

معايرة بارامترات مرشح كالمان باستخدام خوارزمية النحل

أحمد حاج درويش

قسم الذكاء الصناعي واللغات الطبيعية، كلية الهندسة المعلوماتية، جامعة حلب

الملخص

تعرض هذه المقالة استخداماً جديداً لخوارزمية النحل the Bees Algorithm وهو معايرة بارامترات مرشح كالمان Kalman Filter. هذا الاستخدام الجديد لخوارزمية النحل يتضمن مقترحاً بصيغة الخوارزمية عبر اختصار بعض الخطوات وتغيير آلية البحث المحلية. تنص الصيغة المقترحة على استخدام تابع توليد أعداد عشوائية ذات توزيع طبيعي في مرحلة البحث المحلي من خوارزمية النحل، مع الإبقاء على ميزة البحث الكلي للخوارزمية. استخدمت الخوارزمية المقترحة لإيجاد أفضل قيم لبارامترات مرشح أو فلترة كالمن المستخدم في تقدير حالة الشحن لبطارية.

جرت مقارنة النتائج الناتجة من تطبيق الخوارزمية المقترحة مع نتائج طريقة خوارزمية النحل بشكلها الأساسي، وأيضاً مع نتائج البحث المحلي بالاعتماد على تابعي توليد الأعداد العشوائية ذات التوزيع النظامي والطبيعي. كما تمت المقارنة مع النتائج المستخلصة من تطبيق الخوارزمية الوراثية. بينت المقارنات فعالية الخوارزمية المقترحة وثبات نتائجها في حل هذا النوع من المسائل.

الكلمات المفتاحية: خوارزمية النحل، مرشح كالمان، أعداد عشوائية، توزيع طبيعي، توزيع نظامي

ورد البحث للمجلة بتاريخ 2019/11/27

قبل للنشر بتاريخ 2020/1/19

Tuning the Parameters of Kalman Filter Using the Bees Algorithm

Ahmed Haj Darwish

Dept. of Artificial Intelligence and Natural Languages, Faculty of Informatics
Engineering, University of Aleppo

Abstract

This paper presents a new application of the Bees Algorithm to adapt the parameters of Kalman Filter. This new proposal includes a strategy for a new form of the Bees Algorithm by reducing the number of its steps and changing the way of its local search mechanism. The proposed method uses a random number generator with normal distribution for local search in the Bees Algorithm, and maintains at the same time the global search of the algorithm. It is also used to find the optimal values of Kalman Filter parameters which are used to predict the state of battery charge.

The results obtained from applying the proposed method were compared with those of the basic form of the Bees Algorithm, and also with those of local search method with uniform and normal random number generators. Again, a comparison with the results of the Genetic Algorithm was performed. The results of comparisons show the efficiency of the proposed algorithm and stability of its results to solve this kind of problems.

Keywords: Bees Algorithm, Kalman Filter, Random Numbers, Normal Distribution, Uniform distribution.

Received 27 / 11/2019

Accepted 19 /1/2020

1- مقدمة:

تعتبر مسائل التنبؤ والتخمين من أساسيات عمليات التحكم والملاحقة والتي لها تطبيقات كثيرة في مجال الروبوتية والمتحكمات الذكية. قدمت العديد من الطرق من أجل التنبؤ منها مرشح كالمان Kalman Filter [1]، حيث وظف بداية كمتنبئ من أجل الأنظمة الخطية وذات ضجيج غوسي. لمرشح كالمان مجموعة من البارامترات ذات القيم الحقيقية، والتي يجب اختيارها بشكل جيد حتى يعطي المرشح خرجاً ونتائج مقبولة من الناحية العملية. تمت في البداية معايرة بارامترات مرشح كالمان بشكل يدوي اعتماداً على خبرة المصمم أو المهندس. استُخدمت خوارزميات الأمثلة لمعايرة بارامترات مرشح كالمان مثل خوارزمية سميلكس [2]. كما أعتمدت مؤخراً طرق الذكاء الصناعي لمعايرة والاختيار الأمثل لبارامترات المرشح مثل الخوارزمية الجينية Genetic Algorithm [3] وخوارزمية أسراب الدقائق Particle Swarm Optimization PSO [4]. وتصنف هاتان الخوارزميتان ضمن ما يسمى تقنيات الأمثلة الذكية Intelligent Optimization Techniques، والتي تشمل أيضاً خوارزمية النحل the Bees Algorithm [5] [6] المستوحاة من سلوك نحل العسل والمستخدم في مسائل الأمثلة. وتتميز خوارزمية النحل ببساطتها ومقدرتها على إيجاد حلول للمسائل الهندسية المعقدة حيث أوجدت خوارزمية النحل حلاً لمسألة أمثلة التوابع المستمرة [6] وإيجاد المسار الأمثل لروبوت نقال [7] وتدريب شبكة ANFIS [8] وفي الأمثلة الديناميكية [9].

