

리소스가 한정된 국지형 로봇들의 제어를 위한 네트워크 토폴로지 및 라우팅

여희주
대진대학교 전자공학과

Network Topology and Routing for Controlling Resource Constrained Local Robots

Hee-Joo Yeo
Department of Electronic Eng., Daejin University

요 약 최근에 광대역 무선센서 네트워크 기술들이 발달되면서 지역이나 위치에 대한 제약이 없어지면서, 네트워크를 이용하여 다양한 종류의 로봇들의 리모트 제어가 가능하게 되었다. 또한 네트워크의 전송속도 및 성능이 향상되면서 간단한 로봇 제어를 떠나서 대용량의 실시간 동영상 데이터까지도 실시간으로 전송이 가능하게 되었다. 하지만, 이런 목적과 성능을 달성하기 위해서, 여전히 복잡하고 고비용의 네트워크 프로토콜과 토폴로지가 요구되며, 이를 구현하기 위해서는 고가의 하드웨어 디자인 또는 장비들을 사용하여 구현하여야만 하였다. 또한 이런 장비들을 운영하기 위해서는 고비용의 리소스가 요구되며, 리소스가 한정된 특수한 환경의 로봇들에 적용하기에는 실질적으로 불가능하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서, 먼저 네트워크 프로토콜을 선정함에 있어서 대용량의 데이터 전송이 가능하면서 전력을 최소로 소비하는 블루투스 프로토콜을 선정하였고, 블루투스의 네트워크 프로토콜을 변경하여 복잡한 센서 네트워크를 지원할 수 있도록 새롭게 제안하였다. 또한 기존의 네트워크 토폴로지들은 좁은 지역이나 한정된 공간에 분포된 리소스가 한정된 로봇들에게는 적합하지 않아, 새로운 블루투스 네트워크 프로토콜에 적합한 네트워크 라우팅 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 이런 새로운 네트워크 기술을 하이브리드 네트워크 토폴로지로 명칭하고 기존의 네트워크 토폴로지의 방법들과 비교 하고 대비를 하였다.

Abstract Many broadband wireless sensor network technologies have been developed recently, and the speed and performance of network communication have also improved dramatically. Hence, these networks can support real-time streaming services to transfer massive volumes of data like video and audio. However, it may require complex and expensive network devices to achieve this high speed and performance of data transmission. However, it should almost be impossible for the resource-limited robots to operate within limited resources, given the situation of the network communication technology. Hence, this paper chose the Bluetooth protocol to overcome this situation. The Bluetooth protocol can transfer a large amount of data by consuming relatively small power compared to other protocols like ethernet. However, since the Bluetooth protocol was not designed ideally for a sensor network, this paper proposed a modified Bluetooth network protocol. Furthermore, since the existing network topologies are too much over-specified to apply to the resource-limited robots in the small designated area, this study proposed a new adequate routing method. Subsequently, this paper called this new network technology the hybrid network topology and compared its efficiency with other existing methods.

Keywords : Robot, Network, Topology, Bluetooth, Routing

*Corresponding Author : Hee-Joo Yeo(Daejin University)

email: hjyeo@daejin.ac.kr

Received October 26, 2021

Accepted January 7, 2022

Revised December 1, 2021

Published January 31, 2022

1. 서론

최근 네트워크 기술의 성능 및 가격 면에서 여러 가지 장점들이 부각되면서, 리소스가 한정된 소형 로봇들을 위한 네트워크 관련된 기술들이 발전하게 되었으며, 다양한 연구 및 산업들에 응용 및 적용되어져 왔다[1-3].

하지만, 대부분의 네트워크 기술이나 장비들은 사이즈나 비용이 많이 요구되기 때문에, 소형의 리소스가 제한된 로봇에는 이런 네트워크의 기술을 적용하는데 한계가 있기 때문에, 이런 리소스가 제한된 로봇의 경우에는 최소한의 리소스를 사용하여 센서값을 측정하는 연구가 많이 이루어졌다[4]. 리소스가 제한된 로봇들이 하나의 센서 노드로 동작하고, 이런 센서 노드들이 좁은 지역에서 많이 분포되어 있을 때, 이들을 연결하기 위한 센서 네트워크 기술이 발달되어져 왔다[5].

