Control of Inverted Pendulum Using Sliding Mode Control

Soha Fareed Fakih*

(Received 12 / 3 / 2026. Accepted 18 / 5 / 2026)

□ ABSTRACT □

The inverted pendulum system is considered one of the most important engineering models in control theory, because of using it in guidance systems. Therefore, we designed a sliding mode controller, and tested three different reaching laws. The simulations were performed using MATLAB after representing the pendulum in state-space form based on a linearized model around the equilibrium point. A sliding mode control system was designed using three reaching laws.

A comparison was conducted between the controller's performance under each reaching law by examining the settling time, the level of oscillation in the control signal, and its smoothness. The results showed that the traditional reaching law outperformed the other methods in terms of robustness against disturbances, although it produced higher oscillations in the control signal. The saturated reaching law produced lower oscillations but with reduced robustness compared to the first. Meanwhile, the exponential reaching law provided a balanced performance, combining good robustness with a smoother control signal.

In conclusion, the traditional reaching law is recommending for heavy systems, while the others are suitable for accurate and smooth systems.

Keywords: Inverted Pendulum, Sliding Control, Robust Control, Reaching Modes, Sliding surface.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* **Academic Assistant, Department of Manufacturing & Production, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Latakia University (formerly Tishreen), Latakia, Syria. Email: Soha.fakih@latakia-univ.edu.sy**

التحكم بالبندول المقلوب باستخدام التحكم الانزلاقي

سها فريد فقيه*

(تاريخ الإيداع 12 / 3 / 2026. قُبِل للنشر في 18/ 5 / 2026)

□ ملخّص □

يعتبر نظام البندول المقلوب من أكثر النماذج الهندسية تحدياً وأهميةً في نظرية التحكم الآلي، حيث يجمع بين عدة خصائص تشكل تحدياً في عملية التحكم عدا عن أهميته في أنظمة التوجيه . صمم متحكم انزلاقي للبندول وجربت ثلاث أنماط للوصول، ونفذت المحاكاة باستخدام MATLAB وذلك بعد اشتقاق معادلات فراغ الحالة للبندول المقلوب كنموذج خطي حول نقطة الاتزان.

أجريت المقارنة بين أداء المتحكم باختلاف نمط الوصول المستخدم عن طريق المقارنة بين زمن الاستقرار ومقدار التذبذب في إشارة التحكم ونعومتها . أثبتت النتائج تفوق التحكم الانزلاقي ذو نمط الوصول التقليدي على باقي الأنماط من حيث المتانة ضد الاضطرابات بينما أظهر نمط الوصول التشبعي تذبذب أقل ولكن بمتانة أقل ضد الاضطرابات مقارنة بالتقليدي، بينما جمع نمط الوصول الأسي بين المتانة ضد الاضطرابات ونعومة إشارة التحكم.

تم التوصل في النهاية إلى ضرورة استخدام التحكم الانزلاقي ذو نمط الوصول التقليدي في الأنظمة الثقيلة التي لا تكون الاهتزازات فيها مشكلة كبيرة، بينما يفضل استخدام نمط الوصول الأسي والتشبعي في الأنظمة التي تتطلب دقة أكبر.

الكلمات المفتاحية: البندول المقلوب، التحكم الانزلاقي، التحكم المتين، أنماط الوصول، سطح الانزلاق.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY-NC-SA 04

* قائم بالأعمال _قسم التصميم والإنتاج _كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية_ جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)_ اللاذقية_ سورية.
ايميل: Soha.fakih@latakia-univ.edu.sy

1. مقدمة:

يمثل نظام البندول المقلوب أحد أبرز النماذج الأولية الأكثر تحدياً في نظرية التحكم الآلي والهندسة حيث تكمن أهمية هذا النظام في طبيعته غير الخطية غير المستقرة بطبيعتها، حيث يسعى البندول دائماً للابتعاد عن وضعية الاتزان الرأسي غير المستقر . بالإضافة إلى ذلك، يُصنف هذا النظام ضمن فئة الأنظمة ناقصة التحفيز مما يزيد من تعقيد عملية تصميم متحكم فعال وقادر على تثبيته . لذلك يُعتبر البندول المقلوب بيئة اختبار مثالية لتقييم أداء استراتيجيات التحكم المختلفة قبل تطبيقها في تطبيقات حيوية مثل الروبوتات، وأنظمة توجيه الصواريخ، والمركبات ذاتية التوازن[1].

لتجاوز التحديات التي تفرضها طبيعة هذا النظام، تم تطوير العديد من استراتيجيات التحكم القوية حيث يعد التحكم الانزلاقي أحد أبرز هذه التقنيات المستخدمة، وذلك لما يوفره من متانة عالية ضد حالات عدم التيقن في النموذج الرياضي والاضطرابات الخارجية .حيث يعتمد على دفع مسار النظام نحو سطح انزلاقي معين والبقاء عليه، مما يضمن الوصول إلى حالة الاستقرار. غير أن العيب الرئيسي لهذا المتحكم يكمن في ظاهرة الاهتزاز وهي تذبذبات عالية التردد في إشارة التحكم ناتجة عن استخدام دالة الإشارة المتقطعة، مما قد يؤدي إلى إجهاد المحركات ويقلل من عمر النظام الميكانيكي[2],[3] . وللتغلب على مشكلة الاهتزاز أو التخفيف منها تم تجريب أنماط وصول مختلفة للتحكم الانزلاقي لاختيار التطبيقات المناسبة لاستخدام كل واحد منها.

2. أهمية البحث وأهدافه:

تتجلى أهمية هذا البحث في عدة جوانب رئيسية:

1. الأهمية العلمية :

يعتبر نظام البندول المقلوب من أكثر النماذج الهندسية تحدياً في نظرية التحكم الآلي، حيث يجمع بين خصائص اللاخطية، عدم الاستقرار و نقص التحفيز . لذلك، فإن دراسة أداء المتحكمات المقترحة على هذا النظام توفر فهماً عميقاً لسلوك هذه المتحكمات وقدرتها على التعامل مع الأنظمة المعقدة، مما يثري المكتبة العلمية في مجال التحكم المتقدم .

2.التطبيقات العملية :

إن النتائج المستخلصة من هذا البحث يمكن تعميمها على تطبيقات حيوية عديدة تشارك البندول المقلوب في خصائصه الديناميكية، مثل:

1. الروبوتات ذاتية التوازن.
2. أنظمة التوجيه في الطائرات والصواريخ
3. المركبات ذات العجلتين.
4. أنظمة الرفع المغناطيسي.

