

## طرق وتقنيات التحكم و التمثيل للنظرية اللاخطية

### Methods and techniques control and simulation in nonlinear theory

أبوالقاسم ضو الغضبان      الصديق محمد بالحاج      حسين أحمد المصروب

المعهد العالي للتقنية      المعهد العالي للتقنية      المركز المتقدم للتقنية/طرابلس  
الصناعية \ النجيلة      الصناعية \ النجيلة

[sedegmb1@gmail.com](mailto:sedegmb1@gmail.com) , [a.elghodban41@gmail.com](mailto:a.elghodban41@gmail.com)

#### الملخص

الأنظمة اللاخطية لها أهمية كبيرة في مجال الفيزياء والهندسة ودراسة الطقس والإدارة والاقتصاد والنمو السكاني والعديد من الظواهر الطبيعية. ولعل من أبسط طرق تمثيل نظام لأخطي هو استخدام البندول المعكوس. ومنذ حوالي الستينات أصبح البندول المعكوس من أهم وابسط النماذج التي تستخدم لتمثيل ودراسة الأنظمة اللاخطية. في هذه الورقة يتم استعراض أهم طرق التحكم المستخدمة للسيطرة علي الأنظمة اللاخطية والتقنيات التي يتم الاستعانة بها لتحقيق أفضل النتائج. والغرض في هذه الورقة هو إجراء مسح لتطبيقات طرق وتقنيات التحكم باستخدام البندول المعكوس متضمنا مقارنة بينها وتوقع الاتجاهات المستقبلية المحتملة التي يمكن تصورها استنادا علي ذلك. الكلمات المفتاحية : اللاخطية، بندول معكوس، طرق تحكم، المنطق الضبابي، مستعمرة النمل ، أسراب العناصر، الشبكات العصبية.

#### Abstract

Nonlinear systems have great importance in physics, engineering, weather, management, economics, population growth and many natural phenomena. Perhaps the simplest way to represent a

nonlinear system is to use the inverted pendulum. Since about the 1960s, the reverted pendulum has become one of the most important and simplest models used to represent and study nonlinear systems. This paper reviews the main control methods used to control nonlinear systems and the techniques used to achieve the best results

**Keywords:** nonlinearity, inverted pendulum, control methods, fuzzy logic, ant colony, Particle Swarm, neural networks.

### 1. المقدمة

الأنظمة اللاخطية تمثل العديد من الأنظمة والعلاقات في مجالات شتى والتي لها أهمية كبيرة مثل الفيزياء والهندسة ودراسة الطقس والإدارة والاقتصاد والنمو السكاني والعديد من الظواهر الطبيعية. ويعتبر البندول المعكوس هو مثال كلاسيكي لنظام غير مستقر بطبيعته.

وبعبارة بسيطة، يمكن تفسير البندول المعكوس بقياس توازن عصا طويلة علي إصبع واحد. وتمثل أنظمة البندول المعكوس فئة كبيرة من الأنظمة الميكانيكية غير الخطية تحت التشغيل، وهي مناسبة تماما للتحقق وممارسة الأفكار الناشئة في نظرية التحكم و الروبوتات [Slavka-2013].

وقد تم الكثير من العمل علي البندول المعكوس منذ السنوات ال 50 الماضية [Vijayanand-2013]. وقد تم وصف الحل الأول لتحقيق الاستقرار في أنظمة الحلقة المفتوحة غير المستقرة في عام 1960 من قبل أوبيرج [J. K. 1960] ثم من قبل شيفر وكانونفي عام 1966 [J.F-1966]. ولأكثر من 100 مرجع يعود تاريخها إلي عام 1960، تم تجميعها لتقديم مسجل لأفكار الناشئة والمشاكل الصعبة في نظرية التحكم غير الخطية التي تم إنجازها والتحقق منها باستخدام هذا النظام الآلي [Olfa 2012].

وعلي الأقل منذ خمسين عاما يصنف البندول المعكوس كمعيار الأكثر شعبية، من بين أمور أخرى، يستخدم في نظرية التحكم غير الخطية [Olfa- 2012].

البندول المعكوس هو مسألة قياسية في نظام التحكم ويطبق في مجالات التحكم الدقيق و الروبوتات. تم تطبيق هذا المفهوم لإبدال روبوتات عالية الدقة، وإطلاق الصواريخ، والسيطرة علي الإقلاع العمودي والهبوط للطائرات (VTOL)، والقمر الصناعي، واستقرار الطائرات خلال تدفق التيارات الهوائية المضطربة وتثبيت المقصورة في السفينة [Vijayanand-2013].

