

النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية لطرائق التحكم بوضعية الأجسام الموجهة المستخدمة في منظومات التوجيه بالأوامر باستخدام البيئة البرمجية MATLAB

الدكتور محمد سعيد طوقايلي*
عبد المعين أحمد الرفاعي**

(قبل للنشر في 2005/9/7)

□ الملخص □

تعالج هذه المقالة النمذجة الرياضية والمحاكاة البرمجية لطرائق التحكم بوضعية جسم طائر المستخدمة في منظومات التوجيه بالأوامر، التي تصادف في تطبيقات عديدة، نظراً لإمكانية استخدامها في منظومات التحكم بوضعية مختلف أنواع الأجسام الطائرة (توابع صناعية، صواريخ، مقذوفات، روبوتات صناعية.....الخ).
تقدم الدراسة النماذج الرياضية ونتائج المحاكاة الحاسوبية لقوانين التوجيه بالأوامر، وتظهر تأثير مختلف محددات (بارامترات) حركة الهدف، والجسم الطائر وقانون التوجيه على المسارات الكينماتيكية Kinematic Trajectory للأجسام الطائرة في كل من المستوي والفرغ.
اعتمدت في العمل البيئة البرمجية MATLAB، التي تمتلك أدوات رياضية وإمكانات بيانية تفاعلية متطورة.

* مدرس في كلية الهندسة الإلكترونية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب
** طالب دراسات - كلية الهندسة الإلكترونية - أكاديمية الأسد للهندسة العسكرية - حلب

Mathematical Modeling & Computer-Aided Simulation for Control Methods of Guided Objects Used in Commands Guidance Systems with MATLAB Environment

Dr. Mohamed S. Tokatli *
Abd Almoeen A. Alrifai**

(Accepted 7/9/2005)

□ ABSTRACT □

This paper concerns on mathematical modeling and computer-aided simulation for guidance methods used in command control systems of most guided objects (satellites,missiles,projectiles,industrial robots.....etc) .

In this study mathematical models and results of computer-aided simulation for command guidance laws are proposed,and kinematic trajectories of guided object for different motion parameters of target and guided object and guidance law variables are illustrated .

Results of the study are applicable for investigation of guided objects which move in two and three dimensions.

In this study the MATLAB programming environment is used,which has power mathematical tools and advanced interactive graphical capabilities

* Assisstant Prof, Al_Assad Academy For Military Engineering _ Aleppo.

**Graduate Student , Al_Assad Academy For Military Engineering _ Aleppo .

مقدمة:

تشكل عملية التحكم بوضعية جسم طائر وإيصاله وفق مسار محدد إلى منطقة التلاقي مع الهدف جوهر التوجيه عن بعد. ويعتبر توجيه الأجسام، سواءً على سطح أو في الفراغ، مسألة متعددة الحلول بمعنى أن هناك مسارات مختلفة وعديدة تؤمن تحقيق الغاية المطلوبة، وهي الوصول إلى الهدف. ولكن هذه المسارات متباينة فيما بينها من حيث درجة الانحناء، وزمن عملية التوجيه، وصعوبة التنفيذ الهندسي [1,2,7] وما يترتب على ذلك من متطلبات عديدة تفرض على منظومة التوجيه والجسم الطائر، سواءً من حيث درجة تعقيد الأجهزة، أو القدرة على المناورة أو المتانة الميكانيكية... الخ. لذلك فإن دراسة المسارات عموماً ومقارنتها بهدف اختيار المسار الأمثل الذي يحقق كافة المتطلبات المفروضة يعتبر مسألة علمية هامة من الناحيتين النظرية والعملية. توصف مسارات الأجسام الطائرة رياضياً بنموذج يسمى المعادلة الحركية (الكينماتيكية) Kinematic Equation لطريقة التوجيه. وإن الطرق المتبعة حالياً في تقييم مسارات الأجسام الطائرة تقوم على تحليل التسارعات الناظمية المطلوبة من هذه الأجسام.

إن تحليل طرائق التوجيه اعتماداً على النماذج الرياضية فقط يتسم بالتعقيد وعدم الوضوح في تبيان تأثير مختلف محددات (بارامترات) حركة الجسم الطائر والهدف وبارامترات قانون التوجيه على المسار. لذلك يتخذ البحث عن أدوات تصميم وتقييم جديدة باستخدام الحاسوب Computer-Aided Design & Evaluation Tools أهمية متزايدة. تلعب النمذجة والمحاكاة دوراً هاماً في تقييم وتصميم منظومات التحكم بوضعية الأجسام الطائرة، وفي تطوير أساليب استخدامها. ويعود السبب في ذلك بالطبع إلى المرونة العالية وإمكانية توفير التكاليف الكبيرة التي تحتاجها عادةً التجارب الحقيقية اللازمة للحصول على المعلومات المطلوبة عن المنظومة المدروسة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية البحث في المزايا العديدة التي تقدمها المحاكاة الحاسوبية لمنظومات التوجيه عموماً، ولمسارات الأجسام الطائرة المختلفة بشكل خاص، باعتبارها تتيح إمكانية دراسة وتحليل وتطوير طرائق التوجيه بمرونة عالية، وبسرعة كبيرة، وبأقل قدر ممكن من التكاليف. سيما وأن تطبيقات مثل هذه المحاكاة تلاقى انتشاراً متزايداً سواءً في مجالات البحث والتصميم، أو في المخابرات الافتراضية Virtual Laboratories في مؤسسات التعليم العالي الهندسي لصالح العملية التدريسية والتدريبية.

بناءً على ما تقدم فإن الهدف من هذا البحث هو إعداد النماذج الرياضية والبرامج الحاسوبية للحصول على أدوات التأمين الرياضي والبرمجي، اللازمة لعملية محاكاة طرائق التحكم بوضعية جسم طائر المستخدمة في منظومات التوجيه بالأوامر بغية تحليل وتقييم هذه الطرائق من أجل مختلف شروط حركة الهدف، والجسم الطائر، وبارامترات قانون التوجيه في كل من المستوي والفراغ. ومن ثم اختيار الطريقة المثلى المناسبة لكل حالة.

طريقة البحث:

اعتمدت في هذا البحث طريقة النمذجة الرياضية والمحاكاة الحاسوبية. لذا تم إتباع المنهجية الآتية:

- دراسة قانون كل طريقة توجيه على حدة،
- وضع وتحليل النموذج الرياضي الهندسي لكل طريقة توجيه في المستوي والفراغ،
- تنفيذ المحاكاة بمساعدة الحاسوب في المستوي والفراغ،
- مناقشة نتائج الدراسة وصياغة الاستنتاجات.

طرائق التوجيه بالأوامر Command Guidance Methods:

تقسم طرائق التوجيه بالأوامر إلى :

أ- طريقة الثلاث نقاط Three Point Method.

