

動態系統理論在動作行為學 之應用

陳重佑／國立臺灣體育學院

陳帝佑／國立彰化師範大學

摘 要

過去以認知心理學為出發點的訊息處理學派提出了記憶鼓理論、閉鎖環理論與基模理論等概念，說明動作學習、動作控制與動作發展的影響機制。而近年來，以生物力學為研究工具的相關研究已成為深入探討研究論題的主流，並且更提出動態系統理論的觀點來解釋、說明與預測由於工作、表現者與環境等三個次系統相互作用與限制的結果之動作行為。本研究係通過文獻回顧的方式，略述傳統的動作行為學理論，進而闡述動態理論說明動作形成與發展的非線性、非連續性觀點，而系統理論則傳達了生物體的行為乃統合了數個次系統以自我組織其行為為表現的理念。在實證性研究方面，本文列舉嬰兒反射性踢與拿取的動作發展課題、上肢上下反覆工作的動作學習課題、有外力作用下的打擊動作控制課題等詮釋動態系統理論的行為特徵。渾沌理論、小波分析、協同論等動態分析的觀點對於說明複雜的動作形成因素也已蔚為動作行為研究的主流方法，當然這也是未來動作行為學研究可以嘗試採用的概念。

關鍵詞：運動行為學、訊息處理、動態系統理論

壹、動作行為學的分科與傳統理論

傳統動作行為學 (motor behavior) 領域包含有動作學習 (motor learning)、動作控制 (motor control) 與動作發展 (motor development) 等三個分科, 其中動作學習主要在探討影響一個人學習動作技能時的學習變項和表現變項 (Schmidt & Lee, 1999), 從學習一詞的定義來說, Magill (2001) 也指出動作學習在探討如何經由練習或經驗使行為或動作技巧產生永久的改變; 動作控制關心的乃是“現在 (here and now)”的運動表現問題, 解釋相當複雜的生物系統如何組織, 而產生動作連貫且極具效能的運動行為 (Whiting、Vogt & Vereijken, 1992), Schmidt 與 Lee (1999) 也指出動作控制在探討個體動作表現時的神經控制機制; 動作發展則是在探討個體從出生到老死由於成長、成熟、老化和環境等因素的交互作用, 而對個體動作行為產生質或量的影響 (Gallahue & Ozmun, 2002; 卓俊伶、簡曜輝、張智惠、楊梓楨、黃鱗棋, 1998)。

而由於這些研究領域的主要學者多來自於心理學學門, 所以, 相關的研究課程多是源自於心理學的研究手段, 學者卓俊伶等人 (1998) 也指出傳統的運動行為學經常使用認知心理學中的訊息處理 (information processing approach) 概念, 剖析動作行為與表現的課題。訊息處理學派主要是將生物體或人體比擬為一部電腦, 並以反應時間 (reaction time) 作為立論的證據, 說明外界的刺激源進入中樞神經系統後到產生動作的時間就是訊息處理所需的時間, 而不同條件下的不同反應時間則說明了行為產生與控制的不同歷程, 在此, 訊息 (information) 則定義為不確定性的降低 (Schmidt & Lee, 1999)。這種訊息處理學派發展出來解釋動作行為的基礎理論有三個: Henry 與 Rogers (1960) 的記憶鼓理論 (memory drum theory)、Adams (1971) 的閉鎖環理論 (closed-loop theory) 和 Schmidt (1975) 的基模理論 (schema theory)。

