

行政院國家科學委員會專題研究計畫成果報告

無段式可變步進角之旋轉步進馬達之開發與特性研究

Development of a Stepping Motor with Infinitely Variable Stepping Angle and
Research on its Characteristics

計畫編號：NSC 87-2212-E-002-048

執行期限：民國 86 年 08 月 01 日起至民國 87 年 07 月 31 日止

主持人：黃光裕 國立臺灣大學機械工程學系

一、中文摘要

本計畫所研發之無段式可變步進角之旋轉馬達，是採用行進波致動與運動合成原理。主要是利用一無段式可變行進波幅擺動致動器，以兩個垂直安置的電動式線性致動器藉由運動合成方式驅動一擺動盤，以產生不同波幅大小之行進波，再經由撓性帶機構驅動另一與行進波接觸之轉盤而產生旋轉步進運動。實驗結果發現步進角直接受行進波幅大小所影響，改變驅動頻率與輸入電壓即可變化行進波之波幅，進而改變步進角大小。此新型旋轉步進馬達有幾項特性異於傳統步進馬達，(1)無旋轉震動問題、(2)無段式可變步進量，理論上並無最小步進量之界限、(3)無能量輸入時能穩固致動前之位置，以及(4)所有線性致動原理皆可以被採用等。

關鍵詞：無段式可變步進角、步進馬達、行進波、運動合成、擺動致動器、撓性帶機構

Abstract

This project applied actuating effect with traveling wave on stepping motor and to develop one with infinitely variable stepping angle. This above mentioned stepping motor operates through a wobbling actuator with infinitely variable traveling wave amplitude, which composes of two perpendicularly fixed

electrodynamical linear actuators, and generates traveling waves with various amplitudes through disc driving caused by motion synthesis. And the traveling wave put driven disc into stepping rotation by applying flexible belt mechanism. According to the results of experiment, the stepping angle of the motor is influenced directly by its traveling wave amplitude. Changing driving frequency can change the amplitude of traveling wave, then can change the stepping angle. There are several characteristics which differentiate the rotational stepping motor newly developed from its traditional counterparts, those are: (1) no rotational stepping vibration, (2) infinitely variable stepping angle, without the smallest stepping angle limitation theoretically, (3) position fixing without energy supply, and (4) all linear actuating effects are applicable etc.

Keywords : infinitely variable stepping angle, stepping motor, traveling wave, motion synthesis, wobbling actuator, flexible belt mechanism.

二、計劃緣由與目的

傳統步進馬達依據其作動原理可分為 (1) 永久磁石式 (Type with permanent magnetic) (2) 磁阻式 (Type with Variable Reluctance) (3) 混合式 (Hybrid Type)，其最小步進量受磁極造型限制，一般都是固定而不容改變的，當行程較大時則是以累積

小步進量來完成。當行程小於馬達之最小步進量且要有適當出力時，則大都是運用傳統機構方式來進行轉換，但同時也存在機構所帶來的背隙、磨耗與滯滑(Stick-Slip)問題[1-3,7,8]。在追求定位精度趨勢下，減小步進馬達之最小步進量亦是多種手段之一，但礙於磁極大小限制，最小步進量也因而有一定的界限存在，一般在半步控制下常見最小步進量為 0.9° 。利用微步進驅動的控制方式，亦可以進一步細分步進角[19]。除此外亦有各式非傳統步進馬達，其中包括以壓電效應[9,10]、磁變形效應[11]、靜電效應[12,13]或形狀記憶效應[14]作為致動原理之步進馬達，其代表性之發展趨勢為(1)最小步進量之減少(2)動態特性之提昇與速率之增加(3)致動前位置之穩固(4)無複雜造型之設計(5)輸出功率之提昇(6)體積之密緻化等。

本研究之主要目的在於研究開發一個具有無段式可變步進量的旋轉步進馬達。採用如圖 1 所示之行進波步進致動原理，連桿一端連接之滾子以連桿另一端為中心對轉盤旋轉，如此使纏繞於滾子與轉盤之撓性皮帶隨滾子轉動而產生一行進波繞著轉盤運行，經由行進波之消長與撓性皮帶支點位置，造成轉盤逆於行進波繞行方向產生間歇式步進運動。

