

智慧型服務機器人輪椅之自動循跡導航研究

鄭文昌、江家慶

朝陽科技大學資工系

{wccheng, s9927623}@cyut.edu.tw

摘要

在此論文中我們以校園無障礙空間為環境完成一部具自動循跡之智慧型服務機器人輪椅，此系統利用影像漆線偵測做為輪椅自動循跡導航的依據，由於校園無障礙空間包含有室內與室外部分，且室外部分也包含有緩坡道及人行道等環境，因此我們提出一個強健的漆線偵測方法，此方法利用動態高斯混合模型(Dynamic Gaussian Models)表示漆線顏色分布與判斷，輸入影像利用此方法完成漆線偵測及參數計算後，輸入至輪椅的模糊邏輯控制器完成輪椅循跡導航控制，此系統已實際於校園無障礙路線實驗測試，其中包含直線及彎道的無障礙路線，結果顯示系統能正確使輪椅保持在漆線方向行進，且平均誤差保持在 ± 10 公分內，這證明智慧型服務機器人輪椅能於校園無障礙路線上自動順利導航。

關鍵詞：路徑循跡，動態高斯混合模型，色彩空間轉換，模糊控制，RFID。

1. 簡介

依據內政部統計處資料顯示，65歲以上的老年人口數佔總人口比例由2008年的10.4%上升到2009年10.6%，預估2027年老年人口將占總人口的20.04% [1]，這些數據顯示我們已經邁入老年化社會，因此高齡者照顧需求有其迫切性。行政院經濟建設委員會於1997年將長期照顧納入「跨世紀國家建設計畫」[2]，對長期照顧之發展提出五項原則：(1)整合性，(2)社區化，(3)人性化，(4)公平性，以及(5)自主性，而行政院衛生署也於1998年將「預防」和「治療」兩項列入長期照顧之範疇，政策規劃也以社區(居家)照顧為主(占70%)，機構照顧為輔(占30%)，希望落實在地老化、在家養老之目標。然而失能者日常生活不管在機構或居家都必需依賴他人的協助，對高齡者而言，其生活模式必須被迫改變，心理和社會互動也因而從社會撤離；對照顧者而言，除了照顧的壓力負荷，家庭生活和工作的都受到影響，因此高齡化社會的高齡者照顧藉由運用科技力量支持照顧的

需求，減輕照顧者的壓力，同時讓高齡者減少照顧依賴，在有尊嚴又獨立的生活原則下，獲得完「全人照顧(holistic care)」[3]。

另一方面，因應老年化社會未來輪椅使用人口增加，許多場所紛紛針對場所內增建無障礙空間，朝陽科技大學一直以來都很重視此一議題，因此於校園內完成一條環繞校園之無障礙空間建置，圖1所示為校園無障礙空間一景，並受教育部委託辦理兩梯次「改善無障礙校園環境工作坊」推廣無障礙環境的重要[4]，活動中除了有靜態演講，也安排動態實地體驗無障礙空間的軟硬體設施。



圖 1. 校園無障礙空間

為了落實運用科技於全人照顧觀念，我們藉由教育部補助 I-Services 計畫之子計畫二「智慧型服務機器人」計畫導入智慧型服務機器人輪椅使用於校園無障礙空間，建置一套基於電腦視覺之自動循跡導航智慧型服務機器人輪椅，此系統透過攝影機擷取無障礙空間影像，利用我們提出的強健的漆線顏色偵測技術計算漆線位置資訊，做為輪椅循跡導航控制。

基於電腦視覺漆線偵測之自動循跡導航技術已有許多相關研究被提出[5-14]，一般常見的偵測方法可分成基於特徵偵測方法、基於顏色偵測方法、以及基於樣板比對偵測方法等，由於一般無障礙空間為凸顯，因此漆線使用的顏色大多會挑選與環境不同的顏色或鮮豔的顏色，因為在此論文研究中我們採用基於漆線顏色為依據的偵測方法。顏色偵測最簡單的方法是臨界值法，針對偵

測顏色的分布設定臨界值範圍，當顏色落在此臨界值中則視為偵測顏色，反之不是，此外亦有學者提出利用高斯函數來表示特定顏色於空間分布的方法[15]，觀察無障礙空間漆線顏色的分布，由於無障礙空間包含室內與室外，且室外又有陰影、樹蔭、及污損等，因此漆線顏色偵測一個困難問題，且無法利用單一高斯函數表示，因此在此論文中我們提出使用高斯混合模型(Gaussian Mixture Models: GMM)來表示漆線顏色的機率分布，高斯混合模型是由多個高斯函數依不同權重值所組成的模型，因此能更正確表示漆線顏色的機率分布，輸入影像透過高斯混合模型能更準確完成漆線顏色偵測。

