

خوارزمية جديدة لمرحلة تخفيض النمط في المتحكم العائم من النمط2

ضياء الدين الأجرد¹

محمد مازن المحاييري² هيام خدام³

الملخص

تعتبر مرحلة تخفيض النمط مهمة في المتحكم العائم من النمط2، لذلك فإن تحسين كفاءة هذه المرحلة مهم لتطوير أداء المتحكم، وتحقيق أفضل استقرار للنظم الهندسية اللاخطية. ولقد نشرنا مقالةً عن مقارنة أهم الخوارزميات المستخدمة في تخفيض النمط وبيّنا كفاءة كل من الخوارزميتين KM و WM. في هذه المقالة ندمج بين هاتين الخوارزميتين لنقترح خوارزمية جديدة تعطي دقة وسرعة أكبر للمتحكم، وأنجزنا ذلك بتصميم متحكمين عائمين من النمط2 لنظام العربية والنواس المقلوب، ومقارنة نتيجة الخوارزمية الجديدة مع كل من KM و WM، حيث أعطت الخوارزمية الجديدة دقة وسرعة أكبر من KM و WM بالنسبة لاستجابة النظام المدروس.

الكلمات المفتاحية: المجموعات العائمة من النمط2، النواس المقلوب، التحكم العائم.

1 قسم هندسة الحواسيب والأتمتة- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

2 قسم هندسة الحواسيب والأتمتة- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

3 قسم هندسة الحواسيب والأتمتة- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

A New Type-Reduction Algorithm for Type-2 Fuzzy Logic Controller

Dia Addeen Alajrad⁽¹⁾

Muhammad Mazen Almahairi⁽²⁾ Hiyam Khaddam⁽³⁾

Abstract

Type-reduction is an important stage in the type-2 fuzzy logic controller, so improving the efficiency of this stage is momentous for developing the performance of the controller, and getting the best stability for the nonlinear engineering systems. We have published an article on comparing the most important algorithms used in type-reduction and showing the efficiency of KM and WM algorithms. In this article we combine between these two algorithms to propose a new algorithm that gives a greater accuracy and speed for the controller. And we achieved that by designing two type-2 fuzzy logic controllers for the cart and inverted pendulum system, and comparing the result of this new algorithm with KM and WM. As the new algorithm gave a better accuracy and speed than KM and WM, in the response of the studied system.

Keywords: Type-2 Fuzzy Sets, Inverted Pendulum, Fuzzy Control.

⁽¹⁾ Eng. Department of Engineering Computers and Computing - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

⁽²⁾ Dr. Eng. Department of Engineering Computers and Computing- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

⁽³⁾ Dr. Eng. Department of Engineering Computers and Computing- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Damascus University.

1- المقدمة:

والخوارزمية المقترحة (التي سيتم تقديمها ضمن هذا البحث باسم KMWM)، وذلك وفق الخطوات التالية:

- دراسة بنية المتحكم العائم من النمط 2.
- دراسة الخوارزميتين KM و WM.
- تقديم الخوارزمية المقترحة KMWM وعملياتها الحسابية.
- دراسة نموذج عربة النواس المقلوب ونمذجته باستخدام Simulink ضمن برنامج MATLAB.
- تصميم متحكم عائم من النمط 2 للتحكم بموضع وقوف العربة ومتحكم عائم آخر من النمط 2 لإبقاء النواس المقلوب بالوضع الشاقولي.
- مقارنة استجابة النظام للمتحكمين من خلال تغيير خوارزمية تخفيض النمط حيث نستخدم الخوارزميات الثلاثة KM و WM والخوارزمية المقترحة KMWM.

التوصيات.**1-2- لمحة تاريخية:**

يوجد العديد من خوارزميات تخفيض النمط المستخدمة في التحكم العائم من النمط 2 من أشهرها خوارزمية KM التي تعتبر الخوارزمية التكرارية الأقدم و الأكثر شيوعاً ضمن هذا المجال [1]، ولكن تحتاج لعمليات تكرارية عديدة، وبالتالي فإن الكلفة الحسابية لها ستكون مرتفعة (حيث تحتاج وسطياً لـ 6 حلقات تكرارية)، لقد تم تحسين هذه الخوارزمية بطرق مختلفة مثل خوارزمية KM المحسنة Enhanced Karnik-Mendel (EKM) التي تعتمد على اختصار المجال الذي نبحث فيه عن نقطتي الاختزال للمجموعة العائمة من النمط 2 [3] هذا الاقتراح ساعد على تقليل الكلفة الحسابية لخوارزمية KM، ولكن بقي مجال تطوير خوارزميات تخفيض النمط مفتوحاً للدراسة لتأتي خوارزمية التكرار مع شرط التوقف Iterative Algorithm with Stopping Condition (IASC) حيث تعتمد على البحث عن نقطتي الاختزال اليمنى واليسرى للمجموعة العائمة من النمط 2 بشكل متزامن [1]، ثم تم

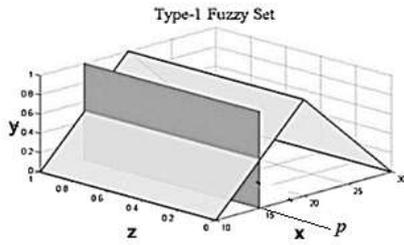
مع تطور النظم الهندسية التي أصبحت أكثر تعقيداً ولاخطية، ظهرت الحاجة إلى تعديل المتحكم العائم من النمط 1 Type-1 Fuzzy Logic Controller (T1FLC) وتطويره إلى المتحكم العائم من النمط 2 Type-2 Fuzzy Logic Controller (T2FLC) الذي يتم التعبير فيه عن درجات الانتماء بقيم عائمة أيضاً. أدى ذلك لوجود مرحلة جديدة في المتحكم العائم من النمط 2 ألا وهي مرحلة تخفيض النمط Type-Reduction (TR) التي تعتبر من أهم مراحل المتحكم العائم من النمط 2 [1]. ظهرت دراسات عديدة تتناول الخوارزميات المستخدمة ضمن هذه المرحلة أقدمها وأكثرها شيوعاً هي خوارزمية Karnik-Mendel (KM) وهي خوارزمية تكرارية ومكلفة حسابياً بسبب عمليات التكرار ضمنها [1] واقترح الباحثون عدة خوارزميات أخرى أكثر كفاءة في تخفيف الكلفة الحسابية مثل خوارزمية Wu and Mendel (WM) التي تعتمد على مبدأ حدود الترجيح (عدم التعيين) Uncertainty Bounds [2]. تم في هذه المقالة اقتراح خوارزمية جديدة تعمل على تحسين عمل مرحلة تخفيض النمط بحيث نستفيد من سرعة خوارزمية KM ودقة خوارزمية WM وبالتالي تحسين أداء المتحكم العائم من النمط 2 والحصول على أفضل استجابة للنظام الخاضع للتحكم.

