

自動武器系統射擊精度數值模擬之研究

孫懷谷* 陳村錦** 沈昱成*

*國防大學中正理工學院兵器系統工程研究所

**國防大學中正理工學院國防科學研究所

摘 要

本研究動機係武器研發過程中，需耗費大量人、物及財力以確保性能符合需求；若在設計階段即能預估系統性能，對縮短研發期程與成本將有很大助益。本文結合剛體機構電腦輔助分析及有限元素法，建立含可撓性腳架之自動武器系統模型。探討機槍機構運動、腳架變形及其耦合現象；配合質點外彈道理論，模擬發射後彈頭飛行軌跡及落點。因膛壓、槍口震動、彈頭出口速度等均有變異性，故以蒙地卡羅法模擬彈著散佈面。結果發現連續發射時耦合現象對射擊精度影響甚巨。目前僅考量二維情況，後續研究將系統置於載具及發展成三維全系統模擬，期更真實地模擬實際狀況。

關鍵詞：剛體機構，蒙地卡羅法，有限元素法，射擊精準度

Numerical Simulation of Firing Precision of Automatic Weapon Systems

Huai-Ku Sun^{*}, Cun-Gin Chen^{**}, and Yu-Chen Shen^{*}

^{*} Dept. of Weapon system Engineering, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

^{**} Graduate School of Defense Science, Chung Cheng Institute of Technology, National Defense University

ABSTRACT

The motive of this research is due to the fact that a huge amount of human, material, and financial resources are required to ensure that the performance can meet the requirement during the R&D phase of weapon systems. Predicting and analyzing the performance of the full system, during the engineering design process, will promote the success of the entire system. In this work, the computer-aided analysis method is combined together with the finite element analysis method to build up the computer model for an automatic weapon with a flexible mount. This model can be used to simulate the motion of gun components, the deformation of gun mount structure and the coupling effect between them during various firing situations. Then, the exterior ballistic analysis is used to predict the impact point on the target. Because of the stochastic characters of the chamber pressure, muzzle vibration, and muzzle velocity of the bullet, Monte Carlo method is employed in this research to predict the dispersion condition. The results reveal that the interaction between the rigid-body mechanisms and its flexible support structures affects performance of whole system greatly. This study considers only the planar case. The dynamic response of the weapon system mounted on a vehicle and a more complicated fully three-dimensional model will be our future work.

Keywords : rigid-body mechanisms, Monte Carlo method, finite element method, firing precision

文稿收件日期 94.9.30. ; 文稿接受後修正日期 95.2.7.

Manuscript received September 30, 2005; revised February 7, 2006

一、前言

新式武器的研製，並非短時間內能完成，國內新式武器的開發，多參照國外現有的武器裝備，進行研製開發，如此雖可縮短研製期程；惟實際設計理念部分並無法獲知，在規格訂定上，因無理論依據，僅能參照國外同型武器規格，以實際測試驗證方式逐一比對，導致研發時程，泰半耗費在測試及驗證工作，不僅造成人力、物力及經費的浪費，且無法掌握研發時程，故本研究目的一希望建立一套適用於自動武器系統在可撓性腳架上之動態行為分析模型並配合外彈道公式進行全系統模擬分析，以提供研發人員在較短時間內，研發及驗證具有理論依據、穩定且可靠的武器系統，俾充實國軍戰力。

經搜整國內、外相關文獻資料，可能涉及機敏問題，故此類研究非常稀少。孫懷谷等[1]曾探討剛體機構在可撓性三腳架上的動態分析，開發一套數值方法計算 2-D 剛體機構與可撓性腳架間耦合現象，其動態分析過程，僅考慮彈藥所產生的膛壓，並未真實將彈頭運動過程納入考量、康新中等[2]在火炮系統建模理論中，假設火炮及砲座均為剛體且以能量法求解運動方程、王放明[3]以集中荷重及能量法求解方式處理火炮機構系統、K. Hu 等 [4] 分析有間隙的可撓性旋轉機軸架於柔性軸承座上的動態行為、有學者研究中心剛體和柔性梁組成的剛柔耦合系統的模態與動力特性[5,6]，自 1980 年至今發展了許多方法及數值分析技術闡示機械及多體系統，說明剛體與可撓體之間耦合的原理[7,8]、Ya. F. Kayuk 等[9]以小變形理論描述剛體繫於可撓性桿件上運動的近似方程式。惟對自動武器系統架於腳架上進行射擊，另配合外彈道公式求其彈著散佈面時，並無相關資料及適當的軟體可完整模擬真實射擊過程，致使多年來國內自動武器設計及研發始終受限。故本研究特點如下：