وعليه ستستخدم خوارزمية النحل the Bees Algorithm في هذا البحث لإيجاد القيم المثلى لبارامترات مرشح كالمان.

نظمت بقية المقالة كما يلي: المقطع الثاني يقدم شرحاً عن مرشح كالمان والتوصيف الرياضي له. المقطع الثالث يقدم خوارزمية النحل. بينما المقطع الرابع يصف الطريقة المقترحة. المقطع الخامس يقدم النتائج التجريبية. المقطع السادس يختم المقالة.

2- مرشح كالمان Kalman Filter

مرشح كالمان هو مخمن أمثلي ذو طبيعة تعاودية وذلك من أجل الأنظمة الخطية، ويستخدم لتقدير متحولات أي نظام مدروس بشكل دقيق وآني [10]. فإذا كانت المعادلات المعبرة عن نظام ما مدروس بالشكل التالي [10]

$$x_k = A.x_{k-1} + B.u_{k-1} + w_{k-1} \quad (1)$$

$$z_k = H.x_k + v_k \quad (2)$$

حيث w_k ، v_k متحولان عشوائيان يمثلان ضجيج العملية والقياس على الترتيب ولهما تابعا توزيع احتمالي غوسي

$$p(w) \sim N(0, Q)$$

$$p(v) \sim N(0, R)$$

Q هو مصفوفة التشتت لضجيج العملية

R هو مصفوفة التشتت لضجيج القياس

فتكون خوارزمية العمل لمرشح كالمان على مرحلتين وهي التنبؤ ومن ثم التصحيح [11] كما في المعادلات 3 و 4 و 5 و 6 و 7 والشكل (1).

حيث P هو مصفوفة التشتت لخطأ التنبؤ.

K_n ربح مرشح كالمان

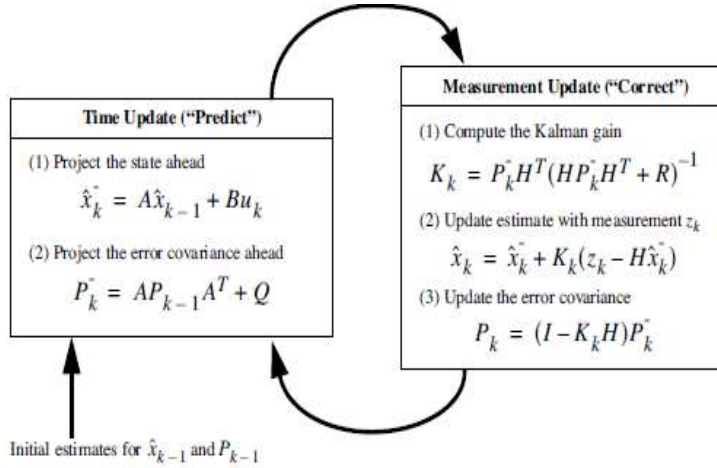
$$\hat{x}_k^- = A.x_{k-1} + B.u_{k-1} \quad (3)$$

$$P_k^- = A.P_{k-1}.A^T + Q \quad (4)$$

$$K_k = P_k^-.H^T (H.P_k^-.H^T + R)^{-1} \quad (5)$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H.\hat{x}_k^-) \quad (6)$$

$$P_k = (1 - K_k.H).P_k^- \quad (7)$$



الشكل (1) مرحلتي التنبؤ والتصحيح في مرشح كالمان [11]

في حالة الأنظمة الغير خطية يستخدم شكل موسع منه يدعى Extended Kalman Filter (EKF). إن مرشح كالمان حساس جداً لنقطة البدء ولمعايرة البارامترات، والتي هي صعبة المعايرة بدون العديد من المحاولات. المشكلة الأخرى هي وقوع فلتر كالمان في الأمثلة المحلية كما أن الفلتر يميل إلى الطول المحلية.

