

國立臺灣師範大學應用電子科技學系

碩士論文

指導教授：許陳鑑 博士

使用 PSO 調整之增強型 ICP 演算法
於未知環境地圖之建立

Map Building of Unknown Environment Using PSO-Tuned Enhanced
Iterative Closest Point Algorithm



研究生：張華恩 撰

中華民國 102 年 7 月

使用 PSO 調整之增強型 ICP 演算法於 未知環境地圖之建立

學生：張華恩

指導教授：許陳鑑 博士

國立臺灣師範大學應用電子科技學系碩士班

摘 要

本論文使用 Pioneer 3-DX 兩輪自走車搭載一台 LMS-100 雷射測距儀做未知環境的地圖建置，主要使用 ICP 演算法將每一筆雷射測距儀的掃描資訊疊合，但由於傳統 ICP 演算法本身容易受到雜訊與離散點影響，造成配對到不恰當的配對點，產生對齊有誤差，而在雷射掃描儀的連續掃描下，誤差的累積越來越多，導致整體的環境地圖對齊結果並不理想，故本論文提出使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法來克服其問題，先使用 PSO 演算法將要對齊的兩集合做初步的對齊，避免兩集合落差太大產生區域最佳解，接著使用部分全域的地圖當作參考資訊，搭配篩選重疊資訊模組、權重模組及參考地圖間格模組，成為增強型 ICP 演算法，此演算法不但可以克服雜訊與離散點影響，還可以降低配對到不恰當的配對點，增加對齊效果，降低累積誤差，以獲得更佳的未知環境地圖。

關鍵字：迭代最近點、粒子群聚最佳化、地圖建立

Map Building of Unknown Environment Using PSO-Tuned Enhanced Iterative Closest Point Algorithm

Student : Hua-En Chang

Advisor : Dr. Chen-Chien Hsu

Department of Applied Electronics Technology
National Taiwan Normal University

ABSTRACT

This paper proposes a PSO-tuned enhanced iterative closest point algorithm (ICP) to build maps for an unknown environment using a Pioneer 3-DX wheeled mobile robot with a laser measure scanner (LMS-100). The proposed algorithm first aligns each scanned information by the ICP algorithm. Because traditional ICP algorithms are easily affected by noise and outliers, false matching points and alignment errors are therefore inevitable. As a result, there are more and more errors accumulated as the scanning process by the laser scanner continues. Therefore, this paper proposes the use of Particle Swarm Optimization (PSO) to work with the Enhanced-ICP in order to effectively filter out outliers and avoid false matching points during the map building process, where PSO is used to align two data sets to avoid huge transformation that causes local optima. Then, we use part of global map as the reference data set with overlapping points for subsequent data matching. The proposed algorithm not only improves outlier and noise problem but also reduces false matching points so that it has better alignment and smaller accumulated errors.

Key word : Iterative Closest Point; Particle swarm optimization; map building

誌 謝

時間過得好快，短短兩年的研究生生活很快就過去了，很開心可以加入演化機器人實驗室這個大家庭，使得單純的演算法加入機器人導航領域靈活運用，使得單一指令的機器人變成智慧型控制，讓機器人擁有自適應的能力，整個有趣極了，很感謝指導老師許陳鑑教授，在這兩年的指導下，培養了學生自我獨立思考，以及解決問題的能力，也給予學生相當大的發揮空間，發揮學生的創意，並提供大量且完善的研究資源與設備供學生們使用，使得大家不用擔心實驗設備不足的問題，同時也謝謝實驗室的學長、同學、學弟妹們，謝謝映宇學長熱心指導我研究上的問題，謝謝書漢學長、國棠學長、世勛學長及宗翰學長，讓我在碩一的時候生活多采多姿，懂得研究生除了研究外，玩樂也很重要，謝謝誠愷、元君、永青陪伴著我這兩年的碩士生活，一起討論課業、運動、出去踏青，使我不會因為研究繁重而忘記運動，謝謝家瑞、奕君、如瑜，使得實驗室增加了不少的歡樂，謝謝家瑜、廣億、芷瑄、駿逸、彥承，跟著你們四位大學生互動真的讓我覺得我依然跟你們一樣年輕，謝謝騰緯、大偉、竣傑讓我在生活中，多學到一些非本領域的專業知識，以及教玩桌上遊戲，最後謝謝大家對華恩這兩年來的厚愛，華恩相當感激各位學長朋友的互助與休閒，我想我會很懷念這兩年的生活的。

目 錄

第一章 緒論	1
1.1. 研究背景與動機	1
1.2. 研究目的	2
1.3. 研究問題與方法	2
1.4. 論文結構	4
第二章 文獻探討	5
2.1. 機器人建立地圖之探討	5
2.2. 迭代最近點演算法	5
2.3. 標準 ICP 演算法	12
2.4. 加權式 ICP	14
2.5. 粒子群聚演算法(PSO)	15
第三章 增強型 ICP 演算法	18
3.1. 全域地圖資訊	18
3.2. 尋找重疊的資訊點	20
3.3. 全域地圖門檻值	24
3.4. 加權增強型 ICP	29
3.5. 增強型 ICP 建立地圖	30
第四章 PSO 調整增強型 ICP 演算法	33
4.1. PSO 輔助對齊	33
4.2. 使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法建立環境地圖	38
第五章 實驗結果	40
5.1. 實驗設備與環境	40
5.2. 環境地圖建立結果與分析	48
5.3. 建立環境地圖	64
第六章 結 論	69
參 考 文 獻	70
自 傳	73
學 術 成 就	74

表目錄

表 5-1	Pioneer 3-DX 規格表	41
表 5-2	LMS-100 規格	41
表 5-3	實驗一平均旋轉位移表	53
表 5-4	實驗二平均旋轉位移表	56
表 5-5	實驗三平均旋轉位移表	60
表 5-6	實驗四平均旋轉位移比較表	64



圖目錄

圖 2-1	ICP 演算法流程.....	7
圖 2-2	ICP 演算法對齊示意圖.....	12
圖 2-3	標準 ICP 演算法.....	13
圖 2-4	原始 ICP 與標準 ICP 尋找匹配點的不同處.....	14
圖 2-5	PSO 演算法流程圖.....	17
圖 3-1	雷射掃描示意圖.....	19
圖 3-2	只針對資料密集的点做對齊.....	20
圖 3-3	機器人可視範圍示意圖.....	22
圖 3-4	非重疊資訊示意圖.....	22
圖 3-5	橘色線將資訊分成兩部分.....	23
圖 3-6	篩選重疊資訊點流程圖.....	24
圖 3-7	機器人初始狀態與環境.....	25
圖 3-8	機器人剛開始掃描的資訊狀況.....	26
圖 3-9	機器人移動到此位置方向.....	26
圖 3-10	機器人 reference data 中存放的資訊.....	27
圖 3-11	紅色為使用篩選機制所找到的資訊.....	27
圖 3-12	機器人移動到此位置與方向.....	28
圖 3-13	紅色為使用篩選機制所找到的資訊.....	28
圖 3-14	紅色為改善過後機器人所篩選出來的重疊資訊.....	29
圖 3-15	增強型 ICP 演算法建立地圖流程圖.....	32
圖 4-1	兩集合成功對齊示意圖.....	34
圖 4-2	兩集合對其失敗示意圖.....	35
圖 4-3	兩集合初始位置圖.....	36
圖 4-4	PSO 初始化後各個粒子的旋轉位移示意圖.....	37
圖 4-5	PSO 演化數代後每個粒子的旋轉位移示意圖.....	37
圖 4-6	使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法建立環境地圖流程圖.....	39
圖 5-1	Pioneer 3-DX 自走車.....	40
圖 5-2	LMS-100 雷射區域掃描儀.....	41
圖 5-3	雷射測距儀掃描示意圖[27].....	42
圖 5-4	實驗環境圖.....	47
圖 5-5	理想環境地圖與實際場景拍攝位置對照圖.....	48
圖 5-6	360° 圓規圖.....	49
圖 5-7	實際地圖.....	50
圖 5-8	實驗一地圖對齊結果.....	52
圖 5-9	實驗二平均地圖對齊結果.....	56
圖 5-10	實驗三地圖對齊結果.....	60

圖 5-11	實驗四地圖對齊結果.....	63
圖 5-12	科技學院五樓理想環境地圖.....	65
圖 5-13	科技學院五樓環境地圖建立比較.....	67



第一章

第九章 緒論

1.1. 研究背景與動機

在早期傳統產業，機器人常用於工廠生產線的自動化控制，幫助製造業提升生產力與生產品質，或是運用在焊接、搬運或不利人類健康的惡劣環境代替人類工作，而隨著科技的創新與產業結構變化，漸漸使得機器人慢慢進入人類的生活中，由過去制式化的機器人逐漸演變成服務人類或是在危險地區探索的機器人，即服務型機器人與探索型機器人。伴隨著電子、通訊、控制、資訊軟體等技術的進步，使得智慧型機器人能深入更多環境，運用領域越來越多元，附加功能越來越豐富，如 LEGO 教育型機器人[1]以及由 iRobot 公司[2]所推出以室內清潔為主的家用型清潔機器人，以複雜多樣的型態存在人類生活中，應付各種不同環境下的種種任務。

若想要機器人在技術上有關鍵突破的成長，勢必在機器人自主性方面加強，所謂機器人的自主性是指機器人不需要人類的控制，即可自行面對多種複雜的環境狀況下做出適當的反應判斷能力，增加機器人在不同環境下的適應性、反應性與靈活性，對於機器人在不同的用途上，要加強的自主性功能也有所不同，以居家型服務機器人來說，需要解決的三個核心問題，分別是「我在哪?」、「我要去哪裡?」以及「我要怎麼到達那裡?」，為了克服以上三個核心問題，則必須增強機器人的導航能力(Navigation)。導航可分為四個部分，分別是地圖建立(Map Building)、定位(Location)、路徑規劃(Path Planning)、及避障(Obstacle Avoidance)，這些能力的提升，才使得機器人在於充滿不確定性的真實環境上得到完全的自主

導航，尤其是地圖的建立，建立出越精準的地圖，越能確保後續的定位、路徑規劃及避障不易出問題，使機器人可以安全地在環境中移動。

1.2. 研究目的

移動式機器人常被運用在探勘未知環境或是對於人類有風險性的危險環境中，代替人類執行任務，由於地圖的建立是讓機器人認識環境的基本能力，擁有優秀的建立地圖能力，明確標示出環境中的障礙物以及可行走區域，才可以確保機器人在行徑過程中避免不必要的碰撞，進而完成任務。

機器人建立環境地圖必須搭配感測器的使用，再透過演算法將環境地圖建立出來，常見的感測器有超音波、雷射測距儀、紅外線及立體視覺攝影機，超音波最大優點為價格便宜且操作容易[3]，但其缺點為因有多次反射的問題，導致距離準確度稍差，而紅外線的優點是價格便宜且反應速度快，但缺點是量測距離較短，也容易受到光線及溫度影響準確度，立體視覺攝影機優點為影像資料豐富及不錯的測距效果，但缺點是資料量過於龐大及影像扭曲的問題，雷射測距儀優點為高精準度，偵測角度大，其缺點是價格昂貴，由於雷射測距儀的高精準度可以明確的將環境資訊呈現出來，為了獲得高精準度的地圖，故本論文使用雷射測距儀偵測環境資訊，並將所得到的資訊搭配迭代最近點演算法(Iterative closest Point Algorithm)進行對齊，進而建立出一個完整的環境地圖。

1.3. 研究問題與方法

本論文主要是使用雷射測距儀偵測環境資訊，並透過由 Mckay[4]所提出的 Iterative closest Point Algorithm(簡稱 ICP 演算法)將每筆雷射掃描給疊合成一張完整的環境地圖。ICP 演算法是一個常被使用於 2D 與 3D 幾何圖形的對齊，其主要方法是尋找兩集合之間的配對點，並且運用這些配對點的關係計算兩集合之間的

幾何轉換，接著運用迭代的方式不斷的計算，直到兩集合之間的距離最小化，並獲得一個最佳的幾何轉換，但由於從雷射接收到的資訊中會有雜訊以及離散點，影響配對點的匹配，導致 ICP 演算法對齊不理想，為了解決這問題，近年來有許多改良的 ICP 演算法被提出來，如 Metric-based ICP(Mb-ICP)[5]、Biunique Correspondence ICP(BCICP)[6]以及 Trimmed ICP(TrICP)[7]，其中，MbICP[5]設計一個初始里程誤差的距離最小化的收斂方式，改善了旋轉誤差的問題，但對於落差太大的兩集合對齊會造成區域最佳解造成對齊錯誤，BCICP[6]是藉由改變匹配方式，讓參考集合與新資訊集合只會有一對一的匹配點，然而對於匹配錯誤的問題導致對齊歪斜，在雷射連續掃描下，累積誤差的問題會越來越明顯，TrICP[7]主要是針對匹配點的問題，給予不同的門檻值做地圖對齊，保留固定比例的配對點，但固定的門檻值對於不同的資訊結果不一，會讓地圖建立時產生不穩定的累積誤差，進而導致全部資訊疊合時發生歪斜，[8][9]則是使用全域的地圖當作參考，擁有較多的地圖資訊來融合每張局部的地圖，但會因為兩集合的非重疊區域影響，導致匹配到不恰當的對應點，而也有論文使用別的最佳化演算法搭配 ICP 演算法改善建立地圖的準確度，如 GA-ICP[10]使用了基因演算法搭配 ICP 演算法做地圖的建立，可以快速的將兩集合對齊，但該基因演算法使用二維編碼的方式定義染色體，並無法有效解決兩集合落差太大所產生對齊不佳的問題，進而使得地圖疊合效果較差。

為了解決離散點與匹配點的問題，本論文提出 PSO 調整增強型 ICP 演算法以解決上述兩大問題，首先使用 PSO 演算法對參考集合與新資訊點集合做初步的對齊，經過初步對齊後的兩集合，距離與旋轉相差變小，此舉可用來克服 ICP 演算法對於兩集合距離與旋轉相差太大所導致對齊不理想的問題，接著將剛初步對齊的兩集合使用增強型 ICP 再對齊一次，本文提出的增強型 ICP 可以有效避免兩集合配對到不恰當的配對點，並可將離散點所造成的影響降低，如此一來就可以

有效解決離散點與尋找合適匹配點的問題，進而增加機器人地圖建立的精準度。

1.4. 論文結構

本文共分為六個章節，其內容說明如下：

第一章 緒論：說明研究背景與動機、研究目的、與研究問題與方法以及介紹內容的章節組織還有研究步驟。

第二章 文獻探討：針對機器人建立環境地圖進行文獻回顧與相關研究探討，接著介紹常用於機器人建立環境地圖所使用的方法 ICP 演算法介紹以及其簡易的改良內容，最後介紹本文會使用到的 PSO 演算法。

第三章 增強型 ICP：在本章結中，將會對本文所提出的演算法做探討，並詳細介紹每一流程與方法其意義與目的，並在最後一節會說明使用增強型 ICP 做機器人環境地圖建立的流程圖。

第四章 PSO tuned 增強型 ICP：本章節中，將會介紹使用 PSO 演算法初步對齊的用意，並解釋加上 PSO 的好處，在最後一節說明使用 PSO tuned 增強型 ICP 的整體演算法流程並運用在機器人建立環境地圖增加精準度。

第五章 實驗結果與分析：介紹開發環境、實驗環境與使用設備介紹、並將機器人建立出來的環境結果呈現出來，並做分析與討論。

第六章 結論：對於本研究做總結，證實本論文所提出的演算法可有效改善 ICP 演算法的問題。

第十章 文獻探討

2.1. 機器人建立地圖之探討

機器人建立地圖之相關文獻大致上可分為已知環境地圖探索[11]-[14]、結構化未知環境探索[15]-[17]與未結構化未知環境探索[18]-[20]，所謂已知環境地圖探索是機器人已具備完整環境的幾何模型與地標資訊，事先在資料庫中建模，但不具備環境地圖資訊，因此機器人探索環境時，會經由感測器所接收到的環境資訊與資料庫中的存在的地圖模型做比對，估測機器人所在位置並作為導航依據，其定位的精準度對於比對的效果極為重要，而結構化未知環境探索則是假設機器人對環境並不具備任何的環境地圖資訊，但對於環境結構具有預備知識，需透過影像與各類感測器辨識結構元素，進而重新建立環境地圖，而未結構化未知環境探索則是假設機器人並不具備任何的環境資訊，必須搭載感測器主動偵測環境顯著特徵，並建立資訊做為後續探索環境與建立地圖之參考資訊。

2.2. 迭代最近點演算法

Besl 與 Mckay[4]於 1992 年所提出的迭代最近點演算法(Iterative Closest Point Algorithm, 簡稱 ICP 演算法)是目前最常被拿來使用做幾何相似度對齊的演算法，是一種可以用於各種不同資料型態的對齊演算法，可使用於點、線、平面、曲線或曲面等不同資料所構成的模型，其原理是尋找兩集合之間的對應點，並使用這對應關係找出兩集合間的幾何轉換矩陣，接著比較兩集合經過轉換後的誤差，經過不斷的重複運算，直到兩集合之間的距離為最短，達到疊合的效果。此結果包含了旋轉矩陣與平移矩陣，欲進行對齊的兩個資料點集合即可藉由 ICP 演算法所

計算出來的幾何轉換資訊進行處理，最後可以讓圖形達到對齊的目的。

在實際處理之前，使用者必須先將兩組要對齊的資訊模型做定義，定義 model shape 為對齊的基準模型資訊，另定義 data shape 為用來準備進行對準的模型，接著透過 ICP 演算法多次迭代後可以得到一個最佳的幾何轉換資訊，可將 data shape 對齊到 model shape 上，而 ICP 演算法基本的步驟主要可分為下列五步驟：

1. 設定資料格式與停止條件門檻
2. 尋找匹配點
3. 計算幾何轉換資訊
4. 更新 data shape 座標
5. 計算誤差值是否符合停止條件

圖 2-1 為 ICP 演算法計算流程，我們將逐一介紹 ICP 演算法五步驟的工作原理。

步驟一：設定資料格式與停止條件門檻

在開始計算 ICP 演算法前，必須先對 model shape 與 data shape 的資料格式進行設定，雖然 ICP 演算法可用在點、線段、平面、曲線及曲面等各種不同的幾何模式上，但其資料格式必須為點集合，如不是點集合，則必須先經過取樣處理，將資料型態化為點集合，才可以使用 ICP 演算法。

接著，使用者必須給定一個讓演算法可以停止的門檻值，當演算法在迭代完成時，會先與此門檻值作比較，如果兩資料集合之間的誤差值大於門檻值則必須重複處理步驟，進行下一次迭代。如果小於門檻值則表示已達到收斂門檻，ICP 演算法則會停止迭代。

