

논문 2007-44CI-1-2

가변 감지영역을 갖는 센서노드로 구성된 무선 센서 네트워크에서 중첩영역 최소를 위한 노드의 위치 결정방법

(A Node Positioning Method for Minimizing the Overlap of Sensing Areas in Wireless Sensor Networks with Adjustable Sensing Ranges)

성기택*, 송봉기**, 우종호***

(Ki Taek Seong, Bong Gi Song, and Chong Ho Woo)

요약

본 논문에서는, 가변의 감지 반경을 갖는 무선 센서 네트워크에서 감지범위가 중첩되는 영역을 최소화하기 위한 노드의 위치를 결정하는 방법에 관하여 기술하였다. 최적의 노드 위치를 구하기 위하여, 이웃하는 노드들과의 감지영역이 중첩되는 면적과 각 노드의 감지 반경 및 이웃하는 노드와의 전개 각도를 이용하여 최적화 식을 유도하였다. 이를 기반으로 한 새로운 가변감지영역제어 (ASRC: Adjustable Sensing Ranges Control)에 의한 노드 위치방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 조건에 의한 방법과는 달리 수학적 식에 근거하여 유도된 모델로서, 다양한 시뮬레이션을 통하여 타당성을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we address the node positioning method for minimizing the overlap sensing areas in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges. To find a optimal node position, we derive a optimal equations by using the overlapped areas, each node's radiuses and expended angles of opposite neighboring nodes. Based on it, we devise a new node positioning method, called as ASRC(Adjustable Sensing Ranges Control). Unlike existing condition based model, our proposed method is derived from mathematical formula, and we confirm its validity through various simulations.

Keywords : wireless sensor networks, adjustable ranges, overlapped area, complete coverage, optimal equations

I. 서론

유비쿼터스에 대한 관심과 함께 최근의 무선 통신 기술과 센서 및 마이크로프로세서의 집적화를 통한 무선 센서네트워크에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 무

선 센서 네트워크(WSN : wireless sensor networks)는 마이크로프로세서와 다양한 센서 및 무선 통신장치를 소형화하여 지역의 감시, 생물학적 환경감시, 지물지형의 감시, 건강관리 등의 분야에서의 다양한 응용이 기대되고 있다^[1]. Jie Wu^[2,3] 등은 WSN 분야에서 주목받고 있는 문제로서 WSN의 감지범위(sensing coverage)와 에너지 소비로 분류하였다. 노드의 위치와 감지 반경의 길이에 의하여 결정되는 감지범위 문제는 특정지역을 완전히 포함하여 감지하거나 특정 지점(discrete points)을 감지영역으로 유도도록 하는 방안 등이 연구되었다. WSN에서 에너지 소비 문제는 네트워크의 수명과 직접적인 관련이 있는 것으로서, WSN의 구조적 특성에 의하여 결정되는 무선 통신 에너지 소비 성향을 고려하여, 무선 통신의 횟수를 단축하거나 효율적인 네

* 정희원, 동명대학교 정보보호과
(Department of Information Security, Tongmyong University)

** 정희원, 경성대학교 컴퓨터과학과
(Department of Computer Science, Kyung Sung University)

*** 정희원, 부경대학교
(Division of Electronic, Computer and Telecommunication Engineering, Pukyong National University)

접수일자: 2006년9월22일, 수정완료일: 2007년1월11일

트위크 라우팅 기법을 활용하는 등 다양한 방법들이 연구되고 있다. 다른 하나의 방법으로서, 일반적으로 WSN의 응용 환경에서 고장 허용, 네트워크 수명 연장 등의 이유로 필요 이상의 다수의 센서노드를 분포시키는데, 이때 WSN을 구성하는 노드의 동작을 조정하는 노드 스케줄링(node scheduling) 또는 노드 밀도 제어(node density control)와 같은 방법들이 연구되고 있다. 이 방법은 다수의 노드가 분포된 환경에서 감지 영역에 대한 조건을 만족하는 센서들의 집합이 구해지면 일정 시간 동안 임무를 수행하는 동작 모드(active mode)로 설정되고 나머지 노드들은 휴지 모드(sleep mode)로 전환되어 에너지 소비를 줄이게 된다. 이와 같이 동작 모드를 전환시키는 방법이 전체 노드에 적용되면 노드들의 소비 에너지의 부하가 분산되고 따라서 전체 네트워크의 수명은 연장될 수 있다. H. Zhang^[5] 등은 모든 센서 노드가 동일한 감지 반경을 갖는다는 조건하에서 이웃하는 노드와의 감지영역이 중첩되는 영역을 최적화함과 동시에 최소의 노드로서 주어진 영역을 감지하도록 노드들의 위치를 선정하는 OGDC(Optimal Geographic Density Control) 프로토콜을 제안하였다.

