مرشّح كالمان اللامحسوس التكيّفي المقيَّد بنموذج منعطف بمعدّل دوران غاوس–ماركوف (AUKF-CT) لتجسير انقطاعات إشارة GPS: معالجة السلوك غير الرتيب والتقييم المقارَن على مجموعة بيانات أوكسفورد

صهيب علوان[1]* ، بسيم عمران[2] ،فادي تركاوي[3]

[1] طالب دكتوراه، قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة حمص، حمص ، سوريا.

[2] أستاذ مساعد، قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة حمص، حمص ، سوريا.
Basmran@albaath-univ.edu.sy

[3] مدرس، قسم هندسة التحكم الآلي والحواسيب، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة حمص، حمص ، سوريا.
faditirkawi@hotmail.com

(*) الباحث المراسل : salwan@homs-univ.edu.sy

الملخص

يعالج البحث مشكلة تجسير انقطاع إشارة القمر الصناعي في نظام تحديد المواقع العالمي (GPS) في البيئات الحضرية باستخدام مرشّح كالمان لا محسوس تكيفي معدل (AUKF-CT). لوحظ من دراسة السلوك غير الرتيب الذي ظهر في الصيغة التكيّفية الأولية أن الخطأ لم يتزايد بشكلٍ رتيب مع زيادة فترة الانقطاع وإنما تفاوتت قيمته ثم انفلت عند زمن انقطاع 60 ثانية. يبين البحث أن هذا السلوك نتج عن مجموعة من الأسباب هي قانون تكيّف تراكمي يقود مصفوفة ضجيج العملية للإشباع، وتثبيت معدّل الدوران طيلة فترة الانقطاع، وتصميم تجريبي بموقع انقطاع واحد وقيمة أولية عشوائية واحدة للضجيج. يقترح البحث لمعالجتها مرشّحاً مؤلف من أربع مكونات هي نموذج منعطف منسّق ينعدم فيه معدّل الدوران وفق غاوس–ماركوف، وقانون تكيّف مرجعي غير تراكمي، وتحديث متين ببوابة التجديد χ^2، وعملية تجميد التكيّف أثناء الانقطاع. تم تقييم المرشّح بتهيئتين (اسمية وتكيّفية) على مجموعة بيانات أوكسفورد الحقيقية باستخدام بروتوكول مونتي–كارلو مؤلف من 180 تكراراً لكل سيناريو، وعلى بيانات مستقلة من طوكيو وناغويا، وتمت المقارنة مع تسع مرشحات تقليدية وتكيّفية.

الكلمات المفتاحية: مرشّح كالمان اللامحسوس التكيّفي، نموذج المنعطف المنسّق، معدّل دوران غاوس–ماركوف، انقطاع GPS، الحساب الاستدلالي للموقع، متانة المرشّح.

ورد للنشر بتاريخ : 2026/9/17

قبل للنشر بتاريخ : 2026/11/18

2026 © المؤلف (المؤلفون).هذا المقال منشور بنظام الوصول المفتوح بموجب ترخيصCC BY-NC-SA 4.0

Adaptive Unscented Kalman Filter Constrained by a Gauss–Markov Turn-Rate Coordinated-Turn Model (AUKF-CT) for Bridging GPS Outages: Correcting Non-Monotonic Behavior and Comparative Evaluation on the Oxford Dataset

Suhaib Alwan[1]* , Bassim Omran[2] , Fadi Tirkawi[3]

[1] Phd's Student, Department of Automatic and Computer Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Homs University, Homs, Syria.

2Associate Professor, Department of Automatic and Computer Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Homs University, Homs, Syria. Basmran@albaath-univ.edu.sy

[3] Assistant Professor, Department of Automatic and Computer Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Homs University, Homs, Syria. faditirkawi@hotmail.com

(*) **Corresponding Author**: salwan@homs-univ.edu.sy

Abstract

This paper addresses the problem of bridging GPS signal outages in urban environments using a modified Adaptive Unscented Kalman Filter (AUKF-CT). It begins by diagnosing the non-monotonic behavior observed in adaptive formulations, where the positioning error did not increase monotonically with the outage duration; instead, the error value fluctuated before diverging at an outage time of 60 seconds. The study identifies the causes of this behavior as a cumulative adaptation law that drives the process noise matrix to saturation, the fixing of the turn rate throughout the outage period, and an experimental design featuring a single outage location and a single random initial noise value. To mitigate this, the research proposes a filter comprising four components: a coordinated turn model with a zero turn rate based on the Gauss-Markov process, a non-cumulative reference adaptation law, a robust update using a χ^2 innovation gate, and an adaptation-freezing mechanism during the outage. The filter was evaluated in two configurations (nominal and adaptive) using the real-world Oxford dataset via a Monte Carlo protocol consisting of 180 iterations per scenario, as well as on independent data from Tokyo and Nagoya, and its performance was compared against nine conventional and adaptive filters.

Keywords: Adaptive unscented Kalman filter, Coordinated-turn model, Gauss–Markov turn rate, GPS outage, Position dead-reckoning, Filter robustness.

Received : 17/9/2026
Accepted : 18/11/2026

© 2026 Author(s). This article is published under the Open Access License CC BY–NC–SA 4.0

المقدمة:

تعتبر عملية تقدير الموقع بشكلٍ مستمر وموثوق عمليةً بالغة الأهمية لتشغيل منظومات النقل الذكية والمركبات ذاتية القيادة. وتؤمّن الأنظمة العالمية للملاحة بالأقمار الصناعية GNSS(Global Navigation Satellite System) موقعاً مطلقاً لا يتراكم خطؤه مع الزمن، ولكنّها تنحرف بشدّة في البيئات الحضرية كما أنها تنقطع كلياً في الأنفاق والأماكن المغلقة [1][2]. خلال الانقطاع يقوم النظام بعملية حساب استدلالي (Dead-Reckoning) تعتمد على نموذج الحركة وعلى الحالة المخمنة عند الانقطاع، فيتزايد خطأ الموقع بشكلٍ رتيب مع الزمن بمعدّل يتعلق بدقّة الحالة وملاءمة النموذج[3][4].

الخوارزمية المعتمدة لمثل هذا الدمج هي مرشح كالمان KF(Kalman Filter) [5][6]، ولصيغه اللاخطية أبحاث مقارنة عديدة كالمرشح الموسع EKF(Extended KF) [7] والمرشح اللامحسوس UKF(Unscented KF) [8]، والتكعيبي CKF(Cubature KF) [9]، ومرشح الجسيمات PF(Particle Filter) [10] [11]، حيث وجد St-Pierre و Gingras [12] أن UKF أقل دقة بقليل من المرشح الموسع EKF حين تنقطع إشارة القمر الصناعي GPS(Global Positioning System) 21.63m مقابل 21.2m وذكروا أن السبب في ذلك ضعف ديناميكية المركبة، في حين تتفوقUKF بشكلٍ كبير على EKF عند وجود انقطاعات متعددة على مسارات طيران لدى Jane [13]، أما لدى Rhudy [14] بينت النتائج فروق صغيرة بين المرشحين في انقطاعات مدتها 30 ثانية. الأمر نفسه استخلصه بقية الباحثين في مقارناتٍ أخرى [15][16][17][18].

تبين النتائج المرجعية التي يقدّمها هذا البحث للمرشحات التقليدية على مجموعة البيانات نفسها أنّ الأفضلية بين مرشحات كالمان مرهونة بفترة الانقطاع وليس بالمرشّح نفسه: يكافئ المرشّح الخطي KF المرشحات اللاخطية أو يتفوّق عليها خلال الانقطاعات القصيرة (حتى 30 ثانية)، وسبب ذلك حالة معدّل الدوران الإضافية التي لم تتشكل عنها معلومات كافية، وكذلك أنّ الصيغة التكيّفية تظهر سلوكاً ليس رتيباً مع زيادة مدة الانقطاع.

بينما تتفوّق عليه المرشحات اللامحسوسUKF و التكعيبيCKF ومرشح الجسيماتPF بنحو 18% عند 60 ثانية.

ينطلق البحث من فكرة أنّ السلوك غير الرتيب ناتج عن ثلاثة أخطاء تم تحديدها في كلٍ من الخوارزمية والنموذج والتصميم التجريبي؛ ومعالجته تتطلب تعديلاً في نموذج الحركة نفسه — وليس قانون التكيّف فقط — إذ إنّ التجديد innovation غير معرَّف أثناء الانقطاع، فلا يملك أيّ قانون تكيّف معلومةً يعتمد عليها خلال تلك الفترة، ويصبح نموذج الحركة هو صاحب الأثر الأكبر.

الدراسات المرجعية:

تم تطوير عدة صيغ تكيّفية من المرشح اللامحسوس UKF لمعالجة تدهور إحصاءات الضجيج. بنى Sage و Husa [19] أول تقدير تعاقبي لإحصاءات الضجيج المجهولة، وأصبح تقديرهما أساساً لكثير من صيغ كالمان التكيفية، ومنها صيغة AUKF-SH التي نقارن بها في هذا البحث. أما Pourtakdoust و Ghanbarpour Asl [20] قدما مرشّحاً تكيّفياً من نمط Sage–Husa يقدّر ضجيج العملية Q وضجيج القياس R لحظياً من التجديد بوزنٍ أسّي، وطبّقاه على تقدير الموقع في نظم AHRS(Attitude and Heading Reference Systems) منخفضة الكلفة. اقترح Le و Matunaga [21] تكيّفاً معتمداً على البواقي(الفرق بين القيمة المقاسة والمتوقعة) لتصحيح التقديرات وتجاوز القراءات غير الصحيحة للحساس العاطل. وفي عائلة التتبّع القوي [22] يُدخل STUKF(Strong-Tracking UKF) عامل تلاشي بقيمة أكبر من الواحد لتضخيم مصفوفة التغاير حين يتجاوز تباين التجديد المرصود نظيره النظري، أي زادت نسبة عدم اليقين لدى المرشح بشأن حالة النظام الحالية.

وفي الأعمال الحديثة طور Zhang وزملاؤه [23] عام 2025 صيغة UKF تكيّفية معتمدة على معيار Versoria الأعظمي (MVCAUKF) لمعالجة القياسات الشاذّة والضجيج اللاغاوسي(يعدل معاملات المرشح ديناميكياً وفقاً لحالة القياسات)، وحققوا تخفيض في خطأ الموقع نسبته 60.94% شرقاً و52.36% شمالاً مقارنةً مع المرشح UKF التقليدي وذلك على مسار مركبة طوله 700 متر ومدته 120 ثانية. قدّم Zhang وزملاؤه [24] عام 2026 إطار التفاعل متعدّد المرشحات (IMF) الذي يبدّل بين أنواع مختلفة من المرشحات(EKF و ESKF) بحسب حالة الطيران للطائرات متعددة المراوح UAV(Unmanned Aerial Vehicle). وتوصل Si وزملاؤه [18] في عام 2025 بعد أن قارنوا مجموعة من تقنيات الترشيح اللا خطي إلى أنّ المرشحات التكيّفية والمتينة تخمد القياسات الشاذة وعدم اليقين بالنموذج عبر التقدير اللحظي لتغاير الضجيج، ولكن دون أن يقدّموا منظومة موحّدة لتقييمها.

أما الدراسات المقارنة بين المرشحات فقلما اختبرت انقطاع GNSS بشروط موحدة من حيث سيناريو الانقطاع والضجيج المضاف. قارن Konatowski وزملاؤه [15] بين المرشحات EKF و UKF و PF في تعقب هدف مناور محاكى بقياسات رادارية عبر 200 تجربة، ووجدوا أن المرشحات PF و UKF قدمت أداءً أفضل من EKF. وقارن Zhang وزملاؤه [16] عدة صيغ لمرشح كالمان في الملاحة المتكاملة SINS/GPS بمحاكاة مؤلفة من 50 تكراراً واختبار على مركبة بزمن 250 ثانية، لكن دون انقطاع للإشارة. واختبر Mollaei وزملاؤه [17] مرشحات EKF و UKF وPF على طائرة محاكاة مع حجب GPS بعد الثانية 15 حتى نهاية التشغيل. ودمج Cahyadi وزملاؤه [25] قياسات GNSS و IMU بمرشّح EKF مترابط بشكل غير محكم على قارب غير مأهول. واستعمل Alaba [26] مرشح UKF لدمج GPS و IMU على بيانات KITTI الحقيقية دون سيناريو انقطاع.

على صعيد نماذج الحركة، نمذج Singer [27] تسارع الهدف المناور بعملية ماركوف من المرتبة الأولى، وعرض Li و Jilkov [28] في مسحهم لنماذج الحركة نموذجَ المنعطف المنسّق (CT) بمعدّل دوران مجهول يُضمّ إلى شعاع الحالة، وتم نمذجته إما بعملية فينر أو بعملية ماركوف من المرتبة الأولى ذات ثابت ارتباط زمني $\tau\omega$، ورجّحا الصيغة الثانية. أما في دراسات تجسير الانقطاع المذكورة أعلاه فيبقى معدّل الدوران، إن وُجد في شعاع الحالة، ثابتاً لا يغيّره سوى ضجيج العملية.