記憶鼓理論是 Henry 與 Rogers 基於技能動作表現關聯著神經動作的記憶系統假定, 認為生物體存在有記憶鼓以儲存產生動作的神經模式 (neural pattern), 每當需要完成某一特殊動作技能的時候, 就必須從記憶鼓中提取該動作的動作程式 (motor program), 並用以妥善協調動作。然而, 較為複雜的動作技能表現, 由於需要較大的動作程式進行動作的規劃, 以協調參與動作的各神經肌肉系統, 因而進一步提出複雜動作的反應時間會長於簡單動作的反應時間假說。Henry 和 Rogers 為了檢證他們的假說, 在實驗的設計上, 通過手指離開按鍵的簡單動作反應時間 (工作 A)、手指離開按鍵抓網球的次複雜動作反應時間 (工作 B) 和手指離開按鍵拍網球、抓網球的最複雜動作反應時間 (工作 C) 進行測試。其結果確實支持他們的假說:「複雜動作的反應時間會長於簡單動作的反應時間」。雖然 Henry 與 Rogers 在研究中也比較了性別和年齡的差異, 可是, 利用反應時間的簡

單實驗設計，則是此一研究的重要特色。就上述所述，Henry 與 Rogers 將生物體比擬為一部電腦，動作技能的產生必須通過技能的學習，以記憶動作程式，當要產生動作時，就從記憶鼓中提取該動作程式。因為，這樣的技能表現過程沒有強調或考慮動作過程的修正問題，所以，常常也被動作行為學家認為是一種開放環式的控制系統 (Magill, 2001)。

閉鎖環理論的形成是 Adams (1971) 通過歸納法的研究手段合理化其論點，他認為控制系統可以通過反應 (response)、錯誤偵測 (error detection) 和錯誤修正 (error correction) 提供回饋，所以，他認為動作技能的學習是以 KR 的認知與訊息觀點而來的，也就是說，訊息與認知是閉鎖環理論掌控 KR 的關鍵 (The handling of KR in the closed-loop theory was informational and cognitive.) (Adams, 1987)。正因如此，閉鎖環理論特別強調錯誤偵測和錯誤修正之能力。由於閉鎖環理論強調錯誤偵測和錯誤修正，所以，閉鎖環理論建構的基本假定就存在有記憶痕跡 (memory trace) 與知覺痕跡 (perceptual trace) 以控制動作的產生。其中，記憶痕跡乃獨立於回饋機制，扮演著起始動作的工作，也就是說，記憶痕跡即是一個簡單的動作程式，以起動反應出的動作；而知覺痕跡則是動作起始後進行動作修正的路徑，也就是說，感覺 (知覺) 就是錯誤評估的參考機制。因此，閉鎖環理論的假定，是以記憶系統解釋動作的學習與獲得，而動作學習就是在強化或加深記憶痕跡和知覺痕跡的記憶結構。當動作學習不需要 KR 後，則表示個體產生了強化的作用 (subjective reinforcement)。

一般常見的閉鎖環問題，就是根據 Schmidt (1975) 所指的此一理論的局限性可以解釋慢速動作和記憶容量的問題，而提出基模理論觀點。基模理論假定個體動作通過回憶基模 (recall schema) 與確認基模 (recognition schema) 來負責動作控制的啟動與評估。回憶基模是負責在引發動作的過程中，依據初始情境與動作結果此二種變項與反應指認確定動作參數之間的關係，提供個體適當的訊息與參數進一步產生動作；確認基模則是依據初始情境與動作結果等二種變項與內在知覺結果 (sensory consequences) 之間的關係，負責個體動作的控制以及對動作執行的結果進行評估。而 Adams (1987) 則根據閉鎖環理論的內容指出，Schmidt (1975) 所指的此一理論過度於依賴反應產生的回饋，而沒有辦法說明無回饋的動作，是屬於此一理論的結構 (theoretical structure) 瑕疵；對於閉鎖環理論沒有考慮到反應的變異性，而符合現實多變的情境問題，則是屬於此一理論的概念性 (theoretical conception) 瑕疵。卓俊伶等人 (1998) 指出基模理論的基本假定為記憶系統 (memory system) 的運作，並進一步衍生練習變異性 (variability of practice) 假說，有別於傳統動作學習中「相同動作，反覆練習」的觀念，這

一理論主張在工作變異的情況下，較能產生工作的「學習」。

事實上，近十年來的蓬勃發展的動態系統理論（dynamical systems theory），完全不認同生物體的動作控制與表現是來自於心智表徵，也就是對訊息處理的觀點持有相當高的存疑，並提出相當多的現象說明人的動作行為表現是來自於與工作（task）、表現者（performer）與環境（environment）等三個次系統相互作用與限制的結果。

