線控機器人與自走子車製作

The Development of A Wire-Controlled Robot and Four Automated Guided Vehicles

東宜豪傑
周立強[1] 高易宏[2] 吳建昌[2]
[1]國立宜蘭技術學院農業機械工程系講師
[2]國立宜蘭技術學院農業機械工程系學生

摘要

線控機器人(以下簡稱母體)其製作主要是能完成排除與重置障礙、取旗與插旗、釋放自走子車(以下簡稱子車)等動作。母體與子車其行走部均採前輪驅動，後輪輔以惰輪。其上半部均以拉繩帶動連桿機構方式完成所要求動作。在母體線路控制方面爲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爲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與功能，顯示在製作過程中所運用的機電知識與創意思考是很有用的。

關鍵字：線控機器人、自走車、可程式控制器

Abstract

The objective of this paper was to develop a wire-controlled robot, in order to remove two obstacles, to release automated guided vehicles into the objective areas, to grasp a flag from a pedestal and insert it into another pedestal. In order to improve the accuracy of occupying the objective areas, each Automated Guided Vehicles (AGV) was equipped with one Programmable Logic Controller (PLC), The robot performed as expected and completed all required tasks.

Keywords：wire-controlled robot, Programmable Logic Controller , Automated Guided Vehicles

1. 前言

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」爲主題背景，要求設計製作出可以排除與重置障礙、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。

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(40 公斤以下)及相關尺寸條件的規定。

2. 材料與方法

本製作主要分成競賽規則與策略討論、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：

2.1 競賽規則與策略討論

由於競賽時間爲 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

長之 13.8 公尺(含回防距離)，因此定爲 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爲 0.3、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 公斤爲目標。

2.2 設計方向與元件規格的決定

2.2.1 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，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傳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 形鋁合金及壓克力爲主，達到質輕且機械強度足夠爲目標。

