

行政院國家科學委員會專題研究計畫 期中進度報告

子計畫三：智慧型感測系統與仿生生物體行為及運動模式設計(1/3)

計畫類別：整合型計畫

計畫編號：NSC92-2213-E-002-054-

執行期間：92年08月01日至93年07月31日

執行單位：國立臺灣大學電機工程學系暨研究所

計畫主持人：陳永耀

共同主持人：李後晶

計畫參與人員：林耿賢、林家全、陳贊文、柯怡賢、陳信名

報告類型：精簡報告

處理方式：本計畫可公開查詢

中 華 民 國 93 年 5 月 31 日

行政院國家科學委員會補助專題研究計畫成果報告

微型仿生生物體之研發(1/3)

子計畫三：智慧型感測系統與仿生生物體行為及運動模式設計(1/3)

計畫類別：個別型計畫 整合型計畫

計畫編號：NSC 92-2213-E-002 -054

執行期間：92年 8月 1日至93年 7月 31日

計畫主持人：陳永耀 國立台灣大學電機工程學系

共同主持人：李後晶 國立台灣大學昆蟲學系

本成果報告包括以下應繳交之附件：

- 赴國外出差或研習心得報告一份
- 赴大陸地區出差或研習心得報告一份
- 出席國際學術會議心得報告及發表之論文各一份
- 國際合作研究計畫國外研究報告書一份

執行單位：

中 華 民 國 93 年 5 月

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

微型仿生生物體之研發(1/3)

子計畫三:智慧型感測系統與仿生生物體行為及運動模式設計(1/3)

計畫編號：NSC 92-2213-E-002 -054

執行期限：92年8月1日至93年7月31日

主持人:陳永耀

臺大電機系教授

計畫參與人員：林家全、林耿賢、陳贊文、陳信名、柯怡賢

臺大電機系

一、摘要

中文摘要

本計畫為”微型仿生生物體之研發”整合型計畫之子計畫三，本子計畫主要研究目標在探討有限感測能力下，仿生昆蟲之行為反應模式設計及所能達成之預期工作目標，研究重點在於感測系統之建立及智慧型感測訊號處理與行為反應。本子計畫第一年度主要的執行內容包含兩主題，氣體擴散環境的建立以及氣味追蹤演算法在氣味來源定位的應用。在過程中，為氣味來源定位問題提供詳細的解析，從一般的搜尋方式到建立一套有系統有效率的氣味搜尋演算法；其中，仿生生物行為的靈感激發給了我們演算法很大的助益。

關鍵字：微型機器人、仿生體、氣味來源定位、氣味追蹤、即時預測

Astract

This project is one of the sub-projects of the main project “The development of Biomimetic Micro-robot”. The main objective of this sub-project in this year contains two principal themes. We present a methodology for the construction of scent distribution environment and develop a search algorithm for odor localization task. In this report, we provide a detailed analysis of the odor localization problem, ranging from a treatment of a general search task to the discussion of the common qualities of efficient odor sources search algorithms. Inspiration from biological systems plays a role throughout, reflecting the belief that the imitation of natural systems, when applied

in the proper context, can be useful to an engineer.

Keywords : Micro Robot, Bio-mimetic Robot, Odor Localization, Odor source tracking, Real-time Prediction

二、計畫緣由與目的

微型機械具有感測周圍環境的刺激以及產生相對應的行為，可用在無人監督情況下幫忙人類完成許多工作，包括許多重複性以及危險性的工作如救災、搜尋有毒氣味來源，以及應用於生產線增加生產力等等。其中，建立一套感測系統能讓微型仿生機械體有能力去尋找及定位一個或多各氣味來源，尤其是吸引我們在氣體感測的領域裡做相關及深入的研究。因為此類應用被高度需求在瓦斯漏氣偵測、氣體污染源的追蹤以及救災救難中失火的起始點。

本子計畫完成一套氣味追蹤演算法，讓帶著氣味感測器的微型仿生機械有能力去搜尋及定位氣味來源，而國外 Russell et al.也有類似系統的發展[1]。本子計畫的演算法主要部分是基於一種概念”氣味指南”也就是利用單一感測器可以指引微型仿生機械到氣味來源的附近領域[2]。而本子計畫提出一種新的氣味來源定位演算法，讓微型仿生機械可以在離氣味來源較遠的區域先行預測離自己近的氣味源的位置，當微型機械作一各固定模式的運動時，將氣味感測器感應的數值帶入氣味直接擴散的模型；因此將兩者做類似擬合動作，可以先行預測氣味來源的方位。

三、氣味感測系統的文獻探討

許多動物在尋找資源如食物等來源大多是靠嗅覺來指引他們的行為動作。這類的行為常出現在鳥類或魚類上，但是大部分我們是在昆蟲上觀察到所需要的知識以及行為尤其是在蛾身上。蛾在氣味追蹤方面的行為主要是藉由“嗅”得異性所遺留下來的費洛蒙而找到彼此。為達到這樣的目標不但需要嗅覺感測器來使自己位於費洛蒙擴散的區域，也須要有風向感測器以至於能在有風的環境下去追尋到同伴的位置。