من الجدير بالذكر أن هذه الأعمال مجتمعةً يجري تقييمها غالباً مع توافر القياس أو تحت انقطاعات قصيرة، وأنّ التكيّف فيها يُقيَّم بدلالة تحسين RMSE في الحالة الاسمية لا بدلالة استقرار السلوك مع طول فترة الانقطاع، في حين أنّ الحالات الحرجة عملياً هي الانقطاع الطويل الذي ينعدم فيه التجديد تماماً، ومن ثم يتجمد التكيف عند آخر حالة وصل إليها. يلخص الجدول(1) مقارنة الأبحاث ذات الصلة مع البحث المقترح.

الجدول (1): مقارنة البحث الحالي مع الأبحاث ذات الصلة

الدراسة	الطريقة	تكيّف الضجيج	نمذجة معدّل الدوران	انقطاع GNSS المقيَّم	البيانات	البروتوكول الإحصائي
Pourtakdoust و Ghanbarpour Asl [20]	AUKF	R بالمربعات الصغرى التعاقبية	لا (تقدير توجّه)	لا	محاكاة طائرة	لا
Le و Matunaga [21]	AUKF بالبواقي	R بعد كشف العطل	لا (وضع قمر صناعي)	لا	محاكاة	لا
Konatowski وزملاؤه [15]	EKF / UKF / PF	لا	موقع–سرعة–تسارع (رادار)	لا	محاكاة هدف مناور	200 تجربة
St-Pierre و Gingras [12]	EKF / UKF	لا	موقع–سرعة–تسارع	نعم، دون ذكر المدة	محاكاة مدفوعة بتسارعات حقيقية	100 تكرار
Rhudy وزملاؤه [14]	EKF / UKF	لا	حركيات INS	30 × 3 ث	طائرة مسيّرة حقيقية	250 تكراراً (حساسية فقط)
Jane [13]	EKF / EKF2 / UKF	لا	INS بخمس عشرة حالة	2–10 ث متعدد	محاكاة طيران	لا
Zhang وزملاؤه [16]	KF / UKF صيغ	لا	SINS كامل دون ω	لا	محاكاة + مركبة 250 ث	50 تكراراً (محاكاة)
Zhang وزملاؤه [23]	MVCAUKF	إعادة وزن بمعيار Versoria	خطأ INS دون ω	لا	مركبة حقيقية، 120 ث	12 تجربة مكررة
Mollaei وزملاؤه [17]	EKF / UKF / PKF	لا	طائرة بست درجات حرية	من الثانية 15 حتى النهاية	محاكاة طائرة	لا
Alaba [26]	UKF	لا	غير محدّد	لا	KITTI حقيقية	لا
Zhang وزملاؤه [24]	IMF (EKF/ESKF)	احتمالات النماذج	خطأ INS دون ω	لا	بيانات حقيقية، 57 دقيقة	لا
هذا البحث	**AUKF-CT (تهيئتان)**	**Q مرجعي غير تراكمي + تجميد + بوابة χ^2**	**GM-CT: ω عملية ماركوف من المرتبة الأولى**	**60–5 ث + سيناريوهات متعدّدة**	**بيانات أوكسفورد حقيقية**	**Wilcoxon + Holm + فترات ثقة عنقودية (n = 180 / 220)**

تشخيص السلوك غير الرتيب في الصيغة المقترحة الأولية

اعتمدت صيغة أولية للمرشح (AUKF-v1) على تحديث Q بنافذة انزلاقية على شعاع التجديد وفق المعادلات:

$$\widehat{C_\varepsilon} = \frac{1}{W}\sum_{i=1}^{W} \varepsilon_i \varepsilon_i^T \quad (1)$$

$$S = HPH^T + R \quad (2)$$

$$\lambda = \text{clip}\left(\frac{\text{tr}(\widehat{C_\varepsilon})}{\text{tr}(S)}, 0.5, 3.0\right) \quad (3)$$

$$Q \leftarrow \text{clip}(\lambda Q, Q_{\min}, Q_{\max}) \quad (4) \text{ (قانون تراكمي)}$$

حيث:

$\widehat{C_\varepsilon}$: تغاير التجديد المرصود فعلياً.

W: عدد العينات المستخدمة(طول النافذة).

ε_i: شعاع التجديد للعينة.

H: مصفوفة القياس.

P: مصفوفة تغاير الحالة المتنبأ بها.

R: مصفوفة ضجيج القياس.

S: تغاير الضجيج الذي يتوقعه المرشح.

λ: نسبة التغاير المرصود على المتوقع.

Q: مصفوفة ضجيج العملية.

عند تحليل هذا القانون نلاحظ ثلاث نقاط أساسية:

- تراكم الضرب: يظهر ضمن الخوارزمية لأن Q تضرب بـ λ في كل خطوة انطلاقاً من قيمتها السابقة وليس من قيمة اسمية ثابتة، بالتالي يتراكم أي انحياز طفيف في قيمة λ عن الواحد. وبما أنّ $\lambda \in [0.5, 3]$ فإنّ Q تبلغ حدّها الأعلى Q_max أو الأدنى Q_min خلال عشرات الخطوات (بضع ثوان عند التردد 5 هرتز) وتبقى في حالة إشباع. وعند الإشباع الأعلى يفقد المرشح ثقته بنموذج الحركة ويتبع قياس GPS المشوَّش، وعندها تصبح السرعة المقدَّرة مشتقاً عددياً لموقع مشوَّش، ويكون الخطأ من مرتبة عدة أمتار في الثانية؛ ويضرب هذا الخطأ بمدة الانقطاع في الحساب الاستدلالي، فينتج انجراف $4m/s \times 60s \approx 235m$، وهو نفسه الرقم المرصود عند انقطاع 60 ثانية.
- تثبيت معدّل الدوران: يظهر ضمن النموذج حيث يحافظ نموذج المنعطف المنسّق على معدل الدوران ω ثابتاً خلال أفق التنبّؤ، الأمر الذي يعتبر مقبولاً لبضع ثوانٍ، لكنّه عند 60 ثانية يعطي زاوية ωT؛ فإذا كان

$\omega \approx 0.1$ rad/s (منعطف تقليدي) بلغت الزاوية 6 rad، أي دورة كاملة تقريباً وهو سلوك لا فيزيائي يفوق خطؤه تجميد الموقع.

- غياب مونتي–كارلو: أجريت تجربة سابقة على موقع انقطاع واحد (منتصف الثلث الأول من المسار) وقيمة أولية عشوائية واحدة للضجيج وبيانات GPS مولَّدة صناعياً. ومن ثمّ فإن كل مدة انقطاع تنتهي عند مقطع مختلف من المسار (مستقيم أو منعطف)، فيتأرجح الخطأ تبعاً لطبيعة المقطع وليس مدة الانقطاع. والتسلسل الناتج هو مسار لعينة وليس توقّع إحصائي، وبالتالي ظهر انخفاض عند 10 و30 ثانية.

هدف البحث:

تعالج الأبحاث تكيف المرشح بضبط إحصاءات الضجيج عند توافر القياس، بينما العامل الأهم في تجسير الانقطاعات هو الفترة التي تنعدم فيها القياسات بشكلٍ دائم، فيتجمّد التكيّف ويسلك المرشح سلوكاً محكوماً بنموذج الحركة وحده وبآخر حالة تكيّف وصل لها. لم يتم تقييم الصيغ التكيّفية في الأبحاث بمعيار استقرار سلوك المرشح مع طول فترة الانقطاع، بل بمعيار تحسين RMSE في الحالة الاسمية.

يسهم البحث بما يلي:

- تحليل مفصل للسلوك غير الرتيب في الصيغة التكيّفية، وفصل الأسباب ضمن الخوارزمية عن تلك الموجودة في النموذج عن الأسباب التجريبية.
- اقتراح مرشح AUKF-CT: مرشّح لا محسوس تكيفي مبني على نموذج منعطف منسق ذي معدل دوران غاوس–ماركوف، مع قانون تكيّف مرجعي غير تراكمي وبوابة χ^2 متينة وتجميد للتكيّف خلال فترة الانقطاع.
- تقييم مقارن موحَّد الشروط مع تسع مرشحات (خمس مرشحات تقليدية وثلاث صيغ تكيفية من الأبحاث) ضمن بروتوكول مونتي–كارلو إحصائي ($n = 180$ لكل خلية) على بيانات قيادة حضرية حقيقية.
- استخدام معايير تقييم إضافةً الى RMSE الاسمي: السلوك الرتيب مع طول فترة الانقطاع، ومعدّل التباعد، ونسبة تضخم الخطأ RMSE(60sec)/RMSE(5sec)، ومتانة الأداء بالنسبة لإحصاءات ضجيج القياس.

مواد البحث وطرائقه

نموذج المنعطف المنسّق ذي معدّل دوران غاوس– ماركوف (GM-CT)

يكون شعاع الحالة من الدرجة الخامسة: $x = [E, N, v_E, v_N, \omega]^{\mathrm{T}}$ ، حيث E وN يعبران عن الموقع شرقاً وشمالاً كما يظهر بالعلاقات (5) و(6) على التوالي، و v_E و v_N تعبران عن السرعة في المعادلتين (7)، و ω معدل الدوران أو السرعة الزاوية كما توضحها العلاقة (8). ومعادلات الانتقال حيث $T = dt$:

(5) $$E_{k+1} = E_k + \frac{\sin \omega T}{\omega} v_E - \frac{1-\cos \omega T}{\omega} v_N$$

(6) $$N_{k+1} = N_k + \frac{1-\cos \omega T}{\omega} v_E + \frac{\sin \omega T}{\omega} v_N$$

(7) $$v_{E,k+1} = \cos(\omega T)\, v_E - \sin(\omega T)\, v_N \,,$$
$$v_{N,k+1} = \sin(\omega T)\, v_E + \cos(\omega T)\, v_N$$

(8) $$\omega_{k+1} = \rho \omega_k + w_\omega$$

(9) $$\rho = \exp\left(-\frac{T}{\tau_\omega}\right), \;\; \mathrm{Var}(w_\omega) = \sigma_\omega^2 (1-\rho^2)$$

يظهر الفرق الأساسي عن النموذج التقليدي في المعادلة (9)، إذ تم نمذجة معدل الدوران بوصفه عملية غاوس–ماركوف من المرتبة الأولى (Ornstein–Uhlenbeck) بمتوسط صفري وثابت زمني $\tau\omega$، بدلاً من كونه ثابت. الأمر الذي يعتبر نمذجة فيزيائية للمركبة: يعتبر معدل الدوران عملية بارتباط زمني محدود، حيث يستغرق أي منعطف عدة ثوانٍ قبل أن يعود المسار المستقيم. بالتالي يحفظ النموذج عملياً الانحناء في الانقطاعات القصيرة (حيث $T \ll \tau\omega$ فيكون $\rho \approx 1$)، ويتحول تدريجياً إلى نموذج السرعة الثابتة خلال فترات الانقطاع الطويلة (حيث $T \gg \tau\omega$ فيكون $\rho \to 0$)، فيحدث تدهور بسيط بدلاً من الانجراف الدائري. عندما $\tau\omega \to \infty$ يتحول النموذج إلى المنعطف المنسّق التقليدي.

قانون التكيف المرجعي غير التراكمي:

بدلاً من عملية ضرب Q بالقيمة السابقة لها، يتم نسب معامل التكيّف بشكلٍ دائم إلى مصفوفة اسمية Q_0:

(10) $$\hat{\lambda}_k = \mathrm{clip}\left(\frac{\mathrm{tr}(\widehat{C_\varepsilon}) - \mathrm{tr}(R)}{\mathrm{tr}(P_{zz} - R)}, \lambda_{\mathrm{lo}}, \lambda_{\mathrm{hi}}\right)$$

(11) $$\lambda_k = (1-b)\lambda_{k-1} + b\hat{\lambda}_k \,, \;\; Q_k = \lambda_k Q_0$$

حيث $\hat{C}\varepsilon$ هو تباين التجديد التجريبي على نافذة W، وPzz تغاير التجديد المتنبَّأ به، وb معامل النسيان للتنعيم الأسي. وبما أنّ Q تُحسب من Q_0 في كلّ خطوة فلا يوجد تراكم، وتبقى قيمة λ محصورة بالقيمة $[\lambda_lo, \lambda_hi]$

من دون إشباع؛ كما أنّ عملية طرح $tr(R)$ و $tr(Pzz - R)$ يجعل $\hat{\lambda}$ مقدَّراً للنسبة بين التباين المرصود والتباين المتنبأ به من النموذج وحده، وليس بين التباين الكلي ونظيره وهو التصحيح الذي يمنع الانحياز من التضخم.

