

無線 LAN を利用した車車間無線ネットワークの検討

松本真紀子^{†1} 大西亮吉^{†1} 吉岡顕^{†1} 眞野浩^{†2}

近年, 自動車への無線 LAN の搭載が進められている. 他の車両やホットスポットとすれ違う一瞬の機会を利用した通信を可能とし, 車両同士の中継によって車両のセンシングしたデータを情報センタへ集めるための情報収集インフラの実現に向けて, 本論文では無線 LAN を利用した車載通信システムを提案する. システムは 2 つの技術で構成されており, ひとつは無線 LAN アクセスポイント (AP) の仮想化, もう一つは無線 LAN の初期接続高速化である. 仮想 AP においては, ESSID 切替や IP アドレス割当を独自の手法で行うことにより, 車車間無線ネットワークを構築する. 無線 LAN の初期接続の高速化のために, 認証や IP アドレス割当用のサーバをシステムに内包し, すれ違いの機会でのデータ送信を実現する. プロトタイプシステムを試作し, 無線 LAN AP の仮想化によって車車間無線ネットワークが構成されることを確認した. また無線 LAN の初期接続高速化の評価のために, 無線インタフェースの開放時間を変化させ, 各開放時間内に転送される通常接続と高速接続のメッセージ数を測定した. その結果, 通常接続は無線インタフェースの開放からメッセージ伝送開始まで 5 秒程度要するのに対して, 高速接続は 1 秒目で既に伝送が開始されており, 高速接続によってすれ違いの通信機会を効率的に利用できることを確認した.

Inter-vehicle Wireless LAN Network

MAKIKO MATSUMOTO^{†1} RYOKICHI ONISHI^{†1}
AKIRA YOSHIOKA^{†1} HIROSHI MANO^{†2}

1. はじめに

近年, 自動車への無線 LAN の搭載が進められている [1]. ユーザが持ち込む情報機器と繋がってナビゲーション機能の提供を受ける, 車外のアクセスポイントと繋がって車両の故障診断やソフトウェアのアップデートを享受するなど, 多様なサービスの実現が期待できる. また車両のセンシングしたデータを, 無線 LAN を介して固定網側の情報センタに集めて解析することで, より精度の高い交通情報や付加価値の高い情報を生成することも考えられる. 走行中, 他の車両やホットスポットとすれ違う一瞬の機会を利用した通信が可能となれば, 車両同士の中継によって, 更に多くのデータを情報センタへ集めることができ, 低コストな情報収集インフラの実現も期待できる.

このような情報収集インフラを実現するためには, 無線 LAN の初期接続の高速化やマルチホップの情報伝達が必要となる. 無線 LAN の接続は一般的に数秒~数十秒程度の時間を要するため, 移動に伴い断続的に出現するネットワークを満足に利用できないといった問題がある. 無線 LAN 標準化のタスクグループの一つである IEEE802.11TGai では初期接続の高速化の標準仕様を協議しており, 2015 年完了を目指す [2]. 目標とする性能は 1 接続あたり 0.1 秒以内, 1 秒間に 100 接続とされ, この仕様による解決が期待される. 一方, マルチホップの情報伝達は, 車両の移動に

伴い伝送経路が変化するという問題がある. 伝送経路の動的な構築には主に二つの手法が考えられる. 一つはネットワーク層以下で構築する手法で, アプリケーションは通常のソケット通信を行うことができる. 例として IEEE802.11s メッシュネットワークが挙げられる. もう一つは上位層で構築する手法で, アプリケーションは専用のミドルウェアを介して通信を行うことができる. 例として BitTorrent が挙げられる. 前者は通常アプリケーションで利用できる点, 後者は通常無線 LAN インタフェースを利用できる点がメリットとして挙げられる.

