

Presenting an Intelligent Topological Approach for Sensor Orientation in Directional Sensor Networks

Marzieh Varposhti*

Department of Computer Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
E-mail: mvarposhti@sku.ac.ir

Short Abstract

Directional sensor networks (DSNs) consist of directional sensor nodes which can switch to several directions to extend their sensing ability to cover the interested area. One important problem in these networks is providing adequate coverage to fulfill the issued sensing tasks. This paper addresses the problem of selection and orientation of directional sensors for providing full area coverage in directional sensor networks. Using the notion of homology in Algebraic topology, we model the coverage of DSNs by simplicial complexes and formulate the problem of selection and orientation of directional sensors as a binary linear programming. Then, an algorithm based on irregular cellular learning automata for orientation of sensors is proposed to solve the problem in a reasonable time. The proposed algorithm works based on the size of the existing holes in the covered area. The proposed algorithm has adopted a homological approach to find holes in the sensor network. The simulation results show about 2% increase in the amount of coverage and also a significant decrease in the number of conditions and variables of the proposed optimization problem.

Keywords

Area coverage, directional sensor networks, hole localization, cellular learning automata, simplicial complex.

1- Short Introduction

Directional Sensor Networks (DSNs) have been adopted in different contexts to provide required information supporting the development of different innovative applications. In practice, due to random deployment of sensor nodes or energy run out, coverage holes could be created which can affect the quality of service. So, hole detection and healing is one of the important issue in the context of wireless sensor networks. In this paper, we design a topological method for hole detection and also selecting the appropriate working directions of sensor nodes to heal the holes in order to provide full area coverage.

2- Proposed Work and Methodology (including comprision, simulation/experimental results and discusion)

The proposed method works based on the homological properties of the simplicial complex of the network. We model the problem of working direction selection as a binary linear programming. The simulations are done in MATLAB. In comparison with the other BIP model, our model contains less variables and conditions. In addition, we propose a distributed method to select the appropriate working direction of sensor nodes to cover the whole area, and in comparison with heuristic algorithm, the proposed algorithm provide better coverage.

3- Conclusion

In this paper, we proposed algorithms for hole localization and selecting the working direction of directional sensors for providing full area coverage. We have drawn on the notion of homology of the simplicial complex of the network to capture the topological properties of the network. We formulated this problem as a BIP problem and proposed an algorithm based on cellular learning automata to solve it in a distributed mannent. Simulation results demonstrate the better performance of proposed algorithm in compare to greedy algorithm. It is shown by simulations that modeling the network by simplicial complexes is an appropriate way for full area coverage problems.

4- References

- [1]. E. Hörster and R. Lienhart, "Optimal Placement of Multiple Visual Sensors," in *Multi-Camera Networks: Concepts and Applications*, ed: Elsevier, 2009.
- [2]. M. Varposhti, M. Dehghan, and R. Safabakhsh, "Distributed Topological Camera Selection Without Location Information," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 14, pp. 2579-2589, 2014.
- [3]. P. Singh and Y.-C. Chen, "Sensing coverage hole identification and coverage hole healing methods for wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 26, pp. 2223-2239, 2020.

ارائه یک رویکرد توپولوژیکی هوشمند برای انتخاب جهت حسگرها در شبکه‌های حسگر جهت‌دار

مرضیه وریشتی

استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد ایران

چکیده

یک شبکه حسگر جهت‌دار از مجموعه‌ای از گره‌های حسگر جهت‌دار تشکیل شده است که می‌توانند در چندین سمت تغییر جهت دهند تا پوشش ناحیه موردنظر را گسترش دهند. یکی از مسائل مهم در این شبکه‌ها فراهم کردن پوشش کافی برای انجام وظایف حسگری است. این مقاله به مسئله انتخاب جهت مناسب برای حسگرهای جهت‌دار به منظور ارائه پوشش کامل ناحیه در شبکه‌های حسگر جهت‌دار می‌پردازد. ما با استفاده از مفهوم مانستگی (homology) در توپولوژی جبری پوشش در شبکه‌های حسگر جهت‌دار را با استفاده از مجتمع‌های سادگی (simplicial complex) مدل می‌کنیم و مسئله انتخاب جهت مناسب برای حسگرهای جهت‌دار را به صورت یک برنامه‌ریزی خطی دودویی فرمول‌بندی می‌کنیم. سپس الگوریتمی مبتنی بر اتوماتای یادگیر سلولی نامنظم برای جهت‌دهی حسگرها پیشنهاد می‌کنیم. الگوریتم پیشنهادی بر اساس اندازه حفره‌های موجود در ناحیه تحت پوشش کار می‌کند. الگوریتم پیشنهادی برای یافتن حفره‌ها در شبکه حسگر از رویکردی مبتنی بر مانستگی استفاده می‌کند. نتایج شبیه‌سازی حدود ۲٪ افزایش در میزان پوشش و همچنین کاهش چشمگیر در تعداد شرایط و متغیرهای مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی

پوشش ناحیه، شبکه‌های حسگر جهت‌دار، مکان‌یابی حفره، اتوماتای یادگیر سلولی، مجتمع سادگی.

نام نویسنده مسئول: دکتر مرضیه وریشتی

ایمیل نویسنده مسئول: mvarposhti@sku.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۲/۱۷

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۱۵

۱- مقدمه

یک شبکه حسگر شامل مجموعه‌ای از حسگرها است که از طریق یک زیرساخت ارتباطی برای انجام یک وظیفه خاص با یکدیگر ارتباط و تبادل اطلاعات می‌کنند. یکی از مسائل مهم در شبکه‌های حسگر مسئله پوشش است. بسیاری از محققان در زمینه پوشش ناحیه و پوشش هدف در شبکه‌های حسگر تحقیقاتی به عمل آورده‌اند [۱، ۲]. این مسئله در شبکه‌های حسگر جهت‌دار که در آن حسگرها زاویه دید محدودی دارند با چالش بیشتری مواجه است، زیرا علاوه بر مکان حسگرها، جهت حسگرها نیز در میزان پوشش تأثیرگذار است. در عمل به دلیل استقرار تصادفی گره‌های حسگر یا تمام شدن انرژی برخی از گره‌ها در ناحیه تحت پوشش حفره‌های پوششی ایجاد می‌شود که می‌تواند بر کیفیت خدمات تأثیر بگذارد. در چنین شرایطی تشخیص حفره‌ها در شبکه و تنظیم جهت گره‌های حسگر برای افزایش پوشش مسئله مهمی است. اما روش‌هایی که بیشتر محققان برای تشخیص و برطرف کردن حفره پیشنهاد داده اند مربوط به شبکه‌های حسگر همه جهته هستند [۳، ۴].

برخی محققان به مسئله تنظیم جهت حسگرهای جهتی به منظور افزایش پوشش ناحیه یا پوشش هدف پرداخته‌اند که هدف اصلی آن‌ها به حداقل رساندن نواحی همپوشانی و تأثیر موانع است [۵]. برخی محققان برای حل مسئله پوشش هدف روش‌هایی بر اساس الگوریتم ژنتیک ارائه کرده‌اند [۶-۹]. در [۶] یک الگوریتم ژنتیک برای مسئله پوشش هدف ارائه شده است که در آن مجموعه‌های پوششی مناسب را برای پوشش مطلوب همه اهداف در منطقه تشخیص می‌دهد. نویسندگان در [۷] یک الگوریتم ژنتیک را برای حل مشکل پوشش هدف مبتنی بر اولویت پیشنهاد داده‌اند که هدف آن‌ها انتخاب حداقل زیرمجموعه‌ای از حسگرهای جهت‌دار است که می‌تواند با نظارت همه اهداف اولویت‌های تعیین شده را تأمین کنند. در [۹] یک روش دقیق برای مسئله به حداکثر رساندن طول عمر شبکه‌های حسگر بی‌سیم جهت‌دار پیشنهاد شده است که در آن از یک راهبرد دوسطحی متشکل از یک الگوریتم ژنتیک و یک رویکرد برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح استفاده می‌شود. در [۱۰] یک الگوریتم توزیع شده بر اساس اتوماتای یادگیری سلولی نامنظم برای یافتن جهت مناسب حسگرها و همچنین یک الگوریتم تقریب برای یافتن حداقل تعداد حسگرهایی که همه اهداف را پوشش می‌دهند، پیشنهاد شده است. در [۱۱] دو الگوریتم مبتنی بر اتوماتای یادگیری برای حل مسئله پوشش k -تایی هدف پیشنهاد شده است.

