

تطوير وحدة قياس عطالة (IMU) لملاحقة حركة قدم الإنسان باستخدام حساسات العطالة MEMS

د. فائق عراج*

زينه وقاف**

(تاريخ الإيداع 4 / 3 / 2021. قُبِلَ للنشر في 20 / 6 / 2021)

□ ملخص □

لا يزال تحليل ودراسة حركة قدم الإنسان مجالاً للبحث والتطوير بما يخدم عدة أهداف مثل بناء مجسمات الروبوتات وآلية تحريكها والتحكم بها وأيضاً تعقب رجال الإطفاء وعمال المناجم بسبب تعقيد البيئة الداخلية فقد يؤدي ضياع الإشارة إلى فشل في تحديد المواقع. وأهم التطبيقات هي في الطب عن بعد أي مراقبة مرضى الزهايمر من السقوط. يتناول هذا البحث التعريف بالأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية MEMS وحساسات العطالة المستخدمة لملاحقة حركة قدم الإنسان ودراسة وحدة قياس العطالة IMU ونظام الملاحة بالقصور الذاتي INS. قمنا بإجراء عملية نمذجة لحركة قدم الإنسان عندما يسير بحركة مستقيمة وبحالة صعود أو نزول الدرج. حيث تم استخدام المرشح المتكامل غير الخطي مع إجراء تحسين بسيط لتصحيح بيانات مقياس الجيروسكوب من خلال متحكم PI وحساب تصحيح الدوران في إطار الجسم اعتماداً على كل من مصفوفة الدوران وبيانات مقياس التسارع وبيانات مقياس المغناطيسية. ووضعت النماذج الرياضية المستخدمة بشكل تفصيلي مع خوارزمية تُظهر مراحل العمل. وقمنا باستخدام خوارزمية تحديث السرعة الصفريّة مع طريقة مبسطة لإزالة انجراف السرعة التكامليّة. وأخيراً استخدمنا شبكة LSTM وهي إحدى أنواع الشبكات العصبونية لملاحقة موقع قدم الإنسان عندما يسير بحركة مستقيمة على أرض مسطحة وقد أعطت نتائج مقاربة.

الكلمات المفتاحية: حساسات العطالة، وحدة قياس العطالة، المرشح المتكامل غير الخطي، نظام مرجع الموقف والعنوان.

* أستاذ مساعد، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.
** طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم هندسة الاتصالات والالكترونيات، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة تشرين، اللاذقية، سورية.

Development of IMU (Inertial Measurement Unit) for human foot motion tracking using MEMS inertial sensors

Dr. Faek Arraj*
Zeina Wakkaf**

(Received 4 / 3 / 2021. Accepted 20 / 6 / 2021)

□ ABSTRACT □

The analysis of human foot movement is still a field for research and development to serve several goals, such as building models of robots, the mechanism of moving them and controlling them, as well as tracking of firefighters and miners. Due to the complexity of the indoor environment, signal occlusion problems could lead to the failure of certain positioning methods. The most important applications are in telemedicine, i.e. monitoring Alzheimer's patients from falling. This research deals with introducing the micro-electromechanical systems MEMS and inertial sensors that used to track human foot movement and studying the inertial measurement unit IMU and the inertial navigation system INS. We have modeled the human foot movement when walking in a straight way and going up or down stairs. Where a non-linear complementary filter was used with a slight improvement to correct the gyroscope Through pi controller and calculation of rotation correction within the body frame depending on both the rotation matrix, accelerometer data and magnetometer data. The mathematical models used are elaborated. In detail with an algorithm that show the work stages. We used a zero-velocity update ZVU with a simplified method of removing integrative velocity drift. . Finally, we used LSTM, a type of neuron network, to track the position of a human's foot when it was moving straight on flat ground and gave close results.

Keywords: Inertial sensors, Inertial Measurement Unit, Attitude And Heading Reference System, Non-linear complementary filter.

* Associate Professor, Department of communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**Master student, Department of communication and Electronics, Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

مع تطور وثيرة الحياة اليومية أصبح الإنسان يعيش عصر السرعة عصر الكمبيوتر والحركة ومن هنا كانت الحاجة للتفكير بإنتاج الكمبيوتر المحمول والهاتف النقال والأجهزة الطبية المحمولة وغيرها، إذ لم تعد الصناعة حالياً تقتصر على تصنيع القطع والآلات الضخمة ذات الأبعاد الكبيرة وإنما تعدت ذلك لتشمل القطع والآلات ذات الأبعاد الصغيرة من مرتبة الميكرومتر. حيث تم التوجه نحو تصنيع قطع وآلات بأبعاد من رتبة الميكرومتر لما لذلك من دور في تخفيض استهلاك الطاقة وزيادة في أداء وحساسية الأجهزة بالإضافة إلى دوره في تخفيض تكاليف الإنتاج، ونظراً لذلك ظهرت ما تُدعى بأنظمة ال MEMS (الأنظمة الكهروميكانيكية الميكروية).

إنّ السبب الرئيس وراء زيادة نشاطات البحث في مجال حساسات العطالة المستخدمة في ملاحقة حركات قدم الإنسان في السنوات الأخيرة هو زيادة نوعية و جودة تقنيات أنظمة ال MEMS. إذ إنها أصبحت أقل تكلفة وجودة وذلك نتيجةً للطلب المستمر من سوق إلكترونيات المستهلك من أجل صنع أجهزة أصغر وأفضل [1].

تمتلك حساسات العطالة عدة مشاكل ناتجة عن أخطاء متراكمة خلال فترة من الزمن، أيضاً من عيوبها هي الميل للانحراف بعد فترة زمنية معينة (دقائق معدودة بحالة الأنواع التجارية الرخيصة). لذلك نلجأ في أغلب الأحيان إلى دمج عدة أنواع من حساسات العطالة. حيث لكل نوع منها نقاط قوة ونقاط ضعف، والفكرة وراء دمج الحساسات هي الاستفادة من ميزات أحد أنواع الحساسات من أجل التغلب على مساوئ حساس آخر أو تعويض النقص. على سبيل المثال: تُدمج الحساسات المغناطيسية (magnetometer) مع حساسات الجيروسكوب (gyroscope) للتغلب على انحراف مكاملة الجيروسكوب [2].

من الطرق المستخدمة في دمج الحساسات هي استخدام Kalman filter وهي خوارزمية تسمح بدمج بيانات الحساسات مع بعضها، تعمل هذه الخوارزمية على شكل مراحل متعاقبة من عيوب هذه الخوارزمية هي الاستهلاك العالي للعمليات الحسابية وصعوبة التنفيذ مما دفع الكثير من الباحثين إلى استخدام Complementary filter ذو الاستهلاك المتوسط للعمليات الحسابية [3].

إن نظام قياس العطالة IMU System المتوفر في الأسواق منخفض التكلفة لكنه يفتقر للدقة ونحن نحتاج إلى نظام عالي الدقة في تطبيقات أنظمة الملاحقة من أجل معالجة مشاكل الحساسات [1]، لذلك كان التركيز على تطوير IMU منخفض التكلفة واستخدامه في أنظمة ملاحقة حركة قدم الإنسان.

أهمية البحث وأهدافه:

استخدمت حساسات العطالة في أنظمة IMUs لملاحقة حركات جسم الإنسان، ملاحقة موقع واتجاه أحد أعضاء جسم الإنسان، وحتى تتمكن من إنجاز ذلك بفعالية علينا معالجة المشاكل التي تعاني منها الحساسات والتقليل من الأخطاء وبالتالي بناء نظام فعال مع مراعاة أن يكون النظام اقتصادياً متوفراً لعامة الناس وبالتالي محاولة تقليل تكلفة المعالجة لبيانات الحساسات وزيادة الاستقرار.

لذلك كانت أهداف البحث:

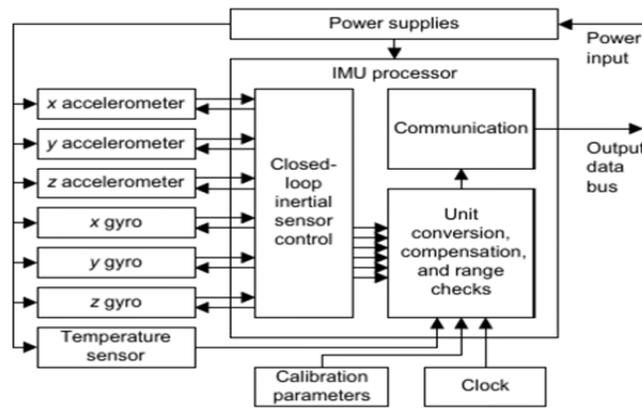
✓ التخلص من مشاكل وأخطاء حساسات العطالة اعتماداً على المرشحات وتقنيات معالجة إشارة ذكية .

