

# 動作行為限制對 自由度的階段轉變

張國華、陳帝佑／國立彰化師範大學

陳重佑／國立臺灣體育學院

## 摘 要

生物體必須調節體內各種組織系統，使其共同發揮作用，才能完成日常生活中各式各樣的動作技能。然而，這樣的機制卻隱藏著複雜且龐大的自由度問題。Bernstein 認為人體為了掌控特殊動作中的眾多自由度，在初學時期會有凍結自由度的現象產生，而透過練習的機制，動作型態將轉變為釋放自由度。本文就自由度的觀點，回顧新近的相關研究，說明自由度的階段性轉變，並非單純地由凍結到釋放，而會取決於個體、工作與環境三種限制的交互作用，進而產生正向、逆向或可逆性的行為特徵。

**關鍵詞：**動作技能、自由度、限制

---

主要聯絡人：陳重佑 404 臺中市雙十路 1 段 16 號

Tel : 04-22213108 轉 2097 e-mail : chung423@ms52.hinet.net

## 壹、前 言

人體在面對一項新的動作技能時，往往會產生許多學習方面的困難，學習過程中，儘管了解指導者所講述的內容並且按照指令執行動作，但結果總是無法立即達到預期的目標。事實上，動作行為 (motor behavior) 的改變是一種非連續性、非線性的歷程，也就是隨著時間序列，產生階段性的轉變 (phase transition) 和突現 (emerging) 的發展 (Kelso & Schoner, 1988)。這樣的變化受到系統中各種關鍵因子所影響，如環境賦使 (affordance) 的助長與速率限制者 (rate limiter) 的約束等 (Gallahue & Ozmun, 2006)，這些正向與負向的限制 (constraint) 因素，將深深牽引著動作型態的產生。本文以 Bernstein (1967) 所提出自由度 (degrees of freedom) 的概念為基礎，透過個體 (individual)、工作 (task) 與環境 (environment) 限制的概念，詮釋自由度的階段性轉變，並闡述近年來動作行為的相關研究。

## 貳、協調與自由度問題

學習動作技能的過程中，組織間的協調 (coordination) 能力，經常影響著動作表現的結果。Turvey (1990) 認為協調指的是頭部、軀幹與肢段間的動作型態，必須根據工作與環境的特殊性，產生相對應的改變。以步態為例，人們在空曠和擁擠的街道上，走路型態可能會有所不同。在空曠的街道，人們的步幅和步頻可依個人所需，大步且快速；但是，在擁擠的街道，往往需要為了躲避行人而放慢腳步。此外，在 Bernstein (1967) 所提出自由度的概念中，把協調視為是一種自由度問題，並進一步指出人體在執行動作時，神經系統必須控制動作器中多餘的自由度，並且將它改變成一個可控制的系統。但由於人體是經由肌肉、關節和大大小小的肢段所結合而成的組合體，再加上動作的產生起因於生物體本身、工作與環境三者的交互作用與限制 (Marin, Bardy, Baumberger, Flückiger, & Stoffregen, 1999; Newell, 1986; Riccio & Stoffregen, 1988)，這樣複雜且龐大的自由度，則使人體面臨需要同時掌控的問題。

就動作協調與控制的觀點對自由度的解釋，人體系統中，自由度亦指著數種獨立的要素，而其中的每一種要素皆可對動作產生不同的作用。因此，在不同的外在環境與起始條件下，即使中樞神經系統下達同樣的動作命令，卻可能產生不同的動作型態 (Bernstein, 1967; Latash, 1996)。Roberson and Caldwell (2004) 則就傳統力學的概念描述空間上的自由度，說明在一個參考座標系內，描述一個物體所需的參數量即為該物體的自由度。例如：在三度空間的座標系中，描述一個點的位置需要 (X, Y, Z) 三個座標，也就是三個自由度；若要描述一個剛體 (rigid body)，除了質量中心的 (X, Y, Z) 三個座標外，還需加上物體本身相對坐標系 (local coordinate system) 與慣性座標系 (global coordinate system) 所形成的三個方位夾角，因此，需要六個自由度。Turvey (1990) 也根據人體的生理特徵，對關節與肌肉間的自由度問題提出看法。假若將人體視為是鉸鏈關節 (hinge joint) 的組合體，則人體在運動時所需控制的機械自由度 (mechanical degrees of freedom) 約有 100 個；但是，關節運動如果還需加上如位置和速度等特殊條件的話，自由度將增加到 200 個以上。