而空間中氣體擴散的模型建立主要是根據環境的流體力學，這深深地影響昆蟲的行為。因此，動物(或者仿生生物體)的搜尋方式之成功被定義在感測器輸入與產生相對應行為間相互作用的確定性。我們藉由具有氣味調節的蛾飛行的行為，來理解氣味刺激的特性和行為反應系統相互作用進而完成完整的氣味源定位問題。

近來生物行為仿生已經被應用在氣味來源定位以及追蹤，如在蛾的研究裡發展的費洛蒙氣味追蹤[8],[9]以及老鼠藉由空氣中的氣味找尋食物[10]，以及龍蝦藉由釋放在水中的氣味做追蹤[11],[12]。生物學利用嗅覺來完成多種的任務包括找到相同的種類中、同伴間的通訊和行為修正、避開敵人並且尋找食物來源。生物結合硬體(感測器)及軟體(行為的演算法)來找尋和定位氣味源。氣味來源的定位本質上是隨動物而不同的行為的問題；如之前提到過的龍蝦利用水中特殊的液體或者螞蟻藉由地上的遺留的殘渣，蛾在空中能跟蹤氣味或者複雜一點如狗使用各類訊息的結合。由工程觀點來看，將微型仿生機械與氣味追蹤行為結合能帶給人們很大的助益，例如在化學氣體漏氣的偵測和危險的廢棄場所的地理環境繪圖[13]。

要完成像氣味來源定位以及辨識氣味來源這樣的工作必須將氣味追蹤演算法、各種感測器模組(氣味、風向及超音波等)結合在微型仿生機械上。這種系統的建立已有許多人投入研究[14],[15],[16],[17]。雖然到目前為止這些研究展現的成

效被可靠性、感測器的暫態特性和敏感性給限制了[18]，雖然將微型機械緩慢地移動並且利用連續取樣氣味的方法，能降低環境雜訊[14],[17]。但是環境和行為限制條件(例如，氣體濃度太低過於分散以及時間延遲問題)仍舊降低了系統的效能 [19]。氣味追蹤演算法根據前人的研究是利用從多個氣體感測器來計算所在位置的氣體濃度梯度值進而往濃度高的方向移動[20],[14]然而微型機械的面積縮小時，氣味濃度的梯度值會受限於氣體感測器的精確度，但前人的這些努力已算成功地利用移動的機器人證明氣味來源定位的可行性。

四、 研究內容

1. 氣味搜尋系統的建立與設計

微型機械的搜尋氣味源或者搜救工作可藉由單一或是群集的機械蟲來完成。本子計畫首先著眼於單一個體能完成的工作；為達到最佳的搜尋方式，微型機械必須作用於有效的搜尋方式。在本節，我們提出一個階段整合的氣味引導演算法以及氣味補償方式，目的在於能利用微型機械較低的人工智慧能力在未知的環境裡去“嗅”出氣味來源位置。此演算法獨特之處在採用新型的階段整合氣味追蹤和點氣味源消去法，來尋找單一或多個氣味來源。

在本子計畫中，因為要縮小微型機械的體積，我們假設機械蟲的運算能力受到限制；因此我們採用反應式的氣味引導演算方式。其中偵測到的氣體濃度的位能場是因為氣體在環境中擴散的緣故，所以氣體擴散的形成跟位能場的建立是類似的。所以，我們的微型機械並不需要事先知道環境的資訊如障礙物的位置以及氣味來源的位置，藉由解決位能場的問題可以幫助微型機械找到氣味來源的位置。

總而言之，我們提出一個不需要高度計算能力、結合階段性且能夠整合於微型機械的演算法。在接下來的章節我們會詳細介紹氣味追蹤的任務和環境系統的問題，這是我們所主要探討的。

2. 氣味來源定位系統方塊圖

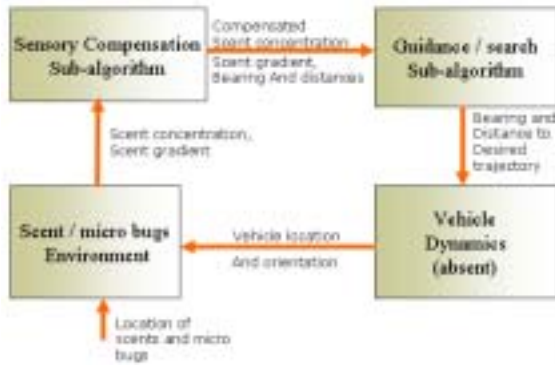


Fig.1 搜尋氣味來源的系統方塊圖

在本子計畫中氣味來源定位的工作被分為如 Fig.1.四個方塊，其各部功能如下：

A. 氣體擴散模型建立

在此方塊中所需的資訊是微型機械蟲所在的位置，之後根據這個位置相對於環境中氣味來源點以及障礙物所在的位置去推算在這個位置的氣味濃度值。

B. 氣體濃度偵測補償演算法

一旦微型機械找到並宣告一個氣味來源點，之後氣體感測器所讀到的濃度值必須加以補償修正，而點氣味源消去法是我們用來計算所需要補償的氣味濃度。

C. 氣味引導和追蹤演算法

當微型機械蟲被置於一個氣體擴散的環境當中，此方塊的功用便是引領它走向氣味來源點以及在行走的過程中避開障礙物。

其中氣味搜尋的演算法可以大致分成三個工作，包括

- 氣味偵測: 偵測漸漸增加的氣味濃度。
- 氣味追蹤: 藉由氣體濃度梯度或其他演算法引領微型機械走向氣味來源。
- 氣味來源宣告: 決定微型機械蟲所在的位置是否是氣味來源點。