✓ تطوير وحدة قياس عطالة MEMS IMU فعالة ومنخفضة التكلفة بحيث نستطيع استخدامها في نظام ملاحقة حركة قدم إنسان فعال من ناحية التكلفة.

طرائق البحث ومواده:

وحدة قياس العطالة (IMU Inertial measurement unit) :

تتكون وحدة قياس العطالة IMU من عدة مراحل كما هو موضح في المخطط الصندوقي المبين في الشكل (1). وهي عبارة عن جهاز مع حساسات accelerometer والجيروسكوب gyroscope والتي تستخدم من أجل قياس التسارعات الخطية والسرعات الزاوية على التوالي. غالبية ال IMU تمتلك أيضاً حساسات magnetometer لتساهم في إضافة الاتجاه المغناطيسي [1].



الشكل (1) مخطط صندوقي لوحدة قياس العطالة IMU.

وحدة قياس العطالة IMU تعطينا الموقع والاتجاه الأولي للجسم. تُستخدم حساسات العطالة في التطبيقات المتقدمة لملاحقة حركات جسم الانسان خلال الزمن و لها أيضاً تطبيقات على نطاق واسع مثل التجهيزات الطبية والملاحقة والواقع الافتراضي [1].

الكميات الفيزيائية (السرعة الزاوية ، التسارع الخطي) يمكن مكاملتها عبر الزمن للحصول على تقديرات المواقع والاتجاهات للجسم. طبعاً ذلك يتطلب خوارزميات دمج حساسات قوية للتخلص من أخطاء التكامل للحساسات.

مزايا IMU التي تعتمد على تقنية MEMS [1] :

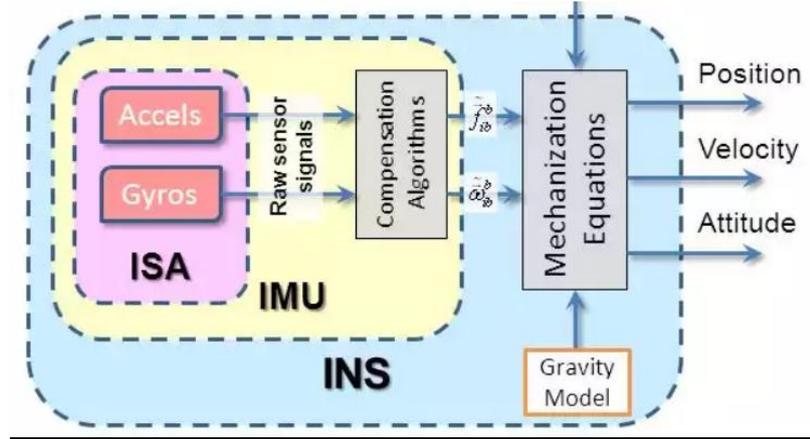
1. فعال من حيث التكلفة ولدينا توفر واسع للحساسات.
2. معدل التقطيع (التردد) عالي.
3. يستطيع العمل في الظلام الكلي (بعكس الأنظمة الضوئية) وأيضاً إمكانية العمل في البيئات الطليقة (غير المقيدة).
4. سهولة الاستخدام عند تنصيب نظام الملاحقة.
5. اقتصادي حيث أن حساسات العطالة تعتمد على تقنية ال MEMS منخفضة التكلفة.
6. الوزن الخفيف والنظام المتقل واستهلاك الطاقة المنخفض.
7. لا يوجد زمن استجابة ملازم مرتبط بتقنية التحسس وكل التأخيرات الزمنية الحاصلة بسبب نقل البيانات.

8. لا يوجد متطلبات (منبع مشع الكترومغناطيسي)، حيث إنّ الأجهزة الضوئية أو السمعية تتطلب انبعثات من مصدر من أجل ملاحقة الأجسام.

9. حساسية ممتازة يعتبر ذلك مفيداً في مجال التطبيقات الطبية.

نظام الملاحة بالقصور الذاتي INS :

يتكون نظام الملاحة بالقصور الذاتي Inertial Navigation System أو اختصاراً INS من عدة مراحل كما هو موضح في المخطط الصندوقي المبين في الشكل (2) ، وهو عبارة عن نظام ملاحة يستخدم الحاسوب، حساسات العطالة (accelerometer, gyroscope) ، لكي يعطينا باستمرار موقع وسرعة واتجاه الجسم المتحرك [1].

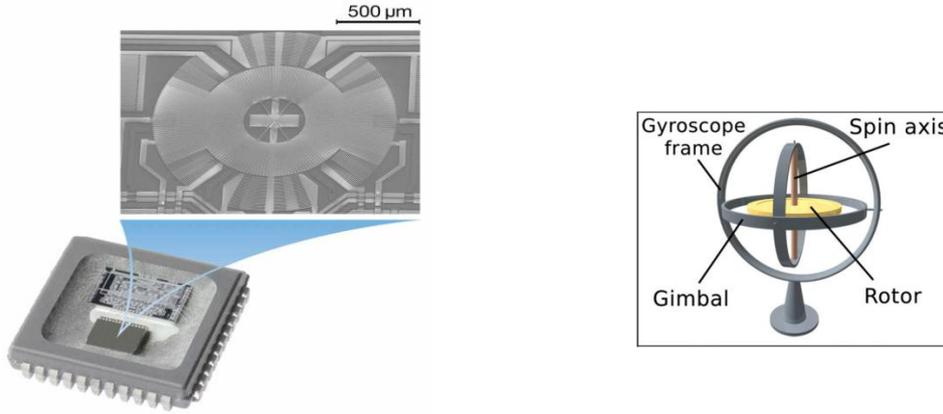


الشكل (2) مخطط صندوقي لنظام INS.

لعل أهم ميزة لنظام INS هي كونه *passive system* ، فهو أولاً: لا يعتمد على أي مصدر خارجي (كما هو الحال مع GNSS الذي يعتمد على الأقمار الصناعية) ، وثانياً : لا يصدر أي إشارة خارجية (كما هو الحال مع أنظمة الملاحة بالرادار والتي تصدر أمواج كهرومغناطيسية). يعتمد ها النظام في آلية عمله على قانون نيوتن الثاني ، تحديداً $f = ma$ [4].

حساس الجيروسكوب Gyroscope:

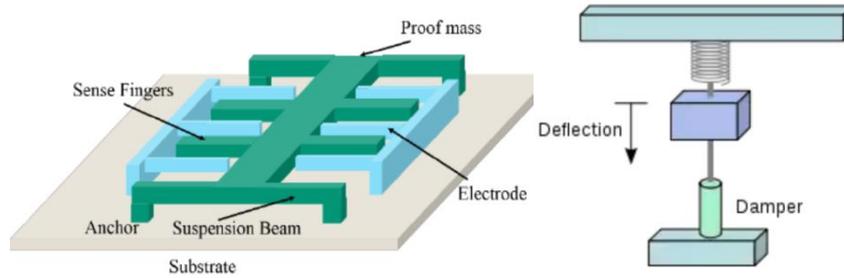
يتكون حساس الجيروسكوب من محور الدوران، إطار الجيروسكوب، والدوار كما هو مبين بالشكل (3). إن الجيروسكوب الأصلي هو قطعة ميكانيكية تعتمد على مبدأ حركة قرص نو محور حر التوجيه. تم تحويل هذا المبدأ في القرن العشرين إلى دارة إلكترونية دقيقة معقدة لتؤدي نفس الغرض الميكانيكي وهو الإحساس بالدوران. تتكون الدارة ببساطة من كتلة دائرية مرنة ومقسمة إلى شرائح تتخللها شرائح مكثفات وعند دوران الجهاز تتحرك تلك الدائرة وتغير من كثافة الشرائح بدرجات متفاوتة فيحسب المعالج التغيير بدقة وينفذ الأمر المرغوب [5]. بالطبع أدى ذلك الجهاز القديم إلى احداث ثورة تقنية عظيمة لتصبح مكون رئيسي لمعظم الأجهزة الحديثة.



الشكل (3) حساس الجيروسكوب

حساس التسارع الخطي Accelerometer :

يتكون مقياس التسارع أحادي المحور من المكونات التالية كما هو مبين بالشكل (4).



الشكل (4) حساس Accelerometer.

