

⑬ 運転支援情報伝送に関する妨害対策の実列車走行実験による検証

交通システム研究部 ※林田 守正 工藤 希 長谷川 智紀 小林 貴
 東京大学 水間 毅

1. はじめに

近年、無線通信を活用した列車制御や運転支援が普及しつつあるため、その情報伝送に関する信頼性が重要になっている。本報告では、昨年度に実施した、踏切事故防止支援システムをモデルとした情報伝送への偶発的／人為的妨害の対策に関するケーススタディの内容を紹介するとともに、それを実際の列車走行実験により検証し、対策効果を確認した結果について述べる。

2. 伝送妨害のケーススタディ

2. 1. モデルとした伝送システム

モデルとした伝送システムの概念を図1に示す¹⁾。列車が接近中の踏切上又は近傍に自動車がある場合、自動車から列車に対し、各々に設置された無線通信装置（以下、「自動車側装置」及び「列車側装置」

という。）を通じて「停滞無し」又は「停滞有り」の踏切情報が伝送される。列車側装置は受信した踏切情報を処理して、運転席に設置された運転士支援画面上への表示（以下、「画面表示」という。）を行う。踏切情報が「停滞有り」で、列車が当該踏切手前の所定地点（以下、「警告地点」という。）を越えると、2.5で後述するように、列車運転士に「踏切に障害物あり！」の画面表示（以下、「警告画面」という。）で警告し、非常ブレーキ等の操作を促す機能を有する。

2. 2. 模擬的な伝送妨害の設定

2. 2. 1. 模擬的な「なりすまし」による妨害

模擬的な「なりすまし」の形態を図1に併せて示す。踏切に停滞した自動車側装置から列車に対し正規の踏切情報（停滞有り）を送信中に、この情報を第三者が傍受し、偽の踏切情報（停滞無し）に改ざんして、列車側装置に送信するという想定である。

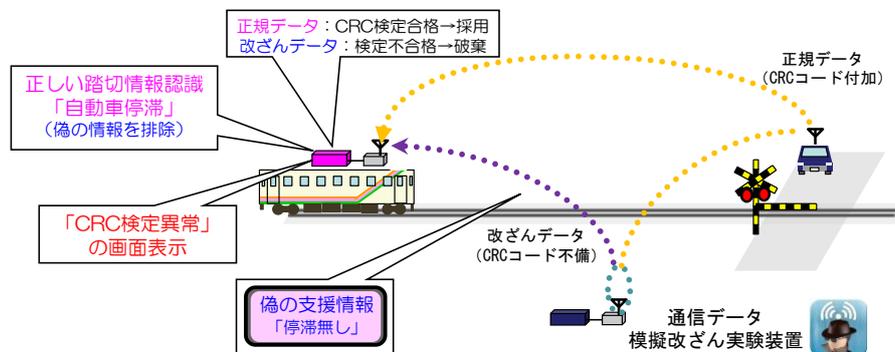


図1 モデルとした伝送システム及び模擬的な「なりすまし妨害」の概要¹⁾

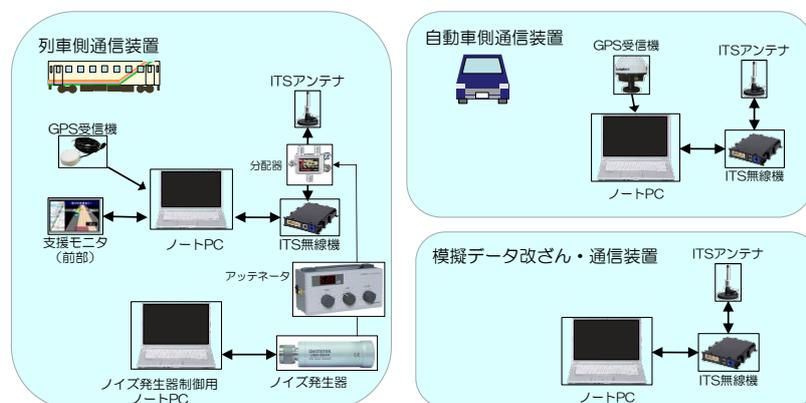


図2 実験装置の構成¹⁾

2. 2. 2. 模擬的なノイズによる妨害

踏切に停滞した自動車側装置からの踏切情報の伝送が偶発的又は意図的なノイズにより妨害され、列車側装置での受信が途絶するという想定である。

2. 3. 実験装置

実験装置の構成を図2に示す¹⁾。先年度に構築した伝送システムを一部変更したもので、無線器は700MHz帯高度道路交通システム(ITS: Intelligent Transport System)向の仕様を採用した²⁾。列車側装置、自動車側装置の他に、模擬データ改ざん装置を追加した。また列車側装置のアンテナと無線機の間、想定する空間ノイズと等価なノイズを模擬的に有線で印加した。

