

以彈道式移動模型評估不同方向下手的移動控制能力

Utilizing Ballistic Movement Models to Assess Hand-Control Movement Abilities under Different Directions

林瑞豐* 黃吉佑 蔡宜倩 林旻欣

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

在日常生活中人們頻繁地執行手控制移動以完成各種作業，然而基於身體四肢的肌肉骨骼組成，在水平面上不同方向下等距的移動需要不同的移動時間完成。由於過去的相關研究大多利用 Fitts' law 作為評估方法，因此我們無從得知在特定方向下需要較長時間的移動除了源於移動速度較慢外，是否也同時受到相較於其他方向的移動較差的準確度。為此，本研究目的是利用彈道式移動模型能將速度與準確度作獨立評估的特性，研究在水平面上不同方向下手在速度與準確度上獨立的移動控制能力。研究中募集了六名平均年齡為 20 歲的受測者。實驗設備除了一台桌上型電腦和一個作為輸入設備的繪圖板外，還包含一套自行開發的彈道式移動實驗執行程式。在實驗過程中，受測者使用繪圖板專用筆在繪圖板上隨機執行八個方向下十種不同距離的彈道式移動。移動過程中所量測到的移動時間與兩個方向的落點誤差變異數分別以兩種彈道式移動模型進行分析。研究結果顯示(1)兩種彈道式移動模型能有效描述量測資料的變異、(2)不同方向下移動速度的差異和過去研究結果一致 – 使用較少肢體及關節的移動所需花費的時間較短、(3)和移動方向相同所量測到的落點變異誤差並不會因不同的方向而有所差異、而(4)和移動方向垂直的變異誤差會在 0° 、 90° 、 180° 和 270° 時的移動較小。

關鍵詞：彈道式移動、彈道式移動模型、Fitts' law、手移動控制、輸入設備評估

Abstract

In everyday life, we frequently perform hand-control movements to complete a variety of tasks. Due to the limb structures, the time required to perform equivalent distance movement varies in different movement directions. Since most of relevant studies utilized Fitts' law to measure the differences, it is unclear whether movements performed in certain direction that take longer time are completely due to lower movement speed or partly due to lower movement accuracy as well. Therefore, the main objective of this study was to utilize ballistic movement models to separately assess the abilities of speed and accuracy while performing hand-control movements on the axial plane. Six participants who had average age of 20 years were recruited in this pilot study. Experimental equipment included a personal computer and a drawing tablet utilized as an input device. A self-developed experimental program was run by the personal computer so that the participants could perform ballistic movements on the drawing tablet. Ballistic movements were manipulated with eight movement directions and ten distances. Measured movement times and two-directional end-point variability

were then analyzed by two types of ballistic movement models. The results showed (1) both types of ballistic movement models predicted well the data variance, (2) in line with previous findings, movements that involve more limb parts and joints require longer movement times to complete, (3) movement directions had no effect on end-point variability measured in the movement direction, and (4) end-point variability measured perpendicularly to the movement direction were smaller for movements executed in the directions of 0° , 90° , 180° and 270° .

Keywords: ballistic movements, ballistic movement models, Fitts' law, hand-control movements, input devices evaluation

1. 前言

人們在日常生活中頻繁地藉由手控制移動完成各種作業，例如使用滑鼠控制螢幕中游標在 Windows 作業系統的桌面上以不同方向移動至預點選的圖示及按鍵。然而，因為身體肢體結構的組成，人員在執行不同方向下等距的移動所需花費的時間並非相同。過去最常被用來評估手移動控制能力以及輸入設備績效的方法為 Fitts' law[1]，但使用 Fitts' law 方法所得到的為完成一個瞄準移動所花費的時間，此時間取決於移動的距離以及目標物的大小，距離越遠所需要花的時間越長，而若目標物越小所要花費的時間也需要較長來達到較高的準確度。因此使用 Fitts' law 方法所量測到的移動時間為移動速度與移動準確度兩個表現的整合性結果，使用 Fitts' law 作為量測評估方法，研究人員並無法得知人員在執行移動或使用設備時速度與準確度的獨立表現。

