

國立臺灣大學工學院土木工程學系

碩士論文

Department of Civil Engineering

College of Engineering

National Taiwan University

Master Thesis

快速單吊車與雙吊車協同吊裝作業路徑規劃方法

A Fast Path Planning Method for Single and
Dual Crane Erections



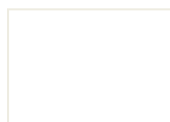
張育誠
Chang, Yu-Cheng

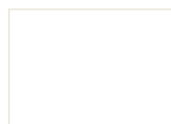
指導教授：康任仲 教授

Advisor: Prof. Kang, Shih-Chung

中華民國 99 年 8 月

August, 2010





國立臺灣大學碩士學位論文

口試委員會審定書

快速吊裝作業路徑規劃方法

A Fast Path Planning Method for Single and
Dual Crane Erections

本論文系張育誠君 (R97521604) 在國立台灣大學土木工程學系碩士班完成之碩士學位論文，於民國 99 年 5 月 25 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：

庄化仲

(簽名)

(指導教授)

謝尚賢

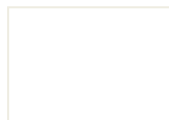
陳昭銘

陳政

呂良正

系主任

(簽名)





誌謝

本論文的完成，最主要感謝我的指導教授康仕仲老師的指導，給予我研究方面的知識與諸多教誨，使我能解決各種研究上所遭遇到的困難與挑戰。謝尚賢教授對於本研究提出許多寶貴的意見，促使本研究成果更加完善。陳俊杉教授則是教導我軟體設計的技巧，使我能將研究中的概念進行實作與展示，在此致上我最誠摯的謝意。

此外感謝中技社計畫經費的支持，中鼎工程廖源輔總工程師與于景華工程師實務上的經驗分享，並提供現地資料供研究參考。以及感謝陳鴻銘教授與陳正忠教授於口試中所給予的建議，藉由這些幫助一點一滴的累積，使本研究得以完整。

最後感謝偉瀚、孟涵、宏霖學長姐，這兩年來不厭其煩回答我各種問題，謝謝睿哥在我初次踏入CAE組時引領我，也謝謝CAE組的同學、學長姐、學弟妹們，與你們在研究上與生活中的互動，使我的研究生生活留下美好的回憶。

張育誠 于台大土木所

民國九十九八月



ABSTRACT

Cranes are essential equipment for lifting objects in construction projects. There are many challenges in an erection progress such as collision avoidance and retaining the safe weight loading. To ensure the safety of entire crane erection process, it needs a precise erection plan for crane operations. However, to have a good erection plan is a difficult task, which requires rich experience and many of the detailed considerations. Engineers need to consider the capacity of crane and avoid all the possible collisions during the erection.

Therefore this research aims at developing a method for automatically finding the erection path by utilizing the computer technology. The proposed method is composed of two steps: The first step is to convert the scene of crane erection into a configuration space, in which the capacity of the crane loading and the obstacles in the environment has been considered; The second step is to find a collision free path in the configuration space by using probabilistic road map (PRM) method.

We conducted three tests to validate the proposed method in this research: The first test and the second test are used to test the feasibility of the proposed planning method for single crane erections and dual crane erection, respectively; In the third test, we conducted two scenarios to test the efficiency of the proposed method and the operational effectiveness of generated path in dual crane erections. The result shows that the proposed method is efficient and can generate effective erection path for operating in near real-time. The method can be appropriately used for both single

and dual crane erection, which can help engineers to easily plan and verify the erection strategies.

Keywords: construction crane, path planning, erection actively, dual crane, robotic.



摘要

在現代營建工程中，吊車往往扮演舉足輕重的地位，舉凡鋼筋結構物、混凝土建材、機電設備等等都需仰賴吊車的搬運，然而吊車在吊裝作業的過程中有許多操作上的危險，如碰撞與承載荷重問題，為了確保吊裝作業的安全進行，通常會以事先進行吊裝路徑的規劃來避免上述問題的發生。但是吊裝路徑規劃並不是一件容易的事，規劃者必須有相當之經驗與耐心，才能規劃出完全無碰撞且符合安全荷重範圍的吊裝路徑。

因此本研究利用電腦技術發展自動化的吊裝路徑規劃方法，其方法主要可分為兩個階段；第一階段，我們將吊裝環境以組態空間(Configuration Space, C-space)的方式來表示，此空間表示吊車、吊物、與障礙物之間的碰撞關係，並考量吊車承載荷重的安全上限值；第二階段，我們使用 probabilistic road map (PRM)路徑規劃方法於組態空間中規劃出無碰撞且符合安全荷重範圍之吊裝路徑。

為了驗證本研究所提出的吊裝路徑規劃方法，我們分別進行了三項實驗：實驗一驗證本研究方法於單吊車吊裝作業的可行性；實驗二驗證本研究方法於雙吊車協同吊裝作業的可行性；實驗三進行效能測試，測試本研究方法的計算效率與路徑的操作性。由實驗結果顯示，本研究方法可適用於單吊車與雙吊車協同吊裝作業，且以接近即時的計算時間完成吊裝路徑規劃，並提供易於操作且有效率的吊裝路徑。

關鍵字：工程吊車、路徑規劃、吊裝計畫、雙吊車協同作業、

機器人學

目錄

誌謝	I
英文摘要	III
中文摘要	V
目錄	VI
圖目錄	IX
表目錄	XII
第一章 導論	1
1.1 研究背景	1
1.2 吊裝規劃的困難	2
1.3 路徑規劃於吊裝作業之應用	2
1.4 研究目的	3
第二章 相關研究	4
2.1 路徑規劃方法	4
2.2 組態空間 C-space (Configuration Space) 建構方法	7
第三章 單吊車吊裝作業路徑規劃方法	9
3.1 研究假設	9

3.2 吊裝路徑規劃流程.....	10
3.3 單吊車組態空間建構.....	11
3.4 單吊車路徑規劃.....	16
3.5 單吊車繩索長度規劃.....	20
3.6 本研究吊裝路徑規劃方法之特色	23
第四章 雙吊車協同吊裝作業路徑規劃方法	24
4.1 雙吊車組態空間建構.....	24
4.2 雙吊車路徑規劃.....	26
4.3 雙吊車繩索長度規劃.....	33
第五章 程式實作.....	35
5.1 開發環境.....	35
5.2 軟體架構.....	36
第六章 實驗結果與討論.....	41
6.1 實驗一：單吊車吊裝作業路徑規劃測試	41
6.2 實驗二：雙吊車協同吊裝作業路徑規劃測試	44
6.3 實驗三：效能測試.....	48
6.3.1 場景一.....	48
6.3.2 場景二.....	51

6.4 實驗結果討論.....	53
第七章 研究貢獻與結論.....	56
7.1 研究貢獻.....	56
7.2 結論.....	57
參考文獻.....	58



圖目錄

圖 2.1 兩段式機械手臂路徑規劃問題：(a)卡氏座標系統 (b)組態空間系統.....	8
圖 3.1 吊車路徑規劃方法流程圖	10
圖 3.2 吊車組態空間建構流程	11
圖 3.3 <i>cObstacleCheck</i> Algorithm.....	12
圖 3.4 <i>getCableLengthRange</i> Algorithm.....	13
圖 3.5 繩索伸長量範圍 h_{min} 與 h_{max}	14
圖 3.6 二維度吊車組態空間建構	15
圖 3.7 路徑規劃流程	16
圖 3.8 組態空間中取樣節點	17
圖 3.9 找尋無碰撞路徑	17
圖 3.10 吊裝路徑中障礙物最大高度	19
圖 3.11 以繩索最大伸長量做為繩索操作參數	20
圖 3.12 經過優化後的繩索操作參數	21
圖 3.13 避免吊物與吊臂產生碰撞而增加繩索長度	22
圖 4.1 雙吊車組態空間建構流程	25
圖 4.2 雙吊車路徑規劃流程	27

圖 4.3 雙吊車協同作業案例	28
圖 4.4 雙吊車協同作業路徑規劃節點取樣方法	29
圖 4.5 雙吊車協同作業路徑規劃節點取樣，吊物與障礙物碰撞時 ..	30
圖 4.6 雙吊車協同作業節點取樣：(a)以吊車 A 為基準時特有節點 (b) 以吊車 B 為基準時特有節點	30
圖 4.7 雙吊車協同作業路徑軌跡	31
圖 4.8 以吊物避開障礙物所需高程為吊裝路徑	34
圖 4.9 繩索操作參數修正方法	34
圖 5.1 <i>Erection Planner</i> 軟體架構圖	36
圖 5.2 吊車模型：(a)3D 模型 (b)物理碰撞模型	37
圖 5.3 障礙物模型：(a)3D 模型 (b)物理碰撞模型	37
圖 5.4 吊裝路徑展示畫面	40
圖 6.1 實驗一場景配置	42
圖 6.2 實驗一吊裝路徑	42
圖 6.3 實驗一吊裝路徑連續截圖	43
圖 6.4 實驗二裝案例場景配置	45
圖 6.5 實驗二無條件限制下之吊裝路徑	45
圖 6.6 實驗二中間障礙物不可通過時之替代吊裝路徑一	46
圖 6.7 實驗二中間障礙物不可通過時之替代吊裝路徑二	46

圖 6.8 實驗二全障礙物不可通過時之替代吊裝路徑一	46
圖 6.9 實驗二全障礙物不可通過時之替代吊裝路徑二	47
圖 6.10 實驗三場景一吊裝案例場景配置	49
圖 6.11 實驗三場景一使用三維度組態空間基因演算方法規劃出之 吊裝路徑.....	49
圖 6.12 實驗三場景一使用三維度組態空間 PRM 方法規劃出之 吊裝路徑.....	50
圖 6.13 實驗三場景一使用二維度組態空間 PRM 方法規劃出之 吊裝路徑.....	50
圖 6.14 實驗三場景二使用三維度組態空間基因演算方法規劃出之 吊裝路徑.....	51
圖 6.15 實驗三場景二使用三維度組態空間 PRM 方法規劃出之 吊裝路徑.....	52
圖 6.16 實驗三場景二使用二維度組態空間 PRM 方法規劃出之 吊裝路徑.....	52

表目錄

表 5.1 C-Space Builder 服務單元表	38
表 5.2 Path Planner 服務單元表	39
表 5.3 Cable Length Planner 服務單元表	39
表 6.1 實驗三場景一路徑規劃方法效能比較	54
表 6.2 實驗三場景二路徑規劃方法效能比較	56



第一章 導論

1.1 研究背景

在營建工程中吊車為非常重要的施工機具，吊車的主要功能是用於搬運大型重物，舉凡鋼筋結構物、混凝土建材、機電設備等等都需仰賴吊車的搬運。即便吊車在使用上有翻覆、誤觸電纜、吊物飛落、撞傷地面工作人員等危險性，因而被歸類為危險性機具，但由於其活動範圍大、荷重能力強、類型種類多可適用於各種不同工作環境，擁有諸多優點，因此在需要搬運大量建材與機具設備的營建工程之中依然被頻繁的使用(Peurifoy et al. 2007)，所以為了能有效率且安全的運用吊車於工程上，如何規劃出完善且安全的吊裝路徑，已成為現今營建工程的重要課題。

而近幾年以來，除了一般常見的單吊車吊裝作業之外，雙吊車協同吊裝作業在現代的營建工程中也越來越普遍，尤其是在工業建設中，經常需要仰賴吊車搬運重達 500 至 1000 噸的大型設備，雖然現有的大型吊車最高能有將近 1300 噸的荷重能力，然而大型吊車卻可能受限施工地點空間不足而無法正常進行吊裝作業，租用昂貴的大型吊車也會增加額外的施工成本，因此使用較為便宜的兩部吊車，以協同方式進行吊裝作業已成為常見的替代方案(Hornaday and Haas 1993; Lin et al. 1996)，但是雙吊車協同吊裝作業需要兩台吊車彼此間緊密地配合以維持吊物的平衡，吊車操作的複雜度高於一般單吊車吊裝作業，伴隨著許多施工上的風險 (Shapiro et al. 1991)，此時若能預先規劃出安全可行的雙吊車協同吊裝作業路徑，將可把風險降至最低，更顯得吊裝路徑規劃在工程上的重要性。

1.2 吊裝規劃的困難

吊裝路徑規劃是一件很困難的事，其困難點主要有三點：第一點，在吊裝過程中需確保吊車所承載的荷重皆處於安全荷重範圍之內，而吊車的承載荷重上限會隨著吊臂角度的改變而隨著變化，因而增加路徑規劃上的難度；第二點，需避免吊車、吊物、與障礙物之間有任何碰撞發生的可能，當吊裝場景障礙物眾多或吊物體積龐大時，要規劃無碰撞的吊裝路徑將更加困難；第三點，當進行雙吊車協同吊裝作業時，在吊裝過程中還需盡可能的維持吊車繩索垂直，避免繩索因傾斜而產生額外張力，增加吊車所承受的荷重。

為了解決上述問題，以往吊裝路徑規劃者主要使用 2D 平面施工圖，從中尋找無碰撞且符合荷重安全範圍的吊裝路徑，然而使用 2D 平面圖並無法完整表示出連續 3D 空間，需要許多不同視角與不同時間點的視圖，互相對照以確保路徑無碰撞，使得要規劃出安全的吊裝路徑並不容易，規劃者需要具備相當的經驗與耐心。

1.3 路徑規劃於吊裝作業之應用

路徑規劃是人工智慧應用的一種，其主要是利用電腦計算，以智慧型的路徑檢索方式，找尋出空間中無碰撞之路徑解，解決路徑規劃問題，然而實際上此類方法的計算相當複雜，其計算需要耗費相當多的時間，因此實際應用價值並不高。

以往路徑規劃受限於計算效率，因而只適用於處理環境單純的移動路徑規劃問題(Lozano-Perez, T. and Wesley 1979)或低自由度的機械動作規劃問題(Lewis and Bejczy 1973)，但隨著電腦科技的發展，電腦

的計算速度也越來越迅速，許多路徑規劃從前難以實際應用的問題，也獲得了改善，如高自由度機械動作規劃 (Kavraki et al. 1996)、即時避障 (Khatib 1986)、及機械協同作業(Mohri et al. 1996)等應用。

由於路徑規劃方法的發展，因此開始有許多研究嘗試著以路徑規劃方式進行吊車吊裝路徑的規劃，使用電腦建構施工場景與吊裝機具的 3D 模型，於虛擬的吊裝環境中進行碰撞偵測，並檢核吊車承載荷重，以路徑規劃方法，規劃出無碰撞可行的吊裝路徑(Kang and Miranda 2006; Reddy and Varghese 2002; Ali et al. 2005)，其中 Kang and Miranda (2006)與 Reddy and Varghese (2002) 所提出的方法可有效地規劃出吊裝路徑，但只適用於單吊車吊裝作業，Ali et al. (2005) 所提出的方法可為雙吊車協同吊裝作業規劃出吊裝路徑，針對雙吊車協同吊裝作業路徑規劃問題，其為目前現有方法之中計算效率最佳者，但吊裝路徑規劃時間仍需長達 3-12 分鐘不等的時間。

1.4 研究目的

本研究的主要目的是發展快速的自動化吊裝路徑規劃方法，以接近即時的計算時間完成吊裝路徑規劃，並同時適用於單吊車與雙吊車協同吊裝作業；且找出符合實際狀況並易於操作的吊裝路徑，使吊車作業人員能以有效率的操作方式完成吊裝作業，以提升自動化吊裝路徑規劃方式於工程上的實際應用價值。

第二章 相關研究

由於本研究涉及吊車的路徑規劃，故先回顧常用的機器人路徑規劃方法，及被用於解決路徑規劃問題的組態空間(configuration space, C-Space)建構方法。

2.1 路徑規劃方法

關於路徑規劃問題的研究，常見的路徑規劃解決方法主要有以下幾種，Potential Field、Cell Decomposition、Genetic Algorithm、Visibility Graph、及 Probabilistic Roadmap 方法。

Potential Field 方法(Guldner 1995)，是將欲做路徑規劃的物體，其所處的空間中建立力場，力場中存在著吸引力與排斥力，所欲到達的終點位置為吸引力中心，空間中的障礙物則為排斥力中心，以此方法將機械推向終點位置，使用 Potential Field 方法雖然容易尋找出路徑，也可於具有狹窄通道的環境中找到路徑，但卻有著容易陷入局部最佳解的缺點存在，關於 Potential Field 方法的應用，有多機器人路徑規劃問題 (Song and Kumar 2002)、機器人即時避障(Khatib 1986)、高速行駛車輛路徑規劃(Daily and Bevly 2008)等應用。