التحديث المتين ببوابة χ^2

$$d^2 = \varepsilon^T {P_{zz}}^{-1} \varepsilon \quad (12)$$

$$R_{\text{eff}} = R\left(\frac{d^2}{9.21}\right) \text{ فإنّ } d^2 > \chi^2(2, 0.99) = 9.21 \text{ إذا كان} \quad (13)$$

يتم تضخيم مصفوفة ضجيج القياس بدلاً من رفض القياس، فيتم تقليل وزن القياس المشبوه. والغرض من ذلك الحفاظ على تقدير السرعة ومعدّل الدوران (وهو ما يعتمد عليه الحساب الاستدلالي كلّه) من تغيره بقياسات GPS الشاذّة في الأخاديد الحضرية قبيل الانقطاع مباشرةً.

تجميد التكيّف خلال فترة الانقطاع

بما أن التجديد $\varepsilon = z - \hat{z}$ غير معرَّف عند غياب القياس، فإنّ التكيّف خلال فترة الانقطاع تستند إلى إحصاءات قديمة. لذلك يتم تجميد λ عند آخر قيمة لها قبل الانقطاع وتبقى $Q = \lambda \cdot Q_0$ ثابتة، بينما تستمر مصفوفة التغاير P بالزيادة بشكلٍ طبيعي حسب معادلة التنبّؤ مع إضافة حد تباين غاوس–ماركوف لحالة معدل الدوران ω. الأمر الذي يمنع تكرار الانفلات بسبب كون Q عند الانقطاع مشبَعة عند الحد الأعلى.

تهيئة المرشح المقترح

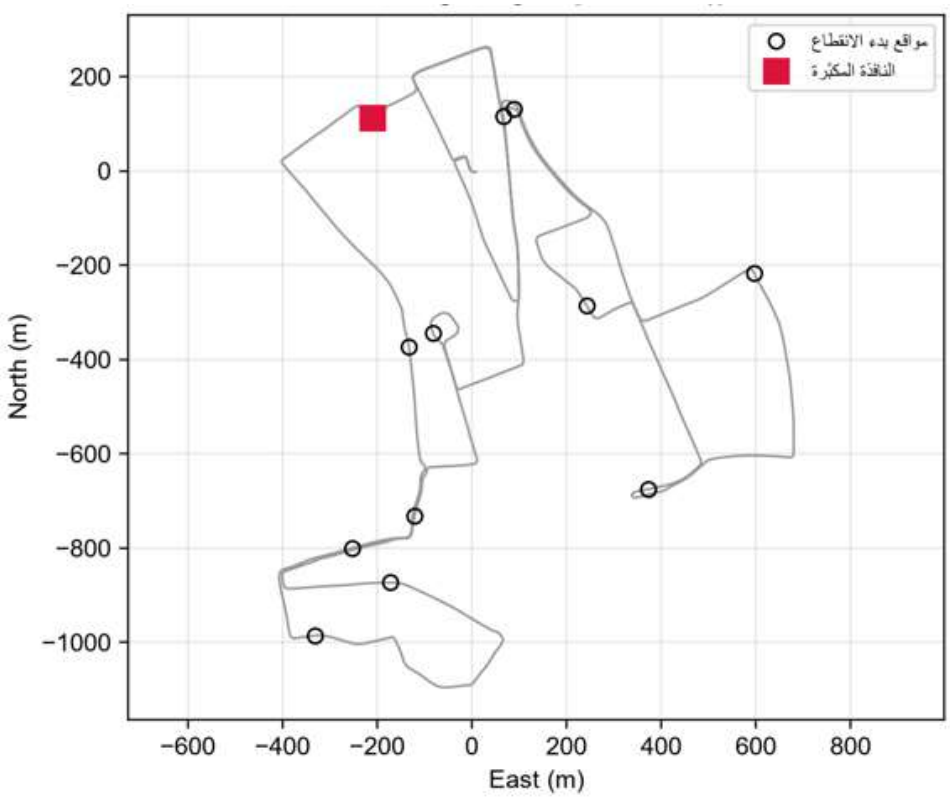
تم تقييم آليتي تهيئة للمرشح بدلاً من واحدة:

- التهيئة الاسمية AUKF-CT-N: يتفعل فيها نموذج غاوس–ماركوف GM-CT وتعطل آلية تكيف Q وبوابة χ^2 ، ويتم الاحتفاظ بـ $Q = Q_0$. وهذه التهيئة يوصى بها عندما تكون إحصاءات ضجيج القياس معروفة بشكلٍ أكيد — كما في مجموعة بيانات أوكسفورد التي تعطي سيغما لكلّ عينة.
- التهيئة التكيفية AUKF-CT-A: تشمل المكونات الأربعة. وهذه التهيئة يوصى بها عندما لا تُعرَف R بدقة ، كما هو الحال في المستقبلات منخفضة التكلفة والبيئة متعدّدة المسارات.

مجموعة البيانات وآلية التقييم

ضمن البحث تم اعتماد مجموعة بيانات أوكسفورد للمركبة الروبوتية (Oxford Robot Car) [29][30]، وذلك ضمن نظام الإحداثيات الجغرافية UTM: تشتمل مجموعة البيانات على 12,637 عينة بمعدّل 5Hz ($dt = 0.2sec$)، بموقع GPS حقيقي ومصفوفة ضجيج قياس R مبنية من السيغما المسجلة لكل عينة، مع الأخذ بعين

الاعتبار تعويض انزياح ذراع التركيب (0.356m شمالاً و0.101m شرقاً) واستبعاد القياسات التي يكون فيها عدد الأقمار أقل من أربعة أو التي تكون فيها سيغما تتجاوز 10m ويتم اتخاذ حل INS مرجعاً للتقييم. يبين الشكل(1) مسار المركبة أثناء جمع البيانات.



الشكل(1): المسار المرجعي لبيانات أوكسفورد

تم اعتماد آلية تقييم موحدة لكل المرشحات: افترضنا خمسة سيناريوهات مختلفة لانقطاع الإشارة (5، 10، 20، 30، 60 ثانية)، يسبقها طور تحضير لمدة 20sec يتبع خلاله المرشح القياس الحقيقي، ولا تقدم فيه أي بيانات INS خلال الانقطاع، وإنما يعمل المرشح بنموذجه. تم إجراء تجربة مونتي–كارلو على 180 تكراراً لكل خلية (15 تحقّق ضجيج قياس معاد توليده ضرب 12 موقع انقطاع موزّعةً على الجزء المتحرك من المسار)، وتم توحيد مصفوفة ضجيج العملية الاسمية $Q_0 = \mathrm{diag}(0.10, 0.10, 0.50, 0.50, 0.004)$ ومصفوفة التهيئة $P_0 = \mathrm{diag}(25, 25, 4, 4, 0.30)$ عبر جميع المرشحات ذات الخمس حالات.

اختيرت Q_0 و P_0 مسبقاً بقيم هندسية، وتم توحيدها لجميع المرشحات منذ البحث المرجعي الأول، ولم تقدَّر من نتائج الانقطاع ولم تضبط عليها. وللتحقّق من معقوليتها تم مقارنتها بإحصاءات حركة مستمدّة من المسار المرجعي (لم تستخدم في ضبط أي مرشّح).

تم اعتماد معاملات المرشح AUKF-CT: $\tau\omega = 2$ ثانية (تم اختيارها من مسح الحساسية في الفقرة ٤−٤)، $\lambda \in [0.2, 5]$، $b = 0.08$، نافذة التجديد $W = 20$ عيّنة (4 ثوانٍ)، عتبة $\chi^2(2, 0.99) = 9.21$.

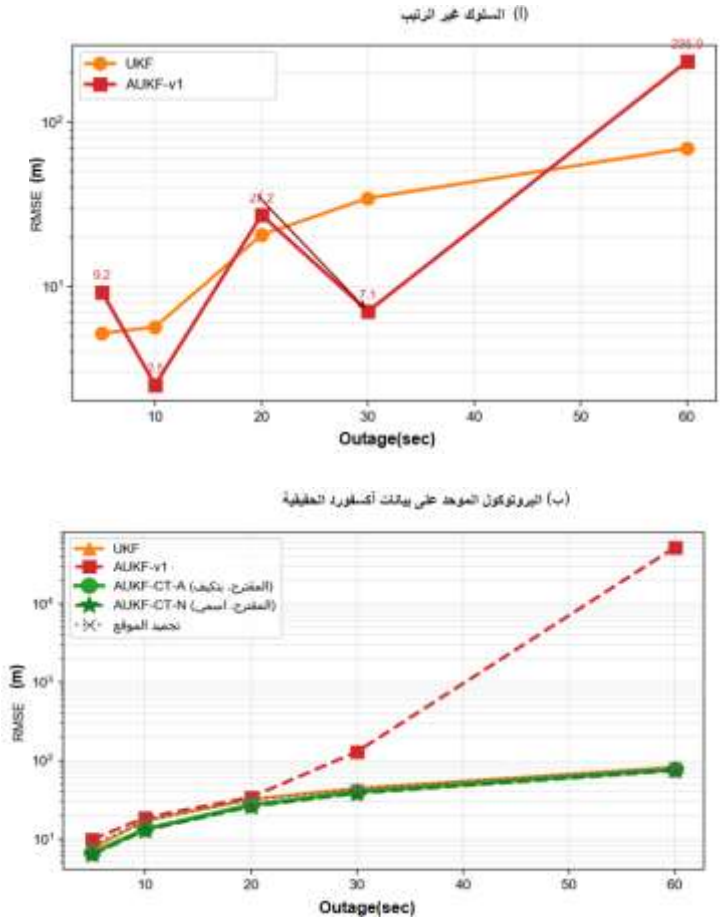
يمثل $\tau\omega$ المدة التي يحتفظ فيها معدّل الدوران بقيمته، وقد وجدنا أنّ دالة الارتباط الذاتي لمعدّل الدوران المحسوب من الحل المرجعي تهبط إلى $1/e$ بعد 2.6 ث في بيانات أوكسفورد، أي إنّ المنعطف النموذجي في القيادة الحضرية يدوم ثانيتين إلى ثلاث. إن سلوك النموذج عند $\tau_\omega = 2$ ث يكون معامل التلاشي لكل خطوة $\rho = e^{-0.2/2} = 0.905$، فيبقى من معدّل الدوران المقدَّر 61% بعد ثانية واحدة و 8% فقط بعد 5 ثوانٍ؛ فيحفظ النموذج المنعطف الجاري لحظة الانقطاع ثم يعود إلى السير المستقيم قبل أن يتراكم خطأ الزاوية. أعطت هذه القيمة لـ $\tau\omega$ أدنى متوسط لخطأ نسبي على الفترات الخمس في مسح الحساسية على أوكسفورد (0.835 مقابل 0.848 عند 1 ث و 0.865 عند 3 ث).

يحدد معامل النسيان $b = 0.08$ سرعة استجابة λ لتغير إحصاءات التجديد، وذاكرته الفعّالة $1/b = 12.5$ خطوة، أي 2.5 ث عند تردد 5 هرتز. هذه القيمة تضمن أن تبقى هذه الذاكرة أقصر من نافذة التجديد ($W = 20$ عينة، 4 ث)، كي لا يزيد التنعيم الأسّي من طول ذاكرة القانون إلى ما بعد النافذة نفسها، وكذلك أن تبقى أقصر من أقصر انقطاع مدروس (5 ث)، فتعكس λ لحظة الانقطاع إحصاءات الثواني الأخيرة قبله.

إضافةً للمقاييس الاعتيادية (المتوسط والوسيط والانحراف المعياري لجذر متوسط مربّع الخطأ داخل نافذة الانقطاع) أضيف ثلاث مقاييس للاستقرار: (أ) التزايد الرتيب (أن يكون RMSE متزايداً بشكلٍ رتيب مع مدة الانقطاع)، (ب) معدّل التباعد (نسبة التكرارات التي تجاوز فيها الخطأ 10^4m)؛ (ج) نسبة النمو RMSE(60sec)/RMSE(5sec) . تم استخدام اختبار Wilcoxon المقترن وذلك للتحقق من دلالة الفروق زوجياً على التكرارات الـ180 نفسها.

النتائج ومناقشتها

تشخيص مشكلة السلوك غير الرتيب



الشكل(2):(أ) السلوك غير الرتيب في المرشح اللامحسوس التكيفي،

(ب) السلوك ضمن البروتوكول الموحّد (n = 180، بيانات أوكسفورد الحقيقية)

يظهر في الشكل (2–أ) السلوك غير الرتيب للمرشح اللامحسوس التكيفي AUKF-v1 باستخدام قيمة أولية عشوائية واحدة للضجيج وبيانات مولدة، بينما يبين الشكل (2–ب) السلوك ضمن البروتوكول الموحّد (n = 180، باستخدام بيانات أوكسفورد الحقيقية) حيث تتباعد صيغة المرشح التكيفي بينما تبقى الصيغة المقترحة رتيبة ومستقرة.