總而言之，日常生活中看似簡單的動作，其實都包含了這些複雜的自由度問題。所以，為了簡化動作控制的過程，生命體必須將固有存在的自由度和可能影響動作的控制參數 (control parameters) 加以系統化的分類與整合，以便提升神經與肌肉的協同作用，使身體能在複雜的控制中產生應有的表現或期望的規律性，形成所謂的協調結構 (coordinative structure)，這樣的機制就是人體與生

俱來的自我組織 (self-organization) 能力 (Bernstein, 1967; Kelso, Southard, & Goodman, 1979; Turvey, 1990)。由於自由度問題是影響動作型態改變的關鍵性要素之一，因此，綜觀過去動作行為的相關研究，自由度的階段性轉變經常成為實驗中的問題背景，一再地受到學者的重述與討論 (Newell & Vaillancourt, 2001)。

## 參、動作技能獲得的三階段

Bernstein (1967) 是最早就動作技能的獲得，提出自由度問題的學者，在其「The co-ordination and regulation of movement」一書中提到，人體的動作型態並非僅是單關節的活動，而是包含了多關節、多肢段也就是多自由度的運動；但除了以上的內在特徵外，還需考慮反作用力、慣性力和重力等諸多環境的因素。因此，個體在學習一項新的動作技能時，為了因應工作與環境所造成本身動作型態的改變，自由度的調控即成為核心問題。所以，Bernstein 針對動作學習過程中，人體控制系統如何調節自由度問題，提出三階段模式的概念。

### 一、凍結自由度 (freezing the degrees of freedom)

Bernstein (1967) 建議初學者在學習動作技能時，必須限制人體多餘的自由度，將可能影響動作的因素降到最低。三階段模式中的第一個階段為凍結自由度階段，更確切地說，人體在執行動作時，藉由將關節與肢段連結、固定，以凍結動作中次要部分的自由度。在某種程度上，這些複雜難以掌握的因素，將被簡化並降低到可控制的範圍，也就是以最簡單的動作來達成工作目的。在學習一項新技能時，有經驗的指導者會引導初學者把學習的注意焦點集中在單一面向上，並且把練習過程簡化，從最基本的動作做起，等到學習者熟練後才慢慢的加入其他進階的動作或增加變異的程度 (Gentile, 2000)。

### 二、釋放自由度 (releasing the degrees of freedom)

第二個階段即是釋放自由度，意指釋放原有固定的限制，並整合所有可能發揮作用的自由度，使其成為一個動態、可控制的系統。在 Bernstein (1967) 的觀點裡，他認為藉由「練習」和「經驗」，個體可以逐漸學習如何控制肢段與肢段間互動所產生的反應，並且形成一種協調機制。舉例來說，在學習網球發球時，通常先將焦點放在肩關節與肘關節的動作，因此會限制腕關節的主動肌與拮抗肌，使腕關節保持固定，此時雖然擊球的動作形態較不切近理想的動力鏈

(kinetic chain) 結構，但卻能提高學習者在初學階段的發球成功率。經過多次的練習後，學習者開始熟悉肩、肘關節的動作，進而開始利用腕關節、髖關節與下肢各關節，亦即原受限制的自由度逐漸受到釋放，學習者逐漸學會如何自我組織更多關節間的活動，使動作的執行更加有效率。Woollacott 等 (1998) 觀察嬰兒在學習站立時平衡控制的發展，發現剛開始學習站立的嬰兒，會有凍結膝關節與髖關節自由度的特徵，並且純粹利用踝關節的動作來對平衡的威脅作出反應，然而，透過經驗和練習的過程，嬰兒在動作當中逐漸增加自由度的數目，並且學習利用髖關節來控制平衡不穩定所造成的搖擺現象。