Cell Decomposition 方法(Brooks and Lozano-Perez 1982)，是將物體所處的空間劃分為許多的子空間，並找出子空間的相鄰關係，產生連結關係圖，接著搜尋起點到終點之間所需經過的子空間與順序，機器依循著該順序通過子空間即可安全抵達終點，而為了解決非多邊形障礙物與物體於非平面空間的問題，衍伸出了 Morse Decomposition

(Acar 2002)，此外還有專門用於解決 pursuit-evasion problem 的 Visibility-Based Decomposition (Guibas et al. 1999)。

Genetic Algorithm 方法(Goldberg and Holland 1988; Mitchell 1996)，主要依據達爾文的進化論“優勝劣敗，適者生存，不適者淘汰”的自然界法則，將行經路徑做為基因，藉由模擬生物進化的過程，得到最佳的路徑解，演算法主要包含了三個步驟，複製、交配、及突變，反覆重覆上述三步驟，藉由複製保留下較佳的基因，再以隨機方式進行基因間的交配與自身的突變，直到滿足終止條件為止，其缺點為計算量大，及可能在收斂出最佳解之前即滿足終止條件等缺點，然而 Genetic Algorithm 因為其容易應用於處理各種最佳化問題的優點，除了被應用於路徑規劃問題外，也被廣泛地應用於各領域上，如電路設計問題 (Zhang et al. 2006)、控制系統設計(Li et al. 1996)、時程規劃問題(Hou et al. 1994)等應用。

Visibility Graph 方法(Oommen et al. 1987; Liu Y. and Arimoto 1992)，此方法將障礙物的頂點做為路徑節點，考慮所有起點至終點的可能路徑，即起點、終點、與節點之間不穿越障礙物的所有路徑均考慮，找出其中路徑長度最短者，為避免節點過多問題，若障礙物不在最短路徑上，則不需考慮，但缺點為若無法預先得知最短路徑走向時，將難以判斷是否將該障礙物的頂點做為節點，且無法處理圓滑型障礙物問題。

Probabilistic Roadmap Methods (PRM) (Kavraki et al. 1996; Choset et al. 2005)為廣泛被使用於機器人動作規劃與路徑規劃問題的方法，其主要方法為在空間中作隨機灑點，將其做為路徑節點，並將所有可

互相通行的節點連結起來做為路徑，建立街景圖，試著從街景圖中，找出起點到終點所有可能的路徑，挑選其中最短者做為機器人運動路徑，若不存在路徑，則繼續灑取更多路徑節點，直到起點至終點存在路徑為止，PRM 已被證明相當完善(Ladd and Kavraki 2004)，只要起點至終點存在路徑的可能性不為零，在有足夠時間的條件下使用 PRM 一定可以找出可行的路徑。

PRM 方法的計算時間，主要取決於路徑節點的多寡。節點越少，計算時間越短，但找到路徑解的機率也越低；節點越多，計算時間越長，找到路徑解的機率也越高，而吊裝路徑規劃並不像機器人走迷宮問題，需要找出許多轉彎且通過狹窄通道之路徑，所以只需要灑取少量路徑節點即可規劃出吊裝路徑，若吊裝作業較為複雜，則可灑取更多路徑節點直到規劃出吊裝路徑，因此為了可快速的規劃出吊裝路徑。本研究以 PRM 路徑規劃方法來實做吊裝路徑規劃方法。



2.2 組態空間 C-space (Configuration Space)建構方法

組態空間(Configuration Space, C-space)為描述機械系統所有可動自由度狀態的集合空間，為了解決對機械系統做路徑規劃問題，一般會將該機械系統的可動自由度定義為組態空間的維度，每一個組態空間上的組態都代表著機械可能的位置、方向、或是該機械的屬性狀況，機械所有的動作與狀態皆可用組態來表示(Lozano-Perez 1983)，在組態空間中，若機械會於該組態發生與障礙物碰撞或自身發生碰撞行為，則將該組態稱為組態障礙物(Configuration-obstacle, C-obstacle)，藉著把機械模型與空間障礙物從卡氏座標系統轉換由組態空間來表示，可不需處理複雜的幾何模型與運動學問題，將困難的機械動作規劃問題簡化為在組態空間中尋找出避開組態障礙物區域的機械起始組態座標點到終點組態座標點的連續連線。

在此以一個兩段式的機械手臂為例如圖 2.1，其第一段手臂的旋轉角度為 q_1 、第二段手臂的旋轉角度為 q_2 ，若直接在卡氏座標系統中進行路徑規劃，則需考慮到機械手臂與障礙物的碰撞問題，但若改以組態空間來表示機械手臂的動作狀態，以 q_1 、 q_2 做為組態空間的座標軸，機械手臂與障礙物發生碰撞的動作狀態以組態障礙物表示，機械手臂的起始與終點狀態可用組態空間中的一點來表示，在組態空間中，起始組態至終點組態避開組態障礙物區域的連線，即為機械手臂可行的操作路徑。

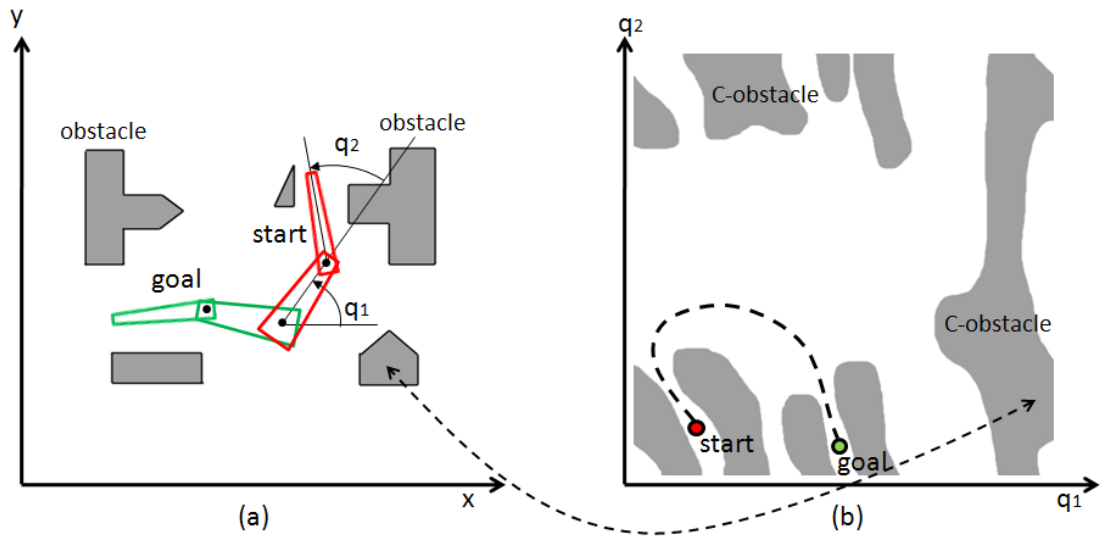


圖 2.1 兩段式機械手臂路徑規劃問題：(a)卡氏座標系統 (b)組態空間



第三章 單吊車吊裝作業路徑規劃方法

本章節主要介紹如何為單吊車吊裝作業建構組態空間，並從吊車組態空間中找尋出無碰撞的路徑，做為單吊車吊裝作業路徑。

3.1 研究假設

本研究所提出之吊裝作業路徑規劃方法有以下之假設條件限制：

1. 路徑計算過程中，障礙物視為靜止。本研究不考慮其它施工機具對吊車的干擾問題，因此假設吊裝過程中，除了吊車與吊物之外，所有障礙物皆為靜止不動。
2. 吊車架設之位置在吊裝過程中不移動。絕大多數的吊裝作業，在吊裝過程中需將吊車架設於一固定位置上，吊車是無法移動的，即使該吊車類型可不需架設於固定位置上進行吊裝行為，通常也會盡可能不移動吊車來完成吊裝作業。
3. 吊裝過程中，吊物視為靜態物體，不考慮其晃動問題。本研究關於吊物的碰撞偵測，使用比吊物真實尺寸較大之模型進行碰撞偵測，若要考慮吊物晃動問題，可調整吊物碰撞模型尺寸，找出與障礙物之間留有較大空隙的吊裝路徑，來避免因吊物晃動而發生碰撞行為，但吊物的碰撞模型尺寸該如何定義來避免碰撞，並非本研究之研究範疇，因此在吊裝過程中假設吊物為靜態物體。

吊裝路徑規劃環境在此限制之下，方可以進行本吊裝路徑規劃方法。

3.2 吊裝路徑規劃流程

本研究所提出之吊裝路徑規劃流程主要分為三個部分，如圖 3.1 所示，首先為吊車建構組態空間，接著於吊車組態空間中進行路徑規劃，最後進行繩索長度的操作規劃，規劃出無碰撞且可行的吊裝路徑。

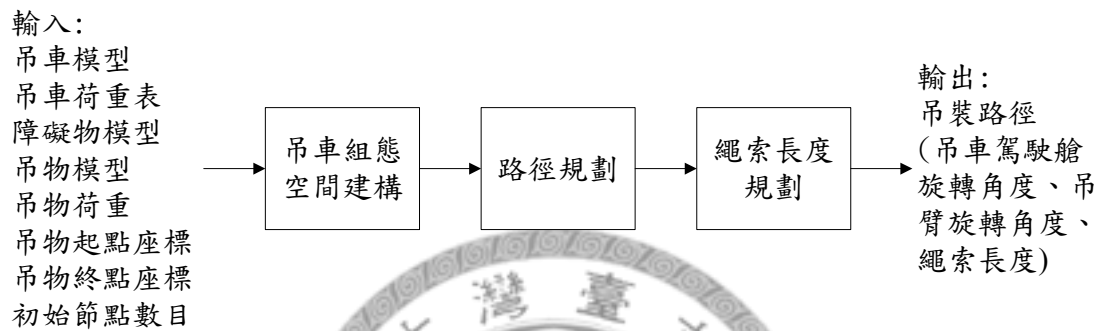


圖 3.1 吊車路徑規劃方法流程圖

3.3 單吊車組態空間建構

本研究將吊車駕駛艙旋轉角度 θ 、及吊臂旋轉角度 ϕ 做為為吊車組態空間的維度，建構二維度的吊車組態空間，吊車組態空間的建構可分為三個部分，首先定義出吊車組態空間的範圍，再判斷出屬於組態障礙物之區域，最後紀錄下空間中各個無碰撞組態所對應的繩索伸長量範圍與障礙物高度，其流程如圖 3.2 所示。

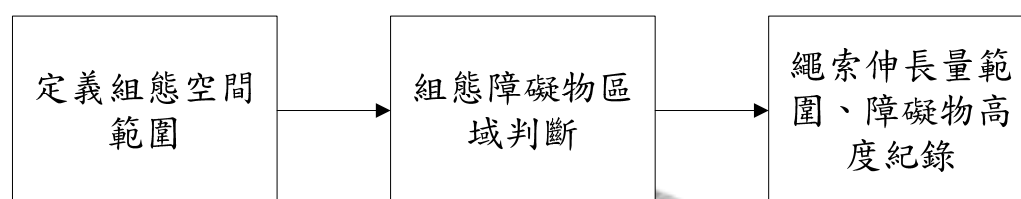


圖 3.2 吊車組態空間建構流程

要定義組態空間範圍，我們需先求得吊臂旋轉角度 ϕ 範圍為何，依吊車荷重表，配合吊物的重量 W ，求出吊臂最大旋轉角 $\phi_{max}(W)$ 與最小旋轉角 $\phi_{min}(W)$ ，即可定義出該吊車的組態空間的座標空間範圍。若為了安全考量，希望規劃出的吊裝路徑，在吊裝過程中吊臂所承受的荷重值不超過安全上限的 $S\%$ ，則將吊物重量視為 W/S ，查詢吊臂荷重表，求解 $\phi_{max}(\frac{W}{S})$ 與 $\phi_{min}(\frac{W}{S})$ 。

定義好組態空間後，我們對組態空間中的各個組態 $[\theta, \phi]$ ，進行吊車、吊物、與障礙物之間的碰撞檢測，以建立組態障礙物區域，將卡氏座標系統中的障礙物資訊轉換至組態空間之中。我們提出 *cObstacleCheck* 演算法判斷組態是否為組態障礙物，該演算法主要可分為兩個部分，第一部分，檢察吊車在駕駛艙旋轉角度為 θ ，吊臂旋轉角度為 ϕ 時，吊車與障礙物之間使否有碰撞行為發生，若有碰撞行

為發生，則該 $[\theta, \phi]$ 為組態障礙物區域，若無碰撞行為發生，則進行第二部份；在第二部分我們提出 *getCableLengthRange* 演算法，分別對吊物與吊車、吊物與障礙物碰撞檢測，求解繩索伸長量範圍值 h_{min} 、 h_{max} ，當繩索長度不斷增加(每次增加 Δh)至吊物與吊臂不發生碰撞時，該繩索長度即為 h_{min} ，當繩索長度不斷增加(每次伸長 Δh)至吊物與建築物、地板、或吊車機身三者其中之一發生碰撞時，該繩索長度即為 h_{max} ，如圖 3.5 所示。若 $h_{min} \geq h_{max}$ ，則表示障礙物過高造成吊物無法通過或吊臂旋轉角度過大造成吊物與吊車過於貼近，此時該組態 $[\theta, \phi]$ 為組態障礙物區域；若 $h_{min} < h_{max}$ ，則該組態 $[\theta, \phi]$ 為無碰撞組態。

Algorithm *cObstacleCheck*(θ, ϕ) : determine the configuration(θ, ϕ) is C-obstacle or not

θ : crane cabin rotate angle

ϕ : crane boom rotate angle

```

1:   if obstacle collided with boom( $\theta, \phi$ ) or cabin( $\theta$ ) then
2:     the configuration( $\theta, \phi$ ) is C-obstacle
3:   else
4:     getCableLengthRange( $\theta, \phi$ )
5:     if  $h_{min} \geq h_{max}$  then
6:       the configuration( $\theta, \phi$ ) is C-obstacle
7:     else
8:       the configuration( $\theta, \phi$ ) is not C-obstacle

```

圖 3.3 *cObstacleCheck* Algorithm

Algorithm $getCableLengthRange(\theta, \emptyset)$: find cable length range h_{min} and h_{max}

θ : crane cabin rotate angle

\emptyset : crane boom rotate angle

h : cable length

Δh : cable length increase in each iteration

h_{min} : minimal cable length for (θ, \emptyset)

h_{max} : maximal cable length for (θ, \emptyset)

```
1:   $h = 0$ 
2:  repeat
3:    if  $h_{min}$  not found then
4:      if object( $\theta, \emptyset$ ) does not collided with boom( $\theta, \emptyset$ ) then
5:         $h_{min} \leftarrow h$ 
6:      else
7:         $h \leftarrow h + \Delta h$ 
8:      end if
9:    else
10:     if object( $\theta, \emptyset$ ) collided with obstacle, ground or cabin( $\theta$ ) then
11:        $h_{max} \leftarrow h$ 
12:     else
13:        $h \leftarrow h + \Delta h$ 
14:     end if
15:   end if
16: until  $h_{max}$  found
17: return  $h_{min}$  and  $h_{max}$ 
```


The logo of National Sun Yat-sen University is a circular emblem. It features a central bell (the Sun Yat-sen Bell) flanked by two torches. The emblem is surrounded by a decorative border containing the university's name in Chinese characters: '國立臺灣大學' at the top and '愛國、學勵、品教' at the bottom.

