

## Using the Kalman Filter to Improve the Reading of Electrical Signals in High-precision Control Systems

Dr. Ali Darwisho<sup>\*</sup>  
Dr. Fadi Motawej<sup>\*\*</sup>  
Milad Zarba<sup>\*\*\*</sup>

(Received 18 / 12 / 2023. Accepted 26 / 6 /2024)

### □ ABSTRACT □

Sensors constitute the main input to control systems, and the quality of the sensor reading is an important criterion in evaluating the quality of the decision of the control or monitoring system used for the sensors. But the operation of sensors is not without challenges, as the sensor reading can be affected by external factors such as electromagnetic interference or changes in temperature, pressure, or humidity. The operation of the sensors is accompanied by the appearance of unwanted signals or a delay in the reading of the sensor. Interruptions in the reading of the sensors may also occur, which results in a major malfunction of the system and the appearance of incorrect readings of the electrical signal. Therefore, in the research we will present a new method to monitor and improve the control decision and accuracy of the movement of the fingers of an artificial palm that can be used in places that the human hand cannot be used to handle, such as mixing chemical solutions and other applications that require precise position control and whose operation requires high precision standards. Our method is based on the use of the Kalman filter and its use in monitoring and correcting the sensor signal to achieve optimal control signals that suit the desired target and exceed the disturbances and distortions that affect the sensors.

**Keywords:** Microcontroller - Kalman filter.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

<sup>\*</sup> Professor - Department of Physics , Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria. [dr.darwisho@gmail.com](mailto:dr.darwisho@gmail.com)

<sup>\*\*</sup> Associate Professor - Department of mechatronic engineering. Faculty of mechanical and electrical engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. [fadimotawej@tishreen.edu.sy](mailto:fadimotawej@tishreen.edu.sy)

<sup>\*\*\*</sup> Postgraduate student (Doctorate) - Department of Physics , Faculty of Science, Tishreen University, Lattakia, Syria. [miladnonzarba@gmail.com](mailto:miladnonzarba@gmail.com)

## استخدام مرشح كالمان في تحسين قراءة الإشارات الكهربائية في أنظمة التحكم عالية الدقة

د. علي درويشو\*

د. فادي متوج\*\*

ميلاد زربا\*\*\*

تاريخ الإيداع 18 / 12 / 2023. قُبِلَ للنشر في 26 / 6 / 2024

### □ ملخص □

تشكل الحساسات المدخل الرئيس لأنظمة التحكم وتعتبر جودة قراءة الحساسات معيار هام في تقييم جودة قرار نظام التحكم أو المراقبة المستخدم للحساسات. ولكن عمل الحساسات ليس بدون تحديات، فمن الممكن أن تتأثر قراءة الحساس بعوامل خارجية مثل التداخل الكهرومغناطيسي أو التغيرات في درجة الحرارة أو الضغط أو الرطوبة. هذا ويرافق عمل الحساسات ظهور إشارات غير مرغوبة أو حدوث تأخير في قراءة الحساس كما وقد تحدث انقطاعات في قراءة الحساسات الأمر الذي ينتج عنه خلل كبير في عمل النظام وظهور قراءات غير صحيحة للإشارة الكهربائية. لذلك سنقدم في البحث أسلوباً جديداً لمراقبة وتحسين قرار التحكم ودقته في حركة أصابع كف صناعي يمكن استخدامه في الأماكن التي لا يمكن استخدام اليد البشرية للتعامل معها، مثل خلط المحاليل الكيميائية وغيرها من التطبيقات التي تتطلب تحكم دقيق للموضع ويتطلب تشغيلها معايير دقة عالية. ويستند أسلوبنا على استخدام مرشح كالمان واستخدامه في مراقبة وتصحيح إشارة الحساسات لتحقيق إشارات تحكم مثلى تتناسب مع الهدف المطلوب وتتجاوز الاضطرابات والتشويشات التي تؤثر على الحساسات.

الكلمات المفتاحية: المتحكم المكروي - مرشح كالمان.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية- سورية. [dr.darwisho@gmail.com](mailto:dr.darwisho@gmail.com)  
\*\* أستاذ مساعد - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين- اللاذقية- سورية. [fadimotawej@tishreen.edu.sy](mailto:fadimotawej@tishreen.edu.sy)  
\*\*\* طالب دراسات عليا (دكتوراه) - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية- سورية. [miladnonzarba@gmail.com](mailto:miladnonzarba@gmail.com)

## مقدمة:

تعتبر الحساسات بمثابة أعضاء الحواس بالنسبة للدارات الإلكترونية ولا بد منها في أي نظام تحكمي حيث تشكل عنصر التغذية العكسية الذي يزيد دقة الأوامر التحكمية ويوجد العديد من الحساسات كل منها يتحسس لقيمة فيزيائية معينة: الحرارة - ضوء - حركة - رطوبة - أشعة....

إذًا الحساس عنصر يقوم بتحويل القيمة الفيزيائية إلى قيمة كهربائية مرتبطة بها وفق قانون رياضي معين، قد يكون قانون خطي وقد لا يكون خطي ويفضل أن يكون خطي لسهولة التعامل مع القيم الخطية [1].

عندما نختار حساس للاستخدام في تطبيق معين هناك عدة اعتبارات يجب أن تؤخذ بالحسبان نذكر منها خواص الجسم الذي سيتم تحسسه "أبعاده، شكله...." والمادة المصنوع منها الجسم "بلاستيكية، معدنية، حديدية...." وسرعة الاستجابة المطلوبة وخطيتها ومسافة التحسس المرغوبة والدقة المطلوبة وكلفة الحساس. إذا تمكنا من الإجابة على هذه التساؤلات فسوف تصبح عملية اختيار الحساس سهلة جدًا [2].

