

國立臺灣大學生物資源暨農學院生物機電工程學系

碩士論文

Department of Biomechatronics Engineering

College of Bioresources and Agriculture

National Taiwan University

Master Thesis

應用於綠牆之修剪機械的設計及研究

Development of a Green Wall Pruning Machine

劉承峰

Shing-Fung Lau

指導教授：葉仲基 博士、黃振康 博士

Advisor: Dr.-Ing. Chung-Kee Yeh, Chen-Kang Huang, Ph.D.

中華民國 112 年 6 月

June 2023



誌謝



首先我要感謝我的指導教授葉仲基博士。不知不覺我來台灣就學已到了第六年，而我的就學生涯有一半的時間都是跟著葉博士學習與進行研究。在葉博士的指導與幫助下，我才能完成這一研究。在課業之餘與葉博士相處輕鬆自在，聽取老師生活上的分享，使我在異鄉念書也能感受到溫暖。

接著我要感謝同實驗室的同學們。與他們討論著各自的研究，每每都能讓彼此看到新的發現，互相成長。當研究遇到困難時彼此給對方打氣與鼓勵，互相支持著對方前行，讓我們建立起革命情誼。另外我想要特別感謝擊劍校隊的大家，雖然校隊訓練不輕鬆，對學業也沒有直接的幫助，但他們對我而言就像家人一般，幫我走過一段段開心難過，是我在台灣就學間的心靈支柱。

最後我想要感謝我的家人們。家人永遠是最強的後盾，支持著我想做的任何事。父母從小便灌輸著我教育的重要性，也鼓勵著我繼續深造。父母讓我吃得飽穿得暖，讓我可以不用煩惱生活的事情，專心在課業上，在艱難的疫情期間完成我的研究。



摘要

綠牆是一種將植物栽種於牆面的栽種方式，其垂直栽種的特性能夠在都市中利用相對較少的面積來達到綠化及降溫的效果。隨著全球都市化的程度增加，大型都市所引起的熱島效應將越來越嚴重，對於綠牆的需求量將會隨著提高。

作業人員必須在高空中移動以對綠牆進行維護，大面積的綠牆會使維護工作變得相當費時及危險。本研究目的為設計及製作能夠應用於綠牆的修剪機械，將綠牆的修剪自動化以提升高空作業的便利性及安全性。

本研究以 SolidWorks 電腦輔助設計軟體 (CAD) 進行設計，並用 3D 列印進行兩款原型機的製作。修剪機械的設計目標為將過長的枝葉剪斷，因此本研究以有效切割率為主要指標。原型機使用蘇格蘭軛機構來製作雙動刀往復式切割，其刀片結構參數為：刀片寬度 15 mm、刀刃高度 20 mm、前橋寬度 0.44 mm、滑切角 20° 。本研究將雙動刀往復式切割的刀刃軌跡方程式推導出，並利用 Desmos 繪圖計算機對原型機製作切割圖，計算其有效切割率。其在固定結構參數以及切割進程為刀片高度的 1.1 及 1.2 倍時達到其最高有效切割率 77.3%。在將切割行程減短至 15 mm 後，整體的有效切割率降低，但以降低漏割區面積的方式提升切割率。

關鍵字：綠牆、修剪機械、電腦輔助設計、雙動刀往復式切割圖、有效切割率

Abstract



Green walls are a cultivation method in which plants are grown on wall surfaces, utilizing vertical planting to achieve greening and cooling effects in urban areas with relatively limited space. As global urbanization continues to increase, the heat island effect caused by large cities becomes more severe, leading to a growing demand for green walls.

Maintenance of green walls requires personnel to work at heights, making the maintenance of large-scale green walls time-consuming and dangerous. The objective of this study is to design and develop a pruning machine specifically for green walls, automating the trimming process to enhance convenience and safety in high-altitude operations.

The design was conducted using SolidWorks computer-aided design (CAD) software, and two prototype machines were produced using 3D printing. The design goal of the pruning machine is to cut excessively long branches and leaves, with the effective cutting rate serving as the primary metric. The prototype machine employs a Scotch-yoke mechanism to achieve dual-action reciprocating cutting, with blade parameters set as follows: width knife section of 15 mm, blade height of 20 mm, width of Leading end of 0.44 mm, and sliding angle of 20° . The study derives the equation for the blade's reciprocating motion and using the Desmos graphing calculator to create a cutting diagram for the prototype, calculating its effective cutting rate. The highest effective cutting rate of 77.3% was achieved when the blade height was set at 1.1 and 1.2 times the fixed structural parameters during the cutting process. By reducing the cutting stroke to 15 mm, the overall effective cutting rate decreased, but the missed cutting area reduced, resulting in an improved cutting rate.

Keywords: Green walls, pruning machine, computer-aided design, dual-blade reciprocating cutting diagram, effective cutting rate

目錄



誌謝	i
摘要	ii
Abstract	iii
圖目錄	vi
表目錄	ix
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究目的	2
第二章 文獻探討	3
2.1 綠牆	3
2.2 爬牆機器人於綠牆的應用及研究	5
2.3 有效切割	9
2.4 蘇格蘭軛	10
2.5 往復式切割器	11
2.6 滑切角	13
第三章 研究方法	16
3.1 研究方向	16
3.2 籬笆剪拆解與分析	16
3.3 利用電腦輔助設計軟體 (CAD) 建模	18
3.4 原型機 1	19
3.4.1 傳動系統設計	19
3.4.1.1 傳動系統構想	19
3.4.1.2 齒輪設計	19
3.4.1.3 傳動系統模型初測	22
3.4.1.4 齒輪優化	23
3.4.1.5 傳動軸設計	24
3.4.2 刀具設計	26
3.4.3 其他非活動件	27
3.4.3.1 主體外殼設計	27
3.4.3.2 刀具支撐架設計	28
3.4.3.3 齒輪支撐架設計	29
3.4.4 原型機 1 測試	31
3.5 原型機 2	33
3.5.1 傳動系統改良	33

3.5.2 刀具設計改良	33
3.5.3 其他非活動件改良	35
3.5.3.1 主體外殼設計改良	35
3.5.3.2 刀具支撐架子	35
3.5.3.3 齒輪支撐架改良	35
3.6 控制系統	37
3.6.1 修剪刀具控制	37
3.6.2 移動控制	39
3.7 切割圖製作	40
3.7.1 Desmos 繪圖計算機	40
3.7.2 運動分析	40
3.7.3 刀刀軌跡與切割圖	42
3.7.4 有效切割率定義與計算	44
第四章 結果與討論	46
4.1 原型機測試	46
4.2 控制系統測試	47
4.3 切割圖	48
第五章 結論與建議	64
參考文獻	65

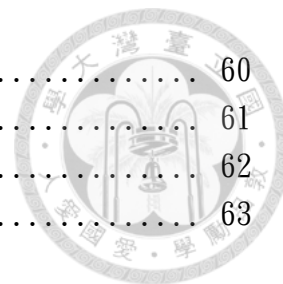
圖目錄



圖 1-1 台灣每年居住於城市人口比例估算（圖片來源：聯合國，2018）	1
圖 2-1 綠幕牆（Manso and João, 2015）	4
圖 2-2 植生牆（Manso and João, 2015）	4
圖 2-3 工地模組化綠牆（圖片來源：三木景觀， http://www.3tree.url.tw/case_fence.html ）	5
圖 2-5 Wallbot 對綠牆植物製作 3D 圖（Wilkinson, 2021）	6
圖 2-4 利用鋼索移動的 Wallbot（Wilkinson, 2021）	6
圖 2-6 切割單元組合	7
圖 2-7 架構概念圖（Anderer, 2018）	8
圖 2-8 氣動快換系統 SWS 005-000-000（Anderer, 2018）	8
圖 2-9 往復式切割器切割圖（宋等人，2016）	9
圖 2-10 簡諧運動圖（范，2018）	11
圖 2-11 曲柄滑塊機構（王等人，2011）	12
圖 2-12 擺環機構（王與王，2008）	12
圖 2-13 行星齒輪機構（冉等人，2020）	13
圖 2-14 滑切角	14
圖 3-1 研究項目	16
圖 3-2 D-520 籬笆剪	17
圖 3-3 D-520 內部構造	17
圖 3-4 D-520 機構模擬	18
圖 3-5 D-520 核心部件（部分細節已省略）	19
圖 3-6 漸開線齒輪設計	20
圖 3-7 主動輪建模	20
圖 3-8 從動輪建模	21
圖 3-9 原型機 1 齒輪組	21
圖 3-10 原型機 1 齒輪組（側視）	22
圖 3-11 齒輪組 3D 列印測試	22
圖 3-12 齒輪組上視圖	23
圖 3-13 原型機 1 主動輪優化設計	24
圖 3-14 原型機 1 從動輪優化設計	24
圖 3-15 原型機 1 傳動軸設計	25
圖 3-16 傳動軸與動輪組合	25
圖 3-17 原型機 1 刀具設計	26

圖 3-18 原型機 1 主體外殼設計	27
圖 3-19 下層刀具支撐架	28
圖 3-20 刀具支撐架組合	29
圖 3-21 上層刀具支撐架	29
圖 3-22 原型機 1 齒輪支撐架組合	30
圖 3-23 原型機 1 上層齒輪支撐架	30
圖 3-24 原型機 1 下層齒輪支撐架	30
圖 3-25 原型機 1 電腦建模	31
圖 3-26 原型機 1 3D 列印模型組裝	31
圖 3-27 原型機 1 傳動系統皮帶部分	32
圖 3-28 原型機 2 傳動系統	33
圖 3-29 原型機 2 刀具設計	34
圖 3-30 刀刀結構參數	34
圖 3-31 原型機 2 主體外殼設計	35
圖 3-32 原型機 2 下層齒輪支撐架	36
圖 3-33 原型機 2 上層齒輪支撐架	36
圖 3-34 原型機 2 齒輪支撐架組合	36
圖 3-35 Arduino Uno 開發板	37
圖 3-36 橋電路結構示意圖（圖片來源： https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/ ）	38
圖 3-37 L298N 馬達驅動模組	38
圖 3-38 控制系統電路示意圖	39
圖 3-39 菜園管理機器人 FarmBot Genesis V1.4	39
圖 3-40 Desmos 繪圖計算機	40
圖 3-41 蘇格蘭軛結構的運動分析圖	40
圖 3-42 原型機 2 切割圖	42
圖 4-1 原型機 2 電腦建模	46
圖 4-2 原型機 2 3D 列印模型組裝	46
圖 4-3 原型機 2 之 0.85h 有效切割圖	50
圖 4-4 原型機 2 之 1.1h 有效切割圖	51
圖 4-5 原型機 2 之 1.2h 有效切割圖	52
圖 4-6 原型機 2 之 1.3h 有效切割圖	53
圖 4-7 原型機 2 之 1.4h 有效切割圖	54
圖 4-8 原型機 2 之 1.5h 有效切割圖	55
圖 4-9 原型機 2 之 2h 有效切割圖	56
圖 4-10 原型機 2 之 0.85h 有效切割圖($S=b$)	57
圖 4-11 原型機 2 之 1.1h 有效切割圖($S=b$)	58
圖 4-12 原型機 2 之 1.2h 有效切割圖($S=b$)	59

圖 4-13 原型機 2 之 1.3h 有效切割圖($S=b$).....	60
圖 4-14 原型機 2 之 1.4h 有效切割圖($S=b$).....	61
圖 4-15 原型機 2 之 1.5h 有效切割圖($S=b$).....	62
圖 4-16 原型機 2 之 2h 有效切割圖($S=b$).....	63



表目錄



表 3-1 D520 內部零件	17
表 3-2 齒輪參數	20
表 3-3 原型機 1 修剪機構零件	32
表 3-4 刀刃結構參數	34
表 4-1 原型機 2 零件清單	47
表 4-2 原型機 2 切割圖數據	48
表 4-3 原型機 2 切割圖數據 ($S = b$)	49



第一章 緒論

1.1 前言

都市熱島效應 (Urban Heat Island Effect) 指的是在城市地區所發生的異常高溫現象，其主要由都市的人類活動以及城市的結構導致的熱量累積所造成。首先，交通運輸、工廠排放、空調等都會在運作時產生大量的廢氣，直接導致城市氣溫上升。其次，城市中大量的混凝土建築及柏油路會吸收及儲存太陽發出的熱輻射，這些材料會長時間儲存大量的熱量。此外，城市地區的綠植覆蓋面積較少，缺少了利用植物蒸散作用來降低周邊溫度的手段。這些原因結合起來將會導致都市熱島效應的發生，造成生命財產的損失。根據聯合國 (2018) 的估算，全球居住在都市中的人口比例將會從 2020 年的 56.2%，於 2050 年達到 68.4%，而台灣的居住在都市中的人口比例將會從 2020 年的 78.9%，於 2050 年達到 87.5% (圖 1-1)。城市人口的增加意味著城市地區的活動與生活需求增加，若是不採取相對應的處理都市熱島效應，在未來將會變得越發嚴重。

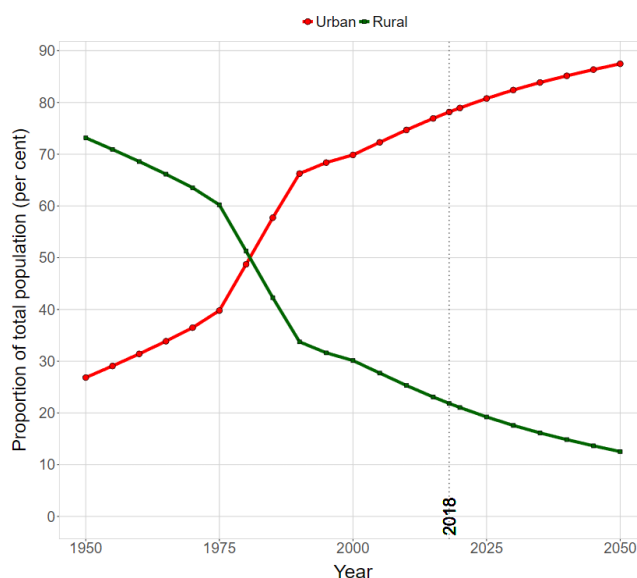


圖 1-1 台灣每年居住於城市人口比例估算 (圖片來源：聯合國，2018)

1.2 研究目的

綠牆擁有著各種好處，但其往上延伸的特性將會使得維護工作變得困難。作業人員必須在高空中移動以對較高的綠牆進行維護，而面積較大的綠牆將會使整個維護工作變得相當費時及危險。因此，開發應用於綠牆的維護機械是非常重要的。本文研究的目的是為設計及製作能夠應用於綠牆的修剪機械，將綠牆的修剪自動化及效率化。用機械代替人力修剪綠牆，提升高空作業的便利性及安全性。

第二章 文獻探討



2.1 綠牆

隨著全球都市化程度的增加，全球各地也頻繁出現都市熱島效應。一個城市的都市熱島效應嚴重程度將會由城市中綠化基礎設施 (Green infrastructure) 的多寡決定 (Wilkinson, 2021)。城市中常見的綠化基礎設施為公園，但在已高度開發完成的城市中要再規劃出面積足夠大的公園是較為困難的。在這一條件限制下，綠牆將會是一個很好的選項。

綠牆是一種將植物栽種於牆面的栽種方法。這種栽種方式可以減少土地面積的使用量，而在都市中的綠牆更能起到美化建築、降噪與降溫等功能。因此，在土地稀缺的都市地區，綠牆成為了有效減緩熱島效應的手段 (高，2010)。綠牆垂直栽種的特性能夠在相對較少的面積來達到綠化的效果，進而實現為都市降溫及美化等目的。2009 年台中市政府推出「台中市重大營建工程空氣污染防治自治條例 (草案)」，其中一項便是推動增加工地綠牆的建設，雖然草案被議會退回，但各縣市的工地亦自發仿效於工地設立綠牆，來達到降噪與美化等功效 (謝，2013)。綠牆的降溫效果與地區的氣候相關 (Susca *et. al.*, 2022)，在特定氣候的地區綠牆能為建築分別減少 16.5% 的加溫耗能 (heating energy) 以及 51% 的降溫耗能 (cooling energy)。

綠牆可以根據其特性分為綠幕牆 (Green facade) 以及植生牆 (Living Wall) 兩大系統 (Manso and João, 2015)。綠幕牆的特點為讓植物直接依附在建築的表面上，一般常見的做法為將攀藤性植物種在地面上，讓植物攀附在牆面上往上生長直到將牆面覆蓋 (圖 2-1)。另外一種常見的做法為將藤曼植物種植在屋頂上，讓植物生長時自然垂下將牆面覆蓋。

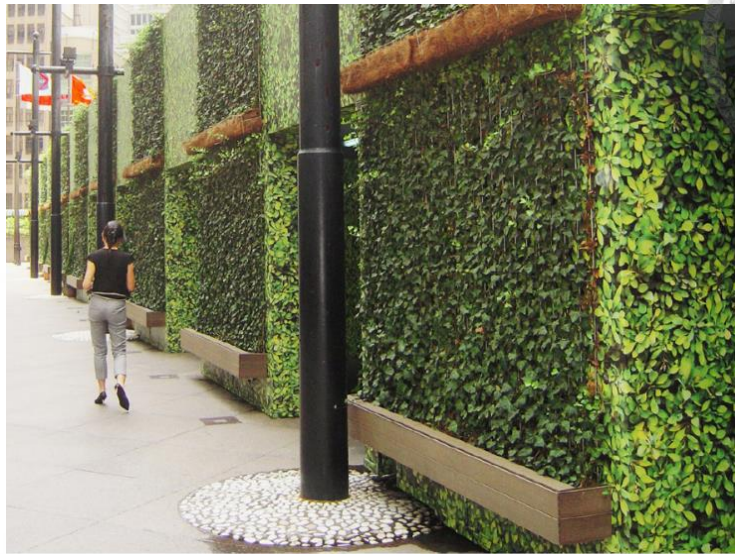


圖 2-1 綠幕牆 (Manso and João, 2015)

植生牆的特點則是先在建築的表面設置承載植物的結構，並讓植物生長在結構上（圖 2-2）。這種結構在材料與形式在選擇上較為多元，因此在綠牆設計及植物的選擇上能夠更加彈性。最常見的植生牆建立方式便是將植物栽種在多個獨立的盆格中，再把各個盆格固定到牆面上（圖 2-3）。模組化的設計能讓綠牆能夠因應外牆的形狀以及藝術設計進行彈性的調整，而這也是工地常見的綠牆形式（謝，2013）。



圖 2-2 植生牆 (Manso and João, 2015)



圖 2-3 工地模組化綠牆（圖片來源：三木景觀，
http://www.3tree.url.tw/case_fence.html）

2.2 爬牆機器人於綠牆的應用及研究

綠牆往上延伸的特性使其在人力維護較為困難，作業人員必須在長時間在高空移動對綠牆進行維護工作如檢查植物狀況、修剪、換盆、補充營養液等等。由於單一綠牆必須具備一定的規模才能展現出它的效益，因此大部分綠牆面積都會較大，進一步增加了維護工作的難度及時長。為了解決人員高空作業的不便，各地的開始進行對綠牆維護機器的研究。

爬牆機器人可以根據其附著在牆面上的方式進行六大類（Nansai and Mohan, 2016），即吸盤附著（Suction Cup Adhesion）、吸盤履帶附著（Suction Cup Crawler Adhesion）、真空泵附著（Vacuum pump Adhesion）、磁力吸附（Magnetic Adhesion）、繩索或軌道（Rope and/or Rail Gripping）、以及仿生附著（Bio-Inspired Adhesion）。這些附著方式各有優缺點，可針對使用的目的以及條件去選擇適合的附著方式。

雪梨科技大學製作出應用於檢測綠牆植物健康狀況的爬牆機器人 Wallbot（Wilkinson, 2021）。Wallbot 由多條鋼索支撐，並利用四個由電腦控制的絞盤來改變鋼索的長度及張力，控制其移動方向（圖 2-4）。Wallbot 承載著三個不同光學

感測器，分別為 Intel RealSense T265、Intel RealSense D425 以及 MAPIR Survey 3。Wallbot 能利用這些感測器來進行移動定位、對綠牆上的植物製作 3D 圖(圖 2-5)、並利用感測得到的資料計算出植物的常態化差異植生指標(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)，用以判斷綠牆植物的健康度。



圖 2-5 利用鋼索移動的 Wallbot (Wilkinson, 2021)

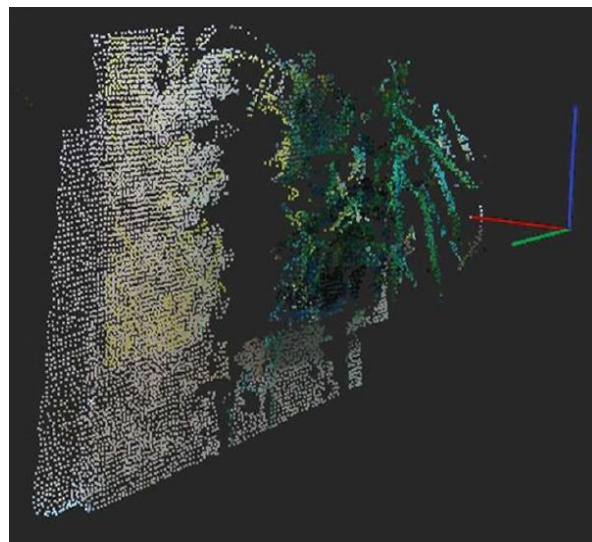


圖 2-4 Wallbot 對綠牆植物製作 3D 圖 (Wilkinson, 2021)

柏林工業大學的研究 (Anderer, 2018) 主導計畫 Urban Vertical Green 2.0，其中的子計畫之一便是綠化建築全自動維護系統的開發、設計與建造。其中關於綠牆維護機器的切割單元，提供了關於各種類型的切割方法、傳動系統、過載保護等 (圖 2-6)。