- 1、將搭接在腳架之自動武器系統中增加彈頭運動，以單發點放及三發連放射擊模式，模擬槍枝射擊運動過程，因機槍受膛壓作用產生運動、腳架變形限制，兩者間產生耦合，使槍口產生振動。
- 2、子彈內發射藥本身就有變異性，致使發射藥產生之膛壓、速度、加速度、槍口振動及彈著點均產生變異性。
- 3、配合外彈道公式考慮重力及風阻影響，模擬射擊後彈頭運動軌跡及落點散佈情形。
- 4、運用蒙地卡羅法對彈著點散佈面進行模擬，以區間估計等方法推估射擊精度，藉此推算武器系統的射程、精度與準確度。

二、自動武器系統模式之建立

自動武器系統包含剛體的機槍機構與可撓性的腳架結構，分屬兩種截然不同的領域。本文嘗試以剛性聯結方式串聯以上兩大部分，建立自動武器系統之運動方程式。當機槍受火藥推力作用後，有進彈、擊發、槍機運動、退殼等一連串機械動作；同時，後座力會使腳架產生振動及變形，兩者間產生耦合，進而致槍口產生振動，影響射擊之精度與準確度。

2.1 運動方程式

2.1.1 剛體機構運動方程式

剛體機構的運動乃為各剛體元件間透過不同接頭連接，其系統運動方程式如下[7]：

$$\begin{bmatrix} [M]_r & [\Phi]_{q_r}^T \\ [\Phi]_{q_r} & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q}_r \\ -\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{g}(t) \\ \underline{\gamma} \end{Bmatrix}, \quad (1)$$

其中 $\underline{g}(t)$ 為武器系統所受外力，包含膛壓、彈簧力及重力等； $[\Phi]_{q_r}$ 為系統運動約束方程式的 Jacobian 矩陣； λ 為拉格朗吉乘數 (Lagrange

multipliers); \ddot{q}_r 系統構件的加速度向量; γ 為速度平方項; $[M]_r$ 為剛體質量矩陣。

2.1.2 可撓性結構有限元素運動方程式

有限元素法 (finite element method) 在結構工程領域現已成為非常重要的分析及設計工具, 藉以獲得可撓體之變形情況、應力與應變等; 其動態方程式如下[10]:

$$[M]_f \ddot{q}_f + [K]_f q_f = F_f(t), \quad (2)$$

其中 $[M]_f$ 為廣域座標之質量矩陣; $[K]_f$ 廣域座標之勁度矩陣; q_f 為節點位移及旋轉向量; \ddot{q}_f 為節點加速度向量; $F_f(t)$ 為所受外力。

2.1.3 自動武器系統運動方程式

利用剛性接頭聯結剛體機構與可撓體支撐結構, 將(1)式與(2)式合併後, 得到自動武器系統運動方程式:

$$\begin{bmatrix} [M] & [\Phi]_q^T \\ [\Phi]_q & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{q} \\ -\lambda \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} g(t) \\ \gamma \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} [K] & [0] \\ [0] & [0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} q \\ 0 \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $[M] = \begin{bmatrix} [M]_r & [0] \\ [0] & [M]_f \end{bmatrix}$ 為系統之質量矩陣, 包

含剛體機構與可撓性支撐結構; $g(t)$ 為所有作用在剛體與可撓體之外力; λ 為拉格朗吉乘數向量; $[K] = \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [0] & [K]_f \end{bmatrix}$ 為勁度矩陣; $q = \begin{Bmatrix} q_r \\ q_f \end{Bmatrix}$ 與 $\ddot{q} = \begin{Bmatrix} \ddot{q}_r \\ \ddot{q}_f \end{Bmatrix}$ 分別代表位置及加速度向量; $[\Phi]_q$ 為所有接頭(含剛性聯結)之 Jacobian 矩陣; γ 為速度平方項。

2.2 質點彈道理論與射擊精準度

彈體在空中飛行時, 受到空氣阻力及重力的作用, 這些合成力 (Resultant Forces) 會降低彈體飛行速度, 直接影響射程、飛行時間、穩定及精度等彈道性質[11]。本文將彈體視為質點, 依據平面機構系統受彈藥膛壓作用後, 計算彈頭離開槍口之狀態, 再推算飛行時間、速度、軌跡、彈著點及彈著點的分布情形等。膛外彈道運動方程式為[12]:

$$m \frac{dV}{dt} = -mg - \frac{1}{2} C \rho A |V|^2 V_{unit}, \quad (4)$$

其中 m: 彈頭質量; g: 重力加速度; C: 阻力係數; ρ : 空氣密度; A: 彈頭截面積; V_{unit} 為 V 之單位向量。

阻力係數 C 會因彈頭飛行速度、溫度及密度等不同條件而有所改變, 實際計算時, 必須根據相關條件, 經由反覆試驗決定 C 值, 故假設為固定值。將彈頭出槍口位置與速度當作初始條件, 計算彈頭飛行軌跡及彈著點。當射擊數量夠多時產生彈著散佈面, 估算彈著點的信賴區間可視為射擊精度, 故射擊精度係計算彈著散佈情形; 而平均彈著點與目標間距離, 即為自動武器射擊的準度指標[13]。影響彈著點因素眾多, 本文以膛壓變異性為影響的主因, 藉此分析彈著散佈與武器系統之關聯性。

