VANETにおけるランダムネットワークコーディングを用いた特定エリア内情報配信システムのGNU Radio/USRP2を用いた実環境評価

金 原 辰 典[†1]　楠 嶺 生 宏[†1]　石 原 進[†2]

筆者らは車々間アドホックネットワーク（VANET）を利用した交通事故や渋滞などの特定位置に関する情報（位置依存情報）の配信手法として，R2D2V（RNC based Regional Data Distribution on VANET）を提案している．R2D2V は，車両，あるいは路側の機器が生成した位置依存情報を，それが生成された時点で情報の生成位置の近傍（情報配信範囲）にいる全車両と，その後新たに情報配信範囲に入って来る車両に，短時間にかつ効率的に配布することを目的として設計された Random Network Coding(RNC) と Opportunistic なデータ配信を組み合わせたデータ配信手法である．R2D2V は，シミュレーションによる性能評価により，情報配信範囲内への素早く確実な情報配信が可能であることが示されているものの，実環境での性能評価は行われていない．プロトコルの研究を進めてく上で，実環境での動作確認と性能評価は重要である．本稿では，R2D2V を LinuxOS 上のプロトタイプとして実装し，ソフトウェア無線開発環境 GNU Radio とその専用端末である USRP2（Universal Software Radio Peripheral 2）を用いた実環境での測定実験について述べる．同実験により，R2D2V で RNC を利用することで，無線通信の通信エラーが起きやすい状況において，より高速な情報配信が可能であることを確認した．

A study on experiment of a regional-information distribution system based on RNC for VANET using GNU Radio/USRP2

Tatsunori KIMPARA,[†1] Naruhiro KUSUMINE[†1] and Susumu ISHIHARA[†2]

In this paper, we discuss delivery of location dependent information in vehicular ad hoc networks (VANET). We have proposed a scheme called R2D2V (RNC based Regional Data Distribution on VANET) which deliveries location dependent information in a specific area. R2D2V utilizes a random network coding function and an opportunistic data delivery strategy for disseminating location-dependent information rapidly and reliably to vehicles in the effective area of the information, and for providing the information to vehicles coming to the effective area of the information after the information has been generated. Simulation results have shown that R2D2V can deliver information quickly to the vehicles in the effective area. However, R2D2V has not been evaluated in real environments. In this paper, we present the implementation of a prototype of R2D2V and the measurement results of the performance of R2D2V in a real wireless network composed USRP2 (Universal Software Radio Peripheral 2) running GNU Radio. The result show that random network coding function in the R2D2V can improve the message delivery speed in a harsh wireless environment.

1. はじめに

近年，車両間で形成されるネットワーク（VANET:Vehicular Ad hoc NETwork）を利用して，交通事故や渋滞など特定位置に関する情報（位置依存情報）を配信する方法の研究が盛んに行われている．VANET では，インフラを用いずに交通事故や渋滞といった情報を周辺端末に対して素早く配信することが期待されている．しかしながら，VANET 上の通信では，端末の移動に伴う周辺端末密度の変化により通信の信頼性が左右されてしまう．端末が多くいる場所において通信を行う場合，IEEE802.11 無線 LAN 規格のようなランダムアクセス方式の MAC を用いる無線ネットワークでは，パケット同士の衝突が起こってしまい，通信の成功率が悪化する．また端末が少ない場所では，通信相手がいないために通信を行えないといった問題が発生する．こうした環境の中，車両間で情報配信を行うことは，通信の信頼性を高く維持することが容易ではなく，車両間で情報配信を行う上での大きな問題となる．この問題を解決するための手法として，筆者らは R2D2V（Random network coding based Regional Data Distribution on VANET）[1)] を提案している．

R2D2V は車両，あるいは路側の機器が生成した位置依存情報を，情報生成時点で情報生成位置の近傍 (情報配信範囲) にいる全車両と，その後新たに情報配信範囲に入って来る車

†1 静岡大学大学院 工学研究科
Graduate School of Engineering, Shizuoka University
†2 静岡大学創造科学技術大学院
Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

両に，短時間かつ効率的に配布することを目的として設計された手法である．この手法では文献 2) に示されているような Opportunistic なデータ配信方式を採用している．R2D2V では，特定位置に関する情報 (位置依存情報) を生成した車両，あるいは他の車両から受信した位置依存情報を保持している車両は，他車両が定期的に配信するビーコンを受信すると，保持している情報の有効範囲内にビーコン送信車両がいる場合，その情報をブロードキャストする．同様の処理の繰り返しにより，データが発生した時点ではデータ送信車両の通信範囲外に存在し，情報生成後に情報配信範囲内へ進入してきた車両に対してもデータ配信が可能となる．しかしながら，車両密度が高い地域においては大量のビーコンが一度にブロードキャストされてしまう．さらに，ビーコンを受信した全ての車両がそのビーコンに対してデータの返信を行おうとすると，ブロードキャストストーム[3] と同様の問題が発生し，冗長なデータの送信によって，無線通信帯域の浪費，パケットロスが誘発される等の問題が起こる．そこで，R2D2V では以下の 3 つの戦略を用いることにより，ビーコンとデータパケットの送信頻度を削減し，通信の信頼性，データの配信速度を向上させている．

- ランダムネットワークコーディング（RNC）を用いた情報配信
- ビーコンの送信周期の動的変更
- ビーコンに対するデータ配信確率の動的変更

R2D2V はシミュレーションによる評価により，データを確実かつ短時間で配信可能であることが示されているが，実環境での性能評価は行われていない[1]．しかし，R2D2V の更なる性能向上・実用化のためには，実環境での性能評価が行えることが望ましい．そこで筆者らは Linux 上で R2D2V のプロトタイプを実装した．

