

تحليل ونمذجة أخطاء نقل الحركة لإدارة آلية سير التوقيت وطرق التصحيح لتقييم الأداء

مهند محمود*

(تاريخ الإيداع 19 / 2 / 2015. قُبل للنشر في 11 / 5 / 2015)

□ ملخص □

يركز هذا البحث على مشاريع تقدير الموضع القابلة للتطبيق على آليات (ميكانيزمات) سيور التوقيت، حيث يكون من الضروري تحديد الحمولة عن طريق نماذج رجوعية تتلقى المدخلات (البيانات المدخلة) من حساس للموضع موصولٍ بمحرّض سير التوقيت، ويقدم هذا البحث التحليل المفصل لمصادر أخطاء نقل الحركة، وتم تطوير عدد من النماذج الرياضية المتعلقة بالبحث باستخدام معرفة بديهية بالعملية. ويظهر هذا البحث أنّ مشاريع كهذه تكون فعّالة جداً عندما لا يكون نظام القيادة خاضعاً لحمولاتٍ خارجية وعندما لا تتغير شروط التشغيل بدرجةٍ كبيرةٍ أي درجة الحرارة المحيطة وتؤثر السير.

الكلمات المفتاحية: سيور التوقيت - تقدير الأخطاء - القياس غير المباشر - زيادة الدقة.

* قائم بالأعمال - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Analyzing and modeling the errors of motion transmission of timing belt drive and correction method for behavior improvement

Mohanad Mahmoud*

(Received 19 / 2 / 2015. Accepted 11 / 5 / 2015)

□ ABSTRACT □

This paper focuses on the estimation schemes of a viable position for timing belt drives where the position of the carriage (load) is to be determined via reference models receiving input from a position sensor attached to the actuator of the timing belt. A detailed analysis of the transmission error sources is presented, and a number of relevant mathematical models is developed using a priori knowledge of the process. This paper demonstrates that such schemes are very effective when the drive system is not subjected to external loads

and operating conditions do not change considerably i.e. ambient temperature, and belt tension.

Key Words: Timing belts, error estimation, indirect measurement, accuracy enhancement.

*Academic Assistant- department of mechanical power – electrical and mechanical engineering college- Tishreen University- Lattakia- Syria

مقدمة:

تستخدم آليات سير التوقيت على نحوٍ متزايد لنقل الحركة الدورانية إلى نقل للحركة بأنظمة تحكّم عالية الدقة أمثال: الطابعات النافثة للحبر و الرواسم والأدوات المخصصة لآلات التحكم الرقمي عن طريق الحاسوب (CNC) وآلات لف السلك والأجهزة البصرية وبعض التجهيزات الطبية البيولوجية [1]، وعادةً تقاد الحمولة التي تحوي جهازاً خاصاً بوساطة عنصر النقل المرن مثل سير التوقيت في آلات كهذه. وهكذا يتوجب التحكم بالحركة الخطية للجهاز بدقة عن طريق القياسات المباشرة للموضع من أجل تحقيق أهداف المهمة المحددة المتوفرة.

إنّ المساوئ الأساسية للعناصر المرنة في ترتيبات كهذه هي أنّها تقدّم لا خطيات معروفة جيداً مثل: الاحتكاك والمرونة والحركة الرجوعية والتعويق الزمني بالنسبة لحلقة الموازنة [2]. وبالتالي حتى نتمكن من تحقيق الضبط المطلوب والدقة في الوضعية لمشاريع ضبط متقدمة [1-6]، مترافقة بقياس مباشر اتقنيات تغذية راجعة متكررة. وإنّه لمن الدقة بالملاحظة أنّه عندما تكون خاصية مدى الانتقال | التوقف لآلة عمومية طويلة جداً < 0.5 م، و يؤدي استخدام تقنيات القياس المباشر التي تتضمن حساسات تقليدية بمعنى مقاييس الجهد والأجهزة الكهرومغناطيسية لإخراج الجهد النسبي للإزاحة أو تحديد السرعة والمقاييس الخطية ومقاييس النداخل الليزرية إلى حلول جسيمة ومكلفة نوعاً ما.

ومن هنا فإنّ الدافع الأساسي لهذا البحث هو تقديم مشاريع تقدير فعالة تقيّد من المعلومات الصادرة عن حساس رخيص التكلفة على بكرة القيادة ويمكن بذلك تقدير وضعية الحمولة للدقة المطلوبة من أجل التطبيقات ذات المتطلبات غير الكثيرة. إنّه لمن الدقة ملاحظته أن نموذجاً كهذا يتطلب نمطاً جيداً لنقل أخطاء آليات سير التوقيت، وعلى الرغم من الحقيقة التي مفادها أنّ تعريف نقل الأخطاء بالتزامن مع تقنيات القياس والتقدير معروفة جيداً في كتب ومطبوعات المسننات (الديناميك)، ولكن لا تبرز سوى قلة قليلة من الدراسات التي تركز على خاصيات أخطاء النقل لإدارة آليات سير التوقيت [7]. فعلى سبيل المثال: هناك علماء كثيرون قدّموا لمحة موجزة عما كُتب في هذا المجال، لكن دراستهم بحثت في أخطاء النقل لسير التوقيت اللولبية على درجة ميل خطوة واحدة للبكرة نظرياً و تجريبياً [8].

أهمية البحث وأهدافه:

إنّ الهدف الأساسي لهذا البحث هو تقديم مشاريع تقدير فعالة تقيّد من المعلومات الصادرة عن حساس رخيص التكلفة على بكرة القيادة أو الإدارة لسير التوقيت، ويمكن بذلك تقدير وضعية الحمولة للدقة المطلوبة من أجل التطبيقات ذات المتطلبات البسيطة. ومن الملاحظ هنا أن نموذجاً كهذا يتطلب نمطاً جيداً لنقل أخطاء آليات سير التوقيت، وهذا ما تمت معالجته فعلاً، ومن هنا كانت أهمية البحث.

طرائق البحث ومواده:

تعتمد طرائق البحث ومواده على وضع نظام آلية سير التوقيت في قالب أو نموذج رياضي وتقديم نتائج المحاكاة، وبعد ذلك يتم توصيف الوضعية التجريبية وتقديم تقرير لبعض التجارب التي أجريت لتحرّي خاصيات النقل لآلية سير توقيت عمومي. وبناءً على البيانات المجمعة، يُقدّم هذا البحث تحليلاً مفصلاً عن مصادر أخطاء الموضع، و نماذج حركية مبنية على هذه النتائج وتقييم للنماذج المقدمّة، بالإضافة إلى الاعتماد على أبحاث علمية منشورة في مجلات علمية في هذا المجال.

النتائج والمناقشة:

1- النموذج الرياضي والمحاكاة:

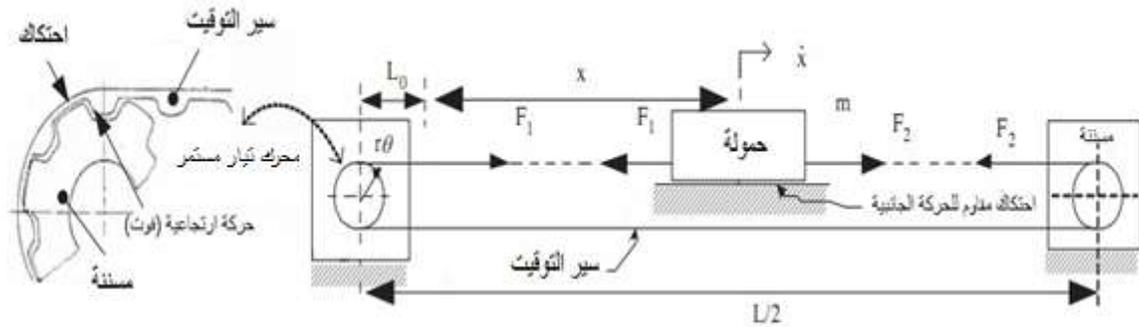
يوضح الشكل (1) الصياغة الرياضية أو النموذج الرياضي لنظام الحمولة الموجه خطياً، إذ تتم حركة الحمولة بواسطة المحرك عن طريق آلية سير التوقيت في ذلك النظام، ويجب أن تتواجد فجوة كافية بين أسنان تعشيق المسننات لضمان حركة سهلة دون تشابك.