## أهمية البحث وأهدافه:

الغاية من البحث استخدام مرشح كالمان في تحسين قراءة حساسات الانحناء (Flex sensor)، واستخدامها في التحكم بحركة كف صناعي لاستخدامها في التطبيقات التي تطلب دقة في التحكم، وتأتي أهمية البحث من خلال تحسين قراءة حساسات الانحناء التشابهيّة وربط قراءتها مع حركة المحركات من أجل تحسين دقة تموضع المحركات وسرعة المحركات.

## طرائق البحث ومواده:

تم التركيز على أهمية استخدام مرشح كالمان في بناء أنظمة التحكم والمراقبة حيث يتيح النظام مرونة وموثوقية عالية في ضبط بارامترات النظام الفيزيائي. يستخدم البحث موارد مادية وهي (Arduino Uno) مع محركات السيرفو بالإضافة لدارة مطبوعة ومقاومات ووحدة تغذية، ويستخدم البحث موارد برمجية وهي برنامج البروتوس في محاكاة الدارة، ومن ثم تم اختبار الدارة عمليًا على أرض الواقع للحصول على النتائج.

### 1. توصيف النظام:

النظام المدروس يمثل كف صناعي يحاكي عمل الكف البشرية في الحركة حيث يتم تحريك أصابع الكف عن طريق محركات السيرفو التي تكافئ في عملها عمل العضلات، ويهدف النظام لتحقيق كفاءة عالية في مطابقة حركة الكف البشرية مع الكف الصناعي بشكل متزامن وبتأخير زمني أقل ما يمكن، وعند اختبار النظام وجدنا ظهور ضجيج أبيض في قراءة الحساسات لم نستطع السيطرة عليه باستخدام الطرق التقليدية في تعويض إشارة الخطأ عن طريق إضافة قيم أو مضاعفة قيمة الإشارة، وهنا ظهرت أهمية استخدام مرشح كالمان من أجل تحقيق كفاءة عالية في دقة التحكم.

### 2. الأجهزة والأدوات المستخدمة:

تتكون دارة الجهاز بشكل رئيسي من ثلاثة أجزاء وهي:

1. مداخل النظام: حساس المرونة "حساس حركة الأصابع" (Flex sensor).
2. لوحة التطوير (Arduino Uno).
3. مخارج النظام: محركات السيرفو.

## 1.2 مداخل النظام: حساس المرونة "حساس حركة الأصابع" (Flex sensor):

مميزات الحساس واستخداماته:

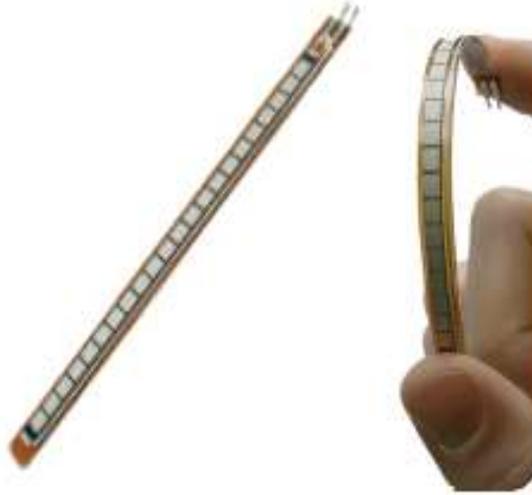
1. قياس زاوية انحناء الأصابع.
2. سهولة المنظومات الميكانيكية المتحركة "انحناء ومرونة".
3. بساطة تصميم الحساس.
4. توفره في السوق المحلية [3].

المواصفات التشغيلية:

1. ثبات جودة قراءة الحساس لعدد كبير من مرات الاستخدام وهذا يعطيه موثوقية عالية.
2. العمل ضمن المجال الحراري ( $-35\text{ c}^{\circ}$  to  $80\text{ c}^{\circ}$ ).

المواصفات الإلكترونية:

1. المقاومة الاسمية للحساس (10 k ohm).
  2. مجال مقاومة الانحناء (60 k to 110 k ohms).
  3. استطاعة العمل الاسمية 0.5 watts القيمة 1 watts [3].
- ويظهر الشكل (1) حساس (Flex).



الشكل (1) حساس (Flex).

طريقة العمل:

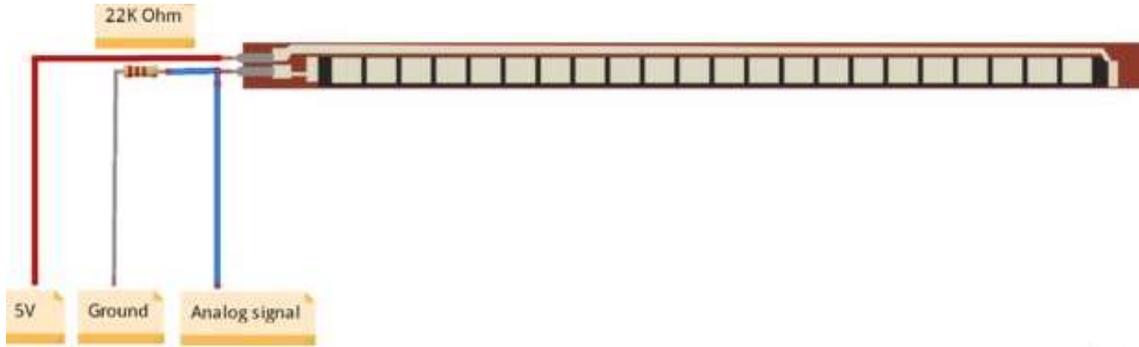
تزداد مقاومة الحساس مع زيادة الانحناء المتعرض له نتيجة حركة الأصابع وبالتالي ينقص الجهد الناتج عن الحساس، والشكل (2) يوضح طريقة عمل الحساس [3]:



الشكل (2) طريقة عمل الحساس.