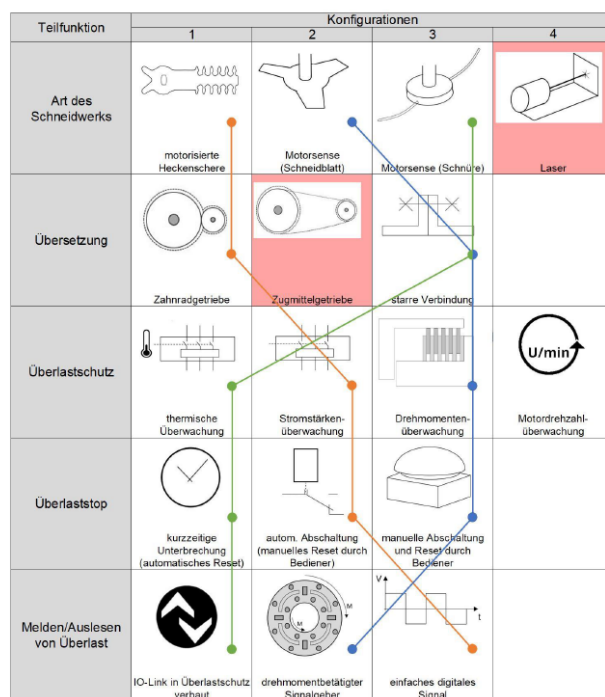


圖 2-6 切割單元組合 (Anderer, 2018)

在切割方法方面，文獻提供了往復式切割、圓盤刀片、牛筋繩、鐳射切割等等。圖 2-7 為維護機系統的整體架構概念圖。整體架構可以分為控制電腦、機械臂、工具頭三大部分，而其中機械臂與工具頭之間以快換系統 (圖 2-7 中 Schnellwechselsystem 處) 做結合。這項研究使用德國雄克公司 Schunk 所開發的氣動快換系統 SWS 005-000-000 (圖 2-8) 來更換工具頭，快換系統 SWS 由快換主裝置 SWK 和快換法蘭 SWA 組成。SWK 會安裝在機械臂端而 SWA 會安裝在工具頭端，當兩個裝置結合後便會啟動氣動鎖將其接牢固定並供電至前端的工具頭。SWS 系統的使用能讓維護機器人根據不同的目的快速更換前端的工具頭，使得使用上更加靈活。

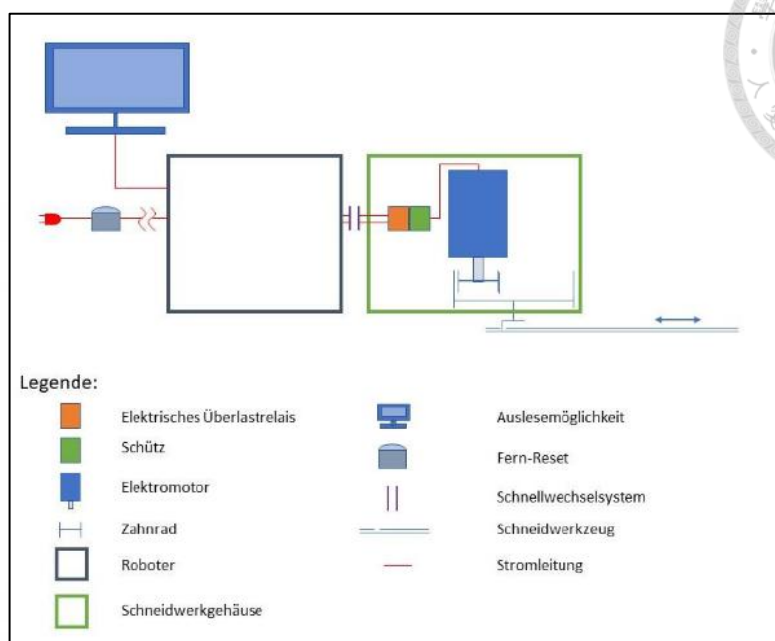


圖 2-7 架構概念圖 (Anderer, 2018)



圖 2-8 氣動快換系統 SWS 005-000-000 (Anderer, 2018)



2.3 有效切割

切割圖為分析往復式切割器的重要工具（向等人，2015），透過對刀刃兩端點的運動軌跡製圖，可以在平面上畫出刀刃工作時所切過的路徑。根據不同的切割情況，刀刃所畫出的面積可分為一次切割區、重割區以及漏割區。

宋等人（2016）針對往復式切割器提出切割有效率的概念。宋等人調整動刀片的各個結構參數，如刀片寬度、刀刃高度、前橋寬度等對往復式切割器進行優化設計，提高切割的效率及降低能耗，並以提升切割有效率為最終研究目的。文獻將往復式切割器的切割圖依照切割情況分為上述的三種分類（圖 2-9）。由點 a 、 c 、 d 、 e 、 f 組成的 S_I 區域為一次切割區，該區內的棉花秸稈只需要被動刀片經過一次便能完成切割。由點 f 、 g 、 h 組成的 S_{II} 區域為漏割區，該區內的棉花秸稈並沒有被動刀片的移動覆蓋切割，容易造成棉花秸稈拉斷以及漏割等狀況。由點 a 、 b 、 h 組成的 S_{III} 區域為重割區，該區內的棉花秸稈在切斷後依然被動刀片的另一刀口重複覆蓋發生重割，而重割的面積越大則造成無作用的功耗越大。

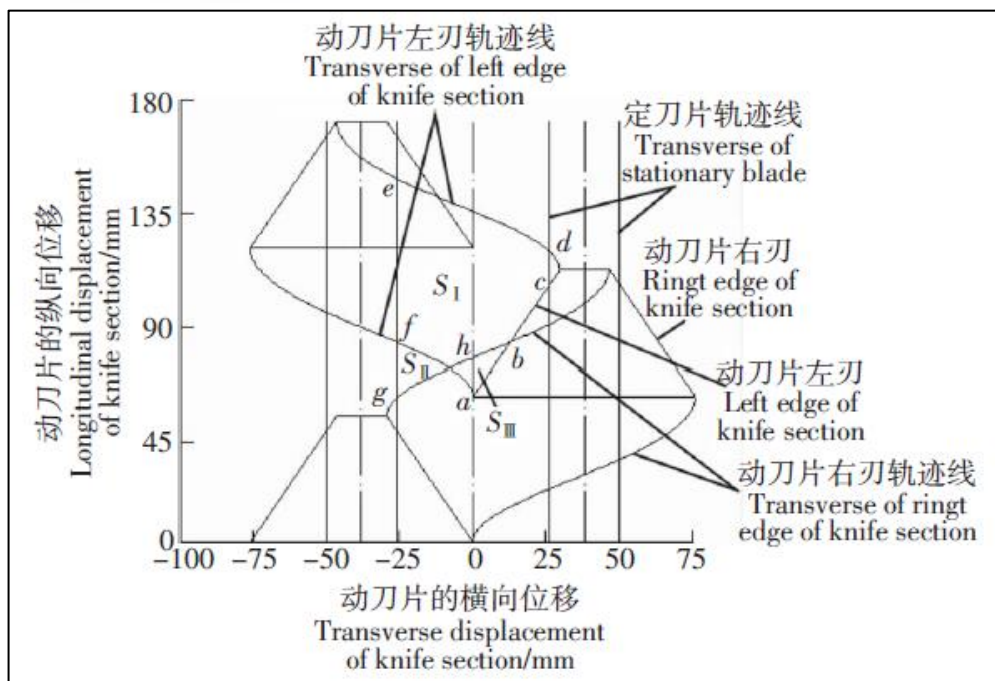


圖 2-9 往復式切割器切割圖（宋等人，2016）

宋等人根據上述的往復式切割器切割圖，將一次切割區、漏割區與重割區整合成一個相互關聯的整體，定義往復式切割器的有效切割率為切割圖中總切割區域的面積減去重割區和漏割區之和的面積，與總切割面積的比值。以圖 2-9 為例的有效切割率計算公式為：

$$\eta = \left(1 - \frac{S_{II} + S_{III}}{2S_I + S_{II} - S_{III}}\right) \times 100\% \quad (\text{式 2.1})$$

式中的 η 為有效切割率（%）、 S_I 為一次切割區域面積（ mm^2 ）、 S_{II} 為漏割區域面積（ mm^2 ）、 S_{III} 為重割區域面積（ mm^2 ）。 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 可以透過調整動刀片的結構參數和運動參數而改變，使用有效切割率能得到更直觀的數據作為優化刀片設計的依據。

2.4 蘇格蘭軛

蘇格蘭軛的原文為 Scotch-yoke，這一機構的特性為能夠將旋轉運動轉換成直線的簡諧運動，反之亦然。鑒於其特性，筆者認為可以利用在將引擎的旋轉動力傳到需要作往復移動的刀具上。根據《機構學》（范，2018）對於簡諧運動的動作分析，在圖 2-10 中質點 P 作等速度圓周運動而其在圓直徑上的投影來代表簡諧運動，當線段 OP 以等角速度 ω 旋轉，B 為 P 點在 X 軸上的投影，則 B 對 O 點的位移 x 為

$$x = R \cos \omega t \quad (\text{式 2.2})$$

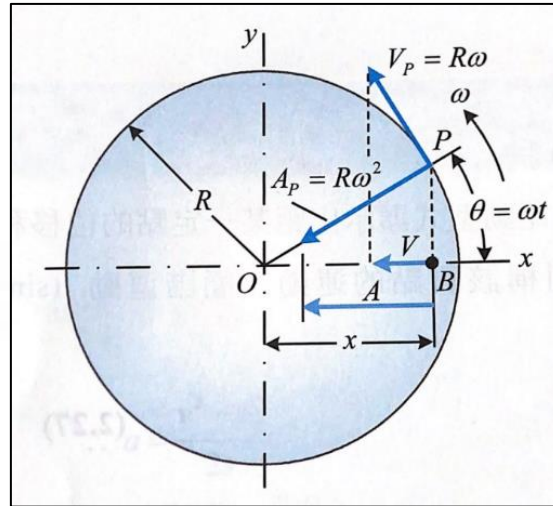


圖 2-10 簡諧運動圖 (范, 2018)

其速度 V 及加速度 A 可由 (式 2.2) 微分得

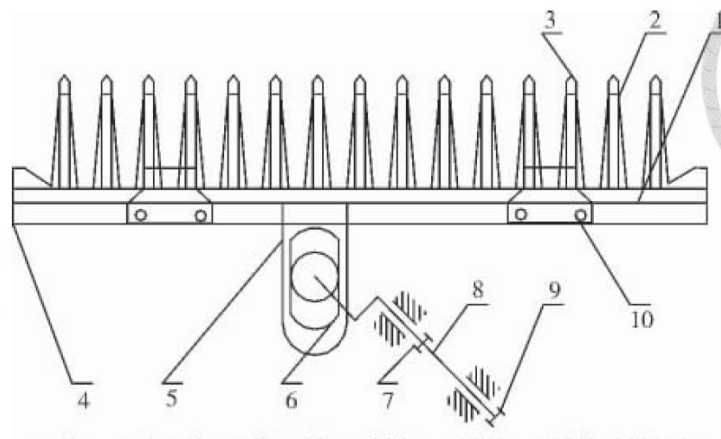
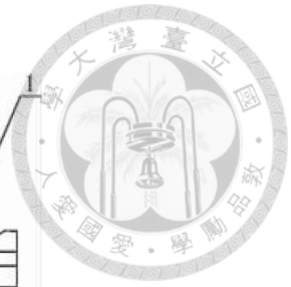
$$V = \frac{dx}{dt} = -R\omega \sin \omega t \quad (\text{式 2.3})$$

$$A = \frac{d^2x}{dt^2} = -R\omega^2 \cos \omega t = -\omega^2 x \quad (\text{式 2.4})$$

2.5 往復式切割器

往復式切割器是一種切割裝置，並被廣泛應用於農業領域，聯合收穫機、割草機、籬笆剪等等農機具都是利用往復切割來運作。其工作原理為利用傳動機構帶動刀具往復運動，使用交錯運動的刀刃將目標物進行切割。根據傳動系統的不同，其機構設計會不一樣，往復式切割機根據其傳動機構大致上可分為三類，即曲柄滑塊機構、擺環機構以及行星齒輪機構。

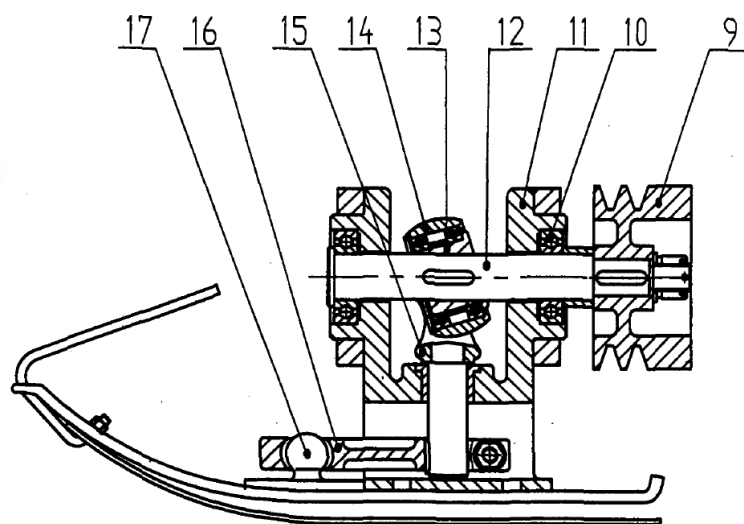
曲柄滑塊機構 (圖 2-11) 是往復式切割器最常見的設計，其結構設計較為簡單。其工作原理為由旋轉的曲柄滑塊，經由連桿或直接連結至動刀片的狹槽，將旋轉動力變成往復運動 (王等人, 2011)。



1. 刀桿；2. 動刀片；3. 護刃器；割台；5. 滑槽；6. 滑塊（軸承）；
7. 小鏈輪；8. 輸入曲柄軸；9. 大椎齒輪；10. 壓刃器

圖 2-11 曲柄滑塊機構（王等人，2011）

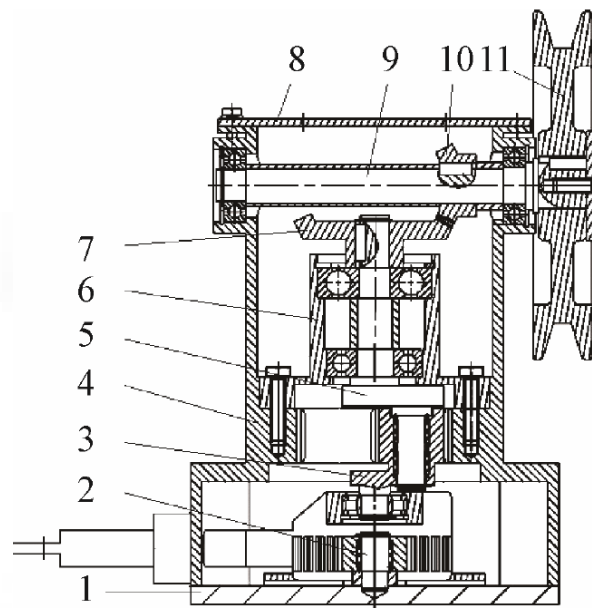
擺環機構由傳動軸、擺環體、擺環叉及擺臂組成，通常傳動軸會偏斜或以安裝偏心套的方式形成斜軸(圖 2-12)。其工作原理為由傳動軸提供旋轉動力至偏心套和擺環體上，旋轉的擺環體使擺環叉及擺臂來回擺動並帶動刀具進行往復運動(王與王，2008)。



9. 皮帶輪；10. 軸承；11. 傳動架；12. 傳動軸；13. 偏心套；14. 擺環體；15. 擺環叉；16. 擺臂；17. 刀頭

圖 2-12 擺環機構（王與王，2008）

行星齒輪機構通常由多個齒輪或齒條組合形成行星輪組件，並通過星輪組件與齒圈嚙合轉動運作（冉等人，2020）。其工作原理為行星輪組件與齒圈嚙合傳動，行星輪組件上轉動時上面的曲柄會在齒圈中心進行往復的直線運動，帶動刀具進行往復切割（圖 2-13）。



1. 底蓋；2. 定軸齒輪軸；3. 行星輪組件；4. 箱體；5. 行星架；6. 行星架支撐座；
7. 大椎齒輪；8. 上蓋；9. 帶輪軸；10. 小錐齒輪；11. 帶輪

圖 2-13 行星齒輪機構（冉等人，2020）

2.6 滑切角

切割機制的機制可分為砍切、傾斜切及滑（移）切三類（龐，1982）。涉及以刀具進行切割的農機具都會因應切割目標物對刀具的滑切角進行考量，而對往復式切割器來說更是尤其重要。在進行切割時，物料會先被動刀片壓緊，然後在刀口的壓力作用下被破壞切割（圖 2-14）。

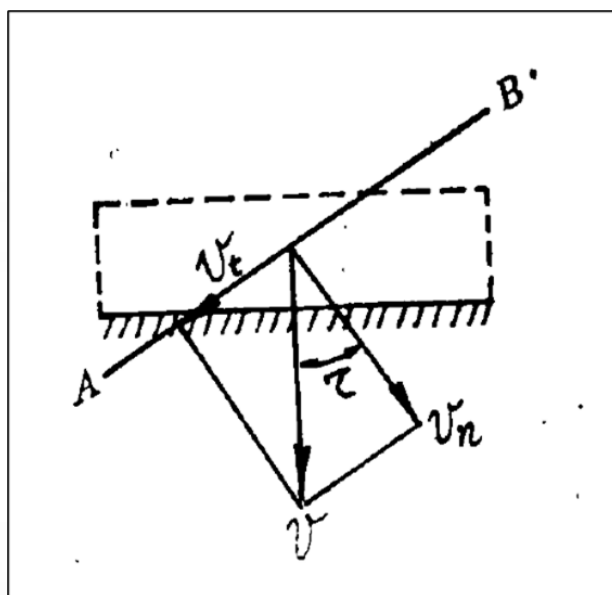


圖 2-14 滑切角
(龐，1982)

圖 2-14 中的 AB 為刀刃的刀口、 v 為動刀片的切割速度。動刀片的切割速度 v 可分為垂直於刀口的砍切速度 v_n 以及平行於刀口的滑切速度 v_t 。切割速度 v 與 v_n 之間的夾角便是滑切角 τ ，而滑切角的正切便是滑切係數 ε (式 2.5)。

$$\varepsilon = \tan(\tau) = \frac{v_t}{v_n} \quad (\text{式 2.5})$$

在接觸物料的瞬間，刀刃的推擠會使物料在刀刃上進行滑移。在微觀的狀態下，呈鋸齒狀的刀刃對物料起到類似鋸斷的作用。由於大多數材料的拉伸強度極限和剪切強度極限比抗壓強度極限小，所以多數情況下滑切會比砍切來得更加省力。

雖然滑切角有助於進行切割，但滑切角並不是越大越好。當滑切角過大時，刀刃不能順利咬上物料時，會推擠物料並使其在刀刃上發生過多的滑移。這種現象輕則使切割過程不順暢且耗能，重則將物料推擠至物料輸入端，造成切割阻力不均，使刀刃局部磨損。



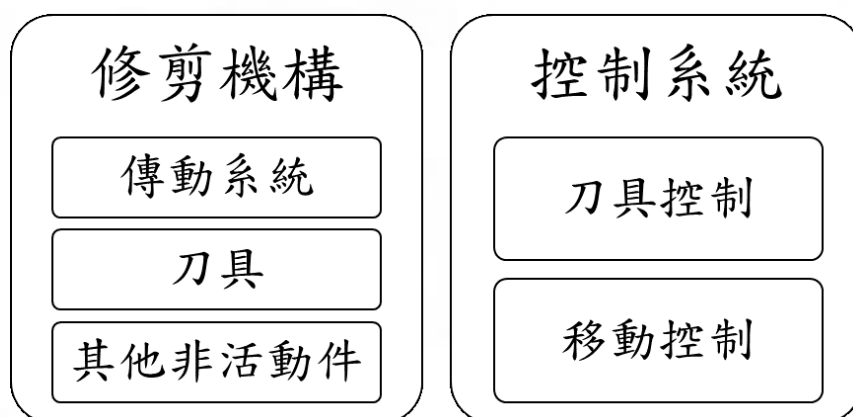
滑切角的選用必須考量刀刀的機構參數、材料種類、切割速度等等多項因素，在不同的條件下最佳的滑切角差別很大，並無法直接選定一個角度為通用的最佳解。但根據龐（1982）的研究，切割器以節約功耗為設計目的，選用的滑切角大約為 20° 至 50° 。根據康等人（2020）的研究，用於 14 mm 至 15 mm 蘋果枝條的往復切割刀具滑切角在 10° 至 20° 時，所需最大切割力隨著滑切角增加而減少。

第三章 研究方法



3.1 研究方向

本研究可分為原型機設計與製作以及切割圖繪製兩大部分。在原型機設計與製作方面，又可分為修剪機構以及控制系統兩大項目來分別進行。將大項目分成多個子項目進行可以讓研究專注在當前的項目上，減少製作時的複雜度使項目的目標更加明確，提高工作效率。圖 3-1 為原型機各個研究項目。



刀刃的結構參數會影響往復式切割器的切割狀況，但在成本與製作時間的限制下，難以製作大量的實體原型機逐一進行比較實驗。切割圖的繪製能夠利用計算的方式得到有效切割率，省去了需要製作大量原型設計製作的成本。

3.2 籬笆剪拆解與分析

本研究以開拓金屬工業的 D-520 籬笆剪作為參考對象，觀察及分析其作動機構進行後續的設計。D-520 是一台由二行程汽油引擎驅動的往復式切割籬笆剪，利用往復移動的刀刃將枝葉切斷。圖 3-2 與圖 3-3 分別為 D-520 的外觀及其內部構



造，表 3-1 為其內部零件的詳細說明。

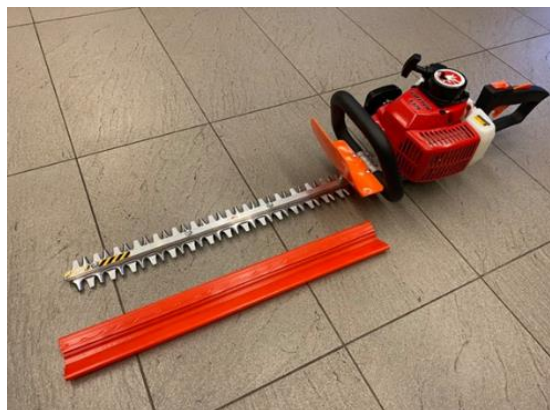


圖 3-2 D-520 籬笆剪



圖 3-3 D-520 內部構造

表 3-1 D-520 內部零件

編號	部件	功能
1	引擎	提供動力來源
2	小齒輪	將引擎動力輸出
3	大齒輪	將輸出動力減速
4	搖臂	將旋轉動力轉換成直線動力，帶動刀片前後移動
5	刀片	將枝葉剪斷

