

## 應用彈道式移動模型評估電腦滑鼠績效

### An application of ballistic movement models for evaluating computer mice

林瑞豐\* 黃吉佑 鍾靜文 蔡宜倩

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

juiheng@saturn.yzu.edu.tw

#### 摘要

儘管 Fitts' law (1954) 是最常被用來評估電腦輸入設備的方法，但以 Fitts' law 作為評估方法，不僅存在著理論上的問題，也無法提供操控設備時，移動速度與準確度上獨立表現的評估。本研究的主要目的除了驗證以兩種彈道式移動模型作為電腦滑鼠評估方法的有效性外，並證實此新評估方法的優越性。在兩個階段的實驗中，四名受測者使用六款滑鼠分別執行彈道式移動與自控步調瞄準移動。得到的實驗數據再分別以 Fitts' law 方法和彈道式移動模型進行六款滑鼠的分析與比較。實驗結果顯示：(1) 兩種彈道式移動模型能有效地描述資料的變異性及 (2) 彈道式移動模型方法提供了滑鼠在「速度」與「準確度」上獨立表現的比較。未來在進一步的研究中，受測者人數、滑鼠驅動程式的差異性與受測者個人差異將會納入考量。

**關鍵詞：**Fitts' law、電腦滑鼠、輸入設備評估、彈道式移動、瞄準移動

#### Abstract

Although Fitts' law (1954) is the most common method utilized to evaluate computer input devices, using Fitts' law as an evaluation method is not completely supported by theoretical rationale. Furthermore, the Fitts' law method cannot provide independent evaluation information of speed and accuracy while operating input devices. The main purposes of this study are (1) to validate the application of ballistic movement models for evaluating computer mice and (2) to demonstrate the superiority of this new evaluation method. In a two-stage experiment, six participants used six different computer mice to execute self-paced aiming movements and ballistic movements, respectively. The measured data then were analyzed by Fitts' law and ballistic movement models so that mice's performance could be compared. The results showed that (1) ballistic movement models can well fit the measured data and (2) the new evaluation method can provide independent performance information of "speed" and "accuracy" while operating mice. Future research will focus on adequate participant, the driver difference of computer mouse, and individual difference.

**Keywords:** Fitts' law, computer mouse, input device, ballistic movement, aiming movement

#### 1. 前言

電腦的使用對於現代人的生活，不管是辦公、社交還是娛樂，都扮演著不可或缺的角色。使用電腦時，最常使用的輸入裝置包含鍵盤以及滑鼠。

為了提升工作效率或降低工作傷害，市面上因應不同需求所設計的滑鼠不斷推陳出新。在這些滑鼠之中，或標榜人體工學設計，或提供額外的功能鍵、更或是強調直覺式的操作控制。然而，這

些滑鼠的廣告、宣傳是否言過其實，是消費者與人因工程專家所希望了解的。一般被廣泛用來評估滑鼠優缺點的方法，除了專家評估、使用者主觀意見問卷或訪談調查外，直接進行工作績效評估是最常被使用的方法。

## 2. 文獻探討

### 2.1 現有輸入設備的評估方法

Fitts' law (1954) 和它所描述的自控步調瞄準移動 (self-paced aiming movement) 是目前最常被用來評估移動控制設備工作績效的方法。自控步調瞄準移動指的是人快速地移動一個物件，在移動一段特定的距離後，停留在預定的目標物上。針對這類的移動，Fitts' law 成功地闡述了移動的速度與準確度之間的交互關係。如公式 1 所示，移動時間 ( $MT$ ) 隨著瞄準移動困難指標 (index of difficulty;  $ID$ ) 的增加而成線性增長，其中  $a$  和  $b$  為實驗所得的常數項，而困難指標 (公式 2) 是由距離 ( $A$ ) 和目標線的寬 ( $W$ ) 所構成的指數項。

$$MT = a + b \times ID \quad (1)$$

$$ID = \log_2 \left( \frac{2A}{W} \right) \quad (2)$$

為了輸入評估設備，實驗人員以 Fitts (1954) 的實驗內容為基礎，量測受測者在使用不同的設備，執行不同困難指標的自控步調瞄準移動所需要的時間。接著，以 Fitts' law 對實驗資料進行迴歸分析，以圖示法比較不同輸入控制設備的績效表現。除此之外，迴歸線的斜率與截距也被作為評估的量化指標。公式 3 所表示的是以公式 1 中斜率的倒數 ( $1/b$ ) 所形成的表現指標 ( $I_p$ )。

$$I_p = ID/MT \quad (3)$$

表現指標所解釋的是「受測者執行特定困難度的移動時，每秒能處理的反應資訊量」。運用公式 3 評估移動控制設備的研究如 MacKenzie、Soukoreff & MacKenzie (1995) 和 Zhai, Morimoto, & Ihde (1999) 等。然而，公式 3 所描述的表現指標因為忽略了 Fitts' Law 中非零的截距項( $a$ )，而存在著理論上的問題。為了解決這個問題，國際標