در برخی از مطالعات مسئله پوشش هدف در شبکه‌های حسگر بصری و شبکه‌های دوربینی در نظر گرفته شده است [۱۲-۱۴]. نویسندگان در [۱۳] مسئله به حداکثر رساندن پوشش هدف اضافی در شبکه‌های حسگر بصری که یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه است را بررسی و راه‌حلی بر اساس الگوریتم NSGA-II برای حل آن پیشنهاد کرده‌اند. مسئله پوشش دید کامل برای نظارت و تشخیص اشیاء ظاهر شده در نقاط هدف در شبکه‌های دوربینی در [۱۴، ۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. محققان در [۱۶] یک روش توزیع شده برای یافتن جهت‌های مناسب حسگرها در یک شبکه حسگر چندرسانه‌ای بی‌سیم ارائه داده اند که در آن هر حسگر جهت‌گیری مناسب را بر اساس موقعیت موانع و همسایه‌های آن تعیین می‌کند. مسئله استقرار دوربین به صورت بهینه در [۱۷] در نظر گرفته شده است و در آن یک الگوریتم مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات دودویی برای حل مسئله استقرار دوربین‌ها پیشنهاد شده است. در [۱۸] یک الگوریتم حریصانه توزیع شده بر اساس نمودار ورونوی^۱ برای بهبود پوشش

ناحیه پیشنهاد شده است. در [۱۹] یک مدل کنترل پوشش حسگر به صورت سه‌بعدی پیشنهاد شده است که در آن جهت‌های کاری جدید حسگرهای جهت‌دار را با توجه تحلیل نیروی مجازی بر اساس نیروی همسایگی تعیین می‌شوند.

یکی از رویکردها برای حل مسائل پوشش در شبکه‌های حسگر استفاده از مفهوم مانستگی در توپولوژی جبری است که برای مطالعه ویژگی‌های توپولوژیکی شبکه‌های حسگر استفاده می‌شود [۲۰-۲۳]. در شبکه‌های حسگر مانستگی از نگاشت فضای شبکه حسگر به یک فضای توپولوژیکی مانند مجتمع ریپس^۲ یا مجتمع چن^۳ استفاده می‌شود. پس از انجام نگاشت با استفاده از گروه‌های مانستگی به شناخت خواص آن فضا پرداخته می‌شود. در شبکه‌های حسگر جهت‌دار می‌توان نقاطی از ناحیه را که تحت پوشش یک حسگر هستند به عنوان یک مجموعه در نظر گرفت. سپس با استفاده از اطلاعات مکان و جهت حسگرها می‌توان همپوشانی بین نواحی تحت پوشش حسگرها را مشخص کرد. با تشخیص این نواحی مجتمع سادگی مناسب برای تحلیل و حل مسئله مورد نظر ساخته می‌شود.

در این مقاله ما مسئله بهبود پوشش ناحیه در شبکه‌های حسگر جهت‌دار را بررسی می‌کنیم. فرض می‌کنیم که حسگرها قابلیت چرخش دارند. به عنوان مثال دوربین‌های PTZ^۴ یا دوربین‌هایی که به یک موتور جهت چرخش تجهیز شده‌اند. ما روشی برای تشخیص حفره در شبکه‌های حسگر جهت‌دار ارائه می‌کنیم. همچنین الگوریتمی برای انتخاب جهت مناسب برای حسگرهای جهت‌دار به منظور تأمین پوشش کامل ناحیه پیشنهاد می‌کنیم. تا آنجا که ما می‌دانیم الگوریتمی برای تشخیص حفره در شبکه‌های حسگر جهت‌دار وجود ندارد. مشارکت ما در این مقاله در ادامه لیست شده است:

(۱) با الهام از خواص مانستگی مجتمع سادگی^۵ شبکه حسگر، مسئله انتخاب جهت حسگرها را به عنوان یک مسئله برنامه‌ریزی خطی دودویی (BIP^۶) فرمول‌بندی می‌کنیم که در آن حداقل تعداد حسگرها و جهت مناسب آن‌ها را برای پوشش کل ناحیه مشخص می‌شود. نشان می‌دهیم که این مدل بهینه‌سازی دودویی با استفاده از مجتمع‌های سادگی نسبت به روش‌های معمول که یکی از آن‌ها در [۲۴] ارائه شده است سریع‌تر اجرا می‌شود.

(۲) همچنین یک الگوریتم توزیع شده برای تشخیص حفره‌های موجود در فضای حسگری بر اساس خواص مانستگی مجتمع سادگی مربوط به شبکه حسگر پیشنهاد می‌شود.

(۳) ما یک روش خودتنظیمی مبتنی بر اتوماتای یادگیری سلولی برای انتخاب جهت مناسب حسگرها برای به حداکثر رساندن پوشش ناحیه پیشنهاد می‌کنیم. بدین منظور تنها حسگرهایی که در مرز حفره‌ها قرار دارند با استفاده از اتوماتای یادگیر جهت مناسب خود را انتخاب می‌کنند و بنابراین بقیه گره‌ها دیگر نمی‌چرخند.

این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: اتوماتای یادگیری سلولی در بخش ۲ مورد بحث قرار خواهد گرفت. در بخش ۳ مفهوم مجتمع‌های سادگی و مانستگی به صورت مختصر بررسی می‌شود. بخش ۴ شامل الگوریتم‌های پیشنهادی برای تشخیص حفره، و انتخاب و جهت‌گیری حسگرهای جهت‌دار است. نتایج شبیه‌سازی در بخش ۵ ارائه شده است. در نهایت نتیجه‌گیری از مقاله در بخش ۶ به انجام می‌رسد.

۲- مروری بر اتوماتای یادگیر

اتوماتای یادگیری یک مدل انتزاعی است که در محیط تصادفی نامعین عمل

^۴ Pan-Tilt-Zoom
^۵ Simplicial complex
^۶ Binary Integer Programming

^۱ Voronoi diagram
^۲ Rips
^۳ Čech

می‌کند. یک اتوماتای یادگیری دارای مجموعه متناهی از عمل‌ها است. اتوماتای یادگیر در هر مرحله، یک عمل از مجموعه عمل‌های خود را بر اساس بردار احتمال مختص به آن انتخاب و در محیط تصادفی انجام می‌دهد. سپس محیط تصادفی عمل انتخاب‌شده را ارزیابی و نتیجه ارزیابی را با یک سیگنال مثبت یا منفی با توزیع احتمال نامعین ثابت به اتوماتای یادگیر تحویل می‌دهد. سپس اتوماتای یادگیر بردار احتمال عمل‌های خود را با توجه به سیگنال تقویتی و عمل انتخاب‌شده به‌روزرسانی می‌کند و به رفتار مطلوب نهایی تبدیل می‌شود. بنابراین در طی این فرآیند، اتوماتا یاد می‌گیرد که عمل بهینه را انتخاب کند. ساختار یک اتوماتای یادگیری با چهارگانه $\{\alpha, \beta, p, T\}$ تعریف می‌شود که در آن $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌های اتوماتا، $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_r\}$ مجموعه ورودی، $p = \{p_1, \dots, p_r\}$ مجموعه احتمال عمل‌ها و $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$ الگوریتم یادگیری را نشان می‌دهد. فرض کنید a_i عمل انتخابی در زمان n باشد، در این صورت اتوماتا مجموعه احتمال عمل خود را بر اساس روابط (۱) و (۲) برای پاسخ‌های مطلوب و نامطلوب به‌روزرسانی می‌کند.

می‌کند. یک اتوماتای یادگیری دارای مجموعه متناهی از عمل‌ها است. اتوماتای یادگیر در هر مرحله، یک عمل از مجموعه عمل‌های خود را بر اساس بردار احتمال مختص به آن انتخاب و در محیط تصادفی انجام می‌دهد. سپس محیط تصادفی عمل انتخاب‌شده را ارزیابی و نتیجه ارزیابی را با یک سیگنال مثبت یا منفی با توزیع احتمال نامعین ثابت به اتوماتای یادگیر تحویل می‌دهد. سپس اتوماتای یادگیر بردار احتمال عمل‌های خود را با توجه به سیگنال تقویتی و عمل انتخاب‌شده به‌روزرسانی می‌کند و به رفتار مطلوب نهایی تبدیل می‌شود. بنابراین در طی این فرآیند، اتوماتا یاد می‌گیرد که عمل بهینه را انتخاب کند. ساختار یک اتوماتای یادگیری با چهارگانه $\{\alpha, \beta, p, T\}$ تعریف می‌شود که در آن $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_r\}$ مجموعه عمل‌های اتوماتا، $\beta = \{\beta_1, \dots, \beta_r\}$ مجموعه ورودی، $p = \{p_1, \dots, p_r\}$ مجموعه احتمال عمل‌ها و $p(n+1) = T[\alpha(n), \beta(n), p(n)]$ الگوریتم یادگیری را نشان می‌دهد. فرض کنید a_i عمل انتخابی در زمان n باشد، در این صورت اتوماتا مجموعه احتمال عمل خود را بر اساس روابط (۱) و (۲) برای پاسخ‌های مطلوب و نامطلوب به‌روزرسانی می‌کند.