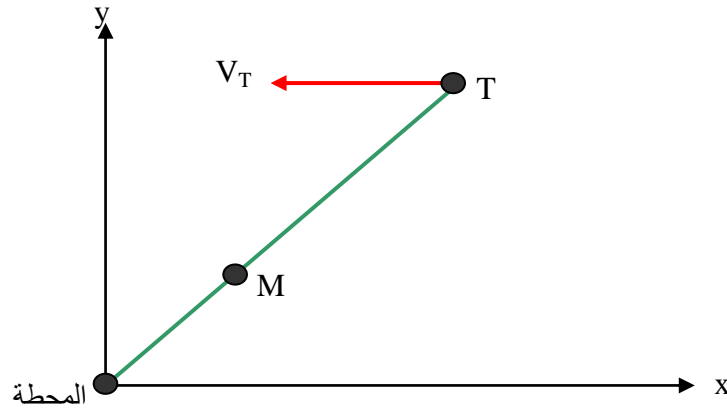
ب- طرائق السبق Lead Methods. والتي تقسم بدورها إلى:

- طريقة السبق الكامل Full-Lead Method.

- طريقة السبق النصفي Half-Lead Method.

1- طريقة الثلاث نقاط Three-point Method:

هي أبسط وأقدم طرائق التوجيه. في هذه الطريقة يجب أن يقع كل من الجسم الطائر والهدف والمحطة على خط تسديد واحد (Line of Sight (LOS) وذلك في كل لحظة زمنية من توجيه الجسم الطائر نحو الهدف كما هو موضح في الشكل الآتي (1) :



الشكل (1) جوهر طريقة الثلاث نقاط

حيث:

T- الهدف،

M- الجسم الطائر.

1-1- معادلات الربط:

إن معادلات الربط لطريقة الثلاث نقاط هي على الشكل الآتي [1,2,7]:

$$\left. \begin{aligned} \epsilon_K &= \epsilon_T \\ \beta_K &= \beta_T \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

حيث أن:

ε_K, β_K - زاوية مكان واتجاه الجسم الطائر المطلوبة،

ε_T, β_T - زاوية مكان واتجاه الهدف.

إن الخطأ في تواضع الجسم الطائر (الإنزياح الخطي للجسم الطائر عن المسار الكينماتيكي) يساوي:

$$\left. \begin{aligned} h_\varepsilon &= D_M (\varepsilon_K - \varepsilon_M) = D_M (\varepsilon_T - \varepsilon_M) \\ h_\beta &= D_M (\beta_K - \beta_M) = D_M (\beta_T - \beta_M) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

حيث:

h_β, h_ε - الخطأ في تواضع الجسم الطائر في المستويين العمودي و الأفقي على الترتيب.

عند تشكيل أوامر التحكم فإنه مكان القيمة الحقيقية للمسافة المائلة حتى الجسم الطائر يكفي استخدام أي تابع زمني كتابع تقريبي $D_M(t)$ هذا يسمح بتوجيه الجسم الطائر نحو الهدف فقط عند وجود معلومات عن القيم الجارية للإحداثيات الزاوية للجسم الطائر والهدف.

1-2- تقييم طبيعة تغير التسارع الكينماتيكي الناظمي للجسم الطائر بمعدل اقترابه من الهدف:

نفترض أن الهدف يتحرك بشكل مستقيم ومنتظم في المستوي العمودي المار عبر مقر منظومة

التحكم ($\beta_T = 0$). عند الشروط السابقة يمكن كتابة:

$$\left. \begin{aligned} W_{knz} &= 0 \\ W_{kny} &= \chi \dot{\varepsilon}_T + D_M \ddot{\varepsilon}_T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

حيث:

W_{knz}, W_{kny} - التسارع الكينماتيكي المطلوب من الجسم الطائر في المستويين الأفقي والعمودي على الترتيب.

$$\chi = 2\dot{D} - D \frac{\dot{V}}{V}$$

نحسب المشتق \dot{W}_{kny} :

$$\dot{W}_{kny} = \frac{d}{dt}(W_{kny}) = \frac{d}{dt}(\chi \dot{\varepsilon}_T + D_M \ddot{\varepsilon}_T) = \dot{\chi} \dot{\varepsilon}_T + (\chi + \dot{D}_M) \ddot{\varepsilon}_T + D_M \ddot{\varepsilon}_T \quad (4)$$

وبالدراسة الرياضية للمشتق \dot{W}_{kny} يتم تحديد عند أية قيم لـ ε_T يكون المشتق $\dot{W}_{kny} > 0$ أي يتزايد التسارع الكينماتيكي الناظمي للجسم الطائر فنحصل على النتيجة الآتية:

- عند الرمي بالملافة $\varepsilon_T < 90^\circ$ (أي عند الرمي على الأهداف المقتربة من المنظومة) فإن التسارع الكينماتيكي الناظمي للجسم الطائر يزداد بمعدل اقتراب الجسم الطائر من الهدف وتزداد المتطلبات لمناورة الجسم الطائر.

في منقطة الالتقاء $D_M = D_T$:

$$\left. \begin{aligned} W_{kny} &= W_{Tny} + (\chi - 2\dot{D}_T) \dot{\varepsilon}_T \\ W_{knz} &= W_{Tnz} - (\chi - 2\dot{D}_T) \dot{\beta}_T \cos \varepsilon_T \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

حيث:

W_{Tny}, W_{Tnz} - تسارع الأهداف في المستويين العمودي والأفقي على الترتيب.

تشير العلاقة (5) إلى العلاقة الكبيرة للتسارع الناظمي المطلوب للجسم الطائر على تسارع الأهداف الجوية.

1-3- مميزات طريقة الثلاث نقاط:

- 1- تمتاز طريقة الثلاث نقاط بالبساطة وقلة البارامترات اللازمة لحساب المسار الكينماتيكي وهي فقط \mathcal{E} و β وهذه يمكن قياسها حتى في ظروف التداخل (التشويش) الإيجابي الفعال لذلك يمكن استخدام طريقة الثلاث نقاط في ظروف التداخل وهذه ميزة إيجابية لهذه الطريقة.
- 2- الميزة السلبية لطريقة الثلاث نقاط هي عدم قدرتها على التعامل مع الأهداف المناورة بشكل كبير وذلك لتعلق التسارع الناظمي المطلوب للجسم الطائر لتحقيق المسار الكينماتيكي بمناورة الهدف، مما يؤدي إلى زيادة انحناء المسار بشكل كبير، وخاصة قرب منطقة التلاقي بسبب زيادة السرعات الزاوية للهدف $(\dot{\mathcal{E}}_T, \dot{\beta}_T)$ بشكل كبير في هذه المنطقة، وعدم مقدرة الجسم الطائر على تنفيذ المناورة المطلوبة.
- من المستحسن استخدام طريقة الثلاث نقاط عند عدم توفر معلومات عن مسافة الهدف وعند استخدام ملاحقة الهدف بالقنال التلفزيونية وفي ظروف عدم إمكانية استخدام طرائق توجيه أخرى.