準組織在 ISO 9241-9 (ISO, 2000) 的規定中，以總處理能力 ( $TP$ : Throughput) 來取代表現指標。總處理能力的計算方式如公式 4 所示，是等於有效困難指標 ( $ID_e$ ) 除以移動時間 ( $MT$ )。

$$TP = ID_e/MT \quad (4)$$

不同於困難指標，有效困難指標是以有效目標寬度 ( $W_e$ ) 及修改後的 Fitts' Law (MacKenzie, 1989; MacKenzie, 1992) 所求得 (請見公式 5)。為了克服受測者可能沒有完全使用到全部目標寬度所產生的問題，有效目標寬度是以實際量測移動落點的 4.133 標準差所計算 (Schmidt et al., 1978)。而更改後的 Fitts' Law 可減少迴歸模型中負載距的發生 (MacKenzie, 1989; MacKenzie, 1992)。

$$ID_e = \log_2 \left( \frac{D}{W_e} + 1 \right) \quad (5)$$

相較於公式 3，以公式 4 作為評估方法，雖然克服了瞄準目標無效寬度的問題以及減少了 Fitts' Law 的負載距問題。但是和公式 3 一樣，以公式 4 所求得的總處理能力同樣也只能用來說明特定困難指標下的移動 (Zhai, 2004)；一個表現指標只適用於形容單一困難指標下的移動。

### 2.2 彈道式移動

近年來，Lin et al. (2009) 所提出的通用性移動模型說明了自控步調瞄準移動，是由基本的移動單位 – 彈道式移動所構成。而執行彈道式移動所需要的時間與執行後所產生的落點誤差則是影響瞄準移動的速度與準確度的兩個要點。以下就分別對這兩個要點作說明。

#### 2.2.1 彈道式移動時間模型

彈道式移動時間指的是執行一個彈道式移動所需要花費的時間。Lin (2009) 已證實 Gan & Hoffmann (1988) 所提出的公式 6 能有效地描述與預測彈道式移動時間( $t_{ballistic}$ )與彈道式移動距離( $d_u$ )之間的關係。

$$t_{ballistic} = a + b \times \sqrt{d_u} \quad (6)$$

公式中的  $a$  和  $b$  為實驗常數項。如公式所示，執行

彈道式移動所需要的時間與移動的距離的平方根成線性關係。

### 2.2.2 彈道式移動變異模型

彈道式移動變異為一個彈道式移動的落點誤差。在人的動作控制系統中，由於存在著某些神經雜訊，彈道式移動無法每一次準確地依照大腦所下達的指令停留在預定的目標點上(Milner, 1992; Novak et al., 2000)。不管落點誤差的量測方式是和移動的方向呈平行或垂直，實際落點的分佈機率會是一個以目標點為中心的常態分配(Crossman and Goodeve, 1963/1983; Fitts, 1954)。為了描述彈道式移動在二維空間中的落點誤差，Lin (2009) 驗證了 Howarth et al. (1971) 所發展的公式 7 對於兩種彈道式移動變異( $\sigma^2$ )的有效性。

$$\sigma^2 = a + b \times d_u^2 \quad (7)$$

公式中的 $a$ 和 $b$ 為實驗常數項。驗證結果顯示：不管是與移動方向平行或與垂直所量測到的兩種誤差( $\sigma_x^2$ 和 $\sigma_y^2$ )都與彈道式移動的距離的平方( $d_u^2$ )成線性關係。

### 2.3 研究動機及目的

雖然 Fitts' law 本身和所描述的瞄準移動已被廣泛地作為評估電腦輸入設備的方法，但此方法存在著特定的限制。除了上述所提到理論上的問題外，Fitts' law 方法所得到的是輸入設備在操作時間上的整合性的結果；所量測到的時間是由輸入設備在操控速度以及操控準確度上兩個表現的結果。無論是利用迴歸線比較圖、表現指標或總處理能力，評估人員雖可以比較不同設備在整體時間上的表現，但卻無法得知設備在「速度」及「準確度」上的獨立表現。