圖 3.4 $getCableLengthRange$ Algorithm

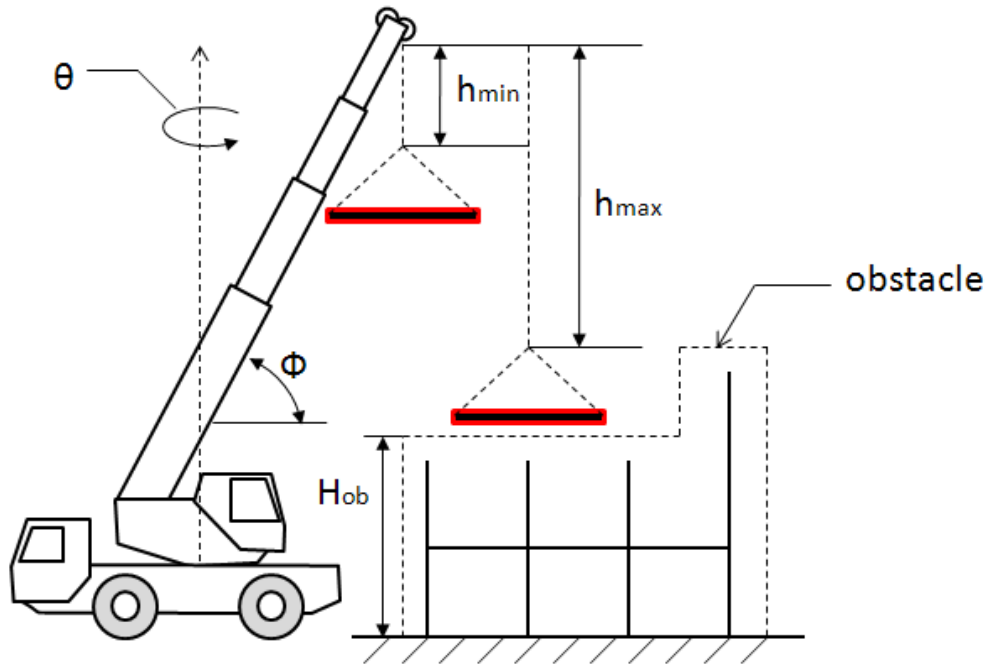


圖 3.5 繩索伸長量範圍 h_{min} 與 h_{max}

完成組態障礙物區域的判斷後，將各組態繩索伸長量範圍值 h_{min} 、 h_{max} 與障礙物高度 H_{ob} 紀錄下來，可用於接下來對吊車進行吊裝路徑規劃。

完成上述步驟後將可為吊車建構出二維度的組態空間，如圖 3.6 所示，吊車駕駛艙旋轉角度 θ 為橫軸，吊臂旋轉角度 ϕ 為縱軸，吊臂最大旋轉角 $\phi_{max}(W)$ 與最小旋轉角 $\phi_{min}(W)$ 為組態空間縱軸範圍限制，在組態空間中不屬於組態障礙物區域的組態，為吊車在此吊裝活動中，不會發生碰撞行為且符合荷重安全值的所有可能動作狀態，以此組態空間進行吊裝作業路徑規劃，可不需考慮複雜的碰撞偵測問題與吊車運動學問題，降低吊裝路徑規劃的困難度。

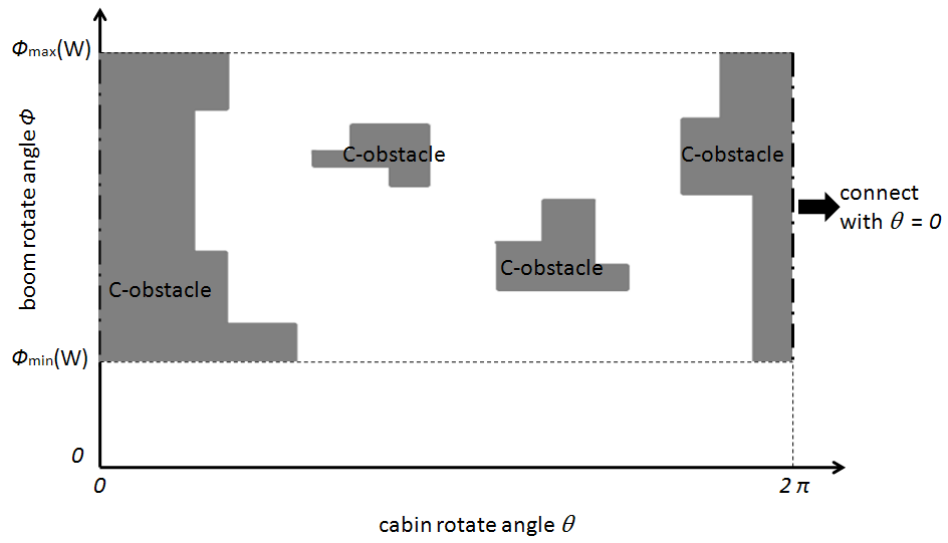


圖 3.6 二維度吊車組態空間建構



3.4 單吊車路徑規劃

本研究使用 PRM 路徑規劃方法來進行路徑規劃，先從吊車組態空間之中隨機取樣足夠的路徑節點，將可連接的節點互相連結為路徑，最後由起點至終點所有的可能路徑中尋找最佳解，做為吊車的吊裝路徑，路徑規劃的流程如圖 3.7 所示。

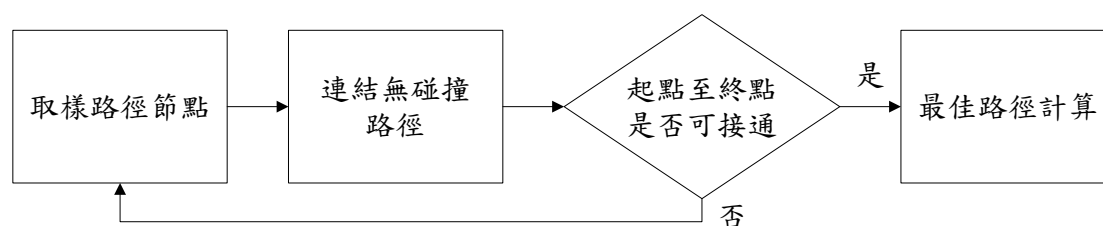


圖 3.7 路徑規劃流程

首先在取樣路徑節點階段，將吊車起點組態與終點組態加入至街景圖中，接著於吊車組態空間之中隨機取樣一個組態，若該組態不屬於組態障礙物，則將其加入至街景圖中做為路徑節點，若該組態屬於組態障礙物，則反覆重新隨機取樣一個新的組態，直至該組態不屬於組態障礙物為止，當街景圖中的節點達到預計的初始節點數目時，則不在取樣路徑節點，進入下一階段，此時街景圖包含著路徑起點、終點、節點等資訊，如圖 3.8 所示。

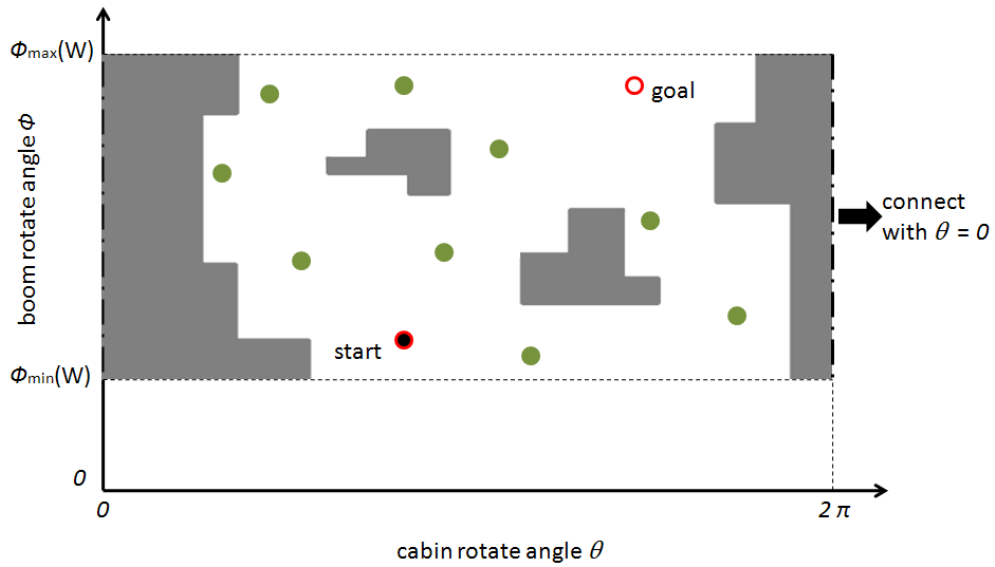


圖 3.8 組態空間中取樣節點

在連結無碰撞路徑階段，我們將直線內插不通過組態障礙物的節點與節點之間連線建立為連結，能由起點透過連結接通到終點的路徑，皆為可行的吊裝路徑，如圖 3.9 所示，若無法尋找出由起點連接到終點的路徑，則回到上一階段，取樣更多的組態做為節點添加至街景圖中，直到尋找出起點連結到終點的路徑為止。

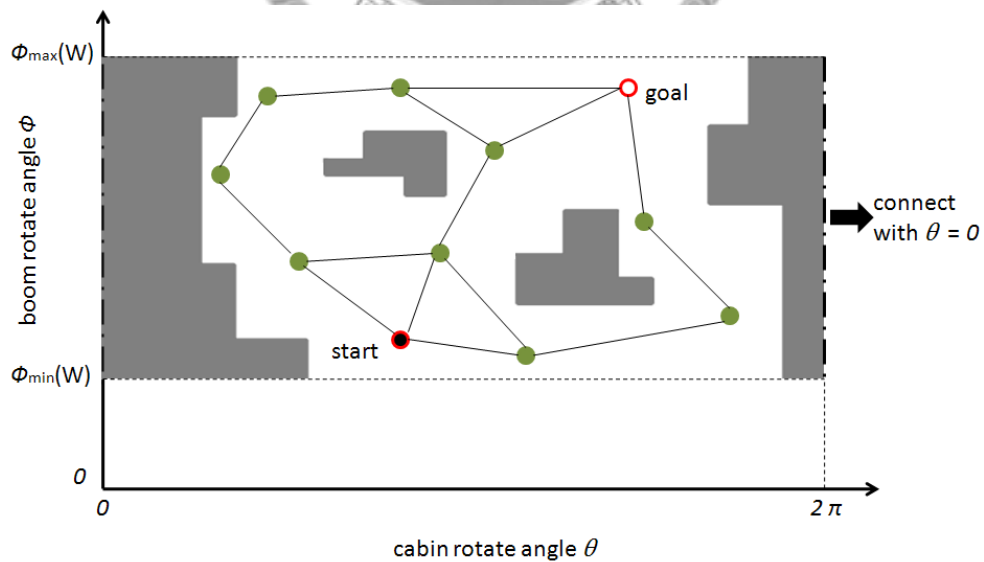


圖 3.9 找尋無碰撞路徑

關於最佳路徑的計算，我們以執行該路徑，吊車所需要的駕駛艙旋轉角度變化量、吊臂旋轉角度變化量、與繩索長度變化量做為評估依據，發展出 P_{cost} 函式來計算執行路徑所需花費的成本，路徑的 P_{cost} 函式計算結果越大，表示執行該路徑所需耗費的時間越多，吊車操作的難度也越高，計算結果最小者，即為最佳路徑。

$$P_{cost}(N_1, N_2, N_3, \dots, N_n) = W_\theta \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\theta_i + W_\phi \cdot \sum_{i=1}^{n-1} \Delta\phi_i + W_h \cdot H_{ob_max} \quad (3-1)$$

$N_i(i=1,2,\dots,n)$: 連結起點至終點的節點組態， N_1 為起點組態， N_n 為終點組態。

$\Delta\theta_i$: 第 i 個節點與第 $i+1$ 個節點所構成的路徑，其駕駛艙旋轉角度 θ 的總變化量，單位為角度。

$\Delta\phi_i$: 第 i 個節點與第 $i+1$ 個節點所構成的路徑，其吊臂旋轉角度 ϕ 的總變化量，單位為角度。

n : 路徑所包含的節點總數。

H_{ob_max} : 路徑所通過的組態之中障礙物高度最大者，單位(公尺)，

圖 3.10 以一含有 4 個節點路徑為例， H_{ob} 最大值即為本值。由於本研究的 2D 吊車組態空間方法，組態並未包含繩索長度的操作參數，因此以吊物需越過的障礙物最大高度做為繩索長度變化量的粗略估算。

ω_θ ：吊車駕駛艙旋轉角速度，單位(角度/秒)。

ω_ϕ ：吊臂旋轉角速度，單位(角度/秒)。

V_h ：繩索伸縮速度，單位(公尺/秒)。

W_θ ：吊車駕駛艙旋轉角度變化量於路徑成本估算中所佔的權重。

W_ϕ ：吊臂旋轉角度變化量於路徑成本估算中所佔的權重。

W_h ：繩索長度變化量於路徑成本估算中所佔的權重。

$$W_\theta = \frac{\omega_\theta^{-1}}{\sqrt{\omega_\theta^{-2} + \omega_\phi^{-2} + V_h^{-2}}} \quad (3-2)$$

$$W_\phi = \frac{\omega_\phi^{-1}}{\sqrt{\omega_\theta^{-2} + \omega_\phi^{-2} + V_h^{-2}}} \quad (3-3)$$

$$W_h = \frac{V_h^{-1}}{\sqrt{\omega_\theta^{-2} + \omega_\phi^{-2} + V_h^{-2}}} \quad (3-4)$$

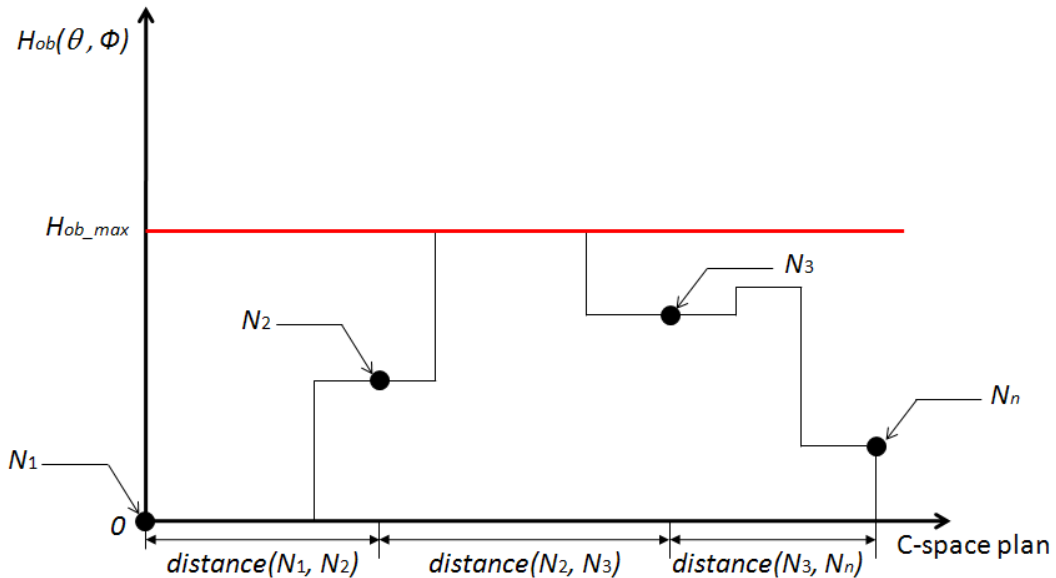


圖 3.10 吊裝路徑中障礙物最大高度

3.5 單吊車繩索長度規劃

由於本研究所使用的二維度吊車組態空間，並未將繩索長度定義為組態空間的維度，因此所尋找出之路徑沒有包含繩索長度的操作資訊，在此我們還需對 3.4 節所規劃出之路徑，做進一步的繩索長度規劃。

首先我們將路徑中的組態，其所對應的繩索長度最大伸長量 h_{max} 做為吊裝過程中繩索操作參數，但發現若直接以組態中繩索最大伸長量做為繩索操作參數，可能會發生在吊裝過程中，繩索做出多餘不必要伸縮變化的情況發生，如圖 3.11 所示，因此為了避免此情況需再對該路徑繩索操作參數做進一步優化的步驟，由起點組態開始，在 h_{max} 到達該路徑中的最小值之前，若當前組態繩索伸長量大於 h_{max} 時，則減少繩索長度至 h_{max} ，若繩索伸長量小於 h_{max} 時，則不做任何繩索長度改變，在繩索伸長量達到 h_{max} 最小值之後，繩索長度將不再做任何改變，直到抵達終點將吊物放下，繩索操作參數優化後的結果如圖 3.12 所示。