يهدف هذا البحث إلى:

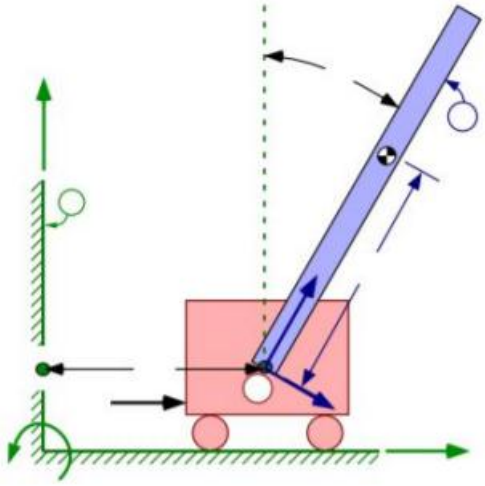
1. تصميم متحكم لتثبيت واستقرار نظام البندول المقلوب، وهو المتحكم الانزلاقي التقليدي وتجريب عدة أنماط للوصول.

2. تحديد أي الأنماط أكثر فعالية من حيث مقدار التذبذب ونعومة إشارة التحكم.
3. تحديد التطبيقات المناسبة لكل نمط وصول.

3. طرائق البحث ومواده:

1.3 استخدامات النواس المقلوب:

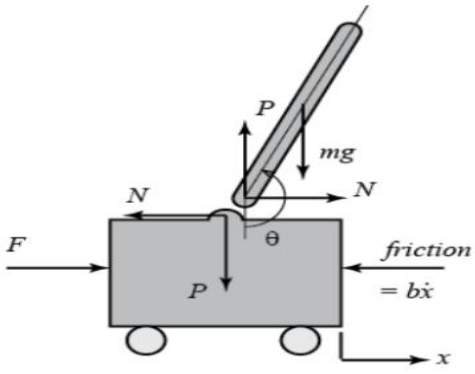
كمثال على ذلك، هو مثال البندول المقلوب على عربة. حيث يتم وضع بندول على عربة بهدف تتبع جسم ما فوقه بينما تتحرك العربة جيئة وذهاباً كما في الشكل (1) حيث تعمل العربة كقاعدة مهتزة، بينما البندول لا تؤثر عليه سوى القوى الناتجة عن حركة العربة، والتي يمكن التحكم بها من قبل مستخدم أو عن بُعد[5].



الشكل (1) البندول المقلوب المثبت على عربة

2.3 تمثيل البندول المقلوب في فراغ الحالة:

يتم اشتقاق النموذج الرياضي للبندول المقلوب بالاعتماد على قانون نيوتن والذي ينص على أن القوة المطبقة على أي جسم تساوي مجموع القوى الناتجة، حيث يمثل الشكل (2) مخطط الجسم الحر للبندول المقلوب المثبت على عربة[6].



الشكل (2) مخطط الجسم الحر للبندول المقلوب المثبت على عربة

بتطبيق قانون نيوتن على العربة ينتج لدينا المعادلة (1)[6].

$$M * x'' + b * x' + N = F \quad (1)$$

حيث:

F (N) القوة المطبقة.

$b(\mathrm{N}\cdot\mathrm{s/m})$ معامل الاحتكاك.

M (k_g) كتلة العربة.

N (N) القوة الأفقية التي يؤثر بها المفصل على البندول.

X (m) إزاحة العربة.

$x'(m/s)$السرعة الخطية للعربة.

$x"\left(m/_{s^2}\right)$التسارع الخطي للعربة.

وبتطبيق قانون نيوتن على البندول المثبت على العربة ينتج لدينا المعادلة (2)[6].

$$N = m * x" + ml\theta" \cos\theta - ml\theta'^2 \sin\theta \quad (2)$$

حيث:

$\theta(rad)$.زاوية البندول.

$\theta'(rad/s)$السرعة الزاوية للبندول.

$\theta"\left(rad/_{s^2}\right)$التسارع الزاوي للبندول.

l (m) بعد مركز البندول عن نقطة التثبيت

وبتعويض المعادلة (2) في المعادلة (1) ينتج لدينا المعادلة (3)[6].

$$(M+m)x" + bx' + ml\theta" \cos\theta - ml\theta'^2 \sin\theta = F \quad (3)$$

وبتطبيق قانون نيوتن على البندول ينتج لدينا المعادلة (4)[6].

$$P\sin\theta + N\cos\theta - mgl\sin\theta = ml\theta" + mx" \cos\theta \quad (4)$$

حيث:

$m(k_g)$كتلة البندول .

$g\left(m/_{s^2}\right)$تسارع الجاذبية الأرضية ويعادل (9.81).

$P(N)$ القوة العمودية التي يؤثر بها المفصل على البندول.

وبجمع العزوم حول مركز البندول ينتج لدينا المعادلة (5)[6].

$$-Pl\sin\theta - Nl\cos\theta = I\theta" \quad (5)$$

حيث:

$I(k_g m^2)$عزم عطالة البندول حول نقطة التثبيت.

وبجمع المعادلتين (4)،(5) ينتج لدينا المعادلة (6)[6].

$$(I+ml^2)\theta" + mgl\sin\theta = -mlx" \cos\theta \quad 6$$

ولتقريب النموذج اللاخطي إلى نموذج خطي ، حيث سنقوم بالتقريب حول نقطة التوازن $(\theta = \pi)$.