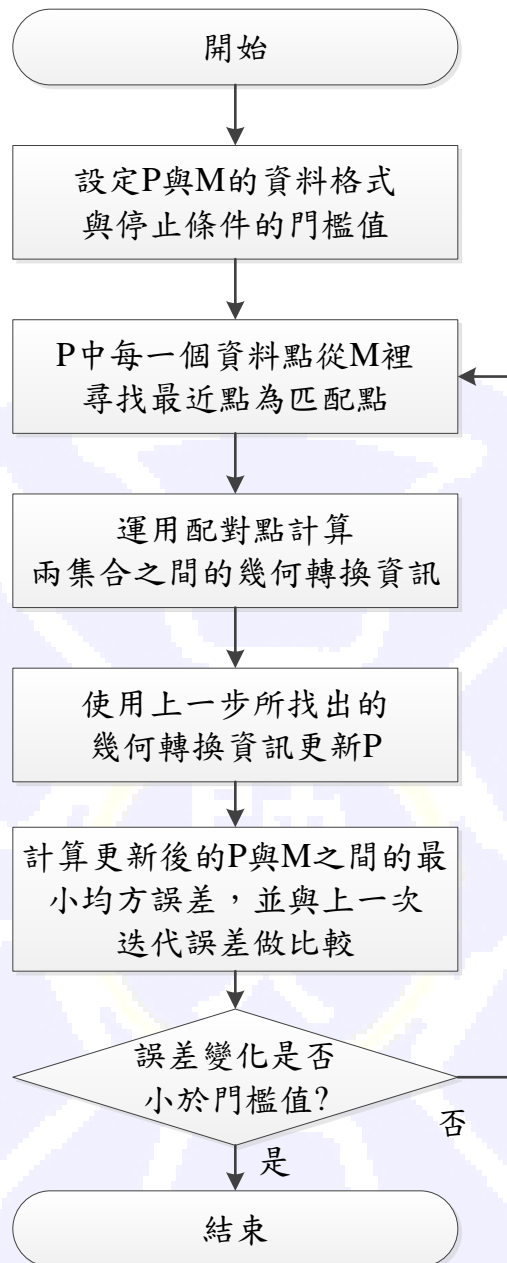


圖 2-1 ICP 演算法流程

步驟二：尋找匹配點

設定完資料格式與停止條件門檻後，接下來要尋找兩資料模型之間的對應關係，也就是找出 data shape 中每一個點在 model shape 中最適當的對應點，首先令 data shape 中的點為 p_i ，使得 $\mathbf{P} \triangleq \{p_i, i = 1 \sim N_p\}$ ，其中 N_p 為 data shape 的點數量，接著令在 model shape 中的點為 m_i ，使得 $\mathbf{M} \triangleq \{m_i, i = 1 \sim N_m\}$ ，而尋找匹配點的方

法則是使用兩點直線距離的方式搜尋，且定義 $\mathbf{X} \triangleq \{x_i, i = 1 \sim N_x\}$ 為在 \mathbf{M} 中所尋找到的對應點，如(2-1)所示，即可找出 data shape 每個點在 model shape 中所找到的匹配點配對關係，最後再將這些配對關係去計算幾何轉換資訊。

$$x_i = \arg \min_{m_j \in M} d(p_j, M) \quad (2-1)$$

步驟三：計算幾何轉換資訊

由於 ICP 演算法屬於剛體轉換(rigid body transformation)，包含了旋轉矩陣與平移矩陣，在上一節中我們透過計算距離的方式得到一組點與點之間的配對關係，而 ICP 演算法運用奇異值分解法(SVD)將配對關係用來計算 model shape 與 data shape 之間的幾何轉換資訊。

首先定義一單位四元數 $q_R = [q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3]^t$ 其中 $q_0 \geq 0$ ，且 $q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2 = 1$ ， 3×3 的旋轉矩陣可藉由單位旋轉四元數 \mathbf{R} 求得(2-2)

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 + q_2^2 - q_1^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 + q_3^2 - q_1^2 - q_2^2 \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

接著計算 \mathbf{X} 與 \mathbf{P} 的質心，透過(2-3)與(2-4)可分別計算出 \mathbf{X} 與 \mathbf{P} 的質心，其中 N_x 與 N_p 分別代表 \mathbf{X} 與 \mathbf{P} 的個數，但由於 \mathbf{X} 與 \mathbf{P} 的配對關係為一對一的配對，故 $N_x = N_p$ 。

$$u_x = \frac{1}{N_x} \sum_{i=1}^{N_x} x_i \quad (2-3)$$

$$u_p = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} p_i \quad (2-4)$$

接著運用(2-5)式計算 \mathbf{x} 與 \mathbf{p} 之間的交叉共變異矩陣(cross-covariance matrix)

Σ_{xp} :

$$\Sigma_{xp} = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} [(p_i - u_p)(x_i - u_x)^T] \quad (2-5)$$

定義一個 3×3 矩陣 $A_{ij} = (\Sigma_{xp} - \Sigma_{xp}^T)_{ij}$ ，接著再從 A_{ij} 矩陣取出一列向量 $\Delta = [A_{23} \quad A_{31} \quad A_{12}]^T$ ，接著運用 Δ 向量形成 4×4 的對稱矩陣 $Q(\Sigma_{xp})$ ，如(2-6)式所示

$$Q(\Sigma_{xp}) = \begin{bmatrix} tr(\Sigma_{xp}) & \Delta^T \\ \Delta & \Sigma_{xp} + \Sigma_{xp}^T - tr(\Sigma_{xp})I \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

其中 I 為 3×3 單位矩陣， $tr(\Sigma_{xp})$ 為的跡(trace)，而單位特徵向量 $q_R = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4]^T$ 所對應到 $Q(\Sigma_{xp})$ 的最大特徵值為最佳旋轉， q_T 為最佳平移 (2-7)。

$$q_T = u_m - \mathbf{R}(q_R)u_p \quad (2-7)$$

步驟四：更新 data shape 座標

經由步驟三所介紹的(2-6)與(2-7)獲得旋轉矩陣與平移向量後，即可計算出經過旋轉與平移後的 \mathbf{p}' (2-8)，並將此次更新過後的結果當作下一次疊代時，尋找對應關係的 data shape。

由此可知，ICP 演算法式不斷的尋找在第 n 次疊代後所更新的 data shape 與 model shape 之間尋找距離最近點的對應關係，進而縮小 data shape 與 model shape 之間的均方距離。

$$\mathbf{P}' = \mathbf{R}(q_r) p_i + q_t \quad (2-8)$$

步驟五：計算改善過後的最小平均距離 MSE

經過上個步驟更新了 data shape 的座標位置後，接下來要計算的就是兩模型之間的最小均方誤差(mean square error, MSE)，首先定義 $\mathbf{P}_k = \{p_{ik}\} = q_k(\mathbf{P}_0)$ 為經過 k 次迭代後的 data shape， $\mathbf{Y}_k = \{y_{ik}\}$ 為已收斂的 P_{ik} 在 model shape 所搜尋到的匹配點，則 MSE 為(2-9)式所示。

$$MSE = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} \|y_{ik} - p_{ik}\|^2 \quad (2-9)$$

經過(2-9)式得到該次迭代的 MSE 值後，並與上一次迭代的 MSE 值做比較，如果 MSE 值的變化量大於門檻值，則表示 ICP 尚未結束，必須回到第二步驟開始繼續計算下去，如果 MSE 值的變化小於門檻值，則表示 ICP 已達到收斂條件，停止迭代，而此時最後一次迭代所獲得的 data shape 結果也在經過幾何轉換後與 model shape 疊合在一起。

下圖 2-2 為 ICP 演算法對齊示意圖，假設有兩個點集合，如圖 2-2(a)紅色為 model shape，綠色為 data shape，設定完門檻值後，接著如圖 2-2(b)開始找最近點為匹配點，接著計算幾何轉換資訊與更新座標如圖 2-2(c)，最後計算兩集合的最小均方誤差，如果未達門檻值，則重複以上步驟直到如圖 2-2(d)兩集合疊合為止。

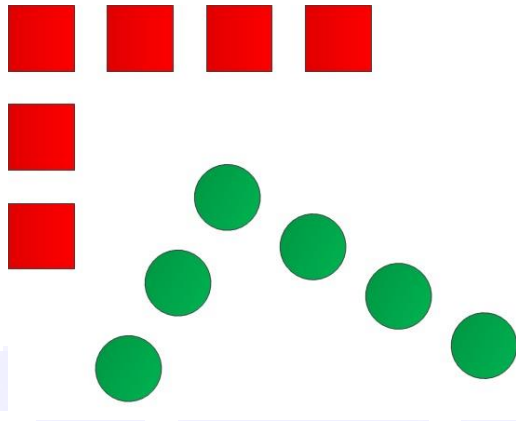


圖 2-2(a)兩集合初始相對位置

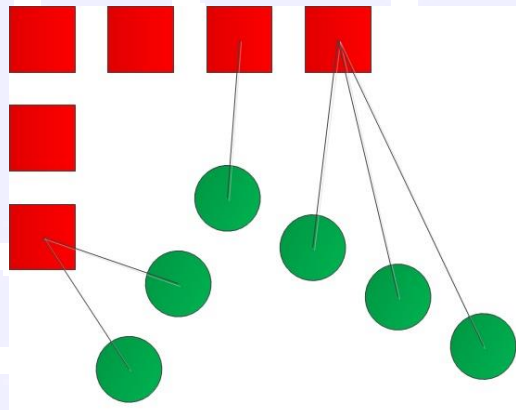


圖 2-2(b)尋找匹配點

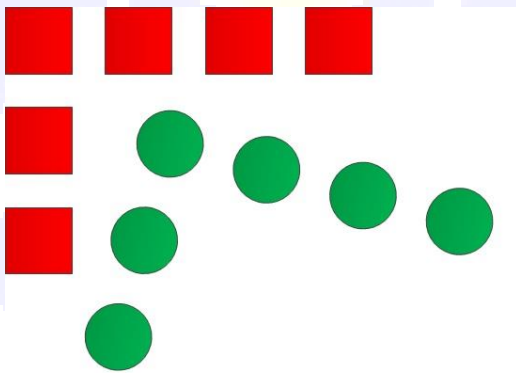


圖 2-2(c)計算幾何轉換資訊並更新座標

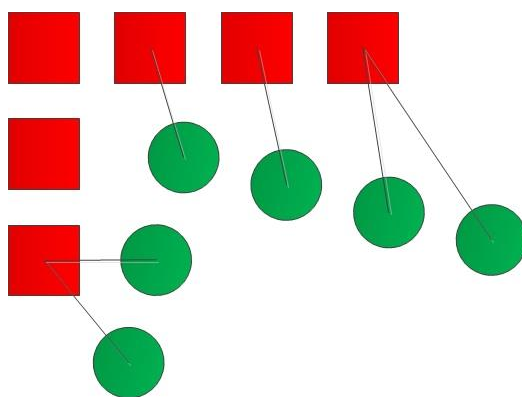


圖 2-2(d)再尋找一次匹配點

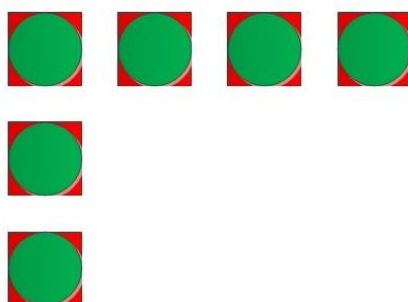


圖 2-2(e)完成對齊

圖 2-2 ICP 演算法對齊示意圖

2.3. 標準 ICP 演算法

ICP 演算法最大的優點在於，可以用來處理不同型態的幾何對齊，如：點、直線、平面、曲線、曲面等，且不需要經過物體表面特徵擷取的過程，直接求點與點之間的最短距離，然而 ICP 演算本身也有缺點，在尋找匹配點的時候，可能會因為離散點資訊或是雜訊點導致 ICP 演算法尋找到不恰當的匹配點，導致兩集合對齊效果不佳，而 Segal、Haehnal 及 Thrun[21] 和 Zhang[22]文中提出一標準 ICP 演算法，建議在尋找匹配點時，設置一個尋找匹配點的門檻值，如果 data shape 在 model shape 中所搜尋到的配對點距離大於門檻值，則表示 data shape 該點在該次迭代沒有成功匹配到恰當的配對點，篩選方式如(2-10)式，圖 2-3 為增加匹配點門檻值的細部計算流程，其原理是將配對距離過大者認為是配對錯誤而不去計算，

進而大幅降低離散點與雜訊點所造成兩集合對齊不理想的問題。

$$w_i = \begin{cases} 1, & d(p_i, m_i) \leq \text{threshold} \\ 0, & d(p_i, m_i) > \text{threshold} \end{cases} \quad (2-10)$$

```

Model shape:  $\mathbf{M} = \{m_i\}$  , Data shape:  $\mathbf{P} = \{p_i\}$ 
M 集合的配對點集合:  $\mathbf{Y} = \{y_i\}$ , 幾何轉換矩陣:  $T$ 

1  while not converged do
2    for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
3       $y_i \leftarrow \text{FindClosestPointInM}(T \cdot p_i)$ 
4      if  $\|y_i - T \cdot p_i\| \leq \text{threshold}$  then
5         $w_i \leftarrow 1$ 
6      else
7         $w_i \leftarrow 0$ 
8      end
9    end
10    $T \leftarrow \arg \min_T \left\{ \sum_i w_i \cdot \|T \cdot p_i - y_i\|^2 \right\}$ 
11 end

```

圖 2-3 標準 ICP 演算法

圖 2-4 為篩選配對資訊的示意圖，圖 2-4(a)為原始 ICP 的尋找配對點的方式，在 data shape 中的每個點都會找到一個點當作配對點，但強制每個點都找到匹配點可能會造成配對到不理想的點，導致對齊效果不理想，而標準 ICP 加入配對點門檻值的作法，如圖 2-4(b)所示，將配對到的點，如果距離大於門檻值，則表示

不給予配對，這樣可以大幅降低配對到不理想的點，進而提高對齊的效果。

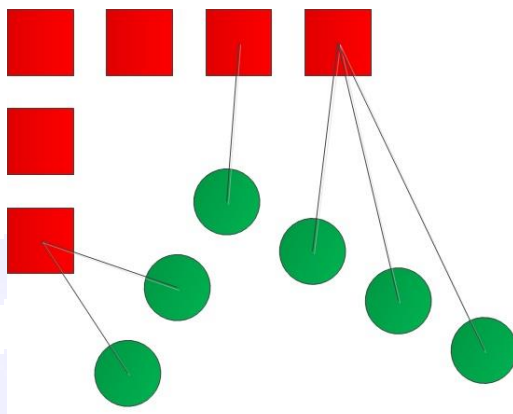


圖 2-4(a)原始 ICP 尋找匹配點方式

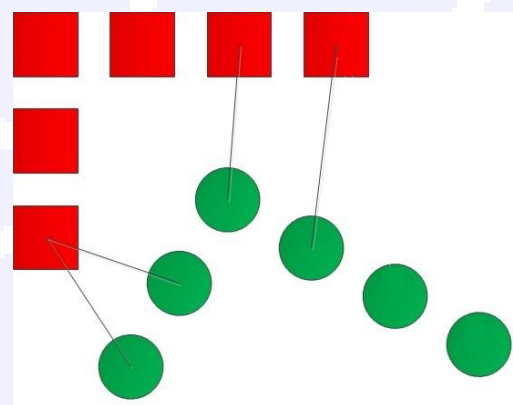


圖 2-4(b)標準 ICP 尋找匹配點方式

圖 2-4 原始 ICP 與標準 ICP 尋找匹配點的不同處

2.4. 加權式 ICP

自從 Mckay 提出 ICP 演算法後，後人為了使 ICP 演算法的對齊效果更加可靠強健，故 Godin[23]提出了加權式 ICP 演算法，透過給予每個即將對齊的集合點一個權重值，進而改善 ICP 演算法對齊結果，常見的權重有兩個，一個是常數權重，另一個如(2-11)式，如果兩集合之間所對應到的配對點距離越長，則所得到的權重越小，相對的兩集合之間對應到的配對點距離越短，則其權重值越高，經

過(2-11)式計算後，每個配對點所得到的權重值介於 0 到 1 之間。

$$w_i = 1 - \frac{Dist(p_i, x_i)}{Dist_{max}} \quad (2-11)$$

而權重主要使用的方法如下，定義 data shape $\mathbf{P} \triangleq \{p_i, i = 1 \sim N_p\}$ 與在 model shape 所找到的匹配點 $\mathbf{x} \triangleq \{x_i, i = 1 \sim N_x\}$ ，由於 data shape 與 model shape 配對關係為一對一的關係，故 $N_p = N_x$ ，此時定義 $\mathbf{W} \triangleq \{w_i, i = 1 \sim N_p\}$ 為一個非負數的權重陣列，表示每個配對關係都有一個權重值，最後將權重值帶入(2-12)式，使得權重值越高的對於 MSE 計算影響力較大，權重值越低的對於 MSE 計算影響力較小，完成在 ICP 演算法加上權重的步驟。

$$MSE = \frac{1}{N_p} \sum_{i=1}^{N_p} w_i \|x_{ik} - p_{ik}\|^2 \quad (2-12)$$

2.5. 粒子群聚演算法(PSO)

粒子群聚演算法(Particle Swarm Optimization, 簡稱 PSO)[24]，由 James Kennedy 跟 Russell Eberhart 於 1995 年所提出，是一種群體智慧的方法，起因是出於對鳥群或魚群的群聚互動特性所引發之社會行為的觀察，藉由群聚移動的模擬，發展出一種以族群為基礎之最佳化法，由於 PSO 的強健性與簡易性，近年來被廣泛使用在各種領域上，擁有運算簡單、執行快速、並列處理等優點。

在 PSO 中，每個最佳化的問題解都被想像成一隻鳥在解空間中飛行，也稱粒子，而每個粒子都有一個適應值函數判斷目前位置的好壞，且粒子擁有記憶性，能記得所搜尋到的最佳位置，其主要可分為五步驟，初始化粒子位置 $x_i(t)$ 與速度 $v_i(t)$ 、計算適應值 Fitness、找出 Pbest、找出 Gbest 及更新粒子位置與速度，首先

決定粒子數量以及決定演化次數，並使用隨機的方式給予每一個粒子初始位置與速度，接著將初始化過後的粒子一一帶入其適應方程式計算出適應值，以作為判斷每一個粒子的好壞，計算完適應值後，接著找出每個粒子在目前為止所找到的最佳解，而這個最佳解稱為 $Pbest$ ，下一步找出所有粒子中，目前為止所搜尋到的整體最佳解，此最佳解稱為 $Gbest$ ，最後將得到的 $Pbest$ 與 $Gbest$ 帶入(2-13)式更新粒子速度，(2-13)式中 w 為慣性權重因子， c_1 與 c_2 為加速度常數，建議值為 0.2~2， $rand$ 為一個介於 0 到 1 之間亂數， i 為粒子，接著再使用更新過後的粒子速度 $v_i(t+1)$ 帶入(2-14)式更新位置，如果還未達到終止條件，則重複以上步驟直到達到終止條件為止，圖 2-5 為 PSO 演算法的流程圖。

$$v_i(t+1) = w \times v_i(t) + c_1 \times rand \times (Pbest_i - x_i(t)) + c_2 \times rand \times (Gbest - x_i(t)) \quad (2-13)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (2-14)$$