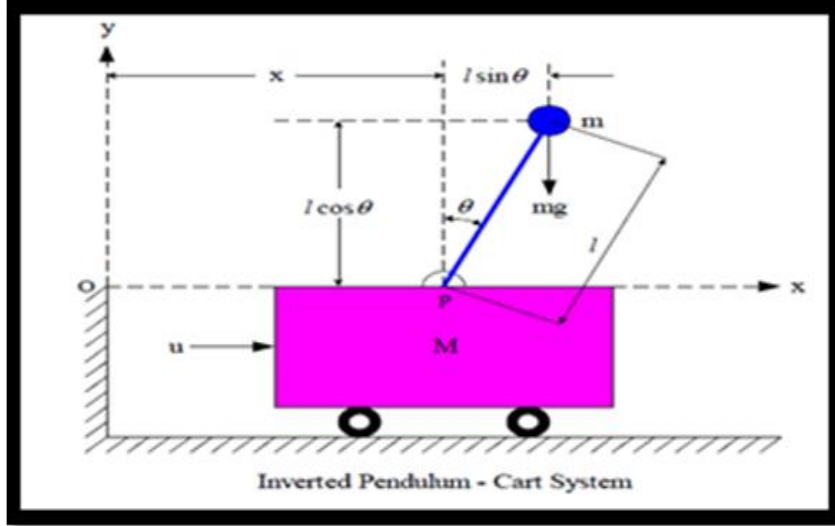
وهناك مجال آخر مهمة جدا حيث يتم استخدام هذا المفهوم هو مجال التعليم. حيث يمكن للطلاب الجدد الحصول علي فكرة جيدة جدا من خلال هذا التطبيق الكلاسيكي [Vijayanand-2013].

ونضرا لتكوينها البسيط، يعتبر البندول المعكوس هو المعيار الأساسي من بين أكثر معايير الروبوت شيوعا مثلا كروبوت (Acrobot) وبيندوبوت (Pendubot) وفوروتا (Furuta) وبندول وموبندول العجلة والدراجة وإقلاع وهبوط الطائرات (VTOL) ونظام القنطرة و الكركوتورا (TORA) [Olfa- 2012].

وكثيرا ما يستخدم نظام البندول المعكوس النموذجي غير الخطي غير المستقر كمعيار لدراسة تقنيات التحكم المختلفة في مجال هندسة التحكم [Velchuri June- 2014]. وقد ركزت معظم البحوث أساسا علي التوازن، في حين تناولت بعضها التحكم في الحركة وتخطيط المسار [Vijayanand-2013].

يمكن تصنيف عائلة أنظمة البندول المعكوس إلي أنظمة البندول المعكوس المفردة، وأنظمة البندول المعكوس المزدوجة من النوع المتوالي، وأنظمة البندول المعكوس المزدوجة الموازية. ويعتبر من الأنواع الأكثر شهرة من البندول المعكوس هو البندول الدوار أحادي الذراع، عربة البندول المعكوس والبندول المعكوس المزدوج [Olfa-2012]. والإصدارات الأقل شيوعا هي البندول الدوار ثنائيا لارتباط، البندول المعكوس الثنائي المزدوج ، البندول المعكوس الثلاثي، البندول المعكوس الرباعي والبندول ثلاثي الإبعاد (D3) أو الكروي [Olfa- 2012].

والبنود المزدوج هو مثال معروف للسلوك الفوضوي [Rod-2011]. والشكل التالي رقم (1) يوضح البنود المعكوس ذو العربة.



