

車載 Wi-Fi による実時間車車間通信 FPGA システム

長岡 佑治^{1,a)} 山口 佳樹^{2,b)}

概要: 交通インフラの安全性や信頼性を高めるため、車車間通信 (V2V: Vehicle-to-Vehicle) や路車間通信 (V2I: Vehicle-to-roadside-Infrastructure) の効率的な利用が提案されている。また、これらに加え、歩行者との通信 (V2P: Vehicle-to-Pedestrian) や既存ネットワークとの通信 (V2N: Vehicle-to-cellular-Network), 更には、全てを統合した概念として V2X (Vehicle-to-everything) などが提案されている。一方、車車間通信を目的とした無線通信規格として IEEE 802.11p など提案されているが、社会実装という観点で見た場合、通信遅延、通信速度、耐障害性、利用可能性、開発容易性などで考えるべき技術的課題が数多く残っている。そこで、V2X の早期の社会実装に向け、特定の無線通信規格に依存しない方式として Internet protocol suite におけるリンク層の拡張とそれを実現するハードウェアシステムについて提案する。本論文では、提案する機能を書き換え可能なハードウェアである FPGA (Field Programmable Gate Array) に実装し、低遅延通信および高信頼性通信を提供可能かどうかについて実機による実証実験を通じて検証を行った。IEEE 802.11ac および 2 台の移動車両を用いた実験では、動画像配信時においてそのフレーム配信における時間遅れは 30 フレーム毎秒 (FPS: Frames per second) の場合で 33 ミリ秒未満であり、提案手法とそのハードウェア実装により十分な性能を提供できることを確認した。

キーワード: FPGA, ITS, 車車間通信, IEEE 802.11

High Reliability Wireless Communication with FPGA

YUJI NAGAOKA^{1,a)} YOSHIKI YAMAGUCHI^{2,b)}

Abstract: The wireless communication is the key technology for the implementation of the next-generation transportation infrastructure such as connected car and intelligent transport system. V2V (Vehicle-to-Everything) is a general idea of a local communication around a moving vehicle, which proposes a highly safe, reliable, and efficient infrastructure framework by information exchange. However, the improvement is almost at a standstill because the current vehicle does not have appropriate and sufficient wireless communication to realize V2X. Thus, this paper proposes a low-latency, high-reliable and widely-available wireless communication based on IEEE 802.11p. It is realized on an FPGA (Field Programmable Gate Array) and the systems were evaluated on two moving electric vehicles.

Keywords: FPGA, ITS, Vehicular communications, IEEE 802.11

1. はじめに

交通インフラについて考えたとき、自動運転という概念の導入は、1939 年に開催されたニューヨーク万国博覧会にお

けるゼネラルモーターズによるフォーチュラマ (Futurama: Future と Panorama の造語) の展示までさかのぼることができる [1]。1950 年代に入ると、自動運転道路システム (AHS: Automated Highway System) の実現に向け、道路に埋設した誘導ケーブルの交流磁界をセンシングし、誘導ケーブルによる走行コースと車両の位置とのズレを最小化する形で操舵を自動化する技術が議論された [2, 3]。このシステムは時速 100 km の走行を実現しており [4]、ゴルフ場のゴルフカートや工場内の搬送システムなどに応用利用されている。しかし、センサ性能、演算性能、それらによる高速走行時の不安定さなど、当時の技術では解決が困

¹ 筑波大学 システム情報工学研究科
Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai Tsukuba Ibaraki,
305-8573, Japan

² 筑波大学 システム情報系
Faculty of Engineering, Information and Systems, University
of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai Tsukuba Ibaraki, 305-8573,
Japan

a) nagaoka@hpcs.cs.tsukuba.ac.jp

b) yoshiki@cs.tsukuba.ac.jp

難な問題が多かった。また、誘導ケーブルの設置コストやその給電システム構築などの検討が必要であったため、広い意味での交通インフラとしての利用は見送られた。

1970年代になると、カメラで撮影した画像から距離を算出し、画像情報を基にして自動運転を行う別のアプローチが提案された。機械技術研究所（現、産業技術総合研究所）の知能自動車（Intelligent Vehicle）は、走査方向を垂直に変更した電子管式カメラにより撮影したビデオ信号を専用ICにより2値化し、それをハードウェアで直接処理することで、1977年に最高時速30kmでの走行実験に成功している[5]。またヨーロッパでは、VaMoRs（Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität und Rechnersehen）[6]をベースとしたVaMP（Versuchsfahrzeug für autonome Mobilität Pkw）が、ミュンヘン（ドイツ）とオーデンセ（デンマーク）の1,600kmを超える距離を平均時速120kmで走行した報告例がある。アメリカでは、1991年にAHS（Automated Highway Systems）プロジェクトが開始され、1997年にカーネギーメロン大学がデモを行っている。これら画像情報を利用した自動運転ないし運転補助技術は実用化されており一定の成功を得たと言えるが、情報取得位置が運転車両に固定されるため、車両の死角となった範囲の情報収集は非常に困難でありこの解決が求められた。そこでこの問題の解決に、異なる車両、歩道、歩行者などから情報を収集することが提案され、車両上での無線通信技術に対する注目が高まった[7,8]。