ينتج عن هذه الحركة الرجوعية في التقنيّة ظاهرة تخلف. وهناك العديد من الدراسات التي تفيد من نموذج بريساتش (Preisach) لتوصيف التأثيرات التراجعية التي تُصادف في فروع متنوّعة، ويتم تعريف مشغلٍ تراجعيٍّ أوليٍّ تماماً على النحو التالي:

$$f(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma \alpha \beta u(t) d\alpha d\beta \quad (1)$$

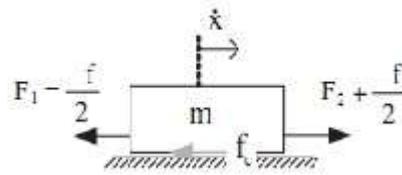
إذ توافق α و β قيمة الرفع و التخفيض للمجال التخلفي. وعلى نحوٍ مماثلٍ يشير $\beta \alpha \gamma$ إلى عناصر تخلفيّة فريدة في النظام حيث (α, β) هي دالة أو تابع وزن اعتباطيٍّ يجب أن يحدّد لكلّ نظام (9). من الملاحظ أنّ نموذج بريساتش (Preisach) هو النموذج الأشهر بين نماذج التخلف المغناطيسي. ومع ذلك فهو لن يؤخذ بعين الاعتبار في هذه الدراسة بسبب الحقيقة التي مفادها أنّ نموذج بريساتش (Preisach) يعرض الذاكرة غير الموضوعية. وبذلك فإنّ القيمة الجارية للخرج لا تعتمد فقط على القيمة الجارية للدخل بل وعلى القيم القصوى للدخل أيضاً، ومن الممكن أن يتطابق خرجان في الزمن t_0 لكنّ ينتج عنهما خرجان مختلفان تماماً $v_2(t)$ و $v_2(t)$ من أجل $t < t_0$ ، ومن هنا فإنها تتعرض لنفس الدخل $\mu(i)$ من أجل $t_0 < t$ [10]. وتبرز مشكلة أخرى في هذا النموذج في تحديد تابع الوزن، ويجب إجراء التجارب على النظام لتحديد هذا التابع، وعلاوةً على ذلك فإنّ المعادلة (1) هي معادلة صحيحة مضاعفة ويجب أن يتم التحقّق من إجرائها الرقمي ليتم استخدامها في خوارزميات نظام التحكم.

يوجد حالتان ديناميكيّتان في النموذج الرياضي إذ تصوغ الحالة الأولى المجال التراجعيّ الأعلى والأدنى بينما يتحرّك الجهاز في اتجاهٍ محدّدٍ بلا توقّف وتوطّر الحالة الثانية المنطقة العابرة حين تغيّر الحمولة اتجاه حركتها. ويُظهر الشكل (1) أيضاً القوى الحاصلة في سير التوقيت:



الشكل 1: مخطّط الجسم الحرّ لنظام الحمولة الموجه خطياً

إذا أهمل الاحتكاك في مسند المسنن للمحرك فإنّ الحمولة ستُدفع باختلاف القوى المحدثة في سير التوقيت. يوصّف مخطّط الجسم الحرّ في الشكل الثاني:



الشكل 2: مخطط الجسم الحر للحمولة

وهكذا فإن معادلة الحركة للحمولة يمكن أن تكتب على النحو:

$$m\ddot{x} + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) = F_2 - F_1 + \Delta f \quad (2)$$

حيث ترمز f_c إلى الاحتكاك المقاوم للحركة الجانبية في مساند الحمولة وسيكون هنالك تشوه مرّن ناتج عن الاحتكاك بين سير التوقيت و أسنان المسننة وبالنتيجة يخلق هذا اختلاف قوى شدّ إضافية (Δf) على سير التوقيت يمكن كتابتها على النحو (3)

$$\Delta f = \begin{cases} k(r\theta - x - h), & r\theta - x \geq h \\ k(r\theta - x + h), & r\theta - x \leq -h \\ 0, & |r\theta - x| < h \end{cases} \quad (3)$$

وفي المعادلة (3) ($h > 0$) يرمز $[\mu m]$ إلى الفجوة / الحركة الرجوعية بين أسنان سير التوقيت وأسنان المسنن، يتوافق مع الصلابة العامة للأسنان. في هذا النموذج، يتم إنشاء القوى بواسطة التشوه المرّن بين أسنان سير التوقيت وأسنان المسنن. علماً ان البرمجيات المستخدمة لهذه البرامج هي من نوع lab view. ويكون الشكل الممكن لهذا النموذج بأن تفصل الأسنان فتغيّر الحمولة اتجاه حركتها وتدخل أسنان سير التوقيت نطاق الحركة الرجوعية. ويتم نقل القوة عن طريق قوى احتكاك ناشئة بين المسنن والسير، وتتواصل هذه الظاهرة التي تعني الانزلاق حتى تنغلق الحركة الرجوعية بين المسننة وأسنان سير التوقيت، وتصبح قوى الشدّ على كلا الجانبين على النحو:

$$F_1 = F - \Delta F_1 \quad (4)$$

$$F_2 = F + \Delta F_2$$

هنا $F > 0$ تشير إلى التحميل / أو الشد على السير، وإنّ قوى التشويش (ΔF_1 و ΔF_2) هي كلها كميات غير سلبية وأقل من التحميل نفسه (F) لضمان استطاعة سعة التحميل للسير. تُظهر معادلة أولر العلاقة بين قوى شدّ السير كمايلي [6]

$$\gamma \equiv \frac{F_2}{F_1} = \frac{\bar{F} + \Delta F_2}{\bar{F} - \Delta F_1} = e^{\mu(u)\alpha} \quad (5)$$

حيث α هي زاوية الإحاطة (التعشيق) للسير (في هذه الحالة مضاعفات من π)، و μ (u) ترمز إلى عامل الاحتكاك الحركي الذي يعتمد على السرعة المحيطة المتعلقة بين المسننة والسير و u هي سرعة الانزلاق، ويتطلب التوافق أن استطالة السير (تمدده) على أحد الجوانب يتطابق مع التغيير في الاستطالة (التقلص) على الجانب الآخر (أو العكس بالعكس) إذ يجب ألا يكون هنالك تغيير (صافٍ) في طول السير وذلك يكون

$$\frac{\Delta F_2(L - L_0 - x)}{AE} = \frac{\Delta F_1(L_0 + x)}{AE} \quad (6)$$

حيث AE هي صلابة السلك (في وحدات القوى أي نيوتن). ويمكن أن تُحسب القوى الديناميكية باستخدام المعادلات (4) و (5) و (6) على النحو التالي:

$$\Delta F_1 = \frac{\bar{F}(\gamma - 1)(L - L_0 - x)}{L_0 + x + \gamma(L - L_0 - x)} \quad (7)$$

$$\Delta F_2 = \frac{\bar{F}(\gamma - 1)(L_0 + x)}{L_0 + x + \gamma(L - L_0 - x)} \quad (8)$$

ومن ثم تصبح المعادلة (4):

$$\Delta F_1 + \Delta F_2 = \frac{\bar{F}(\gamma - 1)(L - L_0 - x + L_0 + x)}{L_0 + x + \gamma(L - L_0 - x)} \quad (9)$$

وهكذا فإن النظام الديناميكي يمكن أن يوصف بالمعادلة:

$$m\ddot{x} + f_c \operatorname{sgn}(\dot{x}) = \frac{\bar{F}(\gamma - 1)L}{L_0 + x + \gamma(L - L_0 - x)} \quad (10)$$