본 연구에서는 기존의 OGDC 프로토콜에서 제시한 가정과는 달리 모든 노드의 감지 반경을 스스로 조절할 수 있다는 가정 하에 노드의 감지 반경이 가변적일 경우 이웃하는 노드와 감지 영역이 중첩되는 면적을 최소화하는 노드의 위치를 결정하는 새로운 방법을 제안한다. 이미 센서 노드의 감지 반경이 조정가능하다는 조건하에서 다양한 연구 결과가 발표되고 있으며, 또한 무선 통신 기술과 무선 감지 기술이 서로 유사한 Radio 기술을 사용하며, 기존의 WSN 운영에서 무선 통신 출력의 조절을 통한 가변 출력 기술이 적용되고 있으므로 센서의 감지반경·조정에 관한 조건은 타당하다. 이와 같이 센서노드의 감지 반경을 제어함으로써 노드의 에너지 소비를 줄여 네트워크의 수명을 연장할 수 있으며 기존의 연구와 같이 노드가 동일한 감지 반경을 가질 경우 필요 이상의 중첩영역이 증대되어 효율적이지 못한 단점을 극복할 수 있다. 노드의 감지 영역의 반경을 조절할 수 있다는 가정 하에서 제안된 본 방법은, 이웃하는 노드들과의 감지영역이 중첩되는 면적과 각 노드의 감지 반경 및 이웃하는 노드와의 전개 각도를 이용하여 최적화식을 수학적 모델로 유도하였다.

본 논문은 이후 다음과 같이 구성 되었다. II. 본론의 1. 에서는 현재까지 수행된 관련 연구에 대하여 소개하고, 2. 에서는 본 연구와 동일한 목적으로 연구된^[12]에

서 제안한 조건에 관한 고찰을 기술하였다. 3. 에서는 ASRC 모델의 최적화 모델링 과정에 대하여 기술하였으며, III. 시뮬레이션에서는,^[12]에서 제시한 조건을 시뮬레이션하기 위한 수학적 모델의 유도과정과 ASRC 모델의 구현, 시뮬레이션 결과 및 고찰을 나타내었으며, IV. 결론에서는 본 연구의 결과 및 적용 예를 간략히 기술하였다.

II. 관련연구

WSN에서 영역 커버 문제는 큰 비중을 갖는 연구 주제로서 시스템의 QoS(Quality of Service) 측정 기준중의 하나로 제시될 수 있다. 시스템에 의한 커버 영역이 일정 비율 이하로 떨어지면 WSN은 더 이상 정상적인 동작을 할 수 없음을 의미한다. 대부분의 WSN은 높은 밀도로서 지역에 분포되며 한정된 전원을 갖는 특성을 갖고 있다. WSN은 기본적으로 시스템의 수명을 연장하기 위하여 에너지 소비를 최소화함과 동시에 적절한 영역 커버 율을 유지해야한다. 영역 커버 문제는 높은 밀도로 분포된 센서 노드들의 분포 밀도를 적절하게 조정함으로써 해결할 수 있다. 이와 동시에 밀접하게 이웃하고 있는 노드들 중에서 일정 비율의 커버 율을 유지하면서 최소의 노드로서 감지영역이 중첩되지 않도록 하여 시스템의 감지 에너지의 소비를 줄임으로서 WSN의 수명연장을 기대할 수 있다^[2].

Slijepcevic^[6] 등은 센서 네트워크에서 특정 지역을 커버하는 노드 수를 구하는 문제가 N-P complete 문제임을 증명하였으며 이를 해결하는 다양한 연구 결과를 발표하였다.

Xu^[7] 등은 GAF 라는 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 감지대상으로 하는 영역을 사각형 그리드(grid) 영역으로 나누고 각 그리드 영역에서 동작할 노드를 선택하되 이웃하는 그리드의 동작 할 노드들 사이의 거리는 통신 가능 범위 이내로 제한하여 네트워크의 연결성을 유지토록 하였다. 이 방법은 연결성은 보장하지만 100% 감지영역의 커버 율을 보장하지 못한다.

Ye^[8,9] 등은 PEAS란 분산 처리 알고리즘을 제안하였다. 이 알고리즘은 주어진 영역을 그리드 영역을 나누고 하나의 그리드 영역에는 최소 한개 이상의 노드가 존재토록 가정하였다. PEAS에서는 sleep 모드에 있는 노드가 wake-up 하여 특정 메시지를 브로드 캐스팅한다. 이때 어떤 노드로부터 응답을 받지 못하면 자신은 sleep 모드에서 정상 mode로 전환하여 자신의 에너지를 모두

소비할 때 까지 주어진 동작을 수행한다. 이 방법은 각 노드에서 분산처리 된다는 특징과 함께 커버율의 개선 부분이 있었으나 전역 커버는 보장하지 못하였다.

Zhang^[5] 등은 최초로 무선 통신 전송 반경과 감지 거리의 관계를 정립하여 네트워크의 연결성을 보장하는 동시에 센서의 커버영역 문제를 해결하는 방안을 제안하였다. 여기서 그들은 OGDC 프로토콜이란 분산처리 가능한 노드들의 밀도 제어 알고리즘을 개발하였다. 이 논문에 의하면, 모든 노드가 주어진 감지영역 내부에 존재할 때, 주어진 영역을 감지하는데 필요한 최소수의 노드를 선택하는 문제는 이웃하는 노드와의 중첩영역을 최소화하는 문제와 동일하다는 것을 증명하였다.

기존의 동일한 센서 반경을 갖는 조건에서의 연구와는 달리 센서의 감지 영역을 조절하는 기능을 이용하는 연구가 최근 제안되고 있는데 그 이유는 감지기능을 위한 에너지의 소비를 절약함으로써 네트워크의 수명연장이 가능하기 때문이다. Cardei^[3] 등은 센서의 감지 영역 반경을 조정할 수 있다는 가정하여 특정 지점을 커버하는 센서 노드의 집합을 구하는 문제(AR-SC : Adjustable Ranges Set Covers problem)를 제시하고 이 문제가 NP-Complete 문제임을 증명함과 동시에 이를 해결하는 다양한 알고리즘을 제안하였다. 여기서는 특정 지역을 커버하는 것이 목적이 아니라 특정 지점을 커버하기 위한 것으로 이미 감지해야할 지점에 대한 위치정보를 알고 있다는 가정 하에 이루어진 연구이므로 불특정 지점에 대한 응용분야에서는 적용하기 어렵다. Dhawan^[4] 등은 Cardei 등이 제안한 방법에서 네트워크의 수명에 대한 부분만을 독창적으로 모델링하여 Garg-Konemann 유추 알고리즘을 활용한 네트워크의 수명 최대화 방법을 제시하였다.