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= p_i(n) + a(1-p_i(n)) \\ p_j(n+1) &= p_j(n) - ap_j(n) \quad \forall j \neq i \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} p_i(n+1) &= (1-b)p_i(n) \\ p_j(n+1) &= \frac{b}{r-1} + (1-b)p_j(n) \quad \forall j \neq i \end{aligned} \quad (2)$$

۳- مروری بر مجتمع‌های سادکی و مانستگی

در این بخش به‌طور خلاصه با مفاهیم مجتمع سادکی و مانستگی در توپولوژی جبری آشنا می‌شویم. برای اطلاعات بیشتر می‌توانید مراجع [25, 26] را مطالعه نمایید.

مانستگی سادکی مربوط به فضاهای توپولوژیکی است که بلوک‌های سازنده آن n -سادک‌ها هستند. n -سادک‌ها در حقیقت مثلث‌های n بعدی هستند. هر نقطه یک 0 -سادک، هر ضلع یک 1 -سادک و هر مثلث یک 2 -سادک است و به همین ترتیب. n -سادک را به‌صورت مجموعه $[v_1, v_2, \dots, v_{n+1}]$ نشان می‌دهیم. همچنین اگر A و B سادک‌هایی باشند و رئوس B زیرمجموعه‌ای از رئوس A را تشکیل دهد، آن وقت می‌گوییم B یک وجه از A است. یک مجموعه متناهی از سادک‌ها در n یک مجتمع سادکی نامیده می‌شود، اگر هرگاه سادکی در مجموعه قرار داشت، همه وجه‌های آن هم در مجموعه قرار داشته باشند. برای یک گردابه از مجموعه‌های $\{s_i\}_{i=1}^N$ ، مجتمع چرخ به‌صورت یک مجتمع سادکی تعریف می‌شود که رأس v_i متناظر با مجموعه s_i و k -سادک آن متناظر با اشتراک نا تهی $k+1$ عنصر متمایز s است.

ترکیب خطی k -سادک‌ها یک k -زنجیر نامیده می‌شود. مجموعه k -زنجیرها را با C_k نشان می‌دهیم. عملگر مرز ∂_k که به یک k -سادک s اعمال می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\partial_k s = \sum_{i=0}^k (-1)^i [v_0 \dots v_{i-1} v_{i+1} \dots v_k] \quad (3)$$

همچنین عملگر مرز برای k -زنجیری به‌طور خطی قابل اعمال است. ∂_k را می‌توان به‌صورت ماتریس $B_k \in \{0, 1, -1\}^{n_k \times n_k}$ نشان داد که در آن n_k تعداد k -سادک‌ها را نشان می‌دهد. یک k -زنجیر σ یک دور است، اگر $\partial_k \sigma = 0$ ، به‌عبارت‌دیگر یک k -زنجیر بسته را یک k -دور گویند. مجموعه k -دورها کرنل ∂_k همان $\ker \partial_k$ است. یک k -زنجیر $\sigma \in C_k$ مرز نامیده می‌شود، اگر $\rho \in C_{k+1}$ وجود داشته باشد که $\partial_{k+1} \rho = \sigma$. مجموعه k -مرزها، که تصویر

$$H_k = \ker \partial_k / \text{img } \partial_{k+1} \quad (4)$$

مانستگی یک مجتمع، مجموعه همه گروه‌های مانستگی آن مجتمع است. رتبه H_k ، یا k امین عدد بتی که با β_k نشان داده می‌شود، تعداد حفره‌ها را مشخص می‌کند. به‌طور خاص β_0 تعداد مؤلفه‌های همبندی و β_1 تعداد حفره‌های یک‌بعدی مختلف را مشخص می‌کنند. عملگر $L_k: C_k(X) \rightarrow C_k(X)$ را k -لاپلاسی گسسته مجتمع سادکی می‌نامند و به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$L_k = B_k^T B_k + B_{k+1} B_{k+1}^T \quad (5)$$

که B_k نمایش ماتریس ∂_k و n_k تعداد k -سادک‌ها در X است. بعد فضای پوچ k امین لاپلاسی ترکیبی برابر با β_k است و عناصر غیرصفر در $\ker L_k$ حفره‌های k -بعدی را در مجتمع سادکی مربوطه نشان می‌دهند.

دو تابع هموتوپیک هستند اگر بتوانیم به‌طور پیوسته یکی را به دیگری تبدیل کنیم. مجموعه X انقباض پذیر است، اگر نگاشت همانی روی X با یک نگاشت ثابت هموتوپیک باشد. به‌عبارت‌دیگر یک فضا انقباض‌پذیر است، اگر بتوانیم به‌طور پیوسته آن را به یک نقطه تغییر شکل دهیم.

قضیه ۱ (چرخ) [۲۷]: اگر مجموعه‌های $\{s_i\}_{i=1}^N$ و همه اشتراکات متناهی آن‌ها انقباض‌پذیر باشند، آن وقت $\bigcup_{i=1}^N s_i$ همان نوع هموتوپیی مجتمع چرخ را دارد.

ما فرض می‌کنیم که هیچ مانعی در محیط وجود ندارد، بنابراین اگر ناحیه تحت پوشش هر حسگر را یک مجموعه در نظر بگیریم، طبق قضیه ۱ اجتماع این مجموعه‌ها دارای هموتوپیی یکسان با مجتمع چرخ است. بنابراین برای مدل‌سازی مسئله خود از مجتمع چرخ استفاده می‌کنیم.

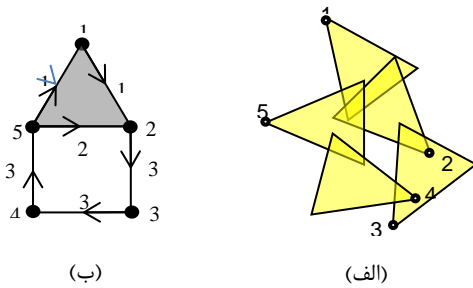
۴- الگوریتم پیشنهادی

در این قسمت الگوریتم پیشنهادی برای مسئله تعیین حفره‌ها در ناحیه مطرح و بر اساس آن الگوریتمی برای مسئله انتخاب و تعیین جهت حسگرها برای پوشش کامل ناحیه ارائه می‌شود.

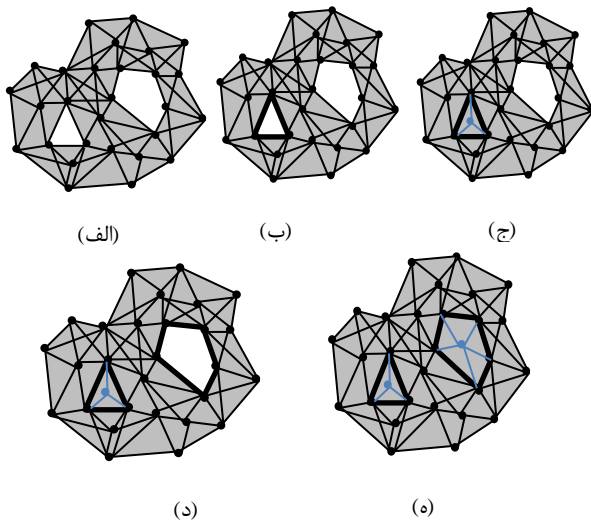
۴-۱- تعریف مسئله

یک شبکه حسگر متشکل از حسگرهای جهت‌دار $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{n_0}\}$ را که در مکان‌های ثابتی در ناحیه $D \subset \mathbb{R}^2$ قرار گرفته‌اند در نظر بگیرید، به‌طوری که حسگرها قابلیت چرخش در یکی از k جهت ممکن دارند و $D \subset \bigcup_{i=1}^n FV_i$ ، که FV_i ناحیه تحت پوشش حسگر C_i است. فرض می‌کنیم که هیچ مانعی در محیط وجود ندارد. مرز محیط (∂D) توسط m حسگر مشخص که آن‌ها را با رئوس مرزی F نشان می‌دهیم پوشیده شده است. هر حسگر عمق دید و زاویه دید محدودی دارد. همچنین فرض می‌کنیم که اگر دو حسگر همپوشانی داشته باشند، در محدوده ارتباطی یکدیگر قرار دارند. به‌عبارت‌دیگر $r_b \geq 2r_c$ که در آن شعاع ارسال و r_c شعاع پوشش حسگر است. ما فرض می‌کنیم که پوشش کامل ناحیه را می‌توان با انتخاب جهت‌های مناسب برای حسگرها تأمین کرد. بر اساس این فرضیات، مسئله چگونگی تعیین کمترین تعداد حسگرها و جهت مناسب آن‌ها برای پوشش کل ناحیه است.