在 D-520 運作時，引擎會將動力直接提供到小齒輪上。小齒輪連結到大齒輪上降低齒輪比，達到減速的效果。D-520 的前端有兩個刀片上下疊在一起，並分別用搖臂連接到大齒輪上。兩個搖臂安裝到大齒輪上的位置會差 180 度（圓形齒輪的兩端），這麼做的目的是為了讓兩個刀片的運動形成相位差。當大齒輪轉動時，連接在上面的搖臂會帶著刀片移動，由於刀片的自由度被限制住了，因此只能作前後往復移動。對稱的安裝方式會讓其中一個刀片往前移動時另一刀片往後移動，使得到兩個刀片交錯往復移動達到切割的效果。

3.3 利用電腦輔助設計軟體（CAD）建模

本研究將會使用由達梭系統（Dassault Systèmes S.A.）開發的 SolidWorks 電腦輔助設計軟體來進行設計及製作。在拆解及研究觀察 D-520 的內部構造後，將其主要作動的機構建模並做電腦模擬，以方便做後續的研究工作。圖 3-4 為 D-520 的電腦模擬動畫，透過動畫模擬分析這個機構的運作。圖 3-5 為 D-520 的核心零件組合後的模樣（部分細節已省略），如章節 3.2 所描述，核心上的兩個圓盤將會分別接到搖臂上，帶動刀具前後往復移動。後續其他硬體零件也會利用這個軟體進行設計，而設計後的零件將會利用 3D 列印製作出模型，並進行組裝測試。

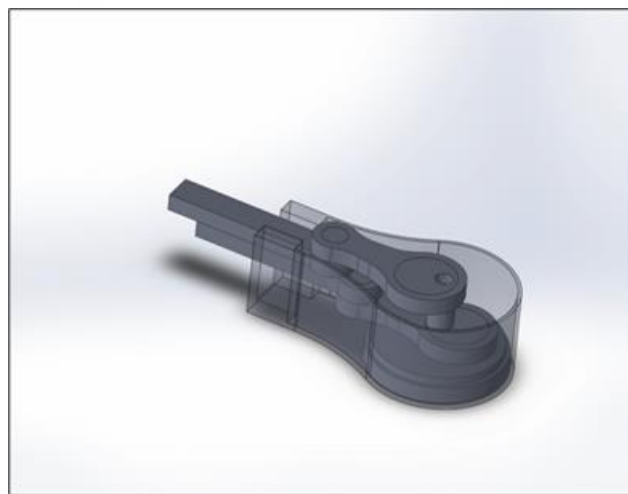


圖 3-4 D-520 機構模擬

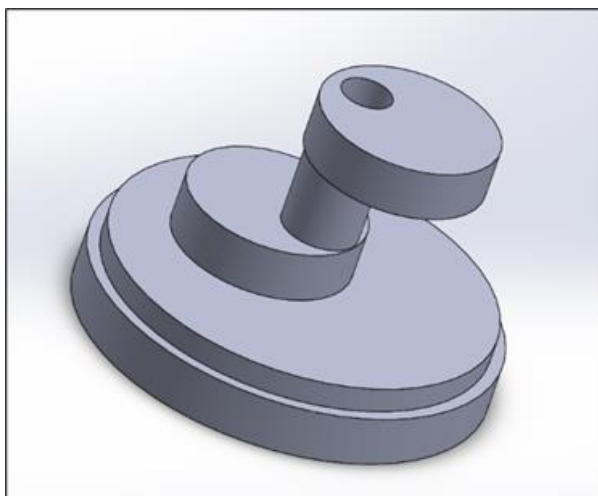


圖 3-5 D-520 核心部件（部分細節已省略）

3.4 原型機 1

3.4.1 傳動系統設計

3.4.1.1 傳動系統構想

傳動系統為驅動這台修剪機的核心，其主要的目的為將動力傳到刀具上，驅使刀具移動以進行切割。在觀察 D-520 的核心機構後，筆者在想是否可以利用別的機構能夠達到一樣的效果、並減少零部件的使用。筆者嘗試使用格蘭軛機構來代替搖臂，製作帶有狹槽的刀具接到帶有滑塊的齒輪上，讓旋轉的齒輪直接帶動刀具前後往復移動來達到剪切的效果。

3.4.1.2 齒輪設計

核心的初步構想為將動力傳到一個大的主動輪上，再分別傳導到兩個從動輪帶動刀片移動。首先需要先設計出齒輪，通過調整齒輪的各個參數，在 SolidWorks 生成一個漸開線正齒輪。表 3-2 與圖 3-6 分別為齒輪的參數及齒輪生成後的樣子。



表 3-2 齒輪參數

模數	3
齒數	20
壓力角	20
節圓	60 mm
基圓	56.38 mm
齒頂	66 mm
齒根圓	52.5 mm

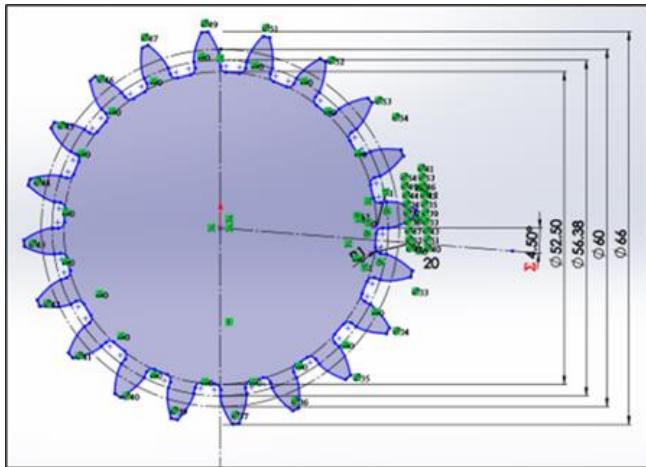


圖 3-6 漸開線齒輪設計

在研究初期，先以 3D 列印製作出實體的模型，觀察這個機構的構想是否能實際運作。利用圖 3-6 的齒輪設計分別製作出主動輪和從動輪的模型，這兩個齒輪的特徵一樣，齒輪比為 1 比 1。在接上動力源前，先進行手動測試機構設計是否能順利作動。為了進行手動測試，在主動輪上設計了一個小把手以供抓握，方便旋轉齒輪。而在從動輪的其中一面上設計了一個凸起的偏心圓充當滑塊，以供刀具的狹槽安裝。圖 3-7 及圖 3-8 分別為主動輪及從動輪的電腦建模。

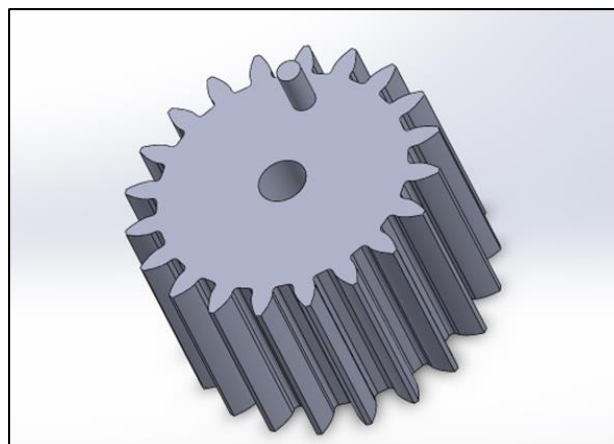


圖 3-7 主動輪建模

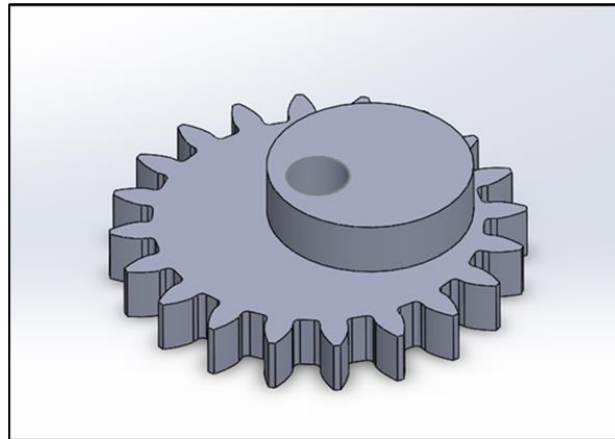


圖 3-8 從動輪建模

使用 SolidWorks 的組合功能將各個零件組合起來，並用動畫模擬整個機構運作的過程。圖 3-9 為組合完成的模樣，使用了一個主動輪、兩個從動輪、及兩個刀具。圖 3-10 為齒輪組合的側視圖，圖中黃色的部分為從動輪、綠色的部分為主動輪。主動輪會驅動兩個從動輪同步旋轉。兩個從動輪在組合時會以對稱方式來組裝。兩個從動輪的滑塊面夾在齒輪之間，並將滑塊以一前一後的方式安裝。這樣的組合方式能將刀具的行程錯開，一個刀具往前時另一個刀具往後。

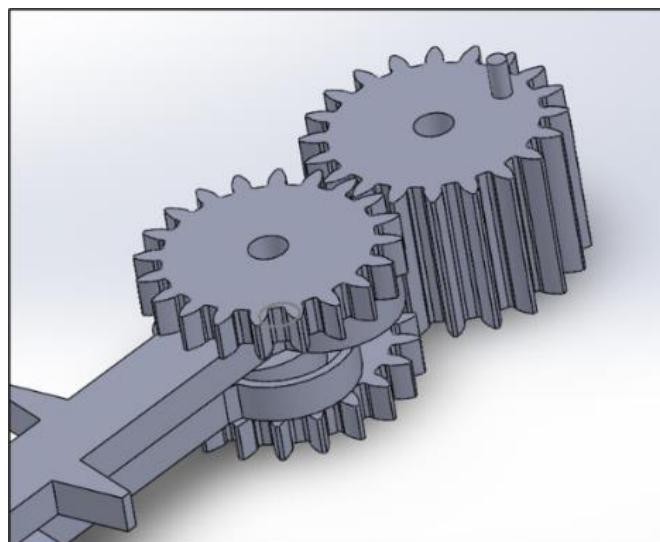


圖 3-9 原型機 1 齒輪組

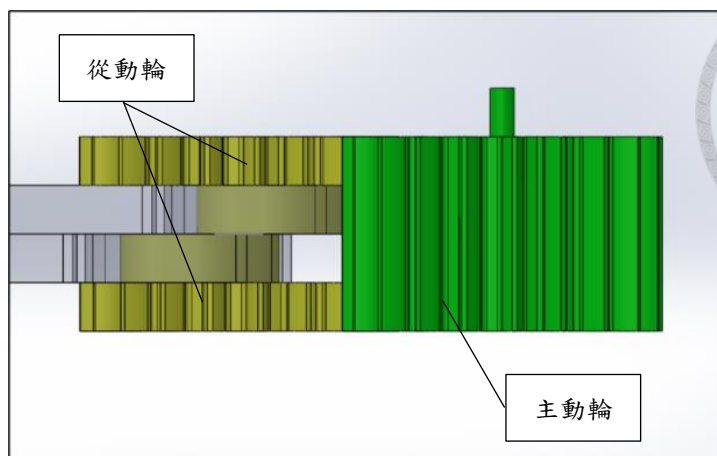


圖 3-10 原型機 1 齒輪組（側視）

3.4.1.3 傳動系統模型初測

圖 3-11 為初版傳動系統 3D 列印模型組合後的樣子。為了進行測試也一併製作了設計簡單的刀具及外殼做暫替品，以觀察帶動刀具的狀況。在實際製作模型並組裝後，發現一些用電腦模擬無法發現的問題。首先，拿到的成品存在著列印的大小誤差，造成組裝及運作的困難。

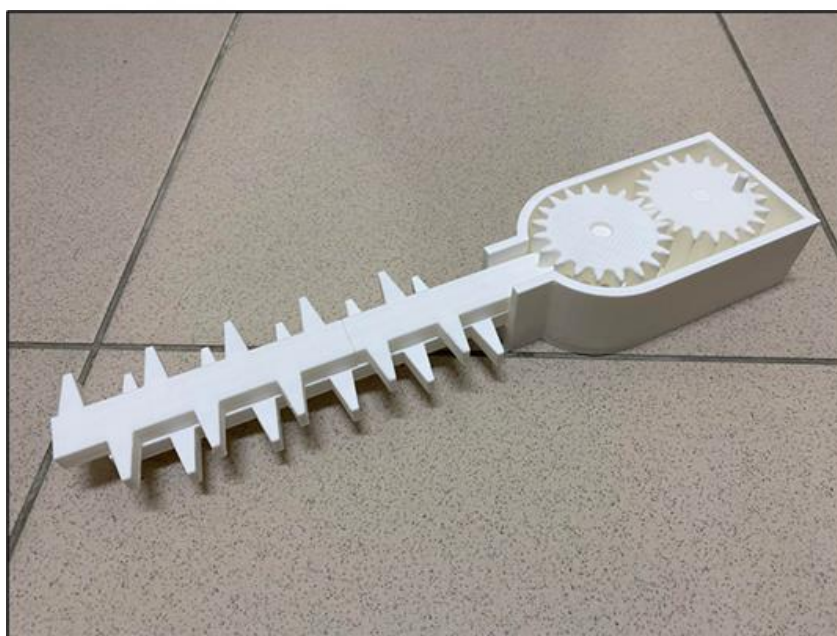


圖 3-11 齒輪組 3D 列印測試

圖 3-12 為機構模型的上視圖，由於拿到的模型尺寸存在誤差，模型的運作與電腦模擬的不一樣。當刀具移動到最右邊時，主動輪的最外圍會卡到刀具，旋轉造

成刀具從原本預期的移動軌跡導致機構無法順利作動。另外，各個部件之間的摩擦力也是問題之一。3D 列印利用材料層層堆疊的方式將模型製作出來，因此成件上會有細小的紋路，這些紋路導致作動件的摩擦力增加而難以運作。大部分的活動件經過砂紙研磨後有明顯地改善，並在後續的設計時將模型網格精度調高減少列印的紋路。

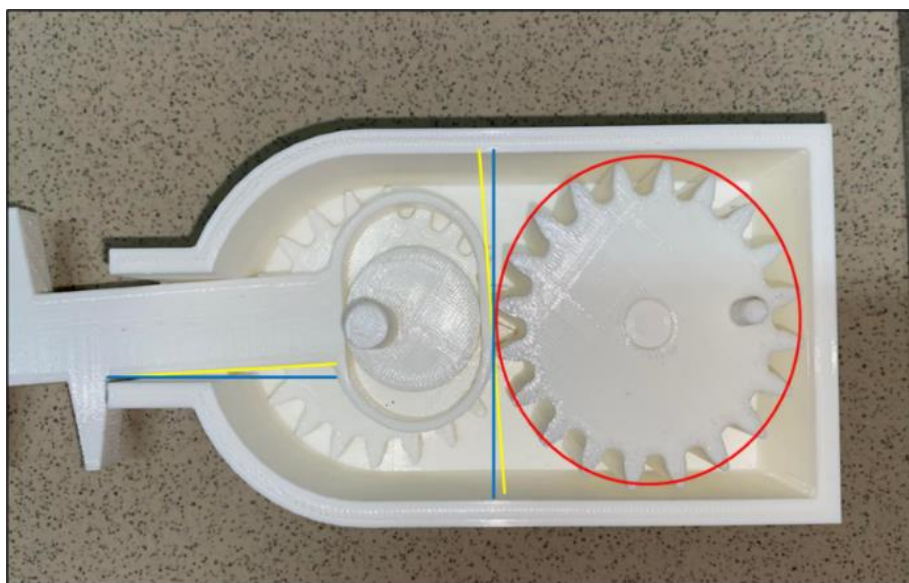


圖 3-12 齒輪組上視圖

經由測試得知這個機構設計是能夠運作，但有一些設計上的細節有待改善。後續將會保留主要的設計，並優化上述的問題。

3.4.1.4 齒輪優化

齒輪將保持著原本的齒牙設計，依舊利用表 3-2 的齒輪參數製作。於原本的設計上對主動輪與從動輪做輕量化的處理，在不影響齒輪的強度及其齒輪特徵的條件下，以挖孔的方式減少材料的使用來節省製作的成本。另外，在主動輪的軸心孔上挖出長條形的鍵槽，以方便安裝上傳動軸，讓傳動軸帶動主動輪旋轉。圖 3-13 及圖 3-14 分別為經過優化後的主動輪及從動輪 3D 建模。

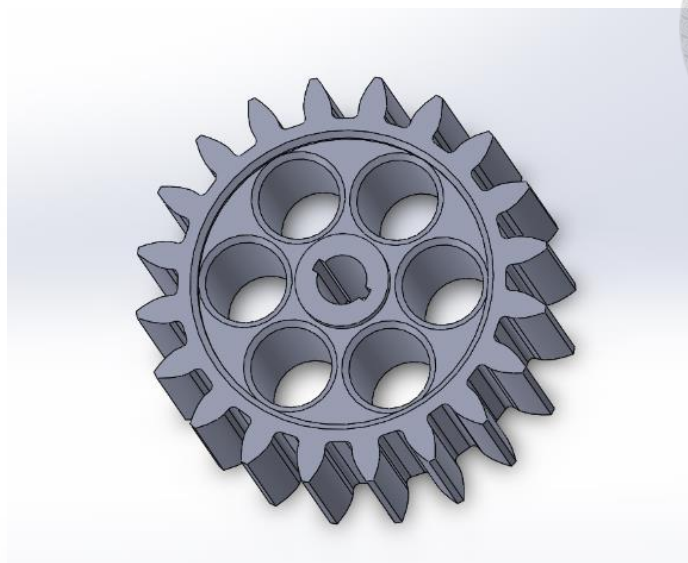


圖 3-13 原型機 1 主動輪優化設計

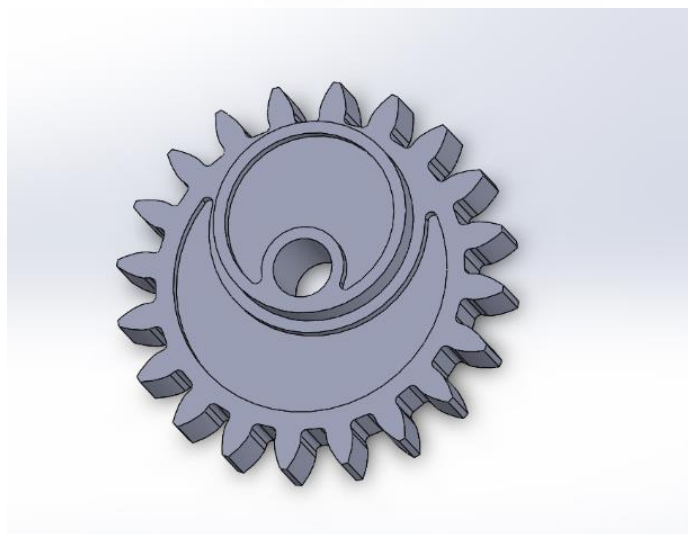


圖 3-14 原型機 1 從動輪優化設計

3.4.1.5 傳動軸設計

馬達的動力利用用皮帶傳導出去，馬達輸出端上裝設 GT2 10 齒正時齒輪並搭配 100XL 正時皮帶作使用。傳動軸的功能為穿過外殼，連結主動輪，將皮帶的動力傳到齒輪上。傳動軸上的突起長條是為與主動輪結合而設計的，這樣的構造能夠在傳動軸轉動時帶動主動輪一起轉動。傳動軸上的齒輪部分以與馬達結合的

GT2 10 齒正時齒輪為依據製作，能夠和 100XL 皮帶緊密貼合。圖 3-15 及圖 3-16 分別為傳動軸以及其與主動輪組合後的模樣。

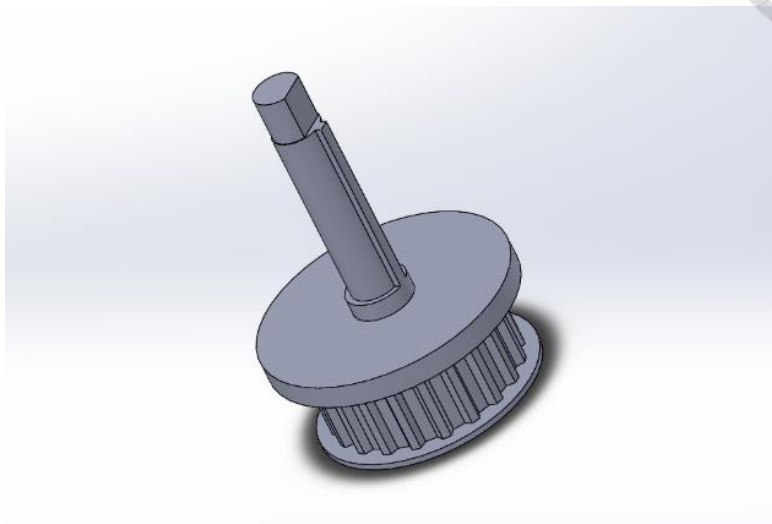


圖 3-15 原型機 1 傳動軸設計

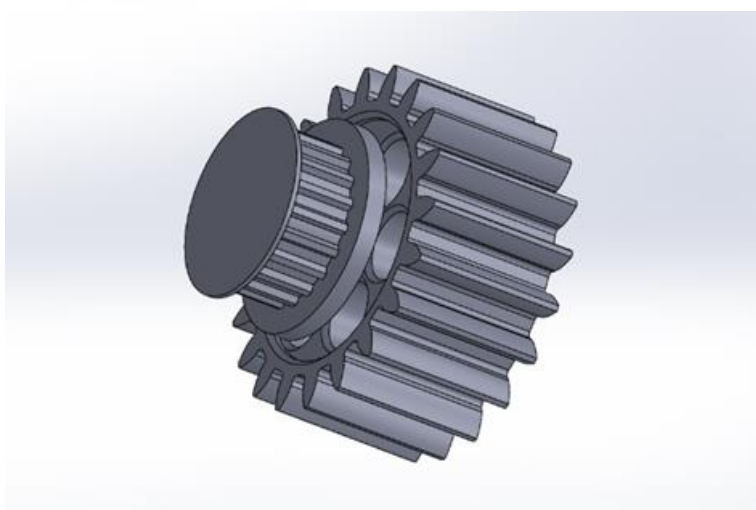


圖 3-16 傳動軸與動輪組合

3.4.2 刀具設計

刀具的設計將會直接影響切割的效果，在設計上需要考量如刀刃角度、刀刃寬度、刀刃形狀等等結構參數。圖 3-17 為刀具的建模，初版的刀具設計為刀刃角度 45° ，且刀刃為左右交錯分佈的設計。刀具的尾端孔洞為其狹槽，其作用為與從動輪上的滑塊結合形成格蘭軛機構。為了解決刀具干涉問題，對狹槽設計做了微調。將狹槽外圍的厚度稍微減少，當刀具在移動到最後端的狀態時就不會碰觸到主動輪，避免零件間的干涉。刀具的中間開了個長條形的孔，讓刀具支撐架能夠穿過兩個刀具，對刀具進行支撐。

