

彈道式移動時間模型與彈道式移動變異模型的驗證

Verification of two models for predicting ballistic movement time and variability

林瑞豐

元智大學工業工程與管理系，遠東路 135 號，桃園縣中壢市，台灣

juifeng@saturn.yzu.edu.tw

摘要

彈道式移動是構成手控制移動的移動單位。研究執行彈道式移動所需的時間及產生的誤差，將有助於瞭解人的移動控制機置，以及預測手控制移動時間與準確度之間的交互關係。本研究的主要目的為設計一個實驗以量測執行彈道式移動的時間、水平誤差和垂直誤差，並且驗證 Gan & Hoffman (1988) 和 Howarth, Beggs, & Bowden (1971) 兩個模型描述量測資料的可行性。在研究初期，四位受測者以個人電腦、繪圖板及本研究自行開發的量測程式執行多種距離的彈道式移動。所設計的實驗成功量測到彈道式移動的時間以及兩種移動誤差，而兩個模型也能有效地描述量測資料和移動距離之間的關係。於接下來的研究將測試更多的受測者以驗證兩個模型的描述資料的有效性。

關鍵詞：彈道式移動、手控制移動、彈道式移動時間及彈道式移動變異

Abstract

A hand-control movement is composed of several unit movements called "ballistic movements." The study of ballistic movement time and ballistic movement variability can help us understand how our motor system works and further predict the relationship of speed-accuracy tradeoffs while performing hand-control movements. The purpose of this study is (1) to develop an experiment for measuring ballistic movement time and variability and (2) to utilize the measured data to test the application of two models proposed by Gan & Hoffman (1988) and Howarth, Beggs, & Bowden (1971) for predicting the two types of ballistic movement data. In a preliminary study, by using a personal computer, a drawing tablet and a self-developed experimental program, four participants conducted ballistic movements manipulated with several distances. The results show that (1) the designed experiment successfully measure ballistic movement time and the two types of ballistic movement variability and (2) the two tested models described well the measured data. To verify the application of the two models, more participants need to be involved in the succeeding study.

Keywords : ballistic movement, hand-control movement, ballistic movement time, and ballistic movement variability

1.前言

在日常生活中，人們藉由頻繁地執行手控制移動(hand-control movements)以完成各種作業，例如以電腦滑鼠控制游標點選 Windows 作業系統中某個按鈕。對於手控制移動，最廣泛被研究的議題為速度與準確度之間的交互關係(the relationship of speed-accuracy tradeoff)。較高準確度的移動，需要花費較長的時間；而較快的移動，

則需要犧牲準確度來完成。然而，由於人的視覺回饋對於動作的影響是間歇性的，一個手控制移動實際上是由多個較小的移動單位所構成。這些較小的移動單位被稱為「彈道式移動」。事實上，一個手控制移動的準確度以及所需的時間取決於這些彈道式移動(Drury, Montazer, & Karwan, 1987; Keele, 1968; Montazer, Drury, & Karwan, 1988)。

在過去近半個世紀中，雖然已有許多學者致力於發展模型來預測手控制移動時間與準確度的交互關係(e.g., Accot & Zhai, 1997; Drury, 1971; Fitts, 1954; MacKenzie & Buxton, 1992)。然而，礙於對彈道式移動的瞭解不足，所發展的模型大多局限於實驗式模型(experimental models)。爲了預測速度與準確度的交互關係，首先必須執行實驗量測人員在幾個操作變因下的數據以進而求得實驗模型中的實驗常數項。

若能對彈道式移動有更充份的認識，便能發展能以事先預測執行手控制移動時的速度與準確度交互關係的模型。爲達到此目的，對於彈道式移動所需研究的議題包括(1)各種手控制移動是如何由多個彈道式移動所構成、(2)執行彈道式移動所需要的時間及(3)執行彈道式移動所產生的誤差。而本研究的範疇即爲上述議題的後兩點。以下便對相關的文獻及本研究的目的作說明。