本論文では, 無線 LAN を利用した車車間無線ネットワークの提案と, プロトタイプ試作による動作検証や高速接続性能の評価結果を紹介する. 本論文の構成は次の通りとなる. 2 章で車載通信システムのアーキテクチャ, 及び試作したプロトタイプの仕様を紹介する. 3 章で動作検証や性能評価を行い, 得られた結果について考察する. 4 章でまとめと今後の課題を述べる.

2. 車車間無線ネットワーク

2.1 車載通信システムのアーキテクチャ

無線 LAN を利用した車車間無線ネットワークを実現するために, 図 1 のような車載通信システムを考案した. 車載機はホットスポットなど固定網へ接続する上流接続用と他の車両や情報機器に接続する下流接続用の 2 つの無線 LAN インタフェースを備え, 独立したホストとして機能する. 無線 LAN や IPv4/6 の単純利用によりネットワークを

^{†1} 株式会社トヨタ IT 開発センター
Toyota InfoTechnology Center, Co., Ltd.

^{†2} 株式会社アライドテレシス開発センター
Allied Telesis R&D Center K.K.

構築することを目指し、P2P ミドルウェアでマルチホップの情報伝達をサポートする仕様とした。無線 LAN インタフェースはいずれも高速接続に対応させる。また下流接続用の無線 LAN インタフェースは仮想化したアクセスポイントとし、車間マルチホップ通信用、ユーザ端末への接続用（車内・車外）とする。このため IP アドレス割当機能や認証機能をシステムに内包する。

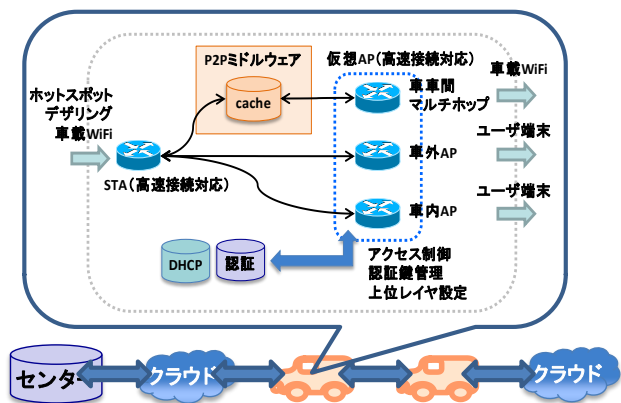


図 1 車載通信システムのアーキテクチャ

2.2 車載通信システムのプロトタイプ試作

2.2.1 プロトタイプのアーキテクチャ

車載通信システムのアーキテクチャの論理構成を明確化する形で、プロトタイプのアーキテクチャ（図 2）を設計した。点線部が車載通信システムに相当する部分であり、実態は 2 つの無線 LAN インタフェースを持つホストコンピュータである。このホスト上に以下の機能要素を実装する。

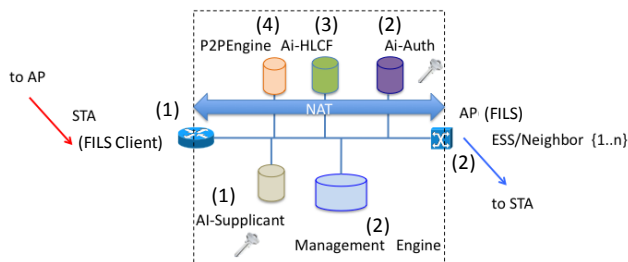


図 2 プロトタイプのアーキテクチャ

(1) 上流接続用無線 LAN インタフェース (STA)

他の車両やアクセスポイントと接続するための無線 LAN インタフェースで、端末 (STA) として動作する。本インタフェースは IEEE802.11TGai においても協議されている、複数の通信プロトコルをまとめることで接続を高速化する仕組み (FILS: Fast Initial Link Setup) を実装する。比較による性能評価のため、設定により高速接続機能の on/off が可能な仕様となっている。また、上流側の認証局 (Ai-Auth) と相互認証するための認証クライアント (Ai-Supplicant) を備える。

(2) 下流接続用無線 LAN インタフェース (AP)

