徵值對資料變異的比重，於是便可採用主要的特徵值來描述此感測系統，除去了次要的元素。也就是說，將較不具影響程度的感測器從矩陣空間移除，以降低系統的複雜性。BP 技術則是一種多層次的類神經網絡系統，由已知的氣味類別

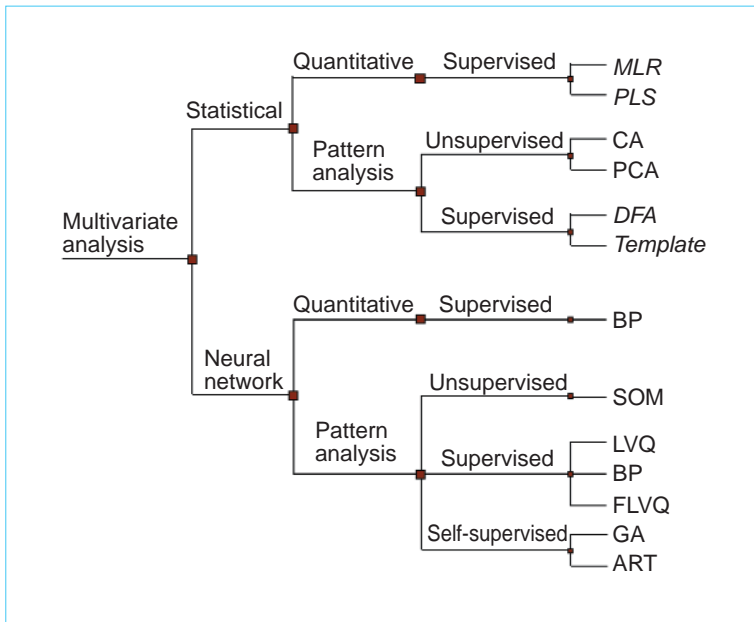


圖 10.

多變數解析技術分類說明 (linear techniques in bold type and parametric techniques in italic type)。

(名詞說明 - MLR: multiple linear regression, PLS: partial least squares, CA: cluster analysis, PCA: principal component analysis, DFA: discriminant function analysis, Template: also known as 'template matching', BP: back-propagation, SOM: Kohonen self-organising map, LVQ: learning vector quantisation, FLVQ: fuzzy learning vector quantisation, GA: genetic algorithm, ART: adaptive resonance theory)。

組成輸出層的類神經元，模擬生物的學習與決策模式，透過學習活動，不斷比較與修正權值 (weight)，取得一非線性的結果。在每次的重覆求值時，修正後的權值又不斷的回饋至整個系統，直到網路誤差 (network error) 最終保持在一微小值或常數範圍內為止。圖 11 表示了一個基本的多層類神經網絡概念，表 3 則是一個對五種不同程度腐敗柳橙氣味的辨識結果範例。限於篇幅，本文僅簡單介紹這兩種主要圖樣辨識技術，有興趣更進入了解這些專門技術的讀者，請參閱相關之參考文獻⁽⁹⁾。

六、人工嗅覺技術現況與展望

電子鼻儀器的發展直到 1990 年代初期，技術逐漸成熟。於是自 1993 年開始，各個製造電子鼻的公司陸續成立，開始生產販售電子鼻。表 4 提供了目前大部分的電子鼻製造公司與產品一覽表。在歐洲，政府及民間的環保意識與行動極為強烈，法令規章亦較為嚴格。此外，氣體感測器的發展起步甚早，累積相當可觀的研究成果，所以大部分的公司均集中在英、法及德等歐洲國家。又由於必須整合感測材料、感測器設計、化學分析與圖樣辨識等不同領域的技術，大部分公司都是由大學研究成果所衍生成立的小型公司型態。根據統計，電子鼻儀

器系統的售價大約是在五千至十三萬歐元之間，現在主要被應用在食品飲料產業的氣味品管方面以及香水化妝品工業的氣味分析方面。到公元 2000 年世界的市場產值預估在三十億美元以上。圖 12 為一法國 Alpha MOS 公司生產的桌上型電子鼻儀器全貌。