ما برای حل مسئله از مجتمع سادکی چرخ به‌عنوان یک مدل انتزاعی از شبکه حسگر استفاده می‌کنیم. برای ساختن مجتمع سادکی شبکه حسگر، ناحیه‌ای که هر حسگر با یک جهت خاص پوشش می‌دهد را به‌عنوان یک مجموعه در نظر می‌گیریم. بنابراین برای هر حسگر k مجموعه متفاوت وجود دارد. با توجه به قضیه ۱، هر مجموعه قابل انقباض است، علاوه بر این، تمام



شکل ۱: (الف) یک شبکه حسگر جهت‌دار. (ب) مجتمع سادگی متناظر با (الف) و جریان لاپلاسی مربوطه



شکل ۲- مثالی از اجرای الگوریتم تشخیص حفره

که در آن B_i ماتریس مرز یال‌ها، y_i برابر با عنصر i ام Y است، و z اندیس مربوط به یالی با بیشترین وزن در W است. بنابراین، یک دور جهت‌دار با کمترین طول را می‌توان با به حداقل رساندن تعداد 1 ها در Y با استفاده از مسئله بهینه‌سازی زیر پیدا کرد:

$$\begin{aligned} \min & \|Y\| \\ \text{s.t.} & B_i Y = 0 \\ & y_j = 1 \quad j = \arg \max Y \\ & y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \end{aligned} \quad (7)$$

فرض کنید p و q دو عدد ثابت مثبت و بزرگ باشند. در این صورت مسئله بهینه‌سازی زیر معادل مسئله (7) است.

$$\begin{aligned} \min f & = \|Y\| + p \|B_i Y\| + q \|Y(j) - 1\| \\ \text{s.t.} & Y \in \{0,1\}^n \end{aligned} \quad (8)$$

تقریب پیوسته مسئله (8) به صورت زیر است.

$$\begin{aligned} \min f & = \|Y\| + p \|B_i Y\| + q \|Y(j) - 1\| \\ \text{s.t.} & 0 \leq Y(i) \leq 1 \quad \forall i \end{aligned} \quad (9)$$

حال با استفاده از روش زیرگردان تصویر شده می‌توان به صورت توزیع شده مسئله (9) را حل کرد. روش حل این مسئله در کار قبلی ما در [۲۰] آورده شده است. خروجی این الگوریتم حفره با کمترین طول در شبکه است. برای یافتن حفره‌های دیگر یک گره اضافی مجازی در نظر می‌گیریم و آن را به همه گره‌های که در مرز حفره قرار دارند وصل می‌کنیم و ۲- سادک‌هایی را با استفاده از این یال‌ها تشکیل می‌دهیم. به عبارت دیگر حفره پیدا شده را با استفاده از ۲-

اشتراک‌های ناتهی آن‌ها نیز قابل انقباض هستند زیرا هیچ مانعی در محیط وجود ندارد. بنابراین، اجتماع این مجموعه‌ها دارای هموتویی یکسان با مجتمع چخ است. بدیهی است که این مجتمع سادگی دارای $kn+m$ رأس است و می‌تواند بر اساس اطلاعات مکان حسگرها به صورت توزیع شده ساخته شود.

۴-۲- تشخیص حفره‌ها

فرض کنید X یک مجتمع سادگی و W اولین بردار در فضای پوچ L_1 باشد. می‌توانیم فرض کنیم که تمام عناصر W مثبت هستند. اگر همه عناصر W مثبت نباشند بدین صورت عمل می‌کنیم که برای یال‌های مجتمع سادگی جهت‌های اختیاری در نظر می‌گیریم و فضای تهی ماتریس لاپلاسی آن مجتمع سادگی را تعیین می‌کنیم. سپس جهت هر یالی که مقدار متناظر آن در فضای پوچ ماتریس لاپلاسی منفی باشد را برعکس می‌کنیم. با در نظر گرفتن این جهت‌های جدید تمام عناصر فضای پوچ ماتریس لاپلاسی مربوطه مثبت هستند. خاصیتی که برای مجموع مقادیر یال‌ها در هر دور از X وجود دارد این است که مجموع جبری مقادیر روی هر دوری که یک ناحیه پر را در بر گرفته است برابر با صفر است و بالعکس، مجموع جبری مقادیر روی یال‌های هر دوری که حفره ای را در بر گرفته است مقداری بزرگ‌تر از صفر است [۲۸]. بنابراین، یک دور جهت‌دار نشان دهنده یک حفره در شبکه است. به عنوان مثال، مجتمع سادگی نشان داده شده در شکل ۱.ب که متناظر با شبکه حسگر داده شده در شکل ۱.الف است را در نظر بگیرید. همان‌طور که مشاهده می‌شود در شبکه حسگر یک حفره پوششی وجود دارد و متناظر آن نیز یک حفره در مجتمع سادگی متناظر آن وجود دارد. اولین ماتریس لاپلاسی ترکیبی آن با ماتریس L_1 ارائه شده است.

$$L_1 = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 2 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 2 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

فضای پوچ L_1 یک بردار یک‌بعدی است که برابر است با $[1 \ 1 \ 2 \ 3 \ 3 \ 3]^T$. دور $[1 \ 5] + [5 \ 2] + [2 \ 1]$ را در نظر بگیرید. مجموع جبری یال‌های این دور صفر است که نشان می‌دهد این دور یک حفره نیست. باین‌حال، مجموع جبری یال‌های دور $[4 \ 5] + [3 \ 4] + [2 \ 3] + [5 \ 2]$ برابر با ۱۱ است، که نشان می‌دهد این دور حاوی یک حفره است.

فرض کنید Y نمایش برداری یال‌ها باشد. وزن یال‌ها در W با نزدیک شدن به حفره‌ها بزرگ‌تر می‌شود [۲۸]. بنابراین، یال با بزرگ‌ترین وزن از لحاظ قدر مطلق روی دور با کمترین طول قرار دارد. در نتیجه، عنصر z از Y برابر با ۱ است، که z اندیس مربوط به یالی با بزرگ‌ترین وزن در W است. با توجه به این موارد، ایده ما یافتن یک دور جهت‌دار با کمترین تعداد یال‌ها است. یک دور جهت‌دار با طول غیر صفر را می‌توان با استفاده از شرایط زیر پیدا کرد:

$$\begin{aligned} B_i Y & = 0 \\ y_j & = 1 \\ y_i & \in \{0,1\} \end{aligned} \quad (6)$$

آن‌ها است نیز برابر با صفر هستند. برای گنجاندن این محدودیت در مسئله بهینه‌سازی (۱۳)، باید تغییراتی را اعمال کنیم. فرض کنید $\partial_1 \equiv B_1$ و $\partial_2 \equiv B_2$ که در آن B_1 و B_2 به ترتیب ماتریس‌های مرزی ۱- سادک‌ها و ۲- سادک‌ها هستند. بنابراین $\partial_1 \partial_2 | Y$ برداری است که عناصر غیرصفر آن متناظر با رؤس ۲- سادک‌های ۲- زنجیر Y هستند. بنابراین، اگر $d_{i\varphi}$ صفر باشد عناصر متناظر $\partial_1 \partial_2 | Y$ نیز صفر هستند. حال یک بردار دودویی S تعریف می‌کنیم که بعد آن $kn+m$ است که k تعداد جهت حسگرها، n تعداد حسگرها برای پوشش کل ناحیه و m تعداد حسگرهای مرزی است. ما برچسب‌های ۱ تا kn را به رؤسی از C_N که گره‌های مرزی نیستند اختصاص می‌دهیم و $kn+1$ تا $kn+m$ را به گره‌های مرزی اختصاص می‌دهیم. بنابراین، بردار S را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$S(i) = \begin{cases} 1 & i \geq kn+1 \text{ or orientation of sensor } \lceil i/k \rceil \text{ is} \\ & \varphi = (i - k \lfloor (i-1)/k \rfloor)^{th} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