J. Wu^[2,3] 등은 센서의 감지 영역의 반경을 조절하여 주어진 영역을 전역 감지(full coverage)함과 동시에 네트워크의 수명을 최대화하는 방법을 새롭게 제안하였다. OGDC의 경우 모든 센서 노드가 동일한 통신 반경과 감지 반경을 갖고 있으면서 동작 모드로 선택되어진 노드들의 감지 영역이 최소의 중첩 면적이 되도록 위치를 결정하는 방안을 제시한 반면, J. Wu 등의 연구에서는 먼저 동일한 감지 반경을 갖는 노드들은 서로 중첩되는 않도록 위치시켜 최대의 감지 영역을 확보하도록 한다. 이때 필연적으로 센서 노드의 감지가 되지 않는 영역(sensing gap)이 존재하게 되며 이 영역을 커버하기 위하여 최소의 감지 반경을 갖는 노드를 sensing gap에 위치시킴으로서 커버 문제와 에너지 소비 문제

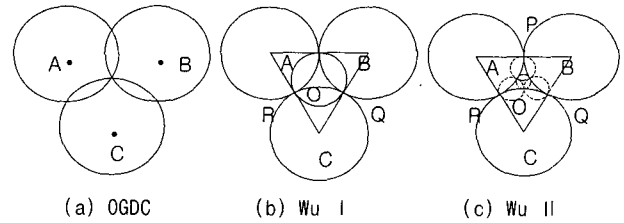


그림 1. OGDC, Wu I, Wu II의 노드 레이아웃

Fig. 1. Nodes layout of OGDC, Wu I, Wu II.

를 해결하는 방안을 제시하였다. OGDC 모델과 J. Wu가 제안한 두 가지 모델(Wu I, Wu II)을 그림 1에 나타내었다.

그림 1에서 (b)는 두 가지의 감지 반경을 사용한 모델이며, (c)는 세 가지의 반경을 갖는 모델이다.

Yi S.^[10] 등은 OGDC 알고리즘을 수정하여 감지영역이 중첩되는 환경과 중첩되지 않는 환경에서의 알고리즘(NODC : non-overlapping Density Control), 그리고 중첩되지 않는 환경에서 감지 반경에 특정 임계값을 두고 가변적으로 운영하는 알고리즘(NODCA : non-overlapping Density Control with Adjustable Sensing Ranges) 알고리즘을 제안하였다. NODCA의 경우 가변의 감지 반경 기능을 이용하였지만 중첩을 허용하지 않기 때문에 전역 커버를 하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 또한, 감지 반경 값의 설정에 있어서 임의의 값을 선택하여 시뮬레이션을 수행하였으며 감지 반경 값의 결정에 대한 부분은 추후 연구과제로 남겨두어 명확한 조건을 제시하지 못하였다.

본 논문에서는 모든 센서 노드의 감지 반경이 가변적이라는 조건하에서 서로 다른 감지 반경을 갖는 노드들의 위치를 결정함에 있어서 중첩되는 면적을 최소화하는 새로운 방안을 제시하였다. 또한 Jennifer C. Hou^[12]에서 제시한 조건과는 달리 노드 위치의 결정 순서에 관계없이 적용 가능한 새로운 방법을 제안하여 알고리즘의 단일화를 통한 센서 네트워크의 노드 스케줄링 운영에 적합토록 하였다.

III. 가변 감지영역의 중첩문제

이웃하는 센서 노드와의 감지 영역의 중첩은 노드의 불필요한 에너지 낭비요소로서 최소화되어야 한다. 중첩영역의 최소화문제에 대하여, Jennifer C. Hou가 활동하고 있는 연구 그룹의 홈페이지^[12]에는 이에 대한 조건을 제시하고 있다. 그림 2는 가변 감지 영역을 갖는 센서노드의 레이아웃을 나타내었다.

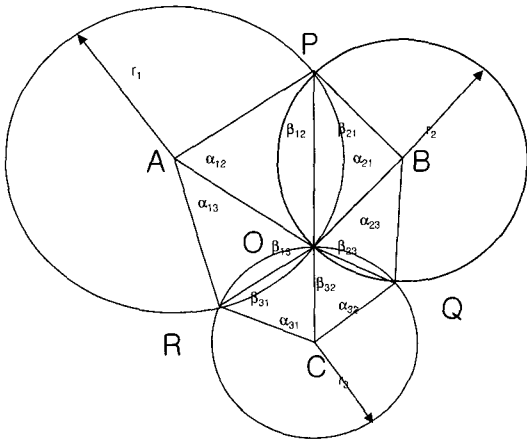


그림 2. 가변 감지영역을 갖는 센서노드의 레이아웃
Fig. 2. Layout of sensor nodes with adjustable sensing ranges.

서로 다른 감지 영역을 갖는 환경에서 두 가지의 경우에 대한 중첩영역 최소화를 위한 조건을 다음과 같이 제시하고 있다.