完成漆線偵測後，利用霍夫轉換計算漆線位置以及漆線與輪椅的角度，當作輪椅模糊控制器的輸入，透過模糊邏輯推論，控制輪椅左右輪轉速差以達到輪椅方向控制，進而完成輪椅的循跡導航控制，此外在此論文研究，我們於無障礙空間路徑上放置 RFID 電子標籤，透過智慧型機器人輪椅上 RFID 讀取器，可以得知輪椅目前於地圖中位置以完成地圖上定位，透過地圖定位使用者可以更容易操作輪椅，且控制中心亦能透過地圖定位掌握輪椅位置。

論文結構描述如下，第二章將更仔細介紹我們提出的漆線偵測方法，接著第三章介紹輪椅自動循跡的模糊系統控制，第四章為模擬實驗以及實際實驗結果，最後為結論與討論。

2. 系統架構

圖 2 為我們提出的智慧型服務機器人輪椅系統的架構，此系統包含影像擷取與校正、漆線偵測與參數計算、圖形操作介面、以及模糊控制器等部分。其中影像擷取與校正負責將影像透過攝影機與影像擷取卡讀入系統，並且進行座標轉換，由於攝影機座標與空間座標轉換不同，因此首先必須針對輸入影像進行座標轉換，接著漆線偵測與參數計算功能負責由影像中偵測漆線位置，並且透過直線霍夫(Hough)方法計算漆線與輪椅方向夾角與位置。

模糊邏輯控制器負責控制輪椅循跡導航，此模糊控制器有兩個輸入，分別是漆線直線與輪椅方向的夾角以及漆線與輪椅的距離，輸出則直接用來控制輪椅的兩輪速度差值，透過兩輪速度差值，則可以得到一角速度，換句話說，使的輪椅可以轉彎達到循跡導航，最後部分為圖形操作介面，透過圖形操作介面、地圖與觸控面板點選操

作，以簡化系統的操作方式，使得行動不便者或年長者，透過簡單地圖的點選，即可以完成操作。

接下來章節我們將針對圖 1 中各個部分的技術更詳細說明。

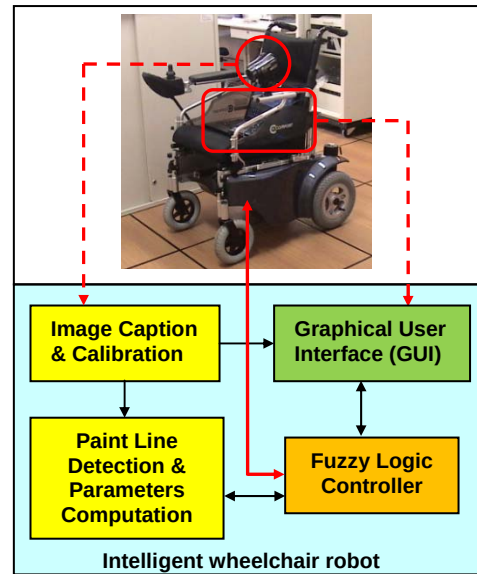


圖 2. 系統架構圖

3. 漆線偵測

利用顏色來偵測漆線是一個困難的問題，由於漆線顏色容易受光源、天氣、污損、陰影等影響，因此在此論文中我們提出一套強健的漆線偵測方法，此方法利用一個高斯混合模型學習漆線色彩的機率分布，輸入影像則利用此高斯混合模型完成影像漆線位置偵測，以下將分別仔細說明。

3.1 色彩空間轉換

為了降低光源對顏色偵測的影響，因此我們採用 CIE-Lab 色彩空間中 a 與 b 做為漆線偵測的依據，在此論文中我們使用 ITU-R 的 BT-709 格式轉換，並且採用 D65 做為參考白點。由於 RGB 色彩空間無法直接對應到 Lab 色彩空間系統，因此必須先將 RGB 色彩空間轉換成至 XYZ 空間，然後再轉換至 Lab 色彩空間，RGB 色彩空間轉換至 XYZ 色彩空間計算可以表示如下所示：

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad (1)$$

，而 XYZ 色彩空間轉換至 Lab 色彩空間計算可以定義如方程式(2)所示：

$$\begin{aligned}
L &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16, \\
a &= 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right], \\
b &= 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right], \\
f(t) &= \begin{cases} t^{\frac{1}{3}}, & t > 0.008856 \\ 7.787t + \frac{16}{116}, & t \leq 0.008856 \end{cases},
\end{aligned} \quad (2)$$

其中 $X_n=0.9504$ 、 $Y_n=1$ 和 $Z_n=1.0883$ 為參考白色點(D65)。圖 3 所示是漆線顏色 a - b 值的分布圖，圖中每一藍點代表一筆漆線顏色 a - b 的取樣值，我們在多種情況下(室內及室外，其中室外包含有雨天、晴天、黃昏、白天等)共收集 1,250,000 筆的漆線顏色 a - b 值，由圖中可以發現，漆線顏色 a - b 值的分布是不規則分布，因此無法利用臨界值範圍設定或單一高斯函數表示其分布，因此在此論文中我們採用高斯函數混合模型學習漆線顏色的 a - b 值機率分布。