1-4- المحاكاة الحاسوبية لطريقة الثلاث نقاط:

في هذه الطريقة نستطيع كتابة معادلات الربط في المستوي العمودي كما يلي:

$$\mathcal{E}_M = \mathcal{E}_T \quad (6)$$

يمكن إيجاد مسار الجسم الطائر والهدف باستخدام طريقة الثلاث نقاط كما يلي:

بفرض سرعة الجسم الطائر والهدف ثابتة وارتفاع الهدف ثابت ومناورة الهدف معدومة.

$$X_t = X(t - dt) + V_t \cdot dt \quad (7)$$

حيث أن:

X_t - الإحداثي X للهدف في اللحظة الحالية،

$X(t - dt)$ - الإحداثي X للهدف في اللحظة السابقة.

إن القيمة اللحظية للزاوية \mathcal{E}_T هي:

$$\mathcal{E}_T = \arctg\left(\frac{Y_T}{X_T}\right) \quad (8)$$

إحداثيات الجسم الطائر أثناء طيرانه تعطى كما يلي:

$$\left. \begin{aligned} X_M &= V_M(t) \cdot \cos \mathcal{E}_M \\ Y_M &= V_M(t) \cdot \sin \mathcal{E}_M \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

وبما أن $\mathcal{E}_M = \mathcal{E}_T$ فإننا نحصل:

$$\left. \begin{aligned} X_M &= V_M(t) \cdot \cos \mathcal{E}_T \\ Y_M &= V_M(t) \cdot \sin \mathcal{E}_T \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

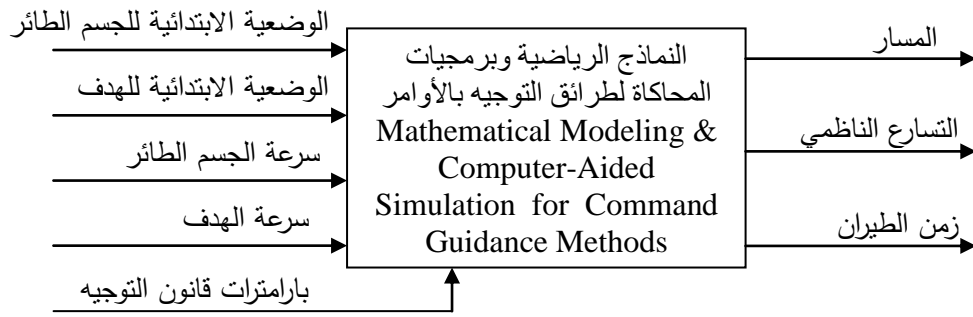
يعطى قانون التسارع الناظمي للجسم الطائر بالعلاقة الآتية [8]:

$$W_{nM} = \frac{2V_M V_T}{Y_T} \cdot \sin^2 \mathcal{E}_T \quad (11)$$

تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB [11,12] لتمثيل حركة الجسم الطائر والهدف في المستوي العمودي

باستخدام هذه الطريقة وذلك لحالات عديدة كما يلي:

معطيات الدخل والخرج لعملية المحاكاة مبينة على الشكل الآتي:



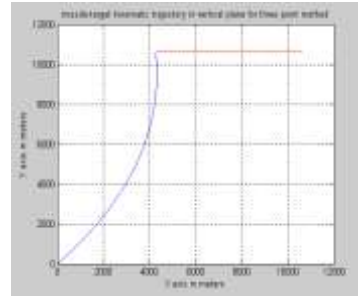
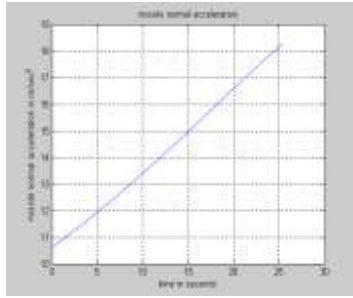
الشكل (2) معطيات الدخل والخرج لعملية المحاكاة

الحالة الأولى: دراسة علاقة اتجاه الهدف على التسارع الناظمي الكينماتيكي للجسم الطائر

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج three_in) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف بطريقة الثلاث نقاط في حالة هدف مقرب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



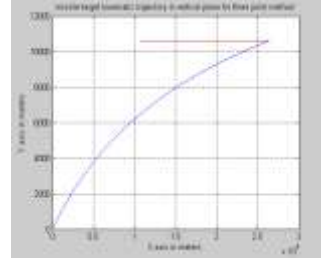
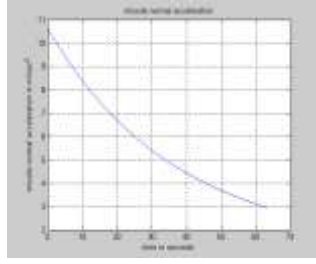
القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مقرب	25.4	18.27	18.27

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج three_out) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الثلاث نقاط في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل السابقة:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_f[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{n\max}[\text{m}/\text{sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{n\text{final}} [\text{m}/\text{sec}^2]$
مبتعد	63.27	10.604	2.943

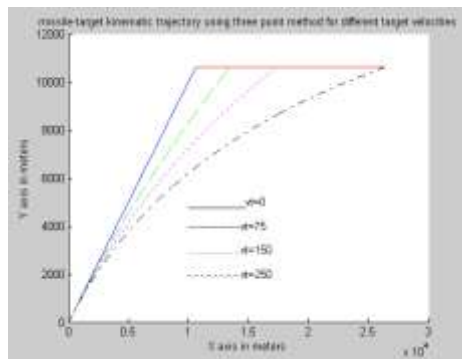
بمقارنة الحالتين نجد أن التسارع الناظمي للجسم الطائر في حالة الرمي على هدف مقرب من المنظومة (ملاقاة) يزداد بمعدل اقترابه من الهدف ويصل إلى قيمة أعظميه في منطقة نقطة الالتقاء ($W_{n\max} = 18.27 \text{ m}/\text{sec}^2$)، وتعتبر هذه هي السلبية الكبرى لطريقة الثلاث نقاط. أما في حالة الرمي بالمطاردة فإن التسارع الناظمي للجسم الطائر يتناقص حتى يصل إلى القيمة النهائية $W_{n\text{final}} = 2.943 \text{ m}/\text{sec}^2$ وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

الحالة الثانية: علاقة انحناء المسار الكينماتيكي بسرعة الهدف

- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج three_compare_out) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الثلاث نقاط في حالة هدف مبتعد من أجل قيم سرعات الهدف $V_T = (0, 75, 150, 250) \text{ m}/\text{sec}^2$ ومعطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15 \text{ km}, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_M = 450 \text{ m}/\text{sec}$$

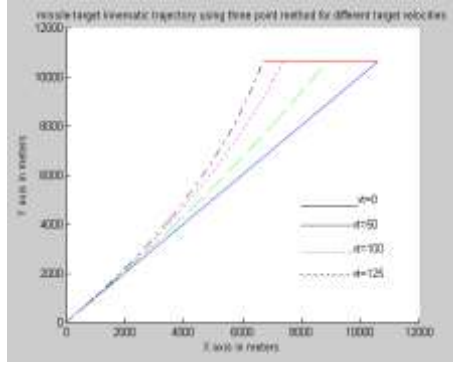
نتائج المحاكاة:



- تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج three_compare_in) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الثلاث نقاط في حالة هدف مقرب من أجل قيم سرعات الهدف $V_T = (0, 50, 100, 125) \text{ m}/\text{sec}^2$ ومعطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15 \text{ km}, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_M = 450 \text{ m}/\text{sec}$$