各部細節將會於下面章節中介紹諸如點

氣味來源消去演算法。

3. 氣體擴散模型建立

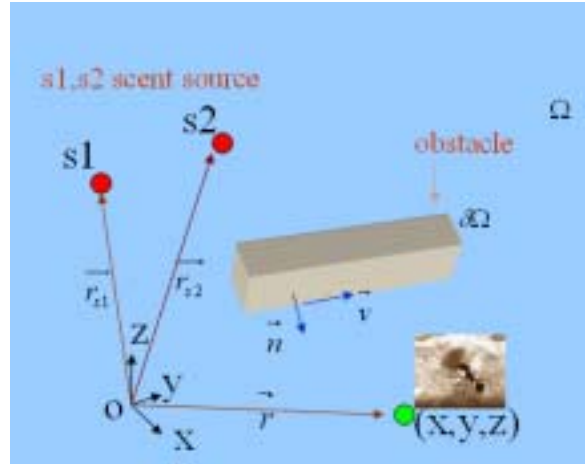


Fig.2 包含氣味來源、障礙物和微型機械的環境

根據波以松波動方程以及假設在障礙物的表面，垂直於表面的氣體擴散速度為零如 Fig.2.因此，如果 \vec{n} 是障礙物表面的法向量， \vec{n} 和 $\nabla\phi(\vec{r})$ 的內積為零。而氣味擴散模型的推導如下 [21]:

$$\nabla^2\phi(\vec{r}) = \sum_j^{n_s} Q_j\delta(\vec{r}-\vec{r}_{s_j})$$

$$\vec{v} = \nabla\phi(\vec{r})$$

$$v_n = \vec{n}\cdot\nabla\phi(\vec{r}) = \frac{\partial}{\partial n}\phi(\vec{r}) = 0$$

經過計算，最後我們得到氣味的濃度 $\phi(\vec{r}_o)$

在環境中任何一點 \vec{r}_o 為

$$\phi(\vec{r}_o) \approx -H_o\left(\frac{1}{2}I+H\right)^{-1}Q + \sum_{i=1}^{n_s} Q_i G(\vec{r}_o, \vec{r}_{s_i})$$

在這個式子中，矩陣 H 是障礙物表面點對點彼此造成濃度影響的矩陣和氣味源無關。

4. 氣味引導和追蹤的演算法應用於氣味源的定位

在這節我們將分別介紹這個演算法的三個部分：

首先介紹階段整合的氣味追蹤，依照偵測到的氣味濃度作等級區分，可以從 Fig.3中看出來接進氣味來源點的氣體濃度分佈是隨著遠離來源點而驟降的；而在整各環境中氣味濃度的分佈大概在0.1左

右，根據這樣的濃度分佈，我們將氣味搜尋的供作分成三各階段。分別是spiral surge, zigzag 路徑以及氣味梯度方式搜尋，這三各階段形成本演算法的主要模型。

第二，介紹氣味來源宣告的方法以及氣味補償的演算法，這部分主要為了讓微型仿生機械可以尋找不只單一個氣味源而且是多個氣味來源。

最後，介紹一個簡單的避開障礙物的方法，用來幫助微型仿生機械可以在氣味追蹤的路途中避開障礙物。

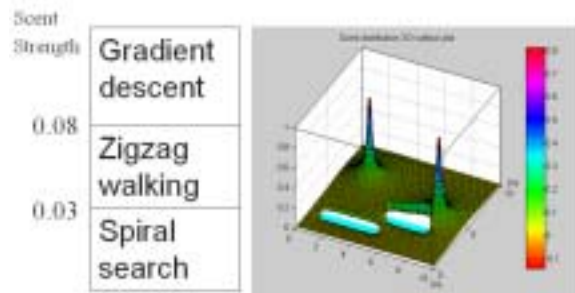


Fig.3 氣味追蹤演算法的分級及氣體擴散的環境

4.1 氣味搜尋演算法

這一小節先介紹不同階段的氣味搜尋方式可以讓微型機械解決氣味來源定位的工作(Fig.4)。

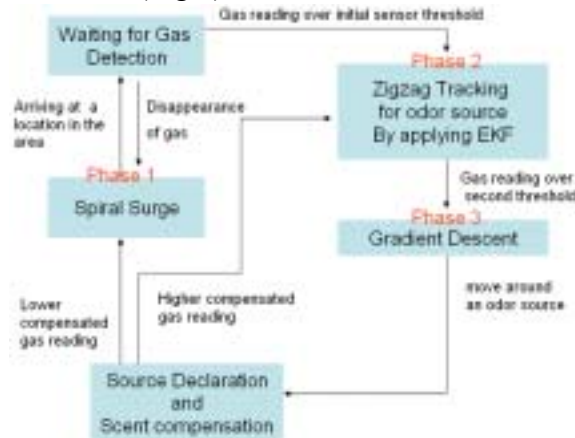


Fig.4 氣味搜尋演算法的個各階段間的關係

階段1: 螺旋式搜尋(Spiral search)