他の車両やユーザ端末と接続するための無線 LAN インタフェースで、アクセスポイント (AP) として動作する。本インタフェースも同様に、高速接続の仕組みを実装し、設定により on/off が可能となっている。また、下流側の接続端末に対する認証局 (Ai-Auth) を持ち、下流側端末の認証クライアント (Ai-Supplicant) と相互認証を行う。このアクセスポイントの識別子 (ESSID) は接続管理機能 (Management Engine) によって設定される。

(3) 下流接続用 IP 層設定 (Ai-HLCF)

IEEE802.11TGai で協議中の IP 層の同時設定で交換される IP 層情報で、従来の dhcp サーバ同様に IP アドレスやデフォルトゲートウェイアドレスの割当を行う。

(4) P2P ミドルウェア (P2P Engine)

すれ違い時にメッセージ等の蓄積情報を交換する情報共有基盤となる。車間無線ネットワークの機能検証に必要最小限の仕様となっており、通信可能な場合に蓄積情報の単純伝送を行うが、メッセージ生成元への伝送を抑止する機能によりループバックを防ぐ。詳細な設計は想定するアプリケーションも含めて別途検討する必要がある。

2.2.2 ハードウェア構成

高速接続の実装においては、無線 LAN のフレームレベルの変更が任意に行える必要があることから、アセロス社製チップセットを搭載した無線 LAN カードを使用した。当該無線 LAN カードは PCI カードバスインタフェースであり、これを 2 つ搭載可能なホストコンピュータが必要となることから、これを実現する Micro ATX 規格のマザーボードとして Asrock B75M を選択した。ハードウェアの構成を図 3、ホストコンピュータの仕様を表 1 に示す。

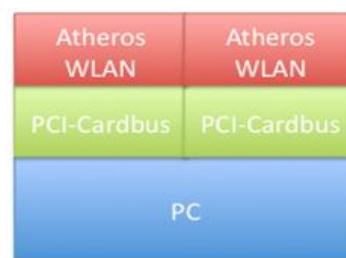


図 3 ハードウェア構成

表 1 ホストコンピュータの仕様

CPU	Intel Celeron G460 (1.5M Cache, 1.80GHz)
マザーボード	Asrock B75M
メモリ	Kingston 4GB 1333MHz DDR3
ケース	KT-6802-PS52
ハードディスク	Intel Boxed SSD 330 Series 120GB
PCI-Cardbus	REX-CBS40 PCカードアダプタ
シリアルI/F	マザーボードシリアル IDC-BB

2.2.3 ソフトウェア構成

プロトタイプを構築するソフトウェアは、図 4 に示す構成にて実装される。

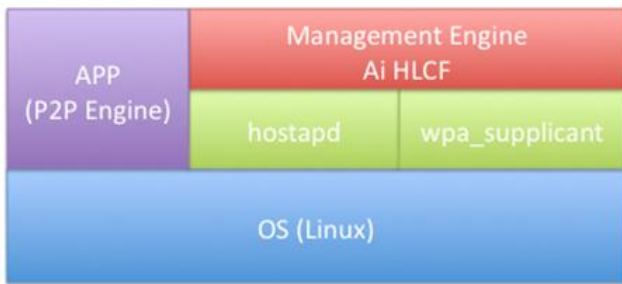


図 4 ソフトウェアの構成

(1) OS

オペレーティングシステムとして Ubuntu 10.10/Linux 2.6.35.14 を採用した。

(2) Ai-Auth, Ai-Supplicant

無線 LAN の AP 機能 (Ai-Auth), STA 機能 (Ai-Supplicant) は、OS のパッケージとして提供されるソフトウェア hostapd, wpa_supplicant に後述の改変を加えて実現した。

(3) Ai-HLCF, Management Engine

新たに開発されたソフトウェアで下流側 IP 層設定 (Ai-HLCF) と ESSID 設定 (Management Engine) の機能を提供する。このソフトウェアは Perl 言語で記述された実行デーモンで、マシンに常駐してサービスを行う。尚、下流から上流への接続には NAT を使用する。

