



مجلة بحوث

جامعة حلب في المناطق المحررة

العدد الأول

1443 / 8 / 12 هـ - 2022 / 3 / 15 م

علمية - ربيعية - محكمة

تصدر عن

جامعة حلب في المناطق المحررة





بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## مجلة جامعة حلب في المناطق المحررة

مجلة علمية محكمة فصلية، تصدر باللغة العربية، تختص بنشر البحوث العلمية والدراسات الأكاديمية في مختلف التخصصات، تتوفر فيها شروط البحث العلمي في الإحاطة والاستقصاء ومنهج البحث العلمي وخطواته، وذلك على صعيدي العلوم الإنسانية والاجتماعية والعلوم الأساسية والتطبيقية.

### رؤية المجلة:

تتطلع المجلة إلى الريادة والتميز في نشر الأبحاث العلمية.

### رسالة المجلة:

الإسهام الفعّال في خدمة المجتمع من خلال نشر البحوث العلمية المحكمة وفق المعايير العلمية العالمية.

### أهداف المجلة:

- نشر العلم والمعرفة في مختلف التخصصات العلمية.
- توطيد الشراكات العلمية والفكرية بين جامعة حلب في المناطق المحررة ومؤسسات المجتمع المحلي والدولي.
- أن تكون المجلة مرجعاً علمياً للباحثين في مختلف العلوم.

الهيئة الاستشارية لمجلة جامعة حلب في المناطق المحررة

د. جلال الدين خانجي      أ.د. زكريا ظلام      أ.د. عبد الكريم بكار  
أ.د. إبراهيم أحمد الديبو      أ.د. أسامة اختيار      د. أسامة القاضي  
د. يحيى عبد الرحيم

هيئة تحرير مجلة جامعة حلب في المناطق المحررة

رئيس هيئة التحرير

أ.د. عبد العزيز الدغيم

البحوث الإنسانية والاجتماعية	البحوث التطبيقية
د. ضياء الدين القالش      نائب رئيس هيئة التحرير	أ.د. أحمد بكار      نائب رئيس هيئة التحرير
أ.د. عبد القادر الشيخ      عضواً	أ.د. جواد أبو حطب      عضواً
د. سهام عبد العزيز      عضواً	أ.د. عبد الله حمادة      عضواً
د. عماد كنعان      عضواً	د. محمد يعقوب      عضواً
د. ماجد عليوي      عضواً	د. كمال بكور      عضواً
د. أحمد العمر      عضواً	د. علي السلوم      عضواً
	د. محمود الموسى      عضواً
	أ.د. محمد نهاد كردية      عضواً

أمين المجلة: هاني الحافظ

## معايير النشر في المجلة:

- 1- تنشر المجلة الأبحاث والدراسات الأكاديمية في مختلف التخصصات العلمية باللغة العربية.
- 2- تنشر المجلة البحوث التي تتوافر فيها الأصالة والابتكار، واتباع المنهجية السليمة، والتوثيق العلمي مع سلامة الفكر واللغة والأسلوب.
- 3- أن يكون البحث أصيلاً وغير منشور أو مقدم لأي مجلة أخرى أو أي موقع آخر.
- 4- أن يرفق بالبحث ملخص عنه باللغات الثلاث العربية والإنكليزية والتركية على ألا يتجاوز 200-250 كلمة، وبخمس كلمات مفتاحية.
- 5- ترسل البحوث المقدمة لمحكمين متخصصين، ممن يشهد لهم بالنزاهة والكفاءة العلمية في تقييم الأبحاث، ويتم هذا بطريقة سرية، ويعرض البحث على محكم ثالث في حال رفضه أحد المحكمين.
- 6- يلتزم الباحث بإجراء التعديلات المطلوبة خلال 15 يوماً.
- 7- يبلغ الباحث بقبول النشر أو الاعتذار عنه، ولا يعاد البحث إلى صاحبه إذا لم يقبل، ولا تقدم أسباب رفضه إلى الباحث.
- 8- ألا يزيد البحث على 20 صفحة.
- 9- تعبّر الأبحاث المنشورة في المجلة عن آراء أصحابها، لا عن رأي المجلة، ولا تكون هيئة تحرير المجلة مسؤولة عنها.
- 10- يلتزم الباحث بتوثيق المراجع والمصادر وفقاً لنظام جمعية علم النفس الأمريكية (APA7).
- 11- يحصل الباحث على وثيقة نشر تؤكد قبول بحثه للنشر بعد موافقة المحكمين عليه.

## المحتوى:

- 5..... كلمة العدد الأول:
- 7..... القانون الدولي الإنساني والنزاعات المعاصرة "الحالة السورية نموذجًا" .....  
أ. زكريا الخليف، د. محمد رشيد
- 31..... المفقود والحكم بموته "دراسة فقهية مقارنة مع القانون" .....  
د. أنس خالد الشبيب
- 55..... المكان الفني في الرواية السوريّة الواقعيّة.....  
أ. محمود المصطفى، د. محمد رياض وتّار
- دور وزراء الأندلس في الحياة السياسية منذ عصر ملوك الطوائف حتى عصر بني  
الأحمر.....  
73.....  
أ. جميل الحجي محمود، د. هدى العبسي
- درجة تقييم برنامج التعليم عن بعد في جامعة حلب في المناطق المحررة (طلاب  
كلية التربية أنموذجاً).....  
89.....  
أ. عبد المالك الضاهر د. سهام عبد العزيز
- 117..... دراسة مظاهر السطح والباثيمتري للأعماق البحرية في الخليج العربي.....  
د. بدر الدين منلا الدخيل
- دور التمويل بالمرابحة وآليات المتابعة في تنمية المشاريع الصغيرة والمتناهية  
الصغر في الشمال السوري.....  
133.....  
أ. محمد مرعي، د. حسام خديجة، د. عبد الحكيم المصري
- 165..... تصميم متحكم أمثلي لجملة عربية- نواس مقلوب.....  
أ. محمد عطا الكدع، د. عبد الرحمن حسين.



## تصميم متحكم أمثلي لجملة عربية-نواس مقلوب

إعداد:

د. عبد الرحمن حسين

أ. محمد عطا الكدع

### ملخص:

يعدّ نموذج النواس من الأمثلة الشهيرة لجمال التحكم التي تتمّ دراستها بشكل عام، وهو يعدّ من الأنظمة التي تملك خصائص غير خطية، ذلك أنه يتميز بأنه نظام وحيد الدخل متعدد الخرج. تكون المواضع التي يكون فيها النواس (الذراع المتأرجح) مستقرّاً هي الحالة العمودية للأعلى أو للأسفل. ومن الأمثلة على تطبيقاته روبوتات المشي وروبوتات نقل الأمتعة الشخصية وروبوتات الكراسي المتحركة. إذن: الهدف في هذه المسألة تحقيق استقرار النظام (جعل الذراع عند زاوية صفر مع الشاقول)، إضافة إلى تحقيق ملاحقة للإشارة المرجعية المطلوبة (ملاحقة العربة للموضع المطلوب). إن مسألة التحكم الأمثلي تراعي هذين الأمرين من خلال إيجاد ثوابت الريج لقانون التحكم بعد حل معادلة ريكاتي الجبرية، إذ إن حل معادلة ريكاتي مبني على قوانين ليابونوف للاستقرار إضافة إلى تصغير تابع الكلفة إذ يحقق ذلك تصغير الخطأ الستاتيكي إلى أقل قيمة ممكنة. تم في هذا البحث تصميم نظام تحكم أمثلي للتحكم بجملة عربية -ذراع مقلوب، وقد أظهرت نتائج المحاكاة فعالية النظام المقترح وقدرته على تحقيق الغرض المطلوب.

