
다중 홉 Ad-hoc 네트워크에서 노드이동성을 고려한 라우팅 프로토콜에 관한 연구

김관웅* · 김변곤** · 김용갑*

An Enhanced Routing Protocol for Supporting Node Mobility in Multi-hop Ad-hoc Networks

Kwan-woong Kim* · Byun-gon Kim** · Yong-kab Kim*

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 대학전력연구센터 육성·지원사업(I-2004-0-074-0-00)에 의해
작성되었습니다

요 약

무선 Ad-hoc 네트워크는 기지국이나 중앙 집중관리가 없는 영역에서 다수의 노드들 간에 무선 데이터 통신 연결이 자율적으로 설정되는 네트워크이다. Ad-hoc 네트워크는 노드의 이동과 전원의 제약 때문에 네트워크 위상(network topology)이 자주 변화할 수 있다. 라우팅 경로를 찾는 과정에서 가장 신뢰성이 있는 경로를 선택하는 것은 Ad-hoc 네트워크 성능을 향상시키기 위해서 아주 중요하다. 본 연구에서, 우리는 수신신호 세기의 변이를 감시해서 AODV 기반의 강화된 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 노드의 이동성과 경로의 홉 수로 구성된 새로운 매트릭 함수는 라우팅 경로 결정에 이용된다. NS-2를 이용한 폭넓은 실험에서, 제안된 라우팅 기법의 성능은 AODV 프로토콜에 비하여 향상되었다.

ABSTRACT

Mobile Ad hoc Networks (MANETs) refer to autonomous networks in which wireless data communications are established between multiple nodes in a given coverage area without a base station or centralized administration. Because of node mobility and limited battery life, the network topology may changes frequently. Selecting the most reliable path during route discovery process is important to improve performance in ad-hoc networks. In this study, we proposed an enhanced routing protocol based on AODV by monitoring variation of receiving signal strength. New metric function that consists of node mobility and hops of path is used for routing decision. From extensive experiments by using NS-2, The performance of the proposed routing scheme has been improved by comparison to AODV protocol.

키워드

MANETs, Mobility, Routing Protocols, AODV

I. 서 론

MANET(Mobil Ad-hoc Network)은 기지국이나 AP(Access Point)와 같은 고정된 기반구조 없이 통신하는 이동 노드들로 구성된 동적으로 변화하는 네트워크이다. 노드들 간의 통신은 서로 직접 연결되거나 다중 홉 무선 링크를 구성하고 중간 노드들에 의해 데이터가 전달되는 방식으로 이루어진다[1][2]. 이러한 Ad-hoc 망의 특징은 동적인 토폴로지, 한정된 대역폭, 가변적인 링크 용량, 제한된 에너지를 갖는다는 것이다. 또한, 노드들은 무선 신호의 간섭이나 페이딩 등의 영향으로 통신 품질의 동요가 심한 무선 환경에서 노드의 이동으로 인한 네트워크 위상(network topology) 변화에 강건한 네트워크를 자기 조직화(self-organization)할 책임이 있다.

무선 Ad-hoc 망은 무선 LAN(Local Area Network) 시스템과 같은 기반구조 도움 없이 스스로 네트워크를 구성할 수 있기 때문에 무선 센서 네트워크, 재해, 재난 지역, 군사작전, 전장 등의 기반 시설이 갖추어져 있지 않은 환경에 적합한 다양한 응용 서비스에 개발에 유용하다.

무선 Ad-hoc 네트워크는 고정 노드를 가진 유선 네트워크에 비해서 네트워크 위상이 자주 변화하기 때문에 이러한 네트워크 위상 변화에 빠르게 적응할 수 있는 적응 라우팅 기법이 요구된다. 즉, 라우팅 프로토콜은 네트워크 위상의 변화 및 경로의 갱신 정보를 전파시켜야 한다. 일반적으로 Ad-hoc 라우팅 프로토콜은 경로를 필요시에만 획득하는 On-demand 방식의 reactive 라우팅 프로토콜과 주기적으로 라우팅 정보를 교환하는 Bellman-Ford 알고리즘에 기반 한 table-driven 방식의 proactive 라우팅 프로토콜로 분류할 수 있다.