一方、その無線通信技術導入を困難にしている課題として、無線通信を利用するための法整備、枠組みや標準化などが十分に整っていない、ということがある。アメリカのカリフォルニア州およびミシガン州では、無線ネットワークを含めた公道での自動運転試験について既に議論されている。手続きの明確化[9]や法案の可決[10]という意味で世界をリードしているが、試行錯誤の段階でもあり、アメリカ全州に広がる勢いとは言い難い。欧州では、アムステルダム宣言[11]に基づき自動運転の実用化や導入に関する欧州統一の枠組みに関する手続きを着々と進めているが、まだ確定するに至っていない。我が国においても、車車間通信用無線通信規格IEEE 802.11p[12]の試験ユニットは存在するが、それを屋外で自由に利活用することは難しい。加えて、無線通信において利用可能な帯域が我が国と欧米で異なるなど、世界規模での整合性に期待することも難しい。つまり、車両とあらゆるものの通信（V2X: Vehicle-to-everything）を実現するシステムを考えた場合、特定の標準規格や無線帯域への依存は産業応用や社会貢献の速度を低下させることに繋がる。

そこで本論文では、特定の無線通信規格に依存しない、という汎用性の観点から無線Wi-Fiに着目した。例えば、本田技研工業株式会社はWi-Fi通信をベースとしたV2X（Vehicle-to-X）通信ユニットを既に販売している[13]。こ

れは、Wi-Fi通信をベースとし、比較的軽い通信という制約があるものの実時間通信をサポートしている。しかし、通信速度という観点において、ミリ波を含む高周波数帯の電波を想定する5Gなど今後登場する新しい規格にも容易に移植可能なシステム構成であることが望ましい。上記より、5Gを含む様々な無線通信規格とユーザアプリケーションを低遅延かつシームレスに接続するハードウェアによるブリッジフレームワークを提案および検証する。

提案システムは、Field Programmable Gate Array（FPGA）上に実現され、検証された。このFPGAシステムを用いて、走行中のある実験車両から別に走行している実験車両に対して動画転送を行い、性能検証を行った。FPGAはInternet protocol suiteにおけるリンク層の拡張機能を実時間で処理するように設計されており、ユーザーおよび無線システムの双方からは意識せずに利用できるように設計されている。無線通信規格としてIEEE 802.11acを用いた実験では、フレーム配信における時間遅れは30フレーム毎秒（FPS: Frames Per Second）の場合で33ミリ秒未満であり、提案手法により十分な性能を提供できることが確認された。

この提案による本論文の貢献は、ハードウェア直接計算により通信パケットのストリーム処理におけるオーバーヘッドを極力減らし、低遅延かつ信頼性の高い実時間通信が実環境で示したことである。CPU実装の場合、メモリアクセス（システムコール回数）が無視できず、単純な処理であっても要求時間内に演算および通信を完了することが難しい。GPU実装の場合、演算性能は十分だが、メモリやPCIeバス等におけるシステム内のデータ転送時間の削減は難しく、V2Xアプリケーションにおいてこれらの時間を無視できない。FPGA実装の場合、ハードウェア直接計算（入力・演算・記憶・出力の密結合による低遅延演算、waitやidleを発生させない専用パイプライン構造、オンチップメモリ使用量の削減、など）により要求性能を満足できる。また、無線通信部とユーザアプリケーションのブリッジ部分をソフトウェアから分離することでより新しい無線通信規格の採用やプロトコル変更などが容易になり、汎用性および拡張性を高めることが可能となる。

以下、本論文では第2章において研究背景を、第3章において既存の通信方式についてそれぞれ紹介する。続く第4章において本論文で提案する冗長化手法を、第5章においてそのハードウェア実装について説明する。第6章と第7章で、提案システムによる実験結果について示し、第8章で本論文をとじる。

2. 研究背景

近年、移動体（特に自動車）をセンシングデバイスとしてみた情報収集に注目が集まっている。これは、社会全体をシステムとして見立て、センサネットワークというかたち

で社会のパフォーマンスを最大化することが可能となるからである。直接的な応用例としては、自動車のワイパーの動作間隔をモニタリングすることでより正確な範囲および現実的な時間で局地的豪雨のポイントを割り出したり [14], バッテリー残量のセンシングによる日照量の確認やそれら情報を統合した遠隔農業などが考えられている。