كلمات مفتاحية: ذراع متأرجح - نواس مقلوب - تحكم أمثلي - نمذجة ومحاكاة



## Designing a group of control for the inverted pendulum ideally

Prepared by:

Muhammad Atta Al-Kada`

Dr: Abdul Rahman Hussein

### Abstract:

The pendulum model is one of the famous examples of control statements that are generally studied and it is considered one of the systems that have non-linear properties because it is characterized as a single-input multi-output system. The position in which the pendulum is stable is vertical up or down. Examples of its applications include walking robots, personal baggage transport robots, and wheelchair robots, So, the goal of this study is to achieve the stability of the system (The arm should be at zero angle with the plumb axis). In addition to achieving tracing of the required reference signal (Chase the cart to the desired position), the problem of optimal control takes into account these two conditions by finding the gain constants for the law of control after solving the Riccati equation. Whereas, the solution of the Riccati equation is based on Lyapunov's laws of stability, in addition to minimizing the cost function, as this achieves reducing the static error to the lowest possible value.

In this paper the optimal control system was designed to control the Cart-inverted Pendulum. The simulation results showed the effectiveness of the proposed system and its ability to achieve the desired purpose.

**Keywords:** Swing arm - inverted pendulum - optimal control - Modeling and Simulation

## Otomobil montajı için modüler kumanda tasarımı - Ters lamba

Hazırlayan:

Muhammed Ata Al-Kada

Dr: Abdul Rahman Hüseyin

### **Özet:**

Sarkaç modeli, genel olarak incelenen kontrol sistemlerinin ünlü örneklerinden biridir ve tek girişli çok çıkışlı bir sistem olarak nitelendirilmesi nedeniyle doğrusal olmayan özelliklere sahip sistemlerden biridir. Sarkacın (sallanan kolun) sabit olduğu pozisyonlar dikey durum yukarı veya aşağıdır. Uygulamalarına örnek olarak yürüyen robotlar, kişisel bagaj taşıma robotları ve tekerlekli sandalye robotları verilebilir. Yani: bu sorudaki amaç sistem kararlılığını sağlamaktır. kol çekül ile sıfır açıda), gerekli referans sinyali elde etmenin yanı sıra (aracın istenen konuma gelmesinin ardından) optimal kontrol sorunu, cebirsel Rickett denklemini çözdükten sonra kontrol yasası için kar sabitlerini bularak bu iki şeyi hesaba katar, çünkü Rickett denkleminin çözümü, maliyet fonksiyonunu en aza indirmenin yanı sıra Lyapunov'un kararlılık yasalarına dayanmaktadır. Bu, statik hatayı mümkün olan en düşük değere düşürmeyi başarır. Bu araştırmada, ters çevrilmiş bir kol arabası cümlesini kontrol etmek için optimum bir kontrol sistemi tasarlanmış ve simülasyon sonuçları önerilen sistemin etkinliğini ve istenen amaca ulaşma kabiliyetini göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Döner kol - ters sarkaç - optimum kontrol - modelleme ve simülasyon.

## 1- مقدمة:

تعدّ طرق التحكم التقليدي وأساليبه، مألوفة لمعظم المهندسين والباحثين في مجال الهندسة الكهربائية والإلكترونية والميكانيكية، وبشكل عام فإن الأنظمة التي يمكن أن تدرس عن طريق استخدام مبادئ التحكم التقليدي هي أنظمة خطية ثابتة غير متغيرة مع الزمن Linear Time Invariant (LTI). إن الهدف الرئيسي للمصمم المستخدم لطرق التحكم التقليدي هو جعل النظام مستقرًا وأن يكون بتابع ربح في الحلقة المغلقة يساوي الواحد، ولكن الهدف الذي يجب العمل على تحقيقه هو تحسين أداء النظام والذي يعني زيادة سرعة الاستجابة الزمنية العابرة ودقة الملاحقة وإلغاء الخطأ الستاتيكي في الحالة المستقرة ورفض الاضطرابات الخارجية ومجابهة تغير البارامترات وعدم دقة التقريب الرياضي للنظام. فعمل التحكم تكون غالباً بقيم وثوابت متغيرة عدا كونها ذات نموذج رياضي غير خطي [1]، ومن هنا تأتي أهمية التحكم الأمثل في قدرته على بناء متحكمات قادرة على تحقيق استقرار النظام وتصميمها وتحسين أدائها الديناميكي بالرغم من تغير بارامترات النظام أو في ظل وجود اضطرابات داخلية أو خارجية قد تؤثر على النظام [2].

إن نموذج النواس-العربة هو تجربة عملية شائعة لتدريس مجموعة متنوعة من المفاهيم والتقنيات في هندسة التحكم وإظهارها [4][3]. في التطبيق الأكثر شيوعاً واستخداماً يشتمل النظام على عمود يتأرجح بحرية (نواس) يتم تركيب نقطة ارتكازه على عربة يمكن تحريكها على طول مسار أفقي [3].

تتنوع تطبيقات النواس ولعل أهمها نموذج موازنة المكنسة ومحاكاة أنظمة الطيران والصواريخ [4].

تم في هذا البحث تقديم منهجية تحكم أمثليه لتصميم نظام تحكم بجملعة عربة-ذراع، وإيجاد شعاع الربح (kc) الذي يصغر مؤشر الأداء التربيعي ويؤمن استقرار النظام الخطي المعطى وفق نموذج فراغ الحالة [5][2].

لقد أظهرت نتائج المحاكاة في بيئة (MATLAB) قوة أداء هذه المنهجية، وقدرتها على تحقيق ملاحقة دقيقة وسريعة للإشارات المرجعية مع الحفاظ على توازن النواس عند الزاوية صفر مع الشاقول على الرغم من تغيير كتلة النواس. تمت إضافة مدرج للإشارة المرجعية للمساهمة بتقليل مقدار الاهتزاز عند الحالات العابرة وتقليل قيمة القوة المطبقة مما أسهم في تحسين الأداء الديناميكي للنظام المقترح.