نتائج المحاكاة:



بمقارنة الشكلين نلاحظ بأنه عند الرمي على هدف ثابت ($V_T=0$) فإن مسار الطريقة عبارة عن مسار مستقيم، أما عند زيادة سرعة الهدف فإن انحناء المسار يزداد بزيادة سرعة الهدف وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

2- طرائق السبق Lead Methods:

تقسم طرائق السبق إلى:

- طريقة السبق الكامل Full-Lead Method

- طريقة السبق النصفى Half-Lead Method

يمكن أن تعطى طرق السبق بشكل عام بالعلاقات الآتية [1,2,6,7]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_K &= \varepsilon_T - m \frac{\dot{\varepsilon}_T}{\Delta \dot{D}} \Delta D \\ \beta_K &= \beta_T - m \frac{\dot{\beta}_T}{\Delta \dot{D}} \Delta D \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

حيث:

m - معامل ثابت،

ΔD - فرق المسافة المائلة بين الجسم الطائر والهدف. ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\Delta D = D_T - D_M \quad (13)$$

عندما تكون $m = 1$ فإن طريقة التوجيه تدعى طريقة التقويم الكامل للمسار (السبق الكامل).

عندما تكون $m = \frac{1}{2}$ فإن طريقة التوجيه تدعى طريقة التقويم النصفى للمسار (السبق النصفى).

إن بارامترات التحكم (الإنزياح الخطي للجسم الطائر عن المسار الكينماتيكي) تساوي:

$$\left. \begin{aligned} h_\varepsilon &= D_M \left(\Delta \varepsilon - m \frac{\dot{\varepsilon}_T}{\Delta \dot{D}} \cdot \Delta D \right) \\ h_\beta &= D_M \left(\Delta \beta - m \frac{\dot{\beta}_T}{\Delta \dot{D}} \cdot \Delta D \right) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

من العلاقات (14) نلاحظ بأنه من أجل إنتاج بارامترات التحكم لطرق السبق يجب معرفة المسافة المائلة.

2-1- تقييم التسارع الكينماتيكي الناظمي للجسم الطائر في منطقة نقطة الالتقاء:

$$W_{kny} = \chi(1-m)\dot{\varepsilon}_T + D_T \left(m\dot{\varepsilon}_T \frac{\Delta \ddot{D}}{\Delta \dot{D}} + m^2 \dot{\beta}_T^2 \cos \varepsilon_T \sin \varepsilon_T \right) + (1-2m)(W_{Tny} - 2\dot{D}_T \dot{\varepsilon}_T)$$

$$W_{kxz} = -\chi(1-m)\dot{\beta}_T \cos \varepsilon_T - D_T \left(m\dot{\beta}_T \frac{\Delta \ddot{D}}{\Delta \dot{D}} \cos \varepsilon_T - 2m^2 \dot{\varepsilon}_T \dot{\beta}_T \sin \varepsilon_T \right) + (1-2m)(W_{Tnz} + 2\dot{D}_T \dot{\beta}_T \cos \varepsilon_T) \quad (15)$$

من العلاقات (15) [7,2,1] نستنتج ما يلي:

1- عندما تكون قيمة $m = 1$ فإن التسارع الكينماتيكي الناظمي للجسم الطائر في منطقة نقطة الالتقاء لا يتعلق بقيمة χ . أي أن الحد الأول في العلاقة (15) يساوي الصفر وبما أن الحد الأول يحدد بشكل أساسي قيمة التسارع W_{kny} و W_{knz} فإنه عند توجيه الجسم الطائر إلى هدف يطير بشكل مستقيم بطريقة التقويم الكامل فإن الأحمال الناظرية للجسم الطائر في منطقة نقطة الالتقاء قريبة إلى الصفر.

- إن سلبية طريقة التقويم الكامل هي العلاقة الكبيرة للتسارعات الناظرية المطلوبة للجسم الطائر بالتسارعات الناظرية للهدف، وهذا يؤدي إلى تخفيض دقة الرمي وخاصة عند التعامل مع الأهداف المناورة.

2- عندما تكون قيمة $m = \frac{1}{2}$ فإنها تُحذف الحدود الأخيرة من العلاقة (15) والمتعلقة بالتسارعات الناظرية للأهداف.

عندئذٍ التسارعات الكينماتيكية الناظرية للجسم الطائر في منطقة نقطة الالتقاء تتحدد بالعلاقة:

$$\left. \begin{aligned} W_{kny} &= \chi \cdot 0.5 \dot{\varepsilon}_T + D_T \left(0.5 \frac{\Delta \ddot{D}}{\Delta D} \varepsilon_T + 0.25 \dot{\beta}_T^2 \cos^2 \varepsilon_T \sin \varepsilon_T \right) \\ W_{knz} &= -\chi \cdot 0.5 \dot{\beta}_T \cos \varepsilon_T - D_T \left(0.5 \frac{\Delta \ddot{D}}{\Delta D} \dot{\beta}_T^2 \cos \varepsilon_T - 0.5 \dot{\varepsilon}_T \dot{\beta}_T \sin \varepsilon_T \right) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

من العلاقات (15) نلاحظ بأن التسارع الكينماتيكي للجسم الطائر لا يتعلق بالتسارع الناظمي للهدف وتعتبر هذه إيجابية كبرى لطريقة السبق النصفى عند التعامل مع الأهداف المناورة.

إن إنحناء المسار بطريقة التقويم النصفى عند رمي الأهداف السريعة أقل وبشكل ملحوظ من إنحناء المسار بطريقة الثلاث نقاط.

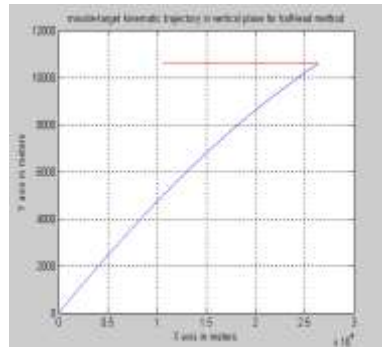
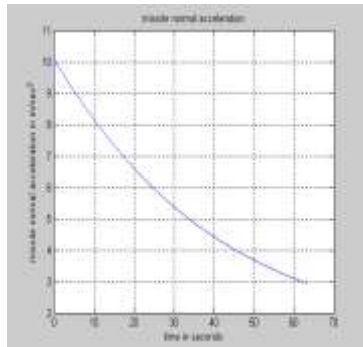
2-2- المحاكاة الحاسوبية لطرائق السبق:

تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB لتمثيل حركة الجسم الطائر والهدف في المستوي العمودي باستخدام طرائق السبق لحالات عديدة كما يلي:

- هدف مبتعد: تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead) بطريقة السبق النصفى من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec, m = 0.5$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