1-1- هدف البحث:

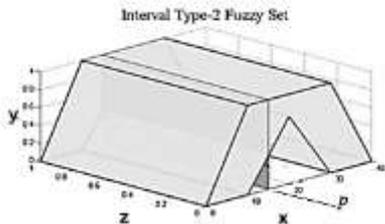
يهدف البحث إلى تقديم خوارزمية جديدة لمرحلة تخفيض النمط في المتحكم العائم من النمط 2 والتحقق من فعاليتها عن طريق بناء متحكمين عائمين من النمط 2 وتطبيقهما على نظام عربة النواس المقلوب - وهو نظام لا خطي - حيث يعمل أحد المتحكمين للتحكم بموضع وقوف العربة والثاني للتحكم بالنواس المقلوب ليبقى بالوضع الشاقولي، ومقارنة نتائج استجابة النظام من خلال تطبيق الخوارزميتين KM و WM

النتائج مقارنة بالتحكم العائم من النمط الأول وبذلك نحصل على استجابة أفضل للنظام الخاضع للتحكم.

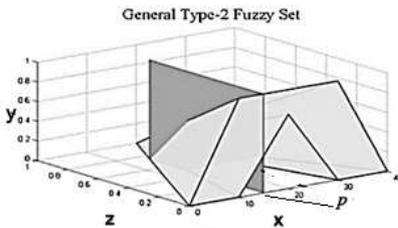
يتم تعويم درجة الانتماء بطريقتين [7]: إما بقيمة واحدة وعندها يسمى المتحكم بالمتحكم العائم من النمط 2 الموحد أو Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller (IT2FLC) أو بقيمة غير واحدة ويسمى عندها المتحكم العائم من النمط 2 العام، General Type-2 Fuzzy logic Controller (GT2FLC) ويبين الشكل (1) الفرق بين المجموعات العائمة من النمط 1 والنمط 2 (الموحد والعام):



(a) المجموعة العائمة من النمط 1



(b) المجموعة العائمة من النمط 2 الموحد



(c) المجموعة العائمة من النمط 2 العامة

الشكل (1) المجموعة العائمة من النمط 1 (a) والمجموعة

العائمة من النمط 2 الموحد (b) والعامة (c) [7]

تحسينها فيما بعد لتنتج خوارزمية Enhanced Iterative Algorithm with Stopping Condition (EIASC) [4] التي تعتبر من الخوارزميات المنافسة لخوارزميتي EKM وKM في الاستخدام ضمن المتحكم العائم من النمط 2، بهذا نجد أن الباحثين يسعون لتطوير خوارزميات تخفيض النمط انطلاقاً من خوارزمية KM بهدف تقليل الكلفة الحسابية.

ومن ناحية أخرى يوجد خوارزميات تعتمد مبدأ حدود الترجيح (عدم التعيين) Uncertainty Bounds وأشهرها خوارزمية Wu-Mendel (WM)، حيث تعاني هذه الخوارزمية من البطء بسبب أنها تحاول إيجاد حدود مجال نقطتي الاختزال خلال أكثر من مرحلة، وتم تحسين هذه الخوارزمية من قبل Latafat وVuqar من خلال اختصار بعض الحسابات ضمنها [5]. كذلك تم تحسين مرحلة تخفيض النمط من قبل كل من Shaohua وJianzhong وYong وRong لأجل المتحكم العائم من النمط 2 العام [6]. انطلاقاً من هذه اللحظة التاريخية أتت فكرة تطوير خوارزمية تخفيض النمط بحيث ندمج بين الخوارزميتين الأشهر والأكثر استخداماً KM التكرارية وWM التي تعتمد مبدأ حدود الترجيح لنحصل على خوارزمية جديدة (KMWM) تحسن من أداء المتحكم العائم من النمط 2.

2- بنية المتحكم العائم من النمط 2: تم تقديم مفهوم زيادة درجات الأنظمة العائمة (Fuzzy Systems FSs) من قبل العالم لطفي زاده [1] وذلك من خلال زيادة أبعاد المجموعة العائمة من النمط الأول (Type1 Fuzzy Sets-T1FSs) لتصبح نمطاً ثانياً وثالثاً... إلخ، وبما أننا نستخدم توابع الانتماء في المتحكم العائم لتمثيل المجموعات العائمة التي أصبحت في النمط الثاني تمتلك درجة انتماء أخرى نتيجة تعويم درجة الانتماء زادت بذلك دقة اتخاذ القرار عند استنباط النتائج من جملة القواعد. إذاً تعتمد فكرة التحكم العائم من النمط 2 على تعويم درجة الانتماء أي جعله مجموعة عائمة كذلك، وبالتالي الحصول على مجالات قرار أكثر عند بناء جملة القواعد واستنباط

ويمكننا تلخيص مراحل المتحكم العائم من النمط 2 وفق التسلسل التالي:

- التعميم Fuzzifier:

ويتم فيها تعويم قيمة الدخل crisp value بحسب شكل المجموعات العائمة من النمط 2 في الدخل (مثلثة - غاوصية - جرسية) والتي تمثلها بتوابع الانتماء.

- محرك الاستدلال Inference Engine:

يتم في هذه المرحلة تلقي القيم العائمة من مرحلة التعميم وبالاعتماد على جملة القواعد Rule Base (التي يضعها الخبير) مع توابع الانتماء في الخرج يتم الحصول على مجموعات عائمة من النمط 2 في خرج محرك الاستدلال.

