創新三維氣壓針車機構平臺設計與分析之研究

林浩庭

摘要因服裝業與製鞋業廠商對產品生產自動化需求,本研究設計之創新三維氣壓針車機構平臺,目標為應用於自動 化縫紉生產製程上,將能使服裝業與鞋業廠商降低大幅人力及時間成本,在導入服裝廠與鞋廠全自動化上有很大的助 益。應用於布料自動化針車,將能立即降低產線勞力密集的情況,以提供新一代產線自動化針車技術,降低人力使用 量,提昇產品品質。此外,本研究將傳統的電動縫紉設備改以氣壓方式驅動,利用空氣之易取得性、乾淨、安全性等 優點,將壓縮空氣所具有之壓力能,作為氣壓三維針車機構平臺之用。此外,結合氣壓缸的設計,本研究設計之機構 平臺具有結構簡單、響應快與節能等特點。研究以 SOLIDWORKS 進行三維氣壓針車機構平臺設計,為了模擬人手縫 紉進料,本研究設計五支無桿式氣壓缸進行布料之縫紉。並進行自由度分析,得此平臺為3自由度的連桿機構。藉由 D-H 座標轉換(Denavit-Hartenberg Notation),分析系統平臺之運動學,先建立各桿件之座標,並求得各桿件間之 座標相對關係,以建立系統之順逆向運動學之解析解。再者設計運動平臺端點軌跡路徑,透過 MATLAB 與 SOLIDWORKS 軟體建立順逆向運動學方程,驗證所建構之三維氣壓針車機構平臺之可行性。本研究所開發之創新氣 壓針車機構平臺將可應用於智慧縫紉生產作業。

關鍵詞:氣壓系統、運動學分析、軌跡追蹤

Design and Analysis of a Novel 3D Pneumatic

Sewing Mechanism

Hao-Ting Lin

ABSTRACT Because the apparel industry and the footwear manufacturers have the product production automation demands, a novel three dimensional pneumatic sewing mechanism is designed and analyzed for the intelligent tailoring production system in this research. The large manpower costs and time costs in the apparel industry and the footwear manufacturers will be reduced. The developed three dimensional pneumatic sewing mechanism applied for cotton materials in the automatic tailoring production line can reduce crowded labor force situation immediately and provide a new generation of automatic sewing machine technology. In addition, instead of the traditional tailoring equipment operated electrically, the novel three dimensional pneumatic sewing mechanism is actuated by air force which is safe and easy to obtain. As a result, the developed three dimensional novel pneumatic sewing mechanism has the structure merits, cleanness, low cost, high security, high response and energy conservation.

The end-effector of the mechanism can achieve motions in the 3D space via the mechanism design theory through pneumatic actuators. By the Kutzbach-Gruebler' s formula, the mobility of the mechanism can be analyzed. The inverse kinematics and the forward kinematics of the mechanism analyzed by the D-H notation method, are in analytical forms. Simulation results show that the novel three dimensional pneumatic sewing mechanism is successfully verified the validity and effectiveness of the derived kinematic models via MATLAB

國立中興大學生物產業機電工程學系專任助理教授,通訊作者。Department of Bio-Industrial Mechatronics Engineering, National Chung Hsing University, 145 Xingda Rd., South Dist., Taichung City 402, Taiwan. Corresponding author, email: haotlin@nchu.edu.tw; Tel.: +886-4-22857564

and SOLIDWORKS. The novel pneumatic automatic sewing machine platform can be applied for the intelligent sewing production.

Keywords: Pneumatic System, Kinematics Analysis, Path Tracking

一、前言

在非剛性材料加工行業中·像鞋業、服裝業或汽車座 椅業·自動化製作程度仍然很低·因而大多為勞力加工· 且在已發展國家中·諸如:美國與歐洲·由於勞動人口的 成本相當高·使得大多數廠商皆將生產線轉移至工資低 廉的國家進行生產製造·例如大陸和東南亞甚至是印度 和非洲·對於需要勞力密集之產業·非常急需自動化方式 或機器人取代且已成趨勢·因而發展相關應用於鞋業、汽 車座椅製作業與服飾業等之機器人於智慧製造愈來越受 歡迎·從而大大降低歐美生產成本·部分製鞋業者藉此回 美國或德國設廠·如:Nike 和 Adidas。

