

線控機器人與自走子車製作在教學上之應用

周立強 高易宏 吳建昌

國立宜蘭技術學院農業機械工程系

摘要

本文目的主要以第四屆全國技專院校創思設計與製作競賽為例，說明製作線控機器人與自走子車過程中，所需要運用的機電知識與技術來達到教學效果。製成的線控機器人必須能完成排除與重置障礙、取旗與插旗、釋放自走子車等動作。而子車被釋放後須以自身動力行進且不可線控或遙控，並於沿途釋放物件於標的區內。在線路控制方面為達到節省元件及減少線路數，採用傳統繼電器接點迴路與可程式控制器兩者並行方式控制所有致動器。而子車自走部分則以可程式控制器為核心，以時間序控方式完成。最後本製作分別在本校模擬場地及雲林科技大學比賽場地完成所有要求的動作功能，顯示在製作過程中所運用的機電知識技術及工程團隊精神是正確而有效的。

關鍵字：線控機器人、自走車、可程式控制器。

The Development of A Wire-Controlled Robot with Four Programmed Sub-Vehicles for Education

Li-John Jou Yi-Hung Kao Chien-Chang Wu

Department of Agricultural Machinery, National Ilan Institute of Technology

Abstract

This work was based on the mobile robot developed for this year's "The 4th Annual Contest of Creative Design among Technological Colleges" held in National Yunlin University of Science and Technology. The objective of this paper was to illustrate how to develop a wire-controlled robot with four programmed sub-vehicles by applying electromechanical knowledge, in order to fulfill the goal of education. The wire-controlled robot was required to remove two obstacles, grasp and insert a vertical flag, and release four sub-vehicles. The sub-vehicles were designed such that they would put appropriate objects on the target area without external controls, while passing through prescribed paths. The design of wiring strategy for robot was to reduce the numbers of parts and wires as much as possible. An electronic system composed of relays and PLC was developed to accomplish strategy and to operate the robot easily. Similar arrangement was also applied to all four sub-vehicles by Time-Sequence control method. Each sub-vehicle was equipped with one PLC, in order to improve the accuracy of occupying the target areas. The complete electrical-mechanical system was successfully tested in our campus as well as in the contest. It was found that both knowledge of mechatronics and spirit of teamwork were crucial to the success of this work.

Keywords : wire-controlled robot , programmable logical controller(PLC) , programmed sub-vehicles

一、前言

全國技專院校創思設計與製作競賽的目的在於以寓教於樂的方式培養技職院校學生對創思設計及製造的能力，使將來能成為我國產業界研發新產品的尖兵。而該競賽從第三屆起除原有專科組外增加大學組，而題目已從單純的線控機器人完成基本動作外，更增加自走子車部份。本次競賽是以我國「三國演義」歷史故事之「明修棧道，暗渡陳倉」為主題背景，要求設計製作出可以在五分鐘內排除與重置障礙、取旗與插旗、釋放自走子車(以下簡稱子車)等動作的線控機器人，而子車被釋放後須以自身動力行進且不可線控或遙控，並在沿途釋放物件於標的區內(詳細競賽規則可參考附錄所示)。

本製作使用本系實習工廠與電工教室之設備機具並配合所學的機電知識技術在製作過程中不斷討論及改良修正，在透過交叉的實作與理論驗證下及在指導老師及二名組員以工程師團隊的型式運作，在規定時間內完成整個實體製作及測試且自製率達百分之百，並達到規定的重量限制(40kgw 以下)及相關尺寸條件的規定。本製作所運用的方法及程序除參考機電整合書籍[1]中有關於機構驅動的選用計算外另針對本次個案以物理學及靜動力學觀念分析並作負載計算，其結果可作為機電整合課程教學的一個實例。

二、材料與方法

本製作主要分成競賽規則解析與策略討論、設計方向與元件規格的決定、底盤與上半部機構製作、線控電路設計規劃配置、自走子車製作、自走子車程式撰寫、功能測試修正等七個流程。以下將各流程進行方式內容分述如下：

(一) 競賽規則解析與策略討論

由於競賽時 5 分鐘內需完成所有動作，故本製作參照競賽規則場地配置公告事項(見附錄)定出下列動作時間及速度要求。母體行走距離 18 公尺，時間 60 秒。障礙排除 60 秒。取旗 30 秒。重置障礙 30 秒。釋放下子車 20 秒。此時時間累計已達 3 分 20 秒，故子車行走時間僅餘 1 分 40 秒。而路徑最遠長為 13.8 公尺(含回防距離)，因此定為 40 秒走完。在子車釋放後母體可進行插旗動作，此時間耗費已含在子車行走時間內，因此全程保守預估在 4 分內完成。由以上的時間策略概定，大致決定了母體與子車行走時的平均速度分別為 0.3 及 0.345(公尺/秒)。依此本製作才能先預估母體與子車行走部直流馬達規格。由於標的區有四個方向，故子車製作有四部，每部重量預計不超過 5 公斤，而規定的重量限制在 40 公斤以下，因此母體設計以不超過 20 公斤為目標

(二)、設計方向與元件規格的決定

1、硬體設計方面。

母體與子車行走部均採前輪驅動，左右兩輪分別各以直流馬達傳動並控制其正反轉來達到直走、轉彎及後退等動作。但母體後輪則輔以兩個惰輪行走，子車則是以一個惰輪行走並著地，以減輕母體重量，故母體底盤設計很低(僅離地 2 公分)，以方便子車釋放時的脫離。在障礙排除與重置、取旗插旗均以控制直流馬達正反轉傳動收拉繩索以帶動連桿機構方式完成，以上如圖 1、圖 2 所示。

此外子車於自走過程中須釋放物件(至少 10 公分高)於標的區內，因此子車上半部設計成直流

馬達帶動自製旋轉筒滑槽以便於沿途釋放物件，如圖 3 所示。製作所需選用的材料以方口、L 形鋁合金及壓克力為主，達到質輕且機械強度足夠為目標。

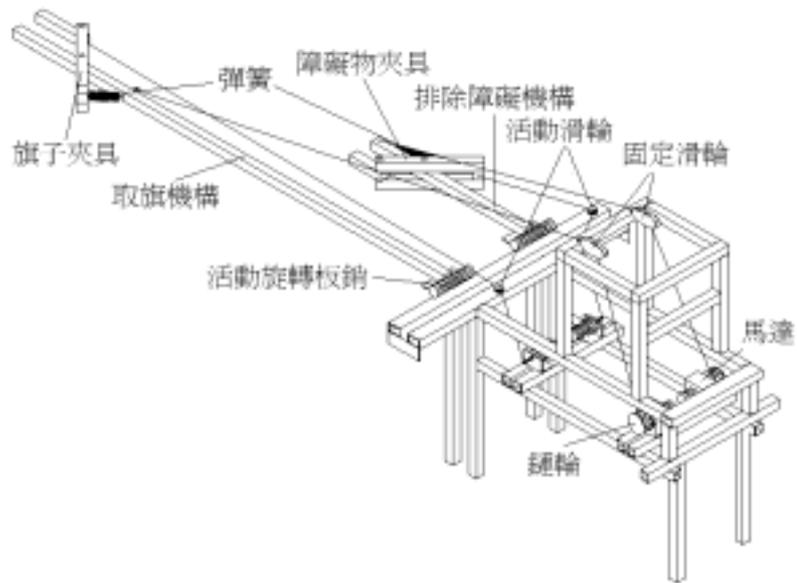


圖 1 線控機器人上半部機構之立體圖

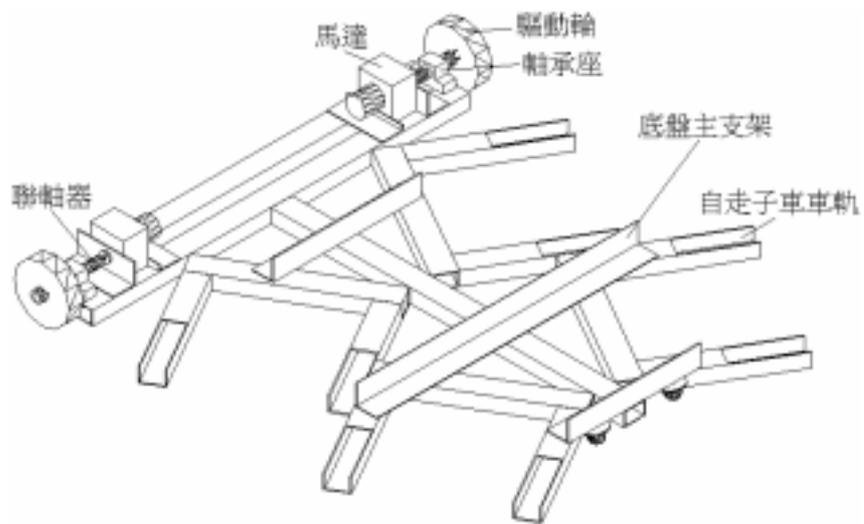


圖 2 線控機器人行走部之立體圖

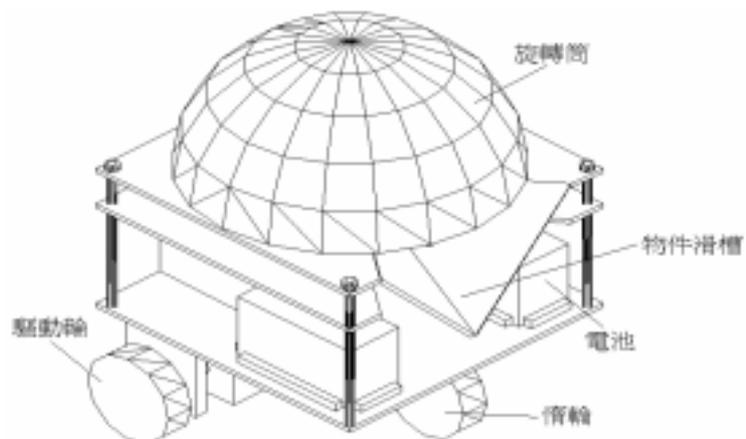


圖 3 線控機器人自走子車之立體圖

2、元件規格的決定

須初步預估上述設計方向決定後所需致動器及各元件規格

(1)母體與子車行走部馬達規格初步決定

依能量守恆方程式(1)可概略預估出行走部所得之能量須克服動能及摩擦能,再進一步推求出馬達所需之輸出功率。為簡化起見,假設條件如下:

- I、規定的重量限制在 40 公斤以下,故設車體總質量 40 公斤,子車為 5 公斤。
- II、行進速度以平均速度為考慮,母體設為 0.3,子車為 0.345(公尺/秒)。
- III、簡化為以物體質心之運動,且假設與地面摩擦為滑動摩擦(此值會高於實際輪子與地面滾動摩擦),以選用同競賽場地材質的地板及輪子經實驗得滑動摩擦係數約為 0.2。
- IV、母體為 4 輪,子車為 3 輪,假設每輪配重分別為 10 及 1.67(公斤重)
- V、S 為行走距離,母體及子車分別是 18 與 13.8 公尺。

$$J = \frac{1}{2}mV^2 + \mu NS \dots\dots\dots(1)$$

1)

J: 行走部外加能量(焦耳)。 m: 車體總質量。 V: 行進速度。
g: 重力加速度。 μ: 地面摩擦係數。 N: 車體於地面之正向力。

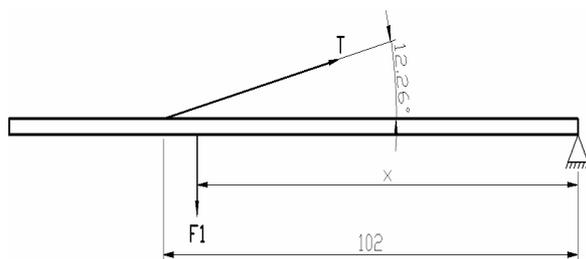
經以上計算得母體需 J=1413 焦耳,在 60 秒內完成,因此母體所獲得之平均功率至少為 23.55 瓦特。因此驅動輪兩只馬達各需至少 11.775 瓦特。同理子車需 135.5 焦耳,在 40 秒內完成,因此其所獲得之平均功率至少為 3.39 瓦特,驅動輪兩只馬達各需至少 1.7 瓦特。由母體與子車行走輪徑 12 及 7 公分,平均速度 0.3 與 0.345 公尺/秒可計算出馬達有載下驅動轉速至少為 47.7 及 94rpm。接著由公式 $\tau = \mu Nr$, r 為輪徑,可推求出母體與子車行走時地面摩擦所給予的反制力矩 為 10 及 1.17(kgf.cm)。由以上數據參考馬達與聯軸器型錄規格及國內現貨等因素下,母體馬達選用型號 DME60S6HP&6H,其輸出為 13watt,減速比 50,空載下轉速為 87rpm,電流 1.2A,輸出轉矩 10kgf.cm。聯軸器選用型號 po90-1B,可承受連續轉矩 15 kgf.cm,最大瞬間可承受轉矩 108 kgf.cm。子車馬達選用型號 DME34B6HP&6H,輸出為 4.5watt,減速比 36,空載下轉速為 102rpm,電流 0.38A 輸出轉矩 3.1kgf.cm,聯軸器選用型號 pk80-3,可承受連續轉矩 3 kgf.cm,最大瞬間可承受轉矩 9 kgf.cm。

(2)上半部機構馬達、彈簧及海綿規格初步決定

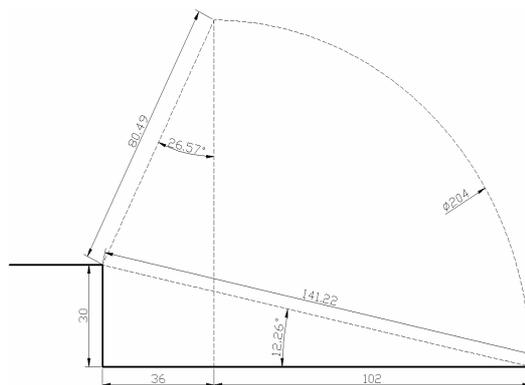
I、取旗機構部分

此部份本製作根據圖 1 所示之取旗機構,由尺寸及方口鋁材質(3gw/cm)、螺栓(30gw*5)、彈簧(30gw*1) 海綿(30gw*2)等重量求得支架總重 0.87kgw(重心 91.5cm);加上已知旗桿重(0.35kgw)可算出取旗機構重心位置在 104 cm處。如圖 4(a)所示為該支架自由體圖, x=104cm, F1=1.22kgw 計算出拉繩張力 T=5.86kgw,此一張力對馬達傳動鏈輪(φ5cm)形成反制力矩 7.32 kgf-cm。由於競賽規定母體(含伸展機構)活動範圍不得超出六角形綠色場地,故取旗機構必須能夠收放,故如圖 1 所示該支桿預估在 10 秒內可收起 90 度(角速率約 0.157 rad/sec)。而以 AUTO CAD 可模擬出收繩量 60cm(如圖 4(b)所示),相當於馬達轉 3.82 圈(轉速需 23rpm)。因此放下機構的馬達規格選用 DME38B6HP&6H 型號,其輸出功率 7.2w、減速比 225、轉速 22rpm 及 10kgf-cm。旗子夾具如

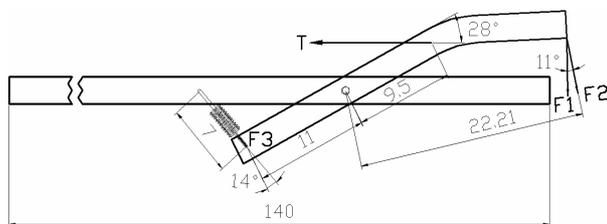
圖 4(c)所示，為增加夾旗時的摩擦力，在夾具兩側粘上兩公分厚海綿，故該夾具未夾旗時張開 4cm，彈簧伸長 1cm(假設彈簧原長選 6cm，其彈性係數 1kgw/cm)，此時拉繩張力 T 為 0，可得正向力 $F_1=0.49\text{kgw}$ 。如圖 4(d)所示，該夾具夾緊旗時張開 6cm(旗桿直徑 3cm 兩側海綿各 1.5cm)，旗桿重 0.35kgw ，已知海綿靜摩擦係數實驗為 0.4，得正向力 F_1 至少要 0.875kgw ，此時彈簧伸長為 8.4cm，計算出彈簧拉力 F_3 至少 2.4kgw ，依力平衡方式，如此可得正向力 $F_1=1.2\text{kgw}>0.875$ ，則此時拉繩張力 T 仍為 0。當夾具要去夾旗時或放旗時，假設至少張開 9cm，如圖 4(e)所示，彈簧伸長 4cm 則 $F_3=4\text{kgw}$ ，可計算出拉繩張力 T 至少 6.8kgw ，此一張力對馬達傳動軸($\phi 6\text{mm}$)形成反制力矩 1.8kgf-cm 。以 AUTO CAD 可模擬出收繩量 5cm，相當於馬達轉 2.65 圈(預估 4 秒，需 40rpm)。因此傳動夾具機構的馬達規格選用 DME34S37G 型號其輸出功率 1.4w、減速比 76、空載下轉速 43rpm 及輸出轉矩 1.8kgf-cm 。