شكل رقم (1) البنود المعكوس ذو العربة

## 2. لماذا التركيز على البنود المعكوس؟

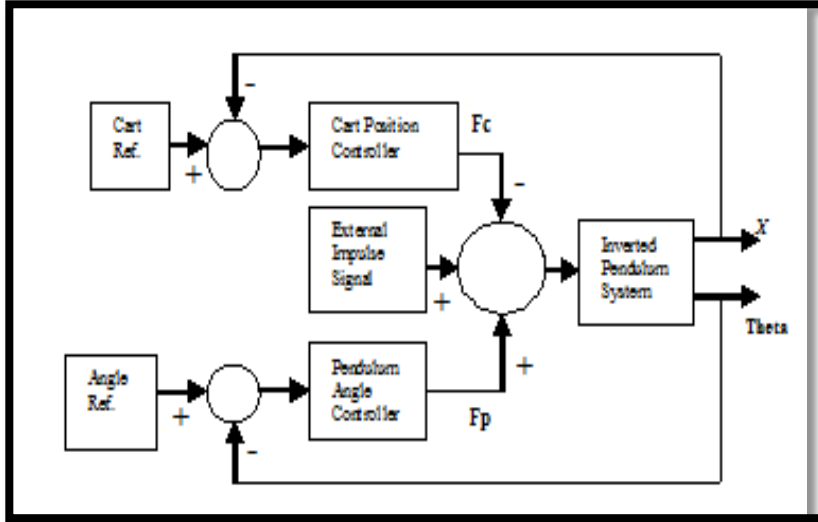
أهم أسباب اختيار البنود المعكوس كنظام يستخدم في مجال نظرية التحكم غير الخطية هي:-

- النظام الأكثر سهولة المتاح ( في معظم الأوساط الأكاديمية) للاستخدام المعمل.
- نظام غير خطي والذي يمكن معالجته ليكون خطي دون الكثير من الخطأ لمجموعة واسعة جدا من الخيارات.
- أنه يوفر ممارسة عملية جيدة للمهندسين في مجال التحكم المحتملين.
- البنود المعكوس ضروري في تقييم ومقارنة نظريات التحكم المختلفة.
- يمكن اعتباره أبسط نظام وروبوتي، بعنصر واحد فقط ومفصل دوران واحد فقط.

- نظام البندول المعكوس هو نظام جيد لشرح استخدام نظرية التحكم ذو التغذية الراجعة، والغرض من ذلك هو تحقيقا لاستقرار في النظام ذو الحلقة المفتوحة غير المستقر.

### 3. تقنيات وطرق التحكم:

تصميم وحدة تحكم هو المحتوى الرئيسي لنظام البندول المعكوس، وتستخدم وحدات التحكم لتحقيق الاستقرار في النظام غير المستقر وجعله قوي ضد الاضطرابات. وقد استخدمت العديد من التقنيات لتحقيق الشيء نفسه، علي سبيل المثال ، تقنية النمط المنزلق، المنطق الضبابي، خوارزميات التحكم المستوحاة من الأنظمة والسلوكيات البيولوجية (شبكات الأعصاب، خوارزميات أجنين)، التحكم في الوقت الحقيقي والشكل رقم (2) يوضح مخطط نظام التحكم للبندول المعكوس.



الشكل رقم (2) مخطط نظام تحكم لعربة البندول المعكوس

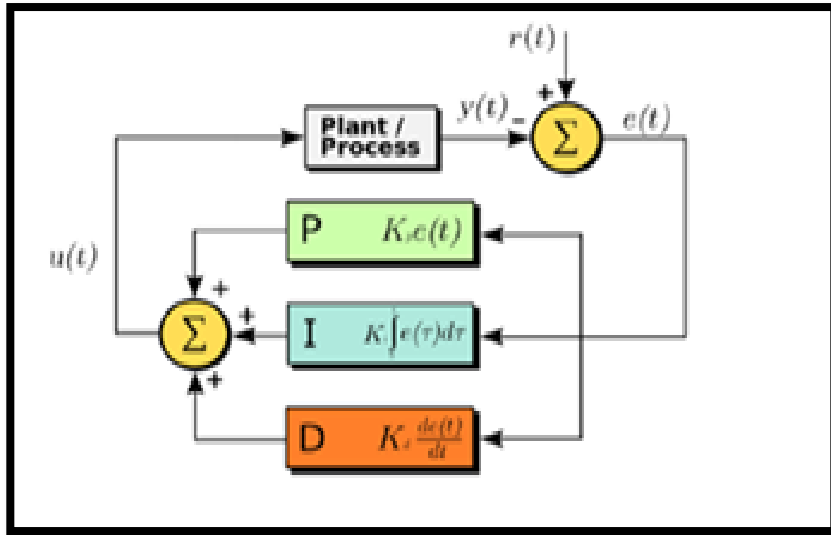
فيما يلي استعراض لأهم طرق وتقنيات التحكم المستخدمة:

### 1.3- المتحكم التناسبي-التكاملي - التفاضلي [PID]

المتحكم التناسبي التكاملي التفاضلي هو نظام التحكم الذي له خرج، متغير القيمة (CV)، ويستند عموماً على الخطأ ( $e$ ) بين القيمة المحددة من قبل المستخدم (SP) والقيمة المقاسة (PV) [Olfa- 2012].