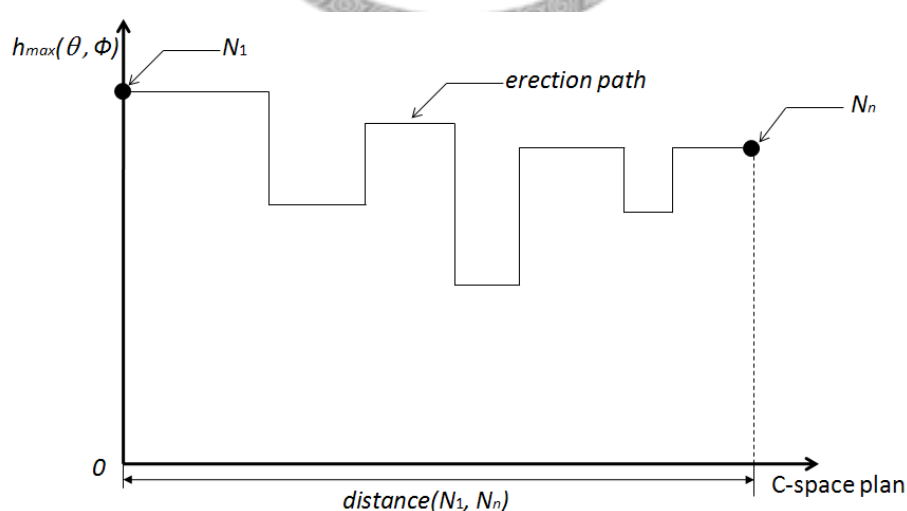


圖 3.11 以繩索最大伸長量做為繩索操作參數

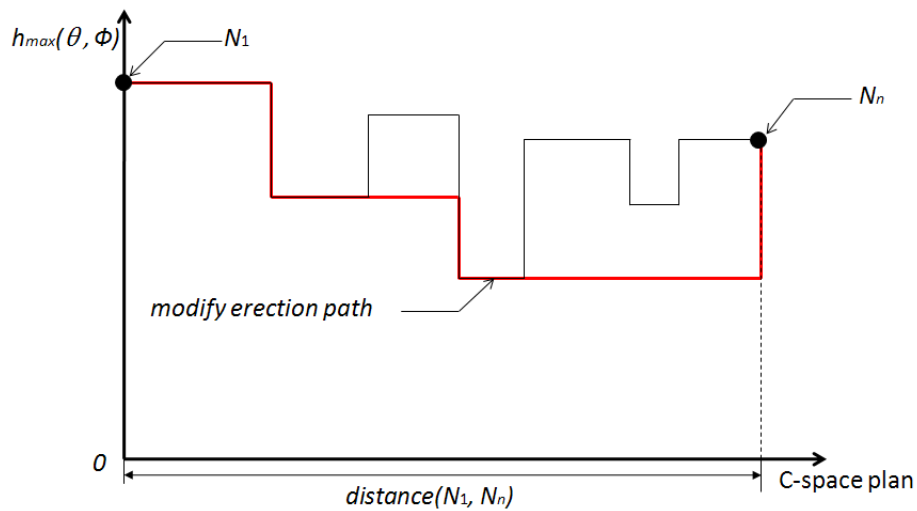


圖 3.12 經過優化後的繩索操作參數

然而雖然繩索操作參數經過修正後，可以有效避免繩索長度不必要的變化，但由於在繩索伸長量達到路徑中 h_{max} 的最小值之後，繩索長度將不再做任何改變的原故，若該路徑，吊臂旋轉角度在不斷增加的情形下，則可能會發生吊物與吊臂產生碰撞行為。因此我們需要再對繩索伸長量達到最小值之後的繩索操作參數做進一步檢查，若當前組態繩索伸長量小於 h_{min} ，則增加繩索長度至 h_{min} ，路徑經過修正後的繩索伸長量結果如圖 3.13 所示，完成修正後的路徑組態與繩索操作參數即為本研究路徑規劃方法所尋找出之最佳吊裝路徑。

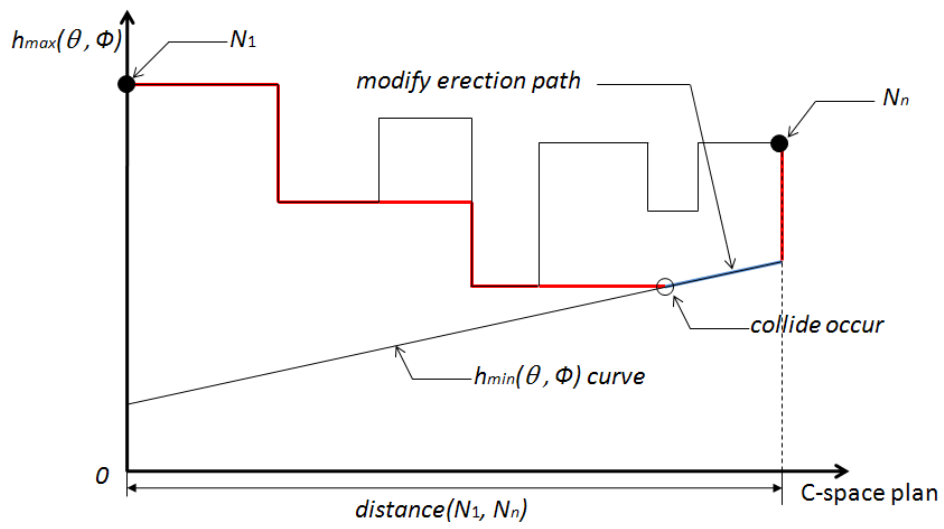


圖 3.13 避免吊物與吊臂產生碰撞而增加繩索長度



3.6 本研究吊裝路徑規劃方法之特色

現有關於吊裝路徑規劃研究(Reddy and Varghese 2002; Ali et al. 2005)，在吊車於吊裝過程中不移動的情況下，皆將吊車的動作以三維度的組態空間來表示，該組態空間主要將吊車駕駛艙旋轉角度 θ 、吊臂旋轉角度 ϕ 、與繩索伸長量 h 定義為吊車組態空間的維度，吊車的所有動作，於組態空間中表示為 $[\theta, \phi, h]$ 。

然而在本研究中我們發現並不需要將繩索伸長量做為組態空間的維度，因為在吊裝過程中繩索伸長量之所以會改變是為了將吊物抬高，以避免吊物與地板或障礙物碰撞，所以我們只需要知道在吊裝過程中，繩索伸長量必須縮短至多少才能使吊物越過障礙物，在進行吊裝作業吊起吊物後，將吊物抬高至預計吊裝路徑經過的障礙物高度之上，即可確保於吊裝過程中，吊物不會與地板或障礙物碰撞。因此本研究求出組態空間中的各個組態所對應的繩索伸長量最小值 h_{min} 、繩索伸長量最大值 h_{max} 、與障礙物高度 H_{ob} ，將三維度的吊車組態空間簡化為二維度的組態空間 $[\theta, \phi]$ ，大幅減少了路徑規劃上的計算量與複雜度，藉此減少電腦的計算時間，更快速的規劃出吊裝路徑。

第四章 雙吊車協同吊裝作業路徑規劃方法

本研究以前述之單吊車吊裝路徑規劃方法加以延伸擴充，發展出雙吊車協同作業吊裝路徑規劃方法，其方法路徑規劃流程仍然如圖 3.1 所示，但為了描述雙吊車系統，改以兩個二維度的吊車組態空間來表示，並發展如何連結兩部吊車各自組態空間，尋找出各種可能的路徑節點之方法，為雙吊車規劃出協同吊裝作業路徑。

4.1 雙吊車組態空間建構

為了描述雙吊車系統，我們分別為雙吊車協同吊裝作業中的兩部吊車建立其各自的組態空間，在此我們將兩部吊車分別稱為吊車 A、吊車 B，吊車 A 的組態空間以 C_A 表示，吊車 B 的組態空間以 C_B 表示。

首先定義 C_A 與 C_B 的座標空間範圍，當吊物的重量為 W 時，由於雙吊車協同作業會平均分擔吊物的荷重，因此以 $W/2$ 分別代入吊車 A 與吊車 B 之荷重表，求得吊臂最大旋轉角 $\phi_{max}(W)$ 與最小旋轉角 $\phi_{min}(W)$ ，定義出各自的組態空間範圍。 C_A 中的組態代表吊車 A 與吊物可能連接點， C_B 中的組態代表吊車 B 與吊物的連接點。

接著以 3.3 節的方法，分別為 C_A 與 C_B 進行組態障礙物區域的判斷，但與單吊車吊裝作業不同的地方為，關於吊物的碰撞檢測，只以吊物與吊車連接端的部分模型進行碰撞檢測，因為本雙吊車組態空間的目的為得知吊車與吊物的可連接動作狀態，吊物與障礙物空間的完整碰撞檢測則是於路徑規劃階段中進行，完成組態障礙物區域的判斷後，紀錄下各組態繩索伸長量範圍與障礙物高度，以兩個二維度的吊車組態空間來表示雙吊車系統，雙吊車組態空間建構流程如圖 4.1 所示。

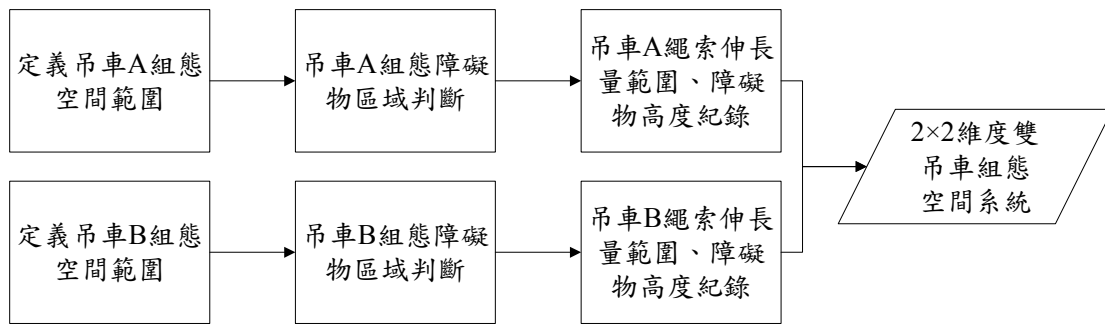


圖 4.1 雙吊車組態空間建構流程



4.2 雙吊車路徑規劃

本研究延伸 3.4 節單吊車作業路徑規劃方法發展雙吊車路徑規劃方法，先從兩部吊車輪流挑選出其中一台為基準，於其組態空間中隨機取樣組態做為該部吊車與吊物的連接點，再尋找另外一部吊車所對應可能的連接點，將兩部吊車對吊物的連接組態做為一組路徑節點，直到取樣足夠的節點數目，將可連接的節點互相連結為路徑，最後由起點至終點所有的可能路徑中尋找最佳解，做為雙吊車協同作業吊裝路徑，雙吊車路徑規劃流程如圖 4.2。



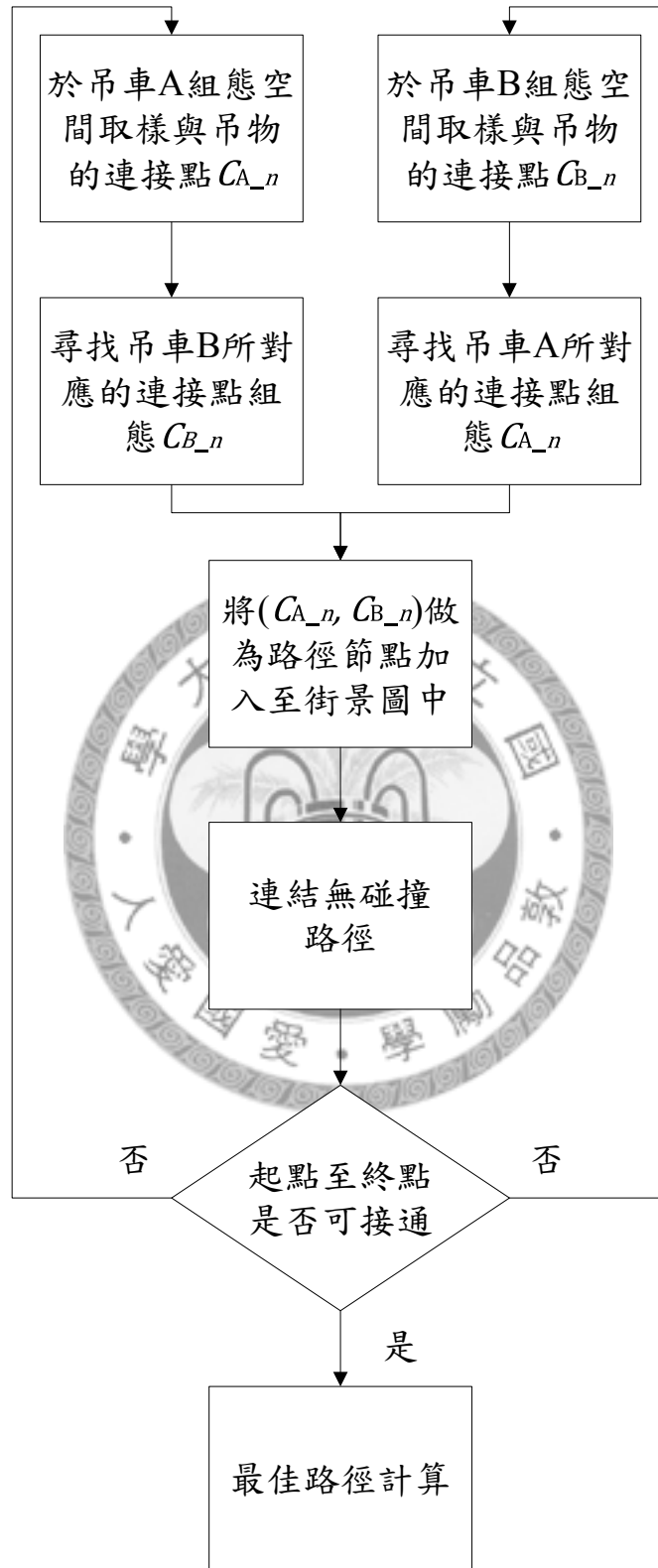


圖 4.2 雙吊車路徑規劃流程

為了說明本研究雙吊車路徑規劃方法，在此以一簡易的雙吊車協同作業案例為例說明，如圖 4.3 所示，此案例由兩部吊車(A 與 B)進行協同吊裝作業，吊物為橫樑，吊物的起點位置與終點位置間存在一建築障礙物，吊車 A 的組態空間以 C_A 表示，吊車 B 的組態空間以 C_B 表示，首先將位於起點位置的吊物與兩部吊車的連接點(C_{A_s}, C_{B_s})做為路徑節點加入至街景圖中，再把位於終點位置的吊物與兩部吊車的連接點(C_{A_g}, C_{B_g})做為路徑節點加入至街景圖中，接著即進入路徑節點取樣步驟。

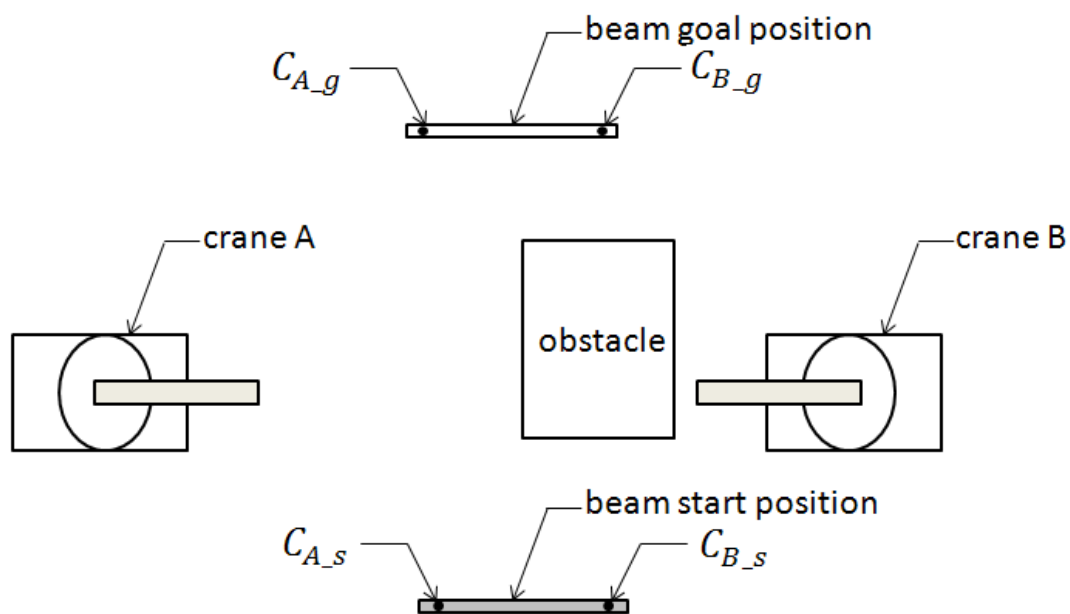


圖 4.3 雙吊車協同作業案例

在節點取樣步驟，節點取樣方法為輪流分別以吊車 A、吊車 B 為基準取樣節點，當以吊車 A 為基準時，從 C_A 中隨機取樣一個不屬於組態障礙物的組態 C_{A_n} ， C_{A_n} 為吊物與吊車 A 的連接點，接下來我們要找尋對應於 C_{A_n} ，吊車 B 與吊物可能的連接點 C_{B_n} ，將 C_{A_n} 做為圓心，以 C_{A_n} 所對應的障礙物高度 H_{ob} 做為吊物高程，於工作空間 XYZ 座標系統 XY 平面上，將吊物旋轉至平行於兩部吊車的吊臂旋轉中心連線 $\overline{C_A C_B}$ ，如圖 4.4 所示，若此時吊物於 XYZ 座標系統中不與障礙物或吊車碰撞，且 C_{B_n} 於 C_B 中不屬於組態障礙物，則將 (C_{A_n}, C_{B_n}) 做為節點加入至街景圖中。