2. 4. 妨害影響の検知及び対策

2. 4. 1. データ改ざん

踏切情報に32ビットCRC(Cyclic Redundancy Check、巡回冗長検査)コードを追加し、列車側装置で受信時に検定を行う。合格した正規データのみが採用され、CRCコードが不備な改ざんデータは不合格となり破棄される。この検定不合格が生じた場合、「CRC検定異常」として検知する。なおCRC検定の有無は、毎回の実験走行毎に切り替え可能とした。

2. 4. 2. 通信途絶

あるデータセットを受信してから次のデータセット(以下、「次データ」という。)を受信するまでの時間を常時チェックし、一定値(しきい値)が経過しても受信出来ない場合は「タイムアウト」として検知す

る。また受信データの通番を常時チェックし、データの欠落のため次データの通番の飛躍が一定値を超えている場合は「通番異常」として検知する。「通番異常」は正規データと改ざんデータを同時受信した際にも生じるため、データ改ざんの検知にも有効である。

2. 5. 支援の画面表示

2.4に前述した妨害影響の検知・対策の状況を運転士に通知するための画面表示を表1及び表2に示す。

- (1) 列車が当該踏切に接近し、自動車側装置からの踏切情報の受信が可能になると、文字列「受信中」が画面①(通常運転)に追記され、画面②に遷移する。踏切情報が「停滞有り」の場合、列車が警告地点を越えると、更に表示が画面②から画面⑥へ遷移する。
- (2) タイムアウトが検知された場合は、文字列「タイムアウト」が画面①に併記される(画面③)。
- (3) 通番異常が検知された場合、文字列「通番異常」が画面①又は画面⑥(踏切に障害物あり!)に追記される(画面④又は画面⑧)。
- (4) 受信データのCRC検定不合格が検知された場合、文字列「CRC検定異常」が画面②又は画面⑥に追記される(画面⑤、画面⑦又は画面⑧)。

表1 異常検知と画面表示併記の機能¹⁾

	検知の指標	標準値	異常検知のしきい値	検知・画面追記のタイミング
CRC異常	CRC関数値(余り)	送信側と受信側の一致	送信側と受信側の不一致	送信側と受信側の不一致時点
通番異常	データ通番から次データ通番の増分	1	15番(3s相当)以上の飛躍	次データ受信(再開)時点
タイムアウト	前データ受信後、次データ受信までの経過時間	200ms	6s以上	前データ受信後、次データ未受信のまま6s経過時点

表2 運転士支援画面

a) 踏切情報：「停滞無し」(通常画面)

①基本画面	②通信中	③通信中断	④データ通番異常	⑤CRC検定異常
通常運転	通常運転 通信中	通常運転 タイムアウト	通常運転 通信中 通番異常	通常運転 通信中 CRC検定異常

b) 踏切情報：「停滞有り」(警告画面)

⑥基本画面	⑦CRC検定異常	⑧CRC検定異常・通番異常
踏切に障害物あり! 83 m	踏切に障害物あり! 83 m CRC検定異常	踏切に障害物あり! 83 m CRC検定異常 通番異常

3. 実験方法

3. 1. 模擬走行実験

2章で前述した機能を確認するため、模擬走行実験を当研究所の構内において実施した¹⁾。走行コースの設定を図3に示す。列車は実験用自動車で、停滯自動車は定置架台で、踏切は舗装路面上のマーキングでそれぞれ模擬した。走行コースは、実列車走行に対し距離を1/4又は1/2に縮尺した2種類の区間(区間①：起点①→起点②及び区間②：起点②→模擬踏切)を設定し、縮尺に応じた低速走行を行った。