貳、動態系統理論

Gallahue 和 Ozmum（2002）及劉宇（1998）等人將「動態系統理論」區分為動態理論（dynamical action）和系統理論（system theory），其中動態理論主要說明動作的形成與發展是非線性的、非連續性的，而系統理論則傳達了生物體的行為乃統合了數個次系統以自我組織其行為表現的理念。動態系統理論基於動作的形成是生物體自我組織而成，且形成的過程並非是連續的或線性的產生，因此「動態系統理論」常被動作行為研究者用來解釋動作行為的發展過程。

由於研究動作發展的著名神經胚胎學家 Myrtle McGraw 和 Arnold Gesell 等人認為大腦發育成熟後才擁有較佳的身體動作控制技巧。因此，Thelen et al.（1993）根據系統理論的概念，指出解釋生物體運動模式（movement patterns）的學習與發展過程，即動作的重新組織是從生物體周邊的生物力學訊息開始，通過生物體的運動器官（organism）與周邊環境以動態、共生（symbiotic）的交互作用形式，使得中樞神經系統逐漸產生適應。也就是說，動作發展的過程中，運動模式不僅僅是單純在腦部獨立工作、思考、記憶等，並命令運動器官完成動作；而是運動器官經由外界環境的回饋與外力場交互作用等因素，再混合於神經肌肉系統中。所以，Thelen（1998）認為 Myrtle McGraw 和 Arnold Gesell 等人以線性或連續性的神經胚胎學觀點，解釋動作行為學的由內發展到外（from the inside out）之研究假定（assumption），在邏輯推論上產生了嚴重的謬誤。Bernstein（1967）也認為此一複雜的發展是為自由度（degrees of freedom）的問題：「在人體運動系統的控制下，如何帶動眾多或多餘的自由度，致使運動的協調？」。

由於 Bernstein 指出動作協調是盡可能地利用運動器官的多餘自由度，並將動作控制的基本問題歸納為如何克服多餘的自由度之「自由度問題」，所以，自由度可以因為有機體本身、環境和工作等限制的交互作用，進而影響動作的行為（Newell, 1986）。是以，動作技能獲得初期的凍結自由度（freezing degrees of

freedom) 到解放自由度，以致於利用自由度所形成的協調結構 (coordinative structures)，為動作學習與動作發展的動作控制因素提出解釋。Vereijden、van Emmerik、Whiting 與 Newell (1992) 就曾利用關節間的交叉相關分析模式 (cross-correlation patterns)，探討動作技能形成過程的自由度改變和協調結構形成的過程。Newell (1985) 曾引用 Kugler 等人根據 Bernstein 的方式和建議，明白的區分協調、控制和技能：

協調—是為限制行為表現單元的潛在變數所構成之函數。

控制—是針對限制行為表現單元的各項潛在變數進行指派。

技能—則是對於控制參數 (限制行為表現單元的各項潛在變數) 給予最佳值。

對於上述名詞的相互關係，例如：以人類行進步態的單一下肢來看，可簡化為三個肢體 (大腿、小腿、足) 所形成，三個肢體的相互協調就形成了各種形式的步態 (快走、慢走等)，而各種不同步態的形成就是由三個肢體的相互控制所影響。然而，若是想要走得 (表現出) 經濟、快速、有效率或是輕鬆自在等步態，就必須針對三個肢體的相互控制進行最佳化的值。

