

Hanoi Tower-機械手臂結合圖形識別之應用

廖琬洲
朝陽科技大學資訊工程系
教授
hcliao@cyut.edu.tw

胡溢鑫 王富譽 王天佑 呂秉鎧
朝陽科技大學
資訊工程系

摘要

工業用機械手臂的運用越來越普遍，但是由於缺少視覺能力，使得手臂功能受到限制，因此，在本論文中將機械手臂結合圖形識別技術、來實現一個典型河內塔的積木移動，將移動路徑的解法轉換成手臂移動積木的步驟，完成對河內塔積木可以快速準確地從初始狀態移動到結束狀態。

系統運作分為四個步驟：運用圖形識別來取得積木初始狀態、運用遊戲樹找出解法路徑、將路徑轉換成手臂移動步驟、控制機械手臂移動積木。

因手臂預設的控制模式為單一的定點移動，缺乏效率，因此本論文進一步對手臂操控進行的優化包括：優化手臂的移動路徑、優化對機械手臂傳送資料模式、優化手臂移動速度及手臂接受指令的停頓時間。上面三個部份的優化加速比分別是 108%，231%與 135%，最終全部整合後的加速比達 338%。透過上述結果顯示，本論文確實達成整合機械手臂與圖形識別技術，實現預期目標。

關鍵詞：工業用機械手臂、圖形識別技術、樣本比對、遊戲樹

Abstract

Industrial robotic arms are widely used in many applications. However, the lack of vision limits the application domains. In this paper, an application is developed by combining the robotic arm and pattern recognition technique. The application is the well-known Hanoi tower. The steps for moving discs, i.e., blocks, are transformed to a series of commands for controlling the robotic arm. The blocks can be moved efficiently from the initial state to the final state for solving Hanoi tower.

The system consists of four phases: the recognition of the current state of blocks, the exploration of the game tree to find out the solution path, the transformation of solution path to commands, and the control of the robotic arm by sending commands.

The initial control mode of a robotic arm is based on a set of fixed points. It is inefficient since a short pause is needed between two

commands to wait for the finish of the previous command. Therefore, three improvements are made to the system, including the improvement of moving path, data transmission, the moving speed and pause time. The speedup of these three improvements are 108%, 231% and 135%, respectively. The overall speedup is 338%. The above results show that the system achieves the purpose the combination of the robotic arm and pattern recognition technique.

Keywords: industrial robotic arm, pattern recognition, template matching, game tree.

1. 簡介

工業機械手臂是近幾十年發展起來的一種高科技自動化生產設備，能模仿人類手臂的某些動作功能，用以按固定方式抓取、搬運物件或操作工具的自動操作裝置。它可代替人的繁重勞動以實現生產的機械化和自動化，能在有害環境下操作以保護人身安全，因而廣泛應用於機械製造、冶金、電子、輕工業和原子能等部門。它的特點是，可通過編程來完成各種預期的作業任務，在構造和性能上兼有人和機器各自的優點，尤其體現了人的智能和適應性，並有極高的精準度。

另外，隨著資訊科技的進步，資訊處理過程日趨複雜，應用範疇也與日俱增，使得影像處理需求增加。含有影像攝取鏡頭的硬體設備越來越多，並融入各種生產製造、商業行為甚至日常生活，不同應用的資訊系統漸漸倚靠自動化影像辨識技術，完成各種新的應用。透過電腦運算技術方法達到圖形的自動判讀的圖形識別（Pattern recognition）技術，與人工智慧之發展日趨密切。若要實現機械手臂的高度自動化操作，圖形識別也許將會成為不可或缺的一部分。因此在本論文中嘗試結合工業用機械手臂與圖形識別技術，來解決河內塔的搬移問題。

2. 系統概述

本系統使用三菱電機工業用機械手臂（MITSUBISHI ELECTRIC MELFA）精準，迅速的完成河內塔積木之移動，並結合圖形識別和路徑搜尋演算法，對河內塔積木進行定位，搜尋最短移動路徑並完成對積木的移動。而在搬移過程暫停手臂動作，接著人為改變積木擺

放位置或增減積木，系統都可以重新計算並繼續完成移動工作，實現一定程度的智慧化。

系統由攝影機，PC，手臂控制箱，機械手臂組成。首先由操作系統對攝影機下達指令，攝影機會回傳積木擺放狀態的影像，系統將計算出最短移動路徑，以及手臂的動作，並將這些資料傳送到手臂控制箱。手臂控制箱則會下達指令讓機械手臂開始移動積木，如圖 1 所示。