交通インフラを想定した無線通信には呼び名が様々な存在し、移動車両と移動車両間の通信(車車間通信, V2V: Vehicle-to-Vehicle), 移動車両と路上・路面との通信(路車間通信, V2I: Vehicle-to-Infrastructure), 移動車両と歩行者間の通信(車歩行者間通信, V2P: Vehicle-to-Pedestrian), 移動車両と無線ネットワーク間の通信(ネットワーク間通信, V2N: Vehicle-to-cellular-Network), などが挙げられるが, それらをまとめた V2X (Vehicle-to-X) という用語が広く定着しつつある。何れの通信も事故の低減や運転支援に関する情報の伝達を可能にすることを目的に提案されており, 交通インフラをより安全かつ高効率に運用可能にすることが期待されている [15]。

そして V2X に焦点を合わせた場合, 高速移動している複数車両間での通信の実現やその運転制御に関する情報のやり取りを可能な限り低遅延かつ正しく情報を伝送する仕組みについて考える必要がある [16]。これらに対する無線通信標準規格として 2012 年に IEEE 802.11p が提案されているが, 各国の事情により使用する無線帯域が異なる [12] などの問題は依然として残されたままである。このため, 既存無線通信を応用するなどのアプローチも含め, 汎用かつ信頼性の高い無線通信技術が強く求められている。

3. 既存方式

日本の Intelligent Transport Systems (ITS, 高度道路交通システム) で使用される車車間通信, 路車間通信の周波数帯は 5.8 GHz 帯 (5.770 ~ 5.850 GHz) と 700 MHz 帯 (710 ~ 730 MHz) の 2 つが割り当てられている [15]。このため, 移動車両向けの無線通信規格として提案されている IEEE 802.11p [17] についても 5.8 GHz 帯を使用する。一方, 北米 (5.850 ~ 5.925 GHz) および欧州 (5.855 ~ 5.925 GHz) は 5.9 GHz 帯を用いるため, 無線通信技術の導入速度だけでなく, 日本市場そのもののガラパゴス化も懸念されている*1。そこで本論文では, 国内だけでなく海外でも特別な手続きなく利用できる無線通信として, PC 等で利用されている無線標準規格 IEEE 802.11ac を利用することとした*2。

ここで, IEEE 802.11p と IEEE 802.11ac の比較を表 1 に示す。IEEE 802.11ac のチャンネルのうち, W56(5.47 ~ 5.725

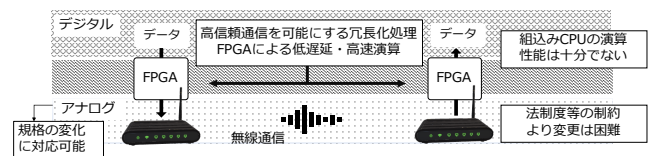


図 1 提案するハードウェアシステムの概要

Fig. 1 Proposed hardware system

GHz) が屋外でも使用可能なチャンネルであるため, 本論文の実証実験ではこの W56 を使用することとした。

表 1 IEEE 802.11p と IEEE 802.11ac の比較

Table 1 Comparison of IEEE 802.11p and IEEE 802.11ac

	IEEE 802.11p	IEEE 802.11ac
遅延時間	数百 μ s ~ [18]	数百 μ s ~ [19]
スループット	~ 27 Mbps	~ 6.93 Gbps
入手容易性	×	○
エラー耐性	○	×
周波数帯域	5.850 ~ 5.925 GHz	5.18 ~ 5.70 GHz
周波数帯域幅	10 MHz	20 ~ 160 MHz (20 MHz も一部可)
変調方式	OFDM	OFDM

ここで, 表 1 に示すカタログ性能だけでなく, 既存の通信プロトコルである IEEE 802.11ac を車車間通信に用いた場合にどの程度のパケットロスまたオーバーヘッドが生ずるのかについて事前検証が必要である。そこで, これまでに本著者らは, 実車と IEEE 802.11ac の組み合わせによる車車間通信実験を行っている [20]。この実験では 2 台の電動自動車を使用し, 時速 20 キロメートル程度で同方向に移動している車車間通信に関してエラー測定を行った。この予備実験では, 10,000 パケットの通信に平均して数回程度のパケットロスが発生し, この再送によって生じる遅延時間が約 55 ミリ秒に達することを確認している。また, 連続するパケットロスや再送の失敗に伴い, ストリーム動画像が正しく送信先の車両に伝送されない(フレーム更新できない)現象も報告している。ストリーム動画像におけるフレームの同期信号やシステムの制御信号を欠損することは問題が大きい一方, パケットロスは周囲の通信環境に依存するため発生予測は困難である。また, 無線通信路の信頼度は採用する無線通信規格および周囲環境により異なるため, その状況に応じた対応が要求される。本論文では, IEEE802.11ac を採用した実証実験において, ビットレートや回路規模などについて検証した。

