

データ集約を行う代理通信制御を用いた高信頼無線通信の 実車評価

国立 忠秀^{1,2} 木下 和彦³ 渡辺 尚²

概要: 将来, 車載センサの重要性が増加し, 多くのセンサが車両に搭載されると考えられる. そこでセンサを接続する電線の省線化に無線ネットワークの利用が考えられている. 一方で, 自動車内は狭く金属で覆われた狭い空間で, シートやハンドルなどの装置が多数あることに加え, 乗員の影響で激しいマルチパス環境になる. さらに, 自動車内の機器間通信への要求は厳しく, 成功率は 99.999% で遅延制約は 20ms である. 本稿では, 自動車に搭乗する乗員数が電波環境に大きく影響することを, 電波暗室における実車を用いた測定で明らかにした. さらに, これまでに提案した, 通信が失敗した場合に中継ノードを利用する手法と, 同じ宛先のパケットを 1 つのパケットに集約する手法を無線端末に実装し, 実車両で通信実験を行った. 実験結果より, 実環境において本方式を用いることで, 十分高い通信品質を実現できることが分かった.

Experimental Evaluations of Reliable Wireless Communications Based on Substitute Forwarding with Data Aggregation in Vehicles

TADAHIDE KUNITACHI^{1,2} KAZUHIKO KINOSHITA³
TAKASHI WATANABE²

1. はじめに

無線通信は通信業界で最も急速に成長している分野である[1]. 情報化社会における IoT (Internet of Things) の革新により, 家具や家電製品など現実世界に存在する様々なものにセンサを取り付けてインターネットに接続する IoT (Internet of Things) が研究されている[2]. また, ICT 機器内のセンサ接続, 航空機内のコンピュータ接続, 衛星内のサブシステム間接続, 自動車のエンジンルーム内のセンサ接続なども検討されている.

自動車においては, 車両の特性や運転者の注意力を感じてドライブをサポートすることが積極的に研究されている[3]. このような研究では, センサは安全で快適な運転のために重要な役割を果たす[4]. 快適性に対しては乗員センサ, 心拍・呼吸センサ, 温度や湿度センサ, 利便性に対してはライトセンサ, レインセンサ, エンジンセンサがそれぞれ利用される[4][5]. 更に将来的には, 車載センサの重要性が増加し, 多くのセンサが車両に搭載されると考えられる. これに伴い, 車内の電線も年々増加すると予想される. 自動車をはじめ多くの機器では, 電源を供給する電線と信号を伝送する電線が用いられる. 特に自動車においては,

複数の電線を束にしたワイヤーハーネスによる組付けが行われる. ここで電線が増加すると, ワイヤーハーネスも大きく重くなるため, 電線の省線化は重要である. そこで, 信号線の増加に対応するためにネットワークの利用が考えられているが, 依然として電線が増加する傾向は続いている[6].

近年は, サイズが小さく設置の自由度の高い無線センサノードを用いて情報収集することで, 車両における快適性と利便性を向上させる研究が行われている. センサを接続するためのワイヤーハーネスは, ハンドルやシートなどを避けて配線しなければならないことから, 配索を考えなくてよい無線接続が注目されている. 一方で, 自動車内は狭く, 金属で覆われた狭い空間で, シートやハンドルなどの装置が多数あることに加え, 乗員の影響で車内は激しいマルチパス環境になるため, 無線接続を利用する場合は電波環境の急激な変化が問題となる[7]. 従来の無線ネットワーク規格は, 実際の車載環境における信頼性が不十分である. 加えて, 車両内の機器間通信において, 要求される成功率と遅延制約は厳しい課題がある. 車両の走行に関わらない機器間の通信でも成功率は 99.999% で遅延制約は 20ms である[8].