蒙地卡羅法為採用隨機亂數模擬不確定性事件的重要方法, 當事件中許多參數為隨機變數, 且理論求解過程非常繁複時, 蒙地卡羅最能有效發揮功用。因工廠生產彈藥時因數量龐大, 每批彈藥的膛壓都有期望值及變異數。本文利用中央極限定理, 由母體(Population) 隨機選出樣本, 若樣本數足夠大時, 其樣本平均數 \bar{x} 抽樣分配將近似於常態分配, 再依大數法則計算信賴區間, 使抽樣樣本性質取代母體特性, 藉此分析彈著精度與武器系統設計關聯性。

當樣本平均數被當做是母體平均數 μ 的點估

計值時，可能產生偏差，此偏差的絕對值稱為抽樣誤差 $|\bar{x} - \mu|$ ，必須根據機率原理決定母數在某一信賴係數下的可能範圍。再依信賴係數 $1-\alpha$ 決定機率區間後轉換為信賴區間，可獲得該母數的區間估計結果。在大部分抽樣案例，母體標準差多為未知數，大樣本($n \geq 30$)條件，僅能用樣本標準差 S 來取代母體標準差 σ ，故計算母體平均數區間估計通式[14]：

$$\mu \in \left(\bar{x} - z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}}, \bar{x} + z_{\alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \right), \quad (5)$$

2.3 自動武器系統模型說明

自動武器射擊方式概分為人員手持、腳架支撐與車載射擊三種，本文針對使用單腳架之自動武器模型做分析探討；於射擊模式上依據火力需求提供不同射擊選擇模式分為單發、三發或連發。根據連發射擊測試發現，通常只有前兩、三發比較接近射擊目標，第三發之後因受槍口偏移的影響，彈著點離目標有相當距離，形成彈藥浪費。如美軍對連發射擊模式重新評估後，將M16A2步槍全自動射擊取消，僅保留三發射擊模式[15]，目的為限制每次射擊數發，並藉每次扣扳機之空檔，重新控制槍身調整瞄準射角。故本文在射擊模式部分針對單發與三發射擊進行模擬分析。

系統模型經簡化後，組成包含機箱、槍機、緩衝簧、復進簧、腳架及子彈等六項，以單腳架進行探討，自動武器模型配置如圖1所示。

圖1中機箱與腳架聯結點P為剛性聯結點，該點須同時滿足自動武器機構運動方程式與腳架運動方程式。

模型配置之相關尺寸及性質如表1及表2所示；文中引用相關數據皆為假設值，不代表任一型槍枝。

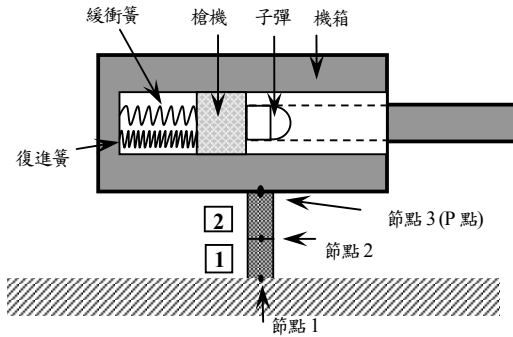


圖1. 自動武器配置單腳架模型平面配置圖。

表1. 剛體機構相關性質

項目	質量 (kg)	轉動慣量 (m^4)	質心位置
機箱	4	0.04	(0.7,0.7)
槍機	1.2	0.012	(0.55,0.65)
彈頭	0.24	0.005	(0.65,0.7)
	自由長度 (m)	阻尼 (Nt*sec/m)	彈簧常數 (Nt/m)
緩衝簧	0.5	50	400
復進簧	1	—	100
緩衝簧與復進簧同軸，與槍機及機箱連接之座標分為(0.45,0.65)及(0.2,0.65)			