2. 文獻探討

2.1 彈道式移動

到目前爲止，雖有許多和彈道式移動相關的研究，但各研究對於彈道式移動的定義並沒有一致性。心理學家將彈道式移動視爲在沒有視覺回饋下所執行的快速移動(e.g., Brooks, 1979; Glencross, 1977; Schmidt & White, 1972; Welford, 1968)。而神經心理學家(e.g., Angel, 1974; Denier Van Der Gon & Wadman, 1977; Hallett & Marsden, 1977; Water & Strick, 1981)以更嚴謹的方式定義彈道式移動的執行，是不包含任何的感覺回饋(如視覺、聽覺及動覺等)。Hoffmann (1981) 和 Gan & Hoffmann (1988)則將困難指標(index of difficulty, 參考 Fitts (1954))小於等於 3 的自控步調瞄準移動(self-paced aiming movements)定義爲彈道式移動。

本文章中所探討的彈道式移動是爲了作爲解釋手控制移動的基本移動單位。對於彈道式移動的定義如下：(1)彈道式移動是根據一個動作神經脈衝所執行的移動單位、(2)彈道式移動一旦執行，在一個校正反應時間(corrective reaction time)內無法經由自主意識對正在執行的移動進行影響及校正及(3)彈道式移動是依據受測者以最快的速度所執行，並非根據外在設定頻率(如節拍器)所執行。

2.2 彈道式移動時間

彈道式移動時間指的是執行一個彈道式移動所需要的時間。過去相關的研究爲 Gan &

Hoffmann 在 1988 年所執行的研究。Gan & Hoffmann 首先懷疑 Fitts Law (Fitts, 1954)對於彈道式移動(困難指標小於 3 的瞄準移動)的適用性。接著，他們證明自己所提出的 Equation 1 比 Fitts Law 更能描述移動時間($t_{ballistic}$)與移動距離(A)之間的關係。

$$t_{ballistic} = a + b\sqrt{A} \quad (1)$$

其中， a 和 b 爲實驗常數項。

2.3 彈道式移動變異

彈道式移動變異指的是執行彈道式移動的落點誤差。在手控制移動機制中，由於存在著未知的雜訊(noise)，一個彈道式移動的執行未必能準確地著落於預定的目標點(Meyer, Smith, & Wright, 1982; Schmidt, Zelaznik, Hawkins, Frank, & Quinn, 1979)。而彈道式移動的落點是以常態分配的機率座落在目標點的周圍(Crossman & Goodeve, 1963/1983; Fitts, 1954; Fitts & Radford, 1966; Welford, 1968; Woodworth, 1899)。

與預測彈道式移動誤差相關的研究主要來自於 Howarth 和 Beggs 等人。基於對視覺回饋如何影響瞄準移動的準確度感到興趣，Howarth et al. (1971)在實驗中請受測者拿著筆從肩膀上方的位置對置於正前方牆上約離 50 公分的十字目標執行瞄準移動。受測者依照幾種設定的頻率，盡可能地控制手中的筆準確點觸在十字目標的中心。爲了控制筆在接觸目標前視覺回饋消失的時間，實驗室內的燈光在筆接近目標前的幾個設定距離會自動熄滅。因此，在點擊目標前沒有視覺回饋的移動便成了「彈道式移動」。針對實驗量測結果，他們發展了一個模型來描述和移動方向垂直的移動誤差以及沒有視覺回饋下移動距離的關係。如同 Equation 2 所示：

$$\sigma^2 = a + b \times d_u^2 \quad (2)$$

移動落點的變異數(σ^2)和沒有視覺回饋的移動距離的平方(d_u^2)成線性關係。其中， a 和 b 爲實驗常數項。此外，Beggs et al. (1972) 及 Beggs, Sakstein, & Howarth (1974) 在另一種瞄準移動的實驗中也測試了以 Equation 2 描述和移動方向相同的誤差的可能性。

2.4 研究動機及目的

由於 Gan & Hoffmann (1988)和 Howarth et al. (1971)所研究的移動和本研究中所定義的彈道式移動相近，Equation 1 及 Equation 2 有著相當高的可能性能被應用來預測執行彈道式移動的時間及誤差。但基於下列幾點原因，進一步的驗證