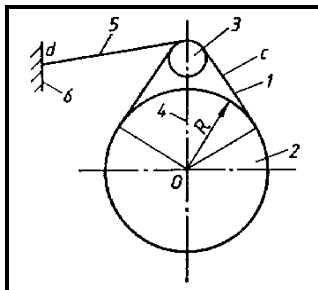


圖 1：旋轉式行進波步進致動原理。

1: 撓性帶, 2: 被帶動轉盤, 3: 滾子, 4: 連桿, 5: 固定帶, 6: 固定機殼, d: 接點。

三、結果與討論

步進馬達的結構設計流程分別包括了致動器結構與電磁系統兩部份。整體結構將依照功能分類進行概念設計，最後再由

概念設計所提之解決方案找出較為適當的進行實體化模型之設計與製作。依據致動器原理之分析，旋轉步進馬達之基本結構如圖 2(a)所示，主要的輸入端為連桿的轉動，透過撓性帶與固定帶的傳動，利用彼此間摩擦力轉動輸出轉盤，由輸出轉盤輸出步進作動運動。圖 2(a)、(b)、(c)、(d)為四段步進分解動作。從圖 2(a)連桿由起始位置以輸出轉盤中心做順時針方向轉動，當連桿帶著滾子轉動，使得滾子接觸到固定帶的時候，被動輸出轉盤開始轉動，如圖 2(b)所示。此時輸出轉盤繞著自身圓心 O 做逆時針運動，一直持續到固定帶與撓性帶的接點再次與輸出轉盤回復接觸為止，如圖 2(c)所示。連桿持續運動回到起始位置，如圖 2(d)所示，如此才完成一個動作週期。

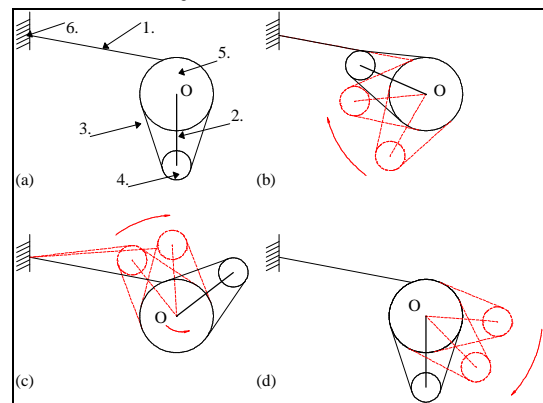


圖 2：旋轉步進致動原理之分段動作解析

1: 固定帶, 2: 連桿, 3: 撓性帶, 4: 滾子, 5: 輸出轉盤, 6: 固定端

根據文獻[15]每次旋轉步進角度為 $\Delta X/R$ ，其中 ΔX 為撓性帶變形前後之長度差異（ $\Delta X = \tilde{L} - L$ ）、 R 為輸出轉盤的半徑，其中 \tilde{L} 為撓性帶變形後之總長，而 L 為輸出轉盤的圓周長。若輸出轉盤的外形大小固定， ΔX 的大小則是影響步進角的最大因素，而影響 ΔX 是連桿的長度。一旦連桿增長，滾子與輸出轉盤的中心距就會增加，同時撓性帶的總長就會增加，進而旋轉步進角也會增加。因此當控制連桿長度或改變中心距，就可以控制步進角度的大小。依據無段式步進角之旋轉馬達之系統子功能分類，致動器是由三大子功能組

成：(1)輸入驅動功能以及中心距調整功能，(2)撓性帶傳動功能，(3)步進角輸出功能。圖 3 所示為新開發之旋轉步進馬達剖面圖，其中顯示具有輸入驅動功能以及中心距調整功能之擺動致動器、輸出轉盤及撓性帶之配置關係。