بفرض $\emptyset$ تمثل انحراف البندول عن موضع التوازن وبالتالي سيكون لدينا:

$$\cos\theta = \cos(\pi + \emptyset) \approx -1 \quad 7$$

$$\sin\theta = \sin(\pi + \emptyset) \approx -\emptyset \quad 8$$

$$\theta'^2 = \emptyset'^2 \approx 0 \qquad 9$$

وبالتعويض في المعادلتين (6)،(3) ينتج لدينا المعادلتين (10)،(11) واللتان تمثلان النموذج الخطي للبندول المقلوب المثبت على عربة.

$$(I + ml^2)\emptyset'' - mgl\emptyset = mlx'' \qquad 10$$

$$(M + m)x'' - ml\emptyset'' = F \qquad 11$$

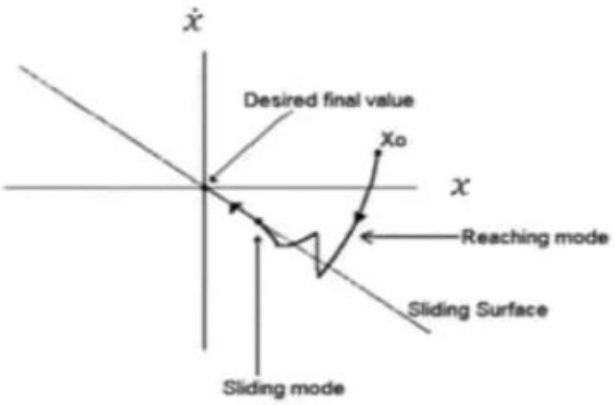
وباعتبار متغيرات الحالة هي موضع العربة والسرعة الخطية للعربة وزاوية انحراف البندول والسرعة الزاوية للبندول، وباعتبار خرج النظام هو موضع العربة وزاوية انحراف البندول ينتج لدينا تمثيل البندول في فراغ الحالة كما هو مبين في المعادلتين (12)،(13) [6].

$$\begin{bmatrix} x' \\ x'' \\ \emptyset' \\ \emptyset'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{mgl(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \emptyset \\ \emptyset' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+Ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} u \qquad (12)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x \\ x' \\ \emptyset \\ \emptyset' \end{bmatrix} \qquad (13)$$

3.3 تصميم المتحكم الانزلاقي:

التحكم الانزلاقي هو تقنية تحكم لا خطية تتميز بخصائص رائعة من حيث الدقة، والمتانة، وسهولة الضبط والتنفيذ. حيث صُممت أنظمة التحكم هذه لقيادة حالة النظام إلى سطح معين في فضاء الحالة، يُسمى السطح الانزلاقي. وبمجرد الوصول إلى السطح الانزلاقي، يحافظ نظام التحكم على الحالة في جوار قريب من السطح الانزلاقي وذلك كما هو موضح في الشكل (6).



الشكل (6) آلية التحكم الانزلاقي

حيث:

Desired final value القيمة النهائية المرغوبة.

Reaching mode نمط الوصول.

Sliding Surface سطح الانزلاق.

لذلك فإن تصميم المتحكم الانزلاقي ينقسم إلى جزأين، حيث يتضمن الجزء الأول تصميم سطح انزلاقي بحيث تلبي الحركة الانزلاقية مواصفات التصميم. أما الجزء الثاني فيهتم باختيار قانون تحكم يجعل السطح المنزلق جاذباً لحالة النظام[3],[2].

بفرض لدينا نظام لا خطي معطى وفق المعادلتين (14)،(15).

$$x = x_1 \quad (14)$$

$$x' = f(x, x', u, t) \quad (15)$$

يتم تصميم المتحكم الانزلاقي باختيار سطح انزلاق يوافق نقطة التوازن المطلوبة[7].

$$s = ax_1 + x_2 = 0 \quad (16)$$

ولتأمين الوصول إلى سطح الانزلاق هذا يلزمنا تحديد نمط وصول يحدد تغيرات السطح الذي يوجد عليه النظام بحيث نضمن الوصول إلى سطح الانزلاق الموافق لنقطة الاتزان وذلك باشتقاق المعادلة (16) فنحصل على المعادلة (17)[7].

$$s' = ax_1' + x_2' \quad (17)$$

وبتعويض المعادلتين (15،14) في المعادلة (17) ينتج لدينا المعادلة (18)[7].

$$s' = ax_2 + f(x, x', u, t) \quad (18)$$

وباختيار نمط وصول معين نستطيع استخراج قانون التحكم(u) من المعادلة (18) حيث لدينا عدة أنماط للوصول نذكر منها:

- نمط الوصول التقليدي ذو المعدل الثابت (Constant Rate Reaching Law) كما هو مبين في المعادلة (19)[8],[9],[10],[11].

$$s' = -k * sgn(s) \quad (19)$$

حيث:

K معامل الوصول لسطح الانزلاق ويحدد قوة الدفع نحو سطح الانزلاق.

Sgn(s) إشارة سطح الانزلاق.

- نمط الوصول التشبعي(Saturation Reaching Law) كما هو مبين في المعادلة (20) [8],[9],[10],[11].

$$s' = -k * \text{sat}\left(\frac{S}{\varepsilon}\right) \quad (20)$$

ε سمك الطبقة الحدودية.

$\text{sat}\left(\frac{s}{\varepsilon}\right)$ دالة التشبع.

إذا كانت الحالة بعيدة ($|s| > \varepsilon$): تُعطي قيمة ثابتة (±1) لدفع النظام بسرعة نحو الهدف.

إذا كانت الحالة قريبة ($|s| \geq \varepsilon$): تُعطي قيمة نسبية لتهدئة الحركة وتجنب الاهتزازات العنيفة.

Kمعامل الوصول لسطح الانزلاق.

- نمط الوصول ذو المعدل الأسي (Power Rate Reaching Law) وهو موضح في المعادلة (21)[8],[9],[10],[11].

$$s' = -k * |s|^{\gamma} * sgn(s) \quad (21)$$

حيث:

K معامل الوصول لسطح الانزلاق.

γ تؤخذ قيمتها عادة بين الصفر والواحد وهي تتحكم في نعومة وسرعة الاقتراب من السطح.

4.3 تصميم المتحكم الانزلاقي للبندول المقلوب:

يهدف هذا البحث إلى تنظيم زاوية البندول عند وضعية التوازن باستخدام التحكم الانزلاقي، لذلك قمنا باختيار سطح انزلاق كما هو مبين في المعادلة (22) حيث يتضح منها أن الاهتمام الرئيسي هو بزاوية البندول لأنه عندما تذهب الزاوية بعيداً عن وضع الاستقرار ينهار النظام.