これまでに著者らは, 自動車内で無線を利用した際の自動車内の位置による電波環境の様子と, 4 人乗車時の時間に時間による変化を明らかにした. また, オーバーヒアリ

1 矢崎総業 (株) 技術研究所
2 大阪大学 大学院情報科学研究科
3 徳島大学 大学院社会産業理工学研究部

ングとデータ集約を用いることにより、高品質な通信を達成した[9][10].

本稿では、電波暗室において実車を利用した測定により、乗員数の違いによる電波環境の違いを明らかにし、提案した通信制御手法を実装し、車両で通信実験を行った結果を示す.

以降、2 章で乗員数による自動車内の電波伝搬の様子を示し、3 章で関連研究を、4 章では本稿で対象としたシステムに、提案手法を実装した端末を用いた実験評価を行い、5 章でまとめとする.

2. 車内電波伝搬特性

2.1 車内における伝搬特性

空間における理論上の伝搬ロス L は、式 1 により計算される[11].

$$L = 20 \log \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right) \quad (1)$$

ここで、 r は送信ノードからの距離(m)で、 λ は波長(m)である.

しかし、車内は金属で覆われた小さな空間で、キャビン内の電波は、座席、乗組員および/または他の装置によって中断される. このため、車室内が式(1)で示すような距離に依存する一様の電波伝搬特性を持たない. これまで著者らは、複数の車両におけるキャビン内の電波伝搬の状態を測定し、車両形状による特性を明らかにしている[9]. この結果より、車両形状によって伝搬損失の最大値が異なるものの、その傾向は同じであることを明らかにしている.

2.4GHz における車両内の伝搬損失の測定結果を図 1 に、4

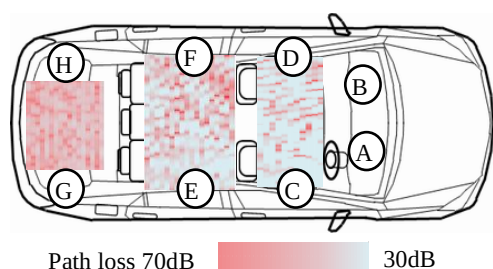


図 1 車内における伝搬損失.

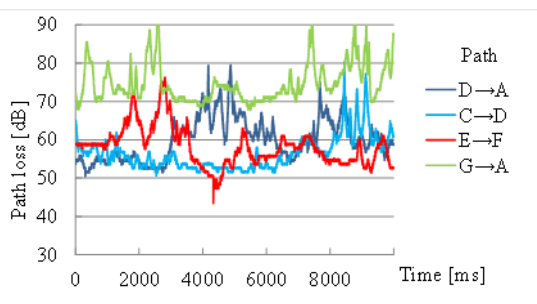


図 2 4 人乗車時の伝搬損失変化.

人が乗車した際の伝搬損失の変化を図 2 に示す.

2.2 乗員数による影響

自動車の乗員は、利用者や利用目的によって変化すると考えられる. そこで、乗員数による伝搬損失の状況の違いを評価するため、電波暗室において実車を利用した測定を行った. 本測定においては、乗員の影響を確認するために、実際の乗員の組み合わせをベースに、図 3 に示す 1 人から 5 人乗車した例を対象にし、図 1 に示す端末 A から H の全ての組み合わせで伝搬ロスを 20 秒測定した. 測定では送信端末を 1 つ選択し、固定のデータを 1ms 毎に送信し続けた. 受信端末ではデータを受信したときの受信信号強度を示す RSSI (Received Signal Strength Indicator Received Signal Strength Indicator) を出力し、7 つの受信端末全てのデータを同時に記録した. 送信電力を 0dBm としたので、受信端末の RSSI が端末間の伝搬損失である.

端末 A は、運転席足元、端末 B は助手席前のグローブボックス内、端末 C-F はドアスイッチ部分、端末 G,H はトランクルーム内の後方でブレーキランプの前方付近である. 車両は[10]で最も伝搬損失の悪化を確認したセダンタイプのトヨタ自動車製カムリ (2006 年製 DBA-ACV40-AEANK) である.