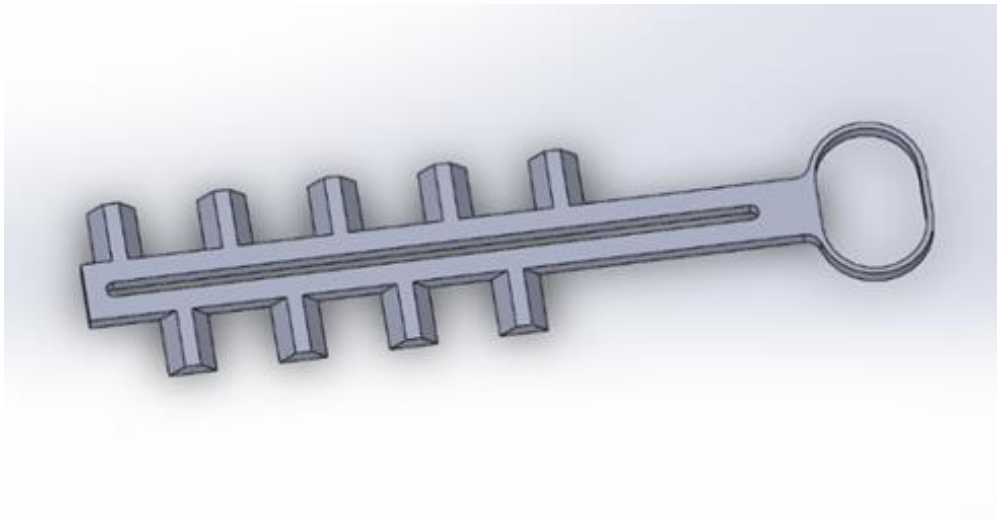


圖 3-17 原型機 1 刀具設計



3.4.3 其他非活動件

3.4.3.1 主體外殼設計

主體外殼的主要功能為承載著各個零件，因此需要考量的是如何將各個零件固定在合適的位置。圖 3-18 為主體外殼的建模。

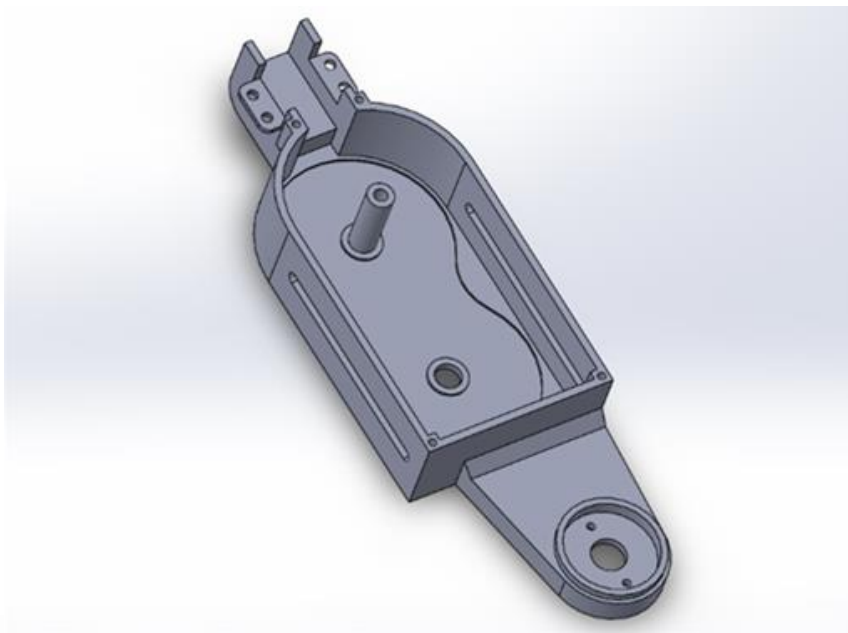


圖 3-18 原型機 1 主體外殼設計

首先為了減少外殼和齒輪面的摩擦，在外殼內部放置齒輪的位置往下挖，減少旋轉齒輪面與外殼接觸。初測時的主體外殼設計是為了用手轉動齒輪所以只設計了兩根固定的軸來裝設齒輪，而後續為了讓電動馬達帶動齒輪，因此要考量如何將主動輪連接到馬達上。改良後的主體外殼在原本固定主動輪的軸去掉，改成安裝傳動軸的孔。

另外，為外殼增加了馬達的支撐架。想要以皮帶傳動為傳導動力的方式，在設計馬達支撐架的時候必須先計算馬達與軸心的距離(D)，才能使馬達正確運作。此處選擇使用 100XL 的正時皮帶，皮帶長度(L)為 254 mm、齒距(t)為 5.08 mm，並使用 20 齒(T_1)和 10 齒(T_2)的正時齒輪，利用式 3.1 計算出馬達與軸心的距

離為 88.9 mm。



$$t\left(\frac{T_1+T_2}{2}\right) + 2D = L \quad (\text{式 } 3.1)$$

為了解決刀具偏移的問題，在這一版做了兩個改良。第一，將刀具離開外殼的口設計得更加貼合，限制刀具可以左右的自由度，讓刀具只能做前後直線移動。第二，在外殼上預留了可以裝設刀具支撐架的地方。刀具支撐架可以進一步限制刀具的移動方向，引導刀具在固定的軌跡上移動。

3.4.3.2 刀具支撐架設計

刀具支撐架的功能為限制刀具移動的方向，並減少刀具在運作時的晃動。圖 3-19 與圖 3-20 分別為下層及上層的刀具支撐架設計。兩片支撐架的設計不一樣，上方的支撐架用螺絲固定在主體外殼上，而下層的支撐架則固定在上層支撐架上。兩片支撐架中間設有三個帶孔圓柱，以供螺絲穿過固定支撐架。圓柱構造在組裝時會卡在刀具中間的長條形孔洞，引導刀具只能在直線方向移動。圖 3-21 為刀具支撐架組合側視圖。

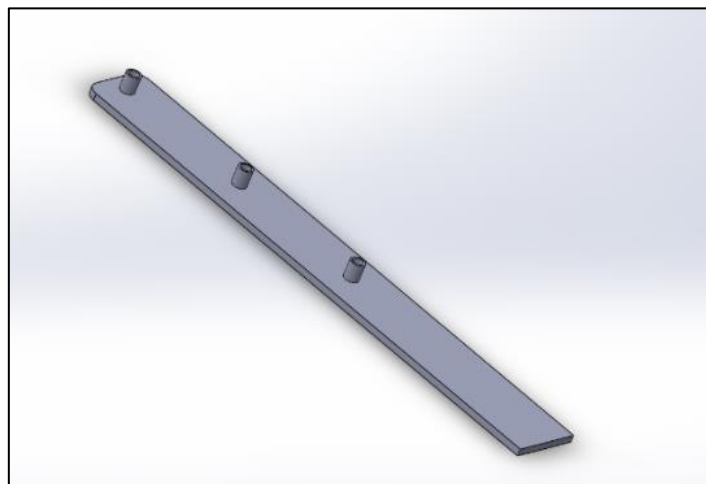


圖 3-19 下層刀具支撐架

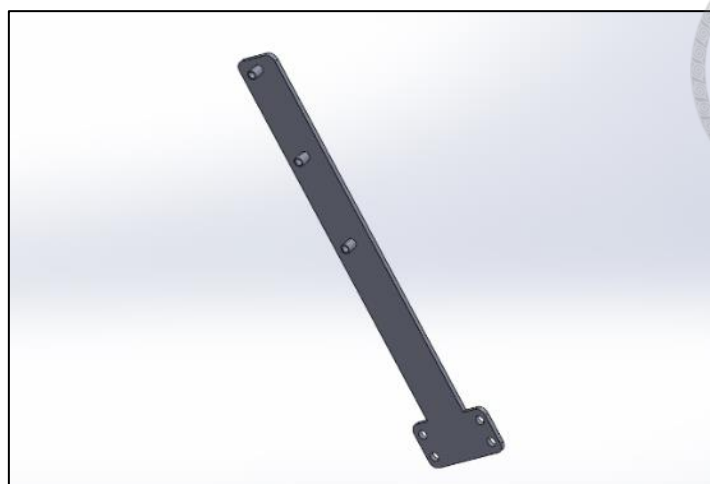
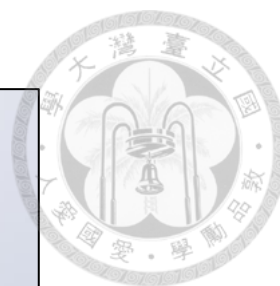


圖 3-20 上層刀具支撐架

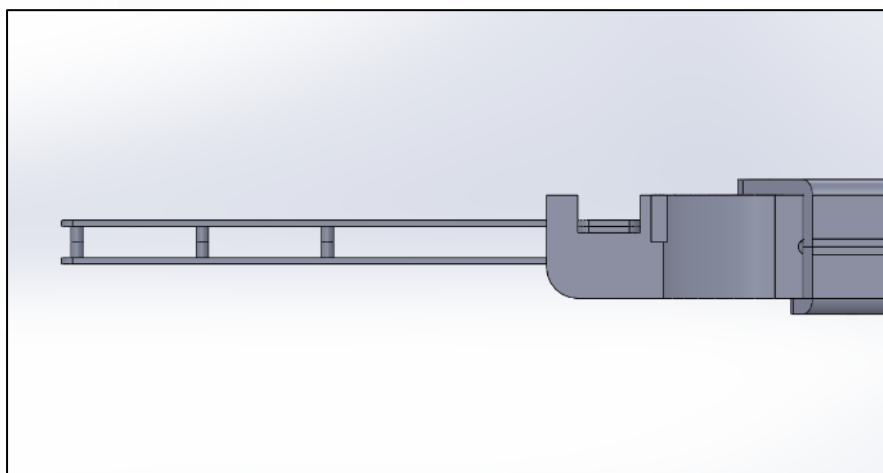


圖 3-21 刀具支撐架組合

3.4.3.3 齒輪支撐架設計

齒輪支撐架的功能為讓齒輪保持在固定的地方，避免齒輪在運轉時掉出來。圖 3-22 及圖 3-23 分別為上層齒輪支撐架及下層齒輪支撐架，上下兩個支撐架設計並不一樣。上方的支撐架的一邊有個突起的構造可以卡在固定從動輪的軸上，另外一邊則有個凹孔可以將傳動軸固定。下方的支撐架有個圓環結構，這個結構用來托著傳動軸達到固定的作用。上下兩部分將會用螺絲鎖在一起，將整個機構固定住。圖 3-24 為上下兩層齒輪支撐架結合的樣子。

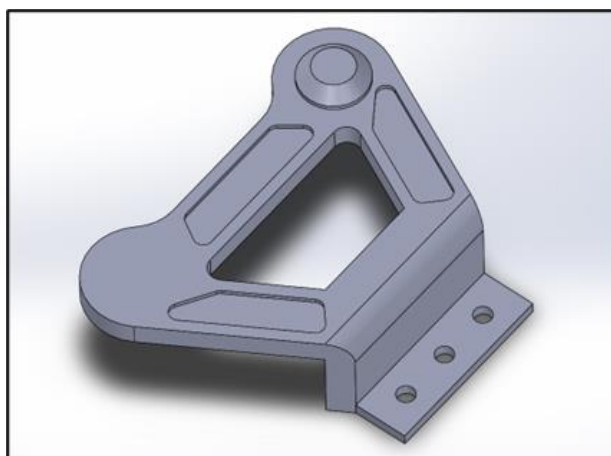


圖 3-22 原型機 1 上層齒輪支撐架



圖 3-23 原型機 1 下層齒輪支撐架

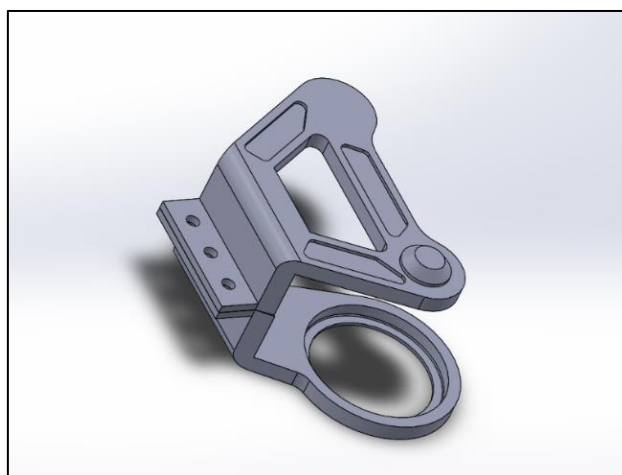


圖 3-24 原型機 1 齒輪支撐架組合

3.4.4 原型機 1 測試

圖 3-25 及圖 3-26 分別為原型機 1 的電腦建模及 3D 列印模型組裝，而表 3-3 為其零件清單。在所有機構組裝完成後，用手動的方式拉動皮帶（圖 3-27）整個機構能夠順利作動，因此認為這個機構設計是可行的。但是，在接上 12V 的直流馬達後發現馬達帶動不了皮帶。單獨測試馬達並沒有發現馬達異常，因此推斷是 12V 的直流馬達的扭力不夠及元件間摩擦力過大，無法帶動皮帶。

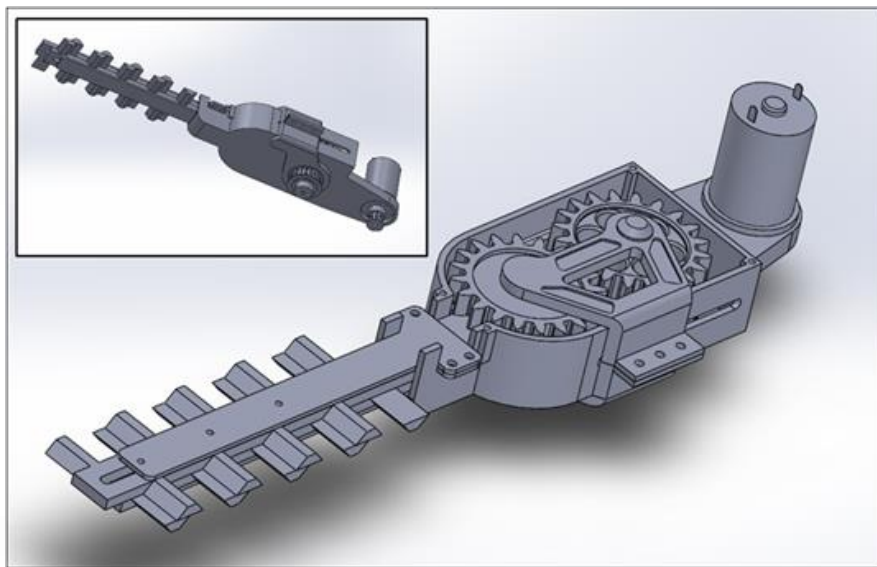


圖 3-25 原型機 1 電腦建模



圖 3-26 原型機 1 3D 列印模型組裝



圖 3-27 原型機 1 傳動系統皮帶部分

表 3-3 原型機 1 修剪機構零件

名稱	數量	功能
主體外殼	1	承載各個零件
主動輪	1	將動力帶給兩個從動齒輪
從動輪	2	帶動刀具前後移動
傳動軸	1	讓皮帶能夠帶動主動輪
刀具	2	將枝葉剪斷
上層刀具支撐架	1	支撐刀具，引導刀具在正確的路徑上移動
下層刀具支撐架	1	
上層齒輪支撐架	1	支撐齒輪，不讓齒輪掉出來
下層齒輪支撐架	1	
GT2 正時齒輪 (10T)	1	直流馬達的輸出端
100XL 正時皮帶	1	將動力從馬達導出



3.5 原型機 2

3.5.1 傳動系統改良

經過前一版本的測試，推斷修剪機構的齒輪組可能會是主要的阻力來源。因此在這一版本將會更改原本的齒輪組構造，捨棄原本的主動輪，將皮帶直接連結至傳動軸，並讓傳動軸直接帶動從動輪旋轉。由於已捨棄使用齒輪組，這一版本的從動輪去除了原本的齒輪構造，減少了材料的使用，使得整體設計更加輕便及緊湊。為了讓傳動軸可以直接與從動輪結合，從動輪中心孔也進行了調整。從動輪中心孔預留了長條形（圖 3-28a），讓兩個從動輪在對稱安裝至傳動軸上可以更加方便進行對齊。圖 3-28b 及圖 3-28c 為從動輪與傳動軸結合的外觀。

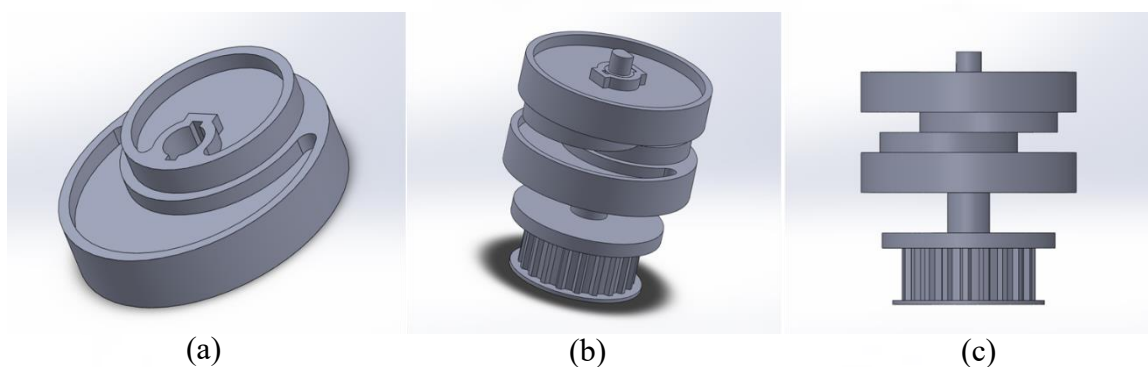


圖 3-28 原型機 2 傳動系統

3.5.2 刀具設計改良

於上一版本中，刀刃並沒有加入滑切角，切割的機制為對目標物施加正壓力進行破壞的砍切。根據滑切理論（龐，1982），在一定的範圍內加入滑切角可以有效地降低功耗，由於現階段並未選定實驗目標物，故根據理論加入 20° 的最小建議滑切角 τ （圖 3-29）。加入了滑切角後，刀刃的形狀呈梯形，構成刀刃的主要結構參數有刀片寬度 l_b 、前橋寬度 l_a 、刀刃高度 h 等（圖 3-30）。詳細的結構參數如表 3-4 所示。

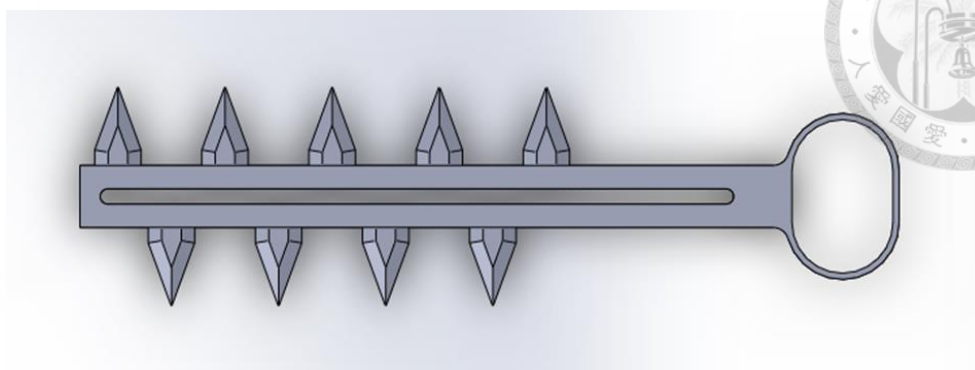


圖 3-29 原型機 2 刀具設計

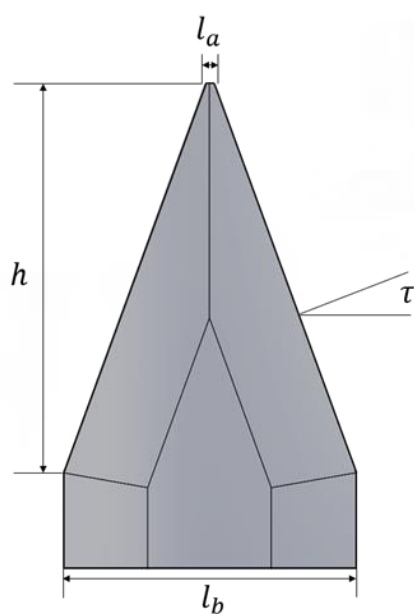


表 3-4 刀刃結構參數

l_a	0.44 mm
l_b	15 mm
h	20 mm
τ	20°

圖 3-30 刀刃結構參數



3.5.3 其他非活動件改良

3.5.3.1 主體外殼設計改良

吸取了前一版本的製作經驗，對原本的主體外殼設計進行改良（圖 3-31）。由於這一版本捨棄了主動輪，因此便把原本安裝從動輪的軸去除，留下安裝傳動軸的孔。另外，原先裝設馬達的孔洞製作成長條型以充當張緊機構，在裝設皮帶時調整鬆緊更加方便。由於捨棄了主動輪，主體外殼設計整體更加緊湊、長度更短。

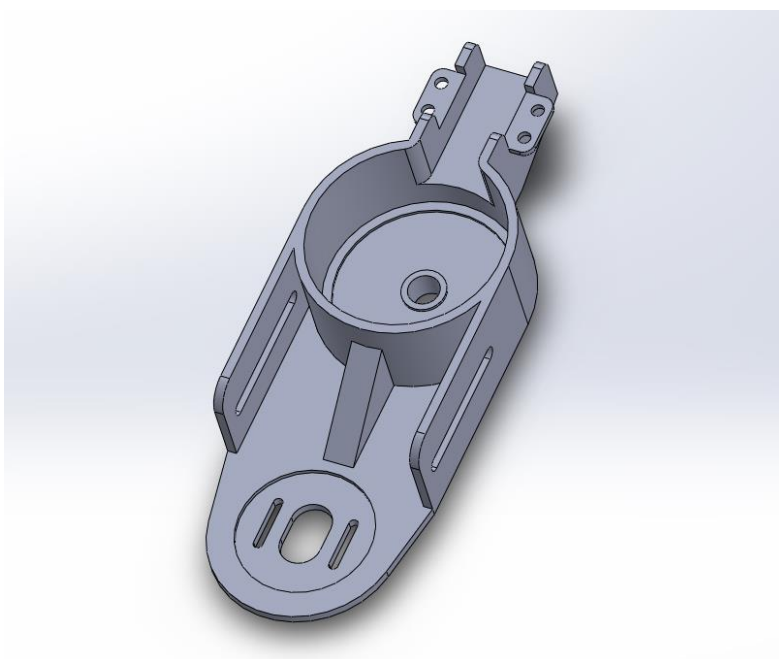


圖 3-31 原型機 2 主體外殼設計

3.5.3.2 刀具支撐架子

此版本的刀具支撐架延續了前一版本的設計，並無進行額外的改良。

3.5.3.3 齒輪支撐架改良

前一版本的齒輪的設計作用為將傳動軸及主動輪固定在主體外殼上，因這一版本捨棄了主動輪故重新設計。此版本的齒輪支撐架保留了上下兩部分結合的樣式，上半部將會用來支撐傳動軸的另一端（圖 3-32），而下半部一樣會托著傳動軸達到固定的作用（圖 3-33）。圖 3-34 為齒輪支撐架組合外觀。