近年來彈道式移動模型[2]為被建議可用來評估手控制移動以及輸入設備的新方法。Lin 等人[3, 4]證實一個 Fitts' law 所量測的瞄準移動事實上可由彈道式移動進行預測；我們可藉由量測人員執行彈道式移動的能力來預測該人員執行瞄準移動時的表現。因此，量測人員執行彈道式移動的能力同樣可評估該人員在執行一般作業時的手控制能力或是所使用輸入設備(如電腦滑鼠及搖桿)的績效表現。但不同於 Fitts' law，使用彈道式移動模型的最大好處是能將速度與準確度兩種表現作獨立的分析。因此，本研究試圖利用彈道式移動模型來探討手在不同方向下的移動速度與移動準確度的各別能力表現。

2. 文獻探討

2.1 手在不同方向下的移動表現

目前為止，有不少的研究探討在水平面上的手控制移動的執行時間是否會因不同的移動角度而有所差異[5-7]。圖 1 為人員在水平面上以右手執行不同方向移動的示意圖，Schmidtke and Stier[7]發現若人員以徒手進行移動，當移動方向為 55° 及 235° 時所花費時間最短；而移動方向為 145° 及 325° 時所花費時間最長。然而，若是以滑鼠為輸入設備，當移動在 0° 和 180° 時所需要花費的時間會最短；當移動方向為 315° 時需要花費相對較長的時間[5, 6]。

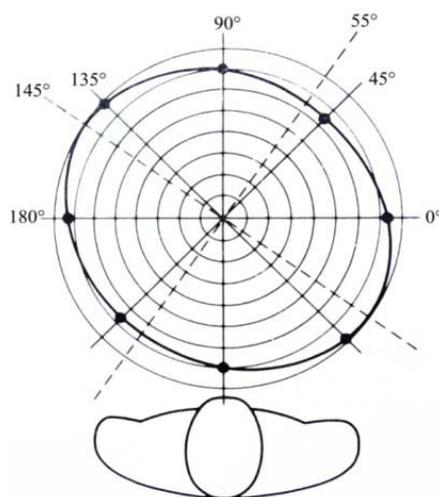


圖 1 手部在八個方向下的移動時間 [來源：7]

上述的研究結果乍看下雖不具一致性，但確符合同一原則：執行移動所需花費的時間是受移動時所使用肢體及關節的多寡所影響[8]。如同圖 1 中的徒手移動，當以右手進行右前(55°)與左後(235°)方向的移動時，主要是藉由伸展與彎曲肘關

節帶動前臂所完成，因為涉及到的肢體關節最少相對移動的速度最快；而當移動方向為左上(145°)與右下(325°)時，必須藉由肩關節與肘關節的改變以同時帶動上臂與前臂才能完成移動，因為所涉及到的肢體關節最多相對的移動速度最慢。

同樣的原則也適用在使用輸入設備進行移動的測量結果。當使用電腦滑鼠時，不同於徒手移動，在移動方向為 0° 和 180° 時所使用到的肢體關節反而是最少的，由於一般人會將滑鼠放置於慣用手的正前方使用，因此若想控制螢幕游標進行水平方向的移動，僅需要改變肘關節的角度以擺動前臂完成移動，因此 Whisenandad and Emurian[6] 得到使用滑鼠在水平方向(0° 和 180°)的移動所花費的平均時間最短的結果。而 Scarlett[5] 在五種不同滑鼠使用績較評估的研究中發現角度為 315° 時會得到較低的移動速度，此結果也同樣歸因於在此方向的移動所涉及到的肢體關節相對較多而產生較慢的移動速度。

上述探討不同方向下移動時間上差異的研究都是使用 Fitts' law 作為量測方法，Fitts' law 如公式 1 所示，闡述了移動的速度與準確度之間的交互關係。一個瞄準移動[1]所需要的執行時間(MT)會隨著困難指標(ID)的增加而呈線性增加，公式 1 中的 a 和 b 為實驗所得的常數項，而困難指標如同公式 2 所示，是由從起始點到目標中心的距離(A)和目標物寬度(W)所決定。

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

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

由公式 1 與公式 2 可知，當執行一個特定方向下的瞄準移動若需要相對較長時間的原因有可能是因為在該方向下的移動速度較慢，也有可能因為在該方向下的移動準確度較低，然而此問題的正確解答無法使用 Fitts' law 方法得知。