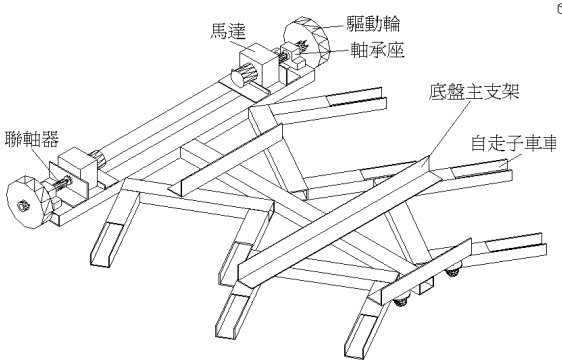


圖 1 線控機器人行走部之立體圖

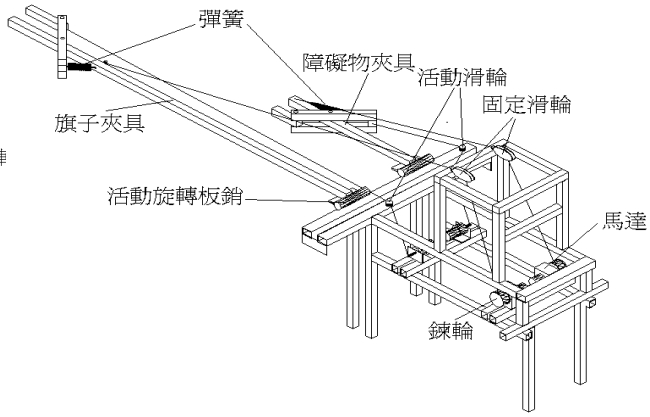


圖 2 線控機器人上半部機構之立體圖

2.2.2 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。爲簡化起見假設條件如下：

規定的重量限制在 40 公斤以下，故設車體總質量 40 公斤，子車爲 5 公斤。

I、行進速度以平均速度爲考慮，母體設爲 0.3 公尺/秒，子車爲 0.345 公尺/秒。

II、簡化爲以物體質心之運動，與地面摩擦爲滑動摩擦(此值會高於實際輪子與地面滾動摩擦)而選用同材質地面及輪子其滑動摩擦係數約爲 0.2。

III、母體爲 4 輪，子車爲 3 輪，假設每輪配重爲 10 公斤重及 1.67 公斤重。

IV、S 爲行走距離，母體及子車分別是 18 與 13.8 公尺。

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

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爲 23.6(瓦

特)，驅動輪兩只馬達各需至少 11.8(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爲 3.4(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爲 47.7 及 94(rpm)。接著由公式 $\tau = \mu N r$ ，r 爲輪徑，可推求出母體與子車行走時地面摩擦所給予的反制力矩 τ 爲 10 及 1.2(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，母體選用型號 DME60S6HP&6H 輸出 13watt，減速比 50，空載下轉速爲 87rpm，電流 1.2A、輸出轉矩 10kgf.cm，聯軸器爲型號 po90-1B，15 kgf.cm，最大瞬間可承受 108 kgf.cm 。子車選用型號 DME34B6HP&6H 輸出 4.5watt，減速比 36，空載下轉速爲 102rpm，電流 0.38A、輸出轉矩 3.1kgf.cm，聯軸器爲型號 pk80-3，3 kgf.cm，最大瞬間可承受 9 kgf.cm 。

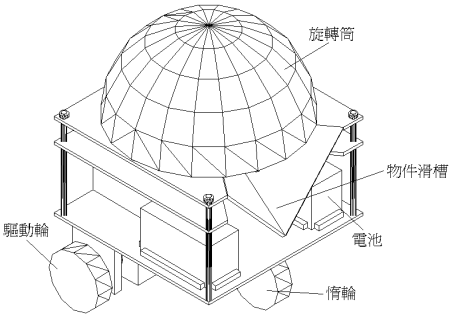


圖 3 線控機器人自走子車之立體圖

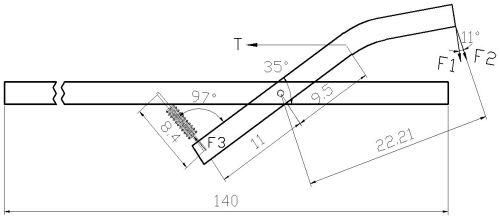


圖 4 取旗機構在夾旗桿時之自由體圖

(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

本製作由圖 1 所示之取旗機構的尺寸及方口鋁材質、螺栓、彈簧重、海綿求得支架重 0.87kgw(重心 91.5cm)、已知旗桿重 0.35kgw、算出重心位置在 1.04m 處。由該支架自由體圖計算出拉繩張力 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。如圖 1 所示該支桿可內收旋轉 90 度預估 10 秒(角速率約 0.157 rad/sec)，以 AUTO CAD 模擬收繩量 60cm，相當於馬達轉 3.82 圈、23rpm。因此放下機構的馬達規格選用 DME38B6HP&6H 型號輸出 7.2w、減速比 225、22rpm 及 10kgf-cm。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 爲 0，可得正向力 F1=0.49kgw。如圖 4 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爲 0.4，得正向力 F1 至少要 0.875kgw，此時彈簧伸長爲 8.4cm(伸長量 2.4cm) ，計算出彈簧拉力 F3 至少 2.4kgw，依力平衡方式，如此可得正向力 F1=1.2kgw>0.875， 則此時拉繩張力 T 仍爲 0。當夾具要去夾旗時或放旗時，假設至少張開 9cm，彈簧伸長爲 10cm(伸長量 4cm)則 F3=4kgw，可計算出拉繩張力 T 至少 6.8kgw，此一張力對馬達傳動軸(φ6mm)形成反制力矩 1.8 kgf-cm。以 AUTO CAD 模擬出收繩量 5cm，相當於馬達轉 2.65 圈(預估 4 秒)、40rpm。因此傳動夾具機構的馬達規格選用 DME34S37G 型號輸出 1.4w、減速比 76、43rpm 及 1.8kgf-cm。