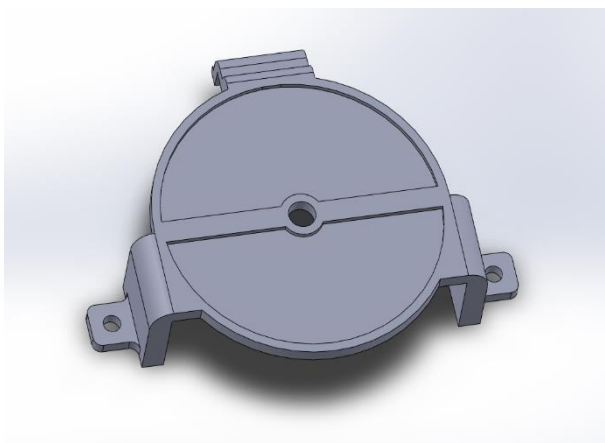


圖 3-32 原型機 2 上層齒輪支撐架

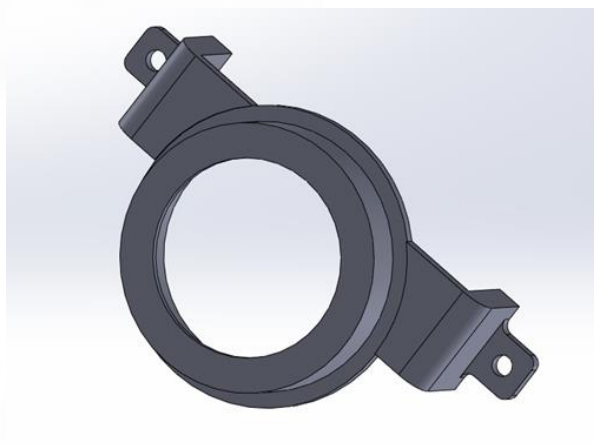


圖 3-33 原型機 2 下層齒輪支撐架

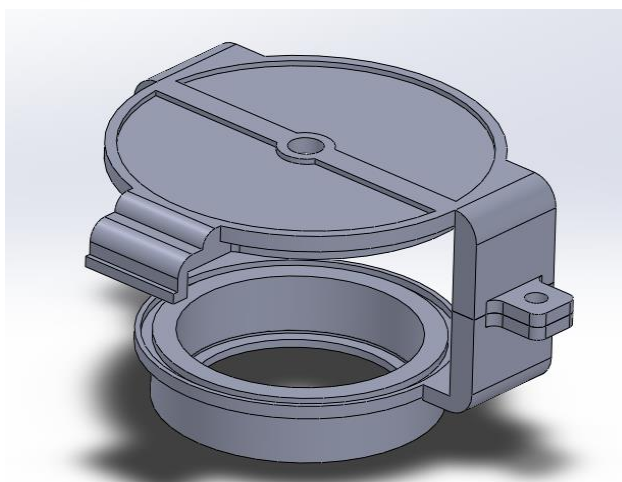


圖 3-34 原型機 2 齒輪支撐架組合



3.6 控制系統

3.6.1 修剪刀具控制

在目前的研究使用 12V 直流馬達充當修剪機的動力源，並利用 Arduino Uno 開發板（圖 3-35）來對修剪機本體進行控制。經過撰寫的程式燒錄至 Arduino Uno 開發板上，連結至電腦上，在測試修剪機時便能在電腦上對其操作。



圖 3-35 Arduino Uno 開發板

Arduino Uno 主要的功能為發出訊號，讓 L298N 馬達驅動模組（圖 3-36）來改變馬達的轉速及轉動方向。L298N 馬達驅動模組本體為 H 橋電路結構（H-Bridge circuit），透過給予其數位訊號控制各個開關打開或閉合，以這種方式控制電流流動的方向。圖 3-37 為 H 橋電路結構示意圖，當 S1 及 S4 閉合時電流從馬達左端流到右端，當 S2 及 S3 閉合時電流從馬達右端流到左端，電流流動的方向將會改變主流馬達的轉動方向。

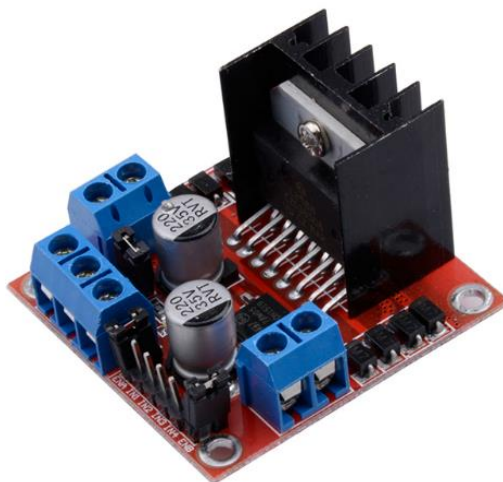


圖 3-36 L298N 馬達驅動模組

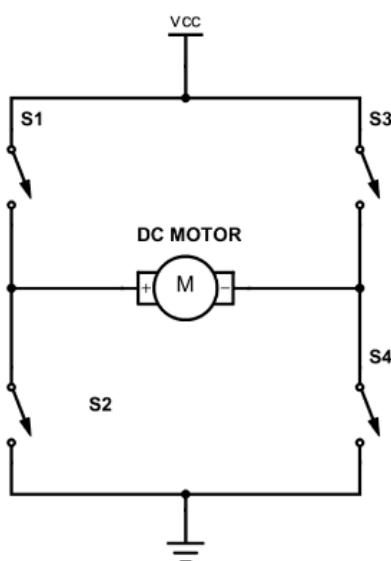
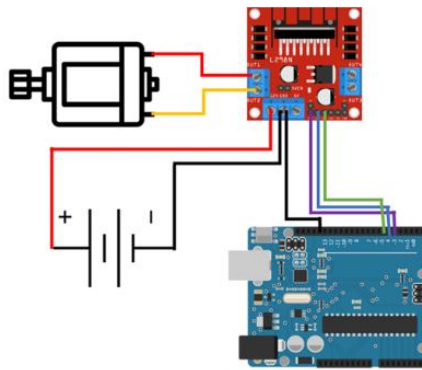


圖 3-37 H 橋電路結構示意圖（圖片來源：<https://www.build-electronic-circuits.com/h-bridge/>）

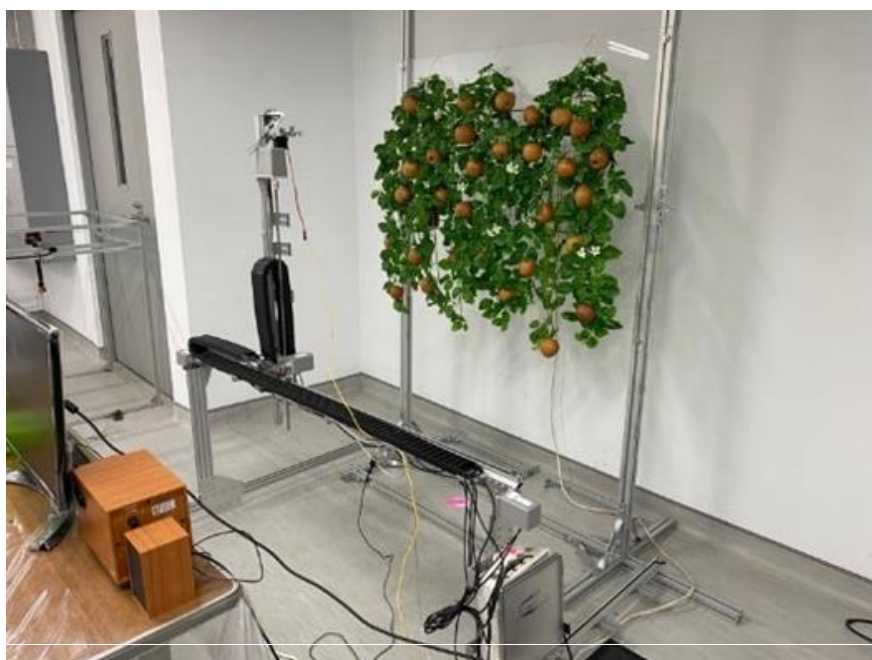
當 Arduino 開發板接到電腦上，電腦將會為其提供 5V 的電源，但這並不足以讓 12V 直流馬達轉動，在電路設計時需要在 L298N 額外接上電源才能讓馬達轉動。

圖 3-38 為修剪機控制系統電路示意圖。



3.6.2 移動控制

本研究使用菜園管理機器人 FarmBot Genesis V1.4 (圖 3-39) 進行測試，利用 FarmBot 移動修剪機來對綠牆進行修剪。FarmBot 系列是由 Shuttleworth 基金會於 2014 年起資助開發，其概念為導入 CNC 架構的工具機到一般民衆的自家菜園進行自動化的菜園維護作業，並將開源軟體釋出讓民衆使用。FarmBot 原本設計於在大面積的菜園中進行水平移動，但經過自行撰寫程式，筆者認為其適用於垂直的綠牆維護，便選擇以這個平台承載修剪機，減少自行開發機械臂的難度。





3.7 切割圖製作

3.7.1 Desmos 繪圖計算機

本研究利用 Desmos 繪圖計算機進行切割圖的製作。這是由 Desmos Studio 這家公益教育公司所開發的免費線上繪圖計算機，可用以繪製各種函數圖形。圖 3-40 為 Desmos 繪圖計算機的操作介面，使用者在畫面左側的欄位中輸入方程式，便能即時生成對應的圖形。在圖形製作時可在方程式中使用變數，當需要製作不同參數條件下的圖形能夠快速進行調整，使圖形製作更加方便。

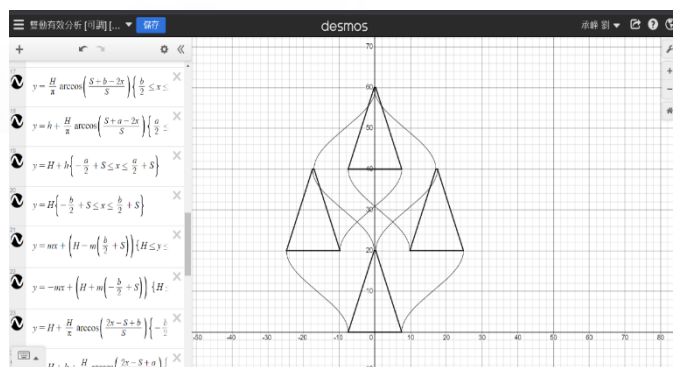


圖 3-40 Desmos 繪圖計算機

3.7.2 運動分析

圖 3-41 為修剪機構中蘇格蘭軛結構的運動分析圖，當從動輪轉動 θ 角時，從動輪上的偏心滑塊會將刀片推動 x 距離。

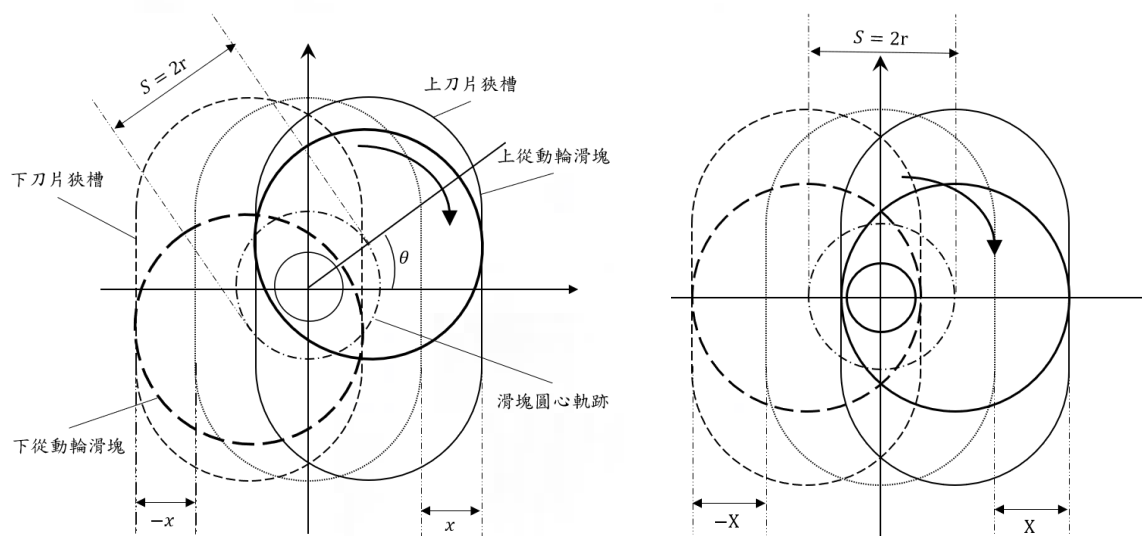


圖 3-41 蘇格蘭軛結構的運動分析圖

上下刀片的從動輪是對稱的，當兩個從動輪同步旋轉，上刀片移動 x 距離的同時下刀片將會移動 $-x$ 距離。當從動輪旋轉角度到達 $\pi/2$ 時，上下刀片將會移動到最大距離 X 及 $-X$ 。兩個偏心滑塊的圓心移動能畫出一個半徑為 r 的圓形軌跡，而切割行程 S 則是取決於 r ，即 $S = 2r$ 。刀片在旋轉的偏心滑塊帶動下，如圖 3-14 所示進行簡諧運動，其所在位置如式 3.2 所示：

$$x = \frac{S}{2} \cos(\omega t) \quad (\text{式 3.2})$$

式中 x 為刀片移動距離(mm)、 ω 為從動輪角速度(rad/s)、 S 為從動輪圓心軌跡直徑(mm)、 t 為時間(s)。鑒於刀片是作有規律的簡諧運動，便能在二維坐標系上利用式 3.3 參數方程式畫出刀刃一個進程的運動軌跡，製作出有效切割圖。

$$\begin{cases} x_i = -r \cos(\omega t) + 0.5S + x_n \\ y_i = v_m t + y_n \end{cases} \quad t \in (0, \pi/\omega) \quad (\text{式 3.3})$$

式中 (x_i, y_i) 為刀刃任意點的位置、 (x_n, y_n) 為刀刃任意點的起始坐標、 v_m 為修剪機構前進速度(mm/s)、 r 為圓心軌跡半徑(mm)、 ω 為從動輪轉動角速度(rad/s)、 t 為完成一個進程時間(s)、 S 為切割行程(mm)。

修剪機構的前進速度由承載的平台移動速度所決定，而其與進程 H 的關係如式 3.4 所示：

$$H = v_m t \quad (\text{式 3.4})$$



3.7.3 刀刃軌跡與切割圖

在切割器還沒開始作動時，上下刀片的刀刃為重合狀態。將刀刃底部中心點定在 O 點上，即 xy 坐標為 $(0,0)$ 。圖 3-42 為原型機 2 之切割圖及其刀刃的結構參數。

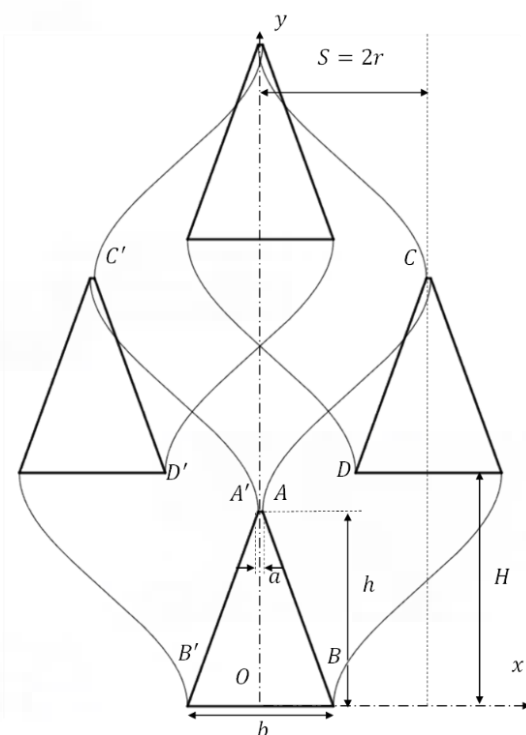


圖 3-42 原型機 2 切割圖

AB 為刀刃的兩端點，因此 A 點軌跡、B 點軌跡、移動前刀刃邊、以及移動後刀刃邊，四條線所圍起來的範圍便是被刀刃切過的地方。當從動輪轉動半周，刀刃會往前一個進程 H 的距離。角速度與進程的關係為：

$$H = \frac{2\pi}{T} \quad (\text{式 3.5})$$

式中 T 為從動輪轉動一周的時間 (s)。由於一個進程所需要的時間 t 為 T 的一半，因此可以將 $T = 2t$ 帶入式 3.5 得



$$H = \frac{\pi}{t} \quad (\text{式 3.6})$$

式中 t 為完成一個進程 H 時間(s)。將式 3.6 代入式 3.4 可得

$$H = \frac{\pi v_m}{\omega} \quad (\text{式 3.7})$$

已知 $S = 2r$ 以及 A 點的起始坐標為 $(a/2, 0)$ ，可得到 A 點的軌跡方程式 (式 3.8)。將式 3.8 參數方程式中的 t 代換後可得普通方程式，再代入式 3.7，最終可得 A 點的軌跡方程式 (式 3.9)。依照一樣的方法可得到 B 點 (式 3.10) 之軌跡方程式。

$$\begin{cases} x_A = -0.5S \cdot \cos(\omega t) + 0.5S + \frac{a}{2} \\ y_A = v_m t + h \end{cases} \quad (\text{式 3.8})$$

$$y_A = h + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{S+a-2x_A}{S} \right), \quad x_A \in \left(\frac{a}{2}, \frac{a}{2} + S \right) \quad (\text{式 3.9})$$

$$y_B = \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{S+b-2x_B}{S} \right), \quad x_B \in \left(\frac{b}{2}, \frac{b}{2} + S \right) \quad (\text{式 3.10})$$

點 C 軌跡為點 A 軌跡的反轉變化，其普通方程必須加入負號進行反轉 (式 3.11)。將式 3.7 代入，便能得到 C 點的軌跡方程式 (式 3.12)。依照一樣的方法可得到 D 點 (式 3.13) 的軌跡方程式。

$$\begin{cases} x_C = 0.5S \cdot \cos(\omega t) - 0.5S + \left(-\frac{a}{2} + S \right) \\ y_C = v_m t + H + h \end{cases} \quad (\text{式 3.11})$$

$$y_C = H + h + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{-S+a+2x_C}{S} \right), \quad x_C \in \left(-\frac{a}{2}, -\frac{a}{2} + S \right) \quad (\text{式 3.12})$$

$$y_D = H + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{-S+b+2x_D}{S} \right), \quad x_D \in \left(-\frac{b}{2}, -\frac{b}{2} + S \right) \quad (\text{式 3.13})$$



利用同樣的方式可得 A' 點、 B' 點、 C' 點以及 D' 點的軌跡方程式，分別為式

3.14 至式 3.17：

$$y_{A'} = h + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{S+a+2x_{A'}}{S} \right), \quad x_{A'} \in \left(-\frac{a}{2} - S, \frac{a}{2} \right) \quad (\text{式 3.14})$$

$$y_{B'} = \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{S+b+2x_{B'}}{S} \right), \quad x_{B'} \in \left(\frac{b}{2}, \frac{b}{2} + S \right) \quad (\text{式 3.15})$$

$$y_{C'} = H + h + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{-S+a-2x_{C'}}{S} \right), \quad x_{C'} \in \left(\frac{a}{2} - S, \frac{a}{2} \right) \quad (\text{式 3.16})$$

$$y_{D'} = H + \frac{H}{\pi} \cos^{-1} \left(\frac{-S+b-2x_{D'}}{S} \right), \quad x_{D'} \in \left(\frac{b}{2} - S, \frac{b}{2} \right) \quad (\text{式 3.17})$$

往復式切割機在進行切割時其刀刃應該具備一定的速度，才能將目標物切斷。本研究的參數方程式在推導成軌跡方程式後，將式 3.8 中的前進速度 v_m 代換掉。本研究所畫出之切割圖為刀刃切割速度與修剪機構移動速度，兩個速度的配合下所畫出，而非指定的速度參數。在實際操作時，可針對特定的情況進行速度參數的調整。以切割為目的，應該先選定理想的刀刃移動速度，再選定修剪機構移動速度進行配合。

3.7.4 有效切割率定義與計算

為了進行後續的，先對有效切割率以及三種切割狀況進行定義：

1. 有效切割率， $\eta(\%)$: 切割圖中總切割面積減去重割區和漏割區之和的面積，與總切割面積的比值。總切割面積包含漏割區之面積。
2. 切割率 $(\%)$: 切割圖中總切割面積減去漏割區與總切割面積的比值。總切割面積包含漏割區之面積。
3. 一次切割區， $S_I (\text{mm}^2)$: 只被任一刀刃經過一次的範圍總面積。
4. 漏割區， $S_{II} (\text{mm}^2)$: 無法被刀刃經過的範圍總面積。
5. 重割區， $S_{III} (\text{mm}^2)$: 已被任一刀刃經過，再被任一刀刃經過的範圍總面積。

根據上述定義，有效切割率的計算由式 3.18 所示：

$$\eta = \left(1 - \frac{S_{II} + S_{III}}{S_I + S_{II} + S_{III}}\right) \times 100\% \quad (\text{式 3.18})$$

利用章節 3.7.3 的方法，得到各點的軌跡方程及刀刃位置方程式後輸入至 Desmos 繪圖計算機，得出此條件下的切割圖。得出的切割圖能將重合的點坐標找出來，利用定積分便能找出特定區域的面積。