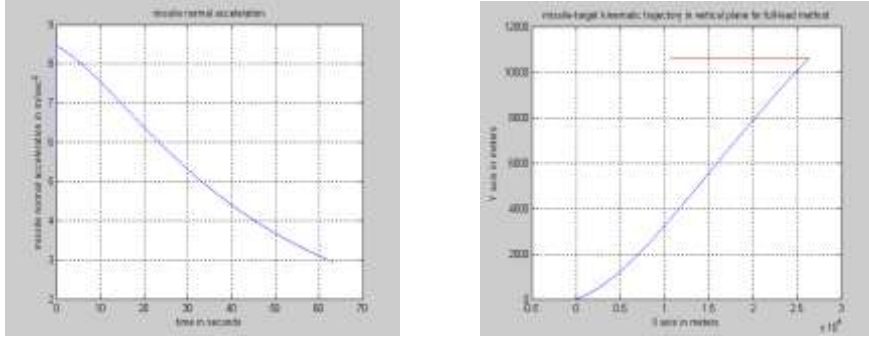
جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
-----------	----------------------------	---	---

مبتعد	63.28	10.0521	2.943
-------	-------	---------	-------

-هدف مبتعد: تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead) بطريقة السبق الكامل من أجل نفس معطيات الدخل السابقة ولكن قيمة $m = 1$:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec, m = 1$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

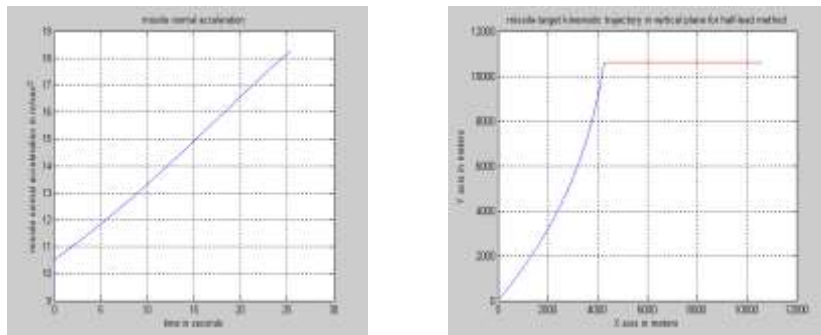
جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مبتعد	63.28	8.46	2.943

بالمقارنة بين الحالتين نلاحظ أن انحناء المسار بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفية وكذلك فإن قيمة التسارع الناظمي للجسم الطائر بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفية.

-هدف مقرب: تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead) بطريقة السبق النصفية من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = -250m/sec, V_M = 450m/sec, m = 0.5$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

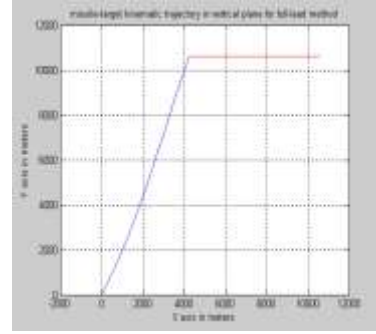
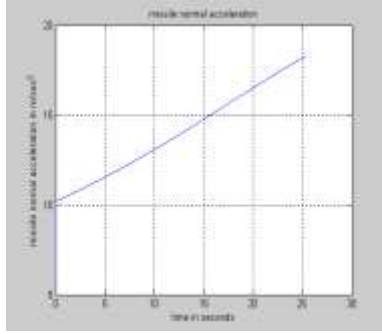
جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مقرب	30	18.46	2.943

مقترب	25.4	18.271	18.271
-------	------	--------	--------

-هدف مقترب: تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead) بطريقة السبق الكامل من أجل نفس معطيات الدخل السابقة ولكن قيمة $m = 1$:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = -250m/sec, V_M = 450m/sec, m = 1$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مقترب	25.4	18.271	18.271

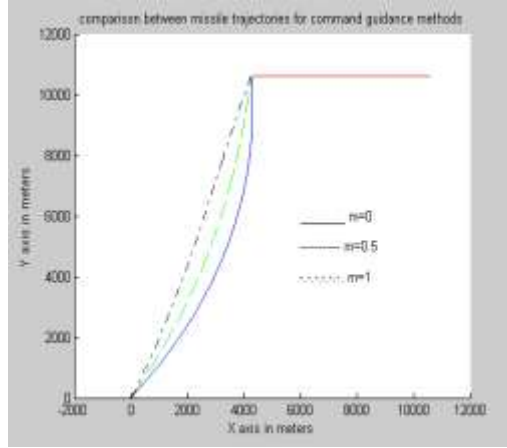
بالمقارنة بين الحالتين نلاحظ أن انحناء المسار بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفى وكذلك فإن قيمة التسارع الناظمى للجسم الطائر بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفى.

علاقة انحناء المسار الكينماتيكي بطرائق التوجيه بالأوامر

سوف نقوم برسم مسار الجسم الطائر والهدف في المستوي بطريقة الثلاث نقاط والسبق النصفى والسبق الكامل من اجل توضيح علاقة انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطرق التوجيه المذكورة أعلاه.
- تنفذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead_compare_in) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف بطرق التوجيه بالأوامر (ثلاث نقاط-سبق نصفى-سبق كامل) في حالة هدف مقترب من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec, m = (0,0.5,1)$$

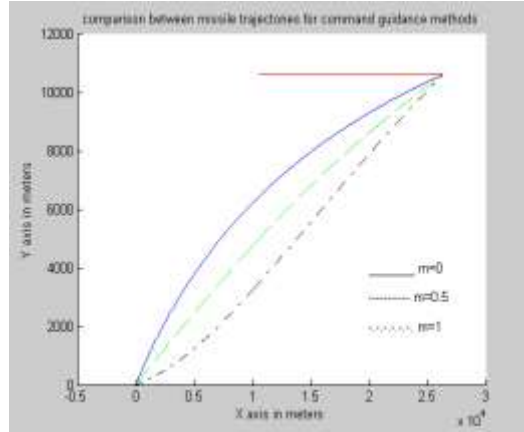
نتائج المحاكاة:



- تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج lead_compare_out) التي تصف مسار الجسم الطائر والهدف بطرق التوجيه بالأوامر (ثلاث نقاط-سبق نصفى-سبق كامل) في حالة هدف مبتعد من أجل معطيات الدخل الآتية:

$$D_0 = 15km, \varepsilon_0 = 45^\circ, V_T = 250m/sec, V_M = 450m/sec, m = (0,0.5,1)$$

نتائج المحاكاة:



من الشكلين نلاحظ أن انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة الثلاث نقاط أكبر منه عند طريقة السبق النصفى والكامل.

انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة السبق النصفى أكبر منه عند طريقة السبق الكامل وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

3-2- نتائج واستنتاجات:

الجدول (1): نتائج المحاكاة الحاسوبية من أجل مختلف طرق التوجيه بالأوامر عند الرمي على هدف غير مناور

Guidance Method	W_{nmax}
Three-Point	10.604
Half-Lead	10.052
Full-Lead	8.46

من الجدول (1) يلاحظ بأنه عند التعامل مع الأهداف غير المناورة فإن أقل قيم للتسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر تحقيقه تتم بطريقة السبق الكامل **Full-Lead**. يستنتج من ذلك بأن أفضل الطرق للتعامل مع الأهداف غير المناورة عند استخدام طرق التوجيه بالأوامر هي طريقة السبق الكامل.