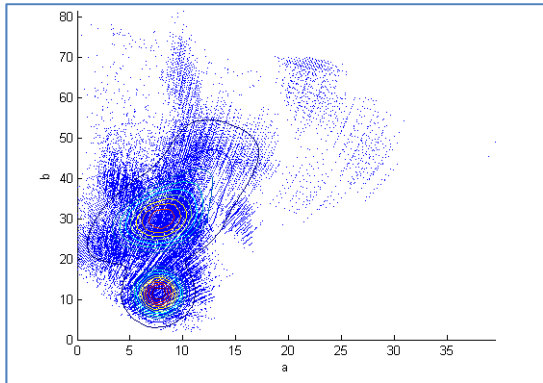


圖 3. 漆線顏色 a - b 值分布與 5 個高斯混合模型的等高線

3.2 高斯混合模型(GMM)

高斯混合模型 (Gaussian Mixture Model: GMM) 是指一個由多個高斯函數所組合的模型，常用來表示資料的機率密度分布函數，由於 GMM 能夠平滑地近似任意形狀的機率密度分布，所以非常適合用來模型漆線色彩 a - b 值的機率分布。GMM 可以表示為 K 個高斯函數的權重和，定義如方程式(3)所示：

$$p(\mathbf{x}_i|\Theta) = \sum_{k=1}^K p_k p(\mathbf{x}_i|\mu_k, \Sigma_k), k=1, 2, \dots, K, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{x}_i \in \mathbb{R}^2$, $i=1, 2, \dots, n$ ，為輸入向量， n 為輸入樣本個數， $\Theta = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K | \Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_K\}$ ，其中 μ_k 和 Σ_k 分別為第 k 個高斯函數的平均值與變異

矩陣，而 p_k , $k=1, 2, \dots, K$ ，代表每一高斯函數分量的權重值，其中每一個高斯函數的計算方式可表示如方程式(4)所示：

$$p(\mathbf{x}_i|\mu_k, \Sigma_k) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^d |\Sigma_k|}} \exp\left[-\frac{1}{2}(\mathbf{x}_i - \mu_k)^T \Sigma_k^{-1} (\mathbf{x}_i - \mu_k)\right], \quad k=1, 2, \dots, K, \quad (4)$$

其中 μ_k 和 Σ_k 分別為第 k 個高斯函數的平均值與共變異矩陣，因此 K 個高斯函數共有 K 平均值以及 K 個共變異矩陣， $\Theta = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K | \Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_K\}$ ，而用來估測的方法稱為 EM 演算法，EM 演算法是一種遞迴演算法，其中包含兩個步驟，分別稱為估測步驟(E -步驟)以及更新步驟(M -步驟)。首先， E -步驟依據目前的 GMM 利用方程式(4)估測每一輸入樣本屬於每一個高斯函數的機率值，定義為：

$$\hat{p}(k|i) = p(y_i = k | \mathbf{x}_i, \Theta_k), \forall k, i, \quad (5)$$

其中 $k=1, 2, \dots, K$, K 為 GMM 所使用的高斯函數個數， $i=1, 2, \dots, n$, n 為輸入樣本個數，因此 $\hat{p}(k|i)$ 代表輸入 $\mathbf{x}_i$ 屬於第 k 個高斯函數的機率值， $\Theta_k = \{\mu_k, \Sigma_k\}$ 分別代表第 k 個高斯函數的平均值與共變異矩陣。接著 M -步驟利用 $\hat{p}(k|i)$ 進行所有參數更新，其計算定義如下：

$$\hat{n}_k \leftarrow \sum_{i=1}^n \hat{p}(k|i), \forall k, \quad (6)$$

$$\hat{p}_k \leftarrow \frac{\hat{n}_k}{n}, \forall k, \quad (7)$$

$$\hat{\mu}_k \leftarrow \frac{1}{\hat{n}_k} \sum_{i=1}^n \hat{p}(k|i) \mathbf{x}_i, \forall k, \quad (8)$$

$$\hat{\Sigma}_k \leftarrow \frac{1}{\hat{n}_k} \sum_{i=1}^n \hat{p}(k|i) (\mathbf{x}_i - \hat{\mu}_k)(\mathbf{x}_i - \hat{\mu}_k)^T, \forall k, \quad (9)$$

重複上述 E -步驟與 M -步驟直到收斂為止。

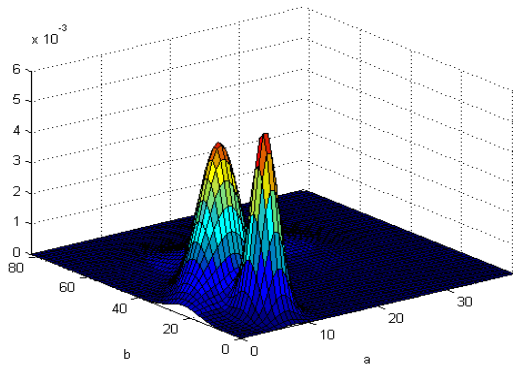


圖 4. 漆線顏色 a - b 值的高斯混合模型

圖 4 顯示為使用 5 個高斯函數的 GMM 學習圖 3 中漆線色彩 $a-b$ 值的機率分布結果，由圖中明顯可以看出其中兩個高斯函數的機率分布較為明顯，主要是因為大部分漆線顏色 $a-b$ 值集中於此兩個高斯函數所涵蓋範圍中，相同結果也顯示於圖 3 中的等高線。