動態理論主要是闡述動作行為的特徵，會因為系統的某一因子產生些微的變化，進而劇烈影響動作行為的特徵產生截然不同的變化，此一現象又稱為相位移 (phase shift)，而此一些微變化的因子就稱之為影響此一系統的控制參數 (control parameter)。控制參數的極微小起伏，使得系統成長得超過我們的預期或控制，因此產生了混沌 (chaos) 的特徵。所以，Kelso 和 Schoner (1988) 研究雙手食指左右的來回平行運動，而當動作的頻率快速到達臨界值之後，動作的運動特徵就會產生極大的轉變，並往一吸引子的特徵移動；所謂「吸引子」則是一個方程式的解所牽引吸引進入到一穩定狀態空間的軌跡。而影響動作改變的控制參數則是由生物體本身、工作和環境等因素的限制所致。Kelso 和 Schoner 為了說明這一現象，設計了兩手手指左右平行移動的實驗，如圖 1，要求實驗參加者依照快速節拍器或實驗者的口頭指示，加快速度移動手指，當平行移動至某一臨界頻率時，手指的運動模式則會突然產生完全不由自主的改變，此時的平行移動就會轉變為相反時相的動作形式，研究者藉由時序 (相對相位, relative phase) 上的協調測量，表達週期性的二肢段相對運動之相互關係。相對相位的計算方法如圖 2A 所示，右手食指的位置以 X_R 表示，左手食指的位置以 X_L 表示，每一手指來回一次的時間為 T ，而 t 則為來回一次的半週期；圖 2A 的上圖表示左右手指為相反時相，下圖則為相同時相。而如果以每一食指的相位圖 (以位置或角度為橫軸、速度或角速度為縱軸) 來看，如圖 2B，就可計算右手食指的相位角 ϕ_R

與左手食指的相位角 ϕ_L ，而 ϕ_R 與 ϕ_L 的差值則為相對相位。

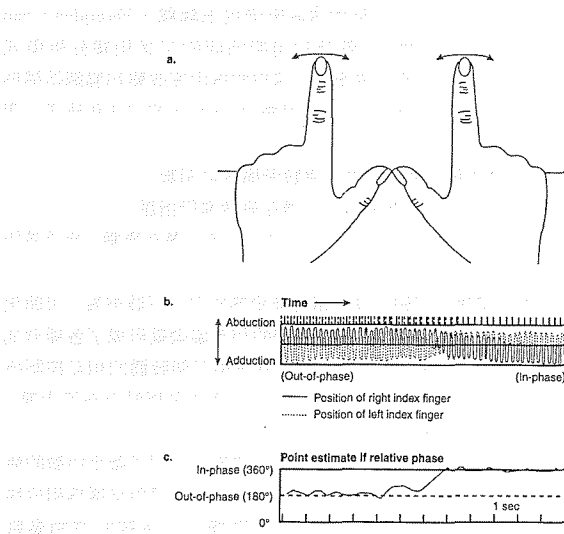


圖 1：手指平行移動實驗。a. 為實驗工作圖；b. 左右手指的絕對角度-時間曲線；
c. 為相對相位的點估計-時間曲線。(Kelso & Schoner, 1988)

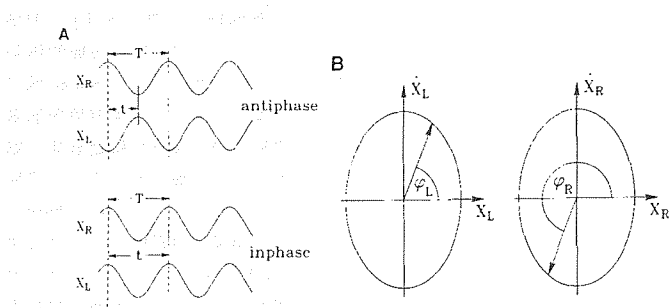


圖 2：(A) 以二個時間序列的點位置計算相對相位；(B) 以相平面曲線進行連續
相位的計算。(Kelso, 1995)