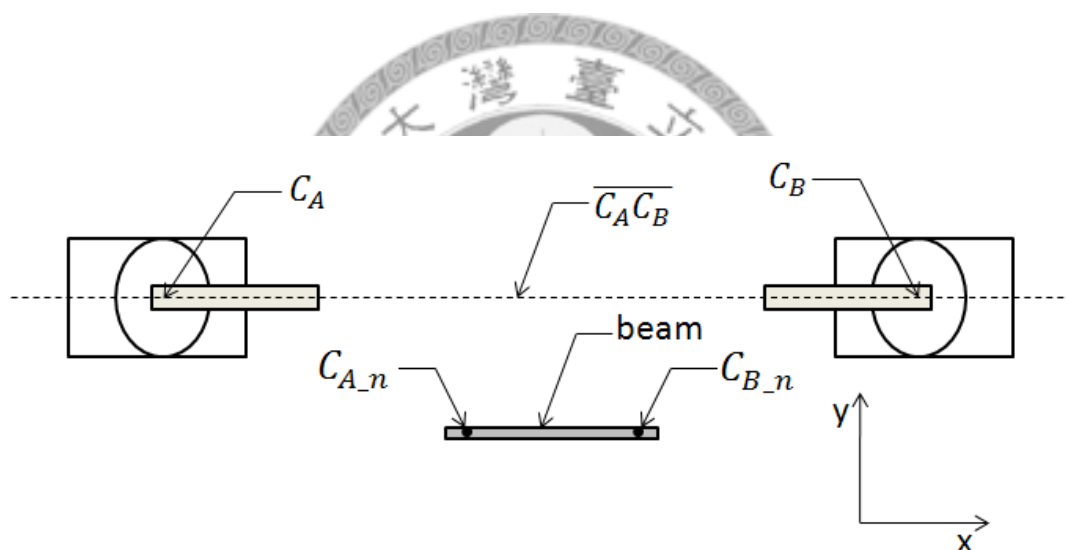


圖 4.4 雙吊車協同作業路徑規劃節點取樣方法

但若吊物與障礙物碰撞，則一樣以 C_{A_n} 為圓心，於 XY 平面上分別順時針與逆時針旋轉吊物直到沒有碰撞發生，若吊物旋轉角度 $\theta_1 < \pi/2$ 或 $\theta_2 < \pi/2$ ，且 C_{B_n} 於 C_B 中不屬於組態障礙物，則將 (C_{A_n}, C_{B_n}) 做為節點加入至街景圖中，如圖 4.5 所示。

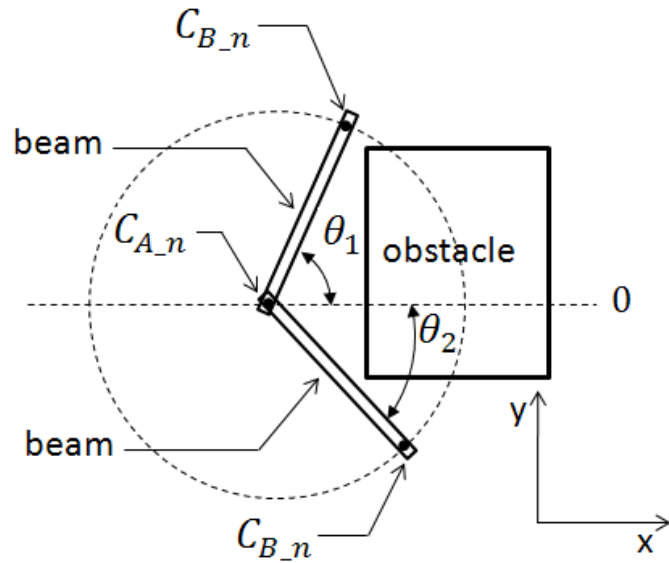


圖 4.5 雙吊車協同作業路徑規劃節點取樣，吊物與障礙物碰撞時

而之所以要輪流分別以吊車 A、吊車 B 為基準取樣節點，其原因是為了確保路徑的多樣性，因本研究採取以吊物與吊車其中一端連接點為圓心，旋轉吊臂以避開障礙物的策略，因此當以不同吊車為基準取樣節點時，會產生出其各自特有的節點，如圖 4.6 所示。

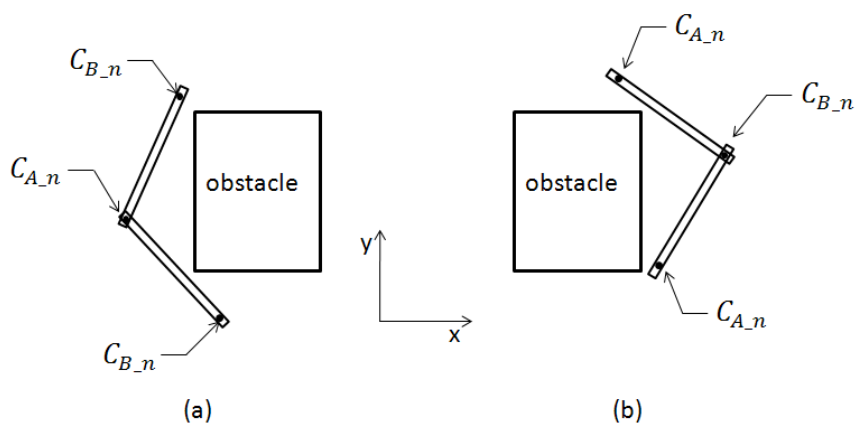


圖 4.6 雙吊車協同作業節點取樣：(a)以吊車 A 為基準時特有節點
(b) 以吊車 B 為基準時特有節點

在連結無碰撞路徑階段，我們將節點與節點之間，吊物與吊車的連接點於工作空間 XYZ 座標系統直線內插為路徑軌跡，如圖 4.7 所示，要判斷節點與節點之間是否為無碰撞路徑，可分為三個步驟：步驟一，求出執行節點與節點之間所形成的吊裝路徑，吊物為了不與障礙物發生碰撞，所需抬高到的高程 H_{object} 為多少；步驟二，分別檢查路徑軌跡中的吊物與吊車連接點於 C_A 、 C_B 中是否不通過組態障礙物，若通過組態障礙物，則表示該路徑吊物端點會發生碰撞行為，節點與節點之間無法連結成路徑；步驟三，檢查為了將吊物抬高至高程 H_{object} ，繩索伸長量是否會超出可行的伸長量範圍，若超出範圍，則表示該路徑無法進行將吊物抬高越過障礙物的操作，節點與節點之間無法連結成路徑。若節點與節點之間判斷為無碰撞路徑，則記錄下執行該路徑吊物所需的高程 H_{object} ，可用於最佳路徑的計算與繩索長度的規劃。

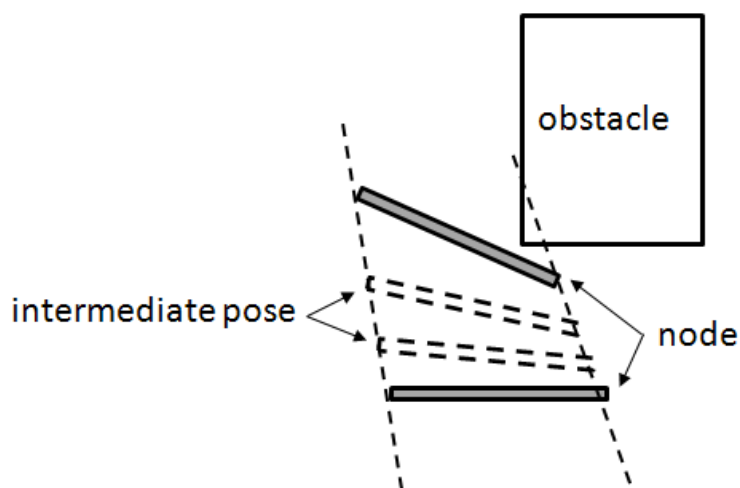


圖 4.7 雙吊車協同作業路徑軌跡

在完成無碰撞路徑的連結後，能由起點透過連結接通到終點的路徑，皆為可行的吊裝路徑，若無法尋找出由起點連接到終點的路徑，則取樣更多的節點添加至街景圖中，直到尋找出起點連結到終點的路徑為止。

關於最佳路徑的計算，我們以 3.4 節所提出的 P_{cost} 函式來計算執行路徑所需花費的成本，分別對吊車 A 與吊車 B 的路徑進行 P_{cost} 函式評估，將其結果相加，相加後的 P_{cost} 函式計算結果越大，表示執行該路徑所需耗費的時間越多，吊車操作的難度越高。



4.3 雙吊車繩索長度規劃

如 3.5 節所提到的，本研究所使用的二維度吊車組態空間，並未將繩索長度定義為組態空間的維度，因此所尋找出之路徑沒有包含繩索長度的操作資訊，在此我們還需對 4.2 節所規劃出之路徑，做進一步的繩索長度規劃。

在雙吊車協同作業中，由於吊車 A、B 與吊物端點的連接點在吊裝路徑中所遭遇到的障礙物高度變化不一定相同，因此雙吊車協同作業繩索長度規劃並不能如同單吊車吊裝路徑規劃問題，以繩索最大伸長量 h_{max} 做為繩索操作參數，所以我們以先前連結無碰撞路徑階段所紀錄下的 H_{object} ，得知吊物為了避開障礙物所需的高程，如圖 4.8 所示，以吊物高程推算出吊車 A 的繩索操作參數 h_A ，並以 3.5 節所使用的繩索操作參數修正方法進行修正，使吊車 A 的繩索長度變化量最小化並符合安全範圍值 $h_{minA} \leq h_A \leq h_{maxA}$ ，如圖 4.9 所示，最後依修正後的 h_A ，求出對應相同吊物高程的吊車 B 繩索長度操作參數 h_B ，此時可獲得完整的吊裝路徑；接著改以先由吊物高程推算出吊車 B 的繩索操作參數 h_B ，並對繩索操作參數進行修正，求出對應相同吊物高程的吊車 A 繩索長度操作參數 h_A ，得到另一不同版本的吊裝路徑，比較前者與後者繩索長度總變化量，較小者即為本研究路徑規劃方法所尋找出之最佳雙吊車協同吊裝路徑。

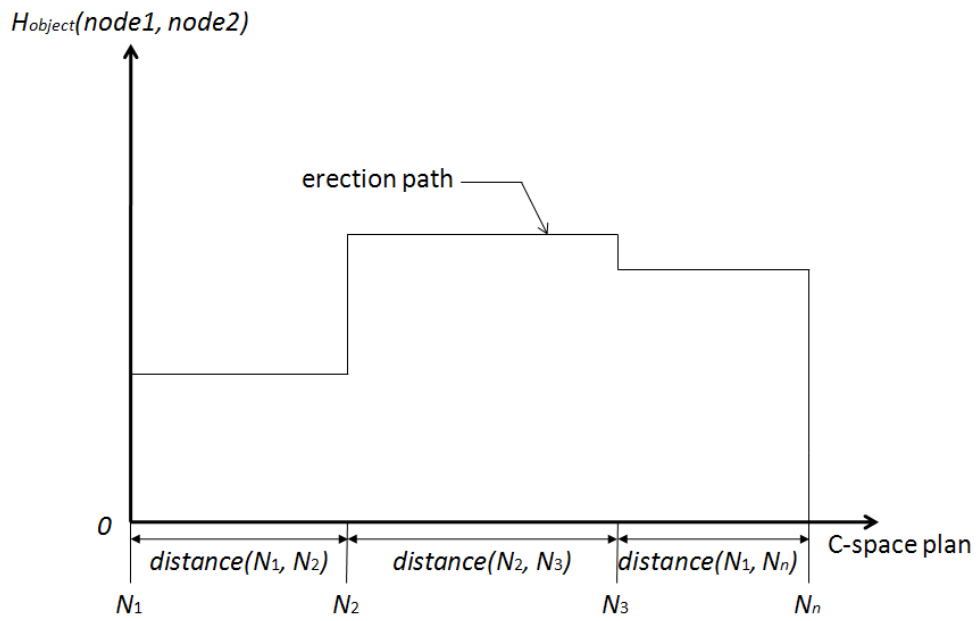


圖 4.8 以吊物避開障礙物所需高程為吊裝路徑

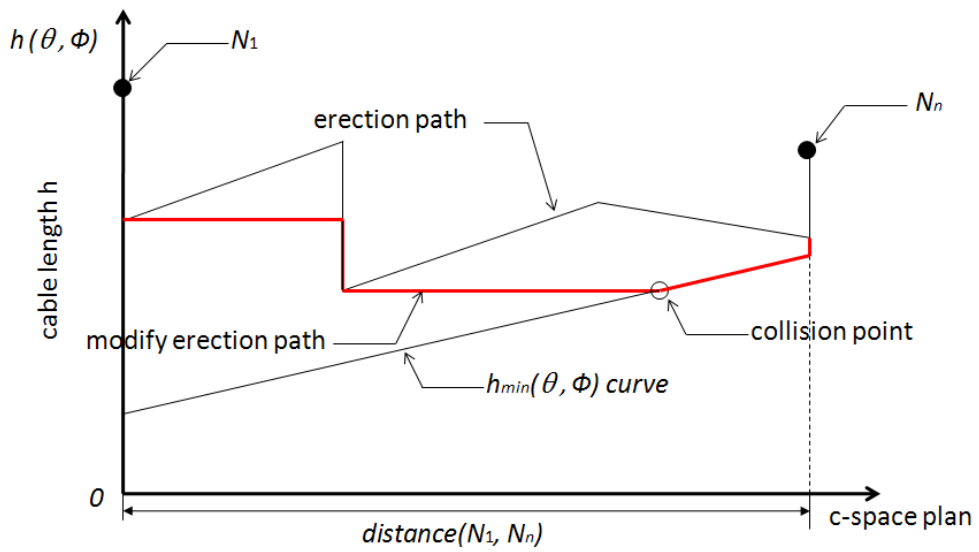


圖 4.9 繩索操作參數修正方法

第五章 程式實作

本章節將介紹本研究自行開發的吊裝路徑規劃軟體 *Erection Planner* 之軟體架構與開發環境。*Erection Planner* 的主要功能為提供視覺化的虛擬吊裝場景，使用者只需給予吊物的起點與終點位置，選定吊裝作業類型，便可透過程式規劃出吊裝路徑，並將規劃出之吊裝路徑與吊裝過程視覺化呈現於虛擬吊裝環境之中。

5.1 開發環境

Erection Planner 以 Microsoft 所研發的遊戲開發平台 XNA Framework 為架構所開發(Microsoft 2009)，使用 DirectX 繪圖引擎建構虛擬的吊裝場景，另外使用 NVIDIA 所開發的 PhysX 物理引擎進行碰撞偵測以及建構吊車組態空間(NVIDIA 2008)。

實驗部分，我們執行測試的機器期硬體環境如下：CPU 為 Intel Core2 Duo E7300 2.66GHZ，RAM 為 3GB，顯示晶片為 NVIVIA GeForce8600GT，作業系統為 Windows XP SP3 32 位元。

5.2 軟體架構

圖 5.1 為 *Erection Planner* 的軟體架構圖，其主要包含 Erection Project Information Input、C-Space Builder、Path Planner、Cable Length Planner、Scene Visualization 這五個部份，以下將分段一一說明：

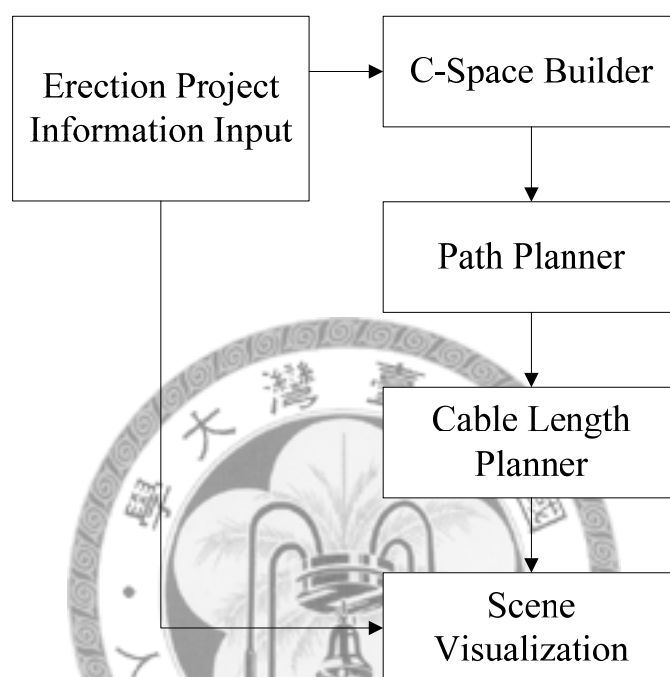


圖 5.1 *Erection Planner* 軟體架構圖

(1) Erection Project Information Input

為了提供視覺化的虛擬吊裝場景，及檢測吊車、吊物、障礙物之間有無碰撞發生，我們以 Autodesk 3ds Max 2009 3D 建模軟體，分別為吊車、吊物、與障礙物製做 3D 模型檔並輸入至本程式中。為了提供可應用於 XNA Framework 架構上的檔案格式，我們將模型檔儲存為 FBX 格式，並將其他吊裝路徑規劃的必要資訊：如吊車荷重表、吊物荷重、吊物起點、終點座標位置等資訊也輸入至程式之中。