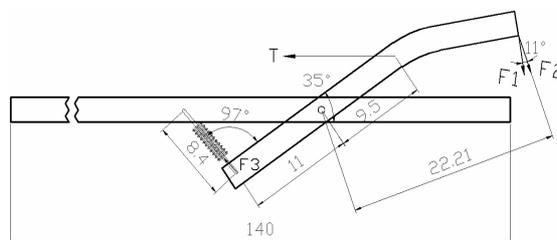
(a) 收放取旗機構時計算拉繩之張力計算



(b) 收放取旗機構時所須之收繩量

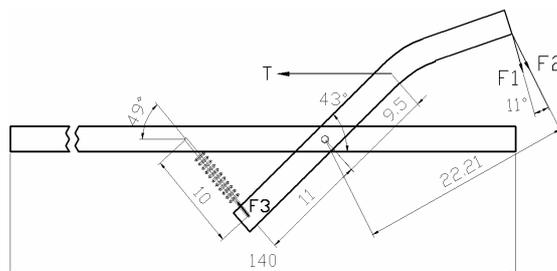


(c) 取旗機構在未夾旗時之自由體圖



(d) 取旗機構在夾旗桿時之自由體圖

圖

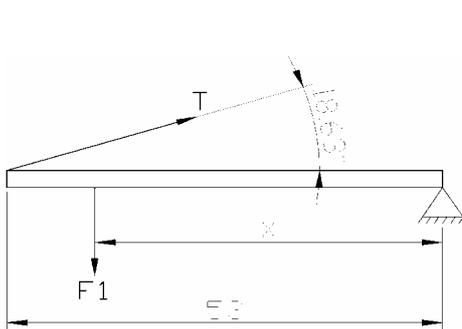


(e) 取旗機構在取旗或釋放旗桿時之自由體圖

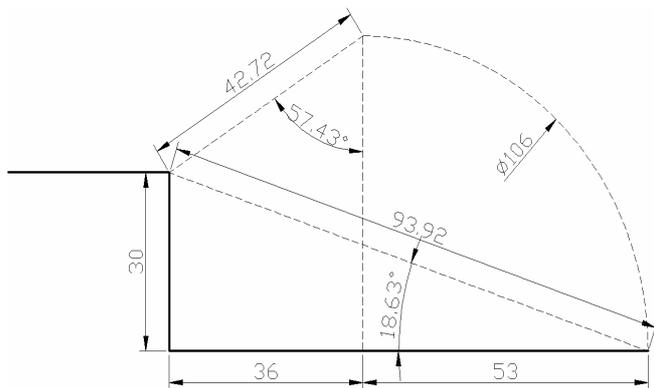
圖 4 取旗連桿機構的靜力分析

II、排除障礙的機構部分

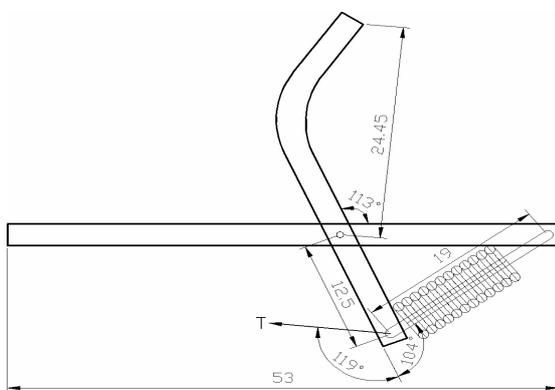
此部份本製作仍根據圖 1 所示之排除障礙機構，由尺寸及方口鋁材質(3gw/cm)、螺栓及彈簧等重量求得支架總重 0.7kgw(重心 29.3cm)、加上已知障礙物重(0.8kgw)可算出夾障礙物時整體重心位置在 40 cm處。如圖 5(a)所示為該支架自由體圖， $X=0.4m$ ， $F_1=1.5kgw$ ，計算出拉繩張力 $T=3.54kgw$ ，此一張力對馬達傳動鏈輪(φ5cm)形成反制力矩 4.43 kgf-cm。由於該機構在 10 秒內旋轉 90 度 (角速率約 0.157 rad/sec)。以 AUTO CAD 可模擬出收繩量 50cm(如圖 5(b)所示)，相當於馬達轉 3.2 圈。因此放下機構的馬達規格選用 DME38B6HP&6H 型號其輸出功率 7.2w、減速比 225、22rpm 及 10kgf-cm。如圖 5(c)所示，當夾具要去夾障礙物時或釋放障礙物時，假設至少張開 30cm，則彈簧維持原長 19cm，拉繩張力 $T=0$ 。如圖 5(d)所示，該夾具夾緊障礙物時張開 10.5cm(障礙物直徑 7.5cm)，障礙物重 0.8kgw，設海綿摩擦係數 0.4，可得正向力 F_1 至少需 2kgw，彈簧伸長 8.5cm，依平衡方式，得到算式： $10.48T-62.45K=41.92$ ，式中 K 為彈簧之彈性係數(設為 0.1kg/cm)。可計算出拉繩張力 T 至少 4.59kgw，此一張力對馬達傳動軸(φ6mm)形成反制力矩 1.2 kgf-cm。以 AUTO CAD 可模擬出收繩量 12cm，相當於馬達轉 6.4 圈(預估 8 秒)、47.7rpm。因此傳動夾取障礙物機構的馬達規格選用 DME33B37G 型號其輸出功率 3w、減速比 76、空載下轉速 48rpm 及輸出轉矩 3.6kgf-cm。



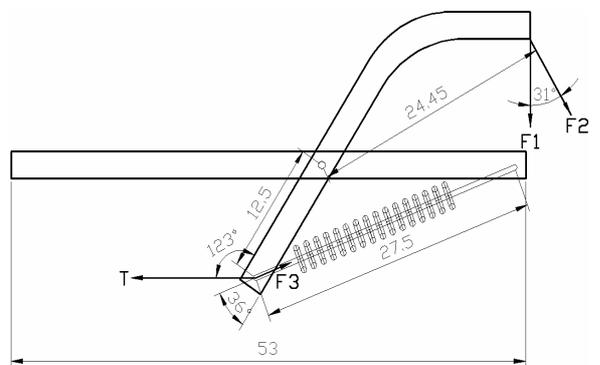
(a)排除障礙時計算拉繩之張力



(b) 收放機構時所須之收繩量計算



(c)在夾取障礙物時之自由體圖



(d) 機構在釋放障礙物時之自由體

圖

圖 5 夾取與重置障礙連桿機構的靜力分析

(3)子車傳動旋轉筒的馬達決定

如圖 3 所示子車上方的旋轉筒分成 5 格每格佔 72 度，時間設為 0.5 秒轉一格釋放物件，因此旋轉速 ω 為 2.51rad/sec 即 24rpm。以旋轉動能 $J=0.5I\omega^2$ 公式，其中 I 為旋轉筒轉動慣量 $0.0061\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ，得到 $J=0.0192$ 焦耳，所以馬達輸出功率至少 0.0384watt。因此傳動旋轉筒的馬達規格選用 DME33S37G 型號，其輸出功率 0.7w、減速比 180、空載下轉速 25rpm 及輸出轉矩 1.3kgf·cm。聯軸器型號 po10-11，可承受連續轉矩 2 kgf·cm，最大瞬間可承受 18 kgf·cm。

(三)、底盤、車架與上半部機構製作

母體製作分為底盤與上半部機構，其材質均為鋁板、方口鋁、L 型鋁、 \square 型鋁。先從底盤開始，切割鋁板其尺寸為 $65 * 11 * 1.5 \text{ cm}$ ，將馬達固定於鋁板上。用 M12 螺桿作為車軸，再用工程塑膠所車製之軸承座(6 mm)固定。車輪採用市售板車專用硬質輪胎，與馬達之連結採用聯軸器。將驅動馬達固定在鋁板上之後，再與方口鋁所製作的車架(如圖 8 所示)以拉釘方式結合。接著以方口鋁與三向塑膠角拉釘套接成鋁支架於底盤部分往上架高，並固定驅動機構的馬達於鋁支架上。夾取障礙物及拔旗的連桿機構仍採方口鋁製作，以插銷做結合，並配合復歸彈簧。最後完成之母車車體如圖 8 所示。

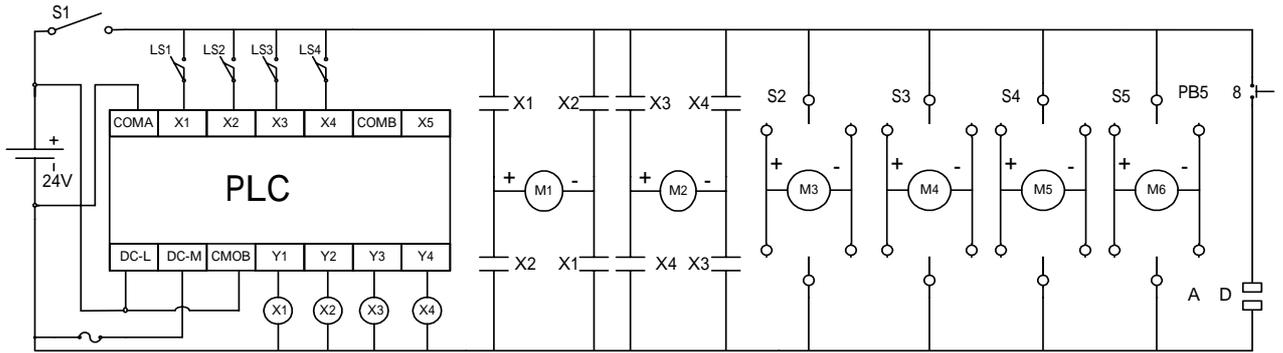


圖 8 母車底盤(左)、車架與上半部機構(右)製作成品

(四)、線控電路設計規劃配置

1、線控電路硬體設計

在線路控制方面本製作採可程式控制器之程式邏輯與傳統繼電器迴路的線路邏輯混合型式以減少繼電器數目及線路數。並配合操縱桿之極限開關、撥動開關控制六只傳動馬達的正反轉，此外以按鈕開關觸發自走子車。圖 9 所示則為本製作之線控電路圖。



符號說明：

S1：總開關。 S2~S5：控制機構馬達正反轉開關(DPDT)。 LS1~LS4：操縱桿之極限開關。

PB5~PB8：觸發自走子車之按鈕開關。 X1、X2 及 X3、X4：控制行走部左右馬達正反轉之輔助電驛。

M1：行走部左馬達。 M2：行走部右馬達。 M3~M6：取旗及夾取障礙機構的傳動馬達。

圖 9 本製作之線控電路圖。

本製作為使線控操作更加靈活，採用電動玩具中操縱搖桿加以改裝，在控制面板設計配置方面如圖 10 所示。

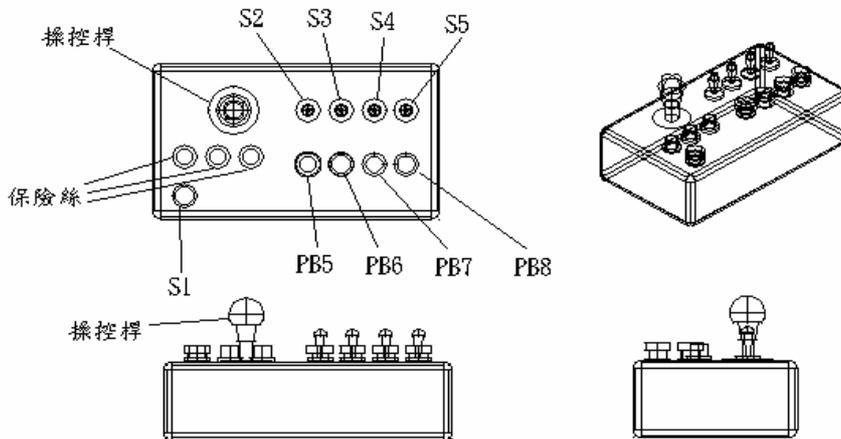


圖 10.線控電路操作器之面板及外型模擬示意

2、布林代數(Boolean algebra)演算法應用於可程式控制器階梯電路圖轉換

由於操縱桿具前後左右四個位置的極限開關相當靈敏，為避免操作時誤觸造成馬達迴路短路，因此彼此間互鎖相當重要。此部份本製作先配合操縱桿前後左右四個位置的極限開關制定與推演其對應的邏輯真值表。再以布林代數演算法演譯其布林表示式(Boolean expression)，再轉換成接點邏輯電路(switching logical circuit)[2,3]，最後完成可程式控制器的階梯電路圖在線上作控制。而此演算法的推演過程分成輸入狀態定義描述、對應策略的形成與輸入出真值表建立、演算