3- خوارزمية النحل the Bees Algorithm

خوارزمية النحل هي تقنية للبحث تعتمد على ذكاء الأسراب [5] [6] وهي محاكاة حاسوبية لسلوك نحل العسل في الطبيعة عند جمع الطعام. تستخدم هذه الطريقة لحل المسائل الهندسية ذات الطبيعة المستمرة أو المتقطعة.

وتحتاج الخوارزمية بشكلها الأساسي لمجموعة من البارامترات [7] وهي:

(n) عدد نحللات الكشف.

(m) عدد المواقع المختارة من ضمن (n) موقع تمت زيارته.

(e) عدد المواقع المختارة كأفضل المواقع ضمن (m).

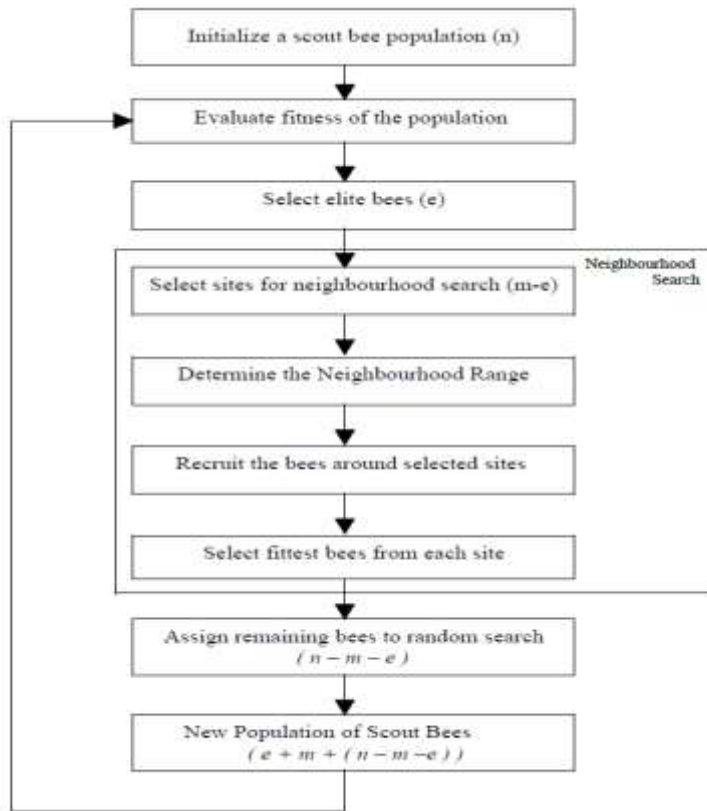
(nep) عدد النحللات العاملة التي يتم استدعاؤها من أجل كل موقع من (e).

(nsp) عدد النحللات العاملة التي يتم استدعاؤها من أجل باقي المواقع (m-e).

(ngh) الحجم الأولي للمنطقة والذي يتضمن الموقع وجواره وشرط التوقف.

يوضح الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزمية النحل، بينما يظهر الشكل (3) الشيفرة الرمزية للخوارزمية. وبشكل عام يمكن وصف عمل الخوارزمية بأنها عملية استكشاف واستخلاص مستمر.

هجنت خوارزمية النحل مع مرشح كالمان الموسع وذلك لمعايرة توابع الانتماء الترجيحية [12] واستخدمت أيضاً لتدريب شبكة عصبونية من نوع RBF وذلك لتمييز الأنماط [13]. حيث قام مرشح كالمان الموسع بتسريع عمل الخوارزمية لإيجاد الحلول الأمثلية. بينما في هذا البحث ستستخدم خوارزمية النحل بشكل معدل ولكن غير مهجن لأمثلة عمل مرشح كالمان.