المتحكم التناسبي-التكاملي-التفاضلي (PID) يعطي الحل الأبسط والأكثر فعالية لمختلف مشاكل التحكم في العالم الحقيقي [Lal-2012].

المتحكم ذو الأطوار الثلاثة التناسبي التكاملي التفاضلي يعتبر متحكم تقليدي ويستخدم كثيراً لإجراء مقارنات و مفاضلات مع أنواع أنظمة التحكم الأخرى ومن أمثلة ذلك البحوث التالية: [ BinYusof,2013- 2014., والشكل رقم (3) يوضح مخطط لنظام تحكم [PID]



الشكل رقم (3) مخطط لنظام تحكم [PID]

### 2.3- المتحكم التريبيعي الخطي [LQR]

هو أحد الطرق الحديثة للتحكم باستخدام معادلات فضاء الحالة الخطية لتحليل الأنظمة مثل البندول المعكوس. يعتبر التمثيل في فضاء الحالة مناسباً لتحليل النظم الديناميكية الخطية متعددة المدخلات والمخرجات والتحكم بها. [June-2014] ولتمثيل الأنظمة الديناميكية يتم استخدام معادلات خطية تفاضلية والكلفة يتم تحديدها باستخدام دالة تريبيعية ولذلك سمية خطية تريبيعية (LQ) [Jianqiang-2002].

الهدف من تطبيق هذا الأسلوب هو إيجاد نظام تحكم مثالي يؤدي إلى تقليل دالة الكلفة التريبيعية [Velchuri June- 2014].

وتصميم متحكم تريبيعي خطي يعتمد على نظام التغذية الراجعة وذلك يؤدي إلى تقليل دالة الكلفة (J) [K. December-2013].

ووفقاً لنتائج المحاكاة وجد أن طريقة المنظم التريبيعي الخطي تعطي أداء أفضل مثل زمن الترسيع، الخطأ عند حالة الاستقرار وتجاوز الهدف مقارنة مع الحاكمة التقليدية PID وهذا يدل على تفوق طريقة المنظم التريبيعي الخطي على الحاكمة التقليدية [K.-2013].

### 3.3- متحكم المنطق الضبابي [Fuzzy logic controller]

متحكم المنطق الضبابي يوفر طريق سهل للوصول الي نتائج محددة معتمدا علي مدخلات ضبابية ومبهمة وغير دقيقة ومشوشة أو معلومات ناقصة [J.-1960] ، و هو أسلوب للتحكم يحاكي أسلوب البشر لاتخاذ القرار. خوارزمية المنطق الضبابي تتمثل في صورة الجملة الشرطية (إذا كان كذا..إذاً كذا) [Velchuri -2014]. ومتحكم المنطق الضبابي يعتبر حالياً أشهر تقنية تحكم [Olfa- 2012] ، وتم تطبيقه بنجاح في الكثير من المنتجات التجارية والأنظمة الصناعية [Li-Xin-1996].

نظرية المجموعة الضبابية هي جيل من نظرية الأنظمة العددية العادية التي طورها الدكتور لطفي زاده في عام 1965. وهي وسيلة مريحة لتعيين مساحة الإدخال

ومساحة الإخراج [Ankur- 2011]. والتكوين الأساسي للمنطق الضبابي يتألف من أربعة أجزاء رئيسية هي:

- (1) التغميض وفيه يتم تحويل المدخلات العددية إلى قيم لغوية.
- (2) قاعدة المعرفة وتحتوي علي القوانين والشروط.
- (3) منطق اتخاذ القرار حيث يتم معالجة المدخلات وتحديد النتائج.
- (4) إزالة التغميض حيث يتم تحويل القيم اللغوية إلى قيم عددية. Dipraj [2011- Ankur, July- 2012].

وقد أثبت متحكم المنطق الضبابي أداء أفضل مثل زمن الترسخ، والخطأ عند حالة الاستقرار و زمن الاستجابة وتجاوز الهدف مقارنة مع الحاكمة التقليدية.

### 4.3- متحكم اللامتاهي (H)

المتحكم اللامتاهي (H) هو تقنية تستخدم لتصميم بواسطة حل فضاء الحالة التي تستخدم دوال الترجيح المعتمدة على المجال الترددي لضبط الأداء وخصائص المتانة وتستخدم دالات الترجيح هذه لتطبيع والمقارنة للمدخلات والمخرجات وتعكس التبعية المكانية والترددية لاضطرابات الدخل ومواصفات أداء متغيرات الخرج (الخطأ). [Johne-2015].