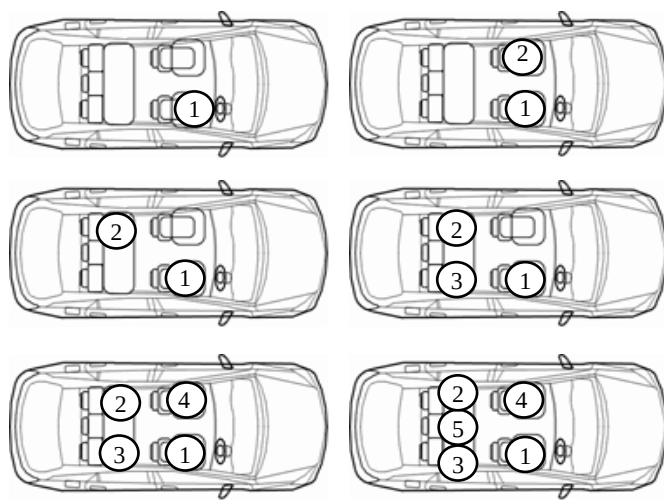


図 3 各乗員数に対する乗車位置.

ここで、運転席乗員は運転動作を、助手席乗員はナビゲーションシステムやオーディオを操作し、後部座席の乗員は座って会話している動作をした.

図 4 に、ノード A からノード H の通信経路における乗員数ごとの伝搬損失の時間経過を、図 5 にノード A からノード F の通信経路における乗員数ごとの伝搬損失の時間経過を示す. この結果の通り、乗員数が増えることで伝搬損失も増加していることが分かる. これらの結果において、測定期間中に伝送損失が急激に増大することが確認された. これは、乗員の人体による遮蔽に加え、個々の動作が重なることによる変化である. 同様の影響により、乗員数の少

ない場合の伝搬損失が、乗員数が多い場合のそれより増加することが確認された。

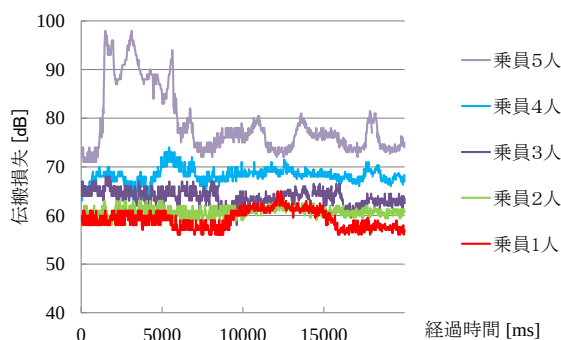


図4 ノードAからノードHへの乗員数に対する伝搬損失の時間変化。

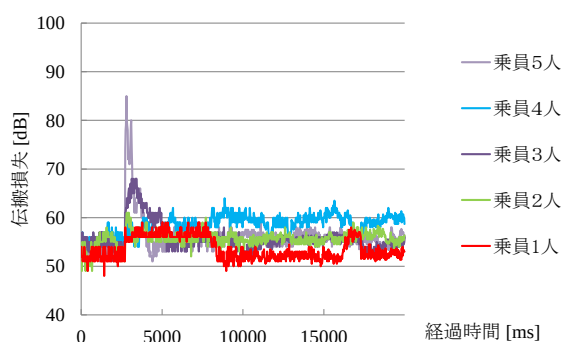


図5 ノードAからノードFへの乗員数に対する伝搬損失の時間変化。

そこで、車内の伝搬損失の傾向を確認するために、図6にそれぞれの乗車状況における電波伝搬の分布結果を示す。車室内全体の傾向を確認するために、測定した伝搬損失のデータ全てを5dB間隔で分類して頻度として示している。結果に示す通り、乗員数によらず、最少損失量に変化はない。これは、端末間の最短距離における空間伝搬損失と一致する。一方、最大損失は乗員数に従って増加する。また、乗員数が増加すると損失の発生範囲も広がり、分散値が増加することから、乗員数と乗員の動作が影響していることが分かる。