특히 센서 네트워크를 구현하기 위해서 사용하는 근거리 무선통신(블루투스(Bluetooth), 지그비(Zigbee)와 와이파이(Wi-Fi)가 하드웨어 성능, 사이즈 및 비용면에서 많이 향상되어져 왔다. 이런 각각의 네트워크 프로토콜은 서로 데이터 전송량과 전송거리, 파워 등의 장단점들이 있기 때문에, 개발목적에 따라 적합한 프로토콜을 선정하여야 한다[6].

본 논문에서는 리소스가 한정된 로봇들을 네트워크로 연결할 때 무선센서 네트워크의 한계와 문제점들을 다시 살펴보고, 새로운 무선 네트워크 프로토콜을 제시하였다. 실제로 블루투스 네트워크에 새로운 무선 네트워크 프로토콜을 적용하여, 대용량의 센서 데이터를 전송함으로써 전송률과 센서 노드의 개수에 따른 연결 지연률 관계를 보였다.

2. 하드웨어의 설계

2.1 메인 보드 및 네트워크 모듈

리소스가 한정되어 있어서 Wi-Fi와 같이 파워 소비가 많은 네트워크를 사용할 수가 없어, 파워 소비가 적은 반면에 데이터 전송량이 높은 블루투스를 채택하여 하드웨어를 설계하였다. Fig. 1(a)와 같이 블루투스 모듈을 부착하여 무선센서 네트워크를 구성할 수 있게 디자인하였다. 이와 같이 블루투스를 이용하여 무선센서 네트워크를 구성함으로써, 로컬 지역적으로 분산된 리소스가 한정된 로봇으로부터 대용량의 데이터들이 블루투스 네트워크로 통신을 한다.

이와 같은 디자인 목적을 달성하기 위해서, 시스템 하드웨어를 제작할 때 아래의 필요한 디자인 요소들을 고려하여 제작하였다.

- **소형 및 저전력** : 여러가지 통신 프로토콜 중에서 소형/저전력/대용량 데이터 전송이 가능한 블루투스 적용
- **프로세서** : 소형 및 저전력으로 많이 사용하는 프로세서인 ATmega128 적용
- **센서** : 대용량 데이터를 발생하는 카메라센서

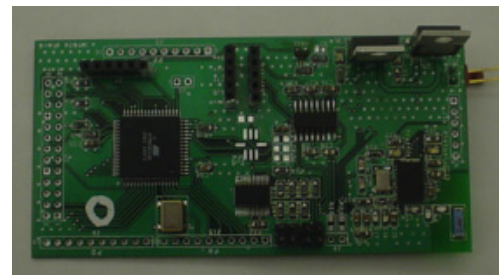
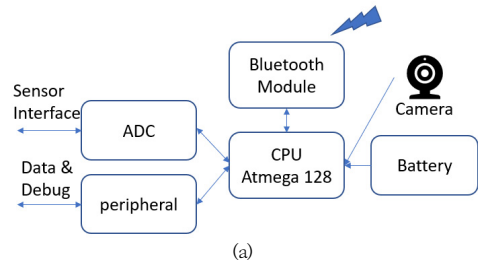


Fig. 1. Resource constrained small-size robot controller (a) System block diagram, and (b) Initial testing prototype board using Bluetooth module.

2.2 소프트웨어 구성

본 논문의 시스템에서는 리소스가 한정된 로봇들이 네트워크상에서 통신할 때의 효과와 결과를 보이기 위해, 최소한의 소프트웨어의 모듈을 사용하였고, 불필요한 소프트웨어 모듈들은 성능향상을 위해서 최소화하거나 완전히 제거하였다.