الجدول (2): مقاييس الرتابة والاستقرار عبر أزمنة الانقطاع الخمس

المرشح	سلوك رتيب؟	عدد الانخفاضات	أكبر انخفاض %	RMSE(60sec) /RMSE(5sec)	تباعد % عند 60sec
AUKF-v1	✗	2	−74.1	25.5	—
AUKF-v1 — البروتوكول الموحد (n=180)	✓	0	0	5351.7	57.8
STUKF	✓	0	0	1134.7	25.0
KF / EKF	✓	0	0	16.5	0
UKF / CKF	✓	0	0	10.9	0
PF	✓	0	0	11.9	0
AUKF-SH	✓	0	0	13.1	0
AUKF-RES	✓	0	0	11.4	0
AUKF-CT المقترح	✓	0	0	11.7	0

يُظهر الجدول (2) أنّ السلوك غير الرتيب في المرشح AUKF-v1 يزول عندما يعاد التقييم باستخدام بروتوكول مونتي–كارلو (لأنّ المتوسط عبر 180 تكراراً يستبعد أثر موقع الانقطاع المنفصل)، ولكنّ تبقى المشكلة، حيث تتباعد هذه الصيغة في 57.8% من التكرارات عند 60 ثانية، وتبلغ نسبة النمو 5351.7 قياساً مقارنةً بـ 11.7 للصيغة المقترحة. أي إنّ التأرجح الظاهر كان خللاً حقيقياً في الاستقرار وليس ضجيج عيّنات فحسب. ويشترك المرشح STUKF في تباعد 25.0%، وهو متوقّع لأنّ عامل التلاشي يُضخّم P من غير قياس يخمد هذا التضخم خلال فترة الانقطاع.

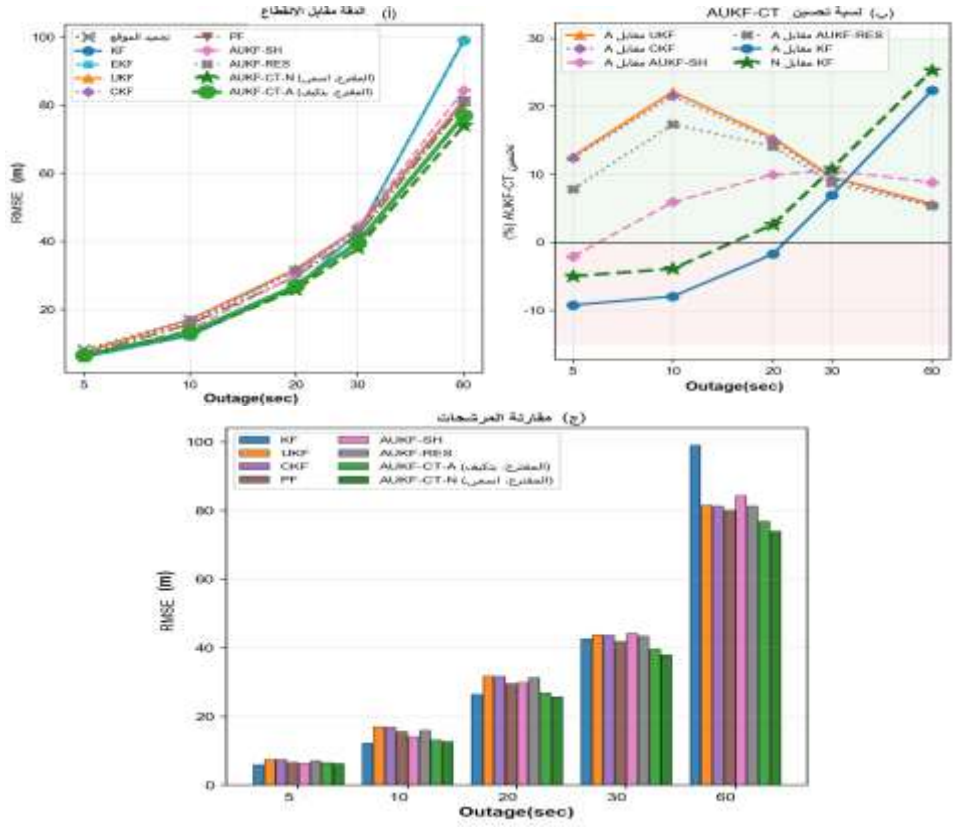
المقارنة الشاملة

يظهر في كلٍ من الشكل(3) والجدول(3) أن التهيئة الاسمية للمرشح التكيفي اللامحسوس AUKF-CT-N تحقق أقل خطأ بين المرشحات التي تم تقييمها في أطول ثلاث سيناريوهات:25.81m عند 20sec (مقابل 26.51m لـ KF و29.68m لـ PF و31.86m للمرشح UKF)، و38.01m عند 30sec (مقابل 41.90m لـ PF و42.61m للمرشح KF)، و74.00m عند 60sec (مقابل 80.19m لـ PF و81.52m لـ UKF و99.06m للمرشح KF). وضمن هذه التهيئة كان المرشح الوحيد الذي ينخفض عند 60 ثانية دون خطّ أساس تجميد الموقع (81.17m) بفارق بلغ 8.8%، أي إن هذه التهيئة جعلت الحساب الاستدلالي نافعاً بدلاً من أن يكون أسوأ من عملية تجميد الموقع. كما أن التهيئة التكيفية AUKF-CT-A حققت أرقاماً مقاربة (26.97 و39.66 و76.91).

الجدول (3): المتوسط و الانحراف معياري لجذر متوسط مربّع الخطأ (m) لكل من المرشحات لكل سيناريو (n = 180 لكل خلية)

المرشح	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث	تباعد (60 ث) %
خط الأساس (تجميد الموقع)	8.22	17.01	31.22	43.27	81.17	—
KF	5.99 ± 3.13	12.28 ± 8.81	26.51 ± 23.13	42.61 ± 36.48	99.06 ± 67.70	0
EKF	5.99 ± 3.13	12.28 ± 8.81	26.51 ± 23.13	42.61 ± 36.48	99.06 ± 67.70	0
UKF	7.49 ± 4.86	17.02 ± 14.37	31.86 ± 30.28	43.87 ± 42.97	81.52 ± 67.27	0
CKF	7.47 ± 4.85	16.89 ± 14.22	31.72 ± 30.24	43.74 ± 42.98	81.33 ± 67.43	0
PF	6.72 ± 4.98	15.64 ± 13.64	29.68 ± 28.12	41.90 ± 40.66	80.19 ± 65.68	0
AUKF-v1	9.78 ± 8.16	18.61 ± 16.68	33.96 ± 31.21	129.26 ± 199.99	5.23e+04تباعد	57.8
AUKF-SH [14]	6.41 ± 5.51	14.09 ± 14.42	29.95 ± 31.93	44.35 ± 44.74	84.33 ± 70.05	0
AUKF-RES [15]	7.10 ± 4.67	16.04 ± 13.41	31.39 ± 30.15	43.45 ± 42.86	81.28 ± 67.32	0
STUKF [16]	46.61 ± 474.57	2429.15 ± 31749.76	8449.53 ± 69144.60	1.95e+04تباعد	5.29e+04تباعد	25.0
AUKF-CT-N(المقترح تهيئة اسمية)	6.29 ± 3.23	12.76 ± 8.65	25.81 ± 21.12	38.01 ± 31.58	74.00 ± 53.87	0
AUKF-CT-A(المقترح بتكيّف)	6.55 ± 3.73	13.26 ± 9.42	26.97 ± 21.80	39.66 ± 32.57	76.91 ± 56.98	0

في نفس الوقت، قلصت التهيئة الاسمية الضريبة التي تدفعها المرشحات اللاخطية خلال الانقطاعات القصيرة، ففي حين كان خطأ UKF على خطأ KF بنسبة 25.0% عند 5sec و38.6% عند 10sec، انخفضت الزيادة مع المرشح AUKF-CT-N إلى 5.0% و3.9% على التوالي. ويُعزى ذلك إلى أنّ تلاشي معدّل الدوران يمنع الحالة الإضافية ω من إدخال تباين تقديري في الفترة التي لم تجمع معلومات كافية، فعند 5 ثوانٍ يكون النموذج قد أهمل معدل الدوران المقدر وعاد إلى السرعة الثابتة.



الشكل(3) : (أ) الدقة مقابل الانقطاع، (ب) نسبة تحسين AUKF-CT ، (ج) مقارنة المرشحات

ملاحظة: حذفت المرشحات STUKF و AUKF-v1 من الرسم لتباعدهما بقيم كبيرة.

بالنسبة للصيغ المرجعية التكيفية فتفاوتت نتائجها، حيث يقترب AUKF-SH [14] من KF خلال فترات الانقطاع القصيرة (6.41m م عند 5sec) ولكنه تراجع خلال الانقطاعات الطويلة (84.33m عند 60sec، أي أنه أسوأ من UKF)، ويبقى AUKF-RES [15] قريباً من المرشح UKF في جميع السيناريوهات وذلك لأنّ نسبته إلى Q_0 تحدّ من تأثيره، بينما يتباعد STUKF عند 60 ثانية، الأمر الذي يؤكد أن التكيف وحده مهما كانت صيغته لا يعالج مشكلة الانقطاع لفترات طويلة، لأنّه معطل خلال تلك الفترة.

التعقيد الحسابي

العتاد الصلب المستخدم لقياس زمن التنفيذ معالج بأربع أنوية Intel Core i5-8250U @ 1.60GHz ، Python 3.14.4 و NumPy 2.4.6.

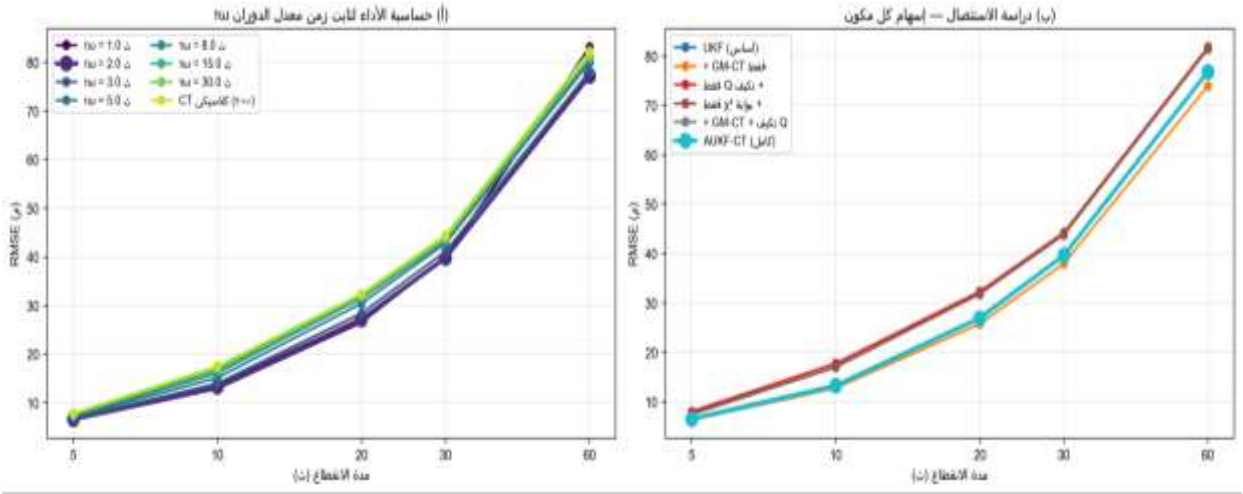
الجدول (4): التعقيد الحسابي وزمن التنفيذ

المرشح	الحالات	تقييمات النموذج/خطوة	كلفة التكيّف الإضافية	الكلفة المسيطرة	زمن الخطوة (µs) تنبّؤ + تحديث	زمن انقطاع 60 ث (ms)	% من ميزانية 200 ms
KF	4	0 (خطي)	—	$O(n^3)$	79 ± 1	2.0	0.04
EKF	5	+ 1 جاكوبيان	—	$O(n^3)$	135 ± 2	17.3	0.07
UKF	5	$2n+1=11$	—	$O(n^3)$	472 ± 8	79.6	0.24
CKF	5	$2n=10$	—	$O(n^3)$	456 ± 7	79.2	0.23
PF	5	$N_p=400$	—	$O(N_p n)$	214 ± 3	33.5	0.11
AUKF-v1، الصيغة الأولى	5	11	$O(m^2W)$	$O(n^3)$	525 ± 9	81.5	0.26
AUKF-SH	5	11	$O(n^3)$	$O(n^3)$	547 ± 99	86.2	0.27
AUKF-RES	5	11	$O(m^2W)$	$O(n^3)$	513 ± 8	79.5	0.26
STUKF	5	11 + إعادة تحديث	$O(n^3)$	$O(n^3)$	624 ± 14	78.5	0.31
AUKF-CT-N، المقترح الاسمي	5	11	ضرب سلمي واحد	$O(n^3)$	474 ± 5	77.1	0.24
AUKF-CT-A، المقترح التكيّفي	5	11	$O(m^2W)$ + قص واحد	$O(n^3)$	534 ± 8	80.7	0.27

تم قياس زمن التنفيذ الفعلي، إضافةً إلى رتبة التعقيد، لكل مرشح على العتاد الصلب نفسه (الجدول 4). تستغرق خطوة AUKF-CT-N 474 ميكروثانية مقابل 472 للمرشح UKF، أي إنّ نموذج GM-CT لا يضيف سوى ضرب سلمي في معادلة انتقال ω وحدّ تباين واحد، وأثره في الزمن ضمن تشتّت القياس. وتضيف التهيئة التكيّفية 13% (قرابة 534 ميكروثانية) لتحديث نافذة التجديد ومسافة ماهالانوبيس. وتبقى كل المرشحات دون 0.31% من ميزانية الخطوة عند 5 هرتز (200 ms)، فالكلفة ليست قيداً في التطبيق الفعلي حتى على معالج حاسوب محمول. والتعقيد المسيطر لـ AUKF-CT هو $O(n^3)$ نفسه لـ UKF، في حين يكلف PF ذو الجسيمات الأربعمئة $O(N_p n)$ وزمناً قدره 214 ميكروثانية.