3. 関連研究

車両内の環境は、一種の無線マルチホップネットワークとみなすことができ、いくつかの既存の方法を適用することができる。しかし、本稿で想定しているアプリケーションでは、非常に不安定な電波伝搬環境下での遅延が非常に小さく信頼性の高い通信が必要である。

無線マルチホップネットワークにおいて低遅延で短距離伝送に有効な、OLSR (Optimized Link State Routing)がある[12]。OLSRでは、通信の前にすべてのルートが確立されるため、パケットを素早く送信できる。IoT機器など、デバイスが固定されていて金属で覆われたシステムでは、電波環境の影響がそれほど激しくないため、有効に機能する。しかし、自動車のように全てが金属で覆われておらず、人ではない。

そこで、通信が開始されるときに最適な経路を選択する

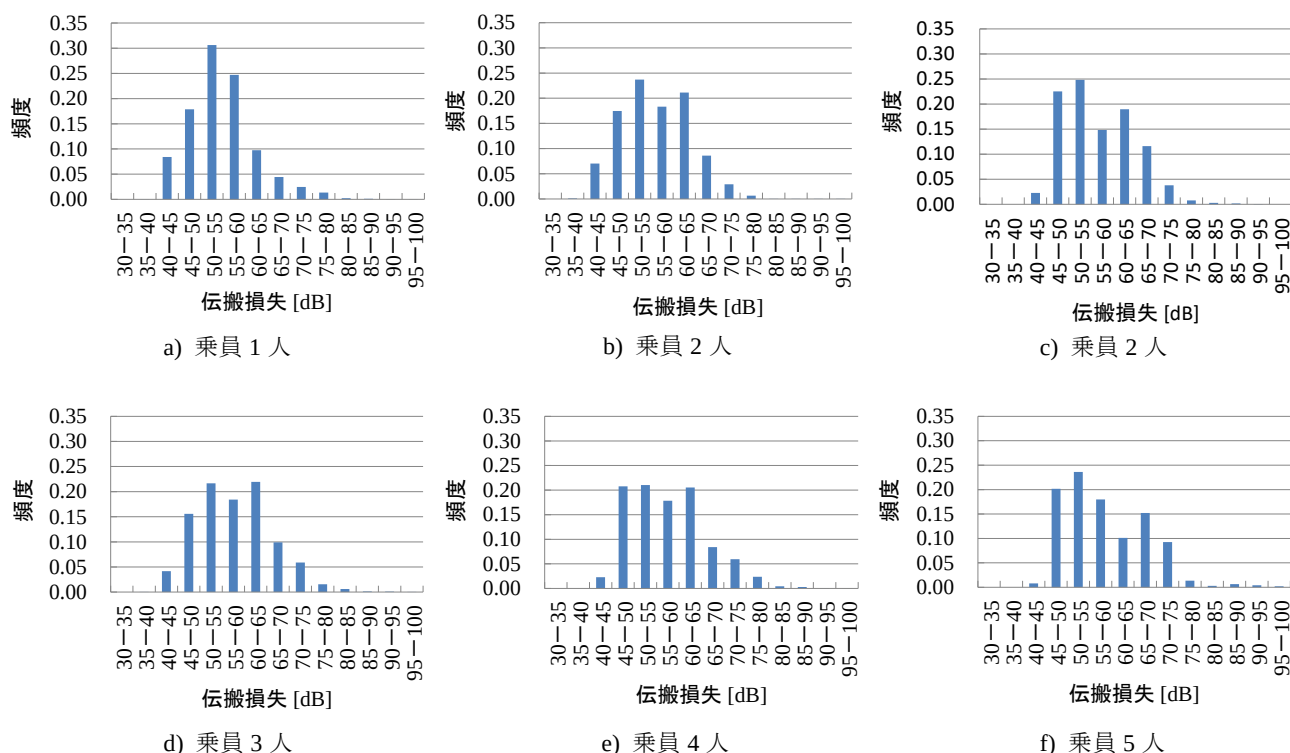


図6 各乗員数に対する伝送損失の頻度。

AODV (Adhoc On-demand Distance Vector routing)がある[13]. AODV は, RREQ (Route Request)および RREP (Route Reply)パケットにより最適な経路を構成し, この情報を基にデータパケットの送信を開始するため, モビリティの高いノードが存在する場合や, ネットワークへノードの出入りが行われる場合において有効に機能する. しかし, 通信遅延は経路設定のオーバーヘッドにより大きくなる傾向がある.

[14]は, UWB-IR を使用してケーブルの軽量化と保守の簡素化を図っている. これは, 理論的に導出した電波伝搬環境に基づき, 理想的な無線端末の配置を提案している. この配置は, 車両内のスイッチやモータなど, 実際のデバイスの位置とは一致しない.

[15]は, UWB-IR における自動車内電波伝搬特性にもとづき設計を行った, ターボ符号化 8 値パルス位置変調 (PPM)を実装し, 実車による通信実験で高品質を実現している. この結果は, 車内ループを起点とし運転席足元とトランクとの間のビットエラーレートによる評価であり, 実際の通信による評価がされていない.

MHVB などのゴシッププロトコルは, 宛先ノードまでの距離と周囲の端末数に基づいて効率的にフラッディングを行う[16]. しかし, 短時間での伝搬損失の変動は考慮していないか無視している.