따라서 본 논문에 사용된 소프트웨어는 CPU (ATmega128)에서 실시간 운영체제(RTOS)는 사용하지 않고, 이런 운영체제 없이 베어메탈(bare metal) 펌웨어(firmware)만으로 구성하였다[7].

3. 무선통신 프로토콜 및 성능

3.1 무선통신 프로토콜 선정

여러 종류의 무선통신 프로토콜이 존재하는데, 각각의 장단점으로 인하여 개발목표에 맞추어 최적으로 선정하여야 한다. Table 1에서 보인바와 같이 각각의 데이터 전송률, 파워와 사이즈에 따라 특징을 가지게 된다[2].

Table 1. Relative comparison over wireless communication protocols

| Protocol | Data Rate | Power Consumption | Size |
|-----------|-------------------------------------|-------------------|-------|
| Bluetooth | high 1Mbps(R2.0) 25Mbps(R4.0) | medium | small |
| ZigBee | low (<250Kbps) | low | small |
| Wi-Fi | high (1Gbps) | high | big |

본 논문에서는 소형 및 저전력이 요구되기 때문에, 와이파이는 선정에서 제외하였고, 고용량의 데이터를 전송하기 위해서, 지그비 대신에 블루투스를 선택하였다. 이런 블루투스 네트워크 프로토콜은 소규모 네트워크로써 마스터와 슬레이브의 피코 네트워크(piconet) 구조로 가지고 있기 때문에, 센서 네트워크의 형성이 불가능하다. 따라서 센서 네트워크를 구성할 수 있게 블루투스 네트워크의 통신 스택(stack)을 변경하여, Fig. 2(a)와 같이 주변환경에 따라 블루투스의 노드들이 마스터와 슬레이브가 동시에 지원이 가능하도록 변경하였다. Fig. 2(b)의 테스트 보드들을 사용하여 테스트를 수행하였습니다. 이와 같은 새로운 블루투스 네트워크 프로토콜을 적용하여, 블루투스의 통신 대역폭(bandwidth)을 최대한 이용하면서, 센서 네트워크의 구성이 가능해졌다.

3.2 블루투스의 네트워크 토폴로지(Topology)

원래 블루투스 프로토콜의 목적은 근거리 (room distance) 디바이스들을 1:1로 연결시키기 위해서 사용되는 소규모용 토폴로지로서 피어 투피어(peer-to-peer) 네트워크로 잘 알려져 있다. 블루투스는 하나의 마스터(Master(M))에 여러 개의 슬레이브(Slave(S)) 장치를 연결하는 방식이어서 장거리나 많은 수의 장비들을 연결할 수 없는 단점이 존재한다. 따라서, 이런 방식으로는 여러대의 장비들에 대해서 네트워크 라우팅을 형성할 수 없기 때문에, 본 논문에서는 새로운 블루투스 토폴로지를 제안하고,

Fig. 2와 같이 각각의 블루투스 노드들이 마스터와 슬레이브의 기능을 다 할 수 있게 블루투스 네트워크로 바꾸었다. 따라서, 각각의 블루투스 노드들이 마스터와 슬레이브 기능을 가질 수 있게 구현하였다.

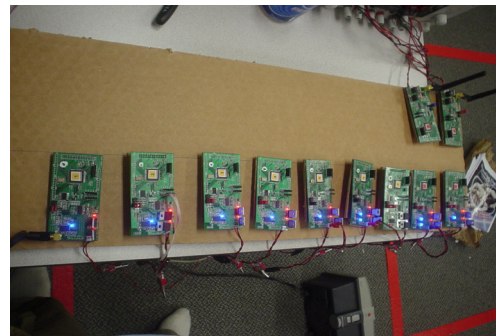
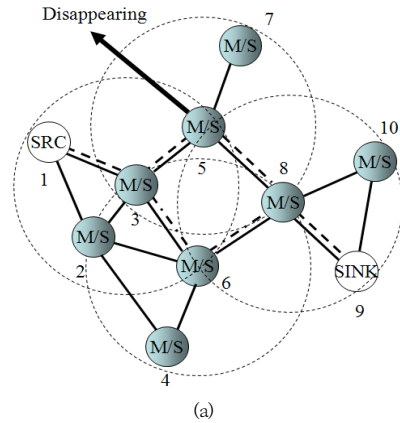