تم إنجاز عدة أبحاث في مجال التحكم بالنواس المقلوب، في البحث [1] تم تصميم متحكم FLC، حيث تمت دراسة مقارنة بين طريقتي تحكم (FLC like PI) و (FLC like PD)، تم عرض نتائج المحاكاة في بيئة MATLAB والتي أوضحت تفوق المنهجية الأولى في سرعة الاستجابة ودقة ملاحقة الإشارة المرجعية والتغلب على الاضطرابات الخارجية.

في البحث [3] تم تصميم منصة عربية-نواس منخفضة التكلفة والتحكم بها، وقد تم تطويرها للأغراض التعليمية، إذ يعد نموذج العربية-نواس أحد أكثر التجارب شيوعاً لتدريس الأنظمة الميكانيكية وطرق التحكم غير الخطية وإظهارها حيث يتم تحريك العربية باستخدام محرك DC، وتم تجهيز المنصة بمشفرات بصرية عالية الدقة لقياس زاوية النواس وموقع العربية. تتم محاكاة النظام بدايةً في بيئة MATLAB/Simulink، ومن ثم تصدير أوامر التحكم للمنظومة في الزمن الحقيقي، قدم العمل فائدة كبيرة فقد كانت النتائج التجريبية متوافقة مع تلك التي تم الحصول عليها في المحاكاة، والتي يتم توفيرها بوصفها أداة تعليمية.

يناقش البحث [4] المعادلات الديناميكية ومشكلة التحكم في الاهتزازات لنواس مقلوب تحت الماء، إذ تم الحصول على معادلات الحركة للنظام باستخدام معادلة لاغرانج. تم في البحث الأخير تطبيق تقنية التحكم الاهتزازي (VIBRATIONAL CONTROL) لأجل أن يستقر النظام بنجاح في الماء تحت تأثير القوى الهيدروديناميكية.

في البحث [6] تم تصميم وحدة تحكم قوية  $H_{\infty}$  للتحكم بالنواس المقلوب في المجال الزمني المتقطع، تم اختبار أداء النظام لأجل أطوال مختلفة لطول وصلة النواس وقد أظهرت النتائج العملية فعالية النظام المقترح. في البحث [7] يتم عرض استقرار نظام العربية-نواس من خلال تصميم متحكم انزلاقي في المستوى العالي. إشارات التحكم تعتمد على أوضاع الانزلاق المتكاملة وخوارزمية الالتواء الفائق (Super-Twisting).

في البحث [8] قام الباحث بدراسة النواس المعكوس وتصميم متحكم تناسبي-تفاضلي (PD controller) وكذلك تم تصميم منظم خطي تربيعي (LQR) وبالمقارنة بينهما توصل لنتيجة بأن المتحكم التناسبي-التفاضلي أعطى نتائج أفضل، إلا أن الباحث في البحث استخدم نموذجاً رياضياً بسيطاً.

في هذا البحث نسعى لتصميم متحكم يجمع بين سهولة التطبيق وبين الأداء القوي، مع الأخذ بعين الاعتبار أن المحاكاة تتم على النموذج الرياضي غير الخطي للنظام.

## 2- أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في تصميم نظام تحكم أمثلي للتحكم بجملة العربة-نواس مقلوب، إذ الهدف من ذلك هو التحكم بموضع العربة على المحور الأفقي  $X$ ، من أجل زاوية دوران النواس بالنسبة للشاقول تساوي الصفر.

## 3- طرائق البحث ومواده:

### 3-1 تقنية التحكم الأمثلي:

لنفرض جملة التحكم غير المتغيرة زمنياً  $G(s)$  والموصوفة في فراغ الحالة، والهدف هو جعل شعاع متغيرات الحالة ينتهي إلى الصفر عندما  $t \rightarrow \infty$  بدون صرف جهد تحكم كبير (تقييد طاقة إشارة التحكم) عندها يجب البحث عن شعاع الربح  $(k_c)$  الذي يولد شعاع التحكم  $(u)$  للنظام عبر قانون التحكم الأمثلي الخطي  $(u=k_c x)$  [2] والذي يصغر مؤشر الأداء التربيعي (تابع الكلفة) [9]:

$$J = 0.5(\|x\|_Q^2 + \|u\|_R^2) \quad (1)$$

إذ إن  $Q, R$  هي مصفوفات تثقل لشعاع التحكم والحالة [9][5][2]. باستبدال إشارة الدخل  $(u)$  بـ  $(k_c x)$  في تابع الكلفة أو الأداء نجد:

$$J = 0.5((Q + r k_c' k_c) L_c) \quad (2)$$

الهدف الآن من التحكم الأمثلي هو إيجاد شعاع الربح  $(k_c)$  الذي يصغر مؤشر الأداء التربيعي ويؤمن استقرار النظام الخطي المعطى وفق نموذج فراغ الحالة، أي أن يحقق شرط ليابونوف للاستقرار [10]:

$$A_c L_c + L_c A_c' = Q_0 \quad (3)$$

$$\text{إذ: } A_c = A + B k_c$$

$Q_0$ : مصفوفة قيم ابتدائية.

$L_c$ : مصفوفة حل معادلة ليابونوف.

يعطى تابع لاغرانج بالشكل الآتي:

$$J_a = 0.5((Q + r k_c' k_c) L_c + P(A_c L_c + L_c A_c')) \quad (4)$$

إذ (P) هو حل معادلات ريكاتي الجبرية يسمى بمتغير لاغرانج. إن إيجاد النهاية الصغرى لتابع الهدف وفق شرط ليابونوف للاستقرار يكافئ إيجاد النهاية الصغرى لتابع لاغرانج (J<sub>a</sub>)، أي البحث عن شعاع الربح (k<sub>c</sub>) الذي يحقق (δJ<sub>a</sub>→0) الذي يكافئ وضع كافة المشتقات الجزئية من المرتبة الأولى لتابع لاغرانج (J<sub>a</sub>) بالنسبة للمجاهيل (L<sub>c</sub>, P)، و (k<sub>c</sub>) تساوي الصفر:

$$\begin{aligned} \nabla_L (J_a) &= 0.5(Q + rk'_c k_c + PA_c + A_c' P) \\ \nabla_{k_c} (J_a) &= rk_c - B'P \end{aligned} \quad (5)$$

بمساواة الحدود السابقة بالصفر ينتج [9] [10]:

$$k_c = \frac{B'P}{r} \quad (6)$$

$$\Gamma = Q + rk'_c k_c + PA_c + A_c' P = 0$$

في الحالة السابقة بتصميم ثوابت المنظم الأمثلي وحسابها فإنه يتولد خطأ ستاتيكي لاستجابة النظام وبخاصة لدى وجود اضطرابات خارجية، ومن أجل الحصول على أداء أقوى وملاحقة أمثلية للمتحكم السابق، تتم إضافة حد تكاملي لبنية المتحكم [9] [2]، وبالتالي نحصل على متحكمات الملاحقة الأمثلية (LQ-servo) إذ يتم توسيع فضاء الحالة للنظام الأساسي بما يتناسب مع البارامترات التي يجب التحكم بها، وعندها فإن قانون التحكم يحسب كما يلي:

$$u = -\begin{bmatrix} K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \zeta \end{bmatrix} \quad (7)$$

إذ:

K : مصفوفة ربح الثابت التناسبي.