مبدأ عمل مقياس التسارع:

يوجد كتلة صغيرة متصلة بنابض مثبت على لوح، ترتبط الكتلة بدورها بلوح آخر. عند تعرض الكتلة لتسارع، تشعر الكتلة بقوة حسب قانون نيوتن الثاني $f = ma$ ، هذه القوة تؤدي إلى انضغاط أو امتداد النابض، وحسب قانون هوك $f = kx$ فإن النابض سيؤدي قوة استعادة متناسبة مع كمية القوة التي تعرض لها (حيث k هو ثابت النابض و x هي الإزاحة) [2].

النتيجة هي تغير المسافة بين اللوحين إما ازدياداً أو نقصاناً. إن كان اللوحان متصلان بتيار كهربائي بحيث يعملان كمكثف، فإن تغير المسافة بينهما يؤدي إلى تغير سعة المكثف وهذا يترجم إلى تغير في الجهد الكهربائي الذي يمكن قياسه [2].

من المهم معرفة أن الخطأ في حالة الجيروسكوب يتراكم مع مرور الوقت، وبالتالي لا يمكن الاعتماد على الجيروسكوب بعد مرور عدة دقائق مثلاً، لكننا نستطيع الاعتماد عليه لحظياً. العكس صحيح في حالة حساس التسارع الخطي: لحظياً نسبة الخطأ فيه كبيرة، لكن نسبة الخطأ هذه متوسطها عبر الزمن قريب من الصفر أي أن نموذج الخطأ للحساسين مختلف تماماً وهذا يجعل الاعتماد على أحدهما دون الآخر غير مجدي بينما الاعتماد عليهما معاً مفيد لأن كلا منهما يكمل الآخر [5].

حساس المغناطيسية **Magnetometer**:

حساسات MEMS Magnetometer قيد الدراسة منذ أكثر من عقد (عشر سنوات) حيث تم اكتشاف نطاق واسع من الخيارات: مبادئ فيزيائية متعددة، مواد مغناطيسية مضمنة، اعتماد مبدأ قوة لورنتز، تضخيم بارامترية، إضافة إلى تقنيات تحسس مختلفة منها ضوئية وأخرى سعوية وغيرها.

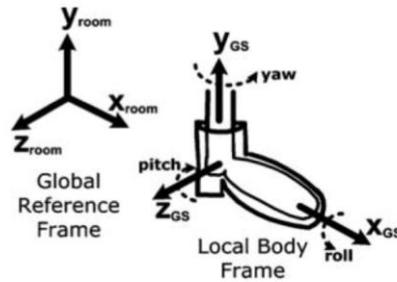
إن حساس Magnetometer عبارة عن جهاز متدرج صغير مصنع بتقنية ال MEMS يستخدم لاكتشاف وقياس الحقول المغناطيسية وذلك من خلال اكتشاف تأثيرات قوة لورنتز، يقاس التغير في الجهد أو تردد الرنين كهربائياً أو من خلال إزاحة ميكانيكية أو يقاس ضوئياً، يمكن استخدام الحساس كبوصلية مغناطيسية مصغرة [6].

خوارزمية **AHRS**:

تُعتبر وحدات MEMS IMUs عرضة لأنواع مختلفة من الأخطاء والضجيج، مقاييس التسارع حساسة للغاية لتغيرات السلوك (المواقف) وقوى التأثير بينما الجيروسكوبات حساسة لتغيرات الحرارة وتعاني من انحياز بطيء التغير وبالمختصر تتميز مقاييس التسارع بخصائص ديناميكية ضعيفة والجيروسكوبات لها ميزات ثابتة ضعيفة. ومن هنا كانت الحاجة إلى خوارزمية AHRS (نظام مرجع الموقف والعنوان) من أجل دمج البيانات من مختلف الحساسات والتغلب على عيوب كل منها والحصول على نظام عالي الموثوقية من أجل إعطاء أفضل موقع للوضع الفعلي للحساس [6]. تُعتبر خوارزمية AHRS أساس تقدير الموقع لهذا السبب يجب إزالة الجاذبية تماماً من مقياس التسارع من أجل الحصول على التسارع الخطي. وعندها يمكننا إجراء التكامل دون قلق والحصول على المعلومات المطلوبة الصحيحة.

تمثيل الدوران:

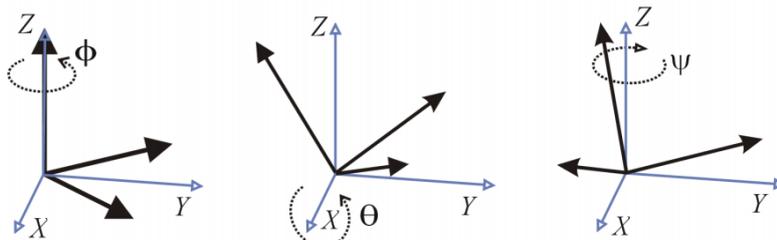
بما أنه يتم النقاط البيانات بواسطة الحساس، ويتم تمثيل البيانات من خلال إطار الحساس. وبما أننا نحتاج معرفة موقع الحساس بالنسبة للإطار الأرضي وبالتالي يجب تدوير البيانات إلى إطار الأرض باستخدام المعادلات المناسبة. ويُعتبر تمثيل الدوران هام جداً نظراً لأن خوارزمية AHRS تعتمد كثيراً عليه.



Reference frames

الشكل (5) الإطارات المرجعية

يوضح الشكل (5) نظامي الإحداثيات المستخدمين : الإطار الأرضي المرجعي وإطار الحساس.



الشكل (6) زوايا أويلر

زوايا أويلر الموضحة في الشكل (6) هي عبارة عن ثلاثة زوايا تقابل تسلسل ثلاث دورات أساسية على التوالي أي الدوران بالتناوب حول المحاور نظام الاحداثيات، تتضمن زوايا أويلر الصحيحة Z-X-Z (أي زاوية للدوران حول المحور Z ثم زاوية للدوران حول المحور X ثم زاوية للدوران حول المحور Z مرة أخرى)، الشكل (6) يمثل حالة Z-X-Z والزوايا ϕ, θ, ψ هي زوايا الدوران حول المحاور Z و X و ψ على التوالي. بتحويل زوايا أويلر إلى مصفوفة الدوران المقابلة [7]:

$$R_{zax}(\phi, \theta, \psi) = R_z(\psi)R_x(\theta)R_z(\phi)$$

$$\text{تحويل} = \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \theta & -\sin \psi \cos \theta + \cos \psi \sin \theta \sin \phi & \sin \psi \sin \theta \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi \\ \sin \psi \cos \theta & \cos \psi \cos \theta + \sin \psi \sin \theta \sin \phi & -\cos \psi \sin \theta \sin \phi + \sin \psi \sin \theta \cos \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta \sin \phi & \cos \theta \cos \phi \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} & r_{xz} \\ r_{yx} & r_{yy} & r_{yz} \\ r_{zx} & r_{zy} & r_{zz} \end{pmatrix}$$

مصفوفة الدوران إلى زوايا أويلر:

يمكن حساب زوايا أويلر باستخدام المعادلات [7]:

$$\theta = -\arctan \left(\frac{R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[3,1]}{\sqrt{1 - R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[3,1]^2}} \right) \dots\dots\dots$$

$$\phi = \arctan 2(R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[3,2], R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[3,3]) \quad (2)$$

$$\psi = \arctan 2(R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[2,1], R_{zax}(\phi, \theta, \psi)[1,1])$$

الرباعيات :

يتألف العدد العقدي من رقم حقيقي و متجه تخيلي واحد ويتم إضافة متجهين تخيليين للحصول على الرباعي، إذ يتم تمثيل الرباعي بأربعة عناصر حسب المعادلة الآتية:

$$q = q_0 + iq_1 + jq_2 + kq_3 \quad (3)$$

حيث q_0, q_1, q_2, q_3 هي أرقام حقيقية، و i, j, k هي متجهات وحدة تخيلي متعامدة [1]. في التطبيقات العملية يتم تضمين الترميز التخلي واستخدم المعاملات الأربعة فقط لتحديد الرباعي كما في المعادلة :