表2. 單腳架相關性質

相關規格	材料特性		
	ρ (kg/m ³)	E(pa)	G(pa)
	7900	2.0E11	7.9E9
	長度(m)	斷面積(m ²)	轉動慣量(m ⁴)
腳架	0.4	0.0004	1.0E-8
節點	1	2	3
座標	(1,0)	(1,0.2)	(1,0.4)

圖1為本研究對象之系統模型，以剛性聯結的觀念，使機槍剛體機構與可撓性單腳架結構結合，依前述2.1.3節，推導出含可撓性腳架之自動武器系統運動方程，如方程式(3)所示。因機槍受膛壓作用產生運動、腳架變形等限制，兩者間產生耦合，使槍口產生振動。文中除討論機槍與腳架間耦合現象外，另考量彈頭運動配合質點外彈道理論考慮重力及風阻影響，模擬槍枝射擊運動過程及發射後彈頭飛行軌跡及落點。因子彈內發射藥本身就有變異性，致使發射藥產生之膛壓

、速度、加速度、槍口振動及彈著點均產生變異性，因參數多且複雜，故運用蒙地卡羅法對彈著點散佈面進行模擬，以區間估計等方法推算武器系統的射程、精度與準確度。

三、數值模擬分析

本文係以 FORTRAN 自行撰寫程式，將架設於腳架提前擊發式自動武器，增加隨機性的膛壓值及配合質點彈道理論，模擬自動武器全系統的射擊運動過程，以假想「提前擊發式」之自動武器，採用「高低壓原理」[13]之彈藥為對象，模擬自動武器架設於單腳架上射擊的動態行為並探討腳架、剛性連結位置及初始射角對槍枝結構設計與射擊精準度之影響。

3.1 剛體機構運動各階段劃分模擬

剛體機構（機槍）運動劃分為四個階段，積分時間間隔(time step)為 $10E-5$ 秒。

- 1、扣扳機後，復進簧推動槍機向前平移運動。
- 2、復進簧伸長至擊發彈藥，產生膛壓，彈頭受膛壓推力，脫離槍機約束沿槍管方向運動。
- 3、槍機受慣性向後運動，壓縮復進簧，迫使槍機退回至備發位置。
- 4、槍機依慣性持續向後運動，槍機持續後退，同時壓縮復進簧與緩衝簧，槍機速度驟減，槍機相對於機箱的速度為零時，復進簧與緩衝簧開始伸長，推槍機回到備發位置。

3.2 機槍與單腳架間運動、變形及耦合現象

3.2.1 單發射擊

此模型係將自動武器架設於單腳架上，腳架底部固定於地面，頂部與武器系統相連結，模型平面配置如圖 1 所示。假設射角為 0° 、輸入之發射藥氣體推力為 $2000Nt$ ，模擬單發射擊所耗用時

間為 0.1367 秒，各階段運動時間，第一階段為 0.1016 秒，第二階段 0.0093 秒，第三階段 0.023 秒，第四階段 0.0028 秒，各組件分析如下：

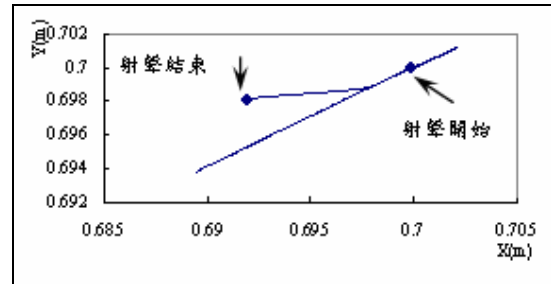


圖 2. 單發機箱位移運動軌跡圖。

機箱運動軌跡如圖 2 所示，其質心初始位置為 (0.7, 0.7)，從第一至第三階段時都在直線之間來回運動，第四階段因緩衝簧開始作用，造成位移突然偏移，並在復進簧與緩衝簧同時作用下，使機箱質心無法回復初始位置；故在第四階段結束時，仍具有向下、向後的速度；此現象與射擊時感受到後座力相符。

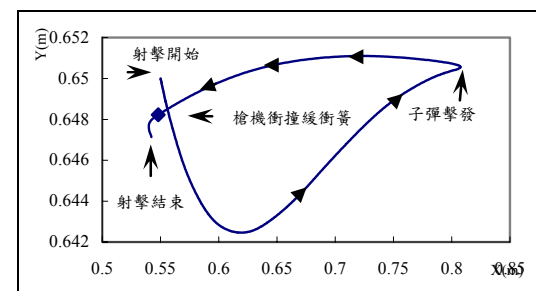


圖 3. 單發槍機運動軌跡圖。

如圖 3 顯示，槍機自扳機釋放後，因受復進簧推力，其運動軌跡呈現不規則情形；故槍機從射擊開始至射擊結束，其備發位置並非原初始位置(相對位置已歸位，絕對座標已偏移)。