4. 提案手法

4.1 概要

提案するハードウェアシステムの概要を図 1 に示す。

図 1 に示すように, 無線通信部とユーザアプリケーションを切り離すことで, アプリケーション層を担当するプロ

*1 日本では, 5.850~6.485 GHz は TV 番組中継および固定衛星を含む電通業務などの帯域として割り当てられているため, 欧米に合わせるのとはそもそも難しいという背景がある。

*2 北米では, 5.725 ~ 5.825 GHz は Wi-Fi 通信に利用されている。

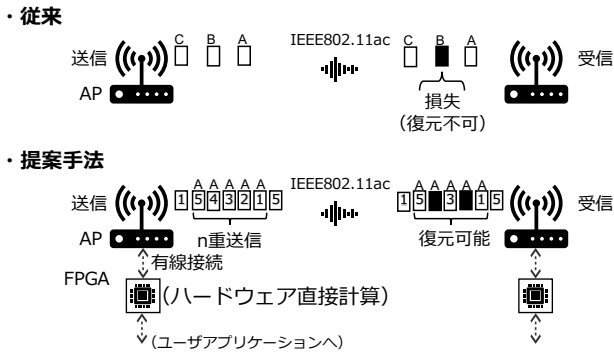


図 2 従来手法と提案手法との違い

Fig. 2 Conventional approach and our proposed approach

グラマやユーザが無線通信部を意識することなくシステムを利用することが可能となる。つまり、物理層とアプリケーション層をFPGAでブリッジすることで、新しい無線通信規格への適用が容易になる。また、FPGA上のハードウェア直接計算により通信処理におけるオーバーヘッドを減らし、V2Xで求められる低遅延通信の実現が可能となる。

ここで、本研究では通信品質と低遅延の双方を保証するため、冗長型通信方式を採用した。このため、信頼性と通信帯域とのトレードオフについては議論が必要であり、本研究では3重冗長と5重冗長について比較を行っている。

4.2 冗長化の手法

無線アクセスポイント (AP) と FPGA は有線接続され、通信データの冗長化はデータリンク層 (MAC 層) で行われる。全ての通信データは送信側 FPGA 内で n 重冗長されて送信され、受信側 FPGA ではその冗長パッケージを受け取って多数決をとることで受信データを確定する。ここで、従来の通信と提案手法との違いを図 2 に示す。

従来の通信ではある 1 つのパッケージが損失した場合、そのパッケージを失うか再送処理の選択が必要となる。パッケージを捨てることを容認した場合、低遅延通信および理論性能に近い実通信性能を確保できるが信頼性が大きく損なわれる。一方、再送処理を選択した場合はそのオーバーヘッドが大きいため、高い信頼性を実現できても低遅延通信を保証することは難しい。本論文における冗長化を施すことによりエラー訂正が可能となり、高信頼かつ比較的理論性能に近い高帯域な通信を期待できる。

ここで採用した手法について具体的に述べる。送信側システムにおいてデータを送信する場合、アプリケーションはFPGAに送信データを転送する。FPGAではそのデータをAPに n 回送信するが、その時に出力される各パッケージは若干異なる情報を含んでいる。これは、FPGA内で冗長パッケージを識別するために新しい識別用 ID (1, 2, ..., n) を付与するためである。この識別用 ID は、図 3 上に示す用に、ペイロードとは別の領域に格納されている。この識別 ID を用い、受信側 FPGA では何番目のパッケージ

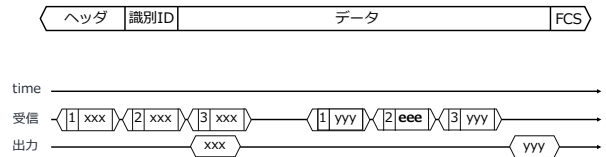


図 3 パッケージの構造と 3 重冗長の例

Fig. 3 Packet Structure and Examples of three-redundancy

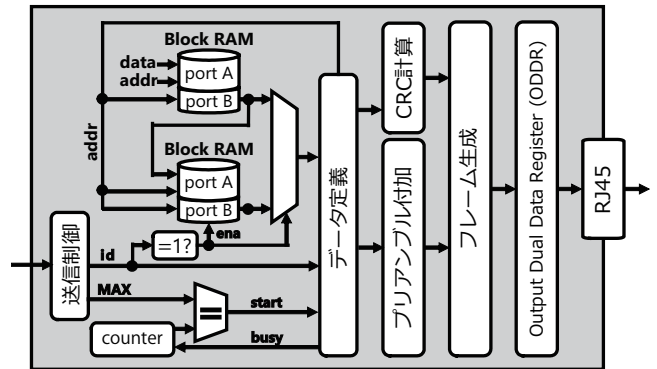


図 4 送信回路のブロック図

Fig. 4 Transmitter Circuit Block Diagram

がロスしたのかなどの判別が可能となる。また、この識別 ID を利用することで多数決の容易化や効率化を図ることが可能となる。

最後に、図 3 に、送受信するパッケージの構造と 3 重冗長時の通信の例を示す。パッケージを受信すると、並行して過去に受信したパッケージと比較し、多数決の条件を満たす場合にデータを決定する。また、ID を利用することで、最後に送信された冗長パッケージの到着を待たずに受信データを確定することも可能となる。これらにより、低遅延な受信時処理が可能となる。