II、排除障礙物的機構部分

仍根據圖 1 所示之排除障礙機構，計算出支架重 0.7kgw(重心 29.3cm)。已知障礙物重 0.8kgw、算出重心位置在 0.4m 處。由該支架自由體圖計算出拉繩張力 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。由於該機構旋轉 90 度預估 10 秒(角速率約 0.157 rad/sec)，以 AUTO CAD 模擬收繩量 50cm，相當於馬達轉 3.2 圈、19.2rpm。因此放下機構的馬達規格選用 DME38B6HP&6H 型號輸出 7.2w、減速比 225、22rpm 及 10kgf-cm。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 所示，該夾具夾緊障礙物時張開 10.5cm(障礙物直徑 7.5cm、兩側海綿各 1.5cm)，障礙物重 0.8kgw，設海綿摩擦係數 0.4，可得正向力 F1 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 爲彈簧之彈性係數(設爲 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 型號輸出 3w、減速比 76、48rpm 及 3.6kgf-cm。

(3)子車傳動旋轉筒的馬達決定

旋轉筒分成 5 格每格佔 72°，時間設爲 0.5 秒轉一格釋放物件，因此旋轉速 ω 爲 2.51(rad/sec)即 24rpm，以旋轉動能 $J=0.5I\omega^2$ 公式，其中 I 爲旋轉筒轉動慣量 0.0061kg-m^2，得到 0.0192(焦耳)，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、25rpm 及 1.3kgf-cm，聯軸器爲型號 po10-11，2 kgf.cm，最大瞬間可承受 18 kgf.cm 。

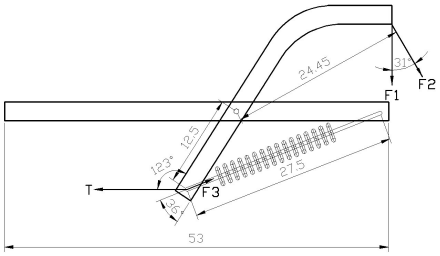


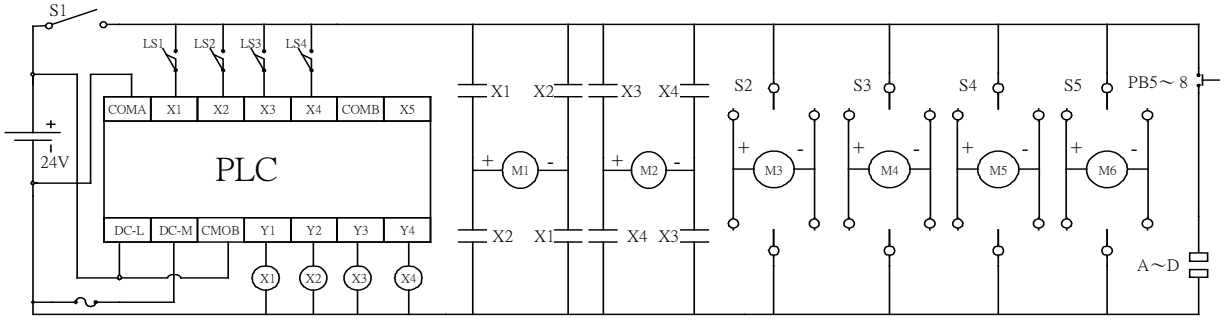
圖 5 夾取或釋放障礙物時之自由體圖

2.3 底盤、車架與上半部機構製作

母體製作分爲底盤與上半部機構，其材質均爲鋁板、方口鋁、L 型鋁、ㄇ型鋁。先從底盤開始，切割鋁板其尺寸爲 65＊11 ＊1.5 ㎝ ，將馬達固定於鋁板上。用 M12 螺絲作爲車軸，再用工程塑膠所車製之軸承座(φ6 ㎜)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。

2.4 線控電路設計規劃配置

在線路控制方面採可程式控制器與傳統繼電器迴路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，此外按鈕開關爲觸發自走子車。圖 6 所示則爲本製作之線控電路圖。由於操縱桿具前後左右四個位置的極限開關相當靈敏，爲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電路，最後完成可程式控制器的階梯電路圖(如圖 7 所示)在線上作控制。