$$s = a\emptyset + \emptyset' \qquad (22)$$

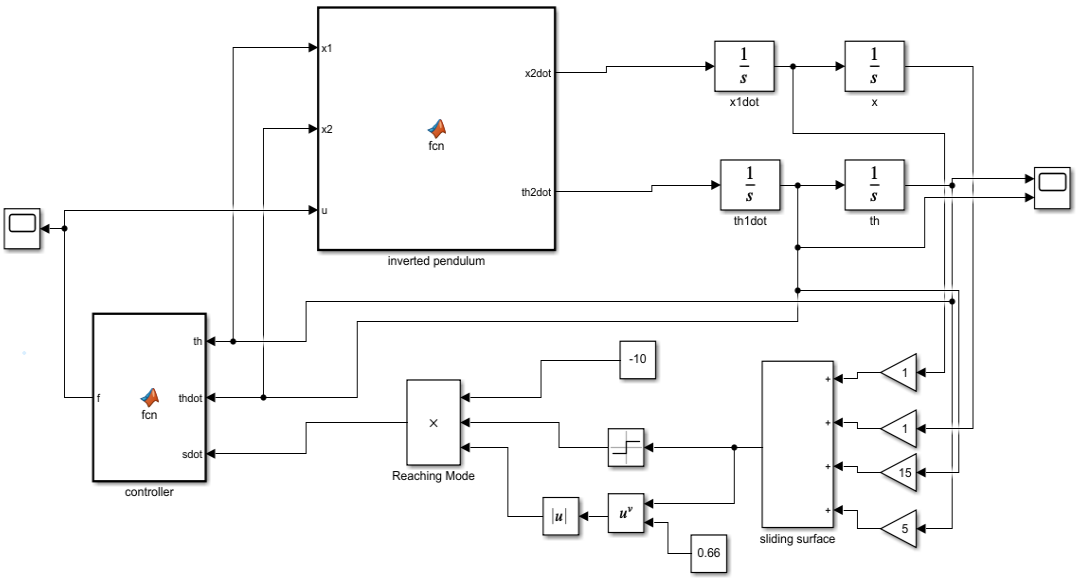
وبالاشتقاق نحصل على المعادلة (23).

$$s' = a * \emptyset' + \emptyset'' = a * w + \left(\frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} * x'\right) + \left(\frac{mgl(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} * \emptyset\right) + \left(\frac{ml}{I(M+m)+Mml^2}\right) * u \qquad (23)$$

وبتعويض أحد أنماط الوصول التي ذكرت سابقاً نستطيع استخراج قانون التحكم (u) من المعادلة (23).

وببناء نموذج في بيئة (Matlab\Simulink) كما هو موضح في الشكل (7) بهدف اختبار خوارزمية التحكم بأنماط وصول مختلفة، حيث تم وضع القيم التالية لكل من كتلة العربة($M=0.5\ k_g$) وطول ذراع البندول ($l=0.3m$). وكان للمتحكم ثلاث مداخل وهي:

1. زاوية البندول.
2. سرعة ذراع البندول.
3. تغير سطح الانزلاق.

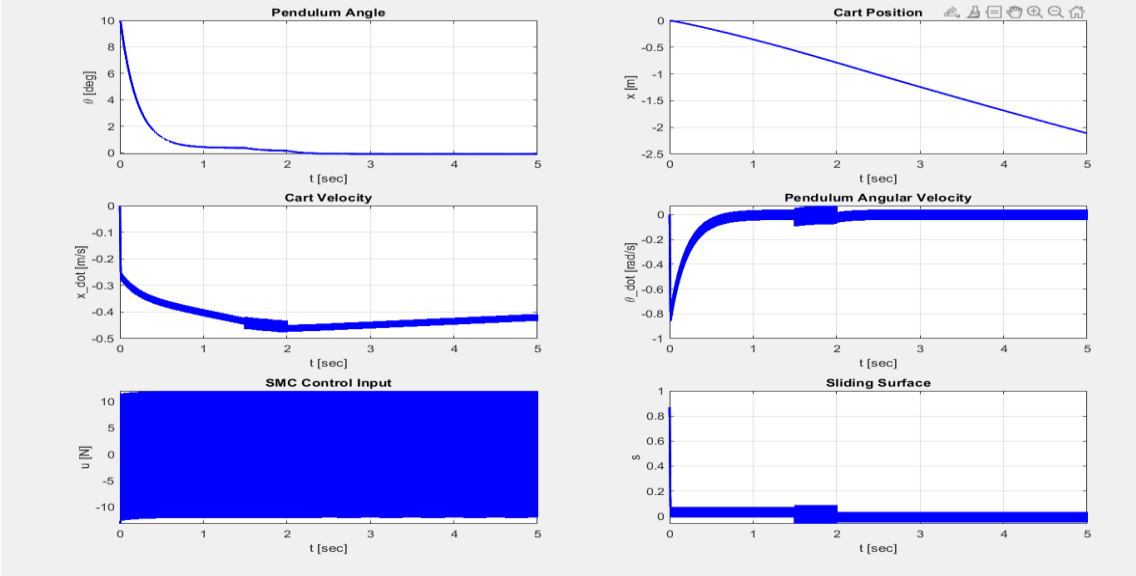


الشكل (7) النموذج المبني في بيئة (Matlab\Simulink)

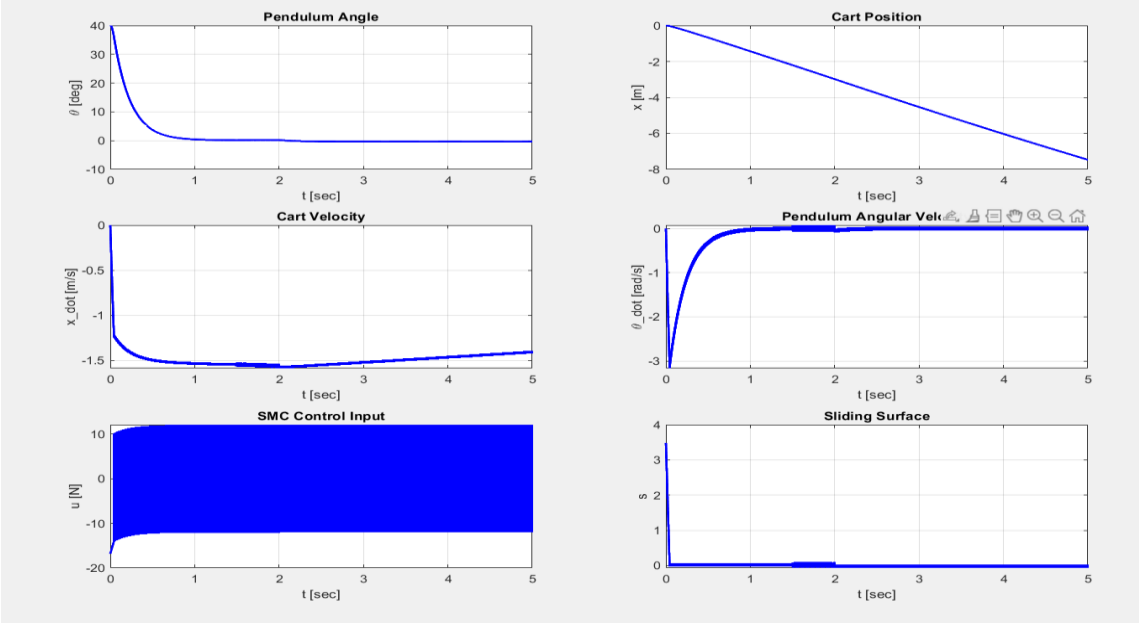
4. النتائج والمناقشة:

1.4 النتائج:

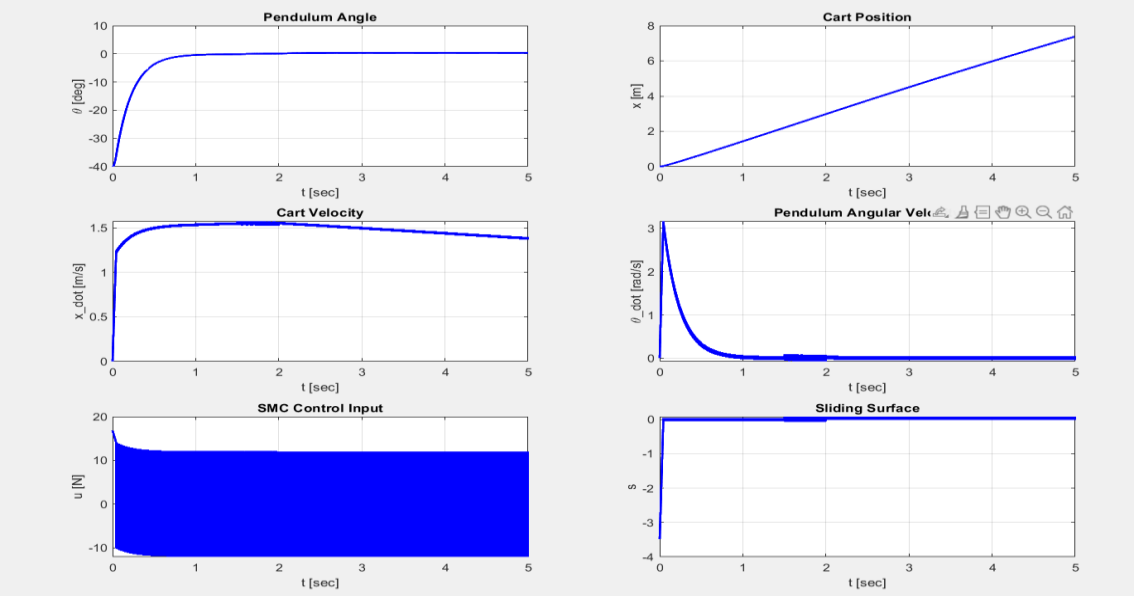
1.1.4استخدام نمط الوصول التقليدي:



الشكل (8) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التقليدي عند البدء بزاوية مقدارها (10) درجات

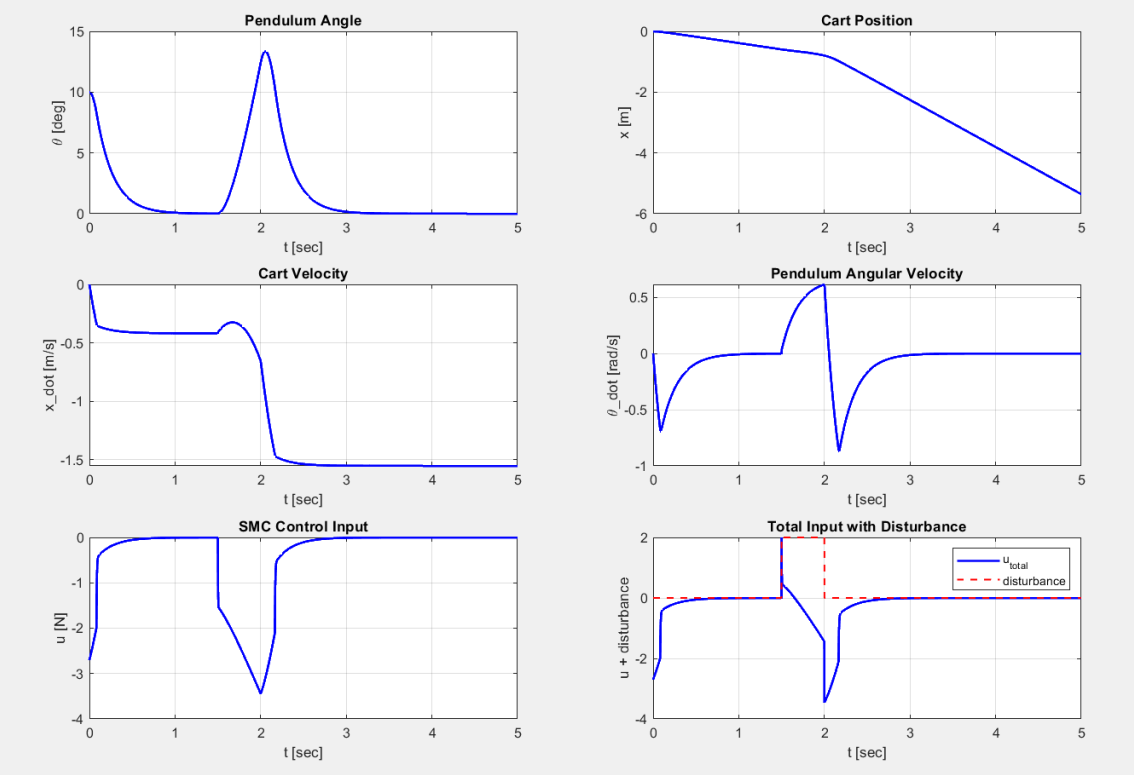


الشكل (9) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التقليدي عند البدء بزاوية مقدارها (40) درجة

