

改良場效法於避障之研究策略

陳亮光¹、蕭賢元²

¹國立台灣科技大學機械工程學系(副教授)

²國立台灣科技大學機械工程學系(碩士生)

²E-mail: M10003417@mail.ntust.edu.tw

摘要

機器人在路徑規劃方面，是否能在存有障礙物的環境中到達目的地為主要研究目標，最為普遍的方法為使用場效函數法，但實際上應用場效法做為路徑規劃時，在某些特定場合下不是最佳路線，若是能將已知電子地圖整合至場效法中，便有機會改善原本可能發生的困境情況，本研究結合場效法與迪傑斯特拉法，於已知電子地圖上規劃出數個路徑中間點，使用迪傑斯特拉法找出最短路徑節點後，利用場效法跟隨路徑節點，並透過電腦模擬驗證其可行性。

關鍵字：路徑規劃、場效法、迪傑斯特拉法

1. 前言

智慧型機器人是整合精密機械、電子電機、資訊通訊等各領域技術的產物，並且可依據不同的環境設計成不同的功能，像是服務、製造、交通運輸、醫護、娛樂、軍事、救援、教育等產業上。日本機器人工業會和聯合國經濟委員會評估，家庭用(如居家服務和休閒娛樂)之智慧型機器人將是未來產業發展空間最大的領域。

機器人在行進時，面臨的第一個問題便是在已知或未知的環境中，如何得知自己的方位。因此，估測位置的演算策略，是目前機器人研究討論的議題之一。為了估算與解決未知環境的演算方式，需要同時定位與地圖建置(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)技術，藉此決定位置與路徑規劃的問題。在地圖與方位建構時，機器人會不斷接收感測器所提供的外部環境資訊來即時建立環境地圖，並同時利用地圖資訊，進而來推估自身定位[1, 2]。常被使用於偵測環境的感測器有編碼器、慣性感測器(IMU, Inertial Measurement Unit)，並搭配雷射測距儀、立體視覺、Wireless LAN、紅外線定位感測器、無線射頻識別系統(RFID, Radio Frequency Identification)等[3-6]。

而機械人在移動過程中，路徑演算方式需先自我定位外，同時還要在環境資料中判別方向，而演算處理的方法，就不能僅依靠單一訊號就能獲得解決。Mizoguchi 等人[7] 提出的 Scout，和 Huttenrauch 等人[8]設計的 Cero，已將 SLAM 與感測器融合中，並引起廣泛討論。

但很少有將室內環境的設計方式整合至 SLAM 演算法中，因為室內環境存在許多位置死角、光源干擾等，多少都影響到感知設備量測的精準性。若是將環境的設計方式整合至 SLAM 演算法中，就能減少對感測器的依賴，便能避開環境干擾的死角與光源，進而減少對感測器的依賴。所以，在環境的路徑規劃方面，是否能減少量測設備的使用，且能在存有障礙物的環境中，到達目的地為研究的目標。

目前路徑規劃普遍的方法為場效函數法。場效函數法是將機器人假設為空間中的一個點，並將此空間視為虛擬的能量場(Artificial Potential Field)。而傳統場效法為兩個向量場，分別為吸力場與斥力場，其中吸力場拉向目標，斥力場為推離障礙物，並以吸與斥的概念達到目的地。此方法可用於有許多未知障礙物的環境中，且使用上相當容易，適合於即時的路徑規劃。

就場效函數法的缺點：振盪現象(oscillation)或者是局部最小點(local minimum point)而言，已有專家學者討論，如[9, 10]做法為重新定義場效法函數來解決局部最小點問題，[11, 12]分別利用模擬退火法(simulated annealing)與基因演算法(genetic algorithm)來避開局部最小點及振盪問題。

但實際場效法應用於路徑規畫時，往往不是最佳路線，如[13-15]分別將場效法結合基因演算法、距離轉換法(Distance Transform)與 Voronoi diagram 順利避開局部最小值並優化場效法路線。