(경우 1) 세 노드의 반경과 위치가 결정되지 않았을 경우

(경우 2) 2개의 노드에 대한 위치 및 반경이 결정되고 나머지 한 개의 노드에 대한 반경과 위치가 결정되지 않았을 경우

경우 1에 대하여 최소의 중첩 면적을 도출하기 위하여 다음과 같은 조건을 만족하는 원의 위치방법을 제안하였다. (그림 2. 참조)

$$\overline{OP} = \overline{OQ} = \overline{OR} \quad (\text{경우 1의 조건})$$

경우 2에 대해서는 이미 결정된 두 노드(그림 2의 원 A, B)의 교차점(O 또는 P, 여기서는 O를 선정)을 지나면서 다음의 조건을 만족하도록 세 번째 노드(원 C)의 위치를 결정하는 방안을 제시하였다.

$$\overline{OQ} = \overline{OR} \quad (\text{경우 2의 조건})$$

[12]에서는 경우 1, 2에 대하여 중첩영역 최소화를 위한 조건만 제시하고 있으며, 관련 연구 [5]에서는 이에 대한 문제는 추후의 연구과제로 남겨두었다.

IV. 가변 감지영역 제어(ASRC: Adjustable Sensing Control) 모델

본 장에서는 가변 감지 반경을 갖는 WSN에서 이웃

하는 노드와의 중첩영역을 최소화하기 위한 노드 위치 추정 알고리즘으로 ASRC 모델을 제안한다.

WSN에 관한 연구를 조사한 바에 의하면 대부분의 경우 센서 노드가 모두 동일한 감지 반경과 통신 반경을 갖는 환경을 고려하여 이루어져 왔다. Tian^[11] 등은 WSN에서 노드가 임무를 수행하는 동안 초기 값 설정의 변환을 통하여 감지 반경을 변화할 수 있음을 언급하고 있다. 본 연구에서도 이러한 센서의 감지 반경을 조절할 수 있는 기능을 활용한다.

센서의 감지 영역에 대해서는 특정 위치를 감지하는 조건, 최적의 커버율을 만족하는 조건, 주어진 영역을 전역 커버하는 조건 등 다양한 분야에 대한 연구가 이루어져왔다. H. Zhang^[5] 등의 연구에 의하면, 어떤 영역을 전역 커버하면서 감지 범위의 중첩으로 인하여 발생하는 중첩영역을 최소화하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 조건을 제시하고 있다.

- 1) 최소 1쌍 이상의 디스크가 교차되어야 한다. (조건 1)
- 2) 하나의 교차점은 3번째 디스크에 의하여 커버된다. (조건 2)

따라서 전역 커버를 하기 위해서는 서로 교차하는 최소 세 개의 노드만이 필요하게 된다. 본 연구에서는 감지 영역을 전역 커버하는 조건에서 감지영역을 최소화하는 세 노드의 위치 추정문제를 다룬다.

ASRC 모델에서 각 노드의 위치추정을 위한 문제를 다음과 같이 정의한다.

[문제의 정의] 모든 센서 노드가 가변의 감지 범위를 갖는 조건에서, 이웃하는 노드와의 중첩영역을 최소화하도록 각 노드의 위치를 결정한다.

주어진 문제에 대하여 다음과 같은 가정을 전제한다.

[가정]

- (1) 감지 대상 지역은 센서노드의 감지 범위에 비하여 충분히 커서 감지의 경계효과는 무시할 수 있다.
- (2) 하나의 센서에 의하여 감지되는 영역의 모양은 센서 위치를 원점으로 반경을 갖는 원 모양이다.

여기서의 가정 (1)은 통상, 이웃하는 센서노드와 발생할 수 있는 경계효과를 고려하여 충분히 많은 노드를

분포시킴으로 센서 감지 반경 대비 감지 영역 값이 충분히 크다는 사항을 고려한 것이며, 가정 (2)의 경우, WSN 관련 연구에서 센서 모델의 대부분은 원모양으로 가정하여 이루어지고 있으므로 이를 근거로 하였다.

그림 2에서 나타난 기호를 설명하면 다음과 같다. 원 A, B, C가 그림 2와 같이 위치할 때,

$\alpha_{12} = \angle PAO$: A에서 B를 바라볼 때 전개되는 각,

$\alpha_{13} = \angle RAO$: A에서 C를 바라볼 때 전개되는 각,

$\alpha_{21} = \angle PBO$: B에서 A를 바라볼 때 전개되는 각,

$\alpha_{23} = \angle QBO$: B에서 C를 바라볼 때 전개되는 각,

$\alpha_{31} = \angle RCO$: C에서 A를 바라볼 때 전개되는 각,

$\alpha_{32} = \angle QCO$: C에서 B를 바라볼 때 전개되는 각

세원의 교차에 따라 발생하는 교차점과 각 원의 원점을 연결한 도형에서 6개의 이등변 삼각형이 존재하게 된다. 즉,

$\beta_{12} = \angle APO = \angle AOP$: 이등변 삼각형 OAP,

$\beta_{13} = \angle AOR = \angle ARO$: 이등변 삼각형 OAR,

$\beta_{21} = \angle BPO = \angle BOP$: 이등변 삼각형 OBP,

$\beta_{23} = \angle BOQ = \angle BQO$: 이등변 삼각형 OBQ,

$\beta_{31} = \angle COR = \angle CRO$: 이등변 삼각형 OCR,

$\beta_{32} = \angle CQO = \angle COQ$: 이등변 삼각형 OCQ

그리고 각 원의 반경에 대하여 다음과 같다.

r_1, r_2, r_3 : 원 A, B, C의 반경

먼저 감지반경이 중첩될 때 발생하는 이웃하는 노드에 의하여 발생하는 내부 각에 대하여 다음의 정리를 제시하고 이를 증명한다.