將機箱及剛性節點運動的角位移作比較，在射擊過程中兩者角位移應該相同，模擬結果如預期，兩者曲線完全相同，無違反機構運動原理，

顯示其運動模式與程式寫作應屬合理，此曲線亦即是槍口角位移振動曲線，如圖4 所示。

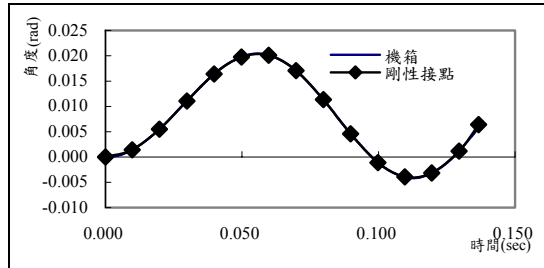


圖4. 單發射擊機箱與剛性節點角度-時間圖。

由於腳架彈性變形可吸收和消耗後座能量，透過剛性聯結點聯結機箱，射擊時因機槍受彈藥膛壓運動、腳架變形限制，兩者產生耦合現象；節點3直接承接槍身作用力並傳遞至各節點產生變形使腳架結構改變；將腳架變形量放大100倍後，如圖5 顯示各節點於單發射擊四個階段的位移變形情況。

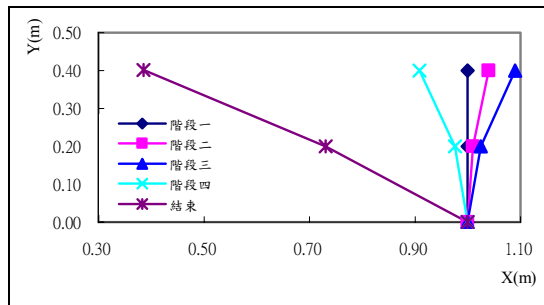


圖5. 單發射擊腳架節點位移變形圖。

3.2.2 三發連續射擊分析

模擬三發連續射擊共計耗用 0.2988 秒，各發耗用時間，第一發為 0.1367 秒，第二發 0.0803 秒，第三發 0.0818 秒，相關組件運動分析如下：

在機箱部分，由單發分析結果得知，當第一發射擊結束後，機箱已具有一向後、向下及槍口上揚偏移情況，因耦合效應第二、三發射擊使機箱振動更加劇烈；由圖6 知第一發開始至第二發

開始即是圖2，而第二、三發射擊時呈現較不穩定狀態。故實際射擊若以單發點放而言，實施瞄準後射擊，命中機率高；若採三發連放時，在瞄準後扣下扳機，第一發應與單發命中率相同，而第二、三發受機構連續運動及相互間耦合影響，通常無法掌控其方向，由此可知三發連放第一發命中機率是可預期，但第二、三發對目標已無直接命中威脅。