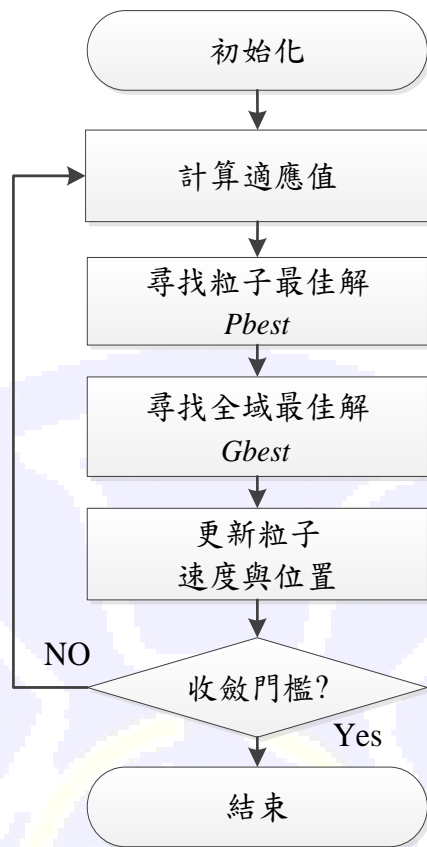


圖 2-5 PSO 演算法流程圖

第十一章 增強型 ICP 演算法

前一章我們介紹了原始 ICP 演算法、標準 ICP 演算法及增加權重的 ICP 演算法，由 Mckay 與 Bsel[4]所提出的原始 ICP 演算法，讓兩個集合可以對齊，但容易受到離散點資訊以及雜訊影響，造成匹配到不恰當的匹配點，導致整體對齊效果不理想，而[21][22]建議在選擇匹配點的步驟中，加入門檻值的方式，可以稍微降低配對到不恰當點的問題，而以機器人建圖來說，經過多張資訊疊合後，依然會因累積誤差導致最後對齊結果不理想，故我們會在本章節介紹我們提出的增強型-ICP，可有效解決離散點與雜訊點的影響，大幅降低累積誤差的問題，讓地圖建立的更加精準。

3.1. 全域地圖資訊

在機器人建立地圖時，機器人所接收到的地圖資訊會跟著機器人的不同位置而有些許差異，如圖 3-1 所示，因為雷射測距儀本身對於越遠的障礙物所掃描到的資料數量會較為稀疏，而距離越接近雷射測距儀本身的障礙物所掃描到的資料數量會越密集，由於這種現象，會導致使用標準 ICP 演算法做對齊的時如圖 3-2 結果，使得只針對資料較為密集的資訊做對齊，而資料較稀疏的資訊點，由於較為離散，可能在尋找匹配點時的門檻值時，所找到的配對點距離大於門檻值而不被採用，最後導致區域最佳解，而在雷射連續掃描下，會讓最後地圖解果不理想，為了改善這個問題，本論文採用了全域的點集合[25]為 model shape 與 data shape 做標準 ICP 演算法對齊。

首先定義全域 model shape 為 S_r ，全域點集合意思是將每次對齊好的資訊存入，使得 S_r 資訊越來越多，增加參考依據，接著將每次對齊過後的新掃描資訊存

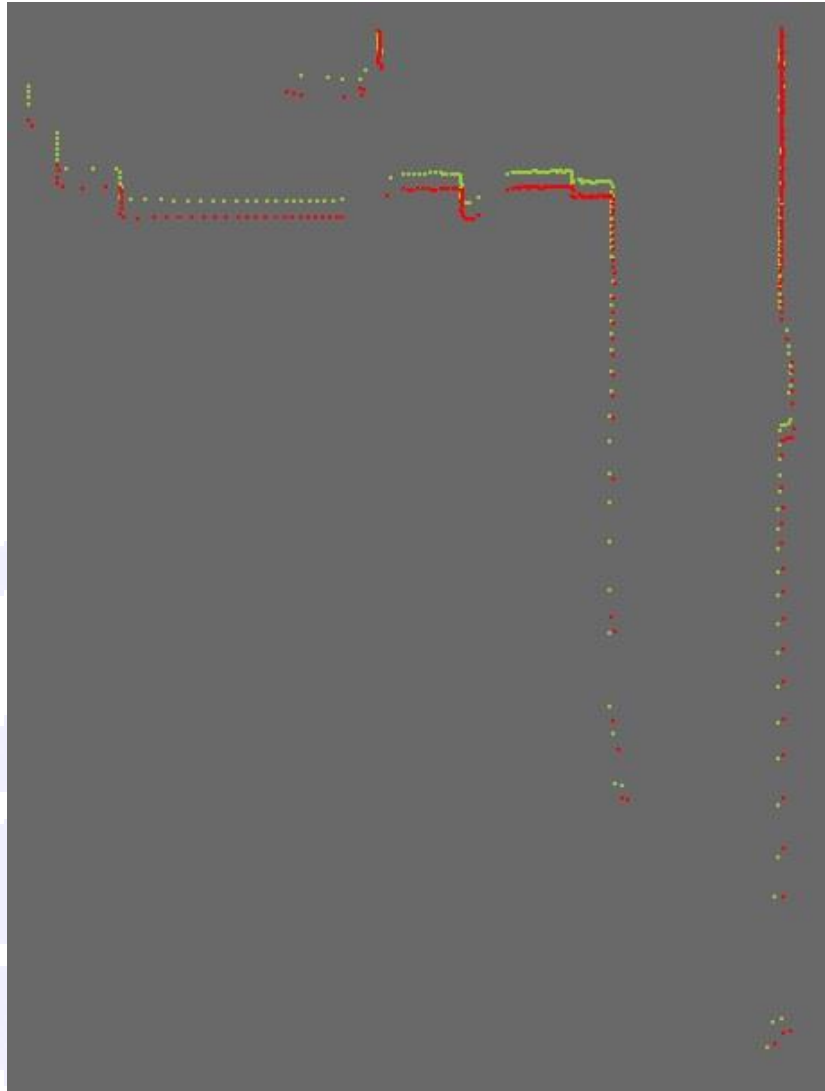


圖 3-2 只針對資料密集的点做對齊

$$S_r = \{S_1, S_2, \dots, S_n\} \quad (3-1)$$

3.2. 尋找重疊的資訊點

由於機器人的移動，使得雷射每次掃描所接收的每筆環境地圖資訊都有些許不相同，經過 ICP 對齊後的 data shape，可以知道此時的機器人在全域地圖中所朝向的方向以及的可視範圍如圖 3-3，而圖 3-3 中黃色的點為全域地圖 model shape，橙色點是機器人位置，而紅色點為機器人當下位置的地圖資訊 data shape，從圖

3-3 中可明顯看出，大部分的全域地圖皆為當下機器人所看不到的地方，這些看不到的地方，會影響 ICP 演算法尋找到不恰當匹配點，進而影響環境地圖的對齊結果，為了避免 ICP 演算法找到機器人看不到的資訊點當作匹配點，固本論文提出一簡易的方式，可輕易的將非機器人共同可視的地圖資訊給分離出來，進而降低 ICP 演算法尋找到不恰當的配對點，提高 ICP 演算法建立環境地圖的精準度。

首先令 model shape 為 S_R ，data shape 為 S_n ，一開始先將 S_R 與 S_n 使用標準 ICP 對齊，此時可以得到一結果 S'_n 如圖 3-4， S'_n 為紅色點， S_R 為白色點，可以明顯看到 S_R 與 S'_n 的部分不重疊資訊，接下來取出 S'_n 中機器人視角 0° 與 180° 的點資訊，令 0° 座標為 (x_0, y_0) 而 180° 座標為 (x_{180}, y_{180}) ，並將這兩點資訊座標代入(3-2)式找出一條經過 0° 與 180° 點資訊的直線方程式 L ，其中 $a = (y_{180} - y_0)$ ， $b = (x_0 - x_{180})$ ， $c = (y_0 x_{180} - x_0 y_{180})$ ，找到的直線方程式如圖 3-5 中橘色線，此時可從圖 3-5 中看出將部分非重疊的資訊點給分辨了出來。

$$L(x, y) : ax + by + c \quad (3-2)$$

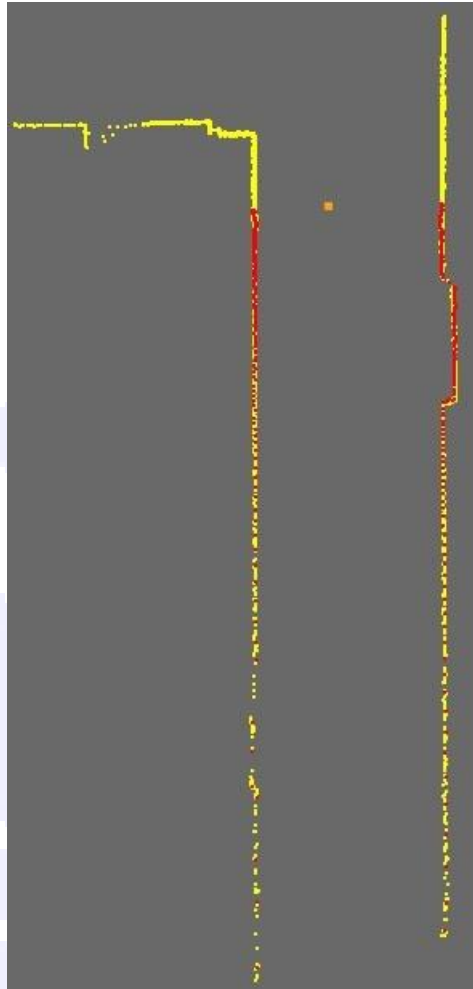


圖 3-3 機器人可視範圍示意圖

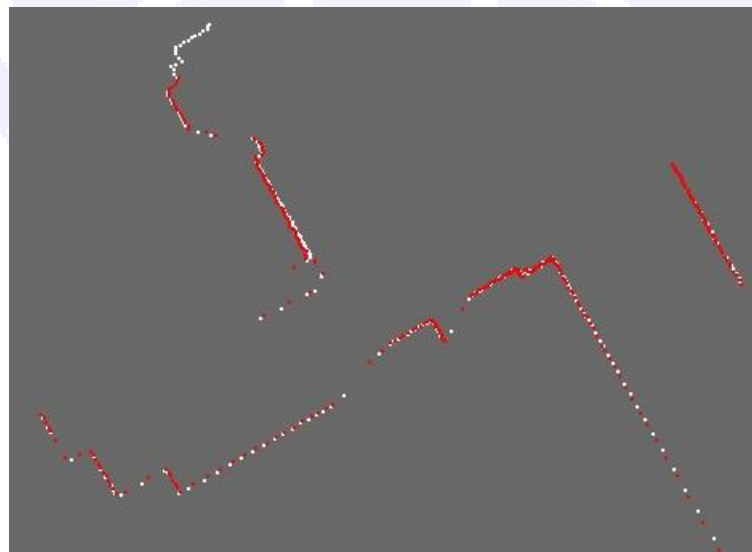


圖 3-4 非重疊資訊示意圖

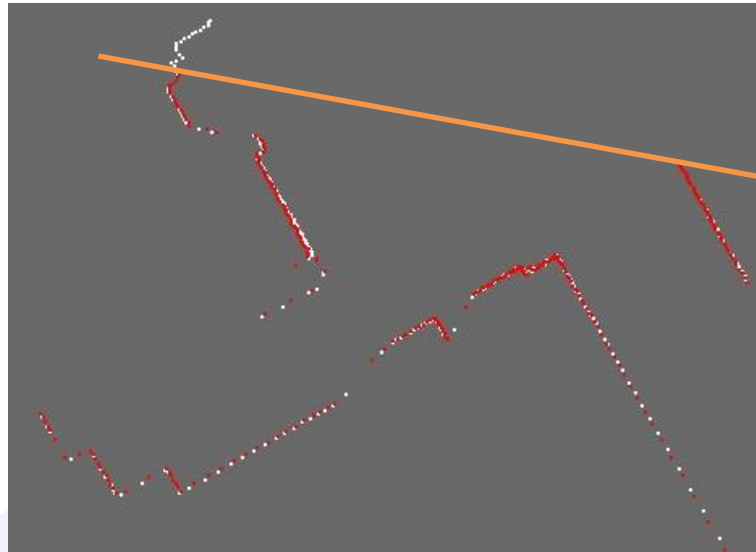


圖 3-5 橘色線將資訊分成兩部分

接著下一步將剔除這些非重疊的資訊，剔除的方式是使用不等式的概念，首先將 S'_n 的 90° 資訊座標 (x_{90}, y_{90}) 帶入已經求得的直線方程式 L ，此時可以求得一個值為 V ，接著再將全域地圖中的一個點 (x_{mi}, y_{mi}) 帶入 L ，其值為 V_m ，最後將 V 與 V_m 相乘，如計算結果大於等於零則表示 (x_{mi}, y_{mi}) 與機器人目前方向相同，則將 (x_{mi}, y_{mi}) 保留下來並放入共同可視集合 S_{RC} ，如計算結果小於零，則表示 (x_{mi}, y_{mi}) 並不在於機器人的可視範圍內，不會將此點保留下來，圖 3-6 為尋找兩集合重疊資訊的流程，經由此演算法後即可將兩集合重疊資訊與非重疊區域分割兩部分，並獲得共同可視集合 S_{RC} ，後面將用來幫助增加建立地圖的精準度。

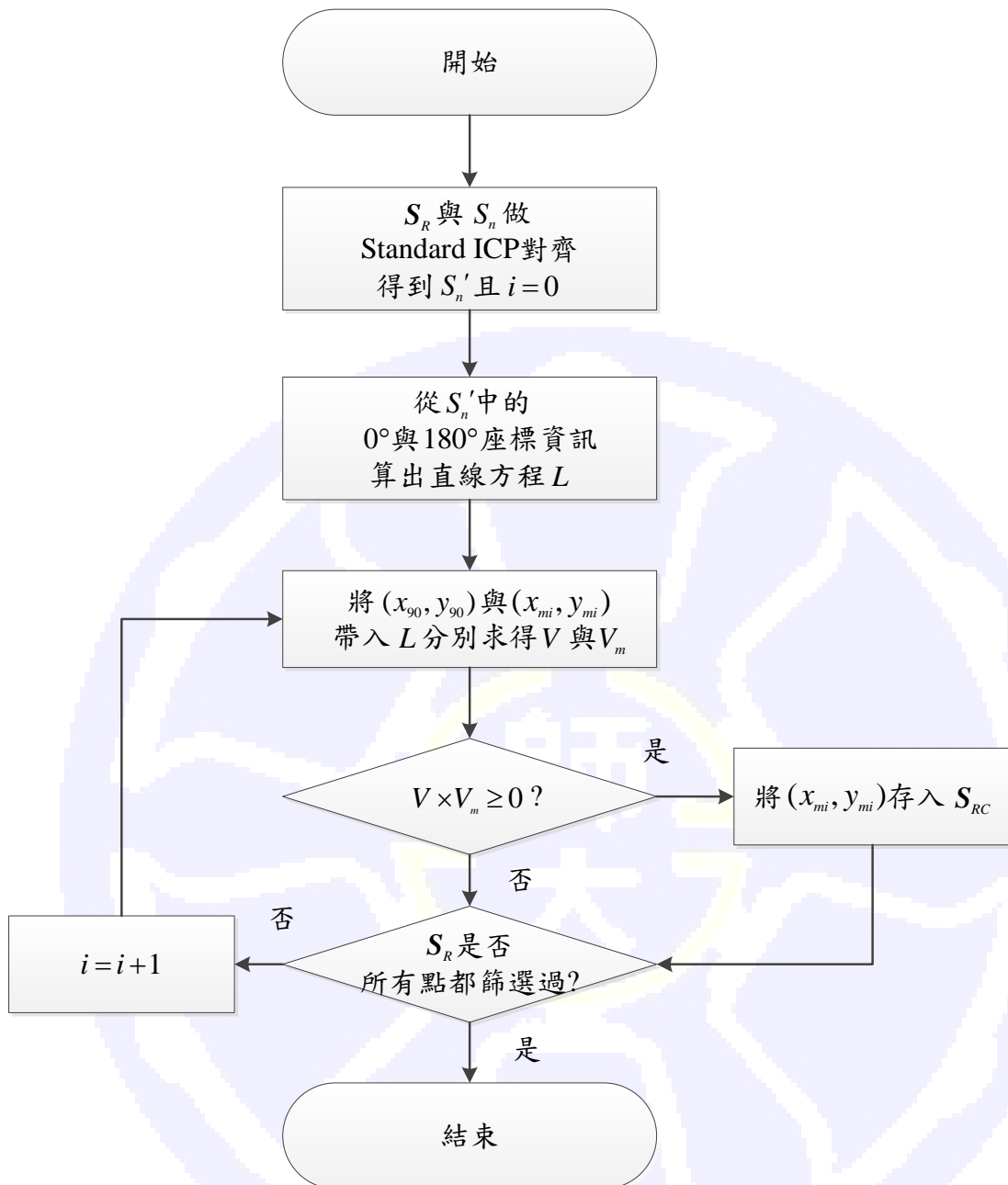


圖 3-6 篩選重疊資訊點流程圖

3.3. 全域地圖門檻值

使用全域的地圖，可以有效降低離散點所導致 ICP 演算法只針對擁有密集資訊的障礙物做對齊，降低對齊結果產生區域最佳解的問題，而上一節所介紹的篩選共同可視的全域地圖，可將機器人當下位置所看不到的資訊點過濾掉，此舉可以使得 ICP 演算法尋找匹配點時，不會選擇到機器人看不到的資訊點，降低因配

對不恰當的点所造成的影响，但是当这两个方式结合时，反而会产生一个新问题。

假设环境地图如图 3-7 所示，机器人搭载一雷射测距仪扫描角度 180° ，此时机器人所蒐集的全域地图资讯如图 3-8 绿色线段，当机器人移动到图 3-9 的位置后，因使用全域地图的方式，此时机器人的地图资讯如图 3-10，而搭配筛选与机器人共同可视的全域地图后，此时 model shape 则为图 3-11 红色线段所示，只留下全域地图与当下雷射测距仪的重叠资讯，但当机器人移动到如图 3-12 的时候，此时使用筛选机制后会发生如图 3-13 的状况，图 3-13 左边的红色地图资讯因筛选机制保留了下来，但实际上雷射测距仪根本看不到该地方的资讯，此时这些资讯会导致 ICP 演算法寻找到不适当的配对点。