(2) C-Space Builder

此部分主要目的為吊車組態空間建構，以本研究 3.3 節與 4.1 節的吊車組態空間建構方法，依照吊裝作業類型，建構吊車組態空間。關於組態空間建構過程所需要的碰撞檢測，我們使用 PhysX 物理引擎為吊車、吊物、障礙物建立較為簡易物理碰撞模型，如圖 5.2、圖 5.3 所示，於 PhysX 物理行為模擬環境下，改變吊車駕駛艙旋轉角度、吊臂旋轉角度、吊物位置，檢查是否有碰撞行為的發生。

表 5.1 為 C-Space Builder 的服務單元與功能，cSpace 主要紀錄組態空間中各組態的資料，其紀錄各個組態是否為組態障礙物、組態對應的繩索伸長量範圍、及障礙物高度；collisionCeck 則是與 PhysX 物理引擎作溝通，傳送吊車駕駛艙旋轉角度、吊臂旋轉角度、吊物位置資訊，回傳碰撞偵測結果，以得知 cSpace 中各組態資料。

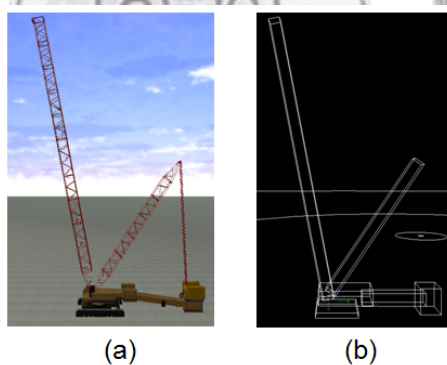


圖 5.2 吊車模型：(a)3D 模型 (b)物理碰撞模型

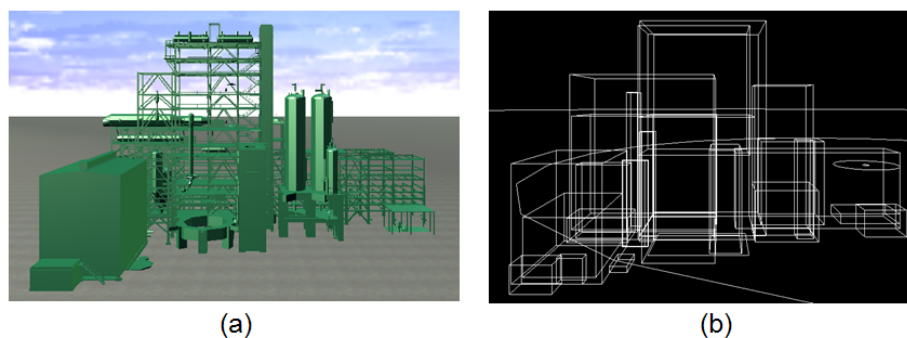


圖 5.3 障礙物模型：(a)3D 模型 (b)物理碰撞模型

表 5.1 C-Space Builder 服務單元表

服務單元名稱	功能
cSpace	紀錄各個組態是否為組態障礙物、繩索伸長量範圍及障礙物高度。
collisionCheck	checkCraneAndObstacle—對吊車與障礙物進行碰撞偵測。 checkCraneAndObject—對吊車與吊物進行碰撞偵測。 checkObjectAndObstacle—對吊物與障礙物進行碰撞偵測。

(3) Path Planner

此部分主要目的為實作本研究 3.4 節與 4.2 節所提出的路徑規劃方法，為該吊裝作業規劃出包含吊車駛艙旋轉角度與吊臂旋轉角度的吊裝路徑資訊，表 5.2 為 Path Planner 的服務單元與功能，xyzToCs 將吊物起點與終點於卡氏座標系統中的座標位置，轉換為吊車組態空間座標系統中所對應的組態座標；sampleNode 與 cSpace 作溝通，取樣路徑節點，將路徑節點資訊傳送給 findPath；findPath 與 cSpace 作溝通，連結可行的路徑，路徑間的連結資訊傳送給 pathCost；pathCost 與 cSpace 作溝通，計算各路徑的執行成本，並將最佳吊裝路徑資訊傳送給 Cable Length Planner。

表 5.2 Path Planner 服務單元表

服務單元名稱	功能
xyzToCs	將吊物卡式座標[x, y, z]轉換為對應的[θ , \emptyset]組態座標。
sampleNode	於組態空間中隨機取樣路徑節點。
findPath	計算節點之間可否連結為路徑。
pathCost	calculateCost—計算路徑執行成本。 getBestPath—計算最佳路徑。

(4) Cable Length Planner

此部分則是以本研究 3.5 節與 4.3 節所提出的繩索長度規劃方法，規劃該吊裝路徑的繩索長度操作，輸出完整的吊裝路徑資訊，表 5.3 為 Cable Length Planner 的服務單元與功能，cableLengthPlan 負責為吊裝路徑規劃出繩索長度操作參數，將規劃完成後的吊裝路徑組態加上繩索長度操作參數，傳送給 csToXyz，輸出吊物於卡氏座標中的路徑軌跡給 Scene Visualization。

表 5.3 Cable Length Planner 服務單元表

服務單元名稱	功能
cableLengthPlan	為吊裝路徑規劃繩索長度操作參數。
csToXyz	將吊車組態[θ , \emptyset]加上繩索長度轉換為對應的吊物卡氏座標[x, y, z]。

(5) Scene Visualization

此部分以 XNA 建構出虛擬的吊裝場景，並將吊物的軌跡標示於吊裝場景中，展示本研究所規劃出之吊裝路徑結果，如圖 5.4 所示。

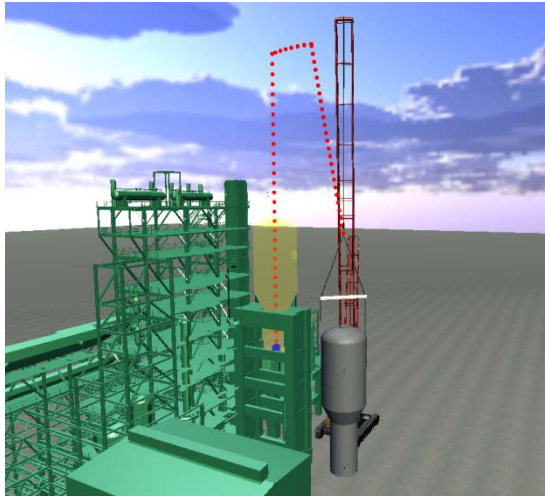


圖 5.4 吊裝路徑展示畫面



第六章 實驗結果與討論

為了驗證本研究所提出的吊裝路徑規劃方法是否可行，我們進行了一系列的場景測試，測試本研究的方法是否能運用於單吊車吊裝案例與雙吊車協同吊裝作業案例。

6.1 實驗一：單吊車吊裝作業路徑規劃測試

實驗一以中油大林(CPC Dali)煉油廠實際單吊車吊裝案例為實驗對象，吊裝場景配置如圖 6.1 所示，吊車需將一圓筒型儲油槽(半徑 4.8 公尺、長 30 公尺)置放於高度 37 公尺的支架上，吊裝場景中儲油槽目標位置的週遭障礙物，主要有 11 層的樓板建築物(高 61 公尺)、兩個已置放於支架上的儲油槽(高 42 公尺)，吊車機身規格長 20 公尺、寬 12 公尺，吊臂臂長 90 公尺，吊裝中吊車駕駛艙旋轉角速度為 4(角度/秒)，吊臂旋轉角速度為 1(角度/秒)，繩索伸縮速度為 1(公尺/秒)。使用本研究吊裝路徑規劃方法，可成功找出不與上述障礙物及吊物目標支架碰撞的吊裝路徑，所規劃出之吊裝路徑，如圖 6.2、圖 6.3 所示。

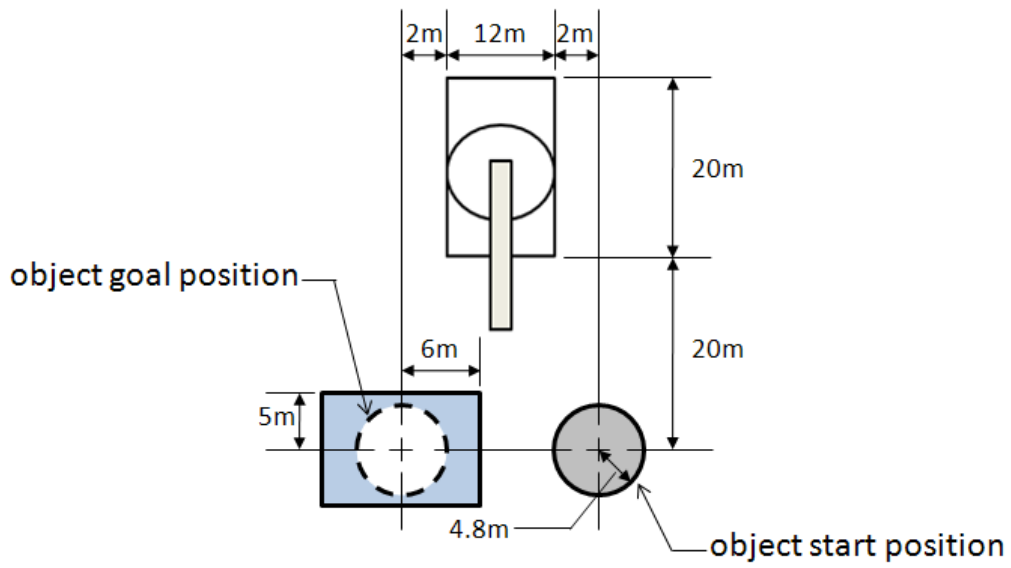


圖 6.1 實驗一場景配置

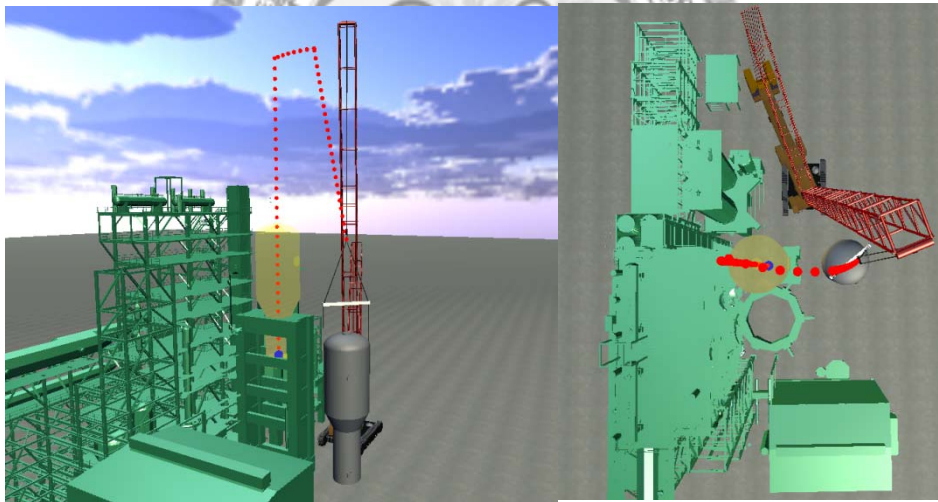


圖 6.2 實驗一吊裝路徑（黃色部分為吊裝物目的地）

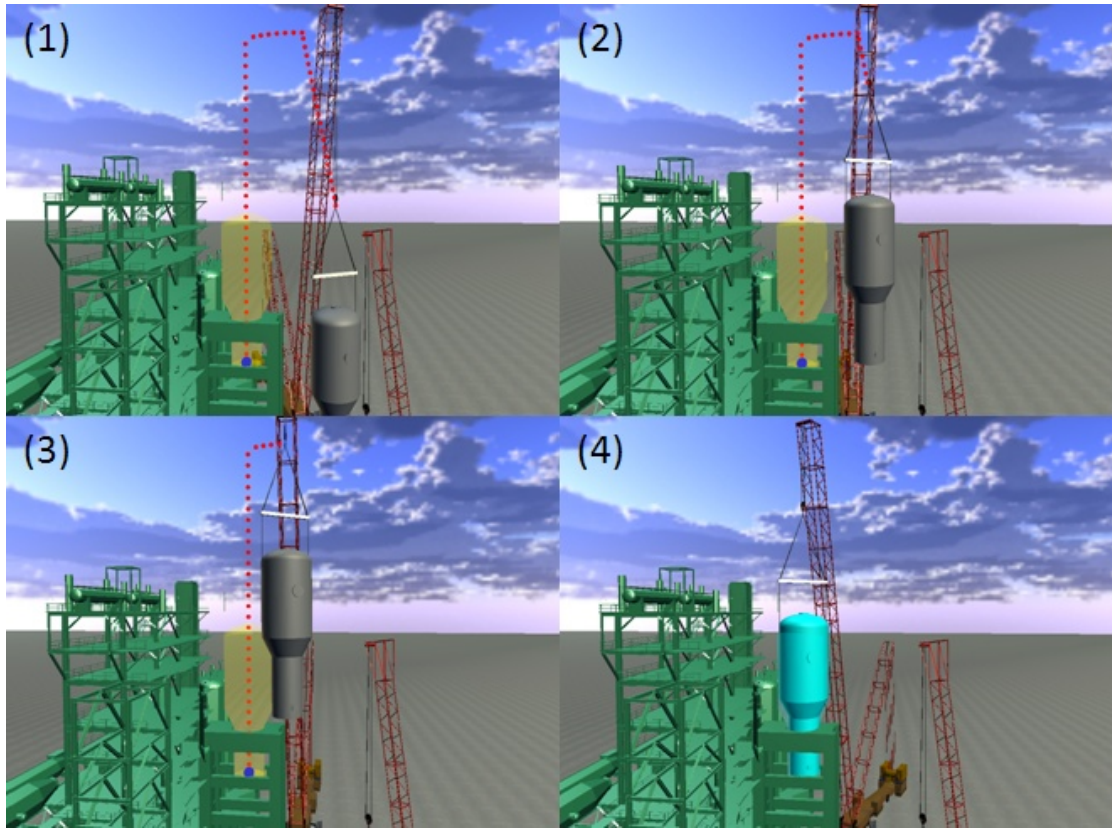


圖 6.3 實驗一吊裝路徑連續截圖



6.2 實驗二：雙吊車協同吊裝作業路徑規劃測試

實驗二我們以 Ali et al. (2005) 中的雙吊車協同吊裝作業場景 2 做為測試案例，案例場景配置如圖 6.4 所示，吊物為橫樑(長 10 公尺、寬 1 公尺、高 1 公尺)，兩台吊車分別與吊物的一端連接，吊物的起點至終點間存在三個障礙物(障礙物 A 高度 5 公尺、B 高度 12 公尺、C 高度 5 公尺)，吊物需避免與障礙物碰撞吊至位於障礙物另一側的終點，吊車機身規格長 10 公尺、寬 6 公尺，吊臂臂長 45 公尺，吊裝中吊車駕駛艙旋轉角速度為 4(角度/秒)，吊臂旋轉角速度為 1(角度/秒)，繩索伸縮速度為 1(公尺/秒)。使用本研究吊裝路徑規劃方法，可成功找出不與上述障礙物碰撞的吊裝路徑，所規劃出之吊裝路徑，如圖 6.5 所示。

吊裝路徑的規劃，除了需考慮碰撞問題與荷重問題之外，還要考量到該吊裝路徑的進行是否會干擾或影響到其他工程項目。圖 6.5 的吊裝路徑規劃結果，雖然以將吊物抬高，越過障礙物的方式，可成功地規劃出無碰撞的吊裝路徑，但若該障礙物有其他地面人員於其中進行施工，為了避免干擾以及吊物或其組件飛落傷及地面人員，此時為了考量施工安全，可能需要較為耗時且操作困難的替代吊裝路徑，以繞過障礙物的策略來進行吊裝作業。因此我們分別在不同的條件限制下，進行替代吊裝路徑規劃測試。首先，希望能找出不通過中間障礙物 B 的吊裝路徑，測試結果如圖 6.6、圖 6.7 所示(黃色部分為吊物起始位置，紅色部分則為吊物之目的地)，可分別找出從左側繞過及右側繞過障礙物 B 之吊裝路徑。接著希望能找出不通過任何障礙物