تحليل الحساسية ودراسة الحذف التدريجي للمكونات

يبين الجدول(5) أن الأداء يتحسن بشكلٍ طردي كلما قل الثابت الزمني حتى القيمة $\tau\omega = 2$ ثانية، ثم يتدهور قليلاً عند $\tau\omega = 1$ ثانية في الانقطاعات الطويلة (83.17 م مقابل 77.25 م) لأن التلاشي السريع يلغي الفائدة لنمذجة الانحناء أصلاً. ومنطقة الأداء الجيد عريضة ($\tau\omega \in [1، 3]$ ثانية)، أي إنّ المرشح ليس حساساً بشكلٍ كبير لهذا المعامل وهي خاصية مرغوبة عملياً. وقيمة $\tau\omega = 2$ ثانية المعتمدة منطقية فيزيائياً كزمن منعطف حضري.



الشكل (4) :(أ) حساسية الأداء لثابت زمن معدل الدوران τω؛ (ب) دراسة الحذف التدريجي للمكوّنات (إسهام كل مكون من مكونات AUKF-CT)

الجدول (5): حساسية الأداء لثابت زمن معدّل الدوران (n = 60) τω لكل خلية)

τω [s]	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث	المتوسط
1	6.47	12.94	26.56	39.99	83.17	33.83
2	6.67	13.37	27.23	39.85	77.25	32.88
3	6.88	13.98	28.42	41.13	78.23	33.73
5	7.20	15.20	30.45	42.83	80.04	35.14
8	7.47	16.15	31.50	43.42	80.71	35.85
15	7.67	16.79	31.89	43.68	81.07	36.22
30	7.74	17.18	32.15	43.94	81.34	36.47
∞	7.85	17.55	32.38	44.49	82.34	36.92

تكشف نتائج دراسة الحذف التدريجي للمكونات من الجدول(6) نتيجةً مهمة: مكون GM-CT هو مصدر الربح الأكبر (74.00 م عند زمن انقطاع 60 ثانية مقابل 81.52 م للمرشح اللامحسوس UKF)، بينما لا يضيف عنصر تكيّف Q شيئاً في هذا الإعداد (بل يكلّف نحو 4%)، ولا تُحدث بوابة χ^2 أثر يذكر منفردةً. يمكن تفسير ذلك في أن مجموعة بيانات أوكسفورد تُعرف مصفوفة ضجيج القياس R معرفةً جيدة كونها مبنية من السيغما المسجلة فعلياً لكل عينة، فلا يجد التكيف ما يصححه، ويبقى أثره الصافي حقن تباينٍ إضافي في λ. كما أن القياسات الشاذة قليلة جداً أو نادرة بعد بوابة الجودة، فلا تجد بوابة χ^2 ما تخمده. يتضح الفرق بشكلٍ جلي عند حقن القياسات بقيم شاذة فنجد أن البوابة تفعلت في 15.8% من التحديثات، وتقلل خطأ GM-CT بنسبة 61.1% عند 5 ث و 25.8% عند 60 ث، وخطأ التهيئة التكيفية بنسبة 58.0% و 11.3% على الترتيب.

الجدول (6): دراسة الحذف التدريجي للمكوّنات - إسهام كلّ مكون على حدى (n = 180 لكل خلية)

التركيب	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث
UKF	7.49	17.02	31.86	43.87	81.52
GM-CT+ فقط	6.29	12.76	25.81	38.01	74.00
+ تكيّف Q فقط	8.02	17.75	32.32	44.27	81.86
+ بوابة χ^2 فقط	7.49	17.04	31.87	43.88	81.52
Q تكيّف + GM-CT +	6.55	13.27	27.00	39.71	76.99
AUKF-CT (كامل)	6.55	13.26	26.97	39.66	76.91

دراسة سيناريوهات قياس مختلفة ومجموعة بيانات أخرى

في التجارب السابقة تم قياس أداء المرشحات في ظرف تُعرف فيه مصفوفة ضجيج القياس R لكل عينة، وعلى مسار واحد في مدينة واحدة. تختبر هذه الفقرة والفقرات التي تليها حدود هذا الظرف في اتجاهين: قياسات تحاكي مستقبلات GPS منخفضة الكلفة على المسار نفسه، ومجموعة بيانات ثانية مستقلة بمستقبِل ومدينتين مختلفتين.

سيناريوهات المستقبل منخفض الكلفة

يختلف المستقبل منخفض الكلفة عن بيانات أوكسفورد في ثلاثة أمور: لا يعطي في الغالب تبايناً موثوقاً لكل عينة، وضجيجه أكبر ومترابط زمنياً بسبب تعدد المسارات والأخطاء الجوية، وتتخلله قفزات ناتجة عن الإشارات غير المرئية مباشرة (NLOS) في الأخاديد الحضرية. تم تعريف سيناريو لكل أمر (الجدول 7)، وثبّتنا معاملاتها قبل تشغيل أي تجربة. في السيناريوهات الثلاثة يستعمل المرشح مصفوفة ثابتة $R_0 = 3^2 I\ [m^2]$، وهي قيمة من رتبة وسيط السيغما المسجلة في أوكسفورد (2.45 m شرقاً و3.69 m شمالاً).

في S1 تكون Ro قريبة من متوسط الضجيج الفعلي، فهو يختبر غياب السيغما وحده. وفي S2 وS3 يفوق الضجيج الفعلي Ro بنحو خمسة أضعاف في الأثر (بحسب وسيط السيغما المسجّلة)، أي أن المرشّح يقلل من أهمية ضجيج القياس، وهي الحالة النموذجية للمستقبل الرخيص في المدينة.

الجدول (7): سيناريوهات القياس الممثلة للمستقبلات منخفضة الكلفة

السيناريو	الخطأ المضاف فعلياً إلى موقع GPS	R في المرشّح
اسمي	أبيض غاوسي بالسيغما المسجّلة لكل عينة (كما في الفقرة ٣–٦)	σ^2 المسجّلة لكل عينة
S1	كالاسمي	R_0 ثابتة
S2	أبيض بضعف السيغما المسجّلة، يضاف إليه ضجيج مترابط زمنياً من نوع غاوس–ماركوف بانحراف 3 m وثابت زمني 30 ث	R_0 ثابتة
S3	S2 مضافاً إليه قفزات NLOS على شكل دفعات: احتمال بدء الدفعة 0.01 لكل خطوة واحتمال استمرارها 0.8، وإزاحة ثابتة خلال الدفعة بين 10 و30 m باتجاه عشوائي (نحو 5% من العينات)	R_0 ثابتة

مجموعة البيانات الثانية

اعتمدنا مجموعة بيانات تحدي تحديد الموقع الدقيق PPC 2024 [34]: ست رحلات حضرية، ثلاث في طوكيو وثلاث في ناغويا، بمستقبِل Septentrio mosaic-X5 بتردد 5 Hz، ومرجع حقيقة أرضية من منظومة Applanix POS LV. لا تحتوي المجموعة على مواقع جاهزة، فقمنا بحساب حلول نقطة مفردة (SPP) من أرصاد RINEX الخام، مع تصحيحات الساعة والأيونوسفير والتروبوسفير، وتم تقدير سيغما كل عينة من مصفوفة تغاير المربعات الصغرى، ثم تم تطبيق بوابة الجودة نفسها ($\sigma \le 10$ m). أخطاء هذه الحلول حقيقية: وسيطها بين 0.6 و2.8 m، والمئين 95 بين 12 و15 m في أربع رحلات من ست بسبب NLOS، والسيغما المقدّرة متحفظة (نسبة الخطأ إلى السيغما أقل من 1 في معظم الرحلات). فهي أقرب إلى سلوك مستقبل يعمل في منطقة حضرية.

تم اختيار نوافذ الانقطاع بقاعدة ثابتة: توقف لا يتجاوز 10% من النافذة، ومسافة لا تقل عن 150 m خلال 60 ث، وسرعة ابتدائية لا تقل عن 2 m/s، وفاصل لا يقل عن 80 ث بين نافذتين. نتجت 52 نافذة (40 في طوكيو و12 في ناغويا): 23 مستقيمة و8 مختلطة و21 فيها انعطاف، وتبدأ 42 منها بانطلاق المركبة من إشارة مرور. اختبرنا وضعين: مواقع SPP كما هي دون أي ضجيج مضاف (وضع «حقيقي»، 52 تشغيلاً لكل خلية)، ومواقع SPP مضافاً إليها ضجيج بالسيغما المقدّرة بعشرين تحققاً (وضع «بروتوكول»، 1040 تشغيلاً لكل خلية). يلخص الجدول (8) الفرق بين مجموعتي البيانات.

الجدول (8): مقارنة مجموعتي البيانات

الخاصية	أوكسفورد	PPC (طوكيو وناغويا)
المواقع	مخرج المستقبِل مع سيغما مسجّلة لكل عينة	حلول SPP من RINEX مع سيغما مقدّرة
المرجع	حل INS	Applanix POS LV
نوافذ الانقطاع	12 موقعاً موزعاً بانتظام على المسار	52 نافذة بقاعدة اختيار ثابتة
التشغيلات لكل خلية	180	1040 (بروتوكول) و52 (حقيقي)
وسيط السرعة أثناء الحركة	5.8 m/s	5.9 إلى 10.2 m/s
نسبة زمن التوقف على المسار	%34	%37 إلى %58
زمن ارتباط معدّل الدوران (1/e)	2.8 ث	2.4 إلى 3.0 ث
الانحراف المعياري لمعدّل الدوران	0.12 rad/s	0.05 إلى 0.09 rad/s

تطبيق قانون التكيّف على ضجيج القياس

قانون التكيّف (10)–(11) يعدّل Q ويفترض ضمنياً أن R صحيحة، فينسب كل فائض في تباين التجديد إلى ضجيج العملية. والتجديد وحده لا يسمح بالفصل بين زيادة في Q وزيادة في R إلا بفرضية إضافية [31]. حين يكون مصدر عدم اليقين هو المستقبِل، كما في S1 إلى S3، فالمعامل الذي يجب تكييفه هو R [32]. لذلك اختبرنا إلى جانب التهيئة التكيّفية AUKF-CT-A صيغةً ثالثة نسمّيها AUKF-CT-R، تطبّق القانون المرجعي غير التراكمي نفسه على R مع إبقاء $Q = Q_0$:

$$\hat{\mu}_k = \mathrm{clip}\left(\frac{\mathrm{tr}\hat{C}_\varepsilon - \mathrm{tr}(P_{zz} - R_k)}{\mathrm{tr}R_0}, \mu_{lo}, \mu_{hi}\right) \quad (14)$$

$$\mu_k = (1-b)\mu_{k-1} + b\hat{\mu}_k, R_k = \mu_k R_0 \quad (15)$$

حيث R_0 مصفوفة ضجيج القياس الاسمية (السيغما المسجّلة إن توفرت، أو القيمة الثابتة)، و$P_{zz} - R_k$ تغاير التجديد الناتج عن النموذج وحده، وحدّا μ هما 0.2 و20، وb وW كما في الفقرة ٣–٦. والتجديدات التي ترفضها بوابة χ^2 (المعادلتان 12 و13) تدخل نافذة التقدير بعد قصّها إلى نصف قطر البوابة، أي بعد ضربها في الجذر التربيعي للنسبة $9.21/d^2$، فلا تضخّم القفزات المعزولة μ، ولا ينغلق المرشّح على قياساته إن بدأ بقيمة R_0 أصغر من الحقيقة. ويُجمَّد μ أثناء الانقطاع كما يُجمَّد λ. الصيغ الثلاث تشترك في نموذج GM-CT وفي البوابة: AUKF-CT-N دون تكيّف، وAUKF-CT-A بتكيّف Q، وAUKF-CT-R بتكيّف R.