2.2 彈道式移動模型

Lin 等人[3, 4]說明彈道式移動是構成一般手控制移動的基本移動單位，一個彈道式移動是根

據一次視覺(及動覺)回饋所建構的動作神經脈衝所執行；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。Lin and Drury[2]為了使用彈道式移動來預測一般手控制移動，為彈道式移動兩個主要的特質驗證了彈道式移動時間模型與彈道式移動變異模型，兩種模型的說明如下：

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。如公式 3 所示，Lin and Drury[2]利用人員在繪圖板上的移動驗證了執行彈道式移動所需要的時間($t_{ballistic}$)與移動的距離的平方根($\sqrt{d_u}$)成線性關係，其中 e 和 f 為實驗常數項。

$$t_{ballistic} = e + f \times \sqrt{d_u} \quad (3)$$

而彈道式移動變異指的是執行一個彈道式移動的落點誤差。在執行彈道式移動後的實際落點會在目標點上以常態分配的方式呈現。公式 4 所描述的是與移動方向平行或垂直所量測到的兩種變異誤差(標示為 σ_x^2 與 σ_y^2)，皆會與彈道式移動距離的平方(d_u^2)為線性關係，其中 i 和 j 為實驗所得的常數項。

$$\sigma^2 = i + j \times d_u^2 \quad (4)$$

2.3 彈道式移動相關的應用

彈道式移動模型目前已被驗證於不同空間中的徒手移動與不同的輸入設備[2, 9-13]。Lin and Drury[2]首先以繪圖板上單方向的移動驗證兩種彈道式移動的有效性，接著林瑞豐等人[11]證實彈道式移動模型相較於 Fitts' law 在對不同滑鼠進行評估時，能提供 Fitts' law 所無法提供的速度與準確度的各別表現。而在三維空間中的移動，Lin and Ho[9, 13]使用彈道式移動模型量測手向身體前方不同方向移動時間與三軸落點變異誤差的差異，結果顯示右手在執行 150°(正右邊為 0°；正左邊為 180°)方向的移動以及左手在執行 30°方向的移動所需的時間最長，而所量測的三軸誤差中，誤差變異由高至低的依序排列為 X 軸(與移動方向相

同)、Z 軸(與移動方向呈上下垂直)而後 Y 軸(與移動方向呈左右垂直)。另外 Lin, Jiang, and Shih [10, 12]則是以彈道式移動模型分析年輕人與高齡者在使用觸控螢幕時手移動控制能力的差異，結果發現對於實驗中具有長期運動習慣的高齡者而言，他們的移動速度雖然比年輕人慢，但移動準確度未必會比年輕人來差。

2.4 研究動機及目的

手在不同方向下進行移動的速度會不同，而移動準確度或許有會有所差異，但使用 Fitts' law 方法無法有效量測速度和準確度的差異。因此本研究試著克服使用 Fitts' law 僅能得到「整合性」時間結果的限制，利用彈道式移動模型量測移動方向對於移動速度與準確度所產生的各別影響。

3. 研究方法

3.1 受測者與實驗設備

實驗受測者為六名平均年齡為 20 歲的大學生，所有受測者的慣用手皆為右手。

在研究中所需要用到的實驗設備包含一台桌上型電腦、繪圖板(Intous 3, 305 mm × 488 mm)以及彈道式移動實驗應用程式。彈道式移動實驗軟體使用 Visual Basic 6.0 進行開發，其主要的目的是讓受測者能在繪圖板上執行不同方向的彈道式移動，並在實驗過程中自動紀錄受測者執行彈道式移動所需要的時間以及產生的垂直誤差和水平誤差。

3.2 實驗設置

受測者使用繪圖板專用筆在放置於身體前桌面上的繪圖板上依螢幕上的指示，隨機執行不同方向且不同移動距離的彈道式移動。實驗應用程式在受測者執行每一次彈道式移動前會出現如圖 2 的執行畫面(以移動角度為 45° 為例)，受測者在看到此畫面後使用專用筆及繪圖板控制電腦游標移至起始點上作執行移動的準備，接著以快速且不間斷的移動畫一直線至十字交叉的目標點上。為了使移動為彈道式移動，在游標離開起始點的同時，螢幕上的游標、起始點以及十字目標皆會