高斯混合模型經學習後可以用來表示漆線顏色 $a-b$ 值的機率分布，因此針對任意輸入影像每一像素色彩的 $a-b$ 值帶入高斯函數混合模型可以經過簡單臨界值判斷得到輸入影像對應的漆線影像結果，其計算定義在方程式(10)。最後對於任意輸入影像每一像素 $a-b$ 值，可以利用 GMM 來完成漆線顏色偵測，定義如下：

$$F(x_i) = \begin{cases} 1, & p(x_i|\Theta) \geq Th1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (10)$$

其中 F 代表漆線影像，而 $Th1$ 為臨界值。圖 5 為一漆線偵測的例子，圖 5(a)為輸入影像，圖 5(b)為漆線偵測結果，將漆線影像由 2/3 高(如圖中紅色虛線位置)到底部投影累加至水平軸上，可以得到圖 5(c)結果，圖 5(c)中最高點位置至水平軸中心寬度定義為 x ，而 x 的變化量定義為 dx ，做為模糊控制系統的兩個輸入參數，至於輪椅的模糊控制系統將在於下一章節有更仔細說明。

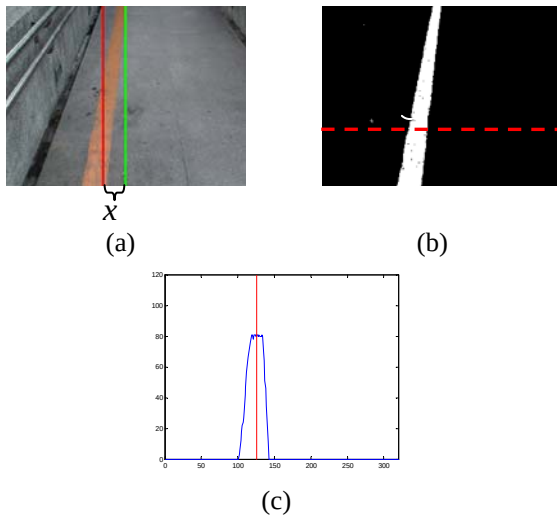


圖 5. 漆線偵測範例，(a)原始輸入影像，(b)漆線偵測結果，以及(c)漆線投影統計

4. 輪椅模糊控制

在此論文中我們使用模糊邏輯來控制輪椅達到循跡導航的目的，由於模糊控制的優點能容易將專家知識表達於系統中，使系統更接近於人類的思考與更符合現實世界的非線性系統。圖 6 所示為我們提出的模糊控制系統架構，此架構包含

有兩個輸入參數 x 與 dx ，以及一個輸出參數為輪椅角加速度，圖中標示 a_1 與 a_2 代表輸入參數正規化係數，分別將輸入參數正規化為 $[-1, 1]$ 之間數值，而標示 a_3 代表輸出參數由 $[-1, 1]$ 調整成對應馬達控制的輸出值，圖 7、圖 8、以及圖 9 顯示對應到輸入參數 x 、 dx 、以及輸出角加速度的三角模糊歸屬函數，其中輸入參數各有 5 個歸屬函數，分別標示為 $\{LE, LC, CE, RC, RI\}$ 以及 $\{LU, LV, VE, RV, RU\}$ ，因此規則庫中共有 25 個模糊規則，表 1 列出模糊規則對應輸出的歸屬函數，圖 10 為模糊控制的輸出模糊圖形(Fuzzy Graph)。