K<sub>I</sub> : مصفوفة ربح الثابت التكاملي.

ζ هو متحول حالة جديد يضاف للنظام وذلك وفق العلاقة الآتي:

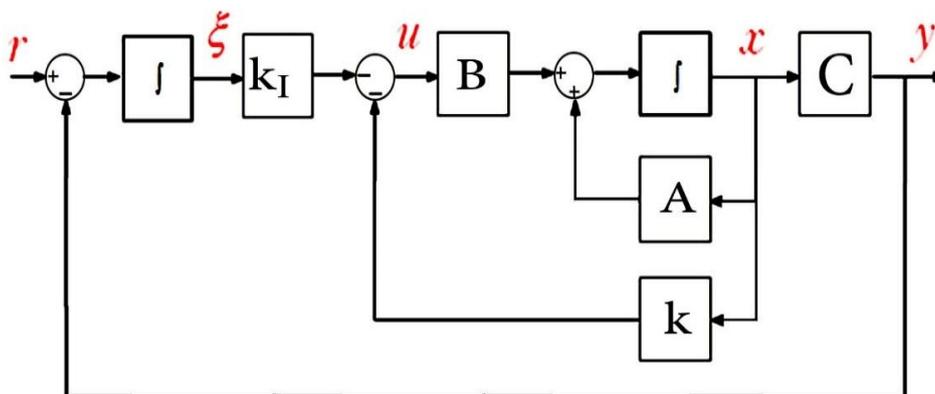
$$\zeta = \int e dt \quad (8)$$

إذ: e = r - y

يصبح فضاء الحالة بعد إضافة متحول الحالة الجديد وفق الشكل الآتي:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\zeta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \zeta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} r \quad (9)$$

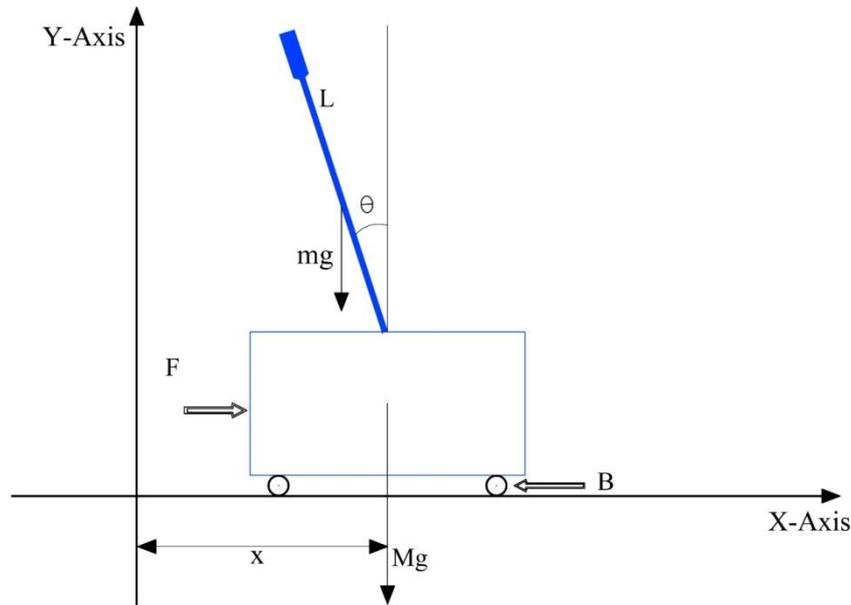
يوضح الشكل (1) جملة التحكم بوجود المتحكم الأمثلي.



الشكل (1): جملة التحكم بوجود ثوابت ربح المتحكم الأمثلي

### 2-3 النمذجة الرياضية للنظام:

يمكن تمثيل جملة التحكم المدروسة بالمخطط التمثيلي الموضح في الشكل (2)، إذ تطابق هذه المسألة مسألة النواس المقلوب المثبت على عربة متحركة [11] [6] [1]. من أجل مكان توضع النواس بالنسبة للعربة، فإننا اعتمدنا على ما قام به باحثون سابقون، إذ إنه في جميع الدراسات التي تم تناولها كان يتم وضع النواس في منتصف العربة، وذلك لكي يتم توزيع كتلة النواس بشكل متجانس على كامل سطح العربة والمساهمة بحصول توازن أكبر للجملة كاملةً.



الشكل (2): جملة الذراع المقلوب-العربة

إذ إن:

( $L$ ) طول النواس (طول الذراع الذي يحمل الكاميرا).

( $\theta$ ) زاوية الذراع بالنسبة للشاقول.

( $M$ ) كتلة العربة.

( $m$ ) كتلة الكاميرا والذراع.

( $g$ ) تسارع الجاذبية الأرضية.

( $B$ ) ثابت الاحتكاك للعربة.

( $I$ ) ثابت عزم عطالة الذراع عند الدوران حول الشاقول.

( $F$ ) القوة الواجب تطبيقها على العربة.

من الجدير ذكره أننا لم نهمل قيمة الثابت  $B$  (ثابت الاحتكاك للعربة) على الرغم أن الحركة تتدرج، وذلك نظراً إلى أن العربة قد تسير على مسار خشن يسبب مقاومة للعجلات عند دورنها، أو أن العربة موضوعة ضمن مجرى خاص بها، وبالتالي فإن حواف المجرى سوف تسبب احتكاكاً مع جسم العربة، كذلك فإن هناك سبباً آخر وهو أنه في بعض الأحيان يتم وضع حزام على بطن العربة لتسير عليه وفق خط مستقيم مما يسبب وجود الاحتكاك.

تعطى المعادلات التفاضلية للنظام الموضح في الشكل (3) وفق الشكل التالي [12] [11]:

$$\begin{aligned} \ddot{x}(M + m) + B\dot{x} - mL\ddot{\theta} \cos(\theta) + mL\dot{\theta}^2 \sin(\theta) &= F \\ \ddot{\theta}(mL^2 + I) - mL\dot{x} \cos(\theta) - mLg \sin(\theta) &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

### 3-3 تصميم نظام التحكم:

لأجل تصميم نظام التحكم يجب بداية تحويل النموذج الرياضي للنظام إلى الشكل الخطي ولذلك نفرض [13]:

$$\cos(\theta) = 1, \sin(\theta) = \theta, \dot{\theta}^2 = 0$$

بإصلاح المعادلة (10) نحصل على:

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M + m & -mL \\ -mL & mL^2 + I \end{bmatrix}^{-1} \left[ \begin{bmatrix} -B & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & mgL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} \right] + \begin{bmatrix} M + m & -mL \\ -mL & mL^2 + I \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (11)$$

بتعويض القيم الاسمية لبارامترات النظام الموضحة في الجدول (1) [9]، وبإصلاح المعادلات السابقة والتعويض نحصل على المعادلة (12).