圖 1：系統示意圖

2. 系統實作

2.1 機械手臂連線方式

系統使用 TCP 的連線的方式控制機械手臂，通訊協定為 TCP/IP。需要先完成環境的設定(IP、連接埠)後連線才可以控制機械手臂。由 PC 端傳送指令(點位坐標，夾爪動作等)至控制箱，控制箱解讀訊號，轉換為 ACSII 編碼，再控制手臂工作。PC 亦可從控制箱讀取信息，例如手臂當前坐標。

2.2 圖形識別技術

本系統使用模版匹配(template matching)的圖形識別技術，利用攝影機取得的圖像來獲取積木的擺放狀態。圖 2 為模版匹配的的視窗，截取影像和對比樣板會在最左邊顯示出來，還可以選擇色彩空間和縮放因素。色彩空間可令擷取影像和對比樣板在二值圖像、灰階圖像、彩色圖像中選取，而縮放因數代表在所有方向上對樣板的縮放程度。縮放因數越小，匹配速度越高，但也需要源圖像中匹配目標與對比樣板的大小更加相近。

這裡一共使用了六種比對方法，分別是平方差匹配法，相關匹配法和相關係數匹配法，以及對他們做了歸一化處理。經過多次試驗，選定歸一化相關係數匹配法的進行匹配。

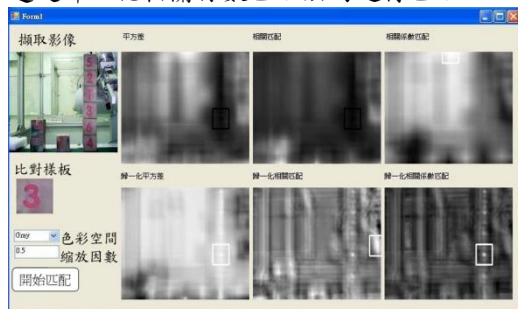


圖 2：模版匹配視窗

2.3 河內塔最短移動路徑搜尋

為了計算最短移動路徑，必須得到每個擺放狀態下一步所有可能的移動方式，這裡以圖 3 移動步驟樹狀圖表示之。開始是積木的初始擺放狀態，然後計算出下一步所有可能的移動方式，接著刪除重複出現的擺放狀態，以此類推，就會得到每一個擺放狀態所有可能的移動方式。通過這種方法，可以在樹狀圖中找出所有解開河內塔的步骤，並選出最短的路徑。

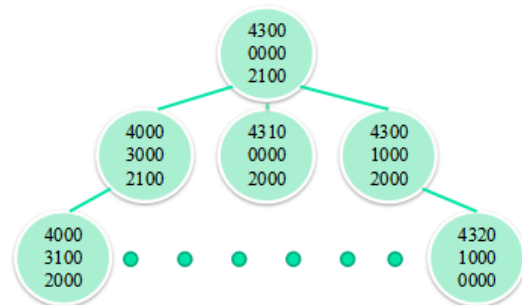


圖 3：移動步驟樹狀圖

河內塔積木的初始擺放位置分三種情況：積木依照大小順序擺放在第一排，如圖 4(a)；積木在符合遊戲規則的情況下隨意擺放，如圖 4(b)；積木不按遊戲規則任意擺放，如圖 4(c)，甚至缺少積木，如圖 4(d)。

系統先判斷積木是否缺少，若缺少積木，則先計算出積木數量 n ，再使積木數字由小到大分別用 $1-n$ 代替。如只有數字為 1、3、4、6 的積木，則分別用 1、2、3、4 代替，作為初始狀態資料的輸入。而步驟的產生仍用積木本身的數字。

無論積木如何擺放，依據上面的步驟，系統都可以搜尋出最短移動路徑，如圖 5 所示，輸入積木的擺放狀態，若該位置沒擺放積木，則用 0 表示。

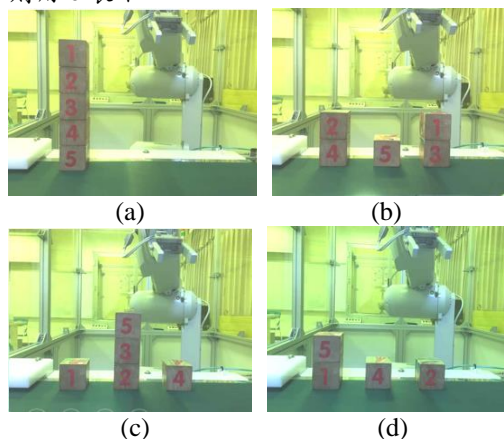
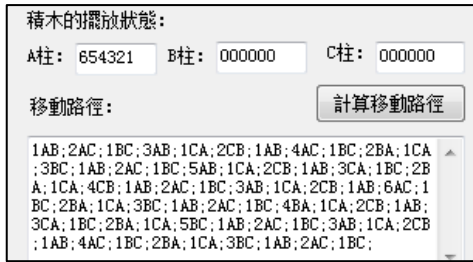
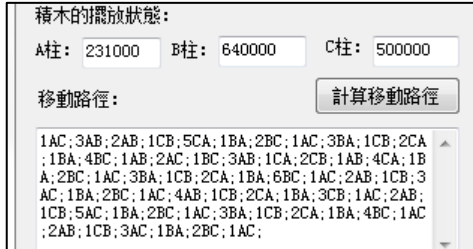