### طريقة ربط الحساس مع الدارة:

يتم تغذية الحساس عبر وصله إلى القطب الموجب وباستخدام مقاومة شد للأرضي يتم إدخال الجهد الناتج Analog signal إلى دارة المتحكم عبر المحول التماثلي الرقمي الخاص بالمتحكم كما في الشكل (3) [4]:



الشكل (3) طريقة ربط الحساس مع المتحكم.

## 2.2: (Arduino Uno)

إن دارة (Arduino Uno) هي عبارة عن دارة إلكترونية صغيرة مفتوحة المصدر تستخدم في برمجة متحكم ميكروي ذي (8 - Bit) ومصممة لجعل عملية استخدام الإلكترونيات التفاعلية في مشاريع متعددة التخصصات أكثر سهولة، وتوفر هذه الدارة منافذ لتوصيل المكونات الإلكترونية إلى المتحكم الميكروي مباشرة، وذلك عن طريق (14) منفذ من النوع الرقمي (Digital In/Out)، ومن هذه المنافذ يوجد لدينا (6) يمكن استخدامها كمخارج (PWM)، أو ما يعرف بالتعديل الرقمي لعرض النبضة (Pulse - Width Modulation)، ويوجد (6) مداخل تستخدم للتحويل من تماثلي إلى رقمي (ADC) وهذه الدارة موضحة بالشكل (4).

كما تحتوي الدارة على هزاز كريستال بتردد (16 MHz)، بالإضافة إلى مدخل (USB) من أجل التواصل مع الحاسوب وهناك مدخل منفصل للطاقة [4].

ويستخدم الأوردوينو بصورة أساسية في تصميم المشاريع الإلكترونية التفاعلية أو المشاريع التي تستهدف بناء حساسات بيئية مختلفة مثل (درجات الحرارة - الرياح - الضغط.... إلخ)، ويمكن توصيل الأوردوينو ببرامج مختلفة على الحاسوب الشخصي، ويعتمد الأوردوينو في برمجته على لغة البرمجة مفتوحة المصدر وتتميز أنها تشبه لغة (C++) وتعتبر من أسهل لغات البرمجة المستخدمة في كتابة برامج المتحكمات الميكروية.



الشكل (4) لوحة التطوير (Arduino Uno).

### 3.2 مخارج النظام: محركات السيرفو:

تستعمل محركات السيرفو عادة في الأنظمة التي تتطلب دقة أكثر في إيقاف الحركة. تستطيع هذه المحركات الوصول إلى سرعات عالية أو العمل عند سرعات منخفضة بنعومة لتنظيم كبيرة مع توقف دقيق في الموضع أكثر من محركات الخطورة ولكن هذه المحركات من مساوئها تحتاج إلى أكثر من دارة تغذية عكسية مما يزيد من تكاليف الدارة وتعقيدها. ومحرك السيرفو هو عبارة عن (DC Motor) مجهز بدارة إلكترونية للتحكم بدقة في اتجاه دوران عمود المحرك ووضعه ومجموعة تروس [4].

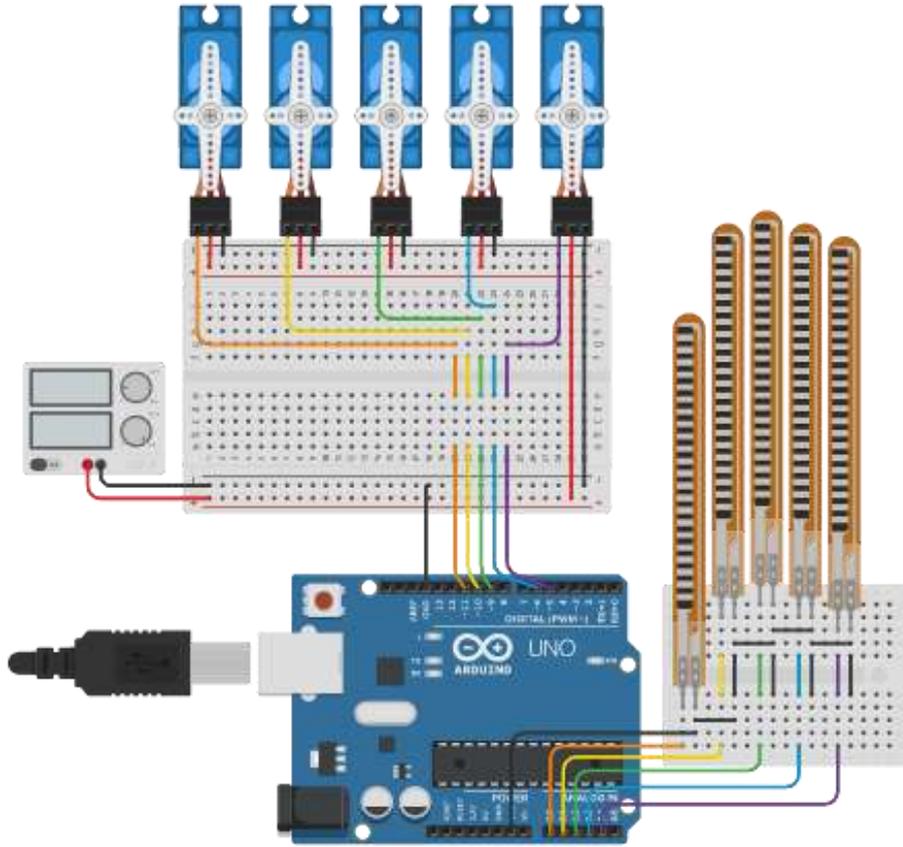
#### يوجد نوعين من محركات السيرفو:

1. محرك Standard servomotor: يكون المحرك قابل للدوران من (0 - 120 or 180) درجة في الاتجاهين مع عقارب الساعة وعكس عقارب الساعة.
  2. محرك Continuous servomotor: يكون المحرك قابل للدوران من (0 to 360) درجة مع عقارب وعكس عقارب الساعة.
- ستقوم محركات السيرفو بتحريك أصابع الكف الصناعي وفق الأوامر التي يتم الحصول عليها من حساسات الانحناء ويقوم الذراع المقاد بمحركات السيرفو بإعادة حركة الكف البشرية.