早期的電子鼻儀器由於包括了氣味傳遞與採樣設備，加上氣味感測器亦未微小化，故均為體積大不易攜帶的桌上型 (desktop) 產品。目前整體的技術不斷改進，體積也大幅的縮小，使得手提式的電子鼻產品已經被開發成功，系統的低消耗功率將是此類產品的主要需求之一。而手提式的產品售價也可降低至八千歐元左右，圖 13 為一美國廠商所生產的手提式電子鼻。

表 3. 以 BP 技術進行柳橙腐壞程度的氣味辨識結果。

Predicted class	A	B	C	D	E
Real class					
A (no taint)	6	3	0	1	0
B (1%)	1	4	3	2	0
C (2%)	3	3	3	1	0
D (3%)	1	2	1	5	1
E (4%)	0	0	0	0	10

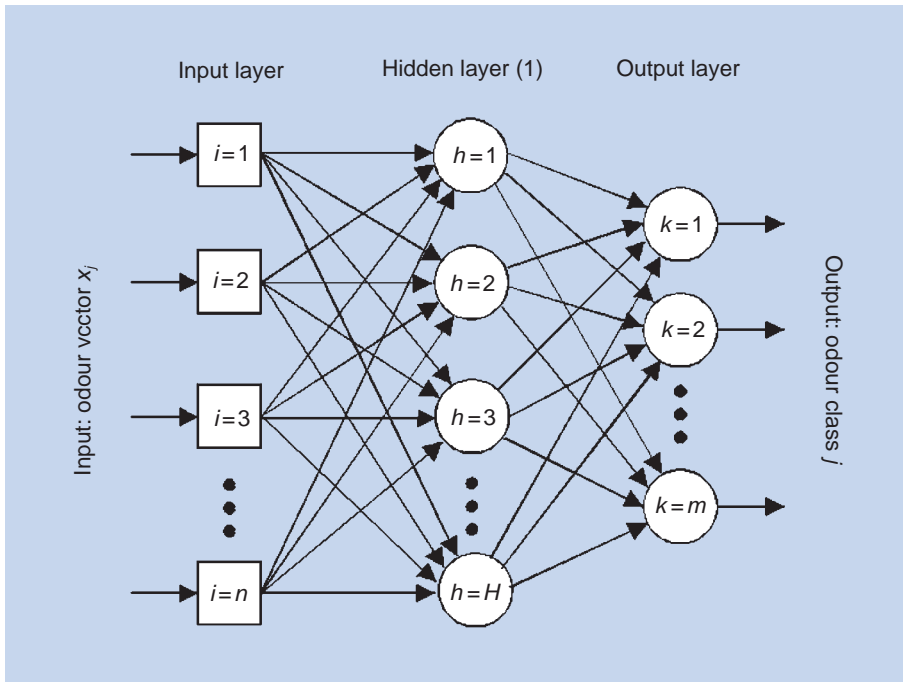


圖 11. 多層次類神經網絡概念圖。

除了功能齊全、售價較為昂貴的電子鼻之外，氣味監測器是另一個值得開發的市場。它只被用來監測總體氣味的強度，並不予以區別分類，故體積較小，單價亦較低廉。如日本 National 公司所生產的口腔氣味計 (oral checker)，可檢查個人的口腔氣味，依據強度的大小予以顯示，做為社交活動或口腔衛生的參考，極富創意。諸如此類的應用，對於