ومن خلال التحاليل تم ملاحظة أن متحكم اللامتاهي يضمن الثبات والأداء العالي من حيث الحساسية للخطأ وكذلك يوفر مقاومة عالية للاضطرابات و استقرارية عالية في أي حالة تشغيل [Ankit - 2013]. ويمكن استخدام نظام معادلات الديناميكية الترددية بسهولة في هذا المتحكم ، ويعتبر هذا المتحكم جيد للنظم التي تتعرض لإثارة غير معروفة. [ الغصين - 2015].

### 5.3 - متحكم بانغ بانغ (Bang Bang control)

إستراتيجية المتحكم بانغ بانغ تتطلب حسابات معقدة وتحكم في المتغيرات بواسطة التحويل المفاجئ بين حالتين [Olfa- 2012].



تعتبر هذه الطريقة فعالة عندما يكون معيار الأداء للمتحكم تابعا للزمن. لذلك يكون الحل من خلال تطبيق قوة تحكم لا محدودة في فترة متناهية الصغر. [الغصين-2015].

### 6.3- المتحكم بالنمط المنزلق ( Sliding Mode Control )

يستخدم المتحكم ذو النمط الأنزلاقي (SMC) القياسي في الأنظمة ذات العناصر الغير معروفة وفي وجود حالات عدم تيقن كبيرة، والنتائج تكون بكسب تبديل عالي وسعة نطاق أعلى من التذبذب أوقد تكون متباعدة تماما. يتم تطبيق نهج المتحكم ذو النمط المنزلق في الحالات التي تتطلب ظروف الاستقرار بشكل جيد وغالبا ضمان أداء قوي. المتحكم لديه استجابة جيدة لتحقيق السمة المطلوبة مقارنة بالمتحكم التريبيعي الخطي (LQR) . [Nawawi-2006].

### 7.3- الخلايا العصبية الصناعية (Neural Networks)

الأسلوب المستخدم يندرج تحت ما يسمى بالذكاء الاصطناعي وفيه يتم محاكاة الكيفية التي تتصرف بها الخلايا العصبية البيولوجية لدى الإنسان لاستخراج القواعد والأنماط من مجموعات من البيانات. وبعض الباحثين يعتبرون أن الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) هو الخيار الأفضل لتصميم وحدة تحكم، حيث يمكن للمرء الحصول على استجابة تحكم متفوقة وأعلي دقة من المتحكم التقليدي (PID) . [Lalithamma-2013].

الشبكة العصبية هي نوع نظام ديناميكي مستمر مع ارتفاع اللاخطية وقدرة تعلم جيدة. [Hagan-1996]. وميزة الشبكة العصبية هي طبيعتها غير الخطية للتنبؤ بلاخطية النظام. [Sudeep-2012]. ومتحكم الشبكة العصبية لديه بناء بسيط وعادة ما يتم تجنب الحسابات غير الضرورية والطويلة . و لبساطته فهو يعتبر حاليا أكثر تقنيات التحكم شهرة. [Sarat-2013]. ومن تطبيقات الشبكات العصبية الاصطناعية متعددة

الطبقات تحقيق تحسينات في كفاءة التحكم في السرعة لمتغيرات صغري وكبري لبارمترات المحرك الكهربائي وحالات الحمل. [Lalithamma-2013].

### 8.3- المتحكم التنبؤي [Model Predictive Control]

تقنية التحكم التنبؤي (MPC) مبنية على النماذج الرياضية، حيث يتم استخدام نموذجاً رياضياً يصف النظام. وهذا النموذج يعطي الخرج المستقبلي كتابع للدخل الحالي. تم تطوير تقنية التحكم التنبؤية في أواخر 70 من القرن الماضي، وأصبح له استخدام واسع الانتشار، وخاصة في صناعة التكرير، في إل 80. [Stephen-2014]. وفي العقود القليلة الماضية، اجتذبت تقنية التحكم التنبؤي (PC) اهتماماً متزايداً في مجال البحوث، وقد استخدمت على نطاق واسع في الصناعات نظراً لأن لها ثلاثة مزايا رئيسية هي: التنبؤ في الوقت الحقيقي وعملية التحسين المباشر وتصحيح التغذية الراجعة المباشر. [WONG-2005]. خوارزمية التحكم التنبؤي هي بالتأكيد أفضل خيارين جميع خوارزميات التحكم المتقدمة المتاحة حتى الآن والميزة الأكثر أهمية التي تميزها عن خوارزميات التحكم الأخرى هو مفهوم التنبؤ بعيد المدى. [ Boo-2006].