### 三、利用反作用現象 (exploiting reactive phenomena)

Bernstein (1967) 認為協調的奧秘在於有效的利用環境中的被動力量 (passive force)，主動的肌肉力量僅需用來彌補動作過程中，被動力量使用的不足。因此，有關動作協調與控制的研究，不應只著重於個體主動的肌肉力量，而必須多加考慮反作用力、摩擦力和慣性力等環境中的被動力量。所以，Bernstein 在三階段模式中的最後一個階段，提出了「利用反作用現象」的概念，意指學習者利用被動力量以取代抵抗之行爲，加強有機體與環境間的互動。在練習初期，學習者面對外在環境所產生的被動力量，會產生抵抗和排斥的現象，造成執行動作時所需耗費的主動力量 (active force) 較多。到了此第三階段，學習者透過練習的影響，能夠更有效的利用環境中的被動力量，導致動作輸出所消耗的能量能更加的節省 (Schneider, Zernicke, Schmidt, & Hart, 1989)。因此，相較於前面兩個時期，學習者能夠更善用功或能量來完成動作。實際上，要直接測得動作過程中的關節間力與肌肉力矩有其研究及技術上的限制，所以肢段間所產生的主動力量和被動力量，可間接利用位移、速度和加速度等實際的運動參數，藉由肢段間互動的動力學 (intersegment dynamic) 方法計算獲得 (Mayagoitia, Nene, & Veltink, 2002; Newell & Vaillancourt, 2001)。

自從 Bernstein (1967) 針對動作控制與學習提出自由度問題後，上述三階段模式的概念逐漸受到學者們的重視，更成爲該領域中的熱門研究課題之一。由於自由度的定義廣泛，可依照分析的觀點而有不同的定義與測量方法，例如：傳統上多以交叉相關 (cross correlation) 來分析關節間的自由度，而在維度 (dimension) 的概念提出後，近似熵值 (approximate entropy, ApEn) 和主要成份分析 (principal component analysis) 也都曾作爲估計維度的方法 (Hong & Newell, 2006; Newell, Broderick, Deutsch, & Slifkin, 2003)。此外，造成動作型態產生階段性轉變的因素相當複雜，不僅受到人體組織間的相互影響，還受到外

在工作與環境的限制，因此，在從事自由度問題的相關研究時，必須多加考慮個體、工作與環境三種動作行爲的限制因素。

## 肆、自由度問題的動作行爲研究

回顧動作行爲的相關研究，無論涉及的領域爲動作控制 (motor control)、動作學習 (motor learning) 或動作發展 (motor development)，其引發的自由度問題深受研究者所重視。然而，測量自由度的變項有很多，例如：關節角度的變異、角運動的振幅和關節間的交叉相關等，其中又以後者最常受到研究者所應用。透過交叉相關的分析結果，研究者可以了解關節間的運動是否存在著線性的相關，進而判斷運動中關節鏈結 (coupling) 的程度。相關係數越低，表示肢段間的動作越獨立，呈現解放自由度的特徵；反之，相關係數越高，表示肢段間爲鏈結的狀態，呈現凍結自由度的特徵。

Vereijken, van Emmerik, Whiting, and Newell (1992) 透過實驗情境中滑雪動作的學習過程，探討人體獲得動作技能時，凍結和釋放自由度的特徵。經由關節角度的交叉相關分析顯示，初期因關節間的鏈結度高，所以交叉相關係數皆呈現中度及高度的相關，然而，隨著練習次數增加，關節運動逐漸的受到獨立的控制，交叉相關係數也跟著下降。此外，如 Steenbergen, Martenuik, and Kalbfleisch (1995) 的抓握工作、Newell and van Emmerik (1989) 研究非慣用手的手寫特徵，以及 McDonald, van Emmerik, and Newell (1989) 的飛鏢投擲等研究，都曾探討自由度階段性轉變的機制，而這些研究的結果，也都支持 Bernstein 所提出的觀點，認爲在動作學習過程中，人體的動作型態會由初期凍結自由度轉變爲釋放自由度的特徵。