是必要的。如同文章一開始所述，各研究對於彈道式移動的定義並非完全相同。Gan & Hoffmann (1988) 所定義的「彈道式移動」指的是困難指標小於 3 的自控步調瞄準移動。由於這些移動的時間皆小於 200 毫秒，即使受測者的視覺回饋沒受到任何的限制，移動的準確度在如此短的時間內也無法得到視覺回饋的幫助。然而，本研究定義的彈道式移動並不受限於小於 200 毫秒的執行時間。因此，驗證 Equation 1 是否適用於執行時間需要超過 200 毫秒的彈道式移動是必要的。同樣的，Howarth et al. (1971) 所研究的「彈道式移動」為在點擊目標點前沒有視覺回饋的移動。這樣的「彈道式移動」在移動開始時(開始沒有視覺回饋時)的移動速度並不為零，而移動的停止也並非完全屬於自主性控制 – 部份取決於實驗中牆的阻擋。而且 Howarth et al. (1971)、Beggs et al. (1972) 及 Beggs, et al. (1974) 實驗中所量測的瞄準移動皆為定速瞄準移動(paced aiming movements)。受限制的移動時間是有可能對移動的誤差產生影響(Schmidt et al., 1979)。另外，雖然 Beggs et al. (1972) 及 Beggs et al. (1974) 曾試著利用 Equation 2 描述和移動方向相同的誤差，但或許也就是因為所採用的為定速瞄準移動，所量測到的水平誤差和垂直誤差並無太大的差異。根據過去的研究顯示，水平誤差大概是垂直誤差的兩倍(e.g., Crossman & Goodeve, 1963/1983; Schmidt et al., 1979)。最後，設計一個實驗方法同時量測人員執行彈道式移動所需要的時間及誤差也是必須的。然而，到目前為止並沒有任何研究及實驗同時對彈道式移動所需的時間及準確性進行量測與研究。

基於上述幾個原因，本研究主要目的首先在設計一個實驗，用以量測彈道式移動時間及兩種彈道式移動誤差。而量測到的實驗數據將用以初步測試 Gan & Hoffmann (1988)的 Equation 1 及 Howarth et al. (1971)的 Equation 2 在預測彈道式移動時間及彈道式移動誤差的可行性。

3. 研究方法

3.1 受測者與實驗設備

本研究所呈現的為初步測試階段的結果，受測者僅為兩位男研究生及兩位女研究生，他們的年齡介於 25 及 30 歲之間，其慣用手皆為右手。

實驗設備包含一台個人電腦、一個 Wacom Intous 3 電腦繪圖板及自行開發的實驗程式。個人電腦所使用的是 17 吋的液晶螢幕，解析度設為 1280 × 1024 畫素。繪圖板的有效範圍為 30.5

× 48.8 公分，繪圖筆的準確度為 ± 0.025 公分。實驗程式使用 Visual Basic 6 所撰寫。

3.2 實驗設置

如圖 1 所示，在實驗中受測者坐在一張雙桌面，且高度可調整的桌子前。液晶螢幕及繪圖板分別放置於後桌面及前桌面上，並且調整到受測者覺得合適的高度(螢幕大約置於眼睛水平面下 15°，而繪圖板大約置於上臂自然垂下時手肘的高度)。受測者使用圖中的繪圖板專用筆在繪圖板上執行彈道式移動。繪圖板的操控距離和螢幕上游標移動距離比例設為 1:1。在執行每一個彈道式移動前，如圖 2 所示，螢幕上呈現需執行的彈道式移動。為執行彈道式移動，受測者首先使用專用筆控制游標移動至起始點(圖中左方的小圓點)上，接著將筆點於繪圖板上以做好執行移動前的準備。在執行移動的過程中，受測者需快速且不間斷地控制游標畫一直線至十字目標的交點。為了使移動為彈道式，在游標離開起始點的同時，螢幕上的起始點、十字目標及游標會暫時消失直到受測者停止移動為止。如圖 3 所示，在移動停止後，螢幕上會出現該彈道式移動的路徑及最後的落點。受測者可以游標點擊螢幕上任何一點後，繼續執行下一個彈道式移動。為了減少不必要的實驗變因，首先，在繪圖板和受測者眼睛之間放置了一塊保麗龍板以隔離來至手的視覺回饋。另外，在執行彈道式移動的過程中，受測者穿戴半指的尼龍手套以降低，並維持手和繪圖板之間的摩擦力。