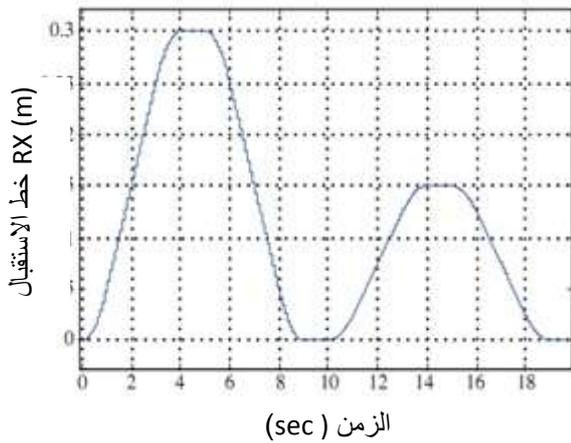
يلاحظ أنه في المعادلة (10) إزاحة مركز الحمولة (x) هو متحول الأمدخل (الوسيط) في هذه المعادلة التفاضلية العادية و لحساب γ وفي المعادلة (5) يُستخدم نموذج احتكاكٍ متقدمٍ يأخذ بعين الاعتبار الانزلاق الميكروي أو البالغ الصغر بعض الشيء. وفي هذه الدراسة يُختار لهذا الغرض نموذج لوجري (*lugre*) الذي تمّ تعديله بدراساتٍ متنوّعة، ويعبّر عن النموذج بشكله الأبسط على النحو:

$$\mu(u) = \sigma_0 z + \sigma_1 \dot{z} + \sigma_2 u \text{ where } \dot{z} = u - \frac{\sigma_0 |u| z}{\mu_k + (\mu_s - \mu_k) \exp\left[-\left|\frac{u}{v_s}\right|^a\right]} \quad (11)$$

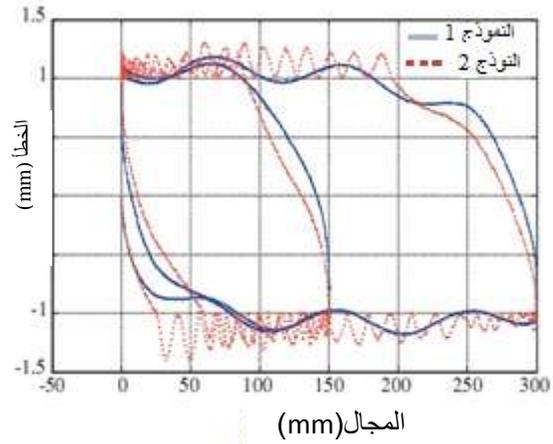
حيث $(\sigma_1, \sigma_2, a, \sigma_0)$ هي عوامل النموذج و z هي الحالة الداخلية ل n ممثّلة الانحراف الوسطي للتوقفات على السطوح المنماسة و v_s ترمز إلى سرعة ستريبك *streibich*، و μ_k و μ_s يشيران إلى عوامل الاحتكاك الحركية والسكونية على التوالي. وعندما تُهمل الحركة الاهتزازية الطولية لسير التوقيت يقدم تحليل حركي بسيطاً شرحاً للسرعة النسبية بين المسنن والسير:

$$u = R\dot{\theta} - \dot{x} - \rho\dot{\theta} \cos(\theta + \theta_0) \quad (12)$$

حيث يشير θ إلى لامركزية المسننة ويمثل θ الزاوية الابتدائية للمسنن. وبناءً على هذه المعادلات يُبحث عن حلٍّ رقميٍّ، ويُظهر الشكل (3) والشكل (4) الدخل والخرج للنموذج على التوالي، وفي الشكل (4) يقدّم نموذج خرج آخر يتطابق مع الحالة التي لا يوجد فيها أي ظاهرة احتكاكٍ إضافيةٍ بين المسنن والسّير عندما يلتقيان. وبالتالي فإنّ النموذج 1 يتوافق مع تركيبٍ متخامد و يتوافق النموذج 2 مع تركيبٍ غير متخامد:



الشكل (3) دخل النموذج



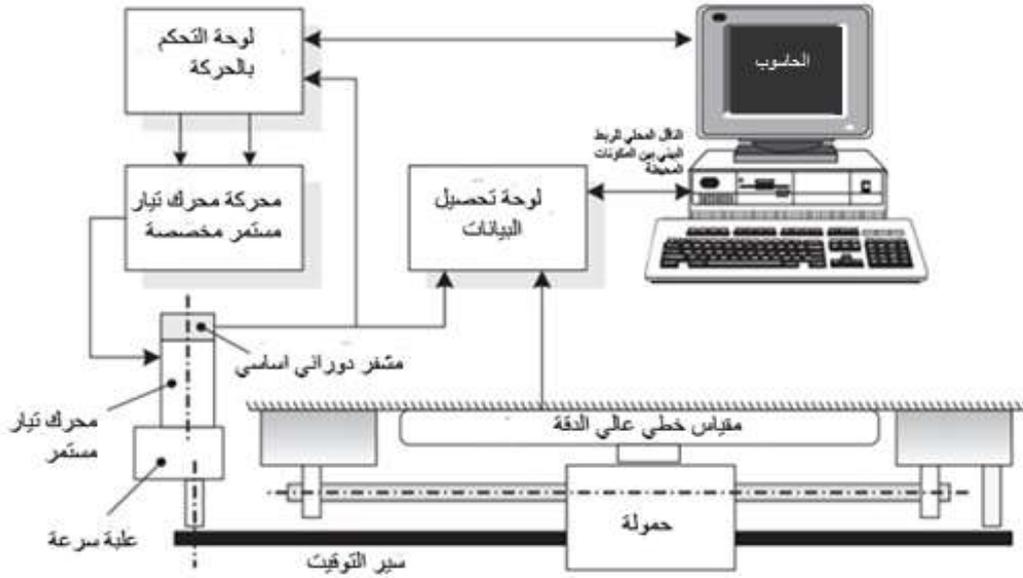
الشكل (4) خرج النموذج

2- إعداد الاختبار:

لدراسة خصائص أخطاء النقل لمحرّكة سير توقيتٍ عموميٍّ يتمّ تعديل الطور الخطّي لنموذج مهياً القدرة. ويوصّف الشكل (5) هذا الإعداد الذي يدفع الحمولة فيه محرّك تيارٍ كهربائيٍّ مستمرٍّ بصندوق سرعةٍ داخليٍّ بواسطة سير التوقيت. ويُعطى شكلٌ تخطيطيٌّ في الشكل (6) بينما بيّوب الجدول (1) البيانات الميكانيكية الهامة للعناصر المُستخدمة في التنسيق.



الشكل 5 صورة تُظهر منظر عام لإعداد الاختبار



الشكل 6 المخطط البياني للشكل التجريبي

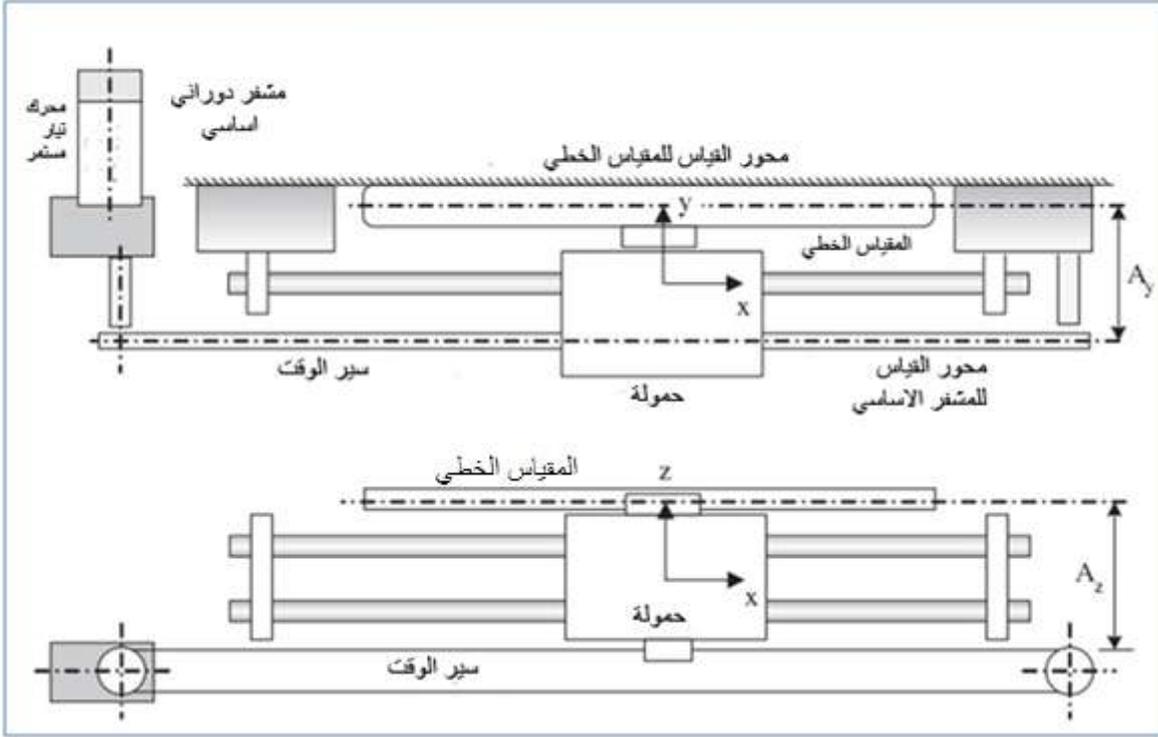
الجدول (1) البيانات الميكانيكية لعناصر الإعداد التجريبي