Table-driven 방식의 프로토콜은 지속적으로 다른 노드에 대한 라우팅 정보를 갱신하고 유지함으로써 패킷 전송 필요시 별도의 경로 획득 절차 없이 라우팅 정보를 이용하여 전송할 수 있는 방식이다. Table-driven 방식에 속하는 라우팅 알고리즘으로는 거리-벡터 계열의 알고리즘들과 링크-상태 계열의 알고리즘들이 있다. Table-driven 방식의 라우팅 프로토콜로는 DSDV(Destination-Sequence Distance Vector), WRP(Wireless Routing Protocole), CGSR(Gateway Switch Routing) 등의 프로토콜이 있다[5].

한편 On-demand 방식은 패킷을 전송할 필요가 있을 경우에만 경로 획득 절차를 실행한다. 따라서 네트워크

경로를 찾을 필요가 있을 때, 네트워크 전체 혹은 일부분에서 경로를 찾는 절차를 진행 할 수 있다. On-demand 방식의 라우팅 프로토콜로는 DSR(Dynamic Source Routing), AODV(Ad-hoc On-demand Distance Vector Routing)[3], LMR(Lightweight Mobile Algorithm), TORA(Temporally Ordered Routing Algorithm), ABR(Associativity-Based Routing), SSR(Signal Stability Routing) 등의 프로토콜이 있다.

MANET에서의 노드들은 자유롭고 예측 할 수 없는 방향으로 움직이기 때문에 패킷의 목적지에 이르는 경로 중에 있는 링크의 연결이 자주 끊어질 수 있다. 노드의 이동성 때문에 발생할 수 있는 링크의 단절은 네트워크 전체 성능에 나쁜 영향을 주게 된다. 이러한 노드의 이동성으로 인한 성능저하를 줄이기 위한 많은 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 노드의 이동성을 고려한 새로운 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 AODV 프로토콜의 기본 및 노드의 이동성에 관련된 라우팅 알고리즘의 관련 연구를 소개하였으며, 3장에서 제안된 알고리즘을 기술하고, 4장에서 시뮬레이션 결과 및 성능을 AODV 방식과 비교, 분석하였으며 마지막으로 5장에 결론을 기술하였다.

II. 관련 연구 및 연구 배경

무선 Ad-hoc 네트워크는 다중 홉을 경유하여 통신할 수 있는 노드들로 구성되어 있다. 노드의 이동성 때문에 네트워크 위상(network topology)이 빈번하게 변화할 수 있으며, 위상 변화의 예측이 불가능 하다. 다중 홉을 경유하여 패킷을 전송하기 위해서는 경로상의 노드들이 협력하여 패킷을 전송해야 한다. 라우팅 경로상의 노드들의 이동으로 인하여 라우팅 경로의 단절이 발생하면 라우팅 경로의 복구를 위한 과정을 진행해야 하기 때문에 라우팅 경로 탐색과정에서 라우팅 경로를 오랜 시간 동안 유지할 수 있는 경로를 찾는 알고리즘은 네트워크 성능 향상에 매우 중요한 영향을 준다.

실제로, 다중 홉 무선 Ad-hoc 네트워크에서 노드의 이동성을 고려한 매우 많은 기법이 제안되어 왔다. 그러나 대부분의 연구에서 네트워크 내의 노드들이 GPS(Global Positioning System)와 같은 위치 인식 장치를 가지고 있

다고 가정하였다. 그러므로 노드들은 노드들의 이동성을 판단할 수 있는 모든 정보를 가지고 있다. 그러나 일반적으로 GPS를 이용하는 것은 많은 제약이 따른다. 즉, 실내의 환경에서 이용될 수 없으며, 많은 전력을 소비하기 때문에 소형의 Ad-hoc 노드에는 적합하지 않다[8].

Tom Goff는 AODV와 DSR 프로토콜을 강화한 preemptive-routing 프로토콜을 제안하였다[9]. Preemptive-routing 프로토콜은 노드의 이동성에 기인한 링크의 단절이 발생하기 전에 경로를 재설정하기 위한 프로토콜이다. 경로상의 이웃노드가 이동하면 수신신호의 세기가 변화한다. 이러한 수신신호의 세기를 측정하여 경로 재설정 과정의 진행 여부를 판단하며 경로의 단절이 발생하기 전에 경로를 재설정하는 프로토콜은 셀룰러 네트워크의 hand-off와 유사하다.