一般割草機的進程約為 1.1 至 1.5 倍的刀刃高度（王，2011），本研究將利用原型機 2 之結構參數套入至這範圍內製作切割圖，以觀察其表現及趨勢。另外，製作進程為 0.85 倍及 2 倍刀刃高度的切割圖，以比較在極小與極大進程下的切割表現。

第四章 結果與討論



4.1 原型機測試

圖 4-1 及圖 4-2 分別為原型機 2 的電腦建模及 3D 列印模型組裝，而表 3-5 為其零件清單。在所有機構組裝完成後，同樣進行簡單的測試。基於設計及製作原型機 1 的經驗，原型機 2 設計時將 3D 列印誤差考量進去，此版本製作的各個元件安裝順暢，並無鬆動現象。利用砂紙打磨及在活動件上針車油，已大幅減少干涉及摩擦問題。

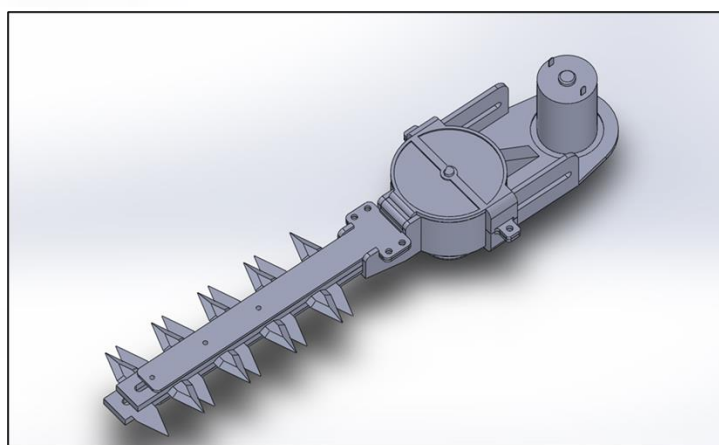


圖 4-2 原型機 2 電腦建模

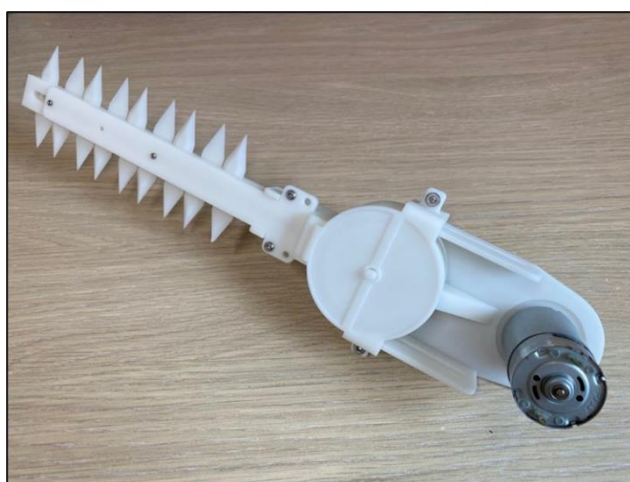


圖 4-1 原型機 2 3D 列印模型組裝

表 4-1 原型機 2 零件清單

原型機 2 修剪機構		
名稱	數量	功能
主體外殼	1	承載各個零件
從動輪	2	帶動刀具前後移動
傳動軸	1	帶動兩個從動輪
刀具	2	將枝葉剪斷
上層刀具支撐架	1	支撐刀具，引導刀具在正確的路徑上移動
下層刀具支撐架	1	
上層齒輪支撐架	1	支撐齒輪，不讓齒輪掉出來
下層齒輪支撐架	1	
GT2 正時齒輪 (10T)	1	直流馬達的輸出端
100XL 正時皮帶	1	將動力從馬達導出
控制系統		
Arduino Uno 開發板	1	發送訊號控制馬達
L298N 馬達驅動模組	1	控制直流馬達方向及轉速
DC12V 直流馬達	1	修剪機構動力源
直流電源供應器	1	提供馬達電流
FarmBot Genesis V1.4	1	充當修剪機移動平台

4.2 控制系統測試

將原型機 2 安裝至 FarmBot 上，成功利用其作為運動平台承載原型機 2 於垂直面上移動。在編寫的程式設定下，FarmBot 可載著原型機先進行水平移動，讓刀刃往復切割一層的面積。待一層的待切割區被往復的刀刃切過後，FarmBot 載著原型機垂直移動至下一層，繼續前述的切割作業。FarmBot 在操作的過程中狀況良好，非常順暢地帶動原型機進行移動。



4.3 切割圖

將原型機 2 的刀刃結構參數輸入至章節 3.7.3 推導出的軌跡方程式得出實驗數據如表 3-6 所示。在進程為 1.1h 至 1.5h 的範圍內，原型機 2 的有效切割率為 76.06%至 77.30%，而其中最佳有效切割率為 1.1h 及 1.2h 的 77.30%。而在 0.85h 及 2h 的有效切割率為 74.76%及 72.75%。

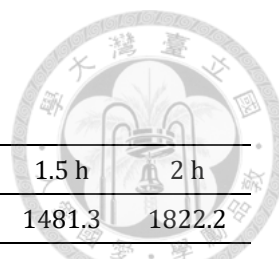
表 4-2 原型機 2 切割圖數據

進程	0.85 h	1.1 h	1.2 h	1.3 h	1.4 h	1.5 h	2 h
一次切割區(mm ²)	1142.82	1374.52	1470.52	1523.96	1592.06	1661.5	1961.58
漏割區(mm ²)	19.04	79.46	115.55	146.68	184.18	223.6	441.90
重割區(mm ²)	366.84	324.24	316.2	307.78	302.84	299.32	292.80
總切割面積(mm ²)	1528.7	1778.22	1902.27	1978.42	2079.08	2184.42	2696.28
漏割區占比(%)	1.25	4.47	6.07	7.41	8.86	10.24	16.40
重割區占比(%)	24	18.23	16.62	15.56	14.56	13.70	10.85
有效切割率(%)	74.76	77.30	77.30	77.03	76.58	76.06	72.75
切割率(%)	98.75	95.53	93.93	92.59	91.14	89.76	83.61

從圖 4-3 至圖 4-9 可以觀察出，當進程增加時整體的切割圖形變得較為修長，而當進程減少時整體的切割圖形變得較為扁平。雖然增加進程能直接增加一次切割的面積，但切割率反而是下降的。造成重割區的狀況有兩種：

- 1.) 被同一刀刃但不同刀口切過的面積。
- 2.) 兩個刀刃重疊切割過的面積。

從切割圖中可以看出雙動刀重割區面積大部分都來自於上下刀具的兩個刀刃重疊時所產生，而非單一刀刃重複切割。當進程持續在增加時，兩個刀刃重疊的面積會越來越接近其極限，導致重割區的面積越來越少，但中間無法被切割的漏割區會被越拉越長，大幅增加漏割區比例。為了減少漏割區面積，嘗試以減少切割行程的方式來壓縮中間的漏割區。表 4-3 為其保持刀刃結構參數，將切割行程從原本的 17.28 mm 改為 15 mm (刀刃寬， l_b) 後的數據。

表 4-3 原型機 2 切割圖數據 ($S = b$)

進程	0.85 h	1.1 h	1.2 h	1.3 h	1.4 h	1.5 h	2 h
一次切割區(mm^2)	994.58	1211.84	1284.64	1353.4	1418.26	1481.3	1822.2
漏割區(mm^2)	14.58	61.84	87.06	116.02	146.4	178.94	364.46
重割區(mm^2)	352.38	314.4	468.94	302.04	298.54	296.14	291.54
總切割面積(mm^2)	1361.54	1588.08	1840.64	1771.46	1863.2	1956.38	2478.2
漏割區占比 (%)	1.07	3.891	4.73	6.55	7.86	9.15	14.71
重割區占比 (%)	25.88	19.80	25.48	17.05	16.02	15.14	11.76
有效切割率(%)	73.05	76.31	69.79	76.40	76.12	75.71	73.53
切割率 (%)	98.92	96.11	95.27	93.45	92.14	90.85	85.29

從圖 4-10 至圖 4-16 可以觀察經過調整切割行程後的切割圖，在進程為 1.1h 至 1.5h 的範圍內原型機 2 的有效切割率為 69.79 至 76.40%，而其中最佳有效切割率為 1.3h 的 76.40%。而在 0.85h 及 2h 的有效切割率為 73.05% 及 73.53%。雖然有效切割率下降了，但各項的切割率有些微提高。雖然有效切割率利用減少漏割區及重割區的面積來提升，但研究認為單純從有效切割率無法評斷往復式切割器的設計好壞。

王等人(2020)的研究中提到在雙動刀的往復切割中，兩刀刀重疊切割的地方對作物的應擾動引起的位移較小，使切割作業較為順暢。雖然以有效切割率為指標設計往復式切割器可以降低耗能及漏割，但如果是以修剪為目的應該將目標設為盡可能降低漏割區，在適度範圍內犧牲有效切割率以提高切割率。

另外，本研究經過推導後的軌跡方程式為切割機構的結構參數畫出，製作出的切割圖為機器的進給速度及刀刀往復的切割速度相互搭配畫出。實際在進行修剪時必須考量切割目標的種類，目標物有無支撐等等諸多因素，切割圖僅作為機構設計的參考輔助。以切割效率為考量，應該先對目標物進行物性分析，計算出所需的剪切力及動力需求後再選定刀刀往復的切割速度，及配合其的進給速度。此外，在定下這兩個速度後，切割的時間將會由刀刀切割覆蓋的面積及進給速度所決定。

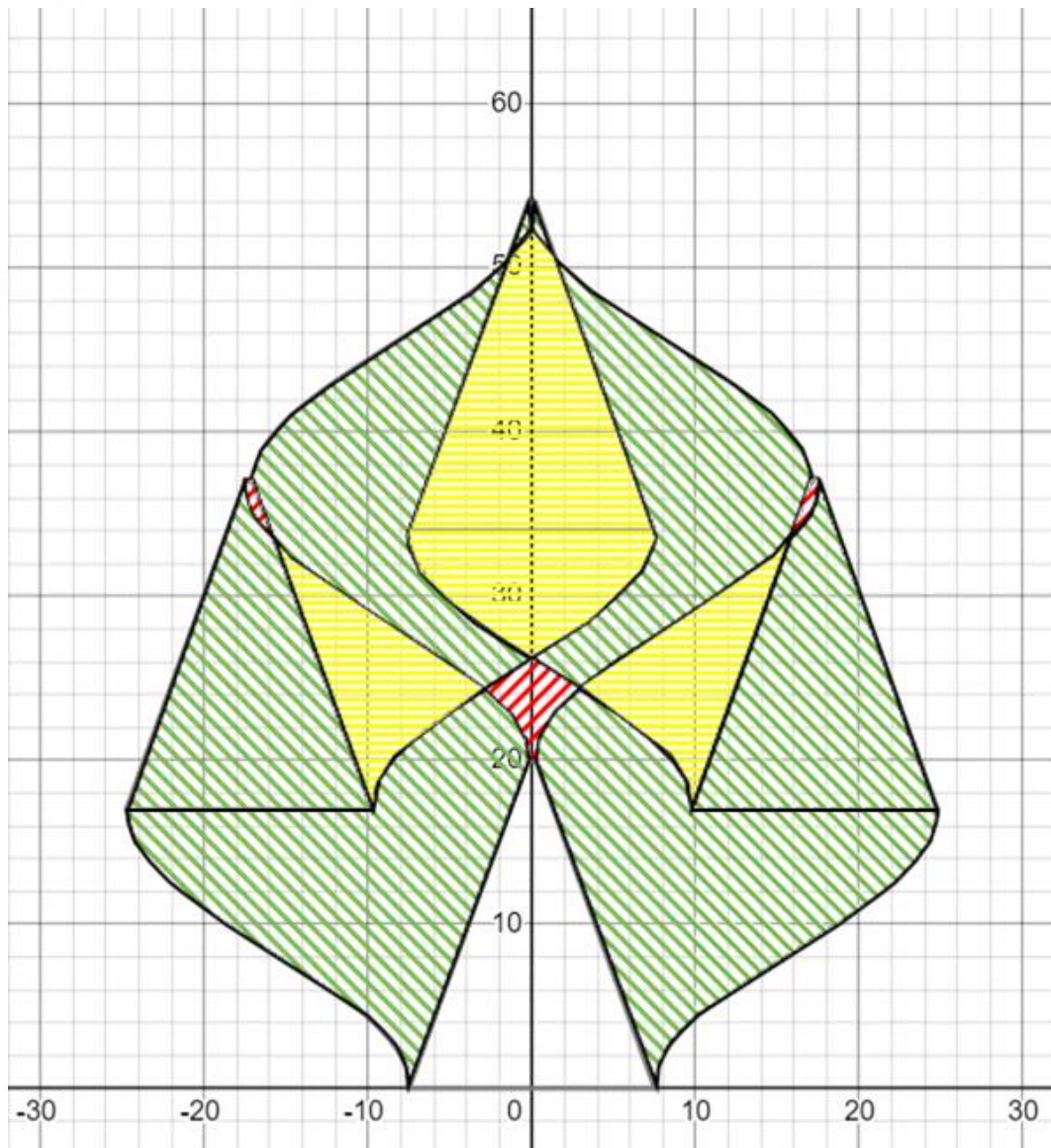


圖 4-3 原型機 2 之 0.85h 有效切割圖

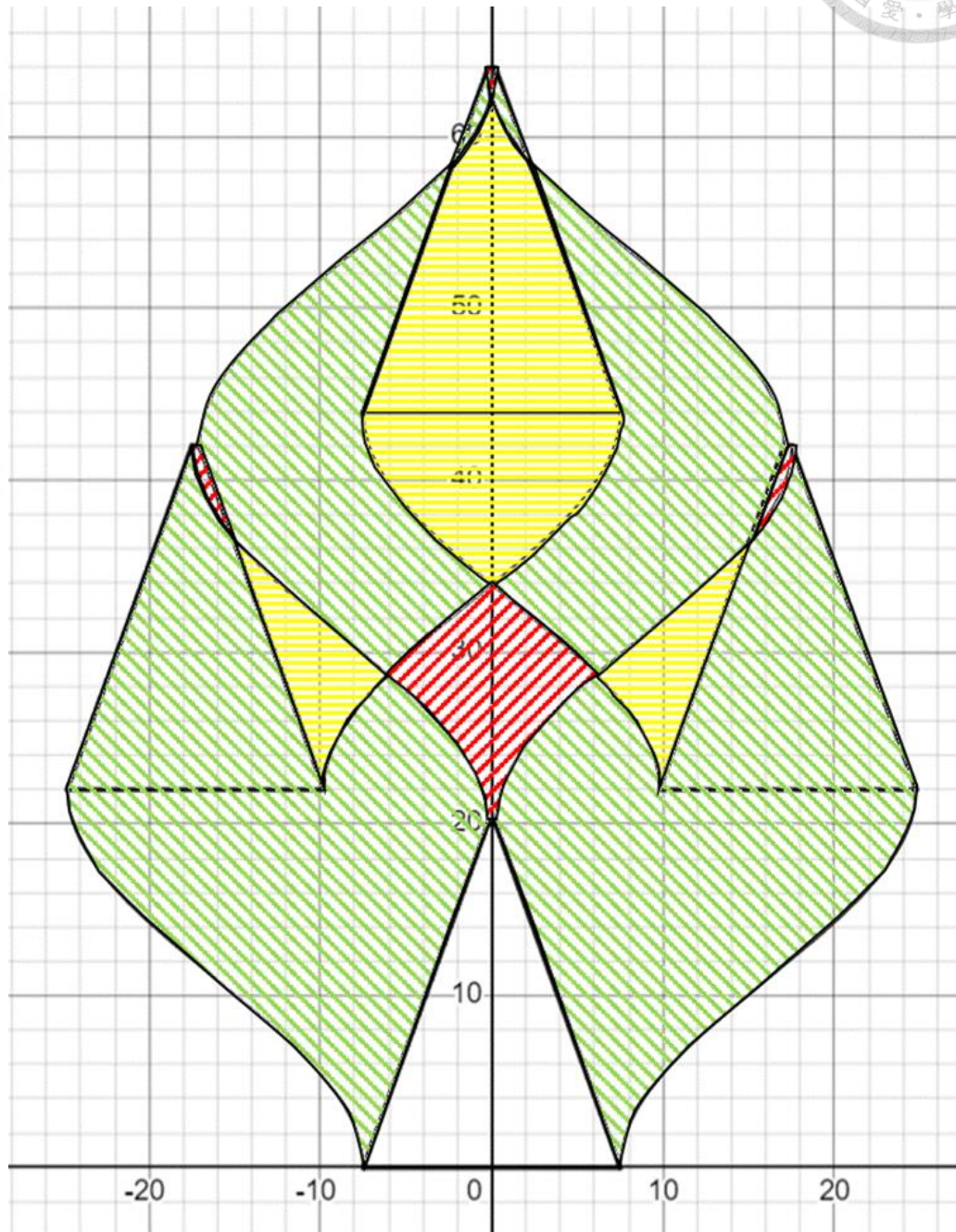


圖 4-4 原型機 2 之 1.1h 有效切割圖

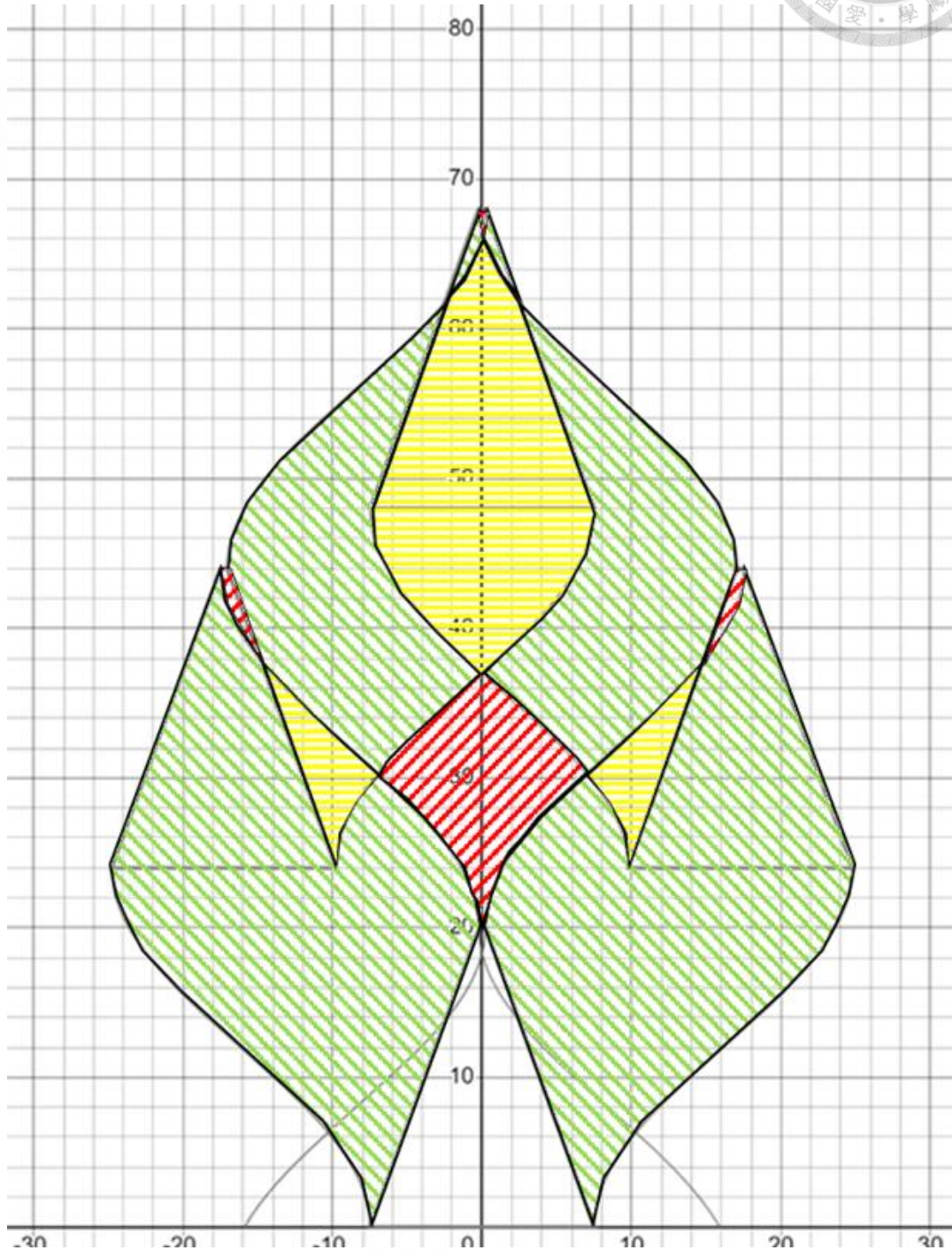
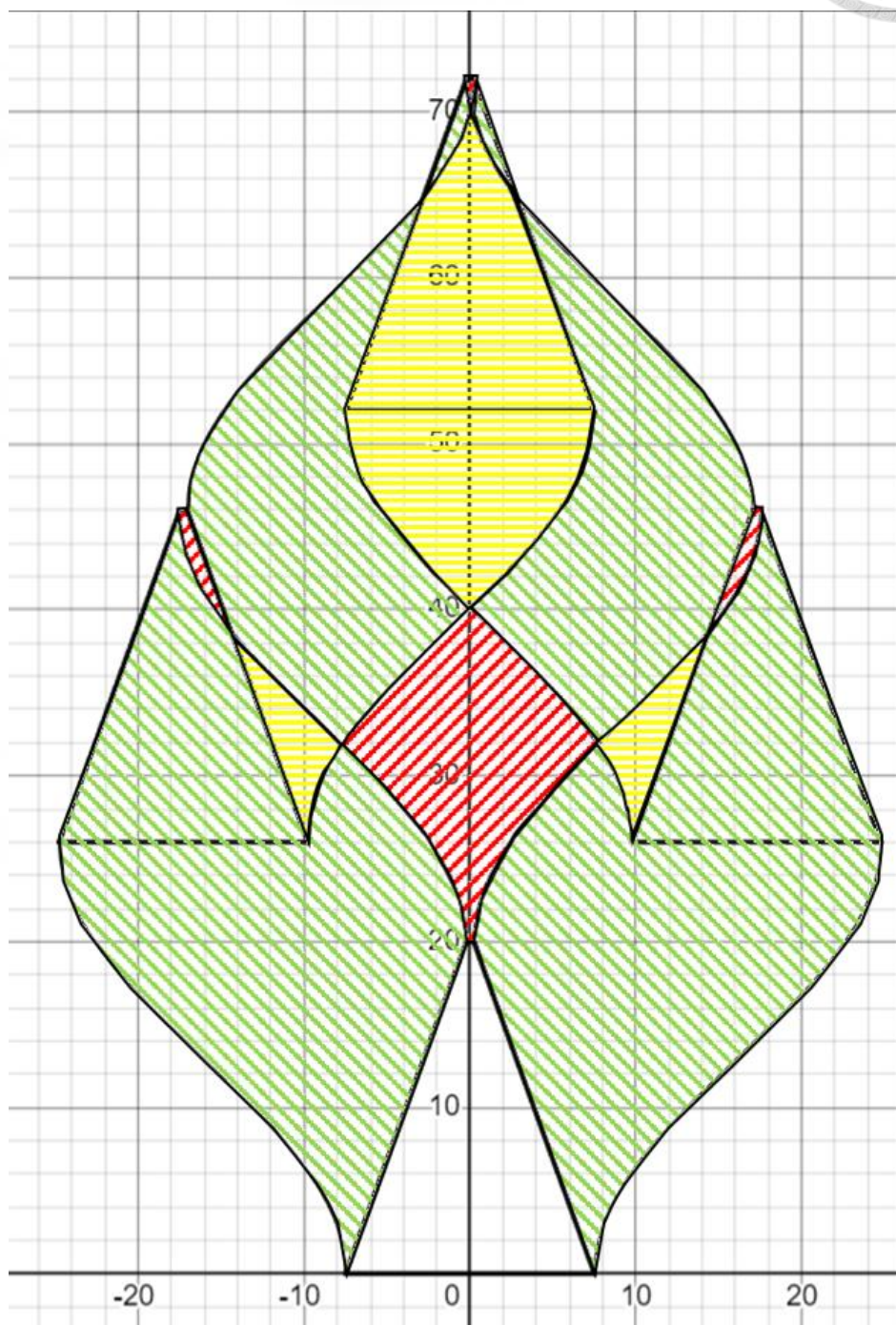