#### الجدول (1): القيم الاسمية لبارامترات النظام

M	0.3 kg
m	0.2 kg
B	0.1 N/m/sec
I	0.006 kg.m <sup>2</sup>
L	0.2 m
g	9.8 m/sec <sup>2</sup>

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.26 & 2.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.74 & 36.3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.6 \\ 0 \\ 7.4 \end{bmatrix} F \quad (12)$$

$$\text{إذ: } x_1 = x, x_2 = \dot{x}, \dots, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$$

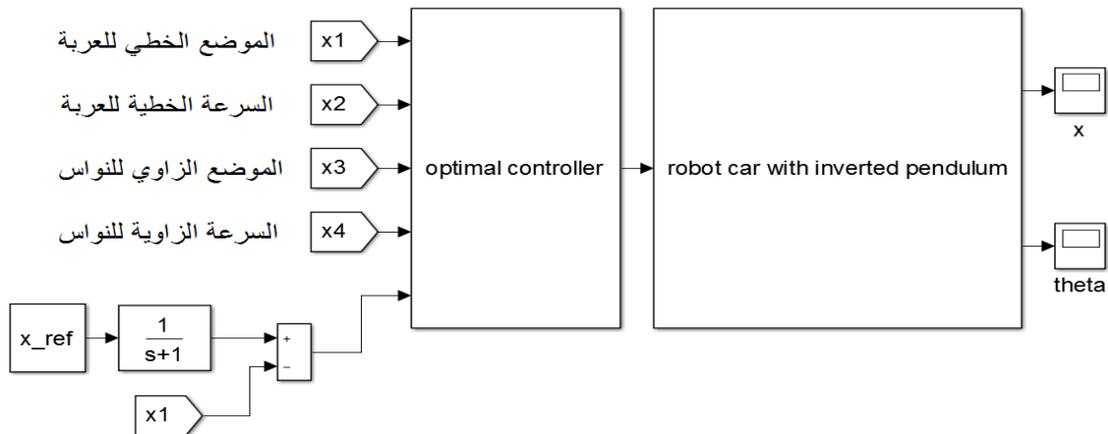
لأجل جعل توسعة فضاء الحالة الموصوف بالمعادلة (12) وإضافة الحد التكاملي لقانون التحكم كما ذكرنا سابقاً في الفقرة (3-1) العلاقتين (7) و (8)، فإننا نضيف هنا متحول حالة جديد هو  $\zeta_x$  والموصوف بالعلاقة الآتية:

$$\zeta_x = \int (x_{1\_ref} - x_1) dt \Rightarrow \dot{\zeta}_x = -x_1 \quad (13)$$

يصبح فضاء الحالة بالشكل الآتي:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{\zeta}_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.26 & 2.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -0.74 & 36.3 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ \zeta_x \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 2.6 \\ 0 \\ 7.4 \\ 0 \end{bmatrix} F \quad (14)$$

يوضح الشكل (3) المخطط الصندوقي لجملة التحكم بوجود المتحكم الأمثلي.

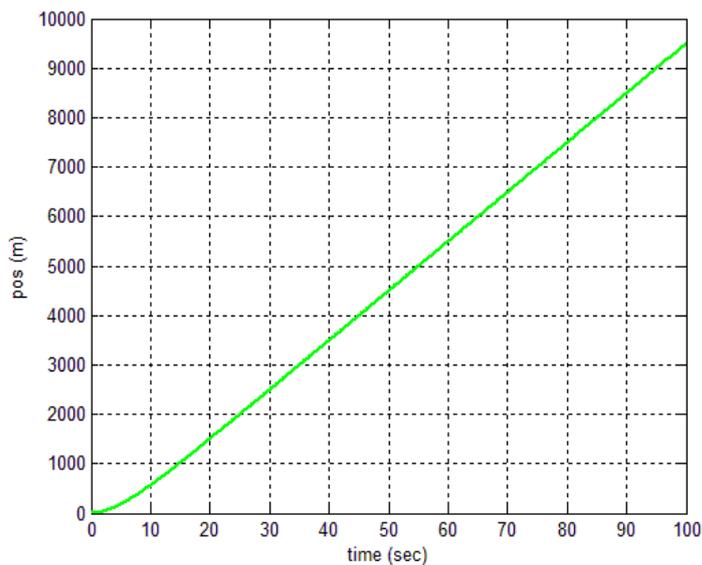


الشكل (3): المخطط الصندوقي لجملة التحكم بوجود المتحكم الأمثلي

4- نتائج المحاكاة:

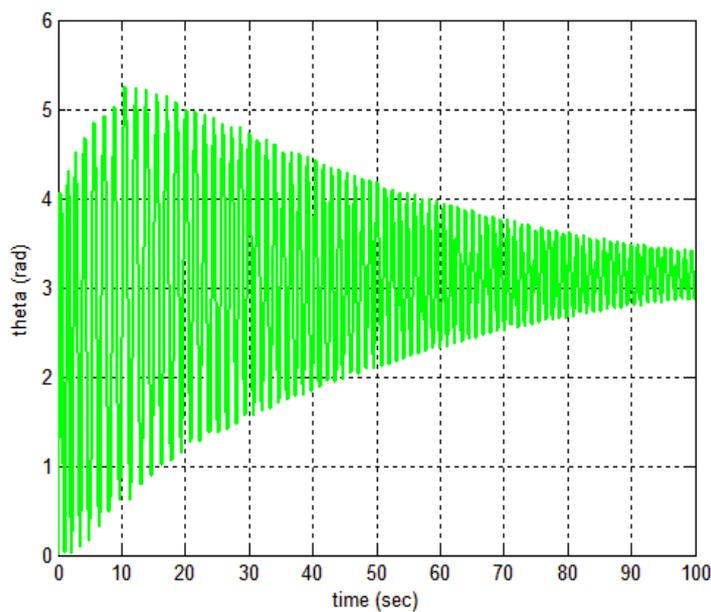
4-1: النتائج في الحلقة المفتوحة:

يوضح الشكل (4) استجابة النظام لأجل حلقة مفتوحة إذ يلاحظ عدم وجود ضبط لموضع العربة وتحركها بشكل مستمر مع الزمن نتيجة تطبيق مستمر للقوة على دخل للنظام.



الشكل (4): إشارة موضع العربة في الحلقة المفتوحة

كذلك يُلاحظ من الشكل (5) وجود اهتزاز كبير للذراع حول محور الشاقول.