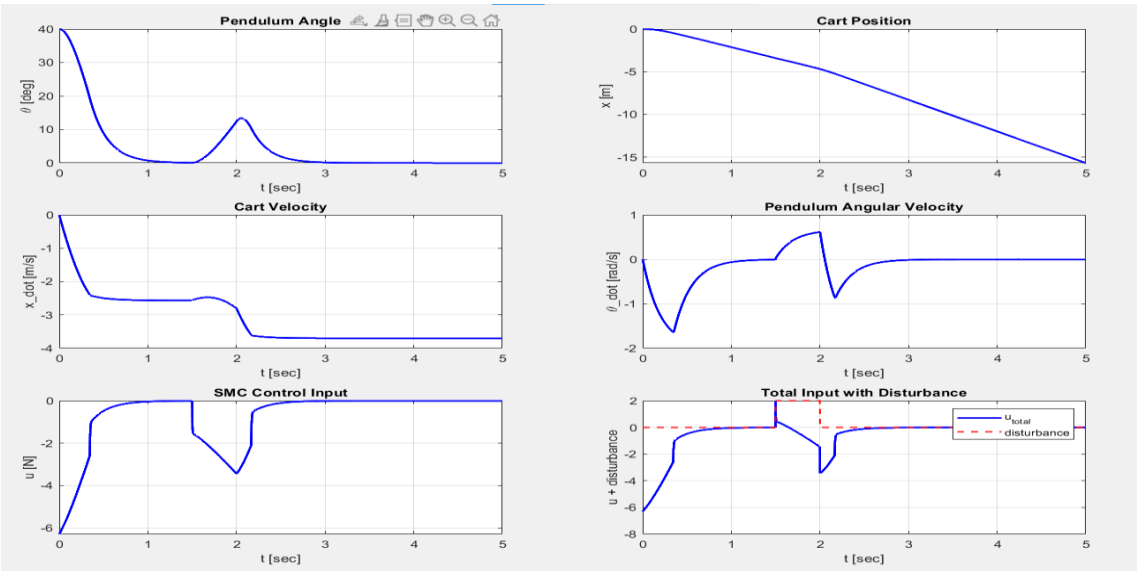


الشكل (10) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التقليدي عند البدء بزاوية مقدارها (−40) درجة

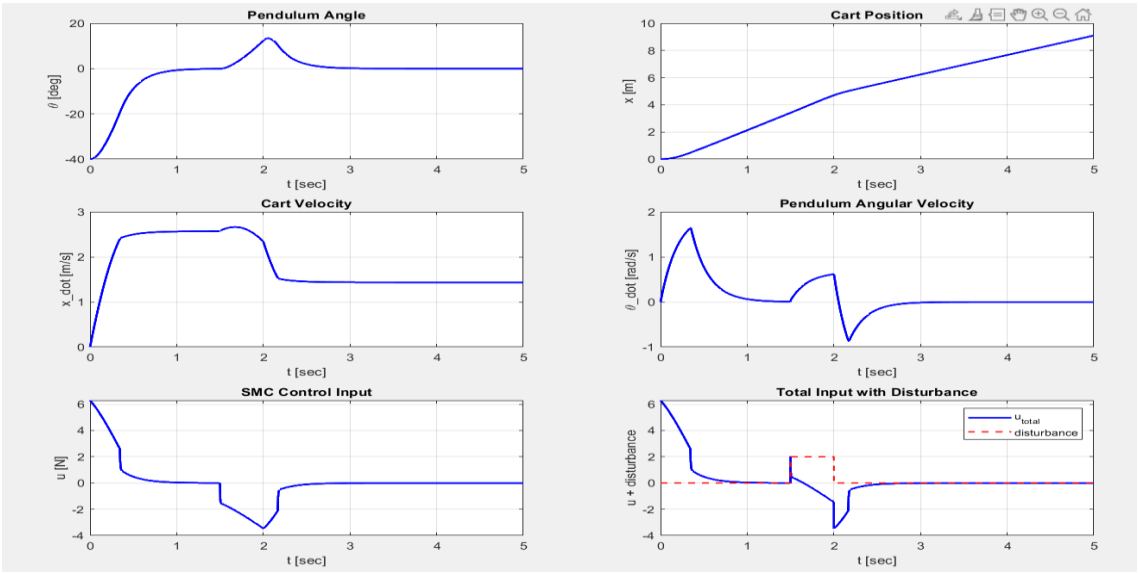
2.1.4 استخدام نمط الوصول التشبعي:



الشكل (11) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التشبعي عند البدء بزاوية مقدارها (10) درجات

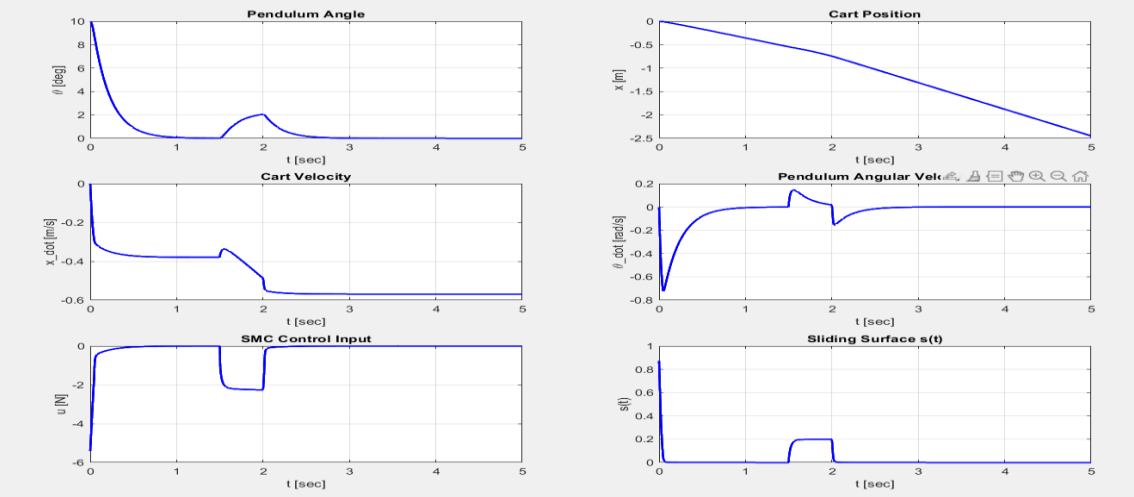


الشكل (12) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التشبعي عند البدء بزاوية مقدارها (40) درجة