3- الدراسة العددية لطرق التوجيه بالأوامر:

ناقشنا في الفقرة السابقة الدراسة التحليلية لإيجاد مسار الجسم الطائر خلال عملية توجيهه نحو الهدف ولقد كان ذلك في المستوي وإذا أردنا إيجاد هذا المسار في الفراغ أو حتى في المستوي لكن ضمن شروط متغيرة إن كان من ناحية الارتفاع أو من ناحية السرعة وأهم شيء من ناحية مناورة الهدف فإننا نجد أن الطرق التحليلية السابقة تفشل في إيجاد هذا المسار وذلك لصعوبة إجراء التكاملات للمعادلات التفاضلية اللاخطية والتي تمثل حركة الجسم الطائر والهدف وهي [6,7,8].

- المعادلات التي تربط بين حركة الهدف والمحطة:

$$\dot{D}_T = V_T \cos(\beta_T - \varphi_T) \cos(\varepsilon_T - \theta_T)$$

$$(16) D_T \dot{\varepsilon}_T = -V_T \cos(\beta_T - \varphi_T) \sin(\varepsilon_T - \theta_T)$$

$$D_T \cos \varepsilon_T \dot{\beta}_T = -V_T \sin(\beta_T - \varphi_T) \cos \theta_T$$

- المعادلات التي تربط بين حركة الجسم الطائر والمحطة:

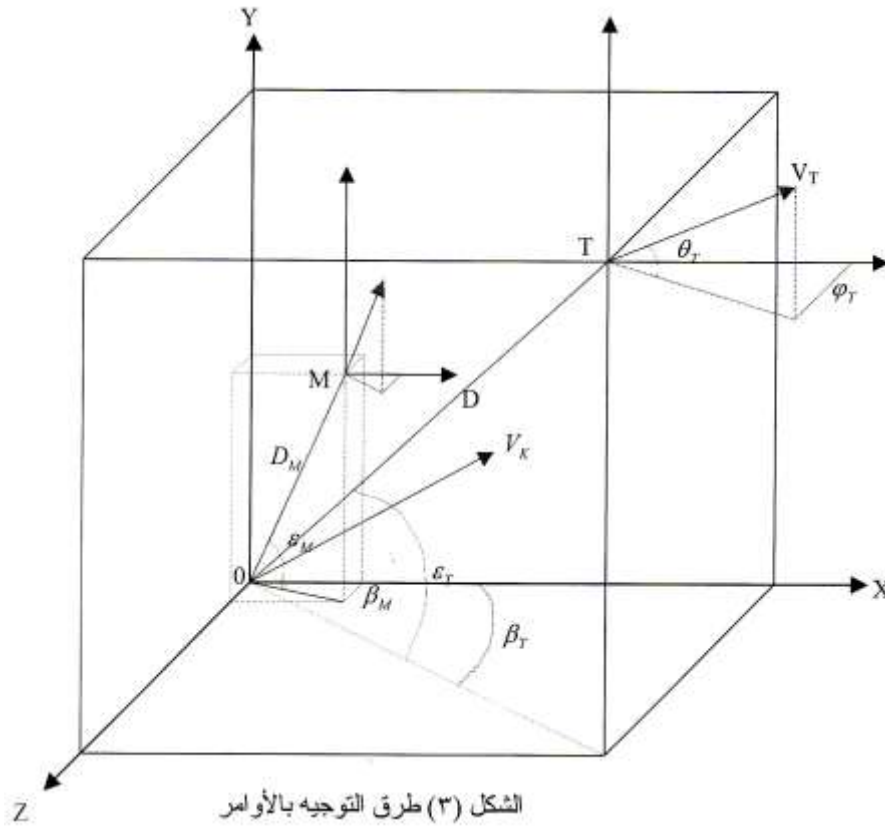
$$\dot{D}_M = V_M \cos(\beta_M - \varphi_M) \cos(\varepsilon_M - \theta_M)$$

$$(17) D_M \dot{\varepsilon}_M = -V_M \cos(\beta_M - \varphi_M) \sin(\varepsilon_M - \theta_M)$$

$$D_M \cos \varepsilon_M \dot{\beta}_M = -V_M \sin(\beta_M - \varphi_M) \cos \theta_M$$

ويمكن تمثيل حركة الجسم الطائر والهدف في الفراغ كما في الشكل (3)

سوف نقوم بدراسة حركة الجسم الطائر والهدف في المستوي والفراغ وذلك ضمن الشروط غير المحددة لطيران الهدف وباستخدام التكاملات المطلوبة في معادلات الحركة (مجموعة من المعادلات التفاضلية اللاخطية) باستخدام إحدى طرق التحليل العددي وهي طريقة رنغ-كانتا (Runge-Kutta) من المرتبة الرابعة [9,10].



3-1- المحاكاة الحاسوبية لطريقة الثلاث نقاط في الفراغ:

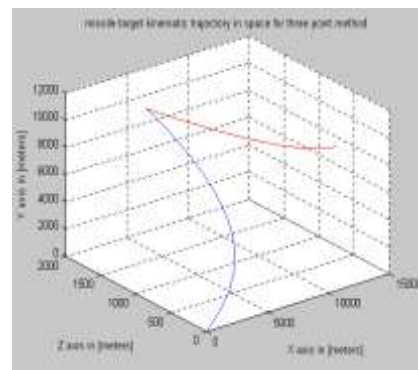
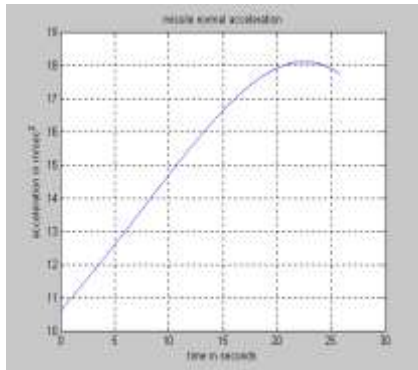
تم بناء برنامج بلغة البرمجة MATLAB لتمثيل حركة الجسم الطائر والهدف في المستوي والفراغ وذلك لحالات عديدة كما يلي:

الحالة الأولى: طريقة الثلاث نقاط (هدف مقرب):

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج sthree) لحالة هدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة تساوي $W_{nzT} = 0.5g$

$$D_{T0} = 15km, \epsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250m/sec, \theta_T = 180^\circ, \phi_T = 0^\circ, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	25.8	18.1	17.74