布林代數表示式及檢驗。以下本文將分述如下：

(1) 輸入狀態定義描述

操縱桿前後左右四個位置的極限開關共 4 點，因此其狀態輸入點對可程式控制器而言共有 4 點輸入並形成 $2^4=16$ 種狀態組合。此定義當操縱桿向前、向後、向左及向右碰觸對應之極限開關意味對車體分別作前進、後退、原地逆時針轉及順時針轉方向控制。同理操縱桿向左前、右前、左後及右後碰觸即表示控制車體作左前、右前、左後及右後的方向控制。當輸入接點閉合，定邏輯值為 1，開啟則為 0。而各輸入點所定義的邏輯變數及對照涵義 A、B、C、D 分別是操縱桿前、後方、左、右側位置的極限開關。因此根據上述定義可先建立輸入狀態的真值表與其所對照的方向控制定義，如表 1 中欄位(2)及(3)所示。表 1 中 4 個輸入狀態可視為二進位中的 4 位元，而欄位序號(1)則表示其十進位的轉換，共有 16 種狀態組合。然而有些狀態是不存在的，例如操縱桿不可能同時前後或左右，所以這種情形將被定義成無關狀況，如表 1 中序號 3、7、11~15 即是。

(2) 對應策略的形成與輸入出真值表建立

根據表 1 中欄位(2)及(3)所定義的輸入狀態的真值表與其所對照的方向控制，再轉換成底盤左右馬達正反轉方向，其中欄位 (4) 之 Y1 及 Y2、Y3 及 Y4 分別是控制左右馬達正反轉的輸出變數，而真值表中排列順序 1 及 0、0 及 1、0 及 0 分別是代表馬達正轉、反轉、停止之意。依據表 1 欄位(2)及(4)欄位可演算出輸出變數與輸入變數的布林函數式。

(3)演算布林代數表示式及檢驗

依前述所反映出的邏輯真值表，該系統為 4 個輸入變數，4 個輸出變數以示意圖 11 表示，則顯示輸入與輸出之間存在一轉換關係，此一轉換關係在邏輯控制中即為布林代數函數式。其基本演算方式可分成「積項之和」與「和項之積」[3,4,5]。前者是把輸出變數 Y_i 出現邏輯值為 1 的所有組輸入變數的邏輯「積」(AND)運算相加，輸入變數的邏輯值為 0 視為反相變數，1 則為非反相變數。後者是把輸出變數 Y_i 出現邏輯值為 0 的所有組輸入變數的邏輯「或」(OR)運算相乘，輸入變數的邏輯值為 0 視為非反相變數，1 則為反相變數。在所有邏輯真值表中，輸出變數的邏輯值 0 項數多於邏輯值為 1 的項數時，採用「積項之和」演算方式較為方便，反之亦然[5]。以下(2)及(3)式即為其基本演算式。

「積項之和」寫成矩陣型式

$$[Y_i]_{n \times 1} = [\alpha]_{n \times (2^\beta - 1)} [m_j]_{(2^\beta - 1) \times 1} \dots\dots\dots$$

....(2)

(2)式中 $[Y_i]$ 為一 $n \times 1$ 階的輸出變數矩陣(本例中 $n=4$ ，故 $i=1\sim 4$)。

$[\alpha]$ 係指根據輸入變數的邏輯運算所構成之 $n \times (2^\beta - 1)$ 階 0 與 1 的係數矩陣，即為 Y_i 輸出邏輯值矩陣的轉置矩陣。

β 係指輸入變數的個數(本例中為 4)。

$[m_j]$ 係每組輸入變數「積」(AND)的邏輯運算矩陣。

(2)式中如果僅考慮 m_j 係指使輸出變數邏輯值為 1 的每組輸入變數「積」(AND)的邏輯運算，則(2)式可寫成係數均為 1 之級數型式

$$Y_i = \sum_{j=0}^{2^\beta-1} 1 \cdot m_j \dots\dots\dots$$

(2-a)

式中 Y_i 為一 n 個輸出的變數(本例中 $n=4$ ，故 $i=1\sim 4$)。

β 係指輸入變數的個數(本例中 $\beta=4$ ，有 0 - 15 共 16 項)。

m_j 係指使輸出變數邏輯值為 1 的每組輸入變數「積」(AND)的邏輯運算。

「和項之積」可寫成如下型式

$$Y_i = \prod_{j=0}^{2^\beta-1} m_j \dots\dots\dots$$

...(3)

(3)式中 Y_i 為一 n 個輸出變數所構成之($n*1$)矩陣，本例中 $n=4$ ，故 $i=1\sim 4$ 。

β 係指輸入變數的個數，本例中為 4，共有 16 項。

m_j 係指輸出變數 Y_i 其邏輯值為 0 所對應的輸入變數「或」(OR)的邏輯運算式。

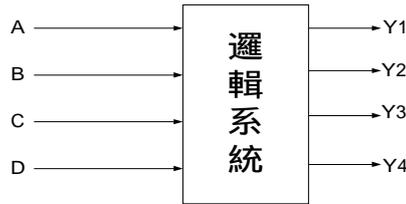


圖 11 4 個輸入變數 4 個輸出變數的邏輯系統

依(2-a)式及表 1 輸出變數真值表可分別寫出 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 輸出變數基本演算式

$$Y_1 = m_2 + m_8 + m_9 \dots\dots\dots$$

(4-a)

$$Y_2 = m_1 + m_4 + m_6 \dots\dots\dots$$

(4-b)

$$Y_3 = m_1 + m_8 + m_{10} \dots\dots\dots$$

(4-c)

$$Y_4 = m_2 + m_4 + m_5 \dots\dots\dots$$

(4-d)

以(4)式為例， m_1 、 m_2 、 m_4 、 m_5 、 m_6 、 m_8 、 m_9 、 m_{10} 所代表的每組輸入變數「積」(AND)的邏輯運算，因此表示如下：

$$m_1 = \overline{A} \cdot \overline{B} \cdot \overline{C} \cdot D \dots\dots\dots$$

...(5)

$$m_2 = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} \dots\dots\dots$$

....(6)

$$m_4 = \bar{A} \cdot B \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \dots\dots\dots$$

....(7)

$$m_5 = \bar{A} \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D \dots\dots\dots$$

....(8)

$$m_6 = \bar{A} \cdot B \cdot C \cdot \bar{D} \dots\dots\dots$$

....(9)

$$m_8 = A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot \bar{D} \dots\dots\dots$$

....(10)

$$m_9 = A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} \cdot D \dots\dots\dots$$

....(11)

$$m_{10} = A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} \dots\dots\dots$$

....(12)

將(5)~(12)式代入(4-a)式,以布林代數演算法則中卡諾圖(Karnaugh map)[2,3,4,5]可化至最簡式

$$Y_1 = \bar{B} \cdot (\bar{A} \cdot C \cdot \bar{D} + A \cdot \bar{C}) \dots\dots\dots$$

... (13)

同理依(4-b)、(4-c)、(4-d)之演算式可分別推演出 Y_2 、 Y_3 及 Y_4 之布林代數表示式

$$Y_2 = \bar{A} \cdot (\bar{B} \cdot \bar{C} \cdot D + B \cdot \bar{D}) \dots\dots\dots$$

... (14)

$$Y_3 = \bar{B} \cdot (\bar{A} \cdot \bar{C} \cdot D + A \cdot \bar{D}) \dots\dots\dots$$

.... (15)

$$Y_4 = \bar{A} \cdot (\bar{B} \cdot C \cdot \bar{D} + B \cdot \bar{C}) \dots\dots\dots$$

.. (16)

為避免演算錯誤,可將(13)~(16)式布林代數函數式輸入至 EXCEL 電子試算表顯現其輸出變數邏輯值與先前所制定之真值表加以比對。完全相符則表示演算無誤,如表 1 中欄位(6)所示。之後才分別將(13)~(16)式轉換成接點的邏輯電路於圖 12 所示,圖中已簡化層次以便轉換成可程式控制器階梯電路圖(須一只可程式控制器及四只繼電器)或傳統繼電器線路圖(須八只繼電器),如圖 13 所示。最後將上述階梯電路圖載入本製作所採用之直流可程式控制器(機型是台安電機 TP02)。