برای نشان دادن وابستگی Y و S دو شرط $S(i) \leq \partial_1 \partial_2 | Y | (i)$ و $\partial_1 \partial_2 | Y | (i) \leq M \times S(i)$ در نظر می‌گیریم که M یک عدد بزرگ است. همچنین به صورت توپولوژیکی به جای انتخاب کمترین تعداد حسگر، کمترین تعداد ۲- سادک‌ها را انتخاب می‌کنیم. بنابراین مسئله بهینه‌سازی زیر را به دست می‌آوریم:

$$\begin{aligned} \min f &= \|Y\| \\ s.t. & B_2 Y = b \\ & S(i) \leq \partial_1 \partial_2 | Y | (i) \\ & \partial_1 \partial_2 | Y | (i) \leq M \times S(i) \\ & \sum_{j=1}^k S(kl+j) \leq 1 \quad \forall l \in \{0, 1, \dots, n-1\} \\ & Y \in \{0, 1, -1\}^{n_2} \\ & S \in \{0, 1\}^{n_0} \end{aligned} \quad (15)$$

برای خطی کردن (۱۵) از تکنیک گفته شده در [۲۹] استفاده می‌کنیم. بنابراین مدل BIP مسئله به صورت زیر است:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^{n_2} (Y^+(i) + Y^-(i)) \\ s.t. & B_2 (Y^+ - Y^-) = b \\ & S(i) \leq \partial_1 \partial_2 (Y^+ + Y^-)(i) \\ & \partial_1 \partial_2 (Y^+ + Y^-)(i) \leq M \times S(i) \\ & \sum_{j=1}^k S(kl+j) \leq 1 \quad \forall l \in \{0, 1, \dots, n-1\} \\ & Y^+, Y^- \in \{0, 1\}^{n_2} \\ & S \in \{0, 1\}^{n_0} \end{aligned} \quad (16)$$

۴-۴- CLA-WDA^v الگوریتم

در این قسمت الگوریتم پیشنهادی خود برای انتخاب جهت مناسب برای حسگرها بر اساس اتوماتای یادگیر به نام CLA-WDA را ارائه می‌دهیم. الگوریتم پیشنهادی شامل ۳ فاز است. نگاشت به C_N ، نگاشت به اتوماتای یادگیری سلولی نامنظم (ICLA^s) و عملیات.

فاز نگاشت به C_N

در این مرحله، ما از مجتمع سادکی چخ به عنوان یک مدل انتزاعی از شبکه حسگر استفاده می‌کنیم. همان‌طور که در بخش ۳-۴ گفته شد برای ساخت

سادک‌های اضافی پر می‌کنیم. حالا دوباره الگوریتم را اجرا می‌کنیم. بنابراین، می‌توانیم حفره دیگری را پیدا کنیم. اجرای این الگوریتم تا زمانی ادامه می‌یابد که همه حفره‌ها در شبکه پیدا شوند. مثالی از اجرای این الگوریتم در شکل ۲ نشان داده شده است.

۴-۳- مدل بهینه‌سازی مسئله انتخاب و تعیین جهت حسگرها

در این قسمت یک مدل بهینه‌سازی خطی دودویی (BIP) برای انتخاب کمترین تعداد حسگرها و تعیین جهت آن‌ها برای پوشش کل ناحیه ارائه می‌کنیم. اولین گام برای حل این مسئله، نگاشت محیط به مجتمع سادکی مربوط به شبکه است که آن را با C_N نشان می‌دهیم. هر حسگر اطلاعات مکان خود را برای همسایگان خود ارسال می‌کند. از آنجایی که هر حسگر در k جهت متفاوت می‌تواند تنظیم شود، به طور مجازی هر حسگر با k رأس در نظر گرفته می‌شود که هر کدام یکی از جهت‌ها را نشان می‌دهند. سپس حسگرها مجتمع سادکی شبکه را با استفاده از اطلاعات همسایگان خود می‌سازند. به عبارت ساده‌تر، حسگرها با استفاده از اطلاعات مکان دریافتی همپوشانی‌های ۲ تایی و ۳ تایی را می‌توانند تشخیص دهند و بنابراین مجتمع سادکی شبکه به صورت توزیع شده ساخته می‌شود. انتخاب کمترین تعداد حسگرها با جهت‌های مناسب برای پوشش کل منطقه معادل با یافتن زیرمجموعه‌ای از C_N به نام C_N^m است که بدون حفره است و شامل رؤس مرزی و کمترین تعداد رؤس داخلی است. علاوه بر این، برای هر k رأس در C_N که مربوط به یک حسگر است، حداکثر یکی از آن‌ها می‌تواند در C_N^m وجود داشته باشد. بنابراین C_N^m باید شامل ۲- زنجیری باشد که مرز آن برابر با ۱- زنجیر مربوط به گره‌های مرزی است. این شرط متناظر با رابطه زیر است:

$$B_2 Y = b \quad (10)$$

که B_2 ماتریس مرز ۲- سادک‌ها، Y نمایش برداری ۲- سادک‌های انتخاب شده و b نمایش برداری مربوط به ۱- زنجیر متناظر با یال‌های مرزی شبکه است. حال متغیر $d_{i\varphi}$ که متناظر با جهت سنسور i است را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$d_{i\varphi} = \begin{cases} 0 & \text{orientation of sensor } i \text{ is not } \varphi \\ 1 & \text{orientation of sensor } i \text{ is } \varphi \end{cases} \quad (11)$$

برای اطمینان از انتخاب تنها یک جهت برای هر سنسور شرط زیر باید برقرار باشد:

$$\sum_{\varphi=1}^k d_{i\varphi} \leq 1 \quad (12)$$

با توجه به این شرایط انتخاب کمترین تعداد حسگرها متناظر با مینیمم کردن تابع هدف $\sum_{i=1}^n \sum_{\varphi=1}^k d_{i\varphi}$ می‌باشد. بنابراین مسئله انتخاب کمترین تعداد و همچنین جهت مناسب برای حسگرها به منظور پوشش کل ناحیه را می‌توان به صورت مسئله بهینه‌سازی زیر مدل کرد:

$$\begin{aligned} \min f &= \sum_{i=1}^n \sum_{\varphi=1}^k d_{i\varphi} \\ s.t. & B_2 Y = b \\ & \sum_{\varphi=1}^k d_{i\varphi} \leq 1 \quad \forall i \\ & Y \in \{0, 1, -1\}^{n_2} \\ & d_{i\varphi} \in \{0, 1\} \end{aligned} \quad (13)$$

بدیهی است که Y و $d_{i\varphi}$ به یکدیگر وابسته هستند. اگر $d_{i\varphi}$ صفر باشد، عناصری از Y که متناظر با ۲- سادک‌هایی هستند که رأس متناظر با $d_{i\varphi}$ یک وجه از

خود را تنظیم می‌کنند. بنابراین، LA_i هر سلول که مربوط به یک گره در $X \cup N$ است، یک عمل را به‌طور تصادفی بر اساس بردار احتمال p_i انتخاب می‌کند.

بدین ترتیب حسگرها به‌صورت توزیع شده جهت مناسب خود را برای پوشش ناحیه طی یک فرایند یادگیری تعیین می‌کنند. لازم به ذکر است که الگوریتم پیشنهادی در شبکه‌های با چگالی زیاد نیاز به محاسبات زیادی دارد که با توجه به اینکه الگوریتم به‌صورت توزیع شده کار می‌کند، این بار روی کلیه حسگرها توزیع می‌شود. البته با توجه به توسعه سریع سخت‌افزار هوشمند و اینترنت اشیا و توسعه کاربردهای مهمی که در زمینه اینترنت اشیا وجود دارد، شبکه‌های حسگر و به‌خصوص شبکه‌های دوربینی هوشمند نسل آینده نیاز به ظرفیت محاسباتی و فضای ذخیره‌سازی بالایی دارند. با توجه به محدودیت ظرفیت محاسباتی و فضای ذخیره‌سازی و طول عمر باتری در شبکه‌های حسگر، راه‌حل این مشکل استفاده از محاسبات ابری است که در آن مجموعه‌ای از سرورها که در یک مرکز داده قرار داده شده‌اند، منابع محاسباتی و ذخیره‌سازی را برای دستگاه‌های اینترنت اشیا (حسگرها) فراهم می‌کنند. همچنین با توجه به ظهور شبکه‌های 5G و محاسبات لبه می‌توان از تأخیر مربوط به محاسبات ابری نیز کاست.