遅延を抑えて通信を確実に行う通信方法として, オーバーヒアを用いた方法が提案されている. [17]では, ブロードキャストベースで中継を繰り返す際, オーバーヒアを利用して他のノードが中継を行ったことを確認して, 中継動作を削減することにより, 衝突を軽減して成功率を向上させている.

モビリティの高い環境への手法として OR (Opportunistic routing) が提案されている[18]. 特定の経路に依存しないパケットを中継することにより, 電波環境変動に応じた通信を実現する. OR は, 通信成功率, 受信電力等を定期的に取得し, 適切な経路を選択することで, トポロジや電波環境の変化に対応するが, 遅延制約は考慮されていない.

いずれの方法も, 短時間に激しい電波環境変動する環境において, 低遅延で高い通信成功率を同時に達成するものはない.

4. 車内通信実験

4.1 対象とするシステム

将来自動車に搭載されるセンサには様々なものがある[3][4][5]. 将来, 自動運転が実現される状況では, 車両内での快適利便の要求が高くなる. 快適利便を実現するため, 車両内の乗員の状態をモニタする必要が高まると予想され

る. そこで本稿では, 車両内のセンサとしてシートセンサを取り上げる. さらに, 今後, 電気自動車 (EV)の普及が予想される. EV では, 多くのリチウムイオンバッテリーが使われると予想される. リチウムイオンバッテリーは, 容量が大きく電圧が高いため非常に危険で, バッテリー状態を常にモニタする必要がある. 通常, リチウムイオンバッテリーをモニタする IC と, バッテリー監視装置は異なる場所に配置されるため, 信号線の配線に課題がある. 本稿でも先行研究同様にバッテリーマネジメントシステムの通信を対象とした[19]. 実験では, システムの簡略化のため, 複数配置されるリチウムイオンバッテリーのセンサから, 代表的な 2 点を選択した. その位置は, 図 1 の G,H である. シートセンサは, 各シート横のドアスイッチ部分に設置し図 1 の C,D,E,F である. センサの集約ノードの位置は, インストルメントパネル周りで図 1 の A および B である.

4.2 実車を用いた自動車内通信実験

実験に用いた通信端末を図 7 に示す. 通信端末に, [9][10]でシミュレーションにより高品質の達成を確認した, オーバーヒアリングとデータ集約手法を実装した.