圖 1 彈道式移動實驗設置

實驗中主要的操縱變因為 14 種移動距離：8, 17, 32, 53, 80, 113, 152, 197, 248, 305, 368, 437, 512 & 593 畫素 (1 畫素 \cong 0.266 公厘)。為了避免受測者對重複性的移動產生動覺回饋(kinesthetic feedback)，兩個水平位移(± 100 畫素)及兩個垂直位移(± 40 畫素)被用來決定四

個彈道式移動不同的起始點。每位受測者以隨機的順序對每一種距離及起始點的實驗組合執行共 5 次的彈道式移動。因此，每一受測者總共執行 280 次的移動。

實驗的應變變因除了彈道式移動時間外，彈道式移動落點誤差以兩個方向進行量測 – 和移動方向垂直的誤差以及和移動方向平行的誤差。實驗程式會在每一次移動執行後，自動記錄這三項應變變因。

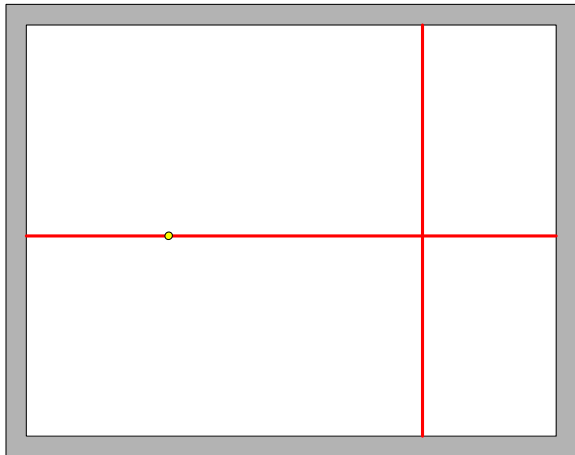


圖 2 執行彈道式移動前的螢幕畫面

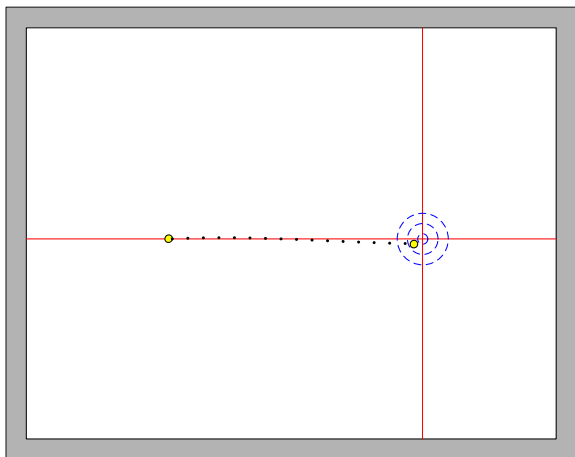


圖 3 執行彈道式移動後的螢幕畫面

4. 研究結果

4.1 彈道式移動時間

量測到的彈道式移動時間首先進行變異數分析。分析所採用的模型為：距離、水平位移和垂直位移設為固定影響(fixed effect)，而受測者設為隨機影響(random effect)。分析的項目包含主要影響、二維及三維的交互影響。對彈道式移動時間有顯著影響的為受測者($F_{3,896} = 12.42, p < 0.001$)、距離($F_{13,896} = 64.12, p < 0.001$)和受測者 × 距離($F_{3,896} = 7.55, p < 0.001$)。由於受測者和距離對於彈道式移動時間有顯著的影

響，可進行應用 Equation 1 描述 $t_{ballistic}$ 的驗證。而受測者和距離之間的交互作用說明著不同受測者因移動距離增長而增加 $t_{ballistic}$ 的比例有顯著的差異。