Fig. 2. (a) All Bluetooth nodes show the capability for Master(M)/Slave(S) to flexibly adjust the network routing (b) Actual sensor nodes test boards before distribution testing.

3.3 라우팅 프로토콜

애드혹 라우팅(AdHoc routing)은 크게 2가지, 프로액티브(proactive) 또는 리액티브(reactive)로 나누어질 수 있고, 각각 테이블과 소스지향(source-initiated) 라우팅 방법들이 존재한다.

- **프로액티브 라우팅** : 이런 형태의 라우팅은 노드들의 변화에 따라서 지속적으로 라우팅 정보를 업데이트하고, 이런 업데이트 때문에 유지비용이 증가하나 라우팅 적응 속도는 빠르다 (Destination Sequenced Distance Vector routing (DSDV)[8]).

- **리액티브 라우팅** : 이런 형태의 라우팅은 라우팅 업데이트 요구가 있을 때만, 라우팅 정보를 업데이트하기 때문에 유지비용은 저렴하나 노드들의 변화에 대한 대응이 느리다(Ad-hoc On-demand Distance Vector (AODV)[9]).

기존의 DSDV는 각각의 노드들이 변화가 생길 때마다 노드 업데이트를 보내고 실제로 액티브 통신선로와 관련 없는 부분까지 업데이트하기 때문에[10], 본 논문과 같이 소규모 네트워크에서는 노드 유지비용이 비싸다. 따라서, 본 논문에서는 리액티브 라우팅에 노드의 변화에 대해서 업데이트를 바로 하지 않고, 캐쉬하고 있으면서 노드의 변화가 사용하고 있는 통신 선로에 연관이 있을 때만 업데이트 할 수 있는 Fig. 3과 같이 적응형(Adaptive) DSDV 라우팅 방법을 제시하였다. 업데이트 룰은 아래의 시간과 상황에 따른 조건들을 만족하였을 때, Eq. (1-3)을 사용하여 라우팅 테이블을 업데이트하였다.

- Time :

$$\Delta t = \min(t_{max}, t_{current}) \quad (1)$$

t_{max} - Maximum time allowed, $t_{current}$ -

Current time duration

if($\Delta t \geq t_{max}$), 업데이트 라우팅 테이블.

- Condition :

if(Active), Update the routing table (2)

if(NOT active), Cache the changes for the next active. (3)

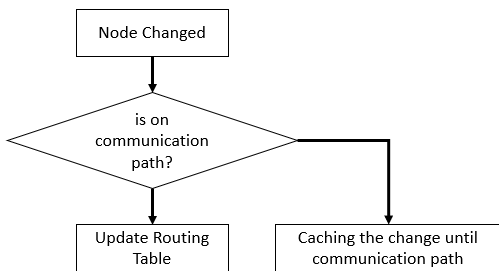


Fig. 3. Update Routing Algorithm with node changes.

3.4 데이터 전송률 및 성능 평가

본 논문에서 사용한 네트워크 데이터에는 아래와 같이 크게 두 가지로 나누어진다.

1) **라우팅 업데이트 정보** : 센서 네트워크를 유지하기 위해서 라우팅 변화에 대한 라우팅을 유지하기 위한 정보 (Table 2).

2) **데이터 정보** : 데이터를 전송하기 위한 데이터 정보 (Table 3). 데이터 전송률을 평가하기 위해서, 대용량의 테스트 동영상 데이터(640 x 480픽셀, 30 frames/sec)를 전송하였다.