圖 4-5 原型機 2 之 1.2h 有效切割圖



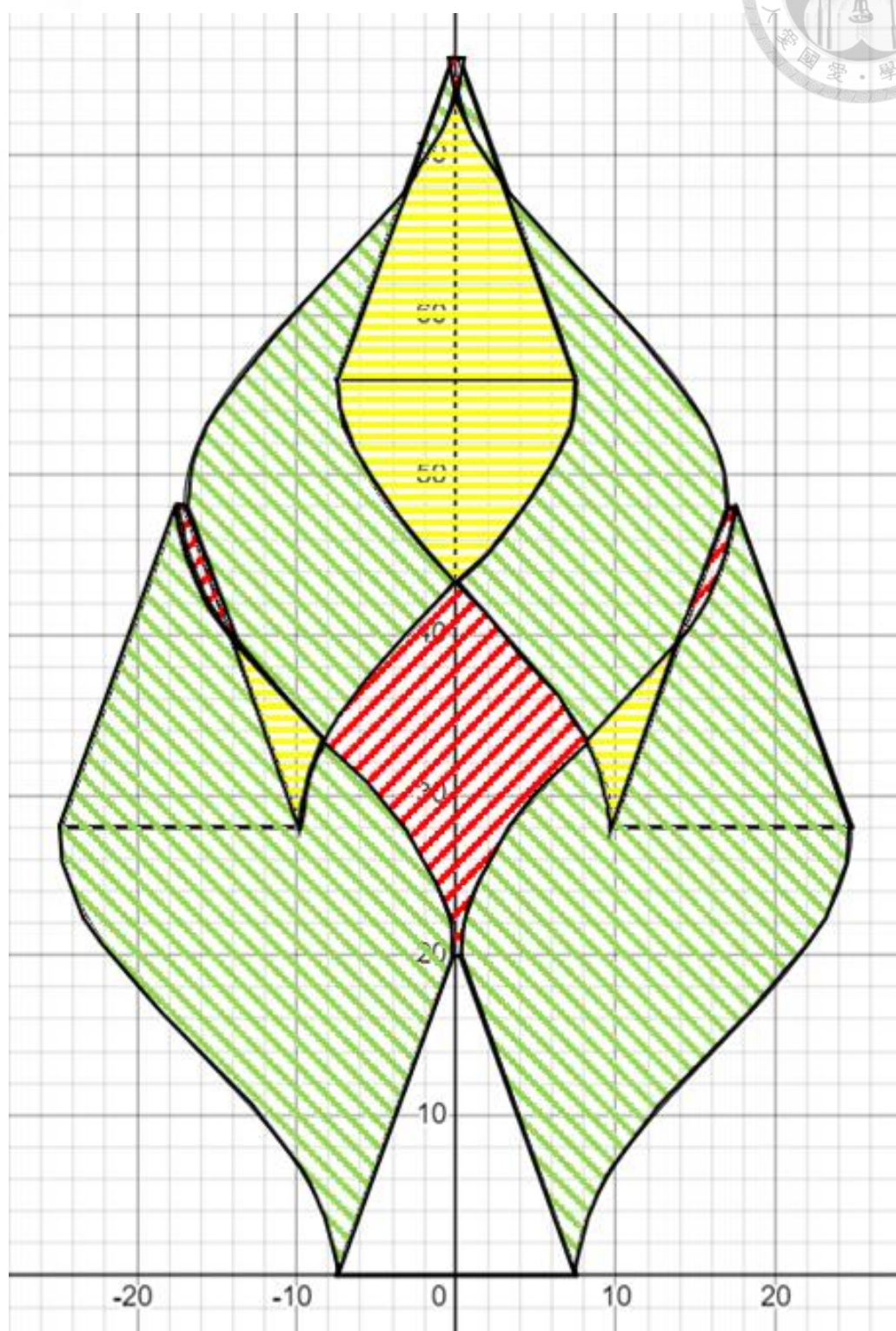


圖 4-7 原型機 2 之 1.4h 有效切割圖

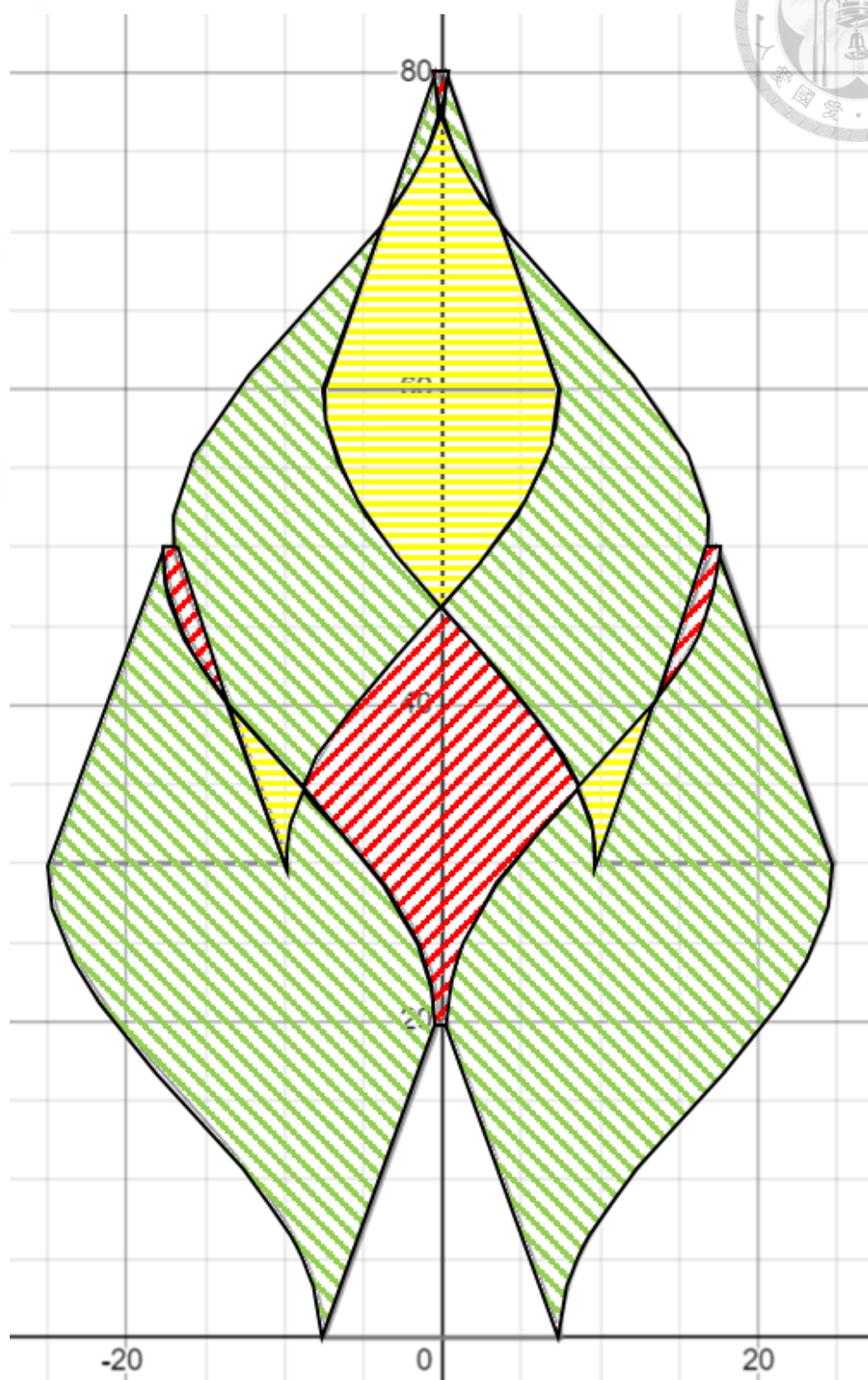
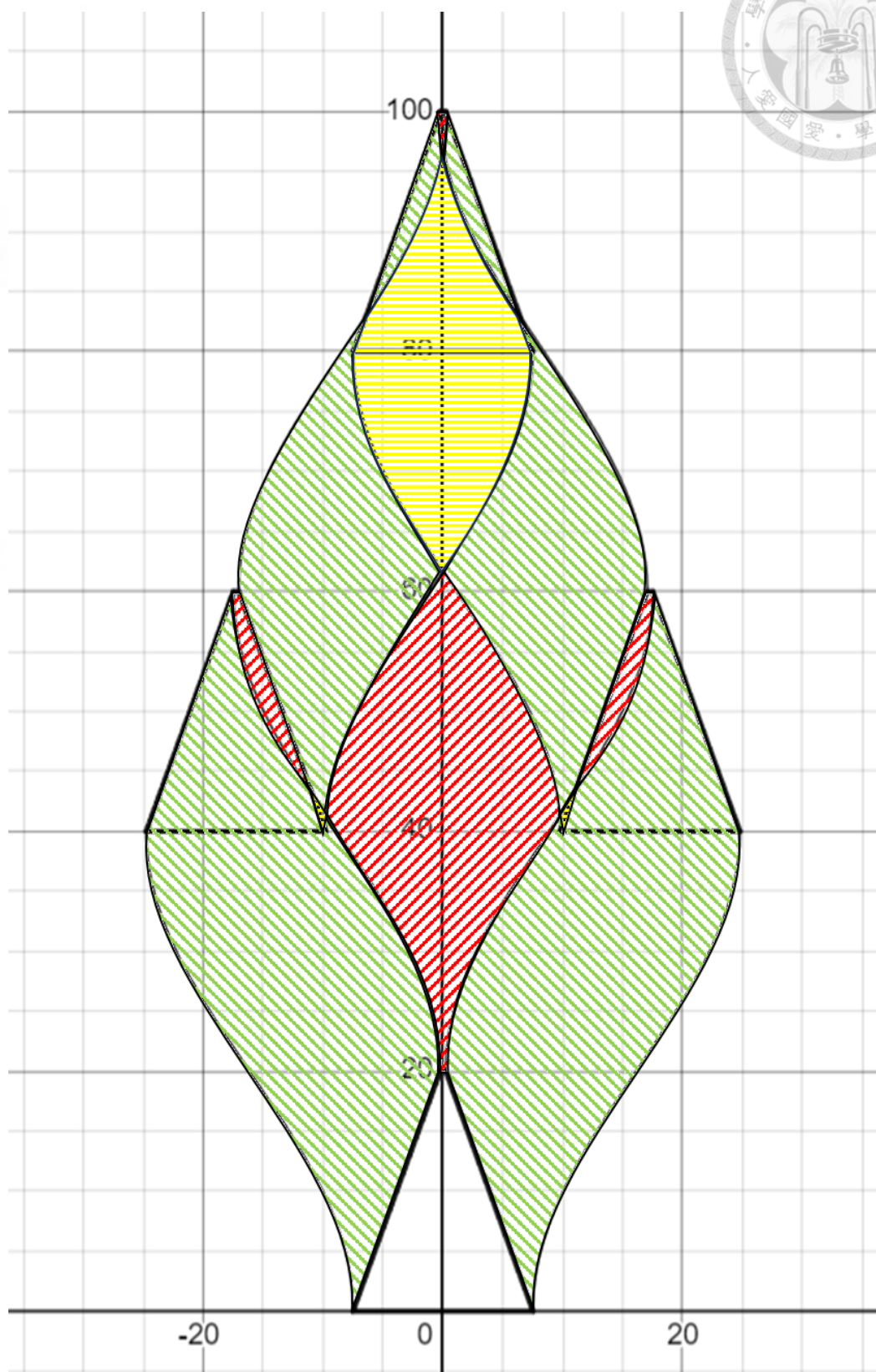


圖 4-8 原型機 2 之 1.5h 有效切割圖



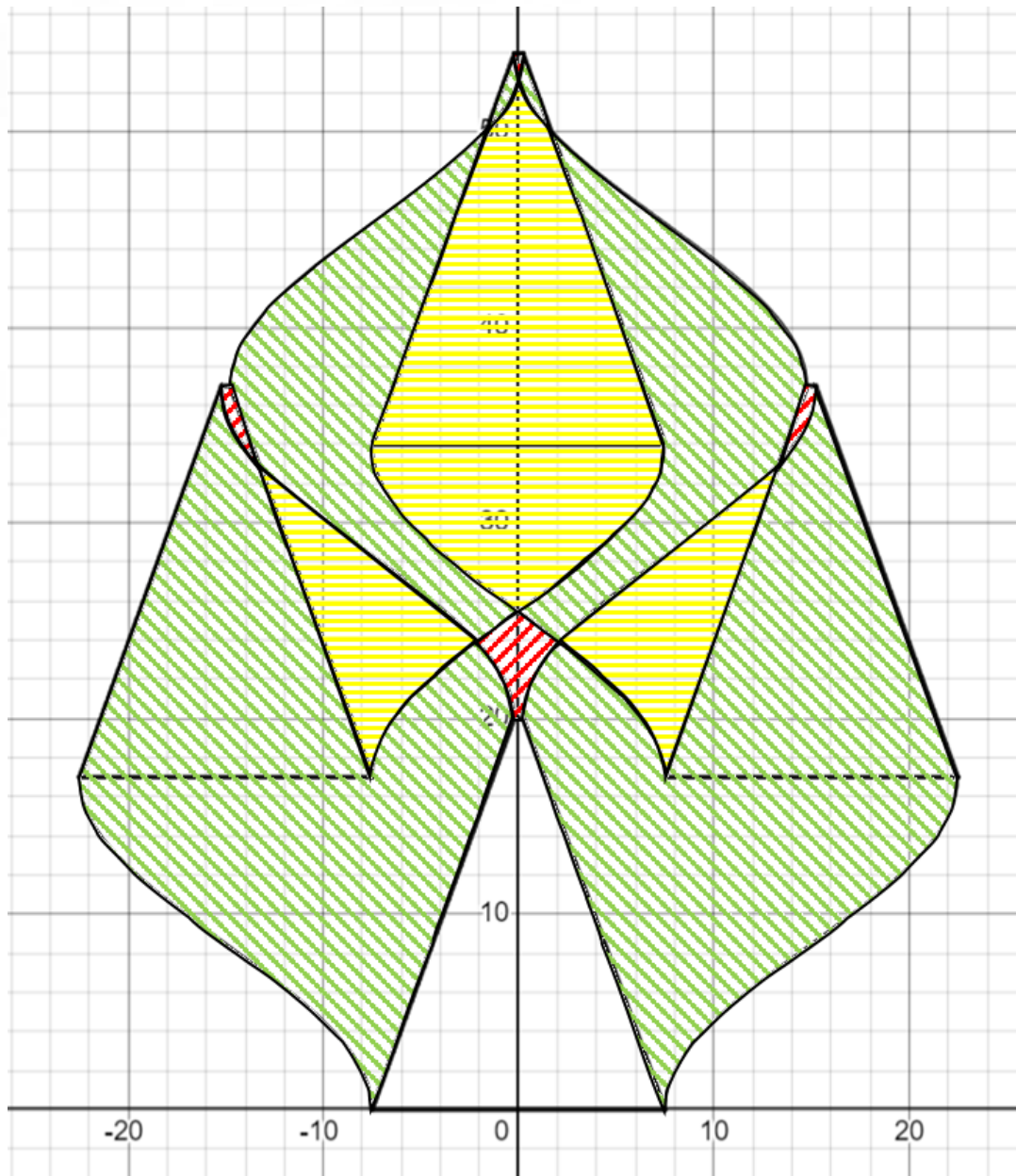


圖 4-10 原型機 2 之 0.85h 有效切割圖($S=b$)

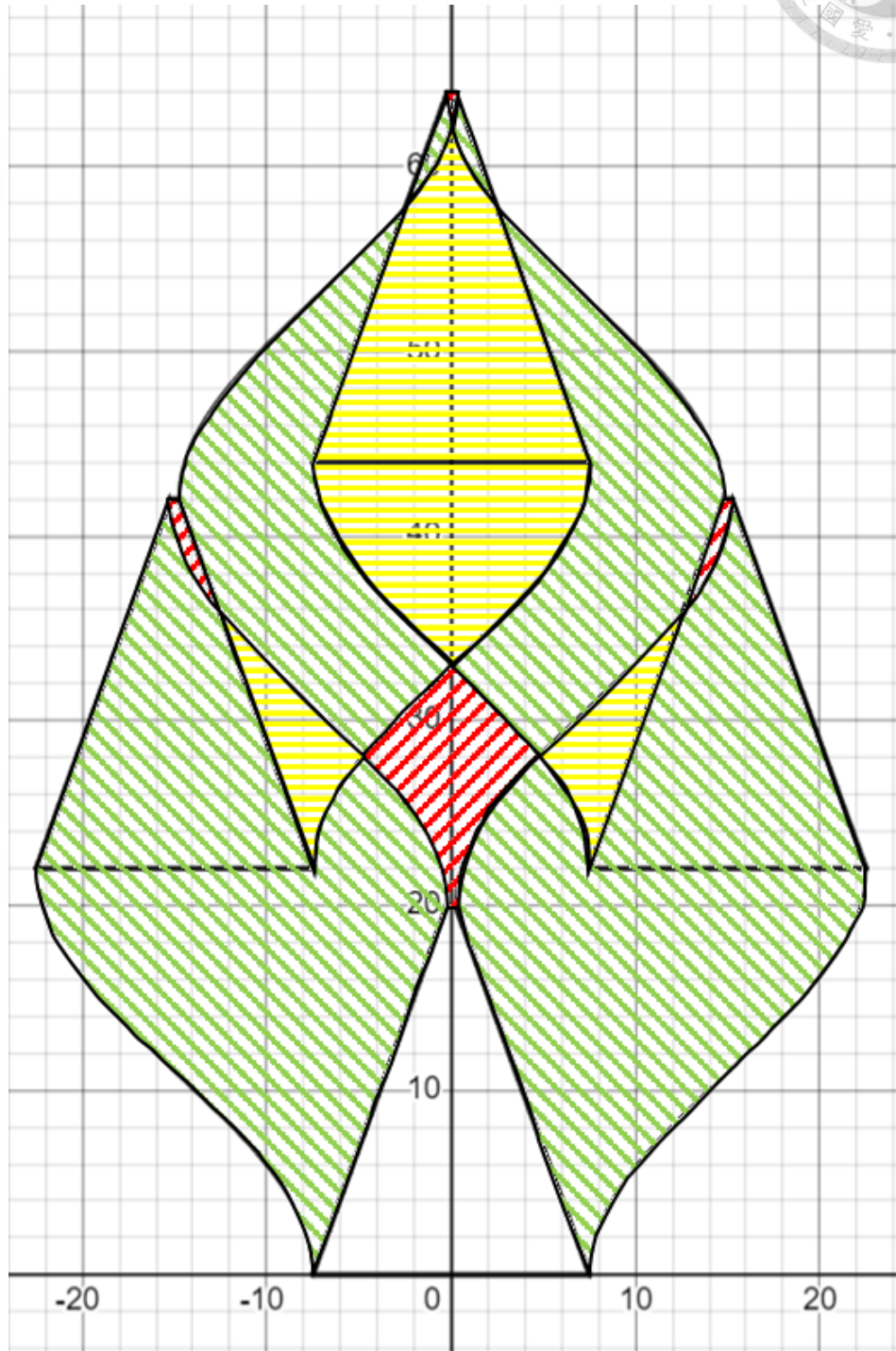


圖 4-11 原型機 2 之 1.1h 有效切割圖($S=b$)