彈道式移動時間的平均值對距離的平方根作線性迴歸分析所得到的截距(a)、斜率(b)及 r^2 值呈現在表 1 中。結果顯示 Equation 1 對於實驗資料的描述能力很好。它解釋了全部受測者資料 98.1% 的變異，而對各別受測者的資料，它至少解釋了 95.2% 以上的變異。對全部及各別受測者量測資料所作的迴歸分析分別顯示在圖 4 及圖 5 中。雖然兩個圖中所看到的關係略呈孤狀，但 Equation 1 對於資料描述的適用性是肯定的。

表 1 Equation 1 對彈道式移動時間的描述結果

模型	$t_{ballistic} = a + b\sqrt{A}$		
受測者	a (毫秒)	b (毫秒 × pixel ²)	r^2
全部	58.32	17.38	0.981
1	27.27	23.16	0.992
2	73.58	16.34	0.952
3	60.99	15.87	0.966
4	71.44	14.15	0.962

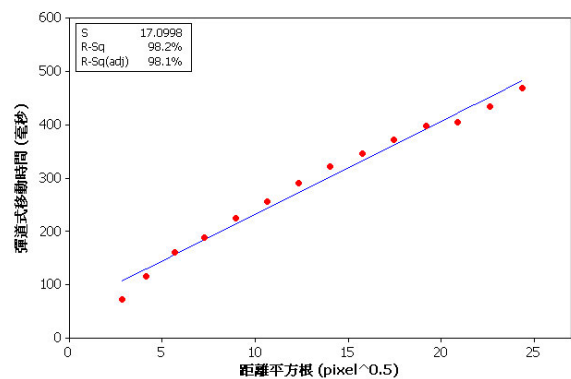


圖 4 彈道式移動時間和距離平方根之間的關係 (全部受測者)

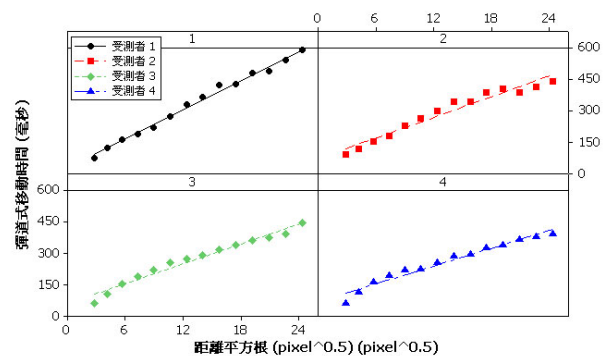


圖 5 彈道式移動時間和距離平方根之間的關係 (個別受測者)

4.2 彈道式移動變異

量測到的水平誤差及垂直誤差首先經由常態檢定後確認兩種誤差皆符合常態分配 ($p < 0.001$)。接著，兩種誤差被分常數誤差 (constant error) 及變數誤差 (variable error) 進行和對彈道式移動時間使用一樣的變異數分析。由於本研究目的主要驗證 Equation 2 在描述兩種變數誤差的有效性，以下僅對變數誤差進行說明。

變異數分析的結果發現，受測者對水平變數誤差有顯著影響 ($F_{3,126} = 6.23, p = 0.001$)。距離對水平變數誤差 ($F_{13,126} = 13.77, p < 0.001$)，以及對垂直變數誤差 ($F_{13,126} = 14.75, p < 0.001$) 皆有顯著影響。由於距離對水平變數誤差及垂直變數誤差皆有顯著的影響，可進行應用 Equation 2 描述兩種誤差的驗證。

所量測到的水平變數誤差及垂直變數誤差在取得平均值後，對距離的平方作線性迴歸分析。分析的結果分別顯示在表 2 及表 3 中。結果顯示 Equation 2 對於全部受測者的資料有著相當好的描述能力，對水平誤差及垂直誤差分別解釋了 92.4% 及 97.8% 的變異。對於個別受測者的水平誤差及垂直誤差資料，Equation 2 分別描述了至少 78.8% 及 79.9% 的變異。對全部受測者水平誤差及垂直誤差所作的迴歸分析則顯示在圖 6 及圖 7 中。在圖中可觀察到 Equation 2 對兩種誤差的描述能力。所量測到的水平誤差大概是垂直誤差的四倍。