[정리]

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\alpha_{ij}) = \pi(k^2 - k - 4), (i \neq j, k \geq 3) \quad (1)$$

[증명] 그림2에서,

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\beta_{ij}) = 2\pi, (\text{단}, i \neq j) \quad (2)$$

모든 $\triangle APO, \triangle BPO, \triangle BOQ, \triangle COQ, \triangle COR, \triangle AOR$ 에 대하여

$$2\beta_{ij} + \alpha_{ij} = \pi \quad (3)$$

이 되며, 식(3)에서

$$\beta_{ij} = \frac{1}{2}(\pi - \alpha_{ij}) \quad (4)$$

식(4)을 식(1)에 대입하면

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \frac{1}{2}(\pi - \alpha_{ij}) = 2\pi \text{ 이 된다. 따라서}$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \alpha_{ij} = (k^2 - k)\pi - 4\pi = \pi(k^2 - k - 4) \quad \square$$

센서 노드의 위치에 따른 중첩영역을 최소화하기 위해서는 다음과 최적화 식을 유도한다.

그림 2에서, 발생하는 중첩되는 면적은

$\triangle APO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap12}} = r_1(\alpha_{12} - \sin \alpha_{12})/2$

$\triangle ARO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap13}} = r_1(\alpha_{13} - \sin \alpha_{13})/2$

$\triangle BPO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap21}} = r_2(\alpha_{21} - \sin \alpha_{21})/2$

$\triangle BQO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap23}} = r_2(\alpha_{23} - \sin \alpha_{23})/2$

$\triangle CQO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap32}} = r_3(\alpha_{32} - \sin \alpha_{32})/2$

$\triangle CRO$ 에서 면적 $S_{\text{overlap31}} = r_3(\alpha_{13} - \sin \alpha_{13})/2$

따라서 중첩되는 면적

$$S = S_{\text{overlap12}} + S_{\text{overlap13}} + S_{\text{overlap21}} + S_{\text{overlap23}} + S_{\text{overlap32}} + S_{\text{overlap31}}$$

$$= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_i(\alpha_{ij} - \sin \alpha_{ij})/2, (i \neq j, k \geq 3) \quad (5)$$

이므로 위에서 제시한 정리를 이용하여 일반화하면 다음과 같은 최적화식의 유도가 가능하다.

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k r_i(\alpha_{ij} - \sin \alpha_{ij})/2, (i \neq j, k \geq 3)$$

$$\text{subject to } \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k (\alpha_{ij}) = \pi(k^2 - k - 4), \quad (6)$$

$$(i \neq j, k \geq 3, r_i > 0, 0 < \alpha_{ij} < 2\pi)$$

따라서 최적화식 (6)을 만족하는 r_i 및 α_{ij} 값을 갖는 센서 노드를 구하면 최소의 중첩 영역을 갖는 노드의 반경 및 위치를 결정할 수 있다. 최적화 식의 해는 선형 프로그램(Linear programming), Integer Programming, 유전자 알고리즘 등 다양한 알고리즘을 사용하여 구할 수 있다. 본 연구에서는 계산의 속도가 아닌 정확한 위치의 추정에 관심이 있으므로 자세한 알고리즘의 구현은 생략하였다. 최적화 식을 구하기 위해 사용된 알고리즘의 상세조건 등은 시뮬레이션 관련부분에서 기술하였다.

V. 시뮬레이션

본 시뮬레이션의 목적을 [12]에서 제시한 최소 중첩

영역 조건이 타당하다는 가정 하에, 본 연구에서 제안한 ASRC 모델과의 비교를 통하여 유효성을 확인하고자 한다. 편의상 [12]에서 제안한 방식을 Zhang 모델, 본 연구에서 제안 방법을 ASRC 모델로 칭한다. 두 모델은 전술한 두 조건을 만족하고 있으므로 이 조건을 이용하면 세 노드의 위치에 대한 범위를 설정할 수 있다. 그림 2.에서, 원점 A, B, C에 대응하는 노드를 각각 X, Y, Z라 했을 때, 노드 X와 Y, Y와 Z, X와 Z에 대하여 d를 두 원의 원점사이의 거리, 각 노드 X, Y, X의 반경을 r1, r2, r3 라 두었을 때 $r_1 \geq r_2 \geq r_3$ 라 전체 하면,

$$d_{XY} = r_1^2 + r_2^2 - 2r_1r_2 \cos(2\pi - \frac{1}{2}(\alpha_{12} + \alpha_{21})), (|r_1 - r_2| < d_{XY} < |r_1 + r_2| ,$$

$$d_{YZ} = r_2^2 + r_3^2 - 2r_2r_3 \cos(2\pi - \frac{1}{2}(\alpha_{23} + \alpha_{32})), (|r_2 - r_3| < d_{YZ} < |r_2 + r_3| ,$$

$$d_{XZ} = r_1^2 + r_3^2 - 2r_1r_3 \cos(2\pi - \frac{1}{2}(\alpha_{13} + \alpha_{31})), (|r_1 - r_3| < d_{XZ} < |r_1 + r_3|$$

(조건 3)

와 같이 노드의 상대 위치에 대한 범위의 조건을 설정할 수 있다. 이상과 같은 3가지 조건은 시뮬레이션에서 Zhang 및 ASRC 모델에 공통적으로 적용가능하다. 또한 조건 3의 경우 대규모 노드가 분포된 환경에서 이웃 노드의 선정의 기준으로도 사용될 수 있다.