表 1 線控操作與方向控制所對應的輸入出真值表及其布林代數方程式檢驗

(1) 序號	(2) 輸入變數				(3) 方向控制	(4) 輸出變數 左馬達 右馬達				(5) 布林方程式				(6) 檢驗布林方程式			
	A	B	C	D		Y1	Y2	Y3	Y4	Y1	Y2	Y3	Y4	Y1	Y2	Y3	Y4
	0	0	0	0		0	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok
1	0	0	0	1	原地左轉	0	1	1	0	0	1	1	0	ok	ok	ok	ok
2	0	0	1	0	原地右轉	1	0	0	1	1	0	0	1	ok	ok	ok	ok
3	0	0	1	1	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
4	0	1	0	0	後退	0	1	0	1	0	1	0	1	ok	ok	ok	ok
5	0	1	0	1	左後退	0	0	0	1	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
6	0	1	1	0	右後退	0	1	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
7	0	1	1	1	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
8	1	0	0	0	前進	1	0	1	0	1	0	1	0	ok	ok	ok	ok
9	1	0	0	1	左前進	0	0	1	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
10	1	0	1	0	右前進	1	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
11	1	0	1	1	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
12	1	1	0	0	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
13	1	1	0	1	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
14	1	1	1	0	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok
15	1	1	1	1	停止	0	0	0	0	0	0	0	0	ok	ok	ok	ok

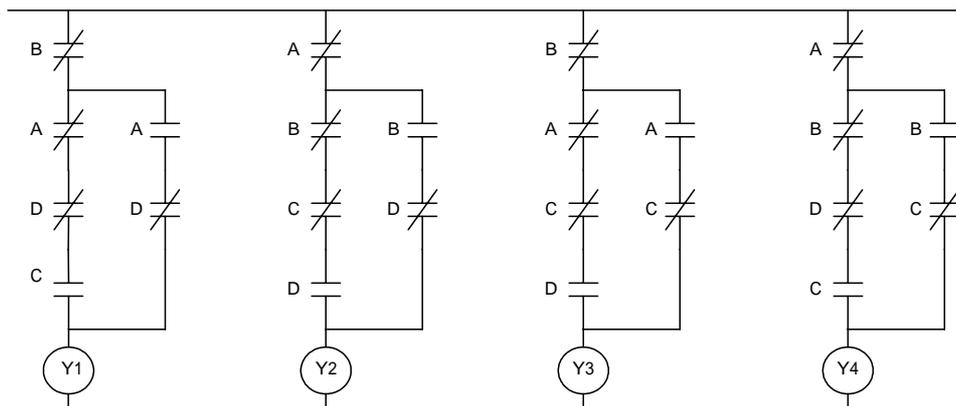


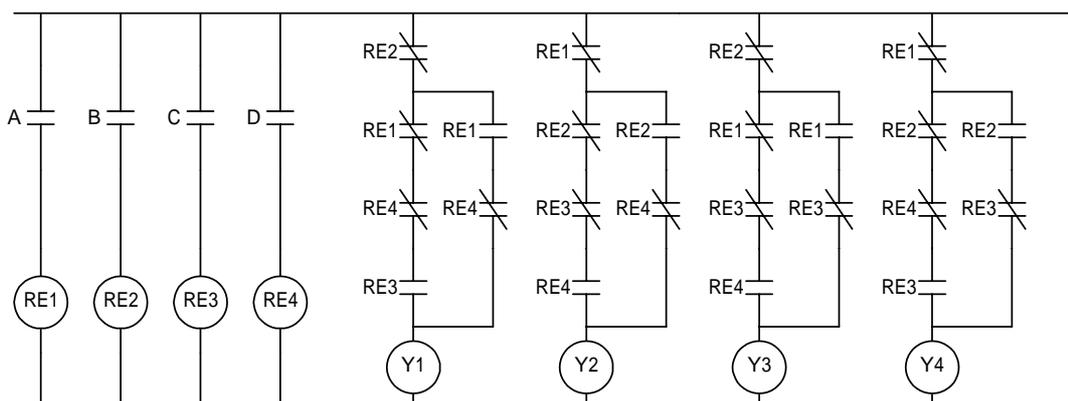
圖 12 邏輯演算法應用於接點邏輯電路的轉換

(五)、自走子車製作

子車其材質為鋁及壓克力板。首先製作底盤，切割鋁板為 22 * 11 * 2.5 cm，將馬達固定在鋁板上，採用 M10 螺桿作為車軸，用 10 mm 軸承座固定，車輪採用市售板車專用硬質輪胎，車軸與馬達以聯軸器傳動，再將鋁板與壓克力板結合，並於後方加裝一個惰輪。接著是用壓克力板

裁成 22 * 22 cm，在中間鑽 10 mm 孔，再切成三角形缺口，將驅動機構馬達固定在中央。最後再裁切一片壓克力板(22 * 22 cm)，仍在中間處鑽 10 mm 孔，再切成兩片三角形，利用熱熔膠將兩片三角形接合以形成一個滑槽，如圖 14 所示。

子車都是以 M6 螺桿作支撐並利用壓克力板將圓盆分為五個空間，如圖 14 所示，在圓盆中間鑽 6 mm 的孔，將長 14 cm 的傳動軸固定在，如此便完成釋放物件的機構。最後才把可程式控制器安裝上去，並將電路接好，組裝後即完成子車車體製作，如圖 15 所示。



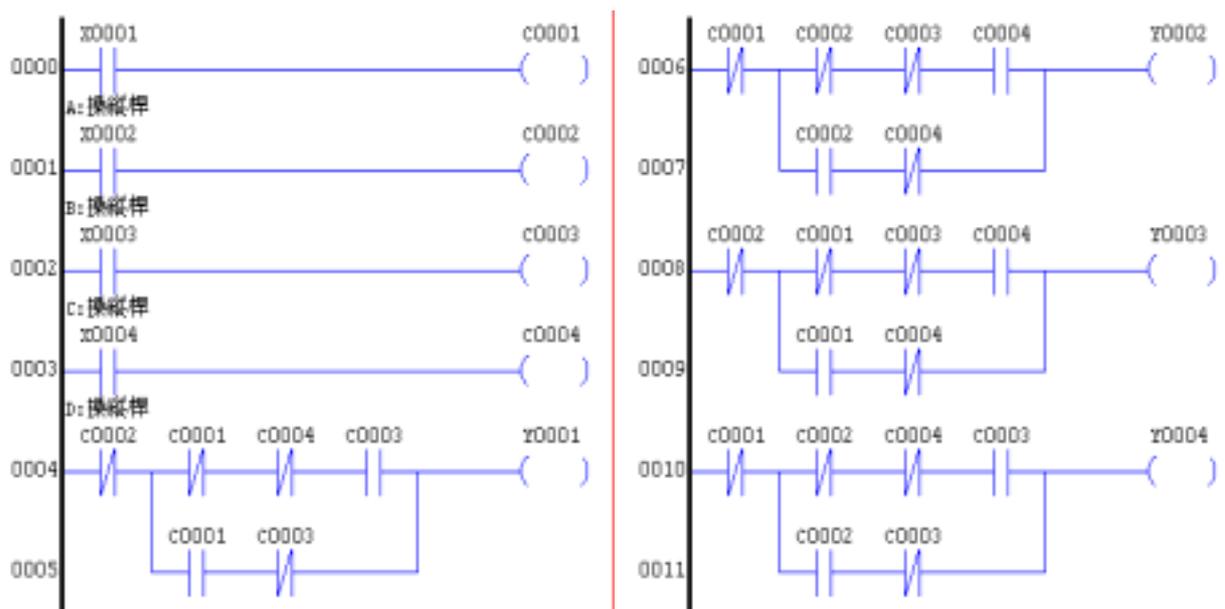
符號說明：

A~D：表示操縱桿四個方向前後左右控制的輸入接點，實際為極限開關。

RE1~RE4：為 A~D 四個輸入接點所對應的輔助繼電器規格是 MY-4N。

Y1~Y4：為分別控制左右馬達正反轉的輔助繼電器。

(a)轉換成傳統的繼電器迴路圖



(b)轉換成可程式控制器階梯電路圖

圖 13 布林代數演算法應用於接點電路圖轉換

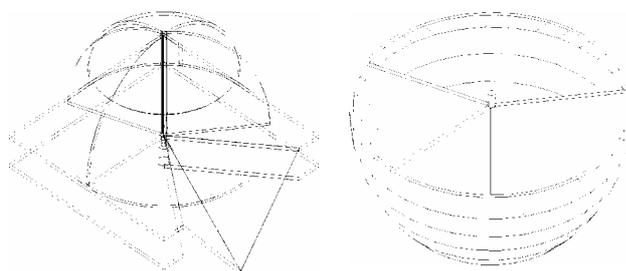
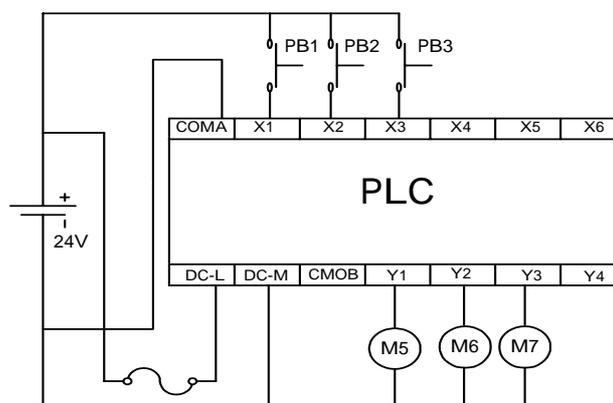


圖 14 子車釋放機構



圖 15 子車製作成品



PB1~PB3：分別是啟動與關閉程式、旋轉筒手動之按鈕輸入。

M5~M7：分別是子車左右馬達及旋轉筒馬達。

圖 16 自走子車外部電路圖

(六)、自走子車程式撰寫

子車控制策略是以時間序控的方式控制子車自走及機構作動。當母體到達對方防線後，線控觸發子車使其開始行走，並於沿途釋放物件於各標的區內。當子車放下最後一個物件後會作回防，去破壞對方所攻佔的物件。本製作子車的外部電路配置如圖 16 所示，而其可程式控制器的階梯電路如圖 17 所示。