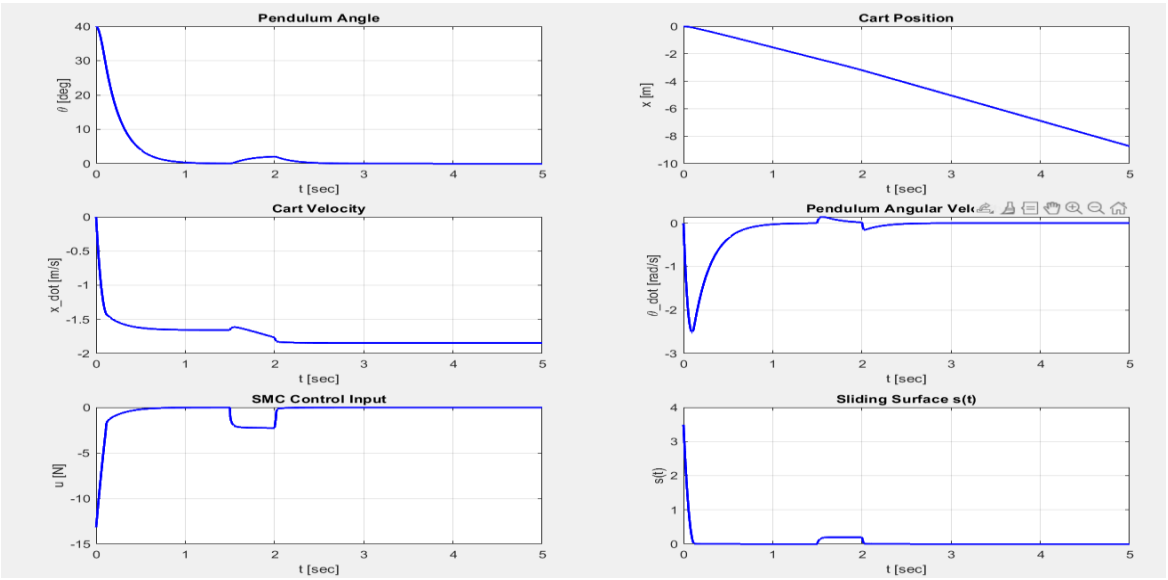


الشكل (13) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول التقليدي عند البدء بزاوية مقدارها (−40) درجة

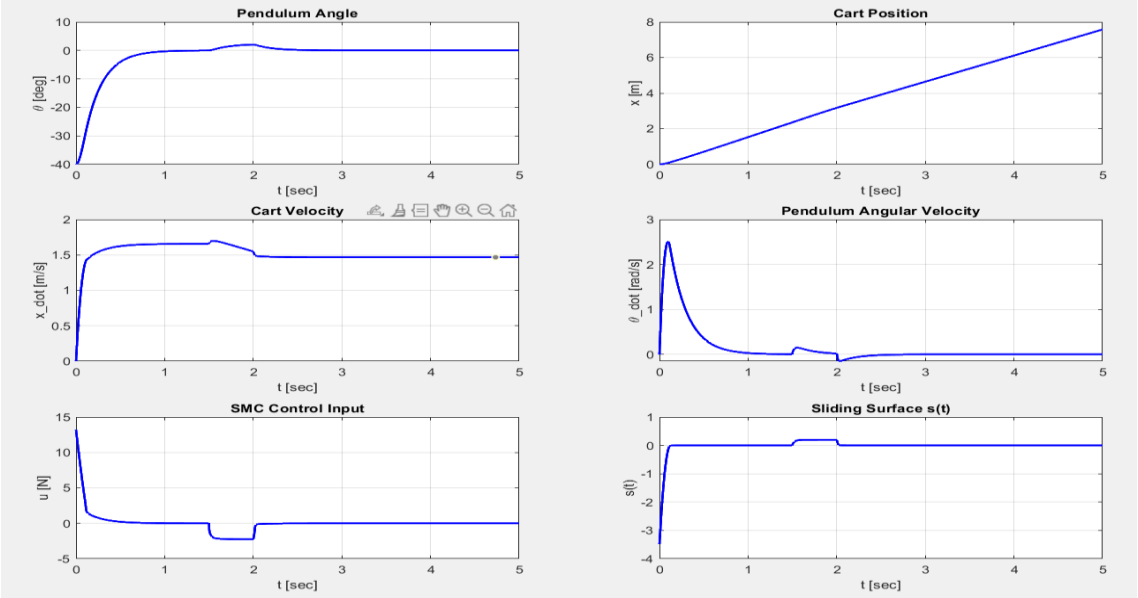
3.1.4 استخدام نمط الوصول الأسي:



الشكل (14) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول الأسي عند البدء بزاوية مقدارها (10) درجات



الشكل (15) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول الأسي عند البدء بزاوية مقدارها (40) درجة



الشكل (16) مميزات النظام عند استخدام نمط الوصول الأسي عند البدء بزاوية مقدارها (−40) درجة

المناقشة:

نلاحظ من الأشكال (8)،(9)،(10) أنه عند استخدام نمط الوصول التقليدي نحصل على:

- سرعة وصول جيدة لكنها ليست الأسرع حيث كان زمن الاستقرار (1 sec).
- تذبذب مرتفع بسبب استخدام دالة الإشارة وحدوث تغيرات حادة فيها.
- جهد تحكم كبير وغير ناعم بسبب التبديل القاسي في خرج المتحكم لأنه يعتمد على دالة الإشارة.
- متانة عالية ضد الاضطرابات وعدم اليقين حيث كان للنظام القدرة للعودة لوضع الاستقرار عند تعرضه لاضطراب خارجي خلال(0.5) ثانية وكان له القدرة للعودة لوضع الاتزان من أجل زوايا انحراف مختلفة.

نلاحظ من الأشكال (11)،(12)،(13) أنه عند استخدام نمط الوصول التشبعي :

- سرعة وصول تصل حتى (1) ثانية.
- يقل التذبذب بشكل كبير مقارنة بالتقليدي لأن الانتقال يحدث بشكل انتقالي وليس بشكل مفاجئ.
- يعطي إشارة تحكم ناعمة داخل طبقة حدودية حول السطح ويصبح جهد التحكم أقل وأكثر سلاسة.
- المتانة ضد الاضطرابات انخفضت قليلاً حيث عاد لوضع الاستقرار خلال (1) ثانية عندما تعرض لاضطراب كما كان له القدرة في العودة لوضع الاستقرار من أجل زوايا انحراف مختلفة.