圖 4：四種可能的擺放狀況 (a)正常擺放的河內塔 (b)按遊戲規則隨意擺放的河內塔 (c)不按規則隨意擺放的河內塔 (d)不按規則隨意擺放，且缺少積木的河內塔



(a)



(b)

圖 5：搜尋解答路徑的實例 (a)正常擺放的路徑搜尋 (b)不按規則擺放的路徑搜尋

2.4 河內塔移動步驟計算

計算出最短移動路徑後，需要將其轉換為手臂移動的點位及夾爪的動作。先設定點位代號，如表 1.所示，一共 18 個點位。為了使移動路徑盡可能縮短，令個代號包括 1、2、3 號點位，分別代表手臂在該位置夾取積木的點位、手臂將積木抬起 3mm 的點位，手臂在積木正上方 5mm 的點位，令手臂正好越過積木。如圖 6 所示。

表 1：積木擺放位置代號

A 柱	B 柱	C 柱
P06	P12	P18
P05	P11	P17
P04	P10	P16
P03	P09	P15
P02	P08	P14
P01	P07	P13

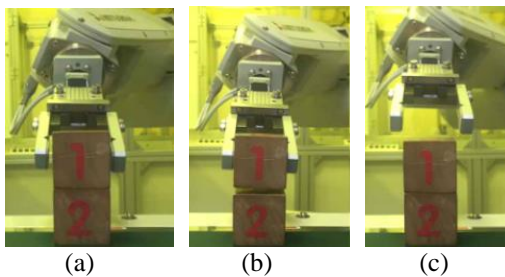


圖 6：(a)手臂夾取積木的點位 (b)夾取後上移的點位 (c)手臂正好越過積木的點位

令 1、2 號積木放在 A 柱，將 1 號積木移至 C 柱，其步驟為 1AC，轉換為具體點位應為：初始點位→P023→P021→P022→P142→P131，手臂移動過程如圖 7 所示。夾爪在 P021 關閉夾取積木，在 P131 張開，放下積木。手