الإجراء الإحصائي

أُجريت تجارب أوكسفورد ببروتوكول الفقرة ٣–٦ نفسه: 15 تحققاً لضجيج القياس في 12 موقع انقطاع، وأزمنة انقطاع 5 و10 و20 و30 و60 ث بعد طور تحضير مدته 20 ث، والمصفوفتان Q_0 وP_0 نفساهما. ولّدنا تحققات الضجيج لكل زوج (تحقق، موقع) من بذرة ثابتة، فتختلف القيم الاسمية في الجداول الجديدة عن الجدول (3) بأقل

من 0.5% (GM-CT عند 60 ث: 73.72 مقابل 74.00 m)، والمقارنات داخل كل جدول جديد مقترنة على التكرارات نفسها. نختبر دلالة الفروق باختبار Wilcoxon المقترن مع تصحيح Holm على مجموعة الاختبارات كلها، ونعطي لنسبة التحسّن فترة ثقة 95% بالمعاينة العنقودية حسب موقع الانقطاع (أوكسفورد، 12 عنقوداً) أو حسب النافذة (PPC، 52 عنقوداً)، لأن التكرارات في الموقع الواحد غير مستقلة.

مصدر التحسّن: نموذج الحركة والتكيّف

يُظهر الجدول (6) أن التحسن في الظرف الاسمي مصدره نموذج GM-CT: يخفض الخطأ عند 60 ث من 81.52 إلى 74.00 m، بينما لا يحسّن تكيّف Q وحده شيئاً (81.86 m)، ولا تغيّر بوابة χ^2 وحدها الخطأ (81.52 m). لهذه النتيجة سبب بنيوي. التجديد غير معرَّف أثناء الانقطاع، فكل قوانين التكيّف معطّلة خلاله، والتنبؤ يحكمه نموذج الحركة وحده. ولا يؤثر التكيّف في خطأ الانقطاع إلا عبر الحالة ومصفوفة التغاير لحظة بدايته. وفي بيانات أوكسفورد تُعرف R لكل عينة، فتكون الحالة عند بداية الانقطاع جيدة أصلاً، ولا يبقى للتكيّف ما يصحّحه، بل يضيف تبايناً صغيراً إلى تقدير λ.

بناءً على ذلك، ينبغي أن يتغيّر ترتيب المكوّنات حين تكون R خاطئة. أعدنا دراسة الحذف التدريجي في السيناريو S3 (الجدول 9).

الجدول (9): دراسة الحذف التدريجي في السيناريو S3، متوسط RMSE (m)، n = 180 لكل خلية

التركيب	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث
UKF (الأساس)	11.91	19.92	34.51	46.80	83.70
GM-CT وحده (AUKF-CT-N)	12.49	21.67	38.55	52.83	90.07
تكيّف R وحده	11.32	20.51	34.85	46.60	83.78
GM-CT مع بوابة χ^2	11.39	19.88	35.84	49.65	86.69
GM-CT مع تكيّف Q وبوابة (AUKF-CT-A)	14.62	23.01	37.43	49.45	84.95
GM-CT مع تكيّف R وبوابة (AUKF-CT-R)	**9.90**	**17.42**	**32.13**	**45.28**	**81.83**

ينقلب الترتيب كما هو متوقع. GM-CT وحده يفقد ميزته على UKF في كل الفترات (90.07 مقابل 83.70 m عند 60 ث)، والفرق بينهما غير دال بعد تصحيح Holm. والبوابة تحسّن قليلاً (8.8% عند 5 ث). أما تكيّف R فيعيد للتركيبة ميزتها: يخفض الخطأ مقارنةً بـ GM-CT وحده بنسبة 20.7% [9.5، 29.9] عند 5 ث و9.1% [1.0، 20.5] عند 60 ث (Holm $p < 10^{-4}$). وتكيّف R دون GM-CT لا يحسّن شيئاً (83.78 m). فالمكوّنان متكاملان: GM-CT يحدد جودة التنبؤ داخل الانقطاع، والتكيّف يحدد جودة الحالة التي يبدأ منها التنبؤ. ولا تظهر قيمة الثاني إلا حين تكون معلومات الضجيج غير صحيحة، وهو ما تم تفصيله الفقرة ٤–٨.

آلية عمل نموذج GM-CT ومجال فعاليته

حدّ خطأ الاتجاه وخطأ الموقع

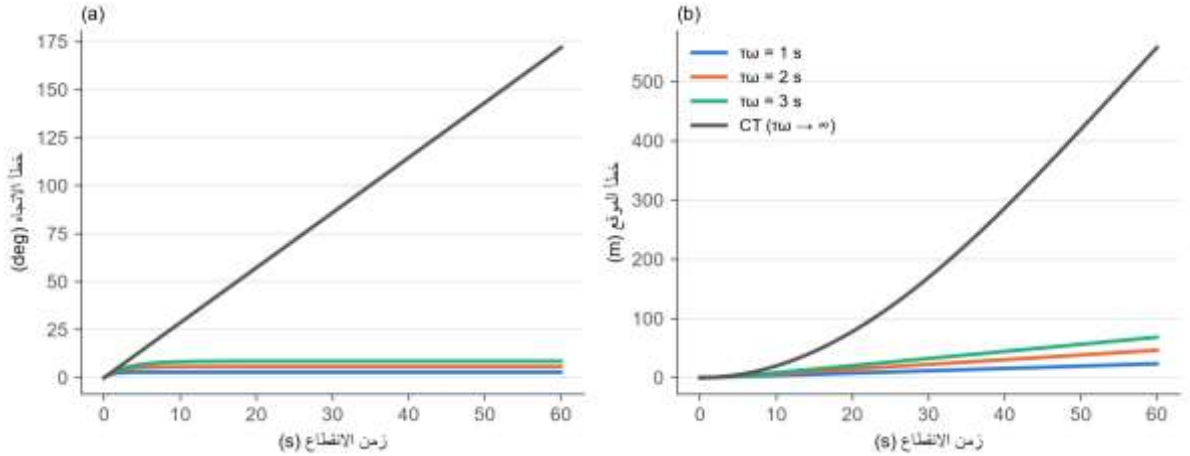
ليكن δω خطأ تقدير معدّل الدوران لحظة بداية الانقطاع. في نموذج المنعطف المنسّق التقليدي يبقى هذا الخطأ ثابتاً، فينمو خطأ الاتجاه خطياً دون حد بالمقدار δω·T بعد زمن T. وفي GM-CT يتلاشى الخطأ بالمعامل ρ في المعادلة (9)، فيكون خطأ الاتجاه:

$$\delta\psi(T) = \delta\omega\tau_\omega(1 - e^{-T/\tau_\omega}) \le \delta\omega\tau_\omega \tag{16}$$

وبتقريب الزاوية الصغيرة، يكون الخطأ العرضي في الموقع لمركبة سرعتها v:

$$e_\perp(T) \approx v\delta\omega\tau_\omega[T - \tau_\omega(1 - e^{-T/\tau_\omega})] \tag{17}$$

وحين يصبح τω لا نهائياً تؤول المعادلة (17) إلى $\frac{1}{2} \cdot v \cdot \delta\omega \cdot T^2$، أي النمو التربيعي في نموذج CT. فـ GM-CT يحوّل نمو الخطأ العرضي من تربيعي إلى خطي، ويجعل خطأ الاتجاه محدوداً بالقيمة δω·τω مهما طال الانقطاع. يوضّح الشكل (5) ذلك لمركبة بسرعة 8 m/s وخطأ تقدير 0.05 rad/s: عند 60 ث يبلغ خطأ الاتجاه في CT نحو 172° وخطأ الموقع 557 m (بالتكامل الدقيق دون تقريب)، بينما لا يتجاوز في GM-CT بثابت τω = 2 ث قيمة 5.7° للاتجاه و46 m للموقع. ومن المعادلة (16) يتحدد المعنى الفيزيائي لـ τω: هو أطول زمن يثق فيه النموذج بآخر معدّل دوران مقدّر.



الشكل (5): (a) خطأ الاتجاه و(b) خطأ الموقع الناتجان عن خطأ ثابت $\delta\omega = 0.05$ rad/s في تقدير معدّل الدوران لحظة بدء الانقطاع، لمركبة بسرعة 8 m/s، في نموذج CT وفي GM-CT بثلاث قيم لـ $\tau\omega$

انكماش متوسط نقاط سيغما

يفسّر عاملٌ ثانٍ لماذا يقترب UKF من خط أساس تجميد الموقع عند 60 ث في الجدول (3) (81.52 مقابل 81.17 m)، ولماذا تكرّر ذلك على بيانات PPC (283.5 مقابل 284.1 m). عدم اليقين في ω ينشر نقاط سيغما على اتجاهات سرعة متباعدة، ويتّسع هذا الانتشار مع الزمن في نموذج CT، فيتقلّص طول متوسط شعاع السرعة الموزون ويتوقف الموقع المتنبأ به عن التقدم. أي أن UKF بنموذج CT يجمّد الموقع ضمنياً في الانقطاع الطويل. في GM-CT تتلاشى قيم ω في كل النقاط نحو الصفر، فيبقى انتشار الاتجاهات محدوداً بالمقدار $\sigma\omega \cdot \tau\omega$، ويحافظ المتوسط على طوله. لهذا تبقى ميزة GM-CT قائمة حتى حين يكون تقدير ω غير منحاز.

أين يربح النموذج وأين يخسر

صنّفنا نوافذ الانقطاع حسب التغيّر التراكمي في الاتجاه المرجعي خلال 60 ث: مستقيمة (أقل من 45°)، وانعطاف (90° فأكثر)، ومختلطة بينهما (الجدول 10).

الجدول (10): متوسط RMSE (m) عند 60 ث حسب صنف النافذة، في الظرف الاسمي لأوكسفورد ووضع البروتوكول لـ PPC

الصنف	أوكسفورد: عدد المواقع	أوكسفورد: UKF	أوكسفورد: GM-CT	التغيّر	PPC: عدد النوافذ	PPC: UKF	PPC: GM-CT	التغيّر
مستقيمة	6	65.4	48.7	−25.5%	23	309.9	277.7	−10.4%
مختلطة	1	207.0	163.2	−21.2%	8	298.1	267.4	−10.3%
انعطاف	5	74.6	85.9	+15.1%	21	249.0	242.0	−2.8%

الربح الأكبر في المقاطع المستقيمة: −25.5% في أوكسفورد و−10.4% في PPC. وهذا ما تتوقعه المعادلة (16): الوظيفة الأولى للنموذج منع المنعطفات الوهمية التي يولّدها خطأ تقدير ω. والكلفة تظهر حين يدوم

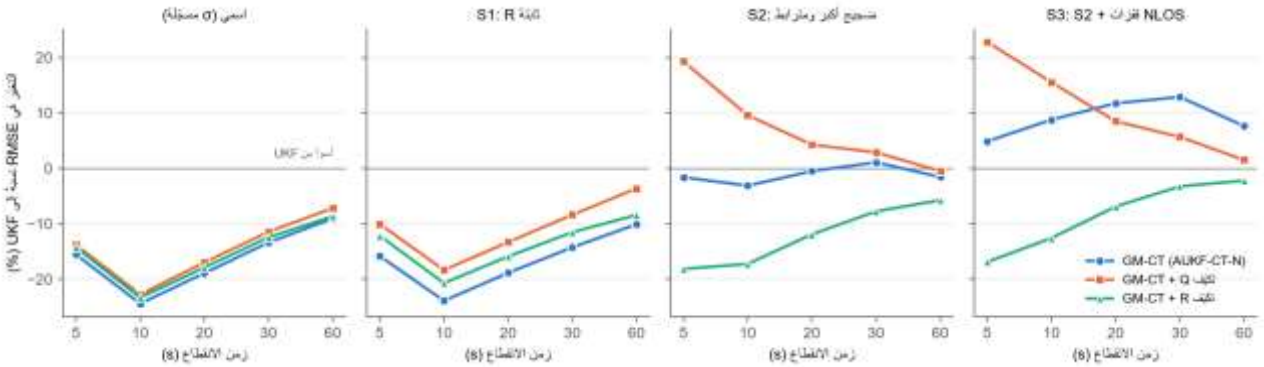
المنعطف الحقيقي أطول كثيراً من $\tau\omega$، لأن النموذج يقطع الانحناء بعد بضع ثوانٍ؛ ففي نوافذ الانعطاف في أوكسفورد، ومنها نافذة تبلغ فيها زاوية الدوران التراكمية 449° لدوّارات متتالية، ارتفع الخطأ من 74.6 إلى 85.9 m، بينما بقي GM-CT أفضل قليلاً من UKF في منعطفات PPC الأقصر. هذا التوازن بين منع الانعطاف الوهمي والإبقاء على الانعطاف الحقيقي يحكمه $\tau\omega$.