為了克服 Fitts' law 方法的限制，本研究的主要目的是驗證以彈道式移動以及兩種彈道式移動模型作為評估方法的優越性及有效性。

## 3. 研究方法

### 3.1 受測者與實驗設備

實驗受測者為四名(兩男兩女)年齡介於 19 至 20 歲的大學生。每位受測者的慣用手都是右手，

矯正後的視力都在 0.9 以上。

實驗設備包含硬體設備和軟體程式。硬體設備為一台個人電腦及六款不同設計的滑鼠(圖 1)。兩套程式是以 Visual Basic 6.0 自行開發的自控步調瞄準移動執行程式與彈道式移動執行程式。



圖 1 六款電腦滑鼠

### 3.2 實驗設置

實驗主要包含兩個階段，四名受測者在兩個階段中以六款滑鼠分別執行自控步調瞄準移動與彈道式移動。每位受測者在正式量測執行前，有充足的時間(二到三小時)熟悉六款滑鼠對於兩種移動程式的操作。在第一階段執行彈道式移動的過程中，受測者依照彈道式移動執行程式的指示，使用指定的滑鼠執行各種距離的彈道式移動。執行程式會在受測者執行每一個彈道式移動前出現如圖 2 的畫面。接著，受測者以滑鼠控制電腦游標移動至圖中的起始點後，按下滑鼠的左鍵以做好開始執行彈道式移動的準備。在執行移動的過程中，受測者控制游標快速，並且不間斷地畫一直線至螢幕中十字目標物的交點上。為了使移動為「彈道式移動」，在游標離開起始點的同時，螢幕上的起始點、十字目標及游標會在移動停止前暫時消失。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。以游標點擊螢幕上任何一點後，受測者可以繼續執行下一個彈道式移動。而圖 3 所顯示的為執行自控步調瞄準移動前的螢幕畫面。和執行彈道式移動相似，受測者以滑鼠控制游標在起始點上按下左鍵後作好執行移動的準備。在執行瞄準移動的過程中，受測者一樣控制游標以最快的速度畫一直線，並將游