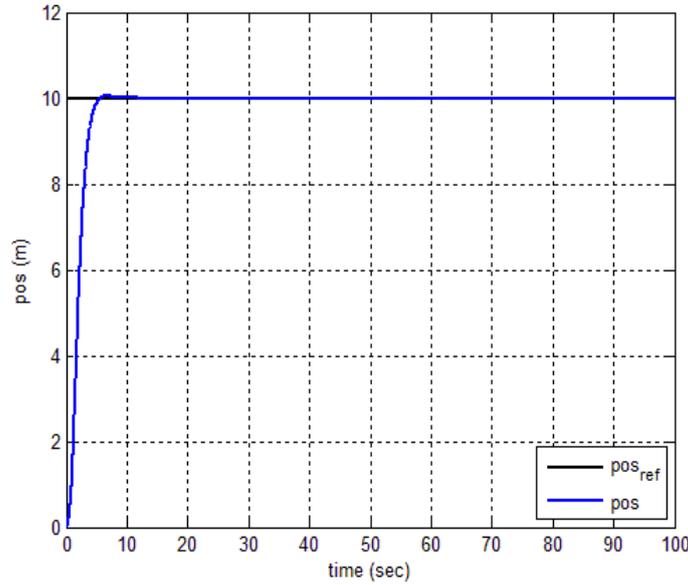


الشكل (5): إشارة زاوية النواس في الحلقة المفتوحة

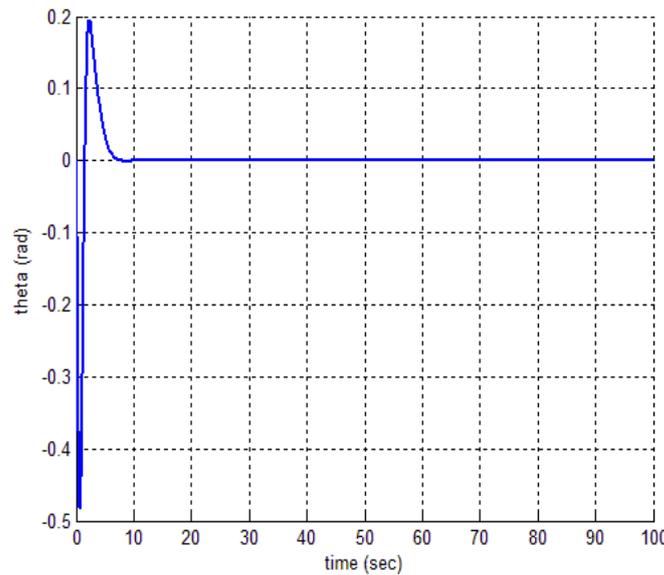
4-2: نتائج المحاكاة باستخدام المتحكم الأمثل:

4-2-1: نتائج المحاكاة من أجل القيم الاسمية للنظام:

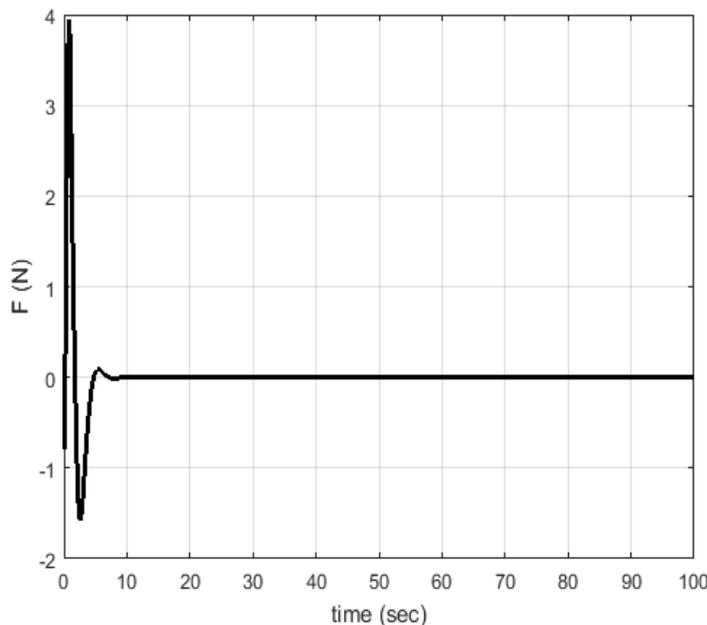
يوضح الشكل (6) استجابة النظام، بينما يوضح الشكل (7) إشارة زاوية الذراع مع الشاقول.



الشكل (6): استجابة النظام لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثل



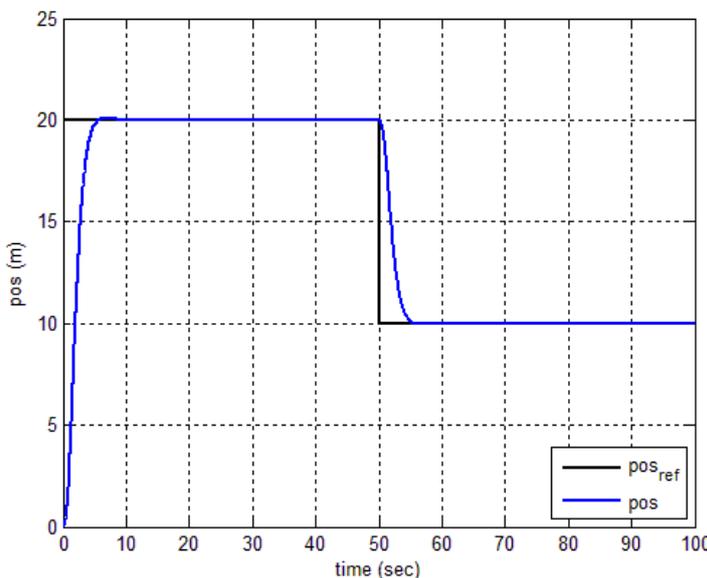
الشكل (7): إشارة زاوية النواس لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثل  
يلاحظ من الشكل (6) أن أداء النظام كان ذا كفاءة جيدة وملاحقة سريعة للإشارة المرجعية، وخطاً ستاتيكي يساوي الصفر، بينما نلاحظ من الشكل (7) كفاءة المتحكم الأمثل في التخلص من الاهتزاز الحاصل بزاوية النواس والمحافظة على توازنه عند الزاوية (0 [rad]).  
يوضح الشكل (8) إشارة التحكم المطلوبة.