۵- نتایج شبیه‌سازی

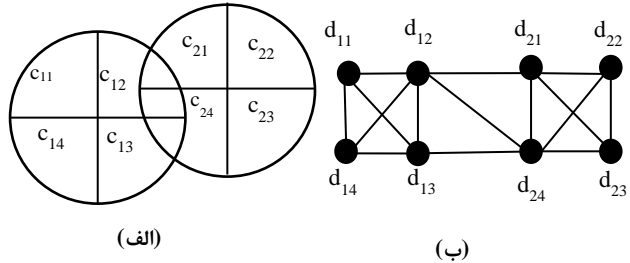
در این بخش نتایج شبیه‌سازی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم پیشنهادی را ارائه می‌کنیم. شبیه‌سازی‌ها در محیط متلب انجام شده است. برای هر حسگر چهار جهت در نظر گرفته شده است.

مسئله بهینه‌سازی تعیین جهت حسگرها برای پوشش ناحیه که ما در این مقاله بررسی کردیم، مطابق با مسئله ۳ مطرح شده در [۲۴] است. در [۲۴] چندین مسئله مطرح شده است که یکی از آن‌ها مسئله تعیین جهت حسگرها است و به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی دودویی مدل شده است. همچنین یک الگوریتم حریصانه متمرکز برای حل آن پیشنهاد شده است. در آزمایش اول عملکرد مدل BIP پیشنهادی را با مدل BIP ارائه شده در [۲۴] مقایسه می‌کنیم. در این آزمایش، n گره با میدان دید ۹۰ و شعاع پوشش ۲۵ تا ۸۰ متر به‌طور تصادفی در یک میدان 100×100 متر قرار گرفته‌اند. همچنین ۱۲ حسگر در مرز محیط قرار گرفته است. چهار جهت کاری برای حسگرها در نظر گرفته شده است. نویسندگان در [۲۴] با در نظر گرفتن تعدادی نقطه کنترلی در ناحیه پوشش ناحیه را تقریب زده‌اند. بنابراین با افزایش تعداد نقاط کنترلی دقت الگوریتم آن‌ها نیز افزایش می‌یابد.

طبق رابطه (۱۶) تعداد متغیرهای مدل BIP مدل پیشنهادی ما برابر با $kn+2n_2$ و تعداد شرایط $n_1+(2k+1)n$ است، که n تعداد حسگرها، n_1 تعداد ۱- سادک‌ها و n_2 تعداد ۲- سادک‌ها است. تعداد متغیرهای مدل BIP در [۲۴] $p+kn+k$ و تعداد شرایط $2kp+n+p$ است که p تعداد نقاط کنترلی، n تعداد حسگرها و k تعداد جهت‌ها است. وقتی $p \rightarrow \infty$ جواب تقریبی الگوریتم [۲۴] به جواب روش پیشنهادی ما همگرا می‌شود. برای حل مسئله BIP در زمان و با حافظه مناسب لازم است تعداد محدودیت‌ها و متغیرها تا حد امکان کم باشد. مقایسه تعداد متغیرها و شرایط مدل BIP ما با مدل BIP ارائه شده در [۲۴] با $k=4$ و $p=100$ به‌ترتیب در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده است. این دو شکل نشان می‌دهد که تعداد محدودیت‌ها و متغیرهای مدل BIP پیشنهادی به‌صورت چشمگیری کمتر از مدل ارائه شده در [۲۴] است.

در جدول ۱ نسبت‌های NV_1/NV_2 و NC_1/NC_2 که به ترتیب نسبت تعداد متغیرها و شرایط مدل بهینه‌سازی پیشنهادی به تعداد متغیرها و شرایط مسئله بهینه‌سازی [۲۴] در دو محیط با چگالی کم و چگالی زیاد نشان داده شده است. این آزمایش روی ۲۰ محیط تصادفی اجرا و نتیجه به‌صورت متوسط

مجتمع سادکی شبکه حسگر، C_N ، ناحیه‌ای که هر حسگر با یک جهت مشخص پوشش می‌دهد را به‌عنوان یک مجموعه در نظر می‌گیریم. بدیهی است که این مجتمع سادکی دارای رأس $kn+m$ است که m و n به ترتیب تعداد گره‌های داخلی و مرزی هستند. شکل ۳ نمونه‌ای از ساخت C_N برای دو حسگر جهت‌دار را نشان می‌دهد. هر حسگر دارای ۴ جهت است. همان‌طور که شکل ۳.ب نشان می‌دهد، ۴ رأس برای هر حسگر در C_N وجود دارد.



شکل ۳- (الف) ۲ حسگر با ۴ جهت. (ب) مجتمع سادکی متناظر

فاز نگاهت به ICLA

در مرحله نگاهت یک ICLA ایجاد می‌شود. هر گره حسگر متناظر با یک سلول در ICLA است. اتوماتای یادگیر در هر سلول که آن را با LA_i نشان می‌دهیم دارای k عمل $\alpha = \{\alpha_1, \dots, \alpha_k\}$ است که در آن k تعداد جهت‌های مختلف حسگرها است. هر LA_i یک بردار احتمال p_i دارد که احتمال انتخاب عمل‌های مختلف را تعیین می‌کند. احتمال انتخاب هر عمل در ابتدا روی $1/k$ تنظیم شده است.

فاز عملیات

فاز عملیات شامل سه مرحله است. تشخیص حفره، به‌روزرسانی بردار احتمال عمل، و جهت‌دهی. ابتدا همه حفره‌ها بر اساس الگوریتم تشخیص حفره تعیین می‌شوند. بردار احتمال عمل حسگرهایی که اخیراً جهت خود را تنظیم کرده‌اند بر اساس اندازه حفره‌ها در تکرار t و $t-1$ به روز می‌شود. سپس تنها گره‌هایی که در مرز حفره‌ها قرار دارند جهت خود را تنظیم می‌کنند.

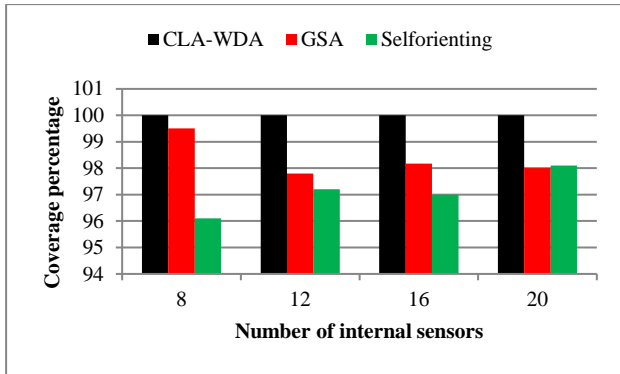
✓ **تشخیص حفره:** هنگامی که هر حسگر جهت خود را تعیین می‌کند، مجتمع سادکی شبکه بر اساس جهت‌های جدید و C_N بروز می‌شود. به‌منظور به‌روزرسانی مجتمع سادکی، رئوس مربوط به جهت‌هایی که انتخاب نشده‌اند، حذف می‌شوند. سپس الگوریتم تشخیص حفره برای شناسایی کلیه گره‌های موجود در مرز حفره‌ها اجرا می‌شود. فرض کنید مجموعه X شامل همه گره‌ها در مرزهای همه حفره‌ها باشد و مجموعه N شامل گره‌هایی است که همسایه گره‌های مرزی در X هستند، به‌عبارت‌دیگر $N = neighbors(F \cap X)$.

✓ **به‌روزرسانی بردار احتمال عمل:** به‌روزرسانی بردار احتمال بر اساس اندازه مجموعه X تعریف می‌شود. بنابراین تابع ارزیابی f را به‌صورت $f = |X|$ تعریف می‌کنیم. در تکرار t برای همه $i \in X \cup N$ بروز می‌شود. اگر $f(t) < f(t-1)$ آن‌وقت سیگنال تقویتی برای پاداش دادن به عمل استفاده می‌شود. بنابراین بردارهای احتمال عمل همه عناصر $X \cup N$ بر اساس رابطه (۱) به‌روزرسانی می‌شوند. اگر $f(t) > f(t-1)$ به این معنی است که حفره‌های بزرگ‌تری در این مرحله ایجاد شده‌اند و بنابراین سیگنال تقویتی برای تنبیه عمل استفاده می‌شود. بنابراین احتمال عمل تمام عناصر $X \cup N$ با استفاده از (۲) به‌روزرسانی می‌شود.