- جملة القواعد Rule Base:

تحتوي جملة القواعد على خبرة المصمم الذي يتعامل مع النظام المدروس حيث يضع مجموعة من القواعد تأخذ الشكل IF THEN وعن طريقها يتم حساب خرج محرك الاستدلال الذي نمثله بمجموعة عائمة من النمط 2.

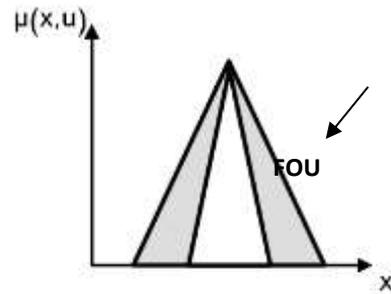
- مرحلة تخفيض النمط Type-Reduction:

وهي المرحلة الأساسية التي يختلف فيها المتحكم العائم من النمط 2 عن المتحكم العائم من النمط 1 حيث يكون دخلها مجموعة عائمة من النمط 2 وينتج عنها مجموعة عائمة من النمط 1 (لكل قاعدة من القواعد)، وفيها يتم تطبيق الخوارزميات مثل KM أو WM أو غيرها من الخوارزميات التي تحاول إيجاد أفضل نقطتي اختزال، ومن هاتين النقطتين نحدد أفضل مجموعة عائمة من النمط 1 يتم تطبيق فك التعميم عليها و الحصول على القيمة الرقمية التي نطبقها على النظام الخاضع للتحكم.

- مرحلة فك التعميم Defuzzification:

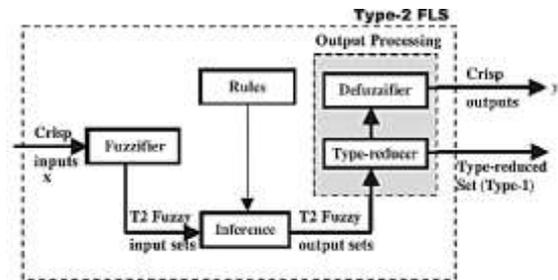
ويتم فيها الانتقال من القيمة العائمة في الخرج إلى قيمة رقمية يتم تطبيقها على النظام المدروس [1].

حيث يدل المحور x على قيم المجال في فضاء الحالة X والمحور y على تابع الانتماء الأساسي والمحور z على تابع الانتماء الثانوي، و p قيمة معينة ضمن المجال X . ويبين الشكل (2) تابع الانتماء الثانوي الذي نحصل عليه:



الشكل (2) تابع الانتماء الثانوي

ندعى المنطقة المظللة في الشكل (2) بمنطقة عدم التعيين (FOU) Footprint of Uncertainty، حيث استوجب هذا الفرق بين المجموعة العائمة من النمط 1 والنمط 2 وجود مرحلة جديدة ضمن المتحكم العائم من النمط 2 ألا وهي مرحلة تخفيض النمط وتكمن مهمة مرحلة تخفيض النمط في إيجاد أفضل مجموعة عائمة من النمط 1 ضمن هذه المنطقة من أجل تطبيق فك التعميم عليها والحصول على أفضل قيمة رقمية نطبقها على النظام الخاضع للتحكم ويبين الشكل (3) [8] موضع مرحلة تخفيض النمط ضمن بنية المتحكم العائم من النمط 2 (سواء الموحد أو العام):



الشكل (3) بنية المتحكم العائم من النمط 2 [8]

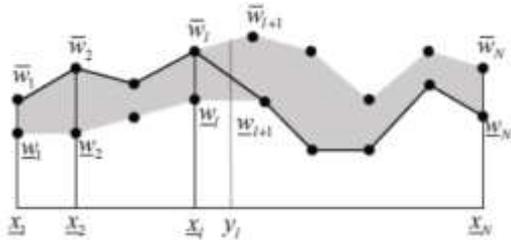
- تابع الانتماء السفلي Lower Membership Function (LMF).

- تابع الانتماء العلوي Upper Membership Function (UMF).

يتم البحث ضمن هذين التابعين عن التابع الأنسب الذي يمثل المجموعة العائمة، ولإجراء هذا العمل ظهرت عدة خوارزميات هدفها إيجاد هاتين النقطتين l, r اللتين تحددان أفضل مجموعة عائمة، وسندرس فيما يلي الخوارزميتين KM و WM، ونقدم الخوارزمية المقترحة KMWM التي تجمع بينهما بهدف تحسين مرحلة تخفيض النمط.

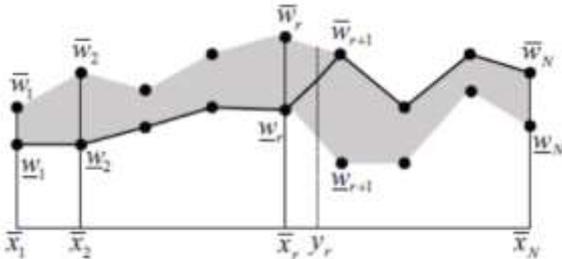
3-1- خوارزمية Karnik-Mendel (KM):

تعتبر هذه الخوارزمية من أشهر الخوارزميات المستخدمة في مرحلة تخفيض النمط ضمن المتحكم العائم من النمط 2 [7]، حيث تعتمد العملية التكرارية في إيجاد نقطتي الاختزال l, r بالاعتماد على قيم تابعي الانتماء السفلي والعلوي كما يبين الشكل (5):



الشكل (5) قيم تابعي الانتماء السفلي والعلوي لنقاط الجهة اليسرى [4]

نفس الأمر بالنسبة لنقاط الجهة اليمنى كما يبين الشكل (6):

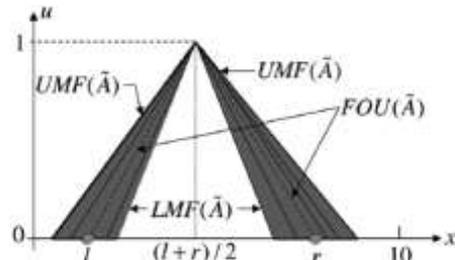


الشكل (6) قيم تابعي الانتماء السفلي والعلوي لنقاط الجهة اليمنى [4]