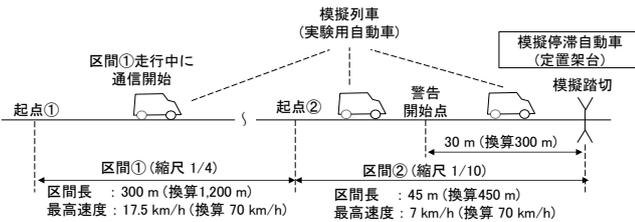


図3 模擬走行実験のコース

3. 2. 実列車走行実験

3.1.に前述した模擬走行実験で確認した機能を検証するため、実列車走行実験を地方鉄道の営業路線において実施した。実験の状況を図4に示す。2.3.に前述した装置を実験用の列車及び自動車に設置し、実験走行区間内の踏切の近傍に自動車を駐車させて踏切内停滯を模擬し、また模擬データ改ざん装置を自動車の近くに配置したうえで、列車を踏切に向けて走行させた。なお、先年度に先行的な実列車走行実験を行い、その結果を2.4に前述した検知、対策に反映した。



図4 実列車走行実験の状況

4. 実験結果

4. 1. 模擬走行実験による機能確認

模擬走行実験による機能確認の主な結果を表3に示す。機能確認の結果は概ね良好であった。

表3 模擬走行実験による機能確認の結果

No.	走行区間	踏切情報	模擬妨害	運転士支援画面表示の確認事項	結果	備考
1	①	停滯無し	無	通信可能となった時点で画面①から②へ遷移	OK	模擬列車の進行に伴い通信可能となる
2	①	停滯無し	無	通信中から再び通信無しとなった場合、画面②から画面①、③へ遷移	OK	通信断がしきい値以上に継続した場合
3	①	停滯無し	無	通信が復旧した時点で画面①又は③から画面④へ遷移	OK	しきい値以上の通番飛躍があった場合
4	②	停滯有り	無	・警告点以遠では画面②を表示 ・警告点を越えると画面⑥に遷移	OK	本来の機能
5	②	停滯有り	なりすまし(CRC検定無)	・警告点以遠では画面②を表示 ・警告点を越えると画面②と⑥の交互表示に遷移	OK	正規データと改ざんデータを同時採用
6	②	停滯有り	なりすまし(CRC検定有)	・警告点以遠では画面⑤を表示 ・警告点を越えると画面⑦又は⑧に遷移	OK	なりすましの存在通知および改ざんデータの破棄
7	②	停滯有り	ノイズ	・警告点以遠では画面②を表示 ・警告点を越えると画面⑥に遷移 ・ノイズ印加時に画面①、③又は④に遷移	OK	ノイズは画面⑥表示中に印加

4. 2. 実列車走行実験による検証

実列車走行実験による検証の主な結果を表4に示す。模擬走行実験と比べて実験走行回数の制約が大であったが、検証の結果は概ね良好であった。

5. 考察と今後の方向性

5. 1. 妨害への対策の効果について

5. 1. 1. 「通信中」の併記

列車の踏切への接近に伴う、通常画面への「通信中」の追記(画面①から②への遷移)については、停滯の有無に関わらず、踏切近傍の自動車の存在が運転士に伝達され、直後に警告画面に切り替わる可能性(画面⑥に遷移)を意識させる効果が検証された。

5. 1. 2. なりすまし妨害対策

「CRC 検定異常」の追記(画面⑤⑦⑧)については、改ざんデータは破棄されているものの、妨害の存在を意識させる効果が検証された。なお本実験では、CRC 検定無しの設定では改ざんデータと正規データの同時受信により通常画面と警告画面の交互表示となり、即座になりすまし妨害を認識できた。しかし改ざんデータの受信レベルが正規データより十分に高いと改ざんデータのみを受信し、通常画面の表示が継続することが懸念される。そのような場合、「CRC 検定異

表4 実列車走行実験による検証の結果

No.	走行方向	踏切情報	模擬妨害	運転士支援画面表示の確認事項	結果	備考
1	上り (南向き)	停滞 有り	ノイズ	・通信可能となった時点で画面①から②へ遷移 ・警告点を越えた時点で画面②から⑥へ遷移 ・ノイズ印加時点で画面⑥から①へ遷移 ・ノイズ印加を停止した時点で画面①から⑥へ遷移	OK	画面⑥に遷移後にノイズ添加、その後添加停止
2	下り (北向き)	停滞 有り	無	・通信可能となった時点で画面①から②へ遷移 ・警告点を越えた時点で画面②から⑥へ遷移	OK	ノイズ妨害無しの動作を確認
3	上り	停滞 有り	なりすまし (CRC検定無)	・通信可能となった時点で画面①から②へ遷移 ・警告点を越えた時点で画面②⑥の交互表示へ遷移	OK	正規データと改ざんデータを同時採用
4	下り	停滞 有り	なりすまし (CRC検定有)	・通信可能となった時点で画面①から⑤へ遷移 ・警告点を越えた時点で画面⑦または⑧へ遷移	OK	改ざんデータを破棄し正規データのみを採用すると共に、なりすましの存在を通知
5	上り	停滞 有り	なりすまし (CRC検定有)	・通信可能となった時点で画面①から⑤へ遷移 ・警告点を越えた時点で画面⑦または⑧へ遷移	OK	改ざんデータを破棄し正規データのみを採用すると共に、なりすましの存在を通知