(4) P2P Engine

新たに開発されたソフトウェアで P2P ミドルウェア (P2P Engine) の機能を提供する。このソフトウェアは Python 言語で記述された実行デーモンでマシンに常駐し、無線 LAN の接続状態の監視及び、メッセージの重複チェック、メッセージの転送を行う。

2.2.4 下流接続 AP の ESSID の設定 (無線 LAN AP の仮想化)

Management Engine は、wpa_supplicant のログから上流接続の無線 LAN 端末の状況を確認し、hostapd の設定ファイルにある下流接続の無線 LAN AP 識別子 (ESSID) を以下に示すルールで書き換えたのち、hostapd へ Hup シグナルを送って再起動をすることで、動的に下流接続 ESSID を切替える。

1. 上流接続先がインターネットアクセスポイントの場合、下流接続 AP の ESSID を ToyotaInet 0 とする。更に仮想化によって、ESSID を MyCar とする下流接続 AP をもう一つ用意して、ユーザ端末に対してインターネット接続サービスを提供する。
2. 上流接続先が ToyotaInet n ($n \geq 0$) の場合、下流接続 AP の ESSID を ToyotaInet $n+1$ とする。
3. 上流接続先が ToyotaInet n_{Max} の場合、下流接続しない。ただし、 n_{Max} はマルチホップの上限数。
4. 下流接続 AP の ESSID として ToyotaInet n が先行して

確立している場合、上流接続先は、 $m < n$ となる ToyotaInet m , またはインターネットアクセスポイントのみとする。

5. 上流接続先がインターネットアクセスポイントでない場合は、下流接続 AP の ESSID を ToyotaAdhoc とする。
6. 上流接続先が ToyotaAdhoc の場合は、下流接続 AP の ESSID も ToyotaAdhoc とする。

無線 LAN ESSID の設定は表 2 のようにまとめられる。またネットワーク構成について、インターネット接続がある場合を図 5, ない場合を図 6 に示す。自身の二つのインタフェース (STA, AP) 間のループバック防止は、これらのインタフェースの BSSID でフィルタリングを行うことで実現する。上流接続先が変化した場合には上流側から IP アドレス割当を受けるソフトウェア (dhcpcd) を再起動し、その結果 IP アドレス空間に変更があった場合には、下流接続先に IP アドレスを割り当てるソフトウェア (Ai-HLCF) の設定を変更し再起動する。

表 2 無線 LAN ESSID の設定

上流接続先 AP の ESSID	下流接続 AP の ESSID
Internet AP	ToyotaInet0 MyCar (ユーザ端末用)
ToyotaInet n	ToyotaInet $n+1$
ToyotaInet 上限	Off
上記以外	ToyotaAdhoc

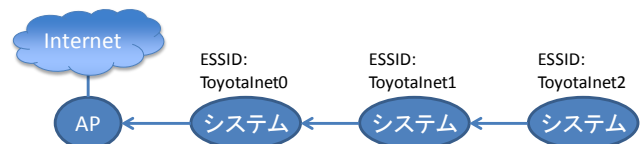


図 5 ネットワーク構成 (インターネット接続あり)

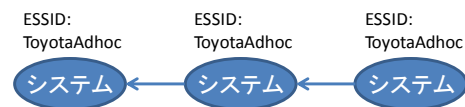


図 6 ネットワーク構成 (インターネット接続なし)

2.2.5 無線 LAN の初期接続高速化

IEEE802.11TGai で協議中の仕様を参考にして、独自に初期接続を高速化する通信プロトコルの試作を行った。通常接続 (WPA2) の認証 (Authentication), 接続 (Association), 鍵交換 (EAPOL-Key), IP アドレス割当 (DHCP) を高速接続 (FILS Association) でまとめて処理する仕組み (図 7) となっている。尚、標準化の現場においては、発見 (Probe) の高速化や、アドレス関連付け (ARP) の部分を FILS Association に含むことなども協議されている。認証は事前共有鍵 (PSK) をベースにしている。