的吊裝路徑，測試結果如圖 6.8、圖 6.9 所示，可分別於吊車與障礙物之間的狹窄空間中規劃出吊裝路徑。

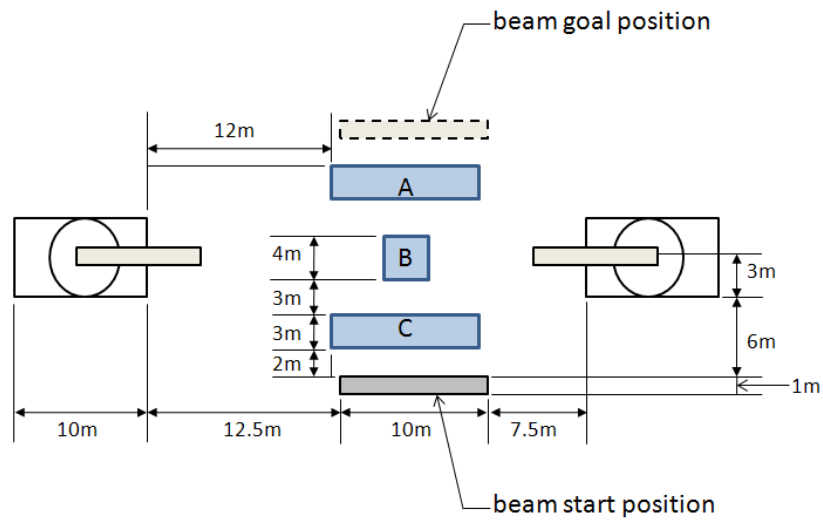


圖 6.4 實驗二裝案例場景配置

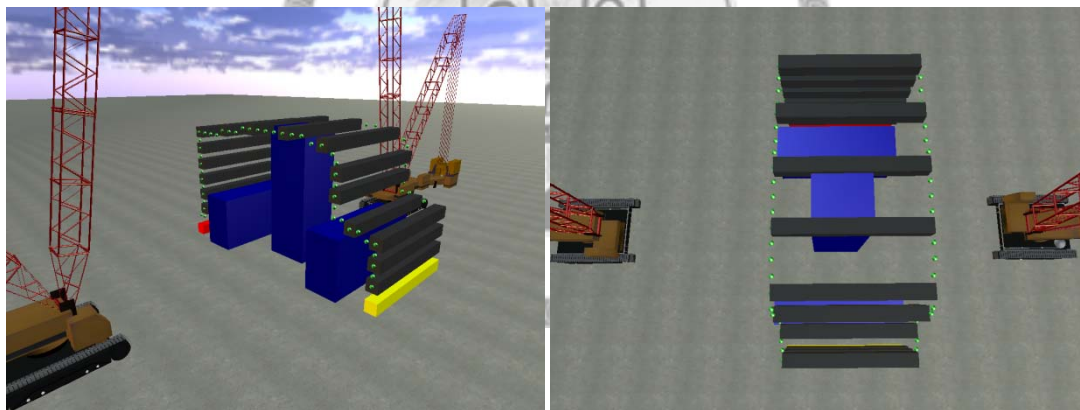


圖 6.5 實驗二無條件限制下之吊裝路徑

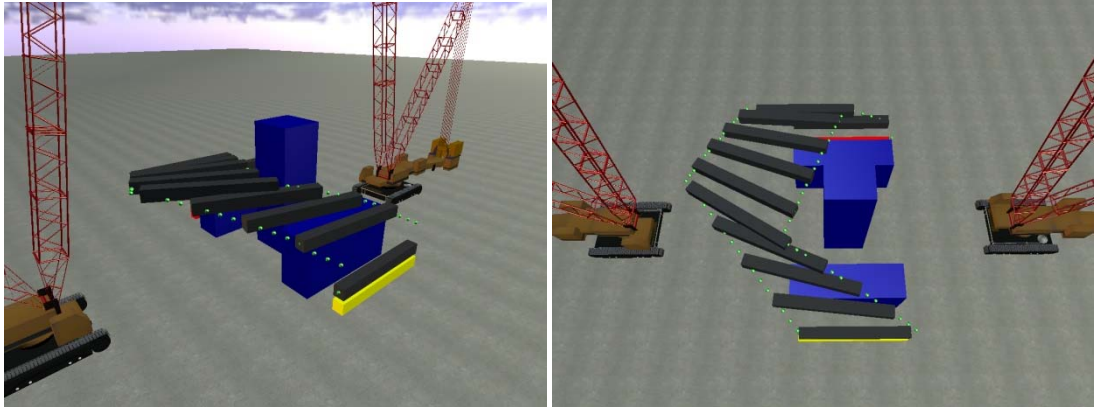


圖 6.6 實驗二中間障礙物不可通過時之替代吊裝路徑一

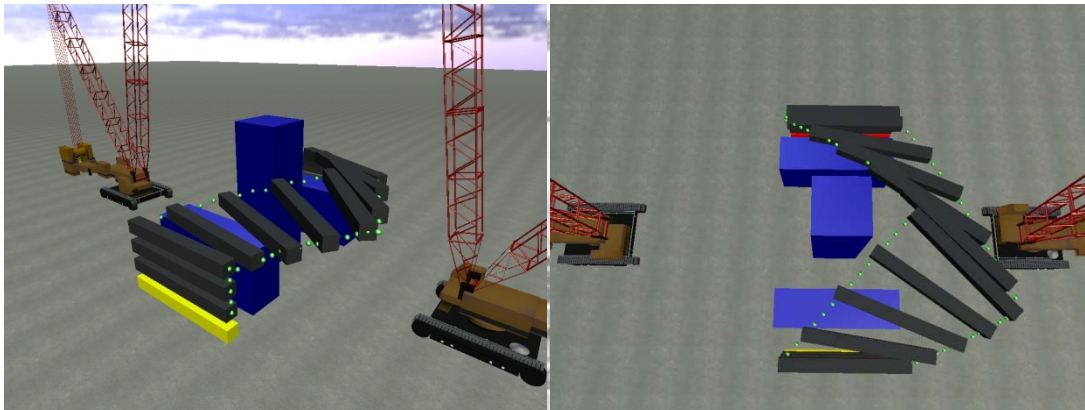


圖 6.7 實驗二中間障礙物不可通過時之替代吊裝路徑二

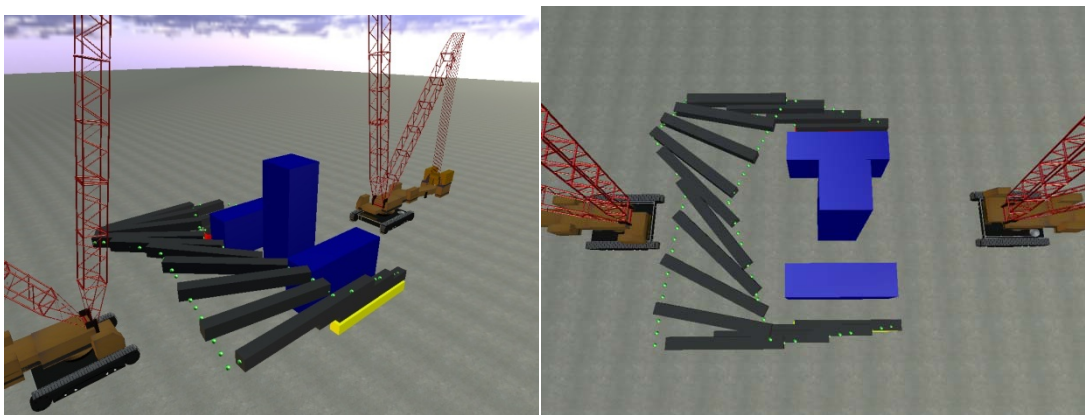


圖 6.8 實驗二全障礙物不可通過時之替代吊裝路徑一



圖 6.9 實驗二全障礙物不可通過時之替代吊裝路徑二



6.3 實驗三：效能測試

實驗三我們選用與 Ali et al. (2005) 中相同的兩個吊裝案例場景進行測試，並同時實做了 Ali et al. (2005) 中所提出之三維度的吊車組態空間建構方法與使用基因演算法概念(Genetic Algorithm)所發展出的吊裝路徑規劃方法，使其與本研究所提出的吊裝路徑規劃方法進行比較，此外也比較本研究所使用的 PRM 路徑規劃方法，在三維度與二維度吊車組態空間中進行吊裝路徑規劃結果之差異。

6.3.1 場景一

場景一以 Ali et al. (2005) 中的雙吊車協同吊裝作業場景 1 做為測試案例，案例場景配置如圖 6.10 所示，吊物為橫樑(長 10 公尺、寬 1 公尺、高 1 公尺)，兩台吊車分別與吊物的一端連接，一同將吊物由地面起吊置放於高度 6 公尺的障礙物頂端平台之上，吊車機身規格長 10 公尺、寬 6 公尺，吊臂臂長 45 公尺，吊裝中吊車駕駛艙旋轉角速度為 4(角度/秒)，吊臂旋轉角速度為 1(角度/秒)，繩索伸縮速度為 1(公尺/秒)。圖 6.11 為使用三維度組態空間基因演算法所規劃出之吊裝路徑，圖 6.12 為本研究 PRM 方法於三維度組態空間中所規劃出之吊裝路徑，圖 6.13 為使用本研究 PRM 方法於二維度組態空間中所規劃出之吊裝路徑。

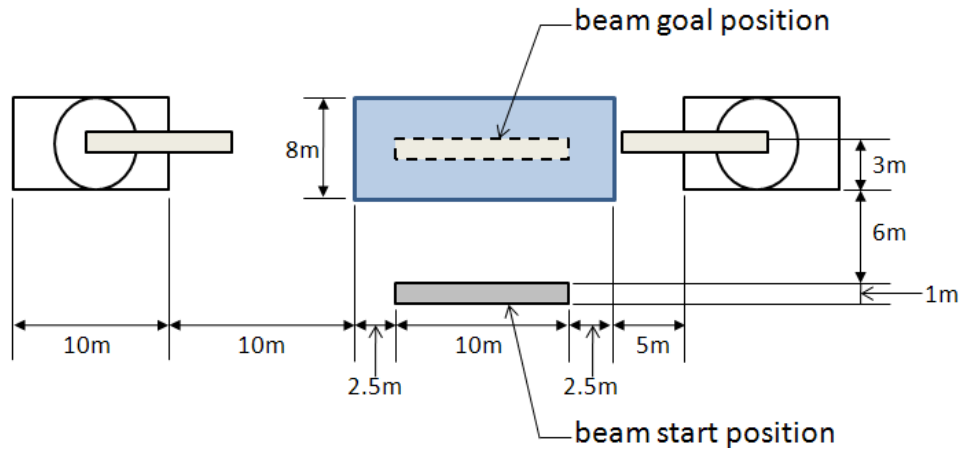


圖 6.10 實驗三場景一吊裝案例場景配置

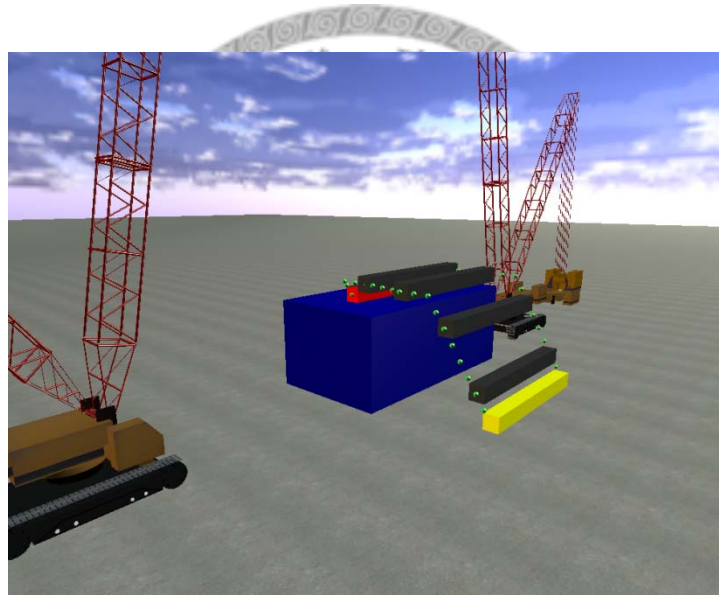


圖 6.11 實驗三場景一使用三維度組態空間基因演算方法規劃出之吊裝路徑

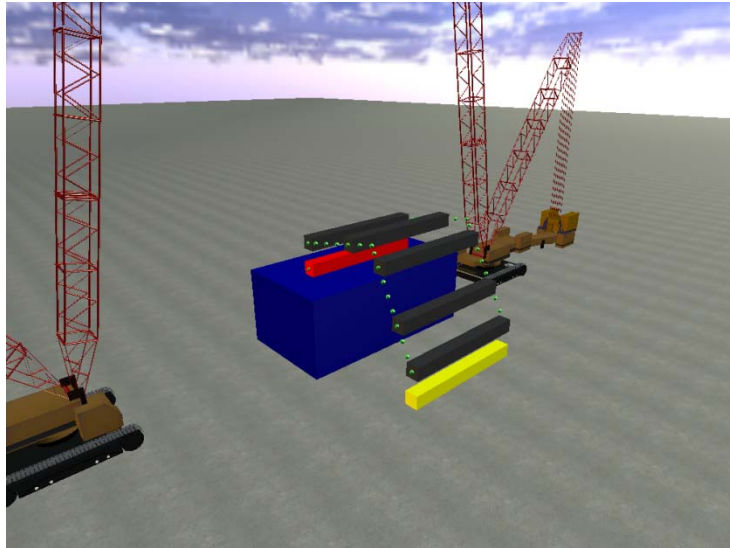


圖 6.12 實驗三場景一使用三維度組態空間 PRM 方法規劃出之

吊裝路徑

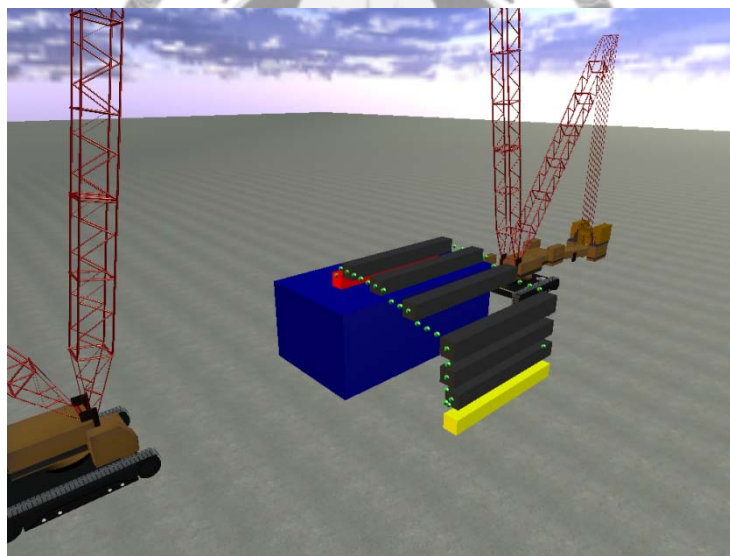


圖 6.13 實驗三場景一使用二維度組態空間 PRM 方法規劃出之

吊裝路徑

6.3.2 場景二

場景二以 Ali et al. (2005) 中的雙吊車協同吊裝作業場景 2 做為測試案例，其案例場景與實驗二相同，配置如圖 6.4 所示，詳細的場景說明可參考實驗二，圖 6.14 為使用三維度組態空間基因演算方法所規劃出之吊裝路徑，圖 6.15 為本研究 PRM 方法於三維度組態空間中所規劃出之吊裝路徑，圖 6.16 為本研究 PRM 方法於二維度組態空間中所規劃出之吊裝路徑。