但上述研究討論都是於未知環境中的模擬，且都需要大量的資料與演算時間。如若能將室內設計整合於場效法中，便可改善原本可能發生的困難，並且減少演算過程不必要時間。故本研究中，將以場效法做為循跡規畫為基礎，並利用電子地圖的已知資訊結合迪傑斯特拉法(Dijkstra)，優化場效法在閃避障礙物並抵達目的地之最佳的路徑。

2. 場效法與迪傑斯特拉法之演算法

2.1 傳統場效法

本研究以場效法結合迪傑斯特拉法來作為機器人的路徑規劃與避障，利用場效法來做路徑規劃與避障有下述幾個優點：(1)即時避障方面相當迅速，設計上也較簡易(2)不需事先了解障礙物的數量與位置(3)不需建立環境地圖，但此方法也有幾個缺點如局部最小值(Local Minimum)問題，一般有兩個解決方向：(1)重新定義場效函數，使虛擬的能量場減少局部最小值

點(2)利用一些特別判斷的方法,使機器人能脫離局部最小值點。

為了使機器人可以在移動時避開障礙物,並且順利到達目標,將虛擬的能量場 $U(q)$ 定義為兩向量場之和,兩向量場分別為拉向目標的吸力場與推離障礙物的斥力場,即

$$U(q) = U_{att}(q) + U_{rep}(q) \quad (1)$$

其中 q 為機器人所在座標 (x,y) , U_{att} 為吸力場, U_{rep} 為斥力場。

2.1.1 吸力場

吸力場函數 U_{att} 定義為一個拋物線函數

$$U_{att}(q) = k\rho_{goal}^2(q) \quad (2)$$

其中 k 為大於零的常數, $\rho_{goal}(q)$ 為歐幾里得距離 (Euclidean Distance) $\|q - q_{goal}\|$, 並以式(2)可了解當與目標距離越大時, $U_{att}(q)$ 所產生的值也越大,距離逐漸縮小時,所產生的值也越小。當到達目標時, $U_{att}(q)$ 也就為零。並可由式(2)可計算出吸力場所產生的力 $\vec{F}_{att}(q)$ 為:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{att}(q) &= -\vec{\nabla}U_{att}(q) \\ &= \frac{\partial U_{att}(q)}{\partial(q)} \\ &= -k\rho_{goal}(q) \\ &= -k(q - q_{goal}) \end{aligned} \quad (3)$$

由式(3)可了解此吸力場函數所受的吸力 $\vec{F}_{att}(q)$ 與全向平台座標呈線性關係,但當 $\rho_{goal}(q) \rightarrow \infty$ 時, $\vec{F}_{att}(q)$ 會產生一個無窮大的力,為了避免此現象發生,將 $\vec{F}_{att}(q)$ 設定一個門檻值,限制吸力場的最大上限。

2.1.2 斥力場

斥力場函數 U_{rep} 為一個拋物線函數

$$U_{rep}(q) = \begin{cases} \frac{1}{2}h\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 & \text{if } \rho(q) \leq \rho_0 \\ 0 & \text{if } \rho(q) > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中 ρ_0 為障礙物影響全向平台的有效距離, $\rho(q)$ 為障礙物與機器人間最短距離 $\|q - q_{obs}\|$, 而在斥力場中所受的力 $\vec{F}_{rep}(q)$ 如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \vec{F}_{rep}(q) &= -\vec{\nabla}U_{rep}(q) \\ &= \frac{\partial U_{rep}(q)}{\partial(q)} \\ &= \begin{cases} h\left(\frac{1}{\rho(q)} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{1}{\rho^2(q)}\vec{\nabla}\rho(q) & \text{if } \rho \leq 0 \\ 0 & \text{if } \rho > 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