目前高科技業的蓬勃發展,應用於半導體、製造業及 生醫等相關產業對於精密定位與快速驅動設備需求愈受 重視,有鑑於此,發展高精度與高響應之自動化製程設備, 將是目前產業迫切需要的。近年來的製造業進步突飛猛 進,不僅只是追求量的生產,更是講求高精度與高效率的 生產條件,而為達成這些目標,各大企業與日俱增的投入 機器人設備,取代過去傳統人力。現今主要以馬達系統作 為驅動單元投入在產業應用上,但此種致動器有組裝空 間上的限制,在進行多軸組裝須預留空間。由於氣壓驅動 為利用壓縮空氣所具有的壓力能,推動活塞轉換成動能, 作為各類型系統驅動之用,相較於馬達和液壓驅動,氣壓 系統的結構組裝簡單、取得乾淨、成本較低、安全性高、 易保養與高響應,因而大量應用於自動化系統、半導體、 光電製程設備與醫療器材設備等各種產業;然而,氣壓系 統本身具有許多缺點,如:高可壓縮性、剛性差、洩漏、 高非線性、伺服閥中立無感應區及零點漂移現象,造成氣 壓系統的控制增加難度。傳統氣壓系統多被應用於點對 點的順序控制上,隨著精密科技的快速進步,感測器整合 於系統設備,並加入閉迴路控制,提升氣壓系統的性能是 必須的。透過量測系統的偵測及擷取大量數據形成巨量 資料·以供控制單元分析與控制·將可大幅提升氣壓系統 的性能表現。

致動器(actuator)是一種能量轉換器,能將電能、氣 壓與音波等能量轉換成物理能,藉以帶動機構運動,一般 較為常見的致動器為電磁式馬達、氣壓致動器與液壓致

動器。氣壓驅動系統相比於其他系統在高速運行較不會 產生過大的熱與摩擦力,更適合用於高速的操作。隨著近 年科技的發展,氣壓控制也不斷突破,氣壓系統之非線性 等問題也逐漸被解決。1954年由 Shearer 提出氣壓系統 之非線性特性,至今已有不少學者建立氣壓系統完整的 非線性數學模型。1980年代,軟硬體技術逐漸成熟,實 際的氣壓系統伺服控制逐漸蓬勃發展。1984 年 Weston 等利用回授補償原理作控制,但未考慮干擾影響[13]。 1987 年 Noritsugu 利用 PID 及 PWM 改善速度及位置 控制[8, 9]。2002 年 Ning 與 Bone 使用 PVA(Position-Velocity-Acceleration)控制結合磨擦力補償,改善氣壓 系統定位之穩態誤差,其水平及垂直方向定位穩態誤差 皆可達到 10um[12]。2004 年 Somyot 與 Manukid 提 出以基因演算法為基礎結合 H-inf 控制於氣壓伺服系統, 實驗結果顯示能使系統穩定及好的強健性[6]·2004 年張 孝陽利用 PD 控制器搭配死區補償進行三軸伺服氣壓平 臺控制,定位精度可達 1um,並利用速度前饋式補償器, 改善直線追蹤效果[2]。2004 年 Chen 與 Hwang 使用 PD-Type ILC(Iterative Learning Control)法則進行 XY 氣壓平臺伺服控制,能追蹤特定軌跡並具有抗干擾的能 力[5]。2005 年鄭奇能將模糊滑動負載補償控制器控制不 同垂向負載下之氣壓缸伺服系統,控制定位精度可達 100nm 以内[4]。2005 年 Ning 等人提出一套氣壓伺服 非線性動態系統模型,包含氣壓缸動態方程、負載運動方 程、摩擦力及閥特性方程,實驗結果顯示此模型有能力預 測氣壓缸活塞的位置與氣壓缸氣室壓力[10]。2007年劉 淵銘將函數近似法之適應性滑動控制器控制三軸氣壓伺 服平臺,其定位精度可達 1um[3]。2012 年林浩庭將函 數近似法之適應性滑動模式結合 H-inf 控制器,成功應用 於氣壓三軸平行機構,並建立與實現軌跡追蹤於多軸平 行機構之控制[1]。2016 年 R. M. Robinson 等人將氣壓 應用於人工肌肉上,並配合適應性神經控制,在未知氣壓 系統及關節動力模型的情況下,可用適應性控制求出其 較完整、品質較好之模型,並花費較少時間運算[11]。