過去對於自由度問題的研究，多觀察個體學習單一工作的歷程，常忽略了工作的特殊性與外在環境的影響。由於動作的產生起因於個體、工作與環境三種限制的交互作用，因此，在新進的研究當中，限制 (constraint) 的概念逐漸受到重視。Newell and Vaillancourt (2001) 針對學習過程中自由度的變化，認爲人體本身的協調解答 (coordination solution) 會依據工作的限制和特殊性，改變自由度的數量。所以，在學習動作技能的過程中，動作型態的轉變會取決於工作的特質，並非如練習初期的凍結自由度到練習後的釋放自由度呈單一方向的改變，這樣的觀點也在研究當中得到證實。Ko, Challis, and Newell (2003) 利用動態平衡的工作，觀察學習者如何調控關節間的自由度，實驗結果不僅說明了工作限制造成自由度呈現「逆向」的轉變（解放自由度→凍結自由度），並發現多

次練習的效應，讓學習者學會如何利用而非抵抗外在環境中的反作用力。此外，Higuchi, Imanaka, and Hatayama (2002) 利用電腦模擬的棒球打擊測驗，觀察實驗參與者在無壓力及有壓力的情境下，動作型態的改變策略，發現在環境限制（有無壓力的情境）的影響下，造成自由度的轉變方向呈現「可逆性」的特徵（凍結自由度 ⇄ 解放自由度）。

事實上，自由度是一種統稱的名詞，可依照系統中的層面而有不同的定義。就生理的層面而言，關節、肌肉、動作單位和神經等都可視為分析自由度的變數 (Turvey, 1990)，但上述的定義將不同於維度，又稱為動態自由度 (dynamical degrees of freedom) 的概念 (Newell & Vaillancourt, 2001)。由於維度不像傳統機械自由度能透過質性的方法解釋，所以在過去動作行為的研究當中，探討維度的實驗相當有限。對於維度的分析，可使用近似熵值 (ApEn) 作為估計的指標，雖然 ApEn 無法明確的計算出維度的數量，但卻能正確的估計維度的增減。Newell, Broderick, Deutsch, and Slifkin (2003) 觀察參與者學習兩組不同的等長 (isometric) 力量輸出工作，研究者認為，等長力量輸出工作雖然無法造成關節間自由度的改變，但由於實驗操弄的不同，參與者為了達到工作目的，力量輸出的維度勢必產生改變。實驗以 ApEn 來評估力量輸出的規律性，結果發現，參與者為了達成工作的需求，降低學習過程中的錯誤率，分別產生不同方式的因應策略。第一組的 ApEn 隨著練習的機制而逐漸增加，另一組則呈現逐漸減少的趨勢。這也說明了不同的力量輸出工作，造成維度的數量產生雙向的改變，隨著練習的過程，人體的協調解答會根據特殊的工作需求與動作本身的限制而有不同的改變。

動作型態的轉變與個體、工作和環境之間關係的研究中，無論是利用關節角度變異、角運動振幅或關節間的交叉相關來觀測傳統的機械自由度，或是藉由近似熵值和主要成份分析來估計維度，學者們多以 Bernstein (1967) 所提出自由度的概念作為基本論點，透過生物力學方法中運動學與動力學的參數加以驗證，不僅能清楚的解釋動作型態轉變的機制，也為動作行為的研究提供了較完整的分析。

## 伍、結 語

人體的動作機制相當複雜，執行過程中組織間的相互影響常造成動作執行的不確定性增加。是故，人體必須同時掌控動作中時間與空間中的因素，並藉由自我組織的方式達到協調的表現，透過這樣的學習歷程，使行為產生相對永

久持續性的改變。過去對於自由度階段性轉變的歷程，多採用 Bernstein (1967) 所提出的觀點，認為透過練習的機制，人體的動作型態會由初始凍結自由度轉變為釋放自由度，呈現單一方向的改變。然而，有越來越多的研究提出，學習動作技能時，動作型態不僅受到人體組織間的相互影響，還受到外在工作與環境的限制，因此，自由度的階段性轉變會受到個體、工作與環境三種限制的交互作用，進而產生順向、逆向和可逆性的轉變。雖然這樣的論點還有待更多經驗上的證實，但概念上確實為往後的研究者，提供更進一步的思維與嶄新的研究方向，透過學習過程中自由度轉變歷程的探討，對於學習者如何適應動作而產生技能，提供了關鍵的訊息，所以，指導者必需清楚的對工作與環境進行分析，了解如何控制影響動作型態的因素，並且利用工作與環境限制中正向引導的概念，延伸出應對的教學方法。