노드에서 GPS 도움 없이 이웃 노드의 상대적인 이동성을 검출하기 위한 다른 연구도 있다. 이러한 연구에서는 수신신호의 SNR(Signal-to- Noise Ratio)을 감시하여 신호를 전송하고 있는 이웃노드가 접근하고 있는지 혹은 멀어지고 있는지를 판단할 수 있다[10]. 이와 같은 방식은 전체 경로의 설정 전략에 직접적으로 영향을 줄 수 없고, 노드 주변의 지역적인 부분의 경로에만 영향을 줄 수 있는 한계가 있다.

III. 제안된 라우팅 기법

라우팅 프로토콜은 종단간의 연결이 가능한 여러 경로 중에서 신뢰성이 가장 높고, 오랫동안 지속될 수 있는 경로를 찾아야 네트워크 성능을 향상시킬 수 있다. 이웃한 두 개의 노드사이의 거리는 수신신호의 세기(RxP)의 역수에 비례한다[7]. 만약에 수신신호의 세기(RxP)가 작아진다면 신호를 전송하는 노드가 수신노드로부터 멀어지는 것이고, 수신신호의 세기(RxP)가 증가한다면 신호를 전송하는 노드가 수신노드로 다가오는 것이다.

그림 1은 수신노드 A에서 수신신호의 세기와 송신노드 B사이의 거리관계를 보여주고 있다.

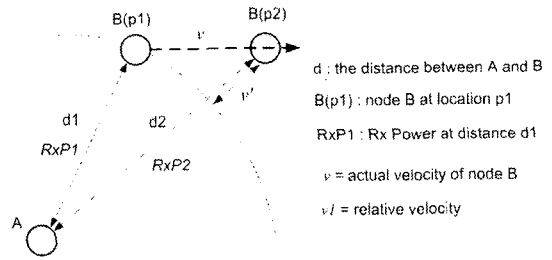


그림 1. 노드 이동과 수신신호 세기와의 관계
Fig. 1. The relationship between RxPower and node movements.

노드 B는 v 의 속도로 p1에서 p2로 이동하여 노드 A의 수신신호 세기는 RxP_1 에서 RxP_2 로 변화되었다. 수식 (1)과 같이 수신신호 세기(RxP)의 변화량을 측정하고, M 값을 계산하여 노드 B의 상대적인 이동성을 검출할 수 있다. 수신신호 세기의 변화량을 측정하기 전에 두 노드 사이의 거리를 정확히 알고 있어야 하는데, 수신신호 세기로부터 정확한 거리를 계산하는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면 수신노드에서 수신신호 세기를 이용하여 거리를 계산하기 위해서는 송신노드에서의 전송 전력, 송/수신 안테나 이득 및 채널 손실 factor 등의 정보가 필요하지만, 수신노드에서 충분한 정보를 가지고 있지 않을 수 있기 때문이다[7][10].

$$M = \frac{d(t_0) - d(t_1)}{t_1 - t_0} \approx \frac{v'}{k}, \quad \text{where } d(t) = RxP(t)^{-\frac{1}{n}} \quad (1)$$

3.1. 경로 탐색 과정

경로 탐색 과정에서 제안된 라우팅 프로토콜은 이동성이 작은 최적의 경로의 탐색을 시도한다.

수식 (1)과 같이 계산한 M 값을 포함한 RREQ(Route REQuest) 패킷의 플래딩을 위해서 패킷 헤더에 4바이트 크기의 M 필드가 필요하다. RREQ 패킷을 수신한 각각의 노드는 경로의 홉 수를 고려하여 다수의 경로 중에서 최대의 M 값을 가진 경로를 선택한다. 소스노드는 라우팅 경로를 탐색하기 위해 이웃노드들에게 M 값이 0으로 초기화된 RREQ 패킷을 broadcast 한다. i 노드로부터 RREQ 패킷을 수신한 j 노드는 RREQ 패킷의 M 값을 다중 홉 무선 링크 중에서 M 값이 가장 큰 경로를 찾기 위해 수식 (2)와 같이 M_{RREQ} 값을 계산한다.

$$M_{RREQ} = \max(M_{RREQ}, M(i)) \quad (2)$$

수식 (2)에서 $M(i)$ 는 수식 (1)을 사용하여 계산된 노드 j 와 i 의 M 값이고, M_{RREQ} 는 수신된 RREQ 패킷의 M 값이다. R_{cost} (route cost)는 패스 비용 함수로써 라우팅 최적의 경로를 찾기 위한 라우팅 테이블 entry 갱신과정에서 사용된다.