実無線通信環境で R2D2V の性能評価を行うには，端末密度の変化，端末の移動，パケットの衝突，無線電波の干渉等様々な条件を変えた実験が必要である．一般に販売されている Wi-Fi 等の安価な無線通信デバイスを用いてこれらの実験を行う場合，無線電波出力の詳細な調整が困難であるうえ，出力を最大まで絞った場合でも無線通信半径が広いため，室内等の限られた環境で実験を行うのは困難である．そこで，今後アプリケーションレベルでのプロトコル設計だけでなく，MAC 層，物理層での動作も含めた設計を行うことも視野に入れて，PC 上で動作するソフトウェア無線開発環境 GNU Radio と専用の無線通信デバイス USRP2（Universal Software Radio Peripheral 2）を用いてテストベッドを構築して実験を行った．

以下，第 2 章で関連研究について述べた後、第 3 章において R2D2V プロトタイプの実装の詳細について述べる．第 4 章で GNU Radio と USRP2 を利用しての実環境性能評価の詳細およびその結果について述べる．第 5 章で本稿をまとめる．

2. 関 連 研 究

VANET を想定したアプリケーションの実現はシミュレーションによる評価だけではなく，実環境による動作テストや評価が重要である．そのような中，車両を用いた実環境による性能評価が行われている．また，筆者らが取り上げている RNC を利用したプロトコルの実環境評価も行われている．

Lee らは，BitTorrent のような P2P を利用した動画等のファイル共有を，VANET で実現しようとする手法 CarTorrent を提案し，車両を利用した実験を行っている[4]．CarTorrent では，路側に設置されているアクセスポイントと車々間通信を用いてファイル交換を行う．この手法では，R2D2V と同じく車々間通信を利用して情報を配信していくが，ネットワークコーディングを用いていない．車々間通信に RNC を用いている手法の 1 つとして Lee らが提案している CodeTorrent[5] が挙げられるが，実環境での評価は行われていない．

ネットワークコーディングを無線ネットワーク上の実環境で性能評価している取り組みとして，Katti らの COPE，MORE，MIXIT が挙げられる[6)7)8]．COPE は，XOR 演算によるネットワークコーディングを利用した Opportunistic 型のルーティングプロトコルであり，MORE は，RNC を利用したルーティングプロトコルである．これらは 20 台の IEEE802.11 の固定無線端末を用いた実験によって評価が行われている．また MIXIT は，RNC をシンボルレベルで行うことにより，ビットエラーによって発生するパケットロスを防ぐ手法である．MIXIT の実験では，本稿と同じく，GNU Radio と USRP（USRP2 の一世代前の製品）が用いられている．しかしながら，これらのプロトコルは R2D2V とは異なり，移動環境での利用を前提としたプロトコルではない．

3. 特定エリア内情報配信手法：R2D2V（RNC based Regional Data Distribution on VANET）

3.1 概　　要

R2D2V では，車両，あるいは路側の機器が生成した位置依存情報を，情報生成時点で情報生成位置の近傍 (情報配信範囲) にいる全車両と，その後新たに情報配信範囲に入って来る車両に，短時間かつ効率的に配布することを目的としている．具体的な用途として，交通事故や渋滞状況が発生した場所の写真や動画を周辺の車両に素早く確実に送信し，ドライバが経路の変更や到着時間の推定をする支援を行うなどの応用が考えられている．

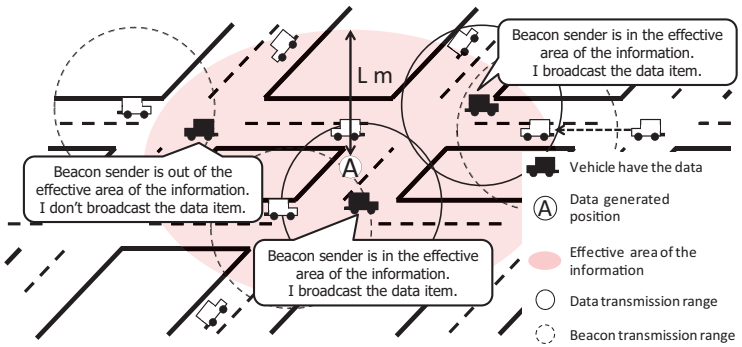


図 1　R2D2V の動作概要

R2D2V では，各車両が GPS を利用して自身の位置を知り，その座標と自身の ID を含むビーコンをブロードキャストしていることを前提とする．また，生成される位置依存情報は 1 回のブロードキャストでは配信不可能な大きさであり，分割されて送信されるものとする．配信される位置依存情報には生成車両の ID，生成位置の座標，生成時刻が付加されているものとする．**図 1** に動作概要を示す．位置依存情報が生成された位置から半径 L 以内の範囲をその情報の配信範囲とする．情報を持っている車両（情報保持車両）はビーコンを受信すると，ビーコンに含まれているビーコン送信元の車両の位置座標を確認し，それが自身の保持している情報の有効領域内であるかを調べる．ビーコン送信元の車両の座標が有効領域内であれば、情報保持車両は自身の保持している情報をブロードキャストにより送信する．