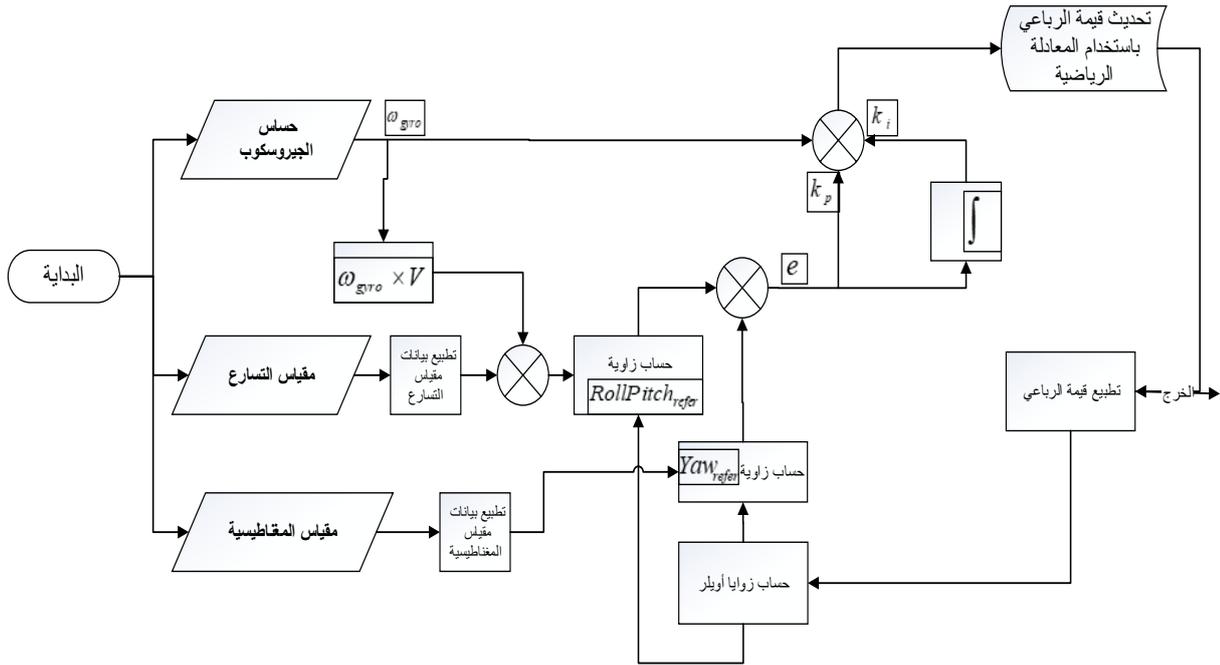
$$q = [q_0, q_1, q_2, q_3] \quad (4)$$

بالنظر إلى الرباعي $q = [q_0, q_1, q_2, q_3]$ فإن مصفوفة الدوران المقابلة هي [10]:

$$R = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2q_1q_2 - 2q_0q_3 & 2q_1q_3 + 2q_0q_2 \\ 2q_1q_2 + 2q_0q_3 & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2q_2q_3 - 2q_0q_1 \\ 2q_1q_3 - 2q_0q_2 & 2q_2q_3 + 2q_0q_1 & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

المرشح المتكامل غير الخطي المحسن:

يتكون المرشح المتكامل غير الخطي المحسن من عدة مراحل كما هو موضح بالمخطط الصندوقي المبين في الشكل (7).



الشكل (7) مخطط صندوقي للمرشح المتكامل غير الخطي المحسن

يمكننا أن نلخص الخوارزمية بالخطوات التالية:

الخطوة الأولى: التهيئة: تبدأ الخوارزمية عندما نعين القيمة الأولية للرباعي $q = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$ حيث تعني هذه القيمة عدم وجود دوران في هذا الزمن ويتم تحديد تردد أخذ العينات ب $1/256$.

الخطوة الثانية: إدخال البيانات حيث يتم إدخال مجموعة من بيانات مقياس التسارع وبيانات الجيروسكوب وبيانات مقياس المغناطيسية ثم يتم تطبيع كل من بيانات مقياس التسارع وبيانات مقياس المغناطيسية (أي نقوم بتقسيم قراءة الحساس على أحد المحاور الإحداثية على طولية المتجه المقابل_الجزر التربيعي لمجموع مربعات العناصر_ مثلاً

باستخدام المعادلات التالية: $a_x = \frac{accl_x}{|accl|}$

$$m_x = \frac{mm_x}{\sqrt{mm_x^2 + mm_y^2 + mm_z^2}}$$

$$m_y = \frac{mm_y}{\sqrt{mm_x^2 + mm_y^2 + mm_z^2}} \quad (6)$$

$$m_z = \frac{mm_z}{\sqrt{mm_x^2 + mm_y^2 + mm_z^2}}$$

$$a_x = \frac{accl_x}{\sqrt{accl_x^2 + accl_y^2 + accl_z^2}}$$

$$a_y = \frac{accl_y}{\sqrt{accl_x^2 + accl_y^2 + accl_z^2}} \quad (7)$$

$$a_z = \frac{accl_z}{\sqrt{accl_x^2 + accl_y^2 + accl_z^2}}$$

الخطوة الرابعة: يتم تطبيق الخطأ كتغذية عكسية مع معاملين قابلين للتعديل وهما الريح النسبي والريح التكاملي والتي تشكل ككل متحكم PI وذلك من أجل تصحيح بيانات الجيروسكوب حيث اعتمدت القيم التالية لكل من الريح التكاملي

: proportional gain $k_p = 2$ والريح النسبي $k_i = 0$

$$\begin{aligned}\omega_x &= \omega x + k_p e_x + k_i \int e_x dt \\ \omega_y &= \omega y + k_p e_y + k_i \int e_y dt \\ \omega_z &= \omega z + k_p e_z + k_i \int e_z dt\end{aligned}\quad (15)$$

الخطوة الخامسة: تحديث قيمة الريح النسبي وقيم زوايا أولير .

يتم تحديث قيمة الريح النسبي باستخدام المعادلة الرياضية التالية [10]:

$$\begin{pmatrix} q_0(t) \\ q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_0(t-1) \\ q_1(t-1) \\ q_2(t-1) \\ q_3(t-1) \end{pmatrix} + \frac{T}{2} \begin{pmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0(t-1) \\ q_1(t-1) \\ q_2(t-1) \\ q_3(t-1) \end{pmatrix}\quad (16)$$

الخطوة السادسة: تطبيع قيمة الريح النسبي باستخدام المعادلة التالية:

$$\begin{aligned}q_0 &= \frac{q_0}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}}, q_1 = \frac{q_1}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}} \\ q_2 &= \frac{q_2}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}}, q_3 = \frac{q_3}{\sqrt{q_0^2 + q_1^2 + q_2^2 + q_3^2}}\end{aligned}\quad (17)$$

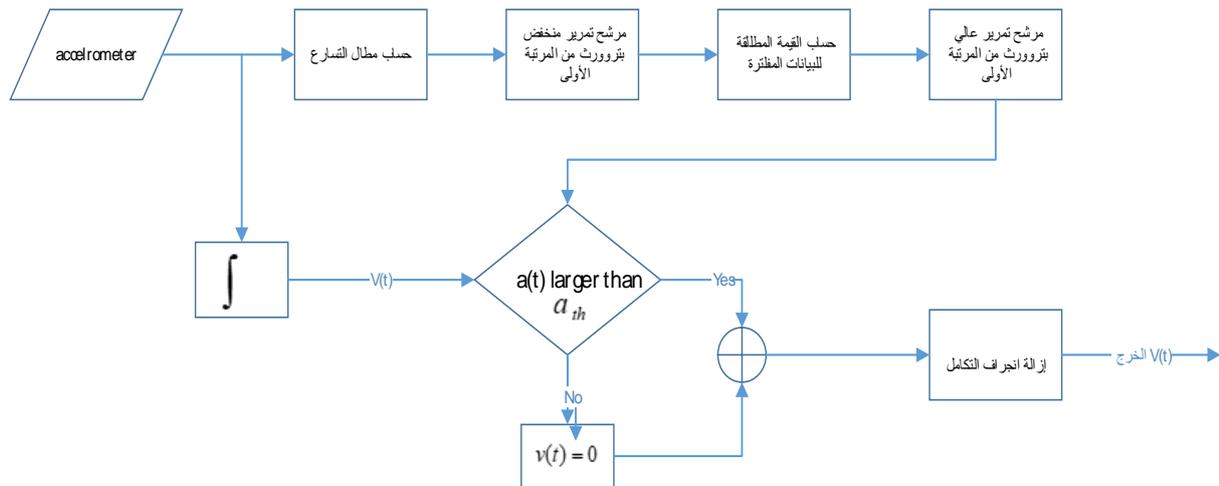
الخطوة السابعة: حساب زوايا أولير اعتماداً على قيم الرباعيات في الخطوة السادسة وباستخدام المعادلة التالية:

$$\begin{aligned}\phi &= \arctan \left[\frac{2(q_2 q_3 + q_0 q_1)}{q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2} \right] \\ \theta &= \arcsin \left[-2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \right] \\ \psi &= \arctan \left[\frac{2(q_1 q_2 + q_0 q_3)}{q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2} \right]\end{aligned}\quad (18)$$

تكرار: تكرار من الخطوة 2 لبداية تكرار جديد واستمر في تحديث القيم.