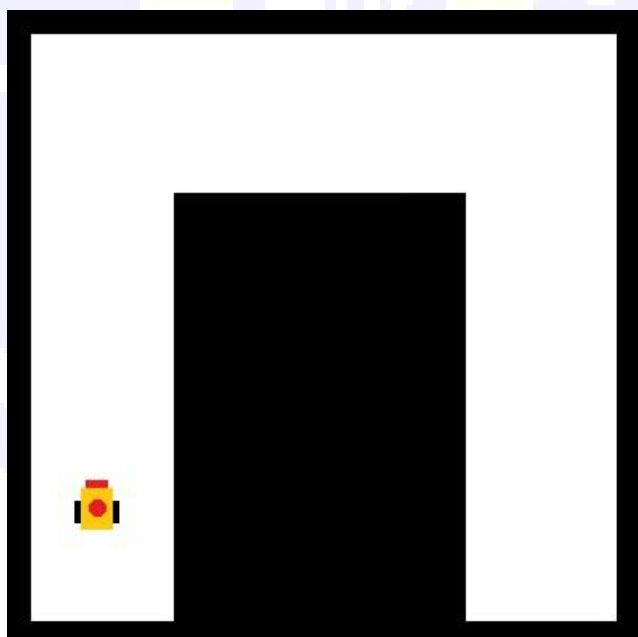


圖 3-7 機器人初始狀態與環境

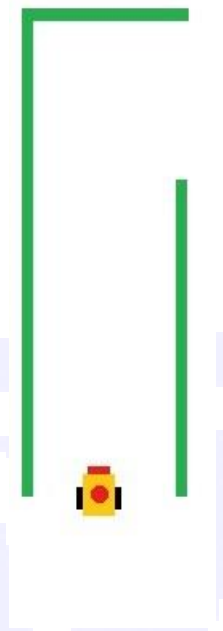


圖 3-8 機器人剛開始掃描的資訊狀況

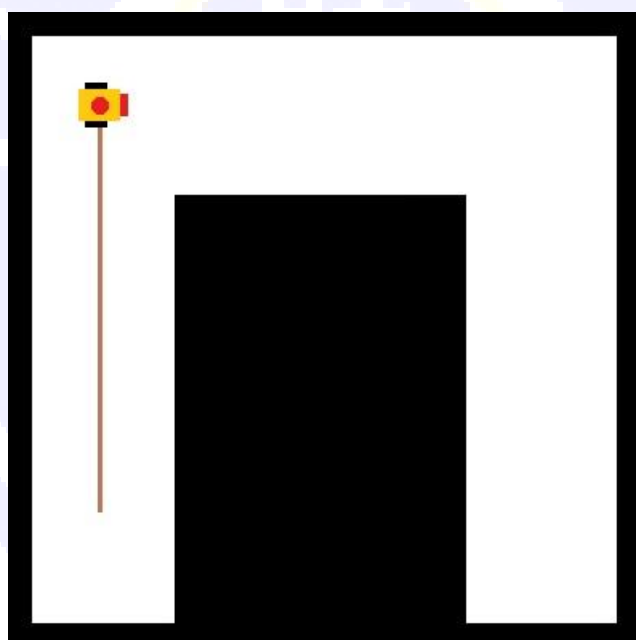


圖 3-9 機器人移動到此位置方向

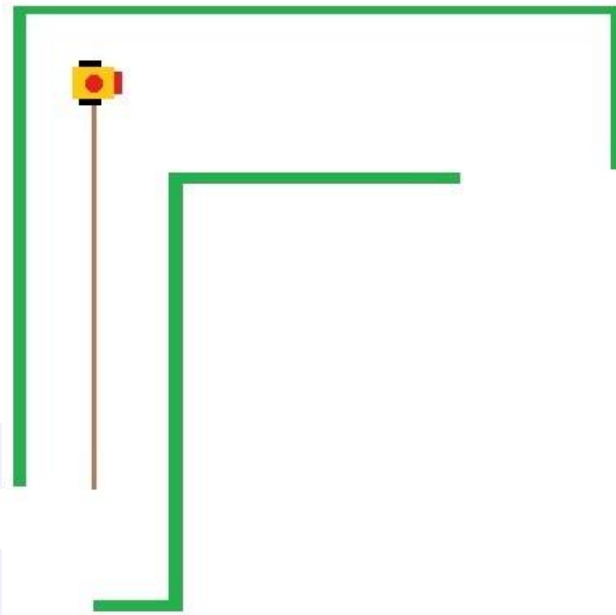


圖 3-10 機器人 reference data 中存放的資訊

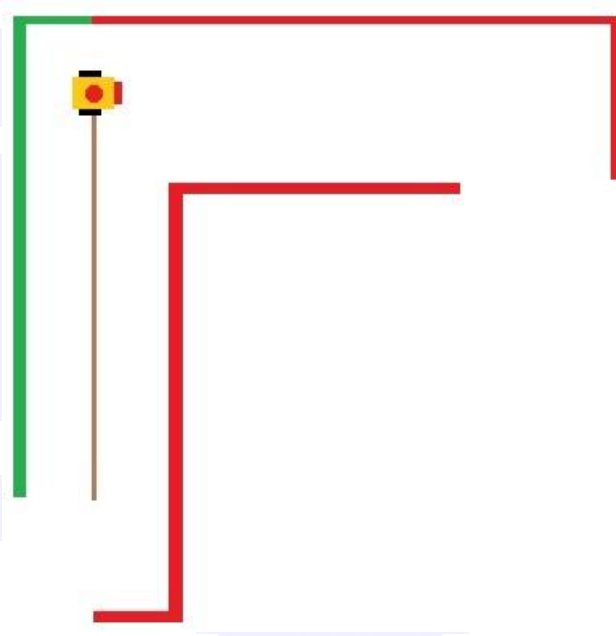


圖 3-11 紅色為使用篩選機制所找到的資訊

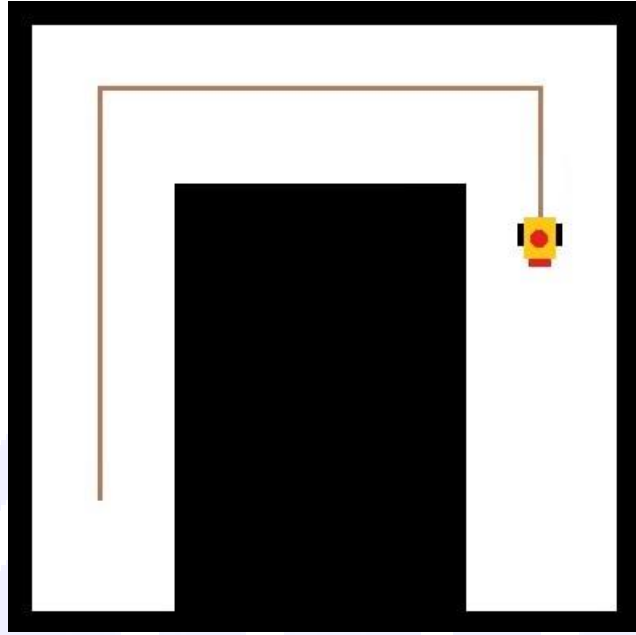


圖 3-12 機器人移動到此位置與方向

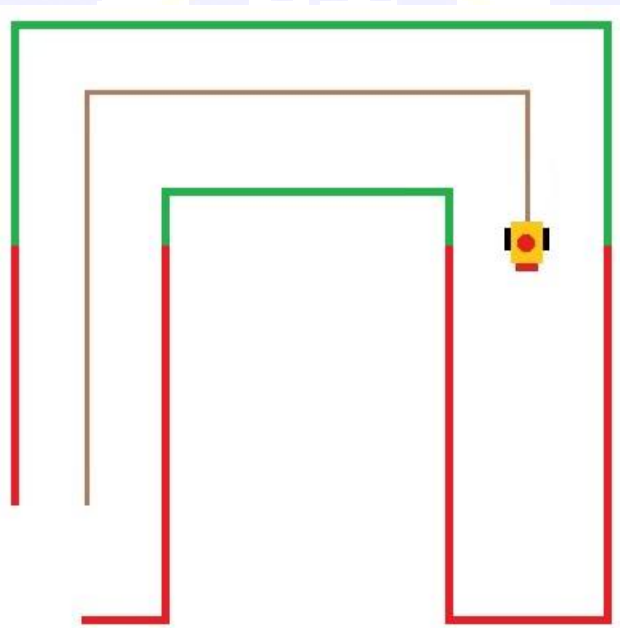


圖 3-13 紅色為使用篩選機制所找到的資訊

故本節提出一個方法，將全域地圖資存取方式改變成只存取機器人當下的前面幾筆掃描資訊，其目的是為了避免如圖 3-13 左邊掃描的資訊並不是當下雷射測距儀所能看見的地方，所以我們可以將(3-1)式改寫成(3-3)式，即表示每次 ICP 對

齊時，所保存當下雷射掃描資訊的前 k 次掃描資訊，其中為 k 正整數，且 $n \geq k$ ，如此一來圖 3-13 的情形將會被改善成如圖 3-14 的樣子，當下所篩選出來的 S_{RC} 為紅色線段，而使用部分全域地圖為綠色線段，即可以避免發生雷射測距儀所掃描不到的地方，納入 model shape 影響對齊效果。

$$S_R = \{S_{n-1}, S_{n-2}, \dots, S_{n-k}\} \quad (3-3)$$

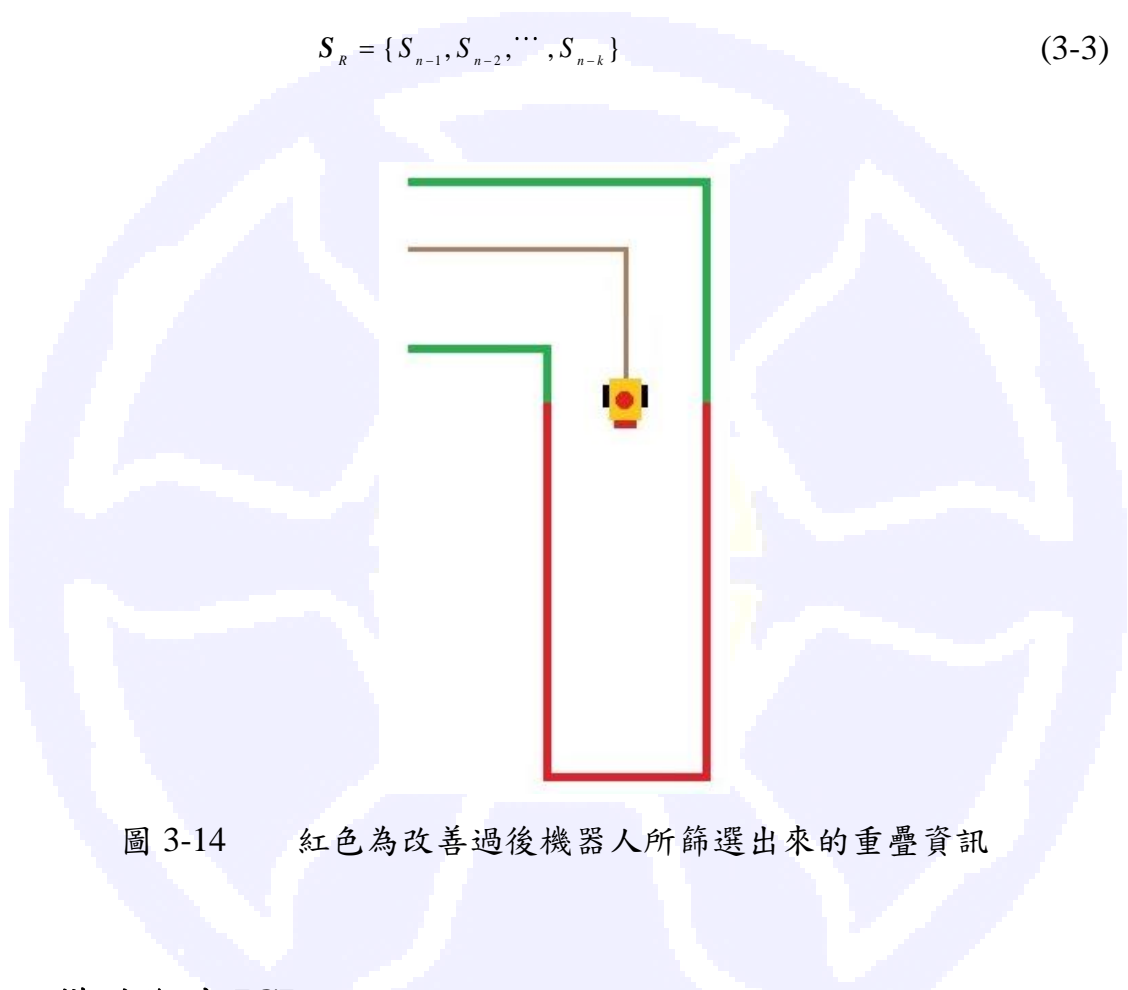


圖 3-14 紅色為改善過後機器人所篩選出來的重疊資訊

3.4. 加權增強型 ICP

經過上述三節的改良後，為了使得對齊精確度更加精確，本論文在最後一步驟加入了權重來幫助增強型 ICP 演算法增加準確度，而加入方式如同第二章文獻探討中所提到，計算每個配對點之間的權重值，最後再將每個權重值用於計算 MSE，但如果只單純的將權重加入增強型 ICP 演算法中，會看不出加入權重後的效果的，因為增強型 ICP 演算法的方法使用全域的地圖當作參考集合，由於增加資訊的方式會使得資料數越來越多，每個配對點所找到的距離平均下降，也就是

說每個配對點所找到的權重值都會普遍落差不太大，此時就會使得權重的影響並沒有比較明顯，甚至沒有影響，而為了使增強型 ICP 演算法加上權重後可以獲得更精準的對齊效果，勢必要避開資料點過多的問題，但參考集合資料點如果過少，會造成雜訊點與離散點的影響，導致對齊效果不佳，故本論文將上一節所介紹的部分全域地圖的概念稍作改變，將原本保存連續前 k 筆資訊的方式，改變成保存從前 $k \times a$ 筆資訊開始保存，其中 a 為正整數，以 a 作為保存資訊間隔，此時將(3-3)式改寫成(3-4)式，將參考點集合所保存的掃描集合間格拉大，如此一來不但可以減少同一障礙物資的料數量，同時也可以不受雜訊與離散點影響，並且使得權重的效果出現，使得增強型 ICP 演算法對齊的效果更加精準。

$$S_R = \{S_{n-a}, S_{n-2a}, \dots, S_{n-ka}\} \quad (3-4)$$

3.5. 增強型 ICP 建立地圖

當機器人使用 ICP 演算法建立地圖時，雷射測距儀所接收到的環境資訊的密集程度以及是否匹配到適當的點都會影響建立地圖的結果，為了解決這個問題，本論文提出了使用部分全域地圖當 model shape 搭配篩選 model shape 找出與 data shape 的重疊資訊成為增強型 ICP，增強型 ICP 不但可以克服因雷射測距儀距離障礙物遠近所產生的資訊密集程度不均勻所造成區域最佳解以及儀器本身的雜訊干擾，亦可有效降低 ICP 演算法尋找到不恰當的匹配點，進而增加地圖整體對齊的準確度以及降低累積誤差。

一開始定義全域地圖為 S_R ，新掃描資訊為 S_n ， k 為保存雷射掃描數量閥值， a 為保留雷射掃描的間格數，當接收到新掃描資訊 S_n ，先使用標準 ICP 將 S_R 與 S_n 兩集合對齊後得到 S_n' ，接著使用前面所說的篩選方式，找出 S_R 與 S_n' 重疊資訊 S_{RC} ，

避免匹配到兩集合之間的非重疊資訊，找出重疊資訊 S_{RC} 後，將 S_{RC} 與 S_n 重新使用一次標準 ICP 對齊兩集合得到 S_n'' ，此時判斷 n 是否為 a 的倍數，如果為 a 的倍數，則將 S_n'' 放入全域地圖 S_R ，否則不會將資訊存入 S_R ，將資訊存入 S_R 的目的是為了增加座標的分佈密集程度，越密集的地方表示越可確認該處為障礙物，而加入 a 的目的是為了使得權重在增強型 ICP 上可以增加其精確度，對於後續對齊可大幅提升其整體地圖的對齊準確度，接著判斷 S_R 資料筆數是否大於 k ，如果大於 k ，則將從 S_R 移除最早一筆資訊 S_{n-ak} ，避免因機器人移動到不同環境使得 S_n 配對到當下雷射所掃描不到的配對點，接著不斷的重複以上步驟直到沒下一筆資訊為止，圖 3-15 為使用增強型 ICP 演算法建立環境地圖的流程圖，流程圖中橘色方塊內部為增強型 ICP 主要流程。

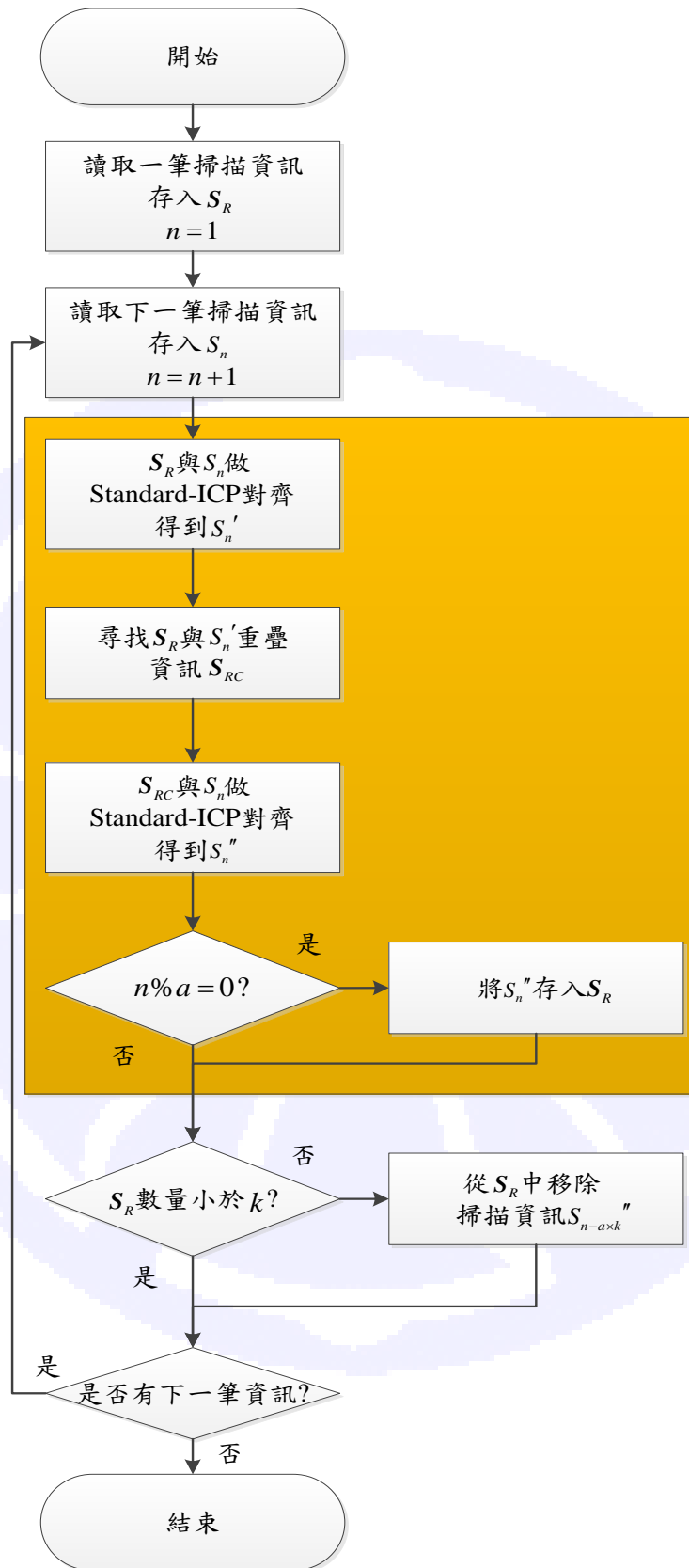


圖 3-15 增強型 ICP 演算法建立地圖流程圖

第十二章 PSO 調整增強型 ICP 演算法

在前一章節，說明了增強型 ICP 演算法的詳細內容與流程，其演算法不但可以解決原始 ICP 演算法對於離散點以及雜訊點問題，且使用部分全域地圖當參考集合可以避免匹配到不當配對點，進而提高地圖精準度，降低累積誤差，但對於落差太大的兩集合所造成無法有效對齊，故本論文使用 PSO 演算法來解決兩集合落差太大所造成的問題。