二、三維氣壓針車機構平臺設計

本研究採用封閉鏈設計方法,由五支-維運動之氣 壓缸,建立三維氣壓針車機構平臺,其縫紉針頭端點設計 為三自由度運動,以達縫紉布料曲面縫紉自動化。圖1為 三維氣壓針車機構平臺架構圖,包含下底座、無桿式氣壓 缸、桿件與車針頭等,其各軸行程分別為 X 軸行程為 500(mm),Y 軸行程為 200(mm),Z 軸行程為 500(mm), 主要考量為所設計之三維氣壓自動化針車平臺能自動縫 紉一般人鞋面布料與衣物布料。本研究利用無桿式氣壓 缸結構特性,易裝配與設計的優點作為考量。其無桿式氣 壓缸細部結構包含無桿式氣壓缸本體、緩衝器與光學尺 讀頭等。無桿式氣壓缸採串連方式作組合。在材料選擇上, 由於實驗機臺驅動源為氣壓系統,且必須考慮在進行實 際控制上,可能導致連桿變形,本研究採用鋁矩形材料, 以避免因重量影響控制誤差,且兼具桿件強度,達設計目 的之高響應、高精確之特性。



圖 1、三維氣壓針車機構平臺架構圖 Fig. 1 3D Pneumatic Sewing Mechanism scheme

三、三維氣壓針車機構平臺自由度分析

與運動學分析

本研究開發之三維氣壓針車機構平臺為三自由度空 間運動之機構機械劈平臺,可由機構自由度進行本平臺 機構總自由度分析,其數學式為[7]:

$$\text{DOF} = \lambda_F \times (\mathbf{n}_L - 1) - \sum_{i=1}^{J} c_i \tag{1}$$

 λ_{F} :機構運動空間之總自由度

n,:機構之總桿件數

 c_i :第i接頭的拘束度

j:機構的總接頭數

$$DOF = 6 \times (6-1) - [(3 \times 5) + (2 \times 6)] = 3$$
 (2)

因此·本研究開發之三維氣壓針車機構平臺之機構 總自由度為 3·由於針車平臺端點運動取決於無桿式氣壓 缸滑塊的位移變化量·換言之·想要得到針車平臺端點軌 跡運動情形·必須先得知滑塊位移變化量·因而採用逆向 運動學反推針車平臺端點軌跡變化之運動情形。逆向運 動學為已知每一桿件的長度與端點在工作空間的姿態, 求得每一滑塊的位移變化量·本系統之逆向運動學推導 採用 D-H 座標轉換法·求解整體運動學關係。D-H 座標 轉換法包含四個參數:桿長d、接頭轉角 θ 、扭轉角 α 及偏置量 *l* · 藉由此四個參數設定 · 以分析與描述本系統 的運動鏈關係 · D-H 座標轉換為表示兩座標系之間的齊 次轉換矩陣運算法則 · 即前一座標 $(X, Y, Z)_{n-1}$ 相對於後 一座標 $(X, Y, Z)_n$ 之齊次轉換矩陣 · 其數學式為

$${}^{n-1}T_{n} = Rot(z_{n-1},\theta_{n}) \times Trans(z_{n-1},l_{n}) \times Trans(x_{n},d_{n}) \times Rot(x_{n},\alpha_{n})$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_{n} & -\sin\theta_{n} \times \cos\alpha_{n} & \sin\theta_{n} \times \sin\alpha_{n} & d_{n} \times \cos\theta_{n} \\ \sin\theta_{n} & \cos\theta_{n} \times \cos\alpha_{n} & -\cos\theta_{n} \times \sin\alpha_{n} & d_{n} \times \sin\theta_{n} \\ 0 & \sin\alpha_{n} & \cos\alpha_{n} & l_{n} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(3)

其中 $^{n-1}T_n$ 為 $(X,Y,Z)_{n-1}$ 平面相對於 $(X,Y,Z)_n$ 平面之 座標間關係矩陣。

圖 2 為三維氣壓針車機構平臺之 D-H 座標表示示意 圖·本研究共建立 8 個座標平面·藉以分析三維氣壓針 車 機 構 平 臺 · 分 別 從 $P_0:(X_0,Y_0,Z_0)$ 至 $P_7:(X_7,Y_7,Z_7)$ 。表 1 為座標轉換參數數值表。表 2 為 本研究分析三維氣壓針車機構平臺之 D-H 座標間參數轉 換表·共建立 8 個座標間之轉換關係參數·其中 $l_1 \cdot l_2 \cdot l_3 \cdot l_4 \oplus l_5$ 為固定參數·屬針車機構平臺設計時之結構長 度· $L_1 \cdot L_2 \oplus L_3$ 為應變參數·為無桿式氣壓缸各別移載行 程·透過此三個參數達到三維氣壓針車機構平臺針頭端 點空間縫紉之情形。