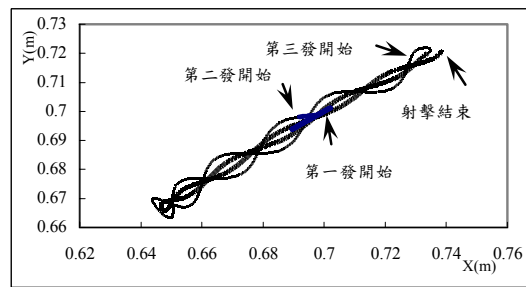


圖6. 三發射擊機箱位移運動軌跡圖。

槍機運動部份，如圖7所示，第一發射擊比較平穩，在第二、三發的運動過程，同樣發生較大的位移偏移量，圖7 中第一發曲線即圖3。

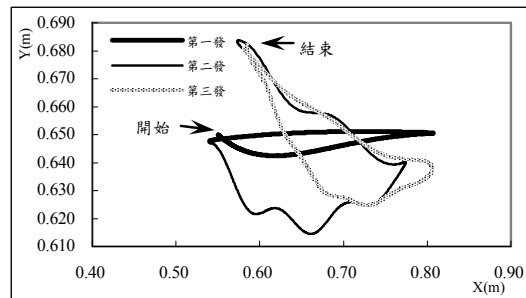


圖7. 三發射擊槍機位運動軌跡圖。

在腳架部分，各節點的角度位移變化情形，如圖8 顯示，第一發結束後各節點角度位移均增大，其中節點3角度位移最大。

圖9 為腳架變形量放大20倍之變形情況。因武器系統在射擊過程，水平方向有較大運動變化，對單腳架支撐射擊方式使腳架易受系統組件運

動影響，發生較大位移偏移量，無法提供系統穩定運動狀態，將直接影響武器射擊精、準度。

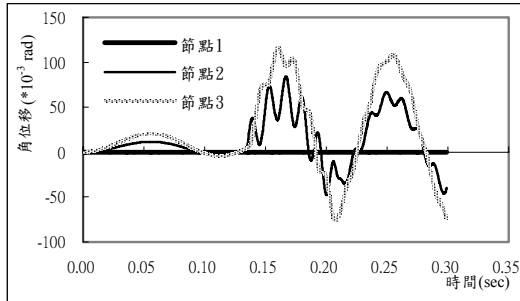


圖8. 三發單腳架節點角位移—時間圖。

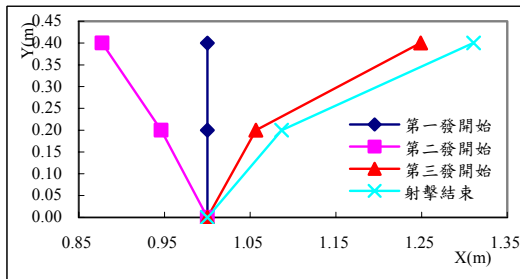


圖9. 三發單腳架節點單腳架節點位移變形圖。

3.3 腳架、剛性連結位置及初始射角對槍枝結構設計與射擊精準度之影響

單發射擊模式因有足夠時間歸於靜止狀態並回復至初始射擊條件，故單發射擊時假設每一發射擊起始條件均相同，不會受到前一發射擊影響。另假設目標點位置，係以發射藥氣體推力 2000Nt，不考慮槍口振動的條件下射擊，彈頭與水平軸(X 軸)相交座標，令此座標距離為靶距。並分別模擬剛性連結點在 A 點(1.0,0.4)位於機箱質心位置前、B 點(0.7,0.4)位於機箱質心位置正下方及 C 點(0.55,0.4)位於槍機質心位置正下方三個位置，為使分析條件一致，釐清非相關因素造成的影響，又根據線性誤差率(Linear Error Probable)應用於武器效能評估時，訂定 50%為其武器系統的誤差率[16]，亦即砲兵對射擊精度所述「半數

必中界」，兩者意義相同，故後續評估精度範圍時，將以 50%及 95%信心水準進行分析比較。

因射程的遠近與彈頭重量、初速、空氣密度及摩擦力等因素有密切關聯性，故最大射程並非發生在仰角 45°，並假設發射藥氣體推力 2000Nt，標準差為 25Nt 模擬射擊，就上述假設下以不同仰角各模擬射擊 100 發。

3.3.1 剛性連結點對單發射擊精度影響

三種不同剛性連結點模擬結果，就射擊精度而言在 50%的信賴水準下，達八成以上精度範圍均可包含目標靶距，以 95%的信賴水準估計時，其精度範圍可完全涵蓋目標靶距，以精度範圍比較發現，不同支撐點的相同射角所得精度範圍相差無幾；就準度而言，以彈著平均數與靶距之差的絕對值稱為準確度，將準確度除以靶距，其平均誤差不到 0.05%，且最大與最小值之間相差不大。係因槍口振動較平穩，第二發不受前一發射擊影響，顯示單發射擊的精度與準度較佳，結果統計如表 3。

表 3 剛性聯結於不同位置單發彈著統計

項次		射角					
		0°	10°	40°	45°	50°	
A 點	靶距	28.89	191.11	392.92	387.73	373.37	
	彈著平均數	28.90	191.20	393.08	387.88	373.53	
	準確度	0.01	0.09	0.16	0.15	0.16	
	最大值	29.26	195.16	399.36	393.95	379.30	
	最小值	28.52	186.75	386.12	381.14	367.13	
	50% 信賴 水準	UCL	28.91	191.32	393.26	388.05	373.69
		LCL	28.89	191.09	392.91	387.71	373.37
		區間	0.02	0.23	0.35	0.34	0.32
	95% 信賴 水準	UCL	28.93	191.53	393.60	388.38	374.00
		LCL	28.88	190.87	392.57	387.38	373.06
		區間	0.06	0.66	1.02	0.99	0.94
	B 點	靶距	34.35	198.13	393.01	388.24	374.42
		彈著平均數	34.36	198.21	393.16	388.39	374.54
		準確度	0.01	0.08	0.15	0.15	0.12
		最大值	34.78	202.23	399.46	394.46	380.34
最小值		33.90	193.72	386.19	381.62	368.10	
50% 信賴 水準		UCL	34.37	198.32	393.34	388.56	374.70
		LCL	34.35	198.10	392.98	388.22	374.38
		區間	0.02	0.23	0.35	0.34	0.33
95% 信賴 水準		UCL	34.39	198.54	393.67	388.88	375.01
		LCL	34.33	197.88	392.65	387.89	374.07
		區間	0.07	0.66	1.03	0.99	0.94
C 點		靶距	32.02	193.82	393.00	389.17	376.07
		彈著平均數	32.01	193.90	393.17	389.33	376.22
		準確度	0.01	0.08	0.17	0.16	0.15
		最大值	32.42	197.82	399.46	395.44	382.05
	最小值	31.60	189.45	386.18	382.54	369.75	
	50% 信賴 水準	UCL	32.02	194.01	393.35	389.50	376.39
		LCL	31.99	193.79	393.00	389.16	376.06
		區間	0.03	0.22	0.35	0.34	0.33
	95% 信賴 水準	UCL	32.04	194.22	393.69	389.83	376.70
		LCL	31.97	193.57	392.66	388.83	375.75
		區間	0.07	0.65	1.03	1.00	0.95