التحقق على بيانات مستقلة

عدد مواقع الانقطاع في أوكسفورد (12) صغير أمام تباين الخطأ بين المواقع، ففترة الثقة العنقودية لتحسّن GM-CT على UKF عند 60 ث فيها واسعة (9.1% [−22.4، 28.6]). أما على بيانات PPC، بمعاملات أوكسفورد نفسها دون أي إعادة ضبط، فيخفض GM-CT الخطأ عند 60 ث بنسبة 7.7% [4.0، 12.0] في وضع البروتوكول، و7.8% [4.2، 12.2] بقياسات SPP الحقيقية، وهو أفضل من UKF في 71% و87% من التشغيلات على الترتيب ($p < 10^{-4}$). فترتا الثقة لا تتضمنان الصفر، فأثر النموذج ثابت على مستقبِل ومدينتين مختلفتين، وهو مستقل عن ضبط المعاملات على أوكسفورد.

التكيّف حين لا تتوفر معلومات ضجيج موثوقة

بيّنت الفقرتان السابقتان أن GM-CT مصدر التحسّن حين تُعرف R. تختبر هذه الفقرة الظرف المعاكس، حين لا يملك المرشّح معلومات ضجيج موثوقة، وتقارن فيه الصيغ الثلاث: دون تكيّف (AUKF-CT-N)، وبتكيّف Q (AUKF-CT-A)، وبتكيّف R (AUKF-CT-R). يعرض الشكل (6) التغيّر في الخطأ مقارنةً بـ UKF، ويعرض الجدول (11) آلية كل صيغة ودلالة الفروق.



الشكل (6): التغيّر النسبي في RMSE مقارنةً بـ UKF (القيمة السالبة أفضل من UKF) للصيغ الثلاث في الظرف الاسمي وفي السيناريوهات S1 إلى S3، n = 180 لكل نقطة

الجدول (11): آلية التكيّف ونسبة التحسّن مقارنةً بالتهيئة الاسمية AUKF-CT-N، مع فترة الثقة العنقودية 95% (القيمة الموجبة تحسّن)

السيناريو	وسيط λ عند بداية الانقطاع (تكيّف Q)	وسيط μ عند بداية الانقطاع (تكيّف R)	تكيّف Q مقابل الاسمية عند 5 ث	تكيّف R مقابل الاسمية عند 5 ث	تكيّف R مقابل الاسمية عند 60 ث
اسمي	0.97	0.97	-2.1% [-6.3, +3.2]	-1.5% [-3.3, +0.1]	-0.4% [-1.0, +0.1]
S1	1.00	0.92	-6.8% [-15.8, +4.6]	-4.3% [-10.9, +0.1]	-1.9% [-5.0, -0.2]
S2	4.79	3.73	-21.2% [-25.9, -16.5]	+16.8% [+9.0, +23.7]	+4.2% [+0.2, +9.9]
S3	4.84	4.50	-17.1% [-22.5, -12.3]	+20.7% [+9.5, +29.9]	+9.1% [+1.0, +20.5]

يكشف الجدول (11) سبب اختلاف الصيغتين. حين يستهين المرشّح بضجيج القياس (S2 وS3) يرى تجديداً أكبر من المتوقع. تكيّف Q ينسب هذا الفائض إلى العملية، فيرتفع λ حتى حده الأعلى (الوسيط 4.84 من 5)، ويفقد المرشّح ثقته بنموذجه ويتبع القياسات المشوّشة قبل الانقطاع، فيزيد الخطأ في الانقطاعات القصيرة بنحو 21% في S2. تكيّف R ينسب الفائض إلى القياس، فيقدّر معامل تضخيم وسيطه 4.50، وهو قريب من نسبة عدم المطابقة الفعلية في هذا السيناريو (نحو 5)؛ وفي الظرف الاسمي وS1 يبقى μ قريباً من الواحد كما يجب.

والنتيجة أن تكيّف R يخفض الخطأ في S2 وS3 في كل المدد، بين 4.2% و20.7%، وفترات الثقة العنقودية كلها لا تتضمن الصفر، وهو أفضل من التهيئة الاسمية في 66% إلى 77% من التكرارات المقترنة. وكلفته حين تكون R معروفة صغيرة، بين 0.4% و1.5% في الظرف الاسمي، وبين 1.9% و4.3% في S1 حيث R_0 قريبة من الحقيقة. فالتكيّف هو المكوّن الذي يحفظ فائدة GM-CT في البيئات التي لا تملك معلومات ضجيج موثوقة، بشرط أن يُطبَّق على المصفوفة الصحيحة. وحين تكون R خاطئة يصبح التكيّف شرطاً لعمل النموذج، لأن الحساب الاستدلالي يستقرئ سرعةً ومعدّل دوران تم تقديرهما قبل الانقطاع بأوزان قياس خاطئة.

الأداء مع مستقبلات GPS منخفضة الكلفة

يقارن الجدول (12) المرشّح المقترح بصيغه الثلاث مع المرشحات المرجعية في السيناريوهات الأربعة.

الجدول (12): متوسط RMSE (m) في الظرف الاسمي وفي سيناريوهات المستقبِل منخفض الكلفة، n = 180 لكل خلية

المرشّح	السيناريو	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث	تباعد % (60 ث)
KF	اسمي	6.05	12.48	27.06	43.41	100.70	0.0
UKF	اسمي	7.43	16.88	31.64	43.55	81.06	0.0
AUKF-SH	اسمي	6.79	14.84	31.32	46.06	86.82	0.0
AUKF-CT-N	اسمي	6.28	12.76	25.66	37.72	73.72	0.0
AUKF-CT-A	اسمي	6.41	13.04	26.26	38.55	75.23	0.0
AUKF-CT-R	**اسمي**	**6.37**	**12.94**	**25.98**	**38.12**	**74.05**	**0.0**
KF	S1	5.87	12.23	26.52	42.47	99.03	0.0
UKF	S1	7.33	16.63	31.54	43.50	80.98	0.0
AUKF-SH	S1	7.73	16.51	31.38	43.46	81.37	0.0
AUKF-CT-N	S1	6.17	12.66	25.60	37.30	72.80	0.0
AUKF-CT-A	S1	6.59	13.58	27.34	39.85	78.02	0.0
AUKF-CT-R	**S1**	**6.44**	**13.19**	**26.53**	**38.48**	**74.16**	**0.0**
KF	S2	10.50	18.77	36.95	56.24	120.88	0.0
UKF	S2	11.15	19.69	34.43	46.18	83.05	0.0
AUKF-SH	S2	14.51	22.89	513.85	3235.63	تباعد	15.6
AUKF-CT-N	S2	10.97	19.07	34.25	46.68	81.72	0.0
AUKF-CT-A	S2	13.30	21.57	35.90	47.51	82.63	0.0
AUKF-CT-R	**S2**	**9.13**	**16.29**	**30.33**	**42.60**	**78.27**	**0.0**
KF	S3	12.05	21.70	43.04	66.21	139.70	0.0
UKF	S3	11.91	19.92	34.51	46.80	83.70	0.0
AUKF-SH	S3	14.55	23.84	372.75	2986.16	تباعد	20.0
AUKF-CT-N	S3	12.49	21.67	38.55	52.83	90.07	0.0
AUKF-CT-A	S3	14.62	23.01	37.43	49.45	84.95	0.0
AUKF-CT-R	**S3**	**9.90**	**17.42**	**32.13**	**45.28**	**81.83**	**0.0**

تظهر ثلاث نتائج. أولاً، غياب السيغما وحده (S1) لا يضر حين تكون القيمة الثابتة واقعية، والتهيئة الاسمية تبقى الأفضل فيه (72.80 m عند 60 ث). ثانياً، حين يكون الضجيج أكبر من المفترض ومترابطاً زمنياً (S2) ومعه قفزات NLOS (S3)، تصبح AUKF-CT-R أفضل صيغ المرشّح المقترح في كل المدد، وأقل خطأً من UKF وKF في كل المدد، وإن كان الفرق عن UKF في الانقطاعات الطويلة غير دال إحصائياً (81.83 مقابل 83.70 m). ثالثاً، صيغة Sage–Husa المرجعية تتباعد في 15.6% و20.0% من التكرارات في S2 وS3، بينما لم تتباعد أيٌّ من صيغ المرشّح المقترح في أي تكرار. التكيّف غير المقيّد يصبح خطراً في الظرف الذي وُضع له بالضبط، والتقييد المرجعي في المعادلتين (11) و(15) هو ما يمنع ذلك. أما KF الخطي فينافس في الفترات القصيرة ويصبح الأسوأ عند 60 ث في كل السيناريوهات (139.70 m في S3)، لأن تقدير السرعة فيه يتبع ضجيج القياس دون نموذج يقيّده.

التحقق بقياسات حقيقية. السيناريوهات S1 إلى S3 محاكاة فوق مسار حقيقي. قياسات SPP في PPC أخطاؤها حقيقية، ونضيف إليها حالة المستقبِل الذي لا يعطي سيغما (R_0 ثابتة). يعرض الجدول (13) النتائج.

الجدول (13): بيانات PPC، متوسط RMSE (m)؛ 52 نافذة، وفي وضع «SPP + ضجيج» 52 نافذة × 20 تحققاً، ومعدّل التباعد صفر في كل الخلايا

المرشّح	R في المرشّح	القياسات	5 ث	10 ث	20 ث	30 ث	60 ث
UKF	السيغما المقدّرة	SPP حقيقية	14.0	34.7	83.6	134.5	283.5
AUKF-CT-N	السيغما المقدّرة	SPP حقيقية	11.4	27.4	69.8	116.6	261.3
AUKF-CT-A	السيغما المقدّرة	SPP حقيقية	11.8	27.6	69.1	114.3	251.2
AUKF-CT-R	السيغما المقدّرة	SPP حقيقية	11.0	26.9	69.1	115.9	260.8
UKF	R_0 ثابتة	SPP حقيقية	13.6	33.7	82.1	133.1	282.6
AUKF-CT-N	R_0 ثابتة	SPP حقيقية	11.4	27.4	69.7	116.6	261.8
AUKF-CT-A	R_0 ثابتة	SPP حقيقية	11.6	27.2	68.3	113.3	249.1
AUKF-CT-R	R_0 ثابتة	SPP حقيقية	11.3	27.3	69.6	116.6	261.7
UKF	السيغما المقدّرة	SPP + ضجيج	14.1	34.3	83.2	134.3	283.5
AUKF-CT-N	السيغما المقدّرة	SPP + ضجيج	12.5	28.5	70.7	117.4	261.7
AUKF-CT-A	السيغما المقدّرة	SPP + ضجيج	12.7	28.6	70.9	117.5	259.6
AUKF-CT-R	السيغما المقدّرة	SPP + ضجيج	12.5	28.3	70.5	117.2	261.2
UKF	R_0 ثابتة	SPP + ضجيج	14.3	33.9	82.4	133.5	282.9
AUKF-CT-N	R_0 ثابتة	SPP + ضجيج	13.3	29.3	71.5	118.3	262.5
AUKF-CT-A	R_0 ثابتة	SPP + ضجيج	13.9	29.9	73.1	121.1	266.3
AUKF-CT-R	R_0 ثابتة	SPP + ضجيج	12.6	28.5	70.7	117.4	261.2

ميزة GM-CT على UKF ثابتة في الأوضاع الأربعة (7.2% إلى 7.8% عند 60 ث، وفترات الثقة لا تتضمن الصفر)، ولم يتباعد أي تشغيل. أما صيغتا التكيّف فأثرهما أصغر هنا مما في أوكسفورد S2 وS3، واتجاهه مختلف. مع قياسات SPP الحقيقية يتفوّق تكيّف Q عند 60 ث بنسبة 3.9% [1.5، 6.7] حين تُستعمل السيغما المقدّرة و4.8% [2.2، 8.0] حين تُستعمل R_0 الثابتة، بينما يقترب تكيّف R من التهيئة الاسمية في الانقطاع الطويل ويتفوّق في القصير (4.8% [1.8، 7.7] عند 5 ث في وضع البروتوكول مع R_0 ثابتة). التفسير أن السيغما المقدّرة لحلول SPP متحفظة، فالخطأ الفعلي أصغر منها في أغلب الرحلات، ويرى التكيّف تجديداً أصغر من المتوقع، فيخفض Q ويصبح تقدير السرعة أنعم، وهذا ما يفيد الاستقراء الطويل. وفي أوكسفورد S2 وS3 كان الضجيج أكبر من المفترض، فكان التصحيح الصحيح تكبير R.