3- دراسة خوارزميات تخفيض النمط: من أهم الأمور الأساسية في الأنظمة العائمة هو الانتقال من المجموعة العائمة إلى قيمة رقمية بحيث يمكن تطبيقها على النظام المدروس، فعندما يكون المتحكم العائم من النمط 1 يتم ذلك عن طريق مرحلة فك التعويم، أما في حالة المتحكم العائم من النمط 2 فلدينا أسلوبين متبعين [8]:

- إما الانتقال مباشرة من المجموعة العائمة من النمط 2 إلى قيمة رقمية عن طريق مرحلة فك التعويم defuzzification.
- أو الانتقال من المجموعة العائمة من النمط 2 إلى مجموعة عائمة من النمط 1 ثم إلى قيمة رقمية وتدعى مرحلة تخفيض النمط type-reduction ومعها مرحلة فك التعويم type-reduction + defuzzification.

ويجب التنويه أنه عندما يختفي الغموض أو الترجيح المتواجد في المجموعات العائمة من النمط 2 عندها تصبح المجموعة عائمة من النمط 1. نحتاج في مرحلة تخفيض النمط أن نحدد نقطتي الاختزال اليمنى (r) واليسرى (l) اللتين تحددان أفضل مجموعة عائمة من النمط 1 ضمن المجموعات العائمة العديدة المتواجدة في المجموعة العائمة من النمط 2 كما يبين الشكل (4) [1]:



الشكل (4) نقطتي الاختزال l, r [1]

يتبين لنا من الشكل (4) وجود تابعين للمجموعة العائمة من النمط 2:

يتم عمل خوارزمية KM وفق الخطوات التالية: 1- نرتب

النقاط x_n وفق التسلسل $n=1, \dots, N$ مع القيم المقابلة لها.

2- نحسب قيم w_n الأولية عن طريق المتوسط الحسابي

للقيمتين w_n, \bar{w}_n .

3- حساب القيمة الأولية y عن طريق المعادلة (1):

$$y = \frac{\sum_{i=1}^N x_i w_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (1)$$

وفق x_n بين ترتيب النقاط $4y$ - نبحث عن ترتيب القيمة

: L المعادلة (2) ونختار الترتيب الأصغر ليكون قيمة

$$x_L \leq y \leq x_{L+1} \quad (2)$$

5- نحسب قيمة y' عن طريق المعادلة (3):

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^L (x_i) \bar{w}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N (x_i) w(x_i)}{\sum_{i=1}^L \bar{w}(x_i) + \sum_{i=L+1}^N w(x_i)} \quad (3)$$

6- نقارن قيمة y' مع y فإذا كانت متساوية نكون

حصلنا على قيمة نقطة الاختزال اليسرى y_l وإلا نجعل

$y = y'$ ونعود للخطوة 4.

هكذا نكون حصلنا على نقطة الاختزال اليسرى وأما بالنسبة

لإيجاد نقطة الاختزال اليمنى نكرر نفس التسلسل في المخطط

التدفقي الموضح في الشكل (7) وكوننا نبحث عن نقطة

الاختزال اليمنى لتمييز حساباتها عن حسابات النقطة اليسرى

نستخدم r بدل l و y_r بدل y_l و R بدل L . من الملاحظ وجود

عمليات تكرارية ضمن طريقة KM مما يزيد من الكلفة

الحسابية في إيجاد نقطتي الاختزال اليمنى واليسرى حيث يتم

البحث عن كل نقطة على حدى ضمن عملية تكرارية مستقلة

عن الأخرى لذلك يمكننا القول أنه بالرغم من أنها أكثر

الخوارزميات استخداماً كونها تحدد المبدأ العام لمرحلة تخفيض

النمط ولكن يسعنا القول أنها لا تعطي دوماً الحل الأمثل

والأداء الأفضل للمتحكم العائم من النمط 2. ننتقل الآن

لخوارزمية WM التي تعتمد مبدأ حدود الترجيح (عدم التعيين)

Uncertainty Bounds

3-2- خوارزمية Wu-Mendel (WM)

حيث:

- x_i القيم التي نحسب لها قيمتي تابعي الانتماء السفلي

والعلوي للجهتين اليمنى واليسرى.

- w_i قيم تابع الانتماء السفلي والعلوي للجهتين اليمنى

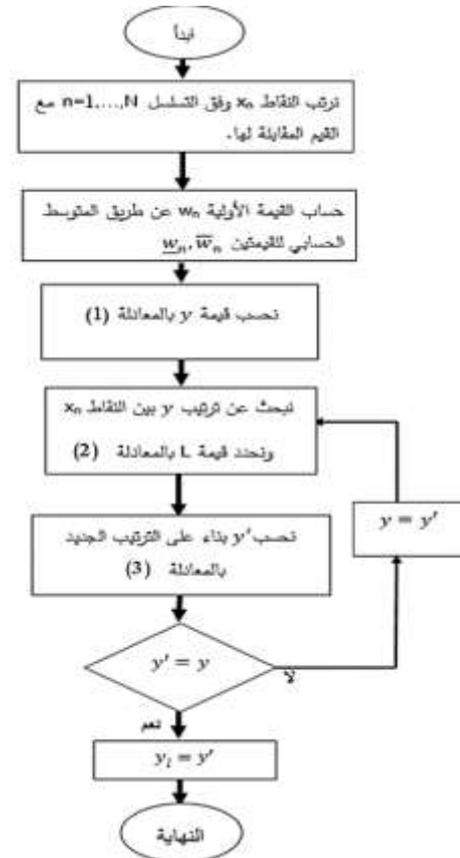
واليسرى.

- y_l نقطة الاختزال في الجهة اليسرى.

- y_r نقطة الاختزال في الجهة اليمنى.

ويكون تسلسل عمليات إيجاد نقطة الاختزال اليسرى كما

هو موضح في المخطط التدفقي في الشكل (7):



الشكل (7) المخطط التدفقي لخوارزمية KM في إيجاد y_l

حيث:

- $n=1, 2, \dots, N$ ترتيب النقاط في الجهة اليسرى.