在空間運動中,會遇到許多不同的障礙物,故將斥力場函數改寫如下:

$$\vec{F}_{rep}(q) = \sum_i \vec{F}_{obssum}(q) \quad (2-6)$$

2.2 改良型場效法

當用傳統場效法行進時,如有遇凹形障礙物或較複雜的環境時,是利用吸力與斥力的向量的和來判斷時,常會使機器人容易陷入局部最小值、振盪或無窮迴圈等情況,進而無法到達目的地,此為傳統場效法的困境情況(Trap-State)。故本研究參考[16]之方法,新增一模糊資料庫,來解決這些特殊情況。

2.2.1 判斷機器人是否陷入 Trap-State

假設吸力場為 $\vec{F}_{att}(q)$ 與斥力場為 $\vec{F}_{rep}(q)$, 並定義兩向量夾角為 θ_i , 當兩向量的夾角超過 90° 時,就有機會陷入 Trap-State, 如圖 1 所示, 當機器人行走至平行或凹形障礙物後, 會使得 $\theta_i \geq 90^\circ$ 。

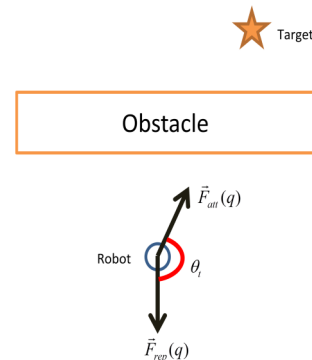


圖 1 吸力場與斥力場夾角示意圖

透過向量內積公式(7), 可計算出 θ_i 角度, 如式(8)。

$$a \cdot b = |a||b| \cos \theta \quad (7)$$

$$\vec{F}_{att} \cdot \vec{F}_{rep} = |\vec{F}_{att}||\vec{F}_{rep}| \cos \theta_r$$

$$\Rightarrow \cos \theta_t = \frac{\vec{F}_{att} \cdot \vec{F}_{rep}}{|\vec{F}_{att}| |\vec{F}_{rep}|} = \frac{\vec{F}_{att}(x) \cdot \vec{F}_{rep}(x) + \vec{F}_{att}(y) \cdot \vec{F}_{rep}(y)}{|\vec{F}_{att}| |\vec{F}_{rep}|} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \theta_t = \cos^{-1} \left(\frac{\vec{F}_{att}(x) \cdot \vec{F}_{rep}(x) + \vec{F}_{att}(y) \cdot \vec{F}_{rep}(y)}{|\vec{F}_{att}| |\vec{F}_{rep}|} \right)$$

2.2.2 沿牆法的移動方式

當判斷 $\theta_t \geq 90^\circ$ 後，機器人便採沿牆法移動。沿牆法第一步是將吸力 $\vec{F}_{att}(q)$ 忽略，並將斥力 $\vec{F}_{rep}(q)$ 順時針旋轉 90° 得到向量 \vec{F}_{cw} 、逆時針旋轉 90° 得到向量 \vec{F}_{ccw} ，最後判斷機器人慣性向量 \vec{F}_i 與兩個旋轉向量 \vec{F}_{cw} 、 \vec{F}_{ccw} 之間的 \vec{F}_{cw} 、 \vec{F}_{ccw} ，並以角度較小的旋轉向量為下一步的移動向量。

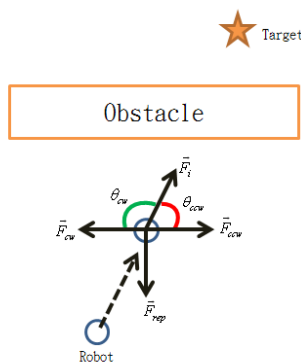


圖 2 沿牆法判斷示意圖

此外，當機器人進入較深的凹形障礙環境底部區域時， $\theta_t \geq 90^\circ$ 機器人使用沿牆法移動，但機器人到達較淺且較旁邊的區域時，會造成 $\theta_t < 90^\circ$ ，此時機器人尚未脫離凹形障礙環境，若切換成場效法移動時，將使機器人又回到凹形障礙環境底部區域，陷入無限迴圈。