تحديثات السرعة الصفرية (ZVU (Zero Velocity Update)

في حالات الشك أو عدم اليقين والتي تنشأ نتيجة تكامل بيانات مقياس التسارع نلجأ للتخفيف من أخطاء التكامل من خلال استخدام تقنية تعرف باسم تحديثات السرعة الصفرية ZVU حيث معظم حركات الإنسان مثل المشي والركض وغيرها لها فترات متكررة يكون فيها تسارع القدم صفر [11] ، ويبين الشكل (8) مخطط صندوقي لتحديثات السرعة الصفرية ZVU :



الشكل (8) مخطط صندوقي ل ZVU

الخطوة الأولى: نقوم بأخذ قراءات مقياس التسارع على المحاور الثلاثة للحصول على قيمة مطال التسارع.
الخطوة الثانية: نمرر مقدار التسارع من خلال مرشح تمرير منخفض بترورث من الدرجة الأولى من أجل تصفية وتنعيم البيانات.

الخطوة الثالثة: حساب القيمة المطلقة للبيانات التي تم ترشيحها.

الخطوة الرابعة: نقوم بتمرير البيانات من خلال مرشح تمرير عالي بترورث من الدرجة الأولى لإزالة القيمة المستمرة DC.

الخطوة الخامسة: تحديد ما إذا كانت القيمة الحالية $a(t)$ أكبر من العتبة المحددة تجريبياً a_{th} ، إذا كانت الإجابة نعم لا تفعل شيء. وإذا لم يكن كذلك فقم بضبط $v(t)$ إلى الصفر.

الخطوة السادسة: كرر من الخطوة الأولى واستمر بالتكرار حتى يتم الحصول على جميع عينات بيانات السرعة.

الخطوة السابعة: ادمج السرعة المصححة خلال فترات الثبات والسرعة أثناء فترات عدم الثبات معاً للحصول على تحديثات السرعة الصفرية.

الخطوة الثامنة: بما أنه السرعة فقط خلال فترات الثبات يتم ضبطها على الصفر فإن تكامل الثبات لا يزال موجود خلال فترات عدم الثبات، أيضاً لأن السرعة في الخطوة الخامسة يتم إجبارها على الصفر وفقاً للعتبة فقط فإن السرعة قبل وبعد العتبة تكون منقطعة أي يجب إزالة الانجراف الناتج عن التكامل.

طريقة إزالة انجراف السرعة التكامليّة هي كالتالي:

أولاً نوجد اختلاف السرعة بين بداية ونهاية الفترات غير الثابتة، ثم نقوم بتقسيم الاختلاف على عدد العينات خلال هذه الفترة غير الثابتة للحصول على معدّل الانجراف بعد ذلك نقوم بضرب معدّل الانجراف مع قيمة البيانات المقابلة للحصول على قيمة الانجراف عند النقطة المحددة ثم نطرح الانجراف من السرعة المحسوبة سابقاً للحصول على السرعة الخطية.

لمعرفة هل الانسان يسير على أرض مسطحة أو يصعد درج أو ينزل درج نعتمد على الخوارزمية التالية:

بدايةً يتم حساب حجم خطوة الانسان باستخدام المعادلة التالية [12]:

$$d_{xy} = \sqrt{(x_{end} - x_{start})^2 + (y_{end} - y_{start})^2} \quad (19)$$

حيث d_{xy} : هو حجم الخطوة (إزاحة خطوة واحدة).

x_{end}, y_{end} : هما احداثيا السطح للنقطة الأخيرة خلال طور الحركة.

x_{start}, y_{start} : هما احداثيا السطح للنقطة الأولى خلال طور الحركة.

حسب القياس الفعلي فعندما يمشي شخص بالغ فإنّ الازاحة الأفقيّة لكل خطوة هي $(0,9m - 1,15m)$ ، بينما في حالة صعود أو نزول درج اتخاذ خطوة لأعلى أو أسفل تكون الازاحة الأفقيّة هي $(0,3m - 0,38m)$ ، اتخاذ خطوتين لأعلى أو أسفل تكون الازاحة الأفقيّة $(0,6m - 0,75m)$. نلاحظ مما سبق الاختلاف الكبير بحجم الخطوة بحالتي السير على أرض مسطحة وحالة صعود الدرج. يمكننا اعتماد العتبة $d_s = 0,8m$ للتمييز بين الحالتين.

بحالة صعود الدرج يحسب الاختلاف على المحور Z (الاختلاف بين الموقعين العلوي والسفلي) باستخدام المعادلة:

$$d_z = z_{end} - z_{start} \quad (20)$$

حيث z_{end}, z_{start} هما احداثيا النقطتين الأولى والأخيرة خلال طور الحركة.

من خلال المناقشة السابقة ومن أجل التمييز بين ثلاث حالات : حالة السير المستقيم على أرض مسطحة وحالة صعود الدرج وحالة نزول الدرج نستخدم التابع التالي [12]:

$$l = \begin{cases} upstairs.....d_{xy} < d_s, d_z > 0 \\ downstairs.....d_{xy} < d_s, d_z < 0 \\ walking.on.flat.plane.....d_{xy} > d_s \end{cases} \quad (21)$$

الذكاء الصناعي:

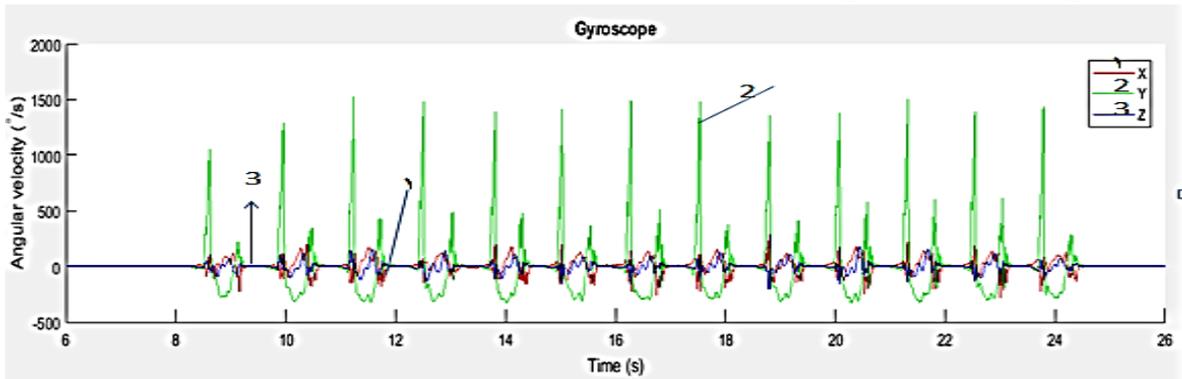
أنظمة الذكاء الاصطناعي AI هي أنظمة برمجية (وربما أجهزة) صُممت من قبل الإنسان من أجل تأدية أهداف أو أعمال معقدة. حيث تقوم بالحصول على البيانات أو تفسير البيانات المنظمة أو غير المنظمة أو معالجة المعلومات المشتقة من هذه البيانات وتحديد الإجراءات الأفضل الذي يجب اتخاذه لتحقيق الهدف المطلوب [13].

ويتضمن الذكاء الاصطناعي فروعاً متعدّدة من أهمها : النظم الخبيرة Expert Systems، والتتقيب في البيانات Data Mining، والخوارزميات الجينية Genetic Algorithms، والشبكات العصبونية Neural Networks. وتعد الشبكات العصبونية الاصطناعية (Artificial Neural Network (ANN) من أهم الطرق المرنة التي لديها القدرة على التعلم الذاتي السريع وسرعة التغير في البيئة الديناميكية، وذلك من خلال قواعدها الخاصة ووفق منهجية محددة وتعزيز هذا المنهج عبر التدريب بطريقة تحاكي فيها عمل الخلايا العصبية الدماغية من حيث بنيتها ومعالجتها للمدخلات، حيث يتم فيها الاستفادة من الخبرات السابقة في سبيل الوصول إلى أفضل نتائج في المستقبل. و تقوم الشبكات العصبونية الاصطناعية بحل المشكلات دون الحاجة إلى وجود خوارزمية حل مما يؤدي إلى تقليل كمية البرمجيات ومن ثم تقليل الوقت والتكلفة.