- l ترتيب نقطة الاختزال في الجهة اليسرى.

$$\begin{aligned} \bar{y}_l(\mathbf{x}) &= \min \{y_l^{(0)}(\mathbf{x}), y_l^{(M)}(\mathbf{x})\} \\ \underline{y}_r(\mathbf{x}) &= \max \{y_r^{(0)}(\mathbf{x}), y_r^{(M)}(\mathbf{x})\} \end{aligned} \quad (5)$$

ويتم حساب قيم الانحراف وفق المعادلات (6) كالتالي [2]:

$$\begin{aligned} \delta_l(\mathbf{x}) &\equiv \left| y_l(\mathbf{x}) - \frac{\underline{y}_l(\mathbf{x}) + \bar{y}_l(\mathbf{x})}{2} \right| \\ \delta_r(\mathbf{x}) &\equiv \left| y_r(\mathbf{x}) - \frac{\underline{y}_r(\mathbf{x}) + \bar{y}_r(\mathbf{x})}{2} \right| \end{aligned} \quad (6)$$

ويتم حساب نقطتي الحدود المتبقية كما في المعادلات (7) التالية:

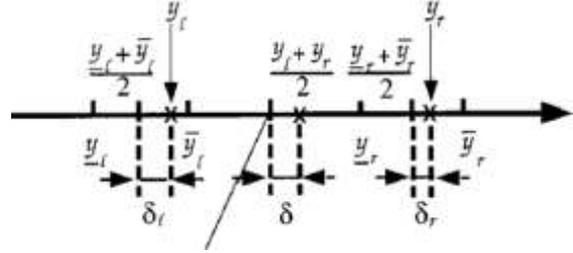
$$\begin{aligned} x) = \bar{y}_l(\mathbf{x}) - &\left[\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{f}^i - \underline{f}^i)}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i \sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \right. \\ &\times \left. \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i (y_l^i - y_l^1) \sum_{i=1}^M \bar{f}^i (y_l^M - y_l^i)}{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i (y_l^i - y_l^1) + \sum_{i=1}^M \bar{f}^i (y_l^M - y_l^i)} \right] \\ x) = \underline{y}_r(\mathbf{x}) + &\left[\frac{\sum_{i=1}^M (\bar{f}^i - \underline{f}^i)}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i \sum_{i=1}^M \underline{f}^i} \right. \\ &\times \left. \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i (y_r^i - y_r^1) \sum_{i=1}^M \underline{f}^i (y_r^M - y_r^i)}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i (y_r^i - y_r^1) + \sum_{i=1}^M \underline{f}^i (y_r^M - y_r^i)} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

أخيراً يمكننا الآن حساب نقطتي الاختزال وفق المعادلات (8) التالية:

$$\begin{aligned} y_l(\mathbf{x}) &= \frac{\bar{y}_l(\mathbf{x}) + \underline{y}_l(\mathbf{x})}{2} \\ y_r(\mathbf{x}) &= \frac{\bar{y}_r(\mathbf{x}) + \underline{y}_r(\mathbf{x})}{2} \end{aligned} \quad (8)$$

وبالتالي يمكننا الحصول على نقطتي الاختزال اليمنى واليسرى دون الحاجة للتكرار الحسابي كما في خوارزمية KM

تختلف هذه الخوارزمية عن خوارزمية KM حيث تعتمد على مبدأ حدود الترجيح Uncertainty Bounds، حيث يتم تحديد مجالين لكل نقطة من نقطتي الاختزال اليمنى واليسرى كما يبين الشكل (8):



الشكل (8) حدود الترجيح (عدم التعيين) [5]

حيث المجال $[\underline{y}_l, \bar{y}_l]$ للنقطة اليسرى y_l ، والمجال $[\underline{y}_r, \bar{y}_r]$ للنقطة اليمنى y_r ، ويتم حساب انحراف النقطة التي نبحث عنها بالضبط عن المركز وهو الذي نرمز له بـ δ .

تبدأ العمليات الحسابية لخوارزمية WM كما يلي: تبين لنا من الشكل (4) أنه أصبح لدينا تابعي انتماء وهما UMF, LMF ولدينا جملة القواعد التي عددها M في المتحكم العائم من النمط 2، فيتم حساب خرج هذه القواعد بالنسبة للجهتين اليمنى واليسرى من خلال مجموعة المعادلات (4) التالية:

$$\begin{aligned} \{\text{LMFs, left}\} : y_l^{(0)}(\mathbf{x}) &= \frac{f^1 y_l^1 + \dots + f^M y_l^M}{f^1 + \dots + f^M} \\ \{\text{UMFs, left}\} : y_l^{(M)}(\mathbf{x}) &= \frac{\bar{f}^1 y_l^1 + \dots + \bar{f}^M y_l^M}{\bar{f}^1 + \dots + \bar{f}^M} \\ \{\text{LMFs, right}\} : y_r^{(0)}(\mathbf{x}) &= \frac{f^1 y_r^1 + \dots + f^M y_r^M}{f^1 + \dots + f^M} \\ \{\text{UMFs, right}\} : y_r^{(M)}(\mathbf{x}) &= \frac{\bar{f}^1 y_r^1 + \dots + \bar{f}^M y_r^M}{\bar{f}^1 + \dots + \bar{f}^M} \end{aligned} \quad (4)$$

حيث $[f^i, \bar{f}^i]$ مجال تفعيل القاعدة i ضمن القواعد M.

ثم يتم إيجاد أصغر وأكبر قيمة من هذه القيم كما في المعادلات (5):

بما أنه تم حساب حدود لكل نقطة اختزال أي النقطة اليسرى ضمن المجال $[\bar{y}_l, \underline{y}_l]$ ، والنقطة اليمنى ضمن المجال $[\bar{y}_r, \underline{y}_r]$ وبالتالي فإن نقطتي الاختزال ضمن هذين المجالين حيث يمكننا استخدام التابعين \max, \min لتحديد القيم الأنسب لنقطتي الاختزال بين قيم حدود المجالين السابقين.