노드는 RREQ 패킷을 수신할 때마다 수식 (3)을 이용하여 수신된 RREQ 경로의 R_{cost} 값을 계산하고, 계산된 R_{cost} 값이 0보다 작으면 RREQ의 경로가 라우팅 테이블의 기존 경로보다 좋은 경로로 판단하고 라우팅 테이블 entry를 RREQ 패킷의 경로로 갱신한다.

$$R_{cost} = h_{RREQ} - h_{RT} + F_m \quad (3)$$

수식 (3)에서 h_{RREQ} 는 RREQ 패킷의 홉 수이며 h_{RT} 는 라우팅 테이블 entry의 홉 수이다. F_m 은 수식 (4)와같이 정의된 상대적인 이동성 값이다.

수식 (4)에서 M_{RT} 는 라우팅 테이블 entry의 M 값이며 k 는 상수이다. 수식 (4)로부터 F_m 값의 범위는 $-k \sim k$ 이며, 우리는 k 값을 2로 설정하였다.

$$F_m = k \cdot \frac{M_{RREQ} - M_{RT}}{M_{RREQ} + M_{RT}}, \text{ when } M_{RREQ} + M_{RT} \neq 0$$

$$F_m = 0, \text{ when } M_{RREQ} + M_{RT} = 0 \quad (4)$$

Ad-hoc 네트워크내의 노드에서 RREQ 패킷을 수신하면 수식 (3)을 이용하여 R_{cost} 값을 계산하여 R_{cost} 값이 0보다 작을 경우에 라우팅 테이블 entry를 갱신한다. 따라서 라우팅 테이블의 경로는 경로의 홉 수가 $h \sim h+k$ 인 범위 중에서 이동성이 가장 적은 경로가 되며, h 는 라우팅 테이블의 홉 수인 h_{RT} 와 RREQ 패킷의 홉 수인 h_{RREQ} 중에서 작은 값을 의미한다.

$$h = \min(h_{RT}, h_{RREQ}) \quad (5)$$

그림 1은 중간 노드에서 RREQ 패킷을 수신했을 때

제안된 알고리즘의 이동성을 고려한 최적의 경로 선택 과정을 보여주고 있다.

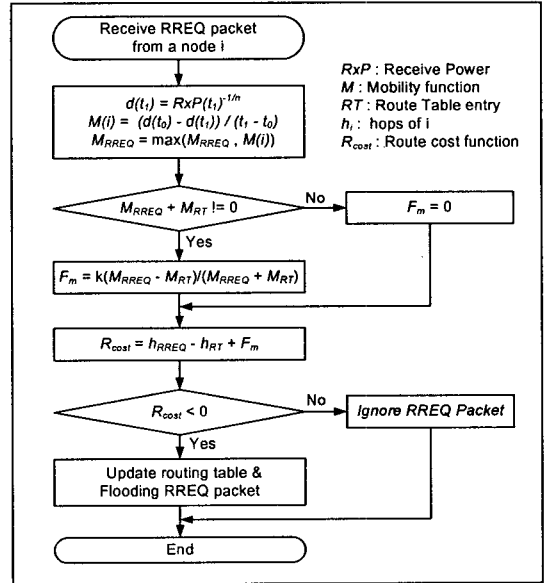


그림 2. 이웃 노드 i로부터 RREQ 패킷을 수신했을 때의 동작

Fig. 2. Behavior of node when it receives RREQ Packet from neighbor i.