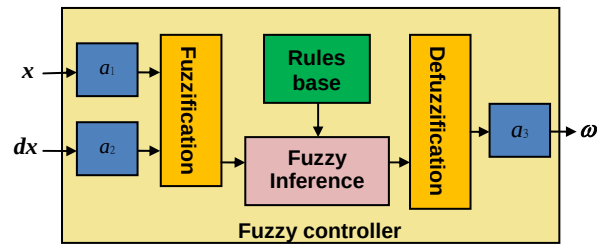


圖 6. 輪椅的模糊控制系統

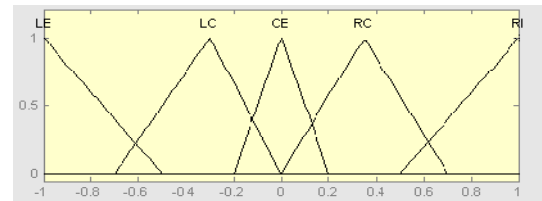


圖 7. 輸入 x 的歸屬函數

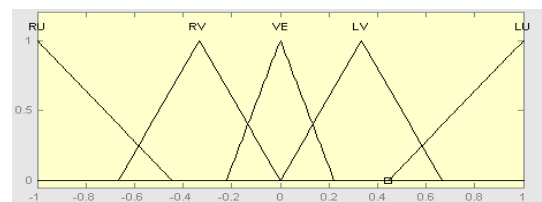


圖 8. 輸入 dx 的歸屬函數

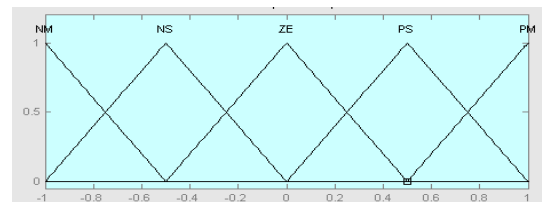


圖 9. 輸出歸屬函數

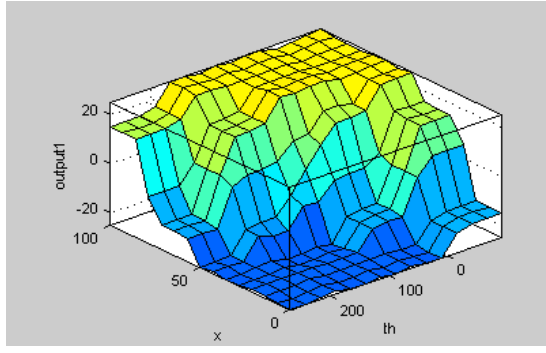


圖 10. 模糊控制系統輸出圖

表 1. 模糊規則

x dx	LE	LC	CE	RC	RI
RU	NS	PS	PM	PM	PM
RV	NM	NS	PS	PM	PM
VE	NM	NM	ZE	PM	PM
LV	NM	NM	NS	PS	PM
LU	NM	NM	NM	NS	PS

5. 輪椅運動方程式模擬

為了驗證模糊控制系統能有效應用於輪椅控制，因此在此章節中我們利用輪椅的運動方程式模擬輪椅的循跡結果。圖 11 為一輪椅示意圖，輪椅主要的驅動為兩個後輪，兩個前輪為輔助輪或稱為惰輪，可以 360 度自由轉向，除控制方向外，亦做為輪椅支撐穩定使用，其中 v 代表輪椅速度， ϕ 代表車身與漆線的夾角，假設左右輪轉速定義為 ω_l 與 ω_r ，且輪椅驅動輪的輪胎半徑為 r ，則左、右輪的速度可以定義為：

$$v_l = r\omega_l \text{ 和 } v_r = r\omega_r, \quad (11)$$

由於輪椅速度可以表示成 $v = (v_r + v_l)/2$ ，將方程式(11)帶入，因此可以得到：

$$v = \frac{r}{2}(\omega_r + \omega_l), \quad (12)$$

最後可以得到輪椅運動方程式如下：

$$\begin{aligned} \dot{y} &= v \cos(\phi), \\ \dot{x} &= v \sin(\phi), \\ \dot{\phi} &= \omega, \end{aligned} \quad (13)$$

其中 $\dot{y}$ 與 $\dot{x}$ 分別為輪椅 x 軸與 y 軸方向變化量，而角度的變化量 $\dot{\phi}$ 既是輪椅的角速度。利用輪椅運動方程式與模糊控制模擬輪椅移動的結果，圖 12 所示模擬結果，圖中紅色方塊代表輪椅，綠色箭頭代表輪椅行進方向，而藍色曲線代表漆線位置，在此例子中，假設輪椅的初始位置位於漆線右邊距離 20 公分處，且輪椅一開始行進方向與漆線平行，經過模糊控制模擬結果發現，輪椅確實慢慢趨近漆線並沿漆線前進。圖 13 顯示為輪椅與漆線距離 x 以及圖 14 為輪椅角度。