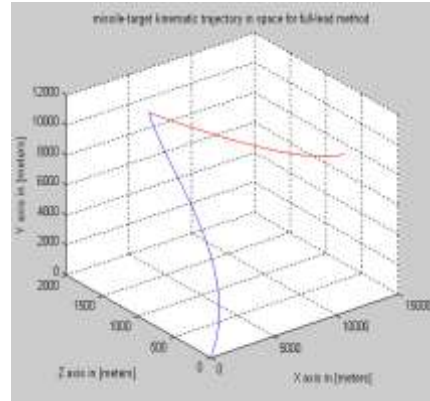
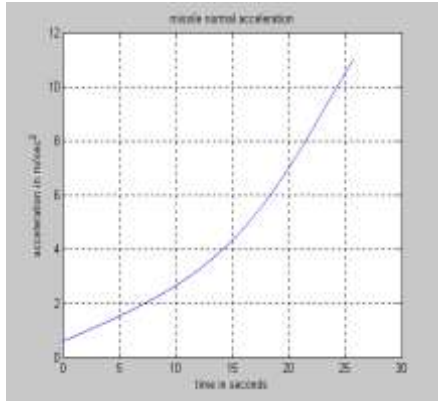
- طريقة السبق الكامل ($m = 1$) هدف مقرب:

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج slead) لحالة هدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة تساوي

$$\cdot W_{nzT} = 0.5g$$

$$D_{T0} = 15\text{km}, \varepsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250\text{m/sec}, \theta_T = 180^\circ, \varphi_T = 0^\circ, V_M = 450\text{m/sec}, m = 1$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران $t_F[\text{sec}]$	التسارع الأعظمي $W_{nmax}[\text{m/sec}^2]$	التسارع النهائي $W_{nfinal} [\text{m/sec}^2]$
مقرب	25.8	11.03	11.03

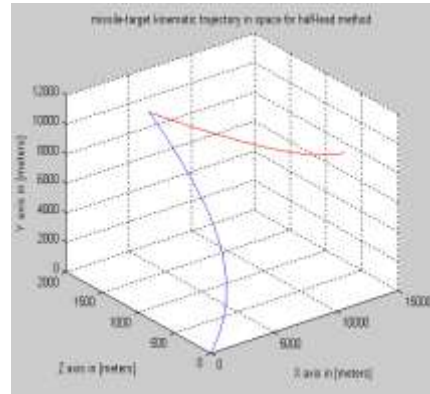
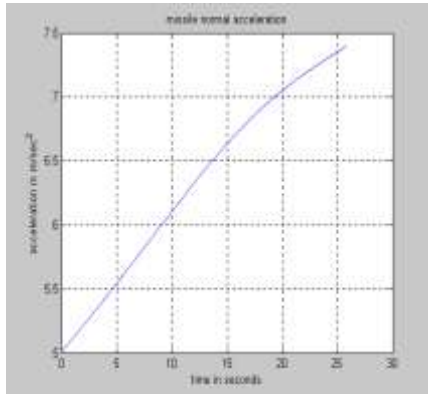
- طريقة السبق النصف ($m = 0.5$) هدف مقرب:

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج slead) لحالة هدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة تساوي

$$\cdot W_{nzT} = 0.5g$$

$$D_{T0} = 15\text{km}, \varepsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250\text{m/sec}, \theta_T = 180^\circ, \varphi_T = 0^\circ, V_M = 450\text{m/sec}, m = 0.5$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مقرب	25.8	7.39	7.39

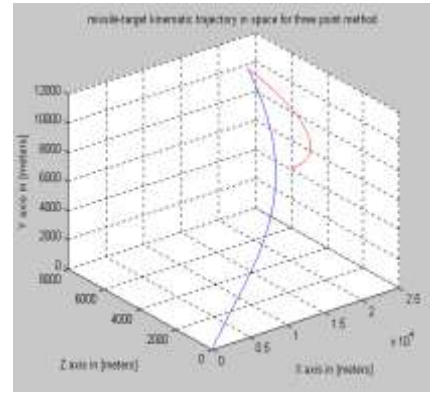
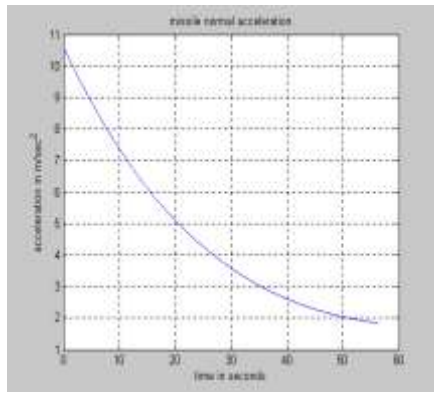
الحالة الثانية:

- طريقة الثلاث نقاط (هدف مبتعد):

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج sthree) لحالة هدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة تساوي 0.5g.

$$D_{T0} = 15km, \varepsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250m/sec, \theta_T = 0^\circ, \varphi_T = 0^\circ, V_M = 450m/sec$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

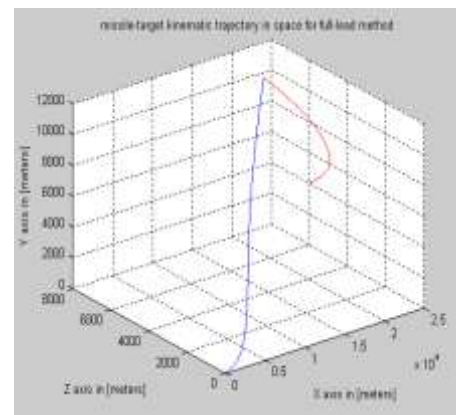
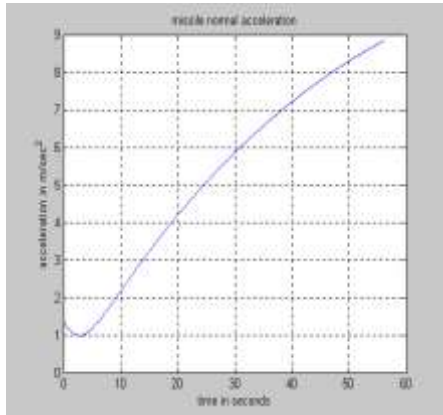
جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مبتعد	56.33	10.603	1.85

- طريقة السبق الكامل ($m = 1$) هدف مبتعد:

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج slead) لهدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة 0.5g.

$$D_{T0} = 15km, \varepsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250m/sec, \theta_T = 0^\circ, \varphi_T = 0^\circ, V_M = 450m/sec, m = 1$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

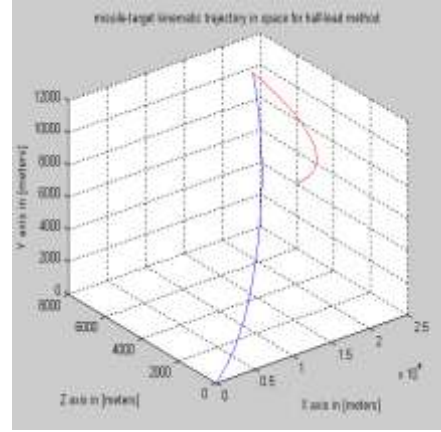
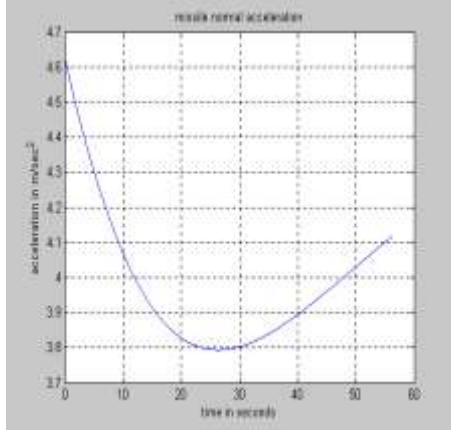
جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مبتعد	56.33	8.85	8.85