図 7 提案手法を実装した通信端末

無線モジュールは, アナログデバイセス社の ADF7242 を用いた[20]. 周波数は 2.4GHz で, ビットレートは 1Mbps である. アンテナは水平面内にほぼ無指向性の特性を持つ. 送信電力は, 周囲への影響を小さくすることを考慮して, -35dBm とした. 受信感度は-95dBm である. 制御用マイコンから 500ms 周期でデータ発生させた. 受信端末でデータの抜けを確認できるように, 通信データに連続するシリアル番号を付与した. また, 送信端末でデータを送信した時にシリアルインターフェイスより端末外部へ送信データを出力し, 受信端末でもデータを受信した時にシリアルインターフェイスより端末外部へ受信データを出力した. これら 2 つのシリアル出力の時間差から遅延時間を測定した. なお, 実験時間の都合でデータ発生数は, パス毎に 1000 回である.

電波暗室において, 2 章で用いたトヨタ自動車製カムリを用いて, 開発した無線装置による自動車内通信実験を行った. 実験に使用した自動車の外観を図 8 に示す.



図 8 実車を用いた実験の様子（車両の外観）

表 1 実験を行った通信区間

Path1	Path2	Path3	Path4
E→A	F→A		
G→B	H→B		
E→A	F→A	G→B	H→B
C→A	D→A	E→A	F→A
E→A	F→A	G→A	H→A
C→B	D→B	E→B	F→B
E→B	F→B	G→B	H→B

表 2 各経路における通信成功率

Path1	Path2	Path3	Path4
1.000	1.000		
1.000	1.000		
1.000	1.000	1.000	1.000
0.998	0.997	0.995	0.999
0.997	0.999	0.997	0.998
0.999	0.998	1.000	0.996
0.998	1.000	0.999	0.998

提案方式の効果を明らかにするために、データが同時に複数発生する条件のみで実験を行った。また、ターゲットであるシートセンサとバッテリーセンサの通信を取り上げ、表 1 に示す組み合わせで通信を対象にした。シートセンサが Sink へ通信する例が、ノード E, F からノード A への通信で、バッテリーセンサが Sink へ通信する例が、ノード G, H からノード B への通信である。また、シートセンサ全てが動作して Sink へ通知する例と、バッテリーセンサ複数動作している例も行った。バッテリーセンサが複数動作する例では、後部座席のノード E, F をバッテリーセンサとみなした。更に追加として、シートセンサおよびバッテリーセンサの通信先を変化させた例も実施した。

結果は表 2 の通りである。ここで、許容伝送遅延を超えているものは失敗しとしている。シートセンサとバッテリーセンサが個別に通信している例では、エラーが発生しなかった。また、それぞれが同時にデータ発生していても、異なるノードへの通信では、集約が上手く機能して高い通信

品質を達成した。今回の実験で用いた評価端末は定期的リセットが発生する。このリセット動作が通信中に発生するとパケットが喪失する現象が確認されており、成功率が 0.999 以上にならなかった。結果において、リセット動作の影響を正確に取り除くことができず、表 2 の結果ではそのまま記載した。

以上より、試行回数が少ないが、実端末においても高い通信品質を実現できることを確認した。

なお、実験評価においては、データ発生が短時間に連続させているが、実環境において 4 つの端末が全て同時にデータ発生する確率はかなり低いと考えられる。すなわち、本方式を用いることで十分高い信頼性が見込まれることを確認した。

5. まとめ

本稿では、自動車への乗員数と車内の電波伝搬の特性を明らかにした。従来の提案手法を実端末に実装し、提案方式の効果を評価するため、電波暗室における通信実験を実施した。結果、提案手法を用いることで、実環境を想定した場合に十分に高い通信成功率が得られることを確認した。