從實驗的結果看來，動作的改變並非是一種線性的過程，對於整個系統的動態性改變，若是簡化為有三個隨時間變化的量之三個微分方程式加以描述。而當任意兩個方程式解的和不是系統本身的解時，則此一系統就呈現了非線性、不連續的混沌特性。不管是自然界的現象或是社會現象，研究者以方程式的解之性質，分辨動作行為或是社會行為等現象為線性的變化或是非線性的變化，如果將方程式的解加在一起而得到一個新的解，則我們稱之為此系統呈現了混沌的狀態，且在初始值微小變化後，系統將產生後續值巨幅改變的特性。動作行為的科學研究利用了非線性的概念與數學方法，可以進一步的對於影響動作產生或是動作發展的過程與限制進行深入的觀察。Kelso 和 Schoner 針對上述實驗的結果認為自發性的動作和天生的動作行為變異，主要是來自於動作者本身和環境相互作用，並從中突現 (emerge) 動作的特殊限制 (constraints)，而這些交互作用並非只是結合了動作知覺和動作的關係，交互作用融合的對象也包括了系統的動態變化，以產生動作的變異。

參、應用動態系統理論的相關研究

在動作發展 (motor development) 的研究中，Thelen et al. (1993) 應用了肢段間互動的動力學技術，觀察嬰兒動作發展的神經系統學習，以適應外界環境的被動力 (包含重力矩與由運動產生的力矩) 作用。在他們多方面縱向與橫向的研究中，顯示了嬰兒出生後一年內在動作控制上產生引人注目的改變。當嬰兒的軀體在質量與肢體外型上產生快速的生長與改變，以及神經系統經歷快速發展時，相對地嬰孩必須學得更好更快的動作技巧，嬰孩必須學習在肢體運動時，如何協調肌肉的募集與各種作用力產生的改變。研究者檢測了嬰孩的反射性伸踢下肢動作和拿取物體的上肢動作，其中，研究者發現反射性伸踢動作的髖關節肌肉控制力矩對髖關節的運動遠大過重力產生的影響，而嬰孩因為藉由改變起始動作姿勢與重力等條件的自我調控外界環境作用，使得肌肉力矩可以抵抗被動的慣性力矩；拿取物體的發展動作研究中，研究者發現由運動產生的力矩對於嬰孩初期的影響相當大，可是隨著其動作的發展，嬰孩學會去減少由運動產生的力矩，使得拿取動作穩定而成熟。

動作學習 (motor learning) 的研究中，許多的研究者著眼於動作控制是練習產生的改變，並進一步指出：「動作學習就是動作控制的獲得」。而 Schneider、Zernicke、Schmidt 和 Hart (1989) 則運用肢段間互動的動力學技術探討人體動作

練習的協調機制，並說明練習過程中動作控制如何改變的機制，而證實了 Bernstein 指出動作協調的哲理意義：『協調的奧祕並非是產生力量去克服被動力量的作用，而是如何去有效地利用此一被動力量。』研究中，Schneider 等人設計了手臂下放、繞過障礙再上放的反覆連續動作，研究的結果發現開始練習動作期間，反轉過程中主要的由動作產生力矩（motion-dependent torque）與作用於曲屈肩關節的上臂角加速度有關。這個小的曲屈力矩受到的阻抗是來自於重力與小的肌肉力矩協同作用的伸展力矩。基本上，肩關節力矩是平衡的，如同一個小的肌肉伸展力矩協助重力作用抵抗來自於上臂角加速度的由動作產生力矩（motion-dependent torque）。然而，練習末期上臂角加速度力矩明顯增大，仍然作用在曲屈肩關節上。因為肢體姿勢在練習前後的逆轉過程是相似的，重力矩的絕對值保持不變是具有相對重要性，因此在練習終了後有很大的減少。練習之後，重力對肩關節動作的逆轉過程有一些影響，而且肩關節肌肉為抵抗由動作所產生的曲屈力矩—與上臂加速度有關，為了抵消由動作產生的淨伸展力矩，也產生一個大的伸展力矩。為補償肩關節增加的伸展力矩（因肢段增加的加速度而來），肌肉力矩必須產生顯著的增加。所以，練習能夠改變肌肉、重力與慣性關節力矩間的協調性。