故從沿牆法切換成場效法時，會先判斷合力向量與慣性向量之間的夾角 θ_n 是否 $\geq 90^\circ$ ，當 $\theta_n \geq 90^\circ$ 時，即使 $\theta_t \geq 90^\circ$ ，機器人也不會從沿牆法轉成場效法移動。

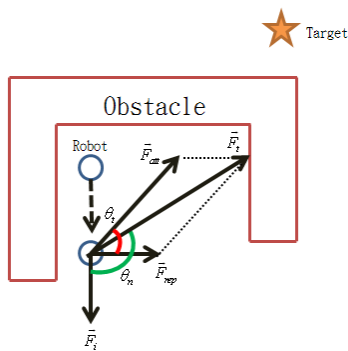


圖 3 沿牆法凹型障礙環境判斷示意圖

並將上述演算法整理成式(9)，其中 p_1 、 p_2 、 p_3 與移

動策略之關係如表 1。

$$\vec{F}_t = p_1 * \vec{F}_{att} + rotate(p_2 * 90^\circ, \vec{F}_{rep}) + p_3 * \vec{F}_{rep}$$

$$= p_1 * \vec{F}_{att} + p_2 * \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} * \vec{F}_{rep} + p_3 * \vec{F}_{rep} \quad (9)$$

表 1 改良型場效法模糊資料庫

	場效法	沿牆法 (\vec{F}_{cw} 為移動向量)	沿牆法 (\vec{F}_{ccw} 為移動向量)
$p1$	1		0
$p2$	0	1	-1
$p3$	1		0

2.3 迪傑斯特拉法

迪傑斯特拉法必須先根據環境建立一路徑圖，如圖 4，並根據路徑圖給予每條路徑的權重，無法相通的路徑設置權重無限大，如表 2。

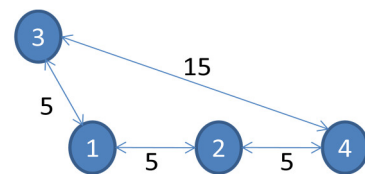


圖 4 Dijkstra 路徑規劃圖，藍圈為節點，藍線為路徑方向，黑色數字為路徑權重

表 2 路徑權重矩陣

節點	1	2	3	4
1	max	5	5	max
2	5	max	max	5
3	5	max	max	15
4	max	5	15	max

之後以任一節點為出發點，並在與其相連且尚未被選取的節點裡，選擇加入離出發點距離最短的節點，並且透過新增的節點更新到達其他節點的距離。如此重覆加入新節點，直到所有的節點都被加入為止，最後計算出從該節點出發到所有其他節點的最短路徑。

3. 路徑規劃及模擬結果

本研究模擬使用為 Borland C++ Builder (BCB) 來做為模擬平台，並將分出一些不同障礙物來模擬各種不同的狀況，圖 5-8 皆是從右下起點規劃路徑到左上終點，紅色範圍為障礙物，圖 5 為目標、起點、障礙物成一直線時之模擬情況，當機台碰觸到障礙物，便會將原本斥力旋轉 90° 後加在機台上，以避開障礙物。此種情況相同於一字型與凹型障礙物，如圖 6、

圖 7，並且在一複雜環境下，如圖 8，皆可藉由模糊資料庫的模式轉換順利抵達目的地。

從以上模擬實驗，可看出場效法能夠有效避開障礙物並抵達目的地，但是若在已知環境下，使用場效法做為避障及路徑規劃的方法時，場效法所規劃的路徑並不見得為最好路徑。如圖 9，使用場效法時會規劃出黑色路徑，但最佳的路徑應為藍色虛線路徑。若是紅線為已知障礙物時，應有方法可使場效法規劃出更佳路徑。