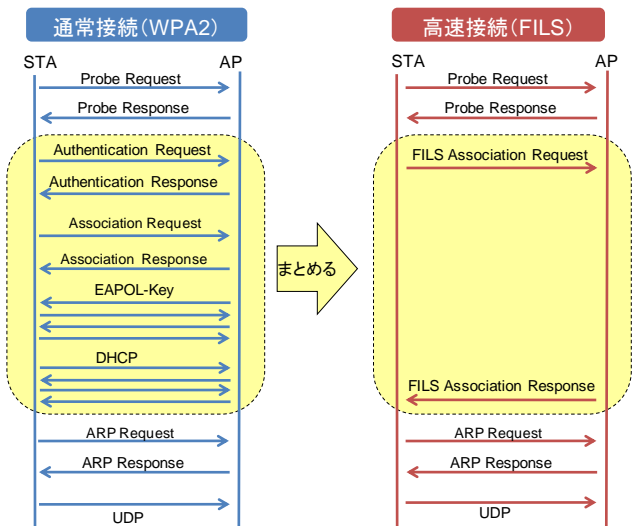


図 7 通信プロトコル

3. 評価検証

3.1 車車間無線ネットワーク形成の確認

3 台のシステムの通信インタフェースを同時に作動させた結果、図 8 のようなネットワークの形成を確認した。上流にインターネットアクセスポイントがある場合は、インターネットに直接接続した車載通信システムの下流接続 AP の ESSID は ToyotaInet0, ToyotaInet0 に接続したシステムの AP の ESSID は ToyotaInet1, その次は ToyotaInet2 となった。上流にインターネットアクセスポイントがない場合は、車載通信システムの AP の ESSID は全て ToyotaAdhoc となった。以上により、上流接続先 AP の ESSID に従って下流接続 AP の ESSID を設定することで、ネットワークを形成できることを確認した。

尚、タイミングにより異なるパタンのトポロジが形成されることも確認された。トポロジ形成後の情報伝達は P2P ミドルウェアの役割とし、詳細な設計は今後の課題とする。

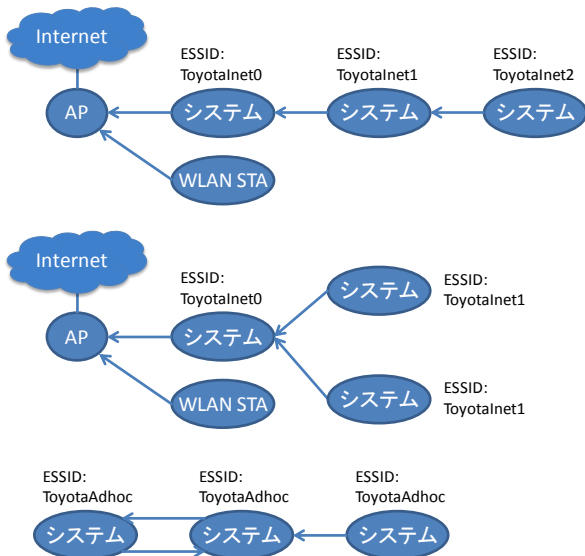


図 8 接続トポロジ

3.2 無線 LAN 初期接続高速化の評価

高速接続機能が期待通りの性能を示すか、またその場合はどの部分がどの程度改善されたのかを調べるために、通常接続 (WPA2) と高速接続 (FILS) の比較評価を行った。

3.2.1 確認手順

2 台のシステム (toyota1, toyota2) を使用し、無線接続の様子、及び接続後にメッセージを送信の様子を調べた。toyota1, toyota2 は有線 Ethernet で接続した制御 PC からコントロールし、以下の手順によって確認が行われる。この手順は、クルマ同士がすれ違う時間 (X 秒間) の間に通信を行う様子を模擬したものである。ネットワーク構成を図 9 に示す。