الشكل (2) المخطط التدفقي لخوارزمية النحل [5]

1. Initialise population with random solutions.
2. Evaluate fitness of the population.
3. While (stopping criteria not met) //Forming new population.
4. Select elite bees.
5. Select sites for neighborhood search.
6. Recruit bees around selected sites and evaluate fitness.
7. Select the fittest bee from each site.
8. Assign remaining bees to search randomly and evaluate their fitness.
9. End While

الشكل (3) الشيفرة الرمزية لخوارزمية النحل [5]

4- الطريقة المقترحة

الطريقة المقترحة عبارة عن نسخة معدلة من خوارزمية النحل وستستخدم عملية المحاكاة للنظام المدروس مع مرشح كالمان للحصول على قيمة تابع الهدف أو التقييم.

يبين الشكل (4) الشيفرة الرمزية للخوارزمية المقترحة. كما يعطي الشكل (5) المخطط التدفقي لآلية عمل الخوارزمية المقترحة. سوف يستخدم تابع التوزيع الغوصي من أجل البحث المحلي في (e) عدد المواقع المختارة من ضمن (n) موقع تمت زيارته. وتبقى عملية الاستكشاف باستخدام تابع Uniform.

أي تحتاج الخوارزمية المقترحة لمجموعة من البارامترات وهي:
(n) عدد نحلات الكشافة.

(e) عدد المواقع المختارة من ضمن (n) موقع تمت زيارته.

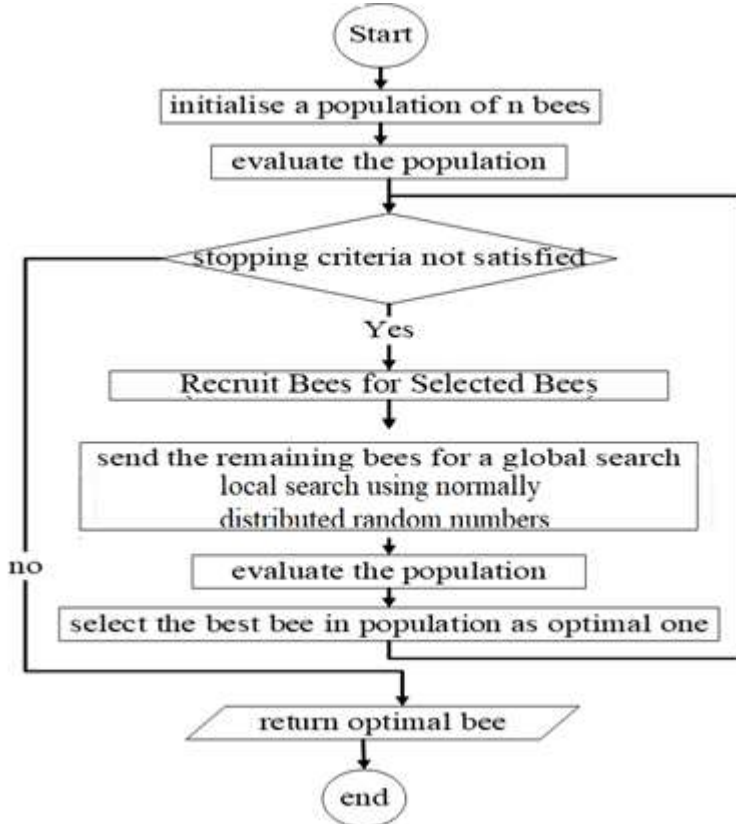
(ngh) جوار البحث المحلي وسوف يستخدم للتعبير عن الانحراف المعياري لتابع التوزيع الغوصي المستخدم في عملية البحث المحلية.
كما يوجد شرط توقف.

في البداية تذهب النحلات الكشافة بشكل عشوائي باستخدام تابع Uniform للبحث عن الحلول في فضاء البحث ومن ثم تقييمها عبر تابع الهدف المستخدم. ثم تُرتب الحلول تصاعدياً بناءً على قيمة تابع التقييم ويتم اختيار أفضل e نحلة والبدء بعملية البحث المحلي باستخدام تابع التوزيع Gaussian or Normal. بعد الانتهاء

من عملية البحث المحلية تُخزن النتائج. ترتب نتائج البحث المحلية من أجل e نحلة ويؤخذ أفضل حل كخرج لتطبيق الخوارزمية. كما يتم الإبقاء على مرحلة الاستكشاف من أجل كل دورة في خوارزمية النحل.