一個臨界值, S_{th1} , 被設定在 0.03 用來消除氣體感測器的初始臨界點, 在氣體感測器偵測到的濃度值大於 0.03 時, 才算真正感測到氣體。在這之前氣味來源的搜尋一開始先讓微型機械作 Spiral search 的運動路徑, 這個路徑是一開始由內向外螺

旋旋出, [6], [7] (Spiral Gap)。這樣可以大致覆蓋到所在位置的周圍區域, 如果搜尋的範圍過於龐大, 一開始可以讓微型機械作較大 Spiral Gap 的運動, 這種運動方式在尚未偵測到氣體前算是一種不錯猜測的搜尋路徑。

階段 2: Zigzag walking (延伸的卡爾曼濾波器)

當氣體感測器偵測的濃度值大於初始臨界點, S_{th1} , 微型機械將進入第二階段的氣味追蹤方式。這樣的氣味追蹤方法是啟發於大自然中蛾的行為模式 (*Bombyx mori*) [3],[4],[5]。將此種行為模式應用到微型機械的氣味追蹤, 一開始先讓微型蟲作一連串固定方向的 Zigzag 路徑行走; 相對於整體前進的方向, 每個 Zigzag 轉角大約在 60 度, 之後將這個路徑上取樣的微型機械相對位置以及對應的氣體濃度, 帶入延伸的卡爾曼濾波器, 則可以預先估算出氣味來源的位置[22],[23](Fig.5)。之後微型機械開始作 two zigzag turns 的運動, 不同的地方在於這一次 two zigzag turns 的運動, 其整體前進的方向是根據前面估算出來的氣味來源位置, 同時也將此次運動獲得的資訊帶入濾波器中作估算; 此後, 繼續做重複的 two zigzag turns 運動, 也一直改變其整體的行進方向。如此可將預估的氣體來源的位置不斷的作修正, 進而引導微型機械到達氣味源附近。

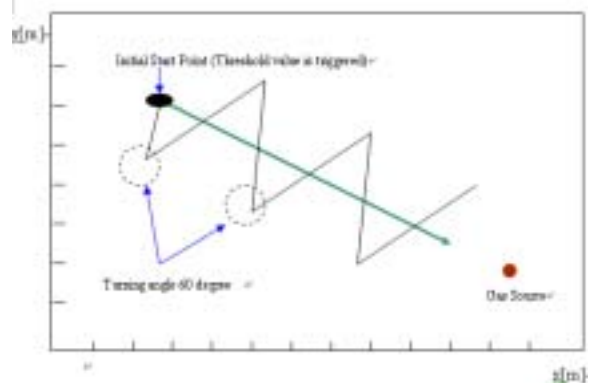


Fig 5 第一次的Zigzag 運動路徑示意圖

Fig. 6 則呈現延伸的卡爾曼濾波器在處理所獲得不斷進來的資訊的方塊圖

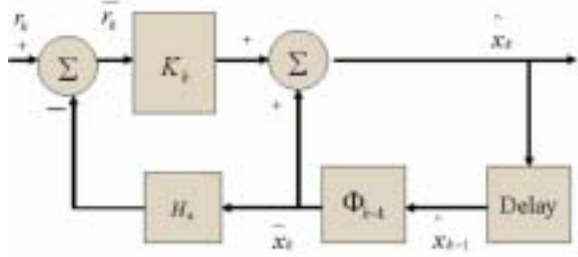


Fig 6. 延伸卡爾曼濾波器方塊圖

一般而言，一個微型機械帶著一個氣體感測器，要來預估氣味來源的位置 (x_s, y_s) ，單存從代數的觀點來看似乎是不太可能；然而藉由延伸的卡爾曼濾波器可以解決這樣的問題，如同之前所說微型機械蟲沿著 zigzag 的路徑行走，在路徑上依序取樣相關資訊就可以造成多個式子來解這兩個未知數。或許會問為什麼不用曲線擬合的方式來求解，問題在於曲線擬合所需耗用的計算資源過於龐大，計算時間也須較長；而延伸的卡爾曼濾波器可以解決計算時間較長的問題進而做到即時計算的效果。

利用延伸的卡爾曼濾波器來預測氣味來源的位置，我們首先要計算的是卡爾曼增益，卡爾曼增益其實與 Riccati 式子有密切的關係；因為沒有進程噪音，我們根據 zigzag 所獲得的資訊足夠讓我們來解 Riccati 式子，其式子如下，

$$M_k = \Phi_k P_{k-1} \Phi_k^T$$

$$K_k = M_k H^T (H M_k H^T + R_k)^{-1}$$

$$P_k = (I - K_k H) M_k$$

在這裡 P_k 是一個協方差矩陣代表在卡爾曼增益更新後的誤差而 M_k 是一個協方差矩陣代表再卡爾曼增益更新前的誤差，誤差一開始是指預測的氣味來源位置與一個初始隨機位置的差距，之後隨著 Riccati 式子的計算而更新。因為 Φ_k 和 H 是非線性的函數關於氣味來源位置狀態的預測，所以線性的卡爾曼濾波器不適用於此，必須用延伸的卡爾曼濾波器。