標停於螢幕右邊的目標線中。在完成移動後，螢幕上會出現該瞄準移動的路徑。受測者可在點擊螢幕上任何一點後，繼續執行下一個瞄準移動。

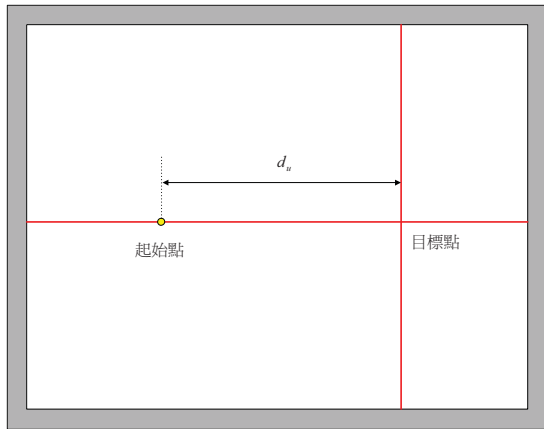


圖 2 彈道式移動執行前的螢幕畫面

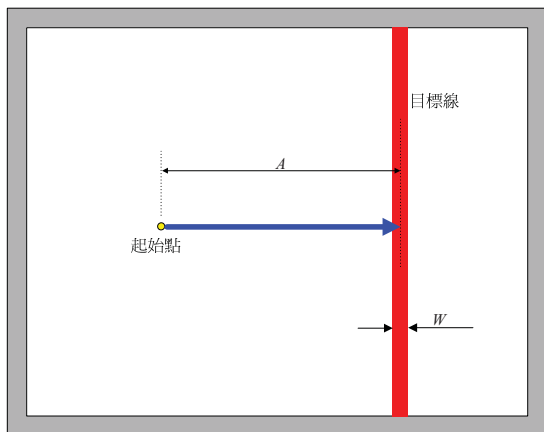


圖 3 自控步調瞄準移動執行前的螢幕畫面

### 3.3 實驗變因

在第一階段彈道式移動實驗中，自變項為彈道式移動的距離和六款滑鼠。移動距離為 8、17、32、53、80、113、152、197、248、305、368、437、512 和 593 畫素 (1 畫素  $\cong$  0.266 公厘)。除了距離和滑鼠外，為了減少受測者對相同起始點的重複性移動所產生的動覺回饋 (Kinesthetic Feedback)，在實驗中以兩個水平位移 ( $\pm 100$  畫素) 及兩個垂直位移 ( $\pm 100$  畫素) 決定四個不同的起始點位置。每位受測者使用六款滑鼠執行彈道式移動。針對每款滑鼠，受測者以隨機的順序對距每一種距離及起始點所組成的實驗組合，共執行五次的彈道式移動。因此，一位受測者使用一款滑鼠所執行的移動為 280 次。實驗中的依變項除

了執行移動所花費的時間外，移動的落點誤差以兩個方向進行量測，包含和移動方向垂直和平行的誤差。

在第二階段自控步調瞄準移動實驗中，自變項是以修改後的 Fitts' Law (MacKenzie, 1989; MacKenzie, 1992) 所決定的困難指數 (2、3、4 和 5 bits) 和六款滑鼠。與彈道式移動執行程式一樣，四個不同的起始點位置同樣被用來減少動覺回饋。針對每一款滑鼠，受測者以隨機的順序對每一種由困難指標及起始點所組成的實驗組合執行兩次瞄準移動。因此，一位受測者使用一款滑鼠所執行的瞄準移動為 120 次。實驗中唯一的依變項為執行瞄準移動所花費的時間。

## 4. 研究結果

### 4.1 變異數分析

首先對實驗量測到的數據進行變異數分析。第一階段彈道式移動實驗的分析結果顯示，受測者、滑鼠和移動距離三個自變項分別對時間、垂直誤差及平行誤差三個依變項都有極顯著的影響，除了移動距離對於垂直誤差影響的  $p$  值是小於 0.05 外，其餘影響的  $p$  值都是小於 0.001。第二階段自控步調瞄準移動實驗的分析結果顯示，受測者、滑鼠和移動距離三個自變項對移動時間皆有極顯著的影響 ( $p < 0.001$ )。

### 4.2 以 Fitts' law 評估滑鼠的結果

由於困難指標對於執行自控步調瞄準移動的時間有顯著的影響，量測資料可進一步以 Fitts' law 方法進行滑鼠工作績效的分析與比較。

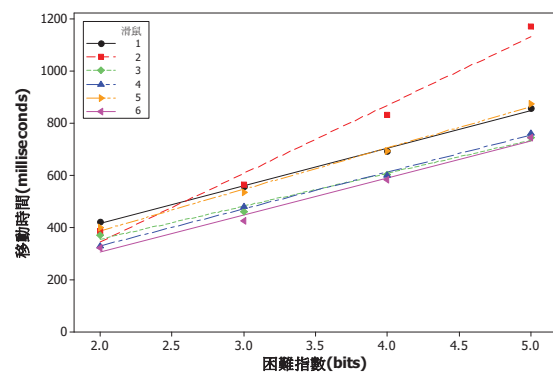


圖 4 以修改後的 Fitts' law 評估六款滑鼠的比較圖



上圖 4 是以修改後的 Fitts' law 對移動時間與困難指標作線性迴歸分析後所得到的比較圖。迴歸分析中  $r^2$  的平均值為 0.99, 而最小 p 值為 0.97。而圖 5 是對六款滑鼠所求得的總處理能比較圖。由兩個圖中可發現, 表現最好的為滑鼠 6, 而表現最差的為滑鼠 2。

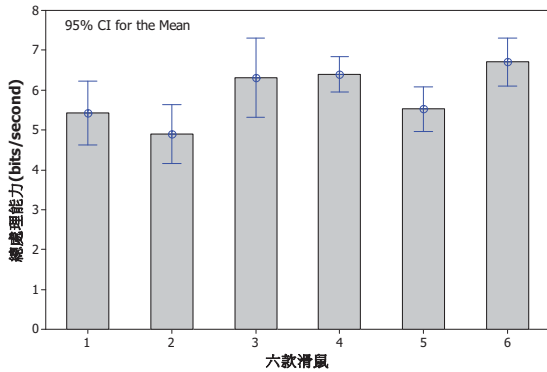


圖 5 以總處理能力評估六款滑鼠的比較圖

### 4.3 以彈道式移動模型評估滑鼠的結果

同樣的, 由於移動的距離對執行彈道式移動的時間以及兩個方向的誤差皆有顯著的影響, 量測的資料可進一步以彈道式移動進行滑鼠工作績效的分析與比較。圖 6 是以公式 6 對移動時間和移動距離平方根作線性迴歸分析(平均  $r^2 = 0.96$ ; 最小  $r^2 = 0.97$ ) 後所得到的表現比較圖。由圖中可發現在移動速度上, 滑鼠 4 的表現最好, 而滑鼠 5 的表現最差。