- 1- Initialize a population of n scout bees randomly
- 2- Evaluate the population
- 3- Select e best Bees (ranking)
- 4- While (stopping criterion not met).
- 5- Run local search using Gaussian random number generator.
- 6- End While.
- 7- Store the results
- 8- Return best solution so far

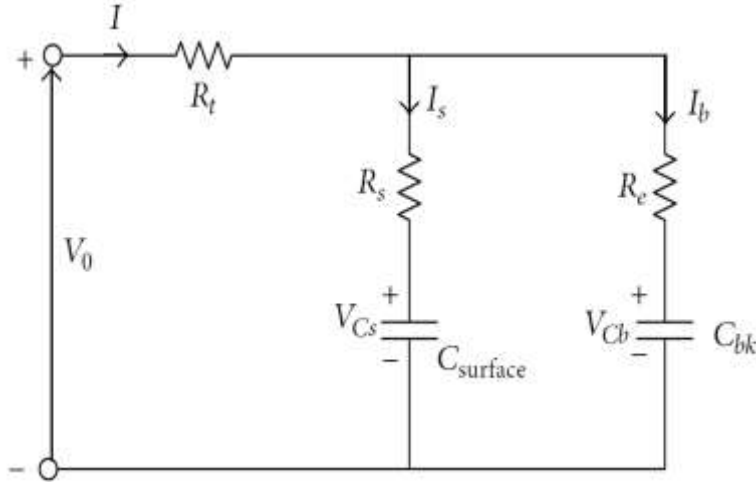
الشكل (4) الشيفرة الرمزية للخوارزمية المقترحة



الشكل (5) المخطط التدفقي للخوارزمية المقترحة

5- حالة مدروسة :

سوف تطبق الطريقة المقترحة لمعايرة بارامترات مرشح كالمان المستخدم في مسألة حالة الشحن لمنظومة بطارية RC [14] [15] . يوضح الشكل (6) رسماً تخطيطياً لدارة كهربائية الممثلة لحالة بطارية [14] [16].



الشكل (6) مخطط لنموذج بطارية RC [14] [16]

حيث C_{bk} مكثفة تمثل مخزن الطاقة في البطارية
 $C_{surface}$ تمثل المكثفة السطحية وتطابير الشحنة في خلية البطارية
 R_t مقاومة الطرفية
 R_e مقاومة السطح
 R_e المقاومة النهائية
 فرق الكمون عبر المكثفتين هما V_{Cs} و V_{Cb}
 ويمكن توصيف المنظومة في فضاء الحالة في المعادلة:

$$\dot{x}(t) = A.x(t) + B.u(t) \quad (8)$$

$$y(t) = C.x(t) + D.u(t) \quad (9)$$

حيث

$$\dot{x}(t) = \begin{bmatrix} \dot{V}_{Cb} \\ \dot{V}_{Cs} \\ \dot{V}_0 \end{bmatrix}$$

وبالتالي

$$x(t) = \begin{bmatrix} V_{Cb} \\ V_{Cs} \\ V_0 \end{bmatrix}$$

$$u(t) = I$$

وكما في [3] [14] [16] فإن قيم

$$A = \begin{bmatrix} 1.51 \times 10^{-3} & -1.51 \times 10^{-3} & 0 \\ 1.6238 & -1.6238 & 0 \\ 1.6223 & 0 & -1.6223 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 5.66 \times 10^{-6} \\ 6.08 \times 10^{-3} \\ 1.05 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}$$

وبالتالي يكون الخرج

$$y(t) = V_0$$

تصبح معادلات الحالة المتقطعة للمنظومة المدروسة على الشكل التالي:

$$x_{n+1} = A_d \cdot x_n + B_d \cdot u_n + w \quad (10)$$

$$z_{n+1} = C_d \cdot x_{n+1} + v_k \quad (11)$$

وبالتالي تصبح قيم المعاملات كما في [3] [14] [16] :

$$A_d = \begin{bmatrix} 0.9984 & -1.51 \times 10^{-3} & 0 \\ 1.6238 & 0.6238 & 0 \\ 1.6223 & 0 & 0.6223 \end{bmatrix}$$

$$B_d = \begin{bmatrix} 5.66 \times 10^{-6} \\ 6.08 \times 10^{-3} \\ 1.05 \times 10^{-2} \end{bmatrix}$$

$$C_d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ستقوم خوارزمية النحل بمعايرة البارامترات Q و R الخاصة بمرشح كالمان وذلك باستخدام RMS للخطأ المقدّر، أي كلما كان RMS أصغر كان أفضل.