العناصر	النمط / النموذج	الملاحظات
المحرك	محرك تيار مستمر من نمط براش (فرشاتي) 150 واط	صندوق سرعة داخلي (1:23.7222)
مشغل المحرك	مضخم التوصيلية	800 واط / MOSFET ترانزستور شبه موصل معدني

خطوة: 5,08 مم (0,2")	متعدّد الأغراض	سير التوقيت
مفتاح تحكّم بمعالج مركزي ذو توجيهات صغيرة نسبياً 8 بت 8-bit RISC controller	PIC معالج مركزي ذو توجيهات صغيرة نسبياً 16F877A و 20 ميغاهرتز	مفتاح التحكّم
2000 نبضة / دورة (لكلّ مجرى رباعيّ)	مُشَفَّر ضوئيّ تربيعةٍ بجملة تجميع طاقة أوتونيكس Autonics ENB	مُشَفَّر المحرّك
500 نبضة / مم (لكلّ مجرى رباعيّ)	(المسافة المشفّرة) هايدنهاين Heidenhain مقياس خطّي LS-176C	المقياس الخطّي
مدخلات 4 enc مصنّف عقد داخلي 4. DAC 4 مبدّل رقمي تماثلي 4 ، 16 ADC مبدّل تماثليّ رقمي 16 ، 8 DI مرباط تبادليّ رقمي 8 8 DO مخرجات رقميّة 8	هوموسوفت MF-614	لوحة اكتساب البيانات
التقاط البيانات والتحليل والتصوّر	ماتلاب أنيّة منطقة الهدف ويندوز	البرمجيّات

يضاف مقياس خطي عالي الدقة إلى الإعدادات ليعاود في النمذجة ولتحقق من الإنجاز التقييمي للنماذج المقدمّة، ويلاحظ أنه من المرغوب به في هذا الإعداد ضبط التسريع / الإبطاء للحمولة بدقة وبالتالي يُستخدم في هذا النظام مفتاح تحكّم بالحركة حسب المواصفات المطلوبة.

وتُقارن قياسات الوضعية للمُشَفَّر (encoder) الأساسي مع قياسات المقياس الخطّي عالي الدقة الذي يُدمج مباشرةً مع حمولة الطور الخطّي لكي يتمّ تحديد أخطاء الانزياح المحدثة عن طريق نظام النقل. و مهما يكن فإنّ محاور القياس للمقياس الخطّي ومحاور القياس للمُشَفَّر الأساسي لا تتوافق بسبب المحدودية التي يفرضها التصميم المادي للطور. ومن هنا سيتمّ تضمين أخطاء إزاحة أبي (Abbe) بشكلٍ غير مباشرٍ في أخطاء الإزاحة الملاحظة، انظر إلى الشكل (7). وتحتوي عناصر النظام عدّة عيوبٍ إذ يوجد العديد من اللاخطيّات الصلبة والمرنة مترافقة مع هذه العناصر، الحركة الرجوعية (علبة السرعة + سير التوقيت) و التأخّر الزمنيّ (سير التوقيت) والاحتكاك (المساند) و المسلك المرن اللزج للسير وغيرها. وهكذا فإنّ تقدير وضع الحمولة باستخدام أساليب قياسٍ غير مباشرةٍ يبرز بكونه تحدّيًا ويتطلب المزيد من جهود ومحاولات نمذجة موسّعة.

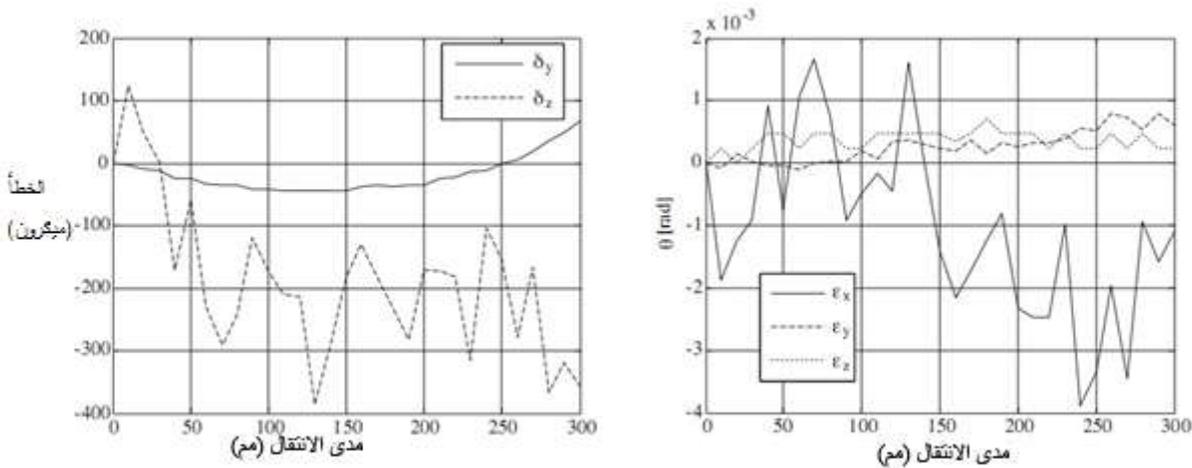


الشكل (7) مكافئات آبي (Abbe)

ويأخذ الاختلاف بين القياسات عن طريق نظام النقل الشكل التالي:

$$\Delta x = x_{LS} - x_{PE} = \delta_x(x_{PE}) + A_z \varepsilon_y(x_{PE}) - A_y \varepsilon_z(x_{PE}) \quad (13)$$

حيث x_{PE} و x_{LS} (LS المقياس الخطي - PE المُشَفَّر الأساسي) يشيران إلى قياسات الوضعية لكل من المقياس الخطي والمُشَفَّر الأساسي على التوالي. وهنا فإن A_z و A_y يشيران إلى قيمة مكافئات آبي (Abbe). فضلاً عن ذلك فإن ε_y و ε_z هي الدورانات الزاوية الصغيرة للمحاور الأساسية و δ_x هو خطأ الإزاحة الذي يقدمه نظام النقل. وبما أن Δx في [13] تشكّل الأخطاء الهندسية / الديناميكية المرتبطة بعناصر دعم أي المساند المقاومة للاحتكاك و أذرع الحوامل يصبح من الواجب عزل خطأ النقل عن طريق تحويلات مناسبة. و يصف الشكل (8) أخطاء انزياح كهذه والدورانات الزاوية للمحاور الأساسية لنموذج نضج القدرة هذا (CMM: Capability Maturity Model).