본 연구에서는 시뮬레이션 툴로서 Matlab을 사용하였다.

1. ASRC 모델 시뮬레이션

ASRC 모델의 시뮬레이션은 먼저 주어진 각 노드 반경 r_i에 대하여 최적화식 (6)을 만족하는 해 α_{ij}의 값을 구하고 이를 이용한 노드의 위치와 이때 발생하는 중첩 영역을 계산한다.

2. Zhang 모델의 고찰

[12]에서 제시한 두 가지 경우에 대한 조건을 시뮬레이션하기 위하여 다음과 같이 조건을 만족하는 모델을 설계하였다.

가. 경우 1)의 조건을 만족하는 해

$$\overline{OP} = \overline{OQ} = \overline{OR} = d \text{ 라 두면}$$

노드 X, Y에 대하여,

$$\sin(\frac{\alpha_{12}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_1}, \sin(\frac{\alpha_{21}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_2}$$

노드 Y, Z에 대하여,

$$\sin(\frac{\alpha_{23}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_2}, \sin(\frac{\alpha_{32}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_3}$$

노드 Z, X에 대하여,

$$\sin(\frac{\alpha_{13}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_1}, \sin(\frac{\alpha_{31}}{2}) = \frac{(\frac{d}{2})}{r_3}$$

$$\begin{aligned} \text{정리에서 } \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\alpha_{ij}) &= \pi(k^2 - k - 4) \\ &= \pi(3^2 - 3 - 4) \\ &= 2\pi \end{aligned}$$

$$\overline{OP} = \overline{OQ} = \overline{OR} \text{ 이므로}$$

$$\alpha_{12} = \alpha_{13}, \alpha_{21} = \alpha_{23}, \alpha_{32} = \alpha_{31}, \text{에서}$$

$$\alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{21} + \alpha_{23} + \alpha_{32} + \alpha_{31} =$$

$$2(\alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{32}) = 2\pi$$

$$\therefore \alpha_{12} + \alpha_{21} + \alpha_{32} = \pi$$

여기서, α₁₂ = π - (α₂₁ + α₃₂)이므로 이를 α₁₂관계식에 대입하면

$$2r_1 \sin(\frac{\pi - (\alpha_{21} + \alpha_{32})}{2}) = d \tag{7}$$

$$A = \frac{\pi}{2}, B = \frac{\alpha_{21} + \alpha_{32}}{2} \text{ 라 두면,}$$

$$\sin(A - B) = \sin(A)\cos(B) - \cos(A)\sin(B)$$

이므로 이를 대입하면 식(7)은 다음과 같다.

$$2r_1 \sin(\frac{\pi}{2}) \cos(\frac{\alpha_{21} + \alpha_{32}}{2}) - \cos(\frac{\pi}{2}) \sin(\frac{\alpha_{21} + \alpha_{32}}{2}) = d \tag{8}$$

$$\text{여기서 } \sin(\frac{\pi}{2}) = 1, \cos(\frac{\pi}{2}) = 0,$$

cos(A + B) = cos(A)cos(B) - sin(A)sin(B)이므로 식(8)은 다음과 같다.

$$2r_1 (\cos(\frac{\alpha_{21}}{2}) \cos(\frac{\alpha_{32}}{2}) - \sin(\frac{\alpha_{21}}{2}) \sin(\frac{\alpha_{32}}{2})) = d \tag{9}$$

$$\cos(\frac{\alpha_{21}}{2}) = \frac{\sqrt{(r_2)^2 - (\frac{d}{2})^2}}{r_2}, \cos(\frac{\alpha_{32}}{2}) = \frac{\sqrt{(r_3)^2 - (\frac{d}{2})^2}}{r_3} \text{ 이}$$

므로 이를 식(9)에 대입하면,

$$(\frac{\sqrt{(r_2)^2 - (\frac{d}{2})^2}}{r_2})(\frac{\sqrt{(r_3)^2 - (\frac{d}{2})^2}}{r_3}) - (\frac{(\frac{d}{2})^2}{r_2 r_3}) = (\frac{d}{2r_1}) \tag{10}$$

여기서 $(\frac{d}{2}) = D$ 라 두고 정리하면

$$2(\frac{r_2 r_3}{r_1})D^3 + ((\frac{r_2 r_3}{r_1})^2 + (r_2)^2 + (r_3)^2)D^2 - (r_2 r_3)^2 = 0 \quad (11)$$

따라서 식(11)을 만족하는 D 값을 구하면 된다. 식 (11)에 의하여 유도된 d값을 이용하여 세 노드의 위치 및 중첩영역을 계산할 수 있다.