R2D2V は通信の信頼性の向上，データ配信速度の向上のために以下の 3 つの戦略を用いている．

- RNC を用いた情報配信
- ビーコンの送信周期の動的変更
- ビーコンに対するデータ配信確立の動的変更

3.2　ランダムネットワークコーディング（RNC）を用いた情報配信

3.2.1　RNC 概要

RNC[9] は，中継端末が受信した複数のパケットに対してそれぞれランダムな係数を選択し，それらを有限体上で線形結合をとってネットワークコーディング（NC)[10] を行う手法である．固定のネットワーク上での NC では，データの配信経路に応じて予め係数を設定しておくことによって，符号化を行うことで配信データの送信回数を少なくすることが可能である．しかし．トポロジが動的に変化する場合では，事前に係数を設定しておくことができない．そこで，中継端末がそれぞれ係数をランダムに選択することで，トポロジが動的に変化するネットワークにおいても NC を用いた必要データ送信回数の削減を実現する方法が RNC である．RNC では係数をランダムに選択するため，受信した複数のデータに用いられた係数が線形独立でない場合，受信端末において元のデータを復号することができないが，単純にデータを分割して送信するよりも高いデータ配信効率が期待される．

RNC の符号化・復号処理の動作を以下に示す．1 回の符号化処理対象パケット数を N とする．送信端末から送出された N 個のパケットを$\boldsymbol{X}=(x_1, x_2, \cdots, x_N)^T$ と表す．中継端末は N 個のパケットを受信すると，ランダムな係数ベクトル$\boldsymbol{c}=(c_1, c_2, \cdots, c_N)(c_i \neq 0)$ を選択し，以下のように符号化パケット $p_i(i=1,2,\cdots,N)$ を生成する．

$$p_i = c_{i,1}x_1 + c_{i,2}x_2 + \cdots + c_{i,N}x_N \tag{1}$$

これらの符号化パケットを元に受信端末側で元のパケット$\boldsymbol{X}$を復号するには，異なる符号化パケット p_i を少なくとも N 個受信する必要がある．受信端末で受信された N 個のパケットを$\boldsymbol{P}=(p_1, p_2, \cdots, p_N)^T$ とすると，$\boldsymbol{P}$と c_i は

$$\boldsymbol{P} = \boldsymbol{C}\boldsymbol{X} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{C} = (c_1, c_2, \cdots, c_n)^T \tag{3}$$

と表すことが出来る．このとき$\boldsymbol{C}$の逆行列$\boldsymbol{C^{-1}}$が存在すれば式 (2) の両辺に逆行列をかけることにより

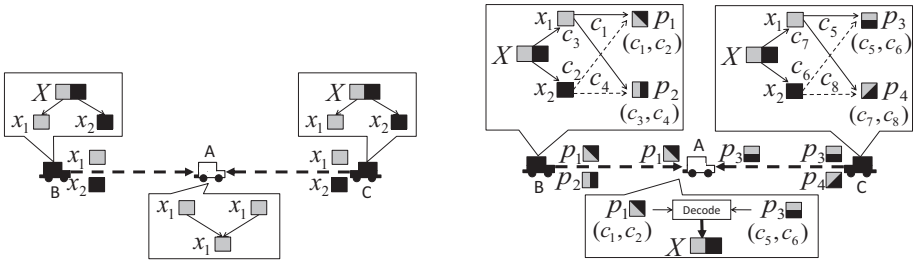
$$\boldsymbol{E}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{C^{-1}}\boldsymbol{P} \tag{4}$$

となり，もとの送信パケット$\boldsymbol{X}$を復号可能となる．

3.2.2　R2D2V での RNC を用いた情報配信

R2D2V において各端末は，自身の現在位置に関連付けられた位置依存情報を生成すると，それを N 個の断片に分割して保持し続ける．また，他端末から受信した符号化パケット，符号化パケットより復号した位置依存情報の断片も保持し続ける．

R2D2V の各端末は，他の端末が送信したビーコンを受け取ると，自身が保持している位置依存情報の断片，あるいは他端末から受信した符号化パケットの生成位置と，受信したビーコンに付加されている送信者の座標を参照する．ビーコン送信者の位置が保持している情報の情報配信範囲内であるならば，保持している符号化パケット N 個，あるいは復号した位置依存情報の断片から新たに符号化パケットを N 個生成し，それを生成する際に利用された係数ベクトルと共にブロードキャストする．このとき，このビーコンを受信した端末がこれまで受信した符号化パケットの数 M が N に満たない場合は，M 個の符号化パケッ



(a) No RNC　　(b) With RNC

図 2　VANET 上での RNC 利用の利点

トを生成し，ブロードキャストする．

RNC を用いることの利点は，最低限のパケットの受信で元のデータを復号することが出来ることにある．例えば**図 2**（a）（b）のように，真ん中の車両 A がビーコンをブロードキャストし左右の車両 B，C がデータ$\boldsymbol{X}$を送信する場合を考える．まず，同図（a）の様にデータ X を 2 つに分割して送信する場合を考える．車両 B，C がそれぞれ$\boldsymbol{X}$を 2 つに分割したパケット x_1, x_2 を送信するものとする．このとき，車両 B，C が送った x_2 がともに車両 A に受信されなかったとする．このような場合，車両 A は$\boldsymbol{X}$全てを受信することができない．次に，同図（b）の様に RNC を利用した場合を考える．車両 B，C はパケットを送信する際，保持しているデータ$\boldsymbol{X}$を RNC によって符号化して送信する．具体的には，車両 B，C がそれぞれランダムに選択した係数ベクトル $(c_1, c_2), (c_3, c_4)$ および $(c_5, c_6), (c_7, c_8)$ と (x_1, x_2) との線形演算によって生成された符号化パケット (p_1, p_2)，(p_3, p_4) を生成し，利用された係数ベクトルを付加して送信する．このとき，車両 B，C がそれぞれ送信した p_2 と p_4 が車両 A に受信されなかったとする．車両 A では受信パケットに付加されている係数ベクトル (c_1, c_2) と (c_5, c_6) を参照し，それらが線形独立であれば元のデータ$\boldsymbol{X}$を復号することが可能となる．このように，パケットロスなどが発生してパケットが失われたとしても，RNC を利用することにより，2 つのパケットを受信するだけでもとのデータを復号することが出来る．したがって VANET のように通信の機会が限られていたり，パケットロスが起こりやすい環境で通信が行われるような場合でも，高い確率で配信されたデータを復元できることが見込まれる．