5. FPGA 実装

送信回路、受信回路に分けて実装した。回路の記述にはハードウェア記述言語である Verilog-HDL を用い、開発環境には Xilinx 社の Vivado Design Suite 2018.3 (System Edition) を使用した。

5.1 送信回路

FPGA から通信パッケージを n 重に冗長化して送出する回路の実装に関して述べる。実装した回路のブロック図を図 4 に示す。FPGA 内ではデータは 8 bits 幅、125 MHz のクロックで動作し、最大で 1 Gbps のスループットとなる。ODDR は Xilinx 社のプリミティブであり、DDR 出力専用のレジスタを使用することで、Reduced Gigabit Media Independent Interface (RGMI) という DDR のインターフェースに変換する。

送信されるデータは FPGA 内蔵メモリである Block RAM (BRAM) に格納されており、8 bits 幅、深さを送

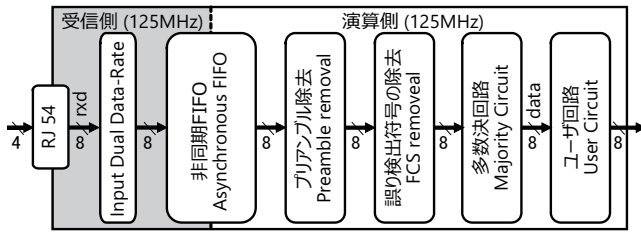


図 5 受信回路のブロック図. 多数決回路に関しては図 6 を参照.
Fig. 5 Receiver Circuit Block Diagram

信したいデータに合わせて設定しておく。同期読み出しによってデータとして送出され、並行して CRC32 の計算を行う。7.1 章での実装のように、最初に送信されるデータを格納した BRAM の中身が書き換わっても多重化されたパケットのデータ部を同一にして送信するために、ID が 2 以上のときに使用される BRAM（幅 8 bits、深さはペイロードサイズ以上）を追加で 1 つ用意しておき、ID が 1 のときにパケットが送信されるのと並行して書き込みイネーブル信号がアサートされ送信したデータを格納するようにし、ID が 2 以上のときにはこちらの BRAM からのデータが送信される。また、FPGA ボード上のスイッチを切り替えることによりパケットの送信間隔、冗長度 ($n = 1, 3, 5$) を変更できるように実装した。

5.2 受信回路

受信回路のブロック図を図 5 に示す。受信した RGMII の信号は IDDR プリミティブにより DDR 入力用のレジスタへ格納され、8 bits 幅のデータとなる。非同期 FIFO はイネーブル信号 (1 bit) とデータ (8 bits) を合わせて 9 bits 幅、深さは 512 とした。

図 6 は多数決回路のブロック図を表しており、過去 3 個分のパケットを BRAM に格納し、新しく受信したパケットとそれぞれの BRAM に格納されていたデータとの比較結果をレジスタに蓄えることにより、5 重冗長の場合でも BRAM の使用量を 3 個に抑えて実装することができる。control ブロックに比較結果と受信した ID が入力され、一定の条件 (多数決による決定) を満たしたときに BRAM の B ポートから適当なデータを出力する。

受信回路でも FPGA ボード上のスイッチを切り替えることにより 冗長度 ($n = 1, 3, 5$) を変更できるように実装しており、BRAM 等のリソースを共有している。

6. 実証実験 1 (屋内・UDP 通信実験)

6.1 回路規模

5 章で提案した回路を Xilinx 社製 Artix-7 FPGA (XC7A200T-1SBG484C) に実装した。送信回路と受信回路のリソース使用量を表 2 と表 3 にそれぞれ示す。

表 2 送信回路のリソース使用量

Table 2 Resource Utilization for Transmitter Circuit

名称	回路使用量	使用可能量	使用率 (%)
LUT	390	133800	0.29
LUTRAM	5	46200	0.01
FF	378	267600	0.14
BRAM	15	365	4.11
IO	34	285	11.93
BUFG	5	32	15.63
MCMC	1	10	10

表 3 受信回路のリソース使用量

Table 3 Resource Utilization for Receiver Circuit

名称	回路使用量	使用可能量	使用率 (%)
LUT	390	133800	0.29
LUTRAM	5	46200	0.01
FF	378	267600	0.14
BRAM	51	365	13.97
IO	27	3285	9.47
BUFG	5	32	15.63
MCMC	1	10	10