나. 경우 2)의 조건을 만족하는 해

노드 X, Y에 대하여 위치가 이미 설정되어 있다는 가정이므로 $OP = d'$, $OQ = OR = d$, $\alpha_{12} + \alpha_{21} = K$ (K는 상수) 이라 두면, $\triangle AOR$, $\triangle BOQ$, $\triangle CQR$, $\triangle CRO$ 에서 다음의 식이 유도된다.

$$d^2 = r_1^2 + r_1^2 - 2r_1^2 r_1^2 \cos(\alpha_{13}) \quad (12-1)$$

$$d^2 = r_2^2 + r_2^2 - 2r_2^2 r_2^2 \cos(\alpha_{23}) \quad (12-2)$$

$$d^2 = r_3^2 + r_3^2 - 2r_3^2 r_3^2 \cos(\alpha_{32}) \quad (12-3)$$

$$d^2 = r_3^2 + r_3^2 - 2r_3^2 r_3^2 \cos(\alpha_{31}) \quad (12-4)$$

정리에 의하여

$$K + \alpha_{13} + \alpha_{23} + \alpha_{31} + \alpha_{32} = 2\pi \quad (12-5)$$

여기서, 경우 2의 조건($OQ = OR$)에 의하여 $\alpha_{31} = \alpha_{32}$ 이다.

따라서 식(12-1),(12-2),(12-3),(12-4),(12-5)를 만족하는 d에 대한 연립방정식의 해를 구하면 된다. 구해진 d를 경우 1)과 같이 노드의 위치와 중첩영역을 계산한다.

3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

시뮬레이션에서는 다양한 상황을 비교하기 위하여, 각 노드의 감지 반경이 동일한 경우($r_1 = r_2 = r_3 = 6$), 각 노드 반경의 차이가 미세한 경우($r_1 = 8, r_2 = 6, r_3 = 6$), ($r_1 = 10, r_2 = 8, r_3 = 7$), 그리고 각각 반경의 차이가 클 경우($r_1 = 15, r_2 = 10, r_3 = 3$)에 대한 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 또한 실제 센서는 응용분야에 따라 센서의 반경이 mm, cm, m, 등의 단위로 적용되므로, 이를 고려하여 스케일에 대한 변화를 주어 $r_1 = 100, r_2 = 80, r_3 = 70$, 그리고 $r_1 = 150, r_2 = 100, r_3 = 30$ 으로 반경을 10단위 스케일 업 하여 함께 시뮬레이션 하였다.

Zhang 모델의 경우 1에서 식 (11)을 이용하여 OP,

OQ, OR의 길이와 함께 중첩영역의 면적을 계산하였고, ASRC 모델의 시뮬레이션은, 최적화식 (6)의 해로서 α_{ij} 값과 이를 이용한 중첩영역의 면적을 이용하여 수행하였다. ASRC 모델의 시뮬레이션은, 최적화식 (6)의 해로서 α_{ij} 값과 이를 이용한 중첩영역의 면적을 이용하여 수행하였다.

경우2에 대해서는, 노드 X, Y의 위치를 우선하여 설정하되 두 노드 원점사이의 거리를 OGDC에서 제시한 최적 조건으로 하여 $\sqrt{3}(r_1 + r_2)/2$ 로 설정한 후 전술한 연립방정식을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 이에 대응하는 ASRC 모델의 시뮬레이션은, 경우 2와 동일하게 노드 X, Y의 위치를 설정한다. 이때 α_{12} 와 α_{21} 의 값은 고정된다. 고정된 값을 최적화식 (6)에 적용하여 중첩영역의 면적을 도출하였다.

Zhang 모델의 경우 1과 ASRC 모델에 대한 시뮬레이션 결과는 표 1과 같다.

표 1에서는 Zhang 모델의 경우 1에 대한 조건식 (11)의 결과($OP=OQ=OR$)와 중첩영역을 표시하였으며,

표 1. Zhang 경우 1 과 ASRC 모델에 대한 시뮬레이션 결과

Table 1. Simulation results of Zhang's case 1 and ASRC model.

r_1, r_2, r_3	Zhang 모델 (경우 1)		ASRC 모델	비교
	중첩면적	OP=OQ=OR		
6, 6, 6	19.5660	6	19.5667	+0.0007
8, 6, 6	23.2178	6.52852	23.2216	+0.0038
10, 8, 7	36.0129	8.12797	36.0150	+0.0021
15, 10, 3	17.4479	5.39282	17.4489	+0.0010
100,80,70	3601.29	81.2797	3601.50	+0.2100
150,100,30	1744.79	53.9282	1744.89	+0.1000

표 2. Zhang 경우 1 과 ASRC 모델에 대한 시뮬레이션 결과

Table 2. Simulation results of Zhang's case 2 and ASRC model.

r_1, r_2, r_3	Zhang 모델 (경우 2)		ASRC 모델	비교
	중첩면적	OP/OQ=OR		
6, 6, 6	19.5666	6/6	19.5666	0
8, 6, 6	23.5767	6.90411/ 6.33699	23.3334	-0.2433
10, 8, 7	36.7197	8.92562/ 7.80892	36.5008	-0.2189
15, 10, 3	35.4565	12.1621/ 4.53509	35.213	-0.2435
100,80,70	3671.97	89.2562/ 78.0892	3650.08	-21.89
150,100,30	3545.65	121.621/ 45.3509	3521.3	-24.35

ASRC 모델에 대해서는 식(11)의 결과에 의한 중첩영역과 각 모델에 의하여 도출된 면적의 차이를 나타내었다. 표 1의 비교에 나타난 바와 같이 ASRC 모델은 Zhang 모델의 경우 1과 비교하여 스케일 대비, 무시할 수 있을 정도의 최소의 중첩 면적 차이가 도출됨에 따라 제안한 모델의 유효성을 확인하였다.

Zhang 모델의 경우 2와 ASRC 모델과의 비교를 표 2에 나타내었다.