4.1.PSO 輔助對齊

由於 ICP 演算法本身有個限制條件，即兩個資料集合之落差不能過大，也就是說 model shape 與 data shape 兩個集合之間的初始旋轉位移以及資料相似度不得相差太多。一般而言，ICP 演算法可以對齊是因為兩資料集合相似以及沒有太大的落差，當兩集合的初始相對位置如圖 4-1(a)所示，經過 ICP 演算法對齊後可以如圖 4-1(b)一樣成功對齊，但如果兩集合的資料相對位置如圖 4-2(a)所示，經過 ICP 演算法對齊後會發現如圖 4-2(b)並無法完整對齊起來，也就是說 ICP 演算法對於兩集合的初始相對位置有一定的容忍度，兩集合落差太大的結果反而會導致 ICP 演算法對齊效果不佳，為了解決 ICP 演算法對於兩集合落差太大不易對齊的缺陷，本論文透過 PSO 演算法來輔助 ICP 演算法克服這個缺陷，先透過 PSO 演算法獲得兩集合之間較好的旋轉位移矩陣，並運用此旋轉位移矩陣來降低兩集合之間的落差。

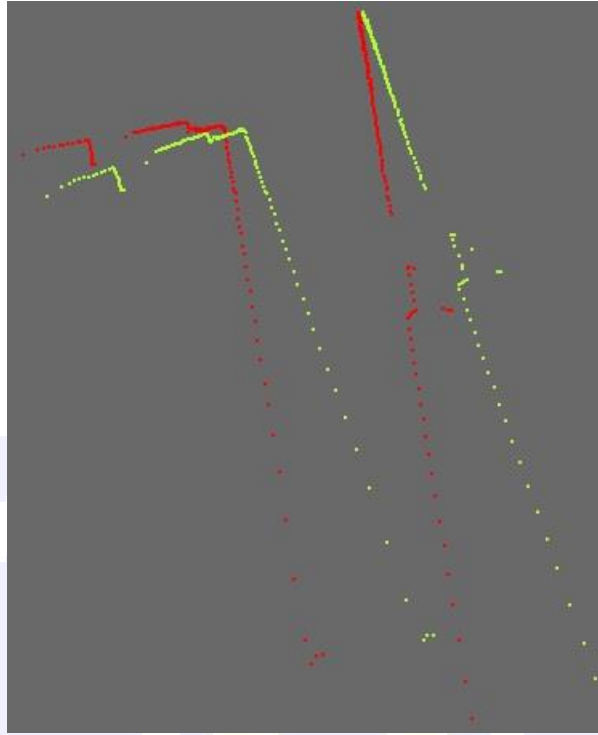


圖 4-1(a)兩集合初始相對位置圖

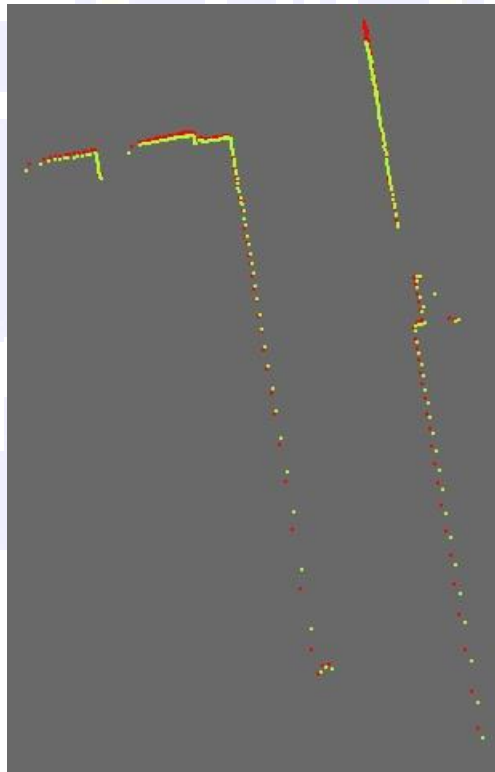


圖 4-1 (b)兩集合成功對齊圖

圖 4-1 兩集合成功對齊示意圖

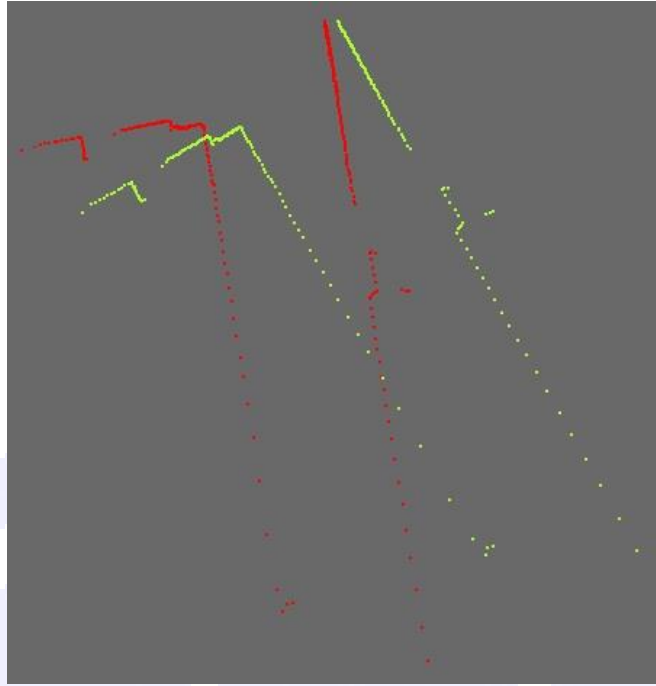


圖 4-2(a)另外兩集合初始相對位置圖

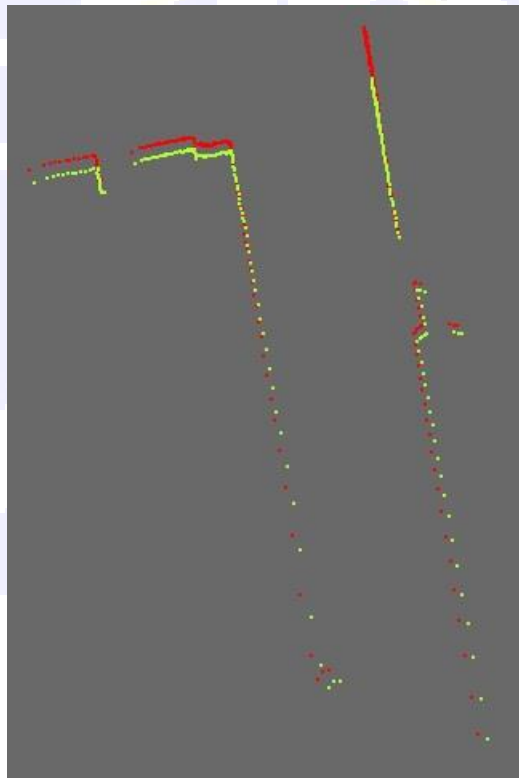


圖 4-2(b)無法完全對齊圖

圖 4-2 兩集合對其失敗示意圖

首先定義每個粒子各擁有 x 分量、 y 分量與 θ 分量，代表兩集合之間的旋轉位移矩陣 $T = [x, y, \theta]$ ，初始化粒子後，即可得到數筆旋轉位移資訊，並用這些資訊帶入 data shape S_n 中，假設有兩筆資訊的初始相對位置如圖 4-3，紅色為 model shape，綠色為 data shape，經過 PSO 初始化後如圖 4-4 中白色點，即可以得到數筆不同位置與方向的 data shape $\overline{S_n}$ ，接著計算每個粒子的適應值，計算適應值與 ICP 演算法尋找兩集合的配對點 (p_i, x_i) 相同，使用(4-1)式來演化每個粒子的適應值，演化數代後其 $\overline{S_n}$ 的示意圖如圖 4-5 所示，透過不斷的演化方可以得到一個最佳旋轉位移矩陣 T_{pb} ，此旋轉位移矩陣後續用來輔助增強型 ICP 演算法對齊，本論文將在下一節介紹如何使用 PSO 輔助增強型 ICP 建立環境地圖。

$$f(p_i, x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N d(p_i, x_i) \quad (4-1)$$

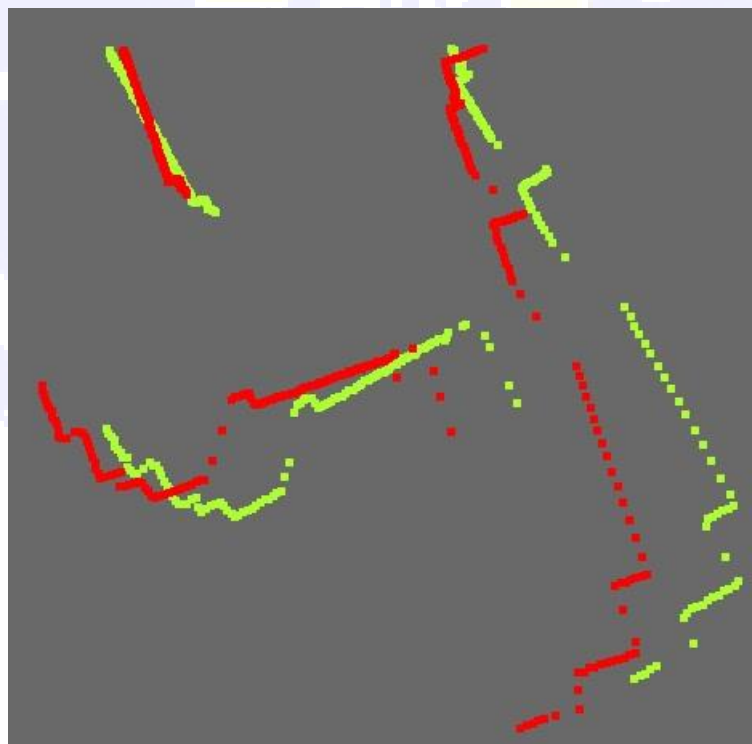


圖 4-3 兩集合初始位置圖

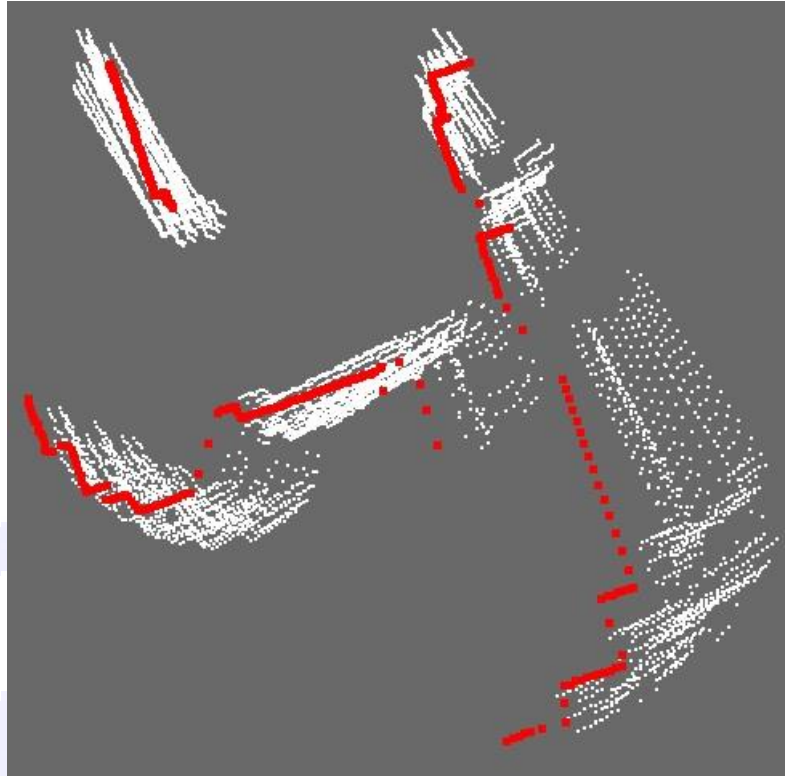


圖 4-4 PSO 初始化後各個粒子的旋轉位移示意圖



圖 4-5 PSO 演化數代後每個粒子的旋轉位移示意圖

4.2. 使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法建立環境地圖

在上一章中，提到使用部份全域地圖當 model shape，並搭配篩選機制找出 model shape 與 data shape 之間的重疊資訊成為增強型 ICP，避免雜訊干擾以及演算法找到不恰當的配對點，接下來在本節中，我們將上一節使用 PSO 尋找到的旋轉位移矩陣 T_{pb} 用來更新 S_n 得到 S_n' ，求得 S_n' 的目的是為了先讓兩集合有初步的對齊，不但可以有效降低 S_R 與 S_n 兩集合之間的落差，並可以增加增強型 ICP 演算法對齊精確度。

使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法建立環境地圖流程如圖 4-6 所示，首先定義全域地圖為 S_R ，新掃描資訊為 S_n ， k 為保存雷射掃描數量閾值，當接收到新資訊時先使用 PSO 演算法尋找一個旋轉位移矩陣 T_{pb} ，並將 T_{pb} 用來更新 S_n 為 S_n' ，做為兩集合初步對齊，接著將 S_R 與 S_n' 做增強型 ICP 對齊得到 S_n'' ，並且將 S_n'' 放入全域地圖 S_R ，增加座標的分布密度，下一步則判斷 S_R 資料筆數是否大於 k ，如果大於 k ，則將從 S_R 移除一筆資訊 $S_{n-a \times k}$ ，最後不斷的重複以上步驟直到沒有下一筆掃描資訊，環境地圖即可建立完成。

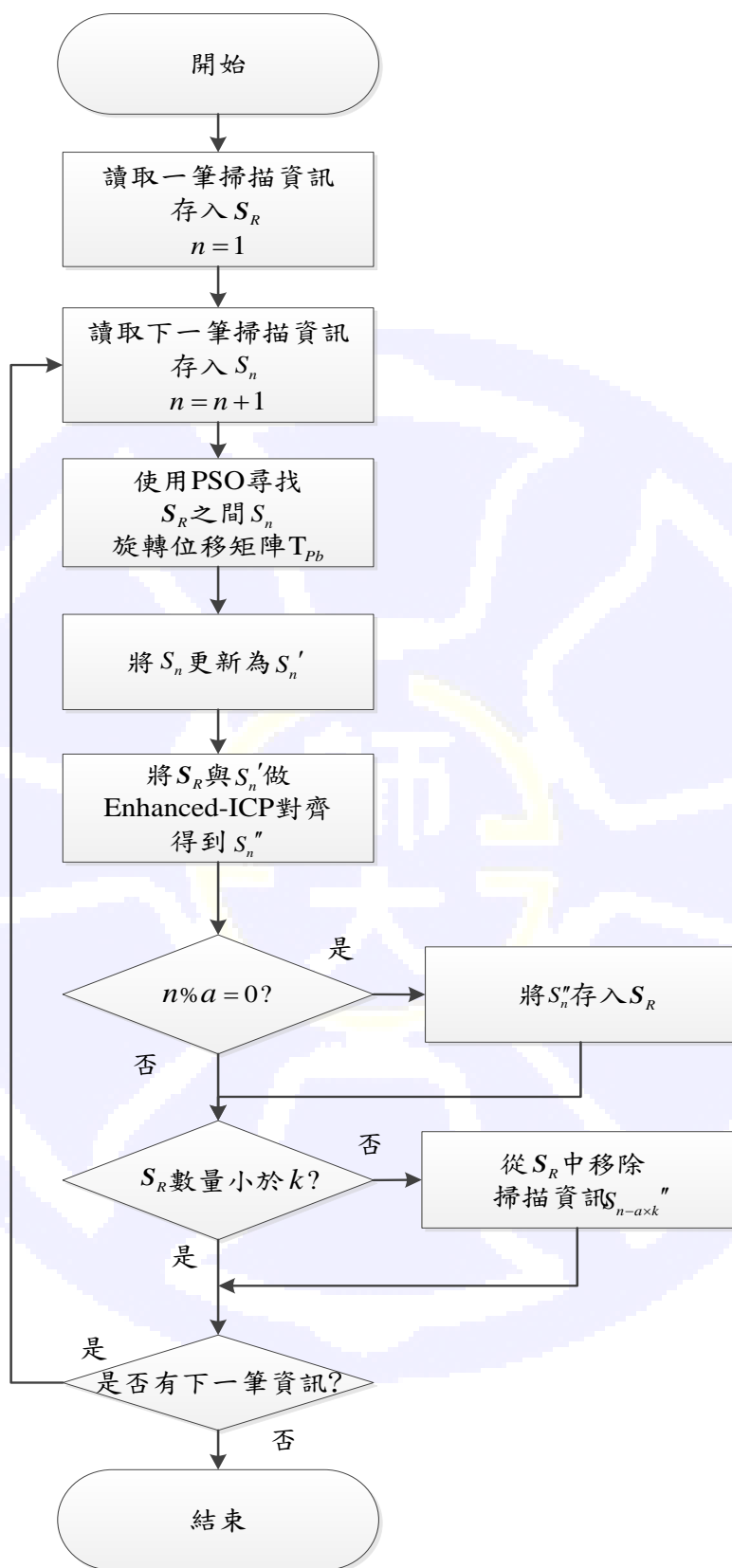


圖 4-6 使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法建立環境地圖流程圖

第十三章 實驗結果

在本節中，將會介紹本論文所使用的實驗設備、實驗環境以及實驗結果與分析，本論文主要使用自走車機器人搭載著一個雷射區域掃描儀來建立環境地圖，利用雷射掃描儀接收環境資訊，加上自走車的移動，進而將欲建立的環境資訊蒐集下來，接者使用本論文所提出的 PSO 調整增強型 ICP 演算法，將每個掃描下來的地圖資訊一一對齊起來成為完整的全域地圖。

5.1. 實驗設備與環境

本論文主要使用由 Adept MobileRobots 公司所開發的 P3-DX 自走車[26]，如圖 5-1 搭載由 SICK 公司開發的 LSM-100 雷射掃描儀[27]，如圖 5-2 所示，自走車的規格表如表 5-1 所示，雷射規格如表 5-2 所示，圖 5-3 為雷射掃瞄範圍示意圖，本論文實驗雷射掃描儀的掃描角度均使用 180° ，電腦作業系統為 Microsoft Windows 7，使用 Microsoft Visual Studio 2008 C#環境開發，實驗環境為台灣師範大學科技學院 5 樓，圖 5-4(a)-(k)為科技學院 5 樓實驗環境場景，圖 5-5 是科技學院 5 樓的理想平面地圖與實驗場景拍攝地點與拍攝方向。



圖 5-1 Pioneer 3-DX 自走車

表 5-1 Pioneer 3-DX 規格表

產品型號	Pioneer 3-DX	電壓(DC)	5V~12V
重量	9kg	續航力(hrs)	24~30
負重	25kg	最大航速	1400mm/sec
長/寬/高(cm)	44/39/23	最大旋轉速度	300 deg/sec



圖 5-2 LMS-100 雷射區域掃描儀

表 5-2 LMS-100 規格

產品型號	LMS-100	工作電壓(DC)	10.8V~30V
掃描角度	270°	掃描解析度	0.25° ~ 0.5°
掃描頻率	25Hz/50Hz	掃描距離	0.5m~20m
系統誤差	±30mm	重量	1.1kg