Table 2. Packet information for routing management table

| No. | Contents | Bytes | Offset |
|-----|-------------------------|-------|--------|
| 1 | start demlimiter | 1 | 0 |
| 2 | packet id | 1 | 1 |
| 3 | time to be sent | 4 | 2 |
| 4 | command | 1 | 6 |
| 5 | source id | 4 | 7 |
| 6 | target id | 4 | 11 |
| 7 | number of changed links | 4 | 15 |
| 8 | information of change | vary | vary |
| 9 | end delimiter | 1 | vary |

Table 3. Packet information for sensor data

| No. | Contents | Bytes | Offset |
|-----|------------------------------|-------|--------|
| 1 | start demlimiter | 1 | 0 |
| 2 | packet id | 1 | 1 |
| 3 | time to be sent | 4 | 2 |
| 4 | command | 1 | 6 |
| 5 | source id | 4 | 7 |
| 6 | large data (like image data) | vary | 11 |
| 7 | end delimiter | 1 | vary |

DSDV와 A-DSDV의 라우팅 테이블을 업데이트하는 네트워크상의 부하를 Fig. 4(a)와 같이 비교하였을 때, 실제 전송량에서 A-DSDV가 좀더 효율적으로 라우팅 테이블을 유지하고 있어서, 네트워크상의 부하를 최소화하였다.

실제 데이터 전송 패킷과 라우팅 테이블 데이터를 동시에 적용하여서, 각각의 라우팅 프로토콜을 비교하였을 때, A-DSDV가 다른 라우팅 방법들에 비하여 Fig. 4(b)와 같이 최소의 노드 연결 부하(connection overhead)를 가지면서, Fig. 4(c)와 같이 네트워크 복구 능력도 DSDV와 거의 동일한 성능을 보여주었다.

4. 결론

본 논문에서는 로컬지역으로 분포되어 있는 리소스가 한정된 로봇들이 동영상과 같은 대용량의 데이터를 전송함에 있어서 필요한 네트워크 블루투스 프로토콜을 분석하여 새로운 방식의 블루투스 프로토콜을 제시하였다. 또한 이와 같은 블루투스 프로토콜을 적용하여 본 논문의 환경에 적합한 A-DSDV 방법을 제시하였다.

새로운 라우팅 방법으로 A-DSDV는 다른 라우팅 방법에 비하여 본 논문의 환경에 가장 적합하였고, 다른 라우팅 방법들과 비교하여 본 결과 네트워크의 노드 연결 오버헤드가 줄어들었다.

본 논문의 새로운 A-DSDV 방법을 사용하여 네트워크 센서 노드들의 온/오프나 유동성의 변화가 많이 요구되는 소규모 사업장이나 현장에서 다수의 센서 노드들을 운영할 때, 손쉽게 네트워크를 구성할 수 있으며, 네트워크 부하가 현저히 줄어들어 네트워크 유지 및 관리비용을 현저히 줄일 수 있게 되었다.

References

- [1] Wang, Z. and *et al.*, "Ad-hoc robot wireless communication", Oct 2003.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/ICSMC.2003.1244520>
- [2] Slyusar, K., and Kulich M., "FRAMEWORK FOR AD HOC NETWORK COMMUNICATION IN MULTI-ROBOT SYSTEMS", 2005
DOI: <http://dx.doi.org/10.14311/APP.2016.6.0018>
- [3] I.F. Akyildiz and *et al.*, "Wireless sensor networks: a survey" Elsevier Volume 38, Issue 4, pp393-422, March 2009.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](https://doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4)
- [4] Marin, L. and *et al.*, "Multi Sensor Fusion Framework for Indoor-Outdoor Localization of Limited Resource Mobile Robots" pp14133-14160, August 2013.
DOI: <https://doi.org/10.3390/s131014133>
- [5] Ryu, J. and *et al.*, "A Review on Sensor Network Issues and Robotics", Volume 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2015/140217>
- [6] Danbatta, S. and *et al.*, "Comparison of Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, and Bluetooth Wireless Technologies Used in Home Automation" 2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), July 2019.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISDFS.2019.8757472>
- [7] Hee-Joo Yeo, "Data Analysis and Processing Methods of Magnetic Sensor for Measuring Wrist Gesture",