協方差矩陣 P_k 不只可以用來計算卡爾曼增益也可以提供誤差相對於氣味來源位置狀態的預測。由上列式子可知，基

本矩陣 Φ_k 和量測矩陣 H 祇適用來計算卡爾曼增益而已。在延伸的卡爾曼濾波器中，新狀態的預估是由舊狀態的預估投影過來加上卡爾曼增益乘以餘數(Fig.6)，

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_{11k} \text{Re } s_k$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k + K_{12k} \text{Re } s_k$$

因為基本矩陣經過計算是單位矩陣，所以

$$\hat{x}_k = \Phi_{k-1} \hat{x}_{k-1} = \hat{x}_{k-1}$$

$$\hat{y}_k = \Phi_{k-1} \hat{y}_{k-1} = \hat{y}_{k-1}$$

因此從微型機械到最接近的氣味來源的投影範圍為

$$\bar{r}_k = \sqrt{(x_{mk} - \hat{x}_k)^2 + (y_{mk} - \hat{y}_k)^2}$$

而餘數的計算其實很簡單，就是量測到的氣體濃度帶入直接擴散的氣體模型所推算的距離 r_k^* 減掉由濾波器所推算的投影距離 \bar{r}_k

$$\text{Re } s_k = r_k^* - \bar{r}_k$$

最後，延伸的卡爾曼濾波器的狀態更新式子如下

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_{11k} \text{Re } s_k$$

$$\hat{y}_k = \hat{y}_k + K_{12k} \text{Re } s_k$$

階段 3: 梯度追蹤演算法

當微型機械蟲藉由 zigzag 運動往氣味濃度高的地方行走時，如果到達一個區域使得偵測到的氣體濃度值大於第二個臨界點 $S_{th2}, 0.08$ ；則進入第三各階段的氣味追蹤演算法---梯度追蹤演算法。假設微型蟲身上還有其他的氣體感測器，藉由這幾個感測器的相對位置可以去推算氣體濃度的梯度值，進而直接指引到氣味來源的位置；至於為什麼要在濃度高的時候才用梯度演算法？因為微型機械的體積過小，導致在濃度低時的感測值都幾乎依樣；在濃度高的時候，其差異性才會變大，並計算出所在位置的濃度梯度值。

4.2 氣味來源宣告及氣味補償

微型機械蟲的目標在於找到氣味來源。如果微型蟲身體的體積夠大，可以身上所裝備的氣體感測器彼此有足夠的距離。則氣味來源的宣告可以簡化為當氣體濃度梯度在四個方向都是負的時候，微型蟲就是在氣體來源的位置。然而如果微型蟲的體積太小，當靠近氣味來源時微型蟲利用此法則會在氣味來源附近徘徊不前。此時我們必須將氣味宣告的方式作修正，如下

$$\begin{cases} \nabla \phi_{k-1} \cdot \nabla \phi_k < -0.999 \\ \text{countsc} = \text{countsc} + 1 \end{cases}$$

ϕ_k 是氣體感測器的濃度值在時間 k ，而微型蟲所在位置 (x_k, y_k) 。當計數的變數 countsc 大於某個固定的數值時，微型蟲便宣告氣味來源的位置。

一旦找到一個氣味來源點後，微型蟲必須氣體感測器讀到的濃度作補償。這樣可以使微型蟲去找尋環境中尚未被找到的其他氣味來源點。根據之前推導氣味擴散的公式如下

$$\phi(\vec{r}_o) \approx \underbrace{-H_o \left(\frac{1}{2} I + H \right)^{-1} Q}_{A} + \sum_{i=1}^{n_s} \underbrace{Q_i G(\vec{r}_o, \vec{r}_{s_i})}_{B}$$

氣體擴散的式子主要可分為兩項，一項是由直接氣味源擴散所造成，B，另一項是非直接氣味源擴散項，A。A 和環境中障礙物的地理位置有關係，假設微型蟲事先並不知道所在環境的相關資訊，因此 A 這項不能被消掉，所以我們作補償僅能消掉已宣告氣味來源的影響，補償如下

$$\phi_c(\vec{r}_o) \equiv \phi(\vec{r}_o) - Q_j G(\vec{r}_o, \vec{r}_{s_j})$$

這種氣味補償方式是所謂的點氣味源消去法[21]。

4.3 避開障礙物

避開障礙物的方式其實就是當微型機械蟲靠近障礙物時，給它一個排斥的力場。讓它沿著障礙物的邊緣行走直到繞過障礙物[21]。如同 Fig.7 所示，障礙物的表面可離散成很多固定的點；假設微型蟲具