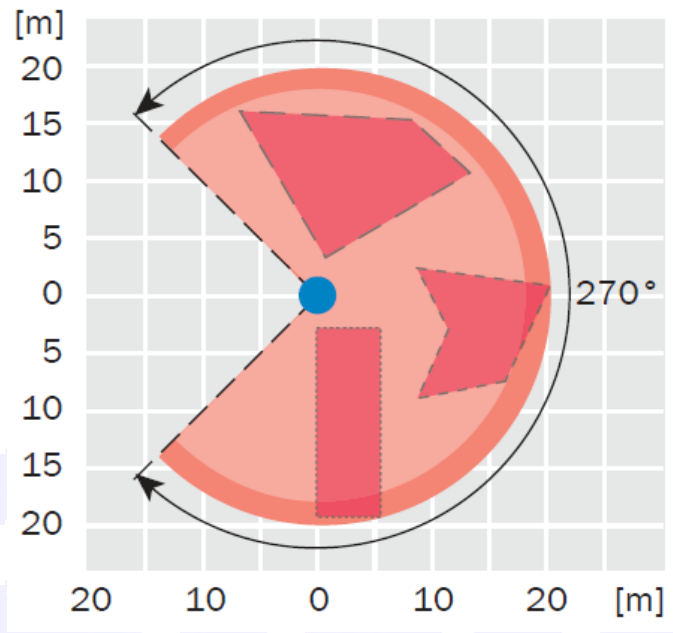


圖 5-3 雷射測距儀掃描示意圖[27]



圖 5-4(a)實際場景圖



圖 5-4(b) 實際場景圖



圖 5-4(c) 實際場景圖



圖 5-4 (d) 實際場景圖



圖 5-4(e) 實際場景圖



圖 5-4(f) 實際場景圖



圖 5-4(g) 實際場景圖



圖 5-4(h) 實際場景圖



圖 5-4(i) 實際場景圖



圖 5-4(j) 實際場景圖



圖 5-4(k) 實際場景圖

圖 5-4 實驗環境圖



圖 5-5 理想環境地圖與實際場景拍攝位置對照圖

5.2. 環境地圖建立結果與分析

在本節中，將會探討由[4]所提出的原始 ICP 演算法(O-ICP)，以及[21]提出的標準 ICP(Standard ICP, Std-ICP)以及本論文所提出的增強型 ICP(E-ICP)、加權式增強型 ICP(WE-ICP)和加權式 PSO 調整增強型 ICP(PSOWE-ICP)演算法做比較，而為了確定本論文所提出的演算法會相較於先前文獻的對齊效果還要來的好，一共做了四個實驗，每次實驗皆重覆 10 次路徑取得平均旋轉位移量，證實本論文的方法會較文獻中的方法還要來的好，而在下一節則會使用以上五種方法建立科技學院五樓的整體環境地圖。

實驗一：原地旋轉 360°

本次實驗使用人工移動的方式原地旋轉 360° ，實驗地點為圖 5-5 中的 k 點，輔助方式為先準備一張有 360° 的圓規圖(圖 5-6)，接著將雷射測距儀放置在上面，接著雷射每旋轉 10° 後掃描一次環境，雷射測距儀掃描角度為 180° ，解析度為 0.5° ，

掃完一圈後共 37 筆掃描資訊，而參數設定，PSO 中的粒子數量 20 個， x 分量、 y 分量及角度搜尋範圍分別為 $0 \sim 200\text{mm}$ 、 $0 \sim 200\text{mm}$ 與 $\pm 15^\circ$ ，參數 c_1 與 c_2 皆為 2，慣性權重為 0.5，演化代數 20 代，部分全域地圖的參數 k 為 10， a 為 2，配對點的距離門檻值為 230mm，圖 5-7 為地圖理想結果，圖 5-8 為使用各種演算法對齊後的結果，黃色點為雷射測距儀所偵測到的障礙物，橘色點為機器人位置，經過 10 次重複實驗後，本次實驗平均數據結果如表 5-3 所示，圖 5-8(a) 為使用 O-ICP 建立地圖結果，可以看到因離散點問題及匹配點問題造成的累積誤差越來越明顯，圖 5-8(b) 則是使用 Std-ICP 建立地圖的結果，因地圖的右上方距離機器人比較近，資訊點比較密集，而造成地圖對齊結果進入區域最佳解，數比資訊對齊下來也造成明顯的累積誤差，圖 5-8(c) 則是使用 E-ICP 所建立出來的地圖，可以明顯看到累積誤差的問題明顯變小，準確度也相較於前兩者好許多，圖 5-8(d) 則是使用 WE-ICP 建立出來的結果，累積誤差的問題較 O-ICP 與 Std-ICP 小，而其準確度也較 E-ICP 稍好一點，圖 5-8(e) 為 PSOWE-ICP 建立出來的結果，其結果較前述幾種方法更加精準。

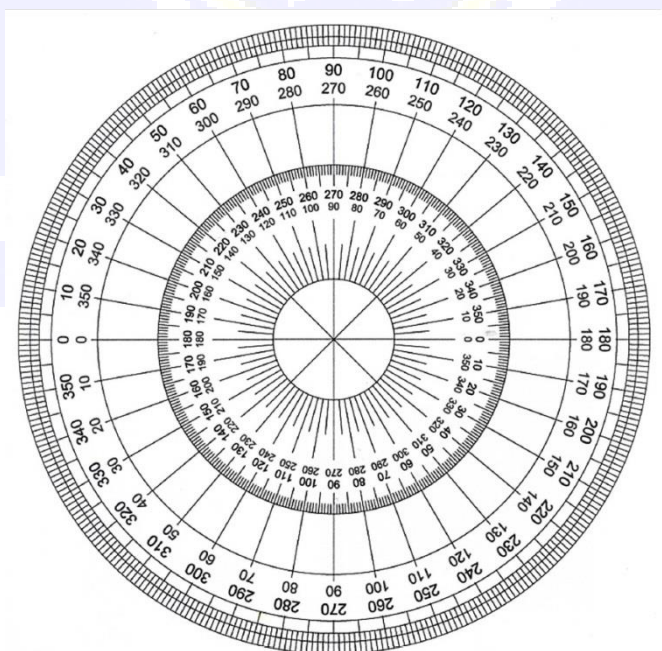


圖 5-6 360° 圓規圖

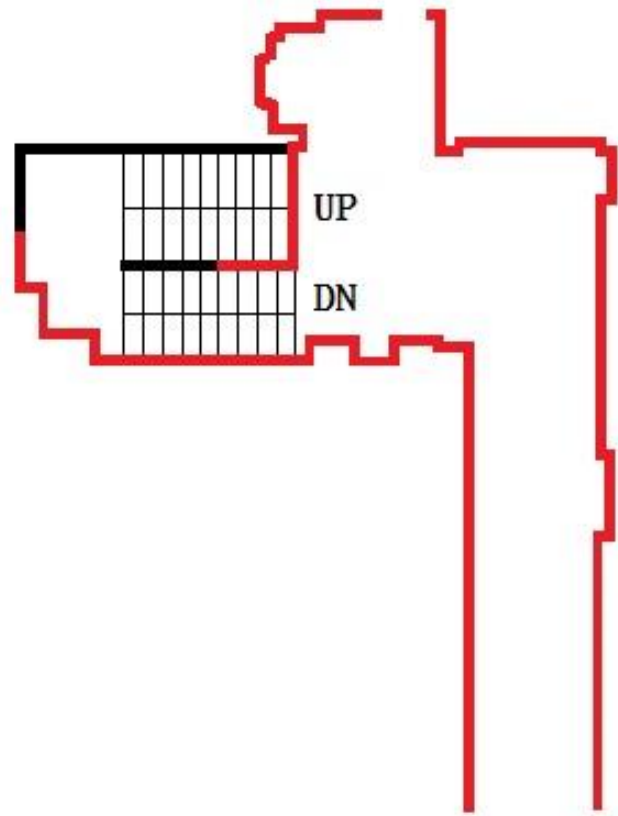


圖 5-7 實際地圖



圖 5-8(a)O-ICP 建立結果

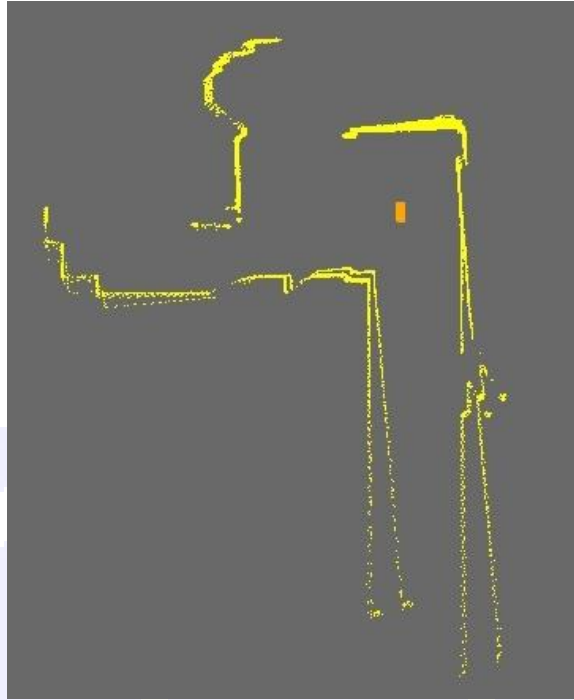


圖 5-8 (b) Std-ICP 建立結果

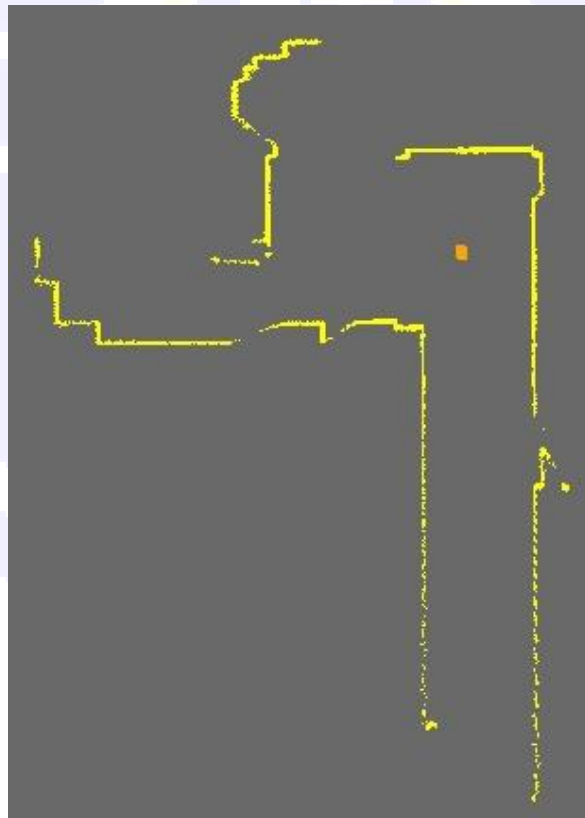


圖 5-8 (c) E-ICP 建立結果

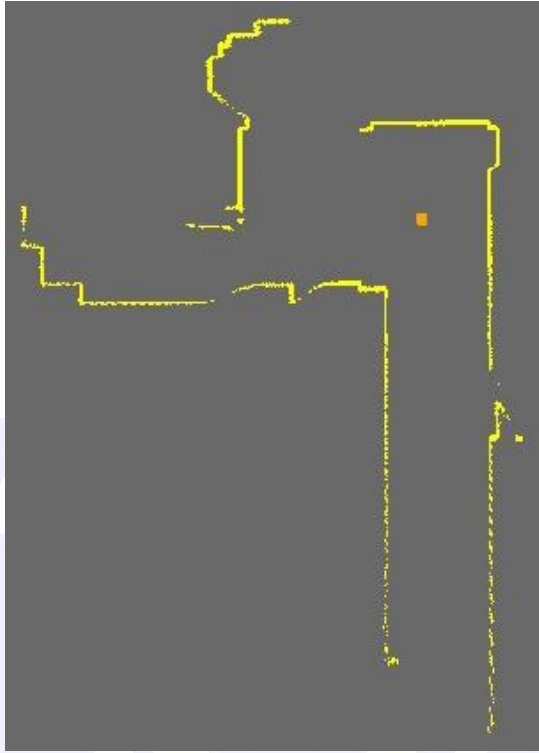


圖 5-8(d) WE-ICP 建立結果

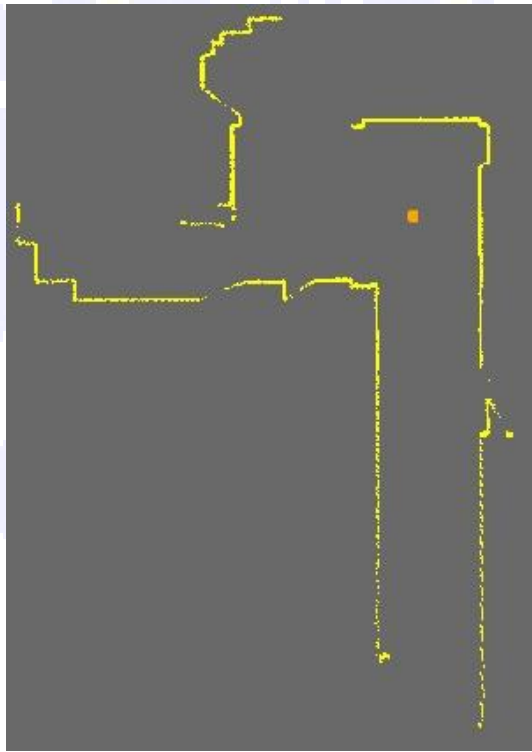


圖 5-8(e) PSOWE-ICP 建立結果

圖 5-8 實驗一地圖對齊結果

表 5-3 實驗一平均旋轉位移表

方法	$\bar{x} \pm \sigma (mm)$	$\bar{y} \pm \sigma (mm)$	$\bar{\theta} \pm \sigma (deg)$
理想結果	0	0	360
O-ICP	217.4 ± 11.45	534.13 ± 34.88	334.93 ± 0.22
Std-ICP	38.29 ± 11.06	322.41 ± 19.86	354.3 ± 0.37
E-ICP	52.52 ± 5.73	57.02 ± 9.88	358.53 ± 0.09
WE-ICP	43.14 ± 3.34	54.25 ± 6.31	358.58 ± 0.03
PSOWE-ICP	23.03 ± 11.3	26.85 ± 15.38	359.03 ± 0.2

實驗二：四方型路徑

本次實驗使用人工移動的方式走一長 140 公分、寬 100 公分的四方型封閉路徑，實驗地點為圖 5-7 中的 k 點，機器人直行時每前進 20 公分掃描一次，轉彎時則如同實驗一，雷射測距儀掃描角度為 180° ，解析度為 0.5° ，每原地旋轉 10° 掃描一次，掃完整個路徑後總共有 60 筆資訊，而參數設定，PSO 中的粒子數量 20 個， x 分量、 y 分量及角度搜尋範圍分別為 $0 \sim 200mm$ 、 $0 \sim 200mm$ 與 $\pm 15^\circ$ ，參數 $c1$ 與 $c2$ 皆為 2，慣性權重為 0.5，演化代數 20 代，部分全域地圖的參數 k 為 10， a 為 2，配對點的距離門檻值為 230mm，圖 5-7 為地圖理想結果，圖 5-9 為使用各種演算法對齊後的結果，黃色點為雷射測距儀所偵測到的障礙物，橘色點為機器人位置，圖 5-9(a) 是使用 O-ICP 建立出來的結果，因離散點與配對點問題造成對其效果不佳，圖 5-9(b) 因區域最佳解問題導致對齊效果不佳，圖 5-9(c)(d)(e) 可看出對其效果較前兩者好出許多，從實驗數據表 5-4 結果顯示出 PSOWE-ICP 對齊結果最為理想。



圖 5-9(a) O-ICP 建立結果

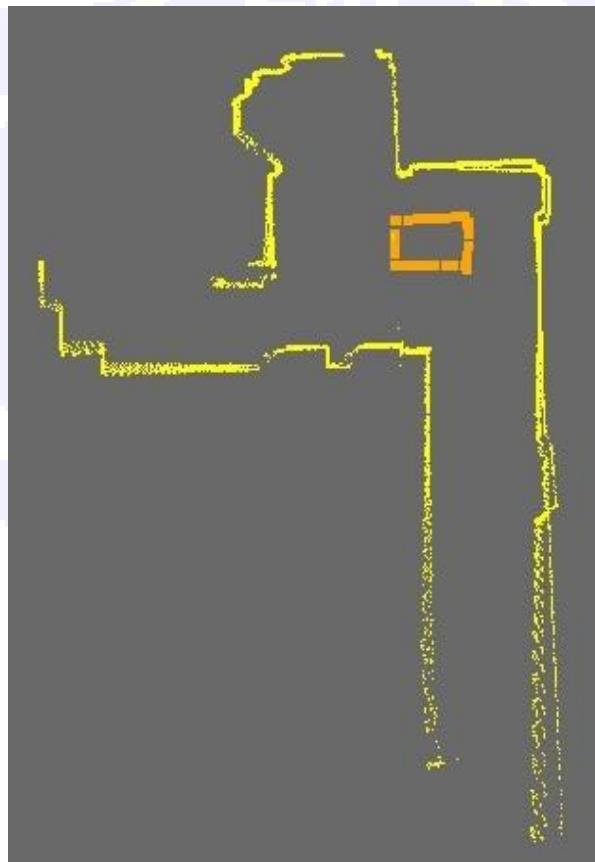


圖 5-9(b) Std-ICP 建立結果

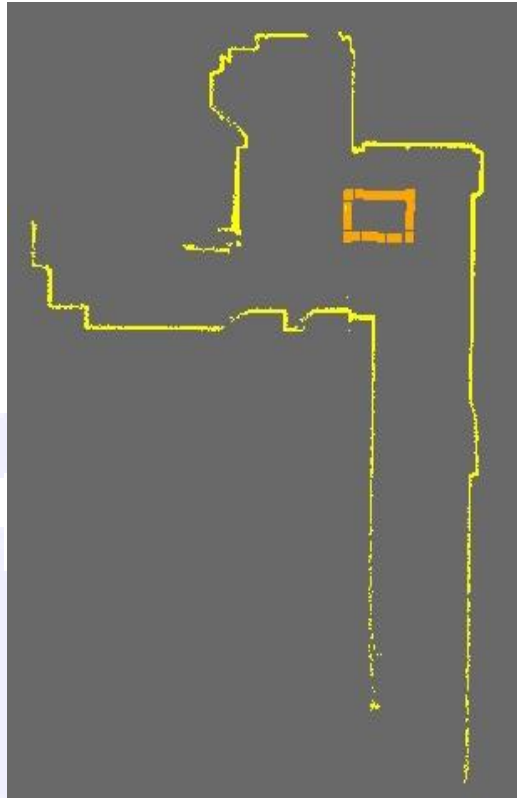


圖 5-9(c) E-ICP 建立結果

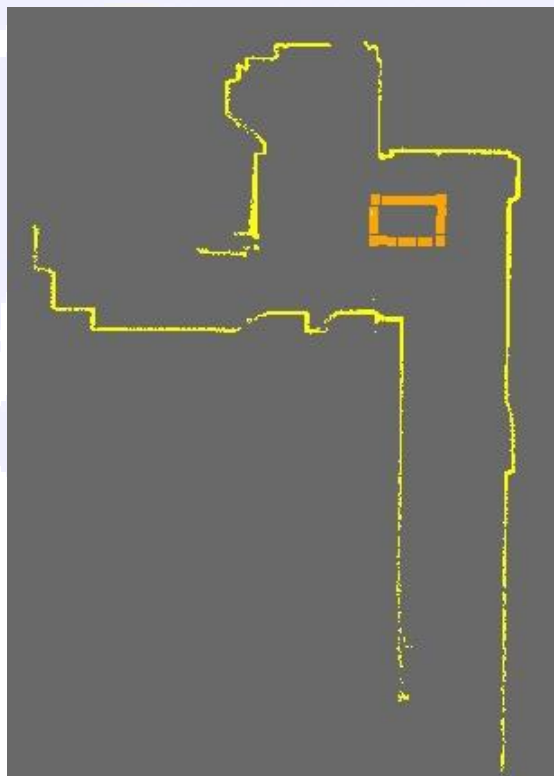


圖 5-9(d) WE-ICP 建立結果

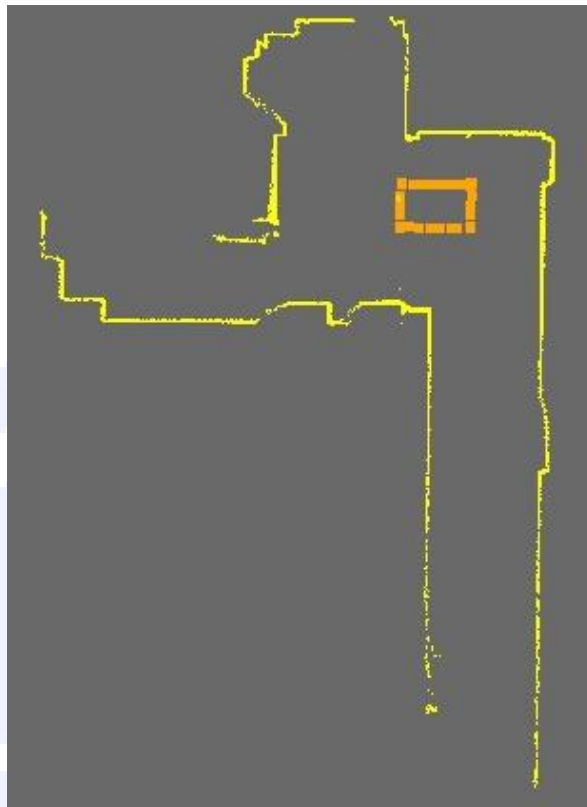


圖 5-9(e)PSOWE-ICP 建立結果

圖 5-9 實驗二平均地圖對齊結果

表 5-4 實驗二平均旋轉位移表

方法	$\bar{x} \pm \sigma (mm)$	$\bar{y} \pm \sigma (mm)$	$\bar{\theta} \pm \sigma (deg)$
理想結果	0	0	360
O-ICP	72.29 ± 40.52	372.09 ± 23.23	340.33 ± 0.33
Std-ICP	181.6 ± 80.06	80.94 ± 8.82	356.06 ± 2.39
E-ICP	12.55 ± 6.91	17.57 ± 5.4	359.91 ± 0.06
WE-ICP	11.33 ± 7.57	16.88 ± 5.86	359.92 ± 0.09
PSOWE-ICP	7.56 ± 7.11	14.8 ± 4.07	359.99 ± 0.08