暫時消失。當受測者停止移動時，螢幕才會再顯示執行移動後的路徑以及落點，如圖 3 所示。為了使得到的結果能與徒手的研究作比較以及減少受測者對於繪圖板的適應時間，繪圖板上的移動距離和螢幕中游標的移動距離比為 1 : 1。

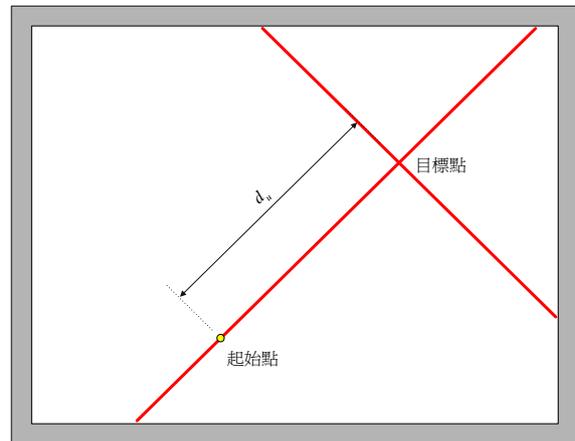


圖 2 彈道式移動執行前實驗畫面

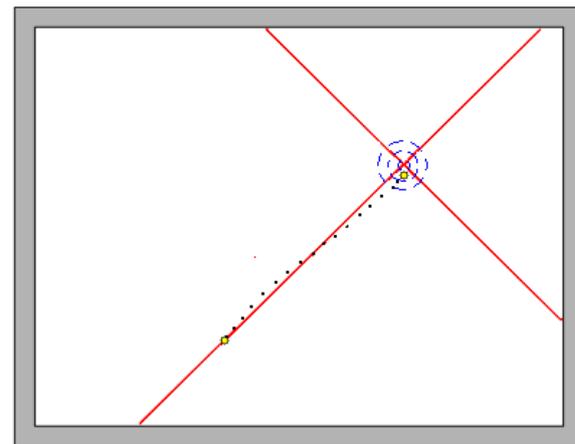


圖 3 彈道式移動執行後實驗畫面

3.3 實驗變因

實驗中的自變項(independent variable)為八個移動角度以及十種移動距離。八個角度為別為 0°、45°、90°、135°、180°、225°、270° 以及 315°，而十種移動的距離為 45、51、69、99、141、195、261、339、429 以及 531 pixel (1 pixel = 0.266 mm)。每位受測者對每一種由移動方向與距離配成的實驗組合執行四次的彈道式移動，因此在一輪的實驗量測中將執行 320 次的彈道式移動，受測者在完成一輪量測後會在適當的休息後進行下一輪的實驗量測，每一位受測者執行三輪實驗量測。

實驗中的三個依變項(dependent variable)分別為彈道移動所花費的時間以及彈道式移動落點的水平誤差與垂直誤差，水平誤差指的是和移動方向相同的誤差、垂直誤差指的是和移動方向呈垂直的誤差。

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：移動距離與角度設為固定影響(fixed effect)，而受測者設為隨機影響(random effect)。分析結果顯示移動距離與角度的主要影響以及二維交互作業影響皆為顯著($p < 0.001$)。移動時間會隨著距離的增長而增長，但增長的程度會隨著移動角度不同而有所差異。而角度對移動時間的影響如圖 4 所示，在 45° 時最短($p < 0.001$)，而在 135° 、 270° 以及 315° 時最長($p < 0.001$)。

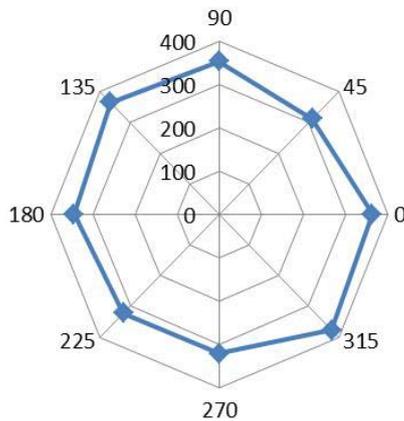


圖 4 移動角度對彈道式移動時間的影響(單位: ms)