6.2 実験環境

本実証実験で使用した FPGA ボード、無線アクセスポイント (AP) を表 4 に示す。FPGA ボードと AP は 2 つをペアにして 2 組使用した。

表 4 実験環境

Table 4 Experiment Environment

FPGA ボード	
ボード名	Digilent 社 Nexys Video
搭載 FPGA	Xilinx 社 Artix-7 (XC7A200T-1SBG484C)
無線アクセスポイント (AP)	
型番	ASUS 社 RT-AC88U

6.3 実験内容

提案手法の性能を評価するため、次の実験を行った。

送信されるパケットのデータ部をシーケンシャルナンバーとして送信し、UDP パケットの到達率を調査した。本実験での条件を以下に示す。

- 屋内環境
- 遮蔽物なし
- AP 間距離：約 5 m
- AP は静止
- ペイロードサイズ：1,440 Bytes

以上の条件下で 冗長度 n ($n = 1, 3, 5$) , データレートを変化させ実験を行った。

6.4 実験結果

通信を行った結果を図 7 に示す。グラフの横軸は実効

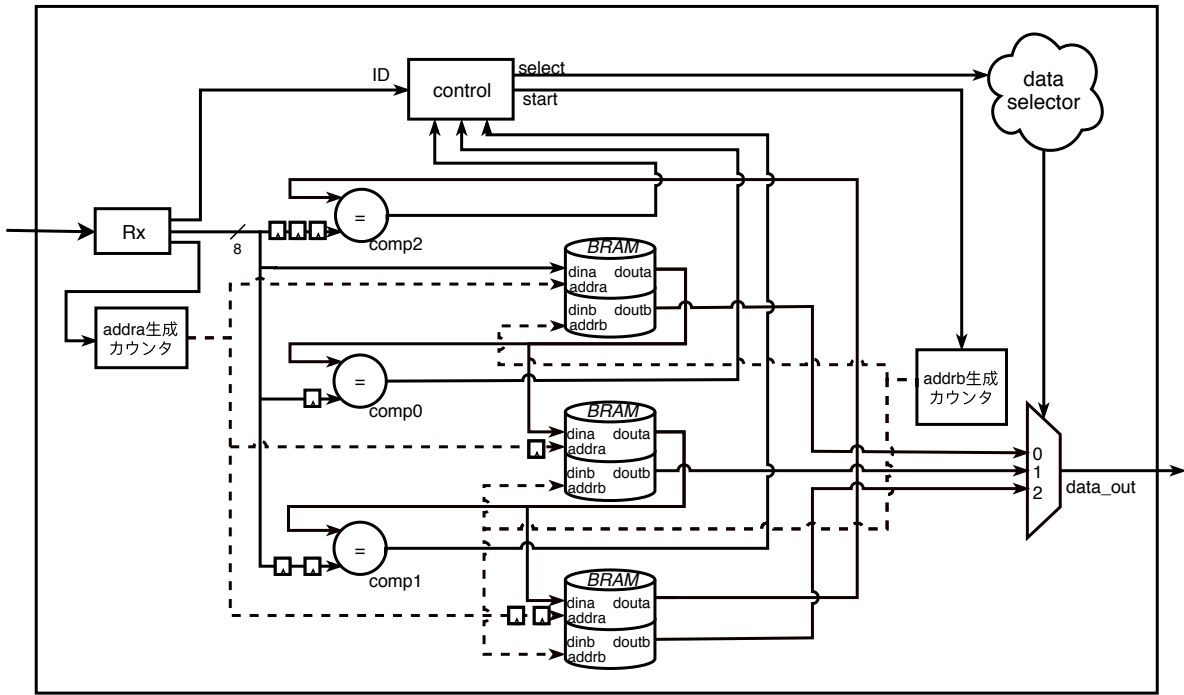


図 6 多数決回路のブロック図. 5 重冗長 ($n = 5$) に対応している

Fig. 6 Majority Circuit Block Diagram

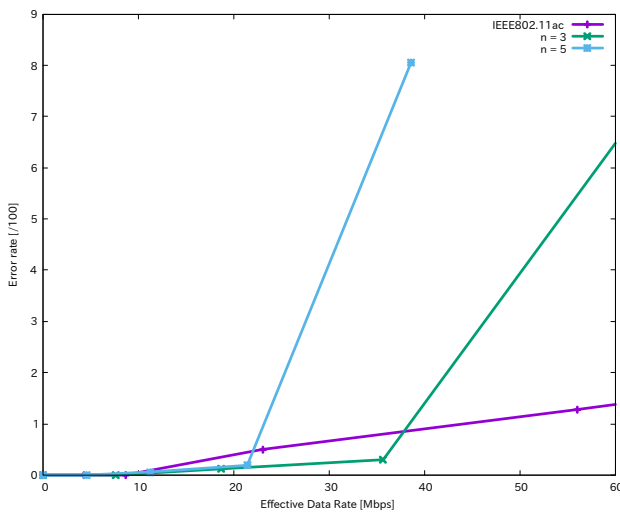


図 7 冗長度の違いによる性能比較

Fig. 7 Performance comparison by redundancy differences

データレート（冗長化される前のデータ）を示し、縦軸はその条件下でのエラーレートを示す。

結果として、データレートが比較的低い通信（3 重冗長でおよそ 35.6 Mbps 以下，5 重冗長でおよそ 21.4 Mbps 以下）において信頼性の向上が確認された。一方で、実効データレートが 40 Mbps を超えるような、比較的数据レートが高い通信となると冗長化により信頼性が低下することがわかった。これは、冗長化による通信量の増加によって AP の処理性能限界に近づき、バーストエラーが多く発生するようになるためと考えられる。



図 8 HDMI 画像伝送におけるフレーム構造

Fig. 8 Frame structure of HDMI image transmission

7. 実証実験 2（屋外・ストリーム動画通信）

7.1 画像通信方式

提案手法での通信方式を利用し、ストリーム動画を送受信する回路を実装した。動画データの入出力には FPGA ボード上の HDMI 入出力端子を使用した。

入力には 1280 × 720 px, 24 bits color, 60 fps の信号を使用し、AP の性能や車載時に物体の識別が可能と考えられる解像度を考慮した結果、出力には 320 × 180 px, 24 bits color, 20 fps を使用することとした。

動画情報を送受信するため、UDP パケットの構造は図 8 に示すように、1 画素目の座標（3 Bytes）と画素情報（RGB 各色 1 Byte）を送受信する。2 画素目以降の画素情報はラスタ走査順で送受信される。