السلسلة الزمنية: عبارة عن مجموعة مشاهدات أو قياسات مرتبة حسب الزمن، ويعتبر أسلوب تحليل السلاسل الزمنية Time Series Analysis أحد الأدوات المستخدمة في التحليل الإحصائي للبيانات غير المستقلة زمنياً أي تعتمد على بعضها البعض.

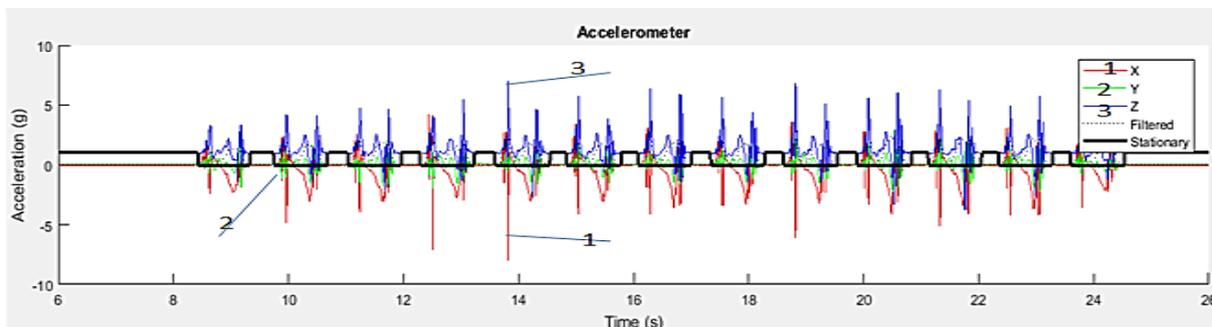
النتائج والمناقشة:

تم أخذ البيانات أثناء سير الشخص بحركة مستقيمة للأمام وبحالة صعود الدرج حيث تم الحصول على البيانات من الحساسات إلى جهاز الحاسب ومعالجتها واستخدام المرشح المتكامل غير الخطي المحسن من أجل الانتقال من جملة الجسم إلى جملة ال NED وتمت عملية المحاكاة باستخدام برنامج الماتلاب وقد استغرقت فترة المراقبة وأخذ البيانات مدة 26 ثانية وتعتبر هذه المدة كافية لأخذ البيانات حيث تم تطبيق الخوارزمية من أجل حركة السير المستقيم وحركة صعود الدرج والتأكد من دقة النتائج وكان تردد أخذ العينات 256 هرتز.



الشكل (9) بيانات الجيروسكوب بحالة الحركة المستقيمة

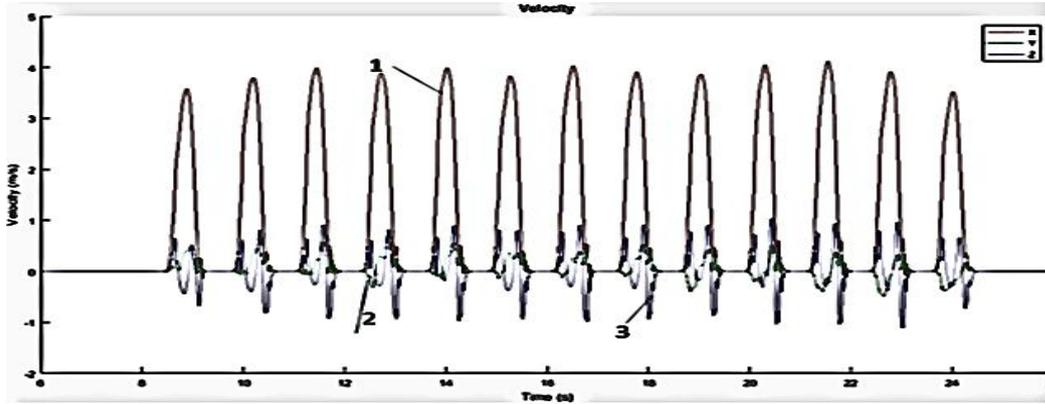
يُظهر الشكل (9) بيانات الجيروسكوب وكما هو مبين في الشكل، يشير المنحني رقم 1 إلى بيانات الجيروسكوب على المحور X والمنحني رقم 2 إلى بيانات الجيروسكوب على المحور Y والمنحني رقم 3 للبيانات على المحور Z. من الواضح أنّ حجم البيانات على المحور Y أكبر بكثير من تلك الموجودة على المحورين X, Z. تُعتبر هذه البيانات معقولة لأنه وكما هو موضح بالشكل (5) من الإطار المرجعي فإنّ المحور X يشير إلى مقدمة القدم، ويقع المحور Z على طول الساق للشخص والمحور Y عمودي على المستوي X - Z، لذلك فإنّ البيانات على المحور X تمثل roll (زاوية التدرج) والبيانات على المحور Z تمثل yaw (زاوية الانعراج) والبيانات على المحور Y تمثل pitch (زاوية الميل). ومن الطبيعة البشرية فإنّ القدم تدور لأعلى وأسفل حول الكاحل. لذلك تكون زاوية الميل أكبر بكثير من زاويتي التدرج والانعراج. في بداية ونهاية كل خطوة تكون قدم الشخص ثابتة على الأرض.



الشكل (10) بيانات التسارع للحركة المستقيمة

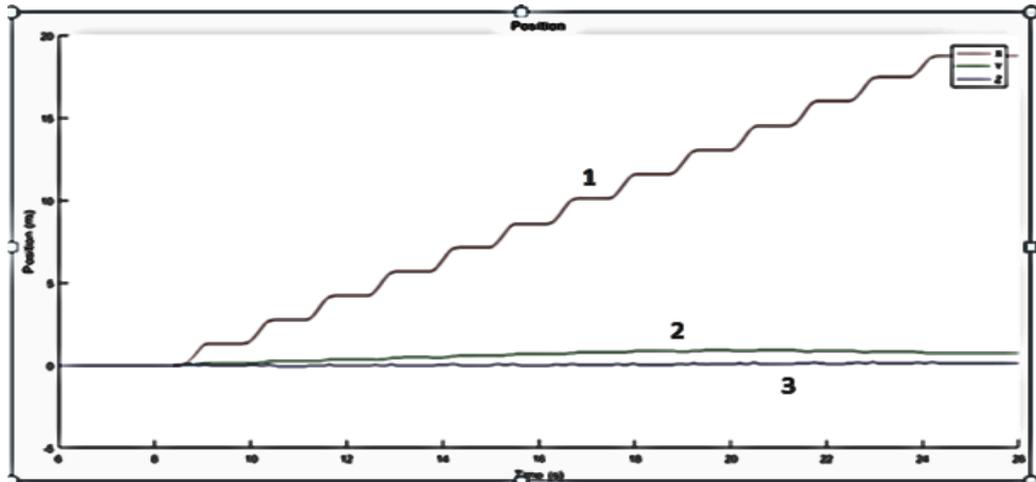
كما هو مبين في الشكل (10)، يشير المنحني رقم 1 إلى بيانات التسارع على المحور X والمنحني رقم 2 إلى بيانات التسارع على المحور Y والمنحني رقم 3 للبيانات على المحور Z الواحدة ($g = 9,81m/s^2$). قبل بدء المشي، تكون قراءة مقياس التسارع على المحور Z هي أكبر من تلك الموجودة على المحورين X و Y وهو أمر معقول لأنه يقيس قوة التسارع بسبب الجاذبية. نلاحظ أنّ البيانات الموجودة على المحورين X و Y لا تتوافق مع الصفر تماماً. يشير هذا إلى أنه لم يتم وضع الحساس في وضع مستقيم تماماً على القدم (محاذي للإطار الأرضي)، لذلك تظهر أجزاء من الجاذبية على المحورين X و Y. من المستحيل أن يستطيع الأشخاص ارتداء أجهزة الحساس في وضع مستقيم تماماً. يمكن تعويض التباين بين إطار الحساس والإطار الأرضي بواسطة خوارزمية AHRS. أيضاً يمكن ملاحظة بعض الارتفاعات في البيانات الموجودة على المحور Z بسبب الضجيج أو تأثير قوى خارجية أو غير ذلك. لهذا السبب من الضروري تمرير بيانات مقياس التسارع من خلال مرشح تمرير منخفض من أجل تصفيتها وتنعيمها والتخلص من الضجيج.