實驗三：逆時針原地旋轉 360°

本次實驗使用自走車搭載雷射測距儀，使用控制指令讓自走車原地旋轉，車子自轉的時速為左輪速度 -100mm/s ，右輪速度 100mm/s ，自走車在旋轉的同時，雷射測距儀掃描角度為 180° ，解析度為 0.5° ，並以掃描 10scan/s 的速度連續掃描，直到旋轉 360° 為止，此時的資料數量就會相較於前兩個實驗多出許多，總共 125 筆資訊，而參數設定的部分，PSO 中的粒子數量 20 個， x 分量、 y 分量及角度搜尋範圍分別為 $0 \sim 200\text{mm}$ 、 $0 \sim 200\text{mm}$ 與 $\pm 15^\circ$ ，參數 $c1$ 與 $c2$ 皆為 2，慣性權重為 0.5，演化代數 20 代，部分全域地圖的參數 k 為 10，由於資料量過多，且兩筆掃描之間變化不大，所以將 a 設為 20，配對點的距離門檻值為 230mm ，圖 5-7 為地圖理想結果，圖 5-10 為使用各種演算法對齊後的結果，黃色點為障礙物，橘色點為機器人位置，本次實驗數據結果如表 5-5 所示，圖 5-10(a)(b) 因為資料數變多，使得區域最佳解的問題更加明顯，且累積誤差量也越來越大，導致對齊效果較差，而圖 5-10(c)(d)(e) 因使用部分全域地圖的方式，有效抑制誤差的累積，故對於大量的資料量影響不大，依然可以將結果對齊好。



圖 5-10(a) O-ICP 建立結果

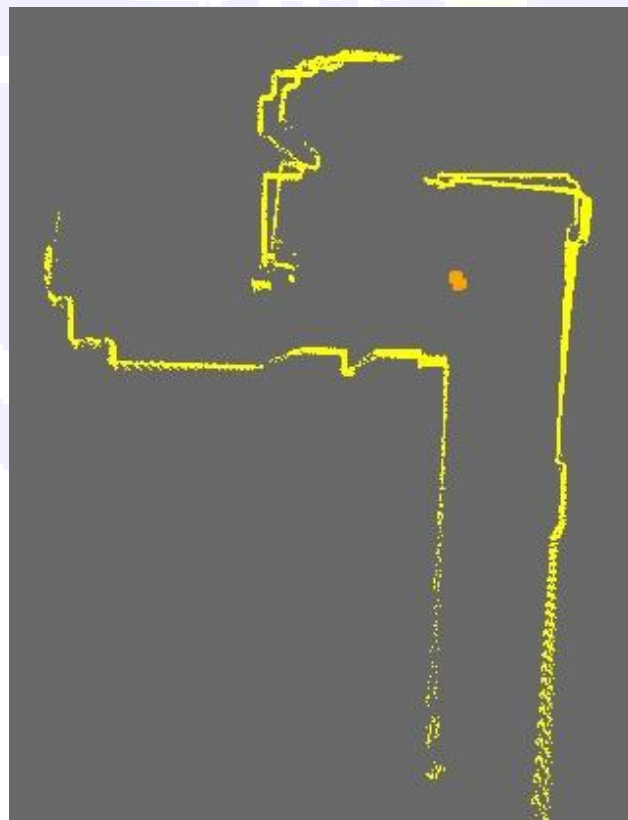


圖 5-10(b) Std-ICP 建立結果

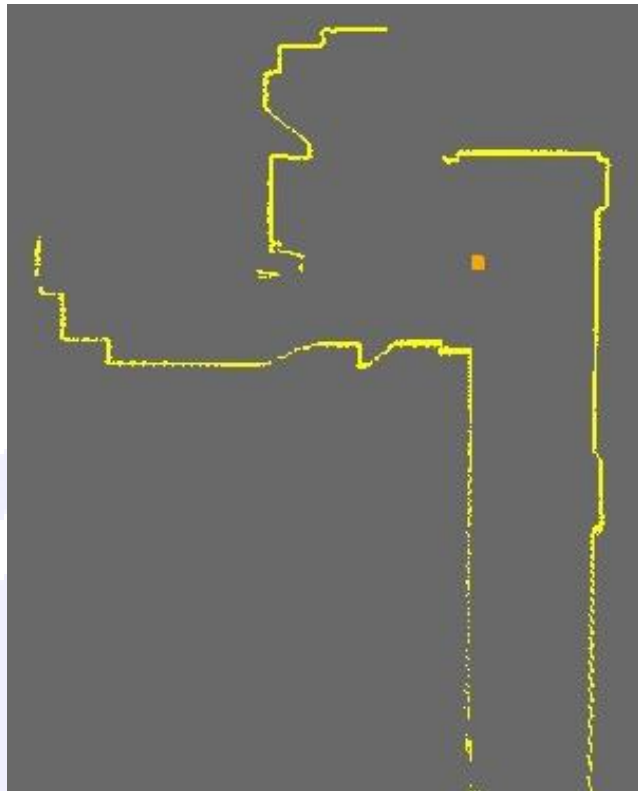


圖 5-10(c) E-ICP 建立結果



圖 5-10(d) WE-ICP 建立結果

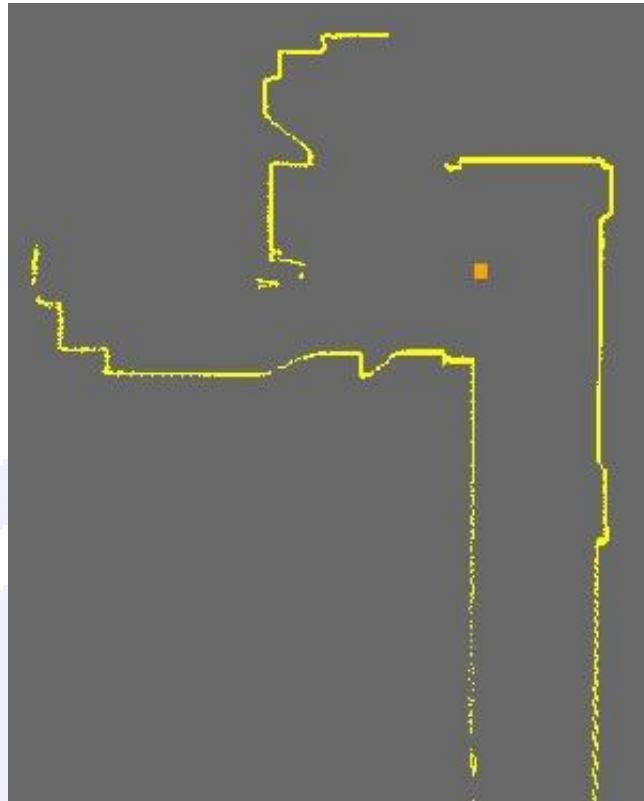


圖 5-10(e) PSOWE-ICP 建立結果

圖 5-10 實驗三地圖對齊結果

表 5-5 實驗三平均旋轉位移表

方法	$\bar{x} \pm \sigma (mm)$	$\bar{y} \pm \sigma (mm)$	$\bar{\theta} \pm \sigma (deg)$
理想結果	0	0	360
O-ICP	80.53 ± 47.53	160.87 ± 41.59	350.28 ± 1.18
Std-ICP	58.92 ± 58.86	93.99 ± 40.47	340.98 ± 2.17
E-ICP	12.54 ± 12.93	17.66 ± 16.03	359.78 ± 1.15
WE-ICP	11.42 ± 13.04	16.4 ± 15.69	359.85 ± 1.14
PSOWE-ICP	8.45 ± 5.19	12.93 ± 11.69	359.94 ± 1.17

實驗四：順時針原地旋轉 360°

本次實驗如同實驗三方式，使用控制指令讓自走車原地旋轉，車子自轉的時速為左輪速度 100mm/s ，右輪速度 -100mm/s ，自走車在旋轉的同時，雷射測距儀掃描角度為 180° ，解析度為 0.5° ，並以掃描 10scan/s 的速度連續掃描，直到旋轉 360° 為止，共 125 筆資訊，其餘的參數設定，PSO中的粒子數量 20 個， x 分量、 y 分量及角度搜尋範圍分別為 $0 \sim 200\text{mm}$ 、 $0 \sim 200\text{mm}$ 與 $\pm 15^\circ$ ，參數 $c1$ 與 $c2$ 皆為 2 ，慣性權重為 0.5 ，演化代數 20 代，部分全域地圖的參數 k 為 10 ，因資料量較大，故將 a 設為 20 ，配對點的距離門檻值為 230mm ，圖5-7為地圖理想結果，圖5-11為使用各種演算法對齊後的結果，黃色點為障礙物，橘色點為機器人位置，本次實驗數據結果如表5-6所示，其實驗結果與實驗三結果類似，圖5-11(a)(b)皆因為資料量多，區域最佳解與累積誤差問題導致對期效果不理想，而圖5-11(c)(d)(e)使用部分全域地圖的方法降低累積誤差所產生的問題，面對大資料量對齊效果依然不錯。



圖 5-11(a)O-ICP 建立結果

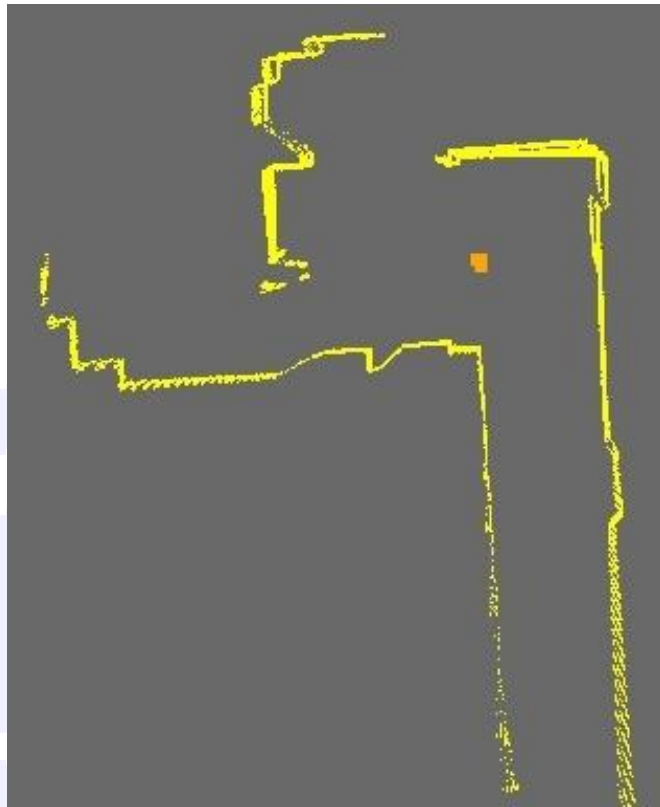


圖 5-11 (b)Std-ICP 建立結果

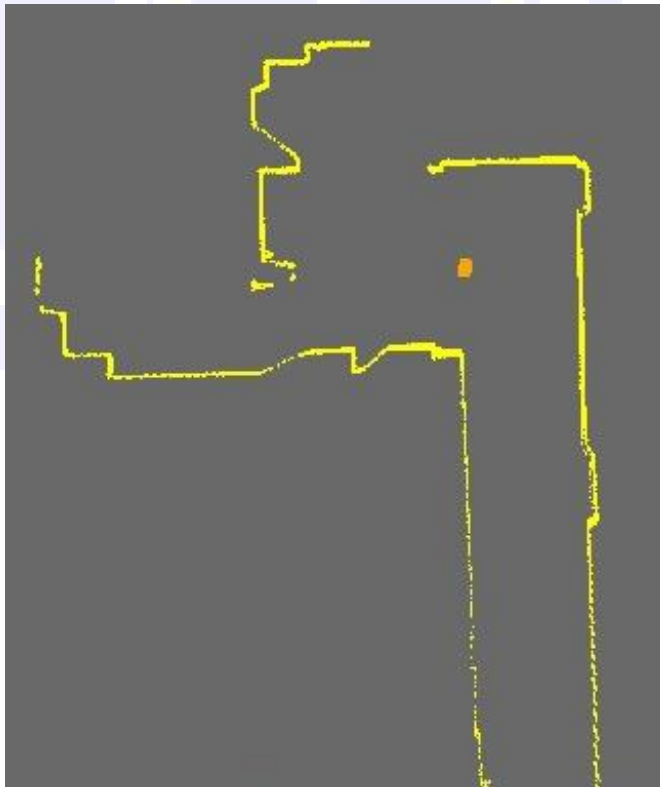


圖 5-11(c) E-ICP 建立結果



圖 5-11(d) WE-ICP 建立結果



圖 5-11(e) PSOWE-ICP 建立結果

圖 5-11 實驗四地圖對齊結果

表 5-6 實驗四平均旋轉位移比較表

方法	$\bar{x} \pm \sigma (mm)$	$\bar{y} \pm \sigma (mm)$	$\bar{\theta} \pm \sigma (deg)$
理想結果	0	0	360
O-ICP	336.07 ± 67.95	550.25 ± 113.07	341.49 ± 3.18
Std-ICP	92.97 ± 29.33	220.85 ± 41.74	353.25 ± 2.6
E-ICP	26.34 ± 34.17	19.81 ± 15.73	359.37 ± 1.41
WE-ICP	13.97 ± 6.83	17.57 ± 13.08	359.4 ± 1.42
PSOWE-ICP	13.72 ± 8.06	15.45 ± 13.43	359.46 ± 1.33

經過四次實驗後，可以明顯看出 Std-ICP 演算法較 O-ICP 演算法的對齊效果還要來的好，尤其是在旋轉的問題有比較明顯的改善，但對於機器人的位置準確度稍顯差強人意，而使用本論文所提出的方式，明顯可以看出地圖已經明顯對齊的相當整齊，加上權重的計算後，使得對齊的效果更好，再搭配 PSO 演算法，提高兩集合之間的落差容忍度，使得地圖建立出來得結果更加準確。

5.3. 建立環境地圖

在本節中，會使用上節所使用的 O-ICP、Std-ICP、E-ICP、WE-ICP、PSOWE-ICP 這五種演算法來做環境地圖的建製，環境地點為台灣師範大學科技學院五樓，圖 5-12 為科技學院五樓理想環境及機器人行走路徑，環境紅色線段表示雷射測距儀會掃描到的部分，黑色線段則表示掃描不到的部分，自走車直走時車速 100mm/s，轉彎採用原地旋轉，速度也為 100mm/s，雷射測距儀掃描角度 180°，解析度為 0.5°，掃描頻率 10scan/s，總共 9139 筆掃描資訊，圖 5-13(a~e)為使用不同演算法所建立出來的環境地圖結果，黃色點為雷射測距儀所掃描到的障礙物，橘色點為機器人