画像通信回路のブロック図を図 9 に示す。HDMI の信号は Transition Minimized Differential Signaling (TMDS) 方式で伝送される。実装には TMDS のエンコード、デコードには Digilent 社 IP の RGBtoDVI, DVItToRGB を使用した。

7.2 回路規模

7.1 節の回路を上述の Nexys Video ボードに実装した。

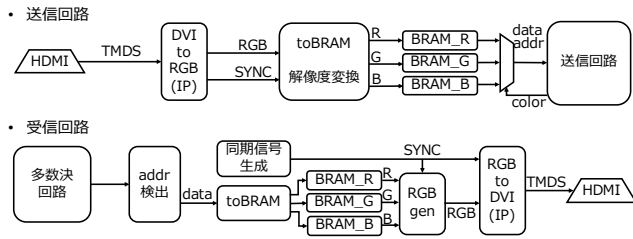


図 9 HDMI 画像通信回路におけるブロック図

Fig. 9 Block Diagram for Image Communication Circuit

送信回路のリソース使用量を表 5 に、受信回路のリソース使用量を表 6 に示す。

表 5 画像送信回路のリソース使用量

Table 5 Resource Utilization for Image Transmitter Circuit

名称	回路使用量	使用可能量	使用率 (%)
LUT	3478	133800	2.60
LUTRAM	296	46200	0.64
FF	4692	267600	1.75
BRAM	92	365	25.21
IO	44	3285	15.44
BUFG	10	32	31.25
MMCM	2	10	20

表 6 画像受信回路のリソース使用量

Table 6 Resource Utilization for Image Receiver Circuit

名称	回路使用量	使用可能量	使用率 (%)
LUT	8427	133800	6.3
LUTRAM	623	46200	1.35
FF	8506	267600	3.18
BRAM	53.50	365	14.66
IO	91	3285	31.93
BUFG	15	32	46.88
MMCM	5	10	50

7.3 自動車実験

電気自動車に本システムを搭載し、動画像通信の品質を目で確認した。2 台の電気自動車にカメラ、FPGA ボード、無線 AP、ディスプレイを搭載し、前方を走行する自動車からの映像を後方の自動車内で受信し表示するものである。カメラとしては SONY 社のビデオカメラ HDR-SR1 を使用し、HDMI 出力機能を使用し送信側 FPGA の入力とした。実験の様子を図 10 に示す。

通信中に動画像を受信し表示している様子を図 11、一部を拡大したものを図 12 に示す。図 11 左側は冗長化なし (IEEE 802.11ac)、右側は提案手法 ($n = 5$) のときのディスプレイ表示を示している。図 11 において、冗長化なしのときに僅かであるが画像にノイズが見られるが、冗長化採用時はノイズが無くなっていることがわかる。



図 10 電気自動車に本システムを搭載した様子

Fig. 10 Hardware Systems on Vehicles

8. まとめ

本論文では、車車間通信において信頼性を確保できるような通信パケットを冗長化する回路を FPGA に実装し、その回路を拡張して HDMI の映像を冗長化し送受信する回路を実装した。屋内環境で実験した結果、3 重冗長で実効データレートがおおよそ 35.6 Mbps 以下、5 重冗長時で実効データレートがおおよそ 21.4 Mbps 以下の場合に従来の IEEE 802.11ac と比較して信頼性の向上が確認された。