الأسلوب الثاني:

بدون استخدام التابعين \max, \min ولكن بالقسمة على القيمتين (2 و 1.1) اللتان تم الوصول إليهما من خلال الخطأ و التجريب كما في المعادلة (9) (تم اتباع هذا المنهج في تحسين KM والانتقال إلى EKM [9]):

$$\begin{aligned} y_l(x) &= \frac{\bar{y}_l(x) + \underline{y}_l(x)}{2} \\ y_r(x) &= \frac{\bar{y}_r(x) + \underline{y}_r(x)}{1.1} \end{aligned} \quad (9)$$

مع إمكانية البقاء على إيجاد المتوسط الحسابي الذي كنا نحسبه باستخدام المعادلات (8). ويمكننا تبيان هذه المراحل وفق المخطط التدفقي المبين بالشكل (9):

ولكن يوجد نسبة كبيرة من الحسابات التي تم إجراؤها هي في الواقع زائدة عن الحاجة، مما يؤثر سلباً على التكلفة الحسابية [5]. هذه العمليات الحسابية تؤثر سلباً على عمل المتحكم عندما يكون لدينا عدد كبير من القواعد التي نريد تخفيض نمط المجموعات العائمة من النمط 2 الناتجة من خرج محرك الاستدلال.

سنقوم من خلال الخوارزمية المقترحة KMWM التي نقدمها في الفقرة التالية لتقليل هذه الحسابات.

3-3- الخوارزمية المقترحة KMWM لمرحلة تخفيض النمط:

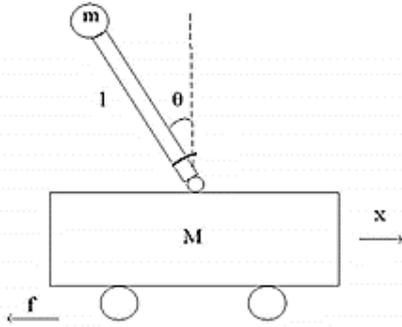
كما رأينا سابقاً فإن مرحلة تخفيض النمط تهدف لإيجاد نقطتي الاختزال ضمن المجموعة العائمة من النمط 2 لنحدد ضمنها أفضل مجموعة عائمة من النمط 1، ولذلك تم وضع العديد من الخوارزميات التي تقوم بالبحث عن هاتين النقطتين اليمنى واليسرى، وتعرفنا على أكثرها شيوعاً KM و WM، وفي هذه الفقرة سنقدم خوارزمية جديدة KMWM تخفف من الكلفة الزمنية لخوارزمية KM، وتقلل من العمليات الحسابية لخوارزمية WM حيث انطلقنا من خوارزمية WM وفق التسلسل التالي:

1. سيتم حساب القيم $\bar{y}_l(x), \underline{y}_l(x)$ عن طريق الخوارزمية KM وبالتالي اختصرنا المعادلات الرياضية (5) الموجودة في حسابات خوارزمية WM.
2. ثم نقوم بحساب $\bar{y}_r(x), \underline{y}_r(x)$ كما في المعادلات (7).
3. لإيجاد نقطتي الاختزال اليمنى واليسرى كنا نقوم بإجراء المتوسط الحسابي كما في المعادلات (8).
4. الآن تم اتباع طريقة الخطأ والتجريب وفق أسلوبين:
الأسلوب الأول:

2- إن إيجاد نقطتي الاختزال ليس محصوراً بالتقسيم على القيمة (2) حيث يمكننا التقسيم على أي قيمة أخرى تناسب النظام المدروس (من خلال الخطأ والتجريب). ولقد قمنا بإثبات مدى فعالية هذه الخوارزمية من خلال تطبيقها عند دراسة استقرار النظام اللاخطي والحرع لنظام العربة والنواس المقلوب وهو ما سيتم عرضه في الفقرة التالية.

4- نظام العربة والنواس المقلوب:
يعتبر نظام النواس المقلوب الذي يتألف من عربة تسير على سكة وتحمل ثقل معلق عن طريق ذراع حر الحركة [10]، من الأنظمة اللاخطية المعقدة و الحرجة في استقرارها فهي تحتاج لمتحكم دقيق للتحكم بموضع النواس بشكله الشاقولي أثناء تحرك العربة.

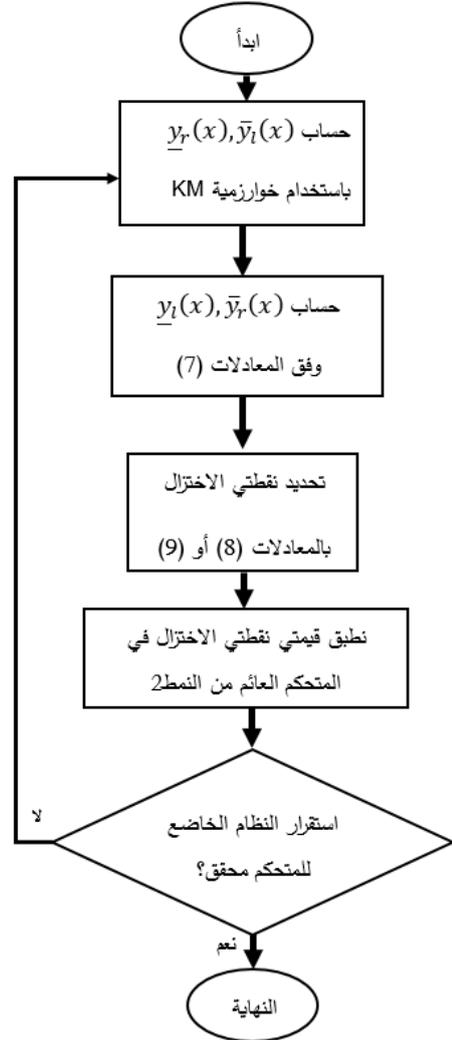
4-1- نمذجة نظام العربة والنواس المقلوب:
يبين الشكل (10) عربة تحمل نواسا مقلوبا:



الشكل (10) العربة والنواس المقلوب [10]

حيث:

- M كتلة العربة.
 - m كتلة النواس.
 - l طول ذراع النواس.
 - x اتجاه سير العربة.
 - f القوة المطبقة على النواس نتيجة حركة العربة باتجاه x.
 - θ زاوية ميلان النواس.
- وتمثل المعادلة (10) القوة N التي نريد تطبيقها هي:



الشكل (9) المخطط التدفقي لاستخدام الخوارزمية المقترحة

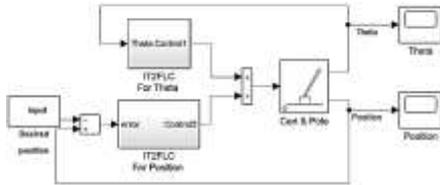
إذا ما تم إنجازه من خلال هذه الخوارزمية هو التالي:

1- اختصار جزء من العمليات الحسابية في خوارزمية WM وإدخال خوارزمية KM ضمن العمليات الحسابية لخوارزمية WM.