提升人類生活品質，多所助益。在居家環境、家電產品、交通器艙內空氣品質、河川與空氣污染監測、生物細菌成長控制與協助醫學診斷等方面，都

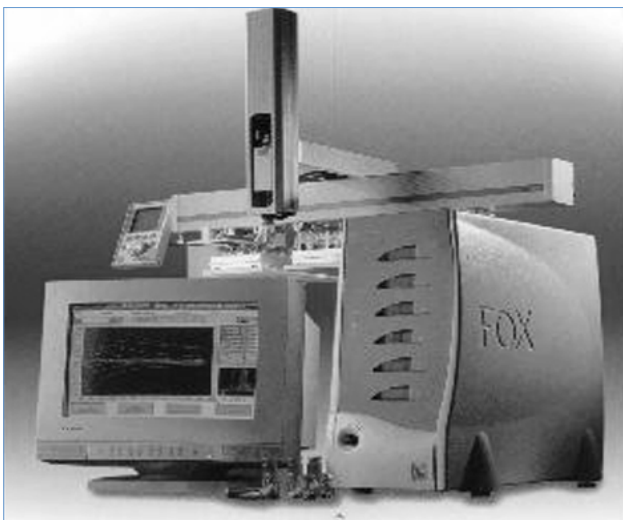


圖 12. 常見的桌上型電子鼻儀器 (法國 Alpha MOS 公司生產)。



圖 13. 新發展成功的手提式電子鼻儀器 (由美國 Cyrano 公司生產，左圖為其內部之 conducting polymer sensor)。

表 4. 現有生產電子鼻的公司與產品一覽表。

Product name	Supplier	Started	Sensor no. / type	Comments
Aromascanner	AromaScan Plc, UK	1994	32 CP resistors	Medium sized company. Market leader in 1997. Autosampler and air conditioning unit available
Bloodhound	University of Leeds Innovations Ltd.	1995	32 CP resistors	Small company. Instrument based on research at Leeds University.
e-NOSE 4,000	Neotronics Scientific	1995	12 CP resistors	Medium sized company. Available with auto sampler and sister company to Neotronics Ltd. (UK)
Fox 4,000	Alpha MOS, France	1993	18 MOS	Medium sized company. Autosampler and air conditioning unit available.
Moses II	Lennartz Electronics, Germany	1996	MOS/QCM	Modular system based on research at University of Tubingen, Germany.
Olfactometer	HKR Sensor systeme	1994	6 QCM	Small company. Based on research at University of Munich, Germany.
Scentinel	Mastiff Electronic Systems Ltd.	-	16 CP resistors	Small company. Instrument based on research at Leeds University aimed at sniffed palms for personal identification.
Rhino	USA	1994	4 MOS	Early instrument may no longer be available.
ScanMaster II	Array Tec	1996	8 QCM	Small company. Launch November 1996

是人工嗅覺技術極富潛力的新應用領域。

新科技領域。

七、結論

近來科技發展的趨勢，由以往的自然界現象與工程系統的巨觀研究，逐漸轉向以人類生命現象與機制的微觀探索，例如人工智慧、人工知覺與生物基因工程等，人類開始反求諸己，嘗試著手了解這宇宙間極為奧妙神奇的一部生物機器。一方面是由於人類意識到先了解本身的重要性。而另一方面，人類所累積的知識與技術也成為推動這些研究的主要動力。筆者認為，電子鼻技術是一門講究科際整合發展的新興科技，技術門檻多且高，一旦技術能力建立以後，較不易受到挑戰與取代。對人工嗅覺技術的發展而言，首先配合了氣體感測器的更新與進展，再加上對人類嗅覺系統的醫學知識，配合近代電子工業與訊號處理技術，最後結合了模擬人類思考模式的人工智慧或多變數分析能力，才造就了像電子鼻這類的人工嗅覺系統。本文著重在原則性的電子鼻系統介紹，許多的細部重要技術無法在文中娓娓道盡，咸盼拙文能發揮拋磚引玉之用，吸引國內有志研究之士投入此一玄妙有趣、潛力無窮的

附註

本文內容係經 Dr. J. Gardner 同意，摘要節譯自其著作 *Electronic Noses* 一書，重要資料與圖表均取自該書內容，有興趣閱讀該書之讀者請逕參考文獻 9。

參考文獻

1. W. F. Wilkens and J.D. Hartman, *Ann. NY Acad. Sci.*, **116**, 608 (1964).
2. R.W. Moncrieff, *J. Appl. Phys.*, **16**, 742 (1961).
3. K. Persaud and G. H. Dodd, *Nature*, **299**, 352 (1982).
4. A. Ikegami and M. Kaneyasu, *Proc. of Transducers* **85**, 136 (1985).
5. J. W. Gardner, *8th International Congress of the European Chemoreception Research Organisation*, 9 (1988).
6. J. E. Amoore, *Chem. Senses Flav.*, **2**, 267 (1977).
7. F. A. Mellon, *In Spectroscopic Techniques for Food Analysis*, VCH, 181 (1994).
8. H. Maarse, *In Food Taints and Off-flavours*, VCH, 63(1993).
9. J. W. Gardner and P. N. Bartlett, *Electronic Noses Principles and Applications*, Oxford, 140 (1999).