#### 3. الدارة الإلكترونية الخاصة بالكف الصناعي:

يوضح الشكل (5) تصميم دارة التحكم الخاصة بالكف الصناعي حيث تعمل الدارة وفق الخطوات التالية:

1. يتم فتح وضع الكف الصناعي من أجل الحصول على القراءات العظمى والدنيا لحساسات الانحناء لأن القراءات العظمى لا تكون متساوية، ثم يتم تخزين القيم ضمن مصفوفة في برنامج Arduino IDE.
2. بعد الانتهاء من مرحلة معايرة القراءات يتم إرسال كل قراءة لمرشح كالمان من أجل تحسين قيم الإشارة ومواكبة قراءتها.
3. يتم تنسيب قيم القراءات الخاصة بالحساسات والتي تتراوح بين 0 - 1023 إلى مجال السيرفو الذي يكون من 0 وحتى 255 والتي تعبر عن عرض نبضة التحكم الخاصة بـ (PWM) باستخدام تعليمة (map) ضمن الأوردوينو.
4. يتم إرسال قيم الزاوية للمحركات لتبدأ بالعمل.

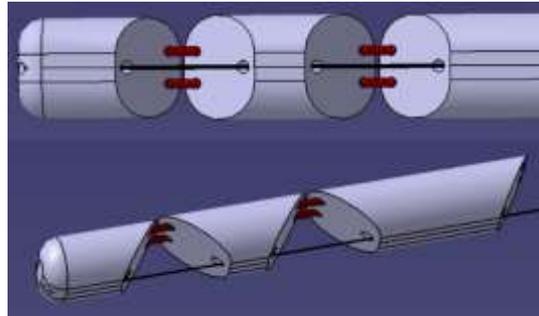


الشكل (5) تصميم دائرة التحكم الخاصة بالكف الصناعي.

#### 4. التصميم الميكانيكي للكف الصناعي:

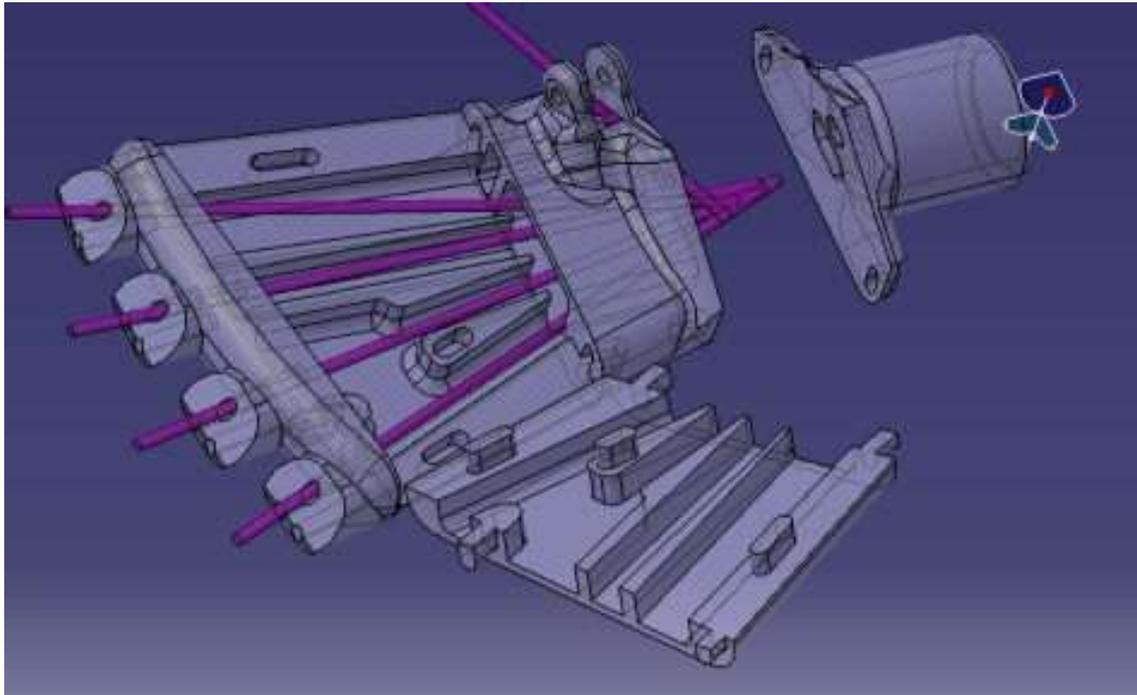
تم بناء النموذج الخاص بالكف ليكون مشابه في عمله لعمل الكف البشري حيث تتمحور فكرة التصميم في إيجاد طريقة لتحريك أصابع الكف دون حدوث تلامس مباشر يعيق الحركة، وبالعودة لليد البشرية والأوتار المحركة للأصابع نبحث عن طريقة لتحريك مفاصل السلاميات عن طريق أوتار أطرافها النهائية موصولة مع القطع المصممة لتكون سلاميات وطرفها الآخر مع محركات ونوابض.