陳重佑（2000）為了解釋外在環境的改變對肢體動力學控制的影響，以 4 名沒有接受過技擊運動訓練之女性大學生為實驗參加者，並依序接受演空打擊練習、零動量撞擊的打擊練習與有動量的打擊練習，並通過肢段間互動的動力學分析計算實驗參加者動作過程中的上肢關節控制力矩。研究的結果發現，肘關節和肩關節的肌肉力矩除了碰撞的過程以外，有撞擊的實際打擊動作在各動作階段的肌肉工作型態均與無撞擊的演空打擊動作的肌肉工作型態相同。而影響肩關節與肘關節之慣性力矩則因為演空打擊動作的練習，獲得穩定的控制型態，並且不會因為撞擊的環境條件改變而影響此慣性力矩的型態。所以，此研究從實證的角度說明了傳統的動作教學過程，先進行動作的演空練習可以遷移到實際撞擊動作的表現。在有無動量撞擊的實際碰撞打擊練習條件下，實驗參加者出現了利用被動的外力作用—接觸力矩，對肘關節產生伸肘的作正功現象，顯示通過練習實驗參加者學會如何利用被動力的作用，以完成打擊動作。因此，不同的動量打擊動作條件可以顯現出相同的肌肉力矩與慣性力矩特徵，而這些慣性力矩特徵相同的情況下，又能顯現出不同接觸力矩運用的現象。此外，在實際碰撞的動作階段引發出上臂角加速度產生的力矩會與肩關節和肘關節的肌肉力矩共同作用行爲，以抵消接觸力矩。

就動態系統理論（dynamic system theory）看來，人體或生物體的行為是受

到環境(environment)、工作(task)與個體(individual)等三個次系統(sub-systems)交互影響所產生,當這三個次系統若有了改變,對人體或生物體的動作產生限制(constraint),則行為開始時就會產生不穩定(instability)的一種渾沌現象,此一階段即為動作或行為的轉換(transition)關鍵期,而人體或生物體就會自我組織(self-organization)以形成另一個動作型態,而產生另一新的動作行為(Magill, 2001)。事實上,疲勞就動態系統理論的觀點就是屬於一種個體次系統的限制(Gallahue & Ozmun, 2002),Chen 和 Lin (2003) 透過短時期強度高的全身性疲勞運動,產生身體疲勞狀態的個體限制,以了解身體疲勞狀態對於不同年齡之中晚期兒童平衡控制型態的影響,結果發現兒童靜態平衡控制表現受個體疲勞狀態限制的影響,不同年齡的兒童在疲勞狀態下,均產生較大的身體擺動情形,雖然不同年齡兒童在疲勞狀態前之平衡控制型態並沒有不同,然而在疲勞狀態的個體條件限制下,不同年齡兒童顯現出不同的平衡控制型態,而其中更出現平衡控制發展的階段性改變現象。過去兒童的姿勢控制發展的研究中(Woollacott & Sveistrup, 1992; Shumway-Cook & Woollacott, 1985; Woollacott, Debu & Mowatt, 1987)也發現當兒童要學習一個新的動作或是不同的動作控制策略時,會產生平衡控制型態不穩定的短暫退化階段,而經過了這個階段的轉換後,平衡控制型態即發展到另一個穩定的階段。因此,姿勢控制的發展並非隨著年齡的增長呈線性的進展,而是在不同年齡呈現階段性的發展。

以動態系統觀點來探討動作型態變化的研究,梁嘉音、卓俊伶及簡曜輝(1998)以1名社會甲組的女性籃球球員為實驗參加者,探討投籃距離的環境限制對於投籃動作型態的影響。研究結果發現,投籃距離的不同會使得投籃的動作型態產生改變,而且到了一定的距離後,動作會產生關鍵性的退化現象。另外,楊梓楨及卓俊伶(1998)以14名平均年齡為8歲的國小二年級兒童為實驗參加者,探討不同大小尺寸的球所造成的環境限制,對兒童接球動作型態的影響。研究結果發現,接球動作的型態會因球的尺寸大小而產生改變,而這種改變是關鍵實現的階段性變化。因此,從動態系統的觀點來解釋不同動作的產生,可以發現其解釋可以涵蓋實際生活中許多動作形成的原因,也解決了平衡控制動作發展神經成熟觀點所無法解決的老化(aging)問題(Haywood & Getchell, 2001),也讓我們知道動作是隨著所處的環境、所面對的動作及自己身體的狀態而有所改變。