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。

2.5 自走子車製作

子車其材質爲鋁及壓克力板，首先製作底盤，切割鋁板爲 22＊11 ＊2.5 ㎝ ，將馬達固定在鋁板上，採用 M10 螺絲作爲車軸，用φ10 ㎜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，如此子車底盤製作完成。接著是用壓克力板裁成 22＊22 ㎝，在中間鑽φ10 ㎜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 ㎝)，仍在中間處鑽φ10 ㎜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。子車都是以 M6 螺絲作支撐並利用壓克力板將圓盆分爲五個空間，在圓盆中間鑽φ6 ㎜的孔，將長 14 ㎝的傳動軸固定在此孔上，如此便完成釋放物件的機構。

2.6 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，子車會作回防，去破壞對方所攻佔的物件。而其可程式控制器的階梯電路圖可參閱文獻[1]。

2.7 功能測試

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。最後全程測試在 1：1 模擬場地進行。如圖 8 爲進行排除障礙物取旗及釋放子車操作測試情形。

圖 7 轉換成可程式控制器階梯電路圖

圖 8 進行排除障礙物、取旗及釋放子車操作測試

3. 結果與討論

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，因此實際車體對地重量爲 31.2kgw。表 1、2、3 所示分別是母體與子車行走部、取旗機構及排除障礙物機構這三部分的測試結果與初始設計條件的對照表，其顯示測試後的結果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。

表 1 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				
					反制力矩(kgf-cm)			輪配重(kgw)		反制力矩(kgf-cm)

初始設計	[illegible]				10	[illegible]		1.67		1.17
測試後	[illegible]				8.64-10.2	[illegible]		1.75		1.225
馬達規格	空載轉速 87rpm、轉矩 10kgf-cm					空載轉速 102rpm、轉矩 3.1kgf-cm				

表 2 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			
			拉繩張力(kgw)	旋轉角速率(rad/s)(rpm)	反制力矩(kgf-cm)	拉繩張力(kgw)	反制力矩(kgf-cm)		收繩速度(cm/s)
初始設計			5.86	0.157、23	7.32	6.8	1.77		1.25
測試後			4.56.9	0.157、22.5	5.6258.625	6.6	1.71		1
馬達規格	空載轉速 22rpm、轉矩 10kgf-cm					空載轉速 43rpm、轉矩 1.8kgf-cm			

表 3 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			
			拉繩張力(kgw)	旋轉角速率(rad/s)(rpm)	反制力矩(kgf-cm)	拉繩張力(kgw)	反制力矩(kgf-cm)		收繩速度(cm/s)
初始設計			3.54	0.157、23	4.43	4.59	1.2		1.5
測試後			36.2	0.234、26.2	3.757.75	5.5	1.43		1.6
馬達規格	空載轉速 22rpm、轉矩 10kgf-cm					空載轉速 48rpm、轉矩 3.6kgf-cm			

母車馬達空載轉速 87rpm，有載時下降爲 53.5rpm，負載電流 5.7A，而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爲 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 。子車中旋轉筒的運動其初始設計條件轉速 ω 爲 2.51(rad/sec)至少 24rpm，測試後 ω 爲 2.83(rad/sec)、27rpm。

4. 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 軟體先模擬繪出再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[2]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爲順利[3]。

在線控電路方面本製作採可程式控制器之階梯電路圖與傳統繼電器迴路的線路邏輯混合,減少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。在配線方面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、簡單機構原理與順序控制的方法[4]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。一開始的時間策略是個錯誤決定，以致車體之行走速度仍過慢，就競賽勝利而言快速移動才是致勝關鍵。

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. 高易宏、吳健昌，「線控機器人與自走子車製作 」，宜蘭技術學院農業機械系專題製作報告（2000）。
2. Japan Servo Co, LTD,「DC Small Motors “DME Series” Catalog 」，嶸鋼公司，台北（2000）。
3. 周立強、游哲銘、洪英傑、林岳迪，「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（2000）。
4. 曾賢壎，機電整合之順序控制（I），全威圖書有限公司，台北（1998）。