### 9.3- المتحكم المستند علي الطاقة [EBC]

الطرق المعتمدة علي الطاقة والأساليب الهجينة تعتبر من أقوى أساليب التحكم المستخدمة للبدول المعكوس والتي يتم فيها تطبيق أدوات ( Lyapunov ) ويتم التحقق من حالات الاستقرار رياضياً. [Olfa- 2012].

### 10.3- طرق التحسين: خوارزمية الجينات [GA] , مستعمرة النمل [ACO] ,

#### أسراب العناصر [PSO]

في السنوات الحالية العديد من طرق التحسين المختلفة المستندة علي القوانين و السلوكيات الطبيعية مثل خوارزميات مستعمرة النمل للتحسين و خوارزميات أسراب العناصر للتحسين و الخوارزميات الجينية للتحسين وخوارزميات الشبكات العصبية للتحسين أخذت اهتمام واستخدمت لإيجاد أفضل الحلول لأنظمة علمية وهندسية معقدة

ومختلفة [ C.-W.-2009 ] و كطرق للتحسين مقارنة مع الحلول الرياضية المعقدة  
[Mahbubeh-2012] [ K.-2013 ] [ J. Van-2009 ]

#### 4. النتائج و المناقشة

في العديد من الأبحاث [astranj-2012] - [Lal]-2012 [Azimi-2012] تم استخدام أنظمة تحكم متعددة تدعم بعضها البعض وذلك للاستفادة من ميزات كل نظام للحصول علي أفضل النتائج. و لضبط وتعديل متغيرات أنظمة التحكم وحل مشاكل التحسين للأنظمة اللاخطية تعتبر الطرق المستوحاة من الخوارزميات و السلوكيات الحيوية مثل الخوارزميات الجينية ومستعمرة النمل و أسراب العناصر خوارزميات تحسين واعدة نظرا لأنها تقلل من الاحتياج إلي الحلول الرياضية المعقدة. فالعديد من الأبحاث تم فيها استخدام طرق التحسين الحيوية لدعم أنظمة التحكم [Adrian-2011 [Sen-2016

#### المراجع

- [1] يزن الغصين- أشرف هالة حسن - تركي طبق، 2015 " تحسين استجابة المنشآت الزلزالية بواسطة أجهزة التحكم شبه الإيجابي " أطروحة أعدت كجزء من متطلبات الحصول على درجة الماجستير في الهندسة الإنشائية الزلزالية في المعهد العالي للبحوث والدراسات الزلزالية جامعة دمشق سورية .
- [2] Aamir Hashim, Obeid Ahmed, 2 ,December 2013 "Optimal Speed Control for direct Current Motors Using Linear Quadratic Regulator", Journal of Science and Technology - Engineering and Computer sciences
- [3] Ankur Gupta, Aziz Ahmad, Amit Kumar, July 2011 "POSITION CONTROL OF SERVO MOTOR USING SLIDING MODE FUZZY CONTROLLER", International Journal of Advances in Engineering & Technology.
- [4] Ankit Bansal, Veena Sharma. 2013 " Design and Analysis of Robust H-infinity Controller" Vol.3, No.2, National Conference on Emerging Trends in Electrical, Instrumentation & Communication Engineering.