- طريقة السبق النصفى ($m = 0.5$) هدف مبتعد:

تم تنفيذ المحاكاة الحاسوبية (البرنامج slead) لهدف مناور في المستوي الأفقي بقيمة مناورة 0.5g.

$$D_{T0} = 15km, \varepsilon_{T0} = 45^\circ, \beta_{T0} = 0^\circ, V_T = 250m/sec, \theta_T = 0^\circ, \varphi_T = 0^\circ, V_M = 450m/sec, m = 0.5$$

نتائج المحاكاة:



القيم العددية لنتائج المحاكاة:

جهة الهدف	زمن الطيران t_F [sec]	التسارع الأعظمي W_{nmax} [m/sec ²]	التسارع النهائي W_{nfinal} [m/sec ²]
مبتعد	56.33	4.63	4.11

3-2- نتائج واستنتاجات:

الجدول (2): نتائج المحاكاة الحاسوبية من أجل مختلف طرق التوجيه بالأوامر عند الرمي على هدف مناور

Guidance Method	W_{nmax}
Three-Point	10.603
Half-Lead	4.63
Full-Lead	8.85

من الجدول (2) يلاحظ بأنه عند التعامل مع الأهداف المناورة فإن أقل قيم للتسارع الناظمي المطلوب من

الجسم الطائر تحقيقه تتم بطريقة السبق النصفى **Half-Lead**.

يستنتج من ذلك بأن أفضل الطرق للتعامل مع الأهداف المناورة عند استخدام طرق التوجيه بالأوامر هي طريقة السبق النصفى .

وبما أن أغلب الأهداف تستخدم المناورة للتخلص من إصابة الجسم الطائر فإن طريقة السبق النصفى هي

أنسب الطرق للتعامل مع الأهداف عند توجيه الجسم الطائر بالأوامر.

النتائج والمناقشة:

من خلال الدراسة التحليلية والمحاكاة البرمجية لطرائق التوجيه بالأوامر تم التوصل إلى النتائج الآتية:

1- من أجل طريقة الثلاث نقاط Three Point Method:

- التسارع الناظمي للجسم الطائر في حالة الرمي على هدف مقرب من المنظومة (ملافة) يزداد بمعدل اقترابه من الهدف ويصل إلى قيمة أعظميه في منطقة نقطة الالتقاء، وتعتبر هذه هي السلبية الكبرى لطريقة الثلاث نقاط. أما في حالة الرمي بالمطاردة فإن التسارع الناظمي للجسم الطائر يتناقص حتى يصل إلى أصغر قيمة ممكنة في منطقة الالتقاء وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.
- عند الرمي على هدف ثابت ($V_T=0$) فإن مسار الطريقة عبارة عن مسار مستقيم، أما عند زيادة سرعة الهدف فإن انحناء المسار يزداد بزيادة سرعة الهدف وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.

2- من أجل طرق السبق Lead Method:

- انحناء المسار بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفى وكذلك فإن قيمة التسارع الناظمي للجسم الطائر بطريقة السبق الكامل أقل من طريقة السبق النصفى.

3- من أجل طرق التوجيه بالأوامر Command Guidance Method:

عند التعامل مع الأهداف غير المناورة:

- انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة الثلاث نقاط أكبر منه عند طريقة السبق النصفى والكامل.
- انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة السبق النصفى أكبر منه عند طريقة السبق الكامل وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.
- عند التعامل مع الأهداف غير المناورة فإن أقل قيم للتسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر تحقيقه تتم بطريقة السبق الكامل Full-Lead.

يستنتج من ذلك بأن أفضل الطرق للتعامل مع الأهداف غير المناورة عند استخدام طرق التوجيه بالأوامر هي طريقة السبق الكامل.

عند التعامل مع الأهداف المناورة:

- انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة الثلاث نقاط أكبر منه عند طريقة السبق النصفى والكامل.
- انحناء المسار الكينماتيكي للجسم الطائر بطريقة السبق النصفى أقل منه عند طريقة السبق الكامل وهذا يتوافق مع الدراسة النظرية.
- عند التعامل مع الأهداف المناورة فإن أقل قيم للتسارع الناظمي المطلوب من الجسم الطائر تحقيقه تتم بطريقة السبق النصفى Half-Lead.

يستنتج من ذلك بأن أفضل الطرق للتعامل مع الأهداف المناورة عند استخدام طرق التوجيه بالأوامر هي طريقة السبق النصفى.

وبما أن أغلب الأهداف تستخدم المناورة للتخلص من إصابة الأجسام الطائرة فإن طريقة السبق النصفى هي أنسب الطرق للتعامل مع الأهداف عند توجيه الجسم الطائر بالأوامر.

4- أظهرت الدراسة تطابقاً كبيراً بين نتائج المحاكاة مع المعطيات المتوفرة في المراجع النظرية ذات الصلة [7,8]، وهذا يدل على سلامة منهجية العمل ومصداقية النماذج الرياضية الموضوعية وصحة برمجيات المحاكاة الحاسوبية،

مما يجعل من الأدوات الرياضية والبرمجية التي يقدمها هذا العمل صالحة للتطبيق عند دراسة هذه الطريقة سواء في مجال التصميم والتقييم، أو في مجال التعليم والتدريب.

المراجع:

.....

- 1- طوشان.الياس فرج الله.1977- نظم توجيه الصواريخ. حلب
- 2- شحادة حسان.1995- نظرية توجيه الصواريخ. حلب
- 3- Kennedy, G.P., Rockets, Missiles and Spacecraft of the National Air and Space Museum, Smithsonian Institution Press, Washington, DC, 1983.
- 4- Nesline, F.W., and Zarchan, P., A New Look at Classical Versus Modern Homing Guidance, *Journal of Guidance and Control*, Vol.4, Jan.-Feb.1981, pp.78-85.
- 5- Garnell, P., Guided Weapon Control Systems, Pergamon, Oxford Press, Brassey's Publishers, Second Edition, 1980.
- 6- El-Sheikh, G.A., Guidance and Control: Tutorial, Technology and Armament Magazine, Cairo, Vol 13-3, July, 1998..
- 7- El-Sheikh, G.A., Theory of Guidance, Cairo, 1993..
- 8- Zarchan, P., Tactical and Strategic Missile Guidance, Second Edition, AIAA, 1994..
- 9- Bakhvalov, N.S, Numerical Methods, Mir Publishers, 1977..
- 10- Abbassi, M.M, Modern Numerical Methods, Vol.1, Almaaref establishment Alexandria, 1975..
- 11- Shahian, B., and Hassul, M., Control System Design using MATLAB, New Jersey, 1993..
- 12- Ogata, K., Solving Control Engineering Problems with MATLAB, New Jersey, 1993.