表 1　ビーコンの送信周期

車両速度 [km/h]	10 未満	10〜	20〜	40〜	60〜
送信周期 [ms]	1200	600	300	200	100

3.3　車両密度に応じたデータ配信確率の動的変更

端末密度が高いとき，単純にビーコンを受け取った多くの端末全てがデータ返信を行うようにすると，冗長なデータ配信が多くなる．そこで，R2D2V ではビーコンを受信した際に生成する隣接車両リストから推測できる隣接車両台数を M として，ビーコンに対する配信確率 $q(M)$ を，M に対して単調減少になるように計算し，ビーコンに対する配信確率を動的に変更し，冗長なデータ配信を削減する．配信確率 $q(M)$ は以下の式で求めるものとする．

$$q(M) = 1/(\alpha M) \tag{5}$$

ここで α は正の実数である．

3.4　車両速度に応じたビーコン送信間隔の動的変更

VANET では大量に送信されるビーコンにより通信チャネルが浪費されてしまう．一般的な道路構造では交差点など車両速度が低い場所では車両密度が高く，交差点と交差点の間などの車両速度が高い場所では車両密度が低くなる傾向がある．そこで R2D2V では**表 1** に従い，ビーコン送信間隔を車両が速いときは短く，車両が遅いときは長くするという様に，車両速度に応じてビーコンの送信周期を制御することで，ビーコンによる通信チャネルへの負荷を低減する[11]．

4.　R2D2V の実装

以下では R2D2V プロトタイプの実装と実験環境について述べる．

4.1　実 装 方 針

R2D2V を構成する機能は**表 2** に示すように，A）通信に関する基礎機能，B) 移動時に必要となる機能，C）移動に伴う通信制御機能の 3 つに分別されるが，実装の第一段階として，R2D2V の通信の基礎部分である RNC に関しての実装に関わる部分のみ（表 2 A）を実装した．また，RNC による符号化・復号処理では GF(2^8) を用いる事とした．

R2D2V プロトタイプで利用するパケットフォーマットを**図 3** に示す．UDP のパケットのペイロード部分の先頭から 28 バイトを R2D2V のヘッダとし，各種制御情報を格納するようにした．ペイロード部分には RNC の符号化処理によって生成された符号化データを付加する．また，R2D2V プロトタイプで送受信するパケットを，ビーコン（28 バイト）と

表 2　R2D2V 構成機能

A）通信に関する基礎機能	・ビーコン送信 ・ビーコンに対しての保持データの送信 ・RNC による配信データの符号化・復号処理 ・データ生成
B）移動時に必要となる機能	・GPS による現在位置の取得 ・端末の移動速度の取得
C）移動に伴う通信制御機能	・受信ビーコンを利用した周辺車両リストの作成 ・周辺車両密度に応じたデータ配信確率の変更 ・車両速度に応じたビーコン配信間隔の変更

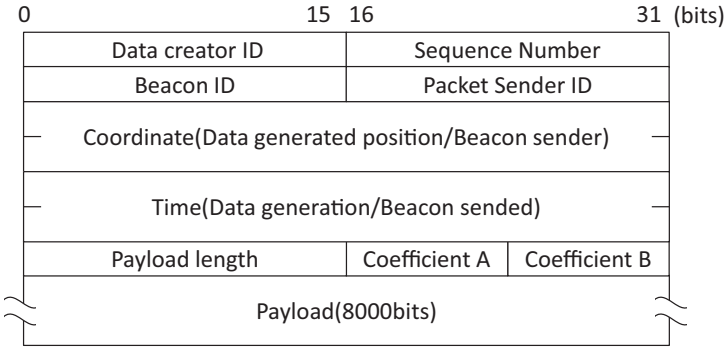


図 3　R2D2V パケットフォーマット

符号化パケット（1028 バイト）の 2 種類を定め，係数ベクトル（図 3 内 Coefficient A,B）が共に 0 であった場合はビーコン，それ以外を符号化パケットとした．なお，ビーコンには R2D2V パケットフォーマット中のペイロード部分は含まれない．

4.2　データ生成

各端末が生成するデータは，乱数によって生成したデータと，このデータを元に MD5 によって得られたダイジェストから構成されている 2000 バイトのデータとした．データのうち先頭 1984 バイトに乱数，残りの 16 バイトにこの乱数の MD5 ダイジェストを格納した（**図 4**（a））．受信端末側では MD5 のダイジェストを確認することで正しいデータを受信できたか確認するようにした．

4.3　RNC によるデータ符号化処理

RNC の符号化処理では符号化を行うデータを $N(=2)$ 分割し，ランダムに生成された係数と分割したデータの線形演算により符号化データ$\boldsymbol{d}_k(k=1,2,\cdots)$ を生成する．符号化対象のデータ $n(=2000)$ バイトのうち先頭から奇数バイト目を$\boldsymbol{a}=(a_1,a_2,\cdots,a_{2/n})$，偶数バイト目を$\boldsymbol{b}=(b_1,b_2,\cdots,b_{2/n})$ と呼ぶこととする（図 4（b））．符号化の際 $\mathrm{GF}(2^8)$ からランダムな係数ベクトル$\boldsymbol{c}_k=(c_{k,i},c_{k,j})(c_{k,i},c_{k,j}\subseteq GF(2^8))$ を選択し，次式に従って 1 バイトごとにガロア体上の演算を行い，符号化データ$\boldsymbol{d}_k$ を生成する．

$$\boldsymbol{d}_k=(d_{k,1},d_{k,2},\cdots,d_{k,n})=(c_1a_1+c_2b_1,c_1a_2+c_2b_2,\cdots,c_1a_n+c_2b_n)$$