註：以上單位為公尺

表 4 剛性聯結於不同位置三發連放彈著統計

項次		射角					
		0°	10°	40°	45°	50°	
A 點	靶距	28.89	191.11	392.92	387.73	373.37	
	彈著平均數	70.40	204.66	388.43	383.81	372.19	
	準確度	41.51	13.55	4.49	3.92	1.18	
	最大值	144.88	293.94	402.42	403.33	399.68	
	最小值	28.47	167.84	374.49	357.29	326.60	
	50% 信賴 水準	UCL	70.57	205.46	388.55	383.94	372.50
		LCL	70.24	203.86	388.31	383.68	371.88
		區間	0.33	1.60	0.24	0.26	0.62
	95% 信賴 水準	UCL	70.89	206.99	388.77	384.19	373.10
		LCL	69.92	202.33	388.09	383.43	371.29
		區間	0.97	4.66	0.68	0.76	1.81
	B 點	靶距	34.35	198.13	393.01	388.24	374.42
		彈著平均數	26.36	164.15	390.60	390.98	380.61
		準確度	7.99	33.98	2.41	2.74	6.19
		最大值	132.60	300.00	402.51	403.97	399.27
最小值		5.62	45.71	374.38	366.17	348.94	
50% 信賴 水準		UCL	27.11	165.49	390.74	391.15	380.93
		LCL	25.62	162.81	390.46	390.82	380.30
		區間	1.49	2.68	0.28	0.33	0.62
95% 信賴 水準		UCL	28.53	168.05	391.01	391.47	381.52
		LCL	24.20	160.25	390.19	390.50	379.71
		區間	4.33	7.80	0.82	0.97	1.81
C 點		靶距	32.02	193.82	393.00	389.17	376.07
		彈著平均數	20.45	209.76	391.68	383.80	368.74
		準確度	11.57	15.94	1.32	5.37	7.33
		最大值	138.16	305.50	403.65	399.89	385.84
	最小值	5.10	145.92	377.59	363.45	338.39	
	50% 信賴 水準	UCL	21.02	210.25	391.82	383.89	368.88
		LCL	19.89	209.28	391.54	383.70	368.59
		區間	1.14	0.97	0.29	0.19	0.29
	95% 信賴 水準	UCL	22.11	211.17	392.10	384.06	369.16
		LCL	18.80	208.35	391.26	383.53	368.32
		區間	3.31	2.82	0.83	0.54	0.84

註：以上單位為公尺

3.3.2 剛性聯結點對三發連續射擊精度影響分析

假設射角與推力模式與前同，分別在選定的三個剛性聯結點，以三發連放射擊模式進行不同仰角各 100 次模擬試驗，結果統計如表 4 所示。

因耦合效應，故當第一發射擊結束時，機箱具有向後、向下及槍口上揚的速度，而第二、三發連續射擊使機箱振動更加劇烈；實際射擊時若以單發點放實施瞄準後射擊命中機率高；若採取三發連放時，在瞄準後扣扳機，第一發命中率應與單發相同，其命中機率是可以預期的，第二、

三發受到機構連續運動影響，通常較無法掌控其方向。

統計結果發現，三發連放的射擊精度，若以 50% 的信賴水準估計時都無法涵蓋靶距，95% 的信賴水準估計時，其範圍僅少數射角可涵蓋靶距。就準確度而言與單發射擊比較相差甚遠，且最大與最小值之間相差太大，即散佈面大，顯示三發連續射擊的精度與準度均比單發射擊差。

值得注意的是在不同剛性聯結點之相同 10° 仰角時，均發生射擊精度或準度變差的情況，此情形亦隨著系統模型與數據的不同，可能發生在不同仰角，對於系統組合可能產生瑕疵，亦可經由模擬獲得，提供設計人員參考。實際情況仍應視模型建立的真實度進行分析。