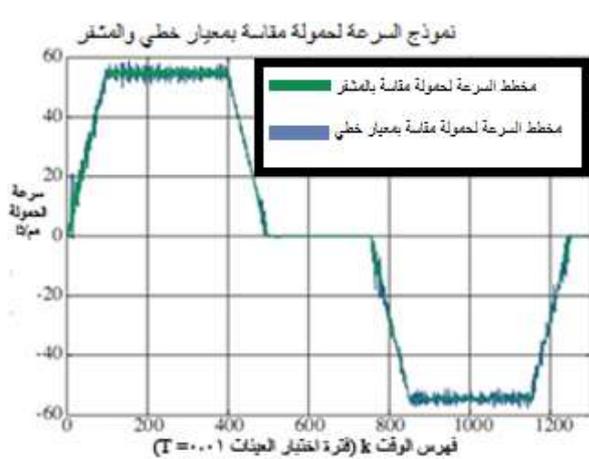


الشكل (8) رسوم بيانية تُظهر أخطاء الإزاحة والدورانات الزاوية للمحاور الأساسية

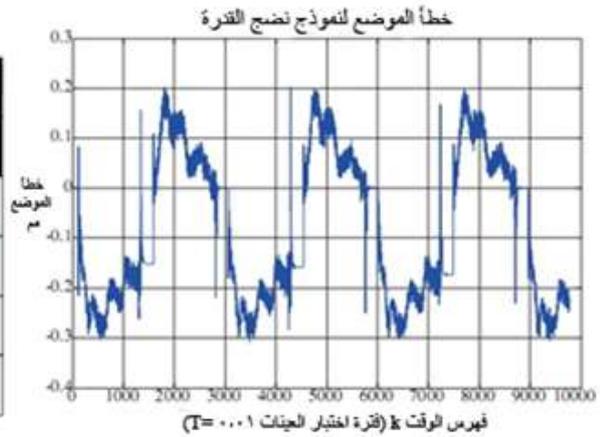
3- التجارب:

تتم اختباراتٍ عديدةٍ من خلال هذه الدراسة، يُدرس فيها أولاً قابليّة تكرار الحركة كشرطٍ أساسيٍّ لاستنباط نماذج مرجعيةٍ متعلّقةٍ بذلك. وفي جميع هذه الاختبارات تُظهر سرعة المحرك التي تُضبط بدقةٍ على طول ممرٍ على شكل شبه منحرفٍ في (الشكل 9) ويمكن افتراض خطأ الموضع / المسار الناتج في الشكل (10) (الذي يتجه بشكلٍ أساسيٍّ نحو الصفر في الحالة الثابتة) على أنه متدنٍ من أجل الأغراض العمليّة. و تحت هذه الشروط يتم طباعة نماذج أخطاء الموضع $(\Delta x = x_{LS} - x_{PE})$

لاثنى عشر مسارٍ مختلفٍ متراكبٍ في الشكل (1) وكما يمكن إثباته بوساطة الرسم البياني للتردد في (الشكل 12) تعرض أخطاء الموضع خصائص تخلفيّةٍ وهي قابلةٌ جداً للتكرار و تشير هذه الظاهرة إلى تنمية نماذج متقدّمةٍ للمقيم .



الشكل (9) رسم السرعة للحمولة



الشكل (10) خطأ مسار الموضع

يتم جمع معلومات خطأ الموضع للحمولة ثم تعدل بمرشح ترددات منخفضة لإزالة التوافقيات عالية التردد التي ينتجها نظام نقل الحركة (علبة السرعة + سير التوقيت). وفي الحقيقة يبين الفحص الدقيق لنماذج الخطأ في (الشكل 11) نقاط حساسة عن خصائص النظام قيد البحث:

• إن مجال التخلف المغناطيسي الذي يبلغ تقريباً 0,03 مم لحالات الاختبار هو ظاهرياً نتيجة الحركة الرجوعية بين سير التوقيت ومسند القيادة ، الازدياد المفاجئ في توتر السير يعمل على توسيع هذا المجال بينما تتسع الفجوة بين الأسنان.

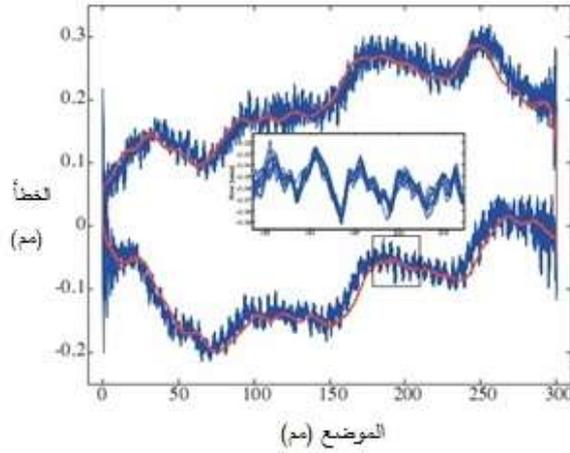
• وكما ذكر سابقاً، تظهر أخطاء مكافئات آبي (Abbe) نفسها على شكل أمواج على الحدود العليا والدنيا، و من هنا عادةً تعرض تداولات ميكانيكية لعناصر المسند بنية مختلفة على هذه النطاقات.

• يُضاف مركب توافقي أساسي حجمه 20 ميكرون على المجال وتردده مساو لتردد عبور السن للسير ومن هنا يمكن أن يُعزى تشكّل أخطاء السير إلى هذه التنوعات.

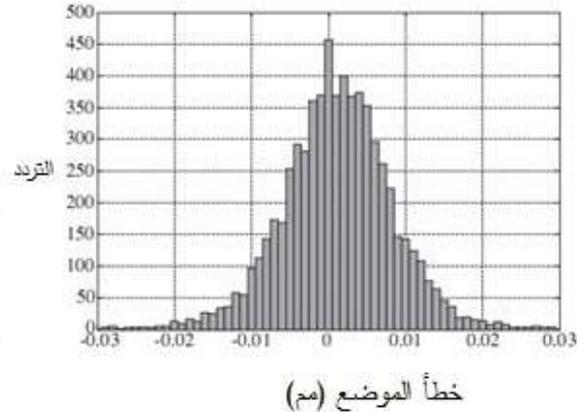
• تبدو التوافقات المحدثّة عن طريق علبة سرعة ثنائية المراحل مُهملة تماماً بينما يكون الانتقال في المنطقة

الارتجاعية التي يبلغ عرض موجتها 0,12 سريعاً للغاية عندما تغيّر الحملولة اتجاه حركتها.

تُرَكِّز المجموعة اللاحقة من التجارب على تأثير السرعة على خطأ الانتقال، ويوضّح (الشكل 13) خمسة أخطاء انزياح مختلفة على طول مدى تتقلل كامل للتركيبية. وكما يبدو من الشكل يكون للتغيرات العنيفة في سرعة وضع الاستقرار تأثيرات طفيفة على طبيعة العلاقة اللاخطية.



الشكل (11) أخطاء الموضع لـ 12 حالة



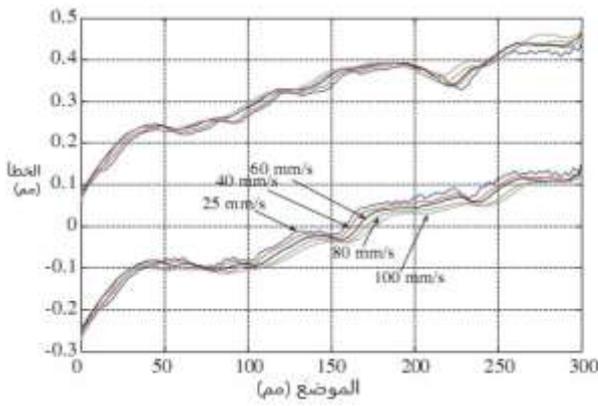
الشكل (12) تردد الأخطاء

وأخيراً يتم تقصي تأثير قوى العطالة بتغيير مظهر التسريع والإبطاء للمحرك كالتالي تحدثها حركة الانزلاق داخل المجال التخلفي. وكما يتبين من الشكل (14) لا يكون لقوى العطالة تأثيراً معتبراً على المسافات المغلقة، وعلى نحو مماثل يفصل الشكل (15) المسافات المغلقة حين يُعكس اتجاه الحركة في مواقع وسطية متنوعة، ومن الجدير ملاحظته أنه عندما يُعكس اتجاه الحركة تتحرر أسنان نقل الطاقة ويسود انزلاق ميكروي خاضع لتحرير خارجي، وينتج هذه الظاهرة ينزلق السير ببطء حتى تتهمك المجموعة التالية من تعشيقات الأسنان بالنقل. وتبرز بعض الجهود

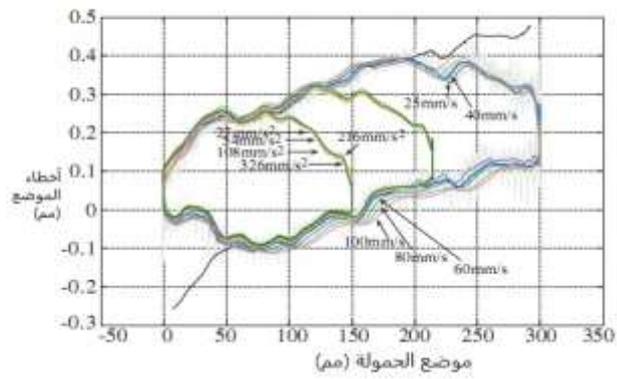
القليلة لتحسين نماذج ديناميكية تشرح هذه الظاهرة على نحو مرضٍ وإنّ تطوير نماذج متقدّمة كهذه هو مجال بحثٍ فعّالٍ في علم الاحتكاك.