مع العلم أنه يمكننا استبدال KM بأي خوارزمية أخرى مثل EKM أو EIASC دون الحاجة لإبدال كامل عمليات الخوارزمية.

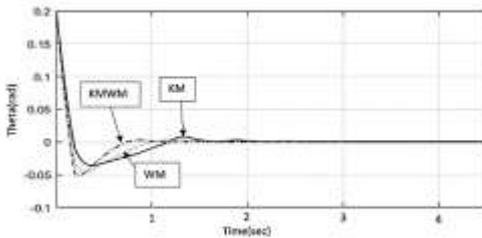
1. If (e is N) and (de is N) then (output1 is BN) (1)
2. If (e is N) and (de is Z) then (output1 is N) (1)
3. If (e is N) and (de is P) then (output1 is Z) (1)
4. If (e is Z) and (de is N) then (output1 is N) (1)
5. If (e is Z) and (de is Z) then (output1 is Z) (1)
6. If (e is Z) and (de is P) then (output1 is P) (1)
7. If (e is P) and (de is N) then (output1 is Z) (1)
8. If (e is P) and (de is Z) then (output1 is P) (1)
9. If (e is P) and (de is P) then (output1 is BP) (1)

يصبح مخطط النظام بعد إضافة المتحكمين كما في الشكل (13):



الشكل (13) مخطط النظام المدروس باستخدام T2FLC

سيتم استخدام ثلاث خوارزميات في مرحلة تخفيض النمط ضمن المتحكمين IT2FLC وهي KM,WM,KMWM ومقارنة استجابة النظام حيث لدينا استجابتين أحدهما موضع النواس الشاقولي والثانية موضع العربة. وبمقارنة الاستجابات الثلاث كانت النتائج كما في الشكل (14) حيث توضح استجابة النظام بالنسبة للنواس المقلوب:



الشكل (14) استجابة النظام بالنسبة لزاوية النواس

المقلوب عند استخدام الخوارزميات KM,WM,KMWM أما بالنسبة لموضع العربة فكانت الاستجابات كما في الشكل (15):

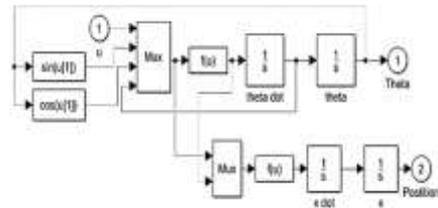
$$N = Mg + F_y$$

$$= (M + m)g - ml\ddot{\theta} \sin \theta - ml\dot{\theta}^2 \cos \theta > 0 \quad (10)$$

حيث:

g - ثابت تسارع الجاذبية الأرضية.

إذا نريد تحريك العربة بالاتجاه x وينفس الوقت إبقاء النواس بشكله الشاقولي، لذلك نحتاج لمتحكمين أحدهما للتحكم بموضع وقوف العربة وآخر لإبقاء النواس بشكله الشاقولي. تم نمذجة نظام العربة والنواس المقلوب باستخدام Simulink في برنامج Matlab كما يبين المخطط في الشكل (11):

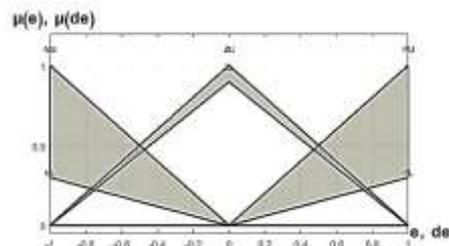


الشكل (11) نمذجة نظام العربة والنواس المقلوب باستخدام

Simulink

4-2- تصميم متحكمين عائمين T2FLC للتحكم بنظام النواس المقلوب:

تم تصميم متحكمين عائمين من النمط 2 IT2FLC من النوع sugeno، حيث تم اختيار شكل توابع الانتماء لتكون مثلثية لكل من الخطأ وتغير الخطأ وهما دخلَي المتحكم كما في الشكل (12):



الشكل (12) توابع الانتماء للدخل في المتحكم T2FLC

وأما إشارة خرج المتحكم u فلها خمس قيم رقمية كون المتحكم نوعه sugeno وبعد تصميم جملة القواعد بطريقة الخطأ والتجريب التالية:

الجدول (1) بارامترات استجابة النظام بالنسبة لزاوية النواس المقلوب

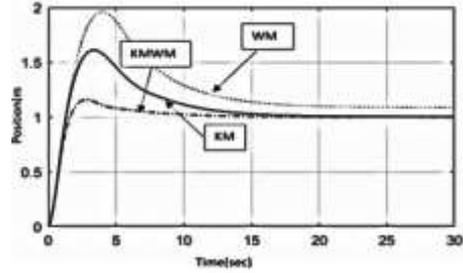
التجاوز	الخطأ الستاتيكي	زمن الاستقرار sec	الخوارزمية المستخدمة
0.047	1.163e-3	12	خوارزمية KM
0.037	1.382e-3	25	خوارزمية WM
0.0505	1.719e-4	10	خوارزمية KMWM

نلاحظ أن زمن الاستقرار بالنسبة للخوارزمية المقترحة KMWM أقل منه للخوارزمتين KM و WM، أما بالنسبة للتجاوز عن القيمة المرغوبة فكانت 0.0505 قريبة من 0.047 عند استخدام خوارزمية KM. وتم حساب بقية بارامترات الاستجابة بالنسبة لموضع العربة كما في الجدول (2):