## 引用文獻

- Bernstein, N. A. (1967). *The coordination and regulation of movement*. Oxford: Pergamon Press.
- Gallahue, D. L., & Ozmun, J. C. (2006). *Understanding motor development: Infants, children, adolescents, adults* (6th ed.). New York: McGraw-Hill.
- Gentile, A. M. (2000). Skill acquisition: Action, movement, and neuromotor processes. In J. H. Carr, & R. B. Shepherd (Eds.), *Movement science: Foundations for physical therapy* (2nd ed., pp. 111-187). Gaithersburg, MD: Aspen.
- Higuchi, T., Imanaka, K., & Hatayama, T. (2002). Freezing degrees of freedom under stress: Kinematic evidence of constrained movement strategies. *Human Movement Science, 21*, 831-846.
- Hong, S. L., & Newell, K. M. (2006). Change in the organization of degrees of freedom with learning. *Journal of Motor Behavior, 38* (2), 88-100.
- Kelso, J. A. S., & Schoner, G. (1988). Self organization of coordinative movement patterns. *Human Movement Science, 7*, 27-46.
- Kelso, J. A. S., Southard, D. L., & Goodman, D. (1979). On the coordination of two-handed movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 5*, 229-238.
- Ko, Y. G., Challis, J. H., & Newell, K. M. (2003). Learning to coordinate redundant

- degrees of freedom in a dynamic balance task. *Human Movement Science*, 22, 47-66.
- Latash, M. L. (1996). The Bernstein problem: How does central nervous system make its choices? In M. L. Latash, & M. T. Turvey (Eds.), *Dexterity and its development* (pp. 277-303). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Marin, L., Bardy, B. G., Baumberger, B., Flückiger, M., & Stoffregen, T. A. (1999). Interaction between task demand and surface properties in the control of goal-directed stance. *Human Movement Science*, 18, 31-47.
- Mayagoitia, R. E., Nene, A. V., & Veltink, P. H. (2002). Accelerometer and rate gyroscope measurement of kinematics: An inexpensive alternative to optical motion analysis systems. *Journal of Biomechanics*, 35, 537-542.
- McDonald, P. V., van Emmerik, R. E. A., & Newell, K. M. (1989). The effects of practice on limb kinematics in a throwing task. *Journal of Motor Behavior*, 21, 245-264.
- 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.
- Newell, K. M., Broderick, M. P., Deutsch, K. M., & Slifkin, A. B. (2003). Task goals and change in dynamical degrees of freedom with motor learning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29 (2), 379-387.
- Newell, K. M., & Vaillancourt, D. E. (2001). Dimensional change in motor learning. *Human Movement Science*, 20, 695-715.
- Newell, K. M., & van Emmerik, R. E. A. (1989). The acquisition of coordination: Preliminary analysis of learning to write. *Human Movement Science*, 8, 17-32.
- Riccio, G. E., & Stoffregen, T. A. (1988). Affordances as constraint on the control of stance. *Human Movement Science*, 7, 265-300.
- Roberson, D. G. E., & Caldwell, G. E. (2004). Planar kinematics. In D. G. E. Roberson, G. E. Caldwell, J. Hamill, G. Kamen, & S. N. Whittlesy (Eds.), *Research methods in biomechanics* (pp. 11-12). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schneider, K., Zernicke, R. F., Schmidt, R. A., & Hart, T. J. (1989). Changes in limb dynamic during the practice of rapid arm movement. *Journal of Biomechanics*,

22, 805-817.

Steenbergen, B., Martenuik, R. G., & Kalbfleisch, L. E. (1995). Achieving coordination in prehension: Joint freezing and postural contributions. *Journal of Motor Behavior, 27*, 333-348.

Turvey, M. T. (1990). Coordination. *American Psychologist, 45*, 938-953.

Vereijken, 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*, 133-142.

Woollacott, M. H., Burtner, P., Jensen, J., Jasiewicz, J., Roncesvalles, N., & Sveistrup, H. (1998). Development of postural responses during standing in healthy children and children with spastic diplegia. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 22*, 583-589.