الشكل (8): إشارة التحكم المطلوبة للوصول للموضع 10m

4-2-2: نتائج المحاكاة من أجل قيمة مختلفة للكتلة عن القيمة الاسمية:

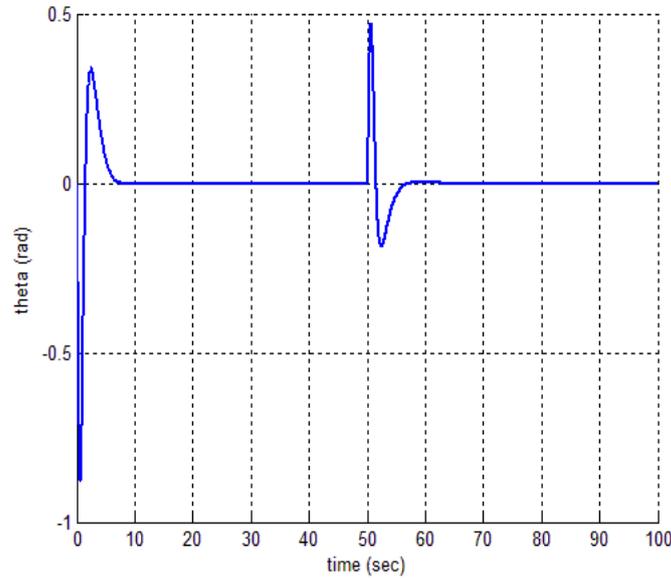
تم إجراء اختبار أداء النظام لأجل تغيير قيمة كتلة النواس لتصبح ضعف القيمة، مع تغيير في شكل الإشارة المرجعية فكانت استجابة النظام وفق الشكلين (9) و (10) على الترتيب.



الشكل (9): استجابة النظام لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثلي مع تغيير قيمة m إلى ضعفي قيمتها

يُلاحظ من الشكل الأخير كفاءة المتحكم الأمثلي إذ تم تطبيق قيمة مرجعية لموضع العربة لحظة انطلاقها عند القيمة 20 متر وبعد 50 ثانية تم تغيير قيمة الموضع المرجعي إلى 10 متر وفي

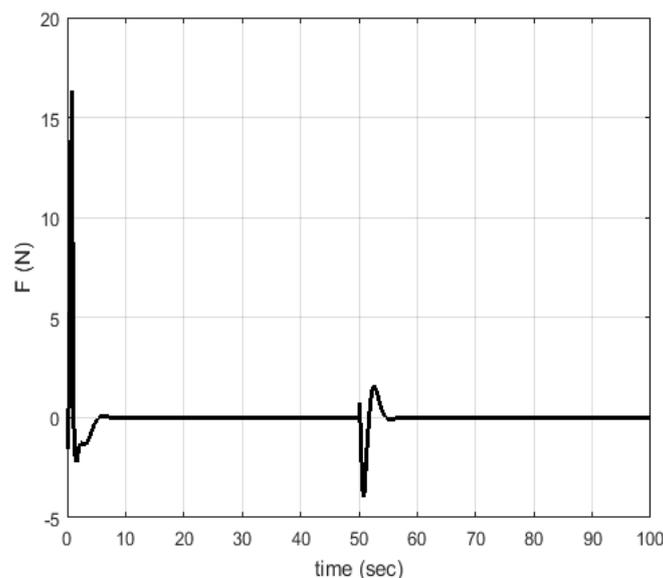
كلتا الحالتين نلاحظ استجابة وملاحقة سريعة للإشارة المرجعية للموضع.



الشكل (10): إشارة زاوية النواس لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثل مع تغيير قيمة  $m$  إلى ضعفي قيمتها

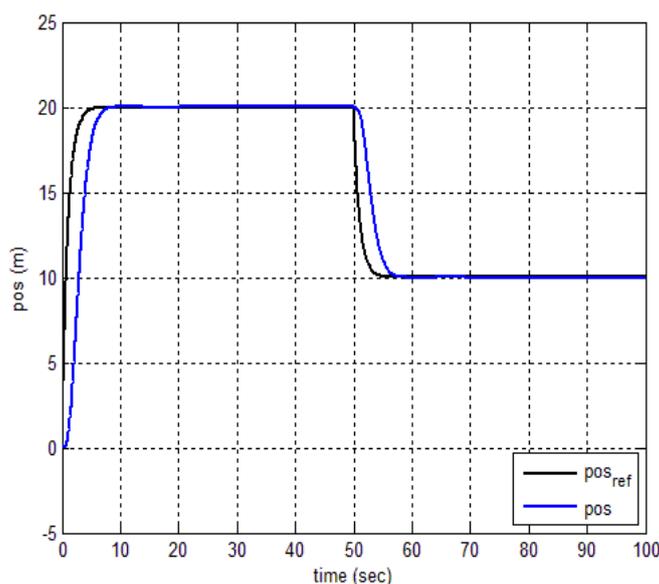
يُلاحظ من الشكلين (9) و(10) أن نظام التحكم الأمثل كان ذا كفاءة وأداء جيد، إذ كانت إشارة الموضع تلاحق الإشارة المرجعية المطلوبة مع الحفاظ على توازن الذراع عند زاوية تساوي الصفر مع محور الشاقول وذلك من أجل قفزات مختلفة لإشارة الموضع علماً أنه حصل اهتزاز طفيف للنواس أثناء الحالة العابرة (بلغت زاوية النواس عند بدء التشغيل قيمة  $-0.9$  rad).

يوضح الشكل (11) إشارة التحكم المطلوبة.

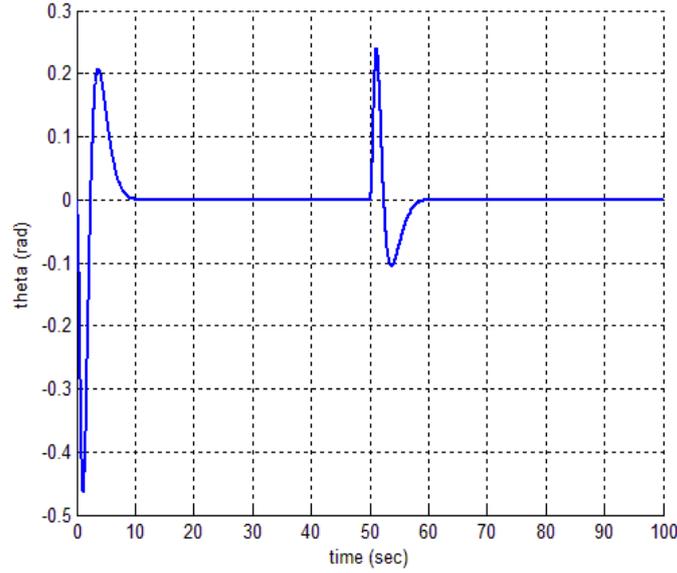


الشكل (11): إشارة التحكم المطلوبة للوصول للموضع المطلوب وفقاً للشكل (10)

بلغت القوة المطلقة عند بدء التشغيل قيمة 16N، أما عند اللحظة 50sec فقد بلغت قيمة 4N-. لتخفيف مقدار الاهتزاز وبالوقت نفسه تخفيف حدة القوة المطبقة عند الحالة العابرة (لحظات الانتقال من موضع لآخر) تم وضع مدرج للإشارة المرجعية للموضع والذي هو عبارة عن تابع نقل من الدرجة الأولى من الشكل  $\frac{1}{s+1}$  يطبق على دخله إشارة تابع القفزة فيعطي على خرجه إشارة أسية وبالتالي لا تطبق الإشارة المرجعية بشكل مباشر على النظام. ستكون استجابة النظام وفق الأشكال (12) و (13) على التوالي.