四、結論

本研究運用電腦輔助分析學、有限元素法、蒙地卡羅法及外彈道理論等，發展一套系統性的方法，成功地模擬含可撓性單腳架之自動武器系統，除能了解與及時監控多體剛體機構及其支撐結構間耦合情況兩者間動態行為外、另可計算射擊精、準度等重要參數。結果顯示本數值模擬方法是可行的。

以往我國自動武器在設計階段，研發人員完成藍圖繪製後，大多運用商用套裝軟體進行系統機構驗證工作，之後即進入零組件試造，對武器性能驗證必須以實彈且逐項測試方式；研發過程往往耗費大量人力、物力、金錢及時間，其結果又無法預測，以至於研發工作備感艱辛。基此，本文提供研發人員在設計階段模擬驗證的可行性方法；對生產工廠研發作業，提供一套完整的模擬系統，有助於提昇武器系統預測、分析、研改能力，並提高數據的可信度。

在三發連續射擊時，由於第二、三發受系統耦合影響，彈著點無法預期，對於要求射擊精度

較高、彈藥造價高昂的武器而言，不宜使用三發連放的射擊模式，將造成彈藥浪費，建議以「單發快放」模式提高射擊精、準度；但對於要求射擊散布面的武器而言，三發連放仍有存在其必要性，惟結構匹配應審慎選擇，否則散布面過大或過小均將失去其存在的意義。

目前雖僅討論二維問題，但自動武器系統動力學在多數情況下可以平面運動問題處理；在後續研究發展方面，繼續發展成三維全系統模擬；另將進行自動武器系統置於車輛上於不同地面運動狀況之數值模擬，以分析武器置於行進間載具上之射擊精準度，建立適合需求的模擬軟體，期能更真實模擬實際狀況。藉以提昇國軍的研發能量，充實國軍戰力。

柒、參考文獻

- [1] Sun, H. K., Chen, C. G., and Shen, Y. C., "Dynamic Analysis of Rigid-Body Mechanisms Mounted on Flexible Support Structures — Planar Case," Material Science Forum. (Accepted)
- [2] 康新中、馬春茂、魏孝達，火炮系統建模理論，國防工業出版社，北京，第一章，第七節，第 41-49 頁，2003。
- [3] 王放明，隨機動力學及其在兵器中的應用，國防工業出版社，北京，第四章，第 95-110 頁，2000。
- [4] Hu, K., Mourelatos, Z. P., and Vlahopoulos, N., "Computational Analysis for Dynamic Response of a Rotating Shaft on Flexible Support Structure with Clearances," Journal of Sound and Vibration, Vol. 267, Issue 1, pp. 1-28, 2003.
- [5] 蔡國平、洪嘉振，"中心剛體-柔性懸臂梁系統的動力特性研究"，航空學報，第 25 卷

- ，第3期，第248-253頁，2004年5月。
- [6] 楊輝、洪嘉振、余征躍，“一類剛-柔耦合系統的模態特性與實驗研究”，宇航學報，第23卷，第2期，第67-72頁，2002年3月。
- [7] Nikravesh, P. E., Computer-Aided Analysis of Mechanical Systems, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp.370, 1988.
- [8] Shabana, A. A., Dynamics of Multibody Systems, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.470, 1989.
- [9] Kayuk, Y. F. and Pyatov, A. L., “Motion of a Rigid Body Hinged to a Deformable Rod,” Soviet Applied Mechanics, Vol. 25, No. 11, pp. 1139-1146, 1990.
- [10] Yang, T. Y., Finite Element Structural Analysis, Prentice-Hall, Inc., New Jersey, pp. 543, 1986.
- [11] 兵器系統中心編著，膛外彈道學，中正理工學院，桃園，第45頁，1985。
- [12] Kang, C., A Cost And Operational Effectiveness Analysis For Future Artillery System in Korea, Naval Postgraduate School Monterey, California, Ms. Thesis, Chap. 5, pp. 25-51, 1995.
- [13] 步兵近戰武器論證參考編寫組，步兵近戰武器論證參考，國防工業出版社，北京，第570-574頁，1992。
- [14] Anderson, D. R., Sweeney, D. J., and Williams, T. A., Statistics for Business and Economics, Info Access & Distribution Pte Ltd, Singapore, pp. 849, 1994.
- [15] <http://home.comcast.net/~gunglossary/big5/index.htm>.
- [16] Przemienjecki, J. S., Mathematical Methods in Defense Analyses, American Institute of Aeronautics, Inc., Reston, Virginia, pp. 28-31, 2000.