نلاحظ أيضاً بالخط المنقط والخط الأسود العريض بيانات مقياس التسارع المرشحة وكذلك يمكننا ملاحظة فترات الثبات. يمكننا أن نرى بوضوح بأن قيمة التيار المستمر للتسارع قد أزيلت خلال فترات الثبات حيث تكون السرعة صفر تقريبا وخلال فترات عدم الثبات فإن قيمة التسارع المفلتر في بداية ونهاية كل فترة تصل إلى ما يقارب من الصفر وبالتالي باستخدام عتبة ($a_{th} = 0.05g$) يمكننا فصل الفترات الثابتة وغير الثابتة.



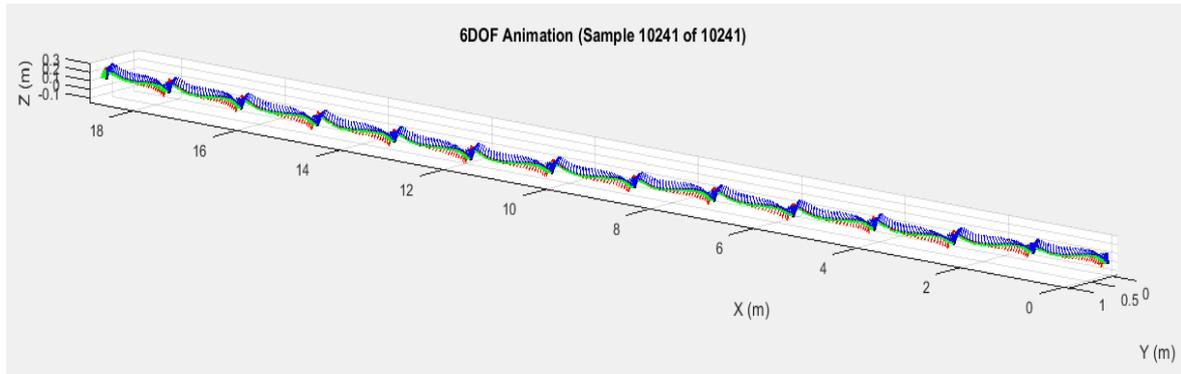
الشكل (11) بيانات السرعة للحركة المستقيمة

الشكل (11) يُظهر بيانات السرعة والتي نحصل عليها من خلال مكاملة بيانات التسارع، مع استخدام تحديثات السرعة الصفريّة ZVU من أجل التخلص من الأخطاء والانجراف. يتم محاذاة ثلاثة منحنيات عند الصفر خلال فترات الثبات. نلاحظ أن القيمة على المحور X (المنحني رقم 1) هي الأعلى والقيم على المحورين Y و Z منخفضة وذلك لأنّ السير المستقيم أساساً يقع على المحور X (من إطار الحساس).



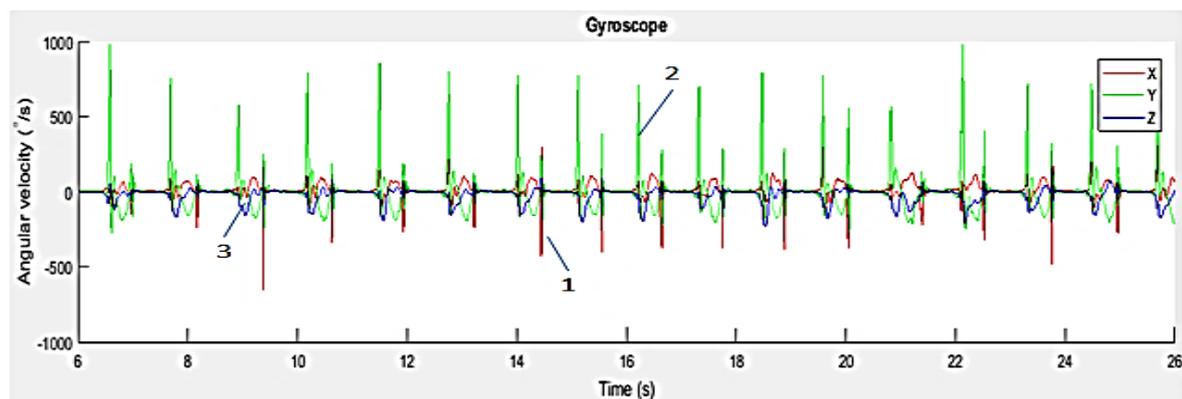
الشكل (12) بيانات الموضع للحركة المستقيمة

ويوضح الشكل (12) بيانات الموضع حيث تمثل كل تمويجة خطوة قام بها الشخص الذي يمشي.



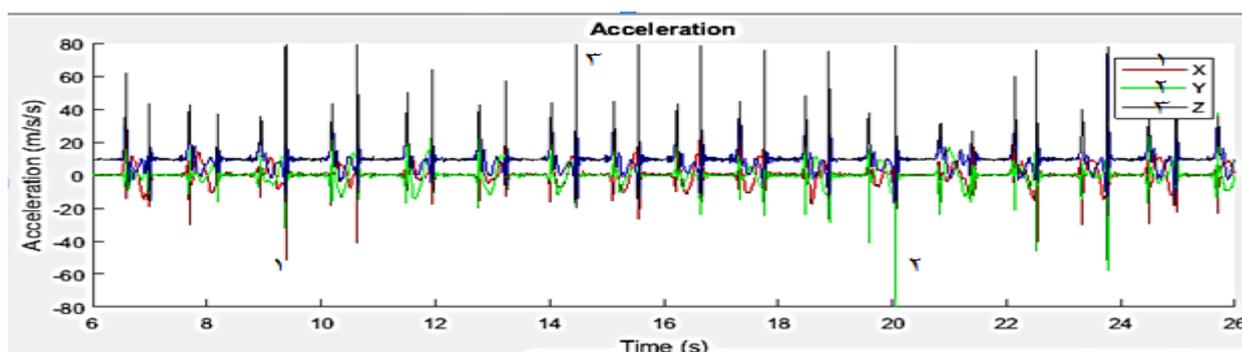
الشكل (13) تمثيل حركة السير على أرض مسطحة باستخدام ست درجات من حرية الحركة

الشكل (13) يوضح حركة السير المستقيم باستخدام ست درجات من حرية الحركة 6DOF Animation (أي الحركة على المحور X بالاتجاهين الموجب والسالب مع امكانيّة الدوران حول المحور X باتجاه عقارب الساعة وبعكس اتجاه عقارب الساعة ، والحركة على المحور Y بالاتجاهين الموجب والسالب مع امكانيّة الدوران حول المحور Y باتجاه عقارب الساعة وبعكس اتجاه عقارب الساعة ، الحركة على المحور Z بالاتجاهين الموجب والسالب مع امكانيّة الدوران حول المحور Z باتجاه عقارب الساعة وبعكس اتجاه عقارب الساعة). نلاحظ من الشكل (13) بأنّ الحركة المستقيمة واضحة تماماً وكل خطوة قام بها الشخص واضحة بالرسم ثلاثي الأبعاد. فيما سبق كانت البيانات الناتجة لحركة بسيطة وهي الحركة المستقيمة. ومن أجل تقييم دقة ومثانة النظام سيتم أخذ بيانات لحركة أعقد على سبيل المثال حركة صعود الدرج.



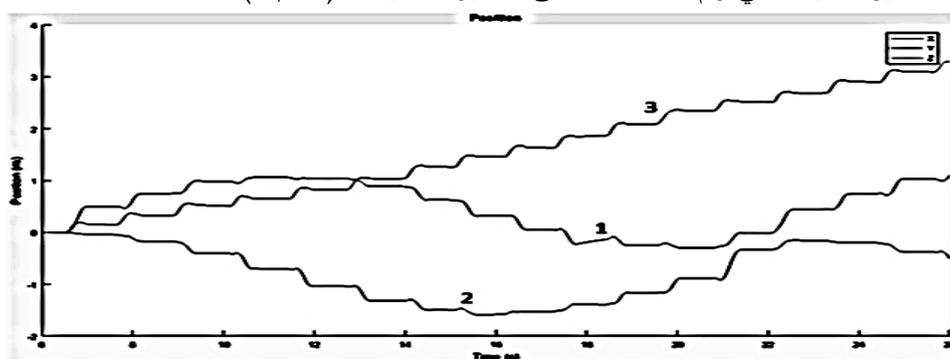
الشكل (14) بيانات الجيروسكوب لحركة صعود الدرج

كما هو مبين في الشكل (14)، يشير المنحني رقم 1 إلى بيانات الجيروسكوب على المحور X والمنحني رقم 2 إلى بيانات الجيروسكوب على المحور Y والمنحني رقم 3 للبيانات على المحور Z. من الواضح أنّ حجم البيانات على المحور Y أكبر بكثير من تلك الموجودة على المحورين X, Z.