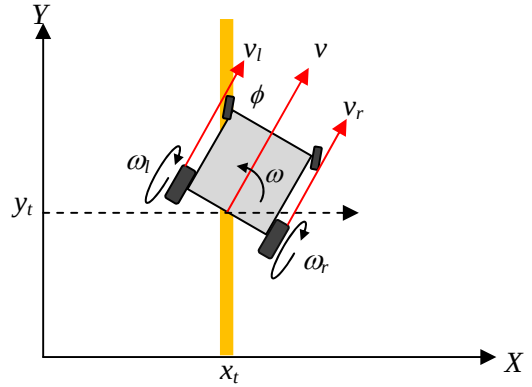


圖 11. 輪椅移動模型

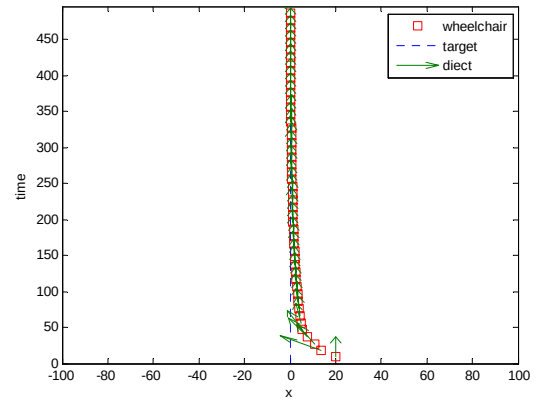


圖 12. 循跡導航模擬

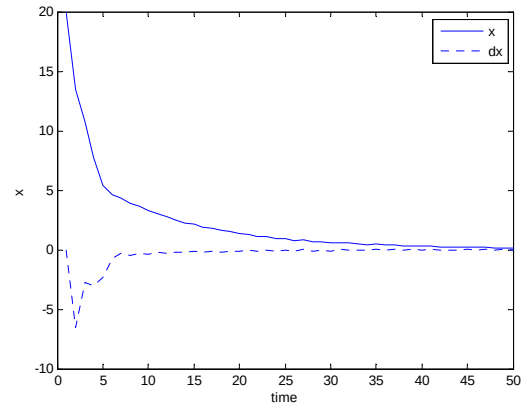


圖 13. 導航模擬水平位置結果

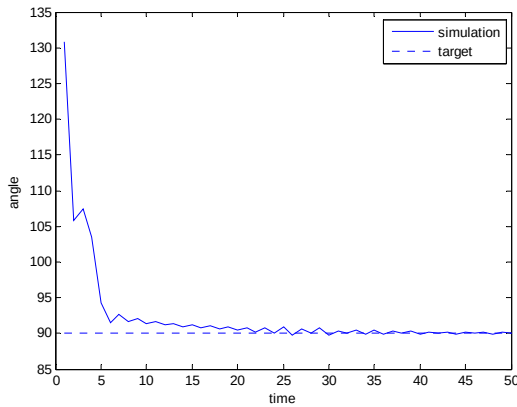


圖 14. 導航模擬角度結果

6. 實驗與結果

我們將實驗分成兩個部分說明，分別是漆線偵測以及實地實驗結果，針對漆線偵測，我們將討論不同個數的高斯函數對於高斯混合模型的影響，並且使用最好的高斯函數個數的 GMM 完成後續實地實際測試。以下分別討論說明。

6.1 漆線偵測

漆線偵測首先針對不同高斯函數個數進行實驗，我們使用不同環境以及不同光源下的影像進行，部分漆線偵測結果顯示在圖 15，圖中第一行為輸入影像，第二至五行為採用 1、3、5 以及 10 個高斯函數混合模型的漆線偵測結果，從圖中發現使用 1 個高斯函數結果最差，而 3 個高斯函數混合模型漆線偵測結果比起 1 個高斯函數有明顯改善，而 5 個與 10 個高斯函數混合模型比起 3 個高斯函數某些情況下有較好的結果，而 5 個與 10 個高斯函數混合模型偵測結果則差異不大，因此最後我們採用 5 個高斯函數混合模型在後續其他實驗，圖 15(f)代表利用 5 個高斯混合模型偵測漆線結果的投影圖，圖中紅色直線代表最高值所對應的位置，同樣結果顯示於第一行的輸入影像中紅色直線位置，而綠色直線則代表影像水平軸的中心位置。從圖 15 結果發現，高斯混合模型能正確完成漆線偵測，雖然仍有雜訊存在，漆線經過投影累加仍能正確偵測代表漆線位置的直線。

6.2 實際實驗結果

在實際無障礙路線環境實驗中，我們以一段校園無障礙空間進行實驗，其中包含兩種路徑，分別如圖 16(a)所示的直線漆線路徑以及圖 16(b)所示 90 度轉彎的曲線路徑，總長約 20 公尺，實驗一開始我們使輪椅攝影機位置對準漆線右側約 20 公分處，並且平行於漆線方向，以每小時約 5 公里速度前進，由於一開始位置並不是正對漆線

方向，程式執行後很明顯輪椅往左移動，試圖使輪椅攝影機對準漆線方向，圖 17 顯示為實驗過程漆線底部位置離影像水平中心的距離，從圖 17(a)明顯看出，一開始影像中漆線位置距離影像水平中心距離約為 -20 公分，接著慢慢趨近於 0，整個過程約經過 1 秒(10~15 frames/sec)，並且沿著漆線前進，接著輪椅進入 90 度轉彎曲線漆線階段，圖 17(b)顯示其結果，從圖中發現，輪椅約在 380 畫面開始進入轉彎(如圖 17(a)中第一箭頭所指)，剛進入轉彎後，漆線位置位於影像中線左方，因此漆線與中心位置的距離數值會呈現負值，此時輪椅會往左轉，隨著影像中漆線位置慢慢恢復直線(如圖 17(b)中第二箭頭所指)，則漆線與中心位置的距離數值會又趨近於零附近輕微震盪並沿著漆線前進。