الجدول (2) بارامترات استجابة النظام بالنسبة لموضع العربة

التجاوز	الخطأ الستاتيكي	زمن الاستقرار sec	زمن الصعود sec	الخوارزمية المستخدمة
0.616	0.005	25	0.9	خوارزمية KM
0.963	0.101	-	1.012	خوارزمية WM
0.158	0.003	20	1	خوارزمية KMWM

نلاحظ أن سرعة استقرار النظام باستخدام KMWM أفضل منه عند استخدام KM، وحيث أنه لم يستقر في نفس المدة الزمنية باستخدام WM فبقي هنالك خطأ ستاتيكي كما تبين استجابة النظام في الشكل (15)، أما بالنسبة للتجاوز عن القيمة المرغوبة فكانت القيمة 0.158 باستخدام KMWM أقل منها بشكل واضح عند استخدام كل من KM و WM. كذلك عند المقارنة بين شكل إشارات التحكم المطبقة على النظام المدروس المبينة بالشكلين (16) و (17) فإن إشارة التحكم عند استخدام KMWM أكثر كفاءة في التطبيق على النظام مقارنة بإشارات التحكم عند استخدام كل من KM و WM أي أن التحسين في استجابة النظام والحصول على نتيجة أفضل عند استخدام KMWM مقارنة بكل من KM و WM لم يكن على حساب تعقيد إشارة التحكم المطبقة على نظام العربة والنواس المقلوب.

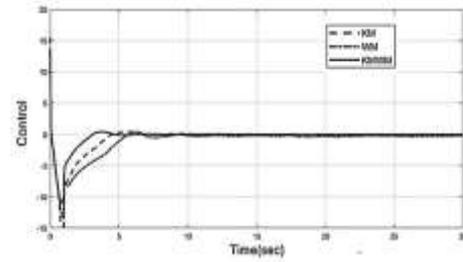


الشكل (15) استجابة النظام بالنسبة لموضع العربة عند

استخدام الخوارزميات KM,WM,KMWM

وكانت إشارة التحكم المطبقة على النظام بالنسبة لزاوية النواس

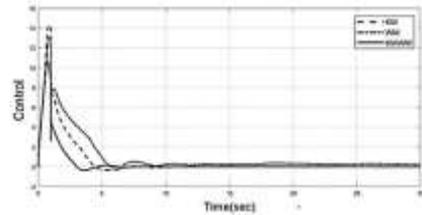
المقلوب كما في الشكل (16):



الشكل (16) إشارة التحكم بالنسبة لزاوية النواس المقلوب

وإشارة التحكم المطبقة على النظام بالنسبة لموضع العربة كما في

الشكل (17):



الشكل (17) إشارة التحكم بالنسبة لموضع العربة

بهذا نكون قد أنهينا مرحلة تصميم المتحكمين العائمين IT2FLC

ورؤية نتائج تطبيقهما باستخدام الخوارزميات KM,WM,KMWM.

5- مقارنة النتائج:

تمت مقارنة النتائج من خلال حساب بارامترات استجابة النظام لكل من زاوية النواس المقلوب وموضع العربة حيث يبين الجدول (1) بارامترات استجابة النظام بالنسبة لزاوية النواس:

يمكننا الوصول من هذه المقارنة إلى أن الخوارزمية المقترحة KMWM أحدثت تحسناً في مرحلة تخفيض النمط ضمن المتحكم العائم من النمط 2 مما أدى لتحسين استجابة النظام الخاضع للتحكم مقارنة مع استخدام كل من KM و WM اللتان تم اختيارهما كون KM أكثر الخوارزميات التكرارية انتشاراً، و WM الخوارزمية التي تعتمد مبدأ حدود عدم التعيين. وبهذا نكون قد أضفنا خوارزمية جديدة لمرحلة تخفيض النمط تحسّن من أداء المتحكم العائم من النمط 2.

6- التوصيات:

يمكننا دراسة استخدام الخوارزمية المقترحة KMWM لمرحلة تخفيض النمط في المتحكم العائم من النمط 2 العام General Type-2 Fuzzy Controller. كما يمكننا دراسة التعقيد الحسابي لهذه الخوارزمية باستخدام طريقة Big(O) ومقارنتها مع بقية الخوارزميات المستخدمة في مرحلة تخفيض النمط، وأيضاً إمكانية إضافتها للأداة Type-2 fuzzy logic tool box وهي مفتوحة المصدر ومتوفرة حالياً ضمن برنامج MATLAB.

المراجع References

- [1] MENDEL.J, “Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems Introduction and New Directions”, 2nd Edition, Springer International Publishing,2017.
- [2] Wu.H, MENDEL.J, “Uncertainty Bounds and Their Use in the Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.10, NO.5, 2002.
- [3] Wu. D, MENDEL.J, “Enhanced Karnik–Mendel Algorithms”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.17, NO. 4, 2009.
- [4] Zhang, Z., Wang, T., Chen, Y., and Lan, J. “Design of type-2 Fuzzy Logic Systems Based on Improved Ant Colony Optimization”, International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 17, NO. 1, 1-9. 2019.
- [5] Mirzakhonov.V, Gardashova.L, “Modification of the Wu-Mendel approach for linguistic summarization”, Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence ,2018.
- [6] Jianzhong.S., Shaohua.L, L., Yong, Y., Rung, L, “An improved general type-2 fuzzy sets type reduction and its application in general type-2 fuzzy controller design”, Soft Computing a Fusion of Foundations, Methodologies and Applications Springer, 2019.
- [7] Doctor.F, Syue.C, Liu.Y, Shieh.J, Iqbal.R, “Type-2 fuzzy sets applied to multivariable self-organizing fuzzy logiccontrollers for regulating anesthesia”, Appl. Soft Comput. J. (2015).
- [8] Karnik.N, MENDEL.J, Liang.Q, “Type-2 Fuzzy Logic Systems”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol.7, NO.6, 1999.
- [9] D. Wu and J. M. Mendel, “Enhanced Karnik–Mendel algorithms”, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 17, no. 4, pp. 923–934, 2009.
- [10] Liu.Y, Yu.H, Burrows.B, “Optimization and Control of a Pendulum-driven Cart-pole System”, Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, London, UK, 2007.