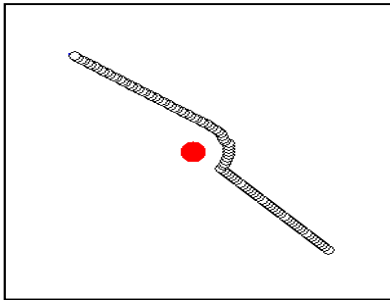


圖 5 障礙物在目標與起點之間之模擬

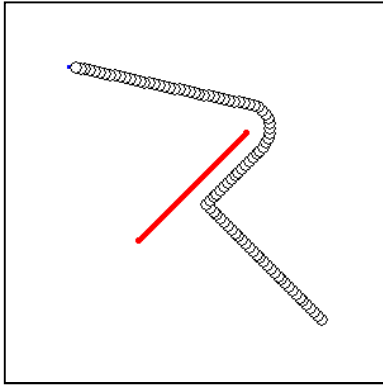


圖 6 一字型障礙物之模擬

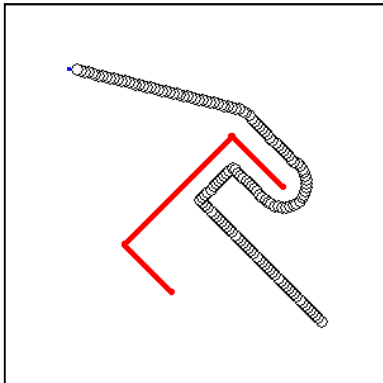


圖 7 凹型障礙物之模擬

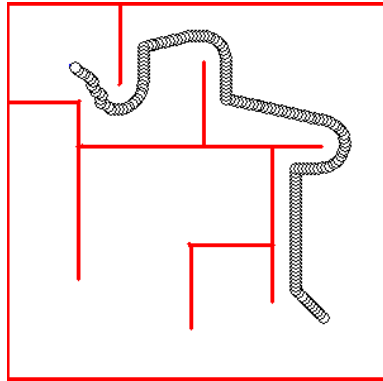


圖 8 複雜環境下之模擬

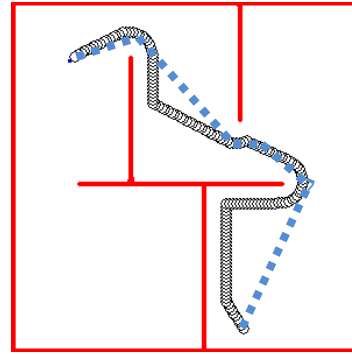


圖 9 場效法路徑圖

為解決此現象，須先將已知電子地圖匯出，如圖 10，並在電子地圖中規劃路徑中間點(綠色點)，之後使用場效法從起點(右下藍點)經過規劃的中間點至目的地(左上藍點)，如圖 11。

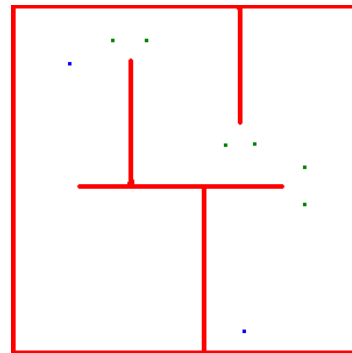


圖 10 電子地圖

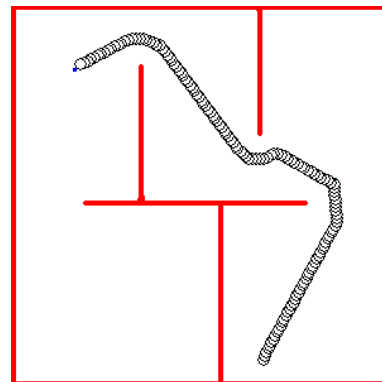


圖 11 改良後路徑圖

由圖 9 和圖 11 可得知，經由在已知的電子地圖中加入路徑中間點時，確實能直接改善場效法的路徑，進而演算出最佳的路徑。

接著根據台灣科技大學的國際大樓 9 樓場所繪製電子地圖如圖 12。並在圖 12 中加入 9 個中間點位置，並根據所指定的路徑如圖 13，並設置各個節點至相鄰節點的路徑權重，而路徑權重如表 3。並可以使用迪傑斯特拉法，算出起點與終點間之最短路徑。