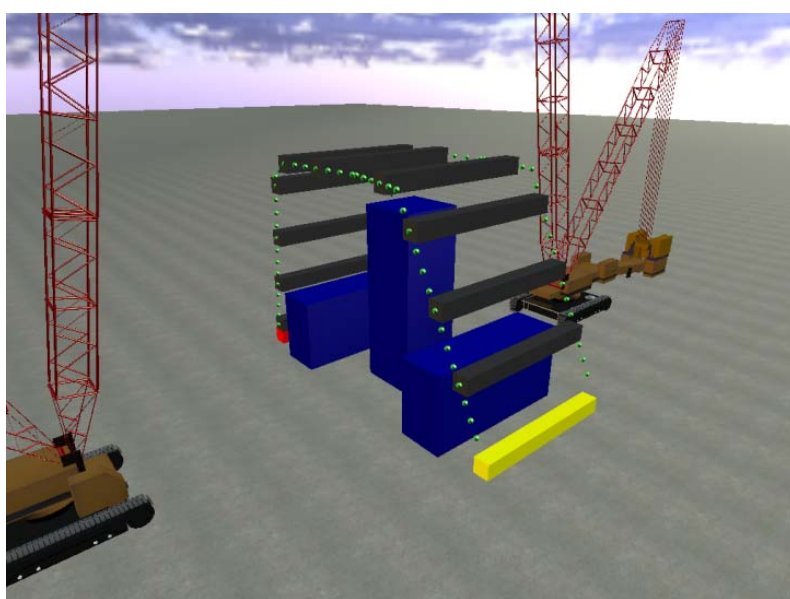


圖 6.14 實驗三場景二使用三維度組態空間基因演算方法規劃出之吊裝路徑

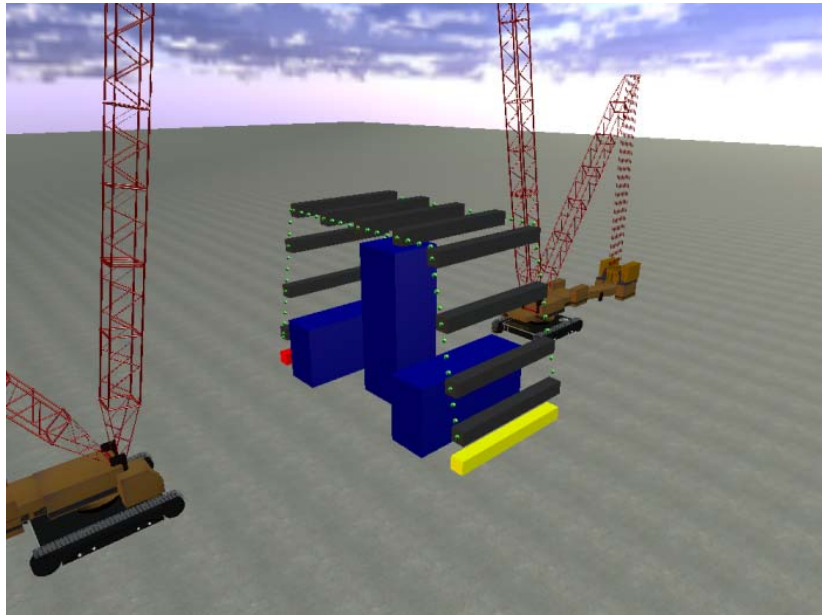


圖 6.15 實驗三場景二使用三維度組態空間 PRM 方法規劃出之
吊裝路徑

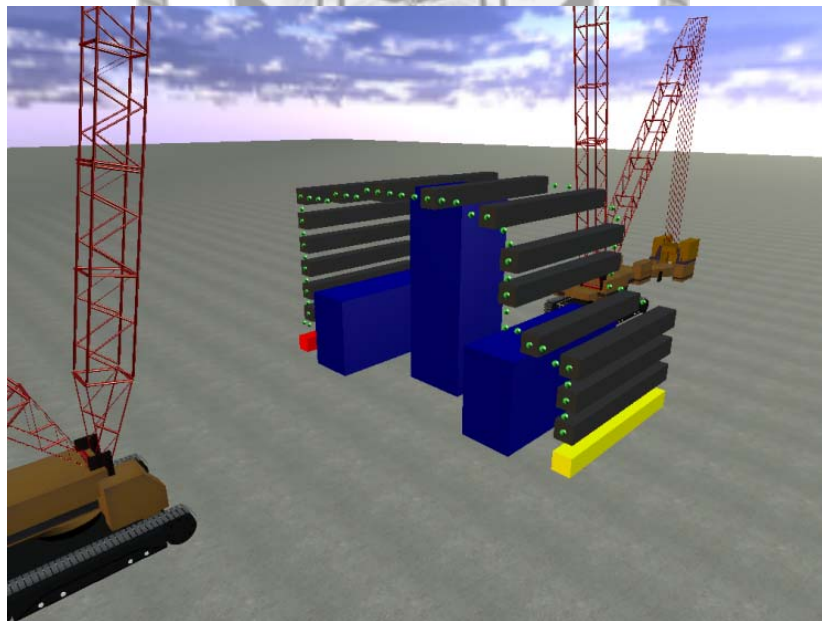


圖 6.16 實驗三場景二使用二維度組態空間 PRM 方法規劃出之
吊裝路徑

6.4 實驗結果討論

由實驗一的路徑規劃結果顯示，如圖 6.2 所示，在單吊車的吊裝案例中，本研究所提出之路徑規劃方法可成功避開障礙物找出無碰撞的可行吊裝路徑，路徑規劃所需花費的計算時間為 0.27 秒，可用相當少的計算時間完成路徑規劃。

由實驗二的路徑規劃結果顯示，如圖 6.5 所示，在雙吊車協同吊裝案例中，本研究所提出之路徑規劃方法可成功避開障礙物找出無碰撞的可行吊裝路徑，路徑規劃所需花費的計算時間為 0.52 秒，一樣可用相當少的計算時間完成路徑規劃。此外除了可找出以抬高吊物的策略避開與障礙物碰撞的吊裝路徑之外，也可以繞過障礙物的策略避開吊物與障礙物之間的碰撞，可於不同的吊裝條件限制下規劃出適合的路徑，如圖 6.6~圖 6.9 所示。

實驗三，我們對不同場景使用不同吊裝路徑規劃方法，分別使用了三維度組態空間的基因演算方法、本研究 PRM 方法於三維度組態空間、及本研究 PRM 方法於二維度組態空間，由路徑規劃結果顯示，如圖 6.11~圖 6.16 所示。上述三種方法皆可為雙吊車協同吊裝案例規劃出無碰撞可行的吊裝路徑。表 6.1、表 6.2 為路徑規劃結果的比較，其數據為執行 100 次路徑規劃所得結果之平均值，比較項目分別有路徑規劃時間、駕駛艙旋轉角度變化量、吊臂旋轉角度變化量、繩索長度變化量。從路徑結果的比較可得之，二維度組態空間 PRM 方法進行路徑規劃平均所需花費的時間遠遠小於其他兩者；而在吊裝路徑關於吊車操作參數變化量的比較，駕駛艙旋轉角度變化量三種方法並無明顯差異，其原因為在吊裝過程中，駕駛艙旋轉角度通常會由起

始角度逐漸轉至終點角度，旋轉方向並不常發生改變；關於吊臂旋轉角度變化量的比較，使用二維度組態空間 PRM 方法可找出變化量較小易於操作的吊裝路徑，其原因為使用基因演算法求解最佳化問題，所能獲得結果為近似最佳解之結果，而三維度組態空間 PRM 方法由於難以使路徑節點平均分布於組態空間中，因此比二維度組態空間方法更難求出最佳路徑解，本研究所使用的 PRM 方法，其路徑節點採取隨機的方式，且檢查所有的路徑節點之間是否可連結為可通行的路徑，若改用其他改良過的 PRM 方法，或許能得到更佳的實驗結果；關於繩索長度變化量的比較，使用二維度組態空間 PRM 方法可找出變化量較小易於操作的吊裝路徑，其原因除了與上述原因相同之外，此外本研究為二維度的組態空間提供繩索長度操作規劃方法，因而減少不必要的繩索長度變化量。

表 6.1 實驗三場景一路徑規劃方法效能比較

Planning method	Problem 1		
	3D C-space Genetic	3D C-space PRM	2D C-space PRM
Average planning time (second)	36.33	11.26	0.51
Variation of cabin rotate angle (degree)	71.47	69.81	67.64
Variation of boom rotate angle (degree)	12.29	13.15	10.32
Variation of cable length (meter)	31.51	32.77	26.69

表 6.2 實驗三場景二路徑規劃方法效能比較

Planning method	Problem 2		
	3D C-space Genetic	3D C-space PRM	2D C-space PRM
Average planning time (second)	59.42	11.32	0.52
Variation of cabin rotate angle (degree)	144.96	143.55	142.93
Variation of boom rotate angle (degree)	24.81	23.22	19.14
Variation of cable length (meter)	106.11	109.78	93.06



第七章 研究貢獻與結論

7.1 研究貢獻

本研究發展了一個自動化的吊裝路徑規劃方法，其主要的研究貢獻如下：

- 發展二維度的吊車組態空間建構方式，降低其複雜度以縮短吊裝路徑搜尋所需要的時間。
- 提供具彈性之吊裝路徑規劃方法以同時適用於單吊車與雙吊車協同吊裝作業。
- 提供一接近即時的吊裝路徑規劃方法，當吊裝作業進行前或進行途中，發現吊裝環境與原先路徑規劃時有所出入，可快速為變更後的吊裝環境規劃出新的可行路徑。
- 發展一路徑成本評估函式，可為不同規格的吊車及吊裝環境，規劃出適合且易於操作的吊裝路徑。

7.2 結論

本研究改良以往三維度吊車組態空間建構方式，捨棄以繩索長度做為組態空間維度，將三維度吊車組態空間簡化為二維度，減少了為吊車進行路徑規劃所需的計算量，並能最佳化所規劃出之吊裝路徑之繩索長度的操作。本研究使用 PRM 路徑規劃方法做為組態空間中的路徑檢索方法，發展自動化的吊裝路徑規劃方法，其方法可適用於單吊車吊裝作業與雙吊車協同作業，能規劃出無碰撞且同時符合荷重安全的吊裝路徑，幫助工程師解決吊裝路徑規劃問題。使用本研究的吊裝路徑規劃方法能比現存已發展之路徑規劃方法更快速地規劃出吊裝路徑，且易於吊車駕駛員操作，並能針對各種不同的吊裝活動條件與需求，更有彈性地尋找出適合的吊裝路徑。



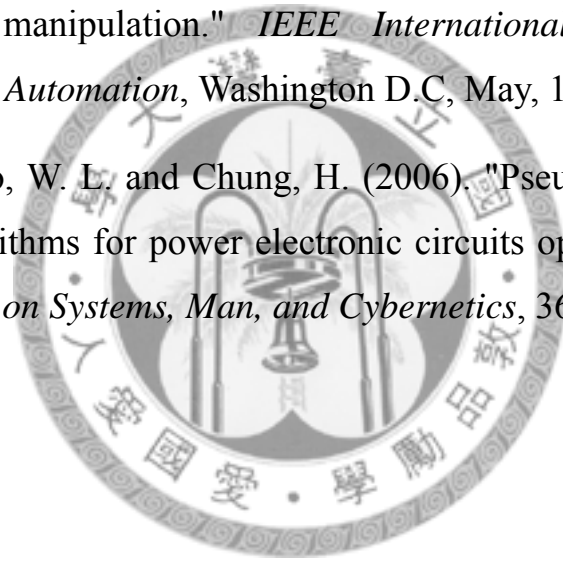
參考文獻

- [1] Acar, E. U. (2002). "Morse decompositions for coverage tasks." *The International Journal of Robotics Research*, 21(4), 331-345.
- [2] Ali, M. S., Babu, N. R. and Varghese, K. (2005). "Collision free path planning of cooperative crane manipulators using genetic algorithm." *Journal of Computing in Civil Engineering*, 19(2), 182-193.
- [3] Brooks, R. A. and Lozano-Perez, T. (1982). "A subdivision algorithm in configuration space for findpath with rotation." *AI Memos No. 684*.
- [4] Choset, H., Lynch, K. M., Hutchinson, S., Kantor, G., Burgard, W., Kavraki L. E. and Thrun, S. (2005). "*Principles of robot motion: theory, algorithms, and implementations*." The MIT Press.
- [5] Daily, R. and Bevly, D.M. (2008). "Harmonic potential field path planning for high speed vehicles." *American Control Conference*, Seattle, WA, June, 4609-4614.
- [6] Goldberg, D. E. and Holland, J. H. (1988). "Genetic algorithms and machine learning." *Machine Learning*, 3(2), 95-99.
- [7] Guibas L. J., Latombe J. C., Lavalley S. M., Lin D. and Motwani R. (1999). "A visibility-based pursuit-evasion problem." *International Journal of Computational Geometry and Applications*, 9(4), 471-493.
- [8] Guldner, J. (1995). "Sliding mode control for gradient tracking and robot navigation using artificial potential fields." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 11(2), 247-254.

- [9] Hornaday, W. C. and Haas, C. T. (1993). "Computer-aided planning for heavy lifts." *Journal of Construction Engineering and Management*, 119(3), 498-515.
- [10] Hou, E. S. H., Ansari, N. and Ren, H. (1994). "A genetic algorithm for multiprocessor scheduling." *IEEE Transactions on Parallel and Distributed System*, 2(5), 113-120.
- [11] Kang, S. C. and Miranda, E. (2006). "Planning and visualization for automated robotic crane erection processes in construction." *Automation in Construction*, 15(4), 398-414.
- [12] Kavraki, L.E., Svestka, P., Latombe, J.C. and Overmars, M.H. (1996). "Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration spaces." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 12(4), 556-580.
- [13] Khatib, O. (1986). "Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots." *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), 90-98.
- [14] Ladd, A.M. and Kavraki, L.E. (2004). "Measure theoretic analysis of probabilistic path planning." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 20(2), 229-242.
- [15] Lewis, R. A. and Bejczy, A. K. (1973). "Planning considerations for a roving robot with arm." *Proceedings of the 3rd international joint conference on Artificial intelligence*, Stanford, August, 308-316.
- [16] Lozano-Perez, T. and Wesley, M. A. (1979). "An algorithm for planning collision-free paths among polyhedral obstacles." *Communications of the ACM*, 22(10), 560-570.

- [17]Li, Y., Ng, K. C. Murray-Smith, D. J. and Sharman, K. C. (1996). "Genetic algorithm automated approach to design of sliding mode control systems." *International journal of control*, 63(4), 721-739.
- [18]Lin, K. L. and Haas, C. T. (1996). "Multiple heavy lifts optimization." *Journal of Construction Engineering and Management*, 122(4), 354-362.
- [19]Liu Y. and Arimoto S. (1992). "Path planning using a tangent graph for mobile robots among polygonal and curved obstacles." *International Journal of Robotics Research*, 11(4), 376-382.
- [20]Lozano-Perez, T. (1983). "Spatial planning: a configuration space approach." *IEEE transactions on computers*, 32(2), 108-120.
- [21]Microsoft. (2009). XNA. Retrieved 6 16, 2010, from MSDN : <http://msdn.microsoft.com/en-us/aa937791.aspx>
- [22]Mitchell, M. (1996). "An introduction to genetic algorithms." Massachusetts Institute of Technology, London, England.
- [23]Mohri, A., Yamamoto, M. and Hirano, G. (1996). "Cooperative path planning for two manipulators." *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Minneapolis, MN, April, 2853-2858.
- [24]NVIDIA. (2008). NVIDIA PhysX SDK 2.8 – Introduction. Santa Clara.
- [25]Oommen, B., Iyengar, S., Rao, N. and Kashyap, R. (1987). "Robot navigation in unknown terrains using learned visibility graphs." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 3(6), 672-681.

- [26]Peurifoy , R. L., Schexnayder, C. J. and Shapira A. (2006).
"Construction, planning, equipment, and methods." Seventh Ed., Mc
Graw Hill, New York.
- [27]Reddy, H. R. and Varghese, K. (2002). "Automated path planning for
mobile crane lifts." *Computer-Aided Civil and Infrastructure
Engineering*, 17(6), 439-448.
- [28]Shapiro, H. I., Shapiro, J. P. and Shapiro, L. K. (1991). "*Cranes and
derricks*." Second Ed., Mc Graw Hill, New York.
- [29]Song, P. and Kumar, V. (2002). "A potential field based approach to
multi-robot manipulation." *IEEE International Conference on
Robotics and Automation*, Washington D.C, May, 1217-1222.
- [30]Zhang, J., Lo, W. L. and Chung, H. (2006). "Pseudo-coevolutionary
genetic algorithms for power electronic circuits optimization." *IEEE
Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 36(4), 590-598.



作者簡歷



姓名：張育誠 (Chang Yu-Cheng)

出生日期：1986/02/07

E-Mail：bpqd@caece.net

聯絡地址：台北縣新莊市新莊路 295 號 4 樓

學歷：

國立新莊高級中學 (2001 ~ 2004)

國立臺灣大學土木工程學系 (2004 ~ 2008)

國立臺灣大學土木工程研究所 電腦輔助工程組 (2008 ~ 2010)