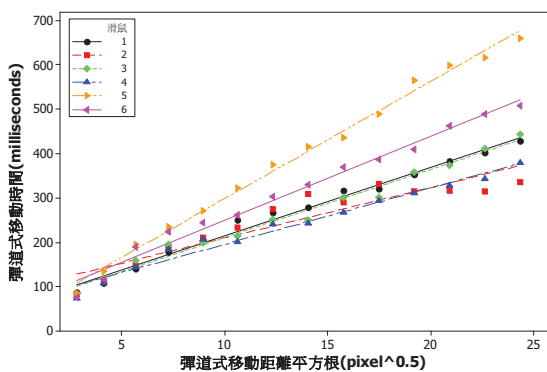


圖 6 以彈道式移動時間模型評估六款滑鼠的比較圖

而圖 7 和圖 8 是以公式 7 分別對移動的垂直誤差 (平均  $r^2 = 0.92$ ; 最小  $r^2 = 0.80$ ) 與平行誤差 (平均  $r^2 = 0.95$ ; 最小  $r^2 = 0.93$ ) 作線性迴歸分析後所得到的比較圖。整體而言, 平行誤差 ( $\sigma_x^2$ ) 大略是垂直誤差 ( $\sigma_y^2$ ) 的 10 倍。關於滑鼠的比較,

無論是比較平行誤差還是垂直誤差, 滑鼠 6 的表現都是六款滑鼠中最好的。此外, 滑鼠 2 在平行誤差上的表現最差, 而滑鼠 5 在垂直誤差上的表現最差。

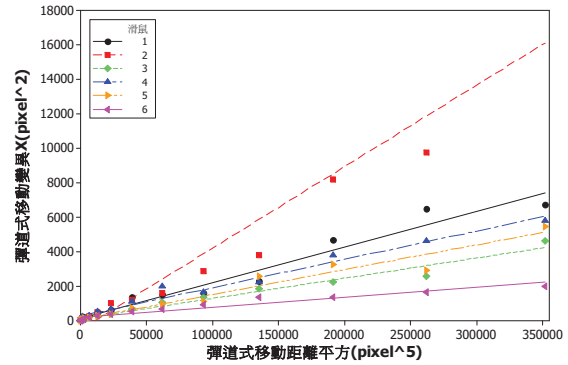


圖 7 以彈道式移動變異模型對六款滑鼠的平行誤差作線性迴歸分析後所得到的表現比較圖

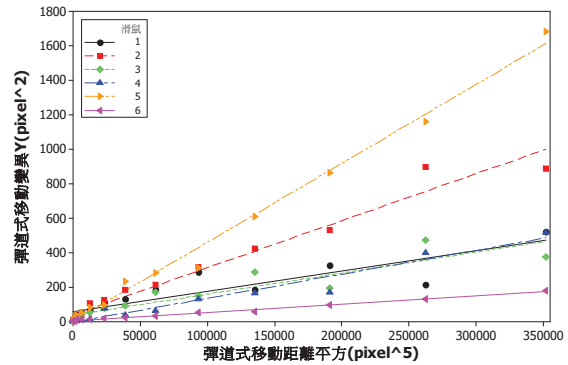


圖 8 以彈道式移動變異模型對六款滑鼠的垂直誤差作線性迴歸分析後所得到的表現比較圖

### 5. 討論

由實驗結果可知, 彈道式移動和兩種彈道式移動模型確實是能用來作為評估滑鼠的新方法。由圖 6、圖 7 與圖 8 可知, 兩種模型能有效地描述實驗資料的變異性。另外, 以彈道式移動作為評估方法確實能提供比 Fitts' law 方法更明確的績效資訊; 彈道式移動模型方法能提供滑鼠在「速度」與「準確度」上獨立的績效資訊, 而 Fitts' law 方法只提供了兩個績效的整合結果。舉例而言, 由圖 4 線性迴歸分析圖與圖 5 的總處理能力比較圖得知, 滑鼠 6 的表現比滑鼠 3 與滑鼠 4 來得好一些, 但卻無法瞭解其中的原因是因為滑鼠 6 相較於滑鼠 3 與滑鼠 4 是在操控的移動速度上比較好, 還是在操控的移動準確度上比較好。但從圖 6 可發現, 滑鼠 6 在操控的移動速度上並沒有比滑