표 2에 나타나 바와 같이 ASRC 모델은 반경이 동일한 경우를 제외하고 Zhang의 경우 2에 비하여 중첩면적의 감소를 보이고 있으며 특히 스케일 업 한 경우에 대해서는 뚜렷한 차이가 보임에 따라 제안한 모델이 보다 우수한 결과를 도출함을 확인하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 WSN에서 노드의 감지영역을 가변 시킨다는 조건하에, 이웃하는 노드와의 중첩영역을 최소화하는 노드위치를 결정하는 새로운 방법을 소개하였다. 제안한 ASRC 모델은 세 노드의 중첩에 의하여 발생하는 전개각과 가변되는 노드의 감지 반경 값을 이용하여 중첩면적을 최소화하는 최적화 식을 기반으로 한다. 시뮬레이션에서 적용한 경우 1의 응용 예로서는, 주어진 영역에 대한 최소의 센서 노드로서 위치를 미리 선정하고자 할 경우에 적용될 수 있으며, 경우 2는 대규모 센서가 분포된 환경에서 순차적으로 노드의 동작 모드(active/sleep node)를 선택하여 스케줄링함으로써 네트워크의 수명연장의 기법으로 적용할 수 있는 예이다. ASRC 모델과 기존의 Zhang의 경우 1과 경우 2에 대하여 동일한 조건하에서 시뮬레이션 수행하여 유효한 결과를 보였으며, 또한 적용한 노드의 감지 반경에 대한 단위길이가 클 경우에는 더욱 큰 감지 면적의 감소를 보였다.

가변 감지 영역을 갖는 노드의 위치 설정에 대하여, 기존의 중첩면적 최소화 조건과는 달리 수학적 모델을 통한 새로운 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 감지 대상영역에 대한 최소 수의 노드를 이용한 최적의 노드 위치추정에 이용될 수 있으며, 대규모의 센서 노드가 분포되었을 때, 노드의 스케줄링에 적용되어 WSN의 수명 연장을 기대할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "Wireless Sensor Networks: A Survey", *Computer Networks*. March 2002.
- [2] Jie Wu and Shuhui Yang, "Coverage issue in sensor networks with adjustable ranges", *Parallel Processing Workshops, ICPP 2004 Workshops. Proceedings. 2004 International Conference on 2004* pp.61-68, 2004.
- [3] M. Cardei, W. Jie, Mingming, M.O. Luan Pervaiz, "Maximum network lifetime in wireless sensor networks with adjustable sensing ranges", *Wireless And Mobile Computing, Networking And Communications, WiMob'2005 : IEEE International Conference on 2005*, 2005.
- [4] A. Dhawan, C.T. Vu, A. Zelikovsky, Y. Li, S.K. Prasad, "Maximum Lifetime of Sensor Networks with Adjustable Sensing Range", *Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing, SNPDP 2006. Seventh ACIS International Conference on 19-20 June 2006*, pp. 285-289, 2006.
- [5] H. Zhang and J. C. Hou, "Maintaining Sensing Coverage and Connectivity in Large Sensor Networks", *NSF International Workshop on Theoretical and Algorithmic Aspects of Sensor, Ad Hoc Wireless and Peer-to-Peer Networks*, Feb. 2004.
- [6] S. Slijepcevic and M. Potkonjak. "Power efficient organization of wireless sensor networks.", In *Proc. of ICC 2001*, pp.472-476, June 2001.
- [7] Y. Xu, J. Heidemann, and D. Estrin. "Geography-informed energy conservation for ad hoc routing.", In *Proc. of ACM MOBICOM' 01*, pp.70-84, July 2001.
- [8] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang, "Energy efficient robust sensing coverage in large sensor networks.", *Technical report, UCLA*, 2002.
- [9] F. Ye, G. Zhong, S. Lu, and L. Zhang., "Peas: A robust energy conserving protocol for longlived sensor networks.", In *Proc. of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*, pp.28, 2003.
- [10] S. Yi and S. Hongchi, "Coverage and energy tradeoff in density control on sensor networks", *Parallel and Distributed Systems*, 2005. *Proceedings. 11th International Conference on Volume 1*, pp.564-570, July 2005.
- [11] D. Tian and N. D. Georganas, "A coverage preserving node scheduling scheme for large wireless sensor networks", In *Proc. of First*

ACM international Workshop on Wireless Sensor
Networks and Applications, p.32-41, 2002.

[12] http://lion.cs.uiuc.edu/projects/wsn_theory.html

— 저 자 소 개 —



성 기 택(정회원)

1988년 부경대학교 전자통신
공학과 학사 졸업.

1990년 부경대학교 전자통신
공학과 석사 졸업.

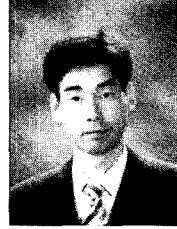
2003년 부경대학교 정보시스템
박사수료

1991년~1998년 국방과학연구소 선임연구원

1998년~2006년 동명대학 조교수

2006년~현재 동명대학교 정보보호과 전임강사

<주관심분야 : 네트워크보안, 센서네트워크>



송 봉 기(정회원)

1997년 부경대학교 전자공학과
학사 졸업.

2000년 부경대학교 전자공학과
석사 졸업.

2005년 부경대학교 정보시스템
박사 졸업.

2005년~현재 경성대학교 컴퓨터학과 초빙외래
교수

<주관심분야 : 유전자알고리즘, 임베디드시스템,
컴퓨터네트워크>

우 중 호(정회원)

대한전자공학회 논문지

-CI 제41권 4호 참조