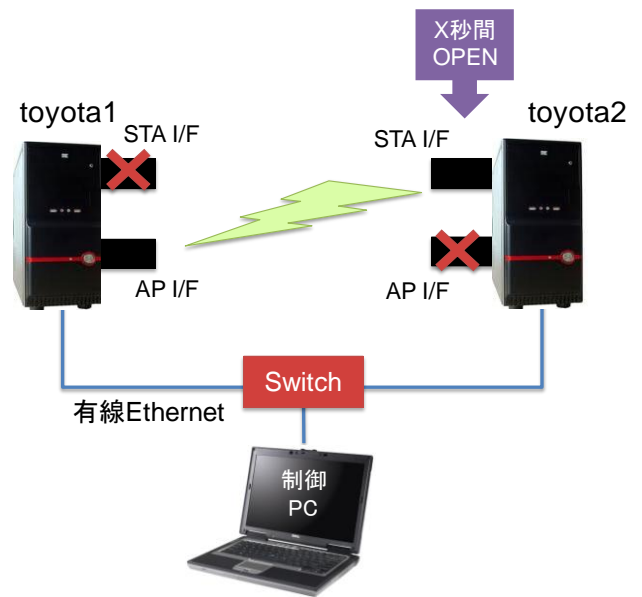


図 9 ネットワーク構成

1. toyota2 でメッセージを生成する。
2. toyota1 は下流接続 AP のみ ON とする。
3. toyota2 は上流接続 STA のみ ON とする。
4. toyota1 と toyota2 が無線接続を開始する。
5. toyota2 から toyota1 へメッセージが送信される。
6. 手順 3 から所定時間 (X 秒間) 経過後に toyota2 の無線 LAN インタフェースを OFF にする。
7. toyota1 と toyota2 の無線接続が切断する。
8. toyota2 から toyota1 へのメッセージ送信が停止する。

3.2.2 動作確認

まず、高速接続のプロトタイプが設計通りに動作することを確認する。特に高速接続機能がどのような手順で動作し、高速接続機能が無い場合との違いはどうかについて明らかにする。

具体的には、2 台のシステム間の無線接続の際に送信されたデータ (パケット) のログを取り、想定した通りに動作しているかどうかを調べた。通常接続 (WPA2) の結果を図 10、高速接続の結果を図 11 に示す。ログは 2 種類存

在し、MAC 層と IP 層（及び上位層）に分かれる。MAC 層では発見 (Probe)、認証 (Authentication)、接続 (Association)、及び鍵交換 (EAPOL-Key) の一部が確認でき、IP 層では鍵交換の一部と IP アドレス割当 (DHCP)、アドレス関連付け (ARP)、そしてデータ伝送 (UDP) が確認できる。パケットを受信した時刻もマイクロ秒の単位で記録されるため、これらの時刻の差分を図ることで、通信プロトコルの各要素において要した時間も図ることができる。

図 10 は通常接続で送信されたパケットのログである。発見 (Probe)、認証 (Authentication)、接続 (Association)、鍵交換 (EAPOL-Key)、IP アドレス割当 (DHCP)、アドレス関連付け (ARP)、データ伝送 (UDP) と想定した手順で接続が行われていることが確認できる。

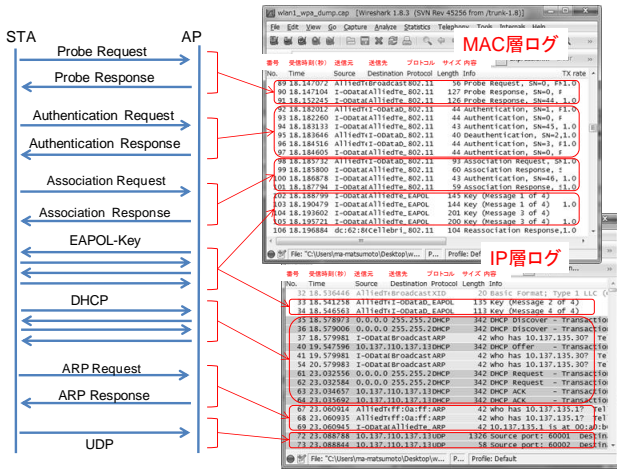


図 10 プロトタイプで送信されたパケットの確認 (通常接続の場合)