鼠 3 及滑鼠 4 好，出人意料的，滑鼠 6 反而是六款滑鼠中第二差的，而滑鼠 4 確是六款滑鼠中最好的。接著再觀察圖 7 與圖 8 可發現原來滑鼠 6 的整體表現比滑鼠 3 與滑鼠 4 好的原因，是因為滑鼠 6 在操控時的移動誤差（不論是與移動方向垂直或與移動方向平行）是六款滑鼠中最小的。滑鼠 2 是另外一個說明彈道式移動模型方法優越性的例子 – 滑鼠 2 的整體表現之所以差的原因並不在操控時的移動速度上（請見圖 6），相反地，滑鼠 2 在速度上的表現在六款滑鼠中僅次於滑鼠 4。其主要的原因是肇因於在平行誤差上的不良表現（請見圖 7）。由此可知，以彈道式移動模型作為評估方法，能提供滑鼠在「速度」與「準確度」上獨立的評估資訊，如此的優點是使用 Fitts' law 方法所無法達成的。

## 6. 結論與建議

在這個測試性實驗中，我們初步驗證了以彈道式移動時間模型與彈道式移動變異模型來評估電腦滑鼠工作績效的有效性，並且說明了這個新評估方法相較於 Fitts' law 方法的優越性。不同於使用 Fitts' law 方法所得到的整合性表現，使用彈道式移動模型方法可以提供滑鼠在「速度」與「準確度」上獨立的績效比較。

針對本研究的限制與未來的發展，在接下來的研究將著重於(1) 量測更多受測者(10 至 12 位)以提高實驗結果的有效性、(2) 排除滑鼠驅動程式的差異性及(3) 考慮受測者在使用不同滑鼠時的各別差異。

## 致謝

本研究為國科會專題研究計畫(國科會計畫 NSC99-2221-E-155 -066)補助支持，特此致謝。

## 參考文獻

1. 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.
2. 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.
3. Gan K.-C., Hoffmann E.R. (1988) Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements. *Ergonomics* 31:829-839.
4. 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.
5. ISO. (2000) International standard: Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 9: Requirements for non-keyboard input devices. International Organization for Standardization.
6. Lin J.-F. (2009) A unified model for self-paced movements, *Industrial & Systems Engineering*, The State University of New York at Buffalo, (unpublished dissertation).
7. Lin J.-F., Drury C., Karwan M., Paquet V. (2009) A general model that accounts for Fitts' law and Drury's model, *Proceedings of the 17th Congress of the International Ergonomics Association*, Beijing, China.
8. MacKenzie I.S. (1989) A note on the information-theoretic basis for Fitts' law. *Journal of Motor Behavior* 21:323-330.
9. MacKenzie I.S. (1992) Fitts' law as a research and design tool in human-computer interaction. *Human-Computer Interaction* 7:91-139.
10. Milner T.E. (1992) A model for the generation of movements requiring endpoint precision. *Neuroscience* 49:487-496.
11. Novak K.E., Miller L.E., Houk J.C. (2000) Kinematic properties of rapid hand movements in a knob turning task. *Experimental Brain Research* 132:419-433.
12. Schmidt R.A., Zelaznik H.N., Frank J.S. (1978) Sources of inaccuracy in rapid movement, in: G. E. Stelmach (Ed.), *Information processing in motor control and learning*, Academic, New York. pp. 183-203.
13. Soukoreff R.W., MacKenzie I.S. (1995) Theoretical upper and lower bounds on typing speed using a stylus and a soft keyboard. *Behaviour & Information Technology* 14:370-379.
14. Zhai S. (2004) Characterizing computer input with Fitts' law parameters - the information and non-information aspects of pointing. *International Journal of Human-Computer Studies* 61:791-809.
15. Zhai S., Morimoto C., Ih de S. (1999) Manual and gaze input cascaded (MAGIC) pointing. *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems: the CHI is the limit*:246-253.