4- نماذج حركية لميكانيكية سير التوقيت:

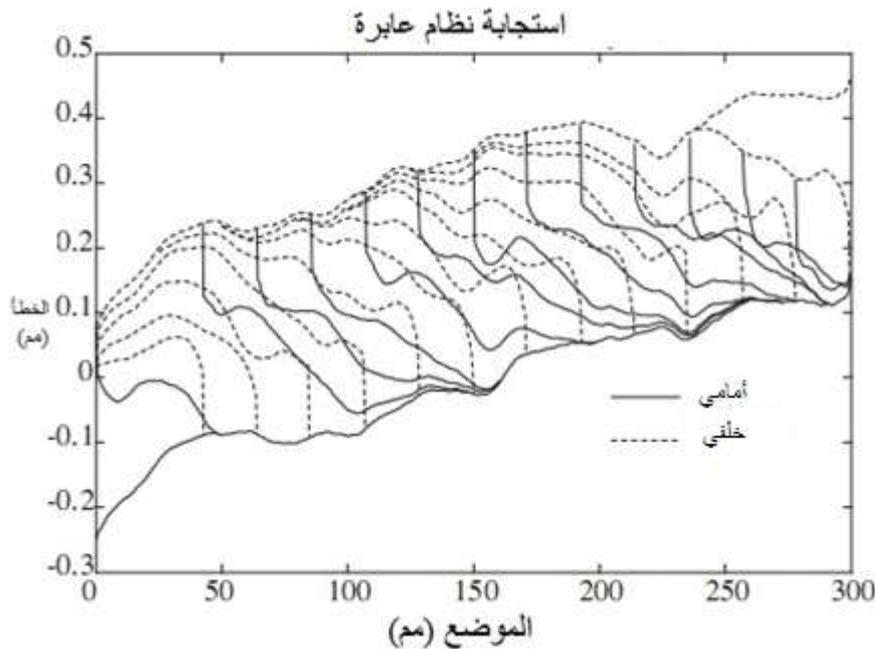
بالرغم من استخدامها الشائع في آلات الدقّة، لم يتمّ تقييم خصائص النقل المرن لعناصر النقل المرن بشكلٍ كاملٍ في الكتب والمطبوعات، وبالنتيجة يجب ابتكار نموذجٍ حركيٍّ بسيطٍ وفعّالٍ في آنٍ واحدٍ في هذه الدراسة. ولسوء الحظّ يمكن أن تُعقّد المسارات المتّبعة داخل المجال كثيراً نظراً للحقيقة التي مفادها أنّ عملية الانزلاق الميكروي تصبح مهيمنة في المنطقة ولا يمكن وصفها كما ينبغي. وبالتالي يجب إتباع منهجٍ أكثر واقعيّة في هذا البحث بدل تطوير نماذج ديناميكية معقّدة بعددٍ هائلٍ من الوسائط المجزّدة، وفي الواقع توجي المسارات المطروحة في الشكل (15) بتطوير ثلاث نماذج مختلفة ذات معانٍ ماديّة و تكاليف حسابيّة مختلفة، وسيتم شرح هذه النماذج لاحقاً.



الشكل(13) أخطاء الإزاحة لمرشّح ترددات منخفضة لسرعاتٍ متنوعة في وضع الاستقرار



الشكل(14) تأثيرات التسارع/التباطؤ على أخطاء الإزاحة



الشكل(15) أخطاء الوضع في انقلابات أو عكس الحركة في مواقع وسطية متنوعة

4-1: النموذج 1: الانتقالية الخطية:

يتم أولاً تطوير نموذج المجال التخلفي المبيّن في الشكل (16). وبناءً على اتجاه الانتقال X والوضع المسجل عندما يتغير الاتجاه يُجتاز مساراً خطياً داخل المجال على النحو

$$y(k) = \begin{cases} m \cdot x(k) - h, & x(k) \geq x(k-1) \\ u(k) = y_d(k) - a[x(k) - x_d(k)], & [x(k) \geq x(k-1)] \wedge [u(k) \geq m \cdot x(k) - h] \\ m \cdot x(k), & x(k) < x(k-1) \\ u(k) = y_d(k) - b[x(k) - x_d(k)], & [x(k) < x(k-1)] \wedge [u(k) < m \cdot x(k)] \end{cases} \quad (14)$$

وهنا a و b و m تشير إلى القيم الخطية المتنوعة بينما يصف h المجال التخلفي، وفي هذه الصيغة k هي دليل الزمن و $x(k)$ هي وضع المشفر الأساسي عند الزمن $t=kT$ بينما $y(k)$ تدلّ على خطأ الموضع عند الزمن $t=kT$. وبلاحظ أنّ x_d و y_d يتطابقان مع موضع المشفر الأساسي والخطأ بالتتالي عندما يُسجل تغيير في اتجاه الحركة:

$$x_d(k) = \begin{cases} x(k-1), & \{[x(k) \geq x(k-1)] \wedge [x(k-1) < x(k-2)]\} \\ x_d(k-1), & \vee \{[x(k) < x(k-1)] \wedge [x(k-1) \geq x(k-2)]\} \\ x_d(k-1), & else \end{cases} \quad (15)$$

$$y_d(k) = \begin{cases} y(k-1) - h_g, & \{[x(k) \geq x(k-1)] \wedge [x(k-1) < x(k-2)]\} \\ y(k-1) + h_g, & \{[x(k) < x(k-1)] \wedge [x(k-1) \geq x(k-2)]\} \\ y_d(k-1), & else \end{cases} \quad (16)$$

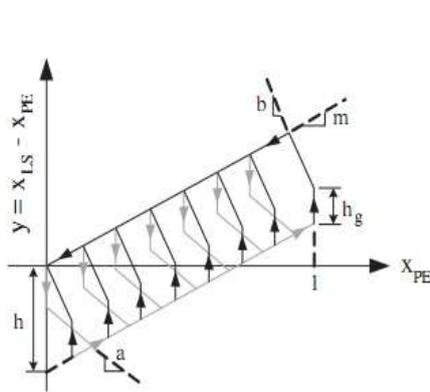
4-2: النموذج الثاني: الانتقال الأسي (التصاعدي)

يؤخذ النموذج في الشكل (17) بعين الاعتبار على أنه بديل ثانٍ. وعندما يتغير اتجاه الحركة في هذا النموذج يتم اجتياز مسار أسي في الحلقة على النحو:

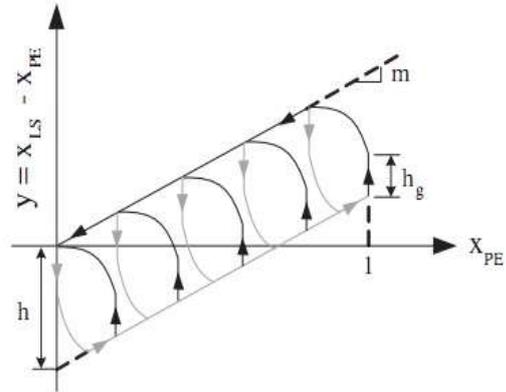
$$y(k) = \begin{cases} m \cdot x(k) - h, & x(k) \geq x(k-1) \\ u(k) = y_d(k) - A[1 - e^{a[x(k) - x_d(k)}], & [x(k) \geq x(k-1)] \wedge [u(k) \geq m \cdot x(k) - h] \\ m \cdot x(k), & x(k) < x(k-1) \\ u(k) = y_d(k) + B[1 - e^{-b[x(k) - x_d(k)}], & [x(k) < x(k-1)] \wedge [u(k) < m \cdot x(k)] \end{cases} \quad (17)$$