(七)、功能測試修正

根據前述開始時的設計條件分成母體與子車行走部、取旗機構及排除障礙物的機構、子車旋轉筒機構四個部分進行功能測試及修正。以彈簧拉力計、光電轉速計、電子秤、馬錶、三用電表進行拉繩張力 T、馬達轉速、輪配重、時間、負載電流的量測，列成初始設計條件與測試後條件加以比對。最後為全程測試在 1：1 模擬場地進行。

1、母體與子車行走部

初始設計條件

母體與子車行走時的平均速度分別為 0.3、0.345 公尺/秒。車體總重 40 公斤，每輪配重 10

公斤，子車 5 公斤，每輪配重 1.67 公斤。母、子車馬達有載下驅動轉速至少為 47.7 及 94rpm 電流是 1.2A、0.38A。母體與子車於行走時地面摩擦所給予的反制力矩分別為 10、1.17kgf-cm。

測試後條件

母體與子車行走時的平均速度分別為 0.35、0.395 公尺/秒。車體總重 36.2 公斤，每輪配重 7.2~8.5 公斤，子車 4.7 公斤，每輪配重 1.75 公斤。馬達有載下驅動轉速為 53.5 及 107rpm，電流是 5.7、0.12A。母體與子車於行走時地面摩擦所給予的反制力矩為 8.64~10.2、1.225kgf-cm。

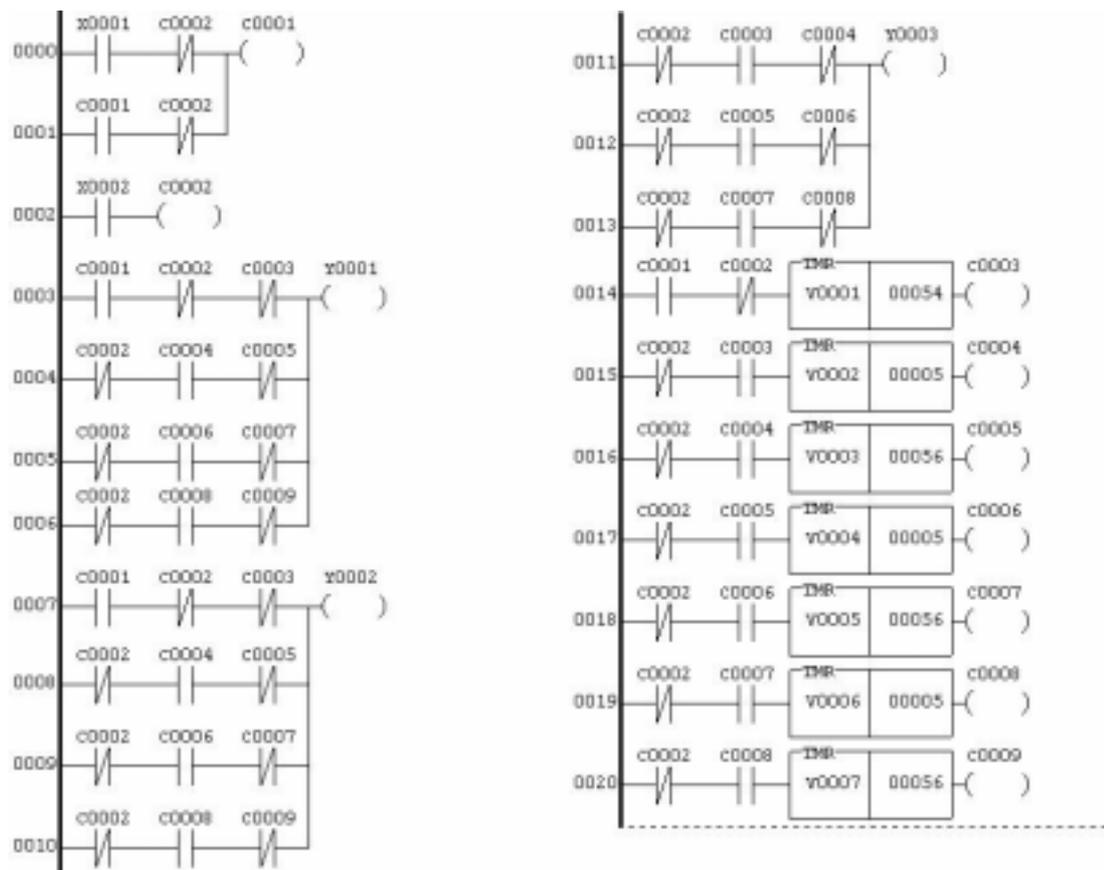


圖 17 自走子車可程式控制器階梯電路圖

2、取旗機構

初始設計條件

支架重 0.87kgw、重心位置在 1.04m 處。放下支架(含旗桿重)於水平位置時的拉繩張力 $T=5.86\text{kgw}$ 。支架旋轉角速率約 0.157 rad/sec 相當於驅動馬達之轉速 23rpm。當夾具要去夾旗時或放旗時，假設至少張開 9cm，計算出拉繩張力 T 至少 6.8kgw。而收繩速度 1.25cm/sec(相當於收繩長度 5cm 及時間 4 秒、馬達轉速 43rpm)。

測試後條件

支架重 0.92kgw、重心位置在 0.937m 處。放下支架(含旗桿重)於水平位置靜止時的拉繩張力 $T=4.5$

，拉起時則為 6.9kgw。支架旋轉角速率約 0.157 rad/sec。當夾具要去夾旗時或放旗時，至少張開

9cm，量出拉繩張力 T 為 6.6kgw。而收繩速度 1cm/sec(相當於收繩長度 4cm 及時間 4 秒、馬達轉速 31.8rpm)。

3、排除障礙物的機構

初始設計條件

支架重 0.7kgw、重心位置在 0.4m 處。該支架(含障礙物重)放至水平位置時的拉繩張力 $T=3.54\text{kgw}$ 。支架旋轉角速率約 0.157 rad/sec，相當於驅動馬達轉速 19.2rpm。當夾具要去夾障礙物時或釋放障礙物時，假設至少張開 30cm，則彈簧維持原長 19cm，拉繩張力 $T=0$ 。該夾具夾緊障礙物時張開 10.5cm，彈簧之彈性係數(設為 0.1kg/cm)伸長 8.5cm，計算出拉繩張力 T 至少 4.59kgw。而收繩速度 1.5cm/sec(相當於收繩長度 12cm 及時間 8 秒、馬達轉速 47.7rpm)。

測試後條件

支架重 0.79kgw、重心位置在 0.42m 處。該支架(含障礙物重)放至水平位置靜止時的拉繩張力 $T=3\text{kgw}$ ，拉起時則為 6.2kgw。支架旋轉角速率約 0.234 rad/sec，相當於驅動馬達轉速 26.2rpm。該夾具夾緊障礙物時張開 10.5cm，量出拉繩張力 T 為 5.5kgw。而收繩速度 1.6m/sec(相當於收繩長度 13cm 及時間 8.1 秒、馬達轉速 51rpm)。

4、子車中旋轉筒的運動

初始設計條件

旋轉筒之旋轉速 ω 為 2.51(rad/sec)即至少 24rpm。

測試後條件

旋轉筒之旋轉速 ω 為 2.83(rad/sec)為 27rpm。

5、實地測試

依競賽場地條件先模擬製作 1:1 之實體，如圖 17(a)、(b)為製作好之機器人進行排除障礙物取旗及釋放子車操作測試情形。



(a)排除障礙物及取旗



(b)釋放下子車操作

圖 18 製作好之機器人進行排除障礙物取旗及釋放下子車之操作測試

三、結果與討論

本製作完成之線控機器人總重量 36.2kgw, 比預計少 3.8kgw, 由於四台子車設計成惰輪著地, 因此實際母體對地重量為 31.2kgw。表 2、3、4 所示分別是母體與子車行走部、取旗及排除障礙的機構這三部分的測試結果與初始設計條件的對照表, 其顯示測試後的條件大致能符合初始的設計條件, 除了母車與夾旗機構馬達顯得略小外, 其餘依先前動力計算所選用之直流馬達規格均符合實際需求。

母車馬達空載轉速 87rpm, 有載時下降為 53.5rpm, 負載電流 5.7A, 其機械負載達額定值 10kgf-cm, 以致轉速下降, 輸出轉矩必須增加以應付外加之機械負載, 因此負載電流增大。這是當初受限於現貨因素下使得原本計算所需之馬達功率為 11.77w, 而不得不選擇 13w 的規格, 就顯得安全係數不足。同理夾旗機構的馬達也是如此。

表 2、母體與子車行走部的測試結果與初始設計條件的對照表

條件	母車					子車				
	平均速 (m/s)	重量 (kgw)	轉速 (rpm)	輪配重 (kgw)	反制 力矩 (kgf-cm)	平均速 (m/s)	重量 (kgw)	輪配重 (kgw)	轉速 (rpm)	反制 力矩 (kgf-cm)
初始設計	0.3	40	47.7	10	10	0.345	5	1.67	94	1.17
測試後	0.35	36.2	53.5	7.2-8.2	8.64-10.2	0.395	4.7	1.75	107	1.225
馬達規格	空載轉速 87rpm、轉矩 10kgf-cm DC24V、1.2A、13W					空載轉速 102rpm、轉矩 3.1kgf-cm DC24V、0.38A、4.5W				

表 3 取旗機構的測試結果與初始設計條件的對照表

條件	支架					夾旗機構			
	重量 (kgw)	重心 (m)	拉繩 張力 (kgw)	旋轉角速率 (rad/s) 轉速(rpm)	反制 力矩 (kgf-cm)	拉繩張力 (kgw)	反制 力矩 (kgf-cm)	轉速 (rpm)	收繩速度 (cm/s)
初始設計	0.87	1.04	5.86	0.157、23	7.32	6.8	1.77	43	1.25
測試後	0.92	0.937	4.5 6.9	0.157、22.5	5.625 8.625	6.6	1.71	31.8	1
馬達規格	空載轉速 22rpm、轉矩 10kgf-cm DC24V、0.65A、7.2W					空載轉速 43rpm、轉矩 1.8kgf-cm DC24V、0.14A、1.4W			