こうして生成された符号化データを R2D2V パケットフォーマットのペイロード部分に埋め込み，データ生成車両 ID，利用された符号化係数等の必要な情報をヘッダーに記述し，符号化パケット p_k を生成する．

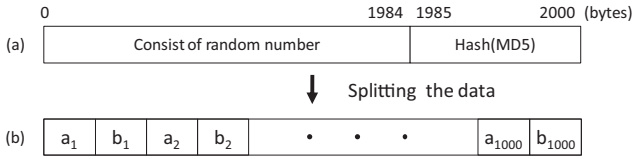


図 4　生成されるデータとデータ分割方法

4.4　RNC によるデータ復号処理

各端末は以下の手順で RNC による復号処理を行う．各端末は受信データ保存用の受信バッファを所持しており，符号化パケットを受信すると，それらを受信バッファ内に貯めていく．端末がパケットを受信した時，すでに受信バッファ内に符号化パケットがあった場合，そのデータと受信した符号化パケットのヘッダに含まれている係数ベクトル（図 3 内 Coefficient A,B）を調べ，それらが線形独立であった場合復号処理を行う．例えば，すでに受信バッファに符号化パケット p_1 を保持しており，符号化パケット p_2 を受信したとする．その時，p_1 中の係数ベクトルが (c_1,c_2)，符号化データが$\boldsymbol{d}_1$，p_2 中の係数ベクトルが (c_3,c_4)，符号化データが$\boldsymbol{d}_2$ だったとする．これらの符号化係数のなす符号化行列の逆行列と，各パケットの符号化データ$\boldsymbol{d}_1$，$\boldsymbol{d}_2$ を用いて，次式に示す線形演算に従って復号処理を行い，$\boldsymbol{a}$と$\boldsymbol{b}$を復号する．

$$\begin{pmatrix}\boldsymbol{a}\\ \boldsymbol{b}\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}c_1 & c_2\\ c_3 & c_4\end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix}\boldsymbol{d}_1\\ \boldsymbol{d}_2\end{pmatrix}$$

4.5 ビーコンに対しての保持データの送信

各端末はビーコンを受信した際，データを保持している場合，保持データの状況に応じて以下のような処理を行う．

- 復号済みのデータ全て（2 個）を保持している場合
  - 保持データに対して RNC による符号化処理を 2 回行い，符号化パケットを 2 つ生成して送信する．
- データの断片のみを保持している場合
  - 保持しているデータの断片を RNC による符号化を行わないで送信する．

4.6 実験環境の構築

実装した R2D2V プロトタイプの性能を評価するには，室内などの限られた実験スペース内で端末密度，パケットロスの変化を考慮した実験が行えることが望ましい．筆者らは，ソフトウェア無線プラットフォーム GNU Radio，その専用無線通信デバイス USRP2 を利用して実験環境を構築した．

4.6.1 GNU Radio

GNU Radio[12] とは，オープンライセンスのソフトウェア無線システム開発環境である．GNU Radio の専用無線通信デバイス USRP（USRP2）を用いることでソフトウェア無線システムの開発を行うことができる．GNU Radio では変復調等の無線通信処理で必要となる基本的な処理を C++のモジュールとして記述し，それらを，スクリプト型のオブジェクト指向言語である Python によるプログラムで繋ぎ合わすことで無線送受信処理を実現している．そのため，独自の通信処理を C++又は Python で開発・追加を容易に行うことが可能で，MAC 層，物理層の開発が可能である．また，GNU Radio で IEEE802.11p の MAC を実装しようとする試みもなされている[14]．

4.6.2 USRP2

USRP2 は，GNU Radio 専用無線送受信デバイスで，信号の A-D/D-A 変換と定型的な高速ディジタル信号処理を行う．受信時には A-D 変換，ダウン・コンバージョン，帯域制限と間引き処理を行う．送信時にはサンプルの補完．アップ・コンバージョンと D-A 変換を行う．USRP2 では計算機との接続にギガビットイーサネットが用いられており，ドータボードの交換によって，様々な周波数帯の送受信が可能である．

4.6.3 無線通信環境の整備

IP を用いた通信プログラムでの通信を USRP2 を介して行うために TAP を用いた．TAP は，イーサネットデバイスをエミュレートし，データリンク層の動作をユーザプログラムで行うことを可能とする仕組みである．TAP を用いると本来 OS がイーサーネットデバイスを経由して行われるデータを奪い，データの出力先を自由に決めることができる．**図 5** に実験システムの構成を示す．UDP でブロードキャストされるものとして送信されたパケットは，TAP により tunnel.py という GNU Radio 内のプログラムに渡される．tunnel.py は GNU Radio に付属するプログラムであり，TAP を利用して，本来イーサネットでの通信用インターフェースを介して送受信されるデータを奪い，簡単な CSMA 方式に基づく MAC により USRP2 を利用して無線パケット送受信を行うことができる[13]．また，tunnel.py では，FBPSK，DQSK 等の複数の変調方式の中からひとつを選択して利用することが可能だが，今回の実験では GMSK を用いた．その他 tounnel.py 上で送受信ゲイン，ビットレートを調整した．