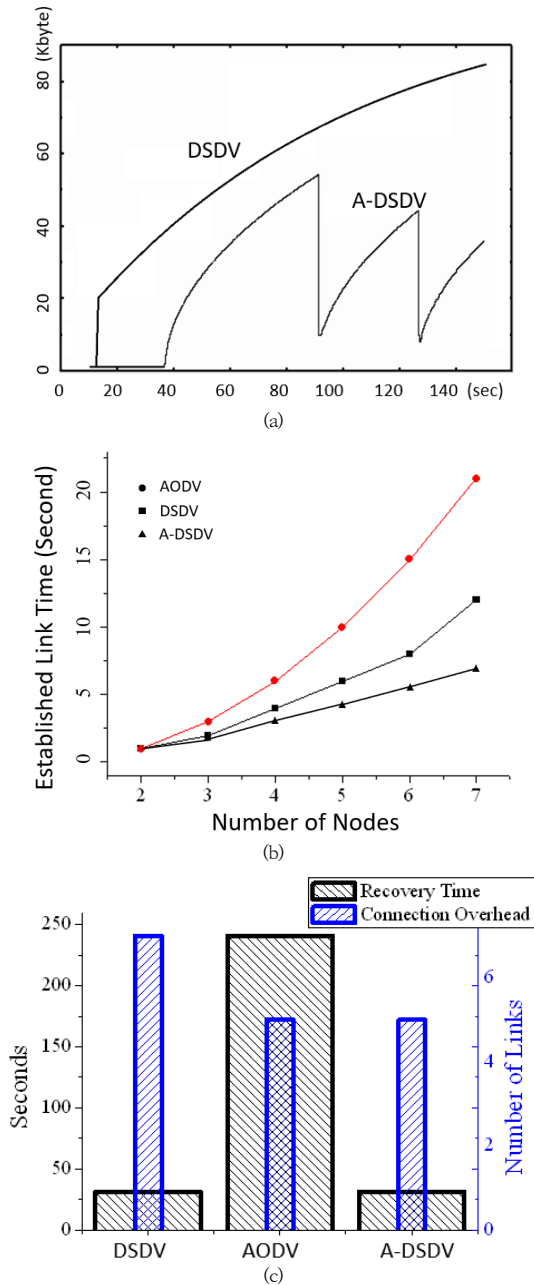


Fig. 4. Comparison over routing protocols. (a) Routing packet to maintain routing table. (b) Average connection latency vs number of sensor nodes. (c) Recovery time and connection overhead.

Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, Vol. 21, No. 11, pp.28-36, 2020.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.11.28>

- [8] C. E. Perkins and P. Bhagwat., "Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing(dsdv) for mobile computers.", in Computer Communications Review, pp. 234-244, Oct. 1994.
DOI: <https://doi.org/10.1145/190809.190336>
- [9] C.E. Perkins and *et al.*, "Ad-hoc on-demand distance vector routing", Proceedings WMCSA'99. Second IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCSA.1999.749281>
- [10] S. Nithya and *et al.*, "Destination-sequenced distance vector routing (DSDV) using clustiner approach in mobile adhoc network", 2012 International Conference on Radar, Communication and Computing (ICRCC)
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICRCC.2012.6450604>

여 희 주(Hee-Joo Yeo)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한양대학교 전자공학(공학사)
- 1990년 2월 : 한양대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1997년 2월 : 한양대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1997년 3월 ~ 현재 : 대전대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

센서기반 제어시스템, 임베디드시스템, 다중로봇시스템의 협조제어