有超音波感測器，能感測這些鄰近的點到本身位置的距離。如果 $(x_{w_{k \min}}, y_{w_{k \min}})$ 是障礙物位置中最接近微型蟲的，則最小距離如下

$$d = \sqrt{(x_r - x_{w_{k \min}})^2 + (y_r - y_{w_{k \min}})^2}$$

蟲的位置相對於此點的角度下

$$\eta_{k \min} = a \tan \left\{ (y_r - y_{w_{k \min}}) / (x_r - x_{w_{k \min}}) \right\}.$$

利用這些資訊以及下列的邏輯我們可以引領微型蟲安全的避開障礙物

if $d < d_{\min}$

then

$$W_k(X_r, X_{w_k}) = v_{\max} b [0, -\sin \eta_{k \min}, 0, \cos \eta_{k \min}]^T$$

else

$$W_k(X_r, X_{w_k}) = [0, 0, 0, 0]^T$$

上面這組邏輯是用於遇到障礙物時會固定左轉沿著障礙物表面走的路徑。

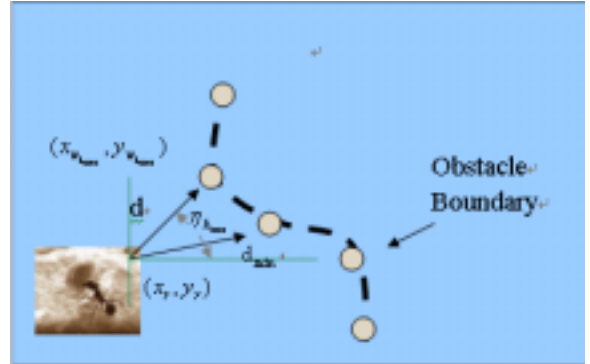


Fig 7. 微型蟲接近障礙物時的示意圖

五、 模擬及結果

Fig.8 呈現氣體在兩個平行的障礙物中的擴散分佈。紅色的軌跡代表微型機械蟲的搜尋路徑，在這個模擬中僅使用濃度梯度追蹤演算法來做氣味原定位。當然也加入了點氣味源消去法的演算法，來找尋不只一個氣味源的環境。

Fig. 9 呈現隨著氣體感測器讀到不同的濃度值所產生不同階段性的氣味追蹤法則。在這個模擬當中，一開始所在位置的氣味濃度便大於初始臨界點， S_{th1} 。所以微型蟲直接進入第二階段的氣味追蹤方式---Zigzag 路徑運動。當漸漸地進入到高濃度區域，便進入第三階段的追蹤方式---

梯度追蹤。之後微型蟲找到並宣告氣味來源的位置，並進行氣味補償。補償後的濃度小於初始臨界點, S_{th1} ，所以微型蟲作 spiral surge 的運動試著去搜尋其他的氣味來源。

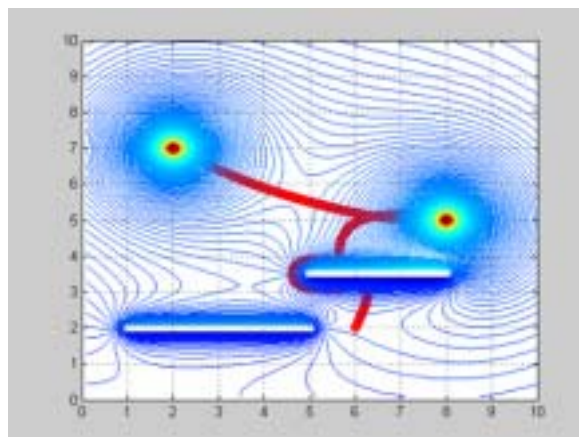


Fig 8. 氣味擴散的等高線圖以及氣味追蹤演算法只利用氣體濃度梯度追蹤

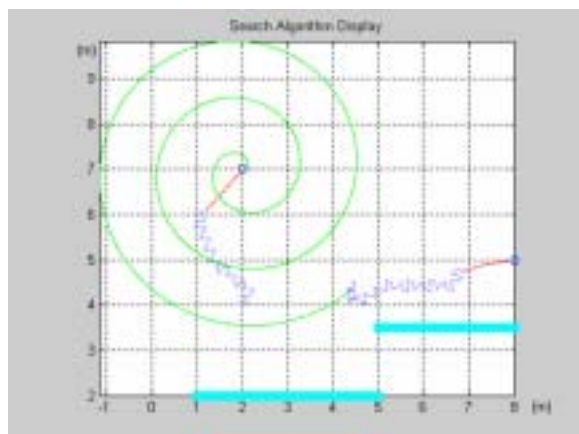


Fig. 9 階段性氣味追蹤的示意圖

Fig.10 呈現完整的氣味來源定位工作。一開始微型蟲的位置置於(3, 1)，其中綠色的路徑被標記為在作 spiral surge 的運動。如果在路途中有障礙物的話，避開障礙物的演算法將指引它沿著障礙物邊緣走；在繞過障礙物之後，微型蟲作 zigzag 的行走去預測接近自己的氣味來源位置。最後，同樣經過梯度追蹤以及氣味來源宣告，微型蟲找到氣味來源並透過補償而找到另一個氣味來源點。Fig.11 是在 Fig.10 中隨著不同的時間點不同的位置，氣體感測器在路徑中所讀到的濃度值。注意的是，圖中兩個突波是指出微型