常」の追記（画面⑤）による、表示の真偽に関する注意喚起が有効であると考えます。

5. 1. 3. ノイズ妨害対策

対策無しの場合は、通信の成否自体が表示されないため、ノイズ妨害の存在を認識できない。これに対し、対策有り（「通信中」の消去（画面①）、「通番異常」又は「タイムアウト」の追記（画面③④））では、一時的な通信途絶を容易に視認できるため、「停滞有り」情報の見逃しや画面表示遅れに関する注意を喚起し、ノイズ妨害の悪影響を低減する効果が期待できる。

5. 2. 支援に必要な通信距離について

列車側装置と自動車側装置との通信が安定し支援画面が確定した地点（「以下、「通信安定地点」という。）から、踏切までの距離及び到達時間を図5に示す。距離はアンテナを室外（運転室窓外）に取り付けた場合は概ね400m前後であったが、室内（客室窓際）に取り付けた場合は200～300mに留まり、踏切到達までの時間も短くなった。供試車両の当該線区における非常ブレーキ距離は最長で約300mであるため、「停滞有り」の場合は少なくともそれ以遠で警告画面（画面⑥）が表示されるよう、アンテナ取付は室外の最適な

位置を選定することが重要である。また同一の踏切であっても、実験走行毎の通信安定地点との距離のばらつきが大きかったため、本実験で試行したITS無線通信仕様の鉄道への応用の可否については、使用条件の差異や無線環境を含め、更に検討が必要と考える。

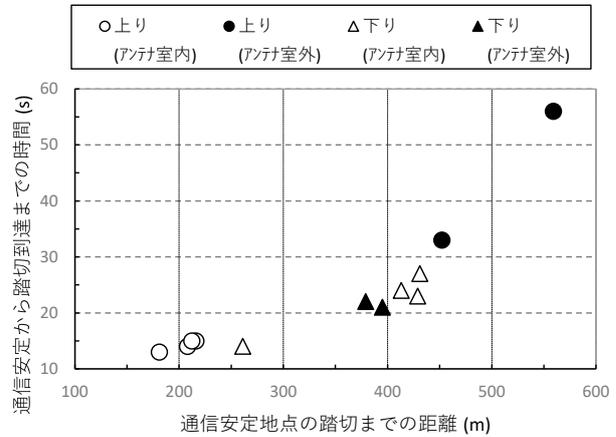


図5 支援時点の踏切までの距離及び時間

5. 3. 実用化に向けて

実用性の点からは、本実験で設定した、画面表示への文字列の追記は、シンボルマーク化等の最適化を検討する必要があると考える。そのうえで、運転士を対象としたモニタ調査等による検証を重ねたい。また、検知機能の画面表示以外への応用も検討したい。

6. まとめ

列車制御や運転支援に利用される無線通信に対する妨害に関し、既存システムをモデルとしたケーススタディを行った。検知、対策の機能を模擬走行実験により確認し、実列車走行実験により検証した。本報告で対象とした妨害はIEC 62280に挙げられる7種類の脅威と対策³⁾の内の2種類であるが、他の5種類の脅威についても検討を重ねる等、情報伝送システムの妨害対策に関する評価法の確立に取り組んでいきたい。

最後に、本実験の実施及びデータ解析に多大な御協力、御支援を賜った関係各位に深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 林田守正ほか，“列車運転支援情報伝送の妨害対策に関する検討”，交通安全環境研究所フォーラム2020講演概要集，pp.43-46（2020）
- 2) (一社)電波産業会，700MHz帯高度道路交通システム標準規格 ARIB STD-T109 .1.0版（2012）
- 3) IEC 62280 Edition 1.0 2014-02