- [5] Azimi Mohammad Mahdi, Koofigar Hamid Reza, Mehdi Edrisi ,2012 "STABILIZATION OF UNDERACTUATED MECHANICAL SYSTEMS WITH TIME-VARYING UNCERTAINTY USING ADAPTIVE FUZZY SLIDING MODE", The Mediterranean Journal of Measurement and Control.
- [6] Adrian-Vasile Duka, 2011 "ADAPTATION OF A FUZZY CONTROLLER'S SCALING GAINS USING GENETIC ALGORITHMS FOR BALANCING AN INVERTED PENDULUM, Scientific Bulletin of the "Petru aior"University of Tg. Mures Vol. 8(xxv) no.2, ISSN 1841- 9267.
- [7] Bin Yusof, A. Muhyiddin.2013,"A comparative study of conventional PID and FUZZY-PID for DC motor speed control", Master's Theses, Universiti Tun Hussein Onn Malaysia.
- [8] [8] Boo Chin Eng, Hong Mei Kwee, Amy Tan Siew Wern,Khairiyah Mohd Yusef, 2006 "FORMULATION OF MODEL PREDICTIVE CONTROL ALGORITHM FOR NONLINEAR PROCESSES" ,Research vote No.71992,University Technology Malaysia.
- [9] C.-W. Tao, J.-S. Taur, J.-T. Jeng, and W.-Y. Wang. , eember 2009"ANovel Fuzzy Ant Colony System for Parameter Determinationof uzy Controllers", International Journal of Fuzzy Systems, Vol.11, No.4.
- [10] Dipraj, Dr. A. K. Pandey ,2012 "Speed Control of D.C. Servo motor By Fuzzy Controller", INTERNATIONAL JOURNAL OF CIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH VOLUME 1, ISSUE 8, EPTEMBER .
- [11] Dastranj Mohamad Reza, Mahbubeh Moghaddas, Younes Ghezi, and Modjtaba Rouhani, September 2012 "Robust Control of Inverted Pendulum Using Fuzzy Sliding Mode Control and Genetic Algorithm",International Journal of Information and Electronics Engineering , Vol. 2, No.5 .
- [12] Eyabi, P. B.1999, "Real time fuzzy logic and PID implemetation and control in LabView" ,Master's Theses. Paper 1805, San Jose State University.
- [13] Hagan, Martin T., Howard B. Demuth, Mark H. Beale, 1996 "Neural Network design" Boston London: Pws Pub. [14] Iraj Hassanzadeh, Saleh Mobayen, 2011"Controller Design for Rotary Inverted Pendulum System Using Evolutionary Algorithms",

- Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering Volume, Article ID 572424, 17 pages.
- [14] Jianqiang Yia ; Naoyoshi Yubazakib, Kaoru Hirota. 2002 "A new fuzzy controller for stabilization of paralleltype double inverted pendulum system, Fuzzy Sets and Systems 126 - 105–119.
- [15] J. K. Roberge,1960 "The Mechanical Seal, Massachusetts Institute of Technology: Bachelor's thesis.
- [16] ]. K. Chakraborty, Dr. J.Mahato, R. R. Mukherjee, March 2013 "Tuning of PID Controller of Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm", IJECT Vol.4, Issue Spl-1.
- [17] Johne. BIBEL, D.Stephen MALYEVAC, 2015 "Guide lines for the selection of weighting functions for H-infinity control", Weapons systems department .
- [18] J. F. Schaefer, R. H. Cannon, 12-24, 1966 "On the control of unstable mechanical systems" Proceedings of the third Automatic and Remote Control, London, vol. 3, n°1, pp.
- [19] J. van Ast, R. Babuska, and B. De Schutter, June 2009 " Fuzzy Ant Colony Optimization for Optimal Control", Proceedings of the 2009 American Control Conference, St. Louis, Missouri, pp. 1003–1008 .
- [20] K. Chakraborty, Dr. J.Mahato, R. R. Mukherjee, March 2013 "Tuning of PID Controller of Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm", IJECT Vol. 4, Issue Spl -1.
- [21] Khalid M. Mousa " Study on Control of Cstr Using Intelligent Strategies, Chemical Eng .Dep./Al-Nahrian University drkhalidalzobai@yahoo.com, Zainab Essaim Dawood.
- [22] K. Ogata, 2002 "Modern Control Engineering", fourth ed., Prentice Hall, New Jersey, pp. 896-910 .
- [23] Lal Bahadur Prasad, Barjeev Tyagi, Hari Om Gupta, 2012 " Modelling & Simulation for Optimal Control of Nonlinear Inverted Pendulum Dynamical System using PID Controller &LQR " Sixth Asia Modelling Symposium.
- [24] Lalithamma GA,P.S. Puttaswamy, Kashyap D Dhruve, May 2013 "Multi-layer Neural Network for Servo Motor Control"International Journal of Computer Applications (0975–8887) Volume 71– No.14.
- [25] Laith Abed Sabri, AL-Khwarizmi, Hussein Ahmed ALMshat 2010 "Implementation of Fuzzy and PID Controller to Water Level