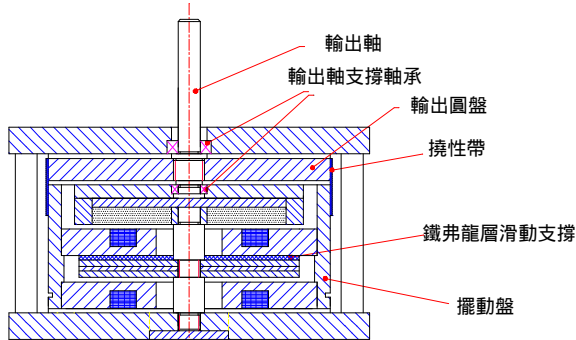


圖 3：新開發之旋轉步進馬達剖面圖。

在雙軸向同時驅動的情形下，擺動盤之運動軌跡如圖 4 所示。合成之軌跡大致成一圓形，驅動方式完全如預期之規畫。

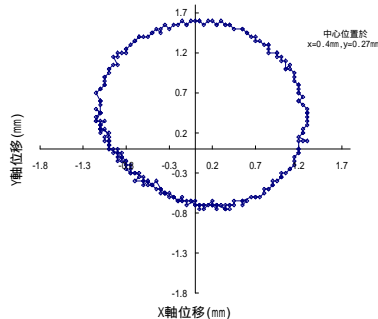


圖 4：15 V_{p-p} 電壓與 25 Hz 驅動頻率作動下擺動盤運動軌跡。

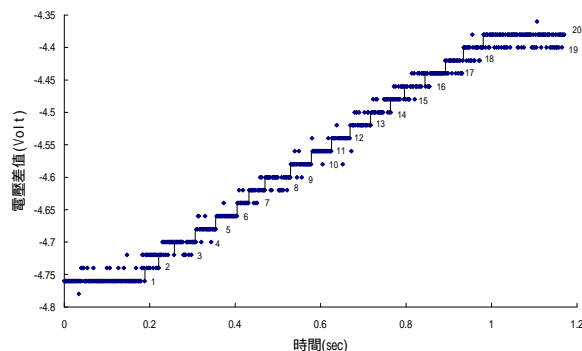


圖 5：20 週期正弦波訊號下步進過程。

圖 5 所示步進馬達作 20 次步進運動之步進過程。同時利用雷射位移量測器記

錄下擺動致動器的兩軸向振幅大小，用以推導理論平均步進角。依據圖 6 所示之理論平均步進角，步進角度隨著驅動頻率的增加而簡減少。驅動電壓增加則可以獲得較大之擺動行程，進而也有較大步進角度。擺動致動器的兩軸向位移值分別為 Δx 及 Δy ，在擺動盤軌跡為正圓形時則 $\Delta x \equiv \Delta y$ ，輸出轉盤與擺動盤半徑相同 $r_d = 32\text{mm}$ 、所以輸出轉盤周長為 $l_d = 64$ 、兩軸心距 $= \Delta L$ 。理論步進角度 $\theta_{\text{theo_step}}$ 即為

$$\theta_{\text{theo_step}} = \frac{\Delta l}{r_d} = \frac{2\Delta L}{r_d} (\text{rad}) = \frac{180}{f} \times \frac{2\Delta L}{r_d} (^{\circ})$$

$$= \frac{180}{f} \times \frac{(\frac{\Delta x}{2} + \frac{\Delta y}{2})}{r_d} (^{\circ})$$

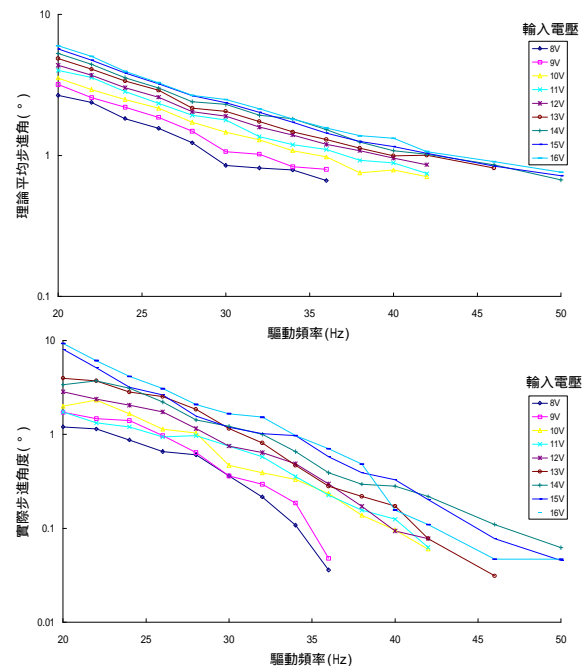


圖 6：不同驅動頻率與電壓下之理論與實際步進角。

實際平均步進角比理論平均步進角小。根據分析判斷，原因除了撓性帶與輸出轉盤間會因摩擦力不足而滑動之外，擺動盤太小擺幅會無法完全使撓性帶與輸出轉盤脫離接觸關係，進而以摩擦方式阻礙輸出轉盤之轉動，而導致步進角度減小。圖 7 所示為扭力矩負載與轉速關係，當扭力矩負載增大時，轉速會明顯的跟著下降，輸入電壓不同也有大致相同的效應。

由步進過程之角加速度瞭解，在步進過程中特定作動區域會需要較大扭力才能造成輸出轉盤轉動，若撓性帶與輸出轉盤間所能提供之最大靜摩擦力不足，則會產生滑動現象，而造成步進角度減少，所以外加扭力矩越大時，上述滑動現象會越明顯，步進角減小的現象也更明顯。在擺動盤擺幅增大時，由於撓性帶形變量大造成與輸出轉盤之間正向力增加，滑動現象會跟著減少。扭力矩與轉速之間之曲線斜率會隨著輸入電壓不同而變化，輸入電壓愈小，曲線斜率愈小。整個曲線之線性趨勢類似直流馬達之扭力矩與轉速曲線。