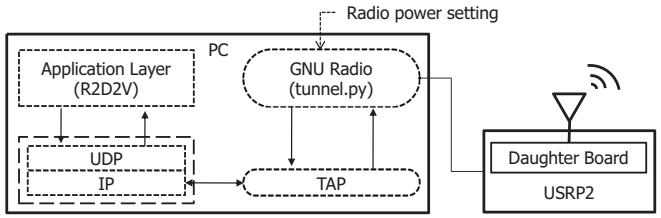


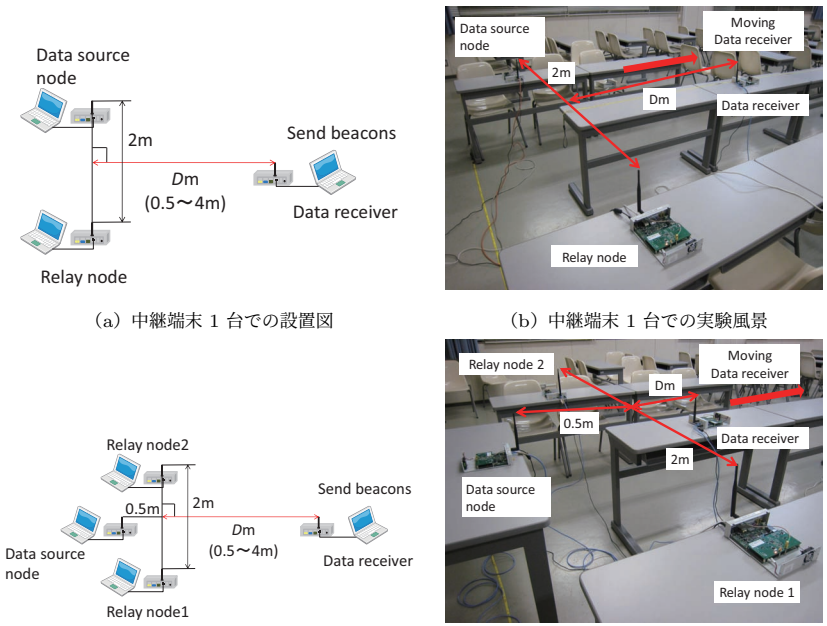
図 5 R2D2V プロトタイプ構成

5. 実環境性能評価

R2D2V プロトタイプの性能評価をするため，無線ネットワークテストベッドを作り，測定実験を行った．以下では実験環境，実験方法について述べた後，測定結果を示す．

5.1 実 験 環 境

2.4GHz-5GHz 帯を利用出来るドータボードとオムニアンテナを利用した．中心周波数を 5.11GHz とし，ビットレートを 1Mbps として，変調方式 GMSK を利用した．また，GNU Radio 内で無線通信電波出力を調整し，通信可能半径を約 6m 程になるよう設定した．パケットサイズはアプリケーション層で定義した図 3 のフォーマットに，UDP と IP ヘッダによる 28 バイトと，GNU Radio 内での処理によって付け加えられるプリアンブルやアクセスコード，CRC コードの値 11 バイトの計 39 バイトが付け加えられ，符号化パケットが 1067 バイト，ビーコンが 67 バイトとなっている．実験に先立って各端末間で時刻の同期を行っている．