圖 16. 實際測試環境，(a)直線漆線路徑，(b)曲線漆線路徑

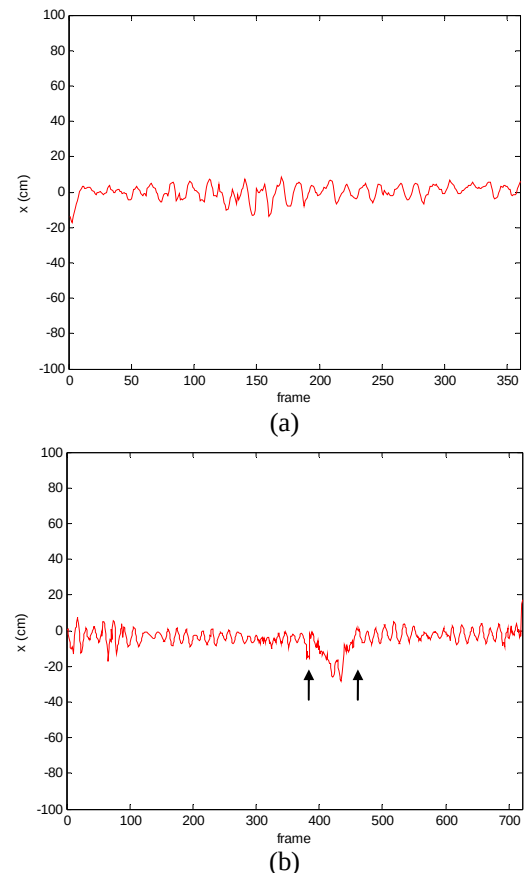


圖 17. 實際無障礙路線導航結果，(a)直線漆線路徑，(b)曲線漆線路徑

7. 結論與未來研究

在本論文研究中我們完成一部具自動循跡導航之智慧型服務機器人輪椅，此系統利用漆線顏色偵測以及模糊邏輯控制完成輪椅自動循跡導航，因此我們提出一個強健的漆線顏色的偵測方法，此方法能適用於室內與室外無障礙路線環境，此外針對輪椅控制，我們利用模糊邏輯完成一套控制系統，此系統已實際於校園無障礙路線實驗測試，其中包含直線及彎道的無障礙路線，結果顯示系統能正確使輪椅保持在漆線方向行進，平均誤差保持在 ± 10 公分內，因此經實驗證實，我們提出的自動循跡之智慧型服務機器人輪椅能於校園無障礙路線上自動順利導航。在未來研究中，為避免碰撞無障礙路線上行人或障礙物，將於此智慧型機器人輪椅四周加裝超音波距離感測器，並且透過模糊邏輯推論與漆線偵測結果整合，最後系統亦結合 RFID 標籤進行輪椅於無障礙路線上的定位，以簡化使用者操作介面及方便控制中心監控。

致謝

此計畫成果部分由教育部補助技專校院建立特色典範計畫(台技(一)字第 0990045921n 號)以及部分由國科會計畫「以綠能無線感測網路為基礎之智慧型健康監測與照護系統研究」所支持，在此特別表達感謝。

參考文獻

- [1]. 內政部統計處網站，<http://www.moi.gov.tw/stat/>.
- [2]. 行政院經濟建設委員會網站，<http://www.cepd.gov.tw/>
- [3]. 陳燕禎、李育哲，“高齡者使用智慧型機器人輪椅需求評估之初探，”元智大學老人福祉科技研究中心。
- [4]. 教育部98年度改善無障礙校園環境計畫，<http://www.cyut.edu.tw/98freecampus/project.html>.
- [5]. A. Rezoug and M. S. Djouadi, "Visual Based Lane Following for Non-holonomic Mobile Robot," *IEEE EUROCON'09*, pp. 902-907, 2009.
- [6]. Y. Xu, K. Li, Yingma, Yuanyi, Wanjian, Chenjun, and Z Yufan, "General Design of the Lateral Control System Based on Monocular Vision on THASV-I," *2004 IEEE Intelligent Vehicles Symposium*, University of Parma. Parma, Italy June 14-17, 2004.
- [7]. X. jiang, y motai, x. Zhu, "Prediction Fuzzy Logic Controller for Trajectory Tracking for Mobile Robot," *2005 IEEE Mid-Summer Workshop on Soft Computing in Industrial Applications*, Helsinki University of Technology, Espoo, Finland, June 28-30, 2005.
- [8]. J-B. Coulaud, G. Campion, G. Bastin, and M. De Wan, "Stability Analysis of a Vision-Based Control Design for an Autonomous Mobile Robot," *IEEE trans. on Robotics*, vol. 22, no. 5, pp. 1062-1069, Oct. 2006.
- [9]. G. Antonelli, S. Chiaverini, "Experiments of Fuzzy Lane Following for Mobile Robots," in *Proceeding of the 2004 American Control Conference*, Boston. Massachusetts, 2004.
- [10]. Z. Hai-bo, Y. Kui, L. Jin-dong, "A Fast and Robust Vision System for Autonomous Mobile Robots," in *Proceeding of IEEE International Conference on Robotics, Intelligent Systems and Signal Processing*, pp. 60-65, Oct. 2003.
- [11]. Guilherme N. DeSouza and Avinash C. Kak, "Vision for Mobile Robot Navigation: A Survey" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 24, no. 2, pp. 237-267, February 2002.
- [12]. Q. Fang and C. Xie, "A Study on Intelligent Path Following and Control for Vision-based Automated Guided Vehicle," in *Proceedings of the 5th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 15-19, 2004, Hangzhou. P.R. China, 2004 IEEE.
- [13]. K.Tomita, and S. Tsugawa, "Visual Navigation of Vehicle along Roads: The Algorithm and Experiments," in *proceedings of the IEEE conference on Vehicle Navigation and Information Systems*, 1994.
- [14]. S. Tsugawa, "Vision-Based Vehicles in Japan: Machine Vision Systems and Driving Control Systems," *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 4, pp. 398-405, Aug. 1994.