因此三維氣壓針車機構平臺之逆向運動鏈數學式可 求得如下:

$$L_{1} = P_{z}7 + l_{3} \qquad (4)$$

$$L_{2} = l_{5} - P_{y}7 \qquad (5)$$

$$L_{3} = P_{x}7 + l_{1} - l_{2} + l_{4} \qquad (6)$$

其中 P_x 7, P_y 7, P_z 7為 P_7 平面之 X、Y 與 Z 之座標。反之· 三維氣壓針車機構平臺之順向運動鏈數學式可分析得如 下:

$$P_x 7 = L_3 - l_1 + l_2 - l_4$$
(7)

$$P_y 7 = l_5 - L_2$$
(8)

$$P_z 7 = L_1 - l_3$$
(9)



圖 2、三維氣壓針車機構平臺之 D-H 座標表示圖 Fig. 2 The coordinate frames of the 3D Pneumatic Sewing Mechanism

表1、座標間轉換參數數值表

Table 1 Coordinate relation values of the 3D Pneumatic Sewing Mechanism

		代表意義	單位(mm)	
固定參數	l_1	Z ₀	72.38	
	l_2	Z_2 軸與 Z_3 軸的位移	62.75	
	l_3	X_3 軸與 X_4 軸的位移	85.31	
	l_4	Z_5 軸與 Z_6 軸的位移	15	
	l_5	X_6 軸與 X_7 軸的位移	127	
應	<i>L</i> ₁ <i>Y</i> 軸的位移		-	
變	L_2	Z軸的位移	-	
參 數	L ₃	X軸的位移	-	

表 2、三維氣壓針車機構平臺座標轉換參數表

Table 2 Coordinate transformation parameters of the 3D Pneumatic Sewing Mechanism

	d	θ	l	α
$P_0 \rightarrow P_1$	- <i>l</i> ₁	0°	0	0°
$P_1 \rightarrow P_2$	0	0°	L ₁	-90°
$P_2 \rightarrow P_3$	l_2	0°	-L ₂	90°
$P_3 \rightarrow P_4$	0	0°	-l ₃	0°
$P_4 \rightarrow P_5$	L ₃	0°	0	90°
$P_5 \rightarrow P_6$	-l ₄	0°	0	0°
$P_6 \rightarrow P_7$	0	0°	-l ₅	-90°

四、軌跡規劃設計及分析

本研究於三維氣壓針車機構平臺軌跡規劃部分,設 計三維軌跡模擬曲線並進行 MATLAB 電腦數值分析模擬, 以驗證設計之機構平臺系統之可行性,同時確認所推導 與分析之順逆向運動方程之正確性。圖 3 為三維氣壓針 車機構平臺端點三維軌跡模擬曲線圖,共分四階段設計, 透過直線軌跡方程與圓軌跡方程的組合,建立空間三維 軌跡模擬曲線,總模擬時間為 20 秒,其四階段規劃過程 如下:

 $t \leq 4 \ secs$,

端點(X,Y,Z)由(0,0,0)到(100,0,100)

 $4 \sec s \le t \le 6 \sec s$,

端點(X,Y,Z)由(100,0,100)到(100,-200,100)

6 secs ≤ t ≤ 7 secs · 端點(X,Y,Z)由(100, -200,100)到(200, -200,100) 7 secs ≤ t ≤ 20 secs · 端點(x,y,z)由(200, -200,100)作半徑為 100mm 之圓軌跡

圖 4 為三維氣壓針車機構平臺端點圓軌跡之L₁、L₂ 與L₃運動學結果,圖 4 可看出並無斷點的產生,可得知 本系統機構的設計與運動學分析之可行性。圖 5 為三維 氣壓針車機構平臺空間三維軌跡模擬曲線模型分析圖, 透過此分析模擬圖可知,本研究所開發之三維氣壓針車 機構平臺可由L₁、L₂與L₃運動學之結果進行機構平臺順向 運動學的模擬,可驗證本系統機構的設計與運動學分析 之正確性。圖 6 為本氣壓針車機構平臺實體圖,整臺實 體系統由氣壓移載平台與縫切設備兩套系統作為整合, 布料移載部分由氣壓系統平臺作控制,針頭移載部分由 縫初設備所控制。