表 1 彈道式移動時間模型對於不同方向移動時間的描述結果

角度	a (毫秒)	b (毫秒 \times pixel ²)	r^2
全部	25.61	23.46	100%
0°	28.95	24.48	99.80%
45°	44.94	19.65	99.90%
90°	12.93	25.01	99.70%
135°	17.00	25.57	99.70%
180°	23.38	23.68	99.70%
225°	50.31	19.91	99.80%
270°	12.14	22.73	99.90%
315°	15.25	26.65	99.70%

由於距離對於彈道式移動時間有顯著的影響，接著以彈道式時間模型(公式 3)進行資料的描述。

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 值整理於表 1 中。

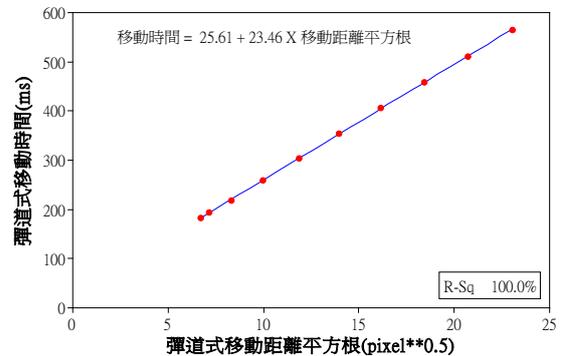


圖 5 彈道式移動時間和距離平方根之間的關係(全部方向下的移動)

結果顯示彈道式移動時間模型對於實驗資料的描述能力很好。它解釋了所有移動資料 100% 的變異，而對各別角度移動的資料，它至少解釋了 99.7% 以上的變異。對全部及不同角度下移動的時間所作的迴歸分析分別顯示在圖 5 及圖 6 中。由兩個圖中可再次看到彈道式移動時間模型良好的描述能力。

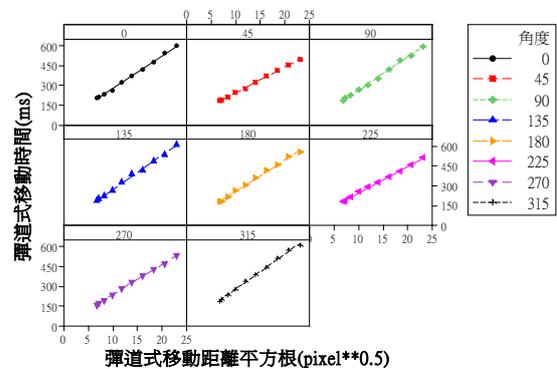


圖 6 彈道式移動時間和距離平方根之間的關係(各別方向下的移動)

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，兩種誤差被分為常數誤差(constant error)及變數誤差(variable error)進行變異數分析。由於常數誤差很小，在此僅對變數誤差進行說明。

變異數分析的結果發現移動距離對水平變數誤差($F_{9,395} = 11.77, p < 0.001$)，以及垂直變數誤差

差($F_{9,395} = 91.05, p < 0.001$)皆有顯著影響。移動的水平以及垂直落點變異會隨著距離的增長而增大，而此增大的程度對於垂直變數誤差而言，會隨著移動角度不同而顯著的改變($F_{63,395} = 2.97, p < 0.001$)。移動角度對水平變數誤差沒有顯著影響，但對垂直變數誤差($F_{7,395} = 12.21, p < 0.001$)有顯著影響，如下圖 7 所示，當移動角度為 0° 、 90° 、 180° 和 270° 時的落點變異誤差最小；而在 135° 及 315° 時最大。

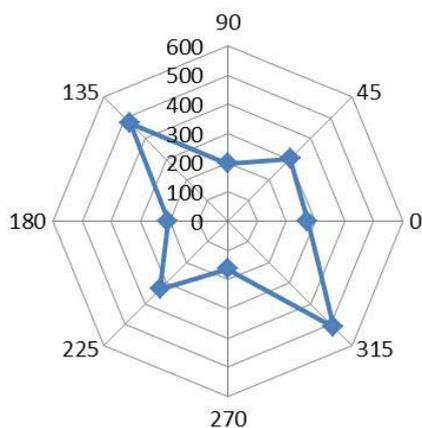


圖 7 移動垂直誤差雷達圖(單位：pixel²)