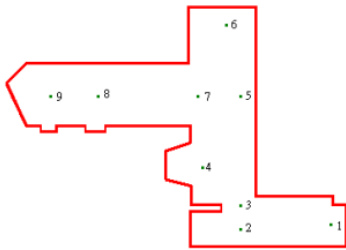


圖 12 國際大樓電子地圖

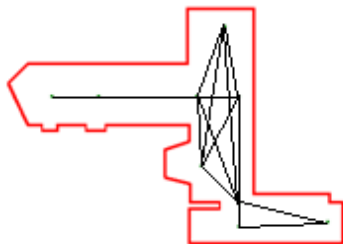


圖 13 國際大樓路徑圖

表 3 路徑權重矩陣

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Inf	95.13	97.08	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
2	95.13	Inf	25	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf
3	97.08	25	Inf	56.57	115	190.59	123.49	Inf	Inf
4	Inf	Inf	56.57	Inf	85	152.07	75.17	Inf	Inf
5	Inf	Inf	115	85	Inf	76.49	45	Inf	Inf
6	Inf	Inf	190.59	152.07	76.49	Inf	80.78	Inf	Inf
7	Inf	Inf	123.49	75.17	45	80.78	Inf	105	Inf
8	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	105	Inf	45
9	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	Inf	45	Inf

為了對照單獨使用場效法與迪傑斯特拉法結合場效法改善結果，同樣以相同的環境地圖來模擬。而單獨使用場效法模擬結果，可看出當從節點 1 至節點 9 時，場效法可完全閃避障礙物並抵達目的地，但是所走的路徑為一冗長路徑；另外迪傑斯特拉法結合場效法改

善結果如圖 15。並對照圖 14 與圖 15，由兩張圖可知兩者皆可完成同樣任務，但結合迪傑斯特拉法後可得到較佳的路徑。

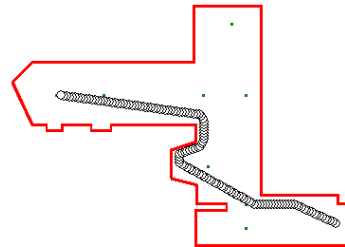


圖 14 使用場效法之路徑圖

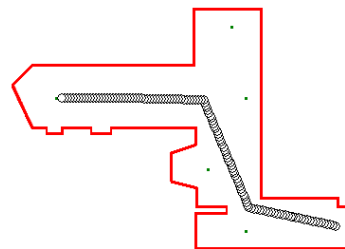


圖 15 使用場效法結合迪傑斯特拉法之路徑圖

4. 結論

本研究主要為在已知環境中使用場效法達到避障、規畫路徑並抵達目標。並在模擬過程中，證實場效法能夠有效避開障礙物並抵達目的地，且當平台陷於困境情況時，依然可順利繞出並抵達目的地，並且將場效法結合迪傑斯特拉法融入已知環境地圖中，使得改良後的場效法所走之路徑為最佳路徑。並於模擬實驗中，將台灣科技大學的國際大樓 9 樓場所繪製成電子地圖，規畫數個路徑中間點，並設置起點與終點，使機台在使用場效法時，可以避開已知障礙物並以最短的路徑行進。

5. 文獻探討

1. T. Bailey and H. Durrant-Whyte, "Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part I The Essential Algorithms," Robotics and Automation Magazine, pp. 99-110, June, 2006.
2. T. Bailey and H. Durrant-Whyte, "Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM): Part II State of the Art," Robotics and Automation Magazine, pp. 108-117, September, 2006.
3. J. Bird, "Indoor Navigation with Foot-Mounted