الخلاصة العلمية لهذه الفقرة أن قيمة التكيّف تظهر حين تكون إحصاءات الضجيج خاطئة، وأن اتجاه الخطأ يحدد المعامل الواجب تكييفه: تكبير R حين يُستهان بالضجيج، وهي الحالة الغالبة في المستقبِل الرخيص الذي يعمل

بقيمة ثابتة مأخوذة من مواصفاته، وتصغير Q حين يُبالغ في تقديره. ويتطلب التقدير المشترك لـ Q وR قيوداً إضافية، كالتقدير البايزي بالتقريب التباييني [33].

الاستنتاجات والتوصيات:

- ينتج السلوك غير الرتيب للصيغة التكيّفية AUKF-v1 عن ثلاثة أسباب هي قانون التكيّف التراكمي للضرب الذي يصل بـ Q للإشباع، وتثبيت معدل الدوران طول فترة الانقطاع، وتصميم تجريبي بموقع وقيمة أولية عشوائية واحدة للضجيج. وبقي الخلل قائماً حتى بعد إزالة السبب التجريبي: تباعد بنسبة 57.8% عند 60 ثانية.
- كلتا صيغتي التهيئة المقترحة رتيبتان بمعدّل تباعدٍ صفري، وتحقّق التهيئة الاسمية AUKF-CT-N أقل خطأ بين جميع المرشحات عند انقطاعات 20 و30 و60 ثانية (25.81 و38.01 و74.00 م) على التوالي.
- كما أن التهيئة الاسمية هي التهيئة الوحيدة التي تنخفض عند 60sec عن أساس تجميد الموقع (74.00m مقابل 81.17m ، نسبة 8.8%)، الأمر الذي يعني أن الحساب الاستدلالي مجدي في هذا المدى بدلاً من كونه أسوأ من تجميد الموقع كما هو الحال في المرشح الخطي KF (99.06m).
- تقلص انخفاض الأداء خلال فترة الانقطاع القصير الحاصل في المرشحات اللاخطية.
- الصيغ التكيفية المرجعية التي اقترحها الباحثون لا تحلّ مشكلة الانقطاع لفترة طويلة، حيث يتراجع AUKF-SH إلى 84.33m عند 60sec (أسوأ من المرشح اللامحسوس UKF)، ويبقى AUKF-RES مقارباً للمرشح UKF، ويتباعد STUKF بنسبة 25.0% من التكرارات.
- إن مصدر التحسن في الظرف الاسمي هو نموذج GM-CT، لأن التكيّف معطل أثناء الانقطاع ولا يجد ما يصححه حين تكون R معروفة. يحد النموذج خطأ الاتجاه الناتج عن خطأ تقدير معدّل الدوران بالقيمة $\delta\omega\cdot\tau\omega$، ويمنع انكماش متوسط نقاط سيغما في UKF. ربحه الأكبر في المقاطع المستقيمة، وكلفته في المنعطفات الأطول كثيراً من $\tau\omega$.
- خفّض GM-CT الخطأ عند 60 ث بنسبة 7.7% [4.0، 12.0] مقارنةً بـ UKF، وذلك على بيانات مستقلة من طوكيو وناغويا، بالمعاملات نفسها.
- حين لا يعطي المستقبِل تبايناً موثوقاً ويكون ضجيجه أكبر من المفترض، يفقد GM-CT وحده ميزته، ويستعيدها تطبيق قانون التكيّف المرجعي على R (المعادلتان 14 و15)، فينخفض الخطأ بين 4% و21% بدلالة إحصائية في كل فترات الإنقطاع. أما تطبيقه على Q فيزيد الخطأ في الانقطاعات القصيرة في هذا

الظرف. فالتكيّف هو المكوّن الذي يحفظ فائدة النموذج في البيئات التي لا تملك معلومات ضجيج موثوقة، والمعامل الواجب تكييفه يتبع اتجاه الخطأ في إحصاءات الضجيج.

يستخلص من البحث مجموعة من التوصيات:

- اعتماد نموذج المنعطف المنسق ذي معدل دوران غاوس–ماركوف (GM-CT) كبديل افتراضي عن النموذج التقليدي في عملية تجسير انقطاعات GNSS في المركبات البرية، وذلك كونه تعميم للنموذج بتعقيد حسابي معدوم عملياً.
- تقييم الصيغ التكيفية للمرشحات بمقاييس الاستقرار (الرتابة ومعدّل التباعد ونسبة النمو) إلى جانب RMSE ، حيث أن الاكتفاء بـ RMSE يخفي تباعد أكثر من نصف التكرارات.
- تجميد قوانين التكيف حال غياب القياس، وعدم السماح بتضخم مصفوفة التغاير من إحصاءات قديمة، الخلل الذي يفسّر التباعد في المرشح STUKF.
- دمج المرشح المقترح AUKF-CT في خوارزمية تبديل مرتبطة بزمن الانقطاع:KF في الانقطاعات القصيرة جداً (10 ≤ ثوانٍ)، وAUKF-CT بعدها، وتقدير عتبة التبديل لحظياً من خلال تباين ω المقدر قبيل الانقطاع.

المراجع:

1- GREWAL, M. S., ANDREWS, A. P., BARTONE, C. G. 2020 - Global Navigation Satellite Systems, Inertial Navigation, and Integration. John Wiley & Sons, 4th ed., Hoboken NJ, USA.

2- NOURELDIN, A., KARAMAT, T. B., GEORGY, J. 2013 - Fundamentals of Inertial Navigation, Satellite-based Positioning and Their Integration. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, Germany.

3- CHAMBERS, A., SCHERER, S., YODER, L., JAIN, S., NUSKE, S., SINGH, S. 2014 - Robust Multi-Sensor Fusion for Micro Aerial Vehicle Navigation in GPS-Degraded/Denied Environments, American Control Conference (ACC), 1892-1899.

4- RAOL, J. R. 2009 - Multi-Sensor Data Fusion with MATLAB. CRC Press, Boca Raton FL, USA.

5- KALMAN, R. E. 1960 - A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, Vol. 82(1), 35-45.

6- SIMON, D. 2006 - Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches. Wiley-Interscience, Hoboken NJ, USA, 526p.

7- JULIER, S. J., UHLMANN, J. K. 2004 - Unscented Filtering and Nonlinear Estimation, Proceedings of the IEEE, Vol. 92(3), 401-422.

8- WAN, E. A., VAN DER MERWE, R. 2000 - The Unscented Kalman Filter for Nonlinear Estimation, IEEE Adaptive Systems for Signal Processing, Communications, and Control Symposium (AS-SPCC), 153-158.

9- ARASARATNAM, I., HAYKIN, S. 2009 - Cubature Kalman Filters, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54(6), 1254-1269.

10- GORDON, N. J., SALMOND, D. J., SMITH, A. F. M. 1993 - Novel Approach to Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian State Estimation, IEE Proceedings F, Vol. 140(2), 107-113.

11- ARULAMPALAM, M. S., MASKELL, S., GORDON, N., CLAPP, T. 2002 - A Tutorial on Particle Filters for Online Nonlinear/Non-Gaussian Bayesian Tracking, IEEE Transactions on Signal Processing, Vol. 50(2), 174-188.

12- ST-PIERRE, M., GINGRAS, D. 2004 - Comparison Between the Unscented Kalman Filter and the Extended Kalman Filter for the Position Estimation Module of an Integrated Navigation Information System, IEEE Intelligent Vehicles Symposium, 831-835, DOI 10.1109/IVS.2004.1336492.

13- JANE, H. 2018 - Comparison of EKF, EKF2 and UKF in a Loosely Coupled INS/GPS Integration. M.Sc. Thesis, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 92p.

14- RHUDY, M., GU, Y., GROSS, J., GURURAJAN, S., NAPOLITANO, M. R. 2013 - Sensitivity Analysis of Extended and Unscented Kalman Filters for Attitude Estimation, Journal of Aerospace Information Systems, Vol. 10(3), 131-143, DOI 10.2514/1.54899.

15- KONATOWSKI, S., KANIEWSKI, P., MATUSZEWSKI, J. 2016 - Comparison of Estimation Accuracy of EKF, UKF and PF Filters, Annual of Navigation, Vol. 23, 69-87, DOI 10.1515/aon-2016-0005.

16- ZHANG, M., LI, K., HU, B., MENG, C. 2019 - Comparison of Kalman Filters for Inertial Integrated Navigation, Sensors, Vol. 19(6), 1426, DOI 10.3390/s19061426.

17- MOLLAEI, M., SHAFIEIRAD, M., MORADI, E. 2025 - Enhanced Navigation Accuracy Using Nonlinear Kalman Filters in INS/GPS Integration, Majlesi Journal of Electrical Engineering, DOI 10.57647/j.mjee.2025.16846.

18- SI, J., NIU, Y., WANG, B. 2025 - A Review of Nonlinear Filtering Algorithms in Integrated Navigation Systems, Sensors, Vol. 25(20), 6462, DOI 10.3390/s25206462.

19- SAGE, A. P., HUSA, G. W. 1969 - Adaptive Filtering with Unknown Prior Statistics, Proceedings of the Joint Automatic Control Conference, 760-769.

20- POURTAKDOUST, S. H., GHANBARPOUR ASL, H. 2007 - An Adaptive Unscented Kalman Filter for Quaternion-based Orientation Estimation in Low-cost AHRS, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 79(5), 485-493, DOI 10.1108/00022660710780614.

21- LE, H. X., MATUNAGA, S. 2014 - A Residual Based Adaptive Unscented Kalman Filter for Fault Recovery in Attitude Determination System of Microsatellites, Acta Astronautica, Vol. 105(1), 30-39, DOI 10.1016/j.actaastro.2014.08.020.

22- ZHOU, D. H., FRANK, P. M. 1996 - Strong Tracking Filtering of Nonlinear Time-varying Stochastic Systems with Coloured Noise: Application to Parameter Estimation and Empirical Robustness Analysis, International Journal of Control, Vol. 65(2), 295-307.

23- ZHANG, J., FENG, K., LI, J., ZHANG, C., WEI, X. 2025 - An Adaptive Unscented Kalman Filter Integrated Navigation Method Based on the Maximum Versoria Criterion for INS/GNSS Systems, Sensors, Vol. 25(11), 3483, DOI 10.3390/s25113483.

24- ZHANG, S., YANG, Z., CAI, C. 2026 - EKF- and ESKF-Based GNSS/INS Integrated Navigation Under the Interaction Multi-Filter Framework, Machines, Vol. 14(2), 217, DOI 10.3390/machines14020217.

25- CAHYADI, M. N., ASFIHANI, T., MARDIYANTO, R., ERFIANTI, R. 2022 - Loosely Coupled GNSS and IMU Integration for Accurate i-Boat Horizontal Navigation, International Journal of Geoinformatics, Vol. 18(3), 111-122, DOI 10.52939/ijg.v18i3.2233.

26- ALABA, S. Y. 2024 - GPS-IMU Sensor Fusion for Reliable Autonomous Vehicle Position Estimation, arXiv preprint arXiv:2405.08119.

27- SINGER, R. A. 1970 - Estimating Optimal Tracking Filter Performance for Manned Maneuvering Targets, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. AES-6(4), 473-483.

28- LI, X. R., JILKOV, V. P. 2003 - Survey of Maneuvering Target Tracking. Part I: Dynamic Models, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39(4), 1333-1364.

29- MADDERN, W., PASCOE, G., LINEGAR, C., NEWMAN, P. 2017 - 1 Year, 1000 km: The Oxford RobotCar Dataset, The International Journal of Robotics Research, Vol. 36(1), 3-15.

30- MADDERN, W., PASCOE, G., GADD, M., BARNES, D., YEOMANS, B., NEWMAN, P. 2020 - Real-time Kinematic Ground Truth for the Oxford RobotCar Dataset, arXiv preprint arXiv:2002.10152.

31- MEHRA, R. K. 1970 - On the Identification of Variances and Adaptive Kalman Filtering, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 15(2), 175-184.

32- MOHAMED, A. H., SCHWARZ, K. P. 1999 - Adaptive Kalman Filtering for INS/GPS, Journal of Geodesy, Vol. 73(4), 193-203.

33- SÄRKKÄ, S., NUMMENMAA, A. 2009 - Recursive Noise Adaptive Kalman Filtering by Variational Bayesian Approximations, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. 54(3), 596-600.

34- SUZUKI, T. 2024 - Precise Positioning Challenge (PPC) Dataset, https://github.com/taroz/PPC-Dataset.