表 2 Equation 2 對水平變數誤差的描述結果

模型	$\sigma_x^2 = a + b \times d_u^2$		
受測者	a (pixel ²)	b (unit)	r ²
全部	181.5	0.005010	0.924
1	186.5	0.006074	0.825
2	148.4	0.002865	0.788
3	79.71	0.004510	0.948
4	252.5	0.006683	0.830

表 3 Equation 2 對垂直變數誤差的描述結果

模型	$\sigma_y^2 = a + b \times d_u^2$		
受測者	a (pixel ²)	b (unit)	r ²
全部	28.56	0.001428	0.978
1	38.74	0.000937	0.801
2	10.95	0.000861	0.919
3	0.76	0.001170	0.820
4	19.37	0.001519	0.799

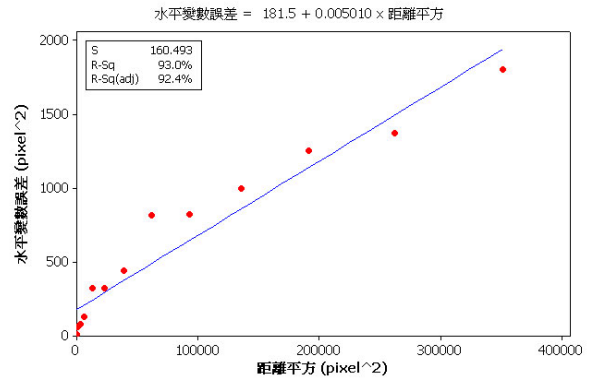


圖 6 水平變數誤差和距離平方之間的關係

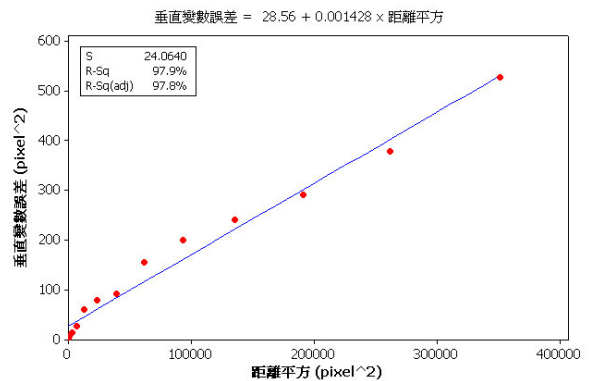


圖 7 垂直變數誤差和距離平方之間的關係

4.3 討論

本研究所設計的實驗成功量測到受測者在實行彈道式移動時所需要的時間以及和移動方向水平及垂直的誤差。

以量測到的資料對 Equation 1 及 Equation 2 進行初步驗證的結果說明了兩個模型在描述資料可行性。Equation 1 有效地描述執行彈道式移動的時間是和距離的平方根成線性關係，而這樣的線性關係並不受限於 Gan & Hoffmann (1988) 所設定的 200 毫秒以內的「彈道式移動」。由圖 1 及圖 2 可觀察到，Equation 1 所描述的線性關係一直延伸到 450-600 毫秒。同樣地，Equation 2 對於執行彈道式移動的水平誤差及垂直誤差皆有良好的描述能力。如 Equation 2 所示，兩種誤差所量測到的變異數皆和移動距離平方成線性關係。有異於過去的研究結果，本實驗所量測到的水平誤差遠大於垂直誤差達四倍之多。另外，相較於水平誤差，Equation 2 對於垂直誤差有著較佳的描述能力。

雖然此初步測試結果顯示了實驗量測資料及兩個模型的可行性，受測者人數限制了對於兩個模型有效性的驗證。為了進一步驗證兩個模型，更多的受測者的量測是必需的。

5. 結論與建議

以作為解釋手控制移動為目的，本研究設計一個實驗以量測彈道式移動時間及兩種彈道式移動誤差(水平與垂直)，並且驗證 Gan & Hoffmann (1988)及 Howarth et al. (1971)兩個模型分別在預測彈道式移動時間及彈道式移動誤差的可行性。實驗方法成功量測到受測者在執行彈道式移動的時間與兩種誤差，而所量測得到的資料也初步驗證了兩個模型的可行性。正如 Equation 1 及 Equation 2 所描述，執行彈道式移動的時間和移動平方根成線性關係，而彈道式移動的水平及垂直誤差的變異數皆和移動距離的平方成線性關係。