فوجدنا أن أفضل طريقة هي استخدام محركات السيرفو (Servo motor) التي تقوم بدور العضلات ماسكة الأوتار من طرف والتي بدورها مثبتة مع نهاية الأصبع من الطرف الآخر، وبالتالي أصبح لدينا آلية لثني الأصابع عن طريق تحريك محرك السيرفو بالاتجاهين (الشد والإرخاء)، ويتثبت النوابض مع السلاميات وشدها بالخيط (الأوتار) يصبح لدينا الإصبع الآلي المحاكي للأصبع البشري الموضح في الشكل (6):



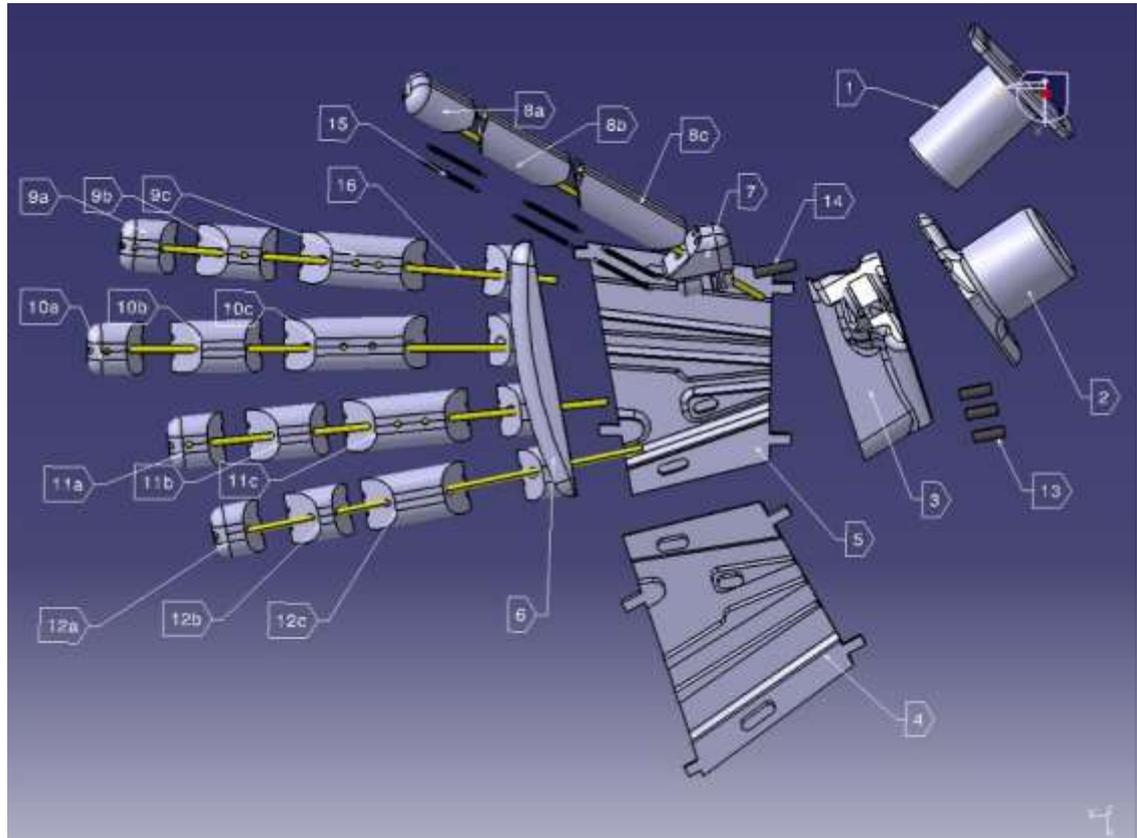
الشكل (6) تصميم نظام حركية الأصابع.

نلاحظ من الشكل السابق أنه قد تم تثبيت الإصبع بشكل تجريبي، فلو أردنا بناء نموذج للتثبيت شبيهه براحة اليد كما في الشكل (7):

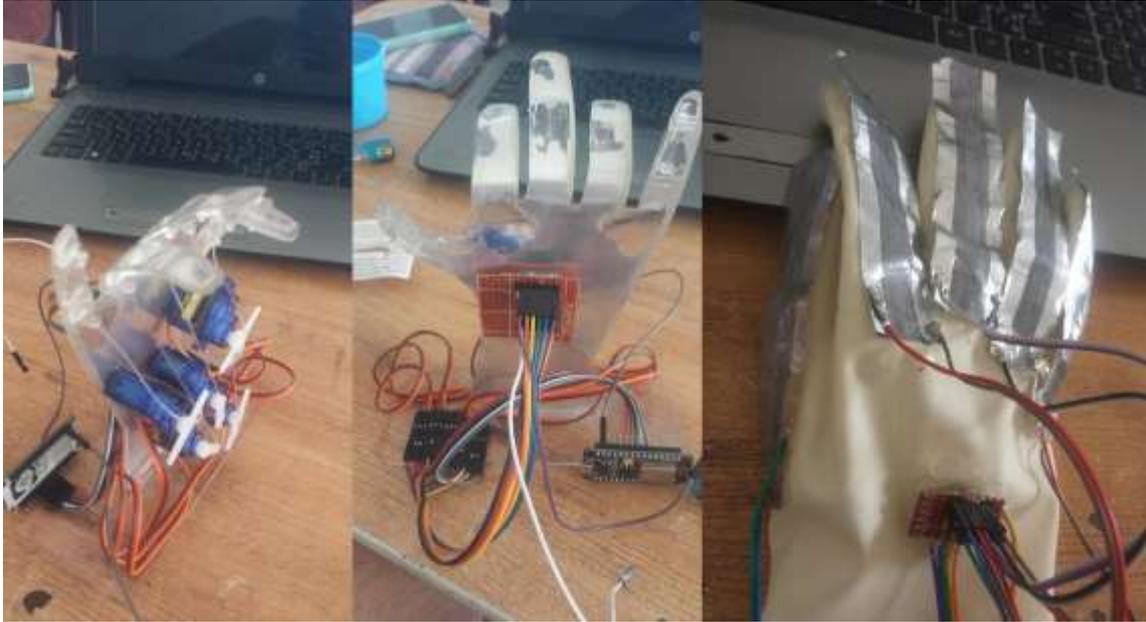


الشكل (7) تجميع الكف الصناعي.