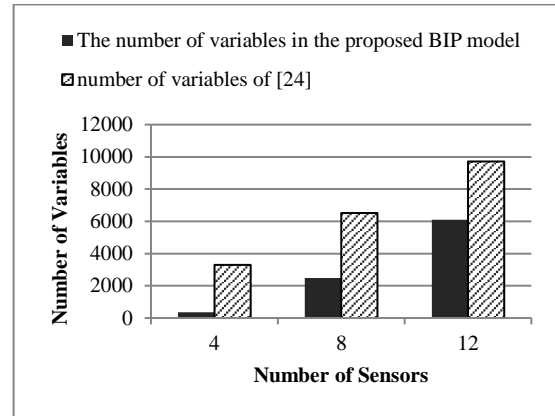
✓ **جهت‌دهی:** در مرحله جهت‌دهی، گره‌های موجود در مرز حفره‌ها جهت خود را تنظیم می‌کنند. از آنجایی که گره‌های مرزی ثابت هستند و نمی‌چرخند، همسایگان گره‌های مرزی که در مرز حفره‌ها قرار دارند، جهت

حسگرها به یک پیکربندی بهینه ختم نمی‌شود. در رابطه با الگوریتم Selforienting [۱۶] مسئله این است که هر حسگر بر اساس عمل مرحله قبل حسگرها جهت خود را تنظیم می‌کند و بنابراین ممکن است در مرحله تصمیم‌گیری دو حسگر به سمت یک ناحیه مشترک که قبلاً فاقد پوشش بوده است تغییر جهت دهند.

گزارش شده است. این جدول نشان می‌دهد که در محیط با چگالی کم تعداد متغیرها و شرایط مسئله ما حدود ۰/۱ مرجع [۲۴] است. در محیط با چگالی زیاد نیز برتری مدل پیشنهادی برقرار است. بنابراین مدل پیشنهادی ما سریع‌تر از [۲۴] حل می‌شود. در واقع این یکی از مزایای مدل‌سازی پوشش ناحیه توسط مجتمع‌های سادگی است.



شکل ۶- مقایسه میزان پوشش تأمین‌شده در CLA-WDA با GSA و Selforienting [۱۶]



شکل ۴- تعداد متغیرهای مدل بهینه‌سازی

برای مطالعه بیشتر رفتار CLA-WDA، آنتروپی را در نظر می‌گیریم که معیاری از عدم قطعیت مرتبط با یک متغیر تصادفی X است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$H(X) = -\sum_i P(x_i) \ln(P(x_i)) \quad (17)$$

که در آن X یک متغیر تصادفی گسسته با مقادیر ممکن $\{x_1, \dots, x_n\}$ و تابع جرم احتمال $P(X)$ است. اگر عمل انتخاب‌شده توسط اتوماتای یادگیر LA_i را به عنوان یک متغیر تصادفی در نظر بگیریم، مفهوم آنتروپی می‌تواند برای اندازه‌گیری عدم قطعیت مربوط به این متغیر تصادفی در هر زمان معین t با توجه به رابطه زیر مشخص شود:

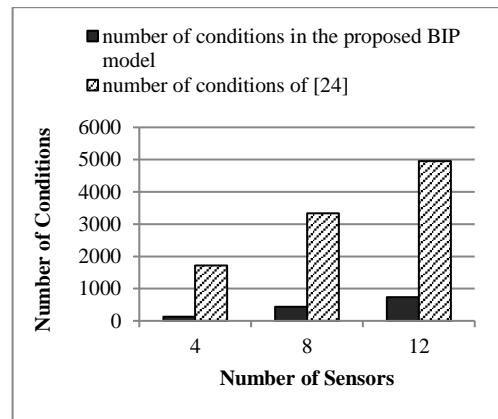
$$H_i(t) = -\sum_{j=1}^{m_i} p_{ij}(t) \ln(p_{ij}(t)) \quad (18)$$

که در آن m_i اندازه مجموعه عمل اتوماتای یادگیر LA_i است. مقادیر بزرگ‌تر $H_i(t)$ به معنای عدم قطعیت بیشتر در تصمیم‌گیری LA_i است. H_i تنها می‌تواند آنتروپی یک اتوماتای یادگیری را نشان دهد. به منظور ارائه معیاری برای ارزیابی عدم قطعیت مرتبط با عملکرد CLA، از رابطه زیر به عنوان آنتروپی سیستم استفاده می‌شود:

$$H(t) = \sum_{i=1}^N H_i(t) \quad (19)$$

شکل ۷ آنتروپی CLA-WDA را در شبکه‌هایی متشکل از ۸، ۱۲ و ۱۶ حسگر نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که آنتروپی CLA-WDA در راندهای اولیه اجرا زیاد است، اما به تدریج کاهش می‌یابد و به صفر همگرا می‌شود. این بدان معنی است که بردار احتمال به بردار ۱-۰ همگرا می‌شود.

برای بررسی همگرایی CLA-WDA بردار احتمال عمل و طول حرفه‌های شبکه را به عنوان دو معیار در نظر می‌گیریم. شکل ۸ بردار احتمال عمل یک اتوماتای یادگیری که به صورت تصادفی انتخاب شده است را نشان می‌دهد. ما برای هر حسگر ۴ جهت در نظر گرفته‌ایم، بنابراین ۴ عمل وجود دارد. این شکل نشان می‌دهد که احتمال یکی از این عمل‌ها به ۱ و بقیه به صفر همگرا می‌شود که نشان‌دهنده همگرایی بردار احتمال عمل اتوماتای یادگیری انتخاب شده



شکل ۵- تعداد شرایط مدل بهینه‌سازی

جدول ۱: مقایسه تعداد متغیرها و شرایط مدل پیشنهادی با [۲۴]

	NV_1/NV_2	NC_1/NC_2
محیط با چگالی کم	0.1	0.08
محیط با چگالی زیاد	0.6	0.15

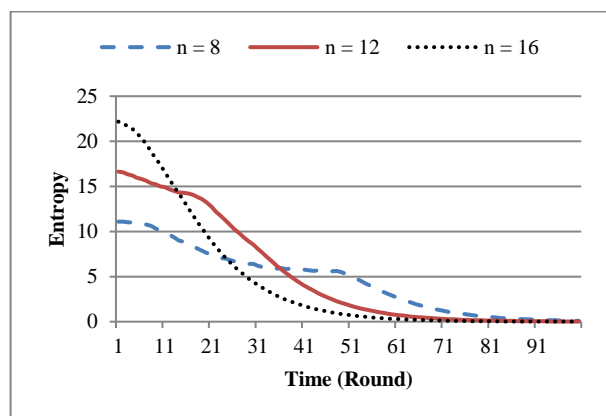
در آزمایش بعدی، میزان پوشش در الگوریتم پیشنهادی CLA-WDA را با دو الگوریتم ارائه شد در [۲۴] و [۱۶] که به ترتیب GSA و Selforienting نام دارند، مقایسه می‌کنیم. در این آزمایش پیکربندی شبکه به نحوی است که امکان فراهم کردن پوشش کامل وجود دارد. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود الگوریتم پیشنهادی ما نسبت به دو الگوریتم دیگر حدود ۲٪ افزایش در میزان پوشش داشته است. در حقیقت، الگوریتم CLA-WDA پوشش کامل را فراهم کرده است، در حالی که الگوریتم‌های GSA و Selforienting نتوانسته‌اند پوشش کامل را تضمین کنند. دلیل این امر این است که CLA-WDA یک الگوریتم هوشمند است که در طول زمان هر حسگر بهترین عمل را یاد می‌گیرد، بنابراین در تعامل با بقیه حسگرها و در نظر گرفتن عمل انتخابی خود و همسایه‌ها در گام‌های پیشین به سمت بهترین جواب همگرا می‌شود. در حالی که GSA [۲۴] به صورت حریصانه عمل می‌کند بنابراین لزوماً عمل مشترک

الگوریتمی بر اساس مانستگی و مجتمع سادکی شبکه پیشنهاد شد. همچنین ما مسئله مربوط به تعیین جهت حسگرها را به صورت یک مسئله BIP فرمول بندی کردیم و الگوریتمی بر اساس اتوماتای یادگیری سلولی برای حل آن پیشنهاد کردیم. نتایج شبیه سازی نشان داد که مدل بهینه سازی پیشنهادی برای تعیین جهت حسگرها نسبت به مدل پیشنهاد شده در [۲۴] تعداد متغیرها و تعداد شرایط بسیار کمتری دارد. در محیط های با چگالی کم تعداد متغیرها و شرایط مسئله حدود ۰/۱، در محیط های با چگالی زیاد تعداد متغیرها حدود ۰/۶ و تعداد شرایط حدود ۰/۱۵ مسئله مطرح شده در [۲۴] است و بنابراین در زمان کمتری جواب بهینه تعیین می شود. همچنین پوشش ناحیه در الگوریتم پیشنهادی به میزان ۲٪ نسبت به روش های ارائه شده در [۱۶، ۲۴] افزایش داشته است. بنابراین می توان گفت که مدل سازی شبکه توسط مجتمع های سادکی روش مناسبی برای مدل سازی مسائل مربوط به پوشش کامل ناحیه در شبکه های حسگر است.