謝辞 本論文の一部は、科学研究費補助金 (JP17H01707) の助成をうけたものである。また本論文は、Xilinx 社より、「Xilinx University Program」を通じ開発ソフトウェアの支援を受けておりここに謝意を表する。

参考文献

- [1] Wood, A. F.: *New York's 1939-1940 World's Fair*, Arcadia Publishing, 420 Wando Park Blvd, Mt Pleasant, SC 29464, USA (2004).
- [2] Vladimir Kosma Zworykin, e. a.: Electronic Control of Motor Vehicles on the Highway, *Proceedings of the Thirty-Seventh Annual Meeting of the Highway Research Board*, Highway Research Board, pp. 436-451 (1958).
- [3] Gardels, K.: Automatic Car Controls for Electronic Highways, General Motors Research Laboratories Report GMR-276, General Motors Research Laboratories (1960).
- [4] Y. Ohshima, e. a.: Control System for Automatic Automobile Driving, *Proceedings of the IFAC Tokyo Symposium on Systems Engineering for Control System Design*, pp. 347-357 (1965).
- [5] 谷田部照男, 広瀬武志, 津川定之: ビジョンシステムをもつ車両の自律走行制御, 計測と制御, Vol. 30, No. 11, pp. 1014-1027 (1991).
- [6] Graefe, V.: Vision for Intelligent Road Vehicles, *Proceedings of Intelligent Vehicles '93 symposium*, pp. 135-140 (1993).
- [7] 財団法人自動車走行電子技術協会: 自動車間通信に関する研究—通信方式の検討と関連技術の動向調査—, 報告書 86-3, 財団法人自動車走行電子技術協会 (1987).
- [8] 財団法人自動車走行電子技術協会: 自動車間通信に関する研究—パケット無線の車々間通信への適用—, 報告書 87-4, 財団法人自動車走行電子技術協会 (1988).
- [9] of California, S.: *Testing of Autonomous Vehicles* (2016).



図 11 実システムによる実験結果. 冗長度 (n)=1(左), 冗長度 (n)=3(中), 冗長度 (n)=5(右)

Fig. 11 Experimental results in a real system: $n=1$ (left), $n=3$ (middle), $n=5$ (right)



図 12 図 11 の拡大図. 冗長度 (n)=1(左), 冗長度 (n)=3(中), 冗長度 (n)=5(右)

Fig. 12 Enlarged view of Fig. 11: $n=1$ (left), $n=3$ (middle), $n=5$ (right)

- California Code of regulations: Title 13, Division 1, Chapter 1, Article 3.7.
- [10] Legislature, M.: Michigan vehicle code (2016). Senate Bill 0995.
- [11] The Netherlands EU Presidency 2016: Declaration of Amsterdam on “Cooperation in the field of connected and automated driving” (2016). signed on 14 April 2016 by transport ministers of all 28 EU member states.
- [12] Gupta, R. and Aggarwal, S.: A Survey on Wireless Access in Vehicular Environment, *International Journal of Advance in Communication Engineering*, Vol. 3, pp. 1–6 (2011).
- [13] 本田技研工業株式会社: 高性能車載通信機「V2X ユニット」の実証実験 (2016).
- [14] Rabiei, E., Haberlandt, U., Sester, M. and Fitzner, D.: Rainfall estimation using moving cars as rain gauges – laboratory experiments, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, Vol. 17, No. 11, pp. 4701–4712 (2013).
- [15] ITS 無線システム委員会事務局: ITS 無線システムの検討状況等, 総務省 (オンライン), 入手先 (<http://www.soumu.go.jp/main-content/000033782.pdf>) (参照 2019-05-16).
- [16] ITS 情報通信システム推進会議: 5.8GHz 帯を用いた車車間通信システムの実験用ガイドライン 3.0 版 (2017).
- [17] Sharma, K. D. and Bhadauria, S. S.: Implementation of Dedicated Short Range Communication(DSRC) IEEE802.11p in NS2 and its Performance Analysis Over IEEE802.11, *International Journal of Advance Research*, Vol. 1, p. 7 pages (2013).
- [18] Xiao, Y. and Rosdahl, J.: Throughput and delay limits of IEEE 802.11, *Communications Letters, IEEE*, Vol. 6, pp. 355–357 (online), DOI: 10.1109/LCOMM.2002.802035 (2002).
- [19] Wang, Y., Duan, X., Tian, D., Lu, G. and Yu, H.: Throughput and Delay Limits of 802.11p and its Influence on Highway Capacity, *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Vol. 96, pp. 2096–2104 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.08.236> (2013).
- [20] 山口佳樹: 車車間情報転送のフィジビリティスタディ, 「高度アクセシブル社会実現に向けた基盤研究」成果報告会 (2017).