3.2. 목적지 노드의 동작

최초의 RREQ 패킷을 수신한 목적지 노드에서는 일정 시간의 타이머를 설정하고 다른 경로의 RREQ 패킷의 수신을 기다린다. 이러한 대기 시간을 설정하는 이유는 다수의 다중 경로 중에서 이동성이 가장 적은 최적의 경로를 선택하기 위해서이다. 타이머가 만료되면 목적지 노드에서는 이동성이 가장 적은 최적 경로를 선택하여 경로의 역방향으로 RREP 패킷을 즉시 전송하여 다중 홉을 경유하는 경로를 설정하게 된다.

IV. 시뮬레이션 결과

4.1. 시뮬레이션 환경

제안된 라우팅 프로토콜의 성능을 검증하기 위하여 네트워크 시뮬레이터인 NS2[11]를 이용하여 다양한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 AODV

방식과 비교분석 하였다.

면적이 $1\text{km} \times 1\text{km}$ 이며 80개의 이동 노드를 가진 Ad-hoc 네트워크를 구성하여 모의실험을 수행하였다. 모든 노드의 채널 모델은 무선 물리 전파모델을 사용하였으며, MAC 프로토콜은 IEEE 802.11 MAC 프로토콜을 사용하였다. RF 전파 모델은 Two-Ray Ground 전파 모델을 사용하였으며 전송범위는 250m이고 간섭범위는 550m이다.

표 1은 NS2에서 Energy Model의 설정된 속성값을 보여주고 있다. 트래픽은 CBR(Constant Bit Rate) 소스를 사용하였으며, 15 개의 CBR 소스에서 매 0.1초 마다 UDP 패킷이 발생하며, UDP 패킷의 크기는 512 bytes이다. 시뮬레이션 시간은 200초이며, 노드의 평균 휴지 시간은 10초이다. 노드의 최대 속도는 5[m/sec]에서 20[m/sec]까지 변화한다.

표 1. NS2에서 에너지 모델 파라미터
Table 1. Parameters of Energy Model in NS2.

Attribute	Description	Value
-initial Energy	Given energy for each node	200 Joules
-Grx, Gtx	Antenna Gain	1
-txPower	Transmitting power in Watt	281.8mW

본 논문에서 제안된 이동성을 고려한 라우팅 프로토콜은 가장 오랫동안 지속될 수 있는 라우팅 경로를 설정하기 때문에 라우팅 경로 설정과정의 성능을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 종단간 패킷 전송률의 증가를 기대할 수 있어 Ad-hoc 네트워크의 성능을 개선시킬 수 있을 것이다.

4.2. 시뮬레이션 결과 및 성능분석

그림 3은 라우팅 메시지의 오버헤드 비율을 보여주고 있으며 그림 4는 라우팅 경로 설정과정에서 발견된 라우팅 경로의 수를 보여주고 있다. 그림 4의 결과를 보면 본 논문에서 제안된 라우팅 프로토콜의 라우팅 설정과정에서 발견된 경로 수가 AODV 프로토콜에 비하여 현저히 적은 것을 알 수 있다. 따라서 라우팅 설정과정에서 발생하는 RREQ 패킷의 플러딩(flooding)을 줄일 수 있고, 그림 3과 같이 라우팅 메시지의 오버헤드 비율을 크게 줄일 수 있다.

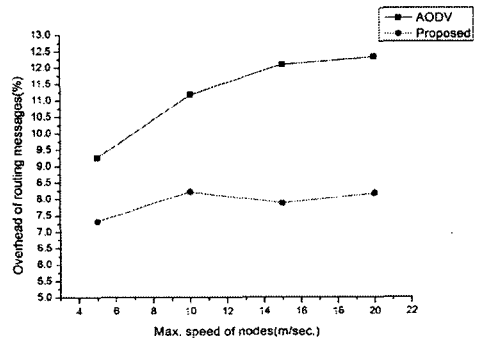


그림 3. 라우팅 메시지의 오버헤드 비율
Fig. 3. Overheads ratio of routing message.

노드의 평균속도가 증가하면 AODV 프로토콜에서는 라우팅 경로의 단절이 증가하여 경로 복구를 위한 라우팅 메시지의 오버헤드 비율이 증가한다는 것을 알 수 있다. 그러나 제안된 라우팅 프로토콜에서는 노드의 이동성을 고려하여 지속시간이 가장 긴 경로를 선택하기 때문에 라우팅 경로의 단절을 일정 수준까지 방지할 수 있다.