وبالتجميع للأصابع مع راحة اليد الآلية أصبح لدينا الشكل (8):



الشكل (8) تجميع الأصابع مع راحة اليد الآلية.

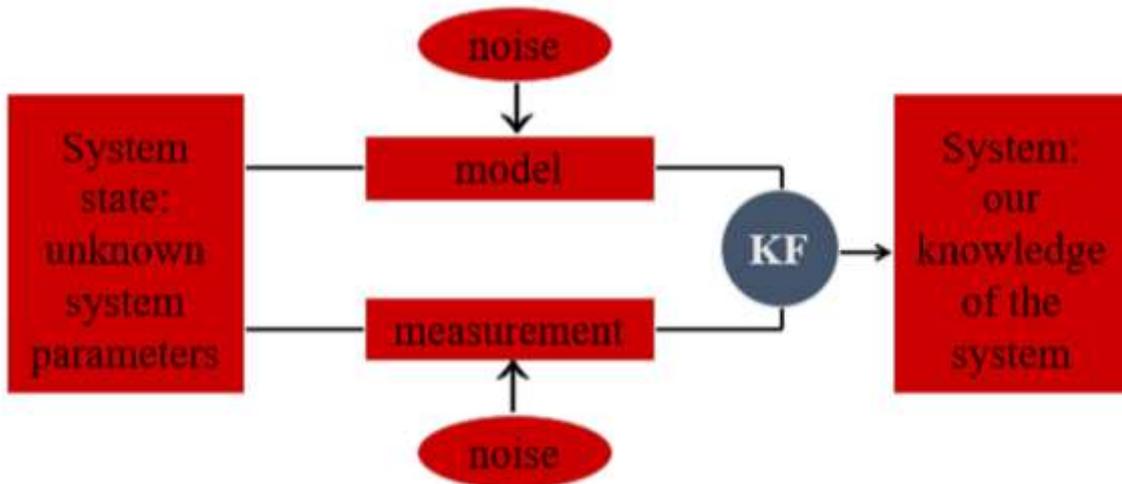


الشكل (9) تنفيذ التصميم.

الشكل (9) يوضح تنفيذ الكف الصناعي حيث قمنا بإنشاء نموذج مبسط لاختبار مرشح كالمان على الضبط الدقيق لسرعة وموقع الأصبع المتحرك يمكن في المستقبل تحسين التصميم وإضافة تعديلات عليه بحيث يصبح التصميم لذراع بشرية بشكل كامل.

#### 5. مرشح كالمان:

يعد مرشح كالمان من المرشحات المهمة في المنطق الزمني، حيث باستخدامه تم تطوير أسلوب تعاقبي معتمد على تمثيل فضاء الحالة سمي بمرشح كالمان، وقد جاءت فكرة كالمان للتغلب على مشكلة عدم الاستقرار التي تعاني منها السلاسل الزمنية في الزمن الحقيقي، وإن أهم ما يميز مرشح كالمان هي الخاصية التعاقبية التي تتيح لنا فرصة الاستفادة من البيانات والمعلومات الجديدة عند تغير الزمن  $(t)$ ، كما أنه لا يشترط أن تكون جميع البيانات مخزنة أو متوفرة دائماً، ويوضح الشكل (10) آلية استخدام مرشح كالمان مع الأنظمة [5]:



الشكل (10) طريقة عمل كالمان مع الأنظمة.

### 1.5 مزايا كالمان:

1. مرشح عام يمكن استخدامه مع مختلف السلاسل الزمنية: المستقر وغير المستقرة والخطية وغير الخطية.
  2. ذو طبيعة تعاقبية مما يجعله مناسباً للتعامل مع الحواسيب والنظم الرقمية.
  3. يعمل بالأسلوب التفرعي بسبب اعتماده على فضاء الحالة حيث يمكن باستخدامه ترشيح سلاسل زمنية متعددة في نفس الوقت.
  4. ذو عامل ربح متغير بتغير الزمن مما يجعله أكثر مرونة في تصحيح الأخطاء.
  5. مرشح سريع مما يجعله مناسب لتطبيقات الزمن الحقيقي [6].
- مرشح كالمان للنظم الديناميكية يتكون من معادلتين أساسيتين الأولى هي معادلة النظام SE والثانية معادلة الملاحظة أو المشاهدة OE [7].

$$\text{System Equation: } X_t = \Phi_t X_{t-1} + \omega_t$$

$$\text{Observation Equation: } Y_t = M_t X_t + u_t$$

حيث  $\omega_t$  هي عبارة عن تشويش النظام وعادة يكون ضحيح من النوع الأبيض ويتوزع هذا الضحيح بمعدل صفر وتباين  $\sigma_\omega^2$ .

وإن  $u_t$  هو عبارة عن تشويش المشاهدة وأيضاً يكون من النوع الأبيض ويتوزع بمعدل صفر وتباين  $\sigma_u^2$ .

إن الهدف من الترشيح هو تقدير قيمة الإشارة  $X_t$  من المشاهدات  $(Y_0, Y_1, Y_2 \dots Y_t)$  ويرمز عادة للقيمة المرشحة من

$X_t$  بالرمز  $X_t^{(t)}$  إن العلاقات التعاقبية لمرشح كالمان يمكن كتابتها بالشكل التالي [6]:

$$X_t^{(t-1)} = \Phi_t X_{t-1}^{(t-1)}$$

$$P_t^{(t-1)} = \Phi_t P_{t-1}^{(t-1)} \hat{\Phi}_t + Q_t$$

$$K_t = P_t^{(t-1)} M_t (M_t P_t^{(t-1)} \hat{M}_t + R_t)^{-1}$$

$$X_t^{(t)} = X_t^{(t-1)} + K_t (y_t - M_t X_t^{(t-1)})$$

$$P_t^{(t)} = P_t^{(t-1)} - K_t M_t P_t^{(t-1)}$$

$X_t^{(t)}$  هو متجه الحالة State vector.