وهنا A و B و a و b تشير إلى متغيرات المنحنيات الأسية بينما تُعرّف x_d و y_d في المعادلات (15) و

(16)



الشكل (16): نموذج الانتقال الخطي



الشكل (17): نموذج الانتقال الأسّي (التصاعدي)

4-3: الاستكمال الخطي:

نموذج ثالث أكثر شمولية يؤخذ بعين الاعتبار نموذج استكمال خطي يمثل الانتقالات داخل المجال التخلفي:

$$y(k) = \begin{cases} \Lambda_f(x(k)), & x(k) \geq x(k-1) \\ u(k) = \Lambda_{ft}(x(k), x(k-1), x_d(k), y_d(k)), & [x(k) \geq x(k-1)] \wedge [u(k) \geq m \cdot x(k) - h] \\ \Lambda_r(x(k)), & x(k) < x(k-1) \\ u(k) = \Lambda_{rt}(x(k), x(k-1), x_d(k), y_d(k)), & [x(k) < x(k-1)] \wedge [u(k) < m \cdot x(k)] \end{cases} \quad (18)$$

حيث Λ_f و Λ_r يشيران إلى جدول البحث عن المجال الأدنى و الأعلى على التوالي بينما Λ_{ft} و Λ_{rt} يشيران

إلى جداول البحث الموجدة باستخدام بيانات مؤقتة موجودة في الشكل (15).

5- تحليل النتائج والمناقشة:

يتم فحص هذين النموذجين وتحدد المعطيات المجردة من هذين النموذجين أولاً باستخدام بيانات تجريبية متعلقة بالموضوع عن طريق أسلوب أقل المربعات. ويوب الجدول (2) هذه المعطيات.

الجدول (2) معطيات النموذج

B	A	b	a	h_g	h	m	النموذج
-	-	0.0012	0.0012	0.11	0.34	0.0010594	1: الخطي
0.09	0.07	- 0.03	- 0.05	0.11	0.34	0.0010594	2: التصاعدي

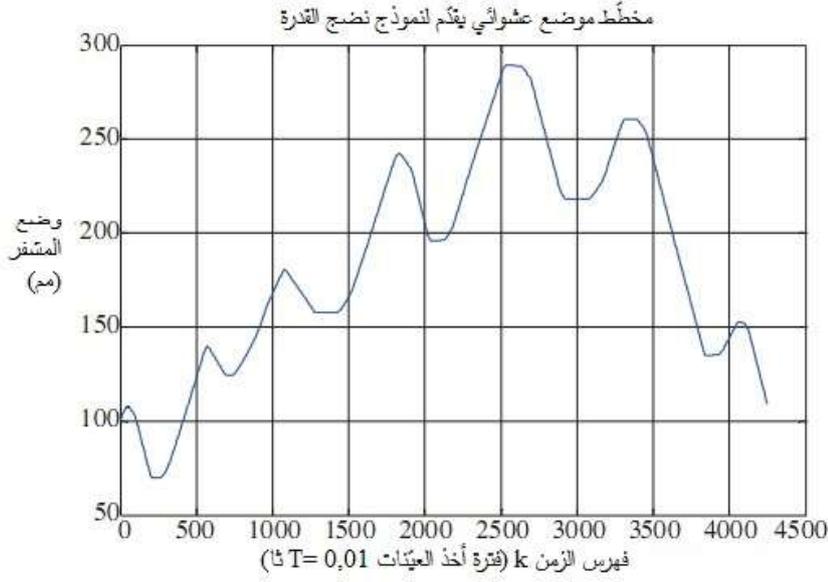
وفيما يخص النموذج الثالث (الاستكمال) تأتي المعطيات من تلك التي وجدت في النموذج الخطي، بينما يتشكل

جدول بحث ثنائي الأبعاد يحتوي إجمالياً 650 نقطة معلومات باستخدام منحني خواص في الشكل (15).

وحالما يتم تشكيل هذه النماذج وجدول البحث تقيم فعاليات التقدير لجميع النماذج بوساطة مخطط معقد تغير

فيه الحمولة اتجاه حركتها فجأة من خلال مسارها كما هو موضح في الشكل (18)، وتبرز نتائج خطأ الوضع المقدرة

في الشكل (19) من خلال الشكل (24)، ويلخص الجدول (3) على نحو مماثل إحصائية المعلومات الناتجة.



الشكل (18): مخطط الاختبار

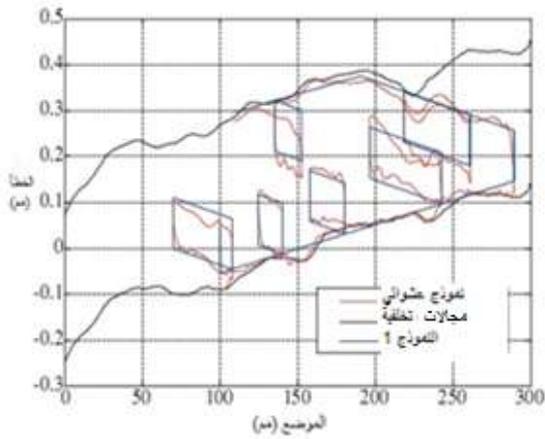
الجدول 3: تلخيص للنتائج

رقم النموذج	النموذج 3	النموذج 2	النموذج 1	(μm)
365	99	120	131	الأعلى
-93	-79	-130	-148	الأدنى
195	26	34	38	خطأ جذر متوسط المربعات

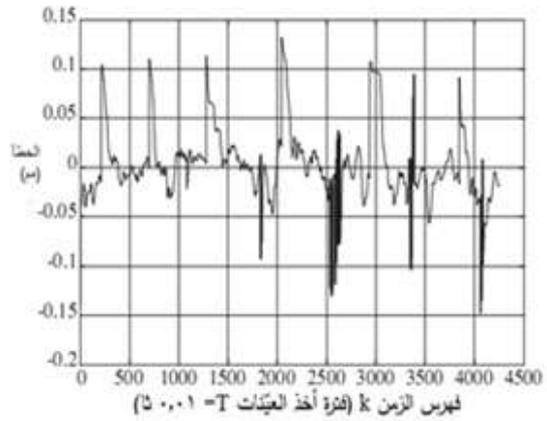
لاحظ أنه في الجدول 3 يُحدّد خطأ جذر القيمة التربيعية الوسطى على النحو التالي:

$$e_{rms} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [x_{LS}(k) - x_{PE}(k) - y(k)]^2} \quad (19)$$

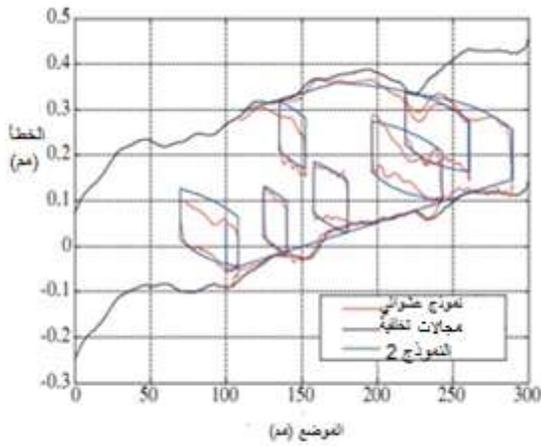
تتقارب تطبيقات النموذج 1 والنموذج 2 كثيراً بسبب الحقيقة التي مفادها أن المنحنيات المركبة متماثلة تماماً، ويثمر الاستكمال الخطّي كما هو متوقّع عن أفضل الفعاليات وذلك بسبب المعلومات المستخدمة لتشكيل جداول البحث فيه تستحوذ خلاصة منطقة الانتقال جوهرياً.