그림 5는 종단 간 패킷 전송률과 수신 노드에서의 패킷 수신 수를 보여주고 있다. 노드의 속도가 증가할 수록 경로의 단절로 인한 패킷의 손실은 증가한다. 그림 4와 5의 결과를 보면 AODV 프로토콜의 경우 노드의 이동 속도가 증가하면 패킷의 손실이 증가하여 패킷의 전송률이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있다. 그러나 제안된 프로토콜의 경우는 노드의 이동 속도가 증가하여도 패킷 손실을 줄여 전송률이 개선되었음을 보여주고 있다.

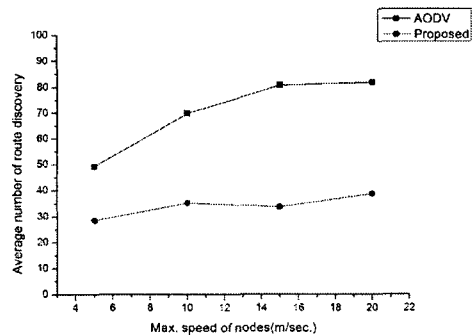


그림 4. 평균 경로 발견 수
Fig. 4. Average number of route discovery.

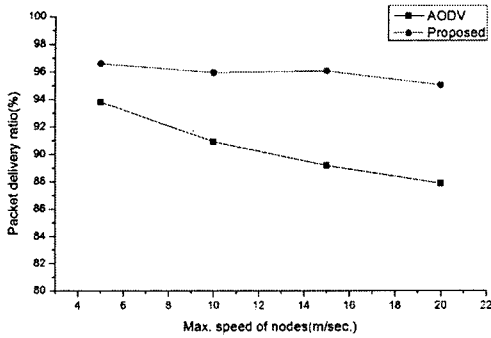


그림 5. 종단간 패킷 전송률
Fig. 5. End-to-end packet delivery ratio.

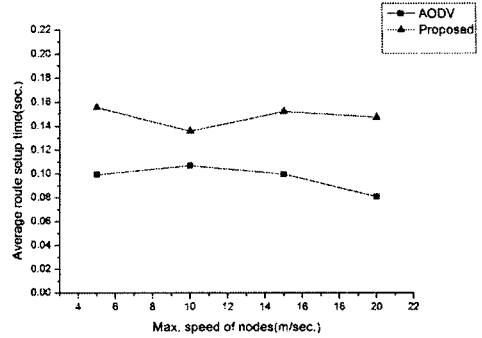


그림 7. 평균 경로 설정 시간
Fig. 7. Average route setup time.

그림 6과 7은 제안된 프로토콜의 단점을 보여주고 있다. 목적지 노드에서는 일정 시간 동안 다른 경로의 RREQ 패킷의 수신들 기다린다. 이러한 설정시간 때문에 그림 8에서와 같이 평균 경로 설정 시간이 AODV 방식에 비하여 50~60% 증가하고 있다. 그림 7의 결과를 보면 제안된 라우팅 프로토콜의 라우팅 경로의 홉 수가 0.5~1 정도 증가하고 있다. 이러한 이유는 본 논문에서 제안된 라우팅 프로토콜에서 노드의 이동성이 작은 노드를 경유하는 보다 지속시간이 긴 경로를 선택하기 때문이다. 이러한 단점에도 불구하고 제안된 라우팅 프로토콜은 기존의 AODV 프로토콜에 비하여 우수한 성능을 제공한다. 또한 노드의 이동성을 검출하기 위한 GPS와 같은 장비나 위치정보를 필요로 하지 않는다.

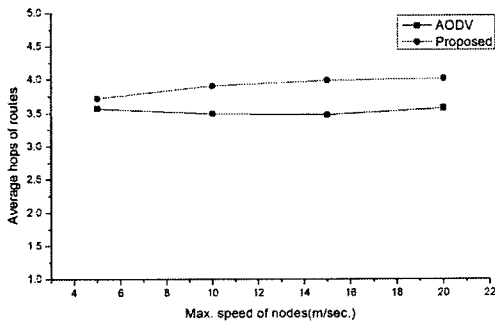


그림 6. 경로의 평균 홉 수
Fig. 6. Average hops of routes.