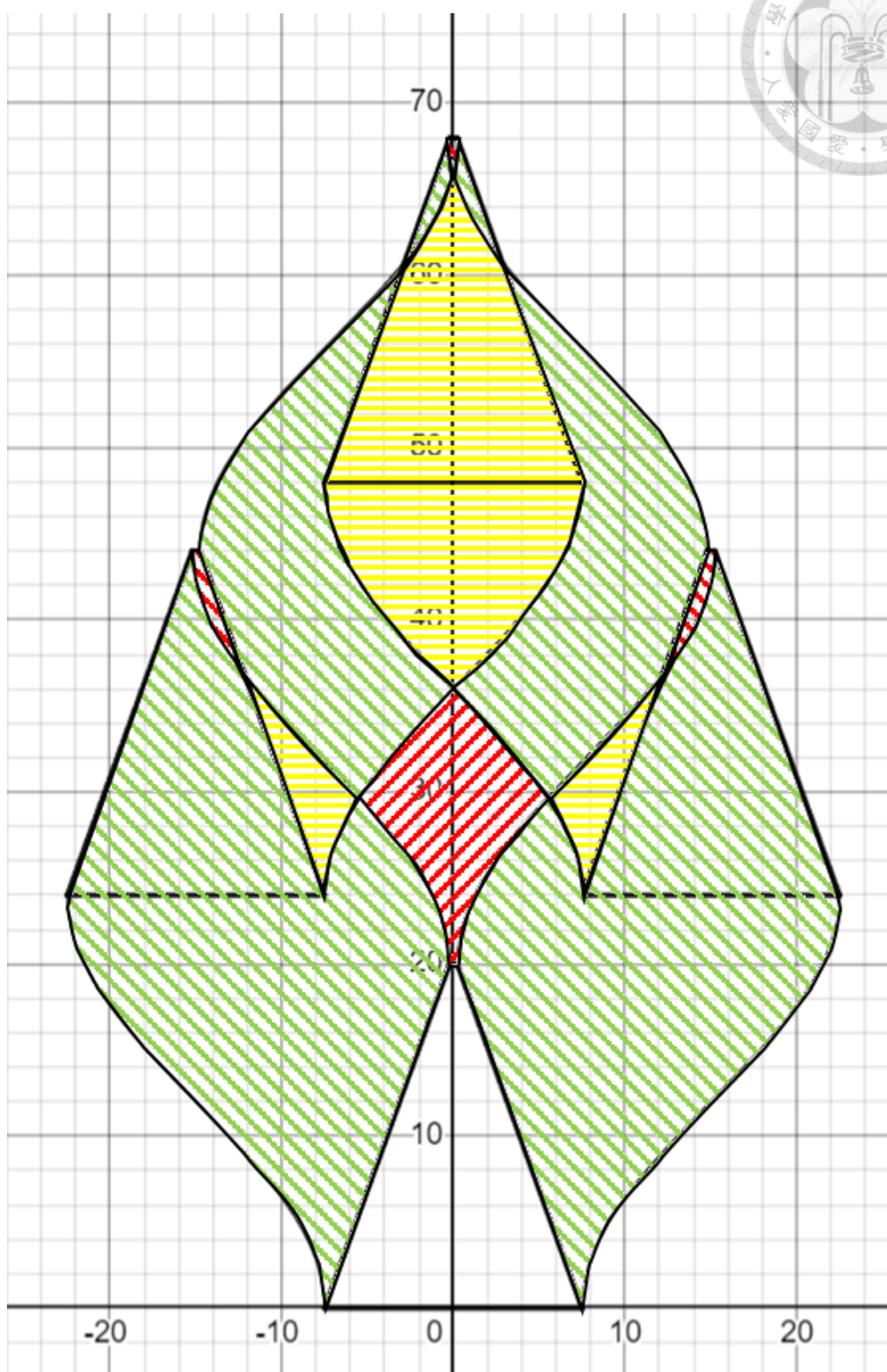


圖 4-12 原型機 2 之 1.2h 有效切割圖($S=b$)

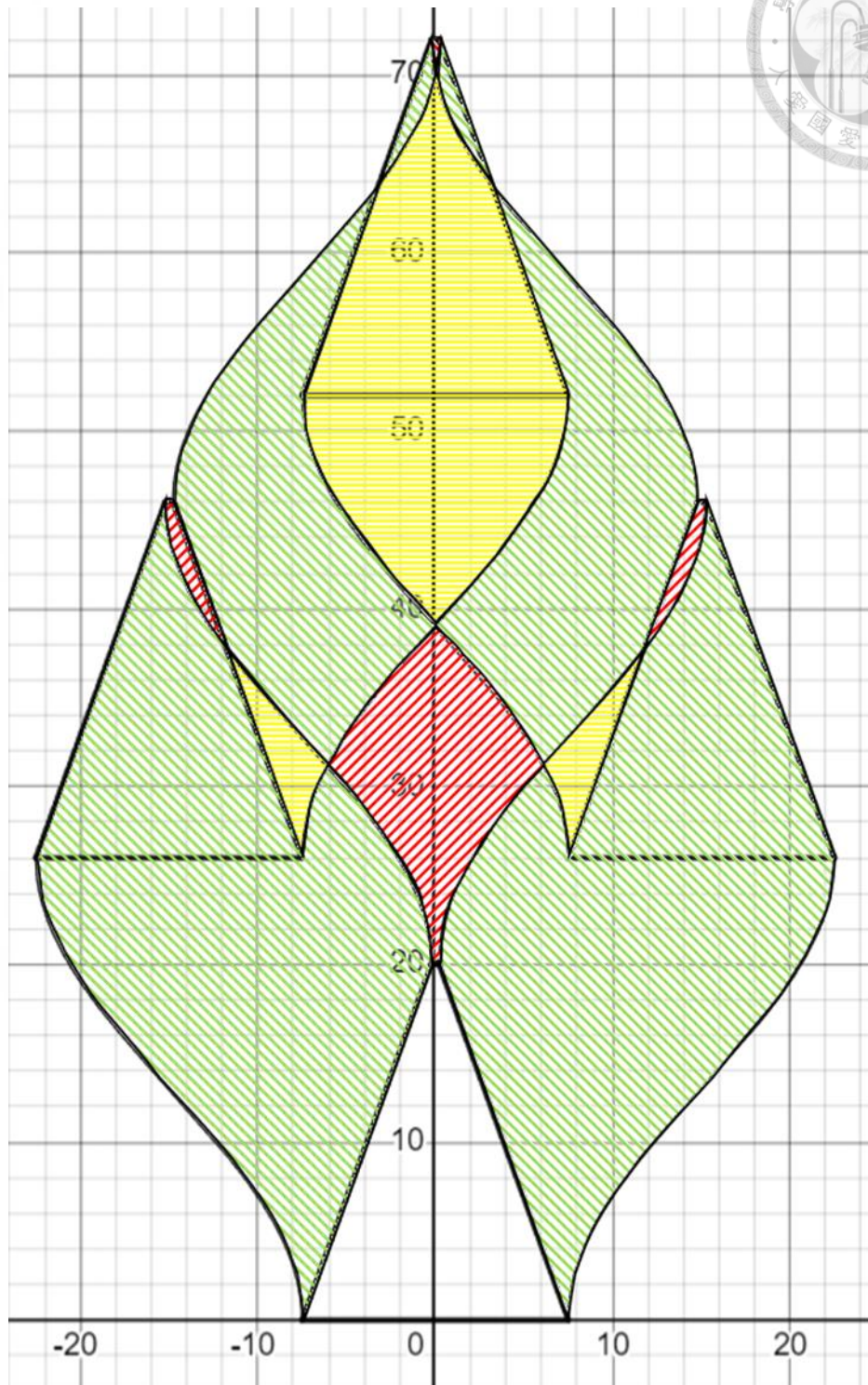


圖 4-13 原型機 2 之 1.3h 有效切割圖($S=b$)

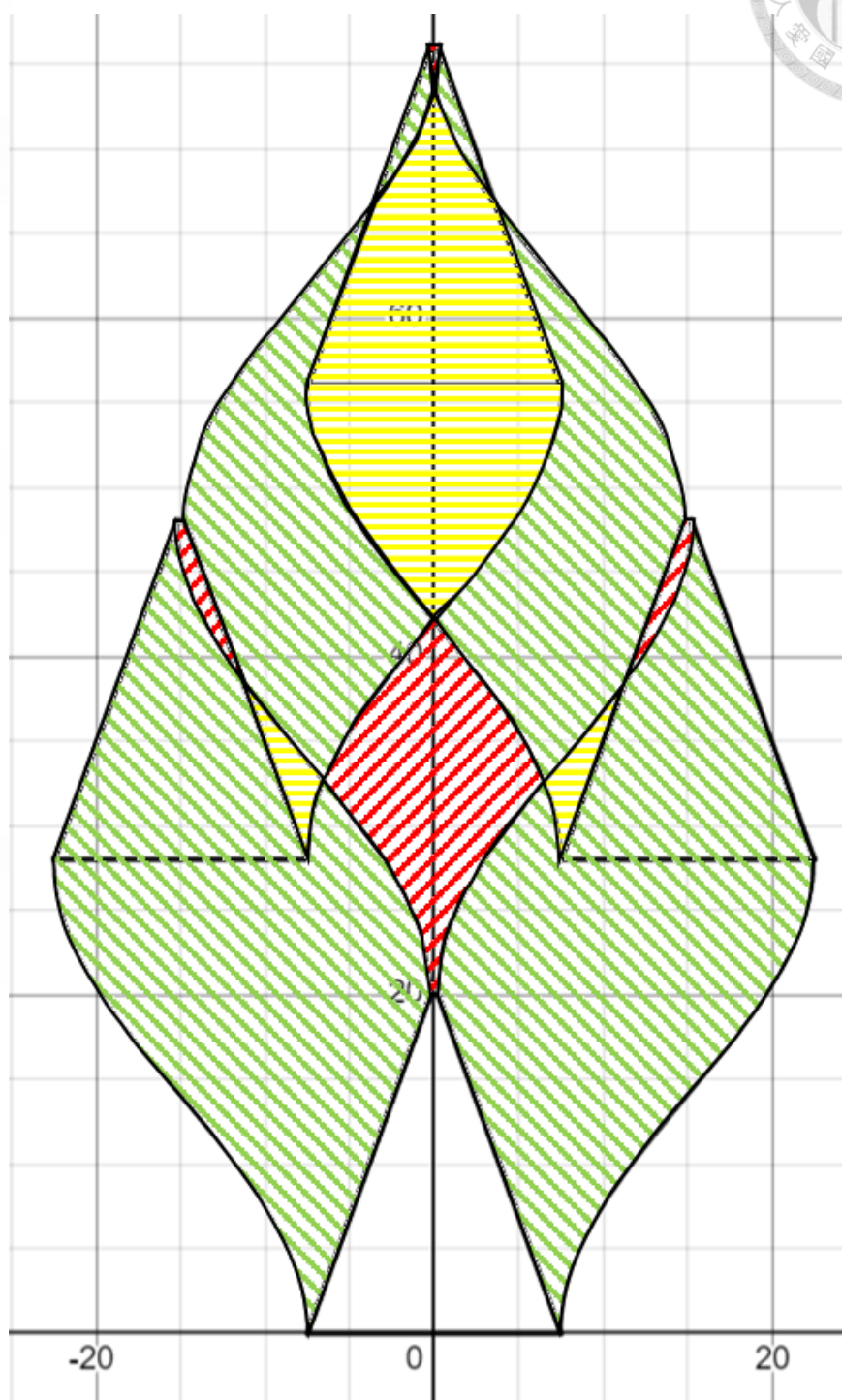


圖 4-14 原型機 2 之 1.4h 有效切割圖($S=b$)

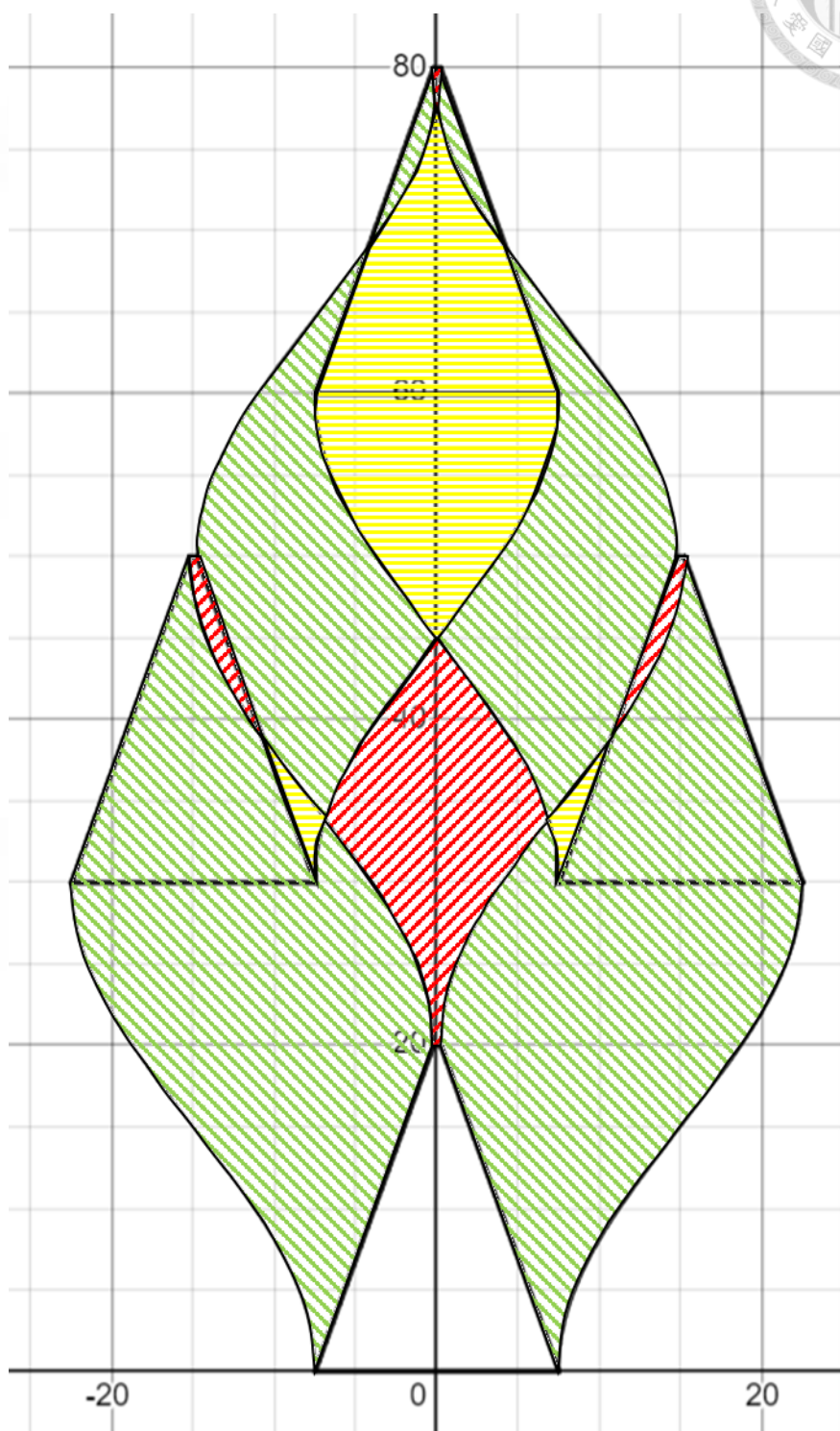


圖 4-15 原型機 2 之 1.5h 有效切割圖($S=b$)

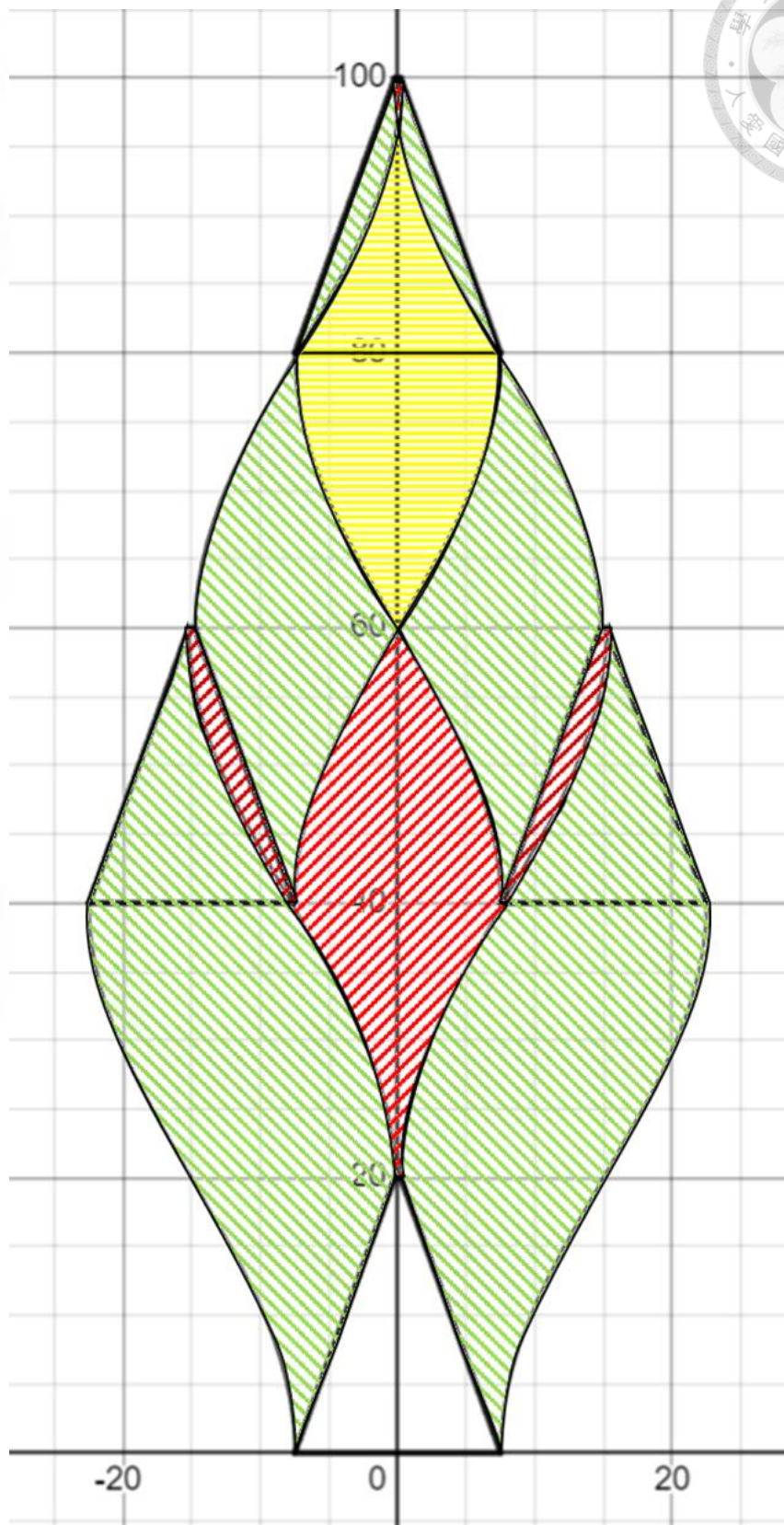


圖 4-16 原型機 2 之 2h 有效切割圖($S=b$)

第五章 結論與建議



本研究設計研製之綠牆修剪機構部分，製作雙動刀往復式切割原型機 1，並以其作為基礎作優化設計原型機 2。控制系統部分，本研究使用 Arduino Uno 及 Farmbot 菜園管理機器人製作，達到刀具作動及移動控制。另外本研究以有效切割率為研究方向，製作切割圖進行圖形分析。本研究的結論如下：

1. 本研究以蘇格蘭軛機構達到刀具往復切割的效果，小巧緊湊的設計以少量的零件製作修剪機構。
2. 利用 Farmbot 菜園管理機器人承載修剪機構，達到讓修剪機構於模擬綠牆環境的垂直面上的移動。
3. 本研究原型機 2 之刀刃結構設計在進程為 1.1 及 1.2 倍的刀刃高度時達到其最高有效切割率 77.3%。
4. 原型機 2 的刀刃結構設計在減短切割行程至 15 mm 後，整體的有效切割率降低，但漏割區減少，切割率提高。
5. 扁平的圖形雖然有效切割率較低，但較高的切割率較為符合以修剪為目標的綠牆修剪機械。

本研究對於綠牆修剪機械的建議如下：

1. 雖然 3D 列印材料因其特性限制無法達到金屬刀具的切割效果，但可利用本研究整理出之刀刃軌跡方程式製作出切割圖，觀察因結構參數所帶來的工作效果，避免浪費製作成本。
2. 根據不同的植物及栽種狀況，會有不同的平均切割速度要求。切割圖為切割速度及進給速度的比值畫出，在機構設計時可將切斷植物所需的平均切割速度進行操作參數的考量。
3. 在研製切割器時，應先根據切割所需剪切力及動力需求再進行機構設計，在後續可避免應機械結構條件不足造成的操作不良。

參考文獻



王鋼、王建。2008。用於割草機的擺環機構。中華人民共和國實用新型專利第200720150291.8號。

王振強、趙春花、劉偉。2011。手扶牧草收割機往復式切割器主要參數試驗分析。山西農業科學 39(9):1001-1004。

冉軍輝、沐森林、李海同、關卓懷、湯慶、吳崇友。2020。油菜聯合收穫機往復式雙動割刀行星輪驅動器設計與試驗。農業工程學報 36(9):17-25。

向陽、羅錫文、曾山、臧英、楊文武。2015。基於可視化編程的往復式切割器工作特性分析。農業工程學報 31(18):11-16。

宋占華、宋華魯、閔銀發、李玉道、高天浩、李法德。2016。棉花秸稈往復式切割器動刀片優化設計。農業工程學報 32(6):42-49。

范憶華、陳正劭、陳振山、陳聰嘉。2018。機構學。第四版，41-42。新北：高立圖書。

康峰、仝思源、張漢石、李文彬、陳忠加、鄭永軍。2020。蘋果枝條往復式切割剪枝參數分析與試驗。農業工程學報 36(16):9-16。

謝采鵠。2013。台中市工地綠圍欄之植栽評估。碩士論文。台中：東海大學景觀學系。

韓余、宋志禹、陳巧敏、梅松、楊光。2022。弧型往復雙動式采茶切割器優化與試驗。農業工程學報 38(24):35-43。

龐聲海。1982。關於滑切理論與滑切角的選用。華中農學院學報(2):64-69。

Anderer, P. 2018. Entwicklung, Konstruktion und Bau eines Schneid-werkes für junge Triebe für die vollautomatische Pflege und Bewirtschaftung von Gebäudebegrünung. Berlin: Technische Universität Berlin.

Built electronic circuits. 2018. What is an H-Bridge. Available at: <https://www.built-electronic-circuits.com/h-bridge/>. Accessed 5 December 2018.

Manso, M., and C. G. João. 2015. Green Wall System: A Review of Their Characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41:863-871.

Nansai, S., and R. E. Mohan. 2016. A Survey of Wall Climbing Robots: Recent Advances and Challenges. *Robotics* 5:2-7.

Susca, T., F. Zanghirella, L. Colasuonno, and V. Del Fatto. 2022. Effect of green wall installation on urban heat island and building energy use: A climate-informed systematic literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 159:1-16.

The Prakriti Story. 2021. Urban Heat Island Effect and how to mitigate their effects. Available at: <https://theprakritistory.com/urban-heat-island-effect-and-how-to-mitigate-their-effects/>. Accessed 9 October 2021.

Wilkinson, S., M. Carmichael, and R. Khonasty. 2021. Towards smart green wall maintenance and Wallbot technology. *Property Management* 39(4): 466-478.