接下來的研究將著重於(1)量測更多的受測者(10 至 12 位)以提高兩個模型驗證的有效性(2)對於在圖 1 及圖 2 中所觀察到的非線性關係作進一步的分析與探討及(3)研究 Equation 2 對於水平誤差及垂直誤差描述的差異性。

參考文獻

- Accot, J., & Zhai, S. (1997). Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems. Atlanta, Georgia, United States, ACM Press: 295-302.
- Angel, R.W. (1974). Electromyography during voluntary movement: The two-burst pattern. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 36, 493-498.
- Beggs, W.D.A., Andrew, J.A., Baker, M.L., Dove, S.R., Fairclough, I., & Howarth, C.I. (1972). The accuracy of non-visual aiming. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 24, 515-523.
- Beggs, W.D.A., Sakstein, R., & Howarth, C.I. (1974). The generality of a theory of the intermittent control of accurate movements. *Ergonomics*, 17(6), 757-768.
- Brooks, V.B. (1979). Motor-program revisited. In R.E. Talbot & D.R. Humphrey (Eds.), *Posture and movement*. New York: Raven Press.
- Crossman, E.R.F.W., & Goodeve, P.J. (1963/1983). Feedback control of hand-movement and Fitts' law. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 35A, 251-278.
- Denier Van Der Gon, J.J., & Wadman, W.J. (1977). Control of fast ballistic human arm movement. *Journal of Physiology*, 271, 28-29.
- Drury, C.G. (1971). Movements with lateral constraint. *Ergonomics*, 14(2), 293-305.
- Drury, C.G., Montazer, M.A., & Karwan, M.H. (1987). Self-paced path control as an optimization task. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 17(3), 455-463.
- Fitts, P.M. (1954). The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, 47, 381-391.
- Fitts, P.M., & Radford, B.K. (1966). Information capacity of discrete motor responses under different cognitive set. *Journal of Experimental Psychology*, 71, 475-482.
- Gan, K.-C., & Hoffmann, E.R. (1988). Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements. *Ergonomics*, 31, 829-839.
- Glencross, D.J. (1977). Control of skilled movement. *Psychological Bulletin*, 84(1), 14-29.
- Hallett, M., & Marsden, C.D. (1977). Effect of perturbations on the EMG pattern of ballistic movements in man. *Clinical Neurophysiology*, 43, 596.
- Hoffmann, E.R. (1981). An ergonomics approach to predetermined motion time systems. Proceedings from the 9th National Conference, Institute of Industrial Engineers, Australia, 30-47.
- Howarth, C.I., Beggs, W.D.A., & Bowden, J.M. (1971). The relationship between speed and accuracy of movement aimed at a target. *Acta Psychologica*, 35, 207-218.
- Keele, S.W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, 70(6), 387-403.
- MacKenzie, I.S., & Buxton, W. (1992). Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. Proceedings of ACM CHI's 92 Conference on Human Factors in Computing Systems, 7, 219-226.
- Meyer, D.E., Smith, J.E.K., & Wright, C.E. (1982). Models for the speed and accuracy of aimed movements. *Psychological Review*, 89(5), 449-482.
- Montazer, M.A., Drury, C.G., & Karwan, M.H. (1988). An optimization model for self-paced tracking on circular courses. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 18(6), 908-915.
- Schmidt, R.A., & White, J.L. (1972). Evidence for an error detection mechanism in motor skills: A test of Adam's closed-loop theory. *Journal of Motor Behavior*, 4(3), 143-153.
- Schmidt, R.A., Zelaznik, H.N., Hawkins, B., Frank, J.S., & Quinn, J.T. (1979). Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts. *Psychological Review*, 86, 415-451.
- Water, P., & Strick, P.L. (1981). Influence of 'strategy' on muscle activity during ballistic movements. *Brain Research*, 207, 189-194.
- Welford, A.T. (1968). *Fundamentals of skill*. New York: Barnes & Noble.
- Woodworth, R.S. (1899). The accuracy of voluntary movement. *The Psychological Review. Monographs supplement*, 3(13), 1-114.