V. 결론

Ad-hoc 네트워크의 위상은 노드의 이동성 때문에 빈번히 변할 수 있다. 다중 홉을 경유하는 라우팅 경로는 다수의 노드와 이들 노드사이의 경로로 이루어진다. 경로 상의 노드 중에서 하나의 노드가 전송범위를 벗어나는 지역으로 이동하면 새로운 링크가 경로 상에 설정되어 종단간의 경로가 복구되어야 한다. 경로의 단절을 검출하고 새로운 링크를 설정하여 경로를 복구하는 과정은 많은 비용이 든다. 따라서 노드의 이동성을 극복하는 기법은 Ad-hoc 라우팅 프로토콜 설계에 있어서 매우 중요한 연구 대상이다.

본 논문에서는 수신신호의 변이를 검출하여 최선의 경로를 제공하기 위한 새로운 라우팅 프로토콜을 제안하였다. 제안된 라우팅 프로토콜은 노드의 이동성뿐만 아니라 경로의 홉 수를 같이 고려하였다. 라우팅 경로 설정을 단순화하기 위하여 노드의 이동성 함수 M 과 홉 수로 구성된 새로운 경로 비용 함수 (R_{cost})를 사용하였다. 이러한 경로 비용함수를 이용하여 목적지 노드에서는 선택 가능한 다수의 경로 중에서 가장 좋은 경로를 선택할 수 있다. 시뮬레이션 결과 노드의 이동 속도가 증가할수록 제안된 라우팅 프로토콜이 AODV 프로토콜에 비하여 우수한 성능을 보여주고 있다.

참고문헌

- [1] C. E. Perkins.: Ad Hoc Networking, Addison- Wesley, Upper Saddle River, NJ, USA (2001)
- [2] <http://www.ietf.org/>
- [3] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das.: Ad Hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. drift-ietf-manet-aodv-12.txt, Work in Progress (2002)
- [4] C. E. Perkins, E. M. Royer and S. R. Das.: Ad-hoc on demand distance vector routing. IETF RFC3561,
- [5] Elizageth M. Royer & Chai-Keong Toh.:A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks. IEEE personal Communications (1999)
- [6] C. K. Toh.: Associatively Based Routing for Ad Hoc Mobile Networks Wireless Pers. J., Special Issue on Mobile Networking and Computing Systems 4 (1997) 151-158
- [7] J. B. Anderson, T.S. Rappaport, and S. Yoshida.: Propagation Measurements and Models for Wireless Communications Channels. IEEE Communication Magazine, 33 (1) (1995) 42-49
- [8] E. D. Kaplan.: Understanding GPS: Principles and Applications. Artech House, Boston, MA (1996)
- [9] Tom Goff, Nael B, et al.: Preemptive Routing in Ad-hoc Networks. ACM SICMOBILE, (2001) 43-52
- [10] Michael Gerharz, Christian de Waal, Matthias Frank, Peter Martini.: Link Stability in Mobile Wireless Ad Hoc Networks. In Proceedings of the 27th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks (LCN'02) (2002) 30-39
- [11] Network Simulator: NS2.28 available via web- site <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>

저자소개



김 관 응(Kwan-woong Kim)

1996년 전북대학교 전자공학과
공학사

1998년 전북대학교 전자공학과
석사

2002년 전북대학교 전자공학과 박사

2006년 ~ 현재 원광대학교 전기전자정보공학부 교수

※관심분야: 통신소프트웨어, 트래픽제어, Ad-hoc 네트워킹



김 변 곤(Beon-gon Kim)

1990년 한국항공대학교 항공전자
공학과 공학사

1997년 전북대학교 전자공학과 석사

2003년 전북대학교 전자공학과 박사

2005년 ~ 현재 군산대학교 전자정보공학부 교수

※관심분야: 무선 센서 네트워크, Ad-hoc



김 용 갑(Yong-kab Kim)

1988년 아주대학교 전자공학과 공학사

1993년 알라바마주립대학교 공학석사

2000년 노스캐롤라이나주립대
공학박사

2003년 ~ 현재: 원광대학교 전기전자 정보공학부 교수

※관심분야: 광통신시스템, 무선 네트워크, 전력선통신