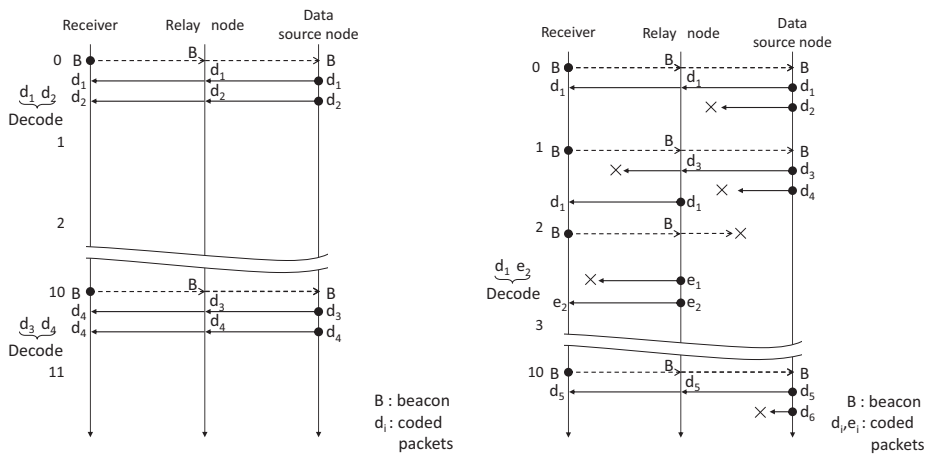


（a）中継端末 1 台での設置図　（b）中継端末 1 台での実験風景

（c）中継端末 2 台での設置図　（d）中継端末数 2 台での実験風景

図 6　実験トポロジ

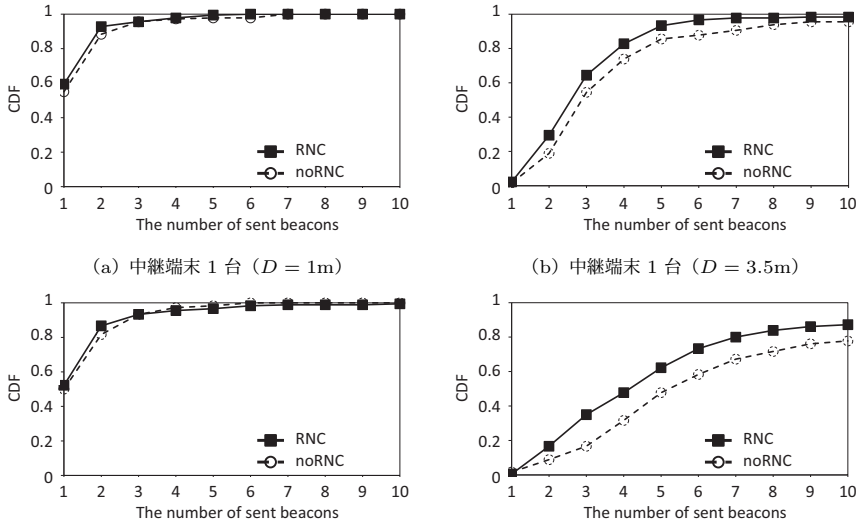
実験では 1 台のデータ生成端末，1 台の受信端末，1〜2 台の中継端末を用いた．各端末を**図 6** の様に，受信端末と他端末との距離がほぼ等しくなるように設置した．データ生成端末は 10 秒毎にデータを生成する．受信端末は 1 秒毎にビーコン送信を行う．中継端末はビーコンの送信，データの生成を行わず，データの中継処理のみを行う．**図 7** に実験におけるタイムチャートを示す．動作が開始されると，データ生成端末はデータを生成し，受信端末はビーコン送信を開始する．データ生成端末と中継端末はビーコンを受信した際，データを保持していれば自身のデータを送信する．受信端末から最初のビーコンがデータ生成端末に到着した時点では，中継端末データを保持していないため，データ生成端末のみが生成したデータを RNC によって符号化し，生成された符号化パケットを送信する．図 7（a）のような場合，受信端末は動作開始 0 秒（以下単純に 0 秒と表記）で送信した最初のビーコンに対して，データ生成端末が返信した符号化パケット d_1, d_2 を受信し，それらから元の



（a）ビーコン送信回数 1 回でデータを復号する場合　（b）通信エラーが発生する場合の一例

図 7　実験タイムチャート

データを復号後，ビーコン送信を停止する．そして，次にデータ生成端末がデータを生成する 10 秒になった時点でビーコン送信を再開する．1 回のビーコン送信で全てデータを受信できない場合，受信端末はビーコン送信を繰り返す．図 7（b）に通信エラーが発生する場合の例を示す．受信端末が 0 秒に送信したビーコンに対して，データ生成端末から符号化パケット d_1, d_2 が送られたが，d_1 は受信端末と中継端末に届いたものの，d_2 はどちらにも届かなかったとする．受信端末は元のデータを復号できないため 1 秒にもう一度ビーコンを送信する．1 秒の時点では中継端末とデータ生成端末の両方がデータを保持しているため，両端末ともデータを送信する．中継端末はデータ生成端末と送信タイミングが重ならないようにランダム時間（0.1〜1 秒）待ってから，保持しているパケット d_1 を送信する．データ生成端末は新たに符号化パケット d_3, d_4 を生成して送信するが，d_3 のみが中継端末に到着し，その他は正しく受信されていない．受信端末では d_1 の受信に成功するが，保持しているパケットと同一であるため元のデータを復号できない．そこで 2 秒に再びビーコンを送信する．2 秒の時点では，中継端末のみビーコンを受信できたとする．その際，中継端末では d_1, d_3 から元のデータを復号し，その後新たに符号化パケット e_1, e_2 を生成し，ランダム時間待ってからそれを送信する．受信端末では，e_2 を受信し，d_1, e_1 より元のデータを復号してビーコン送信を 10 秒まで停止する．



（a）中継端末 1 台（$D = 1$m）　（b）中継端末 1 台（$D = 3.5$m）

（c）中継端末 2 台（$D = 1$m）　（d）中継端末 2 台（$D = 2$m）

図 8　各データ受信に要したビーコン送信回数の累積分布

以上の動作では，1 つのデータに対して最大 10 回のビーコン送信を行う．そこで，10 秒を 1 セットとし，受信端末がデータの復号を成功するまでのビーコン送信回数を計測した．10 回より多くビーコン送信したセットは失敗とみなした．

5.2　実 験 結 果

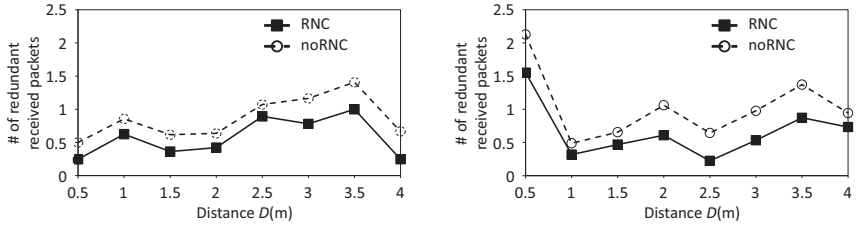
図 6 に示す端末間距離 D を 0.5m ずつ変化させ，各距離で RNC を用いた場合，用いない場合で各 180 セットの測定を行った．RNC を用いない場合の実験は，符号化処理にて符号化係数 $(1, 0)$ および $(0, 1)$ にすることで行った．性能を評価するにあたり，以下の 2 点を比較した．

- 各セットで受信端末がデータを受信するのに要したビーコン送信回数の分布
- 冗長パケット数：データが復号されたセットにおいて，データ復号に利用されなかったパケットの受信端末での受信数

5.3　ビーコン送信回数の分布

図 8 にデータ受信に要したビーコン送信数の累積分布を示す．パケットロスが低く通信状態が良い場合 (図 8（a）（c）$D = 1$m) と，パケットロスが高く通信状態が悪い場合 (図 8（b）$D = 3.5$m（d）$D = 2$m) の結果を示す．