- Strapdown Inertial Navigation and Magnetic Sensors,* IEEE Wireless Communications, April, 2011.
4. H.S. Ahn and W. Yu, “*Environmental-Adaptive RSSI-Based Indoor Localization,*” IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, vol. 6, no. 4, October, 2009.
 5. A. M. Santana and A. A. D. Medeiros, “*A Line-Based Approach to Slam Using Monocular Vision,*” IEEE Latin America Transactions, vol. 9, no. 3, June, 2011
 6. Brian Williams, Georg Klein and Ian Reid, “*Automatic Relocalization and Loop Closing for Real-Time Monocular SLAM,*” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 33, no. 9, SEPTEMBER, 2011.
 7. F. Mizoguchi, H. Nishiyama, H. Ohwada, H. Hiraishi, “*Smart office robot collaboration based on multi-agent programming,*” Artificial Intelligence, vol. 114, pp. 57-94, October, 1999.
 8. Helge Hüttenrauch, Kerstin Severinson-Eklundh, “*Fetch-and-carry with CERO: Observations from a long-term user study with a service robot,*” IPLab, Nada, KTH, S-100 44 STOCKHOLM, Sweden, June, 2002.
 9. S. S. Ge, and Y. J. Cui, “*Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method,*” Autonomous Robots, vol. 13, no. 3, pp. 207-222, 2002.
 10. S. K. Pradhan, D. R. Parhi, A. K. Panda et al., “*Potential field method to navigate several mobile robots,*” Applied Intelligence, vol. 25, no. 3, pp. 321-333, 2006.
 11. P. M. Gyu, J. J. Hyun, and M. C. Lee, “*Obstacle avoidance for mobile Robots using artificial potential field approach with simulated annealing,*” Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics, vol. 3, pp. 1530-1535, 2001.
 12. P. Vadakkepat, T. C. Kay, and M. L. Wa “*Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path,*” Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, vol. 1, pp. 256-263, 2000.
 13. Yanping Liu and Kamal K. Bharadwaj, “*A Hybrid Artificial Potential Field:Genetic Algorithm Approach to Mobile Robot Path Planning in Dynamic Environments,*” Computer Science and Convergence Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 114, Part 1, pp. 325-333, 2012
 14. Lim Chee Wangt, Lim Ser Yongt and Marcelo H. Ang Jr.t, “*Hybrid of Global Path Planning and Local Navigation implemented on a Mobile Robot in Indoor Environment,*” IEEE International Symposium on Intelligeni Control, October, 2002.
 15. Ya-Chun Chang, Yoshio Yamamoto, “*On-line path planning strategy integrated with collision and dead-lock avoidance schemes for wheeled mobile robot in indoor environments,*” Industrial Robot: An International Journal, Vol. 35 Iss: 5, pp. 421-434, 2008.
 16. 吳佳儒(2007), 智慧型看護與居家照顧機器人系統之設計與研製—子計畫一：可全方位運動之服務機器人的設計、研製與控制(3/3), 行政院國家科學委員會專題研究計畫, 國立雲林科技大學電機工程系暨研究所, 雲林。

Method to Improve Potential Field Method for Robot Obstacle Avoidance

Liang-kuang Chen¹、Mao-Yuan Hsiao²

¹Department of Mechanical Engineering
National Taiwan University of Science and
Technology(Associate Professor)

²Department of Mechanical Engineering
National Taiwan University of Science and
Technology(Student)

²E-mail: M10003417@mail.ntust.edu.tw

Abstract

The main goal of robot path planning is how to avoid obstacle and reach to the destination. The common method is to use the Potential Field Method (PFM). But in some certain situations, it is not the best path by using PFM in path planning. If we can combine the known electronic map with PFM, we could avoid some troubled situation and improve the original path. This study combines PFM with Dijkstra Method (DM). We plan several middle points on known electronic map and then use DM to find the shortest path between starting point and destination. Finally, use PFM to follow the path points Calculated by DM. We verify the feasibility by computer simulation.

Keywords : Path Planning, Potential Field Method (PFM), Dijkstra Method (DM)