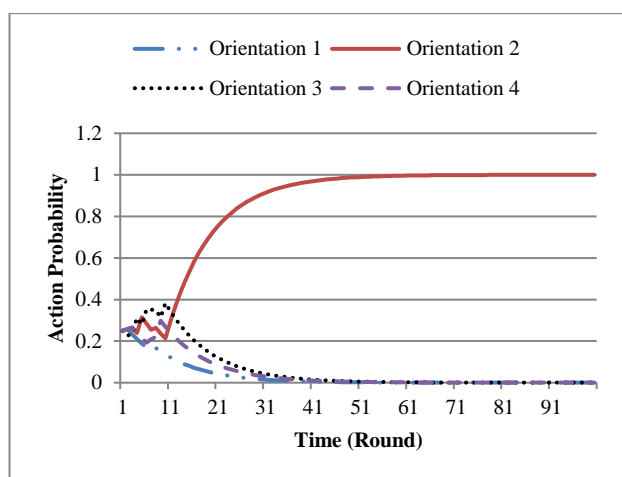
مراجع

- [1] ه. اقدسی، م. عباسپور، "الگوریتم توزیع شده جهت فراهم آوردن پوشش چندچند جانبه از هدف در شبکه های حسگر بصری،" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۲، صفحات ۵۳-۶۳، ۱۳۹۲.
- [2] ح. پروین، م. محمدپور، ا. امیدوار، "ارائه روشی مبتنی بر پوشش سراسری و تخمین اتفاق آرا برای بهبود کارایی در شبکه حسگر بی سیم،" مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۷، شماره ۳، صفحات ۸۷۷-۸۹۱، ۱۳۹۶.
- [3] P. Singh, Y.-C. Chen, "Sensing coverage hole identification and coverage hole healing methods for wireless sensor networks," *Wireless Networks*, vol. 26, no. 3, pp. 2223-2239, 2020.
- [4] P. Gou, G. Mao, F. Zhang, X. Jia, "Reconstruction of coverage hole model and cooperative repair optimization algorithm in heterogeneous wireless sensor networks," *Computer Communications*, vol. 153, pp. 614-625, 2020.
- [5] A. Tripathi, H. P. Gupta, T. Dutta, R. Mishra, K. Shukla, S. Jit, "Coverage and connectivity in WSNs: A survey, research issues and challenges," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 26971-26992, 2018.
- [6] A. Alibeiki, H. Motameni, H. Mohamadi, "A new genetic-based approach for maximizing network lifetime in directional sensor networks with adjustable sensing ranges," *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 52, pp. 1-12, 2019.
- [7] J. Wang, C. Niu, R. Shen, "Priority-based target coverage in directional sensor networks using a genetic algorithm," *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 57, no. 11-12, pp. 1915-1922, 2009.
- [8] N. Allah Mottaki, H. Motameni, H. Mohamadi, "A genetic algorithm-based approach for solving the target Q-coverage problem in over and under provisioned directional sensor networks," *Physical Communication*, pp. 101719, 2022.
- [9] A. Singh, A. Rossi, "A genetic algorithm based exact approach for lifetime maximization of directional sensor networks," *Ad Hoc Networks*, 2012.
- [10] H. Mohamadi, A. S. B. H. Ismail, S. Salleh, "A learning automata-based algorithm for solving coverage problem in directional sensor networks," *Computing*, vol. 95, pp. 1-24, 2013.
- [11] A. Javan Bakht, H. Motameni, H. Mohamadi, "A learning automata-based algorithm to solve imbalanced k-coverage in visual sensor networks," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 2817-2829, 2020.
- [12] D. Zhang, J. Zhang, "Multi-species evolutionary algorithm for wireless visual sensor networks coverage optimization with changeable field of views," *Applied Soft Computing*, vol. 96, pp. 106680, 2020.
- [13] E. O. Rangel, D. G. Costa, A. Loula, "On redundant coverage maximization in wireless visual sensor networks: Evolutionary

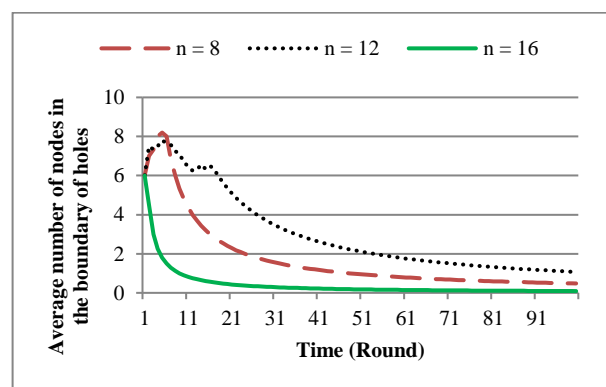
است. شکل ۹ میانگین تعداد گره ها در مرز همه حفره های شبکه را نشان می دهد. این شکل نشان می دهد که اندازه حفره ها در طول زمان کاهش و به صفر همگرا می شود که به معنای از بین رفتن کلیه حفره ها در شبکه است. (۸، ۱۲ و ۱۶ تعداد گره های داخلی هستند. همچنین ۱۲ گره در مرز محیط وجود دارد.)



شکل ۷- آنتروپی CLA-WDA



شکل ۸- احتمال عمل در یک اتوماتای یادگیری



شکل ۹- تعداد حسگرها در مرز حفره ها

۶- نتیجه گیری

در این مقاله مسئله مکان یابی حفره ها و انتخاب جهت مناسب برای حسگرهای جهت دار به منظور تأمین پوشش کامل ناحیه بررسی شد. برای تعیین حفره ها

- [21] H. Chintakunta, H. Krim, "Distributed Localization of Coverage Holes Using Topological Persistence," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 10, pp. 2531-2541, 2014.
- [22] F. Yan, W. Ma, F. Shen, W. Xia, L. Shen, "Connectivity based k-coverage hole detection in wireless sensor networks," *Mobile Networks and Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 783-793, 2020.
- [23] M. Varposhti, V. Hakami, M. Dehghan, "Distributed coverage in mobile sensor networks without location information," *Autonomous Robots*, vol. 44, no. 3, pp. 627-645, 2020.
- [24] E. Hörster, R. Lienhart, "Optimal Placement of Multiple Visual Sensors," *Multi-Camera Networks: Concepts and Applications*: Elsevier, 2009.
- [25] A. Hatcher, *Algebraic Topology*: Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press, 2002.
- [26] F. H. Croom, *Basic Concepts of Algebraic Topology*: Springer-Verlag, New York edelberg Berlin, 1978.
- [27] R. Bott, L. Tu, *Differential Forms in Algebraic Topology*: New York: Springer-Verlag, 1995.
- [28] A. Muhammad, M. Egerstedt, "Control using higher order Laplacians in network topologies." pp. 1024-1038.
- [29] D. Bertsimas, J. N. Tsitsiklis, *Introduction to Linear Optimization*: Athena Scientific, Belmont, MA, 1997.
- algorithms for multi-objective optimization," *Applied Soft Computing*, vol. 82, pp. 105578, 2019.
- [14] J. Jia, C. Dong, Y. Hong, L. Guo, Y. Yu, "Maximizing full-view target coverage in camera sensor networks," *Ad Hoc Networks*, vol. 94, pp. 101973, 2019.
- [15] X. Zhu, M. Zhou, A. Abusorrah, "Optimizing node deployment in rechargeable camera sensor networks for full-view coverage," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 9, no. 13, pp. 11396-11407, 2021.
- [16] N. Tezcan, W. Wang, "Self-orienting wireless multimedia sensor networks for occlusion-free viewpoints," *Comput. Netw.*, vol. 52, no. 13, pp. 2558-2567, 2008.
- [17] C. Hocine, A. Benaissa, "New Binary Particle Swarm Optimization Algorithm for Surveillance and Camera Situation Assessments," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, pp. 1-11, 2021.
- [18] T.-W. Sung, C.-S. Yang, "Coverage Improvement for Directional Sensor Networks," *Advances in Intelligent Systems and Applications - Volume 1*, Smart Innovation, Systems and Technologies R.-S. Chang, L. C. Jain and S.-L. Peng, eds., pp. 541-550: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [19] M. Huadong, Z. Xi, M. Anlong, "A Coverage-Enhancing Method for 3D Directional Sensor Networks." pp. 2791-2795.
- [20] M. Varposhti, M. Dehghan, R. Safabakhsh, "Distributed Topological Camera Selection Without Location Information," *Sensors Journal, IEEE*, vol. 14, no. 8, pp. 2579-2589, 2014.