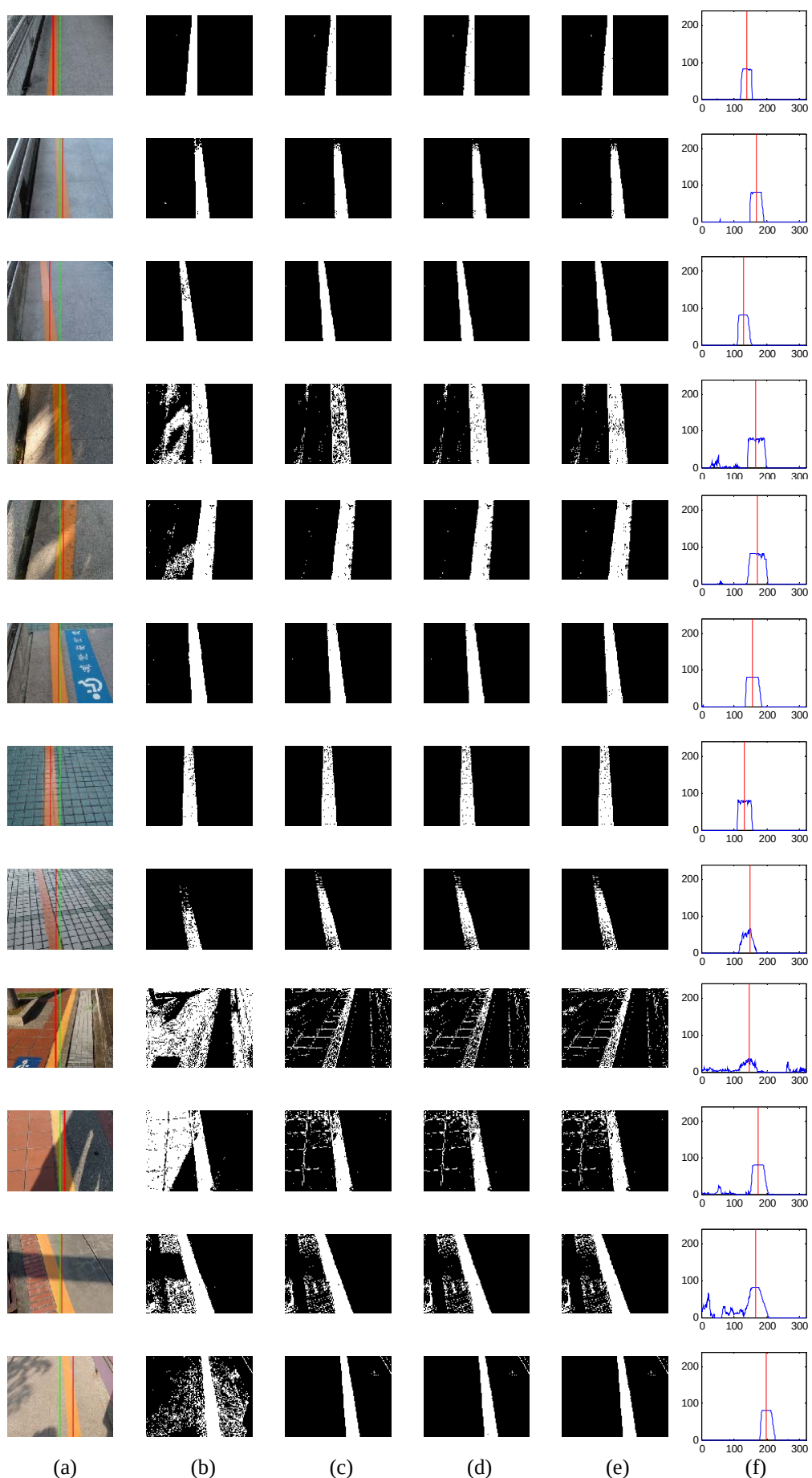


圖 15. 漆線偵測結果，(a)輸入影像，(b)-(e)分別 $K=1, 3, 5$, 和 10 個高斯函數混合模型，(f)漆線垂直累加值($K=5$)