6- النتائج التجريبية

استخدمت خوارزمية النحل بشكلها الأساسي لمعايرة بارامترات مرشح كالمان، ومن ثم استخدم البحث المحلي الخاص بخوارزمية النحل (بدون مرحلة الاستكشاف) بتابعي توزيع احتماليين وهما تابع التوزيع النظامي $Uniform$ وتابع التوزيع الطبيعي (الغوسي) $Gaussian$ كلاً على حدة. وبعد ذلك جرى تطبيق الطريقة المقترحة لإيجاد القيمة المثلى لبارامترات مرشح كالمان. أعيدت التجربة 10 مرات من أجل جميع الطرق المذكورة وذلك لإيجاد المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للنتائج التجريبية. وكانت بارامترات خوارزمية النحل بشكلها الأساسي:

(n) عدد نحلات الكشف وهو 10.

(m) عدد المواقع المختارة من ضمن (n) موقع تمت زيارته وهو 5.

(e) عدد المواقع المختارة كأفضل المواقع ضمن (m) وهو 2.

(nep) عدد النحلات العاملة من أجل كل موقع من (e) وهو 4.

(nsp) عدد النحلات العاملة من أجل باقي المواقع (m-e) وهو 2.

(ngh) وهو 0.5 وعدد دورات 10.

وكانت بارامترات البحث المحلي في حالة تابع التوزيع النظامي هي فقط نطاق البحث أي ngh. أما بارامترات البحث المحلي في حالة تابع التوزيع الطبيعي هي المتوسط والانحراف المعياري وهو 0.5.

بينما بارامترات الطريقة المقترحة

(n) عدد نحلات الكشف 10.

(e) عدد المواقع المختارة 4.

مع نفس بارامترات البحث المحلي في حالتيه الاثنتين النظامي والطبيعي.

يبين الجدول (1) التالي مقارنة لبعض النتائج التجريبية المستخلصة من تطبيق الطرق المذكورة على الحالة المدروسة.

الجدول (1) مقارنة لبعض النتائج التجريبية المستخلصة من تطبيق الطرق المذكورة على الحالة المدروسة.

الطريقة المقترحة	الخوارزمية الوراثية [3]	خوارزمية النحل بشكلها الأساسي	بحث محلي (توزيع طبيعي)	بحث محلي (توزيع نظامي)	
1.96E-07	2.3282E-6	1.95E-07	1.51E-04	2.63E-04	المتوسط الحسابي
5.6563E-11	N / A	1.60145E-09	0.000118999	0.000150337	الانحراف المعياري

من النتائج نجد أن البحث المحلي في حالة تابع التوزيع النظامي يمكن أن يعطي نتائج جيدة بشكل سريع ولكن ذو نتائج متباينة. بينما حالة البحث المحلي في حالة تابع التوزيع الطبيعي يعطي نتائج متقاربة أي تباينا أقل في النتائج عند إعادة التجربة. بينما أعطت خوارزمية النحل بشكلها الأساسي والمقترح نتائج أفضل مقارنة بالخوارزمية الوراثية [3] وبالبحث المحلي. تتميز الطريقة المقترحة بالمقدرة على إيجاد نتائج أمثلية وبنفس الوقت تباين منخفض بين النتائج في حالة إعادة التجربة، ويعود السبب إلى استخدام تابع التوزيع الطبيعي في الجزء الخاص بعملية البحث المحلي بخوارزمية النحل. حيث إن تابع التوزيع الطبيعي يناسب حالة مرشح كالمان.