今後、提案手法をバスや電車などの大型専用車に適用することも検討する。

参考文献

- [1] G. Andrea, “Wireless communications,” Cambridge university press, 2005.
- [2] L. Atzori, A. Iera, and G. Morabito, “The internet of things : A survey,” Elsevier Computer Networks, vol.54, no.15, pp.27 87-2805, Oct. 2010.
- [3] A. Sahayadhas, K. Sundaraj, and M. Murugappan, “Detecting driver drowsiness based on sensors: a review,” Sensors, vol.12 no.12, pp.16937-16953, Dec. 2012.
- [4] 吉田貴彦, “快適・利便システムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向,” デンソーテクニカルレビュー, vol.17, 2012.
- [5] 野村浩, 酒井峰一, 横山賢一, “安全システムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向,” デンソーテクニカルレビュー, vol.17, 2012.
- [6] 杉村竹三, 杉本薫, “次世代ワイヤーハーネスシステム,” 古河電工時報, no.132, 2013.
- [7] 金森勝美, 国立忠秀, 中川雄太, Xiaojuan Jiang, 藤橋卓也, 渡辺尚, 木村恒人, “自動車内における電波伝搬特性の無線通信への影響,” 電子情報通信学会 ソサイエティ大会, B-5-111, Sep. 2012.
- [8] Christopher A. Lupini, “Vehicle Multiplex Communication – Serial Data Networking Applied to Vehicular Engineering,” SAE, Apr. 2004.
- [9] 国立忠秀, 木下和彦, 渡辺尚, “自動車内における高信頼通信の実証的検討,” 電子情報通信学会論文誌 B, vol.J99-B, no.4, pp.323-333, Apr. 2016.
- [10] T. Kunitachi, K. Kinoshita, and T. Watanabe, “Empirical Discussion of Reliable Wireless Communications in Vehicles,” IEICE TRANSACTIONS on Communications, vol.E102-B, no.4, pp. 751-759, Apr. 2019.
- [11] B. H. Walke, “Mobile Radio Networks Networking, Protocols and Traffic Performance 2nd Edition,” JOHN WILEY & SONS, LTD, p.29, 2001.

- [12]Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” RFC 3626, IETF Network Working Group, Oct. 2003.
- [13]Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing, RFC3561, <http://tools.ietf.org/html/rfc3561>.
- [14]I. Takayama, and A. Kajiware, “Intra-vehicle wireless harness with mesh-networking,” *Antennas and Propagation in Wireless Communications (APWC)*, pp.146-149, Sept. 2016.
- [15]滝沢賢一, 池田浩太郎, 李選幫, 木村恒人, 國立忠秀, 児島史秀, “超広帯域無線システムを利用した自動車内無線通信装置の開発,” *信学技報*, vol.119, WBS2019-1, pp.1-6, May 2019.
- [16]T. Osafune, L. Lin, and M. Lenardi, “Multi-Hop Vehicular Broadcast (MHVB),” *6th International Conference on ITS Telecommunications (ITST 2006)*, pp.757-760, June 2006.
- [17]小泉達也, 笹瀬巖, “エナジーハーベスティング無線センサネットワークにおけるバッテリー駆動のセンサノードによるパケットのオーバーヒアを利用したデータ収集方式,” *電子情報通信学会 技術報告*, vol.112, no.405, AN2012-65, pp.97-102, Jan. 2013.
- [18]N. Chakchouk, “A Survey on Opportunistic Routing in Wireless Communication Networks,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.17, Issue4, pp.2214-2241, Mar. 2015.
- [19]T. Kunitachi, K. Kinoshita, and T. Watanabe, “Reliable Wireless Communications in Battery Management System of Electric Vehicles,” *The 11th International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Networking (ICMU)*, pp.1-8, Oct. 2017.
- [20]ANALOG DEVICES Inc., “Low Power RF Transceivers ADF7242,” <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADF7242.pdf>.