نلاحظ من الأشكال (14)،(15)،(16) أنه عند استخدام نمط الوصول الأسي نحصل على:

- سرعة وصول مشابهة للنمطين السابقين حيث كان زمن الاستقرار (1) ثانية.
- تذبذب أقل من التقليدي لأن الجزء الخطي يساعد على التنعيم.
- جهد التحكم موزون بين جزء خطي وجزء غير خطي.
- متانة جيدةً ضد الاضطرابات حيث كان له القدرة على العودة لوضع الاستقرار خلال زمن قدره (0.5) ثانية كما كان له القدرة في العودة لوضع الاستقرار من أجل زوايا انحراف مختلفة.

كما نلاحظ من الأشكال السابقة أن الاهتزاز يزداد عندما تكون زاوية الانحراف سالبة لأن النظام أبعد ما يكون عن نقطة الاستقرار.

يوضح الجدول (1) المقارنة بين أنماط الوصول المستخدمة.

الجدول (1) المقارنة بين أنماط الوصول المستخدمة

نمط الوصول	زمن الاستقرار (sec)	الخطأ عند الاستقرار	تكامل الخطأ المطلق	طاقة إشارة التحكم	مقدار التذبذب (تباين إشارة التحكم)	أقصى انحراف عند الاضطراب (درجة)	زمن العودة بعد الاضطراب (sec)
التقليدي	1	0	0.0503	723.74	20	0.1	0.01
التشبعي	1	0	0.158	4.972	0.1	15	1
الأسي	1	0	0.038	0.63546	0.04	2	0.5

كما يبين الجدول (1):

1. استهلكنا طاقة كبيرة من المتحكم عند استخدام نمط الوصول التقليدي بسبب الاهتزاز الكبير حول نقطة التوازن.
2. حصلنا على تذبذب كبير عند استخدام نمط الوصول التقليدي بينما كان له القيمة الأقل عند استخدام نمط الوصول الأسي.
3. حصلنا على أقل انحراف عند الاضطراب عند استخدام نمط الوصول التقليدي وعلى أقل زمن لازم للعودة للاستقرار بعد حصول الاضطراب وهذا يدل على أن نمط الوصول التقليدي أكثر متانة من النمطين الآخرين.
4. حصلنا على نفس زمن الاستقرار والخطأ عند الاستقرار لجميع الأنماط.
5. حصلنا على تكامل خطأ عبر الزمن أقل عند استخدام نمط الوصول الأسي وهذا يعني أن المتحكم يكون هنا سريع ودقيق وحصلنا على أكبر قيمة عند استخدام النمط التشبعي بسبب وجود الطبقة التي لا يوجد فيها أي رد فعل تحكمي.
6. تكامل الخطأ عبر الزمن كان له قيمة صغيرة لجميع الأنماط وهذا يدل على متانة التحكم الانزلاقي.

5. الاستنتاجات والتوصيات:

1.5 الاستنتاجات:

1. نستخدم التحكم الانزلاقي ذو نمط الوصول التقليدي عندما تكون المتانة أهم من نعومة الإشارة، أو عندما لا تكون التذبذبات مشكلة كبيرة مثل أنظمة الهيدروليك الصناعي الثقيل حيث إنها لا تتأثر كثيراً بسبب الاهتزازات أو في الأنظمة التي تعمل في بيئات مضطربة باستمرار مثل الأنظمة الريحية.
2. يستخدم التحكم الانزلاقي ذو نمط الوصول التشبعي عندما يكون تقليل التذبذب مهماً جداً مثل آلات الCNC او الطابعات ثلاثية الأبعاد.
3. نستخدم التحكم الانزلاقي ذو نمط الوصول الأسي عندما نحتاج وصولًا أسرع مع تذبذب أقل دون التضحية بالمتانة مثل أنظمة التحكم بالتوجيه أو المركبات ذاتية القيادة.
4. يعتمد اختيار نمط الوصول الأمثل على طبيعة النظام، حساسية المشغلات، ومتطلبات الأداء الديناميكي، لذلك لا يوجد نمط واحد يناسب جميع التطبيقات.

2.5 التوصيات:

- يجب ضبط معاملات التحكم في الأنماط الثلاثة بعناية لضمان الاستقرار وتقليل جهد التحكم، مع مراعاة خصائص النظام والاضطرابات المتوقعة.
- إجراء محاكاة مقارنة تحت نفس الظروف (اضطرابات، ضوضاء، تغيّر حمل) لتقييم أداء كل نمط بشكل موضوعي قبل التطبيق العملي.
- تنفيذ اختبارات عملية بعد المحاكاة للتحقق من تأثير التذبذب على المشغلات الحقيقية، خصوصاً في الأنظمة الحساسة.
- تطبيق المحاكاة عبر منصة حقيقية ودراسة حالة عزم معارض فجائي.

References:

[1] K. J. Åström and K. Furuta, "Swinging up a pendulum by energy control," *Automatica*, vol. 36, no. 2, pp. 287–295, 2000.

[2] V. I. Utkin, "Sliding mode control design principles and applications to electric drives,"* IEEE Transactions on Industrial Electronics,* vol. 40, no. 1, pp. 23–36, 1993.

[3] S. K. Spurgeon, "Sliding mode control: A review of recent contributions,"* Annual Reviews in Control, *vol. 39,no.1, pp. 84–107, 2015**.**

[4] A. Kolesnikov, "Inverted pendulum: From rocket guidance origins to modern control applications," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, no. 2, pp. 1–7, 2020.

[5] A. Benallegue and A. Kheddar, "Modeling and control of the cart–inverted pendulum system: A survey,"* *IFAC-PapersOnLine*,* vol. 54, no. 20, pp. 1–8, 2021.

[6] K .Ogata, *Modern control engineering*,5th ed. New Jersey: Prentice Hall,2010**.**

[7]V. Utkin, J. Guldner, and J. Shi, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2009.

[8] J.-J. E. Slotine and W. Li, **Applied Nonlinear Control*,* 1st ed. New Jersey: Prentice Hall, 1991.

[9] X. Yu and J.-X. Xu, "Reaching law based sliding mode control: A survey,"* *Control Theory and Applications*, *vol. 26, no. 8, pp. 1025–1036, 2009.

[10] H. Sira-Ramírez and S. K. Spurgeon,* *Variable Structure Control of Nonlinear Systems: A Differential Geometric Approach*,* 1st ed. London: Springer, 1999**.**

[11] Y. Feng, X. Yu, and Z. Man,"Non-singular terminal sliding mode control of rigid manipulators,"**Automatica*,* vol. 38, no. 12, pp. 2159–2167, 2002.