表 4 排除障礙物的機構的測試結果與初始設計條件的對照表

條件	支架					夾障礙物機構			
	重量 (kgw)	重心 (m)	拉繩 張力 (kgw)	旋轉角速率 (rad/s) 轉速(rpm)	反制 力矩 (kgf-cm)	拉繩張力 (kgw)	反制 力矩 (kgf-cm)	轉速 (rpm)	收繩速度 (cm/s)
初始設計	0.7	0.4	3.54	0.157、23	4.43	4.59	1.2	47.7	1.5
測試後	0.79	0.42	3 6.2	0.234、26.2	3.75 7.75	5.5	1.43	51	1.6
馬達規格	空載轉速 22rpm、轉矩 10kgf-cm DC24V、0.65A、7.2W					空載轉速 48rpm、轉矩 3.6kgf-cm DC24V、0.28A、3W			

四、結論與建議

本製作各部份在事先均由構想繪圖並利用 ADAMS 與 Auto CAD 軟體先繪出虛擬模型再模擬分析，判斷其可行性後，根據場地、重量及尺寸等限制條件，假設機構運動中各種條件、計算出完成動作所需動力，由廠商型錄[6]中找出匹配之元件規格。因此在製作測試與改進過程中修正幅度很少也較為順利[7]。

在線控電路方面本製作採布林代數演算法觀念推演可程式控制器之階梯電路圖並將布林代數表示式運算至最簡，再與傳統繼電器迴路的線路邏輯混合，減少了繼電器數目及線路數，並解決開關之間互動與互鎖電路難懂部分。此外該演算法可配合 EXCELL 電子試算表中邏輯函數功能作到列式、運算及檢驗，此方式對於順序控制課程極具教學意義。

在配線方面以修整線路、元件配置、少線為主、短線操作為原則，並使用電纜及其接頭與壓接端子作到整齊美觀。此外各負載電流的計算相當重要，此影響到導線線徑與保險絲規格選擇，使在競賽中不致因電線過載而短路或元件過載燒毀。

因機構或者是連桿間若干變數只能預估假設(例如連桿間接合點之摩擦力矩、滑動摩擦係數、致動器與機構間的傳動效率等)因此元件規格的決定必須選比設計的計算值至少高 20% 以上。

本製作應用了一些物理觀念、簡單機構運動原理設計與驅動動力選用計算(如聯軸器、彈簧及直流馬達等)[1]與順序控制的方法(如順序控制之邏輯運算與資訊及信號變換等)[8]具有教學上的實例意義。然而就競賽勝利而言採氣壓方式是較易掌握與控制。本製作之行走速度仍過慢以致還未出城時，就被對手堵住出口而敗陣。一開始的時間策略是個錯誤決定，就競賽勝利而言快速移動才是致勝關鍵，此獲得一慘痛經驗。

誌謝

感謝財團法人 TDK 文教基金會贊助及教育部與雲林科技大學主辦本次活動，使本製作得以完成並學習到機器人製作所應用到的相關知識、經驗、經費、進度與團隊分工合作的掌控。

參考文獻

- 1、郭興家、邱弘興(1997)，機電整合，第 93-102, 107-114, 127-147 頁，高立圖書有限公司，台

北。

- 2、 Rosen, Kenneth H.(1999),“Discrete Mathematics and Its Applications”, 4th edition, WCB/McGraw-Hill Co., pp.593-617, Singapore.
- 3、 Norris, Fletcher R.(1994), “Discrete Structures: an introduction to mathematics for computer science”, Prentice Hall Inc., pp.109-133, New Jersey.
- 4、 張康，張茂盛(1997)，離散數學，第 271-311 頁，東華書局，台北。
- 5、 童景賢，陳育堂，藍天雄(1997)，自動控制概論，第 20-24 頁，全威圖書有限公司，台北。
- 6 Japan Servo Co.,LTD. (2000), DC Small Motors “DME Series” Catalog, pp.6-27, Long-Goung Co, Taipei.
- 7、 周立強，游哲銘，洪英傑，林岳迪(2000)，「線控機器人之製作」，第三屆全國技專院校創思設計與製作競賽技術論文集，第 43-48 頁。
- 8、 楊水枝(1992)，自動控制，第 31-62，73-79 頁，正文書局，台北。