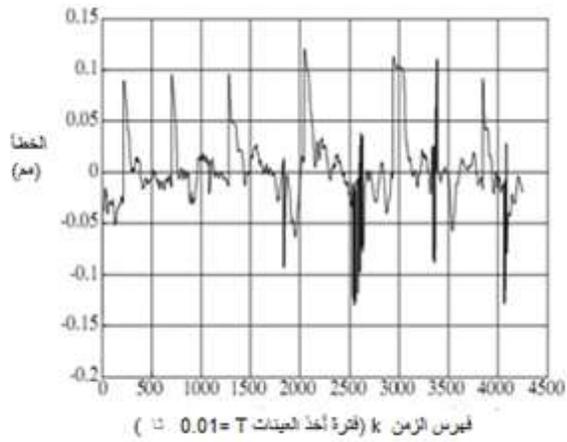
الشكل (19): فعالية التقدير للنموذج 1



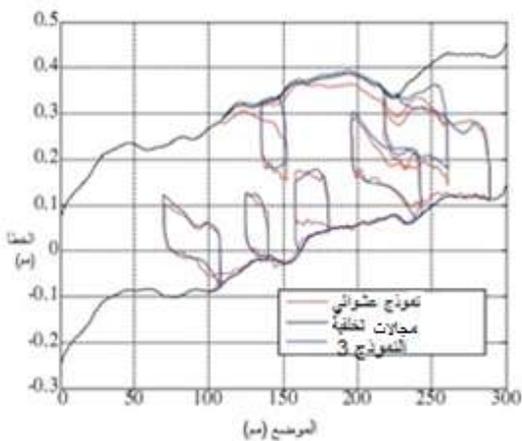
الشكل (20): رسم الارتياح للنموذج 1



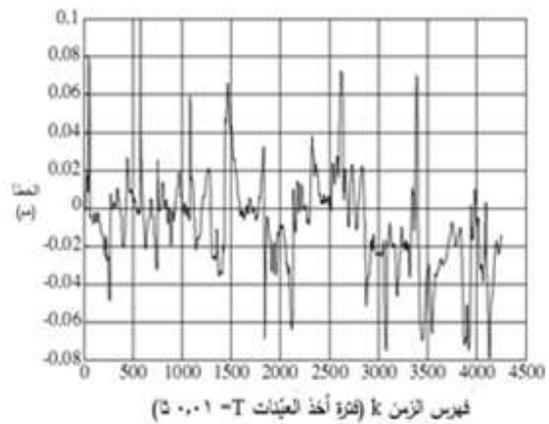
الشكل (21): فعالية التقدير للنموذج 2



الشكل (22): رسم الارتياح للنموذج 2



الشكل (23): فعالية التقدير للنموذج 3



الشكل (24): رسم الارتياح للنموذج 3

الاستنتاجات والتوصيات:

- تغطي هذه الدراسة بعض المظاهر الهامة لميكانيكية سير التوقيت والتي تُستخدم كثيراً في أنظمة التحكم بالحركة، ونقاط هذا البحث الأساسية هي:
- تستنبط منها آليات عمل النموذج الديناميكي لمحرك سير التوقيت والتي يمكن استخدامها في تصميم أنظمة التحكم في الحركة.
- تكون النتائج الظاهرية المرتكزة على النموذج المطور على توافقٍ جيّدٍ مع النتائج التجريبية.
- تُجرى دراسة تجريبية للتحري عن سمات آليات كهذه، ويتم جمع معلوماتٍ شاملةٍ في ظروف تشغيلٍ مختلفةٍ خلال التجارب، وتظهر المعلومات الملتقطة قابليةً للتكرار بالتقنية زمانياً ومكانياً.
- قابلية التكرار العالية توحى بالإنماء (والنشر) لتقنياتٍ مختلفةٍ لتقدير / فاحص الوضع.
- يتم إحراز انخفاضٍ ضخمٍ في الأخطاء (من مستوى 350 ميكرومتر إلى مستوى 30 ميكرومتر أو ميكرون) وذلك بالاستفادة من طرق استكمالٍ متقدمةٍ، ولا تسبب التقنيات المطروحة التي تعتمد القياس غير المباشر أية تكلفةٍ إضافيةٍ في المكونات المادية للنظام الإجمالي.
- ويوضح البحث أنّ استراتيجيات التقدير المتقدمة تكون فعالةً جداً عندما لا يخضع نظام القيادة لحمولاتٍ خارجيةٍ أو شروط تشغيلٍ متغيرةٍ على نحوٍ واسعٍ مثل درجة الحرارة المحيطة وتوتر السير .

المراجع:

- [1] A. S. Kulkarni, M. A. El-Sharkawi "Intelligent Precision Position Control of Elastic Drive Systems," IEEE Trans. On Energy. Conv., vol. 16:1, pp 26-31, 2001.
- [2] W. Li, M. Rehani, "Modeling and control of a belt-drive positioning table", in *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference of Industrial Electronics (IECON)*, vol. 3, Taipei, Taiwan, Aug. 1996, pp. 1984–1989.
- [3] Z. Zhao, L. Cai, "On the improvement of tracking performance of positioning tables", in *Proc. of the 22nd IEEE International Conference of Industrial Electronics (IECON)*, vol. 3, Taipei, Taiwan, pp. 1990–1995, 1996.
- [4] S. Abrate, "Vibrations of belts and belt drives", *Mechanism and Machine Theory*, vol. 27, no. 6, pp. 645–659, 1992.
- [5] D. W. South, J. R. Mancuso, Eds., *Mechanical Power Transmission Components*. New York: Marcel Dekker Inc., 1994.
- [6] Firbank, T. C., "Mechanics of the Belt Drive", *Int. J. of Mech. Sci.*, Cilt: 12, s: 1053-1063, 1970.
- [7] Ozgüven, H.N, Houser, D.R., "Mathematical Models Used in Gear Dynamics – A Review", *Journal of Sound and Vibration*, vol. 121:3, pp. 383-411, 1988.
- [8] Kagotani, M., Ueda, H., Koyama, T., "Transmission Error in Helical Timing Belt Drives (Case of a Period of Pulley Pitch)", *Journal of Mechanical Design*, vol. 123(1), pp. 104–110, 2001

- [9] I.D. Mayergoyz, “Mathematical Models of Hysteresis”, Springer-Verlag, New York, 1991.
- [10] Kam K. Leang, “Iterative Learning Control of Hysteresis in Piezo-based Nanopositioners: Theory and Application in Atomic Force Microscopes”, University of Washington, Ph. D. Thesis, 2004.
- [11] I.D. Mayergoyz, A. A. Adly, “Numerical Implementation of the Feedback Preisach Model”, IEEE Transactions on Magnetics, vol.248, No. 5, 1992
- [12] C. Canudas de Wit, H. Olsson, K. J. Astrom ve P. Lischinsky, “A New Model for Control of Systems with Friction”, IEEE Trans. on Automatic Control, vol. 40, pp. 419–425, 1995.
- [13] O. A. Bauchau, C. K. Ju, “Modeling Friction Phenomena in Flexible Multibody Dynamics”, Comput. Methods App. Mech. Engr., vol. 195, pp. 6909–6924, 2006.
- [14] J. J. Choi, S. I. Han, J. S. Kim, “Development of a Novel Dynamic Friction Model and Precise Tracking Control Using Adaptive Back-Stepping Sliding Mode Controller”, Mechatronics, vol. 16, pp. 97–104, 2006.
- [15] E. Ostertag, M. J. Carvalho-Ostertag, “Fuzzy control of an inverted pendulum with fuzzy compensation of friction forces”, *International Journal of Systems Science*, vol. 24, no. 10, pp. 1915–1921, 1993.
- [16] Kilic, E., Dolen, M., Koku, B. A., Dogruer, C. U., “Novel Position Estimators for Timing Belt Drives”, *Journal of Automation, Mobile Robotics, and Intelligent Systems*, vol. 1, no. 2, pp. 55-61, 2007
- [17] B. Armstrong-Helouvry, P. Dupont, C. Canudas De Wit, “A survey of models, analysis tools and compensation methods for the control of machines with friction”, *Automatica*, vol. 30, no. 7, pp. 1083 –1138, 1994.