- System using LabView " University of Baghdad AL-Khwarizmi college of Engineering.
- [26] Li-Xin Wang, 5 OCTOBER 1996 "Stable Adaptive Fuzzy Controllers with Application to Inverted Pendulum Tracking", IEEE TRANSACTIONS ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS-PART B:CYBERNETICS .
- [27] Mahbubeh Moghaddas, Mohamad RezaDastranj, Nemat Changizi, and Narges Khoori , August 201 " Design of Optimal PID Controller for Inverted Pendulum Using Genetic Algorithm",International Journal of Innovation, Management and Technology, Vol. 3, No. 4.
- [28] Nawawi S.W, Ahmad M.N, Osman J.H.S. September 2006 "Control of Two- wheels Inverted Pendulum Mobile Robot Using Full Order Sliding Mode Control", Proceedings of International Conference onMan-Machine Systems 2006, Langkawi, Malaysia.
- [29] Nnochiri ,U. 2014, "Comparison Study between Fuzzy Logic Controller (FLC) and Proportional-IntegralDerivative (PID) in Controlling of Liquid Flow", International Journal of Engineering and Technical esearch (IJETR) ,Vol-2.
- [30] Olfa Boubaker, Received 15 Mar 2012; Accepted 14 Nov 2012 "The Inverted Pendulum Benchmark in Nonlinear Control Theory: A Survey , International Journal of Advanced Robotic Systems.
- [31] Rod Cross, May 2011" A double pendulum model of tennis strokes Am Phys. University of Sydney, Sydney NSW, Australia .
- [32] Sarat Kumar Sahoo and A. Ramulu Accepted 13 August, 2013 "Salient features ofvector control in AC motor drives: A review", Academic journal.
- [33] Selma Sefriti , Jaouad Boumhidi , Majid Benyakhlef, and Ismail Boumhidi, July 2013 "ADAPTIVE DECENTRALIZED SLIDING MODE NEURAL NETWORK CONTROL A of CLASS NONLINEAR INTERCONNECTED SYSTEMS", International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 7.
- [34] Sen Muhammed Arif , Mete Kalyoncu, October 2016 "Optimal Tuning of a LQR Controller for an Inverted Pendulum Using the Bees Algorithm".Journal of Automation and Control Engineering Vol 4, No.5.

- [35] Slavka JADLOVSKA1, Jan SARNOVSKY.11NVMBER 2013 "A Complex Overview of Modeling and Control of the Rotary Single Inverted Pendulum System, power engineering and electrical engineering volume, SPECIAL ISSUE.[38] Stephen Piche ,Gene Boe ,Jim Keeler,Doug Johnson ,Greg Martin, Mark Gerules,2014" Neural Network Based Model Predictive Control", Pavilion Technologies.
- [36] Sudeep Sharma,Vijay Kumar,RajKumar, 2012 "Supervised Online Adaptive Control of Inverted Pendulum System using ADALINE Artificial Neural Network with Varying System Parameters and External Disturbance",I.J. Intelligent Systems and Applications, 8, 53-61.
- [37] Suneel Kumar , Pratibha Tiwari, March 2015" Indirect Vector Control of Induction Motor using ANN with PI Speed Controller" Internatinal Journalof Innovative Researchin Eelectrcal, Electronics ,Instrumentationand Control ngineering Vol. 3, Issue 3 .
- [38] Tzu-Chun Kuo, Ying-Jeh Huang , Ping-Chou Wu, 2013 "Genetic Algorithm Tuned Fuzzy Logic Controller for Rotary Inverted Pendulum" , Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology 6(5): 907-913, ISSN: 2040-7459; e-ISSN: 2040-7467.
- [39] Velchuri Sirisha and Dr. Anjali. S. Junghare. June 2014 " A Comparative study of controllers for stabilizing a Rotary Inverted Pendulum, International Journal of Chaos, Control, Modelling and Simulation (IJCCMS) Vol.3, No.1/2.
- [40] Vinodh Kumar E, Jovitha Jerome, 2014 "An adaptive particle swarm optimization algorithm for robust trajectory tracking of a class of under actuated system" ARCHIVES OF ELECTRICAL ENGINEERING VOL.63(3), pp.345-365,Department of Instrumentation and Control Systems Engineering, PSG College of Technology Coimbatore, India-641004.
- [41] Vijayanand Kurdekar, 5 Sep–Oct.2013 "Samarth Borkar, Inverted Pendulum Control: A Brief Overview, International Journal of Modern Engineering Research (IJMER) Vol.3,Issue. pp-2924-2927 ISSN: 2249-6645.
- [42] WONG CHI MAN, WAN FENG ,2005 " Predictive Control with Wavelet Neural Network for Inverted Pendulum System",University of Macau, Macau, SAR.

- [43] Xiao, Q. 2010, “Fuzzy Adaptive PID Control Tank Level”,  
IEEE, International Conference on Multimedia Communications,  
p149-152.