有節奏性的動作模式(如行走動作),通常會被認為為生物體的個體振子(肢體、脊髓或中樞型態發生器),係屬於一個結構穩定的動態系統,而此動態系統是唯一且穩定收斂於圓形的範圍。也就是說,假設每一個振子的行為都會被吸引

至一個封閉的位置-速度相平面軌道。可是實際上的有節奏的動作在其相位平面上，並不會產生一個單一的曲線，而是產生數條曲線相交的帶狀圖，很多研究者認為這是一種研究人體或生物體常隨機出現的生理噪音（noise）。而 Mitra、Riley 和 Turvey（1997）在假設相位平面上有著高維度的空間致使此帶狀圖的產生，而大於 2 個維度的非線性動力學法即可誘發此一渾沌的行為，所以，研究者要求實驗參加者在感覺自然的頻率（0.67Hz 和 1.25Hz）和振幅下，平順、舒適地擺動擺錘以產生節奏性肢體運動，觀察此一動態的現象。並研究假設人體肢段有不同的大小時，就會造成不同的重力和反作用力，而有不同程度的運動行為；如果神經系統聚集這些振子，並且利用調節這些已存在的力量去產生預期的目的，那麼由於肢體大小的改變致使力量不同的情形，就會誘發動作的動態改變。結果發現完全展開振子後，大的虛擬肢體和小的虛擬肢體分別顯露含有 4、5 個維度，表示實驗觀察的動作變異性主要是由較高維度產生的，動作變異程度的振子大小是造成較大變動的根源。

肆、結語

過去以實驗心理學為研究手段的動作行為學多半強調以認知心理學為根基的訊息處理概念，而就近來的研究手段看來，以生物力學（biomechanics）的相關技術作為研究工具，已成為此一學門的重要發展特徵。此外，許多近來頗為盛行的非線性動力學概念，例如：渾沌理論（chaotic）、小波分析（wavelet analysis）、協同論（synergetics）等，也逐漸被動作行為學者廣為運用來說明動作發展、控制或學習等相關課題。當然，以理論架構作為研究課題的中心思想，也仍是動作行為學門在研究主題的論題。未來縱使有更大一統或放諸四海皆通的理論或定律說明動作行為，本文作者引用學者陳定雄所言：「知識的起源非新非悟，而在於觀點。」為未來動態系統理論解釋動作行為的全面性下一註腳。

引用文獻

- 梁嘉音、卓俊伶、簡曜輝（1998）。距離對籃球投籃動作型式的影響。《體育學報》，25，199-208。
- 卓俊伶、簡曜輝、張智惠、楊梓楨、黃麟棋（1998）。身體活動心理學與動作行

- 為的發展概況與規劃。《臺灣師大體育研究》，5，117-130。
- 陳重佑 (2000)。《不同動量打擊練習過程中的肢體動力學控制》。未出版的博士論文，國立臺灣師範大學，臺北市。
- 楊梓樞、卓俊伶 (1998)。接球動作型式的環境限制變項探討。《體育學報》，25，269-278。
- 劉宇 (1998)。《國術騰空飛腳動作關節控制力矩及其協同作用效果：肢段間互動的動力學分析》。臺北：逸文出版社。
- Adams, J. A. (1971). A closed-loop theory of motor learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-149.
- Adams, J. A. (1987). Historical review and appraisal of research on the learning, retention, and transfer of human motor skills. *Psychological Bulletin*, 101(1), 41-74.
- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movements*. Oxford: Oxford university.
- Chen, C. Y., & Lin, S. W. (2003). The developmental effects of standing control in children under individual constraint. *Book of Abstracts for International Society of Biomechanics XIXth Congress* (p. 57). Dunedin, New Zealand: 2003 XIXth Congress of the International Society of Biomechanics.
- Gallahue, D. L., & Ozmun, J. C. (2002). *Understanding motor development: Infants, children, adolescents, adults* (5th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Haywood, K. M., & Getchell, N. (2001). *Life span motor development* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Henry, F. M., & Rogers, D. E. (1960). Increased response latency for complicated movements and a "memory drum" theory of neuromotor reaction. *Research Quarterly*, 31, 448-458.
- Kelso, J. A. S. (1995). *Dynamic patterns: The self-organization of brain and behavior*. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Kelso, J. A. S., & Schoner, G. (1988). Self organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science*, 7, 27-46.
- Magill, R. A. (2001). *Motor learning: Concepts and applications* (6th ed.). Dubuque, IA: Brown.
- Mitra, S., Riley, M.A., & Turvey, M.T. (1997). Chaos in human rhythmic movement. *Journal of Motor Behavior*, 29(3), 195-198.