通信環境が良い場合では，手法によるビーコン送信回数の差はほとんど無いものの，RNC を利用した場合より少ないビーコン送信回数でデータを受信できているのがわかる．通信環境が悪い場合，RNC の有無による差が大きく，RNC を用いることにより，より少ないビーコン送信回数でデータの受信が可能となっている．また，RNC を用いることで最終的に復号することができたデータ数も増えており，受信率が向上している．



（a）冗長パケット受信数（中継端末 1 台）　（b）冗長パケット受信数（中継端末 2 台）

図 9　冗長パケット受信数

5.4　冗長パケット受信数

図 9（a）（b）に D を変化させた場合の冗長パケット数の変化を示す．どの D においても RNC を用いることにより，RNC を用いない場合に比べて冗長データの受信数が減少している．これより，RNC を用いることで冗長なデータ受信を削除し，効率的にデータを受信できることがわかる．

同図（a）3.5m 同図（b）2m は，図 8 で示したようにパケットロスが高く通信状態が悪い状態である．これらを $D = 1$m のような通信環境が良い場合と比べると，手法による冗長パケット数の差が若干大きい傾向にある．すなわち，データ復号率の悪いパケットロスが起こりやすい環境下において，RNC による冗長パケット削減の効果がより大きいことがわかる．

6. ま と め

本論文では，VANET における RNC を用いた特定エリア内情報配信手法 R2D2V のプロトタイプを実装し，ソフトウェア無線開発プラットフォーム GNU Radio とその専用無

線端末 USRP2 を利用して実環境性能評価を行った．R2D2V はビーコン送信間隔の動的変更，データ返信確率の動的変更，RNC を用いたデータ配信の 3 つの手法を組み合わせることにより，通信の信頼性，データの配信速度を向上させている．本実験では R2D2V の通信の基礎部分となる RNC を用いたデータ配信機能を持ったプロトタイプを実装した．UDP ブロードキャストアプリケーションとして実装した R2D2V のプロトタイプを，USRP2 を介して通信するために TAP を利用した．USRP2 上で変調方式 GMSK，簡単な CSME 方式での MAC を用い，送受信ゲインを絞って室内での実験を行った．実験により，RNC を用いることで，データ受信率とデータ配信速度の向上ができること，冗長なデータの受信回数が減少することが確認できた．今後は端末数を増やしての実験を行うとともに，端末の移動を考慮した実験を行なっていく計画である．

謝辞　本研究は，科学研究費補助金基盤研究 (B)「リアルタイム画像カーナビのための効率的車々間データ配信技術（課題番号 23300024）」の助成によるものである．また，USRP2 による実験は，静岡大学情報通信研究グループの協力によるものである．ここに記して謝意を示す．

参　考　文　献

1) Kusumine, N. and Ishihara, S.: R2D2V: RNC based Regional Data Distribution on VANETs, *Proc. IEEE Vehicular Network Conference* (*VNC2010*), pp.271–278 (2010).
2) Vahdat, A. and Becker, D.: Epidemic routing for partially-connected ad hoc networks. Technical Report CS-2000-06, Duke University (2000).
3) Ni, S. -Y., Tseng, Y. -C., Chen, Y. -S. and Sheu, J. -P.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *Proc. ACM Mobicom 99*, pp.151–162 (1999).
4) Lee, K.C., Lee, S.H., Cheung, R., Lee, U. and Gerla, M.: First experience with cartorrent in a real vehicular ad hoc network testbed, *Proc. 2007 Mobile Networking for Vehicular Environments*, pp.109–114 (2007).
5) Lee, U., Park, J.-S., Yeh, J., Pau, J. and Gerla, M.: CodeTorrent: Content Distribution using Network Coding in VANETs, *Proc. The First International Workshop on Decentralized Resource Sharing in Mobile Computing and Networking (MobiShare'06)*, pp.1–5 (2006).
6) Katti, S., Rahul, H., Hu, W., Katabi, D., Médard, M. and Crowcroft, J.: XORs in the air: practical wireless network coding, *Proc. ACM SIGCOM'06*, pp.243–254 (2006).
7) Chachulski, S., Jennings, M., Katti, S. and Katabi, D.: Trading Structure for Randomness in Wireless Opportunistic Routing, *Proc. ACM SIGCOMM'07*, pp.169-180 (2007).
8) Katti, S., Katabi, D., Balakrishnan, H. and Medard, M.: Symbol-level network coding for wireless mesh networks, *Proc. ACM SIGCOMM'08*, pp.401–412 (2008).
9) Ho, T., Medard, M., Koetter, R., Karger, D. R., Effros, M., Shi, J. and Leong, B.: A random linear network coding approach to multicast, *Proc. IEEE Jounal on Selected Areas in Communications*, vol.22, pp.107–120 (2004).
10) Ahlswede, R., Cai, N., Li, S. Y. R. and Yeung, R. W.: Network information flow, IEEE Trans. Information Theory, Vol.46, No.4, pp.1204–1216 (2000).
11) ITS 情報通信システム推進会議: 5.8GHz を用いた車々間通信システムの実験用ガイドライン，ITS FORUM RC-005 1.0 版 (2007).
12) GNU Radio: ⟨http://www.gnuradio.org/⟩ (accessed 2011-05-20)
13) 石原進: USRP / GNU Radio を利用したマルチホップ無線通信の実装, 電子情報通信学会 2010 ソサイエティ大会，チュートリアル講演，BT–3–2 (2010).
14) Fuxjager, P., Costantini, A., Valerio, D., Castiglione, P., Zacheo, G., Zemen, T. and Ricciato, F.: IEEE802.11p Transmission Using GNURadio, *Proc. The IEEE 6th Karlsruhe Workshop on Software Radios (WSR)*, pp.1–4 (2010).