圖 3、三維氣壓針車機構平臺端點三維軌跡模擬曲線圖 Fig.3 Simulation results of the end-effector path with the 3D trajecto



圖 4、三維氣壓針車機構平臺端點三維軌跡模擬曲線之 $L_1 \cdot L_2$ 與 L_3 運動學結果 Fig. 4 Simulation results of L_1, L_2 and L_3



圖 5、三維氣壓針車機構平臺運動軌跡分析模擬圖 Fig. 5 3D Simulation results of the 3D Pneumatic Sewing Mechanism



圖 6、氣壓針車機構平臺實體圖 Fig. 6 Layout of the pneumatic sewing mechanism

五、結論

本研究成功以 SOLIDWORKS 進行三維氣壓針車機 構平臺進行設計,透過機構自由度分析法,本設計之平台 為3自由度之機構平臺。藉由 D-H 座標轉換,分析系統 平臺之運動學,先建立各桿件之座標,並求得各桿件間之 座標相對關係,以建立系統之順逆向運動學之解析解,並 設計運動平臺端點空間三維軌跡模擬曲線路徑, MATLAB 與 SOLIDWORKS 軟體建立順逆向運動學方程, 驗證所推得的運動學方程之正確性與可行性。並建立本 氣壓針車機構平臺實體系統,整臺實體系統由氣壓移載 平台與縫切設備兩套系統作為整合,布料移載部分由氣 壓系統平臺作控制,針頭移載部分由縫初設備所控制。本 研究開發之創新氣壓針車機構平臺除了可應用於智慧縫 紉生產作業,由於具有快速移動、高安全性、易設計裝載 與高穩定乘載之能力,未來也能應用於種材之扦插或立 體之嫁接作業,對於農業生產的貢獻將十分可期。

六、謝誌

感謝科技部計畫 MOST 107-2221-E-005-076-經 費支持。

七、參考文獻

- [1] 林浩庭。2012。3-PUU 氣壓平行機構機械劈設計分 析與軌跡追蹤伺服控制結合立體影像量測系統之研 究。國立臺灣大學工程科學及海洋工程研究所碩士 論文。
- [2] 張孝陽。2004。三軸伺服氣壓運動控制之研究。國立 成功大學機械工程研究所碩士論文。
- [3] 劉淵銘。2007。奈米精度氣壓-壓電混合驅動之 XY-Z 三軸長行程定位系統設計與適應性滑動控制。國 立臺灣科技大學自動化及控制研究所碩士論文。
- [4] 鄭奇能。2005。氣壓缸精密定位設計與控制於受垂直 負荷之研究。國立成功大學機械工程學研究所碩士 論文。
- [5] Chen, C. K. and Hwang, J., 2004. PD-type iterative learning control for trajectory tracking of a pneumatic X-Y table with disturbances, Robotics

and Automation IEEE International Conference, p.3500-3505.

- [6] Kaitwanidvilai, S. and Parnichkun, M., 2004. Position control of a pneumatic servo system by genetic algorithm based fixed-structure robust H infinity, loop shaping control, IECON Proceedings (Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society).
- [7] Kevin, M. L. and Frank, C. P., 2017. MODERN ROBOTICS-Mechanics, Planning, and Control, Cambridge University Press, p.18.
- [8] Noritsugu, T., 1987. Electro-Pneumatic Feedback
 Speed Control of a Pneumatic Motor. Part I : With an Electro-Pneumatic Proportional Valve, Journal of Fluid Control, p.17-37.
- [9] Noritsugu, T., 1987. Development of PWM Mode Electro-Pneumatic Servomechanism. Part II : Position Control of a Pneumatic Cylinder, Fluid Control, 66, p.65-80.
- [10] Ning, S. and Bone, M., 2005. Development of a nonlinear dynamic model for a servo pneumatic positioning system, IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, p.43-48.
- [11] Robinson, R. M., Kothera, C. S., Sanner, R. M. and Wereley, N. M., 2016. Nonlinear Control of Robotic Manipulators Driven by Pneumatic Artificial Muscles, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2, p.55-68.
- [12] Shu, N. and Bone, G. M., 2002. High steady-state accuracy pneumatic servo positioning system with PVA/PV control and friction compensation, Robotics and Automation, IEEE International Conference, 3, p.2824-2829.
- [13] Weston, R. H., Moore, P. R., Thatcher, T. W. and Morgon, G., 1984. Computer Controlled Pneumatic Servo Drives.

2019年08月16日收稿 2019年12月09日修正 2020年01月04日接受