- Newell, K. M. (1985). Coordination, control and skill. In D. Goodman, R. B. Wilberg, & I. M. Franks (Eds.), *Differing perspective in motor learning, memory, and control* (pp. 295-317). Holland: Elsevier Science.
- Newell, K. M. (1986). Constraint on the development of coordination. In M. G. Wade & H. T. A. Whiting (Eds.), *Motor development in children: Aspects of coordination and control* (pp. 341-360). Boston: Mortinus Nijhoff.
- Schneider, K., Zernicke, R. F., Schmidt, R. A., & Hart, T. J. (1989). Changes in limb dynamics during the practice of rapid arm movements. *Journal of Biomechanics*, 22(8/9), 805-817.
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 225-260.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (1999). *Motor control and learning: A behavioral emphasis* (3rd ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Shumway-Cook, A., & Woollacott, M. H. (1985). The growth of stability: Postural control from a developmental perspective. *Journal of Motor Behavior*, 17(2), 131-147.
- Thelen, E. (1998). Bernstein's legacy for motor development: How infants learn to reach. In M. L. Latash (Ed.), *Progress in motor control: Vol. 1. Bernstein's traditions in movement studies* (pp. 267-288). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Thelen, E., Corbetta, D., Kamm, K., Spencer, J. Schneider, K., Zernicke, R. F. (1993). The transition to reaching: Matching intention and intrinsic dynamics. *Child Development*, 64, 1058-1098.
- Vereijden, B., van Emmerik, R. E. A., Whiting, H. T. A., & Newell, K. M. (1992). Free(z)ing degrees of freedom in skill acquisition. *Journal of Motor Behavior*, 24(1), 133-142.
- Whiting, H. T. A., Vogt, S., & Vereijken, B. (1992). Human skill and motor control: Some aspects of the motor control- motor learning relation. In J. J. Summers (Ed.), *Approaches to the study of motor control and learning* (pp. 81-111). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science.
- Woollacott, M. H., Debu, B., & Mowatt, M. (1987). Neuromuscular control of posture in the infant and child: Is vision dominant? *Journal of Motor Behavior*, 19(2), 167-186.

Woollacott, M. H., & Sveistrup, H. (1992). Changes in the sequencing and timing of muscle response coordination associated with developmental transitions in balance abilities. *Human Movement Science, 11*(1/2), 23-36.

謝志遠、陳鳳英、吳嘉祥

謝志遠、陳鳳英、吳嘉祥

本研究以動態系統理論為基礎，探討了不同年齡兒童在平衡木上的表現。研究發現，隨著年齡的增加，兒童在平衡木上的表現會發生顯著的變化。這些變化主要體現在肌肉反應的協調性和時間性上。具體來說，年長的兒童能夠更有效地協調肌肉活動，並在更短的時間內完成動作。此外，研究還發現，兒童在平衡木上的表現受到多種因素的影響，包括身體發育、神經系統成熟度以及環境因素等。這些發現對於理解兒童平衡能力的發展過程具有重要意義，並為相關領域的研究提供了參考。