الشكل (15) بيانات التسارع لحركة صعود الدرج

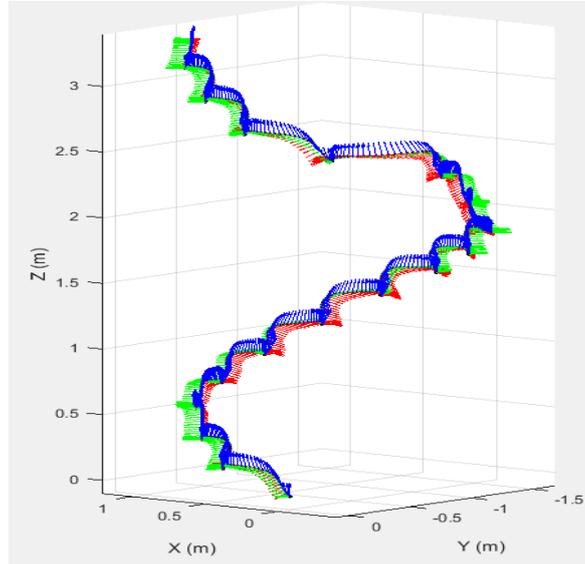
كما هو مبين في الشكل (15)، يشير المنحني رقم 1 إلى بيانات التسارع على المحور X والمنحني رقم 2 إلى بيانات التسارع على المحور Y والمنحني رقم 3 للبيانات على المحور Z الواحدة (m/s²).



الشكل (16) بيانات الموضع لحركة صعود الدرج

يوضح الشكل (16) بيانات الموضع لحركة صعود الدرج يمكننا بسهولة من خلال ملاحظة البيانات على المحور Z (المنحني رقم 3) رؤية شكل درج صاعد للأعلى.

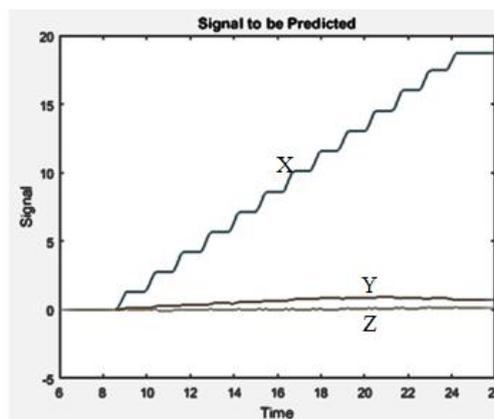
والشكل (17) يبين محاكاة حركة صعود الدرج باستخدام ست درجات من حرية الحركة.



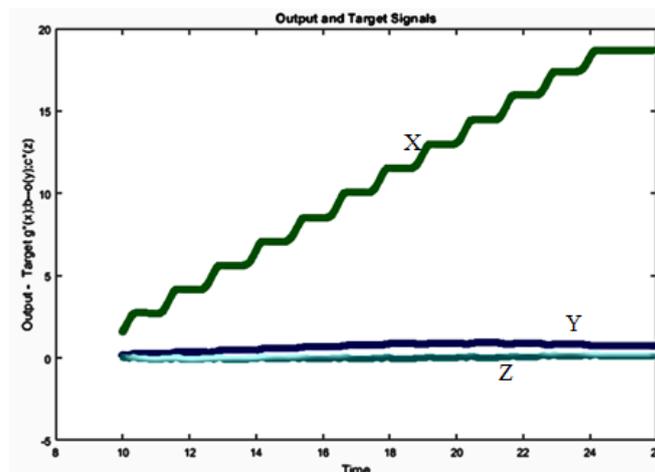
الشكل (17) تمثيل حركة صعود الدرج باستخدام ست درجات من حرية الحركة

تطبيق الذكاء الاصطناعي الشبكات العصبونية:

لدينا في الشكل (18) الإشارة قبل التوقع الناتجة عن تكامل بيانات السرعة لحركة السير المستقيمة وباستخدام تقنية الذكاء الاصطناعي الشبكات العصبونية نحصل على الشكل (19) حيث تم استخدام شبكة LSTM وهي إحدى أنواع الشبكات العصبونية المتكررة RNN والغاية من استخدامها هو التأكد من دقة النتائج التي حصلنا عليها وبالمقارنة بين الشكلين (18) و (19) نجد أنّ النتائج جداً متقاربة ويخطأ لا يتجاوز 0.01 متر.



الشكل (18) الإشارة قبل التوقع وتطبيق شبكة LSTM



الشكل (19) الإشارة بعد تطبيق الشبكات العصبونية شبكة LSTM

الاستنتاجات والتوصيات:

تم في هذه الورقة تصميم وحدة قياس عطالة MEMS IMU منخفضة التكلفة لملاحقة حركة قدم الإنسان، وقد أعطتنا حلاً للتطبيق في المستشفيات بهدف ملاحقة حركة المرضى ومراقبة حركتهم أيضاً يمكن استخدامها من قبل رجال الإطفاء لملاحقة حركتهم وغيرها من التطبيقات المعقدة.

تم تصميم نظام خفيف الوزن بهدف التغلب على مشكلة الانجراف الخطيرة التي تعاني منها حساسات العطالة منخفضة التكلفة التي تعتمد على أنظمة MEMS.

يمكننا التعمق في مفهوم الذكاء الصناعي والشبكات العصبونية بهدف ملاحقة حركة قدم الإنسان عند قيامه بصعود أو نزول الدرج أو عند القيام بحركات أكثر تعقيداً وذلك يتطلب جهد ووقت إضافيين.

يمكننا دمج النظام مع نظام تحديد المواقع العالمي GPS بهدف تتبع حركة الرياضيين عند القيام برياضات مثل الترحلق على الثلج وغيرها حيث تكون المسافات طويلة والبيئات مفتوحة.

References:

- [1] SHETTY, Y.K. *Robust Human Motion Tracking using Low-Cost Inertial Sensors*. ARIZONZ STATE UNIVERSITY, December 2016
- [2] Roetenberg D. *Inertial and Magnetic Sensing of Human Motion*. (2016).
- [3] PAINA, G.P. *Experimental comparison of Kalman and complementary filter for attitude estimation*. Argentine Symposium on Technology. Cordoba, Argentina. 2011.
- [4] YUKSEL, Y. *Design and Analysis of inertial Navigation Systems with Skew Redundant Inertial Sensors*. UCGE, Report 20328, 2011.
- [5] BURG, A; MERUANI, A; SANDHEINRICH, B; WICKMAN, M. *MEMS Gyroscopes and their application*. 2004.
- [6] GESSESSE, M.H. *Multi-sensor Attitude and Heading Reference System Design using Genetically Optimized Kalman Filter*. Diss. Carleton University. 2018.
- [7] WANG, M; YANG, Y; HATCH, R.R; ZHANG, Y. *Adaptive Filter for a Miniature MEMS based Attitude and Heading Reference System*. In PLANS 2004. Position Location and Navigation symposium, IEEE Cat. No. 04CH37556, 2004, P. 193-200.

- [8] PREMERLANI,W;BIZARD,P.*Direction Cosine Matrix IMU: Theory*.Diy Drone: Usa,2009,13-15.
- [9] JUSTA,J;SMIDL,V;HAMACEK,A. *Fast AHRS Filter for Accelerometer, Magnetometer, and Gyroscope Combination with Separated Sensor Corrections*. Sensors 20.14(2020);3824.
- [10] ZHENG,L;ZHAN,X;ZHANG,X.*Nonlinear Complementary Filter for Attitude Estimation by Fusing Innertial Sensors and a Camera*. Sensors,2020,20:6752.
- [11] EL_GOHARY,M; MCNAME,J. *Human joint Angle Estimation with Inertial sensors and Validation with a Robot Arm*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering,2015.
- [12] WANG,B;SU,T;JIN,X;KONG,J;BALY. *3D Reconstruction Trajectory with Moving Direction Learning and Optimal Gait Recognition*.Complexity.2018.
- [13]SAMOILI,S;COBO.M.L;GOMEZ,E;DEPRATO,G;MARTINEZPLUMED,F;DELIPE TREV,B. *AI Watch. Defining Artificial Intelligence. Towards an operational definition and taxonomy of artificial intelligence*. No. JRC118163.Joint Research Centre (Seville site), 2020.
- [14] CHEN,Y;SHEN,C;WEI.X.S;LIU,L;YANG,J. *Adversarial PoseNet: A Structure-aware Convolutional Network for Human Pose Estimation*. Proceeding of the IEEE international Conference on Computer Vision. 2017. P 1212-1221.