臂完整動作為初始點位→P023→P021→夾爪 Close→P022→P142→P131→夾爪 Open。

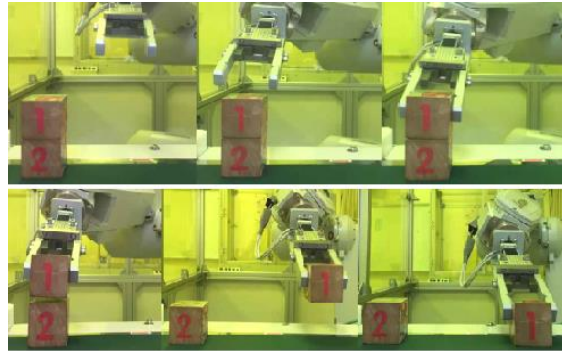


圖 7：手臂移動過程示意圖

系統將所有移動步驟轉換為手臂的點位及夾爪開關的動作 轉換的實例如圖 8 所示。



圖 8：點位轉換計算

3. 系統優化

3.1 原始系統的問題

原始系統是使用原本廠商提供之手臂操控工具所實作出來，這裡列出發現的問題：

- 移動路徑不是最短

為了避免手臂在移動過程中碰撞到其他積木，最初設定的移動方式為夾取積木後在垂直方向移動至該柱最高點，再進行水平方向移動，但是比較浪費時間。

- 傳送控制命令缺乏效率

因手臂預設的控制模式為單一的定點移動，缺乏效率。且手臂控制箱在控制手臂完成一次移動後，無法立即接收下一個指令，而需要進行短時間的停頓，這造成時間的延遲。

- 控制命令之間停頓時間過長

由於不確定每次命令送出並移動後所需要的停頓時間，因此將停頓時間取最大值，目

前設定為 1.8s。大多數情況下該停頓時間是過長的。

- **無法任意暫停手臂的動作**
手臂在移動時，控制箱無法接受任何訊息。只有通過緊急停止按鈕來暫停手臂的動作。

3.2 優化方法

為了提升原始系統的效能，因此嘗試從不同面向進行系統優化，優化的重點如下：

- **優化手臂的移動路徑**
判斷出移動路徑上最高的積木高度，使手臂水平移動時，可正好躍過移動路徑上積木，可縮短垂直方向的移動距離。
- **優化資料的傳送模式**
改變資料的傳送模式，一次傳送數個移動點位的資料，大幅縮短停頓時間。此方法需要改寫控制箱的程式，使用 Melfa Basic 語言進行實作。
- **優化手臂移動速度**
將機械手臂的移動速度由最初設定的 50% 提高至 100%。
- **優化手臂接受指令的停頓時間**
手臂在完成移動後需要一小段時間才能接受下個指令，這段時間稱為基礎工作時間，這裡將停頓時間進行優化。優化方式說明如下：

最理想的停頓時間=手臂移動所需時間(總路程/速度)+基礎工作時間，用於判斷何時下達手臂夾爪的開關指令。

這裡將三個點位之間的距離差值忽略，令豎直方向代號差為 1 時，手臂移動所需時間為 X，起始柱移動代號差值為 a，移動柱移動代號差值為 b，基礎工作時間為 N，水平方向每移動一柱所需時間為 Y，手臂接收資料之停頓時間為 T，T 可以由公式(1)來計算得知。

$$T = \begin{cases} (a+b) \times X + 2Y + N, & \text{Move from A to C} \\ \text{Move from C to A} \\ (a+b) \times X + Y + N, & \text{others} \end{cases} \quad (1)$$

透過實際量測得知 X=0.075s，Y=0.2s，N=0.75，這三個參數就會代入公式(1)中以計算出合適的停頓時間。

- 提高系統可操作性，加入中斷功能
利用執行緒，將移動指令分段傳送至控制箱。通過暫停執行緒來中斷手臂工作。

3.3 優化效果

這裡針對原始系統與優化後的系統進行實際移動時間的量測，發現移動路徑優化的加速比隨著積木數量的增加而降低，原因是隨著積木的增加，減少的距離占總移動距離的比例下降，如表 2.藍色折線。3 塊、4 塊、五塊積木時加速比分別為 116%、113%、108%。

速度及停頓時間優化的加速比隨著積木

數量的增加而上升，如表 2.綠色折線。3 塊、4 塊、五塊積木時加速比為 125%、131%、135%。

資料傳送模式優化的加速比最高，如表 2.紅色折線，由此可見基礎工作時間占工作耗時的比重相當高。3 塊、4 塊、五塊積木時加速比為 191%、210%、231%。

將所有優化方式結合后，加速比隨著積木數量的增加而上升，如表 2.紫色折線。3 塊、4 塊、五塊積木時加速比為 279%、311%、338%。由此可見。優化方式確實極大縮短了工作時間，提高了系統的工作效率。

表 2：優化方法效果比較

積木數量 優化方法	3	4	5
移動路徑	116%	113%	108%
資料傳送	191%	210%	231%
速度與停頓時間	125%	131%	135%
全部結合	279%	311%	338%

4. 結論

本論文中說明一個運用工業用機械手臂，並結合圖形識別技術的系統，可以自動解決河內塔的搬移問題，重要幾點結論如下：

- 本系統確實達成整合機械手臂與圖形識別技術，可以快速準確的搜尋出各種狀態的河內塔移動路徑并完成移動，實現系統的預期目標。
- 針對系統的缺陷進行優化改善后，工作時間明顯縮短，以五塊積木的河內塔為例，加速比達 338%，大幅度提高了系統的工作效率。
- 圖形識別技術，與人工智慧之發展日趨密切。若要實現機械手臂的高度自動化操作，圖形識別也許將會成為不可或缺的一部分。
- 在資訊技術不斷地提升其功能與應用領域的同時，一般使用者有相當多的需求卻尚未被有效的滿足，起因於使用者大都無法自行擴充來超越系統原先實作出來的功能範疇。本系統中所提出來的機械手臂結合圖形識別，針對使用者的需求，利用攝影機取代人的眼睛來做手臂操作，未來會持續將類似的設計概念應用到更多的使用者需求上。

5. 參考文獻

- [1] 王先榮，C# Match Template，Feb.2010，<http://www.cnblogs.com/xrwang/archive/2010/02/05/MatchTemplate.html>
- [2] 河內塔演算法，C++，from <http://openhome.cc/Gossip/AlgorithmGossip/HanoiTower.html>