図 11 は高速接続で送信されたパケットのログである。通常接続とは異なり、認証 (Authentication)、鍵交換 (EAPOL-Key)、IP アドレス割当 (DHCP) は無くなり、発見 (Probe)、接続 (Association)、アドレス関連付け (ARP)、データ伝送 (UDP) の手順で通信が行われていることが確認できる。認証 (Authentication)、鍵交換 (EAPOL-Key)、IP アドレス割当 (DHCP) は接続 (Association) に相乗りしており、こちらも設計通りに動作していることが確認できた。

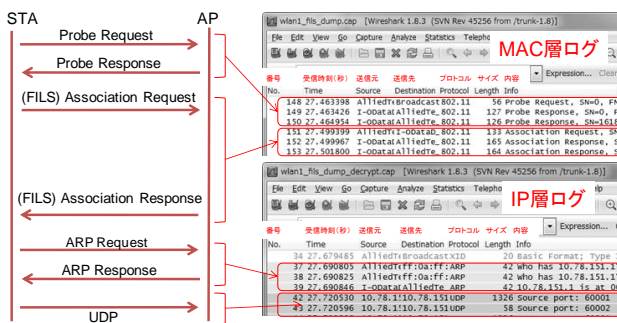


図 11 プロトタイプで送信されたパケットの確認 (高速接続の場合)

3.2.3 性能評価

続いて、高速接続の性能について評価する。特に高速接続の差異について、プロトコルのどの部分がどの程度関与するのか、どの程度ばらつきがあるのかを明らかにする。

確認手順の手順 1 におけるメッセージ生成数を 3000 とし、手順 6 の無線通信を可能とする時間 $X=1\sim 20$ 秒@1 秒間隔 (つまり、1 秒間通信, 2 秒間通信, ..., 20 秒間通信) で変化させて、通信時間内に転送されるメッセージ数を測定した。ばらつきを見るために、各時間において 100 回の試行を行い、平均値とばらつき (平均 $\pm 3\sigma$) の値を調べた結果を図 12 に示す。

通常接続は 5 秒目でメッセージ伝送が開始されているのに対して、高速接続は 1 秒目で既に伝送が開始されている。伝送速度 (スループット) に差異はないためグラフの傾きは同じとなるが、メッセージ数が増えるにつれて伝送速度が低下している。これは、メッセージの重複伝達の確認を単純なソートアルゴリズムにより実装したため、メッセージ数が増えるにつれて、その確認に手間取っているためと考えられる。仮に 2 台の車両が通信距離 50m、時速 40km (秒速 11m)、対向ですれ違う場合の通信時間はおよそ 5 秒間であり、通常接続ではほとんどメッセージ伝送できないが、高速接続では伝送できることが分かる。

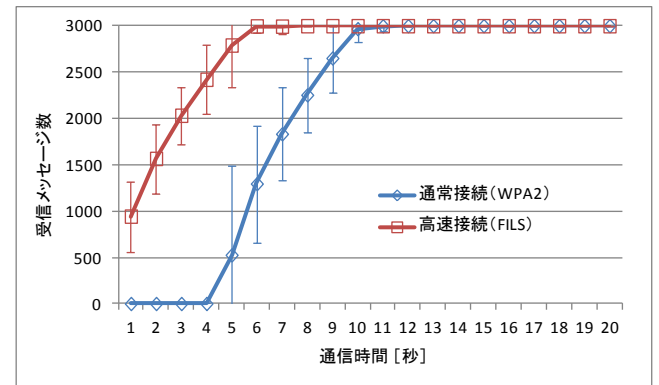


図 12 通信時間に対する受信メッセージ数のグラフ

このときの接続時間の内訳を調べた結果を図 13 に示す。通常接続の時間は平均でおよそ 4.61 秒要するところが、高速接続では 0.08 秒となっている。高速接続の平均 $+3\sigma$ の値は 0.33 秒となっており、接続時間は大幅に改善されているものの、設計目標である 0.1 秒の達成は引き続き工夫が必要である。また性能目標の前提となる実装や動作環境の定義も必要であると考えられる。