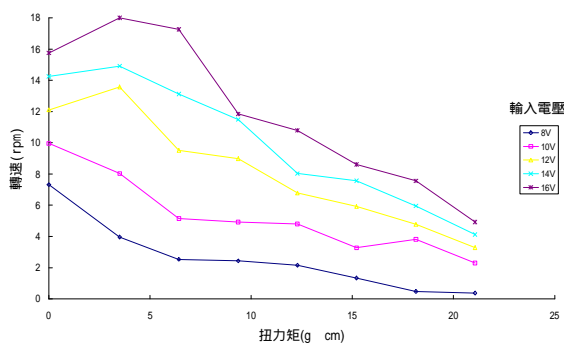


圖 7：扭力矩負載與轉速關係。

測試所得之馬達性能為：最低驅動頻率 10Hz；最高驅動頻率 50Hz；最大輸入電壓 $V_{p-p}=16V$ ；最小步進角為 0.67° ；最大步進角為 6° ；最低轉速 4rpm；最高轉速 20rpm；最大輸出扭力矩約為 27 g·cm。此新型旋轉步進馬達具有幾項特性異於傳統步進馬達：(1)無旋轉震動問題。(2)無段式可變步進量，理論上並無最小步進量之界限。(3)無能量輸入時能穩固致動前之位置。(4)所有線性致動原理皆可以被採用等。

四、計畫成果自評

本研究計畫如原預期規畫完成無段式可變步進角之旋轉馬達實體模型之設計與製作，也以各種實驗測試方式完成必要特性測試，同時也推導出理論分析程式能夠相當有效且準確模擬步進馬達之運動模式之趨勢。所開發之馬達具有結構造型與功能兩項創新，適合於申請新型專利與學

術期刊發表。其特性曲線之線性趨勢與直流馬達之扭力矩與轉速曲線類似，所以控制上也可以援用現有之直流馬達技術。而其中擺動致動器之運動合成之功能亦可運用於其他不同領域中。

五、參考文獻

- [1] 許益適編譯：步進馬達原理與運用，全華科技圖書公司，1994。
- [2] 陳世春譯著：控制用引動器，復漢出版社，1985。
- [3] 依日光編纂：精確小型馬達技術，復漢出版社，1992。
- [4] 鍾文政編著：數位信號處理器 -DSP TMS320C25 原理與實習應用，長高電腦圖書，1995。
- [5] 林達湖著：線性行進波致動器，國立台灣大學機械工程學研究所碩士論文，1996
- [6] Singiresu S. Rao: Mechanical Vibrations 3rd edition, Addison-Wesley,1995.
- [7] Acarnley: Stepping Motors, a guide to modern theory and practice, New York 1982
- [8] Slocum: Precision Machine Design, Prentice-Hall International Editions 1992.
- [9] R Gloess and H. Marth : Fiber position with a new drive concept, Laser in Engineering, Proceedings of the 11th international Congress laser 1993, Springer-Verlag, pp700-704.
- [10] Bexell et al. : Characterization of an inchworm prototype motor, Sensors and Actuators A, 43(1994) pp.322-329.
- [11] Huang: Entwicklung von Bauformen und Untersuchungen an magnetostruktiven Linearmotoren. VDI-Fortschritt-Berichte Reihe 8. Nr. 394. 1994.
- [12] Trimmer and R. Jebens : Harmonic electrostatic motors, Sensors and Actuators 20, 1989, pp17-24
- [13] Mehregeny et al. : A study of three microfabricated Variable-capacitance motors, Sensors and Actuators A21-23 173-9.

- [14]Duerig and K.N. Melton, Designing with Shape Memory Effect. Materials Research Society international Meeting on advanced Materials Vol.9, 1989, pp581-597.
- [15]Dobroljubow and A.W. Kusmin: Neu Wellenmechanimen. Feingeraetetechnie, Berlin 35, 1986, pp.19-20.
- [16]Edministen: Electromagnetics, 2e. 1992. McGraw-Hill Book Co.
- [17]Sigley, Joseph Edward, Mischke, Charles R., Mechanical Engineering Design, 5th ed., McGraw-Hill International Editions, Singapore,1989; pp. 299.
- [18]Fred M. Lilienstein, Magnetics Engineering Fundamentals and Computer-Aided Design Solutions, Van Nostrand Reinhold, 1993.
- [19]Li-Ren Lin and Han-Pang Huang, Calibration of The Micro-Step Stepping Motor Drives, Journal of Chinese Fuzzy Systems Association, Vol.3, No.2.