$\Phi_t$  &  $M_t$  ثابتا ملائمة النموذج حيث  $\hat{\Phi}_t$  مصفوفة النقل،  $M_t$  مصفوفة التحويل.

$R_t$  تباين تشويش المشاهدة والذي يكافئ  $\sigma_u^2$  في حالة أحادي البعد Scalar.

$Q_t$  تباين تشويش النظام ويكافئ  $\sigma_\omega^2$  في حالة أحادي البعد Scalar.

$K_t$  تمثل ربح الترشيح Filtered gain.

$P_t$  تمثل مصفوفة التباين Covariance matrix لخطأ الترشيح.

## 6. بناء نموذج كالمان الخاص بحركة أصبع من أصابع الكف:

الموقع الحقيقي: يقع الأصبع مبدئيًا عند النقطة  $x = 0$  ويتحرك على  $X$  بسرعة ثابتة  $V = 10 \frac{m}{sec}$ ، وبالتالي فإن معادلة حركة الأصبع في الكف هي:

$$X = X_0 + V * t$$

تشكيل فضاء الحالة للنظام:

$$X_k_{prev} = [0; 5 * V_{true}];$$

تهيئة معادلات كالمان:

$$X_k_{buffer} = \text{zeros}(2, N_{samples} + 1);$$

$$X_k_{buffer}(:, 1) = X_k_{prev};$$

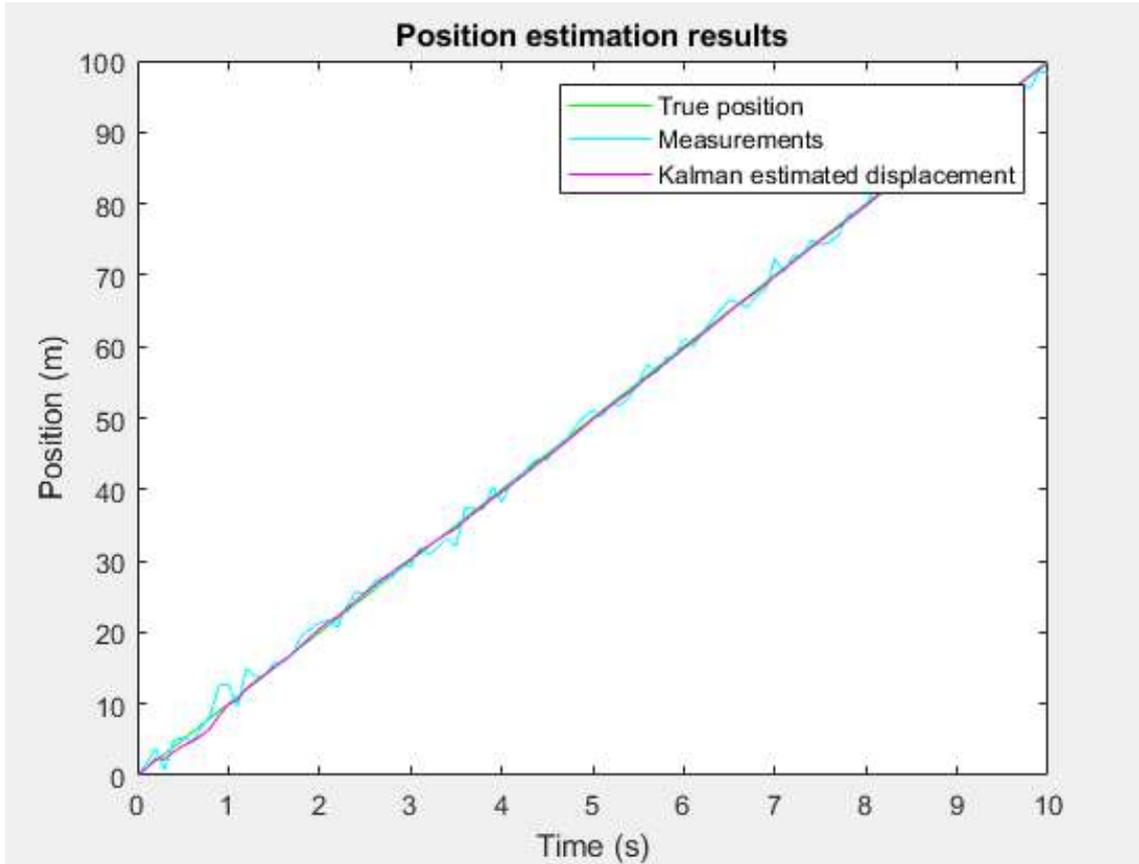
$$Z_{buffer} = \text{zeros}(1, N_{samples} + 1);$$

## 7. النتائج الخاصة بمرشح كالمان:

لدى أخذ عينات من شريحة الأردوينو الموصولة مع الحساسات وتشكيل منها قيم المصفوفات التي استخدمناها في بناء نموذج محاكاة للكف الصناعي على الماتلاب وفق القراءات السابقة حصلنا على النتائج التالية:

### 1.7 نتائج الموقع:

يوضح الشكل (11) نتائج الموقع وفق الحسابات الحقيقية والمقاسة ووفق كالمان:



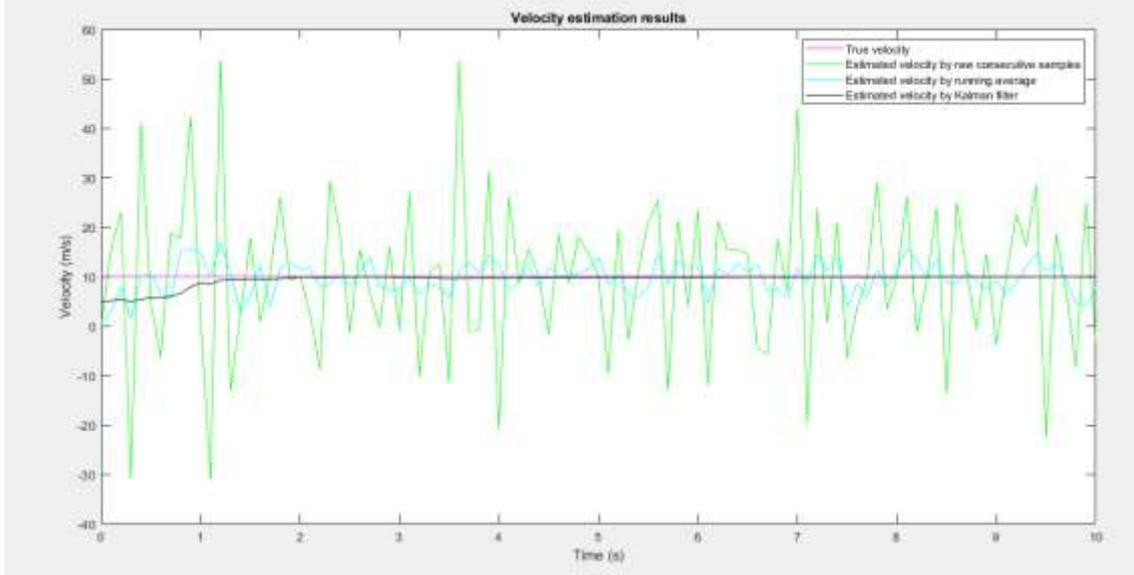
الشكل (11) نتائج الموقع.

1. نلاحظ أنه في اللحظات من 0 حتى 1.5 ثانية هناك تغيرات غير متقاربة بين الموقع الحقيقي والمقاس وذلك بسبب التأخير بسبب تأخير كالمات في تصحيح الإشارة وبعد هذا التأخير طبيعي بسبب حاجة كالمات لزمان ميت لتصحيح الإشارة.

2. نلاحظ في بقية اللحظات هنا تقارب جيد جداً بين القيم المقاسة والموقع الحقيقي وهذا ما يدعم خطية كالمات.

## 2.7 نتائج السرعة:

يوضح الشكل (12) نتائج السرعة خلال زمن الاختبار حيث يحوي الشكل السرعة الحقيقية والسرعة باستخدام كالمات والسرعة باستخدام عينات متتالية خاضعة لتشويش حيث نلاحظ كمية التشويش التي تظهر على المنحني الأخضر.



الشكل (12) نتائج السرعة.

1. نلاحظ من الشكل قدرة كالمات على تتبع الموقع في النظام بالرغم من وجود مجال زمني بداية المجال يحتاجه كالمات للوصول للاستجابة الصحيحة.

2. نلاحظ من المنحني اقتراب إشارة السرعة المحسوبة بواسطة كالمات من الإشارة الحقيقية وبالرغم من الضجيج المضاف.

## الاستنتاجات والتوصيات:

قدم هذا البحث تطبيق يستخدم مرشح كالمات في تطبيق تحمي لضبط قراءات الحساسات، ومن خلال النتائج نلاحظ ما يلي:

1. استخدام مرشح كالمات في التعامل مع إشارة حساس في الزمن الحقيقي أظهر كفاءة وقدرة عالية على متابعة تغيرات إشارة الحساس ورصدها الأمر الذي حسن من دقة النظام وجودة الإشارة الكهربائية وقربها من القيمة الحقيقية لها.
2. بالرغم من كفاءة المرشح إلا أنه أظهر حالات خلل ظهرت بشكل واضح في بداية المجال الزمني بسبب وجود فترة زمن ميت يمر بها المرشح قبل الوصول للاستجابة الصحيحة لذلك نوصي في المستقبل باستخدام الشبكات العصبية في ضبط خطأ النظام لتعمل بشكل متكامل مع مرشح كالمات.

**REFERENCES:**

- [1] Júlio Costa, Filippo Spina, Pasindu Lugoda, Flexible Sensors-From Materials to Applications, DOI:10.3390/technologies7020035, Technologies 7(2):35, [https://www.researchgate.net/publication/332298977\\_Flexible\\_Sensors\\_From\\_Materials\\_to\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/332298977_Flexible_Sensors_From_Materials_to_Applications), 2019
- [2] Simon Monk, Programming Arduino, SECOND EDITION, ISBN 978-1-25-964163-3, <https://agsci.colostate.edu/wp-content/uploads/sites/95/2020/03/Programming-Arduino.pdf>, 2016
- [3] William Pollock, Arduino Project Handbook, ISBN-10: 1-59327-690-7, ISBN-13: 978-1-59327-690-4, Library of Congress, 2016
- [4] BLOG POSTANAT ZAITAPRIL, AN INTRODUCTION TO ARDUINO UNO PINOUT, (2018)
- [5] Masoud Khodarahmi & Vafa Maihami, (2022), "A Review on Kalman Filter Models", Archives of Computational Methods in Engineering.
- [6] Bermudez et al. 2024, "An improved Kalman filter algorithm for tightly GNSS/INS integrated systems".
- [7] Roy, S. K., & Paliwal, K. K. (2018, December). A non-iterative Kalman filter for single channel speech enhancement in non-stationary noise condition. In 2018 12th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS) (pp. 1-7). IEEE.