由於移動距離對水平變數誤差及垂直變數誤差皆有顯著的影響，接著利用彈道式移動變異模型(公式 4)對兩種誤差進行描述。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 8 及圖 9 中。彈道式移動變異模型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 96.8% 及 99.7% 的變異，而所量測到的水平誤差大約為垂直誤差的五倍。

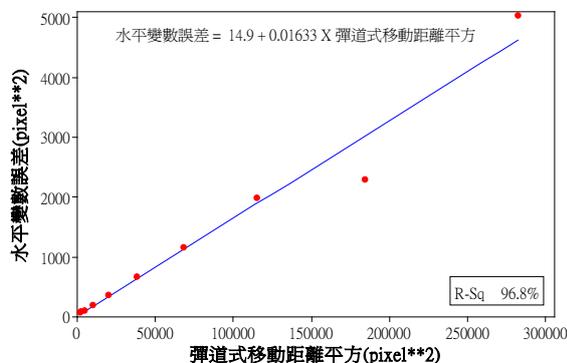


圖 8 水平變數誤差和距離平方之間的關係(全部方向下的移動)

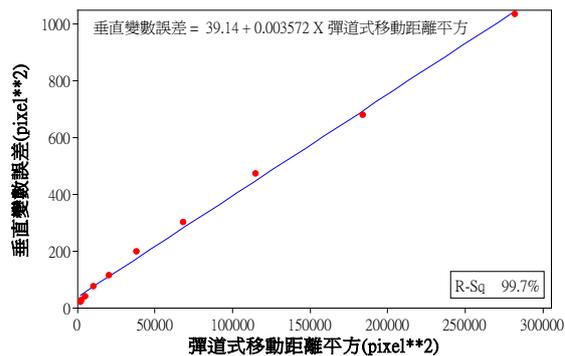


圖 9 垂直變數誤差和距離平方之間的關係(全部方向下的移動)

由於移動角度只對垂直變數誤差有顯著影響，模型僅對垂直變數誤差作各別方向下的資料分析。所量測到的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後所得到的截距(a)、斜率(b)及 r^2 值整理於表 2 中，而對八種角度下移動的垂直變數誤差所作的迴歸分析顯示在圖 10。結果顯示彈道式移動變異模型對於個別方向下所量測到的垂直誤差有很好的描述能力，它至少描述了 94.4% 的資料變異。

表 2 彈道式變異模型對垂直變數誤差的描述結果

角度	a (毫秒)	b (毫秒 \times pixel ²)	r^2
全部	39.14	0.003572	99.70%
0°	18.61	0.003368	99.60%
45°	35.1	0.003166	99.30%
90°	36.31	0.001781	96.00%
135°	-8.24	0.005894	97.40%
180°	39.71	0.002293	98.60%
225°	47.33	0.003534	99.10%
270°	52.45	0.001463	94.40%
315°	34.88	0.00603	97.30%

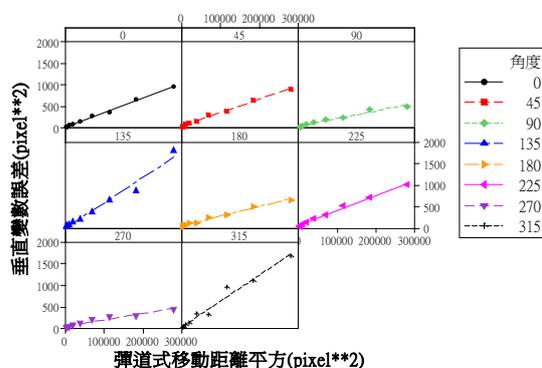


圖 10 垂直變數誤差和距離平方之間的關係(各別方向下的移動)

5. 討論與建議

本研究突破過去使用 Fitts' law 對於整合性時間結果的限制，使用彈道式移動模型進行得知不同方向的移動如何對於手控制移動的「速度」與「準確度」產生影響。就移動速度而言，圖 4 所呈現出來的結果與過去學者[7, 8]所得到的結果相似，當移動所涉及到的肢體及關節越多，移動的速度就會較慢，而研究中發現移動方向對於和移動方向相同的落點變異誤差並沒有顯著性的影響，反而僅對和移動方向垂直的落點變異誤差有顯著的影響，如圖 7 所示以右手在身體前的水平面執行移動時，在水平(左右)與垂直(前後)方向的移動所產生的垂直誤差較小，而在 135° 以及 315° 方向時所產生的垂直誤差最大(此時所涉及到的肢體關節活動最多)，而 45° 和 225° 方向上的移動誤差次之(此時所涉及到的肢體關節活動最少)。