蟲的確找到模擬環境中的兩個氣味來源，並宣告其所在位置。

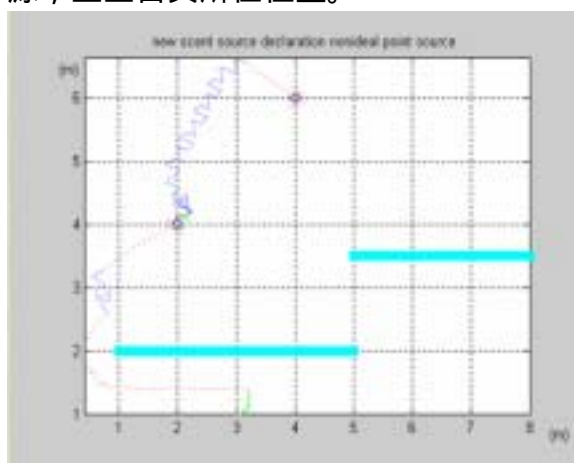


Fig. 10 完整的氣味來源定位及階段性的追蹤方式

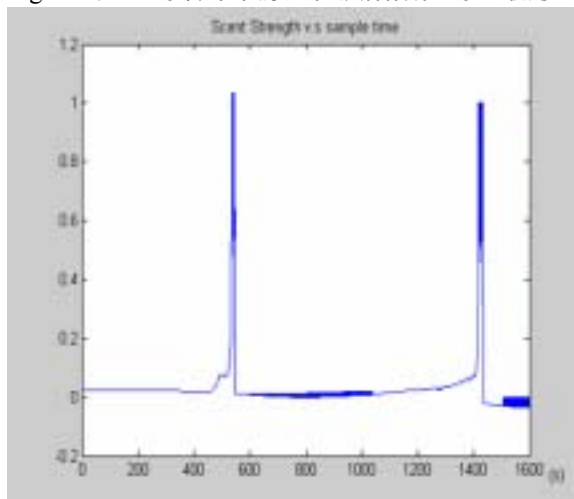


Fig. 11 氣體感測器在 Fig.10 中對時間的濃度值

Fig.12 呈現微型蟲作 zigzag 運動而漸漸朝向預測的氣味來源位置。此 zigzag 運動軌跡與預測的氣味來源方向維持 60 度的角度為了幫延伸的卡爾曼濾波器蒐集最新的資訊，來作為參數的更新。所預測的氣味來源方向亦呈現在 Fig.12，右邊的箭頭指向預測氣味源的方向。雖然剛開始預測的誤差相當大，但是隨著取樣點數的越多，微型蟲預測的氣味源方向會越接近實際的位置。

我們模擬這樣的情形以及結果如 Fig.13；可以看到的是在所宣告的氣味來源的位置與實際上較靠近自己的氣味源的位置，其誤差在 68% 的時間之後將降到合乎理想的協方差限制內。告訴我們，延伸的卡爾曼濾波器工作正常。

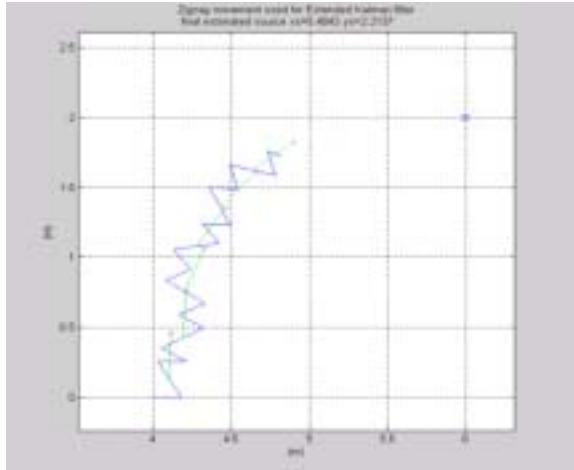


Fig. 12. Zigzag 運動由模擬呈現的結果

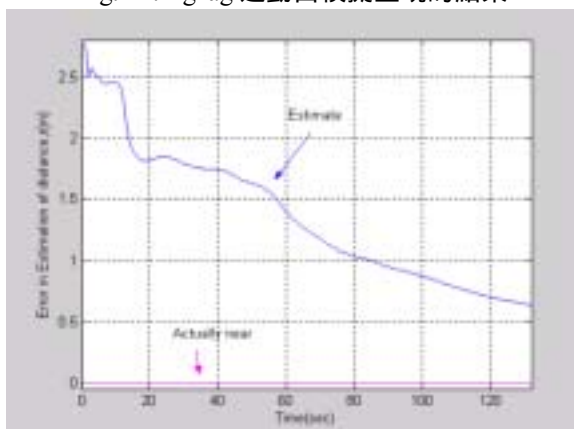


Fig. 13 延伸的卡爾曼濾波器顯示正常的操作在氣體來源點的預測

六、 結論和成果自評

在本年度計畫之計畫成果可總結如下:

1. 初步研究關於昆蟲的氣味感測與反應行為。
2. 了解環境、昆蟲行為以及目標物之間的關聯。
3. 建立氣味擴散模型，並發展一套完整的氣味追蹤演算法去模擬一隻微型機械蟲可以使用此階段式的搜尋追蹤方式，在未知的環境裡完成有效率的搜尋；並引進點氣味源消去法來尋找環境中其他的氣味來源點。
4. 延伸的卡爾曼濾波器是有效的方法來預測接近微型蟲的氣味源的位置。

下一年度將持續進行之工作包括:

1. 加入氣體感測器的動態模型，考慮實際上感測器會有延遲以及其他的特性。
2. 將演算法作得更完善諸如利用延伸的

卡爾曼濾波器來考慮氣味源的強度以及環境中的雜訊問題。

3. 將建立的演算法整合於晶片中，以期達到硬體的實現。

七、 參考文獻

- [1] R.A. Russell, D. Thiel, R. Deveza, A. Mackey-Sim, A robotic system to locate hazardous chemical leaks, *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, May 1995, pp. 556-561.
- [2] T. Nakamoto, H. Ishida, T. Moriizumi, An odor compass of localizing an odor source, *Sensors and Actuators B* 35, 1996, pp.32-36.
- [3] B. Webb., View from the boundary. *Biological Bulletin*, 200:184, April 2001.
- [4] C. Loizos. Special feature: Service-sector robotics: Robots are breaking out of the factory. *Red Herring*, September 1998.
- [5] G. Walter. *The Living Brain*. Norton, New York, 1953.
- [6] J. F. Engelberger. Robotics in practice : management and applications of industrial robots. *AMACOM*, New York, 1980.
- [7] L. Bruno. Mister roboto: Pioneer Joseph Engelberger shares his passion for robotics. *Red Herring*, August 2000.
- [8] R. T. Carde and A. Mafra-Neto. Effect of pheromone plume structure on moth orientation to pheromone. In R. T. Carde and A. K. Minks, editors, *Perspectives on Insect Pheromones*. *New Frontiers*, p275. Chapman and Hall, N.Y., 1996.
- [9] J. H. Belanger and M. A. Willis., "Adaptive control of odor guided

- locomotion: Behavioral flexibility as an antidote to environmental unpredictability.” *Adaptive Behavior*, 4:217-253, 1996.
- [10] U. Bhalla and J. M. Bower. Multi-day recording from olfactory bulb neurons in awake freely moving rats: Spatial and temporally organized variability in odor-ant response properties. *J. of Computational Neuroscience*, 4:221-256, 1997.
- [11] J. Atema. Eddy chemotaxis and odor landscapes: Exploration of nature with animal sensors. *Biological Bull.*, 191:129-138, 1996.
- [12] M. J. Weissburg. From odor trails to vortex streets: Chemo and mechanosensory orientation in turbulent and laminar flows. In M. Lehrer, editor, *Orientation and Communication in Arthropods*, pages 215-246. Birkhauser, Basel, 1997.
- [13] R. A. Russell. Odor detection by mobile robots. *World Scientific*, Singapore, 1999.
- [14] T. Nakamoto, H. Ishida, and T. Moriizumi. A sensing system for odor plumes. *Analytical Chemistry*, 71(15):531A-537A, August 1999
- [15] R. A. Russell, D. Thiel, R. Devezza, and A. Mackay-Sim. A robotic system to locate hazardous chemical leaks. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 556-561, Nagoya, 1995
- [16] F. W. Grasso, T. R. Consi, D. C. Mountain, and J. Atema. Biomimetic robot lobster performs chemo-orientation in turbulence using a pair of spatially separated sensors. *Robotics and Autonomous Systems*, 30:115-131, 2000
- [17] S. Kazadi, R. Goodman, D. Tsikata, and H. Lin. An autonomous water vapor plume tracking robot using passive resistive polymer sensors. *Autonomous Robots*, 9(2):175-188, 2000.
- [18] H. T. Nagle, R. Guitierrez-Osuna, and S. S. Schiffman. The how and why of electronic noses. *IEEE Spectrum*, 35(9):22-31, September 1998.
- [19] H. Ishida, T. Nakamoto, T. Moriizumi, T. Kikas, and J. Janata. Plume-tracking robots: A new application of chemical sensors. *Biological Bulletin*, 200:222-226, April 2001.
- [20] H. Ishida, Y. Kagawa, T. Nakamoto, and T. Moriizumi. Odor-source localization in the clean room by an autonomous mobile sensing system. *Sensors and Actuators B*, 33:115-121, 1996.
- [21] Jeffrey L. Dohner. A Guidance and Control Algorithm for Scent Tracking Micro-Robotic Vehicle Swarms. *Sandia Report* march , 1998
- [22] Ryohei Kanzaki. Behavioral and Neural Basis of Instinctive Behavior in Insects: OdorSource Searching Strategies without Memory and Learning. *Robotics and Autonomous Systems*, 18:33-43, 1996.
- [23] Ryohei Kanzaki. Self-generated Zigzag Turning of *Bombyx Mori* Males During Pheromonemediated Upwind Walking. *Zoological Science*, 9:515-527, 1992.