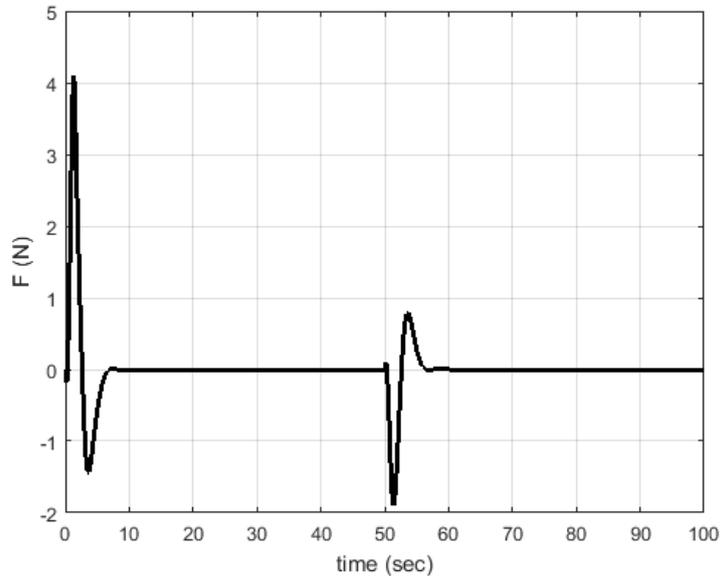


الشكل (12): استجابة النظام لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثلي مع وضع مدرج للإشارة المرجعية  
 يُلاحظ من الشكل السابق تحقيق ملاحقة دقيقة للإشارة المرجعية المطلوبة بالنسبة لإشارة الموضع بعد وضع مدرج للإشارة المرجعية.



الشكل (13): إشارة زاوية النواس لأجل التحكم بموضع العربة باستخدام المتحكم الأمثل مع وضع مدرج للإشارة المرجعية

يوضح الشكل (14) إشارة التحكم المطلوبة.



الشكل (14): إشارة التحكم المطلوبة للوصول للموضع المطلوب كما في الشكل (12)

يُلاحظ من الشكل (10) أن مقدار الاهتزاز عند الحالات العابرة قد انخفض بشكل واضح بعد إضافة المدرج مع الحفاظ على تحقيق ملاحقة دقيقة للإشارة المرجعية المطلوبة بالنسبة لإشارة

الموضع الموضحة في الشكل (12). (بلغت زاوية النواس عند بدء التشغيل قيمة  $-0.4 \text{ rad}$ ). كذلك نلاحظ من الشكل (14) أن وجود المدرج أسهم بتخفيض قيمة القوة المطبقة في الحالات العابرة إذ كانت تصل القوة في الحالة الأولى (الشكل (11)) لحظة التشغيل إلى  $16\text{N}$ ، بينما بعد إضافة المدرج فقد كانت تصل لقيمة  $4\text{N}$  فقط، أما في اللحظة  $50\text{sec}$  فقد كانت تصل القوة في الحالة الأولى (الشكل (11)) إلى  $-4\text{N}$ ، بينما بعد إضافة المدرج فقد كانت تصل لقيمة  $-2\text{N}$  فقط.

#### 5- الخلاصة:

تم في هذا البحث تصميم متحكم أمثلي للتحكم بجملة العربة-نواس مقلوب، وقد أظهرت نتائج المحاكاة فعالية النظام المقترح وقدرته على تحقيق ملاحقة دقيقة للإشارة المرجعية لموضع العربة على الرغم من تغيير كتلة النواس، مع الحفاظ على توازن النواس وجعله عند زاوية تساوي الصفر بالنسبة للشاقول، تم إضافة مدرج للإشارة المرجعية وقد أسهم ذلك بتقليل مقدار الاهتزاز بمقدار  $40\%$  عند الحالات العابرة وكذلك تقليل قيمة القوة المطبقة بمقدار  $(200-400)\%$  مما أسهم في تحسين الأداء الديناميكي للنظام المقترح.



## References:

- [1] Ahmad M. El-Nagar, Mohammad El-Bardini, Nabila M. EL-Rabaie “Intelligent control for nonlinear inverted pendulum based on interval type-2 fuzzy PD controller” Alexandria Engineering Journal [www.elsevier.com/locate/aej](http://www.elsevier.com/locate/aej) [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)-2014
- [2] Oualid Araar, and Nabil Aouf “Full Linear Control of a Quadrotor UAV, LQ vs  $H_{\infty}$ ” IEEE-2014
- [3] Kyriakos Mouratis, John Fasoulas and Michael Sfakiotakis “Development and Control of a Low-Cost Cart-Pendulum Educational Platform” Technological Educational Institute (T.E.I.)-2018
- [4] Saqib Hasnain<sup>1</sup>, Umer Hameed Shah<sup>1</sup>, Sang-Hei Choi<sup>2</sup>, and Keum-Shik Hong<sup>1</sup> “Dynamics and Vibrational Control of an Underwater Inverted Pendulum” (ICCAS)-2016
- [5] Wenzeng Guo, Xueshan Gao, Shigong Jiang, Chengguo Zong, Fuquan Dai “LQR controller design for two-wheeled robot with a movable seat” IEEE-2014
- [6] Kei Katayama, Yohei Hosoe, Tomomichi Hagiwara “Demonstrating the Effectiveness of Noncausal LPTV Scaling through Control Experiments with Cart Inverted Pendulum” Science Direct (IFAC)-2013
- [7] Jesus Mendoza Avila, Ismael Castillo, Rafael Iriarte “Higher Order Sliding Mode stabilization of an inverted cart-pendulum system” Science Direct (IFAC)-2017
- [8] Ahmad shehawe “Design of State Feedback Controller to Control of the inverted pendulum” Albath university Journal -2016
- [9] Oualid Araar, Nabil Aouf “Quadrotor Control for Trajectory Tracking in Presence of Wind Disturbances” UKACC-2014
- [10] Lin, S.-Y. Guo, Julian Chang “Fuzzy coordinator compensation for balancing control of cart-seesaw system” Journal of Sound and Vibration- Science Direct-2011
- [11] Mahadi Hasan<sup>1</sup>, Chanchal Saha<sup>1</sup>, Md. Mostafizur Rahman<sup>2</sup>, Md. Rabiul Islam Sarker<sup>2</sup> and Subrata K. Aditya “Balancing of an Inverted Pendulum Using PD Controller” IEEE-2012
- [12] Yury Rassadin “Invariance to Unmatched Bounded Disturbances in Inverted Pendulum Stabilization Control” IEEE-2020
- [13] Sudarshan M Samarasinghe, Manukid Parnichkun “Pitch Control of an Active Omni-wheeled Unicycle using LQR” (ICA-SYMP)-2019





**جامعة حلب في المناطق المحرّرة**  
**Aleppo university in the liberated areas**