未來的研究方向可增加受測者人數、探討不同移動方向下產生不同垂直變異的原因以及量測不同的輸入設備。由於此研究為前測實驗，僅量測六名受測者，為了提供較有效的研究結果，量測充足受測者人數是必要的。此外，研究結果顯示了垂直方向的落點誤差並非完全和移動所使用的肢體關節多寡成絕對的關係，確切的原因可作為未來研究規劃。最後，除了繪圖板上的移動，在未來也可以同樣的研究方法量測不同的輸入設備，如滑鼠、搖桿或是以手指使用智慧型手機等。

由上述可知，以彈道式移動模型做為評估方法，能夠提供對於使用不同輸入設備進行手移動操作實驗在「速度」與「準確度」上獨立的評估資訊，此優點是 Fitts' Law 無法做到的。

6. 結論

本研究使用彈道式移動模型量測人員在繪圖板上執行不同方向移動時，速度與準確度的獨立表現。研究結果發現移動方向對於移動速度的影響是決定於在移動時所使用的肢體關節活動程度有關，當肢體關節活動越多，移動速度越慢，反之肢體關節活動越少，移動速度越快。然而，移動方向僅對和移動方向垂直的變異誤差有顯著

的影響，對和移動方向相同的水平變異誤差沒有顯著影響，垂直變異誤差會受到肢體關節的活動所影響，但不同於移動速度，垂直變異誤差的大小並不完全取決於肢體關節活動多寡。

致謝

本研究由國科會專題研究計畫(NSC100-2815-C-155-004-E)補助支持，特此致謝。

參考文獻

1. Fitts, P.M., *The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement*. Journal of Experimental Psychology, 1954. **47**: p. 381-391.
2. Lin, J.-F. and C.G. Drury, *Verification of two models of ballistic movements*. Lecture Notes in Computer Science, 2011. **6762**: p. 275-284.
3. Lin, J.-F., et al. *A general model that accounts for Fitts' law and Drury's model*. in *Proceedings of the 17th Congress of the International Ergonomics Association*. 2009. Beijing, China.
4. Lin, J.-F. and C. Drury. *Modeling Fitts' law*. in *The 9th Pan-Pacific Conference on Ergonomics*. 2010. The Ambassador Hotel, Kaohsiung, Taiwan.
5. Scarlett, D., *Ergonomic Mice: Comparison of Performance and Perceived Exertion*. Usability News, 2005. **7**(1).
6. Whisenandad, T.G. and H.H. Emurian, *Analysis of cursor movements with a mouse*. Computers in Human Behavior, 1999. **15**: p. 85-103.
7. Schmidtke, H. and F. Stier, *Der Aufbau komplexer Begegnungsabläufe aus Elementarbewegungen*. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, 1960. **822**: p. 13-32.
8. Balakrishnan, R. and I.S. MacKenzie, *Performance Differences in the Fingers, Wrist, and Forearm in Computer Input Control*, in *CHI1997*. p. 303-310.
9. Lin, R.F. and Y.-C. Ho, *Verification of ballistic movement models in a true 3D environment*, in *The 2nd East Asian Ergonomics Federation Symposium2011*: National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan.
10. Lin, R.F., B.C. Jiang, and S.-W. Shih, *Verification of ballistic movement models for pointing tasks on the touchscreen*, in *The 2nd East Asian Ergonomics Federation Symposium2011*: National Tsing Hua University, Hsinchu, Taiwan.

11. 林瑞豐, et al. 應用彈道式移動模型評估電腦滑鼠績效. in 第十八屆人因工程學會暨學術研討會. 2011. 中山醫學大學, 台中, 台灣.
12. 石馨文, 應用彈道式移動模型探討高齡者與年輕人使用觸控螢幕時手移動控制能力的差異, in 工業工程與管理研究所 2011, 元智大學: 桃園.
13. 何奕成, 應用彈道式移動模型量測三維空間中的瞄準移動, in 工業工程與管理研究所 2011, 元智大學: 桃園.