通常接続の時間の実に 97% が IP アドレス割当である DHCP で占められており、高速接続はこれを 1 つの接続手順に取り込むことによって、高速化を実現していることが分かる。移動を伴わない比較的静的なネットワークにおける IP アドレスの共用を想定した場合、接続に 4 秒程度の遅延が発生することはさほど問題にはならない。しかし、モバイル機器の持ち込みやすれ違いによって断続的に発生す

るネットワークではレスポンスの低下に繋がるため、このような用途には無線 LAN 標準で IP アドレスの割り当てを取りきめることは合理的であると思われる。

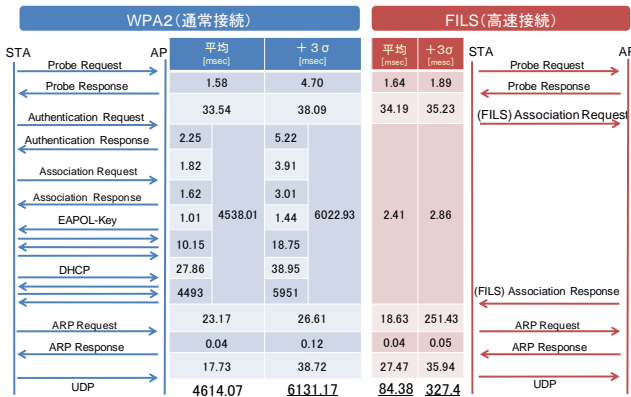


図 13 接続時間の内訳

参考文献

- 1) トヨタ, KDDI, Wi-Fi を活用した次世代テレマティクス向けアクセスネットワーク構築に向けた協業について合意, トヨタ自動車, 参照先 http://www2.toyota.co.jp/news/12/01/nt12_0110.html .
- 2) IEEE P802.11 - TASK GROUP AI - MEETING UPDATE, IEEE, 参照先 http://www.ieee802.org/11/Reports/tgai_update.htm .

4. まとめと今後の課題

本論文では他の車両やホットスポットとすれ違う一瞬の機会を利用した通信を可能とし、車両同士の中継によって、車両のセンシングしたデータを情報センタへ集めるための情報収集インフラを実現するための方策を示した。無線 LAN を利用した車載通信システムのアーキテクチャを提案し、その評価を行った。本アーキテクチャは主に2つの技術で構成されている。ひとつは無線 LAN AP の仮想化、もう一つは無線 LAN の初期接続高速化である。仮想 AP においては、ESSID 切替や IP アドレス割当を独自の手法で行うことにより、マルチホップ通信網を構築する。また無線 LAN の初期接続の高速化のために、認証や IP アドレス割当用のサーバを車載通信システムに内包させた。

プロトタイプシステムを試作し、無線 LAN AP の仮想化によって車車間無線ネットワークが構成されることを確認した。また無線 LAN の初期接続高速化の評価のために、無線インタフェースの開放時間を変化させ、各開放時間内に転送される通常接続 (WPA2) と高速接続 (FILS) のメッセージ数を測定した。その結果、通常接続は無線インタフェースの開放からメッセージ伝送開始まで 5 秒程度要するのに対して、高速接続は 1 秒目で既に伝送が開始されており、高速接続によってすれ違いの通信機会を効率的に利用できることを確認した。

性能評価用にシンプルなメッセージ交換用ミドルウェアを開発したが、アドホックに形成されたネットワークポロジを把握し、アプリケーションからの要求に従って情報伝達する仕組みは今後の課題である。