7- الخاتمة والأفاق المستقبلية

قدمت هذه المقالة تطبيقا جديدا لخوارزمية النحل في الأمثلة المستمرة، وذلك بمعايرة بارامترات مرشح كالمان في حالته المتقطعة والمستخدم في تقدير حالة الشحن

لبطارية. تم استخدام تابعين مختلفين للبحث المحلي وهما النظامي والطبيعي. قوة خوارزمية النحل في البحث الكلي وسرعة وكفاءة طريقة النقطة الداخلية في البحث المحلي. أثبتت النتائج التجريبية قوة واستقرار خوارزمية النحل مقارنة بالخوارزمية الوراثية وفعاليتها في حل هذا النوع من المسائل الهندسية. كما أظهرت النتائج أهمية استخدام البحث المحلي المناسب لكل مسألة على حدة. لذلك تفوقت الطريقة المقترحة على ما سبق بسبب استخدام تابع التوزيع الطبيعي والذي يناسب حالة مرشح كالمان. يمكن توسيع الطريقة المقترحة من أجل أشكال أخرى من مرشح كالمان.

المراجع

- [1] M. S. Grewal and A. P. Andrews, Kalman Filtering - Theory and Practice Using MATLAB, vol. 4th, John Wiley & Sons, Inc, 2015.
- [2] T. D. Powell, "Automated Tuning of an Extended Kalman Filter Using the Downhill Simplex Algorithm," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2002.
- [3] T. O. Ting, K. L. Man, E. G. Lim and M. Leac, "Tuning of Kalman Filter Parameters via Genetic Algorithm for State-of-Charge Estimation in Battery Management System," *The Scientific World Journal*, 2014.
- [4] R. K. JATOTH and T. K. KUMAR, "Particle Swarm optimization Based Tuning of Extended Kalman Filter for Manoeuvring Target Tracking," *INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING*, 2009.
- [5] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koc, S. Otri and S. Rahim, "The Bees Algorithm. Technical Note," Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK, 2005.
- [6] D. T. Pham and M. Castellani, "A comparative study of the Bees Algorithm as a tool for function optimization," *Cognet Engineering*, p. 1–28, 2015.
- [7] A. Haj Darwish, A. Joukhadar and M. Kashkash, "Using the Bees Algorithm for wheeled mobile robot path planning in an indoor dynamic environment," *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, 2018.

- [8] H. Marzi, A. Haj Darwish and H. Helfawi, "Training ANFIS using the enhanced Bees Algorithm and least squares estimation," *Intelligent Automation & Soft Computing*, vol. 23, no. 2, p. 227–234, 2016.
- [9] D. Pham, Q. Pham, A. Ghanbarzadeh and M. Castellani, "Dynamic Optimisation of Chemical Engineering Processes Using the Bees Algorithm," in *17th IFAC World Congress (IFAC'08)*, Seoul, Korea, 2008.
- [10] K. Youngjoo and B. Hyochoong, "Introduction to Kalman Filter and Its Applications," IntechOpen, 2018, p. 16.
- [11] G. Welch and G. Bishop, "An Introduction to the Kalman Filter," University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, 1995.
- [12] D. T. Pham and A. Haj Darwish, "Optimising fuzzy membership functions using the Bees Algorithm with Kalman filtering," in *5th International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS 2009)*, Cardiff, UK, 2009.
- [13] D. T. Pham and A. Haj Darwish, "Using the Bees Algorithm with Kalman Filtering to Train an Artificial Neural Network for Pattern Classification," *Journal of Systems and Control Engineering*, vol. 224, no. 7, p. 885–892, 2010.
- [14] T. O. Ting, K. L. Man, C.-U. Lei, and C. Lu, "State-of-charge for battery management system via kalman filter," *IAENG Engineering Letters*, vol. 22, no. 2, 2014.
- [15] B. S. Bhangu, P. Bentley, D. A. Stone, and C. M. Bingham, "Nonlinear observers for predicting state-of-charge and state-of-health of lead-acid batteries for hybrid-electric vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 783–794, 2005.
- [16] T. O. Ting, K. L. Man, N. Zhang, C.-U. Lei and C. Lu, "State-Space Battery Modeling for Smart Battery," in *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists IMECS 2014*, Hong Kong, 2014.