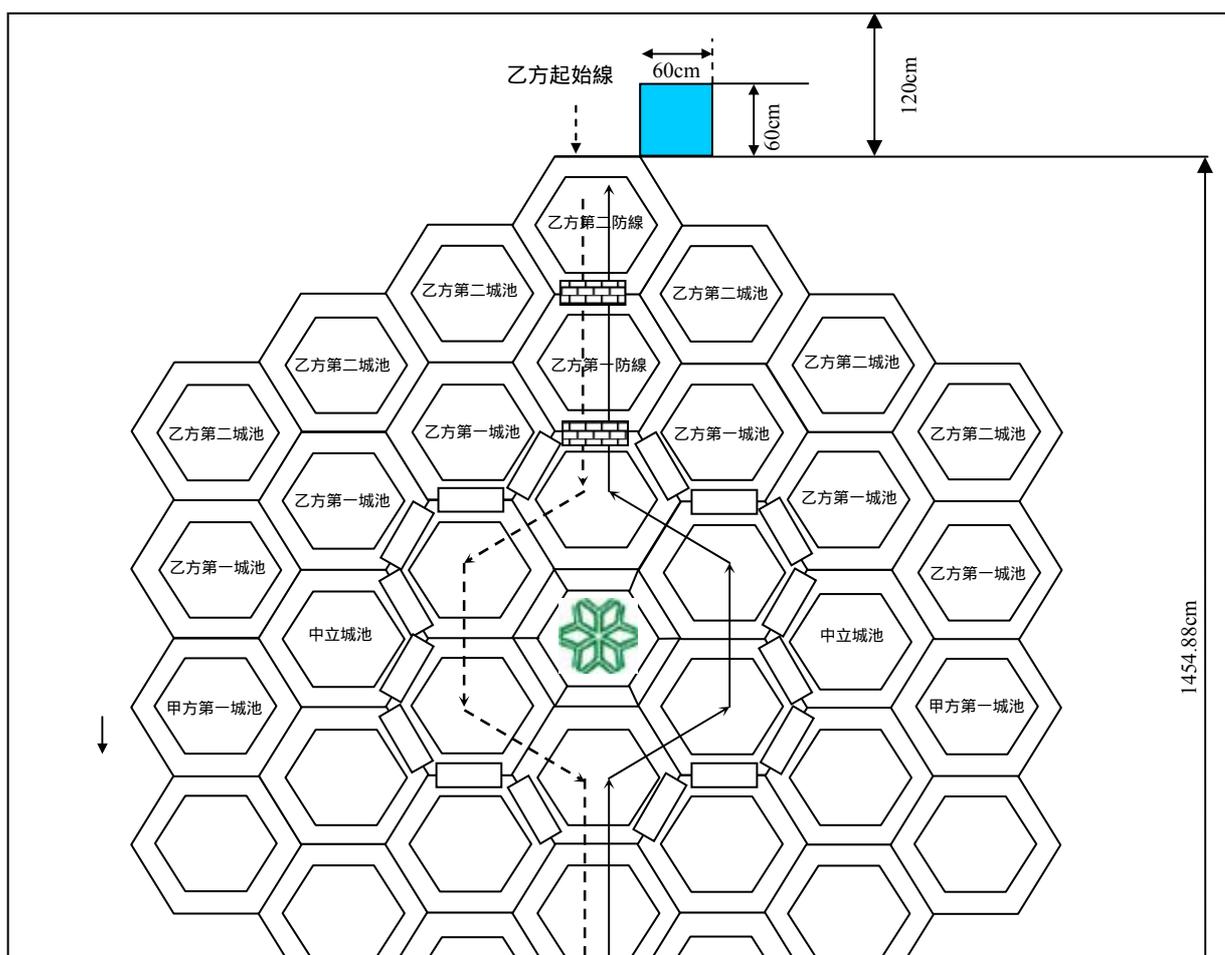
附錄

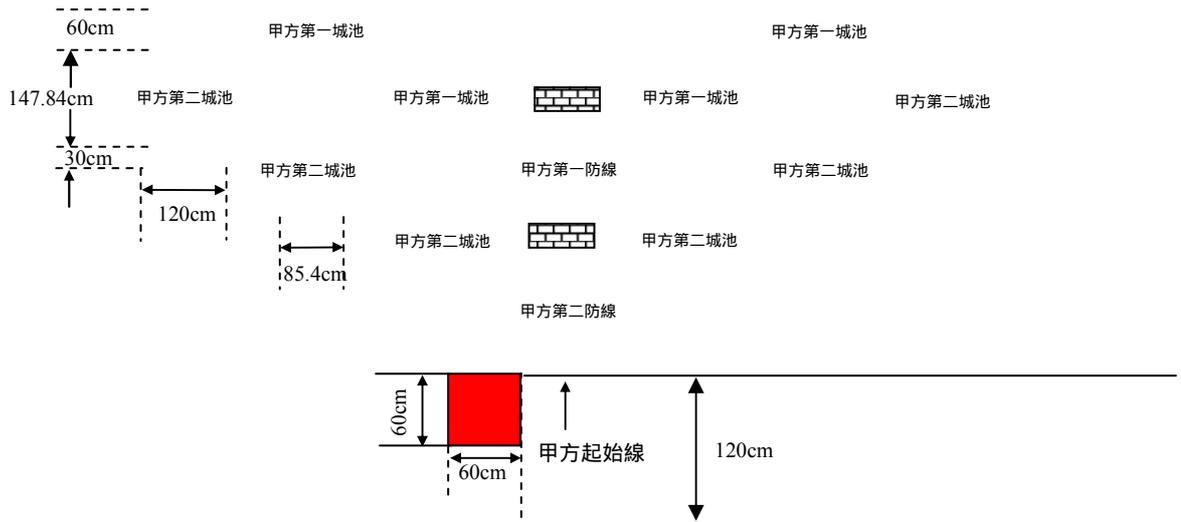
第四屆全國技專院校創思設計與製作競賽四技及二技組規則

以我國古典小說「三國演義」為主題背景，結合現代科技的競賽，期能融入中國傳統文化，更能啟發學生創意，並以蜂巢狀圖案代表三國時期，因戰亂而呈現千瘡百孔的中國大地。

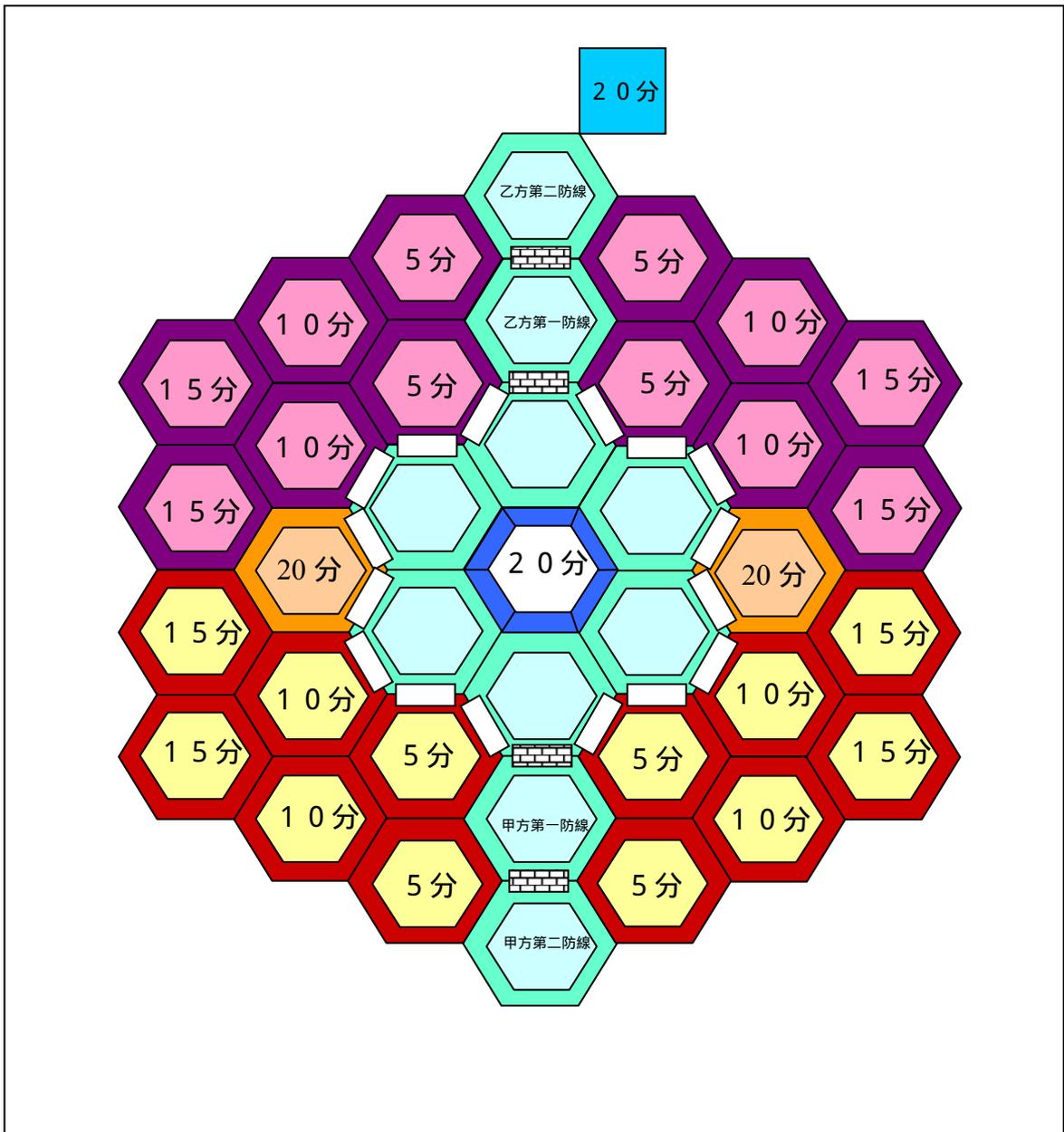
一、競賽規則

1. 場地佈置圖(如圖一)尺寸標註於上。





圖一(a) 四技及二技場地佈置圖



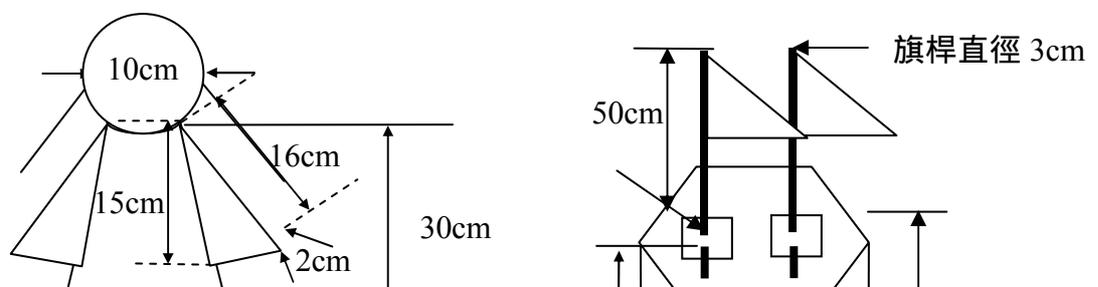
20分

圖一(b) 四技及二技場地配分圖

- 六角形蜂巢的外組織單元，其邊線上部分置放阻擋機器人前進的障礙物兩塊（開賽時），為邊長 30 公分×寬 30 公分×高 10 公分的長方體，位於前進路線上的，稱為泡棉障礙物，位於其他邊線上的，稱為木質屏障物，(如圖二)。
- 機械人必須依照規定的前進路線前進（如圖一），且不可壓到非前進路線上的蜂巢組織單元(不可超過綠色色帶範圍)，實線為甲方行進路線，虛線為乙方行進路線，否則一概不予記分。
- 機器三國人物的攻略，必須利用抓取方式，將前進路徑上位於蜂巢之外組織單元邊線上的高硬度泡棉障礙物清除，並放置在行進路徑上的任何地方，機器人始能前進攻入下一個蜂巢組織單元(其中所有障礙物皆必須抓離地面，以裁判可判斷的高度為標準)。而被重行置放的障礙物，可用來阻擋敵方的前進。
- 機械人不得推離綠色色帶邊線上的木質屏障物，否則必需扣分。
- 機械人最多可攜帶 25 件物件(以下“物件”概稱為士兵)從起始點走至中央的烽火台後，利用機械手臂把代表己方的旗幟由烽火台中取出，然後繼續依照行進路徑前進，不得後退，不然視同犯規（若只在同一單格內前進後退轉向不算犯規）。
- 當機械人進入標示為敵方防線的六角形蜂巢組織單元後，雙方才可開始各派士兵攻佔敵方城池(物件樣式不限，但需脫離機械人本體，以自身的動力，不拘任何方式攻佔對方城池，亦即不可用線控或無線方式控制士兵)，士兵整體皆必須著位於蜂巢內組織單元中，不可壓到蜂巢內組織單元的邊線，否則不予記分。
- 機械人進入敵方第一防線內只可攻佔敵方第一城池，不可越級攻佔敵方第二城池，否則不予計分，中立城池除外。（備註：第一防線士兵請標明 1，第二防線士兵請標明 2。）
- 機械人未在標示為敵方防線的六角形蜂巢組織單元內，即進行攻佔敵方城池之動作時，不予記分。
- 攻佔敵方城池後，需穩定在蜂巢內組織單元中，且每位士兵的垂直高度皆要高於 10 公分，不可壓到蜂巢內組織單元的邊線。
- 每個攻佔城池至少置放一個士兵。
- 機械人最後在排除所有行進路徑上敵方所設的障礙物，並將己方旗幟放置在敵方平台架上，才算攻佔成功。
- 機器三國人物的防守動作，是將障礙物移至對手前進及攻佔的路徑中，以進行阻擋防守。
- 每場比賽限時 5 分鐘，時間終了，依參賽機器人奪取旗幟及攻佔城池的得分為評比標準，分數高者為優勝。
- 場地佈置圖一中  代表障礙物  代表屏障物。

二、注意事項

- (一) 機器人出發時之重量不得大於 40 kg。
- (二) 伸展長度不可超過任何綠色範圍內的蜂巢。
- (三) 機器人本體的操控方式為線控。
- (四) 士兵(物件)出發後可自由變形，士兵的大小必須大於 10 公分高，小於蜂巢內組織單元。
- (五) 不得安裝或使用會破壞、污損競賽場地，或具危險性裝置。
- (六) 機器人一律使用電池，電池可以不直接安裝於機器人本體上。
- (七) 不可碰撞或惡意破壞對方機器人。



/

/

障礙物/屏障物

烽火台平台

圖二 四技及二技組競賽項目，障礙物/