路徑。



圖 5-12 科技學院五樓理想環境地圖

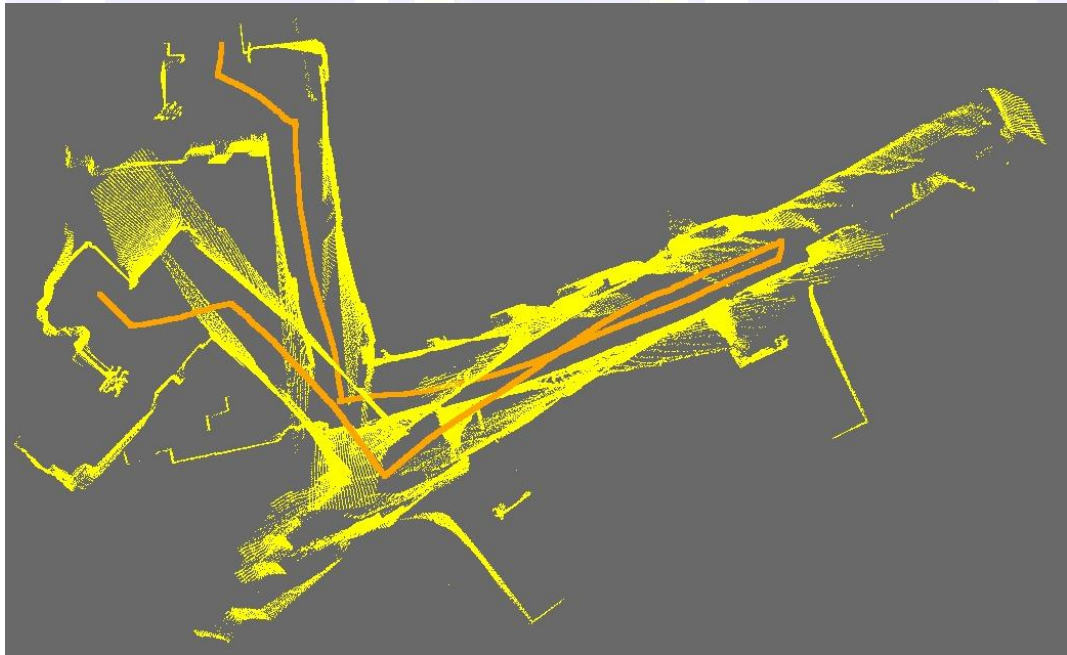


圖 5-13(a)使用 O-ICP 建立環境地圖結果

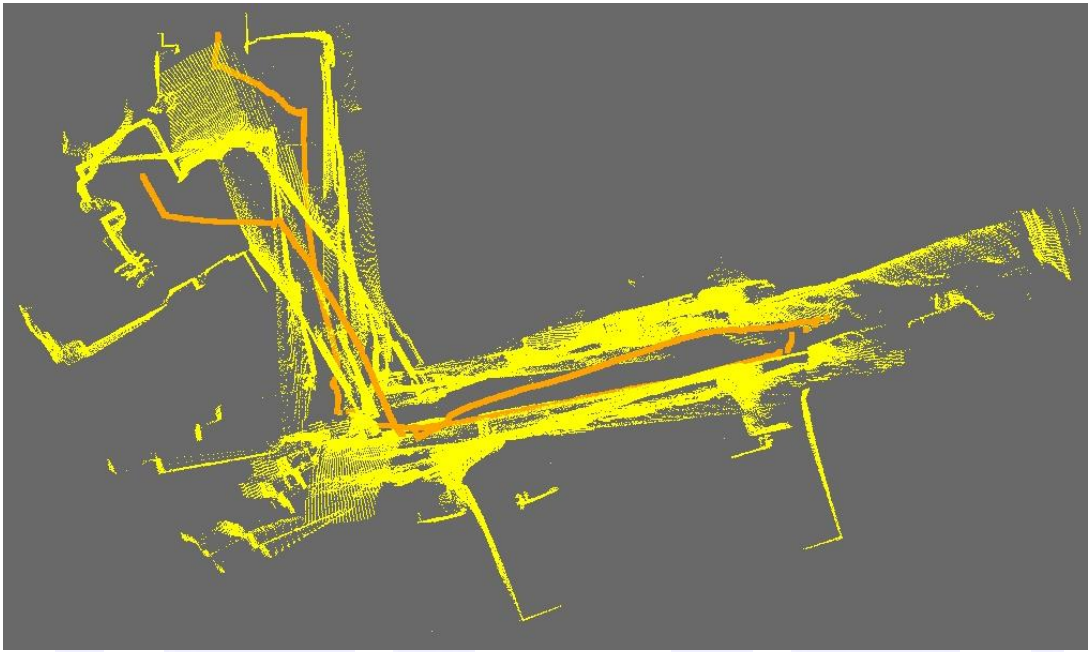


圖 5-13(b) 使用 Std-ICP 建立環境地圖結果

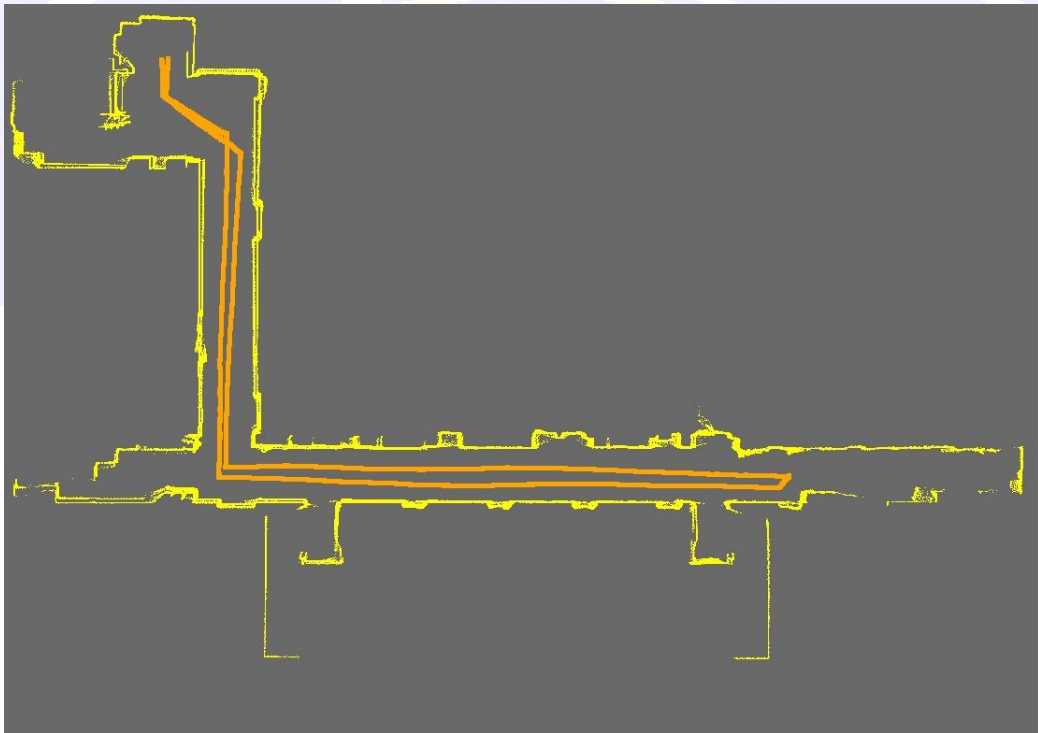


圖 5-13 (c) 使用 E-ICP 建立環境地圖結果

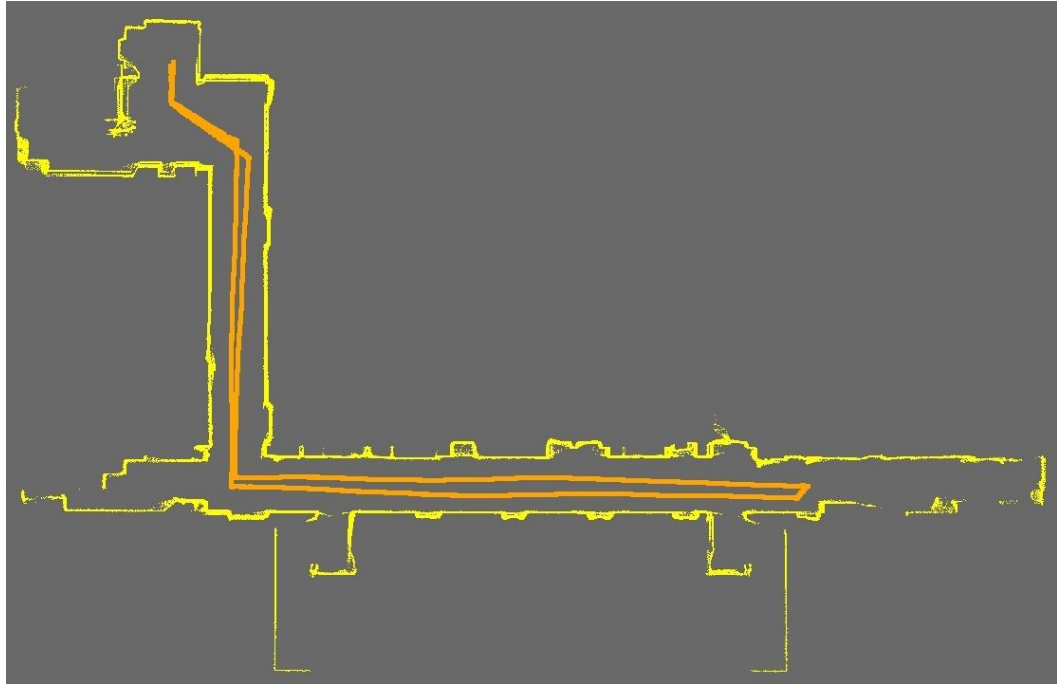


圖 5-13 (d) 使用 WE-ICP 建立環境地圖結果

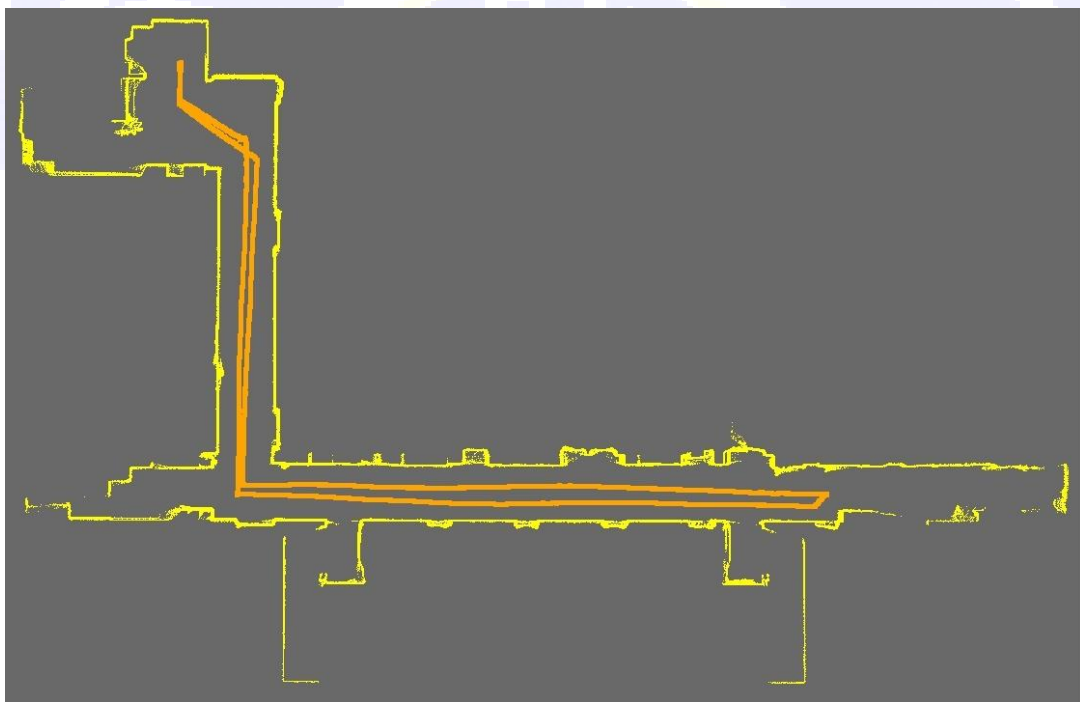


圖 5-13 (e) 使用 PSOWE-ICP 建立環境地圖結果

圖 5-13 科技學院五樓環境地圖建立比較

O-ICP 演算法受到雜訊以及離散點的影響，造成每次對齊所產生些許誤差，使得在多筆資訊連續對齊下，誤差累積量越來越大，最後導致對齊結果嚴重歪斜，而 Std-ICP 演算法對於雜訊與離散點較有抑制能力，但對於地圖上產生資料密集的地方，容易導致對齊時往資料密集點對齊，此原因也會造成誤差累積量越來越大，進而導致地圖對齊結果歪斜，E-ICP 則是使用部分全域地圖的方式不但可以降低雜訊與離散點的影響，並且透過篩選重疊資訊的方式，降低兩集合配對到不合適的配對點，進而提高準確度，降低累積誤差，WE-ICP 則將配對點加入權重運算，使得配對點距離較短的資訊點擁有較高的權重，並加入一正整數來調整部分全域地圖的間格，使得可用較少的參考資訊以獲得最佳的對齊準確度，最後 PSOWE-ICP 則可以避免兩資料集合落差太大所導致的區域最佳解，並獲得較好的初始相對位置。

第十四章 結 論

本論文提出了使用 PSO 調整增強型 ICP 演算法來未知建立環境地圖，克服了原始 ICP 演算法與 Standard-ICP 演算法對於雜訊、離散點、以及密集資料所造成的對齊效果不佳，首先使用 PSO 演算法先對兩集合做初步的對齊，降低兩集合之間的落差，增加對齊效果，接下來使用全域地圖的方式，增加參考集合的資料量，克服雜訊與離散點所造成的問題，接著使用篩選重疊資訊方法，避免配對到不恰當的配對點，由於使用全域地圖加上篩選點的方法，會產生參考集合中的資訊點是當下雷射測距儀掃描不到的位置，影響配對點的搜尋，故將全域地圖的方法改為部分地圖，使得此問題可以得到改善，而加上權重則可以使得較近的配對點獲得較高的權重值，讓對齊效果更加準確一些，經過實驗證實，本論文所提出的方法建立環境地圖，的確擁有較好的對齊效果，並可以有效地降低誤差的累積。

參 考 文 獻

- [1]. 網昱多媒體，<http://swf.com.tw>
- [2]. iRobot, <http://store.irobot.com/home/index.jsp>
- [3]. 林士勛，以模糊理論為基礎應用超音波感測器未知環境地圖建置，台師大工業教育學系碩士論文，2011年。
- [4]. P. Besl and N. McKay, "A Method for Registration of 3-D Shapes," IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intel, 1992, pp. 239-256.
- [5]. J. Minguez, F. Lamiroux, and L. Montesano, "Metric-Based Scan Matching Algorithms for Mobile Robot Displacement Estimation," Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Spain, 2005, pp. 3557-3563.
- [6]. Sung-In Choi and Soon-Yong Park, "Robust ICP Registration Using Biunique Correspondence," IEEE Int. Conf. on 3D Imaging, Modeling, Proc. Visualization and Transmission (3DIMPVT), South Korea, 2011, pp. 80-85.
- [7]. D. Chetverikov, D. Svirko, D. Stepanov, and P. Krsek, "The trimmed iterative closest point algorithm," Proc. Int. Conf. Pattern Recognition, Canada, 2002, pp. 545-548.
- [8]. M. Tomono, "Robust Robot Localization and Map Building using a Global Scan Matching Method," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Japan, 2004, pp. 1059-1064.
- [9]. F. Lu and E. Milios, "Globally Consistent Range Scan Alignment for Environment Mapping," Autonomous Robots, Netherlands, 1997, pp. 333-349.
- [10]. K. Lenac, E. Mumolo, and M. Nolic, "Fast genetic scan matching using corresponding point measurements in mobile robotics," Lecture Notes in Computer Science, Berlin, 2007, pp. 375-382.
- [11]. M. R. Kabuka and A.E. Arenas, "Position Verification of a Mobile Robot Using Standard Pattern," IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, pp. 505-516.
- [12]. A. Kosaka and A. C. Kak, "Fast Vision-Guided Mobile Robot Navigation Using

- Model-Based Reasoning and Prediction of Uncertainties,” *Computer Vision, Graphics, and Image Proc. Image Understanding*, 1992, pp. 271-329.
- [13].S. Atiya and G.D. Hager, “Real-Time Vision-Based Robot Localization,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1993, pp. 785-800.
- [14].C. C. Tsai, S. M. Hu, H. C. Huang, and S. M. Hsieh, “Fuzzy Hybrid Navigation of an Active Mobile Robotic Assistant: A multisensory fusion approach,” *Proceedings of CACS International Automatic Control Conference, Taichung*, 2007, pp. 1280-1285.
- [15].H. P. Moravec and A. Elfes, “High Resolution Maps from Wide Angle Sonar,” *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, Missouri*, 1985, pp. 116-121.
- [16].S. Thrun, “Learning Metric-Topological Maps for Indoor Mobile Robot Navigation,” *Artificial Intelligence*, 1998, pp. 21-71.
- [17].N. Ayache and O. D. Faugeras, “Maintaining Representations of the Environment of a Mobile Robot,” *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 1998, pp. 804-819.
- [18].S. Se, D. Lowe, and J. Little, “Mobile robot localization and mapping with uncertainty using scale-invariant visual landmarks,” *International Journal of Robotics Research*, 2002, pp. 735–758.
- [19].S. Se, D. G. Lowe, and J. J. Little, “Vision-Based Global Localization and Mapping for Mobile Robots,” *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, pp. 364-375.
- [20].S. Y. Chung and H. P. Huang, “Relative-Absolute Map Filter for Simultaneous Localization and Mapping,” *Proceedings of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, Beijing*, 2006, pp. 436-441.
- [21].A. Segal, D. Haehnel, and S. Thrun, “Generalized-icp,” *Proc. of Robotics: Science and Systems, Seattle*, 2009, pp. 26–27.
- [22].Z. Zhang, “Iterative point matching for registration of free-form curves and surfaces,” *Int. Journal of Computer Vision, Boston*, 1994, pp. 119–152.

- [23]. Godin, G., Rioux, M., and Baribeau, R. "Three-dimensional Registration Using Range and Intensity Information," Proc. SPIE Videometrics III, Boston, 1994, pp. 279-290.
- [24]. J. Kennedy, R.C. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," Proc. IEEE Int. Conf. on Neural Networks, USA, 1995, pp. 1942-1948.
- [25]. M. Tomono, "Robust Robot Localization and Map Building using a Global Scan Matching Method," Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Japan, 2004, pp. 1059-1064.
- [26]. Mobile Robot, http://www.mobilerobots.com/Mobile_Robots.aspx
- [27]. 台灣西克股份有限公司, <http://www.sick.com.tw/>
- [28]. L. Shang, C. Kai, and A. Liang, "A map-coverage algorithm basing on particle swarm optimization," Eighth Int. Conference on Embedded Computing, China, 2009, pp. 87-91.
- [29]. S. Rusinkiewicz and M. Levoy. "Efficient variants of the ICP algorithm," Proc. 3-D Digital Imaging and Modeling, CA, 2001, pp. 145-152.
- [30]. F. Lu, E. Milos. "Robot Pose Estimation in Unknown Environments by Matching 2D Range Scans," Journal of Intelligent Robotics Systems: Theory and Applicant, Netherlands, 1997, pp. 249-275.
- [31]. 張家瑋, 研製具有探索未知室內環境功能之影像導航自走車, 聖約翰科技大學電機工程系碩士論文, 2009年。

自 傳

一九八九年的孟夏，學生張華恩出生在資源豐富、進步的台北市，家中排行長子，下有一個妹妹。畢業於國立台灣師範大學應用電子科技研究所。

從小到大，面對課業方面一直保持著”今日事，今日畢”及”要怎麼收穫，先要怎麼栽”的態度，在研究所兩年期間，修習了許多專業知識，如演化計算、控制系統設計、機器人控制、數位相機設計等，讓我的專業知識更上一層樓，碩士論文方向與題目，透過指導教授與專業知識結合，讓我更能夠實務與理論互相並重學習，除此之外，同學與同學之間的互相學習，也是讓我獲益良多，透過學習互相討論，不但增加專業知識，也增加課本以外的知識。感謝老師的課業及做人處事的指導，及同學們的互相教學、鼓勵，讓我對電機、控制相關專業領域的學習中獲得莫大的樂趣。

追求知識是永無止境的，所以要不斷的進修充實自己，才能與社會連結，尤其是工程技術的日新月異，更應該時時加以關注，因此要不斷的充實自己的專業知識，擴展專業領域，更希望未來可以將自己所學應用在實務上，達到學以致用碩士畢業在即，在未來的歲月，我將努力不懈、訂好目標、盡其所能、發揮所長，這是我永遠的追求。

學術成就

論文發表

- C. C. Hsu, H. E. Chang, Y. Y. Lu, "Map Building of Unknown Environment Using PSO-Tuned Enhanced Iterative Closest Point Algorithm," Proc. IEEE Int. Conf. on System Science and Engineering, Budapest, 2013, pp.279-284.

專利

- 中華民國專利「移動物體軌跡偵測系統」(審查中)

競賽

- 2011 亞洲創新設計大賽「不球於人」佳作獎

參與計畫

1. 以 SOPC 為基礎利用單一攝影機傾斜攝影之移動式機器人物體追蹤與定位系統(1/2)
2. 以 SOPC 為基礎利用單一攝影機傾斜攝影之移動式機器人物體追蹤與定位系統(2/2)